

第4卷 制度文化
第5卷 教化与礼仪
第6卷 学术

第8卷 艺文

第9卷 宗教与民俗

第10卷 中外文化交流

第1卷 历史文化沿革

第2卷 地域文化

第3卷 民族文化

中华文化
通志

第

7

【科学技术】

物理与机械志

◎ 中华文化通志编委会编
◎ 上海人民出版社



戴念祖 撰

中华文化
通志

第 7 卷

【科学技术】

物理
与机械志

◎ 中华文化通志编委会编
◎ 上海人民出版社

中国社会科学院
近代史研究所
图书馆藏书章

K203
Z669
:7(6)

中华文化通志·科学技术典 (7-066)

陈美东 主 编

物理与机械志

戴念祖 撰

上海人民出版社出版、发行

(上海绍兴路54号 邮政编码 200020)

印 刷 深圳中华商务联合印刷有限公司

开 本 880×1270毫米 32开

字 数 364,000

印 张 15.125

插 页 1

版 次 1998年12月第1版

印 次 1998年12月第1次印刷

书 号 ISBN7-208-02319-0/K·538

141304

《中华文化通志》编委会

编委会主任 萧 克

编 委 李学勤 宁 可 王 尧 刘泽华
孙长江 庞 朴 陈美东 刘梦溪
汤一介 姜义华 陈 昕 朱金元
张国琦

办公室主任 张国琦

办公室副主任 王科元

策 划 姜义华 张国琦

FGB4 / 14141334

物理与机械志

作者简介

戴念祖,1942年生。1964年毕业于厦门大学物理系。中国科学院科学史研究所研究员。著有《朱载堉——明代的科学和艺术巨星》、《中国力学史》、《中国声学史》等;主编有《原理——时代的巨著·纪念牛顿的〈原理〉出版300周年文集》、《20世纪上半叶中国物理学论文集粹》等。发表论文近百篇,数次荣获中国科学院自然科学奖。

总 序

中华文化绵延了五千年的历史，起伏跌宕；哺育着差不多五分之一人类的身心，灿烂辉煌。它坦诚似天，虚怀若谷，在漫长的岁月里，广袤的土地上，有过无私奉献四面传播的光荣，也有过诚心求教八方接纳的盛事。它和以直，健以稳，文而质，博而精，大而弥德，久而弥新，昂然挺立于世界各民族文化之林。

任何一个民族的文化，勿论东西，不分大小，都有它自己的土壤和空气，都有它自己的载体和灵性，当然也就都有它自己的长处和短处，稚气和老练。准乎此，任何一个民族的文化，都有它存在和发展的天赋权利，以及尊重异质文化同等权利的人间义务。每一民族都需要学习其他文化的各种优点，来推动自身发展；都应该发扬自身文化的一切优点，来保证自己的存在，缔造人类的文明乐园。

现在，当二十世纪的帷幕徐徐降落之际，为迎接新世纪的到来，中华民族正在重新检视自己，以便在新的世界历史发展中，准确地找到自己的地位。呈现在读者面前的这部百

卷本《中华文化通志》，便是我们为此而向新世纪的中国和世界做出的奉献。

《中华文化通志》全书共十典百志。

唐人杜佑著《通典》，罗列古今经邦致用的学问，分为八大门类，“每事以类相从，举其始终”，务求做到“语备而理尽，例明而事中，举而措之，如指诸掌”。《通典》的这一编纂方法，为我们所借用。《中华文化通志》分为十典：历代文化沿革典、地域文化典、民族文化典、制度文化典、教化与礼仪典、学术典、科学技术典、艺文典、宗教与民俗典、中外文化交流典。每“典”十“志”。历代文化沿革典十志，按时序排列。地域文化典十志，主要叙述汉民族聚居区域的地域文化，按黄河流域、长江流域、珠江流域排列。民族文化典十志，基本上按语系分类排列。中外文化交流典十志，按中国与周边及世界各大区域交往分区排列。其余各典所属各志，俱按内容排列。

宋人郑樵《通志·总序》有曰：“古者记事之史，谓之志。”“志者，宪章之所系。”指的是，史书的编纂关系到发掘历史鉴戒之所在，所以，编纂者不能徒以词采为文、考据为学，而应在驰骋于遗文故册时，“运以别识心裁”，求其“义意所归”，承通史家风，而“自为经纬，成一家言”。（章学诚《文史通义·申郑》）

本书以典、志命名，正是承续这样的体例和精神。唯本书为文化通志，所述自然是文化方面诸事，其编撰特色，可以概括为“类”与“通”二字。

“类”者立类。全书十典，各为中华文化一大门类；每典十志，各为大门类下的一个方面；每志中的“编”“章”“节”“目”，亦或各成其类。如此依事立类，层层分疏，既以求其纲目分明，论述精细，也便于得门而入，由道以行，俾著者、读者都能于浩瀚的中华文化海洋里，探骊得珠，自在悠游。

“通”者贯通。书中所述文化各端，于以类相从时，复举其始终，察其源流，明其因革，论其古今。盖一事之立，无不由几及显，自微至著，就是说，有它发生和发展的历史。弄清楚了一事物一制度一观念的演变轨迹，也就多少掌握到了它内在本质，摸索到了它的未来趋势。

“通”者汇通。文化诸事，无论其为物质形态的，制度形态的，还是观念形态的，都非孤立存在。物质的往往决定观念的，观念的又常左右物质的；而介乎二者之间的制度，固受制于物质与观念，却又不时反戈一击，君临天下，使制之者大受其制。其内部的诸次形态之间，也互相渗透，左右连手，使整个文化呈现出一派斑斓缤纷的色彩。中华文化是境内古今各民族文化交融激荡的硕果；境外许多不同种的文化，也在其中精芜杂存，若现若隐。因此，描绘中华文化，于贯通的同时，还得顾及如此种种交汇的事实，爬梳剔理，还它一个庐山真面目。此之谓“汇通”。

“通”者会通。“会”字，原义为器皿的盖子，引申为密合；现在所说的“体会”、“领会”、“会心”、“心领神会”等，皆由此得义。《中华文化通志》所求之通，通过作者对中华文化的领悟，与中华民族心灵相体认，与中华文化精神相契合。

这就是《中华文化通志》依以架构旨趣之所在。是耶非耶，知我罪我，恭候于海内外大方之家。

《中华文化通志》由萧克将军创意于1990年。1991年先后两次在广泛范围内进行了论证。1992年组成编纂委员会。十典主编一致请求萧克将军担任编委会主任委员，主持这一宏大的文化工程。1993年1月和1994年2月，全体作者先后齐集北京、广东花都市，研究全书宗旨，商定典志体例，切磋学术心得，讨论写作提纲。事前事后，编委会更多次就全书的内容与形式、质量与速度、整体与部分、分工与协作等问题，进行研究讨论。近二百位作者进行了创造性构思和奋斗式劳作。这项有意义的工作得到了中央领导同志以及各界人士的热情支持。编委会办公室承担了大量的日常工作。上海人民出版社承担了本书出版任务，并组织了高水准高效率的编辑、审读、校对队伍，使百卷本《中华文化通志》得以现今面貌奉献于世人面前。我们参与这一工作的全体成员带着兴奋而又惶恐的心情，希望它能给祖国精神文明建设大业增添些光彩，更期待着读者对它的不当和不足之处给予指正。

《中华文化通志》编委会

内容提要

本书叙述了从遥远的古代到 1949 年中国物理学与机械工程的发展脉络、主要成就及其文化背景,对其历史意义和国际影响也作了简要评论。本书重在古代,兼及近代。

全书分上下两篇:上篇为物理志,下篇为机械志。上篇分别叙述中国古代的力学、声学、光学、热学、电磁学和物质观的理论、概念、主要成就和发展脉络,最后概述近代物理学在中国的建立过程。下篇在简述机械的起源之后,分别叙述以畜力、水力、风力、热力为动力的机械的发明与发展,以及计时机械、交通运输机械、自动机械和飞行机械的制造、流传及其社会影响,最后概述近代机械工程在中国的兴起过程。

古代中国人在物理学与机械工程两方面都曾经取得了许多重要成就,对世界文明作出了巨大贡献。众所周知,指南针的发明和地磁偏角的发现,曾对欧洲资本主义的兴起产生了重大影响,就是其中一例。在机械工程方面,仅据李约瑟博士所言,古代中国至少有 26 项发明居世界之先;而在十六、十七世纪期间,西方文明对中国机械技术真正有贡献的只有 4 项。本书除叙述这些重大成就、文化背景和历史特点之外,还揭示了中西交流的某些事实。本书古今联贯,并附有大量插图。

目 录

导 言	1
-----	---

上篇 物 理 学

第一章 力学	21
第一节 杠杆、滑轮和浮体的物理规律	21
一、杠杆原理	21
二、滑轮起重	23
三、浮体定律	24
四、浮力称重	25
第二节 力和运动	27
一、对力的认识	27
二、时空和运动	29
三、滚动、转动和自由落体运动	31
四、箭的飞行轨道问题	32
五、动力学知识	34
第三节 力学的相对性原理	35
一、相对运动	35

141684

二、相对性原理的古代说法	36
三、东西方运动学和动力学知识的总考察	38
第四节 材料力学	40
一、《考工记》与《墨经》论材料	40
二、发绳与应力	42
三、试弓定力和弓的弹性规律的发现	43
四、梁木断面的高宽比	49
第五节 液体的物性	51
一、水的比重	51
二、卤水浓度和比重计	52
三、表面现象	54
第二章 声学	57
第一节 声学发展的文化背景	57
一、丰富的音乐实践奠定了声学发展的基础	57
二、音乐文化的交流促进了声学的发展	59
三、庞大的国家音乐机构	60
四、乐律家的社会地位及学术之争	62
五、乐和政平与天人感应	63
第二节 对声波及其性质的认识	65
一、水波与声波	65
二、声波的反射、衍射和折射现象	66
三、声音的分类	68
四、声速问题	69
第三节 共振	70
一、关于振动的知识	70
二、共振现象	72

三、消除共振的方法	73
第四节 钟磬与壳板振动	75
一、磬与板振动	75
二、编钟发展史	77
三、壳体振动知识	79
四、喷水鱼洗	81
第五节 声音的利用	83
一、地听器	83
二、利用声响捕鱼	85
三、建筑与声音	86
四、活簧的安装	88
第六节 音调的数学计算	90
一、三分损益法及其起源	90
二、三分损益律的发展	93
三、纯律的理论与实践	95
四、十二平均律的创建	98
五、朱载堉及其平均律在国内外的影响	99
第七节 音高标准器与管口校正	101
一、弦准的发展	101
二、律管	102
三、管口校正	104
第三章 光学	106
第一节 灯和镜	106
一、灯	107
二、冷光	109
三、反射镜	113

四、透镜·····	115
第二节 光的直线行进性质及其利用·····	118
一、小孔成像实验·····	118
二、影子形成的道理·····	121
三、赵友钦的“小罅光景”实验·····	122
四、影戏·····	125
第三节 有关反射的知识·····	126
一、对光反射的认识·····	126
二、平面镜的组合与潜望镜的发明·····	128
三、透光镜的创制·····	129
四、对月球发光的解释·····	131
五、彩色雨伞滤光效果的发现·····	132
第四节 镜面成像原理的探讨·····	133
一、平面镜成像·····	133
二、凹面镜成像·····	134
三、凸面镜成像·····	136
第五节 有关色散的知识·····	137
一、雨虹的成因·····	137
二、晶体和露珠的色散·····	139
第六节 大气光象·····	141
一、海市蜃楼·····	141
二、峨眉宝光·····	143
三、小儿辩日·····	145
第四章 电学和磁学·····	147
第一节 电学知识·····	147
一、对雷电的认识·····	147

二、摩擦起电·····	149
第二节 静磁学知识·····	152
一、磁体特性的发现·····	152
二、司南·····	155
三、指南鱼与地磁倾角的利用·····	156
四、指南针的制造与安装方法·····	157
五、地磁偏角的发现·····	158
六、航海用指南针与罗盘·····	160
第五章 热学·····	165
第一节 摩擦取火和对热的本质的认识·····	165
一、摩擦取火·····	165
二、活塞式点火器·····	167
三、对热的本质的探讨·····	168
第二节 对热与冷的认识·····	169
一、物态变化,雪花与冰花·····	169
二、自然现象·····	171
三、热胀冷缩·····	172
四、沸腾过程·····	173
五、热传导现象·····	174
六、火候的概念·····	175
七、体温与温度标准·····	177
第六章 古代的物质结构观念·····	178
第一节 不可分的思想·····	178
一、儒家的“莫能破”·····	178
二、名家的“无内”·····	180

三、墨家的“端”	181
第二节 连续的物质形态	182
一、元气说的特点	182
二、波动的世界图景	185
第七章 近代物理学	189
第一节 近代物理学的启蒙时期	190
一、西方物理学知识的早期传播及其影响	190
二、物理学书籍的翻译	195
三、物理教育的萌芽	200
四、教育体制初步确立时的物理教育	204
第二节 近代物理学的创立时期	207
一、“五四”新文化运动和近代物理学知识的普及	207
二、物理学留学生	210
三、物理教育的发展	212
四、研究机构的建立	216
五、中国物理学会	219
第三节 二十世纪上半叶中国物理学的主要成就	222

下篇 机械 工程

第八章 简单机械	234
第一节 杠杆	234
一、杠杆和秤	234
二、桔槔及其他	237
第二节 滑车与轮轴	240
一、滑车	240

二、辘轳·····	242
三、绞车·····	244
第三节 尖劈、斜面与螺旋·····	246
一、尖劈·····	246
二、斜面与螺旋·····	248
第四节 改变运动形式或运动速度的机械·····	249
一、绳、链、铰链、连杆和曲柄机构·····	249
二、轮、齿轮和弹簧·····	255
第五节 工具·····	263
第九章 车辆和畜力的利用·····	266
第一节 有效挽具的创制与发展·····	266
第二节 车辆·····	270
第三节 独轮车·····	274
第四节 指南车·····	280
第五节 记里鼓车·····	285
第六节 畜力磨与车磨·····	288
一、历史的叙述·····	288
二、畜力磨·····	292
三、车磨·····	296
第七节 畜力的其他应用·····	298
第十章 利用水力的机械·····	302
第一节 升水机械·····	302
一、刮车·····	302
二、筒车·····	303
三、龙骨水车·····	304

第二节	水碓与水磨·····	307
一、	水碓·····	307
二、	水磨·····	309
三、	舟磨·····	314
第三节	水排与罗面机·····	315
第四节	橹、舵与轮船·····	319
第五节	打捞船·····	324
第十一章	利用风力的机械·····	326
第一节	风箱和猛火油柜·····	326
一、	橐与风箱·····	326
二、	唧筒与猛火油柜·····	332
第二节	风扇车·····	336
第三节	风车·····	341
第十二章	武器和热力机械·····	345
第一节	弓弩与炮车·····	345
一、	弓弩·····	345
二、	炮车·····	349
第二节	火箭、地雷和水雷的发火装置·····	351
一、	火箭·····	351
二、	地雷和水雷的发火装置·····	355
第三节	走马灯与省油灯·····	358
一、	走马灯·····	358
二、	省油灯·····	360
第十三章	计时机械·····	362

第一节 宋代以前的计时机械	362
一、张衡的水运浑象	363
二、一行的“水运浑天”	365
第二节 宋代的计时机械	367
一、宋代天文钟的历史概述	367
二、张思训的浑象	371
三、苏颂的水运仪象台	372
四、宣和玑衡	382
第三节 宋代以后的计时机械	383
一、元代的灯漏与宫漏	383
二、明代的计时机械	385
第十四章 地动仪和自动机械	390
第一节 候风地动仪	390
第二节 机械木偶和捕鼠器	394
一、机械木偶	394
二、自动门	395
三、捕鼠器	396
第三节 水饰和自动船	399
第十五章 飞行机械	403
第一节 各种飞行器的创制	404
一、飞行木鸢	404
二、锥形热气球	405
三、风筝的起源	407
四、葛洪“飞车”	409
五、陀螺与平衡环	411

六、降落伞·····	414
第二节 飞行尝试及其机械设想·····	416
一、飞行尝试·····	416
二、飞行机械的设想·····	418
第十六章 近代机械工程·····	422
第一节 近代机械工程的兴起·····	423
一、明清之际西方机械知识的传入·····	423
二、洋务运动时期创办的军事工业·····	428
三、江南制造总局与福建船政局·····	431
四、外商与民营机械工业·····	434
五、机械产品的制造·····	436
六、近代机械工程教育的肇始·····	439
第二节 近代机械工程的初步发展·····	442
一、机械工业的发展和仿制技术的提高·····	442
二、教育、科研机构和学会·····	447
结 语·····	451
参考文献·····	459

导 言

本书题为《物理与机械志》，将物理学与机械工程合为一志。

物理学是研究物质内部结构及其运动规律的科学^①。按物质的不同存在形式和不同的运动形式，经典物理学的各个分支学科一般地分为力学、热学、光学和电磁学。声学包括在力学之中，因为它是研究机械运动中最普遍的一种运动形式，即振动与波的学科。在中国古代，声学具有特别丰富的内容；在现代物理学中声学已独立成一门学科。因此，本书除将力学、热学、光学和电磁学各列一章外，又将声学列为一章。

从世界科学史的眼光看，物理学的发展经历了不同的阶段：从远古到中世纪的古代阶段；从文艺复兴到十九世纪末的经典阶段；从十九世纪末二十世纪初开始，以量子论和相对论的创立为代表的现代物理学的全面发展阶段。然而，各个民族都有自己的社会与科学的发展进程。就中华民族而言，一般地，人们将 1840 年鸦片战争以前看作

^① 有关物理学的定义、研究内容和方法，详见朱洪元“物理学”，载《中国大百科全书·物理学》，中国大百科全书出版社 1987 年版，第 1—14 页。

古代经验科学的时期,1840年以后方才进入近代科学的启蒙与发展期。本书的叙述也将遵循这一历史顺序进行。

所谓“机械”,一般是指机器和机构的总称。它是用以节省或代替人力或畜力,以完成各种体力工作的具有特殊用途的装置^①。机械学是研究如何制造和使用机械及其基础理论的学科,机械工程是指与机械和动力生产有关的一门工程学科。机械学与机械工程之区别只在于对理论和实践的侧重不同罢了。

在中文里有一些表述不同学科的名词在英文中实际上是同一词根派生出来的。“机器”英文为 machine,“机器”与“机械”又总称为 machinery,“力学”与“机械学”同为 mechanics。人们常以 mechan-作为机械的构词成份。可见,机械学与经典物理学中的一个分支学科即力学是同一学科,它们的区别也只在于深度与侧重点不同罢了。在科学史上,古代人的机械制造经验与实践曾促使近代力学的诞生,而近代力学理论的每一重大发展又使机械制造得以进步。伽利略和牛顿都是近代力学、机械学和物理学的奠基人。十八、十九世纪时,与机械学最为密切的刚体力学达到比较成熟的阶段,因而在英、法等国出现了经典机械学派。十九世纪热力学和能量守恒定律的建立,为机械工程技术奠定了理论基础。十九世纪下半叶,电磁理论的建立又促成了一项崭新的机械工程即发电机、电动机以及相关的交通运输机械的问世与发展。

十九世纪末,由于机器制造的迅速发展,产生了基础科学与工程实践直接结合的问题。德国数学家兼力学家克莱因(Christian Felix Klein, 1849—1925年)在哥廷根大学创设应用力学专业,以后其他各国相继

^① 关于机械和机械工程的定义有种种不同的说法。参阅《简明不列颠百科全书》(中国大百科全书出版社,1985年中译版,第4册,第139—144页)中的“机器和机械零件”、“机械工程”等词条;也见刘仙洲:《中国机械工程发明史》,科学出版社1966年版,第4—6页。

仿效。不久就从力学中诞生了材料力学、应用力学、工程力学、机构学、机械零件等独立课程。原来只限于运动学研究的机构学,在二十世纪高速机械出现后就又发展了机械动力学。随着机器生产的不断发展,以后又发展出机械的分析与设计等课题。这样就诞生了现代机械学和机械工程。如今,机械工程已从古代工匠的摸索实践中发展到专业工程师依据科学理论在研究、设计和生产中使用的科学方法。其领域已包括:研制以计算机存储和处理数据的自动生产物品的机器;发展包括电子、流体、电力、水力的机械,甚而超温、超导、耐摩、耐蚀的生产动力机械;研制核反应、核武器和航空、航天等高速、高功率的机械装置;研制生物工程机械以及与环境控制有关的新技术、新设备,等等。

由此可见,物理学与机械学、机械工程之间,无论在理论原理或实践方向两方面都是密不可分的。本书将物理学与机械工程合在一志之中,以上篇叙述物理学——作为机械工程的理论基础,以下篇叙述机械工程——作为物理学原理的实践应用。虽然从历史发展顺序看,它们关系密切,但从今天的科学分类看,它们仍然是两门性质完全不同的学科。这一点又是需要特别说明的。

二

“物理学”一词希腊文为 $\Phi\upsilon\sigma\iota\kappa\eta$, 它是由 $\Phi\upsilon\sigma\iota\varsigma$ 派生的,其本意是探讨自然界和自然现象。当亚里士多德(Aristotle, 前 384—前 322 年)创造这一词并用它命名他的一本著作时,该书题原意为《自然哲学》或《自然论》。由于中世纪的拉丁文译本已根据希腊文音译为 Physica, 后来英译本也将它译为 Physics(物理学), 中译本便随之而译成《物理学》^①。

^① 亚里士多德著、张竹明译:《物理学》,商务印书馆 1982 年版,第 9—10 页;杨玉:《关于中译“物理学”名称的由来》,《物理》1987 年第 1 期。

物理学词义的历史变迁说明这门科学的大概的进程。

“物理学”一词在中国的演变是极为有趣的。早在先秦时期,人们以“格物致知”一词泛指探讨自然界和包括人事在内的各种事物的道理^①。明清时期,由该词演变出“格物”、“格致”和“格物学”、“格致学”等词,后者就成了汉译西方科学或物理学的专有名词。另一方面,古代学者常以“物理”一词泛指包括人事在内的各种事物的道理。公元前二世纪成书的《淮南子·览冥训》写道:“耳目之察,不足以分物理;心意之论,不足以定是非。”其中的“物理”一词指的就是这种意思。然而,在所需探讨的事物道理中,《淮南子·览冥训》列举了四个例子,其中的三个在今天看来也仍然属于物理学范畴。它们是阳燧取火,磁石吸铁,葵花向日。它们分别属于光学、磁学和生物物理现象。其后,晋代杨泉著《物理论》,明清之际方以智著《物理小识》,方以智的老师王宣著《物理所》。这些冠以“物理”的著作包括了自然现象、人事现象以及鬼神、巫术^②。由此可见,“格物学”或“物理”的原初意义也是属于自然哲学或哲学。

中国古代词汇以及明清之际中国人译西方科学著作的用词都曾对日本产生很大影响。在兰学传入日本之初,日本学者曾将中文西方科学译著引入日本;明治维新之后,在方以智《物理小识》书名的启示下,也是在中国人译西学时以“学”为公称,以门类为私号的约定^③启发下,日本学者借用中文“物理”一词、加上公称“学”而译西方的 physics 一词为“物理学”^④。1879年,饭盛挺造(1851—1916年)将其

① 《礼记·大学》:“致知在格物,物格而后知至。”

② 戴念祖:《中国物理学史略·物理词义的演变》,《物理》1981年第10期。

③ 邓玉函、王徽合译:《远西奇器图说》卷一。

④ 日本物理学会:《日本の物理学史》上,东海大学出版社1978年版,第54、60、78、81页;汤浅光朝:《科学文化史年表》,科普出版社1984年中译本,第186页;杨玉:《物理》1987年第1期。

在东京大学的讲义编成《物理学》一书出版^①。1900年,日本和中国学者又将他的著作译成中文。于是,“物理”一词就在亚洲东方绕了一圈之后终于成为中国的物理学专有名词而确定下来。

至于“力学”一词,中国古代的意义与近代科学含义乃风马牛不相及^②。明天启七年(1627年),王征与传教士邓玉函合译《远西奇器图说》时,将 Mechanics(力学)译为“力艺”、“重学”^③。将它译为“力学”是十九世纪最后三十年间的事^④。虽然如此, Mechanics 的本意为机械原理或机械学,其“机械”一词及探求使用机械以省体力的意图在中国古已有之。

战国时代,“机”用以表示弩牙^⑤、桔槔^⑥、杠杆^⑦、云梯一类攻城器械^⑧;织布机称为“机杼”^⑨,从事丝麻织业的工人称为“机匠”、“机工”。器械中的发动部件称为“枢机”、“机关”。“机”与“械”二字合成“机械”一词,见于《庄子·外篇·天地》:“有机械者必有机事,有机事者必有机心。”《韩非子·难二》亦写道:“舟车机械之利。”可见,战国时期“机械”已成为专用名词。尤其是,古人已认识到机械和力、省力极有关系。《庄子·天地》述及桔槔时说:“有械于此,一日浸百畦,用力甚寡而见功多。”《韩非子·难二》指出机械之利在于“用力少,致功大,则入多”。以经济观点作为机械定义的内容之一,看来是传统的中

① [日]八木江里:《日本最初の物理学者たち》,载辻哲夫編集:《物理学史研究》,东海大学出版社1976年版,第125页。

② 例如,《金史·张行简传》:“颖悟力学,淹贯经史。”

③ 《远西奇器图说》卷一。

④ 戴念祖:《中国力学史》,河北教育出版社1988年版,第1—2页。

⑤ 《书·太甲上》:“若虞机张。”孔传:“机,弩牙也。”《淮南子·原道训》:“其用之也若发机。”高诱注:“机,弩机关。”

⑥ 《庄子·天地》:“凿木为机,……其名曰槔。”

⑦ 《礼记·曾子问》:“遂舆机而往。”郑玄注:“机,舆尸之床也。”

⑧ 《战国策·宋卫策》:“公输般为楚设机。”高诱注:“机,械,云梯之属。”

⑨ 古乐府《木兰诗》:“不闻机杼声,唯闻女叹息。”

国特点。当西方科学初入中国时,王征与邓玉函译 Mechanics 为“力艺”,其原因是:“艺,则用力之巧法、巧器,所以善用其力,轻省其力之总名也。”^① 可见,他们准确地表述了 Mechanics 的本意。

从上述“物理学”词义的起源及演变看,中国古代人并没有认识到物理学是一门独立的学科。与此相关的是,古代确实没有专门的物理学或格致学著作,人们将物理现象和物理规律分散地记述在经、史、子、集的各种书籍之中。相比之下,有关机械的著作倒是集中一些,除了一些佚书之外,例如苏颂的《新仪象法要》是中世纪一本重要的天文和机械的图书。我们不妨在此先开列一些书目,以供读者研读。

先秦时期的《墨经》和《考工记》是值得重视的两本著作。

《墨经》是以墨翟为首的墨家的自然科学和逻辑学的代表作。流传本《墨经》编入《墨子》书中,包括《经上》、《经下》、《经说上》、《经说下》四篇,或者再加上《墨子》的《大取》、《小取》二篇。关于《墨经》的作者及成书年代问题,曾在一个时期众说纷纭。至今,一般认为,《经》是墨翟自著,《说》是墨翟弟子记述墨翟讲学的言论^②。墨翟卒后,墨家分为几派,各派取舍不一,流传至今的《墨经》可能与墨翟原著在体例与书写格式上会有所不同。《墨经》文简意赅。《经》文多则二十余字,少则三五字;《说》文字数稍多,个别条文在百字左右。《经》与《说》四篇,约计 180 余条,5700 余字。字数虽不多,其内容却很丰富。除了大量的逻辑学和个别几何学条目之外,该书集中地记述和探讨力学和光学现象,为我国古代难得的一本科学著作。

《考工记》是春秋末年齐国人的著作,一说为战国初年的著作^③。

① 《远西奇器图说》卷一。

② 详见戴念祖:《中国力学史》,河北教育出版社 1988 年版,第 22—24 页。

③ 闻人军:《考工记导读》,巴蜀书社(成都)1987 年版,第 122—138 页。

汉河间献王以《周官》阙《冬官》一篇，遂以《考工记》补入。《考工记》成为《周礼》中的一篇。该书记述了当时官营手工业中三十项专门的生产部门，如“攻木之工七”包括了如何制作轮、舆、弓、庐、匠、车、梓；还有攻金之工、攻皮之工、设色之工、刮摩之工、埴埴之工等工艺技术。显然，《考工记》是按照原材料将技术分工的。就现在看来，它实际上包括了制车、兵械护甲、礼乐器具、制陶、建筑与水利、量器制造、织染刺绣、农业机械等技术。几乎每一门类的技术都涉及设计规范、制造工艺，并且阐述其中的科学道理。可以说，《考工记》是先秦时期工艺技术的百科全书，对于研究中国机械史和物理学史都是一本极为重要的著作。

从秦汉起迄明清之际西方科学传入中国之前，与物理学和机械工程有关的主要著作如下：

汉淮南王书，即《淮南子》、《淮南万毕术》二种，它们是由淮南王刘安集合其门客编纂而成的，其中记述了许多物理经验和知识。

东汉王充的《论衡》旨在批驳当时流行的各种错误见解。为了论证的需要，他搜集了大量的物理现象，并作出了直观的初步解释，在力学、光学和磁学的知识方面尤为丰富。

晋张华《博物志》，以静电现象和热现象的记述为多。

隋代临孝恭《欹器图》和《地动铜仪经》，与欹器和地动仪的制造有关，也与重心、平衡、惯性力等物理性质有关。可惜该二书已佚。唐代杜牧的《考工记注》，发展并创新了《考工记》的某些见解。

宋元时期有较多著作与物理学和机械工程的关系较密切。其中有：曾公亮等人的《武经总要》，涉及武器、车船和火药制造；苏颂《新仪象法要》，记述了一种机械计时器即“水运仪象台”的设计、制造问题；沈括《梦溪笔谈》，在物理学与机械方面均有大量记载；李诫《营造法式》是一本建筑专著，但与材料力学甚有关系；赵友钦《革象新书》，涉及一种大型光学实验；王祯《农书》（也称《王祯农书》）描述了大量

的农业机械。

明至清初的著作有：李时珍《本草纲目》是中草药物专著，内中包括了大量的晶体知识；朱载堉《乐律全书》，在声学史上是极为重要的著作；徐光启《农政全书》也涉及大量农业机械问题；王征《新制诸器图说》是在西方科学影响下的一本专门的机械之作；宋应星《天工开物》也包含了各种机械技术和物理知识；方以智的《物理小识》记述了各种物理现象及经验。

从明末至清末，由于西方传教士来华，西方科学著作译成中文者日渐见多，中国的传统著作也日益受西方影响。如郑复光的《镜镜论痴》等书，是西方科学知识与中国传统文化相结合的典型之作。来华教士与中国学者共同翻译了许多西方的科技著作，我们将在以下各章中述及它们。

除了以上所述之外，二十四史中的《律历志》或《音乐志》都涉及声学问题，而《宋史·律历志》中的“浑仪”、“漏刻”涉及计时器，《宋史·仪卫志》中的“政和大驾”、《宋史·舆服志》中的“指南车”和“记里鼓车”涉及交通运输机械，这些都是古代科技史志中难得的经典文献。

许多出土文物在科学史中有举足轻重的作用。它们弥补了文献典籍之不足，或提供文字记载之佐证。曾侯乙钟的发现及其铭文的解读，为中国声学史提供了大量素材，这就是一个例子。历代的绘画、壁画等艺术作品也很值得机械史工作者的重视。

三

为使读者了解本书所述论题的发展轮廓，我们按照历史顺序简略地叙述物理学和机械工程在中国的主要成就。

从远古到西周(前 770 年以前)

在中国历史上,夏代以前是以石器为特征的时代。距今170万年以前的云南元谋人,距今50万年以前的北京人都能打制或磨制石质尖状器或刮削器,他们可能从天然尖状物的刺痛中领悟到锋刃或尖劈的作用。此后,以骨、石为原料制造的各种生活和生产用具,表明杠杆已在实践中被使用。公元前6000年,河南舞阳贾湖村人创制了具有六声或七声音阶的骨笛,它表明中国古代的音乐文化远早于古巴比伦文化。齐家文化、龙山文化和马家窑文化中都有少量的红铜或青铜制作的刀、锥、凿等工具。弓箭、舟楫、杵臼等等是这个时期的重要器械发明。据史籍载,那时的人们“弦木为弧,剡木为矢”,“剡木为舟,剡木为楫”,“断木为杵,掘地为臼”^①。钻木取火的技术也是这个时期的重要成就。

夏、商、西周时期是以铜器为特征的时代。青铜工器的冶炼铸造、耕作技术、陶瓷、纺织、建筑、车船、兴修水利等,都有长足的进步。平面铜镜起源于齐家文化时期,殷商时期人们已经制造了镜面微凸的青铜镜。青铜编钟起源于商代初期的铜铃,晚商与西周时期编钟、编磬大有发展。各种车的制造在商代已发展到相当精巧复杂的程度,车的附件及驾车佩饰名目繁多。纺织发展到使用纺轮和传动机构相结合的机械。特别是西周的手工业从农业中分化而出,产生了官营手工业作坊,手工业本身也趋向专门化,这些都有利于机械的发明和物理经验的积累。

声学知识已肇始于音乐之中。西周的民歌汇集而成的《诗》记载了二十九种乐器。十二律产生于殷商或西周初期。公元前十世纪,钟工或乐师通过调音而制成双音钟,即一个钟体能发出两个基音;律管也大约在此时问世。从商至西周的小笙,都是在管端装有簧片的复音乐器。反映了西周典章制度的《周礼·典同》中记述了十二种钟的形

^① 《易·系辞》。

状与其音量、音质的关系,这是有关壳体振动经验知识的第一次总结。

春秋战国(前 770—前 220 年)

春秋战国约 550 年间,是从铜器向铁器过渡的时代;按照历史学家的说法,也是从奴隶制向封建制过渡的历史阶段。这时期的列国兼并战争也促使科学技术比前一时期有极大的发展。

人们创制并运用的机械有滑轮(古称滑车)、桔槔、辘轳、附有回转柄的磨与碓、木鸢、云梯、手摇纺车以及皮囊(原始的鼓风机)等等,轴承与润滑油被广泛应用。著名的机械师有鲁班和墨翟等人。

《考工记》与《墨经》代表了这个时期的机械学与物理学的水平。

《考工记》在叙述各种器物制造中,以制车和弓箭为详细,释理深刻。它叙述了滚动摩擦和惯性现象;从造弓选材等技术中提出了检验材料强度的方法;讨论了皮革形变与强度的关系,尖劈与斜面引重的问题;对箭的结构比例及其飞行力学作了经验记述;总结了磬、钟、鼓一类板壳振动知识,等等。

《墨经》讨论了杠杆、滑轮和斜面等简单机械的原理,初步探讨了浮体的平衡规律,讨论了建筑砖石的受力平衡,探讨了梁木和柔绳不同的发挠变形性能,论述了度量衡的一般法则,对时间、空间作了定义,对时空与运动以及运动与静止的关系,对圆球的随遇平衡、转动现象和自由落体作了探讨。此外,它首次记述了地面上的陶瓮可作为听音器使用。然而,《墨经》的更大成就还在光学方面,它以八条文字连续地记述了光学问题。它们是:影子生成的道理;光线与影的关系;光直线行进实验;光反射性质;从物体与光源的相对位置确定影子大小;平面镜、凹面镜和凸面镜的成像规律。这八条文字是墨家从事光学实验、仔细观察的忠实记录,也是世界文化史上最早的一篇光学著作。

《考工记》着重在手工技术,承上启下、总结过去、开创未来。它在

几千年的中国文明进程中影响了科学发展的方向。中国古代工程技术大放异彩与此不无关系。相比之下,《墨经》的内容着重于自然科学和逻辑学,随着汉代以后墨学断绝,以《墨经》为代表的脆弱的自然科学的理性主义也消失了。

除上述二部经典之作以外,此时期还有许多典籍零散地记述了各种物理知识。《庄子·天地》记述了桔槔的构造和原理,《庄子·徐无鬼》记述了共振现象。《管子·地员》记述了弦长与音调定量关系的三分损益法,这是人类第一次成功的以数学总结自然规律的尝试。磁石的某些特性、热胀冷缩现象也有所被认识或被应用。

从秦汉到五代(前 221—960 年)

这是我国古代的机械制造和物理学的发展时期。汉代以后,我国已完全进入铁器时代,钢铁技术长足进步。先进的钢铁制造技术是同期的西方无法相比的科技与社会发展的条件。

在机械制造方面,西汉时期人们发明了齿轮、滚动轴承、辘轳用于起动重物。织机已发展为由杠杆、轮、连杆和索等简单机械构成的联合机械。丁缓发明被中常炉(其原理与回转仪相似)和七轮扇。毕岚造翻车,实际上是一种链唧筒。唧筒、渴乌(虹吸管)、耕犁、扇风车(一种以人力产生风的机械,古称“风车”,但要区别以自然风作为动力的风车)、船用舵和橹、水碓、水排、水磨都是这个时期的重要发明。

东汉张衡创制候风地动仪、水力运转浑象仪,指南车和飞行木雕,巧妙地运用了杠杆原理和齿轮系统。三国时期,马钧造指南车,改进翻车、织绌机和抛石机。晋代葛洪发明了具有螺旋桨原理的“飞车”。南北朝时期,祖冲之改进指南车外,又创制千里船,使桨式间歇运动变成轮式连续运动。风筝和加帆车也是这个时期的发明。天文钟中的减速传动和棘轮系统是隋唐时期重要的机械成就。更有现代技术意义的是,唐代杨务廉第一次创制了人工合成言语声的机械木偶。

这一时期在物理学方面的重大成就有：

力学方面，在《尚书纬·考灵曜》中对力学相对性原理作出了最古老的叙述；王充在《论衡》中提出了一个系统的内力无作用效果的思想；随着弓箭的长期应用以及测量弓力的实践，汉代人发现了弹性定律；在欧洲，这些成就都是在近代科学兴起之后才取得的。

在热学方面，人们从天气变化和生活实例中知道物态的三种变化与温度的定性关系。韩婴在公元前二世纪观察性地记述了雪花晶体的六角对称形态。晋代张华在《博物志》中定性地记述了油与水的不同沸点和水的递次沸腾现象。以人体腋下的温度作为判别周围环境的温度变化的标准也为人们所知。

在光学方面，凹面镜即阳燧被普遍用于取火，人们发现了各种能聚焦光线的物体，并初步探讨了阳燧的焦点问题。冰透镜、“透光”镜、锥形幻灯或活动影片是汉代人的创造。对雨虹色散现象、月亮发光原因也有较深刻的认识，甚至于作出了人造雨虹的简单实验。

在声学方面，董仲舒与王充等人提出空气波与水波类似的观点。乐器与乐律学有很大发展。尤其是，从汉代京房到隋唐祖孝孙，三分损益律发展到近似的十二平均律，这是此时期乐律学的非凡成就。晋代荀勖发现了类似于今日洞箫一样的复杂管的管口校正方法。人们对于振动和共振的认识逐渐深刻，晋代张华、唐代曹绍夔等人相继发现了消除共振的方法。

在电与磁方面，人们广泛地注意到磁石的吸引和排斥两种现象，王充记述了司南的形状、用法与指向问题。人们不仅发现了琥珀、玳瑁的静电吸引现象，而且还记述了静电火花和放电声。

宋辽金元(960—1368年)

继盛唐之后，宋朝成为中国古代科学文化发展的高峰期。国内贸易发达，行会制度盛行，城市经济繁荣，纸币和汇兑流行，这一切都促成了当时科技的发展。尤其在农业、手工业、冶金、武器制造、纺织、陶

瓷方面比前一时期都有较大进步。在宋、辽、金三方交战的岁月，火药武器和造船技术突飞猛进地发展。元朝在机械与物理学方面基本保持宋代水平。

在机械制造方面，燕肃等人分别再造指南车与记里鼓车，并且留下了较为详细的文字记载。苏颂造水运仪象台，这是具有减速齿轮系统和擒纵器的现代天文钟的始祖。僧怀丙打捞铁牛应用了类似现代起重浮艇的原理。轮船在此时发展到高峰。在水排的基础上，活塞风箱、风箱式喷火武器（《武经总要》记其为“猛火油柜”）以及盐井吸卤用拉杆活塞式机械应运而生。此外，在宋代的重要发明中还有管形火枪、走马灯和火箭。木棉搅车、尖劈榨机、可折叠船、水转大纺车等，至晚也是元代的重要发明。

在力学上，李诫系统地总结了历代建筑经验，提出了横梁截面的高度与宽度的科学比例数。由于虹吸管和风箱的应用，此时期有大量的关于空气压力的经验记述。以莲子、鸡蛋测试盐卤浓度的方法，表面张力演示仪的发明，等等，是这个时期的力学成就。

沈括是此时期伟大的科学家之一，他对物理学的贡献尤多。在光学上，他对日食、月食和雨虹的成因作了理论总结；他研究了各种镜子、探讨了透光镜的机理；发现了阳燧焦距。元代赵友钦又进行了大型光学实验。此外，关于色散的知识也有很大进展。

在声学方面，沈括讨论了古乐钟的形状及其对发音的影响，第一次成功地作了演示共振实验。赵希鹄提出了对琴室的设计要求，这是建筑声学的滥觞。

电与磁的知识此时达到古代认识的高峰。指南针的磁化方法和磁偏角的发现、对雷电现象和静电现象的大量记述，是其中最典型的事例。

明清（1368—1911年）和近代科学在中国的启蒙时期（1600—1911年）

明、清两代是我国科学技术从古代传统向近代过渡的一个特别时期。一方面,传统科学仍在缓慢地发展;在1600年以前并无明显表现出落后于西方的情形,而在1600年之后的300年间,也确实还有个别的成就可与西方同样成就相比;另一方面,从十六世纪末起,西方科学知识在中国传播,中国的传统科学缓慢地与近代科学交融在一起。

在明、清两代仍然属于中国传统的机械与物理学成就有:宋应星《天工开物》所描绘的各种机械技术;茅元仪《武备志》所记述的火箭、地雷、水雷及其发火装置;朱载堉创建的十二平均律理论和管乐器末端效应的发现;刘献庭《广阳杂记》中记述的磁屏蔽现象;建筑中的隔音技术等。

明末传教士来华,迄清末止,传教士和中国学者翻译了200种左右有关机械与物理学的西方著作,从而在传统科学中注入了新的科学概念、思想与方法。

十九世纪六十至九十年代期间,在“兴办洋务”的口号下,上海、苏州、福州等地相继开设造船厂、枪炮局等军用工业,中国人学会了设计与制造蒸汽机、火轮船和近代军火武器,也学习了机械应用技术,从而近代机械制造业开始在中国萌芽。十九与二十世纪之交,西方某些动力和生产机械引入中国,又通过派遣留学生学习科学与技术,兴办学堂,为下阶段的发展奠定了人才与知识基础。

近代物理学和机械工程的初步发展时期(1911—1949年)

五四新文化运动的开展,科学和工程学术团体在二十世纪第二个十年的创立,尤其是,以1928年中央研究院(内设物理研究所、工程研究所)的建立,中国的物理学和机械工程进入初步发展时期。

在物理学方面,首先是物理学留学生回国后多在大学从事物理教育,创办物理系,建立实验室。到三十年代初期,全国已有30多所高等院校建立了初具规模的物理系、数理系或理化系。某些大学物理

系的教学水平超过美国大学本科。抗战期间,学校内迁,物理系和研究所的研究受到极大影响,但教学质量没有下降,仍然培养出大批物理人才,如杨振宁、李政道等等。中国物理学家在国内外或沉思宇宙的广袤,或探索原子的奥秘,在物理学的各个分支学科都取得了一些重要成就。

在机械工程方面,1949年之前,有10余所高等院校设有机械工程专业;在技术上虽然主要是仿制或装配外国机械,但在蒸汽机、内燃机、电机、机床、锻压设备、机车、纺织机、货车等方面相继设厂,生产了一定数量的机器和设备。抗战期间,在战争的刺激下,也有局部与短暂的发展。尤其是,在培养人才和技术方面,为下半个世纪建立近代机械工业体系奠定了基础。

上 篇
物 理 学

本篇叙述从远古到二十世纪五十年代初中国物理学的主要成就及其文化背景。前六章讨论古代时期的经验物理学的成就与思想，第七章叙述近代物理学的启蒙与发展。

在前五章中，先讨论力学，因为它是近代科学兴起时的先头学科，也因为它是人类在自然界中生活的直接经验的总结；然后讨论声学，它是中国传统物理学中史料最丰富、成果最多的学科；以下顺序为光学、热学、电学和磁学。国际中国科学史界曾有人认为，声学、光学、磁学在中国古代曾得到很好发展；而力学，除了机械制作与技术经验外，几乎无理论成就。这种状况与欧洲形成了鲜明对比：在拜占庭时代和中古后期，力学和动力学较为进步，而磁学则差不多不为人所知^①。我们在本篇中将要看到，就是在运动学或动力学方面，古代中国人几乎涉及了西方所讨论的全部内容，而且还知道同时期的西方人尚未认识的许多知识。

古代人关于物质结构的看法有别于西方的观念。在物质世界的可分与不可分、连续与不连续的思辨性探讨中，人们重视前者而淡漠于后者。

从十六世纪末开始，西方物理学知识开始传入中国。由于种种原因，中国人在接受西方物理知识和方法方面，经历了持续而缓慢的过

^① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part I, pp. XXIII—XXV. Cambridge, 1962.

程。洋务运动期间,近代物理学出现萌芽状态。十九世纪末二十世纪初才有留学生出国专门学习物理学。这批中国近代物理学工作者,在回国之后,或执教于讲坛,或研究于实验室,开创了近代物理学。中国传统的物理学从此融合于世界性的科学长河之中。

第一章 力学

本章着重叙述古代人在力学的理论方面取得的一些成就,至于应用力学知识留待下篇讨论。

某些科学史家曾经认为:中国古代没有对运动有研究的学者,中国典籍中没有关于弹道和自由落体的讨论,没有运动学和动力学。愿本章所述,能给读者留下另一种印象:同其他科学和技术一样,中国古代在力学方面也有丰富的、甚至不少是超越时代的知识。

第一节 杠杆、滑轮和浮体的物理规律

一、杠杆原理

秤在春秋期间的发明和应用,以及后来具有可变换支点(在一个秤杆上有二个提绳)的铤秤的发明^①,都表明古代人在实际上完全掌握了杠杆原理。以墨翟为首的墨家最早记述了秤的物理规律。

墨家将秤的重臂称为“本”,权臂称为“标”(图 1-1)。他们指出,

^① 关于天平和秤的历史,见本书下篇。

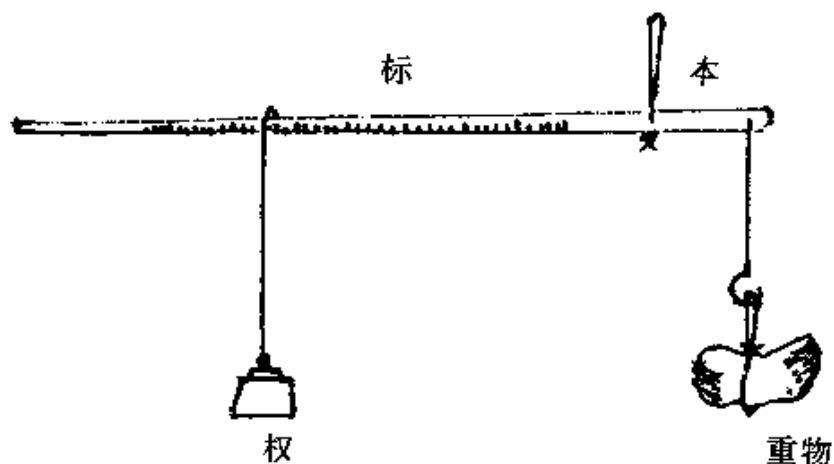


图 1-1 秤

秤量重物的必要条件是“衡而必正”^①，即秤杆必需保持平正，而不是倾斜。就秤的平衡问题，《墨经·经说下》写道：

衡，加重于一旁，必垂，权重不相若也。相衡，则本短标长。两加焉，重相若，则标必下，标得权也。

意思是：当秤平衡时，在重物端加重，这一端必定下垂，因为此时的权与重不相等。如果权与重不相等而秤“相衡”，则是“本短标长”所致。如果在“本短标长”的情况下，在秤的两端各加上相等重物，“则标必下”垂。

由于墨家的文风和当时书简的困难，他们没有提供本、标、重、权的具体数据。但这条文字无疑是墨家在使用秤的经验中所作出的一种定义性或普适性总结。其中，“标得权”三字，因年代久远、词义变迁，迄今学者对于可否将它释为“标 \times 权”的力矩概念多有异议。就整条文字看，墨家同样分析讨论了阿基米德定律的全部杠杆平衡原理，

^① 《墨经·经下》。本书所引《墨经》条文，根据前人考订和多数人说法而书写出一段文字，不作训诂考证。有兴趣者，可参阅孙诒让：《墨子閒诂》、梁启超：《墨经校释》、谭戒甫：《墨辩发微》、高亨：《墨经校论》、李渔叔：《墨辩新注》等书。本书所引条文，均见戴念祖：《中国力学史》，河北教育出版社1988年版。

这是毫无疑问的。

二、滑轮起重

利用滑轮和绳索将重物举起的简单机械，古代人称之为“滑车”，墨家称它为“绳制”。

《墨经·经下》：“挈与收反，说在薄。”

《墨经·经说下》：“挈，有力也。引，无力也。绳制挈之也，若以锥刺之。长重者下，短轻者上。挈，上者愈得，下者愈亡。绳直，权重相若，则正矣。不正，所挈之止于斜也。收，上者愈丧，下者愈得。上者权重尽，则遂。”

参看图 1-2。通过滑轮的绳子向上提挈重物，或在滑轮一边向

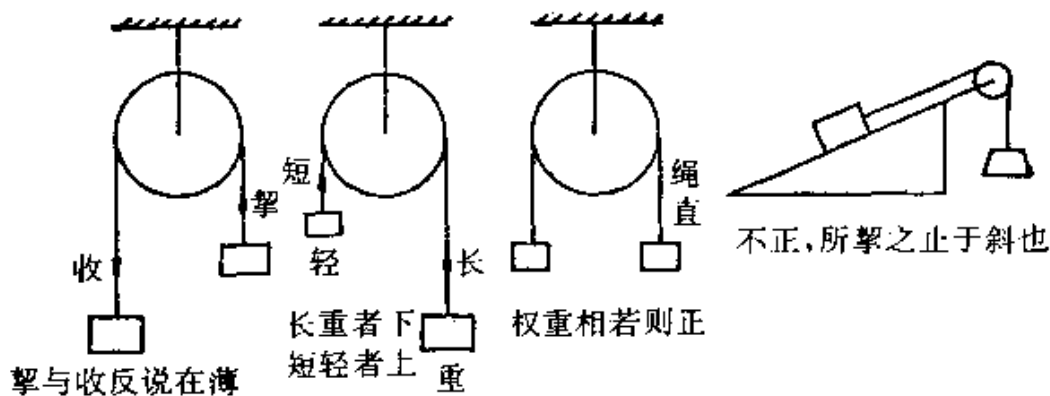


图 1-2 《墨经》讨论滑轮

下收绳而拉升重物，其作用力方向正好相反（“挈与收反”）。所谓“反”，是特指“挈”与“收”的两种力同时作用在同一点上，墨家记此情形为“薄”^①。两种性质的力对向一个作用点，故云“说在薄”。

《经说下》详细讨论滑轮起重。首先指出三种用力情形：一是需用

^① “薄”，--为道近、靠近。如“日薄西山”；一为侵入，如“寒暑未薄而疾”。

人力的“挈”；二是不需人力的“引”，我们在下面一节中再讨论它们；三是“绳制”。以“绳制挈之”，就如同用针锥刺物一样省力（“若以锥刺之”）。接着讨论绳制的一般力学性质：“长重者下，短轻者上。”^①看来，墨家是用一根绳将轻重不同的两个物体同时悬挂于滑轮的两边而进行实验的。从“挈”看来，目的是要把重物提举到某一高处，被提举的物体（“上者”）愈来愈高（“上者愈得”），而滑轮另一边的重物（“下者”）则愈往下坠（“下者愈亡”）。在这过程中，如果绳子总是直立不斜、滑轮两边“权重”相等，那么滑轮就处于平衡状态（“则正矣”）；如果满足这两个条件而不平衡，那么所提挈的重物就处在斜面上（“不正，所挈之止于斜也”）。从“收”看来，情况正与挈相反，是“上者愈丧，下者愈得”，直到“上者”的“权重尽”，整个起重过程也就结束了（“则遂”）。

墨家是世界上最早讨论滑轮平衡问题的学者。在滑轮两边，“长重者下，短轻者上”，以及“绳直，权重相若，则正”的平衡结论，在西方是由荷兰数学家斯泰芬（Simon Stevin，1548—1620年）于1605年出版的《数学札记》中讨论的结论。^②

三、浮体定律

春秋战国时期，人们对浮体上浮的原因产生了兴趣。慎子（约前395—前315年）说：

燕鼎之重乎千钧，乘于吴舟，则可以济。所托者，浮道也。^③

① 有人认为，该句在此为衍文，应当将它植入前述有关杠杆的经文中。若此改动可信有据，则墨家对杠杆物理规律的陈述就更全面、明确。

② F. Cajori（卡约里）著、戴念祖译、范岱年校：《物理学史》，内蒙古人民出版社1981年版，第34—35页。

③ 《慎子·逸文》；也见《太平御览》卷七六八引。

类似的说法举不胜举。庄子(约前 369—前 286 年)的论述更具有物理意义。《庄子·内篇·逍遥游》写道:

夫水之积也不厚,则其负大舟也无力。覆杯水于坳堂之上,则芥为之舟;置杯焉则胶,水浅而舟大也。

可见,人们早已知道,液体要有一定的深度才能有相应的浮力。从理论上探讨浮体,还是墨家最早。

《墨经·经下》:“形之大,其沉浅也,说在衡。”

《墨经·经说下》:“沉形之衡也,则沉浅非形浅也,若易五之一。”

综观经文,墨家在阐述浮体平衡时犯了一个今天的初中生容易犯的错误:浮体沉没水中的部分与整个浮体平衡(“沉形之衡”)。他们没有看到,浮体所排开的水量与浮体本身平衡。或许,墨家对自己错误说法也有所觉察或疑问,因此他们又说:“则沉浅非形浅也,若易五之一。”他们有可能以市场上五件甲商品交换一件乙商品比喻浮体沉没水中部分的排水量与整个浮体的平衡。商品交换必需是可交换的两种商品。鉴于墨翟比阿基米德早约二个世纪,因此,其中的概念模糊当可理解。

四、浮力称重

《墨经》关于浮体定律的不清楚的表述并未影响后人对浮力的运用。在事实上,人们确实清楚地知道浮体所排开的水的重量等于浮体的重量。据记载,东周燕昭王(前 311—前 279 年在位)时期,水官曾以浮舟称千钧大豕^①。这事发生的时候,阿基米德(前 287—前 212 年)不过十岁顽童。以舟称豕的方法当与后来曹冲称大象相同。东汉

^① 吴曾:《能改斋漫录》卷二《以舟量物》引《符子》。详见戴念祖:《中国力学史》,河北教育出版社 1988 年版,第 389—390 页。

末,神童曹冲(196—208年)提出“以舟量物”的方法被史籍记载如下:

邓哀王冲,字仓舒。少聪敏歧疑,生五六岁,智意所及,有若成人之智。时孙权曾致巨象,太祖欲知其重,访之群下,咸莫能出其理。冲曰:“置象大船上,而刻其水痕所致,称物以载之,则校可知矣。”太祖大悦,即施行焉。^①

该故事清楚表明,人们知道浮体的排水量等于浮体的重量。“刻其水痕”既是记录排水量的多寡,又便于第二次秤物时有标准可据(图1-3)。

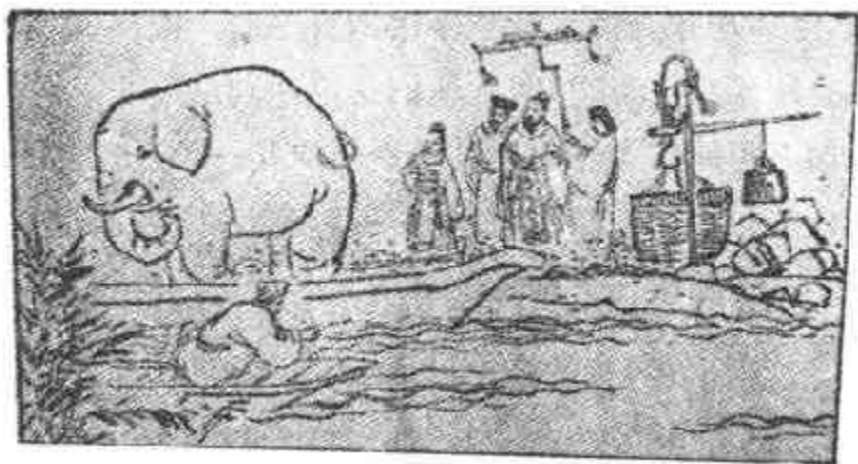


图1-3 曹冲称象绘画

曹冲称象的故事被历代许多典籍辗转传抄。但有人认为它是“佛教故事”,是随佛教而传入中国的^②。这个说法缺乏严密论据。^③

① 陈寿:《三国志·魏书·邓哀王冲传》,中华书局校点本,1982年版,第二册,第580页。

② 《陈寅恪文集·寒柳堂集》,上海古籍出版社1980年版,第157—161页。

③ 戴念祖:《中国力学史》,河北教育出版社1988年版,第390—392页。

第二节 力和运动

一、对力的认识

力是什么?《墨经·经上》说:“刑之所以奋也”。“刑”即形体。“奋”原指鸟张开翅膀从田野起飞。从春秋时期起,“奋”字大多用于描述物质的、精神的或运动的状态改变,所谓“奋飞”、“振奋”、“奋发”等都是这个意思。如果保守某种状态就谈不上“奋”。《墨经》还以举重为例,说明重物的状态在被举的刹那间发生了改变,人体因之需要付出力。可见,《墨经》的定义是颇有科学见地的。中世纪欧洲的哲学家和工艺学者,都错误地以为力是维持运动的原因。伽利略最早确立了加速度概念,并认为力是改变运动状态的原因。此后,牛顿又在他的基础上建立了力的数学表达式。墨家的定义所以有意义,就在于“奋”字所形容的状态改变中实际上包括了运动状态的改变。

墨家还对悬吊重物作了受力分析。《墨经·经下》与其《经说下》在讨论建筑砖石后,特别例举了以线绳悬吊石块的受力实验。(图1-4)它写道:“胶丝去石,挈也;丝绝,引也。未变而名易,反也。”其意思是,如果将砖石系上绳子,搬去其周围石块,要保持该石原位置,就要用力提挈它。如果绳子断了,那是因为有一种向下的力牵引它。同一块石头和绳子,而“挈”与“引”两种力的方向正好相反。

墨家不仅指出了这两种力的方向,而且在讨论滑轮起重时还指出了力的性质:“挈,有力也;引,无力也。”在这里,“无力”的“引”

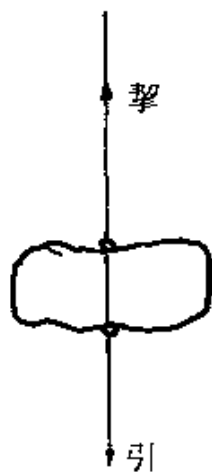
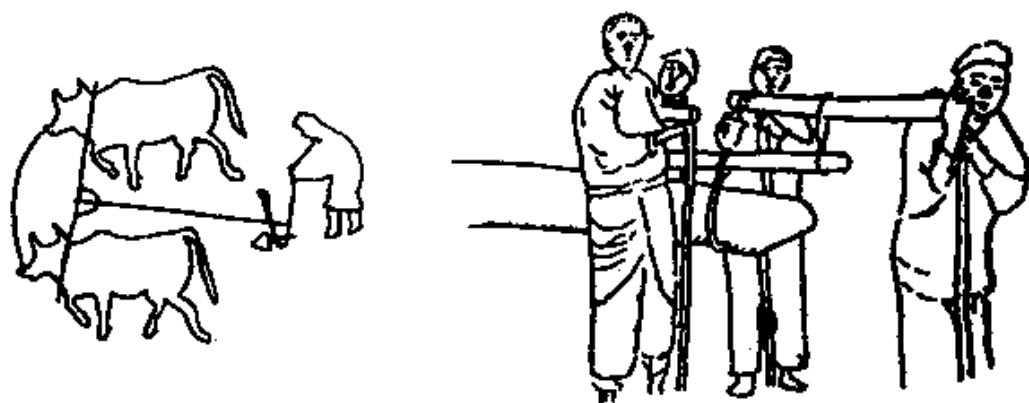


图 1-4 悬石受力分析

自然是指不需人力,而非“引”这种力本身无力。虽然不能将墨家认识的“引”这种力等同于今日的万有引力,但他们已知道自由下落的物体受到一种不需人力的“引”的作用。在力的认识史上,这是很有意义的。

合力的概念也是很早被人们认识的。汉代人称它为“积力”。《淮南子·主术训》:“积力所举,则无不胜也。”明代茅元仪的《武备志》写道:“合力者积众弱以成强也。”^①然而,合力的思想在战国时期已经产生。《墨经·经下》写道:“合与一,或复否,说在拒。”《经说下》又以举重为例,说明“积众弱以成强”的道理。在生产实践中,诸如汉代耦耕、抬木头(图 1-5)等生产劳动中都利用了合力原理,即使在十九世纪,也使欧洲人感到惊讶。



耦耕图(摹陕西米脂
出土东汉画像石)

抬木头

图 1-5 分力与合力的应用与实践图示

至于力的作用点的重要性,在杠杆和其他工具的使用中也必定早为人所知。《淮南子·主术训》以屋柱和门闩所处的位置说明它:

^① 茅元仪:《武备志》卷一一四《军资乘·守五·堡约》。

“十围之木，持千钧之屋；五寸之键，制开阖之门。岂其材巨小足哉，所居要也。”

令人惊讶的是，古代人提出了关于一个系统的内力对该系统无作用效果的有趣的说法。《韩非子·观行》写道：

有乌获之劲，而不得人助，不能自举。

“乌获”，据说是秦武王宠爱的大力士，能举千钧之重。但是，无他人帮助，他自己却不能将自己举离地面。《论衡·效力》篇也写道：

力重不能自称，须人乃举……。古之多力者，身能负荷千钧，手能决角伸钩，使之自举，不能离地。

“不能自举”、“不能离地”，也就是，自己对自己的作用力效果等于零。这一说法，与十八世纪分析力学中形成的关于质点组（或由相互关联的各个单体组成的力学系统）内诸内力的总和等于零的原理是一致的。其间的区别，前者为生活经验的总结；后者是来自对机器生产的数学分析。

二、时空和运动

《墨经》以多条文字记述了时间、空间、运动以及它们之间的关系。在《墨经》中时间称为“久”，空间称为“宇”。《墨经·经上》写道：“久，弥异时也。宇，弥异所也。”《经说上》以“古今旦暮”为例说明“异时”，以“东西家南北”为例说明“异所”。一个“弥”字，既说明时间的悠久无极，又说明空间的广漠无限^①。例举空间概念中的“家”字，还把

^① 关于时空的概念，古代又常称为“宇宙”。《尸子》卷下：“上下四方曰宇，古往今来曰宙。”《庄子》中有关的定义似乎更具物理意义：“有实而无乎处者宇也，有长而无乎本末者宙也。”（《庄子·杂篇·庚桑楚》）

空间方位的参考坐标指出来了。^①

对于具体的时间而言,《墨经》将有时间间隔和无时间间隔分别定义为“有久”和“无久”,并将即时的概念定义为“始”。^②

墨家讨论了许多运动问题。在他们看来,空间区域内物体的运动(“宇域徙”)要有广延的空间(“长宇”)和连续的时间(“长久”)两个条件,这才能使运动物体“徙而有处”。至于时空与运动的关联问题,《墨经》中作了这样的分析:在空间运动的物体需要有时间(“行修以久”),这是时间本身有先有后(“说在先后”)的缘故;该物体的运动必先近而后远(“行者必先近而后远”),因为“远近”就是路程或空间(“修也”),“先后”就是时间(“久也”),所以物体在空间运动必定需要时间(“民行修必以久也”)。^③

高明的墨家还以时间过程定义静止。《墨经·经上》:“止,以久也”。这就是说,所谓静止是在可观察到的时间段内物体不运动。在以上各种概念基础上,墨家讨论了箭矢的飞速运动和人步行过桥的缓慢运动之区别。

对于箭矢运动,《墨经》记它为“无久之不止”。这是说,当箭矢飞过如木柱所标识的空间段时,它从木柱一侧移向另一侧,空间区域显然改变了,但人们感觉不到箭矢飞越木柱的时间过程。墨家将这类运动比喻为“当牛非马”。对于人过桥,《墨经》记它为“有久之不止”。这是说,人在过桥的每一步中都可以感知其在一个时间段内停留在某一处上,但他又确实处在“不止”即运动之中。墨家将这类运动比喻为

① 无“今”字不能定时间的过去与未来,无“家”字也不能定空间方位的东西南北。《淮南子·齐俗训》:“西家谓之东家,东家谓之西家,虽皋陶之理不能定其处。”这就道出了地位相对性的普适性法则。

② 见《墨经·经上》和《经说上》。

③ 《墨经》原文为:《经下》:“宇域徙,说在长宇久。”《经说下》:“徙而有处,宇。宇南北,在且又在暮,宇徙久。”《经下》:“行修以久,说在先后。”《经说下》:“行者必先近而后远。远近,修也;先后,久也。民行修必以久也。”

“当马非马”。

类似墨家的运动辩证观在战国时期不乏其例。惠施说：“日方中方睨，物方生方死。”公孙龙说：“镞矢之疾而有不行不止之时。”^①关于运动与静止的这些看法，成为中国几千年的传统科学思想。直到明代，王夫之更透彻地说：

方动即静，方静旋动；静即含动，动不舍静。善体天体之化者，未有不如此者也。^②

动、静，皆动也。由动之静，亦动也。^③

静者静动，非不动也。^④

古代中国关于时空与运动的观点远在欧洲古代同类观点之上，甚而超过了经典物理学时期的某些看法。在后者看来，或则运动，或则静止，其间泾渭分明。

三、滚动、转动和自由落体运动

以墨翟为首的墨家分析了称为“丸”的球体滚动问题。球体在平面上的位置状态无所谓斜，也无所谓偏，但却随时随处都在滚动。《墨经·经下》记此为“正而不可安”。《经说下》进而解释说：“丸，无所处而不中县，转也。”《考工记·舆人》以“立者中县”描述物体位置直立不偏的状态，《墨经》可能借用此说。因为球体运动时，它和平面的接触点与其球心的连线总是处在铅垂线上，所以说它“无所处而不中县”。墨家在此准确地描述了球体滚动及其成因，解释了球体随遇平衡的物理机制。

① 《庄子·杂篇·天下》。

② 王夫之：《思问录·外篇》，中华书局1983年版，第33页。

③ 王夫之：《读四书大全说》卷一〇《孟子·告子上》，中华书局1975年版，第661页。

④ 王夫之：《思问录·内篇》，第12页。

《墨经》还讨论了转动问题。它认为,类似门户之枢一类的转动是枢心不动,而其“偏际徙者”,即转动体的边际都绕枢心转。

墨家对自由落体运动的讨论是值得注意的。如前所述,自由落体所以下落,墨家以为是一种向下的“引”力作用的结果。《经说下》还写道:“凡重,上弗挈,下弗收,旁弗劫,则下直;斜,或害之也。”这是说,凡重物、在其上下左右都不受到人为作用时,必定垂直下落。如果它沿斜线下落,那是有某种人为作用在妨碍它。这个讨论,对自由落体作了定义,分析了它的必要条件。众所周知,亚里士多德曾讨论了落体。他认为,物体的下落是由于自然界害怕真空的缘故。古代中国人没有亚里士多德所犯的错误。

四、箭的飞行轨道问题

古代人尤其重视弓箭的制作。《考工记》以“弓人”和“矢人”两篇文字叙述它,可见一斑。弓箭制作的所有技术问题始终围绕着一个目的:保证弓有足够弹力与箭中的。暂且不涉及弓的制作,对箭矢的技术要求就包括矢与箭杆的长度比、箭羽位置及其多寡、箭杆材料的选择及其强度与刚度的检验。只有达到特定的技术要求,箭才能在空中有稳定的中的轨道。对于箭杆各部分不同强度与刚度所引致飞行轨道的偏差,《考工记·矢人》写道:

前弱则俯,后弱则翔;中弱则纡,中强则扬;羽丰则迟,羽杀则趯。

这里的“强”、“弱”,是指箭杆的强度和刚度而言的。最后两句表明羽毛多寡与飞行速度、轨道的关联^①。杜牧在《考工记注》中对前四句解释说:“前弱则矢行而低,后弱则矢行而旋,中弱则矢行而曲,中

^① “趯”(zào),戴震注曰:“言于羽之病使矢行不正。趯,旁掉也。”见《考工记图》。

强则矢行而起。”看来,这些文字都是从箭杆本身结构不善而论述飞行轨道出偏差。有人从箭杆在受力后发挠情形探讨箭离弦的位置状态,以此证明《考工记》的这段文字记载是正确的。^①

有趣的是,在指出箭矢的不正常飞行中,无论《考工记》的作者还是唐代杜牧,都不涉及正常飞行的路径、轨迹问题。这是出于射箭实际需要,只指出其中的错误呢,抑或他们心中都知道正常轨道?

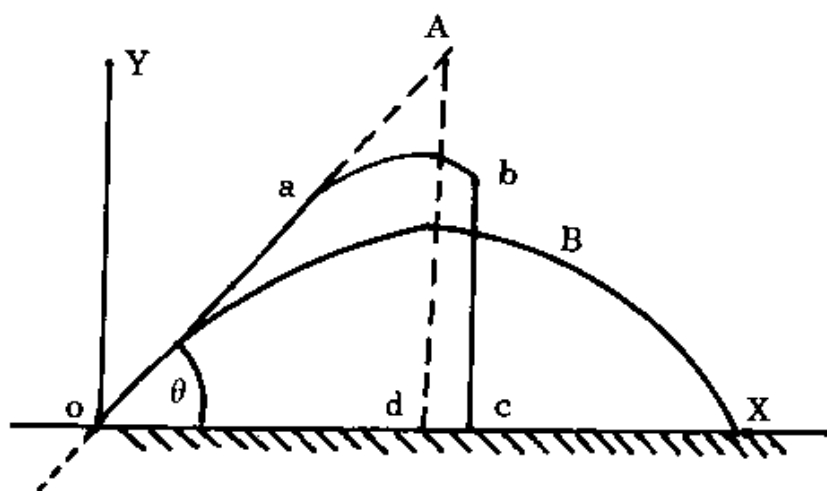


图 1-6 箭飞行轨道的古今看法示意图

OAd 为亚里士多德看法;Oabc 为达·芬奇看法;OBX 为伽利略看法。

如果箭以 θ 角射出,亚里士多德说它沿 OAd 路径前进(图 1-6):先沿 OA 直线上升,然后在顶点 A 直线下落。文艺复兴时期的达·芬奇说,箭先受强迫运动沿 Oa 前进,然后是混合运动的 ab 路径,最后是自然运动即沿 bc 路径垂直降落。伽利略对此作出正确结论:沿 OBX 抛物线路径运行。显然,《考工记》成书时代的“弓人”会毫不犹豫地判亚里士多德和达·芬奇的箭为劣质箭。中西文化的差异在此表现得一清二楚:西方人即使完全不合实际也要把意见

^① 闻人军:《考工记中的流体力学知识》,《自然科学史研究》第 3 卷(1984)第 1 期,第 5—7 页。

表述出来。由此,我们以为,认定古代中国人不知道箭矢的正常飞行轨道是不恰当的。就箭的轨道而论,古代东西方都只知道问题的一半:西方人知道的一半是错误的,而中国人知道的一半是指出了这种错误。

就动力学而言,亚里士多德和中世纪欧洲哲学家的以下观点显然是错误的:箭所以飞行,是因其尾部产生了真空。自然害怕真空,因此,箭周围的空气涌向箭尾使箭继续向前飞行。而明代吕坤(1536—1613年,年代比伽利略稍早)说:“矢行,风必束之。前必欲锐,欲破风以为疾也。”^①这个说法不仅与亚里士多德恰巧相反,而且是完全正确的解释。虽然它见之于文字稍晚些,但无疑是中国传统的说法。

五、动力学知识

先了解一下古代人的速度概念。这个概念多见于古代的算书中,其中不少算题就是运动学习题。它们在诸如力、重量、时间、路程、速度等诸多物理量中提出问题,作出答案。《九章算术》中,“程傅委输空车日行七十里”就是平均速度概念^②;在良弩二马的问题中,良马“日增十三里”、弩马“日减半里”,是平均加速度概念^③。平均加速度的思想至迟在西汉时期已经产生。

力和运动的关系属动力学中的内容,除以上有关的叙述外,历史上还有许多零散的记述。《淮南子·主术训》写道:

夫举重鼎者,力少而不能胜也,及至其移徙之,不待其多力者。

① 吕坤,《救命书》卷下引郭宗昌《二戒记》。

② 《九章算术》卷六,四部丛刊初编缩本。

③ 《九章算术》卷七,关于这两道题的答案及解法,见戴念祖:《中国力学史》,第103—104页。

这表明,人们知道在滑动摩擦中推移重物比举起该重物省力得多。

王充《论衡·状留》篇写道:

是故湍濑之流,沙石转而大石不移。何者?大石重而沙石轻也。

且圆物投之于地,东西南北无之不可,策杖叩动,才微辄停。方物集地,一投而止,及其移徙,须人动举。

是故车行于陆,船行于沟,其满而重者行迟,空而轻者行疾。……任重,其取进疾速,难矣。

这些叙述,实际上指出了力、重物、摩擦力、速度之间的关系,甚至暗含了加速度的概念。

早在春秋战国之际,《考工记·辘人》最早记述了惯性现象:在驾车中,“马力既竭,辘犹能一取焉。”

毋需更多引述和解释,中国古代有运动学和动力学知识是无疑义的,将墨翟、王充等人称为对运动学和动力学有所研究的学者,并不过分。

第三节 力学的相对性原理

一、相对运动

战国末期由吕不韦(?—前 235 年)主持编纂的《吕氏春秋·慎大览·贵因》篇所载“刻舟取剑”的故事至今还脍炙人口,它是相对运动或运动相对性的典型例子。

王充在《论衡·说日》篇论述“天”与日月运动时举出了一个颇富物理意义的比喻:“其喻若蚁行于础上,日月行迟天行速,天持日月转,故日月实东行,而反西旋也。”《晋书·天文志》也写道:

天旁转如推磨而左行，日月右行，随天左转，故日月实东去，而天牵之以西没。譬之蚁行磨石之上，磨左旋而蚁右去，磨疾而蚁迟，故不得不随磨以左回焉。^①

这是相对运动概念在天文学中得到运用的例子。古代某些天文数据正是在这个概念基础上通过计算而得到的。

在日常生活中，“仰游云以观，日月常动而云不移”^②，“见游云西行，而谓月之东驰”^③，人们所发现的相对运动的例子举不胜举。

颇为有趣的是，人们将相对运动的现象著于诗篇。南朝梁元帝（名萧绎，552—555年在位）在其诗《早发龙巢》中写道：“不疑行舫动，唯看远树来”^④。敦煌曲子中有《浪淘沙》一词，也描写人们坐船的感觉：“看山恰似走来迎。子细看山山不动，是船行。”^⑤

这些诗多么微妙地刻画了船与河岸山林的运动关系，逼真地表现了它们之间的相对运动。在人类文化史或科学史上，船与河岸、山林的运动关系成为论述运动的一个传统例子，在今天也不失其科学意义。

然而，相对运动与下面所述的相对性原理是完全不同的两个物理概念，切切不可混淆。

二、相对性原理的古代说法

在一个惯性系统内不能以任何力学实验确定该系统是处在静止

① 《晋书》卷一一《天文志》，中华书局校点本，第二册，第279页引《周髀》。

② 《隋书》卷一九《天文志》，中华书局校点本，第二册，第513页引晋代束皙语。

③ 葛洪：《抱朴子·内篇·塞难》。

④ 丁福保编：《全汉三国晋南北朝诗》下册《全梁诗》卷下，中华书局1959年版，第957页。

⑤ 王重民辑：《敦煌曲子词集》（修订本），商务印书馆1956年版，第31页。

的或匀速直线运动的状态。换句话说,在一个惯性系统内观察到的所有力学定律在相对于该系统作匀速运动的任何其他系统中同样有效。这就是力学的相对性原理,又称为“伽利略相对性原理”。这个原理是全部动力学得以建立的基础。

古代中国人又在何时、如何表述这原理的呢?《尚书纬·考灵曜》在论证“地动”时写道:

地恒动不止,而人不知。譬如人在大舟中,闭牖而坐,舟行而人不觉也。

《尚书纬》是纬书之一。“纬书”是对正统的儒家“经书”而言的。它虽有许多迷信和谬说,但它多取材于民间,记录了经书中所没有的天文历法和地理等方面的知识。西汉末年纬书流行。断定《尚书纬》成书于西汉末年、即公元前一世纪是恰当的。

古代的“地动”观念并非近代地球的自转运动,而是以太阳每天在正南方的高度的周年变化所反映出来的大地的“游动”。从现在来看,古代人心中的“地动”方式是错的,但古人承认“地动”而不是静止,特别是他们用以论证“地动”的道理却是非常深刻的。

《尚书纬·考灵曜》中的这句话有两点值得注意:(1)“闭牖而坐”,这相当于舟构成了一个封闭的作匀速直线运动的惯性系统;(2)“舟行而人不觉”的“觉”字,含有感觉、察觉、发现、知道等多种含义。《考灵曜》的叙述是以在匀速直线运动的船体内的人不能发觉船本身的运动而完成了地上的人不能察觉“地动”的论证。《考灵曜》的重大发现正是在此,其物理意义也就是力学的相对性原理。

在西方,力学的相对性原理最早是由伽利略提出来的。他在1632年出版的《两大世界体系的对话》中叙述了封闭船舱内发生的现象^①。

^① 伽利略著、上海外国自然科学哲学著作编译组译:《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》,上海人民出版社1974年版,第242—243页。

他的许多实验性叙述想要说明的一个根本思想就是《考灵曜》的“舟行而人不觉”一句话。但是,伽利略本人并没有立即认识到自己的发现所具有的科学价值。只是在伽利略之后,又经过了近三个世纪,在马赫(E. Mach, 1838—1916年)、洛伦兹(H. A. Lorentz, 1853—1928年)、彭加勒(H. Poincaré, 1854—1912年)、爱因斯坦(A. Einstein, 1879—1955年)的有关工作之后,人们才认识到,提出“舟行而人不觉”这一说法的重要意义,并把它称之为“伽利略相对性原理”。爱因斯坦又把它推广到光学和电动力学的实验也不能发觉匀速运动的舟究竟是运动着的还是处在静止状态,换句话说,在一切惯性参照系里的自然规律都是相同的。爱因斯坦的推广说法就成为他的狭义相对论的两大支柱之一。

《考灵曜》和伽利略《对话》中的叙述完全是一回事。而前者比后者早约一千七百年。就论证地动的物理思想而言,在伽利略之前的西方没有人达到《考灵曜》的水平。^①

三、东西方运动学和动力学知识的总考察

要了解以上力学知识在科学文化史上的地位,就应当将它和西方同时期的知识摆在一起作总考察。

阿基米德曾发现杠杆定律和浮体定律,它们是物理学史上古代的重大成就之一。而早于他的亚里士多德的动力学,却是令人费解的。他不仅提出了关于自由落体的荒谬见解,而且将运动分为“顺自然运动”和“逆自然运动”两方面。“逆自然运动”的说法运用于自然本身是很不恰当的。他以“自然害怕真空”解释箭矢飞行。他认为物体的速度(注意:不是加速度)与其“运动能力”(motive power)成正比,

^① 详细情形,参阅戴念祖:《中国力学史》,第112—115页。

与介质阻力成反比。这些见解一直成为中世纪的物理学经典理论。比较之下,《考工记》的作者、墨翟及其弟子、刘安及其门徒、还有王充等人有关运动与力的叙述是扎扎实实、朴素的科学知识。

中世纪时期,除亚里士多德的物理观点之外,欧洲人发展了一种“冲力说”^①。它是公元前二世纪希腊天文学家辛普里修斯(Simplicius)提出的。他以此解释箭的飞行:因为给箭提供了冲力,冲力就可以维持它一直运动下去。至于箭为何又停止不动,他没有解释。大约公元六世纪时,他的观点得到修正:运动的箭带着一种“动性”(motive virtue)向前进。由此引发了中世纪的所谓“动力学思潮”。直到十四世纪,冲力说才发展到接近物理真理的程度。布里丹(John Buridan, ? —1358年)提出,某一物体从推动者那里获得的冲力与该物体的物质质量和速度成正比;而该物体在被推动之后,其冲力会逐渐减少(这才解释了箭的运动停止现象);物体愈重冲力愈大;若无介质阻力,冲力会永远存在。与此同时,牛津学派的一些人完成了加速度的思想观念。尼古拉·奥里斯姆(Nicolas d'Oresme, ? —1382年)采用冲力说预言了笛卡尔坐标。文艺复兴前期的物理学家、如意大利的布拉修斯(Blasius, ? —1416年)认为,速度是“地位运动”,加速度是“地位瞬时运动”,等加速度是“均匀传布的地位瞬时运动”。这些所谓“动力学思潮”及我们前述箭矢弹道的问题,就留给伽利略再考察并实验验证了^②。由此可见,西方的运动学和动力学知识大体上从一个错误的出发点开始,经过缓慢但却是持续不断的推理改进与发展,终于达到以伽利略为代表的近代物理学的起跑线。

① [日]广重徽著、祁关泉等译:《物理学史》,上海教育出版社1986年版,第52—54页;也见,[英]S. F. 梅森(Mason)著、上海编译组译:《自然科学史》,上海人民出版社1977年版,第109—113页;[荷兰]R. J. 弗伯斯(Forbes)等著、刘珺珺等译:《科学技术史》,求实出版社1985年版,第97—100页。

② Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part I, pp. 57—58.

相比之下,古代中国人有更多的运动学和动力学知识,尤其是关于滑轮起重、一个系统的内力无作用效果、相对性原理的叙述等成就,都是令人赞叹的。然而,这些知识都是经验的总结。缺乏推理、不曾运用数学、没有一种科学方法,使这些知识一直停留在墨翟和王充等人的经验水平上。这是不可忽视的中西差别。

第四节 材料力学

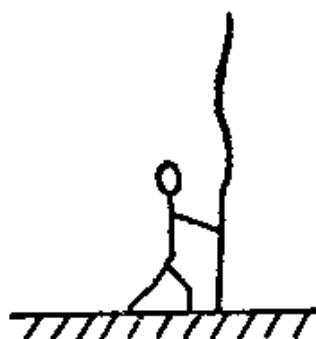
一、《考工记》与《墨经》论材料

凡是固体材料,如机械构件或结构物、杠杆或房屋栋梁等,都有表征其特性的强度与刚度。所谓强度,通俗地说是材料抵抗破坏的能力;所谓刚度,通俗地说是材料抵抗变形的能力。泛指强度概念有时包括刚度在内。早在春秋战国之际,人们就找到了检验材料强度的经验方法。《考工记·庐人》就检验长兵器木柄问题写道:

凡试庐事,置而摇之,以视其蜎也;灸诸墙,以视其桡之均也;横而摇之,以视其劲也。

“庐”即戈戟一类长兵器的木柄。“蜎”(yuān),原指虫豸之属的蠕动状态,在此借以形容直立木杆受力摇动后的弯曲或发挠的形态。“灸诸墙”,是将木杆横置于两墙之间(见图 1-7)。以摇动或用力压杆的方法,审视材料的弯曲程度以及是否断裂。通过“置而摇之”、“灸诸墙”和“横而摇之”三种实验,就可以看出木杆受力变形的状况、变形是否均匀、在其断裂之前能承受多大的“劲”。最后以“试之既齐均,又以强劲为尚”。^①

^① 戴震:《考工记图》卷下,商务印书馆 1955 年版,第 96 页。



置而摇之，以视其娟

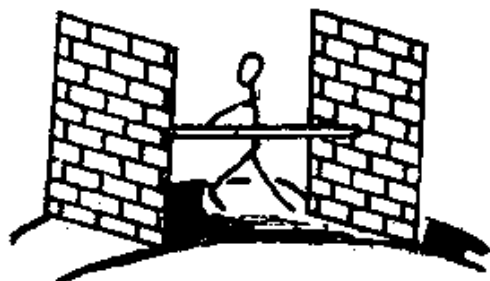
灸诸墙，以视其挠之均；
横而摇之，以视其劲。

图 1-7 检验材料强度的经验方法

《考工记·矢人》以类似的方法检验箭杆的强度。在中国的工匠中这种方法已成为传统的材料检验技术之一。

皮革在古代是极为重要的兵甲材料。《考工记·鲍人》还讨论了皮革的检验法：用力拉伸皮革后，皮革伸展平直；相反，如果拉伸后有歪邪现象，皮革一定是一边太松、一边太紧。若如此，使用时必定紧的一边先断裂^①。这种经验方法，对于选择皮毛，判断作为机械传动带的皮革质量都是科学的。其中的道理，也符合应力集中的近代力学观点。

墨家曾讨论梁木和柔绳的不同力学性能。《墨经·经下》说，梁木“负而不挠”；捆束在两根立柱上的绳索，“无加焉而挠”。用今天的话说，梁木具有抗弯能力，而绳索只能抵抗拉伸。当然，梁木上所加的重量不能超过该梁的强度极限，否则也会断裂。有趣的是，墨家在解释这两种材料不同性能时使用了当时的科学用语，所谓“极

^① 《考工记·鲍人》：“引而信之，欲其直也。信之而直，则取材正也。信之而枉，则是一方缓一方急也。若苟一方缓一方急，则及其用之也，必自其急者先裂。若苟自急者先裂，则是以搏为棧也。卷而搏之而不弛，则厚薄序也。视其著而浅，则革信也。”

胜重”。看来，这个“极”的概念或许相当于今日的“抗弯力矩”也未可知。

二、发绳与应力

《墨经·经下》：“均之绝不，说在所均。”

《墨经·经说下》：“发均悬轻而发绝，不均也。均，其绝也莫绝。”

《孔丛子·嘉言》有一段与此类似的文字，该书据说是孔子八世孙孔鮒（生卒年不详）所著。他认为“发”即“发绳”或“一缕之发”。

《经》文显然是一种普适性定义，它论述的对象是包括发绳在内的所有材料。其意思是，材料本身的结构均匀与否，决定了该材料在受力作用时是否会断裂。而《说》文以发绳为例，具体阐述《经》文的普适性论断。它的意思是，悬挂轻物的发绳却断了，那么这发绳就不是均匀的；如果它是均匀的，它就不会断绝（图 1-8）。

《墨经》以发绳为例说明材料的性能是极为高明的。一则发绳的内部结构均匀与否，人们可以容易看清；二则，若不均匀，也就是有的毛发已断，或毛发松紧不一，照现在的话说就是容易产生应力集中，因此容易断裂，其断裂情形也容易被看出来。现代科学家对拉杆应力的计算，事实上就是将它作为一种均匀的发绳看待的。

一根毛发当然不能牵引太重的物体，但是由众多毛发编成的发绳，却能悬吊或拉动重物。战国时期思想家公子牟因而大胆地提出

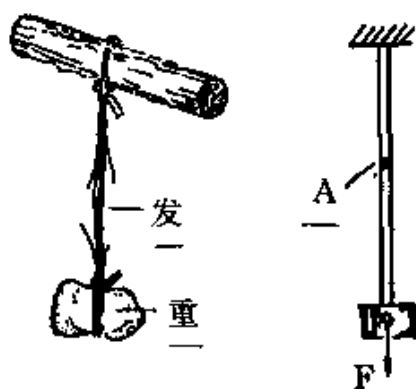


图 1-8 发绳断裂实验

“发引千钧”，并解释说：“发引千钧，势至等也。”^①看来，他将今天所谓“拉伸应力”概念名之为“势”。晋张湛对公子牟这句名言解释说：“夫物之所以断绝者，必有不均之处。处处皆均，则不可断。故发虽细而得秤重物者，势至均故也。”^②当材料承受的“势”或应力平均分布在该材料的各个部分，就不会造成应力集中，公子牟和张湛的论述与材料力学理论极为相符。

《列子·汤问》也引述并解释了《墨经》的这段有关发绳的文字，并且明确地将它推广到其他物体中。它写道：

均，天下之至理也。连于形物亦然。

张湛又在此句中注释道：

发甚微脆而至不绝者，至均故也。今所以绝者，犹轻重相倾，有不均处也。若其均也，宁有绝理？

不匀的毛发会产生“轻重相倾”，这个说法更接近于现代“应力集中”的思想。不过，任何材料都有其一定的强度极限，超过这个极限、结构分布再均匀的材料也会断绝。古代某些学者或许对“均”的哲理太偏爱了，以致忘却了对这一点作出必要说明。

三、试弓定力 and 弓的弹性规律的发现

弹性物体在外力作用下发生变形，其形变与外力成正比。这是英国物理学家胡克(Robert Hooke, 1635—1703年)于1660年在进行螺旋弹簧拉伸实验后发现的。他从实验中得到以下结论：

如果某一重量(1盎司或1磅)使弹簧伸长某一段距离(1/12英寸或1英寸)，则两倍的重量将使它伸长两倍的距离，三倍的重量将使它伸长三倍的距离，以此类推。

^{①②} 《列子·仲尼》。

三年之后,胡克亲自为英王表演了弹簧拉伸实验。又过了两年,他在一篇文章的结尾以字谜的形式暗示了力与变形的线性关系;又一年之后,他公布了谜底:“有多大的伸长,就有多大的力。”直到1678年,他总结了螺旋弹簧、表盘簧、金属丝和悬臂木梁的拉伸实验结果,写成《论恢复力》的论文,“胡克定律”由此得名。^①

胡克曾高度赞扬中国古代的文化。他认为,对中国文化的深入研究,“将会在我们面前展现出一个迄今为止只被人们神话般地加以描述的学术王国”^②。然而,他大约不知道,在他之前1500年,古代中国人在测试弓箭的弹力中已经作出了与他类似的发现。

古代人在距今3万年前创制了弓箭^③。《诗·小雅》记述了弓的变形方向与其弹力方向正好相反^④。《考工记·弓人》详细记述了弓箭制造技术,并指出“量其力,有三均”。这表明春秋时期人们已有测量弓弹力的器具与方法。许多典籍留下了弓弩弹力数据,并以弹力大小命名弓与弩。^⑤

宋应星在《天工开物》中介绍了测量弓力的方法,称其为“试弓定力”。在兵器制造中,凡特殊的弓与弩,大概都需要在制作完毕和使用之前试弓定力,也作为对弓箭的测量检查。这种技术传统决非肇始于

① 关于胡克定律发现史的详细情况,可参阅老亮:《中国古代材料力学史》,国防科技大学出版社1991年版,第27—29页;S. P. 铁木生可著、常振樵译:《材料力学史》,上海科学技术出版社1961年版,第16—17页;威·弗·马吉著、蔡宾牟译:《物理学原著选读》,商务印书馆1986年版,第104—106页。

② [英]胡克:《关于中国文字和语言的研究和推测》,《皇家学会会志》(哲学卷)第16卷(1686年),第35页。本文引自Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vo. I, 扉页,中译本同。

③ 贾兰坡等:《山西峙峪旧石器时代遗址发掘报告》,《考古学报》1972年第1期;考古研究所实验室:《放射性碳素测定年代报告(四)》,《考古》1977年第3期。

④ 《诗·小雅·角弓》:“骍骍角弓,翩其反矣。”

⑤ 《左传·定公八年》:“颜高之弓六钧”;《管子·轻重甲》:“十钧之弩”。类似记载也见《荀子·议兵》,《吕氏春秋·贵直论·壅塞》等等。

宋应星时代,也许可以追溯到《考工记》成书年月,甚至更早。这才能理解历代典籍中以斤两命名弓弩的文字记载^①。关于“试弓定力”的具体方法,《天工开物·佳兵·弧矢》写道:

凡试弓力,以足踏弦就地,秤钩搭挂弓腰,弦满之时,推移秤锤所压,则知多少。

宋应星还绘画了“试弓定力”图(图1-9)。在试弓定力过程中,只要测出弓腰到弦中心点的距离就可以求出形变量,从而也就知道形变与弹力的关系。

其实,古代还有其他测试弓力及其变形的办法。例如,测量弩弓的弹力及其形变量尤为方便。因为弩臂使弓固定,在弩臂上可以方便地测出弓的变形量;其弓弦上往往装有牵引绳,借此可以悬挂砝码,又可以消除一些非线性影响(参见第十二章第一节)。在此测量过程中,只要将原先平放的弩垂直放置就可以了。

正是在这种传统的技术背景下,东汉经学家郑玄在《考工记·弓人》注中总结性地记下了弓的变形位移与外力之间的线性关系。他写道:

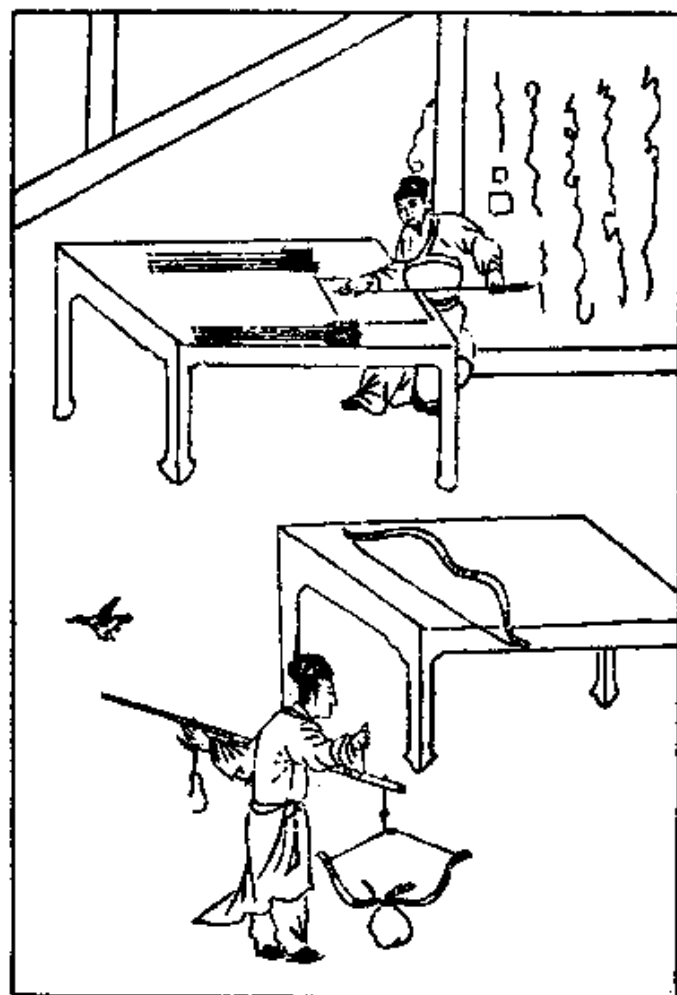
假令弓力胜三石,引之中三尺。弛其弦,以绳缓擗之,每加物一石,则张一尺。^②

唐初,贾公彦在疏解郑玄注中又写道:

“假令弓力胜三石,引之中三尺”者,此即三石力弓也。必知弓力三石者,当“弛其弦,以绳缓擗之”者,谓不张之,别以一绳系两箭,乃加物一石张一尺,二石张二尺,三石张三尺。^③

① 据老亮统计,在汉代居延汉简中,记弓弩弹力数的文字有94处之多,如“夷胡隧七石具弩……,今力三石卅六斤六两”[简编号:三五三·一(甲一七九六)]。参见中国社会科学院考古研究所:《居延汉简甲乙编》,中华书局1980年版;老亮:《中国古代材料力学史》,国防科技大学出版社1991年版,第24—25页。

②③ 《周礼注疏》卷四三、《十三经注疏本》,中华书局1980年版,第936页。



天工開物 卷下 器具

二六二

力定弓試 箭端

图 1-9 《天工开物》绘试弓定力图。该图不足之处是，未画出“以足踏弦就地”的情景；或许，在所绘的弓腰绳环上挂砝码，也未可知。

郑玄和贾公彦的注疏文字，可以看作是对弓的变形位移与其弹力成正比关系的叙述。根据宋应星所绘的“试弓定力”图，也不难想象古代人测定弓的弹力及其形变位移这两个物理量的方法。可惜的是，在郑、贾二人的叙述中未明确指出，在形变位移的计算中，是否先减去变形前的弓高（从弓腰到弦中心点的距离，它是一个常数）。若否，则会给弓的形变量带来非线性影响。然而，这只是现代力学计算的严

格要求；在弓箭的生产实践和现代射箭训练中往往将弓高计入形变量之中。郑、贾的注疏显然是指实践要求的近似理想的弓体变形情况^①。这样，我们完全有理由将郑、贾关于弓体变形的叙述与胡克关于弹簧和木杆所作的实验叙述在本质上看作相同的一回事。“胡克定律”实际上早在胡克之前 1500 年已被郑玄所发现。^②

郑玄(127—200 年)，字康成，北海高密(今属山东)人，东汉著名经学家。幼时入太学，“日夜寻诵，未尝怠倦”。后游学十余年。归里后，聚徒讲学，弟子多达千人。他“博稽六艺”，“质于辞训”，又精通历算。因党锢事被禁，遂潜心著述。史称郑玄注解《周礼》是“囊括大典，网罗众家”^③。因此，关于弓的弹性规律乃郑玄之前的发现，甚而是春秋战国之际“百工”中的“弓人”所为，也未可知。当然，郑玄也完全有条件发现它，至少可以说，他记下了他的同时代人的有关发现。总之，从《考工记》成书时代起，中国人对弹性定律并不陌生。

古代人还通过测试弓的弹力以改进弓干的刚度，使箭射得更远。宋代初年，大将杨承信(921—964 年)和弓箭制作使魏丕(919—999 年)曾以此方法改造弓弩。据载，

魏丕作场使。旧制床子弩止七百步，上令(魏)丕增至千步。求规于(杨承)信。(杨承)信令悬弩于架，以重坠其两端。弩势圆，取所坠之物较之，但以二分中增一分，以坠新弩，则自可千步矣。如其制造，果至千步，虽百试不差。^④

旧弩射 700 步，而改造后新弩射 1000 步，距离增加了约 0.5 倍。在同

-
- ① 长沙国防科技大学老亮最早发现郑、贾注疏文字的科学意义。此后的许多异议都是基于对弓体形变的现代力学要求出发的。
 - ② 老亮：《中国古代材料力学史》，国防科技大学出版社(长沙)1991 年版，第 20—29 页。
 - ③ 《后汉书》卷三十五《郑玄传》，中华书局校点本，第五册，第 1207—1213 页。
 - ④ 江少虞：《事实类苑》卷一四《德量智识》引《魏王别录》，四库全书本。也见《宋史》卷二七〇《魏丕传》，中华书局校点本，第二六册，第 9276 页。

样的形变位移下,旧弩坠 2 分重物,新弩坠 3 分重物,新弩比旧弩的弹力也增加了 0.5 倍。只要改变弓干的复合材料,使其达到新弩的弹性要求,一般情况下是可以达到目的。而这里所述的测定弩弓弹力的方法是“以重坠其两端”,即以相等重物悬挂在弓的两箭。这个方法与郑玄的在弓弦中央挂重物不同,但更合理,因为它可以避免弓弦的非线性影响。由此可见,古代人曾以多种方法测量弓的弹性形变。

我们不妨从古代转向现代,看看体育射箭训练中的有关说法。射箭队使用的弓多为复合弓,训练中实际计算弓的形变是以箭的长度衡量的。搭箭拉弓,从箭栝到箭簇尖端的长度为形变量。这样,他们不仅将弓高、而且将簇长都计入形变量之中。据说,这是一种标准计算方法。颇有趣的是,在训练教材中述及弓箭性能时基本上仍持郑玄或贾公彦的说法。例如,女运动员使用 42 磅的弓、28 英寸箭,则“一般每增长 1 英寸要增加 1.5 磅”的力;男运动员所用的 45 磅弓,“增长 1 英寸要增加 2 磅”;“如果是 55 磅的弓,每增长 1 英寸要增加 2.5 磅”的力^①。这表明,汉唐时期人们关于弓体弹性规律的表述一般地是正确的。

应当指出,弹性定律对于弹性体也是有限适用的。胡克在其论文中未说明这种有限性。因此,在他的论文发表之后近 15 年,引致德国数学家和力学家莱布尼兹(G. W. Leibniz, 1646—1716 年)的怀疑。1691 年,他向惠更斯(C. Huygens, 1629—1695 年)询问有关胡克实验事。惠更斯在复信中指出:仅当弹簧轻微伸长时,胡克的实验结论才是正确的。今天,人们既然不再苛求胡克,不苛求射箭队的基础理

① “美国射箭专家布罗斯卡来讲学”,引自国家体委北京射击场编:《射击射箭参考资料》1985 年第 3—4 期(合刊),第 8—24 页。许多射箭教材在实验基础上指出,由复合材料制成的弓,其初始形变位移与其外力基本上成正比;此后,外力的增加与弓体的形变是非线性的;过此,外力的增加并不改变弓的形变量;然后,外力与形变又是非线性关系。

论教师,自然也不应苛求古代中国人。

四、梁木断面的高宽比

屋栋柱梁承受巨大荷载,自然要有足够的强度。选择合理截面的梁木,就能增加强度。截面模量越大的材料,强度越大。由于方形梁的截面模量较同样参数的圆形梁为大,如果希望这两种梁承受同样荷载,方形梁就可以小些。^①

在人类文明史中,起初人们以为,原形的圆木比加工成其他形状更坚固。后来发现事实并非如此。于是将圆木加工成方木或矩形木。而在应用矩形梁上,如果依据梁木在地面上的自然稳定位置,将截面长边 a 作宽度、短边 b 作高度架于屋上,则容易招致梁断屋塌的危险。这种教训或许使人们懂得,架梁时必需将其自然位置倒过来,以其长边 a 作高度(图 1-10),从而安全度大大加强。令人惊讶的是,

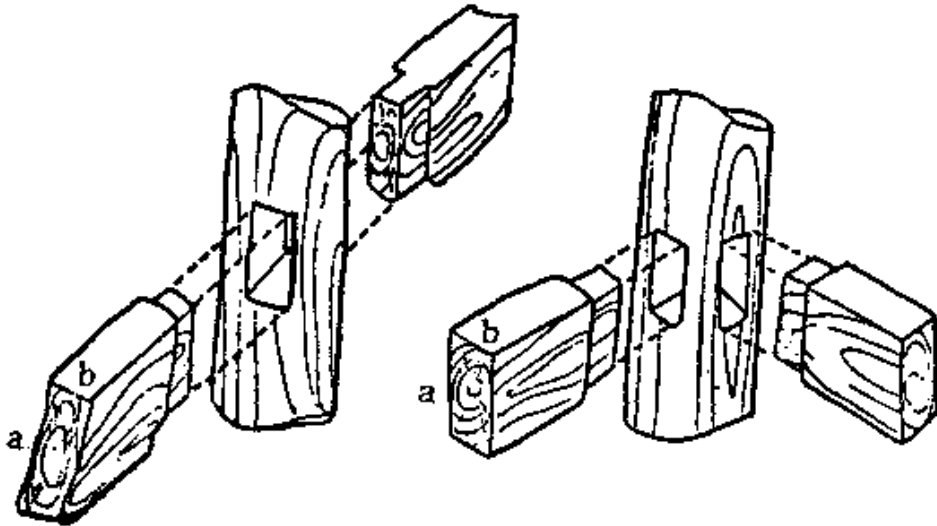


图 1-10 矩形梁木

① 一直径为 d 、截面为 A 的圆梁木,其截面模量 $S = \frac{1}{8}Ad = 0.125Ad$,同样参数的正方形梁的截面模量 $S = 0.147Ad$ 。

古代中国人早在公元前 5000 年就开始采用矩形梁。浙江河姆渡遗址中有断面 32 厘米×10 厘米、26.5 厘米×11 厘米、13 厘米×9 厘米的矩形木梁和木枋^①。尤其是,几十根梁头榫的断面,其高×宽为 22.5 厘米×5.5 厘米,高宽比近似于 4:1^②。这个经验截面在远古时代是相当科学的。

据《国语·鲁语》载,鲁成公十六年(前 575 年),鲁大夫公孙婴齐曾云:“吾闻之,‘不厚其栋,不能任重’。”^③此说是极有科学道理的。“厚”字可以理解为矩形梁的梁高。“厚其栋”也就是要加大梁的高度。它表明,春秋时期的建筑师已经经验地知道增大梁木断面的高度对于承重的重要性。

迄宋代,建筑师已作出矩形梁木高宽比例的科学的定量结论。李诫在《营造法式》中写道:

凡梁之大小,各随其广分为三分,以二分为其厚。^④

广三分、厚二分,是加工梁木时的数据。架梁时,将其长边为高,短边为宽,这种梁的高宽比就是 3:2。这个比例数字,是古代中国重大的力学成就之一。

在西方,最早进行梁木承重实验的是达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452—1519 年),但他没有认识到高宽比的重要性。后来,伽利略在《两门新科学对话》中描述了矩形梁竖放和平放的承重实验,才得到竖放梁木的抗断裂能力比平放时大。伽利略的结论远未达到《营造法式》的高度。1702 年,法国数学家和物理学家帕朗特(A.

① 祁英涛:《中国早期木结构建筑的时代特征》,《文物》1983 年第 4 期,第 60—73 页。

② 《河姆渡遗址第一期发掘简报》,《考古学报》1978 年第 1 期,第 39—94 页,本数据在第 47 页。

③ 《国语》卷四《鲁语上》,上海古籍出版社 1988 年版,上册,第 180 页。后来的许多注释家将“厚”字译为“大”,从而失去了材料力学的科学意义。

④ 李诫:《营造法式》卷五《大木作制度》。

Parent, 1666—1716 年)讨论了从圆木中截取具有最大强度矩形梁的方法,其结论为,梁的高宽比应是 $\sqrt{2} : 1$,相当于 $2.8 : 2$ 。又过了一个多世纪,英国物理学家托马斯·杨(Thomas Young, 1773—1829 年)在 1807 年证实,刚性最大的梁,其高宽比为 $\sqrt{3} : 1$,相当于 $3.46 : 2$;强度最大的梁,其高宽比为 $\sqrt{2} : 1$,也即 $2.8 : 2$ ^①。《营造法式》的比例数为 $3 : 2$,恰好在杨实验的两个比例数之间,或许该书作者李诫既考虑了材料的刚度,又考虑了它的强度,才作出这一明智的选择。

第五节 液体的物性

古代人认识到的液体只有几种:水(包括水溶液)、油类、酒、炼丹家手中神奇的液态汞等。本节所述,主要是人们对水的力学性质的认识。

一、水的比重

至迟在东汉时期,人们开始在冬至日测量水的比重,得到了在特定气温下“权水轻重,水一升冬重十三两”^②的结论。虽然这记载缺乏地点,但可以想到,当是京城所在地。北魏道士李兰创制秤漏,他严格规定:“漏水一升,称重一斤,时经一刻。”^③这不仅准确的规定了

① [美]S. P. 铁木生可(Timoshenko)著、常振模译:《材料力学史》,上海科学技术出版社 1961 年版,第 5、12、38、81 页;郭黛姮:《从近现代科学技术发展看中国古代木构建筑技术的成就》,《自然科学史研究》第 2 卷(1983 年)第 4 期,第 370—376 页。

② 《后汉书·礼仪志中》,中华书局校点本,第一一册,第 3125 页。

③ 徐坚:《初学记》卷二五《器物部·漏刻》。

计时器的流量标准,而且,它相当于按当时的度量单位水的比重为1斤/升。明代李时珍在《本草纲目》中将水列为药物之一纲,他集历代用水及测水比重的记载,比较了各地水的同积之重^①。有趣的是,清乾隆帝曾特制一“银斗”,每巡行一地,命内侍测该地泉水每斗之重。^②

欧洲人于十世纪提出“比重”一词,其含义为单位体积的物质重量。测定水的比重是阿拉伯人阿勒·哈齐尼(Al Khazini)在其1137年完成的著作《智慧秤的故事》中首先述及的。古代中国人虽然没有提出比重一词,但就测定水的比重而言却要比欧洲人和阿拉伯人早很多世纪。^③

早在晋代,人们还知道酒与水的“比重”不同。孔奕(生活于三世纪)见人提两桶酒进其家,他从仆人两手用力轻重不同而断定有一桶是水^④。这故事被编成“酒令”传世:“孔奕颇明察,两罍一乃水。何为遂知之,轻重有异耳。”^⑤

二、卤水浓度和比重计

测定卤水的浓度与生产盐直接相关,因此,从汉代起它就受到朝廷的重视。历代有许多典籍记下了卤水浓度的测定法。迄止宋代,这种测定法已达到成熟阶段。人们分别用莲子、鸡蛋、桃仁等物体测定卤水浓度。

淳化四年(993年)任两浙巡抚的乐史(930—1007年),据其所见

① 李时珍:《本草纲目》卷五《水部》,人民卫生出版社1982年版,上册,第387、402页。

② 《御制玉泉山天下第一泉记》,转引自王夔山:《自然科学史研究》第4卷第4期(1985年),第305—311页;也见清·刘岳云:《格物中法》卷二《水》引《御制玉泉记》。

③ F. Cajori 著、戴念祖译:《物理学史》,内蒙古人民出版社1981年版,第23、27页。

④ 《晋书》卷七八《孔严传》,中华书局校点本,第七册,第2059页。

⑤ 元·曹绍:《安雅堂酒令·孔奕水酒》,《说郛》(商务印书馆本)卷五六。

而记述了盐民以莲子测卤水浓度的方法：

取石莲十枚，尝其厚薄，全浮者全收盐，半浮者半收盐，三莲以下浮者则卤未堪。^①

所谓“尝其厚薄”，即选择不同重量相同体积的莲子。“全浮者全收盐”，相对于卤水浓度为 100%；“半浮者半收盐”，相对卤水浓度为 50%；浮三莲以下，卤水浓度太淡，不能用它晒盐。

南宋姚宽（生活于十二世纪）曾任台州（今浙江临海等县）监，杜渎盐场，记述了他自己以莲子试卤之方法：

择莲子重者用之。卤浮三莲、四莲，味重，五莲尤重。莲子取其浮而直；若二莲直或一直一横，即味差薄；若卤更薄，则莲沉于底，而煎盐不成。闽中之法，以鸡子、桃仁试之，卤味重则正浮在上；卤淡相半，则二物俱沉。与此相类。^②

莲子、鸡蛋、桃仁在卤水中浮沉状态都是由卤水浓度决定的。莲子肉质厚薄不一；鸡蛋黄白多少不一，气泡大小不一，这就使它们比重不尽相同。将这样的莲子或鸡蛋数个置于卤水中，当其中某一个与待测卤水比重相同或相差无几时，它在水中呈直立悬浮状态；当某个的比重比液体的比重小，甚至小得多时，它几乎全浮在液面上，又因其形状与重心关系，使它们在液面上取横躺形式；当某个的比重比液体大，它就沉没在容器底（见图 1-11）。这就是姚宽在测试卤水浓度时要求“莲子取其浮而直”的道理。

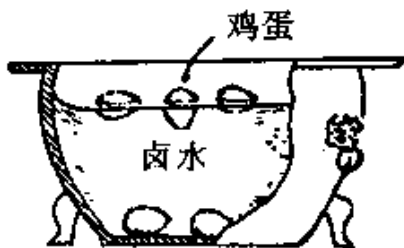


图 1-11 以鸡蛋测试卤水浓度示意图

① 乐史：《太平寰宇记》卷一三〇《淮南道八·海陵盐》。

② 姚宽：《西溪丛语》卷上。

元代,测试卤水浓度的方法有了极大进步。于元统(1333—1335年)中任下砂场盐司的陈椿描述道:

要知卤之咸淡,必要莲管秤试。如四莲俱起,其卤为上。……莲管之法,采石莲,先于淤泥内浸过,用四等卤分浸四处。最咸处卤浸一处,三分卤浸一分水浸一处,一半水一半卤浸一处,一分卤浸二分水浸一处。后用一竹管盛此四等所浸莲子四。(后需用之,将莲子)放于竹管内,上用竹丝隔定竹管口,不令莲子漾出。以莲管汲卤试之,观四等莲子浮沉,以别卤咸淡之等。^①

在这里,四等卤是:最咸处卤为一等,其浓度为 100%;三分卤一分水为二等,浓度为 75%;半卤半水为三等,浓度为 50%;一分卤二分水为四等,浓度为 33%。将莲子分浸这四等卤中,这就为测定其他卤水浓度制备好了“浮子”。在装有这些浮子的竹筒内注入待测卤水,其浓度就被相应地测出。在这里,浮子是事先制备的定量化的检测物。因此所测溶液的浓度就比较精确了(图 1-12)。实际上,这就是近代浮子式比重计的始祖。

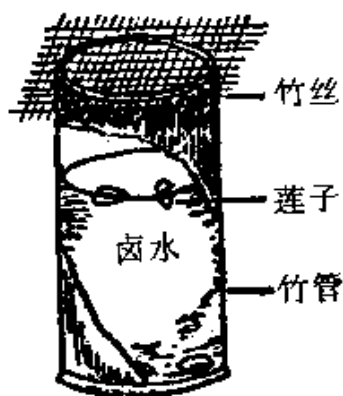


图 1-12 古代浮子式比重计示意图

三、表面现象

由于液体的表面张力,人们观察到液体的许多表面现象:球形液滴,毛细管现象,肥皂泡现象,表面薄膜等等。就其中一二,我们看看

^① 陈椿:《熬波图》。

古代人的认识。

南宋张世南在其著《游宦纪闻》卷二中就检验油漆的质地与方法写道：

验漆之美恶，有概括为韵语者云：“好漆清如镜，悬丝似钩钩；撼动虎斑色，打著有浮沤。”验真桐油之法，以细篾一头作圈子，入油蘸。若真者，则如鼓面鞞圈子上。渗有假，则不著圈上矣。

好漆能挂起一条丝，搅动它时其表面起浮泡。上等桐油能在竹篾圈上形成一层薄膜。这些都是由纯净液体的表面张力导致的。当桐油含杂质，表面张力减小，竹篾圈上就不能形成一薄层鼓面。张世南所记，表明古代人掌握了表面张力的经验知识。其中的竹篾圈正是现代给学生演示表面张力常用仪器的祖先。可以想到，它在宋代、甚至宋以前的油漆贸易市场上不知被应用了多少世纪。

比重大于水的金属针，可以浮在水面上。这也是液体表面张力的实验证明。汉代刘安的《淮南万毕术》将此现象记为“首泽浮针”（见图 1-13）：“取头中垢以涂塞其孔，置水即浮”^①。这个水浮银针的实验一直流传下来，《淮南万毕术》的这段文字也被历代典籍辗转传抄。明代妇女于农历七月七日相聚一起，表演“丢巧针”，它是

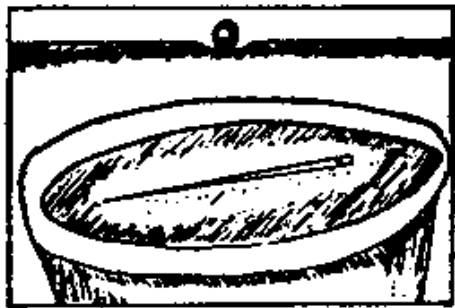


图 1-13 水浮银针(上为断面放大图)
水浮银针实验的普及化罢了。此时人们已清楚地知道银针浮于水面是由于“水膜生面”的缘故^②。在日光照射下的水面形成了许多气泡，

① 刘安，《淮南万毕术》，见菲泮林辑本或孙冯翼辑本，也见《太平御览》卷七三六《方术部》引。

② 刘侗、于奕正：《帝京景物略》卷二《春场》。北京古籍出版社 1982 年版，第 69 页。

气泡膜的表面张力足以支撑银针。

宋代周密(1232—1308年)还发现了油脂薄膜或“单分子膜”的现象,并记述了有关的医疗应用。他写道:

熊胆善辟尘。试之之法,以净水一器,尘幂其上,投胆一粒许,则凝尘豁然而开。以之治目障医,极验。每以少许净水略调开,尽去筋膜尘土……,时以铜箸点之,绝奇。^①

“熊胆”可能是一种固体脂肪,一旦它溶于水,立刻在水面展开成一薄膜。其表面张力将水面尘埃推开,中医以此治眼疾,清洗眼球表面染上的尘土。

中国古代人还有许多关于液体的经验力学知识。在壶漏的长期应用与改进中,人们知道液体的黏滞性、水压与其流速的定性关系等^②。根据河道横断面上各部分流速不均的事实,明末清初的学者揭暄(生活于十七世纪)指出:

中流者恒迅于边。流行之水力于停贮之水。湍激之水力于流行之水。^③

“中流者恒迅于边”,是近代圆形管层流流速实验的结论。揭暄却从观察平稳流动的河流中得到类似看法。法国物理学家泊肃叶(Jean-Louis-Marie Poiseuille, 1799—1869年)最早证明层流管的中心流速大于边缘流速,中国人早于他两个世纪从经验观察中知道了这一点。至于前述检验桐油质地的竹篾圈、油脂薄膜即单分子膜的理论,在近代物理学中也都是十九世纪期间的成就。

① 周密:《齐东野语》卷四《经验方》。

② 详见戴念祖:《中国力学史》,第375—465页。

③ 方以智:《物理小识》卷二《地类·水行湍势》揭暄注。

第二章 声 学

声学在中国古代得到了充分的发展。在近代科学诞生以前,世界上少有其他民族像中华民族一样掌握了如此丰富的声学知识。这首先是中国的传统文化和思想背景对于经验声学知识的积累起了极大的促进作用。

第一节 声学发展的文化背景

一、丰富的音乐实践奠定了声学发展的基础

在某种意义上说,古代的声学就是音乐学。乐器的制造、乐器材料的选择、调音定律的方法与理论、音阶的组织,等等,都涉及声学问题。沈括从物质材料的传声和音调的千变万化中命名了一个新学科名词“声学”^①。十八世纪法国物理学家索维尔(Joseph Sauveur, 1653—1716年)建议发展一门新学科,它涉及普通声音,也包括乐音,并将它称为acoustique(声

^① 沈括:《梦溪笔谈》卷六《乐律》,四库全书本。

学)^①。声学词源说明它与音乐的密切关系。

无论是异性求爱,还是劳动节奏,抑或语音低昂,模仿自然或巫术兴起,有许多原因使远古时代产生了音乐。

乐器与音乐几乎同时问世。原始部落歌舞时,随地拾起石块或采摘芦苇以为伴奏。后来,石块与芦苇分别发展为磬与龠。令人吃惊的是,公元前 5000 年,河南舞阳贾湖村人已制成类似今日洞箫一般的乐器,准确的音高令人难以猜测他们如何计算各个音孔的位置。进入铜器时代后,铜制乐器问世。尤其编钟的发展,使人们不仅在技术上制成双音钟,而且掌握了壳体振动与发声规律。“振动”一词及其概念最早就是在演奏编钟实践中得到的认识。殷末周初人已形成了十二律音高的概念。

从西周到春秋战国,宫廷雅乐大发展,民间音乐如郑卫之音蓬勃兴起。记载于《诗》中的歌谣三百多首,乐器近三十种。相继出现许多音乐家、演奏家。相传齐国临淄“其民无不吹竽鼓瑟、击筑弹琴”^②。1978 年在湖北随县出土的曾侯乙墓中,发现了埋葬于公元前 433 年的地下乐器宝库,各种乐器共百余件。调音定律的三分损益法就形成于此时期。

秦汉时代,北方流行各种民歌,概称“相和歌”,其影响波及南北朝。汉代国家音乐机构“乐府”,搜集民歌、创作歌曲。讨论律吕,甚至“典领倡优伎乐盖有千人之多”^③。隋唐时期,燕乐风靡、宋元流行杂剧、南戏和说唱。在乐器方面,秦汉兴琵琶,魏晋迄唐流行琴与箜篌,宋元又长拉弦乐器。这一切促使汉至宋千余年间三分损益律的不断

① 参见 *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. XII, p. 127. Charles Scribner's Sons, New York, 1975; 也见宋子良等译,《科学史词典》,湖北科学技术出版社 1988 年版,第 6 页。

② 《战国策·齐一》。

③ 桓谭:《新论》。

发展,而琴又促使纯律的问世。

明清时期,民歌小曲盛行,戏曲声腔兴起。尤其是,明中叶资本主义因素萌芽,民间艺术进入城市,器乐演奏对旋宫转调产生迫切要求,终于诞生了十二平均律理论,中国古代声学成就达到高峰。

二、音乐文化的交流促进了声学的发展

音乐文化的交流是中外交流史上最为灿烂的一页。试想战国和南北朝时期,在兼并战争中各地区各民族音乐文化大融合的情形,即可见一斑。有趣的是,据传,公元前十世纪,周穆王(约前 947—前 928 年在位)曾率领一个巨大乐队到遥远的西方游历,在阿富汗东北附近的一个山下,在与黑海相连的黑湖(Karakul)畔分别举行了盛大的演奏会^①,曾将一个会表演傀儡戏的外国艺人带回中国^②。若是,中西音乐文化交流确实具有悠久历史。

随着丝绸之路的逐渐开拓,文化交流日益开展。中国的琵琶从公元前二世纪开始多次传入西方。汉武帝曾两次以宗室女为公主嫁乌孙国王,该民族于公元前 161 年左右西迁至伊犁河和伊塞克湖畔(今哈萨克共和国东南部)。惟恐乌孙公主“行道思慕”,故随行携带了乐队和琴、箏、筑、琵琶等乐器。所以称之为“琵琶”,“取其易传乎外国也”^③。与此同时,中国也接受了外国的许多新知识、新乐器。起源于西亚的胡箏篥于公元二世纪通过印度传入中国,西亚与印度的曲项琵琶、五弦琵琶、凤首箏篥于公元四世纪传入中国。^④

① 《穆天子传》卷二。

② 《列子·汤问》。

③ 《全上古秦汉三国六朝文·全晋文》卷四五(傅玄)《琵琶赋·序》,中华书局 1985 年版,第 1716 页。

④ 杨荫浏:《中国古代音乐史稿》上册,人民音乐出版社 1981 年版,第 78—80 页。

中、朝与中、日之间的音乐交流是众所周知的事。^①

当蒙古军的铁骑扫荡欧洲时,中西交流又起高潮。十三世纪,西方管风琴经阿拉伯国家传入中国^②,而中国的笙也曾多次传入西亚和欧洲各地。笙簧的安装方法曾引起欧洲音乐界一场簧管乐器的革命。^③

明代朱载堉的平均律理论传到欧洲则更是一件复杂而有趣的事。^④

三、庞大的国家音乐机构

在国家政体中设音乐机构,通过考试选拔音乐官员,将音乐作为国子的一门教育课程,这在古代世界史上独有中国如此。它影响了东方一些国家,也对中国声学发展产生了不可忽视的影响。

相传远古黄帝时代就设有乐官。黄帝的乐官称为“伶”。一个名为“伦”的乐官曾受黄帝之命至大夏之西伐竹造律。^⑤

周朝设有庞大的音乐官僚机构,其乐官之长称为“大司乐”。他执掌乐律、乐教和大合乐,参与朝廷典礼^⑥。秦汉起,主管礼乐的最高行政机构称为“奉常”、“太常”或“太常寺”。太常的主管官称为“太常卿”,其下属中与音乐关系密切的有:太常博士,协律都尉(或校尉),太乐署的令、丞。

汉以后建置的还有鼓吹署或部的令、丞;清商署或部的令、丞,

① 杨荫浏,《中国古代音乐史稿》上册,第160—162、128—129页。

② 《元史》卷七一《礼乐志》,中华书局校点本,第六册,第1771—1772页。

③ 戴念祖,《中国声学史》,河北教育出版社1993年版,第386—394页。

④ 戴念祖,《朱载堉——明代的科学和艺术巨星》,人民出版社1986年版,第125—140页。

⑤ 《吕氏春秋·仲夏纪·古乐》:“昔黄帝令伶伦作律。”

⑥ 《周礼·春官宗伯·大司乐》。

等。兼及乐与乐律计算的官员,视其地位高下分别为协律都尉、协律中郎将、协律郎、钟律令、钟律郎等。各朝代太常所主管的音乐部类不全相同,其下属各署、局、部的分并也不全一样。一般地,太常卿的官阶为三至五品不等,其下属各署丞为五至六品,其他如协律都尉在六至九品之间。

虽然有如此之多的各级音乐官员,但是,大凡遇上乐律重大问题或根本性改律动议,“则集侍从官、秘书省长贰或百官,议定以闻”^①。为乐律之事而如此兴师动众,在今天决没有哪一个国家政府会这么做。

唐代起,宫廷内还设有“教坊”、“梨园”等音乐学校。相应地设立“教坊司”,委派“教坊使”。唐玄宗时,梨园人数多达千人。在这些培养和选拔音乐人才的基层机构中,确实产生了许多闻名的乐工、艺人和声学家。

音乐机构的大多数官员是通过考试选拔出来的。据载,唐代考课中有“二十七最”,“其第五曰音律克谐,不失节奏,为乐官之最”。^②

就教授音乐的专门机构而言,并非起于唐代。西周时期设立四座学宫,其中之一为学殷人歌舞学问,称为“西学”。将“乐”与“数”作为养国子,教“六艺”之两种课程。调音的数学法则产生于公元前六世纪,和这种教育不无关系。孔子订“六经”,倡导《礼》、《乐》、《书》、《诗》、《易》、《春秋》为其弟子必读课,而孔子本人就是一个有实践、会演奏的音乐家。

儒家对音乐的重视,对几千年中国音乐传统的形成与发展起了重大作用。

^① 《宋史》卷一六四《职官志》,中华书局校点本,第一二册,第3851页。

^② 《旧唐书》卷四三《职官志》,第六册,第1823页。

四、乐律家的社会地位及学术之争

褒奖耳朵灵敏、有成就的音乐家是中国几千年的传统。战国时期,赵王烈侯(前409—前400年在位)给两个善歌者每人赐田“万亩”。^①北宋熙宁(1068—1077年)年间,教坊乐工徐衍在一次演奏二弦嵇琴时,虽断一弦而终奏毕乐曲。因其演奏技巧,他受到人们尊敬^②。政和(1111—1118年)年间,“善音律,而尤工吹笛”的平民朱维受到教坊推崇,并被提举为典乐官、京西提刑^③。而那些不称职的音乐家则每每受到惩罚。形容无真才实学的“滥竽充数”一词,迄今已成妇孺皆知的成语典故。历代正史中的《音乐志》、《律历志》中还留下了许多这样的褒奖事例。

值得一提的是,历史上还有许多精通乐律的帝王将相。例如唐玄宗李隆基不仅在政治上继“贞观之治”而开创了“开元盛世”,他还是一个音乐家和指挥,有一双聪敏的耳朵。政务之暇,他“教太常乐工子弟三百人为丝竹之戏,音响齐发,有一声误,玄宗必觉而正之”。^④

十一世纪时,发生了一场关于律与度量衡之间关系的争论。其焦点是:以什么黍排定律尺?怎么排法?是度量衡起源于律还是律起源于度量衡?参与争论者有音乐家、乐律家、官员和儒生学者,多达几十人。其中,枢密副使、尚书左仆射司马光(1019—1086年)和翰林学士、知谏院丞范镇(1007—1087年)之间关于律与度量衡因果关系之争“前后三十年不决”^⑤,“往复论难,凡数

① 《史记》卷四三《赵世家》,中华书局校点本,第六册,第1797页。

② 沈括:《梦溪笔谈·补笔谈》卷一《乐律》。

③ 叶梦得:《避暑录话》卷上。

④ 《旧唐书》卷四《音乐志》,第四册,第1051页。

⑤ 《宋史》卷八一《律历志》,第六册,第1917—1919页。

万言”^①。这是历史上罕见的学术之争。其积极意义是,使人们清楚了律与度量衡的辩证关系,对后世乐律学的发展产生了重大影响。^②

凡此种种,举不胜举。倘若将中国与古希腊、古罗马和中世纪欧洲相比,真有天壤之别。后者,重视理论上的数字和谐,而那些有经验的实验音乐家往往受歧视。如果一个音乐家专心调谐音的些微差别,高贵的哲学家就会嘲弄他在“浪费时间”,甚至说“他们像在窃听邻居的讲话”。^③

五、乐和政平与天人感应

某些思想观念对声学的发展也起了作用。

在古代人看来,乐与礼、政、刑四者是治国安邦的纲领。“礼节民心,乐和民声,政以行之,刑以防之。礼乐政刑,四达而不悖,则王道备也。”^④因而,在中国古代,少有不重视音乐与乐律的国君,也少有这样的历史学家。

音乐不仅作为“通伦理”的重要工具之一,使君臣父子、尊卑贵贱各各有序,而且又是移风易俗、疏通政治、“助流政教”^⑤的一个重要手段。人们普遍认为,调音定律是否成功,音高选取是否合适,是一个国家“乐和政平”的先兆。因此,历代成帝王霸业者,必先“调阴阳、定律吕”,以求国泰民安。这些属于中国古代特有的对音乐功能的认识,促使历代帝王设置庞大的太常机构,重视乐律的调音与发现,也使得

① 《宋史》卷三三七《范镇传》,第三一册,第10789页。

② 戴念祖:《中国声学史》,河北教育出版社1994年版,第489—499页。

③ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part I, p. 184. Cambridge, 1962.

④ 《礼记·乐记》。

⑤ 《史记》卷二四《乐书》,中华书局校点本,第四册,第1184、1186页。

历史学家在其编纂的史书中不能不写下“律历志”与“音乐志”的篇章,从而也为我们今天的研究保存下大量素材。

天人感应思想的基本点是,“天”(自然)与人相通。发生于自然界的各种现象都是对活动于地面的人与其行为的警告、规劝或褒贬的一种暗示。在古人看来,能够证明这种观念的最好证据是,除了磁石吸铁之外就是声学中的共振现象了。既然乐器某一弦的振动能“超距”而又无形地作用于另一乐器的某弦,那么天上的现象就可以对人起类似作用便是可以想见的了。于是,发现或演示共振现象意味着掌握或理解了一种能通天人之际的奥秘。我们看看汉代最具才华的思想家董仲舒(前 180—前 115 年)的论述:

气同则合,声比则应。其验皦皦然也。试调琴瑟而错之,鼓其宫则他宫应之,鼓其商则他商应之。五音比而自鸣,非有神,其数然也。美事召美事,恶事召恶事,类之相应而起也,如马鸣则马应也。帝王之将兴也,其美祥亦先见;其将亡也,妖孽也先见。故物以类相召也。……阴阳之气因可以类相损益也。天有阴阳,人亦有阴阳;天地之阴气起,而人之阴气应之而起……。故琴瑟报弹其宫,他宫自鸣而应之。此物以类相动者也。其动以声而无形,人不见其动之形,则谓之自鸣也。又相动无形则谓之自然。其实非自然也,有使之然者矣。^①

董仲舒对自鸣或共振作了极好的定义,他的论述在古代产生的深远影响是不可低估的。后代学者、甚至平民百姓之所以注重共振现象,无疑受到这种思想支配。凡此种种因素,使得中国古代声学的发展要超过同一时期的欧洲。

^① 董仲舒:《春秋繁露》卷一三《同类相动》。

第二节 对声波及其性质的认识

一、水波与声波

声音传播中的波动概念并非可以轻易建立。水波在这个概念的建立过程中起了重要作用。东汉王充在《论衡·变虚》篇中写道：

天之去人高数万里，使耳附天，听数万里之语，弗能闻也。人坐楼台之上，察地之蝼蚁，尚不见其体，安能闻其声。何则？蝼蚁之体细，不若人形大，声音孔气不能达也。今，天之崇高，非直楼台；人体比于天，非若蝼蚁于人也。谓天闻人言，随善恶为吉凶，误矣。……人不晓天所为，天安能知人所行。使天体乎，耳高不能闻人言；使天气乎，气若云烟，安能听人辞。说灾变家曰：“人在天地之间，犹鱼在水中矣，其能以行动天地，犹鱼鼓而振水也，鱼动而水荡气变。”此非实事也。假使真然，不能至天。鱼长一尺，动于水中，振旁侧之水，不过数尺，大若不过与人同，所振荡者不过百步，而一里之外淡然澄静，离之远也。今人操行变气，远近宜与鱼等；气应而变，宜与水均。

王充(27—97年?)是东汉杰出的思想家。这是对灾变家的一段批驳性文字。从中可见，王充对声强和声传播距离有一定认识，而且提出“气应而变，宜与水均”的见解。

灾变家已经指出，“人在天地之间，犹鱼在水中矣，其能以行动天地，犹鱼鼓而振水也，鱼动而水荡气变。”这些说法表明，他们已初步认识到水波与空气波的相关性。所谓灾变家是专以自然现象占卜人事吉凶的流派，公元前二世纪的董仲舒是其代表人物之一。在他的思想影响下，西汉、东汉都出了不少持灾变说之徒。灾变家的声波思想

当出自公元前二世纪至公元一世纪之间。

在水波与声波比拟问题上,罗马建筑师维特鲁维乌斯·波利奥(Vitruvius Pollio,约前 85—前 26 年)的说法与王充几乎相同。波利奥所处时代在董仲舒之后一世纪、王充之前一世纪。或者说,古代东西方几乎同时提出声波与水波的相似性的思想。

王充的著作《论衡》长期被当作“异书”而被埋没。因此,其中对自然现象的许多有价值的观察和解释在历史上并未产生应有的影响。直到明末,宋应星又一次提出了声波与水波的相似性问题^①。当然,在今天看来,声波是纵波,水波是横波。两者是不相同的。

有价值的是,宋应星曾提出朦胧的冲击波思想。他说,当炮弹出膛时,“虚空静气冲逼开”,“逢窍则入,逼及耳根之气骤入于内,覆胆隳肝,故绝命不少待也”。^②

二、声波的反射、衍射和折射现象

最显著的声波反射例子是回声。有关它的记载在历史上非常丰富。山谷回声在蒙学课本《千字文》中记为“空谷传声”,从而被历代儿童诵读。

明代方以智记述的三个声波反射现象特别有意义:一是太姥山(今福建福鼎县内)峡谷回声,“每呼一名,凡七声和之”,因为“峡石七曲也”;二是该山上一雪洞内交混回响;三是方以智设计的声波反射实验:“若作夹墙,连开小牖,则一声亦有数声之应。”^③这正是图 2-1 所示意的回声。

① 宋应星:《论气·气声七》,见《宋应星佚著四种》,上海人民出版社 1976 版,第 75 页。

② 同上书,第 76、78 页。

③ 方以智:《物理小识》卷一《天类·异声》。

在古代典籍中较少见到声波衍射现象的文字。宋代曾三异指出,声音可以绕过墙垣。但他不明其理,只是说:“声之感通者若神。”^①

关于声音的折射现象,也以方以智记述为最好。他连续记下了三种折射例子:

若高山日暮,闻城市之喧声,以日气敛而人静听也。

风顺夜静,则山头闻百里,不为奇矣。

愚尝江上晡出三山峡,即闻鲁港、鸠兹之人声。^②

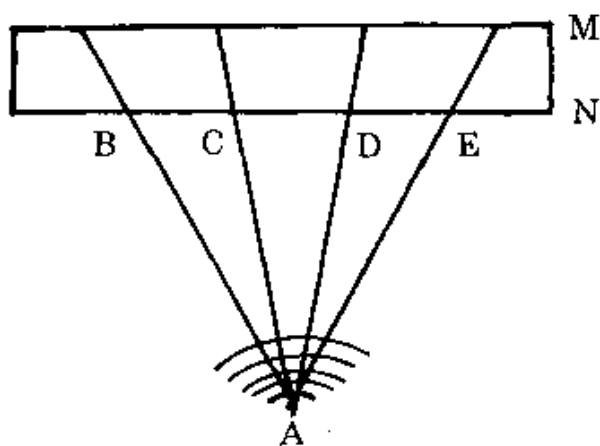


图 2-1 夹墙回声示意图

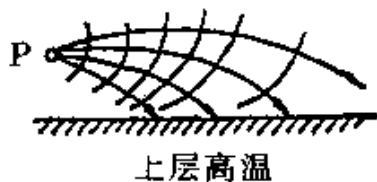
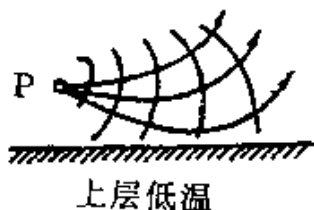


图 2-2 温度梯度对声射线的影响

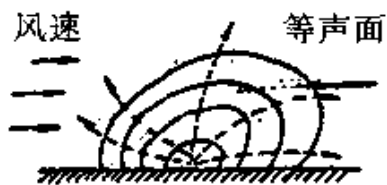


图 2-3 风速梯度对声射线的影响

如图 2-2,当温度梯度随高度增大而减小时,声波射线偏折向上;温度梯度相反时,声波射线偏折向下。当风速梯度随高度而增加(图 2-3),逆风行进的声波射线偏折向上,顺风则相反。方以

① 曾三异:《因话录》,见《说郛》卷一九,商务印书馆本。

② 方以智:《物理小识》卷一《天类·异声》。

智所述第一例,地面温高、上层温低,因此高山上可听见山下城市的喧闹声。第二例是风速随高度而增大,加上寂静之夜,故“山头闻百里”。第三例,是发生在江面上的声波全反射现象。

方以智留心观察自然现象,记下了大量笔记。其著《物理小识》中笔录了许多与声学有关的科学认识或发见。

三、声音的分类

早在西周时期,随着乐器种类的增多,人们已开始对声音产生分类的思想。众所周知,当时按物质材料将声音分为八类,称为“八音”:“播之以八音:金、石、土、革、丝、木、匏、竹。”^① 这种分类法独具音色特点,故有其合理性。

迄止宋代,声音的分类有了一次飞跃性发展。北宋张载提出了更具物理意义的分类法。他说:

声者,形气相轧而成。两气者,谷响、雷声之类;两形者,桴鼓叩击之类;形轧气,羽扇、敲矢之类;气轧形,人声、笙簧之类。^②

这一分类法表明古人对物体振动产生声音和气流冲击产生声音都有了深刻的认识。在张载的分类思想启发下,明代宋应星又将声音分为五类。他写道:

及夫冲之有声焉,飞矢是也;界之有声焉,跃鞭是也;振之有声焉,弹弦是也;辟之有声焉,裂缯是也;合之有声焉,鼓掌是也。^③

“冲”、“界”、“振”、“辟”、“合”五类产生声音的运动方式,与现代

① 《周礼·春官宗伯·大师》。

② 张载:《正蒙》卷三《动物篇》,也见王夫之:《张子正蒙注》。

③ 宋应星:《论气·气声》,见《宋应星佚著四种》,上海人民出版社1976年版,第66—67页。

声学教科书的某些说法基本相同。古希腊和罗马的分类法是按乐器将声音分为：吹奏乐器、弦线乐器和打击乐器。在西方文化基础上产生的现代分类法，将声音分为：打击乐器、膜鸣器、弦鸣器、气鸣器和电声器。这些分类法产生声音的标准是双重的。既按物质材料，又按声音产生方式而进行分类。相比之下，宋应星的分类法有很大合理性与先进性。

宋应星还将张载的分类法作了发展，提出了“形破气”而成声者，并进而解释了“形破气”的物理原因。宋应星说：“凡以形破气而为声者，急则成，缓则否；劲则成，懦则否。”为什么呢？形破气需“急冲急破”，声音方起，因形体周围之气“偶逢逼轧，而旋复静满之位，曾不移刻”。“若矢以轻掷，鞭以慢划，弦以松系，帛以寸裁，掌以雍容而合，椎以安顿而亲，则所破所冲之隙，一刹优扬还满，究竟寂然而已。”^①

宋应星的论述充满物理意义。后来，方中通、揭暄等人也多有讨论。^②

宋应星以他的《天工开物》一书誉满西方。但是，很少人知道他的专著《论气·气声》。该书成于崇祯丁丑年（1637年），《气声》九章，是专门讨论声音的作品。宋应星企图将音乐与乐器附属于“气声”这一总纲之下，具有明显地脱离音乐的倾向。

四、声速问题

古代中国似无声速的概念，也未有关于测定声速的文字记载。但是，在工程技术中古人确曾利用经验声速值测定距离。据北魏酈道元

^① 宋应星：《论气·气声》，见《宋应星佚著四种》，上海人民出版社1976年版，第66—67页。

^② 方以智：《物理小识》卷一《天类·声论》，方中通注文，揭暄注文。

(?—527年)《水经注》载：

江陵城地东南倾，故缘以金堤，自灵溪始。桓温令陈遵造。遵善方功，使人打鼓，远听之，知地势高下。依傍创筑，略无差矣。^①

江陵在湖北中南部、长江沿岸，荆州古城属此。其地势向东南倾斜，为江水所犯。东晋成帝时，桓温(312—373年)，都督荆、梁四州，任安西将军、荆州刺史等职。永和二年(346年)，率军西征，后还江陵。永和五年(349年)，欲北征，并上疏朝廷，议水陆之宜^②。桓温大概于此时令陈遵修筑江陵金堤。令人感兴趣的是，陈遵以击鼓听声来测量地势高下远近的事实。虽记述不详，其方法可作如下推测：记下系有红色绸布鼓槌击落时间与听到鼓声的时间，由两者时间差、依凭经验推知两地的距离。这里所谓的经验，包含了关于声音传播速度的观念，以及平时试验而得到的时间差与距离之间的定量关系。

第三节 共振

一、关于振动的知识

古代中国比古希腊更早提出“振动”一词。它出自公元前六世纪左右敲击编钟的音乐实践。《考工记·凫氏》在记述编钟的设计制造时写道：

薄厚之所振动，清浊之所由出。

① 郦道元：《水经注》卷三四《江水》；王国维《水经注校》本，上海人民出版社1984年版，第1083页。

② 《晋书》卷九八《桓温传》，中华书局校点本，第八册，第2568—2580页。

将钟壳的壁厚度与其发声的“清浊”(即高低)相关联,多么科学!后来,唐代武则天的《乐书要录》和谭峭《化书》又发展了振动知识。《乐书要录》提出了“声源”一词,并指出“形动气彻,声所由出”^①。《化书》首先提出“气振”,指出“声发则气振,气振则风行”^②。这些记载表明,人们已知道,形体与气体的振动,通过气体的传播而产生声响之感。

就弦线振动而言,古人知道音调与弦长成反比。例如,瑟“前其柱则清,却其柱则浊”^③,下面将述及音调的数学计算,证明古代人还清楚地知道音调与弦长的定量关系。也知道音调与线密度成反比:“瑟以小弦为大声,以大弦为小声。”^④ 音调与弦张力的反比关系也为人们定性地掌握:“凡弦急则清,慢则浊。”^⑤ 为了保证线密度均匀一致,古人对组成弦的丝数作了严格的定量规定;沈括还提出了“缠弦”法^⑥,即今日钢琴弦普遍采用的方法。

就管内气柱振动而言,古人不仅发现了音调与管长的定量关系,还作出了种种管口校正的计算。汉代蔡邕说:“箫长则浊,短则清。”^⑦ 《晋书·律历志》载:“歌声浊者用长笛长律,歌声清者用短笛短律。”^⑧

晚唐南卓的《羯鼓录》是一本专门叙述鼓的著作。他对鼓膜振动有初步认识,描述了鼓面张力对其发声的影响。^⑨

至于钟、磬一类壳与板的振动知识,在古代尤为丰富,留待下节

① 武则天:《乐书要录》卷五《辨声音审声源》,丛书集成本。

② 谭峭:《化书》卷二《声气》,四库全书本。

③ 蔡邕:《月令章句》,汉魏遗书抄本。

④ 《韩非子·外储说左下》;也见《淮南子·论言训》,《韩诗外传》卷一、七等书。

⑤ 嵇康:《琴赋》;蔡邕:《月令章句》(汉魏遗书抄本)等。

⑥ 《史记》卷二四《乐书》司马贞索引,中华书局校点本,第四册,第1181—1183页;沈括:《梦溪笔谈·补笔谈》卷一《乐律》。

⑦ 蔡邕:《月令章句》,汉魏遗书抄本。

⑧ 《晋书》卷六《律历志》,中华书局校点本,第二册,第480页。

⑨ 南卓:《羯鼓录》,中华书局校点本,1958年版,第3页(中国文学参考资料丛书)。

叙述。

二、共振现象

某一物体的振动导致另一物体的振动或发声,称为共振。汉代董仲舒最早命名它为“自鸣”。

共振知识的获得与乐器调音密切相关。调音时,一面拨弦或吹律,一面观察另一乐器的弦线,就有可能观察到共振现象。《庄子》首先对此作了记述:

鲁遽曰:“是直以阳召阳,以阴召阴,非吾所谓道也。吾示子乎吾道。”于是为之调瑟,废一于堂,废一于室,鼓宫宫动,鼓角角动。音律同矣。夫或改调一弦,于五音无当也。鼓之,二十五弦皆动。^①

鲁遽其人,据说生活于周初。但是,这个共振实验未必是周初人鲁遽所为。将二具瑟调好音后,将其分置不远的二处,即可表演此共振实验。这个记载表明,至晚在公元前四世纪(或战国初年)人们已经掌握了共振,并认识到它发生的原因:“音律同矣”,即今天所说的它们的固有振动频率相同。“吾示子乎吾道”一句表明,“鲁遽”其人是在有意识地表演共振实验。引文中最后一句,很可能是指泛音共振现象。

汉代董仲舒以共振现象阐述其天人感应的思想,我们已在前面述及。此后,类似记载不乏其例^②,甚至历代正史的“五行志”中也多

^① 《庄子·杂篇·徐无鬼》。

^② 例如,《吕氏春秋》卷三《有始览·应同》,卷二〇《恃君览·召类》,以及汉代高诱注文;《史记》卷二四《乐书》郑玄集解;韩婴,《韩诗外传》卷一;李昉,《太平广记》卷二〇三《宋沈》;王说,《唐语林》卷六;周密,《癸辛杂识》续集上;方以智,《物理小识》卷一《天类·同声相应之征》等等。

有记录,而小说家还以共振现象编造了许多离奇故事。^①

从宋代起,人们对共振现象有了更深的认识。沈括不仅作了管与弦的共振实验^②,还在世界上首次以纸人演示共振。他写道:

琴瑟弦皆有应声:宫弦则应少宫,商弦则应少商,其余皆隔四相应。今曲中有应声者,须依此用之。欲知其应者,先调诸弦令声和,乃剪纸人加弦上,鼓其应弦,则纸人跃,他弦即不动。声律高下苟同,虽在他弦鼓之,应弦亦振。此之谓正声。^③

沈括用以演示实验的纸人,在西方声学实验中称为“纸游码”。牛津的诺布尔(William Noble,生卒年不详)和皮戈特(Thomas Pigott,生卒年不详)在十七世纪才以纸游码演示弦线振动。^④

三、消除共振的方法

如果说,共振的发现需要耐心和仔细的观察,那么,发现消除共振的方法则是智慧的体现,从文献典籍看,最早发现这方法的是晋朝博物学家张华。《异苑》写道:

晋中朝有人蓄铜澡盘,晨夕恒鸣如人叩,乃问张华。华曰:“此盘与洛阳钟宫商相应,宫中朝暮撞钟,故声相应耳。可错令轻,则韵乖,鸣自止也。”如其言,后不复鸣。^⑤

“铜澡盘”今称为钹。将铜盘锉去一点点,就改变了它的固有振动

① 段成式:《酉阳杂俎·前集》卷六;段安节:《乐府杂录·琵琶》等。

② 沈括:《梦溪笔谈》卷六《乐律》。

③ 沈括:《梦溪笔谈·补笔谈》卷一《乐律》。该实验详情,可参阅戴念祖:《中国声学史》,河北教育出版社1993年版,第91—97页。

④ [美]F. Cojori 著、戴念祖译、范岱年校:《物理学史》,内蒙古人民出版社1981年版,第103页。

⑤ 刘敬叔《异苑》卷二,四库全书本。

频率,因此,它不再与宫内钟声共鸣。

《异苑》作者刘敬叔(生年不详,卒于465—471年之间)晚张华(232—300年)不足百年,他可能是根据当时有关传说将此事记载下来的。张华,字茂先,范阳方城(今河北涿州)人。幼年牧羊度日,好学不倦。在魏晋之际的政治和文学活动中,他是个重要人物。晋初任中书令等职,他排除众议,力劝晋武帝司马炎(265—290年在位)定下灭吴之计。西晋统一后,曾官至中书监和司空。后因宫廷内争被诛杀。张华为官,对有才华的知识分子总是“咨嗟称咏,为之延誉”^①。在消除共振的科学知识尚未被人理解之时,上述引文常被人当作方术看待,张华本人也被误为“方士”。张华的著作传世者仅有《博物志》一书,内中有许多物理现象的忠实记录。

历史上也留下了许多消除共振的文字记述。我们再读一个脍炙人口的故事:

袁得师,给事中高之子也。九日出糕谓人曰:“洛阳有某僧,房中磬子,日夜辄自鸣。僧以为怪,惧而成疾。求术士百方禁之,终不能已”。曹绍夔素与僧善。夔来问候。僧具以告。俄击斋钟,磬复作声。绍夔笑曰:“明日设盛饌,余当为除之。”僧虽不信绍夔言,冀或有效,乃力志饌以待。绍夔食讫,出怀中错,鏖磬数处而去,其声遂绝。僧问其所以,绍夔曰:“此磬与钟律合,故击彼应此。”僧大喜,其疾便愈。^②

这就是闻名的曹绍夔鏖磬治病的故事。它被唐以后典籍辗转传抄,其影响甚为久远。该故事以共振和消除共振为主题,无异于一个简短而生动的科普报导。

曹绍夔于唐开元(713—741年)年间任太乐令,精通乐律。他的

^① 范宁校:《博物志校证》前言,中华书局1980年版。

^② 韦绚:《刘宾客嘉话录》,《说库》本。

听觉之灵敏及对音乐造诣之深,另有故事传说为之描述^①。上引文出自晚唐韦绚(九世纪人)的《刘宾客嘉话录》,是一可信的记述。

第四节 钟磬与壳板振动

一、磬与板振动

与板振动有关的乐器种类繁多。属于自由板振动的有磬、铎、钹;属于周边固定或有几个支点的板振动有铜鼓、方响、云锣。从板的形状而言,有圆形板振动的铎、钹、铜鼓,有长方形板的方响,其他形状如磬,等等。

磬在中国起源于原始社会时期。公元前二千年以前已有石制磬^②。晚商的磬,多为三、五件一组。从西周到春秋战国,编磬制作技术大发展。它与编钟一起成为宫廷歌舞必备的乐器。其成组的件数有十几件、甚至几十件。曾侯乙编磬多达 32 件,总音域达到五个八度,其中间的三个八度音域包括了所有的半音^③。春秋战国之际,人们已总结了制磬技术、调音方法和有关板振动的知识。

磬的各部分名称如图 2-4 所示。《考工记·磬氏》记述了磬的形制规范和调音问题:

磬氏为磬,倨句一矩有半。其博为一,股为二,鼓为三。叁分其股博,去一以为鼓博。叁分其鼓博,以其一为之厚。已上则摩

① 王说:《唐语林》卷五《补遗》。

② 《1978—1980 年山西襄汾陶寺墓地发掘简报》,《考古》1983 年第 1 期,第 30—42 页。

③ 高鸿祥:《曾侯乙钟磬编配技术研究》,《黄钟》(武汉音乐学院学报)1988 年第 4 期,第 85—95 页。

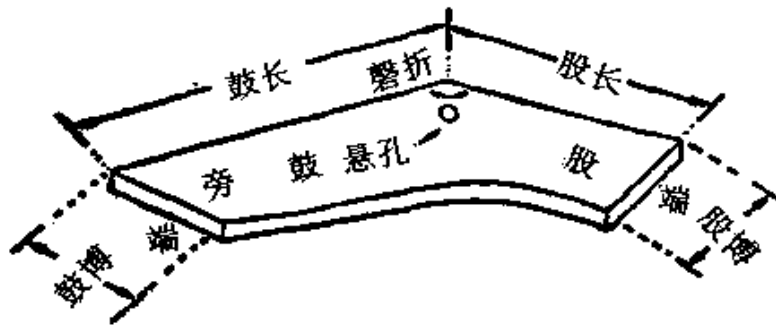


图 2-4 磬的各部分名称及其比例

其旁，已下则摩其端。

特别值得注意的是，《考工记》所述调音技术与板振动原理完全一致。据研究，磬的振动基频与其板厚成正比，与其“股鼓总长”成反比^①。因此，当其音太高，磬师摩锉其两旁，使厚度减小，从而振动频率下降；当其音太低，摩其两端，使“股鼓总长”减少，从而振动频率升高。由此可见，古代人在实践经验中掌握了磬板的振动原理。

由铁片或玉片组成的方响产生于北周时期。人们也知道它的加工调音技术，懂得“铁愈薄而声愈下”。^②

铜鼓产生于春秋中期^③，以西南地区为多。表明人们对它的振动知识有所了解的还是调音技术。许多古代铜鼓留下了刮削痕迹，从中可见其某些共同规律：刮痕以鼓心成对称扇形；刮痕以鼓心为同心圆；同心圆与对称扇形相结合^④。这些刮痕与圆形板振动节线极为相似（见图 2-5, 2-6）。

① Chen Tong and Wang Zhongyan, *Chinese J. of Acoustics*, Vol. 8(1989), No. 4, pp. 289-294.

② 沈括：《梦溪笔谈》卷五《乐律》。

③ 《云南楚雄古墓群发掘简报》，《文物》1978年第10期，第1—16页。

④ 李世红、万辅彬等：《古代铜鼓调音问题初探》，《自然科学史研究》第8卷（1989年）第4期，第333—340页。

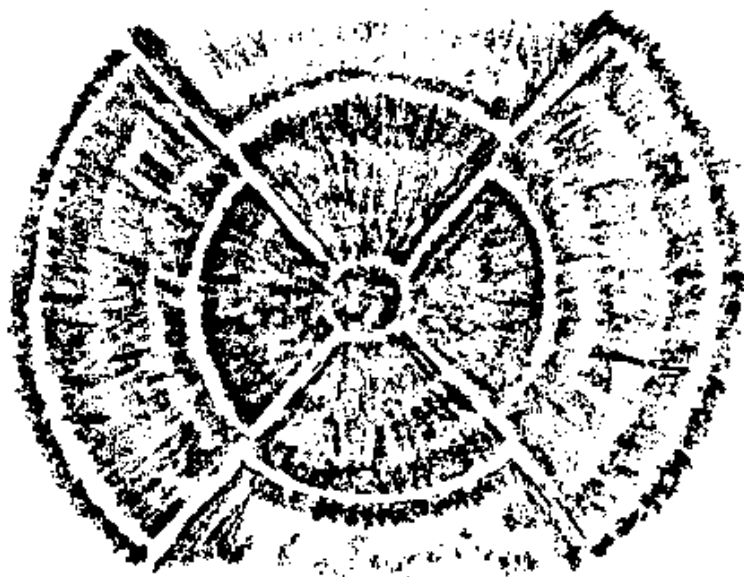


图 2-5 铜鼓的加工刮痕(本照片由广西民族学院万辅彬教授提供)

锣、钹与铜鼓有类似加工痕迹或光晕^①。或许,正是由于其符合圆形自由板振动的加工调音才音色优美。也因此,十六、十七世纪期间,中国锣开始传播到欧洲,至迟十九世纪初法国乐队开始使用中国的大铜锣。

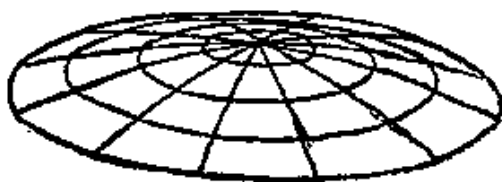


图 2-6 圆形板振动纵、横节线

二、编钟发展史

从物理原理看,属于壳振动的乐器包括青铜制的钟、搏、铎、钲、铙、铎、铃,陶瓷的缶、碗,木制敌、祝等。我们以钟为代表,看看古代人

^① 孙淑云等,《中国传统响铜器的制作工艺》,《中国科技史料》第 12 卷(1991 年)第 4 期,第 73—79 页。

有关壳体振动的知识。

编钟的各部分名称示如图 2-7。中国编钟,俗称“扁钟”,“古乐钟皆扁如合瓦”^①,椭圆形球壳(横截面近似椭圆)是其最大特点。

编钟起源于原始社会时期的陶钟、木钟。商初有铜铃,由铜铃演变成编钟。安阳大司空村殷墓中出土三件一组编钟,殷墟妇好墓出土五件一组编钟。西周时期,制钟技术大发

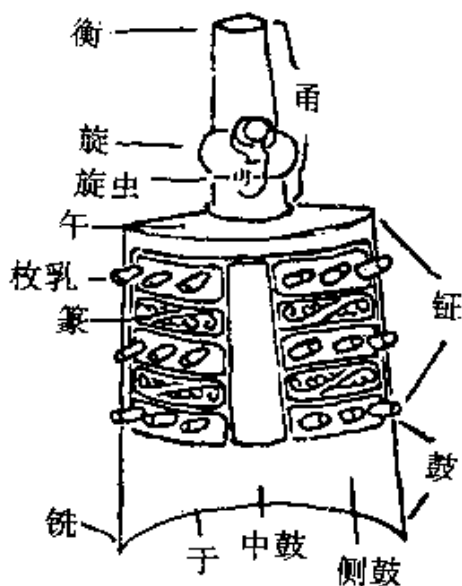


图 2-7 编钟各部分名称示意图

展。每组件数增多,音域增广,音阶结构逐渐完整。战国初年曾侯乙钟的制造,表明古代制钟技术与相应的壳振动知识所达到的高峰。与曾侯乙钟几乎同时的《考工记》对此作了详细文字记述。

曾侯乙编钟计 65 件,制作于楚惠王五十六年(前 433 年)。其中最大的钟重达 203.6 公斤,通高 153.4 厘米;最小的钟 2.4 公斤,通高 20.4 厘米。全套钟重约 2500 公斤。音域从 A_1 至 c^4 ,达五个八度以上。在占三个八度的中音区,十二半音俱全。其上铭文 2800 字,有律名 29 个,阶名和变化音名 37 个,实测音响与铭文均相符合。它不仅证明先秦制钟技术的高度发达,而且是乐器史、音乐史和声学史中稀世之珍。

双音钟的发明是编钟史和壳体振动理论上的一个伟大奇迹。在同一钟壳的不同部位能敲出两个不同高度的音,而且,这二音构成三度谐和关系。双音钟起源于公元前十三世纪。公元前十世纪趋于完

^① 沈括:《梦溪笔谈·补笔谈》卷一《乐律》。

整和普遍,除中鼓音外,侧鼓音均有记号标识。

秦汉以后,随着乐器品种增多,编钟铸造技术时起时落、时兴时衰,甚而多次失传。一则朝代更迭、战争纷繁,乐工散亡;一则编钟笨重,不易搬动,且耗资甚巨、制作困难、调音复杂,它的消亡就成了历史的必然。历代帝王所以不断制造它,大多是作为一种礼仪装饰和权位的象征罢了。

除编钟之外,梵钟和朝钟随佛教传入而开始被重视。宋应星《天工开物》详细记述了这类钟的铸造技术。北京大钟寺的“万钧钟”是梵钟之一,约42吨,铸于明永乐(1403—1424年)年间。它是世界上现存的最古老、而且能被敲击的大钟。

三、壳体振动知识

伴随编钟的长久、大量的制作,古代人关于壳体振动的各因素与振动发声的认识也格外丰富。《周礼·春官宗伯·典同》最早记述了十二种钟的形状及其发声效果:

以为乐器,凡声,高声砢,正声缓,下声肆,陂声散,险声敛,达声羸,微声鰒,回声衍,侈声箝,奔声郁,薄声振,厚声石。^①

这段文字无疑是乐工、钟工的实践总结。它从音响角度找到了适宜演奏的最佳壳形,即椭球形壳,也发现了圆形钟的缺点,即“回声衍”:过长的延长音。基于这些经验,《考工记》对设计、制造编钟的技术又作了详细记载。

^① 关于这段文字的详细解释,见戴念祖:《中国的钟及其在文化史上的意义》,《亚洲文明论丛》,四川人民出版社1986年版,第101—120页;也见戴念祖:《中国声学史》,河北教育出版社1993年版,第426—428页。

《考工记·攻金之工》规定了钟体合金比例：“六分其金而锡居一。”这或则是1/7的锡，6/7的铜；或则1/6的锡，5/6的铜。《考工记·凫氏》详细记述钟体各部分名称、规范尺寸，并且写道：

薄厚之所振动，清浊之所由出，侈弇之所由兴。有说，钟已厚则石，已薄则播，侈则柞，弇则郁，长甬则振。

钟大而短，则其声疾而短闻；钟小而长，则其声舒而远闻。

在这里，指出了钟壁薄或厚、钟口侈或弇、钟甬长或短对钟体发声振动的影响。这些定性叙述均与近代声学知识相吻合。就整个钟壳而言，又大又短的钟，出声快（“声疾”）、听闻时间短；而又小又长的钟，其音响效果也相反。这也与壳体振动理论相符。

刘宋时廷尉张永（？—474年）知道合金中杂质对钟壳发声的影响。杂质使钟声嘶哑^①。宋代发生了一场关于编钟形状与悬挂方式的争论，从而又一次加深了人们对壳体振动的认识。

乐律家王朴（生于906或915年，卒于959年）主张“编钟皆不圆而侧垂”。经学家胡瑗（993—1059年）将其改成“圆其形而下垂”，其结果是“叩之揜郁而不扬，其搏钟又长甬而振掉，其声不和”^②。音乐家李照（生活于十世纪末至十一世纪上半叶）为使王朴钟的发声降低而“私赂铸工，使减铜齐”^③，虽其手段不当，但他对壳体振动有深刻认识。他还提出，钟上枚乳起“节余声”作用，“盖声无节，则铿锵成韵而隆杀杂乱”^④。太常寺燕肃（961—1040年）又发现，钟磬面上涂漆对钟声有影响，“所涂积厚，声益不协”^⑤。太常博士杨杰（约1021—

① 《南史》卷三一《张永传》，中华书局校点本，第三册，第805页。

② 欧阳修：《归田录》卷一，中华书局校点本，1981年版，第17页；欧阳修《集古录》卷一《器铭》，四库全书本。

③ 《宋史》卷一二七《乐志》，中华书局校点本，第九册，第2970页。

④ 王黼：《博古图》卷二三《辅乳钟》说文。

⑤ 《宋史》卷二九八《燕肃传》，中华书局校点本，第二八册，第9910页。

1090年)指出编钟“宜勿连击”。^①

北宋科学家沈括对这场争论作了颇具物理意义的总结:

古乐钟皆扁如合瓦。盖钟圆则声长,扁则声短。声短则节;声长则曲,节短处皆相乱,不成音律。后人不知此意,悉为圆钟急叩之多晃晃尔,清浊不复可辨。^②

沈括准确地描述了圆形壳和椭圆形壳各自发声特点,也是对两种钟形的音响效果的总结性概括,在科学史上有极高价值。他对圆形钟的结论与十九世纪末瑞利勋爵(Lord Rayleigh, 1842—1919年)的研究结论基本相同^③,而后者对于中国编钟壳体似乎并无所闻,也无所知。

四、喷水鱼洗

喷水鱼洗是一种特制的铜盆。盆边有对称双耳。盆底铸刻有鱼纹或龙纹;铸鱼纹者称“鱼洗”,铸龙纹者称“龙洗”。注水于洗内,双手摩擦其两耳,则水面呈驻波,水珠喷射(图2-8),似乎是盆底铸的鱼或龙搅得浪花飞溅,因而,可供玩赏。

鱼洗的振动类似圆柱形壳体的振动,其振动节线总是偶数对称型。手与两耳的摩擦是洗振动激励源。通过摩擦,赋予洗周壁振动能量。双手摩擦的两耳中心是波节线(图2-9),洗周壁振动方向平行于水平面,因此,在波腹处水面振动最烈,甚至产生喷注;在波节处,水面不振动。水珠、气泡等停留在水面节线上。由此人们清楚看见了鱼洗壳体的振动情形。

^① 《宋史》卷一二八《乐志》,中华书局标点本,第九册,第2982页。

^② 沈括:《梦溪笔谈·补笔谈》卷一《乐律》。

^③ Lord Rayleigh, *Theory of Sound*, Vol. I, pp. 391, 464—465, Dover Pub., 1929.



图 2-8 喷水鱼洗表演

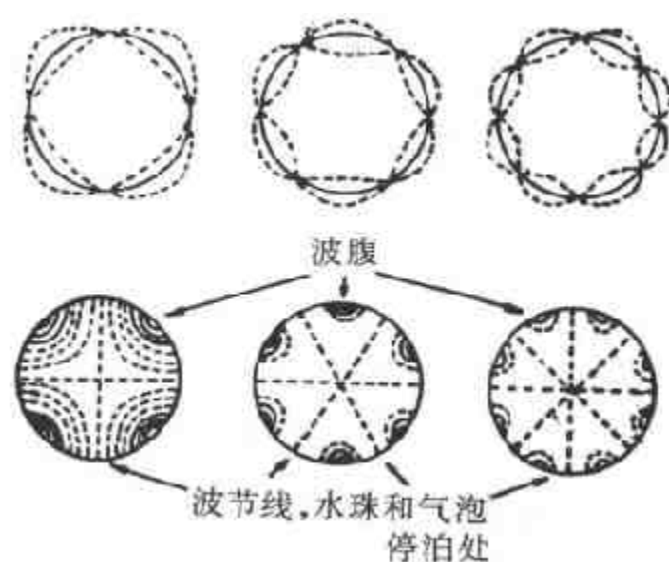


图 2-9 鱼洗周壁振动节线及相应的水面驻波

表明古代人充分掌握鱼洗壳体振动的是，他们在铸造鱼洗时，总是将四条鱼的口须分别对准基频振动的波腹，而将其两耳放在波节线上。

真正能作喷水表演的铜质鱼洗起源于北宋后期^①。王明清^②、何蘧均有记述。何蘧写道：

至今句容人铸铜为洗，名双鱼者，用其遗制也。^③

顺此指出，古代人还发现以加减水量控制或调谐壳体振动。喷水鱼洗内水量多少，可产生四、六、八节线驻波。唐武宗(841—846年在位)时乐官郭道源在敲缶作乐时，以“加减水于其中”、在十二个小碗上演奏各种音乐。^④

第五节 声音的利用

一、地听器

声音在固体中传播时，若遇有空穴，声能就在空穴界面之间连续反射，产生混响。这种现象称为空穴效应。利用这种效应，将陶瓮、空心枕一类器物埋置地面，就可以听见远处人马行走声；通过谛听邻近几个空穴的响度差，还可以大致识别声源方位。我们称这种装置为“地听器”。有人称它为声音放大器、振动检测器或“地话器”(geophones)。

早在战国时期，墨子及其弟子们发现了多种利用地听器监听地下声源的方法。《墨子·备穴》介绍了其中的三种方法。

第一种，在城墙附近挖地洞，将罌口“固幕之以薄鞞革”，置于洞

① 戴念祖：《喷水鱼洗起源初探》，《自然科学史研究》第2卷(1983年)第1期，第16—23页；又，《喷水鱼洗的起源及其物理试析》，《科学月刊》(台北)第20卷(1989年)第1期，第58—61页。

② 王明清：《挥麈录·前录》卷三，四库全书本。

③ 何蘧：《春渚纪闻》卷九《纪研》。

④ 段安节：《乐府杂录》。

内,“使聪耳者伏罍而听之”,即可判断敌方挖洞攻城的阴谋。

第二种,在地洞内置两个有一定距离的陶罍,一覆一仰。覆着的罍,“容三十斗以上”,以便让监听人自己进入罍内,听其混响。然后,对这二罍的响度差作出判断。

第三种,在同一洞内的二罍上,放置木板。人耳贴板而听。

墨家在战争中创用的这种地听器在历史上有着极为久远的影响,并为历代军事家所重视。唐代李筌称其为“地听”^①,宋代曾公亮称其为“瓮听”。^②

在西方,公元前六世纪波斯人围攻巴卡(Barca)时曾以空心盾作地听器;公元前214年,埃及亚历山大人围攻阿波罗尼亚(Apollonia)时,以地下置青铜器皿而探听敌方人马声^③。可见,东西方几乎是同时各自独立地发现了地听方法。

唐宋时期,地听器有新发展。李筌指出,皮制空葫芦作枕垫,“有人马行三十里外,东西南北皆有响于葫芦中”。^④

沈括记述了牛皮制矢箛(装箭的皮袋)可作地听器,并对它能听见远处地面声作了物理解释:“盖虚能纳声也。”^⑤这一解释与空穴混响的道理基本一致。

宋代诗人张耒(1054—1114年)将地听器及混响一并写入其《夏日》诗中:

落落疏帘邀月影,嘈嘈虚枕纳溪声。^⑥

① 李筌:《太白阴经》卷四《守城具篇第三十六》。

② 曾公亮:《武经总要·前集》卷一二《守城篇》。

③ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 1, p. 210, Cambridge, 1962.

④ 李筌:《太白阴经》卷五《游奕地听篇第四十八》。

⑤ 沈括:《梦溪笔谈》卷一九《器用》。

⑥ 清·张景星等编:《宋诗别裁集》(原名《宋诗百一钞》)卷六《七言律·夏日》,上海古籍出版社1978年版,第138页。

二、利用声响捕鱼

利用声响捕鱼包括两个方面：一是以人造声响逼集鱼群；一是以某种器物探测鱼群活动声。古代对此两者都有许多记载。

汉代人已发现人造声响可以逼集鱼群^①，以此捕捞更多的鱼。他们“择水深鱼潜处，引舟环聚，各以二椎击榔（船后横木——笔者注），声如击鼓，节奏相应，鱼闻之皆伏而不动。以器取之，如俯而拾诸地。”^②唐代人称此为“鸣榔”。诗人皮日休（？—883年）^③、陆龟蒙（？—881年）^④皆有诗咏鸣榔捕鱼的热闹景象。类似记载延续到明清时期。

更值得注意的是，古代人发明了以去节竹筒探听水下鱼群的方法，其功能类似于现代的“声呐”。竹筒有许多功用，明代抗倭名将戚继光（1527—1587年）曾“以竹筒贯地穴而耳之”^⑤，以此监听倭寇动静，这是竹筒式地听器。以竹筒探听鱼群，又是一项伟大发现。明代田汝成（生活于十六世纪，于嘉靖五年即1526年进士）写道：

杭人最重江鱼，鱼首有白石二枚，又名石首鱼。每岁孟夏，来自海洋，绵亘数里，其声如雷，若有神物驱押之者。渔人每以竹筒探深水底，闻其声，乃下网截流之。^⑥

类似记载甚多^⑦。以竹筒探听水下鱼群的方法，至晚始于明代，

① 刘安：《淮南子·齐俗训》。

② 施润章：《矩斋杂记》“鸣榔条”。

③ 《全唐诗》卷六一一，皮日休：《奉和鲁望渔具十五咏·鸣榔》，中华书局1980年版，第18册，第7163页。

④ 《全唐诗》卷六二〇，陆龟蒙：《渔具诗·鸣榔》，第7136页。

⑤ 方以智：《物理小识》卷一《天类·异声》，方中通注文。

⑥ 田汝成：《西湖游览志余》卷二四。

⑦ 如，王士性：《广志绎》卷四；李时珍：《本草纲目》卷四四“勒鱼”；郭柏苍：《海错百一录》卷一“黄花鱼”注文。也见郭永芳：《我国古代的几种物理捕鱼法》，《自然科学史研究》第5卷（1986年）第4期，317—320页。

并一直被沿海渔民袭用至今。

三、建筑与声音

近代建筑声学讨论如何消除厅堂内混响、使屋内具有最佳音质的语言声和乐声。而古代关注的是,如何使广场或厅堂上的人们清楚听见有限强度的声音。无论东方或西方,似乎古代人都努力于使声音传播得更远。

早在南北朝时期人们已注意厅堂声响问题。梁朝周兴嗣(?—521年)在其编撰的蒙学课本《千字文》中有“空谷传声,虚堂习听”一句,表明当时人们已将山谷回声与高堂大厦的混响看作是一回事。

宋代赵希鹄(生活于十三世纪)还提出了具有特殊音响要求的房间的设计思想:

弹琴之室,宜实不宜虚,最宜重楼之下。盖上有楼板,则声不散;其下空旷清幽,则声透彻。若高堂大厦,则声散;小阁密室,则声不达;园囿亭榭,尤非所宜。^①

古琴声低微。若琴室上有楼板,三面有墙体,声反射和混响会将琴声传播得远些,加之其前空旷清幽,该琴室就形成了一个天然扩音喇叭。这种想法,是建筑声学的最初构想。

大约唐宋时代,人们曾以共鸣器扩大声音,在钟楼或琴室下挖有共鸣室^②。明代屠隆(1542—1605年)就建造琴室写道:

如平屋中,则于地下埋一大缸,缸中置一铜钟,上用板铺也可。^③

① 赵希鹄:《洞天清禄集》“古琴辨”。

② 陈彭年:《江南别录》,见《说郛》卷五八,商务印书馆本;王明清:《挥麈三录》卷一,四库全书本;也见戴念祖:《中国声学史》,河北教育出版社1993年版,第454—456页。

③ 屠隆:《考槃余事》卷二。

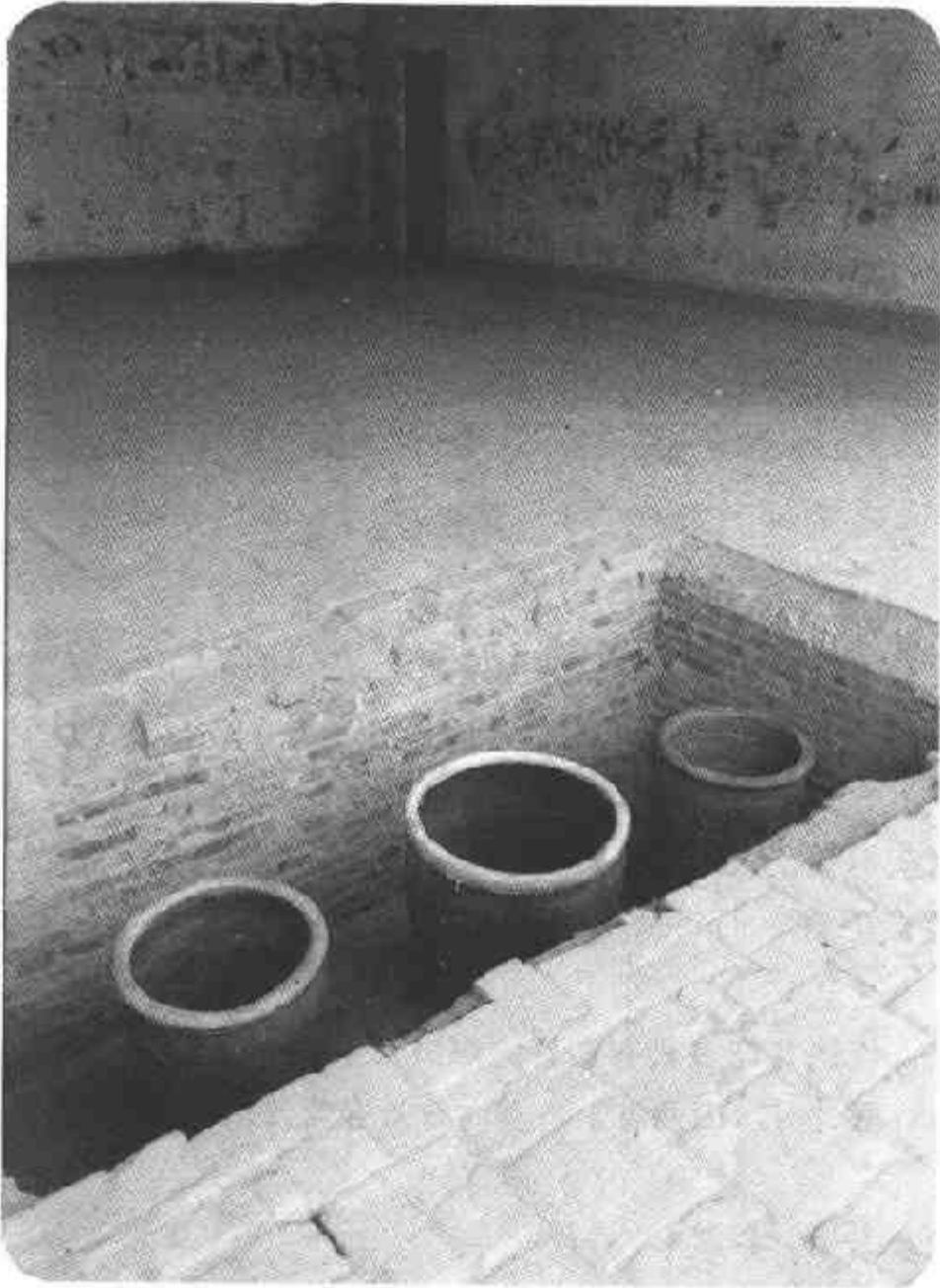


图 2-10 舞台地面的陶瓮(山西南部二十世纪五十年代初传统舞台建筑)

这一设计无疑是来自墨家瓮听的启迪。在晋南、晋西南地区,迄今还留存宋元时期的戏台、舞楼,其台下几乎都有坑洞,洞内放多只陶瓮(图 2-10)。其建筑遗风一直传到二十世纪五十年代初。

有趣的是,约公元前一世纪古罗马建筑戏院,也在墙壁上挂青铜

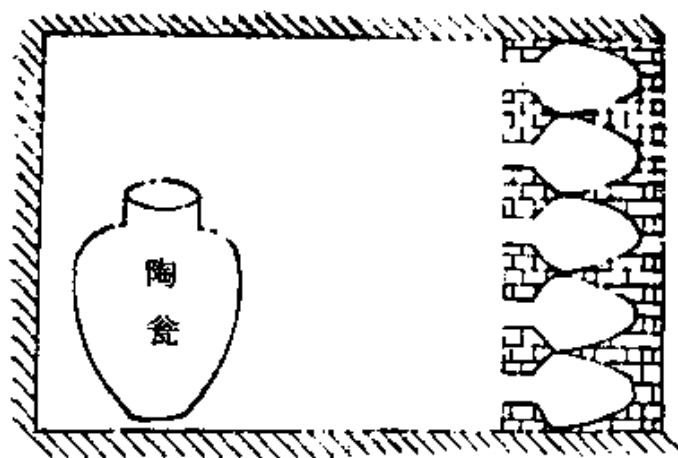


图 2-11 古代隔声墙示意图

器皿^①。但此后整个中世纪,几乎无人问津了。

隔音建筑也是中国人的伟大发明之一。明代人以瓮累墙,使瓮口向屋内,“则外过者不闻其声。何则?声为瓮所收也。”^②(图2-11)这种隔声方法极类似近代以亥姆霍茨共鸣器建造的隔音墙。德国物理学家亥姆霍茨(H. von Helmholtz, 1821—1894年)于1860年提出共鸣器原理,而将共鸣器用于墙体隔声建筑是二十世纪初的事。^③

在古代还有许多具有良好的声波反射特性的建筑,如北京天坛中的回音壁、圜丘,山西省永济县内普救寺莺莺塔,等等。

四、活簧的安装

簧乐器起源于西周时期。《诗·小雅·鹿鸣》有“吹笙鼓簧”之句。

① *A Source Book in Greek Science*, Harvard Univ. Press, 1958, p. 308.

② 方以智,《物理小识》卷一《天类·隔声》。

③ V. O. Knudsen and C. M. Harris 著,王季卿等译:《建筑中的声学设计》,上海科技出版社 1957 年版,第 101—103 页。

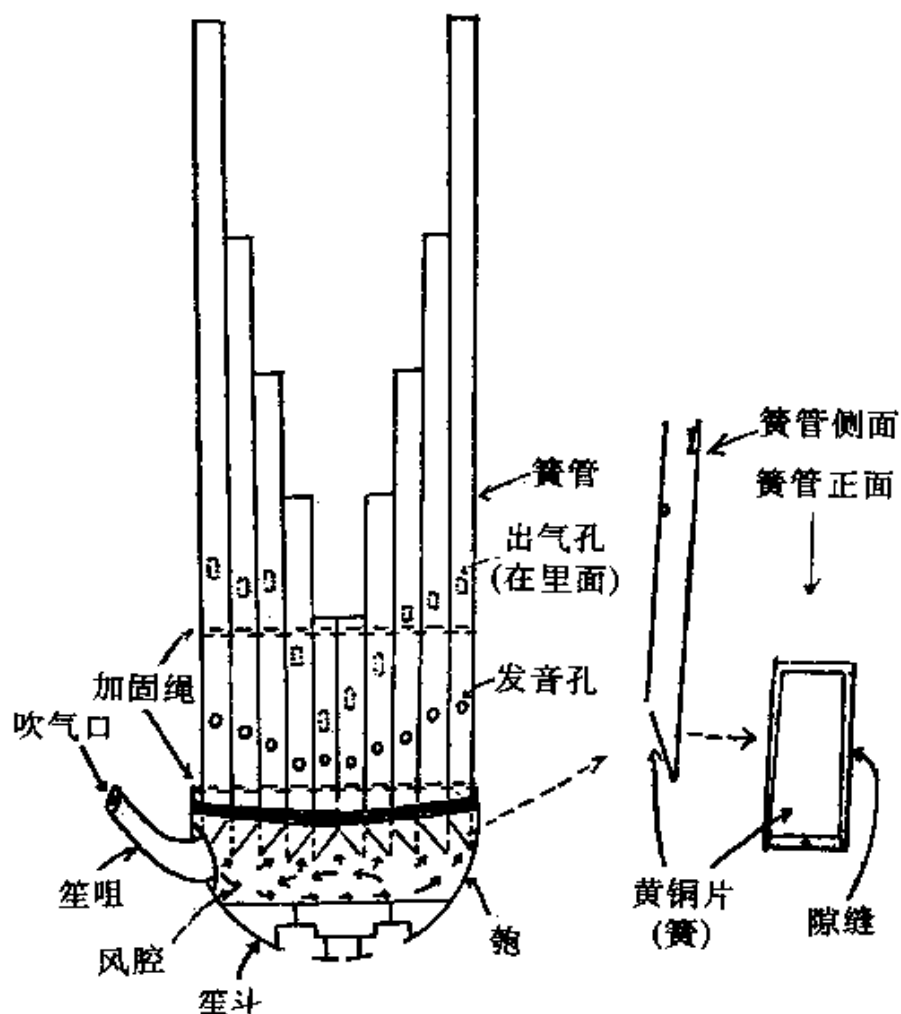


图 2-12 笙的结构与装簧法

它表明西周时期已有笙，笙管内装有簧。曾侯乙墓出土的笙，笙斗为葫芦，笙管已烬，但残存竹制簧片以及簧上的白色物质，后者当是调音点簧用的物质。至迟从明代起，簧片由竹制改为铜制，簧片上调音用的蜡改为锡。

笙的结构如图 2-12 所示。簧片装于笙管底端被削成的斜面上。簧片总是小于管端斜面，其一端固定于管壁，另一端是自由的。因而，它被称为活簧。当簧受到来自风腔的气流冲击，就作自由往复振动。这是中国笙史上传统的装簧法。当中国笙传到欧洲时，欧洲的音乐家

和物理学家对此大为惊讶。

欧洲传统的装簧法是,簧片大于管端斜面。因此,簧片振动不是自由的,而是拍击管壁,故而称为拍击簧或死簧。十七、十八世纪,欧洲簧管作了改进,在装置簧片的管壁上垫于软皮革。虽声稍清亮些,但并未根本上解决问题。

十八世纪,中国笙被教士、探险家和商人多次经俄罗斯或西亚或海上带回欧洲,成为受西方人欢迎的“口吹管风琴”。活簧的安装法启迪了欧洲音乐家和物理学家,促成了欧洲的簧乐器革命,为他们创制或改进管风琴、口琴、手风琴等乐器作出了贡献。^①

第六节 音调的数学计算

本节所述内容,在古代称之为律学或乐律学。它是从发声体振动规律出发,以弦长为计算基础,研究乐音的数理关系的学科。其内容包括生律法、律制、定律器(即音高标准器),在古代人看来,还包括与历法和度量衡的关系。^②

一、三分损益法及其起源

三分损益法是古代人用以确定各个律音和音级的弦长比值并概

① 详见 Curt Sachs, *The History of Musical Instrument*, London, 1942, pp. 182—184; Joseph Needham, *Science and Civilization in China*. Vol. 4, part 1, p. 211. 以及各种大百科全书中有关词条。也见戴念祖:《中国声学史》,河北教育出版社 1994 年版。

② 本节所述,详见戴念祖:《中国声学史》,第 138—385 页;缪天瑞:《律学》,人民音乐出版社 1983 年版;杨荫浏:《中国古代音乐史稿》,人民音乐出版社 1981 年版;以及《中国大百科全书·音乐卷》及其《物理卷》中有关内容。

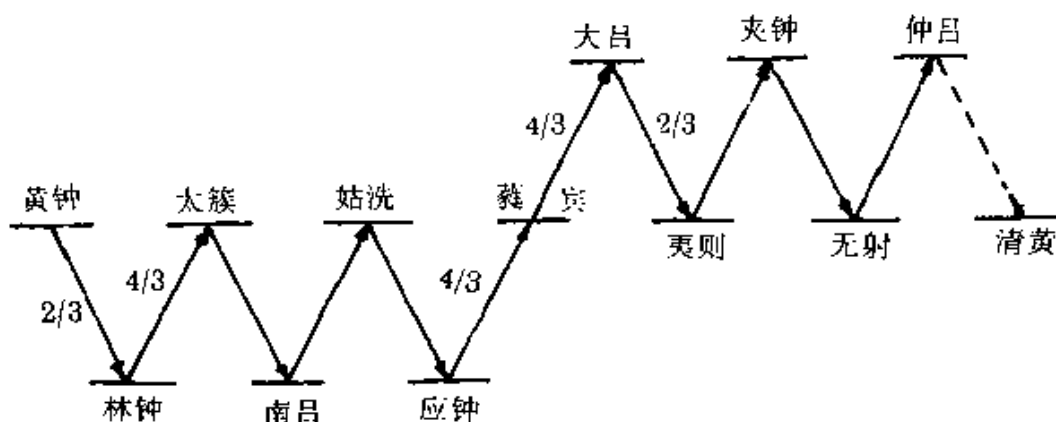


图 2-13 三分损益十二律

述它们的内部联系和规律的一种数学方法。在近代科学的频率概念基础上,也可以用它确定各个音级的频率比值。由这种方法产生的各律音就称为三分损益律。

将某一起始音的弦长分为三等份,去其一份(即乘以 $2/3$)称为“损”;加上一份(即乘以 $4/3$)称为“益”。这样一损一益计算十二次之后,就得到一个八度内的十二律(图 2-13),在计算过程中,为使十二律都在一个八度组内,一般地是“先损后益”(也称为“先下而上”)、“蕤宾重上”。而且,一般地也是将计算所得的前五律或七律组成五声音阶或七声音阶。

我们将三分损益十二律及七声音阶的计算结果列表如下。由表 2-1 可见,三分损益十二律中,相邻两律间的音程只有五度律大半音(114 音分,频率比为 $2187/2048$)和五度律小半音(90 音分,频率比为 $256/243$)两种;相邻两音级的音程也只有大全音(204 音分,频率比为 $9/8$)和五度律小半音两种。由此可见,三分损益律计算方便,音阶结构简单,音调悦耳纯正,为历代音乐家所喜欢。

三分损益法起源于何时?在河南舞阳县贾湖村发现了公元前 6000 年以前的 16 支骨笛,类似今日洞箫,可以吹出筒音为角音的六声音阶:mi, sol, la, b si, do, re;或者筒音为宫的七声音阶:do, re, mi,

表 2-1 三分损益十二律各参数值

律名	黄钟	大吕	太簇	夹钟	姑洗	仲吕	蕤宾	林钟	夷则	南吕	无射	应钟	清黄
相生次序	1	8	3	10	5	12	7	2	9	4	11	6	(13)
相当今日音名	C	$^{\#}C$	D	$^{\#}D$	E	F	$^{\#}F$	G	$^{\#}G$	A	$^{\#}A$	B	C^1
七声宫调	宫		商		角		变徵	徵		羽		变宫	清宫
弦长	9.00	8.42	8.00	7.49	7.11	6.66	6.32	6.00	5.62	5.33	4.99	4.74	4.50
弦长比数	1	$\frac{2048}{2187}$	$\frac{8}{9}$	$\frac{16384}{19683}$	$\frac{64}{81}$	$\frac{131072}{177147}$	$\frac{512}{729}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{4076}{6561}$	$\frac{16}{27}$	$\frac{32768}{59049}$	$\frac{128}{243}$	$\frac{1}{2}$
音分值	0	114	204	318	408	522	612	702	816	906	1020	1110	1200
两相邻律的音分值	114 90 114 90 114 90 90 114 90 114 90 90												
两相邻级的音分值													

fa, sol, la, si^①。后者正是传统的中国音阶形式。贾湖骨笛可以看作上古古人智慧爆发的产物,在追寻中国古代音程与音阶的起源时,它是有力的历史佐证。

夏代出土的音乐文物,表明古代人已有绝对音高的概念。殷商时代的陶埙、铜钟证明,那时不仅音列完备、有完整的七声音阶,而且在十一个音之间构成半音关系,只差一个音就有完整的十二律了^②。西周中晚期的编钟铭文,已有众多律名。

山西侯马出土了春秋中叶(至迟在前 572—前 542 年间)晋国九件编钟,对其测音结果是,前五个音 g^2 、 a^2 、 c^3 、 d^3 、 e^3 恰好是后来《管子·地员》记载的徵、羽、宫、商、角五声。几乎与此同时,周景王的律官伶州鸠于周景王十三年(前 522 年)不仅指出当时的音高标准器

① 《河南舞阳贾湖新石器时代遗址第二至六次发掘简报》,《文物》1989 年第 1 期,第 1—14 页;黄翔鹏:《舞阳贾湖骨笛的测音研究》,第 15—17 页。

② 黄翔鹏:《新石器和青铜时代已知音响资料与我国音阶史问题》,《音乐论丛》1978 年第 1 期,第 184—206 页;1980 年第 3 期,第 126—160 页,人民音乐出版社版。

（“均钟木”）的调律方法，还清楚地提出，调律中“纪之于三”^①的方法，即将弦线分为三等份的方法。可见，三分损益法起源于公元前六世纪，当无疑义^②。比侯马钟晚约百年问世的曾侯乙钟，证明当时乐律学知识已完全成熟。

从文字记载看，《管子·地员》最早记述了三分损益法；《吕氏春秋·季夏纪·音律》详细记述了对十二律进行的数学计算。以上历史事实表明，虽然《管子·地员》是战国时期作品，但他所载的三分损益法本是春秋中叶、甚至是春秋初期管子（？—前645年）生活时代已有的科学内容。曾有不少人认为，中国乐律学知识起源于古希腊、古巴比伦的看法是毫无根据的猜测。^③

二、三分损益律的发展

设从起始律黄钟9寸开始，按照三分损益法计算十二次，其结果得到黄钟8.8788寸或清黄钟4.4394寸，而不是9寸或4.5寸。计算结果不能返宫。按照音分值计算，其误差为：

$$3986.3137 \times \log \left[\left(\frac{3}{2} \right)^5 \left(\frac{3}{4} \right)^7 \right] = 23.46 (\text{音分})^{\text{④}}$$

这个值称为最大音差或古代音差。三法损益五度圈不能成为一个圆（图2-14）。为了消除这个音差，按古代说法是为了返宫或旋宫转调，从汉代起，许多乐律家为此作了大量努力，取得了丰硕的学术

① 《国语》卷三《周语下》，上海古籍出版社1988年版，上册，第132页。

② 戴念祖：《三分损益法的起源》，《自然科学史研究》第11卷（1992年）第4期，第325—332页。

③ 戴念祖：《中国、希腊和巴比伦：古代东西方的乐律传播问题》，《中国音乐学》1993年第3期，第5—16页。

④ 以八度为1200音分的音程算法，参阅缪天瑞：《律学》，人民音乐出版社1983年版，第20—42页。

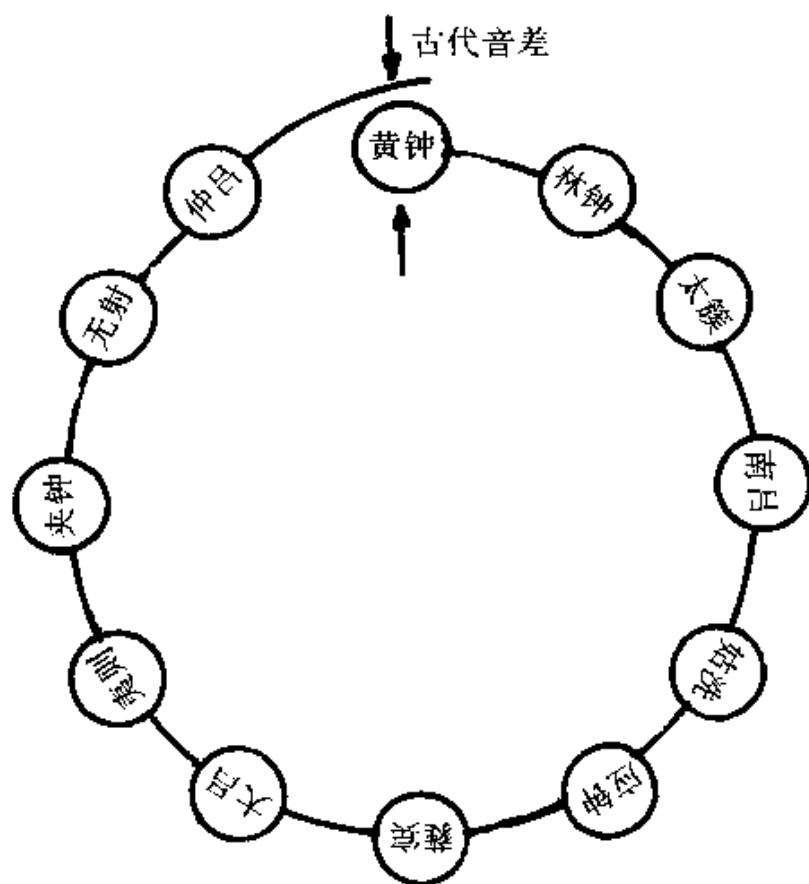


图 2-14 三分损益五度圈与古代音差

成果。

汉代京房(前 77—前 37 年)从黄钟出发连续计算出 53 律,其第 54 律“色育”的音分值与清黄钟只有 3.61 音分差。京房使古代音差大为缩小,人耳已难辨别其音差内的两个音。由于他迷信占卜《易》学,他实际上计算到 60 律。他的理论探讨,为其后律学发展打开了一条道路。刘宋钱乐之(生活于五世纪)、梁朝沈重(500—583 年)沿着京房道路,计算到 360 律。第 360 律比清黄钟多 1.83 音分。

京房、钱乐之等人的探讨,实际上是遵循一条增加律数、由简演繁的路线。由于 $2/3$ 是一个永远除不尽的循环小数,即使再往下计算,音差还是不能绝对消除,而只能相对缩小。但他们的努力为乐律家探索新律提供了极可资利用的理论成果。

隋代奴隶出身的音乐家万宝常和隋唐时协律郎、太常少卿祖孝孙,分别将 360 律化繁为简。万宝常从 360 律中选出 144 律。祖孝孙从 360 律中确定 12 律,使之接近于近代的十二平均律,三分损益律的发展由此达到其高峰,也是中国声学史上一个非凡的成就。它不仅影响并奠定了隋唐及其后乐律学理论的基础,而且比近代科学创始人伽利略的父亲伽利莱(Vincenzo Galilei,约 1520 年代后期—1591 年)提出的近似平均律要早约一千年。

三分损益律的另一方向的发展是:基本上不增加律数,而适当调整十二律弦长比值,使之达到旋宫转调的结果。

刘宋何承天(370—447 年)将古代音差的弦长数值 0.1212 寸平分 12 份,然后将此平均数(0.0101 寸)累加到各律的原数值上。这样,八度值恰为 2,其他各律也很接近平均律。

隋代刘焯(544—610 年)建立一种新律,他不遵循三分损益法,而将十二律管长构成一种等差数列。结果虽失败,但为朱载堉创建平均律理论提供了一个可贵的教训。

北周王朴(生于 906 或 915 年,卒于 959 年)提出一种新律,他严格定义八度倍半弦长之外,将三分损益其他十一律数值稍作变动,从而也达到平均律效果。

南宋蔡元定(1135—1198 年)取京房 60 律中的前 18 律,将多出 12 律的 6 个变律排列在图 2-14 的五度圈中,使相邻两律只有 90 音分和 24 音分两种音程,从而实现旋宫转调。

三分损益律在古代得到充分发展,人们作了一切可能想到的探索,它们构成古代声学史中内容丰富的篇章。

三、纯律的理论与实践

纯律,又称自然律。它和三分损益律都是不平均律。

三分损益律实际上是利用空弦振动的第二泛音(弦长 $1/2$)、第三泛音(弦长的 $1/3$ 、 $2/3$ 处)和第四泛音(弦长的 $1/4$ 、 $3/4$ 处)。纯律是除前三种泛音外,又利用了第五泛音(弦长的 $1/5$ 、 $2/5$ 、 $3/5$ 、 $4/5$ 处)和第六泛音(弦长的 $1/6$ 、 $5/6$ 处)。(图 2-15)第五泛音构成纯律大音阶。第六泛音构成纯律小音阶或自然小音阶。

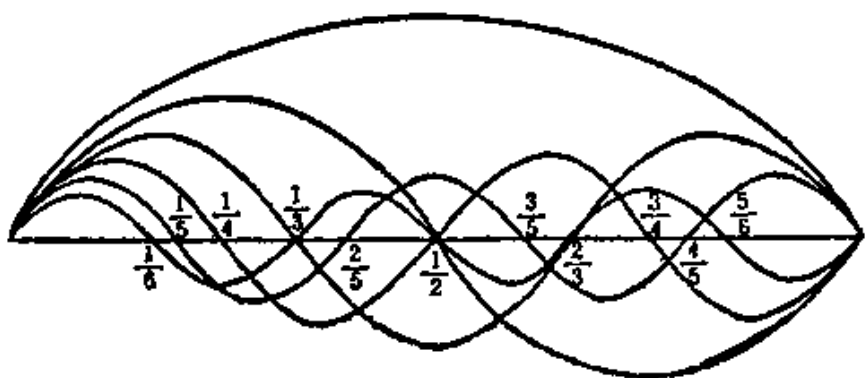


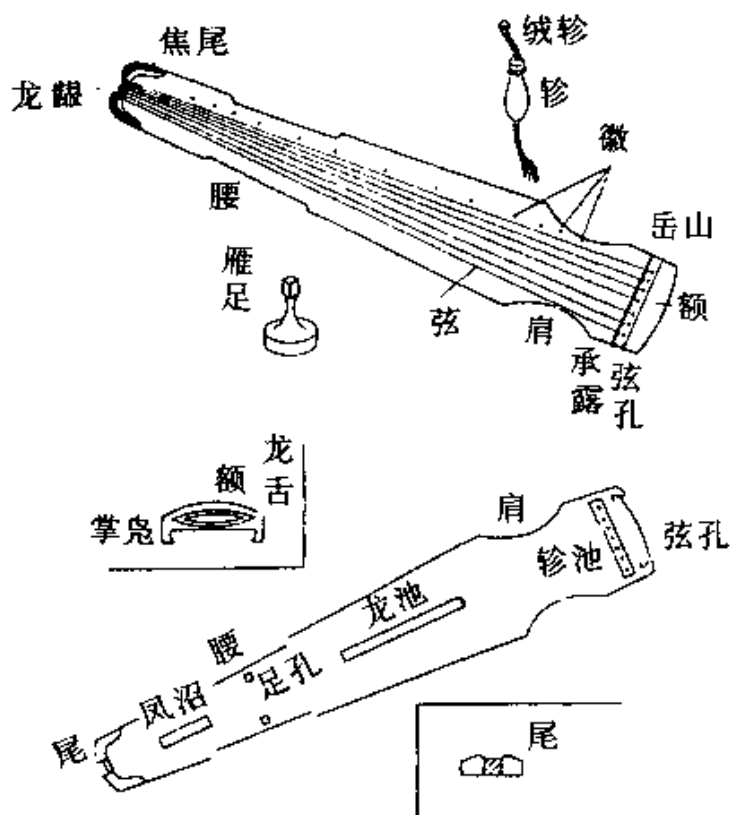
图 2-15 两端固定的空弦振动

纯律音程在中国有长久的音乐实践。公元前 4000 年半坡出土一音孔陶埙,开闭音孔的二音之音程为 341 音分,很接近纯律小三度,这是迄今已知的最早的纯律音程。殷商编钟有纯律小三度,西周钟律实际上是三分损益、平均律和纯律的混合律制。曾侯乙钟的中一侧鼓音程接近于纯律大小三度者与接近于五度律大小三度者几乎相等。

古琴是中国传统的弹拨弦乐器(图 2-16)。琴上十三徽正是第二至第八泛音的标识点(见表 2-2)。按照演奏古琴泛声指法^①就可以得到纯律音程。不仅琴徽表明泛音与纯律音程的应用,留传至今的大量古琴谱也证明古代音乐家确曾应用纯律^②。事实上,古人所谓“琴律”是三分损益律和纯律的混合律制。

① 宋代陈旸说:“左手微按弦,右手击弦,泠泠然轻清是泛声也。”见陈旸:《琴声经纬》,转引自《古今图书集成·乐律典》卷一〇四《琴瑟部·汇考二》。

② 杨荫浏:《三律考》,《音乐研究》1982 年第 1 期,第 30—39 页。



上:正面 下:背面

图 2-16 古琴的构造

古代人发现了绝顶聪明的琴徽位置算法:折叠法。将琴弦三、四、五、六、八折,十三徽的位置就确定了。这种方法正如图 2-15 所示一样,纯律泛音在五折与六折的徽位上。其方法真是琴家“俗工口传,莫知从来,疑必古人遗法”^①。朱载堉对琴徽作了数学计算,其方法与结果与表 2-2 所示相同。^②

在西方,毕达哥拉斯的第二代信徒阿契塔(Archytas,约前 400—前 350年)最早发现纯律大三度音程($5/4$),地理学家埃拉托色

① 朱载堉:《律学新说》卷一《密率律度相求第三》。

② 朱载堉:《律学新说》卷一《论准徽与琴徽不同第十》。

表 2-2 古琴十三徽的位置与弦长比值表

徽位	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
弦长比	$\frac{7}{8}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{3}{5}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{8}$

尼(Eratosthenes, 约前 276—前 196 年)发现纯律小三度($6/5$)。但是,此后无论在理论或实践中,纯律在西方均未发展。直到十三、十四世纪,复音音乐兴起之后,西班牙音乐家拉莫斯(Bartolomeo Ramos, 1441—约 1491 年)建立了含纯律音程的七声音阶,意大利音乐理论家札利诺(G. Zarlino, 约 1517—1590 年)在确立大小三和原理之后才奠定了纯律的理论基础。然而,即使此后还有许多纯律理论,却没有任何实践运用。

四、十二平均律的创建

由于演奏实践和转调的需要,平均律具有悠久历史。曾侯乙编钟具有平均律因素,秦汉及其后产生的弦鼗、卧箜篌、琵琶、阮、月琴等带品柱的弹拨弦乐器,都具有平均律倾向。如前所述,祖孝孙、何承天等人从三分损益法出发而得到近似平均律。但是,真正从数学上完成十二平均律理论建树的是明代王子朱载堉的功劳。

朱载堉称十二平均律为“新法密率”。“新法”是对“旧法”即三分损益法而言的;“密率”即 $\sqrt[12]{2}$,朱载堉又称它为“应钟律数”。他从 1560 至 1580 年经过整二十年的努力,才建立了十二平均律的数学理论。他的初衷是力图从数学上找到一种旋宫转调的方法,而实现其目的的必然结果是发现十二平均律。

朱载堉找到了两种求解平均律的数学方法。

第一种,令完全八度的两个音的弦长比为 2,“不用三分损益、不

拘隔八相生”，而是先求出八度内十三律的公比数值 $\sqrt[13]{2}$ ，然后将2除以 $\sqrt[13]{2}$ ，连续累除12次，即得出八度内十三律的音高弦长数。不过，他将 $\sqrt[13]{2}$ 写成1.059 463 094 359 295 264 561 825，并称它为“应钟律数”。每个数值都计算到25位，并详尽地列出了倍律（黄钟为2）、正律（黄钟为1）、半律（黄钟为0.5）三组共36律的计算数值。^①

第二种，实际上就是求解一个等比数列的通解法：先求13项组成的等比数列的中项；再求，由四项构成的等比数列的第二、三项^②。朱载堉在世界数学史上首次找到了由四项构成的等比数列的求解公式。他的成果比荷兰数学家斯泰芬至少早约20年，比法国科学家默森（Marin Mersenne, 1588—1648年）要早50余年。^③

五、朱载堉及其平均律在国内外的影响

朱载堉（1536—1611年），怀庆府（今河南沁阳市）人，字伯勤，号句曲山人、狂生、山阳酒狂仙客。他是明朝开国皇帝朱元璋的九世孙，是郑恭王朱厚烷之子，从小酷爱音乐、数学，在安定的家庭生活中接受了各种教育。嘉靖二十九年（1550年），由于家族内争嫡夺爵，世宗帝昏庸，致使朱厚烷被削爵禁锢，从此，朱载堉“筑土室宫门外，席藁独处者十九年”^④。此期间，他专心研读乐律学。隆庆元年（1567年），复朱厚烷爵，并复载堉世子冠带。从1560至1581年间，载堉完成了《律学新说》、《律历融通》、《律吕精义》、《算学新说》等书初稿，在科学和音乐学上作出了许多重要发现。1581年之后，几经精练其著述，编著《圣寿万年历》，将其六十余卷上百万字的科学和音乐艺术著作汇

① 朱载堉：《律吕精义·内篇》卷一《不用三分损益第三》。

② 朱载堉：《算学新说》。

③ 见戴念祖：《朱载堉——明代的科学和艺术巨星》，人民出版社1986年版。

④ 《明史》卷一九《诸王列传》，中华书局校点本，第一二册，第3627—3628页。

编成《乐律全书》；从 1595 至 1606 年，又以 10 年时间全力从事雕板、印刷这些著作。

万历十九年(1591)郑王朱厚烷卒。按理，载堉当嗣爵位，然而，从 1591 年至 1606 年间，他累疏恳辞，让出国爵。

朱载堉虽然在世界上首创平均律理论，但他在明朝廷却受到冷漠与反对。他的著作被搁置史馆，未及施行；一个半世纪后，又招致清康熙帝与乾隆帝的无理围剿，被斥之为臆说。在皇家权威的影响下，十八世纪的中国几乎没人敢说平均律的好处。清代乐律家陈澧(1810—1882 年)明知十二平均律的优越性，但他却主张三分损益的“古法诚不必改”。^①

大概只有一个乐律家是朱载堉的知音知己。他就是清代的江永(1682—1762 年)。当他在 77 岁第一次读到《乐律全书》时，“悚然惊，跃然喜”，“是以一见而屈服也”^②。此后不足一年，他就完成了《律吕阐微》一书，在其中表达了对朱载堉的敬仰，并对康熙、乾隆帝的错误理论予以反驳，还修正补充了朱载堉理论中的一些细节。

然而，朱载堉的平均律理论传到欧洲后，成了智慧的启迪。据考，斯泰芬、开普勒(J. Kepler, 1571—1630 年)、伽利略、默森等人都有可能接受来自中国的平均律解法的学术信息。十八、十九世纪，“王子载堉”的名字传遍了欧洲学术界。李约瑟博士说：“平心而论，在过去的三百年间，欧洲及近代音乐确实有可能曾受到中国的一篇数学杰作的有力影响。”^③没有十二平均律的理论，就不会有今天丰富的音乐艺术生活。现在，人们在音乐文化中不时地感受到朱载堉这位 400 多年前诞生的科学和艺术巨星的光辉。

① 陈澧：《声律通考》卷二。

② 江永：《律吕阐微·序》。

③ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 1, p. 228.

第七节 音高标准器与管口校正

一、弦准的发展

为了确定标准音高，古代人创制了许多音高标准器。《诗·商颂·那》：“鞀鼓渊渊，嘒嘒管声。既和且平，依我磬声。”或许殷商或西周时期，曾一度以磬作为音高标准器。律管是一种管式音高标准器，而弦线式音高标准器称之为“均”（yūn）、“均钟木”、“准”、“弦准”等。

《国语·周语》曾记述春秋时期伶人所用的“均”。三国时韦昭（204—273年）注解：“均者，均钟木，长七尺，有弦系之，以均钟者，度钟大小清浊也。汉大予乐官有之。”^①大概这就是春秋战国时期用以调校编钟的音高标准器。《国语·周语》说它是“古之神瞽考中声而量之以制”。可惜，文献记载中未涉及其弦数。曾侯乙墓出土一个五弦器，据考，它可能是先秦均钟木之一^②。若能进一步证实，它便是世界上现存的最古老的音高标准器。

汉代京房创制了称为“准”的音高标准器。“准之状如瑟，长丈而十三弦，隐间九尺，以应黄钟之律九寸。中央一弦，下画有分寸，以为六十律清浊之节。”^③可见，京房的“准”是为他创建六十律理论服务的。宋陈旸还绘制了一张京房准图（图2-17），不知是否有据？

梁武帝萧衍（464—549年）是颇有才干的乐律家，他于天监元年

① 《国语》卷三《周语下》，上海古籍出版社1988年版，上册，第132页。

② 黄翔鹏：《均钟考：曾侯乙墓五弦器研究》，《黄钟》（武汉音乐学院学报）1989年第1期，第38—51页；第2期，第83—93页。

③ 《后汉书·律历志》，中华书局校点本，第一一册，第3000页。



图 2-17 陈旸绘京房准

(502年)自制了称为“通”的弦式音高标准器^①。他严格地规定了每弦长度、线密度。又以其创制的笛校通声,从而可以消除张力的不确定性。北魏乐律家陈仲儒(生活于五、六世纪之交)也依京房方法制造了十三弦的准^②。五代王朴于周世宗显德六年(959年)也制造了律准。^③

这些弦式音高标准器都是建立在三分损益基础上、为三分损益律定律调音用的。朱载堉认真总结了前人制准的经验,创制了为平均律服务的标准器,称之为“新制准器”,或“均准”。

朱载堉的均准如图 2-18。它似琴非琴,似瑟非瑟,以桐木制成,通长 55 寸,上施十二弦。两侧分别标刻三分损益律和平均律的弦长数,以便人们作比较。在均准中脊上,装有符合平均律各音的十二徽^④。它实际上不仅是音高标准器,也是世界上第一件建立在平均律基础上的弦乐器。

二、律 管

律管,由十二支竹管或铜管组成,其一端为吹口,另一端为开口,

① 《隋书》卷一三《音乐志》,第二册,第 289 页。

② 《魏书》卷一〇九《乐志》,第八册,第 2835—2836 页。

③ 《旧五代史》卷一四五《乐志》,第六册,第 1938—1939 页。

④ 朱载堉:《律学新说》卷一《立均第五》、《论琴徽与准徽不同第十》。

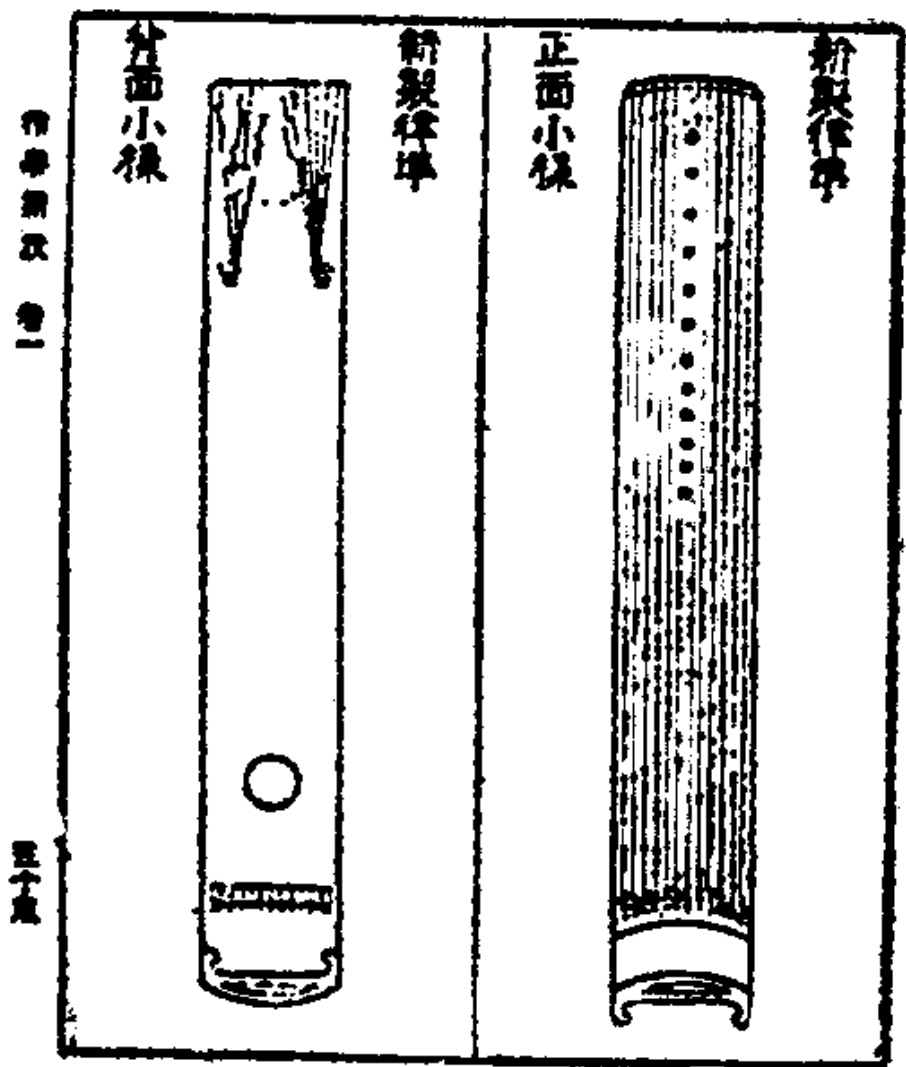


图 2-18 朱载堉的均准

中间无音孔。长沙马王堆 1 号汉墓出土一套竹质律管，是迄今所见的古代律管之一。

《吕氏春秋·古乐》载“昔黄帝令伶伦作律”^①，表明律管的创制非常古远。

律管可能由原始编管乐器龠、箛演变而成。这些乐器至晚产生于

^① 《吕氏春秋·仲夏纪·古乐》。

夏商时代。一般地,先有演奏乐器,后有考音定律的声学仪器。东汉蔡邕对律管产生过程作了极好论述。他认为,在无任何音高标准器之前,人们“以耳齐其声”,后来“假数以正其度”,“乃截竹为管”以调校编钟之音^①。《史记·律书》说:“武王伐纣,吹律听声。”可以吹的律当指律管。因此,以公元前十一世纪作为律管问世的下限时间,大体是可信的。春秋战国时期,律管就成为普通的音高标准器。

秦火之后,汉代人曾一度崇尚律管。以致先秦文献中的“律”字多被当作“管”看待。这种错误曾对后世影响极大。

三、管口校正

凡开口管,皆因其末端效应而使成倍半长度的二支管不能和谐。因此要对管口作校正。

根据《史记·律书》中关于“律数”的记载,很可能先秦律管是作了管口校正的^②。汉代人反而不明其理,一味强调律“大小围数无增减”^③。他们按三分损益法算得管长之后,其孔径全都以三分为准。

西晋孟康(公元三世纪人)是秦汉后第一次发现十二支律管的内径不应相同的人,他试图以缩小管径办法校正发音^④。宋代,阮逸(生卒年不详)、胡瑗(993—1059年)合作创制了一套内径数不同的律管,打破了汉以来内径均为三分之说。^⑤

几乎与孟康同时,晋代荀勖(?—289年)创制竖吹六孔笛,作出了完全正确的管口校正数,这在声学史上是一件非凡的成就。荀勖首

①③ 蔡邕:《月令章句》。清王谟辑,汉魏遗书抄本,经翼第二册。

② 戴念祖,罗琳:《史记律书律数匡正——兼论先秦管律》,《音乐探索》(四川音乐学院学报)1993年第2期,第8—16页。

④ 《汉书》卷二一上《律历志》孟康注,中华书局校点本,第四册,第964页...

⑤ 阮逸、胡瑗:《皇祐新乐图记》卷上《皇祐律吕图第二》,四库全书本。

先采用缩短管长的方法消除管端效应、校正管口发音。其校正方法是,任一律的校正数等于该笛命名律的律长减去比命名律高四律的律长。^①

朱载堉不仅制造了平均律均准,还制造了平均律律管 36 支。他将这些管编联而吹,这实际上是世界上最早的平均律管乐器。这些管的长度与平均律弦长一致,而管内径是以 $\sqrt[24]{2}$ 为公比数的一组等比数列。此外,朱载堉还作了这样的律管实验:

以竹或笔管制黄钟之律一样两枚,截其一枚分作两段,全律、半律各令一人吹之,声必不相合矣。……又制大吕之律一样两枚,周径与黄钟同,截其一枚分作两段。全律、半律各令一人吹之,则亦不相合。而大吕半律乃与黄钟全律相合。略差不远。^②

这是历史上有关末端效应的又一次实验结论。几千年来,同径管律与弦律一致的说法被朱载堉以实验证伪。实验结论表明,两支同径管成倍半长度关系时,其音程不正好是八度,而是约略大七度。朱载堉的实验又给清代徐寿以极大启发。徐寿(1818—1884 年)几乎以相同实验证明,两支成八度关系的同径管,其长度比为 4/9。当徐寿的实验报告以通讯形式刊载于 1881 年 3 月 10 日英国《自然》(Nature)周刊时,英国物理学家、声学家和音乐家都为之惊讶与敬佩。^③

① 《晋书》卷一六《律历志》,中华书局校点本,第二册,第 480—486 页;参见戴念祖:《中国声学史》,第 227—236 页。

② 朱载堉:《律吕精义内篇》卷二《不取围径皆同第五之上》。

③ 戴念祖:《中国古代在管口校正方面的成就》,《黄钟》(武汉音乐学院学报)1992 年第 4 期,第 1—7 页;《中国科技史料》第 13 卷(1992)第 4 期,第 6—13 页。

第三章 光 学

光学,在中国古代被公认为是发展得比较好的学科之一。战国时期的墨家和古希腊柏拉图学派,以及其后的欧几里得(Euclid,前330?—前275年?)、阿基米德(Archimedes,前287—前212年)等人具有几乎同样的光学知识。战国初期的墨翟、东汉王充、宋代沈括、元初赵友钦都曾在光学上作出了重要成就。在发现冷光、利用磷光或荧光物质方面远早于世界其他国家。关于冰透镜、组合平面镜、潜望镜、不等曲率镜、复合透镜、椭圆面镜等方面的知识,关于雨虹成因、晶体分光、大气光象等现象的历史记载及其科学认识,都有许多重要的发现。

由于古代玻璃制造业不发达、几何学知识缺乏,因此,有关光路的认识和折射知识甚为薄弱。但是,由于炼丹家、道士、本草药物学家对玻璃与晶体极感兴趣,他们积累了透镜方面的一些经验知识,其中有关晶体分光的知识则走在世界前列。

第一节 灯 和 镜

灯、镜和屏,三者是进行初级光学实验的必备器物。三者中,屏较

简单,可以因地制宜、随物而用,甚至古人常以自己的眼睛作屏。作为光学实验的物质基础,我们着重讨论灯和镜在古代的发展。

一、灯

在天空中,一个最大的发光体(日)和一个最近的反光体(月)成为明亮的象征,“明”字就是由它们两者构成的。火的应用是上古人最伟大的发明之一。距今 170 万年前的云南元谋人,距今 70 万年前的陕西蓝田人和周口店北京猿人,都会用火和保存火。那时的第一堆篝火,就是原始先民的第一个人造照明光源。

古代的灯是最原始的火焰光源。最先,它大概就是燃烧着的一根树枝或一束植物的根或茎。古代人称它为“爝火”、即炬火。《庄子·逍遥游》:“尧让天下于许由曰:‘日月出矣,而爝火不息,其于光也,不亦难乎。’”这种炬火发光不稳定,燃烧速度太快。或许在此前后,人们发现,燃烧松枝条是较好的灯,因为它含有松脂,可以延长照明的时间。考古工作者在六盘山余脉发现几处新石器时期的窑洞,其中一个的洞壁上有 50 多处火苗状烧土。经模拟实验,证明这些烧土就是古人用灯的遗迹。其灯具很可能就是油松木条^①。在一个窑洞内同时点燃 50 多支油松灯,其明亮与壮观程度是可以想见的。“光”字的造型“从火,在人上”^②,是人高举火炬之意。可见,“光”字与早期火焰光源是一致的。

西周时期,像松枝一类火炬称为“庭燎”,又称为“烛”^③。这些火

① 陈斌:《灯具的鼻祖,四千年前窑洞的壁灯》,《文物天地》1989 年第 2 期,第 20—21 页。

② 许慎:《说文解字》,中华书局 1963 年影印版,第 210 页。

③ 《诗·小雅·庭燎》:“夜如何其?夜未尽,庭燎之光。”《周礼·秋官司寇·司烺氏》:“凡邦之大事,共煇烛庭燎。”

炬以松、苇、竹、麻等材料作芯,外束以纤维,再浸以松油或动物油脂,或在其茎内灌以蜜蜡。燃烧时既明亮、持久,又能随意移动。战国、秦、汉时期,油灯上灯芯也多如此制作。据考古发掘,战国灯具上常有一灯盘,盘心有一尖锥状支钉,硬质灯芯插于支钉上。这种形制近似于后来的烛台与蜡烛,适用于实验光源。墨家的光学实验与此光源有关系,也未可知。

灯光的“灯”字,初写为“鐙”或“錠”。诗人屈原的《楚辞·招魂》:“兰膏明烛,华鐙错些。”^① 这些灯,即考古发掘的陶豆、铜豆。火旁的“灯”字,晚至汉代才出现。灯具上引火的灯芯,或如同上述硬质材料,或是灯草一类软质材料,但棉纱灯芯的使用大约也是汉以后的事。

真正的蜡烛起源于汉代。先秦时期,人们将动物油脂、蜜蜡、虫蜡融化于灯具中作油脂使用。汉代蜡烛称为“膏烛”、“蜜烛”。《淮南子·原道训》:“膏烛之类”,“火愈燃而消愈极”;《西京杂记》:“闽越王献高帝石蜜五斗,蜜烛二百枚。”^② 1983年广州象岗西汉南越王墓出土几件铜烛台,上有直筒状插座^③。蜡烛的产生与灯具问世相吻合。自魏晋起,蜡烛逐渐普及。宋代人开始用矿物蜡^④,它曾通过波斯或阿拉伯商人传播到西方。古希腊和古罗马人所用的“烛”,与先秦火炬相同,西方人用蜡烛是十至十一世纪期间的事。

中国古代灯具种类繁多^⑤。令我们感兴趣的是,西汉长安巧工丁缓发明“常满灯”^⑥。据说,它能自动添油。在河北满城二号墓发掘的西汉“长信宫灯”,具有可装卸的活动灯座、灯盘和灯罩。灯盘可以转

① 王夫之:《楚辞通释》卷九《招魂》,上海人民出版社1975年版,第148页。“华鐙错些”意为华美的灯具用黄金涂饰。

② 汉刘歆(一说葛洪)撰:《西京杂记》卷四,四部丛刊初编缩印本。

③ 《西汉南越王墓发掘初步报告》,《考古》1983年第3期,第222页。

④ 陆游:《老学庵笔记》卷五。

⑤ 高丰、孙建君:《中国灯具简史》,北京工艺美术出版社1991年版。

⑥ 刘歆:《西京杂记》卷一,四部丛刊初编缩印本。

动,灯罩可以开合,从而可以随意调节灯光的照射角度和方向(图3-1)。人造灯具在公元前二世纪已达到很高的水平。宋代流行省油灯,也称“夹灯盏”^①。我们在热学和机械篇中再讨论它。

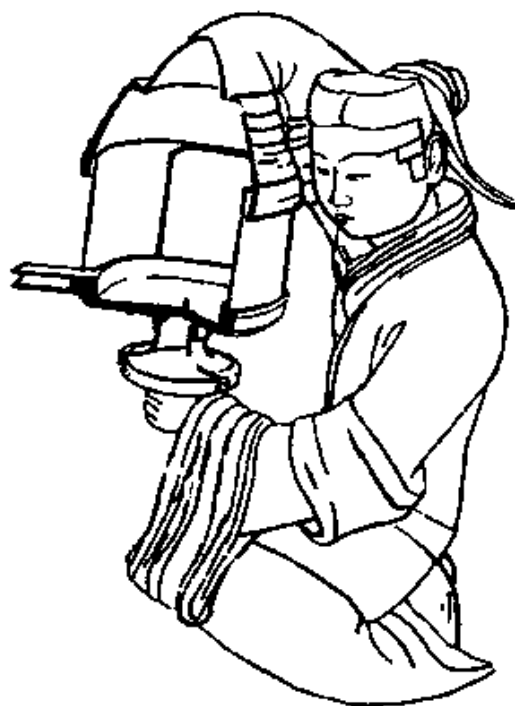


图3-1 汉代长信宫灯

以灯烛作光学实验的记载屡见之于典籍。汉代方士齐少翁为解除武帝思念已故李夫人之忧,“夜张灯烛,设帷帐”,以影戏形式重现李夫人容貌^②。元初赵友钦作小孔成像光学实验,其光源是上千支蜡烛^③。然而,古代人也常以日光进行光学实验。当太阳刚升起之时,从地平线射进屋宇的一缕阳光可以看作是平行光。《韩非子·外储说左上》曾记述某画家在豆荚内膜上作精细图画,然后“筑十板之墙,凿八尺之牖,而以日出之时,加之其上而观”。可见,古代人掌握了利用日光进行光学实验的方法。

二、冷 光

低温发光或冷光,古代人也有许多记述。冷光包括荧光,它是荧光物质(例如硫化锌)受辐射激发后的发光;磷光,是由磷光物质的发

① 《老学庵笔记》卷十,也见《陆放翁集·斋居记事》。

② 《汉书》卷九七上《外戚传》,中华书局校点本,第一二册,第3952页。

③ 赵友钦:《革象新书》卷五《小罅光景》。

光,俗名“鬼火”多属此类;荧光与磷光又称矿物发光。还有生物发光,是由活有机体发出的光,例如萤火虫。许多微生物或菌类也能发光,它们多附集于腐烂潮湿的植物或动物体身上。海洋上的光是由海洋生物(如夜光虫、放射虫、甲藻等)发出的。有些化学反应也能发光,称为化学发光。还有电发光,如摩擦物体的静电放光,我们留待电学中再叙述它。

磷光受到古代人普遍注意。《淮南子·汜论训》、《论衡·论死》篇都有记述。张华《博物志》写道:

战斗死亡之处,其人马血积千年化为磷。磷著地及草木如露,略不可见。行人或有触者,著人体便有光,拂试便分散无数,愈甚有细咤声如炒豆,唯静住良久乃灭。^①

微生物或菌类的冷光,在古代被记之为“腐草为萤”^②,或“腐草皆有光”^③,并记下“蔓金台”、“夜明苔”、“芸蓬”^④、朽木和枯竹根^⑤等所发出的冷光。宋代俞琰曾生动地记下“石楠叶”和“松皮”发光现象:某人在五台山“拾满一布囊”这类潮湿的发光物,拟持归馈赠“江南亲戚故旧,以示希有。数日后视之,则干而无光也。笑而弃之。”^⑥方以智的老师王宣曾说:“峨嵋五台佛灯,偶飞近人,手持之皆树叶。”^⑦这些记载表明,人们清楚知道这类发光与腐烂、潮湿的关系。

① 张华:《博物志》卷九《杂说上》,范宁校本,中华书局1980年版,第106页。

② 《礼记·月令·季夏》。

③ 李淳风:《感应经》,见《说郛》卷九,商务印书馆本;王闿之:《澠水燕谈录》卷一《说论》,中华书局1981年版,第5页。

④ 王嘉:《拾遗记》卷九、卷十,中华书局1981年版,第213、228页。

⑤ 梁元帝《金楼子》卷五《志怪》,四库全书本;吴越陈口纂:《葆光录》卷二,丛书集成初编本。

⑥ 俞琰:《席上腐谈》卷上。

⑦ 方以智:《物理小识》卷二《风雨雷暘类》引王宣语。

还有典籍记下了腐臭的鸭蛋^①、“龙蛻”(蛇壳)^②和湿虾壳^③的发光现象。

明代陆容对上述各种冷光的性质总结说：“夜有火光，但不发焰。”^④指出它们是无火焰光源。

关于海水发光，唐刘恂^⑤、宋庞元英^⑥、明陆容^⑦都有所记述。徐兢在出使高丽途经“黑山洋”时，“遇夜，则波间熠熠，其明如火”^⑧。宋元以来，往来于吕宋(今菲律宾群岛)的船客都知道，“夜以淡水茶拨海，则见火光。小西洋一处，海火夜盛。持器汲起，满器皆火光。滴入掌中，光亦莹然可玩”^⑨。直到1830年，近代科学家才对此现象作出海洋微生物发光的科学解释。

炮制中药秦皮，并以其荧光现象鉴别其真伪，这是最早发现的化学发光之一。《淮南子·俶真训》：“夫柁木色青翳。”东汉高诱注：“柁木，苦历木名也。生于山，剥取其皮，以水浸之，正青，用洗眼，愈人目中肤翳，故名‘色青翳’。”这里所记述的正是秦皮浸液及其荧光颜色。后来的本草药物著作中屡有记载。^⑩

以冷光作为照明光源的典型例子是聚萤火虫为“萤囊”。《诗·豳风·东山》中已有“熠熠宵行”之句描述夜间萤火虫的情景。捕获众多萤火虫，将其装集于羊皮薄膜或纱笼之中，就成了“有火之用、无火之热”^⑪

① 沈括：《梦溪笔谈》卷二一《异事》。

② 何蘧：《春渚纪闻》卷二《杂记·龙蛻放光》。

③ 俞琰：《席上腐谈》卷上。

④⑦ 陆容：《菽园杂记》卷一五，中华书局校点本，1985年版，第188—189页。

⑤ 刘恂：《岭表录异》卷上，该书还记述了江海中“黄腊鱼”发光的现象。

⑥ 庞元英：《文昌杂录》卷三：“夜见海中如火龙无数，不知涯际，甚可怖也。”

⑧ 徐兢：《宣和奉使高丽图经》卷三四《黑水洋》。

⑨ 方以智：《物理小识》卷二《风雨雷肠类·阴火潜热》。

⑩ 郭家林：《我国古代秦皮浸出液荧光的发现和应用》，《中国科技史料》第5卷(1984)第3期，第7—9页。

⑪ 程大昌：《演繁露》卷八《萤囊》。

的萤囊,以此作夜间照明或诱聚鱼群之用^①。在古代小说笔记中,常见描述穷苦书生聚萤虫以为灯、发奋攻读而功名成就的故事。

如果磷光现象较为普遍,各民族都有所发现,那么中国人发现宝石荧光却要比西方人早几个世纪。李时珍《本草纲目》引《别宝经》载:“凡石韞玉,但将石映灯看之,内有红光,明如初出日,便知有玉也。”^②《别宝经》一书似已佚,它的成书时间当在李时珍生活的年代或之前。古代药物学家或炼丹家以其荧光现象从璞中辨玉,其发现当比《别宝经》记载早得多。^③

对冷光最有趣的应用是,古代人以萤石或磷光物质作画,使艺术品产生奇特效果。

唐代段成式指出,以曾青和壁鱼设色,以点壁画中僧或鬼神眼睛,其目眸随人转^④。“曾青”俗语孔雀石,其色绿,成份为 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ，“壁鱼”可能是硫酸钙(CaSO_4)，古称玄精石。两者煅烧化合可产生蓝色或绿色荧光。这是世界上最早利用荧光物质作画的记录。宋代时有人画牛，“昼则啮草栏外，夜则归卧栏中”^⑤。据载，此人分别以蚌胎水和色，以沃焦山石磨色，然后以这两种色料在同一画面上两次作画而成。前者含磷光物质，后者或是石墨、或是氟石。这种制备磷光物质的技术，在西方直到十八世纪才发明。1768年，英国的约翰·坎顿(John Canton, 1718—1772年)才描述了由蚌壳作成的发光化合物。

① 郎瑛：《七修类稿》卷四〇，《事物类·捕鱼法》。

② 李时珍：《本草纲目》卷八《金石部·石之二》引。

③ 陆学善：《中国晶体学史料撮拾》，《科技史文集》第12辑《物理学史专辑》，上海科学技术出版社1984年版，第17页。

④ 段成式：《酉阳杂俎·前集》卷一一《广知》。

⑤ 僧文莹：《湘山野录》卷下《徐知谔喜畜奇玩》。

三、反射镜

人类的光学知识是从镜开始的。自从有了镜,人们才开始注意光的各种物理性质。

镜史上最原始的“镜”当为池沼湖泊平静的水面。从原始社会起,美的观念至少促使人们面水寻影、梳妆打扮。自从有了陶器,就有“水监”。只要在陶盆里盛水,它就成为一面相当好的反射镜。甚至在青铜镜发明后很长时间,水镜还被使用。“贫家女无以为镜,每以瓦盆之水而镜之。”^①人们还清楚,只有静止的水面才能当镜使用。“水静则平,平则清,清则见物之形弗能匿也。”^②

青铜反射镜的出现比铜器时代的到来要早得多。考古发掘出公元前两千多年以前齐家文化时期的铜镜^③。西周时期,青铜镜已很普遍。《诗·邶风·柏舟》:“我心匪鉴,不可以茹。”意思是:我心不比青铜镜,是好是歹都留影^④。有了青铜镜,镜字的造型发生了变化:原来以盆装水的“监”变成带金字旁的“鉴”或“鑑”。而镜字稍晚才出现。

反射平面镜中,如果镜面稍稍凸起,则小镜也可以反射出较大实物的像。这样铸镜,省料,且便于携带。对此镜面曲率的认识似乎起源于齐家文化时期,殷商时代受到特别的注意。^⑤

凹面铜镜,古称为“阳燧”、“夫燧”、“金燧”,利用它可对日取火。它至晚产生于西周时期。《周礼·秋官司寇·司烜氏》:“夫遂取明火

① 宋·佚名:《观时集》,《说郛》卷六五,商务印书馆本。

② 《淮南子·说林训》,及其《俶真训》等篇;也见北齐刘昼:《刘子》卷一。

③ 孔祥星:《中国铜镜图录》,文物出版社1992年版,第1页。

④ 余冠英:《诗经选译》,人民文学出版社1963年版,第17页。

⑤ 参见何堂坤:《中国古代铜镜的技术研究》,中国科学技术出版社1992年版,第258—259页。

于日。”战国时期，凹面镜相当普遍。人们常在身上“左佩……金燧，右佩……木燧”，^①以备取火之用。“木燧”是钻木取火工具，阴雨天少不了它。

值得指出的是，古代人发现了多种凹面反射镜。《淮南子·天文训》载：无缘青铜杯，摩令光滑，“日中”时以当日下，“以艾承之则燃得火”。王充发现，“刀剑之钩月，摩拭朗白，仰以向日，亦得火焉”。^②

更有物理意义的是，从汉代起，人们不断地发现了球形或抛物线形平面镜及其成像情形。《淮南子·齐俗训》写道：

窥面于盘水则圆，于杯则隋（椭）。面形不变其故，有所圆有所隋者，所自窥之异也。

北齐刘昼写道：

镜形如杯，以照西施。镜纵则面长，镜横则面广。非西施貌易，所照变也。^③

明代屠隆还记述了一种名为“轩辕镜”的球形镜；“其形如毬”，挂于卧榻前避邪。因其使物变形，致使山精鬼怪“其形在镜，则销亡退走”^④。这当然是一种迷信之说。

与西方相比，古埃及青铜镜的出现与我国齐家文化约略同时。在古希腊，公元前424年已有玻璃阳燧，青铜镜相对稀少。传说，当罗马人包围叙拉古（Syracuse）城时，阿基米德曾以凹面镜在一定距离内烧毁敌人船队。“这可能是一个虚构的故事。”^⑤

① 《礼记·内则》，《十三经注疏本》，第1461页。

② 王充：《论衡·率性》及该书《乱龙》、《定贤》。

③ 刘昼：《刘子》卷一〇《正赏第五十一》。

④ 屠隆：《考槃余事》卷四《起居器服笺·镜》。

⑤ F. Cajori 著、戴念祖译、范岱年校：《物理学史》，内蒙古人民出版社1981年版，第9—10页。

顺此，需要说明玻璃在中国的产生与发展，因为它对光学的发展影响甚大。古代中国的玻璃自成体系，是一种铅钡玻璃，起源于金属冶炼。它与古埃及、古希腊的钠钙玻璃起源于制陶业有极大差别。先秦时期，中国虽有玻璃制品，但始终未见玻璃镜。至于其名称，直到战国时期才有“璆琳”一说。汉代又写作“陆离”、“流离”、“琉离”等。它们很可能是玻璃的梵语“吠努离耶”(Vainūrya)的音译。“颇黎”、“玻璃”之称晚至《北史·魏书》、《旧唐书》中才出现。可见，秦汉后我国玻璃制品甚为稀少，所见者多为舶来品。唐代开始用硼砂制玻璃。硼砂来自西藏。但其生产配方似未推广。反而在十世纪左右硼砂传入阿拉伯，促使西方生产出优质玻璃。宋以后，中国传统玻璃发展迟缓，徘徊不前^①。中国人得益于陶瓷制造者甚多，但玻璃业始终未兴起。这真是有得必有失呀！

四、透 镜

玻璃业在中国古代虽不发达，但不等于中国古代没有透镜。随着丝绸之路的开拓、中西交流的发展，西方玻璃制品当作珍品传入中国。同时，中国本土出产的水晶矿石又是炼丹家和本草药物家的收藏品^②。因此，有关透镜的知识在古代中国也是相当丰富的。

汉代炼丹家或道士可能发明了点火用的玻璃透镜。王充在《论衡》中述及“天道有真伪”时曾说：“道人消烁五石，作五色之玉，比之真玉，光不殊别”；“道士之教”，“于五月丙午日中之时，消烁五石，铸

^① 赵匡华：《化学通史》，高等教育出版社1990年版，第7—8页；宋·程大昌：《演繁露》卷三《流离》对东西方的玻璃及传播情况作了某些精到的论述。

^② 宋·杜绾：《云林石谱》卷下《石镜》曾记述在永州一山岩中发现一巨大质好的水晶，“工人谓之石镜”。

以为器,磨砺生光,仰以向日,则火来至”^①。与此相关的,东汉墓葬中确实出土了一些凸透镜。^②

如前所述,唐代硼砂玻璃一度兴起。南唐道教学者谭峭的“四镜”是这时期玻璃复兴的反映,也未可知。他说:“小人常有四镜:一名圭,一名珠,一名砥,一名孟。圭,视者大;珠,视者小;砥,视者正;孟,视者倒。”^③这四种镜均为玻璃透镜,而非反射镜,当无疑义^④。由此看来,古代中国虽玻璃制造业不发达,但有关透镜及其成像的知识并不陌生。

古籍中还有关于火齐、火齐珠、火珠、火精、琉璃、玫瑰等名称记载。它们可能是玻璃珠,或透明玉石;或中国产,或由西方传入。其中一些可以在阳光下引火。从汉代起,这些记载屡见不鲜,但未见实物而不能断其所属。例如,张华《博物志》载:“取火法,如用珠取火,多有说者,此未试。”^⑤唐代从国外传入火珠甚多,用它“正午向日,以艾承之则火燃”^⑥。明代方以智及其同时代人总结了光在透镜中取向:“凹者光交于前,凸者光交于后。”^⑦

在各种透镜中,中国古代人首创冰透镜是毫无疑义的。刘安《淮南万毕术》载:“削冰令圆,举以向日,以艾承其影则火生。”^⑧清代郑

① 王充:《论衡·率性》、《乱龙》、《定贤》。关于这段文字是否为透镜,曾有过争论。徐克明认为它描述了玻璃平凸透镜,似有见地。见《自然科学史研究》第8卷(1989),第47—55页。

② 王夔山:《我国古代的透镜》,《物理》1982年第10期,第632—634页;以及《亳县曹操宗族墓葬中出土透镜的初步研究》,《自然科学史研究》1987年第1期,第28—31页。

③ 谭峭:《化书》卷一《形影》,四库全书本。

④ 见徐克明在《自然科学史研究》第8卷中的论文。

⑤ 张华:《博物志》卷四《戏术》,中华书局校注本,1980年版,第50页。

⑥ 《旧唐书》卷一九七《南蛮西南蛮传》,卷一九八《西戎传》,中华书局校点本,第一六册,第5270、5273、5312、5314页。

⑦ 方以智:《物理小识》卷二《风雨雷响类·空中取火法》。

⑧ 刘安:《淮南万毕术》,清·茆泮林辑,丛书集成初编本。

复光在对冰透镜进行实验研究之后,曾特别指出一种制造冰透镜的简易、巧妙的方法:将盛有热水的水壶底置冰块上旋转几回,冰透镜立即制成^①。这可能是古代中国的传统制冰透镜的方法。汉代人发明冰透镜并用其取火,它比英国物理学家胡克的同样发明至少早 18 个世纪。李约瑟博士不相信古代中国人在这方面的聪明程度,他以为,这些记载是西方玻璃透镜传播到中国的证据^②。对此判断,不敢苟同。

宋代人还有两项关于凸透镜的重要发现或发明。

刘跂在《暇日记》中写道:在他生活的时代,一些法官在刑事案中常身带十几种水晶,以鉴读不清晰的案牍。由此人们知道,“暗者,以水晶承日,照之乃见”^③。这种水晶,当是凸透镜或平凸透镜,也即放大镜。它的使用还可以在古代小工艺品上刻写山水图画或整本佛教经文为证^④。因为没有放大镜,这种微雕工艺品就不可能问世。

在杯底装有透镜的酒杯或水杯是宋代又一项重要发明。在酒杯底装上一凸透镜,其下嵌一鱼形物或花形物,当杯内不盛酒时,鱼、花等物成象在人眼一侧的实象,人眼不易看清;盛酒后,透明的白酒与透镜组成一复合透镜,鱼、花等物在这复合透镜的焦点之内,成象为杯底一侧放大的虚象(图 3-2)。于是,或见“一鲫长寸许,游泳可爱”,而把酒水倒尽,“鱼不复见”^⑤。古代人称此为“鲫鱼杯”或“青华酒杯”,它表明人们掌握了复合透镜的成象技术。

① 郑复光:《镜镜论痴》卷四《取火第十一条》。

② Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, Part 1, pp. 113—114. Cambridge 1962.

③ 刘跂:《暇日记》,《说郛》卷四,商务印书馆本。

④ 杨瑀:《山居新话》卷三,四库全书本。

⑤ 何蘧:《春渚纪闻》卷九《纪研》;宋·佚名:《真率笔记》,《说郛》卷六四,商务印书馆本。明·郎瑛:《七修类稿》卷一五《奇谑类·异宝》记有类似现象的瓷碗。

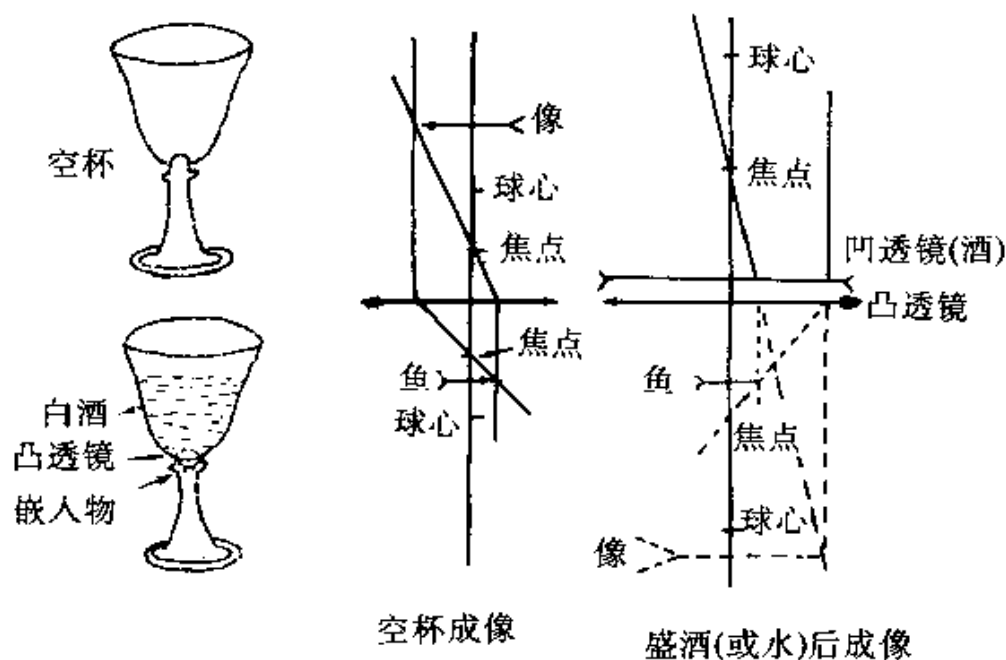


图 3-2 青华酒杯及其成像原理示意图

第二节 光的直线行进性质及其利用

一、小孔成像实验

小孔成像实验最早是由墨家所作的。《墨经·经说下》指出，光照人如同射箭，是笔直前进的（“光之人，煦若射”）。墨家或许以当时烛光作光源，在板上开小孔；或以清早阳光作光源。光线通过小孔进入暗室，屏上即成人物之倒像（图 3-3）。为什么是倒像呢？《墨经》解释说：关键在于小孔（“端”），当光线经过小孔时上下位置要发生交错颠倒（“景倒，在午有端”）；来自人足下的光经过小孔直射向上，来自人头部的光经过小孔后却直射向下（“下者之人也高，高者之人也下”）；人的足部蔽着下光，故成影于壁上；人的头部蔽着上光，故成影于壁

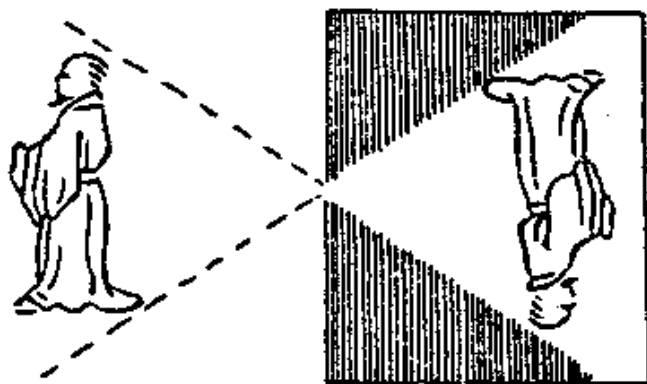


图 3-3 小孔成像实验

下(“足蔽下光,故成景于上;首蔽上光,故成景于下”)。

这个实验指出了光学最基本最重要的一条原理:光的直线行进性质。近代光学中借以说明这种性质的也是演示针孔照像匣实验。

自然界中经常出现类似小孔成像实验的现象。梁沈约(441—513年)在其《咏月诗》中描写清风月夜,月亮的“圆影隙中来”^①;“塔影倒立”、“寺影倒立”,也是此类现象之一。元代陶宗仪曾说:“平江虎丘阁,板上有一窍,当日色清朗时,以掌大白纸承其影,则一寺之形,胜悉于此见之,但顶反居下耳。”^②

由于唐代段成式曾述及塔影倒乃海翻所致^③,遂引起人们对倒立塔影的兴趣与关注。从唐至清,有关现象及其讨论的记载屡见不鲜^④,从而大大加深了人们对光线直进性质的了解,而小孔成像的规律也为人所皆知。宋代沈括对此作了深刻的记述:

① 欧阳询:《艺文类聚》卷一《天部上·月》引沈约《咏月诗》,上海古籍出版社 1985 年版,上册,第 8 页。

② 陶宗仪:《辍耕录》卷一五《塔影入屋》。

③ 段成式:《酉阳杂俎》前集卷四《物革》。

④ 例如,宋·陆游:《老学庵笔记》卷八,明·张居正:《张文忠公全集·文集第十一》,明·方以智:《物理小识》卷八《器用类·阳燧倒影》,清·郑复光:《镜镜詀痴》卷一《原线》第十条;虞兆隆:《天香楼偶得》等。

若鸢飞空中,其影随鸢而移,或中间为窗隙所束,则影与鸢逐相逆,鸢东而影西,鸢西则影东。又如窗隙中楼塔之影,中间为窗隙所束,亦皆倒垂,与阳燧一也。……《酉阳杂俎》谓海翻则塔影倒,此妄说也。影入窗隙则倒,乃其常理。^①

清代光学家郑复光在探讨塔影倒立中画下了它的成像原理图(图3-4)。

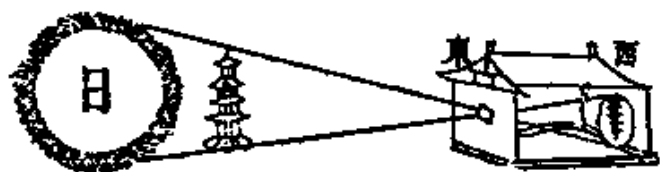


图3-4 郑复光绘塔影倒立原理图

中国古代日食观察记载不绝,其中一个重要原因是,人们解决了观察太阳及其日食的方法。“凡日食,于窗隙间穿纸如钱许,取影视之,可见食之多寡。东缺则西见,西缺则东见。”^②可见古代天文学家也充分掌握了小孔成像的原理。

元代郭守敬(1231—1316年)创造的天文仪器“仰仪”与“景符”,就是根据这个原理制造的^③。以此方法观察太阳或日食,不仅可以避免肉眼直接观察而受到损伤,又消除了因日光散射而导致“影虚而淡”的不精确性。

① 沈括:《梦溪笔谈》卷三《辩证一》。

② 王恽:《玉堂嘉话》卷二,古代人还创造了以油盆对日影观察日食的方法,我们下面还要谈到它。

③ 中国天文学史整理研究小组:《中国天文学史》,科学出版社1981年版,第179—180、193—194页。

二、影子形成的道理

《墨经》指出,影是物体阻挡光线的行进造成的,“光至”则“景(影)亡”。当障碍光线的物体移动时,表观看来影也在移动,实际上是原影不断消失、新影不断形成的过程。墨家由此断论“景不徙”。战国时名家惠施与公子牟也有类似看法。惠施说:“飞鸟之影未尝动也。”^① 公子牟说:“景不移者,说在改也。”^②

《墨经》进一步讨论了物、影与光三者之间的关系:

如果有两个光源,处于物体同一侧的不同位置并同时照耀该物体,则“景二”。今称其为“重影”:一个全黑影,即今所谓本影;一个半黑影,今称半影(图 3-5)。

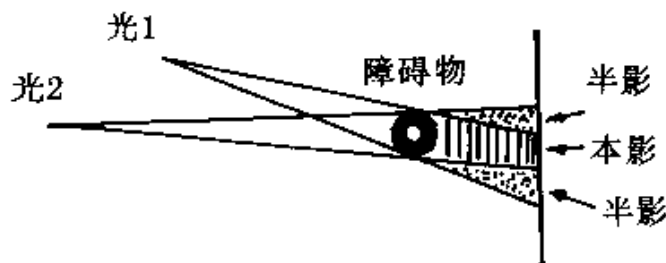


图 3-5 重影

如果以平面镜反照太阳光,使“日之光反烛人,则景在日与人之间”。《墨经》称此现象为“景迎日”(图 3-6)。

《墨经》继续讨论了“景之小大”与物体放置的“斜正”、距光“远近”之间的关系。如将木杆置于太阳光下,当“木斜”,则“景短大”;“木正,景长小”;当光源为火,且“火小于木,则景大于木”。木杆的影子还

^① 《庄子·天下》。

^② 《列子·仲尼》。

与它距光源的远近有关系。

墨翟及其弟子对影子成因、本影与半影、反射光成影、决定影子大小的各种因素都论述到了。这些讨论大概与古代天文学中以圭表测影的实践有关。早期的表就是一根直立的木杆，以它的影子长短及方向确定一年四季的时刻。《考工记·匠人》载，“置槷以悬，视其景”，“识日出之景与日入之景”。“槷”就是木杆制成的表。在近代机械计时器发明之前，圭表虽有发展，但其以影测时间的原理却未有改变。

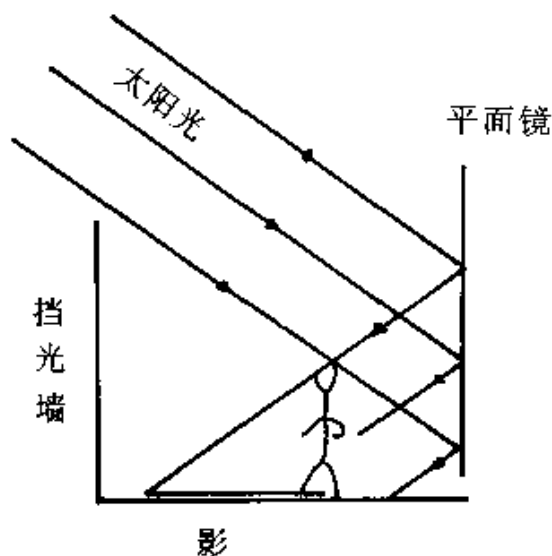


图 3-6 “影迎日”

在近代机械计时器发明之前，圭表虽有发展，但其以影测时间的原理却未有改变。

三、赵友钦的“小罅光景”实验

元初，赵友钦设计了一个大型的小孔成像实验，通过改变光源的大小与强弱、光源与小孔距离之远近、小孔的大小、小孔与像距离之远近等条件，研究了有关小孔成像的一些物理规律。

实验是在一间特设的房间里进行的(图 3-7)。房间大体分左右两边，两边各有直径为 4 尺多的地下室，左地下室深 8 尺，右地下室深 4 尺。左地下室置一高 4 尺的桌子。当其置桌子时，桌面与地面之距离与右地下室深度相同。有两块圆板，其上可插蜡烛几支、或几十支，甚至上千支。将此二板分置地下室作光源。当烛光作为物时，撤去左地下室桌子，左右两边的物距就不同了。用中心开小孔的 5 尺圆板分别遮盖左右地下室的阱口，左板开孔广 1 寸许，右板开孔广 1.5 寸。屋顶天花板或楼板作为像屏，也可分别挂一活动像屏，因而可以

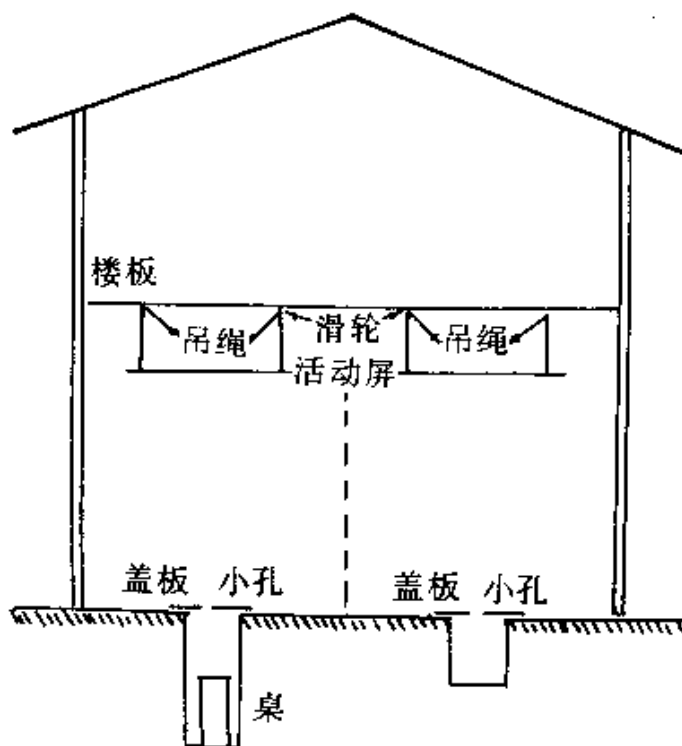


图 3-7 赵友钦的光学实验室

随意改变像距。

赵友钦按照以下步骤进行他的实验。

首先,光源、小孔、像屏三者位置不变,只改变烛光多少(如,从千支烛改为几百支,或几十支,或一支)和左右二小孔之大小;第二,利用活动像屏改变像距,其余条件同前;第三,撤去左地下室桌子,以改变物距,其余条件也如前。第四,改变罅孔大小和光源形状。通过以上实验,他的结论是:

前三个步骤实验完成后,赵友钦认为,“凡景(像)近窍者狭,远窍者广;烛远窍者景亦狭,近窍者景亦广。景广则淡,景狭则浓。烛虽近而光衰者,景亦淡;烛虽远而光盛者,景亦浓。由是察之,烛也、光也、窍也、景也四者消长胜负皆所当论者也。”

第四步实验之后,赵友钦得出:“小景随光之形,大景随罅空之象,断乎无可疑者。”

赵友钦的“所当论者”是指平日观察到的一些小孔成像及日食的光学规律。“室有小罅,虽皆不圆,而罅景所射未有不同。及至日食,则罅影也如所食分数。罅虽宽窄不同,景却周径相等,但宽者浓而窄者淡。若以物障其所射之处,迎夺此景于所障碍物上,则此景较窄而加浓。予始未悟其理,因熟思之。凡大罅有景,必随其罅之方圆、长短、尖斜而不同,乃因罅大而可容日月之体也。若罅小则不容日月之体,是以随日月之形而皆圆,及其缺则皆缺。罅渐宽,则景渐淡;景渐远,则周径渐宽而愈加淡。大罅之景渐远亦渐广,然不减去浓,此则浓淡之别也”^①。正是为了证实他的这种想法,赵友钦才设计并完成上述光学实验。在解释实验结果中,赵友钦完全把握了光的直进性质。他发前人之所未发,萌生了类似照度和光通量的概念,初步懂得照度随光源强度的增加而增加,随距离的增加而减小。在赵友钦之后400年,物理学家朗伯(J. H. Lambert, 1728—1777年)在其1760年的《光度学》一书中最终作出了有关照度的物理阐释。

赵友钦(生活于十三世纪)是宋室汉王第十二世孙,字子恭,自号缘督,鄱阳(今属江西)人。宋亡,避祸隐循,奔走他乡,先住江西德兴,后迁龙游(今浙江衢县)定居。喜观天象,在龙游鸡鸣山筑观象台。其间曾往东海独居十年,注释《周易》。其著《革象新书》涉及天文学、数学和物理学。该书虽经明代王祜(1321—1372年)删改付梓,并定为《重修革象新书》,但《四库全书》将赵氏原本和王本一并采录,今仍可窥原本全貌。是书《小罅光景》一篇是中世纪末罕见的大型光学实验的忠实记录。^②

① 赵友钦撰、明王祜重修:《重修革象新书》卷五《小罅光景》。

② 银河:《我国十四世纪科学家赵友钦的光学实验》,《物理通报》1956年第4期;王锦光:《赵友钦及其光学实验》,《科技史文集》第12辑,上海科学技术出版社1984年版。

四、影 戏

在灯光照耀下,利用物体的移动在屏幕上产生动影,以此作为艺术表演的技巧,称为影戏。西方人称其为幻术。表演影戏需要三个条件:(1)光源;(2)活动的实物或小孔与像屏;(3)影屏或幕,三者缺一不可。当用小孔与像屏时,其情状即今谓之幻灯,古人也称其为影戏。唐宋间出现“皮影戏”,其活动实物多为皮革缝制而成。无论影戏或幻灯,都利用了光的直进性质而作出的艺术发明。

影戏产生于战国时期。前述《韩非子·外储说左上》曾记载一画家在豆荚内膜上作精细图画,然后在清晨将其置于板墙窗洞上,在暗室内“望其状尽成龙蛇禽兽车马,万物之状毕具”。这个画荚就是古老的幻灯片,它是近代幻灯艺术的始祖。活动影戏起源于汉代。前述汉方士齐少翁为武帝重现李夫人容貌,有光源(灯烛),有屏幕(帷帐),让武帝“居他帐”,“遥望见好女如李夫人之貌,还幄坐而步”。汉武帝由是愈加相思悲感^①。影戏中的李夫人形象是用什么做成的呢?晋王嘉曾考证说:以轻质色青之石,“刻之为人像,神悟不异真人”。武帝得此石,“即命工人依先图刻作夫人形。刻成,置轻纱幕里,宛若生时”。自然,这石像毕竟只是轮廓大概,因而只“宜远望,不可逼(近)也”^②。由此看来,方士齐少翁可以看作是活动影戏的创始人。

唐宋年间,影戏大发展。那时候将影人做成能动作的木偶,屏幕上因而出现栩栩如生的影子。宋仁宗时(1023—1063年),以此影

^① 《汉书》卷九七上《外戚传》,中华书局校点本,第一二册,第3952页;也见《史记》卷二八《封禅书》,第四册,第1387页。

^② 王嘉:《拾遗记》卷五《前汉上》,中华书局校点本,1981年版,第116—117页。

戏表演三国故事，且边演边唱，青年男女极为喜爱。每当演至斩关羽时，还有人为之哭泣^①。周密《武林旧事》追记南宋京城旧事，“诸色伎艺人”中“影戏”者有 22 家，除男子之外，还有“女流王润卿”等也从业影戏^②。影人的制作，起先不过是剪纸，其后“以素纸雕镂”而成，而后发展为以羊皮雕刻形体，进而又缝制羊皮，使其四肢、头颈皆可活动^③。这就是中国传统的皮影戏。表演时，“以纸糊大方窗为戏台，剧中人以皮片剪成，染以各色，以人举之舞”。^④

诞生于中国的影戏，传遍东南亚各国。大约元代传到中亚，并通过波斯传至埃及、土耳其。大约十八世纪期间，传到欧洲各地。

第三节 有关反射的知识

一、对光反射的认识

先秦墨家在讨论前述“景迎日”时，清楚地认识了光反射现象。《墨经·经下》：“景迎日，说在转。”“转”字表现墨家认识到反射光的光路发生了方向性变化。明代方以智还以“转光”一词表述并归纳各种反射光现象。^⑤

① 高承：《事物纪原》卷九《博弈嬉游部·影戏》，中华书局校点本，1989年版，第495页；周密：《武林旧事》卷二《元宵》。

② 周密：《武林旧事》卷六《诸色伎艺人》。

③ 孟元老撰、邓之诚注：《东京梦华录注》卷五《京瓦伎艺》，中华书局1982年版，第138—139页。

④ 崇彝撰：《道咸以来朝野杂记》，转引自刘东升等编撰：《中国音乐史图鉴》，人民音乐出版社1988年版，第167页。

⑤ 方以智：《物理小识》卷一《天类》。

宋代,诞生了另一种影戏,称为“移景法”。“乃隐象于镜,设灯于旁,灯镜交辉,传影于纸。”^① 青铜平面镜上的图画,在灯光照耀下反射于纸屏。“灯镜交辉”中一个“交”字表现了人们对反射光和入射光的光路变化的仔细观察。

为了提高镜面反射率,古代人对镜面进行加工处理,使其光洁平滑。《淮南子·脩务训》:“明镜之始下型矇然,未见形容,及其粉以玄锡,摩以白旃,鬓眉微毫可得而察。”唐宋间,“磨镜”成为手工行业之一^②,古代中国有极为发达的磨镜抛光技术^③。然而,有时需要降低镜面反射率,以便进行天文观察。以水盆、油盆作镜面观察日食,就是古代中国人的创造。汉代京房曾“置盆水庭中,平旦至暮视之”^④,以候日食。宋代又以“油盆俯窥”日像^⑤。这些事实证明,古代人充分掌握了有关镜面反射率的知识。下面将要讨论的镜面成像原理,也将表明他们对光反射知识掌握的程度。

然而,遗憾的是,古代人从未测量过反射角与入射角,也没有关于这两个角相等的知识。在古希腊,比墨子稍晚的柏拉图学派既知道光的直进性质,也知道反射角与入射角相等。同样,或许由于玻璃业不发达,古代中国人对折射现象也较生疏,更没有关于入射角与折射角关系的认识。在西方,托勒密(Ptolemy,生活于公元二世纪)是最早测量折射角的人。可以说,在这两个光学理论问题上,古代中国都落后于西方。直到明末以后,这些知识才从西方传入中国。

可是,没有反射与折射的定量知识,似乎并不影响古代中国人对

① 储泳:《祛疑说》,《说郛》卷七六,商务印书馆本。

② 周密:《武林旧事》卷六《小经纪》。

③ 参见本丛书《纺织与矿冶志》。

④ 瞿县悉达撰:《唐开元占经》卷九引。

⑤ 僧文莹:《玉壶清话》卷一。

广漠宇宙中光学现象的定性认识与发现。这也许是古代科学本身的特有气质吧。

二、平面镜的组合与潜望镜的发明

将几个平面镜以不同方式组合或装配,会得到一些奇特的成像效果。这种知识早为汉代人所掌握。唐陆德明在《庄子·天下》释文中写道:

鉴以鉴影,而鉴亦有影。两鉴相照,则重影无穷。

谭峭在其《化书》卷一《形影》中也写道:

以一镜照形,以余镜照影,镜镜相照,影影相传,不变冠剑之状,不夺黼黻之色,是形也与影无殊,是影也与形无异。

汉唐期间,类似记载不绝于书。葛洪《抱朴子·内篇·杂应》中的“日月镜”与“四规镜”是二面与四面平面镜的组合。该书《地真》篇述及这些组合平面镜的成像效果:“其镜道成则能分形为数十人,衣服面貌皆如一也。”唐以后还有类似记载与发现。清代人据此原理发明了“万花镜”等多种镜子。^①

人们不仅知道组合平面镜与成影的关系,而且早在汉代就发明了开管式潜望镜(图 3-8)。公元前二世纪淮南王刘安的《淮南万毕术》写道:

取大镜高悬,置水盆于其下,则见四邻矣。^②

这是两个平面镜组合的潜望镜,它是近代潜望镜的始祖。

① 王锦光、洪震寰:《中国光学史》,湖南教育出版社 1986 年版,第 97—98、168—169 页。

② 唐·马总:《意林》卷六《淮南万毕术》,四部备要本。类似记载也见《感应类从志》,该书一说宋僧赞宁撰,见《说郭》(宛委山堂本)第一〇九卷,一说晋张华撰,见《说郭》卷二四,商务印书馆本。

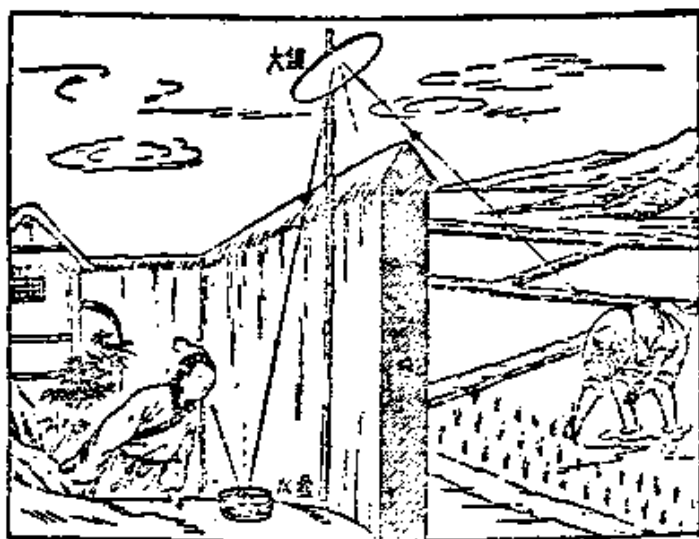


图 3-8 古代潜望镜

三、透光镜的创制

所谓“透光镜”，实际上就是起反射作用的青铜平面镜。它的奇特就在于，被它反射到屏幕的光斑中出现了该镜背面的纹饰或文字，仿佛是来自光源的光线穿透了青铜镜体、神出鬼没地将镜背图案反射到屏上了。因此，古代人称它为“透光镜”，日本人称它为“魔镜”，而近代西方人称它为“不等曲率镜”。

透光镜产生于西汉时期。上海博物馆珍藏四面汉代透光镜，其中之一的背面有“透日之光、天下大明”八字。清乾隆敕撰《西清古鉴》中载当时发现并尚存的“汉长生鉴”、“汉明光鉴”、“汉清白鉴”均为透光镜。这些镜“迎日照之，则背文透出”。^①

不能穿透普通光线的青铜镜体为何在反射阳光时会将镜背图案照现于屏幕上呢？乍看起来，令人不可思议。这个现象首先被宋代科

^① 清乾隆十四年敕撰《西清古鉴》卷三九，四库全书本。

学家沈括等人揭开了。沈括指出：

人有原其理：以为铸时薄处先冷，唯背纹上差厚，后冷而铜缩多。文虽在背而镜面隐然有迹，所以予光中现。予观之，理诚如是。^①

沈括的解释在后世颇具影响，历史上不少学问家赞同此说。今日把类似他的解释称为“加热法”。究其原因，如沈括所述，由于镜背图案致使镜体厚薄不匀，在铸造加热过程中热胀冷缩就不一致，造成镜面与镜背有相同的、但肉眼察觉不出的纹迹。这就是今日所谓的镜面曲率不相等。清代光学家郑复光将这种镜面比喻为盆中之水。水面平静如镜，实可照人；而将它置阳光下，其反射光斑却是光影流波，荡动不已^②。镜面的微小曲率变化，正如水面微波荡动，虽肉眼不察，但在太阳光一类长程光的照耀下就显露出来了。

古代人还以其他种种方法铸造了透光镜，并作出了相应的理论解释。元代吾衍（又名吾丘衍，1276—1311年）认为，在镜面刻痕如其背纹，然后又以黄铜或紫铜补铸其上，再磨平抛光。这样的镜也能反射背面图案^③。这种方法称为“补铸法”或“镶嵌法”。郑复光又曾指出，由于镜背花纹凹凸，而在刮磨时遂使镜面产生与镜背一致的凹凸花纹^④。这种方法称为“刮磨法”。可见，透光镜的制作方法是多种多样的。但是，无论如何，工艺要求精致，方能使透光镜既可作照镜使用，又能呈现“透光”的错觉。

中国的透光镜大约于明代传播到日本，十九世纪时通过印度传入欧洲。至今它还令目睹其情状者大为惊叹！在沈括生活的十一世纪，已流行的技术和正确的科学解释而在十九世纪时却倾注了欧洲

① 沈括：《梦溪笔谈》卷一九《器用》。

② 郑复光：《镜镜论痴》卷五《透光·作透光镜》。

③ 吾衍：《闲居录》，四库全书本；方以智：《物理小识》卷八《器用类》。

④ 《镜镜论痴》卷五《透光·作透光镜》。

许多科学家和物理学家的心力。当时参与对透光镜物理机制研究的有英国物理学家布儒斯特(David Brewster, 1781—1868年), 法国天文学家、光学家阿拉哥(D. F. J. Arago, 1786—1853年)等人, 1843年英国《自然》杂志还开展了有关的专题讨论。直到1932年, 晶体物理学家布喇格(W. L. Bragg, 1890—1971年)以“论中国‘魔镜’”为题, 对此作出总结性解释, 从物理原理指出, 这是由于长光程光对镜面微小变化的放大作用^①。为了探讨汉代人发明的透光镜的成因, 使近代欧洲科学家忙碌了整一个世纪(1830—1930年)。二十世纪七十年代以来, 中国学者对此又作了许多复原制造工作, 进一步摸清了造成镜面不等曲率的种种原因。^②

四、对月球发光的解释

汉代人对月光是月球反射的太阳光作出了正确解释。大约西汉成书的《周髀算经》载:“日兆月, 月光乃出, 故成明月。”赵君卿(一说汉人, 一说魏晋间人)在该书注中指出:“月光生于日之所照”, “月禀日光而成形兆, 故云日兆月也。”^③ 西汉京房指出:“先师以为日似弹丸, 月似镜体。或以为月亦似弹丸, 日照处则明, 不照处则暗。”^④ 此后东汉张衡在《灵宪》中亦有类似说法^⑤。至此, 可以说, 关于月光的成因, 古代中国人已获得了深刻的认识。

① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 1, pp. 94—97.

② 阮崇武、毛增滇:《中国“透光”古铜镜的奥秘》, 上海科学技术出版社1982年版; 上海博物馆、复旦大学光学系:《解开西汉古镜透光之谜》, 《复旦大学学报》(自然科学版)1975年第3期, 第1—10页; 何堂坤、朱寿康:《关于透光镜的模拟实验》, 《自然科学史研究》第九卷(1990)第3期, 第232—237页。

③ 《周髀算经》卷下, 四部丛刊本。

④ 郭璞注、邢昺疏:《尔雅注疏》卷五。

⑤ 张衡:《灵宪》, 见《玉函山房辑佚书》第七六卷。

在对月光成因的历史考察中,值得我们注意的是,唐代段成式较早从月影中推测到月球是凹凸不平的:“月势如丸,其影,日烁其凸处也。”^① 这一思想直到十七世纪才被伽利略用望远镜得以证实。

另一件值得指出的是,沈括、赵友钦都曾以圆球演示实验证明月光的成因。尤其是赵友钦在屋檐下挂一黑漆球反射日光。将此球比为月,其反射光远射至暗壁。日照处则明,日照不到之处则黑。赵友钦以此实验,详细阐述了月亮盈亏的道理。^②

五、彩色雨伞滤光效果的发现

我们稍微超出一点反射的范围,谈谈古代人有关滤光的发现及应用。以上所述,是光波从某一媒质达到另一媒质而反射;如果另一媒质对光的不同波段具有选择吸收或透过的特性,这种媒质就被称为滤光物质。古代人曾发现滤光雨伞的妙用。

古代中国雨伞制作精巧,品类多。折叠式雨伞就是中国人发明的。以红绸、绢或红色桐油纸作伞罩,这样的雨伞就有滤光效果:它只让红光穿过伞罩。表面青紫色瘀血的受伤者,在红色光照射下其伤势清晰可见。古代刑吏在验伤验尸中充分地利用了红雨伞的滤光效应。

据宋代皇甫牧《玉匣记》(成书于978年以前)载:“太常博士李处厚知庐州梁县,常有殴人死者,处厚往验之,以糟或灰汤之类薄之,都无伤痕。”邑中一老书吏告知:“以新赤油繖(伞)日中覆之,以水沃尸,其迹必见。”李处厚“如其言,伤迹宛然。自此江淮间官司往往用此法”^③。这个未留姓名老书吏发现此方法之后,在古代侦刑案件中逐

① 段成式:《酉阳杂俎》前集卷一《天咫》,中华书局校点本,1981年版,第11页。

② 赵友钦:《重修革象新书》卷三《月体半明》。

③ 皇甫牧:《玉匣记》,《说郛》(宛委山堂本)三二卷。

渐广为人知了。^①

南宋法医学家宋慈(1186—1249年)又发展了这种方法。他指出,验尸或验骨伤损处,“于露天以新油绢伞或明油雨伞覆欲见处,迎日隔伞看,痕即见。若阴雨以热炭隔照,此良法也。”^②宋慈将此法推广到阴雨天,发现一种可供利用的红色光源:炽热炭火的光是长波长光。

第四节 镜面成像原理的探讨

一、平面镜成像

在前述透镜中,我们已叙述了古代人对透镜成像的知识,本节着重叙述历史上有关平面镜和球面镜的知识。

对平面镜成像原理最早作出理论探讨的还是墨翟及以他为首的墨家。

《墨经·经下》和《经说下》指出,当以水为镜或将平面镜平置地面时,物体的像是倒立的(“临鉴而立,景倒”),它的像只有一种(“正鉴,景寡”),成像的形状、颜色、位置、正斜都由反射光而生(“貌态、黑白、远近、斜正、冀于光”)。墨家虽未发现反射角与入射角相等的知识,但他们发现了镜面对称现象:像在镜的背后,物与像两者同时走向或离开镜面,两者始终对称(“鉴、影当俱,就去亦当俱,俱用背”)。^③

① 在皇甫牧之后记述此方法的有:沈括:《梦溪笔谈》卷一一《官政一》;郑克:《折狱龟鉴》卷六;方以智:《物理小识》卷三《人身类·验伤法》,等等。

② 宋慈:《洗冤集录》卷二。

③ 徐克明:《墨家的物理学研究》,《科技史文集》第12辑,上海科学技术出版社1984年版,第61页;王锦光、洪震寰:《中国光学史》,湖南教育出版社1986年版,第29—32页。

在墨家之后,对平面镜成像作出深入探讨的是宋代沈括。他分析了小平面镜为何镜面稍有微凸的道理。他说:

古人铸鉴,鉴大则平,鉴小则凸。凡鉴洼则照人面大,凸则照人面小。小鉴不能全观人面,故令微凸,收人面令小,则鉴虽小而能全纳人面。^①

这段文字是对殷商以来制作平面镜的经验总结。承先启后,对后世铸镜有极大影响。

二、凹面镜成像

《墨经·经下》及其《经说下》对凹面镜成像有精辟论述。那时尚无焦点的概念,墨家将焦点与球面镜球心之间距离称为“中”。实验时,以自己的脸作物,以眼睛作屏,直接对着凹面镜看^②。因此,他们发现了极有趣的规律。

墨家忠实地记下了一个观察者由远而近走向凹面镜的所见情景。(图3-9)当观察者从远而近走向凹面镜时,发现自己缩小的倒像迎面而来;走到临近“中”时,像仍小而倒,但逐渐模糊,以至不可辨(因为像与人眼相距不及25厘米,小于人的视距,故而看不清);而走到“中”时,观察者就什么也看不见了(因为此时成像在人背后);当人走过“中”,再向镜面走,又看到一个放大的正像。《墨经》对此写道,凹面镜有两种像,“景一小而易,一大而正,说在中之外内。”

这个实验记录因实验中不用物与屏而没有记下球心与焦点间的成像情形。然而,以人的脸与眼当作光学实验的物与屏,在习惯于实

① 沈括:《梦溪笔谈》卷一九《器用》。

② 钱临照:《释墨经中光学力学诸条》,载北平研究院编:《李石曾先生六十周年纪念论文集》,1942年版;也见方励之主编:《科学史论集》,中国科技大学出版社1987年版。

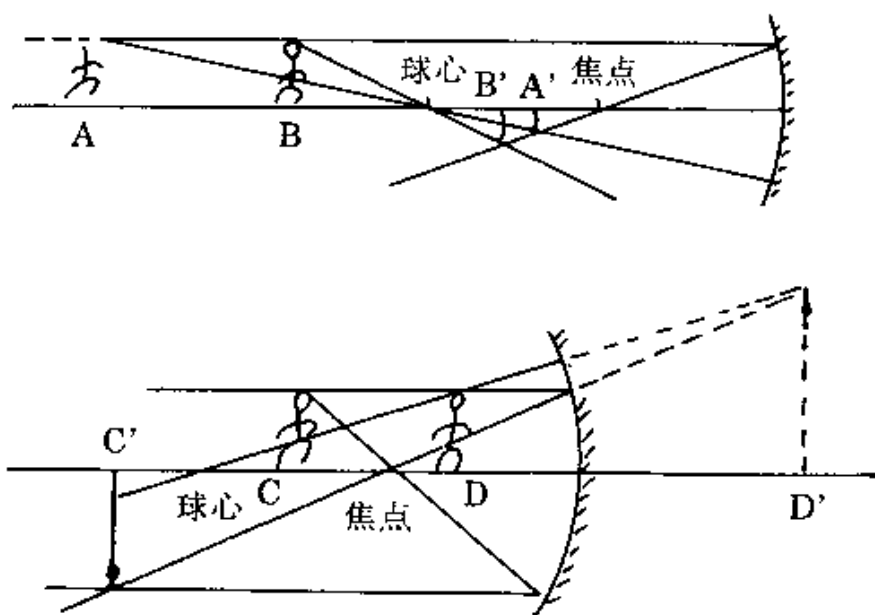


图 3-9 墨家凹面镜成像实验图

验条件齐备的近代,并非人人都曾想过或实验过的题目。英国化学物理学家冉赛(William Ramsay, 1852—1916年)在他的《基础几何光学》的习题中就有这样一道题^①。而墨家在二千多年以前就对此作出了实验性解答,这就不能不令人赞叹了。

对凹面镜焦点的认识,从实践到理论有一段很长的过程。在实践上,人们以阳燧取火,着火点即焦点,但人们未从理论上认识它。墨家以“中”字表述焦点与球心之间的一段距离。汉代已有关于焦点的朦胧认识。《淮南子·说林训》说:“凡用人之道,若以燧取火。疏之则弗得,数中则弗中,正在疏数之间。”以“疏数”二字表述“远近”距离关系,虽无精确定量,但表明人们对阳燧焦点位置所在已有所注意。第一个道出焦点与焦距概念的是沈括。他说:

阳燧面洼,向日照中,光皆聚向内。离镜一二寸,光聚为一

^① 钱临照:《论墨经中关于形学、力学和光学知识》,《科学通报》1951年第8期,第797—801页;也见《物理通报》1951年第3期,第97—102页。

点,大如麻菽,著物则火生。^①

如麻菽大小、会着火的那一点,现今称为焦点;它距镜面一二寸,这个距离,今称为焦距。沈括在探讨凹面镜成像过程中,还提出了“格术”概念:

阳燧照物皆倒,中间有碍故也。算家谓之格术。^②

然后,他以摇橹时橹担两端的运动方向相反,又以各种小孔成像实验中物与像互为倒立及其他生活实例,说明几何光学中通过焦点的光路发生“颠倒”变化的情形。看来,沈括所谓“碍”表述的正是今日焦点的概念。“格术”是他为解释小孔成像、球面镜成像的一种古代光学理论。清代郑复光将“格”训为“隔”^③;邹伯奇更作《格术补》,以为“格术”是几何光学^④。可见,沈括的“格术”思想影响之深远。^⑤

三、凸面镜成像

墨家将凹面镜称为“鉴洼”,将凸面镜称为“鉴团”。他们认识到,物体离凸面镜的近与远,是和像的大小相关的:“鉴者近,则所鉴大,景亦大;其远,所鉴小,景亦小。”但是,这些像(景)都是正像^⑥(图3-10)。

至此,我们对战国时期以墨翟为首的墨家和宋代沈括在光学史上的贡献都有了深刻的印象,他们标志了中国光学史发展的两个里

①② 沈括:《梦溪笔谈》卷三《辩证一》。

③ 郑复光:《镜镜论痴》卷一《原线》。

④ 邹伯奇:《邹征君遗书》。

⑤ 有人以为,“格术”及其“本末相格”是现代光学中等角空间变换。理虽通,但不合古代人的思想。参见李志超等:《中国古代光学的格术》,《物理》1985年第12期;也见关增建:《中国古代物理思想探索》,湖南教育出版社1991年版,第182—183页。

⑥ 《墨经·经下》与其《经说下》。

程碑。

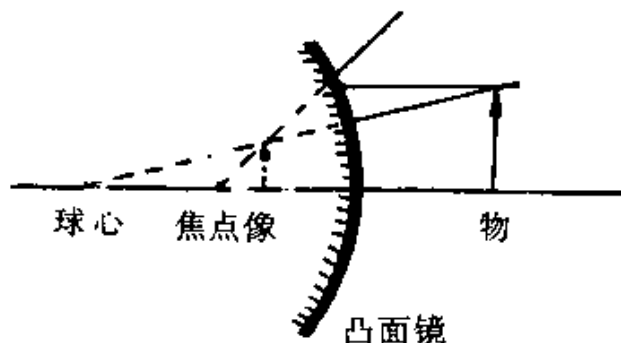


图 3-10 凸面镜成像示意图

第五节 有关色散的知识

一、雨虹的成因

复色光(例如太阳光)分解为单色光而形成光谱的现象称为色散。当太阳光通过棱镜、光栅,或者某些特殊形状的晶体都能实现色散。自然界中的雨虹是由太阳光进入雨滴层时的折射和反射而形成的一种彩色同心弧。

殷商时人们已对雨虹有所观察和描述。甲骨文中“虹”与“霓”二字都是照雨虹形状而画的。西周时,虹又称“蜺”或“蜺”,在人们观念中是淫乱之兆。《诗·鄘风·蜺》描述青年女子在东方有薄云、西方有虹的早晨私奔。诗人指责她只图个人婚恋、而不顾父母之命,因而私奔时天上出现虹。“雨虹饮水”及其表征阴阳错乱、婚姻失序的思想至少一直影响到唐宋年间。在这种思想支配下,人们特别注意雨虹产生的物理条件。

东汉蔡邕说:虹“常依阴云而昼见于日冲,无云不见,太阴也不

见,见辄与日相互率。以日西,见于东方”^①。南朝江淹(444—505年)在《赤虹赋·序》中指出,他曾对虹蜺“迫而察之”,发现在山岩峻险、溪水飞瀑之中,“正逢岩崖相照,雨云烂色,俄而雄虹赫然,晕光曜水,偃蹇山顶,舄弈江湄”^②。江淹的这次观察,不仅使他写下了《赤虹赋》,而且弄清了长期来人们以为“雨虹饮水”山间的物理原因:流水飞瀑而形成雨云,在太阳光照射下雨云成虹。

唐代,人们对雨虹的认识有一次飞跃发展。孔颖达在《礼记·月令》注疏中说:“若云薄漏日,日照雨滴则虹生。”孔颖达的同时代人董恩恭《咏虹诗》云:“日落雨飞余,横彩分长汉。”^③稍后,张志和(744—773年)叙述了人造雨虹的实验:“背日喷水成霓虹之状。”^④迄至九世纪,人造雨虹成了小儿游戏之一:“大中(唐宣宗年号,847—860年)末,京城小儿叠布蘸水,向日张之,谓揆晕。”^⑤唐以后,关于雨虹成因的记载更屡见不鲜。^⑥

在西方,虹被看成上帝构筑的美丽的桥。迄止十三世纪,英国罗吉尔·培根(Roger Bacon,约1220—1292年)才指出虹是日照雨滴而产生的。大约1270年,图林根(Thuringian)的修道士威特洛(Vitellio,或Witelo,1230—1275年)推测虹霓是由日光在雨滴中的反射和折射造成的^⑦。直到1637年,法国科学家笛卡尔(René

① 蔡邕:《月令章句》,汉魏遗书抄本;也见徐坚:《初学记》卷二《天部下·虹蜺》,中华书局1989年版,第38页。

② 徐坚:《初学记》卷二《天部下·虹蜺》,第39页。

③ 欧阳询:《艺文类聚》卷二《天部下·虹》引,上海古籍出版社1985年版,第39页。

④ 张志和:《玄真子·涛之灵》,四库全书本。

⑤ 苏鹗:《杜阳杂编》卷下;也见王说:《唐语林》卷七《补遗》,上海古籍出版社1985年版,第251页。

⑥ 详见沈括:《梦溪笔谈》卷二一《异事》;陆佃:《埤雅》卷二〇《释天·虹》;赵令畤(赵德麟):《侯鲭录》卷四;张居正:《张文忠公全集·文集第十一》;郎瑛:《七修类稿》卷五《天地类·虹蜺》,等等。

⑦ F. Cajori 著、戴念祖译:《物理学史》,内蒙古人民出版社1981年版,第28页。

Descartes, 1596—1650年)发表了一篇关于虹的研究报告,才最后对虹的成因作出科学结论。

二、晶体和露珠的色散

晶体色散也称晶体分光,它是由阳光穿过晶体时的折射引起的。古代人对此现象有许多记述。

各种奇特的晶体是炼丹家手中的珍宝。它们的形状特点及分光作用早在宋代之前已有零散记述。如果唐代对雨虹有飞跃性的认识,那么宋代对晶体色散有较为深刻的知识。

杜绾在《云林石谱》中就菩萨石写道:

嘉州峨嵋石正与五台山石相似,出岩窦中,名菩萨石,其色莹洁,状如太山、狼牙、信州、永昌之类。映日射之,有五色圆光。其质六棱,或大如枣栗,则光采微茫;间有小如樱珠,则五色灿然可喜。^①

菩萨石即石英,又称水晶。这里记述它六棱锐首,可见其外形为棱柱或棱锥。将它“映日射之”有“五色”现象,正是日光通过它的色散造成的。《云林石谱》成书于政和三年(1113年)。可见,该现象在十二世纪初已被观察认识。杜绾还记述了其他几种水晶的类似现象。在其后,寇宗奭也有同样的描述。^②

但是,南宋程大昌(1123—1195年)在《演繁露》中转引《杨文公谈苑》的有关描述在时间上更值得我们注意。杨文公,即杨亿(约生活于十至十一世纪之交),字大年,在真宗朝(998—1022年在位)“掌内外制,有重名,为天下学者所伏”^③。《杨文公谈苑》就菩萨石之类晶体

① 杜绾:《云林石谱》卷下《菩萨石》、《石绿》,卷上《英石》,四库全书本。

② 李时珍:《本草纲目》卷八《金石部》引。

③ 《杨文公谈苑》,《说郛》,商务印书馆本,卷二一。

写道：“日射之，有五色，如佛顶圆光。”^① 可惜该书只见后人辑本，载于《说郛》之中。杨忆发现晶体分光比杜绾、寇宗奭要早约一个世纪。

在西方，牛顿以三棱镜发现分光现象是在 1666 年。就发现晶体分光现象本身而言，中国人至少比牛顿早 600 年。但是，揭示晶体分光的本质或其物理原因，是牛顿的功劳。

有趣的是，早在六世纪，庾信(513—581 年)在其诗中描述了球形冰的色散现象：“冰珠映九光。”^② 程大昌又发现了露珠的色散现象，他写道：

凡雨霁或露之未晞，其余点缀于草木树叶之末，欲坠不坠，则皆聚为圆点，光莹可喜。日光入之，五色俱足，闪烁不定。是乃日之光品着色于水，而非雨霁有此五色也。峨眉山佛能现此异，则不得而知。此之五色，无日则不能自见，则非因峨眉有佛所致也。^③

在这里，露珠、冰珠和晶体一样起分光作用。程大昌思想高明之处在于他第一次明确指出，色散的彩光是日光通过露珠而形成的，各种彩光原属“日之光品”，“无日则不能自见”。他除了没有说出露珠对日光各种彩色的折射率不同之外，几近露珠分光问题的本质。

除了色散现象外，人们对晶体的变色现象(Change of Colours)和变彩现象(Play of Colours)也有所认识。唐末杜光庭就西周卞和献玉或和氏璧的传说写道：凡玉“侧而视之色碧，正而视之色白”^④。明代，大约比李时珍稍早的顾荐在《负暄录》中写道：“有夹胎玛瑙，正

① 程大昌：《演繁露》卷九《菩萨石》。

② 《庾子山集》卷四《诗·郊行值雪》。

③ 《演繁露》卷九。

④ 杜光庭：《录异记》，载《道藏·洞玄部·记传类》，《说郛》(宛委山堂本)第一一八卷有简录。本文转引自陆学善：《中国晶体学史料撮拾》，《科技史文集》第 12 辑，第 18 页。

视莹白,侧视则若凝血,一物二色也。截子玛瑙,黑白相间。合子玛瑙,漆黑中有一白线间之。”^①所谓“夹胎玛瑙”等物,都是在它淀积形成期间夹有杂质的石英。它们的变色或变彩现象是由于晶体内杂质反射光的干涉造成的。转动晶体或从不同方向看晶体,就改变了干涉光的颜色。

色散现象不仅可以由不同色光的折射率不同所致,也可以由光的衍射或干涉所形成。张华《博物志》曾记述一种“有廉纒”的虫,“在阴地色多绀绿,出日光中变易,或青或绿、或丹或黄、或红或赤”,又记述“孔雀毛亦随光色变易”的情形^②。唐武后时,“安乐公主使尚方合百鸟毛织二裙,正视为一色,傍视为一色,日中为一色,影中为一色”^③。这些色散现象正是由“廉纒”、羽毛的衍射引起的。

第六节 大气光象

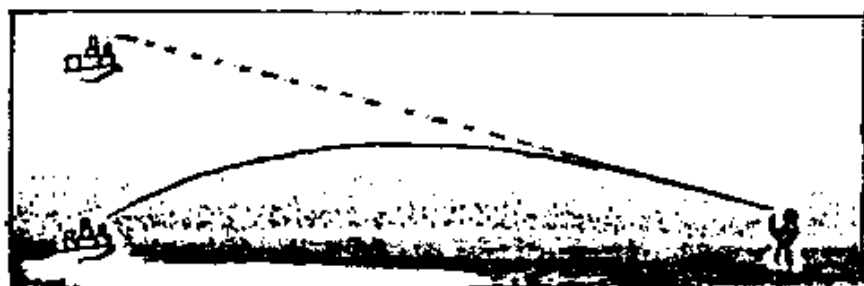
一、海市蜃楼

海市蜃楼,简称海市,也称蜃景(Mirage)。当光线经过不同密度的空气层而发生折射、甚而全反射时,将远处景物显示在空中或地面而造成奇异幻景。这种现象常发生在海边和沙漠地带。发生在海边,为上现蜃景,即在空气中形成正立的幻景;发生在沙漠地带为下现蜃景,即在地面形成倒立的幻景。因其是倒影,人们往往以为远处有水,故又称其为“水影”(图 3-11)。

① 李时珍:《本草纲目》卷八《金石部·石之二》引。

② 张华:《博物志·佚文》,中华书局校点本,1980年版,第133页;也见《太平御览》卷九五〇引。

③ 《新唐书》卷三四《五行志》,中华书局校点本,第三册,第878页。



上现



下现

图 3-11 蜃景

秦汉时期已有海市蜃楼的记载^①。二十四史中的“灾祥志”或“五行志”更将其作为灾难的征兆之一，不断地予以记载。史官们记下了沿海居民、远航船夫所见海上蜃景，也记下了西北大陆所见陆地蜃景^②。沈括也曾记述道：“登州海市，时有云气，如宫室、台观、城堞、人物、车马、冠盖，历历可见。”^③

虽然有大量的蜃景记载，但长期来认为它的出现是由于海上一种神物“蜃”（或说其为蛟龙，或说其为大蛤）吐气的结果。直到明清时

① 见《史记·天官书》、《汉书·天文志》；范正敏：《通斋闲览》（《说郭》卷三二，商务印书馆本）：“汉时有人奉使过海，忽见汉家宫阙台殿如在目前，使人因具衣冠，向阙而拜。须臾，风驰舟行，遂迷所在。”

② 如《新唐书》卷三六《五行志》，《旧唐书》卷三七《五行志》，王说：《唐语林》卷八《补遗》，庞元英：《文昌杂录》卷二，陈霆：《两山墨谈》卷一一，陆容：《菽园杂记》卷九，方以智：《物理小识》卷二《地类》，等等。

③ 沈括：《梦溪笔谈》卷二一《异事》。

代才有一些接近科学的推测。

明代陆容说：“所谓楼台，所谓海市，大抵皆因山川之气掩映日光而成，固非蜃气、也非神物。”^① 其中，“气掩映日光”一语多少揭示了蜃景形成的大气条件。

明代郎瑛坚决反对海市为鬼怪之说，他从蜃景有规律的出现时间、地点，情状相似性等方面提出，“或新结气空中，遇天地缊，则随气以见”^②。这一说法也多少可以解释蜃景中漂浮不定的虚像。

明末清初，揭暄在解释蜃景时说：“气映而物见”，“气变幻，则所照之形亦变幻”^③。除了没有说出大气折射或全反射等物理要点外，他几乎接近蜃景产生的实质。蜃景与大气层和空气流动甚有关系。大气疏密程度一旦改变，折射路径随之变化，蜃景就可能立即消失。微风气流，又造成蜃景的变幻莫测。

二、峨眉宝光

“峨眉宝光”、“峨眉佛光”、“金顶祥光”是在高山顶上见到的光学奇景。在我国历史上于四川峨眉山所见居多，故而如是称之。它又称对华、彩光环、布罗肯光环(Brocken bow)或山地宝光。西方所谓布罗肯光环是以德国哈尔兹山脉的最高峰布罗肯命名的，其海拔为1142米。四川峨眉山主峰万佛顶的海拔为3099米。实际上在许多高山顶上都能见此奇景，甚至于在云层上方阳光中飞行的飞机上也偶有所见。实际上，它是射进云雾表层的太阳光的衍射光环。当山顶上观察者头部与其距离较近的下方云层或雾带上的投影正好落在该衍

① 陆容：《菽园杂记》卷九《蜃气楼台之说》。

② 郎瑛：《七修类稿》卷四—《事物类·海市》。

③ 方以智：《物理小识》卷二《地类》“海市山市”条揭暄注文。

射光环中心时,这奇景尤其令人发生兴趣与惊讶。

宋代范成大于淳熙丁酉年(1177年)详细记录了他游峨眉山时所见到的宝光:

登(峨眉)天仙桥至光明岩……忽云出岩下旁谷中,即雷洞山也。云行勃勃如队仗,既当岩则少驻。云头现大圆光,杂色之晕数重,倚立相对,中有水墨影,若仙圣跨象者。碗茶顷,光没,而其旁复现一光如前,有顷亦没。云中复有金光两道,横射岩腹,人亦谓之“水现”。日暮,云物皆散,四山寂然……。丙申,复登岩,眺望岩石,……俄氛雾四起,混然一白,僧云“银色世界”也。少顷,大雨倾注,氛雾辟易。僧云“洗岩雨也,佛将大现”。兜罗锦云复布岩下,纷郁而上,将至岩数丈辄止,云平如玉地。时雨点犹余飞,俯视岩腹,有大圆光,偃卧平云之上,外晕三重,每重有青黄红绿之色光,至正中,虚明凝湛。观者各自见其形,现于虚明之处,毫厘无隐,一如对镜。举手动足,影皆随形,而不见旁人,僧云“摄身光也”。……凡佛光欲现,必先布云,所谓“兜罗锦世界”。①

高空太阳光与高山云雾雨滴是宝光产生的必要条件。范成大正确地记为“凡佛光欲现,必先布云”。“至正中,虚明凝湛”,表述了衍射光环中心的暗影,出现于虚明之处的“摄身光”正是观察者本身在衍射环心的投影。至于衍射光环与彩色变化的表述都一清二楚。只差衍射等近代光学道理未言明罢了。明代陆深(1477—1544年)将宝光出现概述为“见于云日映射之际”②,真是简洁明了。

① 范成大:《吴船录》卷上,四库全书本。

② 陆深:《蜀都杂抄》,丛书集成初编本。

三、小儿辩日

“小儿辩日”叙述两个儿童争论太阳究竟在早晨还是在中午距地面近的命题。这个有趣的光学故事在中国流传了几千年。故事出自《列子·汤问》：

孔子东游，见两小儿辩斗，问其故。一儿曰：“我以日始出时去人近，而日中时远也。”一儿以日初出远，而日中时近也。一儿曰：“日初出大如车盖，及日中则如盘盂。此不为远者小而近者大乎？”一儿曰：“日初出沧沧凉凉，及其日中如探汤。此不为近者热而远者凉乎？”孔子不能决也。两小儿笑曰：“孰为汝多知乎？”

这是一个比较复杂的光学问题。孔子不能断其是非，理所当然。用照相机拍照的太阳照片，早晨与中午同样大，而眼睛所以会有太阳晨大午小的感觉，主要是：（1）背景的衬托。早晨地平线远处的树木、房屋小得看不清；红日升起，与之比较就显得大。而中午太阳在高空顶，无可比之物，因而显得小；（2）光渗现象。清晨，大地与其周围空间尚黑，中午明亮。背景越黑而物体越亮，视网膜上像的轮廓就越大，这称为光渗。早晨在海平面见又红又大的太阳就是这个原因；（3）早晨，平视太阳，人眼位置正常；中午要仰视太阳，眼球凸鼓。在鼓凸的眼球内视像比正常眼球的小；（4）早晨与中午相比，阳光通过大气中较厚的空气层，视觉就较模糊，因而造成早晨太阳大的视错觉；（5）视觉中的天穹并非一个圆，而是扁球。在头顶天空高远，四周天空仿佛低近。远物投影小，近物投影大。至于另一儿童提出太阳晨凉午热，那是因为，中午太阳在天顶，阳光直射地面，穿过大气层薄，因而辐射热大部分为地面吸收，气温升高。

历史上许多学者对小儿辩日问题试图作答。东汉桓谭^①和王充各以其理主张“日中近而日出入远”^②。虽不合科学^③,但王充曾指出,“日中光明,故小;日出入时光暗,故大”^④。这个解释同前述光渗现象,是有道理的。张衡解释说:“日之薄地,暗其明也。由暗视明,明无所屈,是以望之若大。方其中,天地同明,明还自夺,故望之若小。”^⑤这个解释也与光渗现象类似。晋代束皙较准确地回答了这个问题。他认为,太阳晨与午一样大,距离也相等,并以视幻觉、太阳亮度,眼球鼓凸与背景衬托等方面作出较全面的解释:

以为旁方与上方等。旁视则天体存于侧,故日出时视日大也。日无小大,而所存者有伸仄:仄而形小,伸而体大,盖其理也。又日始出时色白者,虽大不甚;始出时色赤者,其大则甚,此终以人目之惑,无远近也。且夫置器广庭,则函牛之鼎如釜;堂崇十仞,则八尺之人犹短,物有陵之,非形异也。夫物有惑心,形有乱目,诚非断疑定理之主。^⑥

在古代光学史上,束皙的解释无疑是一个重要成就。此后,后秦姜岌以“地有游气”(指大气及其中尘灰微粒)^⑦、南朝祖暅提出眼睛的仰视与平视有别^⑧,等等,对此作出了正确的解释。直至清末,后继解释者不断。“小儿辩日”几乎成为科学之谜,它所引起的讨论之多,延续时间之长,也是中国科学史上罕见的例子。

① 《桓子新论》。

②④ 王充:《论衡·说日》。

③ 严格地说,即使同一天、同一地点,太阳高度与日地距离均应随时而改变。但是,这小小的差数是不能以光学和热学现象解释的。有关这个差数的计算方法及数据,详见戴文赛:《中午太阳是否比早晚离我们近》,载《光明日报》1955年8月15日;《科学副刊》,转载于杨伯峻:《列子集释》,中华书局新编诸子集成本,1985年版,第169—171页。

⑤ 张衡:《灵宪注》,《说郛》宛委山堂本,第六〇卷。

⑥⑧ 《隋书》卷一九《天文志》,中华书局校点本,第二册,第513页。

⑦ 同上书,第515页。

第四章 电学和磁学

指南针的发明并最早将它运用航海,这是世所公认的古代中国的成就之一。本章着重叙述古代人关于静电和静磁方面的知识。

第一节 电学知识

一、对雷电的认识

殷商甲骨文中“雷”字,西周人以“雷”和“电”二字分别表述大气放电的声音与闪光。对雷电现象的观察使人们知道,先见闪电、后闻雷声^①。在历史上大量的雷电现象记载中,不仅有线状闪电,还有联珠状闪电和球状闪电^②。人们将雷电的成因总是解释为阴阳二气激烈摩擦与碰撞的结果。《淮南子·墜形训》:“阴阳相薄为雷,激扬为电。”王充在《论衡·雷虚篇》中指出,“阴阳分争则相校軫,校軫则激

① 例如,《南齐书·五行志》:“建元元年十一月庚戌,电光,有倾雷鸣,久而止。”

② 《张文忠公全集·文集第十一》:“天微雨,忽流火如球,其色绿,后有小火点随之,从雨中冉冉腾过予宅,坠于厨房水缸之中,其光如月。”又,姚宽:《西溪丛语》卷上记述火球如车轮;陆深:《愿丰堂漫书》记述大雷之前火球相逐,等。

射”而为雷电。他统计性地比较了一年四季中雷电的分布,分析了其中的原因。他的见解与古罗马卢克莱修(Lucretius,前99—前55年)的看法基本相同。^①

特别有意义的是,王充曾详细论证“雷者乃火”。他说:

以人中雷而死,即询其身,中头则须发烧焦,中身则皮肤灼煇,临其尸上闻火气,一验也;道术之家,以为雷烧石色赤,投于井中,石焦开寒,激声大鸣,若雷之状,二验也;人伤于寒,寒气入腹,腹中素温,温寒分争,激气雷鸣,三验也;当雷之时,电光时见,大若火之状,四验也;当雷之击,时或燔人室屋及地草木,五验也。^②

在这五种检验雷电为火的论证中,除了第“三验”为中国特有的中医理论外,其余四验都是科学的。这四验中的现象分别为:“火气”即硫磺气味或怪味,爆裂声响,发光,杀死动物、烧毁草木屋宇。在王充之后1600年,美国富兰克林(B. Franklin, 1706—1790年)在1749年以风筝实验证明地上人工电与天上闪电本质上是一致时,提出了十二种证据,其中四种与王充完全相同。1737年,富兰克林也认为闪电就是一种有怪味的火。^③

尖端放电现象早在汉代就被发现。元始年间(公元1—5年),汉朝与车师后王国战争中,车师后王姑句的兵士观察到“姑句家矛端生火”^④。晋惠帝永兴元年(304年),成都王发动叛乱,陈兵邺城,夜里“戟峰皆有火光,遥望如悬烛”^⑤。至于塔尖放电,在古代典籍中也屡

① 卢克莱修著、方书春译:《物性论》,三联书店1958年版,第410—415页。

② 王充:《论衡·雷虚》。

③ F. Cajori 著,戴念祖译:《物理学史》,内蒙古人民出版社1981年版,第125—126页。

④ 《汉书》卷九六下《西域传》,中华书局校点本,第一二册,第3924页。

⑤ 干宝:《搜神记》卷七。

有记述。

在雷电灾害中,古代人已初步形成两类不同导电性质的物体的概念。《南齐书·五行志》记载一次雷电轰击寺庙,“刹上四破,电火烧塔下佛面,而窗户不异”^①。沈括曾记述一次雷电袭击民宅,宅内一藏诸器之漆盒,“其漆器银扣者,银悉熔流在地,漆器曾不焦灼;有一宝刀极坚刚,就刀室中熔为汁,而室亦俨然”^②。其后庄绰(字季裕,生活于十一至十二世纪之际)也曾观察到类似的雷电袭击寺庙的事^③。根据历史上种种记载,方以智总结说:“雷火所及,金石销熔,而漆器不坏。”^④。

在雷电通过金属或含金属的涂料时,不仅由于雷电的高能量、更由于雷电的高频电磁感应会在导体上产生涡流,因此,立刻融化了粉以金属涂料的佛面、银器、宝刀。而皮革、漆器和干燥的木料为非导体,它们依然如故。方以智虽不知更深的物理原因,但他作出了金属与漆是对雷电有不同性质的两类物体的结论。在他之后,由于电学的发展,人们才将这两类物体分别命名为导体和绝缘体。“导体”一词是十八世纪三十年代格雷(Stephen Gray, 1670—1736年)引入电学之中的。^⑤

二、摩擦起电

摩擦琥珀、玳瑁的静电吸引现象曾引起古代人的极大注意。殷商时代,人们已将琥珀、绿松石当作装饰品。东汉,人们将琥珀雕成动物

① 《南齐书》卷一九《五行志》,中华书局校点本,第二册,第379页。

② 沈括:《梦溪笔谈》卷二〇《神奇篇》。

③ 庄季裕:《鸡肋篇》卷下,四库全书本。

④ 方以智:《物理小识》卷二《风雷雨雹类·火异》。

⑤ 戴念祖:《我国古代关于电的知识和发现》,《科技史文集》第12辑,第78—85页。

以供玩赏。中医琥珀入药也有悠久的历史。由于其颜色美观,有一定透明度,因此被视为珍宝,价格昂贵。玳瑁是一种类龟的海生爬行动物,其甲壳也叫玳瑁,或同音词“顿牟”,“瑇瑁”。妇女以玳瑁作簪,富贵人家以玳瑁为床^①。琥珀,玳瑁的广泛使用,其静电吸引力自然被人们所发现。汉代纬书《春秋考异邮》载“玳瑁吸啮”^②，“啮”即芥草。特别是,人们以它们的这种性质来鉴别其真伪。刘宋时雷斅《炮炙论》说:“琥珀如血色,以布试热,吸得芥子者真也。”^③南朝陶宏景《名医别录》中指出,琥珀“惟以手心摩热拾芥为真”。^④

三国时虞翻(164—233年)关于静电、静磁的记述特别有意义。他于13岁之时听人说:“虎珀不取腐芥,磁石不受曲针。”^⑤这不仅表明,它们的静电、静磁现象为人所周知,而且还懂得,静电并不吸引含水份的腐烂芥草,磁石也不吸引如金一类软金属物质。

有趣的是,古人仍然以气解释静电和静磁的吸引现象。王充写道:

顿牟掇芥,磁石引针,皆以其真是,不假他类。他类肖似,不能掇取者,何也?气性异殊,不能相感动也。^⑥

在王充看来,“气”性相同,就可以彼此感动,相互吸引。东晋郭璞(276—324年)又写道:

磁石吸铁,瑇瑁取芥,气有潜通,数亦宜会,物之相投,出乎意外。^⑦

在郭璞看来,它们的“气”可以相互媿通。这些猜测性的思辨解释

① 戴念祖:《我国古代关于电的知识和发现》,《科技史文集》第12辑,第78—85页。

② 见孙穀辑:《古微书·春秋纬》。

③④ 李时珍:《本草纲目》卷三七《木部·琥珀》引。

⑤ 《三国志》卷五七《吴书·虞翻传》注引,中华书局校点本,第五册,第1317页。

⑥ 王充:《论衡·乱龙》。

⑦ 郭璞:《山海经图赞·北山经第三》,古典文学出版社1958年版。

也颇类似卢克莱修以一种看不见的“流”阐述磁石相吸的现象一样。^①

值得注意的是,古代人总是将琥珀、玳瑁的静电性与磁石的静磁性相提并论,或许人们一开始就注意到它们的物理关联性和共同性。此外,除琥珀、玳瑁之外,中国人还发现了同时期西方人所未知的静电现象。

晋代张华首先发现了木梳或漆木梳在梳理头发时因摩擦产生的静电火花和放电声^②。唐代段成式首先发现猫皮摩擦的静电火花^③。宋代张邦基又发现孔雀毛摩擦后的静电吸引,以此用之作帚^④。明代张居正对皮革和丝绸的摩擦起电现象记载道:

凡貂裘及绮丽之服皆有光。余每于冬月盛寒时,衣上常有火光,振之迸炸有声,如花火之状。人以为皮裘丽服温暖,外为寒气所迫,故博击而有光。理或当尔。^⑤

与张居正同时代的都邛写道:

吴绫出火。吴绫为裳,暗室中力持曳,以手摩之良久,火星直出。^⑥

我国素称丝绸之国,张居正、都邛的记述当为丝绸工人早已熟悉,只是记成文字稍晚些罢了。

在西方,古希腊、古罗马直至文艺复兴时期,人们只知道琥珀的静电吸引性。从张华到都邛的发现在西方是在1600年之后才陆续为人所知。英国吉尔伯特(W. Gilbert, 1540—1603年)在1600年发表

① 卢克莱修著、方书春译:《物性论》,第410—415页。

② 张华:《博物志》卷九《杂说上》,范宁校点本,中华书局1980年版,第106页。

③ 段成式:《酉阳杂俎》续集卷八《支动》,中华书局校点本1981年版,第277页。

④ 张邦基:《墨庄漫录》卷一,丛书集成初编本。

⑤ 《张文忠公全集·文集第十一》。

⑥ 都邛:《三余赘笔》,丛书集成初编本。

论磁的著作,他发现玻璃、硫磺、火漆和各种宝石经摩擦后具有像磁体一样的吸引力。十七世纪时,波义耳(R. Boyle, 1627—1691)才观察到头上的假发经梳理后的起电现象,他比张华晚约 1300 年。盖利克(Otto von Guericke, 1602—1686 年)发现了与段成式相同的现象,而牛顿才发现丝绸摩擦起电。

颇有趣的是,东西方人在电学上的认识过程恰好殊途同归。古代中国人一直认为天空闪电是电,“电”字就是从雷电现象而来的。但他们从未认识到上述各种摩擦起电现象是电,而将它们归属为火或光一类。张华将其发现的静电火花与冷光置于同属,方以智将它们和冷光、石油火光和其他各种火统称为“火异”。虽然近代科学证实电的本质是光,但在未将天上雷电与地上各种人工摩擦电统一认识之前,这种古代的意见仅是表观类比而已。在西方,与中国古代恰相反,各种人工摩擦电被看作是电,而天空闪电在富兰克林实验之前一直未被看作是电。西方电(electricity)一词来自琥珀的希腊文 *ēlektron*。富兰克林冒生命危险以风筝实验证实这两者的统一确属科学史上之大事。在完成这步统一之后,经十九世纪电磁学的发展,人们才认识到电磁本质是光。如果近代科学是沿着中国的道路走下去,也必需要有一个富兰克林来证明人工摩擦的各种电是与人们已认识的天上闪电一致的,最后才能再证明张华、方以智等人统一于光的结论。

第二节 静磁学知识

一、磁体特性的发现

战国时期,人们已知道磁体的吸引性质。《管子·地数》将它记为

“慈石”。《鬼谷子·反应》篇记曰：“若慈石之引针。”《吕氏春秋·季秋纪·精通》篇载道：“慈石召铁，或引之也。”东汉高诱注曰：“石，铁之母也。以有慈石，故能引其子。石之不慈者，亦不能引也。”这大意是，铁是从矿石中提炼出来的，所以，石是铁之母。因此，具有磁性的石头，能吸引其儿子。这是早期人们对磁石吸铁的解释。“慈石”一词，因“慈石召铁，如慈母之招子，故名”之。^①

天然磁石内含杂质不同，其吸力大小也随之而异。古代人据其吸力将磁石分类：“四面吸铁一斤者，名延年沙”，“四面吸铁八两者，号曰续采石，吸铁四、五两者号曰磁石”^②。宋寇宗奭将磁铁分为“煇铁石”、“玄石”，前者能“吸连针铁”^③，后者大约是普通磁铁矿。由于它的吸引性，据说秦始皇造阿房宫曾用它作门，以防盗窃持铁器而入^④。晋将马隆在战斗中曾“夹道累磁石，贼负铁铠，行不得前。隆卒悉被犀甲，无所留碍，贼咸以为神”。^⑤

值得注意的是，汉代人已发现磁体的排斥作用。汉方士栾大斗棋，以磁石作棋子，“棋自相触击”^⑥；《淮南万毕术》载“慈石提棋”和“慈石拒棋”^⑦，前者为吸引，后者为排斥。为了制作这样的棋子，古代人可能发明了人造磁石的方法。据载，“取鸡血，作针磨铁捣之，以和磁石，用涂棋头，曝干之，置局上，即相拒不休。”^⑧这记载过于简单，其可靠性尚存疑窦^⑨。但南宋庄绰确曾“捣磁石，错铁末，以胶将其涂于瓢”。然后，将这样的两个瓢置之水面，“相去一二尺而跳跃，相就上

①② 李时珍：《本草纲目》卷十《金石部·慈石》引唐代陈藏器语。

③ 寇宗奭：《本草衍义》卷五。

④ 《史记》卷六《秦始皇本纪》，中华书局校点本，第一册，第256页《正义》引《三辅旧事》。

⑤ 《晋书》卷五七《马隆传》，中华书局校点本，第五册，第1555页。

⑥ 《史记》卷二八《封禅书》，或《汉书》卷一五上《郊祀志》。

⑦⑧ 刘安：《淮南万毕术》，清·孙冯翼辑本。各种不同辑本，文字稍有不同。

⑨ 洪震寰：《淮南万毕术及其物理知识》，《中国科技史料》1983年第3期，第34页。

下,宛转不止。”^①

古代人还发现磁体的其他特性。《淮南子·览冥训》：“若以磁石之能连铁也,而求其引瓦则难矣。”《淮南子·说山训》又指出,“磁石能引铁,及其以铜则不行也。”此外,磁石不引金与“惫铁”,即完全锈化了的铁。^②

古代人又发现,磁石的作用并不需要接触,而是在一段距离内就可以实现。汉代人称其为“磁石上飞”^③,晋代人称其为“隔阔潜应”^④。或许,古代人还观察到磁石在铜盆外还可以使盆内铁屑跳动,仿佛磁体作用不被其他金属阻碍,因而称这种现象为“磁石吸铁,隔碍潜通”^⑤。究竟什么东西方可以隔断磁作用呢?清代刘献庭(1648—1695年)终于发现了磁屏蔽作用的现象。他写道:

或问余曰:“磁石吸铁,何物可以隔之?”犹子阿孺曰:“惟铁可以隔耳。”其人去复来,曰:“试之果然。”^⑥

刘献庭的侄子阿孺知道,铁可以隔断磁体的作用。虽未记载如何“隔断”法,但经实验确有此事。从现在知识看,将铁放进接地的封闭金属壳或金属网笼之中,其外磁铁就不能吸引它了。这种作用称为磁屏蔽。它是在十九世纪下半叶,随着无线电的发明和应用之后才逐渐引起人们的注意。

① 庄绰:《鸡肋篇》卷中。

② 谭峭:《化书》卷二《琥珀》:“磁石不取惫铁。”

③ 《淮南子·说山训》。

④ 晋·郑思远撰:《真元妙道要略·证真篇第二》,见《道藏》第956册《洞神部·众术类》。

⑤⑥ 刘献庭:《广阳杂记》卷一。

二、司南

据考证,司南是最原始的磁性指向器^①。《论衡·是应》:“司南之杓,投之于地,其柢指南。”看来,它像一把杓子,置于光滑的用于拭占

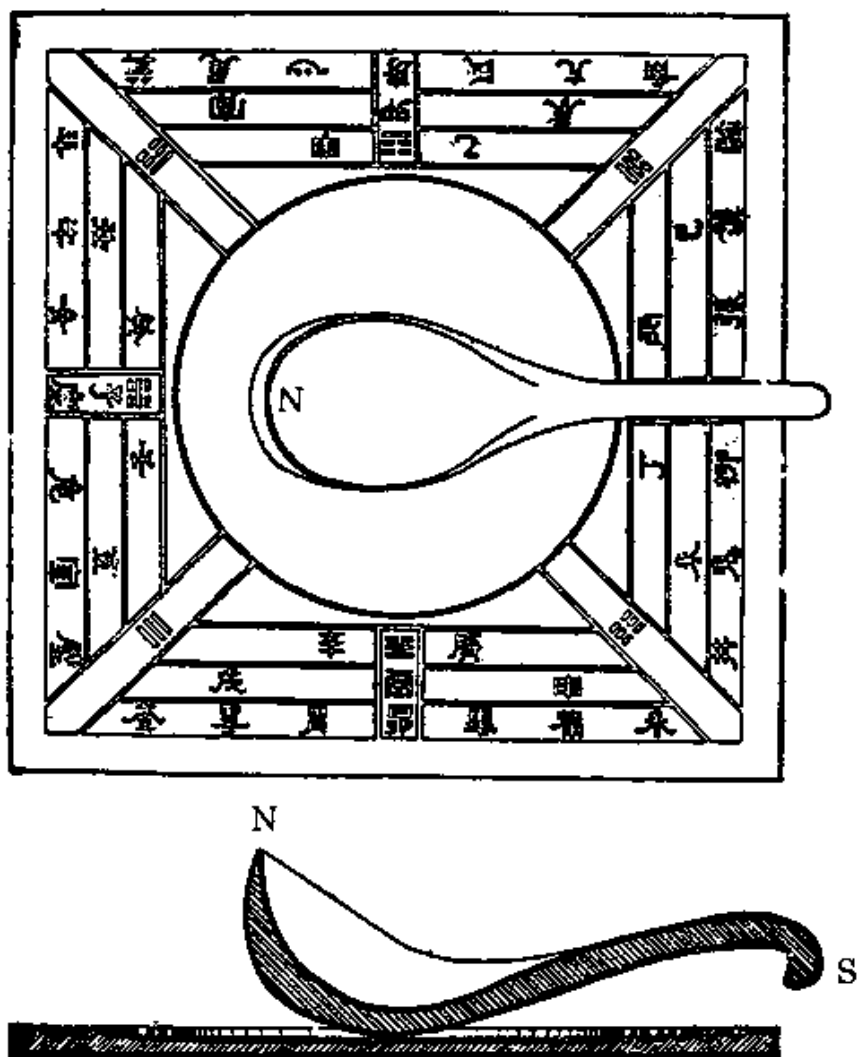


图 4-1 王振铎复原司南模型

^① 王振铎:《司南、指南针与罗经盘》,《科技考古论丛》,文物出版社 1989 年版,第 50—218 页。

的地盘上,杓把顺地磁方向南指(图4-1)。它在战国时期已经问世,《韩非子·有度》篇记有“先王立司南”之文字。

司南是否为磁性指向器,尚有不同学术意见:“司南”为天上北斗星,并非指向器^①;汉代司南为指向器,而先秦司南为测影木竿^②;司南是指向器,但并非投于地盘上,而是投于水银池中,《论衡》记述的“投之于地”的“地”字乃“池”字之误^③。对于这些看法,又有人提出了反驳意见。^④

三、指南鱼与地磁倾角的利用

宋代,磁学发展到古代科学史的高峰。人们发现了多种人工磁化的方法,也发明了多种形式的指南针。

由曾公亮(999—1078年)和丁度等人编纂的《武经总要》(成书于1044年)中记述了指南鱼的制作方法:

(指南)鱼法,以薄铁片剪裁,长二寸,阔五分,首尾锐如鱼形,置炭火中烧之,候通赤,以铁钤钤鱼首出火,以尾正对子位,蘸水盆中,没尾数分则止。以密器收之,用时置水碗于无风处,平放鱼在水面令浮,其首常南向午也。^⑤

在这记述中,除指南鱼的制作方法外,尤其令我们感兴趣的是,利用了地磁倾角以增强铁片的磁化程度。将鱼形铁片加热,可以瓦解铁片内无规则排列的磁畴;“蘸水盆中”淬火,则能产生马氏铁相变,

① 刘秉正:《司南新释》,《东北师大学报》(自然科学版)1986年第1期。

② 刘洪涛:《指南针是汉代发明》,《南开学报》1985年第2期。

③ 王锦光、闻人军:《〈论衡〉司南新考和复原方案》,《未定稿》(中国社会科学杂志社)1987年第6期;也见《科技日报》1987年4月2日。

④ 林文照:《关于司南形制与发明年代》,《自然科学史研究》第5卷(1986)第4期;又《天然磁体司南的定向实验》,《自然科学史研究》第6卷(1987年)第4期。

⑤ 曾公亮、丁度:《武经总要前集》卷一五。

使磁性矫顽力得以保持；“以尾正对子位(北)”，即将铁片放于地磁场南北方向，使磁畴排列具有方向性，因而可获得较高热剩余磁性；淬火时“没尾数分”，整块铁片在水中形成一倾斜方向。这就是，利用地磁倾角，使铁片和地磁场方向尽可能接近，以获得较佳的磁性。曾公亮等人虽不明其奥妙，但他们根据前人或同时代人制造指南鱼的经验而作的总结文字，确实与近代磁学理论完全吻合^①。这是世界上最早利用地磁磁化指南针的记载。

四、指南针的制造与安装方法

除了曾公亮记述的指南鱼并以地磁磁化的方法外，对于利用磁感应方法制造种种指南针，在宋代也是人所周知的事。沈括曾记述道：“方家以磁石磨针锋，则能指南”，“其中有磨而指北者”^②。他又说：“以磁石磨针锋，则锐处常指南，亦有指北者，恐石性亦不同”，“南北相反，理应有异，未深考耳。”^③人们在发现感应磁化的同时，还发现磁极性有南北不同。这一认识比汉代人“斗棋”前进了一大步。

如何安装指南针呢？沈括指出了多种方法：(1)水浮法。将针直接投放水面，利用水的表面张力使针浮起(参见图1-14)。然而，“水浮多荡摇”；(2)将针放于光滑的指甲或碗唇上。这样安装“运转尤速，但竖滑易坠”；(3)以“缕悬为最善”。其法“取新纩中独茧缕，以芥子许蜡，缀于针腰，无风处悬之”^④。在沈括之后，寇宗奭又补充了一种水浮法：将指南针穿过几根灯芯草，浮于水上。^⑤

南宋陈元靓作《事林广记》，发展了指南针制法，制造了“指南

① 李国栋：《中国古代磁学上的成就》，《物理》1974年第6期，第342—347页。

② 沈括：《梦溪笔谈》卷二四《杂志一》。

③④ 沈括：《补笔谈》卷三《药议》。

⑤ 寇宗奭：《本草衍义》卷五《磁石》。

鱼”、“指南龟”^①。“指南鱼”不同于曾公亮制法,它是将指南针装入木质鱼腹中而得名,将木片置水中而浮起、指向南方;“指南龟”是将指南针装入木质龟腹之中,以尖竹钉支撑龟的重心点,其转动而指南。

这些安装方法如图4-2。其中水浮法,包括曾公亮水浮指南鱼、沈括水浮指南针、陈元靓水浮木质指南鱼,为后来水罗盘的肇始;而缕悬法和钉尖支撑的指南龟为后来旱罗盘发展的肇始。作为堪舆家使用的罗盘、无论水罗盘或旱罗盘,都不会晚于十二世纪下半叶。

五、地磁偏角的发现

迄今所知,地磁偏角的发现至晚在十一世纪上半叶。它比沈括记述指南针制造法早半个世纪,而与曾公亮记述指南鱼的制法几乎同时。宋代杨维德的《荃原总录》(成书于1041年)写道:

匡四正以无差,当取丙午针,于其正处,中而格之,取方直之正也。^②

这意思是,要定四方的方位,必将指南针取丙位(图4-3)。待针停止摆动后,在丙位与午位之间“中而格之”即可。显然,这是堪舆家定地理方位的方法。既然指南针要取丙位,也就是人们发现了地磁偏角。这段文字和半个世纪后沈括的有关记述完全相同。沈括说:

方家以磁石磨针锋,则能指南,然常微偏东,不全南也。^③

杨维德与沈括关于地磁偏角的结论是吻合一致的。沈括之后,寇宗奭又写道:

① 陈元靓:《事林广记》卷一〇《神仙幻术》。参见王振铎:《司南指南针与罗经盘》,《科技考古论丛》,文物出版社1989年版,第150—153页。

② 杨维德:《荃原总录》卷一,转引自郭沫若主编:《中国史稿》第五册,人民出版社1983年版,第620—621页。

③ 沈括:《梦溪笔谈》卷二四《杂志一》。

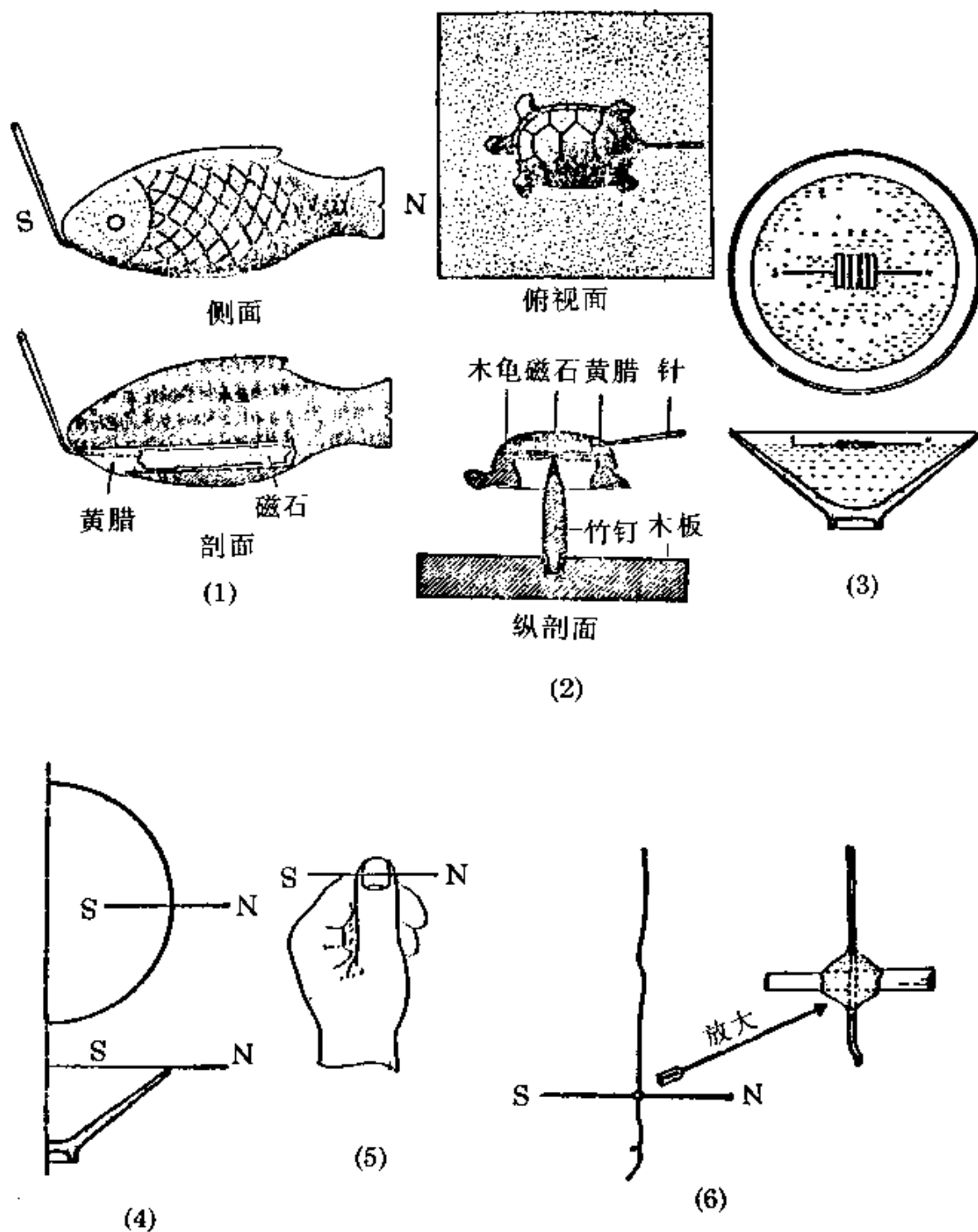


图 4-2 指南针安装法复原示意图

(1)《事林广记》载指南鱼；(2)《事林广记》载指南龟；(3)水浮指南针；
 (4)置碗唇上的指南针；(5)置指甲上的指南针；(6)缕悬指南针。

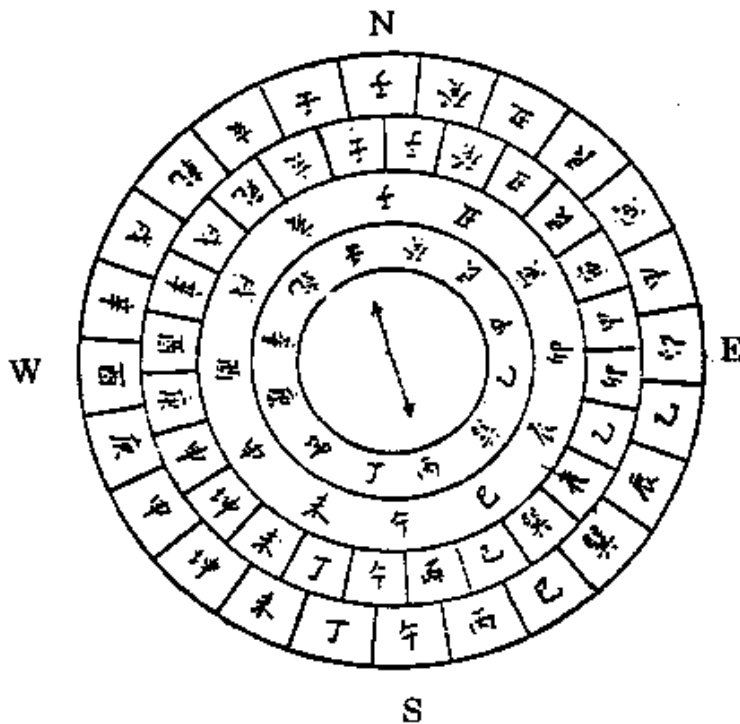


图 4-3 罗盘方位及指南针指向示意图

以针横贯灯心，浮水上，亦指南，然常偏丙位。^①

此自之后，有关记载屡见不鲜^②。但是，这些较早的记载均未留下具体的磁偏角数据。明代王子朱载堉在 1581 年之前几年或十几年测得北京地磁偏角为南偏东 $4^{\circ}48'$ ^③。他还知道地磁偏角随地理位置的不同而不同，指出“八方之地各有偏向”。^④

六、航海用指南针与罗盘

关于在航海中使用指南针的最早文字记述见之于北宋宣和元年

① 寇宗奭：《本草衍义》卷五。

② 如，程棗：《三柳轩杂识》；曾三异：《因话录》，等等。

③ 戴念祖：《朱载堉——明代的科学和艺术巨星》，人民出版社 1986 年版，第 220—221 页。

④ 朱载堉：《律历融通》卷四《方正》。

(1119年)成书的朱彧的《萍洲可谈》。该书记述了从元符二年(1099年)到崇宁元年(1102年)广州航海业发达的盛况。其中写道:

舟师识地理,夜则观星,昼则观日,阴晦观指南针。^①

可见,至迟十一世纪末中国人已在航海中使用指南针。宣和五年(1123年),徐兢奉使高丽,回国后撰《奉使高丽图经》一书。徐兢继朱彧之后又一次记述了指南针在航海中的运用:

舟行过蓬莱山之后,……是夜,洋中不可住维,视星斗前迈。

若晦冥,则用指南浮针,以揆南北。^②

如果说,以上记述仅表明指南针只是航海中辅助导航仪器,那么《诸蕃志》的记述就更值得我们注意了。南宋初年,宋宗室赵汝适提举福建路市舶司,撰《诸蕃志》,记述了沿海通商之情:“舟舶往来,惟以指南针为则,昼夜守视唯谨,毫厘之差,生死系矣。”^③可见,十二世纪初指南针已成为航海专用而且是主要的导航仪器了。

南宋咸淳十年(1274年),吴自牧完稿《梦粱录》一书。该书旨在记述都城临安(今杭州)盛况,也记述了商舶从浙江出海情形。其中写道:“风雨晦冥时,惟凭针盘而行,乃火长掌之,毫厘不敢误差,盖一舟人命所系也。”“海洋近山礁则水浅,撞礁必坏船。全凭南针,或有少差,即葬鱼腹。”^④这里所谓“针盘”,也就是航海罗盘。它是迄今所知最早的航海罗盘的文字记述。自南宋末始,由于航海罗盘的运用,航海中不同地方的不同针位点的连结线、即“针路”,也在十三世纪末的典籍中有了记载。^⑤

① 朱彧:《萍洲可谈》卷二。

② 徐兢:《宣和奉使高丽图经》卷三四《半洋焦》。

③ 赵汝适:《诸蕃志》卷下。

④ 吴自牧:《梦粱录》卷一二《江海船舰》。

⑤ 元·周达观撰、夏鼐校注:《真腊风土记校注·总叙》,中华书局1981年版,第15页;也见王振铎:《中国古代磁针的发明和航海罗经的创造》,《科技考古论丛》,文物出版社1989年版,第219—228页。

值得注意的是,堪輿家用罗盘比航海家用罗盘要早得多。据《考古》刊载,在江西临川宋墓中发掘“张仙人瓷俑”2件,该俑左手抱一罗盘置右胸前(图4-4)。瓷俑制作于1197年之前^①。从瓷俑中罗盘看,这是一件旱盘,也就是以缕悬指针的罗盘。可见,十二世纪下半叶旱罗盘已经成型并被人们普遍采用。宋曾三异《因话录》载:“地螺,或有子午正针,或用子午丙壬间缝针。”^②“地螺”即地罗,是为罗盘的最早文字记载。曾三异生活于十二至十三世纪之间,淳熙年间(1174—1189年)中乡贡,端平年间(1234—1236年)授承事郎。可见,张仙人瓷俑中的罗盘问世不久,就被曾三异在《因话录》中记录下来了。过去有人认为,旱罗盘是从外国传入中国的^③,张仙人瓷俑的发现修正了这样的看法。

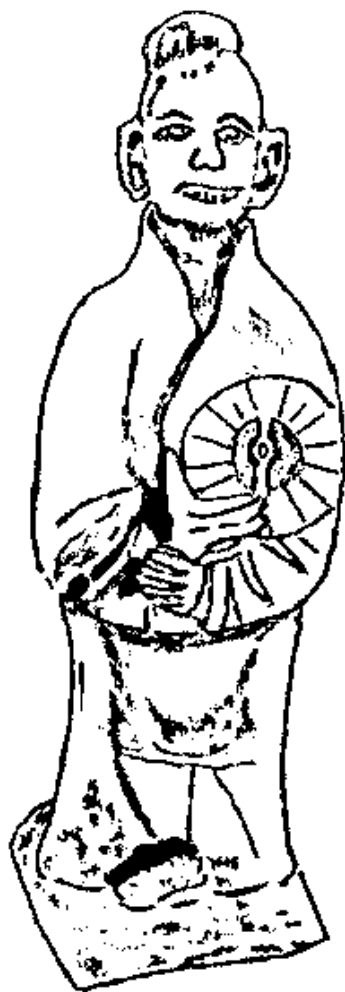


图4-4 张仙人瓷俑(江西临川宋墓出土)

乾隆三十一年(1766年)敕撰的《皇朝礼器图式》中,有一图表明,当时已将指南针或罗盘针装置于平衡环之中(图4-5)^④。平衡环是汉代长安巧工丁缓发明的,当时称为

① 陈定荣,徐建昌:《江西临川县宋墓》,《考古》1988年第4期,第329—334页。

② 曾三异:《因话录》,《说郭》商务印书馆本卷一九、宛委山堂本第三三卷,两种版本文字略有不同。

③ 王振铎:《司南指南针与罗经盘》,《科技考古论丛》,文物出版社1989年版,第199—201页。

④ 《皇朝礼器图式》卷三,四库全书本。

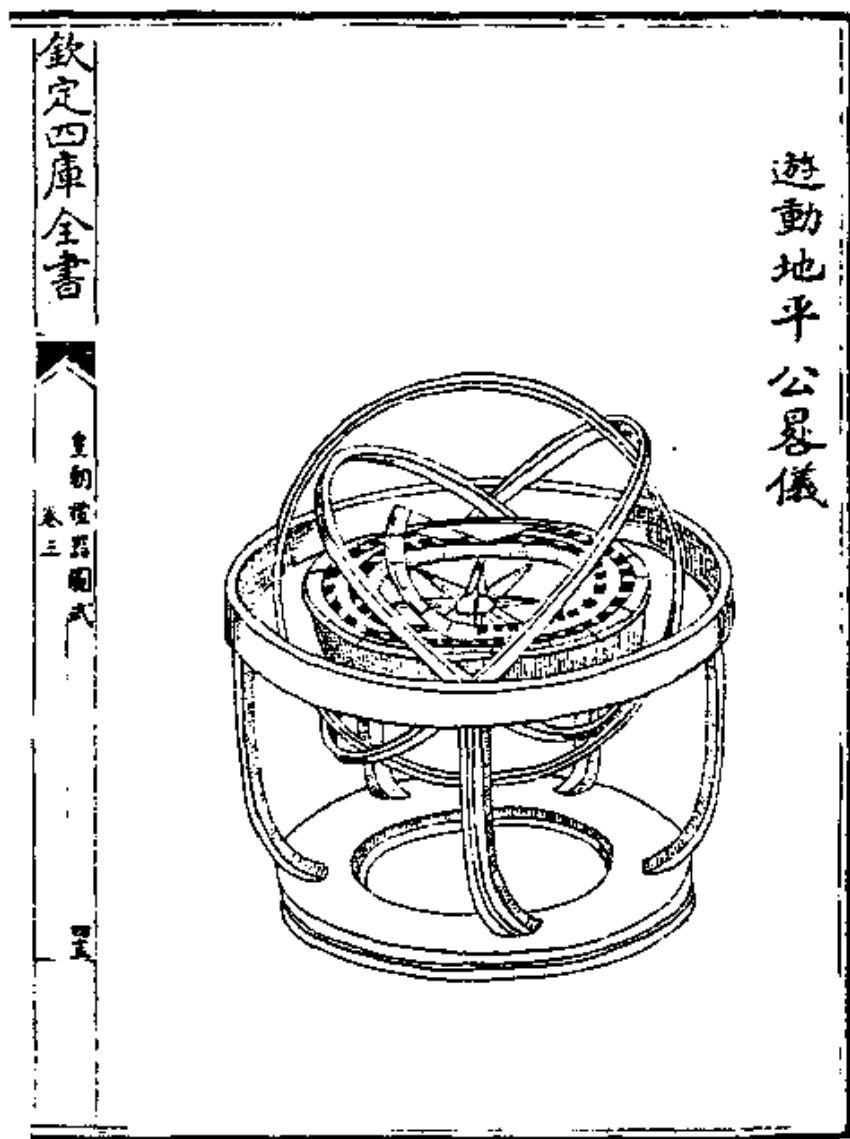


图 4-5 装于平衡环中的罗盘针(引自《皇朝礼器图式》)

“被中香炉”^①。将指南针安置于平衡环内的思想有可能是传教士带进中国的,但是,平衡环与指南针都是中国人的发明。如今,这种平衡环已成为航空、航海必备的导航仪器之一,而且又有了新的发展。

我们再回顾一下西方磁学的早期情形。西方指南针的最早记载

^① 刘歆:《西京杂记》卷一。

见 1190—1210 年间法国人戴普鲁恩(Guyot de Prouins)的咏圣经诗:水手将针与一种难看石头摩擦后,用草浮于水上可指北。十三世纪初,英国修道士尼坎(Alexander Neckam, 1157—1217 年)在 1207 年的《论器具》(De Utensilibus)中说,阴晦之日船上用针指示方向^①。应当说,一旦指南针上了航船,它的传播之快当与航速相同。现在,人们毫不怀疑,指南针的发明及其在航海上的最早应用应当归之于中国。它是由阿拉伯人从中国带到欧洲的^②。至于地磁偏角,哥伦布(C. Columbus, 1446—1506 年)在 1492 年的远航中才发现,它比杨维德的记述晚 450 年。诺曼(R. Norman)于 1576 年发现磁倾角的存在^③,也比曾公亮利用地磁倾角制造指南鱼的记述晚约 550 年。顺便指出,中国人创造的指南针安装中的缕悬法,即用蚕丝悬吊磁针的方法,在科学仪器史上也甚有意义。法国科学家库伦(C. A. de Coulomb, 1736—1806 年)于 1777 年发明扭转天平,也是以缕悬法悬吊磁针,他从而获得法国科学院奖赏,但他比中国人的同样发明至少晚 600 年。吉尔伯特的《论磁》于 1600 年问世,从而开创了近代磁学。然而,自那以后,还有不少英国人相信:用大蒜磨擦磁石可以去磁,用山羊血涂抹又可以复磁;磁石可以招魂,等等。这些观念与汉代《淮南万毕术》记载几乎相同。这又令人怀疑:随同指南针的西传,有关磁幻术及其观念是否也传至欧洲了呢?

① 刘秉正:《我国古代关于磁现象的发现》,《物理通报》1956 年第 8 期,第 458—462 页;张之翔:《中国古代在电磁学方面的成就》,《物理》1990 年第 11 期,第 693—694 页。

② Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 1, pp. 229—330. Cambridge, 1962.

③ F. Cajori 著、戴念祖译:《物理学史》,内蒙古人民出版社 1981 年版,第 51—52 页。

第五章 热 学

人类生活在季节交替、天气变幻的自然界中，冷与热是他们最早感受到的自然现象之一。在冶炼金属、烧制陶瓷等生产活动中，人们也积累了许多有关热与温度的知识。但是，在温度计发明之前，这些知识都只能停留在定性阶段上，而不会有定量的概念。古代中国人也是如此。本章所述，包括各种摩擦取火方法的发现，对热的本质的探讨，以及发现雪花晶形、液体的递次沸腾、热胀冷缩现象、火候观察法、以人体腋下温度作为环境温度的判别标准，等等。

第一节 摩擦取火和对热的本质的认识

一、摩擦取火

原始社会时期，人们已学会用火，发明了钻木取火的工具和取火方法。用两条木片或木棒，使其之一的一端与另一条激烈摩擦，在摩擦点附近放上易燃物质。摩擦运动产生高温，甚至迸出火星，易燃物即着火燃烧。史籍记载，这是原始社会时期的燧人氏发明的，或称“黄

帝作钻燧,生火以熟荤臊”^①,或称“钻燧取火”,“钻木取火”^②。《礼记·内则》将这种取火工具称为“木燧”,人们将它佩带在身,以备阴雨天取火之用。通过钻木取火实践,人们发现了一条基本热学原理:“木与木相摩则燃。”^③

摩擦干燥的竹片也能发火。以一片竹瓦(竹筒破而为二,似瓦状)覆盖纸灰,在其上穿一孔,以另一竹片(又称“竹刀”)通过小孔往来摩擦,“三四回,烟起矣;十余回,火落孔中,纸灰已红”^④。这种取火法,又称“错木取火”。所谓错,当指“竹木相戛,如锯竹木然”^⑤。此外,在生产实际中因激烈摩擦而产生火花的现象屡被典籍所记载。^⑥

碰撞也能生火。古代人还制造了相应的工具,称火石镰,或钢镰。它是以两块不同质地的石头,或一石一钢铁,互相打击而生火。《关尹子·二柱》:“石击石即光。”唐代刘言史与孟郊的《煎茶诗》云:“敲石取鲜火,汲泉避腥鳞。”^⑦唐制,武官五品以上带火石袋^⑧。明代,这种取火工具成为军事武器中的发火器件。茅元仪^⑨和宋应星^⑩都曾描述地雷、水雷等爆炸物以钢镰、火石镰点火的方法。这是当时世界上最先进的武器发火装置。^⑪

① 《管子·轻重戊》。

② 《韩非子·五蠹》。

③ 《庄子·外物》。

④ 方以智:《物理小识》卷二《风雷雨场类·石竹火》;又见宋濂:《宋学士文集·钻燧说》。

⑤ 《古今图书集成·历象汇编·乾象典·火部》引《河图·始开图》;宋林洪:《山家清事》,《说郛》宛委山堂本,第七四卷。

⑥ 参见吴兢:《贞观政要》卷二《纳谏下》;宋应星:《天工开物·珠玉》;等。

⑦ 吴曾:《能改斋漫录》卷三《阳燧》。

⑧ 《旧唐书》卷四五《舆服志》,中华书局校点本,第六册,第1953页。

⑨ 茅元仪:《武备志》卷一——《军资乘·守·需备》,卷一三四《火器图说一三上》。

⑩ 宋应星:《天工开物·佳兵·火器》;也见焦玉:《火龙经·炸炮》,等。

⑪ 刘仙洲:《我国古代慢炮、地雷和水雷自动发火装置的发明》,《文物》1973年第11期,第46—51页。

二、活塞式点火器

景颇族的祖先发明了一种类似活塞式点火器的器物。以牛角作外套筒，木制推杆(图 5-1)，杆前端粘缚艾绒。取火时，一手握住套筒，一手猛推杆入筒，并随即将杆拔出，艾绒即燃。口吹艾绒，立见火苗。

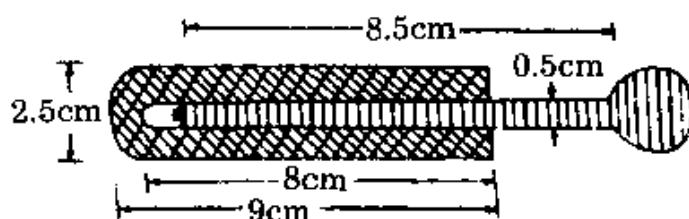


图 5-1 景颇族人发明的取火器

景颇族聚居云南德宏一带地区，其历史甚为悠久。景颇语称这种取火法为 *ngarung hpaipok*，前一词为“牛角”之意，后一词读如“迫炮”，为取火时的声音^①。中国历史博物馆将此点火器照片展示于原始社会厅，确切的发明年代已不可考。但最迟不会晚于明代。

显然，在十九世纪之前任何一个民族都不知道热力学中的绝热压缩过程，在这个过程中，系统不与外界发生任何热交换，由于急速压缩、体积急剧变小，因而该系统的温度急剧升高。景颇族的祖先以他们的聪明才智，在热力学诞生之前很久，就在实践中发明了符合绝热压缩过程的取火器，并通过东南亚而传到欧洲。法国数学家、力学家拉普拉斯(M. de Laplace, 1749—1827 年)以玻璃筒代替牛角，以玻璃杆代替木质推杆，在欧洲最早发现了压缩点火法^②。欧洲人称它

① 郭建荣、郭颖：《景颇族取火器》，《中国科技史料》1985 年第 3 期，第 34—35 页。

② 英国田大里著，傅兰雅、徐建寅译：《声学》卷一《总论发声传声》。江南制造局版线装本。

为“活塞式点火器”，并产生了一系列连锁式影响。致冷科学的奠基者、德国工程师林德(Carl Linde, 1842—1934年)在1877年左右在慕尼黑发表演说,表演一种根据活塞原理制成的香烟打火机。后来狄塞耳(Rudolf Diesel, 1858—1913年)于1897年创制柴油发动机(也称压力点燃热机),事后狄塞耳称,与他的发明最有关系的经验并促成其发明的是林德香烟打火机。^①

三、对热的本质的探讨

热究竟是什么?这是十八世纪科学界争论的大问题之一。持“热质说”者认为,热是一种物质;持“燃素说”者认为,燃烧是因为自然界有燃素。这种学说曾解释某些热过程和燃烧现象,但不能解释摩擦起火现象。伦福德伯爵(Count Rumford,即 Benjamin Thompson, 1753—1814年)在1798年从钻大炮孔的摩擦实验中作出“热是一种运动”的结论,他以此推翻了热质说,促进了热学的发展。

古代中国人也提出了自己的种种看法。

先秦时期,人们崇尚“五行”观念。五行,即金、木、水、火、土。古人认为,万物都可以归结为五行之中,“火”也就被当作自然万物之一。因此,火是物质的看法在中国有非常悠久的历史。后来,约东晋成书的道家著作《关尹子·二柱》发展了这种物质说,它记述道:

寒暑温凉之变,如瓦石之类,置之火则热,置之水即寒,呵之即温,吹之即凉,特因外物有来有去,而彼瓦石实无来去。

在《关尹子》作者看来,“外物”的来去使瓦石发生寒暑温凉之变。这种“外物”观与热质说大致相似。有趣的是,古人还从五行观念中找

^① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 135—145.

到了摩擦生火的根据。北齐刘昼的《刘子·崇学》写道：

金性苞水，木性藏火，故炼金则水出，钻木而火生。

在刘昼看来，摩擦生火是因为木本身含有“火”。这种观点与燃素说完全一致。五行观念给古代人轻巧地抵达科学彼岸提供了独木方舟。

然而，古代持运动说者也不乏其人。《庄子·外物篇》说：“木与木相摩则燃。”《淮南子·原道训》：“两木相摩而燃。”这些记载表明人们已认识到起火燃烧是由于摩擦运动的结果。南唐谭峭在《化书》卷二《动静》中说得更彻底：“动静相摩，所以化火也。”这些思想一直影响到清代，郑光祖在《一斑录》说：“火因动而生，得灰而燃。”^①从钻木取火中得出的这些经验结论是科学的。它和伦福德伯爵从钻炮孔中得出的结论完全一致。

在历史上，也有人以为，古代热运动说还不够，尚需加进传统的阴阳观念。宋代理学家程颐是这方面代表人物。他说：“钻木取火，人谓之火生于木，非也。两木相戛，用力极则阳生。今以石相轧，便有火生，非特木也。盖天地间无一物无阴阳。”^②在摩擦或碰撞运动中又加入阴阳之说，以近代科学眼光来看，真有点画蛇添足了。

第二节 对热与冷的认识

一、物态变化，雪花与冰花

在整个古代时期，人类对天气变化的观察而获得了有关物态变

① 郑光祖：《一斑录》卷三《物理》，海王邨古籍丛书本，中国书店1990年版。

② 《河南程氏遗书》卷一八。

化、蒸发、汽化和固化的知识^①。同是水，“夏日则雨水，冬日天寒则雨凝而为雪”^②，“云雾，雨之征也。夏则为露，冬则为霜，温则为雨，寒则为雪”^③。人们将气温变化与水的状态变化相联系，而且还进一步指出：“冰，水为之而寒于水”^④，“冰生于水而冷于水”^⑤。对于物态变化有所研究的是炼丹家，他们对于汞的不同形态和温度高低之间关系有许多定性叙述。^⑥

在人类生活中，一方面要火，要高温；另一方面要冰，要降温。殷商和西周时期，已有采掘天然冰，利用它冰冻食品的记载，西周人还制造了专门用以冰冻食品的“冰鉴”^⑦，即同时装置冰和食品的柜类容器。

古代人对于雪花的仔细观察，使他们知道其晶形的六重对称性。公元前二世纪，韩婴在《韩诗外传》中指出：“凡草木花多五出，雪花独六出。”^⑧刘熙的《释名》就以这种对称性定义雪。后来典籍中有关记载连续不断^⑨。北周庾信(513--581年)作“郊行值雪”诗，内有“风云俱惨惨，原野共茫茫；雪花开六出，冰珠映九光”之句^⑩。在欧洲，1260年有人指出，雪花为星芒状。但在1600年之前没有人注意到它的六重对称性。开普勒(J. Kepler, 1571--1630年)在1611年写了未完成

① 王锦光、洪震寰：《中国古代物理学史略》，河北科学技术出版社1990年版，第43—46页。

② 王充：《论衡·感应》。

③ 王充：《论衡·说日》。

④ 《荀子·劝学》。

⑤ 《刘子·精神》。

⑥ 戴念祖：《中国古代物理学》，山东教育出版社1991年版，第109—110页。

⑦ 《周礼·天官·凌人》。

⑧ 韩婴撰、清·赵怀玉校并辑补遗：《韩诗外传·补遗》，龙谿精舍丛书本，或丛书集成初编本。

⑨ 陆学善：《中国晶体学史料掇拾》，《科技史文集》第12辑，上海科学技术出版社1984年版，第1—2页。

⑩ 《庾子山集》卷四《诗·郊行值雪》。

的即兴之作《六角形的雪》，指出了雪花的这种对称性，但比韩婴晚了1700年。

除雪花之外，典籍中也不乏对霜花、冰花的记载。段成式将冰花描写为“作花如缣(xié)”^①，即类似有花纹的丝织品。沈括《梦溪笔谈》指出屋瓦上霜花“皆成百花之状”。他曾经目睹水渠中冰花“冰纹皆成花果林木”；“屋瓦上冰亦成花，每瓦一枝”，有似牡丹、芍药者，有似海棠、萱草者，“皆有枝叶，无毫发不俱”^②。这些描述表明了冰霜晶体枝蔓生长的情况。可见，古代人对自然现象观察之仔细。

二、自燃现象

人们知道，可燃性物质的大量堆放，有可能产生自燃。

根据历代有关知识和经验，宋代陈师道总结出一系列可自燃的物体：“油绢纸、石灰、麦糠、马矢粪草，皆能出火。”^③

十三世纪初，桂万荣在其著《棠阴比事》（成书于公元1207年）中记述了露积油布的自燃现象：

强至祠部为开封仓曹参军时，禁中露积油布。一夕，火，主守者皆应死。至预听讞，疑火所起，召幕工讯之。工言：“制幕需杂他药，相因既久，得湿则燔。”府为上闻，仁宗悟曰：“顷者真宗山林火，起油衣中，其事正尔。”主守者遂比轻典。昔晋武库火，张华以为积油所致，是也。^④

油布、油绢纸等物，制作时“需杂他药”，也许是带酚或醛的漆。油布的堆积产生热，由氧化作用使酚或醛达到燃点，布或纸就成了最好

① 段成式：《酉阳杂俎》卷四《物革》。

② 沈括：《梦溪笔谈》卷二—《异事》。

③ 陈师道：《后山丛谈》卷四。

④ 桂万荣辑、明代吴讷删正：《棠阴比事原编》“强至油幕”条，丛书集成初编本。

的燃料,从而产生自燃。类似现象在欧洲直到十八世纪才引起注意。杜阿梅(J. P. F. Duhamel)在 1757 年发表了实验:加赭石和油的帆布,于暑夏阳光下干燥后,只堆积数小时就产生自燃。^①

三、热胀冷缩

热胀冷缩原理被中国人应用于凿河道、碎巨石,兴修水利之中。据记载,在秦昭王三十年至秦孝文王之间(前 277—前 250 年),蜀守李冰主持开凿都江堰工作。两岸悬崖,巨石坚硬,刀斧“不可凿”,李冰“乃积薪烧之”^②。东汉时,成都太守虞诩主持西汉水(嘉陵江上游)航运修整工程,他“使人烧石,以水灌之,石皆坼裂,因凿去石”,“于是水运通利”。^③这就是说,以堆柴烧巨石,使巨石炽热,然后用水浇。一热一冷,石裂而易凿。在历史上水利与采矿工程中,这种方法被广泛运用,并被称之为“烧爆法”、“烧石易凿法”。^④

据载,古代名门权贵常身佩“辘轳剑”。所谓“辘轳”,是由两块球形玉相套合而成,外形似“吕”字,“形口中间,似辘轳旋转,无分毫隙缝”。那么,如何将一个球形玉的轴塞进另一个的孔洞之中?原来是,“当间煮之膨胀,撑塞双轴,入窍关住,所以宛转无碍”^⑤。也即是,将带孔的球蒸煮加热,然后将另一球的轴塞入其孔中。元代陶宗仪(1316—?)经多次实验后,得到“煮之膨胀”的结论。“膨胀”即今膨胀。由此可见,古代人充分掌握了热胀冷缩的原理。

① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 1, p. 67.

② 晋·常璩:《华阳国志》卷三《蜀志》。

③ 《后汉书》卷五八《虞诩传》,中华书局校点本,第七册,第 1869—1870 页。

④ 方以智:《物理小识》卷七《金石类》。

⑤ 陶宗仪:《南村辍耕录》卷二三《玉辘轳》。

四、沸腾过程

古代人的日常生活中极为讲究煮水泡茶。因此,至迟在宋代已发现了水的递次沸腾现象。

元代王祜写道:煮茶水“当使汤无妄沸。始则蟹眼,中则鱼眼,累然如珠,终则泉涌鼓浪。此候汤之法,非活火不能尔。”^①所谓“蟹眼”、“鱼眼”,是指水在不同温度下表现其沸腾状态的气泡大小。在温度较低时,甚至无气泡出现,人们又将此时称为“盲眼”。

明代屠隆将水的沸腾过程归结为“三沸”：“始如鱼目,微微有声,为一沸;缘边泉涌连珠,为二沸;奔涛溅沫为三沸。”^②

比上述更早的宋代人,称“汤之未滚者为盲眼”,“其未滚者无眼,所语盲也。”^③蔡襄在述及煎茶水未沸时指出:“前世谓之蟹眼者,未熟汤也。”^④既是“前世”所言,犹指唐代也未可知。苏轼还为煎茶水赋诗,其中二句为后世所流传:“蟹眼已过鱼眼生,飏飏欲作松风声。”^⑤

李约瑟博士虽然未曾充分掌握古代中国人有关递次沸腾知识的文献资料,但他对中国文献的有关记载非常感兴趣。他以现代知识说明水的“三沸”过程:初始为“核心沸腾”,中沸为“过渡沸腾”,最后为“稳定膜型沸腾”。^⑥

除此之外,晋张华曾描述两种不同沸点的混合液体在加热过程中发生沸腾的现象:

① 《王祜农书·百谷谱集之十·茶》,农业出版社1981年版,第163页。

② 屠隆:《考槃余事》卷三《茶笈》。

③ 庞元英:《谈薮》,《说郛》卷三一,商务印书馆本。

④ 蔡襄:《茶录》,《说郛》卷八。

⑤ 见《王祜农书·百谷谱集之十·茶》和屠隆:《考槃余事》卷三《茶笈》。

⑥ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 1, pp. 68—69.

煎麻油,水气尽,无烟,不复沸,则还冷,可内手搅之。得水,则焰起飞散,卒不灭。此亦试之有验。^①

这一记述是完全正确的。在初始加热过程中,由于水蒸汽挥发而造成油沸的假象,实际上油尚未达到沸点。此时可将湿手伸入油中而不致烫伤。当油达到沸点时,它处于水的上层,若滴入水滴,则焰起飞散,甚至喷出油滴引起燃烧。

五、热传导现象

汉代王充有丰富的热传导知识。他说:

近水则寒,近火则温,远之渐微。何则?气之所加,远近有差也。^②

这个叙述表达了热传导与远近距离的关系。只要将这里的“气”理解为空气,这个叙述就是正确的。他还写道:

夫燧一炬火爨一镬水,终日不能热也。倚一尺冰,置庖厨中,终夜不能寒也。何则?微小之感不能动大巨也。^③

燧薪燃釜,火猛则汤热,火微则汤冷。^④

这些叙述也表达了热量的多少与其发生热传导的外界系统的关系。热量太少,不足以影响或改变巨大的外界系统的温度。王充的这些认识是很有见地的。

中国人在热传导技术方面还有两项重要发明:省油灯和保温瓶。前者留待本书下篇叙述。

古代的“保温瓶”,是利用夹层技术防止热辐射,它创制于战国初年或者更早。在湖北随县曾侯乙墓中曾发掘出一大方鉴,内套一小方

① 张华撰、范宁校证:《博物志校证》卷四《物理》,中华书局1980年版,第46页。

②③④ 王充:《论衡》中《寒温》、《感虚》、《谴告》。

鉴^①。这种夹层容器可以保温。或许，西周时的“冰鉴”就是夹层的，才能使冰不致很快被融化。

宋代洪迈曾记述当时某人发现一古瓶，无人能识其为何时物，甚爱之，便用它装水养花。一次，“方冬极寒，一夕忘去水”，“凡他物有水者皆冻，独此瓶不然”。此瓶装热水，终日不冷，甚至有如新沸之水。“后为醉仆触碎，视其中与常陶器等，但夹底厚几二寸”^②。且不论西周冰鉴，曾侯乙方壶，而这个古瓶当是近代保温瓶的始祖。^③

六、火候的概念

今天，人们常以“火候”来形容事物的环境气氛。历史上，这词的本意是观察发热物体的火焰颜色。在金属冶炼或烧陶工艺中，历代工匠都以火焰颜色来判别炉体内温度的高低。因此，火候实际上是古代创造的一种经验的高温目测技术。虽然它具有很大的经验性，但也有充分的科学性。

《考工记》最早记述了冶铸青铜时火焰颜色：

凡铸金之状，金与锡，黑浊之气竭，黄白次之；黄白之气竭，青白次之；青白之气竭，青气次之。然后可铸也。

在冶炼青铜矿石过程中，首先熔化挥发的是那些不纯杂物，呈现“黑浊”焰色^④；然后，熔点较低的锡或杂有硫熔化并挥发，呈现“黄白”焰色；随着炉温升高，铜（古写为“金”）熔化并挥发，呈现“青白”焰

① 《湖北随县曾侯乙墓发掘简报》，《文物》1979年第7期，第7页以及图36至38，图版七-2。

② 洪迈：《夷坚甲志》卷一五《伊阳古瓶》。

③ 王锦光、洪震寰：《中国古代物理学史略》，河北科学技术出版社1990年版，第40—41页。

④ 令人感兴趣的是，朱载堉释《考工记》火色时作如是解。见朱载堉：《律学新说》卷四，冯文慈点注本，人民音乐出版社1986年版，第228页。

色。此时,炉火纯青,开炉铸造。

这种察看火候的方法,不仅被历代工匠沿用,也被炼丹家所发展。炼丹家常以火焰颜色判断丹砂和矿石的成份。例如,“消石”(硝酸钾)火焰为“紫青”,氧化铜火焰“似红金”,“销汞”(汞硫合金)为“青焰”等等^①。直到十八世纪,檀萃就云南炼铜写道:“凡炼……绿火黄火,各如其矿色也。惟红花为上,乃铜之光。”^②这些记载表明,火焰颜色确实反映了温度的高低以及熔炉内气氛等多层意义。

宋应星在《天工开物·陶埴》曾述及烧制陶瓷过程观察火候的方法以及掌握火候的重要性:

烧砖有柴薪窑,有煤炭窑。用薪者出火成青黑色,用煤者出火成白色。凡柴薪窑,巔上偏侧凿三孔以出烟,火足止薪之候,泥固塞其孔,然后使水转锈。凡火候少一两,则锈色不光;少三两,则名“嫩火砖”,本色杂现,他日经霜冒雪,则立成解散,仍还土质。火候多一两,则砖面有裂纹;多三两,则砖形缩小、折裂,屈曲不伸,击之如碎铁然,不适于用。……凡观火候从窑门透视内壁,土受火精,形神摇荡,若金银融化之极然,陶长辨之。

烧柴与煤有不同火焰色,因其燃烧发热温度不同。所谓火候“多一两”或“少一两”之说,自是陶长或炉长们的经验。宋应星的记述表明火候的重要性。即使今天,有许多先进的高温测量仪,但在实践中,工人掌握火候的经验仍然是难以完全替代的目测高温技术。^③

① 张子高:《中国化学史稿》,科学出版社1964年版,第74、117页。

② 檀萃:《滇海虞衡志》卷二《金石》。

③ 陈锡光:《火候在现代陶瓷生产中仍有应用的必要吗》,《物理学史》1987年第1期,第33—35页。

七、体温与温度标准

在温度计发明之前,人们常以手触摸物体来判别温度的高低。这种以体温为基础的触摸感觉法,只能判断一定范围内的温差。古人所谓寒、冷、凉、温、热、烫等概念,都是以体温为标准的温差概念,而不是特定的温度概念。

体温是古代最恒定的“温度计”,因为正常人的体温基本相同。古代人充分认识并利用了这种“温度计”。北魏贾思勰曾指出,牧民作奶酪,常使酪的温度“小暖于人体”;作豆豉,“令温如腋下为佳”^①。人体的腋下温度最稳定,迄今仍为医学界所采用。宋代陈旉在述及洗蚕种的水温时说:“调温水浴之,水不可冷,亦不可热,但如人体斯可矣。”^② 元代王祯也曾述及蚕种及养蚕的最佳室温,养蚕人在蚕室内需服单衣,“以为体测”,“自觉身寒,则蚕必寒,使添熟火;自觉身热,蚕亦必热,约量去火。”^③ 不仅作奶酪、养蚕如此,在焙制茶叶中也是如此。茶农“用火常如人体温”,“若火多则茶焦不可食”。^④

以体温,特别是人体腋下温度作为其他物质或环境温度的判别标准,在温度计发明以前无疑是热学温度计量中最佳的方法。

① 贾思勰:《齐民要术·养羊》“作酪法”与“作豉法”。

② 陈旉:《农书》卷下《收蚕种之法篇》,中华书局1956年版,第22页。

③ 王毓瑚校:《王祯农书·农桑通诀集之六·蚕缲》,农业出版社1981年版,第67页。

④ 蔡襄:《茶录》上篇,《说郛》卷八一,商务印书馆本。

第六章 古代的物质结构观念

古代东西方人在物质结构观念上有明显的差异。崇尚不可分割，提倡原子论，是西方科学文化的特征。崇尚连续性，提倡元气说，是中国科学文化的特征。原子论对经典科学的兴起有相当的影响，而元气说为探索当代科学思想的渊源越来越受到人们的重视。

第一节 不可分的思想

一、儒家的“莫能破”

物质“不可分”的思想在中国起源甚早。公元前十三世纪，殷商甲骨文中已有“小”字，写作三点：两边各一点成八字，是分的意思；将中间一根木杆分了又分的微点，便是“小”的形象。东汉许慎的《说文解字》对小字作如是说^①。从“小”字造形的原意看，很可能早在殷商时期就有关于物质分割不尽的思想。

传说为孔子之孙子思（前 483—前 402 年）的著作《中庸》写道：

^① 许慎：《说文解字》：“小，物之微也。从八丨，见而分之。”

语大，天下莫能载焉；语小，天下莫能破焉。

这意思是，我们所说的“大”，是指无边无际的宇宙，世界上没有别的东西可以把它包容在里面；我们所说的“小”，是指不能再分的物质微粒，世界上没有任何东西可以把它再分割。《中庸》说的“莫能破”即今日所谓“不可分”，而这正是 Atom 的本意。因此，可以说，中国提出“莫能破”和古希腊德谟克里特 (Democritus, 前 460—前 371 年) 提出 Atom 的思想至少是相同的时候。

遗憾的是，虽然《中庸》是儒家的一部经典，但是，在它成书后的千余年间几乎没人理睬“莫能破”的观念。从子思以后，一代代儒家弟子都像他们的鼻祖孔子一样，把注意力集中在社会伦理道德上，对他们的先师本来就很少的自然哲学闪光并不过问。直到宋代，朱熹才对此作出进一步解释。朱熹说：

莫能破，是极其小而言之。今以一发之微，尚有可破而为二者。所谓莫能破，则足其小。注中谓其小无内，亦是说其至小无去处了。

莫能载，是无外；莫能破，是无内。谓如物有至小而尚可破作两边者，是中着得一物在。若云无内，则是至小，更不容破了。^①

朱熹对“莫能破”这一原子概念解释得何等清楚！可惜，朱熹也仅仅停留在解释字意上，而没有用它解释物质运动和自然现象的任何问题。朱熹如此，朱熹的继承者也如此。又过了几百年，当西方的传教士把近代科学连同古希腊的原子论带入中国时，中国人才想起了自己祖先的“莫能破”概念。此后就把西方的“原子”一词译成“莫能破”或“莫破”。^②

^① 《四书朱子大全·中庸第十二章》。

^② 严复译：《穆勒名学》，商务印书馆 1981 年再版，第 218—219 页。

二、名家的“无内”

在朱熹阐述物质不可分和原子的思想中,提到“莫能破是无内”。“无内”也是战国时期百家争鸣中的一种原子概念。它是由名家的代表人物惠施提出来的。

惠施……历物之意曰:至大无外,谓之大一;至小无内,谓之小一。^①

惠施在阐述“物”的意义时说了以上的话。“无内”对应于“无外”,“小一”对应于“大一”。它们都是指物的不同层次的名词。

《庄子·秋水》篇所拟河伯与北海若的对话,谈到了类似问题。河伯问:“然则吾大天地而小毫末,可乎?”北海若答曰:“否。夫物,量无穷,时无止,分无常,终始无故。是故大知观于远近,故小而不寡,大而不多,知量无穷。……以其至小,求穷其至大之域,是故迷乱而不能自得也。由此观之,又何以知毫末之足以定至细之倪,又何以知天地之足以穷至大之域。”这意思是说明天地并非至大,毫末并非至小。它是论证惠施关于“大一”与“小一”的概念也未可知。《鬼谷子·捭阖》篇也有“为小无内、为大无外”的论断。《管子·宙合》篇同样写道:“天地万物之橐,宙合有橐天地,下暨于地之下,散之至于无间,不可名而止,是大之无外,小之无内。”^②

由此可见,“大一”是指无边无限的宇宙;“小一”是物质的最微细粒子。小到只有一点,“莫能破”了,故而称为“无内”。晋代司马彪在《庄子·天下》篇注中明确写道:“无外不可一,无内不可分,故而谓之一”,“若其可析,则常有两,若其不可析,其一常在。”看来,无内、小一

^① 《庄子·天下》。

^② 参见郭沫若等:《管子集校》本。

都是物质小到“不可析”或不可分割的原子概念。

三、墨家的“端”

众所周知,以墨翟为首的墨家也曾经提出过类似原子的概念,即他的不可分割或“不可新”的“端”^①。《墨经》中有不少条文涉及这个问题。

端:体之无序而最前者也。

端:是无间也。

非半弗新则不动,说在端。

“端”古文作“耑”。《说文》云:“耑,物初生之题也。上象生形,下象根也。”段注云:“题者,额也……物之初见,即其额也。”原来,“端”的本义是和有形有根之物相联系的。墨家以此字说明其物质的不可分割的概念:组成形体的最原先或最原始的微粒,这微粒本身没有间隙可供再将它分成两半或两个更小的粒子。洪震寰指出:“‘端’有两个基本特征:一是和形质之‘体’相联系,二是‘无序’‘最前’的。显然,这更接近于质学中的‘原子’。”^②

《墨经》还进一步告诉人们如何分割物体而得到“端”的认识:

新半,进前取也,前则中无为半,犹端也。前后取,则端中也。

新必半,无与非半,不可新也。

墨家的“端”正是从日常生活中分割物体而得到的认识。这既包括了分割的操作方法、操作定义,也包括了墨家的高度抽象思维和总结。这种情形和古希腊原子论形成之初以沙粒和巨石辘为细末来说明原子的概念一样。在墨家看来,取一木棍,往前将其一半一半地分

^{①②} 洪震寰:《墨经‘端’之研究》,《自然科学史研究》1989年第4期,第315—321页。

割,一定会分到在其中央不能将它分为两半的时候,此即“犹端也”。若是在该棍的前后二头向它的中间分下去,“端”则出现在木棍中央。

正是由于墨家持有这种“端”的概念,即物质有不可分割的、不连续的、类似原子的观念,才引起战国时期辩者公孙龙、惠施等人提出相反的论题:“一尺之捶,日取其半,永世不竭。”^①这显然是一种物质无限可分的、连续性的观念。

西方的原子即 Atom,其本意为不可分。古希腊人、古罗马人以此原子的思想去解释物质及其运动,形成了古代原子论。综上所述,在春秋战国时期,从不可分的本意上说也有三种类似原子的概念:从“小”字引申出来的“莫能破”,“小一”和“端”。遗憾的是,提出它们的三大学派即儒家、名家、墨家都没有将原子思想加以发展,更未曾将它们进一步运用于解释物质及其运动上。虽然墨家对其“端”还有一些论述,但总的说来,原子论在中国古代基本上没有形成。秦汉以后,墨家和名家本身在历史发展中消失了,儒家又忽视自然知识,因此,原子论的思想在中国古代也是极为薄弱的。

然而,另一种物质观、即物质是无限可分的、连续的思想在古代中国得到了充分的发展。这是在物质观上中国有别于西方的一大特点。

第二节 连续的物质形态

一、元气说的特点

物质是无限可分的连续的观念集中在元气说中。元气说在历史

^① 《庄子·天下》。

上得到长期持续的发展,它描绘了一幅丰富多采的物理世界图景。

在古代人看来,“气”是天地万物的成份,它的运动变化可以解释包括物理现象在内的各种自然现象。这种看法可能起源于春秋战国之际。起初的根据无非是人们的生活经验,诸如对风雨云雾天气现象的观察、煮水作饭的实践,以及观察到一缕阳光中的尘埃的翻滚运动,等等。战国初期,宋钘、尹文等人就提出了气产生万物的思想:

凡物之精,比则为生。下生五谷,上列为星;流于天体之间,谓之鬼神;藏于胸中,谓之圣人;是故名气。杲乎如登于天,杳乎如入于渊,淖乎如在大海,卒乎如在于岬。^①

这意思是,万物是由各种精气结合而成的。在地面生出五谷,在天上分布出许多星,流动在天地之间的叫作鬼神,在心中藏着就成圣人,所以叫它“气”。它有时光明照耀,好像升在天上;有时隐而不见,好像没入深渊;有时滋润柔和,好像在海里;有时高不可攀,好像在上。

从这个叙述中,我们看到构成宇宙万物的“气”存在于天上、地下、天地之间,甚至人心中。它具有光明、黑暗、滋润以及运动等性质。后来,元气中又加入了《易》中阴与阳的概念。“气有阴阳”,同一种气就有两种不同特性。气成为阴与阳两方面对立的统一的物质实体,更便于解释自然界中各种物理的、化学的、人体的或生物的运动现象。

从物理学观点看,元气究竟是什么?

元气是最微细的物质。王充说:“元气,天体之精微也”,“气若云烟”^②;王夫之说:“气弥沦无涯而希微不形。”^③ 所谓“希微不形”,即

① 《管子·内业》。

② 《论衡·四纬》及《自然》。

③ 《张子正蒙注·太和》。

听不见、摸不着、看不到的微小物质。

元气又是“弥沦无涯”的连续形态的物质。它充满宇宙，贯一切实，盈一切虚。王充说：“天去人高远，其气莽苍无端末”，“天地，含气之自然也。”^①张载说：“太虚即气”，“太虚者，气之体”^②。原来认为空空荡荡的空间，在元气说中成为气存在的基本形式，“太虚”成为物质和空间二者共有的概念：“气之聚散于太虚，犹冰凝释于水，知太虚即气，则无无。”^③王夫之更明确地说：“凡虚空皆气也”，“虚空者，气之量”，“则人见虚空而不见气”^④。在古希腊的原子论中，物质是原子和空虚构成的，空间是虚无的，因此超距作用也是普遍存在的。而在中国的元气说中，空虚并不存在，一切作用都是由气在其间作为中介。这就是中国古代元气说中最大的特点。

古代人关于气和物两者关系的论述是如此精采、独到，以致当代物理学家无不感到惊讶！^⑤宋代张载说：

太虚不能无气，气不能不聚而为万物，万物不能不散而为太虚。循是出入，是皆不得已而然也。

气聚，则离明得施而有形；不聚，则离明不得施而无形。方其聚也，安得不谓之有；方其散也，安得遽谓之无。^⑥

在张载看来，物质性的气总是发生或聚或散的运动变化。它的聚合或凝缩，就产生使感官可觉察（即“离明得施”）的有形物质；有形物的消散或离析就为感官不可觉察的气，复归于无形的太虚之中。在这里，不仅在一定意义上阐述了物质不灭的原理，也表现了古代人对物

① 《论衡·变动》及《谈天》。

② 《正蒙·太和》及《乾称》。

③④ 王夫之：《张子正蒙注·太和》。

⑤ 何祚庥：《元气新解》，《科技史文集》第12辑，上海科学技术出版社1984年版，第35—41页。

⑥ 张载：《正蒙·太和》。

质不同形态相互转化的辩证认识。

正如我们在前面几章中曾谈到的一样,古代人以元气说解释了他们所知道的力、声、光、电磁和热的各种物理现象。元气说中的“动非自外”、“一物两体”^①等观点,阴阳二气的细缊、浮沉、升降、隐现、屈伸、消长、激荡和阖辟等运动变化的观点,给古代人解释各种物理现象提供了充分的理论和思维方式。元气说在科学思想上的深刻性,使现代物理学在这里找到了某些内涵的思想渊源。正因为这样,在现代物理学不断发展的二十世纪里,它总是随其发展而变换着被比喻为“以太”、“力”、“微波”、“放射能”、“场”,甚而“量子场”。可见,元气说在近代科学思想史上具有不可低估的影响。

二、波动的世界图景

元气是一种连续形态的物质,波动就自然地成为它的最基本的物理世界图景。历史事实是如此。持元气说的古代学者认为元气运动的种种形态中,浮沉、升降、屈伸、消长就是最简单的波动现象。而当阴、阳二性加入元气本体之后,阴阳对立、阴阳交替的位形与动形使元气本身的波动图景更为深刻了^②。而这种思想大概最早见之于《易》。

《易》以阴阳对立的观点描述世界的运动。阴与阳“变动不居,周流六虚,上下无常,刚柔相易”^③。在《易》中,阴与阳不仅上下消长,盛

① 张载:《正蒙·参两》,王夫之:《张子正蒙注·参两》。《正蒙》:“凡圆转之物,动必有机,既谓之机,则动非自外也”;“一物两体,气也”。王夫之注:“细缊太和,合于一气,而阴阳之体具于中矣。”

② 英国李约瑟博士在他的《中国科学技术史》第二卷和第四卷第一分册中最早提出这一思想。

③ 《周易·系辞下》。

衰起伏,而特别值得注意的是,这种运动变化还随时间不断地向前流行,即所谓“损益盈虚,与时偕行”^①。《易》所描述的运动变化形式,大概只有自然界中的波动现象可以与之对应。

历史上有大量的典籍记述了这种阴阳波动的现象。例如:

《易纬·乾凿度》:“阳动而进,阴动而退。”

《内经·素问·天元纪》:“动静相召,上下相临,阴阳相错,而变化生也。”

《春秋繁露》卷一二《天道无二》:“阴与阳相反之物也,故或出或入,或左或右,……有一出一入,一休一伏,其度一也。”

刘智《论天》:“阴阳相承,彼隆此衰。”^②

直到十七世纪,毛奇龄(1623—1716年)就《易》中阴阳问题还写道:

《易》曰:阴阳动静。虽似有分属,而至于生,则未有不兼动静者也。阳生于子则阳气动,阴生于午则阴气动,故动静者虽阴阳之别,亦生息之别。动则生,不动则息。故阳动则阴息,阴动则阳息。阴阳动静,互相推迁。^③

类似叙述,在古代典籍中屡见不鲜。由此可见古代人的物质世界的运动情景:相反的物质形态(阴与阳)、及其相反的运动(动静、升降、出入、进退、隆衰)、相反的位形(上下、高低、左右、东西与南北),相反相成,变作由生。这种以阴阳表述的运动,阴与阳两个对立面的一上一下、一进一退、一高一低、一起一落,互相推迁、与时偕行而造成彼隆此衰的运动图景,正好是一幅波动世界图。古代人的阴阳观为波动世界的设想带来极大的方便。它比古希腊的原子论者设想原子

① 《周易·经下·损卦·象传》。

② 《全上古三代秦汉三国六朝文·全晋文》卷三九;也见清·王仁俊辑、刘智:《论天》,玉函山房辑佚书本。

③ 毛奇龄:《太极图说遗议》。

具有偏斜运动要复杂得多。^①

世界是波动着的观念,不仅表现在阴阳观和元气说上,而且几乎贯穿了整个古代的哲学思想史。阴阳的运动是波,由阴阳两性构成的元气运动也是波,在古代的各种哲学流派中少有不涉及这种观念的。我们看看诗人屈原(约前 340—前 278 年)和文学家柳宗元(773—819 年)的叙述。屈原《天问》写道:

圜则九重,孰营度之?惟兹何功,孰初作之?

意思是,穹隆的天有九重,那是谁营造的?这是何等功绩,是谁最初创建的?

柳宗元在《天对》中答道:

无营而成,沓阳而九。转轹浑沦,蒙以圜号。冥凝玄厘,无功而作。^②

意思是,天体不是由谁经营建造的,而是阳气无限积聚的结果。浑沦一片的阳气像车轮般转动着,因此被加上“圜”的称号。阳气自然积聚自然调整,没有谁为此建功立业。

在这相距千年的一问一对的诗句中,令人感兴趣的是,形成天的浑沦阳气,却无时不在像车轮般转动着。那么,它的运动轨迹不正是一种波吗?!

与《天问》、《天对》相比,宋代理学集大成者朱熹的论述更清楚不过了。他说:

太极理也,动静气也。气行则理也行。二者常相依,而未尝

① 参见马克思:《博士论文》(题目为《德谟克里特的自然哲学与伊壁鸠鲁的自然哲学的差别》),人民出版社 1961 年版。早先,人们认为,西方的原子论中只有直线式往复运动。马克思在其博士论文中,发现原子的偏斜运动,并给予它极高的评价,认为它可以打破命运的束缚。

② 屈原:《天问》,柳宗元:《天对》,原文及注释可参阅:复旦大学中文系注:《天问天对注》,上海人民出版社 1973 年版;吉林师大历史系等:《天问天对译注》,人民出版社 1976 年版。

相离也。当初元无一物，只有此理。有此理便会动而生阳，静而生阴，静极复动，动极复静，循环流转。其实理无穷，气亦与之无穷。自有天地，便是这事物在这里流转，一日有一日之运，一月有一月之运，一岁有一岁之运，只是这个事物滚将去。^①

我们暂且不顾朱熹关于理与气是什么事物，只先认其为“事物”即可，也不顾他的理与气在世界开始之时谁先谁后，就他所说的，自有天地之后，理与气便处在动与静的“循环流转”之中，并且年年、月月、日日不停地“滚将去”，而这正是一种波动着的图景。朱熹还说：

气运从来一盛又一衰，一衰了又一盛，只管凭地循环去，无有衰而不盛者。^②

气一盛一衰或一高一低、一涨一落往前凭地循环运动，这种波动思想再清楚不过了。自然，朱熹很有可能将其日常观察到的水波、绳子波抽象化地浓缩进他的理与气的哲学之中。他的这些见解可以作为对《易》中“损益盈虚、与时偕行”的注解，也是中国古代波动思想的发展。

在古代人的生活与生产经验中，人们无疑知道直线运动、偏斜运动或曲线运动、波动。水波与绳子波肯定是古代人所熟悉的运动形式。本书所述，也只限于古人关于物质世界波动的看法，他们认识到，在其物质观中物质的运动形式是波动，而有关波动的更多更深的物理内涵，古人自然无从谈起。

① 《朱子全书·理气》卷四九《太极》。

② 《朱子全书·理气》、《总论》。

第七章 近代物理学

本章着重叙述 1840 年后近代物理学在中国的兴起与发展。随着西方科学知识在中国的传播、中国的封建教育体系逐步走向近代教育体系,才有一批了解近代物理学的人才,才有相应的专门的学术机构和组织,才有近代物理学在中国的发展。大致上,从 1840 年到 1911 年间,是近代物理学在中国的启蒙时期;从 1912 年到 1949 年为创建时期;1949 年以后,物理学开始在中国得以发展。本章的叙述主要是前两个时期的情况。

西方科学知识在中国的传播并非在 1840 年鸦片战争之后,而是从明朝末年传教士入华开始的。从利玛窦抵澳门、即 1582 年开始,到清康熙末年,传教士在传教的同时也夹带了一些零散的科学知识,其中最主要的是古希腊和罗马的科学体系,包括托勒密地心说和九重天的宇宙观、阿基米德力学、欧几里得几何学、古希腊四元素以及某些器具(如螺旋提水机、三棱镜、计时器等)。这段时间,恰值伽利略关于落体研究(始于 1589 年)到牛顿出版《自然哲学的数学原理》(1687 年),持续了一个世纪的动力学创建时期,以牛顿为代表的经典物理学体系初步形成。但是,由于当时来华传教士均属宗教改革后的旧教教派,是天主教内一个主要保守集团,这就决定了他们不可能在中国传播属于科学革命的整个经典物理学体系及其科学思想和方法。加

之,他们中大多数人的科学知识甚为贫乏,也未必能理解经典物理学本身的重要内容。此时期中国的一些贤儒,如方以智、王微、郑复光等,却能将传入中国的点滴科学知识与中国传统相结合,甚而加以发挥,对中国传统科学产生了深刻影响。虽然从雍正时起到鸦片战争时止(1723—1840年),清王朝推行闭关自守政策,西方科学知识向中国的传播也因此停顿了百余年,但是,这种影响在此停顿时期仍在发生作用,诸如在光学、力学方面作出了许多超越传统的成就。

鸦片战争之后,随着门户开放与洋务运动的兴起,近代科学知识才在中国得以大量传播,经典物理学体系才开始传入中国。戊戌变法(1898年)之后,一些最新的物理学知识迅速传入中国,新的教育体系逐渐推广,也有少数人出国学习物理学。清王朝的灭亡,“五四”新文化运动的开展,为近代科学在中国的生根发芽创造了较好的环境气氛,此后物理学才在中国逐渐建立起来。

第一节 近代物理学的启蒙时期

一、西方物理学知识的早期传播及其影响

在1840年以前,传入中国的物理学知识可以看作早期的传播成果。它的内容主要在两个方面:一是诸如三棱镜、望远镜及其光学知识;二是围绕制作计时器、机械“奇器”的力学知识。这些知识既适应明末改历、编撰《崇祯历书》和建立天文台的需要,也适应兴建农田水利、制造农业机械的需要。

阳玛诺撰《天问略》(刊于1615年)和汤若望撰《远镜说》(刊于1626年)是较早传播光学知识的著作。前者重在阐述西方九重天的观念,解释日月食的成因,在宇宙观和物理知识方面并未超过古代中

国,但它带来一种新思维,如以作图法说明日月食成因等等。后者讲述了望远镜和几何光学的某些原理,也以作图法说明镜面成像原理。然而,该书“语焉不详”^①,并且所有的光路图都是错误的,对此后中国光学发展产生了不良影响。

比利时教士南怀仁于康熙十三年(1674年)编著《灵台仪象志》一书涉及较多的物理知识。伽利略关于材料强度实验、单摆实验,湿度计与温度计制作方法,十六世纪之前西方的折射知识与色散知识,书中都略有所述。

将力学和机械知识较早而且较集中介绍到中国的是《远西奇器图说》一书,该书由邓玉函口译、王徵笔述,刊于1627年。它涉及阿基米德、阿格里哥拉(Georgius Agricola, 1494—1555年)、刺墨里(Agostins Ramelli, 1531—1590年)、未多(Francois Viete, 1540—1603年)、斯泰芬的静力学知识和简单机械的力学原理。^②

1840年以前与物理学有关的主要译书大致如此。虽然传入中国的物理学知识并不多,但对中国的影响却是积极的。

西方的科学知识首先引起中国学者的新鲜感。许多学者将他们所见闻的西方科普知识撰入自己著作之中。方以智的《物理小识》、宋应星的《天工开物》、徐光启的《农政全书》,甚至于王夫之的《思问录外篇》都记述了西方的物理知识或机械制作。方以智在其《物理小识·自序》中对当时他所理解的中西学术之异同作了比较:将西方科学称为“质测”,即考究一事一物之理,推其常变;将中国的科学称为“通几”,即以费知隐,推究天地万物所自来。方以智认为:“远西学人,详于质测而拙于通几。然智士推之,彼之质测,犹未备也。”《物理小

^① 张福禧:《光论》,丛书集成本。

^② 严敦杰:《伽利略的工作早期在中国的传播》,《科学史集刊》第7期(1964),第8—27页。

识》具有比其前代典籍更为深刻的物理思想,与方以智本人欲融贯“通几”与“质测”不无关系。

西方科学知识的传入,不仅在于翻译、刊行了几部有关的书籍,丰富了中国传统科学,还在于紧接其后,中国学者又加以发展。王徵与邓玉函合译《远西奇器图说》之后,王徵又独立撰写了《新制诸器图说》,将其学到的知识融会贯通,从而设计了“自行车”、“自行磨”等机械。此外,由于阿基米德力学知识的传播,关于杠杆的数学计算成为明清之际数学家感兴趣的课题,有些算题具有一定难度,反映了当时力学水平的提高。梅珏成等人于1719年编写的《数理精蕴》中已采用代数法求解杠杆力学,接近于近代静力学解法^①。而光学知识的传入对中国影响最为深远。虽然传教士带来的光学知识很零碎,甚至镜面成像的光路图是错误的,却使这一时期中国光学有了很大发展。

首先得到发展的是眼镜。十五世纪初,它便已传入中国。起初,人们按照它的阿拉伯语(al-unwainat)或波斯语(ainak)读音称其为“爰逮”、“爰碓”^②。约一个世纪之后,郎瑛首先将其称为“眼镜”^③。早期传入的眼镜是手执式或夹鼻式、可开合或可折叠的老花镜,而且数量稀少,价值百金。^④ 不仅文人墨客将眼镜入诗,而且乾隆五十六年(1791年)朝廷还以眼镜为题考翰林。^⑤ 随着光学知识在明末清初的传入,中国人不久就学会制造眼镜。孙云球、薄珏、黄履庄等人都曾以制眼镜和光学仪器谋生^⑥。十八世纪,一个新兴产业,即眼镜店、眼镜街在中国形成了。北京的眼镜店“三山斋”建于乾隆初年,而乾隆末、

① 王燮山:《关于明清之际中国杠杆力学问题的算法》,《中国科技史料》1991年第1期,第53—62页。

② 张宁:《方洲杂录》;田艺蘅:《留青日札摘抄》卷二。

③ 郎瑛:《七修类稿·续稿》卷六《事物类》。

④ 时得之:《我国早期的眼镜》,《文物》1988年第3期,第18—19页。

⑤ 董树岩:《眼镜入华考》,《物理通报》1994年第3期。

⑥ 王锦光、洪震寰:《中国光学史》,湖南教育出版社1986年版,第157—159页。

嘉庆初,广州太平门外眼镜街的产品已行销全国。北京、上海、苏州、广州等地都有不少人以制眼镜为业。鸦片战争前后,中国的眼镜在数量、质量(均为水晶片)和品种(除老花外,尚有近视、平光、平凸等镜)上都超过舶来品。眼镜随之逐渐普及。

在望远镜和其他各种光学镜器的制造上,也有如同眼镜的发展情形。1629年徐光启奏请制造三架望远镜。两年之后,其中一架被用于观察日月食。这是在汤若望《远镜说》一书出版之后三年的事。孙云球不仅制造眼镜,还制造了“千里镜”(望远镜)、“存目镜”(放大镜)、“察微镜”(显微镜)、“万花镜”(万花筒)、“幻容镜”(哈哈镜)等十几种,还著有《镜史》一书(已佚)。薄珏不仅制造了望远镜,而且他还是将望远镜装置于大炮上作为瞄准器的发明者^①。黄履庄也制造了望远镜、显微镜等多种光学仪器。在这种技术背景下,小说家也将有关制造工艺和成像情况撰入章回小说之中。^②

在光学理论方面,也比传统中国科学有较大发展。郑复光著《镜镜论痴》一书,于1835年完成初稿,1846年刊刻。该书不仅叙述了几何光学中一些基本概念,而且阐述了其中某些定律,如光的直进性质、光的独立传播、反射定律和折射定律。在对各种镜子的制造及其成像原理的描述中,他以中国特有的“顺收限”、“顺展限”、“顺均限”定义透镜的各种焦距,以比率表形式得到了某些类型的望远镜的焦距公式^③。该书综论古今,结合中西,发展了已传入中国的近代光学知识,也是中国光学史上第一部专门的光学著作。然而,由于《远镜

① 李约瑟,《江苏的光学艺术家》,见潘吉星主编:《李约瑟文集》,辽宁科学技术出版社1986年版,第533—565页。

② 郭永芳,《清初章回小说〈十二楼〉中的一份珍贵光学史料》,《中国科技史料》1988年第2期,第87—89页。

③ 林文照,《十九世纪前期我国一部重要的光学著作〈镜镜论痴〉的初步研究》,《科技史文集》第12辑,第103—121页。

说》中光路图是错误的,从而影响了《镜镜论痴》中某些光路图的正确性。

在郑复光之后,又一个光学家邹伯奇对光学作出了突出贡献。他正好生活于鸦片战争前后,他的成就主要是鸦片战争前中国光学的继续与发展。或许由于他的家乡在广东珠江三角洲的南海县,经济与科技信息比内地灵通。因此,其著《格术补》(大约成书于1844年)发展了郑复光的光学成果,对望远镜和显微镜的成像规律、结构原理、光学性能以及成像公式作出正确的结论,澄清了此前几何光学上的错误,也介绍了此前传教士所没有的知识。他大约在1840年开始研究照相机,并于1844年获得成功。这是在1839年发明照相术之后五年、在银版摄影法于1846年传入我国之前两年取得的成果。邹伯奇自制感光材料、研制照相机全套设备,并拍摄了不少照片,开创了我国的摄影技术事业^①。之后不久,又一个新兴产业即照相业在中国兴起。

此外,郑光祖在其初稿于1822年的《一斑录》中对鸦片战争前传教士带入中国的物理知识有所记述。尤其在声学知识方面有较深刻的认识,正确解释了声波在凹面上的反射与聚焦现象。^②

在少量的西方科学知识的影响下,中国传统的物理学在鸦片战争前取得了可喜的进步。但这决非传教士的初衷。对于传教士而言,传播科学知识是以传教为目的的。但不少接受者却对科学而不是对宗教感兴趣。利玛窦等人每每感叹,在华期间受洗礼入教者如此之少,而与之讨论科学技艺的人数却出乎预料的多,其原因就在于此。素有技巧的中国人,从少量的科技信息中发挥了自己的最大才能,从

① 骆正显:《释邹伯奇的〈格术补〉》,《中国科技史料》1988年第2期,第31—37页;李迪、白尚恕:《我国近代科学先驱邹伯奇》,《自然科学史研究》1984年第4期,第378—390页。

② 戴念祖:《中国声学史》,第128页。

而为中国物理学从传统步入近代时期打下了一个良好的基础。

二、物理学书籍的翻译

以牛顿为代表的经典物理学在十九世纪五十年代才真正地较为全面地介绍到中国。到十九世纪最后十年间,一些最新的物理学知识也开始迅速地在中国传播。这些介绍或传播主要是以译书形式进行的。

1852年魏源《海国图志》增补刻本问世,其中极为简单地述及牛顿对彗星和潮汐现象的解释。“宇宙间万物皆有相摄之理”一语,即今日所谓“万有引力”一词首见于该书^①。1853年张福禧和教士艾约瑟合译《光论》一书问世,该书首先将牛顿的三棱镜分光实验和光色散问题作了介绍。而较全面地完成引入牛顿经典物理的则是李善兰之功。

1859年刊行了三部与牛顿学说关系密切的译著:一是李善兰和伟烈亚力合译的《谈天》;二是李善兰和艾约瑟合译的《重学》;三是李善兰和伟烈亚力合译的《代微积拾级》。第一本译书介绍了牛顿的万有引力概念及其定律,包括日月五星的运动、测定行星质量、开普勒三大定律等内容。第二本译书较全面地介绍了力学中各个课题,特别是介绍了牛顿的三大运动定律及其运用问题。第三本译书介绍了牛顿的微积分计算方法。值得指出的是,李善兰在译完上述各书之后,还与伟烈亚力、傅兰雅合作,着手翻译《奈端数理》(牛顿的《自然哲学的数学原理》)一书。一说他们译完《奈端数理》初集十四卷,并作为上海“广方言馆”学生教本^②;又一说他们译完该书八册中前三册^③。可

① 魏源:《海国图志》卷九七《地球天文合论二》,卷一〇〇《地球天文合论五》。

② 《广方言馆全集·开办学馆事宜章程十六条》第19—39页。转引自朱有璩:《中国近代学制史料》第一辑上册,华东师范大学出版社1983年版,第220—234页。

③ 傅兰雅:《江南制造总局翻译西书事略》,载《格致汇编》第三年卷(1880年)。

惜,译述未果,后来译稿也佚。

李善兰(1811—1882年),字壬叔,号秋纫,浙江海宁人,是我国十九世纪一流的科学家。从1852年开始,他8年间在上海译书8种80余卷。1868年入北京任同文馆算学总教习达13年之久。就李善兰译牛顿《原理》一事,傅兰雅说:“此书虽为西国甚深算学,而李君亦无不洞明,且甚心悦,又常称赞奈端之才。”^①李善兰通过译书,极大地提高了自己的科学水平。在《重学》“自序”中他简洁地总结了牛顿三大运动定律就是一个例证。在《谈天》“自序”中,他不仅将托勒密学说开普勒椭圆运动、牛顿万有引力作了历史发展的概述,而且指出,“摄力”(即万有引力)之理“定论如山,不可移矣”。他宣称自己“主地动及椭圆之说”,并指出“此二者之故不明,则此书(指《谈天》)不能读”。牛顿的经典物理学体系就这样在中国传开了。李善兰的《谈天·序》是中国人接受经典物理学宇宙观的宣言书,也是中国物理学从传统向近代科学转变的界标。在其后四五十年间,经典物理学的思想体系对中国的科学发展和社会运动都产生了极为深刻的影响。^②

英国物理学家、科普讲演家和著作家丁铎尔(John Tyndall, 1820—1893年,曾译名“田大里”)于1853年被选为伦敦皇家学院自然哲学教授,并在十九世纪六十至七十年代作了一系列科普讲演,受到人们极大欢迎。他的许多专题讲演都曾在中国翻译出版,如他的《声学》、《光学》、《电学》、《热学》,都受到中国读者的极大喜好。这些专题著作的中译本向中国读者介绍了直到十九世纪中期物理学各分支学科的基础知识,并成为晚清时期各地书院的格致科教材。

我们以丁铎尔的《声学》为例谈一点科学史上有趣的事。该书中

^{①②} 戴念祖、郭永芳:《牛顿在中国》一文引,见戴念祖、周嘉华主编:《原理——时代的巨著》,西南交通大学出版社1988年版,第81—89页。

译本八卷,基本上按原著译出。不仅该书内容深入浅出,而且书中许多声学仪器绘图和实验插图也是中国人第一次所见。1874年,《声学》中译本以线装书形式装帧成二册刊行。中译者之一教士傅兰雅(John Fryer,1839—1928年;另一译者为徐建寅)寄赠丁铎尔一部,并给丁铎尔写了一封信,言及他和徐建寅译此书之苦衷。丁铎尔在1875年6月为其《声学》英文本第三版作“序”中摘引了这封信的部分文字,并且写道:

在我面前摆放着二大册装帧奇特的书,我完全不认识书中的文字。然而,我处处都看到《声学》前两版中熟悉的插图。我感谢傅兰雅先生送我这些书。与此同时,几周以前他给我寄来一封信。我从这信中摘引一段如下。傅兰雅先生写道:

在您的《声学》初次到达上海不久,一天,我正在认真阅读它的时候,一个叫徐建寅的明智的官员看到书中一些图版,就要我给他讲解其中的意思。他由此对声学变得极感兴趣,以致除了翻译它之外没有任何别的东西能使他感到满足。可是,由于工程的和其他方面的著作在当时更高的官员看来是更具实际意义和重要性,因此,我们定在每天晚上的空闲时间翻译您的大作,并且由我们独立出版。可是,当我们译毕并将译稿送达更高当局时,他们却对该书非常感兴趣和喜欢,他们立即同意以政府经费出版,并赔本销售。每本书的售价是480铜钱,或约1先令8便士,你会想到本地印刷费用极为廉价。

傅兰雅先生和他的中国朋友在掌握该书的每个概念上都毫不困难。……

从以上引文中,我们看到当时翻译西方科技书籍的某些有趣情节。中国一些先进知识分子在当时掌握最新声学概念毫不困难,一方面是由于丁铎尔的著作通俗易懂;另一方面也由于声学是中国传统科学中最为发达的学科。尚需指出的是,或许由于丁铎尔的《声学》是

一本科普读物,某些声学概念并不确切。例如,全书以“动数”(number of vibrations)一词代替“频率”(frequency),以致这个错误的概念直到二十世纪二十年代,还有些中国人在重复它。

更有意思的是,中译本《声学》一出版,有关管内空气柱振动与弦线振动完全一致的看法,立即引起中国学者徐寿的注意。徐寿经过实验证明,成倍半长度关系的管、其音高不正好是八度;而成八度关系的两支同径管其长度之比为 $4/9$ 。于是,徐寿写信到英国请教了铎尔教授。当他的信通过傅兰雅译成英文、并在1881年3月10日出版的《自然》(Nature)杂志发表时,立即引起了欧洲物理学家、声学家和音乐家的极大惊叹。实际上,徐寿以中国传统的声学方法证明了开口管的末端效应,也即管口校正。因此,《自然》的编辑在发表徐寿信的编者按中指出:“看来,发现对旧定律的真正有科学意义的现代修正却来自中国,并且是以最原始的器具证明该修正是有根据的。”声学家斯通博士(Dr. W. H. Stone)在对徐寿信的评论中说:“很有意思的是,证实这个鲜为人知的事实却是来自遥远的东方,而且是以如此简单的实验方法得到的。”^①

这一事实表明,中国人在翻译西方科学著作中的确学习了近代科学知识,同时也将自己的传统科学的真知灼见介绍到西方。在人类文明的进化史上,学习与交流总是彼此得益的知识传播过程。

我们再谈谈译成中文的其他书籍。

傅兰雅和徐建寅合译的《电学》一书,系统地叙述了十九世纪六十年代之前的电学知识,并有插图数百幅。完全由中国学者徐兆熊等人译著的《电学测算》一书也颇具特色,它不仅列有单位换算表,有关电、磁、热、化方面的物理数据表,而且每章附有习题,书

^① 详见戴念祖:《中国古代在管口校正方面的成就》,《黄钟》(武汉音乐学院学报)1992年第4期;《中国科技史料》1992年第4期。

末附英汉术语对照。英国人克尔(John Kerr, 1824—1907年)的《无线电报》是一本十分及时的译作,由卫理和范熙庸合译,江南制造局1900年刊印。虽然1900年刚开始应用无线电,但有关的理论、概念和实验通过该书的翻译和出版而使中国人有所知晓。1899年上海江南制造局刊印了由傅兰雅和王季烈合译的《通物电光》(即X光)一书,它与伦琴(W. K. Röntgen, 1845—1923年)发现X射线仅距4年。

1900年江南制造局刊印的《物理学》(上编、中编)一书,是日本饭盛挺造编、藤田丰八(1869—1929年)译、王季烈重编并润色文字的教科书。该书曾被誉为“理科中善本”,影响后来物理学教学20余年。它的定名与出版使中国科学史上第一次有了“物理学”一词的正式称谓。此后十余年间,有许多物理学教科书是从日文译成中文的。1906年清政府学部图书编译局出版了严文炳译、常福元重订的《力学课编》一书。该书共八卷29课,课末有问题,卷末有试题,书末有答案,而且该书第一次横排力学公式,并以中国的实例取代原书西方实例。它是一部表明中国人对西方近代物理学知识已有所融会贯通的较好的初等力学教课书。从译书角度看,到二十世纪头10年,作为近代物理学史的启蒙阶段已趋成熟。

十九世纪六十年代洋务运动兴起,建工厂、办学堂、译西书,引进西学,各地书局、书馆相继出版了一些西方科技著作。据统计,自咸丰到清末(1851—1911年)共出版西方科学著作968种,其中理化类98种;而据可查资料,理化类中的物理学译书以及和物理学有关书籍约65种左右。不过,除以上所述重要译书之外,此时期大部分译书是实用性通俗性读物和教科书。其译书形式基本上是由来华教士与中国学者共同完成的,教士口述,中国学者笔记并润色文字。二十世纪上半叶,中国学者才独立地进行翻译西方物理学著作。

三、物理教育的萌芽

向西方学习科学技术、特别是军事科学技术是十九世纪六十年代开始的洋务运动的主要内容之一。在洋务运动时期,各地相继办起了外语学校(当时称为“方言馆”)和各类军事技术专门学校。在这些学校里,陆续开设了当时称为“格致”或“格物”而今谓物理的课程。这就是近代物理教育在中国的肇始。在这些学校里所以开设格致课或格致馆,其主要动机是:“察格致一门,为新学之至要,富国强兵,无不资之以著成效。”^①

真正的物理教育开始于1862年在北京创办的京师同文馆。起初,该校是专为八旗子弟学外语而设,1866年增设天文算学馆,1888年正式开设格致馆。由于同文馆的不断扩充发展,因而兼收满汉学生,以培养办理洋务人才为宗旨。学生分隶天文、算学、化学、格物、言语文字各馆,相当于现在的各科系。格致馆教习先是美国人丁韪良(William Alexander Parsons Martin, 1827—1916年),后为英国人欧礼斐(Charles Henry Oliver, 1857—?)。德国人施德明(Carl Stuhlmann, 生卒年不详)原是化学和矿物学教习,1894年兼格致教习。

据光绪二年(1876年)同文馆公布的八年课程表来看,格致课程安排在第四、五年。“四年:数理启蒙、代数学,翻译公文;五年:讲求格物,几何原本,平三角、弧三角,练习译书。”事实上,在第六年“讲求机器”,第七、八年“天文测算”中都要粗浅地涉及一点物理学内容。对于

^① 《同文馆题名录》记光绪十四年(1888)开设格致馆事,光绪二十四年(1898)刊。转引自朱有瓛:《中国近代学制史料》第一辑上册,华东师范大学出版社1983年版,第18页。

年纪稍长的学生,五年学完全部课程,格致课程安排在首年、第三年。“首年:数理启蒙、九章算法、代数学”;“三年:格物入门、兼讲化学、重学测算”。而事实上,在第四、五年的“航海测算”、“天文测算”、“讲求机器”各课程中也要粗浅地涉及一点物理学^①。应当指出,这样的课程安排在同文馆的历史上并非一成不变。

据《清会典》卷一〇〇记载,格致学大致分为力学、水学、声学、气学、火学、光学、电学七类。《清会典》的记载大概是同文馆格致科学生所学课程及其内容总纲。至于所用教材,大概也有多种。丁韪良于1866年编译的《格物入门》、1883年编译《格物测算》都是京师同文馆刊印并被该校采用的教本。《格物入门》包括力学、气学、水学、火学、电学、化学、算学共七卷。问答体裁,适宜学生熟背硬记。书中附有插图。《格物测算》包括力学三卷,气学、水学、火学、光学、电学各一卷,仍采用问答体裁。在简明叙述物理原理和规律之后,又以“演题”加深理解。该书首次教学生以微积分计算物理问题。由傅兰雅辑译的《格致须知》丛书和《格致图说》丛书也是许多学校采用的启蒙读本。自然,艾约瑟、李善兰合译的《重学》,傅兰雅、徐建寅等人译的英国丁铎尔的《声学》、《光学》、《电学》,以及由这些书为蓝本而改编的各种所谓“浅说”、“揭要”等,也都是洋务运动时期各类学校采用的格致科教材。

京师同文馆可谓是当时中国的皇家学校。但是,1900年以前格致馆学生甚少。虽然不知道历年学生人数,但据统计,学习格物并参加“大考”的学生1893年为20人,1898年为4人;学格物测算并参加“大考”的学生1879年7人,1888年4人,1893年3人。比之学数

^① 《同文馆题名录》记光绪十四年(1888)开设格致馆事,光绪二十四年(1898)刊。转引自朱有瓚:《中国近代学制史料》第一辑上册,华东师范大学出版社1983年版,第71—73页。

学、天文、化学的学生要少得多。同文馆实行年有“岁考”、“三年一大考”，类似于科举的考试制度。通过考试，分别优劣。优者分别授七、八、九品官，劣者分别降、革、留级。

同文馆格致学学生除了死记硬背课本之外，尚无任何实验或演示实验课程，也根本上没有任何实验仪器和演示教具。据 1896 年登记造册，学校里只有汉文典籍和算书 1800 本，洋文书 1900 本；有一小印刷所和一座小型观象台。充任教习者也良莠不齐。据说，有一个天文学教习口口声声要推翻万有引力定律^①。最能反映当时教学水平的，除教材、教本之外，便是各类考题的深浅了。

同治十一年(1872 年)格物岁考题分汉文题与英文题两种。汉文题中如“以水为则而权物之轻重者，其理若何”、“测算汽机之力，其式若何，其理若何”等；英文题中如“冬夏之冷暖有别，以图考之，其理何”，“光有二说，其理孰长”等。汉文格物考题与英文格物考题各为 9 题，除了其中的一、二题为简单算题外，其余均为自然常识或简单物理规律。但是，从考题看来，历年水平在逐渐加深。如同治十三年(1874 年)月考格物试卷题为：

今有甲乙丙丁四人各持一绳曳重物，甲乙两人各用力百斤，丁丙二人各用力百五十斤，甲乙之间其角二十度，乙丙之间其角二十二度，丙丁之间其角二十四度，试推其共力(今谓合力)若何？费力(即甲乙丙丁四人用力总和比合力多出的力)若何？及重物所行方向若何？^②

这是一道由力的平行四边形法则求合力和合力方向的考题。学生贵荣作图如 7-1，并详细、正确地解出了这道题。因学习成绩优

① 丁韪良：《同文馆记》，中译文载《教育杂志》第 27 卷第 4 号，转引自朱有瓚：《中国近代学制史料》第一辑上册，第 174 页。

② 本书所引各类考题，均见朱有瓚：《中国近代学制史料》第一辑上册，第 81—123 页。

异, 贵荣完成学业后留馆任教, 后升任为格物副教习, 并曾作为“笔述”者之一参与丁韪良翻译《格物测算》一书。

光绪十二年(1886年)格物测算大考题已相当于今日高中水平了。其题如下:

物自极高下坠地, 力时变而无恒, 其求速公式, 何法推之。

物自无穷远落地, 其末速几乎七洋里, 设自无穷远而落于太阳, 试推其末速何如。

有钟自赤道移至北极, 试推其秒摆次数加增若干, 并明其用以探测地形之法。

有百斤炮子以一千六百尺之速击铁甲船, 试以尺磅推算其力。

炮子轰击土城, 若倍其速, 必深入四倍, 试明其理。

船有铁桅, 必为空身, 试言其故, 并算其空身与实体者强弱比例。

一般说来, 格物考题多为物理知识、原理或定律的基本问答题, 而格物测算考题多为这些原理、定律的应用计算题。从上述几年的考题看, 京师同文馆格致学的教学水平在逐渐提高。

京师同文馆格致学的教学情况可以作为十九世纪下半叶我国近代物理学教育萌芽的代表。各地相继仿效同文馆。1863年设上海广方言馆(1869年移入江南制造局, 1905年改为工业学堂), 1864年设

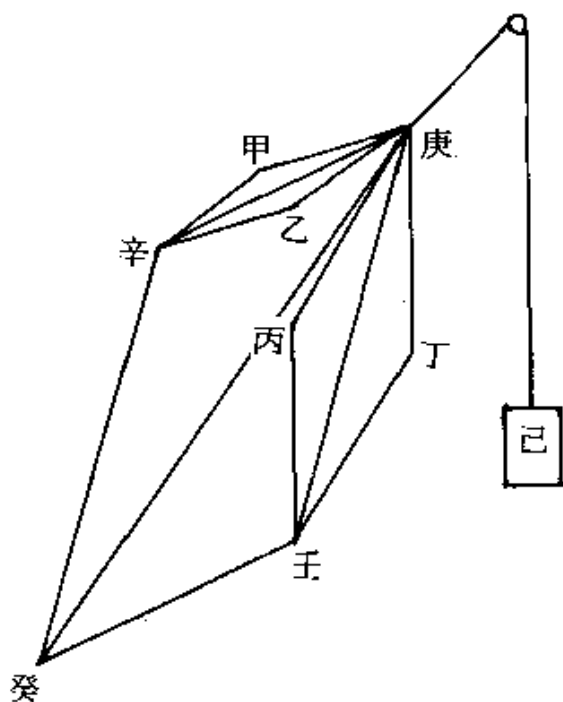


图 7-1 学生贵荣为 1874 年考题作图

广州同文馆,1893年设湖北自强学堂,这些学校的格致之学教学情况与京师同文馆雷同,只是在程度上稍低些。这些学校的优秀生均派送京师同文馆学习。徐寿、徐建寅父子、华蘅芳等人都曾经是上海广方言馆格致教习。

在企求船坚炮利、富国强兵的洋务运动期间,还办了一些军事技术学校和专业技术学校。上海江南制造局(1865年开办)于1874年设操炮学堂;1898年设工艺学堂,旋又改为兵工学堂。1866年在福州马尾开办福建船政学堂,又称求是堂艺局。该局又分为:注重法文和轮船制造的前学堂,注重英文和驾驶轮船的后学堂。学习操炮、制造轮船的学生,其科目中有格物、重学;学习驾驶和管轮的学生,其科目中有气学、力学、水学、火学等。据《严幾道年谱》载,严复15岁入福建船政学堂,“所习者为英文、算术、几何、代数、解析几何、割锥、平三角、弧三角、代积微、动静重学、水重学、电磁学、光学、音学、热学、化学、地质学、天文学、航海术等”^①。其他各种水师学堂、武备学堂、电报学堂、铁路学堂等等,也都相应教授格致课或格致中某些课程。例如天津水师学堂(开办于1880年)规定驾驶班学生在“力学、静力学、动力学、水学”方面要得125分,在“格物学:水、气、重学、理镜学、热学、吸铁学、风雨表、远镜、地平经纬仪、纪限仪、干湿寒暑表等件制法用法”方面要得100分。

1840年之后,在华各种教会创办了许多教会学校,他们比较重视自然科学,重视物理课程的教学。

四、教育体制初步确立时的物理教育

从十九世纪六十年代开办同文馆等学校到这一世纪末,从学生

^① 王蓬常编:《严幾道年谱》,商务印书馆1936年版,第4—5页。

人数、教学情状等方面看其成果都极为有限。可以说,这是穿上“西学”外装的完全封建的科举教育。真正建立起近代教育体系是在戊戌变法前后的事。

1898年(戊戌年),历时103天的维新变法运动虽然失败了,但维新运动领袖们的施政纲领,特别是废除八股,改各省书院为学堂、奖励新著作新发明等举措,都为清政府在此后所一一采纳。维新运动期间,还成立了相当于教育部的“学部”。这些都对后来的教育事业发生了影响。

1902年(壬寅年)管学大臣张百熙拟定《钦定学堂章程》,称为“壬寅学制”。次年(癸卯年)又有《奏定学堂章程》,称为“癸卯学制”。这是我国历史上第一个法定的并在全国施行的学制。癸卯学制颁布后,物理学以法定形式列入大中学校的教学之中。1905年,清政府明令取消科举制度。1906年,学部又将教育宗旨定为“忠君、尊孔、尚公、尚武、尚实”的方针。可见,这个教育体制带有极大的封建性。

根据癸卯学制,大学一般地分几个科。其中格致科又分6门:算学门、星学门、物理学门、化学门、动植物学门、地质学门。物理学门是后来物理系的前身。本科物理学门三年课程有:物理学、力学、天文学、物理化学、应用力学、应用电气学,这些课程课时最多,每周3至5学时;数理结晶学、物理实验法、最小二乘法、气体论、毛管作用论、音论、电磁光学论、物理星学,每周1至2学时;物理学实验、化学实验、理论物理学演习,星学实验,只列出课名而不作课时安排,实际上是徒有其名而已。由此可见当时教学一般情形。

根据癸卯学制,在中学5年中,第4年有每周4学时的物理课。第二类高中是为准备进入数理农工大学而培养学生的,因此第2、3年开设物理课,包括力学、物性学、声学、热学、光学、电气学、磁气学,每周3学时。

实际上,在戊戌变法之前几年,陆续地开办了一些新式学校。其

中如 1896 年在上海创办的南洋公学(1911 年易名南洋大学,1912 年又名上海工业专门学校,也是后来上海交通大学的前身)是比较闻名的。早期的一些物理学家如李复几、夏元璠、丁燮林等人都是南洋公学的毕业生。

1898 年创办的京师大学堂,是我国近代国立大学的肇始,也是维新运动的产物。1902 年京师同文馆并入京师大学堂,学堂初具规模。管学大臣张百熙从实际出发,开始不设本科,只设预科。预科又分政(文法)、艺(理、工、农、医)两科,学制三年。为收急效,又设速成科,下分仕学馆和师范馆,学制 3—4 年。师范馆下设数学物理学部,这是我国大学数理专业教育之始^①。早期物理学家何育杰是京师大学堂师范馆首届(1902 年)学生,1904 年被派往英国留学。师范馆格致课程设置大致为:第 1 年,力学、声学、热学;第 2 年,热学、光学;第 3 年,电气、磁气;第 4 年,数理科之次序与方法(相当于今日教学法)。

1901 年,学务大臣张百熙要求译书局不仅翻译一般书籍,更要翻译教科书。从此时起到清末,日本的各类中等学校教科书被译成中文出版,并作为此时期中学教科书。据统计,1901—1902 年间,所译各级各类中等学校教科书达 23 种。1904 年学部成立图书局,专管教科书审订,从此开始自己编纂一些教科书。从 1904 年到 1911 年间,共有 13 种物理学教科书出版,其中翻译的 4 种,编译的 3 种,中国学者自己编纂的 6 种。^②

在大学教科书中,1903 年出版了饭盛挺造编、王季烈等重新编排的中译本《物理学》(下编);同年,京师大学堂译书局出版了《额伏烈特物理学》五卷。英国物理学家额伏烈特(Joseph David Everett, 1831—1904)曾于 1870 年将法国德夏内尔(A. P. Deschanel)著《初

① 沈克琦、吴自勤:《早期的北京大学物理系》,《物理》1992 年第 11 期,第 693 页。

② 骆炳贤、何汝鑫:《中国物理教育史》,湖南教育出版社 1991 年版,第 55—57 页。

等物理学》译成英文,中译本据英译本译出。1906年严文炳译,常福元重订《力学》,如此等等,均为当时格致科普遍采用的教科书。

第二节 近代物理学的创立时期

一、“五四”新文化运动和近代物理学知识的普及

辛亥革命推翻了清王朝的封建统治,1912年成立了南京临时政府,孙中山任临时大总统,蔡元培任教育总长,科学教育曾一时得以复兴。但是,接着袁世凯、张勋、段祺瑞三次复辟活动,恢复尊君、尊孔、读经,又削弱了自然科学的教育。从1915年开始,进步青年和知识分子掀起了反封建、反迷信,提倡民主和科学的新文化运动。1919年,这个运动又以震撼世界的反帝反封建的五四运动达到了高潮。在“五四”新文化运动的影响下,中国人民高举“民主”和“科学”的两面大旗,科学知识得到空前普及,最新物理学的成就——放射现象、量子论和相对论作为科学新潮之一而得到广泛的传播,为二十世纪上半叶物理学的发展打下了极好的思想基础。^①

就物理学而言,虽然二十世纪初中国尚处在幼稚阶段,但在这期间,许多最新的物理学成就都传播并介绍到广大知识分子和青年学生之中。1903年鲁迅先生的作品《说钋(镭)》曾将1898年居里夫妇的发现介绍到中国,但当时似乎并未引起多少人注意。1915年《科学》杂志又有文章介绍放射性、劳厄晶体衍射等最新物理学成就,^②

^① 戴念祖:《五四运动和现代科学在中国的传播》,载《纪念五四运动六十周年学术讨论会论文选》(三),中国社会科学出版社1980年版,第375—386页。

^② 《科学》第1卷第7、8期。

但也仅限于部分知识分子所闻见而已。直到1919年,当大量的有关科普文章在各报刊发表时,关于镭和放射性等知识就为民众所熟悉了。此时,随同镭和放射性的传播,有关原子结构、晶体结构、元素蜕变的知识,特别是关于卢瑟福原子模型、放射性治疗等知识也在民众中传开。甚至于带有量子条件的玻尔—卢瑟福原子模型也在报刊中出现了。我国民主革命的先行者孙中山在1918年曾作出原子是不可穷尽的精采论述,指出“前之所谓元素者,更有元素以成之,元子者,更有元子以成之。”^①这无疑是新文化运动科学普及宣传的成果。

就量子论而言,最早的介绍文章发表于1917年^②。1920年,周昌寿翻译并发表了普朗克在1900年关于量子假设的划时代的论文:《热辐射律与作用量子之假设》;同年,他又以题为《光波诱电论》的文章详细介绍了爱因斯坦的光电效应,其内容包括初期的实验,光电效应与各种物理因素之关系,光电量子论、统计论,以及它的应用等十一节。1921年周昌寿又撰写了《量子说梗概》一文。文中特别述及卢瑟福-玻尔原子模型以及1916年索末菲提出的原子椭圆形轨道等问题。令人感兴趣的是,爱因斯坦1922年2月24日晚在柏林大学作“光之性质”的讲演。不出两个月,这个讲演就被译载于当年4月13日的《时事新报》副刊“学灯”上。其中,还报道说,当爱因斯坦讲演时,座无虚席,中国人到会听讲者也有十几位。这一消息引起当时青年学生的极大兴趣。^③

爱因斯坦及其相对论是新文化运动期间最令读者关心的科学家和科学理论。其原因是多方面的。第一,英国哲学家罗素于1920—

① 《孙中山选集·孙文学说》上卷,人民出版社1956年版,第140页。

② 《学艺》第1卷第2期。

③ 戴念祖:《1915—1924十年间我国的物理学》,《科技史文集》第12辑,第142—151页。

1921年间在中国作了相对论专题讲演,多次讲到列宁和爱因斯坦是“现代世界上两个最伟大的人物”。从而引起了中国学生和进步青年的注意。第二,爱因斯坦本人在1922—1923年间两次路过上海,并在上海作了讲演。正值爱因斯坦第一次路过中国期间,瑞典播发了他获得1921年度诺贝尔物理学奖的消息。第三,1919年日食观察证实了爱因斯坦关于光线在太阳附近偏折的预言,从而相对论轰动欧美各国,也波及中国知识界。第四,根本上是由于五四新文化运动为科学的传播、普及、宣传和发展扫除了障碍,打开了道路。

据大致统计,1917年在中国报刊上开始出现相对论文章,到1923年上半年,有关爱因斯坦及相对论的著作、译文、报告、通讯等文章达百余篇。《解放与改造》杂志(后改名《改造》)(第3卷第8期)、《少年中国》(第3卷第7期)、《东方杂志》(第19卷第24期)相继刊行爱因斯坦专号或相对论专号。《同济杂志》(第1卷第1、2期)开辟了“相对论研究”专栏,北京大学成立了相对论研究会,举行相对论报告会。五四新文化运动的积极分子如杨铨、鲁迅、李大钊等人都积极地宣传和普及相对论科学知识;许多大学教授,如夏元瑛、何育杰、丁燮林、李书华、张贻惠、周昌寿、文元模、郑贞文等为传播、介绍相对论而撰文、著述,作出了重要贡献^①。夏元瑛在1921年春曾陪同教育总长兼北大校长蔡元培在柏林访问爱因斯坦,邀请其来华讲学。他从德文翻译的爱因斯坦《相对论浅说》(今译《狭义相对论》)不仅在中国多次出版,也曾在东南亚各国刊行。

一件有趣的事是,在新文化运动中,当爱因斯坦及其相对论广为传播之时,已经成为保皇党的康有为于1922—1923年间对爱因斯坦在1917年提出的宇宙有限无边说提出诘难。他说:“譬如人家有一卵壳内之物,测至其壳内能还原处即谓物之大者止于一卵,则卵外岂无

^① 戴念祖:《爱因斯坦在中国》,《社会科学战线》1979年第2期。

他物耶？岂不大愚乎？其谬不待辨矣。”^①

二、物理学留学生

物理学留学生，学成归国，或执鞭于讲坛，或用心于研究所，对中国近代物理学的创立起了重大作用。

根据方豪的研究^②，同治前赴欧留学生达 113 人。他们作为天主教会会员，大多学习神学并从事宗教活动。其中，杨德望（1733—1798 年？）、高类思（1733—1780 年？）二人于乾隆十六年（1751 年）赴巴黎和里昂学习法文、初级科学与神学。1765 年回国时，法王路易十五曾赐予望远镜、显微镜、静电起电器等物。但是他们回国后并未在科学或物理学上作任何工作。直到 1900 年，虽有不少人以官费、自费出国游学，但几乎无人有眼光派学生出去学习数理化基础学科。1899 年，清政府才注意到应改变这种局面，1908 年才规定官费留学生必需学习理工农商学科。

就现在所知，第一个出国学习物理学的是李复几。他于 1901 年在上海南洋公学毕业后，由学校派送英国伦敦和德国波恩学习。在德国波恩皇家大学深造期间，由著名物理学家、大气中氦的发现者凯瑟尔（H. Kayser, 1853—1940 年）指导，进行光谱学研究，曾以实验证实勒纳（P. Lenard, 1862—1947 年）于 1903 年、1905 年相继提出的光谱理论的错误，从而于 1907 年获高等物理博士学位。但他后来是否回国，详情不明^③。在二十世纪第一个十年，出国学习物理学的有：

① 《康南海诸天讲·附篇十五》，1930 年铅印线装本。

② 方豪：《同治前欧洲留学史略》，《方豪文录》，上智编译馆 1948 年版，第 169—187 页。

③ 戴念祖：《我国第一个物理学博士李复几》，《中国科技史料》1990 年第 4 期，第 32—36 页。

何育杰(1882—1939年)于1903年留学英国曼彻斯特大学,1907年获学士学位,1909年回国任京师大学堂格致科教习,后来曾任北京大学物理系主任,对北大物理系建设贡献尤多;

夏元璠(1884—1944年)于1904年入南洋公学,1905年考取广东省留美公费生,1906年入耶鲁大学攻读物理,1909年入德国柏林大学深造,1912年回国任北京大学理科学长、物理教授等职,为北大理学院和物理系的建设作出了很多贡献。

李耀邦(1884—1940年?)于1909年入美国芝加哥大学,曾随密立根(R. A. Millikan, 1869—1953年)教授从事测定电子电荷的工作,并于1914年获博士学位,1915年回国后曾任南京高等师范教授一年,1917年起先后转入基督教和工商界。

此外,还有留学日本的张贻惠(1886—1946年),以及以庚款第一届(1909年)赴美留学生胡刚复、梅贻琦。胡刚复(1892—1966年)于1918年获哈佛大学哲学博士学位,旋即回国,历任南京高等师范和东南大学教授、物理系主任,平生为创办许多大学的物理系作出了贡献。梅贻琦学习物理与电机,于1914年获武斯特工艺美术学院理学士学位,回国后曾任清华学校物理学教授和清华大学校长。

从1910年起出国学习物理学的人增多了。他们中主要有:李书华(1913年留法,回国后任北京大学物理系教授、系主任,北平研究院副院长)、饶毓泰(1913年留美,回国后任南开大学物理系主任,北京大学物理系主任)、桂质廷(1913年留美,后任武昌华中大学物理系教授、系主任)、颜任光(1913年留美,后任北京大学物理系主任)、丁燮林(1914年留英,后任北京大学物理系教授、预科主任,中央研究院物理研究所所长)、裘维裕(1916年留美,后任上海交通大学物理系主任,理学院院长)、叶企孙(1918年留美,后任清华大学物理系主任、理学院院长)等等。从1920年到1925年间先后出国留学、学习物理学者有:吴有训、萨本栋、严济慈、朱物华、谢玉铭、王守竞、周培

源等人。他们中多数人回国后从事物理教学或研究,有筚路蓝缕之功。

1909年清政府利用美国退还庚子赔款余额成立“游美学务处”,专门培养留美学生。1911年,游美学务处改名清华学校。上述留学生中多数出自清华学校。二十世纪三十年代英国仿效美国作法,遂有留英庚款公费生,如王竹溪、王大珩、张宗燧等人便是其中赴英学习物理学的佼佼者。

三、物理教育的发展

民国初年,蔡元培任教育总长,于1912年和1913年制定了“壬子癸丑学制”,废除“忠君尊孔”的教育方针,引进欧美国家教育思想。该学制除规定各级学校的年限、课程和办学宗旨之外,又将大学分为文、理、法、商、医、农、工等科,无理科者不得称之为大学。北京大学首先建立理科物理学门。夏元璪于1913年任北大理科学长。他和物理学教授何育杰于1913年招收物理学门学生,1916年便有我国第一届物理学本科毕业生。

“五四”新文化运动之后,1922年又提出了较系统的学校改革方案,称为“壬戌学制”。该学制完全引入美国教育思想,并为我国长期采用。大学一律废科设系、设系主任,废学长设教务处。北京大学于1919年最早建立物理系。抗战前历届系主任为:何育杰(任期为1918.1—1920.4)、张大椿(1920.4—1921.9)、颜任光(1921.9—1925.11)、丁燮林(1925.11—1926.11)、李书华(1926.11—1929.3)、夏元璪(1929.3—1931)、王守竞(1931—1933)、饶毓泰(1933—1937)。

壬戌学制还规定了物理学为中学必修课,初中、高中均有一学年课程。1932年还颁布了“中小学课程正式标准”,详细规定了初中和

高中物理课程教学大纲。中等学校的物理教材也日渐完备、深入。

由于物理学留学生归国人数增多,大学物理系的教学从此逐步发展起来。

北京大学自设物理系之后,至1925年,基础物理与实验课程已比较完备,其毕业生水平比美国大学硕士稍低而高于其理学士。毕业学生人数从1918年的3人到1925年增至13人。三十年代在王守竞和饶毓泰任系主任期间,延聘师资、扩大实验室与图书设备,理论与实验物理课程达24门。在王守竞、饶毓泰和吴大猷等教授指导下,建立了研究实验室。毕业学生人数在1937年已增加到27人。1930年北京大学筹办研究科,物理系也陆续开出一系列研究生课程,其教学水平已接近国际物理学发展前沿。

1926年清华学校成立物理系,叶企孙任系主任。1928年正式易名清华大学。迄1932年止,物理系规模初具,有一批阵容强大的教授队伍,如吴有训、萨本栋、周培源、赵忠尧、任之恭、施汝为等,开设了理论与实验课程有37门,建立了普通物理、热学、光学、电学和近代物理五个实验室。从1929年物理系第一届毕业生王淦昌、周同庆、施士元之后,又培养了冯秉铨、龚祖同、王竹溪、傅承义、赵九章、陆学善、张宗燧、彭桓武、钱伟长、钱三强、王大珩、何泽慧等等物理学家。

燕京大学物理系初建于1920年,系主任为美国人郭察理(C. H. Corbett)。1926年郭察理辞职回美,物理系由谢玉铭任主任。三十年代,燕大物理系也初具规模。由教会支持,它具有比其他学校更好的实验仪器、更全的图书设备。谢玉铭与班威廉(William Band,副系主任)配合密切,重视实验室建设,开设独具特色的物理讨论课,由学生议论,评讲物理学发展动态。该系先后培养了孟昭英、王明贞、褚圣麟、张文裕、袁家骝、毕德显、陈仁烈、王承书、戴文赛、鲍家善、卢鹤绂等物理学家。

迄止三十年代,北京师范大学、中央大学(南京)、浙江大学、中山

大学(广州)、交通大学(上海)、南开大学(天津)、齐鲁大学(济南)、金陵大学(南京)、东吴大学(苏州)、华中大学(武昌)、厦门大学、岭南大学(广州)、大同大学(上海)、同济大学(上海)等等,约30余所高等院校都有初具规模的物理系、或数理系、理化系,物理教学已达到成熟阶段。其中一些学校设立研究院、培养研究生、授予学士或硕士学位。

早期留学回国的物理学工作者大多成为教育家。胡刚复1918年回国,先后创办并执教于南京高等师范等7所大学的理学院或物理系。严济慈于1927年获法国国家科学博士学位回国,在1927—1928年间,同时任大同大学等4所大学物理学教授,来回穿梭于宁沪线上。叶企孙、吴有训培养了王竹溪,饶毓泰培养了吴大猷,而王竹溪、吴大猷又培养了杨振宁、李政道。类似例子,举不胜举。学有师承,后继有人,保证了中国物理学的不断发展。

大学教材的演变很可以反映物理教学水平的一个侧面。二十年代和三十年代初,许多大学采用美国人达夫(A. Willmer Duff,又译为“特夫”)主编的《普通物理学》。二十年代初,北京大学、南京高等师范都曾自编中文实验讲义。1929年,叶企孙、郑衍芬合编《初等物理实验》,叙述了40个实验的目的、仪器、操作方法,是一本实验讲义与学生实验报告合一的教材,被清华大学和许多院校采作一年级普通物理实验教本。三十年代初,中国物理学工作者开始自编中文教材。萨本栋于1933年编著《普通物理学》、1935年编著《普通物理实验》;1941年戴运轨编著《大学普通物理学》,1947年严济慈编著《普通物理学》,它们相继为各类院校采作教本。郭察理和谢玉铭合编《物理实验》、《物理学原理及其应用》于1924和1926年出版英文本,为燕京大学物理教本,1928年先后译成中文,成为一种有浓厚中国特色的大学普通物理教科书,并受到美国教育家、哲学家杜威(John Dewey, 1859—1952年)的称赞。另外,倪尚达的《无线电学》自1929年初版以来,在1951年以前一直被工科院校所采用。1939年,萨本

栋著《双矢量电路分析》(英文)一书,被选入国际电工丛书;1946年,他的《交流电机基础》(英文)一书又被美国加州大学等几十所院校采作教本,从而开始了中国学者编著的教材被欧美先进国家采用的先例。

大学高年级课程或专业课程,大多由教授依其选择的教学参考书而讲授。例如,二十年代北大物理系的电子论、X射线和放射学课程的参考书有:密立根的《电子》,J. J. 汤姆逊的《阳射线》,德布洛衣的《X射线》,卢瑟福的《放射性物质及其原理》,居里夫人的《放射性》等等。三十年代课程中,如量子力学分三阶段学习:第一阶段内容为基本原理,氢原子,微扰论,多电子问题和氢分子;第二阶段为复杂原子能级之计算,斯塔克效应,多原子分子之振动、转动,电子能级及其光谱,拉曼效应,碰撞理论,核衰变和蜕变;第三阶段为狄拉克电子论。三个阶段的参考书有海森伯的《量子理论的物理基础》,索末菲的《波动力学》,以及 Handbuch der Physik 第二十四卷一分册中泡利所写的一章,等等^①。可见,教学内容及参考书均为当时物理学前沿学科的开创性工作或研究总结。

三十年代初期刚刚起步发展的物理学教育事业,因日寇侵华等原因,在1937—1949年间被迫处于停滞状态。抗日战争初期,华北、华东、华南地区各大学和学术机构纷纷迁至西南、西北地区。这时期,交通闭塞、书籍奇缺、校舍拥挤、缺医少药,更缺教学与研究用的仪器设备。在这样情况下,如西南联大物理系师生“精神振奋,以极严谨的态度治学,弥补了物质条件的不足”^②。在坚持开展理论方面的教学与研究的同时,还造就了如胡宁、杨振宁、黄昆、李政道、朱光亚、邓稼

^① 沈克琦、吴自勤,《早期的北京大学物理系》,《物理》1992年第11期,第693—703页。

^② 杨振宁,《读书教学四十年》,三联书店香港分店1985年版,第3—4页。

先等一批杰出的物理人才。

四、研究机构的建立

有留学回国人员作骨干,有教学的发展,二十年代后期开始、专门的物理学研究机构逐渐得以建立。

1928年3月在上海成立国立理化实业研究所,同年6月中央研究院创立,同年11月理化实业研究所之一部分改名为物理学研究所,隶属中央研究院,由丁燮林任所长^①。尽管当时经费有限,该所在丁燮林领导下,先后建立了物性实验室、X射线实验室、光谱实验室、无线电实验室、磁学实验室,以及标准检验室和南京紫金山地磁台,金木工场。除了各实验室进行有关实验研究之外,还曾制造理化仪器供全国大中学和研究机关之用,其中仅中学教学实验仪器一项至少制有2600套,为促进我国物理教学的发展作出了贡献。抗战期间,该所屡次迁移,始迁昆明,继至桂林,后迁北碚。抗战胜利后复返上海。1946年冬议迁南京九华山麓,并将地磁部分归入中央研究院气象研究所。1947年冬在南京建成实验大楼,1948年全部图书仪器集中于新楼。这个新建的物理所有图书室、原子核实验室、金属学实验室、无线电实验室、光学实验室、恒温室及金工场等。自该所成立到1947年,研究人员发展到近30人。其中有研究员(专任和兼任)7人,副研究员3人。

1929年9月在北平建立了北平研究院,副院长李书华和严济慈创办了该院物理研究所,由严济慈任所长,开展了光谱、感光材料、水晶压电、水晶侵蚀图像、重力加速度、经纬度测量与物理探矿等研究工作,尤以应用光学、应用地球物理方面成绩卓著。该所又与中法大

^① 1946年丁燮林辞职,由萨本栋兼任所长。1947年又聘吴有训兼任所长。

学合作于 1929 年创办了镭学研究所,严济慈任所长,进行放射性和 X 射线学研究。抗战期间,这两个所均迁至昆明。抗战胜利后,物理所迁回北平,镭学所迁至上海。1947 年,前者有研究员 7 人(专任),后者有研究员 4 人(专任)。1948 年,镭学所分为结晶学实验室(在上海)和原子能研究所(在北平),前者由陆学善主持,以 X 射线研究物质结构和晶体结构;后者由钱三强主持,开展核物理与原子物理研究。

继上述两个物理研究所之后,1932 年 5 月军政部兵工署建立理化研究所,内设物理部,有金属、弹道、光学、材料、电学五个实验室。其研究问题包括特种钢之物理性质及其金属组织,钢加热处理与其物理性质和金属组织之关系,研究并制造各种棱镜、军用通讯设备、感光器材与无线电遥控等课题或设备。

二十年代末,国家批准有条件的大学设立研究部,在教学同时开展科学研究。清华大学于 1929 年成立研究院,招收研究生,开展科学研究,试办物理研究所。1935 年,物理所扩展为理科研究所,所下按学科设研究部,物理学部由物理系负责。在短期内建立了 X 射线、无线电、光学、磁学等研究室。北京大学于 1930 年筹办研究科,1931 年招收研究生、聘任研究教授,1932 年正式设立研究院,理科各系大力发展在此前建立的实验室或研究室。物理系主任王守竞建立了真空系统、阴极溅射设备、拉制金属丝和磨制光学玻璃等设备,饶毓泰和吴大猷又扩展机械工作室,添置大型光栅摄谱仪等设备,为开展原子、分子光谱研究创造了良好条件。先后陆续设立研究部的有燕京大学、中央大学、武汉大学、南开大学、金陵大学等学校。

抗日战争期间,内迁的各大学因经费与设备困难,实验研究大为减少,大部分转入理论研究。周培源与王竹溪在西南联大转入湍流理论研究,浙江大学王淦昌于 1941 年提出验证中微子存在的建议、几个月后为美国物理学家所证实,等等。财力和人力都较为雄厚的清华

大学于 1939 年新办了五个特种研究所,由叶企孙任特种研究所委员会主任委员。其中有无线电研究所,所长任之恭;金属研究所,所长吴有训。这些研究所在极困难的条件下还是出了一些成果,培养了不少科研人才。

顺此简单叙述一下科学实验仪器的制造和实验室的兴建过程。

对物理仪器及实验重要性的最早认识大约起于 1870 年上海广方言馆“再拟开办学馆事宜章程十六条”。其中之一条为“购测器以便考订”,指出“查西人言理必显诸迹象,即有各类操作者”,“中国素未讲求,故言理终涉空疏,反借口于玩物丧志,其目所未见者,又以为荒诞而不足凭”,故而主张购置仪器,使“格致之学假象以明其理,借器以显其象”^①。1896 年,李端棻在“请推广学校折”中指出当时各种学校格致学徒有空谈、而无图器之教学状况,提出“格致之学、咸借试验”,并建议创仪器院^②。在这样的形势下,才有 1901 年创办的上海科学教学仪器馆。该馆在 1933 年之前只是生产一些中等学校所用的简单的教学仪器模型和挂图。南开学校创办人张伯苓(1870—1950 年)于 1904 年从国外购置学生实验仪器,在南开学校每周设 2 学时实验课,两人一组,并鼓励学生动手制作仪器。虽然当时学生人数甚少,但毕竟开创了中学物理实验的先河。1920 年前后,北京大学和南京高等师范分别在颜任光、丁燮林和胡刚复主持下,创办实验室,自编中文实验讲义,开设了大学物理实验课。从此各大学相继仿效,至三十年代实验课在大学蔚成风气。1925 年,北京大学物理系主任颜任光鉴于大学实验器材奇缺,毅然离开北大讲坛,与丁佐成一起在上

① 《同治九年三月初三日(1870. 4. 3)总办机器制局冯、郑上督抚宪禀》,《广方言馆全集》,第 19—39 页。也见朱有瓚:《中国近代学制史料》第一辑上册,华东师大出版社 1983 年版,第 231 页。

② 《光绪朝东华录》(四),中华书局 1958 年版,总 3791—3793 页。也见舒新城:《中国近代教育史资料》(中册),人民教育出版社 1981 年版,第 511 页。

海创办了大华科学仪器仪表公司,为中国科学仪器的创立与发展立下了头等之功。此后,中央研究院物理研究所制造高中物理仪器,北平研究院物理研究所制造光学仪器、显微镜和水晶振荡器。抗战时期,颜任光、蔡金涛主持桂林无线电器材厂,龚祖同主持兵工署军用光学器材之制造,方声恒主持中央工业试验所电学仪器制造。这些都助于物理教学和研究的进展。

五、中国物理学会

中国物理学会成立于1932年,它是物理学教学、研究发展的必然结果。1932年,全国物理学工作者约300人左右。

1931年设立在瑞士的国际联盟派了四位专家来华考察中国教育,其中一位是法国物理学家郎之万教授。他在考察中,建议中国物理学工作者应联合起来,成立中国物理学会,并加入国际纯粹物理和应用物理联合会,以促进中国物理学发展和国际交流。由此,1932年8月22日至24日在北平清华大学召开中国物理学会成立大会,通过学会章程,选举学会理事会和会长,并设立学报委员会,物理学名词审查委员会、物理教学委员会。抗战胜利后又增设应用物理汇刊委员会。学会理事会领导会务工作。理事会推选四人分任会长、副会长、秘书和会计。

按物理学会成立大会暨第一届年会通过的章程,理事会每年度改选一次。也许由于各种原因,后来并未完全履行该章程所定选举制度。如果按照改选理事长或副理事长为一届而计算,那么,从1932年到1949年各届理事会领导为:第一届(1932—1935年)会长李书华,副会长叶企孙,秘书严济慈,会计萨本栋;第二届(1935—1936年)会长叶企孙,副会长梅贻琦;第三届(1936—1942年)会长吴有训,副会长丁燮林;第四届(1942—1943年)会长吴有训,副会长王守竞;第五

届(1943—1946年)理事长(从1943年起会长改为理事长)吴有训,副理事长严济慈;第六届(1946—1947年)理事长叶企孙,副理事长萨本栋;第七届(1947—1948年)理事长叶企孙,副理事长饶毓泰;第八届(1948—1949年)理事长严济慈,副理事长饶毓泰。

从1932年到1949年中国物理学会召开了16次年会。在成立大会暨第一次年会上,仅北京地区20余名会员参加,提交论文10篇。1933年第二次年会在上海交通大学举行,此时已有会员88人,提交论文33篇。1934年第三次年会在南京中央大学举行,1935年第四次年会在青岛山东大学举行。1936年第五次年会与中国科学社等7个学术团体联合举行,分别在北京清华大学和燕京大学召开,此时物理学会会员已有200余人。这次年会盛况空前,也是对日本帝国主义侵占东北领土的一次学术抗议和示威活动。抗战期间,鉴于交通困难,年会活动分地区举行。如1942年第10次年会分为六个区,即在昆明、重庆、成都、城固(陕西)、遵义(贵州)、桂林在不同时间举行的。这一年正是牛顿诞生300周年纪念,重庆、贵州、福建长汀和永安及延安的物理学和科学工作者都分别举行纪念活动。第16次年会是1949年11月6日在上海枫林桥中央研究院举行的,与会者200余人。此时已有会员600余人。

中国物理学报于1933年创刊。在1933—1935年出版了第一卷共三期,至1950年共出版了七卷。该学报以外文(主要为英文,个别为法文、德文)发表,附以中文摘要。它在国内外学术交流中起到很好的作用。

物理学名词术语的翻译审订工作有一段较长的历史。1877年由在华的新教教士成立的益智书会(英文名 School and Text—Book Series Committee,即“学校教科书委员会”;1905年改为“中国教育会”,1915年又易名“中国基督教教育会”)重视术语译名与统一工作。1872年出版《英华萃林韵府》,该书反映了当时科技术语的翻译

情况,其中力学与物理学术语由艾约瑟和丁韪良根据当时一些译书汇编而成。1904年,该会又出版了《术语辞汇》,1910年修订重版^①。1908年,清政府学部所审定的《物理学语汇》收物理学名词近千条,英、汉、日三文并列。这是物理学名词的创始性工作。1920年科学名词审查委员会增加物理组,并将1908年《语汇》一书扩大之,列有英、德、法、日、汉五种文字,并附旧时译语参考。1931年教育部厘订该语汇,公布刊行。但物理学名词术语的使用仍相当混乱,且语词多有不确。1932年,中华教育文化基金董事会印行了萨本栋编的《物理学名词汇》,这是英汉名词对照、依英文字母检索的新式版本。中国物理学会物理学名词审查委员会成立后,推举杨肇熾为主任委员、王守竞、周昌寿、何育杰、裘维裕、吴有训、严济慈等为委员。1933年夏在上海中央研究院物理研究所召开名词审订工作会议,其结果于1934年由商务印书馆出版,定书名为《物理学名词》。此次之后,该委员会人员虽有变动,但名词审订工作至今不断。

1934年,中国物理学会加入国际纯粹与应用物理联合会,并派王守竞前往伦敦出席该联合会大会。在国际学术交流中,1933、1934、1935和1937年,马可尼(G. Marconi, 1874—1937年)、朗缪尔(I. Langmuir, 1881—1957年)、狄拉克(P. A. M. Dirac, 1902—1984年)、玻尔(Niels Bohr, 1885—1962年)相继访问中国。从1932年到1949年,郎之万、法布里(C. Fabry)、拉曼(C. V. Raman)等14位国际上著名物理学家被选为中国物理学会名誉会员。1935年,严济慈被法国物理学会选为理事,吴有训被德国洪堡学会推举为会员。1945年萨本栋先后被美国麻省理工学院和斯坦福大学聘为访问教授,主讲交流电机及其原理。在这期间,许多物理学家出国访问、讲学

^① 王扬宗:《清末益智书会统一科技术语工作述评》,《中国科技史料》1991年第2期,第9—19页。

或研究,取得了重大成果。

中国物理学会还作了两件有历史意义的工作。一是1934年就度量衡和大小数命名法提出建议。这个建议被社会各界采用;二是1946年1月15日,鉴于广岛原子弹事件,在昆明发表了关于原子能问题意见书,要求联合国组织设立原子能委员会,以保证原子能和平利用,而不用于毁灭性武器;组织视察团,调查各国有关原子能应用真相;设立联合国原子能实验室,共同研究重要问题,并与各研究机构联系。

由于地球物理学工作者人数逐渐增多,1947年他们从中国物理学会独立而出,宣告成立中国地球物理学会。

第三节 二十世纪上半叶中国物理学的主要成就

中国物理学工作者的研究工作在二十世纪上半叶绝大部分是在外国完成的^①。从二十年代末起,中国本土有少量的研究工作。抗战之前,较多的是实验研究,如光谱学、电学与磁学。抗战期间,鉴于仪器设备及经费的困难,绝大部分是从事理论研究,如相对论、湍流理论和统计物理学。在二十和三十年代,从事光学、应用光学和光谱学的研究者居多;而在四十年代,较多人在国外从事原子和原子核物理的研究。中国物理学家在上半世纪所作出的成就受到国际上的重视,他们的艰苦创业为中国后来的物理学的发展奠定了基础。

二十世纪最初十年,李复几以碱金属光谱实验证实勒纳的光谱

^① 有关本节更详细的内容和参考文献,见戴念祖:《本世纪以来中国物理学家的成就概述》,《中国科技史料》1991年第4期,文内有200余条参考文献;又见戴念祖主编:《二十世纪上半叶中国物理学论文集粹》,湖南教育出版社1993年版,该书列有105位物理学家简略评传及其代表著作。

理论的错误,促进了光谱学研究的发展。在第二个十年里,李耀邦于1914年精确地测定了电子电荷值。颜任光研究气体离子的迁移率与气体混合物的粘滞性,并以油滴法测定了气体黏滞系数的绝对值,对当时通用的物理-化学常数用表和以后的有关研究帮助极大。在第二个十年的后半期,胡刚复关于X射线的研究,对于确定X射线谱项结构、揭示原子发射X射线的机制都有意义;李书华研究极化膜的渗透性,这在当时是有创见性的工作;丁西林以热电子发射实验验证麦克斯韦速度分布律,这在当时是重要成果之一。二十年代初,叶企孙精确地测定普朗克常数,其测定值被后来物理学界沿用了16年之久;饶毓泰设计了一种新型的低压电弧光源,并研究了汞弧光灯的激发电势。1900年中国才有正式名为《物理学》的教科书,而在紧接着的20年间就以这些成就占有国际物理学学术版面之一角,令人欣慰。这20年间的物理学工作者,大多成为中国近现代物理学的奠基者。

二十世纪上半叶的物理学,大至宇宙、小至原子核,其门类之多、范围之广,是三言两语述说不尽的,也是难分清其门类界限的。其间,中国物理学家的成果也洋洋大观,现举其荦荦大端如下:

周培源和胡宁等研究相对论。周培源通过引进某些物理条件而获得轴对称静态引力场方程的严格解。王守竞是中国最早也是世界公认的卓越的量子力学家,他在量子力学诞生的1927—1928年间,成功地用量子力学方法解决普通氢分子和不对称陀螺问题。

在力学方面,丁燮林于三十年代创制一种可逆摆以测定重力加速度 g 值,从而避免了过去的许多实验误差。研究流体力学的有周培源、林家翘、李政道和卢鹤绂等。周培源于1945年提出了两种求解湍流运动的方法,迄今仍被称为湍流理论的奠基性工作。钱伟长研究板壳的内禀理论,首次用摄动法处理薄板大挠度问题。钱学森和郭永怀研究跨声速和高超声速流动的力学问题,提出在跨声速流场中重要

而有实际意义的是上临界马赫数。

在热力学和统计物理领域作研究的有葛正权、王竹溪、张宗燧、黄子卿、王明贞、王承书等。葛正权验证麦克斯韦速度分布律的实验成为经典实验被载入物理学著作之中。王竹溪在超点阵统计理论、在多元系的平衡与稳定性的热力学理论方面作了许多研究。张宗燧研究了固溶体的统计理论、合作现象和量子统计。黄子卿精确地测定了水的三相点。四十年代后期，杨振宁对超格统计理论的研究富有成果。

在声学方面，叶企孙于二十年代后期测定清华大礼堂音质，这是中国有关近现代声学的最早研究。三十年代末，马大猷建立了房间声学简正波的理论基础，提出了分析混响的新方法。四十年代他又以波动声学探讨了矩形室中非均匀声边界、颤动回声以及房屋声质起伏等问题。汪德昭在二次大战期间，研究声呐和超声波。

在光学和应用光学方面研究者甚多，尤其是严济慈领导下的北平研究院物理研究所、丁燮林领导下的中央研究院物理研究所都作了大量的应用光学研究。王大珩四十年代在英国研究光学玻璃，龚祖同在抗战期间制造了望远镜等军用光学仪器。

在光谱学方面除北平研究院物理研究所的大量研究之外，饶毓泰三十年代初在德国研究铷和铯的倒斯塔克效应，观测到这两个元素主线系的分裂和红移，为量子力学微扰理论提供了实验数据。他在北京大学研究了拉曼光谱，在美国研究了分子振动-转动光谱。吴有训以研究康普顿效应著称，他发现了康普顿效应中变线与不变线的能量分布和能量比率，确凿地证明了康普顿效应的存在。谢玉铭于1932—1934年间在美国与豪斯顿(W. V. Houston)合作研究氢原子光谱巴尔末系的精细结构，发现了在四十年代后期才得以肯定的著名的“兰姆移位”，并提出了与后来才发展的重整化理论方向相同的大胆建议。他的工作是上半世纪物理学的重大成就之一。在光谱学方面研究有成就的还有吴大猷、赵广增、查谦等人。

在电磁学方面,叶企孙于二十年代初研究了流体静高压对铁磁性金属磁性的影响,观测到许多复杂的现象。他回国后,又指导施汝为等人开创了国内磁学研究。李庆贤于1931年在美国研究低温下磁铁矿晶体的磁性,首次观察到磁冷却时感生磁的各向异性变化。萨本栋关于三相电路并矢代数的研究,被美国电气工程师学会评为1937年度“理论和研究最佳文章荣誉奖”。他所编写的《交流电机基础》也被英、美各国采作教本。严济慈和钱临照研究了水晶压电及其振荡现象。此外,还有马士修、蔡柏林、潘孝硕等人的研究。

在固体物理方面,陆学善创立了利用晶体点阵常数测定相图中固溶线的方法。钱临照、周如松等研究金属晶体的范性形变和晶体缺陷。余瑞璜提出了X射线晶体分析的傅立叶综合法。郑建宣发现了新结构型的 Co_2Al_5 晶体。葛庭燧在四十年代后期创立了金属内耗的整个研究领域,在物理文献中以他的名字命名的名词有“葛氏扭摆”,“葛氏内耗峰”,“葛氏晶粒间界模型”等。在半导体方面,范绪筠研究了锗硅导体,发现了导电电子密度偏离正常值相当大的现象,定量地讨论了两个物体接触处附近的势位和电子密度分布。黄昆在这方面也颇有成就,他提出了多声子辐射和无辐射跃迁的量子理论,成为研究固体杂质缺陷光谱和半导体载流子复合的奠基性工作;他还提出了分析极性光学振动的“黄方程”,并又由此推导出晶体中声子与电磁波耦合振荡模式,这又成为后来称为极化激元领域的奠基性工作。1947—1951年间,黄昆与玻恩(M. Born)合著《晶格动力学》一书,成为该领域的一本基本理论著作,在国际上享有盛名。

在原子和分子物理方面,除了早期叶企孙测定普朗克常数、吴有训实验康普顿效应、王守竞以变分法计算氢分子的结合能等工作外,三十年代初期,吴大猷在实验室制出超铀元素之前,通过计算铀原子的外电子能态而在理论上预言了铀原子可能为一组14个元素的起始;三十至四十年代,他进行了原子多重激发态的研究,其所预言的

某些多重激发态也在后来得到证实；他研究了氯化乙烯的同分异构体的红外光谱及分子对称问题，探讨了由电子激发的分子振动、分子振动与转动的交互作用、分子简正振动。尤其是他在抗战期间完成的《多原子分子结构及其振动光谱》一书，是这个领域的第一本国际性经典著作。在这一领域研究并有成就的还有赵广增、褚圣麟、卢鹤绂、洪朝生等。

还有一批物理学家从事 X 射线、放射性和宇宙线的研究。一批物理学家从三十年代后期到五十年代初在国外从事核物理的实验或理论研究，取得了许多重要成果。

1930 年，赵忠尧在研究硬 γ 射线的吸收系数和散射的实验中，最早观察到正负电子对的产生和湮灭现象。他的发现对于人们确立正电子和正负电子对的概念以及对于“对”的性质起了重要作用。

张文裕在三十年代后期曾以实验证明玻尔的核液滴模型。1949 年他在吸收介子的云室研究中，发现了 μ 子原子和 μ 子辐射现象，开拓了奇异原子物理研究的新领域。国际上称这两个发现为“张原子”和“张辐射”。

钱三强于 1939 年实验证明铀与钍受中子打击后产生镭的同位素，支持了刚发现的核裂变概念。1945 年何泽慧首次利用磁场云室观察和研究正负电子的弹性碰撞。1946 年，钱与何共同发现铀核受慢中子打击后分裂为三、为四的现象，并对此机制作了理论解释。

王淦昌于三十年代前期对镭系、钍系的 β 谱作研究，1941 年在困难的抗战时期提出了探测中微子的建议，为寻找和发现中微子作出了重大贡献。

虞福春于 1949—1951 年间，高度精确地测定了 20 多个稳定核素的磁矩，确立了核磁共振“化学位移”的概念，发现了“核自旋耦合劈裂”现象；他在普通水中发现 O^{17} 核磁共振讯号，测定 O^{17} 的自旋为 $5/2$ ，最早支持并证实迈耶尔 (M. Mayer) 提出的原子核中存在自旋

与轨道耦合的观念。

在核物理领域,还有王普研究核裂变,杨澄中研究轻核削裂反应,吴健雄从事 β 谱实验研究,梅镇岳从事低能核谱研究,朱光亚研究金(Au^{198})和铪(Hf^{181})的衰变形式,等等。

在理论物理方面,张宗燧研究量子场论,彭桓武研究介子物理和量子场论,胡宁研究核力理论、量子电动力学,马仕俊研究介子理论和量子电动力学。朱洪元于1947年最先对高能电子在磁场中运动而放出的电磁辐射的性质在理论上作了全面研究,该辐射即后来称为的同步辐射,不久即被实验证实。1949年,杨振宁、李政道和他们的合作者(M. Rosenbluth)共同提出普适费密作用与中间玻色子的存在;同年,杨振宁与费密(E. Fermi)提出了费密-杨模型,提出 π 介子是质子与反质子束缚态的可能性,开导了研究粒子内部结构的先河。1950年,杨振宁从推导一个粒子湮灭为两个光子的选择定则中提出了决定介子衰变的对称本性的方法。

在大气物理和空间物理方面,汪德昭在三十至四十年代之间研究大小离子的平衡态,提出了大离子平衡的新理论。桂质廷在三十年代在国内进行地磁、极光和电离层研究。在天体物理方面,吴大猷探讨了日冕光谱的来源。特别有意义的是,李政道于1950年对白矮星的研究证明它不含氢,从而断定它是天体演化的终点,同时证明白矮星的能量并非其内部核反应的结果。

在高真空技术方面,何增禄于三十年代初发明了7喷嘴的水银扩散泵,被称为“何氏泵”;他在高真空技术研究中首次提出了“抽速系数”的概念,被国际上称为“何氏系数”。

下 篇
机 械 工 程

从此开始要转入到叙述机械工程的历史。在这篇中,前八章(即从第八章到第十五章)叙述古代的机械制作与主要成就,其中包括简单机械、车辆与畜力机械、水力机械、风力机械、武器与热力机械、计时机械、自动机械、飞行机械。最后一章,讨论从1840年起近代机械工程在中国的兴起与发展情形。

从技术的角度看,机械制作在古代占有相当重要的地位,不仅有交通运输机械、农业机械、计时机械,而且在冶金、纺织、营造、水利、军事等技术门类中都缺少不了机械的制造。鉴于在本丛书中冶金技术另有专志记述,本篇对于铸铁、炼钢、锻造、热处理和切削加工等都不作讨论,纵使它们与金属机械的制造密切相关。

从一般的历史眼光看,就数理化的理论与技术上的实践而言,古人还是偏重于实践与技术。古代机械技术的高度成就与此不无关系。春秋战国之际成书的《考工记》将从事各种技术工种的人称为“百工”,其定义为

审曲面势,以飭五材,以办民器,谓之百工。

并将他们与王公、士大夫、商旅、农夫、妇功并列为“国有六职”。虽然历史上常有人将技术发明与机械制作当作雕虫小技、奇技淫巧,但《考工记》表明,至少在中国古代科技发展的早期,“百工之事”被认为是属于“圣人之所作”的。《考工记》写道:

知者创物,巧者述之、守之,世谓之工。百工之事,皆圣人之作也。烁金以为刃,凝土以为器,作车以行陆,作舟以行水,此皆

圣人之所作也。天有时，地有气，材有美，工有巧，合此四者，然后可以为良、材美工巧。

这就难怪后代人要将许多发明创造归之于尧舜或假托周公之名了。因为在人们心目中，他们是上古时期最完美的圣人。又鉴于西周被后代美化为完满的天国，因此，《考工记》作为《周礼》的一篇在历史上的科技影响是不能忽视的。这又应当感谢汉河间献王刘德(?—前130年)将《周礼》所阙之《冬官》大胆地以《考工记》补入的功劳。从此，先秦的重要技术典籍借《周礼》而得到完整保存的藏身之地，使后来的“百工”也可以有个名正言顺的社会地位。就先秦时期而言，百工的社会地位是完全有别于古希腊和罗马的奴隶。可见，中华民族对技术或机械制作的重视源远流长。从《考工记》到《天工开物》，中国的技术成就在世界上占有两千余年的优势。

我们在导论中述及有关机械的古代书籍。其中，历史上的机械图或实物图尤为珍贵。

早在王祯《农书》、宋应星《天工开物》之前，具有绘画传统的中国知识界描画了一些有关机械的图稿。殷商时期，许多象形文字原本就是绘画。秦汉时代，有许多画像砖石，所绘画的早期机械中有鼓风皮囊、滑轮、辘轳、车轮作坊、各种车马及其挽具，等等。魏晋起，寺庙壁画，敦煌壁画，历代画家的风俗画、田园画，也有表现机械实物的画面。五代卫贤画的《闸口盘车图卷》是迄今所发现的最早的工程画卷。入宋以后，又出现了插图军事著作，如《武经总要》，其传统为后代所继承。苏颂的《新仪象法要》的插图，可以看作古代最早的机械部件分类图。宋高宗南迁临安(杭州)，楼璩献《耕织图》，其中描画了一些农业与纺织机械。此后《耕织图》屡被重绘与翻刻，而且曾传播到日本和欧洲。纵使这些图画与近代机械制图相去甚远，但它们确实是研究中国机械史的重要资料。

除了图画之外，还有许多文物，而且不断地被考古界所发现。如

秦陵出土的铜车马、汉代水碓陶模型和风车陶模型,宋代省油灯,等等。它们成为文字记载的有力佐证。

从明末传教士入华,尤其是十九世纪中下叶掀起的洋务运动,中国的近代机械工业逐渐兴起。郑复光、龚振麟、丁拱辰、丁守存、徐寿、徐建寅等,都是那时出现的一批早期的近代机械专家。在此基础上,二十世纪上半叶近代机械工业才得以继续发展。

第八章 简单机械

第一节 杠 杆

一、杠杆和秤

杠杆是最简单的机械。它的起源或许可以追溯到原始人阶段。当人们拾起一根棍棒,并以此企图撬动一块石料时,他们实际上就是在使用杠杆。旧石器时代、新石器时代的许多石质或骨质工具,如石斧、骨耜等等,其上都凿有孔,以便安装木柄。这表明那时期的人们已经有意识地使用杠杆了。宋应星在《天工开物》中描绘了安装盐井架的画面,其中一人手持杠杆、一人拉绳索,共同在撬移和调整井架的架基(图 8-1)。像《天工开物》所描绘的杠杆使用实例,在人类生活和生产中可谓司空见惯。

杠杆还被广泛应用在衡器、桔槔、踏春等器具上。有关杠杆原理在物理篇中我们已作了叙述,在这里将进一步阐述其起源、大致结构和流传或传播的情形。

中国古代衡器称为权衡、秤。一种是等臂的,一种是不等臂的。《慎子·逸文》:“权左轻则右重,右重则左轻。”《汉书·律历志》:“权

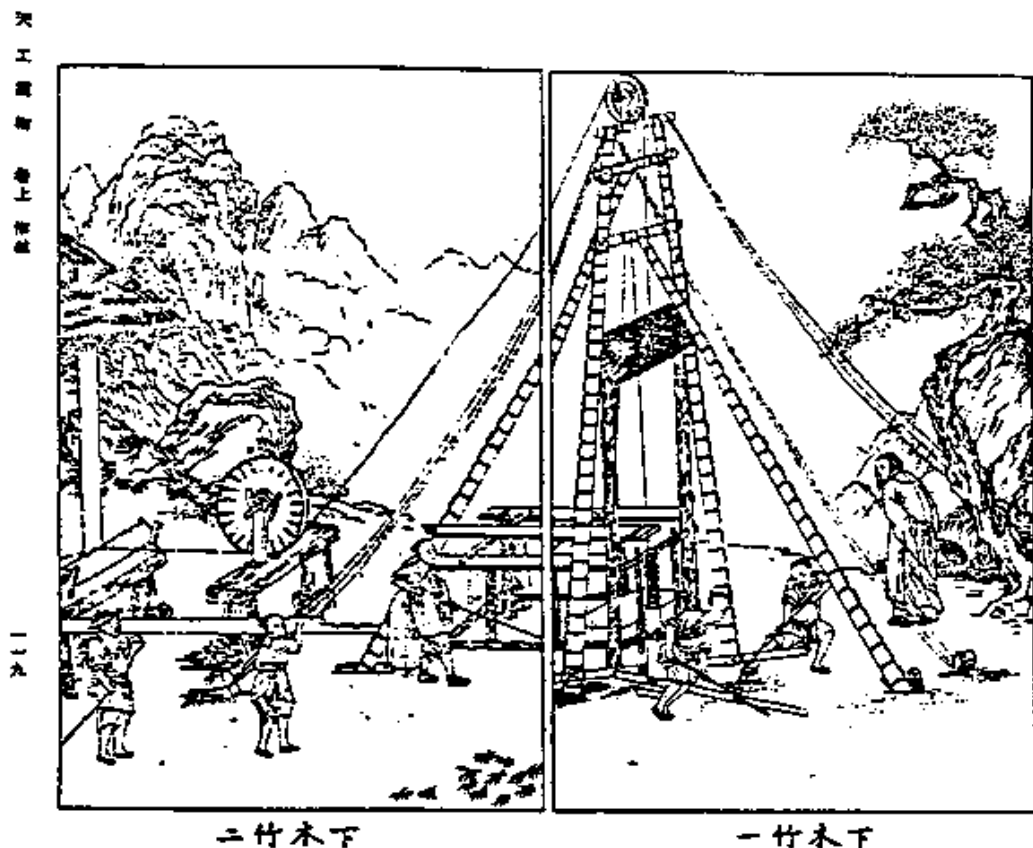


图 8-1 《天工开物》绘安装盐井架图

与物钧而生衡。”这些文字都是对等臂天平或等臂秤说的。“权”又名秤锤，它与物等重，等臂秤就平而不斜。《史记·仲尼弟子列传》：“千钧之重，加铢两而移。”“移”字表示在秤杆上移动权的位置。这显然是对不等臂秤而言的。从这些文字记载看，至迟春秋时期已有各种类型的衡器。而且，当时的衡器已相当灵敏。《慎子》：“悬于权衡，则毫发辨矣”；“悬于权衡则厘发之不可差。”这些说法并不夸张。考古发掘的长沙左家公山上楚墓等臂天平，为公元前四至三世纪遗物，其最小的砝码为 0.6 克^①。战国时期，诸子百家都以衡器作为宣扬自己主张的

^① 高至善：《湖南楚墓中出土的天平与法马》，《考古》1972年第4期，第42～45页；春秋战国时期的一些衡器实物，也见刘东瑞：《谈战国时期的不等臂秤‘王’铜衡》，《文物》1979年第4期，第73—76页。

例证。这与衡器的普遍使用有关。《庄子·外篇·胠篋》在抨击圣人与大盗时指出，圣人“为之权衡以秤之，则并与权衡而窃之”。《荀子·正名》篇在论述人心不正、祸福有感时也写道：“衡不正，则重悬于仰，而人以为轻；轻悬以俯，而人以为重。”

可变换支点(在同一秤杆上有二至三个提绳)的秤是古代人在衡器上的重大发明之一。南朝梁时张僧繇绘二十八宿神像图之一，其人手执三个支点的秤(图8-2)^①。唐宋年间，民间出现一种铢秤，它有两个支点即两根提绳。那种秤量轻小物体(如草药)或贵重物体(如黄金)的小杆秤，称为“等子”、“戥子”、“银秤”、“钱秤”，也有两个支点。宋李廌《师友谈记》写道：

子之文铢两不差，非秤上秤来，乃等子上等来也。

人们用多支点秤，不需换秤杆就可以秤量较重物体。这表明古代中国人在实际上已完全掌握了杠杆原理。



图8-2 南朝张僧繇绘二十八宿神像图之一(摹自《中国历史参考图谱》)

^① 丘光明：《我国古代权衡器简论》，《文物》1984年第10期，第78页；图8-2转引自丘光明摹绘。

二、桔槔及其他

桔槔是古代的一种取水工器,实际上它就是杠杆之一。作为取水工具,一般地是用它改变施力方向;用于其他目的时也可以改变力的大小,只要将杠杆长臂端作为施力端。

桔槔,或作颡皋、榨槔、撑槔、桥衡,简称桥、槔。明代罗颉编《物原》,说“伊尹始作桔槔”。据说,伊尹是商汤的贤臣。也就是说,它产生于约公元前 1700 年。这似乎并不过早。因为,将一根粗木杆支架于立柱上就可以造成简单的桔槔。春秋时期,桔槔被普遍用作农田灌溉机械。春秋末年郑国大夫邓析出游,曾下车教农夫使用之^①。战国时,墨翟将它改装成挖凿机械^②。大概是,墨翟将桔槔长臂端装上刀具,利用冲击力将坚土凿松。这是他发明的最古老的冲击式凿掘机械。汉代山东武梁祠壁画和画像砖绘有许多桔槔图(图 8-3)。桔槔

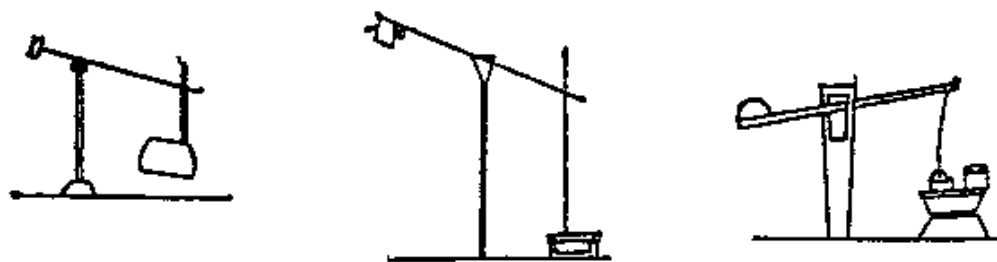


图 8-3 汉代壁画和画像砖中所见的桔槔

《文物》1963 年第 4 期摹自王振铎文

的运用在后来日益广泛。古代抛石机上的炮杆、攻城用的“木慢车”、“饿鹞车”、“搭车”,等等,都是桔槔或杠杆原理的运用。晋杜弢曾以桔

① 刘向:《说苑·反质》。

② 《墨子·备穴》。

棒“打官军船舰”。^①

我们再回头读一段有关桔槔的故事,《庄子·外篇·天地》写道:

子贡南游于楚,反于晋。过汉阴,见一丈人方将为圃畦,凿隧而入井,抱瓮而出灌,搨搨然用力甚多而见功寡。子贡曰:“有械于此,一日浸百畦,用力甚寡而见功多,夫子不欲乎?”为圃者抑而视之曰:“奈何?”曰:“凿木为机,后重前轻,挈水若抽,数如沃汤,其名曰槔。”为圃者忿然作色而笑曰:“吾闻之吾师,有机械者必有机事,有机事者必有机心。机心存于胸中,则纯白不备……,吾非不知,羞而不为也。”

这段文字清楚地以力与功效表述了人们对机械的定义。至于农夫不愿用桔槔的理由实则是该故事编纂者的道德观念,并非是古代农民的观念。

古代许多器具利用了杠杆原理。最简单的有如剪刀;稍复杂些的如弩机上拨动机件,即扳机或称悬刀;较为沉重的如脚踏碓(图8-4)、水碓和槽碓(图8-5)上的主件即碓杆,实际上它是一根架于支撑点的长木,用力端为短臂,作功端为长臂。在织机中,杠杆、连杆、踏板相结

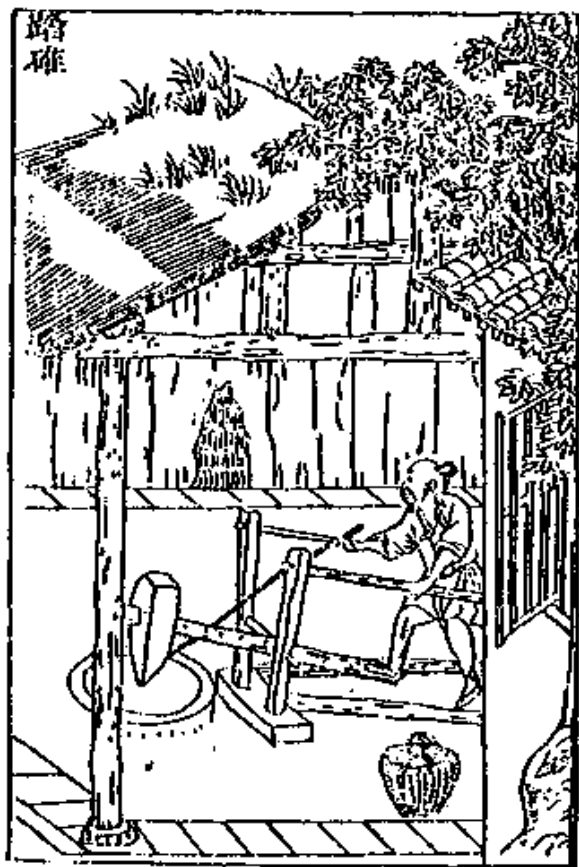


图 8-4 王祯《农书》绘脚踏碓

^① 《晋书》卷五八《周访传》,中华书局校点本,第五册,第1579页。

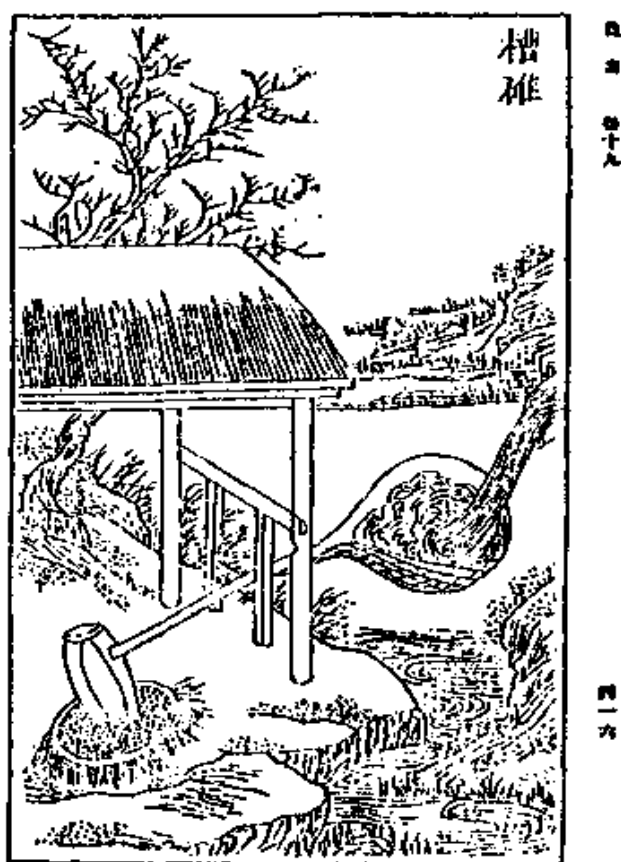


图 8-5 王祯《农书》绘槽碓(见永乐大典本)。这是直接利用水力作功的机械。将杠杆一端挖成勺状以盛水,另一端装上舂杵,当水勺端力矩大于舂杵端力矩时,水勺端下落并将其水倾覆,此时舂杵端下落作功。

合,形成了复杂的连杆机构。雨伞、阳伞中的可折叠撑杆是轻巧的滑动杠杆。《汉书·王莽传》描述地皇二年(21年)王莽令人制造了一具大型雨伞,其内有“秘机”。二世纪评注家服虔认为,内有弯曲接头使其伸缩自如,“其杠皆有屈膝,可上下屈伸也”。在以滑动杠杆为基础的创造物中,元代一个名为“王漆匠”的人,制造了可折叠皮船,可折叠浑天仪。^①

^① 见杨瑀:《山居新话》卷三九。

第二节 滑车与轮轴

滑车,在原理上是由杠杆演变而成的,它又发展出辘轳、轮轴、绞车等简单机械。

一、滑 车

西方称为滑轮的东西,古代中国人称为“滑车”。滑车的含义,除了主要部件滑轮外,还包括安装滑轮的构架、绳索或皮带。应用一个定滑轮可以改变力的方向,应用适当配合的一组滑轮可以省力。

至迟从战国时代开始,滑车在作战机械、井中提水中被广泛运用。传说公输般为季康子葬母创造了转动机关^①,为帮助楚国攻宋创制了云梯^②,其中都使用了滑车。墨翟在其《墨经》中将其称为“绳制”,并讨论了它的力学原理。这在物理篇中已作了叙述。以绘画形式表现滑车者,大约起于汉代。汉代盐井画像砖和明器陶井模都有滑车(图8-6)。这可能从汉代起,滑车在工程技术中被普遍使用的缘故。我们从图8-1中也可以看到高耸的盐井架上安装了定滑轮的情景。

山东武梁祠汉画像石之一,描绘了人们从水中打捞铁鼎的画面(图8-7):河岸两边各有三、四人前后拉着绳子,脚蹬河岸斜坡,弯腰使劲;绳子一端通过滑轮连结在铁鼎上;上下左右,众人围观。它描述的是秦始皇“泗水取鼎”的故事,其内容见《史记·秦始皇本纪》。传说,大禹造了九个巨鼎,以便人们识别善恶。九鼎从夏代传到商、周,

① 《礼记正义》卷下《檀弓》下,十三经注疏本。

② 《墨子》卷一三《公输》,诸子集成本。

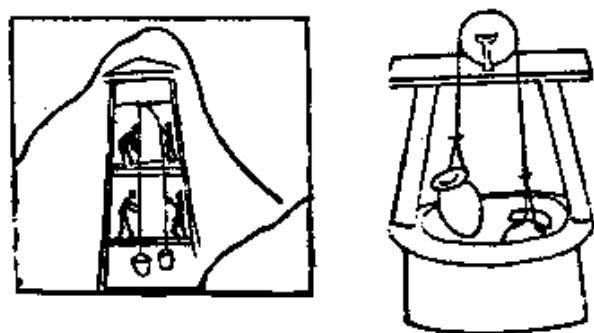


图 8-6 汉代盐井画像砖(左)和陶井模型(右)摹本(采自《文物参考资料》1954年第9期)



图 8-7 汉画像砖“泗水取鼎”图(摹自吴曾德《汉代画像石》,摹本有删略)

成了最高统治者权力的象征。周赧王十九年(前 296 年),秦昭王从周王室取走九鼎,不幸途中一鼎竟然飞入泗水河。后来,秦始皇去东海觅神仙,路过此地,便命千人入泗水河捞宝鼎。可是,当鼎刚出水面,一条龙(在画面鼎上)冲出,咬断绳索,宝鼎又沉落河底。画面左边生动刻划了绳子断裂一刹那,拉绳人朝天仰倒的情景。

二、辘轳

辘轳是滑车的另一种形式,也作鹿卢、磨鹿、棊栌。它的主要部件是一根短圆木,上绕绳索,圆木可绕其固定轴转动(图 8-8)。它可能

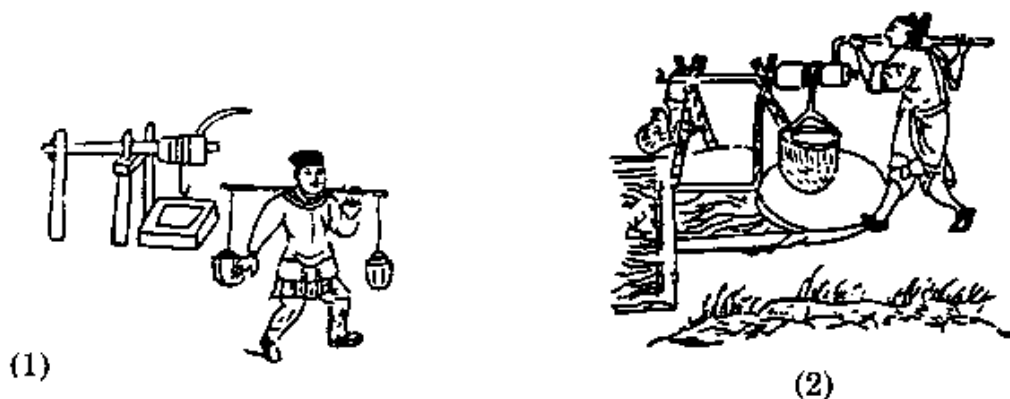


图 8-8 辘轳

(1)金墓壁画(摹自《考古通讯》1955年4月);(2)元代王祯《农书》绘(摹本)。

起源商末周初。《物原》载:“史佚始作辘轳。”史佚为周初史官。宋代曾公亮等人也持此说。《武经总要》载:“周武王以飞桥、辘轳,越沟堑,飞江天。”^①春秋时期,在一种军用巢车或八轮车上装有辘轳,以便将巢车举起,车内人即可居高望敌城^②。战国迄汉,辘轳常被用作入葬下棺的机械^③。辘轳还被用于打捞器物。据载,晋成帝咸康二年(336年),一巨钟掉落河中,打捞者将钟“系于竹组,用牛百头,鹿栌引之”^④出

① 曾公亮:《武经总要前集》卷一—《水攻·济水府》。

② 见《左传·成公十六年》(即前575年);杜佑:《通典》卷一六〇:“以八轮车上树高杆,杆上安辘轳,以绳挽板屋上杆首,以窥城中……,亦谓之巢车,如鸟之巢。”李筌:《神机制敌太白阴经》卷四《攻城具篇》有类似记述。

③ 《礼记·丧大记》;刘熙:《释名·释典艺》等。

④ 司马光等:《资治通鉴》卷九五。

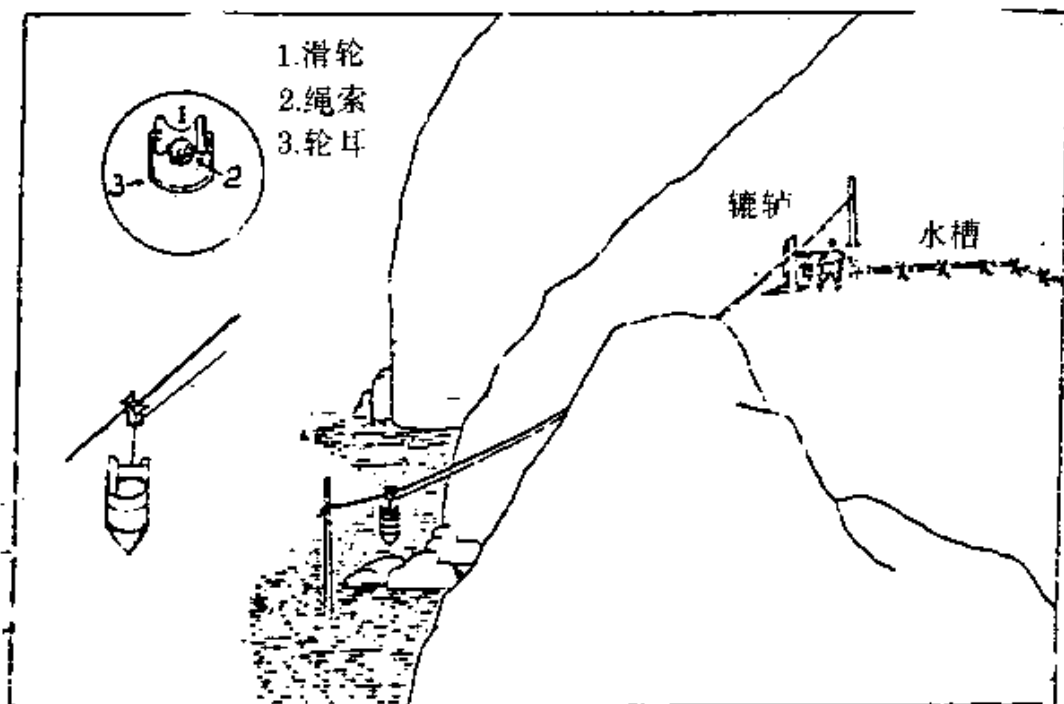


图 8-9 “机汲”(辘轳、滑轮与架空索道联合应用)示意图

水。更巧妙的是，古代伎人走绳表演时，绳索两端分别以一辘轳张紧拉直^①。当然，辘轳经常被用作井中提水机械。

当辘轳用于提水时，绕在其上的绳子两端均可系吊水桶，只要两股绳逆顺交转于轳筒上。这样，它可以达到总是在作有用功的目的。这样的辘轳称之为双辘轳，或花辘轳，或复式辘轳。王祜《农书·农具图谱集之十三》写道：辘轳“或用双绳而逆顺交转所悬之器，虚者下，盈者上，更相上下，次第不辍，见功甚速。”该书成稿于1313年。可见，双辘轳的发明至晚在十三世纪期间。

古代人联合应用辘轳、滑轮与架空索道(图8-9)，以便将山下的流水引上山。这在机械工程上是很有意义的创造。唐代刘禹锡在

^① 王澹：《唐语林》卷五。

其《机汲记》中所作的描述^①，被认为属于这种简单机械的联合应用。^②

三、绞 车

绞车是与滑车、辘轳相似的另一机械(图 8-10)。它在古代也被普遍应用。

绞车可能起源于西晋。十六国后赵王石季龙(又名石虎, 295—349)令人盗邯郸赵简王墓, 因墓穴有水, 故作“绞车, 以牛皮囊汲之”^③。从唐代开始的各种军事著作中对它都有详细描述, 它成为军用必备器械之一。《武经总要》写道:“绞车, 合大木为床, 前建二叉手柱, 上为绞车, 下施四轮, 皆极壮大, 力可挽二千斤。”^④在强劲的弓弩上也有“以轴绞张其弓”^⑤的。在宋人画的捕鱼图中, 有用绞车搬罾的图画(图 8-11), 其装叉手之木轴粗于缠绳之

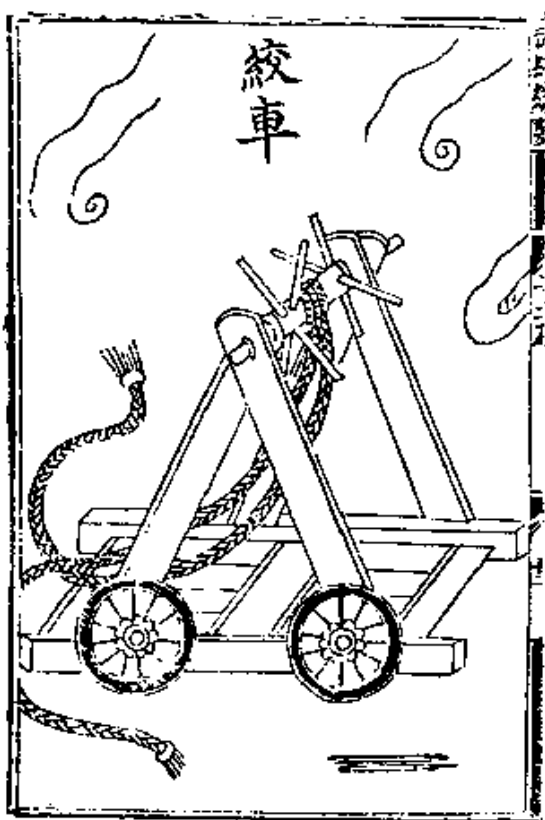


图 8-10 《武经总要》绘绞车

- ① 见《全唐文》卷六六六;《刘梦得文集》卷二七;也见戴念祖:《中国力学史》,第 209—210 页。
- ② 李崇洲:《中国古代各类灌溉机械的发明和发展》,《农业考古》1983 年第 1 期,第 142—143 页。图 8—9 引自该文。
- ③ 《晋书》卷一〇七《石季龙传》,中华书局校点本,第九册,第 2782 页。
- ④⑤ 李筌:《神机制敌太白阴经》卷四《守城具篇》;曾公亮:《武经总要前集》卷一二、一三。

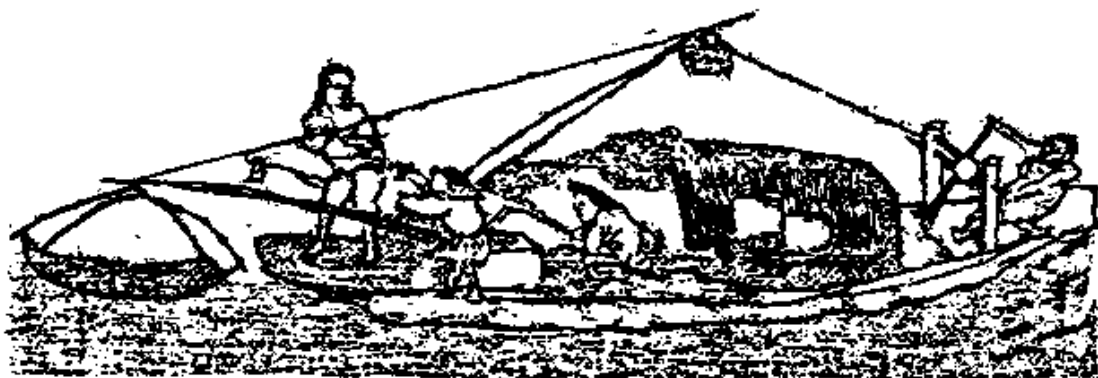


图 8-11 宋人画绞车搬罾图(摹自刘仙洲《中国机械工程发明史》)

木轴,此二木轴又为一心。它相当于两个滑车的组合,是一种复式滑车。绞车很可能用在船闸中,以将船拖曳过闸。

有趣的是,古代人在钓鱼竿上安装的卷线轮,实则也是一种绞车。明代王圻编的《三才图会》中有钓鱼图、钓鳖图,其钓竿上装有卷线轮。转动轮轴,线被卷在轮周边上。这种卷线轮起始年代虽不详,但肯定是明代以前的发明。

在辘轳基础上,古代人创制了另一种绞车,如图 8-12。将一根圆轴削成同心而不同径的两部分,在其上绕以绳索,绳下加一滑轮,转动其轴即可将重物吊起。这种绞车又称较差式滑车,或称“中国绞车”^①。但其起源年代不详。

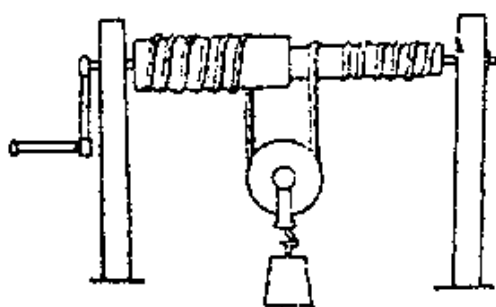


图 8-12 “中国绞车”示意图

^① 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,科学出版社 1962 年版,第 21—22 页。

第三节 尖劈、斜面与螺旋

一、尖 劈

和杠杆一样,尖劈也是古代人最早利用的简单机械之一。原始社会时期,人们打制或磨制的各种石制或骨制工具中,有许多是利用了尖劈(图 8-13)。尖劈能以小力发大力,以少力得到大功效。而且尖劈两面的夹角越小,以同样大的原动力就可得到更大的功。因此,尖劈的发展成为尖利的锋刃,如针、锥、钩等物。随着材料的进步,各种尖劈也以青铜、铁或钢铁制成。本志物理篇中谈到墨家讨论滑轮,他们说:滑轮的省力“若以锥刺之”。王充在《论衡·状留》篇中写道:“针

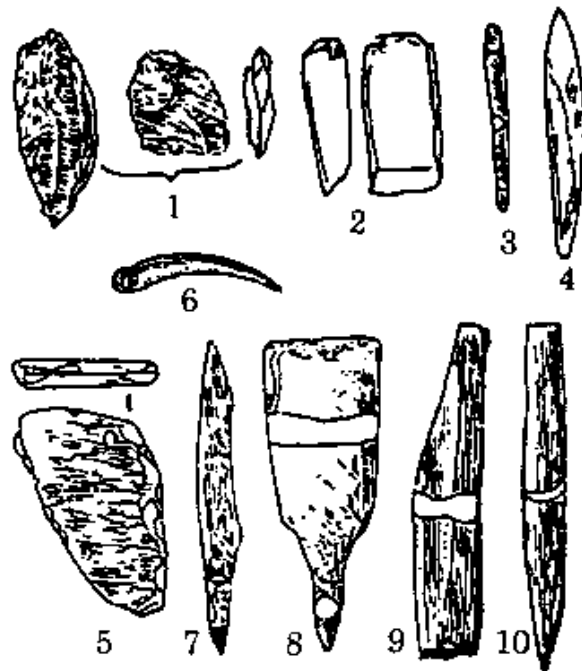


图 8-13 新石器时代的石、骨器——尖劈

- (1)打制燧石片; (2)石斧; (3)石凿; (4)石镰; (5)石铲; (6)骨针;
(7)骨镰; (8)骨钻; (9)骨凿; (10)骨锥。

锥所穿,无不畅达;使针锥末方,穿物无一分之深矣。”可见人们在理论上也知道尖劈原理。

我们略举一例说明尖劈在工程技术上的巨大功用。据载,唐代在苏州建重元寺阁。后发现其柱倾斜,人们无所措手足。一僧人竟用木楔(即木质尖劈)数十,打入柱间,将巨大沉重的寺阁扶正。^①

尖劈在机械工程中应用普遍。古代榨油机被称为“尖劈压机”就是一例。在该机架上叠方木,方木间打入长楔,以挤压预先置于方木油槽中的油料(图 8-14)。尖劈原理的另一个重大历史应用是耒耜和犁的发明。公元前 5000 年浙江河姆渡遗址

中发现有骨耜。《考工记·车人》总结了坚硬不同的土地需用不同角度的耜。战国时期出现铁犁铧。犁中的铧与镮是翻土的主要部件(图 8-15)。犁铧以铸铁为之,多系等边三角形,两边削薄成刃,其前端交

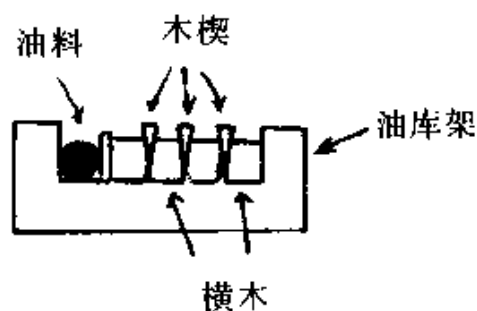
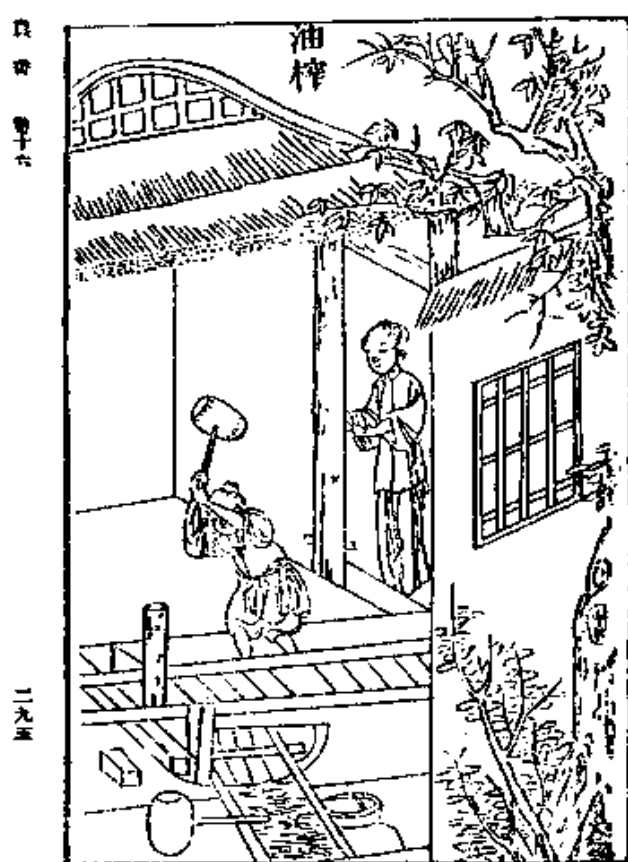


图 8-14 王祯《农书》绘榨油机及其机理示意图

^① 李肇:《唐国史补》卷中,上海古籍出版社 1979 年版,第 46 页。

为犁铧,也即尖劈,其功用在平切土地。犁铧,也以铸铁为之,多为抛物线型斜面,其功用在于将犁铧所起之土翻向一侧。在犁这一农耕工具中。尖劈与斜面都用上了。今天,虽然犁的外形、大小、质地、发动力等方面有所改进,而犁铧、犁铧的基本形状及机制却没有改变。

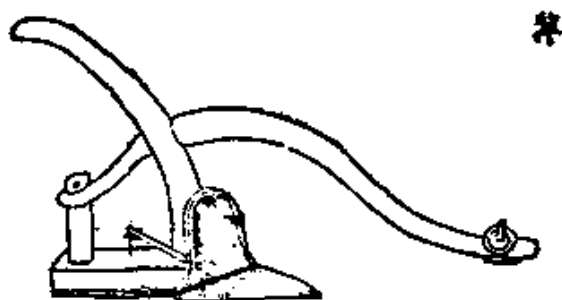


图 8-15 王祯《农书》绘犁

二、斜面与螺旋

斜面是人们生活中熟悉的事物。通过斜面牵引重物到一定高度比直接将该物举到同样高度要省力。古代人对此有许多发现。《考工记·辘人》：“登斜者，倍任者也。”这是指拉车上坡比走平地要付出更大的力。《荀子·宥坐》：“三尺之岸而虚车不能登也，百仞之山任负车登焉。何则？陵迟故也。”这就是说，人不能将空车子举上三尺之岸，却可以将满载的车子拉上山，因为山坡斜缓（“陵迟”）的缘故。《墨经·经下》有一段文字记述，是专门教人如何制造一种斜面引重车

（图 8-16），以便将重物拉举到所需的高度。^①

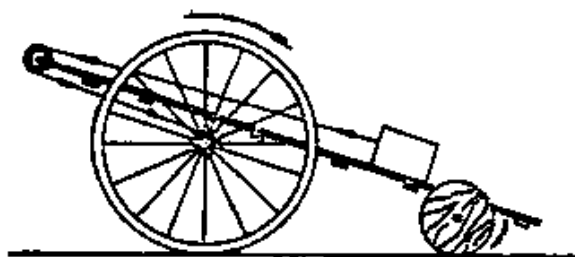


图 8-16 墨家创制的斜面引重车

将斜面卷起来就成为螺旋。它包括螺栓、螺帽，或圆柱体之螺杆。在众多简单机械中，独此为西方文明的产物。大约于明末清初由来华传教士传入

^① 戴念祖：《中国力学史》，第 221—223 页。

中国。王征《远西奇器图说》和王圻《三才图会》才开始描述或绘画这类机械。它的功用,一是它能与普通齿轮相接合;二是在成直角的二轴间传送运动。明代以前,在机械工程中中国人对此有其他解决办法。由于古代机械多为木质,中国人发明的斗栱与榫卯接合法不比螺旋接合差;在传送运动方面,中国人发明的各种齿轮在古代技术水平上完全可以代替螺杆,我们在下面再详细叙述。

第四节 改变运动形式或运动速度的机械

传送运动或改变运动形式的机械有绳链系统、连杆与曲柄机构;改变运动速度或运动方向的机械有齿轮系统等。下面我们分别作一简要叙述。

一、绳、链、铰链、连杆和曲柄机构

在这些机件中,最简单的是绳索、皮带,动力机或主机的运动通过它们传递到工作机上。以上各种机械图中,如桔槔、辘轳、绞车和凿井机械中都可以看到绳带。就绳索而言,特别是那些天然植物纤维,无疑在新石器时代已被运用。但是,起机械传输作用的绳带在中国的确切起源时间尚不能确定。据考,手摇纺车(图 8-17)可能产生于公元前十三世纪的商代^①。若是,则利用绳带传送运动也不晚于此时期。燧人氏钻燧取火,虽起源甚古,但类似木工的弓钻(图 8-18)、或其间以藤条带动钻干的钻燧的出现时间尚难确定。属于新石器时代的良渚玉器中,有玉环、玉璧、玉珠等物,其中多有孔洞。据分析,加工

^① 陈维稷主编:《中国纺织科学技术史》,科学出版社 1984 年版,第 56 页。

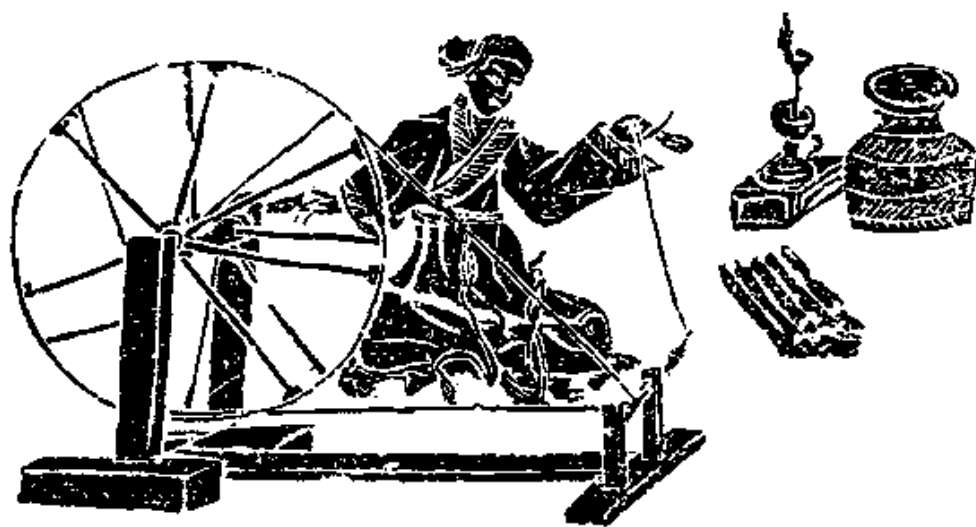


图 8-17 汉墓壁画手摇纺车(引自刘仙洲:《中国机械工程发明史》)

这些玉器当有旋钻之类工具^①。西周时期,以传动为功用的绳带得到较多应用,以致《考工记》记述了专门制作皮革用品的“函人”与“鲍人”,并对检验皮革形变的方法作了有物理意义的描写^②。接着,如本志物理篇所述,《墨经》中探讨了发绳的结构与应力关系。可见,绳带的应用及其物理性能在春秋战国时期受到人们普遍重视。绳索加上踏板,又创制出古代最简单的人力车床、即磨床(图 8-19)。在磨轮轴的两端分别以反方向缠绕一根绳或皮带,绳或皮带另一端分别固定在两块踏板上。当交替地踏动踏板时,磨轮就左右转动。

链,其形状与质料都多种多样。它是既坚固又能挠曲的传动机件。商代初期,在一些日用青铜器物上已有圆环式金属链,它是器物

① 据猜测与分析,加工制作光滑洁净的各种圆形玉器,并在其上钻孔眼,必有切削、钻磨、抛光的工具,如砣具,类似制陶用“陶车”或管钻。其中管钻类似图 8-18,在钻管内置燧石,旋转管钻以凿小孔。见《凌家滩墓葬玉器测试研究》,《文物》1989 年第 4 期;牟永抚:《良渚玉器三题》,《文物》1989 年第 5 期;杨伯达:《中国古玉研究刍议五题》,《文物》1986 年第 9 期,等等。

② 戴念祖:《中国力学史》,第 142—143 页。

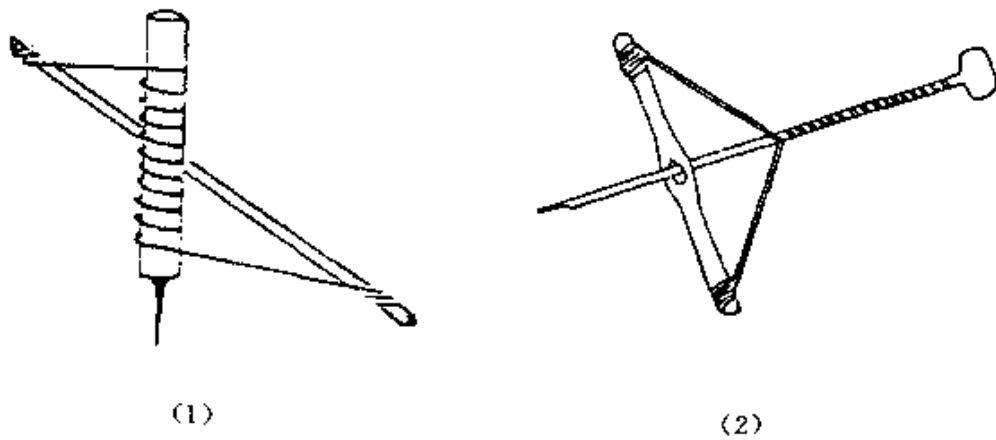


图 8-18 弓钻中的绳带：(1)普通钻，若钻干为空管，内装置并压紧燧石，使管下端小孔露出燧石尖角，则可加工玉器；以木作钻干，可摩擦取火。早期的钻，无传动绳带，仅以双手连续摩擦而已；(2)舞钻，它具有较大的惯性力，为近代钻具之一。



图 8-19 《天工开物》绘磨床

本身与其盖的维系物。在古代各类水车中，如翻车(龙骨水车)中的刮水板，高转筒车的水筒，都以链的形式安装在机械中。传输作用的铁

链是中国人最早发明并应用的。北宋苏颂创制的天文钟即“水运仪象台”中有称为“天梯”的机件(图 8-20),实际上就是输送运动的铁链。它装于主轴至顶层浑天仪的齿轮盒上,主轴的运动通过它而带动齿轮箱内的小齿轮(毂)。或许更早时候,张思训于公元 978 年制造的水银驱动的天文钟中,已有链传动机件。

在绳链系统中,应当述及铰链在中国的发明和应用。在农业、战争与纺织工艺中,铰链有显著用途。由一长柄和一组平行木构成的农用连枷,或由一长柄和一环式链构成的军用连枷(图 8-21),都属于

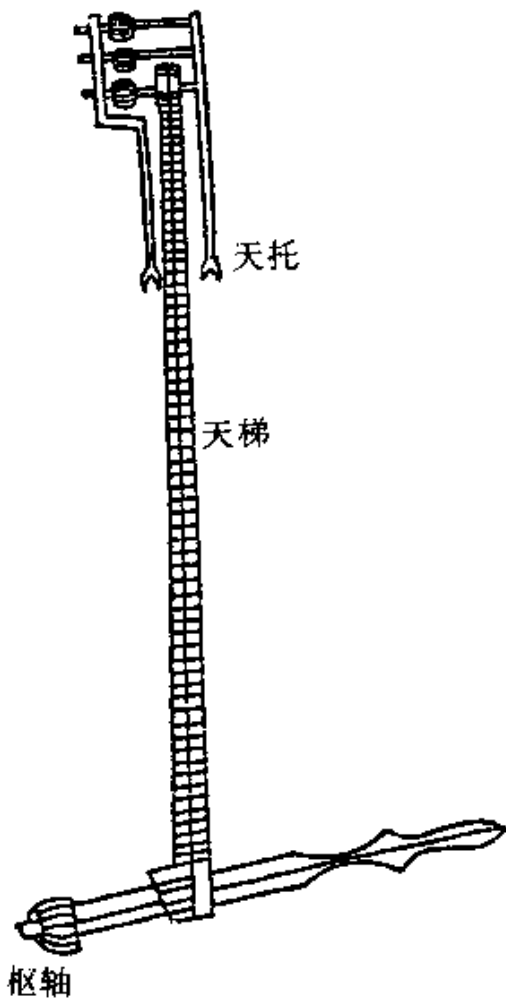


图 8-20 苏颂《新仪象法要》绘“天梯”(参见图 13-5 至图 13-8)。

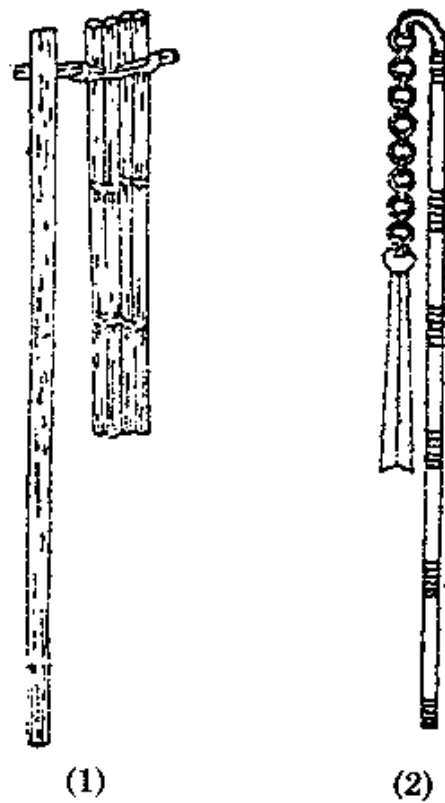


图 8-21 (1)农用连枷(王祯《农书》绘);(2)军用连枷(曾公亮《武经总要》绘)

铰链的一种。由于人的适当操作，长柄的前后运动可以转变成平行木或环链的回转运动，而且产生较大的打击力。在畜力利用、青铜器和青铜铸造的车饰件中也常见各种形式的铰链。在战国的礼器青铜瓠壶和鼎上，还可见到，人们成功制造的球形铰链和 T 形活动钩(图 8-22)。

在转换运动形式的机件中，

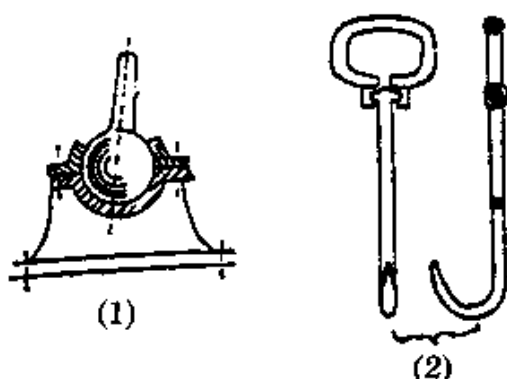


图 8-22 (1)战国青铜瓠上的环链,它是由球铰链组成的;(2)战国铜鼎上鼎钩,为 T 形活动连杆(引自《文物》1993 年第 1 期第 33 页)。



图 8-23 王祯《农书》绘磨

曲柄起着相当重要的作用。曲柄俗称“拐”。辘轳上装曲柄,便于人们转动它。磨或磨上的连杆与曲柄(图 8-23),使手推连杆的往复运动轻易地转变成磨的回转运动。中国人在发明脚踏纺车的同时,又创造了倾斜式连杆或曲柄。它与踏板、甚至与具有偏心运动的轴接合式踏板相结合(图 8-24),对中国古代纺织业的发展作出了特殊的贡献。曲柄、连杆与偏心轮相结合,形成复杂的曲柄机构,可以将回

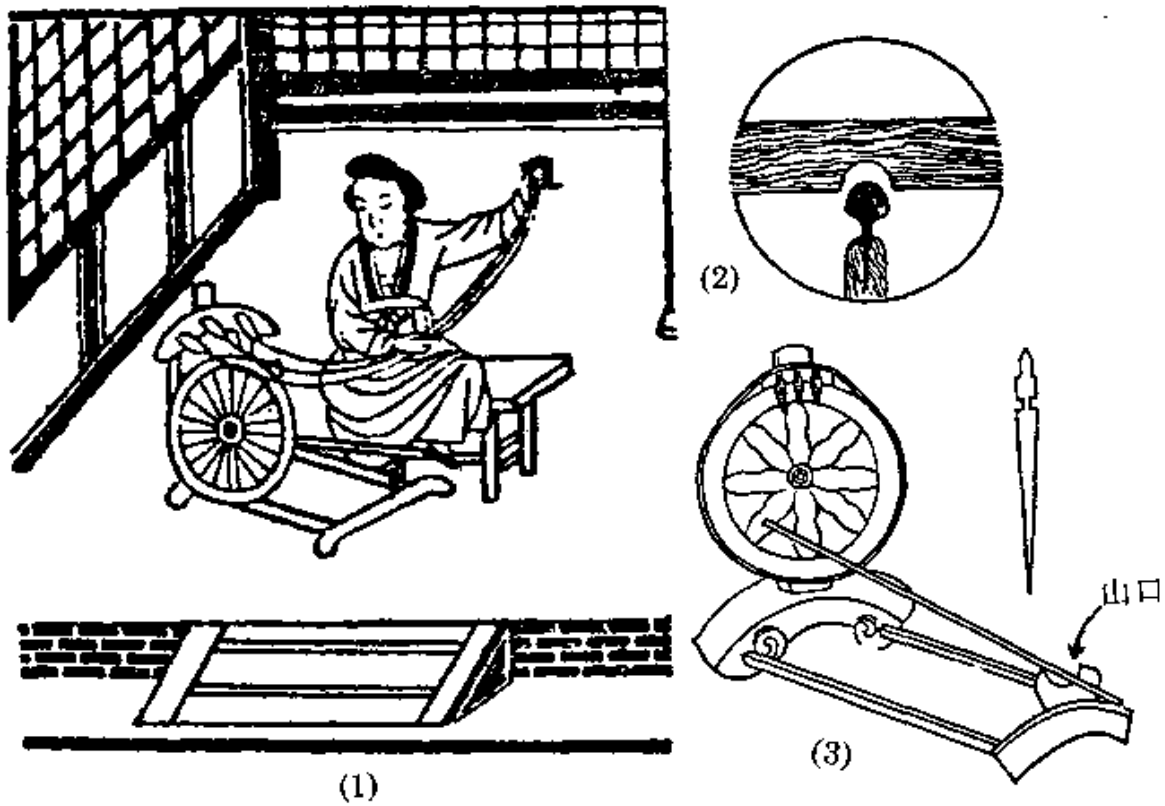


图 8-24 脚踏纺车及其连杆：(1)晋顾恺之绘，宋刻本《列女图》翻刻三锭脚踏纺车。图中所绘连杆一端与纺轮某辐条相接，形成倾斜式杆；(2)以半球形铁钉头作为踏板支点，钉头起偏心轮作用；(3)另一种脚踏板纺车。其连杆一端插入纺轮某辐的孔洞内，并伸出到纺轮的另一面；另一端置“山口”上。一足放于山口，不使连杆滚出；另一足向纺轮方向轻推连杆端点，利用纺轮惯性使其轻易转动。这种纺车至迟起源于东汉时期。①

转运动转换成直线式往复运动，也可以将往复运动转换成回转运动。在古代粮食加工机械中的“水击面罗”，在冶铸生产中使用的鼓风机机械“水排”，都有复杂的连杆机构(图 8-25)。它们是近代蒸汽机、内燃机中连杆机构的始祖。在近代工业兴起之时，它们起了不可或缺的作用。

① 陈维稷主编：《中国纺织科学技术史》，第 180—182, 184 页。

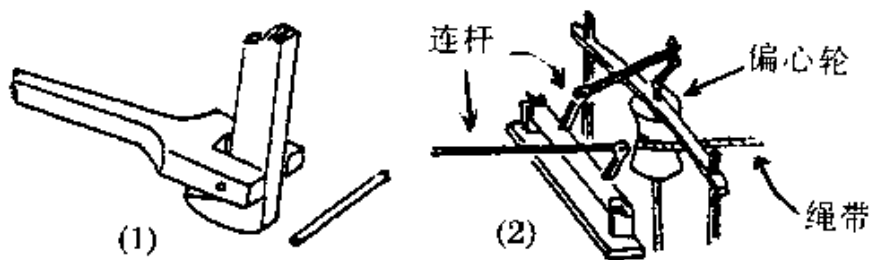


图 8-25 连杆机构：(1)普通连杆与曲柄；(2)带偏心轮的连杆机构，在古代的罗面机和“水排”中运用。

二、轮、齿轮和弹簧

在轮的各种创造物中，车轮的发明对人类文明的进步曾经起着重要作用。公元前 3000 年，两河流域的西亚文明已经知道车。在中国，车的发明晚于两河流域，其年代不早于公元前十五世纪。车轮的起源可能受到早期人类生活或生产活动中滚动木头或木柱的启发。车轮诞生之初，以整段木头作轮，与此不无关系。但是，就中国轮的起源而言，从公元前 5000 年起，在新石器时代已有纺轮、陶轮，甚至经过雕琢加工的玉质珠、轮、环和璧(图 8-26)^①。由此发展顺序看，中国的车和车轮是独自发展的。中国车的起源虽晚些，但从商、周之际起，车得到迅速发展，除作为交通运输工具之外，还有战车，且有车战。春秋战国时期，制车业极为发达，分工极为精细。有专制轮子的

^① 最早的纺轮见于公元前 6000 年左右浙江余姚河姆渡遗址：《河姆渡遗址第一期发掘简报》，《考古学报》1978 年第 1 期；陶轮出现于仰韶文化时期：中国硅酸盐学会编：《中国陶瓷史》，文物出版社 1982 年版，第 6 页；玉器，初见河姆渡遗址，后在新石器晚期，即甘肃齐家文化、江苏良渚文化中已有加工极精致的玉珠、玉轮、玉环、玉璧、玉琮等物。见《1982 年江苏常州武进寺墩遗址的发掘》，《考古》1984 年第 2 期；《江苏吴县张陵山东山遗址》，《文物》1986 年第 10 期；《安徽含山凌家滩新石器时代墓地发掘简报》，《文物》1989 年第 4 期；《萧县金寨村发现一批新石器时代玉器》，《文物》1989 年第 4 期。

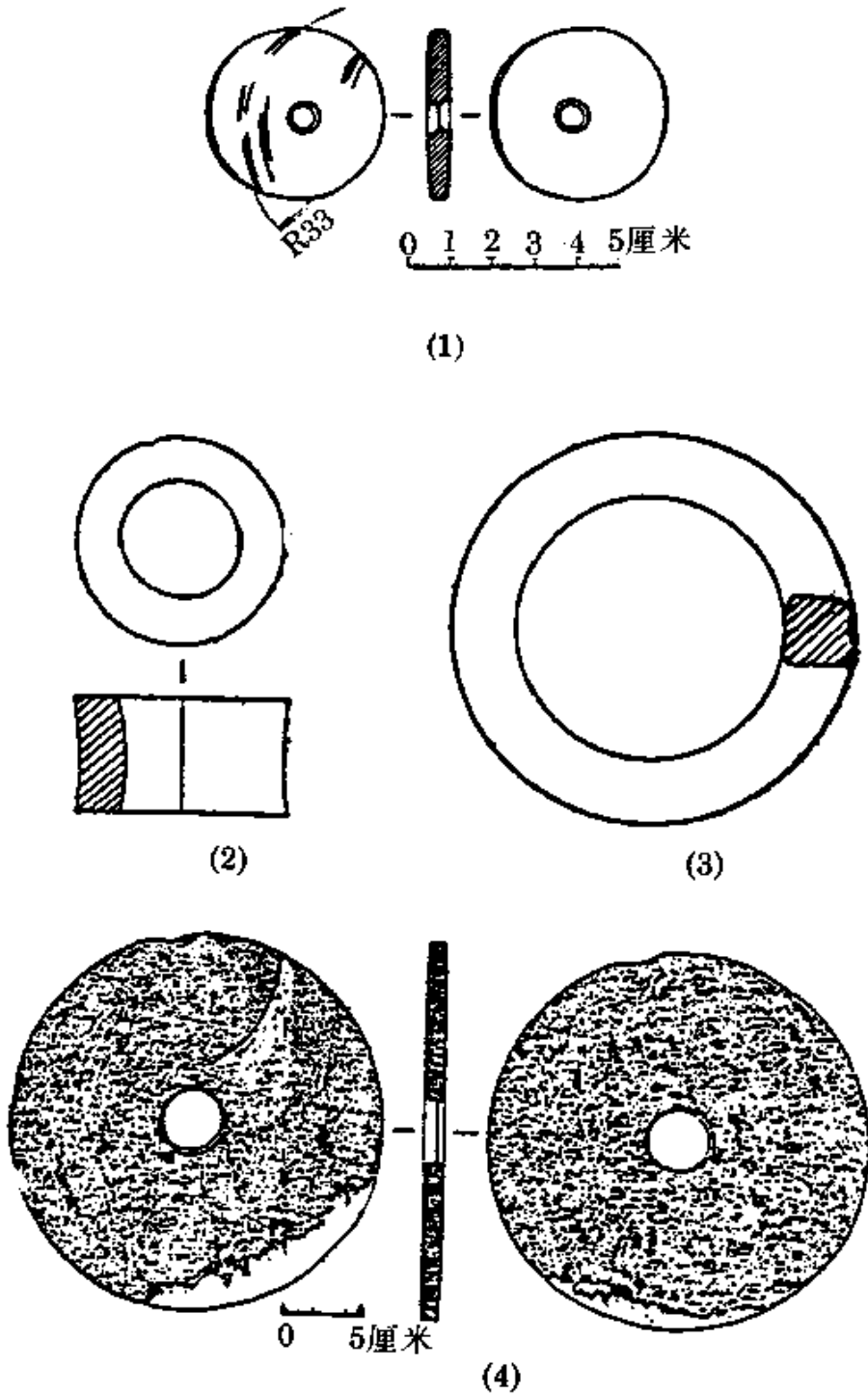


图 8-26 良渚文化墓葬出土的玉器：(1)玉纺轮；(2)玉锤；(3)玉环；(4)玉璧
 (引自南京博物院，“江苏吴县张陵山东山遗址”，《文物》1986年第10期)。

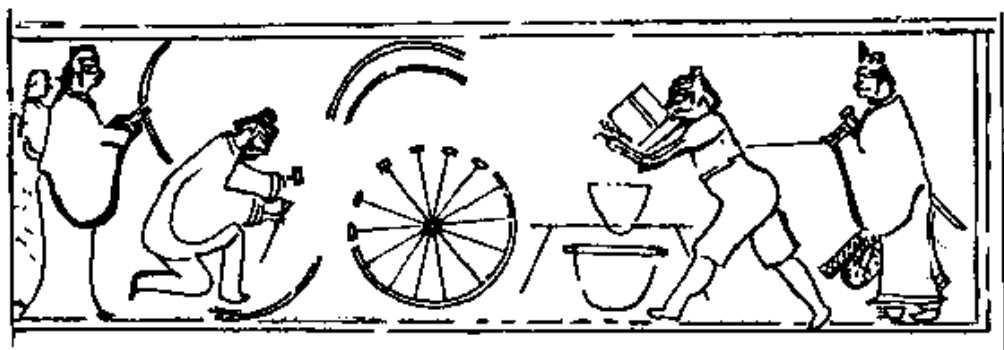


图 8-27 汉代制轮画像石(摹本),1954 年山东嘉祥洪山出土,现存山东省博物馆。

“轮人”,专制车厢的“舆人”,专制车辕的“辇人”,等。图 8-27 是描绘制轮作坊的汉代画像石。

轮,既可作为传递运动的机械,又可作为承载负荷或破碎它物的机械。在交通车中,轮既要运动又要载重。因此,古代人制造木质车轮的工艺要求是相当高的。《考工记·轮人》对春秋战国之际制轮工艺技术作了详尽记述,对轮的各部件(毂、辐、牙)的形状、规范、相互间尺寸比例及接合工艺,包括其中的科学道理都作了记载。其中,要特别指出的二点是:车辐入毂的深度应等于辐的广度(“量其凿深,以为辐广”);整个车轮制成后,车毂要向外侧(或内侧)隆起,就像鼓肿的大眼睛(“望其毂,欲其眼也”)(图 8-28)。前者是保证木质轮结构坚固的数学法则,在欧洲古代或中世纪技术史中对此无任何记述;后者保证载重轮在崎岖不平的道路上能抵抗其侧向冲力、震动力或破坏力,它被欧洲技术史家称为“盘状车轮”,是“轮匠艺术的最高发展”,是十五、十六世纪欧洲取得的“辉煌成就”^①。但它在中国,至迟

^① C. Singer et al, *A History of Technology*, Vol. 2, p. 537. Oxford, 1956; J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 76—77. Cambridge, 1965.

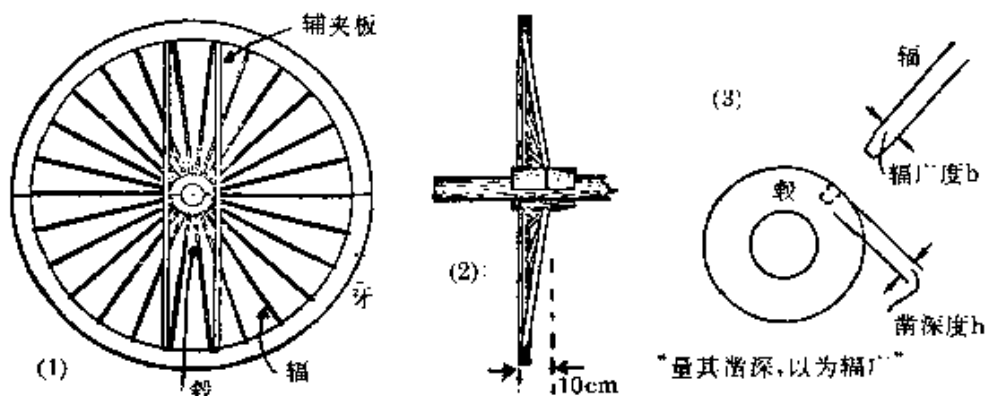


图 8-28 辉县战国车轮:(1)车轮正面图;(2)车轮侧面图,可见其成盘状样式。由于“毂露出轮外 10 厘米”,“每根辐条都向毂斜放”,因此,当车轮水平放置时,其牙水平面与毂水平面相差 10 厘米。从而形成盘状车轮(引自夏鼐“战国车马坑”,载《辉县发掘报告》,科学出版社 1956 年版,第 47-51 页);(3)凿深 h 与辐广 b 的比例示意图,即 $h=b$ 。(据《考工记》记载绘制)

是春秋末期的技术产物。

齿轮用以改变传动或转动方向、速度,改变力矩。齿轮大量发现于战国、秦汉时期。出土实物中,有战国齿轮陶范^①,汉代铁齿轮^②和青铜齿轮^③;从其形态种类言,有普通齿轮、棘轮和人字形齿轮,也有直齿正轮和斜齿轮(图 8-29)。齿轮被广泛用于磨、里程计、弓弩瞄准器和天文钟等方面。下面将述及的各种机械中,可以看到古代人掌握并应用齿轮系及其匹配法则。

① 邯郸市文物保管所:《河北邯郸市古遗址调查简报》,《考古》1980 年第 2 期;西汉齿轮陶范见刘仙洲:《中国机械工程发明史》,第 92 页。

② 孟浩等:《河北武安午汲古城发掘记》,《考古通讯》1957 年第 4 期;福建省文物管理委员会:《福建崇安城村汉城遗址发掘》,《考古》1960 年第 10 期;陕西省博物馆:《陕西省发现汉代铁铎和铎》,《文物》1966 年第 1 期;河南省文物局文化工作队:《南阳汉代铁工厂发掘简报》,《文物》1960 年第 1 期。

③ 杨文斋:《山西水济县薛家崖发现的一批铜器》,《文物参考资料》1955 年第 8 期;也见李文信:《文物参考资料》1956 年第 3 期;杨文斋:《文物参考资料》1958 年第 8 期。

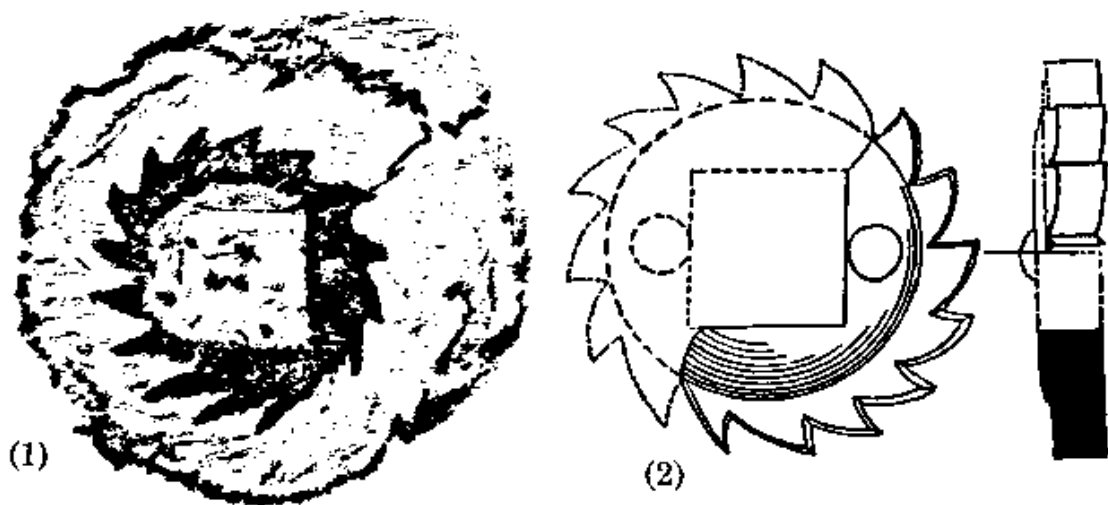


图 8-29

(1) 汉代棘轮范(摹自王振铎《科技考古论丛》第4页,文物出版社,1989);(2) 汉代棘轮残件及复原图(采自孟浩等,《考古通讯》1957年第4期)。棘轮是间歇运动机械之一。在与棘爪杆相配合时,它能将往复运动变换为单向间歇运动;或用以防止反转运动。

宋应星《天工开物》中绘有“轧蔗取浆”图。其中,绘出了一对轧甘蔗取浆汁的木轧辊,其上半部刻画着斜齿轮(图8-30)。它在现代机床和重型机器上被广泛使用。但在欧洲,它的出现迄今不过一二百年的历史。

图8-31是古代所用的轧棉机,俗称轧车。转动机器时,棉绒通过铁轴与木轴间狭缝,其上钢刀带有若干沟与刃,以便抓住棉绒。脚踏连杆、驱动飞轮,一手转动曲柄,轧机就可以顺利运转。该机铁轴端十字架上,因其未加有重木块,其转动时质量集在轮端,不仅转动惯量加大,而且提高轧机转动的平稳性。所以它是近代飞轮的始祖。据刘仙洲考,这种轧机的发明与应用时间“最晚应在公元1313年以前”。^①

^① 刘仙洲,《中国机械工程发明史》,第33页。

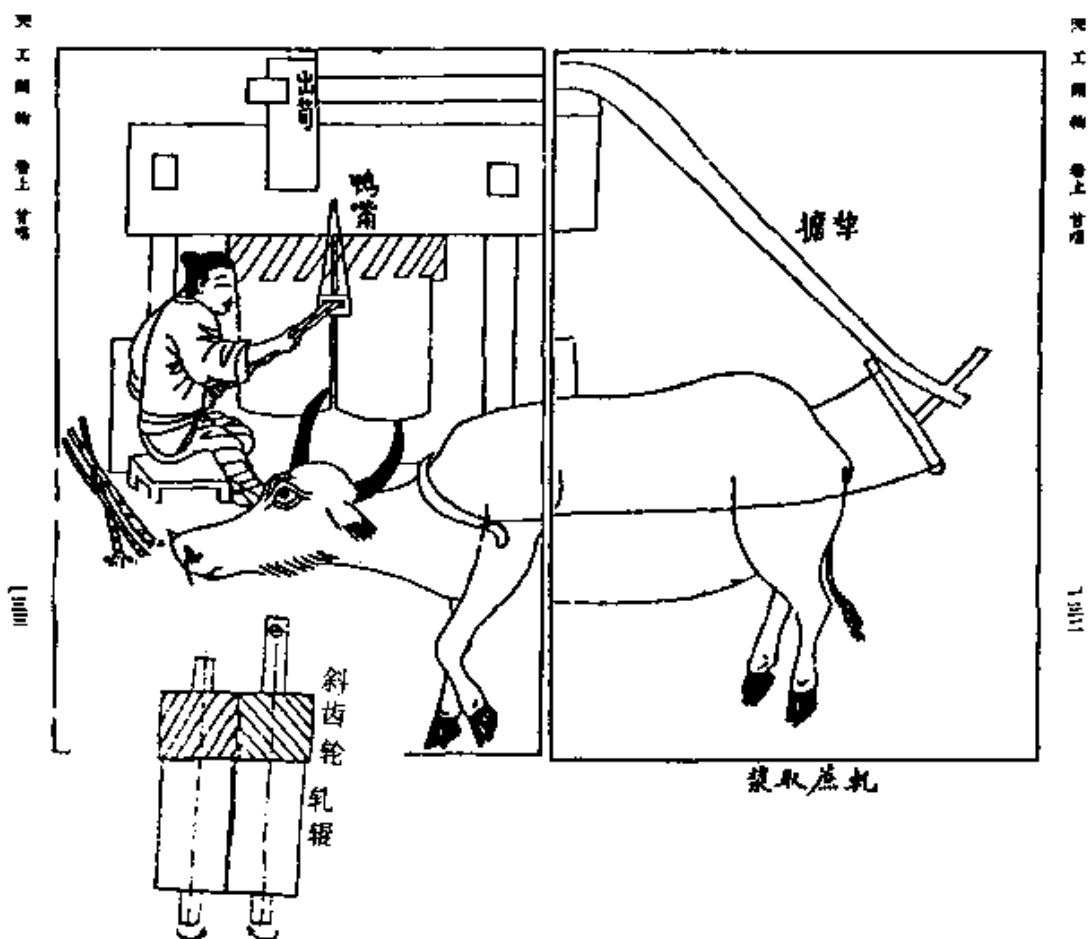


图 8-30 《天工开物》绘轧蔗取浆图。其轧辊之一的斜齿方向画误，改正图在其左下角。

还有一种凸轮，在古代也得到广泛应用。它是一种具有曲面周缘或凹槽的机件。古代水碓、机碓中，转动轴上装有数组拨杆。拨杆不仅与主轴一起转动，而且它拨动春杆（即从动杆），使春杆往复上下跳动。这各组拨杆就起了凸轮作用。在记里鼓车、张衡创制的称为“转轮蓂莢”的天文仪器以及儿童玩耍的小风车上都有类似的凸轮。

在述及各种轮与齿轮的同时，顺便要提及轴承在中国的发明。在山西薛家崖出土三件汉代铜制轴承，和“现代汽车轮上的滚动珠架一

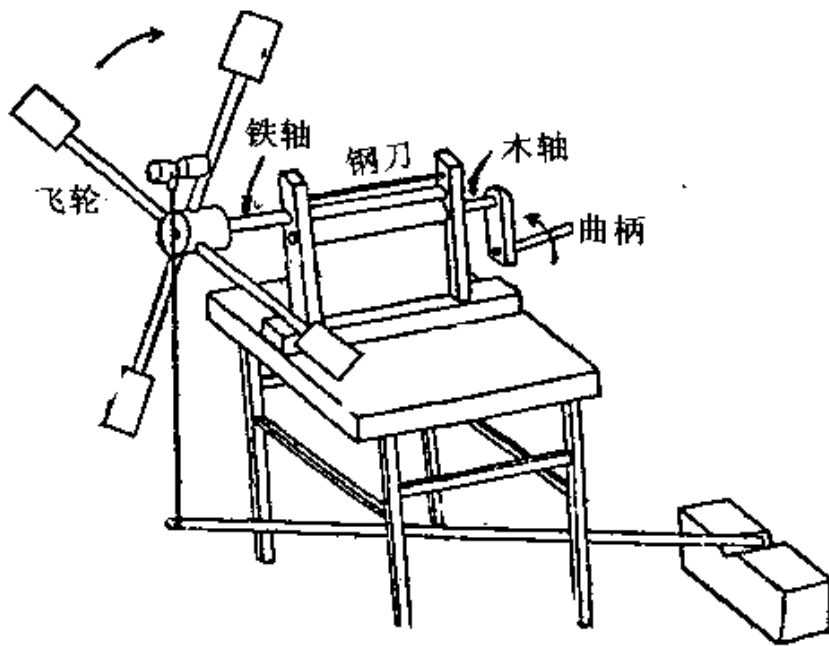


图 8-31 轧棉机上的飞轮(引自刘仙洲《中国机械工程发明史》)

样,是一种铜质环形槽,内分四或八格,格中都有铁粒残余”^①。这些铁粒似为滚珠(图 8-32)。可见,滚动轴承创制于汉代。元代郭守敬制“简仪”,在这种天文仪器中“卧施圆轴四,使赤道环旋转无涩滞之患”^②。这是滚轴在天文仪器中的运用,其“圆轴”估计为滚针。滚轴在生产中也有许多巧妙的运用。^③

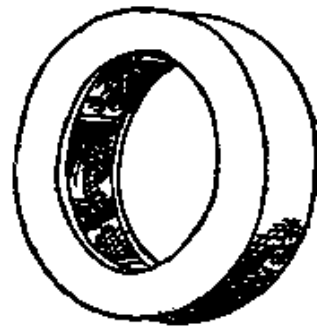


图 8-32
山西出土汉代铜滚轴
(引自刘仙洲文)

在某些机械中,齿轮与弹簧往往联合应用。过去以为螺旋弹簧是

① 杨文斋:《山西永济县薛家崖发现的一批铜器》,《文物参考资料》1955年第8期;也见李文信:《文物参考资料》1956年第3期;杨文斋:《文物参考资料》1958年第8期。

② 《元史》卷四八《天文志》,中华书局校点本,第四册,第992页。

③ 戴念祖:《中国力学史》,第224—226页。



图 8-33

《武备志》绘齿轮与弹簧

欧洲的发明,片式弹簧和扭力弹簧为中国创制。近年考古证明,早在战国时期就有螺旋弹簧^①。其用途尚待考证。古代常见的另一种弹簧是金属条(或丝)按之字形弯折而成的。

明代茅元仪在《武备志·火器图说三》中画出武器上起控制作用的齿轮与这种弹簧的联合装置(图 8-33),且称弹簧为“擗子”。片式弹簧、尤其竹制弹弓在弓箭、纺织机械、捕鼠器等方面被广泛应用。至晚隋唐时期发明的簧锁(图 8-34)是典型的片簧结构^②。文字记载的弹簧也不乏其例。

宋代燕肃曾修理一只脱落的鼓环,他将“鑲簧”装于环脚内,利用该簧的弹力压紧鼓身上环耳,使其不转动,也就不致脱落^③。

古人发明的暗器之一袖箭,将箭藏于袖中,内设弹簧,扳机箭发^④。这些文字记述的弹簧不是螺旋式,就是“擗子”式。

-
- ① 《湖北当阳县金家山两座战国墓葬》,《文物》1982年第4期。该墓葬断为战国初年,发掘出螺旋弹簧16件,为青铜合金制,且仍有弹性;弹簧长1.5cm,丝直径0.4cm。
 - ② 考古界发现许多古代簧锁。例如《文物》1966年第3期第15页图12,载唐代鎏金铜锁。
 - ③ 欧阳修:《归田录》卷二。
 - ④ 袖箭自秦汉起即有之。《元史·顺帝纪》还记载严禁以袖箭暗器伤人。各种军事、军器著作都述及袖箭。

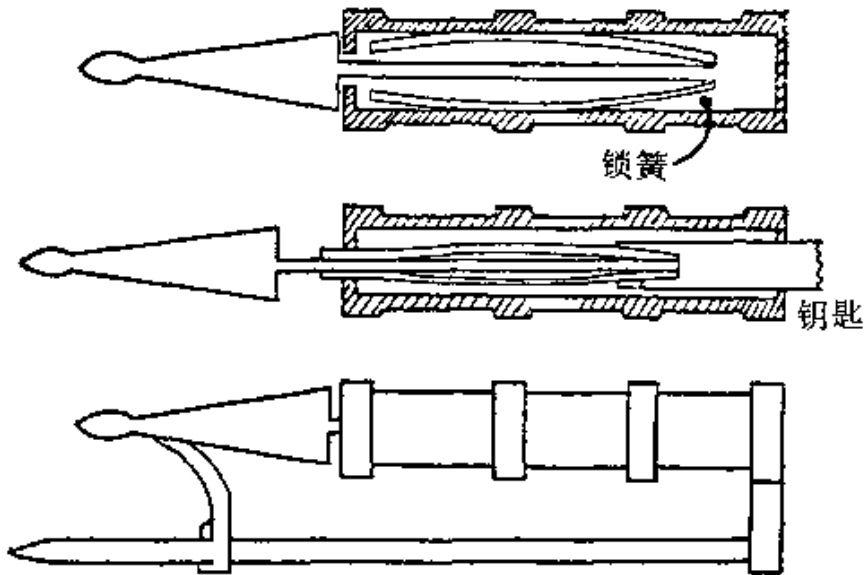


图 8-34 簧锁及其内部锁簧结构

第五节 工 具

顺便,简单地叙述一下制造机械的工具是必要的。

古代的机械大多是木质材料,因此,所有的木工工具也是制造机械的工具。其中,刀、斧、凿、钻、锯、锥、针,产生于新石器时代(见图 8-3)。制作这些工具的材料、工具本身的形状是随时代的进化而改变的。由石器时代到铜器时代、铁器时代,制作工具的材料就由骨、石而进化到青铜、铁,甚至于钢。战国时期,鲁般大概是因为创造了刨、墨斗(用以在木料上画直线)并改进了多种工具的形状,才被后人尊为木圣。

虽然有关木工工具的图画出现较晚,诸如王祯《农书》、清代麟庆《河工器具图说》等,但它们无疑是几千年来中国的传统工具(图 8-35)。至于画圆的规、画方的矩(木工的曲尺),最晚也起源于夏初。以

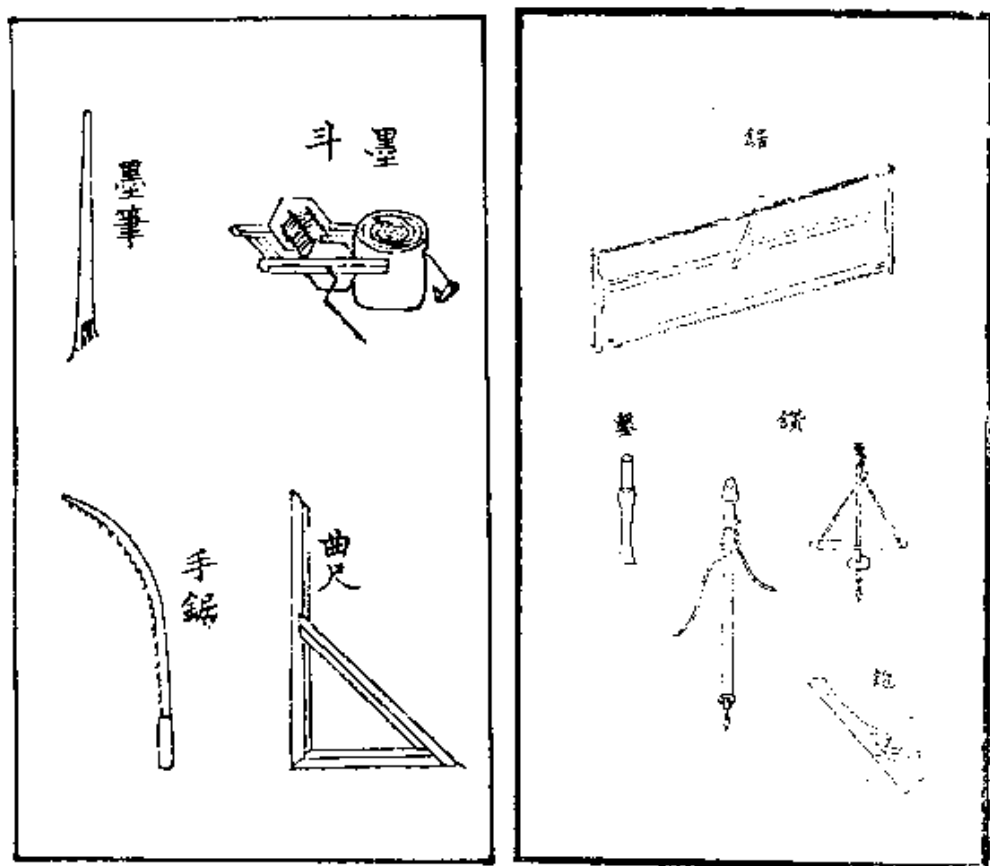


图 8-35 《河工器具图说》绘木工工具之一部分

致后来关于伏羲女娲氏的绘画或壁画，将他们画成一手执规、一手执矩。

值得指出的是，公元 9 年制作的新莽铜卡尺（图 8-36），其形式与用途都极为类似今天的测径游标尺。据考，其正面“所刻分寸，皆镂银成文，制作甚工。……上下共六寸，中四寸，有分刻”^①。这在度量衡史上也是一件了不起创造。它对于古代机械制作、测定圆径和齿距等方面无疑会起到重要作用。另一个令人惊讶的工具是凤翔秦公陵园出土的青铜手钳（图 8-37）^②，它与今日的钢制手钳也完全类似。

① 清·吴大澂：《度量权衡实验考》，1919 年刊本。

② 韩伟：《秦国史迹钩沉》，《文物天地》1988 年第 5 期。

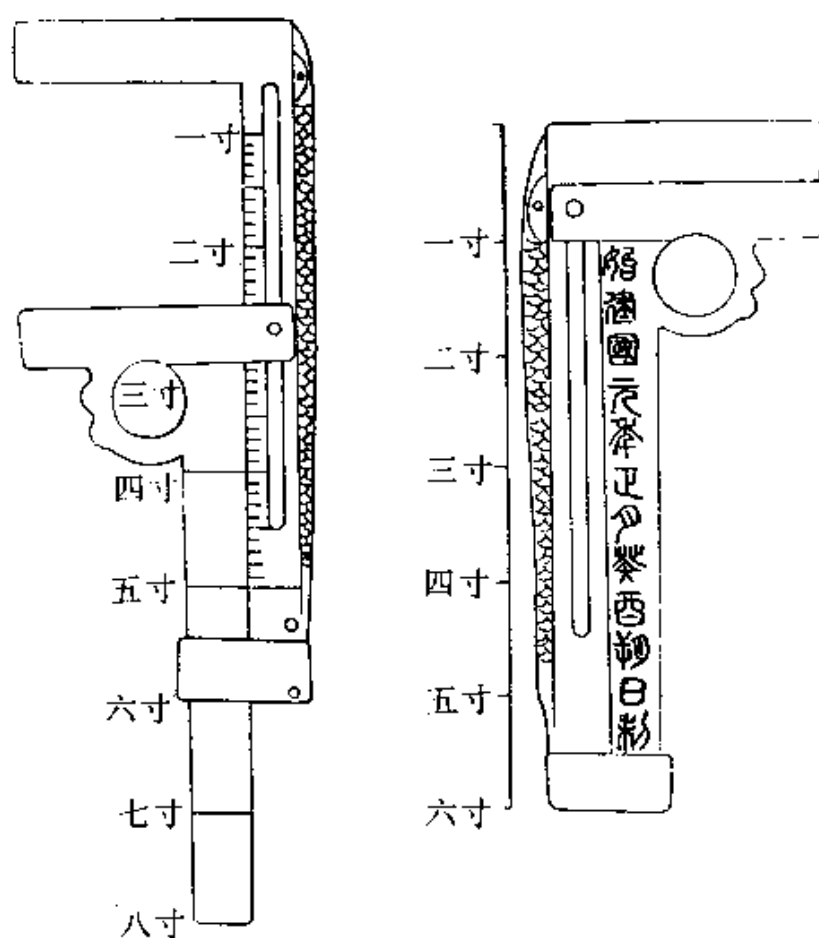


图 8-36 新莽铜卡尺示意图(摹自《中国古代度量衡图
集》,文物出版社,1986)



图 8-37 战国青铜手钳示意图(摹自韩伟文,脚注②)

第九章 车辆和畜力的利用

古代车辆的原动力大多为人力或畜力,因此本章将车辆与畜力合在一起叙述。利用畜力,必先解决牲畜挽具问题,然后才能用它拉车推磨,或在其他机械中作原动力使用。由于牛的生理结构的特点,即它有隆起的肩峰,因此牛的挽具在技术上较容易解决。有效马具即勒套的发明却成为文明进步的一种标志。

第一节 有效挽具的创制与发展

李约瑟博士对此问题曾有过精辟论述。他认为,马的挽具在历史上的发展曾经过三个阶段:(1)喉带和肚带式挽具;(2)胸带式挽具;(3)颈圈式挽具。(图9-1)第(1)种是最古老的挽具。其最大缺点是,利用它马则不能拉重载。因马用力时马具逼压其咽喉,马愈用力或跑得愈快、愈感呼吸困难,致使马不能尽力。古希腊、罗马和欧洲古代的马车都是小车辆,载重极轻,载人极少。其原因即在于此。第(2)种挽具产生于公元前四至公元一世纪,于八世纪传播到欧洲。第(3)种挽具见于公元前一世纪汉画像砖、公元三世纪三国墓砖画、公元五世纪敦煌壁画,总之是在公元前一世纪到公元五世纪期间创制,于十世纪

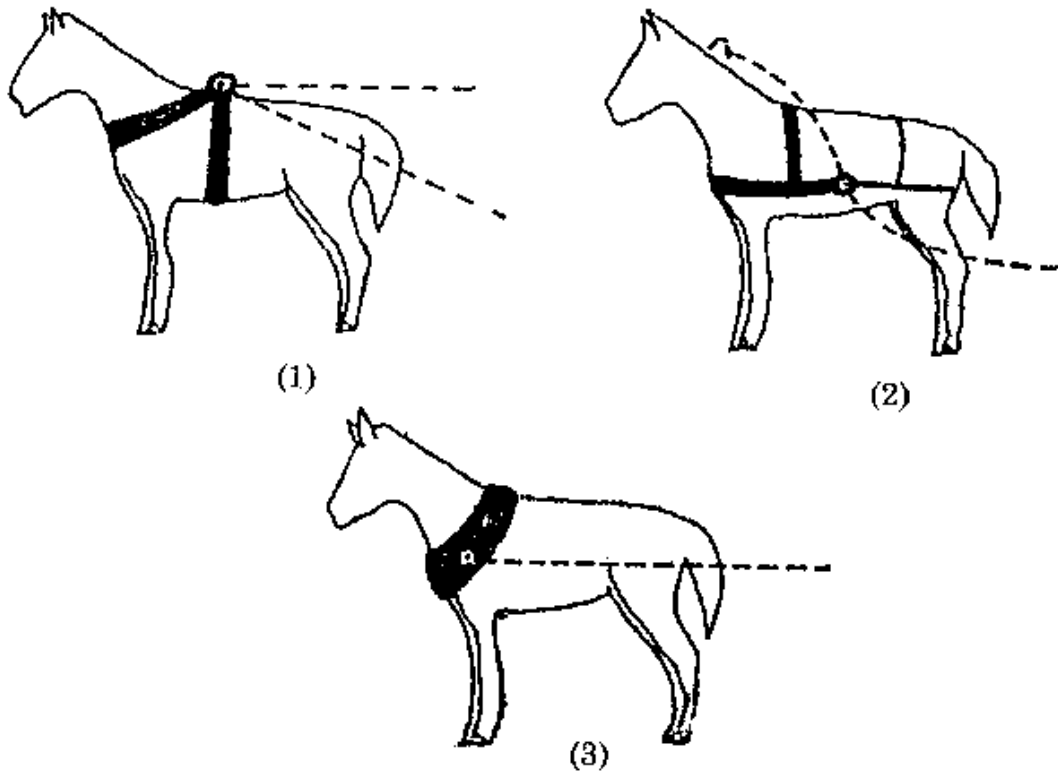


图 9-1 马具的三种主要形式；(1)喉带和肚带式；(2)胸带式；(3)颈圈式传播到欧洲^①。李约瑟说：

这清楚地告诉我们，有效挽具在公元 400—1000 年之间传入欧洲。那些认为每件物品都来自欧洲、“伟大的白种人”是地球上最优秀民族而且天生就聪明的人，应当学习一点历史，以便承认欧洲引为骄傲的许多东西原来都不是在欧洲产生的。而有效畜力挽具显然是这些东西之一。^②

但是，在李约瑟博士的叙述中，第一种挽具即喉带与肚带式马具在中国古代存在与否，迄今并无证据。从先秦墓葬的许多车马实物断

^① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 303—328. Cambridge, 1965.

^② 潘吉星主编：《李约瑟文集》，辽宁教育出版社 1986 年版，第 52 页。

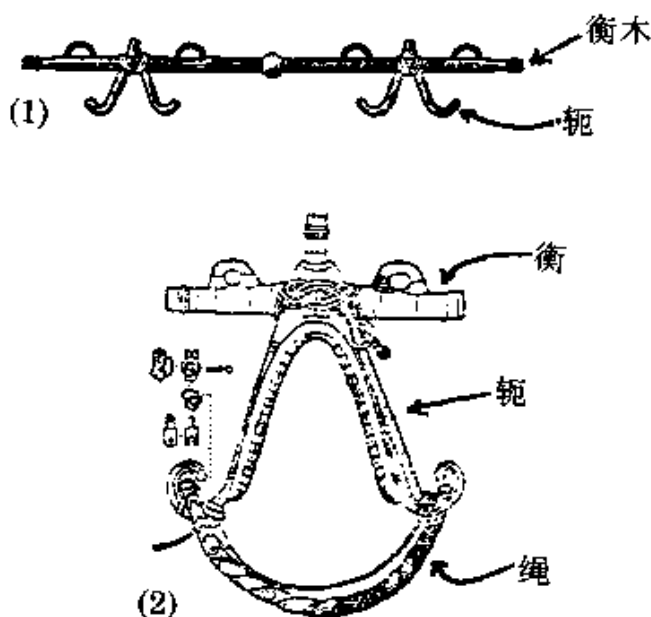


图 9-2 轭在衡木的位置(1)及其结构图(2)

定,在胸带式马具使用之前,中国古代人用的是“轭鞅式马具”。“轭”,一个人字形木支架,外包裹软垫,架在马肩上(图 9-2)。“鞅”即绳带或皮带,其一端系于轭叉,另一端系于舆前环上,再用一粗绳在环上将鞅接于轴。鞅的有无成为古代马车系驾法的标准之一^①。有许多古文字或图画可以为此佐证(图 9-3),迄今发现的先秦墓葬也提供了大量实例。1980年初,陕西临潼秦始皇陵出土两辆随葬铜马车,其中一辆为 4 匹马曳引,各种构件和系驾挽具均以金属制成^②。因其保存完好,为轭鞅式系驾法的认识提供了可靠依据。轭鞅式马具的特点是,车轮大,车箱小,车体较轻,马呼吸通畅,可以达到相当高的车速。

在轭鞅式挽具中,将鞅与轭分离,两鞅变成一条绕过马胸的胸

① 孙机:《中国古代马车的系驾法》,《自然科学史研究》1984年第2期;《从胸式系驾法到鞍套式系驾法》,《考古》1980年第5期。

② 《秦始皇陵二号铜车马清理简报》,《文物》1983年第7期。

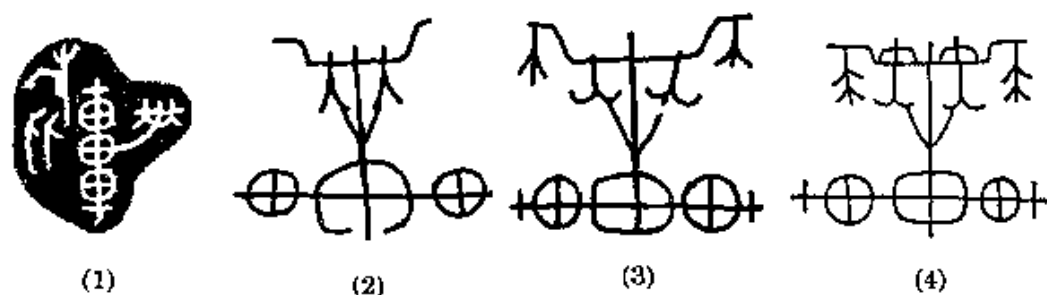


图 9-3 古文字描绘的车：(1)西周《作父丁尊》中旅字，为车上载二人一旂的象形；(2)至(4)为商代铜器铭文(引自孙机，同脚注文献①)，从图中可见，车辕前一横线为驾车用的衡，即衡木；衡左右各一人字，分别为两匹马肩上的轭，由两轭内轭到舆前的斜线，就是两条靽。(3)与(4)中，中间两匹马称为服马，外侧两匹马称为驂马。外侧各一支叉或双支叉符号表示驂马的靽以及防止其内侵的附件。

带。马曳车时，这条绳带受力，两轭只起着支撑轅与衡的作用。这就是胸带式挽具或胸带式系驾法(图 9-4)。

李约瑟博士所述的颈圈式挽具在中国存在时间较短。实际上它

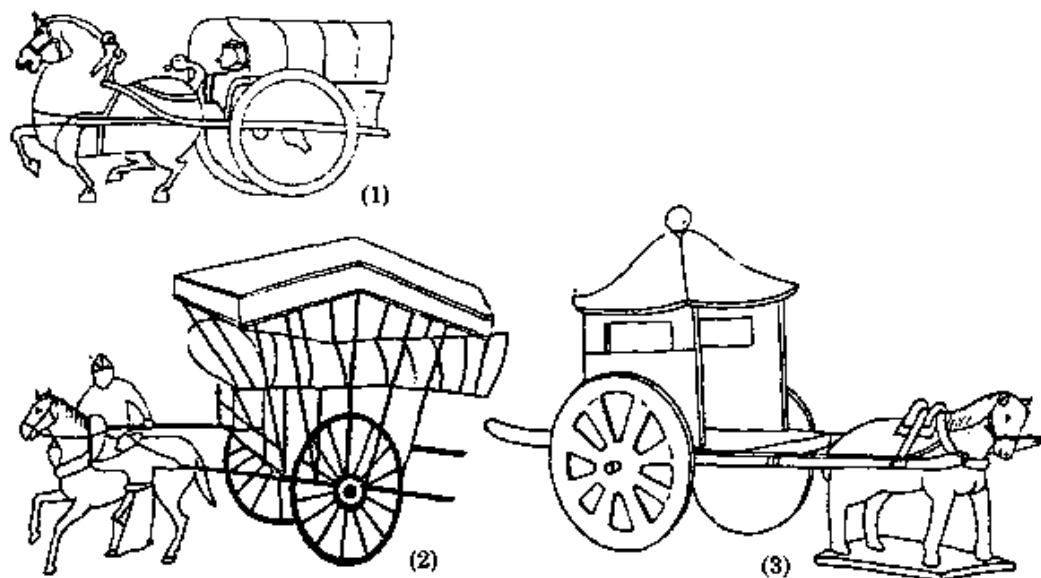


图 9-4 三种马车及其挽具：(1)武梁祠画像石上的犁车，属胸带式挽具；(2)敦煌莫高窟 156 窟唐代壁画，属颈圈式挽具；(3)西安曲江段继荣陶车，属鞍套式挽具(采自孙机文，同上页注①)。

是从胸带式到近代鞍套式挽具的过渡阶段。只要在颈圈、即一个软质皮革衬圈外加驮鞍即可。鞍套式挽具约起源于宋末元初。西安曲江段继荣墓出土至元二年(1265年)陶车为迄今发现的较早的鞍套式挽具马车(图9-4)。^①

现将东西方马车挽具发展情况比较如表9-1。

表9-1 马车挽具及其起源年代

马具种类	起源时代或时间	
	中 国	欧 洲
喉和肚带式	尚无证据存在	极古
轭鞵式	约公元前十三世纪	无证据存在
胸带式	公元前四至公元一世纪	公元八世纪
颈圈式	公元三世纪	公元九或十世纪
鞍套式	公元1265年之前	公元十四世纪

第二节 车 辆

车辆是工程学原理最早得以应用的机械之一。在前述车轮、挽具的文字中,我们已略知它的起源与一般发展情形。

受到滚动圆木,或纺轮、陶轮和玉质圆形物滚动的启发,在公元前2000年,中国可能出现了原始的车。早期车轮称为“轮”,即无辐条的圆木板。相传夏代奚仲造车,可能是利用马力和辐条车轮的创始。安阳殷墟出土马车多为单辘两轮车。此后,直到战国时期马车的形制

^① 《西安曲江池西村元墓清理简报》,《文物参考资料》1958年第6期。

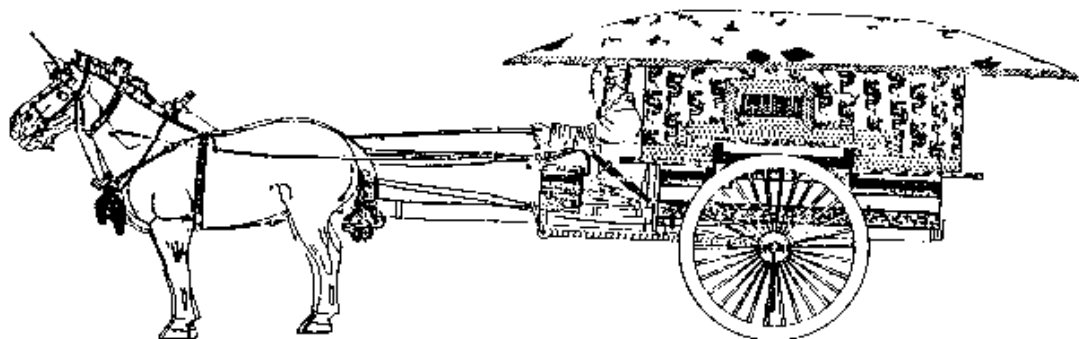


图 9-5 秦始皇陵出土,制于公元前三世纪的铜马车(引自《文物》1983 年第 7 期)。这是轭套式马车的典型,图中的车轮也为“三十辐一毂”的说法佐证。

基本相同^①。值得指出的是,秦始皇陵出土的铜车马(图 9-5)是按照实用车的一定比例缩小制造的,它制于公元前三世纪。其工艺中,不仅对不同构件采用不同铜锡比的青铜合金,而且构件的焊接形式多样化,有铸接、铸焊接、嵌接、销接、插接和活铰链接等多种形式^②。另一个重大成就是,在车毂中装置金属制的钅与铜,并在其间涂抹油脂,既保证车毂坚固耐用,又能减少摩擦阻力、加快速度。润滑油脂的应用是中国古代人最早发现的。^③

-
- ① 西安老牛坡商墓出土双轮、独辮、二马驾驶的车(见《文物》1988 年第 6 期,第 1—22 页);类似的车也见山西侯马上马墓地 3 号车马坑的发掘,该车为春秋初期,公元前 655 年左右制成(见《文物》1988 年第 3 期,第 35—49 页);太原金胜村 251 号春秋大墓及车马坑发掘出春秋晚期的实用车,其形制与《考工记》记载类似(见《文物》1989 年第 9 期,第 59—86 页);战国时期的车甚多,以辉县发掘者颇具代表性(见《辉县发掘报告》,科学出版社 1956 年版)。
- ② 《秦始皇陵二号铜车马清理简报》,《文物》1983 年第 7 期;《秦始皇陵二号铜车马初探》,同前。
- ③ 《诗·邶风·泉水》:“载脂载韃。”《左传·哀公三十年》:“巾车脂辖。”这些文字意思是,将油脂放入钅辘之间。《吴子·治兵篇》:“膏辘有余,则车轻人。”参见戴念祖:《中国力学史》,第 162—163 页。

自商、西周至春秋的长时期中,用于车战中的战车是决定交战诸侯国胜负的重要兵种。战车的多寡是衡量国力的尺度,故有“千乘之国”、“万乘之君”之说。战国初,车战被逐渐淘汰,马车成为交通运输的重要工具。造车是先秦一个大型的工程技术部门。《考工记》:“一器而工聚焉者,车为多。”“轮人”、“舆人”和“辀人”是迄今尚存较完整的《考工记》中叙述制车的三篇文字,它们记载了从西周至春秋战国之际一系列造车的技术规范与检测标准,饱含着工程工艺学、材料力学和应用物理学的内容。从此时迄汉代止,制车技术精湛,车的品种也颇多^①,而历史文献中记述的有关车的专用名词或技术名词达几十种之多(图9-6)。《后汉书·舆服志》记载的车辆22种^②,而这仅仅是宫廷用车而已。《宋史·舆服志》记载的宫廷用车30余种。“舆”即车辆成为历代正史中必要的篇章(其内容或载于《舆服志》、或载于《礼志》),这在世界其他民族看来是难以想象的事。

当车战衰落的战国时期,马车以牛车为法,逐由独辀改为双辀,驾二马以上改为驾一马。汉兴,马车辀的曲度逐渐改小;迄止三国时期,完全成平直双辀了。

牛车也是古代重要的交通运输工具,尤以民间如此。谯周《古史考》:“黄帝作车,引重致远;少昊驾牛,禹时奚仲驾车。”可见牛车起源甚古。驾牛大车安装双辀至晚起于春秋末期。初,牛车笨重,不受重

① 以大小言之,有大车、小车。小车曲辀,大车直辀或略有弧度。大车又称柏车。役车、柴车、栈车等是大车之属,牛车一般谓之大车,马车又曰攀车。以形体言之,如车辀曲直、弧辀深浅、舆上布篷和窗户的有无,分别称为辀车、辘车、耕车、轩车、鞶车等。以车衣别之,有帷车、衣车、容车等。以装饰绘画言之,有墨车、朱斑轮车等。以驾车牲畜言之,有马车、牛车、羊车、羸车、鹿车等。以乘坐形式言之,有立车、安车等。详见赵化成:《汉画所见汉代车名考辨》,《文物》1989年第3期。

② 这22种车的名称为:玉辂、乘舆、金根、安车、立车、耕车(又曰芝车)、戎车、猎车、耕车、青盖车、绿车、皂盖车、夫人安车、大驾、小驾、法驾、轻车(古之战车)、大使车、小使车、近小使车、载车、导从车。

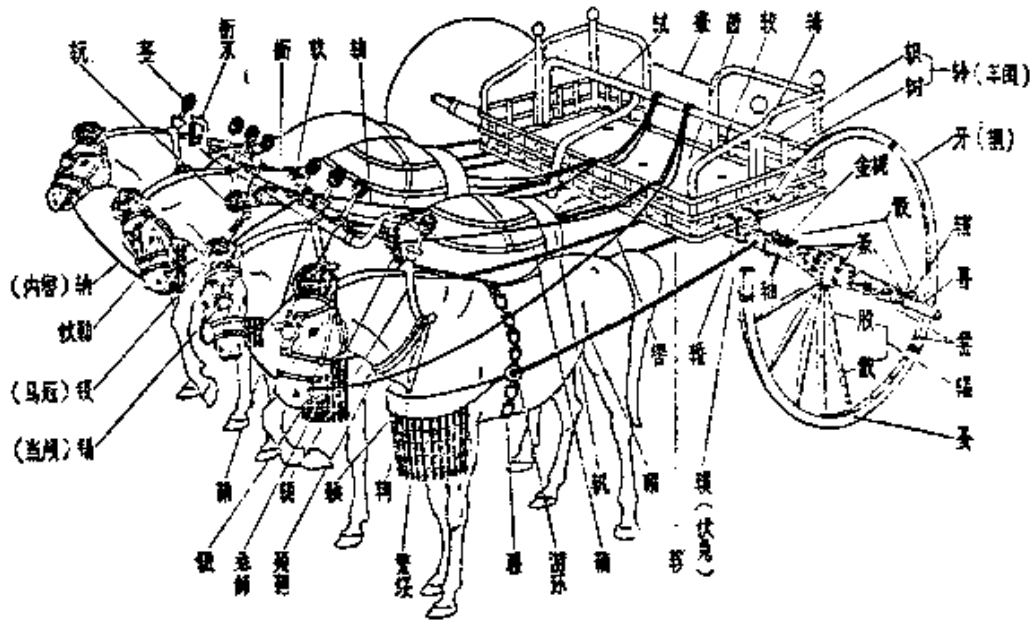
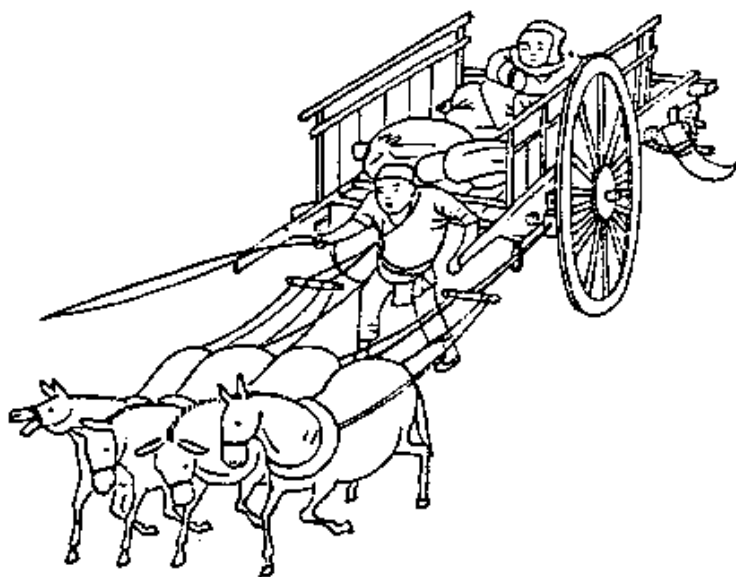


图 9-6 马车的部分专有名词示意图(注意,该马车的系驾法不具任何时代意义)。

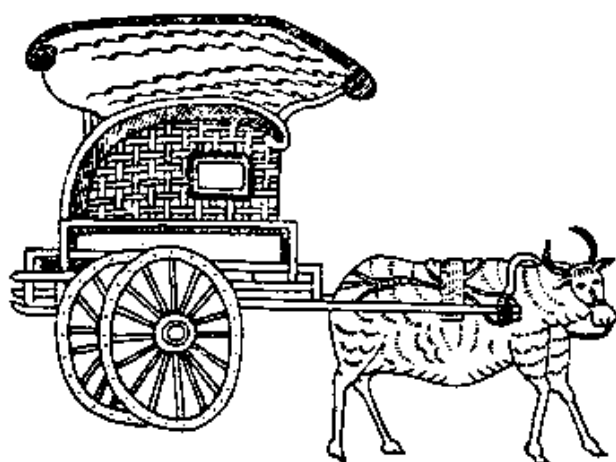
视。车战衰落,牛车渐兴。汉代起,将相也乘牛车,尤其在东汉灵帝、宪帝之时,上至天子、下至庶子,“以为常乘”(《晋书·舆服志》)。南北朝时期,牛车风靡。其他车辆,如驴骡之车,也随马车、牛车而起(图 9-7)。

最后要述及手推车的起源。无疑,它是与有轅有轮的车同时创造的。手推车古称“辇”。除双轮独轅之外,它一般地具有轅短而细,轳的曲度较浅,衡短而小,轮小,牙窄等特点。陕西陇县边家庄 5 号春秋墓葬的车属于这种早期的轻型手推车^①。从出土的车木俑看,其驾驶方法是双手托衡于胸前拉车前进(图 9-8)。它是现代人力车的始祖。手推车在古代的应用也非常普遍。《左传·庄公十二年》(前 682 年),王宫内乱,一名南宫万者以辇载其母奔陈,据说,日行 260 里。南宫万的手推车与图 9-8 有可能类似,因为时间约略相同。

^① 《陕西陇县边家庄 5 号春秋墓发掘简报》,《文物》1988 年第 11 期。



(1)



(2)

图 9-7

(1)装饰华丽的宋代牛车(故宫博物院藏宋簪花铅罐上绘画), (2)载重驴车
(《清明上河图》绘)(引自孙机,《考古》1980年第5期)。

第三节 独轮车

这是又一项使欧洲人惊讶的发明。由于重心法则,独轮车极易倾

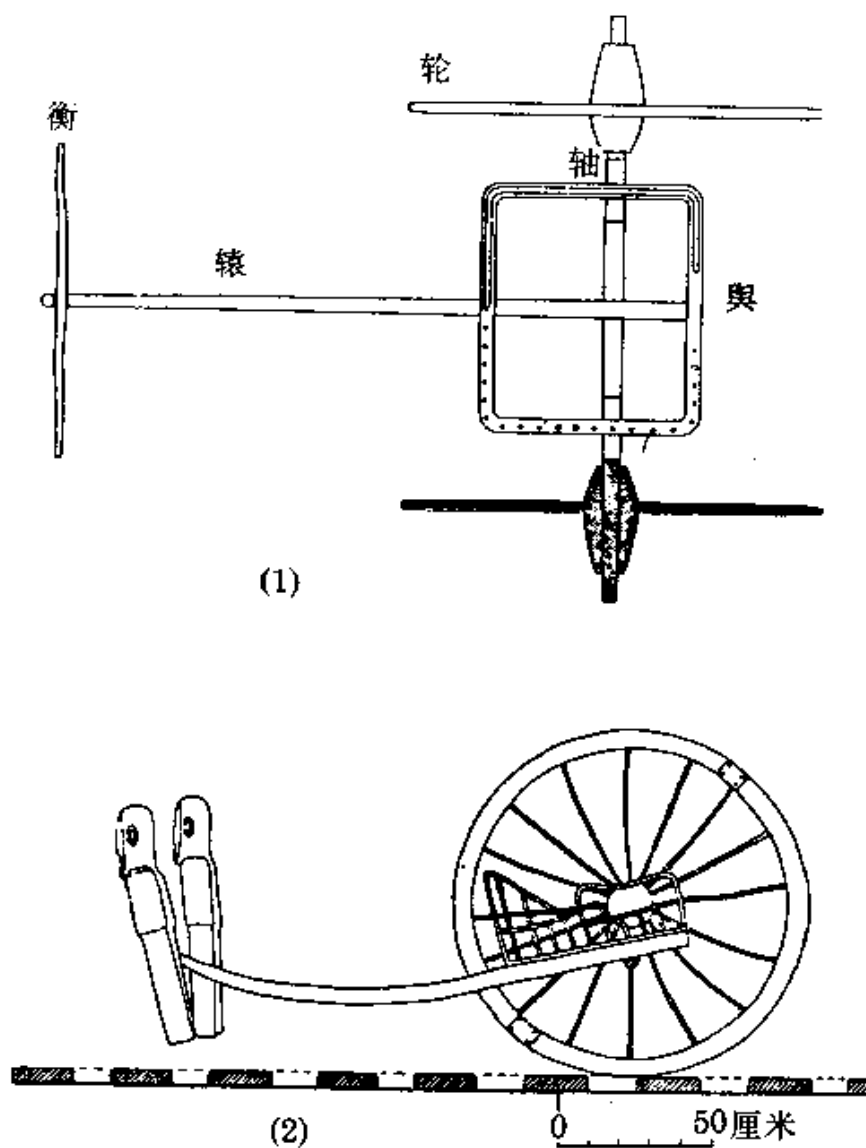


图 9-8 春秋初期的手推车

(1)俯视图；(2)侧视图，图中可见木桶拉车之状。（引自《文物》1988年第11期）

覆并不让人奇怪。奇怪的是，中国古代人用它载重、载人，长途跋涉而平稳轻巧（图 9-9）。因此，它的创制者和第一个驾驶者必定是有胆有识的机械工程师。

独轮车大概是古车中最简单的一种，以只有一个车轮为标志。至于车辕长短、平斜，支杆高低、直斜，轮罩之方椭，几乎随地而异，随人



獨車推方南

图 9-9 《天工开物》绘独轮车

而异。图 9-10 是李约瑟博士所绘的各种类型独轮车草图。^①

独轮车的第一个创制人究竟是谁？人们立刻会想到三国时蜀国

^① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, p. 270. Cambridge, 1965.

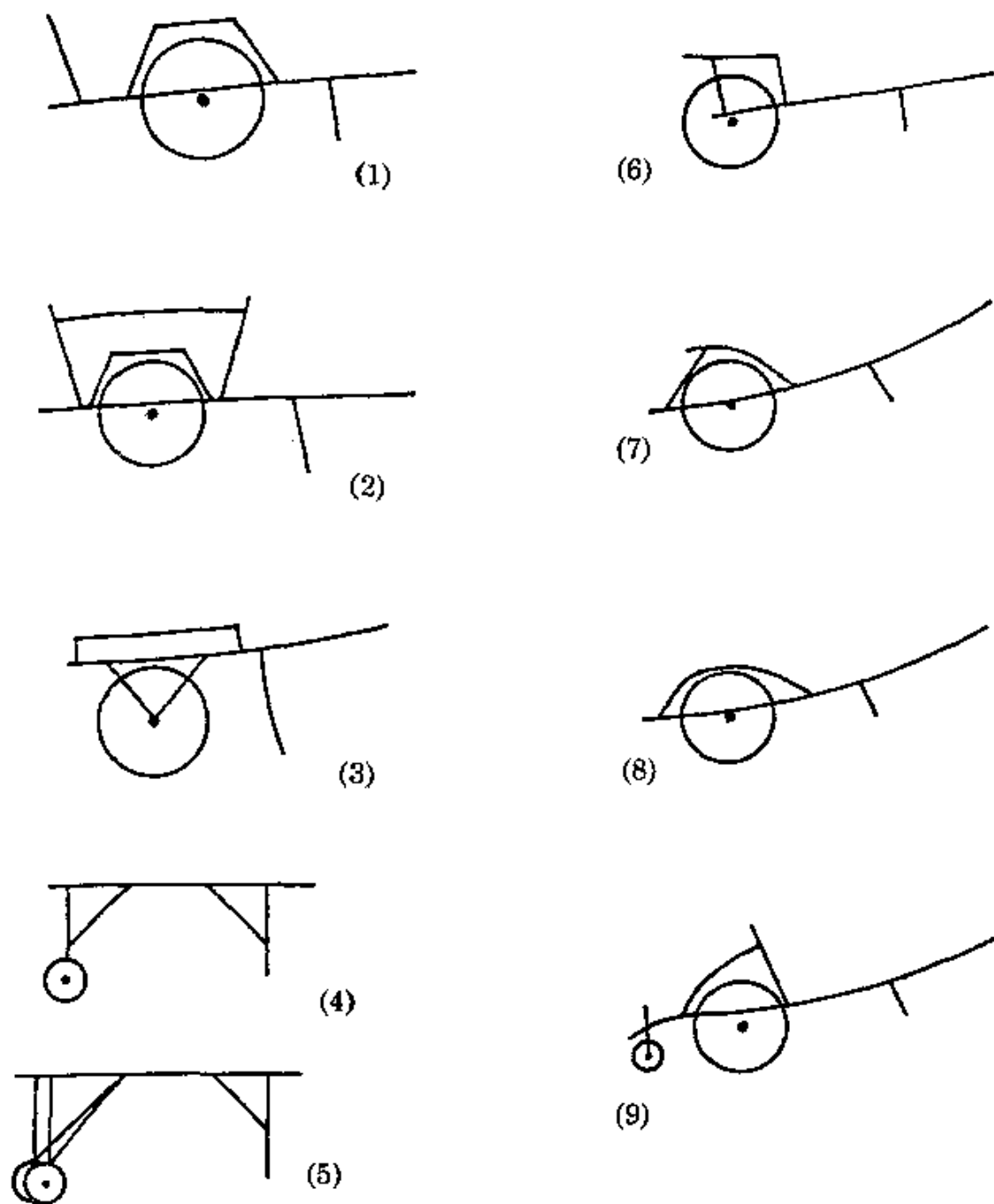


图 9-10 李约瑟绘独轮车类型简单示意图

(1) 轮在中央, 轮上有罩架, 类图 9-9, 可满载负荷, 称为“驮马”式, 见于江西; (2) 同(1), 有马车沿, 见于川北; (3) 重心偏高, 轴上架斜撑, 主要用于运土, 见于陕西; (4) 小轮在前, 重心较高, 轴上直立拉杆支架, 见于四川; (5) 二小轮在前, 重心较高, 轴上支架同(4), 见于四川; (6) “半担架”式, 或为最古老的型式, 见于陕西; (7) 轮上曲罩架, 见于川西; (8) 轮上流线型罩架, 见于川西; (9) 与(7)类似, 只是车前有一小辅轮, 见于湖南等省。

丞相诸葛亮。《三国志·蜀书·诸葛亮传》确实记下“木牛流马，皆出其意”的文字，在他卒前几年复出祁山时，他确也曾以木牛和流马运送粮草。据考，木牛流马也就是独轮车^①。出于当时军机，文献记载将它神秘化了。宋代高承撰《事物纪原》也将造独轮车之功归于诸葛亮^②。然而，据历史记载，蜀国著名的钢铁冶炼技师蒲元曾上书诸葛亮，禀告造成木牛事^③。在诸葛亮之前，可能还有一些能工巧匠造成独轮车。诸葛亮是东汉以来使用已久的独轮车改进者，当无疑义。根据汉画像砖和一些文字记载，经考证，独轮车的发明时间可上推到西汉晚年，或称为“鹿车”、“辘轳车”。^④

三国以后，独轮车被广泛使用。宋代曾敏行曾又一次述及它的军事用途，不仅可运粮草，且又能卫阵拒马。曾敏行称它为“活城”^⑤。北宋晚期，张择端《清明上河图》中多处描绘了满载货物的独轮车；在其画面的城门外，因独轮车载货太重，除驴拉人推之外，还在货架上临时捆扎二轅，以供另一人在驴后车前拉曳。宋应星在《天工开物·舟车》中描绘并记述了南北方独轮车之驾法：北方独轮车，人推其后，驴曳其前；南方独轮车，仅视一人之力而推之。而在欧洲，独轮车直至十二世纪后期，甚至十三世纪尚未出现。此后欧洲的独轮车，由于车轮在车架最前端，车载负荷全部在车轮与推车人之间，这无异于推车人与车轮在抬重物了。至于独轮车以何种方式、通过什么渠道传播到欧

① 黎谐远：《刘仙洲在新著中进一步论证认为木牛流马是独轮车》，《北京晚报》1962年12月2日第1版；刘仙洲：《从车的发明谈到木牛流马》，《科学画报》1964年第9期，第340—341页。

② 高承：《事物纪原》卷八《舟车帷幄部·小车》，金圆等点校本，中华书局1989年版，第404页。

③ 唐·虞世南：《北堂书钞》卷六八。

④ 刘仙洲：《我国独轮车的创始时期应上推到西汉晚年》，《文物》1964年第6期；史树青：《有关汉代独轮车的几个问题》，同前。

⑤ 曾敏行：《独醒杂志》卷九。

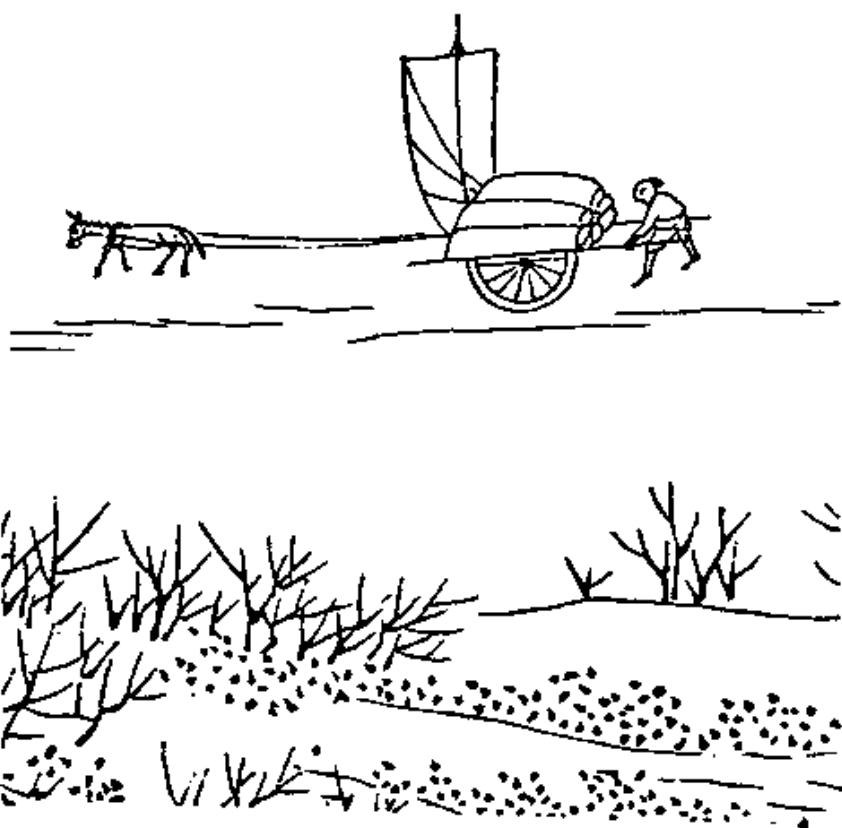


图 9-11 麟庆《鸿雪因缘图记》绘加帆车

洲的问题,尚待研究。

中国的独轮车除人推畜拉之外,更有在车架上安装风帆,利用风力推车前进的发明。这种车称为“加帆车”,大约创制于五世纪^①。关于帆车的图画和文字记述相对少些。清道光二十九年(1849年)麟庆(1791—?)著《鸿雪因缘图记》第三集中绘有加帆车(图 9-11)^②。俞樾(1821—1906年)《春在堂随笔》(卷四)写道:

先大夫言:小车,俗名二把手,遇顺风,有以布为帆。曩于山

① 戴念祖:《中国力学史》,第 476 页。

② 麟庆:《鸿雪因缘图记》第一集完稿于 1839 年,第二集完稿于 1841 年,第三集完稿于 1849 年。加帆车绘于第三集下册“邯郸说梦”图中。

东道上见之。口占一绝云：车行如驾不须推，陆海茫茫妙想开，偷得船家使风法，布帆三尺树荫来。

这简明地记述了独轮车与布帆的巧妙结合，以利用风力行车。或许，正是由于“偷得船家使风法”，儒生墨客不愿为之多费笔墨，致使历代有关记载极少。独轮车在明末清初传到欧洲后引起了巨大反响。十六、十七世纪期间，欧洲编制的中国地图以帆车作边饰。荷兰工程师斯泰芬、英国物理学家胡克曾仿制中国帆车。英国哲学家霍布斯(Thomas Hobbes, 1588—1679年)在其著《哲学概论》中以帆车实验证明其对船帆的受力分析。1684年，法国科学院令传教士柏应理(Philippe Couplet, 1623—1692年)到中国查询有关帆车的细节。德国哲学家、数学家莱布尼兹(F. von Leibniz, 1646—1716年)在计划科学博物馆时曾建议展品中应包括“确系来自中国”的帆车^①。十七世纪英国著名诗人弥尔顿(John Milton, 1608—1674年)在其长诗《失乐园》中写下“中国人利用风帆驾驶藤制的轻车”^②。大概此时，全世界都在为中国帆车而神魂颠倒。

第四节 指南车

指南车，又称司南车。它是一种指示方向的机械装置。在联合运用车轮、滑轮、各种齿轮和绳索的基础上，只要在车开始运动时将车上木人手指南方，其后“车虽回运而手常指南”^③。据载，它的创制是

-
- ① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 276—279.
② 弥尔顿著、朱维之译：《失乐园》第三卷，上海译文出版社1984年版，第110页。译者在该句诗注中说：十七世纪出版的黑凌的《世界志》认为，中国是个平原国，大小藤车用风帆驾驶。
③ 《晋书》卷二五《舆服志》，中华书局校点本，第三册，第755页。

基于这样一种需要：“地域平漫，迷于东西，造立此车，使常知南北”，“以送荒外远使”。^①

我们将历史上指南车制造者及有关文献列于表9-2。他们中有

表9-2 历代指南车制造者及文献

时间(年)	年代	制造人	文 献	备 注
	战国	鲁 班	《酉阳杂俎》	不可信
	东汉	张 衡	《宋书·礼志》	孤证难断
235	三国	马 钧	《三国志·魏书·明帝纪》裴注引《魏略》；《三国志·魏书·杜夔传》裴注；《宋书·礼志》	成；晋乱车亡
333—349	后赵	解 飞 魏猛变	《宋书·礼志》；《邺中记》；《太平御览》卷七五二和卷八二九	成
417	后秦	令狐生	《宋书·礼志》	成
424—452	后魏	郭善明	同上	未成
		马岳	同上	垂成，为善明酖杀
477—478	刘宋	祖冲之	《宋书·礼志》；《南齐书·祖冲之传》	成
		索驭麟	《南齐书·祖冲之传》	未成
616—647	唐	杨务廉	《玉海·车服部》引《宣和卤簿记》	未成
713—741	唐	马待封	《太平广记》卷二二六《伎巧二》引《纪闻》	成
806—820	唐	金公立	《宋史·舆服志》	成
1027	宋	燕 肃	《宋史·舆服志》；《宋史·燕肃传》；岳珂《愧郈录》卷十三	成
1107	宋	吴德仁	《宋史·舆服志》	成

① 《宋书》卷一八《礼志》，中华书局校点本，第二册，第496页。

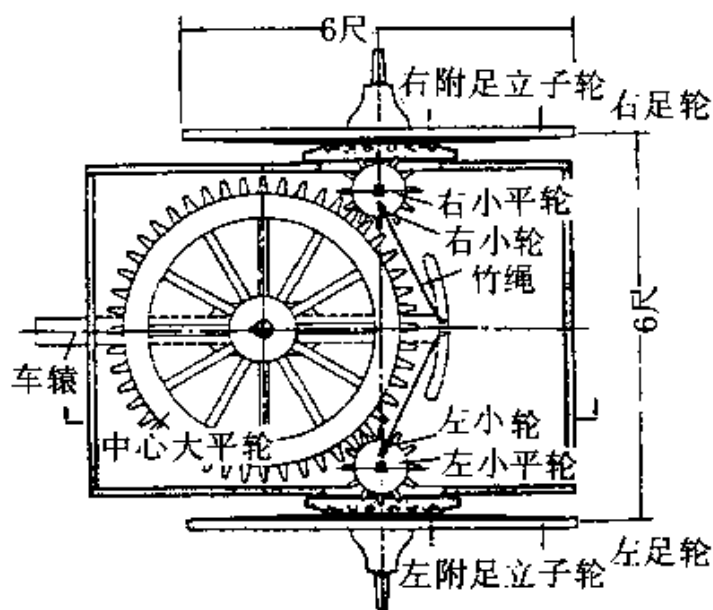


图 9-12 燕肃、吴德仁指南车机械结构图,王振铎复原。

些人成功了,有些人没有成功。三国时马钧是第一个成功地制造指南车的人。《宋史·舆服志》详细地记载了燕肃和吴德仁所造指南车的结构和技术规范,成为世界史上最宝贵的工程学文献。

燕肃(961—1040年),字穆之,青州益都(今属山东)人,是宋代最伟大的机械工程师之一。他曾经制造计时准确的“莲花漏”、记里鼓车、欹器;对潮汐现象作了10年的实地考察,写下了闻名的《海潮论》和《海潮图》。于宋仁宗时官龙图阁直学士、礼部侍郎、工部郎中^①。于天圣五年(1027年)任工部郎中时,燕肃设计制造了指南车。

燕肃的指南车是一辆双轮独辕车,车上立一木人,伸臂指南。车中,除2个沿地面滚动的足轮(即车轮)外,尚有大小不同的7个齿轮(图9-12,9-13)。《宋史·舆服志》分别记载了这些齿轮的直径或圆周以及其中一些齿轮的齿距与齿数。由齿数、转动数,并保证木人指南的目的,可见古人掌握了关于齿轮匹配的力学知识和控制齿轮

^① 《宋史》卷二九八《燕肃传》,中华书局校点本,第二八册,第9909页。

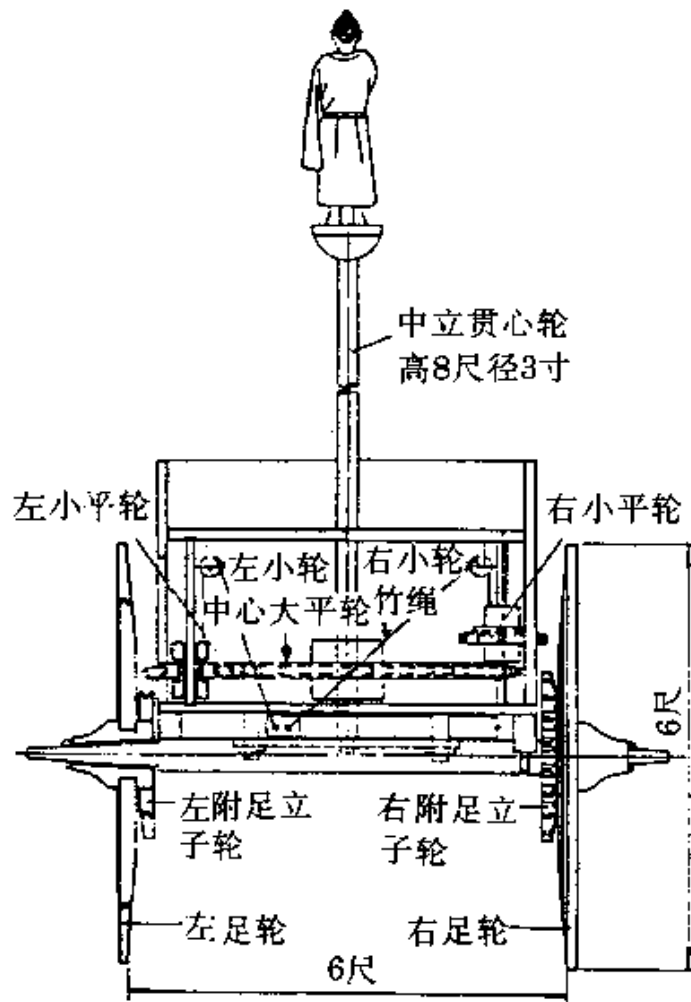


图 9-13 燕肃、吴德仁指南车后视图,王振铎复原。

离合的方法。车轮转动,带动附于其上的垂直齿轮(称“附轮”或“附立足子轮”),该附轮又使与其啮合的小平轮转动,小平轮带动中心大平轮。指南木人的立轴就装在大平轮中心。当车转弯时,只要操作车上离合装置、即竹绳、滑轮(分别居于车左或车右的小轮)和铁坠子,就可以控制大平轮的转动,从而使木人指向不变。例如,当车向右转弯,则其前辕向右,后辕必向左。此时只要将绕过滑轮的后辕端绳索提起,使左小平轮下落,从而与大平轮离开;同时使右小平轮上升,从而与大平轮啮合,大平轮就随右小平轮而逆转。由于各个齿轮匹配合

理,车轮转向的弧度与大平轮逆转弧度相同,故木人指向不变。

吴德仁在大观元年(1107年)献其所制指南车、记里鼓车。鉴于燕肃指南车的一个大缺点:车不能转大弯,否则指向就失灵,吴德仁重新设计制作指南车。吴德仁指南车基本原理与燕肃一致,只是在附设装置方面较为复杂。他的车分上下两层。上层除木人指南外,绕木人还有龟二、鹤二、童子四。

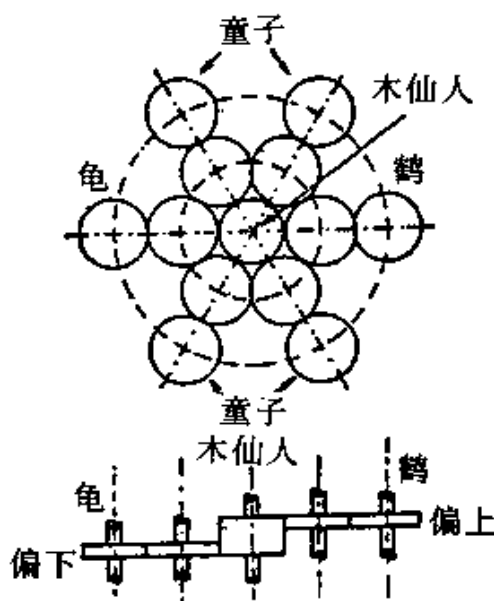


图 9-14 吴德仁指南车的上层结构设计图(刘仙洲设计)。

的齿轮就是为它们设的(图 9-

14)。下层的齿轮装置与结构如前所述^①,是他发明了绳轮离合装置,以保证车转大弯也不影响木人指向。

国内外有许多著名学者、科学家和工程师对指南车作了专注的研究和复原探讨工作。英国人兰彻斯特(George Lanchester)认为,指南车中应用了类似现代汽车上的差动齿轮;李约瑟博士在对差动齿轮的背景作了详细叙述之后指出:无论如何,指南车是人类历史上第一架有共协稳定的机械(homoeostatic machine);当驾车人与车辆成一整体看待时,它就是第一部摹控机械。^②

① 关于燕肃、吴德仁指南车的详尽记载,见《宋史》卷一四九《舆服志》,中华书局校点本,第一一册,第 3491-3493 页。有关研究及复原探讨文章,参阅王振铎,《科技考古论丛》,文物出版社 1989 年版,第 1-49 页;刘仙洲《中国机械工程发明史》,第 100-104 页;Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 286-303。

② Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 286-303。

第五节 记里鼓车

记里鼓车又名记道车、大章车。它是利用车轮带动大小不同的一组齿轮,使车轮走满一里时,其中一个齿轮刚好转动一圈,该轮轴拨动车上木人打鼓或击钟,报告行程。

历史上记载记里鼓车的文献非常多^①。若依晋崔豹《古今注》的记载,记里鼓车至少创始于公元三世纪。大约成书于魏晋时期的《孙子算经》(卷三)中有一道算题与记里鼓车有关:“今有长安、洛阳相去九百里,车轮一匝一丈八尺。欲自洛阳至长安,问轮匝几何?”这道题大概是以记里车的发明与使用为背景的。《西京杂记》中也有“记道车,驾四,中道”的记载,倘若该书为汉刘歆(?—23年)所撰,或许记里车的发明还可上溯至西汉末年,至晚是公元一世纪初年。公元一世纪前后,汉画像石上有“鼓车”图(图9-15)。然而,迄今无法证实它就是记里鼓车。大约表9-2中成功地制造了指南车的人,也都制造了记里鼓车,此外,还有宋或五代时苏颋,宋代卢道隆等人。而第一个在史书中留下姓名的记里车机械专家当为马钧。

马钧,字德衡,三国时曹魏人,是那时闻名的机械大师。他不仅制造了指南车、记里鼓车,而且改进了绀机,提高织造速度;创制翻车(即龙骨水车);设计并制造了以水力驱动大型歌舞木偶乐队的机械;对兵器制造也甚有成果。可惜,就连他的生卒年史官们也未留下一笔

^① 例如,《晋书·舆服志》,《宋书·礼志》,《南齐书·舆服志》,《隋书·礼仪志》,《旧唐书·舆服志》,《新唐书·舆服志》,《宋史·舆服志》,《金史·舆服志》,《金史·仪卫志》;也见刘歆:《西京杂记》卷五,崔豹:《古今注》卷一,陆翹:《鄜中记》,马竊:《中华古今注》卷一,江少虞:《皇朝类苑》,岳珂:《愧乡录》卷一三,以及《太平御览》卷二二六,等等。

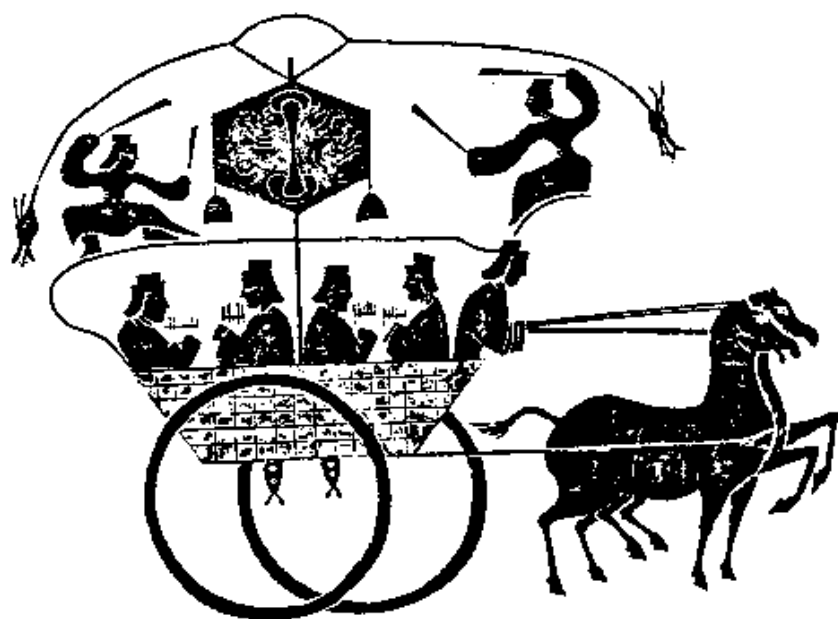


图 9-15 汉孝堂山画像石“鼓车”图。

记载,只知道他当过“给事中”小官吏,加之不擅辞令,终生不得志。

《宋史·舆服志》留下吴德仁和卢道隆制造记里鼓车的较为详细记载。吴德仁于 1107 年同时制成指南车和记里鼓车。卢道隆于天圣五年(1027 年)制成记里鼓车,比吴德仁早 80 年。同样,史书中也没有留下关于卢道隆生平的记载。

吴德仁记里鼓车,除两个车轮外,内有 4 个齿轮,而卢道隆的车内有 6 个齿轮。其结构装置如图 9-16,9-17。当车轮(直径 6 尺,转 100 周行进 180 丈为 1 里)转动达 1 里路程时,通过附于车轮上的立轮(18 齿)、下平轮(54 齿)、旋风轮(3 齿,和下平轮同轴)减速后,上平轮(100 齿)仅转

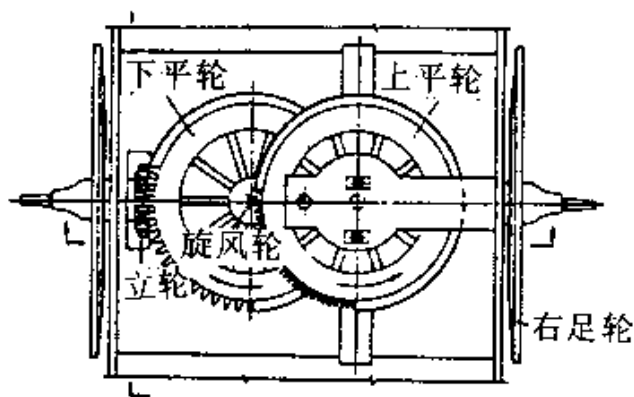


图 9-16 卢道隆、吴德仁记里鼓车机械结构图。王振铎复原。

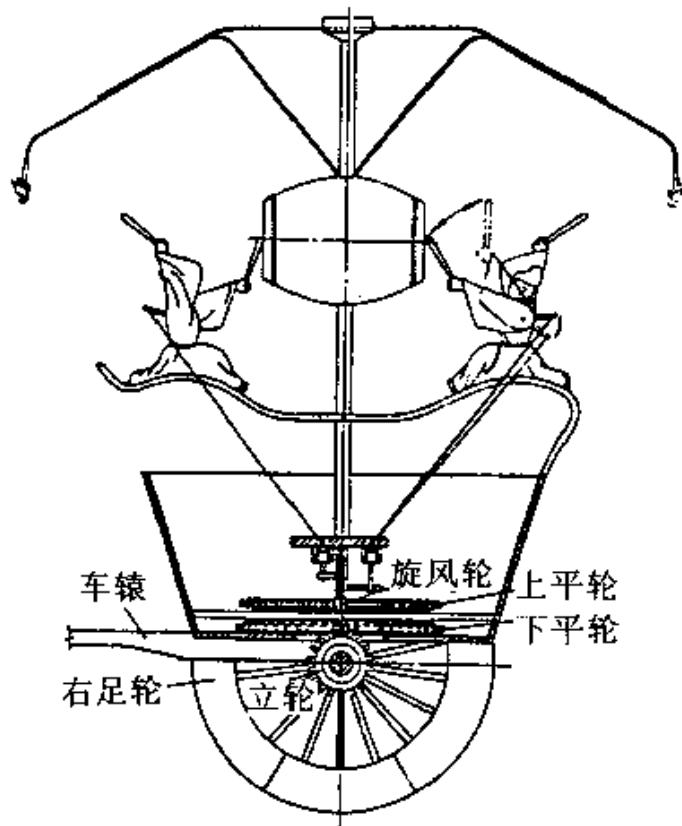


图 9-17 卢道隆、吴德仁记里鼓车侧视图。王振铎复原。

一周。这样，在上平轮轴上若装有凸轮或拨子，拨动车上木偶之臂，就可以使之击鼓一次。更进一步，若在上平轮轴上再装一个 10 齿小平轮，使其与另一轴上 100 齿的大平轮相啮合。大平轮轴也装凸轮。那么，车行 10 里，该凸轮可拨动木偶击钹。前者为吴德仁记里鼓车，后者为卢道隆记里鼓车。卢道隆的车比吴德仁的稍微复杂些，但机械原理是一致的。^①

记里鼓车是减速齿轮系的典型。它也是现代计程车、计速器的重

^① 关于记里鼓车的复原制作，张荫麟最早对历史文献作了刊误，并提出了正确的复原设计。见张荫麟：《宋卢道隆吴德仁记里鼓车之造法》，《清华学报》2 卷 2 期（1925 年），第 635—642 页。从 1935 年起，王振铎多次对记里鼓车进行了模制工作，见王振铎：《科技考古论丛》，第 1—49 页。

要祖先。它的报告里数的设计,也是近代所有机械钟表中报时木偶的始祖。在欧洲,记里车的设计始于公元一世纪亚历山大里亚的希罗(Hero of Alexandria, 活动于公元60年左右),其报告里数的装置为一个球掉落于容器之中。据载,罗马皇帝康摩迪斯(Commodus, 161—192年)在位时曾使用过这样的记里车。但此后一直没有任何记载。直到十五世纪末期才再度出现于欧洲。看来,东西方的记里车是各自独立发展的。令人感兴趣的是,中国古代有关记里车的文献记述几乎与欧洲同时或稍早些,但是,当欧洲记里车销声匿迹之时,中国记里车不仅屡有人制造,而且摆在宫廷大门外炫耀豪华。而当记里车在欧洲再度兴起时,中国人却几乎忘了它的存在。明代郎瑛在《七修类稿》中写道:

本朝尝以记里鼓出题试士,多不知为何物者,知者又不知始于何时、何人创也。^①

从记里车的历史,使我们又一次看到东西方的科学技术在历史上彼隆此衰的情景。

第六节 畜力磨与车磨

一、历史的叙述

许多欧洲的学者对磨的古代历史作了大量的研究。他们得到了关于磨的顺序发展的结论:由原始磨发展到手磨、由手磨发展到畜力磨,进而水磨,机械磨或车磨。马克思在分析机器与自然力和科学的

^① 郎瑛:《七修类稿》卷二四《辩证类·记里鼓》,明清笔记丛刊,中华书局1959年版,第370页。

应用中,也研究了磨的发展史。他得出了与上述顺序相同的结论,并指出:“从磨的历史可以研究力学的全部历史”;“磨可以被看作是最先应用机器原理的劳动工具”,“因为水轮(水落在其上),水轮的轴(它通过齿轮系统将运动传给磨盘),包括了机械运动的完整体系。”^①

然而,上述关于磨的发展史,包括马克思的结论都不适用于中国。中国磨的发展史具有明显不同于欧洲的特点。

大约公元前 3000—前 4000 年的新石器时代,古代中国人已发明了多种形式的磨棒和石磨盘^②。但那时的磨,绝大多数尚无磨齿,只是人们通过柱形石棒在石板上往复压碾谷物罢了。这种技术状况直到夏商之际可能没有多大改变。商代,杵臼得到较大发展,产生了多个象征舂或杵臼的文字符号^③。当时杵臼的数量及其功效都可能大于原始磨棒。直到西周时期,杵臼还可能保持对磨的优势。《诗·大雅·生民》在歌颂发明农业的后稷的同时,也描述了西周人舂米簸糠的情景^④,但却没有述及磨。

春秋战国时期,磨有了极大发展,产生了极为先进的旋转磨。石器作坊专门加工圆石磨^⑤。在秦都栎阳发现的磨,不仅磨石中心微鼓起,且有方形轴孔、内装铁轴芯,磨齿排列规则有序^⑥。从这些遗物看

① 马克思:《机器、自动力和科学的应用》,人民出版社 1978 年版,第 57—59 页。

② 在河北武安磁山发现新石器时代石磨棒 56 件,其数量之多令人惊讶。见《考古》1977 年第 6 期,第 363 页,《考古学报》1981 年第 3 期,第 327 页。

③ 如𣎵、𣎶、𣎷,这三个字或许表明杵臼本身的三个发展阶段:第一个字表示最古老的杵舂,两只手举起杵在地面捣碎谷物;第二个,杵的下端经过加工,且有臼;第三字,杵被提举向上,杵端较精致的加工,臼内二点以示谷物。

④ 《诗·大雅·生民》:“诞我祀如何?或舂或揄,或簸或蹂,释之叟叟,燕之浮浮。”

⑤ 河北邯郸发现的战国磨石,为当时石器作坊制造。见《考古》1980 年第 2 期,第 146 页。

⑥ 见《文物》1966 年第 1 期,第 17 页。陈文华等编:《中国古代农业考古资料索引》提供了丰富的古代磨的实物照片,见《农业考古》1983 年第 1 期,第 280—284 页。

来,磨有上、下两个磨盘,均有规则磨齿;下盘固定,并以其中心轴和上磨盘形成活榫式接合。据《世本》等文献载,公输般作磨。公输般是与墨翟同时的机械制造师,他或许改进了磨齿、或许创制了推动磨的曲柄连杆(见图 8-23),或许制造了类似磨的碯、碓,人们才会将这时期磨的进步归功于他。

秦汉时代,舂与磨更有飞速发展。两汉之际的桓谭对于到他那个时代的舂的发展史作出了高度概括:

宓牺之制杵臼,万民以济。及后世加巧,因延力借身重以践碓,而利十倍杵舂。又复设机关,用驴骡牛马及役水而舂,其利乃且百倍。^①

从这个概括中可知,在耶稣降生前的某个年月,古代中国人已经先后发明了脚踏碓、畜力碓、乃至水碓。从桓谭的生平可以推断,这些发明决不晚于西汉末年,即公元前一世纪的下半叶。

另一个值得注意的文献《后汉书·杜诗传》载,建武七年(31年)杜诗成功地创造水力鼓风设备,即水排。水碓、水排与水磨的机械原理完全相似,而水排要比水磨复杂得多。在水碓、水排诞生的基础上,水磨应时而生,当是顺理成章的事。至于各种水碓、水磨的发明史留待下一章讨论。

就文字记载看,水排诞生后至少约 150 年,才有畜力磨的记载。《三国志·蜀书·许靖传》中述及东汉末年许劭曾“以马磨自给”。可见,马磨产生于东汉末年。在许邵之后数十年,在畜力磨史上产生了一个更引人注目的奇迹,以一牛转动八磨。它是在晋武帝(265—290年在位)或晋惠帝(290—306年在位)初,一个叫刘景宜的发明家创制的。刘景宜和中书侍郎嵇含是表兄弟。嵇含为表兄的发明作《八磨

^① 《太平御览》卷七六二《器物部》、卷八二九《资产部》引《桓谭新论》;也见清代孙冯翼辑:《桓子新论》。

赋》而留传至今^①。在刘景宜发明前后,杜预也创制了牛转八磨^②。杜预在入晋后,多所发明,除制造连机碓、牛磨外,又作人排新器、制周庙敬器、造舟桥、筑道路。他的同时代人赞誉他为“杜武库”^③。除马磨、牛磨外,驴磨则出现于刘宋时期^④,唐代惯用“盲骡”^⑤,即用布遮住骡眼拉磨。元代王祯将畜力磨统称为“旱水磨”^⑥,以区别水磨。

为了保证加工过程中粮食的清洁卫生,元末,宫廷中一个姓瞿的工人制造了畜力分离磨,将动力轮与工作轮置于楼的上下两层,楼下为畜转动轮,该轮轴延伸到楼上带动磨^⑦。这种分离磨肯定受到同类水磨的启发。分离水磨的确切记述在五代时期,而畜力分离磨的产生则要晚些。

综上所述,中国磨的发展是,由原始压力磨和杵臼进化到旋转磨和脚踏碓,进而是畜力碓、水碓,然后水排的创造促使水磨诞生,畜力磨才最终发展起来。至晚从春秋战国开始,中文“磨”字已包含了旋转的概念。这与西方古罗马时代尚无旋转磨而只有压榨磨形成极大差别。印度与肥沃新月的磨虽也起源甚早,但其水磨的产生时间与中国约略上下。当然,其间或许某个类型的磨或部件、或其形状有过交流,但这需要素材与仔细研究,方能作出交流形式、内容与路线的确切结论。

① 《八磨赋》：“外兄刘景宜作磨，奇巧特异，策一牛之任，转八磨之重。因赋之曰：方木矩峙，圆质规旋，下静似坤，上动似乾，巨轮内建，八部外连。”见《太平御览》卷七六二；严可均辑：《全上古秦汉三国六朝文·全晋文》卷六五。

② 王祯：《农书·农器图谱集之九·杵臼门》；《魏书》卷六六《崔亮传》，中华书局校点本，第四册，第1476页。

③ 《晋书》卷三四《杜预传》，中华书局校点本，第四册，第1025—1033页。

④ 朱翌：《猗觉寮杂记》卷二引刘宋时袁淑（408—453年）文。

⑤ 《太平广记》卷四三六《推磨骡》。

⑥ 王祯：《农书·农器图谱集之九·杵臼门》。

⑦ 陶宗仪：《南村辍耕录》卷五；也见杨瑀：《山居新话》，该书成于“至正庚子年”，即公元1360年。

下面我们转入以机械角度讨论磨的各种情形。

二、畜力磨

磨，也作礮，磑，也称为石磨，它们都由坚石打制而成。和它相似的有碾，或作辊碾。另一种是在南方普遍使用的碄。它由竹编作外围，内实泥土，其形如磨，以烤炒过的硬竹木片打入土表层作齿。王祯《农书》对它们的技术名词一一作了介绍。

畜力磨当中或许最简单的一种是，在上磨盘上系有连杆，牲畜挽具也系在连杆一端，牲畜围着磨转，从而带动上磨盘转动。上磨盘有一大的进料漏斗，米或麦通过磨盘漏孔随磨的转动而自动进入磨齿间（图9-18）。自然，除磨本身外，这种推磨方式很可能仿造“赶场”而来。“赶场”即以牛或马拉动石辊在晒场压脱稻麦颗粒

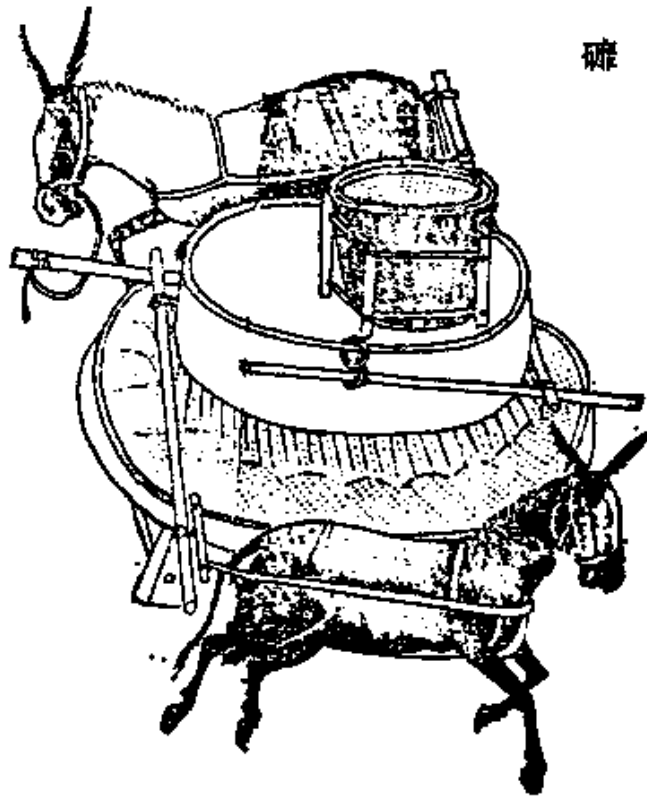


图9-18 王祯《农书》绘畜力磨。

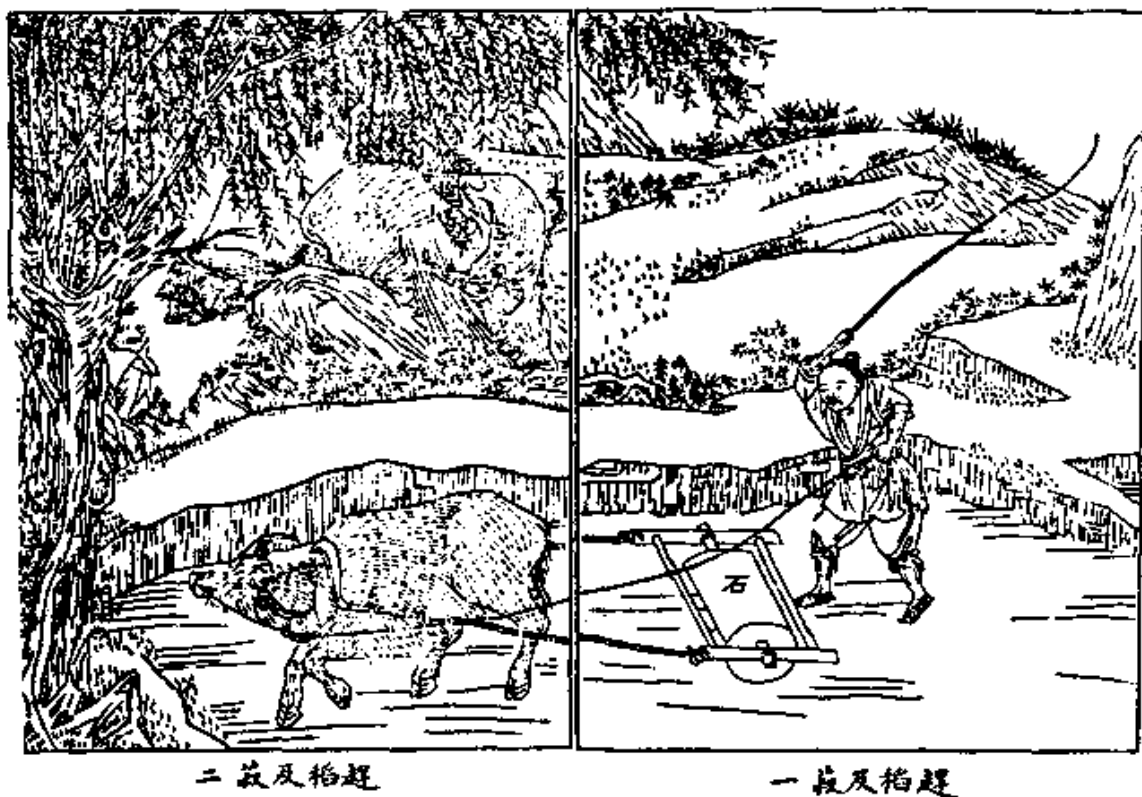


图 9-19 《天工开物》绘赶场图

(图 9-19)。

最普遍的畜力磨(或磨)是在磨房中建造一个大木轮轴。“畜力挽行大木轮轴,以皮弦或大绳绕轮两周,复交于磨之上级;轮转则绳转,绳转则磨亦随转。计轮转一周,则磨转十五余周,比用人工既速且省。”^①(图 9-20)绳带交叉绕过主动轮和工作轮,这是近代工业传动带中最早的安装方式。

最奇特的是牛转八磨(图 9-21),也称连磨、连转磨。王祯《农书》写道:“其制,中置巨轮,轮轴上贯架木,下承碓臼,复以轮之周围列绕八磨,轮辐适与各磨木齿相间。一牛曳转,则八磨随轮辐俱转,用

^① 王祯:《农书·农器图谱集之九·杵臼门》,王毓瑚校,农业出版社 1981 年版,第 282 页。

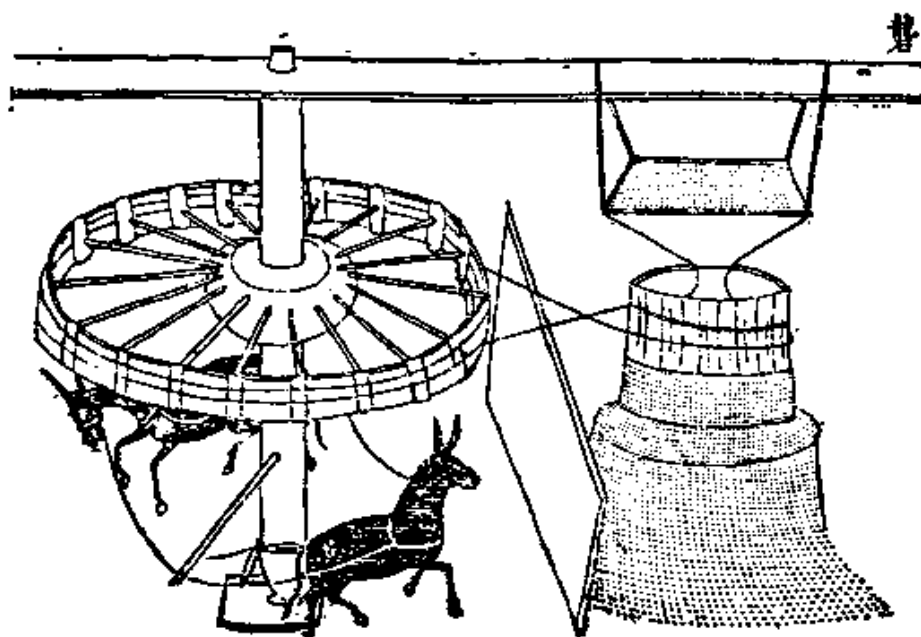


图 9-20 王桢《农书》绘畜力轮磨

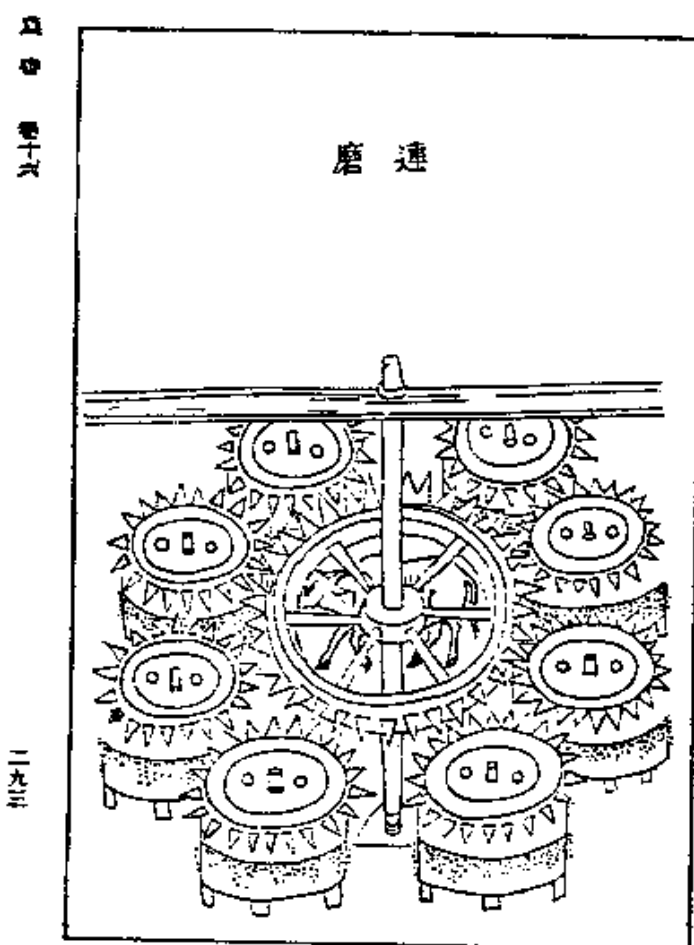


图 9-21 王桢《农书》绘牛转八磨

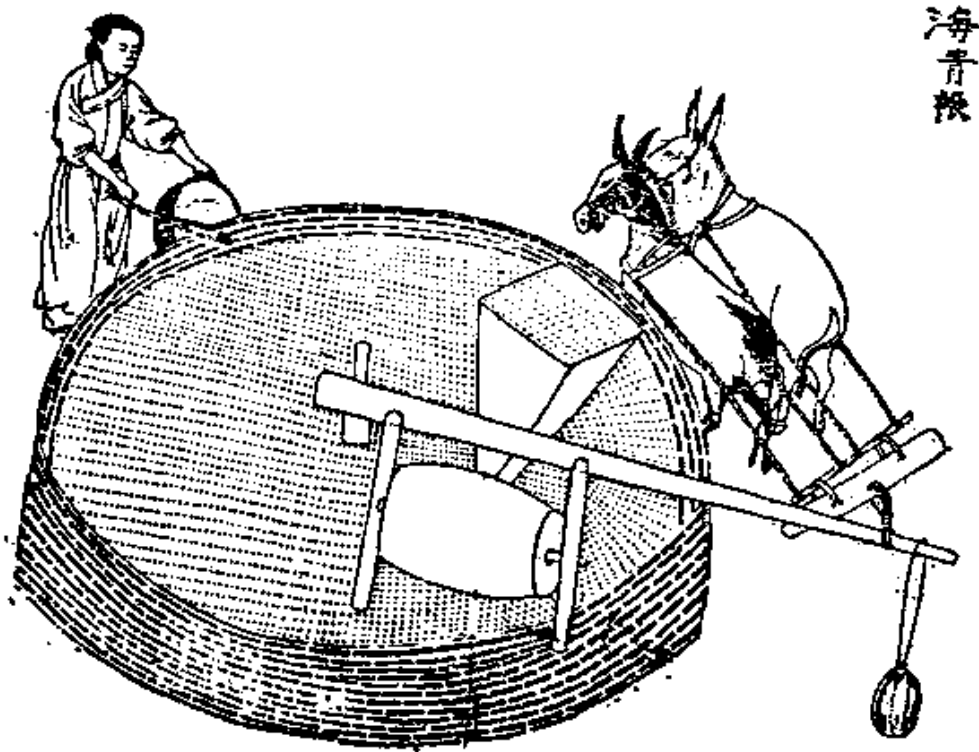


图 9-22 王祯《农书》绘辊碾

力少而见功多。”这里，主动轮直接啮合各个磨的齿轮。在欧洲，类似连磨的发展极为缓慢，直到十五世纪之后才见之于图画。

最具中国特色的磨，被李约瑟称之为“边缘滚轮磨”。图 9-22 为其形式之一，称为“辊碾”。它似乎更直接地将赶场石辊搬上了磨，只不过石辊与磨轴的连杆之一端加上一个小地轮。图 9-23 是边缘滚轮磨的代表，也称“石碾”。从图中可见磨在边缘上作功的情景。磨上转动的两个石轮是立式安装的，其间还带有一搅耙，可将轮滚过后的谷物翻松换位。此外，还有药房或珠宝房用于碾药或碾珠宝的铁碾磨（图 9-24），在立式铁质轮轴上安装连杆，推动连杆的往复运动使铁轮在轮槽内压碾药物。药房中更简单的碾，是铁轮中心穿过一短木轴，双脚分别站立木轴各一端，驱动铁轮在槽中滚动。这样的磨在西方从未出现过。



石碾

图 9-23 《天工开物》绘石碾

三、车 磨

所谓车磨，是置于马车或其他畜力车上的磨。由指南车和记里鼓车推想，车轮上附立轮，立轮带动一个平轮，平轮中轴上方装磨，即车行磨转。或者，由立轮轴上装凸轮式拨子，拨动舂杆，即可碓米。这种车磨于 333 至 349 年间由后赵王石虎（即石季龙）的一个小官解飞和尚方工人魏猛变所造。晋代陆翊撰《邺中记》写道：

石虎有指南车及司里车，又有舂车木人，及作邺行碓于车



图 9-24 《天工开物》绘铁碾，用于碾碎朱砂或中草药

上。车动，则木人踏碓舂，行十里，成米一斛。又有磨车，置石磨于车上，行十里，辄磨麦一斛。凡此车，皆以朱彩为饰。惟用将军一人。车行，则众巧并发，车止则止。中御史解飞、尚方人魏猛变所造。

《说郭》本《邙中记》文字与此稍有不同：“解飞者，石虎时工人，作旃檀车，左轂上置碓，右轂上置磨。每行十里，磨麦一石，舂米一斛。”很可能，解飞与魏猛变先分别造了车碓、车磨，然后又把碓与磨安装在一个车体之中。无论如何，这是世界科技史上最宝贵的机械工程史料之一。解飞与魏猛变是最早成功地制造车磨或机械磨的

工程专家。

有趣的是,从明末王微时代起,随传教士入华和西方车磨在中国的介绍,人们却忘了伟大的工程专家解飞和魏猛变,遂以为车磨是欧洲的发明。

顺此我们再提及几种畜力车。宋代科学家沈括曾记述唐高宗时制造的一种称为“大驾玉辂”的旅行车,其特点是“安若山岳,以措杯水其上而不摇”。该车直到沈括时虽已久坏,但还存在^①。是否在这种车上安装有汉代就已发明的“被中香炉”即常平支架?在沈括之后6个世纪,欧洲人确实设计了一种有常平支架的旅行车。除此之外,宋朝蜀王赵衍曾令工人造一“平底大车”供旅游用,该车“设二十四轮,牵以骏马,其去如飞,谓之流星辇”^②。宋应星在《天工开物·舟车》中又画有8匹马驾驶的4轮载货车。这些都是古代运输机械的重要成就。

第七节 畜力的其他应用

我们只能简单地述及一些利用畜力的其他机械。

早在商代已有牛耕,公元前二至前一世纪之交,汉代搜粟都尉赵过发明了高效播种机“耒车”^③,改进牛耕法,创始“耦犁,二牛三人”,从而“田多垦辟”,“用力少而得谷多”(《汉书·食货志》)。在灌溉机械方面,有牛转翻车(图9-25)、骡转筒车等机械。

在古代的工业或手工业中,畜力也被广泛用作机械原动力。在杜

① 沈括:《梦溪笔谈》卷一九。

② 陶穀:《清异录》,见《说郛》(商务印书馆本)卷六一。

③ 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,第45—46页。

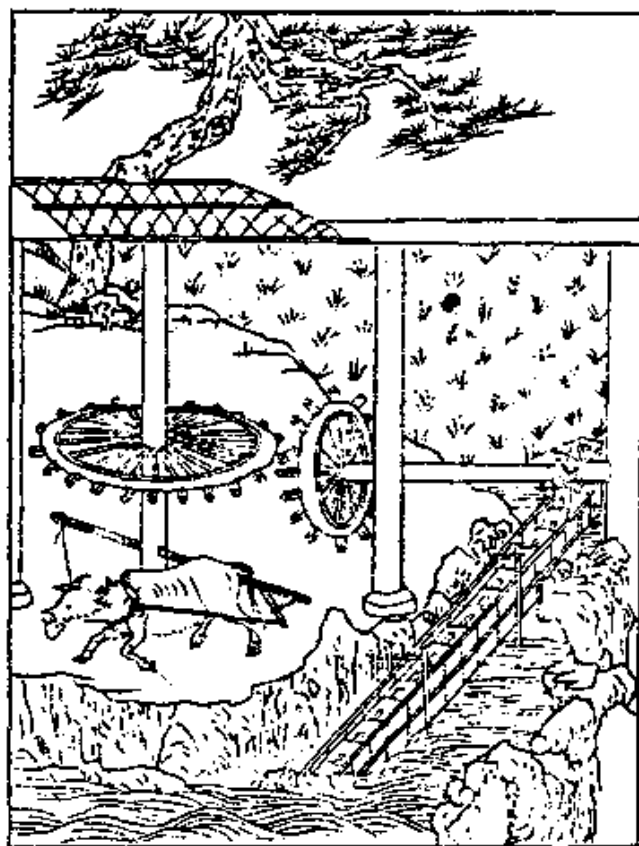
牛
转
翻
车

图 9-25 《天工开物》绘牛转翻车。

诗发明水排之后,以马作为原动力的鼓风机械即“马排”还被广泛用于远离河流而又出产铁矿的山区。或许,由于这个缘故,三国时韩暨教人引水作水排^①。还有以畜力转动的纺纱机械“大纺车”。在轧蔗机(图 8-30)、打井汲卤(图 9-26)等方面都利用了畜力。

顺此要特别述及一种水车,它是为以人力或畜力提升井水而设计的(图 9-27)。熊梦祥(活动于十四世纪中期)的《析津志》“施水

^① 《三国志》卷二四《韩暨传》,中华书局校点本,第三册,第 677 页。

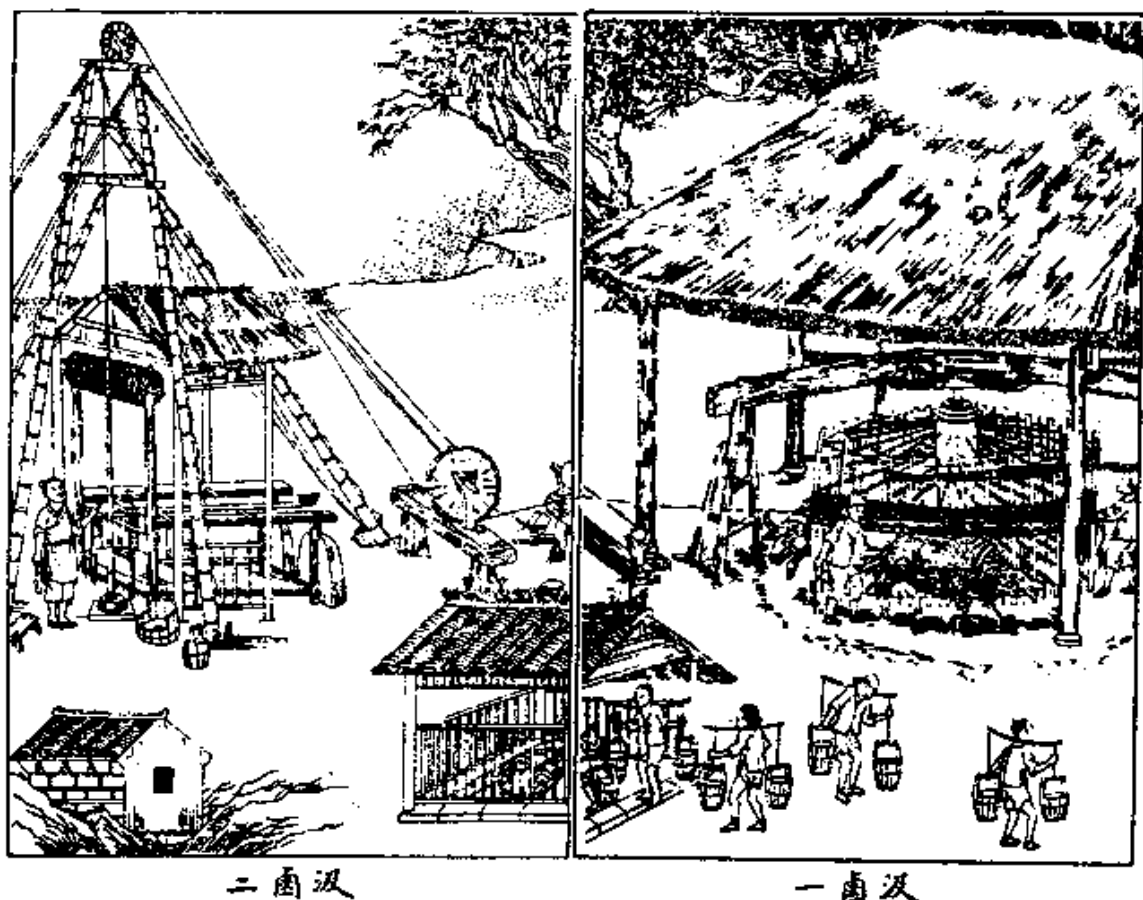


图 9-26 《天工开物》绘汲卤图

堂”条写道：

顷年有献施水车……，其制随井深浅，以鞞确水车相銜之状，附木为戽斗，联于车之机，直至井底，而上人推平轮之机，与主轮相轧，戽斗则倾于石椀中，透于阑外石槽中。^①

该水车的特点是，以戽斗链代替龙骨水车中刮水板链和高转筒车中竹筒链。记载表明，在 1294—1364 年间元大都北京普遍使用这种戽斗式机轮水车。有人怀疑它是元朝期间来自西方或中亚的产物。

^① 赵其昌：《〈析津志〉所记元大都戽斗式机轮水车》，《文物》1984 年第 10 期；及其《〈析津志〉及其著者熊梦祥》，《首都博物馆馆刊》1982 年第 1 期。

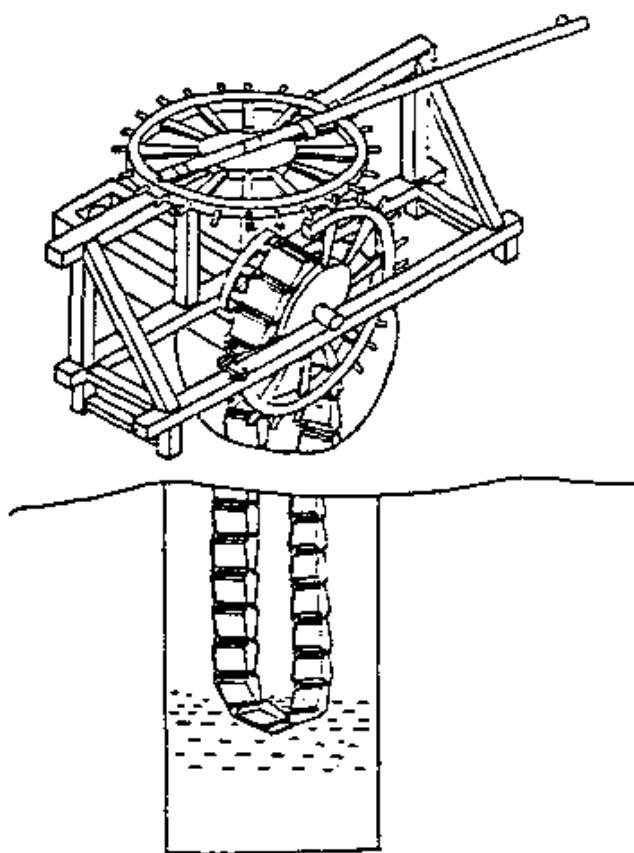


图 9-27 《析津志》载戽斗式机轮水车复原设计图(引自赵其昌文,见第 300 页注①)。

其实,它是中国传统水车的发展。唐代前期已有这种水车^①,刘禹锡在其诗“何处深春好”中称其为“井车”^②。入元之后,因其在元大都的应用,《析津志》才作了较详细的记载罢了。

① 李昉:《太平广记》卷二五〇“邓玄挺”条载:“唐邓玄挺(?—689年)入寺行香,……见水车以木桶相连,汲于井中。”中华书局1961年版,第五册,第1936页。

② 《刘宾客外集》卷二。

第十章 利用水力的机械

古代人利用水力大致可分为几种情形：建造各种升水机械，如水车，提高水位；利用水落差的能量或流水冲力以推动各种机械；利用水的浮力。本章对此作一简要叙述。

第一节 升水机械

用以提高水位的升水机械，如前述及的桔槔、辘轳，这里着重叙述刮车、筒车和翻车。

一、刮 车

刮车就是一个带有曲柄、连杆的水轮（图 10-1）。先在流水岸边挖水槽，以岸的高低决定水轮大小，以人力驱动水轮运转，轮辐将水刮上岸。刮车筒

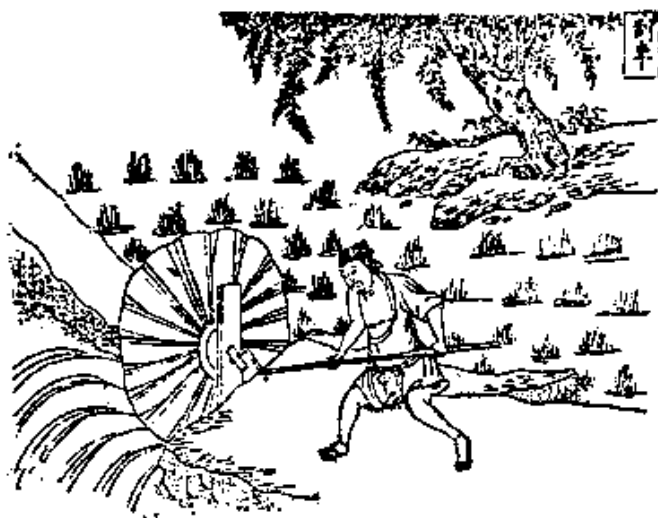


图 10-1 王祯《农书》绘刮车

便易制,被普遍使用于农业灌溉。元代王祯《农书》对此已有文字叙述并绘图。^①

刮车除用手操作外,也有在水轮轴上附设机件以便脚踏。除灌溉外,也用于盐田刮卤水。十六、十七世纪期间,刮车传至高丽、日本、欧洲等地。

二、筒 车

筒车,也称流水筒车、水转筒车(图 10-2),或简称筒轮。其主要机构也是一个水轮。其特点是,水轮周边安装盛水筒,只是水筒倾斜方向要安装得当,使之能在轮下装水,在轮上覆水;其轮辐制成桨叶状,或在轮辐一端加装受水板,以增加受水冲力。最简单的筒车只要将其轮轴架于河岸支柱上即可。流水冲击桨叶状轮辐或受水板使水轮运转,从而盛水筒随轮运转而将水提升。

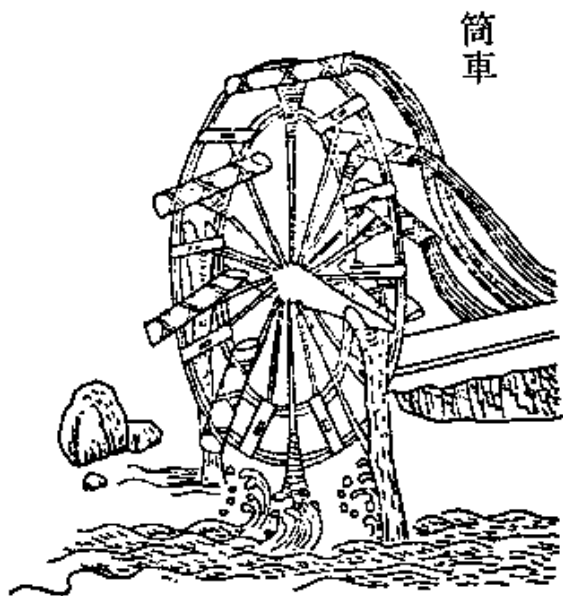


图 10-2 王祯《农书》绘筒车

如果在水轮轴外端安装一立轮,使其与一牛转平轮相啮合。这样的筒车就成为牛转筒车或卫转筒车(图 10-3)。

若水岸陡高,则可装高转筒车(图 10-4)。它的特点是,盛水筒

^① 王祯:《农书》有些版本(如永乐大典本)无图 10-1。农业出版社王毓瑚点校本(1981)以明嘉靖本图为主,缺者以四库全书本补,故点校本有图。

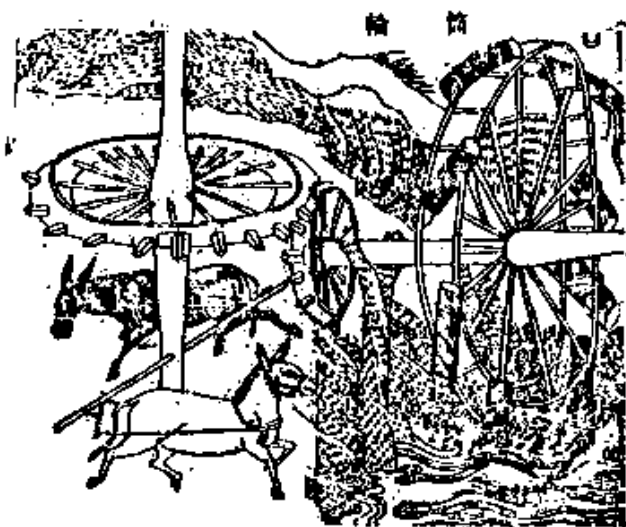


图 10-3 王祯《农书》绘牛转筒车

构成筒链、绕过水轮与上轮之周边,古称“筒索”。筒链上升一边,因盛水筒而加重,故作一平板槽承之。高转筒车上轮轴可设人踏、牛转之机,也可以在水轮轴上附设水转之机。

李约瑟博士认为,筒车可能起源于印度,在希腊文化世界中产生于公元二世纪。正如龙骨水车是中国的文化特征一样,筒车是印度和西亚地区的文化特征。此论不确,尚需以另一思维方向去深入研究。

三、龙骨水车

龙骨水车也称翻车、踏车、水车。它可以分别用手拉、脚踏(图 10-5)、牛转(见图 9-25)和水转(图 10-6)多种动力驱动。车身为

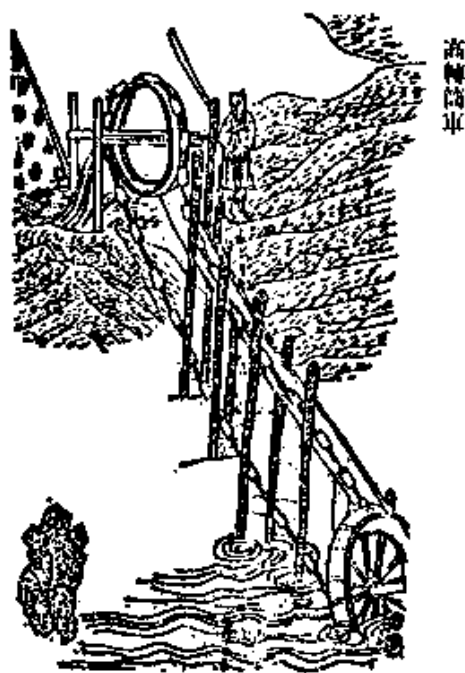


图 10-4

王祯《农书》绘高转筒车



图 10-5 《天工开物》绘脚踏翻车

一个盛水木槽，木槽两端分别装轮轴。由一连串相互平行的木板（其大小适与槽等）构成板式链（称“行道板”）置于槽内，并绕过车两端的轮板（称“龙骨板叶”）上，行道板与龙骨板叶相啮合。上轮轴两端各装上 4 支拐木，踏动拐木，上轮运转，从而带动龙骨板循环转动，行道板在木槽内刮水上岸。李约瑟称此类水车为“方板式链泵”。

在机械原理上，以畜力或水力驱动的水车都是直角齿轮系传动链条。以手推拉的水车称为“拔车”，只要在其上轮轴上装曲柄、连杆，供人手推曳即可。

关于水车或翻车的最早记载见之于《后汉书·张让传》，汉灵帝时中常侍张让在 186 年前后令毕岚造翻车。毕岚是那时颇具才干的



水转翻车

图 10-6 《天工开物》绘水转翻车

工程师，他曾铸造钱币，铸铜人、铜钟和“天禄虾蟆”（可能是喷水池用的喷水管），“又作翻车、渴鸟，施于桥西，用洒南北郊路，以省百姓洒道之费”。大约毕岚之后 50 年左右，即在公元 227 年至 239 年之间，马钧在洛阳又制作翻车，“令儿童转之，而灌水自覆，更入更出，其巧百倍于常”^①。这大概是对毕岚创制翻车的第一次重大改进。

迄唐宋时止，翻车已为乡村农民普遍使用。《旧唐书·文宗纪》指出，大和二年（828 年），“内出水车样，令京兆府造水车，散给缘郑白

^① 《三国志》卷二九《杜夔传》裴松之注引，中华书局校点本，第三册，第 807 页。

渠百姓,以溉水田”。宋代范仲淹^①、苏轼^②和《耕织图》的作者楼璩^③都曾为其赋诗。北宋画家、绛州人杨威常在京都汴梁卖画,专工“村田乐”。他的《农事图》画中,有4人踩脚踏翻车的画面^④。南宋初年有牛转翻车的绘画^⑤,陆游于1170年入蜀亲见牛转翻车^⑥。王祯《农书》,及其后《天工开物》、《农政全书》等书都记载并绘画了各种翻车。

水车中方板式链成为中国传统文化的特征之一。1221年丘长春经土耳其斯坦访问成吉思汗,中国水车随之传播到西亚地区^⑦。大概元代随蒙古军铁骑而传播到更广泛的地区。1362年,水车进入高丽。直至十七世纪时散布于全世界。英国海军于十七世纪曾用它在军舰上清除污水,并于该世纪末传入美国。^⑧

第二节 水碓与水磨

一、水 碓

水碓是脚踏碓(见图8-4)机械化的结果。以水力推动水轮,在延长的水轮轴上装上一列凸轮或拨杆,使其拨动碓杆端末,即可使碓上下自由跳动。《天工开物》绘出了一个水轮带动4个碓的画面(图

① 《范文正公集》卷二。

② 王祯:《农书·农器图谱集之一三》,农业出版社王毓瑚校点本,第327页。

③ 林桂英、刘锋彤:《宋〈蚕织图〉卷初探》,载《文物》1984年第10期。

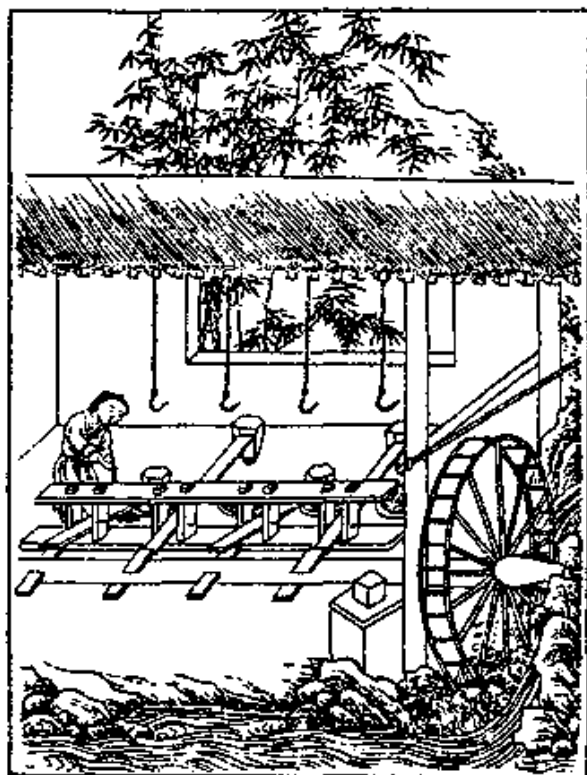
④ 王伯敏:《中国绘画史》,上海人民美术出版社1982年版,第349—350页。

⑤ 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,第48页。

⑥ 陆游:《入蜀记》卷一。

⑦ 李志常:《长春真人西游记》卷一。

⑧ Needham, J., *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 348—352. Cambridge, 1965.



碓水

天工開物 卷上 耕種

九二

图 10-7 《天工开物》绘水碓

10-7)。值得注意的是，立式水轮在这里得到最恰当最经济的应用，正如在水磨中常常应用卧式水轮一样。

水碓，又称机碓、水捣器、翻车碓，或斗碓、鼓碓^①。在述及机械的历史文献中，大概以水碓为最多。从桓谭《新论》看，王莽时代，水轮带动杵碓并非新奇之事。汉安帝永建四年（129年），尚书仆射虞诩上疏，建议在陇西羌人住地筑河槽、造水碓^②。从此边远地区偏布“水春河

① 王祯：《农书·农器图谱集之十四·利用门》，农业出版社王毓瑚校本（1981年版，第358页）有关机碓文字中，标点多有误。

② 《后汉书》卷八七《西羌传》，中华书局校点本，第十册，第2893页。

漕”，“用功省少，军粮饶足”^①。东汉马融将水碓撰入文学作品中^②，而孔融在论法律中指出水碓之巧，胜于圣人^③。汉末尚年幼的魏舒曾为其叔父吏部郎魏衡看守水碓^④。三国两晋时期，水碓尤为发展。以吝啬出名的富豪王戎其水碓“周徧天下”^⑤，“水碓之属，洛下无比”^⑥。石崇有“水碓三十余区”^⑦。更有甚者，晋王爵公主的水碓多到“遏塞流水，转为浸害”，以致不得不下令罢水碓，方使“百姓获其便利”。^⑧

应当特别指出，晋代杜预造连机碓^⑨，可能是一个大水轮驱动数个水碓；刘宋祖冲之造水碓磨^⑩，可能是一个大水轮同时驱动水碓与水磨的机械。这些成就表明古代水碓技术的大发展。

入唐以后，水碓记载更多，其用途也逐渐推广。大凡需要捣碎之物皆可用省力功大的水碓，如捣碎药物、香料、乃至矿石、竹蔑纸浆等等。

至少可以说，杜预发明的连机碓是蒸汽锤出现之前所有重型机械锤的直系祖先。十八世纪西方的锻锤乃水碓之复制品而已。^⑪

二、水 磨

水磨的发展与杜诗发明水排有关。马钧大约在公元 227—239 年

① 《后汉书》卷八七《西羌传》，中华书局校点本，第十册，第 2893 页。

② 马融：《长笛赋》，见唐代李善注：《文选》卷一八。

③ 孔融：《肉刑论》，见《全上古三代秦汉三国六朝文·后汉文》卷八三；也见第 308 页注①。

④ 《晋书》卷四一《魏舒传》，中华书局校点本，第四册，第 1185 页。

⑤ 《晋书》卷四三《王戎传》，中华书局校点本，第四册，第 1234 页。

⑥ 王义庆撰、刘孝标注：《世说新语》下卷之下《俭啬》，四部丛刊本。

⑦ 《晋书》卷三三《石崇传》，中华书局校点本，第四册，第 1008 页。

⑧ 《晋书》卷四六《刘颂传》，中华书局校点本，第五册，第 1294 页。

⑨ 《太平御览》卷七六二；高承：《事物纪原》卷九；《王祯农书·农器图谱集之十四》。

⑩ 《南齐书》卷五二《祖冲之传》，中华书局校点本，第三册，第 906 页。

⑪ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 394—396.

间创造一个由水轮转动的大型歌舞木偶机械,包括以此水轮带动舂、磨^①。无疑,这是根据当时流行的水碓、水磨而设计的。在马钧之后,杜预造连机碓,其中也可能包括水磨。祖冲之在南齐明帝建武年间(494—498年)于建康城(今南京)乐游苑造水碓磨^②,这显然是以水轮同时驱动碓与磨的机械。几乎与祖冲之同时,崔亮在雍州“造水碾磨数十区,其利十倍,国用便之”^③,这是以水轮同时驱动碾与磨的机械。由此可见,水磨自汉以来极为发展,同时,多功能水磨机械早在三国时代已经诞生。北魏孝文帝太和十七年(493年)迁都洛阳,建造了繁华的洛阳城,及永熙(532—534年)之乱,又成废墟。大概比崔亮晚一辈的杨衒之于东魏孝静帝武定五年(547年)行役洛阳,对洛阳兴废感慨万千,遂采拾旧闻、追叙古迹,写了《洛阳伽蓝记》,其中述及“碓、硃、舂、簸,皆用水功”^④。这段历史表明,以水作为动力的各式各样粮食加工机械至少在北朝已相当普遍。迄止隋唐,一个皇亲国戚所占“水碓并田宅以千百数”^⑤,豪门贵族兴建过多水磨而侵害百姓利益,唐朝廷不得不下令拆毁,“破豪家水碾,利民田”^⑥。宋哲宗时期,也发生类似情形。^⑦

我们再从机械角度看看中国水磨。它是由水轮、轴和齿轮联合传动的机械。从车轮到水轮是技术史、也是人类文明史进步的标志。仅从水碓、水磨的发展可见古代中国人在这方面取得的成就。从图

① 《三国志》卷二九《魏书·杜夔传》裴注,中华书局校点本,第三册,第807—808页。

② 《南齐书》卷五二《祖冲之传》,中华书局校点本,第三册,第906页。

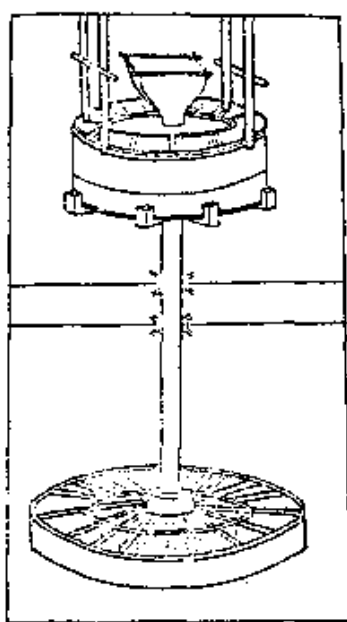
③ 《魏书》卷六六《崔亮传》,中华书局校点本,第四册,第1481页。

④ 杨衒之:《洛阳伽蓝记》卷三《景明寺》。

⑤ 《隋书》卷四八《杨素传》,中华书局校点本,第五册,第1292页。

⑥ 李吉甫:《元和郡县图志·关内道一》;韩愈:《昌黎集》卷三五。有关材料还可参阅《中国科技史资料选编——农业机械》,清华大学出版社(该书未注明出版时间),第296—304页。

⑦ 见《宋史》卷九四《河渠志》,中华书局校点本,第七册,第2329—2330页。



开口盘车图中的水磨结构

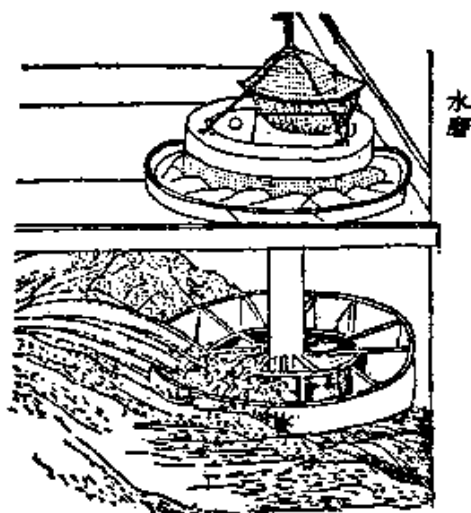


图 10-9 王祯《农书》绘水磨

图 10-8 五代卫贤画《闸口盘车

图卷》中水磨结构

10-8 到图 10-11, 为古代绘画中的一系列卧轮水磨; 从图 10-12 到图 10-15, 为古代绘画中一系列立轮水磨和立轮式水转大纺车。这 8 张图几乎都采自王祯《农书》。可见, 古代中国人并没有特别喜好卧式轮; 卧式轮也不能构成中国传统。否则, 就难于解释这 8 张图中水轮的不同安装方式。值得我们注意的是, 虽然下面将述及的水排、水击面罗多为卧式水轮, 而所有水碓(参见图 10-7)又都是立式水轮。因此, 李约瑟博士多次强调的、中国文化传统以卧轮为特征、西方文化传统以立轮为特征的说法, 看来是值得商榷的。在中国古代的各种机械中, 安装卧轮还是立轮并非机械工程师的喜好, 而是根据当地水利资源、水势高低、齿轮与轮轴的配匹原则, 从经济、方便的观点加以具体解决的。这些情况在王祯《农书》涉及各种机械制作中多有阐述。

顺便要指出一些具体历史情形。五代画家卫贤的《闸口盘车图

带见同轴片再。

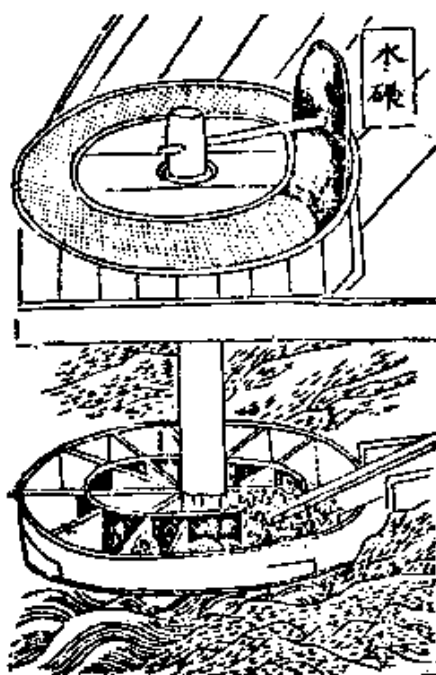


图 10-10 王祯《农书》绘水碾

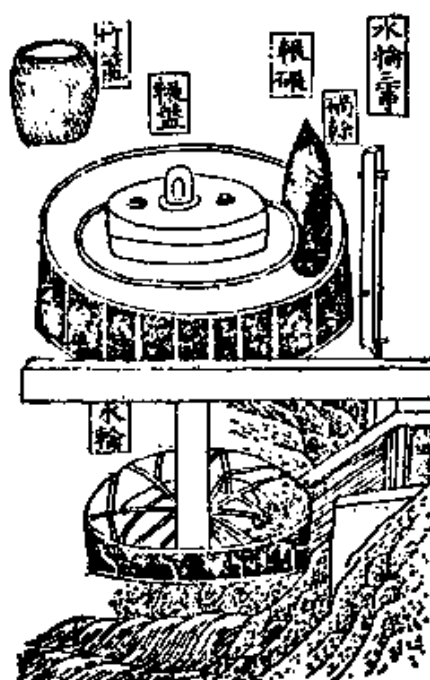


图 10-11 王祯《农书》绘“水轮三事”，即多功能水轮。



图 10-12 王祯《农书》绘水碓

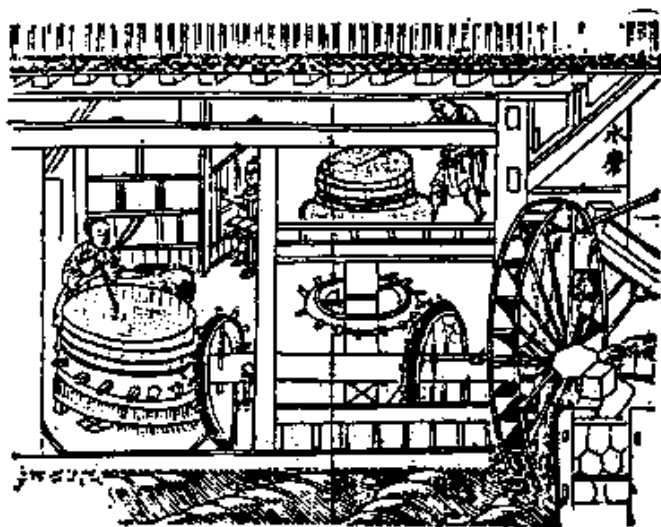


图 10-13 王祯《农书》绘“立轮连二磨”，即一轮多磨。

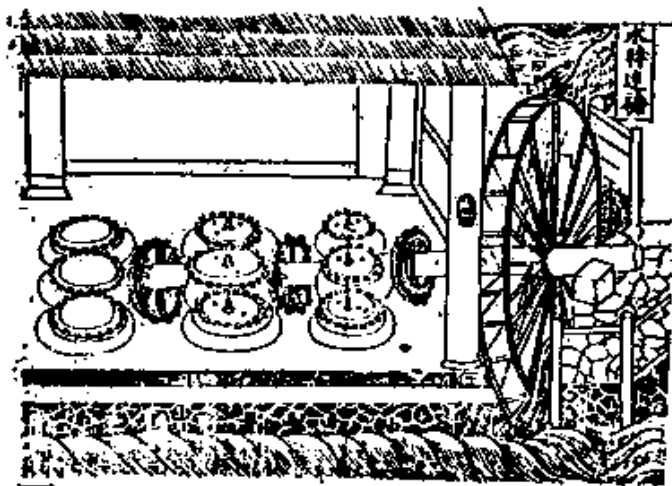


图 10-14 王祯《农书》绘“水转连磨”

卷》是现存最早的一幅水力机械图画，它比王祯《农书》的绘画要早约 400 年。这幅画卷以描绘唐末宋初官营磨坊为题材，为我们揭示并保存了那时的水磨(图 10-8)和罗面机(见下文)的基本情况^①。北宋张舜民(字芸叟，号浮休居士)于崇宁末、大观初(1106—1107 年间)作

^① 郑为：《闸口盘车图卷》，《文物》1966 年第 2 期。

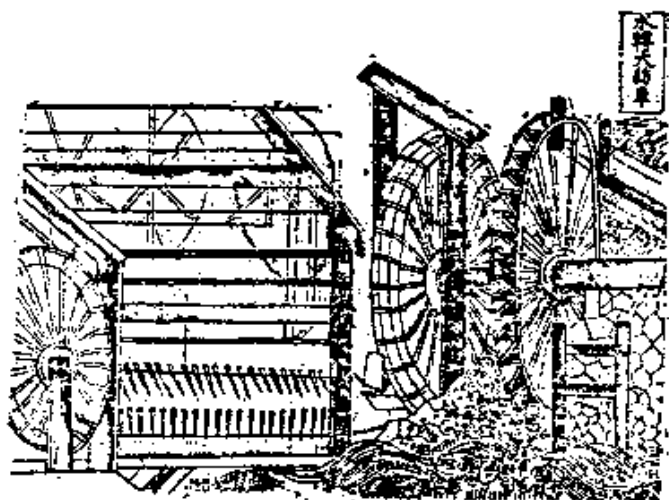


图 10-15 王祯《农书》绘水转大纺车

《水磨赋》。该文为其隐居长安观城南水磨而作，它描述了类似图 10-11 的多功能水轮，即一台兼有碓、碾、磨的机械装置^①。它比王祯创制的“水轮三事”早 2 个世纪。

水转纺车，正如王祯在其《农书》中所述，“与水转碾磨之法俱同”。水轮轴带动纺车大轮，通过绳带传送，纺车大轮将运动传递到纺车各机件，使整个机器转动起来（图 10-15）。水转大纺车的创制时间当在王祯《农书》成书的 1313 年之前。

三、舟 磨

舟磨是装磨于舟中、利用湍急河水冲动置于河中的立式水轮，水轮长轴的两端分别伸入舟中，以轴端齿轮带动磨齿而作功。王祯《农书》对此作了简要描述，以大铁锚固定两只相傍之舟，在舟上搭架竹棚，舟内置磨，两舟间激流中置立式水轮。若水涨，则舟移之近岸。故此又称它为“活法磨”。舟磨与前述车磨，都是中国古代在机械磨方面

^① 郭正忠：《张舜民的〈水磨赋〉和王祯的“水轮三事”设计》，《文物》1986 年第 2 期。

的光辉创造。

第三节 水排与罗面机

南阳太守杜诗于公元 31 年创造了称为“水排”的水力鼓风机,之后,还有人依旧造人力或畜力的鼓风机,称为人排或马排^①。三国韩暨又在河旁制作安装水排,“计其利益,三倍于马排”^②。自汉代起,这种鼓风机机械在冶炼生产中被普遍应用,但直到王祯《农书》才绘出水排图。这是因为在宋代已诞生了手拉活塞风箱,致使王祯绘图时经多方搜访才列出图谱。但是,一种与水排的机械结构基本相同的“水打面罗”(又称罗面机,即水力机械筛),至晚产生于杨銜

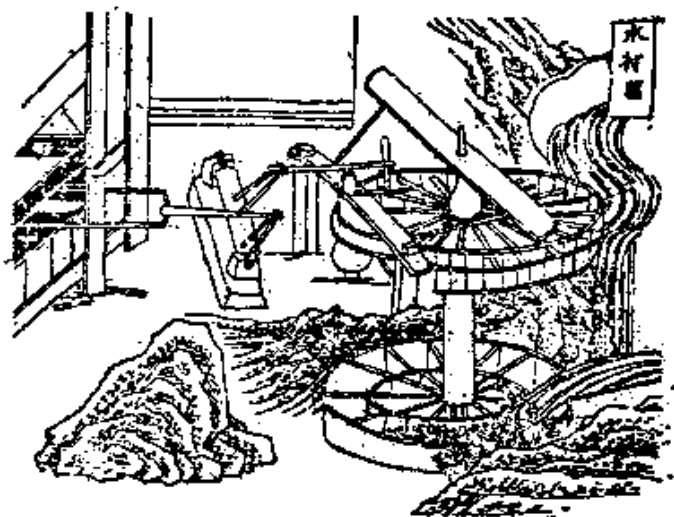


图 10-16 王祯《农书》绘水力罗面机(此图有误,参见后一图)

之《洛阳伽蓝记》所描述的五世纪下半叶,而且一直流传下来。《闸口盘车图卷》所绘罗面机,是迄今发现的最早的有关绘图(图 10-16, 10-17)。在远离水流的地区,粮食加工过程中的簸与筛可以由脚踏

① 《三国志》卷二四《韩暨传》,中华书局校点本,第三册,第 677 页;《晋书》卷三四《杜预传》,中华书局校点本,第四册,第 1027 页。

② 《三国志》卷二四《韩暨传》,中华书局校点本,第三册,第 677 页。

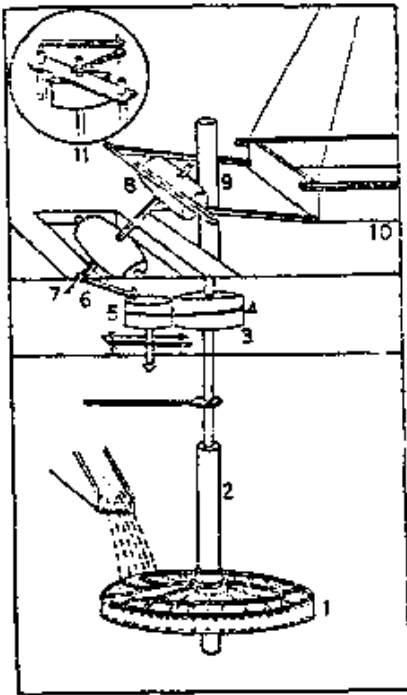


图 10-17 闸口盘车图中的
罗面机结构：

(1)水轮；(2)立轴；(3)上平
轮；(4)弦索；(5)旋鼓；(6)掉枝；
(7)行枕；(8)鼓木；(9)撞柱；
(10)面罗；(11)旋鼓与掉枝的另
一种结构。(采自《文物》1966年
第2期郑为文)

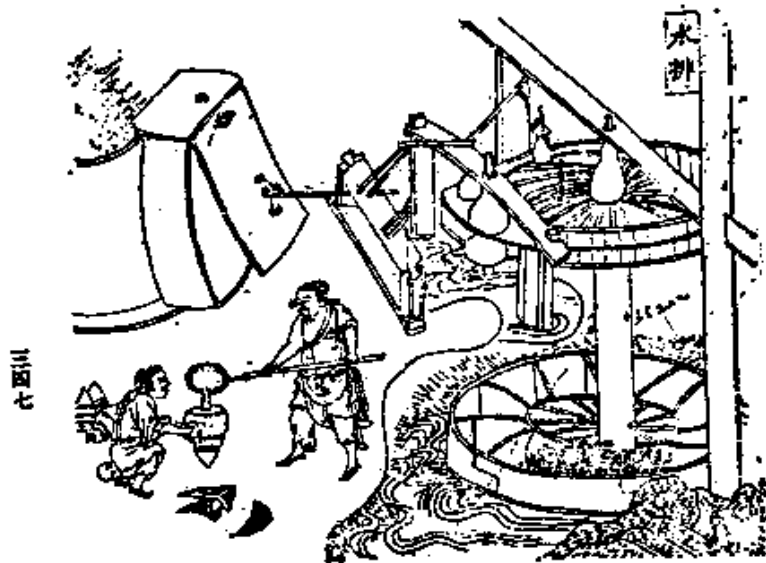


图 10-18 王祯《农书》绘水排(此图有误,参见后一图)

罗面机完成。宋应星《天工开物·粹精》中画出了脚踏罗面机的图画。

王祯《农书》所绘水排(图 10-18)偏心轮(“旋鼓”)及曲柄连杆机构的装接有误,更正其图如图 10-19,水排的组件包括卧式水轮(动力轮)、立轴(轮轴)、上卧轮、弦索(传动带)、旋鼓(偏心轮或凸轮)、掉枝(曲柄)、行枕(连杆),还有攀耳(实则为摇转杆上两个突

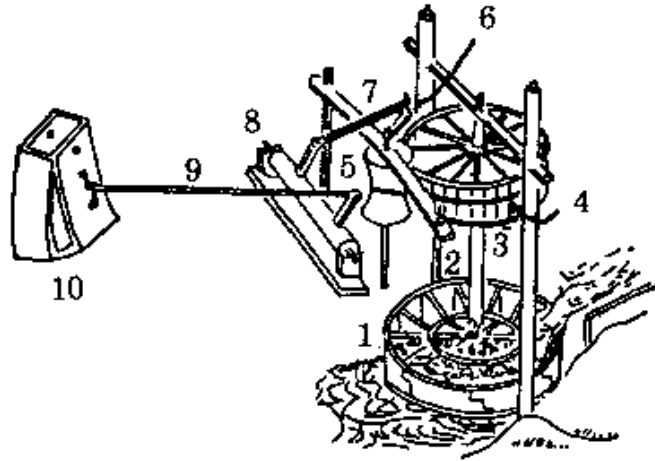


图 10-19 王桢水排机械结构修正图(据刘仙洲绘)

- (1)水轮;(2)立轴;(3)上卧轮;(4)弦索;(5)旋鼓;(6)掉枝;(7)行桃;
(8)攀耳;(9)风门行桃;(10)木风扇。

耳)、活动接头等。水轮的转动通过立轴、上卧轮、弦索而转给旋鼓,起着偏心轮或凸轮作用的旋鼓的转动,又通过掉枝、行桃和摇转杆及其攀耳的作用,往复地推动木扇的风门杆。这样,就完成了将水轮的连续转动变换为风门杆的来回往复运动。从而也就达到使风扇一张一翕而鼓风的目的。罗面机的运动情形与水排相同。水排上的木扇风门连桃、罗面机中的罗架连杆实际上也就是风箱中的活塞连杆。由此可见,偏心轮、曲柄连杆和活塞连杆三大机械组件早为中国古代人所创造与应用。

从水碓、水磨、尤其是水排和罗面机来看,中国工程师在实用的机械原理方面领先于西方十几个世纪。从水排和罗面机的机械中可以看到往复式蒸汽机的典型安装方式,只不过蒸汽机作用方向正和水排、罗面机相反,它是将活塞连杆的往复运动转变成机轮的旋转运动。偏心轮、曲柄连杆和活塞杆三组件在欧洲十四世纪及其之前的文献中从未见到过,十五世纪时偶或有之。达·芬奇(Da Vinci, Leonardo, 1452—1519年)在十五世纪末有许多机械设计,以图解决旋

转与往复运动之转换关系,其设计在后世机械中均有应用。但是蒸汽机的主要基本系统却是来自中国而非达·芬奇。为何?在西方机件磨损问题不能解决,而中国早已有良好的钢轴承和极好的钢铁。李约瑟博士曾作如是评论^①。实际上,蒸汽机中往复式活塞及汽缸原理也最早见之于中国古代发明的风箱,我们将在下面继续讨论风箱问题。^②

在此,还要讨论另一种水排结构。王祯《农书》对此也有记述。如图 10-20,将水轮立式安装,其轴即水平伸出,水平轴上装拐木。这些拐木实则起偏心轮作用而推动连结于风箱活门的木箕(即连杆)及偃木(即月弧形曲柄)。当轮轴上拐木随轮轴转动时,风箱前的竹弓和牵索将活门打开,然后拐木又推动偃木将风箱活门关闭。这是一种仅凭偏心作用就将动力水轮的旋转运动变换成木箕往复运动的鼓风机。王祯《农书》述及轮轴上可装许多拐木,以推动多个风箱。我们在

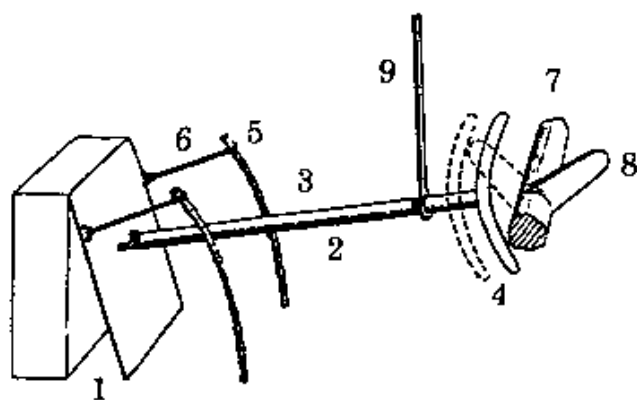


图 10-20 王祯《农书》记载的另一种水排设计图(引自杨宽,见本页脚注
②)

(1)木扇;(2)木箕;(3)秋千索;(4)偃木;(5)竹弓;(6)牵索;(7)拐木;(8)立式水轮的卧轴;(9)吊环

① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 379, 383—390.

② 杨宽:《关于水力冶铁鼓风机水排复原的讨论》,《文物》1959年第7期。

此又一次看到古代机械工程中的卧轮与立轮两种安装方式。

第四节 橹、舵与轮船

篙、桨、橹都是船的推进机械。篙与桨是以反作用力推动船前进。作为推进船前进的橹在力学上是很有意思的。它多装于船的两头或船侧,支点放在船舷上,其入水端(又称橹板)剖面呈弓形,另一端(又称橹手)以绳索(又称橹担绳)系在甲板上(图 10-21)。摇动橹担绳,橹板左右摆动,船随之前进。这种情形极像鱼在水中靠其尾的摆动而前进。实际上,橹板在水摆动时,产生了前后压力差,从而形成船体前进的动力。

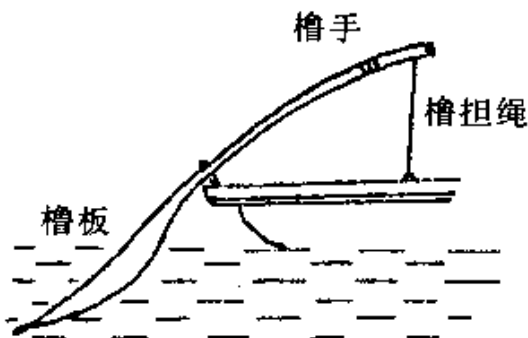


图 10-21 船橹示意图

橹在中国起源的具体时间尚难确定,但至晚产生于汉代。东汉刘熙《释名》对橹字已作了解释,认为它产生的力沿着船脊方向^①。《清明上河图》中有六人共摇一橹的图画。大航船中,每船有橹十几支到二十余支^②。陈侃于 1544 年完成的《使琉球录》中写道:“张帆施双橹,去势如脱箭。”^③可见橹与帆配合使用,可产生巨大的推动力。

舵是船航行导向机械。它由舵柱(或称舵杆)和舵板(或称舵扇、舵面)组成。舵柱在船尾直插(也有斜插)入水中,下接舵板。

① 戴念祖:《中国力学史》,第 459 页。

② 《宣和奉使高丽图经》卷三四《客舟》:“每舟十橹,开山入港,随潮过门。”

③ 陈侃:《使琉球录》卷一《使事纪略》。

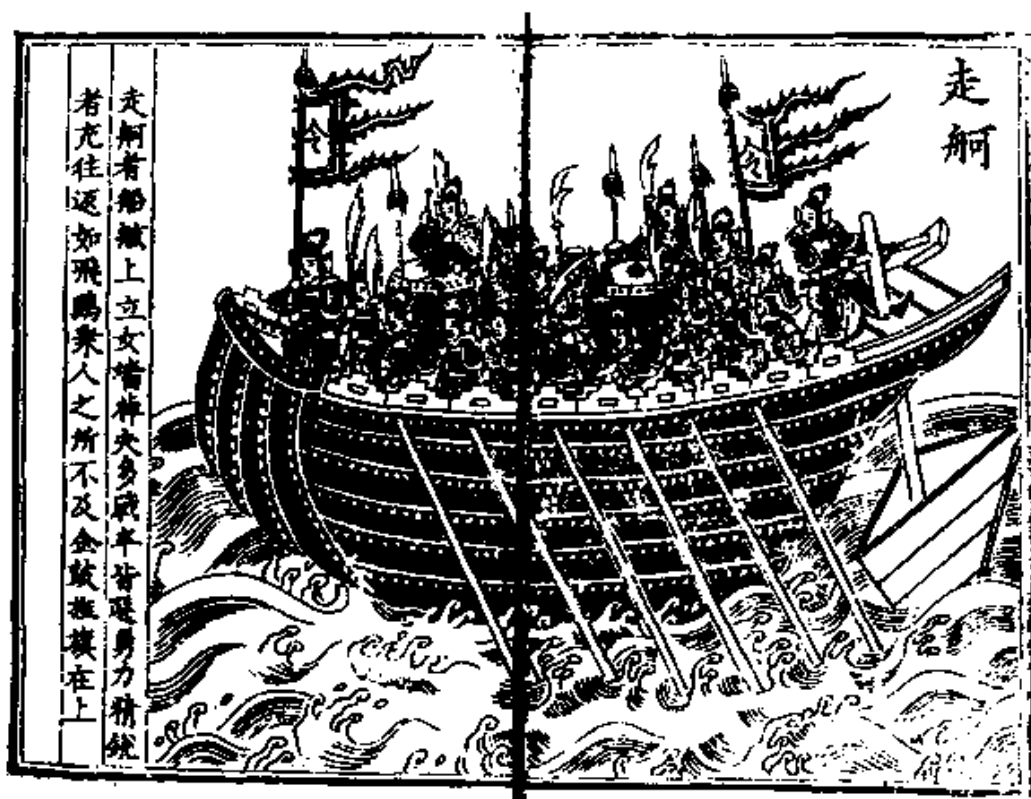


图 10-22 《武经总要》绘船图，置于船尾的舵清晰可见。

大舟在船尾部建有舵楼，楼内安装辘轳或绞车，以便升降舵柱（图 10-22）。舵板形式多样（图 10-23），当船航行时水流在舵板上形成水压——舵压，舵压与船的浮心之间形成一力矩，从而可以改变船的航向。

舵的使用至迟起于汉代，长沙 203 号汉墓船模中已有舵^①。其功用也被人们所识，宋代周去非说：“千百人之命，直寄于一舵，……如一丝引千钧于山岳震颓之地。”^② 明代庄元臣说：“舵横则舟横，舵正则舟正。”^③ 正因为如此，航海船只“前后俱置舵”^④。宋应星在《天工

① 《长沙发掘简报》，科学出版社 1957 年版，第 154—160 页。

② 周去非，《岭外代答》卷六《器用门·舵》。

③ 庄元臣，《叔苴子内编》卷二。

④ 崔旦，《海运编》卷上《船舶考》。

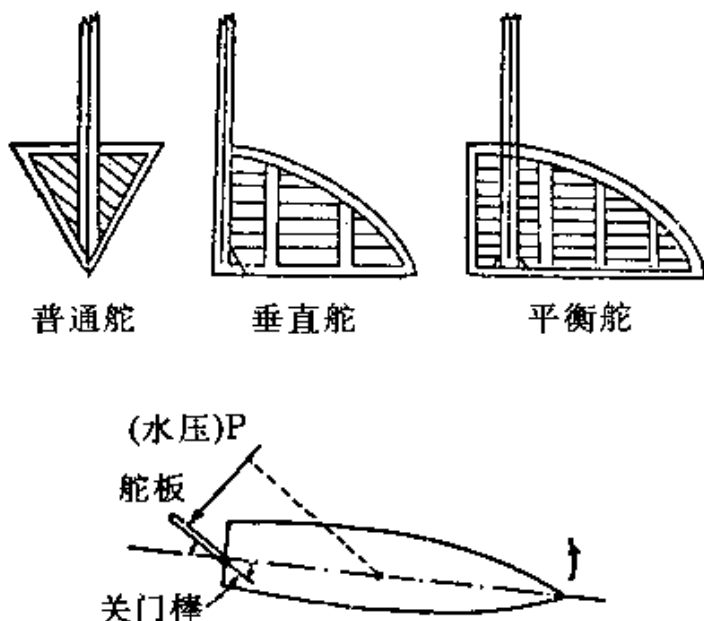


图 10-23 常见三种舵以及舵面受力、船向改变示意图。

开物》中对舵的功用及舵下水流作了极好的叙述。^①

橈与舵都是中国人最早发明的。十八世纪时欧洲人才开始在舰艇中学着使用“中国式摇橈”。舵早在十世纪时传入阿拉伯，可能十二世纪传入欧洲，但平衡舵直到十八世纪才在欧洲开始使用。

更有意义的是，南北朝时期中国人发明了轮船。以船侧轮子的转动代替划桨，以轮激水前进。古称为“车船”，“车轮舸”（图 10-24）。在这里，轮成为以连续运动代替间歇运动的机械。

史载，祖冲之发明“千里船”，在建康（南京）新亭江试航，“日行百余里”^②。可惜，该记载未明确指出祖冲之是否以轮代桨作为动力机械。在祖冲之之前，晋安帝义熙十二年（416 年），大将王镇恶在潼关自河入渭伐羌，乘“蒙冲小舰”，“行船者悉在舰内”，“舰外不见有乘行

① 宋应星：《天工开物》卷九《舟车》。

② 《南齐书》卷五二《祖冲之传》，中华书局校点本，第三册，第 906 页；也见《南史·祖冲之传》。



图 10-24 茅元仪《武备志》绘轮船

船人”，羌人莫不惊惧^①。祖冲之之后，徐世谱与叛逆侯景战于荆州赤亭湖，“别造楼船、拍舰、火舫、水车（船）以益军势”^②。在这近 150 年

① 《宋书》卷四五《王镇恶传》，中华书局校点本，第五册，第 1369 页。

② 《陈书》卷一三《徐世谱传》，中华书局校点本，第一册，第 197 页；也见《南史·徐世谱传》。

间所造的船中,很可能有轮船。王镇恶最初用于水战的舰,可能在动力机械方面由祖冲之加以改进,或者在船内搬用了脚踏翻车的轮轴机构。因此,徐世谱将这种船称为“水车”。如是,则中国轮船发明于五世纪初。

唐代李皋制造了二轮战舰,“挟二轮蹈之,翔风鼓浪,疾若挂帆席,所造省易而久固”^①。宋代,火药与轮船成为两项最重要的军事武器。宋将韩世忠在1129年镇江黄天荡战役中“用飞轮八楫,踏车蹈回江面”,有力打击金主完颜亮^②。接着,农民起义军领袖杨么在洞庭湖以轮船迎战官兵,也取得了重大胜利。宋将岳飞在与杨么作战中学会使用和制造轮船^③。在采石场战役中,宋将虞允文的轮船战舰使金兵“相顾骇愕”^④。宋、元两军于公元1272年樊城战役中,双方都用轮船^⑤。从黄天荡战役到樊城战役的150年间,在中国江海面上出现了世界上最壮观的水军舰队。杨么起义军、宋官军和元军都有几百至几千艘轮船战舰。造船工程师成为当时最宝贵的财富,并为战争双方所争夺。金主完颜亮失败原因之一是乱杀无辜的造舟者。随轮船制造技术的提高,船中桨轮数量也从2轮发展到4轮、8轮、20轮,甚至32轮。^⑥

元代之后,脚踏轮船更多地成为江南或沿海地区的运载或旅游交通工具。明代茅元仪在《武备志》中绘下了“车轲图”,指出轮船

① 《旧唐书》卷一三三《李皋传》,中华书局校点本,第一一册,第3640页;也见《新唐书·李皋传》。

② 袁褰:《枫窗小牋》卷二;也见《宋史》卷三六四《韩世忠传》。

③ 《宋史》卷三六五《岳飞传》;陆游:《老学庵笔记》卷一。

④ 《宋史》卷三八三《虞允文传》,中华书局校点本,第三四册,第11794页。

⑤ 《元史》卷一二八《阿术传》,中华书局校点本,第十册,第3119—3124页。

⑥ 有关文献见《宋会要》卷五〇《食货》;《玉海》卷一七四;熊克:《中兴小纪》卷一三;《古今图书集成·经济汇编·戎政典》卷九七至一〇〇《水战部》等。李约瑟的《中国科学技术史》对此作了大量的生动有趣的叙述,见其巨著(英文本)第4卷第2分册,第408—435页。

“内安四轮，轮头入水约一尺，令人转动，其行如飞”^①。入清以后，鸦片战争中又制造轮船与英军作战。不久，丁拱宸制造了蒸汽机轮船，称为“火轮船”。

古代脚踏轮船的轮轴机构如图 10-25，可以说，它与脚踏翻车中上轮轴机构相当类似。轮轴上除了安装脚踩架外，也可装绞车式架，以人手转动之。

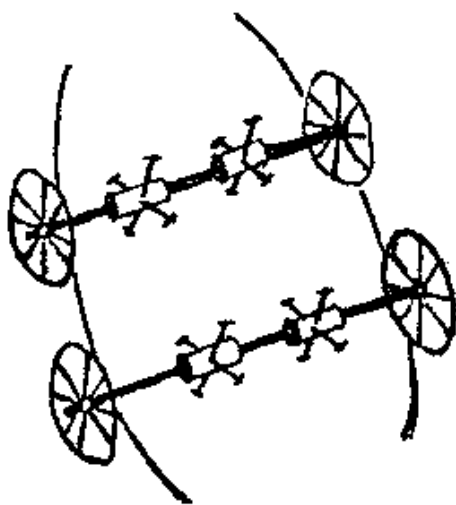


图 10-25 脚踏轮船内部轮轴结构推想图。人或坐或立，脚踩拐木，驱轮运转。

第五节 打捞船

宋僧怀丙以杠杆原理创造历史上第一艘打捞船。在机械史上也是一项重大成就。

横跨黄河、连结秦晋的蒲津桥是一座浮桥。它以上千艘船作桥，以竹索、木料加固。唐开元十二年(724年)大修，特增设8头铁牛以维系浮桥巨缆。300多年后，即宋庆历年间(1041—1048年)因河水暴涨，桥遂坏，铁牛被洪水冲入河中。每只铁牛数万斤。时无人能将牛搬上岸。《宋史·僧怀丙传》写道：

怀丙以二大舟实土，夹牛维之，用大木为权衡状钩牛，徐去其土，舟浮牛出。

^① 茅元仪：《武备志》卷一一七《军资乘·水·战船二》。

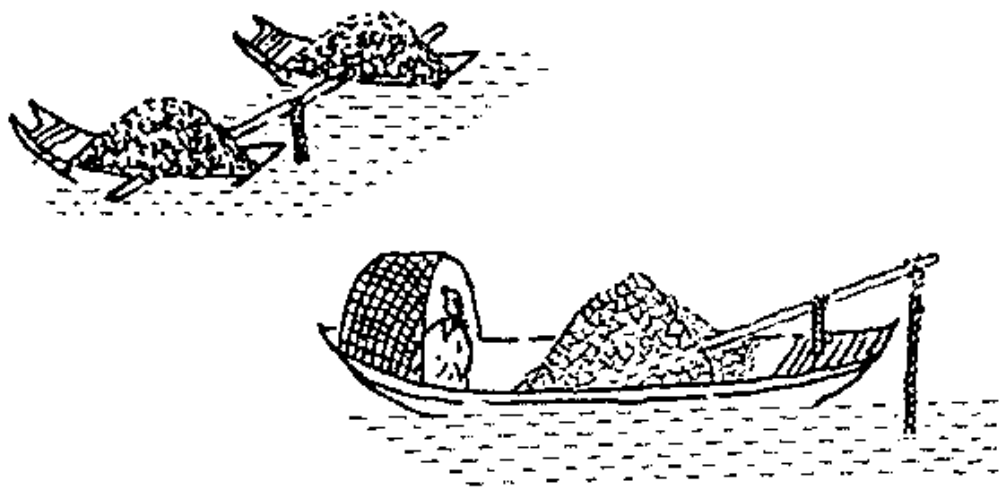


图 10-26 僧怀丙的打捞船示意图

这是利用舟浮力打捞铁牛的方法。另有文献说：

真定僧怀丙，请于水浅时以绳系牛于水底，上以大木为桔槔状，系巨舰于其后。俟水涨，以土压之，(牛)稍稍出水，引置于岸。^①

或许，僧怀丙用了这两种方法打捞铁牛(图 10-26)。

《宋史·僧怀丙传》仅述及怀丙生平三大事：除打捞铁牛外，修理真定十三层浮图，“不闻斧凿声”而巧妙地更换了佛塔中层一根已坏木柱；修理赵州桥，“不役众工”而将倾斜的桥身扶正。可惜有关记载太简单了，我们不能从中窥其方法之一二。但从这些事实看，怀丙是中世纪伟大的工程师和工程力学家。他创造的浮力起重法，曾于十六世纪在欧洲由意大利数学家和工程师卡丹(Hieronimo Cardano, 或 Cardan, 1501—1576 年)所重复设计并使用。在今天，怀丙的方法已成为打捞机械船的实用方法。

^① 吴曾：《能改斋漫录》卷三《河中府浮桥》。

第十一章 利用风力的机械

利用风力的机械大致有两大类：一是产生风或气流的机械，如扇风车、风箱；一是利用风力作功的机械，如风车。古代人往往将产生风与利用风的机械统一称为“风车”。本章对此作一简要叙述。

第一节 风箱和猛火油柜

一、橐与风箱

橐是最早的鼓风机，也是风箱的前身。在技术语汇中，风箱是空气泵的一种。

橐或橐龠，也称鞴或鞴。橐，以牛皮制成的风袋，龠，原指吹口管乐器，这里借喻橐的输风管。鞴、鞴，也作橐，即今排字。战国时期已有橐龠。《老子·道经》用它比喻空间：“天地之间，其犹橐龠乎？虚而不屈，动而愈出。”这是说，皮橐内充满空气而不塌缩，拉动其体又能将其内空气压出。空气通过输风管进入熔炼炉中，因此，《管子·揆度》将橐称为“炉橐”。《墨子·备穴》说：“炉橐，橐以牛皮，炉有两甗，以桥鼓之。”“桥”即桔槔。以桔槔上下运动拉压皮橐鼓风，可见那时鼓

风器已初具规模。

汉代典籍中述及橐龠者甚众。山东滕县宏道院出土汉代冶铁画像石中有橐龠的画面(图 11-1)^①。经王振铎复原研究^②,橐龠结构如图 11-2。它有三个木环、两块圆板、外敷皮革而成。拉开皮橐,空气通过进气阀而入橐;压缩皮橐,橐内空气通过排气阀而进入输风管,再入冶炼炉中。



图 11-1 汉冶铁画像石,左边一人正在操纵橐鼓风

汉代冶铁技术大发展,是与橐龠的动力改进密切相关的。动力机械从汉代起有了极大提高,而鼓风器本身即皮制的橐大概一直应用到唐宋年间。

宋代,活跃在西北地区的少数民族建立了夏国。十一世纪时强盛的夏国有发达畜牧业、农业和手工业,还创造了西夏文字。皮橐的初步改进大概是西夏人作出的。敦煌榆林窟第3窟西夏壁画中有双木扇风箱画(图 11-3)^③。该风箱靠木质箱体上木板的启闭运动造成断续气流。为了得到足够的风力,其扇风板比人体还高。其鼓风效率可能较低,甚至不及橐。不久,这种木扇风箱被安装在水力驱动的机械

① 《汉画像冶铁图及说明》,《文物》1959年第1期。

② 王振铎:《汉代冶铁鼓风机的复原》,《科技考古论丛》,文物出版社1989年版,第275—277页。

③ 蔡美彪等:《中国通史》第六册,人民出版社1979年版,第206页;也见王伯敏:《中国绘画史》,上海人民美术出版社1982年版,第372页,329图。

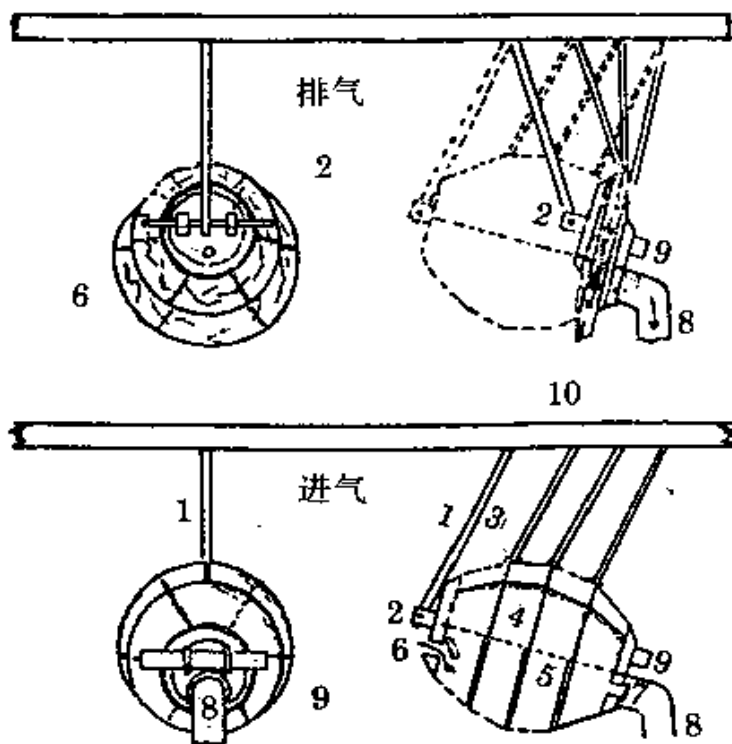


图 11-2 汉囊复原图：(1)吊杆；(2)拉杆；(3)铁环；(4)囊皮；(5)木环；(6)进气阀；(7)排气阀；(8)输风管；(9)横木；(10)横梁。（引自王振铎设计）

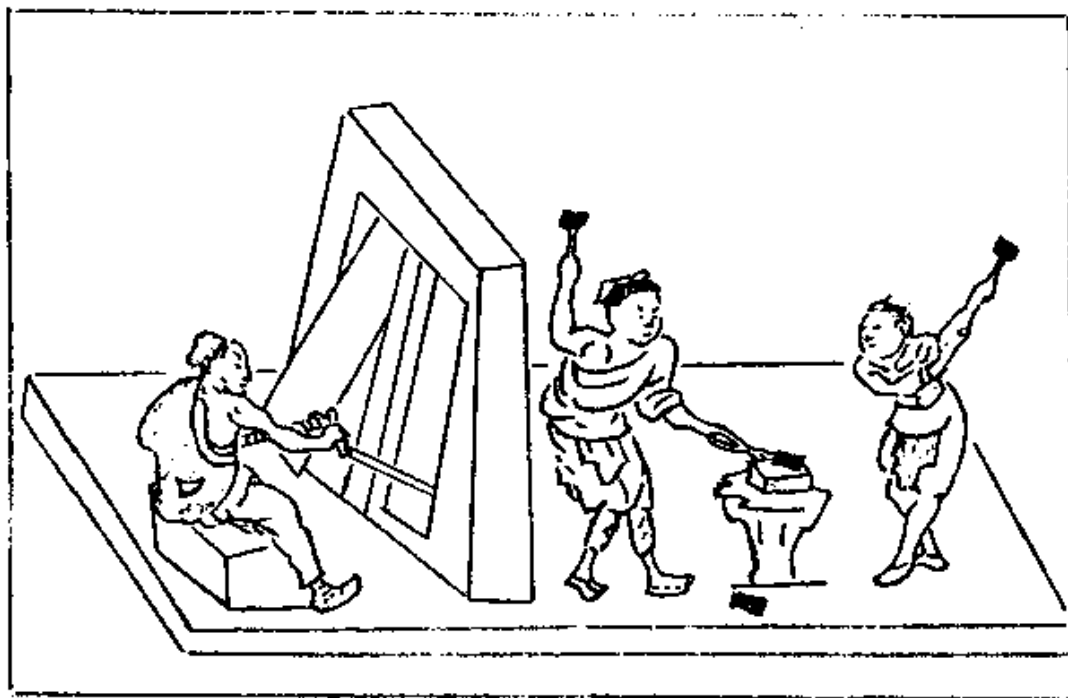


图 11-3 敦煌榆林窟西夏鼓风锻铁壁画。



图 11-4 《演禽斗数三世相书》绘拉杆活塞式风箱：(1)锻铁；(2)打银。

上,如同图 10-18 王祯所绘。这才使木扇风箱有较高的功效。南宋末年、约十三世纪下半叶,这种风箱就被拉杆活塞式风箱所取代,因而王祯在撰写《农书》时经“多方搜访”才得其梗概^①,而其中有些水排的机械细节都画错了。

据李约瑟博士考证,成书于 1280 年的一本题为《演禽斗数三世相书》卷二中有拉杆活塞式风箱的最早的图画^②(图 11-4)。这种风箱轻便省力、功效高,很快得到普及和发展。明代宋应星《天工开物》

① 王祯:《农书·农器图谱之十四》,王毓瑚校本,农业出版社 1981 年版,第 347—348 页。

② J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, Fig. 427.

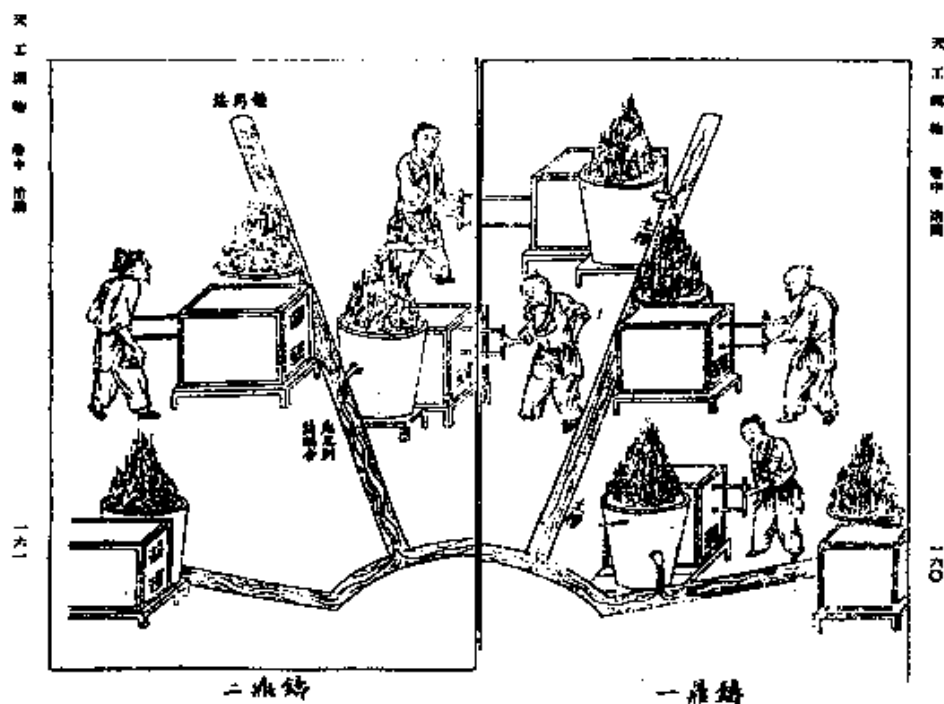


图 11-5 《天工开物》绘冶铸图。该图中画了六个风箱，从其拉杆的正面和背面可以知道这些风箱阀门的数量：正面下方一个阀门，背面二个阀门。

中绘有许多风箱图(图 11-5)，而且，不同用途的风箱，其进气或出气的阀门数也不相同^①。他描画了四种阀门的风箱。它们的外形及其工作机制分别如图 11-6, 11-7 所示。

图 11-7 中，当拉杆从左向右推入时，活塞左边突然造成局部真空，A、B 阀被大气压推开，C、D 阀被箱内气压关闭，气流从活塞右边气室进入输风管，同时将阀 E 推向左边。当拉杆从风箱拉出时，A、B 阀被关闭，C、D 阀被推开，活塞左边形成气流，并通向输风管，同时将阀 E 推向右边。在这 4 类风箱中，前 3 类可造成连续气流，唯第 4 类风箱的气流是间歇性的。

综上所述，特别重要的技术细节我们未曾述及。这就是，如果不

^① 戴念祖：《中国古代的风箱及其演变》，《自然科学史研究》1988 年第 2 期。

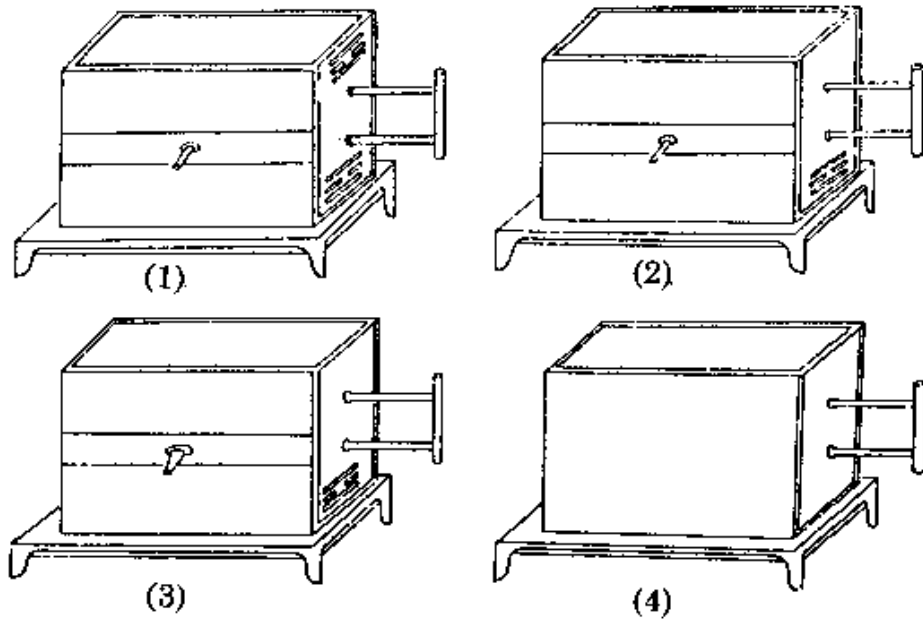


图 11-6 《天工开物》绘 4 种风箱：(1)拉杆的正面和背面各有 2 个阀；(2)正面杆下一个阀，背面 2 个阀；(3)正面和背面各为一个阀；(4)只有背面一个阀。

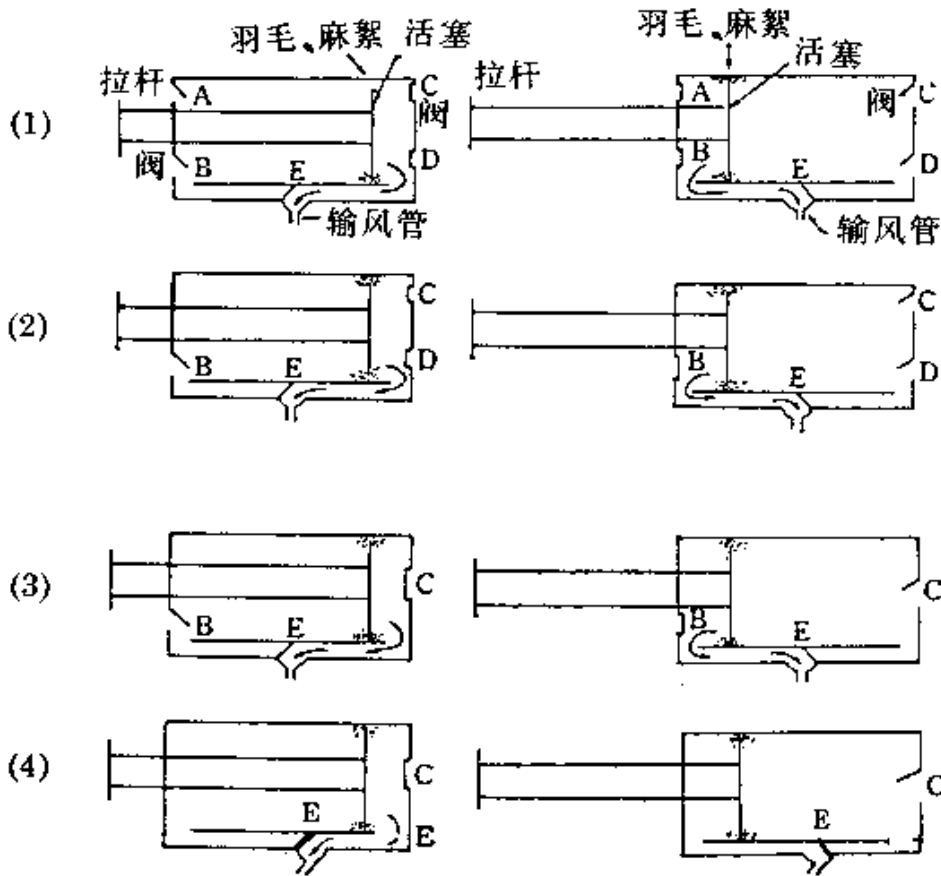


图 11-7 《天工开物》绘 4 种风箱的工作机制。左为拉杆推进风箱时的各阀启闭和气流流动情形；右为拉杆拉出风箱的情形。

找到风箱中拉杆与活塞的起源,那么,皮囊与木扇式风箱不可能发展到拉杆活塞式风箱。拉杆与活塞究竟从何而起?

二、唧筒与猛火油柜

古代唧筒也就是水泵。在军事上用的猛火油柜实质上是喷火枪,或油泵。它们为风箱的创造解决了关键的技术问题。

北宋曾公亮在其著《武经总要前集》(卷十二)的一幅插图中画有唧筒(图 11-8),他注解道:“唧筒,用长竹,下开窍,以絮裹水杆,自窍唧水。”可见,在这种唧筒中有拉杆和活塞。将其竹筒端放进水中,并将裹絮(即活塞)水杆(即拉杆)往上抽起,水就通过窍(阀)进入水筒中。

唧筒在中国起源年代不详。但在曾公亮之前,产竹地区的儿童将它当作玩具的历史一定很久了。曾公亮只是鉴于其军事上灭火急需,便将它收录于军用武器之中。值得注意的是,

四川盐井中的吸卤唧筒当和盐井的历史一样长久。北宋苏轼《东坡志林》述及盐井的吸卤唧筒是用水排式机械来拉动其拉杆的^①。这

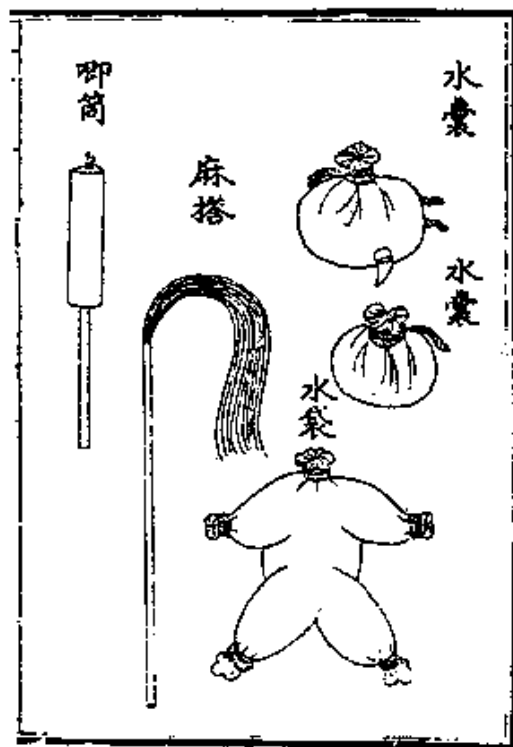


图 11-8 《武经总要》插图之一,其左边绘唧筒。

^① 苏轼:《东坡志林》卷四《筒井用水排法》。

意味着,在宋代儿童的玩具唧筒已发展为工业用水泵了。

如果说唧筒为风箱的发明提供了活塞拉杆的启示,那么,曾公亮创制的猛火油柜(图 11-9)为风箱的诞生而在形态与机理两方面都作出了样品。《武经总要》中有猛火油柜的记载:

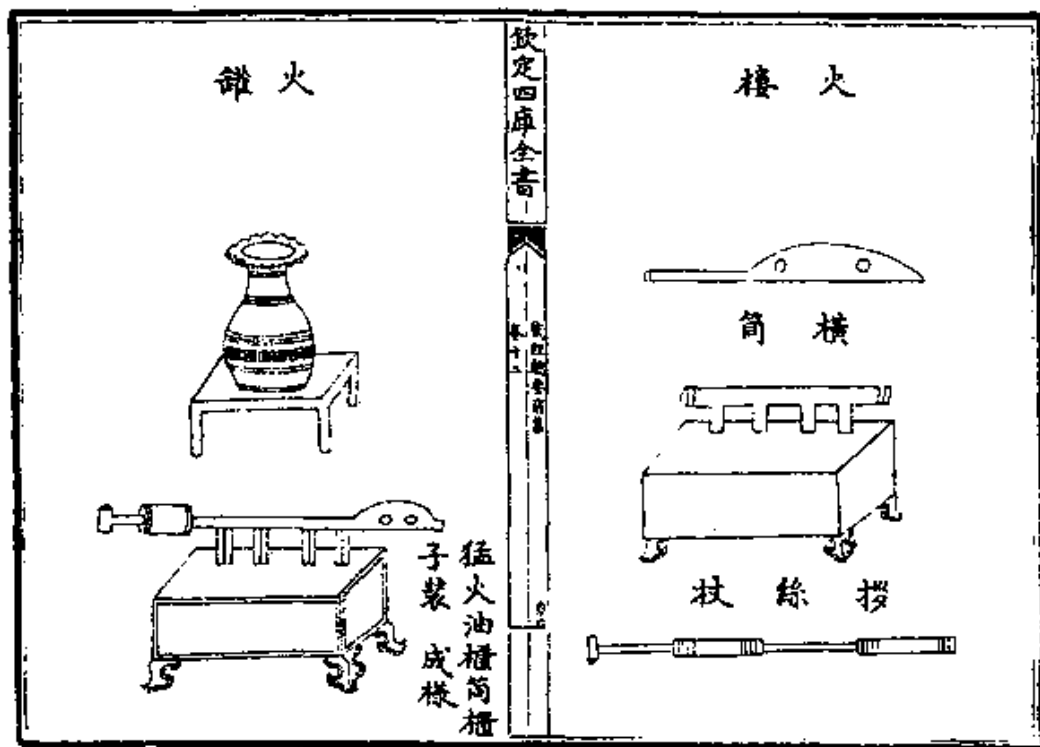


图 11-9 《武经总要》绘猛火油柜。

以熟铜为柜,下施四足,上列四卷筒。卷筒上横施一巨筒,皆与柜中相通。横筒首大、细尾、开小窍。卷筒为口,口有盖,为注油处。横筒内有撈丝杖,杖前缠散麻,厚寸半,前后贯二铜束约定。尾有横拐,拐前贯圆揜,入则闭筒口。放时以杓自沙罗中挹油注柜窍中,及三斤许。筒首施火楼,注火药于中使然(燃)。发火用烙锥。入撈丝,放于横筒。令人自后抽杖,以力蹙之,油自火楼中出,皆成烈焰。①

① 曾公亮、丁度等:《武经总要前集》卷一二《守城·猛火油柜》。

由图 11-9 和 11-10, 可推想到, 油柜内盛火油是易燃石油; 四个卷筒实为抽油管; 横筒装置类似唧筒, 其内搽丝杖即附有活塞的拉杆。不过, 该杖上有两个活塞。因此, 猛火油柜是一种单筒、单拉杆、双活塞和双喷油道的液压泵, 也是世界上最早的军用喷火枪。

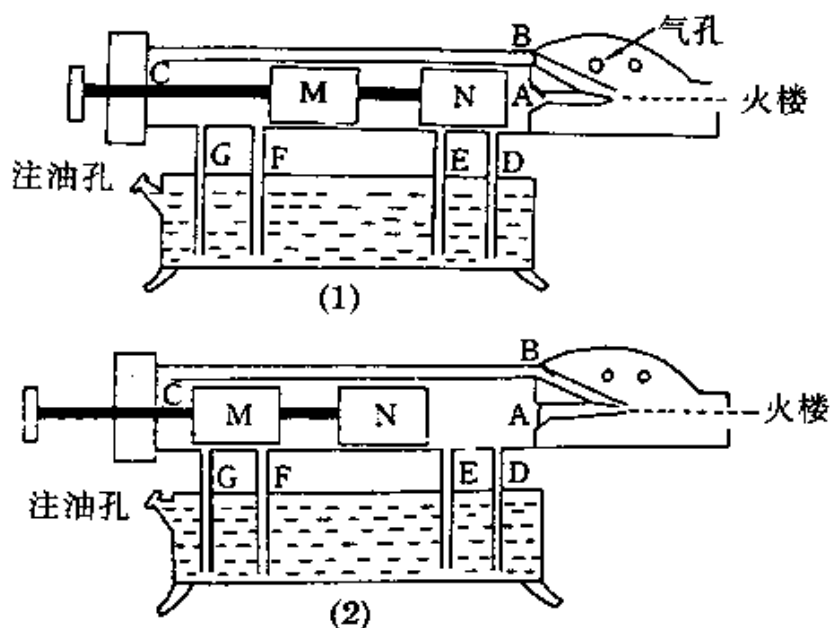


图 11-10 猛火油柜复原设想及工作原理示意图:

M、N 为拉杆上两个活塞; BC 为附在横筒后室的喷油道;

A、B 分别为前室和后室的喷嘴阀门; D、E、F、G 分别为输油卷筒。

(1) 为拉杆压入筒体, (2) 为从筒体抽出拉杆。

图 11-10 上图, 拉杆被一直压入筒体前端, E、D 油管先后被活塞 N 堵住。在这过程中, A 阀打开, 筒体前室的油经阀 A 喷出; 而 B 阀关闭, 后室因局部真空、柜中油经 F、G 管进入后室。图 11-10 下图, 拔出拉杆, F、G 油管被活塞 M 堵住, B 阀被油压冲开, 后室的油经 CB 管道喷出, 同时, 由于活塞 N 后退, 前室造成局部真空, A 阀被关闭, 柜中油经 D、E 管进入前室。当拉杆再往前推压时, 重复前述过程。这样, 拉杆前后往复运动都能将油喷出, 产生连续喷火。

从上述可知,猛火油柜比风箱更复杂。若将猛火油柜改装成风箱是轻而易举的事。由此可断定,拉杆活塞风箱的诞生当继猛火油柜后不久。《演禽斗数三世相书》中的风箱自然是猛火油柜的发展,从复杂的液泵发展为气泵。近代冶铸用的风箱曾极大地得益于战争武器的启发。

从水排到畜力排,从猛火油柜到风箱,似乎古代的机械技术的发展线路是先解决复杂的高尖机械,然后推广于较简单的机械。这也许是中国古代机械技术高度发达的内部因素之一。

十九世纪的科学著作家尤班克(T. Ewbank)曾评价中国风箱的科学价值及其历史地位。他认为,“最完美的鼓风机和近代改良泵的杰作”都是中古时期中国活塞风箱的“仿制品”。^①

在西方,1557年出版的阿格里哥拉(G. Agricola, 1490—1555年)《论天然金属》(De Re Metallica)第9篇描述了当时欧洲各种熔炼炉和风箱设备,其中有手拉、脚踏和水车驱动的皮制鼓风机,它们和我国战国时期的橐、东汉水排极为相似。其笨重和低效率直到十八世纪才得以改进^②。十八世纪中期,以水作为动力的一种箱式鼓风机才被广泛用于熔炼炉中^③,才有了和《天工开物》类似的风箱。风箱无疑是历史上中西交流而传播到欧洲的,尚待研究的是传播的具体年代和方式。欧洲十八世纪的产业革命和资本主义的兴起当有中国风箱的一份功劳。

① T. Ewbank, *A Descriptive and Historical Account of Hydraulic and other Machines for Raising Water, Ancient and Modern*...Scribner, New York, 1870, ed. the 16th; 也见 J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 148, 136—137.

② *A History of Metallurgy by Tylecote*, R. F., pp. 95—100, London, 1976, 该书有中译本,但未署英文本原作者之名。

③ A. Wolf 著、周昌忠等译:《十六、十七世纪科学技术和哲学史》,商务印书馆 1985 年版,第 563—569 页。英文原本 1950 年伦敦第 2 版,第 498、522 页。

第二节 风 扇 车

古代典籍中将一种能产生风(或气流)的机械叫风扇车、扇车、扬车或“风车”。为了避免与利用风力作功的机械即风车相混淆,我们将产生风的机械一律称为风扇车。

将扇叶装于轮轴,转动轮轴就产生强气流。西汉时长安巧工丁缓发明“七轮扇。连七轮,大皆径丈,相连续,一人运之,满堂寒颤”。^①这大概是在一个轮轴上装有7个扇轮,转动轮轴、7个扇轮都旋转鼓风,因而使人有寒颤之感。丁缓是西汉时有名的机械师,他除了发明“七轮扇”之外,还创制“被中香炉”(即平衡环,与回转仪原理近似)、“常满灯”(可能是能自动添油的灯具机械)和“九层博山香炉”,后者能自由转动。就他的七轮扇而言,又是一个复杂机械的发明先于同类的简单机械的事例。因为后来我们见到的风扇车都是单个扇轮的机械。

《武经总要前集》绘制了一个风扇车(图 11-11),它还写

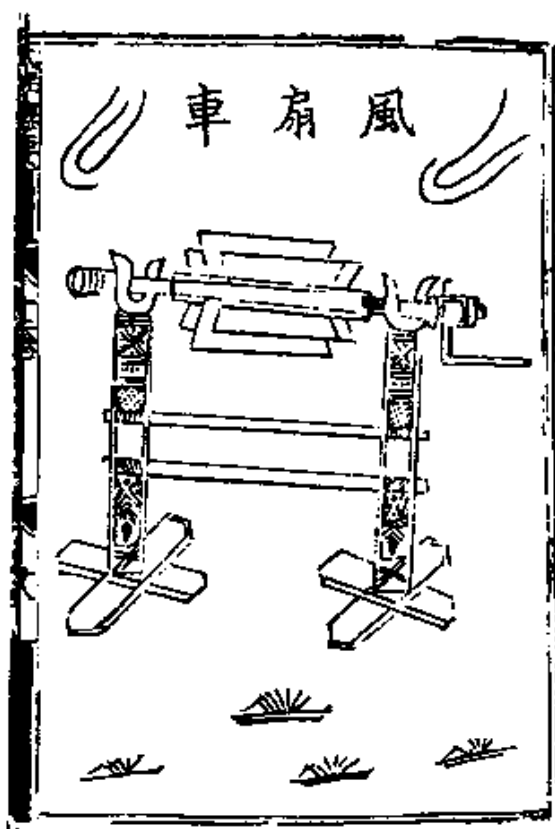


图 11-11 《武经总要》绘风扇车

^① 刘歆:《西京杂记》卷一。

道：“上施转轴，轴四面施方扇。凡地道中遇敌人，用扇扬石灰、簸火毬烟，以害敌人。”^①由图中可见，这个军用风扇车是以轴上曲柄转动的。王祯《农书》和宋应星《天工开物》也绘制了风扇车（图 11-12），不过它们用于扬弃稻麦的秕壳，其轮轴上装曲柄连杆，以脚踏连杆使轮轴转动。

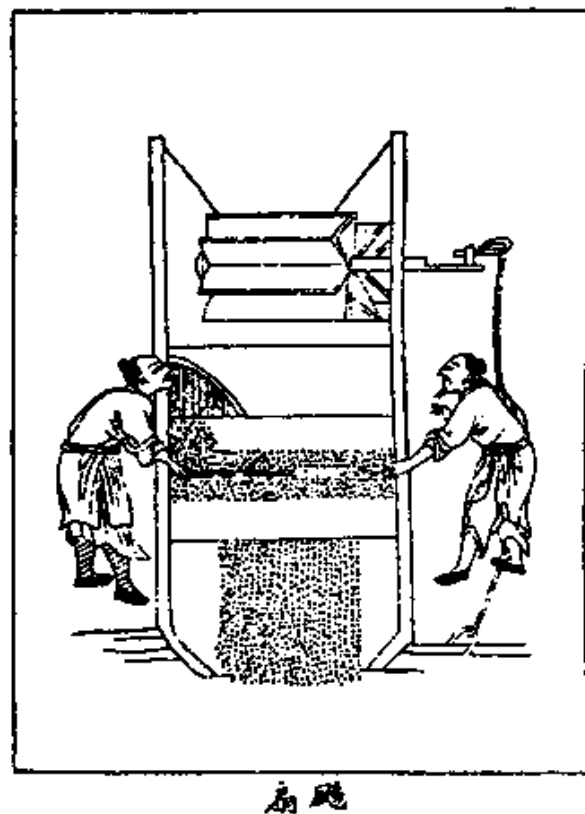


图 11-12 《天工开物》绘风扇车

然而，以上所述都是开放式风扇车，它们没有特设的风道，因此，风扇产生的风是向四面流动的。

在丁缓之后，一种具有风道的风扇车问世。1969年在河南济源

^① 曾公亮、丁度等，《武经总要前集》卷一二。

县发现汉代新莽之前不久的陶制风扇车模型^①,1971年又在洛阳发现东汉时期陶扇车模^②。前者是一梯形箱,其结构的纵剖面如图11-13。后者是长方形,内部机构与西汉晚期风扇车大致相同。

大概在济源陶扇车模制成后不久,成书于约公元前40年的史游(生卒年不详)的《急就篇》出现了有关风扇车的文字记载。它写道:“碓、碓、扇、隙、舂、簸、扬。”颜师古(581—645年)注:“扇,扇车也;隙,扇车之道也。隙字或作遗,隙之言坠也。言既扇也,且会坠下也。”由此看来,风道在西汉可能称为“隙”。中国风扇车从一开始就具备了这样的特点:以旋转运动产生风,有风腔和风道,可以控制气流方向,提高鼓风效率。

王祯《农书》在述及颴扇即扬谷器时,虽然以文字叙述了闭合式风扇车,但没有绘图。《天工开物》绘制了闭合式风扇车(图11-14),从中可见,在装有轮轴、扇叶板和曲柄摇手的右边,是一个特制的圆形风腔,曲柄摇手的周围圆形空洞就是进风口,左边有长方形风道,来自漏斗的稻谷通过斗阀穿过风道,饱满结实的谷粒落入出粮口,而糠粃杂物沿风道随风一起飘出风口(图11-15)。这种闭合式风车一直沿用至今日的偏僻农村之中。

李约瑟博士认为,中国旋转式风扇车的一个惊人特点是进气口总是位于风腔中央,因而它是所有离心式压缩机的祖先。欧洲的风扇车直到阿格里哥拉时期还是进气口与出气口分处箱的两边缘,而闭合式旋转风箱直到十八世纪早期才出现。^③

① 《济源泗涧沟三座汉墓的发掘》,《文物》1973年第2期。

② 余扶危,贺官保:《洛阳东关东汉殉人墓》,《文物》1973年第2期。

③ J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 154—155; 也见沃尔夫(A. Wolf)《十六、十七世纪科学技术和哲学史》,中译本,商务印书馆(北京)1985年版,第556—557、583页;戴念祖:《中国力学史》,河北教育出版社1988年版,第493—498页。

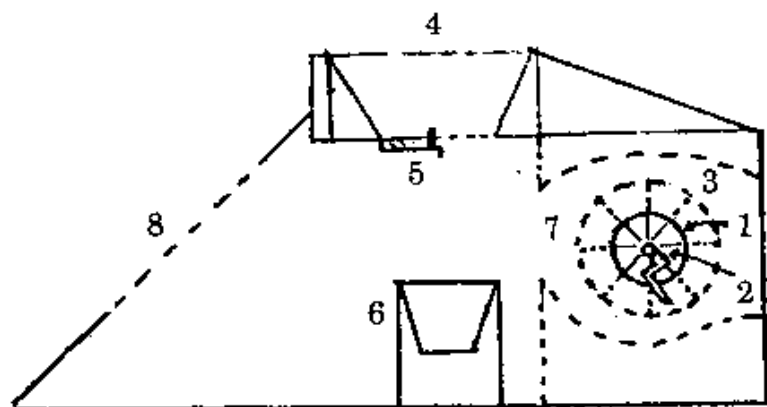


图 11-13 西汉晚期济源陶扇车模结构复原图(纵剖面):(1)入风洞;(2)轮轴与曲柄(示意于纵剖面上);(3)扇叶板;(4)进粮漏斗;(5)斗阀;(6)出粮口;(7)圆形风腔与风道;(8)排风口与糠秕出口。

天
工
开
物
卷
上
辨
物



車風

图 11-14 《天工开物》绘风扇车。

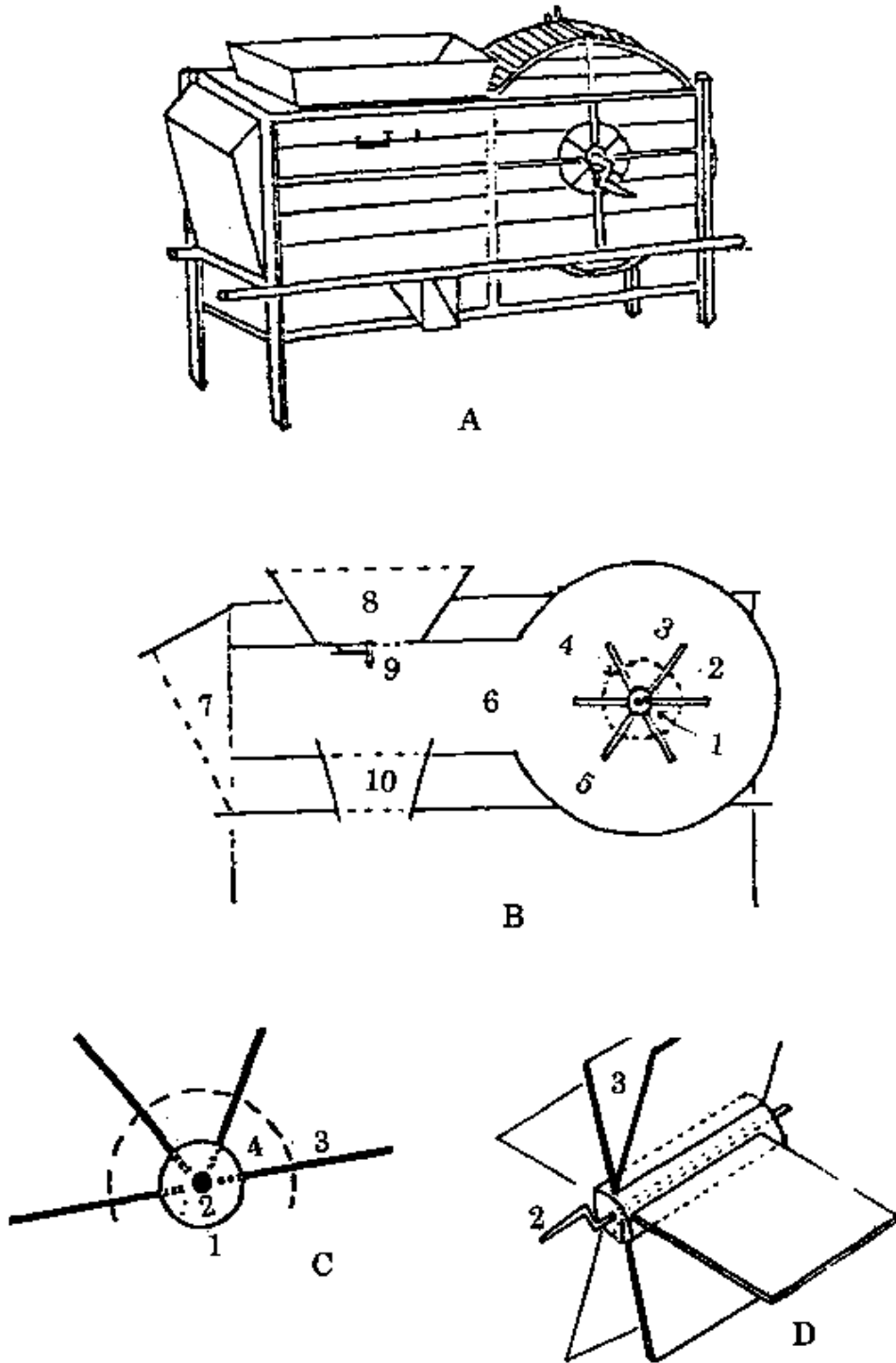


图 11-15 明清时期风扇车结构图：A. 外形图；B. 纵剖面图；C. 扇轮轴与扇叶结构剖面图之一部分；D. 扇轮轴与扇叶结构图。在这四个图中，数码表示为：(1)扇轮木轴；(2)铁质轴心；(3)木质扇叶；(4)进气口；(5)风腔；(6)风道；(7)出风口；(8)漏斗；(9)斗阀；(10)出粮口。

第三节 风 车

利用风力使轮轴旋转,从而磨麦、转动水车等作功的机械,称为风车。它在中国不知起于何时。

《天工开物·乃粒》写道:“扬郡以风帆数页,俟风转车,风息则止。”方以智《物理小识》(卷八):“用风帆六幅,车水灌田者,淮扬海埂皆为之。”可见,明代风车的应用已很普遍(图 11-16,11-17)。

元代耶律楚材曾作《河中府诗十首》,其中之一写道:“冲风磨旧麦,悬碓杵新粳”,并自注“西人用风磨,如南方水磨”。^①于是,李约瑟



图 11-16 1656 年欧洲人绘江苏地区的风车(引自李约瑟《中国科学技术史》)

^① 元代盛如梓:《庶斋老学丛谈》卷上引《湛然居士集》(丛书集成本)。

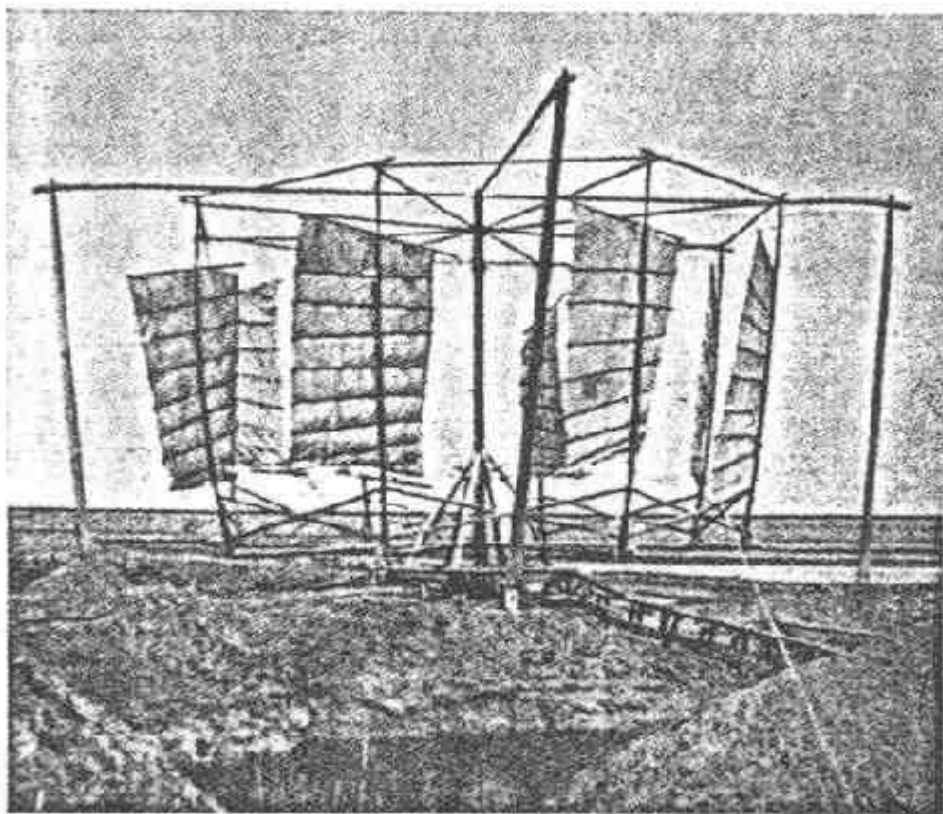


图 11-17 近代河北唐沽地区盐田使用的风车,用以带动水车、提升卤水。(引自李约瑟《中国科学技术史》)

断言,风车是由中亚细亚、或阿拉伯、波斯传入中国的。^①

中国古代风车具有明显特点,除卧式轮轴外,风帆为船帆式。帆并非安装于轮轴径向位置,而是安装在轴架周围的八根柱竿上。帆又是偏装,即帆布在竿的一边较窄,在另一边较宽,并用绳索拉紧。如图 11-18,当风作用于 A 时,帆系顺风,帆与风向垂直(受力最大)并被绳拉紧;转到位置 C 时,帆被吹向外,帆面与风向平行;至 E 处再恢复迎风位置。利用绳索的松紧和帆的偏装,它可以利用戡风或逆风,如同在船帆中一样。这种装置法,帆可以自由随风摆动而不产生特别

^① J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, p. 561; Fig. 688, 689.

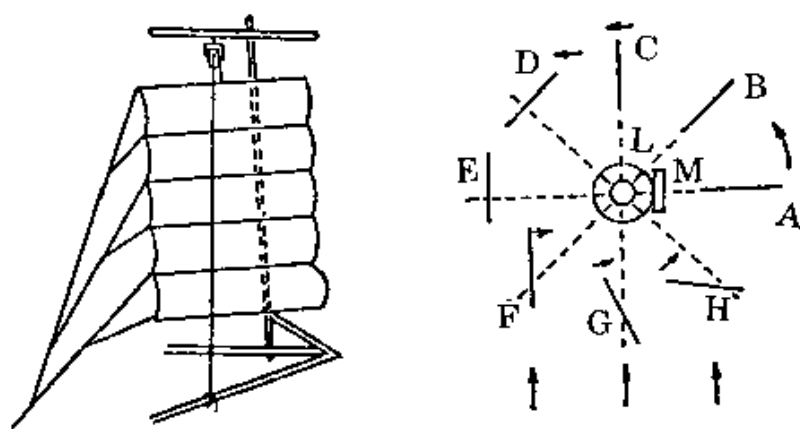


图 11-18 风帆及其受力转动示意图。

的阻力,帆在外周转动的有效风力作用范围超出 180 度。如在位置 G,开始转入顺风,帆还可以利用部分风力少量做功。这种船帆式风车的特色并不见于欧洲立轮风车之中。

有趣的是,传统的儿童玩具“纸风轮”和玩具风车,历来为中国儿童所喜爱(图 11-19)。它们的绝对起源时间,尚希对此感兴趣的学者留心有关文献资料或历代绘画艺术。

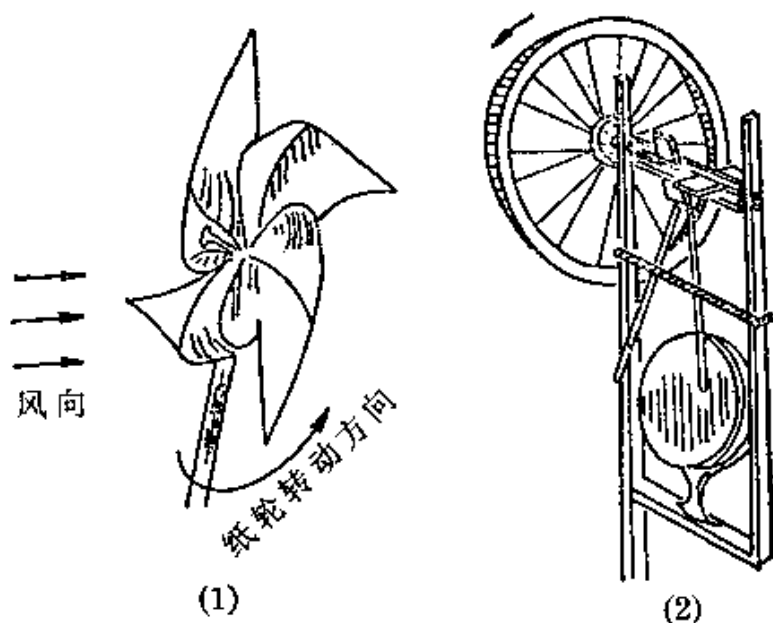


图 11-19 纸风轮(1)和玩具风车(2)

将一张纸沿其垂直中线剪开,成4块相连的小方纸。“相连”,即该纸中心不能剪过。将此4块小方纸弯曲折叠、粘连,其中央插一细木条作轴,即成一个纸风轮。它在风中能不断旋转。这个纸轮也是飞机螺旋桨的最原始模型。

将细竹篾或秫秸弯成一轮圈,又将类似上述纸轮结构装于该轮圈内,形成一螺旋桨式风轮。将该轮轴装于木架上,该轮便在风中旋转;无风时举轮跑动,造成气流的相对运动,风轮也会转动。风轮每转动一次,其轮轴上拨杆就拨动架上小直竿击鼓一次。实际上,这种玩具风车正是利用风力作功的机械模型。它应是立式张帆风车的始祖。明代刘侗的《帝京景物略》(1635年刊)写道:

剖秫秸二寸,错互贴方纸,其两端纸各红绿,中孔,以细竹横安秫竿上,迎风张而疾趋,则转如轮,红绿浑浑如晕,曰风车。^①这是十六、十七世纪文学作品中有有关风车的记载,但作为儿童玩具的风车的真正起源时间当在明代之前很久。

利用风力的机械还有很多,如帆车、船帆、风筝、降落伞等等,其中一些前已述及,另一些将在以下叙述。

^① 刘侗,于奕正:《帝京景物略》卷二《城东内外·春场》,北京古籍出版社1982年版,第72页。

第十二章 武器和热力机械

本章叙述一些较有机械意义的武器。火药发明以后,军事武器首先利用它的爆炸力,并在古代战争中发挥重大作用。本章因而将武器和热力机械合二而一。

第一节 弓弩与炮车

一、弓 弩

弓与弩作为武器,在古代曾发挥重要作用。但从机械角度看,它们不过是箭的推进动力机构,箭的飞行依靠它们的弹力。

在山西朔县峙峪旧石器晚期遗址中发现了 28000 多年以前的石镞,表明人类制造弓箭的历史极为久远。虽然竹或木制的弓和箭干容易腐烂,但是文明史初期的许多骨制、石制的箭镞还遗留至今。《易·系辞》说,黄帝时代,“弦木为弧,剡木为矢。弧矢之利,以威天下”。所谓“弧”也就是弓,所谓“矢”也就是箭干和镞矢。

成书于春秋战国之际的《考工记》记述了利用复合材料造弓的方法。这些材料包括竹或木(弓的主干材料)、牛角、牛筋、胶、丝绳和漆。

《考工记·弓人》写道：

弓人为弓，取六材，必以其时。六材既聚，巧者和之。干也者，以为远也；角也者，以为疾也；筋也者，以为深也；胶也者，以为和也；丝也者，以为固也；漆也者，以为受霜露也。

它不仅叙述了造弓材料，还从早期的力学观念分析了材料的性能。由多种材料组成的复合弓，成为我国弓箭制造的传统技术。唐宋以来的军事著作述及由竹(或木)、牛角、牛筋、桦树皮或其他材料作成的复合弓(图 12-1)。这些材料的组合极大地增加了弓的弹性力。而且当它们接合得越紧密、围绕竹或木形成一整体的弓干时，弓的抗拉能力就越大。

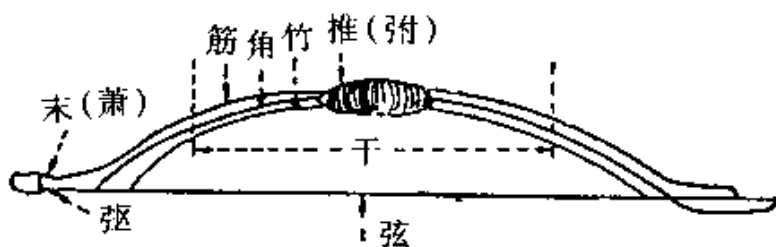


图 12-1 弓及其复合材料示意图

将弓干安装在一特制的木柄端。这木柄看来就像弓的臂，并称为弩臂。弩臂中央挖槽以置箭，弩臂后端装弩机、以控制弓弦的张弛与射击。弩机上设置有钩弦弩牙，瞄准用的望山，以及拨动弩牙的扳机或叫悬刀(图 12-2)。发射时手指往后拨悬刀，弩牙即下坠，弓与弦都因恢复松弛位态而产生巨大弹力，弦即将搭于其上的箭射出。

在我国，木弩产生于上古时代。战国时期已有铜制弩机^①。汉代，

^① 据考古发现，战国时期已有铜弩机，但尚无铜弩郭。随着弩弓拉力增大，汉代方出现铜弩郭。见《洛阳中州路战国车马坑》，《考古》1974年第3期；高至善：《记长沙、常德出土弩机的战国墓，兼谈有关弩机、弓矢的几个问题》，《文物》1964年第6期。

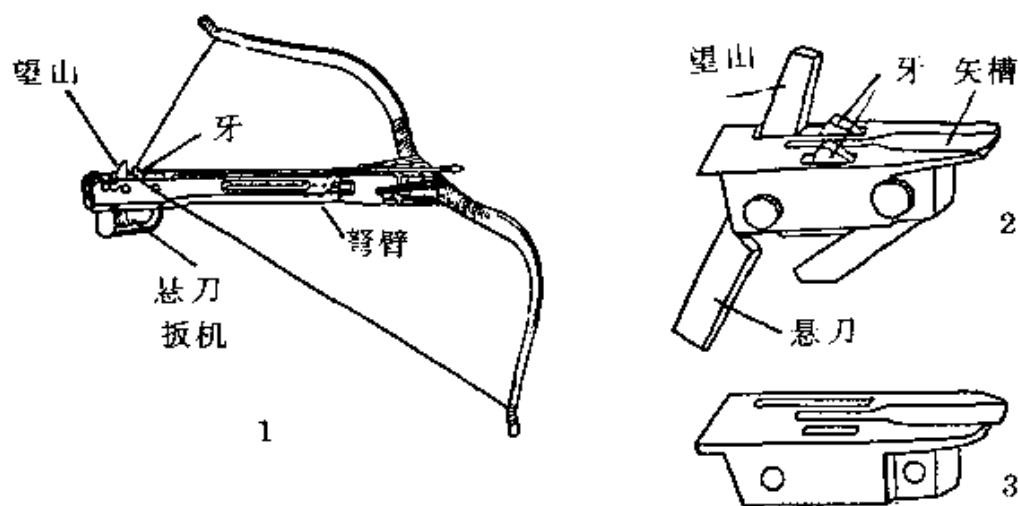


图 12-2 弩：(1)战国弩复原图；(2)汉代铜弩机外形；(3)汉代铜弩机郭。

弩的使用极为普遍，有多种形式的弩，如擘张弩（以手臂开弩）、蹶张弩（以足开弩）、腰引弩（以身体的力量开弩钩弦）。从机械角度看，最为精巧的是东汉时期发明的床弩，唐代时期称其为绞车弩，因为该弩要用绞车来拉紧其弦（图 12-3）。

绞车弩机构如图 12-4 所示。弩臂上装三弓。两弓在前，一弓在后并反向安装。居中的一弓称为主弓。用一短绳将主弓与前弓的弓箫相连；主弓的弓箫上还装有滑轮，以便系在后弓箫上的弦

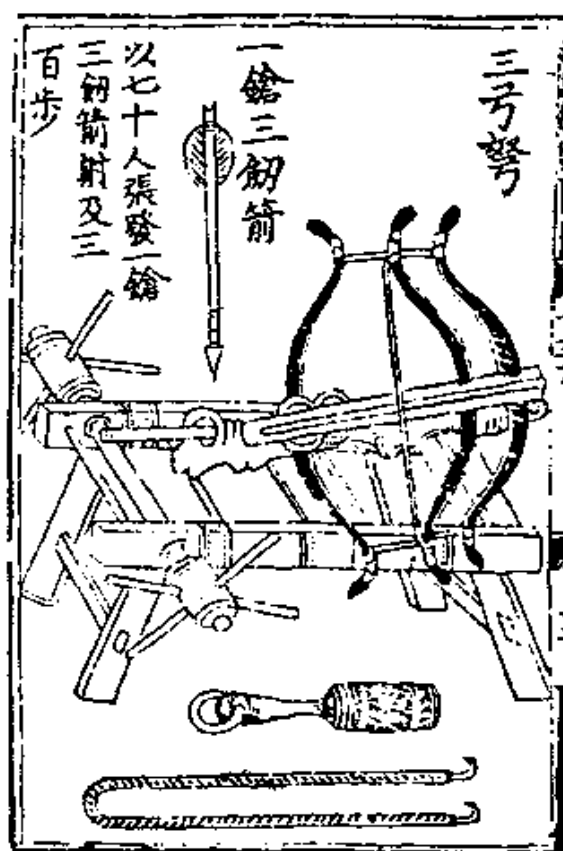


图 12-3 《武经总要》绘三弓弩

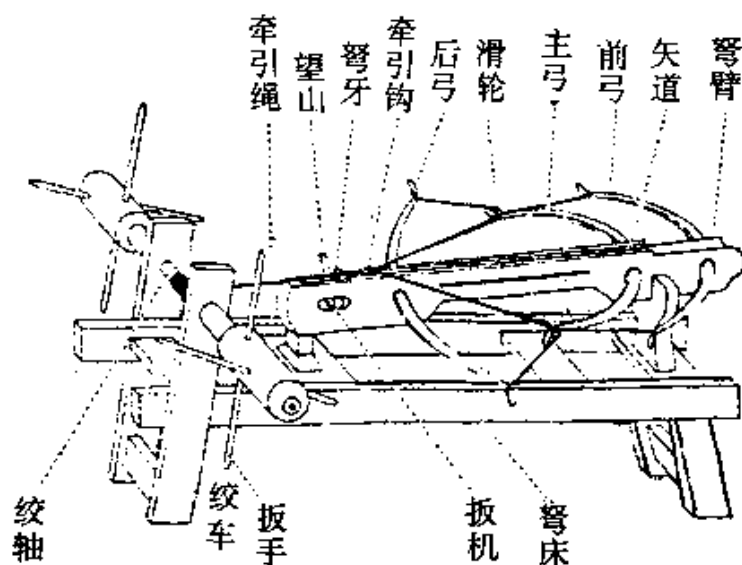


图 12-4 绞车弩复原示意图(引自孙机文)

通过滑轮连结主弓,再将该弦扣在弩牙上。这样,三弓的弓力方向是一致向前的。张弩时,转动弩床后的绞车,收紧钩在主弦上的牵引绳。然后,以弩牙扣住弓弦,解下牵引绳,此时再将箭置于弩臂矢槽内,并将箭括顶在两牙之间的弦上^①。发射时,箭被三弓的巨大弹力射出。“所中城垒无不崩殒,楼橹亦颠坠”^②。绞车弩的射程远、杀伤力强,是战斗中的重型武器。其机械装置的巧妙性也独具风格。

三国蜀丞相诸葛亮曾改进连弩,称“元戎”。弩臂上装弓一把,是轻型弩。其特点在于矢槽里可装十支箭。每射出一支箭后,矢槽里会自动弹出第二支,从而节省了装箭时间,提高发射速度^③。或许,诸葛连弩的矢槽与弩机中装有弹簧一类简单机械,也未可知。

① 孙机:《床弩考略》,《文物》1985年第5期。

② 李筌:《太白阴经》卷四《战具类》。

③ 《三国志》卷三五《诸葛亮传》,中华书局校点本,第四册,第927—928页。该传引《魏氏春秋》言诸葛连弩“一弩十矢俱发”。有人理解为扣动一次扳机而发十矢,似误。

二、炮车

炮车,或称抛车,抛石机。因为,在火药发明之前,这种机械的功用是将石块抛掷到敌方;火药发明后,它又用于将火毯、燃烧弹一类物体抛掷至敌方。此时,炮与炮通用,故又写为炮车。被抛的石块在空中飞行有声,故又称为“霹雳车”。

炮车起源于春秋战国之际^①,两汉时被普遍用于军事上。汉献帝建安五年(200年),袁绍与曹操在官渡大战;袁以高橧车置山坡上,以高治下,箭矢齐发;曹以炮车反击,石破橧楼,因而取胜^②。唐代,炮车巨大,一车需200人拉绳发石,因而称其为“将军炮”或“擂石车”。至德二年(757年),唐将李光弼与叛臣安禄山手下大将史思明战于太原,光弼除挖地道迎贼外,又以此巨大炮车击贼。^③

炮车二轮或四轮,车架上立木柱,木柱顶端架横轴,轴中间穿炮杆(图12-5)。炮杆长臂端系皮窠以装石

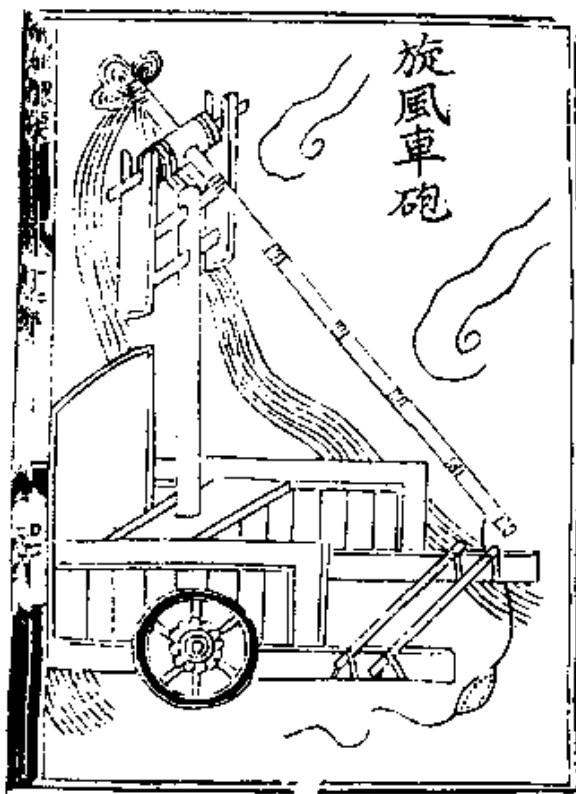


图12-5 《武经总要》绘炮车

① 《汉书》卷七〇《甘延寿传》引《范蠡兵法》注:“飞石重十二斤,为机发行二百步。”中华书局校点本,第九册,第3007页。

② 《三国志》卷六《袁绍传》,中华书局校点本,第一册,第199页。

③ 《新唐书》卷一三六《李光弼传》,中华书局校点本,第十五册,第4585页。

块,短臂端系几十至百余条绳索以供众人拉曳。号令一下,众人猛拉绳索,在离心力作用下石块抛向远方。初,炮车不易转动,后发明可以旋转定方向的旋风炮车。

上述炮车是间断性发射石弹。三国马钧创造了轮转发石车。将石块系于绳索,绳缠于轮周。当轮激烈转动之后,以利刀断绳或引火断绳,石块便连续地一个个抛出去。^①

在火药发明之后,火炮或铳也是一个个分别点火发射的。或许在马钧的轮转石炮思想的启发下,人们发明了连续点火轮,可一次点燃36架炮铳的引线,原初间断发射炮弹的方法成为连续发射,从而造成巨大威力。明代茅元仪还绘制马驮引线轮及点燃引线轮的图画(图12-6),并指出该轮18辐,每辐左右傍靠二铳。点放时依铳高低将轮置于地面铁转柱上。行军时,一马驮二轮。^②

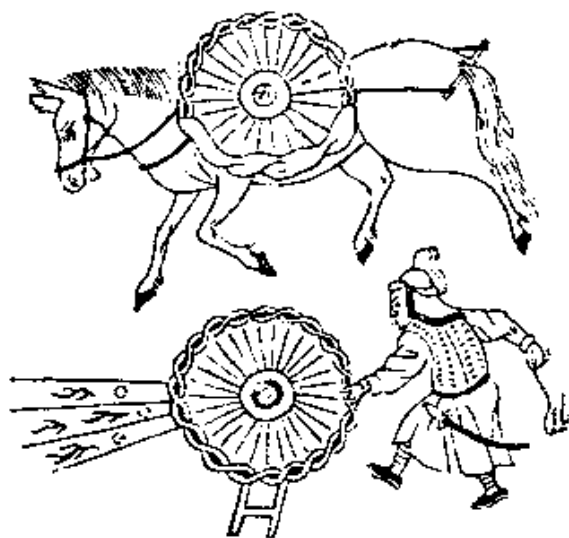


图 12-6 茅元仪《武备志》绘车轮炮

① 《三国志》卷二九《杜夔传》注引傅玄文,中华书局校点本,第三册,第807页。

② 茅元仪:《武备志》卷一三三《军资乘·火器图说》。

第二节 火箭、地雷和水雷的发火装置

一、火 箭

发明火药是炼丹家的功劳。他们一代一代经过几百年的苦行修炼,终于在九世纪懂得了火药的配方及其燃烧现象。成书于1044年的《武经总要》中保存世界上最早的三种军用火药配方。但是,这时期的火药因油脂过多,呈膏状,并不能作为火箭燃料。固体火药可能诞生于十二世纪初期,从此,真正的火箭才有燃料保证。

所谓“真正的火箭”,就是以牛顿的作用与反作用定律为基础的火箭,它是依靠火药燃烧后喷射推进作用而往前飞行。在此之前所谓“火箭”,实际上是纵火箭、放火箭,也是以弓弩发射的燃烧起火的箭。弄清这一物理概念,帮助我们理解并判断历史文献中所记述的有关材料是至关重要的。^①

火箭起源于十二世纪初。较早使用火箭的记载是1161年宋金战争中的采石场战役、宋将虞允文使用的“霹雳炮”,以及同年胶州湾海战中宋将李宝使用的“火箭”^②。金兵在和宋军战争中学会制造与使用火箭。在北宋亡后,金占领火箭生产基地北宋京都汴(今河南开封),这又为金人生产和发展火器创造了条件。1232年,蒙古军攻打京都汴,金兵守将赤盏合喜见城外满山遍野蒙古军,吓得“语言失措,面无人色”,守城军民却奋勇抵抗,并以“震天雷”火炮和“飞火枪”痛

① 戴念祖,《中国力学史》,第302—306、319—339页。

② 关于采石场战役,见《宋史》卷三八三《虞允文传》,中华书局校点本,第三四册,第11792—11793页;关于胶州湾海战,见《宋史》卷三七〇《李宝传》,中华书局校点本,第三三册,第11500—11501页。

击蒙古军,取得了保卫金都的胜利^①。次年五月,金哀宗出逃汴京至归德(今河南商丘),被蒙古军包围,此时金兵守将蒲察官奴又一次使用了前曾使用的“飞火枪”,致使蒙古军溃败^②。经考,这些战争中使用的“霹雳炮”、“火箭”、“震天雷”、“飞火枪”都是以火药燃烧后喷射推进的武器,也就是火箭。^③

1234年,蒙古军灭金,也学会了制造和使用火箭,同时俘虏了大量的中原火药、火器与火箭制造工人。1234—1258年间,蒙古军扫过伏尔加河,占领里海;侵入波兰,攻下莱格尼察城;灭木刺夷,抵阿刺模忒堡(里海南);又降服黑衣大食国,抵巴格达^④。西征途中,蒙古军随带汉人工匠,助其管理火药、火器。1241年攻打波兰莱格尼察城,曾发射火箭。在该战场附近的古教堂中人们发现一幅描绘当年蒙古军使用“火箭”(火箭)的壁画^⑤。蒙古军西征将中国的火箭、火药武器和火药制造技术传播到阿拉伯国家和欧洲各地,这是一次武力征服,同时又传播了先进科学技术。

火箭的制造与造鞭炮类似。1233年金蒙归德战役中,金兵的火箭“以束黄纸十六重为筒,长二尺许”,内实以火药^⑥。二尺相当于62.52厘米。当然,还有更长大的特用火箭。制造火箭的最关键的技术是在于打火药引线眼^⑦。这个孔眼也就是火箭的喷气孔。火箭的形式多种多样,除了普通的一支箭杆上捆束一个火药筒外,除了箭簇的形状变化外,还有一筒多箭、一筒双向箭、二级火箭、火箭飞弹等(图12-7)。

① 《金史》卷一一三《赤盏合喜传》,中华书局校点本,第七册,第2496—2497页。

② 《金史》卷一一六《蒲察官奴传》,中华书局校点本,第八册,第2548页。

③ 潘吉星,《中国火箭技术史稿》,科学出版社1986年版,第38—51页。

④ 有关蒙古军西征史,见蔡美彪等编,《中国通史》第七册,人民出版社1983年版,第59—60、68—70页。

⑤ 潘吉星,《论火箭的起源》,《自然科学史研究》1985年第1期。

⑥ 同上注②。

⑦ 戴念祖,《中国力学史》,第330—331页。

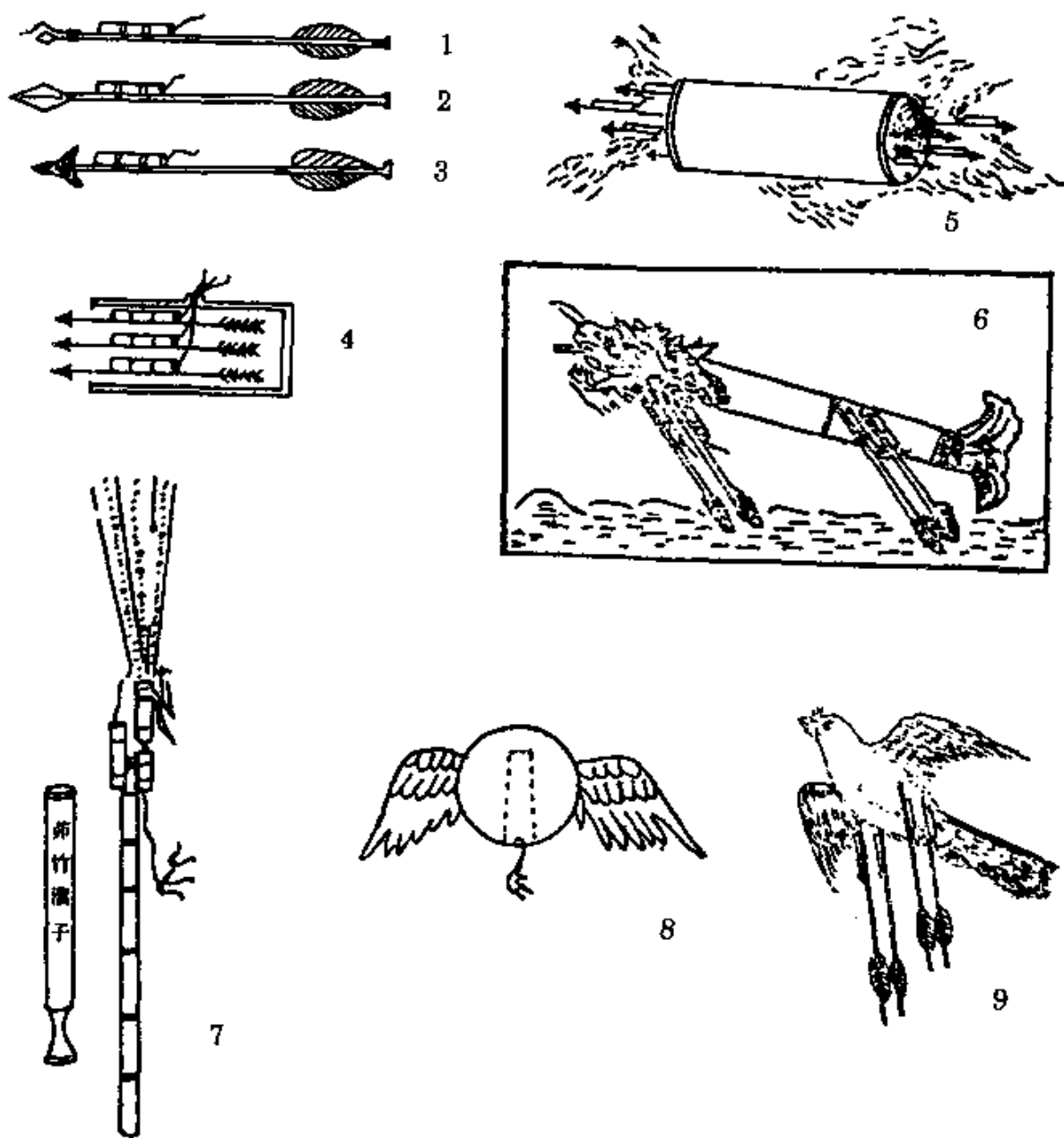


图 12-7 《武备志》绘几种火箭：(1)飞刀箭；(2)飞枪箭；(3)飞剑箭；(4)机神箭——单向集束火箭；(5)双飞火龙箭——双向集束火箭；(6)火龙出水——以 4 个火箭筒携带一个竹制龙形大火箭筒射出，在飞出一定距离后引燃龙筒内众多火箭而射杀敌营。其实质是二级火箭；(7)飞空砂筒——两个火箭筒对向安装，先点燃向前的火箭筒，到敌营后竹筒爆裂，喷出砂石，此时必引燃另一火箭筒而退回本营。其实质是二级回收火箭；(8)震天雷——火箭飞弹，火箭装于球内；(9)神火飞鸦——运载火箭装于鸦翅下的椭圆形飞弹。

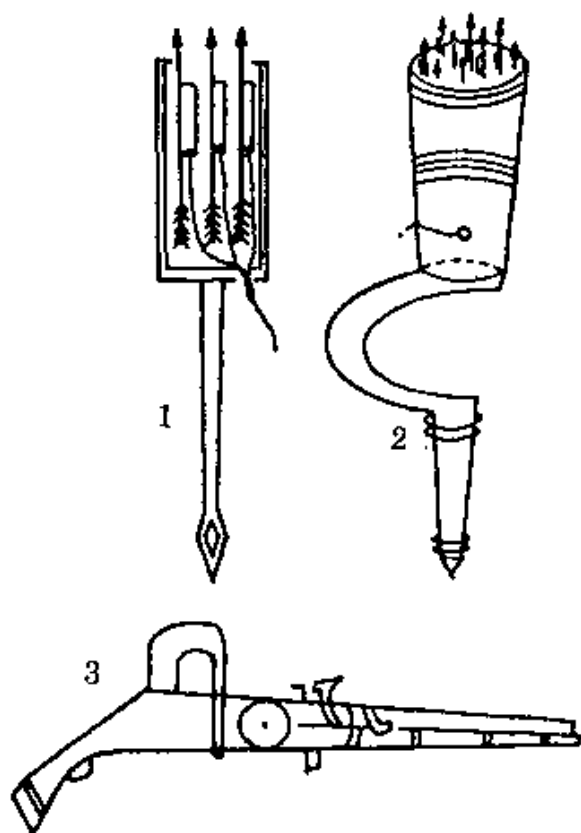
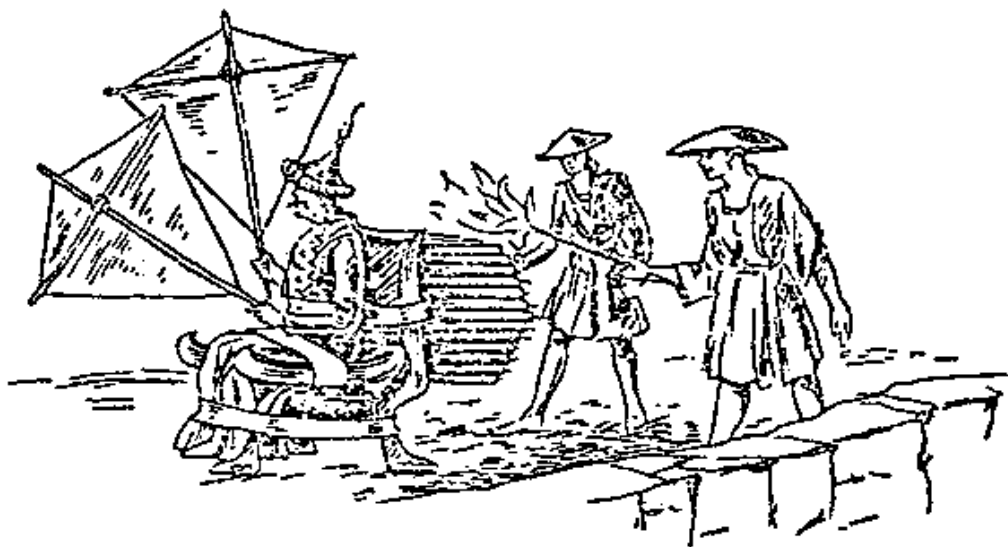


图 12-8 几种枪式火箭发射架：(1)茅元仪《武备志》绘“三只虎钺”；(2)焦玉《火攻神器图说》绘“火龙枪”；(3)赵士桢《防虏车銃仪》绘“火箭榴”，将火箭置于木柄滑槽内发射。

发射火箭的方法，除了手持之外，也有枪式发射(图 12-8)、筒式发射和板式发射等。在这多种形式的火箭中，有一支一支单放的火箭，也有集束火箭，即将多支火箭装在一个筒体中同时点放。

有趣的是，大约十五世纪时，一个叫万虎的人试图乘坐火箭上天。他在其座椅背上装置 47 支当时最大的火箭，他自己手持两个大风箏坐在椅上(图 12-9)^①，当仆人点燃火箭后，他大概只有一摔了

^① 潘吉星：《中国火箭技术史稿》，第 72—74 页。图 12-9 源出于 *Rockets and Jets* by Herbert S. Zim, pp. 31-32, ed., 1945.



WAN-HOO AND HIS ROCKET VEHICLE

图 12-9 中国火箭飞行试验者万虎飞行绘图(引自第 354 页注①)

事。虽然,迄今历史学家和科学史家尚未查明有关万虎其人其事,但他的科学想象和勇敢精神直到今天还为人们所纪念。科学家们以他的名字命名月球上的一个环形山脉。

虽然,古代制造火箭的机械并不复杂,但它表明古代中国人在利用热力和爆炸力方面的高度智慧与才干。

二、地雷和水雷的发火装置

与在空中飞行或爆炸的各种炮、铳和火箭不同的另一类火药武器是慢炮(定时炸弹)、地雷和水雷^①。明代许多兵书记述了这类武器,如焦玉的《火龙经》(成书于 1412 年)、唐顺之的《武编》、茅元仪的《武备志》(成书于 1628 年)以及宋应星的《天工开物》。嘉靖二十五年

① 刘仙洲:《我国古代慢炮、地雷和水雷自动发火装置的发明》,《文物》1973 年第 11 期。

(1546年)总督陕西三边军务的明代将领曾铣、抗倭名将戚继光等都曾制造过慢炮、地雷或水雷。

这类爆炸性武器的发火装置有三：香火；火石；火镰；“以机或火”或“钢轮发火”。其后者是值得机械史所注意的。在茅元仪《武备志》中，述及后者的有好几种，如“神武默机火箱”、“钢轮发火”，“钢轮伏火柜”，“钢轮木匣石板木架”^①等。虽其名称不一，但其发火装置或基本原理相同。茅元仪在“钢轮发火”一节中清楚地记述了其构造原理：

钢轮匣，用榆槐木如式造，两头重用藏火线隔板，底凿坠石口，匣盖周围多钻引线眼，内两旁用槽木四枝，上粘紫胶。火石纯钢，照匣大小造。两轮中用铁轴卷绳，从下中孔拴坠石于底外，匣内两头搁轮。用铁板四个，中开眼。制铁长针，将底外坠石板扶住。搁于地坑，草土覆之。其针鼻拴游线、交横、远系钉地。若人马绊绳，针脱轮转，火起贯发通槽火线，群炮轰发，有神术之妙。屡试验也。^②

《武备志》还绘出了钢轮发火的机械部件(图12-10)。刘仙洲对此作了复原研究并绘图(图12-11)。从图中可见，这个发火机械是一对可转动的钢轮。将它们分别置于木匣两侧，使它们与火石摩擦，起火星并引燃火线。其装置犹如现在手推小钢轮的打火机。把它看作后者的先驱打火机械也不过分。关键是如何使钢轮转动而又满足军事要求？为此在木匣中间装铁轴、贯钢轮，绕绳铁轴上。绳的一端挂重物(一般用石块，故此绳称为“坠石绳”)。当坠石急剧下降时，它带动铁轴与钢轮转动，使钢轮与火石相摩擦并喷出火星、点燃装于匣内的引线。平时用一尖形铁条，托住坠石板，使石不掉落；或者在游线进入木匣前装一板阀，使铁轴不转动。整个装置，实际上是重力的巧

①② 茅元仪：《武备志》卷一三四《火器图说十三》。

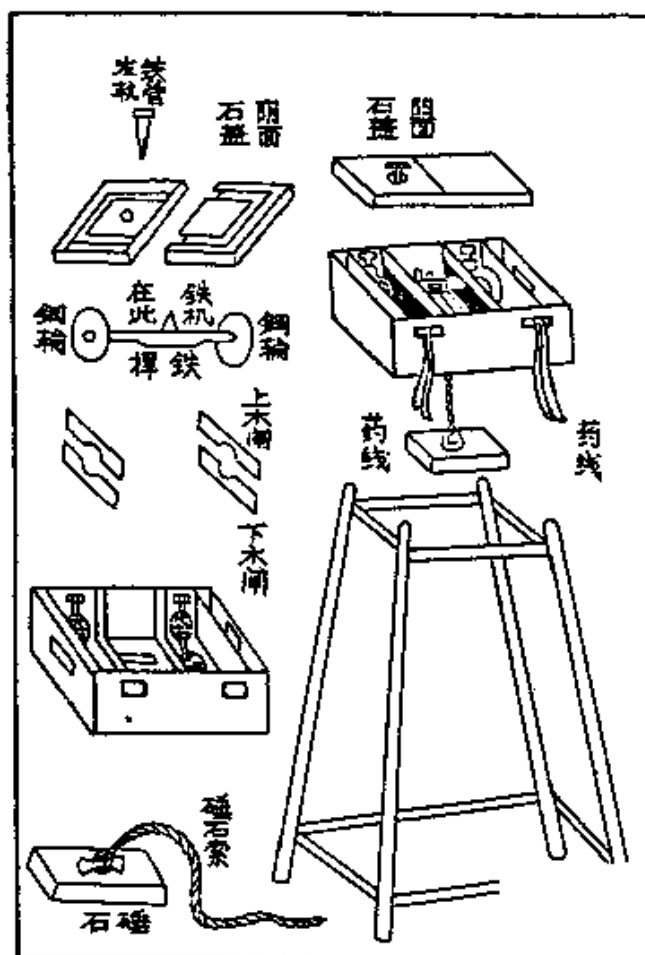


图 12-10 《武备志》绘钢轮发火机件图

妙利用。将这发火装置隐匿草丛或土中，只要有人踩中游线，使坠石掉落，炸弹就会爆炸。

明初，1412年成书的《火龙经》述及“炸炮”发火装置，就是这种钢轮：“药槽连接钢轮。上掩，使贼不知。踏动发机，地雷震起。”^①可见，利用重力作用的自动发火装置至少在十五世纪初年已被人们所掌握和利用。

^① 焦玉：《火龙经》卷下。

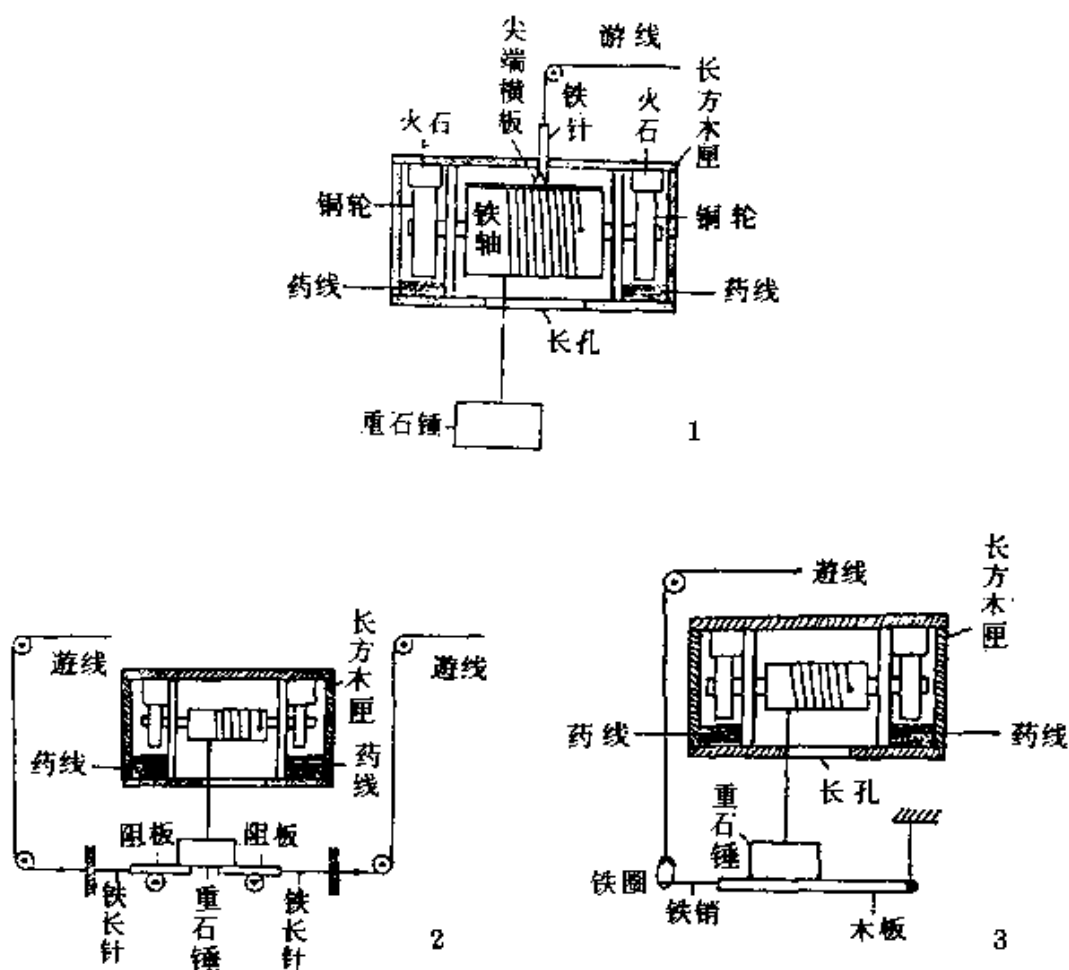


图 12-11 《武备志》三种钢轮发火装置主要部分略图(引自刘仙洲文)

第三节 走马灯与省油灯

一、走马灯

如果加热空气,造成气流,并以此气流推动轮轴旋转,按此原理造成的玩具就是走马灯。清末成书的《燕京岁时记》写道:

走马灯者,剪纸为轮,以烛嘘之,则车驰马骤,团团不休。烛

灭则顿止也。^①

更早的关于走马灯的记载也见 1635 年成书的刘侗《帝京景物略》。

走马灯如图 12-12。在一个或方或圆的纸灯笼中,插一铁丝作立轴,轴上方装一叶轮,其形状类似前述玩具风轮;轴中央装两根交叉细铁丝,在铁丝每一端粘贴人马一类剪纸。当灯笼内点燃灯烛后,热气上升而升成气流,从而推动叶轮旋转,于是剪纸随轮轴转动。它们的影子投射灯笼纸罩上。从外面看,形成“车驰马骤、团团不休”之景况。

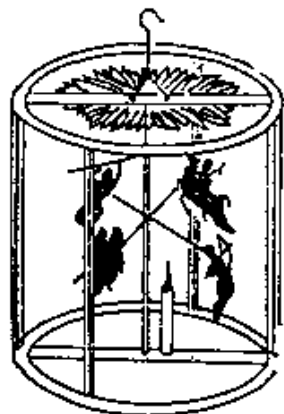


图 12-12 走马灯

走马灯的发明至晚在宋代。宋代许多著作记述了走马灯或马骑灯。吴自牧《梦粱录》在述及南宋京城临安(今杭州)夜市时,指出其中有买卖走马灯的^②。周密《武林旧事》在记叙临安“灯品”时也说:“若沙戏影灯,马骑人物,旋转如飞。”^③可见,走马灯在南宋时已极为盛行,甚至还有不少有关走马灯的诗作。如范成大以“转影骑纵横”^④的诗句赞美它;姜夔则写道:

纷纷铁骑小回旋,幻出曹公大战年;若使英雄知底事,不教儿女戏灯前。^⑤

生活于南北宋之交的金盈之撰《醉翁谈录》一书,其第三、四卷备载北宋京都汴京风物繁华之盛况,凡所见闻,皆有记载。该书列举了

① 富察敦崇:《燕京岁时记·走马灯》(光绪三十二年即 1906 年刊印),北京古籍出版社 1983 年版,第 86 页。也见 1758 年刊印的潘荣陛的《帝京岁时纪胜·正月·岁时杂戏》,明末刘侗、于奕正的《帝京景物略》卷二《城东内外·灯市》(1635 年刊印)。

② 吴自牧:《梦粱录》卷一三《夜市》,浙江人民出版社 1980 年版,第 119 页。

③ 周密:《武林旧事》卷二《灯品》,浙江人民出版社 1984 年版,第 34 页。

④ 范成大:《石湖居士诗集》卷二三《上元纪吴中节物俳谐体三十二韵》。

⑤ 姜夔:《白石道人诗集》卷下《观灯口号十首之七》;也见《西湖志》(雍正十二年序)卷四七《外纪一》。

汴京上元月东华门灯市上各种灯,有“镜灯、字灯、马骑灯、风灯、水灯……”^① 马骑灯即走马灯。这证明北宋已发明了走马灯无疑。

走马灯虽是个玩具,但其原理与近代燃气轮机相同。

二、省油灯

所谓“省油灯”,是在油灯上巧妙地安置一种冷却系统,使灯油不致因灯火燃烧而受热蒸发,从而达到省油的目的。它和走马灯一样,虽是小发明,但却是近代大工业冷却系统的始祖,在机械史上有着重大意义。

宋代陆游在《陆放翁集·斋居记事》中写道:

书灯勿用铜盏,惟瓷盏最省油。蜀中有夹瓷盏,注水于盏唇窍中,可省油之半。

所谓“夹瓷盏”,即灯盏中有夹层装置,可一边盛油点灯,一边注水以冷却。陆游在《老学庵笔记》中进一步写道:

《宋文安公集》^② 中有“省油灯盏”诗。今汉嘉^③ 有之,盖夹灯盏也。一端作小窍,注清冷水于其中,每夕一易之。寻常盏为火所灼而燥,故速干。此独不然,其省油几半。邵公济牧汉嘉时^④,数以遗中朝士大夫。按文安公亦尝为玉津令,则汉嘉出此物几三百年矣。^⑤

这段文字解释了夹灯盏省油原因,也揭示了省油灯的起源年代。在陆游所处的年代,夹灯盏已存世近 300 年,则其诞生当在九世纪末。

① 金盈之:《醉翁谈录》卷三。

② 宋文安公,即宋白(936—1012年)。

③ 汉嘉,今四川芦山。

④ 汉嘉牧邵济其人,不知其详,或许是陆游同时代人。

⑤ 陆游:《老学庵笔记》卷一〇,中华书局校点本,1979年版,第130页。

今四川邛崃县邛窑窑址曾出土夹灯盏,湖南岳阳和天津亦曾出土这样的灯,重庆市博物馆还藏有完整精品^①。其结构如图 12-13。从图中可见,它与陆游的记载完全一致。

在辽宁辽墓中曾出土一件青瓷盏^②(图 12-14),其盏腹分隔为两部分,实则也是一种省油灯。据考,这种灯称为“摩羯灯”,源自印度或中亚。但传入中国后,不仅工艺上得到改进,而且吸收了邛崃省油灯的结构,使之更为完美。^③

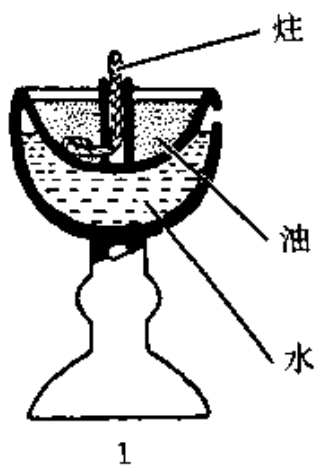


图 12-13 四川邛窑出土省油灯(引自孙机文)

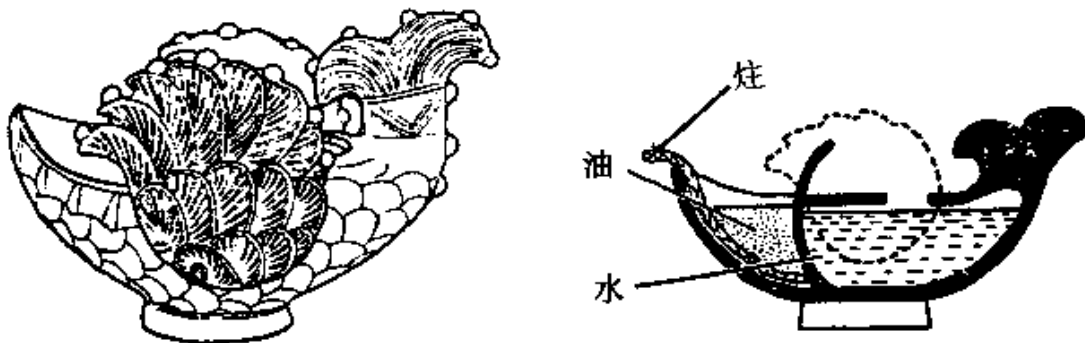


图 12-14 辽宁北票水泉一号辽墓出土省油灯及其剖面图(引自孙机文)

①③ 孙机:《摩羯灯》,《文物》1986年第12期。

② 《辽宁北票水泉一号辽墓发掘简报》,《文物》1977年第12期。

第十三章 计时机械

计时机械或称为机械计时器,是古代发明中最为复杂的科学器械,也是古代科学史和机械工程史中最伟大的成就。它对近代科学的兴起曾经产生重大影响。前几章所述的机械、表明古代人如何将动力驱动连续运动转变成往复运动;而这一章要说明,古代人在将任一动力驱动连续运动均匀地划分为相等时段的运动方面也表现出高度智慧与技巧。古代的机械计时器是近代钟表的祖先。马克思称颂钟表是“一种最奇异的自动机”,它“提供了生产中采用的自动机和自动运动的原理”^①。但马克思所处的时代,人们并不知道这一切都是由古代中国人所发明和奠定的基础。

第一节 宋代以前的计时机械

古代中国有多种计时器。例如,圭表,以日影测定时间;香篆,或称更香,以香炷或其他均匀的可燃性物体的燃烧定时间;鞞弹,或称星丸漏、弹漏,以在弯曲斜面上滚落一定数量的弹球确定时间;刻漏、

^① 马克思:《机器、自动力和科学的应用》,第68、110页。

秤漏,即铜壶滴漏,以流水(或水银)的运动测定时间,虹吸管(古称渴鸟)在这里得到充分应用^①。除此之外,就是本章叙述的机械计时器。其特点是,这种机械具有动力轮、各种相互匹配的齿轮和其他机件;在宋、元及其之前,它又与测天观象的科学仪器浑仪或浑象组装在一起,相当于今日的天文钟。浑仪是测量天体球面坐标的仪器。浑象是演示天体的仪器,相当于现代的天球仪。

一、张衡的水运浑象

东汉张衡在汉安帝元初四年(117年)曾制成一架浑象。十几年后,约公元130年又制成一架水运浑象。该球状仪器的球面“以四分为一度,凡周一丈四尺六寸一分”。也就是,浑象的球体直径达1米以上。而且,在这球体周围和球面上“具内外规、南北极、黄赤道,列二十四气、二十八宿中外星官及日月五纬”^②。《晋书·天文志》还写道:

〔浑象〕以漏水转之于殿上室内,星中出没与天相应。因其关戾,又转瑞轮蓂莢于阶下,随月盈虚,依历开落。

所谓“蓂莢”是神话中的一种植物,它随月盛衰而开落。新月初出,长出一莢;满月时长出十五莢;月圆之后又一天掉落一莢。这样,这种植物就可以预告一个朔望月的日数和月亮的盈虚变化。张衡创制的“瑞轮蓂莢”就是在此思想启发下,以机械轮子和“关戾”(凸轮、齿轮、拨杆等的组合)的转动来显示月相和朔望月的天数,它是前所未闻的一种计时机械。不过,它不是显示一日之中的时辰更点,而是表示一个朔望月的日期。“瑞轮蓂莢”和浑象都是以水力转动的。

^① 戴念祖:《中国力学史》,第267—270、409—422页;关于刻漏,可参阅华同旭:《中国漏刻》,安徽科学技术出版社1991年版。

^② 《晋书》卷一一《天文志》,中华书局校点本,第二册,第281、284—285、288页。

据推测与研究,张衡的浑象是由水轮驱动减速齿轮系使其每天回转一周。在这齿轮系的某一轮轴上安装圆柱,圆柱周围布置 15 个具有凸轮作用的弧形拨板,以拨动套在其外的套筒上按螺旋线安装的 15 个活动蓂莢。轮轴每月转一周,蓂莢就可以“随月盈虚,依历开落”^①。在张衡所处的时代,制造这样的浑象和机械日历计已具有相当技术基础。因为,水碓及其拨杆机构、水排中的水轮及曲柄连杆机构、还有各种齿轮,都是早于他几百年的发明。张衡智慧地利用了它们的原理并设计了一组减速齿轮系。

问题在于,张衡的这套机械是以“漏水”转动的。人们极易从“漏水”二字想到铜壶滴漏,其流水似难以驱动这架宏大而笨重的机械。由于历史文献记载不详,不能释今人种种疑义。于是,有人以浮子、平衡锤和绳索系统复原张衡这套机械^②。这个复原设想类似于古希腊的浮子式升降钟,它虽能作出一些释疑之解,然而,要推动张衡这套机械,其浮子当大于今日游泳池中的救生圈。可想而知,这套仪器就太大了。

张衡的水运浑象和瑞轮蓂莢制成后,传世近 300 年。西晋末“永嘉之乱”时它从洛阳被搬迁到长安。到东晋安帝义熙十四年(418 年),刘宋的军队攻下长安时,这架仪器就又落到刘宋朝开国皇帝刘裕(420 年建立南朝宋)手里^③。但此时,它已是一架残缺不全的仪器了。

① 详见刘仙洲:《中国机械工程发明史》,科学出版社 1962 年版,第 116—120 页。坐落于北京的中国历史博物馆陈列了按照这一思想设计的张衡浑象和瑞轮蓂莢的复原制作。

② 薄树人:《张衡》,载杜石然主编:《中国古代科学家传记》上册,科学出版社 1992 年版,第 80—83 页。薄引陈宇的硕士论文《张衡浑天仪的复制与研究》(中国科技大学 1990 年)。

③ 《宋书》卷二五《天文志》,中华书局校点本,第三册,第 678 页。

二、一行的“水运浑天”

在张衡创制水运浑象近 600 年之后,唐开元十三年(723 年),唐僧一行(俗名张遂)和梁令瓚等人合作制成“水运浑天”。它不但能演示天球和日月的运动,还能按刻击鼓、按辰撞钟。这是一架地道的可控天文钟。《旧唐书·天文志》载:

〔唐玄宗〕诏一行与梁令瓚及诸术士更造浑天仪,铸铜为圆天之象,上具列宿赤道及周天度数。注水激轮,令其自转,一日一夜,天转一周。又别置二轮络在天外,缀以日月,令得运行。每天西转一周,日东行一度,月行十三度十九分度之七,凡二十九转有余而日月会,三百六十五转而日行周。仍置木柜以为地平,令仪半在地下,晦明朔望,迟速有准。又立二木人于地平之上,前置钟鼓以候辰刻,每一刻自然击鼓,每辰则自然撞钟。皆于柜中各施轮轴,钩键交错,关锁相持。既与天道合同,当时共称其妙。铸成,命之曰水运浑天俯视图,置于武英殿前以示百僚。

刘仙洲对一行等人的这架“水运浑天”作了复原研究(图 13-1)^①,其重点在于设想以机械齿轮的旋转运动带动浑象和日环、月环的规律运动,而对于该机械的报时机构并未作太多讨论。或许,这是由于指南车和记里鼓车的结构很容易使人推想得知“水运浑天”的报时机构的情形。如果,考虑到驱动轮(即水轮)的惯性作用得以控制,并且能将驱动轮的连续旋转运动借其他机械而分割成均匀的等时运动,那么,这个复原设想也许可以省去许多中间的齿轮环节。这一考虑在上述引文中是有文字根据的。

一行、梁令瓚的“水运浑天”中不仅“施轮轴”,而且“钩键交错,关

^① 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,第 106—110 页。

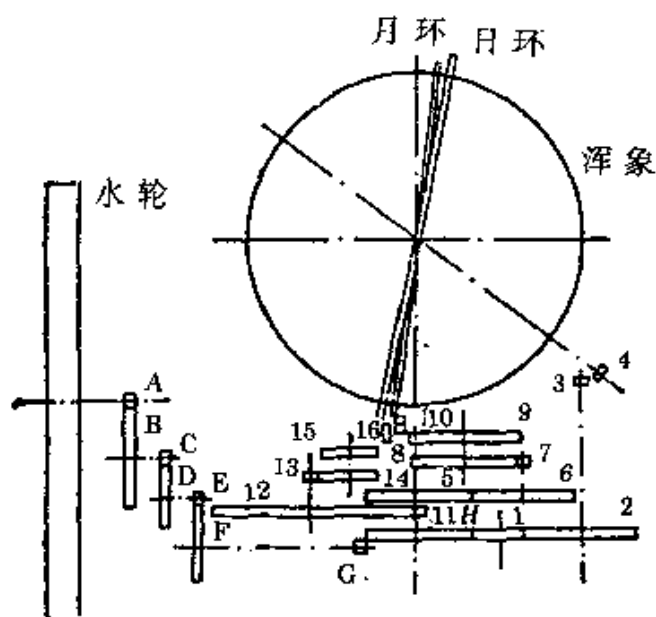


图 13-1 一行的水运浑天推想图。由水轮轴带动齿轮 A,再经过齿轮 B、C、D、E、F、G 和 H 的减速后,H 轮每天转一周。H 轮又带动齿轮 1、2,齿轮 2 的轴带动齿轮 3、4,使浑象每天转一周;由 H 轮立轴上的齿轮 11,再经过齿轮 12、13、14、15、16 的减速后,带动日环转动,日环每天转 $1/365$ 周;而 H 轮立轴上齿轮 5,经过齿轮 6、7、8、9、10 而带动月环旋转。其中,各齿轮齿数比的具体数字参见刘仙洲,第 365 页注①。

锁相持”。这很可能是对控制驱动轮的连续转动而言的。若是,一行和梁令瓚便成为计时机械中擒纵机构的最早的发明者。

一行和梁令瓚等人不仅制造了“水运浑天”,而且在此前还制成黄道游仪。遗憾的是,在一行于 727 年卒后,他们创制的水运浑象“因铜铁渐涩(大概是潮湿生锈),不能自转,遂收置于集贤院,不复行用”^①。颇有趣味的是,这架仪器直到近 300 年后还存于世,它竟然躲过了“天宝之乱”。宋太宗至道元年(995 年),制造浑仪专家韩显符在宋京汴城文德殿鼓楼下还见到这台仪器,大概几经风雨、机件丧失、

① 《旧唐书》卷三五《天文志》,中华书局校点本,第四册,第 1296 页。

残缺不全了,因此、韩显符说它“制极疏略,不可施用”^①。不知它是何时从唐都长安被搬到宋京汴的?

第二节 宋代的计时机械

一、宋代天文钟的历史概述

宋代科学技术曾达到辉煌的高峰,天文钟的制造就是一例。那时不仅多次制成天文钟,而且还诞生了多种有关的科学著作。

公元960年,宋太祖赵匡胤定都汴京,建立北宋王朝。18年之后,即太平兴国四年(979年),巴中(今属四川)人张思训创造了以水银驱动的天文钟。因此,原是司天监学生的张思训被宋太宗诏为司天浑仪丞。可惜,史籍未留有关他的生平事迹。

元祐三年(1088年),在苏颂领导下的一个制造天文钟的小组完成了古代最大型的天文钟,即“水运仪象台”。

苏颂(1020—1101年),字子容,泉州府同安县(今属福建)人,23岁(1042年)与王安石同榜登进士。初任宿州(今安徽宿县)观察推官,后历任今江苏、浙江、河南等地推官、知府、知州、知县,在中央政府曾任礼、工、刑、吏各部官员,直至尚书左丞、右仆射中书侍郎和宰相职^②。苏颂领导制造天文钟,事在其任吏部尚书兼侍读之时。元祐元年(1086年),苏颂奉诏定夺新旧浑仪。通过考察访问,了解张衡、一行和张思训各种天文仪器的优劣,他决定“兼采诸家之说,备存仪

① 《宋史》卷四六一《韩显符传》,中华书局校点本,第三九册,第13502页。

② 见《宋史·苏颂传》,颜中其等主编;《中国宋代科学家苏颂》,吉林文史出版社1986年版;薄树仁、蔡景峰;《苏颂》,载《中国古代科学家传记》上册,科学出版社1992年版,第480—496页。

象之器”^①，访得吏部守当官韩公廉“晓算术，有巧思”^②，便请他一起制作新仪象。韩公廉在得知苏颂意图后，不久撰成《九章勾股测验浑天书》，制成“木样机轮”，激水运轮。在韩公廉的大力支持下，苏颂决定先造木质模型。后依模型造铜质浑天。元祐二年(1087年)，苏颂“置局差官”，即组织了制造该仪器的工作班子；由王沆之任“监造”并管收支财务；由太史局官员周日严、于太古、张仲宣和韩公廉等任“制度官”，即负责机械设计与制作；太史局一些年轻生员袁惟几、苗景、张端、刘仲景和学生侯永和、于汤臣等任测验和实验人员。元祐三年(1088年)五月“造成小样”即实验模型，年底完成大木样制作。据《宋史》记载：

〔仪象之器〕共置一台中，台有二隔，浑仪置于上，而浑象置于下。枢机轮轴隐于中，钟鼓时刻司辰运于轮。上木阁五层蔽于前，司辰击鼓、摇铃、执牌出没于阁内。以水激轮，轮转而仪象皆动。此兼用诸家之法也。^③

这是浑仪、浑象、圭表和报时机械三者合而为一的大型机械。据研究，它总高为35.65尺(约12米)，宽21尺(约6米)，全台为方形底、上狭下广的三层木构建筑，动力机、传动机和工作机均置于其内。^④

大木样机制成后，经过三个月运转测试，与实际天象相合，即诏以铜造浑仪、浑象。与此同时，苏颂、韩公廉还制造了一具世界上最早的假天仪。^⑤这些仪器均在元祐七年(1092年)六月完成。朝廷即“诏三省、枢密院官阅之”。绍圣元年(1094年)十月，又决定建造浑天仪象所，并将苏颂所造仪器置于该所内。^⑥

①③ 苏颂：《进仪象状》，见其著《新仪象法要》。

② 《宋史》卷三四〇《苏颂传》，中华书局校点本，第三一册，第10866页。

④ 王振铎：《宋代水运仪象台的复原》，《科技考古论丛》，第238—274页。

⑤ 王振铎：《中国最早的假天仪》，同上书，第278—286页。

⑥ 《宋史》卷八〇《律历志》，中华书局校点本，第六册，第1905—1906页。

苏颂《新仪象法要》一书当完成于元祐七年。该书三卷：上卷介绍浑仪；中卷介绍浑象；下卷介绍水运仪象台，包括整体和分部机构、驱动与擒纵装置、报时装置。全书绘有图 63 幅：上卷浑仪总图 4 幅，分图 13 幅；中卷浑象总图 1 幅，分图 4 幅，以及星体图 14 幅（其中星图 5 幅，四时昏晓中星图 9 幅）；下卷水运仪象台的台体总图 2 幅，分图 21 幅，附别本图 4 幅。在这些图中，机械图占 49 幅。王振铎曾指出：“这些珍贵的附图是我国遗存最早的机械图纸，是用透视或示意办法并标注名称表达的。”“这些古老的机械图纸表达的方法虽多与今不同，但通过我们的研究证明，它一点一线都有根据，与书中所记尺寸数字是符合的。”^①可以说，这也是现今遗存的世界第一本描述天文钟制造的插图科学著作。

苏颂的《新仪象法要》先在北方流行，而宋南迁之后已极为稀少。南宋孝宗乾道八年（1172 年）始有施元之在江苏吴兴刻板。清初学者钱曾藏有此刻本，并精心雕板再刊。1772 至 1781 年间完成编纂的《四库全书》编录此书，其《提要》称，该书“流传秘册阅数百年，而摹绘如新，是固宜为宝贵也”。之后，又有张海鹏、钱熙祚刻本。

据《宋史·艺文志》载，另有阮泰发《水运浑天机要》一卷。该书可能是宋代第二本有关天文钟制造的书，但它未留传下来。

在苏颂卒后一年，即崇宁元年（1102 年），开封祥符人王黼登进士。是年，他曾“邂逅方外之士于京师，自云王其姓，面出素书一，道玑衡之制甚详”^②。这位王某人的素书大概是史籍记载的第三本有关天文钟的书。虽然王黼获得此书，但他并没有制造天文钟的任何机械才能。然而，他于宣和六年（1124 年）令应奉司依其所得素书造成小样（木制模型）。当小样在两个月内完成后，“又著为成书”。这大

^① 王振铎：《科技考古论丛》，第 274 页。

^② 《宋史》卷八〇《律历志》，中华书局校点本，第六册，第 1906 页。

概是第四本有关天文钟的著作。然后，徽宗帝下诏，命王黼为总领、内侍梁思成副之，讨论制造该器械^①。可是，时隔不久，金兵大举南侵，北宋王朝危在旦夕，王黼亦性命难保，这架天文钟的制造大概只好流产了。

回头再看看苏颂的水运仪象台的命运。

绍圣初年，水运仪象台刚制成、运转不几年，惯于欺上胁下的尚书左丞蔡卞议欲毁之。好在其下属中尚有人惜仪象台精密，未曾言听计从。虽然，当蔡京、蔡卞兄弟把持朝政之时，“无一人敢与此器为地矣”^②。但是，直到金兵陷落汴京之时，水运仪象台并未受损，一直在正常运转之中。

水运仪象台难逃靖康之乱的浩劫。《宋史·天文志》载：

靖康之变，测验之器尽归金人。

《金史·历志》称：

金既取汴，(水运仪象台等所有仪器)皆辇致于燕，天轮、赤道牙距、拨轮悬象、钟鼓司辰刻报、天池水壶等器久皆弃毁，惟铜浑仪置之太史局候台。

《宋史》对水运仪象台的记述寥寥几句，而《金史》则洋洋长篇。追其故，实乃有关制造的图书秘档及仪器本身皆藏于金朝廷之因。水运仪象台虽已损坏，但其中铜浑仪经过调整后继续在金朝被使用。明昌六年(1195年)，台遭雷击，台体中裂，浑仪仆落台下。经修理，置浑仪于原处，大概还在使用之中。迄蒙古军攻燕，金朝廷贞祐南渡，水运仪象台既不能再经受辇载之振摇，又不忍熔毁于铜铁，遂留在燕让蒙古军接收了。直到元代郭守敬制作各种仪器时，它尚存于世。

^① 《宋史》卷八〇《律历志》，中华书局校点本，第六册，第1906—1908页。

^② 朱弁：《曲洧旧闻》卷八。

二、张思训的浑象

在述及一般的历史之后,我们按照历史顺序一一叙述天文钟本身的内部结构。

张思训于 979 年设计的浑象,于 980 年制成。据《宋史·天文志》载:

其制:起楼高丈余,机隐于内,规天矩地。下设地轮、地足;又为横轮、侧轮、斜轮、定身关、中关、小关、天柱;七直神,左摇铃,右扣钟,中击鼓,以定刻度。每一昼夜,周而复始。又以木为十二神,各直一时,至其时则自执辰牌,循环而出,随刻度以定昼夜短长;上有天顶、天牙、天关、天指、天抱(托)、天束、天条,布三百六十五度,为日、月、五星、紫微宫、列宿、斗建、黄赤道,以日行度定寒暑进退。

这段文字所记载的机械部件和齿轮名称比唐代一行和梁令瓚的“水运浑天”记载要详细得多。其中的“地轮”可能和苏颂水运仪象台的“枢轮”即动力轮相类似。“定身关、中关、小关”一类机械也可能与苏颂的天关、天锁的功效雷同,是用于控制“地轮”的惯性运动的,也就是起擒纵器的作用。“定身关”一词生动地表述了控制“地轮”转动的意义。而在报时机械之上的“天牙”、“天关”、“天束”、“天条”等机件又可能是操纵浑仪或浑象的设置。以木偶制成的“七直神”、“十二神”是报时机件。张思训的这架天文钟与一行不同之处,是以水银推动动力轮;同时,“著日月象,皆取仰视”。《宋史·天文志》还说:“按旧法,日月昼夜行度皆人所运行,新制成于自然,尤为精妙。”看来,张衡和一行等人的浑象都有部分需人操作或调整,而张思训设计了一种全自动的浑象。

110 年后,苏颂制造了水运仪象台。而张思训的仪器当时还在,

苏颂在《进仪象状》中说它“机绳断坏,无复知其法制”。然而,对于通晓算术和机械制作的韩公廉而言,它无疑起了很大的参考作用,水运仪象台中许多机件名称亦可能是沿袭张思训所用词,就这个意义上说,在中国古代天文钟的制造方面“张思训首创其式”^①的评价是很恰当的。

可惜,有关张思训仪象的文字记载过于简略,更无图留下来供我们研究。苏颂的《新仪象法要》在人类文化史上就显得更为可贵了。

三、苏颂的水运仪象台

从外表看,苏颂、韩公廉的水运仪象台类似三层楼房的木构建筑。上层置浑仪,并有板屋以防风雨;中层置浑象;下层又分为五小层,每层均有报时木偶(见图13-2、5、6)。所有齿轮及其传动系统、报时系统、枢轮及其动力系统皆装置于这一木构建筑内(图13-3、4、7)。图13-2、3、4、7、9,是苏颂《新仪象法要》中绘的图;图13-5、6,是王振铎的复原设计;图13-8、10,供读者了解齿动系传动情况作参考。对照古今两种绘图,既可以了解苏颂、韩公廉创作之精细与伟大,又可以更好理解水运仪象台内机机构及传动情形。

先从动力系统谈起。如图13-5、6,在画面所示的北面,有一组车水机械,由升水下轮、升水下壶、升水上轮、升水上壶、河车和天河组成。由人操纵河车(即舵盘)将水由升水上、下轮(即筒车)逐级提高,灌入天河(即受水槽)中。在河车的东面,有一组类似“铜壶滴漏”的器械,它包括天池、平水壶、渴鸟和泄水管。天河的水流入天池,再到平水壶。平水壶的水缓慢地注入枢轮边的庠斗中。当庠斗被注入一定水量后,由于其重力作用使枢轮发生转动。随枢轮的转动,庠斗

^① 苏颂:《新仪象法要·进仪象状》。

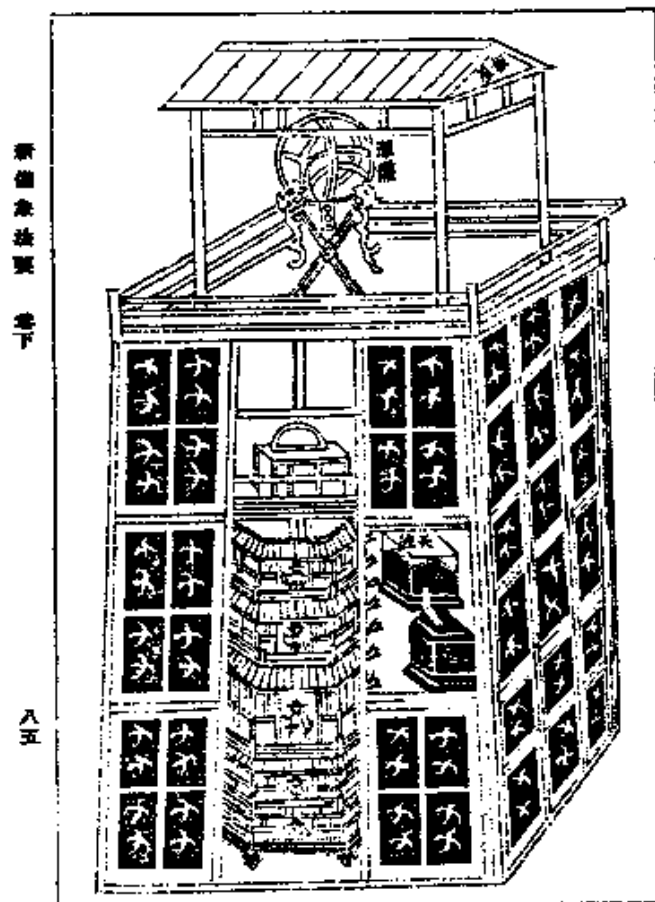


图 13-2 水运仪象台台体图(《新仪象法要》绘)。可见上层浑仪,中层浑象,下层各小层的报时木偶。

内的水会因其倾斜而泄出,水流落退水壶中。再由水槽将退水壶的水引入升水下轮而重复被利用。

枢轮,即整个台内各种机械的动力轮。其直径一丈一尺(约 3 米多),由束以 3 鞞上的 72 条木辐、挟持着 36 个水斗组成。每壶斗长一尺、阔五寸、深四寸,并带一铁拨子以拨动其旁的天衡关舌。枢轮的转动也就是其轴端名为地轂的齿轮的转动。地轂与天柱的下轮直角啮合。天柱,也就是全台的转动立轴,它除有下轮外,还有中轮、上轮(参见图 13-7、8)。中轮带动报时机械和浑象的拨牙机轮。上轮通过前轂(前轮)、后轂(后轮)而带动浑仪。

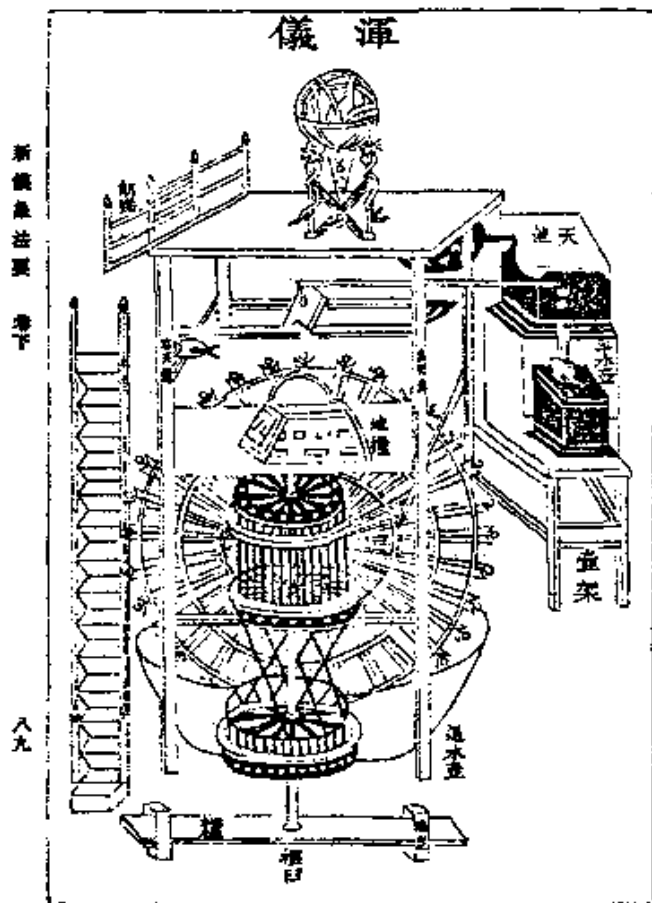


图 13-3 水运仪象台内部机构图:前纵列一组齿轮为报时轮,其后一大轮,即枢轮(《新仪象法要》绘)。

图 13-4 的“昼夜机轮”即报时机轮,也见图 13-3 和图 13-5。它的立轴(图 13-8 中的“机轮轴”)底端由枢臼承托,并由地极、地足固定枢臼。因此,机轮轴可自由转动。机轮轴的上端由“天束”木架活性地匡定。如图 13-8,这机轮轴的顶端为“天轮”的轴,机轮轴的转动带动“天轮”。天轮通过一个中间齿轮和浑象的赤道牙(即赤道齿轮)相啮合,从而也带动浑象转动。机轮轴下方除装有与天柱的中轮相啮合的拨牙机轮外,从上至下还有:时刻钟鼓轮,其“上安时初正百刻拨牙,以击钟、鼓、铃”;时初正司辰轮,“上安时初十二司辰,时正十二司辰”;报刻司辰轮,“上安百刻司辰”;夜漏金钲

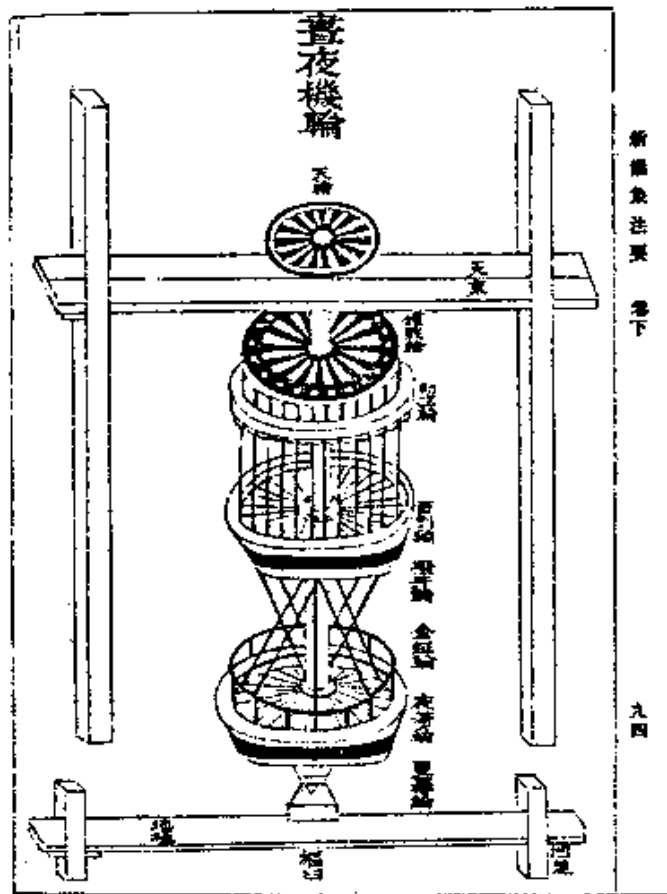


图 13-4 水运仪象台的报时轮机构(《新仪象法要》绘)

轮，“上安拨牙，以击夜漏金钲”；夜漏箭轮，“以截金钲夜漏箭轮”；夜漏更筹司辰轮，“上安日出入昏晓待旦更筹司辰”^①。整个昼夜机轮和浑象的旋转运动都是通过拨牙机轮和天柱中轮的啮合、从而带来了枢轮的转动动力。

水运仪象台南面的五层木阁是显示时间的装置，由各层中服饰不同的木偶在不同时间或敲钟、或鼓击、或摇铃以告示具体时间。五层木阁由上而下是：第一层，时刻钟鼓轮带动 3 个拨子以拉动 3 个木偶手臂，时初摇铃，时正扣钟，刻至击鼓；第二层，时初正司辰轮，轮辋

^① 苏颂：《新仪象法要》卷下《昼夜机轮》。

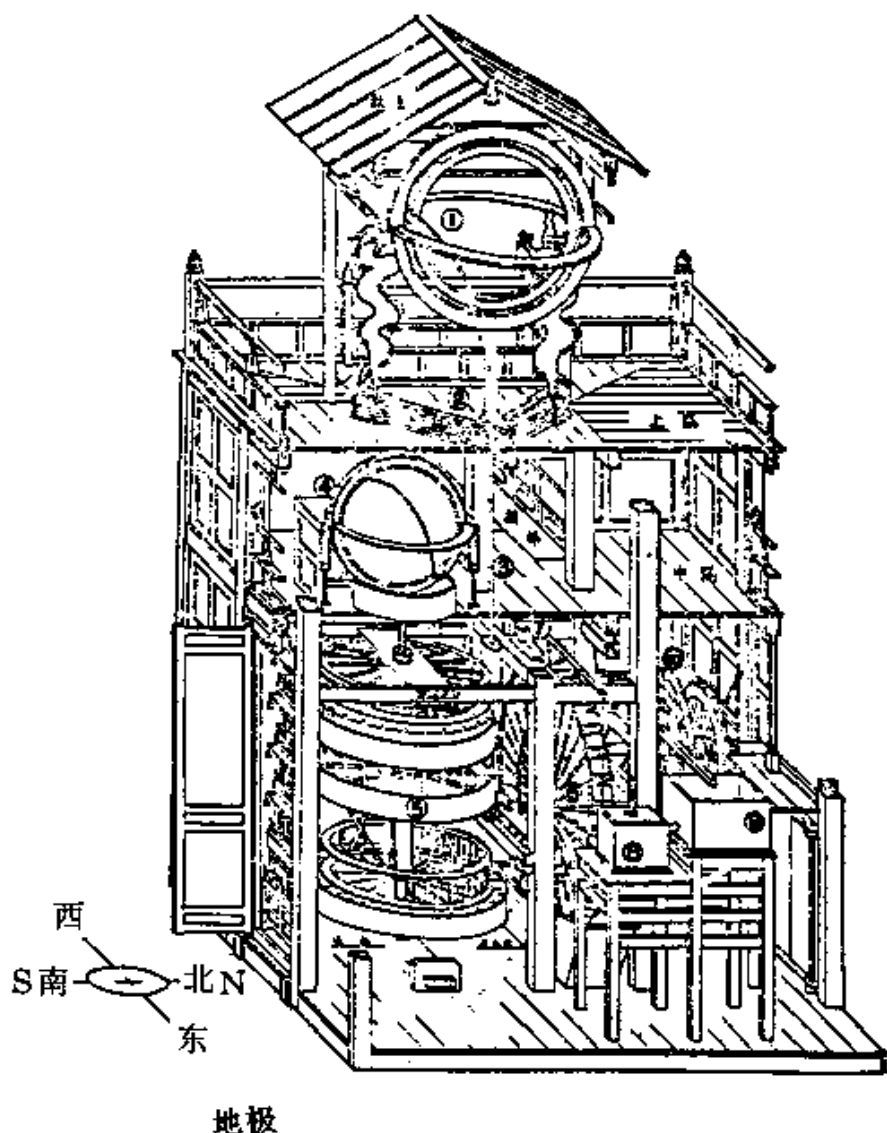


图 13-5 水运仪象台复原透视图(王振铎复原): (1)浑仪; (2)鬘云,圭表; (3)天柱; (4)浑象,地柜; (5)昼夜机轮; (6)枢轮; (7)天衡,天锁; (8)平水壶; (9)天池; (10)河车,天河,升水上轮。各层报时木偶在南面。

边挂 24 个司辰木偶,手执辰牌,牌面书写十二支初、正时刻;第三层,报刻司辰轮,轮辋边挂 96 个司辰木偶,除其中 24 个木偶报时初外,余皆报刻;第四层,夜漏金钲轮和夜漏箭轮,前者轮辋上按二至、二分打疏密不同的孔洞,孔中插入更筹木箭杆。利用箭杆与拨子作用,拉动木偶击钲报更数;第五层,夜漏司辰轮,轮辋上设可移动的 38 个司

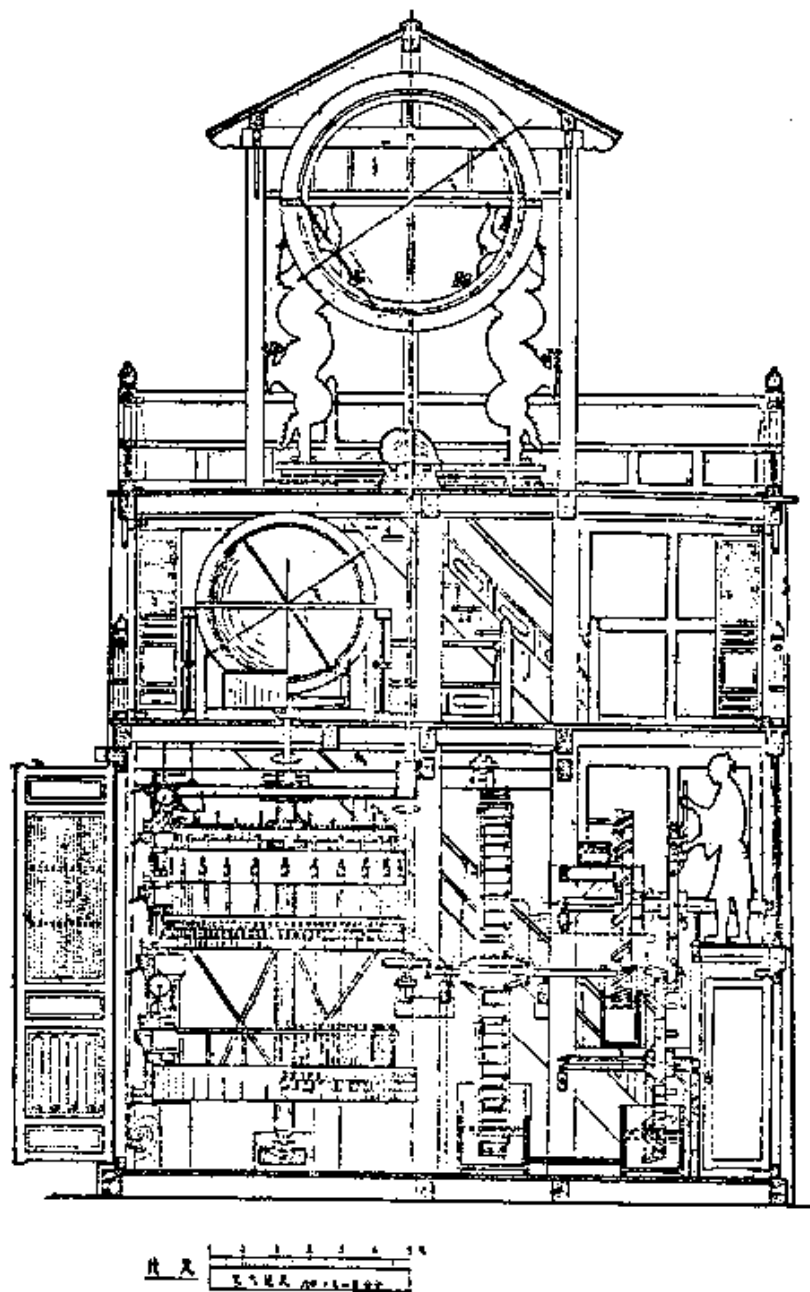


图 13-6 复原水运仪象台东立面图(王振铎复原)

辰木偶,其位置据前层箭筹而定,即随季节变化排列。它是为宫中布置朝会而特设的待旦时刻。五层木阁外有双门。打开双门,见木阁各层彩色服饰的木偶、听到报时的不同乐声。这个报时机械具有高度艺

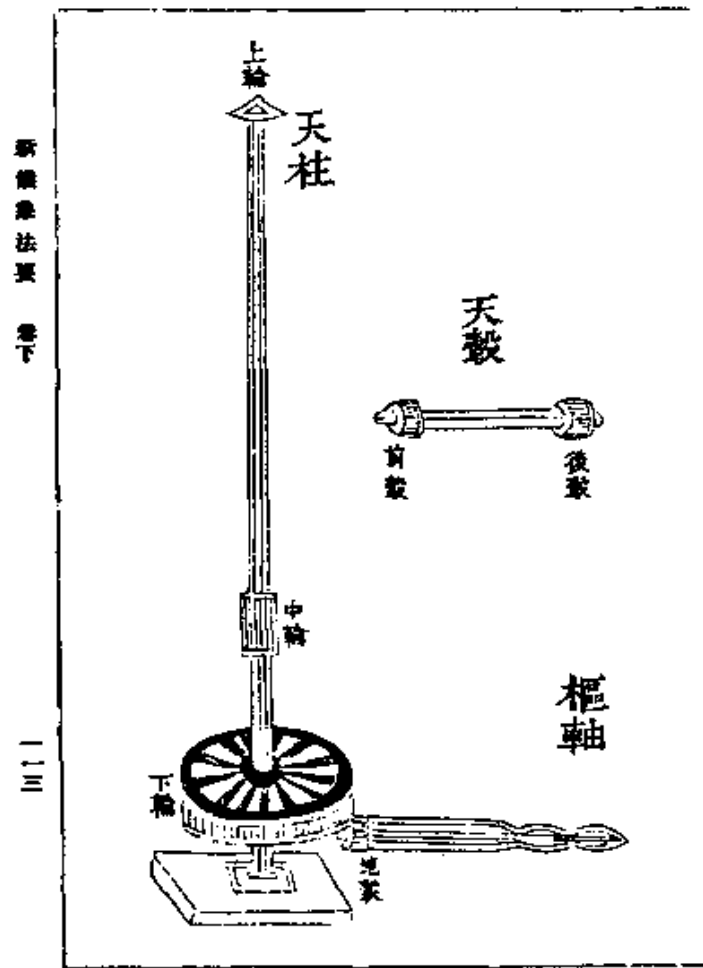


图 13-7 《新仪象法要》绘“天柱”等机件，其传动关系见图 13-8。

术性，也是历史上计时机械的重大创造。^①

再回头看水运仪象台的擒纵装置，它是如何将枢轮的连续转动分为均匀、间隔的等时运动。参看图 13-9 和 13-10，苏颂称作“天衡”的装置与现代机械钟表中的擒纵机构的作用完全相似。当枢轮周边的某一水斗承接来自平水壶的水而不足一定重量时，左天锁顶住枢轮某一轮辐，使枢轮不转动；当该水斗受接一定水量，枢衡（实为杠

^① 王振铎：《宋代水运仪象台的复原》，《科技考古论丛》，文物出版社 1989 年版，第 238—274 页。

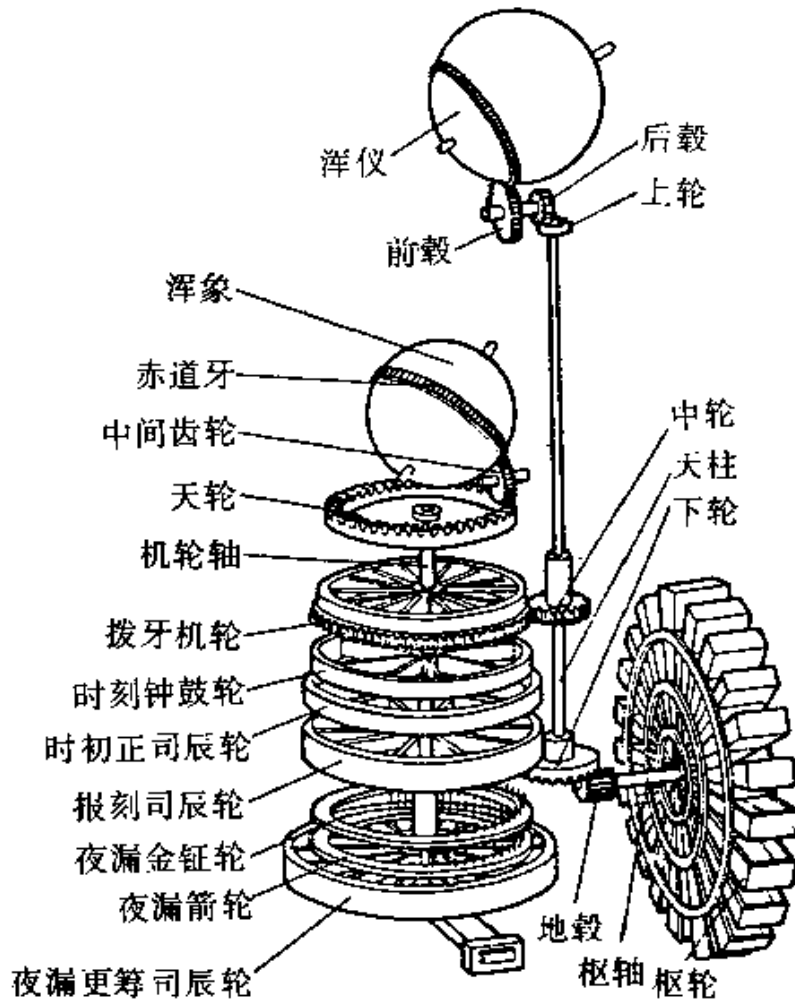


图 13-8 水运仪象台的齿轮传动系统(引自《中国大百科全书·机械工程》)

杆)另一端的枢权(即重锤)不足以平衡斗内水重,该水斗向下倾斜并压迫格叉和关舌向下降,同时通过天条拉下顶上一根杠杆天权端而使天关升起,天关又吊起左天锁,于是,枢轮转动。枢轮转动一个受水斗距离时,枢权下垂,格叉与关舌上升,随之天条又使其上杠杆的天关端下垂,左天锁又顶住了枢轮的转动。在这个天衡装置的约束下,枢轮只能是装满一斗水转动一斗之隔。与左天锁相对的右天锁可防止枢轮倒退。枢权与天权是天衡中上下两根杠杆的平衡重锤。枢权

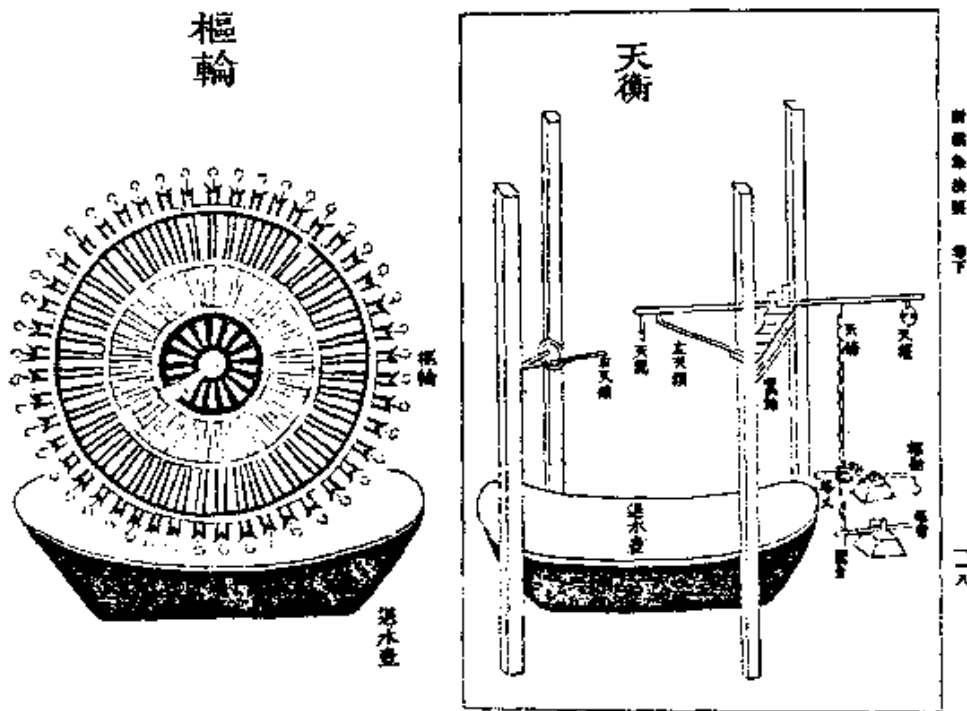


图 13 - 9 水运仪象台的枢轮及其“天衡”装置(即擒纵机构)、“天衡”的实际位置紧挨着枢轮外侧(《新仪象法要》绘)。

的轻重决定了水斗受水的多寡,对于来自平水壶的隐流而言,也就决定了流水的时间间隔或枢轮转动一水斗距离的时距。因此,通过调节枢权的重量就可以调节枢轮间歇转动的时距,从而也调节了整个水运仪象台的运转速度和报时机械的准确性。而天权的轻重又影响到天关和天条的拉力或张力,从而影响到左天锁和枢轮的灵敏度。苏颂的天衡装置是计时器或钟表史上的一项伟大发明。

李约瑟博士对中西钟表史作了仔细研究。他指出,公认的欧洲第一具成功的立轴摇杆式擒纵机构装置的时钟诞生于十四世纪初叶,此前在欧洲一直是空白。因此,擒纵机构在欧洲的起源问题成为一个神秘的课题。苏颂的擒纵机构比欧洲早三个多世纪;张思训的擒纵机构比欧洲早四个世纪;而唐代一行和梁令瓚的天文钟中若能肯定其擒纵机构,则比欧洲早七个世纪。而从十四世纪初欧洲有擒纵机构的

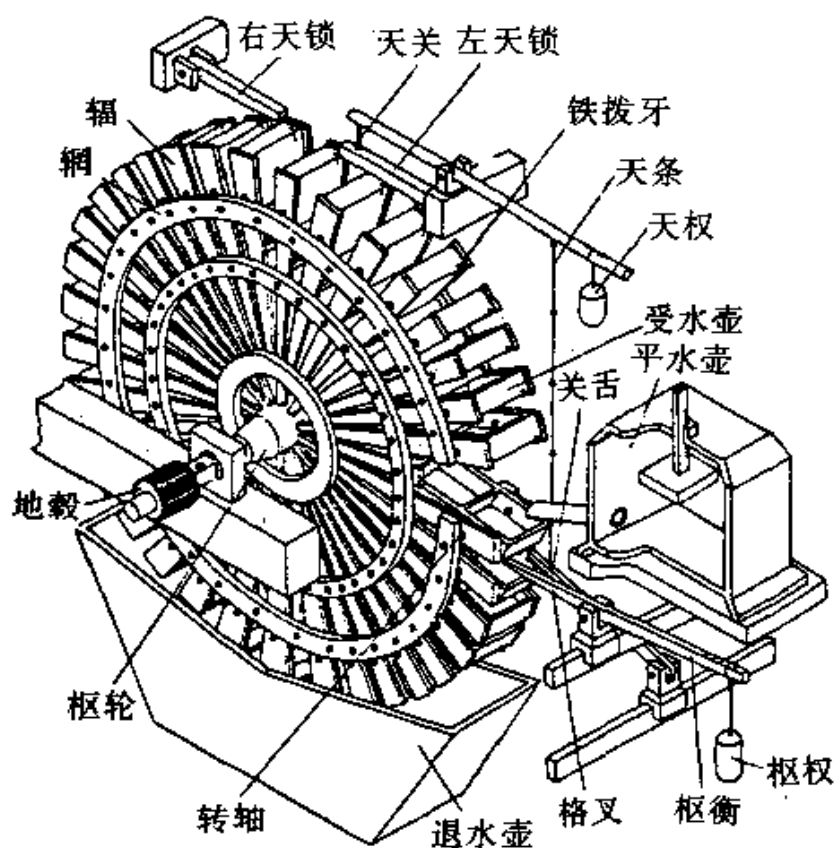


图 13-10 水运仪象台的枢轮及其擒纵机构推想图。由平水壶注水于枢轮外沿的庠斗内,每一庠斗都是可倾式受水壶。(引自《大百科全书·机械工程》)

时钟问世以来,迄 1955 年李约瑟博士发现苏颂天文钟及其擒纵机构、从而找到欧洲有关机构的真正起源,其间苏颂和韩公廉的伟大贡献整整被埋没了六个世纪。他问道:“在世界历史中中国人对时钟制造的贡献怎么竟被埋没?”^①

^① Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol.4, Part 2, pp. 435-436, 444-446.

四、宣和玑衡

宣和六年(1124年),王黼依据方士王某素书由应奉司制成一“玑衡”小样,实则为天文钟模型。据《宋史·律历志》载,该仪器除了“与天象吻合,无纤毫差”的浑象之外,

玉衡植于屏外,持扼枢斗,注水激轮,其下为机轮四十有三,钩键交错相持,次第运转,不假人力,多者日行二千九百二十八齿,少者五日行一齿,疾徐相远如此,而同发于一机,其密殆与造物者侔焉。^①

显然,这里描述的是擒纵装置、动力轮,并列举了其中两个齿轮的齿速。

根据王黼奏疏,该玑衡与一行的仪器不同之处:一行的机械零件以铜铁作成,该玑衡以坚木和美玉之类材料作成;一行的浑象外络二轮,以缀日月,月体常圆;该玑衡日月附黄道上。如蚁行砵上,且月体圆缺隐见与天象合;一行的浑象只以钟鼓报刻辰,该玑衡“为司辰寿星,运十二时轮,所至时刻,以手指之,又为烛龙,承以铜荷,时正吐珠振荷,循环自运”。

很可惜,由于前已述及的原因,作为制造玑衡的总领王黼终未完成制作,只是停留在小样阶段。当时制作了三件小样,“一纳御府,一置钟鼓院,一备车驾行幸所用”。

它们的命运大概都和苏颂的水运仪象台一样,被金人掠劫北上而毁。

^① 《宋史》卷八〇《律历志》,中华书局校点本,第六册,第1906—1908页。

第三节 宋代以后的计时机械

如果将苏颂、韩公廉的天文钟作为古代计时机械发展的高峰,那么,宋以后,计时机械开始从天文钟中独立而出。苏颂成功地将计时器和天文仪器结合在一起,而比胡克(Robert Hooke, 1635—1703年)先行六个世纪,比夫琅和费(Joseph von Frahofer, 1787—1826年)先行七个世纪。胡克于1670年第一次建议制造自动调整的钟机传动望远镜,夫琅和费于1824年发明了第一架有效的钟机传统装置。可见,中国人在计时机械方面走了一条先复杂、后简单的路。相比之下,单纯的计时器比天文钟要简单些。而西方的计时机械的历程恰与中国人相反。在这里要评论谁优谁劣、那条科技路线才是捷径,可能要费力不讨好。令人惊讶的是,这两条路线最终都汇成近代科学的洪流之中。我们先看看宋代以后中国机械计时器的情形。

一、元代的灯漏与宫漏

郭守敬(1231—1316年),字若思,顺德邢台(今属河北)人,元代天文学家、仪器制造师和水利专家^①。他所制造的计时器称为“大明殿灯漏”,或简称“灯漏”,制于其晚年(一说为1276年)。

据《元史·天文志》载,灯漏外表看像个“灯毬”,“内分四层,上环布四神”(这一层次布置类似苏颂的报时机构五层木阁,郭守敬省去的一层无疑是苏颂设计的为宫廷早朝定时间的夜漏司辰轮)。在灯毬

^① 陈美东:《郭守敬》,载《中国古代科学家传记》下册,科学出版社1993年版,第667—681页。

之上有“曲梁”和“中梁”。曲梁“中设云珠,左日右月。云珠之下,复设一珠。梁之两端,饰以龙首,张吻转目,可以审平水之缓急”。这大概是驱动水轮运转的供水装置;中梁“有戏龙珠二,随珠俯仰,又可察准水之均调。凡此皆非徒设也”。这可能是擒纵装置,类似苏颂水运仪象台中的“天衡”。其报时装置是,“分百刻,上列十二神,各执时牌,至其时,四门通报。又一人当门内,常以手指其刻数。下四隅,钟鼓钲铙各一人,一刻鸣钟,二刻鼓,三钲,四铙,初正皆如是”。整个灯漏的动力轮即“其机发隐于柜中,以水激之”。^①

由此可见,郭守敬的灯漏已和天文仪器分家,机械设计的重点在于计时。其名称为“漏”,表示此机械的功用仅与古代“铜壶滴漏”相同,而不包括浑象、浑仪一类天文仪器在其中了。

在郭守敬灯漏制成后约半个世纪,元顺帝妥懽帖睦尔于至正十四年(1354年)创造“宫漏”。据《元史·顺帝纪》载,宫漏“约高六七尺,广半之,造木为匱,阴藏诸壶其中,运水上下”。虽文献记载不详,有关动力轮丝毫未涉,但从“运水上下”一语可知其继承苏颂以水推动枢轮的传统。宫漏的报时系统是完全按照宫廷面貌设计的,设“西方三圣殿”(即孔子、老子和佛祖)和“日月宫”,内有木偶神人按时刻报时^②。可见,报时装置也沿袭唐一行以来的木偶机械。元顺帝是历代帝王中罕见的有机械才能的人,他不仅自制宫漏,还曾设计一种新式龙舟,当其行时,“龙首、眼口、爪尾皆动”。^③

从元代开始,计时机械从天文钟中独立而出,这是科学史发展的必然,而不是元代开始无人会制作天文钟。

^① 《元史》卷四八《天文志》,中华书局校点本,第四册,第994—995页。

^{②③} 《元史》卷四三《顺帝纪》,中华书局校点本,第三册,第918页。

二、明代的计时机械

据《明史·天文志》载,当明太祖朱元璋刚推翻元朝、平定天下之际,“司天监进水晶刻漏,中设二木偶人,能按时自击钲鼓。太祖以其无益而碎之”。自然,就其设计而言,水晶刻漏当是元代末年的成果。而作为开国皇帝的明太祖的如此举动,对明代天文学和天文机械发展的消极影响,是可想而知的。这水晶刻漏的详情及简单绘图见之于明中后期周述学的《神道大编历宗通议》之中^①。这个独立的计时机械的动力轮、供水系统、报时方法都继承了苏颂、郭守敬的传统。

明代在计时器上的重要贡献是詹希元在明初设计制造了一种沙漏。《明史·天文志》载:

明初,詹希元以水漏至严寒水冻辄不能行,故以沙代水。然沙行太疾,未协天运,乃以斗轮之外复加四轮,轮皆三十六齿。而宋濂的《五轮沙漏铭序》对其描述更详细些。它指出“初轮”(即原动轮)大小,“上环十六斗,斗广八分,深如之”,初轮轴长、轴粗及其端设6齿的小齿轮以带动第二轮;第二、三、四轮的齿数36,每轮的轴端都有6齿的小齿轮,以带动下一齿轮。第五轮称“中轮”,其齿数36外,轴端“不设齿,挺然上出,以贯测景盘”。所谓“测景盘”即今日钟表面盘,“盘列十二时,分刻盈百”。除测景盘能指示时刻外,第五轮附设击鼓拨牙,以拨动能击鼓鸣钲的活动木偶。除测景盘外露,整个计时器都有外壳包装。据《五轮沙漏铭》载,詹希元是该计时器的最初设计者,他的同时代人郑永作过改进。宋濂作铭曰:“挈壶建漏测以水,用沙易之自詹始。水泽腹坚沙弗止,一日一周与天似。郑君继之制益美,

^① 周述学:《神道大编历宗通议》卷一七(该书也称《神道大编》)。也参见白尚恕、李迪,《周述学在计时器方面的贡献》,《自然科学史研究》1984年第2期。

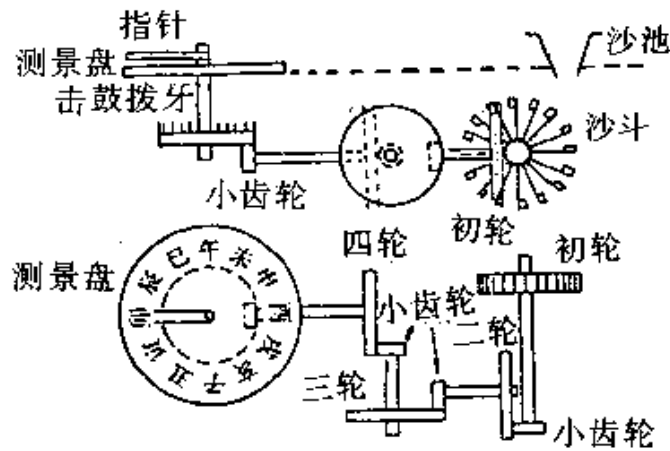


图 13-11 詹希元五轮沙漏复原设计(引自刘仙洲文)

请惜分阴视斯晷。”^①

刘仙洲对五轮沙漏作了复原设计,如图 13-11。由小齿轮和二、三、四轮齿数可知,每对齿轮转速比均为 6,整个齿轮系的转速比则为 6^4 ,即 1296。因此,每天测景盘转 1 周,初轮应转 1296 周,即每小时转 54 周。对于装设沙斗的初轮而言,1 分多的时间转 1 周是极为缓慢的。为此,沙池的漏斗必定设计极小,因而造成堵沙现象。^②

在詹希元之后,周述学提出以增大流沙孔防止堵沙的改进方法。随流沙孔增大,或则增加齿轮;或则增加齿数、扩大轮径。周述学提出了五种措施^③。其中之一是,将詹希元的五轮改为六轮,其轮齿数改为 30,小齿轮不变,则每对大小齿轮的齿数比为 5,五对齿轮组成的齿轮系的转速比为 3125。这样,初轮每小时转 130 周多一些。

五轮沙漏是以减速齿轮系使初轮与测景盘的转速达到与时间吻合的目的。其中是否需要由擒纵装置控制初轮的运动,意见不一。李

① 《宋文宪公全集》卷四七《五轮沙漏铭序》,四部备要本。

② 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,第 114—115 页。

③ 详见白尚恕、李迪:《周述学在计时器方面的贡献》。

约瑟认为,有擒纵机构;刘仙洲认为,不一定要有擒纵机构。历史文献对此未有详载。无论如何,沙漏的内部机构、齿轮的安装及测景盘的出现,都极为类似后来的钟表。

测景盘可能是古代传统的继续。唐代张鷟的《朝野僉载》记道:

则天如意(692年)中,海州(今江苏连云港、东海、沭阳等县市的部分地区)进一匠,造十二辰车。回辕正南,则午门开,马头人(午时属相)出。四方回转,不爽毫厘。^①

宋代工部尚书陶穀曾记载唐内库有“十二时盘”,该盘边缘的物象随时辰更迭而变^②。南宋赵希鹄曾记述北宋范仲淹家藏“十二时镜”。时正,镜背标识时间的棋子有光。又记“士人家藏十二时钟,能应时自鸣”^③。这些记载中的机械,因记述过于简略,不明其详。然而其中记载的各种显示时盘是清楚的。詹希元和周述学的测景盘正是这些更早的显示时盘的发扬光大。

从周述学开始,也即是利玛窦进入中国之前几十年,时钟制造出现了中西合璧的现象。周述学在其著中描述了一器称为“浑仪更漏”的计时器,其中的浑象及其带动浑象的齿轮安装方法都极为类似苏颂的水运仪象台中的浑象部件,但其动力机构却是类似古希腊阿基米德时代的浮子。浮子系于绳索,浮在水面,绳索的另一端系于原动轮(周述学称之为“地轮”)的轮轴(“地轴”)上。如同铜壶滴漏中平水壶的水逐渐减少,浮子及其重物下降,从而带动地轴和地轮旋转。^④

利玛窦入华,带来了西方时钟机械,当时中国人将CLOCK译为“自鸣钟”。明末王徵结合西方时钟机械和传统计时器创制了“轮壶”

① 转引自李昉等编:《太平广记》卷二二六《十二辰车》。

② 陶穀:《清异录》卷二。

③ 赵希鹄:《洞天清录集·古钟鼎彝器辨》。

④ 周述学:《神道大编历宗通议》卷一八,也见前引白尚恕、李迪文。

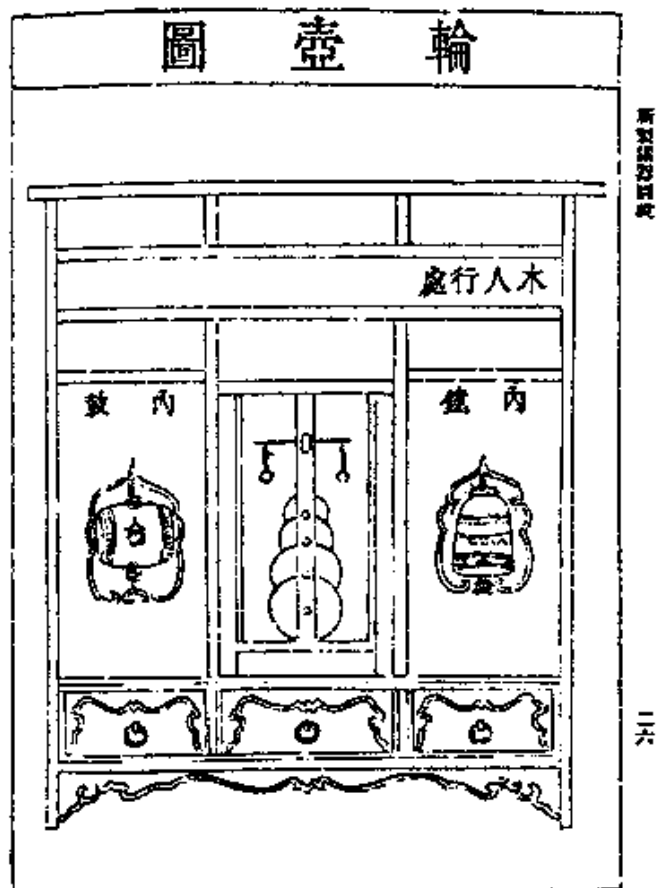


图 13 - 12 王徵绘“轮壶”，可见其中央立轴上齿轮，及其上的摇杆式擒纵机构；“木人行处”即报时木偶所在区。由铅弹推动的原动轮未画出。

(图 13 - 12)。^①该轮壶应用了西方立轴摇杆式擒纵机构；又有以铅弹滚落(类似沙漏中的沙)推动的原动轮，由原动轮带动报时木偶。后者显然是中国传统的设计。由于中国人已习惯或喜欢时钟机械上敲锣打鼓出更牌的热闹场面，因此，初期传教士来中国所设计并制造的时钟，特别是那些进贡朝廷的时钟，都要添加中国传统的报时装置。其后，中国人也学会在时钟机械中装发条。清代齐彦槐曾制造一具恒星

① 王徵：《新制诸器图说·轮壶图说》。

天文钟,其内动力机构称为“钢肠”,也即弹簧发条^①。鸦片战争前后,上海、苏州、广州等地所产时钟可以和舶来品相媲美,也威胁着舶来品的销路。十八世纪末,上海徐朝俊撰《自鸣钟表图说》,为中国近代第一本有关制造钟表的图书。徐朝俊在该文序言中称,其家族已有五代专制时钟历史^②,徐朝俊是徐光启的五世孙。

① 梁章钜:《浪迹丛谈续编》卷八《自鸣钟》;也见史树青:《齐彦槐所制天文钟》,《文物参考资料》1958年第7期。西方时钟机械,以弹簧代替早先的下落重物作为动力,始于十五世纪末叶,十六世纪前25年间才最终获得圆满解决。

② 徐朝俊:《高厚蒙求》卷三《自鸣钟表图说》。

第十四章 地动仪和自动机械

如前所述的指南车、计时器等，都可以看作是古代自动机械。本章所述包括两个方面内容：一是与宫廷娱乐或显示豪华有关的机械，例如自动木偶或傀儡、机械玩具、游戏车船等等；另一是与生产或生活有关的自动机械，如地动仪、捕鼠器，等等。这些机械大多受到朝廷赞赏，因此制造者的名字也大多被记录下来。在中国历史上，几乎每一朝代都有这样的创造者或发明者，有许多历史文献对此作了记载。但是，对这些机械的描述都过于简单，更没有机械示意图留下来，而许多记载带有传奇的或文学夸张色彩，令人难以相信。但是，大多数记载都述及这些机械中有原动机（如水轮）或其“机关”、“关掾”等。无论如何，这些机械充分体现了古代人对简单机械（如杠杆、连杆、曲柄、虹吸、浮子、滑轮、各种齿轮、水轮）的应用，也表明古代人完全掌握了它们的基本原理。

第一节 候风地动仪

候风地动仪是东汉科学家张衡于公元 132 年发明的。据《后汉

书·张衡传》记载：

阳嘉元年，复造候风地动仪。以精铜铸成，员径八尺，合盖隆起，形似酒尊，饰以篆文山龟鸟兽之形。中有都柱，傍行八道，施关发机。外有八龙，首衔铜丸，下有蟾蜍，张口承之。其牙机巧制，皆隐在尊中，覆盖周密无际。如有地动，尊则振，龙发机，吐丸而蟾蜍衔之。振声激扬，伺者因此觉知。虽一龙发机，而七首不动，寻其方向，乃知震之所在。^①

这段文字自十九世纪下半叶以来曾引起世界各国许多学者的注意和研究。大家公认，这是世界上最早关于地震仪的文字记载，用它测定震源的方位。我国学者王振铎从1936年到1963年也对此作过多次复原研究，其成果也比较符合文献记载和中国科学文化背景。^②

候风地动仪的关键机构是一根称为“都柱”的倒立摆，其重心高于摆动中心。在受地震横波袭击时，由于惯性力作用，它将倒向震源方向，从而带动该方向的传动部件，使相应方向的龙口上颌起挠，龙口中的铜丸便掉落在蟾蜍口中(图14-1、2)。

都柱是候风地动仪的动力部件，传动部件就是“傍行八道、施关发机”。王振铎复原设计的传动部件有直杠杆牙机和曲杠杆牙机(图14-3)两种。在这曲杠杆系统中，“八道”实际作用是支撑龙体重量。李约瑟博士认为，“八道”实为槽，其内设有撞针和滑块系统。当都柱倒下时，与“八道”之某一道的撞针相碰，撞针推动滑块，从而将龙口铜丸推出龙口^③。李约瑟博士的复原设计思想是合理的，但中国古代传统中似乎较少见撞针与滑块在机械中的应

① 《后汉书》卷五九《张衡传》，中华书局校点本，第七册，第1909页。

② 王振铎：《张衡候风地动仪的复原研究》，《科技考古论丛》，文物出版社1989年版，第287—351页。

③ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 3, Fig. 270.

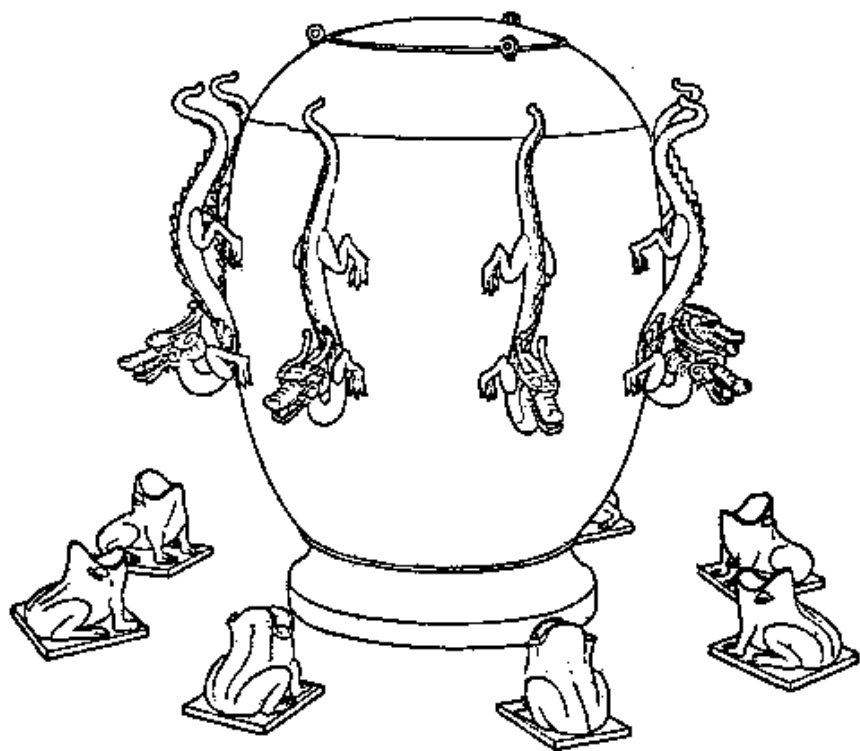


图 14-1 候风地动仪外形(引自王振铎文)

用。^①

张衡创制的候风地动仪,灵敏度与精确度都很高。据载,发生在陇西的一次地震,而安置在洛阳的该仪器准确无误地将它测出。于是,京师学者“皆服其妙”。当然,地动仪本身必须与地层或地面有牢固紧密的连接,或者说,使它成为地面的一部分,王振铎复原设计的“地盘”其目的就在于此。再则,对于地震纵波,候风地动仪可能不大起作用。都柱在地面纵波冲击下,倾倒的方向是难以预料的。

^① 中国科技大学李志超提出,“候风地动仪”的“候风”是官名;安置其都柱的底座下有 8 个可作水平滑动的滚珠,推动龙嘴张开的是二级杠杆机构,如此可将该仪器的灵敏度提高 20 倍(其原文误为 200 倍)。这一设想虽不能在历史文献中找到对应文字根据,但其复原思想是新颖的。见李志超,《候风地动仪新说》,载《寻根》杂志 1994 年第 1 期,第 28—30 页。

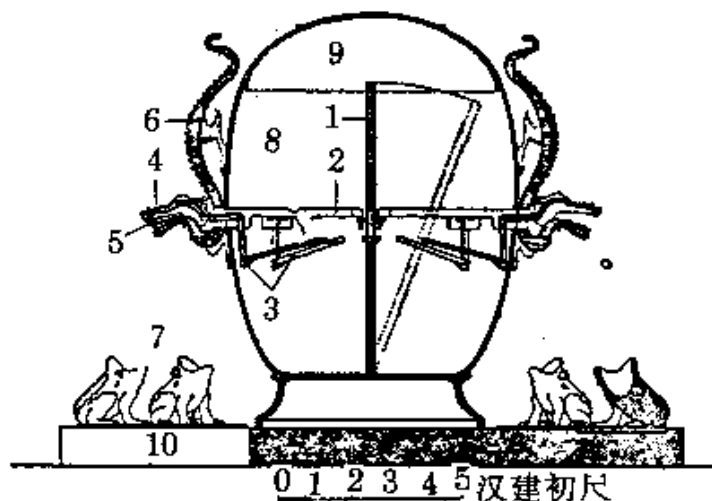


图 14-2 候风地动仪复原设计之一：(1)都柱；(2)八道；(3)牙机；(4)龙首；(5)铜丸；(6)龙体；(7)蟾蜍；(8)仪体；(9)仪盖；(10)地盘。(引自王振铎文)

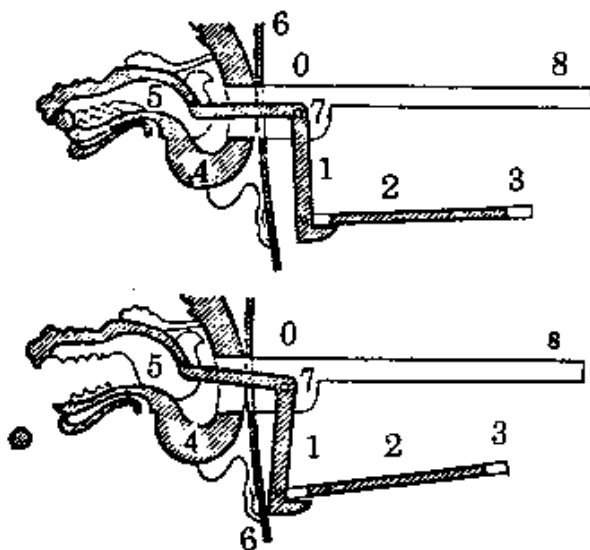


图 14-3 八道曲杠杆牙机设计图：(1)(2)牙机；(3)机括；(4)龙首下颌；(5)龙首上颌；(6)仪体剖面；(7)八道枢轴；(8)八道；(0)支点。(引自王振铎文)

在机械制造方面，张衡除创制世界上第一具地震仪之外，还制造了指南车或记里鼓车，“腹中施机、能飞数里”的木鸟，演示天象的水转浑仪和日历机械“瑞轮蓂莢”，等等。故而后人将他和马钧并称为

“木圣”。在张衡之后,北齐信都芳、隋代临孝恭等人,或曾制造类似张衡的地动仪,或撰写有关的著作。

第二节 机械木偶和捕鼠器

一、机械木偶

机械木偶或其他质料做的机械傀儡在古代典籍中屡见不鲜。公元四世纪时,王嘉曾述及一种机械玉人,“机戾自能转动”^①。这表明,这种玉质木偶装有各种使其转动的简单机械。人们将这种机械木偶称为“机妍”^②,相当于现在所说的机器人的滥觞。

机械木偶往往与歌舞机械相结合。据《西京杂记》载,汉高祖刘邦于公元前 206 年攻入咸阳,行秦王宫库府,发现内有“铜人十二枚,坐皆高三尺,列在一筵上,琴筑笙竽各有所执,皆缀花采,俨若生人。筵下有二铜管,上口高数尺,出筵后。其一管空,一管内有绳,大如指。使一人吹空管,一人扭绳,则众乐皆作,与真乐不异焉”^③。由一人牵动绳索,引发机械,大概内装齿轮、轮轴与各种拨牙机关,可使众乐齐发。这个铜人机械大概就是最早的八音盒。其制造时间可推断在战国末期。

六世纪时,西魏文帝元宝炬曾制造“水芝欹器”,通过两个木偶加以虹吸管将水灌于模型山上或荷花芙蓉之中^④。北齐兰陵王高孝瓘(一名长恭)“有巧思”,制造了称“舞胡子”的木偶机械,能“捧盏”作

① 王嘉:《拾遗记》卷三《周灵王》。

② 刘歆(一说葛洪):《西京杂记》卷三。

③ 李昉:《太平广记》卷二二五,中华书局 1961 年版,第五册,第 1733 页。

揖，“人莫知其所内也”。^①

唐代，机械木偶盛行。洛州县令殷文亮“刻木为人”，“又作妓女”，唱歌吹笙，劝人饮酒。“饮不尽，即木小儿不肯把；饮未竟，则木妓女歌管连催”^②。当然，这里的所谓“歌”，是只能按预先机械设计程序奏出一二句乐曲。在众多的木偶机械中，将作大匠杨务廉设计的行乞木僧具有现代意义。该木僧“手执一碗，自能行乞。碗中钱满，关键忽发，自然作声云‘布施’。”^③这是历史上最早的发声机械人的记载。估计，它的发声是通过两种物体的摩擦发出类似“布施”二字的摩擦声。

唐代以后，有关机械木偶的记载不绝。例如，宋代周密在《武林旧事》中述及琉璃山，其上“人物皆用机关活动”。^④

二、自动门

可以设想，古代自动门的设计大概包括踏板、绳索、滑轮与下坠重石，如同前述武器中的钢轮发火装置一样。

东晋元帝大兴(318—321年)年间，一个叫欧(也作区)纯的衡阳人，甚有巧思，“造竹木室，作一妇人居其中，人扣其户，妇人开户而出，当户再拜，还入户内，闭户”^⑤。制造这样一套机械可能要复杂些。北齐武成帝(561—565年在位)时候，有僧灵昭者“造七宝镜台”，内有36室。一木偶妇人手执锁，“才下一关，三十六户一时自闭。若抽此关，诸门咸启”^⑥。这个妇人所执关锁，通过其他传动机械，连接并控制着这镜台的36个小门户。

①②③ 张鷟：《朝野佥载》卷六，四库全书本。

④ 周密：《武林旧事》卷二《元宵》。

⑤ 汤球辑：《晋阳秋辑本》卷三。

⑥ 李昉：《太平广记》卷二二五，中华书局1961年版，第五册，第1734页。

也许这两个记载的内容不过是玩具,并未记述其中的某些关键机构。在此之后,七世纪初,隋炀帝令工匠造观文殿,其两厢各为12间书屋,每3间开一门户。“当户地口施机”,“去户一丈,脚践机发”,此时即有木仙人下阁,“捧幔而升,阁扇即开,书厨亦启,若自然。皆一机之力”^①。这个自动门的记载,就机械角度看,比前两个记载要清楚一些。

唐开元(713—741年)初,东海人马待封曾设计并制造过指南车、记里鼓车、相风鸟等。其后他又为皇后设计制造了一个自动梳妆台。台中立镜,台下两层,皆有门户。当皇后栉沐、启镜奁后,不仅台下两层自动开门,有木人递送巾栉、面脂、眉黛、髻花等物。皇后既妆罢,诸门皆合。可以想象,这个梳妆台的自动门和自动木偶的操纵机械应当包括主动轮和拨牙,各个木人也是按照设计程序一一先后递送梳妆用品。“穷极精妙焉”。遗憾的是,马待封辛劳地在皇宫内服务多年,而宫廷却不赐给他一官半职,甚至也不召见。他感到耻辱,便改变姓名隐于山林之中,过着穷困潦倒的日子。开元末,他以“吴赐”(意为无可赐予)为名,下山为崔邑令李劲制造“酒山朴满欹器”等物,“机运皆在龟腹内”^②。因而,在历史上留下了记载。马待封的命运,或许是古代许多天才机械师的命运。

三、捕鼠器

与机械木偶和自动门的创制比起来,捕鼠器的发明却是有益于民众的事。

^① 李昉:《太平广记》卷二二五,中华书局1961年版,第五册,第1737页。

^② 李昉:《太平广记》卷二二六,第1739—1740页。

据段成式记载,“王肃造逐鼠丸,以铜为之,昼夜自转”^①。制造者可能是曹魏散骑常侍王肃(195—256年)^②。在王肃之后大约100年,前述制造自动门的欧纯曾制造一个玩具鼠笼,“四方丈余,开有四门,门中有一木人。纵四五鼠于中,欲出门,木人辄以椎椎之。门门如此,鼠不得出”。^③

唐代张鷟曾记述郴州刺史王琚曾制造自动捕鱼的木獭。其时在开元二至二十年间,即714—733年。他“刻木为獭,沉于水中取鱼,引首而出。盖獭口中安饵为转关,以石縋之则沈。鱼取其饵,关即发,口合则衔鱼,石发则浮出矣”。^④

唐穆宗(821—824年在位)朝,倭国人韩志和能“刻木猫以捕雀鼠”。在他的机械制作中,还有木鸟,“以关揆置于腹内,发之则凌空奋羽。可高百尺,至一二百步外”;又作“龙床”,“置之则不见龙形,踏之则鳞鬣爪角俱出”;还作了一种称为“绳虎子”的玩具,将其置于手上,“猎蝇于数步之内,如鷓擒雀,罕有不获者”。^⑤

宋仁宗庆历(1041—1048年)中,一个姓李的有技巧的术士也曾制作一种捕鼠器:“木刻一舞钟馗,高二三尺,右手持铁筒。以香饵置钟馗左手中,鼠缘手取食,则左手扼鼠,右手用筒毙之。”^⑥

唐宋以后,类似自动木偶、自动门和机械捕鼠器的记载屡见不鲜。但是,有关这些器具的图画直到十九世纪初才出现。麟庆在其道光十六年(1836年)成书的《河工器具图说》中描绘了捕捉狐狸的“狐柜”,捕捉鼯鼠的“鼠弓”。

① 段成式:《酉阳杂俎》卷一〇《物异》,中华书局校点本,1981年版,第96页。

② 《三国志》卷一三《王肃传》,中华书局校点本,第二册,第414页。北魏有一王肃,见《魏书》卷六三《王肃传》。

③ 清代汤球辑:《晋阳秋辑本》卷三。

④ 张鷟:《朝野僉载》卷六。

⑤ 苏鹞:《杜阳杂编》卷二;李昉:《太平广记》卷二二七。

⑥ 沈括:《梦溪笔谈》卷七《象数一》。

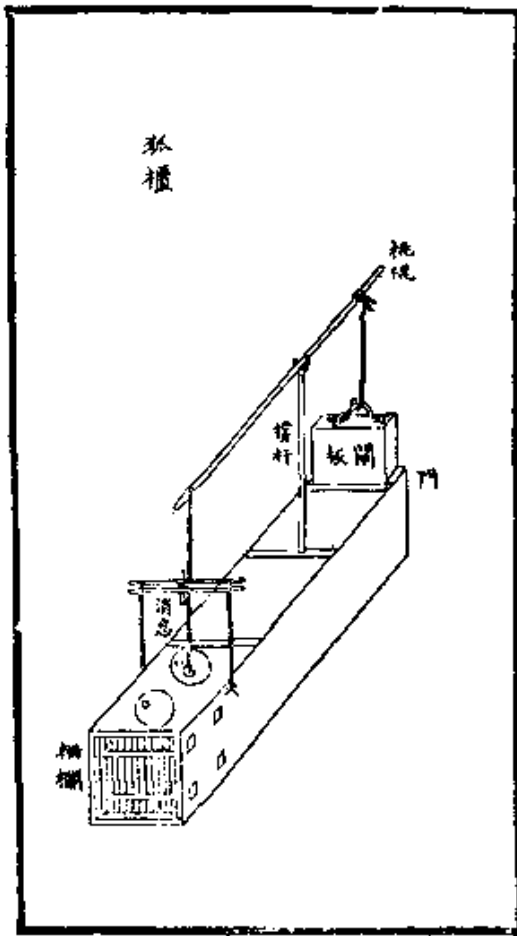


图 14-4 狐柜(麟庆《河工器具图说》绘)

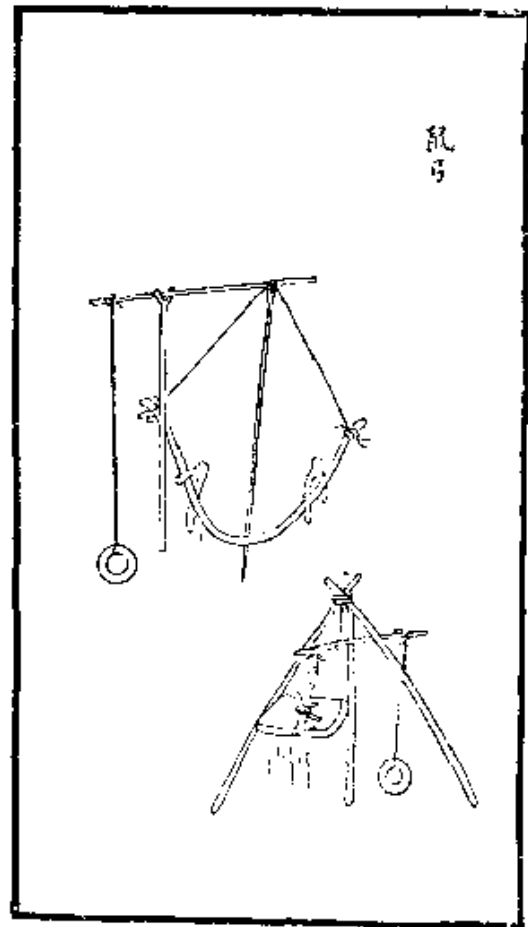


图 14-5 鼠弓(麟庆《河工器具图说》绘)

狐柜,如图 14-4,“前以挑棍挑起闸板,以撑杆撑起挑棍,后悬绳于挑棍而系消息于柜中。以鸡肉为饵,安置近栅处,使狐见而入柜攫取。一碰消息,则绳松棍仰,杆落板下,而狐无可逃遁矣”^①。“鼠弓”(如图 14-5)有三种:“一用铁签张于弓上,签直如矢;一用挑棍、撑杆,悬以消息;又一式三叉其木,坠以巨砖,悬以消息。”^②所谓“消息”,指机件中最灵敏的部分。

①② 麟庆:《河工器具图说》卷一《宣防》。

第三节 水饰和自动船

所谓“水饰”，也称为“水转百戏”或歌舞水机，是娱乐的机械。

三国时马钧曾作水饰。据载：

人有上百戏者，能设而不能动也。帝以问先生（指马钧）：“可动否？”对曰：“可动。”帝曰：“其巧可益否？”对曰：“可益。”受诏作之。以大木雕构，使其形若轮，平地施之，潜以水发焉。设为女乐舞象，至令木人击鼓吹箫；作山岳，使木人跳丸掷剑，缘绳倒立，出入自在；百官行署，舂磨斗鸡，变巧百端。^①

马钧设计的水饰，以水转动大木轮，大概由该轮轴通过其他种种齿轮、凸轮、拨牙而带动各种乐舞木偶、百戏木偶、木偶官员，甚而带动舂、磨，使木鸡相斗。其中，水碓、水磨在前面几章中已经讨论过。根据它的原理，再加上其他木偶装饰，就成了引人入胜的娱乐机械。马钧的创造，不仅对后来水饰的发展，也对水舂、水磨的发展起了重要影响。

水饰的制造往往还与自动船的创造相关，而且，事先还要设计并挖通一条流水渠道。这种娱乐成了显示宫廷豪华与威望的场面。北齐武成帝曾令僧灵昭造七宝镜台，又令灵昭在宫廷内院山亭之中造流水池和自动船。据载，“船每至帝前，引手取杯，船即自住。上有木小儿抚掌，遂与丝竹相应。饮讫放杯，便有木人刺还。上饮若不尽，船终不去。”^② 大概酒杯所在部位及其重量掣动这种游戏模型船的关键，因而使船停止或前进。沙门灵昭步入凡俗，或许因制造这艘自动

① 《三国志》卷二九《杜夔传》裴松之注。中华书局校点本，第三册，第807页。

② 李昉：《太平广记》卷二二五；李昉等：《太平御览》卷七一七。

船而过于操心劳累,就在表演自动船的时候,他“忽拊心,疑有刀刺,须臾吐血而终”。^①

隋炀帝大业年间(605—617年),黄究制造了更为壮观的水饰。以水力带动水轮主机,通过各种简单机械牵动歌舞木偶或由木偶扮演的神话人物、帝王将相。与前面所述的各种歌舞木偶一样,它们按预先的设计程序表演预定的歌舞。黄究的水饰,可连续表演72种历史故事中最精彩的场面,称之为“七十二势”:

若此等总七十二势,皆刻木为之,或乘舟,或乘山,或乘平洲,或乘盘石,或乘宫殿。木人长二尺许,衣以绮罗,装以金碧,及作杂禽兽鱼鸟,皆能运动如生,随曲水而行。又间以妓航,与水饰相次,亦作十二航。航长一丈阔六尺。木人奏音声,击磬撞钟,弹琴鼓瑟,皆得成曲。及为百戏,跳剑舞轮,升竿拂绳,皆如生无异。其妓航水饰,亦雕装奇妙,周旋曲池,同以水机使之。^②

除此之外,黄究又设计了自动船。据记载,其制与僧灵昭的设计相差无几。“小舸子长八尺,七艘,木人长二尺许,乘此船以行酒。每一船,一人擎酒杯立于船头,一人捧酒鉢次之,一人撑船在船后,二人荡桨在中央”,船绕曲水池随岸而行,疾于水饰。遇岸旁人取酒杯,船即止。记载中明确指出,这一切皆由“岸水中安机”所致。^③

据记载,隋炀帝领群臣观赏黄究设计的以上水饰之后,又命学士杜宝撰《水饰图经》并图画十五卷。可惜该书早已散佚^④。黄究在史书上记载也极少。他与其兄黄亘“不知何许人”,“炀帝每令其兄弟直少府将作”,“当时工人皆称其善,莫能有所损益。亘官至朝散大夫,究官

① 李昉:《太平广记》卷二二五;《太平御览》卷七一七。由灵昭卒前病情记载看,他是卒于突发性心脏病。

②③ 李昉:《太平广记》卷二二六,中华书局1961年版,第五册,第1735—1736页。

④ 有清人马国翰辑:《水饰》一卷,见《玉函山房辑佚书》子编小说家类;还有鲁迅辑本,见鲁迅编:《古小说钩沉》。

至散骑侍郎”。^①

正如在水饰中常有自动船一样,古代人还设计制造了机械自动车,车上设自动木人,以供娱乐。

大约从战国开始,人们就产生了有关自动车的设想。世传,鲁般工巧,为母作木车马,由木人驾驶,其内机关备具,载母其上。可是,这木车马竟一去不复返,鲁般未料慈母亦丢失。汉代王充记下了此传说并对此作了质疑。^②

十六国后赵王石季龙(又名石虎,295—349年)时候,宫廷役使解飞和魏猛变曾为其制作“檀车”。据晋代陆翔《邺中记》载:“檀车,广丈余,长二丈,四轮,作金佛像坐于车上,九龙吐水灌之。又作木道人,恒以手摩佛心腹之间。又十余道人,长二尺余,皆披袈裟,绕佛行。当佛前,辄揖礼佛,又以手撮香投炉中,与人无异。车行则木人行,龙吐水;车止则止。”^③可惜,记载中未明言该车的动力机构,抑或是人力推动的。车上各类木偶、以及喷泉装置或唧筒是清楚的,但它是否以水力推动尚不明确。

根据一个到过中国经商的外国商人的叙述,1115年左右回教作家阿马魏茨(al-Marwazi)指出,中国人在市场上用自动车流动卖货:在市场上,人各备一车,既供乘坐,又可载货。车自动运行,不需兽力。人坐车内,行止随意^④。据李约瑟博士说,经考,报道此事的商人旅行中国的时间在907—923年间^⑤。这正是唐亡五代离乱的时候。此时,这样的车在西方尚闻所未闻。李约瑟认为,它也许是最早的中

① 《隋书》卷六八《黄亘兄弟传》,中华书局校点本,第六册,第1598—1599页。

② 王充:《论衡·儒增篇》。

③ 陆翔:《邺中记》,四库全书本。

④ V. F. Minorsky (ed. & tr.), *Sharaf al-Zamān Tahir al-Marwazi on China, the Turks and India* (c. +1120), Royal Asiatic Soc. London, 1942.

⑤ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, p. 159.

国脚踏车(pedicarts)。

虽然笔者尚未获得有关自动车的确切史料以进一步证实阿马魏茨的记述,但是,关于车上能自动调节座椅方向的记载最早见之于《邺中记》:“当坐处安转关床,若射鸟兽,直有所向,关随身而转。”^①大概这也是解飞、魏猛变为石虎特制的打猎用坐车。

明代王徵于天启七年(1627年)左右设计了一种自行车。他从欧洲落重自鸣钟而推想到自行车的设计。该车四轮,前二轮低、后二轮高。后二轮共同轴上装有齿轮,并与其他三个齿轮啮合。由一重物的下落带动初始轮转动,通过其他齿轮的变速传动而使后轮轴转动。当重物下落后,坐车人借杠杆之力提起重物。这样,重物的一起一落,车轮即不断转动前进^②。王徵的设计虽然未必实用,但它恰好处于世界上自动车辆从草图到实用的中间时期,在机械史仍不失其意义。大约1500年,达·芬奇(L. da Vinci, 1452—1519年)画出几种机动车辆的草图;十八世纪中期,可能是俄国人较早采用脚踏曲拐机构制成了一辆人力驱动车,直到1860年,法国人米切奥克斯(E. Michaux)获得了自行车脚踏曲拐机构的专利权。

① 陆翔:《邺中记》,四库全书本。

② 王徵:《新制诸器图说·准自鸣钟推作自行车图说》。

第十五章 飞行机械

在遥远的古代,人们可能曾有飞行的幻想。看到鸟的飞行,懊恨自己不长翅膀;为逃避猛兽的追击,也企盼自己能飞上天。进了文明社会后,幻想又成为美丽的诗篇。

屈原曾在《离骚》中写道:

朝发轫于天津兮,夕余至乎西极。凤凰翼其承旂兮,高翱翔之翼翼。……

路修远以多艰兮,腾众车使轻待。

他既想象如鸟飞翔,又冀望驾车腾空。而《庄子·逍遥游》在述及鲲鹏展翅、扶摇而上之后,假春秋时代郑国列御寇之名道出了飞行的意愿:

夫列子御风而行,泠然善也,旬有五日而后反。

在庄子的笔下,列子竟然飞行了15天。不仅历代都有人幻想飞天、升天,而且人们确实制造了木鸢、竹蜻蜓一类飞行器,尝试了人本身的飞行实验。

这一切,都成为近代各种飞行器和人类飞行的先驱。

第一节 各种飞行器的创制

一、飞行木鸢

据载,战国时代,鲁般与墨子都曾制造木鹊或木鸢。《墨子》说:

公输子削竹木以为鹊,成而飞之,三日不下。^①

鲁般制造了能飞行的木鸟,可能是木质风筝。说它飞行了三天而不落下,无非夸张而已。《韩非子》记载墨子造木鸢:

墨子为木鸢,三年而成,蜚一日而败。弟子曰:先生之巧,至能使木鸢飞。墨子曰:不如为车輓者巧也。用咫尺之木,不费一朝之事,而引三十石之任。致远力多,久于岁数。今我为鸢,三年成,蜚一日而败。惠子闻之曰:墨子大巧,巧为輓、拙为鸢。^②

这是从墨子的功利观念评述其巧拙的。王充对此作出另一种评论。他认为,刻木为鸢以象鸢形,如果木鸢机关具备,飞之可也;倘若“言其三日不集,增之也”。因为使之飞翔运动的“机关为须臾间,不能远过三日”^③。这样的评述可以说基本上符合机械动力的基本法则。

由于文字记载过于简单,鲁般与墨子的木鸢究竟是风筝还是什么,尚难确定。他们都是善技巧的木工,钻或弓钻在当时已经发明。利用弓钻的绳系法,他们发明了后来称为的竹蜻蜓,也未可知。

迄后汉,张衡又创造了飞行木鸟,“假以羽翮,腹中施机,能飞数

① 孙诒让:《墨子间诂》卷一三《公输第五十》,诸子集成本。

② 《韩非子·外储说左上》,有关记载,也见余知古:《渚宫旧事》,《列子·汤问篇》,《淮南子·齐俗训》等。

③ 王充:《论衡·儒增》。

里”。^①张衡自己的著作中也曾述及

参轮可使自转，木雕犹能独飞，已垂翅而还故棲，盍亦调其机而铄诸？^②

后两句是双重语，既说明木雕可通过调整其内部机关使之再飞，也暗示张衡自己再任太史令后总有高升之日。然而，张衡木雕的腹中施以什么样机械，华丽的文学语言总不如朴实的工程用词使后人明白。当然，有一点是肯定：鲁般、墨子和张衡都曾经制造了木质鸟形物，通过某种方法使其在空中作短暂飞行。在这些方法中，以动物筋的弹力将木鸟射出，或许是符合当时科技水平的。

二、锥形热气球

汉代淮南王刘安的《淮南万毕术》中记述了这样一件事：“艾火令鸡子飞。”注云：“取鸡子去其汁，燃艾火内空卵中，疾风高举自飞去。”^③

这是古代最早记述的类似热气球升空的尝试。但有人认为，这个实验不能成功，因为蛋壳的比重大于空气^④。但李约瑟博士指出，十七世纪欧洲人欢度复活节的娱乐习惯，就是作蛋壳升空游戏。其方法极简单，但要有点诀窍。除了吸尽蛋汁外，还要将蛋壳烘干。然后由小孔注入少许水，并以蜡封闭小孔。这样，蛋壳在炎日下逐渐呈不稳状态，逐渐变轻而终于浮飘空中。只是飘浮的时间极短暂。这是因为水蒸发，壳内气体膨胀，待小孔上的蜡经日晒而熔化，小孔成为排气

① 《太平御览》卷七五二（也见卷九一四）引《文士传》。

② 张衡：《应闲》，见《后汉书》卷五九《张衡传》，中华书局校点本，第七册，第1899页；或张震泽校注：《张衡诗文集校注》，上海古籍出版社1986年版，第275页。

③ 《太平御览》卷七三六、九二八引《淮南万毕术》，高诱注。

④ 洪震寰：《淮南万毕术及其物理知识》，《中国科技史料》1983年第3期。

孔,蛋壳适可升空一短时间。待蒸汽排尽,空气再渗入蛋壳,它就即行下落。^①

据载,淮南王刘安门客数千人,多方术之士,喜言神仙黄白之术^②。蛋壳升空试验,似为其门下术士之作,不无可能。

有许多著作认为,中国似为热气球的发源地。中国不仅是世界上发明造纸的国家,而且扎糊纸灯笼在中国有几千年传统。当灯笼顶部气孔较小、其内烛光较强时,它极易飘扬并有脱离悬线之趋势。喜庆节日,以灯笼为游戏。当夜晚篝火正旺,男女歌舞于其旁,此时灯笼极易飞入夜空,远望如飘荡之星,即时被焚毁而坠地^③。但是,在中国古代典籍中,虽有许多关于灯笼的记载,却无热灯笼升空的明确记述^④。值得注意的是,1232年,蒙古军将领速不台攻打金都汴,金大将赤盏合喜与尚书右丞白撒负守城使命,白撒意欲与城外被俘的大量金兵相约而弃城夺路逃跑。史载:

初,白撒命筑门外短墙,委曲狭隘容二三人得过,以防(蒙军)大兵夺门。及被攻,诸将请乘夜斫营,军乃不能猝出,比出已为北兵所觉。后又夜募死士千人,穴城由壕径渡,烧其炮坐。城上悬红纸灯为应,约灯起渡壕,又为围者所觉。又放纸鸢,置文书其上,至北营则断之,以诱被俘者。识者谓前日纸灯、今日纸鸢,宰相以此退敌难矣。^⑤

白撒在战争中应用红纸灯笼是清楚的,然而“悬挂”纸灯还是“起

① J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, p. 596.

② 《汉书》卷四四《刘安传》,中华书局校点本,第七册,第2145页。

③ Joseph Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 596—597.

④ 姜长英在其《中国航空史料》(中国航空史之二,西北工业大学1980年版)“孔明灯”一节中,曾详细列出这种灯笼的各种名称:松脂灯、孔明灯、颺灯、飞灯等,但它们都出自二十世纪的中外著作。笔者赞赏姜长英从大量素材中作出孔明灯或热气球在我国有悠久历史的结论,但深入发掘有关史料仍然是艰巨的事。

⑤ 《金史》卷一一三《赤盏合喜传》,中华书局校点本,第七册,第2496页。

放”纸灯,似乎二者都有可能。后来许多关于起放灯笼、解救围难的军事传说,或者节日放灯笼志庆的传闻,是否受此记载之影响,也难断论。

三、风筝的起源

风筝被世界航空史界公认为最早的飞行器,对十六世纪之前的欧洲人而言是前所未闻的东西。第一次世界大战前,若干飞行先驱称自己的试验飞机是“动力风筝”、“巢形风筝”,可见它对现代动力学思想的发展曾起着重要作用。

风筝,初期名为纸鸢、纸鹞、风鸢,形状似鸟。《红楼梦》第70回描写的风筝有蝴蝶形、鱼形、螃蟹形等。清末,满族人富察敦崇的《燕京岁时纪·风筝》写道:

风筝即纸鸢。缚竹为骨,以纸糊之,制成仙鹤、孔雀、沙雁、飞虎之类,绘画极工,儿童放之最能醒目。

它在空中飞行受到三种力作用:重力、空气动力和拉线张力(图15-1),稍有气流作用,它就上升。当风力微弱或无风时,它因重力而下降。放风筝者常拉紧线跑动,借助相对气流运动而使风筝飘浮升空。此时,风筝沿一大圆弧运动,拉线之长即其运动轨道的半径。它与飞机相似之处是,都有羽翼,靠气流浮力上升。当然,飞机尚有机械动力的作用。

风筝制法也极简单。如《燕京岁时纪》描述的一样,用几根细竹条作成鸟形框架,糊上纸即可。明代徐渭《风筝图诗二十五首》中有“缚竹糊

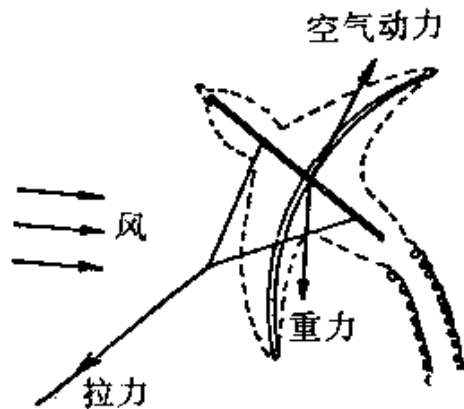


图 15-1 风筝受力作用示意图

腔作鸟飞”，“线长线短回高低”的句子^①。历代还有些艺术家以放风筝为题作画。敦煌 332 窟和 148 窟中有放风筝壁画；上海博物馆藏明代青花瓷碗一个，其腹部绘婴戏图，一儿童正在放风筝，风筝尾部为三条纸带、迎风飞舞；清代画家吴友如的《画宝》也有几幅放风筝图^②。清代入华教士也对放风筝感兴趣，并绘有放风筝的图画。

关于风筝的起源有两种说法。

一种认为是汉代初期韩信创制。宋代高承《事物纪原》说：

俗谓之风筝。古今相传云是韩信所作。高祖之征陈豨也，信谋从中起，故作纸鸢放之，以量未央宫远近，欲以穿地隧入宫中也。盖昔传如此，理或然矣。^③

类似记载也不少，大概都承袭高承之说，似难断论。另一种意见认为是五代汉隐帝（948—950 年在位）与李业所作。明代郎瑛《七修类稿》说：

纸鸢本五代汉隐帝与李业所造，为官中之戏者。^④

据《新五代史·李业传》载，李业确造过风筝：“（隐）帝方与业及聂文进、后赞、郭允明等狎昵，多为度语相谑戏，放纸鸢于宫中。”

其实，风筝的发明与制造虽不如高承所言之汉初那么早，也不是郎瑛所言之五代那么晚。唐德宗建中二年（781 年）七月，节度使田悦反叛，攻临洛城，守将张仵在粮储渐乏、救兵未至之时，放风筝告救军援急。他“以纸为风鸢，高百余丈，过悦营上，悦使善射者射之，不能及”^⑤。比这更早 200 多年，即南梁武帝太清三年（549 年），侯景反于寿阳，围台城，简文帝（550—551 年在位）“与太子大器为计，缚纸鸢

① 徐渭：《青藤书屋文集》卷一二，海山仙馆丛书本。

② 徐家珍：《风筝小记》，《文物》1959 年第 2 期。

③ 高承：《事物纪原》卷八《岁时风俗部第四二·纸鸢》。

④ 郎瑛：《七修类稿》卷二二《辩证类·纸鸢》。

⑤ 见《新唐书·田悦传》；《旧唐书·张仵传》；《旧唐书·德宗纪上》。

飞空,告急于外”^①;一说,在侯景围攻,内外断绝之时,一名为“羊车儿”的“献计作纸鸢,系于长绳,藏救于中。简文出太极殿前,因西北风而放,冀得书达援军”。^②

可见,风筝的发明迄今已近1500年的历史了。它的起源,初与战争通讯有关,后成为宫中娱乐,再发展为平民百姓尤其是儿童的嬉玩之物。南宋时期,市上已有专卖风筝的小经纪了。^③

由纸鸢、风鸢,而后有风筝。这大概是纸鸢中又有了带声响的构件,其声似筝,故名风筝。唐代高骈有《风筝诗》:

夜静弦声响碧空,官商信任往来风,依稀似曲才堪听,又被风吹别调中。^④

关于有声风筝的造法,明代陈沂的《询蓂录》写道:

初,五代汉李业于宫中作纸鸢,引线乘风为戏,后于鸢首以竹为笛,使风入,作声如箏鸣,俗名风筝。

四、葛洪“飞车”

晋代葛洪在《抱朴子》中记述了一种称之为“飞车”的器械。他写道:

或用枣心木为飞车,以牛革结环剑,以引其机。或存念作五蛇六龙三牛、交罡而乘之,上升四十里,名为太清。太清之中,其气甚罡,能胜人也。^⑤

所谓“飞车”,不少人认为,它就是后来称之为“竹蜻蜓”的儿童

① 李尤:《独异志》卷中。

② 马总:《通纪》卷七。

③ 周密:《武林旧事》卷六《小经纪》。

④ 尤袤:《全唐诗话》卷五引。

⑤ 葛洪:《抱朴子内篇》卷一五。

玩具^①。它的主要部件是一个加工成斜面或弯曲面的薄竹片,如图 15-2,弯曲面类似向下吹风的风扇叶。竹片中央榫接一根直立轴,将绳带(或牛革)以类似木工用的弓钻方式绞纽在立轴上。拉动绳带,竹片急速旋转。旋转着的竹片借其弯曲面造成的气流而上升。这可能是“以牛革结环剑,以引其机”的内容。竹片在空中借惯性而继续旋转。一旦惯性作用停止,竹片不转动了,它就掉落下来。

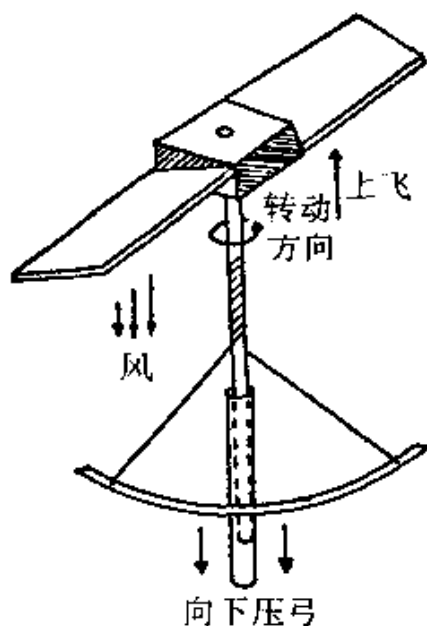


图 15-2 竹蜻蜓

葛洪在叙述其飞车时,还指出罡风或罡气。在葛洪看来,这是高空中强烈的风或气流。将飞车或竹蜻蜓的升空运动与强烈的气流相联系,表明葛洪已有初步的空气动力学知识。

竹蜻蜓传到欧洲后,被称为中国陀螺,并引起了早期航空实验家们的注意。1784年,法国拉奥努瓦(Launoy)和比安旺尼(Bienvenu)制造了以弓钻驱动的两个互为反转的螺旋桨,桨叶用丝绸蒙在骨架上。

1792年,称为近代航空之父的乔治·凯莱(Sir George Cayley, 1773—1857年)对中国陀螺发生兴趣。他用弓钻驱动两个羽毛螺旋桨,并由螺旋桨带起陀螺升入空中。他称其为“旋浮器”或“飞升器”^②。由此可见,中国的竹蜻蜓或飞车是直升旋翼和飞机螺旋桨之祖。

① 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,第24页。

② J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 582—583.

五、陀螺与平衡环

古代的陀螺如图 15-3 所示。处于回转运动中的陀螺显倾斜状态,其重力分量 p^2 会使它的中心轴线更加倾斜,但回转效应又使它中心轴线向垂直方向(图 15-3 中矢号 v)偏转。因此,一旦陀螺旋转之后就不会倒下,而是沿一锥面运动,称为进动。它的运动特性使孩童

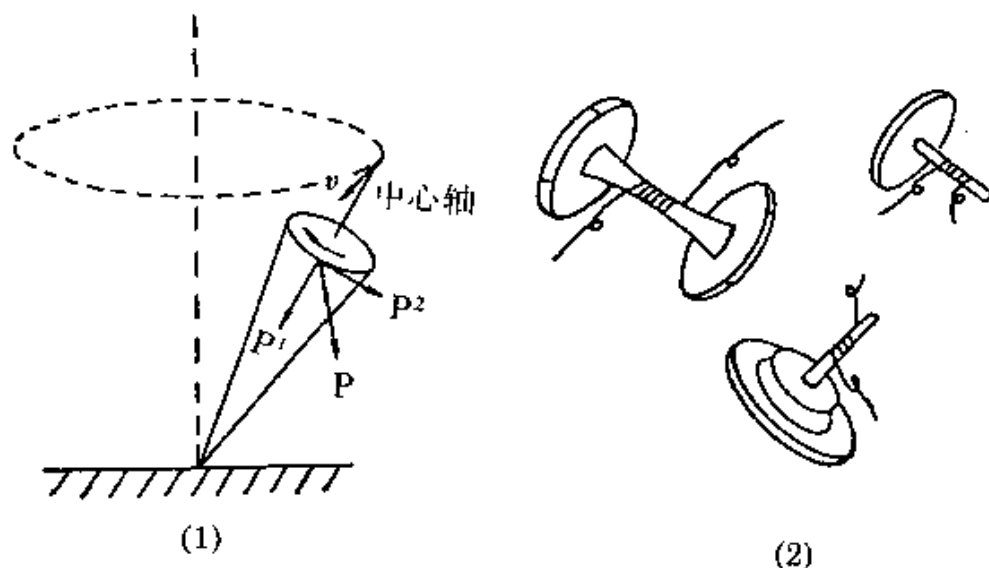


图 15-3 古代的陀螺:(1)陀螺及其回转运动;(2)空钟几种

们感到极大兴趣,因此,它在我国作为一种玩具一代代地传了下来。

与陀螺相似的另一种玩具称为空钟,又称空竹、空筝,俗称地龙、地牛黄,或称扯铃。其名称随地而异,而形制大体相同,或木制或竹制。

明崇祯八年(1635年)成书的《帝京景物略》中有关于陀螺的记述:

陀螺者,木制如小空钟,中实而无柄,绕以鞭之绳而无竹尺。卓于地,急掣其鞭。一掣,陀螺则转,无声也。视其缓而鞭之,转转无复往。转之疾,正如卓立地上,顶光旋旋,影不动也。

又有关于空钟的记述:

空钟者,剖木中空,旁口,荡以沥青,卓地如仰钟,而柄其上之平。别以一绳绕其柄,别一竹尺有孔,度其绳而抵格空钟,绳勒右却,竹勒左却。一勒,空钟轰而疾转,大者声钟,小者蛩蛄飞声,一钟声歇时乃已。制径寸至八九寸。其放之,一人至三人。^①

明代,京师童谣唱道:“杨柳儿活,抽陀螺;杨柳儿青,放空钟……”^②

陀螺的运动包括自转、进动和章动,因此《帝京景物略》称它“转转无复往”。带柄的空钟在地面上以绳抽打使其运动的情形,与陀螺相似。相比之下,在绳子上抖转空钟倒需要些诀窍。先将绳绕空钟柄数圈,迅速地以绳提起空钟并两手来回抖动绳子、拉格空钟,空钟才能在绳子上旋转不已,并发出嗡嗡声。这声音是由空钟木轮边的小孔造成的。绳子两端可以分别系在竹片上,以便“抵格空钟”。技巧熟练者可以使旋转的空钟从一人的绳子中抖出,由另一人接着继续抵格。空钟在几个人的抖绳中传来传去,并在绳子约束下不停地旋转而不致掉落地下。今天的杂技表演中也往往有此节目,它大概是古代杂技百戏的传统节目之一。但它究竟起源于何时,在明代之前多久,尚待进一步研究。

将陀螺装在平衡环上就成为航空、航海必不可少的仪器,即陀螺仪表,或称回转仪(gyroscope)。(图 15-4)这个平衡环在中国古代称为“被中香炉”,它是汉代长安巧工丁缓发明的。据《西京杂记》卷一记载:

长安巧工丁缓者……,又作卧褥香炉,一名被中香炉。本出房风,其法后绝。至缓始更为之。为机环转运四周,而炉体常平,可置之被褥。故以为名。

所谓“机环”,即其支架的轴心线相互垂直并活动接合的各层金属环(图 15-5),无论平衡环(被中香炉)整体如何运动,作为其重心

^{①②} 刘侗、于奕正:《帝京景物略》卷二《春场》,北京古籍出版社 1982 年版,第 67 页。

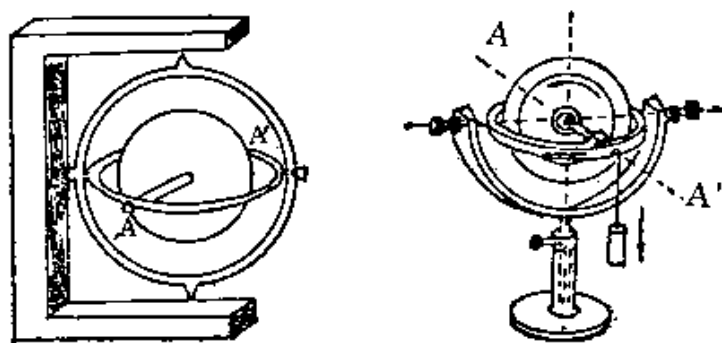


图 15-4 近代两种回转仪

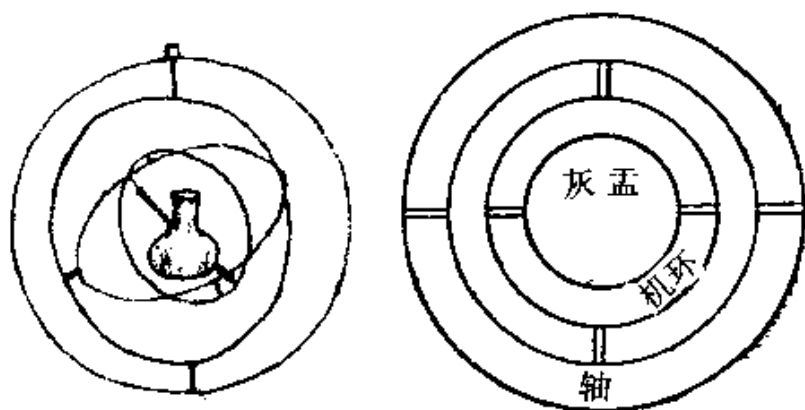


图 15-5 明代被中香炉摹画及其机环和灰孟俯视图(引自史树青文,《文物》1962年第3期)

与中心的灰孟总是能保持其原有的位置状态。任何科学仪器放在这个中心位置,就不受外界多变环境的丝毫影响。

丁缓的发明在历代颇具影响,连《西京杂记》中的这段文字也被许多著作辗转传抄^①。明代人称这种平衡环为“卧褥炉”^②,又称为

① 例如,唐代徐坚,《初学记》卷二五;宋代洪刍,《香谱》;大约成书于宋代的《续博物志》卷九(旧本题晋李石撰);宋代赵令畤(一名赵德麟),《侯鯖录》卷一,等等。

② 屠隆(一作屠龙),《考槃余事》卷四《起居器服笺》。

“香球”^①。据田艺蘅的记述,香球是由三层“机环”构成的。

我们在机械计时器中曾述及武则天时候,有一来自海州的匠人制造了“十二辰车”。正是这个未曾留下姓名的巧匠,将平衡环装于火笼中。人们冬天取暖提火笼时,就不必担心火炭掉落而烧毁衣物。记载说,该匠人“又进木火通,铁盏盛火,辗转不翻”^②。从此,平衡环从宫廷可能走进百姓之家。迄宋代,平衡环又被装在节日舞龙灯的“灯球”上,舞灯人如何挥动他手中的灯球木柄,灯火决不掉落^③;一种妇女佩挂于身上的“香球”,也有以平衡环作成的^④。前者是娱乐用具,后者是装饰品。宋代,平衡环成为市场上的售卖之物了。^⑤

在中国古代,平衡环不仅有许多专有名称和文献记载,而且迄今还有不少实物留传至今。例如,唐代的银薰球(彩色插页图 10)^⑥,南宋手提火炉^⑦,明代被中香炉^⑧,出自西藏的铜制灯球^⑨和日本奈良正仓院收藏的唐代被中香炉^⑩,等等。

六、降落伞

撑开伞具、增大空气阻力、降低落体速度,这是跳伞运动的基本物理原理。古代人经验地知道,从高处跳落时,手持张开的伞具,可以安然无恙。

根据李约瑟博士的研究报告,十七世纪法国国王路易十四派驻暹罗大使龙伯尔(Simon de la Loubère,于 1687—1688 年为驻暹罗

① 田艺蘅:《留青日札》卷二二《香球》:“今镀金香球,如浑天仪然,其中三层关榘,轻重适均,圆转不已,置之被中,而火不复灭,其外花卉玲珑,而篆烟四出。”

② 《太平广记》卷二二六,中华书局 1961 年版,第五册,第 1738 页。

③④⑤ 周密:《武林旧事》卷二、九;吴自牧:《梦粱录》卷一、一三、一九。

⑥ 《陕西出土文物》,陕西人民出版社 1973 年版,第 37 页。

⑦⑧ J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, Fig. 477, 480.

⑨⑩ 史树青:《古代科技事物考》,《文物》1962 年第 3 期。

使节)曾著《新历史关系》一书,其中述及中国和暹罗的跳伞表演:

有人利用雨伞从拱门跳下,伞柄牢牢地系于裤带上。有时风将人带落地面,但有时落到树上、房顶、甚至河中。

十八世纪时,作过降落实验的勒内芒(L. S. Lenormand, 1757—1839年)于1783年亲自从树梢及屋顶跳下,颇为成功。有人证明,勒内芒读过《新历史关系》一书,并对其中描写的跳伞极感兴趣。他命名了一直沿用至今的“降落伞”一词。勒内芒又将其跳伞尝试告知正在作氢气球升空实验的蒙戈尔费(Montgolfier)兄弟。蒙戈尔费兄弟极为欣赏,由此又引起了法国航空家加内里安(A. J. Garnerin, 1769—1823年)于1797年自气球中跳下的降落实验^①。由此可见,古代中国人的降落杂技在近代航空史上所起的作用。

然而,据记载,跳伞在中国和中国历史本身一样长久。

据典籍载,传说时代的舜帝,年轻时曾手持两笠从高杆上跳下。《竹书纪年》说:“舜父母憎舜,使自涂廩,自下焚之。舜服鸟工衣服飞去。”^②《史记·五帝本纪》记述较清楚:舜的生父瞽叟因再娶,舜后母欲杀舜。于是发生了这样的事:“瞽叟尚欲复杀之,使舜上涂廩,瞽叟从下纵火焚廩。舜乃以两笠自杆而下,去,得不死。”^③唐代司马贞在“索隐”中指出,舜持两笠自杆跳下,“有以鸟张翅而轻下,得不损伤”。现在看来,远古的传说中若确有其事,也当是舜帝急中生智而已。鉴于舜帝在上古史中极其重要的地位,这个传说无疑使古代人普及了降落伞的知识。司马贞的“索隐”表明人们已懂得了降落伞的原理。

舜帝跳伞是个传说,然而下面的故事却是真实的。

岳飞的孙子岳珂著《程史》一书,其中一段文字记述了广东番禺

^① J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4. part 2, p. 595.

^② 沈约注:《竹书纪年》卷二。

^③ 《史记》卷一《五帝本纪》,中华书局校点本,第一册,第32、34—35页。

的风俗。在那里居住着许多阿拉伯商人,他们有自己的习俗、寺庙与宗教。其中一塔甚高,楼梯“圆转焉如旋螺,外不复见其梯磴”,塔顶铸一颇大的“金鸡”。后来,金鸡的一足为盗所窃。不久,捕捉了一个卖金人。经审讯,确为其所盗。问其何如盗得鸡足,此人招供:“獠家(指阿拉伯人)素严,人莫闯其藩。予栖梁上,三宿而至塔,裹赍粮,隐于颠,昼伏夜缘,以钢铁为错,断而怀之。重不可多致,故只得其一足。”又问其何如下塔楼,该人答曰:“予以登也,挟二雨盖,去其柄。既得之,伺天大风,鼓以为翼,乃在平地,无伤也。”^①

还有其他记载,我们留待下一节再叙述。

第二节 飞行尝试及其机械设想

以上所述的各种飞行器中尚有火箭,以及万虎试图乘坐火箭上天的故事,我们已在第十二章谈到了这些内容。除此之外,古代人确曾设想过载人飞行机械,并以人自身作飞行尝试。其中有些尝试为惨不忍睹的暴力所迫。

一、飞行尝试

本章一开始,我们曾谈及人类本身具有久远飞行的幻想史。在幻想的支配下,有许多关于“羽人”、“飞天”的图画。例如,沂南汉画像石有腾空羽人,敦煌 207 号窟有隋代塑造的羽人像,唐代有羽人飞凤花鸟铜镜,还有飞人砖画^②。1964 年在西安发掘出汉代铜羽人跪坐像,

① 岳珂:《程史》卷一一《番禺海獠》,中华书局标点本,1981 年版,第 126 页。

② 戴念祖:《中国力学史》,第 508—509 页。

其人形状奇特,长脸尖鼻,颧骨与眉骨隆起,耳高出头顶,脑后锥形发髻,穿一身无领紧袖交襟长衣,宽肩束腰,背部长两只翅膀。^①

在航空科学知识尚处愚昧的古代时期,美好的神话幻想往往会促人去实践一番。汉王莽时期,天凤六年(19年)与匈奴交战。王莽一面招募天下丁男及死囚,以为锐卒;一面召募有奇术之士,以为反攻之兵将。《汉书·王莽传》载:

又博募有奇术可攻匈奴者,将侍以不次之位。言便宜者以万数:或言能渡水不用舟楫,连马接骑,济百万师;或言不持斗粮,服食药物,三军不饥;或言能飞,一日千里,可窥匈奴。莽辄试之。取大鸟翮为翼,头与身皆着毛,通引环纽,飞数百步坠。莽知其不可用,苟欲获其名,皆拜为理事,赐以车马,待发。

这位飞行术士以羽毛为翼、身披羽毛,且有环纽一类设备。看来是经过许久的山坡滑翔试验的人,因此才能“飞数百步坠”。这大概是人类史上第一个学鸟飞行的勇敢者。与这种贪图名利、自愿充当“羽人”而摔得浑身青肿的人比较起来,北齐文宣帝(550—559年在位)却是个以飞行实验杀人的暴君。《隋书·刑法志》载:

帝尝幸金凤台,受佛戒,多召死囚,编箠篠为翅,命之飞下,谓之放生。坠皆致死,帝视以为欢乐。

此事发生在天保九年(558年)。齐文宣帝所谓“放生”,以芦苇或竹子编的粗席(“箠篠”)为翼,实际上是存心要将人摔死。次年,文宣帝又肆意诛杀,其中之一叫元黄头的,先被当成羽人实验,然后活活饿死。《资治通鉴》写道:

使元黄头与诸囚自金凤台各乘纸鸢以飞,黄头独能至紫陌乃坠,仍付御史中丞毕义云饿杀之。^②

① 《西安发现一批汉代铜器和铜羽人》,《文物》1966年第4期。

② 司马光:《资治通鉴》卷一六七《陈纪一》,中华书局校点本,第一册,第5189页。

残忍又无知,造成了人类古代飞行史上最悲惨的一幕。

汉代王充曾经严肃地指出:“能升之物,皆有羽翼;升而复降,羽翼如故。”^① 他批判那些道仙之人企图以羽毛助飞升天的愚蠢行为。直到明代,庄元臣也说:“以翼飞者,无翼则不能飞也。”^② 于是,人们幻想或企图假机械而飞翔。

二、飞行机械的设想

假机械以航天的思想,初见魏晋时期的一些著作。郭璞注《山海经》“奇肱之国”写道:

其人善为机巧,以取百禽,能作飞车,从风远行。汤时,得之豫州界中,即坏之,不以示人。后十年,西风至,复作遣之。^③

在郭璞前后,皇甫谧的《帝王世纪》、张华的《博物志》也有类似记述。在宋代以前的许多著作中常见此类文字。可见人们对这一新奇之事极感兴趣。

明清时期便有许多著作对奇肱飞车的设想作画。图 15-6 为明初成书的《异域图志》所绘。图中两人合乘一车,车轮齿的方向对着风向,恰似一立式风轮。图 15-7 是清代汪绂(1691—1759 年)释《山海经存》所绘图,其中的车轮颇有螺旋桨意味^④。人们不能不想到,自葛洪飞车和竹蜻蜓发明以来,中国古代人对于螺旋桨式叶轮在飞行中的作用无疑有了极深刻的印象。

在章回小说中对这种飞行机械作出描述并绘图更是一件有趣的

① 王充:《论衡·道虚》。

② 庄元臣:《叔苴子内篇》卷二。

③ 郭璞注:《山海经》卷七《海外西经》。

④ 对奇肱飞车作图的还有明代王崇庆:《山海经释义》等书。汪绂释绘图见其《山海经存》卷六《海外西经图》。



图 15-6 《异域图志》绘奇肱飞车

图 15-7 《山海经存》绘奇肱飞车

事。清代李汝珍(1763—1830年)的《绘图镜花缘》(成书于1829年)第66回、94回中都有飞车插图(图15-8)。该书作者在第94回这样描述他的机械设想:

国舅家人已将三辆飞车搭放院中,都向西方,按次摆了。众人看时,那车只有半人之高,长不满四尺,宽约二尺有余,系用柳木如窗棂式做成,极其轻巧。周围用蛟绡为幔,车内四面放着指南针。车后拖一小木,如船舵一般。车下尽是铜轮,大小不等,有大如面盆的,有小如酒杯的,横竖排列,约有数百之多,虽都如同纸薄,却极坚刚。当时议定,国舅、若花坐前车;红红、亭亭坐中车;兰英与仆人坐后车。国舅把钥匙交给仆人,又取三把钥匙递给红红道:“一是起匙,一是行匙,上面都有名目,用时不可错误。如要车向左,将舵朝右推去;向右,朝左推去。紧随我车,自无舛



图 15-8 《绘图镜花缘》第 94 回插图

错。车之正面，有一鲛绡小帆，如遇顺风，将小帆扯起，尤其迅速”。

从这些描写看来，这飞车设想中包括有车制大小、轻重、各式各样的传动车轮、操作机件（舵）、起动与加速阀门（“起匙”与“行匙”）、指南针等，几乎将古代机械成就与空气动力学知识都包括在内了。从其绘图中还可以看到其车轮极类似于图 11-19 中的纸风轮和玩具风轮。看来，《镜花缘》作者的心中有清楚的螺旋桨模式。在这些描写中，唯一不足的是，没有指出飞车的动力设备。

在李汝珍之后几十年，清末苏州能工巧匠吴正明因受《山海经》

奇肱飞车的启发,专心制作飞车,以致倾家荡产。其车能“离地尺余,飞渡港汊不由桥”,车“如栲栳椅式,下有机关,齿牙错合。人坐椅中,以两足击板上下之。机转风旋,疾驰而去”^①。从长期的飞行幻想到实践制作飞行机械,并实验飞行,这是中国航空史上的一件大事。在西方,1890年德国飞行技师李立恩塔尔(Q. Lilienthal, 1848—1896年)用单层甲板滑翔机进行滑翔飞行,1903年美国莱特兄弟[Orville (1871—1948年)和 Wilbur Wright (1867—1912年)]作了第一次用发动机的控制飞行。据此即可想到吴正明的勇敢及其飞行试验之意义了。

^① 《吴县志》(1933年版)卷七五《列传艺术一》。

第十六章 近代机械工程

在叙述了古代人的机械创造和发明之后,我们要转入近代机械工程在中国的兴起与发展这个主题。

近代机械工程是以英国产业革命为开端的,它以机械化代替手工工具,在纺织机械、蒸汽机和工作母机三方面促成了机械时代的出现,从而形成了近代机械工程技术。它与古代之区别在于,以机构学和热力学等科学理论代替古代纯粹的经验,以热力和电力(始于十九世纪)代替人力和畜力,以钢铁等金属为主的材料代替以木材为主的材料,以集中的工厂化生产代替分散的手工作坊。

明末清初,西方传教士来华,传播了一些西方早期的机械知识。近代机械工程在中国是以军事工业为先的,洋务运动期间开办的各种军用工厂使中国人初步学到了近代机械知识及其生产管理方法,在枪炮武器的生产中最先采用机器生产方式。二十世纪上半叶,逐渐掌握了仿制外国动力机械、交通机械、机床和其他机械,发展了机械工程教育,创办了相应的研究机构和学术团体,开创了近代机械工程在中国的初步发展时期。

第一节 近代机械工程的兴起

一、明清之际西方机械知识的传入

明清之际，传入中国的西方机械知识集中在两本译书中。一是由邓玉函和王征合译的《远西奇器图说》；一是由熊三拔和徐光启合译的《泰西水法》。前者初刊于天启七年（1627年）。全书三卷：卷一介绍静力学基本原理和知识；卷二介绍简单机械；卷三绘画并解说了54种机械，包括“起重、引重、转重、取水、转磨、解木、解石、转碓、转书轮、水转日晷、代耕、水铰”等机械。后者初刊于万历十四年（1612年），全书六卷。徐光启《农政全书》水利部分录取此书。它述及了西方多种升水机械。

在西来的机械知识中，有许多是中国古代已有的知识，或者仅仅是安装机械的方式不同而已。例如，古代中国的机碓，碓杆为横置；而传入中国的西方机碓，碓杆是立式安装的。只有极少数机械不为古代中国人所知，例如，螺丝、蜗杆和阿基米德螺旋泵；液压唧筒或泰西比乌斯(Ctesibius)压力泵。

螺丝的最早图画见于1609年成书的《三才图会》，该书中将它用作鸟铳的枪帽，大约是阿拉伯人最早传入中国的。螺丝、蜗杆的形状、制法、功用和机械原理在《远西奇器图说》卷二中作了介绍，该书称其为“藤线器”：“藤线器有三类：一柱螺丝转，二球螺丝转，三尖螺丝钻。”（图16-1）阿基米德螺旋泵初见于《泰西水法》（图16-2），人们称其为“龙尾车”。徐光启之后，许多学者曾试图推广龙尾车，以求普及。但由于中国传统的龙骨水车或翻车具有同样功效，龙尾车始终未在中国生根。泰西比乌斯液压泵或其他液泵，被中国人称为“玉衡

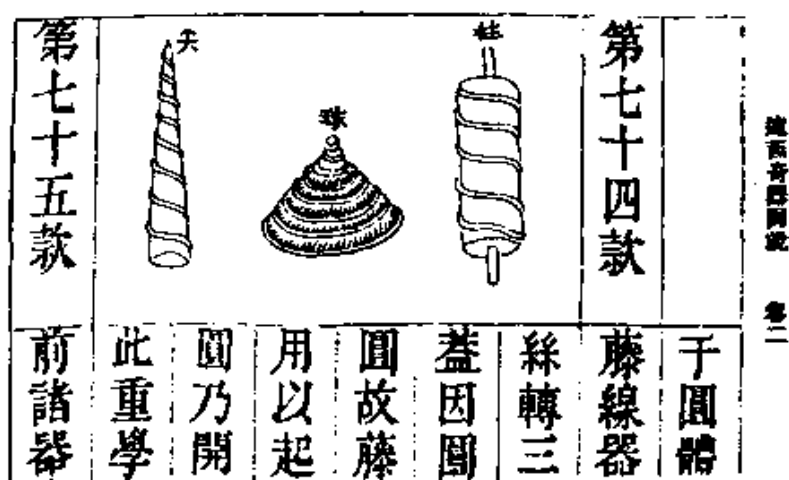


图 16-1 《远西奇器图说》绘三种螺丝,其中柱螺丝转也称蜗杆。

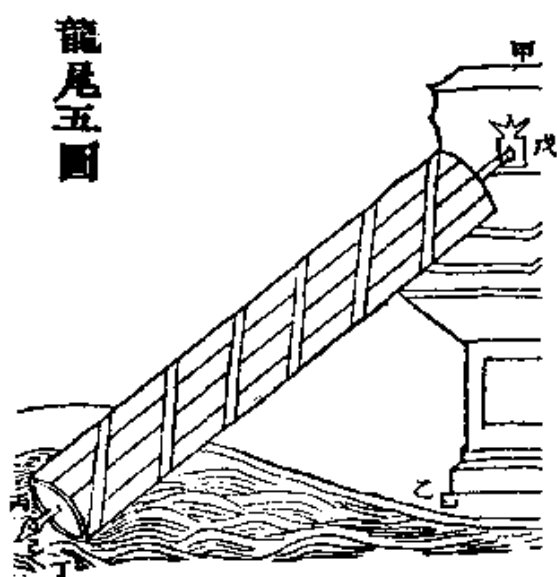


图 16-2 《农政全书》绘龙尾车

车”、“恒升车”(图 16-3),成为灭火机械即水銃(图 16-4、5)。

在明清之际传入中国的还有计时机械。前面有关章节中已作了初步叙述。西方计时机械于 1582 年由罗明坚、利玛窦等人引入中国,并将时盘上 24 小时改为 12 时辰 100 刻,将阿拉伯或罗马数字改成中文。1583 年随传教士进入广东肇庆的还有一个钟表匠,在肇庆制

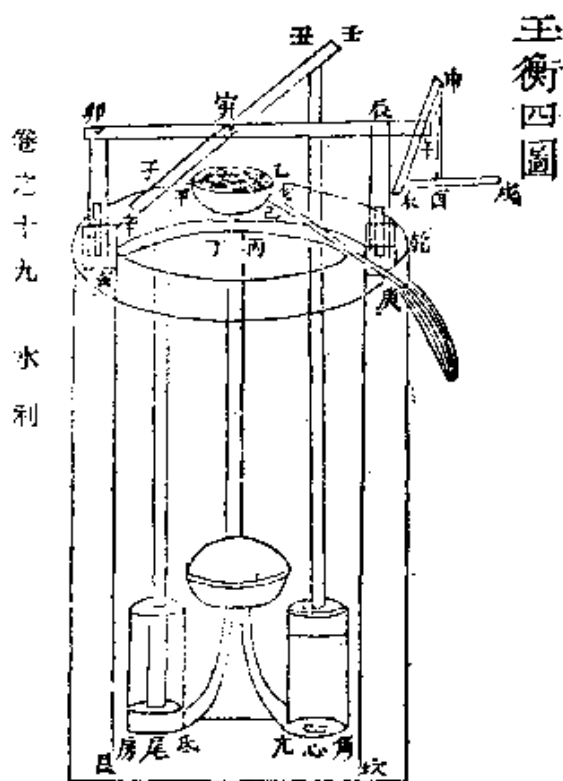


图 16-3 《农政全书》绘玉衡车

钟^①。清康熙帝好西洋机械，尤喜钟表，宫内设制钟作坊。乾隆初期成书的《红楼梦》，不仅多次描写了贾府中自鸣钟，而且还有专门“收拾”（修理）自鸣钟的匠人，书中主人公贾宝玉有核桃大的金表^②。北京圆明园特设“钟房”。十八世纪后期，中国人学会制造钟表中的游丝和发条。1796年，徐朝俊的《高厚蒙求》成书，其中《自鸣钟表图说》分别叙述了钟表名目、配轮齿法、作法、修钟表法、装拆法和使用法等10节。在“作法”一节中详细记述了作游丝和发条的方法。

另一件值得我们注意的是，南怀仁和闵明我在康熙十七或十八

① 利玛窦、金尼阁著，何高济等译：《利玛窦中国札记》，中华书局1983年版，第173—174页。

② 曹雪芹：《红楼梦》，第45、58、92回等。

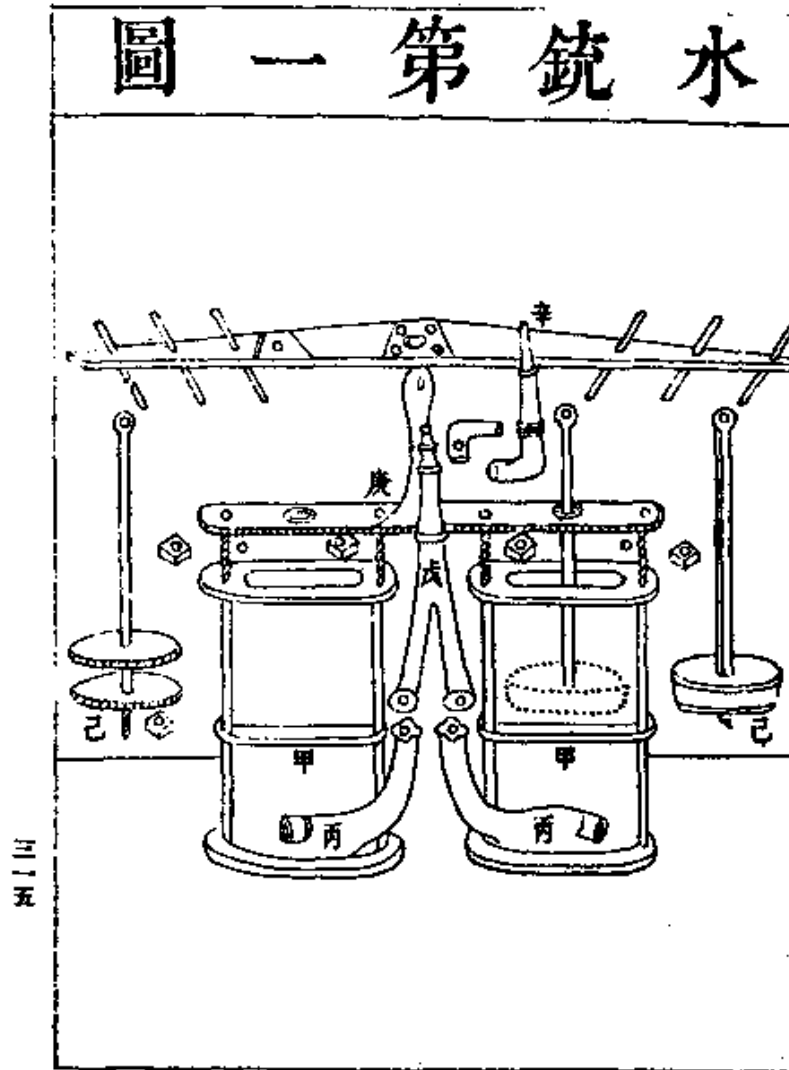


图 16-4 《远西奇器图说》绘水銃

年间(1678 或 1679 年)于紫禁城内为康熙帝制造蒸汽轮机道路车 (Steam-Turbine road-Carriage), 1681 年南怀仁撰写有关论文, 并于 6 年后发表在德国的《欧洲天文学》(Astronomia Europea) 杂志。其中讲道:

三年以前, 当余试验蒸汽之力时, 曾用轻木制成一个四轮小车。长二尺, 且极易转动。在车之中部, 设一火炉, 炉内装满燃烧之煤, 炉上置一汽锅。在后轮之轴上, 固定一青铜制齿轮。其齿横出, 与轴平行。此齿轮与另一立轴上之小齿相衔。故当立轴转

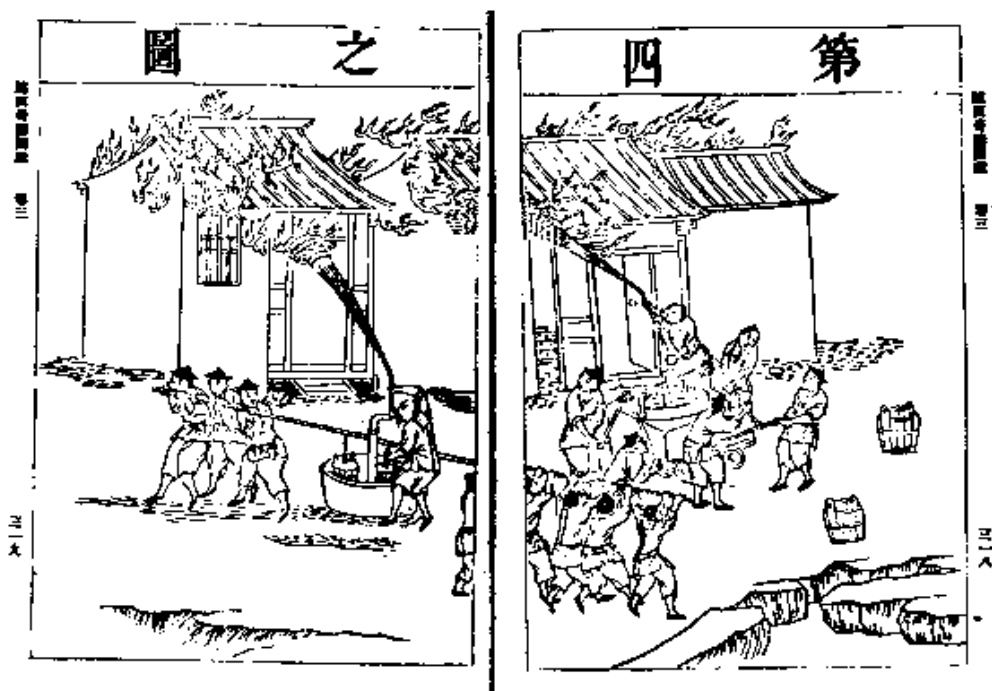


图 16-5 水铕灭火(《远西奇器图说》绘)

动时,车即被推而前进。^①

南怀仁指出,来自汽锅内高压蒸汽冲击轮叶,使轮及轴旋转。试验时,他在车后轴之间装一方向舵,以控制车随意转弯。这一成功又促使他制成一蒸汽轮船、赠予康熙帝。这是在新技术时代的汽车、火车、轮船产生之前,在中国土地上作出的发明之一。

一般认为,南怀仁、闵明我设计的蒸汽轮机道路车是来自罗马设计师布兰卡(Giovanni Branca)于1629年发表的《论机械》(Le Machine)一书中的设想与建议。其后约半个世纪,南怀仁实现了这一设想,并使之成为有实用前途的真正的玩具车。在米兰国家科技博物馆还珍藏了南怀仁蒸汽车的复制品(图16-6)。

^① 方豪,《中西交通史》第4册《明清之际中西文化交流史》上册,台北1954年版,第71页;也见J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4, part 2, pp. 225—227。



图 16-6 南怀仁蒸汽汽车复原模型(藏米兰国家科技博物馆, 引自李约瑟文,第 427 页注①)

二、洋务运动时期创办的军事工业

真正近代机械工程肇始于洋务运动时期创办的军事工业。

1840—1842 年、1856—1860 年,两次鸦片战争的失败,激起了有良知的中国人“开天辟地以来未有之奇愤”^①;1851—1864 年太平天国与捻军起义,清政府以洋枪洋炮镇压了农民起义,促使清王朝统治者下决心、仿西洋开设枪炮工厂。在魏源等人“师夷之长技以制夷”的思想影响下,十九世纪六十至九十年代兴起了洋务运动。这个运动虽

^① 冯桂芬:《校邠庐抗议》卷下《制洋器议》。

然主要是购买和仿制西洋枪炮、船舰,但它却是中国历史上第一次出现的自上而下的机械化和近代化运动。^①

最早认识到要向西方学习生产方式的还是太平天国的领袖们。干王洪仁玕(1822—1864年)于1859年在《资政新篇》中曾提出建立资本主义制度的设想,兴办产业,造火车、轮船,奖励发明创造、欢迎外国人入华传播技艺等主张。曾经留学美国的容闳(1828—1912年)于1862年曾访南京太平天国干王洪仁玕,提出了7条富国之议;1863年他又向曾国藩提出发展中国机械工业体系的设想,其要点是:“先立一母厂,再由母厂以造出其他各种机器厂。”这些母厂“非专造枪炮者,乃能造成制枪炮之各种机械者也。”在容闳看来,发展近代机械工业,首要的是先办“制造机器之机器”,“根本之机器”^②。在洋务运动期间,李鸿章、左宗棠等人也有类似容闳的认识。左宗棠认为,“以机器制造机器,积微成钜,化一为百”,从而达到“更添机器、触类旁通”,“有适民生日用者,均可次第为之”^③。在容闳建议之后,曾国藩即委派容闳向美国购买了一批多达100余种的成套机器设备,它们成为江南制造总局的基本设备,也是中国第一次成批引进蒸汽机、机床等近代机械。^④

从咸丰十一年(1861年)曾国藩首创安庆内军械所到甲午战争(1894年)的34年中,清政府先后在全国各地兴办了30多个军工厂。其中最主要的有:

1863年刘佐禹、丁日昌等创办上海炸弹三局;同年刘佐禹创办

① 杜石然等:《洋务运动与中国近代科技》,杜序第2页,辽宁教育出版社1991年版。

② 容闳:《西学东渐记》,第87页,转引自中国史学会主编:《洋务运动》第4册,上海人民出版社1961年版,第509—510页。

③ 同治五年五月十三日(1866年6月25日)左宗棠折,见《左文襄公全集》奏稿卷一八,第1—6页(光绪十六年刊),转引自朱有瓛:《中国近代学制史料》第一辑上册,第330页。

④ 张柏春:《中国近代机械简史》,北京理工大学出版社1992年版,第13页。

苏州洋炮局；

1865年李鸿章、曾国藩等创办江南制造总局；同年李鸿章又办金陵机器局；

1866年左宗棠办福建船政局；

1867年崇厚办天津机器局；

1869年左宗棠办西安机器局；1872年又办兰州机器局；

1874年瑞麟办广州机器局；

1875年，刘坤一办广州火药局；丁宝楨办山东机器局（济南）；王文韶办湖南机器局（长沙）；

1877年丁宝楨办四川机器局（成都）；

1881年，吴大澂办吉林机器局；刘坤一办金陵火药局；

1883年，刘秉璋办浙江机器局（杭州）；奕譞办神机营机器局（北京）；

1884年张之洞办云南机器局（昆明）；

1885年，刘秉璋办杭州机器局；张之洞办广东枪弹厂（广州）；刘铭传办台湾机器局（台北）；

1890年张之洞办汉阳枪炮厂；

1894年鹿传霖办陕西机器局。

此后，还有盛京机器局（1896年办），河南机器局（1897年），山西（1898年）、新疆（1898年）、黑龙江（1899年）、江西（1903年）、安徽（1907年）等机器局，以及北洋机器制造局（1904年）、四川兵工厂（1910年）等。

这些工厂主要是生产枪支弹药，或轮船、船用蒸汽机。江南制造局还生产各种车床，并供其他厂局使用。他们的规模大小、生产品种与质量各不相同，其间也经历了艰难曲折，甚至官僚徇私舞弊、管理昏庸无知，以致许多厂不能顺利发展。有的时兴时废，或倒闭夭折，或耗资颇巨而成果微小。然而，它们的确是以军工生产为先导的我国从

手工操作向机械化过渡的重要标志,是我国机械工业的嚆矢。亦如李鸿章在同治二年二月初十日(1863年3月28日)奏疏中所言:“洋务为国家怀远招携之要政”,“一切轮船火器之巧技,当可由渐通晓,于中国自强之道似有裨助。”^①

三、江南制造总局与福建船政局

我们以这两个局为例,看看洋务运动时期机械工业的情况。

江南制造总局,又名上海机器局,简称沪局。在曾国藩支持下,由李鸿章委派江海关道“留心西人秘巧”的丁日昌等人筹办于1865年初,购买美商在沪的旂记铁厂(修造轮船为主),并入上海其他两个炮局,而名江南制造总局。容闳赴美购买的100余套机器设备安装于该局后,规模与生产能力大为提高。1867年,总局下设机器厂、枪厂、船厂、锅炉厂、熟铁厂、铸铜铁厂、木工厂(这些厂相当于今日的车间)和其他配套辅助设施;仅技术工人988名,各种机器工具数量581种。其中机器厂有蒸汽机(300马力)2台,起重架9台,各类机床76台和其他机器设备;枪厂有蒸汽机(60马力)1台,汽锤3具,各类机床190台等设备。1891年,又先后建成炮厂、火药厂、枪子厂、炮弹厂、水雷厂、炼钢厂、铜引厂等。该局从而拥有13个分厂、1个工程处的综合性军火工厂。此时有技术工人2172名,机器工具设备4188种,其中蒸汽机(20至300马力不等)32台,各类车床621台,以及相当数量的起重机、汽锤、造炮机等,成为当时远东规模最大的通用机器厂^②。此外,总局还设有广方言馆、翻译馆、操炮学堂(后改为炮队

^① 《李文忠公全书》奏稿卷三,第11—13页(光绪三十四年印行),转引自朱有瓚主编:《中国近代学制史料》第一辑上册,第215页。

^② 杜石然等:《洋务运动与中国近代科技》,第41页。

营)、工艺学堂等机构,是当时中国军工生产和传播科学技术的中心。^①

江南制造总局按李鸿章规定的“以制造枪炮、借充军用为主”的方针,主要生产各种军用武器,其次建造蒸汽轮船、生产各种机床;十九世纪九十年代又开始冶炼军用钢材。在1867—1894年间,各类军用武器中仅火炮生产585门,炮弹1201894发;制造舰船8艘;就机械产品而言,前后生产了大大小小47种机械,大至汽锤、起重机、各种机床、轧钢机和炼钢炉,小至剪刀机和压皮带机。仅1867—1876年的10年间,生产车、刨、钻、镗等各种机床168台,占当时该局机床总数的2/3。它的产品不仅提供本厂再生产的机器设备,而且还支援天津机器局等新建军事工业。

实际上,江南制造总局远未发挥其机器设备的作用。甲午战争的失败,对它也是一个沉重打击。1905年,该局分为江南船坞和兵工厂两部分。1912年,江南船坞又改名为江南造船所。

福建船政局或称福州船政局、马尾船政局,由闽浙总督左宗棠创办于1866年。它是继江南制造总局之后又一个规模巨大的近代化机械工厂。

左宗棠在同治五年(1866年)的一次奏折中曾将中国造船业与西洋各国、东洋日本作了简单比较,鉴于鸦片战争的失败,他说:“自海上用兵以来,泰西各国、火轮兵船直达天津,藩篱竟成虚设,星驰飙举,无足当之。”他提出“以机器制造机器”的同时,认为“防海之害”、“非设局监造轮船不可”^②。他聘请法国人日意格为监督。在他离闽转任陕甘总督期间,又荐举江西巡抚沈葆楨总理船政。从法国购买了全

^① 王兆春:《中国火器史》,军事科学出版社1991年版,第348页。

^② 《左文襄公全集》奏稿卷一八(光绪十六年刊),转引自朱有曦:《中国近代学制史料》第一辑上册,第330—331页。

套机器设备,制定了五年计划并与洋雇员签订了生产与培训中国学员的合同。1869年开始生产。1874年,该局初具规模,拥有大小工厂17个,还有学校、洋员办公所、船政衙门等机构,约有2600人。其中几个厂的机械设备及生产情况如下:

木模厂和锯厂,设有各种形式机械锯,包括磨、钻、车、钳在内机床35台,15马力蒸汽机。曾制造150马力、250马力蒸汽机和单锻压力为7吨重的汽锤木模;

锤铁厂和拉铁厂,相当于锻造车间和轧材车间。前者有汽锤6个(包括单锻压力和双锻压力锤、压力在300—7000公斤不等),锻铁炉16座,再热炉6座。制造了150马力船用蒸汽机的锻制部件、高强度锻件等产品。后者,有6座再热炉,4台由100马力的蒸汽机带动的轧机,生产各种船用铁管、铜板,该厂可年产3000吨轧材;

水缸厂,即锅炉车间,主要为锤铁厂和拉铁厂提供动力,还制造了150马力蒸汽锅炉14台;

轮机厂与合拢厂,即装配车间与安装车间。前者有30马力动力设备,可年产蒸汽机500马力的能力。迄1874年止,已制造7台150马力船用蒸汽机,并有2台接近完工。后者,有动力设备、铸铜炉和铸铁炉。平均每周可铸造12—15吨铸件,如汽缸、冷凝器等。其最高月产量甚至达到90吨铸件的水平;

造船厂,由3个船台组成,可组装龙骨长100米、排水量2500吨船舶;有铁船槽一座,可装修2500吨位轮船,因有机械滑道,该船槽实则为浮船坞,当时在国际上也是先进的修建船用设备;

此外,还有钟表厂(制造船用经纬仪、航海罗盘及部分光学器件)、大机器厂、铸铁厂、截铁厂、打铁厂、样板厂、锯木厂、铜厂、储材厂等。除造船之外,该局还自制许多船用器件和起重机、钻床、碾床。到二十世纪初,该局虽因资金不足而处于停滞状态,但它仍拥有564种机器设备,4370个工人,还是我国设备最齐全、最大的一家专业造

船厂。

1873 年底,外国技师按合同规定撤离该局。此时,先后建成大小舰船 15 艘。1874 年,中国技师与工匠主持造船,厂局的总司或各厂监工均由该局船政学堂毕业生担任。1877 年,又向欧洲派出留学生,加强了船政局技术力量。直到清末,该局自造船舰 25 艘,其造船总数占全国同期造船数的 70%。^①

四、外商与民营机械工业

由于鸦片战争后欧洲列强已取得在中国沿海和内河航运权,因此,外商首先在中国办起了船舶修造厂。1845 年,英国人柯拜(John Couper)在广州黄埔设立柯拜造船厂,从事修船业务。此后陆续增加,至十九世纪六十年代,外商在广州、上海、厦门、福州等地沿海口岸建立大小船舶修理厂 22 家。1876 年英商在上海试用火车,兴办了铁路车辆修理厂。1880 年英国人在唐山建立胥各庄修车厂(1899 年迁至唐山,更改唐山修车厂)。据 1908 年统计,外商在华经办了 34 个主要的机器厂,其中船舶修造厂 28 个,铁路车辆厂 3 个。

二十世纪初,日本加紧对中国侵略,在东北地区开办机械厂。1906 年南满铁路株式会社扩建了从帝俄手中接收的大连铁路工厂,抚顺煤矿机械厂;1907 年又新建沙河口铁路工厂;1908 年川崎造船所扩建了接收帝俄在大连的船坞和工场,等等。

外商在中国经营的机械厂,几乎垄断了中国的机器进口贸易,加重了对中国的经济剥削。同时,他们也将世界各类著名厂家的机械产品展示于中国,在近代化机械生产方面起了示范作用。

^① 陈真、姚洛编:《中国近代工业史资料》第三辑,三联书店(北京)1961 年版,第 12—14 页;张柏春:《中国近代机械简史》,第 14 页。

随着外商的增加、洋务运动中各类厂矿的兴办,民营轻工业和机械工业也随之兴起。早期的民营手工作坊逐渐向机械生产方式过渡。1866年开办的上海发昌机器厂是中国第一家民营机械厂,它较早使用近代车床。随之有广州陈联泰机器厂,上海郭甘章船厂。稍后又有上海建昌铜铁机器厂、均昌机器厂、广德昌机器造船厂、广州均和安机器厂,等等。由于资本微薄,又得不到清政府支持,这些民营机械业都经历了极为艰难的阶段,有些厂最终被外商洋行吞并。

甲午战争的失败、迫使清政府设定了一些奖励发展民族工商业的法令。1898年颁布《振兴工艺给奖章程》,凡发明军用船械、日用新器等,既可获一定时间专利,又可授予工部郎中或主事等官。1903年又颁发《公司注册试办章程》,1906年《奖给商勋章程》,鼓励制造新机器。1907年颁发《华商办理实业爵赏章程》,对于达到一定资产者可分别赐男爵、子爵。在这些鼓励下,尤其是随着社会生产对机械产品需求的逐渐增加,此时期民营机械业有所发展。1895—1913年,仅上海一地民营机械厂新增87家。汉口周恒顺机器厂(1895年创办)、上海大隆机器厂(1902年)、上海求新制造机器轮船厂(1904年)、汉口扬子机器厂(1907年)都是此时期创办的有代表性的民营机械厂,具有一定的资本和规模。^①

顺此述及一点机械工业的兴起与传统观念之冲突^②。当洋务派兴办机器产业时,上层保守派人士警告李鸿章要“慎益加慎”,上奏朝廷“所用洋人机器全行一律停止”^③。李鸿章对此也无可奈何抱怨道:“官坤禁用洋法机器,……文人学士动以崇尚异端光怪陆离见责,中国人心真有不可解者矣。”^④普通百姓也有对新式机器难以承受的心

①② 张柏春:《中国近代机械简史》,第29、25—27页。

③ 中国史学会主编:《洋务运动》第7册,上海人民出版社1961年版,第404页。

④ 中国史学会主编:《洋务运动》第1册,第270页。

理,他们甚至“一闻造铁路电报,痛心疾首,群起阻难,至有以见洋人机器为公愤者”^①。机器生产与传统发生了一时的激烈冲击。有人提出,机器“有伤风水”,“男女同一厂房作工,有伤风化”,“恶果甚多”^②云云。1873年,当广东陈启源办继昌隆机器缫丝厂时,有人鼓动风潮,几将丝厂拆毁。从1895年清政府连续颁发各种鼓励办厂措施之后,情况才有所好转。

五、机械产品的制造

前述江南制造总局和福建船政局时已述及其中某些产品,在此再作些补充叙述。

早期的动力机械大多与造船相结合。鸦片战争之前曾随外国商船谋生的福建晋江人丁拱辰(1800—1875年)留心研究轮船和蒸汽机。1843年,他的《演炮图说辑要》一书刊行,内中述及他召良工巧匠制造小火轮车、小火轮船(图16-7、8)。机车长1.9尺,宽6寸,载重30公斤;轮船长4.2尺,宽1.1尺。其内装配了自造的铜质直立双作往复式蒸汽机^③。从其大小可见,其车和船仅是模型样品。因手工操作,尚无制器之器,故未曾达到实用阶段。但丁拱辰是中国人中第一个对蒸汽机和火车、轮船有所研究并尝试制造而初步成功的人。

1862年,徐寿、华蘅芳、徐建寅等人在安庄内军械所通过研读合信(Benjamin Hobson, 1816—1873年)的《博物新编》中《热论》,制成一台小蒸汽机,次年又制成螺旋桨推进轮船,后命名为“黄鹄”号。该

① 中国史学会主编:《洋务运动》第2册,第304页。

② 孙毓棠:《中国近代工业史资料》第一辑下册,科学出版社1957年版,第959页。

③ 郑复光儿与丁拱辰同时对蒸汽轮船、火车有所注意并研究。在他留心这些机械时,丁两次赠其《演炮图说》初稿中有关内容。郑即在《镜镜论痴》书末附“火轮图说”,刊载丁的有关图稿。

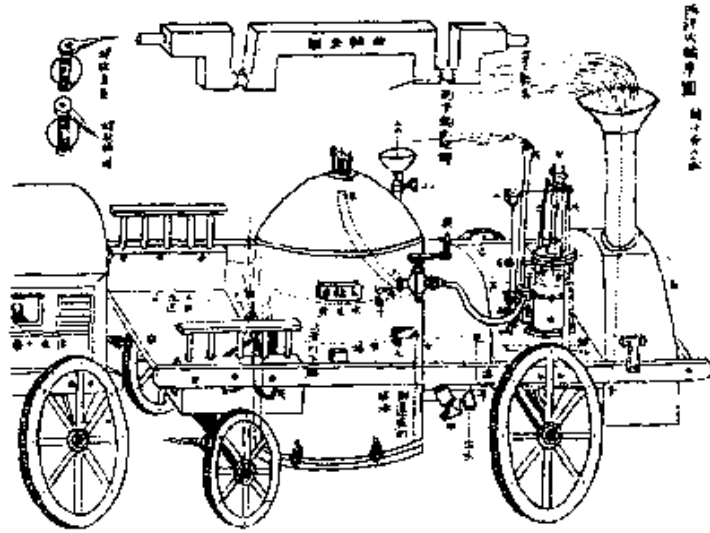


图 16-7 丁拱辰设计的小火轮车

船长 55 尺,重 25 吨,时速 6 海里,这是中国人制成的第二艘蒸汽轮船。1867 年,徐寿、徐建寅父子奉调江南制造总局。从 1868 年他们在江南制造总局制成“恬吉”(后改称为“惠吉”)号兵船开始,到 1885 年,已制成“操江”、“测海”、“威靖”、“海安”、“驭远”木壳明轮船,以及“金瓯”、“保民”暗轮铁甲船。1905 年,江南船坞制造了以内燃机为动力的轮船,以柴油机为动力的单螺旋桨柚木船。1911 年,为亚细亚火油公司造“开焕”号双螺旋桨柴油机钢制驳船,功率为 110 马力。江南制造总局还曾制造一台 300 马力蒸汽机,作为全厂机床的原动机。

福建船政局制造兵船和蒸汽机方面亦成绩显著。1869 年,150 马力运输轮船“万年青”号下水。该船长 238 尺,宽 27.8 尺,排水量 1370 吨,载货 470 吨,动力 150 马力,时速 10 海里。到 1873 年底,先后建成大小舰船 15 艘。从 1874 年到 1880 年,中国技术人员独立建成 8 艘船舰。1881 年进入一个新阶段,开始建造巡洋舰“开济”号。1885 年又建铁肋钢甲舰和钢甲巡洋舰,标志我国造船技术进入一个新水平。从 1866 到 1907 年,船政局共造舰船和商船 44 艘;从材料结

构言,有木船,铁木合构船,钢船;从用途言,有商船、炮舰、巡洋舰、穹甲舰、钢甲舰、鱼雷快艇、浅水舰、鱼雷艇及练船、拖船、小机船。这表明船政局制造动力机械和运输机械的水平逐渐提高,偶尔能有与同期先进水平不相上下的机械产品,其中一些舰艇在甲午海战中发挥了一定的战斗作用。

洋务运动时期其他一些机器局或船局、一些民营机器厂都陆续生产制造了小型蒸汽机、小轮船。据记载,天津机器局于 1880 年由一个不知名学者设计制造了一艘潜水艇^①。可惜,这个设计者的名字未留下来。

1881 年胥各庄修车厂制造了中国第一台蒸汽机车“中国火箭”号,牵引力约 100 吨。该厂迁唐山后,又装配了中型机车。1903 年,民营的求新制造机器轮船厂、扬子机器厂制造了铁路客货列车。

内燃机的仿制起于广州均和安机器厂。该厂于 1908 年仿制成功单缸 8 马力煤气机。其后,求新制造机器轮船厂也仿制成不同马力的煤气机、25 马力煤油煤气双燃料发动机。^②

在飞行机械方面,除了十五章最后述及苏州吴正明受《山海经》

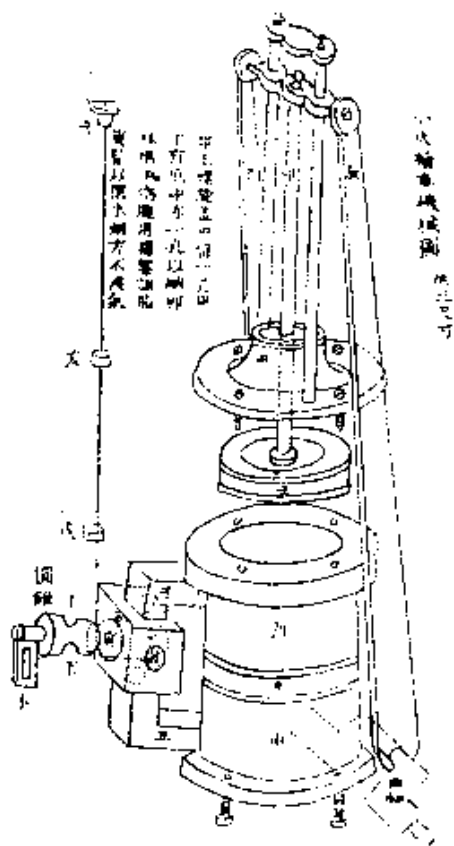


图 16-8 丁拱辰设计的蒸汽机
中部分机械

^① 杜石然等:《洋务运动与中国近代科技》,第 69 页。

^② 张柏春:《中国近代机械简史》,第 39 页。

启发而制造脚踏滑翔机之外,国外华人作了不少研究,且有与西方人同样的成就。如,在莱特兄弟影响下,1907年冯如(1883-?)在美国研制飞机,并于1909年试飞成功。在国内,1894年谢纘泰设计制造铝壳飞艇,艇上装发动机、螺旋桨,并于当年试飞成功。1910年清政府在北京南苑建厂制飞机。

在机床和其他机械方面,也都有一定的仿制能力。除前述江南制造总局、福建船政局外,其他各洋务厂局、民营机械厂都能生产或装修某些机床或小机器。在纺织机械方面,1872年筹办的广东继昌隆缫丝厂、1887年筹办的上海永昌机器厂,都能仿制全套缫丝机。大约1910年,轧花机、轧油机、织布机、卷烟机、印刷机、面粉机、碾米机,及各种农业机械等均能仿制生产。

六、近代机械工程教育的肇始

早期近代机械工程教育要比前述物理学早而且系统,因为在当时,物理学仅仅是机械工程教育中的一门学科。

1866年开办福建船政学堂(原名求是堂书局)。其前学堂专学法文和轮船制造,分制造学堂(造船科)、绘事院(设计科)和艺圃。绘事院是中国近代机械制图教育的开始。后学堂专学英文和驾驶,也分三科,即驾驶学堂、练船和管轮学堂。基本课程中,除数、理、化和外语外,有重学(力学)、热学、机械学、机械制图、蒸汽机构造、航海术、驾驶方法与轮机修理、保养等。然后,据其所学而到局内各厂或船上实习。学制一般为3年。1866年到1873年,学生数由60名增加到300余名。由于教学严格,重视实践,该学堂先后培养了一批有设计制造与驾驶能力的技术人才。1875年船政局曾派魏瀚等3人赴法国学轮船制造。1877年船政学堂派33名学生分赴法、英学习。严复(严宗光)是这批学生之一。出国留学前,船政大臣沈葆

楨于 1874 年制订三年出国学习课程设想, 其中如水力重学(水力学)、汽学(热力学)、材料配力之学(材料力学)、画图(机械制图)、轮机制造与轮机学、轮机重学(机构与机件学)等。这批学生回国后, 分别担任船政局总司或各分厂监工, 他们接替了外国教员和技术人员。1892 年起, 驾驶教习全由中国人担任; 1902 年起, 制造教习也全是中国人了。可见, 船政学堂成为培养中国近代海军技术队伍和机械人才的摇篮。

辛亥革命后, 福建船政学堂与船政局分置。学堂也分为制造学校(原前学堂)、海军学校(原后学堂)和艺术学校(艺圃)三个独立学校。福建船政学堂前后共历 46 年, 成为清末培养技术人才的最高学府。

江南制造总局于 1874 年办操炮学堂(后为炮队营, 又并入工艺学堂)。1898 年设工艺学堂, 分化学工艺和机器工艺两科, 开设“分化物质诸理法”和“重力汽热诸理法”。学生以所学到相应厂实习。华蘅芳教数学, 徐华封教化学, 王世绶教工艺, 杨渐逵教绘画, 华备钰教机器。1905 年该学堂改为工业学堂, 后又改为兵工学堂。但培养人才并不多。

此外, 广东实学馆、天津水师学堂也都设有与机械相关的课程。

戊戌变法前后, 机械工程教育有所发展。1895 年创办的中西学堂设有采矿冶金、机械、土木工程等科, 开创了我国高等机械工程教育; 南洋公学于 1910 年设立电机实验室。在二十世纪初的几年间, 清政府确定大学堂章程, 规定机器工学科为 23 门: 算学、力学、应用力学、热机学、机器学、水力学、机器制造学、应用力学制图及实验, 计划制图及实验, 蒸汽及热力学、机器几何学及机器力学等, 辅助课有电气工学及实验, 冶金制器学、火器及火药、房屋构造等等。第三年末毕业时, 呈交毕业课艺及自著论说、图稿。1903 年, 京师高等实业学堂及其他一些学校设有机械科。从此, 机械工程教育正式列为国家法定

教育之一。^①

出国留学,学工科者也比理科早。1872年容闳带领30名幼童首次赴美留学,学工科学生中成绩卓著的如詹天佑。留欧学生有福建船政学堂派遣的。二十世纪初大批学生留学日本。迄1911年止,清政府共派留欧学生107名,其中学造船41人,学机械制造4人,蒸汽机2人,飞机1人。1909年,另有23人赴英美学习飞机、潜艇。^②

西方机械工程书籍的翻译出版,尤其是洋务运动期间翻译了一批数理化和轮船、机器之学,对中国机械工程教育和普及也起了一定作用。其中较重要的译书有:

伟烈亚力与徐寿合译的《汽机发轫》;傅兰雅与徐寿的《汽机命名说》、《匠海与规》、《机动图说》、《铁甲丛说》、《造管法》;傅兰雅与徐建寅合译的《汽机必与》、《汽机新制》、《器象显真》;傅兰雅译《汽机锅炉图说》、《西画初学》及其编写的《纺织机器图说》、《农器汇说》、《工程机器器具图说》、《造瓷机器择要》、《金类器皿机器图说》;傅兰雅和华备钰合译的《制机理法》、《兵船汽机》等。这些书的内容涉及蒸汽机、轮船、舰艇、电机、各种机床、纺织机械、农业机械、机械零件等的结构原理和制造工艺。除蒸汽机、轮船外,其他机械大多是首次介绍到中国。也有些翻译及时之作,如英国人蒲而纳(J. Bourne)于1865年出版的《蒸汽机原理和用法》一书,1872年即以中文本《汽机必与》在中国问世出版。而江南制造局、以及傅兰雅、徐氏父子对传播西方机械工程知识作出了巨大贡献。同治九年(1870年)总办机器制局冯焌光、郑藻如上督抚宪禀书,其中表彰这些人的翻译工作道:“此数人者,竭虑殚精,条分缕析,入深出显,竟委穷源,于西人格致之学,均能

① 舒新城:《中国近代教育史资料》中册,人民教育出版社(北京)1981年版,第605—606页。

② 张柏春:《中国近代机械简史》,第46页。

有所发明。”^①此期间,江南制造总局、福建船政局曾出版一些工程技术名词术语表或辞典,对学堂教学和译书也有所裨助。

第二节 近代机械工程的初步发展

从1912年到1949年,我国机械工业得到初步发展^②。但由于这期间时局动荡,发展极为艰难曲折。大体上,1937年之前初步奠定了民营机械工业的基础,初步形成了近代体系的机械工程教育与科研机构。由于日本帝国主义对中国发动全面的侵略战争,1937年后,机械工业的格局发生了变化,沿海发达地区的厂矿、学校与学术机构纷纷内迁至西南、西北地区,机械产品的生产也需调整到适宜战时的需要,但也提高了机械产品的生产与自给能力。

一、机械工业的发展和仿制技术的提高

辛亥革命的成功,第一次世界大战期间西方国家经济萧条,五四新文化运动期间抵制日货、提倡国货的呼声,这些条件都为中国民营机械工业在1915至1924年间的发展带来了好时机。此期间,仅上海地区民营小型机械厂由91家增加到284家;江南造船所在1918—1920年间曾按照美国提供的设计为其制造万吨级运输舰配套的4台3000马力巨型主机。1918年,上海王岳记机器厂制造出中国第一台3号万能铣床。1926年,上海丰泰机器厂和福昌祥机器厂分别制

① 朱有璩:《中国近代学制史料》第一辑上册,第225页。

② 本节文字主要参照《中国大百科全书·机械工程》中“中国近代机械工业”;张柏春:《中国近代机械简史》有关内容,特此申明,不敢掠美。

造出 1 号、2 号万能铣床。

国民政府奠都南京之时,方谋国民工业发展之策,陆续推出《奖励工业品暂行条例》(1928 年),《特种工业奖励法》(1929 年),《奖励工业技术暂行条例》(1932 年)等,对民用机械制造业的发展起到了一定作用。1937 年之前,在各地形成了一些专门从事机械制造的工厂。生产纺织机械的有上海大隆机器厂,上海中国铁工厂和寰球铁工厂;生产内燃机的有大隆机器厂,上海新中工程公司,武汉周恒顺机器厂,广州协同和机器厂、山东潍县华丰机器厂;生产发电机的有上海华生电器厂;生产车床的有上海荣昌泰机器厂;生产农机具的有无锡工艺机器厂,江苏农具制造所;生产缝纫机的有上海协昌、润昌缝纫机行;生产钟表的有烟台中宝时钟厂;在修造船舶方面有江南、马尾、求新、大沽、黄浦等厂;在铁路机械修造方面有长辛店、唐山、四方、江岸等厂。据统计,1936 年全国除东北地区外有机器厂 781 家(不包括大小船厂和铁路机车车辆厂)。其中,如大隆机器厂,1920 年初创时仅有机床 10 台,1930 年增加到 100 台,且能自制车床和牛头刨床;1932 年建立化验室,尝试流水作业,加强产品检验;迄 30 年代中期,已有设计部、试验部、工具部、原动机制造部、纺织机械制造部以及机器设备 500 余台,形成了制造整套棉纺机的技术。虽然,像大隆这样厂还不多,而且,就技术力量而言,也只有上海大隆、新中、新民、济南陆大、武汉周恒顺、重庆华兴等少数机械厂有工程师,但是,民营机械工业已有一定的修造和仿制机械的能力,其机械工业基础已初步建立。

奠都南京之后,国民政府也开始考虑并重视机械工业的建设。1931 年在上海筹建中央机器厂。国际知名物理学家王守竞毅然离开北大讲坛,投身工业建设,出任该厂筹委会主任,组织了强大的筹备班子,在国外购买机器器材。刚就绪,日本帝国主义大举侵略华北、华东等地,迫使该厂建厂计划停顿,并迁往西南内地,损失惨重。1936

年,国民政府又在湘潭开始筹备中央电工器材厂,下设电线电子管、照明设备、电话机、电机四个分厂。由于同样原因而被迫迁昆明。1934年航空委员会在杭州建设中央飞机制造厂,1936年在南昌又建飞机厂以专门制造轰炸机。当然,这些工厂都靠进口发动机和重要零部件维持生产,实属飞机装配修造厂。即使如此,也因资金不足而难以生产。

日本帝国主义侵华期间,为其侵略战争服务而在我东北地区设立了大量的机械厂。据不完全统计,迄1938年止,除满洲飞机制造厂等直接生产军工产品的工厂外,新建200多个机械厂,其中设在沈阳、大连、鞍山、抚顺等地的就有180多个。

1937年之前,我国能够生产的主要机械产品如下:动力机械中有:40、50马力以下柴油机,100马力左右狄塞尔柴油机,200马力以下煤气机,160马力以下蒸汽机,200马力以下锅炉,200千瓦以下交流发电机和电动机,6600伏以下变压器;机床有:18英尺普通车床,14英尺龙门刨床,摇臂钻床、万能铣床、冲床等中小型机床和锻压设备,以及自动螺丝机、轧钢机、拉钢丝机;交通机械中有:排水量4275吨长江客货轮,排水量2383吨护航舰,轮船机器,铁路机车机件,汽车机件,人力自行车;以及小型各类纺织机械,农具机,起重机,造币机,小型离心泵,风机,空气压缩机,一般化工机械,文化用品机械,普通医疗器械等等。自然,某些主要原材料和零件仍然依靠进口。

1937年起,随日本帝国主义大举向华北、华东、华南等地发起侵略战争,沿海地区机械工厂纷纷向西南、西北内地迁移。到1939年,全国民营机械厂内迁143家;到1941年太平洋战争爆发时,增至230家。内迁后能复工者198家。这些内迁厂多分布在四川、湖南、广西、陕西等地,以重庆居多。有些厂经沿途多次搬迁,几乎丧失殆尽;有些厂只迁出部分,多被日军炸毁或落入日军之手。留在沦陷区的某些厂,或者迁入租界内以求生存,但在1941年日军占领租界后而被

迫减产、停产；或者被迫转而生产军需用品，为日本侵略者服务。

由于受战争环境和工业品奇缺的刺激，机械工业曾一度有所发展。重庆国民政府先后颁布《工业奖励法》，修订了《奖励工业技术暂行条例》等法令。民众关心、支持抗战，大批科学家放弃原有的理论研究而投身实际生产部门^①。这些都曾促成抗战初期阶段机械工业的发展势头。至1941年底，西南后方324家机器厂共生产机床2615台，蒸汽机107台，煤气机457台，柴油机13台，水轮机14台，小型纺纱机1306台，其他机械1万余台。后方机械厂的厂数超过战前，机械制造的能力也高于战前。

在这些机械厂中，从规模、设备、技术、生产能力与管理水平看，能代表当时中国机械工业水平的还是几家官办工厂：中央机器厂，中央电工器材厂，飞机厂，兵工厂等。中央机器厂几经挫折后于1939年正式成立于昆明，初设5个分厂（汽轮机、锅炉、煤气机、发电机、汽车分厂）和4个处，有215台机器设备、近千名工人，其中有美、德产名牌机床，全套先进检验设备。1941年，在运送从美购进的汽车装备的途中遭日军抢劫；另一部分汽车设备因运输困难未曾抵达昆明，于1942年也落入日军之手。1942年该厂改组为7个厂：金属冶炼、蒸汽锅炉、内燃机、发电机、工具机、纺织机和普通车床厂。1943年，该厂已有521台机器设备，员工2475人，其中技术人员400余人。其总体水平不次于欧美普通机器厂。但由于受市场销售量小的影响，产品多、批量小，并未完全发挥其作用和实力。其他官办厂也有类似情形。

迄1943年止，大后方除近百家军工厂外，有民用机械厂1477家。机械工业成为三大工业（纺织、化工、机械）部门之一。这时期的

^① 仅以物理学家为例，除1938年出任昆明中央机器厂厂长的王守竞之外，又有翁文波主持甘肃油矿局；颜任光、蔡金铸主持桂林无线电器材厂；葛正权主持航委会氧气制造；龚祖同主持兵工署军用光学器材制造；方声恒主持中央工业试验所电学仪器制造；吴学蔭主持中央机器厂第一分厂即金属冶炼厂，等等。

主要产品是：在动力机械方面，仁记、恒顺机器厂、中国制钢厂等厂的 200 马力蒸汽机，中央机器厂、新中工程公司等厂的 65 马力、1800 转/分的四缸柴油机，中央机器厂等厂的 250 马力、600 转/分的煤气发电机组，上海民生、中央等机器厂、中央电工器材厂的水轮机，等等；交通机械方面，中国汽车制造公司改装的桐油汽车，新中工程公司等改装的煤气车，中国汽车配件厂等生产的汽车齿轮、引擎、活塞等零配件；纺织机械方面，中央、四方、恒顺等机器厂，广西纺织机械厂生产的大型纺织机械；在工具机方面，中央机器厂、中央工业试验所机械厂的车床、铣床、磨床、刨床、钻床、铣刀等各种刀具；兵器方面，兵工署各厂的 150 毫米迫击炮、中正式 79 步枪等。此外，还有金属、纺织等方面试验仪器、航空器材。

大后方的民营机械厂大多经历了通货膨胀之苦；1942 年，工业衰落，机器滞销；或由于资金困难，经营维艰，常处于歇业、停业之萧条状态。有部分工厂，受日军轰炸、破坏，损失惨重。

在解放区也有一些机械厂、兵工厂。除生产枪炮等武器外，也生产民用产品。陕甘宁边区茶坊一厂在 1943 年前后还自行设计并生产车床、铣床、刨床、钻床等，成为实际上的一个通用机器厂。但是，这些厂的实际规模都很小。

抗日战争胜利后到 1949 年间，机械工业如同其他行业一样，处于衰落时期。日本帝国主义投降时，大量地破坏工业厂矿。接着，苏联军队又迁走了东北机械厂中许多关键设备。国民政府在接收或改组日本占领地各厂矿中，各种腐败现象蔓延，致使工厂不能恢复生产。大后方工厂迁回沿海各地，或分散设厂，又一次改变工业布局。从官营到民营的机械厂，都存在缺少资金、无人投资、难于恢复生产，或物价暴涨、市场萧条，而不得不停产。

在这一时期，机械工业标准的制定与推广是一件有重要意义的工作。早在 1917 年，北洋政府交通部成立了“铁路技术标准委员会”，

詹天佑为会长。1920—1921年间,该会设计了标准机车、客车,制定了机车制造规范、车辆材料规范。这是中国最早的近代工程技术标准。1932年,经南京国民政府行政院批准,正式成立“工业标准委员会”,该委员会机械组有33位委员。1935年开始编订中国工业标准,1940年公布《中国工业标准草案》,其中有关机械工业标准152种。这才逐渐使不同机械零部件的配制与生产工作有了一个初步的公共规范。此后,中国工程师学会和全国度量衡局也分别成立了工业标准机构。1947年,工业标准委员会和全国度量衡局合并组成中央标准局。

二、教育、科研机构 and 学会

近代机械工程的高等教育、研究与学术团体的起源与发展,有与前述物理学相同的背景。

1921年,东南大学设立机械工程系,系主任李世琼。同年,刚改组成立的上海交通大学也成立机械工程系,系主任为周仁。这是我国高等机械工程教育的开始。到1936年前后,有19所院校开设机械工程系或专业。其中,交通大学、清华大学、北平大学、中央大学、浙江大学、同济大学、山西大学、武汉大学、中山大学、北洋工学院的机械工程系发展较好,教学课程较齐全,教师阵容较为强大。以1934年清华为例,该系为4年制,有70余门课程,较齐全的实验设备和实验室。一年级开设自然科学基础课;二年级为工程基本训练,设力学、机件学等课程;三年级开设普通机械工程课,如热力工程、机械设计、机动力学、热工试验等;四年级分科组训练或设计:原动力工程组训练筹建、试验并设计发电厂;机械制造组设计、创作和制作机械;航空工程组训练装卸飞机发动机,通过试验和比较进而学习制造飞机。

1936年,中央大学机械工程系开办特别研究班,招收本科毕业

生,教授两年航空知识。抗战时期便以此为基础成立了中国最早的航空工程系。

抗战开始,学校内迁西南、西北地区。在战争环境下,图书资料、实验设备甚为奇缺,师生教室及住房也极为简陋。但师生们教学风气极好。为适应战时对技术人才的需要,招生人数增加,教学内容作了相应调整。此时更注重一般机械原理、设计与制造的教学,以满足战时对毕业生的各种社会需求。然而,研究生的教学一直未曾很好地建立起来,虽有个别教授招收了极个别的硕士研究生,但当时大学毕业生多以赴欧美留学为时尚。

1940年延安成立自然科学学院,附机械实习工厂。这是中国共产党创办的第一所培养技术人才的学校。1941年该院设系,物理系内设热机学、机械原理、经验设计等课程。可惜,该院因整风、大生产运动而停学二年。1944年,物理系改为机械工程系,在以政治为主课的前题下,学生学习一些国内通用机械教材。抗战胜利前,有42名学生。

同物理学一样,高等机械工程教育的教材也经历了从洋教材到本国教授自编中文教材的过程。1930年前后,在自编教材中有冯雄的《机构学》(1933年出版)、《机械设计》(1934),何乃民《汽车学纲要》(1930)、《高等汽车学》(1936),顾复《农具学》(1927)、《农具》(1933),蔡昌年《水力机》(1937)等。刘仙洲编著教材成绩突出,他从1921年编写《机械学》到1936年《热机学》,编写教材近10种。这些教材既表明中国机械工程教学水平的逐渐提高,又便于该学科在中国生根成长与传播。

有关机械工程研究机构的建立始于1930年前,1928年成立中央研究院,下设工程研究所,但该所未设机械工程机构。1930年,中央工业试验所成立于南京,初分化学与机械两组。首任机械组组长张可治。这个机械组是中国最早的机械工程试验研究机构。该组在抗

战前进行了材料和动力试验、热工实验、机械设计与制造等方面的研究。1937年,该所迁至重庆,先后在北碚、磐溪、内江、嘉定等地设立机械设计、动力、电气、热工、材料等17个试验室,开办了机械制造、电工仪表、油脂、制革鞣料等11个实验工厂,在一些城市设立了工作站。1942年在兰州成立分所,所长顾毓琇。

1939年航空委员会在成都创办航空研究所,所长为王光锐、王助。下设器材组、飞机组、气动力组。1941年该所扩充为航空研究院,下设器材系和理工系,又分12组,研究飞机结构、动力、飞行理论、设计制造和仪器仪表等课题。迄1945年止,该所先后研制了木质和竹质教练飞机,发表了30余篇研究报告。此外,清华大学金属研究所(所长吴有训)和航空研究所(所长庄前鼎)也从事金属材料和航空研究。1940年,清华航空研究所建成5英尺口径的风洞,是当时国内唯一可供试验研究用的风洞。

此外,还有省办的工业试验所,其中有的也设机械方面的机构。如:山西工业试验所(成立于1917年),河北工业试验所(1929年),湖南工业试验所(1933年),陕西工业试验所(1935年)等。另有私办的某些专门性试验所,如:1938年在重庆成立的纺织机实验所。个别工厂也具有实验、研究能力,如:王守竞执掌的中央机器厂,在他的督导与倡议下,几乎每个车间都是一个实验室。该厂培养了一大批既能研究问题又能动手制作的技术人才。一些大学的机械工程系也倡导教学与研究并重的风气。

抗战胜利后,机械工程研究处于沉寂时期。其中,中央工业试验所分别迁往南京、上海,进行部分重建;留在重庆的部分,改组成重庆工业试验所。1950年该所由中央人民政府轻工业部接管,改称上海工业试验所。从抗战胜利到1949年间,为建成全国试验网,还成立了北平、台湾工业试验所,广东、湖南、湖北等省工作站。但因种种因素影响,这几年间几无实际的有成果的工作。

中国机械工程学会正式成立于三十年代。但此前成立的工程师学会已包括机械工程学科。1912年詹天佑发起成立中华工程师会,1913年又与另两个学会合并而成为中华工程师学会,1922年该会设机械干事。1918年留美工科学生发起成立中国工程学会。1931年,中华工程师学会与中国工程学会在南京合并为中国工程师学会,开展包括机械在内的各学科的学术活动,出版《工程》与《工程周刊》杂志。在中国工程师学会下,1934年成立中国航空工程学会,中国电机工程学会;1935年成立中国自动机工程学会。

1935年,庄前鼎、杨毅、顾毓琮、王仕倬、王季绪、李辑祥、刘仙洲等在清华大学发起筹备中国机械工程学会。1936年在杭州正式成立,选举黄伯樵、庄前鼎为正、副会长,会址设在南京。下设原动机,自动机,普通机械,矿冶机械,铁道、航空、造船、兵器、纺织、农业、化工机械等组,出版《机械工程》季刊。抗战开始后,该刊暂停出版。1941年,学会改选,成立了7个地方学会,出版《机工通讯》,并参与中国工程师学会战时工作审查委员会等活动。1944年,中国农具学会成立于重庆。

1941年,陕甘宁边区成立机械电机学会,活动范围仅限于解放区。

统一机械工程名词术语的工作始于1928年。先后编订《机械工程名词草案》、《机械工程名词》、《英汉对照机械工程名词》。后者于1941年由重庆国民政府教育部审查通过。

结 语

一

中国的科学技术经历了从古代传统到近代科学两个历史阶段。在古代传统阶段,它曾有过光彩夺目的成就,在相当长的时间内居同一时代的世界民族之先。当世界步入近代时期之后,中国的传统科学还在封建土壤上蹒跚而行,而西方的科学却突飞猛进。中国的物理学和机械工程两大学科可以说是这一历史趋势的典型代表。在吸收、消化西方近代物理学的基础上,中国近代物理学才于二十世纪初开始起步与发展,而机械工程是在洋务运动期间开始起步的。

为什么高度发达的传统中国科学竟没有进入或上升到近代科学阶段?对于这个曾被称为“李约瑟问题”的答案显然是多方面的,而且几乎每个人都可以摆出自己的几条见解。但是,归根结底不外乎两大原因:一是社会的总体生产水平制约着传统科学的发展;二是传统科学固有的某些不足与缺陷。

就社会的总的生产水平看,众所周知,至少从十八世纪英国产业革命起,西方的生产方式从粗制的手工工具向机械化过渡。十八世纪下半叶,纺织机械、蒸汽机、工作母机、钢铁技术与采矿技术有了飞跃发展。相当于这个时期的中国是康熙后期到乾隆年间,中国仍然处在

手工工具的历史阶段,王祯曾描绘的水转大纺车、传统的钢铁技术当然比不上西方的机械化,更何况这些传统中的先进技术并未完全、普遍地被应用。十九世纪起,在西方兴起了大工业生产、交通机械开始现代化,从而又促成建立世界市场;而中国的绝大部分地区仍是自给自足的封建经济与手工生产,洋务运动兴办的个别军事工业即使在中国的社会生产中也只占很小比重。同时,在中国土地上生活着的人们却受尽帝国主义的掠夺与侵略,接二连三的不平等条约刮尽了中国土地上的白银与黄金。这就是在近代中国科学技术落后于西方的一个最根本的重要原因。^①

至于中国传统科学中诸多方面的不足或缺陷^②,虽然是中国科学技术落后的原因,但它只能对某一历史阶段的落后起影响作用。如果有良好的国际环境与社会环境,有发达的生产基础,善于取长补短、善于学习的中华民族会在一个较短的历史阶段中(例如一个世纪)改变这种局面。

二

比较一下东西方古代物理学的发展过程也是颇有意思的。在西方,亚里士多德、阿基米德最早观察、记述了一些物理现象,总结了个别的物理规律,但在古罗马后期开始的一个很长时间里,几乎没有什么进展。在中国,从《考工记》的作者和墨家开始,一直到西方传教士大批入华的十六世纪,对物理现象的描述与记载持续不断。古代西方人探讨物理现象时多少含有理性成份,纵使某些理性在今天看来是

① 详见戴念祖:《中国近代科学技术落后的三大原因》,《大自然探索》1983年第1期。

② 详见中国科学院自然辩证法通讯杂志社编:《科学传统与文化——中国近代科学落后的原因》,陕西科学技术出版社1983年版。

完全错误的,他们也要从此出发对现象作出解释。在中国,除了早期墨家有些实验和逻辑推理外,大量的物理发现是经验知识的总结。这些经验或来自生产、或来自生活:弹性规律的发现完全由于测试弓力的实践;相对性原理的发现来自众多的无数次的乘船生活经验。自然,其中包含了中国人敏锐的观察能力。善于从实践经验中总结自然法则曾使中国古代的物理学出现过辉煌成就。然而,进入近代阶段,绝对地依赖经验又使中国传统科学处于极为落后的状态。毕竟从近代起,科学已不是决定于经验,而更多、更大量的是决定于实验和理性。

由于中国古代的物理学是经验的物理学,因此,某些物理规律的发现往往被记述于相隔几十年到几个世纪的著作之中。自然,这里难免有相互传抄的可能,但从经验出发,后来人很可能也是根据自己的或来自同时代的经验而将同一规律或发现撰入自己的著作之中。基于同样的理由,也很难说清楚某人就是发现某一物理规律的物理学家。例如,郑玄在注疏《周礼》中记述了此后很久才被英国人胡克发现的弹性定律,但是郑玄肯定不是弹性定律的第一个发现者,在郑玄之前从事弓箭制作并测量其弓力的工人,都有可能察觉这一规律并将其经验告知他人。

我们注意到,在古代经、史、子、集的图书分类中,物理学不属于其中任一门类,没有一本集中记述物理现象的著作。由于天文、算法、医药、术数被古代人列入其图书分类的子部之中,子部图书颇受科技史界重视。子部中的《墨子》、《韩非子》、《淮南子》、《论衡》、《梦溪笔谈》、《谭子化书》、《物理小识》等等确也较深刻地记述了某些物理现象。史部中的二十四史、《营造法式》等等是研究历史和科技史不可或缺的,但是,集部中的诗文别集尚未引起人们普遍注意。其实,古代人将物理现象撰入诗词之中不乏其例。例如,唐代诗人韦应物的“滁州西涧”一诗可谓妇孺皆知,它写道:

独怜幽草涧边生，上有黄鹂深树鸣。

春潮带雨晚来急，野渡无人舟自横。

该诗的最后一句描写了渡舟在波浪中横置于水流方向的情景，其物理思想的价值却鲜为人知。这个现象正是十九世纪后期声学家瑞利(Lord Rayleigh, 1842—1919年)提出以声盘作为绝对测量声场强度装置的基本原理^①。虽然不能说韦应物发现了这一原理，但他的物理观察能力是相当仔细的。

除了以上三部类的图书之外，经部图书往往被忽视。而物理学的一些重大发现却又常常载于经部图书之中。例如，世界上最早记述弹性定律的是《周礼》，它属于“经部·礼类”；世界上最早记下相对性原理的现象是《尚书纬·考灵曜》，它属于“经部·讖纬类”；最早对共鸣作出定义的是《春秋繁露》，它属于“经部·春秋类”；而有关声学内容的著作，除了史部二十四史中的乐律志之外，几乎都在“经部·乐类”之中。可见经部图书对研究中国古代物理学的重要性。

不像农、医、天、算等学科，古代物理学没有一本专门之作，却又可以在古代图书分类的任一类著作中找到有关物理现象的记述。由此，人们不能不想到《周礼·考工记》中关于“粤无镈、燕无函”的一段文字。这不是真的、完全的无，而是因为在那些地方，人人都能造镈，人人都能制函。《考工记》说：

粤之无镈也，非无镈也，夫人而能为镈也。燕之无函也，非无函也，夫人而能为函也。

古代中国没有专门的物理学著作，是否与“粤无镈、燕无函”的意义有所雷同呢？然而，这也正是尚未分科的古代科学的特征。

^① 戴念祖：《中国声学史》，河北教育出版社1993年版。

三

在对古代的机械制造作出一点结束语之前,我们还是先借用李约瑟博士的学术成果。他说:

我们必须记住,在早些时候,在中世纪时代,中国在几乎所有的科学技术领域内,从制图学到化学炸药都遥遥领先于西方。从我们的文明开始到哥伦布时代,中国的科学技术常常为欧洲人望尘莫及。^①

李约瑟博士的研究表明,在中国人大量的创造发明中,于公元一世纪至十八世纪的不同时间里传到欧洲和其他地区的发明就有:

(a)龙骨水车;(b)水转石碾;(c)水力操纵的冶炼鼓风机;(d)旋转风扇和扬谷机;(e)活塞风箱;(f)提花机;(g)缫丝机;(h)独轮手推车;(i)帆车;(j)磨车;(k)高效牲畜挽具;(l)弩;(m)风筝;(n)竹蜻蜓和走马灯;(o)钻井术;(p)铸铁;(q)“卡丹”吊环(即被中香炉);(r)拱桥;(s)铁索吊桥;(t)运河闸门;(u)船舶和航运原理;(v)船尾舵;(w)火药并用作军事技术;(x)磁铁指南针并用于航海;(y)纸、印刷术、活字和金属活字;(z)瓷器。^②

他一口气列出了26项,将26个英文字母都用完了。但他认为还有许多重要的机械发明未曾列出;有些机械似乎从未传播到别的文化圈,如指南车、连弩等。而当传教士进入中国的十六、十七世纪,能给中国文明有所贡献并且是中国真正缺少的机械或机械零件只有四种:它们是:(a)螺丝钉或阿基米德螺旋(水泵);(b)泰西比乌斯(Ctesibius,

^① 潘吉星主编:《李约瑟文集》,辽宁科学技术出版社1986年版,第294页。

^② 同上书,第141—146页。

或 Ctesibian) 的双联压力唧筒; (c) 曲轴; (d) 发条装置。^①

李约瑟博士的论述概括了中国古代的机械成就及其东西交流基本史实。我们自然注意到中国古代机械技术高度发达的原因。其中,除了封建制度下中国的总体生产水平远高于西方之外,也必有其内部原因。正如我们在正文中阐述过的一样,中国古代计时机械是先有天文钟、后才有单纯的计时器;水磨和车磨的诞生与发展是得益于在其前创制的水排;单杆双活塞的猛火油柜先于风箱问世;在自动机械上,马钧的水饰(即歌舞水机)的复杂机械也是先于其他一步。抓住某些重大的或关键的课题,从而可以带动一片的科技发展模式或战略是今天的人们谈论的时髦话题。中国古代人不自觉的遵循了这套创造模式,它和机械技术的高度发展或许不无关系。

在别的民族或国家没有、而只在中国才具有的是,在封建帝国的历代政府中都有庞大的工程技术管理机构。如《周礼·冬官》所述,其“冬官”所辖几乎包括了当时的全部技术生产部门。秦汉起,这个管理机构或称民曹、左民、起部郎、工部,名称虽常变更,但其管理范围或职责大致相同。唐、宋两代,工部与吏部、户部、礼部、刑部、兵部并列,工部掌管全国城廓、宫室、屯田、舟车、器械、山泽、河渠之事,其中不仅包括了各种机械器具的设计与制造,甚至还包括制订工匠法式、颁行全国。工部下属有屯田、虞部、水部,时或主管弓弩兵械的军器所也隶工部。再者,又有直属宫廷所辖并与机械制造有关的机构,如少府监或尚方,掌百工技巧之事,总中尚、右尚、左尚、织染、掌冶五署,以供朝廷礼器饰物、车马甲冑、金银矿藏、铜铁钱币、弓弩刀剑等;如将作监,主京都与宫廷土木工程之事;如都水监,总舟楫、河渠、桥梁之事;军器监,掌督造兵器。某些朝代,因制造弓弩的需要,特设弓弩院;因制作金银之需而特设作坊。宋开宝(968—976年)年间,因全国水

^① 潘吉星主编:《李约瑟文集》,第141—146页。

磨之发展及管理之需,特设水磨务。此外,还有秘书省下太史局,其灵台与待漏院有一批专门制作天文仪器的人员。如此庞大的工程管理机构,无疑集中了大量高超的工匠或技术人员,致使他们成为战争中争夺的对象之一。金破汴灭北宋,除掳掠金银财宝之外,便将京城内金匠、银匠、铁匠、木匠、弓人、弩人、火药制造工、冶炼铸造工、织工、刺绣工等等技术工人、乃至全家押解北归。后不久,蒙灭金,这批技术工人或其后代又成为蒙古军西征的强大的技术队伍。

集中大量的高技术人员,建立庞大的工程管理机构,难免会扼杀某些自由创造,但却能组织高难的技术发明。苏颂的水运仪象台、李诫兴建南宋京都临安并撰写《营造法式》等等,正是在这些庞大机构中某一部门组织下完成的。

自然,还有各种各样的技术工人散布于民间,有些地方豪强、王公贵族的家中也收养了一大批技术工人。水磨在民间、边缘山区的广泛分布,某些王公豪强有几十至上百所水磨以收敛财富,可以为这些民间技术的水平佐证。而世代相传、工匠世家,成为中国技术传统的最大特色。达到一定水平的技术,能在几代人上百年中保持下来;珍惜上代的技术传统,珍惜前辈的天工造物,这种观念曾使伟大的技术创造保守几百年而不被毁坏,自然也不会有所创新。

古代,从事手工技术的不仅有大量的平民工匠,还有奴隶、僧人和宦官。他们的社会地位是不同的。总之,与西方的奴隶工匠的地位有极大差别。在平民中,如发明折叠船的元代王漆匠、创作捕鼠器的宋代李某,连名字也没留下来,更多的工匠甚至发明了重要机械却连姓名皆无。唐代马待封虽有机发明天才,但最终不得不改名“吴赐”以自嘲。在僧人中,僧一行、僧怀丙、僧灵昭等等似乎幸运些,他们以自己的技术才干获得了社会的尊敬。在宦官中,有张衡、苏颂、曾公亮、沈括等一大批仕人,也有曹王李皋(发明轮船)、西魏文帝元宝炬等王公天子。大概奴隶工匠是最惨的了,他们的发明创造多记载于主

人名下,其身躯与造化全属于主人所有。可是,也不尽然。隋代的机械发明家耿询原是一家奴,因其有高超的机械创造天才,其前后两个主子因犯事被斩,作为家奴的耿询两次当陪斩而不斩,甚而他由家奴成官奴、成良民,最后还任右尚方署监事这样一个小小芝麻官^①,而且被列入史书传记之中^②。当然,这样的事例并不多见,却又能代表特定环境下的技术背景。

无论是平民,还是僧人、奴隶,甚而所有的人都持这样一种观念:若不能通晓经书、及第进仕,学门手艺、有技术也就有饭吃。这种观念曾影响中国人几千年的生活,也是中国传统技术观中的一个重要侧面。它对中国传统技术曾经有过什么影响,当可进一步探讨。

① 戴念祖:《奴隶和科学家》,《自然辩证法报》1986年第11期第3版。

② 见《隋书·耿询传》、《北史·耿询传》。

参 考 文 献

本文献按作者、编者或译者的姓氏汉语拼音排列。凡两个以上作者,按第一作者排列;本文献只列出一些主要参考书目或论文,而考古发掘或文物报道见正文脚注;凡论文著作无版权法定人者,即以学术团体或集体署名。

白尚恕、李迪:《周述学在计时器方面的贡献》,《自然科学史研究》1984年第2期。

S. P. 铁木生可著、常振穉译:《材料力学史》,上海科学技术出版社1961年版。

陈通、郑大瑞:《古编钟的声学特性》,《声学学报》1980年第3期。

陈通、郑大瑞:《椭圆截锥的弯曲振动和编钟》,《声学学报》1983年第3期。

陈万甯:《朱载堉研究》,台北1992年。

陈维稷主编:《中国纺织科学技术史》,科学出版社(北京)1984年版。

陈真、姚宽:《中国近代工业史资料》第2、3、4辑,三联书店(北京)1958、1961年版。

F. 卡约里著、戴念祖译、范岱年校:《物理学史》,内蒙古人民出版社1981年版。

戴念祖:《朱载堉——明代的科学艺术巨星》,人民出版社(北京)1986年版。

戴念祖:《中国力学史》,河北教育出版社1988年版。

戴念祖:《中国古代物理学》(任继愈主编《中国文化史知识丛书》之一),山东教育出版社1991年版。

戴念祖:《中国声学史》,河北教育出版社1994年版。

戴念祖主编:《二十世纪上半叶中国物理学论文集粹》,湖南教育出版社1993年版。

戴念祖:《中国物理学史略》,《物理》1981年第10、12期。

戴念祖:《中国物理学记事年表(1900—1949年)》,《中国科技史料》1983年第4

期。

戴念祖:《中国、希腊和巴比伦:古代东西方的乐律传播问题》,《中国音乐学》

1993年第3期。

戴念祖:《中国古代在管口校正方面的成就》,《黄钟》(武汉音乐学院学报)1992

年第4期。

戴念祖:《爱因斯坦在中国》,《社会科学战线》1979年第2期。

戴念祖、周嘉华主编:《原理——时代的巨著》,西南交通大学出版社1988年版。

戴念祖:《五四运动和现代科学在我国的传播》,载《纪念五四运动60周年学术

讨论会论文选》第三辑,中国社会科学出版社(北京)1980年版。

董光壁:《中国近现代科学技术史论纲》,湖南教育出版社1992年版。

董树岩:《眼镜入华考》,《物理通报》1994年第3期。

杜石然等编著:《中国科学技术史稿》,科学出版社(北京)1982年版。

杜石然等:《洋务运动与中国近代科技》,辽宁教育出版社1991年版。

杜石然主编:《中国古代科学家传记》,科学出版社(北京)1992年版。

方豪:《方豪文录》,北平上智编译馆1948出版。

方豪:《中西交通史》第4册《明清之际中西文化交流史》,台北1954年。

方孝博:《墨经中的数学和物理学》,中国社会科学出版社1983年版。

樊洪业:《耶稣会士与中国科学》,中国人民大学出版社1992年版。

高至善:《记长沙、常德出土弩机的战国墓——兼谈有关弩机弓矢的几个问题》,

《文物》1964年第6期。

郭黛姮:《从近现代科学技术发展看中国古代木构建筑技术的成就》,《自然科学

史研究》1983年第4期。

高丰、孙建君:《中国灯具简史》,北京工艺美术出版社1991年版。

郭建荣、郭颖:《景颇族取火器》,《中国科技史料》1985年第3期。

郭永芳:《清初章回小说〈十二楼〉中的一份珍贵光学史料》,《中国科技史料》

1988年第2期。

郭永芳:《我国古代的几种物理捕鱼法》,《自然科学史研究》1986年第4期。

郭正忠:《张舜民的〈水磨赋〉和王禛的水轮三事设计》,《文物》1986年第2期。

何堂坤:《中国古代铜镜技术研究》,中国科技出版社(北京)1992年版。

洪震寰:《墨经力学综述》,《科学史集刊》第7期(1963年)。

洪震寰:《淮南万毕术及其物理知识》,《中国科技史料》1983年第3期。

- 洪震寰:《墨经“端”之研究》,《自然科学史研究》1989年第4期。
- 黄翔鹏:《新石器与青铜时代的已知音响资料与我国音阶发展史问题》,《音乐论丛》第1、3辑,人民音乐出版社(北京)1978、1980年版。
- 黄翔鹏:《舞阳贾湖骨笛的测音研究》,《文物》1989年第1期。
- 黄翔鹏:《均钟考:曾侯乙墓五弦器研究》,《黄钟》(武汉音乐学院学报)1989年第1、2期。
- 老亮:《中国古代材料力学史》,国防科技大学出版社(长沙)1991年版。
- 李崇洲:《中国古代各类灌溉机械的发明与发展》,《农业考古》1983年第1期。
- 李迪、白尚恕:《我国近代科学先驱邹伯奇》,《自然科学史研究》1984年第4期。
- 李国栋:《我国古代磁学上的成就》,《物理》1974年第6期。
- 李世红、万辅彬等:《古代铜鼓调音问题初探》,《自然科学史研究》1989年第4期。
- 林桂英、刘锋彤:《宋〈蚕织图〉卷初探》,《文物》1984年第10期。
- 刘复:《十二等律的发明者朱载堉》,载《庆祝蔡元培先生65岁论文集》上册,北平1933年。
- 刘仙洲:《中国机械工程发明史》,科学出版社(北京)1962年版。
- 刘仙洲:《我国独轮车的创始时期应上推到西汉晚年》,《文物》1964年第6期。
- 刘仙洲:《我国古代慢炮、地雷和水雷自动发火装置的发明》,《文物》1973年第11期。
- 骆炳贤、何汝鑫:《中国物理教育史》,湖南教育出版社1991年版。
- 骆正显:《释邹伯奇的〈格术补〉》,《中国科技史料》1988年第2期。
- 马大猷:《中国声学三十年》,《声学学报》1979年第4期。
- 缪天瑞:《律学》,人民音乐出版社(北京)1983年增订版。
- 牟永抗:《良渚玉器三题》,《文物》1989年第5期。
- 潘吉星主编:《李约瑟文集》,辽宁科技出版社1986年版。
- 潘吉星:《中国火箭技术史稿》,科学出版社(北京)1986年版。
- 潘吉星:《天工开物校注及研究》,巴蜀书社(成都)1989年版。
- 钱宝琮:《墨经力学今释》,《科学史集刊》第8期(1965年);又见《钱宝琮科学史论文集》,科学出版社(北京)1983年版。
- 钱临照:《释墨经中光学力学诸条》,载《李石曾先生60岁纪念论文集》,1942年昆明版;重载方励之主编:《科学史论集》,中国科技大学出版社(合肥)1987

年版。

钱临照:《论墨经中关于形学、力学和光学知识》,《物理通报》1951年第3期;《科学通报》1951年第8期。

丘光明:《我国古代权衡器简论》,《文物》1984年第10期。

丘光明:《中国度量衡》,新华出版社(北京)1993年版。

任道斌:《方以智年谱》,安徽教育出版社1983年版。

阮崇武、毛增滇:《中国透光古铜镜的奥秘》,上海科技出版社1982年版。

沈克琦、吴自勤:《早期的北京大学物理系》,《物理》1992年第11期。

史树青:《古代科技事物四考》,《文物》1962年第3期。

史树青:《有关汉代独轮车的几个问题》,《文物》1964年第6期。

舒新城:《中国近代教育史资料》,人民教育出版社(北京)1981年版。

孙机:《从胸式系驾法到鞍套式系驾法》,《考古》1980年第5期。

孙机:《始皇陵二号铜车马对车制研究的新启示》,《文物》1983年第7期。

孙机:《中国古代马车系驾法》,《自然科学史研究》1984年第2期。

孙机:《弩床考略》,《文物》1985年第5期。

孙机:《摩羯灯》,《文物》1986年第12期。

孙淑云等:《中国传统响铜器的制作工艺》,《中国科技史料》1991年第4期。

孙毓棠编:《中国近代工业史资料》(1840—1895)(第一辑),科学出版社(北京)1957年版。

汤定元:《天坛中几个建筑物的声学问题》,《物理通报》1953年第2期;《科学通报》1953年第2期。

万辅彬等:《中国古代铜鼓科学研究》,广西民族出版社1992年版。

王伯敏:《中国绘画史》,上海人民美术出版社1982年版。

王锦光、洪震寰:《中国光学史》,湖南教育出版社1986年版。

王锦光、洪震寰:《中国古代物理学史略》,河北科技出版社1990年版。

王燮山:《我国古代的透镜》,《物理》1982年第10期。

王燮山:《中国古代所测定的物质比重》,《自然科学史研究》1985年第4期。

王燮山:《关于明清之际中国杠杆力学问题的算法》,《中国科技史料》1991年第1期。

王兆春:《中国火器史》,军事科学出版社(北京)1991年版。

王振铎:《科技考古论丛》,文物出版社(北京)1989年版。

- 王扬宗:《清末益智书会统一科技术语工作述评》,《中国科技史料》1991年第2期。
- 汪敬虞编:《中国近代工业史资料》(1895—1914)(第二辑),科学出版社(北京)1957年版。
- 闻人军:《考工记导读》,巴蜀书社(成都)1987年版。
- 徐家珍:《风筝小记》,《文物》1959年第2期。
- 徐克明:《墨家物理学成就述评》,《物理》1976年第1、4期。
- 严敦杰:《伽利略的工作早期在中国的传播》,《科技史集刊》第7期(1964)。
- 杨伯达:《中国古玉研究刍议五题》,《文物》1986年第5期。
- 杨宽:《关于水力冶铁鼓风机水排复原的讨论》,《文物》1959年第7期。
- 杨荫浏:《中国古代音乐史稿》,人民音乐出版社(北京)1981年版。
- 杨荫浏:《三律考》,《音乐研究》1982年第1期。
- 杨振宁:《读书教学40年》,三联书店香港分店1985年版。
- 银河:《我国14世纪科学家赵友钦的光学实验》,《物理通报》1956年第4期。
- 张柏春:《中国近代机械简史》,北京理工大学出版社1992年版。
- 张国辉:《洋务运动与中国近代企业》,中国社会科学出版社(北京)1979年版。
- 赵化成:《汉画所见汉代车名考辨》,《文物》1989年第3期。
- 赵匡华:《化学通史》,高等教育出版社(北京)1990年版。
- 赵其昌:《〈析津志〉所记元大都斗式机轮水车》,《文物》1984年第10期。
- 郑为:《闸口盘车图卷》,《文物》1966年第2期。
- A. Wolf 著、周昌忠等译:《16、17世纪科学技术和哲学史》,商务印书馆1985年版。
- 朱有璩编:《中国近代学制史料》(第一辑上册),华东师范大学出版社1983年版。
- 自然科学史研究所主编:《科技史文集》第12辑《物理学史专辑》,上海科技出版社1984年版。
- 中国史学会主编:“中国近代史资料丛刊”:《洋务运动》1—8集,上海人民出版社1961年版。
- 《音乐研究》1981年第1期(曾侯乙编钟专辑)。
- 《中国大百科全书·物理学》,中国大百科全书出版社1987年版。
- 《中国大百科全书·力学》,中国大百科全书出版社1985年版。

《中国大百科全书·机械工程》，中国大百科全书出版社 1987 年版。

国家计量总局主编：《中国古代度量衡图录》，文物出版社 1981 年版。

清华大学科技史研究组编：《中国科技史资料选编——农业机械》，清华大学出版社（无出版时间）。

中国硅酸盐学会编：《中国陶瓷史》，文物出版社 1982 年版。

中国天文学史整理研究组：《中国天文学史》，科学出版社（北京）1981 年版。

中国艺术研究院音乐研究所编：《中国音乐史图鉴》，人民音乐出版社（北京）1988 年版。

Acoustical Properties of Qing by Chen Tong and Wang Zhongyan, *Chinese J. of Acoustics*, Vol. 8(1989), No. 4, pp. 289—294.

History of Musical Instrument by Curt Sachs, London, 1942.

History of Technology by Charles Singer et al, Vol. 1—5, Oxford Univ. Press, 1954—1958。（其中，第 5 卷已有中译本，由陈凡等译，东北工学院、哈尔滨工业大学等 6 家出版社联合出版）

Science and Civilization in China by Joseph Needham, Vol. 4, part 1. 2, Cambridge Univ. Press, 1962, 1965.

A Source Book in Greek Science by Morris R. Cohen and I. E. Drabkin, Harvard Univ. Press, 1958.

Two-Tone Set - Bells of Marquis Yi edited by Chen Cheng-Yih, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1994.