

前 言

在当今科学技术飞速发展的形势下，“专门化”教育模式越来越显示出它的局限性。专业知识教育，可以使学生学到有用的知识，但不能保证使他们成为和谐发展的人才。为了使当代大学生成为全面发展的年轻一代，当前高等教育中的一个重要课题是消除现代文化中的两种文化——科学文化和人文文化——之间的隔阂。只有当这两种文化的隔阂在大学校园里弥合之后，我们才能对世界给出完善的和令人信服的描述。因此，在工科专业各门课程的教学过程中，在学时允许的情况下，适当增加人文文化的内容，对提高同学们的科学素质使其全面发展是十分有益的。爱因斯坦说过：“科学对人类事物的影响有两种方式，第一种方式是大家都熟知的，科学直接地、并且在更大程度上间接地产生完全改变人类生活的工具；第二种方式是教育的性质——它作用于人的心灵。”（许良英等译·爱因斯坦文集（第三卷）·商务印书馆，1979，135）李政道也认为：“科学和艺术是不可分割的，就像一枚硬币的两面。它们共同的基础是人类的创造力，它们追求的目标都是真理的普遍性。普遍性一定植根于自然，而对它的探索则是人类创造性的最崇高表现。”（李政道·艺术和科学·科学，1997，49（1）：3）著名学者、《中国科学技术史》作者李约瑟博士也说过：“科学、宗教、历史、哲学与艺术创造是我们人类认识宇宙的五种经验形式，如果谁对这个或那个方面缺乏见识，他就不能算作一个完美的人。”（王国忠·李约瑟博士与中国·上海科学普及出版社，1992年版前言）

就物理学而言，物理学既是科学，同时又是高层次、高品位的文化。

物理学研究物质世界最基本最普遍的运动规律，物理学研究“物”之理。物理学具有彻底的唯物主义精神，坚持“实践是检验真理的唯一标准”的原则，坚持“实事求是”的科学态度，物理学是“求真”的。物理学致力于把人类从自然界中解放出来，导向自由。物理学促使人们的生活趋于高尚。物理学规律在各自适用的范围内有其普遍的适用性、统一性和简单性。表达物理规律的语言是数学，而且往往是比较简单的数学。这些都说明物理学本身就是一种深刻的微妙的美。杨振宁说过，发现科学美，就能攀高峰。“自然界现象的结构是非常之美的，非常之妙的，而物理学这些年的研究使我们对这种美有了认识。物理学的美是由表层到深层的灵魂美、宗教美直至达到最终的美。”（2001年4月28日天津《今晚报》）

本书中的大部分内容均在大学物理教学过程中不同程度地使用过，取得了很好的效果，受到了同学们的好评。教师自己也得到了不同程度的提高。本书在编

写过程中做了如下分工：李增智负责第1、2章，吴亚非负责第3章，李鸿负责第4章，孟湛祥负责第5章和附录。由李增智负责统稿。本书是集体互相帮助、共同努力的成果。在多年的教学实践中，我们阅读了大量文献，受益匪浅。在此，我们衷心感谢学术界的前辈为我们提供了准确翔实的资料。在成书过程中，天津大学马世宁教授、南开大学刘义斌教授提出了很好的改进意见。作者相信，读过本书的读者都能够通过不同的侧面获益。尽管如此，由于编者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳请广大教师和同学批评指正。

编 者

2004年9月于天津大学

目 录

| | |
|-----------------------|----|
| 第 1 章 力学 | 1 |
| 1.1 古代中国人民的贡献 | 1 |
| 1.1.1 概述 | 1 |
| 1.1.2 《墨经》中的力学知识 | 4 |
| 1.1.3 曾侯乙墓编钟 | 7 |
| 1.1.4 神奇的马王堆汉墓 | 9 |
| 1.1.5 李冰与都江堰工程 | 10 |
| 1.1.6 张衡与候风地动仪 | 12 |
| 1.1.7 一行与地球子午线的测量 | 14 |
| 1.1.8 中国古代火箭 | 17 |
| 1.1.9 声学成就 | 19 |
| 1.1.10 郑和七次下西洋 | 25 |
| 1.2 经典（牛顿）力学的确立 | 29 |
| 1.2.1 概述 | 29 |
| 1.2.2 阿基米德与杠杆原理 | 33 |
| 1.2.3 伽利略及其斜面实验 | 36 |
| 1.2.4 笛卡儿与莱布尼兹之争 | 41 |
| 1.2.5 牛顿及其《自然哲学的数学原理》 | 44 |
| 1.2.6 海王星的发现 | 49 |
| 1.3 狭义相对论 | 52 |
| 1.3.1 经典（牛顿）力学的危机 | 52 |
| 1.3.2 爱因斯坦的奇迹年 | 56 |
| 1.3.3 质量和能量 | 60 |
| 1.3.4 狭义相对论中的一些哲学问题 | 63 |
| 第 2 章 热学 | 69 |
| 2.1 热力学第一定律 | 69 |
| 2.1.1 古代中国人民的贡献 | 69 |
| 2.1.2 “永动机”之梦 | 73 |
| 2.1.3 热力学第一定律的确立 | 77 |
| 2.2 热力学第二定律 | 94 |
| 2.2.1 热力学第二定律的确立 | 94 |

| | | |
|------------|------------------|------------|
| 2.2.2 | 熵 | 99 |
| 2.2.3 | 热寂说 | 111 |
| 第3章 | 电磁学 | 119 |
| 3.1 | 古代中国人民的贡献 | 119 |
| 3.1.1 | 概述 | 119 |
| 3.1.2 | 沈括和《梦溪笔谈》 | 133 |
| 3.2 | 电磁学理论的确立 | 145 |
| 3.2.1 | 概述 | 145 |
| 3.2.2 | 法拉第及其力线 | 148 |
| 3.2.3 | 麦克斯韦和麦克斯韦方程组 | 160 |
| 3.2.4 | 美与物理学 | 166 |
| 第4章 | 光学 | 175 |
| 4.1 | 古代中国人民的贡献 | 175 |
| 4.1.1 | 概述 | 175 |
| 4.1.2 | 《墨经》中的光学知识 | 180 |
| 4.1.3 | 赵友钦和小罅光景实验 | 184 |
| 4.2 | 西方光学发展史简介 | 188 |
| 4.2.1 | 概述 | 188 |
| 4.2.2 | 光的微粒说与波动说之争 | 192 |
| 第5章 | 量子力学 | 197 |
| 5.1 | 量子力学的确立 | 197 |
| 5.1.1 | 光的量子性 | 197 |
| 5.1.2 | 量子力学的确立 | 201 |
| 5.1.3 | 20世纪中国著名物理学家简介 | 211 |
| 5.2 | 量子力学中的一些哲学问题 | 227 |
| 5.2.1 | 概述 | 227 |
| 5.2.2 | 玻尔的并协原理与我国古代阴阳学说 | 231 |
| 5.2.3 | 对称性与守恒定律 | 237 |
| 5.2.4 | 21世纪物理学展望 | 241 |
| 附录 | 诺贝尔物理学奖简介 | 246 |

第 1 章 力 学

1.1 古代中国人民的贡献

1.1.1 概述

我国是文明古国。我国古代的科学技术，在一个相当长的历史时期内居世界领先地位。在天文、历法、数学、医学、农学、冶金、纺织、建筑等方面都取得了举世瞩目的辉煌成就，特别是造纸、指南针、火药和印刷术四大发明，更是我国人民对世界文明做出的巨大贡献。从出土的文物古迹以及留传下来的文字记载中，可以领略到我国古代人民的力学知识已达到相当高的水平。例如，在春秋战国之交成书的《考工记》，战国时期以墨翟为首的墨家代表作《墨经》，汉朝王充所著的《论衡》，宋朝曾公亮所著的《武经总要》，沈括所著的《梦溪笔谈》，李诫所著的《营造法式》，明朝宋应星所著的《天工开物》等著作中，都涉及了大量的力学问题。此外，我国古代人民还发明了大量的机械器物，修建了大量的著名建筑和工程，也从另一个侧面反映了古代中国人民已掌握了丰富的力学知识。

考古工作者在陕西西安半坡村出土了属于仰韶文化时期（距今约 5000 年）的盛水陶罐，又称提水壶，如图 1.1 所示。这种提水壶底尖、腹大、口小，高约 40 厘米，最大直径处的周长约为 70 厘米。系绳的耳环设在壶腹稍靠下的部位。当提水壶空着时，由于整个提水壶的重心略高于支点（耳环）之上，因此，当用绳拴在耳环上将空壶悬挂起来时，壶身略有倾斜。在向提水壶注水过程中，当壶中水达到一定的量（约占壶内体积的 60% ~ 70%）时，提水壶的重心下降到支点之下，提水壶就不再倾斜而正立了。当继续注水，使得提水壶的重心升高到支点之上时，壶将自动倾倒。由此可见，我国古代人民将提水壶的重心安排得何等巧妙！汲水和倒水都十分方便省力。荀子在《荀子·宥坐》中说“虚则欹，中则正，满则覆”，指的就是这种盛水陶器。



图 1.1 尖底提水壶

后来，这种提水壶经过修饰，已由民间用具变为一种宫廷中贵族的玩物，称为“欹器”。从春秋战国直到汉朝末年，这种欹器一直作为宫廷中的奇物长期传袭，可惜到三国时期，由于战乱而绝迹。

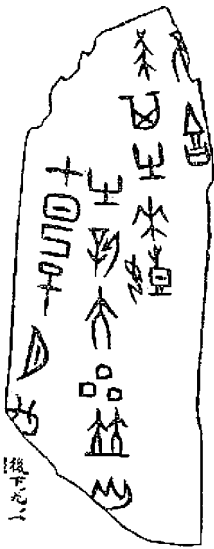


图 1.2 最早的新星记录
 上下辞的年代约为公元前
 1300 年，从左到右的两行文
 字为：“七日己巳夕 新大
 星并火”。

我国古代人民具有严谨和实事求是的科学态度，很多天文现象都做了客观翔实的记录。在公元前约 1300 年的商朝时期的甲骨文中，就有“七日己巳夕 新大星并火”的记载，如图 1.2 所示。新大星即新星，现代天体物理学表明，恒星的燃料耗尽之后，在引力作用下产生收缩，最后发生爆发，亮度突然增大很多倍，称为“新星”或“超新星”。并火即心宿二，是星宿的名称。上句话的意思是说：“己巳日，即初七这天，有一颗巨大的新星在心宿二处出现。”人们公认，这是人类历史上现今发现的最早的新星爆发记录。西方最早发现的新星是希腊天文学家依巴谷（Hipparchus）于公元前 134 年观测到的，但他并没有说明新星所在的位置。对于这颗新星，我国汉志中也有记载：“元光元年六月客星见于房。”元光元年即公元前 134 年，客星就是新星，房是星宿名称，即房宿（天蝎座）。我国记载中既有新星出现的时间，又有新星出现的位置，但后来的研究表明，这颗星可能是颗彗星而不是新星，因为这颗星的位置在移动。另外，汉朝史书中还有另一颗新星的记载：“中平二年十月癸亥，客星出南门中，大如半筵，五色喜怒，稍小，至后

年六月消。”中平二年即公元 185 年，客星就是新星，南门是星宿名称即半人马座，筵指坐席，其周长约 0.56 ~ 0.65 米，呈八角或十角形。这句话的意思是说：“中平二年十月癸亥这天，有一颗新星出现在半人马座的正中，有座席的一半那么大，轮流呈现出五种颜色。亮度逐渐减弱，到第二年的六月就消失了。”

最著名的是宋朝的关于超新星爆发记录。宋史记载：“至和元年（公元 1054 年）五月，客星晨出东方，守天关，昼见如太白，芒角四出，色赤白，凡见二十三日。”“至和元年五月己丑，（客星）出天关东南，可数寸，岁余稍没。”天关是星宿的名称，即金牛座。太白即金星。这颗新星开始出现的 23 天内，白天如金星一样明亮，一年多之后就看不见了。从这些记载来看，这颗新星是颗超新星。其爆发后的遗迹就是著名的蟹状星云。天文学家发现，蟹状星云在膨胀，从其膨胀的速度计算，蟹状星云产生于 800 年以前，与我国宋史的记录相符。在蟹状星云的中心处，有一颗中子星在旋转，其发射无线电脉冲的周期为 0.033 秒，并且以 1.26×10^{-5} 秒/年的速率在增加。所在这些，均与超新星爆发的理论相吻合。

春秋时期，鲁文公十四年（公元前 613 年）我国人民记载一颗彗星（哈雷彗星）。这是世界历史上最早的哈雷彗星的记录。哈雷彗星的周期约为 76 年。

从公元前 613 年至公元 1910 年，我国共有 31 次哈雷彗星的记录，这是世界上最完整最全面的哈雷彗星记录。此外，对太阳黑子、极光等现象我国古代人民也都做了详细地观测记录。

我国古代人民丰富的天象记录，为天文学和天体物理学的发展起到了重要的作用，赢得了国际上知名学者的称赞。例如，天文学家金利奇（C. H. Gingrich，原美国《通俗天文学》杂志编辑主任）在《通俗天文学》第 42 卷第 4 期（1934 年）里写道：“看中国天文的史实悠久而明确，则所谓西方的文化，真可以说是瞠乎其后矣！”美国天文学家海尔（G. E. Hale, 1868 ~ 1938）在他的著作《宇宙的深渊》（The Depth of the Universe）中写道：“中国古人观测天象的精勤，非常惊人。太阳黑子的观测，远在西方人前 2000 年，历代记载不绝，并且相传颇为正确，自然可以相信。独怪欧西天文学家，在这样长久时期中，何以竟没有一个人注意到呢？一直到了 17 世纪使用望远镜以后才发现它，这不是一件奇怪的事吗？”

我国古代人民也较早地注意到运动的相对性。王充在《论衡》中就叙述了相对运动的思想。《晋书·天文志》在描述天体和天球运动时写道：“譬之于蚁行磨面之上，磨左旋而蚁右去，磨疾而蚁迟，故不得不随磨以左回焉。”这是相对运动的极好例子，包含了相对速度的概念。汉朝成书的《尚书纬·考灵曜》中写道：“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。”这就是伽利略相对性原理，但其表述却比伽利略早约 1500 年。

我国古代人民对世界文明做出了巨大的贡献。李约瑟曾把中国古代科学文明比喻为一座“令人眼花缭乱的、绝对的金矿。”但是，在近代却逐渐落后了。既然中国古代能取得如此辉煌的成就，为什么在中国没有诞生近代科学呢？这个问题也引起了中外学者的广泛深入的探讨。爱因斯坦曾说过：“西方科学的发展是以两个伟大成就为基础的，那就是：希腊哲学家发明形式逻辑体系（在欧几里得几何学中）以及（在文艺复兴时期）发现通过系统的实验找出可能的因果关系。在我看来，中国的先哲们没有走上这两步，那是用不着惊奇的。要是这些发现果然都做出了，那倒是令人惊奇的事。”（爱因斯坦文集（第一卷），商务印书馆，1979）李约瑟从地理、气候、社会制度和商业等四个方面，找出了近代科学未能产生于中国的原因。中国是一块紧密相连的大陆，物产丰富，自给自足，因此，中国人重视农业、轻视商业。中国处于季风区，对于灌溉、防洪、贮水等工程建设特别重视，将大量人力物力集中于水利工程建设。中国产生了中央集权的官僚制度，人们认为士绅阶级前途光明，商人社会地位低下，商人可以发财致富，但不可能拥有像文艺复兴时期欧洲商人所拥有的权势和影响力，这样就使得中国无法发展充分的资本主义，从而抑制了近代科学的生长。李约瑟意味深长地说：“如果有像西方那样的气候、地理以及社会经济因素，而我们西方有像中国这样的相同条件，近代科学就会在中国产生，而不是在西方。西方人就不得

不学习方块字，以便充分掌握近代科学遗产，就像现在中国科学家不得不学习西方语那样。”（潘吉星主编．李约瑟文集．辽宁科学技术出版社，1986）

下面分几个小题目，介绍我国古代人民在力学领域所取得的成就。

1.1.2 《墨经》中的力学知识

《墨经》一书是墨子（即墨翟，约公元前478～公元前392）和墨家学派的重要著作。墨家学派的成员大多出身于下层社会，以刻苦耐劳、从事生产劳动、勤做观察、勇敢善战著称。《墨经》分上经、下经两卷，共计178条。每条中又分〔经〕和〔说〕两部分。〔经〕是主题，是命题，〔说〕是解释。〔说〕用〔经〕中的第一个字为标题，接着对〔经〕的主题论点加以解释说明。〔经〕和〔说〕都极简约，因而颇为费解。《墨经》全书涉及自然科学和社会科学的各个方面。自然科学方面以数学和物理学的内容较多，而物理学方面则以力学和光学的内容较为丰富。涉及力学部分的内容主要有以下几条（在引用介绍过程中，我们先把〔经〕和〔说〕的原文抄录下来，然后根据前人的研究成果，对词句加以注释，最后用现代汉语说明其含意。）：

〔上经21〕：力，刑之所以奋也。〔说〕：力。重之谓。下、與，重奋也。

注释：刑即形，指有形的物体。奋是指物体由静止到运动或由慢到快的运动状态的变化，也就是加速运动的状态。與与现代汉语的举字意义相同。

本条的意思是，力是使物体产生加速度的原因。重量也是力。物体所做的下坠、上举的运动，都是在重力作用下所产生的加速度而进行的。

由此可以看出，“力，刑之所以奋也。”这句话，与牛顿第二运动定律（在直线运动的情况下） $F = ma$ ，就定性的意义上来说是一致的。这就是说，早在2400年前，《墨经》就已经正确地阐明了力的概念。

〔上经39〕：久，弥异时也。〔说〕：久。合古今旦莫。

注释：久即宙，古代久和宙两字发音相同，两字互相通用。弥有遍、满的意思。旦指早晨，莫同暮，指晚上。

本条的意思是，久（宙），遍指各种不同的时间，包括古往今来，朝朝暮暮，时时刻刻。

〔上经40〕：宇，弥异所也。〔说〕：宇。冢东西南北。

注释：弥仍是遍、满的意思。冢即是蒙，是覆盖、包括的意思。

本条的意思是，宇，遍指各种不同的处所空间，包括上下左右、东南西北。

以上两条是对宇宙所下的定义，宇指空间，宙指时间。就是我们现在所说的，四方上下为宇，往古来今为宙。

〔上经41〕：穷，或有前不容尺也。〔说〕：穷。或不容尺，有穷；莫不容尺，无穷也。

注释：或同域，指空间区域。

本条的意思是，对于空间中的某区域而言，当用尺去度量它时，总有不能容纳测量尺的时候。当空间区域不能容纳测量尺时，称为有穷，就是现代所说的有限空间；当空间区域不存在不能容纳测量尺时，就称为无穷，即无限空间。本条是对空间的有限与无限所下的定义。

[上经 43]：始，当时也。[说]：始。时，或有久，或无久。始当无久。

注释：始就是开始。有久是持续一段时间的意思，指时间间隔。无久是没有时间间隔的意思。

本条的意思是，所谓开始，指的是某一时刻。时间概念本身，可以区分为“有久”和“无久”，即有时间间隔和没有时间间隔两种情况。开始与无久相当，指的是某一时间间隔的起点。

本文中 so 阐明的时间概念，与现今物理学中常用的时间概念是一致的。例如，按现代的语言说，从第 1 秒初的时刻开始到第 10 秒末的时刻为止，经历的时间间隔是 10 秒钟。将这句话的意思改成《墨经》中的语言，应该是，从第 1 秒初的无久开始，到第 10 秒末的无久为止，所经历的有久为 10 秒钟。

[上经 50]：止，以久也。[说]：止。无久之不止，当牛非马，若矢过楹。有久之不止，当马非马，若人过梁。

注释：久即灸，在这里是拒的意思，应理解为阻力。楹就是柱，古时人们常树立两根木柱而在两木柱之间练习射箭。梁指桥梁，大多是用木桩和竹竿架设而成的。人在过这样的桥梁时大多是小心地缓慢地行走。

本条的意思是，运动物体之所以会停止下来是因为受到阻力作用的缘故。运动着的物体如果不受阻力作用是不会停止运动的，这如同说牛不是马一样明白无疑。像箭飞过两柱之间的情况就属于这种情形。当然，运动着的物体也有虽然受到阻力作用而没有停止运动的，这似乎如同说马不是马那样难于理解，但这种情况确实存在。不过，物体受到阻力作用虽然并不停止但也得像行人过桥那样多少要减慢下来。

《墨经》中的这段论述相当精辟。让我们把这一段论述与现今物理学知识做一对照。

一个质量为 m ，初速度为 v_0 的物体，在恒定阻力（例如摩擦力） f 的作用下，它的速度 v 将随时间 t 的增加而减小，公式为 $v = v_0 - \frac{f}{m}t$

如果其速度还没有减小到零，就属于“有久之不止”的情况。物体虽受到阻力作用，但尚未停止运动。

如果 $\frac{f}{m}t = v_0$ ，即 $v = 0$ ，这就是“止，以久也”的情况。物体因为阻力影响

而停止了运动。

如果 $f=0$ ，则 $v=v_0$ ，这就是“无久之不止”的情况。物体在不受阻力作用的情况下是不会停止运动的。这实际上就是牛顿第一运动定律（即惯性定律）。由此可知，我们的祖先在 2400 年前就大致总结出了惯性定律的内容。

[下经 25]：衡而必正，说在得。[说]：衡。加重于其一旁，必捶，权重相若也。相衡，则本短标长，两加焉，重相若，则标必下，标得权也。

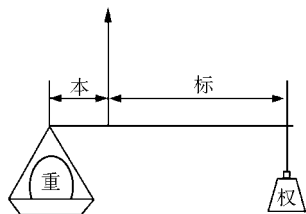


图 1.3 相衡（杆秤）

注释：衡指天平，相衡指杆秤。捶即垂，下垂。权指砝码或秤砣。重指所称之物的重量。本指所称重物一边的力臂，称为重臂，标是砝码或秤砣一边的力臂，如图 1.3 所示。

本条的意思是，天平称物，一定要达到平衡，要点在于砝码要放得合适。天平平衡以后再向某一边增加重量，天平必然下垂而失去平衡，因为砝码和物体的重量所起的作用是相同的。对于杆秤来说，由于其重臂（本）较短而力臂（标）较长，所以当两边加上同样的重量时，力臂一边必然下垂。这是因为在力臂一边的重量起秤砣一样的作用而占优势的缘故。

在墨子生活的年代，即春秋末年战国初年，我国已经比较大量地使用天平和杆秤，用以称量物体的重量。1954 年，在湖南长沙左家公山出土的春秋末至战国初的楚墓中，有大量的天平和砝码。天平杆全长 27 厘米，距离杆端 0.7 厘米处各有一个直径为 4 厘米的秤盘。砝码每组共 9 个，最大的砝码为 125 克，最小的砝码为 0.806 克，其称量准确度可在 10 毫克之内。另外，在安徽寿县出土的公元前 4 世纪的楚墓中，有铜杆秤两件，其中一件以寸刻度，另一件则以寸和半寸刻度。

不管是天平，还是杆秤，其称量重物的依据是

$$\text{物重} \times \text{重臂} = \text{力臂} \times \text{砣（砝码）重}$$

现在人们把这一关系称为杠杆原理或杠杆定律。通过以上对《墨经》的分析以及出土的古代实物的验证，我们可以得出结论，墨家学派已经掌握了杠杆原理，这要比阿基米德（Archimedes，公元前 287 年～公元前 212 年）发现杠杆原理早两个世纪。

[下经 52]：均之绝不，说在所均。[说]：均。发均县，轻而发绝，不均也。均，其绝也莫绝。

注释：绝是断的意思，发是头发的意思，也指纤维丝或线，县是悬挂的意思。

本条的意思是，一束悬挂重物的头发或纤维丝，其断与否，决定于它所承受的重量是否真的均匀分布。例如，一束头发，如果头发受力不均匀，即使悬挂的是比较轻的物体也会把头发拉断；但是，如果头发受力真的是均匀分布了，即使原先

可以被拉断的头发，现在也不会被拉断了。通常把以上的内容称为“以发悬物”。

我国古代人民曾用头发（或别的纤维线之类的东西）编成发辫来悬挂重物，结果发现发辫中有的头发被拉断，有的头发不被拉断，这是什么原因呢？墨家对此进行了细致的观察之后，得出了上述的正确结论，给出了合理的解释。这种解释的意义已不是单纯地记载所观察的一般事实，而是通过观察甚至经过简单定量的实验来解决思考中的疑难问题，最后得出了正确的结论。同时，在墨家的解释中还包含了近代科学中的“应力”概念。

1.1.3 曾侯乙墓编钟

1977年9月~1978年3月，考古工作者在湖北随州发掘出了一座距今已有2400年的战国时期的古墓——曾侯乙墓。曾侯乙墓的墓葬平面呈不规则多边形，墓口东西最长处为21米，南北最宽处为16.5米，其中椁室面积近200平方米，规模甚为宏大，仅为了防水防潮所用的木炭就有60吨之多。在出土的各种文物中，最引人注目的是排列整齐有序的气势磅礴的编钟以及其他组成成排的青铜礼器，如图1.4所示。

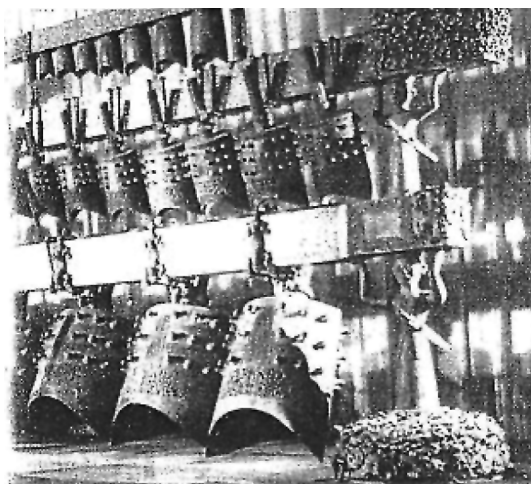


图 1.4 曾侯乙墓编钟

曾侯乙墓出土的编钟共计65件，分三层排列。上层的钮钟声音清脆纯净，音量较小，频率较高，稍有余音。中层较小的甬钟，声音接近钮钟但更嘹亮，频率也较高，音量也不大，余音较短；中层较大的钟，声音圆润洪亮，音量较大，频率较低，余音略长。下层的大钟声音低沉浑厚，音量大，频率低，余音长。真正用于实际演奏的主要是中层和下层的钟，上层的钮钟可能是用于定调或合节拍的。下层钟声音洪亮、深沉，起烘托气氛的作用。这65件编钟音色优美、音质

纯正、音域宽广（总音域达到五个半八度），完全可以用于演奏古今中外乐曲。中层和下层钟以姑洗律（相当于现代音乐的C大调）为基调，在宽广的音域范围内构成了高、中、低三个音域区，并且备有十二个半音。基本骨干音为五声、六声乃至七声音阶，可以旋宫转调（关于旋宫转调的解释参见1.1.9小节声学成就部分）。在演奏时还发现，这些编钟所发出的音调对温度的变化非常敏感，当温度变化不太大时，编钟所发出的音调已有很明显的改变。编钟上还刻有总计2800多字的铭文，内容都是关于音乐乐理方面的。最大的一件编钟高152.3厘米，质量为203.6千克，这是历年来出土的编钟中体型最大的一件。全套编钟的总质量为4400千克。这意味着曾侯乙墓编钟是目前世界上所有出土的乐器中绝无仅有的特大型的定音古乐器，同时也是目前世界上保存下来最早的具有十二个半音的乐器。

乐器发声的理论属于物理学中声学部分的内容，特别是与声学中的共振、驻波等内容联系密切。有些乐器（例如编钟）在制造过程中更需要物理学、化学、冶金学等多种学科的综合知识。我国古代人民在2400年前制造出了这样高质量的乐器，反映了我国古代人民在这些领域中已经达到了相当高的水平。

经过对编钟的分析研究后得知，编钟中锡含量为12.5%~14.6%，铅含量为1%~3%。大多数学者认为，铜钟的锡含量在14%左右，铅含量在2%~4%之间，铜钟的综合性能最优越。由此可知，曾侯乙墓编钟的锡铅含量比较合理，而且在铸造过程中也较好地掌握了诸如回火等铸造工艺。

曾侯乙墓出土的乐器，除了65件编钟之外，还有32件编磬以及鼓、瑟、琴、笙、排箫等乐器，总共124件。

此外，还出土了一件衣箱。衣箱长82.8厘米，总高44.8厘米，箱的外壁涂有黑漆。箱盖表面的一端绘有青龙图案，另一端绘有白虎图案，中心处用朱红漆写有一个象征北斗七星的“斗”字。围绕“斗”字按顺时针方向排列一周的是用篆文书写的二十八宿的古代星宿名称。这是我国迄今所发现的二十八星宿名称的最早记录，表明我国战国时代在天文学领域已取得很高的成就。

我国古代天文学家在观象授时的基础上，为了进一步对日月五星（即水星、金星、火星、木星、土星）的运行及位置做系统的观测，绕天一周选取28个星座作为观测的标志，称为二十八宿。具体名称为角、亢、氐、房、心、尾、箕、斗、牛、女、虚、危、室、壁、奎、娄、胃、昂、毕、觜、参、井、鬼、柳、星、张、翼、轸。它的出现，对日月五星运行周期和运行轨道的确定，对编制较为精确的历法，以及对恒星的观测和天区的划分等，都起了重要作用。曾侯乙墓中的二十八宿星象图，是二十八宿完整名称的最早发现，也是二十八宿与四象（苍龙、白虎、朱雀、玄武即龟蛇等动物称为四象，用以指示东、西、南、北四个方位）相配合的最早记录，表明了我国在战国时代的天文学知识居当时世界

上的领先地位。

1.1.4 神奇的马王堆汉墓

1972年，考古工作者在湖南长沙马王堆挖掘了三个汉朝墓葬，称为马王堆汉墓。其中一号墓的主人是西汉诸侯长沙国丞相利苍的妻子辛追。二、三号墓分别为利苍本人和他的儿子的墓。所以称它们为神奇，是因为马王堆汉墓有几项世界之最以及多个存在人们心目中的不解之谜。首先令人感到神奇的是，一号墓中辛追的整个身体全部浸在水中，虽然经历了2000余年，但是尸体并未腐烂，而且面色鲜活，栩栩如生。通过仔细地解剖后发现，这具尸体不仅保持有完整的外形，而且各内脏器官完整无损，血管结构清楚，骨骼组织完好。腹内的一些食物仍然存在（在食管、胃、肠中共发现138颗半甜瓜子）。所有这一切都似乎说明，尸体并不是两千余年前的死者，而是刚刚谢世而去的当代人。一具尸体为什么经历两千余年而不腐烂，仍能完整保存至今，实在是一个谜。

在一号墓中出土了一件素纱禅衣，也可以称得上是一件令人感到神奇的稀世珍品。素纱禅衣长128厘米，两袖通长190厘米，其总质量为49克，还不到现在的一两。禅衣薄如蝉翼，是目前所发现的世界上年代最早、保存最完好、制作最精细和最轻薄的一件丝绸衣服。据丝织物专家鉴定，素纱的经密为58根/厘米，纬密为40根/厘米，每平方米素纱织物的质量为15克。经纬丝的直径都很细，不仅和现代缫出的最精细的蚕丝十分相当，而且和现代轻柔透明的乔其纱织物也无两样。在2000多年前，在科技水平和生产力都不发达的古代，要缫出这样细而均匀的蚕丝，没有高超熟练的技术是不行的。

三号墓是利苍儿子的墓穴。此墓穴竟然像一个小规模的图书馆。在一个大漆盒里，考古学家发现了排列整齐的20多种、12万多字的帛书，还有部分简册，可见利苍儿子是个博学多才的人。帛书，又称素书，是一种白色生绢，质地平软，便于书写文字，但在潮湿的地下却容易腐烂，所以在考古发掘中很少见到帛书。但是马王堆三号墓中的帛书，经历了两千余年仍不腐烂，而且保存完整，又是一个难解之谜。这批帛书的宽度为18厘米。从内容上看，帛书主要涉及古代历史、哲学以及相当一部分自然科学著作和兵法图集等，其中有《周易》、《老子》、《战国纵横家书》（共27章）、《五星占》、《天文气象杂占》、《相马经》、《五十二病方》等等。《五星占》和《天文气象杂占》是目前世界上保存下来的最早的天文学专著。《五十二病方》的成书时间也早于《黄帝内经》，所以是我国现存最早的有关医方的书籍。

《五星占》是关于水星、金星、火星、木星、土星五大行星的天体运行记录，约8000字。《五星占》中记载土星的会合周期是377日，与现今测得的378.09日相比只差1.09日，两者非常接近。《五星占》中在谈到金星的会合周

时期说：“五出，为日八岁，而复与营室，晨出东方。”这就是说，金星的五个会合周期刚好等于八年，由此算出金星的会合周期为 584.4 日，与现今测得的结果 583.92 日相比，只相差 0.48 日。法国著名天文学家弗拉马利翁在《大众天文学》第 2 册中说：“8 年的周期已经算是相当准确的了，事实上金星的五个会合周期是 8 年减去 2 天 10 小时。”帛书《五星占》还列出了从秦始皇元年到汉文帝三年之间，也就是从公元前 246 年至公元前 177 年共 70 年期间的土星、木星和金星等五星在天空中的运行位置。

帛书《天文学气象杂占》的精华部分是 29 幅彗星图。这些彗星图都绘有彗核、彗发、彗尾等部分，而且都是头朝下、尾朝上的，这是因为彗尾总是背着太阳的缘故。由此可以看出，彗星图绘制得十分科学可靠。在国外，直到公元 66 年才有一个出现在耶路撒冷上空的彗星图。在欧洲，直到公元 1528 年还把彗星画成一个怪物。马王堆三号墓出土的 29 幅彗星图应是世界上最早的彗星图。

马王堆三号墓还出土了一幅绘在帛上的边长为 96 厘米的正方形地图。经考证，这幅地图大约在公元前 180 年左右绘制，距今已有 2180 余年了。

这幅地图绘制的方位是上南下北，与现在上北下南的方位正好相反。地图所包括的范围是东经 $111^{\circ} \sim 112^{\circ}30'$ ，北纬 $22^{\circ} \sim 26^{\circ}$ 之间的区域。图中主区的比例大约为十七万分之一至十九万分之一，即一寸折十里的地图，应该是相当于现代的大比例尺的地图。从内容上看，这是一幅经过实地勘测之后再绘制的地图。地图的主区是一个万山磅礴、高山深水的地带，地形非常复杂，但地图的准确性很高。例如，河系的平面图形、山脉的走向、城市的方位等均与现代同一地区的地图基本相同。两千多年以前，绘制出如此高水平的地图，在世界地图史上是独一无二的，充分体现了我国古代人民的聪明智慧。马王堆三号墓出土的这幅地图也是目前世界上现存最早的绘在绢帛上的地图。

从马王堆汉墓所出土的文物可以看出，在两千多年以前，我国古代人民在纺织、测绘、天文、地理、医学等各个领域都已达到了很高的水平。

1.1.5 李冰与都江堰工程

战国时期，秦国于秦惠文王九年（公元前 316 年）吞并蜀国（今四川省）。为了彻底治理岷江水患，大约在秦昭王三十年至秦考王之间（公元前 277 年～公元前 250 年），秦国派遣精通治水的李冰出任蜀守。李冰学识渊博，“知天文地理”。经过实地调查以后，李冰决定带领蜀地人民修建都江堰水利工程以彻底根除岷江水患。

都江堰水利工程，主要由鱼嘴、飞沙堰、宝瓶口和渠道网所组成，如图 1.5 所示。鱼嘴是在岷江上游江心处修建的分水堰，因为堰的顶部很像鱼嘴而得名。鱼嘴将岷江分为内江和外江两部分，起着航运、灌溉和分洪的作用。外江原来就