

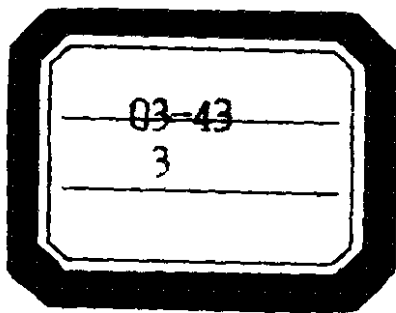
GAO DENG

高等
师专
教材

主编 须和兴

力学

SHI ZHUAN
JIAOCAI



1751696

高等师范专科学校教材

JY1/102/01
力学

(修订版)

主 编：须和兴
编写人员：何 勤 金烈候
 须和兴 张宏彬
主 审：苏云荪



华东师范大学出版社



北师大图书 B1369984

03-43/3. 1751696

责任编辑 刘万红

封面设计 高山

力 学

(修订版)

主编 须和兴

华东师范大学出版社出版发行

(上海中山北路 3663 号 邮政编码 200062)

新华书店上海发行所经销

上海新文印刷厂印刷

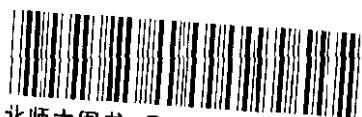
开本 850×1168 1/32 印张 15.75 字数 395 千字

1998 年 6 月第 2 版 1998 年 6 月第 1 次印刷

· 印数 001—3 000 本

ISBN7-5617-1835-7/O · 070

定价 14.70 元



北师大图书 B1369984

出版说明

1986年,我社受国家教委有关部门的委托,根据国家教委师范司制订的《二年制师范专科学校八个专业教学计划》的要求,与全国各省、市、自治区教委合作,共同组织编写了全国高等师范专科学校教材20余种;并与华东六省教委密切协作,编写了能反映华东地区师专教学和科研水平的、适应经济建设较为发达地区的师专教学需要的教材40余种,师专第一次拥有了比较符合自己培养规格、规律和教学要求而自成系统的教材。实践证明,师专教材建设对于提高师专教学水平,保证师专教学质量起到了重要作用。

近几年来,在邓小平同志建设有中国特色社会主义理论的指引下,我国的教育事业取得了很大发展。国家教委根据《中国教育改革发展纲要》的要求,针对高等师范专科学校的教育特点,颁发了《高等师范专科教育二、三年制教学方案》,进一步明确了高等师范教育面向21世纪的发展目标和战略任务,以及教学内容和教学结构的改革要求。

自出版第一本师专教材以来,我社多年来分阶段地对师专教材的使用情况进行了跟踪分析,又于1995年开展了较为系统的全面调查。调查中,教师普遍反映,现有师专教材尚不同程度存在着与当前师专教学实际相脱节的现象;对各学科中的新发现、新理论、新成果,未能加以必要的反映,已跟不上当前社会、经济、科技等发展的新形势。考虑到师专从二年制向三年制发展的现状和趋势,我社于1996年初与华东六省教委有关部门一起,邀集全国48所师专代表专门研讨了师专教材建设问题,随即开展了部分教材的修订和新编工作。

师专教材建设并不是一个孤立的系统,它必须服务于师范教

育的总体规划。它已经历了从“无”到“有”的过程,并将逐步实现从“有”到“优”的目标。我们相信,通过各方面的努力,修订和新编的师专教材将充分体现基础与能力相结合,理论与实践相结合,当前与未来相结合的特色,日臻完善和成熟。

这次编写和修订工作得到了华东六省教委的大力支持,我们谨在此深表谢忱,并向为师专教材建设付出辛勤劳动的各地师专领导和所有参加编写、修订和审稿的专家、学者等致以衷心的感谢。

华东师范大学出版社

1997年3月

前 言

“力学”是师专物理专业最重要的课程之一,它是整个普通物理课程的前导和很多后继课程的基础。

本书包括静力学、运动学、动力学、刚体力学、固体的弹性、振动和波、流体力学和狭义相对论八大部分。第一章为静力学,第二章为运动学,第三、第四、第五、第六章为动力学,第七章为刚体力学,第八章为固体的弹性,第九、第十章为振动和波,第十一章为流体力学,第十二章为狭义相对论简介,基本上把师专物理专业力学课程应该学习的内容都包括了。

考虑到师专学生的特点,并根据我们多年的教学经验,在编写本书过程中,我们力求贯彻“高、宽、浅、平、准、简”的原则,即考虑到中学力学学得比较多,为提高学生学习的兴趣,本书的起点定得比较高,力求避免和高中物理过多的重复;考虑到师专学生将来当教师需要的知识面比较广,因此本书所涉及的面比较宽,而深度要比本科浅一点,因而梯度相应比较平,但概念的表述力求准确,叙述力求简洁明了。另外,为了适当体现静力学的分量,增加了物体的平衡一章;为了体现知识的完整性、先进性和兴趣性,我们还编入了一部分大纲没作要求的内容,这部分内容都用*标记,各学校可根据实际教学情况取舍。在习题中,为了加强学生对基本概念的理解,我们在思考题中适当选配一些有一定难度的选择题。我们认为,这样处理比较符合师专学生的水平和教学特点。

本书是在由须和兴主编的1991年第一版的基础上进行修订的,第一版的第一、第七、第八章由巢湖师专潘亚农执笔,第二、第十一、第十二章由镇江师专严仲强执笔,第三、第四、第五、第六章

由上饶师专须和兴执笔,第九、第十章由绍兴师专金烈候执笔。本版修订工作的第一、第七、第八章由巢湖师专张宏彬执笔,第二、第十一、第十二章由镇江师专何勤执笔,第三、第四、第五、第六章由上饶师专须和兴执笔,第九、第十章由绍兴师专金烈候执笔,全书由须和兴统一修改定稿。

本书承华东师大物理系苏云荪教授仔细审阅,并作了一些修改,在此我们表示衷心感谢。

由于我们水平有限,经验不足,错误和不妥之处在所难免,欢迎读者批评、指正。

编 者

1997 年 12 月

绪 论

物理学是一门重要的自然科学,在科技、生产等各个部门中都离不开物理学,随着物理学的发展,它对人类活动的各个领域都产生了重大的影响,因此物理学在自然科学中占有重要的地位。

对师范专科学校的物理系学生来说,普通物理学是整个学习过程中最重要的基础课程,只有学好普通物理学才能顺利地学好其他后继课程,并能居高临下、深入浅出地讲授初中物理学。

力学是学习物理学的第一门课程,在学习力学前对物理学的全貌和重要性作一简单而概括的了解,有助于我们开阔眼界,加强在今后学习中的联想,提高学习的积极性。

§ 0.1 物理学的形成

物理学研究的范围在不同的历史阶段是不同的。早期物理学是研究所有非生物的自然现象的一门科学,并称为自然哲学。19世纪中期后,物理学仅研究物质的化学性质不发生变化的过程。由于20世纪物理学的迅速发展,物理学研究的对象又扩大到较宽的领域。现在认为:物理学是研究物质的结构和相互作用以及它们运动规律的科学。科学家根据这些相互作用,来说明物质的性质和观察到的自然现象。

20世纪以前,人们将观察到的现象加以分类,从而产生了不同的物理学分支。具体地说,物理学家分别根据物体的机械运动现象、热现象、声现象、光现象、电磁现象而将物理学分为力学、热学、声学、光学和电磁学。这五门学科构成了当时的物理学。20世纪

初,物理学家研究高速运动现象发展起狭义相对论,研究原子内部运动状态发展起量子力学,物理学的发展进入了一个新的时期,它被称为近代物理学。与之相应,称在此以前的物理学为经典物理学。由经典物理学的理论得出的有些结论和微观高速领域中的实验结果不相符合,显示出它在理论上的缺陷和它的局限性,近代物理学克服了这些缺陷,从而发展了物理学。

随着物理学的发展,它描述世界的范围正向大、小两个方向深入。原子以及小于原子范围的世界称为微观世界;大于原子小于星系的世界称为宏观世界;大于星系的世界称宇观世界。自然科学各分支的划分都与物体的线度有关。描述微观世界方面的有原子物理学、核物理学、粒子物理学等;描述宏观世界方面的有化学、生物学、固体物理学、流体物理学、气象学、地质学等;描述宇观世界方面的有天文学、宇宙学等。物理学所研究的基本运动形式(机械运动、热运动、电磁运动、……)普遍地存在于一切线度物体的各种运动形态之中。例如宇宙中任何物体都遵守万有引力定律,一切变化过程都遵守能量守恒和转换定律,可以说物理学是自然科学中最基本的学科。物理学的重要性不仅在于它为建立其他相关的自然科学(如生物物理学)提供了基本的理论框架,从应用的观点看,它几乎为所有领域提供了理论、实验手段和研究方法。

按物体线度和运动速率大小来划分,物理学的整个领域大体如表 0.1 所示。

表 0.1

c 光速								
			相对论量子力学		相对论经典物理学		相对论宇宙学	
$\frac{c}{10}$								
速率↑	?		量子力学		经典物理学		宇宙物理学	
0		10^{-14} m		10^{-10} m		10^{20} m		
		原子核		原子		星系		
			线度→					

在表上物理学被划分成六个大的学科。对小于原子核和大于光速范围内的物理学,目前尚未判定其真实性。

§ 0.2 物理学的研究方法

物理学的理论是通过观察、实验、抽象、假说等研究方法并经实践检验而建立起来的。

物理学是一门实验科学,观察、实验是建立物理学理论的基础。观察是在不改变自然条件的情况下,对自然现象进行考察的一种方法。例如,对天体的运动和气象的变化,都要采用观察法。随着近代空间技术的发展,观察手段发生了重大的变革。通过人造卫星和星际飞行器,人们已从地面上观察发展到宇宙空间的观察,并获得许多在地面上无法得到的信息。例如,人们已查明月球上的环形山是由于流星轰击所形成,火星上并无真正的运河和火星人存在等等。另外,人们通过电子显微镜已能观察到直径为零点几个微米的物体,借助于显微镜人们可以直接观察布朗运动现象,以及细菌、细胞和大分子构成等等。

实验方法必须根据研究对象和目的精心设计。在人工控制的条件下,排除各种偶然因素的干扰,突出主要因素,使现象反复重演,以便进行观测研究。例如,用单摆实验测重力加速度时,我们必须尽量减小摆线的质量和可伸性,并减小摆球的大小和振幅,才能得到较准确的结果。实验方法是建立和检验理论的重要手段,是探讨物理现象及其规律的基本方法。

抽象方法是在观察和实验的基础上,根据问题的内容和性质,抓住主要因素,撇开次要的、局部的和偶然的因素,建立一个与实际情况相近的理想模型或设计一个理想实验来进行研究。

利用理想模型可以使抽象的假说和理论形象化,便于想象和研究问题,物理学的发展离不开理想模型。在力学中,“质点”、“刚

体”、“理想流体”、“匀速直线运动”和“匀变速运动”都是常见的理想模型。质点是对物体质量和点这种特性的突出反映；刚体是对固体的体积、形状不易改变这种特性的突出反映；理想流体是对流体的流动性的突出反映；匀速直线运动和匀变速运动则是对质点在运动过程中速度或加速度不变性的理想化。大家熟悉的“点电荷”、“面电荷”、“线电荷”、“点光源”和“夸克模型”等，也都是理想模型。

理想实验又叫假想实验，是人们在思想中塑造的理想过程，它与直接的物理实验有着原则的区别。在物理学的理论研究中，理想实验具有重要作用。例如，惯性定律就是理想实验的一个重要结论。这个结论是不能直接从实验中得出的。伽利略设计了“斜面理想实验”，并假设小球在斜面上运动时完全不受摩擦力作用，从而推出了惯性定律的结论，否定了亚里士多德认为力是维持物体继续运动的原因这一错误的观点，为力学的建立奠定了基础。

在观察和实验的基础上，为了寻找事物运动的规律，提出的一些说明方案或论点统称假说。通过进一步的观察和实验会取消或改进一些假说，经实践证明是正确的假说将上升为定律和原理而成为理论的一部分。例如，在人类对宇宙的认识过程中，哥白尼建立了地动说，在他的假说中行星是以太阳为中心做圆周运动的。哥白尼天体模型只是部分地反映了真实情况，因为实际上行星轨道是以太阳为一个焦点的椭圆。这个正确的模型后来被开普勒提出。正是根据开普勒的太阳系模型，再结合地面上物体的下落，牛顿才提出万有引力定律。

从观察、实验、抽象、假说到形成理论，物理学的研究并没有结束。任何理论都有局限性，必须进一步接受实验检验，以便修改、充实、发展并建立新理论。

观察、实验、抽象、假说是建立物理学理论的四个重要环节。在物理学研究中离不开语言和逻辑，这里还有一系列具体的方法，例如等效法、类比法、隔离法、数学方法等等。

等效法是从等同效果出发来研究物理现象和物理规律的一种方法。例如力学中力的合成、分解,将抛体运动等效为两个直线运动,电学中等效电容、电阻的计算,都属于这一类方法。从等效的观点出发,爱因斯坦还建立了广义相对论中的等效原理。

类比法对不同的物理过程用类比的方法进行逻辑推理,由已知的物理规律导出未知的物理规律。例如,刚体定轴转动的运动学规律就可以从它和质点圆周运动的规律对比中得出来。又如波粒二象性也是根据光的二象性用类比法得出的,最后由实验得到验证。

隔离法是从整体中抽出一部分来进行研究的一种方法。例如,力学中为了计算系统的内力,就采用隔离法使内力转化为外力,以满足牛顿第二定律只能适用于外力这一要求。在流体力学中,研究静止流体内部的压强、物体在液体中所受的浮力以及运动流体的伯努利方程的建立,都是采用隔离法。

数学方法是物理学研究中的一种重要手段,是理论思维的一种有效形式。物理学是定量的科学,数学为物理学提供了定量表示的语言能力。可以说数学是物理学的语言,几乎每一个物理规律都有它相应的数学表达式。例如,伽利略在研究单摆运动时,发现单摆的周期 T 和摆长 L 的平方根 $\sqrt{L}$ 成正比,如果不利用数学,不知道一个数的平方根如何计算,单摆运动规律是无法表示的。又如,在引入速度和加速度概念时,必须利用极限和微分的概念;在计算两物体间引力的大小时必须利用积分计算。在历史上牛顿正是为了计算两物体间引力的大小,才发明了微积分。爱因斯坦在建立广义相对论的体系时,曾遇到数学知识不足的困难,他花了六七年的时间进行数学补课,终于找到了用微分几何来表述广义相对论的方法。

学习物理学除了对它的基本概念和基本规律必须有深入和准确的理解外,对物理学的各种研究方法也应当充分重视,这样才能

收到良好的学习效果。

§ 0.3 力学的研究对象和发展简史

力学是物理学中研究机械运动的规律及其应用的一门学科。力学可分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学研究物体在外力作用下保持平衡的条件；运动学研究运动的描述方法，而不涉及运动的原因；动力学研究作用于物体上的力与运动之间的关系，以此来阐明物体运动状态发生变化的原因。力学也可按研究对象的性质分为质点力学、刚体力学、连续介质力学。连续介质包括固体（弹性体和塑性体）和流体（液体和气体）。

力学是和人类历史同时发展起来的一门最古老的自然科学。中国在春秋战国时，鲁班就巧妙地运用力学知识在建筑和机械方面作出不少发明创造。《墨经》一书中记载着墨翟（约公元前 468 年～公元前 376 年）对力所作的定义：“力，形之所由奋也。”在古希腊，亚里士多德（公元前 384 年～公元前 322 年）、阿基米德（公元前 287 年～公元前 212 年）等人对物体的平衡问题及浮力问题也都作了说明。

力学发展为一门系统的、独立的学科，开始于 16 世纪到 17 世纪。伽利略（1564 年～1642 年）应用实验方法发现了落体的运动规律、斜面运动规律和单摆运动规律，从而在力学中引进了速度、加速度的概念。他还提出了惯性定律，用来解释地面上物体和天体的运动。1687 年牛顿（1642 年～1727 年）总结了伽利略的工作，在他所著《自然哲学的数学原理》中提出了力学的三条基本定律，使力学成为系统的理论。牛顿还提出万有引力定律，成功地解释了地球上落体运动规律和行星的运动轨道，他还和莱布尼茨（1646 年～1716 年）同时创立了微积分，给力学研究提供了有效的方法和语言。牛顿的这一系列成就奠定了力学的实验和理论的基础，在以后

的两个世纪中,牛顿的力学体系被欧拉、达朗伯、拉格朗日、泊松和哈密顿等物理学家作了广泛的推广,成为一门具有完整理论的学科,称为经典力学。经典力学在描述天体和地面上物体的运动规律方面是非常成功的。

经典力学按历史发展阶段和研究方法的不同,又分为牛顿力学和分析力学。在力学发展初期,人们直接以牛顿定律为出发点研究质点系统的运动,这就是牛顿力学。普通物理中的力学实际上就是牛顿力学。用牛顿力学解决简单的力学问题是比较方便的,但对处理复杂的受约束的质点组问题就比较困难。1785 年拉格朗日发展了欧拉、达朗伯等人的工作,发表著作《分析力学》,开辟了力学研究的新途径。分析力学处理问题时以整个力学系统为对象,它着眼于能量,采用抽象的分析方法,便于解决复杂的力学问题。

经典力学有两个基本假设:第一个假设是时间和空间是绝对的,空间距离和时间间隔与观测者的运动无关,物质间的相互作用的传递是瞬时到达的。第二个假设是一切可观测的物理量在原则上都可以无限精确地加以测定。实际上,经典力学的研究对象是低速、宏观物体,第一个假设只适用于速度远小于光速的低速运动,第二个假设只适用于宏观物体。

19 世纪末,随着科学技术的进步,在实验室中已能观察到高速运动的物体。1901 年考夫曼发现阴极射线中高速运动电子的质量随速度的增大而增大,更是直接动摇了牛顿定律。人们发现经典力学具有局限性。1905 年爱因斯坦提出狭义相对论,指出在高速运动的情况下,时间和长度不能再认为与观察者的运动无关,经典力学不过是物体速度远小于光速时的近似理论,对高速物体必须用狭义相对论来代替经典力学。另一方面,经典物理学在解释黑体辐射、光电效应等问题上,遇到了不可克服的困难。为了解释黑体辐射,普朗克在 1900 年提出能量子假说。为了解释光电效应,爱因斯坦在 1905 年提出光子假说,1924 年德布罗意进一步提出波粒

二象性的假说,在此基础上薛定谔、海森伯等人建立了量子力学。量子力学指出,在微观系统中,所有物理量在原则上不可能同时被精确测定,它成功地解释了经典力学所不能解释的微观现象,从另一方面修正了经典力学。尽管如此,对速度远小于光速的宏观物体来讲,用经典力学已足够准确了。目前研究大多数日常现象和生产实际还是以经典力学为理论基础的。例如,在建筑物的设计过程中,要研究材料的受力情况;兴修水利要研究水的流动规律;在武器研制中要研究枪弹的飞行;人们按预定计划发射人造卫星和宇宙飞船也是用经典力学来计算它的轨道和周期的。在经典力学的基础上,近代力学的许多分支,如物理力学、宇宙力学、地球力学、生物力学……都迅速地成长起来,所以力学也是一门年轻的学科,是大有发展前途的。

学习物理学要从力学开始,物理学的很多概念、思想和方法都是首先在力学中提出的,因此学好物理学必须在学习力学时就打下坚实的基础。

目 录

前言	1
绪论	1
第一章 物体的平衡	1
§ 1.1 力的概念	1
§ 1.2 力的合成和分解	4
§ 1.3 物体的平衡条件	12
思考题一	18
习题一	19
第二章 质点运动学	22
§ 2.1 基本概念	22
§ 2.2 描述质点运动的物理量	25
§ 2.3 质点的直线运动	35
§ 2.4 平面直角坐标系 抛体运动	45
§ 2.5 自然坐标系 切向和法向加速度	53
§ 2.6 质点的相对运动	62
思考题二	66
习题二	69
第三章 质点动力学	73
§ 3.1 牛顿运动定律	73
§ 3.2 单位制和量纲	79
§ 3.3 三种常见的力	85
§ 3.4 牛顿运动定律对直线运动的应用	93
§ 3.5 牛顿运动定律对曲线运动的应用	99
* § 3.6 牛顿运动定律在变力情况下的应用	103
§ 3.7 力学相对性原理	108

* § 3.8 非惯性系和惯性力	111
思考题三	118
习题三	121
第四章 功和能	126
§ 4.1 功和能	126
§ 4.2 保守力和势能	133
§ 4.3 质点组的功能原理	138
* § 4.4 三种宇宙速度	146
思考题四	153
习题四	156
第五章 动量和冲量	160
§ 5.1 质点动量定理	160
§ 5.2 质点组的动量定理和质心运动定理	166
§ 5.3 质点组动量守恒定律	173
§ 5.4 球的对心碰撞	178
* § 5.5 球的非对心碰撞	185
* § 5.6 反冲和火箭	190
思考题五	194
习题五	196
第六章 角动量	199
§ 6.1 力矩	199
§ 6.2 质点的角动量定理及角动量守恒定律	205
§ 6.3 质点组的角动量定理及角动量守恒定律	215
思考题六	217
习题六	219
第七章 刚体力学	221
§ 7.1 刚体的运动学	222
§ 7.2 作用于刚体上的力	229