

普通物理学教程丛书

力 学

(上册)

郑永令 贾起民 编著

复旦大学出版社



(沪)新登字 202 号

内 容 提 要

本书是《普通物理学教程丛书》中的一种,是作者在给复旦大学物理系学生上课时所用的讲义基础上,经过多年实践不断修改而成的。全书十章分为五篇,分别讲述质点力学、质点系力学与守恒定律、刚体与流体、振动和波、相对论等。全书显得内容清新、层次分明、注意了力学的历史发展及力学同其他学科的联系,使可读性和开拓性都很好。

全书分上、下两册出版,可供综合性大学或工科大学作为普通物理学的力学教科书或主要教学参考书。

力 学

(上 册)

郑永令 贾起民 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 常熟市文化印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 10.5 字数 310,000

1989 年 10 月第 1 版 1992 年 10 月第 2 次印刷

印数 3,501—6,500

ISBN 7-309-00954-1/O·113

定价: 5.00 元

前 言

这套“普通物理学教程丛书”，是我们以历年来在复旦大学物理类专业教学中使用的讲义为基础，经过补充修订、编写而成的。多年来，在我校担任物理课教学的许多同志，曾努力结合教学实践，对普通物理学教材作出了改进。实践表明，这些改进对提高教学质量是有重要作用的。这套丛书的编写也可以说是我们对这些共同的努力所作的一点总结。

普通物理学是很成熟的课程，通行的优秀教材不少；而且很久以来已形成了传统的格式，框架结构已相对地稳定，改变的余地似乎不多。但是教学是创造性的工作，每一位教师的讲课都反映了他本人对所教内容的体会、理解，有他自己的讲授方法，会给听课的学生以不同的感受。教材的编写，集中地体现了这些方面不同的风格。正如在绘画、音乐等艺术创作中，同一题材在不同作者手里总是反映出不同的个性特点一样。近几年，各类物理教材的出版，比过去繁荣得多，这不仅为教师提供了更多的选择余地，而且也加强了教学经验的交流，有力地促进了教学的改进和教学质量的提高。我们这套教材在复旦大学出版社的支持下陆续出版，我们认为也是一个学习交流的机会，使我们能把仅在自己学校里实践过的点滴经验，拿到同行老师们和广大读者中来，争取得到大家的帮助、指正，使它们逐步改进和完善。

总的说来，我们在编写过程中力求做到：

1. 重点放在基本概念和基本原理的清楚阐述上。在阐述方法方面，力求由物及理，揭示明确的物理图像（不回避使用学生已学过的数学工具，但在运用新的数学工具时，要特别注意不掩盖物理内容的实质），引导学生注意建立这些原理的实践基础，提高运用它们解决物理问题的兴趣和能力，而不停留在仅仅钻研原理本身。

2. 基本保持传统框架，适当更新题材，注意横向联系。物理学的

发展和学科之间的沟通渗透，为普通物理学教学提供了大量新题材和新问题。适当地反映这些情况，使学生能在更广泛的意义上理解物理学的基本内容，是当前物理学教学发展的趋势和要求。在考虑内容更新的同时，也要注意普通物理学课程在物理学教学全局中的位置，注意与其他课程有恰当的分工和衔接。

3. 注意启发学生的思考。使他们对一些问题萌生进一步探讨的兴趣，而不满足于接受现成的知识。

4. 运用近年来物理学教学研究的成果，适当加强过去教学中某些较为薄弱的环节。

5. 适合不同方面的需要。除了供普通物理学课程教材之用外，也可以给教师、学生和其他读者作参考书。书中用小号字排印的内容和一部分附录就是为这方面的需要而补充的。

当然，就这几方面，我们也深感不容易做好，希望与读者共同切磋，力求继续改进。

这套教材是从集体教学经验中产生的。但各册由不同的作者分头编写，独立成书，因而也反映了各自的教学特点，没有企求整齐划一。前人主张“转益多师”。在科学发展的新形势下，对大学生来说，更有这样的需要。从这一意义上说，让各部分教材保持各自的特点，也许不是没有积极意义的。

丛书的出版得到校内外许多同志的大力支持、帮助，谨在此表示衷心的感谢。

复旦大学物理系普通物理学教研组

1985年4月

作 者 的 话

作者历年在复旦大学物理系讲授力学，本书就是在授课讲稿和讲义的基础上整理而成的。在成书过程中，进行了修改和补充。

力学曾是物理学中最古老的一个部门，现已发展成为与物理学并列的一门独立的学科。但力学的基本原理仍是物理学的重要基础。多年来，普通物理课中的力学更多地被看作后继课必不可少的基础而受到重视，却较少注意到它在物理学的发展乃至整个人类认识发展中的地位 and 作用，以及它与其他学科(包括前沿学科)的联系，结果使人感到力学课程在结构和内容上似乎比较陈旧，缺少活力。当然，这是物理基础课普遍存在的问题，但力学课尤为突出。从六十年代开始，世界上一些先进国家就已注意到这一问题，并着手作了一些改革。在美国，相继产生了诸如费曼、伯克利、弗伦奇、霍尔顿等一些有影响的教材，苏、英、法、德等国也有相应的新教材问世。尽管新教材由于种种原因不能完全取代旧教材，但却以各种方式改变了并正在改变着旧教材。近年来，随着改革、开放形势的发展，我国也出现了许多有新意的物理基础教材，包括力学教材。我们就是在这种情况下着手修订教材的。

鉴于以上情况，我们在本书编写过程中，特别注意了以下几个问题：

1. 从力学的历史发展来阐明某些力学基本概念、基本定律的意义。霍尔顿曾在这方面作过有益的尝试。他的《物理科学的概念和理论导论》一书至今仍有广泛的影响。当然，我们不能处处都从历史和哲学的角度来阐述物理规律，但就一些主要的概念和规律，从历史的角度阐明其形成和发展还是可行的。这样做，不仅使这些概念在历史背景的烘托下更具立体感，而且可使学生从科学的建立者们那里学到去粗取精、去伪存真、由表及里、由此及彼的富有创见的研究方法。科学，就其完整的意义而言，不仅包括专业知识和技能，而且包括获取和发展

这些知识和技能的方法，还包括对各种知识和技能的相互关系及其本质的探索 and 认识。正是这一切，构成了科学发展的历史。本书主要就落体运动规律、运动定律、动量和动能概念及狭义相对论的形成等方面，或在正文中，或用附录的形式，从历史的角度阐明了它们的形成和发展。着重介绍了伽里略、牛顿和爱因斯坦三位科学家的历史功绩。

2. 注意力学与其他学科的联系。上面提到力学不仅仅是物理学的基础，它本身有着广泛的应用。本书主要联系天体(包括地球)的运动和运动生物力学两个方面阐述了力学的应用，并将这些内容分散在有关的章节中。例如在运动学一章中增设一节介绍奥伯斯佯谬和宇宙膨胀，功与能一章中增设一节介绍宇宙膨胀动力学，角动量一章中介绍向行星发射人造天体的霍曼轨道方案，在运动定律和角动量两章中分别介绍潮汐现象及其与地球自转的关系，刚体一章中增加体育运动中的角动量守恒等内容，流体一章中增加介绍血液流动的内容等。在其他地方，则通过例题等方式讲述这些应用。通过这些内容的叙述，使学生感到力学并不只是些枯燥的概念和规律，它在解决实际问题中仍大有用武之地。

3. 增加相对论一章。在力学中讲授相对论，已成为一种世界性趋势。我们在若干年前已开始这样做，效果不错。相对论问世已80年，经过近20年教育家和科学家们的努力，已形成了多种适合于低年级学生的阐述方法(美国已有中学讲授相对论)。在力学中增加这一近代物理新内容，不仅顺理成章，还可提高学生兴趣。让学生尽早接触这一内容，一方面可使学生多一个学习相对论的循环过程，弥补过去相对论只有单循环的不足，便于学生消化吸收；另一方面，也可为讲授普通物理后继课有关内容打好基础。我们的阐述方法则先从物理上讲清同时性的相对性、时间膨胀和长度收缩等概念，而把洛伦兹变换作为它们的自然结果，然后再讨论一些似是而非的佯谬，进一步加深学生对内容的理解。不介绍闵可夫斯基四维矢量等内容，对初学者也许是合适的。书中对广义相对论也作了浅近的介绍。

4. 在增加新内容的同时，我们仍然把主要精力放在对传统内

容的处理上。在这方面,我们主要做了以下一些工作。

1) 改进对某些概念的论述。例如,在讨论伽里略变换时,用例子说明选择合适的参照系对解决动力学问题的好处。在功与能一章中,我们加强了对功概念的讨论,在此基础上改进了保守力定义的叙述方法,使它既适用于一个质点,又适用于多个质点(即质点系)运动的情况。在流体一章中,加强了对流动状态与参照系关系的讨论,在此基础上阐明在利用伯努利方程研究问题时选择适当参照系的重要性,澄清了学生中一些易犯的错误。并在波动一章中,运用这一思想导出了深水波的波速。

2) 增加了一些较深内容。但讲述方法仍是普通物理式的。如增加有心力场中质点径向运动的讨论,并将它与质点运动轨道的定性讨论联系起来。刚体一章中引进了惯量主轴概念,以加深学生对角动量与角速度关系的理解。利用转动参照系中的角动量守恒讨论了章动,使学生对刚体的章动有一个初步的概念。在振动一章中,增加二自由度振动,以与波中驻波的简正模式内容相呼应。简单介绍了非线性振动的概念和近似处理方法,为学生今后处理非线性问题打下一个基础。在波一章中简单介绍非线性波和孤立子概念,等等。增加这些较深内容,或有利于加强有关概念之间的联系,或从另一侧面表明在普通物理中着重讨论的某些概念、定理的适用范围和应用限度。同时,也为学有余力的学生提供一些学习的材料。即使学生对这些内容并不完全理解,我们的目的也已部分达到。

3) 在内容安排上,我们将全书十章分为五篇,分别阐述质点力学、质点系力学与守恒定律、特殊的质点系——刚体与流体、特殊的运动形式——振动与波和相对论,这样使全书脉络清晰,层次分明。为适应不同读者的需要,全书用大小两种字体排印。基本内容用大号字排印,非基本和加深的内容用小号字排印(在目录中则用“*”号标明)。略去小号字的内容,不影响全书的连贯性。因而本书可同时作为不同教学要求的力学教材。

4) 对数学的要求。本书是为同时学习微积分的学生写的,书中广泛应用矢量代数和必要的简单微积分讲述物理概念和定律。但这种叙

述是由浅入深的,在前几章中,这种叙述既可看成应用微积分思想来阐明物理概念,也可看成应用物理实例来阐明微积分概念。在后面章节中,虽然用了一些简单的微分和积分运算,但不涉及微分方程的求解。

全书每节都有与内容紧密配合的例题,每章附有思考题和习题(用小号字排印,与正文小字内容相关的用“*”号标明)。正确回答和演算这些思考题和习题,有利于加深对内容的理解。

蔡怀新教授审阅了全部书稿,并提出许多宝贵意见;方小敏同志参加了全书的修改工作,编选了全部习题,演算和核对了习题答案;杨莉敏同志绘制了全书的图稿。一并在此表示感谢。

在本书成稿过程中,我们深感要编写出一本便于教学上使用,适合学生水平,又富有新意的基础课教材是一件相当艰巨的工作。由于作者学识水平有限,错误和不妥之处在所难免,恳请广大读者提出批评。

郑永令 贾起民

1988年7月于复旦大学

目 录

(上 册)

前言	1
作者的话	3

第一篇 质 点 力 学

第一章 质点运动学	3
§ 1.1 参照系	3
空间、时间与运动 参照系和坐标系 时间标准和长度标准	
§ 1.2 质点	7
§ 1.3 位矢、速度和加速度	8
质点的位矢和运动方程 速度 加速度 位矢、速度、加速度的相互关系 位矢、速度、加速度在直角坐标系中的分量形式	
*位矢、速度和加速度相互关系的进一步讨论 例题	
§ 1.4 切向加速度和法向加速度	21
§ 1.5 速度与加速度在平面极坐标中的表示	25
平面极坐标 极坐标中的位矢、速度和加速度 例题	
§ 1.6 相对运动	33
动参照系作匀速直线运动, 绝对速度、相对速度和牵连速度	
动参照系作任意方式的平动, 绝对加速度、相对加速度与牵连加速度 动参照系作匀角速转动, 科里奥利加速度 例题	
* § 1.7 哈勃定律与宇宙膨胀	45
奥伯斯佯谬与多普勒红移 哈勃定律, 宇宙的年龄与大小 银河系是宇宙的中心吗?	
思考题	49
附录 1 A 伽里略对落体和抛体运动的研究	53
习题	55

第二章 牛顿运动定律	61
引言	61
§ 2.1 牛顿运动定律	64
第一定律与惯性参照系 第二定律 第三定律	
§ 2.2 单位制与量纲	72
单位制 基本量与导出量 量纲	
§ 2.3 常见的力	75
力的基本类型 接触力和非接触力 引力和重力 弹性力 摩 擦力 洛伦兹力	
§ 2.4 牛顿定律的运用	81
质点动力学基本问题 约束 例题	
§ 2.5 力学相对性原理和伽里略坐标变换	95
力学相对性原理 伽里略坐标变换 例题	
§ 2.6 非惯性系与惯性力：平动加速系中的平移惯性力	99
平移惯性力 潮汐现象的解释 厄缶实验 例题	
§ 2.7 非惯性系与惯性力：匀速转动参照系中的离心力和 科里奥利力	105
离心力 离心机原理 重量和纬度的关系 银河系的自转 科里奥利力 例题 *惯性的本质是什么?	
思考题	122
附录 2 A 牛顿与他的《原理》	126
习题	128

第二篇 守恒定律与质点系动力学

第三章 动量	143
§ 3.1 动量与动量定理	143
冲量 质点动量定理 质点系动量定理 几点说明 例题	
§ 3.2 质心与质心运动定律	151
质心 质心的位置 体系动量定理与质心运动定律 例题 几点说明	
§ 3.3 动量守恒定律	158
动量守恒定律 几点说明 质心坐标系 例题	

§ 3.4 变质量物体的运动	164
变质量体系的含义 运动方程的导出 讨论 火箭的运动	
例题	
思考题	173
习题	174
第四章 功与能	181
§ 4.1 功与功率	181
作用于单个质点的力的功 作用于质点系的力的功、外力的功	
和内力的功 几种力的功 例题	
§ 4.2 质点动能定理	194
质点动能定理 由动能定理求解物体的运动 质点动能定理与	
参照系的关系 例题	
§ 4.3 质点系动能定理	203
质点系动能定理 质点系动能定理与质点系动量定理的比较	
例题	
§ 4.4 质点系的势能	205
保守力与非保守力 质点系的势能 几种势能 势能曲线 例题	
§ 4.5 机械能和机械能守恒定律	218
质点系的功能原理和机械能守恒定律 质点在保守力场中的机	
械能和机械能守恒定律 几点说明 例题	
* § 4.6 宇宙膨胀动力学	229
退行速度 开宇宙、平宇宙与闭宇宙	
§ 4.7 质心系中的功能定理和机械能守恒定律	231
质点系动能和质心动能 *一般质心系中的功能定理和机械能守恒定	
律 例题	
§ 4.8 碰撞	240
正碰 斜碰 碰撞和质心坐标系 例题	
思考题	256
习题	261
第五章 角动量	270
§ 5.1 力矩	270

力矩的定义 作用于质点的力矩和作用于质点系的力矩	
§ 5.2 质点角动量定理	275
质点的角动量 质点角动量定理 质点角动量守恒 例题	
§ 5.3 质点系角动量定理	281
质点系角动量定理 质点系角动量守恒 银河系为什么是扁的?	
*潮汐与日长的持续性增长 例题	
§ 5.4 质心系中的角动量定理	287
质心系中的角动量定理 质心系中的角动量守恒 体系角动量	
和质心角动量	
§ 5.5 质点在有心力场中的运动 开普勒定律	289
有心力 有心力场中质点运动的一般特征 有效势能与轨道特	
征 *向行星发射人造天体 行星运动的开普勒定律 两体问题	
例题	
思考题	306
习题	308
上册习题答案	314

第一篇 质 点 力 学

本篇讨论质点的运动规律，分为运动学和动力学两部分。质点运动学研究质点机械运动的描述，不追究运动发生的原因。应用矢量和微积分概念，着重分析描述运动的三个物理量——位矢、速度和加速度的意义以及它们的相互关系。质点动力学则研究物体(看成质点)在周围其他物体作用下如何发生运动。首先讨论物体在一定的力作用下如何运动，然后讨论如何将其他物体的作用归结为力。在本篇中，还将讨论在不同参照系中处理运动学和动力学问题的不同方法及它们的相互联系。本篇的内容是全书的基础。

第一章 质点运动学

§ 1.1 参 照 系

一、空间、时间与运动

力学中研究的运动,是指物体位置的变动,称为机械运动,这是最简单、最基本的运动形式,它存在于一切运动形式之中。

运动总是在空间与时间中发生。空间与时间是物质与运动的广延性与持续性的反映,是事物的次序性的体现。对机械运动而言,空间规定了运动物体的大小与位置,时间则规定了运动过程的长短与顺序。在牛顿力学范围内,空间与时间是脱离物质与运动的独立存在;空间是延伸到整个宇宙的容纳物质的三维平直框架,时间则犹如一座始终均匀运转着的钟。近代的相对论表明,空间、时间是与物质及其运动紧密联系着的,空间的几何性质与时间的量度,既与观察者的运动状态有关,又与物质分布及其运动状态有关。牛顿力学的绝对时空观只是实际时空性质的一种近似。

二、参照系和坐标系

机械运动是指物体位置在空间的变动。任何物体的位置及其变动,只有相对于事先选定的物体或彼此无相对运动的物体群而言才有明确的意义。这种被选作物体运动依据的物体或物体群称为参照物。与参照物固连的三维空间称为参照空间。另外,位置变动总是伴随着时间的变动,所谓考察物体的运动,也就是考察物体的位置变动与时间的关系。因而,考察运动还必须有计时的装置,即钟。参照空间和与之固连的钟的组合称为参照系。但习惯上,常把参照物简称为参照系,不必特别指出与之相连的参照空间和钟。同一物体的运动情况相对不同的参照系是不同的。例如,在地面附近自由下落的物体,以地球为参照

系,它作直线运动;以匀速行驶的火车为参照系,它在作曲线运动。研究某一物体的运动,选取其他什么物体或物体群作参照系,在运动学中是任意的(在动力学中则不然),可视问题的性质和方便而定。参照系选定后,为了定量地表示物体相对参照系的位置,还必须在参照系上建立适当的坐标系。所谓坐标系就是固定在参照空间的一组坐标轴和用来确定物体位置的一组坐标。常用的坐标系有笛卡尔坐标系即直角坐标系(相应的坐标为 x, y, z ; 图 1.1-1)和平面极坐标系(相应的坐标为 r, θ ; 图 1.1-2)、球坐标系和柱坐标系等。物体的运动状态完全由参照系选取决定,与坐标系的选取无关。坐标系不同,只是描述运动的变量不同而已,对应的物体的运动状态并无不同。

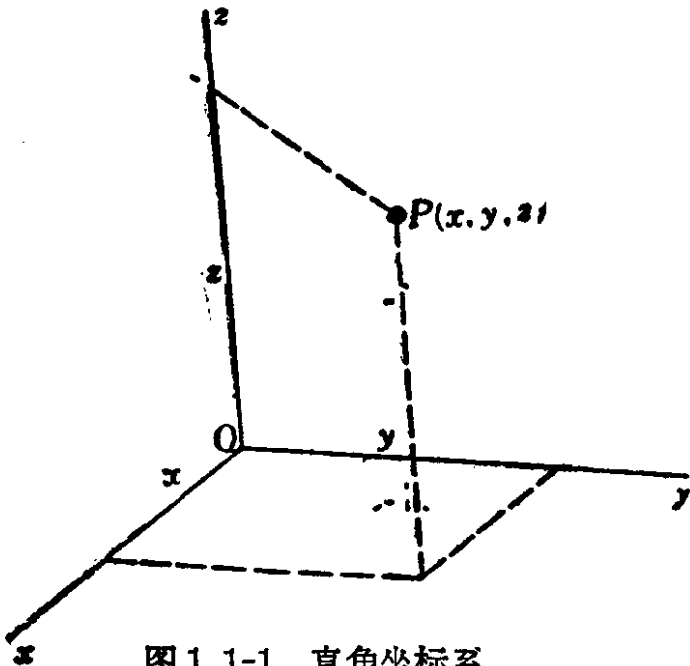


图 1.1-1 直角坐标系

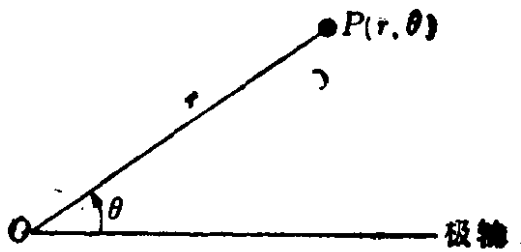


图 1.1-2 平面极坐标系

三、时间标准和长度标准

为了定量地确定物体的运动状态,亦即确定物体的坐标与时间的关系,必定要进行时间和长度的测量,这就要涉及时间和长度的单位和标准。

1. 时间的单位和标准

一切周期运动都可用来量度时间。地球的自转和公转以及月球绕地球的运动是人类最早认识的周期运动,因而自古以来,年、月、日一

直是世界各民族计量时间的单位和标准。为了更细致地量度时间，又将“日”划分为更小的单位。我国古代将1日分为10时，1时分为10刻；又将1日分为12个“辰”，并分别以子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥称之。这与古埃及的计时法相一致，并与近代的将1日分为24小时的计时法一脉相承。以后在欧洲又形成将1小时分为60分，1分分为60秒的更精细的计时法，这可能是在古代巴比伦的六十进位法的基础上发展起来的。我国最早的计时仪器有“圭表”和“日晷”，分别利用太阳的影长和影的方向计时。其后又有“漏刻”，以静水的周期性漏滴作为计时的基础（图1.1-3）。唐、宋时期制造的水运浑天仪和水运仪象台，利用齿轮传动机构，将计时精度提到一个新的高度。后者堪称世界上最古老的天文钟。古代欧洲也采用水漏和沙漏计时，直至12至13世纪，才有用齿轮传动的钟。

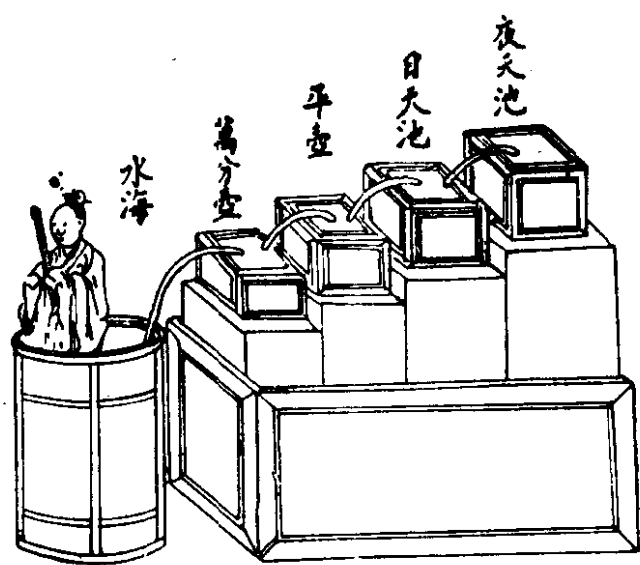


图1.1-3 漏刻

目前国际通用的时间单位是秒(s)。秒原来规定为一年中平均日长(称为平均太阳日)的 $1/86,400$ ，这种以地球自转为基础的计时标准叫世界时(UT)。由于地球自转的不均匀性，1956年起改用以地球公转周期为基准的时间标准，称为历书时(ET)，并规定秒为1900年回归年的 $1/31,556,925.9747$ 。所谓回归年，就是太阳在黄道面上相继两次通过春分点所需的时间（图1.1-4）。为了进一步提高计时的精度，1967年国际计量大会决定采用原子的跃迁辐射作为计时标准，并规定