



面向21世纪课程教材

基 / 础 / 物 / 理 / 教 / 程

LI XUE
力 学

王 楚 李 椿 周乐柱 郑乐民 编



北京大学出版社

PEKING
UNIVERSITY
PRESS

面向 21 世纪课程教材

基础物理教程

力学

王 楚 李 椿 周乐柱 郑乐民 编

北京大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学/王楚等编. —北京:北京大学出版社,1999
面向 21 世纪课程教材·基础物理教程
ISBN 7-301-04289-2

I. 力… II. 王… III. 力学-教材 IV. 03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 34632 号

书 名: 力学

著作责任者: 王 楚 李 椿 周乐柱 郑乐民

责任编辑: 李采华

标准书号: ISBN 7-301-04289-2/O · 0451

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑室 62752021

电 子 信 箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 北京因温特有限公司

印 刷 者: 北京大学印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787×1092 18 开本 17 印张 300 千字

1999 年 9 月第一版 1999 年 9 月第一次印刷

定 价: 24.5 元

内 容 提 要

本书是《基础物理教程》丛书的第一卷,该教程丛书为教育部批准的面向 21 世纪课程教材。

本书讲述了经典力学的基本概念与基本规律,包括时空观、物质的基本运动形式(位移与波动)、动量守恒定律与能量守恒定律。本书还扼要介绍了相对论的基本知识。在内容的选择上,本书以经典力学为主,但注意引进现代物理知识和物理思想。读者可以从书中正文,特别是附录和思考题中,了解到物理学的最新进展,发现其中仍未解决的问题,体会到联系实际、思索问题、解决问题的乐趣。

本书可作为综合大学理工科的基础物理教材,也可作为其他高等院校和中学物理教师的教学或自学参考读物。

《基础物理教程》总序

物理学是其他各自然学科和技术学科的基础,在过去几十年中物理学日益成为新技术的一个重要的支柱,因而《基础物理》已成为大学理、工、农、医各专业重要的基础课,而且各国的高等学校都为改进物理教学作了长期的探索.新技术的飞速发展,要求学生较全面地掌握物理学的基本知识,并在思维方法方面得到锻炼,从而能适应他们一生在事业中将遇到的不断变化和发展的情况.然而,要把近代物理学的成就和应用,组织成基础课的教学体系,并不单纯是材料的取舍和拼接,而是一个知识再加工的研究课题,需要经过长期持之以恒的研究和实践,才可能逐步有所改进.课程改革是一个永无止境的难题.

在写这套书时,我们着重考虑了以下三个问题:

1. 按基本原理组织内容,适当调整某些素材的区划范围

对于教学改革的一个共识是如何精选内容,使教材不至过分庞杂.经过考虑,我们认为宜以物理学的基本概念与基本规律为主题,并应联系现代的应用实例.由于物理学的基本规律具有普遍性,所以在论述上和素材的选取上与传统的区划范围可以有所不同.例如,在力学中可以涉及洛伦兹力;在分子运动论中可以讨论带电粒子的随机运动.这样做有助于阐明基本规律的意义,并使线索更加明晰.

2. 注重论述的科学性并加强思维能力训练

对于物理课程改革的另一个共识,就是应提高学生的理解能力和理论联系实际的能力.这是又一个难题.我们认为在过去的教材中,某些命题的论述欠深入;对实际应用的介绍未能着重于体现基本原理,而是较多地描述具体的技术过程;习题偏重于“代公式型”或“技巧型”.这些急于求成的做法,往往使学生不自觉地养成注重记忆结论、但是忽视理解和思考的习惯.在这套书中,我们力图使论述比较深入,体现物理学的思辨,用基本原理来概括各种可能的应用.我们认为习题是课程教学的一个重要环节,习题能引导学生运用基本原理分析和解决实际问题.这套书中除习题外,每一章还编入能引导学生深入思考的思考题.

习题和思考题数量较多,不可能要求学生全做.有些习题涉及较深入的课题,可作为课堂讨论或课外研究的命题.学生即使不做,只要看一遍

并略加思索,作为自我检查的“镜子”也是有益的。

3. 《基础物理》是供学生反复阅读的书

物理课的教学环节,包括讲授、实验、自习、习题、复习考试等。许多教学组织者,常希望教师能把学生“讲明白”,但往往是事与愿违。困难在于任何课程和教材,都只能按“直线式”的顺序来安排内容。但在一门课中介绍的概念或规律,又必须综合其他课程的内容才能理解。真正的理解和消化有赖于学生的反复钻研。我们不希望这套书,是一套学生在考试后可永不再翻阅的书。因此,书中的材料可能比授课时的教学要求高一些,有些论点也比教学基本要求深入一些。总之,对大学的主要课程,学生不能只学教师的讲稿内容,也不宜只看一本教材。学生应通过对几本教材的比较,通过自己的研究,才能做到逐步消化和理解。

本书是参照理工科大学的教学基本要求编写的,但又不局限于此。希望对学生的钻研和进取,有一定的引导作用。为了便于使用,本书将有关内容分为若干层次。打“*”号的章节可有选择地讲授或不讲;有些为扩展知识面的或常识性的材料则写在附录中。

《基础物理教程》包括《力学》、《电磁学》、《光学》、《热学》、《原子物理》五本书。本书所需的数学知识是矢量代数、空间解析几何及简单的微积分运算,这些都是中学毕业生可以掌握的知识。鉴于当前一些中学的教学受“应试教育”的影响,不少中学生未能系统地掌握应具备的知识,尤其缺乏思辨能力和通过自学进取的意识。为弥补中学生数学知识的不足,作者还编写了《基础物理中的数学方法》,这本书可作为大学一年级学生的参考书。

《基础物理教程》是作者长期从事教学研究和实践的总结,也是一次教学改革的大胆试验。作者欢迎广大教师和读者提出自己的见解、指出本书的缺点和错误,以期进一步改进。

王 楚

序

《力学》是理工科大学学生学习物理的入门课。本书侧重于介绍物理学的基本概念与基本规律,包括时空观、物质的基本运动形式(位移与波动)、动量守恒定律与能量守恒定律。这些概念与定律在中学物理中,均已有了初步的介绍。

在学习大学物理以前,不少学生已不自觉地养成一种习惯,就是记忆几条定义和定理,做到能代公式做题。但应注意,物理学的概念和规律,并不能通过文字与公式简单地完全显示出来,尤其是基本概念与基本定律的内涵,至今还是一个永无止境的命题。在阅读本书时,希望读者能注意到命题的提出与论述,综合已有的知识消化理解,特别应注意到还有未穷尽的问题,逐步建立自己的认识。这是学习物理学的基本方法。事实上,本书也只是提出问题,引导学生作一次初步的归纳与整理。要做到有基本的认识,还有待于在学习后续课乃至在实际工作中反复回味与加工。

由于物理学的基本概念和规律的内涵极广泛,不能用有限的文字充分表述,尤其是它们彼此交叉,相互蕴含,不能按直线式的演绎逻辑穷其本意。但任何一本书只能按直线式的逻辑来组织与论述,不同作者写的书可以有不同的见解与论述。作为大学生,对重要的基础课应不是只读一本书。通过比较不同的见解与论述,才能有助于消化与理解。基于这一点,本书只是一本供学生阅读的书,其中包含一些供学生进取的阅读资料,也不是全面概括教师的授课内容。

物理学是以实验为依据的科学。通过实验观测,在一定的精确度内,提炼出描述客观事物的模型与公式,建立相应的理论与概念。这是研究物理现象及解决技术问题的基本方法。在本书的论述中,希望读者能注意物理模型是如何建立的,以及物理模型蕴含的意义。也望读者能注意到,任何一种具体的模型都不能包含各种可能的实际因素,还要充实与改进。这是大学生应注意养成的、分析实际问题的基本思维素养。

有一些学生把读书变为用眼睛看书,缺少思考与归纳,这不是大学生应有的习惯。建议读者在阅读一个章节后,认真地想一下命题的内涵、论述的逻辑、前后的关联,最好能整理出简明的摘要与笔记。在这过程中,对有关的公式和结论要自己动手推导与演算。动手推导与演算的过程,就是引导自己用数学语言归纳和消化理解的过程。这也是科技工作者应具备

的基本素养与能力. 为引导学生做到这一点, 在本书的某些论述中省略了一些演算过程, 就是要求学生自己推导演算.

做题是教学过程中的重要环节. 一些学生习惯于代公式做题, 并检验答数对否. 对于物理课来说, 应注意做到先对命题的内涵作出分析与判断, 再作演算, 还要对得到的结果作简明的讨论. 这是检验理解的基本方法, 也是解决实际问题的基本方法. 为使学生从学第一门课开始养成这种思维习惯, 在本书的论述中和某些例题中注意体现了这项要求, 但因限于篇幅未能充分展开.

就大学物理来说, 一类有意义的练习是把已有的知识联系起来作知识的再加工, 及用基础知识分析观察到的现象. 这种问题常只能作定性的论证, 也没有完整的标准答案, 其意义在于引导学生理解物理, 培养运用知识进行科学的观察与分析客观现象的能力. 为帮助学生养成这种习惯, 在本书的习题中和思考题中, 有一部分是这类问题, 其中有一些可能是学生力所不及, 甚至是无从下手的问题. 作者的意图只在提出值得思考的问题, 引导学生注意在学习过程中和日常生活中, 养成观察和思考的习惯. 学生也不必急于逐一回答这类问题, 只要知道以后还需要思考和加深理解, 就已是一种提高与进步.

王 楚

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 质量	(1)
1.1.1 质量的概念	(1)
1.1.2 物体与质点	(2)
1.1.3 静止质量与动质量	(3)
§ 1.2 时间与空间	(4)
1.2.1 经典的时-空观	(4)
1.2.2 参照系与坐标系	(5)
1.2.3 物理世界的时间与空间	(7)
1.2.4 时间和长度的基准	(8)
§ 1.3 单位制与量纲	(9)
1.3.1 国际单位制——SI 制	(9)
1.3.2 量纲	(10)
1.3.3 常用的单位词头	(11)
思考题	(11)
习 题	(12)
第二章 运动学	(13)
§ 2.1 质点运动的描述	(13)
2.1.1 位矢与位移	(13)
2.1.2 速度	(15)
2.1.3 加速度	(17)
§ 2.2 转动	(19)
2.2.1 角速度与角加速度	(19)
2.2.2 圆周运动	(22)
2.2.3 自然坐标	(23)
2.2.4 用极坐标描述运动——科里奥利加速度	(24)
§ 2.3 相对运动——伽利略变换	(27)
2.3.1 伽利略变换	(27)

2.3.2 相对平动的参照系	(28)
2.3.3 相对转动的参照系	(30)
§ 2.4 刚体运动的描述	(32)
2.4.1 自由度	(32)
2.4.2 刚体的运动	(34)
附录 A 平面曲线的曲率	(36)
思考题	(37)
习 题	(39)
第三章 运动定律	(43)
§ 3.1 运动第一定律——惯性定律	(43)
3.1.1 运动第一定律的表述	(43)
3.1.2 惯性与惯性参照系	(44)
3.1.3 相对性原理	(45)
§ 3.2 运动第二定律——动量定理	(46)
3.2.1 运动第二定律的表述	(46)
3.2.2 动量与冲量	(46)
§ 3.3 运动第三定律——作用与反作用定律	(48)
3.3.1 运动第三定律的表述	(48)
3.3.2 物体与质点组	(49)
3.3.3 基本的相互作用	(50)
§ 3.4 常用的描述方法	(52)
3.4.1 重力与重力加速度	(52)
3.4.2 弹性力	(53)
3.4.3 摩擦力——固体间的摩擦	(55)
3.4.4 流体的阻力	(58)
附录 B 物质结构的层次	(60)
思考题	(62)
习 题	(63)
第四章 动量与动量矩	(67)
§ 4.1 动量定理与动量守恒定律	(67)
4.1.1 质心	(67)
4.1.2 动量定理	(70)
4.1.3 动量守恒定律	(71)
§ 4.2 相对于质心的运动	(74)

4.2.1 质心参照系	(74)
4.2.2 两体问题	(75)
4.2.3 碰撞	(76)
4.2.4 四类碰撞	(77)
§ 4.3 动量矩(角动量)与力矩	(80)
4.3.1 质点的动量矩定理	(80)
4.3.2 角动量	(81)
4.3.3 对固定轴的动量矩定理	(83)
§ 4.4 动量矩定理与动量矩守恒定律	(85)
4.4.1 动量矩定理的导出	(85)
4.4.2 动量矩定理的意义	(86)
4.4.3 动量矩守恒定律	(88)
§ 4.5 初等刚体动力学	(90)
4.5.1 刚体绕固定轴转动	(90)
4.5.2 通过质心的固定轴	(93)
* 4.5.3 刚体的主轴	(95)
* 4.5.4 进动	(96)
思考题	(98)
习 题	(100)
第五章 非惯性参照系动力学	(106)
§ 5.1 等效原理——惯性力	(106)
5.1.1 惯性力的概念	(106)
5.1.2 等效原理——惯性力场	(107)
§ 5.2 转动的非惯性参照系	(108)
5.2.1 转动参照系的惯性力场	(108)
5.2.2 重力加速度的测量值——视重	(109)
* 5.2.3 离心机	(110)
* 5.2.4 傅科摆	(111)
* § 5.3 地球上的几种自然现象	(113)
5.3.1 潮汐	(113)
5.3.2 河水对河岸的冲刷	(114)
5.3.3 大气中的涡旋	(115)
思考题	(115)
习 题	(116)

第六章 能量	(118)
§ 6.1 动能与功	(118)
6.1.1 运动积分——质点的动能定理	(118)
6.1.2 正交方向的功与动能	(120)
6.1.3 动能与功的单位	(122)
§ 6.2 质点组的动能定理	(122)
6.2.1 质点组的动能与动能定理	(122)
6.2.2 内力的功	(124)
6.2.3 质点组动能定理的表达式	(126)
§ 6.3 势能和机械能守恒定理	(129)
6.3.1 保守力与耗散力	(129)
6.3.2 势能与机械能	(131)
6.3.3 引力势能与电势能	(133)
6.3.4 弹性势能	(134)
· § 6.4 能量与能量守恒定律	(136)
6.4.1 热力学第一定律	(136)
* 6.4.2 相对论的能量与能量守恒定律	(138)
附录 C 流体的运动	(140)
思考题	(144)
习 题	(146)
· 第七章 保守场中的运动	(150)
§ 7.1 保守场的图示——势能曲线	(150)
7.1.1 势能与保守力的关系	(150)
7.1.2 势能曲线	(151)
7.1.3 势阱	(153)
7.1.4 势垒	(154)
§ 7.2 平方反比力场	(155)
7.2.1 轨迹	(155)
7.2.2 引力场中的运动	(158)
7.2.3 三种宇宙速度	(159)
7.2.4 斥力场中的运动	(160)
§ 7.3 在质心系中解两体问题——折合质量	(162)
7.3.1 折合质量与质心系中的动能	(162)
7.3.2 质心系中的动量与动量矩	(164)

思考题	(165)
习 题	(166)
第八章 振动	(168)
§ 8.1 简谐振动与无耗线性振子	(168)
8.1.1 研究振动的意义	(168)
8.1.2 无耗线性振子的自由振动	(168)
8.1.3 描述简谐振动的参量	(170)
8.1.4 简谐振动的几何表示	(172)
§ 8.2 振动的合成	(173)
8.2.1 一维同频率振动的合成	(173)
8.2.2 一维不同频率振动的合成	(175)
8.2.3 二维振动的合成	(177)
§ 8.3 有耗振子的自由振动.....	(179)
8.3.1 有耗线性振子	(179)
8.3.2 弱阻尼振子的自由振动	(180)
*8.3.3 强阻尼振子	(182)
§ 8.4 线性振子的受迫振动.....	(183)
8.4.1 受迫振动的建立过程	(183)
8.4.2 稳定的受迫振动与谐振	(185)
*8.4.3 相差与功率因数	(187)
* § 8.5 自激振动.....	(188)
8.5.1 产生自激振动的方法	(188)
8.5.2 参量激励振动	(189)
思考题	(189)
习 题	(191)
第九章 波动	(194)
§ 9.1 波动传播的描述	(194)
9.1.1 波动现象	(194)
9.1.2 简谐波的描述——波线与波面	(195)
9.1.3 描述简谐波的参量	(197)
§ 9.2 波的动力学方程与能流	(198)
9.2.1 无耗介质中的波动方程——纵波	(198)
*9.2.2 横波的方程	(200)
9.2.3 能流	(202)

§ 9.3 惠更斯原理	(204)
9.3.1 惠更斯原理	(204)
9.3.2 反射定律与折射定律	(205)
§ 9.4 波的叠加——干涉	(207)
9.4.1 线性介质中的叠加原理	(207)
9.4.2 驻波	(209)
* 9.4.3 谐振腔	(211)
§ 9.5 多普勒效应与激震波	(213)
9.5.1 多普勒效应	(213)
* 9.5.2 激震波	(215)
* § 9.6 光速不变原理	(216)
9.6.1 关于以太和光速的困惑	(216)
9.6.2 洛伦兹的假说	(218)
9.6.3 光速不变原理	(219)
附录 D 线性关系	(220)
思考题	(221)
习 题	(223)
* 第十章 相对论力学简述	(227)
§ 10.1 相对论的时间与空间——四维空间	(227)
10.1.1 光速不变原理的内涵	(227)
10.1.2 特殊洛伦兹变换	(229)
10.1.3 长度收缩——空间的相对性	(232)
10.1.4 时间膨胀——时间的相对性	(233)
10.1.5 同时的相对性——时间与空间相关	(234)
§ 10.2 速度的变换与电磁波的多普勒效应	(235)
10.2.1 速度的变换	(235)
10.2.2 电磁波(光波)的多普勒效应	(237)
§ 10.3 动力学的基本定律	(238)
10.3.1 动量守恒定律	(238)
10.3.2 质量守恒定律	(241)
10.3.3 能量守恒定律	(243)
* § 10.4 关于引力的探索	(246)
10.4.1 惯性质量与引力质量	(246)
10.4.2 等效原理的意义	(247)
10.4.3 电磁波的引力效应	(248)

10.4.4 有引力场的时间与空间	(250)
附录 E 四维时空的动量与力	(251)
思考题	(253)
习 题	(255)

第一章 绪 论

物理学是研究各种形态物质间相互作用及其运动规律的科学. 通过对宏观物体的相互作用及运动的科学观测, 归纳出基本的实验定律, 建立了经典力学(又叫做牛顿力学). 以后, 随着科学实验领域的不断扩展, 逐步建立了热学、光学、电磁学等. 在 20 世纪初, 又建立了相对论和量子力学(量子论), 奠定了现代物理学的基础, 使人们对物理世界有了较深刻的理解. 现代物理学的建立, 为技术科学的发展提供了依据, 这是现代技术得以迅速发展的一个重要的原因.

经典力学以对直观的物体的观测为依据, 正确地总结出物理世界的基本规律, 至今仍有广泛的实用意义. 由经典力学开始建立的动量(及动量矩)守恒定律和能量守恒定律, 至今仍是物理学的基本定律. 物理学的发展, 只是不断充实其内涵, 并赋予新的意义. 本书侧重于用经典的概念讨论“守恒定律”, 以及物质的两种具体运动形式——位置移动和波动. 此外, 也适当地介绍相对论的基本概念与量子论的常识.

§ 1.1 质 量

1.1.1 质量的概念

力学的基本规律都涉及质量、时间和空间(长度). 质量、时间和长度是物理学的三个基本量, 也是三个最重要的基本概念. 在经典物理中, 沿用了人类在长期实践中形成的概念. 牛顿在著名的《自然哲学的数学原理》(以后简称《原理》)一书中写道:“我不给时间、空间、位置和运动下定义, 因为那是大家所知道的.”经典的概念是人们的直观概念, 长期以来被认为是完全正确的. 到 19 世纪末, 由精密的科学实验得到的结果, 与传统概念不能协调, 爱因斯坦敏锐地认识到需要重新认识质量、时间和空间, 并以新的概念为依据提出了相对论. 经典物理就是以经典的质量、时间和空间等概念为出发点建立的物理学. 因此, 在学习物理学时, 必须先了解什么是经典的概念.

质量源于对物质的认识. 在 20 世纪以前, 人们认识到的物质是能被我们的感官所直接感受到的, 可称为物体的客观存在. 在长期的实践中,

需要量度物体的量,由此形成了质量的概念.即:质量被理解为“物体所含物质之量”,质量具有可加性.例如,每一物体的质量是其各组成部分的质量之和.

在经典概念中,物体的质量与它的运动状态无关.任一物体在运动时或静止时质量保持不变.这一基本认识不仅与人们的直观感受一致,也与20世纪以前的科学实验相符.

在建立牛顿力学以前,人们已广泛地使用了称量质量的衡器(例如天平等).在建立牛顿力学之后,由于质量是一个重要的物理量,需要进一步揭示质量的属性,也需要规定一个质量的计量基准.物理学的基本定律是由科学实验归纳出来的规律,只有准确的测量,才能有准确的归纳.

与质量直接有关的基本定律有两条:其一是万有引力定律;其二是运动定律.按照引力定律,若两质点分别与另一质点有相等的距离,则两质点受到的引力大小之比,等于两质点的质量之比.若规定一物体(质点)的质量为1单位,则引力的比值就是另一质点(物体)的质量.依据万有引力定律定义的质量叫做**引力质量**.常见的用天平称量物体的质量,实际上就是测量引力质量.

另一种方法是依据运动定律定义质量,叫做**惯性质量**.由两条独立的定律定义的质量是否相同呢?经过数百年不断地测量,在测量精确度范围内没有发现两种质量有差异(见10.4.1节).

显然,规定质量的基准是非常必要的.迄今为止,国际上公认的质量基准是保存在巴黎国际计量局中的铂铱原器,规定它的质量为1 kg(1千克),所以又叫做**千克原器**.各国一般有千克原器的复制品.其他物体的质量,应通过与千克原器比较(直接或间接)来确定.

1.1.2 物体与质点

在力学中,经常用到物体和质点两个名词.直观地看,物体是有广延的物质,物体有质量.质点是指广延小到可以不计的、可看作几何点的物质,质点也有质量.在处理实际问题时,可以设想将任一物体无限细分,把它看作由无穷多个微小的单元组成.每一微元的广延小到可以不计,因而每一微元是一个质点.由此可见,物体总是由大量的质点组成的.因此,物体又叫做**质点组**或**质点系**.根据质量具有可加性,物体的质量等于它所含的各质点的质量之和.

可加性是许多物理量都具有的属性.大家知道力、动量、能量都有可加性.在经典概念中,每一种物理量的可加性都是科学实验的“经验”.由