



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书

主编 杨国桢 副主编 程福臻

力学与理论力学

[上册]

(第二版)

杨维纮 编著



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书
主 编 杨国桢 副主编 程福臻

力学与理论力学(上册)

(第二版)

杨维纶 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是《力学与理论力学(上册)》,即普通物理力学部分,也是“中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书”的第一本.本书是作者在给中国科学技术大学学生上课时所用讲稿的基础上,经过十几年的教学实践不断修改而成的.其特点是注重归纳法教学、物理直觉能力的培养和物理方法的阐述,这对在大学中初学物理的学生是有益和重要的.本书内容精练,物理概念准确清晰,着力用现代观点审视教学内容,并为当代前沿开设了一些窗口和接口.

本书可供综合性大学及理工类院校作为普通物理力学教材或参考书,也可供大专院校物理师生及物理教学研究工作者参考.

图书在版编目(CIP)数据

力学与理论力学.上册/杨维纭编著. —2版. —北京:科学出版社,2014.6
中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书/杨国桢主编
“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
ISBN 978-7-03-041226-3

I. ①力… II. ①杨… III. ①力学-高等学校-教材 ②理论力学-高等学校-教材 IV. ①O3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 126413 号

责任编辑:窦京涛 王 刚 / 责任校对:彭 涛
责任印制:阎 磊 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年6月第 二 版 印张:21 1/4

2014年6月第八次印刷 字数:428 000

定价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版丛书序

2008年这套丛书正式出版,至今使用已五年,回想当初编书动机,有一点值得一提.我初到中国科学技术大学理学院担任院长,一次拜访吴杭生先生,向他问起科大的特点在哪里,他回答在于它的本科教学,数理基础课教得认真,学生学得努力,特别体现在十年CUSPEA考试(中美联合招收赴美攻读物理博士生考试)中,科大学生表现突出.接着谈起一所大学对社会最重要的贡献是什么,他认为是培养出优秀的学生,当前特别是培养出优秀的本科生.这次交谈给了我深刻的印象和启示.后来一些参加过CUSPEA教学的老教师向我提出,编一套科大物理类本科生物理教材,我便欣然同意,并且在大家一致的请求下担任了主编.我的期望是,通过编写这套丛书将CUSPEA教学的一些成果能保留下来,进而发扬光大.

应该说这套书是在十年CUSPEA班的教学内容与经验基础上发展出来的,它所涵盖的内容有相当的深度与广度,系统性与科学的严谨性突出;另外,注重了普通物理与理论物理的关联与融合、各本书物理内容的相互呼应.但是,使用了五年后,经过教师的教学实践与学生的互动,发现了一些不尽如人意的地方和错误,这次能纳入“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材”是个很好的修改机会,同时大家也同意出版配套的习题解答,也许更便于校内外的教师选用.为大学本科生教学做一点贡献是我们的责任,也是我们的荣幸.盼望更多的使用本套书的老师和同学提出宝贵建议.



2013年10月于合肥

第一版丛书序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年.值此筹备校庆之际,由几位长年从事基础物理教学的老师建议,编著一套理科基础物理教程,向校庆五十周年献礼.这一建议在理学院很快达成了共识,并受到学校的高度重视和大力支持.随后,理学院立即组织了在理科基础物理教学方面有丰富教学经验的老师,组成了老、中、青相结合班子,着手编著这套丛书,并以此进一步推动理科基础物理的教学改革与创新.

中国科学技术大学在老一辈物理学家、教育家吴有训先生、严济慈先生、钱临照先生、赵忠尧先生、施汝为先生的亲自带领和指导下,一贯重视基础物理教学,历经五十年如一日的坚持,现已形成良好的教学传统.特别是严济慈和钱临照两位先生在世时身体力行,多年讲授本科生的力学、理论力学、电磁学、电动力学等基础课.他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带领出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生.这套丛书的作者,应该说都直接或间接受到过两位先生的教诲.出版这套丛书也是表达作者对先生的深深感激和最好纪念.

这套丛书共九本:《力学与理论力学(上、下)》、《电磁学与电动力学(上、下)》、《光学》、《原子物理与量子力学(上、下)》、《热学 热力学与统计物理(上、下)》.每本约40万字,主要是为物理学相关专业本科生编写的,也可供工科专业物理教师参考.每本书的教学学时约为72学时.可以认为,这套丛书系列不仅是普通物理与理论物理横向关联、纵向自洽的基础物理教程,同时更加适合我校理科人才培养的教学安排,并充分考虑了与数学教学的相互配合.因此,在教材的设置上,《力学与理论力学(上、下)》、《电磁学与电动力学(上、下)》中,上册部分分别是普通物理内容,而下册部分为理论物理内容.还要指出的是,在《原子物理与量子力学(上、下)》、《热学 热力学与统计物理(上、下)》中,考虑到普通物理与理论物理内容的界限已不再那样泾渭分明,而比较直接地用现代的、实用的概念、物理图像和理论来阐述,这确实不失为是一种有意义的尝试.

这套丛书在编著过程中,不仅广泛吸取了校内老师的经验,采纳了学生的意见,而且还征求了中国科学院许多相关专家的意见和建议,体现了“所系结合”的特点.同时,还聘请了兄弟院校及校内有丰富教学经验的教授进行双重审稿,期望将其错误概率降至最低.

历经几年,在科学出版社大力支持下,这套丛书终于面世,愿她能在理科教学改革与创新中起到一点作用,成为引玉之砖,共同来促进物理学教学水平的提高及其优秀人才的培养,并望广大师生及有关专家们继续提出宝贵意见和建议,以便改进.最后,对方方面面为这套丛书编著与出版的完成所付出艰辛努力及其给予关心、帮助的同志表示深切感谢!

中国科学技术大学理学院院长

杨国桢 院士

2007年10月

第二版前言

本书第一版问世以来,已被一些院校用作教材.应使用本书的老师和学生们的建议,本书第二版对第一版作了勘误(主要是习题与答案中的错误)和少数内容的修订.

本书第一版发行后,不断收到不少关心本书的老师和学生们的来信和电子邮件,希望能出版与本书配套的习题解答.谢谢大家对本书的关心,该习题解答方面的工作现在已经完成并付梓,不日将与大家见面,希望能满足大家的要求.我们热烈地期待着对本书各方面的批评和建议.

杨维絃

2014年6月

于中国科学技术大学

第一版前言

本书是《力学与理论力学》的上册,即普通物理力学部分,也是“中国科学技术大学国家基础科学人才培养基地物理学丛书”的第一本.作者在中国科学技术大学讲授普通物理力学多年,本书就是在授课讲义的基础上整理而成的.在成书的过程中,对讲义进行了修改和补充.

普通物理中的力学,是比较难教的,凡是教授过这门课的教师大都有此体会.一方面,力学的基本原理是整个物理学的重要基础,它包含许多基本的概念、方法和理论,需要学生极为准确地加以掌握,以备后继学习之用;另一方面,初入大学的学生,往往看轻力学,误认为新的内容不多,似乎在中学里都已学过,结果力学反而被疏忽了.

这种局面迫使一些教师采用理论力学的方法来教授普通物理力学.这样做,确实可以解决上述问题的第二个方面,学生不再感到“似曾相识”了.随着教和学二者的提高,原属理论力学的部分内容的确可以逐渐放到普通物理中来.但是若仅限于这一途径改进教学还不能完全解决问题的第一个方面——力学的基本原理是物理学的重要基础.这个基础,是相对于物理学的当代发展以及前沿研究的角度而言的.它至少应包含以下两个方面的内容:一是不断用新的现代的观点去整理老的内容;二是不断用新的前沿成果来充实基础.如相对论,它正是20世纪爱因斯坦对物理学中最基本的概念——时间和空间进行深刻分析后提出的.相对论的提出,对整个物理学产生了深远的影响.

我们的学生最终要走出学校,用所学的知识回报社会.对于他们,从学习物理学的第一天起,就教给他们学习、研究物理的点金之术是十分必要的,这就是编写本书的指导思想.具体地说,有以下几点.

1. 强调实验的重要性,尽量采用“归纳法”的教学方法

物理是一门实验科学,实验是检验物理理论的唯一标准.需要注意的是,有些物理学的结论不是来自理论,而是直接来自实验,如质量具有可加性.一个成功的实验必须至少具备两点:实验思路的简洁和实验结果的可重复性.如何构造实验并在实验中只用最少的假定等,体现着对物理概念的深刻认识(或曰物理直观),是学习物理的难点,也是授课的难点和重点.本书采用以实验为主的教学方法(有人称之为“归纳法”),使各物理概念的引入尽可能自然,顺理成章.用这种归纳教学方法培养出来的学生有较强的独立思考能力和创造能力,易于很快进入科学发展的前沿.教学实践也证明,用这种方法教学,学生的思路活跃,讨论热烈,教学效果较好.

2. 适当地为物理学前沿打开窗口和为后继课程安排接口

本书是这套丛书的第一本,在适当的地方开一些通向物理学前沿的窗口和为后继课程安排接口,对开阔学生的眼界,启迪他们的思维,加深他们对本门课程的理解有好处.如从惯性的起源、引力场中零质量的运动,引申出惯性和引力的几何(或时空)性质,为广义相对论作铺垫.在“振动和波”一章中讲到纵波的波速时,给出的声波的速度公式与实验结果有 20% 的误差,究其原因空气的局部温度变化所致.这个开向后继课程热学的接口,使学生们极为震惊,因为力学中摩擦力司空见惯,而摩擦力做的功变成了什么,他们却是从不考虑的.

3. 对数学的要求

本书对数学的要求是矢量代数和简单微积分,并尽量避免繁琐的数学推导.转动参考系中的科里奥利加速度是比较难以讲述的,本书在引入绝对微商和相对微商概念后,发现教学效果很好,学生容易接受.

本书的教学学时约为 72 学时,其中的第 10 章是甲型物理的学生选修的,数学使用了偏微商和场论的一些知识,乙型物理的学生可以跳过这一章.

本书在出版过程中得到科学出版社、中国科学院物理研究所、中国科学技术大学领导和许多同行的热情支持,清华大学李复教授、中国科学技术大学张玉民教授仔细审阅了全部书稿并提出宝贵的意见和建议,中国科学技术大学向守平教授对本书提出了不少建设性建议并对本书上、下册的协调做了大量的工作,在此一并表示感谢.

出版一部有创意的教材是作者多年的夙愿.在本书的撰写过程中,作者深感要编写出一部易教易学,又富有创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,书中错误和不妥之处在所难免,敬请广大教师和读者不吝指正.

杨维纶

2007 年 7 月

于中国科学技术大学

目 录

第二版丛书序

第一版丛书序

第二版前言

第一版前言

第 1 章 质点运动学	1
1.1 引言	1
1.1.1 力学的研究对象	1
1.1.2 时间、空间和牛顿力学的绝对量	1
1.1.3 宇宙的层次和数量级	3
1.2 质点和参考系	5
1.2.1 质点和参考系	5
1.2.2 轨迹和运动学方程	6
1.3 速度与加速度	8
1.3.1 位移、路程与速度	8
1.3.2 加速度	9
1.4 直角坐标系中运动的描述	10
1.4.1 直线运动	12
1.4.2 曲线运动	13
1.5 自然坐标系中运动的描述	15
1.5.1 切向加速度和法向加速度	16
1.5.2 自然坐标系	20
1.5.3 圆周运动	20
* 1.6 平面极坐标系中的运动描述	21
1.6.1 平面极坐标系	21
1.6.2 位矢、速度和加速度的极坐标表示	23
第 2 章 质点动力学	25
2.1 牛顿运动定律	25
2.1.1 牛顿第一定律(惯性定律)	25
2.1.2 牛顿第二定律	28
2.1.3 牛顿第三定律(作用与反作用定律)	32

2.2	常见的力	33
2.3	动力学问题的求解	37
2.4	力学相对性原理和伽利略变换	44
2.4.1	力学相对性原理	44
2.4.2	时间和空间的绝对性	44
2.4.3	伽利略变换	45
第3章	非惯性参考系	47
3.1	非惯性参考系、虚拟力	47
3.1.1	相对运动	47
3.1.2	平动参考系	47
3.1.3	转动参考系	52
3.2	例题	60
*3.3	牛顿绝对时空概念的局限	63
第4章	动量定理	65
4.1	动量守恒定律与动量定理	65
4.1.1	孤立体系与动量守恒定律	65
4.1.2	冲量与质点的动量定理	67
4.1.3	质点系动量定理	68
4.2	质心运动定理	70
4.2.1	质心运动定理	70
4.2.2	质心坐标系	72
4.3	变质量物体的运动	74
4.3.1	变质量体系	74
4.3.2	运动方程	75
第5章	动能定理	78
5.1	动能定理	78
5.1.1	质点动能定理	78
5.1.2	功和功率	79
5.1.3	质点系动能定理	80
5.2	势能	82
5.2.1	有心力及其沿闭合路径做功	82
5.2.2	保守力与非保守力、势能	82
5.2.3	势能曲线	85
5.3	机械能守恒定律	86
5.3.1	质点系的功能原理和机械能守恒定律	86

5.3.2	保守系与时间反演不变性	87
5.4	质心系	88
5.4.1	柯尼希定理	88
5.4.2	质心系中的功能原理和机械能守恒定律	89
5.5	两体问题	91
5.6	碰撞	96
5.6.1	正碰	97
5.6.2	斜碰	100
5.6.3	在质心参考系讨论	101
第6章	角动量定理	103
6.1	孤立体系的角动量守恒	103
6.1.1	单质点孤立体系和掠面速度	103
6.1.2	两个质点的孤立体系和角动量	104
6.2	质点系角动量定理	105
6.2.1	质点角动量定理	105
6.2.2	质点系角动量定理	106
6.3	质心系的角动量定理	109
6.3.1	质心系的角动量定理	109
6.3.2	体系的角动量与质心的角动量	109
*6.4	对称性、因果关系与守恒律	110
6.4.1	什么是对称性	110
6.4.2	物理定律的对称性	111
6.4.3	因果关系和对称性原理	112
6.4.4	守恒律与对称性	113
第7章	万有引力	116
7.1	万有引力定律	116
7.1.1	开普勒的行星运动三定律	116
7.1.2	牛顿的理论	117
7.1.3	引力的线性叠加性	121
7.2	关于万有引力的讨论	124
7.2.1	G 的测定	124
7.2.2	引力的几何性	125
7.2.3	逃逸速度	125
7.3	质点在有心力场中的运动	126
7.3.1	研究有心力问题的基本方程	127

7.3.2	有心力问题的定性处理,有效势能与轨道特征	128
7.3.3	有心力问题的定量处理及轨道问题	130
* 7.4	牛顿宇宙学	135
7.4.1	宇宙学原理	135
7.4.2	奥伯斯佯谬和宇宙的膨胀	136
7.4.3	哈勃定律、宇宙的年龄和大小	137
7.4.4	宇宙膨胀动力学	138
第8章	刚体力学	141
8.1	刚体运动学	142
8.1.1	刚体的性质	142
8.1.2	刚体的几种特殊运动	144
8.1.3	刚体的一般运动	144
8.2	施于刚体的力系的简化	147
8.2.1	作用在刚体上的力是滑移矢量	148
8.2.2	几种特殊力系	148
8.3	刚体的定轴转动	150
8.3.1	角动量与角速度的关系	150
8.3.2	转动定律	150
8.3.3	转动惯量	151
8.3.4	定轴转动刚体的角动量守恒	154
8.4	刚体运动的基本方程与刚体的平衡	155
8.4.1	刚体运动的基本方程	155
8.4.2	刚体的平衡	155
8.5	刚体的平面平行运动	156
8.5.1	运动方程	156
8.5.2	纯滚动的运动学判据	157
8.5.3	瞬时转动中心	157
8.5.4	刚体的动能定理	159
8.5.5	刚体的重力势能	159
8.5.6	解题注意事项	160
8.6	刚体的定点运动	162
8.6.1	没有外加力矩的定点运动	162
8.6.2	陀螺的运动	164
第9章	振动和波	166
9.1	简谐振动	166

9.1.1	平衡与振动	166
9.1.2	恢复力与弹性力	167
9.1.3	简谐振动的描述	169
9.1.4	谐振子的能量	171
9.1.5	振动的合成与分解	172
9.2	阻尼振动	176
9.2.1	运动方程及其解	176
9.2.2	欠阻尼振动	177
9.2.3	临界阻尼与过阻尼	179
9.3	受迫振动与共振	179
9.3.1	运动方程及其解	179
9.3.2	稳态解分析	181
9.3.3	共振	182
9.4	机械波	185
9.4.1	机械波的产生和传波	185
9.4.2	波的分类	186
9.4.3	平面简谐波	188
9.4.4	波动方程和波的传播速度	190
9.5	波在空间中的传播	192
9.5.1	惠更斯原理	192
9.5.2	波的反射定律	193
9.5.3	波的折射定律	193
9.5.4	波的衍射	194
9.6	波的叠加	194
9.6.1	波的干涉	194
9.6.2	驻波	195
9.6.3	非相干波的叠加、波的群速度	197
9.7	多普勒效应	199
9.7.1	波源静止,观察者运动	199
9.7.2	波源运动,观察者静止	199
9.7.3	波源和观察者都运动	200
9.7.4	马赫锥	201
*第10章	流体力学	202
10.1	流体的基本性质	202
10.1.1	易流动性	202

10.1.2	黏性	203
10.1.3	压缩性	203
10.2	流体运动学	204
10.2.1	流体运动分类	204
10.2.2	描写流体运动的两种方法	204
10.2.3	流线与流管	208
10.3	流体静力学	211
10.3.1	应力张量	211
10.3.2	静止流体的平衡方程	213
10.3.3	重力场中静止流体内各点的压强	214
10.3.4	浮力、浮心和定倾中心	214
10.4	无黏性流体的动力学	216
10.4.1	连续性方程	216
10.4.2	运动方程	217
10.4.3	伯努利方程的应用	219
10.5	黏性流体的运动	225
10.5.1	黏滞定律	225
10.5.2	圆管内定常层流、泊肃叶公式	226
10.5.3	层流与湍流、雷诺数	227
10.5.4	黏滞流体中运动物体所受的阻力	229
第 11 章	相对论	234
11.1	牛顿时空观的困难	234
11.1.1	光传播的射击理论的困难	234
11.1.2	“以太”理论及其困难	236
11.2	相对性原理	240
11.3	洛伦兹变换	242
11.4	相对论时空观	245
11.4.1	时间间隔的相对性	245
11.4.2	同时的相对性	247
11.4.3	长度的相对性	247
11.4.4	时序的相对性和因果关系	249
11.4.5	时空间隔的绝对性	250
11.4.6	速度变换	251
11.4.7	角度变换公式	253
11.4.8	加速度变换公式	254

11.5 狭义相对论力学	257
11.5.1 相对论动量和质量	257
11.5.2 相对论中的力	259
11.5.3 质能公式	260
11.5.4 静质量为零的粒子	261
* 11.6 狭义相对论中质量、动量和力的变换公式	262
11.6.1 质量的变换公式	262
11.6.2 动量和能量的变换公式	263
11.6.3 力的变换公式	264
* 11.7 广义相对论简介	265
11.7.1 等效原理、广义相对性原理与局部惯性系	265
11.7.2 光在引力场中的弯曲	266
11.7.3 引力时间延缓、引力红移	267
11.7.4 弯曲时空、水星的进动	269
习题与答案	271
参考书目	313
中英人名对照	314
名词索引	316
教学进度和作业布置	321

第 1 章 质点运动学

1.1 引言

1.1.1 力学的研究对象

经典力学研究机械运动所遵循的客观规律. 通常把力学分为运动学、动力学和静力学. 运动学只描述物体的运动, 不涉及引起运动和改变运动的原因; 动力学则研究物体的运动与物体间相互作用的内在联系; 静力学研究物体在相互作用下的平衡问题.

1.1.2 时间、空间和牛顿力学的绝对量

描写物体的运动, 要用时间和空间这两个概念. 因此, 我们先来对时间、空间本身作一些分析.

可以说时间和空间是最平凡的概念了, 因为在日常生活中也常常用到它们. 不过, 若问什么是时间, 什么是空间, 却又不容易找到恰当的答案. 其实, 这是两个很难的问题. 尽管有不少关于时间和空间的定义, 但大都不能令人满意. 一种或许可以接受的说法是: 时间、空间是物理事件之间的一种次序, 时间用以表述事件之间的顺序, 空间用以表述事物相互之间的位形.

没有满意的“严格”的理论定义, 并不妨碍时间和空间二者在物理中的使用. 因为物理学是一门基于实验的科学, 在考察物理学的概念或物理量的时候, 首先应当注意它与实验之间是否有明确的、不含糊的关系. 对于时间和空间这两个基本概念来说, 首要的问题似乎不是去追究它们的“纯粹”定义, 而是应当了解它们是怎样量度的.

量度时间, 通常是用钟和表. 然而, 钟和表并不是测量时间的唯一工具. 原则上, 任何具有重复性的过程或现象都可以作为测量时间的一种“钟”. 自然界里有许多重复性的过程, 其中有一些我们早已把它们当作计时标准. 例如, 太阳的升没表示天, 四季的循环称作年, 月亮的盈亏是农历的月. 其他的循环过程, 如双星的旋转、人体的脉搏、吊灯的摆动、分子的振动等, 也都可以用作测时的工具.

更一般地说, 只要知道了某个物理现象随时间的变化, 尽管它不是重复性的过程, 也可以用来测定时间. 譬如, 我们能从一个人的容貌估计出他的年龄, 因为容貌