

中国科学技术大学

21世纪教改系列教材

(第2版)

力学

MECHANICS

杨维纮 编著

中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学 21 世纪教改系列教材

力 学

(第 2 版)

杨维铤 编著

中国科学技术大学出版社

2004 · 合肥

内 容 简 介

本书是作者在给中国科学技术大学物理类专业学生上课时所用的讲稿基础上,经过十几年的实践不断修改而成的。其特点是注重归纳法教学,注重物理直觉能力的培养和物理方法的阐述,这对于在大学中初学物理的学生是有益和重要的。本书内容精炼,物理概念准确清晰,着力用现代观点审视教学内容,并向当前物理研究前沿开设了一些窗口和接口。

本书可供综合性大学和理工类院校作为普通物理力学教科书或主要参考书,也可供大专院校物理教师和物理教学研究者参考。

图书在版编目(CIP)数据

力学/杨维弘编著. —2 版. —合肥:中国科学技术大学出版社,
2004. 11

(中国科学技术大学 21 世纪教改系列教材)

ISBN 7-312-01744-4

I. 力… II. 杨… III. 力学—高等学校—教材 IV. O3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 107202 号

中国科学技术大学出版社出版发行

(安徽省合肥市金寨路 96 号,230026)

合肥学苑印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本: 850×1168/32 印张: 18.75 字数: 487 千

2002 年 4 月第 1 版 2004 年 11 月第 2 版

2004 年 11 月第 3 次印刷

印数: 5001—10000 册

ISBN 7-312-01744-4/O · 298 定价: 25.00 元

第 2 版前言

本书第 1 版问世以来,已被一些院校用作教材。根据使用过本书的教师、学生以及其他读者反馈的意见,也考虑到普通物理教学大纲的要求,第 2 版增加了“流体力学”一章。该章主要供物理类专业的学生使用,因而数学知识相对于前 8 章的要求要高一些,使用了偏微分和场论的一些初步知识,授课老师可以根据需要酌情删改。非物理类专业的学生可以跳过这一章。

本书第 1 版出版后,曾收到不少关心本书的教师和学生的批评与建议,一些教师和学生还花了许多时间为本书修改错误与疏漏,在此谨对他们表示感谢。相信本书第 2 版更能满足读者的要求,我们热烈地期望着对本书各方面的批评和建议。

杨维纮

2004 年 10 月

于中国科学技术大学

前 言

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,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老师,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教授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,若仅限于通过这一途径改进教学,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、前沿的研究成果来充实基础。比如相对论,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,这就是编写本教材的指导思想。具体地

说,有以下几点:

1. 强调实验的重要性,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。例如,质量具有可加性,为什么?不是来自牛顿定律,而是来自实验。一个成功的实验必须至少具备两点:实验思路的简洁性与实验结果的可重复性。如何构造实验,以及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和顺理成章。用这种“归纳法”的教学方法,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。教学实践证明,用这种方法教学,学生思路活跃,讨论热烈,教学效果较好。

2. 物理理论不是独一无二的,穿插讲述一些关于自然的辩证法

有的中学教师把牛顿定律等当作金科玉律来教。必须纠正这种观念。物理理论不是独一无二的,牛顿定律只是到目前为止解释宏观低速运动比较好的理论。解释一类实验现象(有限个),完全可以用几种风马牛不相及的理论。例如,“永动机不可能”这条能量守恒定律以前用“人力有限”来解释(如果可以造出永动机,则可以不消耗任何东西而能得到无穷无尽的有用功,人力岂非无限?而人力是有限的,故永动机不可能),大气压强以前用“自然害怕真空”来解释(我们知道,活塞抽水机可以抽出矿井里的水,是利用了大气压强;而古代的解释是,如果向上提活塞时,水不跟着上升的话,则活塞和水之间就会出现真空,而“自然害怕真空”,所以水也就跟着活塞上升)。即使时至今日,不少学生还是认为像能量守

恒、动量守恒、角动量守恒这些守恒定律是牛顿定律的推论。可是在高速运动时,牛顿定律失效了,但为什么这些守恒定律依然正确?这是因为还有凌驾于牛顿定律之上的更高层次的定律(或法则),这就是对称性原理。能量守恒定律来自于时间的平移对称性,动量守恒定律来自于空间的平移对称性,而角动量守恒定律来自于空间的各向同性。这三个守恒定律在考虑宏观低速运动状态时又可以成功地导出牛顿的力学定律。

物理理论反映的是我们对客观世界的认识,不同的观点就会有不同的理论。比如,目前描述我们宇宙时空的理论就有三个:假定伽利略相对性原理的牛顿力学理论、假定狭义和广义相对性原理的爱因斯坦相对论以及时空对称性原理。我们当然可以用实验去证伪,而这三种理论在宏观低速运动状态下都与实验符合得极好。从另一方面看,物理实验还有其局限性,这表现为两点:其一是任何实验都是有误差的(比如,有人说,能量守恒定律并不正确,若太阳系每年自动产生 10^{-20} 尔格的能量,则由于它小于实验误差,不会与现今的任何实验矛盾);其二是近代物理的许多实验并不是直接的,而是间接的,同一实验可以有不同的解释。物理理论不是绝对真理,它们只是相对真理,理论的多样性并不是坏事,每个学生日后都有创建物理理论的可能。

3. 适当地为物理学研究前沿打开窗口和为后继课程安排接口

在适当的地方开一些通向物理学研究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都有好处。如从惯性的起源、引力场中零质量的运动,引伸出惯性和引力的几何(或时空)性质,为广义相对论做铺垫。由引力与其他几种基本相互作用不同(没有斥力),而与引力对抗的是运动,微观粒子的运动又表现为热现象,引伸出引力与热现象可能是一对矛盾的统一体。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,是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,因为在力学中摩擦力司空见惯,而摩擦力做的功变成了什么是从不考虑的。

4. 对数学知识的要求

本书对数学知识的要求是矢量代数和简单的微积分,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,本书在引入了绝对微商和相对微商的概念后,发现教学效果很好,学生容易接受。

本书在出版过程中得到了许多同行的热情支持,周子舫教授审阅了全部书稿,并提出了宝贵意见,张泰永教授为本书的出版做了大量的工作,在此一并表示感谢。

出版一本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本易教易学、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。

杨维纭

2001 年 10 月

于中国科学技术大学

目 录

第2版前言	(I)
前言	(III)
绪论	(1)
0.1 什么是物理学?	(1)
0.1.1 物理学以前称自然哲学	(1)
0.1.2 物理学是探讨物质结构、运动基本规律和 相互作用的科学	(1)
0.1.3 物理学的任务和目的	(2)
0.1.4 物理学的理论与实验,科学与技术	(4)
0.1.5 物理学研究方法和科学态度	(5)
0.2 怎样学习物理学?	(7)
0.2.1 培养物理直观	(7)
0.2.2 了解各种理论的适用范围	(7)
0.2.3 做好习题	(7)
第1章 质点运动学	(8)
1.1 引言	(8)
1.1.1 力学的研究对象	(8)
1.1.2 时间、空间和牛顿力学的绝对量	(8)
1.1.3 宇宙的层次和数量级	(11)
1.2 质点和参考系	(15)
1.2.1 质点和参考系	(15)
1.2.2 轨迹和运动方程	(17)
1.3 速度与加速度的瞬时性	(19)
1.3.1 位移、路程与速度	(19)

1.3.2	加速度	(24)
1.4	直角坐标系中运动的描述	(26)
1.4.1	直线运动	(28)
1.4.2	曲线运动	(32)
1.5	自然坐标系中运动的描述	(36)
1.5.1	切向加速度和法向加速度	(37)
1.5.2	自然坐标系	(43)
1.5.3	圆周运动	(43)
1.6	平面极坐标系中运动的描述	(46)
1.6.1	平面极坐标系	(46)
1.6.2	位矢、速度和加速度的极坐标表示	(48)
1.7	相对运动	(51)
1.7.1	动参考系作任意方式的平动	(51)
1.7.2	动参考系作任意方式的运动	(53)
	思考题	(64)
	习题	(66)
第2章	质点动力学	(72)
2.1	牛顿运动定律	(74)
2.1.1	牛顿第一定律(惯性定律)	(74)
2.1.2	牛顿第二定律	(78)
2.1.3	牛顿第三定律(作用与反作用定律)	(86)
2.2	常见的力	(88)
2.2.1	弹性力	(88)
2.2.2	摩擦力	(88)
2.2.3	重力	(90)
2.2.4	万有引力	(90)
2.2.5	库仑力	(90)
2.2.6	分子力	(91)
2.2.7	核力	(91)

2.2.8 洛伦兹力	(92)
2.3 动力学问题的求解	(93)
2.4 力学相对性原理和伽利略变换	(104)
2.4.1 力学相对性原理	(104)
2.4.2 时间和空间的绝对性	(105)
2.4.3 伽利略变换	(106)
2.5 非惯性参考系和虚拟力	(107)
2.5.1 平动参考系	(108)
2.5.2 转动参考系	(113)
2.5.3 例题	(120)
2.5.4 牛顿绝对时空概念的困难和惯性的起源	(124)
思考题	(128)
习题	(130)
第3章 动量	(140)
3.1 动量守恒定律与动量定理	(141)
3.1.1 孤立体系与动量守恒定律	(141)
3.1.2 冲量与质点的动量定理	(144)
3.1.3 质点系动量定理	(144)
3.2 质心运动定理	(148)
3.2.1 质心运动定理	(148)
3.2.2 质心坐标系	(151)
3.3 变质量物体的运动	(155)
3.3.1 变质量体系	(155)
3.3.2 运动方程	(156)
思考题	(160)
习题	(161)
第4章 机械能守恒	(167)
4.1 能量守恒	(168)
4.1.1 永动机不可能	(168)

4.1.2	重力势能	(169)
4.1.3	动能	(172)
4.1.4	弹性势能和其他能量形式	(173)
4.2	动能定理	(175)
4.2.1	质点动能定理	(175)
4.2.2	功和功率	(177)
4.2.3	质点系动能定理	(179)
4.3	势能	(181)
4.3.1	有心力及其沿闭合路径做功	(181)
4.3.2	保守力与非保守力, 势能	(182)
4.3.3	势能曲线	(185)
4.4	机械能守恒定律	(188)
4.4.1	质点系的功能原理和机械能守恒定律	(188)
4.4.2	保守系与时间反演不变性	(191)
4.4.3	两体问题	(192)
4.5	质心系	(197)
4.5.1	柯尼希定理	(197)
4.5.2	一般质心系中的功能原理和机械能守恒定律	(199)
4.6	碰撞	(203)
4.6.1	正碰	(205)
4.6.2	斜碰	(209)
4.6.3	质心坐标系	(210)
4.7	对称性、因果关系与守恒律	(217)
4.7.1	什么是对称性	(217)
4.7.2	因果关系和对称性原理	(219)
4.7.3	守恒律与对称性	(220)
	思考题	(222)
	习题	(223)

第 5 章 角动量定理	(229)
5.1 孤立体系的角动量守恒	(229)
5.1.1 单质点孤立体系和掠面速度	(229)
5.1.2 两个质点的孤立体系和角动量	(230)
5.2 质点系角动量定理	(233)
5.2.1 质点角动量定理	(233)
5.2.2 质点系角动量定理	(234)
5.2.3 角动量守恒定律与空间各向同性	(238)
5.3 质心系的角动量定理	(238)
5.3.1 质心系的角动量定理	(238)
5.3.2 体系的角动量与质心的角动量	(239)
5.4 万有引力	(240)
5.4.1 开普勒的行星运动三定律	(241)
5.4.2 牛顿的理论	(243)
5.4.3 引力的线性叠加性	(247)
5.5 关于万有引力的讨论	(252)
5.5.1 G 的测定	(252)
5.5.2 引力的几何性	(254)
5.5.3 逃逸速度	(255)
5.5.4 引力是什么	(256)
5.6 质点在有心力场中的运动	(262)
5.6.1 研究有心力问题的基本方程	(263)
5.6.2 有心力问题的定性处理,有效势能与轨道特征	(265)
5.6.3 有心力问题的定量处理和轨道问题	(268)
思考题	(274)
习题	(276)
第 6 章 刚体力学	(282)
6.1 刚体运动学	(284)

6.1.1	刚体的性质	(284)
6.1.2	刚体的几种特殊运动	(287)
6.1.3	刚体的一般运动	(288)
6.2	施于刚体的力系的简化	(292)
6.2.1	作用在刚体上的力是滑移矢量	(293)
6.2.2	几种特殊力系	(293)
6.3	刚体的定轴转动	(296)
6.3.1	角动量与角速度的关系	(296)
6.3.2	定轴转动刚体的动量矩定理	(297)
6.3.3	转动定律	(298)
6.3.4	转动惯量	(299)
6.3.5	惯量张量和惯量主轴	(302)
6.3.6	定轴转动刚体的角动量守恒	(308)
6.3.7	约束反力与静、动平衡问题	(308)
6.4	刚体运动的基本方程与刚体的平衡	(311)
6.4.1	刚体运动的基本方程	(311)
6.4.2	刚体的平衡	(312)
6.5	刚体的平面平行运动	(314)
6.5.1	运动方程	(314)
6.5.2	纯滚动的运动学判据	(315)
6.5.3	瞬时转动中心	(316)
6.5.4	功能原理	(318)
6.5.5	解题注意事项	(319)
6.6	刚体的定点运动	(323)
6.6.1	没有外力矩的定点运动	(323)
6.6.2	陀螺的运动	(326)
	思考题	(330)
	习题	(331)
第7章	振动和波	(341)

7.1	简谐振动	(341)
7.1.1	平衡与振动	(341)
7.1.2	恢复力与弹性力	(342)
7.1.3	简谐振动的描述	(346)
7.1.4	谐振子的能量	(349)
7.1.5	振动的合成与分解	(350)
7.2	阻尼振动	(356)
7.2.1	运动方程及其解	(357)
7.2.2	欠阻尼振动	(358)
7.2.3	临界阻尼与过阻尼	(360)
7.3	受迫振动与共振	(361)
7.3.1	运动方程及其解	(362)
7.3.2	稳态解分析	(364)
7.3.3	共振($\omega = \omega_0$)	(366)
7.4	二自由度振动	(371)
7.5	机械波	(373)
7.5.1	机械波的产生和传播	(374)
7.5.2	波的分类	(374)
7.5.3	平面简谐波	(377)
7.5.4	波动方程和波的传播速度	(380)
7.5.5	波的能量密度	(383)
7.6	波在空间中的传播	(387)
7.6.1	惠更斯原理	(387)
7.6.2	波的反射定律	(388)
7.6.3	波的折射定律	(389)
7.6.4	波的衍射	(390)
7.7	波的叠加	(391)
7.7.1	波的干涉	(391)
7.7.2	驻波	(393)

7.7.3 非相干波的叠加,波的群速度	(396)
7.8 多普勒效应	(399)
7.8.1 波源静止,观察者运动	(399)
7.8.2 波源运动,观察者静止	(400)
7.8.3 波源和观察者都运动	(401)
7.8.4 一般情况	(401)
7.8.5 马赫锥	(404)
7.9 非线性波简介	(405)
思考题	(408)
习题	(410)
第8章 相对论	(420)
8.1 牛顿时空观的困难	(421)
8.1.1 光传播的射击理论的困难	(421)
8.1.2 “以太”理论及其困难	(424)
8.2 相对性原理	(430)
8.3 洛仑兹变换	(434)
8.4 相对论时空观	(437)
8.4.1 时间间隔的相对性	(438)
8.4.2 同时的相对性	(441)
8.4.3 长度的相对性	(441)
8.4.4 时序的相对性和因果关系	(444)
8.4.5 时空间隔的绝对性	(446)
8.4.6 速度合成律	(447)
8.4.7 角度变换公式	(451)
8.4.8 加速度变换公式	(454)
8.5 狭义相对论力学	(459)
8.5.1 相对论动量和质量	(459)
8.5.2 相对论中的力	(462)
8.5.3 质能公式	(463)

8.6 狭义相对论中质量、动量和力的变换公式·····	(467)
8.6.1 质量的变换公式 ·····	(467)
8.6.2 动量和能量的变换公式 ·····	(468)
8.6.3 力的变换公式 ·····	(471)
8.7 四维时空 ·····	(473)
8.7.1 四维矢量 ·····	(473)
8.7.2 时空间隔 ·····	(476)
8.7.3 四维速度矢量 ·····	(477)
8.7.4 四维动量矢量 ·····	(478)
8.7.5 多普勒效应 ·····	(479)
8.7.6 孪生子佯谬 ·····	(481)
8.8 广义相对论简介 ·····	(487)
8.8.1 等效原理和广义相对性原理 ·····	(488)
8.8.2 光在引力场中的弯曲 ·····	(489)
8.8.3 引力时间延缓和引力红移 ·····	(490)
8.8.4 弯曲时空和水星的进动 ·····	(492)
思考题·····	(494)
习题·····	(496)
第9章 流体力学 ·····	(502)
9.1 流体的基本性质 ·····	(503)
9.1.1 易流动性 ·····	(503)
9.1.2 粘性 ·····	(503)
9.1.3 压缩性 ·····	(504)
9.2 流体运动学 ·····	(505)
9.2.1 流体运动分类 ·····	(505)
9.2.2 描述流体运动的两种方法 ·····	(506)
9.2.3 流线与流管 ·····	(511)
9.3 流体静力学 ·····	(515)
9.3.1 应力张量 ·····	(515)
9.3.2 静止流体的平衡方程 ·····	(518)