

# 理论物理导论

(力学、热物理学卷)

*Introduction to Theoretical Physics*  
—*Mechanics and Thermophysics*

● 李华钟 崔世治 吴深尚 编著



CHEP

高等教育出版社



Springer

施普林格出版社

高等学校教材

# 理论物理导论

(力学、热物理学卷)

李华钟 崔世治 吴深尚 编著



CHEP  
高等教育出版社



Springer  
施普林格出版社

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

理论物理导论/李华钟等 编著. —北京:高等教育出版社;  
海德堡:施普林格出版社,1999.8  
ISBN 7-04-007696-9

I. 理… II. 李… III. 理论物理-高等学校-教材 IV. 041

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 25526 号

书 名 理论物理导论(力学、热物理学卷)  
作 者 李华钟 崔世治 吴深尚 编著

---

出版发行 高等教育出版社 施普林格出版社  
社 址 北京市东城区沙滩后街55号 邮政编码 100009  
电 话 010-64054588 传 真 010-64014048  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所  
印 刷 北京民族印刷厂

开 本 880×1230 1/32 版 次 1999年8月第1版  
印 张 13.875 印 次 1999年8月第1次印刷  
字 数 400 000 定 价 22.00元

---

©China Higher Education Press Beijing and Springer-Verlag Heidelberg 1999

版权所有 侵权必究

## 建设精品教材 促进教学改革

当今世界,科学技术突飞猛进,国际竞争日趋激烈。未来的竞争,归根结底是人才的竞争。为此,党和国家提出“科教兴国”的发展战略,把希望寄托在人才培养和科技发展上。高等学校肩负培养高素质创造性人才的重任。面向新世纪,高等学校要通过深化改革,努力提高人才培养的数量和质量。

在高等教育的改革和发展中,教学改革是核心。教学改革包括人才培养模式、教学内容、课程体系、教学方法、教学手段和教材建设等丰富的内容。其中,教材是教学经验和学科理论知识融合的结果,是教学内容和教学方法的知识载体,是教师进行教学的基本工具,是学校教学和科研水平的重要体现。教材建设是高等学校的基础性工作。抓好教材建设,是提高教学质量、培养高素质人才的基础环节和重要保证。因此,中山大学十分重视教材建设。

“抓重点,出精品”是“九五”期间普通高等教育教材建设与改革工作的核心。中山大学为了进一步贯彻落实国家教育部教材建设“树立精品意识,实施精品战略”的要求,保证“211工程”建设目标的实现,促进出版一批能突出反映学校学科优势、质量较高、影响较大、适应21世纪高等教育发展需要的精品教材,学校决定从“211工程”建设经费中拨出专款,用于建设中山大学“211工程”系列精品教材。其目的就是为了提高教材建设水平,使教材建设与教育改革和教学改革协调发展,更好地为教学服务,提高教学质量。

现在,第一批中山大学“211工程”精品教材与读者见面了。我衷心感谢各位编著教师和评审专家的辛勤劳动,感谢高等教育出版社和科学出版社的鼎力支持,并对他们的劳动深表敬意。相信这批教材能

够促进学校的教学改革,为进一步提高教学质量和培养高素质的创造性人才作出应有的贡献。

王珣章

1998年9月于中山大学

## 序

1980年中山大学物理系就大学物理专业的理论物理课程开始一项改革。那时候物理专业的理论物理课是四门,即理论力学,热力学及统计物理,电动力学和量子力学,通称之为“四大力学”,它们和普通物理一起构成物理专业大学学习的基础。这“四大力学”源自1952年全国院系调整,在“全面学习苏联”的指导思想下,全国实行这种课程体制数十年,有些学校沿袭至今。“四大力学”体系的确为新中国培养了许许多多人才,也已成为中国物理教学的主流和传统。1980年是改革开放的初期,物理专业学制已从五年制改为四年制,大学生的专业教育也要作相应的调整。因此为了这个时代转变的需要,设想把“四大力学”体系改变,将四门理论物理课程改为一门一年制的“理论物理导论”。这样的课程,并不新鲜,西方国家中有一部分就行之已久。不过对我们来说是一项教学上从思想到实践的改变,因为它要改变三十年的习惯。

中国的大学教育自20世纪50年代以来一直是“专业教育”,而不是“文化教育”。培养的是“专才”,而不是西方国家教育所常说的“通才”。虽然近年有不少人讲所谓大学的“素质教育”。但至今我们未脱离这一基本的轨道。从“专业教育”的层次来看,大学物理教学基础课程应该认识到,它的专业作用在于要给予:物理理论基础,应用物理的一些专业知识和“工业物理”的一般认识。前两者是人所共知,第三项“工业物理”是标新立异的提法,这里不必多作解释\*。基于以上的认识,“理论物理导论”就不可以是四大力学的“浓缩版”、“精简型”。对教学内容的取材和处理,要有一种观点,就是“学以致用”,但不是“立竿见

---

\* 注:关于“工业物理”,作者曾有另文论述:——在第三届中美日三国物理教学研讨会上的发言(1993),和在中国物理学会广东分会年会(1990)上的报告:“物理学与传统工业”。

影”。这一设想在理论物理教学的老师中有支持的,当然也有不支持的。但毕竟由郑庆璋教授等率先实践,开始了这项教学改革。十多年来,几经人事上的更迭,原先的拟想未必一贯地得到认同、体现和发挥。但毕竟还是有部分教师坚持在他自己的教学中沿此方向探索与实践,积累了一些东西。今天“导论”这一门课程由本来只有极少数学生选修的课,变成中山大学物理系大多数学生修读的主流课。学校有关方面建议出版这一课程的教学参考书,事隔十余年本来已是“旧事不须记”。幸而尚有一些积极分子,崔世治教授和吴深尚教授,他们在各自的努力下,把力学和热物理这两部分首先整理出来;此外,在1980年时候还有一门辅助的选修课程,配合这种设想,叫做“应用物理的理论方法”,为三年级学生的选修课。我把讲稿加以补充,也就形成“附篇”。这是对于本课程的一项必要的补充或辅助读物。它给出从课本到实际工作的辅助工具,填补两者之间的鸿沟,使学生认识可能通往实际的桥梁。(但是有关量子力学举例部分,由于本卷未包含有关的基础知识,因而不包括在这附篇之中。)至于电磁理论及量子力学部分,仍在组织整理编写中。考虑到全书篇幅较大,也希望及早收集到同行对于我们上述改革设想与实践的反映,故先将已完成的几部分集结成本卷出版。(力学篇由吴深尚执笔;热物理学篇由崔世治执笔;附篇由李华钟执笔;全书由李华钟主编)。至于我们试图达到的设想,在多大程度上能做到,那就要请读者们鉴评了。

在本书出版过程中,蒙倪光炯教授、刘有延教授细心审阅书稿并提出不少宝贵意见,谨表衷心的感谢。

李华钟

1998年9月于中山大学

责任编辑 赵天夫  
封面设计 张楠  
责任印制 陈伟光



# 目 录

<b>第一篇 力学</b> .....	(1)
<b>第一章 导论</b> .....	(1)
§1-1-1 力学中的支系 .....	(2)
§1-1-2 单质点的动力学问题,边界条件和初始条件.....	(5)
§1-1-3 接触作用、力,超距作用、势与场.....	(8)
§1-1-4 参考系,坐标架,非惯性系与惯性力 .....	(9)
§1-1-5 时空几何,平直与弯曲空间的力学现象 .....	(20)
§1-1-6 维数、空间尺度、自由度以及它们 与物理的关系.....	(25)
§1-1-7 系统和环境.....	(30)
习题 1-1 .....	(31)
<b>第二章 一维质点动力学——线性及非线性现象</b> .....	(33)
§1-2-1 保守力和势,运动积分,简谐势,简谐运动 .....	(33)
§1-2-2 有心力势.....	(37)
§1-2-3 周期势,受迫振动 .....	(41)
§1-2-4 速度势,阻尼振动 .....	(43)
§1-2-5 阻尼受迫振动.....	(46)
§1-2-6 微扰论初步.....	(48)
§1-2-7 单摆运动.....	(51)
§1-2-8 混沌.....	(58)
习题 1-2 .....	(64)
<b>第三章 质点组的单粒子运动和集体运动</b> .....	(67)
§1-3-1 质点组质心的概念及运动的分解.....	(67)
§1-3-2 一维质点组(晶格动力学模型、声子)、	

耦合摆、耦合振子 .....	(71)
§ 1-3-3 介质中的线性波动 .....	(76)
§ 1-3-4 非线性波动和孤波 .....	(87)
§ 1-3-5 刚体的运动学 .....	(91)
§ 1-3-6 刚体的转动 .....	(97)
§ 1-3-7 流体 .....	(103)
§ 1-3-8 流体的相似原理、雷诺数 .....	(110)
习题 1-3 .....	(111)
<b>第四章 力学理论的形式化</b> .....	(113)
§ 1-4-1 约束和广义坐标 .....	(113)
§ 1-4-2 达朗贝尔原理 .....	(114)
§ 1-4-3 保守系统的拉格朗日运动方程 .....	(117)
§ 1-4-4 哈密顿函数和正则运动方程 .....	(121)
§ 1-4-5 最小作用量原理 .....	(126)
§ 1-4-6 力学量的运动方程、泊松括号 .....	(131)
§ 1-4-7 正则变换 .....	(133)
§ 1-4-8 多谐振子系统 .....	(136)
§ 1-4-9 诺特(Noether)定理 .....	(139)
习题 1-4 .....	(142)
<b>第五章 守恒和对称、局部与整体</b> .....	(144)
§ 1-5-1 对称性和守恒律 .....	(145)
§ 1-5-2 时间的平移、空间的平移与转动 .....	(147)
§ 1-5-3 相对论力学,洛伦兹变换 .....	(152)
§ 1-5-4 具有无穷多自由度的经典力学系统的对称性与 守恒律 .....	(160)
<b>第一篇习题解答</b> .....	(166)
<b>第一篇参考书目</b> .....	(175)
<b>第二篇 热物理学</b> .....	(176)
<b>引言</b> .....	(176)
<b>第一章 预备知识</b> .....	(177)

§2-1-1 对热现象的基本认识 .....	(177)
§2-1-2 概率基础 .....	(180)
§2-1-3 量子态 .....	(188)
习题 2-1 .....	(192)
<b>第二章 熵和温度</b> .....	(193)
§2-2-1 等概率假设 .....	(193)
§2-2-2 孤立系的平衡:熵与温度 .....	(196)
§2-2-3 几点进一步的讨论 .....	(201)
习题 2-2 .....	(206)
<b>第三章 分布和配分函数</b> .....	(208)
§2-3-1 正则分布和巨正则分布 .....	(208)
§2-3-2 热力学量和热力学基本方程 .....	(213)
§2-3-3 顺磁固体 .....	(218)
习题 2-3 .....	(222)
<b>第四章 经典近似</b> .....	(223)
§2-4-1 半经典方法 .....	(223)
§2-4-2 经典理想气体 .....	(229)
§2-4-3 能量均分定理 .....	(235)
习题 2-4 .....	(238)
<b>第五章 热力学方法</b> .....	(240)
§2-5-1 假想实验方法 .....	(240)
§2-5-2 热力学函数与麦克斯韦关系 .....	(248)
§2-5-3 特性函数 .....	(256)
§2-5-4 热力学第三定律 .....	(259)
习题 2-5 .....	(263)
<b>第六章 气体</b> .....	(264)
§2-6-1 非理想经典气体 .....	(264)
§2-6-2 黑体辐射——光子气体 .....	(268)
§2-6-3 量子气体的一般性质 .....	(274)
习题 2-6 .....	(281)

## 8 目 录

<b>第七章 固体</b> .....	(283)
§ 2-7-1 固体的比热 .....	(284)
§ 2-7-2 磁性 .....	(292)
习题 2-7 .....	(296)
<b>第八章 不可逆过程和非平衡态</b> .....	(297)
引言.....	(297)
§ 2-8-1 唯象讨论 .....	(297)
§ 2-8-2 玻耳兹曼方程 .....	(307)
习题 2-8 .....	(315)
<b>第九章 相变和化学反应</b> .....	(316)
§ 2-9-1 热力学平衡和相平衡 .....	(316)
§ 2-9-2 相变 .....	(321)
§ 2-9-3 多元系 .....	(328)
习题 2-9 .....	(336)
<b>附录 A 斯特令公式</b> .....	(338)
<b>附录 B 巨正则分布有关公式的推导</b> .....	(339)
<b>附录 C 统计力学的信息论方法</b> .....	(341)
<b>附录 D 磁功</b> .....	(345)
<b>第二篇习题答案</b> .....	(347)
<b>第二篇参考书目</b> .....	(350)
<b>附篇 应用物理中的理论方法</b> .....	(351)
§ A-1 引言 .....	(351)
§ A-2 用近似和物理模型估计量级 .....	(353)
§ A-3 近似的数学式运算 .....	(359)
§ A-4 量纲分析 .....	(379)
§ A-5 形式方法和近似的失效 .....	(398)
§ A-6 作为工具和方法的对称性 .....	(405)
§ A-7 物理模型的构思 .....	(413)
§ A-8 费米-费曼风格 .....	(422)
<b>附篇参考资料</b> .....	(430)

# 第一篇 力学

## 第一章 导论

力学是研究物体受力作用与物体运动之间关系的学科。它是整个物理学科的基石,当然也可以说是自然科学,工程学科最重要的基础。

虽然自古以来中外不少自然哲学家观察到自然界中的各种力学现象,研究过天体以及发生在他们身边的物体的运动特性,也提出过种种学说。但是直到近世,完整的力学理论才由伽利略、牛顿等人所确立。牛顿在前人的基础上以紧凑的数学理论形式表述了对各种力学现象的统一解释。他所提出的一些简单的假说上升到定律的地位,成为我们所讲述的力学学科的基础。

力学中还有一套有别于牛顿力学理论的表述形式,它就是我们称之为分析力学的形式。它包括了哈密顿形式的表述和拉格朗日形式的表述。分析力学采用数学分析的方法来解决力学问题,它所注重的不是物体的作用力、加速度等具有直接现象的物理量,而是直接由具有更深刻意义的物体的能量出发,同时扩大了坐标的概念——引入广义坐标。它推演出的运动方程具有涵义更加普遍等优点。分析力学中所采用的研究方法和某些结论对于其它物理领域的研究和发展有重要的启发作用。其中最显著的例子是量子力学中能量算符、力学量算符之间的对易关系都能从分析力学中找到它们的对应。所以说分析力学是量子力学不可缺少的知识基础。

在力学编中,我们侧重三个方面的讨论。第一方面是一些重要的力学概念,这些概念对于整个理论物理是至关重要并且经常出现。第二方面是在牛顿理论的框架内讨论一维的线性和非线性运动,多粒子系统的集体运动。这是因为一维运动不仅有简单的优点而且有现实的意义。非线性现象更是目前科学前沿的一个热点。此外,集体运动是

凝聚态物质的一种基本运动形式。第三方面是在分析力学的框架中讨论力学的基本动力学方程和物理系统的对称性及物理量守恒的理论。这是物理分析中的一种更大概括力和更高的手段。

### § 1-1-1 力学中的支系

力学中按照它所描述的运动内容侧重不同而分成一些分支,一般称为动力学,运动学和动态学。

#### 一、运动学(Kinematics)、惯性及惯性质量

##### 1. 运动学

力学中首先要接触的问题是有关物体的运动。我们要知道物体是静止还是运动着,我们称之为运动状态。运动学是关于如何描述物体运动形态的表述,它告诉我们如何定义物体的位置坐标,运动速度、加速度等。它只涉及这些量之间的关系和描述运动状态,而不过问产生运动的外界原由。

牛顿第一定律指出:静止状态和匀速直线运动都是物体在没有外力作用下的自然状态。

现在我们考察不受外力作用的两个物体 A 和 B。假设它们之间存在着相对运动,那么从物体 A 的角度观察到 B 物体以  $v$  的速度作匀速直线运动,但如果从物体 B 的角度则观察到 A 物体以  $-v$  的速度作匀速直线运动。因此为了统一准确地表述物体的运动,运动学要求引入描述物体运动的参照物及固联于参照物的某种坐标架。例如我们刚才所讲到的 A, B 两物体的运动:第一种描述,我们将 A 物体作为描述运动的参照物,坐标架  $Oxy$  固联于 A 上(为了简单,只讨论二维空间)。这时物体的运动方程分别为:

$$\begin{cases} x_A = 0 \\ y_A = 0 \end{cases}, \begin{cases} x_B = v_x t + C_1 \\ y_B = v_y t + C_2 \end{cases} \quad (1-1-1)$$

第二种描述,我们将 B 物体作为参照物,坐标架  $Oxy$  固联于 B 上。这时物体的运动由下面的方程所描述:

$$\begin{cases} x_A = -v_x t + C_3 \\ y_A = -v_y t + C_4 \end{cases}, \begin{cases} x_B = 0 \\ y_B = 0 \end{cases} \quad (1-1-2)$$

其中  $C_1, C_2, C_3, C_4$  是常数,  $O_{xy}$  是二维笛卡尔坐标。

可见为了表明到底是哪个物体在运动,运动学假定一个静止的坐标系(架)并用此坐标系来描述物体的运动。从以下关于牛顿第一,第二定律的讨论知道,我们通常选择的这个静止参考系也就是地球。

## 2. 惯性与惯性质量

不受外力作用的物体具有保持原来运动状态的特性,这就是惯性。将静止物体的惯性用数量表示出来就是物体的质量,称为惯性质量;而表明运动物体的惯性则用动量。动量与惯性质量成正比,也与运动速度成正比。

## 二、动力学(Dynamics),力和相互作用

依照牛顿力学理论,物体的运动状态随时间,空间变化是因为物体受外力作用。而对于研究运动随时间、空间变化的动力学来说,只有明确了力自身的性质,才能给出物体的运动方程。所以可以认为动力学理论是关于如何从物体之间的相互作用出发,去寻找对物体的作用力从而确定物体运动的理论。

自然界中各种形态的物质的相互作用形式极为复杂,只有少数有意义的实际问题,它们的互作用规律——力规律才有简单的数学形式。通常我们只能在足够精确的近似情况下在形式上把真实的作用力表达出来。不过,归根到底,许多复杂的作用形式,都只是几种最基本作用力的表现而这些基本作用力只能在微观基础上阐明。现在我们讨论宏观力学时只能唯象地表达各种作用力的形式。下面举几个常见力:

1. 例如牛顿在开普勒对太阳系行星运动观察的基础上对行星运动规律做了数学精确的表达,明确了地球表面的落体运动和行星运动有相同的本质。牛顿提出著名的万有引力定律,其数学表达式为:

$$F = G(M_1 M_2 / r^3) r \quad (1-1-3)$$

这是一种二体作用力。

2. 又如小球受弹性范围内形变的弹簧作用作一维振动,胡克提出弹性力描述弹簧对小球的作用:

$$F = -kx \quad (1-1-4)$$

#### 4 第一篇 力学

这里  $k$  是由实验确定的常数。

3. 摩擦作用却是不同于上述二种作用。在物体作阻尼运动或减速运动时,摩擦力起着决定性的作用。两个固体表面接触时的静摩擦力  $f$ ,它满足

$$|f| \leq \mu_s N \quad (1-1-5)$$

其中  $f$  是阻止物体滑动的力、 $N$  是使两固体表面互相接触的垂直作用力(也称为约束力), $\mu_s$  是与材料有关的系数。(5)式是关于静摩擦力的一个近似表达式,由经验观测而推导出来的。运动摩擦更为复杂。虽然说摩擦力的分子力本质是已知的,但目前仍然弄不清摩擦力产生的机制。

4. 外部施加的力可能采取各种形式,在明显与时间有关的力中,我们常常遇到周期性变化的力,象  $F = F_0 \cos \omega t$ 。

归纳起来,我们可以给动力学下一个明确的界定:动力学是对物体之间的相互作用提出某种假说研究在这些作用下物体运动的规律。

牛顿力学中动力学的最基本内容是牛顿第二定律及第三定律。第二定律告诉我们,物体运动速度的变化率与外力的大小成正比。牛顿用动量来描述运动,所以第二定律的表达式为  $F = dp/dt$ 。第三定律指出物体 A 施力于物体 B 时会同时受到物体 B 施之于 A 的一个反作用力。 $F_{AB}$  表示 A 施于 B 的作用力, $F_{BA}$  表示 B 施于 A 的反作用力,二者的关系为  $F_{AB} = -F_{BA}$ 。这就是第三定律的数学表达式,负号代表作用力,反作用力在同一力线上而方向相反。

### 三、动力学(Kinetics)

我们从上面的讨论知道,力学的内容按其研究的侧重面而有运动学和动力学之分。当我们对所处理的运动只着重于运动形态的描述而不讲究其内外受力的作用时,我们只需从系统的守恒量定律、几何对称性等可以得到有用的结果。这种途径是求解整个问题的部份解答。这一力学部类称为运动学。当我们要知道系统如何在力作用下运动,力的作用如何主宰系统的运动时,求解这个问题的就是动力学。除此之外还有一支类:人们不问力或相互作用的细节,也不对运动的几何形



态有兴趣,只追究系统在受到外界作用和内部相互作用前后所起的变化,把这种变化定性和定量地表述出来。这一支类称为动力学。

对于大数目的粒子(质点)体系,我们不必去追寻引起系统变化的机制和原因(有时是不可能弄清楚其机制),只需采用动力学的理论往往能得到有用的信息。例如气体分子动力学,玻尔兹曼动态方程等。

### § 1-1-2 单质点的动力学问题,边界条件和初始条件

质点是做为研究物体运动动力学问题的一个抽象概念也是物体的一个理想化模型。当我们研究物体的运动规律时,如果可以不用考虑物体的内部结构和物体的转动,则可以将刚性物体理想化为一个只有质量的几何点——质点。这样处理使过程大大简化。自然,质点的运动规律完全由牛顿三大定律支配,即三定律确定了它的受力与运动情况的因果关系。本节简要讨论如何运用牛顿定律解决具体的力学问题。

#### 一、牛顿理论的核心定律

牛顿力学理论的核心定律是其第二定律,它反映质点运动状态的改变完全是因为质点受力作用的缘故,因此求解质点运动的关键成为求解运动动力学方程:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \quad (1-1-6)$$

由第一定律知物体(质点)的运动状态是用动量  $\mathbf{p}$  来描述,动量与质量成正比,  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ 。如果质点质量不随时间变化即  $\frac{dm}{dt} = 0$ ,则由(1-1-6)式有

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{F} \quad (1-1-7)$$

上式中  $\mathbf{r}, \mathbf{v}, \mathbf{p}$  分别是质点在空间的位置矢量,速度矢量及动量矢量。虽然(1-1-7)式是解决质点运动问题的出发点,但正如前面说过自然界中宏观物体相互作用仅有少数实际问题的作用力能够被我们精确确定,故求解实际力学问题也不容易。此外由于(1-1-7)式是一个矢量方程,即使我们在惯性参照系中明确了作用力的表达形式,固联于参照系的坐标架如何选取也是一个非常重要的问题。一个好的坐标架往往