

内 容 简 介

本书根据美国 W. W. Norton & Company, Inc. 出版的 A. P. French 著《牛顿力学》(*Newtonian Mechanics*)一书 1971 年版译出。

《牛顿力学》为美国麻省理工学院教育研究中心的《M. I. T. 物理学导论丛书》(M. I. T. Introductory Physics Series)中的一卷。中译本按原书的三个部分分成三册出版,第一册为“牛顿动力学入门”;第二册为“经典力学的运用”;第三册为“专题”。第一册内容包括六章:粒子世界;空间、时间和运动;加速运动;力和平衡;自然界中的各种力;力、惯性和运动。

本书可作为高等学校物理学课程的教学参考书,也可供有关科技人员参考。

美国 M·I·T·物理学导论丛书

牛 顿 力 学

1

A·P·弗伦奇 著

郭敦仁 何成钧 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 6.125 字数 135,000

1978 年 12 月第 1 版 1980 年 4 月第 1 次印刷

印数 00,001—33,500

书号 13012·0264 定价 0.55 元

译者前言

本书是美国麻省理工学院《物理学导论丛书》中的一卷，是近年出版的一本比较好的大学物理课教学用书。

本书从历史发展的角度，由人们日常所见所及的实际力学现象出发，引入牛顿力学的基本概念和原理，然后逐步展开，在广泛的自然现象和近代科学技术的范围内，比较深入地讨论了这些概念和原理，使人读之有一种生动活泼、启人心智的感觉。加上丰富的插图，更突出了这些特点。因之，本书不是一些定义和定理的枯燥陈述，而是把牛顿力学这一近代科学的基石，以一种引人入胜的、富有生命力的形式介绍给初入大学的青年学生，避免使这门学科成为他们出于某种责任感而不得不勉强接受下来并用力去记住的一堆知识。这对目前我国大学理工科的普通物理教学可能起一点他山之石的作用。本书篇幅较多，题材较广，作为教学用书时教师需要按不同教学大纲的要求作适当的抉择。关于这一点，作者在序言中有所建议，可供参考。

我们认为，本书作为一本大学水平的参考读物介绍给广大读者（从青年工人、农村知识青年到大学生和普通科技人员）是有益的。对中学物理教师 and 高等学校物理教师也有一定的参考价值。

本书的习题部分由北大朱生传同志协助翻译，人民教育出版社物理编辑杨再石同志对译文提出了许多宝贵意见，谨在此表示谢意。限于我们的水平，尽管我们作了一定的努力，译文中一定还存在着缺点和错误。我们诚恳地期待来自各方面同志们的批评和指正。

郭敦仁 何成钧

1978年12月于北京

序

M. I. T. [麻省理工学院]的教育研究中心(原科学教学中心)的工作是致力于课程改革的和与之有关的教学过程和辅助设备以及主要是对于大学本科水平的学生的学习过程本身的研究。这个中心设立于1960年,由已故的F. L. 弗里德曼教授为主任。自1961年以来这中心就主要由美国全国科学基金会支持;也曾得到凯特林基金会,壳牌公司基金会, 维多利亚基金会, W. T. 格兰特基金会以及宾格基金会的慷慨资助。

这个中心的工作的一个直接成果就是这一套 M. I. T. 物理学导论丛书。这个丛书的意图是以一套篇幅不大的书,总起来把基础物理学的各个主要领域都包罗在内。这套书企图强调实验和直觉在建立物理理论中的相互作用。这套书的各卷试图为基础课程提供各种类型的可能的基础,其范围是从那些主要是强调经典物理的内容到那些包含着相当分量原子物理和量子物理的内容。我们试图使各卷在水平和处理方式上彼此一致,但是并不想使之成为紧密交织的一整套;与之相反,每卷的布局相当独立,可作为一个单独的组成部分用于多种不同的课程设置。

本卷所包含的内容准备使之成为或多或少是独立的牛顿力学引论,以使一个对本科目基础很弱或毫无基础的学生能从头学起,逐步地达到相当精通的程度。本卷分为三部分,为使用时提供一大致的指导。第一篇,牛顿动力学入门,意图为两个目的服务。首先,它几乎是从头起讨论运动学和动力学的基本概念。其次,它试图切实地把力学的学习置于物理现象的世界和必然是不完善的一些物理理论的来龙去脉中。这是作者本人的一个有意识的反应:

反对把力学阐述为同真实脱离的“应用数学”，以及在多少代(特别是那些在英国教育制度下成长起来的)学生中造成的使之误解的严格性印象。一个在应用牛顿定律方面已经有一些专长的学生将发现从第一篇中学不到多少分析和定量的东西，但是把它通读一遍也还是能够从它的较广泛内容中得到一些益处的。

第二篇，**经典力学的运用**，无疑是本书的核心。有些教师将愿意从这里开始而把第一篇降到背景阅读材料的地位。最初的重点放在应用牛顿第二定律于单个物体。稍后，重点转移到两个或多个质点的系统以及关于动量和能量的守恒定律。篇幅颇长的一章专用于在整个牛顿体系中值得引以为荣的课题——万有引力理论和它的成就，这至今仍被誉为人在自身所处的庞大宇宙中寻找秩序的努力的一个顶峰。

第三篇，**若干专题**，主要是处理非惯性系、有心力运动和转动的动力学问题。如果这本书确是用作力学的入门讲授的基础，这些材料的大部分，也许除了有关转动和角动量的基本特征之外，可以视为选读的内容。毫无疑问，全书包括的材料超出了一学期课程里所能全部讲授到的内容；但是可以考虑把第一篇和第二篇作为初学者能够接受的整体，而把第二篇和第三篇作为已经有些预备知识的学生的教材。

经典力学的一个最为令人满意之处在于它的原理可以应用于范围广阔的和多种多样的物理体系。在本卷中我们作了努力以求清楚地提及这类应用，并同本丛书的其他各卷一样，从原出处作恰当的摘引以“证实”这种陈述。经过这样用它自己的历史予以充实之后，经典力学，在作者看来，有一种令人激动之处，为任何晚近发展的物理理论领域所不及。

本卷，同本丛书的其余各卷一样，要感谢许多人包括学生和教师的关心、批评和建议。就本卷而言，特别要向洛杉矶西方学院

的 A. M. 赫德森教授致谢，他同作者一起工作，准备了初步的教材，五年后发展成今天的这一版本。还要谢谢伊法·M·哈喀拉和威廉·H·英格汉姆他们在准备出版的手稿中所给予的无可估价的帮助。

A. P. 弗伦奇

剑桥，麻萨诸塞州

1970 年 7 月

目 录

序	v
引言	3

第一篇 牛顿动力学入门

第一章 粒子世界	19
§ 1 粒子观	19
§ 2 电子和核子	22
§ 3 原子核	23
§ 4 原子	24
§ 5 分子;活细胞	26
§ 6 沙子和尘埃	29
§ 7 地球上的其他物体	30
§ 8 行星和卫星	30
§ 9 恒星	33
§ 10 星系	34
习题	36
第二章 空间、时间和运动	41
§ 1 什么是运动	41
§ 2 参照系	44
§ 3 坐标系	46
§ 4 位移矢量的相加	51
§ 5 矢量的分解	54
§ 6 矢量加法和空间的性质	57
§ 7 时间	59
§ 8 长度和时间的单位和标准	61
§ 9 时-空图	64

§ 10	速度	65
§ 11	瞬时速度	66
§ 12	相对速度和相对运动	70
§ 13	行星运动: 托勒密与哥白尼之争	71
	习题	76
第三章	加速运动	83
§ 1	加速度	83
§ 2	直线运动的分析	85
§ 3	关于增根的评注	91
§ 4	二维弹道问题	93
§ 5	单个原子的自由落下	96
§ 6	自由落下运动的其他特点	100
§ 7	匀速圆周运动	103
§ 8	极坐标中的速度和加速度	104
	习题	107
第四章	力和平衡	115
§ 1	静力平衡中的力	115
§ 2	力的单位	118
§ 3	平衡条件; 作为矢量的力	119
§ 4	物体接触时的作用与反作用	123
§ 5	转动平衡; 转矩	124
§ 6	无接触的力; 重量	128
§ 7	滑轮和绳	130
	习题	132
第五章	自然界中的各种力	141
§ 1	力的基本类型	141
§ 2	引力	142
§ 3	电力和磁力	146
§ 4	核力	148
§ 5	中性原子间的力	150
§ 6	接触力	151

§ 7 摩擦接触力·····	153
结束语·····	155
习题·····	156
第六章 力, 惯性和运动·····	163
§ 1 惯性原理·····	163
§ 2 力和惯性质量: 牛顿定律·····	166
§ 3 关于牛顿定律的一些评述·····	169
§ 4 质量和力的标度·····	172
§ 5 连续作用的力的效果·····	175
§ 6 牛顿定律的不变性; 相对性·····	176
§ 7 特定的力的规律下的不变性·····	179
§ 8 牛顿定律和时间反转·····	180
结束语·····	182
习题·····	184

开始时是力学

麦克斯·冯·劳埃,《物理学史》(1950)

我奉献这一作品, 作为哲学的数学原理, 因为哲学的全部责任似乎在于——从运动的现象去研究自然界中的力, 然后从这些力去说明其他现象。

牛顿,《原理》前言 (1686)

引 言

宇宙的最突出的特征之一是运动。银河系相对于其他河外星系运动，所有的恒星都在运动，诸行星则以恒星为背景作不同的运动。在日常生活中首先吸引我们注意的是那些与运动有关的事件。甚至你们现在正读着的、表面上似乎毫无动静的书也是由在其平衡位置附近迅速运动着的原子构成的。十七世纪的法国哲学家雷内·笛卡儿说过，“给我物质和运动，我就能造出宇宙来。”无疑，如果我们想了解我们周围的世界，运动就是我们必须在各种程度上学会去处理的现象。

艾萨克·牛顿发展了一个严谨的和强有力的有关运动的理论，按照这个理论，任何客体的运动的**变化**是它受力作用的结果。由此，他创立了叫做经典力学或牛顿力学这一学科，这是本书所要讲的主题。它是科学史上的一个里程碑，因为它以理性的、惊人地成功的关于因和果的图式代替了仅仅涉及现象的描述。的确，牛顿力学的严格因果性广泛地对西方的思想和文明的发展有着深刻的影响，由此引起有关科学、哲学和宗教之间的相互关系的一些基本问题，并在社会意识观念以及人类奋斗的其他领域中有所反响。

经典力学是一门引人入胜的双重性格的学科。因为它从同人类一样悠久的日常经验出发，而又使我们面对有关我们周围宇宙的某些最深刻的问题。一枚被抛出去的卵石的飞行，或一个苹果的落下，竟包含着有关天体的力学的线索并且竟然最终涉及我们能够对空间和本性的本性所提出的某些最基本的问题，这不是很值得注意的吗？有时，力学被阐述成似乎只包含一些自明的或已

揭示了真理的惯常应用。没有什么比这离事实更远的了；它是一个极好的例子，说明一个物理理论如何通过观察与假设之间持久的相互影响慢慢地演化并逐渐精炼起来。

我们对于力学的感性认识之丰富给人以深刻的印象，通过眼、手和脑的协作，我们直接解决了数不清的动力学问题而无需借助于数学分析。就象莫里哀的那个著名角色 M. 若尔丹得悉他终生在说着散文而不自知那样，每个人就熟悉力学定律的后果来说都是专家，尽管他也许从来没有看到过写在纸上的这些定律。技术高超的运动员具有几乎使人难以置信的判断力和控制力，恰到好处地运用其肌力的大小和方向以达到一想望的结果。例如，有人曾经估计，在那关键性的一次击球时，只要低一毫米，1962 年的世界棒球联赛冠军就会易手^①。然而，对物体运动的这种个人身体的感受和控制与用物理的定律和方程予以分析是很不相同的两回事。经典力学的任务就是发现和表述基本的原理，使它们能应用于任何情形，特别是应用于相互作用的无生命客体。在这方面，我们对自己的肌肉的作用和效果的深悉，虽然代表着某种了解（也是重要的一种），却并无多大帮助。

经典力学最大的胜利是牛顿自己对太阳系的运行的成功分析。人类自远古以来就观察天体的运动。他们注意到某些规律并学会去预言诸如行星的会合和日、月蚀这样一些现象。然后，在十六世纪，丹麦天文学家第谷布拉积聚了许多有关行星运动的、从未有过那么精确的细心记录。他的助手，J. 开普勒，在积年累月地钻研这些大量资料之后，发现所有观测结果可以总括如下：

1. 诸行星在以太阳为一焦点的椭圆上运动。
2. 在相同时间内，太阳和一指定的行星之间的连线所扫过的

^① P. Kirkpatrick, *Am. J. Phys.*, **31**, 606 (1963).

面积是一样的。

3. 一个行星的年的平方除以行星到太阳的平均距离的立方对所有行星都一样。

这代表了人类对天体力学知识的一个伟大进步，但它依然只是一种描述，而不是理论。“为什么？”仍是个尚待解决的问题。于是出了牛顿和他的力是运动改变之因的概念，以及他所假定的一种特殊的力的定律——引力的反平方定律。利用这些，他证明开普勒的定律只不过是事物图式的一个必然结果，这图式还包括了掉下的苹果以及其他一些地上的运动。（在本书的后面我们将详述牛顿的这一伟大成就。）

即使万有引力只不过是把行星的周期同距离联系起来，它仍不失为一个光辉的理论。然而，如同物理学中任何其他好的理论一样，它还具有预见性的价值，即可以把它应用到它所由来的情形之外的场合。探讨一个理论的预见性可能包含寻求迄今尚未想到的现象，或者可能关系到承认某一已经熟知的现象必须符合新格局。不论是哪一种情形，理论都面临考验，是站得住还是失败。对于牛顿的引力理论，起初的考验差不多全在已知效应的分析方面，但已是一张相当丰富的单子了。这里列出一些牛顿给予过定量解释的现象：

1. 地球和木星由于它们的自转而中部凸出。
2. 在地球表面上不同纬度处重力加速度的变化。
3. 由于太阳和月球的联合作用而产生潮汐。
4. 彗星在太阳系中运行的轨道。

5. 由于太阳和月球的引力转矩的作用而产生的地球自转轴方向的缓慢变化。（这一变化的全周期约为 25,000 年，所谓“岁差”就是它的表现。）

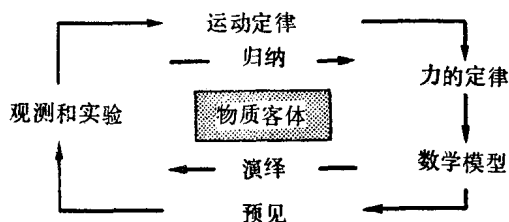
对自然现象的这一惊人的明察代表了牛顿纲领的最后部分，

正如在我们开头的引语中他所描述的“…然后由这些力去说明其他现象。”这一质朴的词句不仅隐藏着无数的成就，而且也隐藏着数学在这一发展中所起的巨大作用。牛顿在他的万有引力理论中创造了今天可称之为太阳系的一个数学模型的东西。一旦造出了这模型，他就随之而引出无数的其他关系。实施这一工作纯粹是数学的，但最后的一步——对结论的考验——则包含回到物理的经验世界，将他的预见与天文学上的定量数据详细核对。

虽然牛顿的宇宙力学图象在他的时代已多方面获得证实，但他未能活着看到它的一些最大的胜利。也许其中给人印象最深刻的是应用他的定律去认出前所未知的太阳系成员。经过对已知行星运动作长期艰苦的分析，人们推断，一定有另外的行星在起着干扰作用。于是在1846年发现了海王星，1930年发现了冥王星。每次都是按推算来确定望远镜的指向去寻找一新行星，可以通过它在恒星的总背景中位置的变化认出来。还有比这更出色和更令人信服的证据说明这理论的正确性的吗？

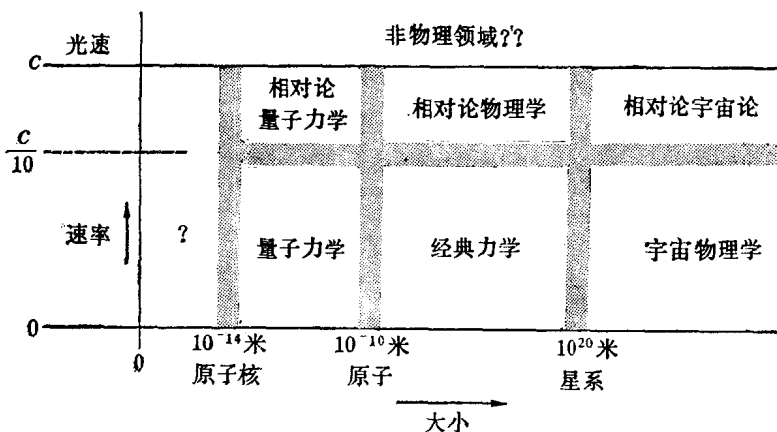
或许本书的每一读者对于经典力学和它的精确数学表述先前都有些了解，这可能使他难以认识到，同任何其他物理理论一样，它的发展并不仅仅是把数学逻辑无区别地应用于一堆数据。牛顿是不得已被迫接受反平方定律的吗？不是的。这是揣测、直觉和想象的结果。用牛顿自己的话来说：“我开始考虑到把重力引伸到月球的轨道，而…由开普勒关于行星周期的法则…导出保持行星于轨道的力必须与它们到公转中心的距离的平方成反比；并由此将保持月球于其轨道所需的力同在地球表面上的重力作比较，发现两者相当接近。”这类智慧的飞跃，虽然少有象牛顿的那样伟大，但是在任何理论和模型的创立中都是有的。它是一种归纳的过程，且超越直接经验之外。某些事实甚至可能暂时被弃于一旁，或者为了利于追求主要目的而置之不问，因为一个部分正确的理

论总比完全没有理论来得好些。在所有的阶段上，实验和理论之间经常是互相影响的，在过程中新的观测不断出现，而理论的改进是永远存在着可能性的。下面的图表示人类探索物质与运动的模式，其所关联的内容越出了经典力学的范畴。



经典力学的巨大成就使得一度认为似乎不需要更多的东西来说明整个物理现象的世界了。这一信念在将近十九世纪末时达到顶峰，当时有些乐观的物理学家以为物理学在原则上已是完善的。他们选择这时候作出这一结论是太不幸了，因为在接着的几十年内，物理学经历了它自牛顿以来的最大变动。放射性的发现，电子和原子核的发现，以及电磁学的精微处都要求有根本性的新概念。而我们今天知道，牛顿力学同任何一个物理理论一样都有其基本局限性。对异常高速运动的分析要求修改对空间和时间的描述，这由爱因斯坦的狭义相对论作了清楚的说明。在分析原子或亚原子尺度的现象时，要求由量子理论来描述的、更为激烈的修正。而牛顿的关于引力理论的特定形式，尽管很成功，也必须接受包含在爱因斯坦的广义相对论里的修正。但这并不改变这一事实，即在一很大的范围内和各种各样的情况下，牛顿力学仍然提供我们一种手段去分析和预见从电子到星系等物理客体的运动。在下图中非常定性地指出它的有效范围和局限性。

在本书中阐述经典力学的主题时，我们将尝试着去指明如何可以逐步扩大它在物理世界中的应用范围和我们自己的眼界。我们所尝试着去阐明的力学完全不是一门呆板的学科，即把力学描



写为“应用数学”，一开始就给定一些法则，而我们唯一可做的事是把这些法则应用于各种各样的情况，这不能认为是正确的。我们想要提供另一途径，在其间的每一阶段上人们都能意识到是在根据部分的或有限的资料从事工作，是在利用着一些没有严格地证明为正确的假设。而这正是物理学工作的精髓。牛顿自己就说过许多，在《原理》的第三篇的开头他提出了四条“哲学中推理的法则”，其中最后一条如下：

“在实验哲学中，尽管可以设想任何相反的假定，我们应把根据现象而用普遍归纳法推得的论断看作严格正确的或非常接近于正确的，直到出现其他的现象，这时，那些论断或是成为更加精确，或是应容许例外。”那些等待着完备知识的人是注定要使自己完成不了一个实验或建立不起一个有用的理论的。但是为了免得把这当作对马虎和肤浅思想的鼓励，我们用乔治·波雅的一个小小寓言^①来结束这一引言。他是以数学家的身分写的，但对物理学家

① 这一告诫性故事出现在名为《Induction and Analogy in Mathematics》（“数学中的归纳和类比”）一书中，Princeton University Press, Princeton, N. J., 1954. 此书及其姊妹篇，*Patterns of Plausible Inference*（“似乎有理的推断的典范”）是任何科学家都喜欢读的。

(及其他人)的告诫是明白的。

逻辑学家, 数学家,
物理学家, 和工程师

“你看这位数学家,”逻辑学家说道。“他看到头 99 个数小于 100, 就用他的所谓归纳法断言一切数都小于一百。”“一个物理学家相信,”数学家说道,“60 是可以被 1, 2, 3, 4, 5 和 6 除尽的。他再考查少数几个随便选取的(他认为如此)数, 如 10, 20 和 30. 由于 60 也能被这些数除尽, 他就认为实验证据已够。”“是的, 请看工程师们吧,”物理学家说,“一位工程师猜测所有的奇数都是素数。他论证说, 至少 1 可看作一素数。然后, 无可置疑, 3, 5 和 7 也是素数。于是到了 9, 一个尴尬情形; 它不象是一个素数。然而 11 和 13 又肯定是素数。‘回到 9,’ 他说, ‘我断言 9 必是一个实验误差。’”但在完成了他的取笑之后, 波雅加了如下的评论。

归纳法之能导致错误是太显然了。然而, 意外的是, 归纳法有时也引导到真理, 既然错误的机会似乎居压倒之势, 那我们是应当从归纳法在其中要失败的明显情形开始研究呢, 还是研究归纳法在其中获得成功的那些异常情形呢? 研究宝石比研究普通的卵石更为吸引人是可以理解的, 此外, 在把矿物学家引导到结晶学这一奇妙的科学方面, 宝石的贡献当比卵石的大得多。

有了这番鼓励, 我们将在第一章中开始走上学习经典力学之路; 那(经典力学)是物理学家的宝藏中最完善的和光洁的宝石之一。但我们还要以一些预备性的练习来作为这一引言的结尾。

题 外 练 习

下面是本书主题之外的一些练习,希望能够引起读者的兴趣. 它们大多是有量级估计(估计到10的最近方次)和得当的近似方面的. 这在物理学家试探着去解决问题时起重要作用,但在教科书中很少得到强调或者系统地作介绍. 例如,人人都学过二项式定理,但有多少学生会想到以它为工具,用下列近似

$$(a^2 + b^2)^{1/2} \approx a \left(1 + \frac{b^2}{2a^2} \right) \quad (\text{设 } a > b)$$

来求出一直角三角形斜边的相当准确值呢?(甚至在 $a=b$ 的最坏情形下,所得结果也只差约百分之六——得1.5而不是1.414...). 此外,需要练习和有意识的努力以养成习惯,去粗略地估算各种量的大小和一个物理系统中各种可能效应的相对重要性. 例如,处理物体在液体中运动时,是否能很快地确定,对于给定速度和线度的物体,阻力主要来源于粘滞性呢,还是湍流?留意尺度大小改变时所产生的影响,可以得到对体系的性质的有价值的洞察. [这方面一个极佳的例子是 J. B. S. Haldane 的一篇著名论文,《On Being the Right Size(关于正确尺寸)》,重登在 *The World of Mathematics*, Vol. II, 1956.] 运用这类方法和思路,可以加深人们对物理现象的体会,并增进人们对世界为何物以及它如何表现自己的感觉.

令人惊异的是,利用相对来说并不算多的一些初级知识,如下面所列举的,人们就可以做很多事情.

物理量的大小

重力加速度(g)	10 米/秒 ²
固体和液体密度	10 ³ -10 ⁴ 千克/米 ³