

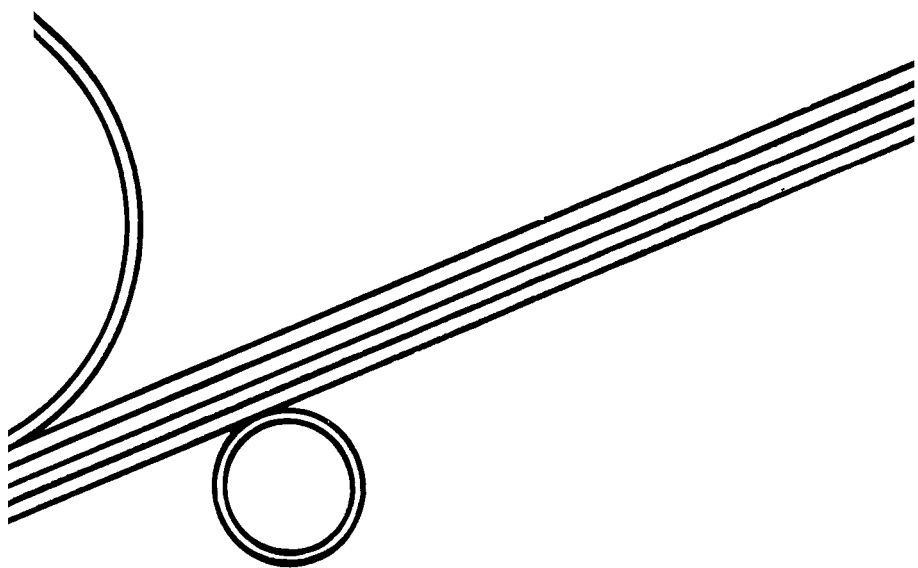
力学概论

方励之 李淑娴 著

安徽科学技术出版社

力学概论

方励之 李淑娴 著



安徽科学技术出版社

责任编辑：张晓红

封面设计：陈治黄

力 学 概 论

方励之 李淑娴

*

安徽科学技术出版社出版

(合肥市跃进路1号)

安徽省新华书店发行 安徽新华印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：12.5 字数：309,000

1986年1月第1版 1986年1月第1次印刷

印数00,001—5,000

统一书号：13200·68 定价：2.50元

内 容 提 要

本书是根据作者在中国科学技术大学及北京大学讲授普通物理的力学部分讲稿整理而成的。其特点是强调用物理的前沿发展去改进基础物理教学，即用现代物理的观点去选择课程的内容，去表现概念和规律。因此，书中包含一些在传统的教材中没有的内容，如牛顿宇宙学等；对许多传统的内容，也采取新的讲授法，使之能与当代物理的进展相呼应。另外，由于力学是物理学的入门和基础，所以本书也注意物理方法的阐述，这对于初学物理的学生是有益的。书中还附有一些习题及答案。

本书可作为综合大学及师范院校普通物理力学教材，也可供大专院校物理教师及物理教学研究工作者参考。

序

这本书原是一份普通物理课程的力学讲义，它曾在中国科学技术大学沿用多年，也曾在北京大学教授过数次。

普通物理中的力学，是相当难教的，凡是教授过这门课的老师，大都有此体会。一方面，力学是整个物理学的基石，它包含许多基本的观念、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，确实可以解决前述问题的第二方面，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，我们觉得，若仅限于这一途径改进教学，还不能或不完全能解决问题的第一个方面——力学是整个物理的一块基石。

基石到底在哪里起了基石的作用？基石到底如何起了基石的作用？显然，这些“哪里”，这些“如何”只有从物理的当代发展以及前沿研究的角度，才能看得清楚。这就是说，如果我们企图从“物理的基石”这一标准来组织教学，它至少有以下两方面的含义：一是不断用新的现代的观点去整理老的内容，一是不断用新的前沿的重要成果来充实基础。事实上，不同时代的教材的差别，最清楚地表现在这些方面。上述的标准，也就是我们在编写这本教材时，尝试着去追求的。也许有的地方达到了，也许有的地方

并未达到。无论成功或失败，它都是我们的追求的记录。

为了使用上的方便，书中编辑了一些例题，每章末也附有一些思考题和习题。由于北京大学物理系和中国科学技术大学物理教研室已编有《物理学习题集》（人民教育出版社，1980），为了不重复太多，本书中的例题和习题只是标志性的。在教学上需要更多习题时，可以参考上述的习题集。

在使讲义变成这本书的过程中，得到过员汝槐同志的协助，谨致谢意。

作 者

1984年4月

目 录

绪论——物理世界的统一	1
第一章 时间、空间和运动学	6
1.1 时间	6
1.2 芝诺佯谬和时间的度量	9
1.3 长度.....	12
1.4 参考系.....	14
1.5 轨迹.....	16
1.6 速度的瞬时性.....	19
1.7 曲线运动的速度.....	23
1.8 加速度.....	25
1.9 圆周运动和角速度.....	33
1.10 匀速圆周运动	36
1.11 运动学里的反问题	38
思考题	42
习题	44
第二章 运动学中的相对性	50
2.1 相对和绝对.....	50
2.2 位置和轨迹的相对性.....	51
2.3 速度的相对性.....	56
2.4 加速度的相对性.....	61
2.5 伽利略变换.....	62
2.6 速度合成律的失效.....	64
2.7 光速不变的结论之一——运动钟的变慢.....	69
2.8 光速不变的结论之二——运动尺的变短.....	72

思考题	75
习题	76
第三章 牛顿动力学	80
3.1 惯性定律	80
3.2 牛顿第二定律	82
3.3 牛顿第三定律	86
3.4 一些具体的力	87
3.5 牛顿力学的一些简单应用	91
思考题	101
习题	104
第四章 万有引力	114
4.1 开普勒的行星运动三定律	114
4.2 万有引力规律的建立	117
4.3 引力常数 G	121
4.4 单位制及量纲	124
4.5 几个重要的引力物理量	127
4.6 引力的几何性	129
4.7 多质点体系的引力作用	135
思考题	140
习题	141
第五章 牛顿宇宙学	146
5.1 哥白尼原理	146
5.2 宇宙中的密度分布	147
5.3 几种速度分布解	149
5.4 奥伯斯佯谬和宇宙的膨胀	150
5.5 宇宙膨胀的动力学	152
习题	156
第六章 能量守恒	157
6.1 机械能守恒	157
6.2 功	161
6.3 引力势能	164

6.4	保守力	170
6.5	一维运动的一般性质	173
	思考题	179
	习题	181
第七章	振动	189
7.1	弹性力	189
7.2	振动解	192
7.3	简谐振动的几何表述	196
7.4	阻尼振动和 Q 值	197
7.5	共振	201
7.6	简谐振动的合成	204
	思考题	209
	习题	213
第八章	动量守恒	217
8.1	动量守恒	217
8.2	冲量	223
8.3	碰撞	226
8.4	质心定理	230
	思考题	233
	习题	235
第九章	角动量守恒	245
9.1	角动量守恒	245
9.2	力矩	247
9.3	隆格-楞茨矢量	253
9.4	转动惯量	265
9.5	转动动能	270
	思考题	271
	习题	272
第十章	刚体	276
10.1	自由度及刚体的自由度	276
10.2	平动和转动	278

10.3 刚体的动能	284
10.4 刚体的运动方程	287
10.5 陀螺	297
思考题	301
习题	302
第十一章 狭义相对论基础	308
11.1 实用的惯性参考系	308
11.2 相对性原理	310
11.3 狭义相对论的基本原理	313
11.4 洛伦兹变换	315
11.5 相对论的时空观	319
11.6 相对论力学	333
11.7 质能关系	337
思考题	339
习题	339
第十二章 动力学与非惯性参考系	342
12.1 非惯性参考系和惯性力	342
12.2 转动参考系	346
12.3 对绝对时空的批评	354
12.4 等效原理	359
12.5 局部惯性系	361
思考题	363
习题	365
全部习题答案	368

绪 论

——物理世界的统一

物理学的兴起，是从经典力学开始的。在经典力学之前，人类的文明中虽然已有不少具有物理价值的发现和发明，但是并不存在一门独立的物理学。因此，我们在学习经典力学的时候，首先应当了解：为什么经典力学成了物理学的起点？经典力学在整个物理学中占据着怎样的地位？

爱因斯坦曾经这样来概括牛顿力学的历史地位：“古代希腊伟大的唯物主义者坚持主张，一切物质事件都应当归结为一系列的有规律的原子运动，而不允许把任何生物的意识作为独立的原因。而且无疑笛卡尔曾按他自己的方式重新探索过这一问题。但是，在当时，它始终不过是一个大胆的奢望，一个哲学学派的成问题的理想而已。在牛顿之前，还没有什么实际的结果来支持那种认为物理因果关系有完整链条的信念。”

这句话的意思是，物理学依赖于一种基本的信念：物理世界存在着完整的因果链条，即自然界是统一的，牛顿力学则是体现这种信念的第一个成功的范例。

从牛顿力学的创建到现在，已经有三百多年了，物理学已经大大发展了，远远超过了经典力学原有的水平。但是，就物理学的最基本的追求和物理学的总目标来说，却一直没有变化。经典力学时代的追求和目标，可以说时至今日仍然是整个物理学的追求和目标。这个最基本的追求和目标，就是自然界的统一。的确，从整个物理学的发展中，可以看到一条鲜明的主线，这就是执着

地追求宇宙的统一，找寻支配宇宙万物的最基本最统一的规律。

相信存在统一，努力寻求统一，如果仅仅作为一种自然观，早在古代已经有了。老子的《道德经》中写有：“道生一、一生二、二生三、三生万物。”这就是中国古代的一种统一观，它完全可以与爱因斯坦所提及的古希腊的哲学相媲美。不过，无论在古代中国或古希腊，统一观都只是一种哲学思辨。

牛顿的力学和古代的哲学不同，它不是思辨地坚持统一观，而是发展了寻找统一的有效的物理方法。牛顿在他的最重要的力学著作《自然哲学的数学原理》中阐明了他采用的方法。他在前言中写道：“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的现象。”*这就是说，寻求统一的出发点不是思辨而应是运动现象。自然界中的运动现象是多种多样的，物理学的责任就在于寻找支配这些现象的统一的力。

今天的物理学，仍然大体地沿袭着牛顿所开创的研究途径：寻找统一的力，或统一的相互作用。因此，几乎所有基本的物理理论都称做某种力学，如牛顿力学、电动力学、色动力学等等。每一种新的力学的确立，都标志着我们在追求统一的途程上达到了一个新的水平。

为了更具体地表达上述的论述，我们利用表1。表1左边列举的是自然界中的种种运动现象，也就是物理学的研究对象。天体的运行和地面物体的运动是人首先看到或接触到的，随后才有时间、空间的概念，所以时空也是一种物理研究的对象，另一类现象是电、磁和光，所有这些物理对象，在二十世纪之前，人们都已知道了。二十世纪以来，又逐渐证实或发现一些新的对象，如原子、原子核、核子以及夸克等。

* 牛顿这段话里的“哲学”一词，实际含义相当于今天的“科学”或“物理学”。

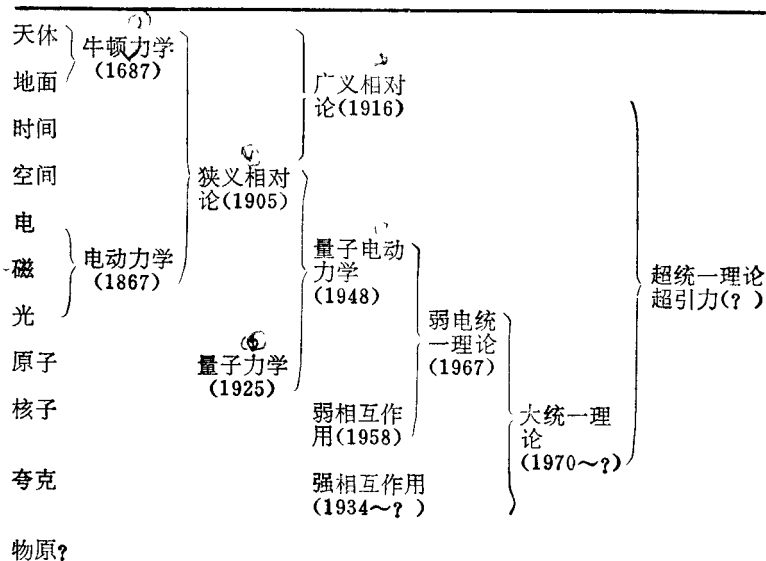
表1的其余部分就表示物理学在寻求统一, 寻求完整的因果链条上一些重要的阶段。

牛顿的力学和万有引力定律, 是物理学上第一次大的统一。在牛顿之前, 传统的观念认为支配天体运行和支配地面物体运动的规律是不相同的, 有所谓天界和世俗两个世界之分。然而, 牛顿发现, 天上行星和月亮的运动, 实际上和地面落体运动遵从相同的规律, 它们都是由引力引起的。这样, 牛顿就用他的力学打破了天界和世俗的界限, 找到了两个世界的统一。牛顿称引力为万有引力, 就是强调这种统一。

第二次大的统一, 是由十九世纪的麦克斯韦完成的。他建立了电磁理论, 使电、磁及光学现象得到统一。这就是电动力学。

很快发现, 牛顿的力学和麦克斯韦的电磁学这两大领域在时

表1 物理学发展中的统一*



* 括号中的数字表示相应的理论建立的年代; 有问号的表示尚未完成。

宏观上是很不协调的。在前者中，各种匀速运动是平权的，但却假定有绝对空间或绝对速度存在。相反，在后者中，有一个地位特殊的速度，即光速，但却始终测不出这个特殊的速度是相对于哪一个绝对空间而言的。爱因斯坦抛弃了绝对空间观念，使电磁学、力学在新的时空观的基础上达到了协调和统一。

爱因斯坦还曾企图把引力和电磁力二者统一起来，但他的努力没有成功。然而，他却找到了能与麦克斯韦电磁理论相协调的引力理论——广义相对论。

作为引力理论的广义相对论和作为电磁理论的麦克斯韦理论构成了我们今天称为经典物理学的理论基础。

与经典物理相对的是量子论。量子力学最初是作为原子、分子的统一的力学而发展起来的。这种新的力学统一地解释了原子、分子的各种光谱现象；统一地解释了元素周期表；统一地解释了各种不同分子的键合。

在将量子力学扩展到电磁场时，遇到了困难，这本质上是由于电磁场是相对论性的。直到四十年代末，发展了所谓重整化方法才巧妙地解决了上述的困难，使量子论与电磁理论能得以统一，产生了量子电动力学。

到六十年代末，我们已经得到了如下的物理世界的图象：宇宙中的所有物理对象可以分成两大类，一类称为“物质”，如夸克、电子、 μ 子等等；另一类称为“相互作用”，如引力、电磁力等等。在目前的宇宙中，有四种基本的相互作用，按它们的强度顺序排列是：核子参与的强相互作用，荷电粒子参与的电磁相互作用，核子及电子、中微子参与的弱相互作用，以及任何粒子都参与的引力相互作用。可以简单地说，宇宙间的一切运动和变化，都可以统一为这四种“力”的作用。但是，追求统一的物理学，似乎认为这种状况仍然不够统一。

1967年，温伯格和萨拉姆再次着眼于统一，先后提出了电磁

相互作用和弱相互作用的统一理论。随后的一系列实验证明他们的统一理论是正确的。

这一新的成功，促使许多人去找寻把电磁作用、弱作用及强作用都包含在内的统一理论，通常称为“大统一理论”。建立这种理论的工作还没有完成，这是正在研究的领域。

如果大统一能够顺利完成，下一步的统一就是要把引力也统一在内了。引力是物理学最早讨论的一种基本的力。但是，它与其他力的统一最难，因为引力有一系列很特别的性质，例如这种力只有引力却无斥力，就是这种特别性质之一。

企图把引力与其他力统一起来的工作，称为超统一的研究，目前还没有得到有实际意义的结果。它是今天的物理学的一个前沿。实现超统一的一个可能是用超引力理论，这种理论中的统一有一个很有趣的特点，即它把物理学中传统的“物质”与“相互作用”之间的界限也打破了。

总之，从牛顿力学开始，物理学就在寻找宇宙的统一，我们希望找到控制着万事万物运动的极少的几个基点。只有从这个角度我们才容易看清经典力学在整个物理学中的地位和作用，也才能全面地了解学习经典力学对于学习整个物理学的意义和作用。

第 一 章

时间、空间和运动学

1.1 时 间

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。

时间和空间可以说是最平凡的概念了，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，时间用以表述事物之间的顺序，空间用以表述事件相互之间的位形。

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，在考查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的工具。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了。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，因为容貌这个量与时间之间有确定的关系。这个例子虽然很普通，但某些有用的测时方法与此是很相似的。在确定星体的年龄时，常常就是根据星体的颜色。

钟的种类很多，但有好有坏。比较两个人的脉搏，就会发现它们之间经常有明显的快慢波动，所以，人的脉搏不是一种好钟，它不够稳定。如果比较一下两个单摆的周期，就会发现它们稳定多了。地球自转则是更稳定的钟。

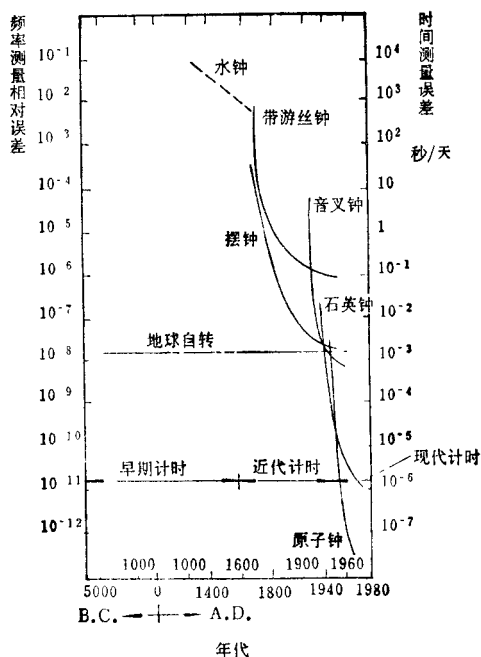


图1.1 不同年代的时间测量精度