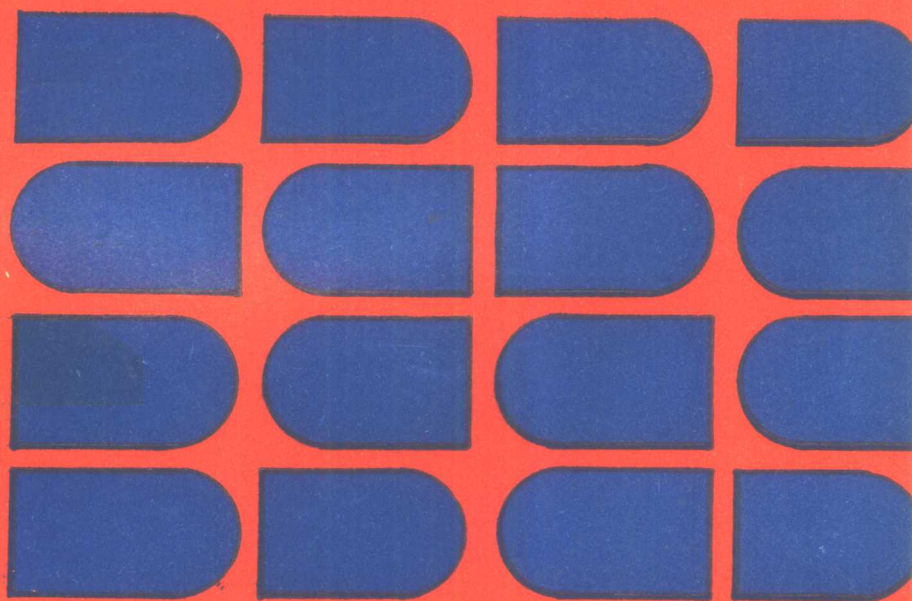


普通物理学教程之一

力学

孙宗扬 汪克林 编

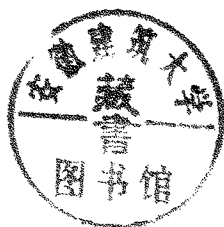
高等教育出版社



普通物理学教程之一

力 学

孙宗扬 汪克林 编



高等教育出版社

(京)112号

内 容 提 要

本书是中国科学技术大学汪克林教授主编的《普通物理学教程》的第一分册。

力学是物理学的基础,为了帮助学生走进物理学这一学科领域,让学生从一开始就能掌握物理学的特点和思维方法,本书完全用矢量这一有力的数学工具来讨论力学问题,使问题的提出和讲解更深刻些,为此本书的起点和深度较其它力学教材有所提高,但内容并不超越普通物理学的范畴。力学虽属物理学的基础,但仍不乏有许多近代物理的研究与力学有密切的联系,编者为在本书中引入这方面的内容作了很大的努力,如在狭义相对论中讨论了粒子的碰撞、穆斯堡尔效应和引力红移等,因而使本书的内容较为新颖,且接近实际应用。一些有余力的学生还可在本书中找到不少有益于学业的阅读材料。

本书可作为高等学校物理专业的教材或参考书,亦可供有关师生及科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

普通物理学教程之一 《力学》/汪克林主编。—北京:
高等教育出版社,1996
ISBN 7-04-005448-5

I. 普… II. 汪… III. ①物理学-高等学校-教材②力学-高等学校-教材 IV. ①04②03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 00427 号

*
高等教育出版社出版
新华书店总店北京发行所发行
中国科学院印刷厂印装
*

开本 850×1168 1/32 印张 12.375 字数 310 000

1995年10月第1版 1995年10月第1次印刷

印数0001—4 103

定价 10.40 元

序

中国科学技术大学建校已逾三十年，三十年来在普通物理的教学中，从我们开始到现在的中年教学工作者们一直力图在教学中走出一条自己的路，这套书的产生基本上就是总结了这些年科大在普通物理教学中的经验和概括了科大普通物理的教学现状。

据我所知，从事该书撰写的是一批长期活跃在教学第一线的中年教师，他们一方面教学，一方面进行科研，经过多次的教学实践和多方面的调研后写成了这一套书。在这套书中基本概念和基本方法的引入和阐述具有清晰的物理图象和清楚的物理思想。书中尽力把科学前沿的信息传递给同学，以新的观点整理材料并把科研的新成果充实到基础知识中去，注意培养学生的科研能力，并试图兼收并蓄国内外同种教材中的各家之长。总之，这是一套以探索精神撰写的，具有自己特色的普通物理教科书。

多年来在普通物理的教学中就存在如何更新教材使学生既能打好基础，增强能力的训练，又能培养他们的创造性和开拓精神的问题。这项工作难度颇大，不过我们要著书育人，要在教育事业上作一点有益的事，总应知难而进，锲而不舍，才能得到一步一步的进展。今天，这套书与读者见面了，我对科大三十年来的普通物理教学取得的这一成果感到由衷的高兴，盼望今后更多的好教材层出不穷。

严济慈

前 言

“力学”是中国科学技术大学汪克林主编的《普通物理学教程》丛书之一。它是根据我们在中国科学技术大学的讲课资料及编写的讲义,结合教学与科研的体会,又经过反复讨论和修改,并参照国内外有关教材,针对中国学生的实际情况编写而成的。

一本教科书是过去经验的总结,它应面对历史。但从它作为教材,帮助学生走进物理学这个色彩缤纷的世界这点来看,它又应面对未来。任何一本教材都要受传统和现实需要的约束,一本新编的教材尤其是这样,它要尊重传统,但又不能一成不变。

力学形成于牛顿在 1687 年出版的“自然哲学的数学原理”一书,后来虽然从物理思想和数学工具上都有不少的更动和充实,但基本框架并未改变。

20 世纪以来,矢量被证明是科学和技术中有力的数学工具,许多作者对如何把矢量引进力学作了许多有益的尝试,我们在上述基础上,试着完全用矢量这一有力的数学工具来讨论力学问题。经过教学实践证明这样做是可行的,同学是能够接受并欢迎的。

我们还注意到,有些看来是属于现代前沿的问题,如两个高速粒子的碰撞反应问题,经过分析发现它们是属于大学一年级学生可以掌握的力学问题。当然这些问题是有一定难度的,我们将把它印成小字,以供学有余力的同学钻研、参考。同样,另外一些扩大眼界但有一定难度的材料,也印成小字供同学参考。这些材料,尤其是打上“**”的材料,可以完全略去不读也不会影响对正文的理解,教员可视学时多少、同学的理解能力而灵活掌握。

本书从讲义到成书的过程中,得到多位老师的支持。阎沐霖、胡友秋、张玉民等位教授提出了重要的改进意见,阎沐霖教授曾用讲义作为教材并且提出在力学中要讲授零质量粒子的碰撞问题,

经他一再强调,我们将这一问题列入了本书;胡友秋教授提供了平太阳日的完整定义;张玉民教授和向守平副教授在材料的取舍上也提出了一些重要的意见,他们的支持使本书增色不少。

北京大学物理系蔡伯谦教授认真、详细地审阅了本书的初稿及修改稿,提出了很多宝贵而又中肯的意见,使得本书能够在保证质量的前提下以一定特色的面貌呈献给读者,蔡先生为此付出了大量的劳动,谨在这里表示感谢!

我们感谢高等教育出版社的奚静平副编审,她审读了全书,提出了很多中肯的意见并做了大量的组织工作。

高等教育出版社的邹延肃编审对本书的出版给予了很大的支持,中国科大的张家铝、王水、王仁川诸位教授也给了鼓励和支持,陈慰祖副教授做了大量的组织工作,陈为平同志帮助抄写书稿。自1986年以来使用过本讲义的老师 and 同学也提供了不少改进意见,在此一并表示感谢!

孙宗扬

汪克林

1994年6月于合肥中国科大

目 录

第一章 运动的描述	1
§ 1.1 位置的概念	1
一、质点	1
二、参考系	2
三、描述一维运动物体的参数	3
四、矢量的概念及运算	3
五、长度单位	5
六、很大和很小的距离	7
§ 1.2 一维空间运动	8
一、时间	9
二、周期 T 的均匀性问题	10
三、时间曲线	11
四、速度和加速度	11
五、一维运动的矢量形式	13
§ 1.3 质点的平面轨道运动	14
一、二维空间中质点位置的描述	14
二、点乘和位置矢量在坐标轴上的投影	15
三、平面轨道运动的速度和加速度	17
四、平面轨道运动的时间曲线	20
五、位置矢量的坐标变换关系	21
§ 1.4 质点在空间的运动	23
一、坐标系中的质点	23
二、一般轨道运动的速度和加速度	26
三、空间轨道退化为平面轨道的例子	28
四、平面轨道的法线 N	29
五、行星的向心加速度	29
§ 1.5 运动轨道分类	32
一、轨道的局部性质	32
二、直线运动和平面运动	33

三、空间运动	36
*四、挠率 ζ 的物理意义	39
**五、挠率 ζ 与运动轨道形态	39
§ 1.6 地球参考系中运动轨道的分析	40
一、月亮绕地球的公转周期问题	40
*二、考虑到地面是球面的运动轨道	41
**三、球坐标系的一些性质	43
第二章 牛顿定律和力	46
§ 2.1 牛顿第一定律与牛顿第二定律	46
一、牛顿第一定律	46
二、物体受到的作用	46
三、牛顿第二定律与质量	49
§ 2.2 有关牛顿第二定律的若干问题	51
一、标准计时问题	51
二、惯性质量和引力质量	53
三、运动方程求解举例	54
§ 2.3 两物体之间的相互作用	56
一、牛顿第三定律	57
二、牛顿第三定律的各种形式	59
三、绕过滑轮的轻绳中的受力分析	61
§ 2.4 摩擦力	64
一、阻力的性质	64
二、物体在固体表面上的摩擦力	65
三、静摩擦现象应用举例	67
§ 2.5 万有引力	70
一、引论	70
二、太阳和行星间的引力	71
三、万有引力常量 G 的测定	72
四、均匀球壳的万有引力	73
五、均匀球体的万有引力	76
六、宇宙速度	77
§ 2.6 弹性力	79
一、简单的物体-弹簧系统	79
二、准弹性力	81

*三、简正坐标	82
§ 2.7 振动	85
一、共振	85
二、阻尼	86
三、临界阻尼和过阻尼	89
四、最佳阻尼	90
五、品质因数	92
§ 2.8 惯性力	95
一、非惯性系的概念	95
二、平移非惯性系	96
三、匀角速旋转参考系中的运动	98
**四、厄卓实验	101
第三章 守恒定律	104
§ 3.1 功和动能	104
一、元功	104
二、在有限轨道上外力所作的功	107
三、周期运动中外力所作的功	109
四、功与路径的关系	112
§ 3.2 机械能守恒原理	113
一、一维运动及一维几何力场	115
二、二维运动及几何力场	116
三、有势力场的性质	120
§ 3.3 质点系的动量和能量	121
一、冲量和动量	121
二、质心	124
三、质心运动定理	126
§ 3.4 碰撞	127
一、弹性碰撞	127
二、实验室系和质心系	129
三、弹性斜碰撞问题	130
四、非弹性碰撞	131
§ 3.5 力矩和动量矩	132
一、力矩的概念	132
二、牛顿第二定律的矩形式	133

§ 3.6 有心引力作用下的质点运动轨道	135
一、有心力与动量矩守恒	135
二、行星运动规律	136
三、开普勒定律	139
§ 3.7 势函数的对称性和物理量守恒	140
一、势函数及其对称性	140
二、势函数的时间-空间平移对称性和能量-动量守恒定律	142
三、动量矩守恒	145
第四章 刚体	148
§ 4.1 描述刚体的参数	148
一、刚体的概念	148
二、刚体的自由度	149
三、在指定条件下刚体的自由度	150
§ 4.2 刚体的运动	153
一、质心的运动	153
二、确定刚体质心的方法	154
三、力矩和力心的概念	157
§ 4.3 刚体的转动	158
一、主力矩	158
二、平行力系的主力矩	159
三、刚体的角向运动方程	161
§ 4.4 转动惯量的性质	165
一、定轴转动	165
二、转动惯量	167
三、刚体质心的实用确定法及其意义	170
四、平行轴定理	171
§ 4.5 平面平行运动	173
一、平面平行运动的特点	173
二、平面平行运动刚体的动能	175
三、平面平行运动的柯尼希定理	176
四、解题举例	177
*§ 4.6 刚体的定点运动	181
一、准备工作	181
二、瞬时转动轴的概念	182

三、欧拉角	184
**四、平均转动轴	185
**五、求平均转动轴的代数方法	187
*§ 4.7 刚体定点运动实例	189
一、陀螺运动概况	189
二、欧拉方程	191
**三、拉格朗日陀螺的进动	193
**四、讨论	194
五、惯量主轴的性质	196
六、一般刚体运动举例	197
第五章 波	201
§ 5.1 波在介质中的传播	201
一、波的概念	201
二、波的传播速度	201
三、波的传播问题	204
§ 5.2 纵波的描述方法	206
一、一维纵波	206
二、气体在等温假设下的声波	207
三、声波在传递过程中气体的状态	209
§ 5.3 简谐波	210
一、简谐波的能量分布	210
二、驻波	211
三、关于半波损失问题	214
§ 5.4 惠更斯原理	216
一、波的反射及折射	216
二、衍射和干涉	219
三、声强	222
§ 5.5 多普勒效应	223
一、引论	223
二、多普勒现象分析	224
三、激波	225
第六章 狭义相对论及其应用	228
§ 6.1 从伽利略变换到洛伦兹变换	228
一、低速的相对运动	228

二、伽利略变换和速度相加原理	230
三、狭义相对论的提出	231
四、长度的洛伦兹收缩	232
五、运动时钟的走时减慢	233
**§ 6.2 狭义相对论的理论基础	236
一、光速不变原理	236
二、变换的不变量问题	237
三、二维洛伦兹变换的导出	238
*§ 6.3 相对论能量-动量关系	240
一、质量和能量	240
**二、协变量和不变量	241
三、能量-动量矢量	242
四、零质量粒子	244
**§ 6.4 高速粒子的碰撞	246
一、有效能量问题	246
二、阈能	249
三、能量为 $h\nu$ 的光子与电子的正碰	251
**§ 6.5 零质量粒子的吸收及放射问题	252
一、共振吸收现象	252
二、原子核的反冲	254
三、穆斯堡尔源	256
四、引力红移的实验验证	256
第七章 弹性和流体	259
§ 7.1 固体形变及弹性	259
一、形变	259
二、切变与拉伸形变	260
三、金属丝的扭转问题	263
四、扭转系数 D 的关系式的推导	264
五、静不定问题简介	265
§ 7.2 梁的弯曲	266
一、梁的平衡	266
**二、梁的受力分析	268
三、截面对中性轴的惯性矩	270
四、梁的下弯情况分析	271

§ 7.3 伯努利方程	272
一、理想流体	272
二、伯努利方程的导出	273
三、流体的动量	275
§ 7.4 翼片的升力	275
§ 7.5 流体的粘性	277
一、粘滞系数	277
二、雷诺数	279
三、粘性流体在圆形管道中的流动	280
四、小球的粘性阻力	282
附录	286
A. 理想潮	286
一、潮汐的成因	286
二、月球在潮汐形成中的作用	287
三、太阳对潮汐的影响	291
B. 粘性流体基本方程	292
一、粘性定常流体的特性	292
二、不可压缩流体的连续性方程	296
三、液体单元在无重力流体中所受的作用力	297
四、关于并矢的注记	299
C. 斯托克斯定律	300
一、小球在粘性流体中运动	300
二、斯托克斯公式的导出	305
D. 回环器的转弯问题	307
一、引论	307
二、作用在回环器上的空气动力	309
三、进动力矩	311
力学学习题	314

第一章 运动的描述

力学的主要任务是讨论物体的机械运动规律，从如何描述物体的运动入手。第一章讨论物体的位置变动(机械运动)规律，主要涉及物体、位置、时间等基本概念，另外还有运动轨道的分类、参考系的作用等。

§ 1.1 位置的概念

一个形状复杂的物体的位置很难精确描述，我们从最简单的理想物体——质点——开始来描述位置及位置的变动(即运动)的概念，然后讨论一些必须注意的问题。

一、质点

质点是指带有一定物理参量(如质量、电荷等)并抽象为没有大小、形状的几何点(各种物理参量的定义将在以后陆续讨论)。质点的位置即是指该几何点的坐标，它的运动是相对于其它物体的位置变动，它没有内部运动。质点是实际物体的一种理想化的模写，如果运动过程中物体的形状及大小可以不考虑，它就可以看成是质点，例如讨论汽车在地面上的位置变动即属这种情况；但如果观察汽车本身的运动时，汽车各部份的运动情况并不完全相同，显然这时不能把它看作一个几何点。对于不能当作质点即大小上不能当作几何点处理的物体，原则上可以将它分割成很多微小的单元，各单元可当成质点处理。

有的物体非常之大，例如地球，但在研究地球绕太阳公转时，可以将它看成是质点；而讨论人类在地球上的活动时，地球就不能

再看作是质点。再举一例，星体是与太阳差不多的非常庞大的物体，但它的直径 d 要比它与观察它的地球之间的距离 l 小很多， $d \ll l$ ，因此在观察星体的视运动时，星体也可以看成是质点。

二、参考系

上面已经提及位置的变动即是运动，只有相对某些静止的背景才能谈论物体的运动，

静止的背景又称为参考系。例如飞机相对于机场的运动，是把机场作为参照的静止背景。参考系是指内部没有相对运动的物体或物体系统。选定一个参考系就是选定这样一个物体或物体系统。质点的运动就是相对于选定参考系的运动。在参考系中往往要指定一个坐标系，坐标轴固连在参考系中，今后，我们一般不区分参考系和坐标系的概念。

在不同的参考系中物体的位置数据会有所不同。见图 1.1，飞机 A 或 B 的运动可以在不同的地点（机场） O_1 和 O_2 观察，但所得到的描述飞机的位置数据彼此不同。

选择参考系通常由习惯制约。例如，在杂技飞车走壁的节目中，观众常以场地为参考系，看到骑摩托车的运动员沿正圆形的内壁作螺旋线上升运动；可是运动员往往以自身为参考系，看到观众在作螺旋形的下降运动。又如，站在站台上的人通常以站台为参考系看见火车在运动，而火车里的人通常将火车作为参考系看见站台在运动。这些例子告诉我们，一个问题中的参考系不止一个，它们彼此之间可以有相互运动。

然而，选择一个合适的参考系可以简化问题的处理。例如，月球在天空中的视运动包含了地球的自转和月球绕地球公转两种效应的联合结果。我们也可以设想在没有自转的地球（称为理想地球参考系）中观察月球的运动，这时月球只有公转运动，其运动规

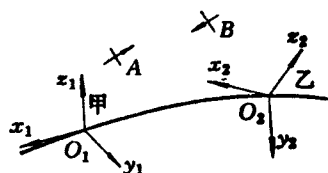


图 1.1

律变得大为简单，而星空可以看成是以理想地球为中心的静止的大球壳，星体嵌在这个球壳上。不过这个参考系不是直接可以看出的，需要有一定的抽象思维能力。

三、描述一维运动物体的参数

在一定条件下，确定物体的位置只需要一个参量。例如，一辆汽车在平直的公路上行驶，其位置由汽车所在点和出发点之间的距离确定。

距离的测定结果是一个数字，它是距离和指定单位相比较的结果，或者说是由单位长度(米尺)测量距离的结果。

见图 1.2，汽车 P 在公路上的运动可以看成是质点在直线（一维空间）上的运动，是一维运动。选定参考原点 O ，还选定一个长度为 1 的有向线段 i ，这样就构成了参考系

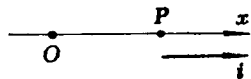


图 1.2

O, i 轴的方向为 x 轴的正向。记从 O 到 P 的有向线段为

$$\overrightarrow{OP} = li \quad (1.1.1)$$

l 称为点 P 在参考系(或坐标系) O 中的坐标。如果 $\overrightarrow{OP}$ 的指向与 i 的方向相同，则 l 为正；如果相反则 l 为负。

如果公路是一条曲线，则汽车位置由所在点和参考点(例如出发点)之间的曲线距离确定。

四、矢量的概念及运算

为了更好地描述物体运动，需要引进矢量的概念。上面我们讨论了有始端和末端的有向线段 $\overrightarrow{OP}$ 。对于始端为 A 、末端为 B 的有向线段记为 $\overrightarrow{AB}$ ，称为固定矢量。见图 1.3，固定矢量 $\overrightarrow{AB}$ 和 $\overrightarrow{CD}$ 两者互相平行，大小相等，指向相同，但它们是不同的两个

固定矢量。

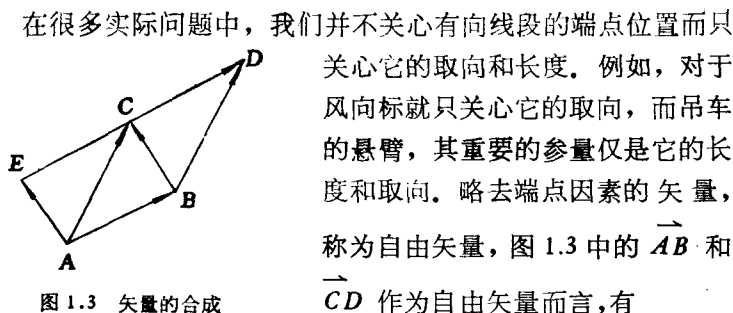


图 1.3 矢量的合成

在很多实际问题中，我们并不关心有向线段的端点位置而只关心它的取向和长度。例如，对于风向标就只关心它的取向，而吊车的悬臂，其重要的参量仅是它的长度和取向。略去端点因素的矢量，称为自由矢量，图 1.3 中的 $\vec{AB}$ 和 $\vec{CD}$ 作为自由矢量而言，有

$$\vec{AB} = \vec{CD} \quad (1.1.2)$$

它们代表同一个自由矢量，而各个以固定矢量表现出来的具体形式是自由矢量的代表。如果 $\vec{AB}$ 和 $\vec{BC}$ 是两个自由矢量的代表，则它们的和矢量（指自由矢量，今后将自由矢量一般简称为矢量）定义为 $\vec{AC}$ ，记成

$$\vec{AC} = \vec{AB} + \vec{BC} \quad (1.1.3)$$

即和矢量是折线 ABC 始末两端决定的，这种加法称为几何加法。注意到式(1.1.3)中各项都是自由矢量，而从图 1.3 可得如下的关系式

$$\vec{AC} = \vec{AB} + \vec{BC} = \vec{CD} + \vec{BC} = \vec{BD} \quad (1.1.4)$$

上式说明自由矢量的和矢量也满足自由矢量相等的性质。从图 1.3 还可以看到，若令 $\vec{AE} = \vec{BC}$ ，将这个关系代入式(1.1.4)中，有

$$\vec{AC} = \vec{AE} + \vec{AB} \quad (1.1.5)$$

这里的 $\vec{AE}$ 和 $\vec{AB}$ 是平行四边形 $ABCE$ 相邻的两边， $\vec{AC}$ 是它的对角线，所以几何加法又称为平行四边形加法（或平行四边形规则。）

质点 P 在原点为 O 的参考系中的位置可用自由矢量 $\mathbf{r}$ 标记，