

大学物理教程

力学

许崇桂 李铨 编著

G F G Y G B S



大学物理教程

力 学

许崇桂 李 铿 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

大学物理教程:力学/许崇桂,李铿编著.北京:国防工业出版社,1997.1

ISBN 7-118-01317-X

I. 大… II. ①许… ②李… 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(94)第05946号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 13¼ 290千字

1997年1月第1版 1997年1月北京第1次印刷

印数:1—3000册 定价:13.70元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

总 序

《大学物理教程》是根据国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材规划，结合作者多年来的教学实践编写的。按照各学校的实际情况和教材规划的要求，本教程的内容和深度介于物理系普通物理和工科普通物理之间。这一选择是为了使本教程能够适合应用物理专业，以及其他偏理的专业如技术物理、核物理、电子技术物理、材料科学、工程化学、生物科学等的需要。

本书注重对物理基本原理和概念的阐述，在注意严密性的同时，强调了借用现象、图像、比喻和实例来说明问题的本质，使内容更为丰富、更具有吸引力。本书力求能够反映20世纪90年代物理学的面貌以及人们对物质世界的认识水平。在叙述方法上力求由简到繁、由表及里、富于启发、便于阅读，以利于引导读者积极思考和分析问题。

根据我们的教学经验，全书主要内容可用180学时讲完（加*号章节为选学内容）。本书作者曾多次研讨了全书的内容、结构和叙述方法，但为了方便读者，仍分册出版，包括力学、热学、电磁学、光学和原子物理学五个分册，它们既构成一个整体，又具有相对独立性，可以单独选用。

国家教委高等学校物理学教学指导委员会应用物理学教材建设组对本书进行了初审和复审，提出了极为宝贵的意见和建议。国防工业出版社的同志对本书的出版给予了热情的

支持和帮助，作者在此一并向他们表示衷心的感谢。

浙江大学李文铸教授主编了本教程，清华大学、北京工业大学、北京科技大学的几位教授担负了具体的编写工作。第一册《力学》由许崇桂、李铿编写，第二册《热学》由许崇桂编写，第三册《电磁学》由李铿编写，第四册《光学》由蔡峰怡编写，第五册《原子物理学》由史斌星编写。

在编写本书各册时，都参考了国内外若干教材和其他书籍，从中得到启发与教益。这些书籍无论在内容选择和安排，或对问题的分析、讨论，以及在插图、例题、习题等许多方面，都有各自的优点，其中有些地方无疑是值得借鉴和吸收的。这里难于一一指出，在此一并致谢。

作 者

前 言

本书是《大学物理教程》的一个分册。

力学是物理学的一个分支,研究机械运动的规律及应用。机械运动是指物体间相对位置的变化,它是自然界中最简单,生产实践和日常生活中最经常遇到的一种运动形式。作为研究这种运动的力学很早就发展起来了,现已相当成熟。

考虑到物理学的现代发展,我们在本书的编写中注意了以下几点:

1. 牛顿运动定律看上去叙述简单,实际上它包含有定义、对自然界的观察、半直观性的概念和一些关于时间空间性质的假设。在书中我们尽可能说明在牛顿定律中哪些内容是以实验为基础,反映了客观规律性;哪些内容属于定义问题。

2. 物理学的现代发展表明,守恒定律已成为整个物理学的基本定律,它比牛顿定律具有更广阔的适用范围和更深刻的物理意义。考虑到这点,我们在书中尽可能着重阐述动量、能量和角动量三个守恒定律。虽然整本书仍然是以牛顿定律为基础来展开的,但是,以三个守恒定律为基础来阐述包括牛顿力学在内的整个力学是一个较理想的方法。

3. 相对论已成为现代物理学的基础之一,并且在科技中有着越来越广泛的实际应用。我们认为有必要而且也有可能让学生较早地学习到这方面的知识。为此,在本书的第九章

介绍了狭义相对论，着重阐述了牛顿力学到相对论时空观的更新。

4. 尽可能联系比较近代而又比较实际的应用。

本书第七、八两章由李铿编写，其余各章由许崇桂编写。陈纲、刘书声和徐庚武三位教授详细审阅了本书的全部手稿，提出了许多宝贵意见和建议，谨此向他们表示衷心感谢。

作 者

内 容 简 介

《大学物理教程》力学分册,是基础物理革新之作。全书共分九章,介绍了牛顿力学的内容,着重阐述了动量、能量、角动量三个守恒定律的意义,此外还介绍了刚体定轴转动,机械振动与机械波,最后介绍狭义相对论。本书力图结合近代实验或比较实际的事例来阐述力学的基本概念和原理。

本书适合大中学物理教师,大学低年级学生,一般科技人员及自学者阅读、参考。

目 录

第一章	质点运动学	1
§ 1.1	参照系, 质点	1
§ 1.2	位置矢量和位移	4
§ 1.3	速度	6
§ 1.4	加速度	11
§ 1.5	用直角坐标系表示力学运动	14
§ 1.6	加速度的切向分量和法向分量	21
§ 1.7	相对运动	29
* § 1.8	牛顿力学的时空概念和伽利略变换	34
习题	.....	39
第二章	牛顿运动定律	43
§ 2.1	牛顿运动定律	43
§ 2.2	力学量的单位和量纲	49
§ 2.3	物理学中常见的力	54
§ 2.4	牛顿定律的简单应用	65
§ 2.5	伽利略相对性原理	80
* § 2.6	牛顿定律和时间反演	84
§ 2.7	非惯性参照系, 惯性力	86
§ 2.8	匀角速转动参照系, 惯性离心力	90
§ 2.9	牛顿力学的适用范围	98
习题	.....	101
第三章	动量	106

§ 3.1	动量, 动量定理	106
§ 3.2	质点系的动量定理	111
§ 3.3	动量守恒定律	115
§ 3.4	火箭运动	120
§ 3.5	质心及其运动	123
§ 3.6	质心参照系	131
习题	.....	134
第四章	功和能	137
§ 4.1	功和动能概念	137
§ 4.2	动能定理	145
§ 4.3	功率	151
§ 4.4	保守力, 势能	152
§ 4.5	由势能函数分析保守力和质点的运动	159
§ 4.6	关于势能的进一步讨论	162
§ 4.7	功能原理, 机械能守恒定律	164
§ 4.8	能量守恒定律	175
§ 4.9	碰撞	177
习题	.....	182
第五章	刚体绕固定轴的转动	186
§ 5.1	角速度, 角加速度	187
§ 5.2	转动惯量	192
§ 5.3	转动定律	200
§ 5.4	刚体对固定轴的角动量及其守恒定律	208
习题	.....	214
第六章	质点的角动量, 守恒定律的意义	220
§ 6.1	质点的角动量	220
§ 6.2	角动量定理和角动量守恒定律	226
§ 6.3	陀螺的进动	234
§ 6.4	守恒定律的作用	237

* § 6.5	守恒定律与对称性	240
习题	.....	242
第七章	机械振动	246
§ 7.1	简谐振动	246
§ 7.2	简谐振动的旋转矢量表示法	253
§ 7.3	质点作简谐振动时的能量	254
§ 7.4	几种常见的简谐振动	256
§ 7.5	阻尼振动	261
§ 7.6	受迫振动与共振	269
§ 7.7	振动的合成	276
习题	.....	286
第八章	机械波	289
§ 8.1	媒质的形变和弹性模量	289
§ 8.2	机械波的形成	295
§ 8.3	波面和波线、波的频率、波长和波速	301
§ 8.4	平面简谐波的表达式	305
§ 8.5	波的动力学方程	308
§ 8.6	波的能量、能量密度和能流密度	311
§ 8.7	波的叠加原理和波的干涉	317
§ 8.8	驻波	320
§ 8.9	多普勒效应	328
§ 8.10	声波	333
习题	.....	336
第九章	狭义相对论基础	340
§ 9.1	伽利略变换, 伽利略相对性原理	341
§ 9.2	爱因斯坦相对性原理和光速不变原理	344
§ 9.3	洛伦兹变换	348
§ 9.4	同时性的相对性	353
§ 9.5	长度缩短, 时间膨胀	360

§ 9.6	相对论速度变换	371
§ 9.7	相对论动量与质量	377
§ 9.8	相对论中牛顿第二定律的形式	382
§ 9.9	相对论中的能量	385
* § 9.10	相对论中动量能量的变换, 力的变换	393
习题	.....	397
习题答案	.....	402
常用物理常数	.....	411

第一章 质点运动学

力学研究物体的机械运动,即物体位置随时间的变化。这种运动又叫力学运动,有时简称运动。拿人造地球卫星来说,如果已知卫星现在的位置和速度,要求预言卫星的轨道,以及什么时候它运动到什么地方,这类问题就是力学所要讨论的。

为了研究各种力学运动,首先要设法区分和描述它们。力学中的这部分内容叫做运动学。在运动学中,通常引入位移、速度、加速度等物理量来描述力学运动,并借以区分各种不同的运动类型(例如圆运动、弹簧振动等),但不涉及形成这些运动的原因,即不涉及力的作用。将运动和力联系起来考虑,研究力学运动的基本规律,这部分内容属于动力学,是力学的主要部分。

本章介绍质点运动学,从下一章开始讨论动力学。

§ 1.1 参照系,质点

为了描述物体的运动,必须预先选定参照系;为了简化对物体运动的描述,可以引入质点概念。

(一)参照系

观察和实验表明,一切物体都处在永恒的运动之中。大到地球、太阳和各种星系,小到分子、原子和各种基本粒子都是

如此。

在描述物体运动时我们发现,同一个物体相对于不同的参考物体,其运动可以不同。例如,考虑在一辆匀速前进的火车中,有一滴水自车厢顶棚上滴下。如果以车厢为参考物体观察水滴相对于车厢的位置变化,则这个水滴的运动是沿一条竖直线自由降落的;如果选地面为参考物体,则水滴是沿着一条抛物线运动的。由此可见,选择不同物体作参考时,对同一个物体的运动的描述可以不同。因此,描述一个物体的运动时,必须预先说明是以哪个物体为参考的,或者说,是相对于哪个物体而言的。这个被选作参考的物体叫做参照系。

常用的参照系有太阳参照系,地心参照系,地面参照系,质心参照系等等。太阳参照系是以太阳和其他几个恒星作为参考物构成的,通常将坐标原点放在太阳中心,坐标轴指向恒星,如图 1.1.1 中 O - XYZ 所示。地心参照系由地心和远处几

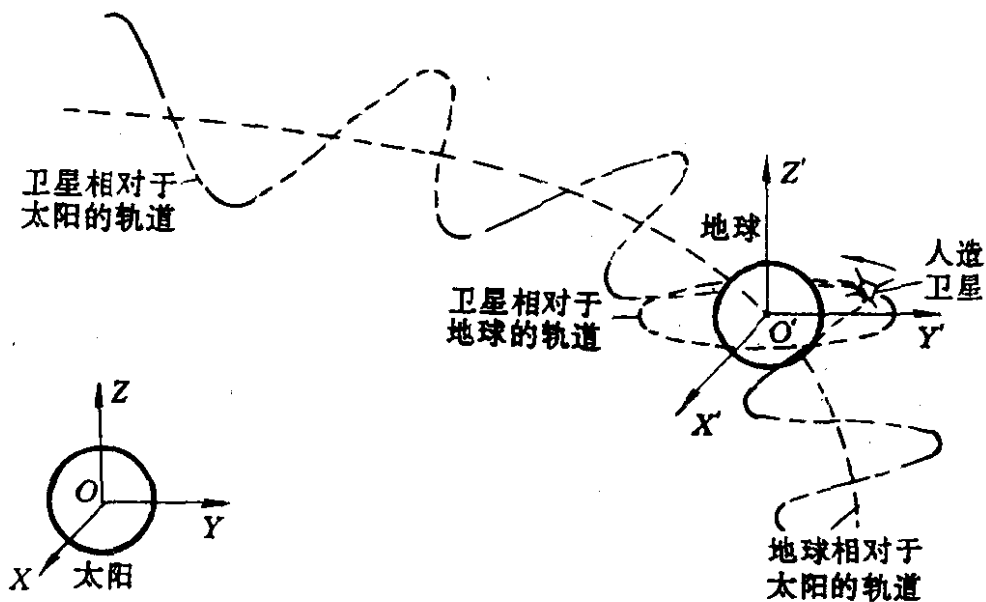


图 1.1.1

个恒星构成,坐标原点在地球中心,坐标轴指向远处恒星,如图 1.1.1 中 $O'-X'Y'Z'$ 所示。地面参照系由地面和地面上的几个静止物体构成,坐标系固定于地面上,随地球一起运动。

设想有两个观察者 S 和 E , S 在太阳上,使用太阳参照系(图 1.1.1 中的 $O-XYZ$), E 在地球上,使用地心参照系 $O'-X'Y'Z'$, 两人都在研究同一个人造地球卫星的运动。对于观察者 E 来说,卫星看起来是沿着近乎圆形的轨道绕地球运行。对于观察者 S 来说,卫星轨道是波纹线形状(图中将卫星轨道的摆动大大地夸大了)。那么,究竟应当选择什么样的参照系呢? 在运动学范围内,对这个问题的回答是:参照系可任意选择,视问题的性质和计算的方便而定。例如,在描述地球卫星的运动时,选择地心参照系就比较简便。当我们描述太阳系中行星的运动时,若选择太阳参照系,行星的运动沿椭圆轨道运行;而如果选用地心参照系,行星将作复杂的曲线运动。因此,在描述行星运动时通常选用太阳参照系,以便使分析工作容易些。当我们描述地面附近物体的运动时,通常选用地面参照系。以下各章中,我们讨论地面上物体的运动时,如无特殊说明,都是相对于地面参照系而言的。

(二)质点

物体的运动,在一定条件下可以忽略它的体积和转动,而用一个点来代表,叫做质点。这是一种理想化的力学模型,可以简化对物体运动的描述。例如,当我们研究地球绕太阳公转时,由于地球半径($6.4 \times 10^3 \text{km}$)比起地球公转的轨道半径($1.5 \times 10^8 \text{km}$)要小得多,就可以忽略地球上各点运动的差异,而将它看作质点。这时我们所关心的,实际上只是地球中心的运动,忽略了地球的大小和转动。又如,当物体作平行移

动时,物体上各点的运动情况完全相同,可以用一个质点的移动来代表整个物体的移动。但是,当我们要研究物体的转动或其他内部运动时,就不能再把它当作质点了。不过,即使在这种情况下,研究质点的运动规律仍然是十分有用的,因为任何复杂的物体都可以看作是一个质点系。

由此可见,研究质点的运动是研究任何物体运动的基础,本书将着重加以阐述。从第一章到第四章所讨论的都是物体可以当作质点时的运动。

§ 1.2 位置矢量和位移

本节介绍怎样描述质点的位置和位置变化。

(一)位置矢量

为了描述质点的位置,必须选定一个参照系,并在参照系上建立适当的坐标系。从坐标原点 O 引向质点所在位置 P 的矢量,叫做质点的位置矢量,简称位矢或矢径。通常用 r 表示,如图 1.2.1 所示。质点在空间的位置除了可用坐标 (x, y, z) 表示外,还可以用位矢 r 来表示。随着质点的运动,它的位矢随时间变化,所以位矢 r 是时间 t 的函数

$$r = r(t)$$

(二)位移

设一质点沿一轨道曲线运动,如图 1.2.2 所示。在时刻 t 位于 A 点,位矢为 $r(t)$,在时刻 $t + \Delta t$ 位于 B 点,位矢为 $r(t + \Delta t)$ 。我们用这两个位矢之差

$$\Delta r = r(t + \Delta t) - r(t)$$

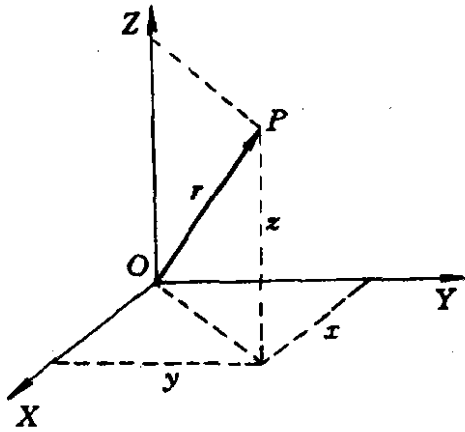


图 1.2.1

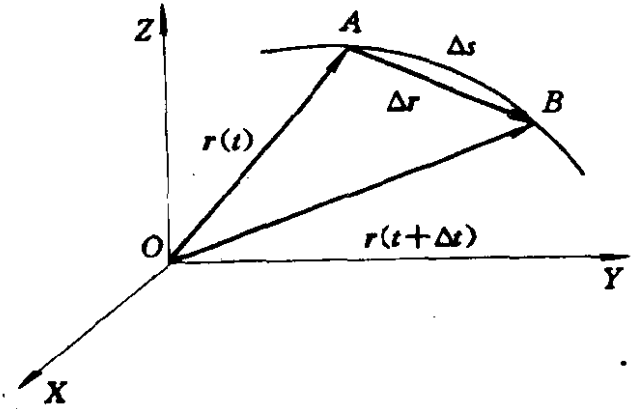


图 1.2.2

来表示质点在时间 Δt 内位置的变化,并且把矢量 Δr 称为质点在这段时间内的位移。

应当注意,位移只给出质点在一段时间内位置变动的结果,并未给出质点是沿什么路径由起点运动到终点的。因此,一般来说位移不同于路程。如图 1.2.2 所示,在时间 Δt 内质点的位移为 Δr ,而它所经过的路程为 Δs 。前者是矢量,后者为标量,两者的大小也不相同。不过,如果所取的时间间隔 Δt 很短,位移的大小 $|\Delta r|$ 与路程 Δs 的差别就会变得很小。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\Delta r| = \Delta s$ 。

(三)位矢、位移与坐标原点的关系

如图 1.2.3 所示,对于同一个点 A,它在不同坐标系中的位矢分别为 r_1 和 r_1' 。若 R 是从不带撇的坐标系原点 O 指向带撇的坐标系原点 O' 的矢量,则有

$$r_1' = r_1 - R$$

所以,位矢依赖于坐标系。对于原点在不同位置的坐标系,同一质点的位矢会不同。

但是,质点的位移却与坐标系无关,如图 1.2.3 所示。实际上,当质点从 A 运动到 B 时,从不带撇的坐标系计算,位移