

张 三 慧 主 编

大学物理学

(第一册)

力 学

张三慧 王虎珠 编著

清华大学出版社

清华大学教材 张三慧 主编

大学物理学

第一册

力学

张三慧 王虎珠 编著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是清华大学新编教材《大学物理学》的第一册,讲述了物理学基础理论的力学部分,包括质点力学、刚体的定轴转动和狭义相对论。书中特别着重于守恒定律的讲解,对势能概念作了清晰的说明。内容的选择上除包括经典基本内容外,还注意引进现代物理知识与物理思想。为此还特别写了基本粒子、奇妙的对称性、弯曲的时空等今日物理趣闻和物理学与现代技术等附加栏目作为选讲或选读内容,以扩大学生的现代物理知识领域。

本书是作为各类工科院校的大学物理学教材而编写的。但也可作其他高等院校师生和中学物理教师教学或自学参考书。

清华大学教材 张三慧 主编

大学物理学

第 一 册

力 学

张三慧 王虎珠 编著

清华大学出版社出版

北京 清华园

人民教育出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 9.5 字数: 245 千字

1990年8月第1版 1990年8月第1次印刷

印数: 0001-8000

ISBN 7-302-00640-7/O·101

定价: 2.15 元

前 言

摆在你面前的这部《大学物理学》，是根据编者们在清华大学长期讲授大学物理学课程的经验编写的。前此曾以讲义的形式在校内多次使用过。

物理学是工科大学生必修的基础理论课。随着工业技术和物理科学本身的发展，物理学内容和讲授方法应有相应的更新。但是，在我国，近几十年来的物理教学，特别反映在物理教材上，并没有很好地适应这种时代的变化。这主要表现在：① 内容基本未变，近代物理的基本概念与方法没有得到应有的反映。② 讲述方法基本未变，某些重要物理现象与规律相对孤立，没有反映出现代物理对自然规律的深刻的系统化的理解。③ 与目前我国中学物理教学衔接不好，不少内容是简单重复。这就破坏了学生学习物理的兴趣，妨碍了他们学习积极性的发挥。

针对这些我们认为的缺点，本书编写时力求体现以下的特点。

首先是起点较高，凡是中学教学大纲已列内容，我们都认为学生已基本掌握。除了本书的讲述系统所需要的以外，一般不再做简单的重复。

其次是着重加强了讲述的系统性。阐述物理学的内容可以按照两种逻辑进行，一种是遵循历史发展的顺序——历史逻辑，从古到今依次讲述。另一种是遵循已知的物理规律自身的相互联系所确定的主从顺序——结构逻辑或教学逻辑，从最基本的规律逐渐展开。虽然在不少地方这两种逻辑是一致的，但二者确有明显的不同。为了使工科大学生在较短的时间内对大学物理课程的内

容有一个尽可能整体的理解，我们在本书中基本上采取了后一逻辑。

力学部分当然是以牛顿定律为基础展开的。书中着重阐述了守恒定律，就中势能的概念作了清晰的解说。在刚体转动部分还特别指明定轴转动定律与一般角动量定理的关系，狭义相对论内容重点是时空观的更新。这应该是现代物理学的基础。为了体现这一点，我们把狭义相对论放在力学后面讲授。

尊重我国教师的习惯，电磁学部分讲述的主线仍是“经典”式的，即把电场、磁场和电磁感应的规律分别建立在不同的实验基础上作为相互独立的规律加以介绍。这基本上是 1873 年已形成的体系。狭义相对论出现不久，就有人以相对论为基础建立电磁学的新体系。目前除在杂志上不断有人发表完善这一体系的文章外，从 60 年代 E. M. 帕塞尔的《电磁学》开始，在大学物理课程中也引入了这一新体系。我们认为这一体系，至少其基本思想，是有可能在中国大学物理课程中为学生所接受的。因此，我们在电磁学部分作为副线讲了电场的变换、运动点电荷的电场，磁场是从哪里来的？匀速运动点电荷的磁场以及从电磁场变换看位移电流和电磁感应等章节。如果按照这一副线讲述（我们就是这样作的），可以使使学生更深刻地理解电磁场的统一性，并且可在讲述过程中大大提高内容的系统性与启发性。此外电磁学的内容我们没有讲到麦克斯韦方程就结束，而是又介绍了加速电荷的辐射场、电磁场的动量与能流等。这对理解电磁场的普遍性质是重要的。

热学部分可以说是以统计概念、统计规律为基础加以讲述的。分子运动论当然是这样。对热力学第一定律也说明了其微观意义。特别是对热力学第二定律，我们没有局限于历史上对热机发展的依赖，而是从更普遍的自然过程的方向性开始讲起，在总结关于宏观过程方向性的基础上提出热力学第二定律并指出它的微观意

义。熵的概念就是这样从统计的角度引入的。

振动与波是牛顿力学的延伸。物理光学实际上是作为波的基本规律在电磁现象中的应用而讲述的。在量子物理部分我们也大胆地采用了教学逻辑:以波粒二象性为基础,以薛定谔方程为基本公式展开讲述有关基本内容。并没有把热辐射作为引入量子概念的课题加以讲解,而是作为谐振子能量量子化的实例讲述的。

第三是在保证基本经典内容的基础上,大力使内容现代化。书中着重介绍了现代物理学的观点,如守恒定律与对称性,相对论的时空观,原子观点、统计观点,微观粒子的二象性与量子性等。关于现代物理包括的物理学前沿知识介绍,除了散见于各章的实例、例题或习题外,本书特辟了两类特殊内容:“今日物理趣闻”和“物理学与现代技术”。前者介绍当今物理学前沿的发展,例如粒子理论、广义相对论、超导、等离子体、大爆炸、耗散结构理论等。后者介绍物理学的某些现代应用,如同步卫星的发射、等离子体发电、热泵、隧穿扫描显微镜等。这些内容很难有时间在课堂上讲授。我们热切地希望读者们都能在课余阅读这些材料。这对于提高学习物理的兴趣,扩大科学视野以及在各自的专业范围内开阔自己的思路一定是有帮助的。

本书还写了十几篇“科学家介绍”,简要地介绍了重要的物理学家的生平与贡献。这样做,一方面是为了向学生提供必要的物理学史知识,另一方面也希望学生能从这些科学家的开创精神、治学态度以及思想境界方面获得教益。

关于习题,我们并不赞同那种越多越好的观点。考虑到学生的全面发展以及理解和掌握物理基本概念和定律的实际需要,本书中只编选了比在规定学时内能完成的稍多的思考题与习题。我们希望大学生在做题时不要贪多,而要求精、要真正把做过的每一道题从概念原理上搞清楚,并且用尽可能简洁明确的语言、公式、图

象表示出来。需知,对一个科技工作者来说,正确地用书面表达自己的科学思维过程也是一项重要的基本功。

本书每章都列有“本章要求”和“本章提要”。我们希望通过这些来发挥学生学习的主动性和帮助他们进行自我检查。

本书在清华大学各工科系使用时,是在规定的 120 学时内授完的(其中包括 20—30 学时的习题讨论课)。讲课有粗有细。有些属于要求的章节也未在课堂上讲授而留给学生自学。学生中的大多数都是怀着很大的兴趣阅读这部教材的。若干兄弟院校也用此书作为教材,师生反应均好。

本书编写时也吸收了本校物理系其他物理教师的宝贵经验。在编写和试用过程中,李恭亮、许崇桂、邓新元、高炳坤、黄天麟、王以炳、陈惟蓉等老师曾提出过许多宝贵的意见;刘凤英、谢起成等老师参加了本书核算习题答案的工作;张礼教授、李兴中教授审阅了部分文稿;韩晓东同志提供了许多照片,程远老师为本书绘制了全部科学家的肖像,郭奕玲老师提供了部分物理学史资料。对以上这些热情的帮助,我们表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,我们还借鉴了国外的许多教材,特别是帕塞尔的《电磁学》(E. M. Purcell: Electricity and Magnetism)和奥哈尼安的《物理学》(H. C. Ohanian: Physics)。对于这两本书的作者,我们也特别致以谢意。

我们曾经以“更新内容,为编写一部第一流的物理教材而努力”作为我们的奋斗纲领。目前这部教材虽然离“第一流”尚远,但我们也愿意把它献给广大的物理教师和大学生们。如果它能对他们的教学更新和学习提高有所帮助,我们将十分高兴。同时,我们也热切地盼望着他们对本书各方面的批评。

本书初版曾以《工科大学物理学》为名由北京科技出版社于 1987 年 12 月出版。现经较大增补更名为《大学物理学》改由清华

大学出版社出版。对清华大学出版社对本书的关照与帮助，我们也表示衷心的感谢。

编 者 1990年4月

数 值 表

真空中的光速	$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
普朗克常数	$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
引力常数	$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$
玻耳兹曼常数	$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
阿佛伽德罗常数	$N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$
电子的静止质量	$m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
等价能量	$E_e = 0.511 \text{ MeV}$
质子的静止质量	$m_p = 1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
等价能量	$E_p = 0.938 \text{ GeV}$
中子的静止质量	$m_n = 1.675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
1 电子伏特能量	$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
质子电量	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
已知的宇宙	
核子数	10^{80}
半径	$10^{10} \text{ 光年} \approx 10^{26} \text{ m}$
星系数	10^{11}
我们的银河系	
质量	10^{42} kg
半径	$10^5 \text{ 光年} \approx 10^{21} \text{ m}$
恒星数	1.6×10^{11}
太阳	
质量	$1.99 \times 10^{30} \text{ kg}$
半径	$6.96 \times 10^8 \text{ m}$
平均密度	1410 kg/m^3
表面重力加速度	274 m/s^2

自转周期	~26 天
总辐射功率	$4 \times 10^{26} \text{ W}$
地球	
质量	$5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$
赤道半径	$6.378 \times 10^3 \text{ m}$
极半径	$6.357 \times 10^3 \text{ m}$
平均密度	5520 kg/m^3
表面重力加速度	9.81 m/s^2
自转周期	1 恒星日 = $8.616 \times 10^4 \text{ s}$
自转角动量	$0.331 MR^2 = 8.05 \times 10^{37} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
到太阳的平均距离	$1.50 \times 10^{11} \text{ m}$
公转周期	1 年 = $3.16 \times 10^7 \text{ s}$
公转速度	29.8 km/s
月球	
质量	$7.35 \times 10^{22} \text{ kg}$
半径	$1.74 \times 10^6 \text{ m}$
平均密度	3340 kg/m^3
表面重力加速度	1.62 m/s^2
自转周期	27.3 天
到地球的平均距离	$3.84 \times 10^8 \text{ m}$
运行周期	1 恒星月 = 27.3 天

目 录

第一章 质点运动学	1
§ 1.1 质点的运动函数	1
§ 1.2 位移和速度	4
§ 1.3 加速度	6
§ 1.4 匀加速运动	10
§ 1.5 匀加速直线运动	12
§ 1.6 抛体运动	15
§ 1.7 圆周运动	19
§ 1.8 相对运动	24
思考题	29
习题	30
科学家介绍 伽里略	34
 第二章 牛顿运动定律	38
§ 2.1 牛顿运动定律	38
§ 2.2 SI 单位和量纲	42
§ 2.3 技术中常见的几种力	46
§ 2.4 基本的自然力	50
§ 2.5 应用牛顿定律解题	54
§ 2.6 惯性系与非惯性系	60
*§ 2.7 惯性力	62
思考题	66
习题	68
科学家介绍 牛顿	74

今日物理趣闻 A. 基本粒子	78
----------------	----

第三章 动量与角动量 89

§ 3.1 冲量与动量定理	89
---------------	----

§ 3.2 质点系的动量	93
--------------	----

§ 3.3 动量守恒定律	95
--------------	----

§ 3.4 质心	99
----------	----

*§ 3.5 质心运动定理	102
---------------	-----

§ 3.6 质点的角动量	107
--------------	-----

§ 3.7 角动量守恒定律	110
---------------	-----

思考题	113
-----	-----

习题	115
----	-----

物理学与现代技术 I. 火箭	118
----------------	-----

第四章 功和能 122

§ 4.1 功	122
---------	-----

§ 4.2 动能定理	127
------------	-----

§ 4.3 一对力的功	130
-------------	-----

§ 4.4 保守力	132
-----------	-----

§ 4.5 势能	134
----------	-----

§ 4.6 万有引力势能	136
--------------	-----

§ 4.7 弹簧的弹性势能	139
---------------	-----

*§ 4.8 由势能求保守力	140
----------------	-----

§ 4.9 机械能守恒定律	142
---------------	-----

§ 4.10 守恒定律的意义	149
----------------	-----

思考题	152
-----	-----

习题	154
----	-----

物理学与现代技术 II. 同步卫星的发射	160
----------------------	-----

今日物理趣闻 B. 奇妙的对称性	163
------------------	-----

第五章 刚体的定轴转动	178
§ 5.1 刚体的运动	178
§ 5.2 刚体定轴转动定律	182
§ 5.3 转动惯量的计算	185
§ 5.4 刚体定轴转动定律的应用	190
§ 5.5 转动中的功和能	193
§ 5.6 刚体的角动量和角动量守恒定律	197
*§ 5.7 进动	204
思考题	209
习题	211
第六章 狭义相对论基础	217
§ 6.1 牛顿相对性原理和伽里略变换	218
§ 6.2 爱因斯坦相对性原理和光速不变	222
§ 6.3 同时性的相对性和时间膨胀	225
§ 6.4 长度缩短	231
§ 6.5 洛仑兹变换	235
§ 6.6 相对论速度变换	240
§ 6.7 相对论质量	243
§ 6.8 相对论动能	247
§ 6.9 相对论能量	249
*§ 6.10 相对论动量—能量变换	254
*§ 6.11 相对论动量变化率的变换	255
思考题	258
习题	259
科学家介绍 爱因斯坦	263
今日物理趣闻 C. 弯曲的时空	267
习题答案	281

第一章 质点运动学

本章要求

1. 正确地应用矢量概念理解质点的运动函数的意义和运动的叠加以及位移、速度和加速度等概念。
2. 复习巩固中学学过的一维匀加速运动、自由落体运动及抛射体运动的规律。
3. 正确理解切向加速度和法向加速度的意义,并能正确地进行计算。
4. 正确理解和应用伽里略速度变换。

§ 1.1 质点的运动函数

力学是研究物体的机械运动规律的。物体的机械运动是指它的位置随时间的改变。位置总是相对的,这就是说任何物体的位置总是相对于其他物体或物体系来确定的。这个其他物体或物体系就叫做确定物体位置时用的参照系。例如,确定交通车辆的位置时,我们用固定在地面上的一些物体,如房子或路牌作参照系,这样的参照系通常叫地面参照系。在物理实验中,确定某一物体的位置时,我们就用固定在实验室内的物体,如周围墙壁或固定的实验桌作参照系,这样的参照系就叫实验室参照系。

经验告诉我们,相对于不同的参照系,同一物体的同一运动,会表现为不同的形式。例如,一个自由下落的石块的运动,在地面

参照系中观察,它是直线运动。如果在近旁驶过的车厢内观察,即以行进的车厢为参照系,则石块将作曲线运动。物体运动的形式随参照系的不同而不同,这个事实叫**运动的相对性**。由于运动的相对性,当我们描述一个物体的运动时,就必须指明是相对于哪个参照系来说的。

确定参照系之后,为了定量地说明一个质点相对于此参照系的位置,就在此参照系上建立固定的坐标系。最常用的坐标系是笛卡尔直角坐标系。这个坐标系以参照系中某一固定点为原点 O ,

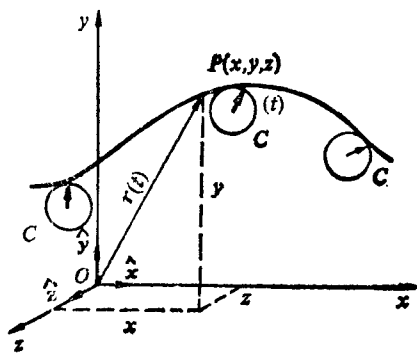


图 1.1 质点的位置表示

从此原点沿三个相互垂直的方向引三条固定的直线做为坐标轴,通常分别叫做 x, y, z 轴(图 1.1)。在这样的坐标系中,一个质点在任意时刻的位置,如 P 点,就可以用三个坐标值 (x, y, z) 来表示。

质点的运动就是它的位置随时间的变化。力学中只描述质点的位置如何随时间变化的这一部分内容,叫**质点运动学**,为了描述质点的运动,需要指出质点到达各个位置 (x, y, z) 的时刻 t 。这时刻 t 是由在坐标系中各处配置的许多同步的钟给出的。质点在运动中到达各处时,都有近旁的钟给出它到达相应各处的时刻 t 。这样,质点的运动,也就是它的位置随时间的变化,就可以用数学函数的形式表示出来。作为时间的函数的三个坐标值可以一般表示为

$$x=x(t), y=y(t), z=z(t) \quad (1.1)$$

这样的一组函数叫做质点的运动函数(有的书上叫运动方程)。

质点的位置可以用矢量的概念更简洁清楚地表示出来。为了

表示质点在时刻 t 的位置 P ，我们从原点向此点引一有向线段 OP ，并记作矢量 $\mathbf{r}$ 。 $\mathbf{r}$ 的方向说明了 P 点相对于坐标轴的方位， $\mathbf{r}$ 的大小（即它的模）表明了原点到 P 点的距离。方位和距离都知道了， P 点的位置也就确定了。用来确定质点位置的这一矢量 $\mathbf{r}$ 叫做质点的位置矢量，简称位矢，也叫矢径。质点在运动时，它的位矢是随时间改变的。这一改变可以一般地用下述函数形式来表示，即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.2)$$

这就是质点的运动函数的矢量表示式。

由于空间的几何性质，位置矢量总可以用它的沿三个坐标轴的分量表示。位置矢量 $\mathbf{r}$ 沿三个坐标轴的分量分别是 x, y, z 。以 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 分别表示沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量（即大小都是 1 个单位的矢量，有的书上分别用 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 表示），则位矢 $\mathbf{r}$ 和它的三个分量的关系就可以用下面的矢量合成公式表示

$$\mathbf{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \quad (1.3)$$

式中等号右侧各项分别是位矢 $\mathbf{r}$ 沿各坐标轴的分矢量，它们的大小分别等于各坐标值的大小，方向依各坐标值的正负而沿各该坐标轴的正向或负向。根据此式，(1.1) 和 (1.2) 式表示的运动函数就有如下的关系

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\hat{x} + y(t)\hat{y} + z(t)\hat{z} \quad (1.4)$$

(1.1) 式中各函数表示质点位置的各坐标值随时间的变化情况，可以看作是质点沿各坐标轴的分运动的表示式。质点的实际运动是由 (1.1) 式中三个函数的总体或 (1.2) 式表示的。(1.4) 式表明：质点的实际运动是各分运动的矢量合成，这个由空间的几何性质所决定的各分运动和实际运动的关系叫运动的叠加（或合成）原理。

§ 1.2 位移和速度

质点在一段时间内位置的改变叫做它在这段时间内的位移。设质点在 t 和 $t + \Delta t$ 时刻分别通过 P 和 P_1 点(图 1.2), 其位矢分别是 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$, 则由 P 引到 P_1 的矢量表示位矢的增量, 即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$$

这一位矢的增量就是质点在 t 到 $t + \Delta t$ 这一段时间内的位移。

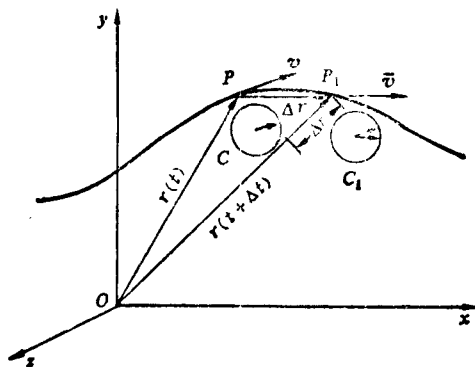


图 1.2 位移矢量和速度矢量

应该注意的是, 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量, 即有大小又有方向。其大小(即它的模)用 Δr 矢量的长度表示, 记做 $|\Delta \mathbf{r}|$ 。这一数量不能简写为 Δr , 因为 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$, $|\Delta \mathbf{r}|$ 是位矢的大小在 t 到 $t + \Delta t$ 这一段时间的增量。一般地说, $|\Delta \mathbf{r}| \triangleq \Delta r$ 。

位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和发生这段位移所经历的时间的比叫做质点在这一段时间内的平均速度。以 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示平均速度

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.5)$$