



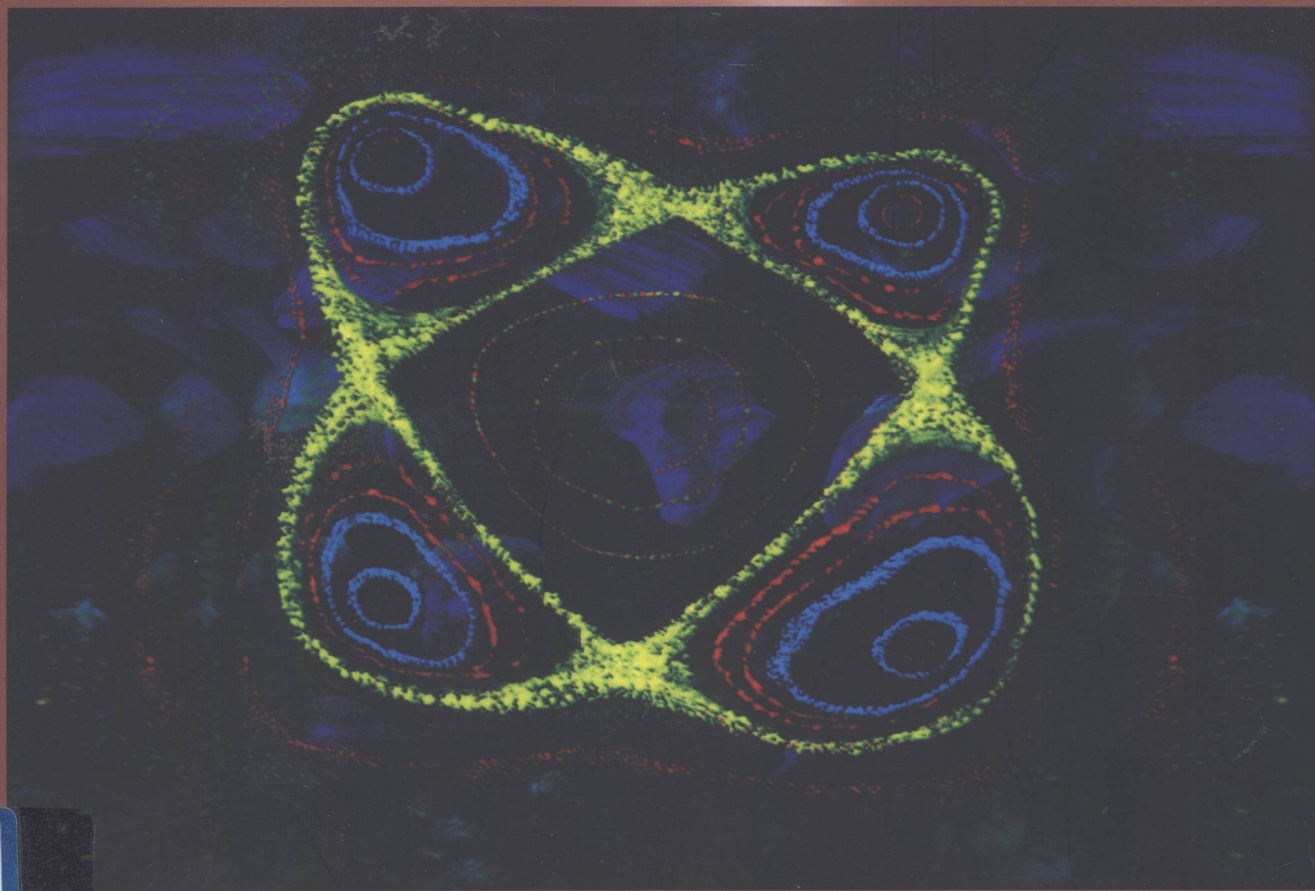
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 大学物理

Physics (上册)

(第三次修订本 **B**)

吴百诗 主编



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS





普通高等教育“十一五”国家级规划教材

荣获国家教委优秀教材一等奖

(第三次修订本 B)

大学物理

Physics

(上册)

主编 吴百诗

修订 焦兆焕 刘丹东



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS





## 内 容 提 要

本书是在总结了初版和前两次修订编写的经验,吸收了使用过本教材师生们意见和建议,并考虑了当前多数工科院校教学实际的基础上修订而成的。全书力图在切实加强基础理论的同时,突出训练和培养学生科学思维方法和分析解决问题的能力!

上册包括力学、热学等内容。

本书可供工科各专业,理科、师范各非物理专业,以及成人教育相关专业作为大学物理教材,也可供自学者使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理:(第三次修订本 B)上册/吴百诗主编. —西安:  
西安交通大学出版社,2009.10  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-5605-3261-5

I. 大... II. 吴... III. 物理学-高等学校-教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167642 号

书 名 大学物理(第三次修订本 B)上册  
主 编 吴百诗  
责任编辑 叶 涛 吴 杰

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)  
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280  
印 刷 咸阳新丽彩印务有限公司

开 本 850mm×1168mm 1/16 印张 14.75 字数 413 千字  
版次印次 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5605-3261-5/O·305  
定 价 32.50 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。  
订购热线:(029)82665248 (029)82665249  
投稿热线:(029)82664954  
读者信箱:jdjly@yahoo.cn

# 序

大学物理  
Physics

物理学研究的是物质的基本结构及物质运动的普遍规律,它是一门严格的、精密的基础科学。物理学的新发现,它所产生的新概念及新理论常常发展为新的学科或学科分支。它的基本概念、基本理论与实验方法向其他学科或技术领域的渗透总是毫无例外地促成该学科或技术领域发生革命性的变化,或里程碑式的进步。历史上几次重要的技术革命都是以物理学的进步为先导的。例如,电磁学的产生与发展导致了电力技术与无线电技术的诞生,形成了电力与电子工业;放射性的发现导致原子核科学的诞生与核能的应用,使人类进入了原子能时代;固体物理的发展导致晶体管与集成电路的问世,进而形成了强大的微电子工业与计算机产业;激光器的出现导致光纤通讯与光盘存储等一系列光电子技术与产业的诞生。微电子、光电子、计算机以及与之相匹配的软件正在使人类进入信息社会。

当今科学技术的发展以学科互相渗透交叉与综合为特征,这一特征在下一世纪将变得更为突出。物理学与技术科学的关系如此密切,以致工科大学生们物理基础的厚薄往往影响他们出校后工作的适应能力和发展的后劲。今天在校的工科大学生将成长为 21 世纪科学技术的生力军,投身祖国科技现代化与经济腾飞,学好物理课程更显得十分重要。

吴百诗教授主编的两卷本《大学物理》涵盖了工科大学生应当掌握的物理学各个部分。它是按国家教委颁布的工科“物理课程教学基本要求”,在多年教学实践的基础上,结合物理学的新进展编撰的,因而既全面系统又简明扼要地反映了物理学的主要进展。它不仅适合作工科大学生的物理教材,也适用于有志更新或强化自己物理知识的工程技术人员。研读本书,读者不仅会学到比较全面系统的物理知识,还将在思维方法与研究方法上受到训练与启迪。本书的出版无疑是对我国大学工科教育的一大贡献,特为之序。

中国科学院院士  
西安光机所所长 侯洵

1994 年 12 月



# 第三次修订说明

大学物理  
Physics

大学物理是大学低年级学生一门重要基础课,它的作用一方面是为学生打好必要的物理基础;另一方面是使学生初步学习科学的思维方法和研究问题的方法,这些都起着增强学生适应能力、开阔思路、激发探索和创新精神,提高人才科学素质的重要作用。打好物理基础不仅对学生在校学习起着十分重要的作用,而且对学生毕业后的工作和在工作中进一步学习新理论、新知识、新技术,不断更新知识都将产生深远的影响。

有一套便于教、便于学的好大学物理教材,是师生们共同的希望,对搞好教学过程也是十分重要的,因此也是教材编写者们的努力方向。

本书出版以来已经修订过两次,三个版本累计发行了二十多万套,几十所工科院校使用过,得到了不少师生的好评,并于1996年获得了国家教委优秀教材一等奖。

经较长时间的使用,普遍认为本书还是符合当前多数工科院校的教学实际,有利于为学生打好物理基础的。因此这次修订,注意保持了原有的风格和特点:即重基本概念、重物理基础理论、重理论联系实际、重分析问题解决问题能力的训练和培养。

本次修订未对书的主体内容和体系,特别是经典物理部分内容和体系做大的改动。因为修订者们认为,经典物理不但是学习工科各专业知识的理论基础,而且也是学习近代科学技术新理论、新知识的理论基础。不仅如此,经典物理当今在科学和技术领域仍然是应用最广泛的理论,而且大学物理中经典物理部分对训练和培养大学低年级学生科学思维方法和分析问题解决问题能力的作用是其它课程所不能代替的,因此这部分内容必须切实保证。对于近代物理部分,则要保证那些学习新理论、新知识所必须的近代物理中的一些基本概念、基本物理基础理论,并在不影响教学负担情况下适当加强近代内容是恰当的。修订者们认为,本书中经典物理和近代物理部分内容选择和相对比例是合适的,是符合我们当前教学实际的。

为了帮助读者正确、深入、灵活、及时地掌握新的教学内容,提高学习效率,也为了帮助读者进一步培养科学思维方法,提高分析问题解决问题的能力,在这次修订中我们专门编写了“想想看”、“复习思考题”和“精选例题”。

(1)在“想想看”中,有紧密联系相关定理、相关定律、相关例题,引导读者深入分析的问题;有结合容易发生错误的物理概念,让读者判断对错——错的话,错在哪里——的问题;还有对相关内容进行扩展的问题。问题一般不包含复杂的计算。

(2)“复习思考题”是与某节内容相关,有一定综合性和带有复习性质的思考题,通常比“想想看”中的问题难度大,有的带有简单的计算。

(3)“精选例题”是一些较典型的并应该较深入掌握的例题,结合对这些例题的分析和求解,较详细地介绍了解题的一般思路和方法。为使“精选例题”与一般例题加以区分,书中在精选例题上加了“■”标记。

以上做法是首次尝试,特别对于“想想看”,无论在题型选择、内容深浅、数量和设置等方面都还缺乏经验,希望在使用中听取师生们的意见,以便进一步完善。

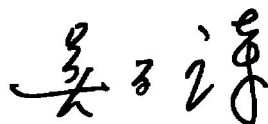
为扩大读者对新知识、新技术的眼界(如,我国的登月车原型、太阳系卫星的新定义等),补充教材和教学中不可能深入介绍的一些重要物理基础知识(如,时间基准、长度基准等),也为了使读者了解一些国内外新建设成就(如,青藏铁路、EAST 超导托卡马克核聚变实验装置等),我们精选了一些有关内容的图片并附有相应的说明,放在各章的章前、章后。

一个高级科学技术人才,不仅应有扎实的基础理论知识和丰富的专业知识,而且应当具备较高的文化艺术修养,这已是大家的共识。钱学森先生就曾说:“一个有科学创新能力的人,不但要有科学知识,还要有文化艺术修养。没有这些是不行的,我觉得艺术上的修养对我后来的科学工作很重要,它开拓科学创新思维。”为帮助读者提高文化艺术素质,我们尝试利用书中空白来介绍国内外名字画,并配以简单的说明,供读者欣赏。这样做,对于长时间学习较枯燥的定律定理和做习题,也是一种调剂。

这次的修订本同时出彩色版和黑白版供大家选用。对于彩色版我们没有经验,面临着许多新的问题,例如:内容的表达,版式的设计,彩色插图的绘制,色彩的控制等等。对此西安交通大学出版社的编辑们和西安交通大学大学物理教学中心的李普选老师付出了巨大劳动,编者对他们深表谢意。

本次修订工作的具体分工为:第1~9章(焦兆焕),第10、11、13章(吴百诗),第12、14~17章(刘丹东)。

参加本书第一版编写的有焦兆焕、张国柱、李甲科、张云祥、周瑞云、石学儒、刘国华、李锦泉、姚国维等老师;其中部分老师参加了本书第一次的修订工作;焦兆焕、李甲科老师参加了本书第二次的修订工作。本书第一版编写过程中还得到王小力、王军、杨英民、孟红星、党福喜等同志的协助,在此表示感谢。



2007年11月



人类的科学发展史表明,物理学是一切自然科学的基础,它的基本概念和基本规律被广泛应用到所有的自然科学领域;当代高新技术的发展也都源于对其研究对象物理规律的探索。我们人类都生活在由物理学基本规律所约束的时空中,物理学的发展对人类的物质观、时空观、世界观,以及对整个人类的文化都产生了极其深刻的影响,因此,物理学是人类现代文明之源。

物理学的每一个新思想、新发现,甚至那些原本看来是“纯”基础的研究成就,都会发展成为高新技术和产业。例如,20世纪30年代末,固体的能带理论的出现使得巴丁、布拉顿和肖克莱在1947年发明了晶体管,1958年基尔比和诺伊斯又发明了锗、硅集成电路,从此,半导体集成电路迅猛发展,出现了一系列新技术、高技术和新产品,以计算机为代表的信息电子产业已成为世界上最大的产业。又例如,在爱因斯坦受激辐射理论上,60年代初诞生了激光器,这又是一个划时代的物理技术应用成果,激光物理的进展为激光在制造业、通讯工业、国防工业以及医学等领域的发展提供了重要的技术基础。今天,物理学的研究仍在不断更新着人们对客观世界的认识。

“大学物理”课程是一门以研究和阐明物质的基本结构形态、基本运动规律和相互作用关系,为大学生提供全面系统的物理学基础为目标的基础课程。在学习“大学物理”课程中,不仅要掌握自然界的事实、定律、方程和解题技巧,更重要的要从整体上认识和掌握物理学。也就是说,通过物理学课程的学习,要认识物理学各个分支之间的关系,认识基本物理规律的普适性和适用范围,认识理论和应用之间的关系,认识物理思想和数学工具,从整体上准确地掌握物理学的基本内容,建立科学的物质观、时空观和世界观。

另外,在物理学课程的学习中,要关注物理学的基本概念、基本规律的产生和发现的历史过程,关注在物理学历史上曾经有过的实验和争论,学会举一反三、触类旁通的方法,如利用已掌握的物理学基本概念去理解和解释新的物理规律,增强学习的创新意识和创新能力的培养。在探讨科学的奥秘过程中,谁最有创新精神,敢于突破旧观念、旧理论的束缚,谁就能率先做出重要贡献。同时,创新也是深化学习的动力。因此,在学习上要勤于思考、善于提问、敢于尝试,多问几个为什么,使自己对物理学的内涵有深刻的理解,为将来做出创新性的工作打下良好的基础。

总之,要学好物理学,重要的是以学习物理基础知识为载体,系统掌握物理学的思维方式和研究方法,而不是死记硬背一些物理公式。因为这些基本知识、物理思想、思维方式和研究方法将会使学生在今后长期的学习工作中观察、分析和解决问题时得到重要的借鉴和应用。

吴百诗教授主持编写的大学物理教材,突出了在物理教育中知识传授和能力培养相结合的特色,集成了数名作者多年来丰富的教改研究和教学实践的经验,在打好学生必备的物理基础、激发学习兴趣、增强科学思考、分析和处理问题的能力、将现代科学技术成就融入基础课程教材等方面都下了很大功夫,为理工科学生全面掌握物理学提供了一个很好的范本。祝愿这本教材在教学实践中得到更加普遍的欢迎和推广,也祝愿读者从中深刻领悟到物理学的“伟大”。

中国工程院院士  
西安交通大学校长 郑南宁

2004年5月

## 1. 国际单位制和量纲

本书根据我国计量法,物理量的单位采用国际单位制,即 SI。SI 以长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和发光强度这 7 个最重要的、相互独立的基本物理量的单位作为基本单位,称为 SI 基本单位。

物理量是通过描述自然规律的方程或定义新物理量的方程而彼此联系着的。因此,非基本量可根据定义或借助方程用基本量来表示,这些非基本量称为导出量,它们的单位称为导出单位。

某一物理量  $Q$  可以用方程表示为基本物理量的幂次乘积

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\xi J^\eta$$

这一关系式称为物理量  $Q$  对基本量的量纲。式中  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \xi$  和  $\eta$  称为量纲的指数,  $L, M, T, I, \Theta, N, J$  则分别为 7 个基本量的量纲。下表列出几种物理量的量纲。

量	量 纲	量	量 纲
速度	$LT^{-1}$	磁通	$L^2MT^{-2}I^{-1}$
力	$LMT^{-2}$	亮度	$L^{-2}J$
能量	$L^2MT^{-2}$	摩尔熵	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}N^{-1}$
熵	$L^2MT^{-2}\Theta^{-1}$	法拉第常数	$TN^{-1}$
电势差	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	平面角	1
电容率	$L^{-3}M^{-1}T^4I^2$	相对密度	1

所有量纲指数都等于零的量称为量纲一的量。量纲一的量的单位符号为 1。导出量的单位也可以由基本量的单位(包括它的指数)的组合表示。因为只有量纲相同的物理量才能相加、减;只有两边具有相同量纲的等式才能成立,故量纲可用于检验算式是否正确。对量纲不同的项相乘、除是没有限制的。此外,三角函数和指数函数的自变量必须是量纲一的量。

在从一种单位制向另一单位制变换时,量纲也是十分重要的。

## 2. 国际单位制中的词头

国际单位制中的词头用于构成倍数单位(十进倍数单位与分数单位),但不能单独使用。



名 称	符号	代表的因数	名 称	符号	代表的因数
尧[它](yotta)	Y	$10^{24}$	分(dec)	d	$10^{-1}$
泽[它](zetta)	Z	$10^{21}$	厘(centi)	c	$10^{-2}$
艾[可萨](exa)	E	$10^{18}$	毫(milli)	m	$10^{-3}$
拍[它](peta)	P	$10^{15}$	微(micro)	$\mu$	$10^{-6}$
太[拉](tera)	T	$10^{12}$	纳[诺](nano)	n	$10^{-9}$
吉[咖](giga)	G	$10^9$	皮[可](pico)	p	$10^{-12}$
兆(mega)	M	$10^6$	飞[母托](femto)	f	$10^{-15}$
千(kilo)	k	$10^3$	阿[托](atto)	a	$10^{-18}$
百(hecto)	h	$10^2$	仄[普托](zepto)	z	$10^{-21}$
十(deca)	da	$10^1$	幺[科托](yocto)	y	$10^{-24}$

### 3. 基本物理常量表(CODATA\* 1998年的推荐值)

物 理 量	符 号	数 值
真空中光速	$c$	$299\,792\,458\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
真空磁导率	$\mu_0$	$4\pi\times 10^{-7}=12.566\,370\,614\dots\times 10^{-7}\text{ N}\cdot\text{A}^{-2}$
真空电容率	$\epsilon_0$	$8.854\,187\,817\dots\times 10^{-12}\text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$
万有引力常数	$G$	$6.673(10)\times 10^{-11}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
普朗克常数	$h$	$6.626\,068\,76(52)\times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{s}$
元电荷	$e$	$1.602\,176\,462(63)\times 10^{-19}\text{ C}$
磁通量子	$\Phi_0$	$2.067\,833\,636(81)\times 10^{-15}\text{ Wb}$
玻尔磁子	$\mu_B$	$9.274\,008\,99(37)\times 10^{-24}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$
核磁子	$\mu_N$	$5.050\,783\,17(20)\times 10^{-27}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$
里德伯常数	$R_\infty$	$10\,973\,731.568\,548(83)\text{ m}^{-1}$
玻尔半径	$a_0$	$0.529\,177\,208\,3(19)\times 10^{-10}\text{ m}$
电子质量	$m_e$	$9.109\,381\,88(72)\times 10^{-31}\text{ kg}$
电子磁矩	$\mu_e$	$-9.284\,763\,62(37)\times 10^{-24}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$
质子质量	$m_p$	$1.672\,621\,58(13)\times 10^{-27}\text{ kg}$
质子磁矩	$\mu_p$	$1.410\,606\,633(58)\times 10^{-26}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$
中子质量	$m_n$	$1.674\,927\,16(13)\times 10^{-27}\text{ kg}$
中子磁矩	$\mu_n$	$-0.966\,236\,40(23)\times 10^{-26}\text{ J}\cdot\text{T}^{-1}$
阿伏伽德罗常数	$N_A$	$6.022\,141\,99(47)\times 10^{23}\text{ mol}^{-1}$
摩尔气体常量	$R$	$8.314\,472(15)\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
玻耳兹曼常量	$k$	$1.380\,650\,3(24)\times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$
斯特藩常量	$\sigma$	$5.670\,400(40)\times 10^{-8}\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$

### 4. 保留单位和标准值

名 称	符 号	数 值
电子伏特	eV	$1.602\,176\,462(63)\times 10^{-19}\text{ J}$
原子质量单位	u	$1.660\,538\,73(13)\times 10^{-27}\text{ kg}$
标准大气压	atm	101 325 Pa
标准重力加速度	gn	$9.806\,65\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
康普顿波长	$\lambda_C$	$2.426\,310\,58(22)\times 10^{-12}\text{ m}$

\* CODATA:国际物理和化学常量委员会。

# 目 录

大学物理  
Physics

序(侯洵)

序(郑南宁)

第三次修订说明

物理量的量纲和单位

## 第 1 章 质点运动学 ..... 1

- 1.1 确定质点位置的方法 2
- 1.2 质点的位移、速度和加速度 4
- 1.3 用直角坐标表示位移、速度和加速度 7
- 1.4 用自然坐标表示平面曲线运动中的速度和加速度 12
- 1.5 圆周运动的角量表示 角量与线量的关系 17
- 1.6 不同坐标系中的速度和加速度变换定理简介 19
- 习题 22

## 第 2 章 牛顿运动定律 ..... 25

- 2.1 牛顿运动三定律 26
- 2.2 力学中常见的几种力 29
- 2.3 牛顿运动定律的应用 33
- 2.4 牛顿运动定律的适用范围 38
- 习题 39

## 第 3 章 功和能 ..... 43

- 3.1 功 44
- 3.2 几种常见力的功 46
- 3.3 动能定理 49
- 3.4 势能 机械能守恒定律 53
- 3.5 能量守恒定律 59
- 习题 61

## 第 4 章 冲量和动量 ..... 65

- 4.1 质点动量定理 66
- 4.2 质点系动量定理 69
- 4.3 质点系动量守恒定律 71
- \* 4.4 质心 质心运动定理 76
- 习题 80



## 第5章 刚体力学基础 动量矩 ..... 83

- 5.1 刚体和刚体的基本运动 84
- 5.2 力矩 刚体绕定轴转动微分方程 88
- 5.3 绕定轴转动刚体的动能 动能定理 93
- 5.4 动量矩和动量矩守恒定律 96
- 习题 104

## 第6章 机械振动基础 ..... 109

- 6.1 简谐振动 110
- 6.2 谐振动的合成 120
- \* 6.3 阻尼振动和受迫振动简介 124
- 习题 127

## 第7章 机械波 ..... 131

- 7.1 机械波的产生和传播 132
- 7.2 平面简谐波 134
- 7.3 波的能量 140
- 7.4 惠更斯原理 143
- 7.5 波的干涉 145
- 7.6 驻波 147
- 7.7 多普勒效应 151
- 习题 154

## 第8章 热力学 ..... 159

- 8.1 热学的研究对象和研究方法 160
- 8.2 平衡态 理想气体状态方程 160
- 8.3 功 热量 内能 热力学第一定律 163
- 8.4 准静态过程中功和热量的计算 165
- 8.5 理想气体的内能和  $C_V$ 、 $C_p$  167
- 8.6 热力学第一定律对理想气体在典型准静态过程中的应用 168
- 8.7 绝热过程 171
- 8.8 循环过程 176
- 8.9 热力学第二定律 180
- 8.10 可逆与不可逆过程 181
- 8.11 卡诺循环 卡诺定理 183
- 习题 186





## 第9章 气体动理论 ..... 191

9.1	分子运动的基本概念	192
9.2	气体分子的热运动	193
9.3	统计规律的特征	196
9.4	理想气体的压强公式	197
9.5	麦克斯韦速率分布定律	200
9.6	温度的微观本质	204
9.7	能量按自由度均分定理	205
9.8	玻耳兹曼分布律	208
9.9	气体分子的平均自由程	209
9.10	气体内的迁移现象	211
9.11	热力学第二定律的统计意义和熵的概念	212
*9.12	实际气体的性质	215
	习题	219

## 索 引



# 质点运动学

## 第1章

Physics

大学物理

### 1927年第5次索尔维会议

索尔维物理会议是著名的国际物理会议，创立于1911年，以后每3~5年举行一次，到1982年已举行过18次。前17次都在布鲁塞尔举行，第18次会议在美国举行，美籍华裔物理学家杨振宁应邀出席。

索尔维会议与传统的学术会议不同，索尔维会议致力于讨论物理学发展中有待解决的关键性问题，一般传统的学术会议只公布已经获得一定成果的科学研究工作。索尔维会议的另一个特点是参加会议的人数不多，但参加者都是来自世界各国最杰出的物理学家，他们在会议上就一个专题进行讨论。这张照片是1927年第5次索尔维会议参加者的合影。照片上29人中有17人先后获得过诺贝尔物理学奖，未获奖者也都在物理学中做出过重大贡献。

第5次索尔维会议讨论的主题是“电子和光子”。在这次会上，以玻尔为代表的哥本哈根派和以爱因斯坦为代表的一派，就量子力学有关概念和理论进行了十分激烈的争论，这一争论被称为玻尔-爱因斯坦争论。这次争论以爱因斯坦“惨败”而告终。

此次会议之后，尽管争论并未休止，但量子力学被迅速运用到各个微观领域，并获得极大成功。



第1排左起：欧文·朗缪尔、马克斯·普朗克、玛丽·居里、亨德里克·洛伦兹、阿尔伯特·爱因斯坦、保罗·朗之万、Ch. E. Guye、C. T. R. 威尔逊、O. W. 里查森

第2排左起：彼得·德拜、马丁·努森、威廉·劳伦斯·布喇格、Hendrik Anthony Kramers、保罗·狄喇克、亚瑟·康普顿、路易·德布罗意、马克斯·玻恩、尼尔斯·玻尔

第3排左起：奥古斯特·皮卡尔德、E. Henriot、保罗·埃伦菲斯特、Ed. Herzen、Théophile de Donder、欧文·薛定谔、E. Verschaffelt、沃尔夫冈·泡利、沃纳·海森伯、R. H. 福勒、里昂·布里渊

运动学以几何观点来研究和描述物体的机械运动,而不考虑物体的质量及其所受的力。本章讨论质点运动学,在引入质点、参考系、坐标系等概念的基础上,介绍确定质点位置的方法及描述质点运动的重要物理量——位移、速度和加速度,并重点讨论质点匀变速直线运动和匀变速圆周运动等。

## 1.1 确定质点位置的方法

### 1.1.1 质点的概念

任何物体都有大小和内部结构。物体运动时,一般说来,其上各点的运动状态都是各不相同的。如果在所研究的问题中,物体上各点运动状态的差异只占很次要的地位,我们就可以忽略物体的大小和内部结构,把它看成一个有质量的几何点,叫做质点。例如在研究与地球绕太阳公转的有关问题时,地球的平均半径虽然大到  $6370 \text{ km}$ ,但是比起地球和太阳之间的平均距离(约为  $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ )来仍然是微不足道的,地球上各点运动状态的差别可以忽略不计,因而可以把地球看成质点。再如,原子大小的数量级只有  $10^{-10} \text{ m}$ ,但在研究原子结构问题时,却不能把它当作质点。必须指出,一个物体能否被看做质点,主要取决于所研究问题的性质。

质点是一个十分有用的简化模型。在不少实际问题中,可以把所研究的对象近似地看做质点;而在另一些问题中,如研究刚体、流体、弹性体的运动时,一般说来不能把整个研究对象看作质点,但可以把它当作是由大量质点组成的。这样,通过研究各质点的运动规律,就可以了解整个研究对象的运动规律,因此研究质点的运动规律也是研究一般物体运动规律的基础。

质点是从客观实际中抽象出来的理想模型,后面将要介绍的刚体、线性弹簧振子、理想气体、点电荷等都是理想模型。在科学研究中,常根据所研究问题的性质,突出主要因素,忽略次要因素,建立理想模型。这是经常采用的一种科学思维方法。这样做,可以使问题大为简化但又不失其客观真实性。值得注意的是,任何一个理想模型都有其适用条件,在一定条件下,它能否正确反映客观实际,还要通过实践来检验。

### 1.1.2 确定质点位置的方法

要确定一个质点的位置,或者要描述一个质点的运动,都必须选择一个或几个彼此没有相对运动

的物体作为“参考”。这些被选来作为“参考”的物体称为参考系。离开参考系而谈质点的位置是毫无意义的。确定质点相对参考系位置的方法,通常有以下几种。

#### 1. 坐标法

设某时刻质点在  $P$  点,建立一个固结在参考系上的三维直角坐标系  $Oxyz$ ,如图 1.1 所示,这样  $P$  点的位置就可用直角坐标  $(x, y, z)$  来确定。

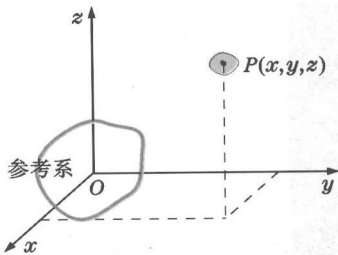


图 1.1

质点在平面上运动时,可在该平面上建立一个二维直角坐标系  $Oxy$ ,质点的位置可用两个坐标  $(x, y)$  来确定。

最简单的情况是质点沿直线运动,这时可在该直线上建立一个坐标轴,例如  $x$  轴,质点的位置只需一个坐标  $x$  就可确定了。

用坐标法确定质点的位置,不限于直角坐标系,根据问题的不同特点,也可以选用其他坐标系。如平面极坐标系、球坐标系、圆柱坐标系等,这里就不一一介绍了。

#### 2. 位矢法

质点的位置,还可用一个矢量来确定。设某时刻质点在  $P$  点,我们在选定的参考系上任选一固定点  $O$ ,由  $O$  点向  $P$  点作一矢量  $r$ ,如图 1.2 所示。 $r$  的大小和方向完全确定了质点相对参考系的位置,称为位置矢量,简称位矢。

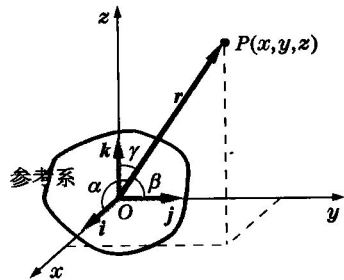


图 1.2

以位矢  $r$  的起点  $O$  为原点,建立直角坐标系  $Oxyz$ ,这样  $P$  点的直角坐标  $(x, y, z)$  也就是位矢  $r$  沿坐标轴  $x, y, z$  的投影。用  $i, j, k$  分别表示沿  $x, y, z$  三个坐标轴正方向的单位矢量,则位矢为

$$r = xi + yj + zk \quad (1.1)$$

例如,一质点  $t$  时刻的直角坐标为  $(-3 \text{ cm}, 2 \text{ cm}, 5 \text{ cm})$ ,则该质点在  $t$  时刻以坐标原点为起点的位矢为  $r = -3i + 2j + 5k$ ,位矢  $r$  沿  $x, y, z$  三坐标轴的投影分别为  $x = -3 \text{ cm}, y = 2 \text{ cm}, z = 5 \text{ cm}$ 。



用  $|\mathbf{r}|$  表示  $r$  的大小, 则

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2)$$

令  $\alpha, \beta, \gamma$  分别表示  $\mathbf{r}$  与  $x, y, z$  三个坐标轴的夹角, 则有

$$\left. \begin{aligned} \cos\alpha &= \frac{x}{|\mathbf{r}|} \\ \cos\beta &= \frac{y}{|\mathbf{r}|} \\ \cos\gamma &= \frac{z}{|\mathbf{r}|} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

### 3. 自然法

在有些情况下, 质点相对参考系的运动轨迹是已知的, 例如, 以地面为参考系, 火车 (视为质点) 的运动轨迹 (铁路轨道) 是已知的。在这种情况下, 可以采用如下的方法确定质点的位置: 首先在已知的运动轨迹上任选一固定点  $O$ , 然后规定从  $O$  点起, 沿轨迹的某一方向 (例如向右) 量得的曲线长度  $s$  取正值, 这个方向常称为自然坐标的正向; 反之为负向,  $s$  取负值, 如图 1.3 所示。这样质点在轨迹上的位置就可以用  $s$  唯一地

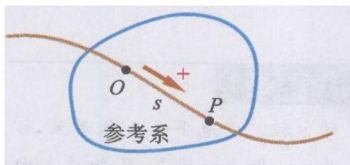


图 1.3

确定, 这种确定质点位置的方法称为自然法。  $O$  点称为自然坐标的原点,  $s$  称为自然坐标。显然  $s$  和直角坐标  $(x, y, z)$  一样是代数量, 其大小反映了质点与原点之间的曲线距离, 其正负表明这个曲线距离是从轨迹上  $O$  点起沿哪个方向量得的。

#### 1.1.3 运动学方程

当质点相对参考系运动时, 用来确定质点位置的直角坐标  $(x, y, z)$ 、位矢  $\mathbf{r}$ 、自然坐标  $s$  等都将随时间  $t$  变化, 都是  $t$  的单值连续函数。

用直角坐标  $(x, y, z)$  表示质点的位置时, 有

$$\left. \begin{aligned} x &= f_1(t) \\ y &= f_2(t) \\ z &= f_3(t) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

用位矢  $\mathbf{r}$  表示质点的位置时, 有

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.5)$$

用自然坐标  $s$  表示质点的位置时, 有

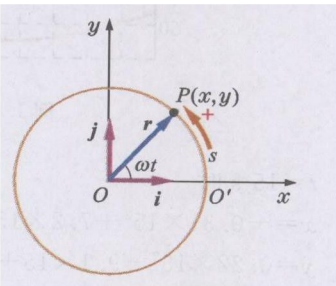
$$s = f(t) \quad (1.6)$$

方程 (1.4)、(1.5)、(1.6) 从数学上确定了在选定的参考系中质点相对坐标系的位置随时间变化的关系, 称为质点运动学方程。方程组 (1.4) 称为用直角

坐标表示的质点运动学方程, 方程 (1.5) 和 (1.6) 分别称为用位矢和用自然法表示的质点运动学方程。

知道了质点运动学方程, 就可以确定质点在任意时刻的位置, 因而也就知道了质点运动的轨迹。此外, 利用已知的质点运动学方程, 还可以确定质点在任意时刻的速度和加速度等。根据具体条件确定质点运动学方程, 是研究质点运动学的一个重要环节。

例 1.1 一质点作匀速圆周运动, 圆周半径为  $r$ , 角速度为  $\omega$ , 如图所示。试分别写出用直角坐标、位矢、自然法表示的质点运动学方程。



例 1.1 图

解 以圆心  $O$  为原点, 建立直角坐标系  $Oxy$ , 取质点经过  $x$  轴上  $O'$  点的时刻为计时起始时刻, 即  $t=0$ 。设  $t$  时刻质点位于  $P$ ,  $P$  点的直角坐标为  $(x, y)$ , 见图。

根据题设条件, 质点作匀速圆周运动,  $\angle O'OP = \omega t$ , 用直角坐标表示的质点运动学方程为

$$x = r \cos \omega t$$

$$y = r \sin \omega t$$

从圆心  $O$  向  $P$  点作位矢  $\mathbf{r}$ , 用位矢表示的质点运动学方程为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} = r \cos \omega t \mathbf{i} + r \sin \omega t \mathbf{j}$$

取轨迹与  $x$  轴的交点  $O'$  为自然坐标原点, 以逆时针方向为自然坐标正向, 用自然法表示的质点运动学方程为

$$s = r \omega t$$

从本题求解中可以看出, 为了正确写出质点运动学方程, 先要选定参考系、坐标系, 明确起始条件及题设其他条件等, 找出质点坐标随时间变化的函数关系即得。

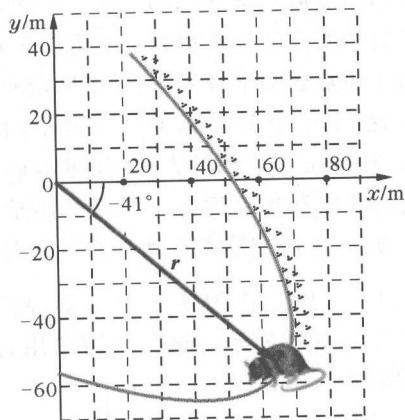
例 1.2 一只小田鼠在雪地里飞跑, 身后留下一串清晰的脚印, 如图。已知用直角坐标表示的小田鼠 (看作质点) 运动学方程为

$$x = -0.31t^2 + 7.2t + 28$$

$$y = 0.22t^2 - 9.1t + 30$$

式中  $t$  的单位为  $s$ ;  $x, y$  的单位为  $m$ 。试求  $t=15 s$  时小田鼠的位矢。

解 根据已知条件, 小田鼠的位矢可写成  $\mathbf{r} = (-0.31t^2 + 7.2t + 28)\mathbf{i} + (0.22t^2 - 9.1t + 30)\mathbf{j}$



例 1.2 图

$t = 15 \text{ s}$  时

$$x = -0.31 \times 15^2 + 7.2 \times 15 + 28 = 66 \text{ m}$$

$$y = 0.22 \times 15^2 - 9.1 \times 15 + 30 = -57 \text{ m}$$

$$\mathbf{r} = 66\mathbf{i} - 57\mathbf{j}$$

$r$  的大小为

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{66^2 + (-57)^2} = 87 \text{ m}$$

$r$  的方向可用  $r$  与  $x$  轴正方向的夹角表示为

$$\theta = \arctan \frac{y}{x} = \arctan \frac{-57}{66} = -41^\circ$$

### 想想看

1.1 一个物体能否被看作质点,你认为主要由以下三个因素中哪个因素决定:①物体的大小和形状;②物体的内部结构;③所研究问题的性质。

1.2 一个质点在运动中,如果位矢的模( $|\mathbf{r}|$ )为常量,则该质点的运动情况可能是:①在一直线上运动;②在一平面上作任意曲线运动;③在以位矢起点为中心的球面上作任意曲线运动。

1.3 由质点运动学方程,可以确定质点任意时刻的位置,也可以确定质点任意位置对应的的时间。试给出例 1.2 中与小鼠的位置  $\mathbf{r}_1 = 56.25\mathbf{i} - 10\mathbf{j}$  所对应的时刻  $t_1$ ,并在图上画出  $\mathbf{r}_1$ 。

### 复习思考题

1.1 如果有人问你,地球与一粒小米哪个可以看作质点,你将怎样回答?

1.2 说人造地球卫星的轨迹形状近乎圆形,这是以什么为参考系的?若以太阳为参考系,人造地球卫星运行的轨迹大体上是什么样子?

1.3 什么是质点运动学方程?你学过几种形式的质点运动

学方程?以地平面为参考系,以与水平面夹角为  $\alpha$ 、初速度为  $v_0$ 。抛出一质点,已知质点抛出后的轨迹为抛物线,试用坐标法和位矢法写出被抛出质点的运动学方程。

1.4 某电子的位置矢量为  $\mathbf{r} = 5.0\mathbf{i} - 3.0\mathbf{j} + 2.0\mathbf{k}(\text{m})$ 。试求:(a)  $r$  的大小;(b) 在直角坐标系中画出此矢量。

## 1.2 质点的位移、速度和加速度

### 1.2.1 位移

质点运动时,其位置将随时间变化。设质点沿轨迹  $LM$  运动,时刻  $t$ ,质点位于  $P$ ,位矢为  $\mathbf{r}(t)$ ;时刻  $t + \Delta t$ ,质点位于  $Q$ ,位矢为  $\mathbf{r}(t + \Delta t)$ ,如图 1.4 所示。在时间(时间间隔)  $\Delta t$  内质点位置的变化可用

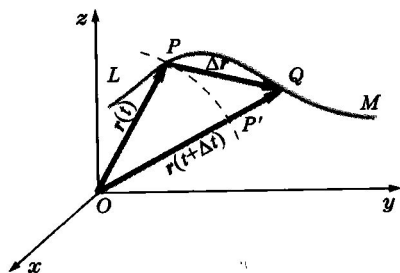


图 1.4

由  $P$  向  $Q$  所作的矢量  $\vec{PQ}$  来描述,  $\vec{PQ}$  的大小等于  $P$  点与  $Q$  点之间的直线距离,方向由起点  $P$  指向终点  $Q$ ,矢量  $\vec{PQ}$  称为质点在时间  $\Delta t$  内的位移。

由图可知

$$\vec{PQ} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t) = \Delta \mathbf{r} \quad (1.7)$$

即质点在某一时间段内的位移等于同一段时间内位矢的增量。

位移和位矢不同,位矢反映某一时刻质点的位置,位移则描述某段时间内质点始末位置的变化。如图 1.5 所示,设西安火车站在  $O$  点,碑林和大雁塔分别在  $B$  点和  $D$  点,某游客于时刻  $t$  从碑林出发,经过时间  $\Delta t$  后于时刻  $t'$  到达大雁塔,现以  $O$  为原点,则矢量  $\mathbf{r}_1$  和  $\mathbf{r}_2$  分别表示  $t$  时刻和  $t'$  时刻游客的位置,它们都是位矢,而矢量  $\Delta \mathbf{r} (= \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1)$  表示的是  $\Delta t (= t' - t)$  内游客始末位置的变化,是位移。



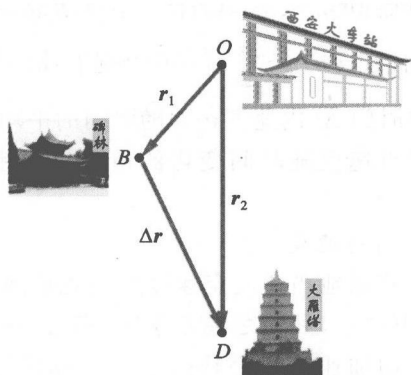


图 1.5

对于相对静止的不同坐标系来说,位矢依赖于坐标系的选择,而位移则与所选取的坐标系无关。对此读者可以自己绘图证明。

位移只反映出一段时间始末质点位置的变化,它不涉及质点位置变化过程的细节。在图 1.4 中,位移  $\Delta r$  的大小虽然等于由  $P$  到  $Q$  的直线距离,但这并不意味着质点是从  $P$  沿直线  $PQ$  移动到  $Q$ 。时间  $\Delta t$  内质点从  $P$  沿曲线  $\widehat{PQ}$  移动到  $Q$  点所经历路程的长度,即弧线  $\widehat{PQ}$  的长度,称为质点在该段时间内的路程。路程是算术量。一般情况下,某段有限时间内质点位移的大小不等于这段时间内质点所经过的路程。

还要指出的是,位移  $\Delta r$ (即位矢的增量)的大小  $|\Delta r|$  与位矢大小的增量  $\Delta r$  一般是不相等的。设时间  $\Delta t$  内位矢大小的增量为  $\Delta r$ ,即

$$\Delta r = |r(t+\Delta t)| - |r(t)| \quad (1.8)$$

在图 1.4 中,以  $O$  为圆心,以  $r(t)$  的长度为半径作圆弧,它与位矢  $r(t+\Delta t)$  相交于  $P'$ ,则  $\overline{P'Q}$  即为  $\Delta r$ ,而位移的大小则为  $|\Delta r| = \overline{PQ}$ 。因此一般情况下,  $|\Delta r| \neq \Delta r$ 。例如:一质点以半径  $R$  作匀速圆周运动,以圆心为原点,半个周期内质点位移的大小  $|\Delta r| = 2R$ ,位矢大小的增量为  $\Delta r = R - R = 0$ 。

大小和方向随时间变化的任一矢量  $A$  ( $A$  可以是位矢也可以是后面即将介绍的速度矢量  $v$  或加速度矢量  $a$  等)在某段时间  $\Delta t$  内增量的大小  $|\Delta A|$  与同一时间内该矢量大小的增量  $\Delta A$ ,一般说来不相等。初学者对此往往容易搞错,故特别加以说明。

### 1.2.2 速度

#### 1. 平均速度

设质点沿轨迹  $LM$  按运动方程  $r = r(t)$  作一般

曲线运动,时间  $\Delta t$  内质点的位移为  $\Delta r$ ,如图 1.4 所示。质点的位移  $\Delta r$  与发生这个位移所经历的时间  $\Delta t$  之比,称为这一段时间内质点的平均速度,用  $\bar{v}$  表示,即

$$\bar{v} = \frac{r(t+\Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1.9)$$

平均速度是矢量,其方向与位移  $\Delta r$  的方向相同。它表示在时间  $\Delta t$  内位矢  $r(t)$  随时间的平均变化率。

平均速度的大小  $|\bar{v}| = \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right|$ 。显然,一般情况下  $|\bar{v}| \neq \left| \frac{\Delta r}{\Delta t} \right|$ 。

平均速度的大小与平均速率是不同的。平均速率等于质点经历的路程  $\Delta s$  与经历这段路程所用时间  $\Delta t$  之比,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

平均速度只能对时间  $\Delta t$  内质点位置随时间变化的情况作一粗略地描述。

#### 2. 瞬时速度

为了精确地描述质点的运动状态,可将时间  $\Delta t$  无限减小,并使之趋近于零,即  $\Delta t \rightarrow 0$ ,这样,质点的平均速度就会趋向于一个确定的极限矢量,见图 1.6,这个极限矢量称为  $t$  时刻的瞬时速度,简称速度,用  $v$  表示,即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1.10)$$

即速度等于位矢对时间的一阶导数。只要知道了用位矢表示的质点运动学方程  $r = r(t)$ ,就可以求出质点的速度。

从速度的定义式(1.10)可知, $t$  时刻质点速度  $v$  的方向就是当  $\Delta t \rightarrow 0$  时平均速度  $\bar{v}$  的极限方向。由图 1.6 可以看出,当  $\Delta t \rightarrow 0$  时, $Q$  点将趋近于  $P$  点, $\bar{v}$  将变得与轨迹上  $P$  点处的切线重合并指向运动一方,故  $t$  时刻质点速度沿着该时刻质点所在位置  $P$  点轨迹的切线方向,并指向质点运动的一方。质点在作曲线运动时,速度沿轨迹的切线方向,这在日常生活中经常可见,如转动雨伞,水滴将沿切线方向离开雨伞等。

速度的大小  $|v| = \left| \frac{dr}{dt} \right|$  常称为速率,速率是算术量,恒取正值。一般情况下,  $|v| \neq \left| \frac{dr}{dt} \right|$ 。例如质点在作圆周运动时,  $\frac{dr}{dt} = 0$ ,而  $|v| \neq 0$ 。