



普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理

UNIVERSITY PHYSICS

第2版

上册

■ 许瑞珍 贾谊明 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

大学物理

上册

第 2 版

许瑞珍 贾谊明 编著

吕团孙 主审

机械工业出版社

本套教材是福建师范大学教材建设基金资助项目,分上、下两册,本书是上册。

本书是在深入调研和分析理工科各专业的大学物理教材和教改情况、培养模式、现代教学需求的基础上,融入作者长期从事大学物理教学的经验 and 体会编著而成的。本书充分考虑到学生理解和掌握物理基本概念和定律的实际需要和目前普通高校每年扩大招生的实际情况,尽量采用较基础的数学语言与基础理论来分析、推导物理原理、定理和引入物理定律,注重加强基本现象、概念、原理的阐述,讲述深入浅出;为了体现和增强经典物理学中的现代观点和气息,书中适度介绍了近代物理学的成就和新技术。精选的例题既注意避免应用到较繁、较深的数学理论,又能较好地配合理解核心内容。本书内容包括质点运动学、质点动力学、刚体力学、真空中的静电场、静电场中的导体与电介质、恒定电流、稳恒磁场、磁场中的磁介质、电磁感应等。每章设有相关著名物理学家简介、阅读材料、思考题和习题。

本书是普通高校理工科各专业的大学物理教材,也可作为文科和高等职业学校相关专业学生的教材或中学物理老师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理.上册/许瑞珍,贾谊明编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2012.9

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-39372-6

I. ①大… II. ①许…②贾… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第182168号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联 陈崇昱

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:马精明 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年10月第2版第1次印刷

184mm×260mm·19.25印张·471千字

标准书号:ISBN 978-7-111-39372-6

定价:33.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是作者根据教育部最新的《重点高等学校物理课程教学改革指南》及教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),从培养21世纪工程技术人才在物理知识、能力和素质方面的要求这一目标出发,在对各种教学资源进行整合,并融入多年的教学经验,努力把握教材内容的难度、广度、深度的基础上编著而成的,目的是使其能更好地满足各类理工科专业学生的使用。

本书为了做到实用、好用,加强了基本现象、基本概念、基本原理的阐述,且讲述深入浅出,增加了典型例题,并在部分例题后给出了相应的思考题,以拓延思路。每章后还围绕教学要求精选了数量和难度适中的思考题、习题。

为适应教学内容现代化的要求,本书在阐述经典物理的同时,渗透、穿插了部分近现代物理内容,如高新技术中的物理原理及最新的科技进展等,以增强教材的现代气息。

为落实能力与素质培养的要求,书中突出强调了“物理模型”的地位和作用,并相应安排了较多的相关插图,还在每章后面提供了适量的、与教材内容相关的阅读材料和相应著名物理学家的简介,以利于学生掌握科学方法,培养他们的创新精神,提高其综合素质和思维能力。

书中带“*”号的内容可根据各专业的实际课时酌情安排选用。

本书由许瑞珍、贾谊明编著。具体分工是:第1~3章由贾谊明(福建师范大学)编著;第4~9章由许瑞珍(福建师范大学)编著。全书由许瑞珍统稿。

本书由吕团孙教授主审。同时,福建师范大学物理与光电信息科技学院吕团孙、黄志高、李述华等多位教授,李山东、林秀敏等多位博士和老师们通过会议的形式对本书进行了讨论审阅,其间提出了许多宝贵的意见和建议,特在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了中国地质大学陈刚教授的大力支持和热心指导,也在此一并表示由衷的谢意。

由于编者的水平有限,书中的缺点和错误在所难免。衷心希望使用本书的老师、同学多提宝贵意见和建议。

编 者

目 录

前言	
绪论	1
第1章 质点运动学	6
1.1 质点运动的描述	6
1.2 直线运动	9
1.3 曲线运动	12
1.4 相对运动	17
思考题	19
习题	20
阅读材料	
茫茫宇宙	22
物理学家简介	
伽利略	26
第2章 质点动力学	28
2.1 动量与牛顿运动定律	28
2.2 单位制和量纲	34
2.3 力学相对性原理和非惯性系	35
2.4 动量定理 动量守恒定律	38
2.5 变质量物体的运动	42
2.6 功 动能定理	44
2.7 功能原理 机械能守恒定律	48
2.8 碰撞	53
2.9 质心 质心运动定理	55
思考题	58
习题	59
阅读材料	
一、线性与非线性系统	62
二、混沌简介	64
物理学家简介	
牛顿	68
第3章 刚体力学	72
3.1 刚体的运动	72
3.2 力矩 转动定律 转动惯量	73
3.3 刚体定轴转动的动能定理	78
3.4 角动量定理 角动量守恒定律	81
3.5 刚体的平面平行运动	86
思考题	88
习题	89
阅读材料	
对称性与物理学	92
第4章 真空中的静电场	96
4.1 电荷	96
4.2 库仑定律	97
4.3 电场强度	100
4.4 电通量 高斯定理	104
4.5 静电场的环路定理	109
4.6 电势能、电势	110
4.7 电场强度与电势梯度	114
4.8 静电场中的电偶极子	117
思考题	118
习题	118
阅读材料	
静电放电 静电防护 静电的应	
用	120
物理学家简介	
一、库仑	122
二、高斯	123
第5章 静电场中的导体与电	
介质	124
5.1 静电场中的导体	124
5.2 电容器 电容	130
5.3 静电场中的电介质	134
5.4 有电介质时的高斯定理	139
5.5 静电场的能量 能量密度	143
思考题	145
习题	146
阅读材料	
一、范德格喇夫静电起电机	149
二、大气电学简介 全球大气电	

平衡 雷雨过境尖端放电与 避雷针	150	第 8 章 磁场中的磁介质	221
三、压电效应	152	8.1 磁介质 磁化强度	221
第 6 章 恒定电流	155	8.2 磁介质中的安培环路定理 磁场 强度	224
6.1 电流 电流密度	155	8.3 铁磁质	228
6.2 欧姆定律 电阻率 欧姆定律 的微分形式	157	思考题	233
* 6.3 金属导电的经典电子论的基本 概念	160	习题	234
6.4 电源 电动势	162	阅读材料	
6.5 基尔霍夫定律	164	一、磁表面存储器的读写原理简介	234
6.6 电源的功率	167	二、生物磁学	235
* 6.7 电子的逸出功	168	第 9 章 电磁感应	237
* 6.8 温差电现象	169	9.1 电磁感应及法拉第电磁感应定律	237
6.9 RC 电路的暂态过程	173	9.2 动生电动势和感生电动势	241
思考题	174	9.3 互感	252
习题	175	9.4 自感	255
阅读材料		9.5 RL 电路的暂态过程	257
太阳能发电	177	9.6 自感磁能 磁场的能量密度	259
物理学家简介		9.7 位移电流 电磁场基本方程的 积分形式	261
一、欧姆	177	思考题	266
二、基尔霍夫	178	习题	268
第 7 章 稳恒磁场	179	阅读材料	
7.1 磁场 磁感应强度	180	一、汽车车速表——电磁感应原理 的应用	270
7.2 毕奥-萨伐尔定律 磁场线	183	二、超导现象的发现和超导技术的 应用简介	271
7.3 磁通量 磁场的高斯定理	190	物理学家简介	
7.4 安培环路定理及其应用	192	一、法拉第	273
7.5 带电粒子在电磁场中的运动	196	二、麦克斯韦	275
7.6 霍尔效应	203	习题参考答案	277
7.7 载流导线在磁场中受的力	205	附录	286
思考题	211	附录 A 数学基础	286
习题	212	附录 B 基本单位和基本数值数据	295
阅读材料		参考文献	299
地磁场	216		
物理学家简介			
一、奥斯特	219		
二、安培	219		

绪 论

我们的自然界是由物质组成的，而物质最基本、最普遍的运动形式有机械运动、热运动、电磁运动、原子和原子核内部的运动等。物理学是探讨物质的基本结构及其最基本、最普遍的运动形式，以及物质之间的相互作用和相互转化的基本规律的学科。

物理学作为一门严谨的、定量的自然科学的带头学科，它的基本理论渗透到自然科学的各个领域，广泛应用于工程技术各个部门。人们通过长期的实践已深刻地体会到：物理学是一切自然科学和边缘科学的基础，是科学技术发展的先导，是现代工程技术发展的最重要的源泉，而且对人类未来发展仍将起着决定性的作用。如果将知识比喻为一棵大树，那么物理学是大树主干和根基，如图 0-1 所示。物理学实质上是人类文化体系中重要而基础的部分。物理教育直接关系到科学素质教育的质量、潜力和成败，它在素质教育中具有不可替代的地位和作用。

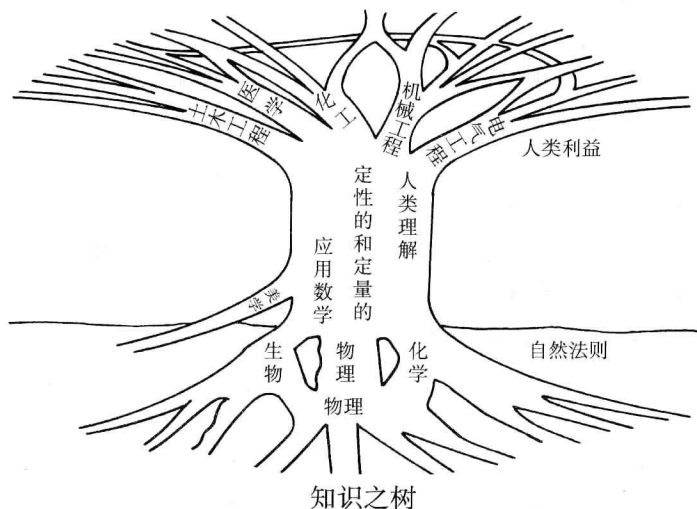


图 0-1 知识之树

物理学的研究对象十分广泛，时间尺度为 10^{-25}s (Z^0 超子的寿命) $\sim 10^{18}\text{s}$ [150 亿年 (宇宙年龄)]，相差 10^{43}s ；空间尺度为 10^{-20}m (夸克) $\sim 10^{26}\text{m}$ [约 150 亿光年 (宇宙)]，相差 10^{46}m ；速率范围为 0 (静止) $\sim 3 \times 10^8\text{m/s}$ (光速)。

对于不同时空尺度和速度范围的对象要采用不同的物理学研究方法。宏观物体低速运动规律是由人类经验得出的经典物理；微、介观粒子的行为要用量子物理解释，粒子高速运动需要相对论物理。图 0-2 是以时空尺度和速度范围为标尺采用不同物理学研究方法的示意图。本书内容除了最后的两章外基本都属于经典物理学的范畴。

人类是认识自然的主体。人最初以自身的尺度规定了长度的基本单位——米 (meter)，研究对象为与米相当的宏观物体。经典物理学的研究是从这个层次上开始的，即所谓宏观物理学。20 世纪初物理学家开始深入到物质的分子、原子层次 ($10^{-9} \sim 10^{-10}\text{m}$)，这一

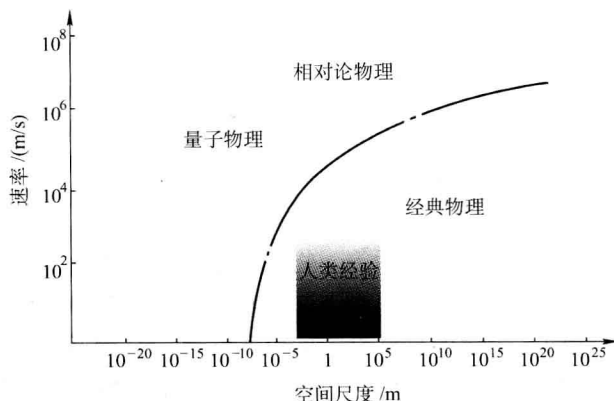


图 0-2 不同时空尺度和速度
范围对应的物理学研究方法

层次的物质运动服从的规律与宏观物体有着本质上的区别。物理学家把分子、原子，以及后来发现的更深层次的物质客体（各种粒子，如原子核、质子、中子、电子、中微子、夸克）称为微观粒子。研究对象的尺度在 10^{-15}m 以下的是物理学的前沿学科。20 世纪 60 年代以来逐步形成的粒子物理的标准模型堪称是在这一学科里的辉煌成就。

近年来，随着材料科学的进步，纳米科学和纳米技术飞速发展，在介于宏观和微观的尺度之间诞生了研究宏观量子现象的新兴学科——介观物理学。还有，如蛋白质、DNA，其中包含的原子数达 $10^4 \sim 10^5$ 之多，如果把缠绕盘旋的分子链拉直，长度可达 10^{-4}m 的数量级。细胞是生命的基本单位，直径一般在 $10^{-6} \sim 10^{-5}\text{m}$ 之间，最小的也至少有 10^{-7}m 的数量级，属于介观物理学的范畴，这是目前最活跃的交叉学科——生物物理学研究领域。

再把目光转向大尺度。离我们最近的研究对象是山川地表、大气海洋，尺度的数量级在 $10^3 \sim 10^7\text{m}$ 范围内，这属于地球物理学的领域。扩大到日月星辰，属于天文学和天体物理学的范围，从个别天体到太阳系、银河系，从星系团到超星系团，尺度横跨了十几个数量级。物理学最大的研究对象是整个宇宙，最远观察极限是哈勃半径，尺度达 $10^{26} \sim 10^{27}\text{m}$ 的数量级。宇宙学实际上是物理学的一个分支。当代宇宙学的前沿课题是宇宙的起源和演化，20 世纪后半叶这方面的巨大成就是建立了大爆炸标准宇宙模型。这一模型宣称，宇宙是在一百多亿年前的一次大爆炸中诞生的，起初物质的密度和温度都极高，那时既没有原子和分子，更谈不上恒星与星系，有的只是极高温的热辐射和其中隐现的高能粒子。于是，早期的宇宙成了粒子物理学研究的对象。粒子物理学的主要实验手段是加速器，但加速器能量的提高受到财力、物力和社会等因素的限制。粒子物理学家也希望从宇宙早期演化的观测中获得一些信息和证据来检验极高能量下的粒子理论。这样，物理学中研究最大对象和最小对象的两个分支——宇宙学和粒子物理学，竟奇妙地衔接在一起，结为密不可分的姊妹学科，犹如一条怪蟒咬住自己的尾巴，如图 0-3 所示。

物理学还有与哲学的关系最为密切的特点，它与哲学是同生共长的“连理树”。一方面，物理学是哲学的重要基础之一，随着物理学的发展，哲学经历了朴素唯物主义、机械唯物主义和辩证唯物主义。可以预料，由于在相对论、量子力学的基础上，在宏观和微观领域，以及大统一理论研究上的不断发展，物理学必将大大地推动哲学向前发展。因此，学习

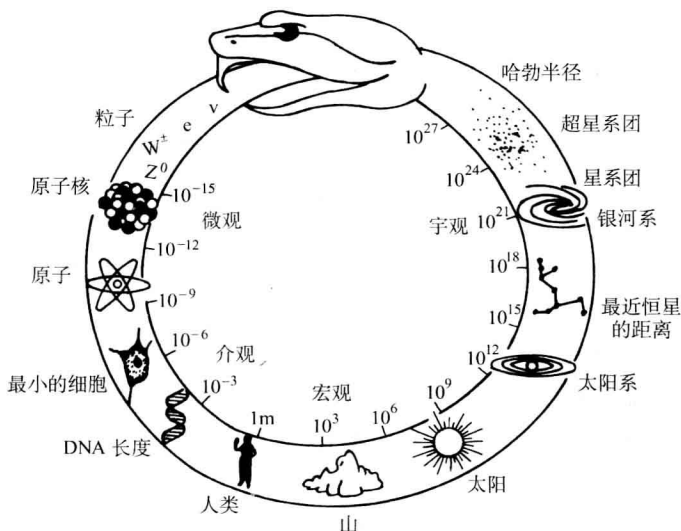


图 0-3 物理学大蟒蛇

和研究物理学有助于形成正确的世界观和方法论；另一方面，物理学又总是受哲学思想的支配和指导。也正是因为如此，历代物理学家在他们的科学实践中都十分重视哲学的研究和探讨。著名物理学家爱因斯坦、玻尔等生前都十分重视对哲学的探索，并发表了大量的哲学论文。

通过物理教学培养学生科学的世界观和方法论是物理学本身的特点，这就要求教师要自觉地把世界观和方法论的培养融汇到教学中去。物理课程涉及的方法论主要包括以下三个方面的内容：

1. 逻辑方法

逻辑方法是物理学研究的重要方法。它是通过对经验材料进行逻辑加工来认识事物的本质和规律的方法，是自然科学长期发展过程中形成的较严密的逻辑推理。在物理学中，运用逻辑方法进行思维的主要方式有分析和综合、归纳和演绎、证明和反证。

2. 与物理学基本原理相联系的基本方法

通过物理学的学习，可以掌握来源于物理概念和原理的基本方法。例如，来源于能量守恒定律的能量守恒方法，正因为确信在任何物理过程中能量守恒定律都应当成立，从而指导人们对物理问题进行正确的分析，乃至可预言一种新的能量形式，历史上中微子的发现就是基于此法。还有，如在力学中有来源于牛顿定律的隔离体受力分析法，在分子运动论中有来源于统计平均原理的统计平均方法，在电磁学中有来源于高斯定理和环路定理的对称分析法，等等。

3. 科学发现中创造性的理性思维方法

在实际的科学发现中，并不存在严格的逻辑通道，科学创造常常是由于科学家们独特的创造性思维的结果。在学习物理知识的过程中，注意学习、领会科学家在科学探索中创立的研究方法是十分重要的。

除上述几种主要方法外，物理学的研究方法还有佯谬法，如爱因斯坦的通光悖论、伽利略的落体佯谬；还有科学想象、试探猜测以及科学的直觉等创造性的思维方法，它们在物理

原理的建立中都起了重要的作用。

一个科学理论的形成离不开科学思想的指导和科学方法的运用。正确的科学思维和科学方法是人在认识途径上实现从现象到本质、从偶然到必然、从未知到已知的过程。科学方法不仅是学生在学习过程中打开学科大门的钥匙,也是学生未来从事科技工作时进行科技创新的锐利武器。因此,在学习物理知识的同时,还要自觉地去领会和掌握物理学的方法论,这是培养面向 21 世纪具有创新意识人才所必需的。

以物理学基础知识为内容的大学物理课程,它所包括的经典物理、近代物理及其在科学技术上应用的知识、相应的物理思想和物理研究方法等,都是一个高级技术人员所必须掌握的。所以,作为高等院校理工科专业的学生,虽然所学专业不同,但物理学始终是一门重要的必修基础课,特别是在高科技迅速发展、竞争日益激烈的当今社会,学好大学物理课程尤显重要,它所体现的科学思维方式以及认识论和方法论,对人才的文化修炼、素质和能力的培养已经构成举足轻重的作用。

大学物理学是在中学物理的基础上开设的一门大学基础课程,怎样才能学好大学物理学呢?问题的答案可能会因人而异,但作为共同点,应该注意以下几个方面:

1. 要明确学习大学物理学的目的

著名理论物理学家、诺贝尔奖获得者理查德费曼说:“科学是一种方法,它教导人们一些事物是怎样被了解的,什么事情是已知的,现在了解到什么程度(因为没有事情是绝对已知的);如何对待疑问和不确定性,证据服从什么法则,如何去思考事物、作出判断,如何区别真伪和表面现象。”

这就是说,学习物理学的目的不能仅仅满足于掌握一些知识、定律和公式,更不要把自己的注意力只集中在解题上,而应在学习过程中努力使自己逐渐对物理学的内容和方法、物理语言、概念和物理图像及其历史、现状和前沿等方面,从整体上有全面的了解。正是这些要素,对于开阔思路、激发探索和创新精神、增强适应能力、提高人才科学素质、科学思维和科学研究能力发挥重要作用。大量事实表明,一个优秀的工程技术人员必定具有坚实的物理基础。

2. 要根据物理学的特点进行学习

任何一门学科都有其自身的特点,而了解一门学科的特点,正是理解和掌握这门学科的关键。物理学的主要特点如下:

1) 它是观察、实验和科学思维相结合的产物。观察和实验是了解物理现象、测量有关数据和获得感性知识的源泉,是形成、发展和检验物理理论的实践基础。但是,要使感性知识上升到物理理论,还要经过科学思维这一认识过程,这种认识过程通常是经过分析、综合、抽象、概括等思维活动,并通过建立概念、作出判断和推理来完成的。例如,物理模型的建立、物理概念的形成、物理规律的发现等,都是观察、实验同科学思维相结合的结果。

2) 它的内容主要是由物理概念和物理规律构成的,而其核心是物理概念。物理概念不仅定性而且定量地反映了客观事物、现象的物理本质属性。在自然界中,只有具有物理属性的事物和现象才能成为物理学研究的对象。也只有把事物的物理属性从该事物的其他属性(如生物属性)中区分出来,并用定义的方式来表明它,才能形成物理概念。物理概念是组成物理内容的基本单元,而构成物理内容的另一重要部分是物理规律。物理学中的公式、定理、定律和原理等,统称为物理规律。物理规律是指物理现象之间的客观内在联系,它表示

物理概念之间实际存在着的关系。在任何一个物理规律中，总是包含有若干个有联系的物理概念，所以，不建立清晰的物理概念，显然就谈不上对物理规律的掌握。此外，物理规律的建立都是有条件的，而且常常不显含在规律的表述之中。因此，学习物理规律一定要注意它的适用条件和适用范围。

3) 它是一门定量的科学，它与数学有着密切的联系。数学是表达物理概念、物理规律最简洁、最准确的“语言”，只有把物理规律用数学形式表达出来，才能使物理规律更准确地反映客观实际。特别是在科学发展突飞猛进的今天，没有数学方法作为工具，物理学将寸步难行。在学习大学物理学时，所需的数学知识除了初等数学以外，主要是矢量代数和微积分等高等数学知识。在研究和解决物理问题时，经常需要大量运用高等数学知识进行定量计算，因此，一定要注意熟练掌握这些数学工具。

4) 它所研究的对象，几乎都是利用科学抽象和概括的方法建立起来的理想模型。理想模型包括理想化客体 and 理想化过程。例如，本课程将要遇到的质点、刚体、理想气体、点电荷、点光源、均匀电场、谐振子、黑体等都是理想客体。又如，匀速直线运动、简谐振动、简谐波、理想气体的各等值过程、卡诺循环等都是理想化过程。可见，物理学中的规律，都是一定的理想化客体在一定的理想化过程中所遵循的规律，它能更本质地反映同一类理想化客体的共同规律。运用理想模型研究物理问题是一种重要的科学研究方法，这种方法也广泛适用于其他自然科学和工程技术的研究中。

5) 它是辩证唯物主义的重要基础，它以高度辩证的、统一的宇宙观来认识物质世界，探求各种自然现象的内在联系。物理学的内容充满着活的辩证法。前面已经指出，通过物理课程的学习，有助于培养科学的世界观，这既是物理学科自身的特点，又是物理课程教学所具有的一种优势。此外，由于物理学研究多种物质运动形态和多种相互作用，因此，它还具有许多有特色的科学观点和研究方法，例如能量的、粒子的、场的、对称与守恒的观点和分析、综合、演绎、归纳、叠加、类比、联想、试探，以及抽象的、统计的、定性与半定量的方法，等等。在学习本课程的过程中，要注意领会和掌握物理学的特点和方法，这不仅有利于逐步学会抓住物理本质，而且有助于培养提出问题、分析问题与解决问题的能力。

总之，物理学的这些特点反映了研究和处理物理问题的一些基本观点、基本思路和基本方法，如能很好地根据这些特点进行学习，就能较准确地建立概念、理解规律，获得大学物理课程所要求的分析和解决一些实际问题的能力，提高学习效率。与此同时，在学习中还需要不断摸索和改进学习方法，要合理地安排时间、记笔记、做小结、学会阅读参考书及文献资料等，努力使自己的学习方法科学化。

第1章 质点运动学

机械运动是物质的各种运动形式中最简单、最基本的一种运动，是物体之间或物体各部分之间相对位置的变化，包括移动、转动、流动、变形、振动、波动、扩散等。

本章描述质点机械运动的规律，即研究质点的位置随时间变化的规律——运动学，不涉及质点运动状态变化的原因——动力学。

1.1 质点运动的描述

1.1.1 参考系、质点、时间和时刻

1. 参考系

自然界中所有的物体都在不停地运动，绝对静止的物体是不存在的，这就是运动的绝对性。但是，对于运动的描述却是相对的。为了描述物体的运动，必须选择另一物体作为参考标准，这个被选作参考的物体叫做**参考系**。

在运动学中参考系可任意选取。同一个物体的运动在不同的参考系中观察是不同的。例如，在匀速前进的火车车厢中的自由落体，相对于车厢是竖直下落的直线运动，相对于地面却是平抛运动。物体的运动形式随参考系的不同而不同，这叫做**运动的相对性**。

2. 质点

任何物体都有一定的大小和形状。一般来说，物体在运动时，内部各点的运动情况是各不相同的。因此，要精确描述物体的运动并不是一件简单的事，为使问题简化，可以采取理想化模型的方法：当物体的大小和形状对所讨论的问题来说影响不大时，就可忽略物体的大小和形状，把物体当成只有质量的一个点，称为**质点**。物理学中的理想化模型还有许多，如理想气体、刚体、点电荷等，它们都是抓住最主要的因素而忽略了一些次要因素。

一个物体是否可以抽象为质点，应根据问题的性质而定。例如，研究地球绕太阳的公转时，由于地球的直径比地球到太阳的距离要小得多，因而可以忽略地球的大小和形状，把地球当成一个质点；而在研究物体的转动时，如果把物体看成一个质点，就没有意义了。再比如，物体在空间中下落时，受重力和空气阻力作用，而空气阻力与物体的大小、形状有关，若不计空气阻力，物体仅受重力作用就可以将物体当成质点。

3. 时间和时刻

任何物体的运动都是在时间和空间中进行的，运动不能脱离空间也不能脱离时间。在物理学中把一个与过程对应的时间间隔称为**时间**，而某一瞬时称为**时刻**。

1.1.2 坐标系、位置矢量、运动方程、位移

1. 坐标系与位置矢量

为了定量描述质点的位置及其运动，必须在参考系中建立一个坐标系，通常采用直角坐

标系（见图1-1）。在笛卡儿坐标系（也称直角坐标系）中，一个质点 P 的位置可以由原点 O 指向点 P 的矢量 $\mathbf{r}$ 来表示，即

$$\mathbf{r} = \overrightarrow{OP}$$

矢量 $\mathbf{r}$ 叫做位置矢量，简称位矢。点 P 的三个坐标 x, y, z 也就是位矢 $\mathbf{r}$ 沿坐标轴的三个分量。位矢 $\mathbf{r}$ 和它的三个分量的关系为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1-1)$$

r 的大小为

$$r = |\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-2)$$

位矢 $\mathbf{r}$ 的方向余弦为

$$\cos\alpha = \frac{x}{r}, \cos\beta = \frac{y}{r}, \cos\gamma = \frac{z}{r} \quad (1-3)$$

式(1-1)中， $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别表示在笛卡儿坐标系中三个坐标轴上的单位矢量。常用的坐标系除了笛卡儿坐标系外还有平面极坐标系、球坐标系、柱坐标系、自然坐标系等。

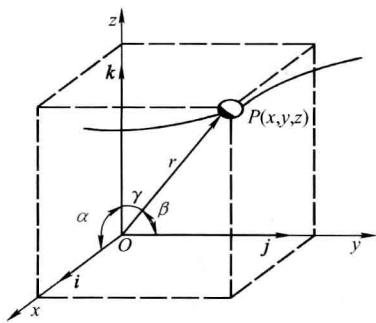


图 1-1 位置矢量

2. 运动方程和轨道方程

质点运动时，其位置矢量是时间 t 的函数，称为运动方程，可写为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1-4)$$

在直角坐标系中，运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-5)$$

知道了运动方程，质点的整个运动情况就很清楚了。所以运动学的一个主要任务就是找出物体运动所遵循的运动方程。

质点在空间所经历的路径称为轨道，也称轨迹。质点的运动轨道为直线时，称为直线运动；其运动轨道为曲线时，称为曲线运动。由式(1-5)消去时间 t 后，可得出运动的轨道方程。

3. 位移与路程

设曲线 AB 是质点运动轨道上的一部分（见图1-2），经过一段时间 Δt ，质点由 A 点运动到 B 点。 A, B 两点的位矢分别用 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 表示，质点的位置变化可用从 A 到 B 的有向线段 $\Delta\mathbf{r}$ 表示， $\Delta\mathbf{r}$ 称为质点的位移，即

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-6a)$$

在直角坐标系中，位移 $\Delta\mathbf{r}$ 可以具体表示为

$$\Delta\mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-6b)$$

位移的大小为

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2} \quad (1-7)$$

路程是质点在 Δt 时间内走过的轨道的几何长度 Δs 。必须

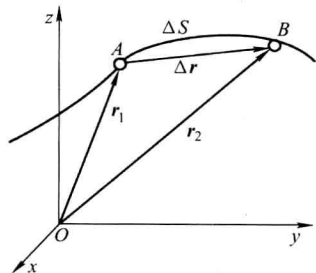


图 1-2 位移矢量

注意：位移是矢量，而路程是标量。就大小来说二者通常也不相同，路程是走过的轨道的长度，而位移的大小是两点间的直线距离。一般情况下， $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$ ，仅当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，才有 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$ 。

1.1.3 速度与速率

速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量。设质点在 t 时刻处于 A 点，在 $t + \Delta t$ 时刻处于 B 点，即在 Δt 时间内，质点的位移是 $\Delta \mathbf{r}$ （见图 1-3），定义：质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与所用时间 Δt 的比值叫做这段时间内的平均速度。即

$$\mathbf{v} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-8)$$

平均速度的方向与位移的方向相同，其大小等于在单位时间内的位移。

平均速度只能描述一段时间内位移的平均变化情况。为了精确地表示质点在某一时刻的运动情况，必须用瞬时速度——质点在某一时刻或某一位置的瞬时速度，等于平均速度在 Δt 趋于零时的极限，即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \quad (1-9)$$

所以速度为位置矢量对时间的一阶导数。速度的方向就是 Δt 趋于零时 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向，也就是质点运动轨道在 A 点的切线方向，并指向质点运动的方向。速度的大小叫速率，用 v 表示，即

$$v = |\mathbf{v}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right| = \left| \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \right| \quad (1-10)$$

若采用直角坐标系，质点的速度可表示为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \mathbf{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} \mathbf{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} \mathbf{k} \quad (1-11)$$

上式中， $v_x = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$ ， $v_y = \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}$ ， $v_z = \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}$ 分别表示速度 $\mathbf{v}$ 在 x ， y ， z 三个轴上的分量。速度的大小为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-12)$$

在国际单位制（SI）中，速度的单位是米/秒（m/s）。

另一方面，若用 Δs 表示 Δt 时间内质点的运动轨迹所经历的路程，则 Δs 与 Δt 的比值叫做平均速率，即

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

因而，速率

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}s}{\mathrm{d}t} \quad (1-13)$$

1.1.4 加速度

速度是矢量，因此，不论是其大小还是方向发生变化，

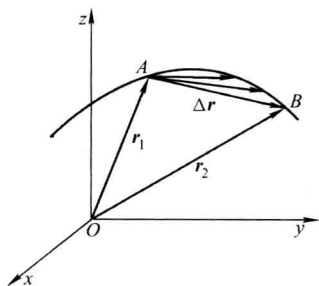


图 1-3 质点的速度

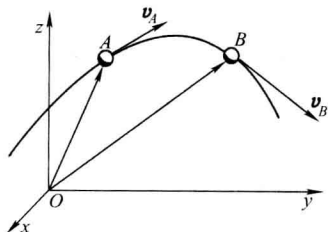


图 1-4 速度的变化

都会产生加速度。设质点在 t 时刻位于 A 点, 速度为 $\boldsymbol{v}_A$, 在 $t + \Delta t$ 时刻位于 B 点, 速度为 $\boldsymbol{v}_B$, 若用 $\Delta \boldsymbol{v}$ 表示其在时间 Δt 内速度的增量, 如图 1-4 所示, 则有

$$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A \quad (1-14)$$

定义 $\Delta \boldsymbol{v}$ 与 Δt 的比值为这段时间内质点的平均加速度, 即

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\boldsymbol{v}_B - \boldsymbol{v}_A}{\Delta t} \quad (1-15)$$

当 Δt 趋于零时, 平均加速度的极限, 即速度对时间的变化率叫做质点在时刻 t 的瞬时加速度, 简称加速度, 表示为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-16)$$

即加速度为速度对时间的一阶导数或位矢对时间的二阶导数。加速度的方向就是 Δt 趋于零时, 平均加速度或速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向, 因而加速度的方向与同一时刻速度的方向一般不一致, 它总是指向曲线凹的一边。若用 θ 表示 $\boldsymbol{v}$ 与 $\boldsymbol{a}$ 之间的夹角, 当 $\theta < 90^\circ$ 时, 质点是作加速运动; 当 $\theta > 90^\circ$ 时, 质点是作减速运动; 当 $\theta = 90^\circ$ 时, 质点是作匀速运动。

在直角坐标系中, 可将加速度分解为

$$\boldsymbol{a} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}\boldsymbol{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\boldsymbol{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\boldsymbol{k} = a_x\boldsymbol{i} + a_y\boldsymbol{j} + a_z\boldsymbol{k} \quad (1-17)$$

其大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-18)$$

【例 1-1】 一质点的运动方程为 $x = 4t^2$, $y = 2t + 3$, 其中 x 和 y 的单位是 m, t 的单位是 s。试求: (1) 运动轨迹; (2) 第 1 秒内的位移; (3) $t = 0$ s 和 $t = 1$ s 两个时刻质点的速度和加速度。

【解】 (1) 由运动方程 $x = 4t^2$, $y = 2t + 3$, 消去参数 t 得

$$x = (y - 3)^2$$

此为抛物线方程, 即质点的运动轨迹为抛物线。

(2) 先将运动方程写成位置矢量形式

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} = 4t^2\boldsymbol{i} + (2t + 3)\boldsymbol{j}$$

当 $t = 0$ s 时, $\boldsymbol{r}_0 = 3\boldsymbol{j}$ m, $t = 1$ s 时, $\boldsymbol{r}_1 = (4\boldsymbol{i} + 5\boldsymbol{j})$ m, 所以第 1 秒内的位移为

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_1 - \boldsymbol{r}_0 = (4\boldsymbol{i} + 5\boldsymbol{j} - 3\boldsymbol{j})\text{m} = (4\boldsymbol{i} + 2\boldsymbol{j})\text{m}$$

(3) 由速度及加速度的定义得

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} = (8t\boldsymbol{i} + 2\boldsymbol{j})\text{m/s}, \quad \boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = 8\boldsymbol{i}\text{m/s}^2$$

当 $t = 0$ s 时, $\boldsymbol{v}_0 = 2\boldsymbol{j}\text{m/s}$, $t = 1$ s 时, $\boldsymbol{v}_1 = (8\boldsymbol{i} + 2\boldsymbol{j})\text{m/s}$

1.2 直线运动

在直线运动中, 位移、速度、加速度各矢量都在同一条直线上, 都可以用标量表示, 而用正、负号表示它们的方向。正号表示沿坐标轴正向, 负号表示沿坐标轴反向。

如图 1-5 所示, 设质点的直线运动是沿 x 轴进行的, 坐标轴原点为 O 。显然质点的坐标 x 是随时刻 t 而改变的, x 为正值时表示质点的位置在原点的右边; x 为负值时表示质点在原点的左边。此时, 质点的运动方程、位移、速度、加速度分别为

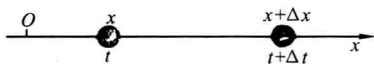


图 1-5 直线运动

$$x = x(t), \Delta x = x_B - x_A, v = \frac{dx}{dt}, a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1-19)$$

若质点作匀速率直线运动, 其运动方程为

$$x = x_0 + vt \quad (1-20)$$

若质点作匀变速率直线运动 ($a = \text{常量}$), 不难得出

$$\begin{aligned} v &= v_0 + at \\ x &= x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2 \\ v^2 - v_0^2 &= 2a(x - x_0) \end{aligned} \quad (1-21)$$

质点作直线运动的问题主要有两类情况: 一类是已知运动方程求质点的速度和加速度。解此类问题应对已知的运动方程求导, 即可求出速度和加速度。

【例 1-2】 小球 A 从 h 高度自由下落的同时, 另一小球 B 在其下方的地面上以初速 v_0 竖直上抛, 两小球在空中相碰, 求它们相碰时的高度。

【解】 可依题意写出两小球的运动方程:

$$\begin{aligned} y_A &= h - \frac{1}{2}gt^2 \\ y_B &= v_0 t - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned}$$

相碰时 $y_A = y_B$, 由此得 $t = \frac{h}{v_0}$, 将其代入上面任意两个公式中, 即可得出相碰时的高度

$$y = h \left(1 - \frac{gh}{2v_0^2} \right)$$

注意: 当且仅当 $v_0^2 \geq \frac{1}{2}gh$ 时, 两小球才可能在空中相碰。

【例 1-3】 如图 1-6 所示, 一人在高为 h 的岸上以恒定的速率 v_0 收绳拉小船靠岸, 求小船运动至离岸 x 时的速度与加速度。

【解】 取 x 轴向左为正, 原点在岸边, 设绳长为 $L = L(t)$, 则小船的坐标

$$x(t) = \sqrt{L^2 - h^2} \text{ 或 } x^2 = L^2 - h^2$$

对 t 求导得

$$2x \frac{dx}{dt} = 2L \frac{dL}{dt}$$

上式中, $\frac{dL}{dt} = -v_0$, 为人收绳的速率;

因而速度

$$v = \frac{dx}{dt} = -\frac{L}{x}v_0 = -\frac{v_0}{\cos \theta}$$

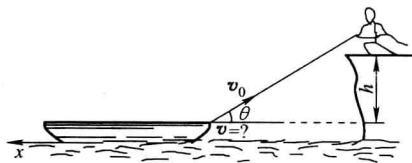


图 1-6 例 1-3 图

加速度

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{\frac{dL}{dt}x - L\frac{dx}{dt}}{x^2}v_0 = -\frac{h^2}{x^3}v_0^2$$

负号表示小船速度和加速度的方向与 x 轴方向相反。

质点作直线运动的另一类问题是已知速度或加速度及初始条件（初速度和初位移），求质点的运动方程。此时要用积分或解微分方程的方法。

【例 1-4】 已知质点的加速度 $a = 6 - 24t$ ，而 $t = 0$ 时， $x_0 = 0$ ， $v_0 = 3\text{m/s}$ 。求质点的运动方程。

【解】 根据加速度的定义有 $dv = a dt$ 。两边求定积分

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t (6 - 24t) dt$$

得

$$v = 3 + 6t - 12t^2$$

再根据速度的定义有 $dx = v dt$ 。两边求定积分

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t v dt = \int_0^t (3 + 6t - 12t^2) dt$$

得质点的运动方程为

$$x = 3t + 3t^2 - 4t^3$$

【例 1-5】 质点作匀变速直线运动： $a = \text{常量}$ ，当 $t = t_0$ 时， $v = v_0$ ， $x = x_0$ ，求质点的运动方程。

【解】 由 $dv = a dt$ ，两边同时积分

$$\int_{v_0}^v dv = \int_{t_0}^t a dt$$

得

$$v - v_0 = a(t - t_0) \quad (1)$$

又由 $dx = v dt$ ，两边同时积分

$$\int_{x_0}^x dx = \int_{t_0}^t [v_0 + a(t - t_0)] dt$$

得

$$x - x_0 = v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2 \quad (2)$$

再从位移公式和速度公式中消去时间变量 t ，可得

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \quad (3)$$

本例中的式 (1)、式 (2)、式 (3) 正是匀变速直线运动的三个基本公式，现在我们用积分的方法得出。

思考：能否由式 (2) 的结果，即运动方程，通过求导得出速度 v 和加速度 a 呢？

【例 1-6】 设某质点沿 x 轴运动，在 $t = 0$ 时的速度为 v_0 ，其加速度与速度的大小成正比而方向相反，比例系数为一常数 k ($k > 0$)，试求速度随时间变化的关系式。

【解】 由题意及加速度的定义式可知

$$a = -kv = \frac{dv}{dt}$$