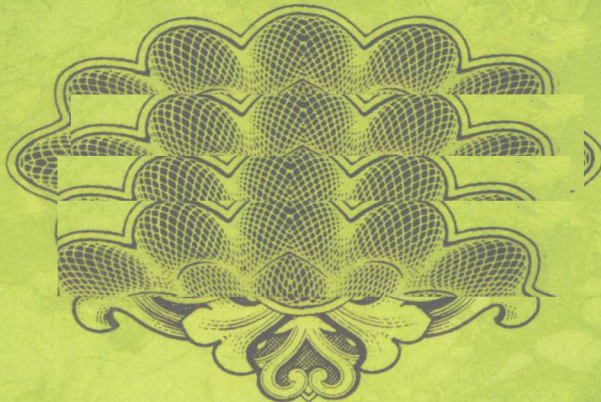




世纪普通高等教育基础课规划教材
教育部世行贷款教改项目成果

大学物理学

第3版



王建邦 主编

第一卷 经典物理基础



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪普通高等教育基础课规划教材
教育部世行贷款教改项目成果

大学物理学

(第一卷 经典物理基础)

第3版



机械工业出版社

本书根据教育部世行贷款教学改革项目的成果和教育部最新颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写而成。全书共两卷，本书为第一卷，主要内容有力学、场物理学、波动学和热学。

本书的一大特色，也是新的尝试是，除在叙述上力求接近学生、概念准确，并以大量实例使内容更加生动、有趣外，还在讲述基本概念、基本原理和基本理论的同时，凸显教学内容中应用的物理学研究方法。特别是，本书在每章编写一节“物理学方法简述”，进一步介绍相关物理学的研究方法，提示读者应用这些研究方法的要点，同时挑选几种方法，要求学生自己通过归纳、总结和应用这些研究方法，达到既掌握知识，又提高能力的教学目的。

本书与配套的《大学物理解题思路、方法与技巧》一书一并提供学生使用。

本书为高等院校理工科非物理专业大学物理基础课教材，也可作为高校物理教师、学生和相关技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学. 第1卷/王建邦主编. —3版. —北京: 机械工业出版社, 2010.2

21世纪普通高等教育基础课规划教材
ISBN 978-7-111-29279-1

I. 大… II. 王… 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 231594 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

封面设计: 马精明 责任校对: 姚培新 责任印制: 乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 2 月第 3 版 · 第 1 次印刷

170mm × 227mm · 26 印张 · 515 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-29279-1

定价: 29.00 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

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

教材是体现教学理念、课程内容、教学要求、教学模式的知识载体,又是指引导学生获取知识的方法和渠道。本书为适应大学本科非物理类专业对物理教学的基本要求,针对地方高校学生层次与认知规律,按集成“知识-能力-素质”于一体的指导思想,在多年教学改革实践及前两版的基础上,着眼于学生智慧和能力的培养来进行修订。同时,为激发学生自主学习和引导学生思考,本书适度改变了前两版的撰写风格,力求在中学物理基础上、在有利学生阅读的同时,营造一种探索与创新氛围。

为了加强大学物理的基础地位,走出“一遇教学改革,物理教育就成为被削弱的对象”的怪圈,本书将大学物理分为“经典物理基础”与“近代物理基础”两卷,两卷各成体系,又相互呼应,并分两学期使用。按因材施教的个性化教育原则,本书有少部分内容适度超出教学基本要求,有少部分内容适度超出课堂教学所需,有少部分内容适度超出多数学生的接受能力。

本科专业教育教学计划是由相互作用、相互依赖的若干部分(要素)结合而成的、具有特定功能的系统。服务于人才培养的大学物理课程是构成专业教育教学计划的一个“要素”,本书一方面注意了传承大学物理教材知识结构的纵向关系,另一方面又考虑了大学物理与本科专业教育教学计划中相关课程交叉、渗透的横向关系。按系统论观点,本书部分地调整了传统大学物理知识结构单元,突出作为自然科学基本规律、能长时期发挥作用的基础性内容;突出通过渗透、融合可伸向理工科类院校非物理类专业或工程技术学科与课程的基础性内容。

例如,在“路论”与“场论”的关系中,“路论”是电类课程的核心,即“以电路分析为基础、以电路设计为主导、以电路应用为背景”。“场论”作为能量流、物质流及信息流的物理基础,在本书中予以彰显。第一卷在介绍质点-质点系-连续体力学后,以流速场承前启后、以真空电磁场为主、以电流场、能流场、标量场、引力场等为辅,开出场物理学,强调在不同物理问题中,场可以是一种方法、可以是一个函数、可以是一种物质。

教学内容现代化一直是大学物理课程教学内容改革的一个热点。以目前我国21个工科大类、69个专业为例,在485门主要课程中,有101门(含同名相近课程)或多或少涉及物理学原理与方法的延伸、拓展、“物化”与应用,其中依托近代物理基本原理的教学内容在不断增加,但专门介绍近代物理基本原理的课程不多,本书第二卷在大学物理层面上选编相对论、量子、激光、固体、原子核

等基础内容，意在加强近代物理向“材料、能源、信息”相关专业与课程的渗透。

为了帮助学生更好地掌握大学物理的基本内容，理论联系实际，增强个性化学习，调动学习主动性，反复加强练习，加强能力培养，本次修订中在部分章节“学习本章要求掌握”的栏目中，适当增加了方法论的要求，并将大部分例题与全部习题从两卷中剥离，单独编写《大学物理解题思路、方法与技巧》一书，作为教材一并提供学生使用，力求使物理概念、原理与例题、习题密切联系与衔接，使教学内容与学生实际有机结合。

按 128 学时的教学时数，建议第一卷安排 72 学时，第二卷安排 56 学时，具体把握可根据学校情况而定。

清华大学张三慧教授审阅了本书第一卷（第 1 版），并认真修改，同时对全书的取材与布局提出了宝贵意见；中国科学技术大学张永德教授与太原理工大学冷叔棣教授分别审阅了第二卷（第 1 版）第五、第六部分，提出了宝贵意见，使我们受益匪浅，在此对三位老先生一并表示衷心感谢。

本书由王建邦担任主编。参加第 3 版修订工作的有：张旭峰（第一～三章）、刘兴来（第四～六章）、杨军（第十一～十三章）、阎仕农（第九、十章）、魏天杰（第十四～十七章）、王建邦（第七、八章）。

编 者
2009. 7

目 录

第3版前言

绪论	1
----------	---

第一部分 力学

第一章 质点力学

第一节 质点运动学

一、位置矢量	4
--------------	---

二、运动学方程	5
---------------	---

三、位移矢量	5
--------------	---

四、速度矢量	7
--------------	---

五、加速度矢量	8
---------------	---

六、笛卡儿坐标系的运用	10
-------------------	----

七、运动学的两类问题	11
------------------	----

第二节 牛顿运动定律

一、牛顿运动定律的内容	12
-------------------	----

二、牛顿运动定律的应用	16
-------------------	----

第三节 质点的基本运动

定理	18
----------	----

一、质点动量定理	18
----------------	----

二、质点动能定理	21
----------------	----

三、质点角动量（动量矩）

定理	25
----------	----

第四节 物理学方法简述

第二章 质点系统的守恒定律

第一节 动量守恒定律

一、质点系的动量定理	34
------------------	----

二、质心概念简介	35
----------------	----

三、动量守恒定律	36
----------------	----

四、火箭飞行原理简介	39
------------------	----

第二节 机械能守恒定律

一、质点系动能定理	40
-----------------	----

二、质点系内力做的功	41
------------------	----

三、质点系统的内势能	42
------------------	----

四、机械能守恒定律	45
-----------------	----

第三节 质点系角动量守恒

定律	46
----------	----

一、质点系角动量	47
----------------	----

二、质点系角动量定理	47
------------------	----

三、质点系角动量守恒条件	48
--------------------	----

四、有关守恒定律的补充说明	49
---------------------	----

第四节 物理学方法简述

第三章 连续体力学

第一节 刚体定轴转动

一、刚体运动的类型	53
-----------------	----

二、刚体定轴转动运动学	54
-------------------	----

三、定轴转动动力学	57
-----------------	----

四、定轴转动刚体的角动量守恒

定律	61
----------	----

第二节 固体的形变和弹性

一、弹性体中的应变和应力	63
--------------------	----

二、胡克定律	66
--------------	----

三、弹性体中的波速	71
-----------------	----

第三节 理想流体及其运动

一、理想流体的定常流动	76
-------------------	----

二、流体运动的描述方法	77
-------------------	----

三、连续性方程	81
---------------	----

四、伯努利方程	83
---------------	----

第四节 物理学方法简述

第二部分 场物理学基础

第四章 真空中的静电场

第一节 库仑定律

一、电荷	91	一、安培定律	138
二、库仑定律	93	二、磁场对载流平面线圈的 作用	140
三、静电力叠加原理	96	第五节 毕奥-萨伐尔定律	143
第二节 电场 电场强度	97	一、毕奥-萨伐尔定律	143
一、静电场	97	二、运动电荷的磁场	145
二、电场强度矢量	98	第六节 磁场的高斯定理	147
三、点电荷电场的电场强度	99	一、磁场的几何描述	147
四、点电荷系电场的电场强度	100	二、磁通量	148
五、连续分布电荷电场的电场 强度	101	三、磁场的高斯定理	149
第三节 高斯定理	105	第七节 安培环路定理	150
一、电场线	105	第八节 物理学方法简述	156
二、电通量	106	第六章 变化的电磁场	158
三、高斯定理	109	第一节 电磁感应定律	158
四、高斯定理的物理意义	111	一、电磁感应现象的发现	158
五、高斯定理的应用	112	二、法拉第电磁感应定律	159
第四节 静电场的环路定 理 电势	114	三、楞次定律	162
一、静电场是保守力场	114	四、涡电流现象	163
二、静电场的环路定理	116	第二节 电路中的电磁感 应 互感与自感	166
三、电势能、电势差和电势	117	一、互感	166
四、静电场的能量	120	二、自感	167
五、电势的计算	121	三、磁场能量	168
第五节 物理学方法简述	122	第三节 动生电动势	170
第五章 真空中的稳恒磁场	125	一、电源电动势	170
第一节 磁现象	125	二、动生电动势的产生及计算	172
一、电流的磁效应	125	三、动生电动势产生过程中的 能量转换	174
二、磁力	126	第四节 感生电动势 涡旋 电场	175
第二节 磁场 磁感应强度	128	一、涡旋电场	175
第三节 磁场对运动电荷的 作用	130	二、感生电动势	176
一、洛伦兹力	130	三、感生电动势与动生电动势	178
二、带电粒子在电场和磁场中的 运动	133	四、涡旋电场的计算	180
三、霍尔效应	134	第五节 位移电流	182
第四节 磁场对载流导线的 作用	138	一、电流场	183
		二、电流连续性方程	185

三、电流恒定条件	186	第四节 物理学方法简述	228
四、电容器的充、放电	187	第十章 机械波	230
五、位移电流假设	189	第一节 机械波的形成与 描述	230
第六节 麦克斯韦电磁场 方程组	190	一、弹性介质中机械波的产生	230
第七节 物理学方法简述	192	二、机械波波动方程	231
第七章 引力场简介	194	第二节 平面简谐波	232
第一节 牛顿万有引力定律	194	一、波动空间中波的几何描述	232
第二节 引力场强	196	二、坐标图中简谐波波函数	233
第三节 保守力场的图示 ——势能曲线	196	三、波场中的相位分布与传播	234
第四节 物理学方法简述	200	第三节 波场中的能量与 能流	238
第八章 标量场	202	一、介质中任一质元的能量	238
第一节 势函数与场强度	202	二、波强度	240
一、等势面	202	第四节 波的叠加与干涉	242
二、电势梯度	204	一、波的叠加原理	242
第二节 物理学方法简述	206	二、波的干涉	243
第三部分 波动学基础	208	第五节 驻波	244
第九章 机械振动	209	一、从波的干涉看驻波	245
第一节 简谐振动	209	二、从固有振动看驻波	247
一、质点振动系统	209	第六节 物理学方法简述	251
二、简谐势	210	第十一章 光的干涉	253
三、简谐振动的运动方程	211	第一节 光波及其相干性	254
四、描述简谐振动的特征量	212	一、光波的相干条件	255
五、简谐振动的几何描述	214	二、非相干叠加	256
六、简谐振动的能量	217	三、获得相干光的方法	257
第二节 简谐振动的叠加	218	第二节 分波前干涉	258
一、同一直线上两个同频率谐 振动的合成	218	一、杨氏实验	258
二、多个同方向、同频率谐振 动的合成	221	二、光程	261
三、二维振动的合成	223	第三节 分振幅薄膜干涉	263
* 第三节 阻尼振动与受迫振动 简介	225	一、物像之间的等光程性	264
一、阻尼振动	225	二、等倾干涉	265
二、受迫振动	227	三、等厚干涉	272
		第四节 物理学方法简述	276
		第十二章 光的衍射	279
		第一节 光的衍射和惠更斯-菲 涅耳原理	280

一、衍射现象的分类	280	学能	318
二、惠更斯-菲涅耳原理	280	一、功	318
第二节 单缝衍射	282	二、系统的热力学能	321
一、实验装置与光路	282	三、热量	322
二、光强分布公式	283	第三节 热力学第一定律	323
三、半波带法	286	第四节 气体的摩尔热容	324
第三节 圆孔衍射	287	第五节 理想气体的热力学 过程	325
第四节 光学仪器的分辨 本领	288	一、等体(定容)过程	325
第五节 光栅衍射	289	二、等(定)压过程	325
一、平面透射光栅的强度分布 公式	290	三、等温过程	326
二、光栅衍射图样的特点	292	四、绝热过程	326
*三、光栅光谱	295	五、绝热线与等温线	327
第六节 物理学方法简述	298	第六节 热力学循环	329
第十三章 光的偏振	300	一、循环过程	329
第一节 光的偏振态	300	*二、制冷机	330
一、自然光	300	第七节 物理学方法简述	331
二、线偏振光	302	第十五章 热力学第二定律	334
*三、椭圆偏振光和圆偏振光	303	第一节 卡诺循环	334
四、部分偏振光	304	一、卡诺循环的4个分过程	334
第二节 偏振片 马吕斯 定律	304	二、卡诺循环的效率	336
第三节 光在反射和折射时的 偏振	307	三、卡诺定理	337
*第四节 晶体的双折射现象	309	第二节 可逆过程与不可逆 过程	337
第五节 物理学方法简述	311	一、实际热力学过程的不可 逆性	337
第四部分 热物理学基础	313	二、理想热力学过程的可逆性	339
第十四章 热力学第一定律	314	第三节 热力学第二定律	341
第一节 热力学中的基本 概念	314	一、不可逆过程与热力学第二 定律的表述	341
一、热力学系统	314	二、熵和热力学第二定律的 数学表述	342
二、系统状态与状态参量	314	第四节 物理学方法简述	349
三、准静态过程	316	第十六章 热平衡态的气体分子 动理论	351
第二节 功、热量和热力 学能	318	第一节 理想气体的压强 公式	352

一、气体分子热运动的基本特点	352	*第五节 玻耳兹曼分布简介	375
二、理想气体的微观模型	354	一、重力场中微粒按高度的分布	376
三、大量分子集体的统计性假设	354	二、玻耳兹曼密度分布律	377
四、理想气体压强公式的导出	356	第六节 物理学方法简述	377
五、关于导出压强公式的几点说明	358	第十七章 气体中的输运现象	380
第二节 理想气体温度的统计意义	359	第一节 气体的黏滞现象	381
一、理想气体的温度公式	359	一、实验现象	381
二、温度的统计意义	359	二、黏滞力的实验规律	382
第三节 能量均分定理	360	第二节 气体的扩散与气体的热传导现象	383
一、自由度	361	一、局域平衡假设	383
二、能量按自由度均分定理	362	二、实验规律与微观机制	384
三、理想气体的热力学能	364	第三节 物理学方法小结	385
四、理想气体的热容	365	附录	388
五、经典理论的缺陷	365	附录 A 量纲	388
第四节 气体分子的速率分布律	366	附录 B 我国法定计量单位和国际单位制 (SI) 单位	389
一、麦克斯韦速率分布律的实验测定	367	附录 C 希腊字母	389
二、实验结果分析	369	附录 D 物理量的名称、符号和单位 (SI)	390
三、速率分布函数的物理意义	372	附录 E 基本物理常数表 (2006 年国际推荐值)	393
四、用速率分布函数求分子速率的统计平均值	373	物理名词索引 (中英文对照)	394

绪 论

物理学是一门重要的基础科学。物理学的发展不仅推动了整个自然科学的发展，而且对人类的物质观、时空观、宇宙观以及整个人类文化都产生了、而且还将继续产生极其深刻的影响。物理教育不但有助于培养一个人处理复杂事物和探索未知领域的能力，而且对所有人都是提高科学素质的一个重要手段。很难设想，一个缺乏基本物理素养的理工科本科毕业生能够成为一个“综合性复合应用型”的高素质人才。

一、物理学是近代科学技术的基础

物理学经过数百年的发展，已是一个拥有十几个二级学科、近一百个三级学科的大系统。物理学与其他自然科学及其技术的广泛结合和应用，对整个人类文明产生了深远的影响，如当代自然科学重大的基本问题：揭示物质结构之谜、宇宙的起源和演化、地球的起源和演化、生命与智力起源、非线性科学和复杂性研究等以及当今技术发展的重要前沿：微电子与计算机技术、通信技术、生物技术、新材料技术、激光技术、航天技术与空间资源开发等，无一不与物理学息息相关。大学物理课程虽不是物理学中的一个子学科，但教学内容中有不少是经过千锤百炼的基本知识的精华，课程体系完整，层次分明，十分有利于给学生打下扎实的基础。当今，随着科学技术日新月异的发展，人类已步入知识经济时代，作为 21 世纪从事产业工作的工程技术人才，需要适应科学技术迅猛发展及世界市场上产业竞争日益加剧的新形势，因此，物理基础不应是削弱而是应进一步加强。

二、物理教育在培养学生正确的时空观、宇宙观、物质观方面有不可替代的作用

众所周知，物理学以极其丰富的事例揭示出物理现象中存在的对立统一及互相转化、量变到质变、局部与整体、现象与本质、特殊与一般、主要矛盾与次要矛盾、矛盾的主要方面与次要方面等规律和深刻内涵，对引导学生建立辩证唯物主义的世界观有积极作用。

三、物理概念、定义、假说与理论的形成与发展本身可以激发学生的求知欲，启迪创新精神

从物理学的发展历史及近代物理学的进展来看，一个物理理论的形成与发展

均要经历一个漫长而艰苦的不断探索、不断创新的过程。其中,许多年轻人富于幻想,很少框框,对新鲜事物具有强烈的好奇心和兴趣,在学习前人所积累知识的过程中或实验与理论的探索中,往往敢于大胆地推测、猜想,容易迸发出新鲜的物理思想火花,在关键时刻敢于摆脱传统束缚与非议,敢于创立新学说。虽然在本科院校中,由于大学物理课程涉及面广,教学时数并不多,不容易把学生引导到物理学的发展规律中去把握每一个概念与定律的实质,但配合教学内容精选若干典型事例,给学生展现一幅幅活生生的物理学图像,却能使学生在潜移默化中受到启发和教育,激发学生的探索与创新精神。

四、丰富的物理方法论在培养学生能力上有其重要的作用

如前所述,物理学经过几百年的发展,已经能够说明小到分子、原子、原子核等粒子,大到恒星、星系、宇宙等的种种物理现象,并正在深入研究小到粒子内部,广阔到宇宙整体以及种种非线性的复杂问题。与此同时,物理学积累了多种多样的研究方法。可以说,在物理学这个大系统中,物理学理论与物理学方法论是相互依存与相互作用的两个子系统。在一定意义上讲,它们之间的配合与协调推动着物理学的发展。有人说,所有科学大师都是他那学科的方法论专家,就包含着这一层意思。从另一角度看,物理学理论本身也具有方法论功能。这些由文字、符号、图像、公式组成的表象既是人类对客观规律的正确反映,又是人类改造客观世界的工具。大学物理课程触及物理学中许多基础知识的精华,学生在学习物理知识的同时,能不同程度地受到方法论的熏陶。

五、物理学在培养学生思维能力、发展学生智力方面有独特作用

人类在认识世界、获取知识的过程中,思维起着重要的作用。人脑是思维的器官,人的思维是大脑活动的产物。近代脑科学的研究表明,人的两个脑半球是用根本不同的方式进行思维的。左脑思维具有单线性,是串联式的,擅长逻辑思维,所谓思路清晰,逻辑性强是左脑功能的表现;而右脑思维具有平行性,是并联式的,右脑是直觉判断的场所,直觉思维是与逻辑思维截然不同的另一种非逻辑思维方式,类似于灵感、顿悟,极富创造性。在学习大学物理课程中,不仅需要进行抽象思维、逻辑推理、数字运算及分析等,即要运用和发展左脑功能,同时也要处理总体形象、空间概念、鉴别几何图形、记忆、模仿等,即又要运用和发展右脑功能。可见,大学物理在发展学生智力中具有独特和非常重要的作用。

第一部分

力 学

力学是大学物理课程中的一个重要组成部分，不仅与中学物理有着密切的关系，而且其中的物理概念、物理规律和研究方法又是整个大学物理的基础。

学习本部分时，要求应用高等数学中的矢量和微积分概念来描述质点运动的矢量性和瞬时性；在牛顿定律的基础上，学习用演绎的方法研究质点运动中力的时间积累与力的空间积累的作用规律；在了解质点及质点系力学的基础上，对刚体、弹性体和流体等连续介质的基本力学规律展开讨论。学习中除需运用中学物理的基础知识外，还要注意在本部分中对中学物理延伸与拓展的内容，特别是理想体流体及其运动，这是学习场物理学思想和方法的基础。

第一章 质点力学

在大量工程实际与生活实际问题中，机器零部件的旋转、平移，交通车辆的行驶以及人们参与的田径、球类等各项体育运动等，都包含最基本、最直观、最简单的机械运动。质点力学就是研究机械运动规律及其应用的学科。

研究物体的机械运动，就是研究一个物体相对于另一个物体的位置随时间的变化规律，或一个物体内部的一部分相对于其他部分的位置随时间的变化过程。首先要做的是，将物体抽象为一个理想化的模型，以突出空间位置变动的特征，这个模型，不考虑实际物体的形状与大小，把它们当作为一个有质量、仅占据空间位置、无内部结构的点，即质点。

学习本章要求掌握

- 位矢、位移、速度、加速度的概念及应用
- 牛顿运动三定律及求解一维变力作用问题
- 质点运动三定理及质点在平面内运动的简单问题
- 各种物理模型的特征与作用

第一节 质点运动学

实践和理论研究表明，在一切宏观自然现象中，不论运动形态多么复杂，从物质的粒子性来看，最基本的运动形式就是质点的运动。质点运动学是力学中仅从几何的观点研究运动的学科，即如何描述质点运动。如图 1-1 是返回式飞船的部分轨道图，轨道形状的描述，就是质点运动学的任务。

一、位置矢量

人们发现，质点相对参考系的位置可以用坐标系定量描述。方法是，在参

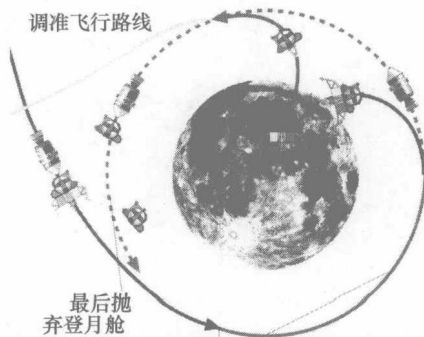


图 1-1

考系中选定一个参考点 O 作为坐标原点, 建立坐标系 (见图 1-2)。由点 O 向质点所在瞬时位置 P 引有向线段 $\mathbf{r}$, 称 $\mathbf{r}$ 为质点的**位置矢量**, 简称位矢 (或矢径)。

问题是, 为什么要用**矢量**来描述质点的位置呢?

首先, 作为描述位置的量, 要包含两种信息, 一是质点相对于参考点 O 的方位, 二是质点相对于参考点 O 的距离 (长短), 这种既要表示方向又能表示长短的要求, 正是矢量所具有的两个基本特征。

其次, 在经典物理学中, 任何物理量 (标量、矢量、张量等) 都是用一组数表示的, 这组数的值一般与坐标的选择有关, 其中, 只要参考点 (即坐标原点) 一定, 矢量与所选坐标系无关。而且不论坐标系如何旋转, 位置矢量是不变的。

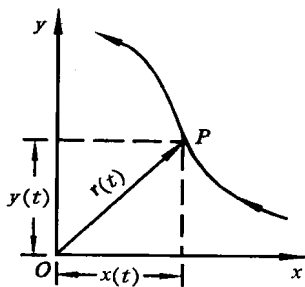


图 1-2

二、运动学方程

当质点运动时, 表示质点位置的位置矢量 $\mathbf{r}$ 必定随时间变化。用数学语言说, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 是时间的函数, 在物理学中, 将这一函数关系表示为

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

上式就是质点的**运动学方程**, 又称**轨道参量方程**。质点运动轨道的研究 (如图 1-1 所示) 是运动学的首要问题, 因为只要知道了函数形式 (1-1), 就可以知道运动的一切信息。如北京航天测控中心, 就专门设有航天器轨道计算系统。

在笛卡儿坐标系中, 式 (1-1) 可用三个坐标轴上的投影来描述, 即

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-2)$$

上式称为运动学方程式 (1-1) 的坐标分量式, 式 (1-1) 与式 (1-2) 的数学关系是

$$\mathbf{r} = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 依次为坐标轴上的单位矢量。

三、位移矢量

质点空间位置的变动, 可以采用路程或位移表示, 但是, 在一般情况下, 质点空间位置变动有两方面的含义: 其一是向什么方向变动; 其二是在某一时间段内变动了多大距离。为此, 在图 1-3 中, 如果以 $\mathbf{r}(t)$ 表示 t 时刻质点位于点 P 的位矢, 以 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$ 表示下一时刻 ($t + \Delta t$) 质点位于点 Q 的位矢, 则将图中

由 P 点指向 Q 点的矢量 $\Delta \mathbf{r}$, 称做位移矢量, 描述质点在 Δt 时间内的位置变动 (大小与方向)。按矢量运算规则

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

从图 1-4 看, 位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 具有如下性质:

1) 位移不同于位矢。位移与坐标原点的选择无关。不过, 依据运动描述的相对性, 位移与参考系的选择还是有关系的。

2) 位移不同于路程。在图 1-3 中, 质点从 t 到 $t + \Delta t$ 所经历的路程等于由 P 点到 Q 点曲线的实际长度, 长度是一个标量, 一般记为 Δl 。图中位移的大小并不等于路程的长短, 即

$$|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta l$$

如果所观测的时间段 Δt 趋于零时, Q 点无限接近于 P 点, 此时, 运用微分学求极限的方法, 有

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta \mathbf{r} = d\mathbf{r}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta l = dl$$

则

$$|d\mathbf{r}| = dl \quad (1-5)$$

式中, $d\mathbf{r}$ 叫做元位移, 也是一个矢量。某时刻该矢量的方向就是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向, 也就是该时刻质点运动轨道的切线方向。因此, 只有在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况下, 在图 1-4 中曲线运动的情况下, 位移矢量的大小才等于质点走过的路程, 否则, 两量不相等。

当观测是在 t_0 到 t 的有限时间段内进行时, 运用积分方法, 质点的位移是一系列元位移的矢量和, 即

$$\Delta \mathbf{r} = \int_{t_0}^t d\mathbf{r} \quad (1-6)$$

注意, 式 (1-6) 是矢量积分。如何计算矢量积分, 将在其他章详细介绍。

3) 位移并不能反映质点从初位置到终位置变化的中间细节, 但是, 同样的位移可以在不同的时间段内完成, 也就是说, 位移也是时间的函数, 位移有快慢之分, 因此, 需要引入速度矢量。

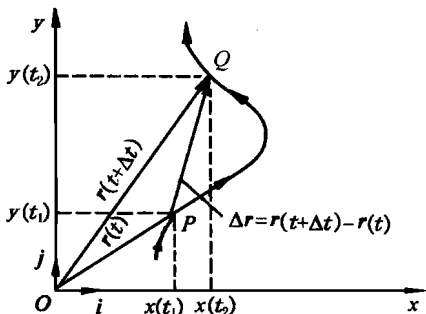


图 1-3

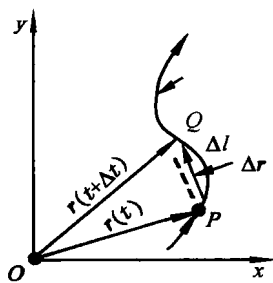


图 1-4

四、速度矢量

速度矢量是描写质点运动快慢和方向的物理量，在质点运动的每个时刻和某一位置，均有一个速度 $\boldsymbol{v}(t)$ ， $\boldsymbol{v}(t)$ 称为瞬时速度矢量。以图1-4为例，为了能精确刻画质点在不同时刻的速度，方法上可分两步做：首先，只对质点运动快慢进行粗略描述，即采用平均速度；然后，利用由近似到精确的数学工具——取极限，求瞬时速度。

具体步骤是，把从 t 到 $t + \Delta t$ 时间段内质点位移对时间的变化率，定义为质点在这一时间段内的平均速度，记为

$$\langle \boldsymbol{v} \rangle^{\ominus} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1-7)$$

由上式看， $\langle \boldsymbol{v} \rangle$ 也是一个矢量，其大小为 $\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$ ，方向与 $\Delta \boldsymbol{r}$ 方向相同。同时，平均速度与位移一样，也与时间 Δt 有关，平均速度的大小和方向在很大程度上依赖于所取时间间隔的大小。但是，时间间隔应该取多大，平均速度概念本身并没有加以限定。所以，当使用平均速度来表征质点运动时，总要指明相应的时间间隔。因此说， $\langle \boldsymbol{v} \rangle$ 只能粗略描述质点在时间段 Δt 内运动的快慢程度，并不能提供具体过程的细节。

一般来说，平均速度和平均速率是两个不同的概念。类比式(1-7)，把质点所经过的路程 Δl 与所需时间 Δt 的比值

$$\langle v \rangle = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (1-8)$$

称为质点在 Δt 时间内的平均速率，平均速率是标量。平均速率与平均速度的关系，类似于路程与位移的关系。一个明显的事例是，在 Δt 时间内，质点沿闭合曲线运行一周，则在这段时间内质点的平均速率不等于零，而相应的平均速度却等于零。因此，平均速度和平均速率在数值上也不一定相等。

为了精确地描述质点在任一时刻 t 和任一位置 $\boldsymbol{r}$ 处运动快慢和方向，所谓由近似到精确的数学方法是：取式(1-7)中的 Δt 趋于零时平均速度的极限，在无限小的时间段内，质点运动的快慢可看做是均匀的，即

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

式(1-9)就是速度矢量的定义式，速度矢量等于位矢 $\boldsymbol{r}$ 对时间的一阶导数，描述质点位矢的瞬时变化率。通常所说的质点运动速度，就是指它的瞬时速度。由

[⊖] 本书以“ $\langle \rangle$ ”表示平均值。