

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

世界名校名家基础教育系列
Textbooks of Base Disciplines from World's Top Universities and Experts

UNIVERSITY
PHYSICS

大学 物理

(上册)

主编 // // // //

李元成 张 静 钟寿仙

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 | “十三五”移动学习型规划教材

 **世界名校名家基础教育系列**
Textbooks of Base Disciplines from World's Top Universities and Experts

大学物理

上册

主 编	李元成	张 静	钟寿仙
副主编	展凯云	谢 丽	冷文秀
参 编	田艳杰	徐大海	张 晶

机械工业出版社



本书为“十三五”国家重点出版物出版规划项目，是以教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会于2010年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》的基本精神为依据而编写的，其中不仅吸收了国内外同类教材的优点，而且还融入了作者在多年教学经历中所积累的成功经验。全套书分上、下两册，上册包括力学、电磁学两篇；下册包括波动和光学、热学、近代物理三篇。

本书适合于普通高等学校理工科各专业学生学习使用，也可作为教师或相关人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 上册/李元成, 张静, 钟寿仙主编. —北京: 机械工业出版社, 2016.10

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 “十三五”
移动学习型规划教材

ISBN 978-7-111-54269-8

I. ①大… II. ①李…②张…③钟… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第158124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: 张金奎 责任编辑: 张金奎 陈崇昱 任正一

责任校对: 刘秀芝 责任印制: 李 洋

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2016年11月第1版第1次印刷

184mm×260mm • 19.75印张 • 482千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54269-8

定价: 39.80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

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com



前言

本书是根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会于2010年颁布的《理工科大学物理课程教学基本要求》的基本精神,在总结多年来教学实践、教学改革和精品课程建设经验的基础上,吸收国内外同类教材的优点编写而成的。本书确保了新教学基本要求中的全部核心内容,选择了一定数量的扩展内容。全套书分为上、下两册。上册包括力学、电磁学两篇,下册包括波动和光学、热学、近代物理三篇。

大学物理是高等学校理工科类各专业的一门重要基础理论课程,学生通过学习该课程能够对物理学的基本概念、基本理论和基本方法有比较系统的认识 and 正确的理解,并为进一步学习打下必要而坚实的基础。大学物理课程在培养学生树立科学世界观、探索精神和创新意识方面具有其他课程不可替代的作用,同时可增强学生分析问题和解决问题的能力,实现知识、能力和素质的协调发展。为了尽可能编写出一套可读性强、易学、易教、好用的大学物理教材,我们在吸收同类教材优点和总结多年教学改革实践经验的基础上,重新调整了课程体系,加强了重点、难点和理论联系实际的内容,注意处理好大学物理与中学物理的衔接,强化了近代物理的教学内容并将最新的教学研究引入教材中。

本书为了与石油工业实际相联系,在每章的前言部分增加了该章内容与石油行业有关的应用实例,对提高学生的学习兴趣和对他们今后专业基础课及专业课的学习都有一定的帮助。同时,本书在每章的练习题后增加了综合能力与知识拓展和阅读材料,这些内容都侧重于物理学原理在石油行业和工程实际中的应用,以加强学生将所学的物理知识与专业背景相结合的能力,使学生明确物理学在石油工业中的重要性,提高他们学习大学物理课程的积极性。这些教学资料也能为教师更好地把大学物理课程与专业基础课及专业课相结合提供一些帮助。但愿这些尝试能够切实提高大学物理课程的教学质量、促进学生更好地学习专业知识和培养学生应用知识的能力、创新



意识和创新能力。

全书由李元成教授[中国石油大学(华东)]、张静副教授(长江大学)和钟寿仙教授[中国石油大学(北京)]担任主编,钟寿仙策划并完成编写大纲,李元成承担了全书修改和统稿工作,张静承担了综合能力与知识拓展和阅读材料的最后统稿工作。参加编写人员的具体分工:第1章由谢丽(长江大学)编写,第2章由李元成、钟寿仙编写,第3章由李元成、田艳杰[中国石油大学(华东)]编写,第4章由李元成、展凯云[中国石油大学(华东)]编写,第5章由谢丽编写,第6章由张静编写,第7章由冷文秀[中国石油大学(北京)]编写,第8章由张静编写,第9章由李红[中国石油大学(华东)]编写,第10章由董梅峰[中国石油大学(华东)]编写,第11章由刘冰[中国石油大学(华东)]、李元成、周广刚[中国石油大学(北京)]编写,第12章由李元成、董梅峰编写,第13章由李元成、陈华东[中国石油大学(华东)]编写,第14章由鄢嫣(长江大学)编写,第15章由袁顺东[中国石油大学(华东)]编写,第16章由鄢嫣编写,第17章由李元成、朱化凤[中国石油大学(华东)]编写,专题选讲(流体力学、几何光学)和附录由李元成编写,长江大学徐大海教授承担了第6、8章的审校及部分习题编写工作,张晶参加了第2章部分内容的编写工作。

本书在编写过程中,参考了大量兄弟院校的教材和互联网上的资料,这里不能一一列出作者的姓名,谨向相关作者致以衷心的感谢!同时,对参与编写的三所学校的大学物理课程组的全体教师所给予的帮助和支持深表感谢,正是他们的辛勤工作,才使本书得以不断完善。三所学校的院系领导也对本书的编写给予了大力支持,在此表示由衷的感谢!

本书出版过程中,得到了机械工业出版社的大力支持,尤其是责任编辑张金奎做了大量细致的协调和组织工作,并对每一章的稿件做了细致的校对和编辑,付出了大量的精力和心血,编者在此表示诚挚的谢意!

限于时间紧迫,加之编者水平有限,虽经多次审校,书中的疏漏及不当之处在所难免,恳请专家、同行和读者批评指正。

编 者



目录

前言

第一篇 力学 1

第 1 章 质点运动学 2

引言 2

1.1 质点 参考系 坐标系 3

1.1.1 质点 3

1.1.2 参考系和坐标系 3

1.2 描述质点运动的物理量 4

1.2.1 位置矢量和运动方程 4

1.2.2 位移与路程 5

1.2.3 速度 6

1.2.4 加速度 7

1.3 曲线运动 12

1.3.1 抛体运动 12

1.3.2 圆周运动 14

1.3.3 一般平面曲线运动 18

1.4 相对运动 18

本章提要 21

思考题 1 21

基础训练习题 1 22

综合能力和知识拓展与应用训练题 25

阅读材料——北斗卫星导航系统和质点运动学 26

第 2 章 牛顿运动定律 28

引言 28

2.1 牛顿运动定律 29

2.1.1 牛顿第一定律 29

2.1.2 牛顿第二定律 30

2.1.3 牛顿第三定律 31

2.1.4 牛顿运动定律的适用范围 31

2.2 相互作用力 31

2.2.1 基本的自然力 31

2.2.2 力学中常见的几种力 33

2.3 牛顿运动定律的应用 35

2.4 惯性系和非惯性系 39

2.4.1 惯性系与非惯性系 39

2.4.2 非惯性系中的力学规律 40

2.5 伽利略变换 力学的相对性原理 43

2.5.1 伽利略变换 43

2.5.2 力学的相对性原理 44

2.5.3 经典力学的时空观 45

本章提要 46

思考题 2 46

基础训练习题 2 47

综合能力和知识拓展与应用训练题 48

阅读材料——傅科摆 51

第 3 章 功和能 53

引言 53

3.1 功和功率 54

3.1.1 功 54

3.1.2 功率 57

3.2 动能 动能定理 57

3.2.1 动能 57

3.2.2 质点的动能定理 57

3.2.3 质点系的动能定理 58

3.3 保守力与非保守力 势能 60

3.3.1 保守力与非保守力 60

3.3.2 势能 61

3.3.3 保守力和势能梯度 63

3.3.4 势能曲线 64

3.4 功能原理 机械能守恒定律 64

3.4.1 功能原理 64

3.4.2 机械能守恒定律 65

3.4.3 能量守恒定律 65

本章提要 68

思考题 3 68

基础训练习题 3 69

综合能力和知识拓展与应用训练题 71

阅读材料 72



第4章 动量和角动量	74
引言	74
4.1 动量 动量定理	75
4.1.1 动量	75
4.1.2 质点的动量定理	75
4.1.3 质点系的动量定理	76
4.2 动量守恒定律	78
*4.3 质心 质心运动定理	82
4.3.1 质心	82
4.3.2 质心运动定理	83
*4.4 火箭飞行原理	84
4.5 角动量 角动量定理	86
4.5.1 角动量	86
4.5.2 力矩	87
4.5.3 质点的角动量定理	88
4.5.4 质点系的角动量定理	89
4.6 角动量守恒定律	90
4.6.1 质点的角动量守恒定律	90
4.6.2 质点系的角动量守恒定律	92
4.7 碰撞	94
4.7.1 正碰	95
4.7.2 斜碰	97
4.8 对称性原理与守恒定律	99
4.8.1 对称性与守恒定律	99
4.8.2 时空对称性与三大守恒定律	101
本章提要	103
思考题 4	103
基础训练习题 4	104
综合能力和知识拓展与应用训练题	108
阅读材料——动量传递概述	109
第5章 刚体力学基础	110
引言	110
5.1 刚体运动学	111
5.1.1 刚体的平动和转动	111
5.1.2 刚体定轴转动的角量描述	112
5.2 刚体定轴转动定律	114
5.2.1 力矩	114
5.2.2 刚体定轴转动定律	116
5.2.3 转动惯量	119

5.3 刚体定轴转动中的功和能	123
5.3.1 力矩的功	123
5.3.2 刚体定轴转动的动能及动能定理	124
5.3.3 刚体的重力势能	125
5.4 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律	127
5.4.1 刚体定轴转动的角动量	127
5.4.2 刚体定轴转动的角动量定理	128
5.4.3 刚体定轴转动的角动量守恒定律	128
*5.5 进动	131
本章提要	133
思考题 5	133
基础训练习题 5	134
综合能力和知识拓展与应用训练题	138
阅读材料——岁差和章动	139

第二篇 电磁学

第6章 静电场	142
引言	142
6.1 库仑定律	143
6.1.1 电荷	143
6.1.2 库仑定律	145
6.1.3 静电力的叠加原理	146
6.2 电场 电场强度	148
6.2.1 电场	148
6.2.2 电场强度 电场强度的叠加原理	149
6.2.3 电场强度的计算	151
6.2.4 电荷在电场中所受的力	155
6.3 高斯定理	156
6.3.1 电场线	156
6.3.2 电通量	157
6.3.3 高斯定理	158
6.3.4 高斯定理的应用	161
6.4 静电场的环路定理 电势	165
6.4.1 静电场的环路定理	165
6.4.2 电势能	167
6.4.3 电势 电势差	167
6.4.4 电势的计算	169
6.5 等势面 电场强度与电势的微分关系	173



6.5.1 等势面	173	7.6.1 洛伦兹力	230
6.5.2 电场强度与电势的微分关系	174	7.6.2 带电粒子在磁场中的运动	230
6.6 静电场中的导体	177	7.6.3 霍尔效应	232
6.6.1 导体的静电平衡条件	177	7.7 安培力	234
6.6.2 静电平衡时导体上的电荷分布	179	7.7.1 安培力	234
6.6.3 静电屏蔽	183	7.7.2 载流线圈在磁场中所受的磁力矩	236
6.7 静电场中的电介质	185	7.8 磁场中的磁介质	237
6.7.1 电介质的极化	185	7.8.1 磁介质	237
6.7.2 有介质时的高斯定理	188	7.8.2 磁介质的磁化	238
6.8 电容和电容器	192	7.8.3 磁介质中的安培环路定理	241
6.8.1 孤立导体的电容	192	7.8.4 铁磁质	242
6.8.2 电容器的电容	193	本章提要	244
6.8.3 电容器电容的计算	195	思考题 7	245
6.8.4 电容器的串联和并联	199	基础训练习题 7	246
6.9 静电场的能量	200	综合能力和知识拓展与应用训练题	248
本章提要	203	阅读材料——核磁共振成像	249
思考题 6	204		
基础训练习题 6	206		
综合能力和知识拓展与应用训练题	211		
阅读材料——石油行业防静电措施	213		
第 7 章 稳恒磁场	215	第 8 章 变化的电磁场	251
引言	215	引言	251
7.1 稳恒电流 电流密度	216	8.1 电磁感应的基本规律	253
7.1.1 稳恒电流	216	8.1.1 电磁感应现象	253
7.1.2 电流密度	216	8.1.2 电动势	255
7.2 磁场 磁感应强度	217	8.1.3 法拉第电磁感应定律	256
7.2.1 磁的基本现象	217	8.1.4 楞次定律	261
7.2.2 磁场和磁感应强度	218	8.2 动生电动势	262
7.3 毕奥 - 萨伐尔定律	219	8.2.1 动生电动势的产生	262
7.3.1 毕奥 - 萨伐尔定律	219	8.2.2 洛伦兹力的做功	263
7.3.2 毕奥 - 萨伐尔定律的应用	220	8.2.3 动生电动势的计算	264
7.3.3 运动电荷的磁场	223	8.3 感生电动势	266
7.4 磁感应线 磁通量 磁场的高斯定理	224	8.3.1 感生电动势的产生	266
7.4.1 磁感应线 磁通量	224	8.3.2 感生电场与静电场	267
7.4.2 磁场的高斯定理	225	8.3.3 感生电动势的计算	268
7.5 安培环路定理	226	8.3.4 电子感应加速器	270
7.5.1 安培环路定理	226	8.3.5 涡电流	271
7.5.2 安培环路定理的应用	227	8.4 自感和互感	272
7.6 洛伦兹力	230	8.4.1 自感	272
		8.4.2 互感	275
		8.5 磁场的能量	277
		8.6 位移电流	280
		8.7 麦克斯韦方程组	283



8.8 电磁场的能量 285

 本章提要 286

 思考题 8..... 287

 基础训练习题 8..... 288

 综合能力和知识拓展与应用训练题 293

 阅读材料——电磁感应法勘探 295

专题选讲：流体力学 297

附录

 附录 A 常用基本物理量 301

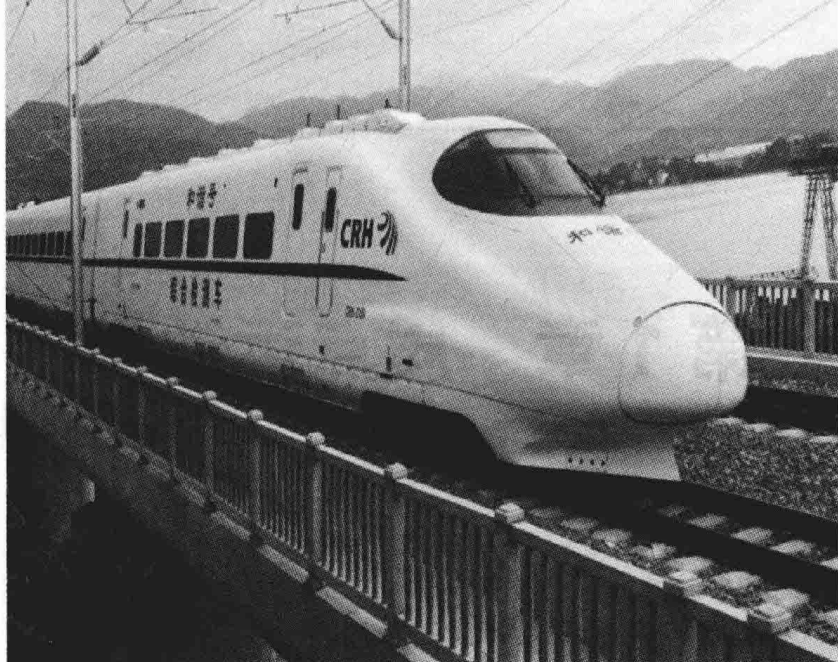
 附录 B 国际单位制 301

 附录 C 希腊字母..... 303

 附录 D 物理量及其单位的名称和符号 303

参考文献 307





第 一 篇

力 学

力

学，是研究物体机械运动及其规律的一门学科。力学分为运动学、动力学和静力学。运动学的任务是描述物体的运动状态随时间变化的规律，动力学讨论物体运动和所受力的关系，静力学则研究力的平衡或物体的静止问题。

人类对力学的研究历史悠久，战国时期，我们的祖先在《墨经》中就有关于运动和时间先后的描述，古希腊学者亚里士多德（Aristotle，前 384—前 332）也在其《物理学》一书中提出了两条物体的运动原理。然而，力学作为一门独立的学科却始于 17 世纪伽利略（Galileo Galilei，1564—1642）对惯性运动的论述。之后，英国科学家牛顿（Isaac Newton，1642—1727）在总结前人实验和理论的基础上提出了力学的三条基本定律和万有引力定律，实现了天上力学和地上力学的综合，形成了统一的力学体系——牛顿力学。牛顿力学又称经典力学，它有着严谨的理论体系和完备的研究方法，并在实践中得到了广泛应用。19 世纪末以来，随着科学技术的发展，产生了研究物体高速运动规律的相对论力学和研究微观物体运动规律的量子力学，揭示了经典力学只在宏观低速领域中适用。但是在包括高速和微观领域在内的整个物理学中，经典力学的一些重要概念和定律，如动量、角动量、能量及其守恒定律也是同样适用的。经典力学不仅没有失去其原有的光辉和存在的价值，而且仍然是现代物理学和自然科学的基础。

本篇在广泛采用矢量、微积分等高等数学知识的基础上，首先介绍经典力学中有关质点运动的一些基本概念和规律，然后介绍牛顿运动定律，接着介绍功和能，动量和角动量，最后讨论刚体力学基础。



第 1 章 质点运动学

引 言

世界是物质的，物质是永恒运动着的。从宇宙天体到微观粒子，从无机界到有机界，从自然界到人类社会，一切领域中的一切形态的物质客体无一例外地处在永恒的、不停息的运动之中。世界上的事物千姿百态，有同有异，人们认识物质，就是认识物质的运动形式。在物质的各种运动形态中，最简单、最普遍的一种运动是机械运动，它是指一个物体相对于其他物体的位置发生改变或物体内部各部分之间的相对位置发生变化，例如，地球的转动、火车的运动、弹簧的伸长和压缩等都是机械运动。

运动学的任务就是描述做机械运动的物体在空间的位置随时间变化的关系，它只描述物体的运动，不涉及引起运动和改变运动的原因。本章主要研究质点的运动，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，如位置矢量、位移、速度和加速度，继而讨论曲线运动和相对运动。

下图是国产时速 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的“和谐号”动车组列车，它的成功下线是我国铁路全面实施自主创新战略取得的重大成果，标志着我国铁路客运装备的技术水平达到了世界先进水平。如果动车组列车的运动可以被看成质点运动，请你用本章所学内容对它的运动状态进行定性的描述。



1.1 质点 参考系 坐标系

1.1.1 质点

实际物体都有大小和形状,当物体在做机械运动时,其运动状况十分复杂。例如,地球在绕太阳公转的同时还绕自身的轴线自转;踢出去的足球,它在空中向前飞行的同时还在旋转。通常情况下,物体的大小和形状的变化,对物体的运动是有影响的。但在有些问题中,如果物体的形状和大小对所研究的问题影响不大而可以忽略,或者物体上各部分具有相同的运动规律,那么就可以把该物体看作一个有质量的点,称为质点。

在物理学中,经常引入一些理想化的模型来替代实际的物体,“质点”就是一个理想化的模型。但是,值得注意的是,在实际问题中,一个物体是否能被抽象为质点是有条件的、相对的,而不是无条件的、绝对的。例如,在地球绕太阳的公转中,地球的半径为 $6\,370\text{ km}$,显然是个庞然大物,但是地球到太阳的平均距离约为地球半径的 10^4 倍,所以在研究地球公转时可以把地球当作质点。然而,在研究地球自转时,就不能再把地球当作质点处理了。

质点是经过科学抽象的理想模型,这种模型突出了问题的主要矛盾,把握住了事物的主要方面,从而容易求出与实际情况接近的结果。应当指出的是,即使有时我们所研究的物体不能视为质点,但可把物体无限分割为极小的质量元(简称质元),每个质元都可视为质点,物体的运动就成为无限个质点的运动总和,即质点系的运动。所以,研究质点的运动是研究物体运动的基础。

1.1.2 参考系和坐标系

在宇宙中,绝对静止的物体是找不到的,大到星系,小到原子、电子,无一不在运动。无论从机械运动来说,还是从其他运动来说,运动和物质是不可分割的,物质的运动存在于人们的意识之外,这便是运动本身的绝对性。运动虽然具有绝对性,但是对一个物体运动的描述却具有相对性。因此要描述一个物体的机械运动,可以根据不同的运动关系,选择另一个物体或几个彼此之间相对静止的物体作为参考系。同一物体的



运动，由于我们所选取的参考系不同，反映的运动关系就不同，对它的运动描述也会不同。例如，一个人站在匀速航行中的船上，并且手里拿着一个物体。在同船的人看来物体是不动的，但岸上的人却看到物体和船是一起运动的。如果船上的人把手松开，同船的人看到物体沿直线自由下落，而岸上的人却看到物体做平抛运动。早在战国后期，我国的名家公孙龙就已意识到这点，他提出了“飞鸟之影，未尝动也”的辩论。飞鸟的影子对地面其他物体来说是运动着的，但对飞鸟本身来说，如影随形，这个影子就是不动的了。研究和描述物体运动，只有在选定参考系后才能进行。如何选择参考系，必须从具体情况来考虑。例如，一个星际火箭在刚发射时，主要研究它相对于地面的运动，所以把地球选作参考系。但是，当火箭进入绕太阳运行的轨道时，为了研究方便，便选取太阳作为参考系。

参考系选定以后，为了把物体在各个时刻相对于参考系的位置定量地表示出来，还需要在参考系上建立一个适当的坐标系。在参考系中，为确定空间一点的位置，按规定方法选取的一组有次序的数据，就叫作“坐标”。坐标系的种类很多，常用的坐标系有：直角坐标系、自然坐标系、极坐标系、柱坐标系和球坐标系等。在具体问题中，如果指明了坐标系，就意味着已经选定了参考系，或者说，坐标系是参考系做定量描述时的替身。我们可以根据具体问题的需要，选定合适的坐标系。

1.2 描述质点运动的物理量

1.2.1 位置矢量和运动方程

如图 1-1 所示的直角坐标系中，在时刻 t 某质点在点 P 的位置可用直角坐标系原点 O 指向点 P 的有向线段 $\mathbf{r}$ 表示，矢量 $\mathbf{r}$ 称为位置矢量，简称位矢。从图 1-1 可以看出，位置矢量在 x 轴、 y 轴、 z 轴上的投影（即点 P 的坐标）为 x 、 y 、 z 。因此位置矢量 $\mathbf{r}$ 可表示为

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

式中， $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 分别为 x 、 y 、 z 轴正方向的单位矢量， $x\mathbf{i}$ 、 $y\mathbf{j}$ 、 $z\mathbf{k}$ 分别是位矢 $\mathbf{r}$ 在三个坐标轴的分矢量。位矢 $\mathbf{r}$ 的大小为

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

位矢的方向余弦为

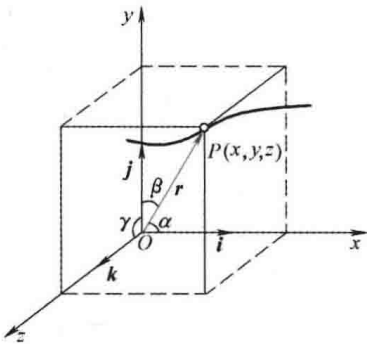


图 1-1 位置矢量



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

式中, α 、 β 、 γ 分别是位矢 $\mathbf{r}$ 与 x 轴、 y 轴、 z 轴之间的夹角。

质点运动时, 位置矢量 $\mathbf{r}$ 将随时间而变化, 因此, 质点的坐标 x 、 y 、 z 和位置矢量 $\mathbf{r}$ 都是时间 t 的函数。表示运动过程的函数式可以写为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-4)$$

或

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-5)$$

式 (1-4) 和式 (1-5) 都称为运动方程, 它们是等效的, 即式 (1-4) 所描述的运动可以看作是由式 (1-5) 所描述的三个相互垂直的分运动的叠加。知道了运动方程, 就能确定质点在任意时刻的位置, 从而确定质点的运动。

质点在空间的运动路径称为轨迹, 质点的运动轨迹为直线时, 称为直线运动, 质点的运动轨迹为曲线时, 称为曲线运动。从式 (1-5) 中消去 t 即可得轨迹方程。轨迹方程和运动方程最明显的区别就在于轨迹方程不是时间 t 的显函数。

1.2.2 位移与路程

机械运动意味着物体的位置随着时间而变化。对于质点, 我们用位移的概念来描述质点在运动过程中的位置变化。

如图 1-2 所示, 设质点在时刻 t 处于点 A , 其位矢为 $\mathbf{r}_A$; 在时刻 $t + \Delta t$, 质点运动到点 B , 其位矢为 $\mathbf{r}_B$ 。在 Δt 时间内, 质点的位置变化由点 A 指向点 B 的矢量 $\Delta\mathbf{r}$ 来表示, $\Delta\mathbf{r}$ 称为质点的位移矢量, 简称位移。从图 1-2 可以看出

$$\Delta\mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A \quad (1-6)$$

在直角坐标系中, 位移的表达式为

$$\Delta\mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-7)$$

式中, $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$, $\Delta z = z_2 - z_1$ 。位移大小的表达式为

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1-8)$$

质点在 Δt 时间内运动的实际路径是曲线段 $\widehat{AB}$, 其长度称为路程, 记作 Δs 。必须注意, 位移和路程是两个不同的概念, 位移是矢量, 它的大小是 $|\Delta\mathbf{r}|$ 为点 A 和点 B 之间的直线距离。路程则是标量, 是点 A 和点 B 之间的弧长。一般来说 $|\Delta\mathbf{r}| \leq \Delta s$ 。只有在 Δt 趋近于零时, 才有 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$ 。

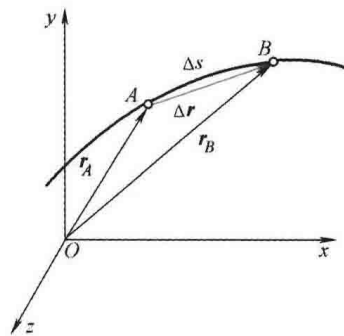


图 1-2 位移矢量



1.2.3 速度

在研究质点的运动时,不但要知道质点在任意时刻的位置,还要知道质点的运动方向和运动的快慢,也就是要知道它的速度。只有当质点的位矢和速度同时被确定时,其运动状态才能被确定。在我们的日常生活用语中,速度和速率这两个词是可以互换的,然而在物理学中,这两者是有区别的:速率是标量,只有大小,而速度是矢量,既有大小又有方向。

1. 平均速度

当质点在 Δt 时间内从点 A 运动到点 B , 质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$, 如图 1-3 所示。为了表示在这段时间内质点运动的快慢程度,我们把质点的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与所经历的时间 Δt 之比,定义为质点在这段时间的平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-9)$$

平均速度是一个矢量,其方向与位移方向 $\Delta \mathbf{r}$ 相同。平均速度的大小等于质点在 Δt 时间内位置矢量的平均变化率。

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 Δs 与经历这段路程所用的时间 Δt 之比,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-10)$$

2. 瞬时速度

平均速度只能对 Δt 时间内质点位置随时间变化的情况做粗略的描述。因为在 Δt 时间内,质点在各个时刻的运动情况不一定相同,质点的运动可以时快时慢,方向也可以不断地改变,所以平均速度不能反映质点运动的真实细节。如果我们要精确地知道质点在某一时刻或某一位置的实际运动情况,应尽量使 Δt 减小。当 Δt 趋近于零时,质点平均速度的极限称为瞬时速度,简称速度,用 $\mathbf{v}$ 表示,也可以写作

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-11)$$

上式表明,质点在 t 时刻的瞬时速度等于其位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间 t 的一阶导数,它仍然是一个矢量。从速度的定义式 (1-11) 可知 t 时刻质点速度 $\mathbf{v}$ 的方向就是当 Δt 趋近于零时,平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 或位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向。由图 1-3 可以看出,当 Δt 趋近于零时,点 B 无限趋近于点 A , $\bar{\mathbf{v}}$ 将变得与曲线上点 A 处的切线重合并指向运动方向。所以质点在做曲线运动时,质点在某一

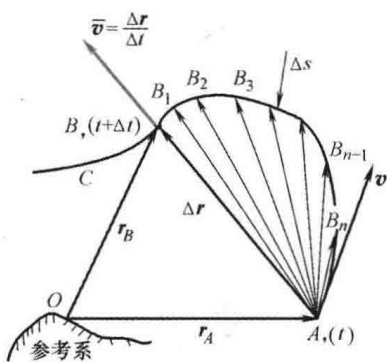


图 1-3 质点的运动路径



点的速度方向就是沿该点曲线的切线方向。这在日常生活中常见可见,如转动雨伞时,水滴将沿着切线方向离开雨伞。

在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限条件下,曲线 $\widehat{AB}$ 的长度 Δs 和直线 AB 的长度相等,即 $ds=|d\mathbf{r}|$, 所以瞬时速率

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \frac{|d\mathbf{r}|}{dt} = |\mathbf{v}| \quad (1-12)$$

这表明速率等于速度的大小,它反映了质点运动的快慢程度。

在直角坐标系中,速度可以表示成

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-13)$$

速度的大小

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2 + (v_z)^2} \quad (1-14)$$

速度和速率在量值上都是长度与时间的比,在国际制单位中,它们的单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2.4 加速度

速度是一个矢量,这就是说,不论速度的大小或方向中任一个有改变或者二者均变,都意味着速度发生了变化。加速度就是描述质点运动速度随时间变化的物理量。

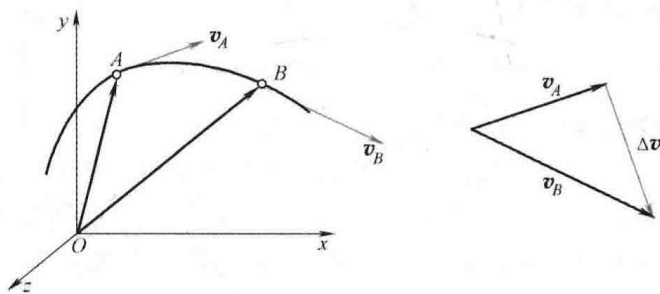


图 1-4 速度的增量

如图 1-4 所示,质点的运动轨迹为一曲线。设在时刻 t ,质点位于点 A ,其速度为 $\mathbf{v}_A$ 。在时刻 $t+\Delta t$,质点位于点 B ,其速度为 $\mathbf{v}_B$ 。由速度矢量图可以看出,在时间间隔 Δt 内,质点速度的增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$$

与平均速度的定义相类似,比值 $\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ 称为时间 Δt 内的平均加速度,即



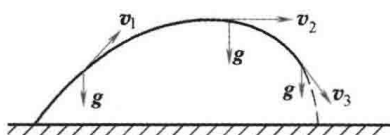


图 1-5 弹丸的速度和加速度随时间的变化

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

平均加速度只能粗略地反映 Δt 时间内质点速度的变化情况。与讨论速度时的情况相似，当我们把时间间隔取得足够小时 ($\Delta t \rightarrow 0$)，取平均加速度的极限，即为瞬时加速度，简称加速度，即

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

加速度仍是一个矢量，它等于速度 $\mathbf{v}$ 对时间 t 的一阶导数，或位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间 t 的二阶导数。加速度的方向为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时速度的增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向。质点在做曲线运动时， $\Delta \mathbf{v}$ 的方向与速度 $\mathbf{v}$ 的方向不在同一直线上，即 $\mathbf{a}$ 的方向不沿曲线的切线方向。如图 1-5 所示，弹丸在飞行过程中各时刻的加速度 $\mathbf{g}$ 的方向竖直向下。随着弹丸上升，速率减小， $\mathbf{g}$ 与 $\mathbf{v}$ 成钝角；随着弹丸下降，速率增大， $\mathbf{g}$ 与 $\mathbf{v}$ 成锐角。然而，无论弹丸处于上升还是下降过程，其加速度的方向总是指向曲线的凹侧。这一结论对任何曲线运动都是适用的，只有在直线运动中，加速度与速度在同一直线上，加速运动时，二者同向；减速运动时，二者反向。

在直角坐标系中，加速度的表达式为

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

则加速度的大小为

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

加速度 $\mathbf{a}$ 的方向可以用其方向余弦表示。

由以上讨论可知，质点的运动方程 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ 是描述质点运动的核心，因为给出了质点的运动方程，就可以知道质点所在的位置矢量 $\mathbf{r}$ 、速度 $\mathbf{v}$ 以及加速度 $\mathbf{a}$ 。一般可以把质点运动学所研究的问题分为两类：

(1) 已知质点运动方程，求质点在任意时刻的速度和加速度。求解这一类问题的基本方法是，将运动方程 $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$ 对时间 t 求一阶和二阶导数。

(2) 已知质点运动的加速度或速度与时间的函数关系以及初始条件 ($t=0$ 时刻质点的位置和速度)，求质点在任意时刻的速度和运动方程。求解这一类问题的基本方法是

将式 $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$ 和 $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 对时间 t 求积分。

