



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理简明教程

Physics

主 编 刘晓莹 彭鸿雁

副主编 姚仲瑜 张铁民 肖世发



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十三五”普通高等教育规划教材

大学物理简明教程

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 刘晓莹 | 彭鸿雁 | |
| 副主编 | 姚仲瑜 | 张铁民 | 肖世发 |
| 参 编 | 孙书娟 | 孙 丽 | 边成玲 |
| | 潘孟美 | 沈振江 | 王红晨 |



广益教育“九斗”
APP 操作说明

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 提 要

大学物理是为高等学校理工科大学一年级学生开设的一门重要的通识性必修基础课,属于非专业教育课程。

本书共 10 章,内容涉及力学、热学、电磁学、光学和近现代物理专题等内容,在不失物理学科体系严谨性的基础上渗透通识教育的理念,在大学物理与高中物理、专业物理的衔接性上做了有益的探索。

本书可作为按大类招生的高等院校少学时大学物理课程的教材和教学参考书,也可用作高等职业教育的物理教材。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理简明教程 / 刘晓莹, 彭鸿雁主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2018. 1
ISBN 978-7-5635-5344-0

I. ①大… II. ①刘…②彭… 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 (2017) 第 307956 号

| | |
|------|--|
| 书 名 | 大学物理简明教程 |
| 主 编 | 刘晓莹 彭鸿雁 |
| 责任编辑 | 张保林 |
| 出版发行 | 北京邮电大学出版社 |
| 社 址 | 北京市海淀区西土城路 10 号 (100876) |
| 电话传真 | 010-82333010 62282185 (发行部) 010-82333009 62283578 (传真) |
| 网 址 | www. buptpress3. com |
| 电子信箱 | ctrd@buptpress. com |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 印 刷 | 北京泽宇印刷有限公司 |
| 开 本 | 787 mm×1 092 mm 1/16 |
| 印 张 | 18.5 |
| 字 数 | 460 千字 |
| 版 次 | 2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷 |

ISBN 978-7-5635-5344-0

定价: 46.00 元

如有质量问题请与发行部联系
版权所有 侵权必究

前 言

物理学是自然科学的基础，它是研究物质的结构和相互作用以及其运动规律的科学，它是由一些基本概念、基本规律和理论组成的体系严谨、精密定量的科学，它是人类文化的重要组成部分。物理学在其发展过程中所形成的基本概念、基本理论、研究方法、实验手段和精密的测试技术渗透在自然科学的一切领域，应用于生产技术的各个部门，已经成为其他自然学科的重要概念的基础和最重要的研究手段。1999年3月在美国亚特兰大市召开的第23届国际纯粹物理与应用物理联合会（International Union of Pure and Applied Physics, IUPAP）代表大会通过的决议五“物理学对社会的重要性”指出：“物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科——是一项国际事业，它对人类未来的进步起着关键的作用。”

自2001年北京大学正式开始实施“元培计划”以来，越来越多的学校根据自己的办学定位和学科专业特点，实施大类招生与培养制度改革。按大类招生即按院、系或一级（二级）学科群来招生，是高等院校根据我国教育发展的实际情况做出的教学改革，大类招生延迟了学生的专业选择时间，让学生在充分了解专业的基础上，结合自己的兴趣和能力，选择更适合自己的专业。以物理学为内容的大学物理课程，是高等学校理工科各专业学生一门重要的通识性必修基础课，通常在大一年级的第二学期开设，学时数常在54~108学时不等，这个学时是少于教育部颁发的《理工科类大学物理课程教学基本要求》中提出的大学物理最低学时数126学时的。按大类招生是高等院校进行内涵建设、提高人才培养质量的重要举措，课程体系的变革是大势所趋，大学物理课程学时数的减少是需要相应教学内容与方式的变革，教材是学生的重要资源，对教材的使用更是要充分考虑大类招生背景下的通识性的特征。

现有的大学物理教材是基于高中物理课程学习的基础上编制的，其内容体系包括力学、热学、光学、电磁学和近现代物理基础。但是目前高中的学生除了力学和电磁学必学之外，其他的模块是选择性学习的，也就是说并不是所有的学生都学习了热学、光学、机械振动与机械波等内容，大学新生物理基础参差不齐，让我们不得不重新审视大学物理教材编写的起点和深度。通识性的课程是属于非专业教育部分课程，旨在培养学生的科学观念和逻辑思维能力，在扩展视野、培养高素质的国家公民方面发挥着独特的作用。在不失物理学体系严谨性的基础上渗透通识教育的理念，做好大学物理与高中物理、专业物理的衔接是课程改革对我们提出的要求。为此，我们的教材——《大学物理简明教程》，突出如下几点：

1. 课程结构注重连续性，与高中物理紧密衔接。

物理学不仅科学地解释了自然现象，深刻揭示自然现象的本质，而且还极大地开阔了人类的视野，改善了人类的生活质量，带领人类进入了全新的科技信息时代，可以确定的是未来社会的发展一样仍然离不开物理科学。学习基本的物理学知识和技能，关心与物理



科学科学有关的社会问题, 进一步提高科学素养, 是大学物理课程的目标。基本的物理知识和技能在初中物理、高中物理及大学物理中有着相同的主题——物质、运动和相互作用、能量, 不同的是学科内容的广度与深度是逐级拓展的。本教材重视大学物理基本概念和原理与高中物理知识的连续性, 以物理学的基本结构来组织教材, 力图为学生的自主发展创造条件, 并深入浅出地勾画出物理思想发展的脉络, 让学生在中学物理学习的基础上扩展与深化对物理学基本概念与原理的理解和认识, 达到提高科学素养的目的。

2. 精炼课程内容, 体现基础性、时代性。

大学物理是属于非专业教育部分课程, 在培养学生的科学观念和逻辑思维, 提高学生科学素养方面有着独特的作用, 为学生的专业选择与终身发展打下基础。本教材重视物理学科体系的基础性和严谨性, 为发展方向不相同的学生提供必要的基础知识、思想与基本方法; 同时又兼顾通识性课程的特征, 降低了教材内容的难度和要求, 这一方面体现在课程内容的精简上, 如电磁学部分, 重点讨论了真空中的电磁场理论, 对于介质中的电磁场理论则作为扩展性的知识切入, 试做深入探讨; 另一方面还体现在习题的选择上, 章节习题与课程内容相匹配, 降低了习题的难度和数量, 重点训练学生的逻辑思维能力和应用微积分解决物理问题的意识和能力, 而教材例题的设置则为分析问题和解决问题的提供范例。

为体现课程内容的时代性, 教材增加了物理学与生活、现代社会及科技发展相联系的内容, 培养学生将所学的知识应用于生活实践的意识。教材每一章节都会用一幅精选的图片开始, 这些图或为自然现象, 或为具有影响力的科技成果, 其中所蕴含的科学原理正是相应章节将要学习的内容。本书最后一章以专题的形式介绍了近现代物理发展的重要成果和科学思想, 对于开阔学生视野, 激发学生的探究欲望有着积极的意义。

3. 重视物理文化的渗透。

物理学的发展史就是一部科学探究史, 是科学家群体从事科学活动的智力劳动过程。物理学知识体系构建的过程中每一个科学上的新发现, 特别是具有重大意义的科学发现, 都有着丰富的人文故事, 都为后继者提供宝贵的教益和启迪。本教材的章节中穿插着部分科学家的简单介绍, 意图提示学生物理学不仅仅是原理、公式, 还有丰富的人文教育价值, 引导学生在汲取前辈科学家科学思维和研究方法的滋养的同时也关注科学知识背后的科学精神和献身于科学的意志品质, 以期激发学生的人文情怀, 感悟人生哲理, 养成正确的价值观念, 保持积极向上的学习心态。

本书由编委会的成员集体完成, 具体编写分工如下: 姚仲瑜编写了运动的描述; 沈振江编写了牛顿运动定律; 姚仲瑜、王红晨编写了力学守恒定律; 刘晓莹、潘孟美编写了机械振动与机械波; 孙丽编写了气体动理论; 彭鸿雁编写了热力学基础; 孙书娟编写了静电场; 刘晓莹编写了稳恒磁场与电磁感应; 张铁民和边成玲编写了光学部分; 近现代物理专题部分则由肖世发、彭鸿雁和刘晓莹共同完成。由刘晓莹、彭鸿雁、姚仲瑜、张铁民、肖世发负责全书的修订工作, 最后由刘晓莹、彭鸿雁完成全书的统稿工作。本书在编写的过程中得到了很多老师的关注和支持, 北京邮电大学出版社的工作人员在本书的编辑出版的过程中也给予了有力的支持和帮助, 在此一并表示衷心的感谢!

本书的编写是一种新的探索, 由于编者水平有限, 对教材中有错漏和不妥漏之处, 还望读者能批评指正, 以便更正与改进。

编者

目 录

第 1 篇 力 学

| | |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 运动的描述 | 2 |
| 1.1 参考系 坐标系 物理模型 | 3 |
| 1.2 位置矢量 位移 速度 加速度 | 4 |
| 1.3 曲线运动的描述 | 8 |
| 1.4 运动学中的两类基本问题 | 11 |
| 1.5 相对运动 | 13 |
| 习题 | 15 |
| 第 2 章 运动定律与力学守恒定律 | 16 |
| 2.1 牛顿运动定律 | 17 |
| 2.2 动量 动量守恒定律 | 20 |
| 2.3 功 动能 势能 机械能守恒定律 | 24 |
| 2.4 质点的角动量与角动量守恒定律 | 31 |
| 2.5 刚体的转动 | 34 |
| 习题 | 42 |
| 第 3 章 机械振动与机械波 | 44 |
| 3.1 简谐振动 | 45 |
| 3.2 简谐振动的合成 | 53 |
| 3.3 机械波的描述 | 55 |
| 3.4 波动方程 | 58 |
| 3.5 波的能量和强度 | 62 |
| 3.6 波的特性 | 65 |
| 3.7 驻波 多普勒效应 | 69 |
| 习题 | 73 |



第 2 篇 热 学

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第 4 章 气体动理论 | 78 |
| 4.1 平衡态 气体状态参量 理想气体状态方程 | 79 |
| 4.2 物质的微观模型 统计规律性 | 82 |
| 4.3 理想气体压强公式 | 85 |
| 4.4 理想气体分子的平均平动动能与温度的关系 | 87 |
| 4.5 能量均分定理 理想气体的内能 | 90 |
| * 4.6 麦克斯韦气体分子速率分布律 | 93 |
| * 4.7 分子平均碰撞次数和平均自由程 | 100 |
| 习题 | 102 |
| 第 5 章 热力学基础 | 105 |
| 5.1 准静态过程 功和热量 | 106 |
| 5.2 内能 热力学第一定律 能量守恒与转化定律 | 108 |
| 5.3 热力学第一定律在理想气体的宏观过程中的应用 | 110 |
| 5.4 循环过程 | 115 |
| 5.5 热力学第二定律 | 119 |
| 5.6 热力学第二定律的微观解释 | 123 |
| * 5.7 熵 熵增加原理 | 124 |
| 习题 | 125 |

第 3 篇 电 磁 学

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第 6 章 静电场 | 130 |
| 6.1 电荷 库仑定律 | 131 |
| 6.2 电场 电场强度 | 133 |
| 6.3 高斯定理 | 141 |
| 6.4 电势 | 148 |
| 6.5 静电场中的导体 | 154 |
| 6.6 电容器及其电容 | 157 |
| 6.7 电场中所储存的能量 | 160 |
| * 6.8 有电介质的电容器 电介质的极化 | 162 |
| 习题 | 165 |



| | |
|------------------------|-----|
| 第 7 章 稳恒磁场 | 167 |
| 7.1 磁场 磁感应强度 | 168 |
| 7.2 磁通量 磁场中的高斯定理 | 170 |
| 7.3 毕奥-萨伐尔定律 | 172 |
| 7.4 安培环路定理 | 175 |
| 7.5 磁场对运动电荷的作用 | 178 |
| 7.6 磁场对载流导体的作用 | 182 |
| * 7.7 磁场中的磁介质 | 185 |
| 习题 | 188 |

| | |
|-----------------------|-----|
| 第 8 章 电磁感应 | 190 |
| 8.1 电磁感应定律 | 191 |
| 8.2 动生电动势 感生电动势 | 195 |
| 8.3 自感与互感 | 200 |
| 8.4 电磁场与电磁波 | 203 |
| 习题 | 207 |

第 4 篇 光 学

| | |
|----------------|-----|
| 第 9 章 光学 | 210 |
| 9.1 几何光学 | 211 |
| 9.2 光的干涉 | 214 |
| 9.3 光的衍射 | 222 |
| 9.4 光的偏振 | 227 |
| 习题 | 232 |

第 5 篇 近代物理学

| | |
|------------------------|-----|
| 第 10 章 近代物理学基础 | 236 |
| 10.1 狭义相对论 | 237 |
| 10.2 量子物理基础 | 247 |
| 10.3 广义相对论简介 | 254 |
| * 10.4 引力波的观测 | 260 |
| * 10.5 探寻暗物质和暗能量 | 265 |
| 习题 | 270 |



| | |
|------------------------|-----|
| 附录 1 大学物理中的高等数学 | 271 |
| 附 1.1 大学物理中的微积分 | 271 |
| 附 1.2 大学物理中的矢量运算 | 275 |
| 附录 2 习题答案 | 279 |
| 参考文献 | 286 |



第 1 篇

力 学

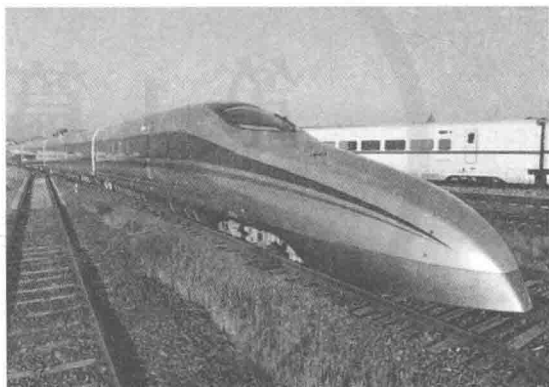
力学是研究物质机械运动规律的科学,它是物理学产生与发展的源头之一,时至今日力学所研究的力、动量、动能以及角动量等概念早已超出了力学研究的范畴;其在发展中所形成的科学研究方法也早已成了人类认识自然的有力工具。

“尽管我们今天确实知道古典力学不能用来作为统治全部物理学的基础,可是它在物理学中仍然占领着我们全部思想的中心。”“牛顿的成就的重要性,并不限于为实际的力学科学创造了一个可用的和逻辑上令人满意的基础;而且直到 19 世纪末,它一直是理论物理学领域中每一个工作者的纲领。”

—— 爱因斯坦

第 1 章 运动的描述

速度一直都是人类追求的终极目标,自 1825 年 9 月 27 日由斯蒂芬森设计的机车牵引的列车以 24 km/h 的速度从达灵顿驶到斯托克时,铁路运输的事业就诞生了.自此随着科技的发展,火车的速度越来越快,人们的出行也越来越便捷.2014 年中国南车制造的 CIT500 型的试验速度达到了 605 km/h,是目前世界上最快的火车,这辆列车被命名为“青铜剑”,计划运营时速为 550 km/h,预计在 2021 年开通.



已有知识基础

- 认识质点、参考系、坐标系概念.
- 知道运动是永恒的(绝对的),也知道运动是相对的.
- 理解位移、速度和加速度概念,知道矢量和标量的区别.
- 了解匀变速直线运动的特点,能在质点模型下解决相关的运动问题.
- 会用运动合成与分解的方法分析抛体运动.
- 会描述匀速圆周运动,知道向心加速度,能用牛顿第二定律来分析匀速圆周运动的向心力.

本章学习目标

- 掌握三维坐标下的位置矢量和位移矢量.
- 认识极限概念,理解速度和加速度矢量.
- 认识平面曲线运动的描述方法,认识自然坐标系.
- 认识变速圆周运动,认识切向加速度和法向加速度,了解角位移、角速度和角加速度,了解一般曲线运动.
- 掌握由运动方程求速度、加速度的方法和由加速度求速度和运动方程的方法.
- * 了解相对运动概念,了解相对运动中两坐标系中的坐标、速度和加速度的变换关系,能初步应用.

物体(或物体各部分)之间的空间位置随时间的变化,称为机械运动(mechanical motion).机械运动是自然界的所有运动中最基本、最简单的运动形态.本章从几何学角度出发,在引入参考系、坐标系、位置矢量、位移概念的基础上,运用极限和微分定义速度和加速度,进而讨论这些物理量随时间的变化以及相互之间的变化关系.然后由直线拓展到曲线,由线度延伸到角度,介绍角位移、角速度和角加速度概念,在曲线运动中讨论切向加速度和法向加速度.最后介绍相对运动.



1.1 参考系 坐标系 物理模型

一、参考系

要描述物体运动,必须选择一个其他的物体作为参考,这个作为参考基准的物体称为参考系。

观察同一物体的运动,如果选择的参考系不同,观察的结果会不一样。例如,在匀速直线运动的车厢中观察自由下落的物体,相对于车厢(参考系)该物体作直线运动;相对于地面(参考系),该物体作抛物线运动。

从运动学的角度讲,参考系的选择可以是任意的。对于参考系的选择,通常以观察和研究问题的方便和简单为原则。例如,研究地球表面物体的运动,通常选择地球为参考系;研究太阳系行星的运动,则选择太阳作为参考系。

二、坐标系

要对物体的运动做定量的描述,就必须在参考系上建立坐标系。直角坐标系是力学中常用的坐标系,但也可以根据具体情况选择极坐标系、自然坐标系、球坐标系等坐标系。下面介绍直角坐标系和自然坐标系。

1. 直角坐标系

直角坐标系也称为笛卡儿直角坐标系,它是由三条共点而且相互垂直的射线组成的(见图 1-1)。三条线的交点 O 称为坐标系的原点,三条射线分别称为 x 、 y 、 z 轴,三个坐标轴的方向分别由三个单位矢量 i 、 j 、 k 表示。如果物体的运动限于在一个平面内,则用二维直角坐标系来描述其运动情况。

在直角坐标系中,矢量 r 表示为

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

矢量大小或模为

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

r 矢量方向与 x 、 y 、 z 轴的夹角 (α, β, γ) 在直角坐标系中的余弦分别为

$$\cos \alpha = \frac{x}{r}, \quad \cos \beta = \frac{y}{r}, \quad \cos \gamma = \frac{z}{r}$$

满足关系

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1-3)$$

2. 自然坐标系

在质点的平面曲线运动轨迹为已知时,在运动轨迹上取一点 O' 作为坐标的原点,则以



笛卡儿(Descartes René, 1596—1650)法国哲学家、数学家、物理学家和生理学家。他创建了直角坐标系,创造了用代数方法来研究几何图形的数学分支——解析几何,使几何图形可以用代数形式来表示。

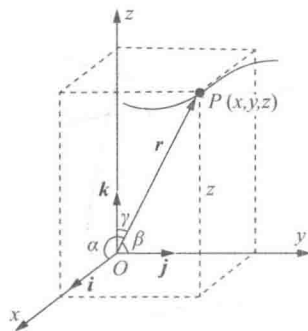


图 1-1



质点运动轨迹为“弯曲”坐标轴的坐标系称为平面自然坐标系. 在平面自然坐标系中, 质点的位置坐标由质点所处的位置沿运动轨迹到坐标原点 O' 的路径长度 s 来表示. 平面自然坐标系是二维坐标系, 以轨迹的切向和内凹法线方向的单位矢量 (τ_0, n_0) 作为其独立坐标方向, 如图 1-2 所示.

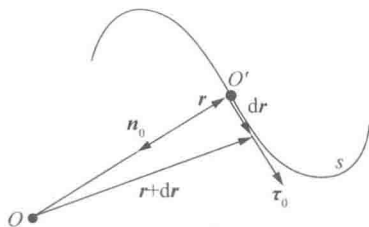


图 1-2 自然坐标系

三、物理模型(质点)

自然界中大多数真实的物理过程是极其复杂的, 为了研究某一物理过程中最基本、最本质的规律, 通常会将真实的物理过程进行合理的简化, 抽象出便于研究物体运动过程的物理模型.

质点就是力学中的一种理想模型. 例如, 研究地球绕太阳公转, 如果不考虑地球自转引起的各局部的运动, 可将地球当作是一个有质量的几何点看待. 再如, 在研究直线运动的火车运动时, 由于火车上各点的速度是一致的, 可以把火车看作是一个质点来研究, 这样问题的处理会变得简单许多.

若物体各部分的运动状态不一致, 可以将物体简化为由若干个质点组成的系统, 即质点系. 当我们把组成这个物体的各个质点的运动状况研究清楚了, 整个物体的运动情况也就清楚了.

视频



物理模型

1.2 位置矢量 位移 速度 加速度

一、位置矢量与运动方程

为了表示质点的位置, 首先应选取参考系, 然后在参考系上建立坐标系, 以及坐标系的原点和坐标轴. 质点 P 在直角坐标系中的位置由 P 点的三个坐标 x, y, z 来确定. 从原点 O 到 P 点的矢量 $\vec{OP} = \mathbf{r}$ 来表示, 矢量 \mathbf{r} 叫作位置矢量, 简称为位矢.

位置矢量

在直角坐标系中, 位矢 \mathbf{r} 表示为

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

位矢 \mathbf{r} 大小为

$$|\mathbf{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1-5)$$

作机械运动的质点, 其坐标和位矢都是时间 t 的函数. 质点的坐标随时间的变化关系, 称为运动方程. 它函数表示为



$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1-6)$$

分量式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-7)$$

有了运动方程,就能确定任一时刻质点的位置,从而确定质点的运动状态.因此,求解质点的运动方程是力学的主要任务之一.

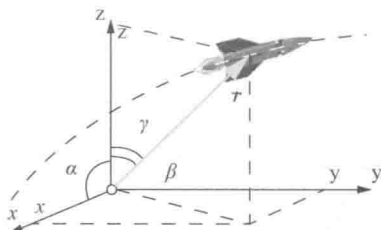
质点在空间的运动路径称为轨迹.质点的运动轨迹为直线时,称为直线运动.质点的运动轨迹为曲线时,称为曲线运动.从式(1-7)中消去 t 可得到质点的轨迹方程.例如,质点作平面运动,运动方程为 $x = x(t), y = y(t)$,消去 t 后,得 $y = y(x)$.很明显,轨迹方程是质点坐标之间的函数关系.

二、位移和路程

我们知道可以用位移来描述质点在一定时间间隔内位置的变化.如图1-3所示,质点沿 AB 运动,在 t 时刻,质点位于 A 点,位矢为 \mathbf{r}_1 ;在 $t + \Delta t$ 时刻,质点位于 B 点,位矢为 \mathbf{r}_2 .在 Δt 时间间隔内质点位矢的增量为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-8)$$

我们称之为位移,它是描述物体位置变化的大小和方向的物理量.位移是矢量,它的运算遵从平行四边形法则(或三角形法则).



运动的描述

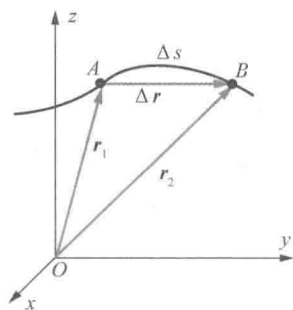


图1-3 位移

位移

在直角坐标系中,位移的表达式表示为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} \\ &= \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \end{aligned} \quad (1-9)$$

位移的大小(模长)为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1-10)$$

国际单位:米(m)

位移与路程是不同的,在一段时间内,质点在其轨迹上经过的路径总长度叫作路程.在图1-3中,位移是有向线段 \overrightarrow{AB} ,它的模为直线 \overline{AB} 的长度;路程为曲线 AB 的长度,是标量,记为 Δs .通常, $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$.

三、速度

全面描述物体的运动状态,不仅要知道物体的位置,还必须知道物体运动的快慢,即速度.如图1-3所示,令 t 时刻质点位于 A ,位矢为 \mathbf{r}_1 ; $t + \Delta t$ 时刻质点位于 B ,位矢为 \mathbf{r}_2 .在 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内质点的位移为 $\overrightarrow{AB} = \Delta \mathbf{r}$.那么质点在 Δt 内的平均速度为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-11)$$



显然,用平均速度描述质点的运动是比较粗糙的,它不能反映质点在任意时刻的瞬时运动速度.要精确描述质点运动的速度,就必须引入极限概念:尽量减小 Δt ,以至于 $\Delta t \rightarrow 0$,用平均速度的极限值来描述质点的瞬时速度,数学表示式为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \bar{\mathbf{v}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

速度

速度等于位矢对时间的一阶导数,记为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-12)$$

在直角坐标系中,瞬时速度的表达式表示为

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

速度的大小(模)可表示如下:

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

国际单位:米/秒(m/s)

描述物理运动快慢时,我们还会常用到速率这个物理量,速率是标量,指速度的大小.

四、加速度

运动的质点其速度可能会发生变化,为了反映这种变化,我们引入加速度的概念.加速度是描述质点的速度随时间变化快慢的物理量.

如图 1-4 所示,质点在 t 时刻 A 处的速度为 \mathbf{v}_1 , $t + \Delta t$ 时刻在 B 处的速度为 \mathbf{v}_2 ,速度的增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_2 - \mathbf{v}_1$$

该速度增量与时间间隔之比 $\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$,称为 t 时刻 Δt

时间内的平均加速度,即 $\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$.

则质点在 t 时刻的瞬时加速度为

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-15)$$

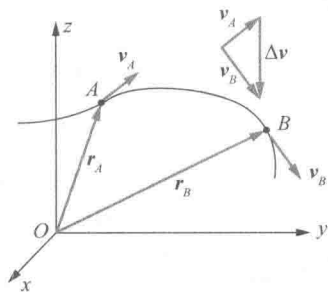


图 1-4

加速度

加速度是速度对时间的变化率,即速度对时间的一阶导数,或位矢对时间的二阶导数.

在直角坐标系中,加速度表示为

$$\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{k} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k} \quad (1-16)$$

式(1-16)中, $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}$, $a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2}$

加速度的模为



$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-17)$$

国际单位:米/秒²(m/s²)

例题 1-1 直线运动的位矢、速度、加速度

目标: 利用给定的运动方程求解任一时刻质点的位置矢量、速度和加速度.

问题: 质点在平面 $O-xy$ 上运动,运动方程为 $x = \frac{1}{2}t^2 - 3t + 4$, $y = 2t + 3$ (位置、时间单位分别为:m,s). 求:(1) 质点位置矢量表达式;(2) 速度矢量表达式,计算 $t = 2$ s 时质点的速度;(3) 质点的加速度表达式,计算 $t = 4$ s 时质点的加速度.

分析: 已知质点运动方程的两个分量式 $x(t)$ 和 $y(t)$, 所以可在直角坐标系中写出质点的位置矢量, 并由此求对时间的一阶导数即为速度的矢量表达式. 速度对时间的一阶导数则为加速度.

解:(1) 位矢
$$\mathbf{r} = \left(\frac{1}{2}t^2 - 3t + 4\right)\mathbf{i} + (2t + 3)\mathbf{j} \text{ m}$$

(2) 根据速度定义
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

有
$$\mathbf{v} = (t - 3)\mathbf{i} + 2\mathbf{j} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

当 $t = 2$ s 时
$$\mathbf{v} = -\mathbf{i} + 2\mathbf{j} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(3) 加速度
$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{i} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

当 $t = 4$ s 时
$$\mathbf{a} = \mathbf{i} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

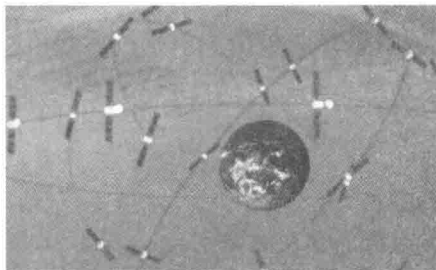
讨论

本题的速度求的是矢量表达式,如果要求 2 s 时速度的大小的话,则需要求出速度矢量的模,即 $v = \sqrt{(t-3)^2 + 2^2} = \sqrt{5} = 2.236 \text{ m/s}$, 设速度与 x 轴的夹角为 α , 则方向可由 $\tan \alpha = v_x/v_y$ 求得.

物理与社会

北斗卫星导航系统

人类在生产 and 生活实践中发明了多种定位和定向方法用于确定自己的位置和速度,卫星导航就是其中之一.卫星导航是利用卫星发射的无线电信号进行导航定位的技术,它因不受气象条件、航行距离的限制,且导航精度高而备受关注.目前很多人一谈起导航就会想起“GPS”,其实 GPS 是美国军方建造的全球定位系统,而中国自主建设、独立运行的卫星导航系统是北斗卫星 (COMPASS) 导航系统.早在



2000 年年底,我国就已经建成北斗一号系统,开始向我国境内提供相关导航定位服务,到 2012 年年底,我国正式建成可向亚太地区提供服务的北斗二号系统.目前我国已经全面启动北斗系统第三步即北斗三号系统建设,预计将于 2020 年前后建成覆盖全球范围的北斗全球卫星导航系统.



1.3 曲线运动的描述

一、一般平面曲线运动

质点作曲线运动时,其运动速度矢量大小和方向会发生变化,为了便于描述和表示速度和加速度,常采用平面自然坐标系予以讨论.

设质点的运动轨道如图 1-5(a) 所示, t 时刻质点在 P_1 点, 速度为 \mathbf{v}_1 ; $t + \Delta t$ 时刻于 P_2 点, P_1 点和 P_2 点切角为 $\Delta\theta$. 在 Δt 时间内速度增量为 $\Delta\mathbf{v}$. \mathbf{v}_1 、 \mathbf{v}_2 和 $\Delta\mathbf{v}$ 之间的关系如图 1-5(b) 所示, 在 AC 上截取 $AD = AB = |\mathbf{v}_1|$, 则 $DC = AC - AD = |\mathbf{v}_2| - |\mathbf{v}_1| = |\Delta\mathbf{v}_\tau|$, 它是速度模量的增量. 连接 BD , $\overrightarrow{BD} = \Delta\mathbf{v}_n$, 它反映了由于方向变化引起的速度矢量的增量. 从图中可知速度矢量的变化关系为

$$\Delta\mathbf{v} = \Delta\mathbf{v}_\tau + \Delta\mathbf{v}_n \quad (1-18)$$

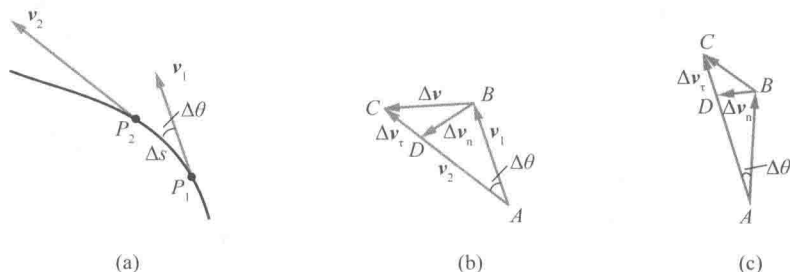


图 1-5

由图 1-5(c) 可以推断: 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta\theta \rightarrow 0$, $\angle ABD \rightarrow 90^\circ$, 即 $\Delta\mathbf{v}_\tau$ 的方向就是 \mathbf{v}_1 的方向, 亦即沿曲线在 P_1 的切线方向; 此时, $\Delta\mathbf{v}_n$ 的方向沿曲线上过 P_1 点的法线方向. 当 $\Delta\theta \rightarrow 0$ 时, $\Delta v_n = v\Delta\theta$. 以 $\boldsymbol{\tau}_0$ 、 \mathbf{n}_0 表示自然坐标系的切线和法线方向的单位矢量, 则加速度矢量表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{v}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{v}_\tau}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\mathbf{v}_n}{\Delta t} \\ &= \frac{dv}{dt}\boldsymbol{\tau}_0 + v \frac{d\theta}{dt}\mathbf{n}_0 \end{aligned} \quad (1-19)$$

由于 $\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = v \frac{1}{\rho}$, 式中 $\rho = \frac{ds}{d\theta}$ 为 P_1 点处的曲率半径. 于是

$$\mathbf{a} = \frac{dv}{dt}\boldsymbol{\tau}_0 + \frac{v^2}{\rho}\mathbf{n}_0 = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n \quad (1-20)$$

式中, $\mathbf{a}_\tau = \frac{dv}{dt}\boldsymbol{\tau}_0$, $\mathbf{a}_n = \frac{v^2}{\rho}\mathbf{n}_0$ 分别为加速度的切向分量和法向(曲线凹进的方向)

分量. $\mathbf{a}_\tau = \frac{dv}{dt}$, 反映速度大小的变化率; $\mathbf{a}_n = \frac{v^2}{\rho}$, 反映速度方向的变化率. 加速度的模为

$$|\mathbf{a}| = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} \quad (1-21)$$

视频



切向加速度