

大学物理学

(上)

陆培民 陈美锋 曾永志 主编

清华大学出版社

大学物理学

(上)

陆培民 陈美锋 曾永志 主编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书分为上、下两册,上、下册各有7章内容。第1章到第3章属于经典力学的内容,讲述质点运动学、质点动力学以及刚体定轴转动;第4章介绍狭义相对论基础知识;第5章到第7章属于波动与光学的内容,讲述振动与波动的基本特征、几何光学基本规律以及光的干涉、衍射和偏振;第8章和第9章属于热学内容,讲述气体动理论和热力学基本定律;第10章到第12章属于电磁学内容,讲述静电场、稳恒电流磁场、电磁感应和电磁波的基本概念;第13章和第14章属于量子物理基础内容,讲述量子物理基本概念、原子中电子的状态和分布规律,并简单介绍固体的结构及其组成粒子之间的相互作用与运动规律。上、下册都开设专题阅读,介绍物理前沿和现代物理思想。

本书涵盖《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》的所有A类内容,B类内容有的带“*”号出现,有的写成专题形式;适合中等学时的大学物理教学。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上/陆培民,陈美锋,曾永志主编. —北京:清华大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-302-24766-1

I. ①大… II. ①陆… ②陈… ③曾… 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(2011)第016106号

责任编辑:朱红莲

责任校对:刘玉霞

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:14.25

字 数:345千字

版 次:2010年12月第1版

印 次:2010年12月第1次印刷

印 数:1~4200

定 价:26.00元

产品编号:039999-01

物理学是研究物质的基本结构、相互作用和物质运动最基本、最普遍的形式及其相互转化规律的科学。物理学的研究对象具有极大的普遍性,它的基本理论渗透在自然科学的一切领域,并广泛地应用于生产技术的各个部门。以物理学的基础知识为内容的“大学物理学”课程,它所包括的经典物理、近代物理以及它们在科学技术上应用的初步知识是理工科学生进一步学习专业知识的基础。为了很好地完成“大学物理学”课程的教学任务,目前有大量的相关教材。不同的教材是根据不同的实际情况编写的,这是因为随着高校招生规模的扩大,高等教育正在从精英教育向大众教育过渡,分层次办学以及人才培养多样化的趋势日渐突出。

本书编写的初衷,是为中等学时的大学物理教学提供一套难度合适、篇幅精练、易教易学的教材。本书是根据教育部最新制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》,在福州大学邱雄等人主编的《大学物理》(上、下册,2002版)基础上进行编写的。它涵盖《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》的所有A类内容;B类内容有的带“*”号出现、有的写成专题形式。

在本书编写初衷的指导下,本书具备以下特色:(1)强调物理思想和物理图像,简约推导,能够用物理图像解释清楚的,尽量不用复杂的数学推证;(2)精心设计问题,引导读者学习,体现引导式、研究性学习理念;(3)注重物理学知识与科学技术相结合、与自然现象相结合、与生活相结合,以增强物理学理论的真实感和生动感;(4)注重科学思维和方法的培养,把物理学方法论中所涉及的一些基本原理介绍给读者;(5)在近代物理学内容的叙述上力求通俗、生动,突出物理学图像,以近代物理学发展的历史为主线编写近代物理;(6)开设专题阅读,介绍物理前沿和现代物理思想,以激发读者学习物理的兴趣;(7)版面设计美观,写作语言朴实流畅、通俗易懂。

本书分上、下两册。上册包括质点力学、刚体定轴转动、狭义相对论、振动波动和光学等内容,下册包括热学、电磁学、量子物理基础和固体物理简介等内容。在保证大学物理教学体系的整体性和系统性的基础上,章节的编排适当地考虑了教学上的方便。例如,狭义相对论虽然属于近代物理内容,但本书把它排在质点力学和刚体定轴转动之后,目的是在经典时空观之后紧接着全新的狭义相对论时空观,形成鲜明的对比;又如,由于振动和波动是波动光学的基础,所以把光学安排在上册。

编写教材是提高教学质量的有效途径之一,福州大学的所有大学物理学任课教师都参与了本书的编写工作。龚炎芳、张晓岚和陈永毅编写第1章到第4章和专题A,陈美锋、曾群英、江云坤和杨开宇编写第5章到第7章和专题B,蒋夏萍和黄碧华编写第8章、第9章、专题C和专题D,曾晓萌、苏万钧、钟志荣和翁臻臻编写第10章到第12章、专题E和专题

F, 曾永志、黄春晖、王松阳和夏岩编写第 13 章、第 14 章和专题 G。全书由陆培民、陈美锋主编。

本书编写参考了许多资料和兄弟院校的教材, 在此一并表示真诚的谢意。

由于水平所限, 加上时间紧, 书中的错误和不足在所难免, 请读者提出宝贵意见, 以期再版时作进一步的修改。

物理常量表

名 称	符号	计 算 用 值
引力常量	G	$6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
真空中的光速	c	$3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$
电子静质量	m_e	$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
质子静质量	m_p	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
中子静质量	m_n	$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$
阿伏伽德罗常量	N_A	$6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
玻耳兹曼常量	k	$1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
元电荷	e	$1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$
真空介电常量	ϵ_0	$8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
真空磁导率	μ_0	$1.26 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$
普朗克常量	h	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
电子康普顿波长	λ_C	$2.43 \times 10^{-12} \text{ m}$
玻尔磁子	μ_B	$9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$
里德堡常量	R	$1.10 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$
玻尔半径	a_0	$5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$

第 1 章 质点运动学	1
1.1 参考系和坐标系 质点	1
1.1.1 参考系和坐标系	1
1.1.2 时间标准和长度标准	2
1.1.3 质点	3
1.2 质点运动的描述	4
1.2.1 位置矢量 运动方程	4
1.2.2 位移 路程	5
1.2.3 速度 速率	6
1.2.4 加速度	7
1.2.5 运动学的两类问题	8
1.2.6 平面曲线运动的自然坐标描述	12
1.2.7 圆周运动的角量描述	15
1.3 相对运动	17
习题	19
第 2 章 质点动力学基本定律	21
2.1 牛顿运动定律	21
2.1.1 牛顿运动定律	21
2.1.2 力学中常见的几种力	23
2.1.3 牛顿运动定律的应用	25
2.1.4 非惯性系 惯性力	28
2.2 动量定理和动量守恒定律	30
2.2.1 动量定理	30
2.2.2 动量守恒定律	35
2.2.3 质心和质心运动定律	37
2.3 角动量定理和角动量守恒定律	39
2.3.1 角动量定理	39
2.3.2 角动量守恒定律	41
2.4 功和能	43
2.4.1 动能定理	43

2.4.2 保守力和势能	47
2.4.3 机械能守恒定律	50
习题	54
第3章 刚体的定轴转动	57
3.1 刚体定轴转动的描述	57
3.1.1 刚体的运动	57
3.1.2 定轴转动刚体的角量描述	58
3.2 刚体定轴转动定律	58
3.2.1 刚体定轴转动定律	58
3.2.2 刚体转动惯量	60
3.2.3 刚体定轴转动定律的应用	63
* 3.3 定轴转动刚体的功和能	65
3.4 定轴转动刚体的角动量守恒定律	66
3.4.1 定轴转动刚体的角动量定理	66
3.4.2 定轴转动刚体的角动量守恒定律	67
习题	69
第4章 狭义相对论基础	73
4.1 经典力学时空观	73
4.1.1 经典力学时空观	73
4.1.2 伽利略变换	74
4.2 狭义相对论的基本原理	75
4.2.1 迈克耳孙-莫雷实验	75
4.2.2 狭义相对论的基本原理	77
4.3 狭义相对论时空观	77
4.3.1 同时的相对性	77
4.3.2 时间膨胀	78
4.3.3 长度收缩	81
4.4 洛伦兹变换	83
4.4.1 洛伦兹坐标变换	83
4.4.2 洛伦兹速度变换	86
4.5 狭义相对论动力学基础	88
4.5.1 相对论质量和动量	89
4.5.2 相对论动力学的基本方程	89
4.5.3 相对论能量	90
4.5.4 相对论能量和动量的关系	92
专题 A 广义相对论和现代宇宙学简介	93
习题	100

第 5 章 振动和波动	103
5.1 简谐振动	103
5.1.1 简谐振动的描述	103
5.1.2 简谐振动的旋转矢量表示法	109
5.1.3 简谐振动的能量	111
5.2 振动的合成	113
5.2.1 同方向的简谐振动的合成	113
* 5.2.2 互相垂直的简谐振动的合成	117
* 5.3 阻尼振动 受迫振动 共振	120
5.3.1 阻尼振动	120
5.3.2 受迫振动 共振	121
5.4 平面简谐波	123
5.4.1 机械波的产生与描述	123
5.4.2 平面简谐波的波函数	127
5.4.3 波的能量	130
* 5.5 声波 超声波 次声波	133
5.5.1 声波	133
5.5.2 超声波和次声波	135
5.6 波的叠加	136
5.6.1 波的叠加原理	136
5.6.2 惠更斯原理	137
5.6.3 波的干涉	138
5.6.4 驻波	141
5.7 多普勒效应	143
习题	145
第 6 章 几何光学	151
6.1 几何光学基本规律	151
6.1.1 光的直线传播	151
6.1.2 反射定律和折射定律	151
6.1.3 全反射	152
6.2 光在平面上的反射和折射	153
6.2.1 平面反射成像	153
6.2.2 平面折射成像	153
6.3 光在球面上的反射和折射	155
6.3.1 一些概念和符号法则	155
6.3.2 球面反射成像公式	155
6.3.3 球面反射成像作图法	156

6.3.4 球面折射成像公式	156
6.4 薄透镜成像	158
6.4.1 薄透镜成像公式	158
6.4.2 薄透镜成像作图法	159
6.5 光学仪器	160
6.5.1 眼睛	160
6.5.2 放大镜	161
6.5.3 显微镜	162
6.5.4 望远镜	163
6.5.5 照相机	164
习题	165

第7章 波动光学 167

7.1 光的干涉	167
7.1.1 相干光的获得	167
7.1.2 杨氏双缝干涉	170
7.1.3 光程 光程差	175
7.1.4 薄膜干涉	178
7.2 光的衍射	185
7.2.1 惠更斯-菲涅耳原理	185
7.2.2 夫琅禾费单缝衍射	186
7.2.3 圆孔衍射和光学仪器的分辨率	190
7.2.4 光栅衍射	191
*7.3 X射线衍射	196
7.4 光的偏振	198
7.4.1 自然光与偏振光	198
7.4.2 起偏 检偏 马吕斯定律	199
7.4.3 反射和折射时的偏振	201
*7.4.4 光的双折射	203
*7.4.5 偏振光干涉 旋光现象	207
专题B 非线性光学简介	209
习题	212

第1章 质点运动学

世界是物质的世界,物质是在永恒地运动着的。物理学的研究对象中,物质运动最基本最普遍的形式与规律是其主要内容。在这些运动形式中,最简单而又最基本的运动是物体位置的变化。这种变化可以是物体之间相对位置的变化,也可以是物体本身中的某些部分相对其他部分位置的变化。例如,宇宙空间中天体的运行、地球上各种交通工具的运动等。这种位置变化叫做机械运动。

力学是研究物体机械运动所遵循的运动规律的一门科学。根据研究对象的不同可将力学分为更细的分支学科。经典力学是研究低速(速度比光速小很多)情况下宏观物体的机械运动所遵循的规律,相对论力学则是研究高速(速度与光速可比拟)情况下宏观物体的机械运动所遵循的规律。根据描述物体运动的侧重点的不同,还可以将力学分为运动学、动力学和静力学等。运动学只研究物体运动的描述,而不涉及物体为什么会运动以及改变物体运动的原因;动力学则是研究物体间的相互作用与物体运动状态变化之间的内在联系;静力学主要研究物体在相互作用下的平衡问题。

本章我们将就运动学的基本内容进行阐述。

1.1 参考系和坐标系 质点

1.1.1 参考系和坐标系

在自然界,一切物质都处于永恒的运动中,因此运动是普遍的、绝对的。但是我们观察和描述运动却总是相对的。例如,相对地面垂直下落的雨滴,对于一个坐在行驶汽车里的人,却总是倾斜向下落的。可见,选择不同的参考物体,对同一个运动描述的结果一般是不相同的。因此,我们描述一个物体的运动时,必须指明是相对于什么参考物体来说的。这个被选定的参考物体称为参考系。

原则上,参考系的选择是任意的,可以根据对象的不同或问题的需要来选择。在研究运动学问题时,参考系的选择主要是考虑所选择的参考系在问题的描述方面是否方便。通常在没有特别指明的情况下,我们总是选地球为参考系的,这是因为我们所研究的物体绝大部分是在地球上运动的。如果研究的是太阳系中行星的运动,则通常选太阳作为参考系。

确定了参考系后,为了能定量地描述物体的位置,还需要在参考系中建立坐标系。最常用的坐标系是直角坐标系,有时也选用极坐标系、球坐标系、柱坐标系等。至于选用哪种坐标系,是以研究问题的方便为准则的。

需要注意的是,同一参考系中两个不同的坐标系,它们对同一物体运动性质的描述是一样的,而仅仅是描述的参数变了。坐标系实质上是由实物构成的参考系的数学抽象,一旦建立了坐标系,意味着参考系也已选定。

1.1.2 时间标准和长度标准

研究物体位置随时间的变化,离不开时间和长度的度量。要度量时间和长度,首先要选择时间和长度的标准。下面简单介绍时间和长度的标准及单位。

1. 时间标准和单位

自然界存在着许多周期性的现象,时间标准应以这种周期性现象为基础。过去的时间标准是在天文观测的基础上规定的。人们把太阳每连续两次经过子午圈相隔的时间称为1个太阳日,也就是通常所说的一昼夜。因为一年之中,太阳日的长短略有差异,我们取一年中所有太阳日的平均值作为时间的标准单位,叫做1个平均太阳日,或简称1日。1日分为24小时,1小时分为60分,1分又分为60秒。这样一个平均太阳日就有 $24 \times 60 \times 60 = 86\,400$ 秒。

以天文观测为基础的时间标准,确定它非常费事,而且用这种方法所确定的时间的准确度也不能满足现代科学技术发展的要求。随着人们对微观世界认识的日益深入和实验水平的日益提高,使得把时间标准和某些分子或原子的固有性质联系起来成为可能。在长期研究的基础上,1967年第十三届国际计量大会决定以铯的一种同位素——铯133所辐射的某一种电磁波的周期作为时间的新标准,并规定1秒等于该周期的 $9\,192\,631\,770$ 倍。

在国际单位制(SI制)中,时间的单位是s(秒)。除了“秒”外,还可以用其他某些时间单位。常用的其他时间单位的符号及其与“秒”的关系如下:

$$1 \text{ min(分)} = 60 \text{ s}$$

$$1 \text{ ms(毫秒)} = 10^{-3} \text{ s}$$

$$1 \text{ }\mu\text{s(微秒)} = 10^{-6} \text{ s}$$

$$1 \text{ ns(纳秒)} = 10^{-9} \text{ s}$$

2. 长度标准和单位

1889年第一届国际计量大会通过:将保存在法国巴黎附近的国际计量局中的一根铂铱合金棒在 0°C 时两条横刻线之间的距离叫做1米。各国都有这个被称为国际米原器的合金棒的精确复制品,而其他各种量具的刻度就是以这种国际米原器的精确复制品为根据的。

长度标准以实物作为基准,就无法保证其不随时间发生变化,也很难防止战争、地震等灾害的毁坏。物理学家早就发现任何大块物质都不可能保持本身的物理性质永久不变,而单个原子的性质却可以合理地假定为基本上不随时间而改变。随着科学技术的发展,1960年第十一届国际计量大会决定,以氪的一种纯同位素——氪86发出的橙红色光的波长作为长度的标准,规定1米等于该波长的 $1\,650\,763.73$ 倍,从而实现了长度计量的自然基准。

随着激光技术的发展和爱因斯坦的相对论观点不断为实验事实所验证,人们发现通过光速来定义米的精度要远优于氪 86。于是,1983 年第十七届国际计量大会通过:米是光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内运行路程的长度,同时规定了真空中光速值为 $c=299\,792\,458\text{ m/s}$ (米每秒)。

本书主要采用国际单位制。在国际单位制中,长度的单位是 m(米)。除了“米”外,还可以用“米”的十进倍数或分数作长度单位。常用长度单位的符号及其与“米”的关系如下:

$$1\text{ km(千米)}=10^3\text{ m}$$

$$1\text{ cm(厘米)}=10^{-2}\text{ m}$$

$$1\text{ mm(毫米)}=10^{-3}\text{ m}$$

$$1\text{ }\mu\text{m(微米)}=10^{-6}\text{ m}$$

$$1\text{ nm(纳米)}=10^{-9}\text{ m}$$

另外,在天文学中计量天体之间的距离时,还常用“天文单位(AU)”、“光年(l. y.)”等作为长度单位

$$1\text{ AU}\approx 1.496\times 10^{11}\text{ m}$$

$$1\text{ l. y.}\approx 9.46\times 10^{15}\text{ m}$$

1.1.3 质点

自然现象是互相联系和互相制约的,其影响因素往往是多方面的,但它们多有主次之分。如果不分主次地考虑所有因素,不利于找出其基本规律,也不利于求得精确的结果。因而,人们在研究自然现象的过程中,总是先抓住那些主要因素,从中找出其基本的运动规律。在这个基础上,继续加进一些次要因素,从而使运动规律更能反映客观实际。这是自然科学中普遍采用的一种研究方法。这种研究方法是将实际对象简化成一种理想化的模型。理想化的模型在现实的世界里是不存在的,但它却起到了突出重点简化问题的作用。

力学中很重要的一个理想化模型是质点,它是指没有大小和形状仅具有质量的几何点。

必须特别指出,把物体当作质点是有条件的、相对的,而不是任意的、绝对的。一个物体能否被看成质点不在于这个物体的大与小,也不在于物体的轻与重,唯一的依据是看物体的大小和形状在所讨论的问题中起不起作用。例如,当我们研究一个乒乓球是如何沿一个斜面滚动时,尽管乒乓球很小也很轻,但球上各点的运动情况是大不相同的,就不能将其看成是质点。当研究地球绕太阳公转时,由于地球与太阳的平均距离(约为 $1.5\times 10^8\text{ km}$)比地球的半径(约为 6370 km)大得多,地球上各点相对于太阳的运动可以看作是相同的,所以在研究地球公转时,就可以把地球当作质点;但如果是研究地球本身的自转,地球上各点的运动情况就各不相同,此时的地球也就不能当作质点了。

此外,当我们研究一些比较复杂的物体的运动时,虽然不能把整个物体看成质点,但在处理方法上可以把复杂物体看成由许多质点组成,在解决质点运动问题的基础上来研究这些复杂物体的运动。

1.2 质点运动的描述

1.2.1 位置矢量 运动方程

1. 位置矢量

在运动学中,常用一个几何点代表质点。要描述质点的运动,首先要确定质点在任一时刻的位置。在选定的参考系上先建立坐标系,确定了坐标系后,从坐标原点到质点所在位置引出一个矢量 $\boldsymbol{r}$,该矢量可以表示出质点在坐标系中的位置,称为质点的位置矢量,简称位矢。

在图 1-1 中,某一时刻质点处于空间的 P 点位置,我们在建立了坐标系后由原点 O 出发向着 P 点画出一条带有箭头的线段 $\boldsymbol{r}$,这就是该时刻质点的位置矢量。位矢 $\boldsymbol{r}$ 的大小 r ,表示质点到坐标原点的距离; $\boldsymbol{r}$ 的方向(由 O 点指向 P 点)表示质点相对于原点的方向。可见,当坐标原点选定之后,位矢 $\boldsymbol{r}$ 就能指明质点相对原点的距离和方位,亦即确定了质点的空间位置。另一方面也应注意到,对于质点的一个确定位置,它的位矢的大小和方向与坐标系的选择有关。

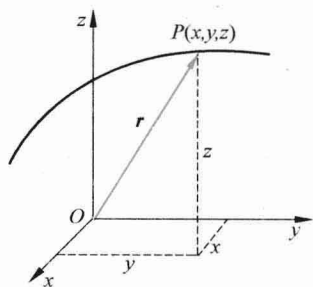


图 1-1 位置矢量及其投影

在直角坐标系中,位矢 $\boldsymbol{r}$ 在三个坐标轴上的投影就是质点的三个位置坐标 x, y, z 。以 $\boldsymbol{i}, \boldsymbol{j}, \boldsymbol{k}$ 分别表示沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量,有

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

质点 P 距原点 O 的距离(即位矢的大小) r 为

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

位矢 $\boldsymbol{r}$ 的方向由三个方向余弦确定

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

式中 α, β, γ 分别是位矢 $\boldsymbol{r}$ 与三个坐标轴 x, y, z 之间的夹角,它们满足

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1 \quad (1-4)$$

2. 运动方程

当质点运动时,其位矢 $\boldsymbol{r}$ 就随时间变化,即 $\boldsymbol{r}$ 为时间 t 的矢量函数。在任一时刻 t ,有

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1-5)$$

上式描述了质点在任一时刻 t 相对于坐标原点的距离和方位,称之为质点的运动方程。

在直角坐标系中,质点的运动方程可表示为

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

或者用分量式表示为

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

也就是说三个位置坐标 x 、 y 、 z 都是时间的函数。

运动方程可以用分量式表示,说明一个运动可以分解为几个分运动,而这些分运动叠加起来就构成合运动。这一性质称为运动的叠加性。例如,作平抛运动的质点,其运动可分解为水平匀速直线运动和竖直匀加速直线运动。

3. 轨道方程

运动质点所经空间各点连成的曲线称为运动轨道,相应的曲线方程称为轨道方程。将质点的运动方程消去参数 t ,就得到了质点的轨道方程。例如,已知某一质点的运动方程为

$$\mathbf{r} = 5\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)\mathbf{i} + 5\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)\mathbf{j}$$

其分量式表示为

$$x = 5\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right), \quad y = 5\cos\left(\frac{\pi}{2}t\right), \quad z = 0$$

该质点的轨道方程为

$$x^2 + y^2 = 25, \quad z = 0$$

这是一个圆的曲线方程,它表明质点是在 Oxy 平面内作圆周运动。

1.2.2 位移 路程

1. 位移

运动的质点,其位置在自身的运动轨道上连续地变化着。不同的时刻,有不同的位置矢。如图 1-2 所示,质点沿图中的轨道曲线运动,曲线 AB 是其运动轨道的一部分。 t 时刻质点位于 A 点,相应的位矢为 $\mathbf{r}_1$; $t+\Delta t$ 时刻质点位于 B 点,位矢为 $\mathbf{r}_2$ 。在此过程中,质点的位置变化量可用从 A 点指向 B 点的矢量 $\Delta\mathbf{r}$ 表示。 $\Delta\mathbf{r}$ 称为质点由位置 A 到位置 B 的位移。从图 1-2 可以看出

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

在直角坐标系中, t 时刻质点的位矢可表示为 $\mathbf{r}_1 = x_1\mathbf{i} + y_1\mathbf{j} + z_1\mathbf{k}$; $t+\Delta t$ 时刻质点的位矢可表示为 $\mathbf{r}_2 = x_2\mathbf{i} + y_2\mathbf{j} + z_2\mathbf{k}$ 。因此, Δt 时间间隔内质点的位移为

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

式中 $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta y = y_2 - y_1$, $\Delta z = z_2 - z_1$ 分别表示质点的位移 $\Delta\mathbf{r}$ 在三个坐标轴方向的分量。

直角坐标系中,位移的大小为

$$|\Delta\mathbf{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1-10)$$

应注意的是,位移的大小必须写成 $|\Delta\mathbf{r}|$,而不能写为 Δr (或 $\Delta|\mathbf{r}|$)。这是因为 Δr (或 $\Delta|\mathbf{r}|$) 均是表示位矢大小的增量,即 $\Delta r = \Delta|\mathbf{r}| = r_2 - r_1$ 。 $|\Delta\mathbf{r}|$ 与 Δr (或 $\Delta|\mathbf{r}|$) 的大小不一

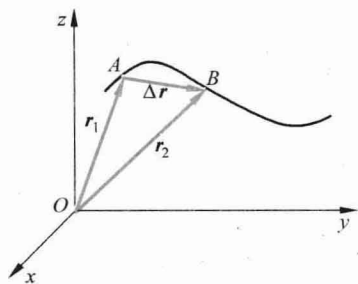


图 1-2 位移的定义

样,物理意义也不一样。

2. 路程

运动质点在 Δt 时间间隔内所经过的实际路径的长度称为路程,通常用 Δs 表示。路程与位移的区别主要在于:(1)路程 Δs 是标量,而位移 $\Delta \mathbf{r}$ 是矢量。(2)路程准确地描述了质点实际运动的长度,却不能指出质点位置变化后的最终位置;位移只是粗略地描述了质点运动位置变化的量值,但能够指出质点位置变化后的最终位置。一般情况下二者的大小不相等,即 $\Delta s \neq |\Delta \mathbf{r}|$ 。从图 1-2 可以看出, $t \sim t + \Delta t$ 时间间隔内,质点运动的路程是 A 点到 B 点的弧长,而其位移的大小是弦长 $\widehat{AB}$,二者显然是不相等的。

1.2.3 速度 速率

为了描述质点运动的快慢和方向,需要引入速度这个物理量。

1. 平均速度

如图 1-2 所示,质点在 Δt 时间间隔内的位移为 $\Delta \mathbf{r}$ 。我们把质点发生的位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与所经历的时间 Δt 之比,定义为质点在这段时间内的平均速度,用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示,即

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

平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 是一个矢量,其大小为 $\left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right|$,方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 同向。平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 只能粗略地反映 Δt 时间内质点位置变化的快慢和方向,并且其粗略的程度与 Δt 成正比。 Δt 越大,这种表示就越粗略; Δt 越小,这种表示就越准确。

2. 速度 速率

当 Δt 趋于零时,平均速度的极限叫做质点在 t 时刻的瞬时速度,简称速度,用 $\mathbf{v}$ 表示,即

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

速度是一个矢量,其大小为 $\left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right|$,其方向是当 Δt 趋于零时平均速度或位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向。由图 1-3 可知,当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, B 点无限趋近于 A 点,此时位移的方向趋于曲线在 A 点的切线方向。因此,速度在 t 时刻的方向就沿着该时刻质点所在处运动轨道的切线并指向质点前进的方向。

在直角坐标系中, $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$, 有

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

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ 是速度 $\mathbf{v}$ 在 x, y, z 三个坐标轴上的投影,也即分量。

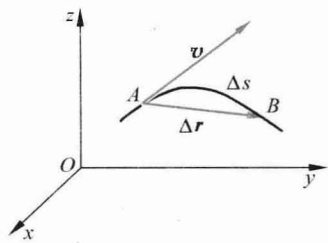


图 1-3 速度的方向

速度的大小为

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

由图 1-3 可知, $t \sim t + \Delta t$ 时间内, 质点从 A 点运动到 B 点, 路程为 Δs 。我们把 Δt 时间内质点所经过的路程 Δs 与时间间隔 Δt 之比值定义为 Δt 时间内质点的平均速率, 用 $\bar{v}$ 表示, 即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-15)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速率的极限值称为质点在 t 时刻的瞬时速率, 简称速率, 用 v 表示, 即

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1-16)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\boldsymbol{r}|$, 因此有 $v = |\boldsymbol{v}|$, 这表明速率就是速度的大小, 它反映了质点运动的快慢程度。

速度和速率是两个不同的概念。日常生活所说的“火车的速度”、“火箭的速度”等, 实际上指的是“火车的速率”、“火箭的速率”。

在国际单位制中, 速度的单位是 m/s。

1.2.4 加速度

一般情况下, 质点运动速度的大小和方向是随时间变化的。因此, 对于质点的运动, 仅仅知道其速度是不够的, 通常还需要研究其速度变化的快慢和方向, 这就需要引入加速度的概念。

1. 平均加速度

如图 1-4 所示, 质点在 t 时刻的速度为 $\boldsymbol{v}_1$, 在时刻 $t + \Delta t$ 的速度为 $\boldsymbol{v}_2$, 则在这段时间内的平均加速度 $\boldsymbol{a}$ 定义为

$$\boldsymbol{a} = \frac{\boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1}{\Delta t} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \quad (1-17)$$

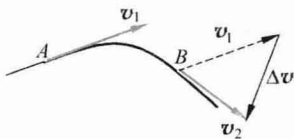


图 1-4 速度的增量 $\Delta \boldsymbol{v}$

平均加速度 $\boldsymbol{a}$ 也是一个矢量, 其大小为 $\left| \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \right|$, 方向与速度增量 $\Delta \boldsymbol{v}$ 同向。

平均加速度 $\boldsymbol{a}$ 只是近似地描述了在 $t \sim t + \Delta t$ 的时间内质点速度变化的快慢和方向。同样地, 当 Δt 越小时, 其对质点速度变化快慢的描述就越精确。

2. 加速度

当 Δt 趋于零时, 平均加速度的极限叫做质点在 t 时刻的瞬时加速度, 简称加速度, 用 $\boldsymbol{a}$ 表示, 即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-18)$$

上式表明, 加速度 $\boldsymbol{a}$ 等于速度对时间的一阶导数或位矢对时间的二阶导数。 $\boldsymbol{a}$ 的方向与 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t}$ 的极限的方向相同。在直线运动中, $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 同向, 质点作加速运动; 反之作减速运动。在曲线运动中, 加速度 $\boldsymbol{a}$ 总是指向运动轨道曲线凹的一侧。图 1-5 画出了质点在