

高等学校教材

University

大学物理学

Physics

(第二版)

上册

主编 郭进 刘奕新

高等教育出版社

高等学校教材

University

大学物理学

Physics

(第二版)

上册

主编 郭进 刘奕新
编者 黎光旭 何开岩 杨庆怡
滕维中 冯禄燕 张文英



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是在第一版的基础上,参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版)修订而成的。全书分上下两册,共14章,主要包括:质点运动学与运动定律、刚体的转动、振动与波、流体力学、相对论、电磁学、波动光学、气体动理论、热力学基础、量子物理、原子核与粒子等。本书通过通俗易懂的具体问题化解物理概念中的难点,力求把物理概念及原理阐述准确、简洁,重在训练和培养科学的思维方法以及分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高等学校理科非物理学类专业和工科各专业大学物理课程的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学.上册 / 郭进,刘奕新主编. -- 2版

. -- 北京:高等教育出版社,2019.1

ISBN 978-7-04-051141-3

I. ①大… II. ①郭… ②刘… 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(2019)第008577号

DAXUE WULIXUE

策划编辑 张琦玮

责任编辑 张琦玮

封面设计 王洋

版式设计 杜微言

插图绘制 于博

责任校对 李大鹏

责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 高教社(天津)印务有限公司

开本 787 mm×1092 mm 1/16

印张 19

字数 450千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2014年5月第1版

2019年1月第2版

印 次 2019年1月第1次印刷

定 价 37.60元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 51141-00

大学物理学

(第二版)

主编 郭进
刘奕新

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1244124>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 abook@hep.com.cn。



扫描二维码
下载 Abook 应用

<http://abook.hep.com.cn/1244124>

第二版前言

本书自 2009 年使用以来,经过多次修改,于 2014 年由高等教育出版社正式出版第一版。第一版在保证基本理论体系的系统性、完整性、科学性的基础上,注意了和中学物理的衔接,又避免不必要的重复,起点要求不太高,但又达到理科非物理学类专业和工科各专业大学物理课程的教学基本要求,注重基础理论,加强了物理规律在实际中的应用。

在本次修订过程中,我们广泛征求使用本教材老师的意见,经认真研究,对第一版内容作了必要的修改和增删。总体思路是保留原有的风格和特色,立足于稳中求新。此外,第二版依托高等教育出版社的网络平台将与本教材相适应的动画、演示实验、图像、文本资料等资源,分别标注在书中相关的内容处,方便阅读者扫码上网查看、参考和借鉴。

参与第二版修订主要人员有:郭进(第四、第六章)、刘奕新(第七、第八、第九章)、黎光旭(第十一、第十二、第十三、第十四章)、何开岩(第五章)、杨庆怡(第十章)、冯禄燕(第一、第二、第三章)。在修订过程中,得到了广西大学大学物理教研室全体教师的大力支持和帮助,高等教育出版社对第二版的出版给予了大力的支持,在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2018 年 12 月

第一版前言(摘要)

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科类大学物理课程教学基本要求》(2010年版),结合我们多年的教学经验,并借鉴当前国内外优秀教材编写而成。本书在编写中,体现了以下特点:

1. 以基本概念为核心,物理思想为灵魂,研究方法为纽带,并将其融为一个整体。尽量避免体系的重复和内容的重叠,使大学物理的概念结构体系科学严谨、精练。

2. 介绍基础知识的同时与时俱进地介绍当代物理的前沿知识、物理学发展的新成就、科学技术的新进展,注意处理好理论与实践的联系,有明显的时代特色。

3. 精选例题和习题,对例题的求解注重解题思路和方法的介绍,避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,通过通俗易懂的具体问题化解物理概念中的难点,力求物理概念、原理阐述准确、简洁,重在训练和培养学生的科学思维方法,分析问题和解决问题的能力。每章都附有小结,便于学生复习。

4. 符合大学低年级学生的认识过程,既与高中物理衔接,又避免不必要的重复,起点要求不太高,但又达到理工科类大学物理课程教学的基本要求。

参加本书编写工作的有:冯禄燕(第一、第二、第三章)、郭进(第四章)、何开岩(第五章)、黎光旭和张文英(第六、第十三、第十四章)、刘奕新(第七、第八、第九章)、杨庆怡(第十章)、滕维中(第十一、第十二章),最后由郭进修改和统稿。为满足教学内容的灵活选择和不同专业的教学需要,部分带有“*”号的内容供选学。

本书在编写过程中,得到许多老师的帮助和指导,高等教育出版社对本书的出版给予了大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢!

由于编者水平和教学经验所限,书中难免有不当之处和错误,恳请读者批评指正。

编者

2013年10月

目 录

第 1 章 质点运动学 运动定律	1	2.2 功 动能定理	35
1.1 质点运动的描述	1	2.2.1 功 变力的功	35
1.1.1 参考系 质点	1	2.2.2 动能 动能定理	36
1.1.2 位矢 运动方程	3	2.3 机械能守恒定律	37
1.1.3 速度	4	2.3.1 保守力的功 势能	37
1.1.4 加速度	6	2.3.2 质点系的动能定理及质点系功能 原理	40
1.2 圆周运动	9	2.3.3 机械能守恒定律	41
1.2.1 圆周运动的角量表示	9	本章小结	44
1.2.2 匀速圆周运动	10	习题 2	46
1.2.3 变速圆周运动	11	第 3 章 刚体的转动	48
1.3 相对运动	14	3.1 刚体的定轴转动	48
1.4 牛顿运动定律	16	3.1.1 刚体的平动和转动 定轴转动	48
1.4.1 牛顿三定律	16	3.1.2 力矩	49
1.4.2 力学中几种常见的力	18	3.1.3 转动定律	51
1.5 牛顿运动定律的适用范围及应用 举例	20	3.1.4 转动惯量	52
1.5.1 惯性参考系与非惯性参考系	20	3.2 角动量及其守恒定律	58
1.5.2 牛顿运动定律的适用范围	21	3.2.1 质点的角动量定理及其守恒 定律	58
1.5.3 牛顿运动定律的应用举例	21	3.2.2 刚体定轴转动的角动量定理及其 守恒定律	59
*1.6 非惯性系 惯性力	24	3.3 力矩做功 刚体绕定轴转动的 动能定理	62
本章小结	25	3.3.1 力矩做功	62
习题 1	26	3.3.2 转动动能 绕定轴转动的动能 定理	63
第 2 章 动量守恒定律和机械能守恒 定律	29	本章小结	66
2.1 动量守恒定律	29	习题 3	68
2.1.1 冲量 质点的动量定理	29		
2.1.2 质点系的动量定理	30		
2.1.3 动量守恒定律	32		

第4章 振动与波	72	5.1.3 帕斯卡原理	118
4.1 线性振动	72	5.2 理想流体的稳定流动	119
4.1.1 简谐振动	72	5.2.1 连续性方程	120
*4.1.2 阻尼振动	80	5.2.2 伯努利方程	120
*4.1.3 受迫振动	81	5.3 黏性流体的运动	123
4.2 简谐振动的合成	83	5.3.1 流体的黏性和牛顿内摩擦定律	123
4.2.1 同一直线上同频率简谐振动的合成	83	5.3.2 泊肃叶公式	125
4.2.2 同一直线上不同频率简谐振动的合成	84	5.3.3 斯托克斯公式	125
*4.2.3 相互垂直同频率简谐振动的合成	86	5.4 液体的表面性质	126
4.3 机械波的产生和传播	87	5.4.1 表面张力	126
4.3.1 机械波及其分类	87	5.4.2 球形液面内外的压强差	127
4.3.2 描述波动的物理量	88	5.4.3 液体与固体接触处的表面现象	128
4.3.3 平面简谐波	90	5.4.4 毛细现象	129
4.3.4 波的能量	93	本章小结	130
4.4 波的叠加	96	习题5	132
4.4.1 惠更斯原理	96	第6章 狭义相对论	135
4.4.2 波的叠加原理	97	6.1 力学相对性原理 伽利略变换	135
4.4.3 波的干涉	97	6.1.1 力学相对性原理	135
4.4.4 驻波的形成和特点	100	6.1.2 伽利略变换	136
4.5 多普勒效应	103	6.2 狭义相对论的两个基本假设	138
4.5.1 波源静止,观察者运动	104	6.2.1 光速依赖于惯性参考系的选取吗	138
4.5.2 观察者静止,波源运动	105	6.2.2 狭义相对论的两个基本假设	140
4.5.3 波源和观察者同时运动	105	6.3 狭义相对论的时空观	141
本章小结	106	6.3.1 “同时”的相对性	141
习题4	109	6.3.2 时间延缓	142
选读材料 冲击波	113	6.3.3 “长度”的相对性	145
第5章 流体力学	115	6.4 洛伦兹变换	148
5.1 静止流体	115	6.4.1 洛伦兹坐标变换	148
5.1.1 压强	115	*6.4.2 洛伦兹速度变换	152
5.1.2 静止流体的压强	117		

6.5 相对论质点动力学	154	习题 7	207
6.5.1 质量 动量 动力学方程	155	选读材料 压电体 铁电体	
6.5.2 相对论动能	156	驻极体	211
6.5.3 相对论质能关系	157	第 8 章 恒定磁场	213
6.5.4 相对论能量动量关系	159	8.1 电流和电动势的基本概念	213
本章小结	160	8.1.1 电流与电流密度	213
习题 6	161	8.1.2 电源与电动势	216
选读材料 黑洞 白洞 虫洞	163	8.2 磁场的磁感应强度	218
第 7 章 静电场	166	8.2.1 磁现象及磁场	218
7.1 静电场的概念	166	8.2.2 磁感应强度	219
7.1.1 电荷与电荷守恒定律	166	8.3 毕奥-萨伐尔定律及其应用	220
7.1.2 库仑定律	168	8.3.1 毕奥-萨伐尔定律	220
7.1.3 电场与电场强度	169	8.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用	221
7.1.4 电场强度的计算	171	8.4 恒定磁场的性质	224
7.2 静电场的性质	174	8.4.1 磁感线及磁通量	224
7.2.1 电场线与电场强度通量	174	8.4.2 磁场的高斯定理	225
7.2.2 静电场的高斯定理及应用	176	8.4.3 磁场的安培环路定理及应用	226
7.2.3 静电场的环路定理	181	8.5 带电粒子的运动	230
7.2.4 电势能与电势	182	8.5.1 运动电荷的磁场	231
7.2.5 电场强度与电势的微分关系	187	8.5.2 洛伦兹力	233
7.3 静电场中的导体	190	8.5.3 带电粒子在磁场中的运动	233
7.3.1 导体的静电平衡	190	8.5.4 带电粒子在电场和磁场中的	
7.3.2 空腔导体	192	运动	235
7.3.3 静电起电机	194	8.6 磁场对电流的作用	237
7.3.4 电容与电容器	195	8.6.1 安培定律	237
7.4 静电场中的电介质	198	8.6.2 磁场对载流导线的作用	238
7.4.1 电介质的极化及其规律	198	8.6.3 磁场对载流线圈的作用	239
7.4.2 电介质中的高斯定理	200	8.7 磁场中的磁介质	242
7.5 静电场的能量	202	8.7.1 磁介质及其规律	242
7.5.1 电容器储存的能量	203	8.7.2 磁介质中的安培环路定理	245
7.5.2 电场能量和能量密度	203	* 8.7.3 铁磁质	246
本章小结	205	本章小结	250

习题 8	251	9.3.4 自感与互感	267
第 9 章 电磁场	255	9.4 磁场的能量	272
9.1 电磁感应现象及其基本规律	255	9.4.1 线圈储存的能量	272
9.1.1 电磁感应的基本现象	255	9.4.2 磁场能量和能量密度	273
9.1.2 电磁感应的基本规律	256	9.5 麦克斯韦电磁场理论简介	275
9.2 动生电动势	259	9.5.1 位移电流	276
9.2.1 动生电动势	259	9.5.2 电磁场基本方程	279
9.2.2 动生电动势的表达式	259	本章小结	280
9.3 感生电动势	263	习题 9	282
9.3.1 感生电动势	263	选读材料 超导体	284
9.3.2 感生电场的产生和性质	264	常用物理常量表	289
9.3.3 感生电场的应用	266		

第 1 章 质点运动学 运动定律

力学是物理学中研究物体机械运动的规律及其应用的学科分支,也就是说力学研究的是机械运动.所谓机械运动就是物体在空间的位置随时间变化的过程,如地球绕太阳的运动、火车在铁路上行驶、吊车吊起重物等都是机械运动的例子.

质点运动学是力学中只从几何点来研究物体运动的内容,如质点的位置、速度、加速度等.质点运动学只讨论质点的位置、速度、加速度等变化的规律,不考虑质点的速度、加速度产生和改变的原因.而联系改变运动状态的原因来研究运动的是动力学,研究的是速度的改变、加速度产生的原因,如牛顿第二定律等.

- 1.1 质点运动的描述
 - 1.2 圆周运动
 - 1.3 相对运动
 - 1.4 牛顿运动定律
 - 1.5 牛顿运动定律的适用范围及应用举例
 - *1.6 非惯性系 惯性力
- 本章小结
习题 1

1.1 质点运动的描述

1.1.1 参考系 质点

1. 参考系

自然界无限广阔,丰富多彩,所有物体都在不断地运动变化中,绝对不动的物体是不存在的.如放在桌子上的物体相对于桌子和房间里的其他物体是静止的,但相对于太阳是运动的,因为地球除了绕着它自己的轴转动,同时又绕太阳作轨道运动(速率约为 30 km/s),所以地球上的物体也跟着地球绕太阳作轨道运动.而太阳也在运动,它以几百千米每秒的速度(约 250 km/s)绕着银河系的中心运动.银河系也在运动,所以绝对静止的物体是没有的,这就是运动的绝对性.

既然一切物体都在不停地运动中,那么怎样描述物体在运动过程的位置及位置的变化呢?当描述一个物体的位置以及位置的变化情况时,首先要选择其他物体作参考(或者说作标准),然后再研究这一物体相对于被选作参考的物体的运动.为描述物体



阅读材料:哥白尼的日心学的提出

参考系

的运动而选择的参考物(或标准物)称为参考系.参考系的选择是任意的,而选择不同的参考系,对同一物体运动的描述是不同的.例如我们说行驶的汽车“运动”是相对于在地面上的观察者而言的,而相对于坐在汽车里面的观察者来说汽车则是“静止”的.也就是说,一个物体的运动对不同的参考系有不同的描述,这就是运动的相对性.

再例如在作匀速直线运动的车厢里,上抛一物体,相对车厢参考系物体作竖直上抛运动(直线运动),而相对于地面参考系,物体作抛物线运动.选择什么样的参考系通常以对问题的研究最方便、最简单为原则.如要研究地球上物体的运动时,在大多数情况下,选择地面或地面上静止的物体作为参考系最为简便(以后不作特别说明,研究地面上物体的运动,都是以地球为参考系).而研究地球或其他行星的运动,就要选择太阳作参考系.常用参考系有:太阳参考系(太阳-恒星参考系)、地心参考系(地球-恒星参考系)、地面参考系、实验室参考系或质心参考系等.

为了能够定量描述物体的位置和运动情况,还需要在参考系上建立一个固定的坐标系.参考系选定后,坐标系可以任意选择,但选择不同的坐标系,对物体运动描述的具体表达形式也将不同.例如,一物体沿一固定的光滑斜面下滑,以地面为参考,若以沿斜面方向为 x 方向,垂直于斜面的方向为 y 方向建立坐标系,则物体只沿 x 方向作匀变速直线运动.而若以水平方向为 x 方向,竖直方向为 y 方向建立坐标系,则物体沿 x 方向和 y 方向均作匀变速直线运动.常用的坐标系是直角坐标系,根据需要,还常选用平面极坐标系、球坐标系、柱坐标系等.

2. 质点

实际物体有大有小,结构也可能很复杂.一般说来,物体在运动时,其内部各点的运动情况是各不相同的,而且它的形状和大小也可能发生变化.物体的形状和大小的变化对物体运动是有影响的,但在某些问题中,物体的形状和大小对物体的运动没有影响或影响很小,根据我们所研究对象的运动特点,有时可以把它看成一个具有一定质量而没有大小和形状的理想物体,这样的物体我们称为质点.质点是力学中最常用的理想模型.物理学中经常用理想模型来代替实际研究的对象,以突出它的主要性质,以便简化问题的研究.除质点外,还有后面陆续要学习的如刚体、理想气体、点电荷、绝对黑体等都是理想模型.那么,在什么样的条件下物体才能看成质点呢?若一个物体其大小的线度比它运动所涉及的空间线度小得多时,或者当物体平动时,物体上各部分的运动情况完全相同,这时,我们可以忽略物体的形状和大小,把

它看成一个具有一定质量的点,即质点.

例如在研究地球的公转时,由于地球的平均半径(6 400 km)比地球与太阳间的距离(约 1.5×10^8 km)小得多,地球上各点对太阳的运动可近似看成一样,这时就可以忽略地球的形状和大小,把它看成一个质点;而在研究地球的自转时,如果仍把地球看成质点显然就没有意义了,所以,这时就不能把地球看成质点.

1.1.2 位矢 运动方程

为了定量描述物体相对于参考系的运动情况,只有参考系是不够的,还要有一种说明物体相对于参考系的位置的方法. 因此选好参考系后,要定量描述质点的运动状态,在参考系上还要选择一个固定的坐标系,这样物体的位置就可以用它在这个坐标系中的坐标来描述. 在讨论问题时常用的坐标系有:直角坐标系、极坐标系、球坐标系、柱坐标系、自然坐标系等.

如图 1.1 所示,在某时刻 t ,质点处于 P 点位置,要确定 t 时刻质点的位置可用直角坐标系中 P 点的坐标 (x, y, z) 来表示,还可以用从坐标原点到质点所在处的径矢,如图 1.1 中的 \vec{OP} 来表示. 我们把从坐标原点到质点所在处的径矢称为质点的位置矢量(或称位矢),用 r 表示. 在直角坐标系中,位矢可表示为

$$\boldsymbol{r} = r(x, y, z) = xi + yj + zk \quad (1.1)$$

式中 i, j, k 分别为 x 轴、 y 轴、 z 轴方向的单位矢量.

位置矢量的大小(也称矢量的模)为

$$|\boldsymbol{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2)$$

当质点运动时,位置矢量将随时间变化,位置矢量是用来确定某时刻质点位置(用矢端表示)的矢量,因此位置矢量是与某一瞬时 t 相对应的,它是一个瞬时量. 质点运动时位置矢量随时刻 t 变化的关系式称为质点的运动方程. 在直角坐标系下,运动方程为

$$\boldsymbol{r}(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \quad (1.3a)$$

或写成分量式

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.3b)$$

质点在运动过程走过的实际路径称为质点的运动轨迹(或轨道). 表示质点的运动轨迹曲线的方程称为该质点的轨迹(轨道)的方程. 在直角坐标系中,质点的轨迹(轨道)的方程为

$$f(x, y, z) = 0 \quad (1.4)$$

轨迹(轨道)方程可由运动方程中将参量 t 消去求得.

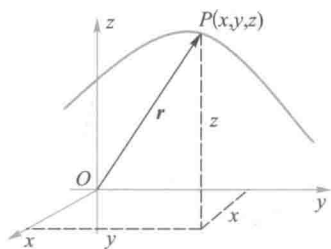


图 1.1 质点坐标

位置矢量

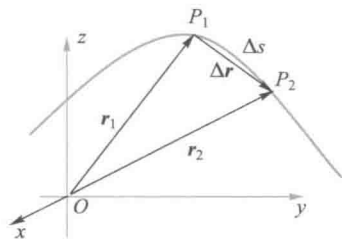


图 1.2 质点位移

位移

当质点运动时,其位置矢量将随时间改变,我们用位移来表示质点在一段时间内位置矢量的变化.质点在 Δt 时间内位置矢量的增量称为质点在这段时间内的位移,用 $\Delta \boldsymbol{r}$ 表示.质点在某段时间的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 就是在这段时间内从质点运动的起点到终点的径矢,与这段时间间隔对应,是一个过程量.如图 1.2 所示,图中的 $\Delta \boldsymbol{r}$ 表示了质点在时间 Δt 内的位移

$$\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 \quad (1.5)$$

位移矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的大小 $|\Delta \boldsymbol{r}|$ 即图 1.2 中 $P_1 P_2$ 的长度,位移矢量 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向为时间 Δt 内从起点 P_1 指向终点 P_2 的方向.

注意以下几个问题:(1) 质点的位置矢量和位移矢量是不同的,质点的位置矢量与某瞬时对应,对应的是某时刻 t .而质点的位移与某过程对应,对应某段时间间隔 Δt ;(2) 质点在某过程或某段时间内产生的位移和路程也是不同的.质点的路程是质点在一段时间内实际运动轨迹路径的长度 Δs ,而质点的位移是质点在一段时间内位置矢量的改变量(增量) $\Delta \boldsymbol{r}$.位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 是矢量,表示质点位置变化的净效果,它只与质点运动的起点和终点位置有关,而与质点运动轨迹无关.而路程是标量,是质点通过的实际路径的长度,与质点运动轨迹有关.

如图 1.2 所示,由图可知,一般情况下 $|\Delta \boldsymbol{r}| \neq \Delta s$.因此一般情况下质点的位移的大小并不等于它的路程,只有在直线运动,且质点始终朝一个方向运动的情形中,其位移的大小才等于它的路程.但当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|\mathrm{d}\boldsymbol{r}| = \mathrm{d}s$,所以一般有 $|\Delta \boldsymbol{r}| \leq \Delta s$.

1.1.3 速度

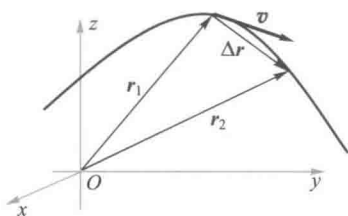


图 1.3 质点曲线运动

假定质点沿如图 1.3 所示的曲线运动,其运动方程由 $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$ 表示,在 t_1 时刻质点的位置矢量为 \boldsymbol{r}_1 ,在 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻质点的位置矢量为 \boldsymbol{r}_2 ,则在 Δt 时间内质点的位移为 $\Delta \boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1$.

质点在 Δt 时间内单位时间的平均位移称为质点在这段时间内的平均速度,其数学表达式为

$$\bar{\boldsymbol{v}} = \frac{\Delta \boldsymbol{r}}{\Delta t} \quad (1.6)$$

平均速度的大小为 $\frac{|\Delta \boldsymbol{r}|}{\Delta t}$,平均速度的方向就是 Δt 时间内质点的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 的方向.平均速度的大小和方向一般与所取的时间间隔有关,选择不同的时间间隔,平均速度的大小和方向一般不同,所以,在说平均速度时,必须要说明是哪一段时间内的平均速度.

速度是表示质点运动的快慢程度的物理量. 显然, 用平均速度来描述物体的运动是比较粗糙的, 如果我们要精确知道质点在某一时刻或某一位置实际运动的真实情况, 应使 Δt 尽量地小, Δt 越小, 比值 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 就越能接近质点在 t 时刻的运动情况, 因此我们用

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的极限来描述质点在 t 时刻的运动情况, 这个极限称为质点在 t 时刻的瞬时速度, 简称速度. 瞬时速度为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.7)$$

即速度等于位置矢量对时间的一阶导数. 速度的方向为 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向, 当质点作曲线运动时, 速度的方向沿曲线的切线方向, 如图 1.3 所示.

在直角坐标系下, 有

$$\mathbf{v} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.8)$$

v_x 、 v_y 、 v_z 分别称为速度在 x 、 y 、 z 方向的分量, 或说速度在 x 、 y 、 z 方向的投影.

速度的大小为

$$|\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.9)$$

质点在一段时间内的路程与这段时间的比值称为这段时间内的平均速率, 如图 1.4 所示. 平均速率的数学表示式为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.10)$$

与瞬时速度的定义类似, 瞬时速率

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} \quad (1.11)$$

由于 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|d\mathbf{r}| = ds$, 有

$$v = \frac{ds}{dt} = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = |\mathbf{v}|$$

即瞬时速率与瞬时速度的大小相等.

注意的问题: 如图 1.4 所示, 一般情况下质点在某段时间内其位移的大小与路程不相等, 即一般情况下 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$, 因此 $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \neq \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right|$, 即在某段时间内, 一般平均速率不等于平均速度的大小. 又由于当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|d\mathbf{r}| = ds$, 所以质点的瞬时速率等于瞬时速度的大小.

在国际单位制中, 速度的单位为米每秒(符号 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

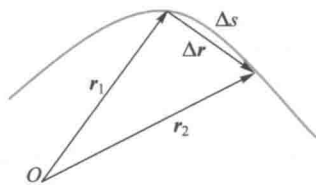


图 1.4 路程与位移

1.1.4 加速度

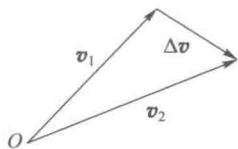


图 1.5 速度增量

当质点作变速运动时,其速度发生变化,用加速度表示速度变化的快慢程度.如果质点作变速运动时,在 t_1 时刻质点的速度为 \boldsymbol{v}_1 ,在 $t_2 = t_1 + \Delta t$ 时刻质点的速度为 \boldsymbol{v}_2 ,在 Δt 时间内,质点的速度的增量为 $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_2 - \boldsymbol{v}_1$,如图 1.5 所示,则 Δt 时间内质点的平均加速度为

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \quad (1.12)$$

平均加速度是矢量,其大小为 $\frac{|\Delta \boldsymbol{v}|}{\Delta t}$,方向为 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的方向.

平均加速度在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限值,称为质点在 t 时刻的瞬时加速度,简称加速度,即加速度为

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1.13)$$

加速度是矢量,其方向为 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向,对于曲线运动,加速度的方向总是指向曲线凹的一侧.

在直角坐标系中,有

$$\boldsymbol{a} = \frac{dv_x}{dt} \boldsymbol{i} + \frac{dv_y}{dt} \boldsymbol{j} + \frac{dv_z}{dt} \boldsymbol{k} = \frac{d^2 x}{dt^2} \boldsymbol{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \boldsymbol{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \boldsymbol{k} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k} \quad (1.14)$$

a_x, a_y, a_z 分别称为加速度在 x, y, z 方向的分量,或者说加速度在 x, y, z 方向的投影.

加速度大小为

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.15)$$

在国际单位制中,加速度的单位为米每二次方秒(符号 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$).

加速度是由于速度的改变而引起的,不论速度的大小发生改变还是方向发生改变,速度都发生了改变,因而都有加速度.

描述质点运动的基本物理量有:位置矢量(位矢)、位移、速度、加速度,这四个基本物理量都是矢量;除位移是对应于某一时间间隔外,位置矢量、速度、加速度三个都是与某一瞬间对应,即位置矢量、速度、加速度都具有瞬时性;同时它们还具有相对性,在不同参考系中,对同一质点,其运动状态的描述是不一样的,即使是在同一参考系里的不同坐标系中,描述的具体表达形式也不相同.

显然,若已知 $\boldsymbol{r}(t)$,即已知质点的运动方程,可求出任一时刻的位置矢量,也就可求出一段时间的位移

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t_2) - \mathbf{r}(t_1)$$

可通过对 $\mathbf{r}(t)$ 求导求出质点的速度

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$$

质点的加速度

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$$

反过来,如果已知质点的加速度和初始条件,即 $t=0$ 时, $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0$, $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0$ 已知,可用积分的方法求速度

$$\int_{\mathbf{v}_0}^{\mathbf{v}} d\mathbf{v} = \int_0^t \mathbf{a} dt$$

运动方程

$$\int_{\mathbf{r}_0}^{\mathbf{r}} d\mathbf{r} = \int_0^t \mathbf{v} dt$$

如果质点作直线运动,其位置矢量、位移、速度、加速度均可看成代数量,计算将更加简单.

如果质点作一般的曲线运动,我们可以将它视为沿 x 、 y 、 z 轴的三个各自独立的直线运动的叠加(矢量加法).这也称为运动的独立性原理或运动叠加原理.

也就是说一般的曲线运动都可以将其分解为直线运动来讨论.如抛体运动可将它分解为沿水平方向的匀速直线运动和沿竖直方向的匀变速直线运动的叠加.

例 1.1

设一质点作二维运动,其运动方程为 $\mathbf{r} = 2t\mathbf{i} + (2-t^2)\mathbf{j}$ (SI 单位),求:

- (1) 该质点的轨道方程;
- (2) $t=0$ 及 $t=2$ s 时质点的速度,并求后者的大小和方向.

分析 题目给出的是运动方程,求轨道方程和速度.轨道方程可由运动方程消去参量 t 求得,而速度应用求导方法计算.

解 (1) 由题给方程,有

$$x = 2t, \quad y = 2 - t^2$$

消去参量 t ,得质点的轨道方程为

$$y = 2 - \frac{x^2}{4}$$

(2) 任一时刻速度为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = 2\mathbf{i} - 2t\mathbf{j}$$

当 $t=0$ 时, $\mathbf{v}_0 = 2\mathbf{i} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $t=2$ s 时, $\mathbf{v}_2 = (2\mathbf{i} - 4\mathbf{j}) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. $t=2$ s 时质点速度的大小为

$$v_2 = \sqrt{2^2 + (-4)^2} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 4.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

方向为

$$\theta = \arctan\left(\frac{-4}{2}\right) = -63^\circ 26'$$

θ 为 \mathbf{v}_2 与 x 轴的夹角.