

高等院校通识教育『十二五』规划教材

大学物理

温亚芹 主编
杨秀娟 刘毅 副主编
刘家春 主审

Physics



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等院校通识教育『十二五』规划教材

大学物理

温亚芹 主编 杨秀娟 刘毅 副主编
刘家春 主审

Physics

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

大学物理 / 温亚芹主编. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2013.9
高等院校通识教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-115-32929-5

I. ①大… II. ①温… III. ①物理学—高等学校—教材 IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第198149号

内 容 提 要

本书根据高等院校非物理类专业大学物理课程教学的基本要求,结合作者历年来的教学经验编写而成。

全书分6个模块,内容包括力学、热学、电磁学、机械振动和机械波、波动光学及近代物理,共17章。作为非物理专业的大学物理教材,本书一方面注重了基础性,同时又在此基础上联系实际,针对不同学生强化了内容的层次性。

本书可作为普通高校非物理专业本科生学习大学物理的教材,也可作为物理学爱好者阅读的参考资料。

-
- ◆ 主 编 温亚芹
 - 副 主 编 杨秀娟 刘 毅
 - 主 审 刘家春
 - 责任编辑 吴宏伟
 - 执行编辑 王志广
 - 责任印制 张佳莹 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 22.75 2013年9月第1版
 - 字数: 565千字 2013年9月北京第1次印刷
-

定价: 43.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

物理学 (φυσική) 一词最早源于希腊文 (φύσις), 意为自然。其现代内涵是指研究物质运动最一般规律及物质基本结构的科学。

从古代的“四大发明”到近代的工业革命, 再到现在的信息时代, 无一不闪烁着物理学的璀璨光芒。

“大学物理”是非物理类专业的一门主干基础理论课, 主要任务是研究物质运动最基本、最普遍的规律。通过对本课程的学习, 学生能够掌握物理学的基本理论和基本知识, 深刻理解物理规律的意义, 并能训练其逻辑思维能力、理解能力、运算能力、分析问题和解决问题的能力以及独立钻研的能力。

本教材是根据国家教育部《高等学校非物理专业物理课程教学基本要求》, 结合编者对大学物理的讲授经验, 并充分考虑了现代大学非物理专业学生的实际情况编写而成的。本书可作为普通高校非物理专业大学物理课程的教材, 也可作为物理学爱好者自学的指导用书。本书特点如下。

(1) 注重基础性。针对大学非物理专业学生在物理学习中“内容多而课时量少”的特点, 对物理概念进行了重新审视和提炼, 并精选了内容。对基本现象、基本概念和基本原理的阐述, 做到了深入浅出, 增加了典型例题, 力争使学生对所学内容一目了然。

(2) 注重结合实际。编者针对以往大学物理只注重讲授理论而忽视和生活相结合而导致学生学习积极性不高的缺点, 在本书中加入了一系列实例, 并配以插图, 力争生动形象、理论结合实际, 体现理论的基础作用, 并提高学生学习物理的积极性。

(3) 注重层次性。为贯彻“因材施教”的原则, 针对不同学生学习物理的基础及水平, 本书收集了不同难度的内容和习题, 其中难度较大的标以“*”号, 作为选讲和自学内容。

本教材共分为力学、热学、电磁学、机械振动和机械波、波动光学和近代物理 6 个模块。

本书, 力学部分、热学部分和电磁学部分由温亚芹编写, 机械振动和机械波部分由杨秀娟编写, 波动光学部分和近代物理部分由刘毅编写。全书由刘家春负责审稿。

由于编者水平有限, 书中难免存在疏漏之处, 敬请读者批评指正。

编者
2013 年 6 月

目 录

模块1 力 学

第1章 质点运动学	2	2.4 *非惯性系 惯性力	29
1.1 质点 参考系 运动方程	2	2.5 习题	31
1.1.1 质点	2	第3章 运动的守恒定律	33
1.1.2 参考系和坐标系	3	3.1 动量定理	33
1.1.3 运动方程	3	3.1.1 质点的动量定理	33
1.1.4 时间和时刻	3	3.1.2 质点系的动量定理	34
1.2 位移 速度 加速度	3	3.2 动量守恒定律	37
1.2.1 位矢	4	3.3 *质心运动 火箭飞行问题	40
1.2.2 位移	4	3.3.1 质心	40
1.2.3 速度	5	3.3.2 质心运动定律	42
1.2.4 加速度	5	3.3.3 火箭飞行	44
1.3 圆周运动	8	3.4 保守力与非保守力 势能	44
1.3.1 切向加速度和法向加速度	8	3.4.1 功	44
1.3.2 圆周运动的加速度	9	3.4.2 保守力与非保守力	46
1.3.3 圆周运动的角量描述	9	3.4.3 势能	48
1.3.4 线量和角量的关系	11	3.4.4 势能曲线	48
1.4 相对运动 伽利略坐标变换	12	3.5 功能原理 能量守恒定律	49
1.4.1 伽利略坐标变换式	12	3.5.1 质点的动能定理	49
1.4.2 速度变换	13	3.5.2 质点系的动能定理	50
1.4.3 加速度变换	14	3.5.3 质点系的功能原理	51
1.5 习题	14	3.5.4 机械能守恒定律	51
第2章 牛顿运动定律	18	3.5.5 能量守恒定律	52
2.1 牛顿运动定律	18	3.6 碰撞问题	52
2.1.1 牛顿第一定律	18	3.7 习题	55
2.1.2 牛顿第二定律	19	第4章 刚体的转动	59
2.1.3 牛顿第三定律	20	4.1 刚体 刚体的运动	59
2.2 几种常见的力	21	4.1.1 刚体的平动和转动	59
2.2.1 万有引力	21	4.1.2 定轴转动的角量和线量	60
2.2.2 重力	22	4.2 力矩 转动惯量 定轴转动定律	61
2.2.3 弹性力	23	4.2.1 力矩	61
2.2.4 摩擦力	23	4.2.2 转动定律	62
2.3 牛顿定律应用举例	24	4.2.3 转动惯量和平行轴定理	64

4.3 角动量 角动量守恒定律	68
4.3.1 质点的角动量和角动量守恒定律	68
4.3.2 刚体定轴转动的角动量定理	70
4.3.3 刚体定轴转动的角动量守恒定律	71

4.4 刚体定轴转动的功能关系	72
4.4.1 力矩的功和功率	72
4.4.2 刚体的转动动能	73
4.4.3 刚体绕定轴转动的动能定理	73
4.5 习题	76

模块2 热 学

第5章 气体动力学

5.1 热运动的描述 理想气体的状态方程	81
5.1.1 气体的状态参量	81
5.1.2 平衡态 准静态过程	82
5.1.3 理想气体的状态方程	82
5.2 分子热运动的统计规律性	83
5.3 压强公式 压强的统计意义	85
5.3.1 理想气体的微观模型	85
5.3.2 理想气体的压强公式及统计意义	85
5.4 理想气体分子的平均平动动能与温度的关系	86
5.5 能量均分定理 理想气体的内能	87
5.5.1 分子的自由度	87
5.5.2 能量按自由度均分定理	88
5.5.3 理想气体的内能	90
5.6 气体分子的速率分布	91
5.6.1 速率分布曲线	91
5.6.2 麦克斯韦气体分子速率分布律	92
5.6.3 三种统计速率	92
5.7 分子碰撞 平均自由程	94
5.8 习题	95

第6章 热力学基础

6.1 准静态过程 功 热量 内能	98
6.1.1 准静态过程	98
6.1.2 功	98
6.1.3 热量	99

6.1.4 内能	100
6.2 热力学第零定律和第一定律	100
6.2.1 热力学第零定律	100
6.2.2 热力学第一定律	100
6.3 理想气体的等体过程和等压过程	101
6.3.1 等体过程	101
6.3.2 等压过程	102
6.3.3 等体摩尔热容 等压摩尔热容	103
6.4 理想气体的等温过程和绝热过程 *多方过程	106
6.4.1 等温过程	106
6.4.2 绝热过程	107
6.4.3 绝热线和等温线	108
6.5 循环过程 卡诺循环	111
6.5.1 循环过程	111
6.5.2 热机和制冷机	111
6.5.3 卡诺循环	113
6.6 热力学第二定律 卡诺定理	116
6.6.1 热力学第二定律的两种表述	116
6.6.2 可逆过程与不可逆过程	117
6.6.3 卡诺定理	118
6.7 熵 熵增加原理	118
6.7.1 熵	118
6.7.2 熵变的计算	120
6.7.3 熵增加原理	120
6.7.4 熵增加原理与热力学第二定律	121

6.8 热力学第二定律的统计意义	121
6.8.1 玻尔兹曼关系式	121

6.8.2 热力学第二定律的统计意义 ..	122
6.9 习题	122

模块3 电 磁 学

第7章 真空中的静电场	127
-------------------	-----

7.1 电荷 库仑定律	127
7.1.1 电荷	127
7.1.2 电荷的量子化	127
7.1.3 电荷守恒定律	128
7.1.4 库仑定律	128
7.2 电场 电场强度矢量	129
7.2.1 电场	129
7.2.2 电场的强度	130
7.2.3 电场强度叠加原理	131
7.2.4 电场强度的计算	132
7.3 电场强度通量 高斯定理	137
7.3.1 电场线	137
7.3.2 电场强度通量	137
7.3.3 高斯定理	138
7.3.4 高斯定理的应用	140
7.4 静电场的环路定理 电势	144
7.4.1 静电场力的功	144
7.4.2 静电场的环路定理	145
7.4.3 电势能	146
7.4.4 电势 电势差	146
7.4.5 电势叠加原理	147
7.5 等势面	150
7.6 习题	152

第8章 静电场中的导体与电介质	155
-----------------------	-----

8.1 静电场中的导体	155
8.1.1 静电感应 导体的静电平衡 ..	155
8.1.2 静电平衡时导体上的电荷分布	156
8.1.3 空腔导体内外的静电场与静电屏蔽	158
8.2 静电场中的电介质	160
8.2.1 *电介质的极化	160
8.2.2 *电极化强度矢量 电极化强度与极化电荷的关系	161

8.2.3 介质中的静电场	161
8.2.4 有电介质时的高斯定理 电位移	162

8.3 电容与电容器	164
8.3.1 孤立导体的电容	164
8.3.2 电容器的电容	165
8.3.3 电容器电容的计算	165
8.3.4 电容器的串联和并联	167
8.4 静电场的能量	168
8.5 习题	170

第9章 恒定电流的磁场	173
-------------------	-----

9.1 恒定电流	173
9.1.1 电流 电流密度	173
9.1.2 电源电动势	175
9.2 磁感应强度	176
9.2.1 基本磁现象	176
9.2.2 磁感应强度矢量	177
9.3 电流的磁场 毕奥-萨伐尔定律	178
9.3.1 毕奥-萨伐尔定律	178
9.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用	179

9.4 磁通量 磁场的高斯定理	181
9.4.1 磁感应线和磁通量	181
9.4.2 磁场的高斯定理	182

9.5 安培环路定理	183
9.5.1 安培环路定理	183
9.5.2 安培环路定理的应用	184

9.6 带电粒子在电场和磁场中的运动	186
9.6.1 洛伦兹力	186

9.6.2 带电粒子在电磁场中的运动和应用	187
-----------------------------	-----

9.6.3 霍尔效应	189
------------------	-----

9.7 磁场对载流导线的作用	190
----------------------	-----

9.7.1 磁场对载流导线的 作用力——安培力	190	10.1.2 法拉第电磁感应定律	206
9.7.2 载流线圈的磁矩 磁场对 载流线圈的作用	194	10.1.3 楞次定律	207
9.7.3 磁力的功	196	10.2 动生电动势	208
9.8 磁场中的磁介质	197	10.3 感生电动势	211
9.8.1 磁介质	197	10.4 自感与互感	213
9.8.2 磁介质的磁化 磁化 强度	198	10.4.1 自感系数 自感电动势	214
9.8.3 磁介质中的安培环路 定理 磁场强度	199	10.4.2 互感系数 互感电动势	215
9.9 习题	200	10.5 磁场的能量	216
第 10 章 电磁感应与电磁场	205	10.6 位移电流 麦克斯韦电磁场 理论	217
10.1 电磁感应定律	205	10.6.1 位移电流 全电流定律	217
10.1.1 电磁感应现象	205	10.6.2 麦克斯韦方程组的积分 形式 电磁场	219
		10.7 习题	221

模块 4 机械振动和机械波

第 11 章 机械振动	225	第 12 章 机械波	247
11.1 简谐振动	225	12.1 机械波的一般概念	247
11.1.1 简谐振动的特征及其 表达式	226	12.1.1 机械波产生的条件	247
11.1.2 振幅 周期和频率 相位	226	12.1.2 横波和纵波	248
11.2 简谐振动的旋转矢量表示法	230	12.1.3 波面 波前 波线	248
11.3 几种常见的简谐振动	231	12.2 平面简谐波的波函数	251
11.3.1 单摆	232	12.2.1 平面简谐波的波函数	251
11.3.2 复摆	232	12.2.2 波函数的物理含义	252
11.4 简谐振动的能量	233	12.3 波的能量 能流密度	255
11.5 简谐振动的合成	235	12.3.1 波的能量	255
11.5.1 两个同方向同频率简谐 振动的合成	235	12.3.2 能流 能流密度	257
11.5.2 两个同方向不同频率简谐 振动的合成 拍	237	12.4 惠更斯原理 波的衍射 反射和 折射	258
11.5.3 两个相互垂直的同频率的 简谐振动的合成	238	12.4.1 惠更斯原理	258
11.6 阻尼振动 受迫振动 共振	240	12.4.2 波的衍射	259
11.6.1 阻尼振动	240	12.4.3 波的反射和折射	259
11.6.2 受迫振动	241	12.5 波的叠加原理 波的干涉	260
11.6.3 共振	242	12.6 驻波	262
11.7 习题	243	12.6.1 驻波方程	263
		12.6.2 半波损失	264
		12.6.3 驻波的能量	265

12.7 多普勒效应	265	12.8 习题	269
------------------	-----	---------------	-----

模块5 波动光学

第13章 光的干涉	274	14.2 单缝衍射	294
13.1 光源 单色性 光程 相干光	274	14.2.1 单缝夫琅禾费衍射	294
13.1.1 光源	274	14.2.2 单峰衍射的条纹空间分布	294
13.1.2 光源单色性	275	14.3 圆孔衍射	296
13.1.3 光程与光程差	275	14.4 光栅衍射	297
13.1.4 光的相干现象	277	14.5 习题	301
13.2 双缝干涉	278	第15章 光的偏振	304
13.2.1 杨氏双缝干涉实验	278	15.1 自然光 偏振光	304
13.2.2 干涉条纹的分布	279	15.2 偏振片 马吕斯定律	305
13.3 薄膜干涉	281	15.2.1 偏振片	305
13.3.1 等倾干涉	281	15.2.2 马吕斯定律	305
13.3.2 等厚干涉	284	15.3 反射光和折射光的偏振规律	306
13.4 迈克尔孙干涉仪	287	15.4 双折射	307
13.5 习题	288	15.4.1 双折射现象	308
第14章 光的衍射	292	15.4.2 光轴 主平面	308
14.1 惠更斯—菲涅尔原理	292	15.4.3 双折射现象的解释	308
14.1.1 光的衍射现象	292	15.5 椭圆偏振光和圆偏振光	310
14.1.2 惠更斯—菲涅尔原理	293	15.6 习题	310
14.1.3 菲涅尔衍射和夫琅禾费衍射	293		

模块6 近代物理

第16章 相对论基础	314	16.4.1 相对论力学的基本方程	321
16.1 狭义相对论的基本原理 洛伦兹变换式	314	16.4.2 质量和能量的关系	322
16.1.1 迈克尔孙—莫雷实验	314	16.4.3 动量和能量的关系	323
16.1.2 狭义相对论的基本原理	315	16.5 *广义相对论简介	324
16.1.3 洛伦兹变化式	316	16.6 习题	325
16.2 相对论速度变换式	317	第17章 量子物理	328
16.3 狭义相对论的时空观	319	17.1 黑体辐射 普朗克的量子假设	328
16.3.1 关于“同时”的相对性	319	17.1.1 黑体 黑体辐射	328
16.3.2 时间延缓	320	17.1.2 黑体辐射的实验定律	329
16.3.3 长度收缩	320	17.1.3 普朗克量子假设 普朗克黑体辐射公式	330
16.3.4 相对性与绝对性	321	17.2 光电效应 爱因斯坦光子理论	331
16.4 狭义相对论动力学基础	321	17.2.1 光电效应的实验规律	331

17.2.2 爱因斯坦光子理论	332
17.2.3 光的波-粒二象性	333
17.3 氢原子光谱 玻尔的氢原子 理论	334
17.3.1 近代关于氢原子光谱的 研究	334
17.3.2 玻尔的氢原子理论及其 缺陷	335
17.4 德布罗意波	337
17.5 不确定度关系	338
17.6 波函数 薛定谔方程	339

17.6.1 波函数	339
17.6.2 薛定谔方程	341
17.7 一维无限深势阱问题	342
17.7.1 一维无限深势阱	342
17.8.2 一维势垒 隧道效应	344
17.8 量子力学中的氢原子问题	345
17.8.1 氢原子的薛定谔方程	345
17.8.2 量子化和量子数	346
17.9 习题	347
附录	349
参考文献	352

模块 1 力 学

自然界一切物质都处在运动之中，机械运动是物质运动的最基本形式。力学是研究物质机械运动规律的科学，分为运动学、静力学和动力学。

运动学：研究物体位置随时间的变化规律，但不涉及变化发生的原因（或物体中各部分相对位置随时间的变化规律）。

动力学：研究物体的运动和运动物体间相互作用的联系，从而阐明物体运动状态发生变化的原因。

静力学：研究物体相互作用时的平衡问题。

本模块主要介绍质点运动学和质点动力学以及刚体的转动。通过两个模型——质点和刚体的建立，得到牛顿运动定律和运动守恒定律等相关定律。

本模块研究的对象都是在经典力学的范畴内，即物体做低速运动（ $v \ll c$ ，物体的运动速度远远小于光速）的情况。当物体的运动速度接近光速时，经典力学就不适用了，此时应该用相对论力学来解释。但是由经典力学得出的动量、角动量和能量的守恒定律依然适用。

学习物理学，应当遵守一定的规律。找出各物体内在的共同特征，然后由简到繁，推广到千差万别的物质世界中。因此，我们先从最简单的质点学起。

1.1 质点 参考系 运动方程

自然界一切物体都处于永恒运动中，绝对静止不动的物体是不存在的。机械运动是最简单的一种运动，是描述物体相对位置或自身各部份的相对位置发生变化的运动。为了方便研究物体的机械运动，我们需要将自然界中千差万别的运动进行合理的简化，抓住主要特征加以研究。

1.1.1 质点

一切物体都是具有大小、形状、质量和内部结构的物质形态。这些物质形态对于研究物体的运动状态影响很大。简单起见，我们引进质点这一概念。所谓质点，是指具有一定质量没有大小或形状的理想物体。质点是一种理想模型。

并不是所有物体都可以当作质点，质点是相对的，有条件的。只有当物体的大小和形状对运动没有影响或影响可以忽略时，物体才可以当作质点来处理。例如，当研究地球围绕太阳公转时，由于日地之间的距离（ $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ ）要比地球的平均半径（ $6.4 \times 10^3 \text{ km}$ ）大得多，此时地球上各点的公转速度相差很小，忽略地球自身尺寸的影响，可以作为质点处理，如图 1-1 所示。

但是，当研究地球自转时，由于地球上各点的速度相差很大，因此，地球自身的大小和形状不能忽略，此时，地球不能作为质点处理，如图 1-2 所示。但可把地球无限分割为极小

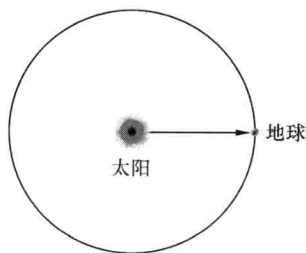


图 1-1 公转的地球可以当作质点

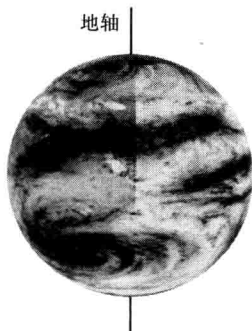


图 1-2 自转的地球不可以当作质点

的质元,每个质元都可视为质点,地球的自转就成为无限个质点(即质点系)的运动的总和。做平动的物体,不论大小、形状如何,其体内任一点的位移、速度和加速度都相同,可以用其质心这个点的运动来概括,即物体的平动可视为质点的运动。所以,物体是否被视为质点,完全取决于所研究问题的性质。

1.1.2 参考系和坐标系

自然界中绝对静止的物体是不存在的,大到星系,小到原子、电子,都处在永恒运动之中。因此,要描述一个物体的机械运动,必须选择另外一个物体或者物体系进行参考,被选做参考的物体称为**参考系**。参考系的选取是任意的。如果物体相对于参考系的位置在变化,则表明物体相对于该参考系运动;如果物体相对于参考系的位置不变,则表明物体相对于该参考系是静止的。同一物体相对于不同的参考系,运动状态可以不同。研究和描述物体运动,只有在选定参考系后才能进行。在运动学中,参考系的选择可以是任意的。但如何选择参考系,必须从具体情况来考虑,主要看问题的性质及研究是否方便而定。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,所以把地球选作参照物。但是,当火箭进入绕太阳运行的轨道时,为研究方便,便将太阳选作参考系。研究物体在地面上的运动,选地球作参考系最方便。例如,观察坐在飞机里的乘客,若以飞机为参考系来看,乘客是静止的;以地面为参考系来看,乘客是在运动。因此,选择参考系是研究问题的关键之一。

建立参考系后,为了定量地描述运动物体相对于参考系的位置,我们还需要运用数学手段,在参考系上建立合适的坐标系。直角坐标和极坐标是最常用的两种坐标形式。

应当指出,对物体运动的描述决定于参考系而不是坐标系。参考系选定后,选用不同的坐标系对运动的描述是相同的。

1.1.3 运动方程

在一个选定的参考系中,运动质点的位置 $P(x, y, z)$ 是随着时间 t 而变化的,也就是说,质点位置是时间 t 的函数。这个函数可以表示为

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

上式叫做质点的**运动方程**。知道了运动方程,我们就可以确定任意时刻质点的位置,从而确定质点的运动。例如,斜抛运动表示为

$$x = x_0 + v_0 t \cos \theta, \quad y = y_0 + v_0 t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2$$

从质点的运动方程中消去 t , 便会得到质点的轨迹方程。轨迹是直线的,就叫做直线运动;轨迹是曲线的,就叫做曲线运动。

1.1.4 时间和时刻

一个过程对应的时间间隔称为**时间**;而某个时间点,即某个瞬间称为**时刻**。例如,两个时刻 t_2 和 t_1 之差 $\Delta t = t_2 - t_1$ 是时间。

1.2 位移 速度 加速度

描述机械运动,不仅要有能反映物体位置变化的物理量,也要有反映物体位置变化快慢

的物理量。下面一一介绍。

1.2.1 位矢

在坐标系中,用来确定质点所在位置的矢量,叫做位置矢量,简称位矢。位矢为从坐标原点指向质点所在位置的有向线段,用矢量 $\vec{r}$ 表示,以直角坐标为例, $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$ 。设某时刻质点所在位置的坐标为 (x, y, z) ,则 x, y, z 分别为 $\vec{r}$ 沿着3个坐标轴的分量,如图1-3所示。

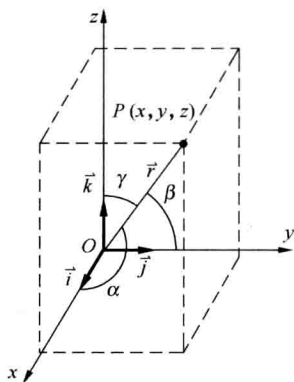


图 1-3 位矢

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

位矢的大小,可由关系式 $r = |\vec{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 得到。位矢在各坐标轴的方向余弦是

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

1.2.2 位移

设在直角坐标系中, A, B 为质点运动轨迹上任意两点。 t_1 时刻,质点位于 A 点, t_2 时刻,质点位于 B 点,则在时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内,质点位矢的长度和方向都发生了变化,质点位置的变化可用从 A 到 B 的有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 来表示,有向线段 $\overrightarrow{AB}$ 称为在 Δt 时间内质点的位移矢量,简称位移。由图1-4可以看出, $\vec{r}_B = \vec{r}_A + \overrightarrow{AB}$,即 $\overrightarrow{AB} = \vec{r}_B - \vec{r}_A$,于是

$$\Delta \vec{r} = (x_B - x_A)\vec{i} + (y_B - y_A)\vec{j} + (z_B - z_A)\vec{k} \quad (1-2)$$

应当注意:位移是表征质点位置变化的物理量,它只表示位置变化的实际效果,并非质点经历的路程。如图1-4所示,位移是有向线段 $\overrightarrow{AB}$,是矢量,它的量值 $|\Delta \vec{r}|$ 是割线 AB 的长度。

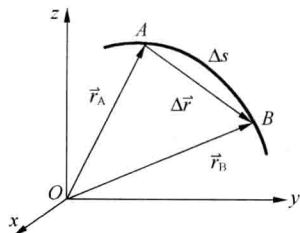


图 1-4 位移

$$|\Delta \vec{r}| = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (1-3)$$

而路程是曲线 AB 的长度 Δs ,是标量。当质点经历一个闭合路径回到起点时,其位移是

零, 而路程不为零。只有当时间 Δt 趋近于零时, 才可视作 $|\Delta \vec{r}|$ 与 Δs 相等。

1.2.3 速度

若质点在 Δt 时间内的位移为 $\Delta \vec{r}$, 则定义 $\Delta \vec{r}$ 与 Δt 的比值为质点在这段时间内的平均速度, 写为

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

其分量形式为

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \vec{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t} \vec{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t} \vec{k} \quad (1-5)$$

由于 $\Delta \vec{r}$ 是矢量, Δt 是标量, 所以平均速度 $\vec{v}$ 也是矢量, 且与 $\Delta \vec{r}$ 方向相同。此外, 把路程 Δs 和 Δt 的比值称作质点在时间 Δt 内的平均速率。平均速率是标量, 等于质点在单位时间内通过的路程, 而不考虑其运动的方向。

如图 1-5 所示, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, P_2 点将向 P_1 点无限靠拢, 此时, 平均速度的极限值叫做瞬时速度, 简称速度, 用符号“ $\vec{v}$ ”表示, 即

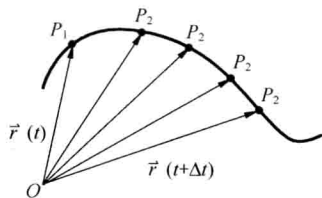


图 1-5 速度推导用图

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(t+\Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1-6)$$

速度是矢量, 其方向为: $\Delta t \rightarrow 0$ 时位移 $\Delta \vec{r}$ 的极限方向, 即, 沿着轨道上质点所在的切线并指向质点前进的方向。考虑到位矢 $\vec{r}$ 在直角坐标轴上的分量大小分别为 x, y, z , 所以速度也可写成

$$\vec{v} = \frac{dx}{dt} \vec{i} + \frac{dy}{dt} \vec{j} + \frac{dz}{dt} \vec{k} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k}$$

即

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1-7)$$

速度的量值为

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-8)$$

$\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \vec{r}$ 的量值 $|\Delta \vec{r}|$ 可以看作和 Δs 相等, 此时瞬时速度的大小 $v = \left| \frac{d\vec{r}}{dt} \right|$ 等于质点在 P_1 点的瞬时速率 $\frac{ds}{dt}$ 。

1.2.4 加速度

由于速度是矢量。因此, 无论是速度的数值大小发生改变还是方向发生变化, 都代表速度发生了改变。为了表征速度的变化, 引进了加速度的概念。加速度是描述质点速度的大小和方向随时间变化快慢的物理量。

如图 1-6 所示, t 时刻, 质点位于 P_1 点, 其速度为 $\vec{v}(t)$; 在 $t + \Delta t$ 时刻, 质点位于 P_2 点, 其速度为 $\vec{v}(t + \Delta t)$; 则在时间 Δt 内, 质点的速度增量为 $\Delta\vec{v} = \vec{v}(t + \Delta t) - \vec{v}(t)$ 。定义质点在这段时间内的平均加速度为

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$$

平均加速度也是矢量, 方向与速度增量的方向相同。

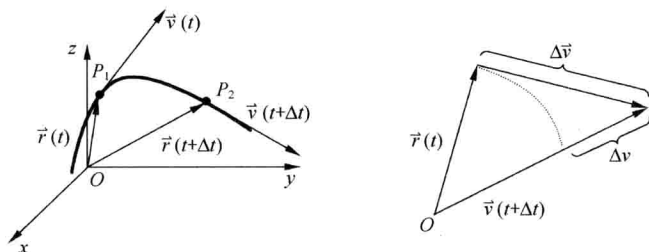


图 1-6 质点的加速度

$\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均加速度的极限值叫做**瞬时加速度**, 简称**加速度**, 用符号 “ $\vec{a}$ ” 表示, 即

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (1-9)$$

在直角坐标系中, 加速度在 3 个坐标轴上的分量 a_x 、 a_y 、 a_z 分别为

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2z}{dt^2} \quad (1-10)$$

加速度 $\vec{a}$ 可写为

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k} \quad (1-11)$$

其数值大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-12)$$

加速度方向为: 当 Δt 趋近于零时, 速度增量的极限方向。由于速度增量的方向一般不同于速度的方向, 所以加速度与速度的方向一般不同。这是因为, 加速度 $\vec{a}$ 不仅可以反映质点速度大小的变化, 也可反映速度方向的变化。因此, 在直线运动中, 加速度和速度虽然在同一直线上, 却可以有同向和反向两种情况。例如质点做直线运动时, 速度和加速度之间的夹角可能是 0° (速率增加时), 即同向, 也可能是 180° (速率减小时), 即反向。

从图 1-7 可以看出, 当质点做曲线运动时, 加速度的方向总是指向曲线的凹侧。如果速率是增加的, 则 $\vec{a}$ 和 $\vec{v}$ 之间呈锐角, 如图 1-7 (a) 所示; 如果速率是减小的, 则 $\vec{a}$ 和 $\vec{v}$ 之间呈钝角, 如图 1-7 (b) 所示; 如果速率不变, 则 $\vec{a}$ 和 $\vec{v}$ 之间呈直角, 如图 1-7 (c) 所示。

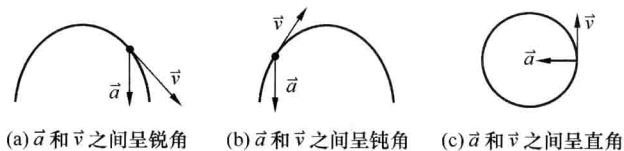


图 1-7 曲线运动中速度和加速度的方向

实际情况中,大多数质点所参与的运动并不是单一的,而是同时参与了两个或者多个运动。此时总的运动为各个独立运动的合成结果,称为**运动叠加原理**,或称**运动的独立性原理**。

运动学中通常解决的问题有以下两种。

(1) 已知质点的运动方程 $\vec{r} = \vec{r}(t)$, 求轨迹方程和质点的速度 $\vec{v} = \vec{v}(t)$ 以及加速度 $\vec{a} = \vec{a}(t)$ 。

(2) 已知质点运动的加速度 $\vec{a} = \vec{a}(t)$, 求其速度 $\vec{v} = \vec{v}(t)$ 和运动方程 $\vec{r} = \vec{r}(t)$ 。

【例 1-1】 已知一质点的运动方程为 $x=2t$, $y=18-2t^2$, 其中 x, y 以 m 计, t 以 s 计。求: (1) 质点的轨道方程并画出其轨道曲线; (2) 质点的位置矢量; (3) 质点的速度; (4) 前 2s 内的平均速度; (5) 质点的加速度。

解 (1) 将质点的运动方程消去时间参数 t , 得质点轨道方程为 $y=18-\frac{x^2}{2}$, 质点的轨道曲线如图 1-8 所示。

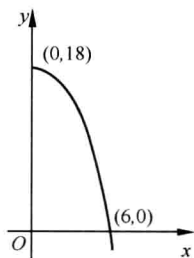


图 1-8 例 1-3 用图

(2) 质点的位置矢量为

$$\vec{r} = 2ti + (18 - 2t^2)j$$

(3) 质点的速度为

$$\vec{v} = 2i - 4tj$$

(4) 前 2s 内的平均速度为

$$\begin{aligned}\bar{\vec{v}} &= \frac{\vec{r}(2) - \vec{r}(0)}{2 - 0} = \frac{1}{2} \{ [2 \times 2i + (18 - 2 \times 2^2)j] - 18j \} \\ &= 2i - 4j (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})\end{aligned}$$

(5) 质点的加速度为

$$\vec{a} = -4j (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

【例 1-2】 一质点沿 x 轴正向运动, 其加速度为 $a=kt$, 若采用国际单位制 (SI), 则式中数 k 的单位是什么? 当 $t=0$ 时, $v=v_0$, $x=x_0$, 试求质点的速度和质点的运动方程。

解 因为 $a=kt$, 所以 $k = \frac{a}{t}$ 。故 k 的单位为 $\frac{\text{m} \cdot \text{s}^{-2}}{\text{s}} = \text{m} \cdot \text{s}^{-3}$

又因为 $a = \frac{dv}{dt} = kt$, 所以有 $dv = ktdt$, 做定积分有

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t ktdt, v = v_0 + \frac{1}{2}kt^2$$

而

$$v = \frac{dx}{dt} = v_0 + \frac{1}{2}kt^2$$

所以

$$dx = \left(v_0 + \frac{1}{2}kt^2 \right) dt$$