



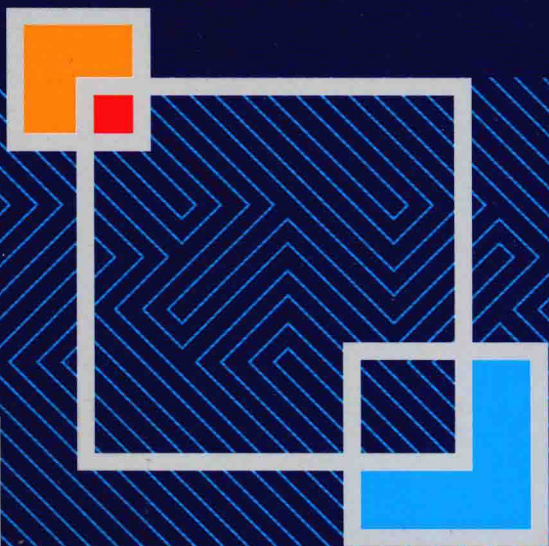
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

刘礼书 刘德生 主编
胡国进 谭欣珍 李迎 副主编

大学物理 (上)

高等院校通识教育『十二五』规划教材

College Physics



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



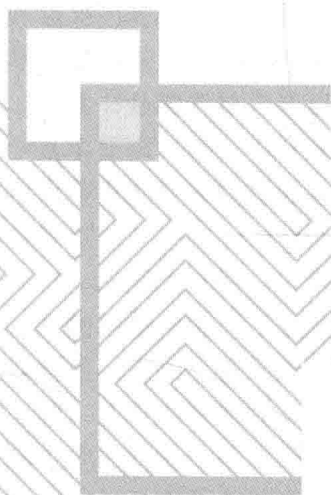
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

刘礼书 刘德生 主编
胡国进 谭欣珍 李迎 副主编

大学物理 (上)

高等院校通识教育“十二五”规划教材

College Physics



人民邮电出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

大学物理. 上 / 刘礼书, 刘德生主编. — 北京 :
人民邮电出版社, 2014. 9
ISBN 978-7-115-35626-0

I. ①大… II. ①刘… ②刘… 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(2014)第195734号

内 容 提 要

本书是根据高等院校非物理类理工学科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的。

本书分为上下两册, 上册分为3个模块, 内容包括力学、热学、电磁学, 共10章。作为非物理专业的大学物理教材, 本书一方面注重了基本理论和基本知识, 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 刘礼书 刘德生
 - 副 主 编 胡国进 谭欣珍 李 迎
 - 责任编辑 马小霞
 - 执行编辑 喻智文
 - 责任印制 张佳莹 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 18
 - 字数: 450千字
 - 2014年9月第1版
 - 2014年9月北京第1次印刷
-

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

物理学是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用的自然科学。它的基本理论渗透在自然科学的各个领域,应用于生产技术的许多部门,是其他自然科学和工程技术的基础。

物理学在人类发展史上的扮演着极其重要的角色,其每一次重大发现和突破都会伴随着人类文明的跨越式进步。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。在过去的一百年中,物理学不断蓬勃发展,并从中分化出来一系列新的独立学科,如力学、热学、电磁学、光学、原子物理学、量子物理学等,其大家族不断壮大。联合国命名 2005 年为“国际物理年”,这也是联合国历史上第一次以单一学科命名的国际年。

在人类追求真理、探索未知世界的过程中,物理学展现了一系列科学的世界观和方法论,深刻影响着人类对物质世界的基本认识、人类的思维方式和社会生活,是人类文明发展的基石,在人才的科学素质培养中具有重要的地位。

以物理学基础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。该课程所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分,是一个科学工作者和工程技术人员所必备的。大学物理课程在为学生系统地打好必要的物理基础,培养学生树立科学的世界观,增强学生分析问题和解决问题的能力,培养学生的探索精神和创新意识等方面,具有其他课程不能替代的重要作用。

本套书是编者结合自己对大学物理的讲授经验,根据教育部《理工科类大学物理课程教学基本要求(2010 年版)》,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,可作为普通高校非物理专业大学物理的教材,也可作为物理学爱好者自学的指导用书。本套书特点如下。

(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,在本套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) 注意层次性。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,本套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。

本套书分为上下两册,内容共分为力学、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。建议整书讲授 128 学时,其中,力学模块约为 24 学时,热学模块约为 16 学时,电磁学模块约为 40 学时,机械振动和机械波模块约为 16 学时,波动光学模块约为 18 学时,近代物理模块约为 14 学时。学时数较少的学校可以挑选部分内容讲授。

本书为上册, 包括力学、热学和电磁学 3 个模块。

本套教材的整体架构和编写思想由刘礼书和刘德生制定, 力学和近代物理模块由刘礼书编写, 热学模块由胡国进编写, 电磁学模块由刘德生编写, 机械振动和机械波模块由谭欣珍编写, 波动光学模块由谢润根编写。本书编写期间, 参阅了许多兄弟院校的教材, 吸取了宝贵经验, 甚至引用了部分内容, 在此深表感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在疏漏之处, 敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 7 月

目 录

模块 1 力 学

第 1 章 质点运动学	2	2.2.4 摩擦力	26
1.1 质点 参考系 时间和时刻	2	2.3 牛顿定律应用举例	27
1.1.1 质点	2	2.4 *非惯性系 惯性力	31
1.1.2 参考系和坐标系	3	复习题	33
1.1.3 时间和时刻	3	第 3 章 运动的守恒定律	37
1.2 位矢 位移 运动方程 速度 加速度	4	3.1 动量定理	37
1.2.1 位矢	4	3.1.1 质点的动量定理	37
1.2.2 位移	4	3.1.2 质点系的动量定理	38
1.2.3 运动方程	4	3.2 动量守恒定律	42
1.2.4 速度和加速度	5	3.3 质心运动 *火箭飞行问题	44
1.3 自然坐标系 圆周运动	8	3.3.1 质心	44
1.3.1 自然坐标系中的速度和 加速度	8	3.3.2 质心运动定律	46
1.3.2 圆周运动	10	3.3.3 *火箭飞行	49
1.3.3 匀速圆周运动的加速度	10	3.4 保守力与非保守力 势能	49
1.3.4 圆周运动的角量描述	10	3.4.1 功	49
1.3.5 线量和角量的关系	12	3.4.2 保守力与非保守力	51
1.4 相对运动 伽利略坐标变换	13	3.4.3 势能	53
1.4.1 伽利略坐标变换式	13	3.4.4 势能曲线	53
1.4.2 速度变换	14	3.5 功能原理 能量守恒定律	54
1.4.3 加速度变换	15	3.5.1 质点的动能定理	54
复习题	16	3.5.2 质点系的动能定理	55
第 2 章 牛顿运动定律	20	3.5.3 质点系的功能原理	56
2.1 牛顿运动定律	20	3.5.4 机械能守恒定律	56
2.1.1 牛顿第一定律	21	3.5.5 能量守恒定律	59
2.1.2 牛顿第二定律	21	3.6 碰撞问题	59
2.1.3、牛顿第三定律	22	3.7 *对称性与守恒定律	61
2.2 几种常见的力	23	3.7.1 对称性	62
2.2.1 万有引力	23	3.7.2 守恒定律与对称性	62
2.2.2 重力	25	复习题	63
2.2.3 弹性力	25	第 4 章 刚体的转动	68
		4.1 刚体 刚体的运动	68
		4.1.1 刚体的平动和转动	68

4.1.2 定轴转动的角量和线量	69	4.3.2 刚体定轴转动的角动量定理	80
4.2 力矩 转动惯量 定轴转动定律	70	4.3.3 刚体定轴转动的角动量 守恒定律	81
4.2.1 力矩	70	4.4 刚体定轴转动的功能关系	83
4.2.2 转动定律	72	4.4.1 力矩的功和功率	83
4.2.3 转动惯量 平行轴定理和正 交轴定理	73	4.4.2 刚体的转动动能	84
4.3 角动量 角动量守恒定律	77	4.4.3 刚体绕定轴转动的动能定理	84
4.3.1 质点的角动量和角动量 守恒定律	77	4.5 *进动	87
		复习题	88

模块2 热 学

第5章 气体动力学	94	5.9 *气体的运输现象	110
5.1 热运动的描述 理想气体的状态方程	94	5.9.1 粘滞现象	111
5.1.1 气体的状态参量	94	5.9.2 热传导现象	112
5.1.2 平衡态	95	5.9.3 扩散现象	112
5.1.3 理想气体的状态方程	95	5.10 *实际气体的范德瓦耳斯方程	113
5.2 分子热运动的统计规律性	96	5.10.1 分子体积引起的修正	113
5.3 压强公式 压强的统计意义	98	5.10.2 分子引力引起的修正	114
5.3.1 理想气体的微观模型	98	5.10.3 范德瓦耳斯方程	114
5.3.2 理想气体的压强公式及统计意 义	98	复习题	115
5.4 理想气体分子的平均平动动能与温 度的关系	100	第6章 热力学基础	119
5.5 能量均分定理 理想气体的内能	101	6.1 准静态过程 功 热量 内能	119
5.5.1 分子的自由度	101	6.1.1 准静态过程	119
5.5.2 能量按自由度均分定理	102	6.1.2 功	120
5.5.3 理想气体的内能	103	6.1.3 热量	120
5.6 气体分子的速率分布	104	6.1.4 内能	121
5.6.1 速率分布曲线	104	6.2 热力学第零定律和第一定律	121
5.6.2 麦克斯韦气体分子速率分布律	105	6.2.1 热力学第零定律	121
5.6.3 三种统计速率	105	6.2.2 热力学第一定律	122
5.7 玻尔兹曼能量分布定律 重力场中的 等温气压公式	107	6.3 理想气体的等体过程和等压过程	122
5.7.1 玻尔兹曼能量分布律	107	6.3.1 等体过程	122
5.7.2 重力场中的等温气压公式	108	6.3.2 等压过程	123
5.8 *分子碰撞频率 *平均自由程	108	6.3.3 等体摩尔热容 等压摩尔热容	124
		6.4 理想气体的等温过程和绝热过程 * 多方过程	127
		6.4.1 等温过程	127
		6.4.2 绝热过程	128

6.4.3 绝热线和等温线	130
6.4.4 *多方过程	132
6.5 循环过程 卡诺循环	133
6.5.1 循环过程	133
6.5.2 热机和制冷机	134
6.5.3 卡诺循环	136
6.6 热力学第二定律 卡诺定理	139
6.6.1 热力学第二定律的两种表述	139
6.6.2 可逆过程与不可逆过程	140
6.6.3 卡诺定理	141
6.7 熵 熵增加原理	141
6.7.1 熵	142

6.7.2 熵变的计算	143
6.7.3 熵增加原理	144
6.7.4 熵增加原理与热力学第二定律	145
6.8 热力学第二定律的统计意义	145
6.8.1 玻尔兹曼关系式	145
6.8.2 热力学第二定律的统计意义	146
6.9 *耗散结构 信息熵	147
6.9.1 耗散结构	147
6.9.2 信息熵	148
复习题	149

模块3 电 磁 学

第7章 真空中的静电场

7.1 电荷 库仑定律	157
7.1.1 电荷	157
7.1.2 电荷的量子化	158
7.1.3 电荷守恒定律	158
7.1.4 库仑定律	158
7.2 电场 电场强度矢量	160
7.2.1 电场	160
7.2.2 电场的强度	160
7.2.3 电场强度叠加原理	161
7.2.4 电场强度的计算	162
7.2.5 电偶极子在均匀场中的力矩	166
7.3 电场强度通量 高斯定理	167
7.3.1 电场线	167
7.3.2 电场强度通量	168
7.3.3 高斯定理	169
*7.3.4 高斯定理的微分形式	170
7.3.5 高斯定理的应用	171
7.4 静电场的环路定理 电势	174
7.4.1 静电场力的功	174
7.4.2 静电场的环路定理	175
7.4.3 电势能	176
7.4.4 电势 电势差	176
7.4.5 电势叠加原理	177

7.5 等势面 电场强度与电势梯度的关系	180
7.5.1 等势面	180
7.5.2 场强与电势关系	181
复习题	183

第8章 静电场中的导体与电介质

8.1 静电场中的导体	186
8.1.1 静电感应 导体的静电平衡	186
8.1.2 静电平衡时导体上的电荷分布	187
8.1.3 空腔导体内外的静电场与静电屏蔽	189
8.2 电容与电容器	190
8.2.1 孤立导体的电容	191
8.2.2 电容器的电容	191
8.2.3 电容器电容的计算	192
8.2.4 电容器的串联和并联	193
8.3 静电场中的电介质	194
8.3.1 电介质的极化	194
8.3.2 电极化强度矢量 电极化强度与极化电荷的关系	195
8.3.3 介质中的静电场	196
8.3.4 有电介质时的高斯定理 电位移	197

8.4 静电场的能量	199	9.7.3 磁力的功	232
8.5 *电容器的充放电	202	9.8 磁场中的磁介质	233
8.5.1 电容器充电	202	9.8.1 磁介质	233
8.5.2 电容器放电	203	9.8.2 磁介质的磁化 磁化强度	234
复习题	203	9.8.3 磁介质中的安培环路定理 磁场强度	235
第9章 恒定电流的磁场	206	9.9 铁磁质	236
9.1 恒定电流	206	9.9.1 磁质的磁化规律 磁滞回线	236
9.1.1 电流 电流密度	206	9.9.2 磁性材料的分类	237
9.1.2 电源电动势	208	9.9.3 磁畴	237
9.1.3 欧姆定律的微分形式	209	复习题	238
9.2 磁感应强度	210	第10章 电磁感应与电磁场	244
9.2.1 基本磁现象	210	10.1 电磁感应定律	244
9.2.2 磁感应强度矢量	211	10.1.1 电磁感应现象	244
9.3 电流的磁场 毕奥-萨伐尔定律	212	10.1.2 法拉第电磁感应定律	245
9.3.1 毕奥-萨伐尔定律	212	10.1.3 楞次定律	246
9.3.2 毕奥-萨伐尔定律的应用	213	10.2 动生电动势	247
9.3.3 运动电荷的磁场	216	10.3 感生电动势	251
9.4 磁通量 磁场的高斯定理	217	10.3.1 感生电场 感生电动势	251
9.4.1 磁感应线和磁通量	217	10.3.2 *电子感应加速器	253
9.4.2 磁场的高斯定理	218	10.3.3 *涡电流	254
9.5 安培环路定理	218	10.4 自感与互感	255
9.5.1 安培环路定理	219	10.4.1 自感系数 自感电动势	255
9.5.2 安培环路定理的应用	220	10.4.2 互感系数 互感电动势	256
9.6 带电粒子在电场和磁场中的运动	222	10.5 磁场的能量	257
9.6.1 洛伦兹力	222	10.6 位移电流 麦克斯韦电磁场理论	259
9.6.2 带电粒子在电磁场中的运动 和应用	223	10.6.1 位移电流 全电流定理	259
9.6.3 霍尔效应	225	10.6.2 麦克斯韦方程组的积分 形式 电磁场	262
9.7 磁场对载流导线的作用	226	复习题	263
9.7.1 磁场对载流导线的作用 力——安培力	227	复习题答案	268
9.7.2 载流线圈的磁矩 磁场对载流线圈 的作用	230	参考文献	279

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。

【学习目标】

- 掌握描述质点运动及运动变化的 4 个物理量——位置矢量、位移、速度和加速度。理解这些物理量的矢量性、瞬时性、叠加性和相对性。
 - 理解运动方程的物理意义及作用。学会处理两类问题的方法：①运用运动方程确定质点的位置、位移、速度和加速度的方法；②已知质点运动的加速度和初始条件求速度、运动方程的方法。
 - 掌握曲线运动的自然坐标表示法。能计算质点在平面内运动时的速度和加速度、质点做圆周运动时的角速度、角加速度、切向加速度和法向加速度。
 - 理解伽利略速度变换式，会求简单的质点相对运动问题，并熟悉经典时空观的特征。
- 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 时间和时刻

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分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。为了使得我们的研究简化，我们引进质点这一概念。所谓质点，是指具有一定质量的没有大小或形状的理想物体。可见，质点是我们抽象出来的理想的物理模型，它具有相对的意义。

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或物体本身的限度远小于物体的运动路径时，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。

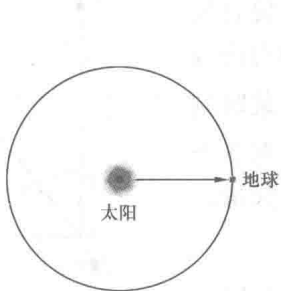


图 1-1 公转的地球可以当作质点



图 1-2 自转的地球不可以当作质点

1.1.2 参考系和坐标系

运动是绝对的, 自然界中绝对静止的物体是不存在的, 大到宇宙星系, 小到原子、电子等基本粒子, 都处于永恒运动之中。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, 被选作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, 选取合适的坐标系可以使得物理问题简化, 数学表达更为简洁。直角坐标、球坐标系、柱坐标以及自然坐标系是我们最常用的坐标系。

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 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 位矢 位移 运动方程 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， $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$ 。设某时刻质点所在的位置的坐标为 (x, y, z) ， x, y, z 分别为 $\vec{r}$ 沿着3个坐标轴的分量， $\vec{i}, \vec{j}$ 和 $\vec{k}$ 为沿 Ox, Oy 和 Oz 轴的单位矢量，如图1-3所示。

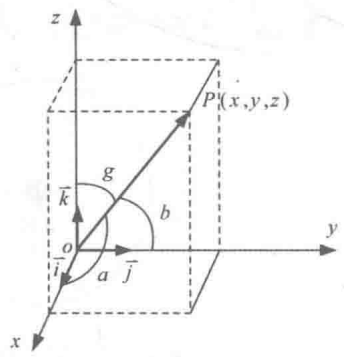


图 1-3 位矢

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

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

1.2.2 位移

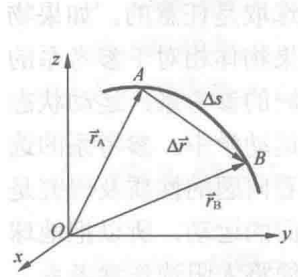


图 1-4 位移

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 $\overline{AB}$ 来表示，有向线段 $\overline{AB}$ 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， $\vec{r}_B = \vec{r}_A + \overline{AB}$ ，即 $\overline{AB} = \vec{r}_B - \vec{r}_A$ ，于是

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

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 $\overline{AB}$ ，是矢量，它的量值 $|\Delta \vec{r}|$ 是割线 AB 的长度。

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

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 运动方程

在一个选定的参考系中，运动质点的位置 $r(x, y, z)$ 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

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1-4)$$

或

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

式 (1-4) 或式 (1-4a) 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, 斜抛运动方程表示为

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

从质点的运动方程 (式 (1-4)) 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。

1.2.4 速度和加速度

1. 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 $\bar{\vec{v}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$

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

其分量形式为

由于 $\Delta \vec{r}$ 是矢量, Δt 是标量, 所以平均速度 $\bar{\vec{v}}$ 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

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

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

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

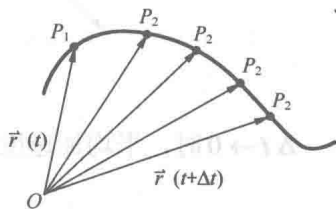


图 1-5 速度推导用图

$\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \vec{r}$ 的量值 $|\Delta \vec{r}|$ 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 $\frac{ds}{dt}$ 。

2. 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

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

平均加速度也是矢量, 方向与速度增量的方向相同。

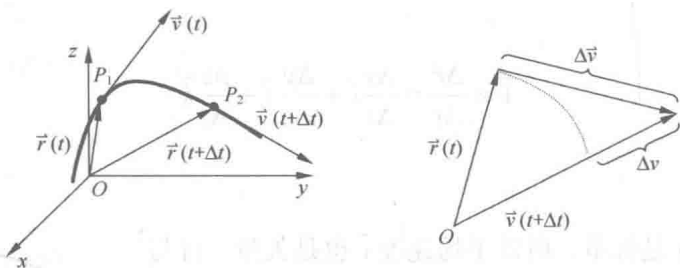


图 1-6 质点的加速度

$\Delta t \rightarrow 0$ 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

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} \quad (1-10)$$

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

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (1-11)$$

加速度 $\vec{a}$ 可写为

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k} \quad (1-12)$$

其数值大小为

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-13)$$

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。

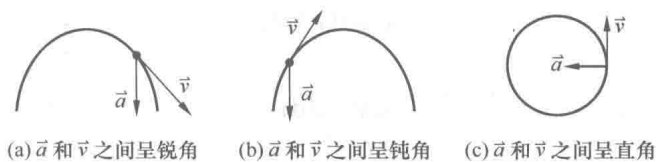


图 1-7 曲线运动中速度和加速度的方向

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】 已知质点做匀加速直线运动, 加速度为 a , 求该质点的运动方程。

解: 本题属于已知速度或加速度求运动方程, 采用积分法。

由定义 $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, 可知 $d\vec{v} = \vec{a} dt$ 。

对于做直线运动的质点, 可直接采用标量形式

$$dv = a dt$$

设 $t=0$ 时, $v=v_0$, 上式两端积分可得到速度

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt$$

$$v = v_0 + at$$

又设 $t=0$ 时, $x=x_0$, 根据速度的定义式

$$\frac{dx}{dt} = v = v_0 + at$$

两端积分得到运动方程

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

进一步消去时间 t , 可得该质点的轨迹方程

$$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$$

【例 1-2】 一质点从静止开始做直线运动, 开始时加速度为 a_0 , 此后加速度随时间均匀增加, 经过时间 τ 后, 加速度为 $2a_0$, 经过时间 2τ 后, 加速度为 $3a_0$, 求经过时间 $n\tau$ 后, 该质点的速度和走过的距离。

解: 由题意可设质点的加速度为

$$a = a_0 + at$$

$$\because t = \tau \text{ 时, } a = 2a_0, \therefore a = a_0 / \tau,$$

即

$$a = a_0 + a_0 t / \tau$$

由

$$a = dv/dt$$

得

$$dv = a dt$$

两端积分

$$\int_0^v dv = \int_0^t (a_0 + a_0 t / \tau) dt$$

得

$$v = a_0 t + \frac{a_0}{2\tau} t^2$$

另由

$$v = ds/dt$$

得

$$ds = v dt$$

等式两端积分, 得

$$\int_0^s ds = \int_0^t v dt = \int_0^t (a_0 t + \frac{a_0}{2\tau} t^2) dt$$

即

$$s = \frac{a_0}{2} t^2 + \frac{a_0}{6\tau} t^3$$

$\therefore t = n\tau$ 时, 质点的速度

$$v_{n\tau} = \frac{1}{2} n(n+2) a_0 \tau$$

质点走过的距离

$$s_{n\tau} = \frac{1}{6} n^2 (n+3) a_0 \tau^2$$

1.3 自然坐标系 圆周运动

1.3.1 自然坐标系中的速度和加速度

在质点的平面曲线运动中, 当已知运动轨道时, 常用自然坐标系描述质点的位置、路程、速度和加速度。为简单起见我们引进自然坐标系。如图 1-8 所示, 一质点做曲线运动, 在其轨迹上任一点可建立如下正交坐标系: 一坐标轴沿轨迹切线方向, 正方向为运动的前进方向, 该方向单位矢量用符号 “ $\vec{e}_\tau$ ” 表示; 另一坐标轴沿轨迹法线方向, 正方向指向轨迹内凹的一侧, 该方向单位矢量用符号 “ $\vec{e}_n$ ” 表示。自然坐标为

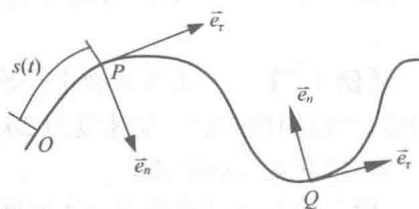


图 1-8 自然坐标系