

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理

College Physics

闵琦 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

大 学 物 理

主 编 闵 琦

副主编 朱加培 王全彪 毕雄伟

参 编 蔡 群 王翠梅 田家金

机械工业出版社

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于2010年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》编写而成,在吸收了国内外同类教材优点的基础上,融入了作者多年教学所积累的宝贵经验,不仅注重知识点的深化,而且注重知识面的扩展。

本书分5个部分,分别是力学、热学、电磁学、光学和天体物理与宇宙学简介,共17章。

本书适用于普通高等学校非物理学专业的学生,也可供普通高等学校教师和相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理/闵琦主编. —北京:机械工业出版社,2020.2

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-64291-6

I. ①大… II. ①闵… 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284188号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李永联 责任编辑:李永联 陈崇昱

责任校对:张征 封面设计:马精明

责任印制:孙炜

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2020年3月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·454千字

标准书号:ISBN 978-7-111-64291-6

定价:47.50元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网:www.cmpedu.com

本书编委会

主任委员 闵琦

副主任委员 朱加培 王全彪 毕雄伟

编委 (排名不分先后)

蔡群 陈艳 丁志美 葛树萍 和万全 蒙清

田家金 王玻 王翠梅 王晟宇 王世恩 王小兵

杨瑞东 翟凤瑞 张宏伟 张黎黎 张青友

前 言

红河学院物理系开设大学物理理论课和实验课已有 40 多年的历史,在这 40 余年的办学实践中,物理系前后选择了国内出版的多个版本的大学物理教材。近些年来,随着大学物理课程学时的大幅压缩,以及红河学院作为地方高校向应用型高校的转型发展,为了更好地完成大学物理的教学任务,物理系在参考兄弟院校所编写的优秀大学物理教材的基础上,根据自身的实际情况,编写了力学和电磁学部分的讲义,并进行了试用,收到了很好的效果。

为进一步适应新形势下所面临的教学需求,编写一本符合学校实际和自身教学特点的大学物理教材非常必要。为此,我们参照教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会于 2010 年颁布的《理工科类大学物理课程教学基本要求》,本着非物理学专业本科生学习大学物理课程需要掌握的基本知识,不仅要有知识点的深化,同时也要有知识面的扩展的原则,组织承担大学物理教学的教师把已使用多年的力学和电磁学部分的讲义重新仔细修订,并在参考国内外同类优秀教材的基础上,补齐了大学物理必修的热学、光学以及天体物理与宇宙学简介部分。受课时所限,近代物理部分未编入其中。

闵琦教授任本书的主编,并负责全书的统稿和审定;朱加培博士、王全彪副教授和毕雄伟副教授任本书的副主编,并负责内容的选择。参与本书编写的有蔡群教授(力学部分)、王翠梅博士(热学部分)、王全彪副教授(电磁学部分)、田家金副教授(光学部分)和毕雄伟副教授(天体物理与宇宙学简介部分)。需要说明的是,退休老教师朱乔忠副教授提供了力学部分的初稿,年轻教师陈艳仔细通读了光学部分的书稿,并提出了许多宝贵的修改意见,在此一并向朱乔忠老师和陈艳老师表示感谢。

本书是物理系全体教师的经验、智慧的结晶和劳动成果,是大家群策群力的结果。

此外,本书的出版得到了国家自然科学基金项目“变截面驻波管声学性质研究及其应用”(11364017)和“大振幅非线性纯净驻波场的获取及其声学特性的实验研究”(11864010)国家自然科学基金项目以及“电-声耦合效应对量子点体系中非经典态性质的影响”(11404103)的资助,同时还得到了“红河学院物理学校级建设学科”项目的资助。

限于编者水平,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前 言

力 学

第 1 章 质点的运动	2	2.2 力学中常见的几种力	27
1.1 质点 参考系 坐标系	2	2.2.1 万有引力	27
1.1.1 质点	2	2.2.2 弹力	28
1.1.2 参考系	3	2.2.3 摩擦力	28
1.1.3 坐标系	4	2.3 牛顿定律的应用	30
1.2 描述质点运动的物理量	5	2.4 * 力学相对性原理 非惯性系和 惯性力	32
1.2.1 时间与时刻	5	2.4.1 惯性参考系	32
1.2.2 位置矢量	5	2.4.2 力学相对性原理	32
1.2.3 位移和路程	6	2.4.3 伽利略变换	32
1.2.4 速度和速率	7	2.4.4 非惯性系和惯性力	33
1.2.5 加速度	8	本章小结	35
1.3 直线运动	11	习题	36
1.3.1 匀速直线运动	11	习题参考答案	39
1.3.2 匀变速直线运动	11	第 3 章 功和能	41
1.4 斜抛运动	12	3.1 功和功率	41
1.4.1 运动的叠加性	12	3.1.1 功	41
1.4.2 斜抛运动的定义	13	3.1.2 功率	42
1.5 圆周运动	15	3.2 动能和动能定理	44
1.5.1 圆周运动的角速度和角加速度	15	3.2.1 动能	44
1.5.2 圆周运动的速度	15	3.2.2 动能定理	44
1.5.3 匀速圆周运动	15	3.3 势能	46
1.5.4 变速圆周运动	16	3.3.1 引力势能	46
本章小结	17	3.3.2 重力势能	47
习题	18	3.3.3 弹性势能	47
习题参考答案	21	3.3.4 保守力	48
第 2 章 牛顿运动定律	23	3.4 机械能守恒定律 能量守恒定律	49
2.1 牛顿三大运动定律	24	3.4.1 质点系的功能原理	49
2.1.1 牛顿第一定律 (惯性定律)	24	3.4.2 机械能守恒定律	50
2.1.2 牛顿第二定律	25	3.4.3 能量守恒定律	51
2.1.3 牛顿第三定律	26		

本章小结	53	5.1 刚体运动的描述	75
习题	54	5.1.1 刚体的平动	76
习题参考答案	58	5.1.2 刚体的定轴转动及其特征量	76
第4章 动量 动量定理	60	5.2 力矩	79
4.1 冲量 动量和动量定理	60	5.2.1 力矩的概念	79
4.1.1 冲量	60	5.2.2 力矩做的功	80
4.1.2 动量和动量定理	60	5.3 刚体定轴转动的动能、转动惯量和 动能定理	81
4.2 质点系的动量定理和动量守恒定律	63	5.3.1 刚体的转动动能	81
4.2.1 质点系的动量定理	63	5.3.2 刚体的转动惯量	81
4.2.2 动量守恒定律	64	5.3.3 刚体转动的动能定理	84
4.3 碰撞	66	5.3.4 转动定律	85
4.3.1 碰撞现象	66	5.4 定轴转动刚体的角动量守恒定律	86
4.3.2 对心碰撞	67	5.4.1 角动量 L	86
4.3.3 完全弹性碰撞	67	5.4.2 刚体对转轴的角动量	86
4.3.4 完全非弹性碰撞	68	5.4.3 刚体对转轴的角动量定理	87
4.3.5 非弹性碰撞	68	5.4.4 刚体对转轴的角动量守恒定律	87
本章小结	70	本章小结	89
习题	71	习题	90
习题参考答案	74	习题参考答案	92
第5章 刚体的定轴转动	75		

热 学

第6章 热学的几个基本概念	94	7.2.1 速度空间	100
6.1 宏观描述方法与微观描述方法	94	7.2.2 麦克斯韦速度分布	101
6.1.1 热学的研究对象及其特点	94	7.3 麦克斯韦速率分布	101
6.1.2 宏观描述方法与微观描述方法的 概念	94	7.3.1 从麦克斯韦速度分布导出速率 分布	101
6.2 热力学系统的平衡态	95	7.3.2 理想气体分子的平均速率 方均根速率 最概然速率	102
6.2.1 热力学系统	95	7.4 自由度 能量均分定理	103
6.2.2 热力学平衡	96	7.4.1 自由度与自由度数目	103
6.3 状态参量与物态方程	96	7.4.2 能量均分定理	104
6.3.1 热力学系统状态参量	96	7.5 气体分子的平均碰撞频率和平均 自由程	104
6.3.2 物态方程	96	7.5.1 气体分子间的平均碰撞频率	104
本章小结	97	7.5.2 气体分子的平均自由程	105
第7章 气体分子动理论	98	7.6 气体的输运现象	106
7.1 概率论基础	98	7.6.1 黏性现象的基本规律	106
7.1.1 概率的表达式	98	7.6.2 扩散现象的基本规律	107
7.1.2 等概率性	99	7.6.3 热传导现象的基本规律	108
7.1.3 概率事件的运算法则	99	本章小结	109
7.1.4 平均值及其运算法则	99	习题	109
7.1.5 均方偏差	100		
7.2 速度空间和麦克斯韦速度分布	100		

习题参考答案	111	8.3.3 卡诺循环	123
第 8 章 热力学基本定律与熵	113	8.4 热力学第二定律	123
8.1 热力学第一定律	113	8.4.1 热力学第二定律的两种表述	123
8.1.1 准静态过程	113	8.4.2 两种表述的等效性	124
8.1.2 功 热量 内能	114	8.5 卡诺定理	125
8.1.3 热力学第一定律的内涵	115	8.6 熵与熵增加原理	125
8.2 热力学第一定律的应用	117	8.6.1 克劳修斯等式	125
8.2.1 热容与焓	117	8.6.2 熵和熵的计算	126
8.2.2 热力学第一定律的具体应用	118	8.6.3 熵增加原理	128
8.3 卡诺循环	121	本章小结	128
8.3.1 可逆与不可逆过程	121	习题	129
8.3.2 热机和制冷机	122	习题参考答案	132

电 磁 学

第 9 章 静电场	136	9.6.4 电位移矢量 有电介质时的高斯 定理	153
9.1 库仑定律	136	9.7 电容器	154
9.1.1 电荷	136	9.7.1 电容器电容的计算	155
9.1.2 电荷的量子性	137	9.7.2 电容器的串联和并联	156
9.1.3 电荷守恒定律	137	9.7.3 电容器的储能	156
9.1.4 库仑定律的内涵	137	本章小结	157
9.2 电场 电场强度	139	习题	158
9.2.1 电场强度	139	习题参考答案	162
9.2.2 电场强度的计算	139	第 10 章 恒定电路	164
9.2.3 电场线	141	10.1 电流 电流密度	164
9.3 电势	142	10.1.1 电流	164
9.3.1 电场力做功	142	10.1.2 电流密度	165
9.3.2 静电场的环路定理	143	10.1.3 电流的连续性方程	165
9.3.3 电势能 电势和电势差	143	10.2 电源 电动势	166
9.3.4 电势的计算	144	10.2.1 电源	166
9.3.5 等势面	146	10.2.2 电动势	166
9.4 高斯定理	147	10.3 恒定电路的计算	167
9.4.1 电场强度通量	147	10.3.1 电阻的串联和并联	167
9.4.2 高斯定理的内容	148	10.3.2 闭合电路的欧姆定律	167
9.4.3 高斯定理的应用	149	10.3.3 一段含源电路的欧姆定律	168
9.5 静电场中的金属导体	150	10.3.4 平衡电桥	169
9.5.1 金属导体的静电平衡	150	10.4 基尔霍夫定律	169
9.5.2 导体壳和静电屏蔽	151	10.4.1 基尔霍夫第一定律	170
9.6 静电场中的电介质	151	10.4.2 基尔霍夫第二定律	170
9.6.1 电介质对电场的影响	151	本章小结	171
9.6.2 电介质的极化	152	习题	172
9.6.3 极化强度矢量	153	习题参考答案	174

第 11 章 稳恒磁场	175	11.3.3 霍尔效应	181
11.1 磁场	175	11.4 磁场的高斯定理 安培环路定理	181
11.1.1 磁场的概念	175	11.4.1 磁场的高斯定理	181
11.1.2 磁感应强度	176	11.4.2 安培环路定理	182
11.1.3 毕奥-萨伐尔定律	176	11.5 磁介质	184
11.2 磁场对载流导线的作用	178	11.5.1 磁介质的磁化	184
11.2.1 安培定律	178	11.5.2 磁化强度	185
11.2.2 磁场对平面载流线圈的作用	178	11.5.3 有磁介质时的安培环路定理	186
11.3 磁场对运动电荷的作用	179	本章小结	187
11.3.1 洛伦兹力	179	习题	188
11.3.2 带电粒子在匀强磁场中的 运动	180	习题参考答案	190

光 学

第 12 章 几何光学和光学仪器	194	13.1 光源 光的相干性	217
12.1 几何光学的基本定律 费马原理	194	13.1.1 光的电磁理论	217
12.1.1 几何光学的基本定律	194	13.1.2 光的独立性 叠加性和 相干性	218
12.1.2 费马原理	195	13.2 光程 光程差	220
12.2 光在平面上的反射和折射	196	13.3 分波面干涉	221
12.2.1 单心光束 实像和虚像	196	13.3.1 杨氏双缝实验	221
12.2.2 光在平面上的反射和折射	197	13.3.2 菲涅耳双面镜实验	222
12.3 光在球面上的反射和折射	200	13.3.3 劳埃德镜实验和半波损失	223
12.3.1 光在球面上的反射	200	13.4 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳 原理	223
12.3.2 光在球面上的折射	202	13.4.1 光的衍射	223
12.4 透镜	205	13.4.2 惠更斯-菲涅耳原理	224
12.4.1 光在连续几个球面上的折射	205	13.5 夫琅禾费单缝和圆孔衍射	224
12.4.2 透镜的原理	205	13.5.1 夫琅禾费单缝衍射	224
12.5 显微镜 望远镜	208	13.5.2 夫琅禾费圆孔衍射	226
12.5.1 光学仪器的放大本领	208	13.6 平面衍射光栅	227
12.5.2 显微镜的放大本领	208	13.7 光学仪器的分辨本领	229
12.5.3 望远镜的放大本领	209	本章小结	230
本章小结	210	习题	231
习题	211	习题参考答案	234
习题参考答案	214		
第 13 章 光的干涉和衍射	217		

天体物理与宇宙学简介

第 14 章 天体的层次和天文观测 工具	238	14.1.3 恒星世界	240
14.1 宇宙中天体的层次	239	14.1.4 银河系	240
14.1.1 天体和天体的层次	239	14.1.5 河外星系	241
14.1.2 太阳和太阳系	239	14.1.6 星系群 星系团 超星系团	241
		14.2 天文观测工具	242

14.2.1 人类获得天体信息的主要 渠道	242	16.1.1 恒星的距离	263
14.2.2 天文望远镜	243	16.1.2 恒星的光度和星等	264
本章小结	248	16.1.3 恒星的光谱	266
习题	248	16.1.4 恒星的大小	267
习题参考答案	249	16.1.5 恒星的质量	267
第 15 章 太阳与太阳系	251	16.2 恒星的形成和演化	268
15.1 太阳	251	16.2.1 恒星的形成	269
15.1.1 太阳的基本特征	251	16.2.2 恒星主序后的演化	270
15.1.2 太阳的结构	252	16.3 致密天体	271
15.2 太阳系	254	16.3.1 白矮星	272
15.2.1 水星	254	16.3.2 中子星	273
15.2.2 金星	254	16.3.3 黑洞	274
15.2.3 地球	255	本章小结	276
15.2.4 火星	257	习题	276
15.2.5 木星	258	习题参考答案	278
15.2.6 土星	259	第 17 章 宇宙学简介	279
15.2.7 天王星	259	17.1 人类对宇宙的探索历程	279
15.2.8 海王星	259	17.2 现代标准大爆炸宇宙学	280
本章小结	260	17.3 大爆炸宇宙学的观测证据	282
习题	261	17.4 暗物质和暗能量	283
习题参考答案	262	本章小结	285
第 16 章 恒星及其演化	263	习题	285
16.1 恒星基本物理量的测量	263	习题参考答案	286
		参考文献	287

力学

第1章 质点的运动

学习目标

- ▶ 理解质点、参考系的概念
- ▶ 掌握直角坐标系和自然坐标系
- ▶ 掌握位置矢量、位移、速度和加速度矢量，并能用于解决实际问题
- ▶ 掌握变加速直线运动、斜抛运动、圆周运动
- ▶ 理解质点运动学的两类基本问题

我们所处的世界是一个物质世界，自然界就是由各种各样运动着的物质组成的。日月星辰和地面上我们所感受到的客观实在都是物质，组成物体的分子、原子、电子以及电磁辐射等也是物质。研究表明，一切物质都在永恒不息地运动着，自然界的一切现象就是物质运动的表现。

物质存在的空间形式有实体性物质和能量性物质两类。实体性物质的存在形式主要有气态、液态和固态。在大学物理课程中主要涉及实体性物质，也涉及引力场、电场、磁场这些能量性物质。

物理学研究的是物质运动最基本、最普遍的形式，包括机械运动、分子热运动、原子和亚原子的运动等。在力学范围内，物理学将着重研究机械运动。

具有客观存在的有形体的物质称为物体。一个物体相对于另一个物体的位置改变，或物体内部的一部分相对于另一部分的位置改变，称为机械运动。机械运动是最基本、最简单的运动形式，机械运动与其他运动形式有着不可分割的联系。行星绕太阳的转动、宇宙飞船的航行、地球上大气和水的流动、各种机器设备的运转等都是机械运动，它们遵从一定的客观规律。

研究机械运动，必须对运动进行正确的描述，本章将对物体之间的相互作用、物体之间运动的变化规律、物体的运动与空间和时间的关联等进行简洁的分析。

1.1 质点 参考系 坐标系

1.1.1 质点

为了便于研究，物理学常常将所研究的对象加以简化，突出研究对象的主要特征，忽略次要因素，将其抽象为理想的模型。这类理想模型是物理学研究中理想化方法的重要内容。

在整个物理学理论研究中,理想模型很多。例如,质点、刚体、理想气体、点电荷、光线、原子模型等。

应该指出,理想模型毕竟不同于真实的研究对象,是为研究便利引入的。每个理想模型都有一定的适用条件,不能不加分析地到处搬用。

在经典力学中,首先碰到的理想物理模型是“质点”。

质点:忽略物体的形状、大小,将其视为一个具有质量的点,这就是质点。质点保留了物体的两个主要特征:质量和空间位置。通常在下列情形下,可以将运动物体当作质点进行研究。

第一种情形是物体的平动。当物体不形变,只做平动时,物体的各个点具有相同的运动状态,可以将它看成质点,进而研究它的运动规律。通常把物体的质心当作其质点位置,即认为物体的质量全部集中在质心处。另外需要说明的是,物体的运动如果不是平动,在特殊情形下也可将其看成质点。例如,研究一颗手榴弹投掷后的运动,手榴弹在飞行过程中同时伴随着转动,但是手榴弹质心的运动轨迹是有规律的。由于我们研究的是手榴弹的运动轨迹,所以可以忽略它的转动,将它作为质点考虑。

第二种情形是物体的尺度与之运动的空间相比甚小,可以将物体看成质点。例如,我们研究一架飞机在空中的飞行,飞机虽然是个庞然大物,但它在更为大的空间运动,我们就没有必要考虑它的大小和形状,只要突出它的主要特征就可以满足研究的需要了。也就是说,只要将飞机看成是一个具有质量的点就可以了。但是在另外的问题情景中,我们就不一定能将飞机视为质点了。

再举一个例子,地球既绕太阳公转又在自转,地球上各点相对于太阳的运动是各不相同的,但是,由于地球与太阳的距离约为地球直径的上万倍,所以在研究地球公转时可以不考虑地球的大小和形状对运动的影响,认为地球上各点的运动情形基本相同,可以把地球看成为一个质点。

在往后的学习中,我们还会看到,如果所研究的物体不能作为一个质点处理时,还可以把它看成若干质点的集合体,称为质点组。

1.1.2 参考系

考察一个物体的运动,我们容易发现,如果考察者所处的位置不同,得到物体是否运动、如何运动的结论很可能不一样。例如,位于铁路旁的一棵果树上落下一枚成熟的果子,地面的观察者看到果子在竖直方向做直线运动;而在匀速直线运行的列车上的观察者看来,果子却在做抛体运动。因此,研究物体的运动必须有作为参考的物体或物体组,这种供参考的物体或物体组称为**参考系**。与地球表面固连在一起的参考系称为**地面系**。

参考系原则上是可以任意选择的,但选取不同的参考系,对同一运动物体的描述是不同的。例如,当你在校园里散步时,如果以你的鼻子为参考系,你的耳朵是静止的;但以路旁的树木为参考系,你的耳朵是运动的。通过这一形象的例子可知,参考系的选择对运动的描述是相当重要的。事实上,人们通常在描述运动时,自觉或不自觉地将与地面牢固相连的建筑物、树木等作为参考系。

在研究物体运动时,究竟应该选择哪个物体或物体组作为参考系呢?这要根据问题的性质、计算和处理上的方便来决定。例如,在研究人造地球卫星的运动时,显然选择地球中心

作为参考系比选择太阳作为参考系要方便得多,结论也要简洁得多。在题意和问题性质允许的情况下,可选择使问题的处理尽量简化的参考系。

为了描述一个物体的运动情形,必须选择另一个运动物体或几个相互间保持静止的物体组作为参考物。只有先确定了参考物,才能明确地表示被研究物体的运动情形。研究物体运动时被选作参考物的物体或物体组,称为参考系。例如,研究地球相对于太阳的运动,常选择太阳作为参考系;研究人造地球卫星的运动,常选择地球作为参考系;研究河水的流动,常选择地面作为参考系等。

此外,还需要对运动的绝对性和相对性建立基本的认识。

运动的绝对性:宇宙中的一切物体都处于永恒的运动之中,绝对静止的物体是不存在的。通常我们认为是静止物体,事实上它们与地球一起都在绕太阳运转,而太阳系还参与银河系的运动,银河系与河外星系还有更为复杂的运动,从这个意义上说,运动是绝对的,这就是运动的绝对性。

运动的相对性:物体的运动与静止、运动的快慢等状态是相对于其他物体而言的,否则就没有意义。从这个意义上说,运动又是相对的,是相对于参考系而言的,这称为运动的相对性。

1.1.3 坐标系

描述质点的运动必须选择参考系。但是在对质点运动进行定量研究时,不可能将所选择的参考系实物一一画出。事实上,我们通常是在参考系上选择一个适当的点,以这个点作为坐标原点建立坐标系,这样一来,质点的运动就是相对于坐标原点的运动,也就是相对参考系的运动。因此建立坐标系后,就可以方便地对质点运动进行描述了。

为了定量描述物体的位置与运动情况,在给定的参考系上建立带有标尺的数学坐标,称为坐标系。一般情况下,我们建立的坐标系的原点 O 都选在地面的固定点上,在这样的坐标系中,质点的运动就是相对地面系的运动。但同时需要注意的是,有时为了研究方便,坐标系的原点也可以选在运动的系统上。

描述质点运动的坐标系一般有直角坐标系、平面极坐标系、自然坐标系、球面坐标系、柱面坐标系等。以下简介前三种常用的坐标系。这些坐标系的应用详见相关内容。

1. 直角坐标系

在大多数情形下,力学中选择的坐标系通常是直角坐标系。

如图 1.1.1a 所示,在参考系上选取一固定点作为坐标系原点 O ,过 O 点画三条互相垂直的带有刻度的坐标轴,就构成了直角坐标系 $Oxyz$ 。为描述方便,在三个坐标轴上分别取单位矢量 i 、 j 、 k 用于表示方向。

2. 平面极坐标系

在处理诸如圆周运动一类的平面运动时,运动质点沿圆周有规律的运动,采用平面极坐标系将更为简便。如图 1.1.1b 所示,在参考系上选取一固定点作为坐标系原点 O ,称为极点;过极点 O 作一条固定射线 OA ,称为极轴;质点位于 P 点, OP 称为极径,用 ρ 表示;极轴 OA 与极径的夹角称为极角,用 θ 表示。 P 的坐标表示为 $P(\rho, \theta)$ 。

3. 自然坐标系

沿质点的运动轨道建立的坐标系称为自然坐标系。如图 1.1.1c 所示,取轨道上一个固

定点为坐标原点，同时规定两个随质点位置的变化而改变方向的单位矢量，一个指向质点运动方向，称为切向单位矢量，用 e_t 表示。一个垂直于切向方向并指向轨道凹侧，称为法向单位矢量，用 e_n 表示。这里说的是用于描述曲线运动时的自然坐标系。如果用自然坐标系描述直线运动，将更为简单，以后在适当的地方会加以介绍。

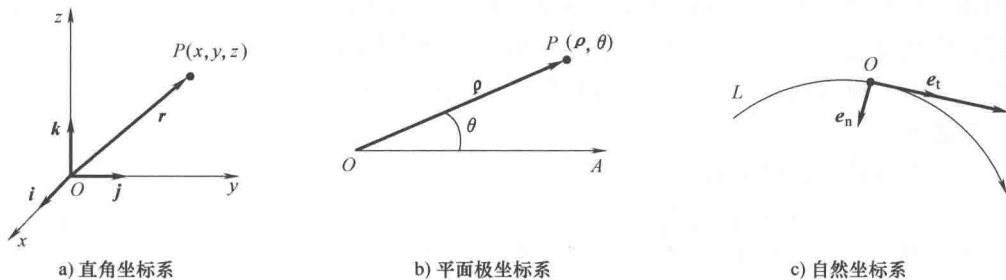


图 1.1.1 三种常用的坐标系

1.2 描述质点运动的物理量

1.2.1 时间与时刻

在物理学中，国际单位制 (SI) 规定了七个基本物理量，时间 (t) 是其中之一，这表明在物理学中，时间是很基本的量之一。

在日常生活中，“时间”一词被广泛使用。虽然日常生活中的时间与时刻这两个概念通常是混在一起的，但一般不会引起误解。而在物理学中，就必须理解时间与时刻的确切含义，避免产生混乱。

时刻是时间轴上的某个点，也可以理解为某确定时间段中的一个“瞬时”，时刻只有先后没有长短。而时间则是两个时刻间的间隔。时间具有连续性和单向性。

例如，日常生活中常说“上午 8:00 上课”，“每一节课的时间是 45 分钟”。在这里，8:00 实际指的是上午第一节课开始时时钟的读数，也就是时刻。而 45 分钟指的才是完成一节课所需要的时间间隔，也就是时间。

时间是标量，在国际单位制中，时间的单位是秒 (s)。常用的时间辅助单位有小时 (h)、分 (min)，有时还会用到日 (d)、毫秒 (ms)、微秒 (μs) 等。利用坐标系考察质点运动时，质点的位置是与时刻相对应的，而质点运动所经过的路程则是与时间相对应的。在物理学研究中，计时起点不一定是物体开始运动的时刻，可以视方便而定。

1.2.2 位置矢量

如图 1.2.1 所示，质点位于点 P ，点 O 为参考系上的固定点，建立直角坐标系，原点就选择在 O 点上。点 P 在任意时刻的位置，可以用位置矢量 (简称位矢) 表示。从坐标原点 O 向点 P 作有向线段 $r = \overrightarrow{OP}$ 。 r 与点 P 的位置坐标 $r(x, y, z)$ 对应，所以可用矢量 r 来表示点 P 的位置，这就是称 r 为位矢的原因。位矢作为一个矢量，包含了两层含义：质点 P 的位置和相对 O 点的方位。

运动质点的位置随时间在不断变化, 它的位矢也随时间而变。说明位矢是时间的函数。表示为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t) \quad (1.2.1)$$

上式不仅描述质点在任意时刻所处的位置, 还给出了质点运动随时间的变化关系, 因而也称为运动方程。知道了运动方程, 就能确定任一时刻质点的位置, 从而确定质点的运动。在力学中, 根据问题的具体条件求解质点的运动方程是主要任务之一。

在直角坐标系中, 位矢表示为

$$\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k} \quad (1.2.2)$$

上式表明, 质点的位矢在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上的投影 (也称分量) 分别为 x 、 y 、 z 。据此可得出质点轨道参数方程的分量式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.2.3)$$

运动质点在空间描绘出的曲线称为轨道, 从式 (1.2.3) 中消去 t 后, 即可确定运动质点的轨道, 这就是式 (1.2.3) 称为轨道参数方程的原因。

\boldsymbol{r} 的大小用它的模表示

$$r = |\boldsymbol{r}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2.4)$$

\boldsymbol{r} 的方向用方向余弦表示

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

方向余弦的关系为 $\cos^2\alpha + \cos^2\beta + \cos^2\gamma = 1$

以上考虑的是三维空间的问题, 在实际问题中碰到的大多是平面问题, 讨论和运算将更为简便。

1.2.3 位移和路程

为描述运动质点空间位置的变化, 需要引入另一个物理概念“位移”。

如图 1.2.2 所示, 设质点在 t_1 时刻位于 P 点, t_2 时刻位于 Q 点, 画出 P 、 Q 的位矢 \boldsymbol{r}_1 、 \boldsymbol{r}_2 。在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 这段时间内, 质点位置的变化可用矢量表示为

$$\Delta\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}_2 - \boldsymbol{r}_1 \quad (1.2.5)$$

$\Delta\boldsymbol{r}$ 同时表示了质点空间位置变化的大小和方向, 称为位移。由图 1.2.2 可知, 位移是位矢的增量。

这里一定要注意位矢与位移的区别, 位矢表示某时刻质点的位置, 是一个描述状态的量, 属于“状态量”。而位移则表示某段时间内质点位置的变化, 与运动过程相联系, 属于

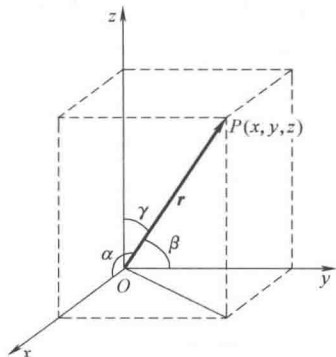


图 1.2.1 位置矢量

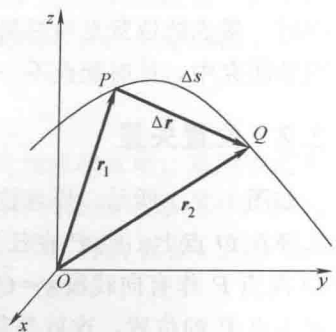


图 1.2.2 位移的概念

“过程量”。

位移反映了运动质点位置和方向的变化，所以位移与质点所经历的路程是不一样的。路程是质点所经过的实际距离，路程是标量，位移是矢量，位移的大小与路程也不一定相同。

在图 1.2.2 中，在 $\Delta t = t_2 - t_1$ 这段时间内，质点位移的大小 $\Delta r = |\Delta \mathbf{r}| = \overline{PQ}$ 。而在相同的过程中，路程则是 $\Delta s = \widehat{PQ}$ 。显然，只有在极限，即 $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} |\Delta \mathbf{r}| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta s$ 情况下，才有位移的大小与路程相等。

位移和路程的单位相同，在国际单位制 (SI) 中，它们的单位为米 (m)。

1.2.4 速度和速率

为描述物体运动的快慢程度引入了速度这个物理量，它是描述运动质点的位置和方向变化程度的物理量。速度具有瞬时性、方向性和相对性。

1. 平均速度和平均速率

如图 1.2.3 所示，质点在 $t \sim t + \Delta t$ 这段时间内从点 P 运动到点 Q ，位移为 $\Delta \mathbf{r}$ ，则可以用 $\Delta \mathbf{r}$ 和 Δt 的比值来反映在这段时间内质点位置和方向变化的平均快慢程度。我们把 $\Delta \mathbf{r}$ 和 Δt 的比值定义为质点在 Δt 这段时间内的平均速度，记为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.2.6)$$

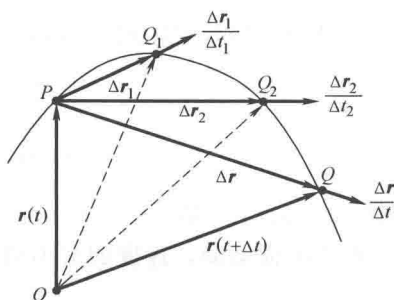


图 1.2.3 平均速度和瞬时速度

平均速度是矢量，其大小为 $v = |\mathbf{v}| = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ ，方向与位移矢量 $\Delta \mathbf{r}$ 一致。

有时候，也用平均速率来描述质点运动的快慢程度。平均速率定义为在 $t \sim t + \Delta t$ 这段时间内的路程 Δs 和时间 Δt 的比值。它是一个标量，表示为

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.2.7)$$

平均速率与平均速度的大小不一定相等，只有在极限，即 $\Delta t \rightarrow 0$ 情况下，或者质点做单方向的直线运动时，它们才相等。

2. 瞬时速度和瞬时速率

由于质点在运动过程中不同时刻的运动快慢和方向一般不同，所以平均速度只能粗略地描述质点的运动。为了能真实地反映质点在任意时刻的运动方向和快慢程度，需要引入瞬时速度的概念。

如图 1.2.3 所示，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，比值 $\frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ 将无限接近于一确定的极限值，这一极限值就是质点在 t 时刻运动快慢的确切描述，同时，这一极限值是矢量，其方向无限靠近 t 时刻质点所在位置处轨道的切线，而这一切线方向就是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，比值 $\frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ 的极限方向，它表示质点在 t 时刻的运动方向。据此，我们将 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，质点平均速度 $\frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ 的极限定义为质点在 t 时刻的瞬时速度，简称速度，用 \mathbf{v} 表示，即