

大学物理学

主编 胡秀霞 古丽娜·乌迈尔



科学出版社

大学物理学

胡秀霞 古丽娜·乌迈尔 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书总的指导思想是开阔学生的视野,突出形象分析,用通俗易懂的语言描述深奥的物理知识,全书16章,建议总学时为72学时,每章内容相对独立,每章后附有一定数量的思考题和习题,以帮助读者检查并巩固所学的知识,其中加“*”号部分内容可以根据实际教学需要进行取舍,本书整体架构清晰,内容设置具有层次性。

本书可作为非物理类本科学生的教学用书,也可作为相关教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学/胡秀霞,古丽娜·乌迈尔主编. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-040544-9

I. ①大… II. ①胡… ②古… 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09321号

责任编辑:石悦 焦志虹 // 责任校对:包志虹
责任印制:田海 封面设计:华路天然工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年5月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014年5月第一次印刷 印张:20

字数:524 000

定价:39.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书编委会

主 编 胡秀霞 古丽娜·乌迈尔

副 主 编 邝先飞 李忠秀

参 编 （按姓氏笔画排序）

王 钰 罗水平

胡国进 钟海坚

涂海华

前 言

本书是依据 2010 年底教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会颁布的“大学物理课程教学基本要求”选择教学内容，针对农林高等院校理工科本科学生的特点，结合编者多年从事非物理专业大学物理教学的经验，面向非物理类本科学生编写的物理课程教材。本书的主要特点是：

1. 科学思维，架构清晰

物理课程在农林高等院校理工科专业是基础课程，通过此课程的学习，培养学生科学思考问题的能力，形成理性的、逻辑的思维。因此，本书在结构和内容的安排上力求具有较强的逻辑性，从而给学生一个完整知识体系框架和一个清晰的脉络层次。本书共分 16 章，包括力学、振动和波、热学、电磁学、波动光学、近代物理等内容。

2. 精讲多练，重点突出

“以学生为中心”的教学法是本书编者承担的省级教改课题，经过多年实践，取得了较好的成绩。本书依据讲练结合的教学法，根据教学需要精选重点内容，在博采众家所长的基础上，针对学生的学习基础和特点，采用最优化方案精讲重点内容。本书的教学指导思想是：多形象分析，少抽象推演；多用通俗易懂的语言描述，少用深奥晦涩的术语论证。讲练结合体现在多介绍知识在生产生活中的应用，多讲解每类典型问题，同时设有例题、练习、习题三个应用环节，以灵活掌握知识。

3. 区分层次，适应面广

考虑不同需求，划分内容层次，如对于标有“*”号的章节，教师可根据教学情况进行取舍；习题包含选择题、简答题、计算题等，可给学生更多的学习空间。注重学习方法指导，如对于中学阶段涉及较少的内容，进行专门学习方法说明。

本书的编写分工如下：胡秀霞（江西农业大学）编写第 1 章、第 2 章；古丽娜·乌迈尔（新疆农业大学）编写第 11 章、第 12 章；邝先飞（江西农业大学）编写第 3 章、第 13 章；李忠秀（江西农业大学）编写第 4 章、第 5 章；胡国进（南昌师范学院）编写第 6 章、第 7 章；王钰（黑龙江工程学院）编写第 8 章、第 15 章；罗水平（江西农业大学）编写第 9 章、第 10 章；涂海华（江西农业大学）编写第 14 章、第 16 章。全书由涂海华通读修改。

在本书的编写过程中，江西农业大学、新疆农业大学和黑龙江工程学院的老师给予了大力支持，在此表示感谢。本书配有完整教案，欢迎使用。

由于编者水平有限，疏漏和不妥之处在所难免，欢迎读者批评指正。

编 者

2013 年 10 月 8 日

目 录

绪论	1
0.1 物理学的发展简介	1
0.2 物质世界及其相互作用简述	1
0.3 物理学的特点	2
0.4 学习要点	2
第 1 章 质点力学	3
1.1 描述质点运动的物理量	3
1.2 描述质点运动的坐标系	6
1.3 质点运动学的两类基本问题	10
1.4 牛顿定律及其应用	12
1.5 伽利略变换	18
习题	19
第 2 章 力学中的守恒定律	23
2.1 功和能 机械能守恒定律	23
2.2 动量 动量守恒定律	32
2.3 角动量守恒定律	40
习题	42
第 3 章 刚体力学	46
3.1 刚体的运动	46
3.2 刚体动力学	48
3.3 定轴转动刚体的角动量守恒	53
3.4 刚体的自由度	55
习题	56
第 4 章 流体的性质与应用	60
4.1 流体的基本概念	60
4.2 理想流体的流动	62
4.3 液体的表面张力	65
4.4 弯曲液面的附加压强	69
4.5 毛细现象	72
习题	76
第 5 章 真空中的静电场	80
5.1 物质的电结构	80
5.2 库仑定律	80
5.3 电场和电场强度	81
5.4 高斯定理	85

5.5 静电场的功 电势	88
*5.6 电场强度与电势的微分关系	92
习题	93
第6章 静电场中的导体和电介质	99
6.1 静电场中的导体	99
6.2 电容 电容器	101
6.3 稳恒电流	103
6.4 电介质及其极化	107
6.5 电位移矢量 有介质时的高斯定理	108
6.6 电场的能量	110
习题	112
第7章 稳恒磁场	116
7.1 磁场 磁感应强度	116
7.2 毕奥-萨伐尔定律及其应用	117
7.3 运动电荷的磁场	120
7.4 磁场的高斯定理和安培环路定理	120
7.5 磁场对载流导线的作用	123
7.6 洛伦兹力	126
7.7 磁力的功	129
7.8 物质的磁性	130
习题	135
第8章 电磁感应 电磁场	141
8.1 电磁感应定律	141
8.2 动生电动势	142
8.3 感生电动势和感生电场	144
8.4 自感和互感	147
8.5 磁场的能量	149
8.6 电磁场理论的基本概念	150
8.7 电感和电容电路的一阶暂态过程	154
习题	160
第9章 气体动理论	165
9.1 分子动理论的基本观点和统计方法的概念	165
9.2 理想气体的压强公式	166
9.3 温度的微观解释	169
9.4 麦克斯韦气体分子速率分布律	170
9.5 玻尔兹曼分布	175
9.6 能量按自由度均分定理 理想气体的内能和摩尔热容	176
9.7 分子的平均碰撞次数和平均自由程	178
9.8 气体内的迁移现象	180
9.9 实际气体的范德瓦耳斯方程	183

*9.10 焦耳-汤姆孙实验 真实气体的内能	184
习题	186
第 10 章 热力学基础	188
10.1 热力学系统 理想气体状态方程	188
10.2 热力学第一定律	190
10.3 理想气体的等值过程 摩尔热容	193
10.4 绝热过程 多方过程	196
10.5 循环过程、卡诺循环	199
10.6 热力学第二定律	202
10.7 可逆过程与不可逆过程 卡诺定理	203
10.8 熵 熵增加原理	205
10.9 热力学第二定律的统计意义	209
习题	211
第 11 章 振动学基础	214
11.1 简谐振动	214
11.2 阻尼振动	220
11.3 受迫振动和共振	221
11.4 简谐振动的合成	222
11.5 电磁振荡	227
习题	234
第 12 章 波动学基础	237
12.1 机械波的产生和传播	237
12.2 平面简谐波	239
12.3 波的能量和能流	244
12.4 电磁波	245
12.5 惠更斯原理 波的反射、折射和衍射	248
12.6 波的叠加原理 波的干涉和驻波	250
12.7 多普勒效应	254
习题	256
第 13 章 波动光学	259
13.1 光干涉的一般理论	259
13.2 分波振面干涉	262
13.3 分振幅干涉	265
13.4 迈克耳孙干涉仪 *时间相干性	269
13.5 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	271
13.6 单缝夫琅禾费衍射	272
13.7 圆孔的夫琅禾费衍射 光学仪器的分辨本领	275
13.8 光栅的衍射	277
*13.9 X 射线衍射	279
13.10 光的偏振态	280

13.11 偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	282
13.12 反射、折射和散射时的偏振现象	284
13.13 双折射现象与光的偏振	286
13.14 旋光现象	289
习题	290
第 14 章 量子力学基础	294
14.1 黑体辐射与普朗克的量子假设	294
14.2 光电效应与爱因斯坦的光量子假设	296
14.3 氢原子光谱与玻尔的量子论	299
14.4 原子的电子壳层结构	302
习题	303
参考文献	306
附录 I 基本物理常数 (2002 年国际推荐值)	307
附录 II 国际单位制 (SI) 单位	308

绪 论

0.1 物理学的发展简介

物理学是研究物质的结构和相互作用以及物质运动规律的学科。早在 19 世纪末就已形成了三种较为成熟的理论：①经典力学，②热力学和统计物理学，③电磁学。紧接着在 20 世纪初与上述理论不相容的实验事实相继出现，在爱因斯坦（1879~1955）和玻恩（1882~1970）等的共同努力下又逐步形成了两种比较成熟的理论：①狭义相对论，②量子力学，二者奠定了近代物理学的理论基础。20 世纪期间，随着物理学的发展，又形成了原子核物理、粒子物理、天体物理及一些交叉学科，如物理化学、生物物理学、农业物理学等。

粒子物理（高能物理）和天体物理是当前物理学研究领域里两个活跃的前沿。粒子物理在最小尺度上探索物质更深层次的结构；天体物理在最大尺度上寻求天体演化的规律。

0.2 物质世界及其相互作用简述

物质是物理学的研究对象。物质包括场与实物，其中实物所涉及的范围十分广阔，大到日地距离（ 10^{11}m 之上），小到基本粒子（ 10^{-14}m 之下）。目前认为存在三类“基本”粒子：①夸克，②轻子（电子、中微子等），③规范玻色子（光子等）。现在人们还未观测到它们的内部结构。

物理理论中不可缺少物质间的相互作用力（简称相互作用）。由于物质的结构与形态（形状或表现）各异，相互作用千差万别。物质的基本形态只有粒子和场，而相互作用有四种：引力、电磁力、强力、弱力。

相互作用的强度和力程（范围）如表 0-1 所示。

表 0-1 相互作用强度和力程

	强力	电磁力	弱力	引力
相对强度	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-39}
力程/m	10^{-35}	长	$<10^{-18}$	长

0.2.1 引力相互作用

引力非常弱但它的力程很长，在长程范围内只有电磁力与引力两种。引力是唯一控制着天体（电中性）运行的力。

0.2.2 电磁相互作用

运动的带电粒子之间除了有电力外还有磁力相互作用，二者统称为电磁相互作用，也属长程力。有电磁力的情况下，引力可忽略。

因为强和弱作用只在原子核的尺度下显示，所以在（宏观上）经典物理中相互作用只有引

力和电磁力两种.

0.2.3 强相互作用

这种相互作用最强,但力程很短,仅 10^{-15} m. 存在于原子核内,质子之间、中子之间及质子和中子之间的力就属此类. 强相互作用可表现为引力也可表现为斥力,其作用是保持原子核的稳定.

0.2.4 弱相互作用

弱相互作用强度很弱,力程更小.

以上四种相互作用都不是物体间直接接触的机械力,都通过场来传递,而且不同的相互作用以不同的场作为媒介.

近代物理学家一直追求把这四种相互作用统一起来. 20 世纪 60 年代建立了弱、电统一的理论. 至今,弱、电、强的所谓大统一理论也取得了一些进展,相对而言,现在人们对发现最早的引力反而了解得最少.

0.3 物理学的特点

物理学以其普遍性、基础性和与其他学科的相关性(提供理论基础、研究方法和实验手段)在自然科学中占有独特的地位. 物理学是定量的科学,它以数学为语言,崇尚严谨的逻辑推理,追求精确的有效结论. 物理学又是实验科学,它对自然界的了解必须依靠观察和实验(在受控制的情况下仔细观测某一现象,并作定量的分析研究). 然而,仅仅做实验是远远不够的,人们还须对所研究的对象提出一种模型(理想模型,如质子、刚体、点电荷、理想气体),然后根据物理现象及现象之间的关系建立概念、定律、定理,从而建立理论体系. 根据已建立的理论体系,用数学方法进行推理,得出可由实验检验的结果,再把它与实验比较,检验这个理论是否正确. 如有误差,理论上要进行修正和改进,如理论结果与实验相悖,就应放弃或重建理论. 理论与实验之间的这种交织的关系,使物理学在坚实的基础上稳步前进.

0.4 学习要点

(1) 须重视物理概念. 因为它是构成物理学大厦的骨架,应该说,概念、物理量与基本规律是不可分的,或者说借助概念、物理量才能描述物质的运动规律;反之,通过运动规律也才能对相关的物理量有更深刻的理解.

(2) 须重视数学手段的运用. 物理学的规律,无论简繁,最终是用数学形式给出相关物理量间的关系. 有些定律只有通过数学的分析才能认识其本质.

(3) 须把物理概念、物理定律和数学手段三位一体地结合起来进行学习.

第1章 质点力学

一个有形状和大小的物体的运动是复杂的，一般可分为平动、转动和振动，本章只研究质点的平动问题。对于质点的平动问题的讨论又分为两个方面：单纯描述质点在空间的运动情况称为质点运动学；而讨论运动产生的原因，如控制运动的方法，即说明运动的因果关系称为质点动力学。

数学是物理的语言，在此引入：①微积分，可对物理规律的理解达到一个新境界；②矢量，可对一些物理量作简单而充分的描述，可不借助坐标系而对物理规律进行描述和推演。两者都是物理学研究的范围扩展。

1.1 描述质点运动的物理量

1.1.1 质点 参照系

质点 任何物体都是具有大小和形状的，但是在某些情况下，物体的形状大小对于讨论它的运动无关紧要。例如地球，当研究地球绕太阳转动时，由于地球直径（约为 $1.28 \times 10^7 \text{ m}$ ）比地球与太阳的距离（约为 $1.50 \times 10^{11} \text{ m}$ ）小得多，地球上各点的运动相对于太阳来讲可视为相同，此时可以忽略地球的形状和大小；但当研究地球绕自身轴转动时则不能忽略。所以说，只要物体运动的路径比物体本身尺寸大得多，就可以近似地把此物体看成只有质量而没有大小和形状的几何点，此抽象化的点就称为质点。由地球的例子可以看出：把物体当成质点是有条件的（地球与太阳的平均距离比地球直径大得多）、相对的（地球自转不能当成质点）。

参考系 宇宙万物大至日月星辰，小至原子内部的粒子都在不停地运动着。自然界一切物质没有绝对静止的，这就是运动的绝对性。但是对运动的描述却是相对的。例如，坐在运动火车上的乘客看同车厢的乘客是“静止”的，看车外地面上的人却向后运动；反过来，在车外路面上的人看见车内乘客随车前进，而路边一同站着的人静止不动；这是因为车内乘客是以“车厢”为标准进行观察的，而路面上的人是以地球为标准观察的，即当选取不同的标准物对同一运动进行描述，所得结论不同。因此，把相对于不同的标准物所描述物体运动情况不同的现象称为运动的相对性，而被选为描述物体运动的标准物（或物体组）称为参考系。参考系的选取以分析问题的方便为前提。例如，描述星际火箭的运动，开始发射时，可选地球为参考系；当它进入绕太阳运行的轨道时，则应以太阳为参考系才便于描述。在地球上运动的物体，常以地球或地面上静止的物体为参考系。

在参考系选定后，为了定量地描述物体的位置随时间的变化，还必须在参考系上选择一个坐标系。坐标系的选取多种多样，如直角坐标系、极坐标系、自然坐标系、球坐标系、柱坐标系，在大学物理学中常用前三种坐标系。

1.1.2 位置矢量和位移

位置矢量 位置矢量是定量描述质点某一时刻所在空间位置的物理量。如图 1-1 所示，设

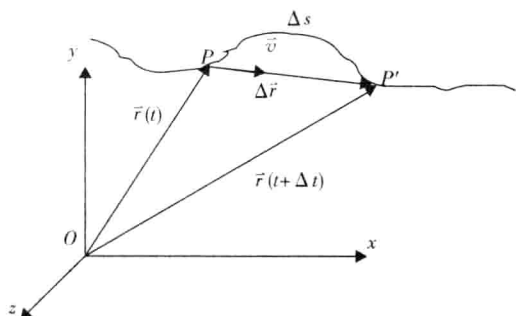


图 1-1 质点位移和平均速度

质点在某一时刻位于 P 点, 从坐标系的原点 O 引向 P 点的有向线段 $\vec{OP}$ 称为该时刻质点的位置矢量, 简称位矢, 以 $\vec{r}$ 表示. 它在 xOy 轴上的投影 (或位置坐标) 分别为 x, y, z . 于是, 位矢 $\vec{r}$ 的表达式为

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

式中, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ 分别为 x, y, z 轴上的单位矢量 (大小为 1, 方向沿各轴正向的矢量). 显然, 位置矢量 $\vec{r}$ 的大小

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

其方向由它的三个方向余弦来确定. 位矢的单位为 m (米).

运动学方程 质点在运动过程中, 每一时刻均有一对应的位置矢量 (或一组对应的位置坐标 x, y, z). 换言之, 质点的位矢是时间的函数, 即

$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad (1-2a)$$

其投影式为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-2b)$$

这样

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = x(t)\vec{i} + y(t)\vec{j} + z(t)\vec{k} \quad (1-2c)$$

按机械运动的定义, 函数式 (1-2a) 描述了这个运动的过程, 故称为质点的运动方程. 知道了运动方程, 就能确定任一时刻质点的位置, 进而确定质点的运动. 运动学的主要任务在于, 根据问题的具体条件, 建立并求解质点的运动方程.

如果由式 (1-2b) 消去参变量 t , 则得质点运动的轨迹方程. 如果质点限制在平面内, 则可在该平面上建立 xOy 坐标系, 于是式 (1-2b) 中的 $z(t) = 0$, 从中消去时间 t , 得

$$y = y(x) \quad (1-3)$$

此即质点在 xOy 平面内运动的轨迹方程.

位移 位移是表示质点位置变化的物理量. 如图 1-1 所示, 设时刻 t 质点经过 P 处, 位矢为 $\vec{r}$; 时刻 $t + \Delta t$, 质点经过 P' 处, 位矢为 $\vec{r}(t + \Delta t)$. 在时间 Δt 内, 质点位置的变化可用它的位移表示. 由图 1-1 知

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

位移是矢量, 其大小为有向线段 $\Delta\vec{r}$ 的长度, 其方向由始点指向末点.

必须指出, 位移和路程不同. 位移是矢量, 是质点在一段时间内的位置变化, 而不是质点所经历的实际路径; 路程为标量, 是指该段时间内质点所经历的实际路径的长度, 以 Δs 表示 (如图中的弧长). 位移和路程除了矢量、标量不同外, 而且总有 $\Delta s \geq |\Delta\vec{r}|$. 只有质点在做单向直线运动时才有 $\Delta s = |\Delta\vec{r}|$. 但是在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况下, $ds = |d\vec{r}|$. 还要注意 Δr 与 $\Delta\vec{r}$ 的区别, 一般以 Δr 代表 $|\vec{r}_2| - |\vec{r}_1|$, 因此总有 $|\Delta\vec{r}| \geq \Delta r$, 只有在 $\vec{r}_2$ 与 $\vec{r}_1$ 方向相同的情况下 $|\Delta\vec{r}|$ 与 Δr 才相等.

1.1.3 速度

速度是表示质点位置变化快慢和变化方向的物理量。将质点的位移与完成位移所需的时间的比值称为质点在该段时间内的平均速度，用 $\bar{\vec{v}}$ 表示，即

$$\bar{\vec{v}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t} \quad (1-5)$$

平均速度是矢量，其方向与 $\Delta \vec{r}$ 的方向相同，如图 1-1 所示。

质点所经历的路程与完成这段路程所需时间之比称为质点在该段时间内的平均速率，以 $\bar{v}$ 表示

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-6)$$

平均速率为标量。在一般的情况下，平均速度的大小并不等于平均速率。

平均速度只能反映一段时间内质点位置的平均变化情况，而不能反映质点在某一时刻（或某一位置）的瞬时变化情况。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，平均速度的极限值才能精确地反映质点在某一时刻（或某一位置）的运动快慢及方向。这一极限值称为质点在该时刻的瞬时速度，或简称速度，以 $\vec{v}$ 表示，即

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (1-7)$$

速度是矢量，其方向与 $\Delta \vec{r}$ 的极限方向一致，即为运动轨迹上该点的切线方向。从式 (1-7) 可以看出，速度是位置矢量对时间的一阶导数。速度的单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

反映质点运动瞬时快慢的物理量称为瞬时速率（简称速率），它是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速率的极限值，即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} v = \frac{ds}{dt} \quad (1-8)$$

由于 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $|d\vec{r}| = ds$ ，故质点在某一时刻的速度大小与该时刻的瞬时速率相等。

1.1.4 加速度

加速度是描述质点速度随时间变化快慢的物理量，如图 1-2 所示。

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

由式 (1-9) 可以看出，质点的加速度等于速度对时间的一阶导数，或等于位置矢量对时间的二阶导数。换句话说，可以通过对速度或位矢求导来计算加速度。加速度的单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

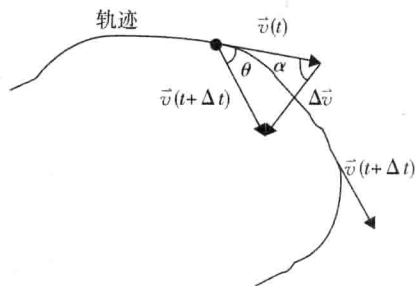


图 1-2 质点加速度

1.1.5 圆周运动的角量描述

轨迹为圆周的运动称为圆周运动。由于做圆周运动的质点必在圆周上，因而其运动可用一组角量来描述。

角坐标 角坐标是描述质点在圆周上位置的物理量。如图 1-3 所示，设时刻 t 质点位于 A 处，则半径与参考轴的夹角 θ 即为该时刻质点的角坐标，它随时间而变化，即运动方程为

$$\theta = \theta(t) \quad (1-10)$$

此即质点做圆周运动时的运动方程. 角坐标的单位为 rad.

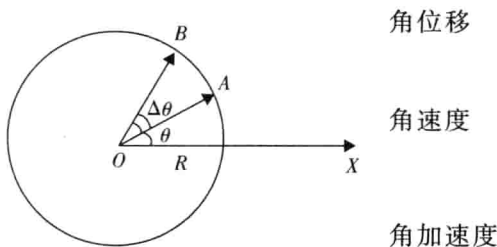


图 1-3 角位置和角位移

$$\begin{aligned} \Delta\theta &\xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} d\theta \\ \bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} &\xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (1-11)$$

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \xrightarrow{\Delta t \rightarrow 0} \beta = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-12)$$

具有矢量性 位移、角速度与角加速度（统称为角量）具有矢量性，单位分别为 rad、 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 及 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$.

例 1-1 一飞轮以转速 $n = 900 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转动，受到制动后均匀地减速，经 $t = 50 \text{ s}$ 静止。试求：（1）飞轮的角加速度 β ；（2）从制动开始至静止，飞轮转过的转数；（3） $t = 25 \text{ s}$ 时，飞轮的角速度。

解题思路 解转动规律题的过程，可以与高中的变速直线运动类似，只是角速度、角加速度的方向要加以注意。

解 （1）由题意可知

$$\omega_0 = \frac{2\pi \times 900}{60} = 30\pi (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$$

根据匀变速圆周运动的角速度公式 $\omega = \omega_0 + \beta t$ ，得角加速度为

$$\beta = \frac{\omega - \omega_0}{t} = \frac{0 - 30\pi}{50} = -0.6\pi (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$$

（2）根据角位置公式 $\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2$ ，得这段时间内飞轮的角位移为

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2}\beta t^2 = 30\pi \times 50 - \frac{1}{2} \times 0.6\pi \times 50^2 = 750\pi (\text{rad})$$

飞轮转数为

$$N = \frac{\Delta\theta}{2\pi} = \frac{750\pi}{2\pi} = 375 (\text{转})$$

（3）根据 $\omega = \omega_0 + \beta t$ ，得 $t = 25 \text{ s}$ 时角速度为

$$\omega = \omega_0 + \beta t = 30\pi - 0.6\pi \times 25 = 15\pi (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$$

1.2 描述质点运动的坐标系

前面讲过，为了定量地描述物体的位置和位置随时间的变化，在参考系上还需要选择一个坐标系。下面介绍三种常用坐标系中的各物理量及其变化的表达式。

1.2.1 直角坐标系

位移 在直角坐标系中，位移可表示为

$$\Delta\vec{r} = (x_2 - x_1)\vec{i} + (y_2 - y_1)\vec{j} + (z_2 - z_1)\vec{k} = \Delta x\vec{i} + \Delta y\vec{j} + \Delta z\vec{k} \quad (1-13)$$

位移的大小

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

其方向由三个方向余弦确定, 分别为

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

速度 由速度定义知, 速度是位置矢量对时间的一阶导数, 即

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k} \quad (1-14)$$

加速度 由加速度定义有

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{dv_x}{dt}\vec{i} + \frac{dv_y}{dt}\vec{j} + \frac{dv_z}{dt}\vec{k} = \frac{d^2x}{dt^2}\vec{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\vec{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\vec{k} = a_x\vec{i} + a_y\vec{j} + a_z\vec{k} \quad (1-15)$$

1.2.2 平面极坐标系

位矢 对于位置矢量限制在一平面上的情形, 除了用平面直角坐标系外, 也可用平面极坐标系来描述. 此时质点的坐标为 r 和 θ . 设 $\vec{e}_r$ 和 $\vec{e}_\theta$ 分别代表径向和横向 (同径向垂直, 指向 θ 角增加的方向) 的单位矢量 (图 1-4) (这里的 $\vec{e}_r$ 和 $\vec{e}_\theta$ 大小不变, 等于 1, 但它们的方向均随质点所在位置而异, 即与坐标有关). 则质点的位置矢量可表示为

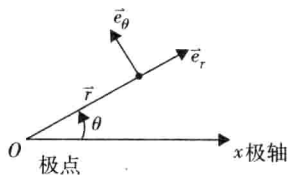


图 1-4 平面极坐标系

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = r(t)\vec{e}_r[\theta(t)] \quad (1-16)$$

当质点在平面上运动时, 随着坐标点的变化, 方向也随之改变, 所以方向也是时间 t 的函数, 位矢的极坐标分量成为

$$\begin{cases} r = r(t) \\ \theta = \theta(t) \end{cases}$$

速度 根据速度定义有

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \frac{d}{dt}(r\vec{e}_r) = \dot{r}\vec{e}_r + r\frac{d\vec{e}_r}{dt} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{dr}{dt}\vec{e}_r + r\frac{d\theta}{dt}\vec{e}_\theta \Rightarrow \begin{cases} v_r = \frac{dr}{dt} \text{ (径向)} \\ v_\theta = r\frac{d\theta}{dt} \text{ (横向)} \end{cases} \quad (1-17)$$

式中, $\frac{dr}{dt}$ 是质点径向坐标对时间的变化率, 即质点与原点距离的时间变化率. v_θ 为横向速度, 推导从略.

加速度 平面极坐标系中质点的加速度已超出普通物理的范畴, 将在理论力学中学到. 平面极坐标系中的加速度也分为径向加速度和横向加速度, 其分别为

径向加速度

$$a_r = \frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2$$

横向加速度

$$a_\theta = r\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\frac{dr}{dt}\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{r}\frac{d}{dt}\left(r^2\frac{d\theta}{dt}\right) \quad (1-18)$$

由上可以看出, 在平面极坐标系中, 加速度分量的表达式比较繁杂, 不像直角坐标系中那么简单, 但这并不等于解算力学中所有问题都要用直角坐标系才显得方便.

1.2.3 自然坐标系

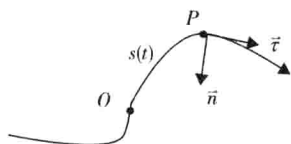


图 1-5 自然坐标系

在有些情况下, 质点相对参考系的运动轨迹是已知的. 例如, 以地面为参考系, 火车 (视为质点) 的运动轨迹 (铁路轨道) 是已知的. 这时可以在轨迹上任一点 P 的切线和法线构成坐标系来研究平面曲线运动. 这种坐标系称为自然坐标系. 如图 1-5 所示, 图中 $\vec{\tau}$, $\vec{n}$ 分别代表切线和法线方向的单位矢量. 显然, 随着质点位置的改变, $\vec{\tau}$ 及 $\vec{n}$ 的方向亦随之而变. 因此, $\vec{\tau}$, $\vec{n}$ 与 $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ 不同, 前者的方向在运动中是可变的, 而后者则是固定的.

运动方程 如图 1-5 所示, 在轨道上任选定一点 O 作为原点 (或称为弧长起算点, 原点不一定是 p 的初始位置), 沿轨道规定一个弧长正方向 (轨道上箭头示, 不一定是 p 运动的方向). 则可用 O 至 P 的轨道弧长 s 来描述 p 的位置. 当 p 随 t 变化位置时, s 是 t 的标量函数.

$$s = s(t) \quad (1-19)$$

这就是以自然坐标表示的质点运动学方程.

速度 在自然坐标系中, 质点的速率 [参见式 (1-8)] 可以通过对式 (1-19) 求导得到. 于是, 自然坐标系中的质点速度

$$\vec{v} = v \vec{\tau} = \frac{ds}{dt} \vec{\tau} \quad (1-20)$$

加速度 对式 (1-20) 求导, 得质点在自然坐标系中的加速度

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dv}{dt} \vec{\tau} + v \frac{d\vec{\tau}}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} \vec{\tau} + \frac{v^2}{\rho} \vec{n} \quad (1-21)$$

这里用到 $d\vec{\tau} = d\theta \vec{n} = \frac{ds}{\rho} \vec{n}$. 式中, ρ 为曲率半径. 右方第一项大小为质点在某一位置 (某一时刻) 速率的变化率, 方向与切线方向平行, 故称切向加速度, 以 a_τ 表示; 第二项与前项垂直, 即与 $\vec{n}$ 同向, 方向为法向, 称法向加速度, 用 a_n 表示. 所以, 在自然坐标系中, 质点的加速度的表达式为

$$\vec{a} = \frac{d^2s}{dt^2} \vec{\tau} + \frac{v^2}{\rho} \vec{n} = a_\tau \vec{\tau} + a_n \vec{n} \quad (1-22)$$

加速度的大小及方向与切线方向的夹角为

$$\begin{cases} a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2} & (\text{大小}) \\ \alpha = \arctan \frac{a_n}{a_\tau} & (\text{方向}) \end{cases} \quad (1-23)$$

从以上讨论可以看出, 切向加速度给出了速度大小随时间的变化率; 而法向加速度则反映了速度方向随时间的变化率.

1.2.4 角量与线量的关系

从 1.1 节容易看出, 在 dt 时间内, 质点发生 $d\theta$ 角位移时, 它所通过的路程

$$ds = r d\theta \quad (1-24a)$$