

PHYSICS

大学物理学 上册

主 编 申兵辉

副主编 朱世秋 何志巍 韩 萍 刘玉颖

PHYSICS

大学物理学 上册

主 编 申兵辉

副主编 朱世秋 何志巍 韩 萍 刘玉颖

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是为全日制高等院校编写的教学用书. 全书分为上、下两册, 上册内容包括运动与力、热现象、电与磁、波与粒子四部分, 下册内容包括习题解答和拓展阅读两部分.

本书的内容涵盖了大学基础物理学的主要内容, 并适当突出了近代物理学的地位和作用. 在表述上力求思路清晰、结构紧凑、体系完整, 具有概念准确、详略得当等特点. 书中每章都附有一定量的精心选择的难易适中的习题, 并在下册对每一道习题均提供了一种参考解法. 另外, 拓展阅读部分既有知识拓展和技术应用, 又有思维的拓展, 通过阅读这些材料不但可以使读者开阔视野, 还可以培养物理学的研究方法和思维方式.

本书适用于高等院校非物理专业理、工、农、医、牧、水等专业使用, 也可供物理学相关工作者学习参考之用.

版权所有, 侵权必究. 侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 上册/申兵辉主编. — 北京: 清华大学出版社, 2017
ISBN 978-7-302-47230-8

I. ①大... II. ①申... 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 (2017) 第 122577 号

责任编辑: 朱红莲

封面设计: 傅瑞学

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm × 260mm

印 张: 20.75

字 数: 492 千字

版 次: 2017 年 7 月第 1 版

印 次: 2017 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1~2500

定 价: 42.00 元

前 言

物理学是研究自然界中的物质结构、物质的相互作用和运动规律的学科。经过长期的发展,人们在认知物质世界物理运动规律的过程中,已建立起经典物理学完美的理论体系。进入 20 世纪以来,物理学又在高速运动问题和探索微观世界基本构成和运动规律的进程中取得了世人瞩目的成就,并对其他学科的发展产生了深远的影响。科学史告诉我们,物理学是自然科学的核心,是新技术的源泉。物理学中不仅蕴涵着先进生产力,同时也蕴涵着先进文化,对人类的未来将起着决定性的作用。物理学不是一切,但是一切离不开物理学。

物理学的特征是:简洁、和谐、对称、统一、生动、活泼。物理学是由思维方式、研究方法和知识三个层次的内容构成的。物理学的思维方式和研究方法是人类探索物理世界奥秘的科学思想和科学方法的宝贵结晶。物理学中的每一个新概念的提出、新规律的建立、新理论的诞生,人们都经历了艰苦卓绝的探索过程,而其新成就又总是对人类社会的生产和生活产生重大影响,并使人们看待自然世界的观念得到更新,认识得到提升。物理学在 20 世纪取得了令人惊讶的成功,改变了我们对空间与时间、存在与认识的看法,也改变了我们描述自然的基本语言,使人类的生产方式、生活方式以及思维方式发生了深刻的变革。

20 世纪后半期,物理学从研究简单的线性系统走向复杂的非线性系统。非线性科学是一门新兴的学科,它用静态非线性关系表示两个量之间的关系,用非线性动力学关系表示两个量变化之间的关系,用复杂的非线性关系表示部分与整体之间的关系,从而使人们对自然的认识更接近其本来面貌。混沌理论、分形几何学和孤立子理论是当代非线性科学的活跃分支。未来是不确定的,法国著名的哲学家埃德加·莫兰把在物理科学、生命进化科学和历史科学中出现的不确定性的认识也列入了复杂性的范畴。莫兰指出:“应该抛弃关于人类历史的确定性观念,教授关于在物理学、生物进化学和历史科学中出现的不确定性的知识,教授应付随机和意外的策略性知识。”

非物理专业的大学物理教学,受到学时数的限制,我们不可能把物理学的整个理论体系完整地展现在学生们面前;同时,对于低年级的大学生而言,受认知能力和理论基础方面的限制,我们也无法讲授一些高深的物理知识。因此,大学物理教学的目标除了传授给学生认识自然世界和进入各自专业领域所需要的一些必备的物理学知识以外,更重要的是让他们掌握物理学的思维方式和研究方法。正如爱因斯坦所说,“在学校里,教育的价值并不是学到很多知识,而是受到如何进行思考的训练,而这是不可能从书本上学到的。”著名的俄国科学家巴甫洛夫曾经说过:“科学是随着研究方法所获得的成就而前进的。研究方法每前进一步,我们就更提高一步,随之在我们面前也就开拓了一个充满着种种新鲜事物的更辽阔的远景。因此,我们头等重要的任务乃是制定研究方法。”

基于上面的考虑,书中所涉及的物理概念、原理和规律,力求从现象和实验出发,着眼于物理内容的阐述和物理本质的揭示,尽量描绘出清晰的物理图像。全书分为六篇:运动与力、热现象、电与磁、波与粒子、习题解答和拓展阅读六部分。在拓展阅读部分,精选了三

方面的内容:一是有关物理学在生命科学中的地位和作用,并介绍了一些生命科学中常用的实用物理学技术;二是通过一些实例进行物理学的研究方法和思维方式的训练;三是若干问题的专题分析.希望读者通过阅读这些材料,能够开阔视野、提升思维能力或在实际工作中需要时查阅.

本书上册每章后均附有一定量的习题,并在下册对每道习题都给出了一种参考解法,供读者自学或复习使用.

本书的编者都是中国农业大学长期从事基础物理教学的老师.本书上册编者分工如下:第1章~第3章、第9章~第11章由申兵辉编写;第4章、第6章由朱世秋编写;第5章、第12章和第13章由刘玉颖编写;第7章和第8章由何志巍编写;第14章和第15章由韩萍编写.下册分工如下:贾贵儒负责拓展阅读A~G;申兵辉负责各章的要点归纳和第1章~第3章、第7章~第11章的习题解答以及拓展阅读H~L;朱世秋负责第4章和第6章的习题解答;刘玉颖负责第5章、第12章和第13章的习题解答;韩萍负责第14章和第15章的习题解答.全书由申兵辉统稿.

由于编者水平所限,书中难免有错误疏漏之处,敬请广大读者不吝指正.

编 者

2017年5月

目 录

第一篇 运动与力

第 1 章 质点运动学	3
1.1 质点运动的描述	3
1.2 速度和加速度在不同坐标系中的表示	6
1.3 相对运动	11
习题	13
第 2 章 动量 角动量	15
2.1 力与物体的运动状态	15
2.2 动量 动量守恒定律	18
2.3 角动量 角动量守恒定律	24
2.4 质心 质心运动定理	27
2.5 刚体的定轴转动	28
习题	33
第 3 章 功和能	36
3.1 动能定理	36
3.2 势能	41
3.3 功能原理与机械能守恒定律	44
习题	46
第 4 章 流体力学	48
4.1 流体静力学	48
4.2 理想流体的流动	51
4.3 黏性流体的流动	55
4.4 液体的表面性质	57
习题	61
第 5 章 振动	63
5.1 振动概述	63
5.2 简谐振动	64
5.3 振动的合成与分解	70
5.4 阻尼振动 受迫振动	74
习题	77
第 6 章 狭义相对论基础	79
6.1 经典时空观	79

6.2	狭义相对论的时空观	81
6.3	狭义相对论的质量和能量	85
6.4	广义相对论简介	86
	习题	90

第二篇 热 现 象

第 7 章	气体动理论	93
7.1	气体的状态方程	93
7.2	气体动理论的基本概念	95
7.3	理想气体的压强和温度	98
7.4	气体分子的速率分布律	101
7.5	玻耳兹曼分布律	103
7.6	能量均分定理	105
7.7	分子的平均自由程	107
7.8	输运现象的气体动理论	109
	习题	111
第 8 章	热力学基础	113
8.1	热力学第一定律	113
8.2	理想气体的典型热力学过程	115
8.3	循环过程	119
8.4	热力学第二定律	122
8.5	熵	125
8.6	熵的统计意义	127
	习题	129

第三篇 电 与 磁

第 9 章	静电场	135
9.1	电荷 库仑定律	135
9.2	电场 电场强度	137
9.3	静电场的高斯定理	143
9.4	静电场环路定理 电势	148
9.5	静电场中的导体	153
9.6	电容 电容器	155
9.7	电介质	158
9.8	静电场的能量	161
	习题	164
第 10 章	恒定磁场	168
10.1	恒定电流	168

10.2 磁场 磁感应强度	172
10.3 毕奥 - 萨伐尔定律	175
10.4 恒定磁场的性质	180
10.5 磁场对运动电荷的作用	183
10.6 磁场对载流导线的作用	186
10.7 磁介质	189
习题	195
第 11 章 电磁感应与电磁场	200
11.1 电磁感应的基本规律	200
11.2 动生电动势和感生电动势	202
11.3 自感和互感	207
11.4 磁场能量	210
11.5 麦克斯韦方程组 电磁场	212
习题	216
第四篇 波与粒子	
第 12 章 波动	223
12.1 简谐波	223
12.2 波的叠加	229
12.3 多普勒效应	234
12.4 电磁波	236
12.5 电磁波的吸收和色散	242
习题	245
第 13 章 光波	247
13.1 相干光	247
13.2 杨氏双缝干涉 劳埃德镜	248
13.3 薄膜干涉	251
13.4 光的衍射	257
13.5 衍射光栅	262
13.6 X 射线衍射	266
13.7 光的偏振	267
13.8 反射光与折射光的偏振	269
习题	271
第 14 章 量子物理学初步	273
14.1 光的本性的再认识	273
14.2 实物粒子的二象性	283
14.3 波函数 薛定谔方程	287
14.4 一维势场中的粒子	291

14.5 氢原子	295
14.6 原子的壳层结构	300
习题	302
第 15 章 原子核与基本粒子	304
15.1 原子核的一般性质	304
15.2 核力	305
15.3 原子核的结合能及其利用	306
15.4 原子核衰变的基本规律	309
15.5 基本粒子	317
习题	322
附录 A 希腊字母表	323
附录 B 基本物理常量和保留单位	324

第一篇

运动与力

自然界中一切物质,大到宏观天体,小到基本粒子,每时每刻都在不停地运动着.运动的形式多种多样,物体在时间和空间中位置的变化,包括平动、转动、变形、流动等,都是运动的表现形式.其中最简单的是物体的空间位置随时间的变化,称为机械运动,在热运动、电磁运动、微观世界的运动、化学变化、生命现象、天体运动中都包含有机械运动.力学就是研究机械运动的物理学分支.

力学可分为静力学、运动学和动力学.静力学研究物体静止时力的平衡,运动学是对物体运动状态的描述,特别是物体何时在何地以多大速率朝哪个方向运动等,而动力学则研究引起物体运动状态改变的起因.按研究对象的形态划分,可分为固体力学、流体力学和一般力学;根据研究方法和所建模型的不同,可以把力学分为质点力学、刚体力学和连续介质力学;按研究对象的速率和尺度,力学还可分为经典力学、相对论力学和量子力学,经典力学的研究对象是宏观低速(相对于光速)物体,相对论力学的研究对象为高速物体,而量子力学则研究微观粒子的运动.

本篇先以质点运动学为例介绍运动的描述方法,再以牛顿运动定律为基础,简述动力学的各种规律,根据力的作用效果引入动量、角动量和动能等概念.除此之外,本篇还会讨论相对论力学和流体力学的基本概念和规律,有助于读者对自然界的运动有一个普遍的认识.

力学是整个物理学的基础.由于力学是物理学中最形象的分支学科,所以物理学中的很多基本概念是在力学中建立起来的,譬如上面提到的动量、角动量等概念,一旦我们掌握了其内涵,可以很方便地推广到量子物理学中.本篇我们还将以力学中的机械振动为模型介绍振动的概念和表示方法,为以后学习波动和量子物理学奠定基础.

第1章 质点运动学

研究某种运动的规律,首先要对这种运动形式进行描述,即对它进行唯象的研究,然后再进一步研究它运动的原因和规律.从历史上看,人们对机械运动的研究也是先从机械运动的描述开始的.运动学的核心问题就是用什么物理概念、物理量去描述物体机械运动的状态,用什么方程去表示物体的运动状态的演化.

1.1 质点运动的描述

1.1.1 质点 参考系 坐标系

所谓质点,是指没有大小和形状,具有一定质量的几何点.显然,质点的密度为无限大,而真实的物体都具有一定的大小和形状及有限大小的密度,因此,质点只是为了使我们研究问题得以简化而引入的一个理想模型.

在什么情况下一个真实物体可以简化成质点呢?一般来说,有下面两种情况:①物体不变形,不作转动,此时物体上任一点的运动都可代表整体的运动;②物体本身的线度与它活动范围相比小得多,此时物体的形变及转动显得并不重要,可以忽略不计.例如,在光滑桌面上滑动的木块就可以看作一个质点.在平直的铁轨上行驶的火车,虽然很长,但由于没有转动与变形,也可以看成质点.再如,研究铁饼或炮弹的运行轨道时,尽管它们都在转动,但相对于轨道的长度来说,它们本身的尺度可以忽略,因此,如果不要求很高的精确度,它们也可以看作质点.

一个物体能否看作质点,不是一成不变的.同样一个物体,往往在某些情况下可以看成质点,而在另外一些情况下则不能看成质点.例如,我们研究地球的公转时,考虑到地球的直径远远小于地球到太阳的距离,因而把地球简化为质点.但是,当我们研究地球的自转时就不能再把地球看作质点.如果要研究空气阻力对炮弹或铁饼的飞行,以及研究铁饼的转动时,就不能再把铁饼或炮弹看成质点了.

质点模型的意义还在于,当我们研究某一个物体的运动时,常常需要将该物体分成许多部分来研究.对其中的每一部分,如果其上的各点的运动近似相同,那么每一小部分就可以分别看作质点.这样,把整个物体看作一系列质点的集合,通过研究各个质点的运动,就可以描述整个物体的运动状态了.

如果我们的研究对象是多个物体构成的系统,而每个物体都能看成质点,也可以通过研究各个质点(个体)的行为来描述系统(整体)的行为.由多个质点组成的系统叫做质点系.

地球上静止的物体,在太阳看来是运动的.相对于行进中的汽车静止的乘客,在地面上看来是运动的.由此看来,一个物体的位置变化只有在和其他物体对照时才能做出判断.被选作参考的物体称为参考系.于是,当我们描述太阳系中行星的运动时,可以选太阳为参考系;当我们描述地面上物体的运动时可以选择地面为参考系.显然,选择不同参考系时对同一

物体的运动描述是不同的,反映了运动的相对性.

应该指出,参考系不一定是静止的.对于同一种运动,由于参考系选择的不同而有不同的描述,这反映了运动描述的相对性.例如,静止于地面上的观察者与行驶的汽车上的观察者对雨点的运动轨迹会做出不同的描述.因此,当我们研究物体的运动时,必须首先明确是相对于哪个参考系的.参考系选定后,对物体运动状态的描述也就确定了.至于应该选择什么物体作为参考系,应该以方便描述物体的运动性质而定.研究地面上物体的运动时,以地球为参考系是最方便的,所以,如果不特别指明,就以地球为参考系.

用一个物体作为参照物研究另外一个物体的运动,只是定性的.为了定量地描述一个力学系统的状态,还须建立一个固定在这个参考系上的坐标系.坐标系是固结在参考系上的,其实质是对参照物体的数学抽象.因此,只要指明了坐标系也就指明了参考系.一旦参考系确定后,坐标系选择不改变对物体运动状态的描述,选取何种坐标系,原点的位置、坐标轴的方向等的选择应该尽量便于计算或描述.综上所述,参考系与坐标系的区别在于:①对物体运动的描述决定于参考系而不是坐标系;②参考系选定后,选用不同的坐标系对运动的描述是相同的.

1.1.2 径矢 运动方程

质点的空间位置可以用它在坐标系中的坐标值来表示,为了描述的简洁性,物理学中用径矢 $\mathbf{r}$ 来描述质点的位置,径矢起始于坐标系的原点,终止于质点的当前位置,如图 1-1 所示.在直角坐标系中,径矢可以表示为

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$$

它的大小为

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

其方向可用三个方向余弦表示:

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

径矢随时间变化的函数关系式叫做运动方程.即

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.1)$$

直角坐标系中,质点的运动方程可以表示为

$$\mathbf{r}(t) = x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} + z(t)\mathbf{k} \quad (1.2)$$

其分量表达式为

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

质点运动时所经过的空间各点的集合形成一条曲线,称为质点的运动轨道.表示轨道曲线的方程式称为轨道方程.在方程 (1.3) 中消去 t , 即得直角坐标系中的轨道方程

$$f(x, y, z) = 0$$

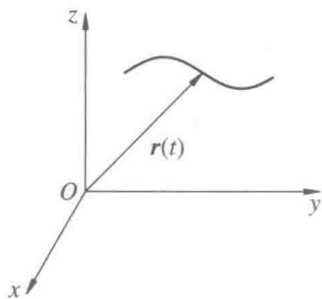


图 1-1 径矢

1.1.3 速度 加速度

如图 1-2 所示, t 与 $t + \Delta t$ 时刻质点的径矢分别为 $\mathbf{r}(t)$ 和 $\mathbf{r}(t + \Delta t)$, 在 Δt 时间内质点位置的变化可以用有向线段 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)$ 来表示, $\Delta \mathbf{r}$ 称为 Δt 时间内质点的位移. 位移的大小 $|\Delta \mathbf{r}|$ 是连接两个时刻质点位置的直线长度, 一般来说, 它不同于质点经历的路程 Δs , 只有当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时它们才相等, 这可写作 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$, 即元位移等于元路程.

为了定量描述完成同样位移 $\Delta \mathbf{r}$ 质点位置变化的快慢, 引入平均速度的概念, 定义质点在 Δt 时间内的平均速度为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$$

平均速度是一个矢量, 方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 相同. 需要指出的是, 平均速度的大小和方向与所取时间间隔有关, 表述时必须指明是哪一段时间间隔内的平均速度.

用平均速度描述质点运动的快慢, 其缺点是明显的. 对于曲线运动, 它并不能真正反映质点运动的快慢程度; 即使对于直线运动, 平均速度也不能反映 Δt 时间间隔内质点运动快慢随时间的变化. 可以看出, 时间间隔 Δt 越短, 平均速度越能真实反映出质点在此时间内运动的快慢. 为此, 引入瞬时速度的概念. 定义 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的平均速度为 t 时刻的瞬时速度 (简称速度), 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}(t)}{\mathrm{d}t} \quad (1.4)$$

速度的方向为 t 时刻, $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向, 它沿着运动轨道上 t 时刻质点所处位置的切线方向, 并指向质点的运动方向. 速度的大小 $v = |\mathbf{v}| = \left| \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \right|$ 反映了 t 时刻质点运动的快慢, 常称为速率. 一般情况下, $v \neq \left| \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \right|$. 例如, 质点作圆周运动时, $v \neq 0$, 而 $\left| \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \right| = 0$.

质点运动时, 它的速度的大小和方向都可能随时间变化. 加速度就是描述速度变化情况的物理量.

设质点沿空间曲线运动, 在时刻 t 的速度为 $\mathbf{v}(t)$, 在时刻 $t + \Delta t$ 时速度为 $\mathbf{v}(t + \Delta t)$, 如图 1-3 所示. 在时间间隔 Δt 内质点速度的增量为 $\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}(t + \Delta t) - \mathbf{v}(t)$, 比值 $\Delta \mathbf{v} / \Delta t$ 叫做质点在时间间隔 Δt 内的平均加速度, 用 $\bar{\mathbf{a}}$ 表示, 即

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$$

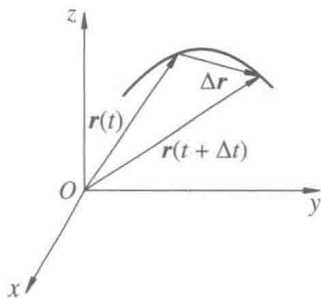


图 1-2 位移

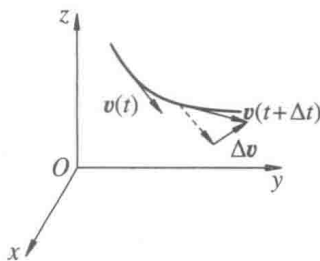


图 1-3 速度增量

平均加速度是矢量, 其方向与速度的增量 $\Delta \mathbf{v}$ 相同, 平均加速度的大小反映了在时间 Δt 内速度随时间的平均变化率. 一般来说, 平均加速度的大小和方向都与时间间隔 Δt 的选取有关. 因此, 表示平均加速度时, 必须首先指明是在哪个时间段内. 平均加速度只能对质点速度随时间的变化情况作粗略的描述, 而不能精确表示质点在运动轨道上各点的运动情况.

为了精确描述质点速度的变化情况, 可以将时间间隔 Δt 无限减小, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 质点的平均加速度将会趋于一个确定的极限矢量, 这个极限矢量称为 t 时刻的瞬时加速度, 用 $\mathbf{a}$ 表示, 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} \quad (1.5)$$

瞬时加速度简称加速度. 根据式 (1.4), 加速度还可以表示为

$$\mathbf{a} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1.6)$$

即加速度是速度对时间的一阶导数, 径矢对时间的二阶导数.

质点作曲线运动时, 加速度的方向总是指向轨道曲线凹的一侧, 一般情况下与同一时刻速度的方向是不同的.

用矢量描述质点运动的优点是, 矢量方程形式简洁, 便于推导. 对于给定的参考系, 矢量描述与具体坐标系的选择无关, 所以常用矢量式作一般性的理论探讨. 然而, 在进行具体计算时, 我们往往采用方程的分量形式.

1.2 速度和加速度在不同坐标系中的表示

1.2.1 直角坐标表示

根据式 (1.2) 及速度的定义式 (1.4), 在直角坐标系中, 速度可以表示为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} + \frac{dz}{dt} \mathbf{k} \quad (1.7)$$

速度的大小, 即速率, 为

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2}$$

加速度在直角坐标中的表示为

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{k} \quad (1.8)$$

加速度的大小为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

式中

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y &= \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ a_z &= \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \end{aligned}$$

下面我们在直角坐标系中研究抛体的运动. 投出的铅球, 射出的子弹或炮弹等都作抛体运动. 空气阻力对抛体的运动轨道影响很大, 严格分析抛体运动是比较复杂的. 在这里, 我们讨论忽略空气阻力时的抛体运动. 另外, 假定抛体运动过程最高点到地面的距离与地球半径相比小到可以忽略的程度, 这样可以认为重力加速度是一个常矢量.

在忽略空气阻力的情况下, 抛体运动是铅直平面上的二维运动. 因此, 我们在铅直平面上建立平面直角坐标系, 如图 1-4 所示, x 轴沿水平方向, y 轴沿竖直方向. 设抛体的初速度为 v_0 , 与水平方向的夹角为 θ , 选抛体开始运动处为坐标原点. 由于抛体在空中只受竖直向下的重力作用, 所以其加速度只有方向向下的重力加速度, 分量表达式为

$$\begin{aligned} a_x &= \frac{dv_x}{dt} = 0 \\ a_y &= \frac{dv_y}{dt} = -g \end{aligned}$$

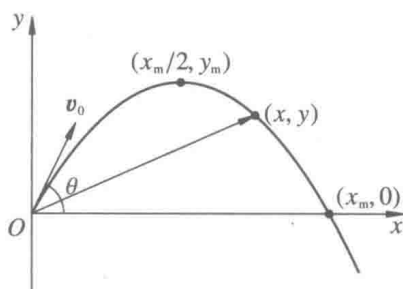


图 1-4 抛体运动

显见抛体运动在 x 轴上的投影是匀速直线运动, 在 y 轴的投影是匀加速直线运动. 以上两式积分后, 可得抛体在 t 时刻的速度分量:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{dx}{dt} = v_0 \cos \theta \\ v_y &= \frac{dy}{dt} = v_0 \sin \theta - gt \end{aligned}$$

上面二式再次作定积分, 可得 t 时刻的坐标分量为

$$\begin{aligned} x &= (v_0 \cos \theta)t \\ y &= (v_0 \sin \theta)t - \frac{1}{2}gt^2 \end{aligned}$$

以上两式中消去时间 t , 即得抛体运动的轨道方程:

$$y = x \tan \theta - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \theta} \quad (1.9)$$

上式表明, 抛射体的轨道是一条抛物线.

抛体从原点抛出后, 又回到发射高度时经过的水平距离称为射程, 记作 x_m . 令式 (1.9) 中的 $y = 0$, 可解出满足方程的两个解:

$$\begin{aligned} x_1 &= 0 \\ x_2 &= \frac{2v_0^2 \tan \theta \cos^2 \theta}{g} = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g} \end{aligned}$$

于是

$$x_m = x_2 - x_1 = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

从式中可以看出, 给定初速度的大小后, 仰角 $\theta = \frac{\pi}{4}$ 时抛体运动具有最大射程. 物体经过水平射程所需时间为

$$t = \frac{x_m}{v_x} = \frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

再来讨论一下抛体所能达到的最大高度(射高). 根据抛物线的对称性可知轨道最高点是 $x = x_m/2$ 对应的 y 坐标. 将此值代入轨道方程(1.9)中, 得

$$y_m = \frac{v_0^2 \sin^2 \theta}{2g}$$

由此可见, 当 $\theta = \pi/2$ 时, 抛体运动有最大射高.

例 1.1 如图 1-5 所示, 用枪瞄准挂在射程之内位于 P 点的靶, 当子弹以 v_0 离开枪口时, 靶由解扣机械释放而自由下落. 试证明不论子弹的初速率多大, 总会击中下落的靶.

解 设子弹射出的仰角为 θ , P 点的坐标为 (x_0, y_0) , t 时刻子弹正好运动到与靶同一水平坐标 $x = x_0$ 的位置.

$$x = (v_0 \cos \theta) t = x_0$$

$$y = (v_0 \sin \theta) t - \frac{1}{2} g t^2$$

同一时刻靶的坐标为

$$x_1 = x_0$$

$$\begin{aligned} y_1 &= y_0 - \frac{1}{2} g t^2 = x_0 \tan \theta - \frac{1}{2} g t^2 \\ &= (v_0 \cos \theta) t \tan \theta - \frac{1}{2} g t^2 \\ &= (v_0 \sin \theta) t - \frac{1}{2} g t^2 \end{aligned}$$

这正好是子弹在 t 时刻所处的位置, 所以子弹正好击中靶.

这一例题来源于一个古老的演示实验, 名为“猎人打猴子”. 意思是: 猎人用枪口对准树上的猴子, 当猎人开枪时, 猴子正好由树上落下, 但猎人恰好击中了猴子. 当然, 为了保证在猴子落地之前子弹能到达猴子所在的位置, 必须满足 $y_1 \geq 0$, 即

$$t = \frac{x_0}{v_0 \cos \theta} \leq \frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

利用

$$\sin \theta = \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}, \quad \cos \theta = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}$$

上面的不等式可以化为

$$v_0^2 \geq \frac{g(x_0^2 + y_0^2)}{2y_0}$$

这就是要击中猴子子弹的初速度必须满足的条件.

此为试读, 需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

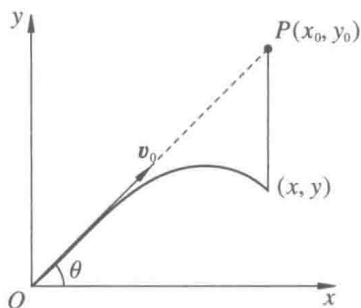


图 1-5 子弹击中下落的靶