

“十二五”普通高等教育本科规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材配套辅导

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理

精讲与典型难题详解

李翠莲 主编

上册 力学与热学



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

“十二五”普通高等教育本科规划教材

国家工科物理教学基地 国家级精品课程使用教材配套辅导

Nucleus
新核心

理工基础教材

大学物理

精讲与典型难题详解

李翠莲 主编

上册 力学与热学



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书分上下两册,上册为力学与热学部分,下册包括电磁学、波动光学和量子力学。每册包括 32 个知识点精讲以及相应知识点课后习题中部分难题的详解。每个知识点由层层递进的若干问题出发揭示知识点的内涵和外延,并配设若干课后练习。

本书可作为非物理类大学本科生的物理教材,也可作为读者期末、考研复习时强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理精讲与典型难题详解.上册,力学与热学/
李翠莲主编. —上海:上海交通大学出版社,2017
ISBN 978-7-313-16215-1

I. ①大… II. ①李… III. ①物理学—高等学校—教
学参考资料②力学—高等学校—教学参考资料③热学—高
等学校—教学参考资料 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 281857 号

大学物理精讲与典型难题详解(上册 力学与热学)

主 编:李翠莲

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:289 千字

版 次:2017 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-16215-1/O

定 价:38.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:14.25

印 次:2017 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-64366274

前言

目前中国国内使用的大学物理教材版本众多：有上海交通大学基础物理教研室编的《大学物理教程》、清华大学出版社出版的《大学物理》(朱峰主编)、北京大学出版社出版的《简明大学物理》等。关于大学物理的习题集就更多了，这里不一一举例。这些教材为物理理论在工科学生中的普及和推广起到了重要的作用。然而，由于这些教材大都在“取其精华、去其糟粕，中学为体、洋为中用”的指导原则下完成，显示出物理学精干的一面，强调物理公式的应用，物理学的“血肉”却被削弱了。这直接导致大多数同学尤其是女同学觉得物理难学，也渐渐对物理失去了兴趣。如我的学生段嘉同学在她的读书报告中写道：“一直以来，我的物理学习都不是我的优势，因此有时会越学越没有耐心。经过这次读书报告，我有机会能够以深入了解为目的去研读课本以及论文资料，使我对麦克斯韦速度分布律有了更加深入详细的了解，而不是仅限于做题，它使我有机会感知每一个公式的详细来源和公式背后的努力与故事。”当然也有一些同学物理学得不错，那也是就考分而言的，欣赏物理的能力、用物理科学方法思考问题的能力还十分欠缺。如我的学生王裕杰同学在完成了仔细研读“多普勒效应”后写道：“第一次接触到这个知识是在高中的物理课本上，当时老师仅仅是一笔带过了，自己也没有多大的印象，觉得只需要记住一个公式就行了。然而在我为写这篇读书报告查找了许多资料之后，才发现多普勒效应的应用竟然如此广泛，作用如此之大，它在我们的生活中几乎无处不在。我深深感受到了多普勒效应的魅力所在，同时也认识到没有哪个物理知识是没有用的，一个物理知识的实现与应用只是时间问题。”所以，我写这本教材的第一个目的就是解开物理学神秘的面纱，让学习者明白物理是有故事的，是有趣的，是可以在等车、排队的间隙阅读的。

物理学不仅仅是“学霸”们的“游戏”，它更是关于自然运动的法则。学习它就像学习交通规则一样，只要是一个具有正常思维逻辑的人都可以去理解它，并且自觉遵守这些自然法则。反之，违反自然法则虽不像违反交通法则一样立即受到惩罚，但这种惩罚只可能迟到而不会缺席，而且其惩罚的程度远远大于违反交通法则。例如，明显违反自然法则的亩产“万斤”论造成的惩罚性后果让经历过这场灾难的中国人至今还铭心刻骨地痛。所以，编写一本理工科甚至文科学生都能读懂的且有兴趣读下去的物理学教材是物理教育工作者的责任。另外，本书对每一个知识点的相关方程都进行了较为详尽的数学推理，并且列举了一些该知识点在工业、医学中的应用例子，

所以本书完全可以满足理工科学生学习的需要。

由于当代学生生活在知识爆炸、信息畅通的时代,纯粹的知识灌输远远不能满足学生的需要,培养学生的学习能力、创新能力比任何时代都更加迫切。正如爱因斯坦指出的“发展独立思考和独立创新的一般能力,应当始终放在首位,而不应当把知识学习放在首位”。这是我写这本教材的第二个目的。

那么怎样才能提高学生的欣赏能力、学习能力和创新能力呢?我们知道爱因斯坦在他 26 岁时就完成论文《论动体的电动力学》,独立而完整地提出狭义相对论,开创了物理学的新纪元,他的创新能力是毋庸置疑的。那么,他的创新能力从哪里来呢?读过爱因斯坦传记的读者都知道,早在中学时代,他就从伯恩斯坦所著的多卷本《自然科学通俗读本》中了解了整个自然科学领域里主要的成果和方法。这套书第一卷的开始部分就论述了有关光速以及光和距离的内容,以至于当时 16 岁的爱因斯坦在无意中想到了一个奇特的“追光悖论”。从此,他开始了长达 10 年之久的关于光速相对性以及关于光的传播介质“以太”存在问题的探索。这样,在他 26 岁那年发表了《论动体的电动力学》,成功地解释了他的“追光悖论”,创立狭义相对论也就是水到渠成的事了。从这个事例中,我们明白了创新是需要源头、需要传承、需要视野的。再举一个例子:两只狼来到草原,其中一只狼很失落,因为它看不见肉,这是视力;另一只狼很兴奋,因为它知道有草就有羊,这是视野。在不创新就要落后的现代社会,物理学教学的目的不仅要培养学生的“视力”——观察、分析能力,更要培养学生的“视野”——推理、预测能力。笔者基于多年教学中遇到的这种困惑以及大量阅读国外教材的一些感悟,为了提高学生科学欣赏能力、科学思维和创新能力,在最近五年教学过程中逐渐引导学生在阅读物理教材和课外学术资料时重点关注物理学知识点的来源、现在发展到什么程度以及今后可能往哪里去等问题,追踪以前的物理学家遇到问题时思考解决问题的方法与解决问题的过程,让学生从六个方面去学习物理的每一个知识点,这六个方面分别为:① 当时遇到了怎样的难题需要建立该新知识点?② 建立该知识点过程中经历了哪些困难、歧途?最后怎样统一到目前这个认识的?③ 目前物理界对该知识点的解析有哪些?④ 该知识点有没有相似的其他描述?如果有,各有什么优缺点?⑤ 该知识点美在哪里?对自然科学的发展起了怎样的作用?对人类生活有哪些影响?举一例说明之。⑥ 该知识点建立后有怎样的发展?你对该知识点的发展有什么看法、建议?此外,要求每一个同学提交一份关于某个知识点的阅读报告。通过 5 年的实践,学生们收获很大。如杨若虚同学在他的读书报告里的个人感悟中写道:“最开始的时候对于热力学第二定律真的是一无所知,不过查了一下就被吓倒了,因为它引出了一个超级‘牛’的概念:熵。虽然我也不知道熵到底有多牛,不过但凡看过《生活大爆炸》的人或多或少都有点概念吧。不过从最开始来讲,热力学第二定律单单是指热量从高温物体向低温物体传导,到后来开始讨论宇宙的无序与黑洞,让我不得不佩服物理学家的巨大‘脑洞’(此处为褒义)。看了热力学第二定律的发展历程我不得不慨叹科学的发展,不过同时也感受到其实任何东

西都不是单一的,都应该是连续的(量子除外),科学的发展也是一步一步走出来的,罗马并非一日建成,吾辈需上下而求索。科学是美的,物理定理更是其中组成美的重要部分,简单的叙述、奇妙的公式,都很直观地显示世界的真理,展示宇宙的神秘。这可以说是物理让人着迷的地方”。另一位同学徐佳北在读了卡诺循环相关知识点后写道:“就我个人而言,我觉得卡诺循环的美,体现在它的简洁性,简约才是美,没有很复杂的推导,也没有很难理解的部分,就是很自然而然提出的理论,让人有一种豁然开朗的感觉,才是一种真正的科学的美。除此之外,卡诺循环背后的故事,更使这个理论平添了往常没有的一些人情故事在里面。在学习这个理论的同时,能感受到卡诺当年孤身一人,独自在属于自己的科学海洋里默默探索。可能学习科学本身就是孤独的,但也是注定辉煌的,即使生前不被认可,但卡诺的成就,已经写在了后世的教科书上。漫漫历史长河,无数物理学家,用他们自己的努力,揭示了一个又一个的真理,向世人展示物理的玄妙,卡诺循环不是其中最耀眼的那颗星,但是它确实在天空闪耀着、永存着”。潘淑媛同学说:“通过这次对简谐振动的探索,我对它有了更深的了解,也对物理更有兴趣了。有许多物理现象都很有趣,值得我们去学习和探索。”

在近 20 年的教学过程和 5 年的教改实验中,我与我的学生一起做了大量的调研工作,积累了大量的资料,现在利用暑假把这些资料整理、完善、出版,让好的东西与大家一起分享。另外,考虑到复习考试同学的需要;本书每个知识点后配设 3~5 道课后练习题,其中一道具有现代应用典型代表意义且具有一定难度。笔者对习题中的部分典型难题做了较为详细的解答并把它放在本书附录中,我们称之为典型难题详解。本书可作为非物理类本科生的物理教材,也可作为读者期末、考研复习准备考试时强化物理知识点和熟悉大学物理解题方法的参考书。

由于编者水平有限,书中存在的错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第一讲	质点运动学	001
第二讲	牛顿三大定律	008
第三讲	万有引力·潮汐现象	015
第四讲	伽利略变换与相对性原理	021
第五讲	惯性力	027
第六讲	狭义相对论	034
第七讲	动量与冲量	041
第八讲	火箭的运动	046
第九讲	功与动能	050
第十讲	保守力与势能	056
第十一讲	功能原理和机械能守恒定律	060
第十二讲	碰撞	064
第十三讲	角动量与角动量守恒定律	071
第十四讲	刚体的定轴转动	078
第十五讲	陀螺运动	089
第十六讲	对称性与守恒定律	098
第十七讲	简谐振动	103
第十八讲	单摆与复摆	108
第十九讲	阻尼振动	115
第二十讲	振动的叠加	119
第二十一讲	机械波	124

第二十二讲	多普勒效应	133
第二十三讲	热力学·温标	138
第二十四讲	麦克斯韦速度、速率分布律	145
第二十五讲	玻耳兹曼能量分布	150
第二十六讲	能量守恒定律	155
第二十七讲	热力学第一定律	159
第二十八讲	卡诺循环	166
第二十九讲	内燃机的理想循环及其效率	171
第三十讲	热力学第二定律	175
第三十一讲	卡诺定理	178
第三十二讲	熵及熵增加原理	184
附 录	典型难题详解	190

第一讲 质点运动学

——位置矢量、位移、速度、加速度以及它们之间的关系

质点运动学重在考察质点某个时刻到达某个位置,具有怎样的速度和加速度等问题。其中,位置矢量(简称位矢)是描述质点在观察者所选坐标系中位置的物理量,一般用 r 表示,它的大小是从坐标原点到质点所在位置的直线长度,方向从坐标原点指向质点。位移是描述位矢变化的矢量,从第一个位矢的末端指向第二个位矢的末端,用 Δr 表示;速度是单位时间位移的变化,即位移随时间的变化率,用 v 表示;加速度是单位时间内速度的变化,即速度随时间的变化率,用 a 表示。

一、位矢、位移、速度、加速度概念建立背景

对于运动和静止的认识,我国墨家的考察很细致,并且给出了定义。他们写道:“动,域徙也”“止,已久也”。其意思是,运动指的是空间(域)的改变;静止,即某物体在某一时间内处于空间某一位置。而描述空间位置,通常用某树、某桥、某柱子处等表示;对速度的描述通常用飞矢(箭)来形容,如“无久之不止,当牛非马,若矢过楹”。现代意义上的关于位矢、位移、速度和加速度这些概念的建立要归于伽利略的运动理论。伽利略首先定义了匀速运动:“我们称运动是匀速的,是指在任何相同的时间内通过的距离相等。”他进一步给出了瞬时速度的概念:物体在给定时刻的速度,就是该物体从该时刻起做匀速运动所具有的速度。关于加速度的定义,伽利略是从落体运动的观察和研究入手的。在比萨大学任教时期,伽利略已经开始研究自由落体问题。他曾经以为落体的速度正比于所通过的距离,但很快他就领略到这个假设的逻辑错误。因为根据这个定义,物体通过某段距离的二倍所用的时间将和通过原来那段距离所用的时间相等,因为在两倍距离的情况下,其速度也是原来的两倍;另外,这个定义也不能描述落体从静止到运动的过渡。于是,伽利略转向由速度的增量 Δv 和相应时间的增量 Δt 的比例来定义匀加速运动。他提出“若一物体从静止出发,并且在相等的时间间隔内获得相同的速度增量,则称该物体的运动为匀加速运动。”而当 Δt 趋于 0 时 $\Delta v/\Delta t$ 的极限就是瞬时加速度。由于我们所处的空间是三维空间,要表

征一个距离需要 x 、 y 、 z 三个方向的长度,按照 $s = \int ds = \int \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2}$ 的关系计算出距离。如果我们还想知道物体运动到哪里去,就需要用方向角指明运动的方向。为了让这类繁琐问题的分析简单化,数学家设计了一种非常重要的工具——矢量分析。于是,位矢、位移、速度和加速度都建立在矢量分析基础上。

简单地说,速度描述了位置是如何变化的,而加速度描述了速度是如何变化的。比如,水平向前扔出一个物体,起初它的速度沿正前方向,然而由于引力的作用使它在向前的同时向下坠落,即其速度改变了,我们说这个物体做加速运动。这里改变物体速度使物体获得加速度的力是地球的引力。

二、位矢、位移、速度、加速度的一般数学描述

位置矢量:在选定的坐标系中从坐标原点出发指向物体(质点)所在位置的带有箭头的直线叫位置矢量,简称位矢。它的大小是线段的长度,方向从原点指向质点,如图 1-1 中用 r 表示的有向线段。在直角坐标系中,也可表示为

$$r = xi + yj + zk \quad (1-1)$$

其中 i 、 j 、 k 分别是 x 、 y 、 z 方向的单位矢量,它们之间满足:

$$i \cdot i = j \cdot j = k \cdot k = 1 \quad (1-2)$$

和

$$i \cdot j = j \cdot k = k \cdot i = 0 \quad (1-3)$$

式(1-2)称为归一化条件,式(1-3)称为正交化条件,即这三个单位矢量的大小各自为一个标准单位,方向相互之间垂直,代表三维空间的三个方向。

设质点 P 在三维空间运动(见图 1-1), t 时刻处于位矢 $r(t)$ 处,经过 Δt 时间后位于 $r(t+\Delta t)$ 处,则定义质点 P 在 t 时刻的瞬时速度(简称速度)为

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{r(t+\Delta t) - r(t)}{\Delta t} = \frac{dr}{dt} \quad (1-4)$$

其中 $\Delta r = r(t+\Delta t) - r(t)$ 是位移的数学表达式, $\frac{dr}{dt}$ 表示位移对时间的一阶导数,在时间-位移图上表现为求斜率。有人可能会问为什么我们这里要用极限来表示速度(或者速率)呢?下面的故事也许可以解开你的疑虑。大家知道,进入市区车辆是限速的。一次一位警察拦住一辆快速行驶的车,对车内的女士说:“女士,你刚才的车速是 72 千米每小时,而这个区段最高限速是 36 千米每小时,你超速了。”女士不服,说:

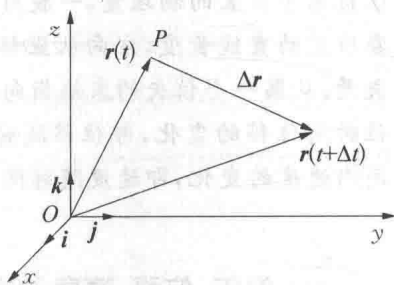


图 1-1

“我刚进这个区 5 分钟,开车还没有 1 小时呢,怎么会行驶 72 千米呢?”如果你是一位警察,你怎么公正、理智地回答她的问题,解决她的疑惑呢?你可以说:“72 千米每小时相当于 20 米每秒,你看那是离你 20 米的墙,如果按照这个速度行驶下一秒钟你就要撞墙了。”女士若有所思,似乎她不必继续开一个小时,主要在于某一瞬间她正在以这个速率开车。而某一瞬间的速率怎么定义呢?我们定义一个物体在很短的一段时间走过的距离除以这段时间。显然,这个时间越短越精确。到底多短呢?对于汽车行驶,这个时间间隔取 1 秒是合适的,但对于自由落体运动,可能要取 $1/100$ 秒,并且用这段时间内通过的距离除以 $1/100$ 秒的时间得到每秒的距离,也就是所谓的速率。实验上,需要根据物体运行速率范围的不同而选取不同的时间间隔,但理论上可以让这个时间间隔趋于无穷小,然后用这个无穷小时间内通过的距离除以这个无穷小时间间隔,得到瞬时速率。这就是我们需要引进“极限”概念的原因。有了极限、导数的概念,就可以把速度值精确到每个时刻、每一点上。今后,还要引进“微分”概念,它使获得的物理量值可以精确到某个时刻、某个空间点对应的值。当然,也要引进“积分”的概念,因为需要把这无穷多个、无穷小时间间隔对应的物理量的值求和而得到某段时间内这个物理量的值。

类似地,定义时刻 t 到 $t + \Delta t$ 时刻之间的平均加速度为

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

平均加速度粗略地表示了在该段时间内物体速度的变化情况。如果 Δt 越小,该段时间内速度的波动就越小,描述的速度变化情况也就越精细,从而定义质点 P 在 t 时刻的瞬时加速度为

$$a(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 r}{dt^2} \quad (1-6)$$

瞬时加速度,简称加速度。反过来有

$$\begin{aligned} v(t) &= v(0) + \int_0^t a(t) dt \\ r(t) &= r(0) + \int_0^t v(t) dt \end{aligned} \quad (1-7)$$

其中,式(1-7)称为运动方程。

注意:(1) 物体的速度方向改变,但加速度的方向不一定改变,如抛物运动。

(2) 物体的速度方向不变,但加速度方向不一定不变,如弹簧振子的运动。

三、位矢、位移、速度、加速度的其他表示形式

1. 平面直角坐标系

在平面直角坐标系中,可以将位置矢量、速度、加速度沿坐标轴分解为

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(t) &= x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j} \\ \mathbf{v}(t) &= v_x(t)\mathbf{i} + v_y(t)\mathbf{j} \\ \mathbf{a}(t) &= a_x(t)\mathbf{i} + a_y(t)\mathbf{j} \end{aligned} \quad (1-8)$$

其中 \mathbf{i} , \mathbf{j} 分别为 x , y 坐标轴上的单位矢量, 皆为常矢量。位置、速度和加速度分量之间满足如下关系:

$$\begin{aligned} v_x(t) &= \frac{dx}{dt}; v_y(t) = \frac{dy}{dt} \\ a_x(t) &= \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}; a_y(t) = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2y}{dt^2} \end{aligned} \quad (1-9)$$

或者用积分式表示为

$$\begin{aligned} v_x(t) &= v_x(0) + \int_0^t a_x(t)dt; v_y(t) = v_y(0) + \int_0^t a_y(t)dt \\ x(t) &= x(0) + \int_0^t v_x(t)dt; y(t) = y(0) + \int_0^t v_y(t)dt \end{aligned} \quad (1-10)$$

这种分解方式的优点在于: ① 形式简便, 运算简洁; ② 因为单位矢量不会变化, 故质点在两个方向上的投影等价于直线运动, 使得矢量问题完全化为代数问题, 并且可以直接使用直线运动的已有结论。

2. 极坐标系

在二维空间里, 极坐标系用径向坐标 r 、角坐标 θ 来表示质点的位置(见图 1-2)。径向坐标是极点与质点的直线距离, 角坐标是极点与质点的连线对于极轴的角弧。在任意点的两个单位矢量分别为沿半径向外的 \mathbf{e}_r 和垂直于半径指向角坐标正方向的 \mathbf{e}_θ 。在极坐标系中, 位置 \mathbf{r} 、速度 \mathbf{v} 、加速度 \mathbf{a} 分别为

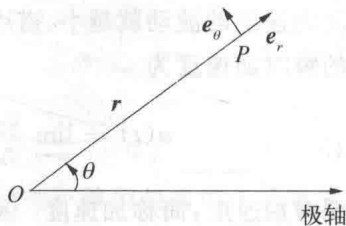


图 1-2

$$\begin{aligned} \mathbf{r} &= r\mathbf{e}_r \\ \mathbf{v} &= \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dr}{dt}\mathbf{e}_r + r\frac{d\theta}{dt}\mathbf{e}_\theta \\ \mathbf{a} &= \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \left[\frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2 \right]\mathbf{e}_r + \left(r\frac{d^2\theta}{dt^2} + 2\frac{dr}{dt}\frac{d\theta}{dt} \right)\mathbf{e}_\theta \end{aligned} \quad (1-11)$$

3. 自然坐标系

假设一个质点移动于二维平面。在质点轨道的任意位置, 二维自然坐标系的一个坐标轴方向(切向 \mathbf{e}_t)保持与轨道切线方向平行, 另一个坐标轴方向(法向 \mathbf{e}_n)则与轨道法线平行(见图 1-3)。

简单地说, 加速度的切向分量 a_t 表示速度大小的变化, 加速度的法向分量 a_n 表示速度方向的变

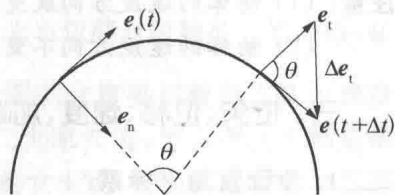


图 1-3

化,即

$$\begin{aligned}
 s &= s(t) \\
 v(t) &= v e_t = \frac{ds}{dt} e_t \\
 a(t) &= \frac{dv}{dt} e_t + v \frac{de_t}{dt} = \frac{dv}{dt} e_t + \frac{v^2}{\rho} e_n
 \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中, s 为路程, 它与位移的关系是 $ds = |dr|$; v 为 t 时刻速度的大小, 即速率; ρ 为此时刻的曲率半径。

注: 从狭义物理学角度讲, 加速度概念的引入一定程度上揭示了运动和力的联系, 有了加速度可以方便地度量受力与预测下一刻的运动状态; 从广义的“阶”的角度来说, 导数概念首先建立在连续的概念之上, 我们看事物的内在联系不再是没有根据的了, 而是发现其连续性并可以由过去和此刻来大胆地预测(或者说是逼近)未来。

四、应用举例

例 某高射炮指挥员在 $t = 0$ 时刻观察到距他垂直距离 90 m 的上空有一不明飞行物突然做自由落体运动向地球飞来, 他立即指挥击落此不明飞行物。

(1) 试帮他设计一下他发射炮弹需要的速度;

(2) 如果此不明飞行物不在高射炮的正上方, 而是距离高射炮水平距离 500 m, 垂直距离 90 m 的上空, 对高射炮发射的速度大小和方向应怎样调整?

解: (1) 假设不明飞行物为 A 物体, 炮弹为 B 物体。由于 A, B 飞行过程中只受到重力作用, 加速度皆为重力加速度(大小为 g)。以高射炮所在位置为坐标原点, 垂直向上为 x 轴正向建立 Ox 坐标, 如图 1-4 所示。设 A 物体初位置为 x_0 , 初速度为 0; B 物体初位置为 0, 初速度为 v_0 , 则任意时刻 t 它们的位置满足如下关系:

$$\begin{aligned}
 x_A &= x_0 - \int_0^t g t dt = x_0 - \frac{1}{2} g t^2 \\
 x_B &= \int_0^t (v_0 - g t) dt = v_0 t - \frac{1}{2} g t^2
 \end{aligned} \quad (1-13)$$

要求 B 击中 A, 需要它们相遇, 即

$$x_A = x_B \quad (1-14)$$

将式(1-13)代入式(1-14)可得

$$t = \frac{x_0}{v_0} \quad (1-15)$$

将式(1-15)代入式(1-13)中的任一等式可得击中位置为

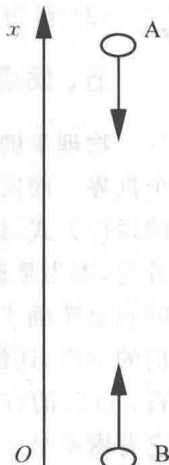


图 1-4

$$x_c = x_0 \left(1 - \frac{gx_0}{2v_0^2} \right) \quad (1-16)$$

由于要求要在地面以上击中目标,即要求 $x_c > 0$, 代入式(1-16)可得

$$v_0^2 \geq \frac{1}{2}gx_0 \quad (1-17)$$

将 $x_0 = 90 \text{ m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 代入式(1-17)可得

$$v_0 \geq 21 \text{ m/s} \quad (1-18)$$

图 1-5 中的三个图说明 $v_0 = 25 \text{ m/s}$, 21 m/s , 15 m/s 三种情形下,炮弹和不明飞行物可能相遇的时间和位置。

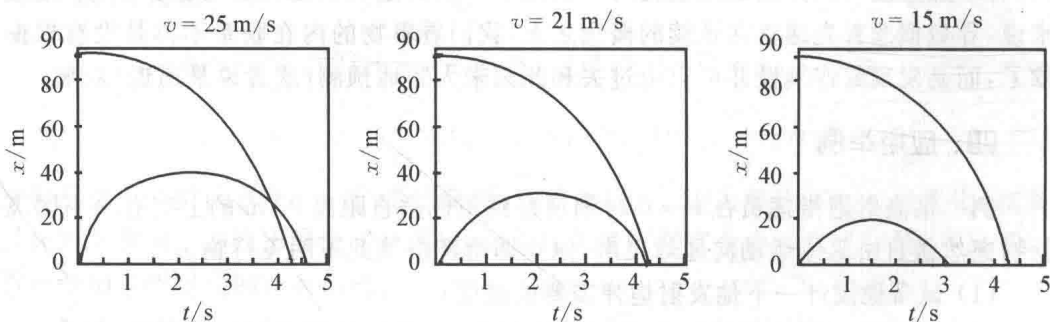


图 1-5

(2) 留为同学们的作业。

五、质点运动学的科学意义和对人类生活的影响

物理学的发展为人类的生活带来了极大的便利,它的魅力在于帮助人类认识这个世界。而质点运动学的魅力就在于它用简洁的图像、易懂的公式描绘了这个世界的运行方式,让人类能够运用它去方便我们的生活,探索未知的领域。例如航天器的升空,因为掌握了运动学的知识,所以才能操控宇宙飞船进入太空,并且按照计算好的轨道精确飞行,通过其搭载的卫星等其他设备能帮助我们监测地球,不仅能方便我们的生活,还能躲避灾难,防范风险。在科学研究方面,质点运动学是物理学科的基石,以后的许多学科,如电磁运动、原子和其他微观粒子的运动、分子热运动等都与它有密不可分的联系,所以说质点运动学的建立为后来的其他重大发现打下了基础。

六、课后练习

1-1 已知质点位矢随时间变化的函数形式为 $\boldsymbol{r} = 5t^2\boldsymbol{i} + (3+4t)\boldsymbol{j}$, 式中 \boldsymbol{r} 的单位为 m , t 的单位为 s 。求:

- (1) 质点的运动轨道;
- (2) 从 $t = 0$ 到 $t = 2 \text{ s}$, 质点的位移;

(3) $t = 0$ 和 $t = 2\text{ s}$ 两时刻质点的速度。

1-2 路灯距离地面的高度为 h_1 ，一个身高为 h_2 的人在路灯下以匀速 v_1 沿直线行走。试证明：人影的顶端做匀速运动，并求其速度大小。

1-3 如图 1-6 所示，ABC 是一座拱桥，桥面中部区间高度按 $y = H - kx^2$ 的方式变化。若一个质量为 m 的卡车保持 x 方向的速度为常数，即 $v_x = v$ ，试推导卡车在桥中部区间任一点的：

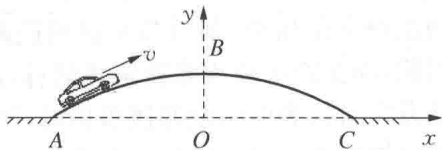


图 1-6

- (1) 速度矢量和加速度矢量；
- (2) 切向加速度和法向加速度。

1-4 跳水运动员自 10 m 跳台自由下落，入水后因受水的阻力而速度变慢。设阻力的加速度为 $a = -kv^2$ ， $k = 0.4\text{ m}^{-1}$ ，求运动员速度减为入水速度的 10% 时的人水深度。

1-5 飞行物自地面以匀速 v_f 向上空垂直飞行。在地面离飞行物起飞点 L 处发射一枚导弹，如图 1-7 所示。假设导弹与飞行物同时发射，导弹的速率 v_d 为常数，且 $v_d > v_f$ ，每一瞬间导弹均指向飞行物运动，求：

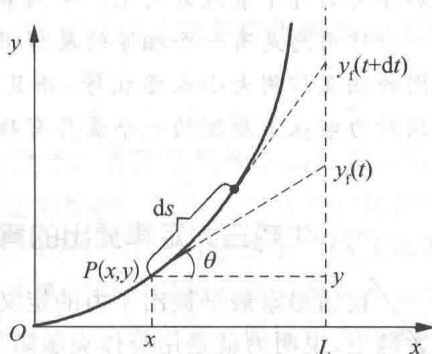


图 1-7

- (1) 导弹的飞行轨道；
- (2) 导弹击中飞行物所需要的时间。

第二讲 牛顿三大定律

牛顿在他的著作《自然哲学的数学原理》中提出了著名的三大定律，即牛顿第一定律(惯性定律)：任何物体如果没有力的作用，都将保持静止或做匀速直线运动的状态。牛顿第二定律：物体运动的加速度与作用在其上的合力成正比，与物体的惯性质量成反比，并且加速度的方向在所加合力的那个直线方向上。牛顿第三定律(作用力与反作用力定律)：每一个作用总是有一个相等的反作用与它相对抗；或者说，两种物体彼此之间的相互作用大小永远相等，并且各自指向其对方。其中第三定律是牛顿对力学基本原理的一个最具有独创性的贡献。

一、牛顿三大定律提出的背景

我国墨家最早提出了力的定义：“力，刑之所以奋也。”这里的“力”象征用农具奋力翻土，说明力就是用身体克服阻力的原因。例如重力是向下的，举重就是“奋”。关于合力，我国淮南学者使用了“积力”的概念。他们在《淮南子·主术训》中写道“积力所举，无不胜也”“力胜其任，则举之不重也。”这里的“积力”就是一些力相加的结果。单个力小于重物之重力就不能举起重物，但是几个力的积力则可举起重物。对于力与运动的关系，我国科学家张衡(78—139)在物理学和机械制造方面均有建树。他发明建造的“候风地动仪”是一项非常了不起的发明，也是世界上最早测量地震的仪器。遗憾的是，当时我国数学家没有发明代数方法，使得我国的科学理论没有量化标准，因而在近代科学史上贡献寥寥。下面看看西欧关于力和运动的研究情况。

公元前4世纪，古希腊哲学家亚里士多德(Aristotle, 公元前384—前322)指出：静止是物体的自然状态，如果没有作用力就没有运动。该观点认为力是维持物体运动的原因，但他第一次提出了力与运动间存在关系，为力学发展作出了一定贡献。公元6世纪，希腊学者菲洛彭诺斯(J. Philoponus)对亚里士多德的运动学说持批判态度。他认为抛体本身具有某种动力，推动物体前进，直到耗尽才趋于停止，这种看法后来发展为14世纪的“冲力理论”。公元14世纪，法国哲学家布里丹(Jean Buridan, 1295—1358)、阿尔伯特·尼克尔·奥里斯姆(Nicole Oresme, 1320—1382)等人提出“冲力理论”，他们认为：“推动者在推动一物体运动时，便对它施加某种冲力或某种动

力,速度越大,冲力越大,冲力耗尽时,物体停止下来。”这一理论为意大利物理学家伽利略·伽利雷(Galileo Galilei, 1564—1642)和英国物理学家艾萨克·牛顿(Isaac Newton, 1643—1727)的相关理论奠定了基础。17世纪,伽利略在他的著作中多次提出类似于惯性原理的说法。他分别于1632年和1638年在《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》和《关于力学和位置运动的两门新科学的对话》中记录了理想斜面实验,并推理“如有一足够长而绝对光滑的表面,将没有东西能阻碍小球运动,所以小球一直继续运动或者直到有东西(外力)阻碍它”,从而得到结论:“物体在自然状态下会维持原有运动而非趋于停止。”该结论打破了自亚里士多德以来约一千三百年间“力是维持物体运动的原因”的陈旧观念,但仍未摆脱其影响。该结论很接近惯性定律。1644年,法国物理学家勒内·笛卡儿(Rene Descartes, 1596—1650)在《哲学原理》中弥补了伽利略的不足。他明确地指出,除非物体受到外因的作用,物体将永远保持其静止或运动状态,并且还特地声明,惯性运动的物体永远不会使自己趋向曲线运动,而只保持在直线上运动。他把这条基本原理表述为两条定律:

(1) 每一单独的物质微粒将继续保持同一状态,直到与其他微粒相碰被迫改变这一状态为止;

(2) 所有的运动,其本身都是沿直线的。

然而笛卡儿没有建立起他试图建立的那种能演绎出各种自然现象的体系,不过他的思想对牛顿对此类定律之后的总结产生了一定的影响。笛卡儿的最大贡献在于他第一个认识到:力是改变物体运动状态的原因。1662年,伽利略指出:“以任何速度运动着的物体,只要除去加速或减速的外因,此速度就可以保持不变。”笛卡儿也认为:“在没有外加作用时,粒子或者匀速运动,或者静止。”牛顿把这一假定作为牛顿第一运动定律,并将伽利略的思想进一步推广到有力作用的场合,提出了牛顿第二运动定律。1664年,牛顿受到对碰撞问题研究较早的笛卡儿的影响,也开始研究两个球形非弹性碰撞的问题。1665—1666年,牛顿又研究了两个球形刚体碰撞的问题。他没有把注意力集中在动量和动量守恒方面,而是集中在物体之间的相互作用上。对于两刚体的碰撞,他提出:“在它们相碰的瞬间,它们的压力处于最大值,它们的整个运动被此一瞬间彼此之间的压力所阻止,只要这两个物体都不互相屈服,它们之间将会持有同样猛烈的压力,它们将会以之前彼此趋近的速度大小相互离开。”1668—1669年,荷兰物理学家克里斯蒂安·惠更斯(Christiaan Huygens, 1629—1695)、沃里斯和英国物理学家克里斯托弗·雷恩(Christopher Wren, 1632—1723)也分别对碰撞问题做了很多研究,并得出了一些重要的结论。其中,惠更斯的工作比较突出,他证明了两硬的物体在碰撞过程中同一方向的动量保持不变,纠正了笛卡儿不考虑动量具有方向性的错误,而且首次提出碰撞前后的动量守恒。牛顿在正式提出牛顿第三运动定律时,肯定了他们的工作,同时也指出了他们的局限性。牛顿认为:“雷恩和惠更斯的理论以绝对硬的物体为前提,而用理想弹性体可以得到更肯定的结果,并且用非理想弹性体,如压紧的木球、钢球和玻璃球做实验,消除误差后结果是一致的。”