



普通高等教育“十三五”规划教材

● 普通高等教育大学物理规划教材



大学基础物理 学习指导与习题解析

(第二版)

◎ 郑勇林 杨 维 朱晓玲 杨 敏 杨 阔 编著

中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

大学基础物理学习指导 与习题解析 (第二版)

郑勇林 杨 维 朱晓玲 杨 敏 杨 阔 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是与《大学基础物理学》(上、下)配套的辅导教材。本书从科学技术的发展和工程技术人才培养的总体要求出发,兼顾实用性和先进性,内容覆盖了所有需要掌握的基本理论和方法。书中对每章的教学重点和主要内容进行了梳理和总结,精选例题和习题解析有助于提高读者的理解、分析和解决问题的能力。

本书可作为高等学校非物理类专业大学物理课程的辅助教材,也可供相关领域的工程技术人员、研究生学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理学习指导与习题解析 / 郑勇林等编著. — 2 版. — 北京: 电子工业出版社, 2018.1
ISBN 978-7-121-33049-0

I. ①大… II. ①郑… III. ①物理学—高等学校—教学参考资料 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 280706 号

策划编辑: 张小乐

责任编辑: 张小乐 特约编辑: 刘闻雨

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 21.75 字数: 557 千字

版 次: 2014 年 3 月第 1 版

2018 年 1 月第 2 版

印 次: 2018 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010)88254462, zhxl@phei.com.cn。

前 言

本书第一版已出版近4年，应出版社之约，本书将出版第二版。读者的反馈意见及教师在教学中的经验反映出第一版内容略显简单，学生完成配套教材作业时还有一定困难，也不易把握知识的重点和难点，因此还有待细化与改善。

这次修订整体框架没有大的变化，但对内容做了较大幅度的调整，增加了部分章节及知识点，并做了一定的扩展描述。例如，第1章增加了重力、弹力和摩擦力等知识点；新增第2章刚体和流体内容；第4章将静电场及静电场中的导体、电介质融合为一体，增加了部分知识点，使知识的系统性更强；第5章增加了几种常见电流的磁场分布、霍尔效应、有磁介质存在时的磁场等内容；第7章将振动、波动联系在一起，增加了横波、纵波以及描述波动的物理量、波的能量、波的叠加原理等知识点；第8章增加了几何光学内容；在第10、11章中，重写了量子力学和现代高新技术章节中的部分内容。量子力学、分子与固体在近代物理学知识中占有相当的比例，其中研究的范围着重在 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ m区间，而在这个区间固体的结构及电、磁、光、热等的性质的研究都获得了巨大的成功，而且这方面还有巨大的应用潜力，所以，在这部分增加了与现代高科技密切相联系的知识点。

修订版最大的亮点是增加了与教材相配套的习题解析，习题解析中有每一题包含的知识点、解题思路及解答过程。习题的选取尽量覆盖对应教材的知识点，习题类型涵盖选择题、填空题、证明题、计算及综合应用题等，部分题目直接与物理实验和实际工程相联系，例如，在分子与固体的习题中有计算固体热容、物体弹性模量的题目。总之，第二版希望能更好地体现作者将知识与应用相结合的思想，希望能更好地帮助读者答疑解惑，巩固和扩展相应的物理知识。

本次修订中，杨敏、朱晓玲、郑勇林改写了第1章、第7章、第9章的相关内容并完善了习题解答；王晓茜、郑勇林、杨阔改写了第2章的内容并完善了习题解答；杨维改写了第3章、第6章内容并完善了习题解答；郑勇林、喻文翠改写了第4章、第5章、第9章、第10章、第11章的内容并完善了习题解答；郑勇林、杨敏、杨阔改写了第8章并完善了习题解答。郑勇林、杨维对全书进行了审核。全书由郑勇林统稿。

本书的修订出版要感谢电子工业出版社和本书的责任编辑张小乐，没有其鼓励很难完成这项工作。要感谢成都大学教务处的支持和教务处长杨明娜教授的支持和鼓励。这次修订中长江师范学院、阿坝师范学院、四川交通职业技术学院的老师提了很多中肯的意见和宝贵的建议，在此表示感谢。还要感谢在第一版中做了大量工作的刘鸿、赵茂娟、戴松晖、卢孟春、孙婷雅等老师。

长江师范学院周晏副教授为本书做了大量工作，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中仍可能存在不妥甚至错误之处，敬请批评指正。

郑勇林

2017年10月于碧落湖

第一版前言

为了更好地适应我国高等教育发展,满足目前社会对一般高等学校大众化教育背景下人才培养的各项要求,进一步探索和完善我国高等学校应用型人才培养体系,积极探索适应 21 世纪人才培养的教学模式,我们根据教育部非物理类专业物理基础课程教学指导分委员会制定的《理工科非物理类专业大学物理课程教学基本要求》(后简称“纲要”)的思想和精神,编写了《大学基础物理学》(上、下)(郑勇林、杨维、卢孟春、赵茂娟等编著)教材及《大学基础物理学习指导》辅导教材。

大学基础物理是工科大学生学习其他后续课程的基础课,是一门全面、系统地培养学生综合素质的课程。大学基础物理课程的学习,可以培养学生科学的思维方式和研究问题的方法,能开阔学生思路,激发学生的探索和创新精神,提高学生科学素养,增强社会适应能力。同时,相应的学习指导和习题又是帮助学生理解和掌握物理学基本概念、基本规律、基本方法的必要手段,也是培养学生掌握科学的学习方法,培养独立获取知识和解决问题的能力的有效途径。为了帮助学生更好地学好大学物理基础知识和解题方法,我们根据多年的教学经验编写了本书。

本书共 11 章,与《大学基础物理学》(上、下)教材配套使用,但本书在章节的编排上相对教材具有一定独立性,以体现学习指导书的特征,同时也能对不使用配套教材的读者学习大学基础物理学提供学习指导。

本书符合一般院校大学物理课程的教学要求并方便课堂教学,覆盖了需要掌握的基本理论和方法,精选了大学物理课程教学内容的知识点,每章按学习要求、内容提要、重点难点分析、精选例题与习题解答等几部分编写。学习要求部分,遵照“纲要”精神分为了解、理解、掌握和熟练掌握 4 个层次对学生提出不同要求,为教学不同的对象提供了理论依据。内容提要概述了本章需要掌握的基本概念、基本公式、定律和方法,重要的知识点等内容,从易于学生理解的角度给出一定的分析阐述。重点难点分析部分,一是指导教学双方理清思路,抓住主线,正确把握相关知识内容的教与学;二是对本章难点之处进行分析讨论,提出具体的解决方法。精选例题与习题解答部分主要从本章难于理解的知识点入手,对相关知识的应用给出一定的解题方法及关键步骤,旨在帮助学生学会运用基本理论分析实际问题。题目中考查了基本概念、知识点的一般应用、综合应用等。

本书第 1~3 章由赵茂娟、王晓茜、戴松晖编写,第 4~8 章由刘鸿、杨维、朱晓玲、陆智编写,第 9~11 章由郑勇林、卢孟春、孙婷雅、朱晓玲编写,李伯恒、陆智参加了例题、习题的编写及本书的讨论。全书由郑勇林统稿。

本书在编写过程中得到了成都大学教务处、长江师范学院教务处的大力支持,编者在此致以衷心的感谢。

西南大学郑瑞伦教授仔细审阅了书稿并提出许多修改意见,在此表示感谢。

成都大学汪令江教授，长江师范学院周晏副教授为本书编写做了大量工作，在此表示感谢。

本书编写中参考了其他出版社的同类资料，在此一并致谢。

由于编者水平有限，书中可能存在不妥甚至错误之处，敬请批评指正。

编者

2014年8月于成都

目 录

前言

第 1 章 质点运动学 质点动力学	1
1.1 学习要求	1
1.2 内容提要	2
1.3 重点难点分析	13
1.4 精选例题与习题解答	13
第 2 章 刚体和流体	44
2.1 学习要求	44
2.2 内容提要	45
2.3 重点难点分析	51
2.4 精选例题与习题解答	51
第 3 章 气体动理论 热力学基础	73
3.1 学习要求	73
3.2 内容提要	74
3.3 重点难点分析	84
3.4 精选例题与习题解答	84
第 4 章 静电场	102
4.1 学习要求	102
4.2 内容提要	103
4.3 重点难点分析	116
4.4 精选例题与习题解答	117
第 5 章 稳恒磁场	147
5.1 学习要求	147
5.2 内容提要	147
5.3 重点难点分析	154
5.4 精选例题与习题解答	154
第 6 章 麦克斯韦电磁场理论	175
6.1 学习要求	175
6.2 内容提要	175
6.3 重点难点分析	182

6.4	精选例题与习题解答	183
第 7 章	振动 波动	197
7.1	学习要求	197
7.2	内容提要	198
7.3	重点难点分析	212
7.4	精选例题与习题解答	213
第 8 章	光学* 波动光学	244
8.1	学习要求	244
8.2	内容提要	245
8.3	重点难点分析	257
8.4	精选例题与习题解答	258
第 9 章	狭义相对论基础	279
9.1	学习要求	279
9.2	内容提要	280
9.3	重点难点分析	284
9.4	精选例题与习题解答	285
第 10 章	量子力学基础	300
10.1	学习要求	301
10.2	内容提要	301
10.3	重点难点分析	311
10.4	精选例题与习题解答	311
第 11 章	分子与固体 现代高新技术	324
11.1	学习要求	324
11.2	内容提要	324
11.3	重点难点分析	333
11.4	精选例题与习题解答	333

第1章 质点运动学 质点动力学

物质最普遍、最基本的运动形式包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核运动以及其他微观粒子运动等。宏观物体之间（或物体内部各部分之间）的相对位置变动，称为机械运动。物理学中研究机械运动的规律及其应用的部分称为力学。通常把力学分为运动学、动力学和静力学。运动学描述物体的位置随时间的变化或运动轨道问题而不涉及引起运动和运动变化的原因；动力学则研究物体的运动与物体间相互作用的内在联系；静力学研究物体在相互作用下的平衡问题。

质点运动学，从最简单的质点模型出发，研究描述质点运动的物理量（位置矢量、位移、速度和加速度、质点运动方程、切向加速度和法向加速度）、运动的叠加性和相对运动及物体位置随时间的变化或运动轨道等问题。引入了数学上的导数运算和积分运算，从而可以对运动的相对性、瞬时性和矢量性等基本性质进行清晰的阐述。

质点动力学，是以牛顿运动定律为基础，研究物体运动状态发生改变时所遵守的规律的科学。宏观物体的运动一定程度上遵循这些规律。物体间的相互作用称为力。某物体受力作用后，其运动状态就会发生相应的变化。在大学物理中可以从两个不同的角度研究力对物体作用的影响：一是力作用的时间累积作用效果，从而引出动量定理、角动量定理；二是研究力的空间累积作用效果，从而引出动能定理。当作用在物体上的力等于零时，反映出动量守恒、角动量守恒定律及能量守恒定律。这些定律是自然界最基本、最普遍的规律，需要认真去理解。

1.1 学习要求

1. 质点运动的描述

- (1) 理解质点模型及参考系的概念。
- (2) 掌握位置矢量、位移、速度、加速度等描述质点运动的物理量；理解平面曲线运动的角位移、角速度、角加速度、切向加速度、法向加速度等概念。
- (3) 能在直角坐标系下计算质点空间运动时的速度、加速度；理解自然坐标系，能计算质点圆周运动的角速度、角加速度、切向加速度、法向加速度。理解伽利略相对性原理，会利用伽利略坐标、速度变换式分析相对运动问题。

2. 牛顿运动定律

- (1) 掌握牛顿三定律及其适用条件，熟练运用隔离法和整体法分析物体受力；会分析三种基本力——万有引力、弹性力和摩擦力。
- (2) 熟练掌握运用微积分方法求解一维变力作用下的简单质点的动力学问题。

(3) 正确理解质量、力等基本概念;理解质心概念和质心运动定律;理解质点系的内力和外力。

(4) 了解惯性系与非惯性系的基本概念。

3. 运动的守恒定律

(1) 掌握功的概念,会计算质点直线运动时变力的功;掌握保守力做功的特点及势能的概念;会计算重力、弹性力、万有引力的势能。理解势能曲线,能从势函数求得保守力。

(2) 掌握质点、质点系的动能定理、动量定理和动量守恒定律;掌握质点、质点系的角动量定理和角动量守恒定律,并能分析、解决运动质点的力学问题;掌握机械能守恒定律,并能熟练应用功能关系解决一些简单实际的问题;了解三大守恒定律与时间空间对称性的关系。

(3) 了解完全弹性碰撞和完全非弹性碰撞的特点。

1.2 内容提要

1. 基本概念

(1) 质点

把物体视为一个具有一定质量而大小可忽略的几何点,这样的几何点称为质点。质点是物体的一种理想模型。例如,导航地图中显示的移动的汽车、雷达屏幕上显示的飞行的飞机等就被看成一个质点。

(2) 参考系与坐标系

为了描述物体的运动而被选定的参考物体称为参考系。为了定量描述物体相对参考系的位置与运动情况,在选定的参考系上建立带有标尺的数学坐标,称为坐标系。在科学研究中通常选用的坐标系有直角坐标系、自然坐标系、柱坐标系和球坐标系等。

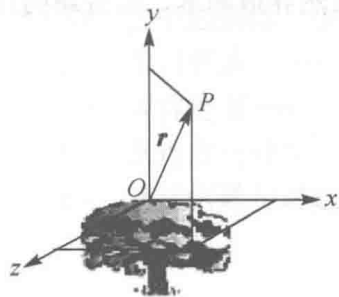


图 1.1 位置矢量

(3) 描述质点运动的物理量

① 位置矢量。在坐标系中质点的位置用一个被称为位置矢量(简称位矢)的矢量来描述。在参考系中任意取定一点 O 作为参考点,如图 1.1 所示,从 O 点指向质点在某一时刻所处的位置 P ,作一矢量 $\mathbf{r}$,称为质点在该时刻的位矢,即

$$\mathbf{r} = \overrightarrow{OP}$$

在直角坐标系中,位矢 $\mathbf{r}$ 可表示为

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

其中, P 点的位置坐标 x 、 y 、 z 就是该点位矢 $\mathbf{r}$ 在直角坐标系 $Oxyz$ 中沿各轴的分量。直角坐标系 $Oxyz$ 中各轴 Ox 、 Oy 、 Oz 的正方向分别用相应的单位矢量 $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 表示,而 $\mathbf{r}_x = x\mathbf{i}$, $\mathbf{r}_y = y\mathbf{j}$, $\mathbf{r}_z = z\mathbf{k}$ 是位矢 $\mathbf{r}$ 的三个分矢量。

质点的位置矢量 $\mathbf{r}$ 随时间 t 的变化关系及在直角坐标系中的表达式为

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

式(1-2)称为质点的运动方程,其中 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 是直角坐标系中运动方程的分量式。质点运动时在空间所经历的路径,称为轨迹,轨迹的数学表达式,称为轨迹方程。在直角坐标系中,从运动方程分量式 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 中消去时间 t ,即可得到轨迹方程 $f(x, y, z) = 0$ 。

② 位移。位移是指自运动始点指向终点的有向直线线段。它描述质点在某段时间内位置的变化,为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-3)$$

位移是位置矢量的增量。

③ 速度。速度是描述质点运动快慢和运动方向的物理量,速度的大小称为速率。

平均速度:
$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-4)$$

瞬时速度:
$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-5)$$

平均速度是位移 $\Delta \mathbf{r}$ 与时间 Δt 的比值,反映了一段时间内位置变化的平均快慢,方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 相同。在描述质点运动时,也常采用“速率”这个物理量,把路程 Δs 与时间 Δt 的比值 $\Delta s / \Delta t$ 称为质点在时间 Δt 内的平均速率,用 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 表示。平均速度与平均速率都与 Δt 有关系,由于 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$,所以, $|\bar{\mathbf{v}}| \neq \bar{v}$ 。瞬时速度是位置矢量对时间的一阶导数,是 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均速度的极限值,反映了 t 时刻位置变化的快慢和方向,瞬时速度只与 t 有关系。位移 $\Delta \mathbf{r}$ 、平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 与瞬时速度 $\mathbf{v}$ 的关系如图1.2所示。位移沿割线 AB 的方向,当 Δt 趋于零时, B 点逐渐趋近于 A 点,相应的割线 AB 逐渐趋近于 A 点的切线,所以质点的速度方向是沿着轨迹上质点所在点的切线方向并指向前进的一侧,亦即质点位矢对时间的瞬时变化率。

速度在直角坐标中的表示为

$$\mathbf{v} = v_x \mathbf{i} + v_y \mathbf{j} + v_z \mathbf{k} = \frac{dx}{dt} \mathbf{i} + \frac{dy}{dt} \mathbf{j} + \frac{dz}{dt} \mathbf{k} \quad (1-6)$$

沿坐标轴的分量分别是

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt} \quad (1-7)$$

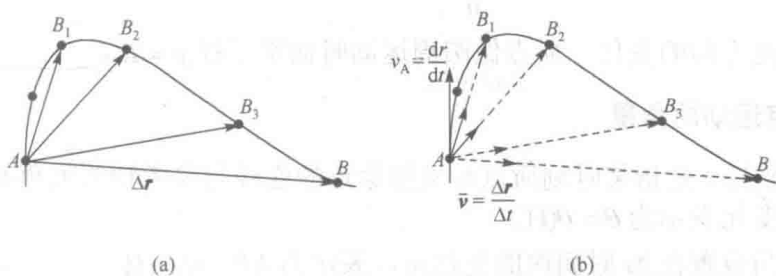


图1.2 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 、平均速度 $\bar{\mathbf{v}}$ 与瞬时速度 $\mathbf{v}$ 的关系

也就是说,质点运动的速度矢量在直角坐标轴上的分量等于相应的位置坐标对时间的一阶导数(标量导数)。所以速度的大小可以用下式计算:

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \quad (1-8)$$

速度的方向可用下式计算:

$$\cos \alpha = \frac{v_x}{v}, \quad \cos \beta = \frac{v_y}{v}, \quad \cos \gamma = \frac{v_z}{v} \quad (1-9)$$

式中, α, β, γ 分别为速度矢量 $\mathbf{v}$ 与 x, y, z 轴之间的夹角。

在自然坐标系中, 速度矢量可表示为

$$\bar{\mathbf{v}} = v \mathbf{e}_\tau = \frac{ds}{dt} \mathbf{e}_\tau \quad (1-10)$$

④ 加速度。加速度是反映质点速度矢量随时间变化的物理量。

平均加速度
$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1-11)$$

瞬时加速度
$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-12)$$

平均加速度是速度矢量增量与时间的比值, 反映了一段时间内速度变化的平均快慢和总体方向; 瞬时加速度是速度矢量对时间的一阶导数, 反映了某瞬时速度变化的快慢和方向。

在直角坐标系中, 可将加速度用分量式表示为

$$\mathbf{a} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} = \frac{dv_x}{dt} \mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt} \mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt} \mathbf{k} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{k} \quad (1-13)$$

在自然坐标系中, 加速度矢量可表示为

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_\tau + \mathbf{a}_n = \frac{dv}{dt} \mathbf{e}_\tau + \frac{v^2}{\rho} \mathbf{e}_n \quad (1-14)$$

式中, ρ 是质点的运动轨迹上某点的曲率半径, $\mathbf{e}_\tau$ 为质点沿切向方向的单位矢量, $\mathbf{e}_n$ 是垂直于 $\mathbf{e}_\tau$ 并指向曲率圆心的单位矢量, $\frac{dv}{dt}$ 为切向加速度, 反映速度大小的变化, $\frac{v^2}{\rho}$ 为法向加速度, 反映速度方向的变化。质点做圆周运动时曲率半径 $\rho = R$ 。

2. 描述质点运动的角量

角位置 (角坐标) 是指某时刻质点和坐标原点的连线与参考轴的夹角 θ 。质点运动时, 角位置随时间的变化表示为 $\theta = \theta(t)$ 。

角位移是指角位置在 Δt 时间内的变化量, 表示为 $\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1$ 。

角速度是指角位移对时间的变化率, 表示为

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (1-15)$$

角加速度是指角速度对时间的变化率, 表示为

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d^2 \theta(t)}{dt^2} \quad (1-16)$$

线量与角量的关系（质点做半径为 R 的圆周运动时）为

$$\begin{aligned} \Delta s &= R \Delta \theta \\ v &= R \omega \\ a_t &= R \alpha \\ a_n &= \frac{v^2}{R} = R \omega^2 \end{aligned} \quad (1-17)$$

3. 相对运动

不同参考系对同一个物体运动的描述是不同的，如图 1.3 所示。 $O'x'y'$ 坐标系相对于 Oxy 坐标系沿 Ox 轴以速度 u 运动，那么，一个运动质点在两个相对运动的参考系中的位移及速度关系为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{r} &= \Delta \mathbf{r}' + \Delta \mathbf{r}_0 \\ \mathbf{v} &= \mathbf{v}' + \mathbf{u} \end{aligned} \quad (1-18)$$

式中， $\Delta \mathbf{r}$ 为运动质点相对于 S 系的位矢变化， $\Delta \mathbf{r}'$ 为运动质点相对于 S' 系的位矢变化， $\Delta \mathbf{r}_0$ 为 S' 系原点对 S 系原点的位矢变化， $\mathbf{v}$ 为质点相对于 S 系的速度， $\mathbf{v}'$ 为质点相对于 S' 系的速度， $\mathbf{u}$ 为 S' 系相对 S 系的速度，也称为牵连速度。

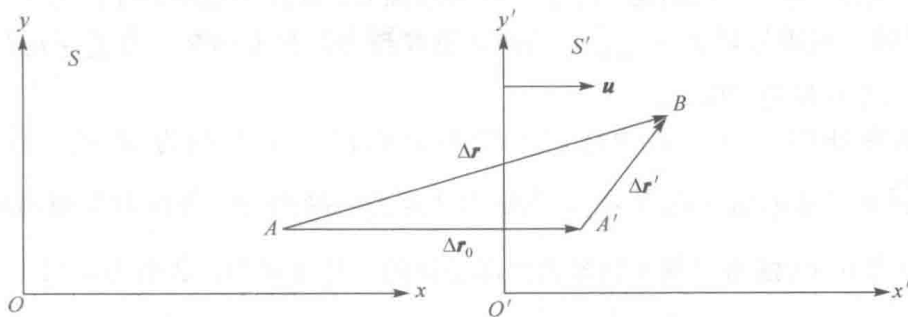


图 1.3 相对运动的描述

4. 惯性与惯性系

物体保持静止或匀速直线运动状态的特性，称为惯性。

在研究物体相对运动时，牛顿 (I. Newton) 第一定律定义了一种参考系，在这种参考系中观察，一个不受力作用的物体将保持静止或匀速直线运动的状态不变。这样的参考系称为惯性参考系，也叫惯性系。也就是说，牛顿第一定律成立的参考系是惯性系。相反，牛顿第一定律不成立的参考系称为非惯性系。

一切相对于惯性系做匀速运动的参考系都是惯性系，在这些惯性系内，所有力学现象都符合牛顿运动定律。

5. 力与力矩

(1) 力

力是物体与物体之间的相互作用, 力是矢量, 有大小和方向。它是量度物体间相互作用的物理量。它能使质点运动的状态发生变化或使物体发生形变。牛顿三条定律都涉及力, 牛顿第一、第二定律以受力物体为对象来研究力的作用效果, 牛顿第三定律则指出物体间的作用是相互的。

日常生活中常见的力有如下几种。

① 重力。重力来源于地球对物体的万有引力。由于地球自转, 地球对物体的万有引力中, 一部分提供了物体随地球一起绕地轴作圆周运动的向心力; 另一部分即为物体所受的重力。在南北两极的地轴上, 物体所受重力即为万有引力, 而在赤道上物体所受的重力等于万有引力与向心力之差。由于这种差异很小, 一般认为重力即为物体所受的万有引力, 方向垂直地面指向地心。作用在物体上的重力, 在量值上为 $W = mg$ 。式中 m 为物体的质量, g 为重力加速度。

② 弹力。弹力来源于物体之间产生的形变。物体企图恢复原状而彼此相互施加的作用力, 称为弹力。弹力的表现形式很多。其中一种为弹簧的弹性力, 这种弹力总是使弹簧恢复原状, 所以又称为恢复力, 实验证明, 这种力遵从胡克定律, 即 $f = -kx$, 式中 f 表示弹力的大小, x 表示弹簧的形变量, k 为弹簧的劲度系数, 它取决于弹簧本身的结构, 负号表示弹性力的方向与形变的方向相反。

③ 摩擦力。两个相互接触的物体在沿接触面有相对运动或有相对运动趋势时, 在接触面之间产生的一对阻止相对运动的力, 称为摩擦力。摩擦力包括静摩擦力 $f_s \leq \mu_s N$ (μ_s 为静摩擦系数, 取等号时 $f_s = f_{s\max}$, 为最大静摩擦力) 和滑动摩擦力 $f_k = \mu_k N$ (μ_k 为动摩擦系数), 式中 N 为正压力。

近代物理证明, 自然界物体之间的相互作用力可归结为 4 类: ① 万有引力 $F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \mathbf{e}_r$ (重力属于此类); ② 电磁力 (弹力、摩擦力、黏性力等相邻原子或分子之间的作用力); ③ 强力, 属于物质内更深层次的一种作用力; ④ 弱力, 属于亚原子之间的一种力。

*另一类是惯性力, 即在加速参考系中引入牛顿运动定律的力, 如在平动加速参考系中, $F = -ma$, 惯性离心力 $F_i = -m\omega^2 r \mathbf{n}$ 。

(2) 力矩

在转动的研究中, 力矩是一个重要的概念。通常有力 F 对给定点的力矩和力 F 对定轴转动的力矩两个概念。

力 F 对给定点 O 的力矩 M_O 表示为位矢 r 与力 F 的矢量积, 即

$$M_O = r \times F \quad (1-19)$$

M_O 是矢量, 对于可以绕 O 点任意转动的刚体, 这个力矩矢量将决定它转动状态的变化。

力 F 对给定轴 Oz 的力矩 M_z 。因为力 F 可以分解为平行于转轴的分力 $F_{//}$ 和垂直于转轴的分力 $F_{\perp}$, 而 $F_{//}$ 对刚体转动没有贡献, 只有 $F_{\perp}$ 能使刚体转动, 所以力 $F_{\perp}$ 对给定轴 Oz 的力矩可表示为

$$M_z = F_{\perp} r \sin \varphi = F_{\perp} d \quad (1-20)$$

式中, φ 为转轴到力作用点半径 r 与 $F_{\perp}$ 的夹角。

说明: 如果有几个力同时作用, 那么上述力 F 可认为是几个力的合力。

6. 动量与角动量

(1) 动量

与速度类似, 动量也是描述物体运动状态的物理量, 即 $p = mv$ 。它是矢量, 其方向与速度方向一致。在物理学中, 用 (r, p) 来表示质点的运动状态比用 (r, v) 来表示更能体现其物理意义。因此, 也可以说动量是物体做机械运动的度量。动量的单位是 $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2) 角动量

质点的角动量是对某一定点而言的, 其定义为

$$L = r \times p = mr \times v \quad (1-21)$$

式 (1-21) 表明角动量 L 的大小为 $L = rp \sin \varphi$, 方向垂直于位矢 L 和动量 p 所组成的平面, 指向是由 r 经小于 180° 的角转到 p 的右手螺旋前进的方向。

注意: 式 (1-21) 中的 r 是该质点相对给定点 O 的位矢, 参考点不同, 角动量也不同, 因此提到角动量一定要说明是对哪一个参考点而言的。

思考题: 质点做圆周运动, 以圆心为参考点的角动量是怎样的?

刚体做定轴转动的角动量定义为

$$L = J\omega \quad (1-22)$$

J 与 ω 分别是刚体绕同一固定轴的转动惯量与角速度。 L 与 ω 都是矢量, 但在定轴转动情况下, 仅有正负之分, 用代数量处理即可。

7. 冲量与冲量矩

冲量是描述力对时间累积作用的物理量。冲量定义为 $I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt$, 它是矢量, 其方向与力的方向一致 (说明: I 的方向和大小要由这段时间内所有微分冲量 $F(t) dt$ 的矢量和来决定, 而不是由某一瞬时的 F 决定, 但在恒力作用时 I 与 F 同向)。上述积分中 $F(t)$ 的关系一般比较复杂, 无法确切知道其具体形式。当力作用时间很短时, 为了计算方便, 常用平均冲力 $\bar{F}$ 代替 $F(t)$ 来计算冲量, 其关系为

$$I = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \bar{F}(t_2 - t_1) \quad (1-23a)$$

恒力作用时, 冲量为

$$I = F\Delta t = F(t_2 - t_1) \quad (1-23b)$$

冲量的单位是 $\text{N} \cdot \text{s}$ 。

冲量矩 (力矩的冲量) 是力矩的时间积累效应, 定义为 $\int_{t_1}^{t_2} M_z(t) dt$, 冲量矩是矢量。也可理解为 Δt 时间内对轴的力矩的冲量和或冲量矩之和。

8. 动量定理和动量守恒定律

(1) 动量定理

物体在运动过程中所受合外力的冲量, 等于质点(或质点系)动量的增量。其数学形式为

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{F}(t) dt = m\mathbf{v}_2 - m\mathbf{v}_1 \quad \text{或} \quad \mathbf{I} = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 \quad (1-24a)$$

式(1-24a)是牛顿第二定律的另一种表达形式, 阐述力对时间累计效应的物理规律。其微分形式为

$$\mathbf{F} dt = d\mathbf{p} = d m \mathbf{v} \quad (1-24b)$$

理解动量定理时注意以下几点:

① 尽管外力在运动过程中时刻改变, 物体的速度方向也可逐点不同, 但却总是遵守动量定理。即不管物体运动过程中动量变化的细节如何, 冲量的大小和方向总等于物体始末动量的矢量差。

② 动量定理不仅适用于碰撞或打击过程, 也适用于其他力学过程。式(1-24a)、式(1-24b)中的力 $\mathbf{F}$ 是物体所受的合外力。在处理铅直方向的碰撞类问题时还应考虑重力, 当物体相互作用力远大于重力时, 重力可忽略。

③ 动量定理是由牛顿第二定律推导出的, 而牛顿第二定律只适用于惯性系, 所以动量定理也只适用于惯性系。具体应用时, 需要选择合适的坐标系, 用其在坐标轴上的分量式进行计算。

(2) 动量守恒定律

若系统所受合外力为零, 即 $\sum_i \mathbf{F}_i = 0$, 则系统的总动量不随时间改变, 即

$$\sum m_i \mathbf{v}_i = m \mathbf{v}_c = \text{常矢量} \quad (1-25)$$

这一结论称为动量守恒定律。不难看出, 系统的动量不变与质心保持匀速直线运动状态是等效的。

动量守恒定律表明, 在物体机械运动转移过程中, 系统中某一物体获得动量的同时, 必然有别的物体失去了一份与之相等的动量。所以, 动量守恒定律的深刻含义在于它是物体机械运动的一种量度。物体动量的转移反映了物体机械运动的转移。

9. 角动量定理和角动量守恒定律

(1) 角动量定理

式(1-21)和式(1-22)分别定义了质点对定点的角动量和刚体做定轴转动的角动量, 质点角动量定理和刚体角动量定理可以共同表示为

$$\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{M}(t) dt = \mathbf{L}_2 - \mathbf{L}_1 \quad (1-26)$$

式中, $\int_{t_1}^{t_2} \mathbf{M}(t) dt$ 是作用在物体上的冲量矩。式(1-26)的物理意义是, 作用于物体的冲量

矩等于角动量的增量。对于质点而言,力矩 $\boldsymbol{M}$ 和角动量 $\boldsymbol{L}$ 必须是对同一个参考点的;对于刚体而言,力矩和角动量必须是对同一转轴的。

定轴转动刚体的角动量定理的微分形式为

$$M_z = \frac{d(J\omega)}{dt} = \frac{dL_z}{dt} \quad (1-27)$$

该式表明刚体所受到的对某给定轴的总外力矩等于刚体对该轴的角动量的时间变化率。该式既适用于刚体,也适用于非刚体。

(2) 角动量守恒定律

若作用于物体的合外力矩 $\boldsymbol{M} = 0$, 则角动量守恒, 即 $\boldsymbol{L} = \text{恒量}$ 。

对于质点, 有

$$\boldsymbol{L} = \boldsymbol{r} \times m\boldsymbol{v} = \text{恒量} \quad (1-28a)$$

对于刚体, 有

$$L = J\omega = \text{恒量} \quad (1-28b)$$

注意: 在有心力作用下, 质点对力心的角动量都是守恒的。

10. 牛顿定律

牛顿第一定律: 任何物体都保持静止或匀速直线运动状态, 直到外力迫使它改变这种状态为止。牛顿第一定律包含两个重要概念: ①任何物体都具有一种保持其原有运动状态不变的特性——惯性, 故也称为惯性定律; ②力是物体之间的一种相互作用, 它是改变物体运动状态的原因。

牛顿第一定律只对惯性参考系适用, 因而把第一定律成立的参考系称为惯性系。牛顿第一定律不能用实验直接验证, 它是在大量观察与经验的基础上, 经过抽象思维和逻辑推理得到的结果。

牛顿第二定律通常可表示为

$$\boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = \frac{d(m\boldsymbol{v})}{dt} \quad (1-29a)$$

式中, $\boldsymbol{F}$ 为作用在物体上的合外力, $\boldsymbol{p}$ 为物体的动量。牛顿本人对第二定律的表述是: 运动的变化与所加的动力成正比, 并且发生在该力所沿的直线方向上。当物体运动速度 $\boldsymbol{v}$ 远小于光速时, m 可视为常量, 这时牛顿第二定律可写成

$$\boldsymbol{F} = m \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = m\boldsymbol{a} \quad (1-29b)$$

式中, $\boldsymbol{F}$ 为作用在物体上的合外力, $\boldsymbol{a}$ 为物体加速度。牛顿第二定律定量地确定了受力物体的加速度与其质量之间的关系。

应用牛顿第二定律时应注意:

① 牛顿第二定律表述的是力的瞬时作用规律, 加速度 $\boldsymbol{a}$ 和所受合外力 $\boldsymbol{F}$ 必须是同一时刻的瞬时量, 且有矢量关系。

② 牛顿第二定律只适用于质点或可化为质点的物体。