

普通高等教育“十三五”规划教材

大学物理

学习导引与能力训练

武文远 龚艳春◎等编著

第3版



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 学习导引与能力训练

第3版

武文远 龚艳春 吴王杰 编著
王 晓 吴成国 王 黎



机械工业出版社

本书基于《理工科类大学物理课程教学基本要求》及《军队院校大学物理课程教学大纲》，结合作者长期教学研究和实践经验编写而成。全书分六篇，共 26 章，覆盖了大学物理课程的主要内容。每章包括知识网络、学习指导、问题辨析、例题剖析、能力训练五个模块，将物理知识学习、学习方法指导和思维能力训练融为一体，注重知识体系的构建、概念规律的诠释、思维方法的训练和应用能力的培养。本书在每章都配备了问题、例题和能力训练题，还设计了力学、热学、静电学、磁学及电磁感应、振动和波动、波动光学、近代物理七套单元综合测试题，试题内容丰富，涵盖了大学物理课程的主要知识点。

本书并不限于某一本确定的教材，是一本独立的大学物理课程教学参考书，适用于学习大学物理课程不同层次的高等学校理工科学生，也可供高等学校从事物理教学的教师参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学习导引与能力训练/武文远等编著. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2019.1
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-61601-6

I. ①大… II. ①武… III. ①物理学-高等学校-教学参考资料 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 283419 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 任正一
封面设计: 马精明 责任校对: 刘丽华 李锦莉
责任印制: 李 昂
北京京丰印刷厂印刷
2019 年 1 月第 3 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·27.5 印张·609 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-61601-6
定价: 55.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言

大学物理是理工科学生的一门重要基础理论课程。多年的教学实践表明,学生在学习过程中普遍存在困难。为了帮助学生更好地掌握物理学的基本概念、基本规律和基本方法,提高他们分析问题和解决问题的能力,我们在《大学物理学习导引与能力训练》(第2版)的基础上,根据《理工科类大学物理课程教学基本要求》和《军队院校大学物理课程教学大纲》,结合长期教学研究和实践经验编写了本书。本书分六篇,共26章,内容覆盖了《军队院校大学物理课程教学大纲》的全部知识点和《理工科类大学物理课程教学基本要求》中的A类知识点,并包含了若干B类知识点。本书每章包括知识网络、学习指导、问题辨析、例题剖析、能力训练五个模块。

知识网络 用图表的形式给出每章的知识结构以及各物理量和物理规律之间的相互关系,旨在帮助学生分清层次、把握脉络,形成系统的知识体系。

学习指导 以知识点的形式梳理每章的基本概念和基本规律,剖析概念,突破难点,诠释规律,以精练、简洁的方式向学生呈现教师课堂授课内容,既可作为学生的读书笔记,也可作为教师的授课提纲。

问题辨析 精选学生学习中容易混淆、不易理解的难点问题,给以简洁并具有启发性的辨别分析,加深学生对物理学基本概念和基本规律的理解,促使知识的迁移与转化,培养学生分析问题的能力。

例题剖析 在总结每章题型及解题思路的基础上,精选若干个具有代表性、技巧性与综合性的典型例题,在“题”与“解”之间给出分析,点出解题依据、关键步骤和方法,旨在帮助学生理清分析思路、领悟解题方法,以一题代一类,达到举一反三、触类旁通的目的。

能力训练 根据每章的特点,精选能力训练题,对基础知识、重点难点、知识应用进行针对性的巩固训练。能力训练题分选择题、填空题、计算题、证明题等类型,对选择题和填空题给出答案,对计算题及证明题给出简要解答过程。

本书还设计了力学、热学、静电学、磁学及电磁感应、振动和波动、波动光学、近代物理七个单元综合测试,旨在帮助学生巩固知识,提高综合应用知识的能力。

全书共精选835个题目,其中问题辨析题124个,选择题240个,填空题233个,计算与证明题238个,并对其中的129个计算题以例题剖析的形式给出了详细分析与解答,对124个问题辨析题进行了简洁的辨别分析。本书各章都配备了问题、例题、能力训练题及综合测试题,试题内容丰富,涵盖了大学物理课程的主要

知识点。

本书在第2版的基础上,调整了部分典型例题和能力训练题,各章都新增了“问题辨析”模块。修订工作的分工如下:吴王杰编写第1~5章的问题辨析题;王晓、王黎修订第9~14章的典型例题和能力训练题;吴成国修订第6~8章及第15、16章的典型例题及能力训练题;龚艳春修订第17~19章的典型例题及能力训练题,并编写第17~19章的问题辨析题;武文远修订全书的“学习指导”并编写其余各章的“问题辨析”题。全书由武文远、龚艳春统稿和定稿。

在本书的编写过程中,陆军工程大学的大学物理课程组的老师们为本书的编写提出了许多有益的建议,机械工业出版社为本书的编写与出版给予了许多指导和帮助,在此一并表示感谢!编者在编写中参考了国内外多部大学物理学教材和教学参考书,在此向所有给予启迪、提供素材的作者们表示谢意!

限于编者的水平,本书中的错误和不妥之处在所难免,恳请读者不吝赐教。

编 者

2018年12月

目 录

前言

第1篇 力学 1

第1章 质点运动学 2

- 1.1 知识网络 2
- 1.2 学习指导 3
- 1.3 问题辨析 9
- 1.4 例题剖析 11
- 1.5 能力训练 17

第2章 牛顿运动定律 20

- 2.1 知识网络 20
- 2.2 学习指导 21
- 2.3 问题辨析 23
- 2.4 例题剖析 24
- 2.5 能力训练 29

第3章 动量与角动量 33

- 3.1 知识网络 33
- 3.2 学习指导 34
- 3.3 问题辨析 39
- 3.4 例题剖析 41
- 3.5 能力训练 47

第4章 功和能 50

- 4.1 知识网络 50
- 4.2 学习指导 51
- 4.3 问题辨析 55
- 4.4 例题剖析 56
- 4.5 能力训练 60

第5章 刚体的定轴转动 64

- 5.1 知识网络 64
- 5.2 学习指导 65
- 5.3 问题辨析 69
- 5.4 例题剖析 72
- 5.5 能力训练 77

力学综合测试题 81

第2篇 热学 87

第6章 气体动理论 88

- 6.1 知识网络 88
- 6.2 学习指导 89
- 6.3 问题辨析 95
- 6.4 例题剖析 97
- 6.5 能力训练 102

第7章 热力学第一定律 105

- 7.1 知识网络 105
- 7.2 学习指导 106
- 7.3 问题辨析 109
- 7.4 例题剖析 111
- 7.5 能力训练 114

第8章 热力学第二定律 119

- 8.1 知识网络 119
- 8.2 学习指导 120
- 8.3 问题辨析 122
- 8.4 例题剖析 123
- 8.5 能力训练 125

热学综合测试题 128

第3篇 电磁学 133

第9章 静电场 134

- 9.1 知识网络 134
- 9.2 学习指导 135
- 9.3 问题辨析 143
- 9.4 例题剖析 144
- 9.5 能力训练 150

第10章 静电场中的导体和电

介质 156

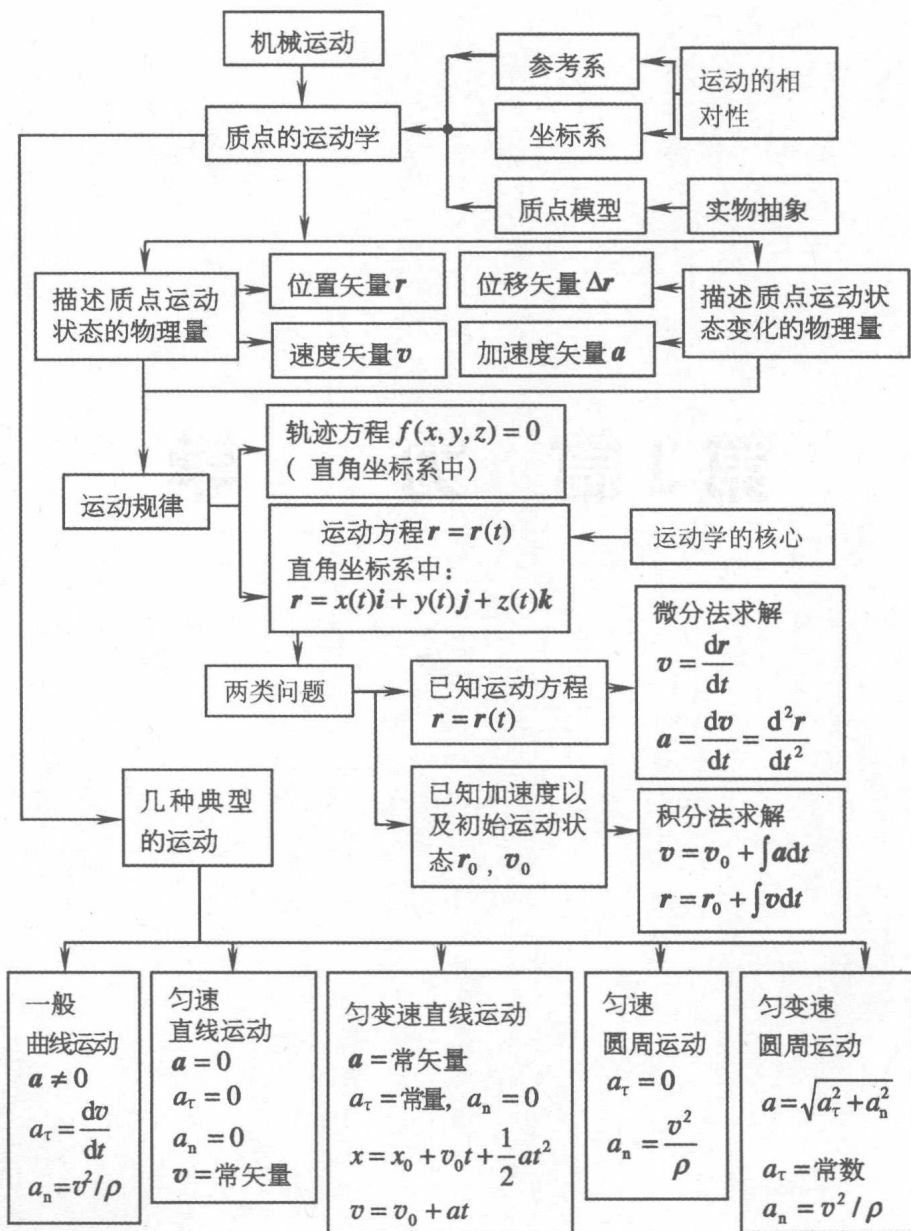
- 10.1 知识网络 156
- 10.2 学习指导 157
- 10.3 问题辨析 164
- 10.4 例题剖析 166

10.5 能力训练	174	16.3 问题辨析	287
静电学综合测试题	179	16.4 例题剖析	290
第11章 稳恒电流与稳恒		16.5 能力训练	297
磁场	185	振动和波动综合测试题	302
11.1 知识网络	185	第5篇 波动光学	307
11.2 学习指导	186	第17章 光的干涉	308
11.3 问题辨析	195	17.1 知识网络	308
11.4 例题剖析	197	17.2 学习指导	309
11.5 能力训练	204	17.3 问题辨析	317
第12章 物质的磁性	210	17.4 例题剖析	319
12.1 知识网络	210	17.5 能力训练	322
12.2 学习指导	211	第18章 光的衍射	327
12.3 问题辨析	214	18.1 知识网络	327
12.4 例题剖析	215	18.2 学习指导	328
12.5 能力训练	218	18.3 问题辨析	335
第13章 电磁感应	220	18.4 例题剖析	336
13.1 知识网络	220	18.5 能力训练	340
13.2 学习指导	221	第19章 光的偏振	343
13.3 问题辨析	229	19.1 知识网络	343
13.4 例题剖析	231	19.2 学习指导	344
13.5 能力训练	237	19.3 问题辨析	349
第14章 电磁场	243	19.4 例题剖析	350
14.1 知识网络	243	19.5 能力训练	352
14.2 学习指导	244	波动光学综合测试题	355
14.3 问题辨析	246	第6篇 近代物理学	359
14.4 例题剖析	246	第20章 狭义相对论	360
14.5 能力训练	248	20.1 知识网络	360
磁学及电磁感应综合测试题	251	20.2 学习指导	361
第4篇 振动和波动	257	20.3 问题辨析	368
第15章 机械振动	258	20.4 例题剖析	370
15.1 知识网络	258	20.5 能力训练	373
15.2 学习指导	259	第21章 光的量子性	377
15.3 问题辨析	264	21.1 知识网络	377
15.4 例题剖析	266	21.2 学习指导	378
15.5 能力训练	272	21.3 问题辨析	384
第16章 机械波和电磁波	278	21.4 例题剖析	386
16.1 知识网络	278	21.5 能力训练	388
16.2 学习指导	280	第22章 微观粒子的波动性和	

状态描述	392	24.3 问题辨析	412
22.1 知识网络	392	24.4 例题剖析	412
22.2 学习指导	393	24.5 能力训练	414
22.3 问题辨析	396	第 25 章 固体的量子理论	417
22.4 例题剖析	397	25.1 知识网络	417
22.5 能力训练	399	25.2 学习指导	418
第 23 章 薛定谔方程	402	25.3 问题辨析	420
23.1 知识网络	402	25.4 例题剖析	420
23.2 学习指导	403	25.5 能力训练	421
23.3 问题辨析	405	第 26 章 核物理与粒子物理	
23.4 例题剖析	405	简介*	423
23.5 能力训练	407	26.1 基本概念	423
第 24 章 原子中的电子	408	26.2 例题剖析	424
24.1 知识网络	408	近代物理学综合测试题	426
24.2 学习指导	409	参考文献	430

第1章 质点运动学

1.1 知识网络



1.2 学习指导

1.2.1 质点 参考系

1. 质点

在力学问题中,如果物体的大小和形状可以忽略不计,则可以把物体当成一个具有质量的点来处理,此时称该点为质点。

(1) 质点是一个理想模型,其运动只有位置的变化,而没有形状的变化。

(2) 质点是一个相对的概念,一个物体能否被视为质点,并非单纯看它的大小,而是看它的大小和形状在所研究的问题中是否起关键作用。例如,在研究地球绕太阳公转时,可视其为质点;而在研究地球和分子的自转时,无论其大或小,都不能视为质点。

(3) 在多数情况下,物体的大小和形状不能忽略,这时可以把物体无限地分割成许多微元,每个微元可以视为质点,整个物体可被看成是由无限多个质点组成的。因此,任何物体都可以被看成是质点的集合。所以,质点的运动规律是讨论复杂系统运动规律的基础。

力学是研究物体机械运动的学科,按内容可分为运动学与动力学。运动学研究的是如何描述物体的运动。

2. 参考系

物理学中把选作标准的参考物体或物体系称为参考系。

(1) 在运动学中,参考系的选取具有任意性,一般视讨论问题的方便而定。参考系的选择不同,对同一问题的描述也就不同。例如,当人乘坐电梯上楼时,以电梯为参考系时,人是静止的;以地面为参考系时,人是竖直上升的。运动是绝对的,但对运动的描述是相对的。

(2) 坐标系是参考系的数学抽象。要解决一个力学问题,首先要建立坐标系,建立了坐标系,才能对物体的运动进行定量的描述。大学物理中常用的坐标系有直角坐标系、平面极坐标系、自然坐标系等。

1.2.2 描述质点运动的基本物理量

1. 位置矢量

位置矢量是描述质点空间位置的物理量,它是由坐标原点指向质点所在处的有向线段。位置矢量简称位矢。

在直角坐标系中

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

位置矢量具有以下特征:

① 矢量性: $\mathbf{r}$ 是矢量,有大小和方向。

② 瞬时性: 质点在运动时,不同时刻其位矢 $\mathbf{r}$ 不同。

③相对性：位矢 $\mathbf{r}$ 依赖于坐标系的选取。

2. 位移

位移是描述质点空间位置变化的物理量，它是从初位置指向末位置的有向线段，它等于质点在 Δt 时间内位置矢量的增量，即

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1-2)$$

(1) 在直角坐标系中

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-3)$$

(2) 位移与参考系的选择有关。例如，人坐在运动的车厢中，选择车厢作为参考系，其位移为零；若选地面为参考系，则位移就不等于零。

(3) 位移 $\Delta \mathbf{r}$ 和路程 Δs 的区别

$\Delta \mathbf{r}$ 是矢量，仅与始、末位矢 $\mathbf{r}_1$ 、 $\mathbf{r}_2$ 有关，而与中间过程无关； Δs 是标量，与过程有关，它是质点运动轨迹的长度，如图 1-1 所示。

通常 $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$ ，但在直线直进运动时，则有 $|\Delta \mathbf{r}| = \Delta s$ ，或在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，有 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$ 。

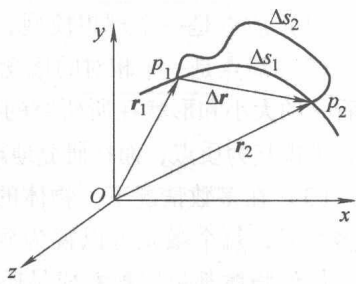


图 1-1 位移与路程

(4) $|\Delta \mathbf{r}|$ 与 Δr 的区别

一般来说， $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta r$ 。 $|\Delta \mathbf{r}| = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$ ，是位移矢量的大小； $\Delta r = |\mathbf{r}_2| - |\mathbf{r}_1|$ ，是位矢大小的增量，即质点位置沿径向的变化量。

3. 速度

速度是描述质点的空间位置随时间变化快慢的物理量，是矢量，用 $\mathbf{v}$ 表示。

(1) 平均速度 若 Δt 时间内质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$ ，则这段时间内质点运动的平均速度为

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

①在直角坐标系中

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\Delta x}{\Delta t}\mathbf{i} + \frac{\Delta y}{\Delta t}\mathbf{j} + \frac{\Delta z}{\Delta t}\mathbf{k} = \bar{v}_x\mathbf{i} + \bar{v}_y\mathbf{j} + \bar{v}_z\mathbf{k} \quad (1-5)$$

$$\text{平均速度的大小} \quad |\bar{\mathbf{v}}| = \sqrt{\bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2} \quad (1-6)$$

平均速度的方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。

②平均速率

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1-7)$$

平均速率是质点运动的路程与所经历的时间的比值。平均速度的大小 $|\bar{\mathbf{v}}| = \left| \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \right|$ ，因为在一般情况下， $|\Delta \mathbf{r}| \neq \Delta s$ ，所以平均速率并不是平均速度的大小。例如，人沿半

径为 r 的圆形跑道跑了 1 周, 用时 Δt , 则其平均速度为零, 而平均速率为 $\bar{v} = \frac{2\pi r}{\Delta t}$ 。

(2) 速度 平均速度只能用来粗略地描述质点空间位置变化的快慢。为了精确描述质点在时刻 t 的运动情况, 需用瞬时速度 (简称速度), 即

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \quad (1-8)$$

①在直角坐标系中

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i} + \frac{dy}{dt}\boldsymbol{j} + \frac{dz}{dt}\boldsymbol{k} = v_x\boldsymbol{i} + v_y\boldsymbol{j} + v_z\boldsymbol{k} \quad (1-9)$$

$$\text{速度的大小} \quad v = |\boldsymbol{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-10)$$

速度的方向为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \boldsymbol{r}$ 的极限方向。其方向是沿轨道上质点所在位置的切线, 并指向质点前进的一方。

②速度的大小称为速率。

$$v = |\boldsymbol{v}| = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right|$$

$$\text{因 } \Delta t \rightarrow 0 \text{ 时, } |d\boldsymbol{r}| = ds, \text{ 因此也有 } v = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| = \frac{ds}{dt}$$

③速度与速率的区别: 速度不仅表明质点运动的快慢, 还表明质点运动的方向, 它是矢量。而速率仅表明质点运动的快慢, 是标量。

④ $\left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right|$ 与 $\frac{dr}{dt}$ 的区别: 通常 $\left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right| \neq \frac{dr}{dt}$, $v = |\boldsymbol{v}| = \left| \frac{d\boldsymbol{r}}{dt} \right|$ 表示的是质点运动的速率, 而 $\frac{dr}{dt}$ 表示的是位矢的大小对时间的变化率。

⑤平均速度与速度的区别: 平均速度是对一段时间而言的, 而速度是对某个时刻而言的。

4. 加速度

加速度是描述质点的运动速度随时间变化快慢的物理量, 是矢量, 用 $\boldsymbol{a}$ 表示。

(1) 平均加速度 若 Δt 时间内, 质点运动速度的变化为 $\Delta \boldsymbol{v}$, 则平均加速度为

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \quad (1-11)$$

$$\text{平均加速度的大小为 } \bar{a} = \left| \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} \right| \neq \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

平均加速度的方向为与 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的方向相同。

(2) 瞬时加速度 平均加速度只能粗略地描述质点的运动速度在一段时间内变化的快慢。为了精确地描述质点在时刻 t 速度变化的快慢情况, 需用瞬时加速度 (简称加速度)。

$$\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-12)$$

在直角坐标系中

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

$$\text{加速度的大小为} \quad a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-14)$$

加速度的方向为 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向。

加速度与速度一样具有矢量性、瞬时性、相对性三个特征。

①加速度的大小与速度变化的关系: 由于加速度是速度对时间的变化率, 所以不论是速度的大小发生变化还是方向发生变化, 都有加速度。 $\boldsymbol{a}$ 与 $\Delta \boldsymbol{v}$ 有关, 而与 $\boldsymbol{v}$ 本身无关。无论速度多么大, 只要速度的大小和方向都不发生变化, 加速度总等于零; 反之, 无论速度多么小 (甚至是零), 只要速度的大小或方向或两者一起发生变化, 就一定有加速度。

②加速度的方向: 加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向。在曲线运动中, 一般 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的方向与 $\boldsymbol{v}$ 的方向不一致。 $\boldsymbol{a}$ 的方向总是指向曲线凹的一侧。

③从速度与加速度之间的夹角的大小可以定性判断速度大小的变化: 当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成锐角时, 速率增大; 当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 成钝角时, 速率减小; 当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 垂直时, 速率不变。在直线运动中, $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 都只有两种可能的方向, 当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 方向相同时, 速率增大; 当 $\boldsymbol{a}$ 与 $\boldsymbol{v}$ 方向相反时, 速率减小。

④ $\boldsymbol{a}$ 等于常矢量的运动称为匀变速运动, 不一定是直线运动。例如, 在无阻力的抛体运动中, $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{g}$, 方向垂直向下。当初速沿竖直方向时, 质点做直线运动; 当初速沿水平方向时, 质点做平抛运动; 当初速沿其他任意方向时, 质点做斜抛运动。

由于质点在某时刻的运动状态是由该时刻质点的所在位置、运动的快慢以及运动的方向确定的, 所以在质点运动学中, 位置矢量 $\boldsymbol{r}$ 和速度 $\boldsymbol{v}$ 是描述质点运动状态的物理量, 而位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和加速度 $\boldsymbol{a}$ 则是反映质点运动状态变化的物理量。

1.2.3 运动方程

1. 运动方程

质点的位矢随时间变化的函数关系 $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$ 称为质点的运动方程。在直角坐标系中, 运动方程的分量式为

$$x = x(t), y = y(t), z = z(t) \quad (1-15)$$

式 (1-15) 也称为质点的轨迹参数方程。

在平面直角坐标系中, 从运动方程分量式 $x = x(t)$ 和 $y = y(t)$ 中消除时间 t , 即可得到轨迹方程。

运动方程包含了质点运动的全部信息。如果能确定运动方程, 则有

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}, \quad \boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2\boldsymbol{r}}{dt^2}$$

所以, 找出各种具体运动所遵循的运动方程是运动学的重要任务之一。

2. 运动学的两类问题

质点运动学问题一般可以归结为两类。

(1) 微分问题 已知运动方程, 求速度和加速度。因求解方法用微分方法, 故称此类问题为微分问题。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \xrightarrow{\text{微分}} \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \xrightarrow{\text{微分}} \mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

(2) 积分问题 已知加速度和初始条件, 求速度和运动方程。因求解方法用积分方法, 故称此类问题为积分问题。

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \Rightarrow d\mathbf{v} = \mathbf{a} dt \xrightarrow{\text{积分}} \mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int_0^t \mathbf{a} dt \xrightarrow{\text{积分}} \mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int_0^t \mathbf{v} dt$$

求解的思路是, 利用速度和加速度的定义, 通过分离变量, 然后求积分, 并由初始条件, 将积分变为定积分, 从而求得质点的速度和位置。加速度的表示通常有以下三种形式, 现以一维运动为例讨论如下:

$$\textcircled{1} a = a(t) \quad a(t) = \frac{dv}{dt} \Rightarrow dv = a(t) dt \Rightarrow \int_{v_0}^v dv = \int_0^t a(t) dt$$

$$\textcircled{2} a = a(v) \quad a(v) = \frac{dv}{dt} \Rightarrow dt = \frac{dv}{a(v)} \Rightarrow \int_0^t dt = \int_{v_0}^v \frac{dv}{a(v)}$$

$$\textcircled{3} a = a(x) \quad a(x) = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v \frac{dv}{dx} \Rightarrow a(x) dx = v dv \Rightarrow \int_{x_0}^x a(x) dx = \int_{v_0}^v v dv$$

1.2.4 圆周运动

1. 圆周运动的加速度

(1) 切向加速度 a_τ 反映速度大小的变化。

$$\text{大小:} \quad a_\tau = \frac{dv}{dt} \quad (1-16)$$

方向: 沿轨道的切线方向

(2) 法向加速度 a_n 反映速度方向的变化。

$$\text{大小:} \quad a_n = \frac{v^2}{R} \quad (1-17)$$

方向: 垂直于 v 且指向圆心

(3) 总加速度 $\mathbf{a} = a_n \mathbf{e}_n + a_\tau \mathbf{e}_\tau$ 。

$$\text{大小:} \quad a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{v^2}{R}\right)^2 + \left(\frac{dv}{dt}\right)^2} \quad (1-18)$$

$$\text{方向:} \quad \tan \varphi = \frac{a_n}{a_\tau} \quad (\varphi \text{ 为 } \mathbf{a} \text{ 与 } \mathbf{e}_\tau \text{ 之间的夹角}) \quad (1-19)$$

2. 圆周运动的角量描述

(1) 角位置 θ , 角位移 $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$

一般规定质点沿逆时针方向转动时, $\Delta\theta > 0$; 沿顺时针方向转动时, $\Delta\theta < 0$ 。

(2) 角速度

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-20)$$

$\omega > 0$, 沿逆时针方向; $\omega < 0$, 沿顺时针方向。

(3) 角加速度

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1-21)$$

3. 圆周运动的角量与线量之间的关系

$$s = r\theta, ds = r d\theta \quad (1-22)$$

$$v = r\omega \text{ 或 } \omega = \frac{v}{r} \quad (1-23)$$

$$a_\tau = r\alpha, a_n = r\omega^2 \quad (1-24)$$

1.2.5 一般曲线运动

当把圆周运动的切向加速度和法向加速度中的圆半径 r 换成曲率半径 ρ , 圆心换成曲率中心时, 所描述的就是质点的一般曲线运动。

若 $a_\tau = a_n = 0$, 速度大小和方向都不变, 则质点做匀速直线运动;

若 $a_\tau \neq 0, a_n = 0$, 速度大小变化, 轨道不弯曲, 则质点做变速直线运动;

若 $a_\tau = 0, a_n \neq 0$ 且为常量, 速度大小不变, 轨道弯曲成圆, 则质点做匀速率圆周运动;

若 $a_\tau \neq 0, a_n \neq 0$, 速度大小和方向都变, 轨道弯曲, 则质点做一般曲线运动。

可见, 根据 a_n 是否为零可判断质点是否做曲线运动。 $a_n \equiv 0$, 质点做直线运动; $a_n \neq 0$, 质点做曲线运动。

1.2.6 相对运动

假设参考系 S' 相对于参考系 S 以速度 v_0 运动。一般将 S 系称为基本参考系 (或绝对参考系), 将 S' 系称为运动参考系。相应地, 物体在 S 系中的运动速度 v 称为绝对速度, 在 S' 系中的运动速度 v' 称为相对速度, 而将 v_0 称为牵连速度。

考虑运动参考系做平动的情况, 如图 1-2 所示。分别在 S 系和 S' 系中描述同一个质量为 m 的质点的运动, 两个参考系中位移的关系为

$$\Delta \mathbf{r} = \Delta \mathbf{r}_0 + \Delta \mathbf{r}' \quad (1-25)$$

即质点相对基本参考系的位移等于质点相对运动参考系的位移与运动参考系相对基本参考系的位移的矢量和。

两个参考系中速度的关系为

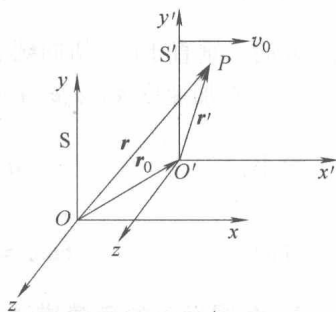


图 1-2 相对运动

$$v = v_0 + v' \quad (1-26)$$

即绝对速度等于牵连速度与相对速度的矢量和。

两个参考系中加速度的关系为

$$a = a_0 + a' \quad (1-27)$$

即绝对加速度等于牵连加速度与相对加速度的矢量和。

必须注意, 以上变换关系属于伽利略变换, 基于时间、空间是独立的, 并与运动无关的经典时空观。

1.3 问题辨析

问题1 微分表达式 $d\mathbf{r}$ 、 dr 、 $|d\mathbf{r}|$ 、 $d|\mathbf{r}|$ 、 ds , 它们分别表示什么意义?

辨析 微分表示一个无限小元过程中某个物理量的变化。要理解微分表达式 $d\mathbf{r}$ 、 dr 、 $|d\mathbf{r}|$ 、 $d|\mathbf{r}|$ 、 ds 的物理意义, 首先要理解 $\mathbf{r}$, r , s 的意义。 $\mathbf{r}$ 是位置矢量 (位矢); r 是位矢矢径的长度, 是标量; s 是路程, 是标量。

因此, $d\mathbf{r}$ 表示位矢在时间 dt 内的微小变化, 是元过程中的位移, 是矢量; dr 是位矢长度在时间 dt 内的微小变化, 是长度的变化, 它是标量; ds 是路程的微小变化, 是标量。

$|\mathbf{r}|$ 是位矢矢量 $\mathbf{r}$ 的模, 一个矢量的模就是矢量的大小, 因此 $|d\mathbf{r}|$ 就是位移 $d\mathbf{r}$ 的长度, 在极限情形下它就是路程的微小变化, 即 $|d\mathbf{r}| = ds$ 。 $d|\mathbf{r}|$ 就是 $|\mathbf{r}|$ 的微元, $|\mathbf{r}| = r$, 因此 $d|\mathbf{r}| = dr$, 是位矢长度的微小变化。

问题2 表达式 $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 、 $\frac{dr}{dt}$ 、 $\frac{d|\mathbf{r}|}{dt}$ 、 $\frac{ds}{dt}$ 、 $\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$, 它们分别表示什么意义?

辨析 根据问题1的分析, $\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 表示速度 $\mathbf{v}$, 是矢量; $\frac{dr}{dt}$ 表示位矢长度的时间变化率, 是标量, 注意它不是速率; $\frac{d|\mathbf{r}|}{dt}$ 就是 $\frac{dr}{dt}$; $\frac{ds}{dt}$ 是路程对时间的变化率, 也就是速度的大小 (速率); $\frac{dx}{dt} = v_x$, $\frac{dy}{dt} = v_y$, $\sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}$ 是二维质点运动的速率。

问题3 质点做半径为 R 的变速圆周运动, v 表示任一时刻质点的速率, 那么以下各个表达式的意义分别是什么? (1) $\frac{dv}{dt}$; (2) $\frac{v^2}{R}$; (3) $\frac{dv}{dt} + \frac{v^2}{R}$; (4) $\sqrt{\left(\frac{dv}{dt}\right)^2 + \frac{v^4}{R^2}}$ 。

辨析 圆周运动的加速度是矢量, $\mathbf{a} = \frac{dv}{dt}\mathbf{e}_\tau + \frac{v^2}{R}\mathbf{e}_n$

(1) $\frac{dv}{dt}$ 是切向加速度分量, 表示速率对时间的变化率。

(2) $\frac{v^2}{R}$ 是法向加速度分量。