



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学物理学

(第5版 数字资源版)
(上)

主编 赵近芳 王登龙
主审 颜晓红

Physics



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

大学物理学

(第5版)

数字资源版

(上)

主 编 赵近芳 王登龙
编 者 杨友田 王凤姣 谢月娥
主 审 颜晓红

北京邮电大学出版社

• 北京 •

内容简介

本书是在“‘十二五’普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》”的基础上进行改编而成。全书仍分为上、下两册,上册包括力学基础、振动与波和波动光学;下册包括电磁学、热学、相对论和量子论。本书作为工科物理及理科非物理专业大学物理教材的改革尝试,采用了“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽量反映新科技发展,注意各部分知识之间的活化联系,并保持教材内容难度适宜。书中一些重点难点知识做成了基于手机的数字资源,可通过“九斗”APP学习,方便学生自学。同时,本书还配备了学习指导书、多媒体课件、电子教案、网络课件、网络学习平台等立体化教学资源。

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材,也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学:数字资源版. 上/赵近芳,王登龙主编. —5 版. —北京:北京邮电大学出版社,2018.1
ISBN 978-7-5635-5333-4

I. ①大… II. ①赵… ②王… 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 306670 号

书 名 大学物理学(第 5 版)数字资源版(上)
主 编 赵近芳 王登龙
责任编辑 刘国辉
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真 010-82333010 62282185(发行部) 010-82333009 62283578(传真)
网 址 www.buptpress3.com
电子信箱 ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京泽宇印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 14
字 数 355 千字
版 次 2018 年 1 月第 5 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

广益教育“九斗”APP 操作说明

本书为“互联网+”立体化教材,配有广益教育助学助教平台——“九斗”APP. 请按照以下步骤操作使用.

步骤一,先使用智能手机扫描本书封面图标中的二维码(见下图),下载安装免费的“九斗”APP. 提示:下载界面会自动识别安卓或苹果手机.



步骤二,安装成功之后,点击“九斗”APP 进入使用界面.

步骤三,首次使用请先注册. 如果您是教师用户请提交资料进行审核,审核通过后即可获得教师的相关功能.

步骤四,注册成功后,按照软件提示或宣传视频操作即可.

提示:

1. 浏览资源请先扫描封底二维码进行教材验证;

2. 教材中带有  标志的图片可以使用“九斗”APP 中 AR 扫描功能扫描图片显示相关资源;

3. 教材中的二维码资源请使用“九斗”APP 中的扫一扫功能扫描二维码进行浏览.

在使用过程中,如有疑问,请随时与我们联系!

联系电话:010-82330186、13811568712

客服 QQ:2158198813

电子邮箱:kf@guangyiedu.com

第5版:数字资源版前言

近年来,随着互联网特别是移动互联技术的迅猛发展,教材的数字化(立体化)对教师的教学和学生的学习起到了很大的帮助和促进,同时教材数字化的建设越来越受到高校、出版社的重视和青睐.原有第5版在高新技术与教学的融合方面做了大胆的尝试.不仅成功地利用了移动互联网平台,还引进了AR增强现实技术,这极大地丰富了教材内容,让老师和学生的知识触角延伸到了互联网.

全书仍分为《大学物理学》上、下两册.上册包括力学、振动与波、波动光学;下册包括电磁学、热学、相对论、量子物理学、新技术物理基础(专题).全书改编过程遵循“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽量反映新科技发展概况,注意各部分知识之间的活化联系,同时保持教材内容难度适宜.

本版吸取具有使用经验的教师的建议,并经过详细的调研,在第5版的基础上更加充实数字化资源,丰富数字化的形式和内容,更好地方便教师和学生使用.同时,本书继续保持第5版中的内容特色.不同院校不同专业的物理教学计划时数可能存在差异,在使用本教材时可根据具体情况对内容进行重组或取舍,教学时数可掌握在72~128学时范围内.

本书由王凤姣负责改编力学、振动与波及其相应章节的阅读材料和习题;杨友田负责改编热学、量子物理篇、新技术物理基础(专题)的所有内容;谢月娥负责改编电磁学篇的所有内容;王登龙负责改编相对论、波动光学篇的全部内容.学习指导的相关章节仍由以上老师改编,最后由赵近芳教授和王登龙教授负责全书的修改和定稿工作.在修订过程中,广西师范大学郭平生、南华大学彭志华、中南大学罗益民等老师参加了讨论和编写,提出了许多宝贵意见.参加讨论和编写的老师还有焦志伟、白心爱、倪江利、曾爱华、胡义嘎、刘道军、曲蛟、汤永新、张博洋、范军怀、马双武、苏文刚、唐咸荣、杜立、韩霞等.教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书.北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示感谢.

编写适合教学需求的教材是一种探索,由于编者水平有限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正.

编者

第 5 版前言

承蒙兄弟院校的厚爱,“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《大学物理学》(第 4 版)得到了全国上百所高等院校的使用,这是广大师生对这套教材的充分肯定,让我们倍感欣慰.为了更好地建设好这套教材,帮助师生们在教学过程中提高效率和兴趣、增加教学手段和扩充知识,我们对教材进行了全方位的互联网立体化建设,在高新技术与教学的融合方面做了大胆的尝试.不仅成功地利用了移动互联网平台,还引进了 AR 增强现实技术,这极大地丰富了教材内容,让老师和学生的知识触角延伸到了互联网.

全书仍分为《大学物理学》上、下两册和《大学物理学学习指导》.上册包括力学、相对论、振动与波、热学;下册包括电磁学、波动光学、量子物理学、新技术物理基础(专题);指导书包括学习指导和系列化习题.全书改编过程遵循“高、宽、新、活、宜”的原则,即高视点选择经典内容,努力拓宽知识面,尽量反映新科技发展概况,注意各部分知识之间的活化联系,同时保持教材内容难度适宜.

近年来,高中物理知识和数学知识有所变动.例如,高等数学中的导数和积分基础知识在高中已开始学习,物理知识则在难度上有所降低,我们参考了近年来部分省(市)的高中物理教材,仔细研究了大学物理跟高中物理最佳的结合体系和内容.在第 5 版上,我们尽量保持原有第 4 版的体系结构和内容,而主要区别则包括以下几个方面.

1. 在例题方面做了适当的调整,替换了部分运算复杂、综合性较强的例题,选用了一些重在物理思想和方法应用的题.

2. 对原有第 11 章和第 12 章进行了合并,统一并称为“变化的电磁场”,以适应大学物理教学的发展.

3. 对全书进行了互联网立体化建设,依托广益教育“九斗”APP,全方位为老师和学生提供教与学上的服务.我们提供了 AR 交互动画、微视频、拓展阅读、科学家简介等.为了提高学生的学习主动性,我们还把部分附录、本章摘要和习题参考答案搬上了互联网,通过这些大胆的创新,可以帮助学生提高从互联网获取知识的能力.

4. 教材与课程建设紧密结合,配备了一套独具特色的教学资源.主要包括学习指导书、多媒体课件、电子教案和教学大纲、网络课件、组卷题库系统等.

不同院校不同专业的物理教学计划时数可能存在差异,在使用本教材时可根据具体情况对内容进行重组或取舍,教学时数可掌握在 72~128

学时范围内.

本书由王凤姣负责改编力学、振动与波及其相应章节的阅读材料和习题;杨友田负责改编热学、量子物理篇、新技术物理基础(专题)的所有内容;谢月娥负责改编电磁学篇的所有内容;王登龙负责改编相对论、波动光学篇的全部内容.学习指导的相关章节仍由以上老师改编,最后由赵近芳教授和王登龙教授负责全书的修改和定稿工作.在修订过程中,广西师范大学郭平生、南华大学彭志华、中南大学罗益民等老师参加了讨论和编写,提出了许多宝贵意见.参加讨论和编写的老师还有焦志伟、白心爱、倪江利、曾爱华、胡义嘎、刘道军、曲蛟、汤永新、张博洋、范军怀、马双武、苏文刚、唐咸荣、杜立、韩霞等.教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书.北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的辛勤劳动,在此一并表示感谢.

编写适合教学需求的教材是一种探索,由于编者水平有限,书中的疏漏和错误之处在所难免,恳请读者批评指正.

编 者

目 录

第一篇 力学基础

第 1 章 质点运动学 /2



- 1.1 参考系 坐标系 物理模型 /3
- 1.2 位置矢量 位移 速度 加速度 /4
- 1.3 曲线运动的描述 运动学中的两类问题 /9
- 1.4 相对运动 /15
- 习题 /18

第 2 章 质点动力学 /20



- 2.1 牛顿运动定律 /21
- *2.2 非惯性系 惯性力 /26
- 2.3 动量 动量守恒定律 *质心运动定理 /29
- 2.4 功 动能 势能 机械能守恒定律 /35
- *2.5 理想流体的伯努利方程 /48
- 习题 /53

第 3 章 刚体力学基础 /56



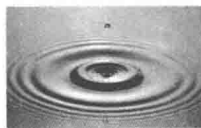
- 3.1 刚体 刚体定轴转动的描述 /57
- 3.2 力矩 刚体定轴转动的转动定律 /60
- 3.3 刚体定轴转动的动能定理 /66
- 3.4 刚体定轴转动的角动量定理和角动量守恒定律 /68
- 习题 /76

第 4 章 机械振动 /79



- 4.1 简谐振动的动力学特征 /80
- 4.2 简谐振动的运动学 /83
- 4.3 简谐振动的能量 /87
- 4.4 简谐振动的合成 *振动的频谱分析 /89
- 4.5 阻尼振动 受迫振动 共振 /96
- 习题 /99

第 5 章 机械波 /102



- 5.1 机械波的形成和传播 /103
- 5.2 平面简谐波的波函数 /108
- 5.3 波的能量 *声强 /115

PHYSICS

5.4 惠更斯原理 波的叠加和干涉 /120

5.5 驻波 /126

5.6 多普勒效应 * 冲击波 /132

*5.7 色散 波包 群速度 /136

习题 /139

第二篇 波动光学

第6章 光的干涉 /144



6.1 光源 光的相干性 /145

6.2 杨氏双缝干涉实验 /148

6.3 光程与光程差 /151

6.4 薄膜干涉 /153

6.5 劈尖干涉 牛顿环 /156

6.6 迈克耳孙干涉仪 /161

习题 /164

第7章 光的衍射 /167



7.1 光的衍射 惠更斯-菲涅耳原理 /168

7.2 单缝夫琅和费衍射 /169

7.3 衍射光栅 /174

7.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率 /179

*7.5 X射线的衍射 /182

习题 /184

第8章 光的偏振 /186



8.1 自然光和偏振光 /187

8.2 起偏和检偏 马吕斯定律 /189

8.3 反射与折射时光的偏振 /191

*8.4 散射光的偏振 /194

*8.5 光的双折射 /194

*8.6 偏振光的干涉 人为双折射现象 /196

*8.7 旋光现象 /199

习题 /200

附录 /202

附录 I 矢量 /202

附录 II 常用基本物理常量表 /213

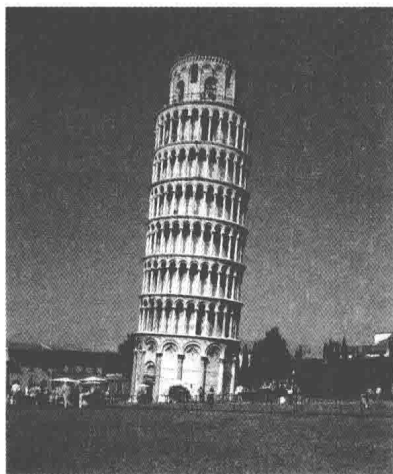
附录 III 其他常用参考资料 /214

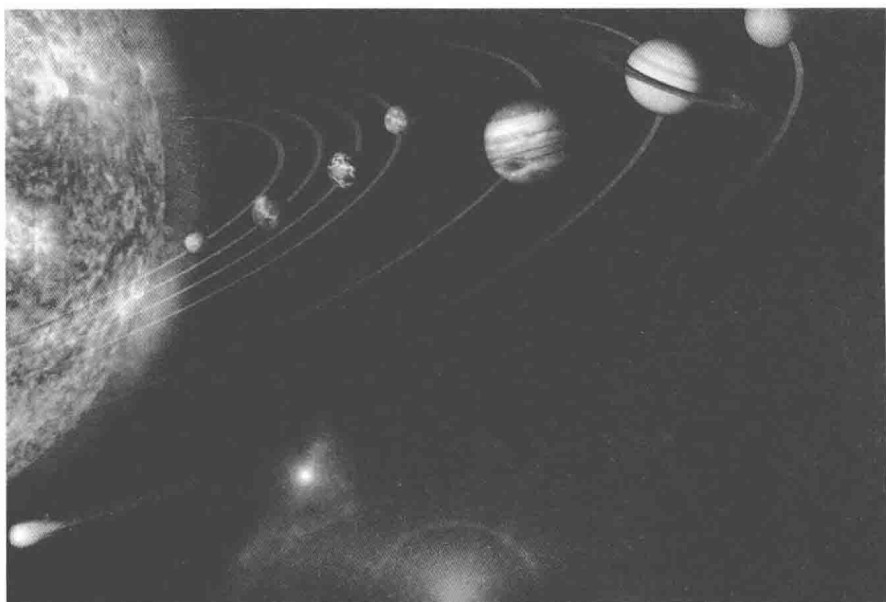
第一篇

力学基础

力学是物理学中最古老和发展最完美的学科。它起源于公元前 4 世纪古希腊学者亚里士多德关于力产生运动的说法,以及我国《墨经》中关于杠杆原理的论述等。但其成为一门科学理论则始于 17 世纪伽利略论述惯性运动,继而牛顿提出了力学三个运动定律。以牛顿运动定律为基础的力学理论称为牛顿力学或经典力学。它所研究的对象是物体的机械运动。经典力学有严谨的理论体系和完备的研究方法,如观察现象,分析和综合实验结果,建立物理模型,应用数学表述,作出推论和预言,以及用实践检验和校正结果等。因此,它曾被人们誉为完美普遍的理论而兴盛了约三百年。直至 20 世纪初才发现它在高速和微观领域的局限性,从而在这两个领域分别被相对论和量子力学所取代,但在一般的技术领域,如机械制造、土木建筑、水利设施、航空航天等工程技术中,经典力学仍然是必不可少的重要的基础理论。

本篇主要讲述质点力学、刚体的定轴转动,以及机械振动和机械波。着重阐明动量、角动量和能量诸概念及相应的守恒定律(并简要介绍了对称性与守恒定律的关系)。长期以来,经典力学被认为是决定论的。随着现代科学技术的发展,人们发现经典力学问题实际上大部分具有不可预测性,是非决定论的。本书也向读者介绍了这方面的基本知识——混沌。狭义相对论的时空观和牛顿力学联系紧密,亦可归入力学范畴。





第 1 章

质点运动学

力

学所研究的是物体机械运动的规律. 宏观物体之间(或物体内部各部分之间)相对位置的改变称为机械运动. 在经典力学中, 通常将力学分为运动学、动力学和静力学. 本章只研究运动学规律. 运动学是从几何的观点来描述物体的运动, 即研究物体的空间位置随时间的变化关系, 不涉及引发物体运动和改变运动状态的原因.



本章提要



1.1 参考系 坐标系 物理模型

为了描述物体的运动必须作三点准备,即选择参考系、建立坐标系、提出物理模型.

1.1.1 运动的绝对性和相对性

众所周知,运动是物质的存在形式,运动是物质的固有属性.从这种意义上讲,运动是绝对的.当然本书所讨论的运动,还不是这种哲学意义上的广义运动.但即使是机械运动形式,任何物体在任何时刻都在不停地运动着.例如,地球在自转的同时绕太阳公转,太阳又相对于银河系中心以大约 234 km/s 的速率运动,而我们所处的银河系又相对于其他银河系以大约 600 km/s 的速率运动着.总之,绝对不运动的物体是不存在的.

然而运动又是相对的.因此本书所研究的物体的运动都是在一定环境和特定条件下的运动.例如,当说一列火车开动了,这显然是指火车相对于地球(车站)而言的.离开特定的环境和条件谈论运动没有任何意义.正如恩格斯所说:“单个物体的运动是不存在的——只有在相对的意义下才可以谈运动.”

1.1.2 参考系

运动是绝对的,但运动的描述却是相对的.因此,在确定研究对象的位置时,必须先选定一个标准物体(或相对静止的几个物体)作为基准.那么这个被选作标准的物体或物体群,就称为**参考系**.

同一物体的运动,由于所选参考系不同,对其运动的描述就会不同.例如,在匀速直线运动的车厢中,物体的自由下落,相对于车厢是作直线运动;相对于地面,却是作抛物线运动;相对于太阳或其他天体,运动的描述则更为复杂.这一事实充分说明了运动的描述是相对的.

从运动学的角度讲,参考系的选择是任意的,通常以对问题的研究最方便、最简单为原则.研究地球上物体的运动,在大多数情况下,以地球为参考系最为方便(以后如不作特别说明,研究地面上物体的运动,都是以地球为参考系).但是,当在地球上发射人造“宇宙小天体”时,则应以太阳为参考系.

科学家介绍



伽利略

1.1.3 坐标系

要想定量地描述物体的运动,就必须在参考系上建立适当的坐标系.在力学中常用的是直角坐标系.根据需要,也可选用极坐标系、自然坐标系、球面坐标系或柱面坐标系等.

总的说来,当参考系选定后,无论选择何种坐标系,物体的运动性质都不会改变.然而,坐标系选择得当,可使计算简化.

1.1.4 物理模型

任何一个真实的物理过程都是极其复杂的.为了寻找某过程中最本质、最基本的规律,总是根据所提问题(或所要回答的问题),对真实过程进行理想化的简化,然后经过抽象提出一个可供数学描述的物理模型.

现在所提的问题是确定物体在空间的位置.当物体的线度比它运动的空间范围小很多时,例如绕太阳公转的地球和调度室中铁路运行图上的列车等;或当物体作平动时,物体上各部分的运动情况(轨迹、速度、加速度)完全相同.这时可以忽略物体的形状、大小,而把它看成一个具有一定质量的几何点,并称之为质点.

若物体的运动在上述两种情形之外,还可推出质点系的概念.即把这个物体看成是由许许多多满足第一种情况的质点所组成的系统.如果弄清楚了组成这个物体的各个质点的运动情况,那么也就描述了整个物体的运动.

在力学中除了质点模型之外,在后续章节中还会遇到刚体、理想流体、谐振子及理想弹性介质等物理模型.

综上所述:选择合适的参考系,以方便确定物体的运动性质;建立恰当的坐标系,以定量地描述物体的运动;提出较准确的物理模型,以确定所提问题最基本的运动规律.

1.2 位置矢量 位移 速度 加速度

1.2.1 位置矢量

为了表示运动质点的位置,首先应该选参考系,然后在参考系上选定坐标系的原点和坐标轴,参看图1.1.质点 P 在直角坐标系中的位置可由 P 所在点的三个坐标 x 、 y 、 z 来确定,或者用从原点 O 到



物理中的模型化

P 点的有向线段 $\overrightarrow{OP} = \mathbf{r}$ 来表示, 矢量 $\mathbf{r}$ 叫作位置矢量(简称位矢, 又称矢径). 相应地, 坐标 x, y, z 也就是位矢 $\mathbf{r}$ 在坐标轴上的三个分量.

在直角坐标系中, 位矢 $\mathbf{r}$ 可以表示成

$$\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1.1)$$

式中 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别表示沿 x, y, z 三轴正方向的单位矢量. 位矢 $\mathbf{r}$ 的大小为

$$|\mathbf{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.2)$$

位矢的方向余弦为

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

质点的运动是质点的空间位置随时间变化的过程. 这时质点的坐标 x, y, z 和位矢 $\mathbf{r}$ 都是时间 t 的函数. 表示运动过程的函数式称为运动方程, 可以写作

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

或

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.3b)$$

知道了运动方程, 就能确定任一时刻质点的位置, 从而确定质点的运动. 力学的主要任务之一, 正是根据各种问题的具体条件, 求解质点的运动方程.

质点在空间的运动路径称为轨道. 质点的运动轨道为直线时, 称为直线运动. 质点的运动轨道为曲线时, 称为曲线运动. 从式(1.3a)中消去 t 即可得到轨道方程. 式(1.3a)就是轨道的参数方程.

轨道方程和运动方程最明显的区别, 就在于轨道方程不是时间 t 的显函数. 例如, 已知某质点的运动方程为

$$x = 3\sin \frac{\pi}{6}t, \quad y = 3\cos \frac{\pi}{6}t, \quad z = 0$$

式中 t 以 s 计, x, y, z 以 m 计. 从 x, y 两式中消去 t 后, 得轨道方程为

$$x^2 + y^2 = 9, \quad z = 0$$

其表明质点是在 $z = 0$ 的平面内, 作以原点为圆心, 半径为 3 m 的圆周运动.

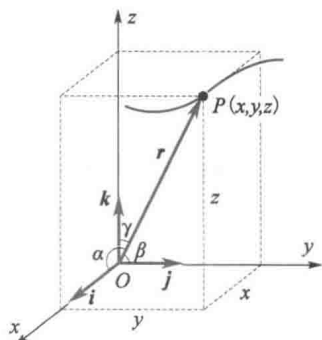
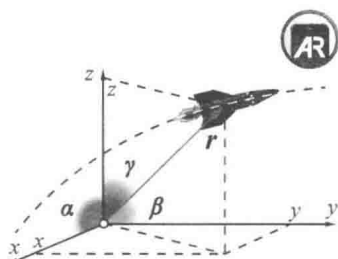


图 1.1 直角坐标系下的位矢



质点运动的描述

1.2.2 位移

如图 1.2 所示, 设质点沿曲线轨道 $\widehat{AB}$ 运动, 在 t 时刻, 质点在 A 处, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 质点运动到 B 处, A, B 两点的位矢分别由 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 表示, 质点在 Δt 时间间隔内位矢的增量

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1 \quad (1.4)$$

称之为位移, 它是描述物体位置变化大小和方向的物理量, 在图上就是由起始位置 A 指向终止位置 B 的一个矢量. 位移是矢量, 它的运算遵守矢量加法的平行四边形法则(或三角形法则).

如图 1.3 所示, 位移的大小只能记作 $|\Delta \mathbf{r}|$, 不能记作 Δr . Δr 通



位移和路程的计算及理解

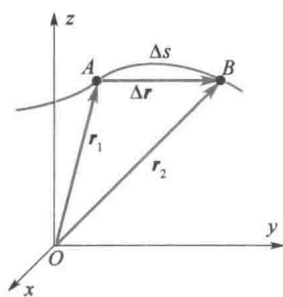


图 1.2 位移

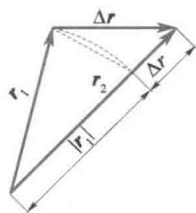


图 1.3 位移的大小

常表示位矢大小的改变, 即 $\Delta r = |r_2| - |r_1|$, 而 $|\Delta r|$ 则是位矢增量的模(即位移的大小), 而且在通常情况下 $|\Delta r| \neq \Delta r$.

必须注意, 位移表示物体位置的改变, 并非质点所经历的路程. 例如, 在图 1.2 中, 位移是有向线段 $\overrightarrow{AB}$, 它的量值 $|\Delta r|$ 为割线 AB 的长度. 路程是标量, 即曲线 $\widehat{AB}$ 的长度, 通常记作 Δs . 一般来说, $|\Delta r| \neq \Delta s$. 显然, 只有在 Δt 趋近于零时, 才有 $|dr| = ds$. 应当指出, 即使在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $|dr| = dr$ 这个等式也不成立.

在直角坐标系中, 位移的表达式为

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{r} &= (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} \\ &= \Delta x \mathbf{i} + \Delta y \mathbf{j} + \Delta z \mathbf{k}\end{aligned}\quad (1.5)$$

位移的模为

$$|\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1.6)$$

位移和路程的单位均是长度的单位, 国际单位制(SI 制)中为 m.

1.2.3 速度

研究质点的运动, 不仅要知道质点的位移, 还必须知道在多长时间通过这段位移, 亦即要知道质点运动的快慢程度.

如图 1.2 所示, 在时刻 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内, 质点的位移为 $\Delta \mathbf{r}$, 那么 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值, 称为质点在 t 时刻附近 Δt 时间内的平均速度

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\overrightarrow{AB}}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1.7)$$

这就是说, 平均速度的方向与位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同, 平均速度的大小与在相应的时间 Δt 内每单位时间的位移大小相同.

显然, 用平均速度描述物体的运动是比较粗糙的. 因为在 Δt 时间内, 质点各个时刻的运动情况不一定相同, 质点的运动可以时快时慢, 方向也可以不断地改变, 平均速度不能反映质点运动的真实状态. 如果要精确地知道质点在某一时刻或某一位置的实际运动状态, 应使 Δt 尽量减小, 即 $\Delta t \rightarrow 0$, 用平均速度的极限值——瞬时速度(简称速度)来描述.

质点在某时刻或某位置的瞬时速度, 等于该时刻附近 Δt 趋近于零时平均速度的极限值, 数学表示式为

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.8)$$

可见速度等于位矢对时间的一阶导数.

速度的方向就是 Δt 趋近于零时, 平均速度 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 或位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向, 即沿质点所在处轨道的切线方向, 并指向质点前进的一方.

速度是矢量,具有大小和方向.描述质点运动时,也常采用一个叫作**速率**的物理量.速率是标量,等于质点在单位时间内所行经的路程,而不考虑质点运动的方向.如图1.2所示,在 Δt 时间内质点所行经的路程为曲线 $\widehat{AB}$.设曲线 $\widehat{AB}$ 的长度为 Δs ,那么 Δs 与 Δt 的比值就称为 t 时刻附近 Δt 时间内的平均速率,即

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1.9)$$

平均速率与平均速度不能等同看待.例如,在某一段时间内,质点环行了一个闭合路径,显然质点的位移等于零,平均速度也为零,而质点的平均速率则不等于零.

尽管如此,但在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限条件下,曲线 $\widehat{AB}$ 的长度 Δs 与直线 AB 的长度 $|\Delta \mathbf{r}|$ 相等,即在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, $ds = |d\mathbf{r}|$,所以瞬时速率

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{ds}{dt} = \left| \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right| = |\mathbf{v}| \quad (1.10)$$

即**瞬时速率就是瞬时速度的大小**.

在直角坐标系中,由式(1.1)可知,速度可表示成

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1.11)$$

式中 $v_x = \frac{dx}{dt}$, $v_y = \frac{dy}{dt}$, $v_z = \frac{dz}{dt}$ 叫作速度在 x 、 y 、 z 轴的分量.这时速度的模可以表示成

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1.12)$$

速度和速率在量值上都是长度与时间之比,国际单位制(SI)中为 m/s.

1.2.4 加速度

在力学中,位矢 $\mathbf{r}$ 和速度 $\mathbf{v}$ 都是描述物体机械运动的状态参量.即 $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{v}$ 已知,质点的力学运动状态就确定了.即将引入的加速度概念则是用来描述速度矢量随时间的变化率的物理量.

在变速运动中,物体的速度是随时间变化的.这个变化可以是运动快慢的变化,也可以是运动方向的变化,一般情况下速度的方向和大小都在变化.加速度就是描述质点的速度(大小和方向)随时间变化快慢的物理量.如图1.4所示, $\mathbf{v}_A$ 表示质点在时刻 t 、位置 A 处的速度, $\mathbf{v}_B$ 表示质点在时刻 $t + \Delta t$ 、位置 B 处的速度.从速度矢量图可以看出,在时间 Δt 内质点速度的增量为

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A$$

与平均速度的定义相类似,比值 $\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ 称为 t 时刻附近 Δt 时间内

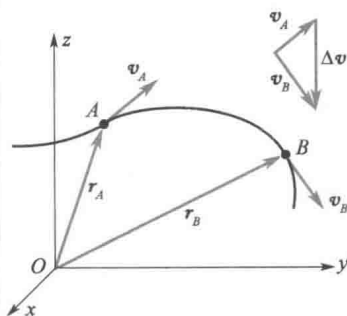


图 1.4 速度的增量

的平均加速度,即

$$\bar{a} = \frac{\mathbf{v}_B - \mathbf{v}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} \quad (1.13)$$

平均加速度只是反映在时间 Δt 内速度的平均变化率. 为了准确地描述质点在某一时刻 t (或某一位置处) 的速度变化率, 须引入瞬时加速度.

质点在某时刻或某位置处的瞬时加速度 (简称加速度) 等于该时刻附近 Δt 趋近于零时平均加速度的极限值, 其数学式为

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1.14)$$

可见, 加速度是速度对时间的一阶导数, 或位矢对时间的二阶导数.

在直角坐标系中, 加速度的表示式为

$$\mathbf{a} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2} \mathbf{i} + \frac{d^2 y}{dt^2} \mathbf{j} + \frac{d^2 z}{dt^2} \mathbf{k} = a_x \mathbf{i} + a_y \mathbf{j} + a_z \mathbf{k} \quad (1.15)$$

式中 $a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2}$, $a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}$, $a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2}$, 分别称为加速度在 x 、 y 、 z 轴的分量. 加速度的模为

$$a = |\mathbf{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1.16)$$

加速度的方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均加速度 $\frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$ 或速度增量的极限方向.

例 1.1

如图 1.5 所示, 一人用绳子拉着小车前进, 小车位于高出绳端 h 的平台上, 人的速率 v_0 不变, 求小车的速度和加速度大小.

解 小车沿直线运动, 以小车前进方向为 x 轴正方向, 以滑轮为坐标原点, 小车的坐标为 x , 人的坐标为 ξ , 由速度的定义, 小车和人的速度大小应为

$$v_{\text{车}} = \frac{dx}{dt}, \quad v_{\text{人}} = \frac{d\xi}{dt} = v_0$$

由于定滑轮不改变绳长, 所以小车坐标的变化率等于拉小车的绳长的变化率, 即

$$v_{\text{车}} = \frac{dx}{dt} = \frac{dl}{dt}$$

又由图 1.5 可以看出有 $l^2 = \xi^2 + h^2$, 两边对 t 求导得

$$2l \frac{dl}{dt} = 2\xi \frac{d\xi}{dt}$$

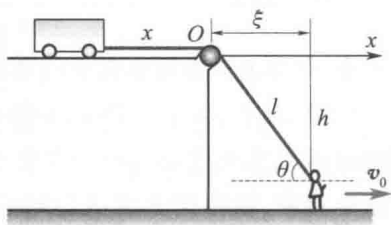


图 1.5

$$\text{或 } v_{\text{车}} = \frac{v_{\text{人}} \xi}{l} = v_{\text{人}} \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 + h^2}} = \frac{v_0 \xi}{\sqrt{\xi^2 + h^2}}$$

同理可得小车的加速度大小为

$$a = \frac{dv_{\text{车}}}{dt} = \frac{v_0^2 h^2}{(\xi^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$$