



普通高等教育农业农村部“十三五”规划教材
全国高等农林院校“十三五”规划教材

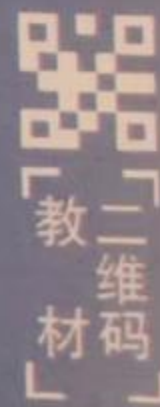
大学物理学

DAXUE WULIXUE

第二版



潘建斌 章国顺 曹春斌 主编



首批全国优秀出版社 |  中国农业出版社

内 容 简 介

本书是参照教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2017 年制定的《理工科类大学物理课程教学基本要求》，结合编者多年教学实践经验编写而成的。书中涵盖了基本要求中所有的核心内容，并选取了一定数量的扩展内容，加强了近代物理的内容。主要包括：力学、振动和波动、气体动理论和热力学、电磁学、几何光学和波动光学、相对论、量子物理等。

本书体系合理，分量适中，适应面宽。在编写过程中，参考了大量最新资料，吸取了很多物理应用最新成果，体现出高视点、新创意。为适应我国“慕课”建设发展形势，响应“全国教育大会”精神，配合新工科、新医科、新农科、新文科建设需要，本书进行了数字化提升，充分应用现代信息技术，实现教材立体化。扫描书中二维码，利用手机即可实现视频学习，声光图文并茂，充分利用碎片时间，最大限度提高学习效率。

本书可作为高等农林院校理工科各专业的大学物理课程教材，也可作为其他各专业教学参考书。

—— 第二版编写人员 ——

主 编 潘建斌 章国顺 曹春斌

副主编 李 辉 叶 剑 李 聪

编 者 (按姓名笔画排序)

叶 剑 刘小标 李 辉 李 聪

周宗立 曹春斌 章国顺 潘建斌

——❧ 第一版编写人员 ❧——

主 编 潘建斌 章国顺

副主编 李小毛 李清玉 李 辉 叶 剑

编 者 (按姓名笔画排序)

叶 剑 刘风勤 李 辉 李 聪

李小毛 李清玉 陆 丹 周宗立

章国顺 潘建斌

FOREWORD | 第二版前言

本书第一版自 2013 年出版至今，已有 6 年多了。在这 6 年多的时间里，我国高等教育发生了巨大变化。

为主动应对新一轮科技革命与产业变革，支撑创新驱动发展、“中国制造 2025”等一系列国家战略，教育部积极推进新工科建设，2017 年先后形成了“复旦共识”、“天大行动”和“北京指南”，并发布了《教育部高等教育司关于开展新工科研究与实践的通知》和《教育部办公厅关于推荐新工科研究与实践项目的通知》，全力探索形成领跑全球工程教育的中国模式、中国经验，助力高等教育强国建设。

2018 年 1 月 15 日，首批“国家精品在线开放课程”发布。“中国特色、世界水平”为我国慕课建设确立了发展战略。目前，我国慕课课程总量已居世界第一，实实在在推动了教学理念、方法、技术、方式、模式的变革，让人人可学、处处可学、时时可学的终身学习梦想得以实现。

2018 年 1 月 30 日，教育部发布《普通高等学校本科专业类教学质量国家标准》。自我国加入《华盛顿协定》之后，全面推进工科教育与世界接轨，全国多数高校目前正在进行工程认证，为教学水平持续提高提供有力保证。

2018 年 9 月 10 日，全国教育大会在北京召开。中共中央总书记、国家主席、中央军委主席习近平出席会议并发表重要讲话。“教师是人类灵魂的工程师，是人类文明的传承者，承载着传播知识、传播思想、传播真理，塑造灵魂、塑造生命、塑造新人的时代重任。”

2019 年 4 月，教育部等 13 个部门在天津联合召开“六卓越一拔尖”计划 2.0 启动大会，全面发展新工科、新医科、新农科、新文科，推动全国高校掀起一场“质量革命”，形成覆盖高等教育全领域的“质量中国”品牌。

2019 年 6 月，《安吉共识——中国新农科建设宣言》发布，对新农科建设做出了总体部署。第一部曲，发布《安吉共识》，为新农科建设画好了“施工图”；第二部曲，在国家粮仓东北地区开启“北大仓行动”，为新农科建设打好“基础桩”；第三部曲，推出“北京指南”，启动一批新农科建设研究与实践项目，发出新农科建设的“开工令”。

2019 年 10 月，教育部发布了《教育部关于深化本科教育教学改革全面提高

人才培养质量的意见》，提出 22 条硬举措，是落实学生忙起来、教师强起来、管理严起来、效果实起来的系统部署，也是全面振兴本科教育的迫切要求。

为适应形势发展，响应国家战略及教育部指示精神，本书进行了数字化提升，充分应用现代信息技术，实现教材立体化。扫描书中二维码，利用手机即可实现视频学习，声光图文并茂，充分利用碎片时间，最大限度提高学习效率。视频内容可实时更新，不再受出版周期限制。

本书由潘建斌、章国顺、曹春斌主编。李辉（河南农业大学）编写第 1、2、3、4 章，曹春斌（安徽农业大学）编写第 5、6 章，刘小标（河南农业大学）编写第 7、8 章，叶剑（安徽农业大学）编写第 9、12 章，周宗立（安徽农业大学）编写第 10、13 章，章国顺（安徽农业大学）编写第 11 章，李聪（河南农业大学）编写第 14、15 章，潘建斌（河南农业大学）编写第 16、17 章。全书由潘建斌、章国顺统稿和定稿。

希望本书的出版能对“金课”“一流本科课程”“慕课”，以及新农科建设起到促进作用。

编 者

2019 年 10 月

FOREWORD | 第一版前言

物理学是研究物质的结构、性质、相互作用、运动规律及它们的各种实际应用的科学。物理学是自然科学的基础，它的基本概念、方法和知识已被广泛地应用于自然科学的很多领域。物理学是人类认识自然、改造自然和推动社会进步的动力和源泉，它的理论及其所创立的世界观和方法论在培养学生的科学素质等方面起着极为重要的作用。因此，大学物理是高等院校中一门不可替代的基础课。向各专业的大学生介绍现代物理基础知识，特别是物理学的思想方法、物理学前沿及物理学在工程技术中的应用，将有利于开阔眼界、活跃思维、启迪心智，使学生的创新精神等科学素养得到大幅度提高。

为适应基础教育和素质教育的需要，根据教育部颁布的“高等工业学校大学物理课程教学基本要求”，编者结合自己多年的教学实践经验和体会，在汲取众多国内外优秀教材优点的基础上编写成了这本教材。在编写过程中力求做到：①紧扣教学大纲，物理学系统完整，基本规律精炼；②压缩经典内容，密切联系工科专业大学物理教学实际，增加现代物理知识应用；③取材适当，物理图像鲜明，选题典型，同时淡化了复杂的数学运算，突出了物理概念的重要性；④内容由浅入深，重点、难点突出，语言通俗易懂，特别是用普通物理的语言讲述了近代物理的内容，适合初学者阅读；⑤阅读材料的选择兼顾了物理知识的应用、物理学发展史及研究方法的介绍，也反映了现代科技发展的前沿动态，编入了一些物理及其交叉学科的新技术、新应用，以便在教学过程中培养学生的创新意识和知识应用能力。

本书由河南农业大学、安徽农业大学、江西农业大学共同编写。参加本书编写工作的教师多年来一直从事大学物理教学工作，对大学物理教学积累了丰富的经验并有许多独到的见解，这些经验和体会已被融入教材之中。为了节约篇幅，阅读材料穿插在正文中，用五号仿宋体编排，以示区别。书中带“*”号的内容为选学内容。

本书由潘建斌、章国顺主编。李辉（河南农业大学）编写第1、2、3、4章，陆丹（江西农业大学）编写第5、6章，李小毛（江西农业大学）编写第7、8章，叶剑（安徽农业大学）编写第9、12章，周宗立（安徽农业大学）编写第10、13章，章国顺（安徽农业大学）编写第11章，李聪（河南农业大学）编写

第 14、15 章，潘建斌（河南农业大学）、刘风勤（浙江农林大学天目学院）编写第 16 章，潘建斌（河南农业大学）、李清玉（西南林业大学）编写第 17 章。全书最后由潘建斌、章国顺统稿和定稿。

在编写过程中，我们借鉴和吸纳了许多相关教材和参考文献的内容，在此，我们对这些教材和文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，难免有疏漏和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月

CONTENTS | 目 录

第二版前言

第一版前言

第 1 章 质点运动学	1
1.1 质点运动的描述	1
1.2 圆周运动	8
1.3 相对运动	11
思考题	12
习题	13
第 2 章 牛顿运动定律	15
2.1 牛顿运动定律	15
2.2 常见的力	17
2.3 牛顿运动定律的应用	18
思考题	20
习题	21
第 3 章 动量守恒定律 能量守恒定律 角动量守恒定律	23
3.1 动量定理 动量守恒定律	23
3.2 功 能 机械能守恒定律	27
3.3 角动量 角动量守恒定律	34
思考题	37
习题	38
第 4 章 刚体力学基础	40
4.1 刚体及刚体运动	40
4.2 质点系的角动量定理	42
4.3 刚体的转动定律	46
4.4 刚体定轴转动的功和动能定理	48
4.5 刚体定轴转动的角动量守恒定律	49
思考题	52
习题	53

第 5 章 机械振动	56
5.1 简谐振动	56
5.2 一维简谐振动的合成 拍现象	63
5.3 阻尼振动、受迫振动和共振	69
思考题	72
习题	73
第 6 章 机械波	75
6.1 机械波的产生和传播	75
6.2 平面简谐波的波动方程	79
6.3 波的能量 能流密度	84
6.4 惠更斯原理 波的衍射	86
6.5 波的叠加 波的干涉	88
6.6 多普勒效应	92
* 6.7 声波	94
思考题	95
习题	95
第 7 章 气体动理论	98
7.1 平衡态 理想气体状态方程 热力学第零定律	98
7.2 物质的微观模型 统计规律性	100
7.3 理想气体的压强公式	103
7.4 理想气体分子的平均平动动能与温度的关系	105
7.5 能量按自由度均分定理 理想气体的内能	105
7.6 麦克斯韦气体分子速率分布律	109
7.7 气体分子平均碰撞次数和平均自由程	111
思考题	113
习题	114
第 8 章 热力学基础	116
8.1 准静态过程 功 热量	116
8.2 内能 热力学第一定律	118
8.3 理想气体的等体过程和等压过程 摩尔热容	120
8.4 理想气体的等温过程和绝热过程	123
8.5 循环过程 卡诺循环	126
8.6 热力学第二定律 卡诺定理	131
8.7 熵 熵增加原理	134
思考题	137

习题	138
第 9 章 静电场	142
9.1 库仑定律	142
9.2 电场强度	144
9.3 高斯定理	152
9.4 静电场的环路定理 电势	160
9.5 电场强度与电势梯度	167
思考题	168
习题	169
第 10 章 静电场中的导体和电介质	172
10.1 导体的静电平衡	172
10.2 导体壳和静电屏蔽	174
10.3 有导体存在的静电场场强与电势的计算	175
10.4 静电场中的电介质	177
10.5 电位移 电介质中的高斯定理	179
10.6 电容	181
10.7 静电场的能量	186
思考题	187
习题	188
第 11 章 恒定电流的磁场	191
11.1 恒定电流 电流密度	191
11.2 电源 电动势	193
11.3 磁感应强度	194
11.4 毕奥-萨伐尔定律及其应用	199
11.5 磁通量 磁场的高斯定理	202
11.6 安培环路定理	204
11.7 磁场对载流导线的作用	208
11.8 霍尔效应	212
思考题	213
习题	214
第 12 章 磁场中的磁介质	217
12.1 磁介质 磁化强度	217
12.2 磁场中的安培环路定理 磁场强度	219
12.3 铁磁质	221
思考题	224

习题	224
第 13 章 电磁感应 电磁场	226
13.1 法拉第电磁感应定律	226
13.2 动生电动势与感生电动势	231
13.3 自感与互感	236
13.4 磁场的能量	240
13.5 位移电流 麦克斯韦方程组的积分形式	242
13.6 电磁场的边值关系	245
思考题	248
习题	248
第 14 章 几何光学	253
14.1 几何光学的基本定律	253
14.2 平面反射和平面折射成像	254
14.3 球面反射和球面折射成像	255
14.4 薄透镜成像	258
14.5 人眼及常用几何光学仪器	259
思考题	262
习题	263
第 15 章 波动光学	264
15.1 光学的基本概念	264
15.2 分波前法干涉	269
15.3 分振幅法干涉	272
15.4 光的衍射	281
15.5 光的偏振	294
思考题	301
习题	301
第 16 章 狭义相对论	305
16.1 经典力学的基本困难	305
16.2 狭义相对论基本原理 洛伦兹变换	309
16.3 狭义相对论时空观	312
16.4 相对论质量和动量	315
16.5 相对论能量 质能关系	316
* 16.6 广义相对论简介	318
思考题	319
习题	319
第 17 章 量子物理基础	321
17.1 黑体辐射 普朗克量子假说	321
17.2 光电效应 爱因斯坦光子理论	324

17.3 康普顿效应	325
17.4 德布罗意假设 电子衍射	327
17.5 不确定关系	329
17.6 薛定谔方程	331
17.7 波函数的统计解释	332
17.8 一维势阱.....	334
17.9 一维方势垒 隧道效应.....	336
17.10 氢原子光谱 玻尔理论	338
17.11 电子轨道角动量	339
17.12 电子自旋	340
17.13 泡利不相容原理 原子的壳层结构	341
思考题	342
习题	342
参考文献	344



质点运动学

自然界中一切物质都处在永恒不息的运动中，运动是物质的基本属性，这种运动的普遍性和永恒性称为运动的绝对性。而运动的形式又是多种多样、千变万化的，其中最简单、最普遍的运动形式是物体之间（或同一物体的各部分之间）相对位置随时间的变化，即**机械运动**（mechanical motion）。例如天体的运行、汽车的行驶、机器的转动等都是机械运动。研究物体机械运动的科学称为**力学**（mechanics）。

经典力学通常分为**运动学**（kinematics）、**动力学**（dynamics）和**静力学**（statics）。运动学只描述物体的运动，不涉及运动发生和改变的原因；动力学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。

我们主要研究运动学和动力学，包括质点运动学、牛顿定律、动量守恒定律、能量守恒定律、角动量守恒定律、刚体的转动规律。

经典力学中对物体运动的描述，称为**运动学**（kinematics）。本章为质点运动学。质点运动学研究质点机械运动的描述方法，而不追究运动发生的原因，着重分析描述运动的三个物理量——位矢、速度和加速度的意义以及它们的相互关系。

1.1 质点运动的描述

1.1.1 时间、空间 国际单位制和量纲

时间（time）和**空间**（space）是客观存在的。时间反映物质运动过程的持续性和顺序性，空间反映了物质存在的广延性。时间和空间是运动着的物质的存在形式，没有脱离物质的时间和空间，也没有不在空间和时间中运动的物质，时间和空间彼此不是独立的，物质的运动是时间和空间联系的纽带。

时间和空间是可量度的，通常选择某种物理存在作为量度的参考或标准，建立相应的量度单位，又由于各物理量之间都由一定的物理规律联系着，所以它们的单位也就有一定的联系，因此，在确定各物理量的单位时，总是根据它们之间的相互联系选定少数几个物理量作为基本量，并人为地规定它们的单位。这样的单位叫**基本单位**，其他的物理量都可以根据一定的关系从基本量导出，这些物理量叫**导出量**。导出量的单位都是基本单位的组合，叫导出单位。基本单位和由它们组成的导出单位构成一套单位制。由于基本单位的选择不同，就组成了不同的单位制。1960年第11届国际计量大会通过并建议世界各国采用的单位制叫**国际单位制**（international system of units），简称为SI。1974年的第14届国际计量大会又决定增加将物质的量的单位摩尔（mol）作为基本单位。它的7个基本量的基本单位为：米（m）、千克（kg）、秒（s）、安培（A）、开尔文（K）、摩尔（mol）、坎德拉（cd），力学



质点运动的描述

中仅涉及米、千克、秒三个基本单位。

“秒”是国际单位制的时间单位，以前曾规定平均太阳日的 $1/86\,400$ 为 1 s 。为了提高时间测量的精度，现在国际单位制的 1 s 的定义是：铯的一种同位素 (^{133}Cs) 原子发出的一个特征频率光波周期的 $9\,192\,631\,770$ 倍。

“米”是国际单位制长度单位，以前把保存在巴黎国际度量衡局中的“米原器”上两刻线之间的距离规定为 1 m 。为了提高长度的测量精度并保证标准的稳定性和易于复制，后来规定氪的一种同位素 (^{86}Kr) 原子发出的一个特征频率的光的波长的 $1\,650\,763.73$ 倍为 1 m 。由于激光的出现使长度测量的精度进一步提高了，1983 年起国际上又采用了“最后”的规定： 1 m 是光在真空中 ($1/299\,792\,458$)s 内所经过的距离。

“千克”是国际单位制质量单位，现在仍用“千克标准原器”的质量来规定。千克标准原器是用铂铱合金制造的一个金属圆柱体，保存在巴黎度量衡局的地窖中。它的质量规定为 1 kg 。为了比较方便起见，许多国家都有它的精确的复制品。

在物理学中，导出量和基本量之间的关系，可以用量纲 (dimension) 来表示。用 L 、 M 和 T 分别表示长度、质量和时间三个基本量的量纲，其他力学量 Q 的量纲与基本量量纲之间的关系，可表示为

$$\dim Q = L^p M^q T^r$$

称为量纲式。例如速度的量纲是 LT^{-1} ，角速度的量纲是 T^{-1} ，加速度的量纲是 LT^{-2} ，角加速度的量纲是 T^{-2} ，力的量纲是 MLT^{-2} ，等等。量纲式和量纲在物理学中很有用处，只有量纲式相同的量才能相加、相减或用等式相连接，这一法则称为量纲法则。我们可以利用量纲法则进行单位换算；检验新建方程，检验公式的正确性及完整性；还可以为探索复杂问题的物理规律提供思路和线索。量纲分析法在科学研究中具有重要作用。

1.1.2 质点 参考系 坐标系

1. 质点 在研究物体的机械运动时，如果问题是确定空间位置。当物体本身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（地球的平均轨道半径是 $1.5 \times 10^{11}\text{ m}$ ，而地球的半径约为 $6.4 \times 10^6\text{ m}$ ），或者当物体在平动（物体上任意两点的连线，在其运动过程中都始终保持其方向不变）时，如高速公路上行驶的汽车等，物体上所有点的运动情况（轨迹、速度、加速度）完全相同。这时就可以不考虑物体的大小和形状，而把物体的运动视为一个具有一定质量的点的运动代表，这种不计物体的大小和形状，而且有物体全部质量的点称为质点 (mass point, particle)。应强调指出，质点是一个理想化的模型，是对实际物体的一种科学抽象，通过这种抽象，可以使问题大大简化，而不影响所得到的主要结果。在实际问题中，能否把物体看成质点，要看所研究的问题的性质和具体情况。

2. 参考系 自然界中一切物质都是不停运动的，没有绝对静止的物体。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 (reference frame)。

同一物体的运动，由于我们所选参考系不同，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做直线运动，相对于地面却是做抛物线运动，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。例如,研究地球上物体的运动,通常情况下以地球为参考系。但是,描述星际火箭的运动,开始发射时可选地球为参考系,当它进入绕太阳运行的轨道时,则应以太阳为参考系才便于描述。

3. 坐标系 在参考系选定后,为了定量地描述物体的运动,必须在参考系上建立适当的坐标系 (coordinate system)。在力学中常用的有直角坐标系 (x, y, z) 、平面极坐标系 (r, φ) 、柱坐标系 (r, φ, z) 、球坐标系 (r, θ, φ) 和自然坐标系等。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。

1.1.3 位置矢量 运动方程 位移

1. 位置矢量 在选定的坐标系里,用一个由原点指向质点的矢量表示质点某一时刻的空间位置,该矢量称为**位置矢量** (position vector),简称位矢。如图 1-1 所示,设质点在某一时刻位于 P 点,有向线段 OP 即为质点该时刻的位矢,以 $\mathbf{r}$ 表示。它在 Ox 轴、 Oy 轴、 Oz 轴上的投影 (即质点的坐标) 分别为 x, y, z 。那么,位矢 $\mathbf{r}$ 的表达式为

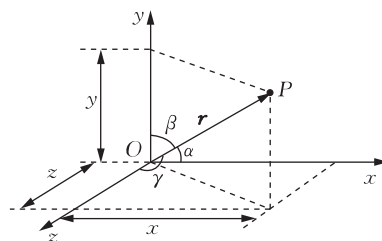


图 1-1 相对坐标系

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

位矢的大小为

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

其方向由 $\mathbf{r}$ 和 Ox 轴、 Oy 轴、 Oz 轴之间的夹角 α, β, γ 来确定,三个方向余弦为

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

位矢的单位为米 (m)。

2. 运动方程 当质点运动时,位置不断变化,因此位矢是时间的函数,即

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

这个函数描述了质点空间位置随时间变化的过程,称之为**运动学方程** (kinematical equation)。

在直角坐标系中,运动方程可用分量表示为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1-3)$$

从中消去变量 t 便得到了质点运动的轨迹方程。质点运动的轨迹若为直线称为直线运动,若为曲线则称为曲线运动。

知道了运动方程,就能确定任时刻质点的位置,进而确定质点的运动。所以运动学的主要任务之一就是根据问题的具体条件,建立并求解质点的运动方程。

3. 位移 如图 1-2 所示,设时刻 t 质点经过 A 处,位矢为 $\mathbf{r}_A$,时刻 $t + \Delta t$ 质点运动到 B 处,位矢为 $\mathbf{r}_B$ 。在 Δt 时间内位矢的增量 $\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r}$ 称为位移矢量,简称**位移** (displacement)。位移是矢量,其大小为有向线段 $\Delta \mathbf{r}$ 的长度,其方向由始点指向终点。

若质点在平面直角坐标系 Oxy 中运动, 其位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j}$$

若质点在三维空间运动, 其在直角坐标系 $Oxyz$ 中的位移为

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = (x_B - x_A)\mathbf{i} + (y_B - y_A)\mathbf{j} + (z_B - z_A)\mathbf{k} \quad (1-4)$$

必须指出, 位移和路程不同。位移是矢量, 是质点在一段时间内的位置变化, 而不是质点所经历的实际路

程。路程为标量, 是指该段时间内质点实际运动轨迹的长度, 用 Δs 表示 (如图 1-2 中的弧长)。当质点运动轨迹为一闭合路径时, 其位移为零, 而路程则不为零。所以, 质点的位移和路程是完全不同的概念。只有在 $\Delta t \rightarrow 0$ 的极限情况下, 才可认为位移的大小与路程相等, 即 $|\mathrm{d}\mathbf{r}| = \mathrm{d}s$ 。

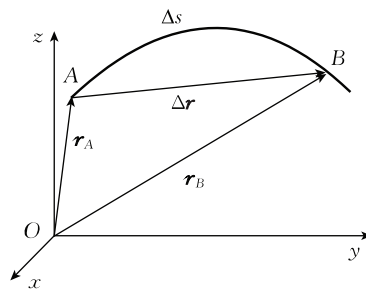


图 1-2 位移矢量

1.1.4 速度

速度是描述质点运动快慢和方向的物理量。在力学中, 只有当质点的位矢和速度同时被确定时, 其运动状态才能确定, 所以, 位矢和速度是描述质点运动状态的两个物理量。

如图 1-3 所示, 质点在平面上做曲线运动, t 时刻质点经过 A 处, 位矢为 $\mathbf{r}_A$, 时刻 $t + \Delta t$ 质点运动到 B 处, 位矢为 $\mathbf{r}_B$, 在 Δt 时间内质点的位移为 $\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A = \Delta \mathbf{r}$ 。将质点的位移与完成位移所需的时间的比值称为质点在该时间内的平均速度 (average velocity), 用 $\bar{\mathbf{v}}$ 表示, 即

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{r}_B - \mathbf{r}_A}{\Delta t} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} \quad (1-5)$$

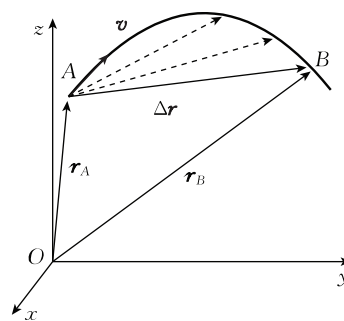


图 1-3 速度矢量

平均速度是矢量, 方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 相同。

平均速度只能反映一段时间内质点位置的平均变化情况, 而不能反映质点在某一时刻 (或某一位置) 的瞬时变化情况。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 平均速度的极限值才能精确地反映质点在某一时刻 (或某一位置) 的运动快慢及方向。这一极限值称为质点在该时刻的瞬时速度 (instantaneous velocity), 简称速度 (velocity), 以 $\mathbf{v}$ 表示, 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} \quad (1-6)$$

速度是矢量, 方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的极限方向一致。所以质点做曲线运动时, 某一点的速度方向为运动轨迹上该点的切线方向。

质点在三维直角坐标系中的速度为

$$\mathbf{v} = \frac{\mathrm{d}\mathbf{r}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\mathbf{i} + \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}\mathbf{j} + \frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\mathbf{k} = v_x\mathbf{i} + v_y\mathbf{j} + v_z\mathbf{k} \quad (1-7)$$

式中 v_x , v_y , v_z 是速度在 Ox 轴, Oy 轴, Oz 轴上的分量, 称为速度分量。

瞬时速度的数值大小叫瞬时速率 (instantaneous speed), 简称速率 (speed)。

$$v = |\mathbf{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (1-8)$$

在国际单位制中，速度和速率的单位都是米·秒⁻¹（m·s⁻¹）。表 1-1 给出了一些实际的速率数值，可以对速度的大小有个直观的了解。

表 1-1 一些物体运动的速率

名 称	速率/(m·s ⁻¹)
光在真空中的速率	3.0×10^8
北京正负电子对撞机中电子的速率	99.999 998%光速
类星体的运行（最快的）速率	2.7×10^8
太阳在银河系中绕银河系中心的运动速率	3.0×10^5
地球公转的速率	3.0×10^4
人造地球卫星的速率	7.9×10^3
现代歼击机的速率	约 9×10^2
步枪子弹离开枪口时速率	约 7×10^2
由于地球自转在赤道上一点的速率	4.6×10^2
空气分子热运动的平均速率	4.5×10^2
空气中声速（0℃）	3.3×10^2
机动赛车（最大）速率	1.0×10^2
猎豹（最快动物）	2.8×10
人百米跑步（最快时）	1.0×10
蜗牛的爬行速率	约 1.5×10^{-3}
大陆板块移动	约 10^{-9}

1.1.5 加速度

加速度是描述质点速度随时间变化快慢的物理量。如图 1-4 所示， t 时刻质点位于 P ，速度为 $\boldsymbol{v}(t)$ ； $t + \Delta t$ 时刻质点运动到 Q ，速度为 $\boldsymbol{v}(t + \Delta t)$ 。在 Δt 时间间隔内速度增量为 $\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}(t + \Delta t) - \boldsymbol{v}(t)$ 。则 Δt 时间内，质点的平均加速度（average acceleration）为

$$\bar{\boldsymbol{a}} = \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{\boldsymbol{v}(t + \Delta t) - \boldsymbol{v}(t)}{\Delta t} \quad (1-9)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，平均加速度的极限就是质点在 t 时刻的瞬时加速度，简称**加速度**（acceleration），即

$$\boldsymbol{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \boldsymbol{v}}{\Delta t} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d^2 \boldsymbol{r}}{dt^2} \quad (1-10)$$

在三维直角坐标系中

$$\boldsymbol{a} = a_x \boldsymbol{i} + a_y \boldsymbol{j} + a_z \boldsymbol{k} \quad (1-11)$$

其中

$$\begin{cases} a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2 x}{dt^2} \\ a_y = \frac{dv_y}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} \\ a_z = \frac{dv_z}{dt} = \frac{d^2 z}{dt^2} \end{cases} \quad (1-12)$$

加速度 $\boldsymbol{a}$ 的大小为

$$a = |\boldsymbol{a}| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-13)$$

加速度 $\boldsymbol{a}$ 的方向是 $\Delta \boldsymbol{v}$ 的极限方向，一般与 $\boldsymbol{v}$ 的方向不同。

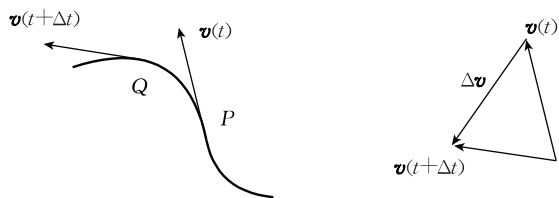


图 1-4 曲线运动的加速度

加速度的国际单位制单位是米·秒⁻² (m·s⁻²)。表 1-2 给出了一些实际的加速度数值。

表 1-2 一些物体运动的加速度

名 称	加速度/(m·s ⁻²)
超速离心机中粒子的加速度	3×10^6
步枪子弹在枪膛中的加速度	约 5×10^5
使人发晕的加速度	约 7×10
地球表面的重力加速度	9.8
汽车制动的加速度	约 8
月球表面的重力加速度	1.7
由于地球自转在赤道上一点的加速度	3.4×10^{-2}
地球公转的加速度	6×10^{-3}
太阳绕银河系中心转动的加速度	约 3×10^{-10}

从位置矢量式 (1-1)、位移矢量式 (1-4)、速度矢量式 (1-7)、加速度矢量式 (1-11) 可以看出,任一曲线运动都可以看成沿 x , y , z 三个方向上各自独立的直线运动的叠加;反之,一个复杂的运动也可以分解成几个简单的直线运动来处理,这就是**运动叠加原理** (superposition principle of motions) 或**运动独立性原理**。

在质点运动学中,主要有以下两种类型的运动学问题:

(1) 已知质点的运动方程,求质点的速度和加速度。这类问题只需按公式

$$\boldsymbol{v} = \frac{d\boldsymbol{r}}{dt}$$

和

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

将已知的位矢函数 $\boldsymbol{r}(t)$ 对时间 t 求导即可求解,这就是求导法。

(2) 已知质点的速度 (或加速度) 及初始条件 (即 $t=0$ 时的初位置、初速度),求质点的运动方程。这类问题需用积分法来解决。下面将用具体实例来说明以上两类问题的求解方法。

例 1-1 已知质点在 xy 平面内运动,运动方程为 $x=2t$, $y=18-2t^2$, 其中 x , y 以米计, t 以秒计。求: (1) 质点的轨迹方程; (2) 质点运动方程的矢量形式 (位矢); (3) 质点在前 2 s 的平均速度; (4) 质点在 2 s 时的速度和加速度。

解 (1) 将质点的运动方程 $x=2t$, $y=18-2t^2$ 联立消去 t , 可得到其轨迹方程为

$$y=18-\frac{1}{2}x^2$$

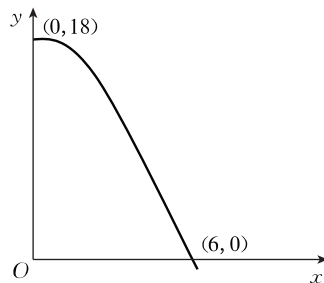


图 1-5 例 1-1 图

由此可知,质点的轨迹曲线为一抛物线,如图 1-5 所示。

(2) 质点的位置矢量为

$$\mathbf{r} = 2t\mathbf{i} + (18 - 2t^2)\mathbf{j}$$

(3) 质点在前 2 s 内的平均速度为

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\mathbf{r}(2) - \mathbf{r}(0)}{2} = 2\mathbf{i} - 4\mathbf{j}$$

(4) 质点在 2 s 时的速度为

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = 2\mathbf{i} - 4t\mathbf{j} = 2\mathbf{i} - 8\mathbf{j}$$

其大小 (速率) 为 $v = \sqrt{2^2 + 8^2} = \sqrt{68} = 2\sqrt{17} \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ 。

质点在 2 s 时的加速度为

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -4\mathbf{j}$$

加速度的大小为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 加速度方向为 y 轴的反方向。

例 1-2 一个质点沿 x 轴以加速度 a 运动。当 $t=0$ 时, $v=v_0$, $x=x_0$ 。求: (1) $a=C$ (常量) 时, 质点在任意时刻的速度和运动方程; (2) $a=kt$ (k 为常量) 时, 质点的速度和运动方程。

解 由 $a = \frac{dv}{dt}$ 得

$$dv = a dt$$

做定积分

$$\int_{v_0}^v dv = \int_0^t a dt$$

质点的速度为

$$v = v_0 + \int_0^t a dt \quad (1)$$

由 $v = \frac{dx}{dt}$ 得

$$dx = (v_0 + at) dt$$

做定积分

$$\int_{x_0}^x dx = \int_0^t (v_0 + at) dt$$

质点的运动方程为

$$x = x_0 + \int_0^t (v_0 + at) dt \quad (2)$$

(1) 当 $a=C$, 质点做匀变速直线运动。

对式 (1)、(2) 积分可得

$$v = v_0 + at \quad (3)$$

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (4)$$

由式 (3)、(4) 消去 t 可得

$$v^2 - v_0^2 = 2a(x - x_0) \quad (5)$$

式 (3)、(4)、(5) 便是我们早就熟悉的匀变速直线运动公式。

(2) 当 $a=kt$, 质点做变加速直线运动。

对式 (1)、(2) 积分可得

$$v=v_0+\frac{1}{2}kt^2$$

$$x=x_0+v_0t+\frac{1}{6}kt^3$$



圆周运动

1.2 圆周运动

运动轨迹是一个圆的质点运动称为圆周运动, 圆周运动是曲线运动的一个重要特例, 对其描述可以采用一套特殊的方法。当物体绕定轴转动时, 其上各点都做圆周运动, 故研究圆周运动是研究物体转动的基础。

1.2.1 角位移与角速度

圆周运动通过适当的坐标选择可以化简成与直线运动类似的简单的一维运动, 取平面极坐标系, 极点在圆心上, 坐标系平面与圆周运动的平面重合 (如图 1-6 所示), 则在圆周上运动的质点的坐标可以表示为 (r, θ) , 其中 r 是圆的半径, 为一常量, θ 为质点的位矢 $\boldsymbol{r}$ 与极轴间的夹角。显然, 质点的运动只改变 θ , 故这样选择坐标系后, 圆周运动便转化成了简单的一维运动, 使问题的求解大为简化。

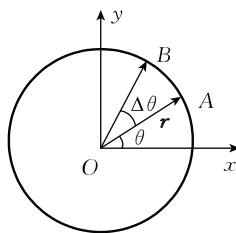


图 1-6 圆周运动

质点的位矢 $\boldsymbol{r}$ 与极轴间的夹角 θ 称为质点的**角位置** (angular position)。质点在运动过程中, 角位置随时间不断变化, 即为

$$\theta=\theta(t) \quad (1-14)$$

称为质点的**角运动方程** (angular equation of motion)。

若质点在 t 到 $t+\Delta t$ 时间间隔内, 从 A 点运动到 B 点, 其转过的角度用 $\Delta\theta$ 表示, $\Delta\theta$ 称为质点的**角位移** (angular displacement)。角位移不仅有大小, 而且有方向, 一般规定, 沿逆时针转动的角位移取正值, 沿顺时针转动的角位移取负值。在国际单位制中, 角位置和角位移的单位为弧度 (rad)。

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 角位移 $\Delta\theta$ 与 Δt 比值的极限叫作质点在 t 时刻的**瞬时角速度** ω , 简称**角速度** (angular velocity), 即

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

角速度的大小反映质点沿圆周运动的快慢。与角位移的方向规定相同, 质点沿逆时针转动时 ω 取正值, 质点沿顺时针转动时 ω 取负值。在国际单位制 (SI) 中, 角速度的单位为弧度 $\cdot$ 秒 $^{-1}$ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$), 工程中也常用每分钟绕行的圈数 n (即转速 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 来表示。

1.2.2 角加速度

设质点 t 时刻的角速度为 $\omega(t)$, 在 $t+\Delta t$ 时刻的角速度为 $\omega(t+\Delta t)$, 则角速度的增量为 $\Delta\omega=\omega(t+\Delta t)-\omega(t)$ 。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 角速度的增量 $\Delta\omega$ 与 Δt 比值的极限叫作质点在 t 时刻的**瞬时角加速度** β , 简称**角加速度** (angular acceleration), 即

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

角加速度描述了角速度随时间变化的快慢情况，当 $\beta=0$ 时，质点做圆周运动的角速度 ω 是常量，称为匀速率圆周运动；当 $\beta=C$ （常量）时，质点的运动称为匀变速率圆周运动；否则，质点做一般的变速率圆周运动。

角速度和角加速度是矢量，写为 ω 和 β 。角速度的方向由质点运动方向按右手螺旋法则确定：右手四指弯曲方向与质点运动方向一致，伸直的大拇指的指向为角速度 ω 的方向。当 ω 数值增大时，角加速度 β 和 ω 同向；反之，当 ω 数值减少时， β 与 ω 反向。在国际单位制（SI）中，角加速度的单位为弧度·秒⁻²（rad·s⁻²）。

质点做圆周运动，当角速度 ω 不随时间变化时，则为匀速率圆周运动，此时角加速度 $\beta=0$ 。如角加速度 β 不随时间变化，但不等于 0，则为匀加速率圆周运动，对匀加速率圆周运动用和研究匀变速直线运动相似的方法可以得到

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + \beta t \\ \theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2 \\ \omega^2 - \omega_0^2 = 2\beta(\theta - \theta_0) \end{cases} \quad (1-17)$$

1.2.3 切向加速度和法向加速度

当质点做圆周运动时，不论其速度大小是否变化，速度的方向总是变化的，因此总有加速度产生。如图 1-7(a) 所示，质点在 t 时刻经过 A 点的速度为 $\mathbf{v}(t)$ ，在 $t+\Delta t$ 时刻经过 B 点的速度为 $\mathbf{v}(t+\Delta t)$ ，速度的增量为 $\mathbf{v}(t+\Delta t) - \mathbf{v}(t)$ 。如果在矢量 $\mathbf{v}(t+\Delta t)$ 上截取一段，使其长度等于 $\mathbf{v}(t)$ ，作矢量 $\Delta \mathbf{v}_n$ 和 $\Delta \mathbf{v}_t$ ，如图 1-7(b) 所示，则

$$\Delta \mathbf{v} = \Delta \mathbf{v}_t + \Delta \mathbf{v}_n$$

将此式代入加速度的定义式（1-10），则

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_t}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_n}{\Delta t} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_n \quad (1-18)$$

其中

$$\mathbf{a}_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_t}{\Delta t}, \quad \mathbf{a}_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}_n}{\Delta t}$$

这就是说，加速度 $\mathbf{a}$ 可以看作是两个分加速度 $\mathbf{a}_t$ 和 $\mathbf{a}_n$ 的矢量合成。

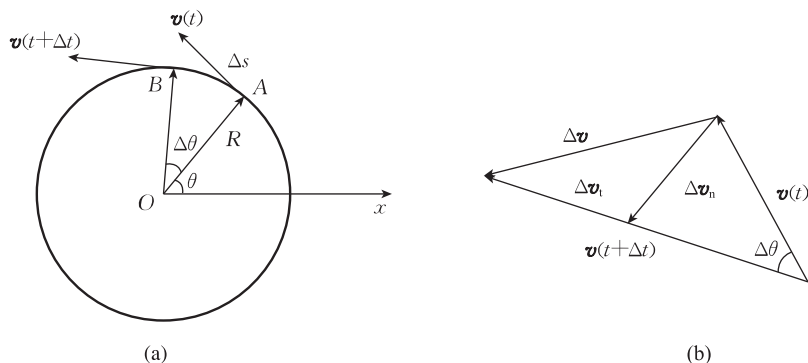


图 1-7 变速圆周运动的加速度

先求分加速度 a_t ，由图 1-7(b) 可知， Δv_t 的大小为 $\Delta v_t = v(t + \Delta t) - v(t)$ ，它等于速度大小（即速率）的增量。则 a_t 的大小为

$$a_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v_t}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} = \frac{d(R\omega)}{dt} = R \frac{d\omega}{dt} = R\beta \quad (1-19)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时， Δv_t 和 v 的方向在同一直线上，因此， a_t 的方向指向轨迹的切线方向，故称为**切向加速度**（tangential acceleration）。切向加速度描述了质点速度大小（速率）的变化快慢情况。如果 a_t 的方向与速度方向一致，速率增大；如果 a_t 的方向与速度方向相反，则速率减小。

再求分加速度 a_n 。由图 1-7 中 (a) 和 (b) 中两个三角形的相似性，可知

$$\frac{|\Delta v_n|}{AB} = \frac{v}{R}$$

即

$$|\Delta v_n| = \frac{v}{R} \cdot \overline{AB}$$

式中 $\overline{AB}$ 为弦长，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时， $\overline{AB}$ 趋于和它对应的弧长 Δs 相等。因此， a_n 的大小为

$$a_n = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{|\Delta v_n|}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v}{R} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{v^2}{R} \quad (1-20)$$

由图 1-7(b) 可看出，当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时， $\Delta \theta \rightarrow 0$ ，此时 Δv_n 的方向趋向垂直于速度的方向而沿半径指向圆心。所以， a_n 的方向在任意时刻都是圆周上该点沿半径指向圆心的法线方向，故称为**法向加速度**（normal acceleration）或**向心加速度**（centripetal acceleration）。

法向加速度表示由于速度方向的改变而引起的速度的变化率。在圆周运动中，总有法向加速度；在直线运动中，由于速度方向不改变，所以 $a_n = 0$ 。在这种情况下，也可以认为 $R \rightarrow \infty$ ，此时式 (1-20) 也给出 $a_n = 0$ 。

也就是说，加速度不仅可沿直角坐标轴分解，还可沿切向和法向分解。由上述讨论可知，在式 (1-18) 中，第一项代表切向加速度，第二项代表法向加速度。

由于 a_t 总是与 a_n 垂直，所以圆周运动的总加速度的大小为

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} \quad (1-21)$$

以 θ 表示加速度 a 与速度 v 之间的夹角（图 1-8），则

$$\theta = \arctan \frac{a_n}{a_t} \quad (1-22)$$

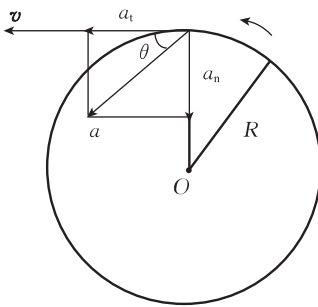


图 1-8 加速度的方向

1.2.4 角量和线量的关系

用角量（角速度、角加速度等）或用线量（速度、加速度等）都能够描述质点的圆周运动，它们之间必然存在一定的联系。

质点做圆周运动时，如果在时间 dt 内，质点由 A 点运动到 B 点，如图 1-9 所示，所经过的圆弧为 $ds = R d\theta$ ，则线速率与角速度的关系为

$$v = \frac{ds}{dt} = R \frac{d\theta}{dt} = R\omega \quad (1-23)$$

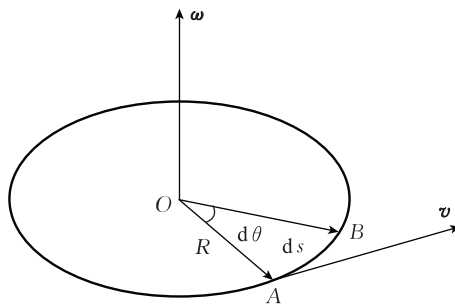


图 1-9 线速度与角速度

利用式 (1-23) 和式 (1-19)、式 (1-20) 可知, 加速度和角加速度的关系为

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d(R\omega)}{dt} = R\beta$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{(R\omega)^2}{R} = R\omega^2$$

例 1-3 一质点沿半径为 $R=0.1\text{ m}$ 的圆周运动, 其运动方程为 $\theta=2+4t^3$, 求 $t=2\text{ s}$ 时切向加速度和法向加速度的大小。

解 根据角速度及角加速度的定义, 有

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = 12t^2$$

$$\beta = \frac{d\omega}{dt} = 24t$$

且 $t=2\text{ s}$, $R=0.1\text{ m}$, 故可得

$$a_t = R\beta = 24Rt = 4.8(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$a_n = \omega^2 R = (12t^2)^2 R = 230.4(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

1.3 相对运动

我们在本章第一节中曾指出, 运动的描述是相对的。物体的同一运动状态, 由于所选取的参照系不同, 运动的描述就会不同。下面讨论在不同参考系中描述同一物体运动状态的基本物理量 (位矢、速度、加速度) 之间的关系。

设两参考系 S 和 S' 之间存在相对平移 (不存在相对转动), 平移速度为 $\mathbf{u}$ 。在两参考系中各建立空间直角坐标系 $Oxyz$ 和 $O'x'y'z'$, 且使 x 、 x' 轴方向与 $\mathbf{u}$ 方向一致。这种做相对匀速直线运动的参考系称**惯性参考系** (inertial frame of reference)。

设质点 P 在 S 系中的位置矢量为 $\mathbf{r}$, 在 S' 系中的位置矢量为 $\mathbf{r}'$, S' 系原点 O' 相对于 S 系原点 O 的位置矢量为 $\mathbf{r}_0$, 如图 1-10 所示。从 S 系看, $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{r}'$ 和 $\mathbf{r}_0$ 之间的关系为

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \mathbf{r}' \quad (1-24)$$

式 (1-24) 对时间求导可得

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}_0}{dt} + \frac{d\mathbf{r}'}{dt}$$

$\frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 是质点相对于 S 系的速度 $\mathbf{v}$, 也叫**绝对速度** (absolute velocity); $\frac{d\mathbf{r}'}{dt}$ 是质点相对于 S' 系的

速度 $\mathbf{v}'$, 又叫**相对速度** (relative velocity); $\frac{d\mathbf{r}_0}{dt}$ 是 S' 系相对于 S 系的速度 $\mathbf{u}$, 叫作**牵连速度**

(involved velocity), 所以上式可写成

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{u} \quad (1-25)$$

上式再对时间求导, 可得



相对运动

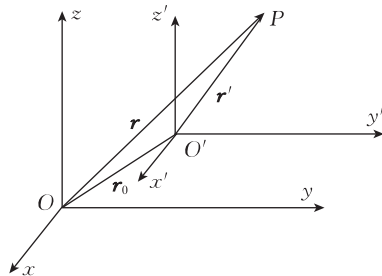


图 1-10 相对坐标系

$$\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \frac{d\boldsymbol{v}'}{dt} + \frac{d\boldsymbol{u}}{dt}$$

即

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}' + \boldsymbol{a}_0 \quad (1-26)$$

其中, $\boldsymbol{a} = \frac{d\boldsymbol{v}}{dt}$ 是质点相对于 S 系的绝对加速度 (absolute acceleration); $\boldsymbol{a}' = \frac{d\boldsymbol{v}'}{dt}$ 是质点相对于 S' 系的相对加速度 (relative acceleration); $\boldsymbol{a}_0 = \frac{d\boldsymbol{u}}{dt}$ 是 S' 系相对于 S 系的牵连加速度 (involved acceleration)。

当 S 系相对于 S 系做匀速直线运动时,

$$\boldsymbol{a}_0 = 0$$

则

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}'$$

这就是说, 在相对做匀速直线运动的参考系中观察同一质点的运动时, 所测得的加速度是相同的。

注意速度的合成和速度的变换是两个不同的概念。速度的合成指在同一个参考系中一个质点的速度和它在各坐标轴上的分量之间的关系, 相对于任何参考系, 它都可以表示为矢量合成的形式。

例 1-4 如图 1-11 所示, 在河水流速 $\boldsymbol{v}_0 = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的地方有一小船渡河, 如果希望小船以 $\boldsymbol{v} = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率垂直于河岸横渡, 求小船相对于河水的速度的大小和方向。

解 这个题目船速的参考系有两个, 一个是河岸, 一个是流水。设河岸为 S 系, 流水为 S' 系, S' 系相对于 S 系做直线运动, 速度为 $\boldsymbol{v}_0$, 船相对河岸 (S 系) 的速度为 $\boldsymbol{v}$, 其大小 $v = 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 方向垂直于 $\boldsymbol{v}_0$ 。

由式 (1-25) 得

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{v}_0 + \boldsymbol{v}'$$

故船相对流水的速度 $\boldsymbol{v}'$ 为

$$\boldsymbol{v}' = \boldsymbol{v} - \boldsymbol{v}_0$$

由图可知

$$v' = \sqrt{v_0^2 + v^2} = \sqrt{16 + 64} \approx 8.9 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$\boldsymbol{v}'$ 和水流方向 $\boldsymbol{v}_0$ 间的夹角为 θ , 则

$$\theta = 90^\circ + \arctan \frac{v_0}{v} \approx 116.6^\circ$$

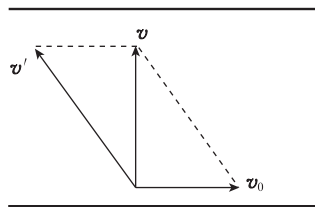


图 1-11 例 1-4 图

思 考 题

1-1 下列概念有什么区别和联系?

(1) 位移和路程;

(2) 速度和速率; 瞬时速度和平均速度。

1-2 有人说: “分子很小, 可将其当作质点; 地球很大, 不能当作质点。” 对吗?

1-3 一质点速度为零时, 其加速度是否一定为零? 加速度为零时, 速度是否一定为零?

1-4 如果一质点的加速度与时间的关系是线性的, 那么, 该质点的速度和位矢与时间的关系是否也

是线性的?

1-5 下列说法是否一定正确?

- (1) 质点做圆周运动时的加速度指向圆心;
- (2) 匀速圆周运动的加速度为恒量;
- (3) 只有法向加速度的运动一定是圆周运动;
- (4) 只有切向加速度的运动一定是直线运动。

1-6 一直点做匀速圆周运动, 取其圆心为坐标原点。试问: “质点的位矢与速度、位矢与加速度、速度与加速度的方向之间有何关系?”

1-7 一只鸟在水平面上沿直线以恒定速率相对地面飞行, 有一汽车在公路上行驶, 在什么情况下, 汽车上的观察者观察到鸟是静止不动的? 在什么情况下, 他观察到小鸟似乎往回飞?

1-8 一个人在以恒定速度运动的火车上竖直向上抛出一块石子, 此石子能否落回这个人的手中? 如果石子抛出后, 火车以恒定的加速度前进, 情况又如何?

1-9 如果有两个质点分别以初速度 $\boldsymbol{v}_{10}$ 和 $\boldsymbol{v}_{20}$ 同时抛出, $\boldsymbol{v}_{10}$ 和 $\boldsymbol{v}_{20}$ 在同一平面内且与水平面的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 。有人说, 在它们飞行期间, 两质点的相对速度是一常量, 你说对吗?

习 题

1-1 质点运动学方程为 $\boldsymbol{r} = a\cos(\omega t)\boldsymbol{i} + a\sin(\omega t)\boldsymbol{j} + bt\boldsymbol{k}$, 其中 a , b , ω 均为正常数, 求质点速度和加速度与时间的关系式。

1-2 一艘正在沿直线行驶的电艇, 在发动机关闭后, 其加速度方向与速度方向相反, 大小与速度平方成正比, 即 $dv/dt = -Kv^2$, 式中 K 为常量。试证明电艇在关闭发动机后又行驶 x 距离时的速度为 $v = v_0 e^{-Kx}$ 。其中 v_0 是发动机关闭时的速度。

1-3 一质点在 xOy 平面内运动, 运动函数为 $x = 2t$, $y = 4t^2 - 8$ 。(1) 求质点的轨迹方程并画出轨迹曲线; (2) 求 $t = 1$ s 和 $t = 2$ s 时质点的位置、速度和加速度。

1-4 一质点的运动学方程为 $x = t^2$, $y = (t-1)^2$, x 和 y 均以米为单位, t 以秒为单位。(1) 求质点的轨迹方程; (2) 在 $t = 2$ s 时质点的速度和加速度。

1-5 一质点沿半径为 R 的圆周运动, 运动学方程为 $s = v_0 t - \frac{1}{2}bt^2$, 其中 v_0 , b 都是常量。(1) 求 t 时刻质点的加速度大小及方向; (2) 在何时加速度大小等于 b ; (3) 到加速度大小等于 b 时质点沿圆周运行的圈数。

1-6 已知质点沿 x 轴做直线运动, 其运动方程为 $x = 2 + 6t^2 - 2t^3$, 式中 x 的单位为米, t 的单位为秒。求: (1) 质点在运动开始后 4.0 s 内的位移的大小; (2) 质点在该时间内所通过的路程; (3) $t = 4.0$ s 时质点的速度和加速度。

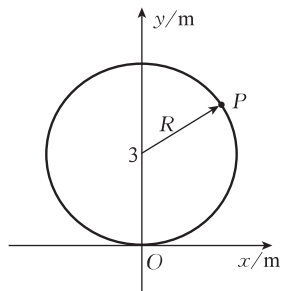
1-7 物体以初速度 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 被抛出, 抛射仰角 60° , 略去空气阻力, 问: (1) 物体开始运动后的 1.5 s 末, 运动方向与水平方向的夹角是多少? 2.5 s 末的夹角又是多少? (2) 物体抛出后经过多少时间, 运动方向才与水平成 45° 角? 这时物体的高度是多少? (3) 物体运动轨迹最高点处的曲率半径有多大? (4) 在物体落地点处, 轨迹的曲率半径有多大?

1-8 已知质点的运动方程为 $\boldsymbol{r} = 2t\boldsymbol{i} + (2-t^2)\boldsymbol{j}$, 式中 $\boldsymbol{r}$ 的单位为米, t 的单位为秒。求: (1) 质点的运动轨迹; (2) $t = 0$ 及 $t = 2$ s 时, 质点的位矢; (3) 由 $t = 0$ 到 $t = 2$ s 内质点的位移 $\Delta \boldsymbol{r}$ 和径向增量 Δr ; (4) 2 s 内质点所走过的路程 s 。

1-9 质点的运动方程为 $x = -10t + 30t^2$, $y = 15t - 20t^2$, 式中 x 、 y 的单位为米, t 的单位为秒。试求: (1) 初速度的大小和方向; (2) 加速度的大小和方向。

1-10 一升降机以加速度 $1.22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 上升, 当上升速度为 $2.44 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 有一螺丝自升降机的天花板上松脱, 天花板与升降机的底面相距 2.74 m。计算: (1) 螺丝从天花板落到底面所需要的时间; (2) 螺丝相对升降机外固定柱子的下降距离。

1-11 如图所示, 一质点 P 沿半径 $R=3.0\text{ m}$ 的圆周做匀速率运动, 运动一周所需时间为 20.0 s , 设 $t=0$ 时, 质点位于 O 点。求: (1) 质点 P 在任意时刻的位矢; (2) 5 s 时的速度和加速度。



习题 1-11 图

1-12 地面上垂直竖立一高 20.0 m 的旗杆, 已知正午时分太阳在旗杆的正上方, 求在下午 $2:00$ 时, 杆顶在地面上的影子的速度的大小。在何时刻杆影伸展至 20.0 m ?

1-13 质点沿直线运动, 加速度 $a=4-t^2$, 式中 a 的单位为米·秒⁻², t 的单位为秒。如果当 $t=3\text{ s}$ 时, $x=9\text{ m}$, $v=2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 求质点的运动方程。

1-14 一石子从空中由静止下落, 由于空气阻力, 石子并非做自由落体运动, 现测得其加速度 $\mathbf{a} = A - B\mathbf{v}$, 式中 A 、 B 为正恒量, 求石子下落的速度和运动方程。

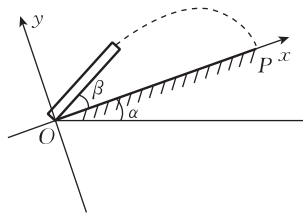
1-15 一质点具有恒定加速度 $\mathbf{a}=6\mathbf{i}+4\mathbf{j}$, 式中 $\mathbf{a}$ 的单位为米·秒⁻²。在 $t=0$ 时, 其速度为零, 位置矢量 $\mathbf{r}_0=10\mathbf{i}(\text{m})$ 。求: (1) 在任意时刻的速度和位置矢量; (2) 质点在 Oxy 平面上的轨迹方程, 并画出轨迹的示意图。

1-16 一质点在半径为 R 的圆周上以恒定的速率运动, 质点由位置 A 运动到位置 B , OA 和 OB 所对的圆心角为 $\Delta\theta$ 。(1) 试证位置 A 和 B 之间的平均加速度为 $\bar{a} = \sqrt{2(1-\cos \Delta\theta)} v^2 / (R\Delta\theta)$; (2) 当 $\Delta\theta$ 分别等于 90° 、 30° 、 10° 和 1° 时, 平均加速度各为多少? 并对结果加以讨论。

1-17 质点在 Oxy 平面内运动, 其运动方程为 $\mathbf{r}=2.0t\mathbf{i}+(19.0-2.0t^2)\mathbf{j}$, 式中 r 的单位为米, t 的单位为秒。求: (1) 质点的轨迹方程; (2) 在 $t_1=1.0\text{ s}$ 到 $t_2=2.0\text{ s}$ 时间内的平均速度; (3) $t_1=1.0\text{ s}$ 时的速度及切向和法向加速度; (4) $t=1.0\text{ s}$ 时质点所在处轨迹的曲率半径 ρ 。

1-18 飞机以 $100\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度沿水平直线飞行, 在离地面高为 100 m 时, 驾驶员要把物品空投到前方某一地面目标处, 问: (1) 此时目标在飞机正下方位置的前面多远? (2) 投放物品时, 驾驶员看目标的视线和水平线成何角度? (3) 物品投出 2.0 s 后, 它的法向加速度和切向加速度各为多少?

1-19 如图所示, 一小型迫击炮架设在一斜坡的底端 O 处, 已知斜坡倾角为 α , 炮身与斜坡的夹角为 β , 炮弹的出口速度为 $\mathbf{v}_0$, 忽略空气阻力。求: (1) 炮弹落地点 P 与点 O 的距离 OP ; (2) 欲使炮弹能垂直击中坡面, 证明 α 和 β 必须满足 $\tan \beta = \frac{1}{2 \tan \alpha}$ 并与 $\mathbf{v}_0$ 无关。



习题 1-19 图

1-20 一直立的雨伞, 张开后其边缘圆周的半径为 R , 离地面的高度为 h 。(1) 当伞绕伞柄以匀角速 ω 旋转时, 证明水滴沿边缘飞出后落在地上半径为 $r=R \sqrt{1+2h\omega^2/g}$ 的圆周上; (2) 读者能否由此定性构想一种草坪上或农田灌溉用的旋转式洒水器的方案?

1-21 一足球运动员在正对球门前 25.0 m 处以 $20.0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的初速率罚任意球, 已知球门高为 3.44 m 。若要在垂直于球门的竖直平面内将足球直接踢进球门, 问他应在与地面成什么角度的范围内踢出足球? (足球可视为质点)

1-22 一半径为 0.50 m 的飞轮在启动时的短时间内, 其角速度与时间的平方成正比。在 $t=2.0\text{ s}$ 时测得轮缘一点的速度值为 $4.0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。求: (1) 该轮在 $t'=0.5\text{ s}$ 时的角速度, 轮缘一点的切向加速度和总加速度; (2) 该点在 2.0 s 内所转过的角度。

1-23 一质点在半径为 0.10 m 的圆周上运动, 其角位置为 $\theta=2+4t^3$, 式中 θ 的单位为弧度, t 的单位为秒。(1) 求在 $t=2.0\text{ s}$ 时质点的法向加速度和切向加速度; (2) 当切向加速度的大小恰等于总加速度大小的一半时, θ 值为多少? (3) t 为多少时, 法向加速度和切向加速度的值相等?

1-24 一无风的下雨天, 一列火车以 $v_1=20.0\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率匀速前进, 在车内的旅客看见玻璃窗外的雨滴和垂线成 75° 角下降。求雨滴下落的速度 $\mathbf{v}_2$ 。(设下降的雨滴做匀速运动)

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理学 / 潘建斌, 章国顺, 曹春斌主编. —2
版. —北京: 中国农业出版社, 2019.12 (2021.1 重印)
普通高等教育农业农村部“十三五”规划教材 全国
高等农林院校“十三五”规划教材
ISBN 978-7-109-26278-2

I. ①大… II. ①潘… ②章… ③曹… 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 (2019) 第 284329 号

中国农业出版社出版

地址: 北京市朝阳区麦子店街 18 号楼

邮编: 100125

策划编辑: 马颀晨 薛波 责任编辑: 马颀晨

版式设计: 韩小丽 责任校对: 周丽芳

印刷: 北京通州皇家印刷厂

版次: 2013 年 8 月第 1 版 2019 年 12 月第 2 版

印次: 2021 年 1 月第 2 版北京第 2 次印刷

发行: 新华书店北京发行所

开本: 889mm×1194mm 1/16

印张: 22.5

字数: 536 千字

定价: 49.50 元

版权所有·侵权必究

凡购买本社图书, 如有印装质量问题, 我社负责调换。

服务电话: 010-59195115 010-59194918