



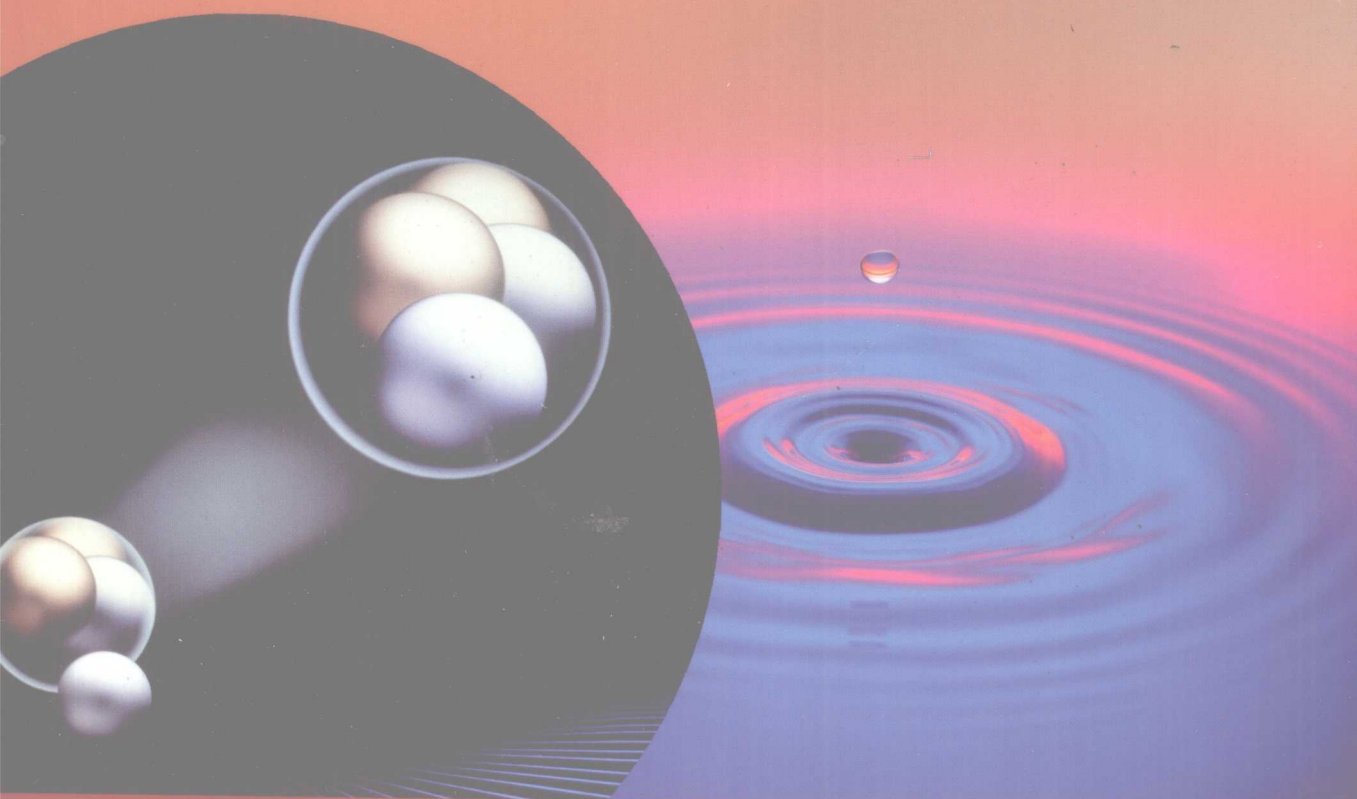
中国科学院教材建设专家委员会规划教材

全国高等医药院校规划教材

物理学

第2版

侯俊玲 邵建华 周恭勤 主编



科学出版社

www.sciencep.com

中国科学院教材建设专家委员会规划教材
全国高等医药院校规划教材

物 理 学

第 2 版

侯俊玲 邵建华 周恭勤 主编



科 学 出 版 社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本教材是在 2003 年第 1 版的基础上,由北京、上海、山东等全国十余所高等医药院校的专家教授参照教育部对高等医药院校物理学教学的基本要求,总结多年来教学改革的经验,吸取了国内外相关教材的优点编写修订而成的第 2 版教材,已纳入中国科学院教材建设专家委员会规划教材及全国高等医药院校规划教材。同时还配有《物理学实验》和《物理学习题指导》。本书共十三章,包括力学、热力学、分子物理学、电磁学、声学、光学、原子物理学和量子物理学等内容。其主要特点是“少而精”,在保持物理学基本理论的系统性的前提下,突出医药院校物理学的特色,注重物理学在医药学中的应用,同时为学生学习其他专业课程打下坚实的基础。

本书可供全国高等医药院校医药学等各专业本科生使用,也可作为成人教育、生命科学、卫生管理等相关专业以及医药工作者和爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

物理学 / 侯俊玲,邵建华,周恭勤主编. —2 版. —北京:科学出版社,2009
中国科学院教材建设专家委员会规划教材·全国高等医药院校规划教材
ISBN 978-7-03-023701-9

I. 物… II. ①侯… ②邵… ③周… III. 物理学-医学院校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 198588 号

策划编辑:郭海燕 曹丽英 / 责任编辑:万 新 曹丽英 / 责任校对:刘小梅
责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 2 月第 二 版 印张:15

2009 年 2 月第七次印刷 字数:419 000

印数:21 001—28 000

定价:25.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈文林〉)

《物理学》第2版编委会名单

主 编 侯俊玲 北京中医药大学

周恭勤 山东中医药大学

副主编 刚 晶 辽宁中医药大学

柴 英 大连医学院

李 光 长春中医学院

黄 浩 福建中医学院

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

柴 英 大连医学院

高建平 甘肃中医学院

郭晓玉 河南中医学院

黄 浩 福建中医学院

李 光 长春中医学院

李维峰 北京中医药大学

鲁玮瑗 首都医药大学

孟 丽 成都中医药大学

隋娜娜 山东中医药大学

王 贺 黑龙江中医药大学

王立普 河北邢台医药高等专科学校

魏晋忠 甘肃中医学院

叶 红 上海中医药大学

郑巧云 北京中医药大学

邵建华 上海中医药大学

鲁玮瑗 首都医药大学

王 贺 黑龙江中医药大学

罗来成 广东药学院

刚 晶 辽宁中医药大学

顾柏平 南京中医药大学

侯俊玲 北京中医药大学

季成杰 山东中医药大学

李长民 山东中医药高等专科学校

林 蓉 上海中医药大学

罗来成 广东药学院

邵建华 上海中医药大学

孙 铭 首都医药大学

王冬梅 黑龙江中医药大学

王文龙 长春中医学院

徐丽珊 山东中医药大学

张 莉 北京中医药大学

周恭勤 山东中医药大学

第2版前言

近年来,随着医药教育事业的迅猛发展,根据教育部对医药院校各类专业物理学教学大纲的要求,为适应我国医药现代化教育发展的需要,全面推进素质教育,培养21世纪高素质复合型人才,由北京中医药大学等十余所全国医药院校的专家、教授于2003年6月编写了适用于高等医药院校使用的《物理学》、《物理学实验》及《物理学习题指导》系列教材第1版。为了更好地跟上现代化发展的步伐,第2版教材在原教材的基础上进一步编写修订、补充和完善当今物理学在医药领域中的应用,本书已纳入中国科学院教材建设专家委员会规划教材及全国高等医药院校规划教材。

在医药教育中物理学的教学是必不可少的重要环节,是学习其他专业的基础。物理学的原理和方法在医药学中的应用越来越多,因此在讲解单纯知识的同时,更要注重传授方法、提高能力的培养;在打下必要的物理基础以外,更要树立正确的科学观念和思维方式。本教材考虑到医药院校的特点及学时数的限制,选择与医药密切相关的物理学知识作为切入点来阐述物理学理论与知识。在兼顾物理学体系完整的前提条件下,要重点阐述与医药相关的内容。不仅讲述物理学知识,同时也提高了学生的学习兴趣。突出理论性与应用性相结合、科学性与系统性相结合。本教材正是以此为指导思想编写而成,在编写过程中注重突出医药院校的特色,注重知识、能力、素质“三位一体”的教育理念。

本教材共分十三章,在第1版的基础上,增加了质点力学、物体的弹性、骨材料的力学性质及几何光学等内容,各章也相应地增加了一些物理学在医药方面的应用等内容。本教材可供高等医药院校的本科生使用,同样适于各类医学院校的成人教育、远程教育及医药工作者、爱好者使用,也可作为相关专业的参考书。

书中存在的错误与不妥之处,恳请专家和读者提出宝贵意见,以便进一步修订。

编 者

2008年11月

第 1 版前言

21 世纪,中医药教育事业将得到更加飞速的发展,尤其是我国已经把中医药事业列入 WTO 发展的重点,因此各个医学院校担负着培养医药学高质量人才的光荣任务,其中物理学的教育亦是必不可少的一个环节。

物理学是一门自然科学,它所研究的是物质最基本、最普遍的运动形式,是总结人们认识物质运动的基本规律,是学生掌握自然科学的基础。实践证明,物理学的理论和方法在医学基础、临床和理论研究方面的应用非常广泛。在几十年来的医学教育蓬勃发展的光辉历程中,物理学的教育发挥了极其重要的作用。例如:在 20 世纪初,相对论、量子力学和原子物理学的建立,使整个人类跨入了一个崭新的微观世界,而医学在物理学发展的重大成果的推动下,与物理学相结合,又孕育出许许多多为医学的发展起重大作用的产物。如:心电图机、脑电图机、心磁图、超声波诊断仪、X 射线 CT、磁共振 CT、电子内镜、电子显微镜以及种种病理或药物检测分析仪器,等等。这无疑为医学的发展作出了巨大的贡献。

本书将讲述与医学密切相关的刚体力学、流体力学、分子物理学、热力学、电磁学、振动与波、波动光学、量子力学基础、几种医疗仪器的原理与应用、原子核物理学基础等知识。这些内容的学习对医药工作者是大有裨益的。

物理学的发展为医学的现代化提供了广阔的前景,物理学可以把现代化自然科学理论、技术和方法同医学的理论、诊断和防治相结合,来研究人体系统状态变化的规律以及疾病诊断和防治的最有效的途径。在现代化技术迅猛发展的今天,如何促进医药事业与现代化发展相同步,这是历史赋予医药工作者的使命。所以,我们必须牢固掌握物理学的基本理论和基本知识,才能更有效地为医药事业的开拓和进取作出贡献。

编 者

2003 年 1 月

目 录

第2版前言

第1版前言

第一章 力学基础知识	(1)	第三章 分子物理学	(32)
第一节 质点力学基础	(1)	第一节 理想气体压强公式	(32)
一、描述质点运动的基本物理概念 ...	(1)	一、理想气体的微观模型	(32)
二、牛顿运动定律	(3)	二、理想气体压强公式	(33)
三、功和能	(4)	三、温度和分子平均平动动能的关系	(34)
四、机械能守恒定律	(5)	第二节 能量按自由度均分定理	(36)
第二节 刚体力学	(6)	一、自由度	(36)
一、刚体的转动	(6)	二、能量按自由度均分定理	(37)
二、转动动能 转动惯量	(8)	三、理想气体的内能	(38)
三、转动定律	(10)	第三节 液体的表面层现象	(39)
四、角动量守恒定律	(11)	一、液体的表面张力 表面能	(39)
五、陀螺的运动	(12)	二、弯曲液面的附加压强 气体栓塞	(41)
第三节 物体的弹性 骨材料的力学性质	(13)	三、表面吸附和表面活性物质 肺泡中的压强	(43)
一、应变 应力 弹性模量	(13)	第四节 液体的附着层现象	(45)
二、骨骼材料的力学性质	(14)	一、浸润现象和不浸润现象	(45)
小结	(16)	二、毛细现象	(46)
习题一	(17)	小结	(47)
第二章 流体动力学基础	(19)	习题三	(48)
第一节 理想流体的定常流动	(19)	第四章 热力学基础	(49)
一、理想流体	(19)	第一节 热力学的一些基本概念	(49)
二、定常流动	(19)	一、热力学系统	(49)
三、定常流动的连续性方程	(20)	二、平衡态	(49)
第二节 伯努利方程	(21)	三、准静态平衡过程	(49)
第三节 伯努利方程的应用	(23)	第二节 热力学第一定律	(50)
一、水平管中压强与流速的关系	(23)	一、热量与功	(50)
二、均匀管中压强与高度的关系	(25)	二、热力学第一定律	(51)
三、小孔处的流速	(25)	第三节 热力学第一定律的应用	(51)
第四节 黏性流体的流动	(25)	一、等容过程	(51)
一、牛顿黏滞定律	(26)	二、等压过程	(52)
二、层流 湍流 雷诺数	(27)	三、等温过程	(52)
第五节 泊肃叶定律 斯托克斯定律	(28)	四、绝热过程	(53)
一、泊肃叶定律	(28)	第四节 卡诺循环 热机效率	(54)
二、斯托克斯定律	(29)	一、循环过程	(54)
小结	(29)	二、热机效率	(54)
习题二	(30)		

三、卡诺循环及其效率	(55)	第三节 基尔霍夫定律	(85)
第五节 热力学第二定律	(56)	一、基尔霍夫第一定律	(85)
一、热力学第二定律	(56)	二、基尔霍夫第二定律	(86)
二、可逆过程与不可逆过程	(57)	第四节 惠斯通电桥	(87)
三、热力学第二定律的统计意义	(57)	第五节 电泳 电疗	(88)
四、卡诺定理	(58)	一、电泳	(88)
第六节 熵与熵增加原理	(58)	二、电疗	(89)
一、熵	(58)	三、直流电中草药离子导入疗法	(90)
二、熵增加原理	(59)	小结	(91)
三、熵变的计算	(60)	习题六	(92)
小结	(61)	第七章 电磁现象	(94)
习题四	(61)	第一节 电流的磁场	(94)
第五章 静电场与生物电现象	(64)	一、磁场 磁感应强度	(94)
第一节 电场强度	(64)	二、磁通量 高斯定理	(95)
一、库仑定律	(64)	三、安培环路定理	(96)
二、电场强度	(64)	四、安培环路定理的应用	(98)
三、场强的计算	(65)	第二节 磁场对运动电荷的作用	(98)
第二节 静电场的高斯定理	(67)	一、洛伦兹力	(98)
一、电力线	(67)	二、带电粒子在均匀磁场中的运动 ...	(99)
二、电通量	(67)	三、霍尔效应	(100)
三、高斯定理及其应用	(68)	四、质谱仪	(101)
第三节 电场力所做的功 电势	(70)	第三节 磁场对载流导体的作用	(101)
一、电场力所做的功	(70)	一、安培力	(101)
二、电势能与电势	(71)	二、磁场对载流线圈的作用	(102)
第四节 静电场中的电介质	(71)	三、磁矩在外磁场中的能量	(103)
一、电介质与电偶极子	(71)	第四节 电磁感应定律	(103)
二、电介质的极化 电极化强度	(72)	一、电磁感应定律	(103)
三、电介质中的电场 介电常数	(74)	二、电磁感应的本质	(104)
第五节 生物电现象	(74)	第五节 生物磁 磁疗	(106)
一、能斯特方程	(75)	一、生物磁场	(106)
二、静息电位 动作电位	(76)	二、磁场的生物效应	(107)
第六节 心电图波形成的基本原理	(76)	三、磁场生物效应的医学应用	(107)
一、电偶极子电场的电位	(76)	小结	(108)
二、心电向量 心电向量环	(77)	习题七	(109)
三、心电图波的形成	(78)	第八章 机械振动与机械波	(111)
小结	(78)	第一节 简谐振动	(111)
习题五	(79)	一、简谐振动 谐振方程	(111)
第六章 直流电路	(82)	二、谐振动的三要素	(112)
第一节 电流密度	(82)	三、简谐振动的速度、加速度	(113)
一、电流强度	(82)	四、谐振动的能量	(114)
二、电流密度	(82)	五、两个同方向、同频率的简谐振动的合成	(114)
第二节 一段含源电路的欧姆定律	(83)	六、两个方向相互垂直、同频率的简谐振动的合成	(116)
一、电动势	(83)		
二、一段含源电路的欧姆定律	(84)		

第二节 波动学基础	(118)	习题九	(158)
一、概述	(118)	第十章 几何光学	(160)
二、简谐波	(119)	第一节 球面折射	(160)
三、波的能量	(120)	一、折射定律	(160)
四、波的吸收	(121)	二、单球面折射	(160)
五、波的特性	(122)	三、共轴球面系统	(163)
第三节 声波	(127)	第二节 透镜	(164)
一、声波	(127)	一、薄透镜成像公式	(164)
二、声速 反射 折射 衍射	(127)	二、薄透镜的组合	(165)
三、声压 声强 声强级	(128)	三、共轴球面系统的三对基点及作图 成像法	(167)
第四节 超声波 次声波	(131)	四、非对称折射系统与柱面透镜	(168)
一、超声波的性质	(131)	五、透镜的像差	(169)
二、超声波对物质的作用	(132)	第三节 眼屈光	(170)
三、超声波的产生	(132)	一、眼的结构	(170)
四、超声波在医学上的应用	(133)	二、眼的光学性质	(171)
五、次声波	(135)	三、眼的调节	(172)
小结	(136)	四、眼的分辨本领和视力	(172)
习题八	(137)	五、眼的屈光不正及其矫正	(173)
第九章 波动光学	(139)	第四节 放大镜和显微镜	(175)
第一节 光	(139)	一、放大镜	(175)
一、可见光 单色光 白光	(139)	二、光学显微镜	(176)
二、介质中的光速 波长	(140)	三、几种特殊的显微镜简介	(178)
三、光强	(140)	第五节 内镜	(182)
第二节 光的干涉	(141)	一、光导纤维	(182)
一、相干光	(141)	二、医用内镜	(183)
二、光程 光程差	(141)	小结	(184)
三、分波阵面干涉	(142)	习题十	(185)
四、分振幅干涉	(144)	第十一章 量子力学基础	(186)
第三节 光的衍射	(145)	第一节 热辐射	(186)
一、光的衍射现象	(145)	一、黑体的辐出度和吸收比	(186)
二、惠更斯-菲涅耳原理	(145)	二、基尔霍夫辐射定律	(186)
三、单缝衍射	(146)	三、黑体辐射定律	(187)
四、圆孔衍射	(148)	四、普朗克量子假说	(188)
五、光栅衍射	(148)	第二节 光电效应及康普顿效应	(188)
第四节 光的偏振	(151)	一、光电效应	(188)
一、自然光 偏振光	(151)	二、康普顿效应	(189)
二、起偏器 检偏器	(152)	第三节 波粒二象性	(191)
三、马吕斯定律	(153)	一、德布罗意波	(191)
四、旋光性	(153)	二、电子衍射实验	(192)
五、(旋光)糖量计	(154)	第四节 不确定关系	(192)
第五节 光的吸收	(155)	第五节 氢原子光谱及玻尔理论	(193)
一、光的吸收	(155)	一、氢原子光谱的规律性	(193)
二、吸收定律	(156)	二、玻尔的氢原子理论	(194)
小结	(157)		

第六节 四个量子数	(196)	三、诊断方面的应用	(209)
一、主量子数	(197)	小结	(212)
二、角动量的量子化与角量子数 ...	(197)	习题十二	(212)
三、空间量子化与磁量子数	(197)	第十三章 原子核物理学基础	(213)
四、电子自旋量子化与自旋磁量子数	(197)	第一节 原子核的组成	(213)
第七节 原子光谱	(198)	第二节 原子核放射性的衰变规律 ...	(213)
第八节 激光及应用	(198)	一、核衰变定律	(213)
一、激光产生的原理	(198)	二、平均寿命	(214)
二、激光器	(199)	三、半衰期	(214)
三、激光的特点	(200)	四、放射性活度	(214)
四、激光在医药学上的应用	(201)	第三节 辐射剂量与辐射防护	(215)
小结	(201)	一、辐射剂量	(215)
习题十一	(202)	二、辐射防护	(216)
第十二章 X射线	(204)	第四节 放射性核素在医学上的应用	(216)
第一节 X射线的基本性质	(204)	一、治疗方面	(216)
一、电离作用	(204)	二、核医学成像	(216)
二、荧光作用	(204)	第五节 核磁共振	(217)
三、贯穿作用	(204)	一、核磁共振的基本原理	(217)
四、光化学作用	(204)	二、核磁共振在医药学上的应用 ...	(220)
五、生物效应	(204)	小结	(220)
第二节 X射线的发生装置	(205)	习题十三	(221)
第三节 X射线的硬度和强度	(205)	附录	(223)
第四节 X射线衍射	(206)	附录一 单位换算	(223)
一、X射线的波动性	(206)	附录二 倍数或分数的词头名称及符号	(223)
二、布拉格方程	(206)	附录三 常用希腊字母的符号及汉语译音	(224)
三、X射线摄谱仪	(207)	附录四 常用物理常数	(224)
第五节 X射线谱	(207)	附录五 微积分	(225)
一、连续X射线谱	(207)	一、导数	(225)
二、标识X射线谱	(207)	二、微分	(226)
第六节 X射线的衰减规律	(208)	三、积分	(226)
第七节 X射线在医学上的应用	(209)	四、向量代数	(227)
一、治疗方面的应用	(209)		
二、药物分析方面的应用	(209)		

第一章 力学基础知识

物体之间或同一物体各部分之间相对位置的变化,称为机械运动(简称运动)。机械运动是自然界中最简单、最普遍的一种运动形式,其基本形式有平动和转动。物理学中研究的机械运动中的运动规律、能量变化及其应用,以及平衡状态下,外力与形变之间对应关系的规律等部分都属于力学的范畴。力学的基本理论不仅是整个物理学的基础,也是研究运动医学、康复医学、骨力学等学科的必备知识。然而,定量描述物体的运动,离不开时间和空间。

第一节 质点力学基础

在平动过程中,若物体各点的位置没有相对变化,则可用物体上任意一点的运动来代表整个物体的运动。质点(particle)就是用来代表原物体,只有质量而没有大小和形状的几何点,它是一个理想化的力学模型。描述质点运动的物理量有位置矢量、位移、速度和加速度等。我们用这些物理量来确定质点的空间位置怎样随时间变化,找出其运动规律。

一、描述质点运动的基本物理概念

1. 参考系

描述某物体的运动时,通常选择另一物体或物体系统作参考。被选作参考的物体或物体系统,称为参考系(reference system)。

2. 坐标系

为了定量地确定质点的位置,描述其运动,还要在所选择的参考系上规定一个坐标系(coordinate system)。在运动学中,参考系和坐标系一般可以任意选择,但根据问题的特征恰当地选择参考系和坐标系,往往可以使讨论问题简便些。通常都是以地面作参考系,使用笛卡尔直角坐标系。

3. 位置矢量

为了确定质点在空间的位置,我们引入位置矢量的概念。图 1-1 中,质点 M 的位置矢量(position vector)定义为从坐标原点 O 指向点 M 的有向线段 $\mathbf{r}$ 。显然,有向线段 $\mathbf{r}$ 与点 M 的位置坐标 (x, y, z) 有一一对应的关系。因此,可以借用矢量 $\mathbf{r}$ 来表示 M 点的位置。

令 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 分别表示沿 x, y, z 轴正方向的单位矢量。在直角坐标系中,位置矢量可以写成

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

4. 位移

为了描述质点空间位置的变化,我们引入位移的概念。图 1-2 所示,质点 M 沿图中曲线运动, t_1 时刻位于 M_1 点, t_2 时刻到达 M_2 点。两点的位置矢量分别为 $\mathbf{r}_1$ 和 $\mathbf{r}_2$ 。在 t_1 到 t_2 时间 $\Delta t = t_2 - t_1$ 内,质点空间位置的变化可用矢量 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ 表示,即由 M_1 指向 M_2 的矢量。 $\Delta \mathbf{r}$ 是描述质点空间位置变化的物理量,它

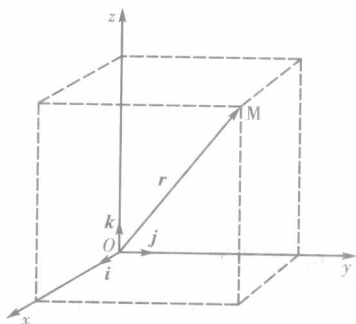


图 1-1 位置矢量

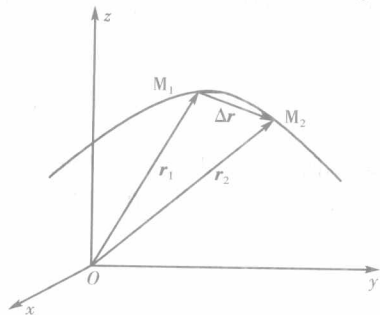


图 1-2 位移矢量和速度

同时表示了质点空间位置变化的距离和方向,称为**位移**(displacement)。

在直角坐标系中,位移 $\Delta \mathbf{r}$ 的坐标表达式为

$$\Delta \mathbf{r} = (x_2 - x_1)\mathbf{i} + (y_2 - y_1)\mathbf{j} + (z_2 - z_1)\mathbf{k} = \Delta x\mathbf{i} + \Delta y\mathbf{j} + \Delta z\mathbf{k} \quad (1-2)$$

5. 速度

为了描述质点位置变化的快慢和方向,引入速度的概念。如果质点在 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内的位移是 $\Delta \mathbf{r}$, 则 $\Delta \mathbf{r}$ 与 Δt 的比值可以反映该段时间内质点位置变化的方向和平均快慢程度。把 $\Delta \mathbf{r}$ 和 Δt 之比称为质点在这段时间内的**平均速度**, 记作 $\bar{\mathbf{v}}$, 这样便有

$$\bar{\mathbf{v}} = \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{\mathbf{r}(t + \Delta t) - \mathbf{r}(t)}{\Delta t} \quad (1-3a)$$

平均速度是矢量,它的大小 $v = \frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$, 方向与 $\Delta \mathbf{r}$ 的方向相同。平均速度只是一种粗略的描述方法, 观察时间 Δt 越短, 平均速度就越能逼真地反映质点在 t 时刻的运动方向和快慢。当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 比值 $\frac{|\Delta \mathbf{r}|}{\Delta t}$ 将无限接近于一个确定的极限值, 这一极限值就是质点在 t 时刻运动快慢的确切描述; 与此同时, $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的方向也无限靠近 t 时刻质点所在位置处轨迹的切线, 这一切线方向就是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的极限方向, 它表示质点在 t 时刻的运动方向。根据上面的讨论, 将 $\Delta t \rightarrow 0$ 时质点平均速度 $\frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t}$ 的极限值, 定义为质点在 t 时刻的**瞬时速度**, 简称**速度**(velocity), 用 $\mathbf{v}$ 表示, 即

$$\mathbf{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{r}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1-3b)$$

速度 $\mathbf{v}$ 等于位置矢量 $\mathbf{r}$ 对时间 t 的一阶导数。

在直角坐标系中, 有

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\mathbf{i} + \frac{dy}{dt}\mathbf{j} + \frac{dz}{dt}\mathbf{k} \quad (1-3c)$$

且

$$v_x = \frac{dx}{dt}, \quad v_y = \frac{dy}{dt}, \quad v_z = \frac{dz}{dt}$$

6. 加速度

质点在不同时刻速度的大小与方向一般也不相同, 为了描述质点速度变化的快慢和速度变化的方向, 引入加速度的概念。如果质点在 t 到 $t + \Delta t$ 这段时间内速度的增量为 $\Delta \mathbf{v}$, 那么 $\Delta \mathbf{v}$ 与 Δt 的比值 $\bar{\mathbf{a}} = \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t}$, 称为质点在该段时间内的**平均加速度**, 其大小反映 Δt 时间内质点速度变化的平均快慢, 它的方向为沿速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的方向。平均加速度只是速度变化的粗略描述, 要精确地描述 t 时刻的速度变化, 只有将时间间隔 Δt 取得足够小。因此, 把 $\Delta t \rightarrow 0$ 时平均加速度的极限定义为质点在 t 时刻的**瞬时加速度**, 简称**加速度**(acceleration), 用 $\mathbf{a}$ 表示, 即

$$\mathbf{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \mathbf{v}}{\Delta t} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \quad (1-4a)$$

加速度等于速度对时间的一阶导数, 或等于位置矢量对时间的二阶导数。加速度是矢量, 它的大小描述 t 时刻速度变化的快慢; 它的方向是当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时速度增量 $\Delta \mathbf{v}$ 的极限方向。在直角坐标系中加速度可以表示为

$$\mathbf{a} = \frac{dv_x}{dt}\mathbf{i} + \frac{dv_y}{dt}\mathbf{j} + \frac{dv_z}{dt}\mathbf{k}$$

或

$$\boldsymbol{a} = \frac{d^2x}{dt^2}\boldsymbol{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\boldsymbol{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\boldsymbol{k}$$

且

$$a_x = \frac{dv_x}{dt}, \quad a_y = \frac{dv_y}{dt}, \quad a_z = \frac{dv_z}{dt} \quad (1-4b)$$

7. 运动方程

质点的位置矢量随时间变化的过程,就是质点的运动过程。把位置矢量与时间的函数关系称为质点的**运动方程**(equation of motion),即质点运动方程表示为

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r}(t)$$

上式在直角坐标系中的 3 个分量式是

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

知道了运动方程就能把握质点运动的全过程,从而完全掌握质点的运动规律。因此,寻找运动方程是力学的基本问题之一。

8. 直线运动的特例

研究质点沿直线运动,总是以该直线作为坐标轴 Ox 来讨论的。设质点 M 在 Ox 轴上运动。质点 M 的位置矢量 $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i}$, 位移 $\Delta\boldsymbol{r} = \Delta x\boldsymbol{i}$, 速度 $\boldsymbol{v} = \frac{dx}{dt}\boldsymbol{i}$, 加速度 $\boldsymbol{a} = \frac{d^2x}{dt^2}\boldsymbol{i} = a\boldsymbol{i}$ 。

因为质点是在 Ox 直线上运动,矢量 $\boldsymbol{r}, \Delta\boldsymbol{r}, \boldsymbol{v}, \boldsymbol{a}$ 的方向用相应的代数量 $x, \Delta x, v, a$ 的正负符号就可以表示。如果 a 和 v 的符号相同,则质点做加速运动;如果 a 和 v 异号,则质点做减速运动。

例 1-1 已知一质点是在 Ox 轴线上运动且满足运动方程 $x = 6t^3 - 12t^2 + 36$ (m), 求第 2s 内的平均速度, 第 2s 末的速度和加速度。

解 第 2s 时间段 $\Delta t = t_2 - t_1 = 2 - 1 = 1$ s, 位移 $\Delta x = x_2 - x_1 = 60 - 30 = 30$ m, 这样, 平均速度

$$\bar{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = 30 \text{ m/s}$$

然而,

$$v = \frac{dx}{dt} = 18t^2 - 24t, \text{ 当 } t = 2 \text{ s 时, } v = 24 \text{ m/s}$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = 36t - 24, \text{ 当 } t = 2 \text{ s 时, } a = 48 \text{ m/s}^2$$

v, a 均为正值,说明质点沿 x 轴方向做加速运动。

二、牛顿运动定律

牛顿的三个运动定律(Newton's laws of motion)是经典力学的基础,是从无数事实中归纳出来的。

第一运动定律 任何物体都具有保持静止或匀速直线运动状态的性质,直到其他物体所作用的力迫使它改变这种状态为止。

第二运动定律 物体受到外力 $\boldsymbol{F}$ 作用时,所获得的加速度 $\boldsymbol{a}$ 的大小与合外力的大小成正比,与物体的质量 m 成反比,加速度的方向与合外力的方向相同。

第三运动定律 当物体 A 以力 $\boldsymbol{F}_1$ 作用在物体 B 上时,物体 B 也必定同时以力 $\boldsymbol{F}_2$ 作用在物体 A 上; $\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$ 在同一直线上,大小相等而方向相反。

牛顿的三条定律是一个整体。第一运动定律指明了任何物体都具有惯性,即具有保持其原有运动状态不变的特性。因此又被称为惯性定律。同时,牛顿第一定律也确定了力的含义,说明力是使物体改变其运动状态的原因(力的另一个效果是使得物体产生形变,将在第三节中详细讨论那部分内容)。第二定律对物体机械运动的规律作了定量的叙述,确定了力 $\boldsymbol{F}$, 质量 m 和加速度 $\boldsymbol{a}$ 之间的瞬时关系

$$\boldsymbol{F} = m\boldsymbol{a}$$

$$(1-5)$$

在国际单位制中,质量 m 的单位是千克(kg),加速度 a 的单位是米每平方秒(m/s^2),力 F 的单位则是牛顿(N)。第三定律肯定了物体间的作用力具有相互作用的本质。作用力和反作用力同时存在,同时消失;当作用力和反作用力存在的时候,不论哪一时刻,它们一定在同一条直线上,而且大小相等、方向相反,分别作用在相互作用的两个物体上。另外,二力的性质是相同的。

应用牛顿运动定律时,参考系不能任意选择,因为牛顿运动定律并不是在任何参考系中都是适用的。凡是牛顿运动定律成立的参考系叫做**惯性参考系**,简称**惯性系**,而牛顿运动定律不成立的参考系则叫做**非惯性系**。在一般精确度范围内,地球或静止在地面的任一物体以及在地面上做匀速直线运动的物体都可近似看成是惯性系,但在地面上做变速运动的物体就不能看成惯性系了。

三、功 和 能

1. 功

功和能是物理学中的两个重要概念。功是力在物体运动过程中,对物体作用所引起的空间累积效应。**功(work)**的定义是力在位移方向上的分量与位移大小的乘积。设力 F 与质点的元位移 $d\mathbf{r}$ 之间的夹角为 θ ,则该力所做的**元功**为

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F |d\mathbf{r}| \cos\theta \quad (1-6a)$$

若用 $d\mathbf{l}$ 表示 $d\mathbf{r}$ 的大小,即 $d\mathbf{l} = |d\mathbf{r}|$ 。(1-6a)式又可写成

$$dA = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = F d\mathbf{l} \cos\theta \quad (1-6b)$$

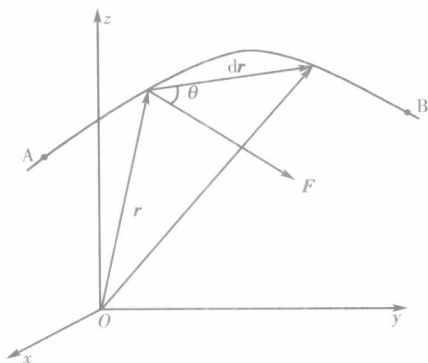


图 1-3 变力曲线功的求法

功是标量只有大小,没有方向,但功有正负。当 $\theta < \frac{\pi}{2}$ 时,力沿位移方向的分量与位移同向,功为正值,也就是力对物体做了正功;当 $\theta > \frac{\pi}{2}$ 时,力沿位移方向的分量与位移反向,功为负值,即力对物体做了负功,或者说,物体反抗外力做了功;当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 时,力的方向和位移方向垂直,则该力不做功。

一般情况下,作用在物体上的力 F 的大小和方向可能随时都在改变,同时物体还可能做曲线运动。如图 1-3 所示,设一物体在变力 F 的作用下沿曲线由 A 运动到 B,则该力 F 在这段曲线上所做的功为

$$A = \int_A^B dA = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_A^B F \cos\theta |d\mathbf{r}| = \int_A^B F \cos\theta d\mathbf{l} \quad (1-7)$$

注意,(1-7)式中位移的大小 $|d\mathbf{r}| = d\mathbf{l}$ 与图中标明的矢径长度的增量 dr 为两个不同的物理量, θ 为某一位置上力与位移之间的夹角,在运动过程中一般也为变量。在国际单位制中,功的单位是焦耳(J)。

2. 质点的动能定理

(1) 物体的动能:物体的动能是物体由于运动而具有的做功本领。设物体的质量为 m ,速度为 v ,则定义该物体具有的**动能(kinetic energy)**为

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2$$

动能是描述物体运动状态的一个重要物理量,它的单位与功相同,也为焦耳(J)。

(2) 动能定理:设质量为 m 的质点在外力 F 的作用下,从 A 点沿曲线运动到 B 点,我们用 v_A 和 v_B 分别表示它在起点 A 和终点 B 处的速度,如图 1-4 所示。外力 F 在该过程中所做的功为

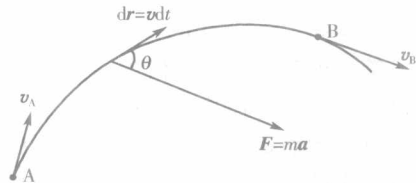


图 1-4 动能定理

$$A = \int_A^B \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = \int_A^B F \cos\theta |d\mathbf{r}| = \int_A^B m a_t |d\mathbf{r}| = \int_{v_A}^{v_B} m \frac{dv}{dt} v dt = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2 \quad (1-8a)$$

(1-8a)式中的 $a_t = \frac{dv}{dt}$ 为质点在某点处的切向加速度。(1-8a)式还可写为

$$A = E_{K_2} - E_{K_1} = \Delta E_K \quad (1-8b)$$

它表明:外力对质点所做的功等于质点动能的增量,这一结论称为质点的**动能定理**(work-kinetic energy theorem)。当 $A > 0$ 时,外力对物体做正功,物体的动能增加;当 $A < 0$ 时,外力对物体做负功,亦即物体反抗外力做功,物体的动能减少。

3. 保守力的功 势能

(1) 重力做功情况:设质量为 m 的物体在重力作用下从 A 点沿任一曲线运动到达 B 点,如图 1-5 所示, A 点和 B 点对地面的高度分别为 h_A 和 h_B 时,重力 $G = mg$ 对物体所做的功为

$$\begin{aligned} A &= \int_A^B \mathbf{G} \cdot d\mathbf{r} = \int_A^B mg \cos\theta |d\mathbf{r}| = \int_{h_A}^{h_B} mg (-dh) \\ &= - \int_{h_A}^{h_B} mg dh = mgh_A - mgh_B \end{aligned} \quad (1-9)$$

从(1-9)式可以看出,重力所做的功只与物体对地面的高度有关,而与所经过的路径无关。

(2) 弹性力做功情况:以弹簧为例来讨论弹性力的做功情况。设弹簧受到外力的作用被拉长,从 x_1 到 x_2 。根据胡克定律,在弹性极限内,弹簧的弹性力,即弹性回复力 f 与弹簧的伸长量 x 成正比,而两者方向相反,即

$$f = -kx$$

k 为弹簧的倔强系数。弹簧的伸长过程中,弹性力不是一个恒力,弹性力做功为变力做功问题,其值为

$$A = \int_{x_1}^{x_2} f dx = - \int_{x_1}^{x_2} kx dx = \frac{1}{2} kx_1^2 - \frac{1}{2} kx_2^2 \quad (1-10)$$

从(1-10)式可以看出,弹性力所做的功只与弹簧的终始位置 x_2, x_1 有关,而与弹簧的伸缩过程,即路径无关。

(3) 保守力的功、势能:由上面讨论可知,重力、弹性力所做的功,只与物体的始末位置有关,而与物体所经过的路径无关,我们把这样的力称为**保守力**(conservative force)。常见的保守力有重力、万有引力、弹性力、静电场力等。不难证明,沿任意闭合路径绕行一周,保守力 $\mathbf{F}_{保}$ 所做的功为零,即

$$\oint \mathbf{F}_{保} \cdot d\mathbf{r} = 0 \quad (1-11)$$

功是能量变化的量度,在保守力做功的过程中,与位置有关的系统能量发生了变化,这种与相对位置有关的能量就是系统的**势能**(potential energy)。我们把 $E_p = mgh$ 定义为物体和地球所组成的重力系统的**重力势能**,而把 $E_p = \frac{1}{2} kx^2$ 定义为弹性系统的**弹性势能**,弹性势能是由于弹性体各部分间的相对位置所决定的势能。由(1-9)式和(1-10)式可见,保守力所做的功可写成为系统始末位置的势能之差,即

$$A_{保} = E_{P_1} - E_{P_2} \quad (1-12)$$

(1-12)式指出,保守力做的功等于系统势能的减少量。

四、机械能守恒定律

1. 功能原理

单个物体的功和动能的关系(1-8)式,可以推广到由几个物体组成的系统情况。这时,我们用

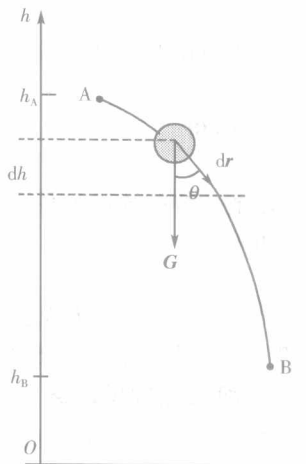


图 1-5 重力做功

E_{K_2} 和 E_{K_1} 表示系统内所有物体在终态和初态的总动能, A 表示作用在各物体上所有的力所做功的总和, 则有

$$A = E_{K_2} - E_{K_1}$$

作用力可分为外力和内力, 外力是指系统外其他物体对系统内各物体的作用力, 内力是指系统内各物体之间的相互作用力。而内力又可分为保守内力和非保守内力。因此, 上式可改写为

$$A_{\text{外力}} + A_{\text{保守内力}} + A_{\text{非保守内力}} = E_{K_2} - E_{K_1}$$

保守内力所做的功可用系统势能的减少来表示, 即

$$A_{\text{保守内力}} = E_{P_1} - E_{P_2}$$

代入上式, 得

$$A_{\text{外力}} + A_{\text{非保守内力}} = (E_{K_2} + E_{P_2}) - (E_{K_1} + E_{P_1}) \quad (1-13a)$$

动能和势能统称为系统的**机械能**(mechanical energy)。若用 E 来表示系统的总机械能, (1-13a) 式又可写成

$$A_{\text{外力}} + A_{\text{非保守内力}} = E_2 - E_1 \quad (1-13b)$$

(1-13b) 式说明: 系统从状态 1 变化到状态 2 时, 它的机械能的增量等于外力和非保守内力所做功的总和。这一结论称为**系统的功能原理**(the principle of work and mechanical energy)。

2. 机械能守恒定律

当 $A_{\text{外力}} + A_{\text{非保守内力}} = 0$ 时, 有

$$E_{K_2} + E_{P_2} = E_{K_1} + E_{P_1} \quad (1-14)$$

(1-14) 式表明, 如果一个系统内只有保守力做功, 其他内力和一切外力都不做功 (或其他内力和一切外力的总功为零), 那么, 系统内各物体的动能和势能可以互相转化, 并且物体之间可以有机械能传递, 但机械能的总和保持不变。这一结论称为**机械能的转化和守恒定律**(the law of conversion and conservation of mechanical energy)。

第 2 节 刚体力学

前面我们所讨论的力学原理主要是对质点而言的, 但是质点这个模型在很多问题中并不适用, 如物体做转动的情况, 这时物体上各个点的运动规律并不相同, 物体上各个点的运动与物体的大小形状都有关, 这样就不能再把这个物体看成质点了。为了研究物体在这种运动状态下的运动规律, 我们再引入另外一个理想模型——**刚体**(rigid body)。所谓**刚体**是指形状完全确定并且在外力作用下, 它的形状不发生改变的理想模型。这是一个理想模型。因为真实的物体受到力的作用时, 它的形状总是或多或少地发生改变, 但是当物体的形变很小时, 我们可以把它近似地看成刚体。

一、刚体的转动

1. 刚体的平动与转动

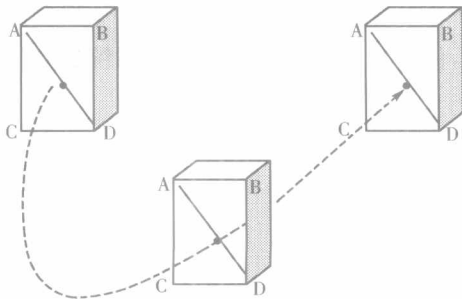


图 1-6 刚体的平动

(1) 刚体的平动: 在运动过程中, 若刚体上任意两点的连线始终与初始连线位置平行, 如图 1-6 中的 AD 连线, 则此刚体的运动就称为**平动**(translation)。由图 1-6 可知, 当刚体做平动时, 因各个点的运动情况与质心的运动情况完全一样, 所以此时可以把这个刚体看成一个质点。第一节中描述质点运动的物理量以及质点运动学的规律对刚体的平动都是适用的。

(2) 刚体的转动: 在运动过程中的某一瞬间, 若刚体内的各个点都围绕同一直线做圆周运动, 这种运动就称为**转动**(rotation), 这一直线称为**转轴**。通常情况下,

转轴的方向和位置都要随时间变化。若转动过程中转轴是固定不动的,则这时的刚体的转动就称为**刚体的定轴转动**(rotation about a fixed axis)。例如,电动机的转子绕其转轴的运动。

2. 刚体定轴转动的描述

(1) **角坐标、角位移**:为了描述刚体的转动,取一垂直于定轴的平面作为转动平面,如图 1-7 所示, OO' 为转轴,坐标轴 Ox 是位于转动平面内的一条与 OO' 轴垂直的参考线。我们研究该转动平面上的一点 P ,从圆心 O 到 P 点作矢径 r ,它与坐标轴 Ox 的夹角 θ 就是**角坐标**(angular coordinate)。该参量可以描写刚体的位置。在转动过程中,角 θ 随时间变化,设在 Δt 时间内, P 点移到 P' 的位置, P 点的矢径扫过了 $\Delta\theta$ 角,它代表了整个刚体转过 $\Delta\theta$ 角。我们定义 $\Delta\theta$ 为刚体在 Δt 时间内的**角位移**(angular displacement)。它是描述刚体转动程度的物理量,而且是一个矢量。角位移的单位是弧度(radian)。

(2) **角速度**:角速度是描述刚体转动快慢的物理量。角位移 $\Delta\theta$ 与所经过的时间 Δt 的比值,称为这段时间的平均角速度,用 $\bar{\omega}$ 表示,即

$$\bar{\omega} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均角速度的极限值称为 t 时刻的**瞬时角速度**,简称**角速度**(angular velocity)。用 ω 表示,即

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

角速度的单位为**弧度/秒**(rad/s),角速度也是矢量。

(3) **角加速度**:如果刚体在 t_1 时刻的角速度为 ω_1 ,经过 Δt 时间,即在 t_2 时刻角速度变为 ω_2 ,则在 Δt 时间内,刚体角速度的变化量为 $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$,我们把 $\Delta\omega$ 与这段时间间隔 Δt 的比值,称为刚体在这段时间内的平均角加速度,用 $\bar{\beta}$ 表示,即

$$\bar{\beta} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,平均角加速度的极限值称为**瞬时角加速度**,简称**角加速度**(angular acceleration),用 β 表示,即

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

角加速度的单位为**弧度/秒²**(rad/s²),角加速度也是矢量。

角位移、角速度和角加速度都是矢量。角位移 $\Delta\theta$ 、角速度 ω 的方向由右手螺旋法则确定:右手四指与大拇指相垂直时,让四个手指弯曲并与刚体转动的转向一致,这时大拇指所指的方向为角位移、角速度的正方向,即**沿转轴指向上方或下方**(图 1-7)。当刚体加速转动时,角加速度与角速度方向相同;减速转动时,角加速度与角速度方向相反。

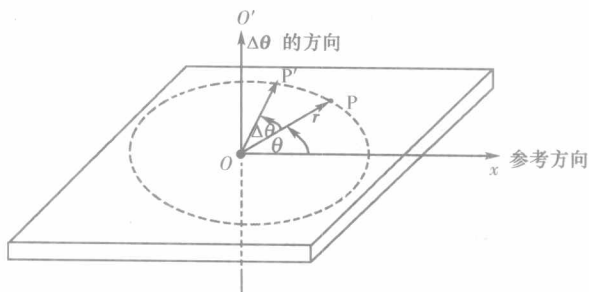


图 1-7 刚体的转动 角位移的方向

(4) **角量与线量的关系**:我们通常把描写质点运动的量称为**线量**,而把描写物体转动的量称为**角量**。刚体做定轴转动时,刚体上各点都在做圆周运动,所以刚体上某一点的运动可以用第一节中的位移、速度、加速度等物理量来加以描述。既然角量与线量都可以用来描述刚体的运动规律,所以线量与角量之间必然有一定的关系。

如图 1-7 所示,刚体上某点 P 在 Δt 时间内转过的角位移为 $\Delta\theta$,从而到达 P' 处,此时点 P 发生的位移大小设为 Δs ,当 Δt 很小时,弦长近似等于弧长,即

$$\Delta s \approx r \cdot \Delta\theta$$