

高等医药院校教材

药用物理学

(供中药、制药、鉴定、药学等专业用)

主编 章新友

江西高校出版社

YAOYONGWULIXUE

高等医药院校教材

药用物理学

(供中药、制药、鉴定、药学等专业用)

主编 章新友



江 社

图书在版编目(CIP)数据

药用物理学/章新友主编. —南昌:江西高校出版社,
2001.1

ISBN 7-81075-182-4

I. 药… II. 章… III. 药理学:物理学-高等学校
-教材 IV. R912

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001) 第 00859 号

江西高校出版社出版发行

(江西省南昌市洪都北大道 96 号)

邮编:330046 电话:(0791)8512093、8504319

江西恒达科贸有限公司照排部照排

南昌市光华印刷厂印刷

各地新华书店经销

*

2003 年 1 月第 2 版 2003 年 1 月第 2 次印刷

787mm × 1092mm 1/16 21.5 印张 540 千字

印数:4201 ~ 8600 册

定价:29.00 元

(江西高校版图书如有印刷、装订错误,请随时向承印厂调换)

编 委 会 名 单

- 主 审 唐志伦(贵阳中医学院)
- 主 编 章新友(江西中医学院)
- 副主编 郭晓玉(河南中医学院)
- 杨培鑫(广州中医药大学)
- 黄 浩(福建中医学院)
- 王 贺(黑龙江中医药大学)
- 杜 琰(江西中医学院)
- 编 委 邵建华(上海中医药大学)
- 杨国平(浙江中医学院)
- 孙 铭(北京联合大学中医药学院)
- 赵 芳(贵阳中医学院)
- 吴文元(江西中医学院)
- 程方荣(河南中医学院)
- 王冬梅(黑龙江中医药大学)
- 王文龙(长春中医学院)
- 赵志坚(江西医学院)
- 陶和生(江西中医学院)

内 容 提 要

本书根据卫生部制定的高等医药院校中药专业的物理学教学大纲,针对近年各院校开设专业的情况和积累的教学实践经验,由全国十一所高等医药院校从事物理学教学的教师共同编写。全书共分十五章,包括力学、电学、光学、粒子物理、物理学与新技术及现代物理技术在药学领域的应用等内容。每章有小结,有适量的例题、思考题及习题,书后附有习题答案。

本书重视基本概念和基本理论的阐述,注重理论联系实际,力求反映物理技术在医药领域应用的新成果。内容深入浅出、重点突出,便于自学,集科学性、系统性、完整性于一体。除供高等医药院校中药、制药、鉴定、药学等医学类专业作教材使用外,也可作为医药类各专业高职及成人教育的物理学教材,还可以作为从事药学研究、生产、教学和管理等工作的专业技术人员参考用书。

前 言

本书主要是供高等医药院校中药、制药、鉴定、药学等医药专业使用的物理学教材。该书是根据卫生部制定的高等医药院校中药专业的物理学教学大纲,针对近年来各院校专业设置的实际情况和多年教学实践与经验的积累,在高校深化教学改革和提倡素质教育的新形势下,以适应 21 世纪医药院校物理学教学的需要,由全国十一所医药院校共同编写而成的。

《药用物理学》在 2001 年 1 月出版后,经参编院校两届学生的使用,师生反映较好,尤其是在 2002 年 7 月召开的中国中医物理与中医工程学术年会上受到同行专家的好评,并要求再次出版。为此,我们又组织了新的编委会,由更多兄弟院校的教师参加编写。本书在原教材的基础上进行了全面修订,并结合物理学在医药领域应用的新发展,更新了教学内容。这次在编写过程中,我们仍然重视对基本概念、基本定律和基本理论的阐述,既考虑到后继课程对物理课的要求,充分体现药用特色,又注意到本学科的系统性、科学性和完整性。认真贯彻理论联系实际和少而精的原则,力求反映近年来运用本学科的理论和方法研究中医药的新成果。

我们运用辩证唯物主义的观点和方法论,来培养学生的辩证唯物主义的世界观,训练学生解决物理问题的科学思维方法,增强学生分析问题和解决问题的能力,尤其注重学生创新素质的培养。全书力求叙述清晰,文字流畅,既便于学生自学,又便于教师讲授。

为了适应新世纪的要求和各校不同的需要,某些章节的部分内容用小字排印或标题上用星号(*)标明,这些内容供选用,也可作为学生进一步学习的参考,以拓宽学生的视野。各章后面的小结、思考题和习题供学生复习、自学和不同专业的学生选做,书后附有习题答案,供读者参考。

全书根据全国自然科学名词审定委员会 1988 年公布的《物理学名词》(基础物理学部分)校核了本书的物理名词。

本书在编写过程中得到了贵阳中医学院唐志伦教授的指导和帮助,以及各兄弟院校领导和同行们的大力支持,在此一并表示感谢。

由于我们水平有限,时间仓促,错误和不妥之处在所难免,恳请广大师生和读者批评指正。

编 者

2002 年 12 月

目 录

绪论	1	习题五	102
第一章 刚体动力学	4	第六章 电磁现象	105
第一节 刚体的定轴转动	4	第一节 电流的磁场	105
第二节 转动动能 转动惯量	7	第二节 磁场对运动电荷的作用	110
第三节 转动定律	9	第三节 磁场对载流导体的作用	113
第四节 角动量原理 角动量守恒定律 进动	13	第四节 电磁感应定律	116
本章小结	17	本章小结	124
习题一	17	习题六	125
第二章 流体动力学	20	第七章 振动和波	128
第一节 流体运动的基本概念	20	第一节 简谐振动	128
第二节 伯努利方程及其应用	23	第二节 波动	135
第三节 实际流体的流动	28	第三节 惠更斯原理 波的干涉和衍射	141
第四节 泊肃叶定律 斯托克斯定律	32	第四节 超声波及其医药应用	145
本章小结	35	本章小结	146
习题二	36	习题七	147
第三章 分子物理学	38	第八章 波动光学	149
第一节 理想气体压强公式	38	第一节 光的干涉	149
第二节 能量按自由度均分定理	42	第二节 单缝和圆孔的夫琅和费衍射	155
第三节 分子的速率	46	第三节 光栅衍射	160
第四节 范德瓦尔斯方程	51	第四节 X射线的衍射	164
第五节 液体的表面性质	55	第五节 光的偏振	166
第六节 物质中的迁移现象	62	第六节 光的双折射现象	169
本章小结	64	第七节 旋光现象 旋光计	172
习题三	66	本章小结	175
第四章 静电场	68	习题八	176
第一节 电场强度与电势	68	第九章 药用光学仪器的基本原理	178
第二节 高斯定理	77	第一节 光度学的基本知识	178
第三节 静电场中的电介质	82	第二节 光的色散	180
第四节 静电场的能量 场能密度	85	第三节 光学仪器的分辨本领	182
本章小结	86	第四节 光的吸收	185
习题四	87	第五节 光的散射	189
第五章 直流电路	90	第六节 荧火 磷光	191
第一节 稳恒电流	90	本章小结	193
第二节 一段含源电路的欧姆定律	92	习题九	194
第三节 基尔霍夫定律	95	第十章 量子力学基础	195
第四节 温差电现象	98	第一节 热辐射	195
本章小结	101	第二节 光电效应	199

第三节 伦琴射线的散射 康普顿效应	202	第三节 液 晶	275
第四节 波粒二象性	205	第四节 新一代扫描显微镜	279
第五节 不确定关系	209	第五节 纳米材料	283
第六节 薛定谔方程	211	*第十五章 现代科学技术在医药领域的应	
本章小结	214	用	288
习题十	216	第一节 静电在药学中的应用	288
第十一章 原子光谱与分子光谱	218	第二节 磁性药物制剂	291
第一节 玻尔的氢原子理论	218	第三节 核磁共振和顺磁共振的应用	293
第二节 四个量子数	223	第四节 放射性核素在医药学上的应用	298
第三节 原子光谱	224	第五节 计算机在药学领域的应用	300
第四节 分子光谱	226	第六节 物理学在生命科学中的应用	308
第五节 激光	230	附录一 矢量分析	314
本章小结	234	附录二 常用物理量的名称、单位和符号	323
习题十一	235	表 1 国际单位(SI)制的基本单位	323
第十二章 原子核物理基础	236	表 2 国际单位制的辅助单位	323
第一节 原子核的组成与基本性质	236	表 3 国家选定的非国际单位制单位	323
第二节 核磁共振与顺磁共振	239	表 4 暂时与国际单位制并用的一些单位及其	
第三节 原子核的放射性衰变	243	换算	324
第四节 放射线的探测	249	表 5 用于构成 10 进倍数和分数单位的词头	
第五节 辐射量与辐射防护	251	—SI 词头	324
本章小结	253	表 6 物理量及其国际单位制单位	325
习题十二	254	附录三 常用常数表	330
*第十三章 粒子物理	256	表 1 常用物理常数	330
第一节 粒子的来源与探测	256	表 2 常用数值常数	330
第二节 基本粒子	258	附录四 希腊字母表	331
第三节 基本相互作用和守恒定律	263	习题答案	332
第四节 强子的夸克模型	265		
*第十四章 物理学与新技术	268		
第一节 等离子体与受控核聚变	268		
第二节 光导纤维	271		

绪 论

一、物理学及其研究对象

物理学是研究自然界基本规律的科学. 它的英文词 Physics 来源于希腊文, 原义是“自然”, 而中文的含义是“物”(物质的结构、性质)和“理”(物质的运动、变化规律), 中文含义与现代观点颇为吻合. 现代观点认为物理学主要研究物质和运动, 或物质世界及其各部分之间的相互作用, 或物质的基本组成及它们的相互作用.

物理学的一个永恒主题是寻找各种序、对称性和对称破缺、守恒律或不变性. 物质的有序状态比我们想像的要广泛得多. 除了排列整齐的位置序以外, 还可以有指向序, 超导态也是一种有序状态. 对称性通常指静止的空间几何对称, 如太极图、八卦、晶体中的平移和旋转对称. 实际上, 对称性还可以是动态的, 可以是时间反演对称、物质—反物质对称以及更为抽象的规范对称等.

19 世纪中叶之前, 物理学曾是完完全全的实验科学, 力学中的理论问题被认为是数学家的事. 19 世纪末, 在当时处于世界物理学中心的德国的大学里, 开始设置理论物理学教授的席位. 此后, 随着人类认识能力的提高, 逐步深入到不能靠直觉把握的微观、高速、宇观现象, 20 世纪初建立了狭义和广义相对论以及量子力学这些深刻的物理理论. 到了 20 世纪中叶, 物理学已经成为实验和理论紧密结合的科学. 20 世纪后半叶由于电子计算机的发展, 既改变了理论物理的工作方式, 也扩大了实验的涵义. 目前物理学已经成为实验物理、理论物理和计算物理三足鼎立的科学. 实验提供的条件比自然界出现的更富变化和更灵活可控, 而物理理论则给出了对自然界的数学描述. 计算物理学是一个重要的新分支, 有自己独特的研究方法. 计算机实验可以提供比通常的实验更为变化丰富和灵活控制的条件, 不过通常需要用到超级计算机.

物理学中最重大的基本理论有下面五个: (1) 牛顿力学或经典力学研究物体的机械运动. (2) 热力学研究温度、热、能量守恒以及熵原理等. (3) 电磁学研究电、磁以及电磁辐射等. (4) 相对论研究高速运动、引力、时间和空间等. (5) 量子力学研究微观世界. 后两个理论主要是在 20 世纪发展起来的, 通常认为是现代物理学的核心. 以上理论中没有一个被完全推翻过, 也没有一个是永远正确的. 例如, 牛顿力学在高速情形下, 应该用狭义相对论来代替; 而对于强引力, 它又偏离于广义相对论, 但在它的适用范围内仍然是精确的. 科学的理论总是要发展的, 需要根据新发现的事实进行修正. 在教科书中只介绍一种版本的做法很可能导致“理论是惟一的”这样的观念, 事实上, 理论决不是惟一的. 科学理论往往在美学上令人赏心悦目, 在数学上优雅而普适, 但是仅仅有这些是决不可能流传下来的. 理论和思想必须经受实验的检验和验证, 物理学中的理论和实验在相互促进和丰富中得到发展.

人们周围存在着的客观实体, 从粒子、原子、分子到宇宙天体, 从蛋白质、细胞到人体都是物质; 从核力场、电磁场到引力场也都是物质. 所有物质都在不停地运行和变化之中, 自然界的一切现象就是这些物质运动的表现, 因而运动是物质存在的形式, 是物质的固有属性. 物理学研究的领域非常宽广, 在空间尺度上已涉及从小到质子半径 10^{-15}m , 大到目前可以观测到的最远的类星体的距离 10^{26}m ; 所包含的时间尺度从短到 10^{-25}s 的最不稳定粒子的寿命, 直到长

达 10^{39} s 的质子寿命. 各种不同的物质运动形式既服从普遍规律, 也有自己的独特规律. 由于物理学所研究的物质运动规律具有普遍性, 就使得物理学成为研究包括药学在内的其他自然科学和技术的重要基础. 物理学的基本概念和技术被应用到了所有的自然科学, 在这些自然科学与物理学之间的边缘领域中形成了一系列新的分支学科和交叉学科. 例如, 高能物理或粒子物理在最小尺度上探索物质更深层次上的结构和运行规律, 是物理学研究中的一个尖端领域; 另一个尖端领域是天体物理, 它在最大尺度上追寻宇宙的演化和起源, 它是物理学与天文学之间形成的边缘学科, 也是物理学及天文学中的一个分支学科. 当今这两个尖端领域已相互衔接起来而成为密不可分的姊妹学科. 再如, 物理学和化学从来就是并肩前进的, 它们相互结合而形成了物理化学、量子化学等边缘学科. 物理化学是应用物理学的原理和实验手段来研究化学反应体系所遵循的普遍规律的一门科学, 它与物理学中的热学、光学、电学等交叉渗透关系非常密切, 它涉及化学反应体系的平衡和动力学以及与之相关联的结构—性能关系, 已发展成为化学科学的理论核心. 量子化学是在量子力学的基础上发展起来的, 它深入研究原子结合力的本质、原子分子空间排列的方式以及结构与性能之间的关系. 物理学的实验方法和理论工具使化学科学得以深入地迅速发展. 物理学与生物学相结合形成了生物物理学. 特别是近四五十年在两学科的交叉点上取得了一系列的重大成就, 如 DNA 双螺旋结构的确定以及分子生物学、遗传工程、耗散结构理论的建立等, 都是与近代物理学的成就密切相关的. 物理学与生物学的相互渗透, 前途是不可估量的. 还可以预料生命科学必定是在与物理学更加密切结合中得到发展.

二、物理学与技术进步、生产实践的关系

就物理学和其他科学的关系而言, 我们可以说, 物理学是最基本的科学. 物理学是最古老、发展最快的科学. 物理学提供最多、最基本的科学研究手段. 最基本的体现是在天文学、地学、化学、生命科学中都包含着物理过程或现象, 在这些学科中用到不少物理学概念和术语是很自然的. 最基本还意味着任何理论都不能和物理学的定律相抵触, 例如, 如果某种理论破坏能量守恒定律, 那么这一理论就很成问题. 当然, 某些物理理论本身或一些阶段性的工作本身也是在不断地完善的.

历史事实证明, 物理学的研究成果除了促进物理学自身和其他自然科学的发展外, 还是改造客观世界为人类服务的强有力的工具. 在 18 世纪和 19 世纪, 由于牛顿力学、热力学的建立和发展推动了其他学科的发展, 研制了蒸汽机和其他工业机械, 掀起了第一次工业革命, 使人类进入了机械化技术的时代. 19 世纪, 在法拉第—麦克斯韦电磁理论的推动下, 人们制造了电机、电器和各种电信设备, 引起了工业电气化, 使人类进入了应用电能的时代, 这是第二次工业革命. 20 世纪以来, 由于相对论、量子力学的建立, 人类对自然界的认识开始从宏观领域推进到微观领域, 对原子、原子核的了解日益深入, 从而实现了原子核能和放射性同位素的应用. 几十年来, 与量子力学微观理论有联系的一些新兴边缘学科不断建立, 同时在量子力学理论的推动下, 直接促成了有关半导体、激光以及核磁共振等许多新技术的发明和应用. 现代技术正经历着一场伟大的革命, 人类已进入了信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、海洋技术、空间技术为主要内容的新技术时代. 而从根本上来说, 20 世纪科学技术的发展都是来源于 20 世纪初期物理学上的三大成就, 即相对论、量子力学和原子核物理. 事实证明, 自然科学的理论研究一旦取得重大突破, 必将为生产和技术带来巨大的进步, 从而使社会物质生产的各个领域面貌一新.

三、物理学的研究与学习方法

一个没有思想的实验工作者可以发现无穷无尽的事实,不过毫无用处;理论家如果不受实验检验这一约束也可能产生出极其丰富的思想,不过与大自然毫无关系而已。

通常的科学研究方法是:通过观测、实验、计算机模拟得到事实和数据,用已知的、可用的原理分析这些事实和数据,形成假说和理论以解释事实,预言新的事实和结果,用新的事例修改和更新理论.上述的后三步都是关于理论的,以上所说的科学研究的步骤是常规的,有时候,有的人可能并不遵循这样的过程,常常直觉或者预感会起相当的作用.有时,机遇(运气或偶然)对于成功也会起作用,使你获得一则重要的信息或发现一个特别简单的解.要学会在恰当的时机提出恰当的问题,并找到问题的答案.有时还必须忽略一些“事实”,原因是这些并不是真正的事实或者它们无关紧要、自相矛盾,或者是由于它们掩盖了更重要的事实或考虑它们使问题过于复杂化.据说,有一次有人问爱因斯坦:如果迈克耳孙—莫雷实验并不导致光速不变你怎么办?他说:他将忽略那些实验结果,他已经得到了结论,光速必须被认为是不变的。

由于物理学是一门基础课,本书中所介绍的内容大部分是物理学中成熟的所谓经典理论.这些基本原理和基础知识至今仍然是各学科赖以发展的基础,在药学领域中也有着广泛的应用,它们对于学习现代物理学新理论也是不可缺少的阶梯.物理学知识经过了几千年特别是近三百年的积累已相当丰富,要在有限的学时内全面讲授物理学的内容是不可能的.所以在内容的选择上只能针对专业性质有所侧重,有些内容仅作概括的叙述.为了学好物理学,进一步提高独立工作能力,学习时不要拘泥于一本教材,还应阅读必要的参考书.此外,物理学是一门实验科学,它的理论是通过实验—理论—实践的考验,经受各种手段从多方面进行检验而建立起来的.因此,要学好物理学还必须重视物理实验,学会使用基本仪器,掌握一些测量的方法和技术操作以及处理数据的原则,并要在实验过程中积极思维,多考虑问题,敢于实践,勇于创新。

在大学物理的学习中,除了学习事实、定律、方程和解题技巧外,还必须努力从整体上掌握物理学,要了解各分支间的相互联系.现代观点认为,应该从整体上逻辑地、协调地来把握物理学.学习中,对于基本物理定律的优美、简洁、和谐以及辉煌应该有所体会,要学会鉴赏其普适程度,了解其适用范围.还要学会区别理论和应用、物理思想和数学工具、一般规律和特殊事实、主要和次要效应、传统的和现代的推理方式等等。

物理学是药学类各专业的一门重要基础课程.物理学的发展,特别是量子力学的发展和应用,对药学的进展起了很大的推动作用.许多新型仪器,如红外分光光度计、紫外分光光度计、质谱仪、傅里叶光谱仪、激光拉曼光谱仪、核磁共振波谱仪等等的使用,已经成为对于药物进行研究和分析的重要手段.量子化学的发展和电子计算机的应用,使得采用理论计算的方法来预测未知化学现象已逐渐成为可能,从而为探求新药物和新流程的研究开拓了广阔的前景.我们深信,同学们通过物理学的严格训练和坚持不懈的学习,不仅可以为今后学习专业课程打下扎实的基础,而且将为发展我国药学事业发挥积极的作用。

第一章 刚体动力学

在机械运动的研究中,以前我们讨论的都是质点运动的规律.质点运动的规律是力学中比较简单但也是比较基本的规律.当物体的形状和大小与所研究的问题无关时,我们就把物体看作质点.例如,研究汽车在公路上的运动情况,就可把汽车看作质点.如果是研究汽车轮子的转动,就不能把轮子看作是质点.实际上,在许多问题中,物体的运动是直接与其形状、大小有关的.例如,地球的自转、轮子的转动和各种物体在外力作用下发生的形变等等,这时,我们就不能再把物体看作质点了.

一般来讲与物体的形状、大小有关的运动都是比较复杂的,因为在外力作用下物体总要或多或少地发生一些形变.但是,在某些问题中,物体的形状和大小的变化很小,可以忽略,如飞轮的转动等等.这样,我们就可以引入刚体这一理想模型,即假定无论在多大的外力作用下,其形状和大小都不发生任何变化的物体称为刚体.也就是说,物体上任意两点之间的距离永远不变.

刚体动力学是研究刚体的运动规律及其应用的科学.刚体最简单和最基本的运动是平动和定轴转动,任何刚体的一般运动都可看成是其质心的平动和绕质心轴转动的合成.当刚体运动时,如果刚体上任意一条直线在各个时刻的位置始终彼此平行,这种运动称为平动.根据平动的定义可以得出,刚体作平动时,其上各点的运动情况是完全相同的.知道了刚体上任一点的运动,整个刚体的运动情况也就知道了.因此,作平动的刚体可以看成是质点.质点动力学中描述质点运动的各种物理量如速度、加速度等等,以及质点力学的规律都适合于描述整个刚体的平动.本章主要讨论刚体作定轴转动时所遵循的规律.

第一节 刚体的定轴转动

刚体运动时,如果刚体的各个质点在运动中都绕同一直线作圆周运动,这种运动称为转动,这一直线称为转轴.如果刚体转动时,转轴固定不动,这种运动称为定轴转动.如电动机的转子绕它的轴转动就是定轴转动.

刚体定轴转动具有如下特点:(1)除轴上各点不动外,刚体上其他各个质点都绕轴做圆周运动,但各质点圆周运动的半径不一定相等.(2)各质点圆周运动的平面垂直于轴线,圆心是平面与轴线的交点.(3)各质点的矢径,在相同时间内转过的角度是相同的.

根据定轴转动的特点,描写刚体的转动,通常取任一垂直于定轴 OO' 的平面 S 作为转动平面,见图 1-1.了解了转动平面的运动情况,就可以了解整个刚体的运动情况.但是,当刚体定轴转动时,转动平面上各点的位移、速度和加速度各不相同,显然仅用这些物理量来描述刚体的运动情况是不够的,为此,我们引进角位移、角速度和角加速度等物理量.

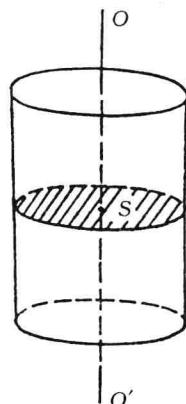


图 1-1 刚体转动的描述

一、角坐标与角位移

我们研究转动平面上任意一点 P , 假定规定水平向右为参考方向, 见图 1-2, 则从圆心 O 到 P 点的连线, 即 P 点的矢径, 与参考方向的夹角 θ 称为角坐标, 它是描写刚体位置的一个参量. 当选取不同的参考方向, 角坐标的值也是不同的. 我们规定, 以参考方向为准, 矢径 r 沿逆时针方向旋转, 角坐标为正 ($\theta > 0$); 矢径 r 沿顺时针方向旋转, 角坐标为负 ($\theta < 0$). 刚体作定轴转动时, 其角坐标 θ 将随时间而变, 函数 $\theta = f(t)$ 就是转动时的运动方程. 角坐标的单位是弧度(rad).

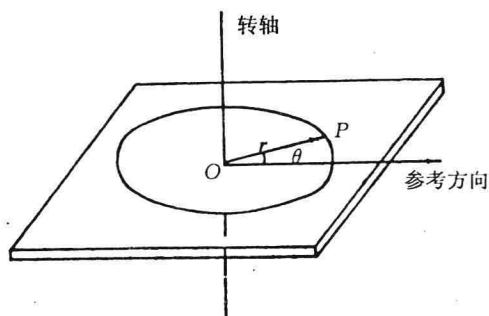


图 1-2 角坐标

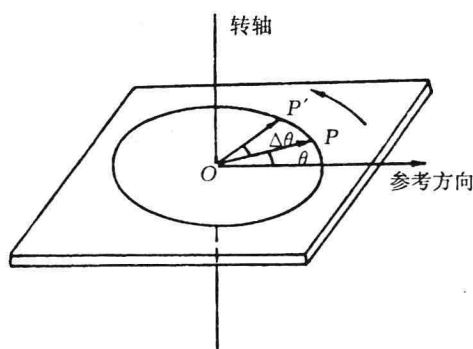


图 1-3 角位移

见图 1-3, 设 t 时刻质点在 P 点, 角坐标为 θ . 在 $t + \Delta t$ 时刻, 质点到达 P' 点, 角坐标为 $\theta + \Delta\theta$, 则角坐标的增量 $\Delta\theta$ 称为角位移.

对于定轴转动来说, 由于只有逆、顺时针两个转动方向, 所以角位移可用正、负号表示. 一般规定沿逆时针方向转动的角位移为正, 沿顺时针方向转动的角位移为负. 角位移的单位也是弧度(rad).

二、角速度

为了描述刚体转动的快慢, 我们引进角速度的概念. 设刚体在 $t \sim t + \Delta t$ 时间内的角位移为 $\Delta\theta$, 则角位移与所用时间之比称为这段时间 Δt 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, 用 ω 表示, 即

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

角速度的单位为弧度/秒(rad/s).

角速度是矢量, 其方向由右手螺旋法则确定: 将右手拇指伸直, 其余四指弯曲, 使右手螺旋转动的方向与刚体的转动方向一致, 这时拇指的方向就是角速度 ω 的方向, 见图 1-4. 当刚体同时参与多个转动时, 其合成转动的角速度与各分转动的角速度遵守平行四边形的相加法则. 在任何相等的时间内, 刚体转过的角位移都相等. 这种转动称为匀角速转动.

三、角加速度

质点在某一时刻的角速度为 ω_0 , 经过时间 Δt 后, 角速度为

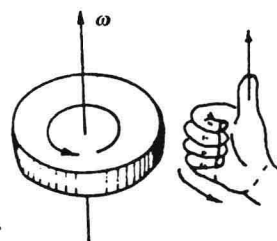


图 1-4 螺旋法则

ω , 则角速度的增量 $\Delta\omega = \omega - \omega_0$. 角速度的增量 $\Delta\omega$ 与时间 Δt 之比, 称为在 Δt 这段时间内质点对 O 点的平均角加速度, 用 $\bar{\beta}$ 表示, 即

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

当 Δt 趋近于零, 那么比值就趋近某一极限值

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

β 称为在某一时刻, 质点对 O 点的瞬时角加速度, 简称角加速度. 角加速度的单位是弧度/秒² (rad/s²).

角加速度 β 也是矢量, 依 $\beta = \frac{d\omega}{dt}$ 定义, 对于定轴转动, 当刚体转动加快时 β 和 ω 方向相同, 当刚体转动减慢时 β 与 ω 方向相反.

刚体作匀速和匀变速转动时, 用角量表示的运动方程与质点作匀速直线运动和匀变速直线运动的运动方程相似. 匀速转动的运动方程为

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (1-3)$$

匀变速转动的运动方程为

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \beta t \\ \theta &= \theta_0 + \omega t + \frac{1}{2} \beta t^2 \\ \omega^2 &= \omega_0^2 + 2\beta(\theta - \theta_0) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中 θ 、 θ_0 、 ω 、 ω_0 和 β 分别表示角坐标、初角坐标、角速度、初角速度和角加速度.

四、角量与线量的关系

我们通常把描写质点运动的物理量叫线量, 描写刚体转动的物理量叫做角量. 由于刚体做定轴转动时, 刚体上的每个质点 (轴线上的点除外) 要作圆周运动, 所以, 从描写质点运动的角度来说, 用的是线量; 从描写整个刚体转动的角度来说, 用的是角量. 因此, 角量与线量之间必然有一定的关系.

见图 1-5, 刚体在 Δt 时间内角位移为 $\Delta\theta$, P 点在这段时间内的位移称为 Δs , 当 Δt 极小时, 弦长可以认为等于弧长, 所以有

$$ds = r d\theta$$

两边除以 dt , 则得

$$\frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt}$$

而 $v = \frac{ds}{dt}$, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$, 所以上式改写为

$$v = r\omega \quad (1-5)$$

写成矢量式为

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r} \quad (1-6)$$

将 (1-5) 式两边对 t 求导数, 由于 r 是恒量, 得

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= r \frac{d\omega}{dt} \\ a_t &= r\beta \end{aligned} \quad (1-7)$$

即

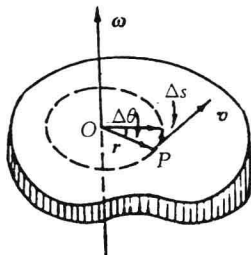


图 1-5 线量与角量的关系

这就是切向加速度 a_t 与角加速度 β 之间的关系式. 把 $v = r\omega$ 代入向心加速度的公式 $a_n = \frac{v^2}{r}$, 可得到

$$a_n = v\omega = r\omega^2 \quad (1-8)$$

这就是向心加速度 a_n 与角加速度 ω 之间的关系式.

第二节 转动动能 转动惯量

一、转动动能

刚体可以看成是由许多质点所组成的. 设各质点的质量分别为 $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_n$, 各质点与转轴的距离分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$. 当刚体绕定轴转动时, 各质点的角速度 ω 相等, 但线速度各不相同. 设其中第 i 个质点的线速度为 v_i , 其大小为 $v_i = r_i\omega$, 则相应的动能为

$$\frac{1}{2}\Delta m_i v_i^2 = \frac{1}{2}\Delta m_i r_i^2 \omega^2$$

整个刚体的动能是所有各质点的动能之和, 即

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2}\Delta m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}\Delta m_2 v_2^2 + \dots + \frac{1}{2}\Delta m_n v_n^2 \\ &= \frac{1}{2}\Delta m_1 r_1^2 \omega^2 + \frac{1}{2}\Delta m_2 r_2^2 \omega^2 + \dots + \frac{1}{2}\Delta m_n r_n^2 \omega^2 = \sum \frac{1}{2}\Delta m_i r_i^2 \omega^2 \end{aligned}$$

因为 $\frac{\omega^2}{2}$ 对各质点都相同, 可从累加号内提出, 所以刚体转动动能为

$$E_k = \frac{1}{2}(\sum \Delta m_i r_i^2) \omega^2 \quad (1-9)$$

(1-9) 式中括号内的量常用 I 来表示, 称为刚体对给定转轴的转动惯量, 因此刚体的转动动能可写成

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1-10)$$

式中

$$I = \sum \Delta m_i r_i^2 \quad (1-11)$$

二、转动惯量

由(1-11)式可知转动惯量等于刚体中每个质点的质量与这一质点到转轴的距离平方的乘积之和, 即所有质点的质量和其半径的平方的乘积之和. 把转动动能与平动时的动能公式相比较, 可知转动惯量相当于平动的质量, 它是物体在转动时惯性大小的量度.

对于质量连续分布的物体, (1-11) 式应写成积分形式

$$I = \int r^2 dm = \int r^2 \rho dV \quad (1-12)$$

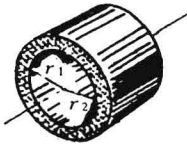
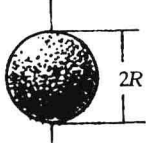
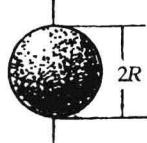
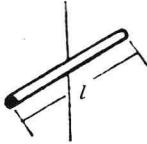
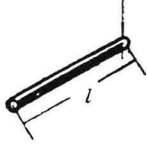
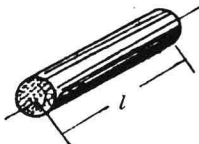
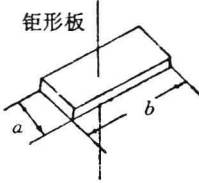
式中 dV 表示相应于 dm 的体积元, ρ 表示体积元处的密度, r 是体积元与转轴之间的距离. 转动惯量的单位是千克·米² ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

从转动惯量的定义可以看出, 刚体的转动惯量与下列因素有关: (1) 与刚体的质量有关, 质量大的转动惯量大. (2) 在质量一定的情况下, 还与质量的分布有关, 即与刚体的形状、大小和各部的密度有关. 例如, 同质料的质量相等的空心圆柱和实心圆柱, 对于圆柱的轴来说, 前者的转动惯量较大. 又如两个质量相同, 形状大小也相同的圆盘, 一个中间密度大边缘密度小, 另一个中间密度小而边缘密度大, 对于圆盘的中心轴而言, 后者的转动惯量较前者大. (3) 转动

惯量与转轴的位置有关. 例如, 同一均匀细长棒, 对于通过棒的中心并与棒垂直的转轴和通过棒的一端并与棒垂直的另一转轴, 转动惯量是不相同的, 后者较大. 所以只有指出刚体对某一转轴的转动惯量才有明确意义.

几种形状简单的、密度均匀的物体对不同转轴的转动惯量见表 1-1.

表 1-1 转动惯量

薄圆盘  转轴通过中心与盘面垂直 $I = \frac{1}{2} m R^2$	圆筒  转轴沿几何轴 $I = \frac{m}{2} (R_1^2 + R_2^2)$	球体  转轴沿直径 $I = \frac{2}{5} m R^2$	球壳  转轴沿直径 $I = \frac{2}{3} m R^2$
细棒  转轴通过中心与棒垂直 $I = \frac{1}{12} m l^2$	细棒  转轴通过端点与棒垂直 $I = \frac{1}{3} m l^2$	圆柱体  转轴沿几何轴 $I = \frac{1}{2} m r^2$	矩形板  轴线通过板中心并与板垂直 $I = \frac{1}{12} m (a^2 + b^2)$

例 1-1 求质量为 m 、长为 l 的均匀细棒对与棒垂直通过离中心 M 为 h 的棒上一点 O 的转轴的转动惯量.

解 沿细棒取坐标轴 OX , 使原点 O 位于转轴处, 见图 1-6. 在细棒上任取一长为 dx 的质点, 其坐标为 x , 质量为 $dm = \lambda dx$. 其中 $\lambda = \frac{m}{l}$ 为细棒的质量线密度. 根据转动惯量的定义, 细棒对 O 处垂直轴的转动惯量为

$$\begin{aligned}
 I &= \int_{-\frac{l}{2}+h}^{\frac{l}{2}+h} x^2 \lambda dx \\
 &= \frac{1}{3} \lambda \left(\frac{l}{2} + h \right)^3 - \frac{1}{3} \lambda \left(-\frac{l}{2} + h \right)^3 \\
 &= \frac{\lambda l^3}{12} + \lambda l h^2 = \frac{1}{12} m l^2 + m h^2
 \end{aligned}$$

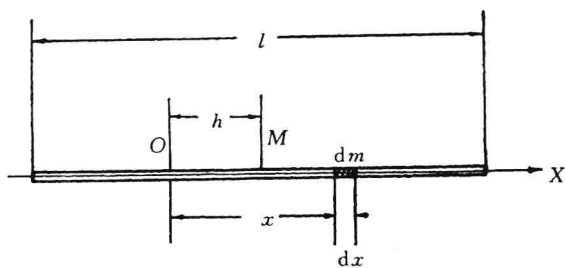


图 1-6 均匀细棒

如果转轴通过棒的中心且与棒垂直,则 $h = 0, I = \frac{1}{12}ml^2$; 如果转轴通过棒的一端且与棒垂直,则 $h = \frac{l}{2}, I = \frac{1}{3}ml^2$.

例 1-2 求质量为 m , 半径为 R 的均匀薄圆盘对通过其中心且垂直于盘面的轴的转动惯量.

解 设圆盘单位面积所具有的质量为 $\sigma, \sigma = \frac{m}{\pi R^2}$, 取宽为 dr , 半径为 r 的细圆环作为质量元 dm , 则 $dm = \sigma ds = \frac{m}{\pi R^2} \cdot 2\pi r dr$, 所以质量元对给定的转轴之转动惯量 dI 为

$$dI = r^2 dm = \frac{m}{\pi R^2} 2\pi r^3 dr$$

于是, 圆盘对给定轴的转动惯量 I 为

$$I = \int dI = \int_0^R \frac{m}{\pi R^2} 2\pi r^3 dr = \frac{2m}{R^2} \int_0^R r^3 dr = \frac{1}{2} mR^2$$

例 1-3 利用上题结果, 求一质量为 m , 半径为 R 的均匀实心球对通过球心的轴之转动惯量.

解 设球体的密度为 $\rho, \rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi R^3}$, 见图 1-7, 取垂直于转轴的厚度为 dx , 半径为 r 的薄圆盘质量元为 dm , 则 $dm = \rho \cdot dV = \rho \pi r^2 dx = \rho \pi (R^2 - x^2) dx$, 根据上题结果, 该质量元对所给定轴的转动惯量 dI 为

$$dI = \frac{1}{2} r^2 dm = \frac{\pi \rho}{2} (R^2 - x^2)^2 dx$$

这样, 球体对所给轴的转动惯量为

$$I = \int dI = \frac{\rho \pi}{2} \int_{-R}^{+R} (R^2 - x^2)^2 dx = \frac{8x\rho}{15} R^2 = \frac{2}{5} mR^2$$

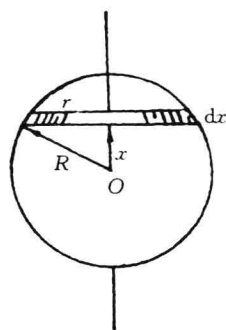


图 1-7 均匀实心球体

第三节 转动定律

一、力矩

由事实可知, 要使原来静止的物体以某一角速度转动, 或者使已转动的物体改变其角速度, 则不仅与所施的力的大小有关, 而且与力的作用点的位置以及力的作用方向有关. 例如, 我们开关门窗时, 用力越大, 门就转得越快; 若力的大小相同, 则作用点离轴越远, 门就越容易转动; 即使以同样大小的力作用于同一点, 但力的方向不同, 则效果也不同, 如果力的方向与轴平行或通过转轴, 则不能打开或关上门窗. 因此在转动中必须研究力矩的作用.

设刚体所受外力 f 在垂直于转轴 OO' 的平面内, 见图 1-8, 力的作用线和转轴之间的垂直距离 d 称为力对转轴的力臂. 则力和力臂的乘积称为力对转轴的力矩, 用 M 表示. 即

$$M = fd$$

设力的作用点是 P , P 点至转轴 OO' 的垂直距离为 r , 相应的矢径为 $\mathbf{r}$. 从图 1-8 可知, $d = r \sin \varphi$, φ 角是力 f 与矢径 $\mathbf{r}$ 之间的夹角, 所以上式也可写成

$$M = fr \sin \varphi \quad (1-13)$$