



普通高等教育“十二五”规划创新教材



河南省“十二五”普通高等教育规划教材

医药物理学

李松山 李高申 程方荣 张灵帅 编著



中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十二五”规划创新教材
河南省“十二五”普通高等教育规划教材

医 药 物 理 学

(第二版)

李松山 李高申 程方荣 张灵帅 编著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

医药物理学 / 李松山等编著. —北京 : 中国科学技术出版社, 2015. 6
ISBN 978 - 7 - 5046 - 6929 - 2

I. ①医… II. ①李… III. ①医药学 - 物理学 - 高等学校 - 教材 IV. ①R
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 116469 号

策划编辑 王晓义
责任编辑 王晓义
封面设计 孙雪骊
责任校对 何士如
责任印制 张建农

出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号
邮 编 100081
发行电话 010 - 62103130
传 真 010 - 62179148
投稿电话 010 - 62176522
网 址 [http: //cspbooks. com. cn](http://cspbooks.com.cn)

开 本 787mm × 1092mm 1/16
字 数 450 千字
印 张 19. 75
印 数 1—3000 册
版 次 2015 年 7 月第 1 版
印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷
印 刷 北京金信诺印刷有限公司

书 号 ISBN 978 - 7 - 5046 - 6929 - 2/ R · 1832
定 价 39. 00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

前 言

物理学作为基础学科,是理、工、农、医各学科专业必须开设的基础课程。物理学的知识与技术在制药技术与设备、医疗器械和手段上有着非常广泛的应用。物理学概念、规律,物理学理论与生命科学的结合越来越紧密。物理学思想、方法在生命科学中有着深刻的体现。医学物理学就是物理学与生命科学相互交叉、相互渗透而发展起来的一门边缘学科。

医学物理学近期发展迅猛,一是医学发展本身的需要,二是物理学本身的特点。当前,医学发展正从宏观走向微观,从定性走向定量,从细胞水平走向分子水平,从手工的、接触型的测试手段走向自动化、智能化、非接触型的测试手段。因此,需要自然科学的各种最新成就为医学服务。物理学既有严格的物理学理论,又有精密的先进的实验方法和手段,因而对医学发展具有重要作用。众所周知,X射线断层照相、磁共振成像等技术,已经为疾病的预防、诊断、治疗提供了强有力的先进手段。

目前,医学院校医学类各专业所用教材《医用物理学》,药学各专业所用教材《物理学》,大多过分注重物理学自身体系,对物理学在医药学学科中的应用仅作了简单的举例,未能做到与医药学学科的交叉融合。同时,现有的《医用物理学》及《物理学》教材都用到较多的高等数学知识,不符合医药学各专业学生的数学知识水平,脱离了学生实际状况。药学各专业教材《物理学》在这方面的问题显得更为突出。药学各专业教材《物理学》更偏重工科性质,从而忽视了为培养临床药师所需要的医学物理学的知识结构。

鉴于上述情况,本书力求做到几点。首先,尽量避免使用高等数学,不得不用时只介绍数学概念,不进行高等数学的演算。其次,着重于物理学概念、规律、定律、理论的阐述,力求用准确的物理学语言讲清楚药学、生理学、医学中的物理学问题及相关知识,为今后的学习和工作奠定必要的物理学知识,物理学思维方式。最后,本书内容能同时适用于药学各专业及医学各专业的教学,避免使用两种教材,便于教学。各医学院校可根据自身医学专业及药学专业设置状况,培养方案的具体要求,在教学中可对本书各章节有不同的取舍。

由于编者水平所限,书中难免有不妥和谬误,恳请读者批评指正。

编 者

2009年3月

第二版前言

2010年,在复旦大学医学院召开的全国高等医药院校《医学物理学》教学经验交流研讨会上,本书编者对本书的内容和特色以及这些年来在教学中的使用情况作了介绍。与会专家、代表对本书给予了充分肯定,认为本书突破了以物理学自身理论框架为主线的传统讲授体系,从物理学与医药学学科交叉融合的讲授思路,构建了新的理论框架,涵盖了“医药物理学”这一边缘学科的基本内容。如对生物力学、血液流变学、电生理学、激光医学、放射医学、现代医学三大影像以及物理学知识与药物分析、检验、鉴定,药物剂型、制备、临床用药等方面知识的交叉融合有较深刻详细的阐述。本书的内容、特色使“医学物理学”课程有机地融合于医药学学科各专业的课程体系之中。

与会代表还充分肯定了本书把医学各专业使用的教材与药学各专业使用的教材进行有机融合的编写特点。医学、药学两大专业知识结构本身就密不可分,不能割裂,最终均应体现在临床医疗和临床用药实践中。高等医药院校医学物理学课程的讲授就不能脱离临床医疗、临床用药这一基本的对相关知识的需求。基于这一思想,本书把生理、病理、医疗等生命过程中以及制药、用药过程中涉及的物理学基本理论、基本知识与其有机融合在一起进行讲授,让医学、药学两大专业学生共同使用,完善了他们的知识结构。本书知识结构体系的整合优化,更有利于医学、药学各专业学生后续课程的学习,更有利于教师教学。

这些年,作者使用本书给药学各专业学生授课时感到:物理学与药学学科知识间的有机融合在本书中的体现还不够丰富。值本书再版之际,作者在这方面作了较大补充。如把流体力学知识、流变学知识、物质的渗透现象、液体的表面性质与药剂学知识;把热力学理论与生化反应过程;把光的吸收理论与药物分析、鉴定;把物质的衰变规律与药物在体内的吸收、代谢过程、临床用药等物理学与药学的理论知识有机融合在一起进行了论述。

限于编者的理论、知识水平,书中难免仍有不足乃至谬误之处,恳请读者给予批评指正。

编者

2014年12月

目 录

绪论	(1)
第一章 物体的弹性	(5)
第一节 物体的平衡	(5)
第二节 应力和应变	(13)
第三节 弹性模量	(17)
第四节 黏弹性物质	(20)
第五节 骨的力学性质	(21)
第六节 肌肉的力学性质	(24)
第七节 血管与心脏的力学性能	(28)
思考题 习题一	(30)
第二章 流体的流动	(31)
第一节 流体及其流动性	(31)
第二节 理想流体的稳定流动	(32)
第三节 伯努利方程	(34)
第四节 实际流体的流动	(36)
第五节 泊肃叶定律、斯托克斯定律	(41)
第六节 血液在循环系统中的流动	(45)
思考题 习题二	(48)
第三章 分子动理论	(49)
第一节 分子运动基本概念、气体的状态参量	(50)
第二节 理想气体状态方程、压强公式	(52)
第三节 气体的分压强	(57)
第四节 能量按自由度均分定理	(58)
第五节 输运过程	(62)
第六节 液体的表面现象	(65)

第七节	肺呼吸的物理原理	(72)
思考题	习题三	(82)
第四章	热力学基本定律	(83)
第一节	热力学第一定律	(83)
第二节	热力学第一定律的应用	(87)
第三节	卡诺循环与热机效率	(94)
第四节	热力学第二定律	(98)
第五节	熵及熵增加原理	(104)
思考题	习题四	(107)
第五章	振动和波动	(110)
第一节	简谐振动	(110)
第二节	阻尼振动、受迫振动、共振	(114)
第三节	简谐振动的合成	(116)
第四节	机械波的产生和传播	(119)
第五节	简谐波	(121)
第六节	波的干涉	(125)
思考题	习题五	(130)
第六章	声波、超声波	(132)
第一节	声波的基本概念和规律	(132)
第二节	人耳传声的物理过程	(137)
第三节	多普勒效应	(141)
第四节	超声波的生物效应	(143)
第五节	超声波在医学中的应用	(149)
第六节	次声波与噪声的生物学效应	(154)
思考题	习题六	(156)
第七章	电磁场的基本概念、规律	(157)
第一节	静电场	(157)
第二节	直流电	(164)
第三节	稳恒磁场	(171)
第四节	电磁感应	(178)
思考题	习题七	(184)
第八章	人体电磁现象	(187)
第一节	膜电位	(187)

第二节	神经的兴奋和冲动	(190)
第三节	心电和脑电	(196)
第四节	直流电的人体效应	(200)
第五节	交流电的人体效应	(206)
第六节	微波的人体效应	(208)
第七节	人体的磁场	(210)
思考题	习题八	(214)
第九章	波动光学	(215)
第一节	光的干涉	(215)
第二节	光的衍射	(223)
第三节	光的偏振	(227)
第四节	旋光现象	(230)
第五节	光的吸收	(232)
思考题	习题九	(236)
第十章	几何光学	(239)
第一节	单球面折射、透镜	(239)
第二节	眼睛	(244)
第三节	放大镜与显微镜	(249)
第四节	检眼镜与纤镜	(252)
第五节	人的视觉物理	(254)
思考题	习题十	(256)
第十一章	X 射线	(257)
第一节	X 射线的产生及其性质	(257)
第二节	X 射线谱	(259)
第三节	X 射线与物质的相互作用	(262)
第四节	物质对 X 射线的衰减规律	(263)
第五节	X 射线在医学上的应用	(265)
思考题	习题十一	(272)
第十二章	原子核与放射性	(273)
第一节	原子核的基本性质	(273)
第二节	原子核的衰变类型	(275)
第三节	放射性核素的衰变规律	(278)
第四节	辐射量与辐射防护	(282)

第五节	放射性核素在医药学方面的应用	(285)
思考题	习题十二	(286)
第十三章	激光及其医学应用	(288)
第一节	激光的基本原理与特性	(288)
第二节	激光的生物作用和医药学应用	(291)
思考题	习题十三	(294)
第十四章	核磁共振及其医学应用	(295)
第一节	核磁共振基本概念	(295)
第二节	核磁共振谱	(298)
第三节	磁共振成像原理	(299)
第四节	核磁共振技术在医学中的应用	(303)
附录		(306)

绪 论

1. 物理学的研究对象

物理学是研究物质结构和相互作用以及物质运动规律的科学,是关于自然界基本形态的科学之一。物理学的发展过程,就是人类对整个客观物质世界的认识过程。

一切客观存在都是物质和物质的运动,物理学所研究的物质可分为“实物”和“场”两类。物体是由原子、分子组成的,原子是由原子核和电子构成的,而原子核又是由更小的粒子——质子和中子构成的,它们都属于实物。实物之间的相互作用是通过场来实现的。实物之间存在多种相互作用场。场作为物质的存在形式具有质量、动量和能量。此外,物理学家还推测宇宙中存在暗物质或非重子类的物质。运动是物质的固有属性,这里所指的运动是广义的,包括机械运动、变化、生长、相互作用等过程。物质运动的形式是极其多样的,各种形式的物质运动之间,相互依存而又本质上相互区别。它们既服从普遍规律,又有自己独特的规律。自然科学的分类就是根据其研究对象的不同而区分的。

在所有自然科学中,物理学所研究的物质运动形式,也具有最基本、最普遍的性质。具体地说,物理学所研究的运动包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子内部运动、场和实物的相互作用等。物理学所研究的运动形式,普遍存在于其他高级的、复杂的物质运动形式之中。因此,物理学所研究的规律具有最基本、最普遍的意义,使物理学知识成为研究其他自然科学所不可缺少的基础。在自然科学尚未分类的古代,物理学也处于也处于襁褓之中,并未独立为一门科学。随着科学的发展,出现了许多自然科学分支,物理学也独立成为一门学科。由于近代科学的迅速发展和相互渗透,出现了许多和物理学直接有关的“边缘学科”,如化学物理学、物理化学、生物物理学、天体物理学、生物物理化学、生物医学工程学等。医学物理学是物理学的重要分支学科,是现代物理学与医学相结合所形成的交叉学科。物理学上的每一次重大发现都极大地推动了其他自然科学学科的发展,促进科学技术和生产技术发生根本的变革。由于物理学所研究的规律具有很大的普遍性,与哲学的关系也十分密切。物理学中许多重大发现,例如,相对论、物质的波粒二象性、基本粒子的相互转化、场和实物间相互作用等,为哲学提供了有力的证据。

物理学的进展还极大地影响了社会科学的发展,改变着整个人类的哲学思想和行为方式。

2. 物理学的科学思维

大学物理是在比中学物理学较高层次上介绍物理学内容和进行物理学实验,因而能更好地体现物理学的研究方法。而对物理学及其科学思维和研究方法的了解,不仅有助于学生对物理学和其他学科的学习,使其具备高级医学卫生人才所应有的理科素质,而且有助于启迪学生的思维。各门科学,包括物理学在内,其基本任务是认识物质属性,研究物质运动规律,其研究方法

都是遵循“实践—理论—实践”的认识法则。具体地说,物理学的研究方法包括观察、实验、假说和理论各个环节。观察和实验所获得的大量资料是理论的依据。理论是从几条基本原理出发,说明一定范围内的各种物理现象,并且还能在一定程度上预言未知现象的存在,指导进一步的实践。

物理学集中了几乎所有重要的科学研究的思想和方法。物理思想主要指物理概念、原理和理论形成过程中的思维方式,物理学描绘了一幅物质世界的完美图像,揭示出物质运动形态的相互联系和相互转化,体现了物质世界的和谐性、统一性。物理学的许多方面都体现了经过深刻思辨和逐步深化、逐步完善的思想认识过程,对物理思想的学习,不仅对掌握物理学的基本内容是必要的,而且对培养科学的世界观和思维方式 also 具有重要意义。

物理学的研究方法是开发智力和提高能力的途径。物理学思想能启迪学生创新思维,是培养创造型人才的火种。物理学的知识结构体系是科学技术的母体,具有很强的迁移和再生能力。知识的迁移就是智慧,知识的再生就是创造。物理学中的研究方法系统、新颖,创新思想层出不穷。对大学生来说,学好物理学能很好地培养和发展自己的知识结构和创新能力。

3. 物理学与生命科学的关系

物理学和医学这两大古老学科自其发展伊始就有着密不可分的联系。

祖国医学中的“切诊”可以认为是力学与医学的最早结合。当血液在心血管系统中循环流动时,受生理、病理因素的制约而呈现出不同的力学表象,即脉象,中医通过对这些脉象的感受而对疾病做出判断。可以说“切诊”的实质是应用力学的指标作为判断疾病的标准。在《医宗金鉴·正骨心法要旨》中有“必素知其体相,识其部位,一旦临证,机触于外,巧生于内,手随心转,法从心出……或拽之离而复合,或推之就而复位,或正其斜,或完其阙”的论述。这里具体地叙述了如何应用不同大小和方向的力使有重叠倾向的骨折“离而复合”,或使有分离倾向的骨折或脱位“就而复位”。

在西方医学界,生物中的力学问题的研究亦可以追溯到很早的年代。一个光辉的例子是血液循环的发现。这要归功于威廉·哈维,他于1615年完成了这一发现。当时还没有显微镜,哈维终其一生从未看到过微血管。他的发现完全是按照力学原理逻辑推理的结果,是一个完全“理论”性的结论。

哈维曾跟伽利略学习过。早在1615年哈维就已形成了血液循环的看法,但直到1628年才发表。这期间,哈维运用伽利略的测量原理,根据流动的力学规律,最终才明确得出了血液只能顺一个方向流动,循环的存在乃是心脏功能的必要条件这一理论结论。实际上,微血管直到1661年才被马尔切洛·马尔皮吉(Marcello Malpighi)所发现,比哈维作出的预言晚了45年。

伽利略在成为著名的物理学家之前,是一位医科学校的学生。他找到了摆长与周期的定量关系,并用摆来测定人的心率,用与心搏合拍的摆长来表达心率。

波雷里(Giovanni Alfonso Borelli)是意大利杰出的数学家和天文学家。他的《论动物的运动》(1680年)一书在医科院校里可称为生物力学的经典之作。他成功地阐明了肌肉的运动和动物自身的运动问题。

建立了杨氏弹性模量的托马斯·杨(Thomas Young)曾是伦敦的一位医生。当杨试图认识人类的声音时,转而研究振动机理,从而导致“干涉原理”的建立。他进而创立了光的波动理论,使他在物理学界赢得了持久的声誉。

流体力学家伯努利(Jeam Louis Poiseuille)原来也是一位医学专业的学生。在他就读医学专业时就创造了用水银计来测量狗主动脉血压的方法。毕业后,在他研究血液流量的规律时,发现了黏性流体的伯努利定律。该定律是流体力学的基础定律之一,伯努利本人也成了流体力学的奠基者而留名于世。

亥姆霍兹(H.L.Helmholtz 堪称为“生物工程之父”)。他先后在柯尼斯堡(Konigsberg)大学任生理学和病理学教授,在波恩大学担任解剖学和生物学教授,在海德堡大学任生理学教授,最后在柏林大学担任物理学教授。他刚从医学院校毕业在军队服役时,便写出了论述能量守恒定律的论文。他揭示了眼的聚焦机理,并继杨之后系统地阐述了色视觉的三色理论。他发明了晶状体镜并用以研究眼球晶体的变化,发明了眼底镜并用以观察视网膜。他第一次测定了神经脉冲的传播速度并确定为 30m/s。他还指出肌肉收缩释放的热是动物热的重要来源。

德国医伍尔夫(Julius Wolff)在 1892 年提出的骨改建定律,既活骨随着受的应力和应变的改变而发生变化,至今仍是骨力学的重要基础理论。

生理学家斐克(Fick)是质量传递的扩散定律的创建人。弗兰克(Frank)提出了心脏的流体力学理论。斯塔林(Starling)提出物质透过膜的传输定律,并说明了人体内水平衡的问题。克罗赫(Krogh)由于对微循环的贡献而获诺贝尔生理学或医学奖。希尔(Hill)则因肌肉力学的研究而获诺贝尔生理学或医学奖,等等。他们的贡献为生物力学奠定了基础。

上述一系列科学史实表明,物理学与医学在研究问题的思维方法及其科学原理方面具有共通性。物理学建立的概念、研究问题的方法及研究过程中发展成熟的物理思想极大地升华了人类对自然界的认识。正确运用物理学的概念和规律,理论和方法来研究生命现象,将使我们生命世界有更深刻的认识,也必将大大提高医疗水平。物理学的理论和方法正在对生命现象本质的研究不断做出新的贡献。

另一方面,物理学所提供的技术和方法已日益广泛应用于生命科学、医学和药学研究以及临床医疗实践之中,并且不断更新。例如,光学显微镜、X 线透视和照片、放射性核素在医药学上的应用已是人们早已熟知的。而现代电子显微镜与光学显微镜相比,分辨率提高了近千倍,成为研究细胞内部超微结构的重要工具,计算机 X 射线断层摄影术(X-CT)与通常 X 线诊断相比,其灵敏度提高了百倍,磁共振成像(MRI)技术既能显示解剖学图像,又能显示反映功能和代谢过程与生化信息的图像,为医学提供了一种崭新的诊断技术。各种光纤内镜取代了刚性导管内镜,提高了疾病的诊断率,减轻了病人的痛苦。物理治疗除常见的热疗、电疗、光疗、放疗、超声治疗等方法外,还应用低温冷冻、微波、激光等手段。电子计算机不仅应用于研究人体生理和病理过程中的各种控制调节,而且用于辅助诊断、自动监护和医院管理。在研究生物大分子本身的结构、构象、能量状态及其变化,以及这些状态和变化与功能之间的关系方面,除应用了物理学中的量子力学方法外,还普遍应用了物理学中的各种光谱和波谱技术等,如电子自旋共振谱、磁共振谱、激光拉曼谱、圆二色术、旋光色散、红外光谱、荧光偏振、X 射线衍射、光散射以及激光全息等物理技术。

物理学在理论上和技术上的新成就不断为生命科学和医药学的发展提供理论基础和技术方法。反过来,生命科学和医药学的发展,又不断地向物理学提供新的研究课题,二者互相促进、相辅相成。总之,物理学与生命科学的关系可归结为两个主要方面:①物理学知识是揭示生命现象不可缺少的基础;②物理学所提供的技术和方法为生命科学的研究、临床实践开辟了许多新的途径。



【学习要求】

1. 了解力的平衡及医学应用。
2. 掌握应力、应变、弹性模量诸概念。
3. 理解黏弹性物质及其特性。
4. 了解骨骼和肌肉的力学特性。

学习物体的弹性,以及物体处于平衡状态时所满足的条件和规律,是研究人体力学所必备的基础知识。在力学中,我们把静止状态、匀速直线运动状态以及匀速定轴转动状态均称为平衡状态(equilibrium state)。但在研究物体的平衡时,人们常忽略在外力作用下物体的形状或大小的改变,这时我们把物体称为刚体。刚体是一个理想模型。然而,实际上任何一个物体在外力的作用下,它的形状或大小都要发生一定的变化,这一变化称为形变(deformation)。当形变在一定限度内时,外力去掉后,物体能恢复原状,物体的这一性质称为弹性(elasticity)。因此,研究物体的形变与引起形变的力之间的关系,不仅对力学和工程技术,而且对生物学、生物力学、医学和医学工程学都有重要的意义。

本章主要讨论应力、应变、弹性模量和物体的黏弹性等内容。

第一节 物体的平衡

当刚体处于平衡状态时,其平动加速度必须为零。由牛顿第二定律可知,作用在该刚体上的外力的矢量和必须为零。同时该刚体的角加速度也必须为零,即作用在该刚体上的外力对任一转轴的力矩之和也必须为零。这就是使刚体处于平衡状态时所应该满足的条件。用数学公式表达出来,即:

$$\begin{aligned}\Sigma F_i &= 0 \\ \Sigma M_i &= 0\end{aligned}\tag{1-1}$$

应该指出,方程组(1-1)中力、力矩之和是矢量和,只在一些特殊情况下才是代数和。

1. 刚体在共点力系作用下的平衡

一个刚体同时受到几个外力的作用,如果这些外力的作用点为一点,或这些外力的作用线或作用线的延长线相交于一点,则这些外力称为共点力系(system of cocurrent forces)。对于共点力系来说,如果它们的合力等于零,很容易证明它们对任一轴的合力矩也必然等于

零。因此,刚体在共点力系作用下处于平衡状态时,所满足的条件可以简化为共点力系的合力等于零。

$$\Sigma \mathbf{F}_i = 0 \tag{1-2}$$

如果刚体所受的共点力系由两个力组成,当该刚体处于平衡状态时,由公式(1-2)知,这两个力必然大小相等、方向相反、作用线在一条直线上。例如,一个人用一只脚站立在地面上而处于平衡状态时的情况。把人作为整体考虑其受力状况而不分析他身体各关节上的受力情况,那么视人的整体为被隔离物,他受到自身重力 W 和地面支持力 N 的作用。 W 与 N 必定大小相等、方向相反,并且 W 的作用线必通过站立脚和地面的接触面,且与支持力 N 的作用线成一条直线。即 W 和 N 为平衡的共点力。

如果刚体所受的共点力系由三个力组成,当该刚体平衡时,由公式(1-2)知这三个力的合力为零。由力的合成的多边形法则知,将这三个力首尾相接必然组成一个三角形。三角形三条边一定处于同一平面内,所以这三个力同时还组成平面力系。

设三个力 f_1 、 f_2 、 f_3 构成平衡的共点力系。按力的合成的多边形法则,三个力 f_1 、 f_2 、 f_3 必然组成一个三角形且同在一个平面内,如图 1-1 所示,由正弦定理知:

$$\frac{f_1}{\sin\alpha} = \frac{f_2}{\sin\beta} = \frac{f_3}{\sin\gamma}$$

由于 $\alpha = \pi - \theta_1, \beta = \pi - \theta_2, \gamma = \pi - \theta_3$, 故有

$$\frac{f_1}{\sin\theta_1} = \frac{f_2}{\sin\theta_2} = \frac{f_3}{\sin\theta_3} \tag{1-3}$$

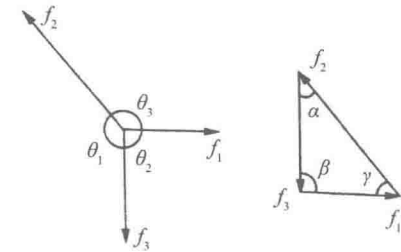


图 1-1 共点力系的三力平衡

公式(1-3)称为拉密定理(Lami's theorem)。它表明:一个刚体受到由三个力构成的共点力系的作用而处于平衡状态时,其中每个力的大小与其他两个力所夹角的正弦成正比,这三个力共处同一平面内。

拉密定理是两个独立的方程式,即它为一方程组,其中有五个变量:三个力的大小和两个角。在五个变量中如有三个为已知,就可以求得其余的两变量。

如果刚体所受的共点力系由四个或四个以上的力组成,当该刚体处于平衡状态时,由公式(1-2)知这些力的合力为零。一般情况下,这些力并不在同一平面内而为空间力系。

设 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 为平衡的共点力系,则

$$\mathbf{f}_1 + \mathbf{f}_2 + \mathbf{f}_3 + \mathbf{f}_4 = 0 \tag{1-4}$$

公式(1-4)为矢量式,若建立空间直角坐标系,则公式(1-4)可写为:

$$\begin{aligned} f_{1x} + f_{2x} + f_{3x} + f_{4x} &= 0 \\ f_{1y} + f_{2y} + f_{3y} + f_{4y} &= 0 \\ f_{1z} + f_{2z} + f_{3z} + f_{4z} &= 0 \end{aligned} \tag{1-5}$$

方程组(1-5)中有十二个变量,需要知道其中的九个才能对方程组(1-5)求解。

2. 刚体在平面力系作用下的平衡

一个刚体同时受到几个外力的作用,如果这些外力的作用线共处于同一平面内,则这些外力构成平面力系(system of coplanar forces)。对于平面力系来说,它们对任一转轴的力矩只有

正、负之分,并且这些外力也只在平面坐标系内分解。因此,刚体在平面力系的作用下处于平衡状态时,所应满足的条件可以写为:

$$\begin{aligned}\sum F_{ix} &= 0 \\ \sum F_{iy} &= 0 \\ \sum M &= 0\end{aligned}\tag{1-6}$$

方程组(1-6)中的力矩之和是代数和。

2.1 力偶

刚体在两个力的作用下处于平衡状态时,它们必定构成共点力系,且在同一平面内。也就是说,使刚体处于平衡状态的两个力,必定构成共点的平面力系,其平衡条件为公式(1-2)。

作用在同一刚体上的大小相等、方向相反的两个非共点力,它们的作用线必定互相平行而不重合。这样的一对力称为力偶(couple)。

图 1-2 表示一对力组成的力偶。其中每个力的大小均为 F ,它们间的垂直距离为 l ,它们的矢量和为零。矢量和为零意味着力偶对刚体不产生平动的效果。

选任意轴作转轴,譬如选垂直纸面通过 O 点的直线作转轴。组成力偶的两个力绕此转轴的合力矩为:

$$\sum M = Fl_2 - Fl_1 = Fl$$

合力矩不等于零意味着:力偶对刚体作用的效果是产生加速转动。力偶产生的总的转动动力矩中不出现各自的力臂 l_1 、 l_2 ,这意味着绕垂直力偶所在平面的任意轴,力偶所产生的转动动力矩都是相等的,并且等于两力作用线间的垂直距离与两力中任一力的乘积。我们称这一转动动力矩为力偶矩(moment of couple)。

受力偶作用的刚体将产生加速转动。刚体只有在受到另一个产生相等力偶矩且方向相反的力偶作用时,才能保持平衡。

归纳上述,使刚体处于平衡状态的两个力,一定是共点的平衡力。非共点的两个力不可能使刚体平衡。所以,使刚体处于平衡状态的非共点的平面力系一定由三个及三个以上的力构成。

2.2 定理

作用于同一刚体上使其处于平衡状态的三个力,必为平面力系。

证明:设作用于某刚体的三个力 f_1 、 f_2 、 f_3 使该刚体处于平衡状态。如果力 f_1 、 f_2 、 f_3 共点,则由拉密定理知,它们必为平面力系。现设 f_1 、 f_2 、 f_3 不共点,其作用点分别为 a 、 b 、 c ,如图 1-3 所示,根据刚体的平衡条件有:

$$\begin{aligned}f_1 + f_2 + f_3 &= 0 \\ M_1 + M_2 + M_3 &= 0\end{aligned}$$

现在在 f_1 的作用点 a 上分别加上与力 f_2 和 f_3 大小相等、方

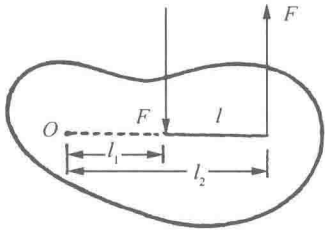


图 1-2 力偶

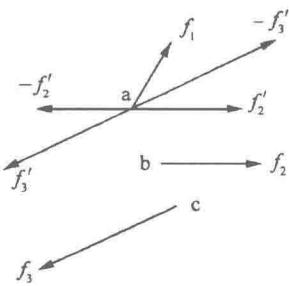


图 1-3 平衡的三个力为平面力系

向平行的两对平衡力 f_2' 与 $-f_2'$ ，以及 f_3' 与 $-f_3'$ 则并不改变刚体的平衡状态，即：

$$f_1 + f_2' + f_3' + f_2 + (-f_2') + f_3 + (-f_3') = 0 \tag{1}$$

$$M_1 + M_2' + M_3' + M_2 + (-M_2') + M_3 + (-M_3') = 0 \tag{2}$$

刚体这时受到共点力系 f_1 、 f_2' 、 f_3' ，以及两对力偶 f_2 与 $-f_2'$ ， f_3 与 $-f_3'$ 的共同作用。由于 f_2 与 f_2' ， f_3 与 f_3' 为大小相等，方向相反的力，故而共点力系 f_1 、 f_2' 和 f_3' 为平衡力。于是由方程组 (1) 和 (2) 可知，力偶 f_2 与 $-f_2'$ 以及 f_3 与 $-f_3'$ ，一定是彼此平衡的力偶。这两对平衡力偶的力偶矩一定大小相等、方向相反，力偶的作用面必定平行或重合。由于两对力偶的作用面均过 a 点，故而它们的作用面只能重合，即 f_2 与 f_3 共面。

同理可证 f_1 与 f_2 共面， f_1 与 f_3 共面，即证明了作用于同一刚体并使其处于平衡状态的三个力 f_1 、 f_2 、 f_3 必为平面力系。

2.3 平面平行力系作用下刚体的平衡

构成平面力系的各个力的作用线彼此互相平行，则称这些力构成平面平行力系。

定理：平衡的共面而非共点的三个力，必构成平行力系。

证明：设三个力 f_1 ， f_2 与 f_3 为共面而不共点的平衡力，即它们作用在同一刚体上使该刚体达到平衡。设这三个力 f_1 、 f_2 与 f_3 和所决定的平面为纸面，它们的作用点分别为 a 、 b 和 c ，如图 1-4 所示。

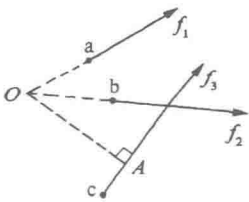


图 1-4 平衡非共点的三个力为平面平行力

假定 f_1 与 f_2 不平行，两者作用线的延长线交于 O 点，因为 f_3 与 f_1 、 f_2 为非共点力，则力 f_3 的作用线或其延长线不可能过 O 点。设点 O 到 f_3 的垂直距离为 OA ，若选过 O 点与纸面垂直的直线作转轴，则 f_1 、 f_2 和 f_3 的总的转动力矩为：

$$\Sigma M = M_3 = f_3 \cdot OA \neq 0$$

这与 f_1 、 f_2 和 f_3 组成平衡力的前提条件不符，故而 f_1 与 f_2 必相互平行。利用反证法同样可以证明： f_1 平行于 f_3 ， f_2 平行于 f_3 ，即平衡的共面而非共点的三个力 f_1 、 f_2 与 f_3 ，必构成平行力系。

例 1-1 上臂竖直上举，肘关节屈曲 90° ，前臂位于头顶上方时，分析计算肘关节承受的作用力。

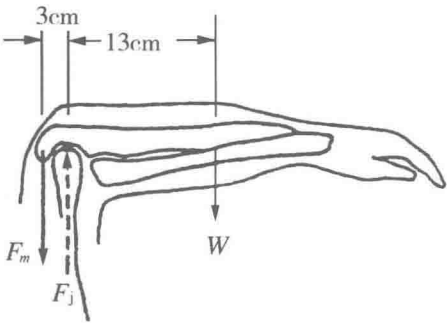


图 1-5 上臂上举，肘屈曲 90° 时，前臂的受力图

解：把前臂隔离开来分析其受力，如图 1-5 所示。可以认为前臂共受有三个力：前臂的重力 W ，已知其大小为 20N （牛顿），方向竖直向下，其作用点在前臂重心，它距肘关节转动轴约 13cm 。

肱三头肌肌腱的拉力 F_m 。已知其方向和作用点，上肢处于这一位置时，解剖学给出拉力 F_m 的方向竖直向下，作用点是肱三头肌在尺骨的附着点，距肘关节转动轴约 3cm 处。未知拉力 F_m 的大小。

作用于肘关节中尺骨滑车窝上的力 F_j 。已知其作用点过肘关节的转动轴心，未知其大小和方向。

重力 W 和肱三头肌力 F_m 均在竖直方向与前臂轴