



21世纪高等学校教材
普通高等教育“十一五”规划教材

YIXUE WULIXUE

医学物理学

李松山 程方荣 李高申◎编著

冶金工业出版社

内 容 简 介

本书共分 14 章,主要包括:物体的弹性,流体的流动,分子动理论,热力学基本定律,振动和波动,电磁场的基本概念和规律,人体电磁现象,波动光学和几何光学,X 射线,原子核与放射性,激光及其医学应用,核磁共振及其医学应用等。

本书内容翔实、层次清晰、脉络分明,可作为高等学校相关专业的教材或教学参考书,也可供广大读者自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

医学物理学/李松山编著. —北京:冶金工业出版社,
2009.3

ISBN 978 - 7 - 5024 - 4848 - 6

I. 医… II. 李… III. 医学物理学—高等学校—教材
IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 011094 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

责任编辑 程志宏 美术编辑 张有文 责任印制 丁小晶

ISBN 978 - 7 - 5024 - 4848 - 6

北京市鑫山源印刷有限公司;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 3 月第 1 版,2009 年 3 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 19 $\frac{1}{2}$ 印张; 480 千字; 312 页

定价: 32.00 元

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。物理学的知识技术在制药技术与设备、医疗器械和手段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,它需要自然科学的各种最新成就为它服务。而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,因而它对医学发展具有重要作用。众所周知,X射线断层照相、核磁共振成像等技术,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《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,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,本书力求做到以下各点。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,为他们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

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,它是关于自然界最基本形态的科学。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,它包括机械运动、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,具有最基本最普通的性质。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,使得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,物理学几乎就是全部自然科学。随着科学的发展,出现了许多自然科学分支,并陆续独立成为一门学科。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,它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,它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的学术层次上介绍物理学内容和进行物理学实验,因而有可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也具有重要意义。

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从而对疾病做出判断。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Marcello Malpighi所发现,比哈维作出的预言晚了四十五年。

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。

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,他转而研究振动机理,从而导致他建立了“干涉原理”。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。

流体力学家泊肃叶(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,发现了粘性流体的泊肃叶定律。该定律是流体力学的基础定律之一,泊肃叶本人也成了流体力学的奠基者而留名于世。

Von Helmholtz 堪称为“生物工程之父”。他先后在 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,并继扬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。

德国医生 Julius Wolff 在 1892 年提出的骨改建定律,既活骨随着它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。Frank 提出了心脏的流体力学理论。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。Krogh 由于对微循环的贡献而获诺贝尔奖。Hill 则因肌肉力学的研究而获诺贝尔奖,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。

目 录

绪论	(1)
第一章 物体的弹性	(1)
第一节 物体的平衡	(1)
第二节 应力和应变	(9)
第三节 弹性模量	(13)
第四节 粘弹性物质	(16)
第五节 骨的力学性质	(17)
第六节 肌肉的力学性质	(20)
思考题 习题一	(24)
第二章 流体的流动	(25)
第一节 流体及其流动性	(25)
第二节 理想流体的稳定流动	(26)
第三节 伯努利方程	(27)
第四节 实际流体的流动	(30)
第五节 泊肃叶定律、斯托克斯定律	(35)
第六节 血液在循环系统中的流动	(38)
思考题 习题二	(41)
第三章 分子动理论	(43)
第一节 分子运动基本概念、气体的状态参量	(44)
第二节 理想气体状态方程、压强公式	(46)
第三节 气体的分压强	(51)
第四节 能量按自由度均分定理	(52)
第五节 输运过程	(56)
第六节 液体的表面现象	(58)
第七节 肺呼吸的物理原理	(65)

思考题 习题三	(74)
第四章 热力学基本定律	(76)
第一节 热力学第一定律	(76)
第二节 热力学第一定律的应用	(79)
第三节 卡诺循环、热机效率	(87)
第四节 热力学第二定律	(91)
第五节 熵、熵增加原理	(97)
思考题 习题四	(100)
第五章 振动和波动	(103)
第一节 简谐振动	(103)
第二节 阻尼振动、受迫振动、共振	(107)
第三节 简谐振动的合成	(109)
第四节 机械波的产生和传播	(112)
第五节 简谐波	(114)
第六节 波的干涉	(118)
思考题 习题五	(123)
第六章 声波、超声波	(126)
第一节 声波的基本概念和规律	(126)
第二节 人耳传声的物理过程	(131)
第三节 多普勒效应	(135)
第四节 超声波的生物效应	(137)
第五节 超声波在医学中的应用	(143)
第六节 次声波、噪声的生物效应	(148)
思考题 习题六	(150)
第七章 电磁场的基本概念、规律	(151)
第一节 静电场	(151)
第二节 直流电	(158)
第三节 稳恒磁场	(165)
第四节 电磁感应	(172)
思考题 习题七	(178)
第八章 人体电磁现象	(181)
第一节 膜电位	(181)
第二节 神经的兴奋和冲动	(184)

第三节	心电和脑电	(190)
第四节	直流电的人体效应	(194)
第五节	交流电的人体效应	(199)
第六节	微波的人体效应	(201)
第七节	人体的磁场	(203)
思考题	习题八	(208)
第九章	波动光学	(209)
第一节	光的干涉	(209)
第二节	光的衍射	(217)
第三节	光的偏振	(221)
第四节	旋光现象	(224)
第五节	光的吸收	(226)
思考题	习题九	(229)
第十章	几何光学	(232)
第一节	单球面折射、透镜	(232)
第二节	眼睛	(237)
第三节	放大镜、显微镜	(242)
第四节	检眼镜、纤镜	(246)
第五节	人的视觉物理	(247)
思考题	习题十	(249)
第十一章	X 射线	(251)
第一节	X 射线的产生及其性质	(251)
第二节	X 射线谱	(253)
第三节	X 射线与物质的相互作用	(256)
第四节	物质对 X 射线的衰减规律	(257)
第五节	X 射线在医学上的应用	(259)
思考题	习题十一	(266)
第十二章	原子核与放射性	(267)
第一节	原子核的基本性质	(267)
第二节	原子核的衰变类型	(269)
第三节	放射性核素的衰变规律	(272)
第四节	辐射量与辐射防护	(275)
第五节	放射性核素在医药学方面的应用	(278)
思考题	习题十二	(279)

第十三章 激光及其医学应用 (280)

第一节 激光的基本原理与特性 (280)

第二节 激光的生物作用和临床应用 (283)

思考题 习题十三 (286)

第十四章 核磁共振及其医学应用 (287)

第一节 核磁共振基本概念 (287)

第二节 核磁共振谱 (290)

第三节 磁共振成像原理 (291)

第四节 核磁共振技术在医学中的应用 (295)

附 录 (298)

第一章

物体的弹性

【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. 理解粘弹性物质及其特性。
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。用数学公式把它表达出来,即:

$$\begin{aligned}\sum F_i &= 0 \\ \sum M_i &= 0\end{aligned}\quad (1-1)$$

应该指出,方程组(1-1)中力、力矩之和是矢量和。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, 所应满足的条件可以简化为共点力系的合力等于零。

$$\sum \mathbf{F}_i = 0 \quad (1-2)$$

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 $\mathbf{W}$ 和地面支持力 $\mathbf{N}$ 的作用。 $\mathbf{W}$ 与 $\mathbf{N}$ 必定大小相等、方向相反, 并且 $\mathbf{W}$ 的作用线必通过站立脚和地面的接触面, 且与支持力 $\mathbf{N}$ 的作用线成一条直线。即 $\mathbf{W}$ 和 $\mathbf{N}$ 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。

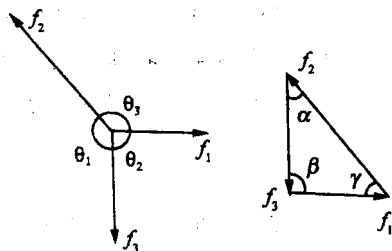


图 1-1 共点力系的三力平衡

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

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

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, 即它为一方程式, 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

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

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:

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

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:

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

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两个力,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

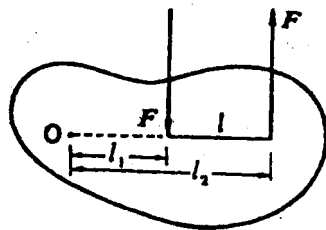


图 1-2 力偶

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:

$$f_1 + f_2' + f_3' + f_2 + (-f_2') + f_3 + (-f_3') = 0 \quad (1)$$

$$M_1 + M_2' + M_3' + M_2 + (-M_2') + M_3 + (-M_3') = 0 \quad (2)$$

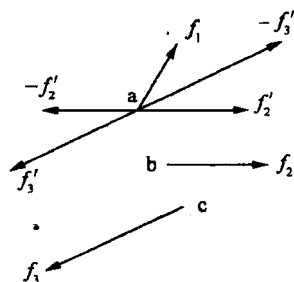


图 1-3 平衡的三个力为平面力系

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,方向相同的力,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。

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 的总的转动矩为:

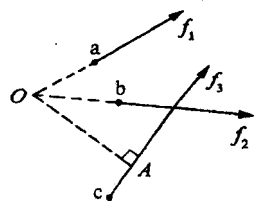


图 1-4 平衡非共点的三个力为平面平行力

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

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。

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

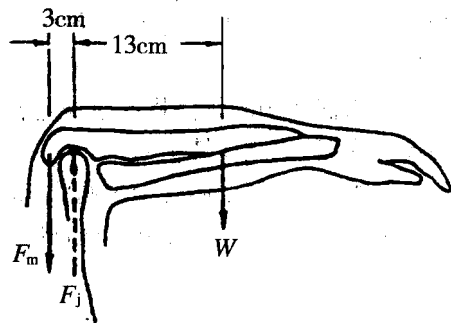


图 1-5 上臂上举,肘屈曲 90° 时,前臂的受力图

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线相垂直,它们为非共点的平行力。作为近似,认为三个力 W 、 F_m 和 F_j 共处同一平面内,由上述定理知,使前臂处于平衡状态的这三个非共点力彼此平行。根据刚体达到平衡时的条件:方程组(1-6),选肘关节轴为转动轴,则有:

$$W a = F_m b$$

$$F_j = W + F_m$$

式中, $a = 13\text{cm}$, $b = 3\text{cm}$, $W = 20\text{N}$, 代入上式得到 $F_m = 87\text{N}$, $F_j = 107\text{N}$, F_j 的方向竖直向上。

2.4 平面非平行力系作用下刚体的平衡

由四个力构成的平面力系,特殊情况下它们是平行力,但一般情况下,它们不是平行力。设刚体在平面力系 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 的作用下处于平衡状态。在这四个力所决定的平面上取平面直角坐标系。 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 的作用点在该坐标系中的坐标分别为: (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) 。

根据刚体平衡的条件方程组(1-6)应有:

$$\begin{cases} f_{1x} + f_{2x} + f_{3x} + f_{4x} = 0 \\ f_{1y} + f_{2y} + f_{3y} + f_{4y} = 0 \\ f_{1y}x_1 - f_{1x}y_1 + f_{2y}x_2 - f_{2x}y_2 + f_{3y}x_3 - f_{3x}y_3 + f_{4y}x_4 - f_{4x}y_4 = 0 \end{cases} \quad (1-7)$$

方程组(1-7)共有十六个变量,应该知道其中的十三个,才能对该方程组求解。

总结以上的阐述,可归纳如下:

(1)刚体在两个力的作用下处于平衡状态时,这两个力一定大小相等、方向相反、作用线为一直线,构成共点力系。

(2)刚体在三个力的作用下处于平衡状态时,这三个力一定构成平面力系,它们或者构成共点的非平行的平面力系,并遵从拉密定理;或者构成非共点的平行的平面力系。

(3)刚体在四个及四个以上的力作用下处于平衡状态时,这些力可能构成共点力系或平面力系,但一般情况下构成空间力系。平衡条件是方程组(1-1),即它们的合力等于零,它们对任意轴的总的转动力矩也等于零。计算时,要选取相应的空间坐标系。

3. 静力分析举例

3.1 受力分析与受力图

对物体(或物体的一部分)进行受力分析时,通常采用隔离物体法。这一方法的基本步骤是:首先把物体(或物体的一部分)从周围物体(或物体的其他部分)中隔离出来,即正确选择隔离物;其次,找出隔离物受的所有外力,特别注意:物体其他部分对这一部分的作用力属于外力;最后,根据所有这些外力的作用状况列出隔离物的平衡方程,并进行力学计算和问题讨论。

应用隔离物体法对关节做完整的静力学分析时,应包括施加在此关节上的所有力。这种分

析极为复杂,因此常使用简化法找出作用在关节上的主要力进行分析。简化分析的结果所求得的关节上所承受的载荷,只是近似值,并且比实际承受的载荷要小。下面举例说明。

例 1-2 求一侧下肢正在举腿登梯时,作用在另一侧负重下肢的胫股关节上的作用力。

解: 将负重侧的小腿同身体的其他部分隔离开来,绘出登梯时的隔离物受力图,如图 1-6 所示,略去次要因素用简化法寻找出小腿所受的主要作用力有:

地面的支持力 N , 已知其大小等于体重, 其方向为竖直向上, 作用点在足与地面间的接触点。

髌韧带力 F_m , 已知其方向是沿着髌韧带离开膝关节指向, 作用点是髌韧带在胫骨粗隆上的附着点, 但不知其大小。

作用在胫股关节上的力 F_j , 只知其作用点是胫骨和股骨髁之间关节表面的接触点, 但不知其大小和方向。

这里我们略去了小腿自身的重力这一次要因素。一般它只有体重的 $1/10$, 通常情况下可以忽略。

将上述三个力标示在隔离物体图上, 见图 1-7: 延长支持力 N 和髌韧带力 F_m 的作用线, 两者相交于 O 点。由于负重一侧下肢处于平衡状态, 现已知力 N 和 F_m 相交, 则胫股关节上的作用力 F_j 与力 N 、 F_m 必组成共点平面力系。于是, 连接力 F_j 的作用点与 O 点即得到力 F_j 的方向。根据已知条件和物体在三个共点平面力作用下的平衡条件——拉密定理, 即可求得髌韧带力 F_m 和胫股关节上的作用力 F_j 的大小。在本例中, 髌韧带力 F_m 等于 3.2 倍的体重, 作用在胫股关节上的力 F_j 等于 4.1 倍的体重。

应该指出, 在单侧下肢负重时, 除髌韧带力为主要肌力外, 还有一些其他肌力也起作用。由于略去其他肌力的作用, 本例计算出的作用在胫股关节上的力小于实际发生的情况。可见, 肌力对作用在胫股关节上的力的影响远远大于体重所引起的地面支持力的影响。另外, 我们还假定了支持力 N , 髌韧带力 F_m 和胫股关节上的力 F_j 组成平面力系。

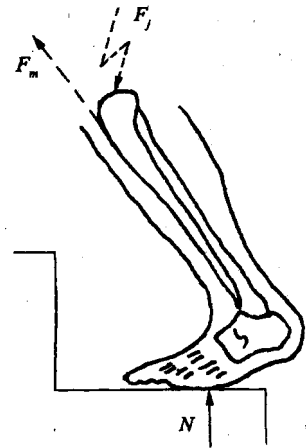


图 1-6 登梯时负重侧小腿所受的三个主要作用力

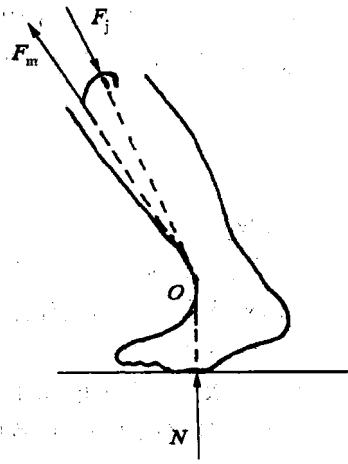


图 1-7 上图的三个主要作用力组成平衡的共点平面力

3.2 腰段脊柱的静力学分析

3.2.1 身体姿势对腰段脊柱载荷的影响

人体站立时身体上部的重心在脊柱前方, 躯干的重力线通常位于第 4 腰椎椎体中心的腹侧, 这意味着重力线在脊柱所有节段的活动横轴的腹侧, 从而使活动节段获得向前的弯曲力矩, 这需要韧带力和背肌肌力加以平衡。

无靠背放松端坐时, 骨盆后倾而腰段脊柱前凸变直, 躯干重量的重力线向前移动更加远离脊柱, 使躯干重力有一个较长的力臂, 这一较长的力臂使腰段脊柱所受力矩增大, 从而使无靠背放松

端坐时腰段脊柱承受的载荷比放松直立时要大。无靠背挺直端坐时,骨盆前倾腰段脊柱前凸变大,使其所受载荷有所降低,但仍超过放松直立时的情况,见图 1-8。图中竖直线为上部身体的重力线。

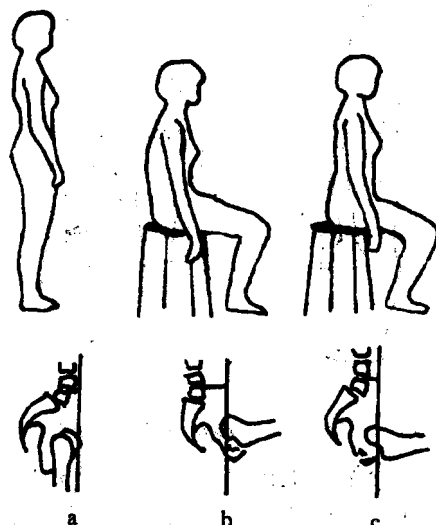


图 1-8 三种姿势下腰段脊柱所承载荷的比较

a 放松直立位时受载荷量小。b 无靠背放松端坐位时受载荷量大。c 无靠背挺直端坐位时居中

3.2.2 提物对腰段脊柱载荷的影响

提物是外界对脊柱施加载荷的最常见的形式。提物时有下列因素影响脊柱上的载荷:

- (1)所提物体与脊柱活动中心之间的相对位置;
- (2)脊柱的屈曲或旋转程度;
- (3)所提物体的性质:体积、形状、重量、密度等。

例 1-3 如果物体的重量、形状相同,但体积不同,那么物体体积越大其重力对于腰段脊柱转动轴的力臂就越长,这样腰段脊柱受的弯曲力矩就越大。

当身体前屈提物时,不仅物体的重力,而且身体上部的重力均能在腰段脊柱上形成弯曲力矩,并且这种弯矩大于身体直立时的情况,从而导致腰段脊柱承受的载荷增加。如图 1-9 所示,人身体上部的重量为 450N,所提物体的重量为 200N,当人直立提物时,重物力 F 与人身体上部重力 W 相对腰段脊柱转轴的力臂分别为 30cm 和 2cm,见图 1-9a。因此人直立提物时腰段脊柱受的弯曲力矩是:

$$200 \times 0.3 + 450 \times 0.02 = 69\text{N} \cdot \text{m}$$

当人前屈提物时,重物力 F 与人身体上部重力 W 相对腰段脊柱转轴的力臂分别增加到 40cm 与 25cm,见图 1-9b,这时腰段脊柱受的弯曲力矩是:

$$200 \times 0.4 + 450 \times 0.25 = 192.5\text{N} \cdot \text{m}$$

两者相比,人前屈提物将使腰段脊柱上受的载荷大大增加。

一般认为提物时膝关节屈曲可降低腰段脊柱上的载荷。因为屈膝提物可使所提重物更靠近躯干,从而减小其对于腰段脊柱转轴的力臂。但是,如果提物方式不当,如在膝的前方把物体提起,则并不能减小腰段脊柱上受的载荷,反而会使其所受载荷增加。因为膝前提物会使重物离躯干较远,从而增大其对于腰段脊柱转轴的力臂。