

高等医药院校教材
供基础、预防、临床、口腔医学类专业用

医用物理学

主 编 赵 合 运 岳 筱 萍

北京科学技术出版社

前 言

医用物理学是为医学各有关专业而开设的一门基础课。医学各专业所涉及的物理知识十分广泛,但作为教材受到其它条件的限制不可能面面俱到。为此,根据卫生部 1982 年 3 月颁布的高等医学院校物理学教学大纲的基本精神,结合 1992 年 9 月卫生部临床医学专业教材评审委员会讨论通过的教材修订意见,针对我国目前医学教育的现状,为培养本、专科临床医师这一特定对象,为他们打好基础理论、基本知识和基本技能的特定要求而编写了这本教材。也可供中等以上医务技术人员阅读参考。

本教材以三基(基础理论、基本知识和基本技能)为主要内容,并针对医学科学的需要,理论联系医学实际,引入物理学新技术在医学中的应用。此外还有少数章节仍保留临床上习惯使用的单位(例如血压用毫米汞柱),便于临床应用。

本教材共分十三章,每章配合一定数量的例题和习题。为了主次分明,并能适应不同学时的教学要求,有些内容用小字排印,教师可根据具体情况选用或参考。参加本教材编写工作的有:赵合运(前言、绪论、第一、五、十一章)、岳筱萍(第二、七章)、刘东华(第三、十章)、李振新(第四章)、毕会英(第六章)、董兵超(第八章)、贺国珠(第九、十二章)、邢怀民(第十三章)。最后由赵合运、岳筱萍统一整理审定,封面设计秦永杰,插图由齐香兰、郭文立绘制。

限于编者水平有限、书上不妥之处在所难免。恳切希望使用本书的教师、学生和读者,惠于批评指正,以便总结经验使本教材得以不断完善。

编 者

1998 年 3 月

目 录

绪论	(1)
第一节 物理学研究对象	(1)
第二节 物理学与现代医学的关系	(1)
第一章 刚体	(3)
第一节 转动	(3)
一、角位移 角速度 角加速度	(3)
二、角量和线量	(4)
第二节 转动动能 转动惯量	(4)
一、转动动能	(4)
二、转动惯量	(5)
第三节 转动定律	(7)
第四节 角动量 角动量守恒定律	(8)
第五节 旋进	(8)
第二章 液体的流动	(12)
第一节 理想流体的稳定流动	(12)
一、理想流体 稳定流动	(12)
二、连续性方程	(13)
三、柏努利方程	(14)
四、柏努利方程的应用	(15)
第二节 实际流体的流动	(16)
一、片流	(17)
二、实际流体的粘滞性	(17)
三、湍流	(19)
四、实际流体的柏努利方程	(19)
五、泊肃叶定律	(20)
六、斯托克司定律	(21)
第三节 血液的流动	(22)
一、血液的脉搏波	(22)
二、血流速度和血压分布	(24)
三、血压的测量	(24)
第三章 液体的表面现象	(28)
第一节 液体的表面张力 表面能	(28)
一、液体的表面张力	(28)

二、表面能	(29)
第二节 弯曲液面的附加压强	(31)
第三节 表面活性物质 表面吸附	(33)
一、表面活性物质	(33)
二、表面吸附	(33)
第四节 液体和固体接触处的现象	(34)
一、润湿现象	(34)
二、接触角	(35)
三、毛细现象	(35)
四、气体栓塞	(36)
第四章 振动和波动	(39)
第一节 简谐运动	(39)
一、简谐运动方程	(39)
二、简谐运动的特征量	(40)
三、简谐运动的矢量图示法	(41)
四、简谐运动的能量	(42)
第二节 阻尼振动、受迫振动与共振	(43)
一、阻尼振动	(43)
二、受迫振动	(44)
三、共振	(45)
第三节 简谐运动的合成	(45)
一、两个同方向、同频率简谐运动的合成	(45)
二、两个同方向、不同频率简谐运动的合成	(46)
三、振动谱	(48)
四、两个不同频率、互相垂直的简谐运动的合成	(50)
第四节 机械波的产生与传播	(51)
一、波的产生	(51)
二、波阵面和波线	(51)
三、波速 波长 波的周期和频率	(51)
第五节 波动方程	(52)
第六节 波的能量与强度	(55)
一、波的能量	(55)
二、波的强度	(55)
三、波的衰减	(56)
第七节 惠更斯原理	(57)
第八节 波的干涉	(58)
一、波的叠加原理	(58)
二、波的干涉	(58)

三、驻波	(60)
第五章 声波	(63)
第一节 声波	(63)
一、声波的物理性质	(63)
二、声压 声强 声阻抗	(64)
三、声波的反射和折射	(64)
四、声强级和响度级	(66)
第二节 叩诊和听诊的物理基础	(68)
一、叩诊的物理基础	(68)
二、听诊的物理基础	(69)
第三节 噪声及其危害	(70)
第四节 多普勒效应	(71)
一、波源和观察者在其连线上	(71)
二、波源和观察者不在其连线上	(73)
第五节 超声和次声	(73)
一、超声波的产生	(73)
二、超声波的性质	(74)
三、超声波的作用	(74)
四、超声波在医学上的应用	(75)
五、次声	(78)
第六章 静电场	(80)
第一节 电场 电场强度	(80)
一、电荷 库仑定律	(80)
二、电场 电场强度	(81)
第二节 电通量 高斯定理	(83)
一、电场线 电通量	(83)
二、高斯定理	(84)
三、高斯定理应用举例	(85)
第三节 静电场力做功 电势	(87)
一、静电场力做功	(87)
二、电势能 电势	(88)
三、电势迭加原理	(89)
四、场强与电势的关系	(90)
第四节 静电场中的电介质	(91)
一、电介质在电场中的极化	(91)
二、电介质中的电场	(93)
三、静电场的能量	(93)
第五节 电偶极子 心电图	(95)

一、电偶极子	(95)
二、电偶层	(96)
三、心电图	(97)
第七章 直流电	(101)
第一节 电流 欧姆定律	(101)
一、电流密度	(101)
二、电解质的导电性	(102)
三、欧姆定律及其微分形式	(103)
第二节 电动势和含源电路	(104)
一、电动势	(104)
二、一段含源电路的欧姆定律	(105)
第三节 基尔霍夫定律	(107)
一、基尔霍夫第一定律	(107)
二、基尔霍夫第二定律	(108)
第四节 电容器的充电放电过程	(110)
一、充电过程	(110)
二、放电过程	(111)
第五节 生物膜电位 电泳	(113)
一、能斯特方程	(113)
二、静息电位	(114)
三、电泳	(115)
第六节 电的生物效应	(116)
一、人体阻抗的复杂性	(116)
二、人体的直流电阻抗	(117)
三、细胞和组织的电阻抗	(117)
四、人体周围的电场	(119)
五、人体内的位移电流	(119)
六、位移电流对人体的影响	(120)
七、直流电对人体的效应	(120)
八、低频电对人体的效应	(122)
九、高频电对人体的效应	(124)
十、微波的吸收规律和热效应	(127)
第八章 电磁现象	(134)
第一节 磁感应强度	(134)
一、磁感应强度	(134)
二、磁感应线	(136)
第二节 磁场对运动电荷和电流的作用	(136)
一、磁场对运动电荷的作用力	(136)

二、磁场对电流的作用力·····	(139)
第三节 电流产生的磁场·····	(142)
一、比奥—萨伐尔定律·····	(142)
二、比奥—萨伐尔定律的应用·····	(142)
第四节 磁介质·····	(145)
一、介质中的磁场·····	(145)
二、各类磁介质·····	(146)
第五节 电磁感应·····	(149)
一、磁通量·····	(149)
二、电磁感应·····	(149)
第六节 RL 电路的暂态过程、磁场的能量 ·····	(151)
一、 RL 电路的暂态过程 ·····	(151)
二、磁场的能量·····	(152)
第七节 电磁振荡和电磁波·····	(153)
一、位移电流和涡旋电场·····	(153)
二、电磁波和电磁波谱·····	(155)
三、紫外线和高频电的医疗应用·····	(157)
第八节 生物磁场和磁场的生物效应·····	(159)
一、生物磁场·····	(159)
二、磁场的生物效应·····	(159)
第九章 波动光学·····	(162)
第一节 光的干涉·····	(162)
一、相干光源·····	(162)
二、光的干涉·····	(163)
三、薄膜干涉·····	(165)
第二节 光的衍射·····	(166)
一、单缝衍射·····	(167)
二、圆孔衍射·····	(169)
三、衍射光栅·····	(170)
第三节 光的偏振·····	(171)
一、自然光与偏振光·····	(171)
二、起偏与检偏·····	(173)
三、马吕斯定律·····	(173)
四、双折射·····	(174)
五、二向色性·····	(177)
第四节 旋光性·····	(178)
一、物质的旋光性·····	(178)
二、糖量计·····	(179)

第十章 几何光学	(182)
第一节 单球面折射	(182)
一、单球面折射	(182)
二、共轴球面系统	(184)
第二节 透镜	(185)
一、薄透镜	(185)
二、厚透镜	(189)
三、圆柱透镜	(191)
四、透镜成像的缺陷与补救	(192)
第三节 眼睛的屈光系统	(193)
一、人眼的光学结构 眼睛的调节	(193)
二、人眼的分辨本领和视力	(194)
三、人眼的屈光不正及其矫正	(195)
第四节 眼的视觉	(198)
一、黄昏视觉	(198)
二、彩色视觉	(199)
三、实体视觉	(201)
第五节 几种医用光学仪器	(204)
一、放大镜	(204)
二、检眼镜	(205)
三、纤镜	(206)
四、显微镜	(206)
第十一章 热辐射和光的量子性	(215)
第一节 热辐射 基尔霍夫定律	(215)
一、热辐射	(215)
二、发射本领和吸收率	(215)
三、基尔霍夫定律	(217)
第二节 绝对黑体的辐射定律 普朗克量子假说	(218)
一、黑体辐射定律	(218)
二、普朗克的量子假说	(220)
第三节 热辐射的应用	(222)
第四节 光电效应 爱因斯坦的光子理论	(222)
一、光电效应	(222)
二、爱因斯坦的光子理论	(224)
三、光的二象性	(224)
第五节 光度学简介	(225)
一、几个基本概念	(225)
二、光度学单位	(229)

三、光度计原理	(230)
第十二章 X射线及其医学应用	(234)
第一节 X射线的发生	(234)
一、X射线的发生装置	(234)
二、X射线衍射和X射线谱	(235)
第二节 X射线的性质	(239)
第三节 X射线的强度和硬度	(240)
一、X射线的强度	(240)
二、X射线的硬度	(240)
第四节 X射线的吸收规律	(241)
第五节 X射线的医学应用	(243)
一、在治疗方面的应用	(243)
二、透视及一般摄影	(244)
三、人工造影和软组织摄影	(244)
四、断层摄影	(244)
第六节 X—CT简介	(245)
一、图像重建的概念	(246)
二、X—CT机工作原理	(247)
三、各代扫描机简介	(248)
四、X—CT的临床应用	(249)
第十三章 核医学基础	(251)
第一节 原子核的基本性质	(251)
一、原子核的组成	(251)
二、原子核的性质	(251)
三、结合能和质量亏损	(252)
四、原子核的稳定性	(254)
第二节 核衰变	(255)
一、 γ 衰变和内转换	(255)
二、 α 衰变	(255)
三、 β 衰变	(256)
第三节 核衰变规律	(258)
一、衰变规律	(258)
二、半衰期	(259)
三、放射性活度	(259)
第四节 射线与物质的相互作用	(260)
一、带电粒子与物质的作用	(260)
二、光子与物质的作用	(260)
三、中子与物质的作用	(261)

第五节 射线的生物效应.....	(261)
一、射线的原发作用.....	(261)
二、射线的继发作用.....	(261)
三、放射剂量.....	(262)
第六节 放射性同位素在医学中的应用.....	(263)
一、诊断上的应用.....	(263)
二、治疗上的应用.....	(265)
三、医药研究上的应用.....	(266)
四、放射性防护.....	(266)
第七节 磁共振成像.....	(266)
一、磁共振的基本概念.....	(267)
二、磁共振成像的原理.....	(271)
三、MRI 临床诊断的物理学依据	(276)
四、磁共振成像系统.....	(278)
五、MRI 的主要优缺点及其发展前景	(279)
第八节 放射性核素成像.....	(280)
一、单光子发射型计算机断层.....	(280)
二、正电子发射型计算机断层.....	(282)
三、SPECT 与 PET 的比较及其医学应用.....	(283)
第九节 γ 刀与 X 刀.....	(284)
一、原理.....	(284)
二、 γ 刀	(285)
三、X 刀.....	(286)
四、X 刀与 γ 刀的比较.....	(287)
部分习题答案.....	(289)
附录.....	(294)

绪 论

第一节 物理学的研究对象

物理学是研究物质运动的普遍性质和基本规律的科学。

物质存在的最基本性质就是运动。这里所指的运动是广义的,它包括各种机械运动、变化、生长、相互作用和相互联系等过程。各种自然现象,如天体运动、化学变化、动植物的生长和生殖过程等都是不同形态的物质运动的表现。最简单的物质运动形态是机械运动,即物体在空间中的相对位移。稍为复杂一点的运动形态有各种物理的和化学的现象,而生命现象则是更加复杂、更加高级的物质运动形态。

各种自然科学以不同的物质运动形态作为研究对象。在所有自然科学中,物理学所研究的物质运动形态具有最基本和最普遍的性质。具体地说,物理学研究的就是:力学的现象、与实物的结构和状态有关的现象、各种场的性质、场和实物的相互作用等等。按现象和过程来区分,物理学可以分为力学、声学、热学、电磁学、光学、原子过程和原子核过程的理论等部分。由于各种物质运动形态都是互相联系、不能彼此分割的,因此物理学的各个部分之间的界线是不可能划得十分清楚的。

物理学所研究的规律在自然界中具有最基本、最普遍的意义。这是因为物理现象存在于一切自然现象之中,和一切自然现象都有着不可分割的关系。例如,在任何化学过程中都包含有电子和分子运动、热和电的现象;人体中的神经活动包含着一系列的电变化的过程等等。一切自然现象,包括有生命的与无生命的在内,都毫无例外地受到热力学定律、万有引力定律以及其他物理定律的约束。物理现象的普遍性使得物理学基本知识成为研究任何科学技术所不可缺少的基础。

第二节 物理学与现代医学的关系

20世纪初,生物学与医学基本上是一门形态科学,其研究方法主要是收集和整理材料并进行观察和归纳。物理学家发明了光学显微镜,使这种观察达到了细胞水平,促进了医学的发展。近八十多年来,物理学和工程技术的飞跃发展,特别是从原子时代进入到电脑时代,电子显微镜、电子医学仪器及电子计算机广泛应用于生物学和医学上,又使医学研究从细胞水平进展到分子水平、电子水平,定性医学正在向定量医学过渡,生物医学的研究将进一步触及到生命现象的本质,如疾病发生的微观机理、有机体内的控

制与调节、新陈代谢的微观过程以及遗传与变异等微观基础的研究迅速发展。对寻找防病治病的有效途径正在起重要作用。

近卅年来,医学科学的理论,越来越多地建立在精确的物理学基础之上,物理学和现代医学不断发展,互相渗透,互相促进,形成了一门新的边缘学科,称为医学物理学(Medical Physics)。物理学、工程学、数学及其它自然科学与生物医学互相渗透,互相促进,又形成了一门多边缘综合性学科,称为生物医学工程学(Biomedical Engineering)。这两门新学科对阐明生命现象的本质和对生物体包括人体进行探索和改造,已经作出了许多新贡献,指明了许多值得注意的发展方向。

物理学与现代医学的密切关系主要表现在下列两个方面:

(1) 物理学所提供的方法和技术,为基础医学和临床医学的研究以及医疗实践,开辟了许多新途径,发明和创造了许多现代医学诊断、护理、医疗的新技术和设备。例如X光机、心电图机、超声诊断仪、光纤内窥镜、电子监护系统、X射线CT机、发射型CT机、核磁共振CT机、放射治疗设备等,这些高级技术和医疗设备为防病治病作出了卓越的贡献,而它们都是按照物理学原理和方法设计制造出来的。1987年超导体研究的突破,钡、钇、铜、氧组成的新型陶瓷,可以在液态氮温度范围内实现超导,这是物理学的最新成就。可以预言,超导体研究的进一步发展,必将在医学上获得广泛应用,特别是有朝一日,价值昂贵的液态氮低温超导磁场的核磁共振CT机,将可改装为成本大降的液态氮高温超导磁场的核磁共振CT机,届时将会广泛应用于临床早期诊断恶疾,为人类造福。

(2) 物理学是学习医学和研究生命现象不可缺少的基础。物理学是举世公认为一切其他自然科学和现代工程技术的基础。对医学来说也不例外。例如,要了解人体血液循环系统中的血流规律,就必须掌握流体动力学的基本知识;要了解眼的作用,也要掌握光学的基本知识;要了解人体内的电是神经与肌肉组织中的基本活动,就要了解脑电、心电、肌电、眼电、胃电等的有关电学知识。对于人体生理和病理过程中的控制和调节过程,必须懂得反馈的概念。在健康防护方面,必须考虑所处环境的物理因素。可见,缺少物理学基础,是不可能学习与研究医学的,每一位医学生必须认识这一点,才能自觉地学好医用物理学课程。正确认识物理学与医学的关系是学好这门课程的关键。

第一章 刚 体

处于固态的物质，有一定的形状和大小。但任何固体在外力作用下，其形状和大小都要发生变化，而物体的形变，除与外力的大小和方向有关外，还与它的组成质料和形状有关。要作详细的分析是比较复杂的。因此在物理学中，为使问题简化，常应用刚体的概念。我们把刚体理解为这样一个物体，它在无论多大的外力作用下，总是保持其形状和大小不变，也就是说，刚体内各质点之间的距离保持不变，刚体的各部分之间没有相对运动。显然，刚体是抽象的，绝对的刚体并不存在。然而，当物体受力不大，或其质料坚实，在外力作用下，无显著形变发生时，是可以把物体看成刚体的。在这样的情况下，刚体是一个有用的理想模型。

第一节 转 动

一、角位移 角速度 角加速度

在平动中常用的物理量有时间、位移、速度、加速度等，这些物理量称为线量。

刚体在做定轴转动时，到转轴距离不等的刚体上各点做圆周运动的线位移、线速度和线加速度各不相同；所以不能用这些量来描述整个刚体的转动情况。但是，刚体上所有各点在任一段时间内都转过相同角度，因此可以用与角度有关的量来描述整个刚体的转动。与转动对应的物理量有时间、角位移、角速度、角加速度等，常称之为角量。

当刚体的转轴固定且作定轴转动时，虽然刚体上的各个质点在同一时间内的位移长短不一，但它们绕过的角度却是一样的。为了描述刚体的转动程度，常采用角位移这个物理量。如图 1-1 所示，设一刚体绕定轴 AA' 转动， OX 为垂直于 AA' 的一条参考线。在转动过程中，角 θ 随时间变化，设在 Δt 时间内转过的角度为 $\Delta\theta$ ，则 $\Delta\theta$ 称为刚体在 Δt 时间内的角位移 (angular displacement)。在刚体转动过程中，任何相等的时间内它的角位移皆相等，这样的转动称为匀速转动。角位移 $\Delta\theta$ 与所经过的时间 Δt 的比值，称为角速度 (angular velocity)。用符号 ω 表示，单位为 rad/s 。

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1-1)$$

在转动过程中，相等的时间内刚体的角位移不相等，则称这种转动为变速转动。对于变速转动， $\Delta\theta/\Delta t$ 只能表示它的平均角速度，即 $\bar{\omega} = \Delta\theta/\Delta t$ 。要表示变速转动中每一时刻的瞬时角速度，则需采用平均角速度的极限值，或者需要求出角位移对时间的一阶导数，

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

刚体作变速运动时，在相等的时间内它的角速度改变量均相等，这种变速转动叫匀

变速转动。用角速度的改变量 $\Delta\omega$ 与所经过的时间 Δt 的比值来描述角速度的变化程度，称为角加速度 (angular acceleration)，用符号 α 表示，单位为 rad/s^2 。

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1-3)$$

对于非匀变速转动， $\Delta\omega/\Delta t$ 可以代表它的平均角加速度，即 $\bar{\alpha} = \Delta\omega/\Delta t$ 。而用平均角加速度的极限值表示它的瞬时角加速度。瞬时角加速度为角速度对时间的一阶导数，也是角位移对时间的二阶导数，即

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1-4)$$

二、角量和线量

角位移、角速度和角加速度是以角度为基础来衡量转动情况的物理量，统称为角量，而位移、速度和加速度则称为线量。

角量与线量之间有如下关系

$$\text{位移} \quad \Delta s = r\Delta\theta \quad (1-5)$$

式中 r 为质点到转轴的距离， $\Delta\theta$ 为微小的角位移。

$$\text{速度} \quad v = \frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt} = r\omega \quad (1-6)$$

$$\text{加速度} \quad a = \frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} = r\alpha \quad (1-7)$$

角位移、角速度、角加速度都是矢量。表示这些矢量的方法常用右手螺旋定则。例如角速度矢量是这样确定的：在转轴上取一有向线段，使右手螺旋转动的方向和刚体转动的方向一致，则螺旋前进的方向即代表角速度矢量的正方向，而所取的有向线段长度即可按一定比例代表角速度的大小。其他角量的矢量表示法与此类似。

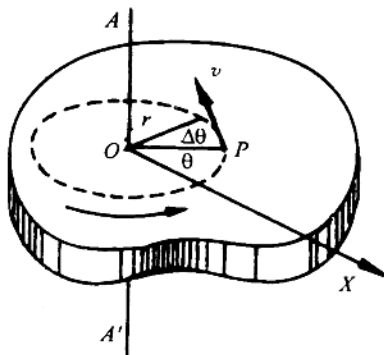


图 1-1 刚体的定轴转动

第二节 转动动能 转动惯量

这一节将讨论刚体转动的动力学，先从分析它的动能开始，在此基础上提出一个重要的新概念——转动惯量。

一、转动动能

一个刚体可以看成是由许多质点所组成，假设这些质点的质量分别为 $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_n$ ，它们对应于转轴的距离分别为 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 。刚体转动时，虽然这些质点作圆周运动的速度 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 各不相同，但是它们的角速度 ω 却是相同的。这些质点的动能的总和，也就是这个刚体的转动动能。因此，刚体的转动动能 E_k 为

$$E_k = \frac{1}{2} \Delta m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} \Delta m_2 v_2^2 + \dots + \frac{1}{2} \Delta m_n v_n^2$$

$$= \frac{1}{2} \Delta m_1 r_1^2 \omega^2 + \frac{1}{2} \Delta m_2 r_2^2 \omega^2 + \cdots + \frac{1}{2} \Delta m_n r_n^2 \omega^2$$

$$= \frac{1}{2} (\Delta m_1 r_1^2 + \Delta m_2 r_2^2 + \cdots + \Delta m_n r_n^2) \omega^2$$

或
$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1-8)$$

式中
$$I = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 \quad (1-9)$$

和质点运动的动能公式 $E_k = \frac{1}{2} m v^2$ 比较, 式 (1-8) 中的角速度 ω 相当于质点运动的速度 v , 而 I 则相当于质点运动中的质量 m , 是一个衡量转动惯性的量。从式 (1-8) 中可以看出, I 愈大, 物体获得一定角速度所需的能量愈多, 把 I 叫做转动惯量 (rotational inertia)。

二、转动惯量

一般物体的质量是连续分布的。因此, 式 (1-9) 应写成积分形式

$$I = \int r^2 dm = \int r^2 \rho dV \quad (1-10)$$

式中 dV 表示 dm 的体积元, ρ 表示该处的密度, r 为此体积元与转轴之间的距离。在 SI 制中, 转动惯量的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

由式 (1-9)、(1-10) 可以看出, 刚体的转动惯量决定于刚体各部分的质量对给定转轴的分布情况。即刚体的转动惯量与下列因素有关: ①质量的大小; ②质量的分布情况, 亦即刚体的形状、大小和各部分的密度; ③转轴的位置。

图 1-2 表示一根长度为 l 、质量为 m 的均匀细棒, 绕一条与它的轴线垂直的转轴 AA' 转动。

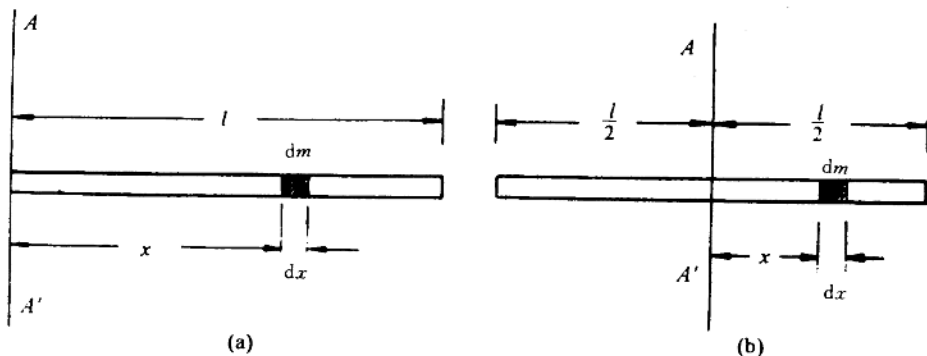


图 1-2 均匀细棒的转动惯量

(a) 当转轴通过它的一端时, 它的转动惯量

$$I = \int_0^l x^2 dm = \int_0^l x^2 \frac{m}{l} dx = \frac{mx^3}{3l} \Big|_0^l = \frac{1}{3} ml^2$$

(b) 当转轴通过棒的中心时

$$I = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} x^2 dm = \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{m}{l} x^2 dx = \frac{mx^3}{3l} \Big|_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} = \frac{1}{12} ml^2$$

只有形状比较简单而密度又有规则地分布的物体才能用数学方法求出它的转动惯量。对形状复杂而密度又不均匀的物体，求转动惯量的最好办法是用实验方法测定。图 1-3 是几种常见物体绕定轴的转动惯量。

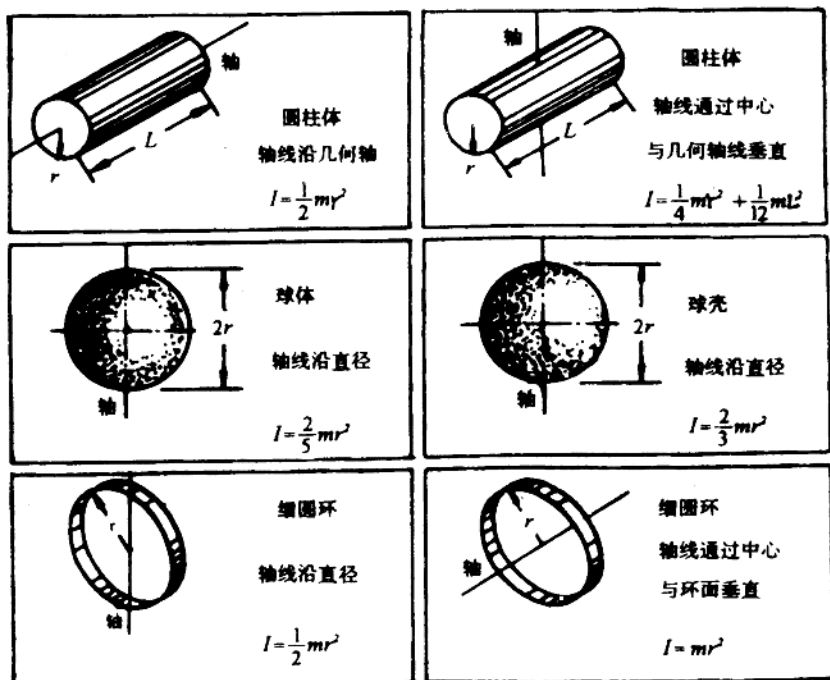


图 1-3 几种常见物体绕定轴的转动惯量

人体的转动惯量和一般物体一样，由三个因素决定：

- (1) 人体的全部质量；
- (2) 人体全部质量的分布情况，即人体的姿势或人体的形状。

(3) 转轴的位置：同一人体在同一姿势时，对不同的转轴转动惯量存有差异。当身体各环节的质心到转轴的距离 r 增加一倍时，它的转动惯量就要增加 3 倍。

测定人体在不同姿势时对某转轴的转动惯量，其装置结构如图 1-4。该装置下端是一个方形板，两侧用两条坚固的绳索吊起来。被测试者乘于方形板上，使其发生扭摆，从而测得此系统的扭摆摆动周期 T 。将测得的 T 代入下式，即可计算出人体不同姿势时对轴的转动惯量：

$$I = \frac{C}{4\pi^2} (W + W') T'^2 - I' \quad (1-11)$$

式中 C 是该装置的结构所决定的常数； W 、 W' 分别为人体和方形板的重量； I' 为方形板对转轴的转动惯量，它的求得需先测出空载时方形板的扭摆周期 T' ，代入下式即可求得：

$$I' = \frac{C}{4\pi^2} W' T'^2。$$

以上公式适合于选用额状轴、矢状轴、垂直轴等不同转轴，对于帮助运动员进行动作训练有着实际意义。

第三节 转动定律

这一节介绍一个关于刚体转动的重要定律，它的意义同质点力学中的牛顿第二定律十分相似。

一个具有固定轴的静止刚体，在外力作用下是否绕轴转动，不但与力的大小有关，而且与力的作用点及方向有关。因此，在研究转动问题时需要引入力矩（moment of force）这一概念。力的大小与力臂（即力的作用线和转轴之间的垂直距离）的乘积称为此力对转轴的力矩，单位为 $\text{N} \cdot \text{m}$ 。力矩为矢量，它的方向可利用右手螺旋定则确定，由矢径（即转轴到力的作用点）方向经小于 180° 角转到力的方向转动螺旋，螺旋前进的方向即代表力矩的方向。

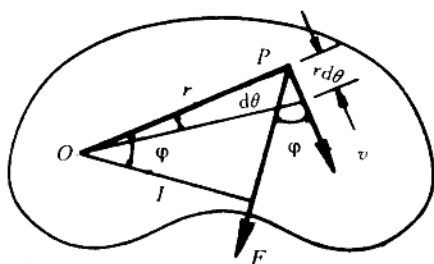


图 1-5 转动定律的推导

如果在转动过程中转动惯量不变，则有

$$Md\theta = I\omega d\omega$$

但 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ ，代入上式整理得

$$M = I \frac{d\omega}{dt}$$

或

$$M = I\alpha \quad (1-12)$$

上式指出，转动物体的角加速度与作用的力矩成正比，与物体的转动惯量成反比。这一定律称为转动定律，相当于质点运动的牛顿第二定律。

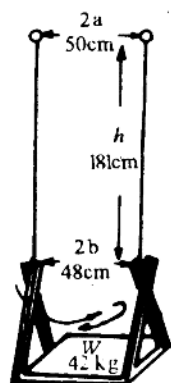


图 1-4

在图 1-5 中，刚体在力 F 的作用下绕垂直于纸面的 O 轴转动。当转动一小角 $d\theta$ 时，力所作的功等于力的作用点的位移 $rd\theta$ 乘以力在位移方向上的分量 $F \cos \varphi$ 。即

$$dW = F \cos \varphi \cdot rd\theta = Fr \cos \varphi d\theta = Fl d\theta$$

式中 Fl 即力矩 M ，故可写成

$$dW = Md\theta$$

做功的结果将引起刚体动能的增加，于是有

$$Md\theta = d\left(\frac{I\omega^2}{2}\right)$$