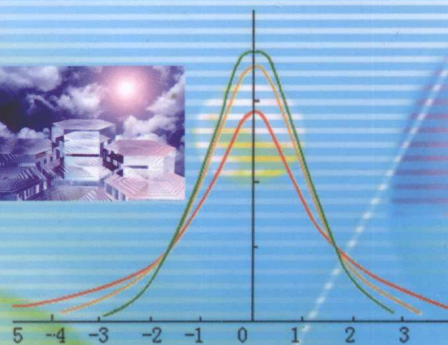


全国高等医药院校规划教材

# 医用物理学

主编 张延芳



科学出版社

www.sciencep.com

全国高等医药院校规划教材

# 医用物理学

主 编 张延芳  
副主编 贺奇才 丘翠环 陈英华  
编 者 (按姓氏笔画排序)  
王 勇(广东医学院)  
叶红玲(广东药学院)  
丘翠环(广东药学院)  
付 利(佛山科学技术学院)  
刘 尉(广州中医药大学)  
张延芳(广东医学院)  
张秀梅(广州医学院)  
陈英华(广东医学院)  
陈鸿鹏(广东医学院)  
赵箭光(广州医学院)  
侯林涛(暨南大学)  
贺奇才(中山大学)  
徐生辉(中山大学)  
郭晋蜀(汕头大学)

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

医用物理学是物理学的重要分支学科,是物理学与医学相结合所形成的交叉学科。我们根据目前的教育现状,总结多年的教学改革经验,吸取国内外相关教材的优点编写本教材。本教材分生物力学基础,流体的运动,振动、波动和声,分子动理论、热力学基础、静电场、磁场、直流电、波动光学、几何光学、量子力学基础、激光及其医学应用、X射线及其医学应用和原子核物理学基础共14章内容,在不同章节分别介绍生物力学、血液的流动、超声、生物电、心电图、生物磁、激光、X射线、显微镜、核磁共振基础知识或相关技术等。

本书适合高等医药院校及综合大学的临床医学、药学、检验、预防医学、口腔、影像、麻醉、眼视光、法医、信息管理等本科专业的教学,也适用于医药院校生命科学等其他相关专业的师生和研究工作者作为参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

医用物理学 / 张延芳主编. —北京:科学出版社,2010.6

全国高等医药院校规划教材

ISBN 978-7-03-027559-2

I. 医… II. 张… III. 医用物理学-医学院校-教材 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 085574 号

策划编辑:周万灏 李国红 / 责任编辑:周万灏 李国红 / 责任校对:陈玉凤  
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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2010年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2010年6月第一次印刷 印张:20

印数:1—5 000 字数:500 000

定价:34.90元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

医用物理学是高等医药院校本科学生必修的一门公共基础课程,参加本教材编写的人员都是长期工作在教学第一线的主讲教师,具有丰富的教学经验。

全书分生物力学基础,流体的运动,振动、波动和声、分子动理论,热力学基础,静电场,磁场,直流电,波动光学,几何光学,量子力学基础,激光及其医学应用,X射线及其医学应用和原子核物理基础共14章。

本教材具有以下特点:第一,在编写上注意由浅入深、由易到难、循序渐进,便于学生理解。第二,在保持物理学知识的系统性、完整性和科学性的基础上,注重介绍物理学的原理和技术在医学中的应用。第三,在每章首页安排导读插图,引起读者的兴趣,结尾有小结帮助读者系统掌握每章的基本内容。阅读材料简要介绍物理的原理和技术在医学中的应用、进展和成果,强化物理与医学的密切结合程度。

物理学的内容广泛,而医药类学生的医用物理学一般都安排在第一个学年度内的某个学期内完成,但是各个高校所学课程的难易程度,理论和实验的课时数都不完全一样,因此,选用合适的教材在有限的时间内完成教学内容是很重要的。

参加本书编写工作的人员有广东医学院的张延芳(第3章)、陈英华(第12章)、王勇(第6章)、陈鸿鹏(部分章节的绘图),中山大学的贺奇才(第11和14章)、徐生辉(第4章),广东药学院的丘翠环(第7章)、叶红玲(第2章),广州医学院的张秀梅(第13章)、赵箭光(第9章),暨南大学的侯林涛(第10章),汕头大学的郭晋蜀(第5章),广州中医药大学的刘尉(第8章),佛山科学技术学院的付利(第1章)。

由于编者水平有限,书中不妥之处和错误在所难免,恳请同行、读者批评指正。

张延芳

2009年于广东医学院

# 目 录

前言		第 6 章 静电场	(119)
绪论	(1)	6.1 电场 电场强度	(120)
第 1 章 生物力学基础	(5)	6.2 静电场的高斯定理	(122)
1.1 刚体的转动	(5)	6.3 电势	(126)
1.2 物体的弹性	(11)	6.4 电偶极子 电偶层	(131)
1.3 骨的力学特性	(17)	6.5 静电场中的电介质	(133)
第 2 章 流体的运动	(25)	6.6 细胞膜电位	(137)
2.1 理想流体的定常流动	(25)	6.7 心电图	(138)
2.2 伯努利方程及其应用	(27)	第 7 章 磁场	(147)
2.3 黏性流体的流动	(31)	7.1 磁感应强度、磁通量	(147)
2.4 血液的流动	(37)	7.2 电流的磁场	(149)
第 3 章 振动、波动和声	(43)	7.3 磁场对电流的作用	(154)
3.1 简谐振动	(43)	7.4 磁介质、磁场的能量	(161)
3.2 简谐振动的合成	(50)	7.5 生物磁场和磁场的生物效应	(165)
3.3 简谐波	(53)	第 8 章 直流电	(173)
3.4 波的干涉	(57)	8.1 电流密度	(173)
3.5 声波	(61)	8.2 电动势	(178)
3.6 多普勒效应	(65)	8.3 电容器的充放电	(182)
3.7 超声波	(67)	8.4 电泳	(184)
第 4 章 分子动理论	(74)	第 9 章 波动光学	(192)
4.1 物质的微观结构	(74)	9.1 光的干涉	(193)
4.2 理想气体分子动理论	(75)	9.2 光的衍射	(198)
4.3 气体分子速率和能量的统计分布	(80)	9.3 光的偏振	(204)
4.4 气体内的输运过程	(83)	第 10 章 几何光学	(216)
4.5 液体的表面现象	(85)	10.1 球面折射	(217)
第 5 章 热力学基础	(94)	10.2 薄透镜	(221)
5.1 热力学基本概念	(94)	10.3 厚透镜	(224)
5.2 热力学第一定律	(95)	10.4 眼的光学系统	(227)
5.3 热力学第一定律的应用	(97)	10.5 放大镜、纤镜、显微镜	(232)
5.4 循环过程 卡诺循环	(102)	第 11 章 量子力学基础	(242)
5.5 热力学第二定律	(105)	11.1 热辐射	(243)
5.6 人体的能量与代谢	(109)	11.2 光的量子性	(245)
		11.3 氢原子的玻尔理论	(247)

---

11.4	实物粒子的波动性	(249)	13.3	X射线谱	(279)
11.5	薛定谔方程	(252)	13.4	X射线的衰减规律	(281)
11.6	薛定谔方程的应用	(254)	13.5	X射线在医学上的应用	(285)
11.7	电子自旋	(258)	<b>第14章</b>	<b>原子核物理学基础</b>	(290)
<b>第12章</b>	<b>激光及其医学应用</b>	(263)	14.1	原子核的组成和性质	(290)
12.1	激光基础	(263)	14.2	核衰变及其类型	(293)
12.2	激光的生物效应	(268)	14.3	核衰变的规律	(296)
12.3	激光的医学应用	(270)	14.4	放射性核素的医学应用	(299)
<b>第13章</b>	<b>X射线及其医学应用</b>	(275)	14.5	辐射剂量和防护	(303)
13.1	X射线的产生	(275)	14.6	磁共振成像简介	(306)
13.2	X射线的基本性质	(277)			
<b>附录A</b>	<b>矢量及其运算</b>	(311)			
<b>附录B</b>	<b>常用物理常量</b>	(313)			
<b>参考文献</b>		(314)			

# 绪 论

物理学(physics)是研究自然规律的基本学科之一,它是一切科学技术的基础,对现代科学技术发展起着极其重要的作用.学习物理学,掌握物理学的基本知识、分析问题的思维方法、解决问题的实际能力,对于非物理专业的人员来说,也是非常重要的.对于医学相关专业的学生或工作人员来说,学习物理学,一方面可以获得医学专业所需的必要的物理学知识;另一方面可以提高科学素质,以适应 21 世纪高素质医科各专业人才的需要.

## 物理学研究对象

自然界是由各种各样的物质构成的.一切物质都在不断地运动着、变化着,绝对不动的物质是不存在的,“运动是绝对的,静止是相对的”.运动是物质存在的形式,是物质的固有属性,没有不运动的物质,也没有非物质的运动,物质和运动是不可分割的.物质存在的基本形态有实物和场两种.实物具有静止质量,看得见,摸得着,占有一定空间并具有不可入性,即一种实物所占据的空间,不能同时为其他实物所占据.例如,花虫鸟兽、山河湖泊、原子粒子、宇宙星空等.场是无静止质量的,看不见、摸不着,以连续形式弥漫于空间,具有可入性,即不同的场可以同时存在于同一空间,互不干扰,是实物之间进行相互作用的传递者,例如,电场、磁场和引力场.电台可以发射电磁波信号,通过空间传送到千家万户的收音机、电视机和手机中.实物和场都是客观存在的运动的物质,是不可分割的联系在一起的,例如,运动电荷的周围有电场和磁场,物体的周围存在引力场,电荷之间的电场力是通过电场相互作用的.实物和场在一定的条件下会相互转化,如粒子的产生与湮灭.电子与正电子一旦相遇将湮灭而转化为  $\gamma$  光子,即转化为电磁场;反之,若  $\gamma$  光子的能量足够大时, $\gamma$  光子也可以转化为正负电子对.电子与正电子都是实物,而光子却是电磁场,即真空.

物质运动和变化的形式是多种多样的,如物体的位置和状态的变化,地球以及天体运动,金属生锈,生物体生长、发育和死亡等.有些运动形态比较简单,有些运动形态则比较复杂,不同的运动形态,既有服从共同普遍规律的共性,也各有自身独特的规律.对各种不同的物质运动形式和规律的研究,就形成了自然科学的各个学科.

物理学是研究物质运动普遍性质和基本规律的科学,具体来说,是研究物质的基本结构、基本运动形式、相互作用的一门自然科学.它的研究对象小到微观粒子,大到宏观天体.物理学所研究的规律具有极大的普遍性,例如,能量守恒和转换定律是物理学的基本定律之一,而其他一切变化和过程,不论它们是否具有化学的、生物的或其他的特殊性质,都遵从能量守恒和转换定律.

## 物理学与医学的关系

医学是一门以人体为研究对象的生物科学.直到 20 世纪初期,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,进行观察和归纳,属于一种定性分析.而物理学则有严格的理论,精密的实验方法和定量的测量技术.随着物理学的概念、原理、方法和技术在基础医学的研究、临床医学的诊断和治疗以及预防医学中的应用,大大地促进了医学

在理论认识、诊断、治疗等方面的发展和提高。目前,医学已经发展到一个比较高的水平,医学发展经历了从宏观到微观,从定性到定量,从细胞水平到分子、量子水平,从手工的、机械的、接触型操作向自动化、智能化、非接触型操作发展。

物理学与医学这两门学科的不断发展和互相渗透、互相促进,形成了许多新的医学分支学科和边缘学科,如医学物理学、生物物理学、生物医学工程学、影像物理学、放射医学、超声医学、核医学、激光医学、电生理学等。这些学科分支的发展和完善,对于阐明生命现象的本质和对生物体(主要是人体)内在规律的探索,以及医学诊断治疗过程中起到了重要作用。

下面从几个方面来简略介绍物理学与医学之间的关系:

### 1. 物理学在医学发展中起着重要的作用

物理学和医学关系密切,源远流长。在英语中有许多有关物理学和医学及生理学的词汇都是同根词,如 *physic* (*n.* 医药, *v.* 给...吃药), *physics* (*n.* 物理学), *physique* (*n.* 体格), *physician* (*n.* 医生、内科医生), *physiology* (*n.* 生理学)等。由此可见物理学与医学的关系非常密切。

物理学在医疗实践和医学发展中一直起着非常重要的作用。许多物理学上的新发现、新发明都直接推动了医学的发展,一些原本属于物理学的研究方法也被用于医学研究而取得了重大成果,甚至一些物理学家也直接对医学发展做出了重大贡献。众所周知,显微镜的发明为细胞的发现提供了条件,使生物医学发展到细胞水平。德国物理学家伦琴(Wilhelm Conrad Röntgen, 荣获1901年第一届诺贝尔物理学奖)发现了X射线并拍摄了世界上第一张X线照片——伦琴夫人手骨像,开创了医学影像诊断的先河。物理学家托马斯·杨(Thomas Young)是光的波动学说的奠基人之一,他本人就是一位医生。物理学家乔治·冯·贝克西(Georg von Bekesy)发现了内耳的电生理功能。美国物理学家沃森(James D. Watson)和英国物理学家克里克(Francis Crick)深受物理学家薛定谔(Erwin Schrödinger)的《生命是什么——活细胞的物理观》以及物理学家维尔金斯(Maurice Hugh Frederick Wilkins)关于DNA(脱氧核糖核酸)的X射线衍射报告的启发,在当时还没有足够实验证据的条件下,于1953年成功地建立了DNA分子双螺旋结构的模型。1954年,美籍俄裔物理学家伽莫夫(George Gamow)提出蛋白质遗传密码的设想。随后不久,三位美国科学家霍利(Robert William Holley)、科勒拉(Har Gobind Khorana)和尼伦伯格(Marshall W. Nirenberg)破译了双螺旋结构所载遗传密码。这些关于DNA分子双螺旋结构及遗传密码的研究成果为分子生物学和分子医学的建立打下了基础,在遗传学发展史上起了划时代的作用,使生物学及医学的研究进入了一个分子水平的新时代,使人类对自身的认识有了新的突破和新的起点。

世界医学的最高奖项当属诺贝尔生理学或医学奖(以下简称诺贝尔医学奖)。自1901年开始颁发诺贝尔奖以来,诺贝尔医学奖项中大约有1/5是将物理学应用于医学而取得的重要成果。获得诺贝尔奖的第一位临床医生丹麦的芬森(Niels R. Finsen)就是将物理学应用于医学而获奖的。他因应用光学原理研制出分光滤光聚光器,用以治疗皮肤结核等皮肤病取得显著疗效,而荣获1903年度诺贝尔医学奖。时隔100年,美国科学家劳特伯(Paul Lauterbur)和英国物理学家曼斯菲尔德(Peter Mansfield)因他们在20世纪70年代发明了核磁共振医学成像,而分享了2003年度的诺贝尔医学奖。核磁共振医学成像的实现使得神经科学、生理学和医学影像学发生了巨大变革,是物理学对医学的重大贡献。在这100多年的时间里,还有很多次诺贝尔医学奖是将物理学应用于医学取得重大成果而获得的。如用改进的示波器发现单一神经纤维的高度机能分化(1944年度奖)、X射线诱发果蝇基因突变(1946年度奖)、内耳电生理功能的发现和研究(1961年度奖)、DNA分子双螺旋结构模型的建立(1962年度奖)、用核素标记技术研究胆固醇和脂肪的体内代谢机理和调节(1964年度奖)、蛋白质遗传密码的设想与破译(1968年度奖)、用电镜和离心技术研究细胞器形态和功能(1974年度奖)、X射线CT(1979年度奖)、创建测量细胞膜离子单通道电流的膜片嵌位方法(1991年度奖)。上述事例从一个侧面



有力地说明物理学在医学发展中起着重要的作用。

## 2. 物理学知识是学习医学和了解生命现象所不可缺少的基础

物理学是除数学之外的一切其他自然科学和工程技术的基础,对于医学来说,也不例外。例如,要了解人体骨骼、关节和细胞受力情况,必须学习弹性力学和流体力学的知识;要了解血液在心血管系统中运动的情况,必须知道流体运动的基本定律;要了解眼睛的作用,不仅必须掌握几何光学的原理和方法,而且还要学习波动光学;要了解声音的听觉过程以及超声在医学上的应用,必须知道声波的物理性质和传播规律;要了解人体生热和散热过程,必须学习热力学的基本定律;要了解人体的电磁现象(心电、脑电、肌电、眼电、心磁、脑磁、肺磁等),必须具备有关的电磁学方面的知识等。显然,生命过程中的每一步都会涉及物理学,要深刻理解生命现象的本质是离不开物理学基础知识的。

## 3. 物理学为医学研究和临床诊断提供了许多新手段、新方法

按照物理学的基本原理设计制造的各种医疗器械、光学仪器、电子仪器和各种综合性大型医用设备正在不断发展、不断更新,几乎所有的现代高新技术都被医学所吸收和利用,为医学诊断和科学研究,提供了强有力的工具。例如,各种心电检测仪器、脑电检测仪器、监护技术、各类超声诊断仪器、光学显微镜、电子显微镜、光导纤维内镜、激光全息照相、热像图、红外技术、遥测技术、X射线透视和照相、医用电视系统、X射线计算机断层成像(X-CT)、数字减影血管造影技术(DSA)、磁共振成像(MRI)、 $\gamma$ 照相机、单光子和正电子发射型断层成像(ECT)、放射免疫分析、生化自动检测仪、各种医用换能器等。

在物理治疗方面除了传统的光疗、热疗、电疗、声疗、X放射治疗之外,还有很多新的物理治疗手段,例如,高频电刀、体外冲击波碎石技术(ESWL)、超声刀、血液透析技术、心脏起搏器、心脏除颤器、低温冷冻技术、医用激光器、X光、 $\gamma$ 刀、医用加速器、钴<sup>60</sup>治疗机、各种生物医学材料等。

从以上介绍的情况可知,物理学的理论和方法是学习和研究各医学分支学科的基础,它为现代医学提供了准确可靠的检测手段和先进的治疗方法,大大地促进了医学的发展。物理学在医学方面的应用越来越广泛和深入,两者的关系也越来越密切。因此,学习医用物理学课程既是为医学专业后继课程打基础,也是将来从事现代化医疗卫生和医学科学研究工作的需要。

总之,现代医学实践、生物技术、生命科学的发展不仅需要物理学最新成果的支持,而且还日益依赖于众多的物理工具技术和物理科学技术。正是由于现代物理学的快速发展,带动了现代医学的发展,提高了临床诊断和治疗的技术水平,促进了人类的健康及社会的进步。反之,当基础医学研究和临床诊断、治疗等出现新问题,无法用现有的技术和仪器解决问题时,就需要新的物理原理、技术和方法来满足新需要,迫使物理学工作者研制新仪器、提供新方法来满足医学领域的需求。物理学和医学之间的这种互为因果关系使物理和医学一直保持着密切的关系,相互渗透、相互促进、相互推动。如果没有X射线的发现,就不会有现在医院中普遍使用的X射线透视机和X线电子计算机断层扫描;没有超声波的发现,就不会有现在医院中普遍使用的B超机。医学与物理学的融合,不仅在生理学、影像诊断、核医学、放射治疗、加热治疗、放射防护领域有所体现,还深入到骨科、眼科、口腔、听觉、内分泌学等领域。可以说,物理学越来越快地向医学和生物学的各个方面渗透,物理学一旦出现新进展,就会迅速在医学和生物学的发展中找到应用,并促进这些学科的发展,医学与物理学有着密切的联系。

## 怎样学好医用物理学

《医用物理学》是医学、药学相关专业必修的基础课,学习《医用物理学》,可以提高医

学、药学相关专业人员的科学素养,也可以提高医学教育水平.在学习《医用物理学》的过程中,既要学习物理学本身的基础知识,又要了解物理学的理论及技术在医学上的应用.对于刚步入医药院校的大学生来说,要学好《医用物理学》,需要注意到以下几个方面.

### 1. 通过绪论课培养学习兴趣

绪论课是学习《医用物理学》的开始.对于刚迈进高等医药院校大门的学生来说,“为什么要学习物理学?怎样学好物理学?”的问题并不十分清楚,在绪论课中就是要解决这些问题.

近百年来,物理学理论和技术对于医学发展起着巨大的推动作用,如 X 射线、激光、电子显微镜、核磁共振等技术为医学研究及临床应用提供了新的方法和手段,对现代生命科学的发展做出了突出的贡献.可以说,没有物理学的支持就没有医学的今天,只有认识到物理学对医学的重要性,才能有学习的兴趣和热情,自觉地学好物理学.

### 2. 物理知识与医学应用相结合

医用物理学的学习要注重理论联系实际,在学习物理学基本原理的同时,一定要多联系具体与医学相结合的实例.例如,在学习流体力学中的伯努利方程后,要理解人体内部血液流动的规律、血压的概念等;在学习表面张力之后,要理解呼吸过程中,肺泡内外的压强分布以及肺泡呼吸的原理,同时也要理解血循环中出现气体栓塞现象的原理;学习静电场时,要理解心电信号的形成过程,以及心电图的特征.这些知识对于锻炼抽象思维和培养自学能力是必要的,也是认识和理解生命现象所必需的.

### 3. 灵活应用,切忌死记硬背

物理学的公式、定理很多,对于某些基本公式、定理,需要熟练记忆,这种记忆,必须是在理解的基础上记忆,这是形成、改变学生整体知识、智能结构的重要组成部分.而对于大量的复杂公式,并不一定要求死记硬背,在今后的学习和工作中需要时可通过查找有关参考资料获得.比死记硬背更重要的是,通过学习掌握自己获取知识的能力和 method.

### 4. 课前预习,课后复习

课前预习,将不懂的地方做好标记,在课堂上注意听老师如何讲解,课后及时对没有消化的内容或相似的概念、规律、公式进行归类、辨析、比较,进一步巩固和确切理解其真正的内涵,防止回忆时用一种知识代替另一种知识的现象.

### 5. 认真完成课后作业

课后作业是每章学习中要求重点掌握的内容,完成课后作业是巩固知识的重要环节,也是用以矫正学生不良学习方式的重要途径.在完成老师布置的作业外,可根据自己的基础及知识的遗漏等情况,通过练习精心选择的题目,解决学习中的难点,以达到对所学知识的全面理解.

### 6. 重视实验,提高创新能力

物理学是一门以实验为基础的学科,理论的正确与否需要实验去检验,实验也可以加深对理论的认识.医学院校的物理实验是使学生学习实验误差理论的一些基本概念和处理方法,掌握最基本物理量的测量方法及基本实验方法,介绍物理学测量仪器和测量手段在医学、药学临床及科研中的应用,尽可能多地接触现代化仪器设备以及实验方法.所以在物理实验课中,首先要端正对实验的认识,不是为了完成实验而实验,而是要变被动为主动,把一些模糊的理论内容,通过实验真正弄懂.要注意理解实验原理,并注意培养实验设计方法、实验结果的分析能力和创新思维能力,从而提高实验素质.

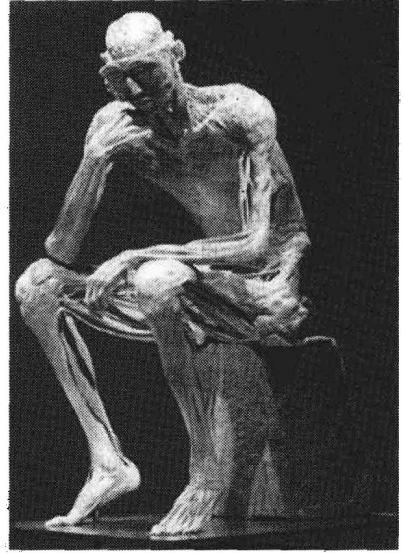
总之,要学好医用物理学,就必须在学习中深刻体会到医用物理学在医学生今后工作中的重要意义,并且学会运用多种手段调动自己的学习兴趣和积极性,为学好后继课程打好基础,为今后的工作做好铺垫,努力成为 21 世纪高素质有作为的医药专业人才.

# 第 1 章 生物力学基础

2007 年 11 月 15 日, 22 具完整的人体标本和 260 个器官与组织标本在西班牙巴塞罗那展出. 参观者可以直观详细地了解运动中的人体骨骼与组织形态.

右图为其中一标本的图片. 图中人体标本是在室温状态下经过脱脂, 以丙酮替代组织中的脂肪成分而成. 用来表明生物力学主要的研究对象, 即人体的骨骼、软组织、血管和微血管、心、肺、肾和头颅的力学模型.

**生物力学**(biomechanics)是力学和生命科学的交叉科学, 它研究力作用的生物效应, 其研究领域包括人体运动学, 骨骼的力学性质, 各种软组织及血液等的流变性质, 血液在血管和微血管中的流动规律, 脉搏的传输规律, 心、肺、肾和头颅的力学模型等, 以及植物根基中水分和养料的输送等方面. 由于研究的领域和范围不同, 现代生物力学又分为一般生物力学、人类工程生物力学、医学生物力学、运动生物力学、康复生物力学等学科. 生物力学对生命科学的发展, 对医学的基础研究和临床, 都有重要的科学价值和应用意义.



本章内容主要讨论在基础医学研究和临床中应用生物力学所涉及的力学基础知识, 主要包括: 刚体的转动基础知识、弹性物体的基本知识等, 为进一步学习生物力学在医学中的应用打下基础.

## 1.1 刚体的转动

在研究物体的运动时, 把具有一定质量而几何形状和尺寸大小可以忽略不计的物体称为质点, 也就是说, 可将物体作为只有质量没有大小的点. 例如, 研究人造地球卫星的轨道时, 卫星的形状和大小对研究的问题无关紧要, 可将卫星看做一个质点. 然而, 当研究电动机转子的转动、天体的自旋、人体肢体的摆动、运动员在运动时身体的平衡等问题时, 物体的形状、大小往往起重要作用, 必须考虑它们的形状大小以及它们的变化. 为此, 人们提出“刚体”的理想模型, 在力的作用下, 物体的形状和大小都不变的物体称为刚体(rigid body). 例如, 当研究人的肢体运动时, 肢体可简化为刚体.

刚体的实际运动可以分解为平动和转动, 平动(translation)是指刚体上的任何一条直线在运动过程中都始终保持相同的方位, 如图 1-1(a)所示, 也就是说, 刚体在平动时, 其上的各点都具有相同的位移、速度和加速度. 所以, 刚体在平动时, 可以把它当成质点来处理. 转动(rotation)是指刚体上的各点都绕同一条直线作圆周运动, 如图 1-1(b), 这条直线称为转动轴(rotation axis). 转动轴固定不动的转动称为定轴转动(fixed-axis rotation).

在生物力学中, 为了进行定量分析, 通常将人体分成头, 躯干, 大、小腿, 足, 上臂, 前臂,

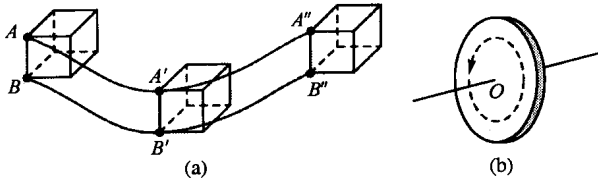


图 1-1 刚体的平动和转动  
(a) 刚体的平动; (b) 刚体的转动

手等各个环节. 人的各个环节可以运动, 人体的姿势也可以改变, 所以, 严格地讲, 人体不是刚体. 但由于人体的骨骼具有固定的形状, 并借助肌肉的力量, 将身体各部分维持一定的姿势, 所以, 在研究人体的平衡和运动时, 通常都有条件地将人体作为刚体. 人体的各个环节常绕各关节作转动, 故在这里主要介绍刚体的转动, 特别是定轴转动.

### 1.1.1 刚体定轴转动的描述

#### 1. 角位移、角速度、角加速度

描述物体的平动时, 一般采用线量, 如位置、位移、速度、加速度等. 当物体转动时, 各质点的速度、加速度一般是不同的. 但对于刚体来说, 由于各质点的相对位置保持不变, 在同一时间内绕过的角度却是一样的, 所以描述物体的转动一般采用角量, 如角位置、角位移、角速度、角加速度等.

当刚体绕某一固定转轴  $AA'$  转动时, 如图 1-2 所示, 在刚体中任选一点  $P$ , 过  $P$  作垂直于转动轴的平面, 此平面称为  $P$  点的转动平面. 转轴与转动平面交点为  $O$ . 选择  $Ox$  为参考方向, 就可以用角量描述刚体的运动.

设  $t$  时刻  $OP$  连线与  $Ox$  夹角为  $\theta$ , 即此时  $P$  点的角位置或角坐标为  $\theta$ . 经过时间  $\Delta t$  后, 到达  $Q$  点, 此时它的角坐标为  $\theta + \Delta\theta$ . 很明显,  $\Delta t$  时间内刚体转过的角度为  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\theta$  称为这段时间内刚体的角位移 (angular displacement), 其单位以弧度 (rad) 表示, 弧度是一个没有量纲的纯数. 对应于一个无限短时间  $dt$  内的角位移记为  $d\theta$ . 角位移  $d\theta$  不但有大小, 而且有方向, 它是一个矢量, 其方向由右手螺旋法则确定. 方法是将右手大拇指与其余四手指垂直, 使四指按照转动的方向回转, 此时大拇指的方向便是角位移  $d\theta$  的方向, 即角位移的方向在转轴上, 如图 1-3 所示. 如果规定了转轴的正方向后, 取向与转轴正方向一致的角位移为正值; 反之, 角位移便为负值.

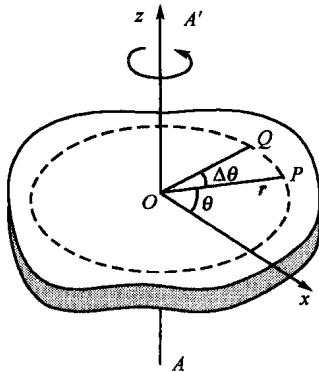


图 1-2 刚体的定轴转动

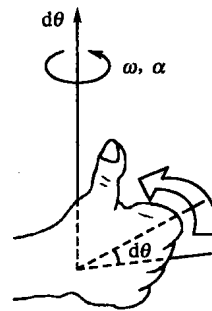


图 1-3 角位移矢量的方向

角速度 (angular velocity) 是描述刚体转动快慢的物理量, 用  $\omega$  表示. 比值  $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  便是刚体在  $\Delta t$  时间内的平均角速度, 当  $\Delta t$  趋于零时,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$  的极限值  $\frac{d\theta}{dt}$  称为刚体在  $t$  时刻的瞬时角速度.

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

角速度的单位为  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$  (弧度·秒<sup>-1</sup>)。由于弧度没有量纲,故角速度的单位有时就用  $\text{s}^{-1}$  (秒<sup>-1</sup>) 表示。角速度的单位有时也用  $\text{rad} \cdot \text{min}^{-1}$  或  $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 即转数·分钟<sup>-1</sup> 表示。角速度为矢量,它的方向也是由右手螺旋法则确定,如图 1-3 所示,即角速度的方向也在转轴上。取向与转轴正方向一致的角速度为正值;反之,角速度便为负值。

如果角速度为常量,则为匀速转动;如果角速度不是常量,则为变速转动。如果刚体在  $t$  时刻的角速度为  $\omega$ ,  $t + \Delta t$  时刻的角速度为  $\omega + \Delta\omega$ , 则角速度增量  $\Delta\omega$  与时间间隔  $\Delta t$  的比值称为平均角加速度,用  $\bar{\alpha}$  表示,即  $\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ 。当  $\Delta t$  趋于零时,  $\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$  的极限值  $\frac{d\omega}{dt}$  称为刚体在  $t$  时刻的瞬时角加速度 (angular acceleration), 用  $\alpha$  表示,即

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

角加速度是描写刚体转动角速度变化快慢的物理量,在国际单位制中,其单位为  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$  (弧度·秒<sup>-2</sup>)。角加速度是矢量,其大小由式 (1-2) 决定,  $\alpha > 0$  时,角加速度方向与转轴正方向相同;  $\alpha < 0$  时,角加速度方向与转轴正方向相反。

## 2. 角量和线量的关系

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,而描述刚体内各质点作圆周运动的位移、速度和加速度等物理量,称为线位移、线速度和线加速度,则统称为线量。设刚体作定轴转动,如图 1-4 所示,选取离转轴的距离为  $r$  的质点  $P$ ,过  $P$  点作垂直于转轴的平面,与转轴相交于  $O$  点。以  $O$  为中心的位置矢量  $r$  表示  $P$  点的位置,该质点在  $t$  时刻的线速度为  $v$ ,线加速度为  $a$ ;刚体转动的角速度为  $\omega$ ,角加速度为  $\alpha$ 。

刚体上质点运动走过的圆弧长度  $\Delta s$  与角位移  $\Delta\theta$  有如下关系

$$\Delta s = r\Delta\theta \quad (1-3)$$

刚体上质点  $P$  的线速度  $v$  与刚体转动的角速度  $\omega$  及  $P$  点的位置矢量  $r$  之间满足叉乘的关系,即

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{r} \quad (1-4)$$

其大小为

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

其方向按照右手螺旋法则确定,当四指从  $\boldsymbol{\omega}$  方向开始沿小于  $\pi$  的角度向  $\boldsymbol{r}$  方向转动时,拇指所指的方向为线速度的方向。关于矢量的运算法则详见“附录 A 矢量及其运算”。

刚体上质点  $P$  的切向加速度为

$$a_t = \frac{dv}{dt} = \frac{d(r\omega)}{dt} = r \frac{d\omega}{dt} = r\alpha \quad (1-6)$$

刚体上质点  $P$  的法向加速度为

$$a_n = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 \quad (1-7)$$

刚体转动速度恒定的转动称为匀速转动,对于匀速转动,其角位移为

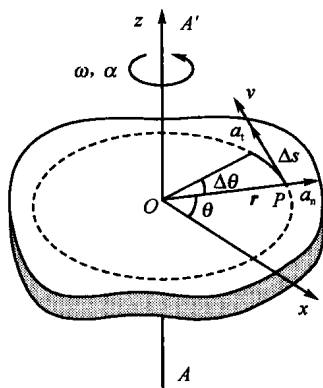


图 1-4 角量和线量的关系

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (1-8)$$

其中,  $\theta_0$  为初始角坐标.

刚体转动加速度恒定的转动称为匀变速转动, 对于匀变速转动有

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (1-9)$$

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (1-10)$$

其中,  $\omega_0$  为初始角速度.

研究刚体定轴转动时, 要首先确定转轴的正方向, 然后再确定转动角速度和角加速度的方向. 角速度与转轴正方向一致时为正, 相反时为负. 角速度增量  $\Delta\omega > 0$  时, 角加速度为正, 角加速度方向与转轴正方向一致; 角速度增量  $\Delta\omega < 0$  时角加速度为负, 角加速度方向与转轴正方向相反.

### 1. 1. 2 转动动能与转动惯量

#### 1. 刚体定轴转动的动能

刚体转动时具有转动动能, 一个刚体可以看成是由许多质点组成的, 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  $r_1, r_2, \dots, r_n$ . 设刚体以角速度  $\omega$  绕定轴转动, 则这些质点的动能总和, 也就是这个刚体的转动动能. 因此, 刚体的转动动能  $E_k$  为

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

或 
$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1-11)$$

式中: 
$$I = \sum_{i=1}^n \Delta m_i r_i^2 \quad (1-12)$$

#### 2. 转动惯量

与质点运动的动能公式  $E_k = \frac{1}{2} m v^2$  相比较, 式(1-11)中的角速度  $\omega$  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  $m$ ,  $I$  是一个衡量物体转动惯性的量.  $I$  越大, 物体获得一定角速度所需的能量越多, 把  $I$  称为刚体对定轴的转动惯量 (rotational inertia). 转动惯量是刚体转动惯性的量度, 转动惯量越大, 刚体的转动惯性就越大. 一般物体的质量是连续分布的. 因此, 转动惯量为

$$I = \int r^2 dm = \int r^2 \rho dV \quad (1-13)$$

式中:  $dV$  表示  $dm$  的体积元,  $\rho$  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(1-12)、(1-13)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, 即刚体的形状、大小和各部分的密度; ③转轴的位置.

非连续刚体的转动惯量由求和法计算, 连续刚体的转动惯量由积分法计算. 若形状复杂, 则需用实验测量.

人体转动惯量是人体惯性参数之一, 而人体惯性参数是指人体整体和环节的质量、质

心位置、转动惯量及转动半径等,它代表了一个种族的体态特征,被广泛地应用于体育、医学、康复以及航空航天、运输车辆等人机工程事业上。所以,人体转动惯量的研究一直受到科学工作者的重视。人体转动惯量可以使用非生命刚体转动惯量的定义和表达式进行描述,但是与非生命刚体又有不同,不能简单地用公式表明人体整体和各环节的转动惯量数值,它会受到许多因素的影响,例如,由于人体的运动造成人体或肢体的质量对转轴分布状态的改变;呼吸、血液循环导致体液的变化;密度不均匀等。目前,获取人体惯性参数的方法一般可分为尸体解剖法、活体测量法、数学模型法、物理模拟法等。

**【例 1-1】** 计算质量为  $m$ , 半径为  $R$  的均匀圆盘绕中心轴  $C$  的转动惯量。

**【解】** 均匀圆盘如图 1-5 所示,在离转轴  $r$  至  $r+dr$  处取一小环,面积为  $ds=2\pi r dr$ , 质量为  $dm=\sigma ds$ , 其中  $\sigma$  为圆盘的质量面密度

$$\sigma = \frac{m}{\pi R^2}$$

由转动惯量的定义

$$\begin{aligned} I &= \int r^2 dm = \int r^2 \cdot \sigma 2\pi r dr = 2\pi\sigma \int_0^R r^3 dr \\ &= 2\pi\sigma \frac{R^4}{4} = \frac{1}{2} m R^2 \end{aligned}$$

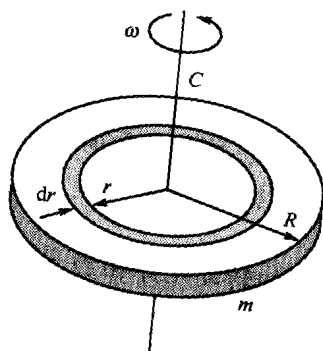


图 1-5 均匀圆盘

### 1.1.3 力矩 刚体转动定律

#### 1. 力矩

一个静止的刚体,在外力作用下是否会转动,不但与力的大小有关,而且与力的作用点及方向有关。在研究转动问题时需要引入力矩(moment of force)这一概念。力矩为矢量,在图 1-6 中,设外力  $F$  作用于刚体的  $P$  点,其矢径为  $r$ , 定义力矩  $M$  为

$$M = r \times F \tag{1-14}$$

其大小为

$$M = rF \sin\varphi = Fl \tag{1-15}$$

即力的大小与力臂(即力的作用线和转轴之间的垂直距离)的乘积,单位为  $N \cdot m$ 。其方向由右手螺旋法则确定。

#### 2. 转动定律

在图 1-7 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,力所做的功等于力的作用点的位移  $rd\theta$  乘以力在位移方向上分量  $F_1 = F \cos\varphi$ 。即

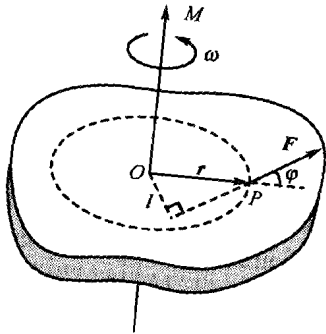


图 1-6 力矩的定义

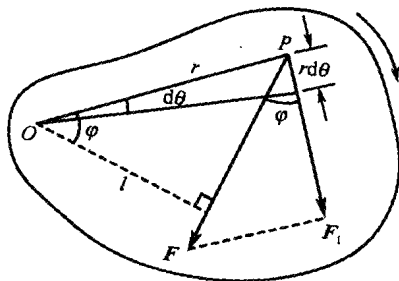


图 1-7 转动定律的推导

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

式中:  $Fl$  即力矩  $M$  的值, 故可写成

$$dW = Md\theta$$

做功的结果将引起刚体动能的增加, 则有

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

若  $I$  在转动过程中不变, 则

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

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

$$M = I \frac{d\omega}{dt} = I\alpha \quad (1-16)$$

上式指出, 刚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, 转动定律也可以写成矢量形式

$$\mathbf{M} = I\boldsymbol{\alpha} \quad (1-17)$$

刚体的转动定律相当于质点运动的牛顿第二定律, 故也称为转动的牛顿第二定律。

### 1.1.4 角动量以及角动量守恒定律

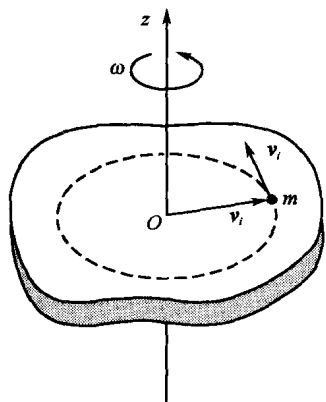


图 1-8 角动量的定义

刚体转动时, 其内部任一质点都在作圆周运动, 设某质点的质量为  $m_i$ , 到转轴的矢径为  $r_i$ , 其线速度为  $v_i$ , 如图 1-8 所示, 定义质点的动量  $mv_i$  与矢径  $r_i$  的乘积称为该质点对圆心的角动量 (angular momentum), 其大小为

$$L_i = m_i v_i r_i = m_i r_i^2 \omega \quad (1-18)$$

其单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 角动量是矢量, 可以表示为矢径  $r_i$  与动量  $mv_i$  的矢积的形式

$$\mathbf{L}_i = \mathbf{r}_i \times m_i \mathbf{v}_i \quad (1-19)$$

其方向根据右手螺旋方向确定, 与角速度的方向一致。

刚体的角动量为各质点角动量之和, 其大小为

$$L = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \omega = \left(\sum_{i=1}^n m_i r_i^2\right) \omega = I\omega \quad (1-20)$$

上式表明, 刚体定轴转动的角动量等于其转动惯量与角速度的乘积。其矢量形式为

$$\mathbf{L} = I\boldsymbol{\omega} \quad (1-21)$$

如同牛顿第二定律  $F = ma$  可以写成动量表示式  $F = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dp}{dt}$ , 转动定律  $M = I\alpha$  也可以写成角动量式

$$\mathbf{M} = I\boldsymbol{\alpha} = I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \frac{d(I\boldsymbol{\omega})}{dt} = \frac{d\mathbf{L}}{dt} \quad (1-22)$$

上式表明, 刚体对于某定轴所受的合外力矩等于刚体对于该轴的角动量随时间的变化率。

同样, 与质点运动中的冲量相似, 可以用冲量矩 (moment of impulse) 来表示力矩的时间累积效应。冲量矩等于力矩和作用时间的乘积。冲量矩也是矢量, 其方向与力矩矢量方向一致。由式(1-22)可知

$$\mathbf{M} dt = d\mathbf{L} \quad (1-23)$$



该式表示:转动刚体所受合外力矩的冲量矩等于在这段时间内它的角动量的增量,称为**角动量定理**(theorem of angular momentum). 由式(1-22)看出,当  $M=0$  时,  $d(I\omega) = dL=0$ , 则有

$$I\omega = \text{恒量} \quad (1-24)$$

式(1-24)表明,当刚体所受的合外力矩等于零时,其角动量保持不变,称为**角动量守恒定律**(law of conservation of angular momentum).

角动量是18世纪在物理学中被定义和使用的,19世纪人们才把它看成是力学中最基本的概念之一,到20世纪,它成为和动量、能量同样重要的物理量. 因为角动量概念的提出与自然界中物体的转动有关,大到星系,小到电子、中微子都具有转动的特征. 角动量守恒是自然界最基本、最普遍的规律之一.

人体的各个部分或整体都经常进行转动. 角动量定理和角动量守恒定律是分析人体转动的力学基础. 跳水运动员在角动量保持不变的条件下,转动惯量变小(即双臂收回团身)时,角速度必将增大,才可能在一定的时间内多翻圈数;芭蕾舞演员在旋转过程中突然把手臂收起来的时候,他的旋转速度就会加快.

## 1.2 物体的弹性

迄今为止,我们总把研究对象简化为“质点”或“刚体”这样的理想模型. 事实上,任何物体受力时,它的形状和大小都或多或少要发生改变,在许多问题中,这些改变不能不计,研究物体在形状和大小发生改变时的力学问题,不仅在工程技术方面,而且在生物医学方面,都是十分重要的. 本节将介绍一些有关物体弹性的基本知识.

### 1.2.1 应变和应力

#### 1. 应变

物体在外力作用下所发生的形状和大小的改变,称为**形变**(deformation). 在一定的形变限度内,去掉外力后物体能够完全恢复原状的,称为**弹性形变**(elastic deformation),这种物体叫**弹性体**(elastic body). “弹性体”也是一种理想模型,不存在绝对的弹性体. 若外力超过某一限度后,去掉外力物体不再能恢复原状的,称为**塑(范)性形变**(plastic deformation). 较为常见的形变是长度、体积和形状三种改变. 为了表示各种形变的程度,引入**应变**(strain)这一概念,即物体受外力作用时,它的形状或体积大小的相对变化称为**应变**(strain)

(1) **线应变**:图1-9表示直杆在竖直方向受力作用下发生拉伸或压缩形变.  $l_0$  和  $l$  分别表示原长和形变后的长度,有  $\Delta l = l - l_0$ ,  $\Delta l > 0$  和  $\Delta l < 0$ , 分别称为杆的绝对伸长和绝对压缩. 它们还不能更好地反映形变程度. 我们用物体受到外力作用时,发生的绝对伸长(或压缩)与原长之比称为**相对伸长**(或**压缩**),又称为**线应变**(line strain),即

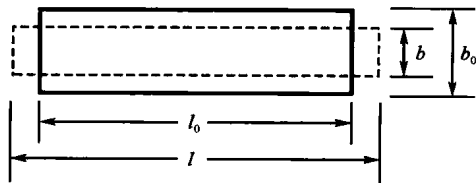


图1-9 线应变

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-25)$$

式中:  $\epsilon$  为正或为负分别表示拉伸和压缩应变. 线应变能反映形变程度.

直杆拉伸压缩时,还产生横向形变. 直杆沿轴向拉伸时,则横向收缩;直杆沿轴向压缩