

高等医药院校试用教材

# 医用物理学

(供中医、针灸、推拿专业用)

主编 庄心田 副主编 谈正卿

上海科学技术出版社

高等医药院校试用教材

# 医 用 物 理 学

(供中医、针灸、推拿专业用)

主    编  庄心田  
副主编  谈正卿  
编    委  (按姓氏笔画为序)  
          王嘉乐  冯绍康  
          李松山  顾启秀

上海科学技术出版社

高等医药院校试用教材

**医 用 物 理 学**

(供中医、针灸、推拿专业用)

主编 庄心田

副主编 谈正卿

上海科学技术出版社出版、发行

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所经销 望亭电厂印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 15.5 字数 364 000

1987年12月第1版 1998年12月第5次印刷

印数: 7 401 - 9 400

ISBN 7-5323-0367-5/R·103(课)

本书如有缺页、错装和坏损等严重质量问题,  
请向承印厂联系调换

## 前 言

为了提高教材质量,促进高等中医药教育事业的发展,卫生部于1983年8月在上海召开了全国高等中医院校普通课、西医课教材编审会议,成立首届全国高等中医院校普通课、西医课教材编审委员会;组成十七个学科编审小组,根据卫生部1982年10月颁发的中医、针灸、中药各专业教学计划对各科教学大纲作了修订;并组织编写本套教材。

中医学院的普通课和西医课教材主要是为培养中医药高级专门人才服务的。本套教材是根据各专业培养目标对本门学科的要求,按照新的教学大纲,各编审小组制定了编写提纲,在总结二十多年来中医学院普通课、西医课教学经验的基础上编写而成。

在编写过程中,以辩证唯物主义和历史唯物主义为指导,力求从高等中医教育的实际出发,既保证教材内容的科学性、系统性和完整性,又贯彻“少而精”和理论联系实际的原则。在更新教材内容的同时,注意充实近年来运用现代科学技术研究中医药学的新成果,从而使本套教材为培养高级中医药人才编写出新的风格和特点。

本套教材包括《英语》、《日语》、《高等数学》、《数理统计方法》、《医用物理学》、《物理学》、《无机化学》、《有机化学》、《物理化学》、《分析化学》、《正常人体解剖学》、《组织学与胚胎学》、《生理学》、《生物化学》、《微生物与寄生虫学》、《病理学》、《药理学》、《西医内科学基础》和《西医外科学总论》等十九门学科,共二十二种教材。其中部分教材是在原有基础上更新、充实、修改而成。

教材质量的高低,将直接影响培养目标的实现。要使中医学院的普通课、西医课教材适应高等中医教育的需要,还要进行长期的努力。要通过大量实践,不断总结经验,加以提高,才能逐步完善。由于水平有限,经验不足,编写时间仓促,本套教材存在不足之处,恳切期望广大师生和读者随时提供宝贵意见,以便在今后修订时加以改进。

全国高等中医院校普通课、西医课教材编审委员会

一九八四年十月

## 编写说明

《医用物理学》是高等中医院校针灸专业的一门普通基础课。卫生部于1983年8月召开了全国高等中医院校普通课、西医课教材编审会议，并制订了高等中医院校针灸专业医用物理学教学大纲(试用稿)。本书就是根据这个大纲编写的，除供针灸专业使用外，也可作为其他中医专业(中医、推拿等)医用物理学的选修课教材，或医学生的参考用书。

本书以高中数学和物理学教学纲要的基本要求为基础，力求结合中医、针灸专业的特点和需要，重点阐明医用物理学基础理论和基本知识，并适当反映物理学的新成就在医学上的应用。鉴于眼睛、显微镜和纤维镜等几何光学的基本知识对医学生的重要性，特增编几何光学基础一章以供选用。为了使本书能适应不同教学时数的要求，便于教学，部分内容用小字编排。各院校可根据具体情况加以选用，或留作学生自学之用。

书中物理量和单位的名称和符号一律采用我国国家标准。书末列有附录以供参考。

本书的编写分工如下：第1、2章由河南中医学院李松山编写；第3、4章由北京中医学院冯绍康编写；第5、6章由成都中医学院王嘉乐编写；第9章前4节由上海中医学院顾启秀编写，后11节由北京中医学院谈正卿编写；绪论和第7、8、10章由安徽中医学院庄心田编写。参加本书审稿工作的，除编写人员外，有全国各中医学院的物理教师代表，他们提出了许多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，实践经验不足，加以编写时间仓促，书中的错误和缺点在所难免。我们恳切地希望使用本书的广大师生和读者提出批评和建议，以便在再版时予以修订。

《医用物理学》编审小组

1986年5月

# 目 录

|                         |    |                         |    |
|-------------------------|----|-------------------------|----|
| 绪论 .....                | 1  | 2.8.1 肺泡中的压强 .....      | 28 |
| 1 物体的弹性 .....           | 3  | 2.8.2 气体栓塞 .....        | 29 |
| 1.1 应力与应变 .....         | 3  | 习题 2 .....              | 30 |
| 1.1.1 张应力与张应变 .....     | 3  | 3 声学基础 .....            | 32 |
| 1.1.2 切应力与切应变 .....     | 4  | 3.1 简谐振动 .....          | 32 |
| 1.1.3 体应变 .....         | 4  | 3.1.1 简谐振动方程 .....      | 32 |
| 1.2 物体的弹性与范性 弹性模量 ..... | 5  | 3.1.2 简谐振动的能量 .....     | 34 |
| 1.2.1 物体的弹性与范性 .....    | 5  | 3.1.3 同方向简谐振动的合成 .....  | 34 |
| 1.2.2 弹性模量 .....        | 6  | 3.1.4 受迫振动 共振 .....     | 36 |
| 1.3 粘弹性物质 .....         | 7  | 3.2 波动 .....            | 37 |
| 1.4 骨骼和肌肉的力学性质 .....    | 8  | 3.2.1 波动方程 .....        | 37 |
| 1.4.1 骨骼的力学性质 .....     | 8  | 3.2.2 波的能量和强度 .....     | 39 |
| 1.4.2 肌肉的力学性能 .....     | 9  | 3.3 声波 .....            | 40 |
| 习题 1 .....              | 11 | 3.3.1 声速 .....          | 40 |
| 2 流体的流动和表面现象 .....      | 12 | 3.3.2 描述声波的几个物理量 .....  | 41 |
| 2.1 理想流体的稳定流动 .....     | 12 | 3.3.2.1 声压 .....        | 41 |
| 2.1.1 理想流体 .....        | 12 | 3.3.2.2 声阻 .....        | 41 |
| 2.1.2 稳定流动 .....        | 12 | 3.3.2.3 声强 .....        | 42 |
| 2.1.3 流体的连续性原理 .....    | 13 | 3.3.2.4 声强级和声压级 .....   | 42 |
| 2.2 伯努利方程及其应用 .....     | 13 | 3.3.2.5 响度级和等响曲线 .....  | 43 |
| 2.2.1 伯努利方程 .....       | 13 | 3.4 多普勒效应 .....         | 45 |
| 2.2.2 伯努利方程的应用 .....    | 15 | 3.5 超声波 .....           | 46 |
| 2.2.2.1 空吸作用 .....      | 15 | 3.5.1 超声波的产生 .....      | 47 |
| 2.2.2.2 小孔流速 .....      | 16 | 3.5.2 超声波的特性 .....      | 48 |
| 2.3 实际流体的流动 .....       | 17 | 2.5.3 超声波在医学上的应用 .....  | 48 |
| 2.3.1 实际流体的粘滞性 粘度 ..... | 17 | 习题 3 .....              | 50 |
| 2.3.2 片流与湍流 雷诺数 .....   | 18 | 4 静电场 .....             | 52 |
| 2.4 泊肃叶定律 .....         | 19 | 4.1 静电场中的电介质 .....      | 52 |
| 2.4.1 泊肃叶定律 .....       | 19 | 4.1.1 库仑定律 .....        | 52 |
| 2.4.2 毛细管粘度计 .....      | 19 | 4.1.2 电场强度 电位 .....     | 53 |
| 2.4.3 流量与流阻 .....       | 20 | 4.1.3 电介质的极化 .....      | 53 |
| 2.5 斯托克斯定律 .....        | 20 | 4.1.4 电极化强度 介电常数 .....  | 55 |
| 2.6 血液的流动 .....         | 21 | 4.2 心电图波形形成的基本原理 .....  | 57 |
| 2.6.1 血液的粘度 .....       | 21 | 4.2.1 电偶极子电场的电位 .....   | 57 |
| 2.6.2 血液的流速 .....       | 22 | 4.2.2 心电向量产生的原理 .....   | 58 |
| 2.6.3 血压 .....          | 23 | 4.2.2.1 心肌细胞的极化向量 ..... | 58 |
| 2.7 液体的表面现象 .....       | 24 | 4.2.2.2 心电向量环 .....     | 59 |
| 2.7.1 表面张力和表面能 .....    | 24 | 4.2.3 心电图波形的形成 .....    | 59 |
| 2.7.2 表面吸附和表面活性物质 ..... | 26 | 习题 4 .....              | 62 |
| 2.7.3 曲面下的附加压强 .....    | 27 | 5 电流 .....              | 64 |
| 2.8 肺泡中的压强 气体栓塞 .....   | 28 | 5.1 一段有源电路的欧姆定律 .....   | 64 |
|                         |    | 5.1.1 电流强度 电流密度 .....   | 64 |

|                              |     |                         |     |
|------------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 5.1.2 电动势 .....              | 66  | 7.1.3 黑体辐射定律 .....      | 103 |
| 5.1.3 闭合电路的欧姆定律 .....        | 66  | 7.1.4 普朗克量子假说 .....     | 104 |
| 5.1.4 一段有源电路的欧姆定律 .....      | 67  | 7.1.5 红外线和紫外线 .....     | 104 |
| 5.2 基尔霍夫定律及其应用 .....         | 68  | 7.2 玻尔氢原子理论 .....       | 106 |
| 5.2.1 基尔霍夫第一定律 .....         | 68  | 7.3 激光及其在医疗中的应用 .....   | 109 |
| 5.2.2 基尔霍夫第二定律 .....         | 68  | 7.3.1 产生激光的基本原理 .....   | 109 |
| 5.2.3 基尔霍夫定律的应用 .....        | 70  | 7.3.2 红宝石激光器 .....      | 111 |
| 5.2.3.1 惠斯登电桥 .....          | 70  | 7.3.3 激光的特点 .....       | 112 |
| 5.2.3.2 电位差计 .....           | 71  | 7.3.4 激光在医疗上的应用 .....   | 112 |
| 5.3 接触电位差 温差电动势 .....        | 72  | 7.4 微观粒子的二象性 .....      | 113 |
| 5.3.1 接触电位差 .....            | 72  | 7.4.1 光的二象性 .....       | 113 |
| 5.3.2 温差电动势 .....            | 74  | 7.4.2 德布罗意波 .....       | 113 |
| 5.4 生物电 .....                | 75  | 7.4.3 电子显微镜 .....       | 115 |
| 5.4.1 静息电位 .....             | 75  | 7.4.4 不确定关系 .....       | 116 |
| 5.4.2 动作电位 .....             | 76  | 习题 7 .....              | 117 |
| 5.5 直流电在医疗上的应用 .....         | 77  | 8 X射线和放射性核素 .....       | 118 |
| 5.5.1 直流电对机体的作用 .....        | 77  | 8.1 X射线 .....           | 118 |
| 5.5.2 离子透入疗法 .....           | 78  | 8.1.1 X射线的基本性质 .....    | 118 |
| 5.5.3 人体皮肤及穴位的电现象 .....      | 79  | 8.1.2 X射线的产生 .....      | 118 |
| 习题 5 .....                   | 80  | 8.1.3 X射线的硬度和强度 .....   | 119 |
| 6 电磁现象 .....                 | 83  | 8.1.4 X射线的衰减规律 .....    | 120 |
| 6.1 磁场 磁感应强度 .....           | 83  | 8.1.5 X射线在医学上的应用 .....  | 121 |
| 6.2 带电粒子在均匀磁场中的运动 .....      | 85  | 8.1.5.1 治疗方面的应用 .....   | 121 |
| 6.2.1 回旋运动 .....             | 85  | 8.1.5.2 诊断方面的应用 .....   | 122 |
| 6.2.2 螺旋运动 .....             | 86  | 8.2 原子核的衰变 .....        | 124 |
| 6.3 磁场对载流导体的作用 .....         | 87  | 8.2.1 原子核的组成 .....      | 124 |
| 6.4 生物磁现象 磁疗 .....           | 87  | 8.2.2 原子核的衰变 .....      | 124 |
| 6.4.1 生物磁现象 .....            | 88  | 8.2.3 衰变图 .....         | 125 |
| 6.4.2 磁疗 .....               | 89  | 8.2.4 放射性衰变规律 .....     | 126 |
| 6.5 电磁感应 .....               | 89  | 8.3 射线和物质的相互作用 .....    | 129 |
| 6.5.1 电磁感应定律 .....           | 89  | 8.4 射线的探测 .....         | 130 |
| 6.5.2 自感现象 .....             | 90  | 8.4.1 电离室 .....         | 130 |
| 6.5.3 磁场能量 .....             | 90  | 8.4.2 盖革计数器 .....       | 130 |
| 6.6 正弦交流电 .....              | 91  | 8.4.3 闪烁计数器 .....       | 131 |
| 6.6.1 正弦交流电 .....            | 91  | 8.5 放射性核素在医学上的应用 .....  | 132 |
| 6.6.2 交流电路中的电阻、电感和电容 .....   | 92  | 8.5.1 示踪作用 .....        | 132 |
| 6.6.2.1 纯电阻交流电路 .....        | 92  | 8.5.2 诊断 .....          | 132 |
| 6.6.2.2 纯电感交流电路 .....        | 93  | 8.5.3 治疗 .....          | 133 |
| 6.6.2.3 纯电容交流电路 .....        | 94  | 8.6 辐射量与防护 .....        | 133 |
| 6.6.2.4 $R-L-C$ 串联交流电路 ..... | 96  | 8.6.1 辐射量及其单位 .....     | 133 |
| 6.7 电磁振荡与电磁波 .....           | 97  | 8.6.2 辐射防护 .....        | 136 |
| 6.8 高频电疗法 .....              | 98  | 习题 8 .....              | 138 |
| 习题 6 .....                   | 99  | 9 晶体管电路基础 .....         | 139 |
| 7 量子物理的基础知识 .....            | 102 | 9.1 晶体二极管 .....         | 139 |
| 7.1 热辐射 .....                | 102 | 9.1.1 本征半导体和杂质半导体 ..... | 139 |
| 7.1.1 黑体的辐射度 .....           | 102 | 9.1.1.1 本征半导体 .....     | 139 |
| 7.1.2 基尔霍夫辐射定律 .....         | 103 | 9.1.1.2 杂质半导体 .....     | 140 |
|                              |     | 9.1.2 $PN$ 结 .....      | 141 |

|                              |                             |
|------------------------------|-----------------------------|
| 9.1.3 晶体二极管.....142          | 9.8.4 滤波电路.....178          |
| 9.1.3.1 晶体二极管的特性曲线.....142   | 9.8.4.1 电容滤波电路.....178      |
| 9.1.3.2 晶体二极管的主要参数.....143   | 9.8.4.2 电感滤波电路.....179      |
| 9.1.4 稳压管.....144            | 9.8.4.3 复式滤波电路.....180      |
| 9.1.4.1 稳压管的结构.....144       | 9.8.5 稳压电路.....180          |
| 9.1.4.2 稳压管的参数.....144       | 9.8.5.1 硅稳压管稳压电路.....180    |
| 9.2 晶体三极管.....144            | 9.8.5.2 串联型晶体管稳压电路.....181  |
| 9.2.1 晶体三极管的基本结构.....144     | 9.9 正弦波振荡器.....182          |
| 9.2.2 晶体三极管的放大作用.....145     | 9.9.1 LC 振荡器.....182        |
| 9.2.3 晶体三极管的特性曲线.....146     | 9.9.2 RC 振荡器.....183        |
| 9.2.3.1 输入特性曲线.....147       | 9.10 脉冲电路.....184           |
| 9.2.3.2 输出特性曲线.....148       | 9.10.1 脉冲电路的基本知识.....184    |
| 9.2.4 晶体三极管的主要参数.....149     | 9.10.2 RC 电路.....185        |
| 9.2.5 晶体管放大作用的应用实例.....150   | 9.10.2.1 RC 电路的充电过程.....185 |
| 9.2.5.1 耳穴探测器.....150        | 9.10.2.2 RC 电路的放电过程.....186 |
| 9.2.5.2 简单的温度控制电路.....150    | 9.10.3 微分电路 积分电路.....186    |
| 9.2.5.3 时间控制电路.....151       | 9.10.3.1 微分电路.....186       |
| 9.2.6 场效应管.....151           | 9.10.3.2 积分电路.....186       |
| 9.2.6.1 结型场效应管.....151       | 9.10.4 限幅电路 钳位电路.....187    |
| 9.2.6.2 场效应管的主要参数.....153    | 9.10.4.1 限幅电路.....187       |
| 9.3 交流放大电路.....154           | 9.10.4.2 钳位电路.....187       |
| 9.3.1 放大电路的组成及工作原理.....154   | 9.10.5 触发电路.....188         |
| 9.3.1.1 直流偏置.....154         | 9.10.5.1 双稳态触发电路.....188    |
| 9.3.1.2 信号的输入与输出.....155     | 9.10.5.2 单稳态触发电路.....189    |
| 9.3.2 放大电路的基本分析方法.....155    | 9.10.6 多谐振荡器.....191        |
| 9.3.2.1 静态工作点.....155        | 9.10.7 锯齿波发生器.....192       |
| 9.3.2.2 直流负载线.....157        | 9.11 集成电路.....193           |
| 9.3.2.3 交流负载线.....159        | 9.11.1 比例运算电路.....194       |
| 9.3.2.4 放大倍数.....160         | 9.11.2 加法器.....195          |
| 9.3.2.5 工作点稳定的常用偏置电路.....161 | 9.12 门电路.....195            |
| 9.4 阻容耦合放大器.....163          | 9.12.1 与门电路.....196         |
| 9.4.1 工作原理.....163           | 9.12.2 或门电路.....197         |
| 9.4.2 频率响应.....164           | 9.12.3 非门电路.....198         |
| 9.5 反馈放大器.....165            | 9.12.4 或非门电路.....199        |
| 9.5.1 反馈的基本概念.....165        | 9.12.5 与非门电路.....199        |
| 9.5.2 射极输出器.....167          | 9.13 电针仪.....200            |
| 9.6 功率放大器.....168            | 9.14 生物医学用换能器.....203       |
| 9.6.1 单管功率放大器.....169        | 9.15 示波器.....203            |
| 9.6.2 推挽功率放大器.....170        | 习题 9.....206                |
| 9.7 直流放大器.....171            | 10 几何光学基础.....212           |
| 9.7.1 直接耦合放大器.....171        | 10.1 单球面折射.....212          |
| 9.7.2 差动放大器.....173          | 10.2 共轴球面系统.....214         |
| 9.7.2.1 差动放大器的基本原理.....173   | 10.2.1 薄透镜.....215          |
| 9.7.2.2 共模抑制比.....173        | 10.2.2 厚透镜.....216          |
| 9.7.2.3 差动放大器的典型电路.....174   | 10.3 眼睛.....218             |
| 9.8 整流稳压电路.....175           | 10.3.1 眼球的构造.....218        |
| 9.8.1 半波整流电路.....175         | 10.3.2 眼的光学系统.....219       |
| 9.8.2 全波整流电路.....177         | 10.3.3 视角.....220           |
| 9.8.3 桥式整流电路.....178         |                             |

|                           |     |                                       |     |
|---------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 10.3.4 眼的调节 非正视眼的矫正 ..... | 221 | <b>附录 1</b> 物理量和单位 .....              | 229 |
| 10.3.4.1 眼的调节 .....       | 221 | <b>表 1</b> 物理量、单位的名称和符号 .....         | 229 |
| 10.3.4.2 非正视眼的矫正 .....    | 221 | <b>表 2</b> 用于构成十进倍数和分数单位的<br>词头 ..... | 235 |
| 10.4 显微镜 .....            | 224 | <b>附录 2</b> 常用常数表 .....               | 235 |
| 10.4.1 放大镜与角放大率 .....     | 224 | <b>表 1</b> 基本物理常数表 .....              | 235 |
| 10.4.2 显微镜 .....          | 225 | <b>表 2</b> 常用数值常数 .....               | 236 |
| 10.4.3 显微镜的分辨限度 .....     | 226 | <b>附录 3</b> 国产半导体器件型号的命名方法 .....      | 236 |
| 10.5 检眼镜 纤镜 .....         | 227 | <b>附录 4</b> 希腊字母表 .....               | 237 |
| 10.5.1 检眼镜 .....          | 227 |                                       |     |
| 10.5.2 光学纤维 纤镜 .....      | 228 |                                       |     |
| 习题 10 .....               | 229 |                                       |     |

## 绪 论

自然科学的研究对象就是物质的属性及其运动的规律。辩证唯物主义认为,物质是在人类意识之外并且不依赖意识而存在的客观实在。物质是处于永恒的运动之中,没有不运动的物质,也没有脱离物质的运动。客观世界所发生的一切变化和过程,如各种物理现象。化学变化、生命过程等都是物质运动的不同表现形式。自然科学的各个分科就是以不同形式的物质运动作为自己的研究对象的。物理学研究对象是物质的最基本、最普遍的运动形式和规律,包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内部的运动等等。这些基本的运动形式都普遍地存在于各种高级的、复杂的运动形式之中。这就使得物理学与其它科学技术发生了密切的联系,而且成为学习其它科学技术所必需的基础知识。

医学属于研究生命现象的生物科学。生命活动是一种高级的、复杂的物质运动形式,它是以物理的和化学的过程为基础的。因此,物理学与医学的关系,也和其它科学技术一样,是非常密切的。每当物理学取得了重大的进展以后,就会促进其它科学技术,也包括医学在内的飞跃发展。例如显微镜的发明,使得生物学和医学的研究达到了细胞水平;而电子显微镜的应用又把它推进到分子水平。再如X射线的发现为医学提供了一种重要的诊断和治疗的手段;而X射线电子计算机断层扫描术和核磁共振成像术的成功,又把医学诊断技术提高到一个崭新的阶段。反过来,医学和其它科学技术的发展,又对物理学提出新的要求,促进了物理学的发展。这样,物理学和生物学、医学的相互促进和相互渗透已经形成了生物物理学和医学物理学等边缘科学。总之,物理学与医学的关系是非常密切的。它在医学上的应用也是非常广泛的。归纳起来,可以从下列三方面来说明:

(1) 研究生命现象中的物理过程,可以帮助我们了解机体活动的规律。物理学是学习医学和了解生命现象不可缺少的基础。例如,要了解骨骼和肌肉的作用,就必须具备力学的基本知识;要了解血液在循环系统中运动情况,就必须知道流体力学的基本定律;要了解听觉和视觉的过程,就必须懂得声和光的物理性质和基本的规律;组织兴奋性的客观表现之一就是电位的变化。如果不具备电磁学的基本知识,就不可能了解生物电和生物磁现象的本质和规律等等。这种例子是多不胜举的。必须注意,生命活动是一种高级而复杂的运动形式,尽管它包含着普遍的、基本的物理和化学过程,但是它具有自己所特有的规律性。如果把复杂的生命现象机械地看做物理和化学现象的总和,企图单独用物理和化学的规律来阐明生命活动的过程而忽视了它所特有的本质,就必然会导致错误的结论。

(2) 外界的物理因素对人体所起的作用也是物理学结合医学的一个重要内容。我们知道,超声波、直流电、高频电流、红外线、紫外线、激光、X射线和放射性核素等对人体产生的效能用于诊断和治疗某些疾病,而在另一方面又对人体产生一定的危害。我们要研究这些物理因素对人体的作用机理,就必须了解它们的物理性质和运动规律,如果没有必需的物理学基础知识,那是不可想象的。

(3) 物理学所提供的方法、技术和仪器为医疗和科研开辟了新的途径。电针和激光针的应用已为祖国医学的针灸技术增添了新的内容。脉象仪、听力计、心电图机、超声心电图

仪,脑磁图仪、微波针灸仪等电子仪器为诊断和治疗某些疾病提供了新的方法。电子计算机在研究祖国医学的基本理论和临床应用上也将发挥积极作用。所有这些物理学的方法、技术和仪器设备在医疗和科研,包括中医的诊断和治疗,以及针灸和经络研究等方面的应用日趋广泛,有的已成为医务工作者日常应用的工具。要了解和正确使用这些新技术和新设备,就必须在一定程度上掌握物理学和电子学的知识。

物理学和医学、包括中医学的密切关系使我们深刻理解到物理学的基本知识是医学生所必不可少的。学好这门基础课程,非但可以帮助我们培养辩证唯物主义的世界观,而且使我们能够掌握与运用物理学的基本知识、方法和技术来指导今后的学习、医疗和科研工作,在继承、发扬祖国医学宝贵遗产、振兴中医和实现中医现代化的事业中做出贡献。

# 1 物体的弹性

在外力的作用下, 物体的形状或大小一般说来是要发生改变的。物体的形状或大小的改变与引起这一改变的力之间的关系, 即物体的弹性与范性问题, 不仅对工程技术, 而且对生物学、医学、医学工程学都有着重要意义。本章将介绍有关物体弹性的基本知识。

## 1.1 应力与应变

### 1.1.1 张应力与张应变

图 1-1 表示横截面积为  $S$  的棒, 在棒的两端各加大小相等而方向相反的力  $F$ 。图 1-1(a) 表示棒受到拉力的情况, 称棒处于张应力状态; 图 1-1(b) 表示棒受到压力的情况, 称棒处于压力状态。设想在棒中作一与棒轴垂直的截面, 如图中虚线所示。棒内截面的每一侧部分受到另一侧部分所施加的一个力, 这两个力是大小相等、方向相反的作用力与反作用力, 我们称它们为内力。图 1-1 中所示的内力其方向与截面垂直。内力是分子力, 即分子间的相互作用力。大量事实表明: 分子在比较接近时分子力表现为引力\*, 而分子彼此间距离进一步缩短时, 分子力则表现为斥力。当物体被压缩时, 分子力为斥力, 阻碍物体的压缩; 当物体受到拉伸时, 分子力为引力, 因而阻碍物体的拉伸。

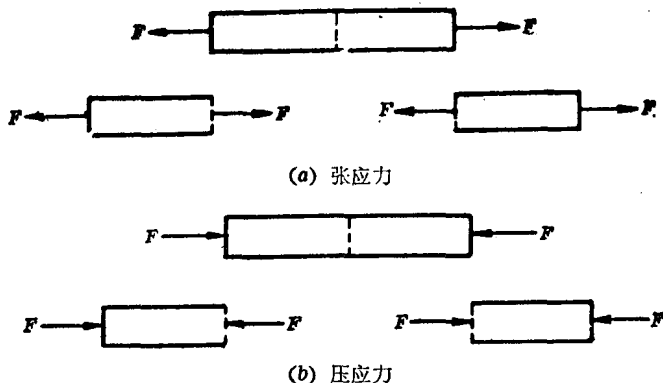


图 1-1 在正应力作用下的棒

我们把垂直作用在物体某截面上的内力  $F$  与该截面面积  $S$  的比值, 定义为物体在此截面处所受的正应力。图 1-1(a) 表示的是张应力, 图 1-1(b) 表示的是压应力。以  $\sigma$  表示正应力, 则

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (1-1)$$

物体受到拉力或压力的作用时, 在忽略它的体积变化的情况下, 物体所发生的形变就是它的长度变化。例如一根细长的棒受正应力的情况。设细棒原来的长度为  $l_0$ , 在外力作

\*在任何情况下, 分子间的引力和斥力是同时存在的, 但是为了处理问题简单起见, 可以认为当两个分子间的距离  $r = r_0$  时, 分子力  $F$  是零; 当  $r < r_0$  时, 分子力  $F$  是斥力; 当  $r > r_0$  时, 分子力  $F$  是引力。  $r_0$  的数量级一般是  $10^{-10}\text{m}$ 。

用下细棒受到正应力作用其长度改变到  $l$ , 长度的改变量为:  $\Delta l = l - l_0$ 。实验表明: 不同大小的外力使棒受到的正应力不同, 引起的长度改变量不同。同样大小的外力使棒受到同样大小的正应力, 由于细棒原长不同而引起的长度改变量也不同。但是, 在细棒受到一定正应力的情况下, 细棒长度的改变量  $\Delta l$  与其原长  $l_0$  的比值却是一定的。我们定义物体在正应力作用下单位长度所发生的改变量, 即比值  $\Delta l/l_0$  为正应变。正应变反映着物体形变的程度。以  $\varepsilon$  表示正应变, 则

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1-2)$$

对于物体受张应力而伸长的情况,  $\Delta l > 0$ , 称为张应变; 对于物体受压应力而缩短的情况,  $\Delta l < 0$ , 称为压应变。

### 1.1.2 切应力与切应变

物体受外力作用的另一种情况是外力的方向和它的作用面平行, 如图 1-2 所示。图中物体原为立方体, 受此外力作用后发生形变而为平行六面体。设想一个与物体上、下底面平行的截面, 如图中虚线所示。截面上、下两部分也互施有内力, 它们为大小相等、方向相反的作用力与反作用力, 它们的方向与截面平行。我们把平行作用在物体某截面上的内力  $F$  与该截面面积  $S$  的比值, 定义为物体在此截面处所受的切应力, 以  $\tau$  表示则有

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1-3)$$

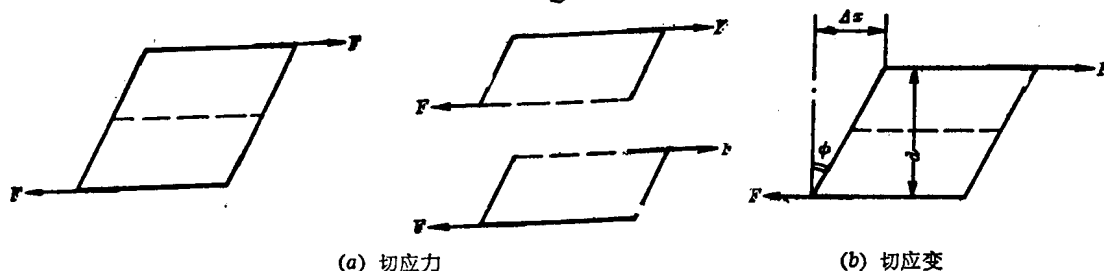


图 1-2 切应力与切应变

实验表明: 物体受切应力作用时, 它只有形状的变化而没有体积的改变, 并且, 与底面距离不同的截面移动的距离也不同。但是, 某截面移动的距离  $\Delta x$  与该截面到底面的距离  $d$  (见图 1-2) 的比值, 在一定切应力作用下都是相同的。我们称这一比值  $\Delta x/d$  为切应变。它反映着物体发生切变的程度。以  $\gamma$  表示切应变, 则

$$\gamma = \frac{\Delta x}{d} = \tan \phi \quad (1-4)$$

式中  $\phi$  角为物体从立方体切变为平行六面体时的倾角, 如图 1-2(b) 所示。在角  $\phi$  很小的情况下, 上式可以写成

$$\gamma = \phi \quad (1-4a)$$

### 1.1.3 体应变

当物体受到来自各个方向的均匀压强时, 其体积将发生变化而其形状不变。例如在弹性容器中, 气体的压强变化时, 将引起它的体积有相应的改变。我们把物体体积的改变量  $\Delta V$  与原体积  $V_0$  的比值, 称为该物体的体应变。以  $\theta$  表示体应变, 则

$$\theta = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1-5)$$

综上所述,应力就是作用在单位截面上的内力,它反映着物体受外力作用时,其内部各部分间相互作用的情况。应力的单位是Pa(帕斯卡), $1\text{Pa} = 1\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ 。应变是反映物体受外力作用产生应力时而引起的形状或大小的相对改变程度的一个物理量。

应该指出,物体不同截面处的内力一般说来是不相同的,并且也不一定等于外力。例如人体重量和地面支持力经过传递间接作用在人的股骨上段,由这些外力所引起的股骨上段各截面处的应力分布如图1-3所示。沿压力线取截面时,两边部分相互作用的应力为张应力;沿张力线取截面时,两边部分相互作用的应力是压应力。力线密集的地方应力大,稀疏的地方应力小。

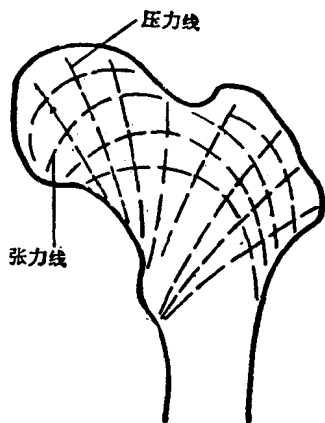


图1-3 股骨上段应力分布

应力的产生以及由此发生的应变,并不一定由机械外力所引起。它也可以由热的、电的因素所引起。例如冬天室外水管的冻裂,就是由于温度改变所引起的应力导致的。再如近年来的研究发现,骨骼中存在着逆压电效应,即在骨骼上施加一电场,可以在其中产生应力和应变。

还应该指出:实际所发生的应变是很复杂的,正应变、切应变、体应变可能会同时发生,并不一定单一存在。

【例1-1】人骨骼上的肱二头肌,可对相连的骨骼施加大约600N的力。设肱二头肌横截面面积平均为 $S_1 = 5.0 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 。腱将肌肉的下端联到肘关节下面的骨骼上,设腱的横截面面积为 $S_2 = 5.0 \times 10^{-5}\text{m}^2$ 。试求肱二头肌和腱的张应力。

【解】根据张应力定义公式(1-1),对肱二头肌而言,张应力为

$$\sigma_1 = \frac{F}{S_1} = \frac{600}{5.0 \times 10^{-3}} = 1.2 \times 10^5 \text{ Pa},$$

对腱而言,张应力为

$$\sigma_2 = \frac{F}{S_2} = \frac{600}{5.0 \times 10^{-5}} = 1.2 \times 10^7 \text{ Pa}.$$

## 1.2 物体的弹性与范性 弹性模量

### 1.2.1 物体的弹性与范性

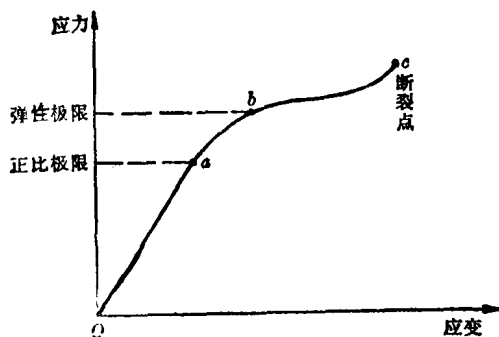


图1-4 典型的应力-应变关系曲线

应力和由它产生的应变之间的关系,对不同材料来说,互不相同,但却有着共同的基本特征。图1-4给出金属材料的典型的张应力与张应变之间的关系曲线。曲线中,由O点到a点应变和应力表现为正比关系,a点叫做正比极限。由a点到b点应变与应力不再成正比。但是,在由O点到b点的范围内,当除去外力时,材料都能恢复原长,我们称材料处于弹性形变范围内,并称b点为材料的弹性极限。在弹性形变范围内,物体呈现出弹性。超过弹性形变范围,即超过b点以后,当除去外力时,材料已不能恢复原来的长度,出现永久变形,

我们称材料发生了**范性形变**。当应力达到**C**点时,材料断裂,称**C**点为**断裂点**,并称这时的应力为材料的**抗断强度**。物体所受外力为拉力时,断裂时的应力为**抗张强度**;物体受压力而断裂时的应力,称为**抗压强度**。能发生较大的范性形变的材料,即应力-应变关系曲线中从**b**点到**c**点的范围较大,我们称这种材料具有**延展性**。反之,称材料具有**脆性**。

### 1.2.2 弹性模量

在应力-应变关系曲线中的正比极限范围内,材料的应变与它所受应力成正比的这一规律称为**胡克(Hooke)定律**。应力与应变的比值称为该材料的**弹性模量**。不同材料具有不同的弹性模量。

当物体发生正应变时,在正比极限范围内,正应力与正应变的比值,称为**弹性模量**,旧称**杨氏(Young)模量**。不同材料具有不同的弹性模量。以**E**表示弹性模量,则

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F l_0}{S \Delta l} \quad (1-6)$$

一部分材料的弹性模量见表 1-1。

表 1-1 一些材料的弹性模量、弹性极限和抗断强度

| 物 质  | 弹 性 模 量<br>( $\times 10^9 \text{Pa}$ ) | 弹 性 极 限<br>( $\times 10^7 \text{Pa}$ ) | 抗 张 强 度<br>( $\times 10^7 \text{Pa}$ ) | 抗 压 强 度<br>( $\times 10^7 \text{Pa}$ ) |
|------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 铝    | 70                                     | 18                                     | 20                                     |                                        |
| 拉伸   | 18                                     |                                        | 12                                     |                                        |
| 骨    | 9                                      |                                        |                                        | 17                                     |
| 压缩   | 20                                     |                                        |                                        | 4                                      |
| 砖    | 110                                    | 20                                     | 40                                     |                                        |
| 铜    | 70                                     |                                        | 5                                      | 110                                    |
| 玻璃   | 50                                     |                                        |                                        | 20                                     |
| 花岗石  | 190                                    | 17                                     | 33                                     |                                        |
| 熟铁   | 3                                      |                                        | 5                                      | 10                                     |
| 聚苯乙烯 | 200                                    | 30                                     | 50                                     |                                        |
| 钢    | 10                                     |                                        |                                        | 10                                     |
| 木材   | 0.02                                   |                                        |                                        |                                        |
| 腱    | 0.001                                  |                                        |                                        |                                        |
| 橡胶   | 0.0002                                 |                                        |                                        |                                        |
| 血管   |                                        |                                        |                                        |                                        |

在发生切应变情况下,在正比极限范围内,切应力与切应变的比值,称为该材料的**切变模量**,以**G**表示,则

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F d}{S \Delta x} \quad (1-7)$$

当物体发生体应变时,设压强的增量为  $\Delta p$ ,相应的体应变为  $\nu$ ,在正比极限范围内相应的弹性模量称为**体积模量**,以**K**表示,则

$$K = -\frac{\Delta p}{\theta} = -V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (1-8)$$

式中负号表示一般情况下压强增大时体积缩小。

体积模量的倒数称为**压缩系数**,以**k**表示,则

$$k = \frac{1}{K} = -\frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-9)$$

表 1-2 一些材料的切变模量和体积模量

| 物 质 | 切 变 模 量<br>( $\times 10^9 \text{Pa}$ ) | 体 积 模 量<br>( $\times 10^9 \text{Pa}$ ) |
|-----|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 铝   | 25                                     | 70                                     |
| 铜   | 40                                     | 120                                    |
| 铁   | 50                                     | 80                                     |
| 玻 璃 | 30                                     | 36                                     |
| 钢   | 80                                     | 158                                    |
| 钨   | 140                                    |                                        |
| 木 材 | 10                                     |                                        |
| 长 骨 | 10                                     |                                        |

表 1-2 给出一些材料的切变模量和体积模量。

弹性模量、切变模量和体积模量的单位均为 Pa。压缩系数的单位是  $\text{Pa}^{-1}$ 。

[例 1-2] 设某人的股骨长 0.40 m，横截面积平均为  $5 \text{ cm}^2$ ，他的体重约 500 N。试求当此人站立时，他的股骨缩短多少？

[解] 人的两条腿支持体重，每条腿承受体重一半，即  $F = 250 \text{ N}$ 。由表 1-1 查得在压缩的情况下，骨的弹性模量  $E = 9 \times 10^9 \text{ Pa}$ 。根据公式 (1-6)，得到他的股骨缩短了

$$\Delta l = \frac{Fl_0}{SE} = \frac{250 \times 0.40}{5 \times 10^{-4} \times 9 \times 10^9} = 2 \times 10^{-5} \text{ m}.$$

### 1.3 粘弹性物质

有一类物质，例如橡胶，多种生物软组织，药物中的一些外用药膏等，它们的力学性质介于弹性固体和粘滞性流体之间。我们称这类物质为粘弹性物质。

粘弹性物质受有应力而产生应变时，应变不是立即达到平衡状态，而是经历一个动态的过程。即对粘弹性体施加应力时，它开始有一迅速的较大应变，随后有一缓慢的继续应变的过程，最后才达到恒定应变量的平衡状态。这种现象称为蠕变。另外，要维持粘弹性体有恒定的应变，则开始所加的应力要大些，然后逐步减小到平衡值，这种现象称为应力弛豫现象。这种在恒定应力下的蠕变，在维持恒定应变下的应力弛豫现象，在完全弹性体上极其微小以致完全可以忽略，但却是粘弹性物质的重要特性。

粘弹性物质的另一重要特性是其达到平衡后的应变与所受应力间的关系曲线具有以下特点：

- (1) 它们的应力-应变关系中没有成正比的部分，从一开始就表现为非线性关系。
- (2) 粘弹性体通常可被拉长到原来长度的数倍而不断裂。

- (3) 在整个形变过程中，当除去外力后，粘弹性体均能恢复到原来的形状和大小，即始终具有弹性。

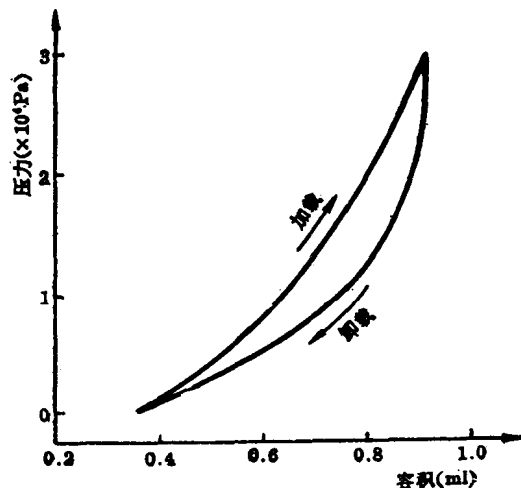


图 1-5 股动脉的压力-容积曲线

(4) 对粘弹性体施加外力并不断增大即加载时,其所发生的应变历程,与逐渐减小外力即卸载时的应变历程,是不相同的。也就是说,应力-应变曲线并不循原来路线返回。这种现象称为**弹性滞后现象**。加载和卸载过程的应力-应变关系曲线形成闭合环,我们称为**迟滞环**。迟滞环面积的大小反映着粘弹性物质在周期性应变过程中所损耗能量的多少。不同的粘弹性物质其迟滞环的大小不一,即其损耗的能量不等。

图1-5给出股动脉的压力与容积关系的实验曲线,加载和卸载由箭头表示。从图中可以看到迟滞环的存在,表明股动脉为粘弹性物质。

## 1.4 骨骼和肌肉的力学性质

### 1.4.1 骨骼的力学性质

骨骼的功能很多,从力学的角度看,它起着支持、运动和保护各种器官的作用。

腿骨具有最明显的支持功能。骨系统加上肌肉支持着人体。骨关节使一根骨能相对另一根骨运动,这些关节使步行和各种运动成为可能。有些骨起着保护人体精致部位的重要作用。如头颅骨保护脑和几个重要的感觉器官,它是一个非常坚硬的容器。肋骨形成一个保护笼,以保护心和肺。脊柱除起支持作用外,还象一根铠状电缆鞘,给脊髓提供易弯曲的屏障。

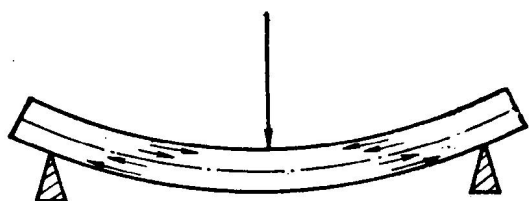


图1-6 横梁受负荷而弯曲

图1-6给出一根横梁在外加负荷作用下发生弯曲的情况。这时在梁的上半部出现压应力而缩短,梁的下半部出现张应力而伸长。同时,愈靠近梁的中轴部应力和应变愈小,在梁的中轴线上无应力和应变。这就是说外加负荷对梁中轴部的影响很小。因此工程上常用工字梁作支持物,最明显的例子是钢轨。

以上分析表明:人类骨骼中的管状骨,在其承受各种外力时,具有最佳的力学性能:既可节约构骨物质,减轻自重,降低营养消耗,同时基本上又不影响其力学性能,不降低其抗断强度。因此,骨的空心圆柱状结构是最佳适宜于完成支持任务的。

如果将某些骨剖开,它们的内部结构是由两种非常不同类型的骨:坚硬的密质骨和海绵状的松质骨组合而成的。松质骨则由细线状的骨小梁构成。图1-7给出了股骨上段的内部结构。骨小梁与密质骨相比有两个优点。(1)当骨主要承受压力和拉力时,骨小梁在提供足够强度时所需的材料比密质骨要少。这进一步减轻了骨自身的重量。(2)由于骨小梁呈细线状,相当容易弯曲。当骨受到较大作用力(如跑步、跳跃时)骨小梁能吸收较多的能量。对骨小梁来说,较小的弯曲应力可以引起较大的弯曲应变,而弯曲应力多集中在长骨的中部,所以骨小梁多分布在长骨的两端。图1-7所示股骨上段骨小梁的排列分布和图1-3所示的应力分布线完全吻合,这表明骨小梁所承受的是张力或压力。

骨的功能决定于它的形状、内部结构和它的组成部分。

有些骨是中空的管状骨,例如四肢骨。为了说明管状骨在支持体重、持物等力学性能方面的优越性,我们先讨论下面的例子。

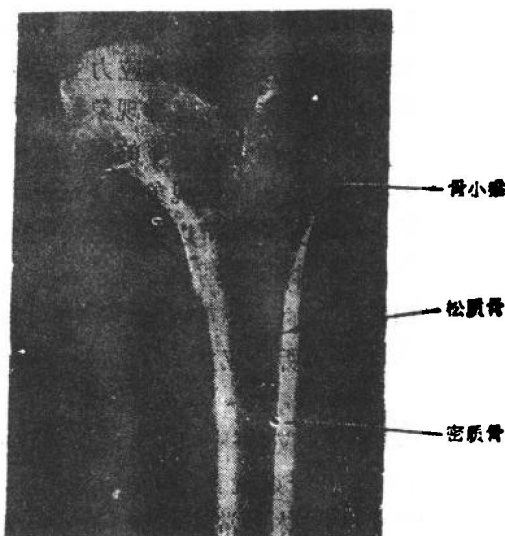


图1-7 股骨上段的内部结构