

全国普通高等教育临床医学专业“5+3”十二五规划教材

医学物理学 学习指导

供临床医学、预防医学、口腔医学
医学影像学、医学检验学等专业用

主编 甘 平

江苏科学技术出版社

医学物理学学习指导

供临床医学、预防医学、口腔医学
医学影像学、医学检验学等专业用

主 编 甘 平

副主编 张 翼 王晓艳 袁小燕

编 委 (按姓氏笔画排序)

马远新 (新疆医科大学)

王晓艳 (泰山医学院)

甘 平 (重庆医科大学)

张 翼 (右江民族医学院)

张淑丽 (齐齐哈尔医学院)

陈龙聪 (重庆医科大学)

陈仕国 (第三军医大学)

范 婷 (石河子大学)

罗亚梅 (泸州医学院)

袁小燕 (长治医学院)

熊兴良 (重庆医科大学)

图书在版编目（CIP）数据

医学物理学学习指导 / 甘平主编. —南京：江苏科学技术出版社，2013. 7

（全国高等教育医学专业5+3临床本科）

ISBN 978-7-5537-0553-8

I. ①医… II. ①甘… III. ①医用物理学—医学院校—教学参考资料 IV. ①R312

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第000011号

医学物理学学习指导

主 编	甘 平
责任编辑	楼立理 徐祝平
特约编辑	王淑英
责任校对	郝慧华
责任监制	曹叶平 方 晨
出版发行	凤凰出版传媒股份有限公司 江苏科学技术出版社
出版社地址	南京市湖南路1号A楼，邮编：210009
出版社网址	http://www.pspress.cn
经 销	凤凰出版传媒股份有限公司
印 刷	南京大众新科技印刷有限公司
开 本	880 mm×1 230 mm 1/16
印 张	9.75
字 数	260 000
版 次	2013年7月第1版
印 次	2013年7月第1次印刷
标准书号	ISBN 978-7-5537-0553-8
定 价	21.80元

图书若有印装质量问题，可随时向我社出版科调换。

出版说明

为了全面提高我国普通高等教育医药卫生类专业人才的培养质量,深入落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010~2020)》以及服务于医疗教育体系的改革,深入贯彻教育部、卫生部2011年12月联合召开的“全国医学教育改革工作会议”精神,通过全面实施以“5+3”为重点的临床医学教育综合改革方案,进一步深化和推进医学教育深层次改革和发展,通过全面推进临床医学专业课程体系及教育体系的改革和创新,推动临床医学教育内容及教学方法改革和创新,进一步更好地服务教学、指导教学、规范教学,实现临床医学教学质量全面提高,培养高层次、高水平、应用型的卓越医学人才,从而适应我国医疗卫生体制改革和发展的需要,凤凰出版传媒集团江苏科学技术出版社作为长期从事教育出版的国家一级出版社,于2012年1月组织全国50多家高等医学院校开发了国内第一套临床医学专业“5+3”十二五规划教材。

该套教材包括基础课程、专业课程46种,部分教材还编写了相应的配套教材。其编写特点如下:

1. 突出“5+3”临床医学专业教材特色 这套教材紧扣“5+3”临床医学专业的培养目标和专业认证标准,根据“四证”(本科毕业证、执业医师资格证、住院医师规范化培训证和硕士研究生毕业证)考核要求,紧密结合教、学、临床实践工作编写,由浅入深、知识全面、结构合理、系统完整。全套教材充分突出了“5+3”临床医学专业知识体系,渗透了“5+3”临床医学专业人文精神,注重体现素质教育和创新能力与实践能力的培养,反映了“5+3”临床医学专业教学核心思想和特点。

2. 体现教材的延续性 本套教材仍然坚持“三基”(基础理论、基本知识、基本技能)、“五性”(思想性、科学性、先进性、启发性、实用性)、“三特定”(特定的对象、特定的要求、特定的限制)的原则要求。同时强调内容的合理安排,深浅适宜,适应“5+3”本科教学的需求。

3. 体现当代临床医学先进发展成果的开放性 这套教材汲取了国内外最新版本相关经典教材的新内容,借鉴了国际先进教材的优点,结合了我国现行临床实践的实际情况和要求,并加以创造性地利用,反映了当今医学科学发展的新成果。

4. 强调临床应用性 为加快专业学位教育与住院医师规范化培训的紧密衔接,教材加强了基础与临床的联系,深化学生对所学知识的理解,实现早临床、多临床、反复临床的理念。

5. 强调了全套教材的整体优化 本套教材不仅追求单本教材的系统 and 全面,更是强调了全套教材的整体优化,注意到了不同教材内容的联系和衔接,避免遗漏和重复。

6. 兼顾教学内容的包容性 本套教材的编者来自全国几乎所有省份,教材的编写,兼顾了不同类型学校和地区的教学要求,内容涵盖了临床执业医师资格考试的基本理论大纲的知识点,可供全国不同地区不同层次的学校使用。

7. 突出教材个性 本套教材在保证整体优化的前提下,强调了个教材的个性,技能性课程突出了技能培训;人文课程增加了知识拓展;专业课程则增加了案例导入和案例分析。

8. 各科均根据学校的实际教学时数编写,文字精炼,利于学生对重要知识点的掌握。

9. 在不增加学生负担的前提下,根据学科需要,部分教材采用彩色印刷,以提高教材的成书品质和内容的可读性。

这套教材的编写出版,得到了广大医学院校的大力支持,作者均来自各学科教学一线,具有丰富的临床、教学、科研和写作经验。相信本套教材的出版,必将对我国当下临床医学专业“5+3”教学改革和专业人才培养起到积极的推动作用。

全国普通高等教育临床医学专业“5+3”十二五规划教材

医学导论	睦建	主编	局部解剖学	吴洪海	黄秀峰	主编	
基础化学	杨金香	主编	诊断学	魏武	郑文芝	主编	
有机化学	周建民	黄祖良	主编	医学影像学	李坤成	主编	
生物化学	黄忠仕	翟静	主编	临床麻醉学	晁储璋	主编	
医学分子生物学	武军驻	主编	全科医学概论	谢波	主编		
医学细胞生物学	苗聪秀	主编	内科学	雷寒	王庸晋	主编	
医学物理学	甘平	主编	外科学	康骅	薛昊罡	主编	
医学伦理学	陈颢	主编	妇产科学	段涛	胡丽娜	主编	
医学心理学	杜玉凤	主编	儿科学	于洁	主编		
生理学	白波	杜友爱	主编	中医学	黄岑汉	主编	
组织学与胚胎学	苏衍萍	王春艳	主编	皮肤性病学	何黎	金哲虎	主编
病理生理学	商战平	王万铁	主编	康复医学	李雪斌	陈翔	主编
病理学	盖晓东	李伟	主编	神经病学	沈霞	主编	
药理学	董志	毛新民	主编	精神病学	王克勤	主编	
人体寄生虫学	李士根	主编	眼科学	吕帆	主编		
医学微生物学	于爱莲	吕厚东	主编	口腔医学	邓锋	主编	
医学免疫学	宋文刚	主编	耳鼻咽喉头颈外科学	龚树生	主编		
临床药理学	许小林	主编	传染病学	周智	主编		
核医学	段炼	主编	临床流行病学	冯向先	主编		
医学统计学	景学安	主编	急诊与灾难医学	廖品琥	主编		
卫生法学	蒲川	徐晨	主编	局部解剖学实践指导及习题集	黄秀峰	吴洪海	主编
流行病学	毛淑芳	主编	人体寄生虫学学习指导	李士根	主编		
预防医学	喻荣彬	主编	医学物理学学习指导	甘平	主编		
法医学	邓世雄	主编	医学物理学实验	张翼	罗亚梅	主编	
系统解剖学	李富德	朱永泽	主编	眼科学学习指导	吕帆	主编	

前言

“5+3”培养模式是以培养住院医师为重点的教学改革,属于临床医学教育综合改革方案和卓越医师教育培养计划的重要组成部分。通过全面推进临床医学专业课程体系及教材体系的改革和创新,推动临床医学教育内容及教学方法改革和创新,进一步更好地服务教学、指导教学、规范教学,实现临床医学教育质量全面提高,培养高层次、高水平、应用型的卓越医学人才,以适应我国医疗卫生体制改革和发展的需要,是全国普通高等教育临床医学专业“5+3”十二五规划系列教材的编写目的。

本学习指导为“5+3”十二五规划教材《医学物理学》的配套辅助教材。由编写理论教材对应章节的编者编写,因此配套教材的各章节均与理论教材具有统一结构和风格。但是,配套教材的内容不与理论教材重复,它是理论教材的补充和扩展。具体内容包括各章节重点和难点解析、延伸内容、习题全解和自测题等。

本学习指导各章节均为统一的编写结构。具体的编写内容统一为:①引言部分 本章内容的简单介绍;②第一节 重点和难点(重点介绍本章节的主要内容、重点和难点);③第二节 延伸内容(教材中需要的补充说明的内容、例题和数学逻辑推导等扩展内容);④第三节 习题全解(理论教材的习题全解);⑤第四节 自测题(题目包括选择题、填空题、判断题和计算题等题型,为学习者提供自我检测学习效果的平台)。

本学习指导主要适用于“5+3”培养模式的五年制以及七年制临床医学、儿科、预防医学、口腔医学、医学影像学、麻醉学、卫生管理、卫生检验、妇幼保健、医学检验、中医学、法医学、基础医学、针灸推拿学、临床药学、生物技术、营养学、康复治疗学、药物制剂、药学等专业教学,也可供医药院校其他专业、生命科学有关专业的师生和研究工作者参考。

本学习指导在编写过程中借鉴了大量其他相关教材的优点,并在参考文献中列出了其中的一部分教材,在此特向相关教材的所有编者表示感谢。

由于编者水平有限,全书编写风格难以绝对统一,书中难免存在不妥之处,希望使用本学习指导的老师 and 同学们多提宝贵意见,以便再版时修订。

甘 平

目 录

第一章 人体力学的基础知识	1
第一节 重点和难点	1
第二节 延伸内容	1
第三节 习题全解	5
第四节 自测题	8
第二章 流体的运动	10
第一节 重点和难点	10
第二节 延伸内容	12
第三节 习题全解	12
第四节 自测题	16
第三章 液体的表面现象和医学应用	20
第一节 重点和难点	20
第二节 延伸内容	21
第三节 习题全解	22
第四节 自测题	25
第四章 振动和波动及超声波成像的物理原理	28
第一节 重点和难点	28
第二节 延伸内容	28
第三节 习题全解	29
第四节 自测题	36
第五章 波动光学及医学应用	39
第一节 重点和难点	39
第二节 延伸内容	40
第三节 习题全解	43
第四节 自测题	47
第六章 几何光学	51
第一节 重点和难点	51
第二节 延伸内容	53
第三节 习题全解	54

第四节 自测题	57
第七章 X射线成像的物理原理	60
第一节 重点和难点	60
第二节 延伸内容	63
第三节 习题全解	69
第四节 自测题	70
第八章 红外线成像与激光在医学中的应用	73
第一节 重点和难点	73
第二节 延伸内容	75
第三节 习题全解	78
第四节 自测题	79
第九章 原子核物理及核医学成像的物理原理	81
第一节 重点和难点	81
第二节 延伸内容	81
第三节 习题全解	83
第四节 自测题	86
第十章 磁共振成像的物理原理	88
第一节 重点和难点	88
第二节 延伸内容	90
第三节 习题全解	90
第四节 自测题	92
第十一章 静电场与心电的物理原理	95
第一节 重点和难点	95
第二节 延伸内容	97
第三节 习题全解	99
第四节 自测题	105
第十二章 直流电及电容器充放电	108
第一节 重点和难点	108
第二节 延伸内容	109
第三节 习题全解	110
第四节 自测题	114
第十三章 电磁现象	117
第一节 重点和难点	117
第二节 延伸内容	119
第三节 习题全解	120

第四节 自测题	125
第十四章 生物热力学基础	129
第一节 重点和难点	129
第二节 延伸内容	130
第三节 习题全解	132
第四节 自测题	133
第十五章 近代力学基础	135
第一节 重点和难点	135
第二节 延伸内容	137
第三节 习题全解	140
第四节 自测题	142
参考文献	144

第一章

人体力学的基础知识

人体力学是医学物理学的主要基础。力学是物理学中研究物体机械运动规律及其应用的科学分支。力学的分析方法主要是以物理学的理想模型法为代表。本章分别以质点、刚体和弹性体这三个理想模型为线索,讨论人体力学中有关的质点力学、刚体力学和弹性力学的基础知识。

本章主要内容有:牛顿定律、刚体的转动、转动定律、角动量守恒定律、物体的弹性、物体的弹性和塑性、应变与应力、弹性模量和骨骼的弹性等。本章从变力的角度出发,利用高等数学的微积分知识重新定义了中学物理学中质点力学的基本规律;然后,重点介绍人体力学的主要内容——刚体力学的基本定律和弹性力学的基本定律。最后为了方便学习者更好地掌握相关内容,对教材的习题进行详细解答,并提供自测题和参考答案。

第一节 重点和难点

一、重点

1. 质点力学 利用高等数学的微积分知识,从变力作用的角度,概述性重新定义中学物理学中质点力学的基本规律。重点内容有:质点的平面运动、牛顿定律和质点力学的基本定理等。

2. 刚体力学 重点内容有:刚体的转动、转动惯量、转动定律、定轴转动的功和能、角动量守恒定律和进动现象等。

3. 弹性力学 重点内容有:物体的弹性、物体的弹性和塑性、应变与应力、弹性模量、应变与应力曲线、肌肉和骨骼的弹性等。

二、难点

1. 刚体转动惯量的积分计算。

2. 应变与应力的计算。

3. 弹性力学的分析方法。

第二节 延伸内容

一、物理量单位和量纲

(一) 物理量单位

对于任何一个物理量,为了定量地描述它必须选定一个基本量(fundamental quantity),这个基本量称为它的物理量单位(unit)。例如,长度用米(m)作单位,质量用千克(kg)作单位,时间用秒(s)作单位。

物理量单位又分为基本单位和导出单位。基本单位是直接规定的,在国际单位制(SI)中,规定长度、质量和时间为力学基本量。其中米(m)、千克(kg)和秒(s)是相应的力学基本单位。由基本单位

导出的物理量单位统称为导出单位。力学中的其他物理量(如速度、加速度和力等)都为导出量,它们的单位($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$, $\text{kg} \cdot \text{ms}^{-2}$)就是导出单位。

(二) 量纲式

表示物理量是由哪些基本量所组成的表达式称为该物理量的量纲式。在 SI 中,用 L 、 M 和 T 分别表示长度、质量和时间这三个力学基本量的量纲。由此,任何导出量都可以用这三个基本量的某种组合表示出来。

$$[Q] = M^p L^q T^r \quad (1-1)$$

上式称为物理量 Q 的量纲式(dimension formula),其中指数 p, q, r 分别称为物理量 Q 对质量、长度和时间的量纲指数。例如,速度、加速度、力和角度的量纲式分别为:

$$[v] = [s]/[t] = LT^{-1}$$

$$[a] = [v]/[t] = LT^{-2}$$

$$[F] = [m][a] = MLT^{-2}$$

$$[\phi] = [s]/[r] = 1$$

以上表明,其中速度对长度的量纲为 1,对时间的量纲为 -1,对质量的量纲为零。

量纲式还可以用于检验等式是否正确。由于在较为复杂的等式中常常包含若干项物理量,因此确定等式是否正确,检验其等式中各项的量纲式是必不可少的步骤。例如,在自由落体运动中,落体的末速度为: $v = \sqrt{2gh}$ 。该等式左边的量纲式为: LT^{-1} ,等式右边的量纲式为: $(L^2 T^{-2})^{1/2} = LT^{-1}$ 。由此可见,该式两端各项的量纲是正确的。

二、功能原理与机械能守恒定律

(一) 功能原理

考虑由 n 个质点组成的质点系,把适用于单个质点的动能定理推广应用到质点系,作用于各质点的力所做的功分别等于各质点的动能的增量:

$$W_1 = E_{k1} - E_{k10}$$

$$W_2 = E_{k2} - E_{k20}$$

.....

$$W_n = E_{kn} - E_{kn0}$$

式中: $E_{k1}, E_{k2}, \dots, E_{kn}$ 分别为各质点的末动能, $E_{k10}, E_{k20}, \dots, E_{kn0}$ 分别为各质点的初动能。将以上各式求和得

$$\sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n E_{ki} - \sum_{i=1}^n E_{ki0} \quad (1-2)$$

系统内各质点所受的力包括外力和内力。无论外力和内力都可分为保守力与非保守力。因此,作用于质点系各力的总功为

$$\sum_{i=1}^n W_i = W^{\text{ex}} + W_c^{\text{in}} + W_{\text{nc}}^{\text{in}} = \sum_{i=1}^n E_{ki} - \sum_{i=1}^n E_{ki0} \quad (1-3)$$

其中,系统内保守力所做的功等于势能增量的负值,即 $W_c^{\text{in}} = - \left(\sum_{i=1}^n E_{pi} - \sum_{i=1}^n E_{pi0} \right)$

由此可得, $W^{\text{ex}} + W_{\text{nc}}^{\text{in}} = \left(\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi} \right) - \left(\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0} \right)$

式中,动能和势能统称为机械能,分别以 E_0 和 E 表示初机械能和末机械能,

即 $E_0 = \left(\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0} \right)$, $E = \left(\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi} \right)$

因此,式(1-3)可表示为

$$W^{ex} + W_{nc}^{in} = E - E_0 \quad (1-4)$$

上式表明,作用于质点系的外力和非保守内力的总功等于质点系的机械能的增量。这一结论称为功能原理。

(二) 机械能守恒定律

根据功能原理,如果 $W^{ex} + W_{nc}^{in} = 0$, 则由(1-3)可得 $E = E_0$,

$$\text{即} \quad \left(\sum_{i=1}^n E_{ki} + \sum_{i=1}^n E_{pi} \right) = \left(\sum_{i=1}^n E_{ki0} + \sum_{i=1}^n E_{pi0} \right) \quad (1-5)$$

上式表明:一个质点系如果外力和非保守内力做功为零,则只有保守内力做功,质点系的机械能的总和保持不变。这一结论称为机械能守恒定律。机械能守恒定律是普遍的能量守恒定律在力学中的特殊表达形式。

三、动量定理与动量守恒定律

(一) 动量、冲量和动量定理

运动物体的质量与速度的乘积称为该物体的动量(momentum)。用 P 表示动量,则 $P = mv$, 动量是矢量,其方向与速度方向一致。在国际单位制中,动量的单位是千克米/秒($\text{kg} \cdot \text{ms}^{-1}$),量纲是 MLT^{-1} 。

根据牛顿第二运动定律可得

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{dP}{dt}, \quad \text{或} \quad Fdt = dP$$

由此可得

$$\int_{t_1}^{t_2} Fdt = \int_{P_1}^{P_2} dP = P_2 - P_1 = mv_2 - mv_1 \quad (1-6)$$

上式等号左端是力对一段时间的积累,称为力在该时间间隔内的冲量;等号右端是该物体的动量的增量。上式表明:运动物体所受合外力的冲量等于该物体动量的增量。这一结论称为动量定理。在实际计算中应注意力和动量都是矢量。可分别把力和动量分解在直角坐标系的 x, y, z 坐标轴上,合外力在各坐标轴上的分量的冲量等于该物体在相应坐标轴上的动量的增量。动量定理在解决碰撞打击一类问题时十分有用。

(二) 动量守恒定律

动量定理可以应用于物体系中各物体所受的力,包括外力和内力。当物体系不受外力或所受合外力为零时,物体系内各物体只有相互作用的内力。

$$\text{对每个物体应用动量定理} \quad \int_{t_1}^{t_2} F_{i\text{内}} dt = m_i v_{i2} - m_i v_{i1}$$

$$\text{对整个物体系求和得} \quad \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^n F_{i\text{内}} dt = \sum_{i=1}^n m_i v_{i2} - \sum_{i=1}^n m_i v_{i1}$$

根据牛顿第三定律,物体系中各物体间相互作用的内力都是成队出现,大小相等,方向相反,因此系统内所有内力冲量的矢量和为零。由此可得

$$\sum m_i v_{i2} = \sum m_i v_{i1} \quad (1-7)$$

或者写成

$$\sum P_i = \text{恒矢量} \quad (1-8)$$

上式表明,如果系统不受外力或所受合外力为零,则系统的总动量保持恒定不变。这一结论称为动量守恒定律(law of conservation of momentum)。

四、生物力学简介

生物力学是应用力学原理和方法对生物体中的力学问题进行定量研究的生物物理学分支。生物

力学的研究范围从生物整体到系统和器官(包括血液、体液、脏器、骨骼等);从鸟飞、鱼游、鞭毛和纤毛运动到植物体液的输运等。生物力学的基础是能量守恒、动量定律和质量守恒三定律,并加上描写特性的特征方程。生物力学重点是研究与生理学以及医学有关的力学问题。依据研究对象的不同,生物力学可细分为生物流体力学、生物固体力学和运动生物力学等。

(一) 生物力学的发展简史

1582年前后伽利略得出摆长与周期的定量关系,并利用摆频来测定人的脉搏率;1616年,英国生理学家哈维根据流体力学中的连续性原理,从理论上论证了血液循环的存在;到1661年,马尔皮基在解剖青蛙时,在蛙肺中看到了微循环的存在,证实了哈维的论断;博雷利在《论动物的运动》一书中讨论了鸟飞、鱼游和心脏以及肠的运动;欧拉在1775年写了一篇关于波在动脉中传播的论文;兰姆在1898年预言动脉中存在高频波,现已得到证实;材料力学中著名的杨氏模量就是英国物理学家托马斯·杨为建立声带发音的弹性力学理论而提出的。

1733年,英国生理学家黑尔斯测量了马的动脉血压,并寻求血压与失血的关系,解释了心脏泵出的间歇流如何转化成血管中连续流的原因。他在血液流动中引进了外周阻力概念,并正确地指出产生这种阻力的主要部位在细血管处。其后泊肃叶确立了血液流动过程中压降、流量和阻力的关系;夫兰克解释了心脏的力学问题;斯塔林提出了透过膜的传质定律,并解释了人体中水的平衡问题。

克罗格由于在微循环力学方面的贡献而获得1920年诺贝尔奖金。希尔因肌肉力学的工作获得1922年诺贝尔奖金。他们的工作为20世纪60年代开始的生物力学的系统研究打下基础。

中国的生物力学研究有相当一部分与中国传统医学结合,因而在骨骼力学、脉搏波、无损检测、推拿、气功和生物软组织等项目的研究中已形成自己的特色。

在20世纪60年代,一批工程科学家同生理学家以及医学家通力合作,对生物学、生理学和医学的有关问题用工程的观点和方法进行了较为深入的研究,使生物力学逐渐成为了一门独立的学科。

(二) 生物力学的研究内容

生物的各个系统(特别是循环系统和呼吸系统的动力学问题)是人们长期研究的对象。循环系统动力学主要研究血液在心脏、动脉、微血管、静脉中流动以及心脏心瓣的力学问题。呼吸系统动力学主要研究在呼吸过程中,气道内气体的流动和肺循环中血液的流动以及气血间气体的交换。

包括生物材料流变性质和动力学研究的所有工作,不仅有助于对人体生理和病理过程的了解,而且还能为人工脏器的设计和制造提供科学依据。

环境对生理的影响也是生物力学的一个研究内容。氧对生物体的发育有很大影响,在缺氧环境下生物体发育较慢,在富氧环境下发育较快。实验表明:在含10%的氧气、压力为一个大气压的环境中的幼鼠,即使只生活24小时,在直径为 $15 \sim 30 \mu\text{m}$ 的肺小动脉壁也会出现大量的纤维细胞。若延续4~7天,纤维细胞则会过渡为典型的平滑肌细胞,这无疑会影响肺循环中血液的流动。

在设计水中航行的工具时,经常需要考虑最佳外形、最佳推进方式和最佳操纵方式。因此,研究某些水生物的运动可以得到一些值得借鉴的知识。例如,海豚是一种较高级的动物,它具有高效率的推进机制和很好的外形。特别是它的皮肤分为两层,其间充满了弹性纤维和脂肪组织,具有特殊的减阻特性。在高速游动时能够保持层流边界层状态,这是因为它的皮肤对边界层中压力梯度变化十分敏感,能作适当的弹性变形以降低逆压梯度,因而在高速游动时,表皮能产生波状运动以抑制湍流的出现。总之,研究大自然中生物运动的意义是很明显的。

心脏-循环系统和肺脏-呼吸系统的动力学问题、生物系统和环境之间的热力学平衡问题、特异功能问题等也是当前生物力学研究的热点。生物力学的研究不仅涉及医学、体育运动方面,而且已深入到交通安全、宇航和军事科学的有关方面。

生物固体力学是利用材料力学、弹塑性理论、断裂力学的基本理论和方法,研究生物组织和器官中与之相关的力学问题。在近似分析中,人与动物骨头的压缩、拉伸、断裂的强度理论及其状态参数都可应用材料力学的标准公式。但是,无论在形态还是力学性质上,骨头都是各向异性的。20世纪

70年代以来,对骨骼的力学性质已有许多理论与实践研究。有限元法、断裂力学、应力套方法和光测弹力学等检测技术都已应用于骨力学研究。

骨骼是一种复合材料,它的强度不仅与骨的构造而且与材料本身相关。骨是骨胶原纤维和无机晶体的组合物。骨板由纵向纤维和环向纤维构成,骨质中的无机晶体使骨强度大大提高,体现了骨骼以最少的结构材料来承受最大外力的功能适应性。

生物流体力学还研究生物心血管系统、消化呼吸系统、泌尿系统、内分泌以及游泳、飞行等与水动力学、空气动力学、边界层理论以及流变学理论有关的力学问题。它一般将生物材料分为体液、硬组织和软组织,而肌肉则属较为特殊的一类。

体液中以血液为研究的重点。在分析血液力学性质时,血液在大血管流动的情况下,可将血液看做均质流体。由于微血管直径与红细胞直径相当,因此在微循环分析时,可将血液看做两相流体。当然,血管越细,血液的非牛顿特性越显著。

人体内血液的流动大都属于层流,在血液流动很快或血管很粗的部位容易产生湍流。在主动脉中,以峰值速度运动的血液勉强处于层流状态,但在许多情况下会转变成湍流。尿道中的尿流往往是湍流;而通过毛细血管壁的物质交换则是一种渗流。因此,体内血液的流动状态是比较复杂的。

对于软组织而言,以研究它的流变性质并且建立其本构关系为主。因为软组织的本构关系不单是进一步分析它力学问题的基础,而且具有重要的临床意义。

对于硬组织而言,除了研究它的流变性质外,对骨骼的消长与应力的关系也进行了大量研究。

运动生物力学是用静力学、运动学和动力学的基本原理结合解剖学、生理学等研究人体运动的学科。用理论力学的原理和方法研究生物力学是一个开展得比较早而且比较深入的研究领域。

在运动生物力学的研究中,首先要建立人体力学模型,通常把人设想为由有限个以球铰联结的链系统。因为人体各相邻分体之间存在肌肉作用力,所以人体力学模型应该是包含肌肉动力系统的特殊刚体系。人与动物的骨骼和肌肉的受力状态,如手提重物时手臂骨骼与二头肌的受力,脊柱与脊柱肌的受力等可用静力学方程求解。

在人体运动中,应用层动力学和动力学的基本原理、方程去分析计算运动员跑、跳和投掷等多种运动项目的极限能力,其结果与奥林匹克运动会的纪录非常相近。在创伤生物力学方面,以动力学的观点应用有限元法,计算头部和颈部受冲击时的频率响应并建立创伤模型,从而改进头部和颈部的防护并可加快创伤的治疗。

(三) 生物力学的研究特点

在研究生物力学问题时,实验对象所处的环境十分重要。作为实验对象的生物材料有在体的生物材料和离体的生物材料之分。对在体的生物材料而言,一般处于受力状态(如血管、肌肉),一旦游离出来则处于自由状态,即非生理状态(如血管、肌肉一旦游离,当即明显收缩变短)。这两种状态材料的实验结果差异较大。同时,在体实验可分为麻醉状态和非麻醉状态两种情况。至于离体实验,在对象游离出来后,根据要求可以按整体正位进行实验,或进一步加工成试件进行实验。不同的实验条件和加工条件对实验结果的影响很大。这正是生物力学研究的特点。

生物力学的研究首先要了解生物材料的几何特点,进而测定组织或材料的力学性质,最后导出主要微分方程和积分方程、确定边界条件并求解。对于上述边界问题的解,需用生理实验去验证。若有必要,还需要另外建立数学模型求解,以期理论与实验结果相一致。

第三节 习题全解

1-1 一直径为1m的轮子以每秒2转的初角速度做定轴转动,角加速度为 $3\text{r} \cdot \text{s}^{-2}$ 。求:

- (1) 6s末的角速度;
- (2) 在6s内轮子转过的角度;

(3) 6s 末轮子边上一点的切向速度;

(4) 6s 末轮子边上一点的合加速度。

解: (1) $\omega = \omega_0 + \beta t = 2 + 3 \times 6 = 20 (\text{r} \cdot \text{s}^{-1})$

$$(2) \theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2 = 2 \times 6 + 1.5 \times 36 = 66 (\text{r})$$

$$(3) v = r\omega = 1 \times 2\pi \times 20 = 125.6 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$(4) a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{(r\beta)^2 + (r\omega^2)^2} = 3.9 \times 10^3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

答: ① 6s 末的角速度为 $20 \text{r} \cdot \text{s}^{-1}$; ② 在 6s 内轮子转过的角度为 66r ; ③ 切向速度 $v = 125.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;

④ 合加速度 $a = 3.9 \times 10^3 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

1-2 一细棒长度为 1m, 质量为 6kg, 转轴与棒垂直而且距离一端为 0.2m, 求其转动惯量。

$$\text{解: } J = \frac{1}{12} ml^2 + md^2 = \frac{1}{12} \times 6 \times 1^2 + 6 \times 0.2^2 = 0.5 + 0.24 = 0.74 (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

答: 其转动惯量为 $J = 0.74 \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

1-3 一均匀薄圆盘的半径为 r , 质量为 m , 求:

(1) 以圆盘直径为转轴的转动惯量;

(2) 对于直径平行, 且与边缘相切的转轴的转动惯量。

解: (1) 设圆盘直径的转轴为 y 轴, 坐标原点为圆盘圆心, 则 $x^2 + y^2 = r^2$ 。在 x 处以细棒转动惯

$$\text{量公式得 } dJ = \frac{1}{12} dm(2x)^2 = \frac{1}{12} \sigma 2x dy (2x)^2$$

$$\text{所以, } J = \int dJ = \int_{-r}^{+r} \frac{1}{12} \sigma (2x)^3 dy = \frac{1}{4} mr^2$$

$$(2) \text{ 由平行轴定理得 } J = J_c + md = \frac{1}{4} mr^2 + mr^2 = \frac{5}{4} mr^2$$

答: ① 以圆盘直径为转轴的转动惯量为 $\frac{1}{4} mr^2$; ② 对于直径平行, 且与边缘相切的转轴的转动惯

量为 $\frac{5}{4} mr^2$ 。

1-4 飞轮的直径为 1m, 每分钟转动 1500 转, 受到制动力后经 50s 静止, 求:

(1) 角加速度和从制动开始到静止所转过的转数;

(2) 制动开始后 25s 时的角速度、飞轮边上的线速度、法向加速度和切向加速度。

$$\text{解: (1) 因为 } r = 0.5 \text{m}, \omega_0 = \frac{1500}{60} = 25 (\text{r} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$\text{所以 } \beta = \frac{\omega - \omega_0}{t} = \frac{0 - 25}{50} = -0.5 (\text{r} \cdot \text{s}^{-2}) = -\pi (\text{rad} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$\theta = \omega_0 t + \frac{1}{2} \beta t^2 = \frac{\omega + \omega_0}{2} t = \frac{0 + 25}{2} \times 50 = 625 (\text{r})$$

$$(2) \omega = \omega_0 + \beta t = 25 - 0.5 \times 25 = 12.5 (\text{r} \cdot \text{s}^{-1}) = 78.5 (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$v = r\omega = 0.5 \times 78.5 = 39.25 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \approx 39.3 (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$$

$$a_n = r\omega^2 = 0.5 \times 78.5^2 = 3081.125 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \approx 3081.1 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

$$a_t = r\beta = 0.5 \times (-\pi) = -1.57 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2}) \approx -1.6 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$$

答: ① 角加速度和从制动开始到静止所转过的转数分别为 $\beta = -\pi \text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $\theta = 625 \text{r}$; ② 制动开始后 25s 时的角速度为 $\omega = 78.5 \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、飞轮边上的线速度为 $v = 39.3 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、法向加速度 $a_n = 3081.1 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 和切向加速度 $a_t = -1.6 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

1-5 飞轮的转动惯量为 $335 \text{kg} \cdot \text{m}^2$, 转速为每分钟 72 转, 因受摩擦力矩作用而均匀减速, 经 40s

后停止,求其摩擦力矩。

解:因为 $J = 335 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $\omega_0 = \frac{72}{60} = 1.2 (\text{r} \cdot \text{s}^{-1})$, $\beta = \frac{0 - 1.2}{40} = -0.03 (\text{r} \cdot \text{s}^{-2})$

所以 $M = J\beta = 335 \times (-0.03) \times 2\pi = 63.11 (\text{N} \cdot \text{m})$

答:其摩擦力矩为 $M = 63.11 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

1-6 一个人坐在转台上,将双手握住的哑铃置于胸前,转台以角速度 ω_0 转动(摩擦不计),人和转台的转动惯量为 J_0 。如果此人将两手水平伸直,使人和转台的转动惯量增加为原来的两倍,求:

(1) 人和转台的角速度;

(2) 转动动能。

解:(1) 因为 $J = 2J_0$

所以,由角动量守恒定律 $J\omega = J_0\omega_0$ 得 $\omega = \frac{1}{2}\omega_0$

(2) 转动动能 $E_k = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2} \times 2J_0 \times \left(\frac{1}{2}\omega_0\right)^2 = \frac{1}{4}J_0\omega_0^2$

答:① 人和转台的角速度为 $\omega = \frac{1}{2}\omega_0$; ② 转动动能 $E_k = \frac{1}{4}J_0\omega_0^2$ 。

1-7 根据《医学物理学》教材表 1-2 提供的数据计算:

(1) 横截面积为 4cm^2 的密质骨在拉力作用下骨折时所受到的拉力;

(2) 在 1000N 拉力作用下,此骨的应变。

解:已知密质骨面积 $s = 4\text{cm}^2 = 4 \times 10^{-4}\text{m}^2$, 根据表 1-2 提供的数据,抗张强度

$\sigma_1 = 1.21 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$; 杨氏模量 $E = 1.6 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ (拉)

(1) 骨折时所受到的拉力

$$F_1 = \sigma_1 s = 1.21 \times 10^8 \times 4 \times 10^{-4} = 4.84 \times 10^4 (\text{N})$$

(2) 因为 $F_2 = 10^3 (\text{N})$; $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$; $\sigma = \frac{F_2}{s}$

$$\text{所以 } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F_2}{sE} = \frac{10^3}{4 \times 10^{-4} \times 1.6 \times 10^{10}} = 1.56 \times 10^{-4}$$

答:① 骨折时所受到的拉力 $F_1 = 4.84 \times 10^4 (\text{N})$; ② 在 1000N 拉力的作用下,此密质骨的应变为 $\varepsilon = 1.56 \times 10^{-4}$ 。

1-8 一条长 0.2m ,横截面积为 50cm^2 的圆柱形二头肌。求以下两种状态的杨氏模量:

(1) 松弛状态时伸长 5cm 所需拉力为 25N ;

(2) 当此肌肉处于紧张状态时,产生同样的伸长需要 500N 的拉力。

解:已知 $l_0 = 0.2\text{m}$, $s = 50\text{cm}^2 = 50 \times 10^{-4}\text{m}^2$, 所以

$$(1) \text{ 杨氏模量 } E_1 = \frac{F_1 l_0}{s \Delta l} = \frac{25 \times 0.2}{50 \times 10^{-4} \times 5 \times 10^{-2}} = 2 \times 10^4 (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$(2) \text{ 杨氏模量 } E_2 = \frac{F_2 l_0}{s \Delta l} = \frac{500 \times 0.2}{50 \times 10^{-4} \times 5 \times 10^{-2}} = 4 \times 10^5 (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$$

答:① 松弛状态时伸长 5cm 所需拉力为 25N 时的杨氏模量 $E_1 = 2 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$; ② 当此肌肉处于紧张状态时,产生同样的伸长需要 500N 拉力时的杨氏模量 $E_2 = 4 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1-9 在边长为 2cm 的立方体的两个平行面上,各施加 980N 的切向力,两力方向相反,两平行面的相对位移为 1mm ,求其切变模量。

解:已知 $l = 0.02\text{m}$, $s = l^2 = 4 \times 10^{-4}\text{m}^2$, $F = 980\text{N}$, $\Delta l = 10^{-3}\text{m}$

$$\text{所以,切变模量 } G = \frac{\tau}{r} = \frac{Fl}{s \Delta l} = \frac{980 \times 0.02}{4 \times 10^{-4} \times 10^{-3}} = 4.9 \times 10^7 (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$$

答:切变模量 $G = 4.9 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

1-10 液压机内所贮油的体积为 0.2m^3 , 油的压缩率为 $2.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$ 。求当受到 $2 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的压强时, 油的体积缩小了多少?

解: 已知 $V_0 = 0.2\text{m}^3$, $k = 2.0 \times 10^{-10} \text{m}^2 \text{N}^{-1}$, $p = 2 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

所以 $\Delta V = kpV_0 = 2.0 \times 10^{-10} \times 2 \times 10^7 \times 0.2 = 0.8 \times 10^{-3} (\text{m}^3)$

答: 当受到 $2 \times 10^7 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 的压强时, 油的体积缩小了 $\Delta V = 0.8 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

1-11 某人体重 60kg , 其腿骨长 1.2m , 平均横截面积为 3cm^2 , 求此人站立时腿骨缩短了多少? (骨的杨氏模量按 $1 \times 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 计算)

解: 已知 $F = 60 \times 9.8 (\text{N})$, $l_0 = 1.2\text{m}$, $s = 3 \times 10^{-4} \text{m}^2$, $E = 10^{10} \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

所以 $\Delta l = \frac{Fl_0}{Es} = \frac{60 \times 9.8 \times 1.2}{10^{10} \times 3 \times 10^{-4}} = 2.35 \times 10^{-4} (\text{m})$

答: 此人站立时腿骨缩短了 $2.35 \times 10^{-4} \text{m}$ 。

1-12 假设股骨为一空心圆管, 已知其最细处的内半径与外半径之比为 0.5 , 可在 $5 \times 10^4 \text{N}$ 的压力下产生骨折, 设股骨的抗压强度为 $1.67 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。试计算此股骨最细处的外直径。

解: 已知 $\frac{r}{R} = 0.5$, $s = \pi(R^2 - r^2) = 0.75\pi R^2$, $F = 5 \times 10^4 \text{N}$, $\sigma_c = 1.67 \times 10^8 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$

所以 $F = \sigma_c s = \sigma_c 0.75\pi R^2$

$$2R = 2 \sqrt{\frac{F}{0.75\pi\sigma_c}} = 2 \sqrt{\frac{5 \times 10^4}{0.75\pi \times 1.67 \times 10^8}} = 2.254 \times 10^{-2} (\text{m})$$

答: 此股骨最细处的外直径为 $2R = 2.254 \times 10^{-2} \text{m}$ 。

1-13 弹跳蛋白是一种存在于跳蚤的弹跳机构和昆虫的飞翔机构中的弹性蛋白, 其杨氏模量接近于橡皮。今有截面积为 30cm^2 的弹跳蛋白, 在 270N 的拉力作用下长度变为原来的 1.5 倍, 求其杨氏模量。

解: 已知 $s = 30 \times 10^{-4} \text{m}^2$, $F = 270\text{N}$, $\Delta l = (1.5 - 1)l_0 = 0.5l_0$

所以 杨氏模量 $E = \frac{Fl_0}{s\Delta l} = \frac{270}{30 \times 10^{-4} \times 0.5} = 1.8 \times 10^5 (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$

答: 杨氏模量 $E = 1.8 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

第四节 自 测 题

【选择题】

1. 截面积为 5cm^2 的圆柱形密质骨受到 500N 拉力时, 其张应变为 0.1% , 其杨氏模量为()
A. $1 \times 10^6 \text{Pa}$ B. $1 \times 10^9 \text{Pa}$ C. $1 \times 10^{12} \text{Pa}$ D. $1.5 \times 10^6 \text{Pa}$ E. $1.5 \times 10^9 \text{Pa}$
2. 弹性模量分杨氏模量、切变模量和()
A. 线变模量 B. 切变模量 C. 体变模量 D. 胡克模量 E. 以上都不对
3. 应变是物体受外力作用时, 其尺寸的()
A. 线变化率 B. 切向变化率 C. 体积变化率 D. 相对变化量 E. 以上都不对

【计算题】

1. 如图 1-1 所示, 质量为 $m_1 = 24\text{kg}$ 的匀质圆盘可绕水平光滑轴转动, 一轻绳缠绕于盘上, 另一端通过质量为 $m_2 = 5\text{kg}$ 的具有水平光滑轴的圆盘形定滑轮后挂有 $m = 10\text{kg}$ 的物体。求: 物体 m 由静止开始下落 $h = 0.5\text{m}$ 时, 物体的速度及绳的张力。

2. 如图 1-2 所示, 一根质量为 m 、长为 l 的均匀细棒 AB, 可绕一水平光滑轴 O 在竖直平面内转动, O 轴离 A 端的距离为 $1/3$ 。今使棒从静止开始由水平位置绕 O 轴转动。求棒转过角 θ 时的角加速度和角速度。