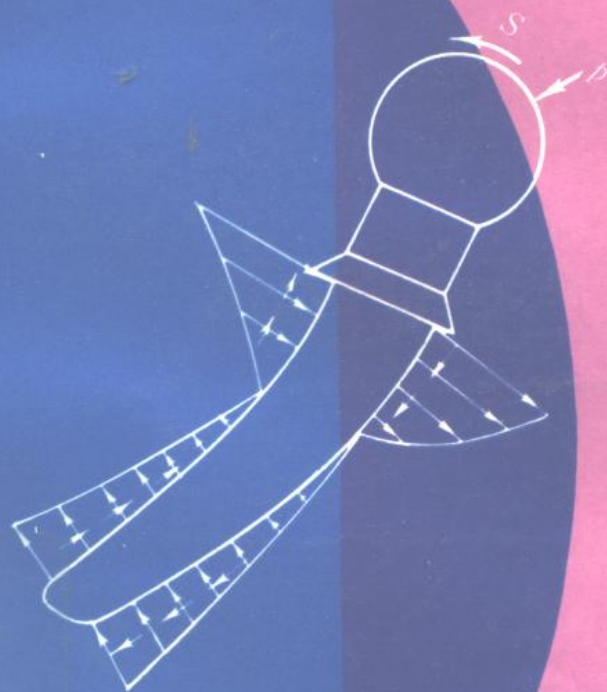


杨桂通主编

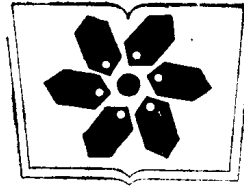
医用生物力学



科学出版社

书馆

DZ99/18



中国科学院科学出版基金资助出版

医用生物力学

杨桂通 主编

科学出版社

1994

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍与医学临床应用密切相关的生物力学各主要领域的基础知识、应用实例,以及最新研究成果。全书共14章,在给出正确的生物力学概念、医用生物力学发展情况后,分别介绍了骨力学、软组织力学、器官力学、呼吸力学、血液流变学、心脏力学、血流动力学、微循环力学、生物传质、药物动力学、振动生物力学等。

可供临床各科医生、医学研究人员、生物医学工程技术人员阅读,并可作为高等院校有关专业学生、研究生用教材和参考书。

医 用 生 物 力 学

杨桂通 主编

责任编辑 王爱琳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

北京市东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1994年12月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1994年12月第一次印刷 印张: 28³/₄

印数: 1—1000 字数: 670 000

ISBN 7-03-004072-4/R·210

定价: 32.90元

前 言

生物力学是一门新兴的边缘学科，它综合生物学、生理学、医学、物理学和力学于一体，形成了一门崭新的学科。生物力学的研究一开始便和临床医学结合在一起，由于这个原因，这门学科一直具有强大的生命力。目前，生物力学的研究在国际上正处在一个非常活跃的时期。生物力学在医学、体育科学、农学、仿生学等领域内得到了广泛的应用，特别是在医学上的应用已经显示了这门学科的重要应用价值。

中国生物力学的研究工作是从70年代末广泛开展起来的。由于著名科学家冯元桢先生对中国生物力学事业的热情帮助与具体指导，中国生物力学的发展较快，研究领域扩展到生物力学的各个分支。其明显的特点：一是有大量的医学工作者、工程技术人员和力学工作者结合在一起协同奋战，联合攻关；二是一开始便注意了在临床医学中的应用，特别是与中国传统医学相结合的一些研究课题受到广泛重视，因而中国生物力学的发展具有自己的特色。

1990年11月在珠海召开的第三届全国生物力学学术会议期间，与会代表在高兴地看到中国生物力学长足发展的情况的同时，广泛要求出版一本具有中国特色的以医学应用为主的《医用生物力学》专著，藉以把最新研究成果介绍给广大医学工作者，同时也促进生物力学的进一步发展。在这种情况下，我们组织了我国在研究工作第一线工作的部分专家，在中国科学院科学出版基金委员会的支持下编写了这部专著。

这部书的成因已经决定了它的风格，这就是在强调必要的理论基础、正确的生物力学概念的前提下，重点放在医学上的应用而并不包含全部生物力学的内容，目的是为广大的医学工作者提供一本既有理论基础又有实用价值的专门书籍。为此，我们力图使这本书结构合理、层次清晰、概念准确、由浅入深、便于自学，适合广大医学工作者阅读，同时对于力学工作者和高年级大学生也是一本学习和开展研究工作的重要参考书。

为了写好这本书，我邀请了国内在医用生物力学部分领域工作的一些专家参加编写工作。我感谢他们的通力合作、密切配合，在短短的半年多时间里完成了初稿。大家共同的愿望是希望本书尽快能在医学界、力学界和生物力学的同仁中起到一点推动作用。应当说明，除本书编著者外，国内尚有不少在生物力学领域中做出贡献的专家，本书在编著过程中吸收了他们的思想成果，特此致以谢意。最后我们非常感谢中国科学院科学出版基金委员会的全力支持，如果没有他们的热情帮助，本书是难以问世的。

杨桂通

1992年6月于太原工业大学

《医用生物力学》编委会

主 编 杨桂通 (太原工业大学)

编 委 (以姓氏笔画为序)

马和中 (北京航空航天大学)

王君健 (华中理工大学)

孙家驹 (西北建筑工程学院)

刘振田 (东南大学)

吴云鹏 (重庆大学)

吴文周 (太原工业大学)

吴望一 (北京大学)

陈槐卿 (华西医科大学)

柳兆荣 (复旦大学)

徐明瑜 (山东大学)

席保树 (清华大学)

陶祖莱 (中国科学院力学所)

曾衍钧 (北京工业大学)

目 录

前言	
第一章 绪论	1
第一节 什么是生物力学、医用生物力学.....	1
第二节 医用生物力学在医学上的应用与发展概况.....	2
第三节 医用生物力学展望.....	5
第二章 生物力学基础知识	9
第一节 运动和力.....	9
第二节 变形体力学基本知识.....	13
第三节 生物流体力学基础.....	25
第四节 生物流变学基础.....	40
第五节 生物传质基础.....	50
第三章 骨的结构及力学特性	58
第一节 骨的成分与结构.....	58
第二节 骨的力学性能.....	64
第三节 骨的本构关系.....	78
第四节 骨的力-电效应.....	83
第五节 骨的塑建与重建.....	86
第四章 骨力学的临床应用	93
第一节 骨折及其治疗.....	93
第二节 关节力学.....	102
第三节 人工关节置换.....	108
第四节 软骨的力学性质.....	114
第五节 脊柱的生物力学.....	121
第五章 软组织力学及其应用	134
第一节 软组织力学基础.....	134
第二节 皮肤.....	138
第三节 韧带和腱.....	148
第四节 肌肉.....	158
第六章 器官力学及其应用	167
第一节 颅脑.....	167
第二节 耳.....	178
第三节 眼.....	185
第四节 口腔.....	192

第七章 呼吸力学和肺功能检测	200
第一节 呼吸系统的静力学性质.....	201
第二节 气体在气道中的流动和扩散.....	203
第三节 强力呼气过程中的容积-时间曲线.....	204
第四节 限速现象及等容压力-流量曲线.....	206
第五节 可塌陷管中的流动及等压点理论.....	207
第六节 流量-容积曲线及呼气末期的扰动.....	211
第七节 高频通气.....	214
第八章 血液流变学及其在医学中的应用	217
第一节 血液流变学基本概念.....	217
第二节 血液流变学检测方法.....	225
第三节 血液流变学在医学中的应用.....	238
第九章 心脏力学及其应用	251
第一节 概述.....	251
第二节 心脏的泵功能.....	256
第三节 心脏瓣膜流体动力学基础.....	260
第四节 心脏瓣膜病及其血流动力学变化.....	270
第五节 人造心脏瓣膜及其性能评价.....	275
第十章 血液动力学及其临床应用	292
第一节 动脉中血液流的分析模型.....	292
第二节 血管的力学性质.....	298
第三节 动脉顺应性的检测.....	300
第四节 血管阻抗.....	307
第五节 脉搏波的传播和反射.....	317
第十一章 微循环力学	325
第一节 微循环的特征.....	325
第二节 微循环的血流动力学.....	328
第三节 微循环中的物质交换.....	337
第四节 微循环力学的临床应用概述.....	352
第十二章 生物传质及其应用	361
第一节 跨血管壁水和小分子的传质.....	361
第二节 大分子跨血管壁的传质和动脉粥样硬化成因.....	367
第三节 肿瘤传质.....	377
第四节 恶性肿瘤传质的生理屏障.....	384
第十三章 药物动力学	391
第一节 药物动力学及其模型.....	391
第二节 房室模型及其在药动学中的应用.....	395
第三节 生理流动模型及非房室分析方法简介.....	407
第四节 给药方案的拟定和优化.....	414

第十四章 人体对振动的耐受性	421
第一节 人体的机械阻抗特性	421
第二节 人体振动模型	428
第三节 振动对人体的影响	435
第四节 振动病	441

第一章 绪 论

第一节 什么是生物力学、医用生物力学

人们熟知,力学是一门古老的学科,它是研究物体在外力作用下的运动和变形以及破损规律的科学.随着科学技术的发展,人们不断地向力学提出新的研究课题和新任务,并由此形成一系列新的分支学科.新兴学科的特点主要是与相关学科或相邻学科相结合,形成多学科相互渗透的边缘学科.生物力学便是这种由生物学和其他专门研究所需要而形成的一门新兴学科,它是力学与生物学、生理学、解剖学、医学等相结合的一门既属于力学学科、又属于生命学科的新兴学科.

生物力学的研究领域非常广泛,诸如动物体的游动、运动;植物体的营养水分的输运;人体组织与器官的功能、萌生、发育、破损、消亡等的机理;血液、体液、气体和水分的流动和扩散规律及其效应等等.这些研究领域,对于人类健康、人类社会的发展来说都有重要的意义.

医用生物力学是把生物力学的研究范围限定在病理、生理及临床诊断、治疗过程中遇到的各种与力学有密切关系的问题.诸如血液流变特性与疾病的关系、人工心脏瓣膜的研制和应用、心血管动力学参数的分析及其与疾病的关系、骨折愈合问题、人工脏器的研制等等.实际上,生物力学的研究一开始便是与临床应用密切联系的,它曾为人类的保健事业做出了重要贡献,今后也必将在广大医务工作者、生物医学工程工作者以及力学工作者的通力合作的条件下做出更大的贡献.

生物力学通常按传统力学的分类办法分为生物固体力学、生物流体力学、生物运动力学等.所谓生物固体力学,它包括骨力学、软组织力学,即骨骼、软骨、皮肤、血管、肌肉、韧带、系膜等都属于固体材料的力学问题;生物流体力学指的是研究血液、体液在血管内、生物体内的运动,气体在体内的流动;生物运动力学包括人体的跑、跳运动,游泳,振动响应以及动物的泳动、爬行、蠕动、飞翔等等性态的力学问题.人体作为一个空间系统,尚可研究其整体结构动力学问题.此外,尚有生物控制论、生物热力学等等.

生物力学的这种传统分类方法,对某些问题来说是难以明确分类的,所以有的又常把生物固体力学和生物流体力学统称为生物流变学(biorheology).我们知道,流变学就是研究物质变形和流动的力学,特点是物质的变形和时间有关,而不像虎克定义的理想弹性体那样,物体受力后,全部变形立刻达到最终位形,与时间无关.流变学所研究的物体在受力后的变形或运动都与时间有关,所以对这类问题,如何去建立一个切合实际的本构关系(即物质的力学特性与物质构造的关系)便是一个非常重要的问题.

生物流变学,显然就是研究生物物质的流变学问题.例如研究血液的流动,红细胞的变形,皮肤、肌肉的变形,淋巴液、关节液、体液、子宫颈粘液和其他分泌物的流变

特性, 软骨、骨骼的流变特性等等。生物流变学也难以包含生物固体力学和生物流体力学的全部精彩的生物力学内容。所以像“血液动力学”(hemodynamics)、“血液流变学”(hemorheology)、“骨力学”(mechanics of bone)等仍以独立的分支学科在迅速发展着, 并在医学的诊断与治疗上得到了广泛的重要应用。

从医学应用的角度和理论研究的科学分类来看, 生物力学可以分为以下三个主要分支学科: ①组织与器官力学(包括骨力学、软组织力学、肺力学、心脏力学、耳力学、子宫力学、口腔力学、颅脑力学等); ②血液动力学(包括血液流变学、动脉中的脉动流、心脏动力学和微循环力学等); ③生物热力学(包括生物传质传热理论、应用生物控制理论以及药物动力学等)。这样, 我们便脱离了传统的按物质形式(刚体、固体和流体)分类的方法, 而更适合于生物力学的特点。实际上, 我们在研究如心脏力学的时候, 不仅有心肌力学的问题, 也有心泵的力学特性问题以及心瓣流体力学的问题; 在研究耳力学问题的时候, 不仅涉及到淋巴液、气体这类流体, 也涉及到耳蜗、耳石这类固体。每一项临床医学所遇到的问题往往都是一个流体、固体、刚体相耦合的较复杂系统。固然, 我们可以在选取分析模型时采用较简便的形式, 但在要求不失其主要特征的情况下, 往往需要采用流体、固体耦合的分析计算模型, 因而传统分类方法常会带来这种困难。

第二节 医用生物力学在医学上的应用与发展概况

生物力学的发展从一开始便与临床医学紧密相关。在临床诊断与治疗过程中, 医生们不断地提出各式各样的有关力学的问题, 诸如人体的各类组织的特性, 各种器官的结构与功能, 血液、体液的成分与流动、交换规律以及与人体疾病、保健、修复等有关的众多力学问题。人们为了解决这些问题, 进而探索人体乃至生命的奥秘做了长久的努力, 并取得了许多重要的成果。

中国古代对人体运动、机体的营养、损伤诊断与治疗有许多成功、深刻的了解, 中国古代医药学是人类文明史中的瑰宝, 有的至今仍有重要应用价值。在公元前一千多年, 我国古代现存的最早的一部哲学巨著《周易》中, 便有有关人体力学的论述。如在艮卦第五十二中便有这样的警句:“艮其腓, 不拯其随, 其心不快。”这句话除了它的神秘的“占筮”含义之外, 明显地说, 如果抑制小腿的运动, 该运动时不运动, 便对身体不利。又如在大过卦第二十八中有“栋挠之凶, 不可以有辅也”。意思是说, 受力挠曲后的构件再继续加载就有危险; 这里的“栋”可以广泛地理解, 我们可以认为人体的长骨即所谓栋, 骨受力后的变形服从这个道理。以后千年的过程中, 深入研究的结果则很少记载。

公元前一百多年, 汉代司马迁著《史记》一书中有“宫动脾, 商动肺, 角动肝, 徵动心, 羽动肾”之说, 这说明中国在两千多年前对不同频率的声音对人体五脏生理功能的影响就有所了解。遗憾的是, 长期以来未能深入研究, 使之上升为精确的量化科学。

人体各类组织是人们首先探索的对象, 皮肤、骨骼、肌肉等的力学特性的研究, 17世纪, 意大利科学家Borelli (1608—1679) 写出了《论动物运动》一书, 成功地论述了肌肉的运动、心脏的运动和肠的蠕动等, 到19世纪这些研究即已达到很高的水平。1847年

G. Wertheim根据临床手术治疗的需要研究了静脉、肌腱、坐骨神经、骨、血管等人体组织的力学特性，完成了一系列的离体的拉伸、压缩试验，给出了不少有重要价值的结果。Wertheim (1847) 首先给出了一个骨的本构方程

$$\varepsilon^2 = A\sigma^2 + B\sigma$$

此处 ε 是应变, σ 是相应的应力 (kg/mm^2), A 、 B 为材料常数。之后骨力学的研究便逐步地广泛起来。但是, 更早的生物力学研究工作要算17世纪Harvey(1628)对血液循环的发现。1615年, Harvey根据动脉中的血液与静脉中的血液不同的特点, 推理形成了血液循环的看法。之后Malpighi (1628—1694) 于1661年解剖了青蛙的肺, 首次在显微镜下观察到微循环的存在, 从而证实了Harvey的推论。Hales (1667—1761) 测量了马的血压, 并探讨了血压与失血的关系。他做了简单的心室处于舒张压状态的蜡质模型, 通过测量这个蜡质模型的体积来估算心输血量, 从而据此进一步估计了心肌力和主动脉的膨胀特性, 并指出, 主动脉的弹性效应使得心脏周期性收缩所射出的血液间歇流转化为血管中的较平稳流。Hales同时引进了血液流动的外周阻力概念, 认为外周阻力主要来自微血管系统, 并认为热水和酒有扩张血管的作用。

18世纪是力学高速发展的时期, 在这个时期, 一些对事物的唯象学研究开始引进定量的分析, 这一时期的一大批数学家、物理学家做出了重要的贡献。如牛顿(1642—1727)、拉格朗日 (1736—1813)、欧拉 (1767—1783)、伯努利 (1700—1782)、托马斯·杨 (1773—1829) 等等。血液流动的第一篇数学分析论文是1775年欧拉提出的, 他成功地描述了弹性管中的无粘性液体的一维流动问题, 托马斯·杨继欧拉之后导出了血脉搏波的传播速度近似公式。

医用生物力学在19世纪有重要进展, Von Helmholtz (1821—1894) 第一次研究了视觉和听觉系统的工作机理, 他发明了眼底镜用来观察视网膜, 又发明了Helmholtz共振仪; 他第一次确定了神经脉冲的传播速度为30m/s。Korteweg (1848—1941) 和 Lamb (1849—1934) 分别推导了脉搏波波动方程, 对血管中波的传播理论进行了研究。

此外, 继Wertheim之后, Wundt (1858) 和Volkman (1859) 都做过生物材料的力学实验, 取得了一系列有意义的的数据, Roax (1895) 研究了人骨的形状、构造, 提出了松质骨结构符合最优结构原理的见解, 并由此给出了著名的骨结构的功能适应性原则, 即骨骼的进化趋向总是以用最轻的重量承受最大的外部作用的方式发展。

Wolff (1884) 提出了一个重要的假说, 通常称沃尔夫定律 (Wolff's law)。Wolff说:“骨在需要的地方就生长, 在不需要的地方就吸收。”意思是说, 骨的生长、吸收、重建和消亡与骨的受力状态有关。这一重要的论断, 指出了力学与生命的关系, Wolff以后的一百多年以来, 人们一直为这一论断寻求理论的与实验的论证, 近年来已取得了一些进展。

Frank (1865—1944) 研究了循环系统流体动力学理论, 他根据血压梯度变化的记录给出了血液流量与时间的关系的计算方法, 这种办法沿用至今。M. Poiseuille (1779—1869) 做了一系列的实验工作与理论工作, 他的关于粘性流体定常流公式在血液动力学中有重要的应用。

Starling (1866—1926) 提出了物质通过膜的模型, 建立了传质定律, 解释了人体

内水分平衡的原理,给出了从毛细血管动脉端漏失的水量等于静脉端吸收的水量的假说,虽然以后的实验从未证明他的论断,但他所建立的Starling定律对以后生物传质与药物动力学的发展仍是有意义的。

本世纪以来医用生物力学得到了重大发展,从60年代以后,生物力学作为生命科学的重要分支吸收了各国的大量的科学家投身于生物力学事业。作为独立的学科建设,冯元桢做出了重要的贡献,他在大量的实验基础上,从严格的数学、物理学出发给出了一般情况软组织的本构方程,建立了肺的数学、力学模型,奠定了肺力学、呼吸力学基础,他对生物组织的生长与应力的关系的模型(称为冯元桢假说)对生物力学的发展将产生重要影响,同时他在微循环力学、肌肉力学、心脏力学、血液动力学等方面都有重要贡献。他的一组《生物力学》多卷集巨著是近代生物力学的代表作。

应当指出的是Krogh (1874—1949) 和Hill (1886—1977) 这两位荣获诺贝尔奖金的科学家的贡献。Krogh (1929) 研究了微血管的解剖学与生物学问题,对人肺的血液流动、微循环现象进行了观测,对微循环的研究奠定了基础。之后由冯元桢和他的学生们等建立了系统的数学理论,并得到了实验的支持。Hill (1938) 研究了肌肉力学,他做了青蛙肌肉受电刺激后其长度随时间而受缩的实验,给出了一个肌肉长度随时间的变化规律和肌力与速度之间的非线性关系式。60年代以后,冯元桢和他的学生们研究了各种不同类型的肌肉,得到了一系列新结果。

血液动力学是生物力学的一个重要分支,它的发展也很快,这是在 Womersley 和 McDonald 所奠定的系统理论基础上前发展的。近 30 年国际上开展了规模巨大的研究工作,美国、日本、俄罗斯、西欧等国家都设有专门的研究机构。在心血管系统流体力学方面、细胞力学方面、生物材料和人工脏器等方面取得了重大进展。生物力学教育方面也在引起重视,除冯元桢的经典著作外,McDonald的《动脉中的血液流》(柳兆荣、陶明德译)、Milnor的《血液动力学》、冈小天的《生物流变学》(吴云鹏、陶祖莱译)、Brankov的《生物力学基础》(1981)、毛昭宪 (Mow V.C.) 的《生物固体力学》(1988) 和Evans E.G.的《生物固体力学》(1973)等等都是优秀教科书和参考书,且均以临床应用为背景。

由于心脏病患者中瓣膜性心脏病占很大的比例,所以人们一直在重视心脏瓣膜流体力学及人工瓣膜的研究。1960年世界上第一个成功的人工心脏瓣膜植入人体,以后的30年得到了很大的发展,挽救了百万计的心脏病患者。近年来,国际上对人工心脏瓣膜流体力学理论与实验研究十分活跃,现有受到重视的人工心脏机械瓣与生物材料瓣两大类,机械瓣与生物瓣各有优缺点。

与此同时,医用生物力学的其他领域也有了很大的发展。如生物传质理论、运动生物力学及与之相关的生物材料科学以及生物医学工程学等等都相应地发展起来。

对于生物系统来说,物质在生物体内的输运过程实际上是物质分子的位移运动,宏观表现为流动、扩散或化学反应等形式。细胞的生命运动就是通过细胞膜不断地进行物质交换或物质输运。E.M.Shell (1969) 给出了一个一般形式的输运方程, Kreuzer 等人测量了人体红细胞膜对于葡萄糖的输运情况,给出了有价值的数值。Middleman, Bird, Lightfoot 等都对生物传质问题做了多方面的研究,近年来在生物力学领域内做出贡献的外国科学家还有Chien (钱照)、Skalak、Katz、Carter、Cowin、L.Y.Woo

(胡流源)、(毛昭宪)、Fukada、Hodgkin等等。

中国生物力学的研究始于70年代末,1978年国家制定10年科学发展规划期间,中国力学学会成立了生物力学专业组,从此开始了全国性的生物力学学术活动。之后,1979年冯元桢先生回国讲学培养了第一批生物力学工作者。从此,以前的根据临床需要或保健、安全方面所做的一些研究便开始逐步地提高了水平,并组成了一支有一定规模的研究队伍。中国生物力学的发展一开始便是与医学工作者结合起来的,同时具有与中国传统医学、中西医结合的临床问题相结合的特点。经过十多年的努力,中国学者在生物力学各方面做出了不少研究成果。例如,在心瓣流体动力学、心血管系统动力学参数的分析与检测及其临床应用,动脉血流理论,脉搏波的分析及临床应用等方面的研究工作;在血液、体液流变特性的研究及其应用方面的研究工作;对生物传质及微循环理论,以及药物动力学理论及应用方面的研究工作;对运动生物力学的研究,人体振动耐受性的研究;骨与软组织的静态及动态本构理论宏观及微观的研究;颅脑损伤与脊柱力学的研究;步态、骨伤及临床应用方面的研究等等,都是很有成果的。中国生物力学的研究引起了国际上的重视。

第三节 医用生物力学展望

综上所述,中国生物力学已有一支数量可观的、有一定研究工作经验的、有生气的研究队伍,如何进一步有组织地发挥我国传统医学、中西医结合的特点,坚实地、科学地做好已开展起来的工作,是我国医学界、生物力学界的重要任务。以下从医用的角度简单地对各分支的主要研究课题、发展战略的设想分述如下:

一、组织与器官力学

肌肉与骨骼力学问题是生物组织力学的重要内容,特别是骨力学问题,它的研究工作虽然开始很早,但到目前仍有许多重要问题尚待解决。近年来,在各种条件下常见类型骨的宏观力学性质及其本构关系已有许多研究成果。但是对骨在受力后的变形机理,及其深层次的物理基础和复杂的物理化学耦合效应仍了解甚少。与骨密切相关的关节、韧带、肌腱等均有不少力学问题有待研究,如股关节、膝关节等关节的人工置换及生物材料等有关问题,关节炎病因、诊断和治疗方法等。

目前的研究工作多为在准静态情况下进行的实验与量测工作。但骨骼及其他组织的损伤往往是在碰撞、冲击等快速加载情况下产生的,而在动态下的骨和软组织的断裂、损伤积累、疲劳破坏等问题的研究工作还很少。当前的一个主攻方向是用多学科的方法研究生物组织在重建过程中如何依赖环境的机理。同时了解组织中的损伤积累和力学环境跟重建、治疗过程之间的关系,有必要开展对人体长期从事某种重复性劳动的耐受性限度的研究,从而提供必要的资料,为防治腰背痛、关节病、振动病等常见的职业病做出贡献。

运用力学原理,来确定韧带的功能和关节在加载条件下力的传递的研究已取得很大进展,这对改进膝韧带受伤的诊断以及诊断量化设备起了很好的作用。但对关节的几

何形态及相关组成成分的描述，本构方程的建立和对脊柱类承重关节的动态力学分析还很不够。

骨折愈合的研究虽是一项古老的课题，目前仍需研究骨折固定装置的合理设计、加快愈合的理论与实践。这项具有广泛应用价值的工作，似应与“生长与应力的关系”这一重大研究课题结合进行。

高速撞击对人体的损伤问题的研究是一项重要研究领域，目的在于了解损伤机理、制定耐受性极限标准。同时开展对颅脑损伤引起的神经系统疾患、心理缺陷的生物力学研究，对组织的挫伤变形和神经轴突损伤之间的关系的的研究，对在高应变下软组织及骨的损伤机理的研究等都属于研究工作的重点课题。

在组织与器官力学中，各种器官的力学问题研究成果甚少。感觉系统的力学特性和各器官的力学工作原理尚有不少问题有待了解。目前，研究较多的是眼和耳，但无论在眼力学中，还是在耳力学中都有未解决的问题。目前对这两个感觉系统的组成和有限的宏观力学描述已由解剖生理学家、生物物理学家给出了科学描述，而摆在生物力学工作者面前的任务是给出器官的细观力学模型和合理的力学分析模型，给出它的工作状态和受干扰、受损伤状态的有临床诊断与治疗价值的的数据。为预防、治疗、人工器官置换提供科学依据。

许多器官如肺、肾、肝、心脏等都是由软组织构成的。对这类器官的组成材料的研究目的在于建立在普通状态下和异常状态下的本构关系模型，这里的力学分析必不可少。此外，如肺力学、心脏力学等的研究都具有重要的临床应用意义。肺力学和呼吸力学的研究对肺水肿、矽肺以及肺心病等都有重要意义。心脏力学与血液动力学、心瓣流体力学、人工瓣膜等有着密切关系，开展器官力学研究与相关问题相辅相成，不可缺少。

二、血液动力学与心瓣力学

如前所述，血液动力学问题的研究已有两个世纪以上的历史。由于它与临床应用密切结合，近30年来已有下列一些研究成果，如：对动脉中脉动流的分析模型的建立已有多线性与非线性理论，对动脉中脉动流量与压力之间的关系式已有不少；脉搏波的传播理论与临床应用已有不少成效；对血管阻抗的研究成果；对心室与血管的耦合作用的研究。但是，对血液动力学仍有许多重要课题急需开展研究工作，如：心室与血管的相互作用，包括心室后负荷的模型以及对心室功能的影响；脉搏波的传播规律与新的检测技术的研究；整体循环理论与微循环理论模型的建立及临床应用的研究等等。

如所周知，早期首先采用过同种主动脉瓣、同种硬脑膜瓣、自体阔筋膜瓣等。现在则主要采用异种生物瓣，其中以猪主动脉瓣和牛心包瓣应用最为广泛。生物瓣的优点是中心流型，故不需抗凝；缺点是容易钙化，耐久性差。当前的研究方向应是研究缓钙化生物瓣。人工机械瓣的优点是耐久性好，但缺点是因应力对血液的成分的破坏而发生溶血现象，应力对内皮细胞的损伤，从而形成血栓，等等。对机械瓣的研究重点应放在研究具有通过瓣膜的流场尽可能均匀、对称，即接近中心流，且有关闭优良性能的新型瓣，并同时研究解决终身抗凝治疗的新途径。

三、血液流变学

近十多年以来，国内外对生物流变学基本理论、检测方法及其临床应用有很大的发展。不少医学研究部门、医学院校都设有专门研究机构。目前的趋势正向血液微观组织特性，细胞膜、毛细管分枝、微血管网络及各种耦合现象特别是临床应用等方面发展。我国学者在血液流变学的临床应用方面已做出了不少贡献。特别是对糖尿病、心肌梗塞、高血压、中风等疾病的血液粘度做了广泛深入的研究。十多年前即已用测定血液粘度来诊断病情。

临床血液流变学还开展了与中医中药相结合的办法进行探索，具有悠久历史的中药活血化瘀的治疗原则引起了很好的效果。有的单位对血液流变学的研究已收到了临床应用的极好效果，像对治疗疑难病过程中所取得的难以预料的效果，对早期诊断脑血栓的形成等等，都取得了进展。

今后血液流变学的研究任务仍然是很重的。首先仍是要在基础理论与临床应用问题方面，要从宏观到微观、分枝到网络结合进行，同时改善检测仪器的精度及采集数据的科学性与完整性，给出细胞水平和分子水平的流变学特异性指标，从而可望血液流变学将对临床诊断与治疗做出重大贡献。

四、生物传质理论的临床应用

疾病的药物治疗是通过药物溶于血液中之后，血液中的大分子跨过血管壁或穿透细胞膜到内皮细胞中，靠其囊泡的“胞饮作用”而传输。定量地了解这些传质过程，进而建立生物传质的合理的数学模型与检测技术是当前的主要任务之一。其中深入了解分子跨血管壁的传质浓度、溶质对流速度以及扩散系数等力学特性；建立新的血液在各类血管中流动的计算方法；开展血液流动对内皮细胞作用的力学效应等等。这些都将对生理疾病现象的分析、最佳用药方案的确定、药物控释系统的设计及动脉硬化与肿瘤的早期诊断与治疗起重要作用。

五、职业病患的生物力学问题

人一机—环境系统的长期相互作用，将可能引起各种职业病。除其他物理、化学的因素外，由于力学因素常见的是振动对人体的影响。如所周知，振动对人体的影响主要取决于振动的振幅和频率，人体的感觉或即人体对振动响应的敏感性则还与其过去对振动的感受经验有关。个体的差异有时是很突出的，声波、微弱振荡首先被感觉器官所接受。对人体造成伤害或不适影响的是强烈振动。一般地说，工作条件的频率、振幅及加速度超过某一范围时，则将对人体造成损害。

人体各器官、各组织对振动频率、振幅的敏感不同，例如眼球会在某种振动环境中发生视觉分辨率下降；颅脑两侧的前庭器官在某种振动环境中一定时间后就会发生内分泌系统、循环系统、消化系统的功能性紊乱，植物神经系统功能紊乱等等。19世纪，国外对振动综合征、白指病等已有一些研究成果。

近年来，由于宇航事业的发展，大力开展了人体耐受性、振动反应敏感器官的研究。我国对这一领域的研究工作较少。根据今后工业、宇航、运输等事业的发展，振动生物力学问题已是急待开拓研究提供成果的领域。这些问题有：①工业振动分析及人体感受振动的特征，包括振动频率范围、振幅大小的范围、振动的性质（谐和振动、随机振动等）；②人体组织与器官对振动的主要感受元件的生理、病理特征，不同振动环境中，特定敏感区的确定方法与最低、最高敏感值；③振动综合征的发生与治疗，振动对神经系统造成的功能紊乱的控制与紊乱机理的研究，振动引起的体温变化、淋巴液流动的变化机理；④人体动力响应特性的研究，包括站立势、坐势、卧势的响应曲线，局部共振特性，以及非周期性外力象冲击、碰撞所引起的应力波的传播和人体的耐受性以及安全防护的措施方案的研究，等等。此外，应当注意到振动效应的另一方面，即适当的振动频率与振幅可能对人体产生有益的效果，不同目的的振动治疗仪器的研制也是有意义的。

我国医用生物力学研究的总方向应该是：进一步把人体各基本层次的认识同各类器官乃至整个机体的反应联系起来，将理论研究同临床应用联系起来，相关学科相互结合起来，从而形成一个对人体的微观到宏观的整体认识，提出最佳医疗和预防方案，造福于社会。

（杨桂通）

第二章 生物力学基础知识

医用生物力学是建立在解剖学、生理学和力学的基础上的。这里所述仅限于它的力学基础，包括：运动和力、变形体力学、流体力学、流变学和生物传质等5个部分。重点在于物理概念的阐述和应用，而不追求其完整性和严密性。

第一节 运动和力

“生命在于运动”，运动就离不开力的作用，就要遵循力学的基本规律。对于生命现象所涉及的以位移为特征的机械运动来说，即使是细胞和亚细胞组织，其尺度也尚未超出牛顿力学有效的范围。故生物力学，尤其是医用生物力学，目前仍然属于牛顿力学的范畴。

任何科学理论都是以一些公约性的基本概念为基础而建立起来的。牛顿力学的理论体系是建立在时间（绝对时间， t ）、空间（欧几里德空间）和质量（ m ，表征物质的多少）这三个公约性的基本概念之上的。

为了定量地描述运动（机械运动），引进笛卡尔坐标系 $\{x, y, z\}$ 。设质量为 m 的质点，在时刻 t 的位置为 (x, y, z) ，在 $(t+dt)$ 时刻（ dt 为无限小量）的位置为 $(x+dx, y+dy, z+dz)$ ，则在此时间间隔内质点移动的距离为 ds ：

$$ds^2 = (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad (2.1)$$

而在此时间间隔内质点的位移则为 ds ， $|ds| = ds$ ，它不仅有大，而且有方向，从点 (x, y, z) 指向点 $(x+dx, y+dy, z+dz)$ 。这种物理量称为向量（又称矢量），而诸如距离 ds 之类只有大小，不计方向的量，则称之为标量。

由此可得质点在 t 时刻的速度为 v ：

$$v = ds/dt \quad (2.2)$$

速度 v 随时间的变化率则为加速度 a ：

$$a = dv/dt = d^2s/dt^2 \quad (2.3)$$

在牛顿力学体系里，力的概念是通过牛顿定律引进的。设力为 F ，则牛顿第二定律告诉我们：

$$F = ma = m(dv/dt) \quad (2.4)$$

此即力的定义。据此，若 $F=0$ ，则 v 不变（作匀速直线运动），这就是牛顿第一定律。若有两个质点 I 和 J 发生相互作用，设质点 J 作用于质点 I 的力为 F_{IJ} ，而质点 I 作用于质点 J 的力为 F_{JI} ，则牛顿第三定律告诉我们：

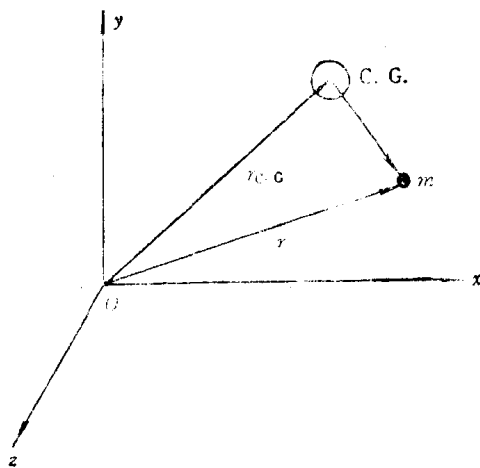


图 2-1 笛卡尔坐标，位置向量、质心 (C.G.)