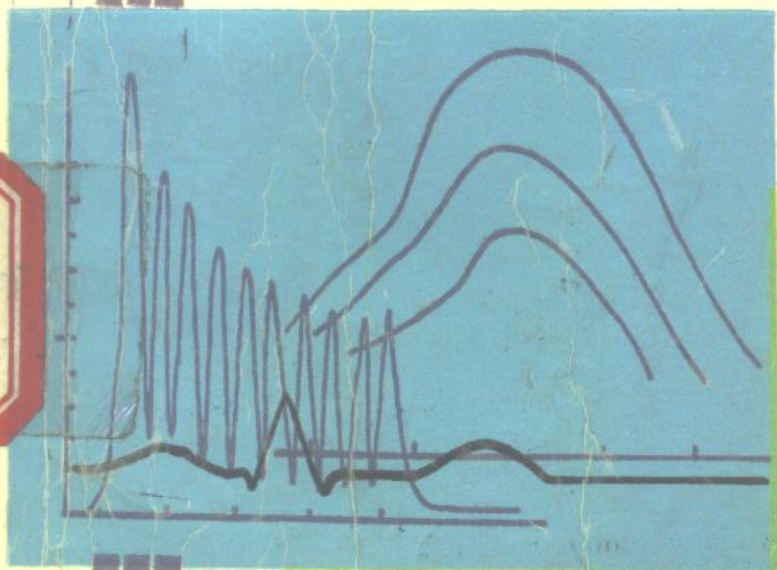


生物力学的 原理与应用

刁颖敏 编著



同济大学出版社

生物力学的原理与应用

刁颖敏 编著

同济大学出版社

2611/68

内 容 简 介

本书较系统、简洁地阐述了有关生物力学的基本原理和基本方法,并介绍了一些在解释生理、病理现象以及结合临床实践方面的应用,内容涉及生物固体力学、生物流体力学和生物流变学诸方面,并在每章后面附有习题。

本书可作为大专院校力学、生物医学工程等专业的教学用书,也可供从事生物力学研究的工程技术人员和医务工作者参考。

责任编辑 卞玉清
封面设计 王肖生

生物力学的原理与应用

刁颖敏 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 10.375 字数 249 千字

1991 年 1 月第 1 版 1991 年 11 月第 1 次印刷

印数 1—1200 定价: 2.35 元

ISBN 7-5608-0651-1/Q·1

前 言

生物力学作为一门新兴的边缘学科近二十年来在力学工作者和医学工作者的密切合作下有了较大的发展,并且正吸引着越来越多的科学工作者投身到这一领域中来。生物力学如同力学一样,涉及面广,内容丰富,根据不同的研究对象可以形成不同的学科门类进行教学和研究,诸如某些教程:“生物流体力学”、“生物固体力学”、“生物流变学”、“流体、热和质量的传递过程”、“运动生物力学”等等,甚至还可以分出更为细微的教程,如“循环系统力学”、“心血管流体力学”、“动脉中的血液流”、“心脏力学”、“骨骼与关节”等等。

根据教育工作的特点,适应当前改革形势发展的需要,努力培养学生具有较坚实的理论基础,并且能不断拓宽专业面,同时也考虑到进行生物力学研究的本身就不可避免地会遇到生物流体力学、生物固体力学和生物流变学等方面的相互交叉和渗透,因此,为了使学生对生物力学的概貌有所了解,也使有志于从事生物力学事业的学生有更大的适应性,克服专业面过窄的弊病,作者感到十分需要一本更能适合于这种要求的教材。作者曾编写了一本讲义,近几年在同济大学工程力学专业高年级学生的生物力学课程教学中使用,本书就是在原讲义的基础上加工、整理而成的。作为一本教学用书,作者考虑在内容上尽可能做到系统、全面,对基本原理的论述尽可能确切、明了,对有关的结论和公式尽可能进行严密的逻辑

辑推理和严格的数学推导。此外，遵从理论必须联系实际的原则，本书力求结合生理、病理现象以及临床医学问题来讲解这些基本理论和公式的实际应用。

本书的章节基本上是按照人体几个主要部分的力学问题来安排的。考虑到理工科学生缺乏基本的解剖学、生理学、医学生物学等方面的知识，因此在每一章的开始部分都安排了有关的生物医学知识以及力学问题的医学背景的简单介绍。同时，作者还编写了一些思考题和练习题，附在每一章的后面，帮助学生加深对课堂讲授的生物力学基本原理的理解和掌握进行生物力学研究的基本方法。由于教学时数有限，本书内容不宜过分繁杂，因而每一章仅能着重介绍典型的力学问题、物理模型、数学模型以及基本解，目的在于使学生掌握最基本的原理和方法，为今后从事专门研究打下基础。

本书除采用国际单位制(SI)外，在引用国外有关资料时也出现有CGS制和工程制，请读者阅读时注意。

在本书的编写过程中，朱立明和钱仲范同志提出了许多宝贵意见，并参加了本书的修改及校对工作，在此谨向他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中会有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

作 者

1990年1月

目 录

第一章 绪 论

§1-1 生物医学工程学与生物力学	(1)
§1-2 生物力学的研究对象	(6)
§1-3 生物力学的研究方法	(9)
练习题	(11)

第二章 血液及其流动特征

§2-1 血液的成分	(12)
§2-2 血液的粘性	(14)
一、牛顿流体和非牛顿流体	(14)
二、表观粘度、微分粘度和相对粘度	(16)
三、血液的粘度	(18)
§2-3 血液的本构方程	(21)
一、非牛顿流体的本构方程	(21)
二、血液的本构方程	(25)
§2-4 血液在圆管中的层流	(28)
一、Stokes 关系式	(29)
二、圆管中牛顿流体的层流	(29)
三、圆管中血液的层流流动	(31)
§2-5 血液在细管中的流动效应	(38)
一、Fåhræus-Lindqvist 效应	(38)

二、Fåhræus 效应	(39)
三、趋轴效应及血浆层的影响	(43)
四、壁面滑移效应	(47)
§2-6 粘度计	(48)
一、毛细管粘度计	(49)
二、旋转圆筒粘度计	(51)
三、锥板粘度计	(52)
练习题	∴ (53)

第三章 血管的力学性质

§3-1 血管的结构与功能	(55)
§3-2 弹性纤维、胶原纤维和平滑肌的力学性质	(58)
§3-3 动脉的力学特征	(60)
一、应力-应变关系	(61)
二、应力松弛	(66)
三、蠕变	(70)
§3-4 血管粘弹性的准线性理论——滞后、应力松弛和蠕变的统一性	(71)
一、线性粘弹性理论	(71)
二、软组织粘弹性的准线性理论	(79)
练习题	(88)

第四章 体循环系统力学

§4-1 血液循环系统介绍	(89)
§4-2 脉动流的基本概念	(94)
一、循环系统中的定常流和脉动流——Womersley 数 α	(94)

二、层流和湍流——Reynolds 数	(95)
三、非定常周期性流动——Strouhal 数	(99)
四、入口段长度	(101)
五、脉动流的阻抗	(102)
§4-3 动脉系统的风箱模型	(106)
一、风箱模型	(106)
二、风箱模型的方程及其基本解	(108)
§4-4 动脉中的血液流	(111)
一、动脉中波的传播及波速方程	(111)
二、波的反射和反射系数	(118)
三、脉动流的基本方程及其解	(125)
§4-5 静脉中的血液流	(139)
一、静脉血管的稳定性分析	(141)
二、可坍陷管压力与截面积的关系	(145)
三、可坍陷管内的一维定常流动	(148)
§4-6 微循环力学	(151)
一、毛细血管中的栓子流模型	(152)
二、考虑管壁渗透时毛细血管内的流动	(155)
§4-7 血管系的最优化原理	(160)
一、目标泛函	(160)
二、血管分枝的优化结构	(162)
三、与Roux经验法则的比较	(165)
四、毛细血管系结构的优化	(167)
练习题	(169)

第五章 肌肉力学

§5-1 肌肉的种类及力学特点	(172)
------------------------------	--------------

§5-2 骨骼肌	(175)
一、骨骼肌的结构及收缩机理.....	(175)
二、Hill 方程.....	(177)
三、线性记忆理论.....	(181)
四、三元素模型.....	(183)
§5-3 心肌	(189)
一、松弛状态下的心肌力学.....	(190)
二、激活状态下的心肌力学.....	(195)
§5-4 平滑肌	(199)
一、自发收缩.....	(200)
二、非激活态的应力特征.....	(202)
练习题	(206)

第六章 骨骼力学

§6-1 骨骼系统的结构及其特点	(207)
§6-2 骨材料的基本力学性能参数及其实验	(210)
一、骨材料试样的选取.....	(213)
二、骨材料的主要力学性能参数及其实验.....	(214)
§6-3 软骨	(223)
一、关节软骨的粘弹性.....	(224)
二、关节软骨的润滑性.....	(226)
§6-4 骨骼系统	(230)
一、颅骨损伤的研究.....	(232)
二、脊柱的力学分析.....	(233)
三、足骨的力学研究.....	(237)
练习题	(239)

第七章 心脏力学

§7-1 心脏的构造	(242)
§7-2 心脏的活动过程及有关的力学参数	(244)
§7-3 心肌活动的控制系统	(247)
§7-4 心脏力学的基本定律	(251)
一、Laplace 定律	(252)
二、Starling 心脏定律	(254)
§7-5 心脏瓣膜有关的力学问题	(256)
一、心脏瓣膜的关闭机理	(258)
二、主动脉瓣及主动脉窦涡模型	(262)
三、二尖瓣及左心室模型	(266)
四、人工心脏瓣膜	(268)
练习题	(273)

第八章 呼吸系统力学

§8-1 呼吸系统的构成及其功能	(275)
§8-2 呼吸道中的力学问题	(277)
一、呼吸道中的流动特征	(277)
二、气道中的流量、压力和能量耗散率	(279)
三、呼吸道中气体的迁移和扩散	(287)
§8-3 肺泡的几何形态及肺泡中的气体交换	(297)
§8-4 肺微循环	(301)
一、肺微循环系统的特征及片流模型	(301)
二、肺泡片中血液流动的基本方程	(303)
三、一维片流理论	(309)

四、肺泡间膜内的流动.....	(315)
练习题	(317)

第一章 绪 论

§1-1 生物医学工程学与生物力学

生物医学工程学(Biomedical Engineering, 简称 BME)是40年代萌芽、50年代开始发展起来的一门新兴边缘学科,它是生命科学与工程学相结合的产物。由于它所涉及的面是如此之广,至今还难以明确其所包含的范围。通常认为,凡是与生命科学有关的工程技术都属于生物工程(Bioengineering),而其中与医学有关的部分称之为 BME。因此,生物医学工程学是综合运用现代科学和工程技术的理论和方法,深入研究人体的结构、功能及其相互关系,力图解决医学中出现的有关问题的一门边缘学科。与自然科学一样,生物医学工程也包括了基础研究和应用技术两大部分。根据目前国内外发展的情况来看,主要有以下几个大的方面:

基础研究:

- 生物材料学;
- 生物力学;
- 生物质量输运和能量传递;
- 生物信息和生物控制论。

应用技术:

- 医用电子学;
- 电子计算机在医学中的应用;

医用换能器；

人工脏器；

新技术(激光、红外线、超声波等等)的应用；

仿生技术。

20 多年来的事实清楚地表明，越来越多的工程技术已经或正在渗透到生物医学领域中来，并且最终将成为影响医学发展的重要因素，它使医学的面貌焕然一新。

生物力学 (Biomechanics) 与生物医学工程的关系就像力学与其他自然科学的关系一样，它是生物医学工程学的理论基础，它也是生物医学工程应用技术的基础。因为没有生物力学，则有些生物学的现象就不可解释，有些生物学的问题就难以解决，就像没有空气动力学很难设计制造出一架好的飞机一样。对于一架飞机，力学可以帮助我们设计它的结构，预示它的性能；对于一个器官，生物力学则帮助我们了解其正常的功能，预示其变化可能导致的影响以及指出人为改进的方法及可能性。正是由于生物力学的发展，对许多医学及生理学上知其然而不知其所以然的现象有了较深刻的认识。因而它已成为诊断学、外科学、修复术等等的基础之一。

生物力学作为一门独立的学科是近 20 年来的事，但是研究生命现象的力学规律却源远流长。从自然科学发展的历史过程中不难发现，还在17世纪之前被认为没有真正的“科学”的时代，学科之间没有明显的界限，不仅力学与古老的天文学、数学融为一体，而且研究工作渗透在各个领域，包括医学、生物学领域。在17世纪以后，出现了科学的黎明，古典物理学分为力学、声学、光学、热学和电学五大分支，而且每一分支学科又不断发展、完善。即使这样，仍有许多天文学家、物理学

家、数学家、力学家对生命的力学问题作出了卓越的贡献；同时也有许多生理学家和著名的医生在他们亲身实践过程中为发展生物力学建立了功勋。生物力学就是在这两方面科学家的共同努力下逐渐发展形成一门独立学科的。下面我们不妨举一些杰出的代表人物，以帮助**我们了解**生物力学的产生和发展是科学历史发展之必然。

Galilei Galileo (1564—1642) 是一位著名的物理学家，但在他成为物理学家之前是一个医科学学校的学生。他发现了摆长与周期的定量关系，并且用与心搏合拍的摆长来表达心率。在1609年他发明了第一台近代显微镜。

Leonard Euler (1707—1783) 是瑞士杰出的数学家，也为流体力学方程组的建立作出了贡献。他于1775年的论文中给出了不可压缩理想流体在弹性管中的一维流动方程组，从而论述了波在动脉中的传播，这是有关血液流动的第一篇数学分析论文。

Von Helmholtz (1821—1894)，他被誉为“生物工程之父”。他曾经是一位生理学、病理学和解剖学教授，直到1871年50岁时才任柏林大学的物理学教授。他的贡献遍及光学、声学、热力学、电动力学、生理学和医学。他的涡量守恒定律是流体力学的基础之一；他发现了眼的聚焦机理，并继 Thomas Young 之后系统地阐述了彩色视觉的三色理论，发明了晶状体镜和眼底镜来观察眼球内晶体和视网膜的变化；他研究了听觉机理，并发明了Helmholtz共振仪；他的著作《声调的感受》一书至今广为流传；他首次确定了神经脉冲的传播速度为30米/秒；他还指出肌肉收缩所释放的热是动物体内热能的重要来源。

Van der Pol (1889—1959)是一位著名的数学家,他于1929年用非线性振荡器来模拟心脏,并用四个 Van der Pol 振荡器组成的模拟装置,得到了逼真的心电图。

此外还有意大利数学家和天文学家Borelli(1608—1679)“论动物的运动”、流体力学家 Korteweg (1848—1941) 和 Lamb (1849—1934) 对弹性血管中理想流体波的传播分析、Frank(1835—1944)发展的弹性腔理论等都是自然科学家对生物力学所作出的贡献。

下面再列举几个生理学家和医生由于研究生命科学的成果而在物理学和力学界享有崇高的声誉。

William Harvey (1578—1658) 是一位英国医生,他曾经跟 Galileo 学习过。当时还没有发现毛细血管,但他弄清血液只能朝一个方向流动,并利用 Galileo 的心率测量方法计算出每小时心脏搏出血液为540磅,按照质量守恒法则和流体连续性原理,他用逻辑推理的方法得出血液循环存在的结论。

Stephen Hales (1677—1761),他测量了马的血压,并通过制作模型估算出心输出量以及心肌的力量。他又测量了主动脉的膨胀特性,以此解释了由于动脉的弹性使心泵输出的间歇流转变为血管中的平稳流动,其效果就类似于救火车的空气室可以使喷射枪连续喷射一样。此外他还引进了外周阻力概念,并指出该阻力主要来自微血管。他还进一步提出,热水和白兰地酒具有扩张血管的功效。

Thomas Young (1773—1829),他是英国伦敦的一位医生。他对血液的粘性阻力及红血球直径等作出了较准确的估计,于1808年发表了《论血液运动》,给出了理想流体在弹性管内波的传播的速度公式。然而他在物理学方面又有许多重

要贡献,他创造了光的波动理论;建立了视觉理论;确立了声带发声的弹性力学理论,因而提出了以他名字命名的弹性模量概念,因为他的这些成就,常有人称他为英国的物理学家。

Jean Poiseuille (1799—1869) 是法国的医生。当他还是医科学校的学生时就发明了用水银计来测量狗主动脉的血压。他对血管中的血液流动作了大量的测量和研究,同时精确测量了水、酒精等普通液体在玻璃管中的层流流动。于1842年发表了著名的 Poiseuille 定律:流量与压降、管径和管长的关系,它成为流体力学的基本定律之一,并用以解释了血液循环中的许多问题,他本人也因此被称为流体力学家。

此外 Marcello Malpighi (1628—1694) 用显微镜观察到毛细血管的存在,Adolf Fick(1829—1901)的物质扩散定律, August Krogh (1874—1949) 对微循环的贡献, Henry Starling (1866—1926)关于物质透过膜的输运定律, Vivian Hill (1886—1977) 对肌肉力学的研究等都为生物力学的发展奠定了基础。

最后我们还要着重提及的是美国国家工程科学院院士冯元桢(Y. C. Fung)教授,他原来是学习航空工程的,在美国加利福尼亚理工学院以优异成绩获得博士学位。此后在美国从事了18年航空工程方面的工作。在60年代中期,他完全转向了生物工程和生物力学方面的研究。由于他在力学、数学和工程技术方面具有很深的造诣,又攻读了医学,使得他在BME方面不断有新的建树,他所发表的论文达160篇之多,成为该学术界享有盛名的学者,曾荣任美国生物医学工程学会的主席。生物软组织的力学研究、肺泡片中的血液流动等等都是他在这一领域中所取得的卓越成就。

尽管我们的前人已经做了许多开创性的工作,不少学者还在奋力开拓,然而生物力学这一领域仍被喻为一块正待开垦的处女地,只要勤于耕耘,其前景就像冯元桢教授所描绘的那样:犹如春天的原野,一望无际盛开的野花,要研究的课题就像随手采摘春花一样,处处都有美好迷人的前景。

§1-2 生物力学的研究对象

力学是研究物质运动规律的科学,生物学是研究生命的科学,因而生物力学则是研究与生命有关的物质特性及其运动规律的科学。它所涉及的内容是相当丰富的。纵观而论,从亚细胞、细胞、组织、器官到整个生物体的物质构成和运动以及与环境的相互关系;横向而言,从植物到动物,从鱼游、鸟飞到人行,都充满着与力学有关的问题。我们按照力学的习惯分类方法以及考虑到生物力学所具有的特殊性,把它分成以下几个方面:

1. 生物材料力学

生物材料力学是研究组成生物体的材料所具有的力学特性。生物材料包括生物硬组织(骨、软骨、牙齿、甲壳等)、生物软组织(肌肉、皮肤、血管、生物膜等)以及体液(血液、淋巴液、唾液等)。生物材料是生命的基本组成部分,研究其力学性能就要给出生物材料的本构方程(Constitutive equation),即表示出应力和应变的关系,或应力和应变率的关系。由于生物材料一般并不简单地服从以虎克定律为基础的弹性力学规律,也不单单服从以牛顿粘性定律为基础的流体力学规律,其应力不仅与应变有关,还与流动因素有关。这种研究物质变形