

中 国 现 代 科 学 全 书 ● 力学  
CHINESE ENCYCLOPAEDIC SERIES OF MODERN SCIENCES ● MECHANICS

● 杨桂通 陈维毅 徐晋斌 著

# 生物力学

---

## BIOMECHANICS



重 庆 出 版 社

中国图书分类号: 81-44  
CIP 数据: 生物力学 / 孙家骥、陈维明、陈维斌 著. — 北京: 中国铁道出版社, 2004. 12  
ISBN 7-113-05400-3

● 孙家骥 陈维明 陈维斌 著

# 生物力学

---

## BIOMECHANICS

中国铁道出版社

中国现代科学全书·力学

# 生物力学

杨桂通 陈维毅 徐晋斌 著

重庆出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

生物力学/杨桂通等 著. - 重庆:重庆出版社,  
2000.6

(中国现代科学全书·力学卷)

ISBN 7-5366-4860-X

I. 生… II. 杨… III. 生物力学-概论 IV. Q66-0

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 72654 号

中国现代科学全书·力学

生物力学

杨桂通等 著

---

出版·发行/重庆出版社

经销/新华书店

印刷/北京市兴谷印刷厂

开本/850×1168 毫米 1/32

印张/11

字数/264 千字

印数/1—3,000 册

版本/2000 年 6 月北京第 1 版

2000 年 6 月北京第 1 次印刷

---

网址:<http://www.cesms.com.cn>

电话:010--64851686

书号:ISBN 7-5366-4860-X/Q·21

定价:24.00 元

---

出版声明/版权所有,翻印必究。

## 中国现代科学全书总编辑委员会

|      |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|
| 名誉主编 | 胡 绳 | 钱伟长 | 吴阶平 | 周光召 |
|      | 许嘉璐 | 罗豪才 | 季羨林 | 王大珩 |
|      | 郑必坚 |     |     |     |
| 主 编  | 姜士林 | 郭德宏 | 刘 政 | 程湘清 |
|      | 卞晋平 | 王洛林 | 许智宏 | 白春礼 |
|      | 卢良恕 | 徐 诚 | 王洪峻 | 明立志 |

## 力 学 编 辑 委 员 会

|      |           |     |     |     |
|------|-----------|-----|-----|-----|
| 名誉主编 | 钱伟长       |     |     |     |
| 主 编  | 徐秉业       |     |     |     |
| 编辑委员 | (以姓氏笔画为序) |     |     |     |
|      | 任 真       | 苏铭德 | 杨桂通 | 岑章志 |
|      | 陆全康       | 陈至达 | 武际可 | 赵文华 |
|      | 恽寿榕       | 姚振汉 | 袁龙蔚 | 徐秉业 |
|      | 殷有泉       | 黄 义 | 谢和平 |     |

## 前 言

自 20 世纪上半叶以来,众多的科学家便开始重视生命科学的研究。例如,量子波动力学创始人薛定谔(E. Schrödinger)在完成了量子力学的重要工作后,出版了他的名著《生命是什么?》;维纳(N. Wiener)建立了工程控制论体系后即重视生物控制论的研究;冯元桢从气体弹性力学的研究,转向了生物力学的奠基性工作,等等。不少人体的物理、化学及力学现象吸引了众多的学者。像心脏跳动、神经脉冲的传输、生物钟现象、人脑系统的联想、记忆、思维,以及遗传几何学等等,都是人们十分关注的问题。可以说,生命科学将是 21 世纪的前沿学科,生物力学则是生命科学不可缺少的重要分支学科。

生物力学作为一门独立的新兴学科出现在 20 世纪 60 年代。当时以冯元桢为代表的一批美国学者完善了生物力学基本内容的框架结构,取得了一系列引人注目的新成果。从此产生了多个生物力学国际学术组织和地区性生物力学学术团体,出版了多种专门的学术刊物,学术交流活动频繁多样,新的研究成果不断涌现,使得以人体组织与器官、血液与循环等为主要研究对象的生物力学在 20 世纪后半叶得到了迅速发展。实际上,在 19 世纪一些生物力学的先驱者已有关于骨力学、血液动力学等方面的研究工作,这些成果起到了重要的启蒙与奠基性作用。我国的生物力学研究工作起步较晚,在 20 世纪 70 年代末由于冯元桢先生的多次来华做系统讲学,推动了我国生物力学的迅速发展。他的三卷生物力学名著,被认为是生物力学工作者的必读教科书。

生物力学是一门多学科交叉的新兴边缘学科,它的科学意义是十分重要的。由于它本身的复杂性,导致可能发现多种物理的、生理的、化学的与力学的新现象,产生新概念,而其临床应用更具有直接造福人类的重要价值。

生物力学包括非常广泛的学术内容。本书主要介绍与人体健康密切相关的生物力学较成熟的内容,此外尚有植物生物力学的问题。例如,各类植物的生长、衰老和腐败与其生存环境、力场效应的问题,植物体内的营养和水分的输运理论问题,种子果品的堆放挤压输运和存放过程的保鲜问题等。另有运动生物力学问题,例如运动竞技的最佳体态问题,鸟类的飞翔、鱼类的游动特征的研究等,都对仿生学研究和高科技发展有着重要的意义。因而,目前已引起学术界的广泛关注。

我们这本简明的生物力学著作,着重介绍生物力学的主要内容和最新成就,尽量避免冗繁的数学推导,以便初学者了解生物力学的重要概念和新成果,了解生物力学的研究方法,熟悉本学科的主要研究方向和最新学术动态。

全书共分 10 章,其中第 1、7、10 章由杨桂通撰写;第 2、3、5、6、8 章及第 9 章第 2 节由陈维毅撰写;作者感谢徐晋斌博士为本书撰写了第 4 章及第 9 章第 1、3 节;全书由杨桂通负责规划和统稿工作。限于水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者指正。

作者感谢太原理工大学应用力学研究所的同志们在本书编写过程中所给予的帮助,感谢清华大学徐秉业教授的热心帮助与支持。

作者 1999 年 5 月于太原理工大学

## 目 录

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 前言 .....                 | ( 1 )  |
| 第 1 章 生物力学概述 .....       | ( 1 )  |
| 1.1 生物力学的研究对象 .....      | ( 1 )  |
| 1.2 生物力学的研究方法 .....      | ( 2 )  |
| 1.3 20 世纪生物力学的发展 .....   | ( 4 )  |
| 第 2 章 骨力学 .....          | ( 14 ) |
| 2.1 骨的结构及分类 .....        | ( 14 ) |
| 2.1.1 骨的结构 .....         | ( 14 ) |
| 2.1.2 骨的分类 .....         | ( 18 ) |
| 2.1.3 骨结构与其力学功能的关系 ..... | ( 19 ) |
| 2.2 骨的力学性能 .....         | ( 24 ) |
| 2.2.1 密质骨的力学特性 .....     | ( 25 ) |
| 2.2.2 松质骨的力学特性 .....     | ( 28 ) |
| 2.2.3 骨折的力学分析 .....      | ( 32 ) |
| 2.3 骨的力—电效应 .....        | ( 34 ) |
| 2.3.1 干骨的压电机理 .....      | ( 35 ) |
| 2.3.2 湿骨的力—电效应 .....     | ( 36 ) |
| 2.4 骨的重建 .....           | ( 38 ) |
| 2.4.1 骨的功能适应性 .....      | ( 38 ) |
| 2.4.2 骨重建的理论 .....       | ( 39 ) |

---

|                           |          |
|---------------------------|----------|
| <b>第3章 软组织力学</b> .....    | (45)     |
| 3.1 软组织的力学特性 .....        | (45)     |
| 3.1.1 单向拉伸时软组织的力学响应 ..... | (46)     |
| 3.1.2 胶原组织的结构及力学特性 .....  | (50)     |
| 3.2 血管的力学特性 .....         | (52)     |
| 3.2.1 血管的结构 .....         | (52)     |
| 3.2.2 血管的力学性质 .....       | (55)     |
| 3.2.3 动脉的顺应性 .....        | (61)     |
| 3.3 皮肤力学 .....            | (63)     |
| 3.3.1 皮肤的力学特性 .....       | (63)     |
| 3.4 肌肉力学 .....            | (68)     |
| 3.4.1 肌肉的基本知识 .....       | (68)     |
| 3.4.2 骨骼肌的功能与结构 .....     | (69)     |
| 3.4.3 肌肉的收缩原理 .....       | (75)     |
| 3.4.4 Hill 方程 .....       | (79)     |
| <br><b>第4章 呼吸力学</b> ..... | <br>(83) |
| 4.1 呼吸系统的构成及其功能 .....     | (83)     |
| 4.1.1 呼吸道的的基本结构 .....     | (84)     |
| 4.1.2 鼻腔 .....            | (85)     |
| 4.1.3 喉 .....             | (87)     |
| 4.1.4 气管与支气管 .....        | (87)     |
| 4.1.5 肺 .....             | (89)     |
| 4.2 呼吸系统的静力学性质 .....      | (94)     |
| 4.2.1 肺通气的动力 .....        | (94)     |
| 4.2.2 肺通气的阻力 .....        | (98)     |
| 4.2.3 肺通气功能的测定 .....      | (102)    |
| 4.3 气体在肺内的流动和扩散 .....     | (104)    |

---

|                          |                       |       |
|--------------------------|-----------------------|-------|
| 4.3.1                    | 气体在气管中的流动 .....       | (104) |
| 4.3.2                    | 肺泡中的气体交换 .....        | (105) |
| 4.3.3                    | 流量—容积曲线及呼气末期的扰动 ..... | (108) |
| <b>第5章 器官力学及应用</b> ..... |                       | (113) |
| 5.1                      | 眼力学 .....             | (114) |
| 5.1.1                    | 眼的解剖结构 .....          | (115) |
| 5.1.2                    | 眼球的运动控制 .....         | (115) |
| 5.1.3                    | 晶状体 .....             | (116) |
| 5.1.4                    | 角膜 .....              | (120) |
| 5.1.5                    | 眼后房壁 .....            | (122) |
| 5.1.6                    | 眼球的运动模型及斜视的治疗 .....   | (123) |
| 5.2                      | 耳力学 .....             | (125) |
| 5.2.1                    | 耳的解剖及功能 .....         | (126) |
| 5.2.2                    | 耳蜗的力学模型 .....         | (127) |
| 5.2.3                    | 耳前庭力学 .....           | (131) |
| 5.3                      | 颅脑力学 .....            | (134) |
| 5.3.1                    | 头颅受打击时的力学响应 .....     | (135) |
| 5.3.2                    | 角加速度引起的脑损伤 .....      | (139) |
| 5.3.3                    | 耐受性 .....             | (141) |
| 5.4                      | 口腔及牙齿的生物力学 .....      | (144) |
| 5.4.1                    | 咬合力及下颌关节 .....        | (145) |
| 5.4.2                    | 牙组织的结构及力学特性 .....     | (149) |
| <b>第6章 血液流变学</b> .....   |                       | (157) |
| 6.1                      | 血液的流变特性 .....         | (158) |
| 6.1.1                    | 血液的组织构成 .....         | (158) |
| 6.1.2                    | 黏度及影响因素 .....         | (162) |

---

|            |                         |              |
|------------|-------------------------|--------------|
| 6.1.3      | 血液的黏弹性及触变性 .....        | (169)        |
| 6.1.4      | 白细胞和血小板的流变特性 .....      | (173)        |
| 6.1.5      | 红细胞沉降率及红细胞的聚集 .....     | (176)        |
| 6.2        | 血液流变特性的测量 .....         | (179)        |
| 6.2.1      | 血液黏度的测定方法 .....         | (180)        |
| 6.2.2      | 血液黏弹性的测定 .....          | (185)        |
| 6.2.3      | 血液触变特性的测定 .....         | (186)        |
| 6.2.4      | 凝血过程的黏弹性检测 .....        | (187)        |
| 6.2.5      | 红细胞电泳率的测定 .....         | (188)        |
| 6.2.6      | 红细胞聚集性及血小板聚集的测定 .....   | (189)        |
| 6.3        | 血液流变学的临床应用 .....        | (191)        |
| 6.3.1      | 冠心病 .....               | (192)        |
| 6.3.2      | 高血压病 .....              | (193)        |
| 6.3.3      | 脑血管意外 .....             | (194)        |
| 6.3.4      | 肺心病 .....               | (195)        |
| 6.3.5      | 糖尿病 .....               | (196)        |
| 6.3.6      | 外周血管病 .....             | (197)        |
| 6.3.7      | 恶性肿瘤 .....              | (198)        |
| 6.3.8      | 血液黏度稀释疗法 .....          | (198)        |
| <b>第7章</b> | <b>心脏及心血管流体力学</b> ..... | <b>(201)</b> |
| 7.1        | 心脏 .....                | (201)        |
| 7.2        | 心脏瓣膜的运动 .....           | (206)        |
| 7.2.1      | 二尖瓣的运动 .....            | (206)        |
| 7.2.2      | 主动脉瓣的运动 .....           | (208)        |
| 7.2.3      | 瓣膜关闭的力学理论 .....         | (209)        |
| 7.3        | 心脏瓣膜病变与血液流动的变化 .....    | (211)        |
| 7.3.1      | 二尖瓣狭窄 .....             | (211)        |

---

|            |                               |              |
|------------|-------------------------------|--------------|
| 7.3.2      | 二尖瓣关闭不全 .....                 | (212)        |
| 7.3.3      | 主动脉瓣狭窄与关闭不全 .....             | (214)        |
| 7.4        | 动脉中的血流分析 .....                | (214)        |
| 7.4.1      | 动脉系统的结构解剖 .....               | (214)        |
| 7.4.2      | 动脉中血流力学的基本概念 .....            | (216)        |
| 7.4.3      | 力学分析模型 .....                  | (219)        |
| 7.5        | 大静脉中的血液动力学 .....              | (223)        |
| 7.6        | 脉搏波的传播与反射 .....               | (227)        |
| 7.6.1      | 脉搏波的传播 .....                  | (228)        |
| 7.6.2      | 脉搏波的传播速度 .....                | (229)        |
| 7.6.3      | 脉搏波波速的测定 .....                | (231)        |
| 7.6.4      | 脉搏波与中医脉象 .....                | (233)        |
| <b>第8章</b> | <b>微循环力学</b> .....            | <b>(236)</b> |
| 8.1        | 微循环的组成及构造 .....               | (236)        |
| 8.1.1      | 微循环的组成 .....                  | (236)        |
| 8.1.2      | 微循环的构造 .....                  | (238)        |
| 8.2        | 微循环流动的力学特征 .....              | (242)        |
| 8.3        | 微循环流体动力学 .....                | (245)        |
| 8.3.1      | 微血管中的压力分布 .....               | (246)        |
| 8.3.2      | 微血管中红细胞速度及流速测量 .....          | (249)        |
| 8.3.3      | 微血管中红细胞的流动特性<br>及与管径的关系 ..... | (254)        |
| 8.4        | 微循环过程中的传质现象 .....             | (259)        |
| 8.4.1      | 毛细血管壁的通透性·Starling 假定 .....   | (259)        |
| 8.4.2      | 器官中毛细血管的压力和水的滤过 .....         | (266)        |
| 8.4.3      | 毛细血管中血浆的流动与水的滤过 .....         | (268)        |

---

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| <b>第9章 细胞力学</b> .....               | (278) |
| 9.1 细胞及其变形 .....                    | (278) |
| 9.1.1 细胞的形态 .....                   | (278) |
| 9.1.2 细胞变形的实验方法 .....               | (279) |
| 9.1.3 细胞变形的简化模型分析 .....             | (282) |
| 9.2 红细胞 .....                       | (288) |
| 9.2.1 红细胞的构造、形状与尺寸.....             | (288) |
| 9.2.2 红细胞的可变形性 .....                | (290) |
| 9.2.3 红细胞变形性的测定 .....               | (292) |
| 9.2.4 红细胞膜的构造及弹性 .....              | (295) |
| 9.3 细胞分裂的力学分析 .....                 | (296) |
| 9.3.1 细胞周期与细胞分裂 .....               | (297) |
| 9.3.2 细胞质分裂的大变形模拟分析 .....           | (302) |
| <br><b>第10章 21世纪生物力学的发展趋势</b> ..... | (304) |
| 10.1 21世纪生物力学发展的特点 .....            | (304) |
| 10.2 生长与应力的关系及临床应用问题.....           | (305) |
| 10.3 生物力学的临床问题.....                 | (306) |
| 10.4 组织工程的发展.....                   | (307) |
| <br><b>结束语</b> .....                | (309) |
| <b>中英文索引</b> .....                  | (311) |
| <b>参考文献</b> .....                   | (323) |

## 第1章 生物力学概述

### 1.1 生物力学的研究对象

力学是研究物体变形和运动的科学,生物学是研究生命的生长与衰亡的科学。生物力学(Biomechanics)是两大学科的结合,专门研究生物与力学相关的问题,像各种形式的力的作用对生命体的生长、萎缩、致病、整合等过程的效应。这里所说的生命体包括人类、动物、植物,像鸟飞鱼游规律的力学原理研究,人体运动的最佳态式的探讨,人体的适应性与耐受性研究,人体各器官的功能及生长、衰退、病变、激活等现象的探索,等等。

由此可见,生物力学是生命科学的重要组成部分,也是生物医学工程和理论与应用力学的新的分支学科。它是多种学科相互交叉、相互渗透所形成的一个新兴边缘学科。生物力学利用连续介质力学、多相介质力学、断裂损伤力学和流变力学等力学基本原理,结合生理学、医学、生物学来研究生物体,特别是人体的功能、生长、消亡以及运动的规律,最终服务于临床诊断与治疗、生物医学工程和生物技术等高新技术领域,以及人类保健事业。目前,生物力学的研究对象主要是以复杂的人体为主。

生物力学的宗旨,是寻求能更精细地描述活组织及器官工作机理和新的生理学原理。没有生物力学的研究,许多生理学原理就得不到确切的证实。例如,动脉粥样硬化是一种妨碍人类健康的严重疾患,人们力求了解引起这种疾患的原因和正确治疗的方法,尽管人们付出了极大的努力,但粥样硬化的谜团并未被解开。

为了解此谜团,进行生物力学研究是必需的。因为,不知道血管和血流的力学特性,就不能真正了解粥样硬化的机理。

生物力学的研究与发展不仅有重要的实用意义,而且可以由此发现新的科学规律。长期以来,人们注意了宏观生物力学的研究。最近,人们开始从宏观世界走进了微观世界,探索生命的众多生物力学现象的新奥秘。新近兴起的细胞力学和 DNA 力学的研究,给人们带来了许多新概念。由此,将使生命科学研究水平大为提高,并将促进生物医学工程学的发展。由此可见,生物力学在科学技术的发展中占有重要的地位。

非线性科学的发展揭示了许多新的物理、力学现象,如所周知,生命现象就是在非平衡耗散结构系统中的一个过程。严格来说,这一过程是一个非常复杂的多层次的非线性力学过程。分子、细胞、器官、整体各个层次及各层次之间的关系和它们的萌生、发育和消亡过程都是具有重大意义的非线性科学的研究课题。可以说,生物力学的发展及其新概念,必将促进相邻科学的发展。

## 1.2 生物力学的研究方法

生物力学作为一门新兴的边缘学科,近年来,已有了很大的发展。但这一学科的深入研究仍存在多方面的困难。例如,难以得到理想的活组织的实验资料;生物体的个体差异性很大,难以给出可靠的本构关系,没有本构关系,力学问题便难以着手分析。

生物力学的研究方法仍然离不开成熟的连续介质力学的传统有效的方法。这就是:由各种形式的实验获得的物理现象建立合理的简洁的力学模型,对所建模型进行理论分析,得出各种运动平衡的规律,再回到实践(或实验)中去检验,经过多次修改力学模型,以期得到满意的结果。

由于生物组织器官乃至生物整体系统运动的复杂性,难以用

一种统一的方法进行研究。对人体组织,如,骨、软骨、皮肤、血管、系膜、肌肉、角膜等等的生命力学研究,可进行离体或在体实验研究,由于在体实验的困难性,一般来说,现在进行的大都是离体研究;但要采取各种有效的办法,尽量使其最大限度地保持在生理环境之中,以便测定其应力—应变关系,从而构造合理的本构关系。对于人体器官来说,例如耳、眼、肺、心脏、颅脑等等,对这类问题,人们需要了解的是它们的工作原理、功能水平、耐受性特征,以及各种病变发生的有关力学的因素和防御办法。研究这类问题,首先仍要确定构成该器官的组织的力学特性,给出本构关系模型,进而根据该器官的工作原理,给出该系统的力学模型,例如脑系统可以简化成一个有弹簧支承的球体。此后,可以根据力学原理和有意义的边界条件,求解边值问题。有的可能要用动力学原理,求解边值初值问题。最后可用临床观测、生理实验来检验以上理论分析结果。若有不妥,则应进一步修改。理论与实验互相参照多次修正,以求合理可靠。

对于人体运动系统来说,例如整体运动、关节运动、脊柱、颈椎系统的研究情况则和上述情况类似。

生物力学中另一大类问题是血液的流动。我们必须了解血液在心脏内、在流过瓣膜时,以及在主动脉中是如何流动的,常见的心脏病是如何发生的,动脉粥样硬化是如何形成的,人体的微循环系统是怎么回事。这些问题涉及的面很广,要了解流体力学、血液流变学、细胞力学、生理学等等。这类问题的研究方法,例如心血管系统仍然要确定血液的流变特性、血管的力学特性,进而确定尽可能逼真的简化的力学模型,进行实验与理论的分析与多次修正,以期满意的结果。类似地还有像呼吸系统、微循环系统、脑血流系统等等。

总之,生物力学的研究方法主要是:

(1)用解剖学方法确定所研究对象结构的几何特征。

(2)用材料力学的宏观与微观的方法,确定所研究对象的力学特性,给定本构关系。

(3)根据器官或系统的工作情况,建立合理的力学模型,推导相应的微分方程或微分—积分方程。

(4)给出该方程的解析解、或数值解、或近似解等。

(5)建立相应的实验方案,做生理实验及实验室的在体或离体实验。

(6)反复对比修正,以期得到有临床应用价值的结果。

### 1.3 20 世纪生物力学的发展

生物力学的研究实际上已有了很长的发展史,其最初的研究与观察人体的构造与功能机理可以追溯到公元前的中国、埃及、古罗马等国的医生们对人體解剖的了解,甚至更早的时期。下面我们分别作简要介绍。

早在中世纪,Leonardo da Vinci(1452~1519)对心血管系统进行了详细研究,指出了心血管的厚度与年龄有关。之后,首次给出血液流动的数学分析的是 Leonhard Euler(1775),他给出了无黏性流体在弹性管中流动的一维方程和详细的数学分析。Thomas Young(1773~1839)则首次给出了血流中脉搏波传播速度的数学分析。他得出脉搏波的传播速度  $c_0$  为:

$$c_0 = \sqrt{\frac{hE}{2\rho a}} \quad (1.3.1)$$

此处  $h$ ,  $a$  分别为血管厚度和半径,  $\rho$  为血液密度,  $E$  为血管的弹性模量。

在他们的基础上,关于血液动力学的研究发展很快,成为生物力学研究中极为活跃的分支之一。

19 世纪人们对人体组织力学的研究已有一些好的成果,1847