



生物力学研究前沿系列  
总主编 姜宗来 樊瑜波

# 康复工程生物力学

Biomechanics in Rehabilitation Engineering

樊瑜波 张明 主编



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

生物力学研究前沿系列  
总主编 姜宗来 樊瑜波

# 康复工程生物力学

樊瑜波 张明 主编



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书是“生物力学研究前沿系列”之一。本书介绍了康复工程生物力学领域研究的若干新进展,重点是我国学者近十多年取得的研究成果。本书涉及的内容包括假肢、矫形器、轮椅等康复辅具设计和评价中的生物力学问题,脑卒中、脑瘫、糖尿病足、老年人运动功能障碍等特殊病患的康复评价与训练中的生物力学问题,以及传统康复治疗中和康复机器人设计与应用中的生物力学问题等。

本书内容对康复工程研究人员、康复医生、假肢矫形师、研究生均有重要参考价值。

## 图书在版编目(CIP)数据

康复工程生物力学 / 樊瑜波,张明主编. —上海:  
上海交通大学出版社, 2017  
(生物力学研究前沿系列)  
ISBN 978-7-313-17993-7

I. ①康… II. ①樊… ②张… III. ①康复医学—医学工程—生物力学 IV. ①R496

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 203585 号

## 康复工程生物力学

主 编: 樊瑜波 张 明

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 上海锦佳印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 352 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-17993-7/R

定 价: 198.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 15.75

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-56401314

谨以此书献给

“生物力学之父”冯元桢先生

發展生物力學  
造福人類健康

馮元楨

2016 七月廿一日

# 生物力学研究前沿系列 丛书编委会

## 总主编

上海交通大学,教授 姜宗来

国家康复辅具研究中心 北京航空航天大学,教授 樊瑜波

## 编委

(按姓氏笔画排序)

北京航空航天大学,教授 邓小燕

中国科学院力学研究所,研究员 龙勉

清华大学,教授 冯西桥

重庆大学,教授 吕永钢

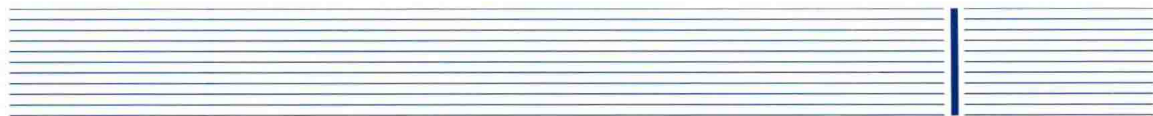
上海体育学院,教授 刘宇

上海交通大学,教授 齐颖新

上海交通大学医学院,教授 汤亭亭

大连医科大学,教授 孙秀珍

重庆大学,教授 杨力



香港理工大学,教授 张 明

军事医学科学院卫生装备研究所,研究员 张西正

太原理工大学,教授 陈维毅

浙江大学,教授 季葆华

上海交通大学医学院,教授 房 兵

四川大学华西口腔医学院,教授 赵志河

# 总主编简介



**姜宗来** 博士,教授,博士生导师;美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow);享受国务院政府特殊津贴,全国优秀科技工作者,总后勤部优秀教师;上海交大学生命科学技术学院教授;曾任上海交通大学医学院筹备组副组长和力学生物学研究所所长;先后担任世界生物力学理事会(WCB)理事,中国生物医学工程学会副理事长、名誉副理事长,中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)副主任委员、主任委员,中国生物物理学会生物力学与生物流变学专业委员会副主任委员,国际心脏研究会(ISHR)中国分会执委,《中国生物医学工程学报》副主编和《医用生物力学》副主编、常务副主编等;长期从事心血管生物力学、力学生物学和形态学研究,培养

博士后、博士生和硕士生 45 人,在国内外发表学术论文 100 余篇,主编和参编专著与教材 26 部,获国家科技进步奖三等奖(第一完成人,1999)、军队科技进步二等奖(第一完成人)和国家卫生部科技进步三等奖各 1 项,获国家发明专利 2 项、新型实用专利 1 项。



**樊瑜波** 博士,教授,博士生导师;美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow);国家杰出青年科学基金获得者,教育部“长江学者”特聘教授,教育部跨世纪人才,全国优秀科技工作者,国家自然科学基金创新群体项目负责人,科技部重点领域创新团队带头人;现任民政部国家康复辅具研究中心主任、附属医院院长,北京航空航天大学生物与医学工程学院院长、生物力学与力学生物学教育部重点实验室主任、北京市生物医学工程高精尖创新中心主任;先后担任世界生物力学理事会(WCB)理事,世界华人生物医学工程协会(WACBE)主席,国际生物医学工程联合会(IFMBE)执委,中国生物医学工程学会理事长,医工整合联盟理事长,中国力学学会中国生物医学工程学会生物

力学专业委员会(分会)副主任委员、主任委员,《医用生物力学》和《生物医学工程学杂志》副主编等;长期从事生物力学、康复工程、植介入医疗器械等领域研究,发表 SCI 论文 260 余篇,获国家发明专利近百项,获教育部自然科学一等奖和黄家驷生物医学工程一等奖等科技奖励。



# 本书主编简介

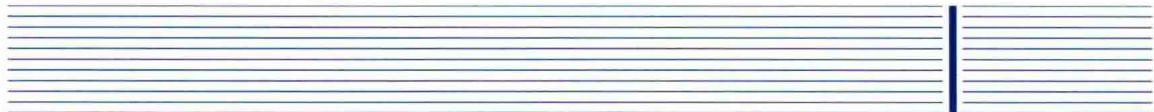


**樊瑜波** 博士,教授,博士生导师;美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow);国家杰出青年科学基金获得者,教育部“长江学者”特聘教授,教育部跨世纪人才,全国优秀科技工作者,国家自然科学基金创新群体项目负责人,科技部重点领域创新团队带头人;现任民政部国家康复辅具研究中心主任、附属医院院长,北京航空航天大学生物与医学工程学院院长、生物力学与力学生物学教育部重点实验室主任、北京市生物医学工程高精尖创新中心主任;先后担任世界生物力学理事会(WCB)理事,世界华人生物医学工程协会(WACBE)主席,国际生物医学工程联合会(IFMBE)执委,中国生物医学工程学会理事长,医工整合联盟理事长,中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)副主任委员、主任委员,《医用生物力学》和《生物医学工程学杂志》副主编等;长期从事生物力学、康复工程、植介入医疗器械等领域研究,发表SCI论文260余篇,获国家发明专利近百项,获教育部自然科学一等奖和黄家驷生物医学工程一等奖等科技奖励。



**张明** 博士,教授,博士生导师;现任香港理工大学生物医学工程学系教授、肌骨生物工程研究中心主任、世界生物力学理事会(WCB)理事、世界华人生物医学工程协会(WACBE)候任主席、中国康复辅具协会及中国生物医学工程学会的常务理事、康复工程分会主任委员、中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)委员等;主要研究领域包括:康复工程、假肢和矫形生物工程、计算生物力学、人体支撑生物力学、足部生物力学及鞋的设计、步态分析、骨力学及骨质疏松的防治;在SCI杂志上发表学术论文150余篇,获教育部自然科学一等奖、黄家驷生物医学工程一等奖和香港理工大学校长奖等奖励。

# 序 一



欣闻姜宗来教授和樊瑜波教授任总主编的一套“生物力学研究前沿系列”丛书,即将由上海交通大学出版社陆续出版,深感欣慰。谨此恭表祝贺!

生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科。现代生物力学通过对生命过程中的力学因素及其作用进行定量的研究,结合生物学与力学之原理及方法,得以认识生命过程的规律,解决生命与健康的科学问题。生物力学是生物医学工程学的一个重要交叉学科,对探讨生命科学与健康领域的重大科学问题作出了很大的贡献,促进了临床医学技术与生物医学材料的进步,带动了医疗器械相关产业的发展。

1979年以来,在“生物力学之父”冯元桢(Y. C. Fung)先生的亲自推动和扶植下,中国的生物力学研究已历经了近40年的工作积累。尤其是近十多年来,在中国新一代学者的努力下,中国的生物力学研究有了长足的进步,部分研究成果已经达到国际先进水平,从理论体系到技术平台均有很好的成果,这套“生物力学研究前沿系列”丛书的出版真是适逢其时。

这套丛书的总主编姜宗来教授和樊瑜波教授以及每一分册的主编都是中国生物力学相关领域的学术带头人,丛书的作者们也均为科研和临床的一线专家。他们大多在国内外接受过交叉学科的系统教育,具有理工生医多学科的知识背景和优越的综合交叉研究能力。该丛书的内容涵盖了血管力学生物学、生物力学建模与仿真、细胞分子生物力学、组织修复生物力学、骨与关节生物力学、口腔力学生物学、眼耳鼻咽喉生物力学、康复工程生物力学、生物材料力学和人体运动生物力学等生物力学研究的主要领域。这套丛书立足于科技发展前沿,旨在总结和展示21世纪以来中国在生物力学领域所取

得的杰出研究成果,为力学、生物医学工程以及医学等相关学科领域的研究生和青年科技工作者们提供研究参考,为生物医学工程相关产业的从业人员提供理论导引。这套丛书的出版适时满足了生物力学学科出版领域的需求,具有很高的出版价值和积极的社会意义。可以预见这套丛书将能为广大科技工作者提供学术交流的平台,因而促进中国生物力学学科的进一步发展和年轻人才的培养。

这套丛书是用中文写的,对全球各地生物力学领域用中文的学者有极大意义。目前,生物力学这一重要领域尚无类似的、成为一个系列的英文书籍。希望不久的将来能看到这套丛书的英文版,得以裨益世界上所有的生物力学及生物医学工程学家,由此促进全人类的健康福祉。

钱煦

美国加州大学医学与生物工程总校教授

美国加州大学圣迭戈分校工程与医学研究院院长

美国国家科学院院士

美国国家工程院院士

美国国家医学院院士

美国艺术与科学院院士

美国国家发明家学院院士

中国科学院外籍院士

## 序 二

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

人体处于力学环境之中。人体各系统,如循环系统、运动系统、消化系统、呼吸系统和泌尿系统等生理活动均受力学因素的影响。力是使物体变形和运动(或改变运动状态)的一种机械作用。力作用于机体组织细胞后不仅产生变形效应和运动效应,而且可导致其复杂的生理功能变化。生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科。生物力学通过生物学与力学原理方法的有机结合,认识生命过程的规律,解决生命与健康领域的科学问题。

20世纪70年代末,在现代生物力学开创者和生物医学工程奠基人、被誉为“生物力学之父”的著名美籍华裔学者冯元桢(Y. C. Fung)先生的大力推动和热情关怀下,生物力学作为一门新兴的交叉学科在我国起步。随后,我国许多院校建立了生物力学的学科基地或研究团队,设立了生物力学学科硕士学位授权点和博士学位授权点。自1982年我国自己培养的第一位生物力学硕士毕业以来,陆续培养出一批接受过良好交叉训练的青年生物力学工作者,他们已逐渐成为我国生物力学学科建设和发展的骨干力量。20世纪80年代以来,我国生物力学在生物流变学、心血管生物力学与血流动力学、骨关节生物力学、呼吸力学、软组织力学和药代动力学等领域开展了研究工作,相继取得了一大批有意义的成果,出版了一些生物力学领域的专著,相关研究成果也曾获国家和省部级的多项奖励。这些工作的开展、积累和成果为我国生物力学事业的发展作出了重要贡献。

21世纪以来,国际和国内生物力学研究领域最新的进展和发展趋势主要有:一是力学生物学;二是生物力学建模分析及其临床应用。前者主要是生物力学细胞分子层次的机制(发现)研究,而后者主要是生物力学解决临床问题的应用(发明)研究,以生物力学理论和方法发展有疗效的或有诊断意义的新概念与新技术。两者的最终目的都是促进生物医学基础与临床以及相关领域研究的进步,促进人类健康。

21 世纪以来,国内生物医学工程、力学、医学和生物专业的科技人员踊跃开展生物力学的交叉研究,队伍不断扩大。以参加“全国生物力学大会”的人数为例,从最初几届的百人左右发展到 2015 年“第 11 届全国生物力学大会”,参会人员有 600 人之多。目前,国家自然科学基金委员会数理学部在“力学”学科下设置了“生物力学”二级学科代码;生命科学部也专为“生物力学与组织工程”设置了学科代码和评审组。在国家自然科学基金的持续支持下,我国的生物力学研究已有近 40 年的工作积累,从理论体系、技术平台到青年人才均有很好的储备,研究工作关注人类健康与疾病中的生物力学与力学生物学机制的关键科学问题,其中部分研究成果已达到国际先进水平。

为了总结 21 世纪以来我国生物力学领域的研究成果,在力学、生物医学工程以及医学等相关学科领域展示生物力学学科的实力和未来,为新进入生物力学领域的研究生和青年科技工作者等提供一个研究参考,我们组织国内生物力学领域的一线专家编写了这套“生物力学研究前沿系列”丛书,其内容涵盖了血管力学生物学、生物力学建模与仿真、细胞分子生物力学、组织修复生物力学、骨与关节生物力学、口腔力学生物学、眼耳鼻喉生物力学、康复工程生物力学、生物材料力学和人体运动生物力学等生物力学研究的主要领域。本丛书的材料主要来自各分册主编及其合著者所领导的国内实验室,其中绝大部分成果系国家自然科学基金资助项目所取得的新研究成果。2016 年,已 97 岁高龄的美国国家科学院、美国国家医学院和美国国家工程院院士,中国科学院外籍院士冯元桢先生在听取了我们有本丛书编写工作进展汇报后,欣然为丛书题词“发展生物力学,造福人类健康”。这一珍贵题词充分体现了先生的学术理念和对我们后辈的殷切希望。美国国家科学院、美国国家医学院、美国国家工程院和美国国家发明家学院院士,美国艺术与科学院院士,中国科学院外籍院士钱煦(Shu Chien)先生为本丛书作序,高度评价了本丛书的出版。我们对于前辈们的鼓励表示由衷的感谢!

本丛书的主要读者对象为高校和科研机构的生物医学工程、医学、生物学和力学等相关专业的科学工作者和研究生。本丛书愿为今后的生物力学和力学生物学研究提供参考,希望能对促进我国生物力学学科发展和人才培养有所帮助。

在本丛书完成过程中,各分册主编及其合著者的团队成员、研究生对相关章节的结果呈现作出了许多出色贡献,在此对他们表示感谢;同时,对本丛书所有被引用和参考的文献作者和出版商、对所有帮助过本丛书出版的朋友们一并表示衷心感谢!感谢国家自然科学基金项目的资助,可以说,没有国家自然科学基金的持续资助,就没有我国生物力学蓬勃发展的今天!

由于生物力学是前沿交叉学科,处于不断发展丰富的状态,加之组织出版时间有限,丛书难免有疏漏之处,请读者不吝赐教、指正。

姜宗来 樊瑜波

2017 年 11 月

# 前 言

康复工程是运用工程学的原理和方法研究病、伤、残者的康复,以最大限度地补偿或恢复因伤病所造成的肢体、器官缺损或功能障碍,从而提高功能障碍者的生活质量,使其能较好地融入社会。康复工程的研究和服务对象既包括某些组织和功能全部丧失或者部分丧失的残疾人,也包括身体功能退化需要辅助的老年人,还包括组织和功能暂时受损,需要凭借辅助器具促进康复的伤病人。

近年来,在国家自然科学基金委、科技部、民政部的支持下,我国康复工程领域的基础理论、重大关键技术和共性技术、重要产品等方面的研究都有了快速发展。同时,也形成了较为稳定的研究队伍,既有国家康复辅具研究中心、中国残疾人辅助器具中心等专门承担辅助器具科研和推广任务的国家级专业机构,也有香港理工大学、上海交通大学、清华大学、北京航空航天大学、浙江大学、西安交通大学等相关院系和研究机构。2016年10月,国务院发布了《关于加快发展康复辅助器具产业的若干意见》,首次把康复辅具作为一个单独的产业来推广发展。可以说,康复工程正面临最好的发展机遇。

生物力学在康复工程的基础理论、应用技术和产品开发各层面都具有极为重要的作用。为了对脑瘫、截瘫、偏瘫等患者的日常行为能力进行康复或辅助,必须首先从生物力学角度对他们的关节活动、软组织特性、运动控制等特征及相关的影响因素进行准确的描述和测量;对于假肢、矫形器、轮椅等辅具的设计,必须考虑对人体支撑界面的影响,如长时间动、静态载荷可能导致的缺氧以致由此造成压疮等,这就需要采用实验或者计算的方法对辅具作用下支撑界面的应力分布进行分析,以及对软组织的损伤机制进行生物力学研究;肌肉骨系统在矫形器、助力系统作用下,可能发生适应性的改建,基于生物力学研究对这些改建结果的预测,将有助于辅具的优化设计,以及发展新型的辅具;心脏康复近年来发展迅速,但不管是通常的运动康复治疗,还是体外反搏等技术的应用,都需要从生物力学的角度对作用机制进行深入的分析,从而制订有效的策略,提高

康复效果。

就发展趋势而言,在国内外康复工程生物力学的理论研究方面,功能障碍者人体组织的生物力学特性及其对生物力学作用的响应特征、人体行为及功能障碍的生物力学机制及评价方法、康复辅具与人体相互作用的原理等将是研究的重点之一;在技术研究方面,客观化、量化的人体生物力学特性及功能特征的在体测量技术、辅具个性化定制中的生物力学评价技术、人-辅具-环境相互作用的评价技术等都是重点的研究方向之一;总体而言,多层次、多系统、多学科整合研究越来越成为康复工程生物力学研究的重要特征。

本书是对近些年来国内康复工程生物力学领域中上述相关研究的一个总结和回顾,书中的内容大部分来自本书作者和合著者已经和正在开展的研究工作。本书的主要读者对象为高校和科研机构的康复工程、康复医学、生物力学等相关专业的研究生和科学工作者,以及康复辅助器具的开发者。

在本书完成过程中,作者和合著者的团队成员、博士生作出了非常重要的贡献,在此对他们的工作表示感谢。对本书所有被引用和参考的文献作者和出版商、对所有帮助过本书出版的朋友们表示衷心感谢!同时,特别感谢国家自然科学基金的资助!

由于本书从组稿到出版,时间相对紧促,纰漏之处望读者不吝赐教、指正,以利于我们改正和提高。

**樊瑜波**

(国家康复辅具研究中心、北京航空航天大学)

**张明**

(香港理工大学)

2017年9月

# 目 录

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

<b>1</b>	<b>下肢残肢的生物力学 / 晏菲 董瑞琪 蒋文涛 张明</b>	<b>1</b>
1.1	残肢形状和体积变化的监测手段	2
1.1.1	水中浸泡和圆周测量	2
1.1.2	激光视频扫描	3
1.1.3	剪影法	4
1.1.4	手持式数字转换器和扫描器	4
1.1.5	X线(X-ray)和CT扫描(computer tomography)	5
1.1.6	磁共振成像扫描	5
1.1.7	超声成像(ultrasound)	5
1.2	残肢皮肤及皮下软组织的生物力学研究	6
1.3	截肢后大腿血管树空间结构的改变	9
1.4	截肢后旋股外侧动脉降支的血液流动和氧气传输	12
	参考文献	15
<b>2</b>	<b>下肢假肢的生物力学研究 / 徐智 黄伟志 王岩 蒋文涛 张明</b>	<b>19</b>
2.1	接受腔	19
2.1.1	界面应力	19
2.1.2	接受腔的CAD/CAM	20
2.1.3	有限元分析	21
2.2	一体化小腿假肢	23



2.2.1	一体化小腿假肢概念	23
2.2.2	界面应力分析	23
2.2.3	设计参数	25
2.3	假肢对线	27
2.3.1	对线过程	28
2.3.2	小腿假肢对线研究	28
	参考文献	32
<b>3</b>	<b>脊柱侧凸矫形器的生物力学 / 郑瑜 贺晨 黄文生</b>	<b>35</b>
3.1	概述	35
3.2	脊柱侧凸矫形器	36
3.2.1	治疗原理	36
3.2.2	治疗效果评价标准	36
3.2.3	侧凸进展风险度	36
3.2.4	脊柱侧凸矫形器种类	37
3.3	超声波技术在脊柱矫形器中的应用	42
	参考文献	52
<b>4</b>	<b>楔形鞋垫生物力学 / 黄伟志 王岩 张明</b>	<b>57</b>
4.1	楔形鞋垫设计与下肢步态生物力学	57
4.1.1	背景	57
4.1.2	楔形支撑下关节力矩的实验研究	57
4.1.3	楔形鞋垫转移足底压力中心	61
4.2	楔形支撑下膝关节的计算生物力学研究	63
4.2.1	肌骨模型及有限元分析	63
4.2.2	半月板和软骨应力	66
4.2.3	膝关节内侧负荷	67
	参考文献	68
<b>5</b>	<b>自主意识控制机器人辅助下的脑卒中后患者上肢康复 / 钱秋阳 谭永昌 胡晓翎 潘伟生</b>	<b>71</b>
5.1	脑卒中后患者的功能损伤及传统上肢康复	71
5.2	机器人训练系统辅助下的脑卒中患者后上肢康复治疗	73
5.3	自主意识控制的机器人辅助训练系统	74