



生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

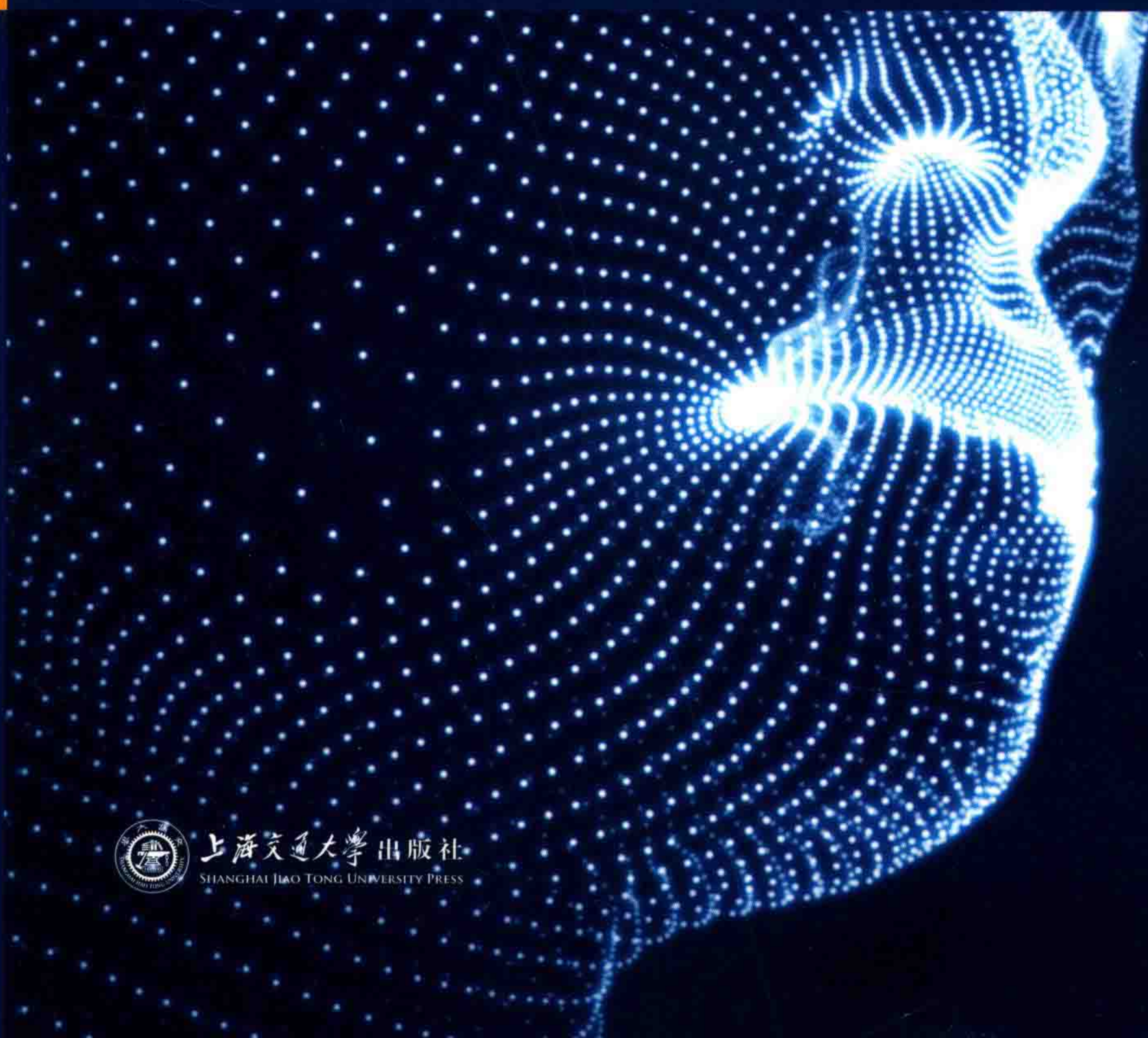
国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



生物力学建模仿真与应用

Biomechanical Modelling and Clinical Application

樊瑜波 邓小燕 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

生物力学建模仿真与应用

樊瑜波 邓小燕 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。本书的主要内容包括：生物力学建模仿真发展历程介绍,以及生物力学建模与仿真技术在血管支架设计与评价、血管手术的血流动力学分析、心血管系统内物质输运、易损斑块建模与风险评估、心脏和瓣膜的生物力学建模仿真及应用等;啄木鸟头部建模与仿真、人体头颈部生物力学建模及其在航空领域的应用;眼生物力学建模与仿真、口腔种植术中骨改重建及其在航空领域的应用;人工颈椎间盘植入手术方案仿真与优化、膝关节前交叉韧带重建与仿真;足踝生物力学建模与仿真、预测宏微观骨强度的非线性有限元建模与仿真等。

本书的读者对象为生物医学工程、生物力学相关专业的研究生、教师,医学院的临床医生以及对生物力学建模仿真感兴趣的工程研究人员。

图书在版编目(CIP)数据

生物力学建模仿真与应用 / 樊瑜波, 邓小燕主编.
—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 - 18498 - 6

I. ①生… II. ①樊… ②邓… III. ①生物力学—系统建模②生物力学—系统仿真 IV. ①Q66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 302551 号

生物力学建模仿真与应用

主 编: 樊瑜波 邓小燕	地 址: 上海市番禺路 951 号
出版发行: 上海交通大学出版社	电 话: 021 - 64071208
邮政编码: 200030	
出 版 人: 谈 毅	经 销: 全国新华书店
印 制: 上海锦佳印刷有限公司	印 张: 29.5
开 本: 787 mm×1092 mm 1/16	
字 数: 498 千字	印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷
版 次: 2017 年 12 月第 1 版	
书 号: ISBN 978 - 7 - 313 - 18498 - 6/Q	
定 价: 368.00 元	

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

發展生物力学
造福人類健康

邬元楨

2016 七月廿一日

生物力学研究前沿系列 丛书编委会



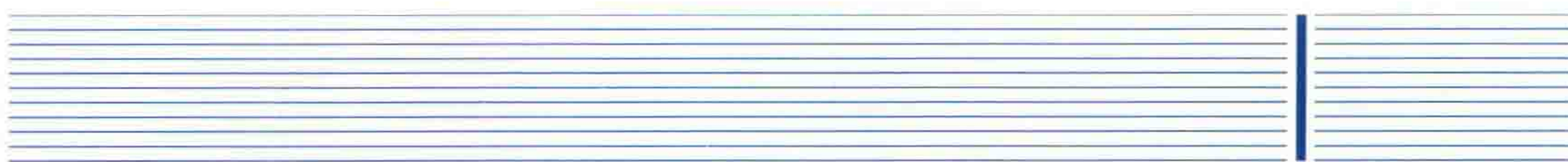
总主编

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

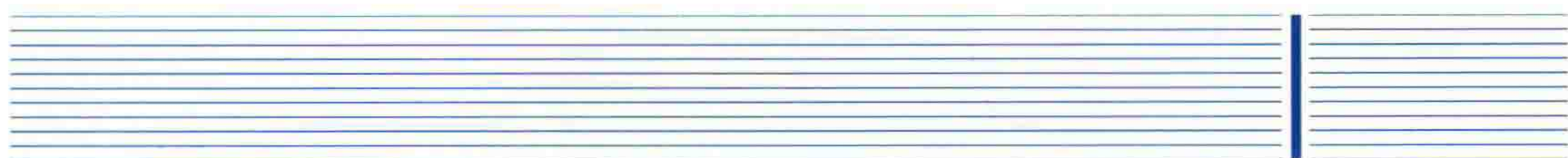


樊瑜波 博士,教授,博士生导师;美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow);国家杰出青年科学基金获得者,教育部“长江学者”特聘教授,教育部跨世纪人才,全国优秀科技工作者,国家自然科学基金创新群体项目负责人,科技部重点领域创新团队带头人;现任民政部国家康复辅具研究中心主任、附属医院院长,北京航空航天大学生物与医学工程学院院长、生物力学与力学生物学教育部重点实验室主任、北京市生物医学工程高精尖创新中心主任;先后担任世界生物力学理事会(WCB)理事,世界华人生物医学工程协会(WACBE)主席,国际生物医学工程联合会(IFMBE)执委,中国生物医学工程学会理事长,医工整合联盟理事长,中国力学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



邓小燕 博士,教授,博士生导师;北京航空航天大学生物与医学工程学院教授;先后担任重庆大学生物工程学院院长,中国生物医学工程学会第六届理事,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)第五届副主任、第六至九届委员,中国生物物理学会生物力学及生物流变学专业委员会委员、副主任,《医用生物力学》《生物医学工程学杂志》《力学学报(英文版)》《生物物理学报》编委等。研究方向涉及生物力学、血流动力学、生物流变学、生物医学材料、心血管植介入器械等。1990年以来发表研究论文180余篇,其中SCI收录130余篇,累计SCI他引900余次,授权专利10余项,著书4章、译著1本。

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

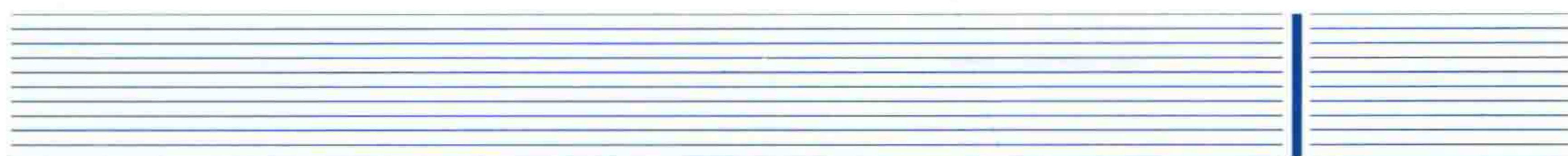
美国国家医学院院士

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們有关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們后辈的殷切希望。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。我們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

生物力学(biomechanics)是研究生命体变形和运动的学科,是力学与医学、生物学等学科相互结合、相互渗透而形成的一门典型的交叉学科。“生物力学之父”冯元桢(Y. C. Fung)先生对生物力学的描述是,“生物科学的原理和方法与力学的原理和方法相结合,认识生命过程的规律(定量),并用以维持、改善人的健康”。近些年来,生物力学发展迅速,特别是在肌骨系统和心血管系统领域的研究越来越深入,在生理病理的机理探究、临床手术方案制订、介入医疗器械设计等方面取得越来越多的成果,大大提高了工程科学服务生物学和医学的能力。

生物力学作为力学与生物学、医学的交叉学科,得益于一切工程科学的研究理论与方法,计算机建模与仿真在生物力学领域的应用即是其重要标志之一。计算机建模与仿真方法(或称数值计算方法)与理论分析方法、实验方法并称为科学研究的三大主要方法,且随着计算机技术和数值计算理论的飞速发展,已在现代科学研究中扮演着越来越重要的角色。近十年来,生物力学建模与仿真经历了从简单的理想模型到基于真实解剖结构的复杂建模跨越,从静态一维数学模型仿真到三维动态复杂生理条件下的物理、生理建模与仿真发展。目前生物力学建模与仿真已经渗透融合到生物力学研究的各个领域,成为生物力学研究的重要手段。

本书旨在总结 21 世纪以来我国在生物力学建模与仿真领域的研究成果,展示我国生物力学研究的实力与未来,为相关学科的科技工作者提供教学和研究的专业学术参考。本书的素材主要来自作者及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最新研究成果。本书的主要内容包括:生物力学建模仿真发展历程介绍,以及生物力学建模与仿真技术在血管支架设计与评价、血管手术的血流动力学分析、心血管系统内物质输运、易损斑块建模与风险评估、心脏和瓣膜的生物力学建模仿真及应用等;啄木鸟头部建模与仿真、人体头颈部生物力学建模及其在

航空领域的应用;眼生物力学建模与仿真、口腔种植术中骨改重建及其在航空领域的应用;人工颈椎间盘植入手术方案仿真与优化、膝关节前交叉韧带重建与仿真;足踝生物力学建模与仿真、预测宏微观骨强度的非线性有限元建模与仿真等。

本书的特色体现在:重点展示生物力学建模仿真与临床问题的结合,突出生物力学在解决临床问题中的作用;同时展示生物力学建模与仿真在新领域(如航空航天领域)的应用。本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研究生和科技工作者。

生物力学在我国起步虽晚于西方欧美国家,但是在近几十年内发展迅速,在生物力学建模与仿真这一前沿领域,部分工作已接近或达到国际先进水平。特别是在当前阶段,医工结合正成为新的研究热点,国内许多一流高校、科研院所正与各大高水平医院开展深度合作,生物力学建模与仿真正迎来新的机遇与发展空间,蓄势待发,适逢其时。本书及时总结了我国在该领域的研究成果,希望能在促进我国生物力学学科发展和人才培养方面贡献我们的力量。

在本书完成过程中,作者和合著者的团队成员和研究生对相关章节的研究工作作出了出色贡献,为各章节的撰写付出了艰辛的努力,在此对他们表示感谢!同时,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一并表示衷心感谢!感谢国家自然科学基金项目的资助!由于本书从组稿到出版,时间相对紧张,难免有纰漏之处,望读者不吝赐教、指正,以利于我们改正和提高。

樊瑜波 邓小燕

2016年12月于北京

目 录

1	绪论 / 樊瑜波 邓小燕	1
---	--------------	---

1.1	生物力学建模仿真及历程	1
1.1.1	心血管系统建模仿真	1
1.1.2	肌骨系统建模仿真	2
1.1.3	跨尺度耦合建模仿真	3
1.2	生物力学建模仿真在我国的发展概况及研究进展	4
	参考文献	5

2	血流动力学几何多尺度数值模拟 / 刘有军 王文馨 李鲍 杜建军	7
---	------------------------------------	---

2.1	血流动力学数学模型	7
2.1.1	三维模型	8
2.1.2	集中参数模型(零维模型)	10
2.2	血流动力学几何多尺度建模方法	16
2.2.1	几何多尺度模型的结构和类型	16
2.2.2	0D/3D 耦合界面处理	18
2.2.3	0D/3D 耦合计算实现	21
2.3	血流动力学几何多尺度数值模拟应用	22
2.3.1	单边肺动脉狭窄对 Glenn 手术血流动力学影响的数值模拟	22
2.3.2	主动脉缩窄的血流动力学几何多尺度数值模拟	30
	参考文献	36

3 血管支架的生物力学建模与仿真 / 乔爱科 李红霞 冯海全 39

3.1	球囊扩张支架扩张变形的建模与仿真	39
3.1.1	引言	39
3.1.2	方法	40
3.1.3	结果分析	42
3.1.4	小结	45
3.2	支架置入后的血流动力学建模与仿真	45
3.2.1	支架置入理想化椎动脉模型后的血流动力学建模与仿真	45
3.2.2	支架置入个性化椎动脉模型后的血流动力学建模与仿真	49
3.3	支架结构优化设计	55
3.3.1	血管支架力学性能的优化问题	56
3.3.2	有限元计算	57
3.3.3	优化结果	59
3.3.4	小结	62
3.4	支架置入后的疲劳寿命分析	62
3.4.1	支架疲劳寿命的评价方法	62
3.4.2	支架疲劳强度安全系数的计算	63
3.4.3	支架的疲劳强度分析	63
3.4.4	小结	69
	参考文献	70

4 聚乳酸基可降解支架的建模与仿真 / 樊瑜波 王丽珍
 储照伟 郭萌 73

4.1	聚乳酸基高分子聚合物降解机理	74
4.1.1	影响聚乳酸基材料降解的因素	75
4.1.2	聚乳酸材料的降解模型	75
4.2	PLGA 支架降解过程的数值模拟与实验验证	76
4.2.1	引言	76
4.2.2	模型与方法	77
4.2.3	结果	80
4.2.4	小结	82
4.3	降解方式对 PLGA 支架降解行为的影响	82
4.3.1	引言	82
4.3.2	模型与方法	83

4.3.3	结果	85
4.3.4	小结	88
4.4	展望	89
	参考文献	89
5	药物涂层支架药物传输仿真与优化 / 蒋文涛 陈宇 孙安强 王振泽	93
5.1	支架内再狭窄与药物涂层支架	94
5.1.1	支架内再狭窄	94
5.1.2	药物涂层支架	94
5.1.3	药物涂层支架的结构及作用原理	94
5.1.4	数值仿真与优化算法	97
5.2	支架几何结构对药物传输的影响	99
5.2.1	支架结构对药物浓度分布影响的数值分析	99
5.2.2	支架连接筋对药物浓度分布影响的数值分析	105
5.2.3	多支架构型对药物浓度分布影响的数值分析	107
5.2.4	支架构型的优化设计	111
5.3	血流动力学对药物涂层支架药物传输的影响	114
5.3.1	血管结构对药物浓度分布及传输的影响	115
5.3.2	血液非牛顿特性对药物传输的影响	118
5.4	展望	123
	参考文献	124
6	动脉瘤支架的生物力学建模与仿真 / 乔爱科 付文宇 王盛章	127
6.1	闭环与开环结构支架治疗 Willis 环动脉瘤血流动力学研究	127
6.1.1	Willis 环动脉瘤模型构建	127
6.1.2	支架模型构建	128
6.1.3	网格划分	129
6.1.4	数值计算方法求解假设及求解控制	129
6.1.5	计算结果	130
6.1.6	实验验证	131
6.1.7	小结	133
6.2	5 种支架置入个体化颈内动脉瘤模型的计算研究	133
6.2.1	引言	133
6.2.2	血管及支架模型的构建	133