



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

眼耳鼻咽喉生物力学

Biomechanics of Eyes and Otorhinolaryngology

陈维毅 孙秀珍 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

眼耳鼻咽喉生物力学

陈维毅 孙秀珍 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。眼耳鼻咽喉生物力学是生物力学的一个专门研究方向,本书系统地介绍了眼耳鼻咽喉生物力学的主要研究内容、基本方法和最新成果。全书共 15 章:第 1 章叙述了眼耳鼻咽喉生物力学研究的基本概况;第 2 章到第 7 章介绍眼力学,包括角巩膜的力学特性及近视眼治疗研究,青光眼、眼外伤的建模分析与实验研究,眼球运动建模及应用,角巩膜交联术的机制研究;第 8 章、第 9 章为鼻腔生物力学及应用,包括正常与病态鼻腔的结构与功能之间的关系,以及临床辅助治疗等方面的研究;第 10 章、第 11 章为咽喉生物力学,包括气道结构功能及 OSAHS 的生物力学研究;第 12 章到第 15 章介绍耳生物力学,包括耳听力系统与前庭平衡系统的生物力学建模分析及相关疾病诊疗的生物力学机制研究。

本书可作为相关专业研究生的生物力学课程教材或教学参考用书,也可供眼耳鼻咽喉科的临床医生及研究人员学习与参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

眼耳鼻咽喉生物力学 / 陈维毅, 孙秀珍主编. — 上海: 上海交通大学出版社, 2017
(生物力学研究前沿系列)
ISBN 978-7-313-18496-2

I. ①眼… II. ①陈… ②孙… III. ①眼-生物力学
②耳鼻咽喉科学-生物力学 IV. ①R322.9②R76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 302558 号

眼耳鼻咽喉生物力学

主 编: 陈维毅 孙秀珍

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: 567 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18496-2/R

定 价: 298.00 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: 25

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

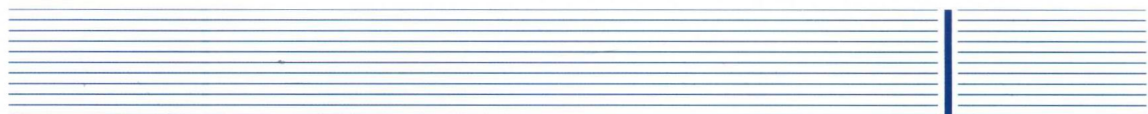
上海体育学院,教授 刘宇

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

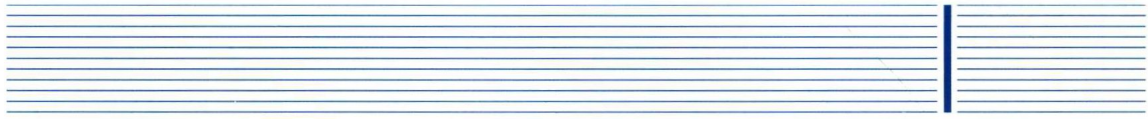


陈维毅 博士,教授,博士生导师;曾任太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所所长、力学系主任、校重点办主任和学术委员会秘书长;现任太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室主任、中国力学学会常务理事、中国生物医学工程学会理事、中国力学学会中国生物医学工程学会生物力学专业委员会(分会)主任委员、山西省力学学会理事长、山西省生物医学工程学会副理事长;主要研究方向为眼生物力学和骨力学,在国内外学术期刊及学术会议上发表论文100余篇,主编或参编专著4部、教材2部,研究成果获省级科学技术奖一等奖1项、二等奖6项。



孙秀珍 教授,主任医师,博士生导师;大连市优秀专家及政府特殊津贴获得者、大连市劳动模范;现任大连医科大学第二临床学院耳鼻咽喉科主任医师、教授,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,辽宁省力学学会常务理事、生物力学专业委员会主任委员,中国医师学会耳鼻咽喉科专委会第一届委员,辽宁省及大连市耳鼻咽喉科专业委员会副主任委员,《中国耳鼻咽喉头颈外科杂志》编委;担任大连市一级重点学科耳鼻咽喉学科带头人15年,长期从事耳鼻咽喉临床专业及器官生物力学研究,培养硕士和博士研究生50余名,在国内外学术期刊发表论文50余篇,获辽宁省科技进步二等奖3项、大连市科技进步一等奖1项。

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

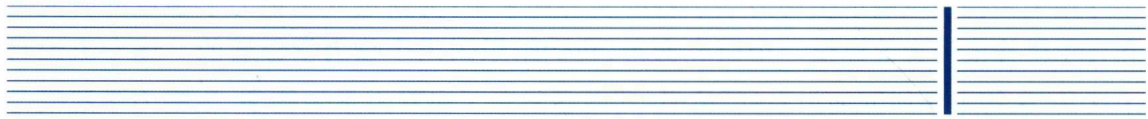
美国国家医学院院士

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、医学和生物学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。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。

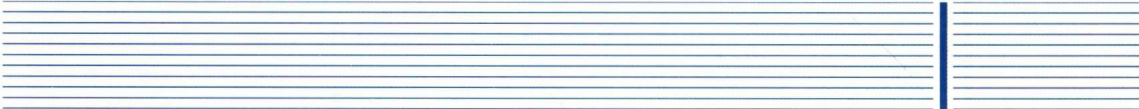
在本丛书完成过程中,各分册主编及其合著者的团队成员、研究生对相关章节的结果呈现作出了许多出色贡献,在此对他们表示感谢;同时,对本丛书所有被引用和参考的文献作者和出版商、对所有帮助过本丛书出版的朋友们一并表示衷心感谢!感谢国家自然科学基金项目的资助,可以说,没有国家自然科学基金的持续资助,就没有我国生物力学蓬勃发展的今天!

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



生物力学作为一门独立的新兴学科出现在 20 世纪 60 年代。当时以冯元桢先生为代表的一批美国学者致力于用力学原理与方法研究生命体及人体的生理、病理等问题,取得了一系列引人注目的成就。由此产生了多个生物力学国际学术组织和地区性学术团体,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。20 世纪 70 年代末冯元桢先生多次来华讲学,直接促成了我国生物力学队伍的建立和发展,特别是近二十年来,我国生物力学紧跟国际学术前沿,研究队伍不断壮大,研究内容从组织器官层次扩展到细胞生物大分子层次,研究领域涵盖了基础医学、康复工程、临床治疗、航空航天医学、健康医学等多个方面。

眼耳鼻咽喉生物力学是生物力学的一个专门研究方向。本书着重介绍眼耳鼻咽喉生物力学的主要研究内容、基本方法和最新研究成果,书中尽量避免冗繁的推导,以便初学者和临床医生了解眼耳鼻咽喉生物力学的基本概念、研究方法、主要研究方向和最新成果。

全书共分 15 章,其中第 1 章叙述了眼耳鼻咽喉生物力学研究的基本概况。第 2 章到第 7 章介绍眼生物力学的研究方法和研究成果,包括角巩膜的力学特性及与此相关的近视眼治疗研究、青光眼生物力学研究、眼外伤的生物力学仿真分析与实验研究、眼球运动模型的建立及其在治疗眼外肌疾患中的应用研究、角巩膜交联术的机制研究。第 8 章、第 9 章介绍正常鼻腔及结构异常鼻腔内气流场的生物力学建模分析及相关的治疗机械设计。第 10 章、第 11 章介绍上气道结构功能及阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合症(OSAHS)的生物力学研究。第 12 章到第 15 章介绍耳生物力学的研究方法和研究成果,包括耳听力系统的生物力学建模分析、前庭平衡系统的生物力学建模分析及耳相关疾病诊疗的生物力学机制研究等。

全书由陈维毅、孙秀珍负责规划和统稿工作。限于水平,书中存在的不妥之处,敬请读者指正。

作者感谢太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所、大连医科大学、大连理工大学、首都医科大学、上海大学、北京航空航天大学、山东省立医院及北京大学第三医院的同仁在本书编写过程中所给予的帮助,感谢上海交通大学姜宗来教授、大连理工大学刘迎曦教授的热心帮助与支持。感谢国家自然科学基金对本书研究内容的资助。

作者

2017年7月

目 录

1	绪论 / 陈维毅 孙秀珍	1
1.1	眼球组织的生物力学特性研究及建模分析	2
1.2	鼻腔生物力学数值模型的建立与“自适应”理论	5
1.3	国人上气道生物力学数值模型研究与临床应用	6
1.4	中耳科生物力学数值模型研究及应用	8
1.5	内耳感音系统与功能的生物数值模拟	9
1.6	内耳前庭与半规管平衡功能的生物力学	9
1.7	结语	11
	参考文献	12
2	角膜生物力学 / 李晓娜 张海霞 李林 陈维毅	15
2.1	角膜基本结构与屈光手术	15
2.1.1	角膜基本结构	15
2.1.2	角膜屈光手术	17
2.2	角膜生物力学特性	18
2.2.1	角膜力学特性实验研究	18
2.2.2	角膜材料本构关系及材料参数的确定	21
2.3	角膜基质细胞对力学刺激的反应	26
2.3.1	角膜基质细胞	26
2.3.2	力学微环境对角膜基质细胞生物学行为的影响	29
	参考文献	32

3	巩膜生物力学 / 陈维毅 李晓娜 王晓君 张全有	35
3.1	巩膜组织结构	35
3.2	巩膜的生物力学特性	36
3.2.1	巩膜组织力学特性检测方法	36
3.2.2	巩膜组织力学特性	38
3.3	高度近视眼与后巩膜加固术	40
3.3.1	高度近视眼概述	40
3.3.2	近视眼动物模型的建立方法	41
3.3.3	后巩膜加固术	42
3.3.4	后巩膜加固术后巩膜组织学特性及力学特性	44
3.4	巩膜成纤维细胞的力学特性	48
	参考文献	50
4	青光眼生物力学 / 刘志成 钱秀清 宋红芳 王乐今	51
4.1	青光眼及其发病机制	51
4.1.1	眼压与青光眼	51
4.1.2	眼底血流与青光眼	53
4.2	高眼压危险因素的生物力学	53
4.2.1	瞳孔阻滞仿真装置及虹膜力学特性	53
4.2.2	眼内压及前后房压强差的在体测量方法	58
4.2.3	植入式青光眼眼压监测系统	60
4.2.4	眼前节房水流域测量及数值模拟	62
4.2.5	小梁网形态学及房水流动通道研究	66
4.3	青光眼眼底损伤的生物力学	71
4.3.1	视神经纤维层与筛板	72
4.3.2	视盘三维重建及数值模拟	77
4.3.3	高眼压下视网膜与视神经损伤研究	79
	参考文献	86
5	眼外伤的仿真与实验研究 / 刘笑宇 耿晓琪 樊瑜波	89
5.1	眼外伤概述	89
5.2	眼损伤的实验研究	90
5.2.1	眼钝击伤实验研究	90
5.2.2	眼冲击伤实验研究	95