



生物力学研究前沿系列
总主编 姜宗来 樊瑜波

人体运动生物力学

Biomechanics of Human Movement

刘宇 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

人体运动生物力学

刘 宇 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。本书通过运动和动作控制、本体感觉、竞技/训练/损伤、运动装备、全民健身、康复医学、体育工程等不同学科间的相关主题,围绕如何提高运动能力、预防运动损伤这一主线,重点阐述了上述主题在新方法、新领域中的生物力学应用,并突出了近十年来我国学者在人体运动生物力学领域的研究成果,展现了我国现阶段运动生物力学研究的实力。

本书面向运动生物力学领域的高校及产学研机构,读者群为相关领域的研究生、教师、教练、科研人员,以及生物医学工程、临床骨科、运动医学科、康复科等有关领域的医师、治疗师和临床科技工作者。

图书在版编目(CIP)数据

人体运动生物力学/刘宇主编. —上海:上海交通大学出版社, 2017
(生物力学研究前沿系列)
ISBN 978-7-313-18347-7

I. ①人… II. ①刘… III. ①运动生物力学 IV.
①G804.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 267683 号

人体运动生物力学

主 编: 刘 宇

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: 714 千字

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-18347-7/G

定 价: 398.00 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: 31.5

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



刘宇 博士,教授,博士生导师;教育部“长江学者”特聘教授、中组部万人计划“教学名师”、上海市“领军人才”、上海高校特聘教授“东方学者”;享受国务院政府特殊津贴;现任上海体育学院运动科学学院院长、运动健身科技教育部重点实验室主任;先后担任国际生物力学学会(ISB)执委、亚洲运动训练科学学会(AACS)副主席、中华全国体育总会委员、中国老年学与老年医学学会运动与健康科学分会副主任委员、中国体育科学学会运动生物力学分会副主任委员、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、*Journal of Sport & Health Science* (SCI)副主编、*Footwear Science*、《体育科学》、《医用生物力学》和《中国运动医学杂志》编委等;长期从事运动生物力学的研究工作,发表科研论文 200 余篇(SCI 收录 50 余篇),获发明专利 15 项(含美国专利 1 项),获国家级教学成果一等奖、上海市科技进步一等奖等奖项。

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的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



人体运动是自然界最复杂的现象,它是神经、肌肉、骨骼、关节以及外在环境协同作用的结果。神经支配肌肉收缩产生力,作用于骨骼系统完成各种机械动作,而执行动作的系统又是一套力学系统。因此,无论是人体基础动作(走、跑、跳),还是高级竞技动作(短跑、跳高、投掷、高尔夫球挥杆等),要想正确认识人体运动的本质,就必须从机制上搞清运动过程中神经肌肉动作控制的生物力学原理。人体运动生物力学,即研究人体在外力和内部受控肌力作用下的运动规律,并通过力学和生物学的观点及方法对人体运动中各项动作进行研究,辅以数学、力学、生物学、计算机模型及运动技术原理的形式进行定性与定量研究。其涵盖范围主要集中于人体一般或高级动作(技术)控制、运动训练、运动损伤与防护、运动器材和装备、全民健身与医学康复等。并且,人体运动生物力学越来越多地在改善运动技术、丰富训练手段、设计与研发运动器材、预防运动伤害及损伤康复等方面,凸显了其重要的作用与意义。

研究人体运动生物力学的终极目标:一是提高人类运动能力;二是减少与预防运动损伤,并最终为提高人类能力与健康服务。本书总结 21 世纪以来,特别是近十年,我国运动生物力学研究在上述两方面取得的新成果,并结合国内外同行在该领域的最新研究进展,体现我国当代运动生物力学研究的特色和水平。因此,不同于一般的运动生物力学教科书,本书并不针对运动生物力学的基本概念和理论体系进行详细介绍,也不仅仅围绕具体运动项目进行探讨,而是通过运动/动作控制、本体感觉、竞技/训练/损伤、运动装备、全民健身、体育工程等不同学科间的相关主题,围绕人体运动这一主线,重点阐述了上述主题在新方法、新领域中的生物力学应用,并突出了 2000 年以来,我国学者在人体运动生物力学领域的研究与成果,全面展现了我国现阶段运动生物力学研究的实力。

本书共分 18 章,每一章在服务于全书的前提下自成体系。其中,第 1 章“绪论”由刘宇教授、傅维杰副教授撰写,主要介绍了运动生物力学的发展简史和现状;第 2 章“生物

力学与神经动作控制”由刘宇教授撰写,重点阐述了生物力学与运动控制相关的技术、研究成果与发展趋势;第3章“本体感觉与神经动作控制”由韩甲教授撰写,主要介绍了本体感觉与神经中枢之间的关系、评价方法及其在动作控制中的作用;第4章“人体多关节运动控制”由孙宇亮博士和刘宇教授共同完成,重点介绍了环节互动动力学分析及主导关节假说的相关研究;第5章“人体运动的肌电图与肌动图学”由傅维杰副教授、田石榴副教授和刘宇教授共同完成,主要阐述了肌电图和肌动图方法及其在人体运动中的最新应用;第6章“运动技术的生物力学分析”中的6.1~6.3节由于冰教授、刘卉教授、郭庆仙国家级教练共同完成,分析三级跳、跳高、铁饼和标枪投掷的生物力学,6.4节由单共兵教授、梁慧敏和万炳军共同完成,从挥杆的运动学、动力学、力学模型、反馈训练等方面阐述了高尔夫的生物力学特征。

本书第7章“人体运动的建模与仿真”由郝卫亚研究员、钟运健副教授、吴成亮讲师和肖晓飞博士共同完成,重点介绍了建模和仿真技术在跳马、自由体操、空中动作和短跑中的应用;第8章“非线性系统及其在人体运动研究中的应用”由李立教授撰写,主要阐述了非线性系统在人体运动研究中的应用;第9章“人体运动的影像学分析”由王少白教授和蔡宗远特聘研究员合作编写,主要阐述了最新的运动影像学分析;第10章“力量训练的神经肌肉适应”由田石榴副教授、刘宇教授和井兰香副教授共同完成撰写,介绍了力量和训练的神经肌肉适应现象及机理;第11章“振动力量训练的效果与力学生物学机制”由史仍飞副教授和危小焰教授共同撰写,主要探讨了振动训练在运动能力和老年康复中的力学生物学问题;第12章“脊柱运动生物力学基础”由陈博博士、邓廉夫教授和吕维加教授合作完成,主要阐述了脊柱的运动学、动力学以及脊柱损伤的生物力学研究。

本书第13章“下肢常见运动损伤的生物力学”由刘卉教授、于冰教授、李翰君副教授和张美珍讲师合作撰写,重点阐述了前交叉韧带损伤、腓绳肌损伤和踝关节不稳的生物力学机制;第14章“运动鞋与装备的生物力学”由傅维杰副教授、魏书涛博士和刘宇教授撰写,从足-鞋系统、紧身装备、肌内效贴3大方面探讨生物力学与装备之间的关系;第15章“步行动作的运动生物力学”由钱竞光教授撰写,重点探讨步态的生物力学、仿真建模及其应用研究;第16章“太极拳中的生物力学”由毛德伟教授、孙威博士、张翠博士、宋祺鹏博士和黄灵燕博士共同撰写,主要介绍太极拳的生物力学特征和效果研究;第17章“运动影响老年痴呆症的分子动力学模拟”由钱振宇博士撰写,详细描述了老年痴呆症的发病机制、分子动力学的原理方法以及运动影响淀粉样蛋白聚集的模拟研究;第18章“老年人运动与健康的生物力学”由李海鹏博士、孙泊副教授和吕娇娇博士共同撰写,以老年人肌力流失、人体运动能耗、老年人与认知三大主题出发,探讨生物力学与大众健康的关系。

感谢本书所有作者的辛苦付出。对本书存在的不足和疏漏之处,恳请读者批评指正。

刘宇

2017年10月

目 录

1	绪论 / 刘宇 傅维杰	1
1.1	人体运动生物力学概述	1
1.2	人体运动生物力学的历史进程与学科发展	1
1.2.1	历史回望	1
1.2.2	今后发展方向	5
1.3	人体运动生物力学的研究内容	6
1.3.1	改善运动技术	6
1.3.2	改良训练手段	7
1.3.3	改进运动器材和装备	8
1.3.4	预防运动损伤	10
1.3.5	促进运动健康和康复	11
	参考文献	12
2	生物力学与神经动作控制 / 刘宇	15
2.1	生物力学与运动控制的关系	15
2.1.1	生物力学与运动控制的术语	15
2.1.2	生物力学与生理学以及运动控制的关系	16
2.2	运动控制的生物力学研究技术	18
2.2.1	运动学影像技术	19
2.2.2	生物传感器技术	20
2.2.3	生物力学建模与仿真	21

2.3	运动控制的生物力学原理	23
2.3.1	获取运动速度的最大冲量原理	23
2.3.2	反向动作的最佳起始力原理	24
2.3.3	打击碰撞的动量保持原理	25
2.3.4	水上运动驱动力之升力原理	25
2.3.5	肌肉屈伸功能依动作而定原理(motor task dependent)	27
2.4	运动控制的生物力学相关研究	29
2.4.1	运动控制的肢体刚度研究	29
2.4.2	运动控制的环节互动动力学研究	36
	参考文献	41
3	本体感觉与神经动作控制 / 韩甲	45
3.1	本体感觉在神经动作控制中的作用	45
3.2	本体感觉: 110年历史与近期的概念理解	45
3.3	本体感觉机能的外周与中枢神经机制	47
3.3.1	本体感觉机能的外周神经机制	47
3.3.2	本体感觉机能的中枢神经机制	49
3.4	本体感觉机能的测量与评价方法	50
3.4.1	本体感觉机能评价方法起源	50
3.4.2	本体感觉机能的测试设备	52
3.4.3	本体感觉机能测试方法操作流程	53
3.4.4	本体感觉机能测试方法的实验模板	54
3.5	下肢关节本体感觉与运动表现	56
3.6	下肢关节本体感觉与运动损伤	57
3.7	运动中下肢本体感觉对于平衡控制的机制	58
3.8	运动相关的踝关节本体感觉评估方法的选择	59
3.9	改善运动中平衡控制的踝关节本体感觉的干预措施	60
3.9.1	被动干预	60
3.9.2	主动干预	61
3.9.3	其他考虑	61
3.10	结语	62
	参考文献	62
4	人体多关节运动控制 / 孙宇亮 刘宇	67
4.1	生物力学特性与多关节肢体运动控制特点	67