

运动生物力学进展

ADVANCES IN SPORTS BIOMECHANICS

郑秀璇 等编著

国防工业出版社

运动生物力学进展

ADVANCES IN SPORTS BIOMECHANICS

清 华 大 学 郑秀媛 贾书惠
北京师范大学 侯 曼 编著
上海体育科研所 忻鼎亮 仰红慧

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

运动生物力学进展/郑秀瑗等编著. —北京:国防工业出版社,1998.4

ISBN 7-118-01830-9

I. 运… II. 郑… III. 运动生物力学-科学研究-进展
IV. G804.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 21391 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{3}{8}$ 264 千字

1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:16.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

IV

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模
主任委员 黄宁
副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允
 曾铎
秘书长 刘琯德
委员 尤子平 朱森元 朵英贤
(按姓氏笔划为序) 刘仁 何庆芝 何国伟
 何新贵 宋家树 张汝果
 范学虹 胡万忱 柯有安
 侯迁 侯正明 莫梧生
 崔尔杰

前 言

本书是一本介绍当前运动生物力学最新实验方法和理论分析的专著。人体运动是自然界最复杂的现象,为了分析复杂的人体运动规律,需要根据最基本的生物学和力学理论作出解释。因此,运动生物力学是一门边缘学科。它既要有较强的理论支撑及实践基础,又要提出解决实际问题的途径与方法,所以它又是一门应用学科。因此它以其独特的内容及研究方式逐渐形成了一门独立的学科。本世纪中期已经开始研究,近 20 年来发展十分迅速,在理工、医学和体育各类大学中已独立开设这门课程,体育院校定为必修的专业基础课,有些院校还建立了有关专业,出版了少量的专著和教材。这些专著和教材大部分是十年前出版,它们的科学性、先进性和实用性均有待补充和提高。正是基于这一情况,作者动议撰写这本专著。

本书撰写的指导思想是:全书重点系统介绍运动生物力学的理论研究方法、各种基本参数的实验采集及数据处理,以及运动生物力学在不同科技领域中的应用。有关力学基本理论部分是以人体运动实用力学为主。力争达到先进性和实用性,为生物力学的发展培养跨世纪人才做出贡献。

本书的先进性体现在:重点介绍当前国内外在该学科上居领先地位的科研成果,其中包括作者在近期完成的属填补我国空白,并居国际国内先进水平的科研成果;高科技在运动生物力学研究中的应用;以及虽然不很成熟,但有发展前景的阶段成果。书中所引用的《中国正常人体惯性参数测定与统计》,由于它具有国际领先水平的 CT 技术、首次测定中国人体的惯性参数,从而结束了用外国人的参数分析中国人运动的历史等,此项科技成果已于 1997

年获得国家体委科学进步一等奖。

本书的实用性体现在：介绍人体结构力学、人体运动生物力学的研究方法、分析动作技术的生物力学等问题，使生物学与人体运动实用力学密切而有机地结合起来。通过实例介绍近年来国内外如何利用这些先进方法解决国防、体育、医学和工业等领域实际问题。希望这部分内容能对教师、教练员、教官及科研人员们的教学、训练和研究工作起到启迪作用。

本书所介绍的近期国内外有关方面科研成果，其中有：中国人体尺寸库、中国人体各组织与器官的密度、根据体态特征预算人体环节惯性参数的回归方程、中国假人的设计与计算、计算中国成年人各种不同姿势总体质心的计算机软件等。以上均是我国第一次系统发表的科研成果。此外，还介绍近年来将多体系统动力学研究人体运动，运用计算机数值仿真技术进行运动规律与运动各项指标的预估等内容。

本书可作为运动生物力学科技工作者、教师科研工作的参考资料，也可作为要求较高的本科生和研究生学习“运动生物力学”课程的教学参考书。

本书由清华大学郑秀媛教授、贾书惠教授，北京师范大学侯曼副教授，上海体育科研所忻鼎亮研究员、仰红慧助理研究员等撰写而成。第一章和第二章的大部分、第三章和第六章少部分由郑秀媛执笔；第四章由忻鼎亮和贾书惠执笔；第五章和第六章大部分由侯曼执笔；第二章中运动图像采集和分析部分由仰红慧执笔。全书由郑秀媛、贾书惠统审定稿。

在编写过程中得到张汝国教授的指导、林洪与方兴等同志提供宝贵的资料，在此表示衷心的感谢。本书作者感谢国家体委和国家技术监督局提供科研基金的支持，感谢“中国正常人体惯性参数测定与统计”和“中国人体质心的研究”两课题的合作者的密切配合。感谢国防科技图书出版基金评审委员会和上海体育科研所给予本书出版资助。感谢国防工业出版社以及本书的责任编辑蒋怡同志对本书出版付出的辛勤劳动和所给予深入细致的帮助。最后

感谢一切支持与鼓励我们的同志。

由于运动生物力学涉及面很宽,作者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请读者指正。

全体作者
1997年4月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 运动生物力学基本参数的采集与处理方法	6
第一节 运动生物力学常用的基本参数	6
第二节 测量运动学参数的方法	7
2.1 运动图像采集与分析	7
2.2 光电运动检测分析系统	32
第三节 非电量测量原理与传感器	44
3.1 非电量电测法的工作原理	44
3.2 传感器和传感元件	45
3.3 国内外数据采集系统的现状	51
第四节 各种力学参数的测量方法	54
4.1 测角仪	55
4.2 加速度计	56
4.3 惯性式传感器	66
4.4 位移传感器	67
4.5 力传感器	67
参考文献	79
第三章 人体基本参数测试和应用	81
第一节 人体的基本参数	81
1.1 中国人体的基本参数	82
1.2 人体基本参数实测的新方法	93
第二节 中国假人设计	122
2.1 提供设计假人参数的依据	123
2.2 人体各环节的质量分布和质心位置回归方程的选择	123
2.3 人体各环节的长度及围度的确定	123
2.4 人体各环节的断面形状	125

第三节	计算各种不同姿势整体质心计算机软件的研制	125
第四节	人体整体质心测量	128
4.1	测一维质心的两支点磅秤显示的重心板	128
4.2	测二维质心的三支点电子秤显示的重心板	129
4.3	测一维或二维质心的四支点电子秤显示的重心板	130
参考文献	132
第四章	运动生物力学的理论分析方法	133
第一节	理论方法的产生和发展	133
1.1	近年来理论方法的发展状况	133
1.2	运动生物力学理论方法的研究	134
1.3	理论分析的基本特征概述	136
第二节	理论分析的方法和步骤	137
2.1	具体运动动作的简化和分析	138
2.2	确定目标函数,运动描述的数学化	139
2.3	系统约束条件的分析和假定	140
2.4	建立系统动力学方程并求解	141
2.5	结论解释和误差分析	142
第三节	理论方法解题实例	143
3.1	原地垂直跳	143
3.2	步行运动	145
3.3	单杠振浪	148
3.4	赛艇运动	150
第四节	建立各种人体动力学方程方法简介	154
4.1	动力学普遍定理	154
4.2	拉格朗日方程	156
4.3	Kane 方法	159
4.4	Roberson & Wittenburg 方法(R/W 方法)	163
4.5	Hazte 方法	168
第五节	一种现代研究方法——计算机数值仿真	169
5.1	方法概述	169
5.2	飞机弹射救生中上肢甩打运动的仿真	175
5.3	跳远运动的仿真	188
第六节	能量法	191

6.1 能量法的理论	191
6.2 能量法的应用	192
6.3 能量分配问题	195
参考文献	197
第五章 人体运动系统的生物力学	199
第一节 人体结构力学基础	199
1.1 应力与应变	199
1.2 粘弹性材料的特点	201
1.3 疲劳与断裂韧性的特点	202
第二节 骨骼生物力学	204
2.1 骨骼应力—应变曲线	204
2.2 骨骼的受力形式与性质	207
2.3 骨骼的强度	211
2.4 影响骨力学性质的因素	213
2.5 骨折和骨的再塑造	217
第三节 肌肉生物力学	225
3.1 肌肉结构的力学模型	226
3.2 肌肉收缩力—长度特性	228
3.3 肌肉收缩力—速度特性	230
3.4 肌肉收缩功、功率	234
3.5 肌肉松弛	237
3.6 肌肉弹性	238
3.7 太空中失重对肌肉的影响	240
第四节 韧带和肌腱生物力学	241
4.1 韧带和肌腱的应力—应变曲线	241
4.2 韧带和肌腱的力学参数	244
4.3 影响韧带和肌腱力学性质的因素	246
第五节 关节生物力学	249
5.1 关节运动学	249
5.2 关节静力学	255
5.3 关节动力学	259
5.4 脊柱关节模型	263
参考文献	270

第六章 特殊条件下的生物力学问题	271
第一节 航空、航天中的超重问题	271
1.1 正超重	272
1.2 负超重	276
1.3 横向超重	277
第二节 人体受冲击力的研究	278
2.1 冲击载荷对人体的作用	278
2.2 人从高处跳落或坠落	279
2.3 撞击伤害和耐力	281
第三节 运动中的流体力学问题	288
3.1 人体与物体在流体中运动时受到的阻力	288
3.2 空气对物体的作用	292
3.3 弹道曲线的研究	305
参考文献	311

Content

Chapter 1 Preface	1
Chapter 2 Collection and treatment of the fundamental parameters of sports biomechanics	6
§ 1 Common fundamental parental parament of sports biome- chanics	6
§ 2 Method of determining kinetic parameters	7
2.1 Collection and analysis of movements pictures	7
2.2 Photoelectrical testing and analytical system	32
§ 3 Principle of nonelectrical measurement and sensor	44
3.1 Principle of nonelectrical measurement	44
3.2 Sensor and sensing element	45
3.3 Present condition of data-collecting system at home and abroad	51
§ 4 Technique of measuring various mechanical parameters	54
4.1 Goniometer	55
4.2 Accelerometer	56
4.3 Inertial sensor	66
4.4 Displacement sensor	67
4.5 Force sensor	67
References	79
Chapter 3 Measurement, test and application of funda- mental human-body parameters	81
§ 1 Fundamental Human-body parameters	81
1.1 Fundamental parameters of Chinese human-body parameters	82
1.2 Actual measuring technique of human-body parameters	93
§ 2 Design of Chinese dummyman	122
2.1 Basis provided for designing dummy	123

2.2	Distribution of masses of human-body segments and selection of regression equations for calculation mass-center positions	123
2.3	Determination of the lengths and the circumferences of human-body segments	123
2.4	Cross-section shape of human-body segments	125
§ 3	Development of software for computing various whole-body mass-centers of various postures	125
§ 4	Measurement of human whole-mass center	128
4.1	Center-of-gravity plate of two-pivot platform scale measuring one-dimensional mass centers	128
4.2	Center-of-Gravity plate of three-pivot electronic scale measuring two-dimensional mass centers	129
4.3	Center-of-gravity plate of four-pivot electronic scale measuring one- or two-dimensional mass centers	130
	References	132
Chapter 4 Theoretical analytical method of sports biomechanics		
§ 1	Formation and development of the theoretical method	133
1.1	The state of the art of the theoretical method	133
1.2	Study of the theoretical method of sports biomechanics	134
1.3	Survey of the essential features of the theoretical method	136
§ 2	Method and procedure of the theoretical analysis	137
2.1	Simplification and analysis of human body movements	138
2.2	Determination of objective function and mathematical formulation of movements description	139
2.3	Analysis and assumption of constraints for human-body system	140
2.4	Formulation of dynamic equations and their solution	141
2.5	Conclusion and error analysis	142
§ 3	Examples of application of theoretical method	143
3.1	Vertical jumping	143
3.2	Walking	145
3.3	Horizontal bar swing	148
3.4	Rowing	150

§ 4	Brief introduction to formulation of dynamic equations of human body.....	154
4.1	General theorems of dynamics	154
4.2	Lagrange's equations	156
4.3	Kane's method	159
4.4	R/W method	163
4.5	Hazte method	168
§ 5	A modern scientific method— computer numerical simulation	169
5.1	Brief introduction	169
5.2	Numerical simulation of upper limbs flail motion in escape ejection from aircraft	175
5.3	Numerical simulation of long jump	188
§ 6	Energy method	191
6.1	Theory of energy method	191
6.2	Applications of energy method	192
6.3	Problems of energy distribution	195
	References	197
Chapter 5 Biomechanics of human-body moving system ...		199
§ 1	Basis of human-body structural mechanics	199
1.1	Stress and strain	199
1.2	Characteristics of viscoelastic material	201
1.3	Characteristics of fatigue and fracture toughness	202
§ 2	Biomechanics of bones	204
2.1	Stress-strain characteristics of bones	204
2.2	Stressed form and behavior of bones	207
2.3	Strength of bones	211
2.4	Factors having influences on the mechanical behavior of bones	213
2.5	Fracture of bones and their remolding	217
§ 3	Biomechanics of muscles	225
3.1	Biomechanical model of muscles	226
3.2	Contraction force-length characteristics of muscles	228
3.3	Contraction force-speed characteristics of muscles	230

3.4	Contraction work and power of muscles	234
3.5	Relaxation of muscles	237
3.6	Elasticity of muscles	238
3.7	In aerospace, influence of agravity on muscles	240
§ 4	Biomechanics of ligaments and tendons	241
4.1	Stress-strain characteristics of ligaments and tendons	241
4.2	Mechanical parameters of ligaments and tendons	244
4.3	Factors having influences on the mechanical behaviors of ligaments and tendons	246
§ 5	Biomechanics of joints	249
5.1	Kinetics of joints	249
5.2	Statics of joints	255
5.3	Dynamics of joints	259
5.4	Models of spinal joints	263
	References	270
Chapter 6 Biomechanica in special conditions		271
§ 1	Problems in G-environment of aerospace	271
1.1	Positive G-environment	272
1.2	Negative G-environment	276
1.3	Transverse G-environment	277
§ 2	Study on human-body under impact	278
2.1	Effect of impact load on human-body	278
2.2	Jumping down or falling down of human-body from a height	279
2.3	Impact injury and endurance	281
§ 3	Fluid mechanics in motion	288
3.1	Drag to a human-body or an object moving in fluid	288
3.2	Effect of air on an object	292
3.3	Study on ballistic curve	305
	References	311