

现代运动生物力学

MODERN SPORTS BIOMECHANICS

清 华 大 学 郑秀媛 贾书惠 高云峰
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

现代运动生物力学 / 郑秀媛等编著. —北京: 国防工业出版社, 2002. 10

ISBN 7-118-02926-2

I. 现... II. 郑... III. 运动生物力学
IV. G804.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 061755 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)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 14 1/8 360 千字

2002 年 10 月第 1 版 2002 年 10 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 28.00 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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部国防工业出版社列选出版。

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

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,原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和武器装备建设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 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序)

刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

前 言

本书是《运动生物力学进展》一书的修订本。《运动生物力学进展》一书出版后深受读者欢迎。由于出版量较少,现已脱销,读者强烈要求重印。作者认为,本学科近年来在不断的不断发展,有不少新的信息值得向读者介绍。重印不如补充修订,把陈旧的和其他书中已经介绍过的内容删去,增补新的内容,包括作者最新的科研成果。修订本基本能体现我国 20 世纪 90 年代后期的水平,为此改名为《现代运动生物力学》。

本书是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加以解释。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,为此它以其独特的内容及研究方式在 20 世纪中期逐渐形成了一门独立的学科。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 10 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,作者动议撰写有关这方面的专著。

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 21 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,其中包括作者们在近期完成的属于填补我国空白,并居国内外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》,由于它应用至今仍处于国际领先水平的“分类赋值处理 CT 图像技术”获得中国人体的惯性参数,此项科技成果已于 1997 年获得国家体委科技进步一等奖,1998 年获得国家科技进步二等奖。由它派生的课题《中国成年人质心的研究》获得国家教委科技进步二等奖,并以此成果为基础制订了《成年人质心》国家标准,结束了用外国人的参数分析中国人运动的历史。其他还有飞机弹射救生中上肢甩打运动的仿真及体操动作的仿真、运载火箭整流罩分离时“呼吸”运动的测定以及可编程控制器在训练器材上的应用,等等。这些成果得到国内专家一致好评,均处于国际先进和国内领先水平,个别项目例如可编程控制器在水上牵引训练系统中的应用属国内外首创。

本书的实用性体现在:介绍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。例如利用作者提出的“比例配置法”设计的中国形体假人,参加我国航天飞船的研制工作,设计和制造的这些假人已经随神州 1、2、3 号航天飞船上天,为航天员上天提供十分宝贵的数据。还有在特殊条件下的生物力学问题例如人在超重、失重、冲击及流体中的运动规律;也有射击和射箭的生物力学问题。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、飞机弹射救生中飞行员上肢甩打运动的仿真等。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先估算等内容,它是很有发展前途的方法。

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、贾书惠教授和高云峰副教授、北京师范大学侯曼副教授、上海体育科学研究所忻鼎亮研究员和仰红慧副研究员等撰写而成。第1章和第2章的大部分内容及第3章的全部、第7章的少部分由郑秀媛执笔;第4章由忻鼎亮、贾书惠执笔;第5章由高云峰、贾书惠执笔;第6章和第7章大部分由侯曼执笔;第2章中运动图像采集和分析部分由仰红慧执笔;第7章少部分内容由高云峰执笔。全书由郑秀媛和贾书惠最后统一审定。

在编写过程中,林洪、方兴与刘卉等同志提供宝贵的资料,在此表示衷心的感谢。感谢国家体育总局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对本书出版的支持和鼓励。感谢国防工业出版社以及本书的蒋怡编审、责任编辑朱秀芬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
2002年5月

目 录

第1章 绪论	1
第2章 运动生物力学基本参数的采集与处理方法	7
2.1 运动生物力学常用的基本参数	7
2.2 测量运动学参数的方法	8
2.2.1 运动图像采集与分析	8
2.2.2 光电运动检测分析系统	35
2.3 运动生物力学常用的非电量测量原理与传感器	45
2.3.1 非电量电测法的工作原理	45
2.3.2 传感器和传感元件的作用与技术条件	46
2.3.3 测角仪	52
2.3.4 惯性式传感器	58
2.3.5 加速度计	59
2.3.6 位移传感器	67
2.3.7 力传感器	68
2.4 数据采集与数据处理	86
2.4.1 国内数据采集与数据处理系统的现状	87
2.4.2 国外数据采集系统的现状	90
2.4.3 国内外静态测试仪器的比较	91
2.4.4 国内外动态测试仪器的比较	92
2.5 可编程控制器在生物力学中的应用	93
2.5.1 概论	93
2.5.2 水上牵引训练系统的组成和功能	94
2.5.3 传动系统和可编程控制系统	95
2.5.4 可编程控制系统设计	95
参考文献	98

第3章 人体基本参数测试和应用	100
3.1 人体的基本参数	100
3.1.1 中国人体的基本参数	101
3.1.2 人体惯性参数实测的新方法	111
3.2 中国形体假人设计	145
3.2.1 提供设计假人参数的依据	145
3.2.2 人体各环节的质量分布和质心位置回归 方程的选择	146
3.2.3 人体各环节的长度及围度的确定	146
3.2.4 人体各环节的断面形状	147
3.3 人体整体质心测量	148
3.3.1 测二维质心的三支点电子秤显示的重心板	148
3.3.2 测一维或二维质心的四支点电子秤显示 的重心板	149
3.4 人体转动惯量测量	151
3.4.1 三线摆测量人体环节转动惯量的方法与 实验设备	151
3.4.2 研究样本的选取	154
3.4.3 测量结果	156
3.4.4 对CT法确定的计算转动惯量回归方程与 三线摆测试的转动惯量的评价	157
参考文献	163
第4章 运动生物力学的理论分析方法	165
4.1 理论方法的产生和发展	165
4.1.1 近年来理论方法的发展状况	165
4.1.2 运动生物力学理论方法的研究	166
4.1.3 理论分析的基本特征概述	168
4.2 理论分析的方法和步骤	170
4.2.1 具体运动动作的简化和建立人体模型	170
4.2.2 确定目标函数,将运动作数学化描述	171

4.2.3	系统约束条件的分析和假定	172
4.2.4	建立系统动力学方程并求解	173
4.2.5	结论解释和误差分析	174
4.3	理论方法解题实例	175
4.3.1	原地垂直跳	175
4.3.2	步行运动	177
4.3.3	单杠振浪	180
4.3.4	赛艇运动	183
4.4	建立各种人体动力学方程方法简介	187
4.4.1	动力学普遍定理	187
4.4.2	拉格朗日方程	189
4.4.3	Kane 方法	193
4.4.4	Roberson & Wittenburg 方法(R/W 方法)	196
4.4.5	Hazte 方法	202
4.5	能量法	203
4.5.1	能量法的理论	203
4.5.2	能量法的应用	204
4.5.3	能量分配问题	206
	参考文献	208
第 5 章	运动生物力学中的计算机数值仿真	210
5.1	计算机数值仿真的介绍	210
5.1.1	概述	210
5.1.2	现有商用软件介绍	211
5.1.3	仿真处理的主要步骤	216
5.2	体操运动员单杠回环运动的仿真	218
5.2.1	研究体操运动员单杠回环运动的意义	218
5.2.2	动力学方程建立	219
5.2.3	仿真结果	226
5.3	飞机弹射救生中飞行员上肢甩打运动的仿真	232
5.3.1	研究上肢甩打运动的意义	232

5.3.2 动力学模型建立	235
5.3.3 数值仿真结果	250
5.4 数据处理方法	256
5.4.1 概述	256
5.4.2 数据前处理中的一些算法	257
5.4.3 微分方程组求解算法	266
5.4.4 计算结果验证方法	267
5.4.5 数据的图形显示	270
参考文献	274
第 6 章 人脑颅骨及运动系统的生物力学	277
6.1 脑颅骨的生物力学	278
6.1.1 脑颅骨的生物力学模型	278
6.1.2 脑颅骨的粘弹性	289
6.1.3 脑颅骨受冲击力的实验研究	291
6.2 肩、髋关节的力学模型	294
6.2.1 肩部关节力学模型	294
6.2.2 髋关节力学模型	301
6.3 膝关节力学模型	314
6.3.1 膝关节现象模型	316
6.3.2 膝关节运动模型	317
6.3.3 膝关节静力和准静力模型	318
6.3.4 膝关节动力模型	320
6.4 其他关节力学模型	329
6.4.1 肘和腕关节模型	329
6.4.2 足跖趾骨关节模型	333
6.4.3 踝关节模型	339
6.4.4 脊柱关节模型	342
6.5 骨的机电性质	347
6.5.1 骨的压电效应	348
6.5.2 骨内动电现象	353

6.5.3 骨重建	359
6.6 人体主要关节的运动学参数	363
6.6.1 肩关节	363
6.6.2 肘关节	366
6.6.3 腕关节	366
6.6.4 髋关节	366
6.6.5 膝关节	367
6.6.6 踝关节	368
6.6.7 脊柱	368
参考文献	369
第7章 运动生物力学中的几个特例	374
7.1 航空、航天中的超重问题	374
7.1.1 正超重	375
7.1.2 负超重	379
7.1.3 横向超重	380
7.2 航空、航天中的失重问题	381
7.2.1 失重对人体的影响	382
7.2.2 航天运动病	385
7.2.3 人工重力	386
7.3 人体受冲击力的研究	389
7.3.1 冲击载荷对人体的作用	389
7.3.2 人从高处跳落或坠落	390
7.3.3 撞击伤害和耐力	392
7.4 步态分析及步态测试系统	398
7.4.1 步态分析研究	399
7.4.2 步态测试仪器发展概况	407
7.5 其他方面的运动生物力学问题	415
7.5.1 空气对铁饼的作用	415
7.5.2 现代射箭运动中弓的减振分析	421
参考文献	425

Content

Chapter 1	Preface	1
Chapter 2	Collection and treatment of the fundamental parameters of sports biomechanics	7
2.1	Common fundamental parameters of sports biomechanics	7
2.2	Method of determining kinematic parameters	8
2.2.1	Collection and analysis of moving pictures	8
2.2.2	Photoelectrical Testing and analytical system of movements	35
2.3	Principle of non-electrical measurements and their sensors of sports biomechanics	45
2.3.1	Principle of non-electrical measurements	45
2.3.2	Function and specifications of sensors and sensing elements	46
2.3.3	Goniometer	52
2.3.4	Inertial sensor	58
2.3.5	Accelerometer	59
2.3.6	Displacement sensor	67
2.3.7	Force sensor	68
2.4	Data collection and data processing	86
2.4.1	Present condition of data collecting systems and data processing systems at home	87
2.4.2	Present condition of data collecting systems abroad	90

2.4.3	Comparison of static measuring instrument at home with abroad	91
2.4.4	Comparison of dynamic measuring instrument at home with abroad	92
2.5	Application of the programmable controllers to biomechanics	93
2.5.1	Introduction	93
2.5.2	Composition and function of the trailing training system of swimming	94
2.5.3	Driving system and programmable controlling system	95
2.5.4	Design of the programmable controlling system	95
	References	98
Chapter 3 Measurement, test and application of fundamental human-body parameters		100
3.1	Fundamental Human-body parameters	100
3.1.1	Fundamental parameters of Chinese human bodies	101
3.1.2	New technique of actual measurement of human-body parameters	111
3.2	Design of Chinese dummies	145
3.2.1	Basis of parameters provided for designing dummies	145
3.2.2	Distribution of masses of human-body segments and selection of regression equations for calculating mass center positions	146
3.2.3	Determination of the lengths and the circumferences of human-body segments	146
3.2.4	Cross section shape of human-body segments ...	147

3.3	Measurement of whole-body mass centers	148
3.3.1	Gravity center plate of three-pivot electronic scale for measuring two-dimensional mass centers	148
3.3.2	Gravity center plate of four pivot electronic scale for measuring one dimensional or two dimensional mass centers	149
3.4	Measurement of rotating inertia of human bodies	151
3.4.1	Method and experimental equipment for measuring the rotating inertia of human-body segments by means of a three-wire pendulum	151
3.4.2	Selection of research samples	154
3.4.3	Results of measurement	156
3.4.4	Evaluation of the regression equation used to calculate the rotating inertia determined by the CT method and the rotating inertia measured by means of a three-wire pendulum	157
	References	163
Chapter 4	Theoretical analytical method of sports biomechanics	165
4.1	Formation and development of the theoretical method	165
4.1.1	The development of the theoretical method in recent years	165
4.1.2	Study of the theoretical method of sports biomechanics	166
4.1.3	Survey of the essential features of the theoretical analysis	168
4.2	Method and procedure of the theoretical analysis	170
4.2.1	Simplification and modeling of human-body movements	170

4.2.2	Determination of objective function and mathematical formulation of description of the movements	171
4.2.3	Analysis and assumption of conditions for constraining human-body systems	172
4.2.4	Formulation of dynamic equations and their solutions	173
4.2.5	Conclusion and errors analysis	174
4.3	Examples of application of theoretical methods	175
4.3.1	Vertical jumping	175
4.3.2	Walking	177
4.3.3	Horizontal bar swing	180
4.3.4	Rowing	183
4.4	Brief introduction to formulation of human-body dynamic equations	187
4.4.1	General theorems of dynamics	187
4.4.2	Lagrange's equations	189
4.4.3	Kane's method	193
4.4.4	Roberson & Wittenburg method (R/W method).....	196
4.4.5	Hazte method	202
4.5	Energy method	203
4.5.1	Theory of energy method	203
4.5.2	Applications of energy method	204
4.5.3	Problems of energy distribution	206
	References	208
Chapter 5 Computer numerical simulation in sports biomechanics		210
5.1	Brief introduction to computer numerical simulation	210