

全国
优博
文库

功能性运动装备的 生物力学研究

Gongnengxing Yundong Zhuangbei De
Shengwulixue Yanjiu

傅维杰 刘宇◎ 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

全国
优博
文库

功能性运动装备的 生物力学研究

Gongnengxing Yundong Zhuangbei De
Shengwulixue Yanjiu

傅维杰 刘宇◎ 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

图书在版编目 (CIP) 数据

功能性运动装备的生物力学研究/傅维杰, 刘宇著. —北京: 知识产权出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-5130-3124-0

I. ①功… II. ①傅… ②刘… III. ①运动生物力学—应用—体育用品—研究
IV. ①G818 ②G804.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 255494 号

内容提要

“工欲善其事, 必先利其器”。无论是竞技体育还是大众健身, 运动装备向来都是人们参加体育活动不可或缺的重要组成部分, 并已成为目前体育科学应用性研究的热点。本书作为运动装备的前沿探索, 基于生物力学、解剖学、生理学和工效学等学科的交叉, 系统地开展了运动装备与人体肌-骨系统响应关系的剖析, 从独特的视角揭示运动装备在预防损伤和提高表现过程中所起的作用, 为我国本土创新型运动装备的研发奠定科学基础。本书可供体育科学、生物力学及运动工效学专业的师生学习, 还可作为运动器材/装备的设计及研究人员等的参考资料。

责任编辑: 周 游

功能性运动装备的生物力学研究

GONGNENGXING YUNDONG ZHUANGBEI DE SHENGWU LIXUE YANJIU

傅维杰 刘宇 著

出版发行: 知识产权出版社 有限责任公司

电 话: 010-82004826

社 址: 北京市海淀区马甸南村 1 号

责编电话: 010-82000860 转 8532

发行电话: 010-82000860 转 8101/8029

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

开 本: 720mm×1000mm 1/16

版 次: 2015 年 2 月第 1 版

字 数: 182 千字

网 址: <http://www.ipph.cn>

<http://www.laichushu.com>

邮 编: 100088

责编邮箱: zhouyou-1023@163.com

发行传真: 010-82000893/82003279

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

印 张: 10.5

印 次: 2015 年 2 月第 1 次印刷

定 价: 49.80 元

ISBN 978-7-5130-3124-0

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题, 本社负责调换。

前 言

伴随全球化的发展、科技的进步,先进的运动装备在运动员比赛与人们的日常健身活动中扮演着越来越重要的角色,并在全球创造了巨大的经济价值。根据世界体育用品联合会(WFSGI)和国际运动用品制造商协会(SGMA)发布的数据显示,全世界每年的体育用品市场规模超过千亿美元,并且这一数字仍在飞速增长。

近几年,我国的体育用品企业和厂商如雨后春笋般涌现,但与此相对应的运动装备研发技术和专业人才相比国际知名体育厂商仍有相当大的差距。早在20世纪80年代初,Nike和Adidas等国际知名装备品牌厂商就相继建立了自己的运动研究实验室(Sport Research Lab),开始了系统的运动装备研发测试和创新研究。然而,我国直到2005年才由本土企业建立了国内首个运动装备科学实验室,导致现阶段我国体育运动装备的发展远远落后于国际一流水平,大量优秀顶级的运动装备仍然依赖进口。与之相对应的是,本土的运动装备产品虽已跻身国际市场,受到国内外的认可,但其科技含量和相关理论论证研究相对还较欠缺,高科技体育产品的研发亦落后于国际知名品牌,绝大多数所谓的“新概念”运动装备科技仍然围绕着国外一线品牌的理念操作,缺乏真正独立自主且拥有国际影响力的研发技术和手段。

2014年10月,国务院发布《关于加快发展体育产业促进体育消费的若干意见》,将发展体育产业上升为国家战略,其中就明确指出需进一步加快体育用品制造业的创新发展,包括采用新工艺、新材料、新技术,来提升传统体育用品/装备的科技含量,并支持企业联合高校、科研机构建立体育相关的产学研协同创新机制,建设体育技术创新战略联盟。由此可见,无论是从国家层面还是全球科技发展的角度,随着竞技体育、全民健身热潮的日趋激烈,以及终身运动理念的蓬勃崛起,围绕影响专项体育成绩、预防运动健身损伤的各种高科技装备和器材始终是世界各国运动科学和生物力学专家们研究的热点,并在很大程度上决定着各个国家在该运动项目上的领先甚至是统治地位。

古人云：“工欲善其事，必先利其器。”从竞技体育出发，针对专项特点和运动特性，为优秀运动员的训练、比赛、恢复等提供各种创新型运动装备的实际应用；从全面健身考虑，通过创新型运动装备的研发来有效预防日常运动损伤的发生，为体育爱好者的运动健康保驾护航。以上两者缺一不可，才能最终为我国早日实现“体育强国”梦夯实坚固的基础。

本书便是在这样的大背景下孕育而生。全文通过生物力学、人体工效学、生理学、运动解剖等不同学科及研究领域的相关知识，系统地开拓了功能性运动装备特性（运动鞋和紧身装备）、人体肌肉-骨骼系统响应及与运动表现、损伤之间相互关系的研究，尝试揭示运动装备和人体机能交互关键作用的内在机制，同时为创新型运动装备的研发和设计提供理论支持和应用参考。本书共分十章。其中第一章“绪论”，简要说明了撰写本书的目的、意义、整体思路、全文框架等。第二至第四章（第二章“冲击力与人体”、第三章“软组织振动与肌肉调谐”、第四章“功能性运动装备研发”），综述和总结了冲击力、人体肌肉-骨骼系统和运动装备关系的最新研究和热点进展。第五章“功能性运动装备的生物力学研究方法”，阐述了本研究及现阶段有关运动装备的人体科学/生物力学测量手段和方式。第六至第九章（第六章“功能性运动装备的下肢生物力学”、第七章“冲击力与运动鞋”、第八章“软组织振动与功能性运动装备”、第九章“下肢肌肉活动与功能性运动装备”），分别从下肢力学、冲击力、软组织振动和肌肉活动这四个方面所获得的研究结果探讨功能性运动装备对其的作用和影响。第十章“运动装备、冲击力与人体肌-骨力学系统”，总结了运动装备研发对人体运动的实际应用，以及对今后本土装备自主创新设计和开发的启示。

预料未来，研发功能性运动装备能够：预防和减少运动损伤。采用高科技的运动装备，能够增强运动员的本体感觉，减少运动过程中人体软组织不必要的振动，从而能够改变肌肉在运动过程的频率特性，加强了人体在运动中的调谐作用，避免了运动损伤；激发运动员的运动潜能，创造佳绩。通过运用大量高科技运动装备，能够调节运动员的身体状态，增强运动员的运动表现；带动我国体育经济和体育科技的迅猛发展。目前国外对于体育科技的研究投入巨大，并取得很好的效果，而我国在这一方面还刚刚起步、发展晚，对于一个13亿人口大国来说，潜在的巨大市场会给我们的体育产业和科技带来丰厚的回报和效益，我们必须投入整合各种资源，达到产学研一体化，缩小与欧美国家的差距，完成从体育大国向体育强国的过渡。而本书的选题和内容恰恰能够弥补我国运动装备从理论到实践的空缺，并希望该书作为我国第一部探索运动装备与人体运动功能关系的

专著，为我国本土创新型运动装备的科学研究起到探路者和先行者的作用。

本书作为运动装备的前沿探索，涵盖了包括生物力学、解剖学、生理学、工效学、运动科学等学科在内的相关理论问题，在重点突出最新应用成果的同时系统地论述运动装备研究的发展历程和当今热点。故可供体育科学、生物力学及运动工效学专业的研究生、教师学习，还可作为运动器材/装备的设计及研发人员等的参考资料。

本书内的部分研究成果得到了国家自然科学基金青年科学基金项目(11302131)、上海市教委科研创新项目(14YZ125)、“运动健身科技”教育部重点实验室、上海市“人类运动能力开发与保障”重点实验室的支持。此外，知识产权出版社为本书的撰写提供了大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

运动装备/器材的科学研究必定会随着科技时代的不断前行而蓬勃发展，而这里面所蕴含大量的跨学科问题仍然需要更深层次的理论探索和系统研究。由于时间、撰写水平及研究手段的限制，本书难免存在不足之处，热忱地欢迎专家、同行和读者朋友们予以批评和建议。同时，我们也真诚地希望本书的出版不仅仅只起到抛砖引玉的作用，更盼望着早日见到我国本土运动装备研究百花盛放、百家争鸣的丰硕成果。

作 者

2014 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 研究目的与意义	6
1.3 研究思路与技术路线	7
1.4 研究创新点	7
1.5 研究假设	8
1.6 研究限制与范围	8
1.7 名词解释及操作性定义	9
第 2 章 冲击力与人体	12
2.1 冲击力的力学特性	12
2.2 人体运动学反应	14
2.3 冲击力与运动损伤——现有理论	15
第 3 章 软组织振动与肌肉调谐	18
3.1 软组织特性与人体振动	19
3.2 肌肉的活化与调谐特性	20
3.3 软组织振动、肌肉调谐与运动损伤——最新进展	23
第 4 章 功能性运动装备研发	25
4.1 运动鞋应用研究	25
4.2 紧身装备应用研究	27
第 5 章 功能性运动装备的生物力学研究方法	32
5.1 研究对象	32
5.2 实验仪器与设备	32
5.3 测试方法与步骤	38
5.4 数据采集与处理	44

第 6 章 功能性运动装备的下肢生物力学	62
6.1 运动学	62
6.2 关节动力学	72
6.3 刚度	75
6.4 运动装备与下肢基本生物力学特征关系	78
第 7 章 冲击力与运动鞋	84
7.1 冲击力峰值	84
7.2 冲量	86
7.3 负载率	88
7.4 冲击力频率	90
7.5 鞋跟加速度时频域	91
7.6 运动鞋与冲击力关系探究	93
第 8 章 软组织振动与功能性运动装备	100
8.1 振动的时域特征	100
8.2 振动的主频和阻尼特性	102
8.3 振动的频率响应和传递性	104
8.4 紧身裤与软组织振动反馈	106
第 9 章 下肢肌肉活动与功能性运动装备	111
9.1 肌电振幅	111
9.2 主动肌-拮抗肌共激活	118
9.3 中位频率	121
9.4 不同运动装备下的肌肉调节与适应	125
第 10 章 运动装备、冲击力与人体肌-骨力学系统	133
10.1 运动鞋因素	135
10.2 紧身装备因素	137
10.3 创新型运动装备研发的启示	139
10.4 功能性运动装备的实践应用及展望	140
参考文献	143
附录 英文名词缩写表 (Abbreviations)	159

第1章 绪论

1.1 背景

运动是维持人体身心健康的重要因素之一。走、跑、跳作为运动中最基本的方式和组成元素，与每一个人的日常生活息息相关。在大众体育范畴，快走和慢跑作为最常见的运动方式，深受广大群众的喜爱，但殊不知每一次足与地面（表面）的接触，人体都需要承受1~3倍于自身体重的地面冲击力^[1]；同样，在竞技体育领域，以注重跑、跳等运动能力为主的田径、篮球、排球等体育项目中，运动员的每一次触地通常都需要承受3.5~7倍于自身体重的地面冲击力^[2-4]，特别是在篮球的三步上篮过程中，这一冲击力甚至可以高达体重的9倍以上^[5]。

在运动科学和医学领域，过去的研究一直认为：跑、跳等动作落地时所承受的巨大冲击力是导致运动损伤的主要原因^[6-11]，如此反复的过度负荷可能会导致急性损伤（如扭伤、骨折、膝关节内紊乱）或诸如应力性骨裂/骨折、髌骨劳损等过度使用性伤害（overuse injuries）。20世纪七八十年代提出运动鞋的“缓冲避震”，就是为了减少运动过程中的冲击负荷，并希望借此来预防运动损伤^[12-14]。

然而，反复冲击负荷和运动损伤之间的相互关系却迟迟未被确立，与此同时，当运动鞋研究聚焦于跑、跳等需要人体肌-骨骼系统（musculoskeletal system）调节控制的运动项目中，由于下肢几何学（Leg Geometry）^[15,16]、关节依从（joint compliance）^[17-19]、肌肉活动^[20-22]和能量消耗^[23]等因素通常在很大程度上会与鞋中底材料和结构本身的力学作用相抵消，进而使得鞋中底的缓冲能力与冲击力的关系缺少了一致性。正如Nigg在1997年的综述中所指出的那样^[24]：作用于人体的冲击力所引起的一系列效果始终无法被研究者很好地理解，很多针对冲击力与损伤发展之间的结果存在着矛盾和无结论性（contradictory and inconclusive）。与此同时，不少研究者已经认识到，在人体生理所能承受的范围

全国
优博
文库

功能性运动装备的 生物力学研究

Gongnengxing Yundong Zhuangbei De
Shengwulixue Yanjiu

傅维杰 刘宇◎ 著



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位

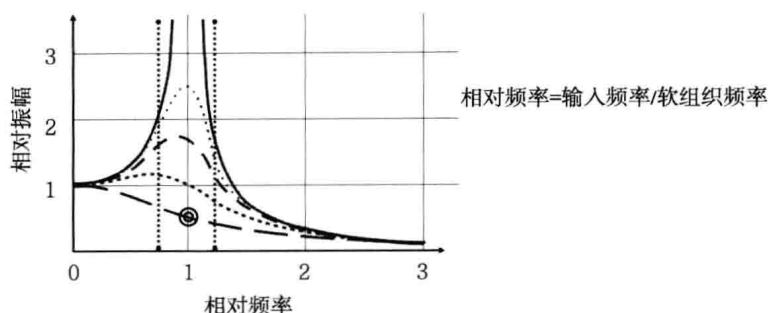


图 1-1 不同阻尼特性的振动系统对输入信号产生的共振曲线

注：相对频率为“1”代表输入信号的频率与软组织系统的固有振动频率相同。

从神经力学角度考虑，跑、跳等动作在着地前，人体肌-骨骼系统会根据着地的情况与条件（如着地速度、地面硬度等）进行明显的预活化（pre-activation），并通过一系列的肌肉调谐使得组织振动降低到最小。肌肉调谐的目的是避免软组织与冲击力产生共振，降低关节和肌腱的负荷。基于初始的肌肉调谐，关节刚度和关节几何位置（joint geometry）也都会随之进行相应的调整，以便活化存在共振危险的软组织。

Wakeling 等在一系列准静态（quasi-static）实验下针对软组织的振动和肌肉活动的关系进行研究先后得出：

- （1）通过肌肉活动的变化能够改变软组织室的机械属性^[21]；
- （2）针对不同的冲击特征，肌肉利用其适应性进行反馈^[47]；
- （3）人体能够，也确实对靠近软组织室共振频率的输入刺激进行了肌肉适应调节（muscle adaption）^[48]。

Boyer 等^[32]观察人体在跑步过程中对于未知运动表面所采取的肌肉活动策略发现：当人体无法准确判断着地条件时，便会影响肌肉在预触地阶段进行的自我调节（肌肉调谐），使得冲击力的输入频率越接近软组织的固有频率，肌肉的共振效应越明显。

由此可见，神经控制的肌肉在触地前后所产生的活化可视作肌肉调谐的一种表现，其目的是为了减小软组织的振动，避免软组织与反复冲击力产生共振，从而减少由此可能产生的运动损伤。

因此，对冲击力的研究不能仅局限于冲击力本身，而应该考虑冲击信号的频率以及人体对冲击力的综合反应与作用效果。基于上述研究，Nigg 等^[30-32]从 3 个方面针对人体运动系统对冲击力、软组织和肌肉的反应机制进行了一个全新的解释。



(1) 冲击力是一组具有振幅、时域和频域特征的输入信号；而人体的软组织结构（肌肉、筋膜、周围组织和皮肤）则可视为一个振动系统。

(2) 跑跳中，冲击力作为一种信号输入人体，使人体软组织产生振动；同时，人体感受器可以感知这种信号，将刺激传入中枢神经系统，并激活相应的主要肌群。

(3) 当冲击力的输入频率接近软组织的固有频率时，肌肉活动最强烈；肌肉通过活化或预先活化改变软组织的频率特性，从而避开可能产生共振的区域（图 1-1 中两竖虚线间区），或利用阻尼特征来减小其自身的振动，致使软组织振动的初始幅度可能很大，但随后通过改变力学特性使振动达到最小化。

进一步研究发现，冲击力作为一组具有一定振幅、时域和频域特征的输入信号，不仅受到触地速度和着地姿态的影响，同样也会由于鞋中底硬度的改变而变化^[13]，因而可以这么理解：每一种鞋/速度（高度）的结合都对人体运动系统提供了一次特殊的冲击输入。与此同时，Challis、Nigg 等^[29,31,33,49]还利用冲击模型和实验研究得出，通过改变外界的输入信号和系统内部的机械属性（固有频率、阻尼等）同样能够影响软组织振动，从而提高运动表现（如减少能量消耗）。

Wakeling 等^[22]对鞋中底硬度对于肌肉活化模式的影响进行研究，结果显示，在高频与低频率成分之间，不同运动鞋、肌肉之间的 EMG 强度和 EMG 强度的比率均存在显著性的差异，提示鞋中底硬度能够影响下肢肌肉的预活化程度，改变肌纤维的募集模式。这一提示与较早的一项钟摆实验（pendulum experiments）的结果类似^[47]：利用钟摆式仪器让受试者穿上两种不同的鞋后对其脚跟进行反复地冲击，结果表明冲击力没有发生明显的改变，然而肌肉活化模式却在冲击前后 50ms 内出现了显著变化。

众所周知，以往针对运动鞋的研究大部分集中于中底“缓冲”效果以及如何减少冲击力所带来的一系列问题，但最终的结果却由于人体肌-骨骼系统的调控以及随之而来的下肢运动学适应（kinematic adaptations）^[44,50,51]而产生了诸多的不确定性^[24]。然而，根据以上冲击力和“肌肉调谐”理论，把触地时的冲击作为一系列具有时频特征的初始输入信号进行处理，同时把人体的软组织结构（肌肉、筋膜、周围组织和皮肤）视为一个振动系统，那么，通过介入运动鞋这一因素能否改变外界信号的特征（频率、振幅等）？怎样改变？进而又是如何影响软组织振动的，是否能够真正达到预防运动损伤、提高运动表现的目的？

与此同时，针对另一重要运动装备——紧身衣的研究同样是目前生物力学和



运动装备的前沿及热点课题^[52]。自从1982年的世界锦标赛中出现引起轰动的第一件“紧身衣”和“连体装”开始,到北京奥运会上出尽风头的第四代鲨鱼皮,运动紧身衣(包括紧身服、紧身短裤袜、紧身泳衣等)在维持肌肉功能、减少运动损伤、提高运动能力方面的作用越来越受到研究者的关注^[53,54]。

目前,国际上用以解释紧身衣促进运动表现的原因主要有四点^[55-59]:①加速血液循环;②改变运动学参数;③增加肌肉本体感觉和功能;④减少软组织振动。现阶段,运动科学与体育训练专家主要针对外在的运动表现来对紧身装备的效果进行评估。研究者们发现:足够紧度的运动装备能够对运动员的力量输出产生一定的积极效果,但其阐述的可能机制包括:①能够使运动员在运动过程中的一些运动学参数(髋、膝关节的活动范围等)发生变化^[58];②可以增加肌肉的本体感觉和平衡协调能力^[60,61],但仍然需要进一步研究证实。与此同时,依然存在部分研究并没有发现类似的积极作用^[62-64]。

此外,结合“肌肉调谐”理论发现,一部分肌肉活动(约2%的能量)被证明用于降低运动过程中软组织的共振效应^[23],这对于运动成绩的影响很大,特别是对田径、游泳等短距离竞赛项目;而紧身装备恰恰也能够帮助人体减少由于运动所引起的肌肉振动。那么,相比探讨运动鞋能否改变外界冲击力信号间接影响软组织的振动表现的问题,作为一种外加紧度负荷的紧身装备是否可以通过直接改变软组织机械属性(固有频率、阻尼等)的方式,调节人体软组织的振动特性、避免“共振”现象的发生?从而在节省不必要的肌肉调谐活动、减少能量消耗的同时获得与肌肉调谐同样的作用效果,进而影响肌肉的疲劳过程、提高运动表现呢?这些问题尚不清楚。

此外,不得不指出的是,虽然有部分研究表明紧身装置确实对运动表现产生了一定的影响,但其内在机制仍不明确,同时依然存在一部分研究并没有发现紧身衣类似的积极作用^[62,65,66],此外,国内外有关紧身衣针对冲击力、软组织振动和肌肉活动影响的研究较少,也同样限制了人们对于紧身装备提升运动能力内在机制的理解。

由此可见,伴随全球化的发展,科技的进步,先进的运动装备在运动员比赛与人们的日常健身活动中扮演着越来越重要的角色,并在全球创造了巨大的经济价值。诚然,我国的体育用品已跻身国际市场,受到国内外的认可,但其运动装备的科技成分和相关理论支撑仍不多见,高科技产品的研发亦落后于国际知名品牌。因此,本研究旨在深层次地挖掘运动装备在人体下肢着地过程中所应扮演的角色,以期对运动装备的功能设计提出新的方向,同时希望借此与国内知名运动

装备企业合作, 加快科研成果向生产力的转化, 并为我国功能性运动鞋、紧身衣等创新运动装备的研发和设计提供理论与应用支持。

1.2 研究目的与意义

跑跳时, 人体下肢所承受的过度的被动冲击可以对人体肌-骨骼系统造成潜在的破坏^[6,8-10,67], 但这并不意味着冲击力就是造成运动损伤的根本原因。近期的研究发现^[21,30,32], 冲击力的频率(10~20Hz)与人体软组织固有频率(5~65 Hz)的重叠而引起的共振是导致软组织损伤的另一个重要因素。

基于此, 本研究的目的: 以主动落地反跳和被动着地两种负荷较大的常见的落地方式作为基本目标动作, 探讨人体在不同着地策略过程中, 篮球鞋和紧身裤这两种不同的外加介入因素对冲击力特征、下肢软组织振动和主要肌群活动的影响, 找寻它们之间的相互关系。

具体包括: 基于冲击力、软组织振动和肌肉调谐前期的理论基础, 获得不同高度和落地策略下, 下肢动力学、运动学、肌电以及软组织加速度数据, 用于:

(1) 探讨穿着不同运动装备在两种落地方式下的基本生物力学特征(运动学和动力学)和运动表现。

(2) 比较不同运动鞋对于冲击力(幅度、时频域特征)和人体下肢软组织特性(幅度、时频域和阻尼特征)的影响, 以及相应肌群所做出的反应(预激活、后激活和共激活等), 进一步量化运动鞋对于响应冲击进而影响下肢肌肉功能的作用, 并试图找寻在此过程中能够切实反映运动鞋变化的敏感指标, 揭示运动鞋针对改变输入信号、预防运动损伤、提高运动表现的新的机制。

(3) 比较不同紧身裤对于冲击力和肌肉活化的影响, 特别是人体下肢软组织的力学属性(频率、阻尼等)以及振动传递特性的变化, 明确紧身装备与肌肉调节和适应功能之间的相互关系, 尝试理解紧身装备能够减少能量消耗、影响肌肉疲劳、最终提高运动表现的内在机理, 同时为紧身衣设计与使用提供理论和应用参考。

本研究的意义在于:

(1) 系统地运用和完善针对外部冲击力、人体软组织振动和肌肉调谐之间关系的研究, 并为之后所进行的功能性运动装备的应用性研究提供了理论支持。

(2) 探讨运动鞋对于主、被动冲击的响应以及对下肢肌肉功能的影响, 从新的角度揭示运动鞋在预防运动损伤和提高运动表现过程中所起的作用。

(3) 阐明紧身装备与软组织振动、肌肉活化之间的关系, 进而揭示紧身装

备能够减少能量消耗、影响肌肉疲劳的内在机制。

(4) 为运动鞋、紧身服等运动装备的研发和设计提供参考和新的方向。

1.3 研究思路与技术路线

本研究采用不同的运动鞋和紧身裤作为外加干预因素，并选取主动落地反跳和被动着地两种常见的落地方式作为基本目标动作，采集受试者完成动作过程中的运动学（下肢三关节角度、角速度等），动力学（地面反作用力、力矩、刚度等），加速度信号（时间、振幅和频率等），表面肌电信号（时频域特征）和高速影像资料，并对所得数据进行后期处理和统计，得出实验结果，进而探讨人体在不同着地策略过程中，不同运动装备对运动学、动力学、冲击力、软组织的振动和肌肉活动的影响以及它们之间的相互关系。其中，本研究的主要技术路线如图 1-2 所示。

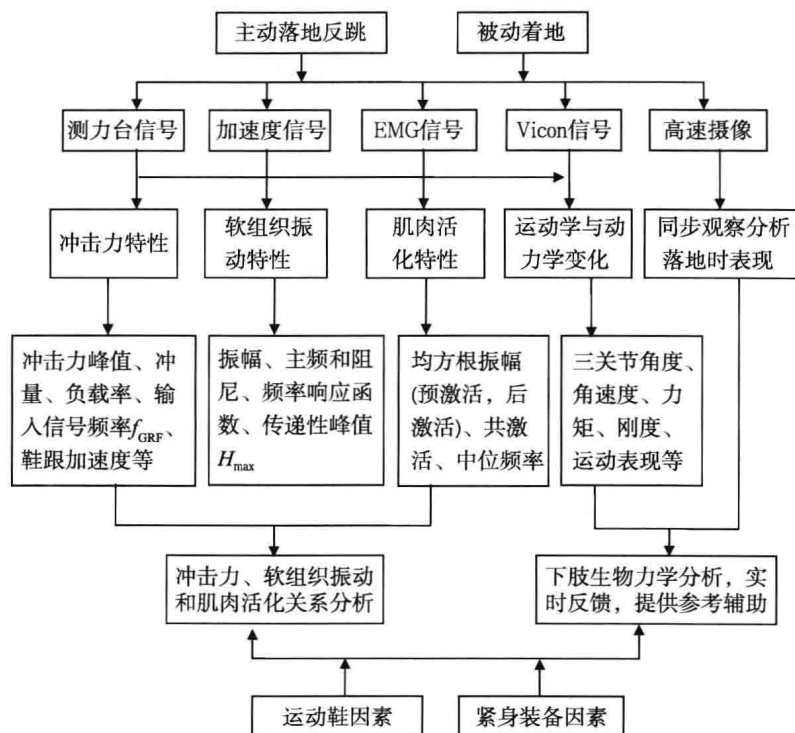


图 1-2 主要技术路线

1.4 研究创新点

(1) 本研究不仅考虑了冲击力本身的动力学特征，同时把冲击力作为一组



输入人体的信号,系统地运用并完善了针对冲击力信号、软组织振动和肌肉响应(人体对此的综合反应)之间相互关系的研究。

(2) 量化运动鞋对于主动、被动冲击的响应以及下肢肌肉功能的影响,找寻在此过程中能够切实反映运动鞋变化的新的敏感指标和评价方法,并从新的角度揭示运动鞋在预防运动损伤和提高运动表现过程中所起的作用。

(3) 阐明紧身装备与软组织振动、肌肉活化之间的关系,尝试利用不同的信号处理方法确定下肢各主要软组织在振动过程中的时频及阻尼特征,进而理解紧身装备能够减少能量消耗、影响肌肉疲劳的内在机制。

(4) 为功能性运动装备(运动鞋、紧身衣等)的研发和设计提供了理论支持、开拓了新的方向。

1.5 研究假设

根据以往的研究及相关前期实验的结果,本研究假设:

(1) 针对两种落地方式下的下肢基本生物力学特征:篮球鞋和紧身裤的介入能够各自影响踝关节和髌关节的角度、角速度以及力矩和功率的输出,同时穿着紧身裤并不一定能够提高反跳高度等运动表现。

(2) 针对运动鞋因素对冲击力、软组织振动和肌肉活动的影响:①能够改变冲击力作为输入信号的各项特征,影响软组织振动和肌肉活动;②不同的运动鞋相比影响程度不一,具有较强缓冲避震功能的鞋能够降低输入频率的大小,在改变肌肉活化程度(强度和频率)的同时让软组织避开共振区域,并使其他因素(诸如高度等对于输入信号)的影响也相对较小。

(3) 针对紧身裤因素对冲击力、软组织振动和肌肉活动的影响:①能够改变软组织的振动特性以及肌肉的活化程度(强度和频率);②高紧度的紧身短裤能够增加软组织的阻尼,减小肌肉的预激活和后激活,增加共激活,即减少不必要的肌肉调谐,从而影响能量消耗和肌肉疲劳过程;③另外,紧身装备能增加软组织固有频率,减少振动幅度,远离振动频率,避开共振区域,达到和肌肉调谐一样的效果。

1.6 研究限制与范围

由于运动装备的限制,本研究并没有选用以材料或硬度作为控制条件的运动鞋,但仍采用了鞋中底配备全掌 Max Air 气垫单元(Max Air 360®),具备强缓冲功能的品牌鞋作为实验用鞋。同样,在无法定做紧身裤的条件下,通过筛选具有

统一大腿围度的受试者,来获得一致的紧度作为实验紧身条件。此外,测试中,加速度计被完全包裹于紧身裤内部,故其相互之间的摩擦可能会影响在肌肉长轴方向上的加速度数值,此为本研究另一个限制。同时,本研究只考虑下肢股四头肌和股后肌群软组织的振动,其他各软组织不在本研究范围内。

1.7 名词解释及操作性定义

(1) 主动落地反跳 (drop jump, DJ)。

在体育训练中又称为跳深。测试过程中,受试者双脚站立于翻板器水平面,脚距与肩同宽,双手交叉抱于胸前,同步信号开始后,两脚脚尖缓慢由翻板边缘向测力台下滑,尽量确保无垂直初速下落,着地后迅速尽力向上垂直跳起(无摆臂),其中共有三个高度,分别为 30cm、45cm 和 60cm (缩写为 DJ30、DJ45 和 DJ60)。

(2) 被动着地 (passive landing, PL)。

本研究中,受试者双脚开立站于翻板,要求身体略微前倾,重心略向前,防止下落着地后由于重心靠后导致整个身体后仰并发生摔倒。给予受试者“准备”口令后,通过人工操作控制翻板突然下翻,使受试者在基本无预知的情况下完成被动着地。动作同样分三个高度,缩写为 PL30、PL45 和 PL60。

(3) 下肢刚度 (leg stiffness, k_{leg})。

表达式为 $F_{z_{\text{max}}}/\Delta L^{[153]}$, 其中, $F_{z_{\text{max}}}$ 代表最大垂直地面反作用力, ΔL 代表下肢最大长度变化量,即髌关节中心从触地到缓冲完成时的垂直位移变化量。

(4) 关节刚度 (k_{joint})。

表达式为 $\Delta M/\Delta \theta^{[69]}$, 其中, ΔM 为缓冲过程中关节力矩的变化量, $\Delta \theta$ 为关节角度的变化量。

(5) 冲击力频率 (f_{GRF})。

把被动冲击力看作一次冲击输入 (shock input), 其信号可以通过加速度的半个正弦波来表示^[70], 计算方式为利用冲击力峰值 (F_z) 结合 20% ~80% 冲击阶段的平均负载率 ($G_{z_{\text{ave}}}$) 计算确定输入频率, 即 $f_{\text{GRF}} = \frac{1}{2(F_z/G_{z_{\text{ave}}})}^{[71]}$ 。

(6) 软组织振动主频 (f_v) 和阻尼系数 (c)。

本研究利用非线性拟合中常见的列文伯格-马夸尔特最小二乘法对所获得的软组织振动曲线进行局部最优化的函数拟合计算^[72], 来完成对于次阻尼情况下周期性自由振动特征的估算。振动衰减模型的方程为 $s = ae^{-ct} \sin(2\pi f_v t + \varphi)$ 。其