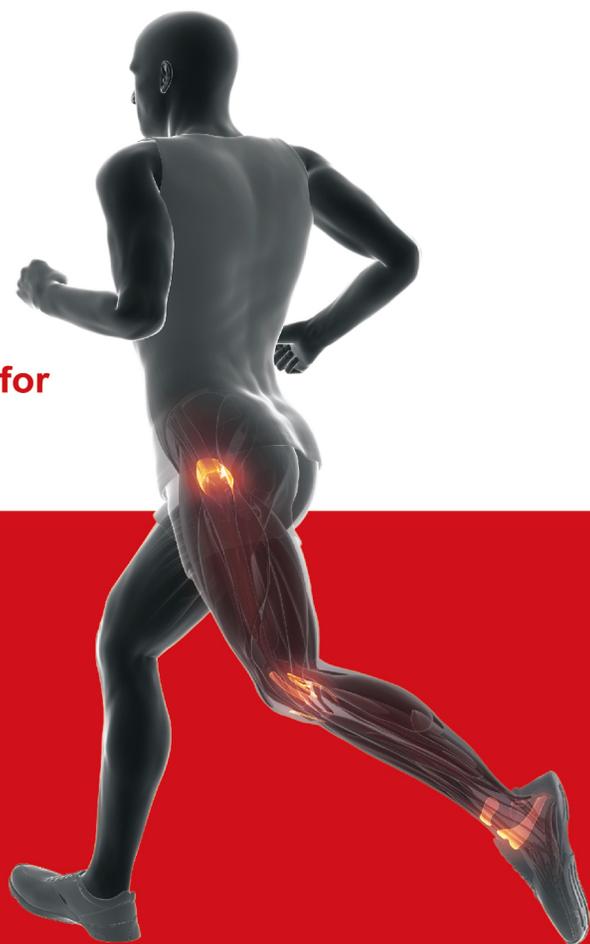


骨骼肌损伤风险 的运动学研究

钟运健 著

The Study on
the Kinematics of Damage for
Skeletal Muscles



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

作者简介

钟运健，男，1976年3月出生，博士。现为南昌大学体育与教育学院副教授，主要研究方向为运动动作的神经肌肉控制研究。

巍巍交大 百年书香
www.jiaodapress.com.cn
bookinfo@sjtu.edu.cn



策划编辑 许苏葵
责任编辑 许苏葵
封面设计 孙 敏

骨骼肌损伤风险 的运动学研究

钟运健 著

The Study on
the Kinematics of Damage for
Skeletal Muscles



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书从动作分析、神经肌肉控制和肌肉力学等多角度对短跑运动员下肢肌肉工作特性进行实验分析,综合探讨各肌群之间相互协调关系的作用机理,量化单块肌肉的力学指标,分析其损伤机制,以期提升短跑速度能力及创新训练方法,突破我国短跑运动的瓶颈。本书为预防下肢肌肉(特别是大腿后肌)损伤以及伤后康复治疗、专项肌肉力量训练提供生物力学的理论依据。

图书在版编目(CIP)数据

骨骼肌损伤风险的运动学研究 / 钟运健著. —上海:上海交通大学出版社, 2016
ISBN 978-7-313-16402-5

I. ①骨… II. ①钟… III. ①肌肉骨骼系统—肌肉损伤—运动学—研究 IV. ①R873

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第004113号

本书为南昌大学社会科学学术著作出版基金资助项目(项目批准号:NCU2016P020)

骨骼肌损伤风险的运动学研究

著 者: 钟运健

出版发行: 上海交通大学出版社

地 址: 上海市番禺路951号

邮政编码: 200030

电 话: 021-64071208

出 版 人: 郑益慧

印 制: 当纳利(上海)信息技术有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 710mm×1000mm 1/16

印 张: 13.75

字 数: 160千字

版 次: 2016年12月第1版

印 次: 2016年12月第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-313-16402-5/R

定 价: 48.00元

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: 021-31011198

前言

短跑是支撑与腾空相交替、蹬与摆相结合的周期性运动，通过支撑期下肢的有力蹬伸，人体获得向前运动的动量。对人体各部分的动作而言，下肢运动动作是整个短跑技术的主要部分，下肢肌群的专项工作能力直接影响跑的速度。了解快速跑时下肢主要骨骼肌的工作性质对于教练员、运动员掌握运动技术和改进训练方式极其重要。腘绳肌拉伤是运动中常见的一种肌肉拉伤，尤其频发在田径运动、橄榄球、足球运动中。最近研究显示，澳大利亚足球专业运动员的所有运动损伤中，腘绳肌拉伤占12%~16%，在英式足球运动中，占12%，在橄榄球运动中，占6%~15%。为防止腘绳肌拉伤及改善拉伤后的康复手段，分析快速跑时肌肉拉伤机制尤其是发生时相非常重要。

本书的研究利用环节互动动力学方法计算快速跑时下肢各关节肌力矩、惯性力矩、外力矩、重力矩，并量化各关节角度变化和下肢各肌群功率，以提升快速跑时下肢各关节动力学的理解；量化快速跑时下肢单块肌肉长度变化和速度变化，探讨快速跑时最优化算法中反映人体神经肌肉系统最优控制的目标函数和算法，以静态最优化算法估算出肌肉力量（应力），并进一步量化单块肌肉单位面积功率及做功总和，结合快速跑完整

步态中下肢各单块肌肉工作性质，尤其是运动过程中极易受伤的腓绳肌的工作状态及其在跑速中所扮演的角色，以综合探讨其损伤机理及发生时相。

测试中采集了 8 名优秀短跑运动员在塑胶跑道上途中跑时完整步态的二维运动学数据（300 Hz）及地面反作用力（1 200Hz）数据，利用环节互动动力学方法分析下肢各关节力矩，并计算各关节角度变化和下肢各关节肌群功率变化。基于受测对象个体的下肢骨性形态学参数和快速跑时下肢运动学二维参数，通过下肢肌肉功能模型计算机应用分析系统分别计算出受测对象快速跑时下肢主要肌肉长度变化、速度变化及对于各关节各伪力臂变化。建立下肢肌肉-骨骼二维模型，确立目标函数和约束方程，应用中尺度序列二次规划拟牛顿线性搜索算法将快速跑时关节肌力矩优化求解单块肌肉应力，并进一步计算肌肉单位面积功率和单位面积做功总量。

在支撑阶段，关节力矩起主要控制作用的为肌力矩和外力矩，肌力矩的主要作用为对抗地面反作用力矩。同时，从近端到远端关节依次出现角速度峰值和伸肌的正功率峰值；踝关节角速度峰值和肌肉功率峰值明显高于其他关节的角速度峰值和肌肉功率峰值，而膝关节肌群在整个支撑期功率远低于髌关节和踝关节肌群功率值。摆动阶段，关节力矩主要为肌力矩和惯性力矩，肌力矩则主要对抗惯性力矩做负功以控制动作。在快速跑完整步态中，髌关节伸肌群、膝关节屈肌群及踝关节跖屈群功率峰值均分别显著高于髌关节屈肌群、膝关节伸肌群及踝关节背屈肌群功率峰值，同时，髌关节伸肌群和膝关节屈肌做正功时功率峰值均显著高于其做负功时功率峰值，踝关节跖屈肌群做负功时功率峰值显著高于其做正功时功率峰值；双关节肌腓绳肌、股直肌和腓肠肌在各时期的应力值均高于其他做功肌肉，且在整个步态中的应力峰值及单个步态的负功积累（单个步态的单

位面积所做负功)均高于其他肌肉;各肌肉均不同程度地存在作为拮抗肌在离心收缩且输出较大功率(做负功)对抗外力矩或惯性力矩的情况。快速跑时存在不少双关节肌在同一时刻分别对两个关节做负功和正功的情况;在摆动期中间阶段,腓绳肌在顺应性离心收缩时突然被激活并快速出现做负功功率峰值;摆动末期,出现腓绳肌长度、速度、应力峰值;触地瞬间,腓绳肌应力和单位面积功率快速增长至支撑期峰值;股二头肌长头的应力峰值、长度峰值、做负功的功率峰值和做负功的总和均显著高于半膜肌和半腱肌。研究结论为:快速跑时,作用于身体各环节的外力和惯性力(还包括科氏力和离心力)对各关节肌群工作性质产生重要影响;支撑期,优秀运动员能较好地做到能量从近端到远端关节依次传递给踝关节而加大对地面的作用而更好地保持跑速。膝关节的主要作用为保持身体重心高度及将髌关节能量传递给踝关节;髌关节伸肌群和膝关节屈肌群的快速主动收缩能力和踝关节跖屈肌群的退让性快速收缩能力在快速跑时极其重要;短跑的专项训练中,应充分重视下肢各相关肌群的在离心收缩情况下的做功能力;利用超等长训练方法进行专项训练时,应根据其离心收缩是否为顺应性及做负功大小收缩而确定超等长训练是否负重或负重的大小;应挖掘与短跑时下肢肌肉复杂的工作特点相类似的下肢整体运动(多关节)的训练方法;下肢双关节肌为快速跑时最易受伤的肌肉;摆动期中间阶段、摆动末期及触地瞬间为快速跑时易发生腓绳肌拉伤的时相;股二头肌长头是腓绳肌群最易拉伤的肌肉。

该研究考虑了快速动作中外力和惯性力对肌肉功能的影响,提升快速跑时下肢各关节动力学的理解,更全面地分析快速跑时下肢各肌群的工作性质。通过最优化算法与肌肉的神经支配特性分析,寻求一种快速跑时神经系统对肌肉控制的合理的目标函数,并量化下肢单块肌肉的肌肉力量。

并且，以快速跑时下肢各单块肌肉的应力协同单块肌肉长度、速度、做功状况及单位面积功率肌肉等指标确定快速跑时下肢单块肌肉的工作状态和在动作控制中的作用，综合探讨各单块肌肉之间的相互协调关系的作用机理及损伤原因，以期提升短跑速度能力及创新训练方法，突破我国短跑运动的瓶颈，并为预防下肢肌肉（特别是大腿后肌）损伤以及伤后康复治疗、专项肌肉力量训练提供生物力学理论依据。

目录

CONTENTS

第一章 绪论 /001

第一节 量化快速跑时下肢各关节力矩及肌肉工作性质的必要性 /001

第二节 腘绳肌拉伤风险生物力学研究的必要性 /003

第二章 关节力矩和肌肉力量的评估模型 /009

第一节 基于肌电图分析的正向动力学 /009

第二节 逆向动力学分析 /012

第三章 混合模型的建立 /021

第一节 肌肉激活动力学 /021

第四章 快速跑时下肢肌肉工作特性研究现状 /039

第一节 基于逆向动力学的肌群层面 /039

第二节 基于肌电图分析的单块肌肉（肌群）层面 /045

第三节 大腿后群肌肉在短跑途中跑技术动作中的用力特点及功能 /057

第五章 快跑时腘绳肌拉伤的生物力学研究现状 /063

第一节 肌肉拉伤的原因 /063

第二节 快速跑时影响腘绳肌拉伤的因素 /066

第三节 快速跑时腓绳肌拉伤风险的研究现状 /076

第四节 肌肉拉伤风险因子模型 /082

第六章 人体活动时冗余肌力的估算方法 /085

第七章 人体运动中的能量、做功和功率 /095

第一节 能量、功及热能学定理 /095

第二节 机械能守恒 /099

第八章 短跑时下肢肌群做功特性及拉伤风险研究实例 /109

第一节 研究对象与方法 /109

第二节 结果与分析 /132

研究结论 /181

附录 1 MARKER 球放置位置表 /183

附录 2 静态优化求解程序 /185

参考文献 /194

索引 /208

第一章

绪论

第一节 量化快速跑时下肢各关节力矩及 肌肉工作性质的必要性

短跑是支撑与摆动相交替、蹬与摆相结合的周期性运动，通过支撑期下肢的有力蹬伸，人体获得向前运动动量。从人体各部分的动作来看，下肢运动动作是整个短跑技术的主要部分，下肢肌群的专项工作能力直接影响跑的速度。了解快速跑时下肢主要肌肉的工作性质对于教练员和运动员掌握运动技术和改进训练方式极其重要。

对在运动过程中肌肉工作特性进行研究的方法中，主要体现在肌群和单块肌肉层面。研究快跑时下肢肌群作用大都采用逆向动力学（Inverse Dynamics）研究方法，计算快速跑时下肢各关节净关节肌力矩和关节反作用力，分析各主要肌群的用力规律以及大致确定它们的工作性质，从而获得专项运动中工作肌群的专项生物力学特征（Belli et al., 2002; Winter, 2009）。不少学者已利用逆向动力学对快速跑时下肢各关节肌力矩进行了量化，在研究短跑时下肢各肌群的功能，进而为提高短跑专项技术的训

练水平方面提供了很多帮助（施宝兴，2004；李庆，2005；Mann et al., 1980、1986；Hunter et al., 2004；Bezodis et al., 2008）。但由于快速跑是一种极限性运动，在支撑期，强大的地面反作用力对下肢各关节均同时产生力矩（外力矩），同时，短跑时摆动期下肢各关节快速屈-伸和伸-屈转换，将产生较大的惯性力（包括科氏力和离心力）作用于各环节，这些外力（地面反作用力）和惯性力作用于各关节所产生的力矩都不可忽视地影响着短跑时下肢各肌群的工作性质（刘宇,1993）（见图 1.1）。这提示我们，在利用逆向动力学求解关节力矩的过程中，如能对求解过程中包含的各种力矩分量进行逐一量化，根据其力学机制进行定义，并进一步对下肢肌群做功情况进行量化，有助于进一步深入了解快速跑过程中下肢关节的动力学特征。



图 1.1 运动员快速跑过程中的下肢关节

目前对于分析快速跑时下肢单块肌肉（肌群）的工作状况的另一种方法为肌电图研究（张原，2008；Marnix et al., 2007；宫本庄等，1985）。这些研究分析快速跑时下肢主要肌群，甚至是单块肌肉的收缩时序性和肌肉间的协调机制，进而结合肌肉的收缩形式对肌肉的工作性质进行了阐明。但上述研究中所提及的肌肉收缩形式也仅是根据关节的屈伸所做的简单判断，对于同时受两个关节转动的影响的双关节肌收缩形式的判断还存在着较大的误差。同时，肌电图激活程度并不完全能准确反映肌力的大小。因为肌肉离心收缩时，肌电大小与实际肌力之间不存在正比关系。Komi 等（1979）发现离心和向心收缩速度都增加时，离心收缩的力量增加，而向心收缩的力量降低，但肌电图却保持一定的稳定。同时，以相同的收缩力量进行收缩时，离心收缩肌电值远低于向心收缩。因此，建立快速跑下肢骨骼肌肉模型，对快速跑时下肢冗余肌力进行估算，并量化下肢肌肉（尤其是受多个关节复杂交互作用的双关节肌）的长度变化和收缩速度变化，结合肌肉应力变化对于分析其工作性质尤其重要。目前，分析快速跑时下肢主要肌肉的应力变化及长度变化和速度变化，进而分析单块肌肉做功状况，以综合确定快速跑时下肢单块骨骼肌工作性质的研究仍鲜有报道。

第二节 腘绳肌拉伤风险生物力学研究的必要性

强而有力的大腿后群肌肉是决定短跑速度能力的重要因素（Liu, 1993；Hunter et al., 2004；李庆，2005）。大腿后群肌肉主要指腘绳肌（hamstring），该肌群是典型的双关节肌，由位于大腿后外侧、长短两头的股二头肌和位于大腿后面内侧半腱肌及半膜肌组成。在快速跑的动作中，

股二头肌和半腱肌是髁关节的有力伸肌，而半膜肌除协同伸髁动作外，还是屈膝、屈小腿的主动肌。这一肌肉被教练员和生物力学学者公认为在短跑支撑腿着地前的下压阶段和着地初期起着非常重要的作用（Wood, 1987；刘宇, 1999；Hunter et al., 2004），它可以使腿快速下压向后抓地，并在膝关节处产生屈膝力矩降低着地时的制动力，带动身体重心快速向前通过支点的正上方。由于短跑支撑时间很短（0.12 秒左右），速度很快，腿后肌的这一功能使得它承受的负荷非常大，出现损伤的概率也很高。因此，腿后肌力量的好坏以及损伤，是制约短跑成绩的重要因素（Mann, 1981）。

腓绳肌拉伤是运动中常见的一种肌肉拉伤，尤其在田径运动、橄榄球、足球运动中（Brooks et al., 2006；Clanton et al., 1998；Ekstrand et al., 1983；Garrett et al., 1983；Orchard et al., 2002；Stanton et al. 1989；Wood et al., 2004）。最近研究显示，在澳大利亚足球专业运动员的所有运动损伤中，腓绳肌拉伤占 12%~16%（Arnason et al., 2004），在英式足球运动中，占 12%（Woods et al., 2004），在橄榄球运动中，占 6%~15%（Brooks et al., 2006）。为防止腓绳肌拉伤及改善拉伤后的康复手段，分析快速跑时肌肉拉伤机制尤其是发生时相非常重要。

关于腓绳肌的拉伤影响因子及拉伤发生的时相还存在争议。有学者认为腓绳肌在快速跑时拉伤最易发生在着地初期（Mann et al., 1980、1981；魏书涛, 2009）。他们的研究认为触地初期肌力矩和外力矩很大，腿后肌承受极大的负荷，是腿后肌损伤发生的高危险期。研究表明，肌肉拉伸比（Best et al., 1995）、收缩速度（Brooks et al., 2001）和收缩性质（Garrett et al., 1987）与肌肉拉伤具有相关关系。但这些研究只是在外力和肌肉力矩层面分析拉伤，未能量化肌肉的长度、速度及应力变化。

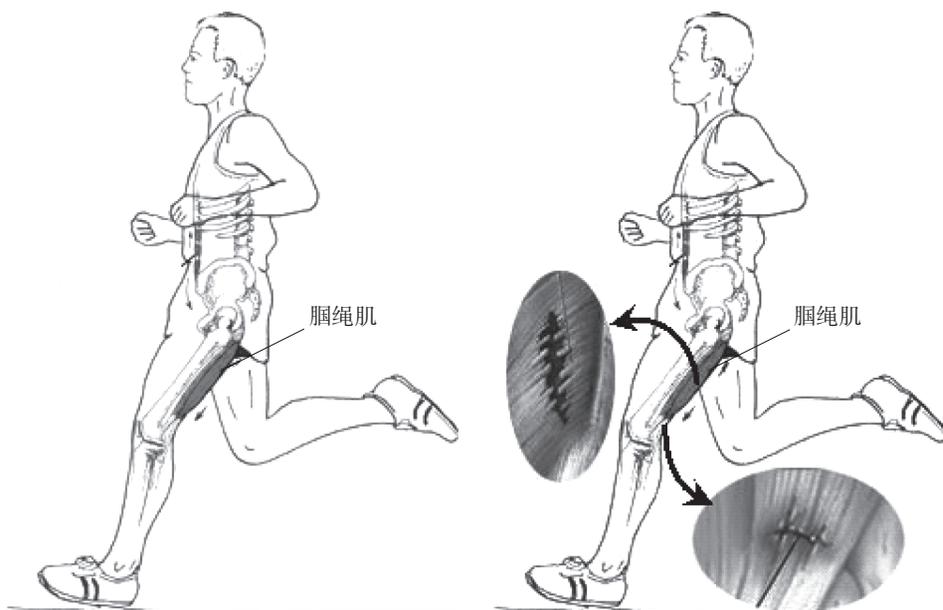


图 1.2 腓绳肌 (hamstring) 拉伤

Thelen 等 (2005) 研究了快速跑的摆动阶段, 发现腓绳肌在摆动后期离心收缩, 且股二头肌长头长度肌力量峰值均出现在摆动末期。其他不少研究也支持肌肉长度的峰值也出现在摆动末期, 且收缩速度出现的时间也在摆动末期 (Simonsen et al., 1985, Wood et al., 1987, Bing Yu et al., 2008)。故以上研究均认为拉伤最可能发生在摆动末期。Bing Yu 等 (2008) 量化了快速跑一个完整步态的右腿腓绳肌的长度、速度变化和肌电图线性包络线, 发现在快速跑的摆动末期和着地后期, 腓绳肌离心收缩。腓绳肌在着地后期的离心收缩速度的峰值和显著大于摆动末期。在着地后期的离心收缩速度的峰值时, 腓绳肌的长度也显著大于摆动末期离心收缩速度的峰值时的腓绳肌长度。故提示腓绳肌拉伤的时相可能存在于摆动末期, 此结果呼应了上述研究。Bing Yu 等同时也认为腓绳肌拉伤也可能存在于和摆动期一样导致腓绳肌离心收缩的着地后期, 但发生概率要低于摆动末期

且具有个性差异。

实际上，大部分肌肉的急性拉伤和肌肉力量（应力）息息相关，肌肉应力也是肌肉拉伤的重要影响因子（Lieber et al., 1993、2002）。Brooks 等（2001）还提出肌肉应力和拉伸长度的乘积（单位面积功率）的大小也是肌肉拉伤的指标。就真正的人体活动而言，单独的或其中一两个指标并不能解释肌肉拉伤。这也意味着肌肉力量（应力）、肌肉长度、肌肉收缩速度和收缩性质甚至肌肉功率等其他因素一起综合导致真实生活中的肌肉拉伤。

人体各个关节都存在一组冗余的活化肌肉，多块的肌肉的同时收缩非常普遍，很多复杂的肌肉共同穿过一个关节，关节力矩可转化为非常多种的肌肉力量组合且很难确定具体为哪一种，导致运动过程中单块肌肉力量的确定成为数学上的求解冗余问题。由于人的活体性和测量方法上的限制，目前并不能做到直接有效地测量运动中单块肌肉的力量。这也就使分析拉伤时相的真正原因及生物力学研究显得极其困难。

因此，建立快速跑下肢骨骼肌肉模型，利用静态优化算法估算下肢冗余肌力变化，以此计算单位面积功率变化，并结合快速跑时一个完整步态的下肢各肌肉运动学数据（肌肉长度、速度变化和关节角度）、综合探讨损伤机理及发生时相显得非常必要。

一、研究意义

考虑快速动作中外力和惯性力对肌肉功能的影响，以提升快速跑时下肢各关节动力学的理解，更全面地分析快速跑时下肢各肌群的工作性质。通过最优化算法与肌肉的神经支配特性分析，寻求一种快速跑时神经系统

对肌肉控制的合理的目标函数，来量化下肢单块肌肉的肌肉力量，并以快速跑时下肢各单块肌肉的应力协同单块肌肉长度、速度、做功状况及单位面积功率肌肉等指标，确定快速跑时下肢单块肌肉的工作状态和在动作控制中的作用，综合探讨各单快肌肉之间的相互协调关系的作用机理及损伤原因，以期提升短跑速度能力及创新训练方法，突破我国短跑运动的瓶颈，并为预防下肢肌肉（特别是大腿后肌）损伤以及伤后康复治疗、专项肌肉力量训练提供生物力学理论依据。