

# 竞技体育运动生物力学研究现状与趋势

刘卉<sup>1a</sup>, 于冰<sup>2</sup>, 张力文<sup>1b</sup>, 吴海军<sup>1a</sup>

(1. 北京体育大学 a 中国运动与健康研究院, b 运动人体科学学院, 北京 100084;  
2. 美国北卡罗来纳大学教堂山分校, 北卡罗来纳州 27599)

**摘要:**运动生物力学是研究人体运动中力学规律的交叉应用学科,主要研究目的是提高竞技体育运动成绩和预防运动损伤。本文从改进动作技术、改善训练方法和运动装备研究3个方面介绍国内外运动生物力学研究在提高竞技体育运动成绩方面的方法和成果,为提高我国运动生物力学和竞技体育科研水平提供参考。希望今后有更多的运动生物力学研究以提高成绩和预防损伤为目的,借助严谨的研究设计,使用新技术获取更多更准确的人体运动力学数据,促进运动生物力学研究的广度和深度。

**关键词:**动作技术分析; 训练方法; 运动装备; 竞技体育

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16156/j.1004-7220.2021.04.001

## Research Status and Trends in Competitive Sports Biomechanics

LIU Hui<sup>1a</sup>, YU Bing<sup>2</sup>, ZHANG Liwen<sup>1b</sup>, WU Haijun<sup>1a</sup>

(1a. China Institute of Sport and Health Science; 1b. School of Sport Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China; 2. University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, North Carolina 27599, USA)

**Abstract:** Sports biomechanics is an interdisciplinary application science that studies human movement. The main purpose of sports biomechanical research is to improve competitive sports performance and prevent sports injuries. This review introduced methods commonly used in biomechanical research, and selected results in biomechanical research on sports performance, training method and sports equipment, so as to provide references for improving the quality of biomechanical research in China. It is hoped that more biomechanical studies will be conducted with the focus on sports performance improvement and injury prevention, using rigorous research design and new technologies to obtain more accurate biomechanical data in human movement, so as to increase the breadth and depth of sports biomechanical researches.

**Key words:** sports techniques analysis; training methods; sports equipment; competitive sports

运动生物力学是研究人体运动力学规律的一门学科,是生物力学的分支,也是体育科学的重要组成部分。运动生物力学兴起于20世纪60年代,为人体科学研究做出重要贡献。近年来,随着计算机、传感器和人工智能等技术的发展,运动生物力

学在促进运动成绩提高和运动损伤预防与康复的理论与实践发挥着越来越重要的作用。

运动生物力学是一门交叉学科。理论力学、材料力学、流体力学等力学理论是运动生物力学的核心知识;人体解剖学、生理学及生物力学等医学、生

物学科是运动生物力学研究的重要基础;另外,电子技术、数据信号处理以及计算机编程和各种软件的应用是运动生物力学的重要研究手段。特别值得注意的是,由于人体运动的复杂性和体育项目规则的特殊要求,竞技体育中的人体运动有各种条件和限制。因此,必须结合各运动项目的技术理论和专项技术特点,以保证运动生物力学的研究结果有真正的实践应用价值。

运动生物力学的主要研究目的是提高运动成绩和预防运动损伤,为运动员在赛场上取得优异成绩提供重要的科技保障。虽然新冠疫情导致东京奥运会推迟1年举行,但运动员们依然刻苦训练,体育科研工作者们则有更充分的时间为运动员提高成绩提供攻关服务。北京冬奥会和冬残奥会将于2022年2月举行,国家投入大量经费设立“科技冬奥”重点研发专项,运用科技手段助力运动员提高成绩是“科技冬奥”的重要研究方向。运动生物力学是竞技体育科技助力的主要科技领域之一。本文着重介绍国内外运动生物力学研究在提高竞技体育运动成绩方面的方法和成果,以期为我国运动生物力学科研人员提供借鉴,也希望能有更多对竞技体育感兴趣的力学工作者进行运动生物力学研究,不断提高我国运动生物力学和竞技体育科研水平。

## 1 优化动作技术,提高运动成绩

运动技术的生物力学分析一直是运动生物力学在竞技体育中的主要应用,特别是对田径、赛艇、体操、跳水、举重和游泳等个人项目的研究已取得丰富成果。使用科学可靠的研究方法是确保运动技术的生物力学分析能切实有效提高运动员成绩的基础。基于模型、计算机模拟和统计分析的方法和研究设计是目前动作技术生物力学分析的常用研究方法,很多研究还借鉴了循证医学的一些研究设计。大样本的动作技术数据,包括大量运动员数据和1名运动员大量次数据是建立高质量模型的前提。目前已开发的无反光点人体运动自动捕捉人工智能系统为大量获取运动员动作数据提供可能<sup>[1]</sup>。

运动技术的生物力学模型一般可以分为复制型和个体型。复制型生物力学模型的研究方法首先要建立高水平运动员动作技术特征数据库,之后使研究对象模仿高水平运动员的动作技术提高运

动表现。复制高水平运动员动作的方法在简单、最佳技术唯一性比较强的人体运动技术研究中广泛使用,并且非常有效。个体型生物力学模型的研究方法则首先要明确具体运动员动作技术的生物力学特点,之后通过对生物力学数据的分析建立起适合具体运动员的运动技术模式。个体最佳动作技术分析方法广泛应用于复杂、最佳动作技术形式受多种因素影响的人体运动技术研究。

### 1.1 复制型模型对运动技术的研究

短跑不但是田径比赛的重要项目,也是其他运动项目的基础。多年来,研究人员对短跑技术进行了大量的生物力学研究和分析。复制型生物力学研究模型是这些研究中广泛应用的研究方法。Hay等<sup>[2]</sup>首先建立了短跑技术的生物力学概念模型,为短跑技术分析参数的选择提供理论基础。上述模型显示,短跑起跑反应时是影响短跑成绩的一个因素。反应时是发令枪响到运动员开始发力蹬起跑器的时间。研究表明,短跑运动员起跑的反应时短于200 ms,女运动员的反应时长于男运动员,但反应时与短跑成绩不相关<sup>[3]</sup>。Harland等<sup>[4]</sup>对优秀短跑运动员起跑技术进行分析认为,运动员蹬离起跑器的抛射角在 $40^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 时,可获得更大的水平地面反作用力;而且蹬离起跑器后第1步和第2步支撑脚落地时,应落在身体质心在地面的投影点之后。Mann等<sup>[5]</sup>使用复制型生物力学模型分析大量优秀短跑运动员数据,发现运动员蹬离起跑器后第1到第3步中支撑脚脚尖都在身体质心在地面的投影点之后,从而证实了Harland等<sup>[4]</sup>的观点。Mann等<sup>[5]</sup>的数据还表明,世界顶级男女优秀短跑运动员的最大水平速度分别为12.5、10.9 m/s,在以最大速度跑时,世界顶级男女优秀运动员的步长分别为2.64、2.25 m,步频分别为4.76、4.85步/s,支撑时间分别为0.09和0.08 s,腾空时间均为0.12 s。此外,最大速度跑时支撑脚落地相对于身体质心的水平距离是影响最大速度的一个重要因素<sup>[6]</sup>。世界顶级男女优秀短跑运动员的这一距离分别为0.38、0.28 m。基于这些数据,在训练中使运动员模仿世界顶级优秀运动员技术的生物力学特点取得非常好的效果<sup>[7]</sup>。

### 1.2 个体化模型对运动技术的研究

使用个体化的生物力学模型可定量估算运动

员采用不同技术时可能表现的运动成绩,从而确定个性化的最佳技术。三级跳远是田径项目中技术最复杂的项目之一,应用个体化模型对三级跳技术进行研究,为确定运动员最佳技术模式提供依据。三级跳远项目要求运动员在高速情况下完成单腿跳、跨步跳和跳跃跳3次跳跃。三级跳远的实际跳跃距离是三跳距离的总和。每一跳距离与实际距离的百分比称为阶段百分比距离。3个百分比距离的比为三跳距离比。三跳距离比是影响三级跳成绩的关键因素<sup>[8]</sup>。根据三跳距离比, Hay<sup>[8]</sup>将三级跳技术分为3种:①单腿跳主导技术或高跳技术,即单腿跳比较高,使单腿跳百分比距离比跳跃跳百分比距离至少长2%;②跳跃跳主导技术或平跳技术,即单腿跳比较平,使跳跃跳百分比距离比跳跃跳百分比距离长至少2%;③平衡式技术,即单腿跳和跳跃跳的百分比距离的差小于2%。虽然很多教练员和研究人员认为,三跳距离比是影响三级跳成绩的关键因素,但是没有定量数据支持这一看法,更无法确定运动员个体化的最佳三跳比例。Yu等<sup>[9]</sup>研究发现,三跳中每一次起跳过程水平速度的损失和垂直速度增量呈线性相关,而且线性回归方程的斜率因运动员而异。这一斜率后来被称为速度转换系数。在这一发现的基础上, Yu等<sup>[9]</sup>建立了1个三级跳跳远的生物力学模型,将水平速度损失和垂直速度增量之间的个体化关系作为模型的约束之一,通过计算机模拟确定个体化的最佳三跳比例。该研究结果显示,如果速度转换系数小于0.5,高跳技术是运动员的最佳技术;如果速度转换系数大于0.9,平跳技术是运动员的最佳技术。这一研究中的三级跳远生物力学模型准确估算了运动员使用个体化最佳技术达到的成绩,指导美国三级跳运动员取得优异成绩。

在后续研究中, Yu等<sup>[10]</sup>还建立了三级跳远摆臂和摆腿的生物力学模型,模拟摆臂和摆腿对垂直速度增量和水平速度损失的影响,确定三级跳远最佳摆臂技术。如果使用平跳技术,运动员应该在单腿跳和跨步跳中单臂摆动,而在跳跃跳中双臂摆动;如果使用高跳技术,运动员应该在单腿跳和跳跃跳中双臂摆动,而在跨步跳中单臂摆动。Liu等<sup>[11]</sup>使用计算机模拟方法确定三跳比例对三级跳远成绩的影响程度,结果表明,使用高跳技术和平

跳技术都可以出现优异的成绩,但平衡式技术不利于运动员发挥最大潜力。Liu等<sup>[12]</sup>还使用计算机模拟技术发现,最佳三跳比例不受助跑速度影响,运动员最后一步助跑落地进入单腿跳起跳时,身体质心向下的垂直速度越小,运动员在单腿跳起跳过程中水平速度损失越小,成绩也就越好。该结果意味着三级跳远运动员在助跑最后几步需要调整身体质心高度,减小在单腿跳起跳过程中身体质心降低幅度。这些研究结果对理解三级跳远技术的生物力学和提高三级跳远成绩产生积极影响。

最近,一些针对投掷项目的研究使用个体化生物力学随机模型,估算改进技术后出现一定成绩的概率。李翰君等<sup>[13]</sup>利用1名优秀女子链球运动员投掷技术的生物力学数据库,确定这名运动员每周旋转中球头处于最低点时球头速度之间以及球头速度与成绩的统计学关系,并将这些关系代入链球投掷的随机模型中作为对模型取值的约束,模拟不同速度节奏下运动员投出一定成绩的概率。吕钢等<sup>[14]</sup>对1名优秀女子标枪运动员的投掷技术进行生物力学分析,结果发现,该运动员比赛试投的真空飞行距离(假设在真空环境中标枪质心的飞行距离)和空气动力学距离(在实际环境中标枪质心实际飞行距离与真空飞行距离的差)负相关,而且这一负相关是限制该运动员运动表现的主要原因。研究人员利用这名优秀运动员的运动技术生物力学数据库,建立投掷成绩的生物力学随机模型并进行蒙特卡洛模拟,发现真空飞行距离和空气动力学距离之间相关系数的平方降低到0.1时,运动员投出67 m以上成绩的概率增加到17%,即6次试投中会有1次超过67 m。研究人员又进一步确定了影响这一相关系数动作技术因素,通过指导训练降低相关系数。这两项研究对提高该运动员的成绩产生重要的影响,模拟结果在其后的全国比赛中也得到验证。

### 1.3 使用统计分析方法对运动技术的研究

生物医学领域常用的一些实验研究方法,例如案例对照研究方法,也在最近的一些运动技术生物力学研究中应用,并取得有意义的结果。Liu等<sup>[15-16]</sup>使用案例对照方法研究标枪运动员躯干和上肢动作顺序对投掷成绩的影响。选择1组优秀的男女标枪运动员作为实验对象,获得每名运动员

在同一次比赛中最好成绩和最差成绩试投的技术数据,比较两次不同成绩试投中运动躯干和上肢动作的顺序。结果表明,虽然男女运动员的动作顺序不同,但同一运动员同一次比赛中最好成绩试投和最差成绩试投中,躯干和上肢的动作顺序并无显著差异。Liu等<sup>[17]</sup>再次使用这一研究设计探讨优秀铁饼运动员身体转动量对铁饼投掷中空气动力学距离的影响。从数据库中挑选1组男女优秀铁饼运动员,对这些运动员在一次比赛中最长和最短空气动力学距离试投的生物力学数据进行对比分析。研究表明,在铁饼出手时,运动员身体围绕前后轴向投掷臂对侧转动的角动量对空气动力学距离有显著影响。上述研究设计控制了运动员体能和比赛环境对成绩的影响,突出了技术动作对成绩的影响。

最近,一项针对举重技术的生物力学研究也应用了这种研究设计<sup>[18]</sup>。选择1组优秀举重运动员作为研究对象,对比每名运动员在同一次比赛中抓举同一重量的失败和成功试举的数据。该研究表明,抓举试举的成功关键在于接杠铃时杠铃的垂直速度以及运动员膝、髋关节的伸展程度,提示抛铃动作的重要性和今后研究抛铃动作细节的必要性。

#### 1.4 使用计算机模拟技术对运动技术一般力学原理的研究

计算机模拟方法是研究复杂运动技术一般力学原理的有效方法。对体操、跳水等项目中人体腾空时身体动作对运动表现的影响研究是采用模型模拟方法研究的经典案例。Yeadon<sup>[19]</sup>建立人体腾空翻转动作的刚体模型并对其进行系统的计算机模拟分析,结果发现,人体的空翻动作有扭转空翻和摇摆空翻两种模式。人体在空中的旋转都可以解释为这两种空翻动作模式的组合。在利用这一模型的后续研究中发现,起跳过程中运动员可以通过上肢动作产生身体在空中围绕纵轴扭转的角动量,但是通过躯干和下肢动作产生的角动量比上肢动作产生的角动量要大1倍<sup>[20]</sup>。在空中通过上肢动作改变惯性主轴方向而增加扭转的角动量对空翻角速度的影响约为1%。运动员可以通过身体的伸展停止扭转运动。进一步的模拟分析发现,运动员起跳时具有前后空翻的角动量时,腾空时可以利用

肢体在不同平面中的动作改变惯性主轴的方向,从而使人体产生扭转;虽然起跳过程中运动员可以产生扭转的角动量,但在空中通过改变惯性主轴方向而获得扭转角动量的效果更好<sup>[21]</sup>。在这些对空翻转体动作力学原理研究的基础上,研究人员又对体操和跳水的具体技术进行计算机模拟<sup>[22-23]</sup>。研究结果为这些项目的动作设计和技术训练提供重要的科学依据。

## 2 科学评价运动能力,提高训练科学性

运动生物力学可以为运动训练学提供重要的测试手段和研究方法,以检验训练方法手段的有效性,设计和开发新的训练方法。很多力学参数可以作为运动员身体能力或运动负荷的评价指标,如力、速度、刚度、功率等。但人体运动器官材料和结构的复杂性,以及神经肌肉控制的复杂性使得人体内部的这些指标很难实际测量,而且基于模型的推算也会因为模型简化造成结果的误差。另一方面,在将这些力学指标应用于运动训练评价和研究时,要在遵循指标力学定义的基础上建立与运动能力之间的关系,正确、合理地赋予力学指标以运动训练学意义。最近,一些针对力、刚度和功率在人体运动能力测评方面的应用和趋势研究,值得运动生物力学研究人员注意。

### 2.1 肌肉力

定量获得肌肉收缩力的大小对准确制定训练计划、监控运动训练效果和预防训练造成的损伤具有非常重要的意义。因此,在运动训练特别是力量训练过程中,需要了解身体外部负荷到底对肌肉产生多大刺激。然而,由于运动控制的复杂性、肌肉组织的非线性材料特性、肌肉执行器的冗余数量以及直接测量技术的侵入性,在体测量或计算肌肉力仍然具有挑战性。目前能比较准确评估肌肉力量的方法主要是等动测力设备和表面肌电测量。但等动测力设备只能获得完成某一关节运动的肌群产生的力矩,无法了解各肌肉的力量和对抗肌的影响<sup>[24]</sup>。表面肌电测试并不能准确获得肌肉收缩力的大小,也无法获得深层肌肉的激活特征<sup>[25]</sup>。由于传统直接测量方法的局限性,研究人员尝试使用模型方法估算人体运动中的肌肉力。估算人体运动中肌肉力的模型可以分为3类:正动力学模型、逆

动力学模型和肌电驱动的肌肉模型。

正向动力学模型方法依赖于优化算法,寻找可以达到某种动作目的的肌肉激活模式,从而进一步确定达到最佳运动表现的肌肉力学特征。例如:以获得最大跳跃高度为目标,采用正动力学模型方法研究蹲跳动作的下肢肌肉间控制策略<sup>[26]</sup>,双侧肌力不对称或疲劳对最大跳跃高度的影响<sup>[27]</sup>。正向动力学模型研究肌肉力学的关键是确定大量符合人体生理、解剖结构和运动能力的边界和约束条件。减小关节自由度、限制驱动关节的肌肉数量可以简化模型,从而更容易找到明确的运动模式。

逆向动力学以环节运动学和外部负荷力作为输入条件,计算关节净力和净力矩,进而通过数值优化算法估算关节周围肌肉收缩力,可用来评价下肢力量练习过程中各肌肉发力的特征。模型中肌肉的数量、肌肉参数、优化的目标、是否考虑肌肉力-长度关系和力-速度关系等问题都会影响肌肉力计算结果。目前研究常采用的优化方法是以肌肉应力最小为目标,最大限度提高肌肉耐力,但这种方法不适用于肌肉疲劳或损伤疼痛情况<sup>[28]</sup>。

肌电驱动的肌骨模型最早由 Liyod 等<sup>[29]</sup>提出,是将运动过程中的肌电信号作为逆动力学模型的输入条件之一,通过优化算法估算肌肉力。这种方法已被用于评估负重弓步力量练习过程中下肢肌肉力的大小<sup>[30]</sup>。与逆动力学方法相比,肌电驱动的肌骨模型考虑了肌肉的实际激活特征,使肌肉力的估算更加合理准确。肌电电极放置的位置和肌电信号处理方法都可能影响计算结果,但已证明高密度肌电测量可以减少肌肉力量估算的误差<sup>[31]</sup>。

由于无法直接测量肌肉力,目前这些模型研究的难点是验证估算肌肉力的准确性。而且无论何种模型,影响估算肌肉力量准确性和合理性的因素主要来源于合理的优化目标和准确、个性化的肌肉解剖和生理参数。因此,未来的研究可考虑应用肌骨超声、机器学习等测量和数据分析方法,以更准确获得力量训练时肌肉的发力情况,为运动员、教练员合理安排训练提供更明确的依据。

## 2.2 下肢刚度

下肢刚度被认为与快速移动能力有关。已有研究证明,增加下肢刚度可以提高短跑成绩<sup>[32]</sup>和变向动作的运动表现<sup>[33]</sup>。下肢刚度还是下肢损伤的

危险因素,过大或过小的刚度均会增加下肢损伤的风险<sup>[34]</sup>。在研究刚度与运动成绩的关系时,最常见的刚度指标测量计算方法有3种。垂直刚度(vertical stiffness)指垂直地面反作用力作用下人体重心垂直位移的大小。腿刚度(leg stiffness)指地面反作用力使下肢长度变化的大小。关节刚度(joint stiffness)指关节力矩作用下关节角度变化的大小。3个指标在测量简便性、重复性和适用评价的项目上各有优缺点。

垂直刚度可作为评价人体跳跃落地时总体刚度的指标,是整个身体在垂直地面反作用力作用下的垂直变形程度。使用一维测力台即可测量垂直地面反作用力,并进一步推算重心高度。Dalleau 等<sup>[35]</sup>给出利用纵跳垫测量触地时间计算单足跳时垂直刚度的公式。但需要注意的是,垂直刚度并不等于下肢刚度,会受到上肢动作和躯干姿态的影响,而且只考虑垂直方向的力和变形的关系,也无法说明下肢各关节对刚度的影响。

腿刚度只考虑地面反作用力对下肢变形程度的影响,是评价下肢总体刚度的指标。而且腿刚度可以评价并不垂直着地的动作,例如跑步或变向动作。腿刚度指标也需利用测力台等设备测量必要参数,但 Morin 等<sup>[36]</sup>提出一种只需测量跑步速度、腾空时间、支撑时间和下肢长度的“正弦波法”评价腿刚度,已被用于很多有关跑步下肢刚度的研究中。当然,腿刚度也不能具体分析各关节对刚度的贡献。

关节刚度可以分别获得髌、膝、踝3个关节的刚度情况,分析各关节刚度对下肢刚度的影响,以及各关节刚度与运动表现的关系,可以为运动训练提供更加准确的依据。Kuitunen 等<sup>[37]</sup>研究发现,膝关节刚度与跳跃离地速度相关,而踝关节刚度与连续跳跃的触地时间有关。获得关节刚度需要通过逆动力学计算关节净力矩,以及通过运动学测量方法获得关节角度。因此,需要一定的设备和比较复杂的测量和计算过程。

## 2.3 人体功率

功率(power)在力学中是单位时间做功的大小,是只有大小没有方向的标量。在运动训练相关研究中,功率往往被用来评价运动员做功或传递能量的效率,被认为与运动表现和运动成绩相关,是

运动训练评价研究的常用指标。在运动训练特别是体能训练研究中,功率往往被理解为爆发力,评价短时间的做功能力。例如:通过测量跳跃动作的功率评价运动员下肢爆发力<sup>[38]</sup>。在耐力性运动项目中,功率往往被用来评价比赛或训练的强度。自行车比赛或训练中经常使用功率计,计算踏蹬力和齿轮转速的乘积获得骑行功率,以评价运动员骑行能力。但是多数相关研究对功率的概念不清楚,计算方法和模型不统一,对数据的解读也缺乏依据。

在从机械能角度考虑,人体运动可以认为是由肌肉收缩产生关节运动做功,以产生人体动能、势能、克服摩擦力及其他环境阻力。因此,人体运动的机械功率可以表达为<sup>[39]</sup>:

$$P_j = P_k + P_f - P_G - P_e$$

其中: $P_j$ 为关节功率; $P_k$ 为人体环节动能的变化; $P_f$ 为摩擦力功率; $P_G$ 为重力功率; $P_e$ 为环境阻力功率。关节功率 $P_j$ 为关节力矩与关节转动角速度的乘积,人体各关节功率的和可认为是人体总的肌肉功率。

**2.3.1 纵跳中的功率** 在运动训练相关研究中,纵跳高度往往用来评价运动员下肢爆发力能力。因此,很多研究以纵跳过程中峰值功率或平均功率说明运动员下肢肌肉输出机械功率的能力。但要思考的问题是下肢爆发力是否就是下肢肌肉(关节)功率(峰值功率或平均功率),以及以测力台测量计算得到的纵跳功率能否代表下肢肌肉(关节)功率。一方面,纵跳高度与峰值功率和平均功率并没有显著的相关关系<sup>[40]</sup>,而起跳冲量无论从力学原理还是实际测试数据都证明是纵跳高度的决定因素。另一方面,影响纵跳高度的因素除了下肢肌肉快速做功能力外,还与技术动作、肌肉收缩初始条件、身高、体质量等很多因素有关<sup>[41]</sup>。虽然可以利用测力台和动作捕捉设备测量的动力学和运动学数据,进行逆动力学计算下肢各关节的功率,但运动过程中下肢关节周围肌肉收缩特征复杂,而且关节及附属结构也会产生力和力矩的作用,故这种关节净功率并不能说明某肌群的功率。虽然并不反对以纵跳高度评价运动员下肢爆发力,但今后的研究应明确肌肉功率、关节功率、人体运动功率(输出功率)的定义、影响因素和计算方法,而且这些概念不能混用和相互代替。已有研究提出,冲量或力的

变化率可能比功率更适合评价人体爆发力<sup>[42]</sup>。研究评价人体运动“爆发力”和人体肌肉“爆发力能力”的最佳生物力学指标,也是一个有意思和有意义的研究问题。

**2.3.2 耐力项目中的功率** 在自行车、速度滑冰和划船等项目中,运动员输出功率大小已经被证明与比赛成绩相关,故被作为评价专项运动能力、训练效果和选材的指标。而在训练中,功率还往往作为训练强度的定量指标,以监控运动员的训练负荷。在自行车等主要在水平方向上运动的项目中,功率往往以动能的变化率计算。但是如果进一步了解身体各关节运动对输出功率的影响,还需要计算各关节功率。目前计算关节功率主要基于将人体看做多刚体系统,采用逆动力学法计算各关节力矩和角速度,这种方法计算下肢功率的准确性相对较高,但对躯干运动功率的估计存在较大误差<sup>[43]</sup>。因此,多数研究只分析髋、膝、踝关节功率,跑步相关研究还会计算跖趾关节功率,但很少分析躯干运动的功率。目前已有研究开发了基于最小平方差优化求解逆动力学方程的方法估算躯干运动功率,与从远端到近端环节依次求解的方法相比,在速度滑冰项目上躯干功率相差31%<sup>[43]</sup>。

### 3 研发运动装备,提高运动效能

运动装备的设计研发一直是竞技体育科学研究的热点,研究者们试图通过优化改进运动装备的外形、材料和结构帮助运动员提高成绩。最近有关运动鞋、运动服和球拍的研究,是运动生物力学在运动装备研究上的典型案例。

#### 3.1 运动鞋

在所有的运动装备中,鞋与运动表现的关系最为直接。运动鞋各个结构的物理性能都会对人体运动时下肢生物力学特征和能量消耗产生影响。目前研究较多的鞋结构和性能包括中底硬度、中底厚度、屈曲刚度、鞋质量、后跟杯、掌跟差、鞋带、鞋垫、后底硬度和前足翘度。

中底是跑鞋的重要结构,其硬度和屈曲刚度会直接影响运动的人体运动学和动力学特征。研究发现,随着中底硬度的增加,跑步时能量损失降低,跑步经济性和运动表现提高,纵跳高度也显著增加<sup>[44]</sup>。但中底硬度对跑步运动表现的影响程度与

跑者的运动水平有关,高水平运动员穿较硬中底跑鞋可以降低跑步能耗,而中底硬度对低水平运动员跑步经济性的影响不显著<sup>[45]</sup>。在中底加入碳纤维板增加中底屈曲刚度可以提高短跑成绩<sup>[46]</sup>和长跑时的跑步经济性<sup>[47]</sup>。但是,跑鞋中底屈曲刚度对短跑成绩的提高程度有明显的个体差异,对长跑成绩的提高也有最佳屈曲刚度范围<sup>[48]</sup>。而且跑鞋中底屈曲刚度对长跑运动表现的影响也与跑者水平有关<sup>[47]</sup>。随着跑步水平的提高,高屈曲刚度更能提高长跑经济性<sup>[47]</sup>。但也有系统综述指出,中底屈曲刚度对长跑运动经济性的影响范围从降低3%到增加3%均有报道,这可能与不同研究中碳纤维板的放置位置、底部加载和几何形状不同有关<sup>[49]</sup>。未来研究应关注跑鞋中底屈曲刚度对跑步运动表现影响的个体差异,并探讨碳纤维板的不同特征对跑步运动表现和损伤风险的影响,为跑鞋研发和跑者选鞋提供依据。

在短跑和足球运动中,钉鞋对提高运动表现有重要影响。研究证明,穿着不同类型的短跑钉鞋均可显著提高短跑速度,改变相关的运动生物力学指标,但鲜有研究探讨不同的鞋钉参数(形状、数量、分布方式、钉与鞋底的角度等)对短跑成绩的影响和力学机制。目前常见的钉鞋鞋钉数量一般为6~8枚。理论上,选择“前尖后平”的三角锥形状有利于增大静摩擦力<sup>[50]</sup>。当鞋钉分布在脚底最大受力部位时,力学效果最佳,但需考虑不同运动员的不同着地方式和压力分布<sup>[50]</sup>。此外,足球钉鞋能为着地时的脚与草坪之间提供足够的牵引力(traction)和稳定性,这些是完成各种足球场上动作的前提,是运动员最关注的足球鞋参数。不同鞋钉形状、长度、数量和构造均会影响足球鞋的牵引力和稳定性,而且更高的牵引力可以提高支撑腿稳定性,同时提高踢球腿速度和准确性<sup>[51]</sup>。另外,鞋面是踢球时与足球接触的部分,球鞋的鞋掌维度、鞋面的弹性模量、摩擦系数和鞋带位置等因素均会影响球鞋的舒适性和击球触感,从而影响球速和准确性等运动表现。未来研究应将相关的足球鞋参数进行组合,为个性化足球鞋设计提供依据。

### 3.2 运动服

紧身服(compression garment, CG)是当前较为流行的一种运动装备,因其具有一定的束身性和舒

适性,在中长跑和自行车等运动项目中得到了广泛的应用,同时成为科学研究的热点问题。根据穿着部位的不同,紧身服可以分为紧身衣、紧身裤、压力袜和压力袖等。紧身服对人体有氧运动能力和长跑运动表现,以及赛后机体恢复的影响仍存在一定的争议。Bringard等<sup>[52]</sup>研究发现,穿着下肢紧身服能够在次最大强度跑步时降低人体摄氧量,从而提高机体的代谢能力,这可能是由于紧身服改变机体的本体感觉和肌肉的协调能力,通过减少肌肉振动来减少肌纤维的募集,降低肌肉活动强度,从而减少长时间运动过程中的能量消耗。然而越来越多的研究发现,无论跑步距离的长短,任何类型的紧身服均不会对机体跑步过程中的耗氧量产生显著影响,对下肢生物力学特征也无显著改变<sup>[53-54]</sup>。但是,穿着紧身服能够显著降低运动后血清肌酸激酶的平均值,促进下肢的静脉回流和血乳酸等代谢产物的清除,从而促进疲劳恢复<sup>[55]</sup>。

在自行车运动中,紧身服对运动能力和表现的作用较强,可显著提高短距离冲刺骑行时的峰值功率和长时间骑行的平均功率,还可降低运动员骑行功率下降幅度和速度<sup>[56]</sup>。紧身服对骑行运动表现的提高机制主要有改善血液循环和促进静脉回流、增加血液中的葡萄糖水平及减少运动过程中的肌肉振动等<sup>[56]</sup>。但需要注意的是,由于运动员身体结构和动作技术之间的个体差异较大,不同压力的紧身服对不同运动水平运动员的影响可能不同。这一问题还需要进一步研究,为紧身衣的设计和选用提供更充分的依据。

在竞技体育中,水或空气作为环境因素,在绝大部分条件下会对人体运动产生阻力因而降低运动员的运动表现。从流体力学的角度分析,身着竞赛服的运动员一般会受到流体介质对其施加的摩擦阻力和压差阻力,游泳运动员还会受到兴波阻力的作用。研究表明,运动员身着宽松竞赛服比赛时其迎风面积显著增加,导致阻力增大约40%<sup>[57]</sup>。实际比赛证明,蕴含高科技因素的紧身竞赛服可以降低运动员受到的阻力,从而提升运动表现。鲨鱼皮泳衣融合了仿生学、流体力学和材料学等多学科科研人员的智慧,是高科技与紧身竞赛服结合之作。鲨鱼可以在海洋中快速游动,生物学家观察到鲨鱼皮肤表面分布有粗糙的V型褶皱和盾鳞结构。研

究人员采用计算流体动力学模拟和水洞实验方法研究鲨鱼皮肤表面的V型褶皱,结果发现,水流经V型槽时产生反向旋转的二次涡对,而且V型槽结构对主涡对具有抬升作用,可以显著降低流动的湍流强度和沟槽内壁的剪切压力<sup>[58]</sup>。另外,鲨鱼皮肤的盾鳞结构能够有效抑制流动分离。因此材料学家基于以上研究结论,在超弹性面料表面仿制鲨鱼皮表面结构制作出“快速皮肤”织物<sup>[59]</sup>。自1999年10月国际泳联允许使用“快速皮肤”泳衣至2010年5月被禁止,高科技泳衣性能由纯粹的减阻进化为同时具备减阻、增加浮力和降低能量损耗功能。在后高科技泳衣时代,可减阻面料、更符合人体工程学的缝合技术仍然是泳衣研究的重点方向。

陆上项目紧身竞赛服的减阻机制与高尔夫球类似,通过对面料表面进行微观和宏观修饰,空气流经修饰物时在边界层内产生湍流,湍流动量可以有效抑制下游的流动分离,从而降低占主导地位的压差阻力。自行车和速度滑冰的最大速度超过50 km/h,对于这类高速运动,紧身竞赛服主要通过改变面料的粗糙度、纱线类型和材料、缝线位置、织物走向、织物的拉伸率和透气率降低阻力。另外,根据不同项目运动员的技术动作特点,在不同部位选择合适的面料进行缝制对降低阻力也尤为重要。

### 3.3 球拍

在网球、乒乓球和羽毛球等球类运动中,球拍作为人对球作用的唯一装备,其结构和材料的力学参数对击球效果产生重要影响。网球拍设计的主要参数包括球拍长度、重量、挥重(swing weights)、球拍面(弦和框架)、甜区等。其中,球拍面、球拍重量和挥重对击球效果影响较大。拍弦张力和球拍框架是影响网球拍面特征的主要参数。优秀网球运动员所使用的弦张力一般为22~31 kg<sup>[60]</sup>。网球拍弦张力能显著影响网球的反弹速度,当弦张力大于18 kg时,相对较低的弦张力造成网球形变较小,能量消耗较少,故可获得更高的反弹球速<sup>[61]</sup>。拍弦张力减小会增加运动员控球误差,而更高的拍弦张力更有利于提高控球精确性<sup>[62]</sup>。此外,球拍框架刚度增加也可显著增加网球回弹速度,而且控球精度也随之提高<sup>[63]</sup>。网球拍的重量和挥重共同影响挥拍效果。挥重是球拍围绕握点转动的转动惯量,代表了挥动球拍的容易程度<sup>[64]</sup>。较轻的网球拍有利

于运动员产生更大的挥拍速度和球速,但同时也需要更多的肩关节肌肉激活,从而增加肌肉疲劳、慢性疼痛或损伤的风险<sup>[65]</sup>。挥重减小可增加运动员最大挥拍速度,并增加击球上旋程度。总结已有研究发现,网球拍挥重为30~35 g·m<sup>2</sup>时对提高网球球速和准确性的效果最好<sup>[64]</sup>。

羽毛球拍弦张力和球拍网线是影响拍面特征的主要参数。由于羽毛球场的尺寸较小且羽毛球反弹速度更大,为了在产生最大速度的同时保持球不超出边界,运动员选择调节弦张力来保证准确性和速度。与网球拍类似,随着弦张力的降低,羽毛球反弹速度增加,而回弹精度降低<sup>[63]</sup>。羽毛球拍弦还通过直径和截面结构影响击球性能。较细的拍弦(直径小于0.70 mm)具有较佳的手感和击球性能,而较粗的羽弦(直径大于0.70 mm)耐击打,使用时间较长,但手感和击球性能相对较差。拍弦结构包括多纤维结构和有芯结构两种,一般有芯结构抗拉伸强度等力学性能优于多纤维结构。球拍杆刚度也是评价羽毛球球拍性能的一项重要指标,可分为硬、稍硬、适中、稍软、软5个等级。较软的拍杆增加了球拍储存弹性势能和释放更多应变能的能力,可以提升击球深度,但会增大击球阻力,降低减震性能,不利于对球的方向控制<sup>[66]</sup>。相反,较硬的拍杆则有利于对球方向的控制,但是容易造成运动员肩关节疲劳和受伤。因此,较软的拍杆适合力量较小、侧重防守的选手,而硬拍杆则适合力量较大、侧重进攻的选手。

乒乓球拍的材料结构能显著影响球拍性能,进而影响击球效果。乒乓球拍由底板和胶皮构成,高质量的球拍能准确控制乒乓球速度和旋转。底板的密度、弹性模量、模量比(modulus ratio)和硬度等性能与其材料密切相关。弹性模量小的底板会增加控球能力和反弹球速,而相对较硬的底板击球受压后形变较小,将产生较小的摩擦力<sup>[67]</sup>。选择底板时还需要考虑胶皮的作用。胶皮是直接接触乒乓球的部位,可分为正胶和反胶,目的是在触球后产生形变和弹力,从而改变球的速度、运动方向、旋转和落点<sup>[68]</sup>。增加胶皮硬度或减低海绵厚度会增加击球速度,但控球能力下降,而使用较厚的海绵可增加击球弹性和控球能力<sup>[69]</sup>。

## 4 总结

运动生物力学研究主要从3个方面促进竞技体育运动成绩提高。首先,运动生物力学研究可以改进运动员动作技术。运动生物力学可以描述、分析和优化人体动作,从而为提高运动效能提供依据。其次,运动生物力学研究可以改善训练方法。在充分了解人体结构受力和适应性变化的基础上,运动生物力学根据动作技术要求设计更合理的训练,并对已有训练手段的效果进行评价,为制定合理的训练方案提供科学依据。第三,运动生物力学研究可以设计和改进运动装备和器材。人与运动装备和运动环境之间的相互力学作用是影响运动成绩的重要原因,运动生物力学研究为运动器材的设计和改进了提供了理论和数据支持。

运动生物力学研究借助各种传感测量技术,获得人体运动过程的力学参数,通过统计分析或模型模拟的方法研究人体运动现象和规律,在提高运动成绩和预防运动损伤的研究中已发挥了重要的作用。今后的研究应在进一步明确提高成绩和预防损伤的研究目的的基础上,借助人工智能无标记点运动捕捉系统、柔性传感设备和大数据分析等新技术、新方法获取更多更准确的人体运动力学数据,遵循生物、医学科学严谨的研究设计,促进运动生物力学研究的广度和深度。

### 参考文献:

[ 1 ] 刘卉,李翰君,曲毅,等. 无反光点人体运动自动捕捉人工智能系统的有效性 [J]. 北京体育大学学报, 2021, 44(1): 125-133.

[ 2 ] HAY JG, REID JG. Anatomy, mechanics, and human motion [M]. USA: Prentice Hall, 1988.

[ 3 ] MERO A, KOMI P, GREGOR R. Biomechanics of sprint running [J]. Sports Med, 1992, 13(6): 376-392.

[ 4 ] HARLAND M, STEELE JR. Biomechanics of the sprint start [J]. Sports Med, 1997, 23(1): 11-20.

[ 5 ] MANN R, MURPHY A. The mechanics of sprinting and hurdling. 2018 Edition [M]. USA: CreateSpace, 2019.

[ 6 ] GRAHAM D, HARRISON A. A biomechanical investigation of the application of schema theory in the sprint start [C]//Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Symposium on Biomechanics in Sport. Salzburg: [s.n.], 2006.

[ 7 ] HARRISON A. Biomechanical factors in sprint training-

where science meets coaching [C]//Proceedings of 28<sup>th</sup> International Society of Biomechanics in sports. Northern Michigan: [s.n.], 2010.

[ 8 ] HAY JG. The biomechanics of the triple jump: A review [J]. J Sports Sci, 1992, 10(4): 343-378.

[ 9 ] YU B, HAY JG. Optimum phase ratio in the triple jump [J]. J Biomech, 1996, 29(10): 1283-1289.

[10] YU B, ANDREWS JG. The relationship between free limb motions and performance in the triple jump [J]. J Appl Biomech, 1998, 14(2): 223-237.

[11] LIU H, YU B. Effects of phase ratio and velocity conversion coefficient on the performance of the triple jump [J]. J Sports Sci, 2012, 30(14): 1529-1536.

[12] LIU H, MAO D, YU B. Effect of approach run velocity on the optimal performance of the triple jump [J]. J Sport Health Sci, 2015, 4(4): 347-352.

[13] 李翰君,刘嘉,叶奎刚,等. 速度节奏对链球成绩的影响:优秀运动员案例研究[J]. 北京体育大学学报, 2020, 43(09): 108-115.

[14] 吕钢,孙凯扬,买毅强,等. 空气动力学距离对标枪运动员运动表现的影响:优秀女子标枪运动员吕会会投掷技术的个案研究 [J]. 中国体育科技, 2021, 57(1): 52-57.

[15] LIU H, LEIGH S, YU B. Sequences of upper and lower extremity motions in javelin throwing [J]. J Sports Sci, 2010, 28(13): 1459-1467.

[16] LIU H, LEIGH S, YU B. Comparison of sequence of trunk and arm motions between short and long official distance groups in javelin throwing [J]. Sports Biomech, 2014, 13(1): 17-32.

[17] LIU H, YU B. Rotation of the thrower-discus system and performance in discus throwing [J]. Sports Biomech, 2021: 1-16.

[18] MASTALERZ A, SZYSZKA P, GRANTHAM W, et al. Biomechanical analysis of successful and unsuccessful snatch lifts in elite female weightlifters [J]. J Hum Kinet, 2019, 68: 69.

[19] YEADON MR. The biomechanics of twisting somersaults Part I: Rigid body motions [J]. J Sports Sci, 1993, 11(3): 187-198.

[20] YEADON MR. The biomechanics of twisting somersaults Part II: Contact twist [J]. J Sports Sci, 1993, 11(3): 199-208.

[21] YEADON MR. The biomechanics of twisting somersaults Part IV: Partitioning performances using the tilt angle [J]. J Sports Sci, 1993, 11(3): 219-225.

[22] KING MA, YEADON MR. Maximising somersault rotation in tumbling [J]. J Biomech, 2004, 37(4): 471-477.

[23] KING MA, KONG PW, YEADON MR. Maximising forward somersault rotation in springboard diving [J]. J Biomech,

- 2019, 85: 157-163.
- [24] HARRIS N, CRONIN J, KEOGH J. Contraction force specificity and its relationship to functional performance [J]. *J Sports Sci*, 2007, 25(2): 201-212.
- [25] HENRIKSEN M, AABOE J, BLIDDAL H, *et al.* Biomechanical characteristics of the eccentric Achilles tendon exercise [J]. *J Biomech*, 2009, 42(16): 2702-2707.
- [26] BOBBERT M. Dependence of human squat jump performance on the series elastic compliance of the triceps surae: A simulation study [J]. *J Exp Biol*, 2001, 204(3): 533-542.
- [27] YOSHIOKA S, NAGANO A, HAY DC, *et al.* The effect of bilateral asymmetry of muscle strength on the height of a squat jump: A computer simulation study [J]. *J Sports Sci*, 2011, 29(8): 867-877.
- [28] LEWIS CL, SAHRMANN SA, MORAN DW. Effect of position and alteration in synergist muscle force contribution on hip forces when performing hip strengthening exercises [J]. *Clin Biomech*, 2009, 24(1): 35-42.
- [29] LLOYD DG, BESIER TF. An EMG-driven musculoskeletal model to estimate muscle forces and knee joint moments *in vivo* [J]. *J Biomech*, 2003, 36(6): 765-776.
- [30] ESCAMILLA RF, ZHENG N, MACLEOD TD, *et al.* Patellofemoral joint force and stress between a short-and long-step forward lunge [J]. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2008, 38(11): 681-690.
- [31] MENEGALDO LL, OLIVEIRA LF. The influence of modeling hypothesis and experimental methodologies in the accuracy of muscle force estimation using EMG-driven models [J]. *Multibody Syst Dyn*, 2012, 28(1): 21-36.
- [32] BRET C, RAHMANI A, DUFOUR A-BA, *et al.* Leg strength and stiffness as ability factors in 100 m sprint running [J]. *J Sport Med Phys Fit*, 2002, 42(3): 274.
- [33] SERPELL BG, BALL NB, SCARVELL JM, *et al.* Muscle pre-activation strategies play a role in modulating Kvert for change of direction manoeuvres: An observational study [J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2014, 24(5): 704-710.
- [34] BUTLER RJ, CROWELL III HP, DAVIS IM. Lower extremity stiffness: Implications for performance and injury [J]. *Clin Biomech*, 2003, 18(6): 511-517.
- [35] DALLEAU G, BELLI A, VIALE F, *et al.* A simple method for field measurements of leg stiffness in hopping [J]. *Int J Sports Med*, 2004, 25(3): 170-176.
- [36] MORIN JBT, DALLEAU G, KYRÖLÄINEN H, *et al.* A simple method for measuring stiffness during running [J]. *J Appl Biomech*, 2005, 21(2): 167-180.
- [37] KUITUNEN S, OGISO K, KOMI P. Leg and joint stiffness in human hopping [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2011, 21(6): e159-e167.
- [38] BOSCO C, KOMI P, TIHANYI J, *et al.* Mechanical power test and fiber composition of human leg extensor muscles [J]. *Eur J Appl Physiol*, 1983, 51(1): 129-135.
- [39] KRUK E, VAN DER HELM F, VEEGER H, *et al.* Power in sports: A literature review on the application, assumptions, and terminology of mechanical power in sport research [J]. *J Biomech*, 2018, 79: 1-14.
- [40] KNUDSON DV. Correcting the use of the term “power” in the strength and conditioning literature [J]. *J Strength Cond Res*, 2009, 23(6): 1902-1908.
- [41] YOUNG WB, MACDONALD C, FLOWERS MA. Validity of double-and single-leg vertical jumps as tests of leg extensor muscle function [J]. *J Strength Cond Res*, 2001, 15(1): 6-11.
- [42] CRONIN J, SLEIVERT G. Challenges in understanding the influence of maximal power training on improving athletic performance [J]. *Sports Med*, 2005, 35(3): 213-234.
- [43] VAN DER KRUK E, SCHWAB A, HELM F, *et al.* Getting in shape: Reconstructing three-dimensional long-track speed skating kinematics by comparing several body pose reconstruction techniques [J]. *J Biomech*, 2018, 69: 103-112.
- [44] STEFANYSHYN DJ, NIGG BM. Influence of midsole bending stiffness on joint energy and jump height performance [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2000, 32(2): 471-476.
- [45] WROBETS J, WANNOP JW, TOMARAS E, *et al.* Softer and more resilient running shoe cushioning properties enhance running economy [J]. *Footwear Sci*, 2014, 6(3): 147-153.
- [46] STEFANYSHYN D, FUSCO C. Athletics: Increased shoe bending stiffness increases sprint performance [J]. *Sports Biomech*, 2004, 3(1): 55-66.
- [47] MADDEN R, SAKAGUCHI M, TOMARAS EK, *et al.* Forefoot bending stiffness, running economy and kinematics during overground running [J]. *Footwear Sci*, 2016, 8(2): 91-98.
- [48] ROY JPR, STEFANYSHYN DJ. Shoe midsole longitudinal bending stiffness and running economy, joint energy, and EMG [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2006, 38(3): 562-569.
- [49] ORTEGA JA, HEALEY LA, SWINNEN W, *et al.* Energetics and biomechanics of running footwear with increased longitudinal bending stiffness: A narrative review [J]. *Sports Med*, 2021, 51(5): 873-894.
- [50] 潘慧炬. 力学原理与跑鞋创新设计[J]. *北京体育大学学报*, 2001, 24(1): 45-46.
- [51] STERZING T, HENNIG EM. The influence of soccer shoes

- on kicking velocity in full-instep kicks [J]. *Exerc Sport Sci Rev*, 2008, 36(2): 91-97.
- [52] BRINGARD A, PERREY S, BELLUYE N. Aerobic energy cost and sensation responses during submaximal running exercise-positive effects of wearing compression tights [J]. *Int J Sports Med*, 2006, 27(5): 373-378.
- [53] RIDER BC, COUGHLIN AM, HEW-BUTLER TD, *et al.* Effect of compression stockings on physiological responses and running performance in division III collegiate cross-country runners during a maximal treadmill test [J]. *J Strength Cond Res*, 2014, 28(6): 1732-1738.
- [54] STICKFORD AS, CHAPMAN RF, JOHNSTON JD, *et al.* Lower-leg compression, running mechanics, and economy in trained distance runners [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2015, 10(1): 76-83.
- [55] BORN DP, SPERLICH B, HOLMBERG HC. Bringing light into the dark: Effects of compression clothing on performance and recovery [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2013, 8(1): 4-18.
- [56] DE GLANVILLE KM, HAMLIN MJ. Positive effect of lower body compression garments on subsequent 40-km cycling time trial performance [J]. *J Strength Cond Res*, 2012, 26(2): 480-486.
- [57] KYLE CR, CAIOZZO VJ. The effect of athletic clothing aerodynamics upon running speed [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1986, 18(5): 509-515.
- [58] WEN L, WEAVER JC, LAUDER GV. Biomimetic shark skin: Design, fabrication and hydrodynamic function [J]. *J Exp Biol*, 2014, 217(10): 1656-1666.
- [59] MORIA H, CHOWDHURY H, ALAM F. Microstructures and aerodynamics of commercial swimsuits [J]. *Procedia Eng*, 2011, 13: 389-394.
- [60] BOWER R, CROSS R. Player sensitivity to changes in string tension in a tennis racket [J]. *J Sci Med Sport*, 2003, 6(1): 120-131.
- [61] HATZE H. The relationship between the coefficient of restitution and energy losses in tennis rackets [J]. *J Appl Biomech*, 1993, 9(2): 124-142.
- [62] BOWER R, CROSS R. String tension effects on tennis ball rebound speed and accuracy during playing conditions [J]. *J Sports Sci*, 2005, 23(7): 765-771.
- [63] BOWER R, SINCLAIR P. Tennis racquet stiffness and string tension effects on rebound velocity and angle for an oblique impact [J]. *J Hum Movement Stud*, 1999, 37(6): 271-286.
- [64] ALLEN T, CHOPPIN S, KNUDSON D. A review of tennis racket performance parameters [J]. *Sports Eng*, 2016, 19(1): 1-11.
- [65] CREVEAUX T, DUMAS R, CHEZE L, *et al.* Influence of racket polar moment on joint loads during tennis forehand drive [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2013, 16(sup1): 99-101.
- [66] PHOMSOUPHA M, LAFFAYE G, COHEN C, *et al.* How to use the elasticity of a badminton racket to increase its speed by 80% [J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 18(S1): 2028-2029.
- [67] YU M. Comparative analysis on performance of table tennis racket's bottom of different materials [J]. *Appl Mech Mater*, 2014, 687-691: 4248-4251
- [68] WANG ZH, YUAN RJ, FAN XB. The wood composite materials of table tennis bat and batting techniques [J]. *Adv Mater Res*, 2012, 583: 49-52.
- [69] 王红梅, 张景亮, 翟祥国. 乒乓球拍中胶皮的使用性能及其影响因素[J]. *橡塑资源利用*, 2013(1): 15-22.