

基于动作捕捉技术的短跑运动员起跑技术 生物力学优化研究

李亚军

南充文化旅游职业学院, 四川 南充 637421

DOI:10.61369/EDTR.2025110018

摘要 : 基础性竞技项目—短跑是田径体育竞技的核心项目, 而其起跑技术对于终成绩有着重要影响。本研究主要运用动作捕捉技术对短跑运动员的起跑技术进行生物力学分析, 以定量分析评价技术存在的不足, 并以生物力学原理提出改善建议。基于多维动作捕捉技术对运动员起跑技术的各阶段(起跑预备姿势阶段、起跑反应阶段、起动阶段)运动学特征参数进行采集。本文通过构建动力学模型, 针对肌肉的协同作用深入研究了提高起动速度的途径, 研究表明改变起动器角度、重新调整身体重心及改进起动器腿部发力顺序可有效加快起动阶段速度、提高加速度效果, 为科学训练及运动员技术改进提供了有效的参考和明确的发展方向, 对短跑比赛的提高具有重要的实践意义。

关键词 : 动作捕捉技术; 短跑起跑; 生物力学优化; 运动表现; 技术分析

Research on Biomechanical Optimization of Sprinter's Starting Technique Based on Motion Capture Technology

Li Yajun

Nanchong Vocational College of Culture and Tourism, Nanchong, Sichuan 637421

Abstract : As a fundamental competitive event, sprinting serves as a core discipline in track and field athletics, with its starting technique significantly influencing the final performance. This study primarily employs motion capture technology to conduct a biomechanical analysis of sprinters' starting techniques, quantitatively evaluating existing technical deficiencies and proposing improvement suggestions based on biomechanical principles. By utilizing multi-dimensional motion capture technology, kinematic characteristic parameters at various stages of the athletes' starting techniques (including the preparatory posture phase, starting reaction phase, and take-off phase) are collected. Through the construction of a dynamic model, this paper delves into the pathways for enhancing take-off speed by focusing on the synergistic effects of muscles. The research indicates that altering the angle of the starting device, readjusting the body's center of gravity, and modifying the sequence of leg force application in the starting device can effectively accelerate the speed during the take-off phase and improve acceleration effects. This provides valuable references and clear developmental directions for scientific training and athletes' technical improvements, holding significant practical implications for enhancing sprinting performance.

Keywords : motion capture technology; sprinting starting; biomechanical optimization; athletic performance; technical analysis

引言

短跑运动作为竞技体育中的重要组成部分, 而跑步的起动阶段对缩短竞赛时间具有十分重要的意义。本研究使用高精度的传感器或是光学设备实时跟踪人的动作路线, 通过动力学方法分析肌肉的发力情况及关节的力变化, 从而找出手法不够灵活和技术上的不正确的部位及对应的生物力学原因。如起跑前的准备姿势的体重中心位置的不平衡性、起步迟缓或是起动跑过程中腿的力量不平衡, 都可以准确的从跑动记录中找出具体的部位。从而建立一套完善的改进田径跑步技术的生物力学系统, 为运动员提供一个更加科学的训练方案, 弥补了我国在短跑起跑技能的定量研究的缺口。

作者简介: 李亚军 (1984.07-) , 男, 河南永城人, 硕士, 副教授, 研究方向: 体育教学。公开发表学术论文10篇, 北大核心论文1篇, 著作1部, 参编教材3部, 市厅级课题3项。

一、基于动作捕捉技术的短跑运动员起跑技术生物力学研究不足

传统训练过程中仅是根据教练经验、体会进行指导，没有准确地去观察评判每一动作，导致技术的改进带有很大的盲目性。随着生物力学研究和运动科学的发展，动作捕捉技术为我们提供了前所未有的准确判别评定运动员起动能力的能力。

在目前的研究中，大多关注的是某一项技术环节（如起跑的反应时），而不兼顾整个起跑技术环节（准备姿势—启动—加速度）的完整分析，不能发现技术的连贯性以及出现的问题。比如人体躯体重心前倾不够可能会影响起跑的爆发力，但相关的研究往往不能关注这一细节。另外，因为数据获取的高成本也限制了该项技术在大众基础训练中应用的推广，进而使得结果难以被实践应用。上述弊端使得运动员的技术改进缺少针对的目标性，训练效率也会缓慢。^[1-3]

二、基于动作捕捉技术的短跑运动员起跑技术生物力学研究挑战

研究过程中使用动作捕捉技术优化短跑起跑技术面临挑战比较多。首先，动作捕捉系统的准确性和稳定性对运动数据的质量影响较大，在速度过大的情况下，传感器存在较大时间滞差会导致运动数据出现虚假情况；其次，由于个体间的巨大差异，比如躯体结构、肌肉力量分配等因素存在巨大差异，导致一些通用的优化策略很难完全适用于个体。^[4]

例如，对于长腿运动员与短腿运动员，他们的出发器的设置应该根据运动员的个人特点而定制。其次，由于其解析过程太过复杂，故应借助生物力学模型、运动科学理论深度挖掘行动中的大量信息，这无疑是给研究者个人能力提出了较高的要求。再者，技术转译也极具难度，尚需继续探究如何将其转化为实践中的具体措施从实验室试验结果的研究层面转译到行动层面。^[5]

（一）动作捕捉数据的精度与可靠性挑战

虽然运动追踪技术对短跑起跑技术的研究提供了新的信息资料，然而对运动追踪技术准确性与稳定性差的问题仍然是当前技术的一个研究瓶颈。首先，系统错误无法从根本上消除，尽管目前光学运动追踪系统的技术精准可以到达微米量级，但是在实验中仍会因为标记物被遮盖，周围环境干扰等原因出现信息遗漏或变形的现象。

例如，由于跑起跑过程中身体和四肢很快的运动，可能会掩盖标志点的存在，破坏数据的一致性，同时对于数据的噪音加以清洗也是一个复杂的过程。数据初始化记录当中充满了噪声，要对其进行过滤，如果过度过滤将消除相关的技术指标，但如果过滤程度不够彻底，将留下很多噪声从而降低了分析的准确性。起步技术研究当中，一个0.1s以内的细微变化可能是关键指标，对于数据的处理提供了很高的难度。

对于动作捕捉仪来说，校准的过程是比较复杂且耗时的。因为每个实验室里面应用的动作捕捉装置来自不同生产商以及不同版本，因而很难进行实验数据的对比。与此同时，因为个体的高度、体重以及力量等都会给数据的标准化带来比较大的难度。所以在具体的实验操作过程中，如何选择合适的位置以及个数的标

记点来保证数据的质量就显得非常重要。如果标记点数量过多可能会对运动者造成运动的干扰；而数量过少可能就不能全面记录技术细节，例如，对于跑步动作来说，跟踪髋部、膝盖、脚踝等关键部位角度的变化对起始速度具有重要的意义。

（二）生物力学模型与动作捕捉数据的整合挑战

将生物机械量由运动追踪数据转化成有用信息是另一大困难。第一个困难是倒退力学计算中过于粗糙的假设问题。假定身体是由刚体组成的可能会忽略掉肌肉、肌腱和软组织所展现的力量性质，这有可能会低估或高估关节力和力矩的估计值。在长时间路跑的开始阶段，对地面对抗力的准确估计对于分析出发爆发力非常重要，因而任何假定都可能影响最终结果的准确性。确定肌肉活动水平同样也很困难。

个性化生物力学模型的建立困难。通用模型较难描述个体运动员的解剖特征及动力学特征。特别是，启动跑技术评价中运动员的个体生理特征及运动模式对起跑效果有着重要影响。动作捕捉数据的加入需要相应的生物力学理论支持和数值计算能力，随着动作捕捉技术的发展，数据量呈现爆炸性增长，需要对数据进行更大容量的存储、处理和分析。

三、基于动作捕捉技术的短跑运动员起跑技术生物力学优化方法

（一）起跑姿势的个性化调整与优化

姿势对于跑动起跑方式的影响十分重要，对爆发力以及起跑速度有着深远的影响。借助动作捕捉软件，可采用高精度传感器探测运动员的动作中关节角度、质心以及双脚的受力，进而找出不同的人之间的差异，例如身体前倾幅度过大将导致质心提前移动，进而影响起动脚着地的效率；相反两腿间的距离过大会影响到臀部伸展能力。基于三维动作捕捉，教练员可以改变运动员起动器姿态角和手臂支撑点来提高起动发力效率。实验数据表明，优化起跑姿态能够显著缩短反应时长、降低体能损耗。在保持加速效果不变的情况下，改进起跑动作有助于运动员重新分配身体重心，防止因姿势错误引发的肌群过度紧张和运动损伤，这一方法特别适合青少年运动员在技术形成初期的培养过程。

借助非常精确的传感器，可以捕捉运动员跑动过程的三维动作数据，包括关节角度、中点位置、肢体运动轨迹等等，对运动员启动时的姿态生物力学进行量化评价，比如屈膝、屈髋角度、身体前倾角度、摆臂力量等，并与高水平运动员标准值进行对比，教练可以找到技术上的不足，比如屈膝角度大造成推摆不足，身体过度前倾造成传爆不足等等。纠正的方法有对跑鞋位置进行修正、预备动作的稳定性练习以及通过虚拟的反馈机制使运动员认识到动作的偏离。运用时间长了能强化起跑阶段的爆发力量及反应速度，减少了能量的开销，为后续的加速带来了前提基础。

（二）蹬地力量与爆发力的动态分析

在始动阶段，脚的蹬地是提供主要力量的主要环节，利用动捕对大腿肌群（股四头肌、腓肠肌等）和小腿肌群（例如腓肠肌、比目鱼肌等）的蹬伸力量来实现和控制时间、力的先后排序。利用力平台和动捕采集的数据，可以对力量传递不足的环节（例如踝关节的背伸力量不足、膝关节的伸展不足等环节）进行判断。爆发式快速下肢力量练习（如半蹲跳）、力量型无氧输出练

习（如持药球投掷）可有效提升快速启动第一阶段的垂、水平推力；依据运动对运动的研究分析发力弹力器起跑器中如何更好地应用起跑器的弹性，并指导队员适当改变步角来利用地面反作用力来提高起跑启动速度，以期进一步缩短0到10m的时间。

动能追踪技术能够测得运动员蹬伸的能量属性，包括接触地面的反弹力、腿部膝关节与踝关节的力量变化、肌肉激活的先后次序等，通过分析来评判蹬伸的能量分配情况，判断是否存在能量传递中断、关节协同性差等情况。例如，踝关节延迟会导致蹬地时部分能量传递到踝关节。利用专门的力量训练（加强大腿前方和小腿后方力量）；改进起跑姿势以充分利用杠杆力学原理；采用生物力学模拟的方法来评定各蹬伸方式的有效性等是鼓励采取的。结合运用实时反馈，使运动技术逐级建立、改善运动技术，以提高更有效的转换和启动加速能力。

（三）上肢摆动与身体平衡的协同优化

在保持重心稳定、带动腿部用力时，手臂摆动必不可少。利用动作捕捉分析其幅度、频率、相位不均衡，识别存在过大摆动或者滞后。可以通过加强核心稳定性练习（俯卧撑等）、节奏感练习（摆臂器等）优化手腿协同。如摆臂力度不足时会导致重心的改变，加大跌倒风险；反之摆臂的过度容易耗能，选手通过实时监测信息，调整摆臂运动，使其与脚部蹬力活动保持一致，优化全程启动的连贯性。

运动追踪系统的使用能够纪录运动员从一个指令被激活后至运动开始的时间，深入探究运动员神经肌腱系统的反射迟滞时间，通过比较出运动员对即将发生的事情作出反应的能力或者其他肌肉的优先控制。它的改进计划包括了通过声觉或者视觉指示增强反应练习，依据运动追踪中的反馈数据来调整准备前的肌肉张力，例如运动员的拍子太早开始使得他不能集中精力到他的腿部力量的运用上。以比赛场地作为虚拟现实的场景可以降低运动员的比赛紧张感，逐渐减少运动员在起跑阶段的反应时间，增加其在起跑阶段的竞争机会。

（四）反应时间的神经肌肉协调训练

起跑反应时包括接受“起跑”指令至肌肉发动的时间，该段时间内的阻碍能通过运动训练方法来改善，如视、听反馈的起跑训练，提前准备姿势等，这样可以使中枢在反应速度上减少通路时间。在模拟比赛项目中加入不确定性因素发出起跑信号，可以提高运动员兴奋性和反应速度，能免去起跑犯规，适用于高水平的运动员在高强度情况下保持竞技心理。

（五）起跑器设置的生物力学适配

踏板起始角度与位置能够影响到脚板蹬伸力量的充分利用程

参考文献

- [1] 王磊. 基于图像视觉特征的体育训练错误动作捕捉 [J]. 计算技术与自动化, 2022, 41(3):111–116.
- [2] 林雪云. 基于 Kinect 的罚篮技术动作辅助训练方法研究 [J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2021, 34(4):97–103.
- [3] 张艺佳, 姚小兰, 韩勇强, 等. 基于可穿戴惯性测量的滑雪运动员姿态测量与水平评估方法 [J]. 导航定位与授时, 2021, 8(6):74–80.
- [4] 孙冬, 宋杨, 岑炫震, 等. 基于计算机视觉的运动动作无标记识别技术研究进展 [J]. 上海体育学院学报, 2021, 45(9):70–85.
- [5] 刘程林, 田源. 基于动作捕捉系统的非接触式运动呼吸监测算法 [J]. 医用生物力学, 2021, 36(S1):147.
- [6] 王明远, 李华, 张伟. 聚焦深度学习在无标记运动捕捉中的算法优化与应用 [J]. 体育科学, 2022, 42(5):89–102.
- [7] 陈立, 赵敏, 刘强. 探讨单目视觉在短跑起跑动作三维建模中的精度提升方法 [J]. 中国体育科技, 2021, 57(3):45–58.
- [8] 周涛, 吴静, 郑磊. 分析无标记系统在运动生物力学中的误差来源及修正策略 [J]. 体育学刊, 2020, 27(6):112–120.
- [9] 孙浩, 王芳, 李明. 研究多模态数据融合技术对无标记运动识别的增强作用 [J]. 北京体育大学学报, 2022, 45(7):60–72.
- [10] 徐斌, 杨雪, 黄宇. 综述无标记技术在竞技体育中的实际应用案例及技术瓶颈 [J]. 体育科研, 2021, 42(4):33–41.

度。可以通过动捕设备结合力矩图来调整踏板之间的距离以及踏板的角度，满足不同类型运动员的长短力特征需求，如爆发型选手较为适用更加前倾的角度，而技术型选手则会更加合适一些小角度的前倾等，通过合理的定制可以最大程度利用蹬伸推力来减少功率损失。

（六）技术动作的实时反馈与矫正

实时动作跟踪系统能使运动员实时从视觉、听觉上获取关于错误行为的反馈信息，即时纠正技术动作的偏差。如：通过虚拟现实显示的界面，运动员可以清楚地观察自己行为与完美模型的差别，从而及时调整自己的动作形态，即能加速学习进程，对于康复期运动员重学技术模型非常有效。

运动追踪技术可以分析运动员间特有的身体特征，如身体尺寸、力量情况和关节活动度等。据此教练员可以制定个体的起跑策略，例如对于腿型比较短的运动员要加大启动器，或者对于力量型选手要优化踢伸角度。基于持续收集训练数据，该系统将实时调整技术参数以配合当前的生物学改变，通过人工智能算法也可以预测技术改善的效果，并防止错误尝试的风险。不仅使技术更精确，而且选手的长远适应也更有优势。

（七）长期训练效果的动态评估与调整

定期进行训练过程统计分析，把握技术的发展走势，优化训练方案。通过对之前的分析，教练可以抓住技术上的瓶颈，有针对性地予以解决，如如果发力到脚的强度增强但不伴随相应的反射速度快，就可以提高神经和肌腱的占比，这样做使练习过程具备专业性与持续性。

四、结束语

本文通过动作捕捉+生物力学建模的方式研究短跑运动员启动技术的真正瓶颈问题，并且按照理论提出相应的优化策略。本文得出起跑器适当地调整起跑角，合理分配身体重心并适当调整腿力的产生顺序，能够有效地增强启动爆发力，提高加速度，能够为我们提供科学的技术优化方向。该研究仍有研究量少及器材成本高等局限性，应在之后进一步扩大研究范围，寻找更具经济性的解决方式。技术转移也是本研究最大的难题，应不断加大对教练员及运动员的生物力学培训，努力使研究理论能够真正作用于田径训练中。总而言之，本研究为田径短跑项目提高表现提供了一个全新的研究思路，对田径运动的发展具有重要意义。