

文章编号: 1004-7220(2024)03-0497-07

影响我国男子 1 500 m 速滑直道速度的关键技术特征

张马森¹, 崔婧², 邵中平³, 刘卉⁴

(1. 西北工业大学 体育部, 西安 710072; 2. 西安明德理工学院, 西安 710124;

3. 黑龙江省体育科学研究所, 哈尔滨 150008; 4. 北京体育大学 中国运动与健康研究院, 北京 100084)

摘要:目的 针对我国男子速滑运动员 1 500 m 直道技术进行生物力学分析, 确定动作技术对运动表现的影响。方法 以参加 2021 年全国速度滑冰锦标赛 1 500 m 项目的 34 名男运动员为研究对象, 采用三维定点录像解析的方法获取运动学数据, 分析周期特征、动作阶段和关键时刻技术特征与周期速度的关系。结果 滑幅($r=0.560$)、滑行距离($r=0.554$)、蹬冰距离($r=0.512$)与周期速度高度正相关。滑行阶段的躯干活动范围($r=0.651$)、踝关节角($r=0.434$)、踝关节活动范围($r=0.446$)与滑行速度中度或高度正相关, 躯干角($r=-0.427$)与滑行速度中度负相关; 蹬冰阶段的躯干角($r=0.673$)、髋关节伸展角($r=0.804$)、髋关节外展角($r=0.560$)、髋关节外展角速度($r=0.566$)与蹬冰速度高度正相关, 蹬冰角($r=-0.605$)与蹬冰速度高度负相关。结论 1 500 m 速滑直道速度主要取决于滑幅, 滑行距离、蹬冰距离越大, 速度越大。躯干角和踝关节角是影响运动员滑行速度的主要技术特征, 适当增加躯干活动范围能有效提高滑行速度; 躯干角、髋关节角和蹬冰角是影响运动员蹬冰速度的主要技术特征, 积极伸髋蹬冰能有效提高蹬冰速度。

关键词: 速度滑冰; 直道技术; 自动捕捉; 动作分析; 生物力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2024.03.018

The Key Technical Characteristics Affecting the 1 500-m Straight Performance of Chinese Male Speed Skaters

ZHANG Masen¹, CUI Jing², SHAO Zhongping³, LIU Hui⁴

(1. Department of Physical Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China; 3. Heilongjiang Provincial Institute of Sports Science, Harbin 150008, China; 4. China Institute of Sport and Health Science, Beijing Sport University, Beijing 100084, China)

Abstract: Objective Biomechanical analyses of straight techniques for Chinese male skaters during the 1 500-m race were conducted to determine the influence of motion techniques on sports performance. **Methods** Thirty-four male skaters participating in the 1 500-m National Speed Skating Championship race were selected as research subjects. Kinematic characteristics were collected using three-dimensional fixed-point video analysis. The correlations between the periodic characteristics, motion phase characteristics, moment characteristics, and periodic velocity were analyzed. **Results** The period distance ($r=0.560$), gliding distance ($r=0.554$), and push-off distance ($r=0.512$) showed strong positive correlations with the periodic velocity. The trunk range of

收稿日期: 2023-12-05; 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2018YFF0300404), 国家自然科学基金项目(12132009), 中央高校基本科研业务费资助项目(D5000240026)

通信作者: 刘卉, 教授, 博士生导师, E-mail: liuhuibupe@163.com

motion (ROM) ($r=0.651$), ankle angle ($r=0.434$), and ankle ROM ($r=0.446$) showed moderate or high positive correlations with the gliding velocity. The trunk angle ($r=-0.427$) showed a moderate negative correlation with the gliding velocity. Additionally, the trunk angle ($r=0.673$), hip extension angle ($r=0.804$), abduction angle ($r=0.560$), and abduction angle speed ($r=0.566$) were highly positively correlated with the push-off velocity. The push-off angle ($r=-0.605$) showed a high negative correlation with the push-off velocity.

Conclusions The velocity of a straight line in 1 500-m speed skating depends on the dancing distance. Greater gliding and push-off distances result in higher velocities. The trunk and ankle angles significantly influence the gliding velocity, and appropriately increasing the trunk ROM can effectively improve the gliding velocity. The trunk, hip, and push-off angles are key determinants affecting the push-off velocity, and actively extending the hip and pushing-off can effectively enhance the push-off velocity.

Key words: speed skating; straight technique; automatic capture; motion analysis; biomechanics

速度滑冰是冰上项目中历史最悠久、开展最广泛的项目,也是冬奥会会产生金牌数最多的分项^[1]。近年来,我国速度滑冰运动员取得了一定成绩,但在冬奥赛场上获得的9块奖牌全部来自短距离项目,部分长距离项目尚不能获得冬奥会参赛资格。作为潜优势项目,中距离比赛成绩的提高对我国运动员在国际赛场实现奖牌数的突破和推动我国速度滑冰项目整体发展至关重要^[1-3]。

专项动作技术是影响速度滑冰运动员运动表现的重要因素。在1 500 m速度滑冰项目中,直道距离占比超过50%,直道表现被认为是取得优异成绩的重要因素^[4]。但关于速度滑冰直道技术的部分观点存在矛盾,研究尚不充分。多数研究表明,不同水平速滑运动员成绩的差异主要取决于滑幅^[1,3,5-6]。也有研究发现,运动员通过提高滑频来维持更高的滑冰速度^[7]。一般认为,蹲屈的滑行姿态有助于降低空气阻力^[1,3,8-9],高水平运动员表现出躯干角、膝关节角较小的滑行姿态^[3,10];但Noordhof等^[11]研究认为,不同水平运动员的躯干角、膝关节角并无差异。研究显示,蹬冰角与滑冰速度显著负相关^[5-6,10-14],高水平运动员也表现出蹬冰角较小的技术特征^[6,10]。但降低蹬冰角是多环节共同作用的结果,故进一步明确起主要作用的环节和运动形式,有助于提高训练的针对性。

在当今越来越达到人体速度极限的情况下,速度滑冰运动员的科学训练和技术优化应精细到每一个滑步,每一次蹬冰。但传统视频拍摄、标定和人工解析影像的方法由于工作量过大而很难应用于对速度滑冰运动员的动作分析和诊断,造成目前

针对速度滑冰比赛中动作技术的研究较少,且多为对技术特征描述不准确、不全面的二维录像解析^[6,10-11,13,15],这可能也是目前有关速度滑冰动作技术的研究结果存在矛盾的原因之一。基于此,北京体育大学联合大连锐动科技有限公司研发了一套基于计算机视觉深度学习技术的无标记点人体运动自动捕捉人工智能系统,该系统能在大范围运动场景下快速、准确获得人体关节点三维坐标^[16-18]。本文使用该系统获取我国男子速滑运动员在1 500 m比赛中的三维运动学数据,分析周期特征、动作阶段和关键时刻技术特征与周期速度的相关关系,确定动作技术对运动表现的影响,研究结果为训练中动作技术优化和比赛中动作技术运用提供支持。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

以参加2021年全国速度滑冰锦标赛1 500 m项目的男运动员为研究对象,剔除因摔倒、打滑等原因导致数据异常的3名运动员,最终纳入34名运动员,年龄(22.2 ± 2.1)岁,身高(180.3 ± 5.1)cm,体质量(70.4 ± 5.9)kg,1 500 m比赛成绩(115.37 ± 2.73)s。

1.2 数据采集

采用三维定点拍摄的方法获取速度滑冰运动员比赛时的运动特征(见图1)。4台分辨率为1 920×1 080高清晰度摄像机(SONY FDR-AX700, SONY公司,日本)分为两组,拍摄画面重合区域长度为4 m,拍摄范围为24 m×8 m×2.5 m。拍摄范围

距离比赛起点位置 650 m, 同组摄像机主光轴的夹角约为 90° , 拍摄频率为 120 Hz/s, 快门速度为 $1/500$ s, 手动对焦。比赛开始前, 在两组摄像机拍摄画面的重合区域放置 5 个标志点以建立大地坐标系, 先对 1、3 号摄像机拍摄范围进行标定, 构成 $14\text{ m} \times 8\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ 空间^[16-17]。然后, 只将标定杆移动到 2、4 号摄像机拍摄范围的 4 个顶点, 再次进行标定, 两次标定共用 1 套大地坐标系(见图 2)。标定完成后, 移除所有标定设置。4 台摄像机在比赛前开机, 使用信号灯同步, 整场比赛结束后关机。

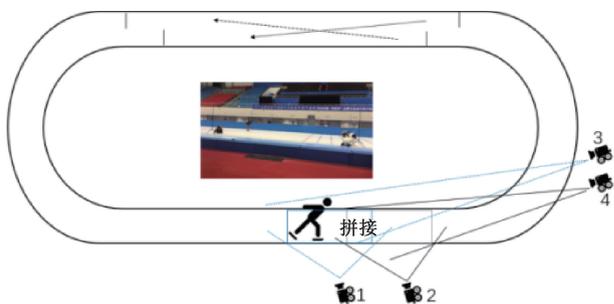


图 1 摄像机放置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shooting

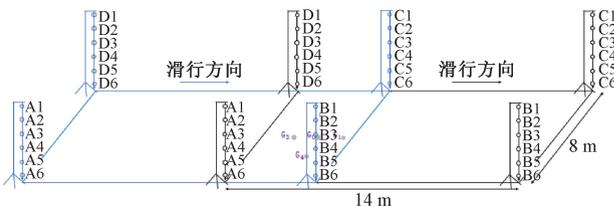


图 2 空间标定示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration

1.3 数据处理

1 500 m 速度滑冰比赛中, 运动员滑行 4 圈, 其中第 2 圈速度最快^[19]。本文选取运动员第 2 圈直道 1 个动作周期(左侧冰刀离地到对侧冰刀离地)的技术特征进行分析, 其中左侧冰刀离地到该侧冰刀着地为滑行阶段, 左侧冰刀着地到对侧冰刀离地为蹬冰阶段(见图 3)。使用人体运动自动捕捉人工智能系统 Fastmove 3D Motion(大连锐动科技有限公司)对比赛视频进行解析, 获得运动员身体 21 个关节节点的二维坐标^[16-17], 使用 Butterworth 4 阶低通滤波方法对解析的坐标数据进行滤波处理, 截断频率为 10 Hz ^[17]。使用直接线性转换方法将解析数据合成大地坐标系下的三维坐标。使用 De Leva 调整后的 Zatsiorsky Seluyanovs 模型计算人体重心坐标^[16]。

根据视频解析得到的人体测量点坐标建立人体基本轴和基本切面^[20-21]。大腿、小腿、足向量由近侧关节点指向远侧关节点。躯干角为两肩中点指向两髋中点的向量和 Z 轴夹角减去 90° , 即躯干和冰面的夹角; 髋关节伸展角为大腿向量在人体矢状面上的投影和人体垂直轴夹角的补角; 髋关节外展角为大腿向量在人体额状面上的投影和人体垂直轴的夹角; 膝关节角为大腿向量和小腿向量夹角的补角; 踝关节角为小腿向量和足向量夹角的补角; 蹬冰角为小腿向量和 Z 轴夹角减去 90° , 即蹬冰腿和冰面的夹角; 重心左右、垂直移动范围为人体重心在 Y、Z 轴上的移动距离(见图 3)。

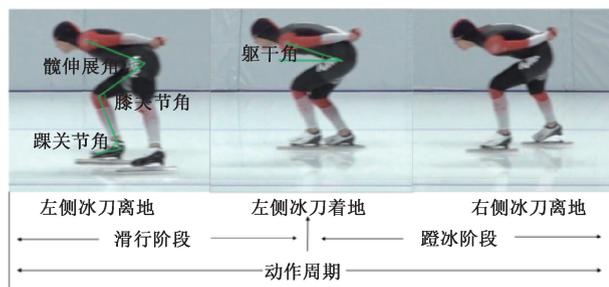


图 3 动作周期和角度指示示意图

Fig. 3 Schematic diagram of motion period and angle variables

1.4 数据分析

使用 Shapiro-Wilk 法结合 QQ 图对指标进行正态性检验。基于指标是否符合正态分布, 使用 Pearson 或 Spearman 相关系数确定周期特征、动作阶段和关键时刻技术特征与速度的相关性, 相关性效果大小的标准参考文献^[22]。采用逐步多元回归模型量化关键指标对运动表现的影响。 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义, 所有统计学分析使用 SPSS 20.0 软件(IBM 公司, 美国)完成。

2 结果

运动员的比赛成绩为 $(115.37 \pm 2.73)\text{ s}$, 周期速度与比赛成绩近似线性负相关($r = -0.937$)。周期特征指标、滑行阶段和蹬冰阶段技术特征指标见表 1。

周期特征与周期速度的相关性分析结果显示, $(13.68 \pm 0.77)\text{ m/s}$ 周期速度下, 滑幅($r = 0.560$)与周期速度高度正相关, 滑频与周期速度不相关。进一步分析可得, 滑行距离($r = 0.554$)、蹬冰距离($r =$

表1 动作周期和动作阶段技术特征指标

Tab. 1 Technical characteristic variables of motion period and motion phase

周期特征指标		滑行阶段技术特征指标		蹬冰阶段技术特征指标	
周期速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	13.68±0.77	躯干角/(°)	23.3±2.3	躯干角/(°)	26.9±2.0
滑幅/m	11.24±1.22	躯干活动范围/(°)	8.5±2.9	躯干角速度/[$(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$]	9.6±5.4
滑频/($\text{次}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.23±0.11	髋关节伸展角/(°)	76.6±6.8	髋关节伸展角/(°)	99.2±3.2
滑行距离/m	8.08±0.89	髋关节伸展范围/(°)	29.8±9.1	髋关节伸展角速度/(°)	166.1±41.3
滑行时间/s	0.59±0.05	膝关节角/(°)	117.3±3.1	髋关节外展角/(°)	37.8±2.7
滑行速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	13.73±0.70	膝关节活动范围/(°)	19.9±4.4	髋关节外展角速度/[$(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$]	60.0±19.8
蹬冰距离/m	3.15±0.50	踝关节角/(°)	85.1±3.7	膝关节角/(°)	137.3±4.8
蹬冰时间/s	0.23±0.03	踝关节活动范围/(°)	30.5±8.7	膝关节角速度/[$(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$]	181.7±33.6
蹬冰速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	13.54±1.19	重心左右移动距离/m	0.74±0.16	踝关节角/(°)	76.3±4.7
		重心垂直移动距离/m	0.09±0.02	踝关节角速度/[$(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$]	90.2±33.6
				蹬冰角/(°)	46.5±3.7
				蹬冰角速度/[$(^\circ)\cdot\text{s}^{-1}$]	32.9±12.8

0.512)与周期速度高度正相关,滑行速度($r=0.996$)、蹬冰速度($r=0.894$)与周期速度近似线性

正相关。滑行时间、蹬冰时间与周期速度不相关(见表2)。

表2 周期特征指标与周期速度的相关性(* $P<0.05$)

Tab. 2 Correlation between periodic characteristic variables and periodic velocity

	滑幅	滑频	滑行距离	滑行时间	滑行速度	蹬冰距离	蹬冰时间	蹬冰速度
周期速度	0.560*	-0.139	0.554*	0.240	0.966*	0.512*	0.140	0.894*

滑行阶段技术特征与滑行速度的相关性分析结果显示,(13.73±0.70) m/s 滑行速度下,躯干活动范围($r=0.651$)、踝关节角($r=0.434$)、踝关节活动范围($r=0.446$)、重心左右移动距离($r=0.479$)、重心垂直移动距离($r=0.538$)与滑行速度中度或高度正相关,躯干角($r=-0.427$)与滑行速度中度负相关,其他指标与滑行速度不相关(见表3)。

以滑行速度(y)为因变量的逐步多元回归方程为:

$$y = 3.316 + 0.176x + 0.087z$$

$$(R^2 = 0.654, P = 0.005)$$

其他指标被排除,躯干活动范围(x)、踝关节角(z)对回归方程的贡献率分别为0.497($P<0.001$)、0.157($P=0.005$)。

表3 滑行阶段技术特征与滑行速度的相关性(* $P<0.05$)

Tab. 3 Correlation between technical characteristic variables and velocity during gliding phase

	躯干角	躯干ROM	髋关节伸展角	髋关节ROM	膝关节角	膝关节ROM	踝关节角	踝关节ROM	重心左右移动距离	重心垂直移动距离
滑行速度	-0.427*	0.651*	-0.144	-0.115	-0.241	0.235	0.434*	0.446*	0.479*	0.538*

注:ROM为运动范围。

蹬冰阶段技术特征与蹬冰速度的相关性分析结果显示,(13.54±1.19) m/s 蹬冰速度下,躯干角($r=0.673$)、髋关节伸展角($r=0.804$)、髋关节外展角($r=0.560$)、髋关节外展角速度($r=0.566$)与蹬冰速度高度正相关,蹬冰角($r=-0.605$)与蹬冰速度高度负相关,其他指标与蹬冰速度不相关(见表4)。

以蹬冰速度(y)为因变量的逐步多元回归方程为:

$$y = 1.927 + 0.114x \quad (R^2 = 0.410, P < 0.001)$$

除了髋关节伸展角(x),其他指标被排除。

关键时刻技术特征与周期速度的相关性分析结果显示,(13.68±0.77) m/s 周期速度下,着地时刻的髋关节伸展角($84.5^\circ \pm 5.3^\circ$)与周期速度高度

表 4 蹬冰阶段技术特征与蹬冰速度的相关性(* $P < 0.05$)

Tab. 4 Correlation between technical characteristic variables and velocity during push-off phase

	躯干角	躯干角 速度	髋关节 伸展角	髋关节 伸展角 速度	髋关节 外展角	髋关节 外展角 速度	膝关 节角	膝关节 角速度	踝关 节角	踝关节 角速度	蹬冰角	蹬冰角 速度
蹬冰速度	0.673*	-0.156	0.804*	0.042	0.560*	0.566*	0.215	0.020	-0.280	-0.357	-0.605*	0.039

正相关($r = 0.629$), 蹬冰角($51.3^\circ \pm 4.3^\circ$)与周期速度高度负相关($r = -0.555$)。离地时刻的蹬冰角

($43.9^\circ \pm 3.3^\circ$)与周期速度高度负相关($r = -0.527$), 见表 5。

表 5 关键时刻技术特征与周期速度的相关性(* $P < 0.05$)

Tab. 5 Correlation between technical characteristic variables at moment and periodic velocity

	躯干角	髋关节伸展角	髋关节外展角	膝关节角	踝关节角	蹬冰角
周期速度						
着地时刻	0.136	0.629*	0.155	-0.192	-0.124	-0.555*
离地时刻	0.336	0.266	0.099	0.081	-0.203	-0.527*

3 讨论

提高滑冰速度并创造优异成绩是速度滑冰运动员的目标。本文结果表明, 1 500 m 速滑直道速度主要取决于滑幅, 即高水平运动员通过在相似的时间滑行更长距离来获得更大的速度, 这与文献[6, 23]的研究结论一致。Koning 等^[7]对运动员以不同速度滑冰时的动作特征进行分析, 发现运动员主要通过增加滑频来维持较高的滑冰速度, 但是该研究中运动员的速度仅为 7.3~10.7 m/s, 其滑幅、滑频、动作模式与实际比赛存在差异。滑幅等于滑行距离和蹬冰距离的总和, 滑行距离、蹬冰距离与周期速度均高度正相关, 提示滑行技术和蹬冰技术同等重要, 而以往的部分研究更关注蹬冰技术, 在一定程度上忽略了滑行技术^[7, 13]。虽然运动员在滑行阶段不产生动力, 但滑行时间是蹬冰时间的 2.57 倍, 任何小的不合理的技术动作经过较长时间的累计效应可能导致较大的能耗和降速。

影响运动员滑行速度的技术特征主要是躯干角和踝关节角。本文结果表明, 在一定范围内躯干角越小、踝关节角越大, 滑行速度越大。运动员在滑行阶段不产生动力, 还要克服冰摩擦力和空气阻力, 故增大躯干前倾幅度和下肢蹲屈程度能有效缓解滑行阶段降速的问题^[1, 3]。而在 Noordhof 等^[11, 13]的二维动作技术研究中, 不同水平运动员在滑行阶段(距离侧方相机垂线最近的一帧画面)的躯干角没有差异, 由于二维动作分析的局限性和确定特征时刻的随意性, 这些结果并不可靠。本文基于三维

定点录像解析, 选取滑行阶段躯干和下肢关节角度平均值, 结果发现, 降低躯干角、增加踝关节角有助于增大滑行速度。在髋、膝关节角度没有差异的前提下, 较小的踝关节角可能导致重心过度前移, 增大冰刀前部应力和冰面摩擦力; 较大的躯干角会抬高重心, 导致身体正迎风面积和空气阻力增加, 进而降低滑行速度。此外, 本文还发现, 躯干活动范围可以解释滑行速度 49.7% 的变异性, 一定范围内增大躯干活动范围有助于提高滑行速度。在中、长距离项目中, 糖酵解系统和氧化能系统供能比例增加, 血流限制、后程降速对成绩的影响也更大^[12, 19, 24-25]。运动员在滑行阶段维持较大的躯干前倾幅度和下肢蹲屈程度虽然能有效降低空气阻力, 但同时导致肌氧饱和度下降和血乳酸堆积, 即生物力学方面有利的蹲屈姿势可能导致生理学方面的劣势^[3], 如何平衡二者关系对解决降速问题和提升运动表现至关重要。本文结果提示, 高水平运动员在中距离比赛中维持低姿态滑行的前提下, 可能通过增大躯干活动范围来缓解血流限制的影响, 提高机体运输氧和清除乳酸的能力, 弥补甚至超越对成绩的不利影响。该推测仍需要进一步研究证实。

影响运动员蹬冰速度的技术特征主要是躯干角、髋关节角和蹬冰角。蹬冰阶段髋关节伸展角、蹬冰角与蹬冰速度高度正相关, 膝、踝关节指标与蹬冰速度相关关系不显著, 其中髋关节伸展角更是可以解释 41.0% 蹬冰速度的变异性, 提示蹬冰角的差异主要是髋关节运动引起, 髋关节伸展角和蹬冰角是影响蹬冰效果的重要指标, 髋关节伸展越充

分,蹬冰越充分,越有助于提高蹬冰速度,这与文献[5,11,13]中研究结果一致。本文还发现,髌关节外展角、外展角速度与蹬冰速度高度正相关,表明髌关节外展肌群爆发力是影响蹬冰速度的重要因素。Menegaldo等^[26]研究也表明,高水平速滑运动员在等速力量测试中髌关节外展肌群表现出更大的力矩和力矩-时间积分,与本文结果吻合。因此,运动员在训练中不仅要重视髌关节伸展、外展力量练习,更要加强髌关节外展爆发力练习,以提高蹬冰效果。此外,本文还发现,蹬冰阶段躯干角与蹬冰速度高度正相关,提示蹬冰阶段应适当抬高躯干。陈民盛等^[27]对速度滑冰运动员低姿态与高能量输出关系的研究也指出,低姿态应以发挥下肢蹬伸力量为前提,而以往很多研究只关注滑行阶段的躯干角,并得出运动员应增加躯干前倾幅度和降低重心的结论^[1,5,11]。本文结果提示,动作技术诊断和优化应更具针对性,运动员应在滑行阶段降低躯干姿态,在蹬冰阶段适当抬高躯干,使得下肢更容易发力,同时借助躯干下压的动作增大远端蹬冰力量,提高蹬冰效果。

对关键时刻技术特征的分析显示,着地时刻髌关节伸展角与周期速度高度正相关,着地和离地时刻蹬冰角与周期速度高度负相关,与文献[5-6, 10-11, 13]研究结果基本一致,提示运动员应尽早伸髌蹬冰,增大蹬冰力和蹬冰效果。速度滑冰运动员滑跑时的动力主要来源于强有力的蹬冰动作,即每次蹬冰时的输出功率^[6]。在影响输出功率的因素中,蹬冰角的相关性最大($r = -0.963, P < 0.01$)^[14],但以往研究往往只关注离地时刻的蹬冰角^[10-11, 13],并作为评价蹬冰效果的指标。本文结果提示,着地时刻、蹬冰阶段和离地时刻的蹬冰角同等重要,尤其蹬冰阶段蹬冰角反映了蹬冰效果的平均效应,可能更适宜作为蹬冰效果的评价指标。

本文研究对象是我国最优秀的一批速度滑冰运动员,但能站上国际比赛领奖台的运动员较少,今后应借助我国举办国际比赛的机会纳入更多世界级运动员,为进一步提高我国运动员的动作质量提供借鉴。

4 结论

基于全国速度滑冰锦标赛1 500 m 男子运动员

的动作技术研究表明,直道速度主要取决于滑幅、滑行距离、蹬冰距离越大,速度越大。躯干角和踝关节角是影响运动员滑行速度的主要技术特征,维持躯干低姿态滑行的同时适当增加躯干活动范围能有效提高滑行速度;躯干角、髌关节角和蹬冰角是影响运动员蹬冰速度的主要技术特征,积极伸髌蹬冰能有效提高蹬冰速度。在今后的训练中,运动员应强化髌关节伸展外展爆发力练习,比赛时维持躯干低姿态滑行的前提下,适当增大躯干活动范围;蹬冰阶段尽早尽快伸髌展髌,爆发式蹬冰以提高蹬冰效果。

利益冲突声明:无。

作者贡献声明:张马森负责实验操作、数据分析和论文撰写;崔婧、邵中平负责数据采集和统计分析;刘卉负责实验设计和论文审阅。

参考文献:

- [1] 李博, 刘翠佳, 杨威, 等. 滑得更快的科学——速度滑冰的运动生物学特征[J]. 体育科学, 2021, 41(8): 34-42.
- [2] 陆乐, 阎智力. 我国速度滑冰项目竞争力提升策略研究[J]. 体育文化导刊, 2020, 1(1): 42-47.
- [3] KONINGS JJ, ELFERINK MT, STOTER IK, *et al.* Performance characteristics of long-track speed skaters: A literature review [J]. Sports Med, 2015, 45(4): 505-516.
- [4] VAN DE RECTOR G, VAN DE KRUK E. Parameter analysis for speed skating performance [M]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2018.
- [5] BOER RWD, NILSEN KL. The gliding and push-off technique of male and female olympic speed skaters [J]. Int J Sport Biomech, 1989, 5(2): 119-134.
- [6] RUUD W, PAUL D, JAN S, *et al.* Characteristic stroke mechanics of elite and trained male speed skaters [J]. Int J Sport Biomech, 1986, 2(3): 175-185.
- [7] KONING JJ, DEBOER RW, DEGROOT G, *et al.* Push-off force in speed skating [J]. Int J Sport Biomech, 1987, 3(2): 103-109.
- [8] VAN INGEN SCHENAU GJ, DE GROOT G, DE BOER RW. The control of speed in elite female speed skaters [J]. J Biomech, 1985, 18(2): 91-96.
- [9] VAN INGEN SCHENAU GJ. The influence of air friction in speed skating [J]. J Biomech, 1982, 15(6): 449-458.
- [10] STOTER IK, HETTINGA FJ, OTTEN E, *et al.* Changes in technique throughout a 1500-m speed skating time-trial in junior elite athletes: Differences between sexes, performance levels and competitive seasons [J]. PLoS

- One, 2020, 15(8): e0237331.
- [11] NOORDHOF DA, FOSTER C, HOOZEMANS MJ, *et al.* The association between changes in speed skating technique and changes in skating velocity [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2014, 9(1): 68-76.
- [12] HETTINGA FJ, KONINGS MJ, COOPER CE. Differences in muscle oxygenation, perceived fatigue and recovery between long-track and short-track speed skating [J]. *Front Physiol*, 2016(7): 619.
- [13] NOORDHOF DA, FOSTER C, HOOZEMANS MJ, *et al.* Changes in speed skating velocity in relation to push-off effectiveness [J]. *Int J Sports Physiol Perform*, 2013, 8(2): 188-194.
- [14] 李建民, 王明辉, 陈民盛. 速滑运动员优秀组与一般组弯道蹬冰技术的比较研究[J]. 北京体育大学学报, 2006, 29(11): 1510-1512.
- [15] 田慧, 何依蔓, 王敏, 等. 2022年北京冬奥会我国运动员奖牌预测与参赛策略——基于奥运会主场优势效应分析[J]. 体育科学, 2021, 41(2): 3-13.
- [16] 刘卉, 李翰君, 曲毅. 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.
- [17] 张马森, 曲毅, 崔婧, 等. 运动捕捉人工智能系统在速滑项目中的应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(14): 5674-5680.
- [18] 刘卉, 于冰, 张力文, 等. 竞技体育运动生物力学研究现状与趋势[J]. 医用生物力学, 2021, 36(4): 491-501.
- LIU H, YU B, ZHANG LW, *et al.* Research status and trends in competitive sports biomechanics [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(4): 491-501.
- [19] 张马森, 冯茹, 刘卉. 速度节奏对我国速度滑冰运动员 1 500 m 比赛成绩的影响[J]. 中国体育科技, 2021, 57(11): 3-8.
- [20] 李秋捷, 包蕾, 朱晓兰. 我国男子越野滑雪运动员长距离传统式上坡双杖推进技术的生物力学分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(4): 553-559.
- LI Q, BAO L, ZHU X. Biomechanical analysis of chinese male cross-country skiers with double poling technique on uphill terrain during long distance classical race[J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(4): 553-559.
- [21] 刘卉. 三维摄影解析中人体关节角度的计算方法[J]. 北京体育大学学报, 2004, 44(6): 767-769.
- [22] HOPKINS WG, MARSHALL SW, BATTERHAM AM, *et al.* Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 2009, 41(1): 3-13.
- [23] VAN INGEN SCHENAU GJ, GROOT GD. On the origin of differences in performance level between elite male and female speed skaters [J]. *Hum Movement Sci*, 1983, 2(3): 151-159.
- [24] FOSTER C, RUNDELL KW, SNYDER AC, *et al.* Evidence for restricted muscle blood flow during speed skating [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1999, 31(10): 1433-1440.
- [25] 张马森, 马沐佳, 刘卉. 不同速度滑冰项目的能量供应特征研究[J]. 体育科学, 2023, 43(8): 61-66.
- [26] MENEGALDO LL, ARAGAO L, MATTATA T, *et al.* Hip adduction and abduction torque-angle curve characterization of speed skating athletes [J]. *Int J Sports Med*, 2020, 41(4): 248-254.
- [27] 陈民盛, 赵春花, 王红宇, 等. 速滑运动低姿势与高能量输出关系之探讨[J]. 北京体育大学学报, 2006, 29(1): 67-69.