



世界优秀短道速滑运动员 500 m 滑行轨迹的运动学研究

徐文泉¹, 王新娜², 李琪³, 侯亚丽^{4,5*}

摘要:目的:通过对现场采集的短道速滑 500 m 项目的优秀运动员运动视频进行处理,获取相关运动学参数,揭示优秀短道速滑运动员滑行运动学参数特征,为运动员科学训练提供依据。方法:通过单台摄像机定点拍摄获取比赛录像,无须在现场放置框架,利用冰面现有文字和线段进行摄像机空间标定,利用 SIMImotion 解析软件得到运动员滑行轨迹的像坐标,最后通过射影变换原理获取运动员在冰面上的滑行轨迹等运动学指标。结果:数据显示在第三圈男女平均速度都达到最大,男子最大圈平均速度为 14.14 m/s,女子为 13.07 m/s。男女直道平均速度、弯道平均速度、入弯瞬时速度和出弯瞬时速度都在第 5 次达到最大值。男子直道最大平均速度为 14.13 m/s,女子为 13.13 m/s;男子弯道最大平均速度为 14.70 m/s,女子为 13.51 m/s;男子入弯最大瞬时速度为 14.76 m/s,女子为 13.66 m/s;男子出弯道最大瞬时速度为 14.21 m/s,女子为 13.12 m/s。起跑第 8 步时,男女瞬时速度分别达到了 8.39 m/s 和 7.63 m/s,男女步长分别达到 2.98 m 和 2.44 m。结论:(1)利用射影变换原理完成运动员比赛滑行路线的标定,为短道速滑研究提供了一种新方法。(2)优秀短道速滑运动员在 500 m 滑行中弯道速度贡献大于直道,起跑爆发力对抢位战术影响较大,运动员体能情况对最后两圈影响较大。

关键词:短道速滑;500 m;滑行;运动学参数

中图分类号:G804 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2022)02-0039-06

DOI:10.12064/ssr.20220206

Research on the Sliding Kinematics Parameters of Elite Short Track Speed Skaters of 500 m

XU Wenquan¹, WANG Xinna², LI Qi³, HOU Yali^{4,5*}

(1. Institute of Physical Education, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. Hebei Sport University, Shijiazhuang 050041, China; 3. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. School of Physical Education, Shanxi Normal University Taiyuan 030032, China; 5. China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China)

Abstract: This paper aims to reveal the characteristics of the sliding kinematic parameters of the excellent short track speed skaters, and provide the basis for the athletes' scientific training by obtaining the relevant kinematic parameters through elite athletes' 500m competition video. The video is obtained by fixed-point shooting of a single camera. The existing space and line segments on the ice surface are used for camera space calibration. The image coordinates of the athlete's sliding track are obtained by SIMI motion analysis software. The athletes' kinematic parameters such as sliding trajectories on the ice are obtained through the principle of projective transformation. The data shows that the average speed of men and women reaches the maximum on the third lap, while the male maximum lap average speed is 14.14 m/s and the feminine is 13.07 m/s. The average speed of straight roads and curve, the instantaneous

收稿日期:2021-07-07

基金项目:国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2019YFF0301805);国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2018YFF0300605)。

第一作者简介:徐文泉,男,硕士,副教授。主要研究方向:运动训练学与心理学。E-mail:1969110@sina.com

*通信作者简介:侯亚丽,女,硕士,讲师。主要研究方向:运动生物力学,运动技战术分析。E-mail:372165197@qq.com。

作者单位:1.北京航空航天大学 体育部,北京 100191;2.河北体育学院,河北 石家庄 050041;3.中国科学院 计算技术研究所,北京 100190;4.山西师范大学 体育学院,山西 太原 030032;5.国家体育总局体育科学研究所,北京 100061。



speed of the incoming bend and exit are all reached the maximum at the 5th time. The maximum average speed of male straight road is 14.13 m/s while the feminine is 13.13 m/s. The maximum average speed of male curve is 14.70 m/s while the feminine is 13.51 m/s. The maximum instantaneous speed of male curve is 14.76 m/s while the feminine is 13.66 m/s. The maximum instantaneous speed of male exit is 14.21 m/s while the feminine is 13.12 m/s. At the start of the 8th step, the instantaneous speed of men and women reach 8.39 m/s and 7.63 m/s while the steps reach 2.98 m and 2.44 m respectively. This study provides a new method for the study of short-track speed skating by using the principle of projective transformation. The speed contribution of elite short track speed skaters in curve is greater than that in straight. The starting explosive force has a greater influence on the position-taking tactics, and the physical condition of athletes has a greater influence on the last two laps.

Keywords: short track speed skating; 500 m; sliding; kinematic parameters

短道速滑是一项以运动员的身体素质、技术水平、心理素质为基础,配合使用一定战术的竞速性冰上运动项目^[1-4]。短道速滑起源于加拿大,在 1981 年被引入中国,1992 年被列入冬奥会比赛项目。短道速滑一直是中国的优势项目^[2,5],从 1992 年到 2018 年的 8 届冬奥会中,中国共获得 60 枚冬奥会奖牌,其中短道速滑项目有 31 枚。通过查阅国内外文献,发现前人关于短道速滑的研究主要集中在战术、体能等方面^[6-11],以及对单一位置的技术参数研究^[12-17],但对短道速滑 500 m 比较全面的滑行运动学参数的研究未见报道。滑行运动学参数是客观反映短道速滑运动员技战术的重要指标^[18]。因此,本文重点将对短道速滑 500 m 优秀运动员的滑行运动学参数进行研究。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象基本信息见表 1。

表 1 2016—2017 赛季上海站的男女 500 m A 组决赛前 3 名

Table1 Men and women top 3 (group A) of Shanghai final in 2016-2017 season

姓名	性别	国籍	出生日期	名次	成绩/s
Elise CHRISTIE	女	英国	1990.8.13	1	43.590
CHOI Min Jeong	女	韩国	1998.9.9	2	43.612
Marianne ST-GELAIS	女	加拿大	1990.2.17	3	43.682
WU Dajing	男	中国	1994.7.24	1	40.618
Shaoang LIU	男	匈牙利	1998.3.13	2	40.701
Victor AN	男	俄罗斯	1985.11.23	3	41.161

1.2 研究内容

选取上海站 500 m 决赛前 3 名运动员在四分之一赛、半决赛以及决赛中各圈滑行的圈时间,圈路程,平

均圈速,直道、弯道的平均速度,入弯道、出弯道位置的瞬时速度,起跑阶段前 8 步(约至第一个入弯道处)的各步步长(起动脚滑出至另一侧的冰刀刚要触地时起动脚冰刀滑行的距离)、每步用时、每步末的瞬时速度作为研究内容。短道速滑场地示意图如图 1 所示。

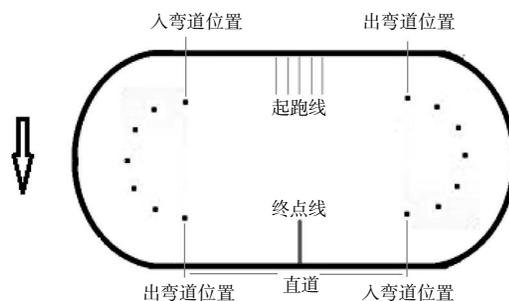


图 1 短道速滑场地示意图

Figure1 The sketch of short track speed course

1.3 研究方法

1.3.1 运动学采集法

运用一台型号为 GC-PX100 的 JVC 摄像机在场地一侧弧顶高位定点录制比赛视频,俯瞰角约为 30°,相机设置为室内运动模式,频率为 50 Hz。现场采集比赛视频。在比赛场地选择不共线的 4 点组成一个平面来进行现场标定,对其两两点之间的距离进行测量。通过在场地的远端、近端、左端和右端分别选取适当长度的线段进行测量来计算标定误差。具体测量结果如图 2 所示。

通过 SIMI motion9.1 对采集到的视频逐帧进行解析,解析方法如下:(1)解析位置为运动员主要支撑腿冰刀的中部位置,尽量贴近冰面;(2)起跑阶段支撑腿切换以一侧冰刀离地为原则,双支撑阶段支撑腿切换时以另一侧支撑腿刚与冰面垂直为原则;(3)起始帧为看到视频中鸣枪光亮的第一帧,结束帧为该名运动员最后一圈冰刀中部压终点线。对原始

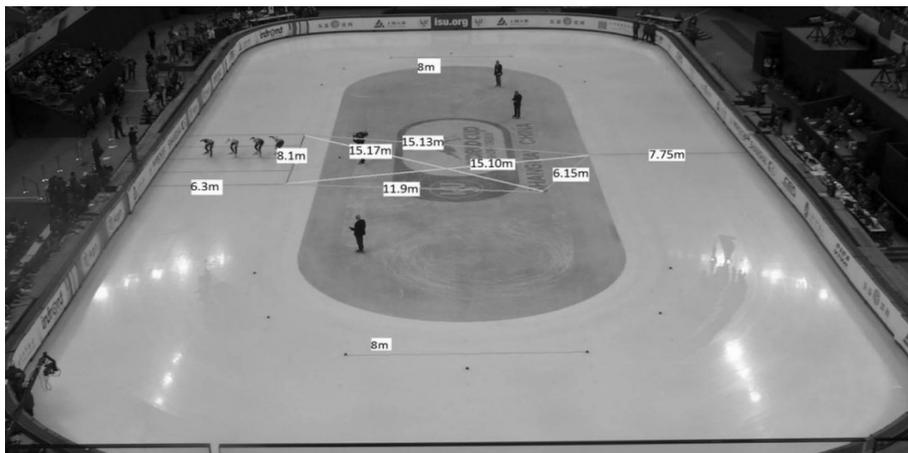


图2 现场标定图

Figure2 The field calibration chart

坐标数据进行中等强度平滑滤波,最后导出运动员滑行的二维像坐标数据。

1.3.2 射影变换

通过自编软件绘制运动员各圈的滑行轨迹,软件主要运用针孔成像原理,即像平面与物理平面为射影变换关系,已知物理平面不共线4点坐标与对应的像平面4点坐标,计算出两平面坐标系的变换矩阵,具体示意图如图3所示。

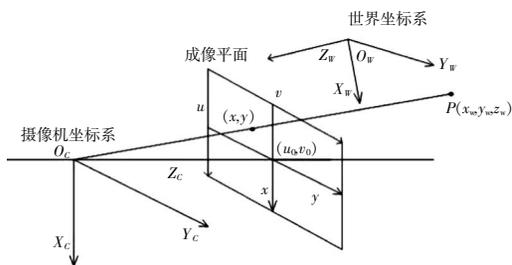


图3 射影变换关系示意图

Figure3 The sketch of projective transformation relation

表2 500 m 比赛中运动员的各圈滑行基本情况 (n=9) ($\bar{X} \pm SD$)

Table2 The basic sliding information of per-lap(n=9) ($\bar{X} \pm SD$)

圈次	圈时间/s		圈路程/m		圈平均速度/(m·s ⁻¹)	
	女子	男子	女子	男子	女子	男子
第1圈	7.34±0.20	6.91±0.14	56.58±0.87	57.79±1.21	7.71±0.19	8.36±0.18
第2圈	9.42±0.14	8.76±0.12	115.72±1.21	116.49±1.68	12.29±0.25	13.3±0.32
第3圈	8.81±0.07	8.24±0.07	115.2±2.34	116.45±1.81	13.07±0.30	14.14±0.28
第4圈	8.90±0.09	8.36±0.09	115.95±2.90	115.75±1.89	13.03±0.43	13.84±0.38
第5圈	9.05±0.11	8.55±0.16	114.27±2.62	114.22±2.03	12.62±0.36	13.37±0.42

在短道速滑 500 m 项目中,运动员共通过 9 次直道和 9 次弯道。表 3 显示了男女 500 m 直道和弯道平均速度、入弯道瞬时速度和出弯道瞬时速度。男子各次的直道平均速度、弯道平均速度、入弯瞬时速度

将 P 坐标去齐次化后即为物体平面坐标。经计算,画面中四端方向上计算值(实际值)分别为:起跑线 6.46 m(6.30 m),终点线 7.69 m(7.75 m),远端线 7.88 m(8 m),近端线 8.04 m(8 m),相对误差最大为 2.54%。坐标转换后利用算法将帧与帧之间的目标检测结果关联起来,利用 3 次 B- 样条曲线的轨迹重建算法^[9]得到运动员的滑行轨迹。

2 研究结果

在短道速滑 500 m 比赛中,运动员需在圈长 111.12 m 的场地上滑行 4.5 圈,第 1 圈为从起跑线到终点线的距离,相当于半圈。从表 2 来看,对于每圈时间指标来说,男子各圈用时都小于女子,在第 3 圈男女用时最短。对于每圈路程指标来说,男女各圈路程表现非常接近。对于每圈平均速度指标来说,男子各圈平均速度要大于女子,且在第 3 圈男女平均速度都达到最大(男子 14.14 m/s,女子 13.07 m/s)。

度和出弯瞬时速度都要大于女子。男女均表现为弯道平均速度大于直道平均速度。男女直道平均速度、弯道平均速度、入弯道瞬时速度和出弯道瞬时速度均在第 5 次出现最大值,分别是直道最大平均速度



(男 14.13 m/s, 女 13.13 m/s), 弯道最大平均速度(男 14.70 m/s, 女 13.51 m/s), 进入弯道最大瞬时速度(男 14.76 m/s, 女 13.66 m/s), 出弯道最大瞬时速度(男 14.21 m/s, 女 13.12 m/s)。第 1、第 2 次出弯道瞬

时速度明显大于入弯道瞬时速度, 这是运动员开始不断加速所致, 中间基本保持高速匀速滑行, 到最后一个弯道入弯瞬时速度明显大于出弯瞬时速度, 说明运动员最后一个弯道存在较明显的弯道减速。

表 3 不同区域和位置的速度指标统计情况 (n=9) ($\bar{X} \pm SD$)

Table3 The speed index of different zones and locations(n=9)($\bar{X} \pm SD$)

次数	直道平均速度/(m·s ⁻¹)		弯道平均速度/(m·s ⁻¹)		入弯道瞬时速度/(m·s ⁻¹)		出弯道瞬时速度/(m·s ⁻¹)	
	女子	男子	女子	男子	女子	男子	女子	男子
第 1 次	4.90±0.22	5.23±0.16	9.38±0.31	10.27±0.25	7.76±0.43	8.49±0.43	10.42±0.22	11.35±0.19
第 2 次	10.48±0.15	11.41±0.18	11.82±0.30	12.89±0.42	11.19±0.42	12.15±0.28	12.01±0.31	13.09±0.35
第 3 次	12.42±0.27	13.49±0.40	13.39±0.36	14.39±0.38	13.29±0.37	14.30±0.48	13.25±0.37	14.12±0.31
第 4 次	12.61±0.28	13.57±0.40	13.09±0.20	14.13±0.26	12.90±0.26	13.88±0.38	13.04±0.30	13.85±0.34
第 5 次	13.13±0.28	14.13±0.40	13.51±0.52	14.70±0.33	13.66±0.37	14.76±0.36	13.12±0.45	14.21±0.32
第 6 次	12.56±0.41	13.55±0.24	13.18±0.39	14.04±0.31	12.88±0.38	13.79±0.24	12.96±0.45	13.73±0.30
第 7 次	13.05±0.47	13.87±0.45	13.42±0.48	14.21±0.50	13.61±0.46	14.48±0.49	13.04±0.38	13.82±0.41
第 8 次	12.53±0.39	13.12±0.42	12.80±0.37	13.53±0.47	12.73±0.47	13.42±0.39	12.64±0.36	13.14±0.30
第 9 次	12.59±0.36	13.33±0.43	12.96±0.35	13.76±0.46	13.15±0.26	13.99±0.53	12.31±0.31	13.25±0.31

从表 4 来看, 男女均表现为从第 1 步到第 8 步用时不断增加, 瞬时速度不断加快, 从第 2 步开始步长也逐渐增加。到第 8 步时, 男女瞬时速度分别达到

了 8.39 m/s 和 7.63 m/s, 男女步长分别达到 2.98 m 和 2.44 m。男女比较呈现出男子每步用时较短, 瞬时速度较大等特点。

表 4 500 m 比赛中起跑阶段前 8 步的滑行情况 (n=9) ($\bar{X} \pm SD$)

Table4 The sliding information of first 8 steps during the starting stage(n=9)($\bar{X} \pm SD$)

步次	步时/s		瞬时速度/(m·s ⁻¹)		步长/m	
	女子	男子	女子	男子	女子	男子
第 1 步	0.84±0.06	0.77±0.08	3.27±0.21	3.32±0.44	1.31±0.18	1.20±0.25
第 2 步	1.09±0.07	1.03±0.08	4.41±0.19	4.70±0.32	0.98±0.11	1.05±0.11
第 3 步	1.38±0.08	1.29±0.08	5.37±0.15	5.75±0.26	1.42±0.15	1.4±0.12
第 4 步	1.65±0.10	1.55±0.09	5.97±0.11	6.40±0.27	1.56±0.23	1.55±0.15
第 5 步	1.94±0.12	1.82±0.10	6.42±0.12	6.86±0.34	1.82±0.19	1.8±0.21
第 6 步	2.24±0.16	2.12±0.11	6.78±0.15	7.27±0.45	1.98±0.44	2.12±0.30
第 7 步	2.56±0.18	2.42±0.11	7.21±0.25	7.77±0.48	2.24±0.23	2.26±0.34
第 8 步	2.89±0.25	2.79±0.12	7.63±0.26	8.39±0.42	2.44±0.72	2.98±0.45

3 分析与讨论

短道速滑在滑行中的技术主要包括起跑技术、直道技术、弯道技术和冲刺技术。其中直道技术和弯道技术是短道速滑滑行的基本技术^[4,9]。由于短道速滑场地较小、滑行速度快, 因此运动员需具备良好的直道和弯道滑行技术, 尤其是掌握高超的弯道技术对提高运动成绩而言较为关键^[20,23]。因此前人对直弯道的研究也较多, 但大多是定性的描述分析, 对弯道速度没有定量化的研究。本研究通过单台摄像机拍摄, 利用冰面上现有的文字和线段进行空间标定, 通过射影变换算法首次对运动员非接触、无干扰的前提下绘制出短道速滑运动员的滑行轨迹, 计算出运

动员滑行速度等运动学参数, 为短道速滑数据获取提供了新的研究方法, 使短道速滑比赛现场的定量研究成为可能。

对于短道速滑 500 m 项目来说, 大多数研究认为起跑阶段的滑行, 尤其是前 15 m 的滑行对比赛结果很重要^[15,24]。本研究选择对优秀运动员起跑的前 8 步(约滑跑至第一个弯道的标志块位置)进行研究, 这一阶段也被称为起跑技术的疾跑阶段, 目的是为了在较短时间里获得较高的滑行速度, 从而为正常滑行打下坚实基础^[15,24]。前期研究普遍认为疾跑阶段步频和步幅大小呈现负相关, 且疾跑的前 3 步对起跑阶段的意义重大^[15]。且滑行速度比滑行频率对总功率的影响更为关键^[25]。通过对优秀运动员前 8 步的步



长、步时及瞬时速度进行统计,发现男女优秀运动员的前8步表现为步时逐渐增加,步频逐渐减慢,步长逐渐增加,确实呈现出负相关趋势。其中第2步步长减小,主要是起跑至第1步末有重心前倾所致^[26]。前8步瞬时速度不断增加,是因为运动员起动后由跑动滑行至滑动滑行的过程。男子瞬时速度比女子大,主要是因为男子的爆发力比女子强^[27],且表现出前3步滑行速度的增幅比随后5步大,充分说明了在500 m滑行中出发后前几步的爆发力很关键。因此在训练中应加强相关训练,使运动员出发后能快速提速,达到稳定滑行状态,为出发抢位战术提供可能。

500 m滑行中由于距离较短,全程滑行速度很快,而弯道滑行时由于受向心力的影响,滑行技术相比直道要复杂。运动员在保持速度不断加速稳定滑行的情况下,需要通过交叉压步来不断减小弯道滑行半径,从而保持其滑行路线^[21]。因此在弯道高速滑行时,对运动员的滑行技术要求更高。在比赛过程中名次不断变化的现象就说明许多选手会利用高超的弯道技术在弯道成功超越^[17]。主要体现为弯道的内道时机超越及外道的高速超越,因此说滑行路线的规划对比赛结果也是非常重要的。在弯道保持速度滑行的情况下,应尽量保持较小的滑行路线;在滑行速度有优势时,可以尝试弯道外道超越。而在较高速度滑行,克服强大的离心力,又要保持较短的弯道滑行半径时,就需要运动员有更强的弯道滑行能力^[22]。从表3可以看到运动员在赛道的人出弯道阶段的速度变化,在前面两圈里都表现为出弯道瞬时速度大于入弯道瞬时速度,说明运动员在前2圈属于加速阶段,此阶段可以选择内外道超越,而到第3圈开始,出弯道速度小于入弯道,运动员高速过弯,离心力增加^[28],对身体稳定性的要求也增加,因此滑行路线的控制更为重要。目前男女最高速度均高于12.5 m/s,最高速度均出现在比赛的第3圈的后半圈(第5次),此阶段外道超越不经济,内道超越需克服较大的离心力,因此超越难度较高。随着滑行时间的增加,运动员的体能消耗越多,机体内乳酸堆积越多,动作易变形,蹬冰力减小,表现为在最后两圈的弯道速度保持较比赛前半程要差,尤其是女子运动员。最后4个弯道的入出弯瞬时速度忽大忽小,也表现出运动员的间歇性发力,最后一圈全力冲刺。所以在日常训练中应加强运动员下肢肌肉耐乳酸的能力^[29],提高肌糖原贮备,有效改善运动员滑行途中的蹬冰力不足。

相比较弯道滑行,直道滑跑相对容易,直道滑跑中运动员主要是通过左右腿依次向侧前方蹬冰,调

整滑行路线,不断增大滑行速度,因此直道滑行时有单支撑阶段、双支撑阶段,可以使运动员的左腿得到相应的休息,为下一次弯道的支撑蓄力。直道技术对于运动员后续完成超越或是带领滑跑节奏都是非常重要的。由于直道滑行距离相同,所以多数运动员一般在超越对手之前,都会在直道滑行时调整步伐,提高速度、抢占有利位置,从而达到外道起速超越或内道超越的目的^[6]。本研究通过重现滑行轨迹,得到运动员的直道滑行平均速度,对比发现各圈直道速度均小于弯道,且女子运动员小于男子运动员,出弯道瞬时速度小于直道平均速度。说明运动员在直道的滑行中主要是调整出弯道离心力导致的滑行路线偏移,并适当增加速度,且主要的增速发生在直道入弯阶段。因此出弯道与直道的衔接部分还有较大的增速潜力,在训练中应多加强此段技术的转化衔接,使得直道滑行贡献增加。

对运动员的滑行路程统计发现,运动员的实际滑行路程均大于500 m,男子平均约为520.70 m,女子平均约为517.72 m。这主要是由于运动员弯道滑行是在标志块外滑行,且弯道滑行时受向心力以及滑行速度的影响,滑行路程会增加^[30],而且男子滑行速度快,因此弯道滑行半径较女子运动员更大。

4 结论

本研究利用射影变换原理完成运动员比赛滑行路线的标定,为短道速滑研究提供了一种新方法。研究发现优秀短道速滑运动员在500 m滑行中弯道速度贡献大于直道,起跑爆发力对抢位战术影响较大,运动员体能情况对最后2圈影响较大。

参考文献:

- [1] 陈文红.从冬奥会成绩看我国短道速滑的发展[J].哈尔滨体育学院学报,2015,33(4):18-22.
- [2] 朱佳滨,黄忠国,董欣.冬奥会短道速滑项目比赛制胜规律的研究[J].冰雪运动,2013,35(5):5-9.
- [3] 朱佳滨,朱鸿哲.世界短道速滑竞技体育强国技战术特点的比较研究[J].哈尔滨体育学院学报,2011,29(4):1-4.
- [4] 高航.我国短道速滑运动员竞技能力特征的研究[J].哈尔滨体育学院学报,2015,33(6):37-40.
- [5] HEXT A, HELLER B, KELLEY J, et al. Measuring straight time in elite short track speed skating relays[J]. Procedia Engineering,2016,147:622-626.
- [6] 孟述,关亚军,董欣.索契冬奥会我国短道速滑运动员与主要竞争对手技战术特征的比较[J].冰雪运动,2014,



- 36(3):1-6,39.
- [7] 朱红.中国、韩国女子短道速滑选手技战术特点的对比剖析[J].冰雪运动,2006,28(3):15-16,35.
- [8] 任翔,杜长亮.我国短道速滑运动员赛中后程降速的“瓶颈”问题研究[J].湖北体育科技,2015,34(5):431-434.
- [9] 柴萍,刘珊,宋来.短道速滑项目技战术训练研究的现状与趋势[J].冰雪运动,2010,32(3):15-17,63.
- [10] MAW S, PROCTOR L, VREDENBURG J, et al. Influence of starting position on finishing position in World Cup 500 m short track speed skating[J]. Journal of Sports Sciences, 2006, 24(12):1239-1246.
- [11] FELSER S, BEHRENS M, FISCHER S, et al. Relationship between strength qualities and short track speed skating performance in young athletes[J]. Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports, 2016, 26(2):165-171.
- [12] 王帅,周继和.短道速滑奥运冠军武大靖500 m入弯道技战术的运动学分析[J].成都体育学院学报,2019,45(4):79-84.
- [13] 孙丹丹.短道速滑个人技术述评[J].赤峰学院学报(自然科学版),2012,28(6):170-171.
- [14] 何天宇.七台河市少年女子短道速滑入弯道技术的运动学比较分析[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2009.
- [15] 王超.优秀短道速滑运动员起跑阶段技术研究[D].金华:浙江师范大学,2015.
- [16] 王玫,陈民盛,李贵阳.优秀速滑运动员入弯道与出弯道蹬冰技术特征的比较研究[J].天津体育学院学报,2007,22(5):382-384.
- [17] 郑承莲.短道速滑运动员外道超越优势及训练方法[J].当代体育科技,2013,3(31):30-31.
- [18] LEE C H, BACK J H. The Kinematical Analysis of female 500 m Sprint Start in 2005 World Short Track speed Skating Championship[J]. Synfacts,2005,15(4):169-179.
- [19] 李琪,杨文浩,侯亚丽,等.短道速滑运动中的轨迹建模[J].图学学报,2019,40(1):8-14.
- [20] 邓雪峰,南相华,高升,等.短道弯道技术训练对速度滑冰弯道技术提高的影响[J].冰雪运动,2013,35(1):1-3.
- [21] BACK J H, CHUNG N J, HAN K H, et al. Analysis of the 500m Short track speed skating starting motion according to the center of gravity position ratio[J]. Korean Journal of Sport Biomechanics, 2003,13(3):199-215.
- [22] KIM T H, JUN M K, YOO S H, et al. Kinematic analysis of cornering with different radius of curve course in short track speed skating[J].Korean Journal of Sport Biomechanics, 2013, 23(2):109-116.
- [23] 周继和.基于三维虚拟现实技术对速滑运动员李红爽500米起跑动作的运动学分析[C]//中国体育科学学会.2015第十届全国体育科学大会论文摘要汇编(一)北京:中国体育科学学会,2015:2.
- [24] BULLOCK N, MARTIN T D, ZHANG A. Performance analysis of world class short track speed skating: What does it take to win? [J]. International Journal of Performance Analysis in Sport, 2008, 8(1):9-18.
- [25] HAUG W B, DRINKWATER E J, MITCHELL L J, et al. The relationship between start performance and race outcome in elite 500m short track speed skating[J]. International Journal of Sports Physiology & Performance, 2015, 10(7):902.
- [26] BACK J H, KWAK C S, CHUNG N J. Analysis of the female 500m sprint starting motion in short track speed skating[J].Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2004, 14(3):285-299.
- [27] WANG X. The lower muscles force features of elite short track athletes and regression analysis of their 500m results [J]. Applied Mechanics & Materials,2011,66-68:1574-1578.
- [28] KONINGS M J, ELFERINK-GEMSER M T, STOTER I K, et al. Performance characteristics of long-track speed skaters: A literature review[J]. Sports Medicine, 2015, 45(4):505-516.
- [29] 侯亚丽,王向东.短道速滑世界杯1500米滑行节奏分析[J].体育科研,2021,42(6):93-100.
- [30] 纪仲秋,姜桂萍,袁庆成.第2届亚洲杯短道速滑比赛直道技术动作的运动生物力学分析[J].体育科学,1993(5):45-47,94-95.

(责任编辑:刘畅)