

文章编号: 1004-7220(2021)04-0502-08

生物力学视角下高山滑雪运动员竞技表现的影响因素

武金萍, 赵亮, 孙冬, 顾耀东

(宁波大学体育学院, 浙江宁波 315211)

摘要:在当前科技助力北京冬奥备战的背景下,系统梳理分析近年来与高山滑雪运动员竞技表现相关的生物力学研究热点和最新成果,确定影响高山滑雪运动员竞技表现的生物力学因素,包括空气阻力、雪板摩擦力、地面反作用力、能量损失、回转半径、雪板和/或重心轨迹。另外,单个回转技术、多个回转衔接技术和个人能力之间的生物力学差异对高山滑雪竞技表现具有重要影响。在回转和大回转项目中,可利用更早的转向启动、更长的滑行轨迹、应用地面反作用力更早更平稳介入以及卡宾技术来降低雪板摩擦力,进而减少能量损耗,提升运动表现。速度滑行阶段应将手臂靠近身体成椭圆形姿势来最大限度减少迎风区域面积,以减少空气阻力造成的能量损失,也可以提升运动表现。顶级水平的高山滑雪运动员会在比赛中针对不同赛道、地形和雪况始终保持良好表现。生物力学视角下优异的高山滑雪竞技表现包括势能的高效利用、最大限度地减少雪板摩擦和空气阻力、选择最佳路线并持续保持高速滑行。在训练和比赛中,应重视个人战术和技术。为了获得更好的成绩,在多个路段和不同地形上的相同表现比在个别路段和特定条件下的卓越表现更重要。

关键词:高山滑雪;生物力学;竞技表现

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.04.002

Influence Factors for Competitive Performance of Alpine Skiers in the View of Biomechanics

WU Jinping, ZHAO Liang, SUN Dong, GU Yaodong

(Faculty of Sports Science, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: Under the background of technological assistance to prepare for the Beijing Winter Olympics in China, the biomechanical research highlights and the latest achievements related to competitive performance of alpine skiers in recent years were systematically analyzed in this paper, so as to determine biomechanical factors affecting competitive performance of alpine skiers, including aerodynamic drag, frictional forces, ground reaction force (GRF), energy dissipation, turn radius, trajectory of the skis and/or center of mass (COM). In addition, biomechanical differences in turn techniques, multiple turns connections and abilities of individuals were also considered as important factors affecting the alpine skiing performance. In the case of slalom and giant slalom events, the earlier initiation of turns, longer path length and trajectory, earlier and smoother application of GRF, and carbene technique carving to reduce the ski-snow friction and thereby dissipate energy should be used to improve sports performance. During speed skiing, minimizing the exposed frontal area and positioning the arms close to the body can reduce the energy loss caused by aerodynamic drag, thereby improving sports performance. Top-level alpine skiers will always perform well on different courses, terrains and snow conditions

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-05-04

基金项目: 国家重点研发计划“科技冬奥”专项课题(2018YFF0300905)

通信作者: 顾耀东, 教授, 博士生导师, E-mail: guyaodong@hotmail.com

during the race. Excellent alpine ski performance from a biomechanical perspective includes the efficient use of potential energy, minimizing ski-snow friction and aerodynamic drag, choosing optimal trajectory and maintaining high-speed skiing. Individual tactics and techniques should be valued in training and competition. For better results, the same performance on multiple sections and on different terrains is more important than excellence in individual sections and specific conditions.

Key words: alpine skiing; biomechanics; competitive performance

高山滑雪是利用山的高度差值,以雪板、雪鞋、固定器和滑雪杖为主要装备,沿旗门设定的路线高速滑行到终点的雪上运动项目。根据旗门位置、转弯半径、速度和赛道长度,可将高山滑雪分为速度小项和技术小项。其中,速度小项包括滑降(也称速降)和超级大回转,平均速度为70~100 km/h(部分赛道可达130 km/h),转弯半径较大,有跳跃动作,比赛时间为90~150 s。技术小项包括大回转和回转,弯道多,转弯半径小,平均速度为20~60 km/h,大回转的比赛时间为60~90 s,回转的时间则在45~60 s^[1]。

多年来,针对高山滑雪竞技表现的研究主要涉及生理生化^[2-3]、运动训练^[4]、雪板摩擦^[5]、运动损伤^[6-9]等领域。相关生物力学领域的研究虽然不断出现,但对其系统的综述却不多见。Müller等^[10]对现代高山滑雪回转技术(主要包括传统平行回转技术和现代卡宾回转技术)的生物力学特点进行比较分析,但该研究并未完整涵盖高山滑雪运动员竞技表现提升的众多生物力学特征。近年来,随着信息技术的发展,高山滑雪生物力学领域的研究方法也呈现多样化,包括使用风洞量化运动员姿态的影响和/或空气阻力对滑行速度的影响^[11];对世界杯比赛视频的复杂分析^[12]或基于现场的全球定位系统(global positioning system, GPS)和惯性传感器(inertial measurement unit, IMU)来获得国际精英高山滑雪运动员的技战术能力特征等^[13]。另外,各种不同的数学模型也被开发、验证并应用于高山滑雪运动员,以获得运动过程不同时间点的更具个性化的运动表现参数^[11,14-16]。

尽管高山滑雪的生物力学研究取得较大进展,但基于运动员竞技表现提升的相关影响因素似乎并未系统化和清晰化。本文通过对这一领域的系统分析,探讨影响精英运动员这一群体专项竞技表现的生物力学因素,以期为我国高山滑雪项目教练

和运动员的训练和竞赛提供更为实际的建议,科技助力北京2022冬奥会和冬残奥会的备战。

1 文献检索方法与筛选标准

外文数据库选取PubMed、Web of Science、EBSCO和SPORTDiscus™等进行检索。采用以下检索策略:(biomechanics AND “Alpine skiing”) AND (biomechanics AND “slalom OR super-G OR downhill”)。中文数据库选取中国知网(CNKI)和维普期刊进行检索。采用以下检索策略:“生物力学”或含“高山滑雪”“回转”“滑降”“速降”。检索时间截止为2020年12月31日。检索词设定在题目、摘要和关键词范围内。

文献资料依据以下标准进行筛选:①只有关于竞技高山滑雪比赛的运动生物力学文章被纳入,不包括器材设备和/或场地布局和/或环境条件的文章。②研究中的受试者必须包括精英高山滑雪运动员(如世界杯、欧洲杯或同等级别的国家队参赛顶级运动员),必须涉及至少1项与运动员表现或排名相关的生物力学测试。③只选择发表在同行评议(可获得摘要)期刊和英语/汉语语言的原始研究。④关于越野滑雪、轮滑、冬季两项、单板滑雪、跳台滑雪、自由式滑雪等其他滑雪的论文都被剔除,关于滑雪损伤的论文也被剔除。依据文献检索和包含排除标准,获得文献16篇。

2 讨论

生物力学是决定高山滑雪竞技表现的重要因素。早期的研究主要集中在运动过程中的肌肉收缩发力以及与之相应的动作顺序。20世纪50年代开始了针对高山滑雪技术的研究。进入1970年代,高山滑雪运动技术的生物力学研究在国际上逐渐受到重视^[9]。Fukuoka等^[17]利用遥测系统和动力装置测定高山滑雪运动员膝关节角度和张力的研

究比较具有代表性,之后针对高山滑雪运动的三维摄像以及参数校正方面的研究不断涌现^[18-19]。接着,高山滑雪的生物力学研究日渐丰富。滑行时足底压力测量以及长期高山滑雪运动对肌肉收缩动员和功能的影响等相关研究接连出现^[20-21]。例如:为了在高山滑雪高速运动中保持动作姿势和适当压力所需要的强大力量,研究者将在高山滑雪场地和训练模拟器上技术动作下肌肉工作模式进行对比分析,为提升运动员表现提供建议^[22-24]。

高山滑雪竞技表现的影响因素非常复杂,确定具有重要影响的生物力学因素面临巨大挑战,因为这一领域研究所用的方法不同。就竞技表现指标来看,考虑到高山滑雪属于竞速类项目,多数研究均以时间作为评判标准,判断回转、分段和路线的优劣^[25-28]。但也有个别研究以空气阻力系数来替代时间指标^[10]。因为分段时间的获得常常面临许多限制^[11]:①受运动员滑行的初始速度、位置和方向的影响;②靠近分段末端的观察会产生误差。虽然这对分段时间的影响很小,但由于出口速度的降低可能会影响下一分段的表现;③分段末端运动员所处位置和滑行方向与下一个旗门有关系,会对分段时间产生边际影响,但同样会影响下一分段的表现;④高出口速度对测试时间的影响很小,尽管它可能对后续分段的表现有贡献。还有研究指出,运动员滑行速度和/或能量损耗在量化高山滑雪竞技表现上也存在局限性,因为实际表现同样依赖于运动员滑行路线的选择^[13]。基于以上原因,不同竞技表现下的瞬时表现比较则是成为常见的研究方案^[29-30]。这些瞬时表现可能来自1个或多个比赛路线或不同的赛段(1个或多个旗门)。

目前已知影响高山滑雪竞技表现的因素主要包括:空气阻力^[10,31]、雪板摩擦力和地面反作用力(ground reaction force, GRF)^[11,18]、回转特征(特别是速度、半径和轨迹)^[12-13,18-19,21]、机械能特征(包括特定机械能、能量损耗、微分机械能和相对能量损耗)^[11-12,16,32]和个体特征^[15]等。任何孤立因素均不能解释高山滑雪运动员的速度差异。虽然瞬时表现的众多参数可以测量和比较,但它们与其他因素的交互作用才能决定总的滑行时间,即最终比赛成绩。从生物力学观点来看,运动学参数反映了运动表现的结果(不考虑原因的运动差异),而动力学参

数则更多地反映了这些表现差异的解释(力的积分及其对运动的影响)。更好地理解 and 提升高山滑雪的竞技表现需两者共同作用。因此,精英运动员需在不同条件下利用这些要素之间复杂的相互作用来尽量缩短滑行时间,才能取得优异成绩。概括地说,有效的势能利用反映了高山滑雪运动员减少雪板摩擦和空气阻力的能力(在滑降项目或直线滑行阶段后者有着特别重要的影响)、保持高速滑行的能力以及选择最佳滑行路线的技术能力^[22]。

2.1 空气阻力、雪板摩擦力和 GRF

空气阻力对高山滑雪的竞技表现有着显著影响。这取决于高山滑雪的不同小项,也取决于研究所使用的生物力学方法。运动员采用适当姿势使得迎风面积最小化,是减少空气阻力、增加滑行的平均速度、减少总体滑行时间的一个关键因素。风洞测试数据显示,完成300 m计算机模拟下的直线滑行时,空气阻力变化约是导致时间差异影响因素的50%^[33]。运动员手臂贴近躯干形成椭圆形姿势滑行时空气阻力最小。然而,大回转项目研究显示,空气阻力仅占每次回转总能量损失的15%(范围5%~28%),空气阻力似乎并不是决定大回转竞技表现的主要因素^[16]。而且,在更具技术性的回转阶段,这种姿势并不可行。因此,高山滑雪运动员高效利用空气动力学的姿势更依赖于既能最大限度减少迎风区域面积,又不损害个体平衡或选择最佳路线^[10]。在某些时间点,如平坦路段或腾空过程,空气动力学因素是运动员为数不多的可控因素之一,即通过空气阻力的减少进而提升表现。因此,在竞争日趋激烈的国际大赛中,空气动力学或许是决定名次的重要因素,尤其是速度为主的小项。

本文没有涉及运动员姿势和动作对雪板摩擦力和直线滑行时间影响的直接研究,特别是滑降和超级大回转项目。精英运动员的比赛过程同样包括低速滑行赛段,其中雪板的摩擦可以对整体的竞技表现产生潜在影响。对非精英运动员的研究表明,滑雪者的姿势和在雪板纵轴的位置不会显著影响雪板摩擦力和完成时间^[34-35]。确切地说,有过训练的滑雪者在椭圆姿势和直立站姿中的雪板摩擦系数是相似的。一方面,专业滑雪测试者在中立位、前倾和后倾等不同姿势也呈现出相似的完成时

间。另一方面,他们使用雪板平面滑行比内侧倾斜滑行速度更快,这也表明倾斜滑行增加了雪板摩擦力^[24]。因此,为了提高直线部分的表现,运动员应限制倾斜动作来尽量减少摩擦力,同时采用椭圆姿势以尽量减少空气阻力,而不必在意身体前后倾的位置。但这一结论的真实性还需在精英运动员群体中进一步验证。

GRF 对滑雪运动员运动表现的影响尚不清楚。针对竞技高山滑雪的研究指出,在大回转转向过程中,运动员可以利用 GRF 增加转向速度,通过进入阶段的有效倾斜(从而增加水平平面重心和雪板轨迹之间的距离)或通过转向顶点附近产生更大 GRF 来减少过渡阶段的力^[18]。另外,研究发现,回转比赛中,不同竞技表现运动员的 GRF 分布并无显著差异,但最高与最低 GRF 的微分特定机械能(即最高能量损耗)相一致,这对所有滑雪运动员的瞬间表现不利,特别是在转弯半径较小时($<15\text{ m}$)^[11]。总体来说,利用 GRF 的适当时机比其大小更重要,也可能会有助于竞技表现的提升。这或许需要更多的精英运动员研究案例来明确这些相关性。

2.2 回转技术和机械能特征

一般来说,回转和大回转项目的转向启动提前和/或早于旗门之前,则回转过程更为平稳和快速。尽管这会增加滑行的距离,但这种回转表现出更为合理的 GRF 分布以及能量损耗的回转净负功更低或相同^[12,18,22]。基于两个连续回转的研究发现了一种“交替”关系,即当滑行路线和下降路线之间的平均距离增加时,平均滑行速度下降^[19]。不过,高山滑雪比赛中的瞬时表现(定义为每次落差变化所损失的时间)与滑行速度的变化比滑行距离的变化更为相关,这表明更快的速度比更短的轨迹更为有利^[13]。

高山滑雪运动员旗门转向之前的阶段比转向之后的阶段损耗能量更多。然而,当对比同一名运动员快慢不同的两次滑行时,旗门转向前后阶段的平均能量损耗不同,即最快滑行时小于最慢滑行时,但总平均能量损耗相同的^[12]。势能的高效利用(如最小化雪板摩擦力以及转向时最佳化雪板引导)可看作完美回转表现的基础。运动员利用卡宾技术回转而不是平滑或转体技术,或许更容易达到

最佳表现^[22]。为减少回转时雪板摩擦和能量损耗,可尽量减少较高的瞬时 GRF,从而缩短大回转路线中段部分所需时间^[11]。高质量的回转过程中,GRF 的水平分量(如指向滑雪方向的分量)介入地更早,并保持一个相对较长的转向比例,这都有助于增加滑行速度^[18]。

许多研究都指出了连续回转中竞技表现的影响因素。例如:进入和离开任何既定回转的条件分别与从上一回转的离开和下一回转的进入条件密切相关^[11]。同时,也有研究强调利用个人优势和减少劣势影响的重要性,因为精英滑雪运动员的运动成绩还会因弯道、路线、地形和环境条件的变化而不同^[15,17]。

绝大多数的实验室研究数据均基于风洞中的运动表现,现场研究则采取不同方法,其中最常见的是视频分析^[11,15]。随着针对动作技术的三维力学分析越来越多地在竞技体育中得到应用,早先为了获取运动过程中的三维动态数据,以摄像机为基础的直接线性变换(direct linear transformation, DLT)技术已经应用于高山滑雪比赛中。即使用多台摄像机拍摄视频影像,利用 DLT 参数计算运动员的位置。随着摄像机的不断发展,不同倾斜角度变焦镜头技术的使用可获得更高精确度的三维数据。近年来,还出现了使用 GPS 进行轨迹和速度跟踪的研究^[17],有些研究同时使用光电计时系统和动作捕捉系统^[18]。例如:引入差分卫星导航系统(differential global navigation system, DGNSS)评估运动员的运动状态^[36];随着 IMU 在高山滑雪上的应用,实现了运动员整体姿态相关重要参数的测试^[37]。与此同时,通过 IMU 与 GPS 的整合开发验证运动员精确位置和运动学数据,更突显了实用性价值^[38-39]。Brodie 等^[28]的研究可看作一个范例,其所使用的系统整合全球定位、惯性捕捉和足底压力传感器。研究人员利用这一系统追踪了 1 名精英运动员在完整大回转路线中整个人体和单一肢体的运动轨迹和动作姿势^[18]。与其他研究结果相似,发现那些最快的回转在到达旗门前存在 1 个“顶点”,以便产生来自旗门处的更大加速度,以及过旗门后更为直向的滑行,同时可以补偿增加的滑行距离^[12,22]。用于加速的 GRF 水平分量(指向滑雪方向)也会提前增加,通常更平稳并可维持相对更长的时间。

基于 IMU 的全身动作捕获在高山滑雪的研究中具有重要意义,可为现场研究提供准确的运动学数据^[20]。与传统视频分析相比,整合 IMU、GPS 和运动捕捉系统的测试方案可在多个回转、甚至完整比赛过程中更大范围内记录运动员的竞技表现。虽然上述 Brodie 等^[28]的研究仅在 1 名运动员中使用了这一方案,但目前已有许多研究支持 IMU^[20]、GPS^[17,36] 及其组合^[40] 在分析高山滑雪生物力学中的准确性和有效性。

高山滑雪的回转半径对运动员竞技表现同样有着重要意义。一方面,在半径较短的回转过程中,特定机械能的差异与转弯半径直接相关^[11]。这表明尽管滑行距离较长,但较长的转弯半径或许有助于高山滑雪运动员的竞技表现,这与 Sporri 等^[12] 的研究结果一致。另一方面,连续两个转弯过程中滑行的平均速度与滑行路线到落地路线的平均距离呈负相关^[19]。这些证据似乎表明了瞬时速度和轨迹长度之间的“协定”,而这最终决定完成 1 个回转所需的时间。较窄的转向可以使滑行路线更直,较宽的转向可以使滑行速度更快。至于这个“协定”,有研究发现瞬时速度比路线选择或转弯半径(即滑行距离)更具影响力^[13]。这些发现与其他基于机械能原理量化运动表现的研究结果一致,根据机械能原理,动能的变化由速度的平方决定^[11,22]。就此而言,运动员保持高速滑行的能力可视为高山滑雪竞技表现的一个决定性因素,它不仅依赖于路线轨迹的选择,也依赖于滑雪技术和完成回转的方法^[41]。事实上,多项研究指出,转向启动离旗门越远,则完成转向时越接近旗门。这样虽然滑行路线变长,但速度更快^[12,18,22]。由于这种回转通常可以从旗门处获得更大的加速度,并且在旗门之后滑行路线更直,故进入接下来的转向速度应该更快,从而提高整体的表现。

然而,也有研究对此提出质疑,因为进入速度与转弯时的速度变化呈负相关^[11-12]。这种负相关表明,当运动员以过高的速度进入转向时,其表现就会变差^[16]。当运动员达到最大速度时,避免失误和摔倒就成了最大挑战。事实上,精英高山滑雪运动员不能仅通过减少空气阻力和摩擦力来最小化能量损失,因为这同样能导致对滑雪速度和轨迹的失控,特别是在以技术为主的项目中。世界杯赛事

中这类现象较为常见,即最快的选手并不总是在所有分段上均有最好成绩^[15]。相反,这些运动员的表现更稳定(即持续保持较短的分段时间),并能够在最小化能量损耗的同时最大化速度。因此,避免转弯半径过小、打滑和 GRF 增加的转向,特别是在回转结束时,被认为是减少能量损耗和摩擦阻力以及抵消运动员下坡运动的力的有效手段^[11-12,22]。一方面,当运动员使用卡宾转向技术时,能量消耗较低,而表现则得到提高,因为它可以保持高速滑行,减少雪板摩擦和 GRF 的负面影响^[42]。另一方面,当滑雪板引导不准确,并使用传统平行转向或转体技术时,能量消耗更高,表现也更差。

2.3 赛道设置

在分析各种生物力学因素对高山滑雪运动表现的影响时,赛道设置似乎也是一个重要的考虑因素。例如:在高山滑雪世锦赛大回转比赛的研究中发现,当旗门偏移减少 2 m 时,进入速度和回转时间的负相关增强。虽然在旗门偏移减少时,完成最快和最慢回转所需时间差异较小,但这些回转的特征将变得更加明显^[12]。这种旗门的改变对以下情况均产生相当大的影响,包括:① 回转结束时的减速;② 回转启动和完成期间的向心力;③ 过旗门后的内倾程度;④ 重心与过旗门后脚踝的相对位置;⑤ 回转周期的结构^[43]。因此,影响一场比赛获胜的生物力学因素可能与不同路线设置的突出因素大相径庭,这在回转^[44] 和大回转^[12,28] 的研究中都得到证实。

2.4 个体特征

虽然本文讨论的是与精英运动员运动表现有普遍相关性的生物力学因素,但考虑到这些运动员技战术能力也具有差异性,故针对不同个体特征的个性化关注同样重要^[15,19]。事实上,世界杯高山滑雪运动员所表现出的任何生物力学影响因素与竞技表现之间的关系,并不是由组成这一群体的所有成员表现出来^[19]。成功的关键似乎与运动员保持一贯的高水平表现更为密切,包括在各种赛道上选择最佳回转技术和滑行路线,以及熟悉地形和雪面情况的能力,这比在既定环境下获得最快的时间或最高速度的能力更为重要。因此,精英运动员的训练不仅要重视优势分段最大化时间争取,同时应注重最大限度地减少弱势分段的时间损失。此外,不

同运动员分段用时的差异倾向于在赛道特定区域增加的趋势。例如:在回转项目中,参赛者之间的时间差异在比赛开始阶段、过渡阶段、急速回转前后以及进入或巡航平坦分段是最大的^[17]。提高这些分段的表现,或许对比赛成绩有着重要贡献。

综上所述,有充分的证据表明,对高山滑雪运动员进行有关降低雪板摩擦力和机械能消耗的指导至关重要。就回转和大回转项目来说:① 回转应尽早启动转向(尽管滑行距离会增加);② 在回转进入阶段,通过内倾以便更有效地转向,更好地利用GRF(即增加重心轨迹和雪板轨迹水平面之间的距离);③ 回转使用卡宾技术而不是传统平行转弯或转身技术;④ 运动员应练习使用并维持减少迎风区域的椭圆姿势。需要指出的是,针对滑降或超级大回转的相关生物力学研究依然较少,故无法针对这两个项目提供建议。

3 研究限制

精英运动员运动表现研究普遍受研究对象数量的限制,但其个人的技战术特征分析依然有着重要意义,将有助于确定影响高山滑雪竞技表现的生物力学因素。另外,精英运动员研究中女性受试者人数占比较低也应引起注意。目前的结论很难覆盖女性运动员,毕竟她们在生理^[45]、形态^[46]以及损伤^[5]方面与男性运动员不同。今后有必要针对女子高山滑雪运动员展开进一步的生物力学研究,并比较男女运动员的差别。

本文仅涉及2~4个旗门,如将研究结果应用于整个比赛同样应谨慎对待。毕竟回转项目完整路由56个旗门组成,2个旗门仅占整个赛道的3.6%。因此,明确有限回转次数中的表现是否能准确反映运动员完成穿越系列旗门的表现具有重要意义。更重要的是,运动员能否在整个比赛过程中始终保持较高的瞬时表现。在生物力学领域研究中,与专用传感器相比,基于视频的分析系统可为滑雪运动员位置变化提供更高的精度,但可分析回转的最大数目受到限制,并且在考虑衍生参数(如加速度和角度)时其准确性会降低。相反,GPS和IMU的使用可以扩大捕获面积,增加可分析回转次数,但同时限制了局部坐标系统的精准性。因此,可能需要同时使用若干系统来进一步推动这一领域的研究。

最后,对于速度性为主的高山滑雪项目(如滑降和超级大回转)来说,来自风洞实验的研究结果对其项目特征尚不完全掌握,运动员滑行姿势和技术动作对雪板摩擦的影响也不清楚,这都需要后续的研究证实。

4 结论

最大限度地减少能量消耗,同时保持高速和最佳轨迹,可以提升高山滑雪运动员的竞技表现。具体来说,包括减少迎风区域面积,增加转弯半径长度,更早启动回转转向,避免较高的GRF(特别是在转弯的后半部分),以及采用卡宾回转技术而不是传统平行转向或转体技术。

在比较快速转向和慢速转向时,GRF的应用和时机在快速和慢速的回转中是不同的,大小则不受影响。虽然个人技战术很重要,但优异的竞技表现始终基于整体的优势,而不是每一个分段的好坏。进一步说,某些生物力学因素在速度性项目(滑降和超级大回转)中明显比在技术性项目(回转和大回转)中更为重要。

综上所述,对高山滑雪运动员潜能的开发反映了他们最小化雪板摩擦力和空气阻力的能力,这在速度性项目和技术性项目的平坦分段尤为重要。然而,在回转和大回转项目中,这种能量消耗最小化不足以影响总的滑行时间。保持最高速度和选择最佳路线或许能够实现滑行时间的最小化,进而对比赛结果产生重大影响。

参考文献:

- [1] 徐金成,高璨,高学东,等. 国外优秀高山滑雪运动员的特征[J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(1): 67-73.
- [2] TURNBULL JR, KILDING AE, KEOGH J. Physiology of alpine skiing [J]. Scand J Med Sci Sports, 2009, 19(2): 146-155.
- [3] FERGUSON RA. Limitations to performance during alpine skiing [J]. Exp Physiol, 2010, 95(3): 404-410.
- [4] HYDREN JR, VOLEK JS, MARESH CM, et al. Review of strength and conditioning for alpine ski racing [J]. Strength Cond J, 2013, 35(1): 10-28.
- [5] COLBECK SC. A review of the friction of snow skis [J]. J Sports Sci, 1994, 12(3): 285-295.
- [6] FLØRENES TW, NORDSLETTEN L, HEIR S, et al. Injuries among World Cup ski and snowboard athletes [J].

- Scand J Med Sci Sports, 2012, 22(1): 58-66.
- [7] HAGEL B. Skiing and snowboarding injuries [J]. Med Sport Sci, 2005, 48: 74-119.
- [8] NATRI A, BEYNNON BD, ETTLINGER CF, *et al.* Alpine ski bindings and injuries: Current findings [J]. Sports Med, 1999, 28(1): 35-48.
- [9] HE 'BERT-LOSIER K, HOLMBERG HC. What are the exercisebased injury prevention recommendations for recreational alpine skiing and snowboarding? A systematic review [J]. Sports Med, 2013, 43(5): 355-366.
- [10] MÜLLER E, SCHWAMEDER H. Biomechanical aspects of new techniques in alpine skiing and ski-jumping [J]. J Sports Sci, 2003, 21(9): 679-692.
- [11] BARELLE C, RUBY A, TAVERNIER M. Experimental model of the aerodynamic drag coefficient in alpine skiing [J]. J Appl Biomech, 2004, 20(2): 167-176.
- [12] SUPEJ M, KIPP R, HOLMBERG HC. Mechanical parameters as predictors of performance in alpine World Cup slalom racing [J]. Scand J Med Sci Sports, 2010, 21(6): e72-81.
- [13] SPÖRRI J, KRÖLL J, SCHWAMEDER H, *et al.* Turn characteristics of a top world class athlete in giant slalom: A case study assessing current performance prediction concepts [J]. Int J Sports Sci Coach, 2012, 7(4): 647-660.
- [14] 陈礼, 齐朝晖. 高山滑雪板力学特征分析[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6): 781-784
- [15] FEDEROLF P. Quantifying instantaneous performance in alpine ski racing [J]. J Sports Sci, 2012, 30(10): 1063-1068.
- [16] FEDEROLF P, REID R, GILGIEN M, *et al.* The application of principal component analysis to quantify technique in sports [J]. Scan J Sci Med Sports, 2014, 24(3): 491-499
- [17] FUKUOKA T. Changes in the knee angle and in the load of the ski during swing motions in alpine skiing [J]. Biomechanics, 1971, 6(1): 246-248.
- [18] CHEN L, ARMSTRONG CW, RAFTOPOULOS DD. An investigation on the accuracy of three-dimensional space reconstruction using the direct linear transformation technique [J]. J Biomech, 1994, 27(4): 493-500.
- [19] NACHBAUER W, KAPS P, NIGG B, *et al.* A video technique for obtaining 3-D coordinates in alpine skiing [J]. J Appl Biomech, 1996, 12(1): 104-115.
- [20] SCHAFF P, HAUSER W, SCHATTNER R, *et al.* Pressure measurements inside shoes and application in alpine skiing [M]//Biomechanics: Basic and applied research. Dordrecht: Springer, 1987.
- [21] KRÖLL J, MÜLLER E, SEIFERT JG, *et al.* Changes in quadriceps muscle activity during sustained recreational alpine skiing [J]. J Sports Sci Med, 2011, 10(1): 81-99.
- [22] NIESSEN W, MÜLLER E, SCHWAMEDER H, *et al.* Force and moment measurements during alpine skiing depending on height position [C]//Proceedings of 16th International Symposium on Biomechanics in Sports. Konstanz: [s.n.], 1998.
- [23] KRÖLL J, SEIFERT J, SCHEIBER P, *et al.* Muscle fatigue in alpine skiing: Determination through phase shifting in EMG [C]//Proceedings of the European College of Sports Science. Belgrade: [s.n.], 2005.
- [24] PANIZZOLO FA, PETRONE N, MARCOLIN G. Comparative analysis of muscle activation patterns between skiing on slopes and on training devices [J]. Procedia Engineering, 2010, 2(2): 2537-2542.
- [25] SUPEJ M, CERNIGOJ M. Relations between different technical and tactical approaches and overall time at men's world cup giant slalom races [J]. Kinesiol Slov, 2006, 12(2): 59-68.
- [26] SUPEJ M, SÆTRAN L, OGGIANO L, *et al.* Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level [J]. Scand J Med Sci Sports, 2013, 23(1): e38-47.
- [27] SUPEJ M, HOLMBERG HC. A new time measurement method using a high-end global navigation satellite system to analyze alpine skiing [J]. Res Q Exerc Sport, 2011, 82(3): 400-411.
- [28] BRODIE M, WALMSLEY A, PAGE W. Fusion motion capture: A prototype system using inertial measurement units and GPS for the biomechanical analysis of ski racing [J]. Sports Technol, 2008, 1(1): 17-28.
- [29] LE ŠNIK B, ŽVAN M. The best slalom competitors: Kinematic analysis of tracks and velocities [J]. Kinesiology, 2007, 39(1): 40-48.
- [30] KRÜGER A, EDELMANN-NUSSER J. Application of a full body inertial measurement system in alpine skiing: A comparison with an optical video based system [J]. J Appl Biomech, 2010, 26(4): 516-521.
- [31] WATANABE K, OHTSUKI T. Postural changes and aerodynamic forces in alpine skiing [J]. Ergonomics, 1977, 20(2): 121-131.
- [32] SUPEJ M. Differential specific mechanical energy as a quality parameter in racing alpine skiing [J]. J Appl Biomech, 2008, 24(2): 121-129.
- [33] LUETHI SM, DENOTH J. The influence of aerodynamic and anthropometric factors on speed in skiing [J]. Int J Sport Biomech, 1987, 3(4): 345-352.
- [34] WATANABE K, OHTSUKI T. The effect of posture on the running speed of skiing [J]. Ergonomics, 1978, 21(12): 987-998.

- [35] FEDEROLF P, SCHEIBER P, RAUSCHER E, *et al.* Impact of skier actions on the gliding times in alpine skiing [J]. *Scand J Med Sci Sports*, 2008, 18(6): 790-797.
- [36] GILGIEN M, SPÖRRI J, CHARDONNENS J, *et al.* Determination of external forces in alpine skiing using a differential global navigation satellite system [J]. *Sensors*, 2013, 13(8): 9821-9835.
- [37] FASEL B, SPÖRRI J, KRÖLL J, *et al.* Using inertial sensors for reconstructing 3D full-body movement in sport-possibilities and limitation on the example of alpine ski racing [C]// *Proceedings of International Symposium on Biomechanics in Sports*. Poitiers:[s.n.], 2015.
- [38] SUPEJ M, HOLMBERG HC. A new time measurement method using a high-end global navigation satellite system to analyze alpine skiing [J]. *Res Q Exerc Sport*, 2011, 82(3): 400-411.
- [39] SEIFRIZ F, MESTER J, KRÄMER A, *et al.* The use of GPS for continuous measurement of kinematic data and for the validation of a model in alpine skiing [J]. *Inter J Comput Sci Sport*, 2009, 1(1): 62-63.
- [40] SUPEJ M. 3D measurements of alpine skiing with an inertial sensor motion capture suit and GNSS RTK system [J]. *J Sports Sci*, 2010, 28(7): 759-769.
- [41] 任立刚, 巨雷, 李美. 竞技高山滑雪运动交换区及回转动作技术原理[J]. *冰雪运动*, 2009, 31(4): 40-43.
- [42] 马喜强, 张华. 卡宾滑雪板的应用给高山滑雪带来的新变革[J]. *哈尔滨体育学院学报*, 2007, 25(6): 16-17.
- [43] SPÖRRI J, KRÖLL J, SCHWAMEDER H, *et al.* Course setting and selected biomechanical variables related to injury risk in alpine ski racing. An explorative case study [J]. *Br J Sports Med*, 2012, 46(15): 1072-1077.
- [44] SUPEJ M, HOLMBERG HC. How gate setup and turn radii influence energy dissipation in slalom ski racing [J]. *J Appl Biomech*, 2010, 26(4): 454-464.
- [45] WHITE AT, JOHNSON SC. Physiological comparison of international, national and regional alpine skiers [J]. *Int J Sports Med*, 1991, 12(4): 374-378.
- [46] HAYMES EM, DICKINSON AL. Characteristics of elite male and female ski racers [J]. *Med Sci Sports Exerc*, 1980, 12(3): 153-158.