



## 影响我国优秀男子跳台滑雪运动员飞行距离的起跳因素分析

### Analysis of Take-off Factors Affecting the Flying Distance of Chinese Elite Male Ski Jumpers

谭旭男<sup>1,2</sup>, 周越<sup>1\*</sup>, 曲峰<sup>1</sup>, 霍波<sup>3</sup>, 付悦<sup>4</sup>, 蒋量<sup>3</sup>

TAN Xunan<sup>1,2</sup>, ZHOU Yue<sup>1\*</sup>, QU Feng<sup>1</sup>, HUO Bo<sup>3</sup>, FU Yue<sup>4</sup>, JIANG Liang<sup>3</sup>

**摘要:**目的:通过分析我国优秀男子跳台滑雪运动员实地起跳阶段运动学、起跳运动模式等指标,探究影响我国男子跳台滑雪运动员飞行距离的主要起跳因素。方法:1)选择8名我国男子跳台滑雪运动员作为研究对象,在日本长野县白马村K90跳台训练基地采集3次起跳阶段二维运动学数据,采用广义估计模型(GEE)分析影响飞行距离的实地起跳阶段运动学因素。2)截取平昌冬奥会排名前10的男子跳台滑雪选手决赛起跳阶段视频数据,采用单因素方差分析研究国内外运动员起跳阶段特定时刻肢体角度差异。3)实验室内使用1台Z camera高速摄像机和1块Kistler 9281EA测力台采集运动员静蹲跳(squat jump, SJ)、反向跳(countermovement jump, CMJ)、模拟跳跃(imitation jump, IJ)、下落跳(drop jump, DJ)的动力学及运动学数据,采用Pearson相关分析检验实验室内运动学及动力学指标与飞行距离间的相关性。结果:1)在实地起跳阶段运动学方面,起跳起始时刻躯干与助滑道夹角、小腿与助滑道夹角、髌关节角、膝关节角,以及起跳阶段的髌关节峰值角速度、膝关节平均角速度、起跳结束时刻膝关节角及髌关节角为飞行距离的影响因素( $P < 0.05$ )。2)在起跳阶段运动模式及力量特点方面,IJ重心最低处膝外翻指数( $r=0.731$ )、DJ膝外翻最小值( $r=0.713$ )、CMJ起跳阶段地面反作用力峰值( $r=0.710$ )、CMJ蹬伸冲量( $r=0.752$ )、SJ( $r=0.723$ )及CMJ起跳峰值功率( $r=0.762$ )均与飞行距离呈正相关。3)对比国内外运动员起跳阶段特定时刻肢体角度发现,国外优秀运动员起跳起始时刻小腿与助滑道夹角( $53.54^\circ \pm 3.14^\circ$ )显著小于我国运动员( $57.62^\circ \pm 4.62^\circ$ ),出台瞬间小腿与助滑道夹角( $58.22^\circ \pm 2.13^\circ$ )显著小于我国运动员( $65.59^\circ \pm 3.84^\circ$ ),大腿与助滑道夹角( $73.28^\circ \pm 6.15^\circ$ )显著大于我国运动员( $58.77^\circ \pm 3.16^\circ$ ),起跳阶段结束时刻髌关节角度( $175.23^\circ \pm 1.96^\circ$ )显著大于我国运动员( $156.37^\circ \pm 13.13^\circ$ )。结论:我国跳台滑雪运动员起跳阶段起跳起始时刻应尽量降低身体重心以减少阻力,并适当提高膝关节角来提高出台后肢体伸展程度。起跳过程中提高膝关节蹬伸力量,同时适当降低髌关节伸展速度,避免风阻对躯干造成不利影响。室内及实地训练过程中,应在提升蹬伸爆发力的同时避免膝关节过度外翻,提高蹬伸力量及传递效率。

**关键词:**跳台滑雪;起跳阶段;飞行距离

**Abstract:** Objective: By analyzing the kinematics and take-off movement patterns of Chinese outstanding male ski jumpers in the field, explore the main take-off factors that affect the flight distance of Chinese male ski jumpers. Methods: 1) Eight Chinese male ski jumpers were selected as the research objects. Three take-off stage of Two-dimensional kinematics data were collected at the K90 platform training base in Hakuba Village, Nagano County, Japan, and the generalized estimation model (GEE) was used to analyze the kinematics factors of the field take-off phase that affects the flight distance. 2) Intercepting the video data of the top 10 men's ski jumpers in the final take-off phase of the Pyeong Chang Winter Olympics, and using one-way analysis of variance to study the physical angle differences of domestic and foreign athletes at specific moments in the take-off phases. 3) Using 1 high-speed Z camera and 1 Kistler 9281EA force platform to collect athletes data of squat jump (SJ), countermovement jump (CMJ), imitation jump (IJ), drop jump (DJ) dynamics and kinematics in the laboratory. Using Pearson correlation analysis to study the correlation between kinematics and dynamics indicators in the laboratory

#### 基金项目:

国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2018YFF0300801)

#### 第一作者简介:

谭旭男(1993-)男,硕士,在读博士研究生,主要研究方向为体育工程、人工智能,E-mail:tanxunan\_bsu@163.com。

#### \*通信作者简介:

周越(1966-)男,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动员机能评定与训练监控,E-mail:chow Yue@163.com。

#### 作者单位:

- 1.北京体育大学,北京 100084;
  - 2.上海体育学院,上海 200438;
  - 3.北京理工大学,北京 100081;
  - 4.苏州市体育科学研究所,江苏苏州 215131
1. Beijing Sport University, Beijing 100084, China;
  2. Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China;
  3. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
  4. Suzhou Institute of Sports Science, Suzhou 215131, China.

and flying distance. Results: 1) In the aspect of kinematics of the on-the-spot take-off stage: the angle between the torso and the slide assist at the beginning of the take-off, the angle between the calf and the slide assist, the hip angle, the knee angle, the peak angular velocity of the hip joint during the take-off phase, the angular velocity of the knee joint, and the take-off knee joint angle and hip joint angle at the end of the stage are the influencing factors of flight distance ( $P < 0.05$ ). 2) In the aspect of the movement mode and strength characteristics of the take-off phase, knee valgus index at the lowest IJ ( $r=0.73$ ), minimum value of DJ knee valgus ( $r=0.71$ ), peak ground reaction force during the take-off phase of CMJ ( $r=0.71$ ), CMJ pedaling impulse ( $r=0.75$ ), SJ ( $r=0.723$ ) and CMJ take-off peak power ( $r=0.762$ ) is positively correlated with the flight distance. 3) Comparing the limb angles of domestic and foreign athletes at specific moments in the take-off phase, the research finds that the angle between the calf and the assist slide at the start of the take-off of foreign elite athletes ( $53.54^\circ \pm 3.14^\circ$ ) is significantly lower than that of Chinese athletes ( $57.62^\circ \pm 4.62^\circ$ ), the angle between the calf and assist slide at the moment of the introduction of foreign excellent athletes ( $58.22^\circ \pm 2.13^\circ$ ) is significantly smaller than that of Chinese athletes ( $65.59^\circ \pm 3.84^\circ$ ), and the angle between the thigh and the slideway ( $73.28^\circ \pm 6.15^\circ$ ) is significantly greater than that of the Chinese athletes ( $58.77^\circ \pm 3.16^\circ$ ), the hip angle at the end time of the take-off phase of excellent foreign athletes ( $175.23^\circ \pm 1.96^\circ$ ) is significantly larger than that of Chinese athletes ( $156.37^\circ \pm 13.13^\circ$ ). Conclusions: Chinese ski jumpers should lower their body's center of gravity as much as possible at the beginning of the take-off phase to reduce resistance and appropriately increase the knee joint angle to increase the degree of limb extension after the take-off platform. Increase the knee joint extension force during the take-off process, while appropriately reduce the hip joint extension speed to avoid the backward angular momentum of the trunk caused by wind resistance to affect the posture and extension of the limbs after the take-off platform. In the process of indoor and field training, it can improve the explosive force of kicking and extension while avoiding excessive knee joint valgus, and improving the force and transmission efficiency of kicking and extension.

**Keywords:** *ski jumping; take-off phase; flying distance*

**中图分类号:** G804.6 **文献标识码:** A

跳台滑雪运动序列可以分成助滑、起跳、飞行、着陆4个阶段(刘树明等,2003)。每个阶段都有特定的任务和功能,且紧密相关,各阶段的完成都依赖于前一阶段(胡齐等,2018;Hammer,2020)。Komi等(2000)发现,在跳台滑雪的整个运动过程中,起跳部分是最关键的阶段,因为不合理的起跳动作会导致运动员在后续的飞行阶段无法维持最佳的空气动力学姿态,进而无法获得更好的成绩(伍颢等,2021)。Schwameder等(2008)认为,跳台滑雪运动员起跳阶段必须在极短的时间内为飞行建立初始条件,即一般要在300 ms内完成完整的起跳动作,在如此高速(约25 m/s)的情况下完成高质量的起跳动作对于优秀运动员也是非常具有挑战性的;此外,起跳阶段的动作质量也决定了运动员后续飞行阶段的所有初始条件,包括出台速度、起跳高度、角动量、运动员姿态及雪板位置等(Brock et al.,2017;Chardonens et al.,2012),且起跳阶段出现的失误无法在后续飞行过程中弥补(Virmavirta,2016)。起跳及后续飞行阶段技术还会受到环境风的影响。研究发现,环境风与跳台滑雪比赛公平性密切相关(Jung et al.,2019)。胡齐等(2020)发现,起跳阶段水平方向环境风对跳台滑雪气动特性影响较为明显,水平方向风阻会对运动员产生后向的旋转角动量,若运动员无法在起跳阶段平衡风阻造成的影响,则势必影响出台后的

飞行姿态,综上所述可以看出起跳阶段对跳台滑雪运动成绩有重要影响。

实地进行跳台训练非常耗时,大部分运动员一天之内只能进行6~8次跳跃训练,因此在室内训练馆进行高质量的模拟训练是非常必要的(Carole et al.,2015)。室内模拟训练通常包括深蹲、静蹲跳、模拟起跳等(Blackwood et al.,2005),虽然这些模拟训练与实地跳台相比有明显差异,但是此类训练方式与实地起跳动作相似度很高,仍是一种有价值的训练方法(Ettema et al.,2016)。然而,目前鲜见有研究揭示哪些起跳参数与我国跳台滑雪运动员实地表现有较高的相关性。

Zanevskyy等(2010)表示,利用跳台滑雪运动员在助滑阶段的身体角度参数探索运动员的技术动作是可行的。本研究通过收集国内外跳台滑雪运动员实地跳台过程中起跳阶段的运动学指标,分析实地起跳过程中对飞行距离有显著影响的参数,并对我国跳台滑雪运动员室内模拟训练的技术动作及力量特点的运动学和动力学数据进行测试分析,探究与飞行距离相关性较高的参数。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

研究对象为8名我国男子跳台滑雪队国家队运动员

(表1)及平昌冬奥会男子跳台滑雪决赛前10名运动员(表2)。其中,我国运动员起跳阶段数据在日本长野县白马村跳台滑雪基地实地测试获得,平昌冬奥会男子跳台滑雪决赛前10名运动员起跳阶段数据截取自央视体育频道。

表1 中国男子跳台滑雪队员基本情况

**Table 1 Basic Information of Chinese Male Ski Jumpers  $n=8$**

年龄/岁	身高/cm	体质量/kg
23.0±7.2	176.1±4.1	62.2±6.1

表2 平昌冬奥会男子跳台滑雪决赛前10名雪运动员情况

**Table 2 Basic Information of Top 10 Men's Ski Jumpers in the Pyeongchang Winter Olympics Finals**

姓名	国籍	决赛名次	飞行距离/m	总得分
Stefan Hula	波兰	1	111.0	131.8
Kamil Stoch	波兰	2	106.5	125.9
Johan Andre Forfang	挪威	3	106.0	125.9
Richard Freitag	德国	4	106.0	125.9
Andreas Wellinger	德国	5	104.5	124.9
Stefen Kraft	奥地利	6	103.5	122.8
Markus Essenbichler	德国	7	106.0	121.6
Karl Geiger	德国	8	103.5	120.3
Ryoyu Kobayashi	日本	9	108.0	120.2
Robert Johansson	挪威	10	100.5	119.9

注:数据来源于央视网-平昌冬奥会男子个人标准台决赛。

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 实地跳台起跳阶段运动学指标

我国运动员起跳阶段运动学矢状面二维视频在日本长野县白马村跳台滑雪场K90跳台实地拍摄获得。运动学指标采集过程:8名我国男子跳台滑雪运动员在K90跳台上进行模拟比赛(每人3跳),3跳成绩相加记为总成绩,比赛前在教练塔上搭设Z camera摄像机,摄像机离地约1.5 m且主光轴与运动员运动平面垂直,拍摄范围约15 m(图1),拍摄频率为120 Hz,拍摄开始前使用1 m长的比例尺对拍摄区域进行标定,选取成绩最好跳次起跳数据与国外优秀运动员进行对比分析。选取平昌冬奥会男子跳台滑雪排名前10名的运动员决赛最后一跳与运动平面垂直角度画面作为分析材料,截取与起跳阶段特定时刻对应的关键帧进行分析。

### 1.2.2 实地起跳阶段划分

实地跳台起跳阶段划分:将从助滑道起跳台直道部分(图2中CD段)助滑至躯干开始伸展时刻设定为起跳阶段的开始(图3a),将躯干及下肢伸展动作结束时刻设定为起跳阶段的结束(图3c)。

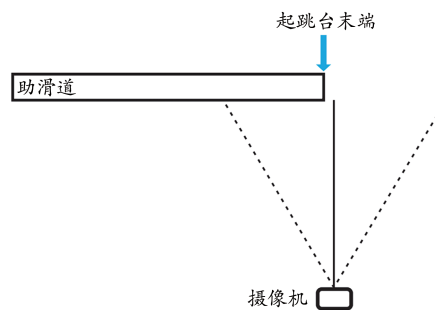


图1 实地测试俯视示意图  
Figure 1. Top View of Field Test

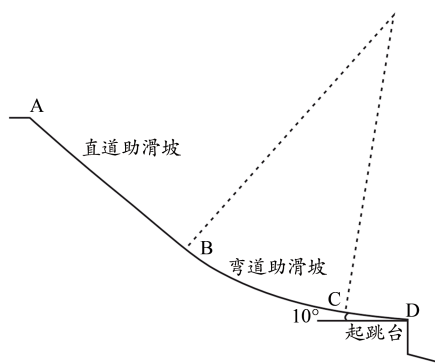


图2 助滑道侧视示意图  
Figure 2. Schematic Diagram of Side View of Slide

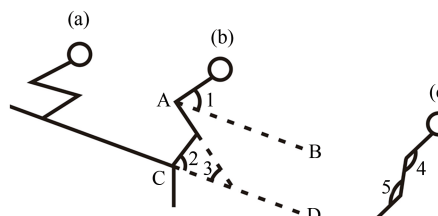


图3 起跳阶段矢状面二维示意图  
Figure 3. Two-Dimensional Diagram of the Sagittal Plane during Take-off Phase

注:AB平行于CD。

将图3(a)时刻定义为起跳起始时刻,图3(b)时刻定义为出台瞬间,图3(c)时刻定义为起跳阶段结束时刻。其中 $\angle 1$ 为躯干与助滑道夹角, $\angle 2$ 为小腿与助滑道夹角, $\angle 3$ 为大腿与助滑道夹角, $\angle 4$ 为髋关节角, $\angle 5$ 为膝关节角,该角度定义同样适用(a)、(c)时刻。

### 1.2.3 室内起跳阶段运动模式及力量特点测试

该部分主要在实验室内测试我国运动员起跳阶段的运动模式和力量特点。

#### 1.2.3.1 测试场地布置

运动学指标测试:室内搭设Z camera摄像机,离地约1.5 m,摄像机位于运动员正前方8 m处,拍摄频率为50 Hz,测试开始前使用长度为1 m的标定杆对拍摄范围进行标定。

动力学指标测试:室内固定位置摆放好测力台,采集

频率为1 000 Hz,配套软件为Bioware 5.1.0.0。

### 1.2.3.2 测试流程

1)熟悉测试程序:进行5 min中等强度慢跑及拉伸等热身练习。

2)讲解测试内容:熟悉动作后进行1次全力试跳。

3)正式测试:按顺序完成3次静蹲跳(squat jump, SJ)、反向跳(countermovement jump, CMJ)、下落跳(drop jump, DJ)及模拟跳跃(imitation jump, IJ),每个动作进行3次测试,间歇时间至少90 s,测试过程中3名研究人员分别记录测力台及视频数据,取最好成绩。

### 1.2.3.3 测试动作要点

1)IJ:运动员站在测力台上模拟助滑动作,听到口令后模拟实地起跳动作,向上尽力跳离测力台。

2)SJ:受试者不能在起跳前出现反向动作,双手放在髌关节上方,先降低重心至全蹲姿势(即大腿与地面平行),之后保持1~2 s。听到口令后,受试者在不做反向动作的前提下尽可能向上跳。

3)DJ:受试者从30 cm高跳箱上跳下(双腿同时落在测力台上),落地后尽全力向上纵跳,落地后应尽可能减少触地时间。

4)CMJ:受试者站立在测力台上,双手位于髌关节上方,双脚分开与肩同宽,听到口令后迅速向下反向预蹲,再向上用力跳起。

## 1.3 数据处理

### 1.3.1 运动学指标选取和处理

实地起跳阶段测试选取的运动学指标包括:出台速度、膝关节平均角速度、髌关节平均角速度、膝关节峰值角速度、髌关节峰值角速度、起跳起始时刻膝关节角、起跳起始时刻髌关节角、起跳起始时刻躯干与助滑道夹角、起跳起始时刻小腿与助滑道夹角、出台瞬间膝关节角、出台瞬间髌关节角、出台瞬间躯干与助滑道夹角、出台瞬间小腿与助滑道夹角、起跳结束时刻膝关节角、起跳结束时刻髌关节角。

实验室测试的运动学指标包括:起跳高度和膝外翻指数( $\Delta d$ ),计算公式为 $\Delta d = \frac{a-b}{a}$ ,其中 $a$ 为两膝关节中心的距离, $b$ 为两踝关节中心的距离, $\Delta d < 0$ 表示膝外翻, $\Delta d > 0$ 表示膝内翻。

采用Kinovea 0.8.26自带的低通滤波平滑功能对数据进行平滑处理,平滑频率为10 Hz。通过截取特定帧的方法选取3个特定时刻(起跳起始时刻、出台瞬间、起跳结束时刻)作为国外优秀运动员的分析数据。

### 1.3.2 动力学指标选取和处理

动力学指标包括:起跳阶段垂直方向峰值力、蹬伸冲量、峰值功率、反应力量指数(RSI)、离心利用率(EUR)。

$RSI = \frac{a}{b}$ ,其中 $a$ 为DJ起跳高度, $b$ 为DJ触地时间。

$EUR = \frac{c-d}{d}$ ,其中 $c$ 为CMJ成绩, $d$ 为SJ成绩。

将Bioware 5.1.0.0测得的动力学指标导入Excel 2010中进行计算。

### 1.3.3 统计分析

实验所得数据均以平均值±标准偏差( $M \pm SD$ )表示,采用广义估计模型(generalized estimating equation, GEE)分析我国运动员实地起跳阶段的运动学数据,探讨影响飞行距离的主要因素;通过单因素方差分析检验国内外运动员起跳阶段特定时刻肢体角度差异;采用Pearson相关分析检验地面反作用力峰值、跳跃高度、蹬伸冲量、EUR、RSI、 $\Delta d$ 及峰值功率与飞行距离的相关性。 $P < 0.05$ 表示有显著差异。

## 2 研究结果

### 2.1 实地起跳阶段运动学指标结果

#### 2.1.1 影响我国男子跳台滑雪运动员飞行距离的运动学指标

各指标测量数据如表3所示。将每位运动员3次实地跳台测试结果作为纵向数据,即按照时间序列对每个个体进行重复测量,且各因变量组相互独立。分别将起跳阶段运动学数据和飞行距离作为自变量和因变量纳入GEE模型,分析结果显示(表4),起跳起始时刻膝关节角、出台瞬间膝关节角、起跳结束时刻髌关节角、膝关节平均角速度对飞行距离有显著正向影响,起跳起始时刻躯干与助滑道夹角、髌关节平均角速度、起跳起始时刻小腿与助滑道夹角、起跳起始时刻髌关节角对飞行距离有显著负向影响。

#### 2.1.2 国内外运动员起跳阶段特定时刻肢体角度差异

国外优秀男子跳台滑雪运动员起跳起始时刻小腿与助滑道夹角( $53.54^\circ \pm 3.14^\circ$ )显著小于我国男子跳台滑雪运动员( $57.62^\circ \pm 4.62^\circ$ )(图4)。

国外优秀男子跳台滑雪运动员出台瞬间小腿与助滑道夹角( $58.22^\circ \pm 2.13^\circ$ )显著小于我国男子跳台滑雪运动员( $65.59^\circ \pm 3.84^\circ$ ),国外优秀男子跳台滑雪运动员出台瞬间大腿与助滑道夹角( $73.28^\circ \pm 6.15^\circ$ )显著大于我国男子跳台滑雪运动员( $58.77^\circ \pm 3.16^\circ$ )(图5)。

国外优秀男子跳台滑雪运动员起跳结束时刻髌关节角度( $175.23^\circ \pm 1.96^\circ$ )显著大于我国男子跳台滑雪运动员( $156.37^\circ \pm 13.13^\circ$ )(图6)。

### 2.2 起跳阶段运动模式及力量特点测试结果

我国男子跳台滑雪运动员起跳阶段运动模式及力量特点测试相关性结果如表5所示。SJ起跳峰值功率( $r=0.723, P=0.042$ )、CMJ起跳峰值功率( $r=0.762, P=0.027$ )、CMJ反作用力峰值( $r=0.710, P=0.048$ )、CMJ蹬伸冲量( $r=0.752, P=0.03$ )、DJ膝外翻最小值( $r=0.713, P=0.046$ )、IJ重心最低处膝外翻指数( $r=0.731, P=0.036$ )与飞行距离中度相关,EUR、RSI指标与飞行距离无显著相关。

表 3 运动学指标描述性统计

Table 3 Kinematic Index Descriptive Statistics

指标	最小值	最大值	平均值	标准偏差
飞行距离/m	68	90	78.91	6.74
出台速度/(m·s <sup>-1</sup> )	84	87	85.36	1.34
膝关节平均角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	262	439	333.25	46.03
髌关节平均角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	273	434	352.87	48.23
膝关节峰值角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	553	984	732.20	108.01
髌关节峰值角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	521	863	675.37	91.43
起跳起始时刻膝关节角/(°)	74	85	79.08	3.42
起跳起始时刻髌关节角/(°)	29	42	35.29	3.09
起跳起始时刻躯干与助滑道夹角/(°)	9	16	12.87	2.19
起跳起始时刻小腿与助滑道夹角/(°)	49	64	56.20	4.28
出台瞬间膝关节角/(°)	109	148	127.70	10.65
出台瞬间髌关节角/(°)	64	112	93.45	12.82
出台瞬间躯干与助滑道夹角/(°)	22	43	33.33	6.37
出台瞬间小腿与助滑道夹角/(°)	63	75	68.45	3.56
起跳结束时刻膝关节角/(°)	162	178	171.58	4.99
起跳结束时刻髌关节角/(°)	126	174	151.66	14.73

注:每名运动员进行 3 个跳次测试,个案数为 24。

表 4 广义估计方程的参数估计值

Table 4 Parameter Estimate

指标	$\beta$	OR	P
截距	107.66	2.74	—
出台速度/(m·s <sup>-1</sup> )	-0.80	0.44	0.13
膝关节平均角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	0.03	1.03	0.01
髌关节平均角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	-0.05	0.94	0.00
膝关节峰值角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	0.01	1.01	0.10
髌关节峰值角速度/[(°)·s <sup>-1</sup> ]	-0.01	0.99	0.43
起跳起始时刻膝关节角/(°)	0.42	1.52	0.00
起跳起始时刻髌关节角/(°)	-0.92	0.39	0.00
起跳起始时刻躯干与助滑道夹角/(°)	-1.01	0.36	0.00
起跳起始时刻小腿与助滑道夹角/(°)	-0.54	0.58	0.00
出台瞬间膝关节角/(°)	0.52	1.69	0.00
出台瞬间髌关节角/(°)	-0.08	0.91	0.66
出台瞬间躯干与助滑道夹角/(°)	0.28	1.33	0.32
出台瞬间小腿与助滑道夹角/(°)	-0.25	0.77	0.19
起跳结束时刻膝关节角/(°)	0.07	1.07	0.46
起跳结束时刻髌关节角/(°)	0.15	1.16	0.00

### 3 分析与讨论

#### 3.1 实地起跳阶段运动学指标

##### 3.1.1 起跳起始时刻运动学指标对飞行距离的影响

研究结果显示,起跳起始时刻部分关节角度对飞行距离有显著影响,同时,我国运动员小腿与助滑道夹角显著大于国外优秀运动员。Janez 等(2012)指出,运动员在助滑过程中减少有效迎风面积可降低风阻的不利影响,这提示,我国运动员需要在起跳起始阶段适当减小小腿与助滑道夹角,同时减小髌关节角及躯干与助滑道夹角,以此降低并使重心前移,从而降低风阻的不利影响。

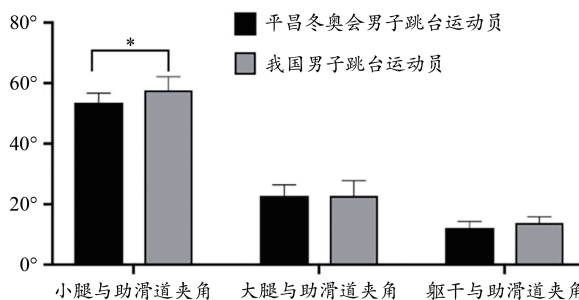


图 4 国外优秀运动员与中国运动员起跳起始时刻肢体角度对比  
Figure 4. Comparison of Limb Angles between Foreign Elite Athletes and Chinese Athletes at the Start of the Jump

注:\*表示  $P < 0.05$ ,下同。

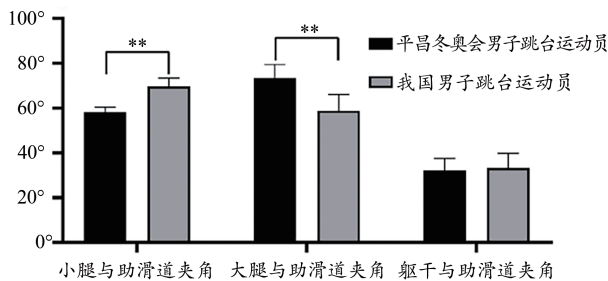


图 5 国外优秀运动员与我国运动员出台瞬间肢体角度对比  
Figure 5. Comparison of Limb Angles between Foreign Elite Athletes and Chinese Athletes at the Moment of Leaving the Platform

注:\*\*表示  $P < 0.01$ 。

研究结果显示,起跳起始时刻膝关节角对飞行距离有显著正向影响,即想要获得较远的飞行距离,应适当增大起跳起始时刻膝关节角。膝关节角变化问题主要与起跳时间有关(起跳阶段历时约 280 ms),膝关节伸肌群在

跳台滑雪起跳阶段是非常重要的,伸肌群的初始长度(膝关节角度)会影响起跳过程阶段的发力效果。Eloranta等(1981)研究发现,如果在助滑阶段下蹲过深(关节角度较小),与更大的膝关节角度(75°~80°)相比,产生力量的能力会受到限制。相比于国外优秀运动员,我国运动员蹬伸力量不足可能导致在起跳阶段极短的时间内无法充分伸展下肢,从而影响后续飞行姿态。虽然更深的蹲伏姿态(较小的膝关节角度)会产生更大的角速度,但相对需要的时间也更长,因此起跳起始时刻膝关节角并不是越小越好。

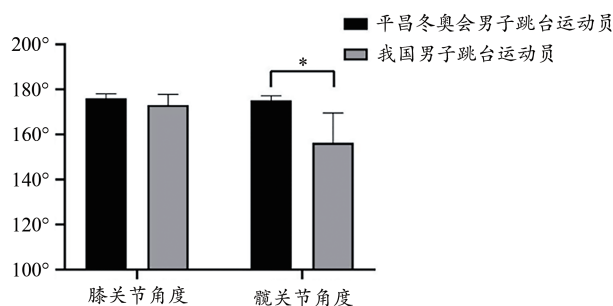


图6 国外优秀运动员与我国运动员起跳结束时刻关节角度对比  
Figure 6. Comparison of Joint Angles between Foreign Elite Athletes and Chinese Athletes at the End of the Jump

表5 起跳阶段运动模式及力量特点测试与飞行距离的相关

Table 5 Correlation of Movement Mode and Strength Characteristic Test and Flying Distance in the Take-off Phase

参数	SJ		CMJ		DJ		IJ	
	r	P	r	P	r	P	r	P
反作用力峰值/(N·kg <sup>-1</sup> )	0.081	0.845	0.710	0.048	—	—	—	—
起跳阶段蹬伸冲量/(Ns)	0.442	0.271	0.752	0.030	—	—	—	—
重心最低处膝外翻指数	—	—	—	—	0.102	0.801	0.731	0.036
膝外翻指数最小值	—	—	—	—	0.713	0.046	0.012	0.981
起跳高度/m	0.633	0.092	0.601	0.114	—	—	—	—
反应力量指数RSI	—	—	—	—	0.602	0.110	—	—
离心利用率EUR	—	—	0.081	0.852	—	—	—	—
起跳峰值功率/(w·kg <sup>-1</sup> )	0.723	0.042	0.762	0.027	—	—	—	—

### 3.1.2 出台瞬间运动学指标对飞行距离的影响

Virmavirta等(2009)研究发现,出台瞬间优秀运动员小腿与助滑道夹角较小,大腿与助滑道夹角较大且膝关节角显著大于水平较低的运动员。本研究发现国外优秀运动员出台瞬间大腿与助滑道夹角显著大于我国运动员,说明起跳蹬伸过程中,我国运动员下肢大腿伸展程度不足,而这种情况也会导致后续飞行阶段肢体伸展不足,进而影响飞行效果,因此在保证躯干不过度抬起的情况下,更多地伸展髋关节和膝关节是较为合理的技术动作。

本研究发现出台瞬间小腿与助滑道夹角对飞行距离有显著影响,垂直起跳高度对于飞行距离的影响较明显,为了更好地将地面反作用力向上传递,起跳阶段运动员需要产生相对于身体重心向前的角动量,以此平衡风阻的不利影响。若保持躯干位置不变则这种姿态可以使运动员的前倾角较小,而我国运动员前倾角较大,通过蹬伸产生前向旋转角动量较小,不利于运动员更快地形成合理的飞行姿态,研究结论在一定程度上支持前人研究,也提示我国运动员助滑至出台瞬间时应调整身体姿态与肢体角度,为飞行阶段做好准备。

### 3.1.3 起跳结束时刻运动学指标对飞行距离的影响

Schmolzer等(2005)表示,早期飞行阶段(起跳阶段结束后)优秀运动员的髋关节伸展角度大于普通运动员。本研究结果显示,起跳结束时刻国外运动员髋关节角显

著大于我国运动员,同时也发现我国运动员髋关节伸展程度对飞行距离有显著的正向影响,在一定程度上支持了上述研究结论,伸髋不足的飞行姿态影响最终的飞行距离。

### 3.1.4 髋关节角速度对飞行距离的影响

Virmavirta等(2009)对冬奥会前10名男子跳台滑雪运动员进行起跳阶段的运动学分析发现,起跳过程中髋关节的角速度与飞行距离呈显著正相关( $r=0.651, P<0.005$ ),但该研究仅仅是基于排名前10的优秀运动员。本研究结果显示,髋关节角速度对飞行距离有显著的负向影响,与Virmavirta等(2009)的研究结论不一致,这可能与风阻对运动员姿态的影响有关。起跳阶段髋关节高速伸展可能会导致躯干过早直立,而躯干的直立将会带来更大的正面风阻,进而有可能影响到运动员的身体姿态以及出台速度。本研究并未测试起跳点周围风速及风向,因此不同方向和速度的风阻也可能对姿态造成不同的影响进而影响研究结果。为了研究最佳的起跳姿态,Grega等(2015)表示,起跳阶段运动员需要产生相对于身体重心向前的角动量,为了达到这一条件,只要地面反作用力作用线位于身体重心后方就可以产生所需要的力臂,在身体姿态方面表现为躯干与助滑道之间的夹角较小。因为当躯干与助滑道夹角增大时风阻就会增加,而且身体重心的位置也会更接近地面反作用力作用线,进

而导致运动员产生较大的向后旋转的角动量。综上,对比国际优秀运动员,我国运动员想要通过提高髋关节角速度的方式来提高飞行距离,可能会因平衡风阻的身体控制能力有限,以及未能掌握正确的运动模式(国际优秀运动员伸髋的过程中躯干伸展幅度较小)而导致成绩下降。因此,在起跳过程中应适当降低髋关节角速度和躯干伸展程度。

### 3.1.5 膝关节角速度对飞行距离的影响

研究结果显示,膝关节角速度对飞行距离有显著正向影响,与既有研究结论一致。膝关节快速有力地伸展会使运动员获得相对于助滑道较高的垂直起跳速度(Arndt et al., 1995),而垂直起跳速度对飞行距离有重要影响(杜芸芸等, 2020; Janez et al., 2010);此外,膝关节快速伸展且保持躯干处于较低的位置可以减少空气阻力(Virmavirta et al., 2005),有助于运动成绩的提高。因此,我国运动员应在起跳阶段提高膝关节伸展速度以提高飞行距离。

## 3.2 起跳阶段运动模式及力量特点

### 3.2.1 膝外翻指数

关于跳台滑雪起跳阶段的运动学分析较少,普遍认为实验室模拟训练的关键参数是起跳蹬伸峰值力以及爆发力相关指标,而本研究发现膝外翻指数与飞行距离有相关关系,这种影响可能与起跳时动力的传递效率有关,这也提示起跳的技术比单纯的蹬伸力量更重要,这一结论也可以帮助教练了解训练过程中的重点,最大程度地提高运动员模拟跳跃训练的效益。在模拟起跳期间出现的膝外翻更多是由于运动员缺少对肢体的控制能力,可能与缺少神经肌肉控制有关(Wallace et al., 2008)。

### 3.2.2 起跳高度及地面反作用力峰值

研究结果显示, SJ 和 CMJ 起跳高度与飞行距离均无显著相关,由于体质量与跳跃高度及瞬时功率相关,不同体质量的运动员完成相同高度的跳跃时所做的功也不同,所以起跳高度并不能完全代表不同运动员的爆发力。

此外, CMJ 垂直方向峰值力与飞行距离呈中度显著相关,表明下肢蹬伸力量指标与飞行距离关联度较高。Vaverka 等(1994)研究指出,跳台滑雪运动员模拟训练可达到纵跳时 88% 的最大起跳力,并且这一数值在实地跳台起跳时会更低。实地跳台训练非常耗时,所以模拟起跳训练是必不可少的,但也要注意实验室模拟起跳与实地起跳在摩擦力、空气动力等多方面存在差异(Virmavirta et al., 2010)。综上,垂直于助滑道的起跳分量不仅对运动员重心上升起重要作用,而且对起跳过程中角动量的产生也有重要影响。因此,我国运动员应注重下肢蹬伸力量的发展,同时减少膝关节过度外翻的情况以保证动力更有效地向上传递,从而增加起跳高度和前向旋转角动量。

### 3.2.3 反应力量

运动员在完成爆发性动作时肌肉-肌腱复合体通常启动拉长-缩短循环,这种反射性收缩方式就是反应力量的表现。当运动员完成对力和速度要求都很高的动作时(如纵跳),力-速率曲线就会受到之前负荷(反向动作)的影响,从而使后续的起跳动作产生更大的反作用力(即使力-速率曲线右移)。进行离心练习后,人体神经肌肉会产生适应性改变,从而提高肌肉-肌腱刚度(Ferdiana et al., 2020)。当活动的肌肉在收缩前进行快速预拉伸时,其最终的力量和速度高于单纯的向心肌肉收缩动作,但这种形式的起跳动作在实际跳台运动中并没有被运动员和教练员广泛接受(Komi et al., 1978),主要是由于整个起跳过程仅有 280 ms 左右,在如此短的时间内,要完成反向预蹲加起跳动作对于运动员来说非常困难。本研究发现,代表反应力量指数的 2 个指标(RSI、EUR)与飞行距离均无显著相关,这可能是由于跳台滑雪起跳阶段不会出现类似跳远动作的起跳模式,同时反应力量测试动作与实地起跳动作也有一定差异,反应力量测试需要运动员从一定高度落下并迅速跳起,而跳台滑雪运动员起跳前全程双脚着地,基本只通过快速向心收缩提供起跳动力。

### 3.2.4 起跳阶段蹬伸冲量及功率分析

研究结果显示, SJ 起跳峰值功率与飞行距离中度相关、CMJ 起跳峰值功率及蹬伸冲量与飞行距离呈显著正相关。Janura 等(2016)研究发现,跳台滑雪运动员与跳远、跳高等项目运动员类似,必须着重发展肌肉力量和爆发力才能达到最佳的运动表现。已有研究也表示跳台滑雪运动员应该专注于低次数、大重量的力量训练以增强最大力量水平,进而提高运动员的爆发力(Holm et al., 2008; Ronnestad et al., 2011)。虽然运动员在实地起跳过程中不会出现类似 CMJ 的明显反向运动,但助滑阶段运动员下肢肌群需要持续地做离心收缩才能保持较低的身体姿态,发力过程要求运动员下肢肌群在离心状态下做快速向心收缩,这种肌肉运动模式与 SJ 类似。因此,下肢爆发力水平对于我国跳台滑雪运动员提高起跳阶段的动作质量和跳跃高度至关重要,在训练中应加强下肢爆发力,且动作模式应该与实际起跳动作类似。

## 4 研究结论

1) 我国跳台滑雪运动员起跳起始时刻应尽量降低身体重心,并适当提高膝关节角,以提高出台后肢体伸展程度。

2) 应提高我国跳台滑雪运动员起跳过程中的膝关节蹬伸力量,同时适当降低髋关节伸展速度,避免风阻对躯干造成不利影响。

3) 我国跳台滑雪运动员室内及实地训练过程中,在提高蹬伸爆发力的同时,应避免膝关节过度外翻,以提高蹬伸力量及传递效率。

## 参考文献:

- 杜芸芸,陈召,柏开祥,2020.跳台滑雪运动成绩预测模型的建立与数值计算[J].武汉体育学院学报,54(11):82-86.
- 胡齐,刘宇,2020.环境风对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响[J].体育科学,40(3):54-63.
- 胡齐,张文毅,陈骐,2018.跳台滑雪空气动力学研究进展[J].中国体育科技,54(5):132-139.
- 刘树明,苗巍,刘辉,2003.浅析跳台滑雪运动的特点与规律[J].沈阳体育学院学报,(2):13-14.
- 伍颢,曲毅,刘思平,等.2021.跳台滑雪技术生物力学智能分析与反馈系统的研发与应用[J].中国体育科技,57(12):3-8.
- ARNDT A, BRUGGEMANN G P, VIRMAVIRTA M, et al., 1995. Olympic Scientific Projects-Techniques used by Olympic Ski Jumpers in the transition from take off to early flight[J]. J Appl Biomech, 11(2): 224-237.
- BLACKWOOD B, 2005. Drop Jumps [J]. J Strength Cond Res, 14(4): 57-59.
- BROCK H, OHGI Y, 2017. Assessing motion style errors in Ski Jumping using inertial sensor devices [J]. IEEE Sens J, 17(99): 3794-3804.
- CAROLE A, PAULI, MELANIE, et al., 2015. Kinematics and Kinetics of squats, drop jumps and imitation jumps of ski jumpers [J]. J Strength Cond Res, 30(3): 643-652.
- CHARDONNENS J, FAVRE J, LE CALLENNEC B, et al., 2012. Automatic measurement of key ski jumping phases and temporal events with a wearable system [J]. J Sport Sci, 30(1): 53-61.
- ELORANTA V, KOMI P V, 1981. Function of the quadriceps femoris muscle under the full range of forces and differing contraction velocities of concentric work [J]. Electromyogr Clin Neurophysiol, 21(4): 419-431.
- ETTEMA G, HOOIVELD J, BRAATEN S, et al., 2016. How do elite ski jumpers handle the dynamic conditions in imitation jumps? [J]. J Sport Sci, 34(11): 1081-1087.
- FERDIANA I, MUHAMMAD M, WIRIAWAN O, 2020. Effect of exercise countermovement jump and depth jump against the increase agility and leg muscle power [J]. BirL E J, 3(4): 2259-2273.
- GREGA A, LOGAR A, MARKO K, et al., 2015. Estimation of joint forces and moments for the in-run and take-off in ski jumping based on measurements with wearable inertial sensors [J]. Sensors-basel, 15(5): 11258-11276.
- HOLM L, REITELSEDER S, PEDERSEN T G, et al., 2008. Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity [J]. J Appl Physiol, 105(5): 1454-1461.
- HAMMER T, 2020. Relative age effect in international ski jumping: analysis of FIS World Cup and FIS Junior World Ski Championships [J]. J Phys Edu Sport, 20(3): 1455-1460.
- JANURA M, CABELL L, SVOBODA Z, et al., 2016. Evaluation of explosive power performance in ski jumpers and nordic combined competitive athletes: A 19-year study [J]. J Strength Cond Res, 30(1): 71-80.
- JANEZ V, BOJAN J, 2010. The factor structure of chosen kinematic characteristics of take-off in ski jumping [J]. J Hum Kinet, 23(1): 37-45.
- JANEZ V, MILAN Č, BOJAN J, 2012. Kinematic structure at the early flight position in ski jumping [J]. J Hum Kinet, 35(1): 35-45.
- JUNG A, MULLER W, STAAT M, 2019. Optimization in ski jumping: The influence of wind [J]. J Biomech, 52(3): 190-193.
- KOMI P V, BOSCO C, 1978. Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women [J]. Med Sci Sport Exer, 10(4): 261-265.
- KOMI P V, VIRMAVIRTA M, 2000. Determinants of successful ski-jumping performance [J]. Biomech Sport, 60: 349-362.
- RØNNESTAD B R, KOJEDAL Ø, LOSNEGARD T, et al., 2011. Effect of heavy strength training on muscle thickness, strength, jump performance, and endurance performance in well-trained Nordic Combined athletes [J]. Eur J Appl Physiol, 112(6): 2341-2352.
- SCHMOLZER B, MÜLLER W, 2005. Individual flight styles in ski jumping: Results obtained during Olympic Games competitions [J]. J Biomech, 38(5): 1055-1065.
- SCHWAMEDER H, 2008. Biomechanics research in ski jumping, 1991—2006 [J]. Sport Biomech, 7(1): 114-136.
- VAVERKA F, JANURA M, SALINGER J, 1994. A comparison of the take-off measured under laboratory and jumping-hill conditions [J]. J Biomech, 27(6): 694-690.
- VIRMAVIRTA M, 2016. Aerodynamics of ski jumping [M]. New York: Springer: 160
- VIRMAVIRTA M, ISOLEHTO J, KOMI P V, et al., 2005. Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition [J]. J Bio-mech, 38(11): 2157-2163.
- VIRMAVIRTA M, ISOLEHTO J, KOMI P V, et al., 2009. Take-off analysis of the Olympic ski jumping competition (HS-106 m) [J]. J Biomech, 42(8): 1095-1101.
- VIRMAVIRTA M, KOMI P V, 2010. Plantar pressure and EMG activity of simulated and actual ski jumping take-off [J]. Scand J Med Sci Spor, 11(5): 310-314.
- WALLACE B J, THOMAS W K, RICHARD P M, et al., 2008. A comparison between back squat exercise and vertical jump kinematics: Implications for determining anterior cruciate ligament injury risk [J]. J Strength Cond Res, 22(4): 1249-1258.
- ZANEVSKYY I, BANAKH V, 2010. Dependence of ski jump length on the skier's bodypose at the beginning of take-off [J]. Acta Bioeng Biomech, 12(4): 79-87.

(收稿日期:2021-02-02; 修订日期:2021-12-05; 编辑:高天艾)