

# 动作姿态对北欧两项运动员跳台滑雪助滑和起跳气动阻力的影响

## Effects of Movement and Postures on Aerodynamic Drag during Ski Jumping In-Run and Take-off Phases in Nordic Combined Athletes

张 栋<sup>1,2</sup>, 邹晓双<sup>3</sup>, 刘 钰<sup>4</sup>, 徐金成<sup>5</sup>, 曹春梅<sup>1\*</sup>

ZHANG Dong<sup>1,2</sup>, ZOU Xiaoshuang<sup>3</sup>, LIU Yu<sup>4</sup>, XU Jincheng<sup>5</sup>, CAO Chunmei<sup>1\*</sup>

**摘要:**目的:探讨北欧两项运动员不同助滑和起跳动作姿态产生原因其对气动阻力的影响及机理,并将姿态参数对气动阻力的影响进行量化评估。方法:以5名北欧两项国家队运动员为对象,采用风洞测试和高清摄像系统及视频分析系统对其在风洞水平工作段中进行助滑和起跳训练时身体姿态和关节角度参数、气动阻力参数进行采集和分析,通过运动员身体形态、运动学特征等因素分析不同姿态产生的原因,探究其影响助滑起跳姿态的机理。结果:1)同一运动员在保持头部平视(与铅垂线夹角 $\theta_1=90.4^\circ$ )、躯干水平(与水平面夹角 $\theta_2=0^\circ$ )、手部水平伸展、完全蹲踞式(髋关节角度 $\theta_3=37.6^\circ$ )姿态进行助滑时气动阻力最小,具有最佳减阻效果。2)不同运动员的起跳动作中,“膝动带髋式”姿势为最佳减阻姿势,相对于平均气动阻力最大的“髋膝变速同步式”姿势,减阻率达到18.34%。3)皮尔逊相关分析表明,运动员的右侧髋关节内外旋ROM增加,起跳的气动阻力相应减小;右髋屈ROM增加,气动阻力相应会增大,起跳气动阻力的降低,有利于运动员赛季跳台的平均距离的提高,以上3组变量之间相关性均具有显著水平( $P<0.05$ )。结论:不同助滑和起跳姿态下北欧两项运动员的气动减阻效应存在一定差异,影响助滑和起跳气动减阻的因素有运动员专项技术特点、身体形态和运动功能特征、心理和场地环境因素等。研究不同姿态的气动减阻效应能够为运动员减小空气阻力、优化能量分配、改进训练策略、提升竞技表现提供重要的科学指导。

**关键词:** 北欧两项;跳台滑雪;助滑;起跳;气动阻力;竞技表现

**Abstract:** Objective: To investigate the effects of different in-run and take-off postures on aerodynamic resistance of Nordic Combined athletes and its mechanism, and to quantitatively evaluate the influence of stance parameters on aerodynamic resistance. Methods: Wind tunnel test, high-definition camera system and video analysis system were used to collect and analyze the body posture and angle parameters, aerodynamic resistance parameters of five Nordic Combined athletes during the in-run and take-off training in the horizontal working section of the wind tunnel. Results: 1) The same athlete has the least aerodynamic resistance and the best drag reduction effects when keeping the head position at eye level (angle  $\theta_1=90.4^\circ$  with the plumb line), torso horizontally straight (angle  $\theta_2=0^\circ$  with the horizontal plane), hands horizontally extended, and completely squatting (hip angle  $\theta_3=37.6^\circ$ ). 2) Among the take-off movements of different athletes, the best body posture of drag reduction is “knee driving hip movement” and the reduction rate reaches 18.34% compared with “hip and knee synchronization nonuniform movement”, which has the highest average aerodynamic resistance. 3) Pearson’s correlation analysis shows that the right hip internal and external rotational range of motion (ROM) increased, the aerodynamic resistance of take-off phase decreased accordingly; the right hip flexion ROM increases, the aerodynamic resistance will increase accordingly, and the decrease of aerodynamic resistance is conducive to the average distance of jumping platform of athlete in season. The correlation between the above three sets of variables was at a significant level ( $P<0.05$ ).

### 基金项目:

国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(2020YFF0304605);中国博士后科学基金项目(2022M711859)

### 第一作者简介:

张栋(1985-),男,副教授,博士,硕士研究生导师,主要研究方向为运动生物力学、运动训练与生化监控, E-mail: zhangdong2023@cupes.edu.cn.

### \*通信作者简介:

曹春梅(1977-),女,副教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为运动生物力学, E-mail: caocm@tsinghua.edu.cn.

### 作者单位:

1. 清华大学,北京 100084;
  2. 首都体育学院,北京 100191;
  3. 河北师范大学,河北 石家庄 050024;
  4. 贵州民族大学,贵州 贵阳 550025;
  5. 国家体育总局冬季运动管理中心,北京 100044
1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;
  2. Capital University of Physical Education and Sports, Beijing 100191, China;
  3. Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;
  4. Guizhou Minzu University, Guiyang, Guiyang 550025, China;
  5. Winter Sports Administration Center, General Administration of Sport of China, Beijing 100044, China.

Conclusions: Different in-run and take-off postures of Nordic Combined athletes have certain differences in aerodynamic drag reduction effects. The factors affecting in-run and take-off aerodynamic drag reduction of Nordic Combined athletes include special technical characteristics, body shape and functional characteristics, psychological factors and field environmental factors, etc. The study on the aerodynamic drag reduction effects of different postures can provide important scientific guidance for athletes to reduce the aerodynamic resistance, optimize the energy distribution, improve the training strategy, and improve the competitive performance.

**Keywords:** nordic combined; ski jumping; in-run; take-off; aerodynamic resistance; competitive performance

**中图分类号:** G863.12 **文献标识码:** A

跳台滑雪运动项目是一项在高速中进行复杂动作的技巧类竞速项目,由于运动员在高处的势能由助滑转化为动能,并在起跳中转化为离台后的切向速度,因此助滑和起跳是决定初速度和跳台滑雪成绩的关键(胡齐等, 2018)。而运动员在助滑和起跳阶段的不同姿态会改变其在运动中身体周围的气动阻力,产生不同的空气动力学效应,在初期飞行时产生能量转化和造成能量损失(王志选等, 1998)。因此,优化运动员助滑和起跳的姿态使其具有最佳的空气动力学效应,是提升竞技表现的重要手段之一。

作为气动阻力测评和姿态优化减阻的重要方法,风洞目前已在跳台滑雪、速度滑冰、自行车、帆船、钢架雪车等竞速类或受风力和风阻影响的体育项目中广泛应用(柏开祥等, 2007; 柳燕, 2000; 汪晓阳等, 1985; Brownlie, 2021; Jung et al., 2014; Sumner et al., 2010; Supej et al., 2013)。通过对运动员不同动作姿态进行流体动力学模拟计算和气动阻力测量,可以分析动作姿态产生空气流动变化、压差和气动阻力变化因素,从而在随后的训练中进行调整和改善(Barelle et al., 2004; Elfmark et al., 2021)。因此风洞测试在竞速类项目的姿势减阻和装备减阻中具有不可替代的重要作用。

北欧两项是由跳台滑雪和越野滑雪组成的运动项目,比赛中由跳台滑雪成绩决定后续越野滑雪比赛中的出发顺序,因此跳台滑雪的竞技表现是北欧两项运动员取得良好成绩的基础和前提(张栋等, 2022)。国外学者针对北欧两项和跳台滑雪运动员的空中姿态进行了比较研究(Svoboda et al., 2011),但鲜见对北欧两项运动员不同助滑和起跳姿势的气动阻力特征和产生因素进行的研究。本研究采用不同姿态进行助滑和起跳训练来模拟跳台滑雪场地中的表现,通过风洞测试获得不同姿态时的气动阻力参数,讨论不同姿态对跳台滑雪竞技表现的影响,并结合运动员身体形态和髋关节活动度分析不同姿态产生的原因,探究其影响助滑起跳姿态的机理。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 研究对象

研究对象为 5 名(A1~A5)国家北欧两项队运动员(表 1)。在测试中运动员均穿着相同材料的跳台滑雪服、

头盔和比赛中用鞋完成测试。本研究经国家体育总局冬季运动管理中心和清华大学伦理委员会批准(批准编号: 20190040),所有被试均对实验知情并签署同意书。

表 1 北欧两项运动员基本信息

Table 1 Basic Information of Nordic Combined Athletes

	年龄 /岁	训练年限 /年	身高 /m	体质量 /kg	BMI (kg·m <sup>-2</sup> )	赛季平均 距离/m
A1	16	3	1.80	57	17.59	84.6
A2	22	6	1.82	66	19.93	85.0
A3	21	4	1.73	59	19.71	78.8
A4	26	5	1.79	64	19.97	86.7
A5	21	4	1.75	58	18.94	91.6
Avg.	20.6	4.33	1.78	60.80	19.23	85.34
SD.	2.7	1.03	0.04	3.96	1.01	4.60
CV	13.1	23.8	2.08	6.52	5.23	5.38

### 1.2 测试设备

采用保定涞源国家跳台滑雪训练科研基地的风洞实验室进行测试。风洞类型是回流式多试验段联通体育专用风洞,工作段共分为水平试验段(0°)、起跳试验段(11°)、飞行试验段(32°)3段,试验位置风速在 0~42 m/s 连续可调,流场湍流度<2%,气流偏角<1(图 1)。

风洞试验使用的天平测力单元是定制设计的 6 分力测量微型轻量化天平模块,安装时基准至校心的距离为天平表面以下 35.25 mm,配有应变仪和在线存储、无线传输模块,测量模块为 AT901-B4005 激光跟踪仪和 BlueCLINO-R0318 电子角度仪,安装根据跳台滑雪雪板尺寸进行改造,精度为±1%,可加载于运动装备,兼顾风洞测试和在线测量。

### 1.3 测试流程

#### 1.3.1 风洞力学同步测试

在体育综合训练风洞试验室中通过人工方式产生并控制气流,模拟跳台滑雪训练中运动员所处的流场环境,其中静态气动减阻姿态测量控制风速为 23.6 m/s,动态气动减阻姿态测量控制风速为 30 m/s。利用在线测力天平单元和控制系统获取不同助滑和起跳姿态运动员的气动阻力。在每种姿态测试时,运动员站立在天平上方,将雪板固定在天平上方盒式六分量天平转接板上,进行头部、手部、髋部姿态的助滑静态姿态模拟和起跳动态姿态模拟(图 2)。数据采集频率为 10 Hz,去除开始和结束的不

规则时间。为了保证姿态数据更加符合专项标准,选取队内1名跳台技术最规范的运动员(A1)进行助滑静态力学同步测试,选取5名运动员分别进行起跳动态力学同步

测试,测试过程中要求运动员尽可能以最完整和规范的姿态完成动作,每名运动员每种姿态进行3次测试,取测力最大值1次动作的力学数据进行后续的分析。

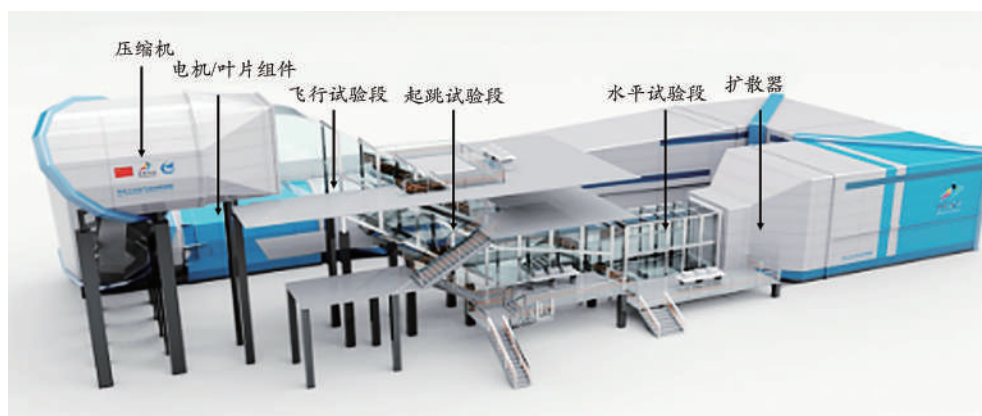


图1 回流式多试验段联通体育专用风洞结构示意图

Figure 1. Structural Diagram of Multi-Test Section Interconnected Sports-Specific Return Wind Tunnel

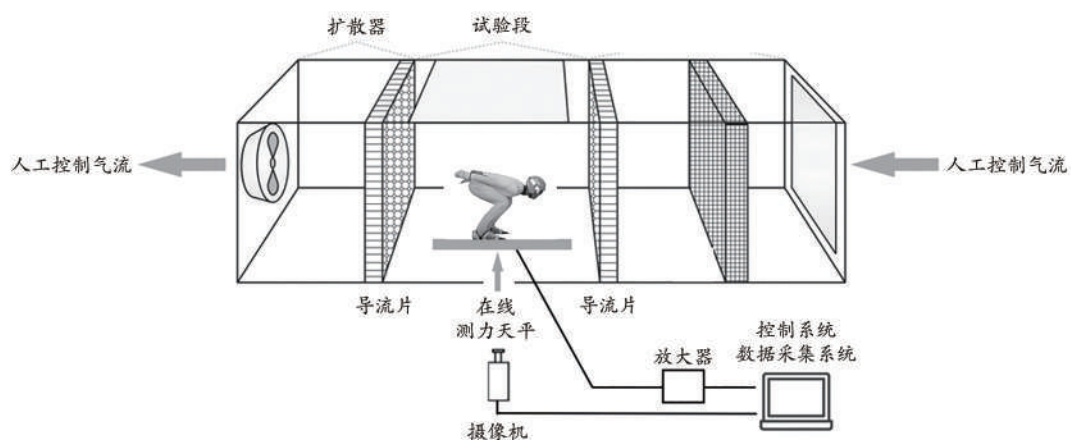


图2 水平试验段测试示意图

Figure 2. Schematic Diagram of Horizontal Test Section Test

### 1.3.2 风洞视频采集和分析

通过高清摄像系统(SONY AK700,日本)采集运动员不同姿势和动作的视频,采用视频分析系统(Dartfish 10 Classic,瑞士)对视频进行逐帧分析。

助滑中一般要求运动员在助滑时手臂贴紧躯干,膝

盖尽量弯曲,头部和背部尽量水平和保持下低姿态,同时下肢应具有较好的控制雪板的能力和稳定性,但由于运动员技术特点和身体特征原因,在助滑时出现不同的手部摆放姿势、头部方向、躯干倾斜、下肢伸展姿势,会在一定程度上对气动阻力造成影响,为此本研究进行了4种不

同静态助滑姿势的气动阻力评估(图 3a),以找到最优的助滑姿态。其中,头部姿态分为低头、平视、抬头 3 组,同时测量头部与铅垂线夹角  $\theta_1$ ;手部姿态分为水平伸展、垂直伸展、紧贴躯干后侧 3 组;躯干姿态分为水平和向下倾斜 2 组,测量躯干与水平面夹角  $\theta_2$ ;下肢姿态分为全蹲和半蹲 2 组,测量髋关节角度  $\theta_3$ 。



图 3 助滑(a)和起跳(b)姿势中测量的身体姿态角度示意图  
Figure 3. Diagram of Body Position Angles Measured during the In-Run (a) and Take-off (b) Phases

为考察不同起跳姿态对气动阻力的影响,起跳动态根据不同运动员(A1~A5)的中性姿态(即惯用动作姿态)进行区分,分别进行气动阻力测试。在不同起跳姿态下,同时分别测定髋关节角度  $\theta_3$ 、膝关节角度  $\theta_4$ 、踝关节角度  $\theta_5$ (图 3b)和运动员阻力参数。全程拍摄每名运动员 3 次测试视频,取测力最大值 1 次动作对应的视频进行后续的分析。

### 1.3.3 身体形态学测试

使用卷尺和体成分分析仪(Inbody 7.1, 韩国)对运动员进行清晨空腹的身高、体质量指标测试,并记录测试指标数据,根据公式计算 BMI。

### 1.3.4 关节活动功能测试

使用肌力角度测量仪(Hoggan MicroFET2, 美国)测量受试者主动髋关节角度,测试指标包括左髋屈、右髋屈、左髋伸、右髋伸、左髋内旋、右髋内旋、左髋外旋、右髋外旋,测试员手握测量仪置于髋部,要求受试者尽最大努力程度与其对抗,每个指标测试 3 次,取髋关节角度最大值。

### 1.4 统计分析

使用 OriginPro 2021 数据分析工作站进行数据分析和制图,应用 SPSS 23.0 进行差异显著性检验和相关分析;采

用皮尔逊相关系数分析法对运动员下肢特征数据和赛季跳台距离数据进行分析,  $0.5 \leq |r| \leq 1$  为具有高度相关,  $P < 0.05$  为具有显著性差异,  $P < 0.01$  为具有非常显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 助滑姿态风洞力学同步测试结果

#### 2.1.1 头部姿态

测试同一运动员在低头(图 4b)、平视(图 4c)、抬头(图 4d)3 组姿态时的气动阻力,测试时要求运动员其他部位(手部、躯干、下肢)均尽量保持一致,并对头部与铅垂线夹角  $\theta_1$  进行测量。测试结果表明,在运动员平视( $\theta_1 = 90.4^\circ$ )时,气动阻力为 67.48 N,减阻效果最佳(图 4a),相对低头和抬头减阻率分别达到 14.19% 和 21.31%。运动员平视时,有利于空气从头盔上方和面部下方流过,而低头和抬头时,分别有头盔和面部阻挡气流流过,在脖颈处产生较大的气压差,从而产生阻力,因此在运动员保持助滑静态姿势头部平视时,相对具有较好的气动减阻效应。

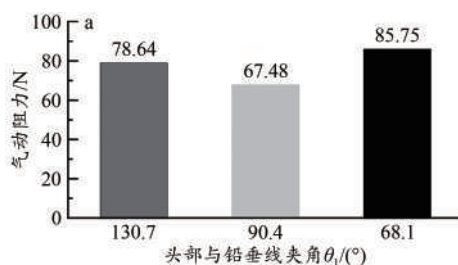


图 4 助滑中不同头部姿势的气动阻力比较

Figure 4. Comparison of Aerodynamic Resistance of Different Head Positions during the In-Run Phase

#### 2.1.2 手部姿态

对同一运动员手部水平伸展(图 5b)、垂直伸展(图 5c)和紧贴躯干后侧(图 5d)3 种不同手部位置进行测试。测试结果表明,3 种手部姿势气动阻力差别不大,在运动员手部保持水平时气动阻力减小效果最明显,相比手部垂直和放在躯干后侧减阻率分别为 5.20% 和 4.03% (图 5a)。研究结果表明,手部垂直伸展、水平向后伸展均有利于空气从手部、手臂和躯干顺利流过身体,并没有产生过多的压差和空气阻力;手部紧贴躯干后侧能够使手臂及手部与躯干完全贴合,从而缩小身体间的空隙,降低空气压差产生的概率,但要注意的是,如果将手部紧贴躯干后侧会造成手臂弯曲或使得滑雪服出现褶皱,这种情况会在一定程度上改变空气阻力,因此应使手臂尽量保持舒展。研究结果显示,在运动员保持手部水平伸展姿态时,

气动阻力为 58.34 N, 相对具有最佳的气动减阻效应。

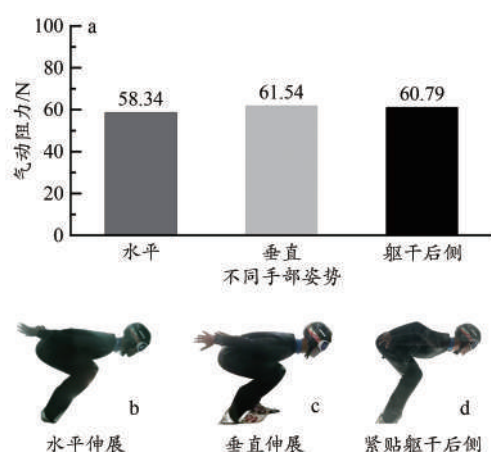


图5 助滑中不同手部姿势的气动阻力比较

Figure 5. Comparison of Aerodynamic Resistance of Different Hands Positions during the In-Run Phase

### 2.1.3 躯干姿态

测试运动员躯干水平(图6b)和躯干向下倾斜(图6c)的2种不同姿态的气动阻力,其中躯干水平是运动员训练和比赛助滑时最常用的姿态。研究结果显示,在运动员保持躯干水平姿态时,气动阻力为 57.34 N, 相对躯干向下倾斜(躯干与水平面的夹角  $\theta_2=12.8^\circ$ ), 减阻率达 11.42% (图6a)。研究表明,躯干保持水平是助滑时保持空气能高速流过身体的最佳姿势(Elfmark et al., 2021), 躯干向下倾斜通常是跳台滑雪运动员刚开始进行专项训练时容易产生的错误动作, 由于速度过快角动量产生不平衡, 躯干容易产生“往前扎”或“向后仰”的错误姿态, 这种姿态容易使背部前方产生一个空气高压区, 在后面产生低压区, 造成压差增大和空气阻力增大。

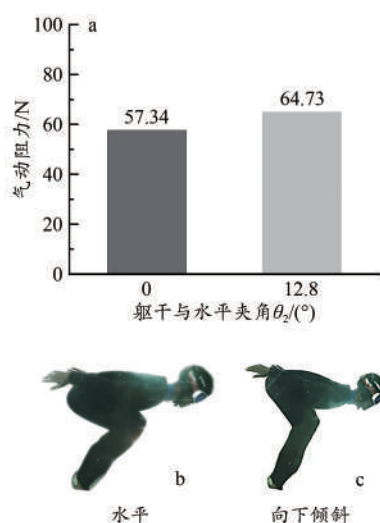


图6 运动员在助滑中不同躯干姿势的气动阻力

Figure 6. Comparison of Aerodynamic Resistance of Different Trunk Positions during the In-Run Phase

### 2.1.4 下肢姿态

测试同一运动员下肢全蹲(图7c)和半蹲(图7b)2组姿态的气动阻力及髋关节角度  $\theta_3$ 。测试结果显示, 在运动员保持全蹲姿态(髋关节角度  $\theta_3=37.6^\circ$ )时, 气动阻力为 62.57 N, 相对半蹲姿态(髋关节角度  $\theta_3=64.2^\circ$ )减阻率达 12.55% (图7a)。

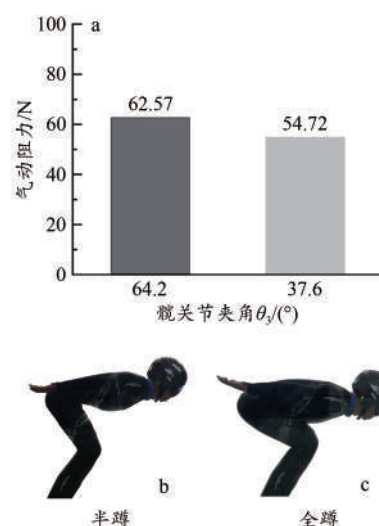


图7 助滑中不同下肢姿态的气动阻力比较

Figure 7. Comparison of Aerodynamic Resistance of Different Lower Limb Postures during the In-Run Phase

## 2.2 起跳姿态风洞力学同步测试结果

根据起跳动作分解姿态, 本研究将5名运动员的起跳蹬伸姿势分别命名为“髋膝变速同步式”“躯干水平同步式”“髋膝等速同步式”“髋带膝式”和“膝带髋式”(图8a~e)5种不同起跳动作模式。

### 2.2.1 关节角度变化

从起跳动作关节角度分析, 5名运动员在起跳过程中踝关节角度均变化不大, 踝关节角度  $\theta_5$  均保持在约  $60^\circ$ , 因为保持固定的脚踝和小腿的角度姿势对固定下肢发力和伸展方向非常重要, 会使得出台时身体的速度方向相对固定。相对而言, 5名运动员在起跳过程中的身体姿态差异更多表现在髋关节角度  $\theta_3$  和膝关节角度  $\theta_4$  的数值和变化趋势。其中, 髋关节角度  $\theta_3$  在整个伸展过程中都会由初始的  $60^\circ \sim 70^\circ$  到达完全伸展的  $180^\circ$ 。这个动作特征的原理是运动时髋关节角度应与下肢发力方向和速度一致, 以便在相同初速度上获得最大加速度, 否则会导致动作不同步, 造成能量损失和速度偏移。在整个起跳过程中, 膝关节角度  $\theta_4$  由初始的  $15^\circ \sim 30^\circ$  到达完全伸展的  $150^\circ \sim 180^\circ$ , 膝关节张开速度反映了蹬伸的速率, 进而在很大程度上决定了身体整体获得的加速度。这就要求膝关节角度  $\theta_4$  变化的大小、速度和时机应与髋关节角度  $\theta_3$  变化同步, 才能使动作的能量得到最大节省。

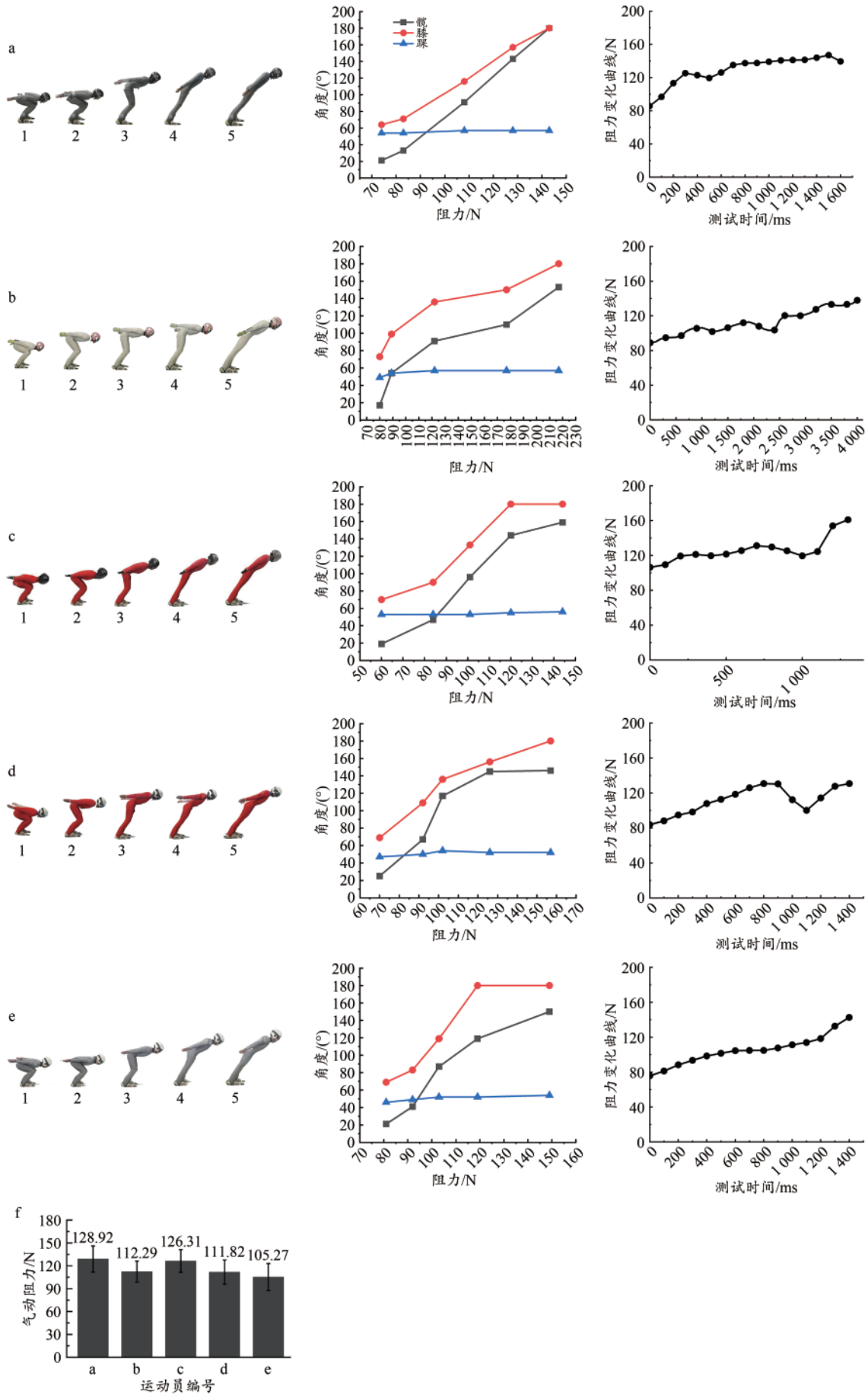


图8 不同运动员在起跳中动作姿态的气动阻力比较

Figure 8. Comparison of Different Movement Postures and Aerodynamic Resistance of Athletes during the Take-off Phase

### 2.2.2 空气阻力变化

从空气阻力角度分析,首先,在起跳初始的助滑时,应使髋关节角度 $\theta_3$ 和膝关节角度 $\theta_4$ 尽量降低,采用更低的蹲踞式姿势,从而降低阻力系数。其次,在整个起跳过程的下肢蹬伸在保证躯干完全打开的情况下应尽可能提高速度,以减小身体变化带来的空气阻力,同时在起跳过程中身体各部位动作的同步性可以降低压差,减小整体的气动阻力。

通过对5名运动员的起跳姿态和阻力数据对比分析可以看出,当运动员助滑蹲踞式姿态髋关节和膝关节角度最低时,起跳起始时的气动阻力也较低(图8a、图8e)。1)运动员采用“髋膝变速同步式”(图8a)起跳动作模式时,气动阻力在前程有所波动,后程整体变化平稳,但平均水平较高,推测是由于起跳全程的躯干髋关节张开速度快而下肢蹬伸速率较慢,导致躯干阻力分布不均匀,躯干受力面积过早增大造成。2)运动员采用“躯干水平同步式”(图8b)起跳动作模式时,在起跳前、中程躯干保持水平以减小阻力,髋关节的变化主要来自于下肢的蹬动,因此在起跳前半程髋、膝关节具有较好的同步性,空气阻力较低变化不大;但由于运动员起跳后程需要将髋关节快速打开,造成空气阻力突然升高,对全程的空气阻力平均值有一定影响。3)“髋膝等速同步式”(图8c)是运动员较常采用的起跳动作之一,运动员在起跳前、中程膝关节与髋角度同步变化增大,在后程保持姿态不变蹬出跳台,由于前、中程身体姿态变化速度较快,后程姿态变化速率慢,会引起气流变化不均匀,造成起跳后程空气分子的积累效应引起的压差增大,造成空气阻力升高。4)运动员采用“髋动带膝式”(图8d)进行起跳时,首先使髋关节张开,带动下肢蹬动,由于髋关节张开较早,在后程躯干基

本保持一定倾斜度不变,而膝关节进行蹬伸。这种模式由于起跳前程躯干张开过早,会造成空气阻力增加,中程由于下肢从蜷缩到伸展,阻力有所降低,后程由于膝关节蹬伸造成空气阻力上升。5)运动员采用“膝动带髋式”(图8e)进行起跳时,先进行髋、膝关节同步伸展,然后使膝关节加速伸展直至 $180^\circ$ ,同时带动髋关节角度缓慢上升,该起跳模式不仅有利于动力链的传递,而且整个起跳过程空气阻力基本保持稳定的缓慢上升,说明空气在身体流动性较好,未产生较大的气阻和压差,是保持稳定姿态和减阻的最佳起跳动作模式。

5种起跳动作模式过程中产生的平均空气阻力,“膝动带髋式”最小为105.27 N,“髋膝变速同步式”最大为128.92 N,最佳姿态的减阻率为18.34%(图8f)。由此,稳定的气动阻力变化曲线有利于运动员降低平均风阻并保持技术稳定,气动阻力变化曲线不够稳定主要由起跳后程出现较大的空气阻力上升导致,推测是由于动作造成的气流受阻,在后期空气分子的积累效应引起的压差增大,造成空气阻力增大引起。同时,蹬伸动作速率慢使空气阻力变大,运动员采用“躯干水平同步式”(图8b)起跳时,蹬伸时间延长至2倍以上,其整个起跳的平均风阻也会有所升高。

### 2.3 身体形态学和关节运动功能测试结果

本研究对5名测试对象的髋关节活动度(range of motion, ROM)进行测量(表2),并将测试数值和反映跳台竞技表现的赛季平均距离数值、反映体型特征的BMI等运动学特征指标和运动员起跳平均气动阻力进行相关性分析(图9)。结果表明,与起跳气动阻力显著正相关的指标有右髋屈ROM( $0.5 < r < 1$ ),显著负相关的指标有右髋内旋ROM、右髋外旋ROM、赛季平均距离( $0.5 < |r| < 1$ )。

表2 髋关节活动度  
Table 2 Hip ROM

	起跳气动阻力/N	左髋屈/(°)	右髋屈/(°)	左髋伸/(°)	右髋伸/(°)	左髋内旋/(°)	右髋内旋/(°)	左髋外旋/(°)	右髋外旋/(°)
A1	128.92	140.40	138.80	20.40	24.10	42.20	35.90	28.10	50.60
A2	112.29	147.50	162.30	20.40	14.60	26.60	28.10	46.80	41.60
A3	126.31	156.90	141.20	29.40	24.20	30.00	37.40	50.00	59.70
A4	111.82	155.90	145.50	23.20	17.30	59.40	51.60	49.20	54.00
A5	105.27	156.30	139.70	18.90	23.20	42.80	34.50	40.40	45.30
Avg.	120.20	151.40	145.50	22.46	20.68	40.20	37.50	42.90	50.24
SD.	11.63	7.26	9.74	4.18	4.44	12.93	8.64	9.09	7.12
CV	9.67	4.79	6.69	18.61	21.47	32.16	23.05	21.19	14.17

## 3 讨论

### 3.1 助滑和起跳专项技术特征与动力学特征的关系

跳台滑雪的专项技术特征与空气动力学和生物力学密切相关,因此研究跳台滑雪助滑和起跳专项技术的动力学特征对训练非常重要(胡齐等,2018)。运动员在助滑

道滑行过程中,要求其下肢和髋关节具有良好的控制力和平衡稳定性,以维持背部呈半流线型的蹲踞式姿态,获得较小的空气阻力系数,从而提高初速度(Bessone et al., 2019)。而且运动员双侧下肢肌肉需具备控制雪板稳定性的能力,维持左、右侧下肢平衡,从而在高速运动过程中降

低雪板触碰滑道边缘产生的摩擦力(Elfmark et al., 2021)。本研究发现,运动员在保持头部平视、躯干水平、手部水平伸展和深蹲的蹲踞式姿态助滑时气动阻力最小。

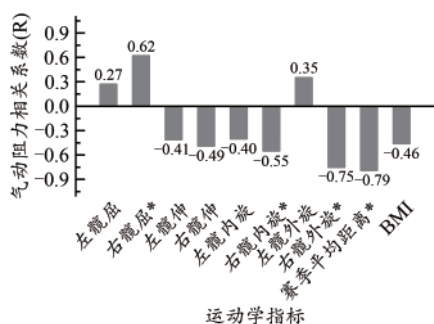


图9 运动学特征与气动阻力相关系数

Figure 9. Correlation Coefficients between Kinematic Characteristics and Aerodynamic Resistance

注:\*表示  $P < 0.05$ 。

跳台滑雪的起跳专项技术较为复杂,由于气动力和初始速度因素综合影响,运动员在起跳前、后过程存在微妙的角动量变化,需要通过动作和姿态调整达到平衡(谭旭男等, 2022)。同时,在起跳动作过程中尽量减小空气阻力,增加空气升力,以达到最佳气动减阻效应,否则会出现姿态偏移、失衡和能量损失,造成速度降低(Vodicar et al., 2010)。采用运动员起跳时的分解动作示意图(图 10)分析了力学和气动阻力变化规律,在助滑时雪板和助滑道产生摩擦力和气动力的合外力作用点相较于身体重心偏后会产生前旋角动量  $M_1$ ,在起跳过程中运动员需将躯干重心前移以产生后旋角动量  $M_2$  与之平衡( $M_1 = M_2$ )。此时,运动员也需调整身体姿态使上、下半身的气动力角动量达到平衡,这样才能获得向前的稳定姿态,而不会使身体出现旋转。同时,运动员在起跳时膝关节需要借助肌肉爆发式的伸展以获得垂直向上的飞行加速度,增加气动升力(Logar et al., 2015)。在飞行初始阶段,身体重心相对合外力作用点靠前,会持续产生前旋角动量  $M_4$ ,运动员需要在飞行初期用脚踝的肌肉力量控制雪板前端上提,使整体获得额外增加的空气阻力,让雪板产生更多的后旋角动量  $M_3$ ,使得前、后旋角动量完全补偿( $M_3 = M_4$ ),从而达到飞行初期的稳定状态,否则容易造成起跳后躯干向前旋转摔倒。

本研究表明,风洞测试的 5 种不同起跳姿态中,“膝动带髌式”具有最佳的气动减阻效应,运动员在使用该起跳动作时平均气动阻力最低(105.27 N)且赛季跳台平均距离为最佳(91.6 m),证明该动作模式亦具有较好的应用效果。本研究发现,采用“膝动带髌式”式起跳时,膝关节与髌关节的快速伸展存在 320~350 ms 的时间差,由于运动员在起跳时先由膝关节向下蹬动,对跳台地面瞬间产生压力,髌关节再随着下肢受到的反向作用力向上进行自

然向前伸展,有利于动力链的传递和起跳过程中运动员将躯干重心前移以产生前旋角动量  $M_2$ ,使角动量平衡,从而使得躯干伸展保持和速度方向一致,对减少能量损失尤其重要。相对而言,虽然在起跳过程中躯干保持水平是一种减阻效果较好的姿势(图 8b),整个起跳过程获得的平均气动阻力也仅为 112.29 N,但由于躯干伸展和膝盖蹬动方向即合力方向不一致,会造成较大的速度损失,最后导致跳台赛季平均距离变短。此外,采用“膝动带髌式”起跳时,由于动力链得到了优化,整个起跳过程的流畅性和稳定性增加,而气动阻力变化曲线也趋于稳定,这样有利于运动员降低平均风阻并保持技术稳定。同时,相比于爆发式的双腿蹬动,延长下肢蹬动时间更为有利。相对于其他 4 种起跳动作模式,“膝动带髌式”的整个起跳过程空气阻力基本保持稳定的缓慢上升,未出现较大的升高或降低变化。

### 3.2 影响气动阻力的竞技特征因素

跳台滑雪作为技术类主导项群的项目,具有项目时间短、速度快、表现难度大、细节丰富等特征,因此影响运动员的跳台滑雪竞技表现的因素是多方面的,除了专项技术特征会直接影响气动阻力之外,身体形态特征、运动功能特征、心理和场地环境等其他因素也会对气动阻力产生间接影响(Janura et al., 2010; Rybakova et al., 2020)。

#### 3.2.1 身体形态

运动员通过训练期的减重保持身体形态的流线型和合理的 BMI 对助滑和起跳气动减阻非常重要(Ostachowska-Gąsior et al., 2021)。有研究表明,运动员每减少 1 kg 体质量跳台距离可以增加 3.5 m 标准跳台距离(Virmavirta et al., 2001)。身体形态对助滑姿势也具有重要影响,本研究发现,当运动员下肢和躯干肌肉过于发达或柔韧性较差,采用蹲踞式助滑姿态时会造成背部不够平直(图 6c)和膝关节不够下压(图 7b)的情况,不利于保持正确的滑行姿态,导致空气阻力增加。在技术动作特征方面,助滑动作下肢保持稳定可以降低因雪板碰撞滑道产生的摩擦力,同时保持蹲踞式姿态获得较小的空气阻力系数,使得初速度提高,起跳衔接的流畅性非常重要,当起跳流畅性降低时,身体两侧和躯干所受到空气流分布不均匀,产生压差,造成气动阻力的升高。

#### 3.2.2 运动功能特征

在运动功能特征方面,髌关节 ROM 作为运动员的先天遗传和后天训练获得的身体条件,在跳台滑雪的起跳技术中具有重要作用(赵玉华等, 1990)。运动员在助滑和起跳整个过程中会进行髌屈和髌伸动作,髌关节活动程度对运动员能否做到正确的减阻姿势非常重要,髌关节 ROM 过大,容易造成髌伸或髌屈动作不稳定;髌关节 ROM 过小,起跳时会出现难以快速地将髌关节完全伸展的情况(Brock et al., 2017)。可以通过身体功能性训练改善髌关



节ROM(王雄等,2014)。有关国内北欧两项运动员的研究表明,髌屈伸和内旋ROM与跳台滑雪运动表现和稳定性具有正相关性(刘钰等,2022)。针对跳台滑雪奥运冠军

运动员的研究发现,髌关节角速度的提升会使雪板和助滑道之间的摩擦力更小,在起跳时动作的空气动力学评价更优,从而获得更远的飞行距离(Ettema et al., 2016)。

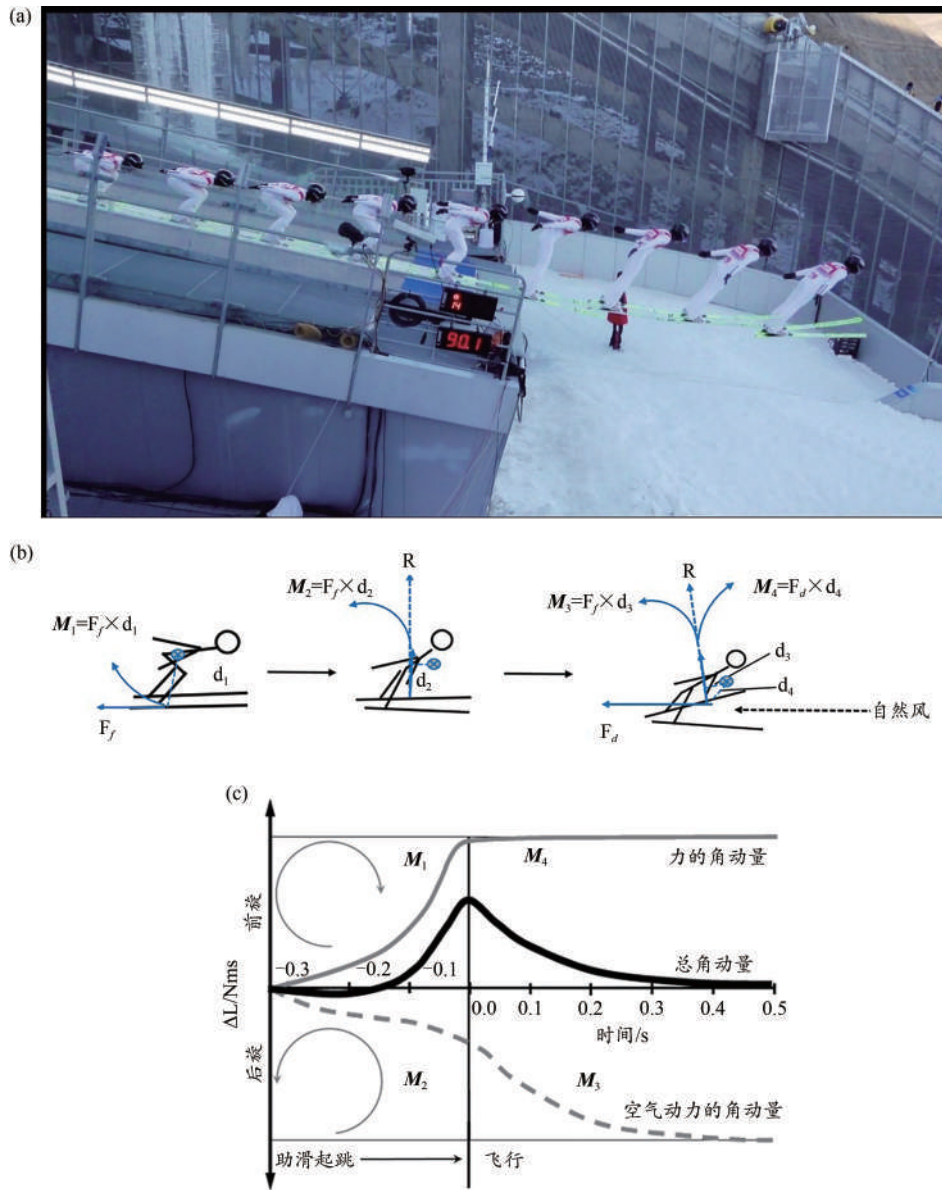


图10 运动员在助滑起跳时的动力学特征和原理示意图

Figure 10. Schematic Diagram of Dynamic Characteristics and Principles of the Athlete during the In-Run and Take-off Phases

本研究发现,起跳气动阻力减少对运动员赛季平均距离增加有正向影响;相比于左髌,右髌(惯用侧)的运动功能特征会对气动阻力具有更大的影响,而髌关节的内外旋ROM增加可以降低气动阻力,屈伸ROM增加会增加气动阻力,这种现象可能是由于髌关节的内外旋提升了运动员在起跳时的身体微调能力,降低了起跳角动量不平衡引起的气动阻力上升概率,而髌屈伸ROM增加会导致起跳髌关节变化过大,造成姿态的不稳定,从而增加气动阻力;本研究还发现,BMI越高对气动阻力降低越有帮助,推测可能是由于具有较高跳台滑雪技术水平的北

欧两项运动员其越野滑雪也较好,身体较为健壮的原因。

### 3.2.3 心理和场地环境

心理和场地环境是影响跳台滑雪竞技表现的重要因素之一。由于跳台滑雪速度非常快(Virmavirta et al., 2005),在起跳过程中只有1~2 s可用于调整姿态,而姿态调整的效果直接影响气动阻力的变化。运动员需要具备沉着冷静的心态、专注的注意力和果断的判断力。通常可以选择在风洞中进行反复训练模拟比赛场景,从而提高运动员对高速产生应激状态的生理适应性,提升心理调节和控制能力。此外,跳台滑雪的起跳和飞行的气动特征

非常依赖于自然风的风速和风向。研究表明,风速  $>4$  m/s 时跳台滑雪运动员受到的气动阻力影响要大于风速  $<2.5$  m/s 时(胡齐等, 2020); 同时,不同的风向也会对升力、阻力和俯仰力矩等参数造成影响,而跳台场地中的环境风况变化比风洞中的人工模拟更加复杂。因此应在风况变化的天气,更加注意运动员的助滑和起跳姿势,将不利因素降至最低。

#### 4 结论

1) 专项技术特征是影响气动阻力的直接因素。在助滑姿势方面,头部、手部、躯干、下肢姿态会对气动阻力均有一定影响。运动员在保持头部平视、躯干水平、手部水平伸展和全蹲的蹲踞式姿态进行助滑时气动阻力最小。在起跳姿势方面,采用“膝带动髋式”气动阻力最优。

2) 身体形态特征、运动功能特征、心理和场地环境是影响气动阻力的间接因素。运动员通过训练期减重保持身体形态流线型和合理的 BMI,从而对助滑和起跳气动减阻产生有利影响;髋关节的内外旋 ROM 增加可以降低气动阻力,屈伸 ROM 增加会增加气动阻力;运动员心理调节和控制能力的提升有助于提高高速环境下的动作流畅性;在不同风况下制定不同的比赛战术,注重调整运动员的助滑和起跳姿势,可以提升运动员的临场表现。

3) 利用风洞能够有效开展不同姿态的气动减阻效应测评研究,在风洞中进行反复训练和模拟比赛场景,对提高运动员在高速下产生应激状态的生理适应性,减小运动员助滑起跳的空气阻力,优化能量分配,改进训练策略,提升运动员技术能力具有重要意义。

#### 参考文献:

- 柏开祥,郑伟涛,王德恂,等,2007.基于风洞试验的帆翼空气动力性能研究[J].首都体育学院学报,19(4):28-31.
- 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.
- 刘钰,张栋,陈聪航,等,2022.我国北欧两项运动员运动功能特征对跳台滑雪专项技术和运动表现的影响[J].首都体育学院学报,34(2):141-151.
- 柳燕,2000.速度滑冰空气阻力的实验研究[J].哈尔滨体育学院学报,18(2):108-112.
- 谭旭男,周越,曲峰,等,2022.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[J].中国体育科技,58(1):38-45.
- 汪晓阳,宋景茂,王蜀东,等,1985.自行车运动阻力因素之研究:人、车实体风洞实验[J].体育科学,5(2):81-85.
- 王雄,刘爱杰,2014.身体功能训练团队的实践探索及发展反思[J].体育科学,34(2):79-86.
- 王志选,李润,关佐恒,等,1998.跳台滑雪空中飞行初始姿态的实验研究[J].体育科学,18(2):55-58.
- 张栋,资薇,陈聪航,等,2022.中国北欧两项运动员核心竞技能力特征及训练策略分析[J].首都体育学院学报,34(3):321-332.

- 赵玉华,孟群,关聪,1990.高山和跳台滑雪运动的肌肉工作分析[J].哈尔滨体育学院学报,8(2):62-65.
- BARELLE C, RUBY A, TAVERNIER M, 2004. Experimental model of the aerodynamic drag coefficient in Alpine skiing[J]. J Appl Biomech, 20(2): 167-176.
- BESSONE V, PETRAT J, SCHWIRTZ A, 2019. Ski position during the flight and landing preparation phases in ski jumping detected with inertial sensors[J]. Sensors (Basel), doi: 10.3390/s19112575.
- BROCK H, OHGI Y, 2017. Assessing motion style errors in ski jumping using inertial sensor devices[J]. IEEE Sens J, 17(99):3794-3804.
- BROWNLIE L, 2021. Aerodynamic drag reduction in winter sports: The quest for “free speed”[J]. Proc Inst Mech Eng P J Sports Eng Technol, 235(4):365-404.
- ELFMARK O, ETTEMA G, 2021. Aerodynamic investigation of the inrun position in Ski jumping[J]. Sports Biomech, doi: 10.1080/14763141.2020.1871503.
- ETTEMA G, HOOVELD J, BRAATEN S, et al., 2016. How do elite ski jumpers handle the dynamic conditions in imitation jumps?[J]. J Sports Sci, 34(11):1081-1087.
- JANURA M, CABELL L, ELFMARK M, et al., 2010. Kinematic characteristics of the ski jump inrun: A 10-year longitudinal study[J]. J Appl Biomech, 26(2): 196-204.
- JUNG A, STAAT M, MÜLLER W, 2014. Flight style optimization in ski jumping on normal, large, and ski flying hills[J]. J Biomech, 47(3): 716-722.
- LOGAR G, MUNIH M, 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.
- OSTACHOWSKA-GĄSIOR A, PIWOWAR M, ZAJĄC J, 2021. Segmental phase angle and body composition fluctuation of elite ski jumpers between summer and winter FIS competitions[J]. Int J Environ Res Public Health, doi: 10.3390/ijerph18094741.
- RYBAKOVA E, SHUTOVA T, VYSOTSKAYA T, 2020. Sports training of ski jumpers from a springboard based on body composition control and physical fitness[J]. J Phys Educ Sport, 20(2): 752-758.
- SUMNER J, WATTERS C S, MASSON C, 2010. CFD in wind energy: The virtual, multiscale wind tunnel[J]. Energies, 3(5): 989-1013.
- SUPEJ M, SAETRAN L, OGGIANO L, et al., 2013. Aerodynamic drag is not the major determinant of performance during giant slalom skiing at the elite level[J]. Scand J Med Sci Sports, 23(1): e38-e47.
- SVOBODA Z, JANURA M, CABELL L, et al., 2011. Kinematic analysis of the flight phase of the Nordic combined and ski jump on a large hill (HS-134 m) during the 2009 Nordic World Ski Championships[J]. Acta Bioeng Biomech, 13(1): 19-25.
- VIRMAVIRTA M, ISOLEHTO J, KOMI P, et al., 2005. Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition[J]. J Biomech, 38(11): 2157-2163.
- VIRMAVIRTA M, PERTTUNEN J, KOMI P V, 2001. EMG activities and plantar pressures during ski jumping take-off on three different sized hills[J]. J Electromyogr Kinesiol, 11(2): 141-147.
- VODICAR J, JOST B, 2010. The factor structure of chosen kinematic characteristics of take-off in ski jumping[J]. J Hum Kinet, 23(1): 37-45.

(收稿日期:2022-08-11; 修订日期:2023-04-23; 编辑:尹航)