



## 冬季运动项目气动减阻的风洞实验研究进展

胡齐<sup>1,2</sup>, 刘宇<sup>1</sup>

(1. 上海体育学院 运动健康学院, 上海 200438; 2. 国家体育总局体育科学研究所, 北京 100061)

**摘要:**冬奥赛场是一个竞争极度激烈的体育环境,细微的运动表现提升也会影响许多运动项目的最终名次。在跳台滑雪、速度滑冰、高山滑雪和雪车等高速运动中,气动阻力是一个重要阻力,同时也是越野滑雪、冰球和单板滑雪障碍追逐等项目运动表现的重要决定因素。研究阐述了冬季运动项目中气动阻力以及风洞实验方法,并系统梳理了近20年来冬季运动项目气动减阻的风洞实验研究成果,从中总结凝练了冬季运动项目气动减阻的技术方案,涉及跳台滑雪、雪车、钢架雪车、雪橇等冬季运动项目。

**关键词:**空气动力学;减阻;风洞;实验研究;冬季运动

**中图分类号:**G804.6 **文献标识码:**A

冬奥会自1924年开始举办以来,迄今参赛人数已增长超过10倍,比赛项目数也增长将近6倍。如1998年长野冬奥会有2176名运动员参加了14个大项的68个小项,而2022年北京冬奥会有2892名运动员参加了15个大项的109个小项。在过去的20多年里,冬奥会运动员和比赛项目数量分别增加了32.9%和60.3%。随着竞争愈发激烈,运动员通常会通过科学训练、膳食营养、服装和装备等途径寻求比其他竞争对手更大的优势,而采用能够减少气动阻力的服装、装备和身体姿势同样也是提高成绩的一个潜在优势,尤其是对奥运会级别运动员的运动表现提升。

除冰壶和花样滑冰外,气动阻力在大多数冬季运动项目成绩中起重要作用。在根据特定距离的完赛时间进行排名的运动项目中,如雪车、速度滑冰和滑降等,气动减阻带来的好处是得到公认的。如Saetran等(2008)认为气动阻力占据了速度滑冰运动员总阻力的80%。在其他冬季运动项目中,气动阻力的影响更为微妙,例如在单板滑雪障碍追逐项目比赛中,运动员采取紧紧跟随领先者并在阻力较低时超越领先者的策略,就有可能决定一场比赛的胜负。在2018年平昌冬奥会男子双人雪车比赛中,经历4轮竞争后,德国队和加拿大队并列获得金牌(总时长均为3:16.86),而铜牌队伍仅落后0.05 s(0.025%)。鉴于在许多比赛中,胜负仅在毫厘之间,规则允许范围内的气动减阻给运动员带来的绝不仅仅是“微不足道”的优势,而且不需要运动员额外训练来激发运动潜能(Brownlie et al., 2004, 2012, 2020a; Kyle et al., 2004)。综上,本文通过系统地梳理近20年来冬季运动项目气动减阻的风洞实验研究成果,以期

对冬季运动项目气动减阻技术有一个清晰全面认识,并提出进一步提升运动员运动表现未来可能的研究方向。

### 1 冬季运动项目中气动阻力

根据牛顿第二运动定律、第三运动定律,大多数冬季项目运动中运动员受到各种力的合力作用,包括:1)通过冰鞋、雪杖、雪板等推离地面爆发产生的地面力;2)其他地面力,包括地面法向力和与冰或雪的摩擦;3)气动阻力与气动升力,包括风的影响;4)重力(表1)。如果运动员在空中,没有地面法向力存在,重力的作用是竖直向下拉。此外,下坡时重力可以帮助运动员,上坡时阻止运动员,在平地上不起作用(Melzi et al., 2016; Norstrud, 2008)。

对一个力学分析主体(如运动员)的气动阻力 $F_D$ 由公式(1)表示:

$$F_D = 1/2 \times \rho \times U^2 \times A \times C_D \quad (1)$$

其中, $\rho$ 为空气密度( $\text{kg/m}^3$ ), $U$ 为气流速度( $\text{m/s}$ ), $A$ 为运动员迎风横截面积( $\text{m}^2$ ), $C_D$ 是无量纲阻力系数,乘积( $1/2 \times \rho \times U^2$ )为来流动压 $Q$ ( $\text{Pa}$ )。迎风横截面积和阻力系数的乘积称为阻力面积 $C_D A$ ( $\text{m}^2$ )。在未进行迎风横截面积测量的实验中,阻力测量值通常被记录为 $C_D A$ 值。

收稿日期:2022-06-26; 修订日期:2022-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11802068);国家体育总局体育科学研究所基本科研业务费资助项目(基本19-06)。

第一作者简介:胡齐(1985-),男,副研究员,硕士,主要研究方向为体育工程、空气动力学、运动生物力学,E-mail: hqbuua03@126.com。

表1 冬季项目运动中需考虑分析的力  
Table 1 Forces to be Considered in Winter Sports

奥运会项目	运动员爆发地面力	与冰/雪摩擦力	重力	气动阻力	气动升力
跳台滑雪	√	√	√	√	√
雪车	√	√	√	√	—
钢架雪车	√	√	√	√	—
雪橇	√	√	√	√	—
速度滑冰	√	√	—	√	—
短道速滑	√	√	—	√	—
高山滑雪	√	√	√	√	—
越野滑雪	√	√	(-)上坡 (+)下坡	√	—
冬季两项	√	√	(-)上坡 (+)下坡	√	—
北欧两项	√	√	(-)上坡 (+)下坡	√	√
冰球	√	√	—	√	—
自由式滑雪	√	√	√	√	√
单板滑雪	√	√	√	√	√
冰壶	√	√	—	—	—
花样滑冰	√	√	(-)跳跃	—	—

注:(-)表示阻止运动员,(+)表示帮助运动员。

运动员的阻力系数受身体形状及表面特性等诸多参数影响,如身体长宽比(长径比)、身体表面粗糙度、流动条件(湍流的强度和长度尺度、肢体运动过程中发生的气流相互作用)、粘性阻力和形状阻力的相对贡献等。

气动阻力与空气密度呈线性关系。因此,在高海拔进行体育比赛时阻力相对减小,有利于提升运动员成绩。例如,目前速度滑冰单人长距离项目世界纪录均是在美国盐湖城的犹他奥林匹克速滑馆(Utah Olympic Oval)或加拿大卡尔加里奥林匹克椭圆馆(Calgary Olympic Oval)创造的,其海拔分别为1 380 m和1 048 m。

气动阻力与速度的平方成正比,功率与速度的立方成正比。随着运动员速度的增加,气动阻力成为向前运动的主要阻力。为了跑得更快,运动员要么增加功率输出,要么减少气动阻力。相较而言,减阻是一种更简单的途径,运动员可通过改变身体形状或运动服表面纹理来实现(Crouch et al., 2017)。

### 1.1 身体简化钝体的空气动力学

在多数运动中,运动员身体被简化为钝体,而非流线型体。因为身体几何形状的突变导致大规模的气流分离和身体后方明显的湍流尾流区,由大尾流产生的不完全压力恢复使得压力阻力占优势。相比之下,流线型物体靠近前缘逐渐变圆,越往后其横截面积和宽度逐渐变细,形成狭窄的后缘或尾部。流线型形状的阻力相对较低,且物体表面的气流分离倾向较少,而且大部分阻力是由平行于物体表面的黏性切向壁切向剪应力产生的,称为摩擦阻力(Crouch et al., 2017; D'Auteuil, 2010)。

通常,粗糙表面(如砂纸)能提供比光滑表面更大的摩擦阻力,因为粗糙表面阻碍了空气在物体表面的流动,并增加了边界层的厚度。对于简单的钝体形状,如圆柱体或球体,粗糙表面提供稍高的摩擦阻力。然而,在某些条件下,粗糙表面通过一个称为气流转捩的过程影响阻力系数,在物体上产生较低的综合阻力(D'Auteuil et al., 2010)。

压力阻力是物体前后表面压力差的结果。气压在物体前部的停滞流区域升高,在尾部区域降低,而气流正是在尾部区域与物体表面分离,留下低压尾流或空腔。压力阻力的大小与这些压差有关,通过对垂直于整个物体表面的表面压力分布进行积分,得到物体上的总合成压力。

虽然很难预测在复杂钝体(如运动中的运动员)表面上出现的多个气流分离位置,但在二维气流中,几何形状不太复杂的圆柱体上的气流分离是众所周知的。由于运动员伸展的肢体在横流中具有类似于锥形圆柱体的几何形状,因此在某些情况下,可以采用减小圆柱体阻力的方法来减小运动服四肢部分覆盖物上的阻力(Chowdhury et al., 2010; D'Auteuil et al., 2010)。

### 1.2 阻力系数与雷诺数

阻力系数( $C_d$ )量化了物体的空气动力效率,包括黏性和形状阻力、物体的尺寸、形状和几何形状、表面粗糙度和流动特性的综合贡献。例如,完全流线型人力交通工具(human-powered vehicle, HPV)的阻力系数可能非常低,仅为0.07,而竖立站立的越野滑雪运动员或横流中圆柱体的空气动力效率低得多,阻力系数约为1.0。横流中圆柱体空气动力学特征在于圆柱体的临界尺寸与雷诺数( $Re$ )的相关性(D'Auteuil, 2010)。无量纲雷诺数根据气流速度、物体的特征尺寸如横截面宽度 $d$ (m)以及运动学空气黏度 $\nu$ ( $m^2/s$ )量化了作用在物体上惯性气动力与黏性气动力的比值,如公式(2)所示:

$$Re = \frac{U \times d}{\nu} \quad (2)$$

其中, $d$ 为横流中手臂或腿的平均宽度或直径, $U$ 为最大肢体速度。有关减少运动员四肢阻力的研究大多关注的是 $Re > 10^4$ 的情况(D'Auteuil et al., 2010)。在此情况下,气流将在分离的剪切层或边界层中从圆柱体分离,这取决于从层流转捩到湍流的位置,出现阻力危机现象(D'Auteuil et al., 2010)。这种“阻力危机”通常发生在约 $Re=2 \times 10^5 \sim 5 \times 10^5$ 范围内,称为临界雷诺数范围( $Re_{crit}$ )(Achenbach, 1971)。 $Re_{crit}$ 范围内的边界层状态控制着圆柱体周围的表面压力分布。类似地,应用在运动中,当肢体处于横流中时,通过特殊纹理的弹力织物覆盖来改变其表面粗糙度,可将肢体的流型转换到与运动员在比赛期间的肢体直径和速度相匹配的 $Re_{crit}$ 范围内。

尽管圆柱体在 $Re_{crit}$ 范围内的阻力值可能会降低50%,但单肢的锥形形状及其相对于自由流的可变投影和倾斜度会将同等速度下单肢的最大减阻限制在约20%(Brown-

lie et al., 2004)。在过去的20年里,许多研究人员利用纹理细密的弹力织物在圆柱体(图1)、人体模型的肢体部分(图2)或运动员的肢体上引起阻力危机(Brownlie et al., 2004; Kyle et al., 2004; Oggiano et al., 2013)。通过身着

纹理明显的服装,实现了总阻力的最大程度降低,其中覆盖每个肢体部分的织物纹理高度与该肢体部分的运动速度和直径相匹配,以便在运动员运动期间始终如一地触发每个肢体部分的阻力危机。

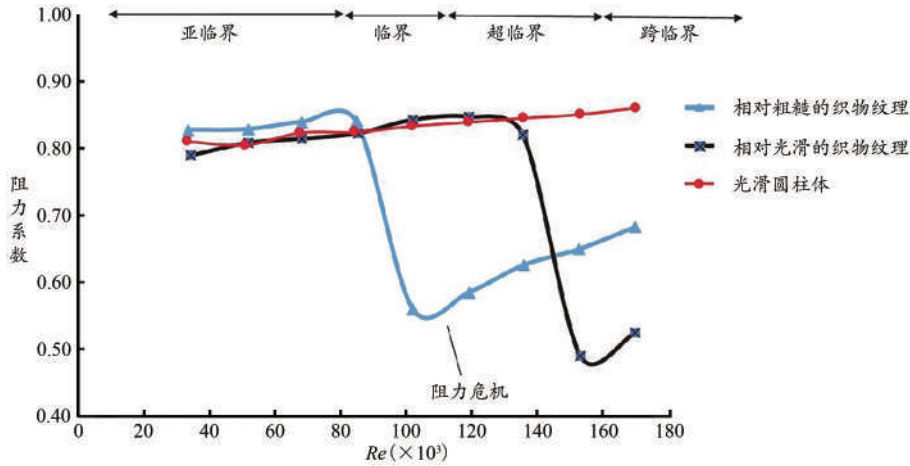


图1 两种弹力针织物对直径10 cm的垂直圆筒阻力系数的影响(kyle et al., 2004)

Figure 1. Effects of Two Stretch Knit Fabrics on the Drag Coefficient of a 10 cm Diameter Vertical Cylinder(kyle et al., 2004)

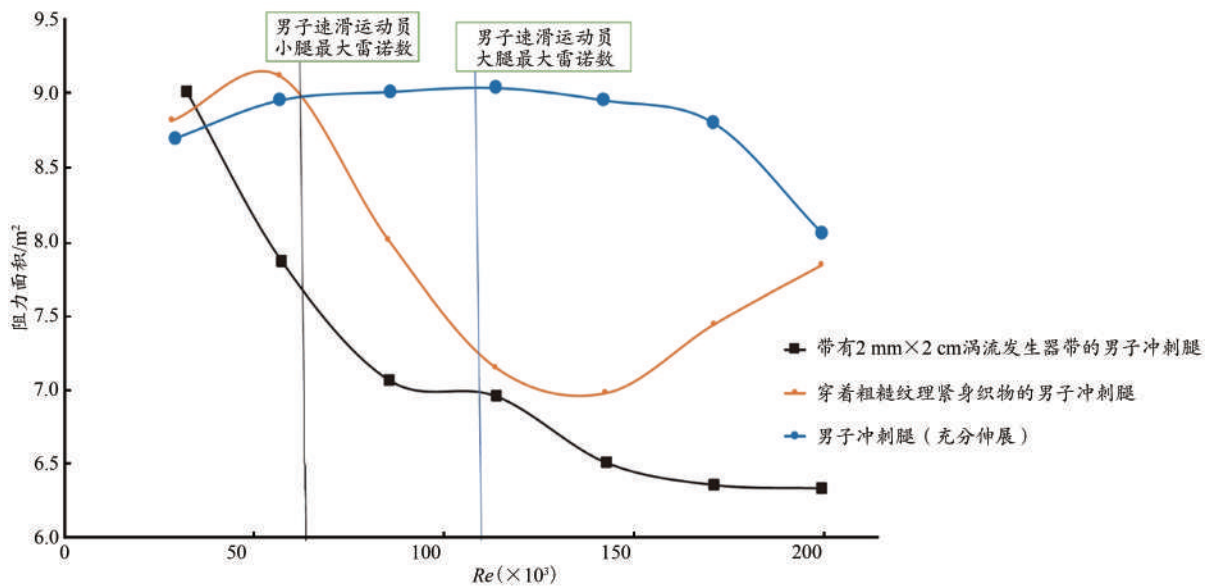


图2 弹力针织面料与总宽10 cm的VGs带对静态伸展腿部模型的阻力面积的影响(Brownlie et al., 2004)

Figure 2. Effects of a Stretch Knit Fabric and 10-cm Wide Strips of Vortexgenerators (VGs) on the  $C_D A$  of a Static Extended Leg Model(Brownlie et al., 2004)

图1显示了二维气流中2个覆盖织物的圆柱体和1个光滑圆柱体的  $Re_{crit}=2 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^5$  变化。该图顶部显示了纹理更粗糙的织物覆盖圆柱体的主要流型。不难发现,两种纹理织物都导致圆柱体在比光滑圆柱体更低的雷诺数下经历气流转换,在该研究中,由于风洞的最大风速有限,光滑圆柱体未能经历气流转换。虽然较粗糙纹理的织物会在较低的  $Re$  下导致阻力危机,但对于该圆柱体,最小  $C_D$  值和转捩后  $C_D$  值都偏高。尽管如此,质地较粗糙的织物是运动服装衣袖部分材质的更好选择,因为

减阻发生在较低的  $Re$ ,从而在较大的肢体运动速度范围内减小四肢的阻力。

从图2中可以看出,与裸腿相比,用粗糙纹理的紧身衣或涡流发生器(vortexgenerator, VG)带在横流中将单腿模型的表面粗糙化也能带来模型阻力面积( $C_D A$ )的减小。需要注意的是,图2代表的是理想化场景,忽略了可变几何形状和运动中腿部暴露所造成的限制、运动中肢体之间的气流相互作用以及自由流湍流的影响(Crouch et al., 2017)。



## 2 风洞实验方法

所有测量气动阻力的实验流程皆为了提供准确、有效和可重复的数据,之后根据实验数据选择气动最优的服装设计、装备或身体姿势。配备高精度天平的风洞是当前测量运动员或模型气动阻力最精确、最有效的方法。风洞是按一定要求设计的、具有动力装置的、用于各种气动实验的可控气流管道系统,是开展空气动力学方面研究的主要装置(刘政崇,2003;恽起麟,2000)。根据相对运动原理,风洞能够模拟运动员的高速运动状态,应用于运动员测试及训练、运动装备研发和场地局地环境风模拟。无论户外环境如何,许多与风相关的环境变量(风速、方向、湍流等级、相对湿度、温度和压力)在风洞内可测量可控。

风洞一般由动力段、稳定段、收缩段、试验段和扩散段组成。风洞按流动方式可以分为回流式风洞和直流式风洞两种基本类型(表2)。一般用于冬季运动项目风洞阻力测量的精度优于0.3%(Brownlie et al., 2016)。风洞也可以用于模型或运动员周围的气流可视化。常见的气流可视化技术包括羊毛簇、羊毛棒、热油烟或陶土气流可视化(图3)。在特殊情况下,通过粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)与测量运动员身后的压力来揭示气流的细微变化(Barlow et al., 1999)。

表2 用于冬季运动项目阻力测试的部分风洞的类型及尺寸

Table 2 The Type and Dimensions of Wind Tunnels Used for Drag Measurements of Winter Sports Athletes

风洞名称	所在地	类型	实验段尺寸/m	
			高	宽
加拿大国家研究中心风洞	加拿大渥太华	回流式	2	3
加拿大安大略大学技术研	加拿大奥沙瓦	回流式	2.9	2.4~4.5
究所风洞				
美国通用汽车公司风洞	美国沃伦	回流式	5.5	10.4
美国华盛顿大学风洞	美国华盛顿	回流式	2.4	3.7
加拿大不列颠哥伦比亚大	加拿大温哥华	直流式	1.6	2.4
学边界层风洞				
二七厂体育综合风洞	中国北京	回流式	3	2.5
日本体科所体育专业风洞	日本东京	回流式	3	2.5

### 2.1 风洞阻塞比

在回流式风洞中,风洞墙体会限制运动员或模型周围气流的位移,从而产生风洞阻塞效应。如果风洞阻塞比(运动员或模型的正面面积与隧道横截面面积的比例)超过5%,就需要使用阻塞校正系数。当测量滑行运动的运动员(雪车、雪橇和钢架雪车比赛)阻力时,会出现一种阻塞效应的特殊情况。由于这些运动员沿着宽140 cm的冰覆盖轨道滑下,若风洞要更加贴切模拟气流,就要求以气流方向排列的垂直壁放置在运动员的两侧(图4)。据估计,两侧墙壁会使模型的阻力增加2.5%~5%,尽管在之前试验中发现墙壁的存在会使女子雪橇阻力增加7.2%,并且使钢架雪车运动员阻力减小1.9%(Hastings, 2008;

Winkler et al., 2008)。

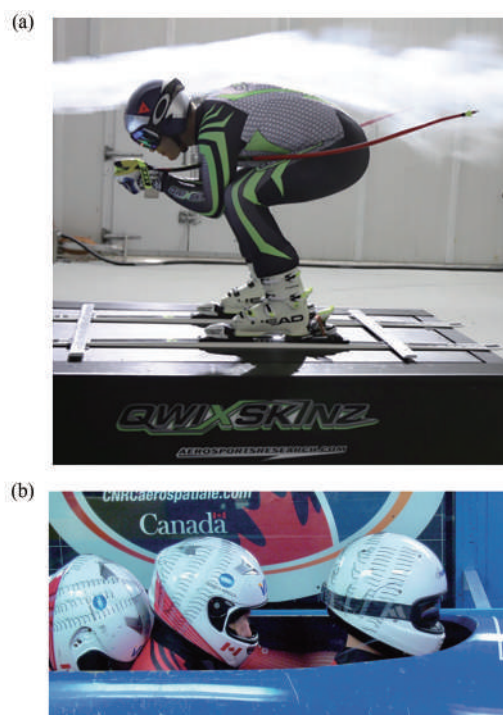


图3 (a)烟雾流过高山滑雪运动员(b)羊毛簇流动显示四人雪车运动员头盔后的气流分离(Brownlie, 2020a)

Figure 3. (a) Smoke Flow over an Alpine Skier and (b) Wool Tuft Flow Visualization of the Flow Separation behind a Four Man Bobsleigh Crew's Helmets (Brownlie, 2020a)



图4 钢架雪车风洞实验状态

Figure 4. Wind Tunnel Experimental State of Skeleton

### 2.2 边界层效应

在风洞实验中,地面和运动员或模型之间的边界层在户外和风洞中与静止地面的形式有很大不同,特别是靠近地面的运动,如车橇项目。在风洞中,隧道地板是固定的,边界层在测试区纵向增长。Katz(2006)注意到在美国通用汽车公司风洞的地板边界层厚度测量后为0.1 m,这至少会部分覆盖雪车车刃以及底部和大部分雪橇或钢架雪车的底部。

在风洞中,地板和雪车都是静止的,所以雪车底面和地板表面速度都接近0,在边界层区域上升到自由气流。边界层效应对于流速的影响将对气动阻力测量产生一个微

小但混杂的因素。为正确模拟在雪橇或雪车地面和赛道之间的气流情况,风洞地面的边界层应该被控制起来。控制边界层的常用方法包括:1)利用在模型前风洞地板上孔吸入边界层;2)在模型下面放置底板使其高于风洞地面;3)在模型下面使用活动底板。其中活动底板能够提供最真实的气流模拟,但这种设施通常只在大型车辆风洞中使用,较少用于冬季运动项目。

用于测量运动员或模型气动阻力的方法已经在多篇文章中介绍过,总的来说,运动员姿态风洞实验研究需要真人。由于运动员很难重新将姿态定位在完全相同的位置,故静态人体模型则可作为服装研发中的首选,它能够提供可重复的结果,尽管由于没有肢体动作会存在一定程度上的流场失真。此外,通过自行车座椅、腿部支撑架等改善冬季项目运动员重新定位,以便收集可重复的阻力数据(图5a、b)。在大多数风洞中,一旦试验风速超过约43.2 km/h(12 m/s),与运动员的口头交流就会失效。为了运动员的重新定位和沟通,可以将实时的阻力值、风速、实验进度和指令,例如“就位”和“放松”等,投影到运动员前面地板上(图5c)。对于需要高精度或运动员参与的测试,可以通过对运动员进行3D扫描来构建人体模型,并最终3D打印出人体模型部件(Brownlie, 2020b)。

### 3 风洞实验研究结果

系统梳理近20年来冬季运动项目气动减阻的风洞实验研究成果,包括跳台滑雪、雪车、钢架雪车、雪橇、速度滑冰、高山滑雪、越野滑雪、冰球、单板滑雪障碍追逐项目与自由式滑雪障碍追逐项目(编队)等。其中,钢架雪车、雪橇风洞实验研究结果的部分数据是本研究团队通过风洞实验研究获得的,尚未公开发表。

#### 3.1 跳台滑雪

跳台滑雪是一项非常刺激的雪上运动项目,运动员脚穿着特制的滑雪板,沿着跳台的倾斜助滑道下滑,借助速度和弹跳力跃入空中,并在空中飞行一段时间后在着陆坡上着陆。跳台滑雪过程通常分为4个阶段:助滑、起跳、飞行和着陆。空气动力学在这些阶段中均起着重要的作用,其中开展飞行阶段的空气动力学研究最多(胡齐等, 2020a, 2021; Gardan et al., 2017)。影响空气动力学的因素主要包括运动员/滑雪板系统的姿态、跳台滑雪服、滑雪板等(Virmavirta, 2016)。

尽管助滑速度是影响飞行距离的最重要的因素(Schwameder, 2008),但目前尚未针对助滑阶段开展广泛的研究。在助滑过程中,运动员的气动阻力应尽可能低,从而实现加速度最大化。Virmavirta等(2001)开展了不同运动员助滑姿势风洞试验发现,运动员的身高越高并不意味着其空气阻力越大。结果表明,两种运动员助滑姿势的气动特性有很大的差异,其中气动升力的差异更大。

Elfmark等(2021a)对8名世界杯运动员及15名洲际杯运动员在比赛中使用的助滑姿势进行风洞实验研究,测量其气动阻力。以偏好姿势滑行时,洲际杯运动员比世界杯运动员的平均阻力大15.5%。而在测试得出的最佳姿势中,两者差距为10.8%,且两组运动员从偏好姿势转换为最佳姿势后,阻力值均有所减小。从空气动力学角度来看,起跳非常关键,因为运动员总是需要在最大限度的提高垂直加速度和最小化气动阻力之间寻求平衡,在起跳时身体快速展开后完全暴露在空气中从而导致气动阻力迅速增加,但提高运动员对气动阻力主观感觉的最佳方法是在风洞中进行起跳实验测量与训练(王志选等, 1998; Muller, 2006; Virmavirta, 2017; Virmavirta et al., 2001, 2011)。

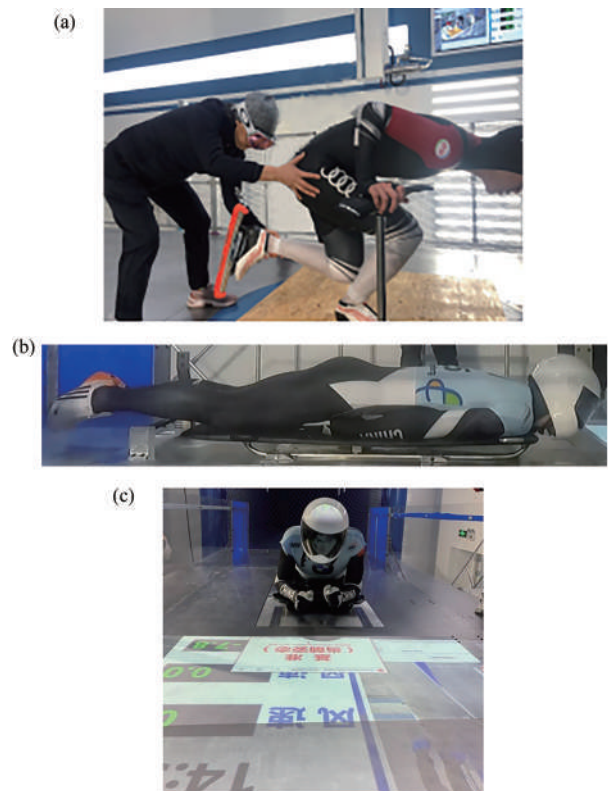


图5 (a)帮助速度滑冰运动员保持静态位置的自行车座椅  
(b)帮助钢架雪车运动员保持固定位置的腿部支撑  
(c)风洞实验投影显示

Figure 5. (a) A Bike Seat Used to Help a Cross-country Skier Maintain a Static Position, (b) Leg Supports Used to Assist a Skeleton Athlete Maintain a Constant Position, (c) Projection Display during Wind Tunnel Experiments

为了使气流经过滑雪板时更加平缓,在飞行过程中滑雪板气动特性在近年来越来越受到人们的关注(胡齐等, 2018; Seo et al., 2004)。Virmavirta等(2019a)通过风洞试验研究单个滑雪板空气动力特性,从测量结果可以看出,升力随着滑雪板夹角(V角)的增大而增大,而边缘角的有害影响似乎也随着V角的增大而增大。同时,具有零边角的大V角仍然改善了气动升力系数,但是,具有如此张开



宽度 $V$ 角的飞行姿态可能变得不稳定。有相关研究探讨了滑雪板长度和体重减少对飞行距离的综合影响,滑雪板最大长度不超过运动员身高的145%,前提条件是运动员身体质量指数(body mass index, BMI)至少达到21。对于BMI $<21$ 的运动员, BMI指数每减少0.125则对应的滑雪板长度需减少0.5%,但此时飞行距离的优势仍然是BMI每减小0.5飞行距离增加1 m左右,此调节手段仅仅抵消了35%~38%的低体重优势。这是因为滑雪板只覆盖了运动员/滑雪板系统的部分空气动力区域(Schwameder et al., 2002; Virmavirta et al., 2019b)。使用较短的滑雪板,特别是在早期飞行阶段,可能不允许运动员像使用较长滑雪板的运动员那样具有较强的前倾能力,但滑雪板长度减少的极限仍未知,高度依赖于运动员的个人技术特征与水平。

由于不断为运动员寻求气动特性更好的装备,跳台滑雪服的设计也发生了多次修改。跳台滑雪服主要影响飞行阶段的气动力,但也可能影响起跳速度,因此,过去的所有修改都改善了空气动力学效应(减小气动阻力或增加气动升力),增加了飞行距离(Hasegawa et al., 2018; Kataoka et al., 2020)。由于在连续多次风洞试验中运动员的姿态再现性较低,因此采用全尺寸模型进行跳台滑雪服研究(Chowdhury et al., 2011; Meile et al., 2006; Virmavirta et al., 2009),只能粗略估计空气流动中跳台滑雪服的适合性和气动情况。但通常修改前后的跳台滑雪服间的变化相对较小,导致预期的差异将被由于风洞中模型的连续修整之间的差异掩盖。Meile等(2006)重点比较了3种跳台滑雪服:紧身跳台滑雪服、符合现行规定的跳台滑雪服、适中尺寸的跳台滑雪服,研究发现,跳台滑雪服对空气动力特性影响较大,因为所研究的细小差异可能对飞行距离有决定性的影响。

### 3.2 雪车

由于雪车比赛的胜负通常仅在0.01 s之间,雪车的空气动力特性对比赛结果起着非常重要的作用。同时,在国际上已达成以下共识,即通过优化雪车的空气动力,使其气动阻力尽量减小,以此提高运动成绩(胡齐等, 2020b)。虽预估雪车车刃与冰面摩擦力在阻碍雪车前进的总阻力中占据主导,但通过风洞和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)研究确定气动阻力占雪车总阻力的20%~30%,而压力阻力约占气动阻力的80%(Winkler et al., 2008)。Sabbioni等(2016)开发了一个简易的雪车运动学数学模型,并指出阻力系数或雪车正面积减少10%,将为原本每圈用时(65.461 s)减少了0.279 s(占总用时的0.43%)。Lewis(2006)开发了一个类似的雪车减阻节省时间的数学模型,发现每减少3%的阻力,可省时0.10 s。通过全尺寸模型或缩比模型风洞试验研究,结合气流可视化CFD和PIV研究,能够尝试优化减少雪车及运动员气动阻力。

有研究发现,与躯干竖直姿态相比,让制动员前倾约 $45^{\circ}$ ~ $55^{\circ}$ (从垂直方向)能使双人或四人雪车的阻力降低3.5%~6%(Chowdhury et al., 2013; Dabnichki et al., 2006; Garcia-Lopez et al., 2014; Sciacchitano et al., 2018; Winkler et al., 2008, 2010)。前倾姿态减小了舵手身后的低压区,并减小了制动员头盔产生的湍流。但增加腔内压力的方法,如侧壁扩口或沿腔的顶部伸长司闸员的手臂,尚未被证明有效(Motallebi et al., 2004; Winkler et al., 2010)。其他一些研究表明,将缓冲器做成流线型或通过增加两个圆形隆起来改变整流罩前端并不能持续有效地在比赛速度下减小气动阻力(Chowdhury et al., 2013; Lewis, 2006; Motallebi et al., 2004)。

1)全比例风洞实验研究。由于缩比例模型试验可能会忽略结构细节,或者仅能提供雪车或雪车+运动员整体的粗略近似值,在设置了模拟赛道挡板的风洞中测量了全比例双人和四人雪车(包含/不包含运动员)的气动阻力。将刺绣线束应用于整个雪车的气流可视化显示,舵手的头盔后方及四人雪车中的第2、3名运动员之间存在明显的湍流(图3b)。虽然应用于整流罩的丝线显示出普遍附着流,但仅仅是整流罩以及头盔上示踪所用丝线的存在也足以使整个雪车的阻力分别增加5.5%和2.2%(Brownlie, 2020a),这表明雪车表面的瑕疵在其整体所受阻力中起着重要作用,也证明了运动员头盔露出整流罩部分以及雪车表面纹理对雪车整体阻力的重要性。

2)头盔改进。为了减少舵手头盔的阻力,所有凸起的表面和通风孔都被去掉,所有孔或开口都用薄而光滑的胶带粘住。为了减少护目镜带的阻力,将其部分贴在头盔上。通过这些调整改进,雪车阻力减少了1.7%(Brownlie, 2020a)。

3)乘员姿势调整。另一种减少四人雪车阻力的方法是让第2名运动员将腿放在舵手周围,而非其身后,来缩小舵手与第2名运动员的间距。在第2名运动员保持相同姿势情况下,缩小舵手和第2名运动员的间距使雪车阻力降低了1.6%。在双人雪车中,将雪车的座位高度提高10 cm,并向前移动10 cm,雪车阻力能够降低1.5%~2.0%。如果舵手向前移动,使头盔前部和整流罩前部开口之间的间隙最小化,雪车阻力将减少2.4%~4.2%,因为更多的气流将被引导到整流罩两侧开口周围区域。此外,在双人雪车中,有研究分别测量了3名不同制动员的雪车阻力,每名制动员的身体尺寸不同,但在雪车上测量出的阻力并没有显著差异,该结果使最终的奥运参赛运动员选择由其他参数决定,如推车时间,而非制动员的气动阻力(Brownlie, 2020a)。

4)雪车改装。在某款双人雪车上,整流罩前部和后部间有一个大的开口间隙(5 cm),用胶带封住这个间隙可以将雪车的阻力降低4.5%。但对于间隙小于1 cm且具有锥形边缘的其他雪车来说,用胶带密封间隙不会显著降

低阻力。在运动员乘坐的车腔里贴上一个充气密封的塑料气囊,以减小双人雪车中制动员后方低压区的大小。试验观察到气囊阻挡了通过车腔的气流,这种构型的阻力比基准阻力高4.3%,还观察到气囊被从车鳍后面卷进来的漩涡猛烈撞击(Brownlie, 2020a)。尽管这不是理想的结果,但研究表明,延长车鳍并让略微向内弯曲可能会减少雪车阻力。Ubbens等(2016)研究了双人雪车前、后整流罩间间隙对其气动特性的影响,风洞实验表明,由于前部迎风面积的扩大和气流进雪车空腔内的不利影响,雪车弯道旋转会增加气动阻力。此外,Gibertini等(2010)通过风洞实验评估雪车车身底部与赛道冰面的间隙高度对雪车气动性能的影响,测试结果表明,改进后雪车间隙高度在70 mm时阻力最小。

从风洞实验研究结果不难发现,通过1)消除舵手头盔上的突起,2)戴面罩而非护目镜,3)减小舵手与第2名运动员的间距,4)最小化舵手头部和整流罩之间的距离,5)减小整流罩前后间隙距离,6)延伸和重塑雪车尾翼,都会显著影响雪车的阻力。风洞试验有助于确定雪车/运动员组合系统的阻力最优值。上述调整方法将使雪车阻力降低3%以上,并可能会对比赛名次产生重大影响。

### 3.3 钢架雪车

与雪车不同,钢架雪车中运动员承受了车体和运动员组合系统的大部分阻力。Zanoletti等(2006)认为推车阶段的速度以及驾驶技能是该项目运动表现的主要决定因素,但Roberts(2013)认为钢架雪车比赛在空气动力学方面仍有很大的改进空间。到目前为止,还未有已发表的研究考虑到在比赛的推车阶段,腿部和手臂的气流转换对比赛用时的影响。由于国际雪车联合会规则限制了钢架雪车和运动员鞍座的尺寸和结构,从而限制了部分空气动力学优势,故风洞试验研究的重点是通过改变运动员的姿势、竞速服装的尺寸、材料和头盔的形状来减少气动阻力。

通过风洞试验可以帮助运动员确定他们的阻力最小姿态,在试验过程中通常可以观察到阻力降低5%~10%。运动员在钢架雪车上的最佳姿态是非常个性化的,但通常包括伸直手臂和限制手部暴露,同时不抬高臀部。一些运动员的阻力最小姿态是双腿略微分开,而另一些运动员则是双腿并拢。在所有情况下,在橇上向前移动5~10 cm时,脚趾向后指是有利的。穿着个性化定制比赛服的运动员可以减少6%~11%的阻力,而由低透气性织物制成的比赛服可以为运动员减少约4%的阻力(Brownlie, 2020a)。

### 3.4 雪橇

决定雪橇比赛成绩的主要因素有出发时间、出发段后速度以及驾驶技术(Bruggemann, 1997)。Sakai(2013)针对1998年长野冬奥会男子单人雪橇比赛进行分析发现,若第16名运动员想赢得比赛,需将气动阻力降低13.3%,或

将初始推进速度提高1.6%,四轮比赛将一共提高3.867 s(1.91%)。由于雪橇结构、服装、头盔和鞋类的限制性规定,导致在雪橇风洞实验研究方面少有相关报道。与雪车或钢架雪车相比,雪橇反应更灵敏,比赛成绩差异往往更小,相差往往仅在0.001 s(Winkler et al., 2010)。如此小的完赛时间差异表明,任何气动减阻都将对提高运动表现具有重要意义。

当前风洞实验主要集中在测量身体姿势细微变化、比赛号码布、雪橇橇体以及橇体底部涂层对气动阻力的影响。当运动员“耸肩”以减小座位中肩部的宽度以及肩颈之间的间隙时,减阻程度最大。若使用更适合运动员肩膀的橇体可以减少运动员8.7%的阻力。Van Valkenburgh(1988)提出在橇体底部增加一个条纹状薄膜可以减少2%的阻力。此外,帆船船体和赛艇艇身的阻力测量结果表明,采用拉条处理后阻力降低了2%~8%(Reidy, 1987; Walsh et al., 1989),拉条的尖锐峰可用于打破涡流流向,并改变表面湍流边界层的结构,从而降低表面摩擦阻力。随着3D打印和激光蚀刻技术越来越普遍,在未来风洞实验中雪橇可以利用拉条胶带处理来尝试减阻。

虽然Dulliand等(2004)观察到雪橇俯仰角或头部角度的增加会减少阻力,但在之后研究中没有看到这种情况,反而在双人雪橇中,上方运动员头盔高度的小幅增加(2 cm)会导致阻力增加4.8%。该研究是在没有雪橇的缩比例模型上进行的,此试验结果表明使用简单模型提供的结果似乎无效,进一步强调了全比例试验的重要性。其他减阻方法,如穿可部分透气的比赛服、小短靴,提高或降低橇体的前部或后部,都未发现能显著改善阻力,但研究发现比赛号码布会增加约5%的阻力(Brownlie, 2020a),若把号码布完全密封,可消除由运动员个人号码布固定情况不同引起的阻力差异。

### 3.5 速度滑冰

速度滑冰是竞速类运动项目,在10 m/s运动速度下,预估气动阻力占速滑运动员运动阻力的80%,在15 m/s运动速度下占90%(Oggiano et al., 2012)。速滑运动员可以通过穿着气动优化的紧身衣来减少气动阻力,带纹理的织物片会过早引发阻力危机,并减少肢体部分的压力阻力(Brownlie et al., 2012; D'Auteuil, 2010; Saetran et al., 2008)。例如,在14.8 m/s的运动速度下,经测量,一种多织物紧身衣的阻力比1998年长野冬奥会上穿的最低阻力紧身衣低10.1%(Brownlie et al., 2004)。

在过去的20年里,空气动力学优化服装的织物选择一直基于与人体直径相似的织物覆盖的圆柱体的风洞实验测量结果(Oggiano et al., 2012)。虽然一些有纹理的拉伸织物可以将圆柱体的阻力降低达50%,但是织物覆盖的单个肢体部分的最大阻力降低约为18%(Brownlie et al., 2004)。由于人体是锥形椭圆圆柱体的复杂交集



合,其中一部分肢体上气流受到其他部分肢体上气流的影响,最大阻力降低约为5%~10%(Brownlie et al., 2009; D'Auteuil, 2010)。在 $Re_{crit}$ 范围内,在肢体上引发气流转捩取决于肢体的形状、长宽比和肢体的3个维度、织物纹理和气流湍流条件(D'Auteuil et al., 2010)。为正确模拟肢体上气流条件,研究人员将确认固定在各种标准速度滑冰姿态的全比例人体模型上的圆柱体数据(Brownlie et al., 2004; D'Auteuil, 2010; Saetran et al., 2008)。

虽然人体模型阻力测量能够测量整套服装对全身阻力的影响,但所能提供的关于每个肢体部分对全身阻力贡献的信息非常少。D'Auteuil(2010)在人体模型中嵌入测压口,以测量侧推姿势下速滑人体模型四肢的表面压力分布和流型,发现人体模型上的大部分阻力变化是由右腿、右上臂和左小腿引起的。Oggiano等(2012)从人体模型中移除了不同的肢体部分,推断在12 m/s的速度下,处于侧推姿态的人体模型高达32%的总身体阻力是由左小腿和右小腿的阻力引起的,而另外21%是由垂直延伸的右臂引起的。虽说上半身和躯干提供了41%的总正面面积,但只提供了18.7%的总阻力,因为这些身体部分的轴向基本上是水平定向的,允许气流保持基本附着。该研究还指出,头部区域仅提供了3%的总身体阻力,故认为在速滑服帽子上应用VG条(Z形条)对总比赛服阻力的影响可忽略不计。Brownlie(2020a)在风洞中测量了在人体模型上速度滑冰服帽子上设置Z形条的效果,发现如果Z形条放置在最佳位置,可以将人体模型的阻力显著降低1.5%。将Z形条的位置从“理想”位置向前或向后移动1.5 cm,会将其有效性降低到0.76%,不过这仍然是较为显著的减阻。此外,使用压力传感器尾流测量结果显示,与穿多种织物速滑服的人体模型相比,裸人台伸出的右腿后面有更大面积的低压区,表明粗糙的纹理织物应仅限于腿部和下臂,而更光滑的织物应用于比赛服的其余部分。Terra等(2018)使用中性密度氦气泡气流可视化和拉格朗日粒子追踪法来测量静态骑行姿态人体模型腿部后面的流场。这种技术在许多运动中为不同的肢体选择最佳的织物方面可能存在未来应用的潜力。

对于速度滑冰比赛服装的设计,Brownlie等(2009)等提出了以下指导原则:1)设计一种适用于运动员比赛姿态的服装版型,这样产生褶皱最少;2)个性化定制比赛服,以最大限度地减少松弛、翻滚或拍打区域;3)在气流附着的区域使用与气流对齐的平接缝;4)将大部分接缝朝向衣服的后部,或者在不会增加阻力的分离气流区域;5)在附着气流的区域(如躯干),使用光滑的织物来减少皮肤摩擦;6)在横流区域(如上臂、大腿和小腿上方),使用适当纹理的织物来诱导边界层转捩并减少肢体段后面的低压尾流。

将VG应用到比赛服的每个肢体部位和躯干部位,会使套装的阻力增加1.82%,因为VG可能会增加皮肤附着

流区域或已由纹理织物触发的气流转捩区域的摩擦。通过依次移除VG,发现VG的最佳位置在小腿和头部,能够使阻力降低1.84%(Brownlie et al., 2016)。未来,风洞实验应该在光滑织物服装的肢体部分使用VG,这样织物纹理不会干扰由VG触发的气流转捩。在速度等于或高于速度滑冰的速度时,预计有效使短距离和长距离运动员的阻力降低10%。

### 3.6 高山滑雪

高山滑雪是以滑雪板、雪鞋、固定器和滑雪杖为主要用具,从山上向山下,沿着旗门设定的赛道滑下的雪上竞速运动项目。每场高山滑雪比赛的获胜者是在使用最短时间正确完成赛道路线后到达山脚的运动员。高山滑雪运动员代表一个复杂的钝体,其形体不断变化,由重力加速下滑,并受到雪板上摩擦力和身体上气动阻力的抵抗。Norstrud(2008)通过简单数学模型,估计气动阻力占滑雪运动员在下坡直道时总阻力的45%,而Supej等(2013)提出,在大回转比赛中,气动阻力占运动员运动总阻力的16%。

由于高山滑雪运动员运动时身体姿势动态特性与运动员在风洞中假定静态姿势相矛盾,很难确定气动阻力在高山滑雪中的作用,但最终可能通过风洞实验和赛道运动学评估相结合的途径解决(Melzi et al., 2016; Meyer et al., 2012)。有相关研究已经在风洞中测量了高山滑雪运动员阻力和阻力系数,然后使用特征股段长度或面积,来估计运动员在赛道上时的阻力(Barelle et al., 2004; Elfmark et al., 2018; Meyer et al., 2012; Supej et al., 2013)。Elfmark等(2021b)通过高山滑雪中团身姿势风洞实验研究发现躯干角度接近0度,膝盖最大限度填满腋窝处空缺的低团身姿态能够最大限度减小气动阻力。此外,小腿处的气流对运动员所受阻力做出了最大贡献,占低团身姿态时总阻力的40%~50%。未来减少运动员阻力的尝试可侧重于减少腿部阻力,其中可能包括使用多种复合织物的比赛服(Asai et al., 2016)。即便是优秀的滑雪运动员也很难在高达140 km/h的风速下保持静止姿态,因此风洞测试也很难解释服装对阻力的影响。然而,Brownlie等(2010)使用支撑架和托架对加拿大滑雪运动员使用的高山滑雪服的阻力进行了综合评估,最重要的发现是,滑雪服必须为运动员量身定制,每次比赛都应该穿新的滑雪服,以最大限度地减少阻力,因为重复穿着后,服装织物往往会过度拉伸,失去弹性,变得多孔,最终会变得松松垮垮。一些高山滑雪运动员在雪季体重会大幅下降,赛服的合身性应在重要比赛前进行调整和确认。

尽管在风洞中测试织物面料覆盖的圆筒有其局限性,但圆筒测试对于织物的初步筛选有用。例如,Bardal等(2012)根据织物覆盖的圆筒的阻力测量结果为挪威高山滑雪队比赛服选择了织物面料。加拿大高山滑雪队教练员曾指出,当穿上由新面料制成的滑降比赛服时,运动员



在直道滑降上滑行时间较慢。为确定服装面料的阻力特性是否是导致观察到的运动成绩下降的原因,在风洞中用圆柱体测量了多种备选滑雪赛服面料的阻力(Brownlie, 2020a)。研究发现,在速度大于30 m/s的情况下,黑色面料(现有比赛服面料)在转换后阻力显著增加,这与教练的赛道滑行时间观察结果相关。另外两种面料,银红色面料和天蓝色面料,在速度高达37 m/s时,其阻力系数低于现有的比赛服面料。天蓝色面料在较低速度下的阻力较低,被选为速度较慢技术项目比赛服的面料,而银红色面料在较高速度下保持较低的阻力系数,被用于定制较高速的滑降和超级大回转项目竞速比赛服。

在符合空气动力学的团身姿态下,滑降运动员通常会使用符合其身体的弯曲雪杖,雪杖水平部分保持在肘部和躯干之间,这样可以将雪杖的阻力降到最低(图3a)。但在跳跃和转弯过程中,雪杖将保持垂直或接近垂直,并基本完全暴露在气流中。一些品牌的滑雪杖被制成具有椭圆形横截面,而其他品牌都是圆形截面,气动阻力可能更高。高山滑雪运动员通常由特定的雪杖制造商赞助,在雪杖的品牌上没有选择。因此,研究减少特定雪杖阻力的技术对于减少滑雪运动员所受的整体阻力十分重要。Brownlie(2020a)研究发现,圆形杖比椭圆形杖阻力高,虽然使用Z形条减少了圆形和椭圆形截面雪杖之间的差异,但椭圆形截面的雪杖仍然是阻力最小的雪杖。由于当前国际滑雪联合会(International Ski Federation, FIS)规则对于Z形条在雪杖的应用没有明确规定,因此这种技术可能是减少运动员阻力的可行方法之一。

### 3.7 越野滑雪

2022年北京冬奥会男子越野滑雪短距离和50 km长距离(因大风天气原因,赛程缩短为30 km)金牌得主的平均速度分别为7.84 m/s和6.99 m/s;女子短距离和30 km长距离金牌得主的平均速度分别为6.33 m/s和5.89 m/s。在此速度下,在平地赛道,预估气动阻力占运动总阻力的45%。在下坡赛道上,气动阻力占运动总阻力的比例将增加。尽管气动阻力的作用很大,但很少有研究考虑越野滑雪或冬季两项运动中气动阻力(Norstrud, 2008; Oggiano et al., 2012)。Frederick等(1988)建议越野滑雪运动员通过在下坡路段采用更好的抱膝姿势,穿着更流线型的滑雪服和帽子,可以将成绩提高3%。Leirdal等(2006)在风洞中测量了北欧两项运动员模拟冲刺运动时所受的阻力。研究发现,“深”自由式滑雪姿势(类似于躯干几乎水平的速度滑冰姿势)与直立推撑姿势相比,气动阻力降低了30%,相当于总功率降低了18%,表明较低的躯干角度有利于减少阻力。

为给越野滑雪和冬季两项运动员提供空气动力学优化的服装,Brownlie(2020a)对1名优秀女子越野滑雪运动员在模拟直立侧推姿势和团身姿势下进行了气动阻力测

量。结果表明,直立侧推姿势阻力系数为1.06,与Ainegren等(2018)报道的男子滑雪运动员在类似直立侧推姿态下阻力系数1.08非常接近,运动员的正面面积和阻力系数在团身姿势下显著降低。该研究发现:1)无论是纹理织物套装的大量升华印花,还是躯干和小腿部分使用过于光滑的织物,都会导致运动员所受阻力增加2.6%~3.5%;2)当运动员戴上比赛号码布时,所受阻力增加了3.4%,若在号码簿底部贴上胶带,使其不会拍打或颤动,能够将阻力增加限制在约0.9%;3)在冬季两项中,以直立和团身姿态携带步枪分别增加了1.8%和6%的阻力,尽管两种情况下阻力的绝对增加值非常相似。但在枪管上使用Z形条来减少步枪阻力的尝试是无效的,因为在直立滑雪姿态下,枪管很少暴露在气流中。此外研究还发现,一个带有蓬松、大体积绒球的帽子比没有绒球的帽子在人体模型上增加了6.84%的阻力。对于团身姿态,大阻力帽子将使运动员的总阻力增加2.9%。鉴于气动阻力在滑雪成绩中重要作用,未来研究应测量越野滑雪比赛中戴的帽子的阻力。

### 3.8 冰球

竞技冰球的成功跟诸多因素相关,包括敏捷性、运动速度、手眼协调性、适当的定位能力和预判(Hache, 2002)。有效攻防的基础是比对手更快加速以及滑行的能力。以顶级运动员的滑冰速度(约11 m/s)为例,运动员产生的外部功率输出主要用于克服气动阻力(75%)和冰面摩擦(25%)(De Koning et al., 1992)。尽管冰球运动中减阻在理论上很重要,但鲜有这方面的研究。

1)比赛服优化。为了研究冰球运动中气动阻力影响,Brownlie(2020a)利用1.83 m高的组合人体模型模拟发力滑冰姿势,进行服装优化风洞实验。传统比赛服中人体模型的正面面积测量为0.627 m<sup>2</sup>,阻力系数为1.06。优化后流线合身型比赛服在40 km/h(11.18 m/s)速度下将人体模型阻力降低了14.2%,但不影响运动员的运动自由或散热能力,而且更精准合身的服装在风洞实验中产生的拍打和翻滚更少。Kyle(2004)通过建立功率消耗模型预测,与传统冰球比赛服相比,优化后的比赛服在60 min冰球比赛中,以11.18 m/s速度在20 min的稳定状态滑行中耗能约节省12%。

2)冰球杆优化。除了肌肉力量、射门技术和当杆头过冰时储存在杆身中的能量之外,最大杆头速度的决定因素之一是杆身和杆头的气动阻力。虽然冰球杆杆头或杆身的阻力应该是抗阻运动总力的一小部分,但是仍值得对冰球杆的阻力进行量化研究。Brownlie(2020a)在风洞实验中测量了冰球杆杆头和部分杆身组合(总长度60 cm)、单独杆身(总长度53 cm)的气动阻力,结果表明,在速度为17.5 m/s和21 m/s时,带有Z形条的杆身和杆头所受的阻力分别比未覆盖Z形条的杆身和杆头小9.5%和11.80%。

Z形条有效地减少了杆身和杆头的阻力,且随着速度的增加,减阻的幅度增加。Z形条的大部分空气动力学优势似乎是减少杆身的阻力,同时也证实了Kuyt等(2016)的发现。如果Z形条降低了冰球杆上的气动阻力,就可以合理地假设杆头速度也会增加,导致冰球球体速度略有增加。冰球速度的任何增加都有可能使被守门员阻挡的射门变成进球(Pearsall et al., 1999)。此外,如果球杆在空气中行进时受到涡流引起的共振,那么具有空气动力学优势的杆身会减小这些振动,从而使击球方向更加精准。应进行进一步研究确认以上结果,并确定当前杆身和杆头设计的其他参数(如表面纹理——平滑、触感、抓握等)对冰球球杆阻力的影响。

### 3.9 编队

随着冬奥会纳入集体出发、对抗赛和团体追逐比赛项目,许多运动员可以通过改善编队技术来提高成绩。Rundell(1996)和Millet等(2003)测量了短道速滑运动员单独滑冰以及编队时的能量消耗情况,发现编队时气动阻力减少了21%,总功率减少了13%。Van Ingen Schneau(1982)认为,当一名在后方滑行的速度滑冰运动员落后领先者2 m和1 m时,气动阻力分别减少了16%和23%。Spring等(1988)对越野滑雪运动员进行滑行测试表明,在领先的滑雪者后方2~3 m处滑行的运动员的阻力将减少25%,而领先运动员阻力也将减少约3%。Bilodeau等(1994)测量了编队滑雪运动员的心率反应,发现编队时心率显著降低5.5%。此外,在公路自行车、马拉松、竞走等项目中编队减阻效果是众所周知的(胡齐等, 2022; Blocken et al., 2018; Crouch et al., 2017; Polidori et al., 2020)。

在单板滑雪障碍追逐和自由式滑雪障碍追逐比赛中,运动员必须通过起伏、弯曲、不规则的路线,还包含数个跳跃动作,同时还要与其他3名运动员进行较量。这些项目的服装规则禁止运动员穿着紧身衣或紧身滑雪服,因此提高比赛成绩的最有效方法之一是在风洞试验中测试训练团身姿态和编队策略(Chua et al., 2011; Oggiano et al., 2010)。虽然运动员之间保持最小间距通常可以最大限度地降低阻力,但找到最佳的距离和姿势以最优优化气动阻力,同时应使产生碰撞的风险最小化。为帮助单板滑雪障碍追逐和自由式滑雪障碍追逐运动员制定编队策略,在第2名运动员位于第1名运动员周围的不同位置时,对处于团身姿态的运动员进行了阻力测量(Brownlie, 2020a)。在自由式滑雪障碍追逐项目中,一名以团身姿态滑行,旁边另一名滑雪者的出现将同时显著增加两人所受的阻力。最佳编队位置在领先运动员正后方1.2~1.8 m处,或略微偏右(或偏左),此时编队运动员前方的压力最大限度地减小,实验获得的最大减阻率达31.1%。在单板滑雪障碍追逐项目中,最佳实际编队距离是后方跟随运动员雪板的前部直接位于领先运动员雪板后缘的后面,

这与自行车团队追逐赛的研究结果一致,其中自行车队尽量减少车轮间距(Crouch et al., 2017)。研究发现,雪板固定方式一致的编队减阻效果要优于雪板固定方式不一致的编队,这是由于两个使用相反雪板固定形式的运动员身体形态和尾流区域不同,前方运动员将无法有效覆盖后方运动员的暴露区域。此外,从领先者角度来说,由于两个项目运动员均穿着宽松的比赛服,领先运动员应保持更加直立和多变的身体姿势,这样领先运动员的气流可能会对后方运动员产生不利影响。在某些情况下,两名运动员的总正面面积会超过风洞实验截面积的20%,因此编队减阻效果会受到严重的阻塞影响,并且会被有些高估。未来,风洞实验编队测量应在更大风洞中进行重复,以减少风道堵塞的混杂效应。

## 4 总结与展望

大多数冬季运动项目比赛结果受空气动力学影响很大,空气动力学试验研究结果与优秀运动员特别相关,有助于其发挥最大潜能,但随着服装和装备的进步,如更轻、更符合空气动力学的冰球球衣,也将使其他运动员从中受益。本文阐述了冬季运动项目中气动阻力以及风洞实验方法,系统梳理了近20年来冬季运动项目气动减阻的风洞实验研究成果。

1)从以往的宽松跳台滑雪服到现代的贴身跳台滑雪服的转变存在一些问题。最大的问题在于硬跳台滑雪服材料不允许身体部分的平稳运动,而更易拉伸的跳台滑雪服材料可以消除这一问题,但会大大降低空气动力学。一个值得研究的解决方案是增加滑雪板的宽度,以补偿上述因使用贴身滑雪服产生的空气动力学效应损失。

2)优化雪车运动员头盔的形状,最大限度地减小运动员头盔之间的空间,并保持雪车整体较低轮廓,将减少雪车的整体阻力。同时,应关注雪车横向偏离(气流偏离雪车轴线,即偏航)时的阻力变化。此外,应寻求减小雪车内部低压腔尺寸的有效方法。

3)优化雪车和钢架雪车运动员的比赛服,以减少推车出发阶段肢体部分的阻力。虽然推车出发阶段相对较短,但肢体部分暴露最大。根据短跑运动员的阻力测量,经减阻优化的比赛服可以将雪车和钢架雪车运动员在比赛该阶段所受的阻力降低10%。

4)在风洞中对车橇项目赛道进行更精确的模拟,使运动员能够在半物理气流条件下训练低阻力姿态。由于时间限制和滑行运动中经受的巨大加速度,使得运动员在实际赛道上训练次数有限。在正常的赛道训练课之外,模拟在真实风力条件下利用能够实现赛道虚拟现实的辅助训练工具来帮助舵手记忆最佳的赛道轨迹。

5)优化速度滑冰紧身衣中VG——基于当前速度滑冰紧身衣的风洞实验研究,速度滑冰紧身衣上适当放置

VG可以显著降低速度滑冰运动员的阻力。

6)开发可穿戴技术,帮助滑冰、滑雪运动员在编队路线、对抗赛或集体出发比赛中找到最佳的编队位置。如开发一种类似的产品,附着在短道速滑、单双板障碍追逐等项目运动员头盔上,以帮助他们确定最佳的编队位置。

7)为越野滑雪运动员开发低阻力比赛服和头套。目前研究表明,越野滑雪中通常佩戴的头套可能会使滑雪者的阻力增加3%。应该对穿连帽滑雪服或低轮廓滑雪帽的越野滑雪运动员进行风洞研究,以确定最佳头套。

8)开发用于越野滑雪和高山滑雪的多织物比赛服,最大限度地提高特定身体部位各种织物的空气动力学性能。将弹力织物的表面纹理与暴露在横流中的肢体段的平均直径和速度相匹配,可以开发出一种竞速比赛服,在多个肢体段上产生阻力危机,并降低整体身体阻力。越野滑雪和高山滑雪都应该考虑开发多面料的比赛服。

9)开展空气动力学优化的服装对冰球运动员最大速度和力量影响的冰上测量,以及气动减阻优化后冰球杆对冰球速度影响的运动学分析。虽然风洞实验显示优化后带有Z形条的冰球杆阻力有所降低,但是在实际击球过程中杆和冰球速度的改善还没有得以测量。

未来,风洞测力天平应能够提供高频率数据收集,同时能够承受由在天平上模拟比赛过程的真实运动员产生的极其多变的载荷。为了减少与这些更真实的运动相关的误差带,需要使用更先进的统计分析技术。在可能的情况下,应在风洞中测量和模拟比赛场地的湍流水平。为了正确模拟编队场景,应该使用更大尺寸的风道来最小化堵塞效应。

#### 参考文献:

胡齐,李波,柯鹏,等,2022.基于风洞实验的竞走项目编队气动减阻效应[J].上海体育学院学报,46(3):62-71.

胡齐,刘宇,2020a.姿态不对称对跳台滑雪飞行阶段气动特性的影响[J].体育科学,40(10):41-49.

胡齐,刘宇,2021.运动员姿态对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响[J].医用生物力学,36(3):407-414.

胡齐,王向东,刘宇,2020b.雪车项目空气动力学研究进展[J].医用生物力学,35(4):376-382.

胡齐,张文毅,陈骐,2018.滑雪板夹角对跳台滑雪飞行阶段气动特性的影响[J].体育科学,38(7):42-49.

刘政崇,2003.高低速风洞气动与结构设计[M].北京:国防工业出版社.

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):1-5.

恽起麟,2000.风洞实验[M].北京:国防工业出版社.

AINEGREN M, JONSSON P, 2018. Drag area, frontal area and drag coefficient in cross-country skiing techniques[J].MDPI Proc, 2: 313.

ASAI T, HONG S, IJUIN K, 2016. Flow visualization of downhill ski racers using computational fluid dynamics[J].Proc Eng, 147: 44-49.

ACHENBACH E, 1971. Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder[J]. J Fluid Mech, 46(2): 321-335.

BARDAL L M, REID R, 2012. Testing of fabrics for use in alpine ski competition suits[J]. Proc Eng, 34: 44-49.

BARELLE C, RUBY A, TAVERNIER M, 2004. Experimental model of the aerodynamic drag coefficient in alpine skiing[J]. J Appl Biomech, 20: 167-176.

BARLOW J B, RAE W H, POPE A, 1999. Low-speed wind Tunnel testing[M]. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons : 169-170.

BILODEAU B, ROY B, BOULAY M, 1994. Effect of drafting on heart rate in cross-country skiing[J]. Med Sci Sports Exer, 26(5): 637-641.

BLOCKEN B, TOPARLAR Y, VAN DRUENEN T, et al., 2018. Aerodynamic drag in cycling team time trials[J]. J Wind Eng Ind Aerod, 182: 128-145.

BROWNIE L, 2020a. Aerodynamic drag reduction in winter sports: The quest for "free speed"[J]. Proc Inst Mech Eng Part P J Sports Eng Technol, 5: 1-40.

BROWNIE L, 2020b. Design considerations in wind tunnel testing of cyclists[M]. Cham: Springer Nature: 57-86.

BROWNIE L, AIHARA Y, CARBO J, et al., 2016. The use of vortex generators to reduce the aerodynamic drag of athletic apparel[J]. Proc Eng, 147: 20-25.

BROWNIE L, KYLE C, 2012. Evidence that skin suits affect long track speed skating performance[J]. Proc Eng 34: 26-31.

BROWNIE L, KYLE C, CARBO J, et al., 2009. Streamlining the time trial apparel of cyclists: The Nike Swift Spin project[J]. Sports Tech, 2: 53-60.

BROWNIE L, KYLE C, HARBER E, et al., 2004. Reducing the Aerodynamic Drag of Sports Apparel: Development of the NIKE Swift Sprint Running and SwiftSkin Speed Skating suits[M]. Sheffield: The International Sports Engineering Association : 90-96.

BROWNIE L, LAROSE G, D'AUTEUIL A, et al., 2010. Factors affecting the aerodynamic drag of alpine skiers[J]. Proc Eng, 2: 2375-2380.

BRUGGEMANN G, MORLOCK M, ZATSIORSKY V, 1997. Analysis of the bobsled and men's luge events at the XVII Olympic winter games in Lillehammer[J]. J Appl Biomech, 13(1): 98-108.

CHOWDHURY H, ALAMA F, ARENA S, et al., 2013. An experimental study of airflow behaviour around a standard 2-man bobsleigh[J]. Proc Eng, 60: 479-484.

CHOWDHURY H, ALAMA F, MAINWARING D, 2011. Aerodynamic study of ski jumping suits[J]. Proc Eng, 13: 376-381.

CHOWDHURY H, ALAM F, SUBIC A, 2010. Aerodynamic performance evaluation of sports textiles[J]. Proc Eng, 2: 2517-2522.

CHUA J, FUSS F, TROYNIKOV O, 2011. Aerodynamics of loose sports garments[J]. Proc Eng, 13: 370-375.

CROUCH T, BURTON D, LABRY Z, et al., 2017. Riding against the wind: A review of competition cycling aerodynamics[J]. Sports Eng, 20: 81-110.

DABNICHKI P, AVITAL E, 2006. Influence of the position of crew members on aerodynamics performance of two-man bobsleigh[J]. J Biomech, 39(15): 2733-2742.

D'AUTEUIL A, 2010. Manipulation of the Boundary Layer Transition to Enhance the Aerodynamic Performance of Athletes[D]. Ottawa: Carleton University.



- D'AUTEUIL A, LAROSE G, ZAN S, 2010. Relevance of similitude parameters for drag reduction in sport aerodynamics[J]. *Proc Eng*, 2: 2393-2398.
- DE KONING J, GROOT G, VAN INGEN SCHENAU G, 1992. Ice friction during speed skating[J]. *J Biomech*, 25(6): 565-571.
- DULLIAND G, GARRY K, 2004. The basic aerodynamic characteristics of a model luge slider[C]. In: 5<sup>th</sup> International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA V), Ottawa, ON, Canada, Oxford: Elsevier.
- ELFMARK O, BARDAL L, 2018. An empirical model of aerodynamic drag in alpine skiing[J]. *MDPI Proc*, 2: 310.
- ELFMARK O, ETTEMA G, 2021a. Aerodynamic investigation of the inrun position in Ski jumping[J]. *Sports Biomech*, <https://doi.org/10.1080/14763141.2020.1871503>.
- ELFMARK O, GILJARHUSK E T, LILAND F, et al., 2021b. Aerodynamic investigation of tucked positions in alpine skiing[J]. *J. Biomech*, 119: 110327.
- FREDERICK N, STREET G, 1988. Nordic ski racing[J]. *Sci Amer*, 258: 20-22.
- GARCIA-LOPEZ J, OGUETA-ALDAY A, LARRAZABAL J, et al., 2014. The use of velodrome tests to evaluate aerodynamic drag in professional cyclists[J]. *Int J Sports Med*, 35: 451-455.
- GARDAN N, SCHNEIDER A, POLIDORI G, et al., 2017. Numerical investigation of the early flight phase in ski-jumping[J]. *J Biomech*, 59(1): 29-34.
- GIBERTINI G, SOLDATI A, CAMPOLO M, 2010. Aerodynamic analysis of a two-man bobsleigh [C]. *Proceeding of 6<sup>th</sup> World Congress of Biomechanics*. Singapore: 228-231.
- HACHE A, 2002. *The Physics of Hockey*[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- HASEGAWA H, KAWABATA Y, MURAKAMI M, et al., 2018. Effect of air permeability on the aerodynamic characteristics of ski jumping suits[J]. *Adv Exp Mech*, 3: 118-122.
- HASTINGS R, 2008. *The Use of Computational Fluid Dynamics to Investigate and Improve the Aerodynamics of Bob skeleton racing*[D]. Edinburgh: The University of Edinburgh.
- KATAOKA Y, HASEGAWA H, MURAKAMI M, et al., 2020. Flow behavior caused by air permeability of ski jumping suit fabric[J]. *MDPI Proc*, 49: 109.
- KATZ J, 2006. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed* [M]. 2<sup>nd</sup>. Cambridge: Bentley Publishers.
- KUYT C, GREIDANUS A, WESTERWEEEL J, 2016. Drag reduction by applying speedstrips on rowing oars[J]. *Proc Eng*, 147: 110-115.
- KYLE C, 2004. A math model of hockey using average power: The effect of air resistance and weight upon performance while sprinting from a stop or steady skating[R]. Nike Inc.
- KYLE C, BROWNLIE L, HARBER E, et al., 2004. *The Nike Swift Spincycling Project: Reducing the Aerodynamic Drag of Bicycleracing Clothing by Using Zoned Fabrics*[M]. Sheffield: The International Sports Engineering Association: 118-124.
- LEWIS O, 2006. *Aerodynamics Analysis of a 2-Man Bobsleigh*[D]. Delft: Delft University of Technology.
- LEIRDAL S, SAETRAN L, ROELEVELD K, et al., 2006. Effects of body position on slide boarding performance by cross-country skiers[J]. *Med Sci Sports Exer*, 38(8): 1462-1469.
- MEILE W, REISENBERGER E, MAYER M, et al., 2006. Aerodynamics of ski jumping: Experiments and CFD simulations[J]. *Exp Fluids*, 41(6): 949-964.
- MELZI S, BELLONI E, SABBIONI E, 2016. *Alpine Ski*[M]. New York: Springer: 53-107.
- MEYER F, LE PELLEY D, BORRANI F, 2012. Aerodynamic drag modeling of alpine skiers performing giant slalom turns[J]. *Med Sci Sports Exer*, 44(6): 1109-1115.
- MILLET G, GESLAN R, FERRIER R, et al., 2003. Effects of drafting on energy expenditure in in-line skating[J]. *J Sport Med Phys Fit*, 43: 285-290.
- MOTALLEBI F, DABNICHKI P, LUCK D, 2004. Advanced bobsleigh design. Part 2: Aerodynamic modifications to a two-man bobsleigh[J]. *Proc IMechE, Part L: J Mater Des Appl*, 218(2): 139-144.
- MULLER W, 2006. Performance factors in ski jumping[J]. *J Biomech*, 39(1): 192-213.
- NORSTRUD H, 2008. *Alpine downhill and Speed Skiing* [M]. New York: SpringerWein: 131-138.
- NORSTRUD H, 2008. *Cross-country Skiing* [M]. New York: SpringerWein, 107-130.
- OGGIANO L, BROWNLIE L, TROYNIKOV O, et al., 2013. A review on skin suits and sport garment aerodynamics: Guidelines and state of the art[J]. *Proc Eng*, 60: 91-98.
- OGGIANO L, SAETRAN L, 2010. A low drag suit for ski-cross competitions[J]. *Proc Eng*, 2: 2387-2392.
- OGGIANO L, SAETRAN L, 2012. Experimental analysis on parameters affecting drag force on speed skaters[J]. *Sports Tech*, 3: 4223-4234.
- PEARSALL D, MONTGOMERY D, ROYHSCHING N, et al., 1999. The influence of stick stiffness on the performance of ice hockey slap shots[J]. *Sports Eng*, 2: 3-11.
- REIDY L, 1987. Flat plate drag reduction in a water tunnel using riblets[R]. Technical Report 1169. San Diego, CA: United States Navy, Naval Ocean Systems Center.
- ROBERTS I, 2013. *Skeleton Bobsleigh Mechanics: Athlete-sled Interaction*[D]. Edinburgh: The University of Edinburgh.
- RUNDELL K, 1996. Effects of drafting during short-track speed skating[J]. *Med Sci Sports Exer*, 28(6): 765-771.
- SABBIONI E, MELZI S, CHELI F, et al., 2016. *Bobsleigh and Skeleton*[M]. New York: Springer: 183-272.
- SAETRAN L, OGGIANO L, 2008. *Skin Suit Aerodynamics in Speed Skating*[M]. New York: SpringerWein: 93-105.
- SAKAI K, 2013. The parametric study for the luge game to get the high record at the Olympic game[R]. Research Report No.25. First Industrial University, 7-10, <https://ci.nii.ac.jp/naid/40019800473/en/>.
- SCHMOLZER B, MULLER W, 2002. The importance of being light: Aerodynamic forces and weight in ski jumping [J]. *J Biomech*, 35(8): 1059-1069.
- SCHWAMEDER H, 2008. Biomechanics research in ski jumping: 1991—2006[J]. *Sports Biomech*, 7(1): 114-136.
- SCIACCHITANO A, PATTAIK P, 2018. Near wake analysis of a two-man bobsleigh scaled model[J]. *MDPI Proc*, 2: 319.
- SEO K, WATANABE I, MURAKAMI M, 2004. Aerodynamic force data for a V-style ski jumping flight[J]. *Sports Eng*, 7(1): 31-39.
- SPRING E, SAVOLAINEN S, ERKKILA J, et al., 1988. Drag area of across country skier[J]. *Int J Sport Biomech*, 4: 103-113.

- 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]. *Scan J Med Sci Sports*, 23: 38-47.
- TERRA W, SCIACCHITANO A, SCARANO F, 2018. A novel approach for skin suit aerodynamic optimization using local momentum deficit[J]. *MDPI Proc*, 2: 222.
- UBBENS H H, DWIGHT R P, SCIACCHITANO A, et al., 2016. Some results on bobsleigh aerodynamics[J]. *Proc Eng*, 147 (1): 92-97.
- VAN INGEN SCHNEAU G, 1982. The influence of air friction in speed skating[J]. *J Biomech*, 15: 449-458.
- VIRMAVIRTA M, 2016. *Aerodynamics of Ski Jumping*[M]. New York: Springer: 33-52.
- VIRMAVIRTA M, 2017. *Aerodynamics of Ski Jumping*[M]. New York: Springer: 1-21.
- VIRMAVIRTA M, KIVEKAS J, 2009. Effective use of a wind tunnel for ski jumping suit research[C]. 12<sup>th</sup> ISB Congress, Cape Town: 176-188.
- VIRMAVIRTA M, KIVEKAS J, 2019a. Aerodynamics of an isolated ski jumping ski[J]. *Sports Engineering*, 22:1-6.
- VIRMAVIRTA M, KIVEKAS J, 2019b. Is it still important to be light in ski jumping?[J]. *Sports Biomech*, 1: 1-12.
- VIRMAVIRTA M, KIVEKAS J, KOMI P V, 2001. Take-off aerodynamics in ski jumping[J]. *J Biomech*, 34: 465-470.
- VIRMAVIRTA M, KIVEKAS J, KOMI P V, 2011. Ski jumping take-off in a wind tunnel with skis[J]. *J Appl Biomech*, 27(4): 375-379.
- WALSH M, ANDERS J, 1989. Riblet/LEBU research at NASA Langley[J]. *App Sci Res*, 46: 255-262.
- WINKLER A, PERNPEINTNER A, 2008. Improving the Performance of a Bobsleigh by Aerodynamic Optimization[M]. Paris: Springer: 329-338.
- WINKLER A, PERNPEINTNER A, 2010. Automated aerodynamic optimization of the position and posture of a bobsleigh crew [J]. *Proc Eng*, 2(2): 2399-2405.
- ZANOLETTI C, LA TORRE A, MERATI G, et al., 2006. Relationship between push phase and final race time in skeleton performance[J]. *J Strength Cond Res*, 20(3): 570-583.

## A Review of Wind Tunnel Experimental Research on Aerodynamic Drag Reduction in Winter Sports

HU Qi<sup>1,2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>

1. *School of Exercise and Health, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China;*

2. *China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China*

**Abstract:** The Winter Olympics are a highly competitive sporting environment where subtle improvements in performance can impact the final order in many events. Aerodynamic drag is the major resistive force in high-speed sports, such as ski jumping, speed skating, alpine skiing and bobsleigh. In addition, it is also an important determinant of sports performance in sports such as cross-country skiing, ice hockey and snowboard cross. In order to have a clear and comprehensive understanding of the aerodynamic drag reduction technology in winter sports, this article reviewed the role of aerodynamic drag in winter sports and wind tunnel experimental methods, the wind tunnel experimental research results of aerodynamic drag reduction in winter sports in recent 20 years were also summarized. Based on the literatures, the technical scheme of aerodynamic drag reduction in winter sports was summarized, including ski jumping, bobsleigh, skeleton, luge, speed skating, alpine skiing, cross-country, biathlon, ice hockey, ski-cross and snowboard cross.

**Keywords:** *aerodynamic; drag reduction; wind tunnel; experimental research; winter sports*

