

doi: 10.7690/bgzdh.2021.12.013

# 风洞中滑雪运动空气阻力特性测量方法

宋 晋, 徐 圣, 张卫国, 李 东, 兰 宇, 刘 蓓

(中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为研究滑雪运动员所受的空气阻力特性, 在风洞中设计一种阻力特性的实验测量方法。在采用天平测量运动员所受空气阻力的同时, 通过图像采集与处理获取运动员的迎风投影面积, 进而计算出其对应的阻力系数。运动员在风洞中模拟不同的运动姿势, 获取各姿势下的数据。实验结果表明: 随着人体从站立到蹲下, 空气阻力和阻力系数呈减小的趋势, 半蹲姿势阻力特性最为稳定, 且阻力系数较小。该方法可为训练提供参考建议与指导。

**关键词:** 滑雪; 空气阻力; 测量

**中图分类号:** V211.753 **文献标志码:** A

## Measurement Method of Air Resistance Characteristics of Skiing in Wind Tunnel

Song Jin, Xu Sheng, Zhang Weiguo, Li Dong, Lan Yu, Liu Bei

(Low Speed Institute, China Aerodynamics Research &amp; Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to study the characteristics of air resistance experienced by skier, an experimental measurement method for resistance characteristics has been designed in the wind tunnel. While measuring the air resistance of skier by balance, the windward projected area of skier is obtained by image acquisition and processing, and then the corresponding resistance coefficient is calculated. The skier simulated different postures in the wind tunnel and obtained the data of each posture. The experimental result shows that the air resistance and resistance coefficient decrease as the human body changes from standing to squatting, and the resistance characteristic of the half squatting is the most stable and the resistance coefficient is small. This method can provide reference and guiding for training.

**Keywords:** skiing; air resistance; measurement

## 0 引言

随着北京冬奥会的临近, 冰雪运动迎来了发展的黄金时期。高山滑雪因其山体垂直落差大、速度快的特点而广受关注, 在冬奥会上的重要性不言而喻。作为竞速型雪上运动项目, 每 0.1 s 的提升对运动员来说都非常困难<sup>[1-3]</sup>。制约优秀成绩取得的原因除了运动员自身体能素质、滑行技术及比赛战术外, 还有运动员行进过程中的空气阻力<sup>[4]</sup>, 尤其是在高速行进时, 空气阻力成为消耗体能的重大因素。有研究表明: 空气阻力占阻力的 80%, 摩擦阻力占 20%, 速度达到 32 km/h 以上时, 运动员 90% 的能量都消耗在克服空气阻力上<sup>[5-7]</sup>, 对于高山滑雪速度项目(滑降与超级大回转)而言, 其速度介于 70~100 km/h, 由此可见其所受空气阻力之大。减小空气阻力可有效提高滑行速度, 提升运动比赛成绩。不同的运动姿势对减阻效果有着明显影响, 为此, 笔者在风洞中设计一种研究运动员阻力特性的实验方法, 测量了不同姿势下的阻力特性, 可提供科学的减阻指导意见, 助力运动员取得更好的比赛

成绩。

## 1 测量原理

评价空气阻力特性的主要依据是阻力系数  $C_x$ ,  $C_x$  是无量纲量, 计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$C_x = \frac{X}{q \cdot S} \quad (1)$$

其中:  $X$  为空气阻力;  $q$  为动压;  $S$  为参考面积。风洞的主要功能是获取被测对象在气流流动作用下所受的力与力矩,  $X$  只需通过风洞的常规天平测力系统即可得到, 而  $q$  是由人工给定风洞动力系统, 并通过系统闭环控制实现并稳定的, 因此测量的难点集中在如何获取运动员的迎风投影面积  $S$ 。

笔者采用了视觉非接触测量的方式, 通过图像采集与处理获取投影面积。将工业相机安装在试验段内, 沿来流方向位于运动员正后方, 使相机的成像面与沿风洞轴线的横截面平行, 采集运动员图像, 通过图像处理算法提取目标并换算出对应的投影面积参数。由于实验中相机的成像面与风洞截面平行, 因此待测目标的投影面积与其所占像素数量成

收稿日期: 2021-08-13; 修回日期: 2021-09-24

作者简介: 宋 晋(1983—), 男, 陕西人, 硕士, 高级工程师, 从事低速风洞测控技术研究。E-mail: songjin0131@sina.com。

正比关系，可采用面积已知且易于实现目标识别的物体作为标定物，先计算标定物所占像素数量，再计算运动员所占像素数量，即可得到运动员投影面积。设  $S_1$  为标定物面积， $N_1$  为标定物像素数量， $N_2$  为待测目标像素数量， $S_2$  为待测目标投影面积，可得

$$S_2 = (S_1 \cdot N_2) / N_1 \quad (2)$$

## 2 测量算法

面积测量基于图像处理技术，主要分为 2 步：

1) 标定，目的是获取标定物面积与像素数量的比例关系；2) 目标提取，通过帧差法<sup>[9-10]</sup>在风洞环境中提取运动员目标，并根据标定比例计算出投影面积。

### 2.1 标定算法

Step 1: 选取标定物。选用白色 A4 纸作为标定物，将 A4 纸粘贴在黑色底板上，便于识别提取，A4 纸面积  $S_1$  精确可知，是作为标定物的较好选择。

Step 2: 计算阈值。将标定物放置于风洞中心并采集图像，如图 1(a)所示。人工框选包含黑色底板的 A4 纸作为标定区域，遍历该区域像素，获取最大灰度值  $\maxgray$  (接近于 255)，最小灰度值  $\mingray$  (接近于 0)，并计算阈值：

$$\text{threshold} = (\maxgray + \mingray) / 2 \quad (3)$$

Step 3: 二值化。对标定区域内的每个像素进行二值化操作，灰度值大于  $\text{threshold}$  的像素赋值为 255，小于  $\text{threshold}$  的像素赋值为 0。框选的标定区域以外的像素均赋值为 0，效果如图 1(b)所示。

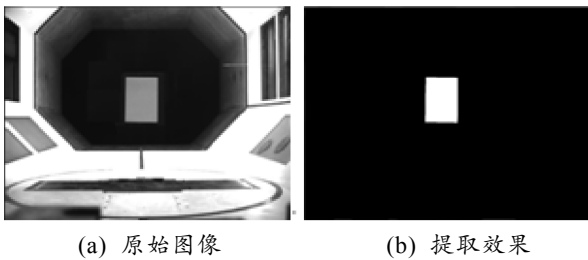


图 1 标定图像与提取效果

Step 4: 目标像素计数。计算图像中灰度值为 255 的像素数量，即 A4 纸对应的像素数量，至此获取式(2)中的参数  $N_1$ 。

### 2.2 目标提取与面积计算

Step 1: 采集背景与前景图像。首先在空风洞状态下采集 1 张图像作为背景，记为  $B(x,y)$ ，如图 2(a)所示；再采集 1 张有运动员的图像作为前景，

记为  $F(x,y)$ ，如图 2(b)所示。

Step 2: 图像差分。前景图像与背景图像对应像素做差分，记为  $D(x,y)=F(x,y)-B(x,y)$ ，在光照不变的情况下，除了有运动员的区域外，其他区域灰度值几乎无变化，认为灰度差分值大于 20 的像素是有运动员的区域，予以保留，如图 2(c)所示。

Step 3: 局部补偿。从图 2(c)处理效果发现，图像差分后运动员小腿以上信息得到完整保留，但小腿位置的信息丢失。原因是由于小腿以上位置所对应的背景是风洞中心，为黑色，灰度值远小于运动员对应的前景；而小腿以下对应的背景是风洞地板，为白色，灰度值高于运动员对应的前景。对该区域做逆差分，记为  $R(x,y)=B(x,y)-F(x,y)$ ，将差分值大于 35 的像素予以保留。此时的处理效果可较好地保留运动员全貌，如图 2(d)所示。

Step 4: 噪点滤除。由于运动员在地面产生影子给图像差分带来误差，会引入少部分噪点，主要集中在 2 只滑雪板中间位置，这些噪点的特征是分散、面积较小，可设置像素连通数量作为滤除条件，将连通区域像素数少于 3 000 的部分予以滤除。

Step 5: 二值化。通过以上处理后对图像进行二值化，运动员特征得到了很好的提取。计算运动员对应的像素数量  $N_2$ 。

Step 6: 计算运动员投影面积。通过 A4 纸的像素数量  $N_1$ 、面积  $S_1$  和运动员的像素数量  $N_2$ ，可得到运动员的迎风投影面积  $S_2$ 。

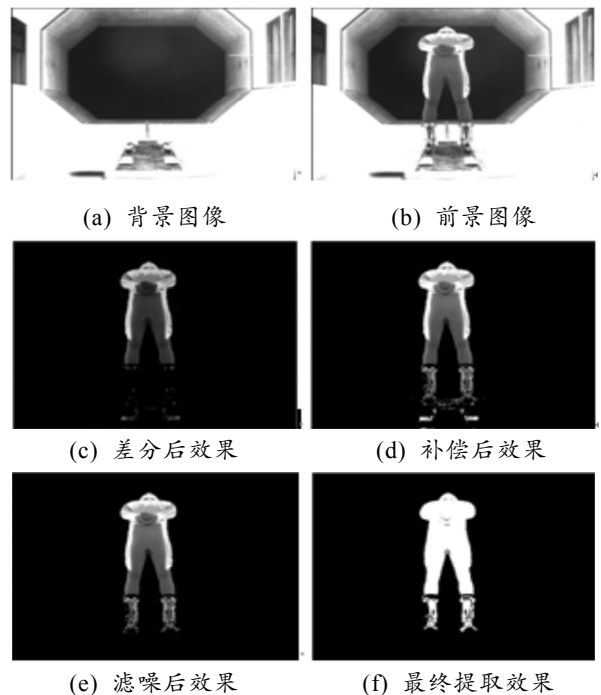


图 2 运动员提取过程效果

### 3 实验

实验在中国空气动力研究与发展中心 FL-12 风洞开展。实验风速 20 m/s(模拟 72 km/h 状态)，实验动压 245 Pa(稳动压控制)。实验中采用的工业相机分辨率为 1 380×1 030，A4 纸的面积为 0.117 m<sup>2</sup>，通过标定，得到 A4 纸为 33 716 个像素。运动员由站立逐渐调整至下蹲，共计 9 个姿势，原始图像如图 3 所示，通过上文介绍的算法处理后的效果如图 4 所示。

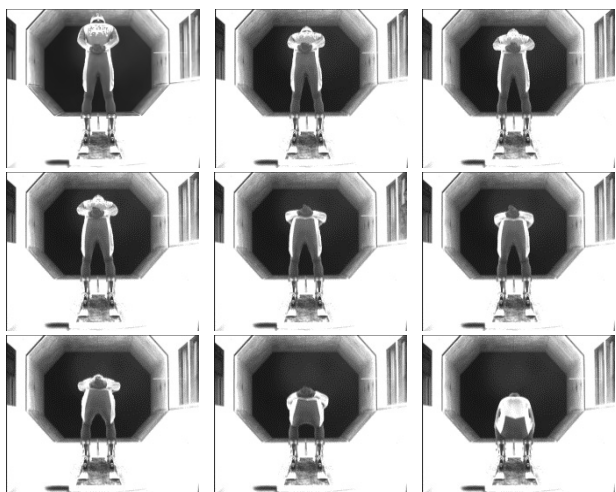


图 3 不同姿势的运动员图像

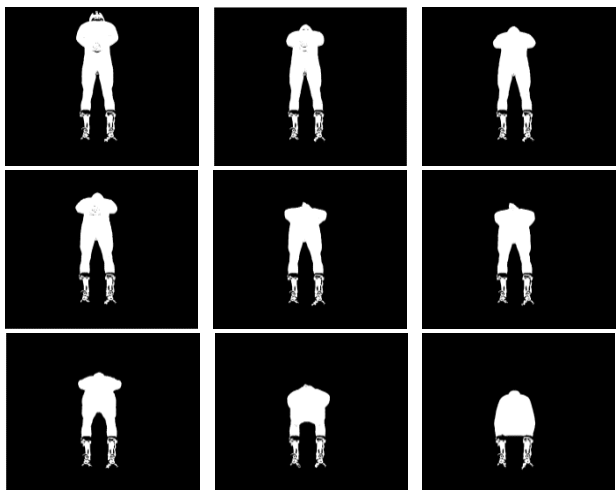


图 4 不同姿势的运动员处理后效果

不同姿势下运动员阻力测量结果如图 5 所示。图中不同的数字代表不同的身体姿势。实验结果显示：随着人体从站立到蹲下，空气阻力呈减小的趋势。在 1, 2, 3, 4 站立姿势时，空气阻力随身体姿势有一定幅度的震荡变化。在弯腰至半蹲状态的 5, 6, 7, 8 姿势下，阻力呈逐步减小的趋势，变化范围为 2.4~3.1 kg。在 9 完全下蹲姿势时，人体阻力最小。

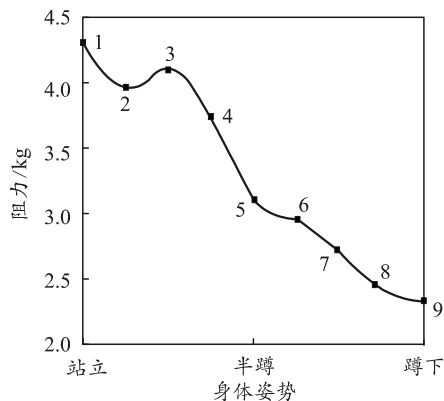


图 5 空气阻力随身体姿势变化

运动员迎风投影面积测量结果如图 6 所示，从站立至下蹲呈逐渐减小趋势。阻力系数计算结果如图 7 所示，显示在站立姿态 1, 2, 3, 4 时，阻力系数随身体姿势变化剧烈。在弯腰至半蹲状态 5, 6, 7, 8 姿势下，阻力系数数量值与变化幅度均较小。在完全下蹲姿势 9 时，阻力系数最小。

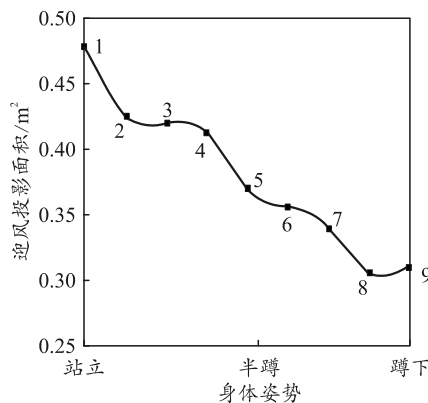


图 6 迎风投影面积随身体姿势变化

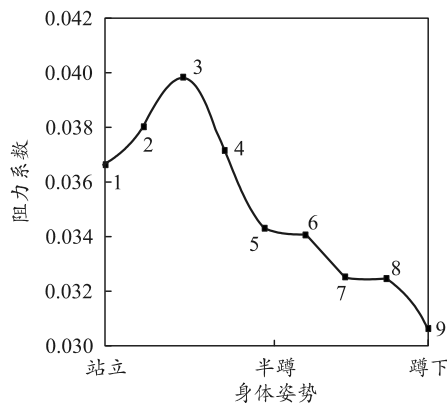


图 7 阻力系数随身体姿势变化

在助滑阶段，站立姿势阻力系数较大，不利于运动员提高速度，完全下蹲后阻力系数最小，但该姿势不利于运动员技术动作施展。综上分析，可采用弯腰至半蹲的身体姿势，此时运动员阻力特性较为稳定，阻力系数较小，约为 0.033。

### 4 结束语

我国冰雪项目由于起步晚,受天气、场地等条件的限制发展缓慢,为助力运动员在 2022 年北京冬奥会斩获佳绩,笔者提出了一种在风洞中测量滑雪运动阻力特性的实验方法,其关键参数运动员投影面积通过图像采集与处理的方式获取。通过实验发现,弯腰至半蹲姿势时阻力系数较小,有利于提高运动员成绩。该方法具有可量化分析且易于实现的优点,不仅可用于滑雪项目,而且同样适用于其他体育项目(如竞速自行车),为科学指导体育训练提供了新的手段和思路。

### 参考文献:

[1] 唐杨洋,席翼,罗俊峰.我国冰雪运动发展政策研究[J].冰雪运动,2018,40(6):31-35.  
 [2] 肖琳琳,连洋.2022年冬奥会对我国大众冰雪运动发展的影响[J].黑龙江科学,2019,10(1):156-157.

\*\*\*\*\*

(上接第 32 页)

### 参考文献:

[1] 方向,张卫平,高振儒,等.武器弹药系统工程与设计[M].北京:国防工业出版社,2012:12-13.  
 [2] 王志军,尹建平.弹药学[M].北京:北京理工大学出版社,2005:195-196.

\*\*\*\*\*

(上接第 46 页)

[8] 何建标.基于激光雷达的果园割草机器人路径规划研究[D].广州:华南农业大学,2016.  
 [9] 习卫娜.基于激光雷达的室内移动服务机器人定位与路径规划研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
 [10] 沈治.自适应 PID 控制的自动推料机器人的设计[J].机械设计与制造,2020(10):261-264,269.  
 [11] 张立娟,姜世公,崔登祺,等.人体下肢运动康复训练机器人的设计[J].兵工自动化,2015,34(5):50-53.  
 [12] 陈中,沈翠凤.基于 MSP430 单片机的环境参数检测系统设计[J].电工电气,2018(9):30-33,45.  
 [13] 程磊,刘波,徐建省,等.基于 OV2640 的微型胶囊内

[3] 魏丽辉,姜淑华.黑龙江省大众冰雪体育发展现状与对策研究[J].哈尔滨体育学院学报,2012,30(5):41-45.  
 [4] 谢霖铨,付悦华.高山滑雪速度的建模与求解[J].江西理工大学学报,2014,35(5):91-95  
 [5] 沈梦,胡紫婷,刘莉.基于空气动力学的高山滑雪竞赛服减阻分析[J].冰雪运动,2019,41(4):16-32.  
 [6] 辛大波,陶仕博,严力.速滑服风致减阻效能评价方法[J].冰雪运动,2012,34(1):92-96.  
 [7] 张才成.对影响高山滑雪滑行速度因素的分析[J].冰雪运动,2000(4):25-26.  
 [8] 许恩乐,周驰,李韶璞,等.平面型防风网阻力系数的研究[J].化学工程,2017,45(7):50-55.  
 [9] 孙清涛,赵欣悦,张晓萌.基于改进三帧差法的微小目标运动轨迹检测方法研究[J].装备制造技术,2019(3):135-137.  
 [10] 段锁林,高仁洲,刘福,等.融合改进帧差和视觉背景提取算法的前景检测[J].小型微型计算机系统,2019,40(9):1903-1908.

\*\*\*\*\*

[3] 智小琦.弹箭炸药装药技术[M].北京:兵器工业出版社,2012:98-99.  
 [4] 李斌,苟瑞君,陈亚红,等.破-破型串联战斗部前级爆炸对后级的影响研究[J].工程爆破,2013(1):28-31.  
 [5] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [6] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [7] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [8] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [9] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [10] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [11] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [12] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [13] 胡焕性.破甲战斗部精密装药基础及实验研究[J].火炸药学报,1999,22(1):1-5.  
 [14] 花加丽,马锋,李开霞,等.基于 nRF24L01 肠道机器人无线图像传输系统设计[J].自动化与仪器仪表,2019(1):87-89,93.  
 [15] 张鹏,张樱凡,倪俊超,等.基于 LPC1768 的智能浇花机器人设计[J].自动化与仪器仪表,2015(3):86-87,90.  
 [16] 牛国臣,许开鲁.基于线性 CCD 的类人机器人循迹系统的设计[J].现代电子技术,2018,41(2):133-136,140.  
 [17] 蒋青山,王凯,赵鹏,等.PID 算法与电位计角度控制的手臂外骨骼[J].单片机与嵌入式系统应用,2019,19(11):78-81.