

# 《跳台滑雪风洞训练指南》行业标准编制说明

## 一、工作简况

### （一）任务来源

风洞是以人工的方式产生并且控制气流，用来模拟实体周围气体的流动情况，并可量度气流对实体的作用效果以及观察物理现象的一种管道状设备，可应用于测试竞速类项目运动员的气动数据。在体育领域，风洞可应用于测试运动员的气动数据。根据相对运动原理，利用风洞内人工风速模拟运动速度，为运动员开展专项训练提供风阻模拟环境。跳台滑雪运动员在助滑、起跳和飞行阶段受空气动力影响较大，每个阶段的姿态和发力都对飞行距离产生重要影响，风洞训练已成为跳台滑雪训练的重要组成部分。形成系统化、规范化、科学化的跳台滑雪项目风洞训练体系，对于指导跳台滑雪运动员在仿真风阻环境中完成减阻姿态优化、加强肌肉记忆、提升技术水平具有重要意义。

2020年10月，由北京体育大学牵头的“冬季项目运动减阻关键技术及平台研究”（编号：2020YFF0304600）项目立项国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项，根据考核指标要求，由课题五“雪上专项特征研究与减阻技术训练和示范应用”执行研制体育风洞相关行业技术标准工作，拟制定《跳台滑雪风洞训练指南》体育行业标准，并于2022年8月，向全国体育标准化技术委员会提交《跳台滑雪风洞训练指南》推荐性行业标准立项申请函。

2023年11月，国家体育总局发布《跳台滑雪风洞训练指南》体育行业标准立项通知，标准计划为号202302，项目周期18个月。

### （二）标准的起草单位及起草人

本标准的起草单位为：宁波大学、国家体育总局体育科学研究所、中国航空工业空气动力研究院、首都体育学院。

本标准的主要起草人为：顾耀东、张妍、黄希发、李庆利、李海鹏、刘雨薇、王崇利、张栋、杨玮、陈小平、洪扬。

### （三）主要工作过程

#### （1）预阶段

2021年1月2日，宁波大学联合国家体育总局体育科学研究所、首都体育学院和中国航空工业空气动力研究院开展了体育风洞相关行业技术标准编制第一次研讨会。综合考虑2022北京冬奥会现实需求和可行性，确定以我国首座跳台滑雪专用风洞为对象，经讨论，初步拟定以下标准制定方向：1）采用风洞对体育器材装备的性能进行测试，体育风洞作为一种试验设备；2）采用风洞对运动员进行测试，体育风洞作为一种运动训练设备。

2021年2月-2021年9月，课题组成员通过查阅大量文献资料和相关案例，在充分了解国际上体育风洞使用情况的基础上，多次前往中国航空工业空气动力研究院（沈阳）、二七国家冰雪运动科训基地进行实地调研，调研中发现，二七厂体育综合训练风洞主要用于跳台滑雪项目开展训练和测试，尽管该风洞性能处于同行业领先水平，但缺少科学、系统的跳台滑雪专项风洞训练方法是限制训练效果提升的主要问题。9月27日，宁波大学组织各起草单位开展了体育风洞相关行业技术标准编制第二次研讨会，明确制定《跳台滑雪风洞训练指南》体育行业标准。

2021年10月-2022年3月，在体育风洞专业人员的指导下，课题组成员多次组织跳台滑雪国家队和北欧两项国家队的重点运动员进行助滑、起跳、飞行阶段不同姿态减阻优化风洞测试，采集相关运动学与动力学数据并进行整理，

用于参数验证分析。2022年3月20日，宁波大学宁波大学组织各起草单位开展了体育风洞相关行业技术标准编制第三次研讨会，针对测试数据进行讨论，明确了跳台滑雪风洞训练的关键技术指标和参数。

## （2）立项阶段

2022年3-6月，相关人员对标准的编制原则、主要内容和涉及的范围、与有关的现行标准的关系进行了研究，确定了标准结构，形成了《跳台滑雪风洞训练指南》体育行业标准初稿。6月6日，宁波大学组织各起草单位开展了体育风洞相关行业技术标准编制第四次研讨会，内部达成了一致意见，通过《跳台滑雪风洞训练指南》体育行业标准初稿。

2022年8月，国家体育总局体育科学研究所向全国体育标准化技术委员会提交《跳台滑雪风洞训练指南》推荐性行业标准立项申请函。

2023年1月，根据冬运中心关于《体育总局体育科学研究所关于对〈跳台滑雪风洞训练指南〉推荐性行业标准立项征求意见的函》的复函意见进行修改。3月12日，宁波大学组织各起草单位开展了体育风洞相关行业技术标准编制第五次研讨会，内部达成了一致意见，确定《跳台滑雪风洞训练指南》体育行业标准初稿的修订稿。

2023年11月，体育总局发布2023年体育行业标准立项通知，《跳台滑雪风洞训练指南》立项，计划号202302，项目周期18个月。

## （3）起草阶段

2023年12月19日，体育总局体育器材装备中心召开2023年体育行业标准编制启动会。会议介绍了体育行标制定程序、标准编制过程中注意事项和主要问题，并说明了标准编写的规范性要求。

2023年12月20日，宁波大学组织各起草单位开展了体育风洞相关行业技

术标准编制第六次研讨会，成立了标准起草组，制定了标准编制方案及编制工作计划。主要起草人共 11 名，其中：顾耀东负责标准编制单位的沟通和协调，张妍负责主笔撰写，黄希发、杨玮、洪扬负责文本修改，陈小平负责跳台滑雪专项风洞训练内容顾问，李庆利、王崇利负责风洞设备的技术顾问，李海鹏、刘雨薇、张栋负责风洞测试和数据整理。

2024 年 3 月，在与运动训练学和空气动力学领域相关专家进行沟通交流的基础上，进一步明确了跳台滑雪风洞训练的训练程序和效果评价指标。起草组成员经多次商讨，对标准的体例、语言、层次等表述形式的规范性进行了修订，形成了《跳台滑雪风洞训练指南》标准征求意见稿。3 月 10 日，宁波大学组织各起草单位开展了体育风洞相关行业技术标准编制第七次研讨会，起草工作组内部达成了一致意见，确定《跳台滑雪风洞训练指南》标准征求意见稿。

#### （四）制定标准的必要性和意义

风洞训练在国际上已成为跳台滑雪训练的重要组成部分。然而，我国跳台滑雪项目起步较晚，风洞训练经验不足，缺少科学、系统的训练指导规范。目前日本、英国、美国及瑞典等雪上项目强国都具备较成熟的跳台滑雪风洞训练能力，我国跳台滑雪风洞训练过度依赖外籍教练。为推动我国跳台滑雪专项训练向国际化、科学化、规范化发展，制定我国自己的跳台滑雪项目风洞训练指南性标准迫在眉睫。

## 二、标准编制原则与确定标准主要内容的依据

### （一）标准编制原则

适应性：所制定的标准应与体育综合训练风洞性能、运动员竞技水平相适应，并具有可操作性，且易于实施。

科学性：基于最新跳台滑雪空气动力学和训练学科研成果，标准的内容应经过充分的科学和试验论证，确保训练方法和技术是科学有效的。

合理性：标准的章节应注意完整性、独立性，逻辑层次应清晰，训练条件、训练流程和内容、训练效果评价依次进行阐述。

规范性：标准文本的编写形式、标准内容的制定原则、标准制定的工作流程符合 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定。

## （二）本标准主要内容

本标准包括七个章节，确立了跳台滑雪风洞训练的原则，给出了跳台滑雪风洞训练的流程和内容，以及训练效果评价与改进等方面的指导。

原则：跳台滑雪风洞训练应基于科学性、针对性和有效性原则。1) 以空气动力学原理为基础，结合运动实践，兼顾运动员的减阻姿态与肌肉发力模式，对最佳减阻姿态和姿态控制的稳定性进行训练，保证训练的科学性。2) 关注运动员个性化特点，充分考虑不同运动员的技术水平和技术特点，制定个性化的姿态减阻训练计划，保证训练的针对性。3) 将定性评价与定量评价相结合，根据评价结果判断训练效果、分析技术薄弱点，找到问题所在，调整训练计划，保证训练的有效性。

训练条件：跳台滑雪风洞训练在专用风洞实验室展开。风洞试验段具备完成跳台滑雪助滑、起跳和飞行阶段减阻姿态训练及数据监测的功能。风洞训练在教练员、操作员和安全员配合下实施。宜制定安全应急预案并定期进行演练。

训练流程和内容：跳台滑雪风洞训练流程：1) 准备活动，包括热身训练和设备调试；2) 风速适应，包括使用惯用助滑姿态适应助滑训练风速、使用惯用起跳动作适应起跳训练风速和使用惯用飞行姿态适应飞行训练风速；3) 正式训

练，包括助滑阶段、起跳阶段和飞行阶段减阻姿态训练；4) 数据采集和导出，包括姿态和力数据的采集、导出及存档。

训练效果评价与改进：训练结束后，运动员、教练员和操作员共同完成风洞训练效果评价，通过综合分析定性评价（运动员的主观感受报告和教练员的反馈评价）和定量评价（运动学和动力学评估）结果的一致性，对助滑、起跳和飞行阶段运动员的减阻姿态进行评价，明确姿态减阻的关键优势和薄弱环节。同时，通过定期例会，根据评价结果判断训练效果，分析技术薄弱点，适当调整训练计划。

### （三）本标准制定参考的主要依据

空气动力学原理：风洞训练的核心原则和条件是基于空气动力学的理论。这是因为跳台滑雪运动员在比赛中面临的主要物理挑战之一是克服空气阻力。因此，制定风洞训练的原则和条件时，重点放在模拟真实比赛中的空气动力环境，以优化运动员的姿态和技术，减少空气阻力。

跳台滑雪的运动实践：考虑到运动员在实际比赛中的体验和动作需求，风洞训练的设计和评价系统与实际的运动实践紧密结合。这包括模拟比赛中的风速条件、运动员的起跳和飞行姿势等，确保训练环境尽可能地接近真实比赛情境。

运动员性能的提升需求：设计训练流程和内容时，主要依据是提高运动员的整体性能。这包括提高他们在助滑、起跳和飞行阶段的技术水平，以及通过针对性训练提高其竞技状态。

全面的效果评价机制：评价标准的制定基于对训练效果全面、系统的评估需求。这不仅包括定性评价，如运动员和教练员的主观感受，还包括定量评价，如运动学和动力学数据的分析，以确保评价的准确性和客观性。

安全性和应急响应：考虑到风洞训练的安全性，特别是在模拟高速和不同角度的训练过程中，制定了详细的安全预案和应急措施。这包括对运动员、设备故障和火灾等情况的应急预案，以确保训练环境的安全性。

### 三、主要条款的说明，主要技术指标、参数和试验验证分析

#### （一）主要条款的说明

无。

#### （二）主要技术指标、参数和试验验证分析

### 1. 风速

#### 1.1 试验验证

针对跳台滑雪国家队运动员实地跳台训练进行测试，使用测速仪测量离开助滑坡前的滑行速度及离开跳台时的出台速度。每名运动员按顺序依次起跳，完成一轮跳跃后集体乘坐缆车返回起点处准备下一轮跳跃，每名运动员进行 3 次跳跃，共计 18 次。

#### 1.2 验证分析

运动员的助滑速度范围为 85-89 km/h，出台速度范围为 88-91 km/h。基于相对运动原理，根据实际运动速度设定风洞训练的模拟风速，助滑阶段风洞中风速宜参考助滑速度，设定为 23.6m/s~25m/s；起跳和飞行阶段风洞中风速宜参考出台速度，设定为 24.4m/s~25.6 m/s。

### 2. 助滑和起跳阶段关节角度、左右天平（侧向）力

#### 2.1 试验验证

在位于河北省涞源县国家跳台滑雪训练科研基地的风洞实验室中，针对跳台滑雪国家队运动员进行了为期三周的姿态捕捉系统与天平测力同步采集测

试，获取运动员助滑姿势数据和天平力数据，通过寻找姿态数据与所受风载的对应关系，帮助运动员优化助滑姿势。

助滑姿态测试在风洞水平试验段中进行，风速设定为 23.6m/s；起跳姿态测试在风洞 11° 试验段中进行，风速设定为 25.4m/s。测试所用的姿态捕捉系统包括两台工业级摄像机、同步器和数据采集与处理软件等。两台摄像机安装于试验段外护栏上，布置于运动员前方两侧（图 2.1）。两台六分量天平用于测量单脚力（图 2.2），中运动员站立于雪板上（图 2.3），每个雪板下方连接一台六分量天平，天平位于试验段下壁板下方，天平实时感受运动员所受风载，并通过测力数据采集与处理系统实时输出力数据和曲线。



图 2.1 摄像头布置



图 2.2 两台单脚测力天平（左）及安装完成后的天平及天平支架（右）



图 2.3 运动员风洞水平试验段助滑训练及测试

测试过程中，采用时钟同步的手段实现姿态捕捉系统与天平测力同步采集，由姿态捕捉系统发出开始采集信号，之后姿态捕捉系统和天平测力采集系统开始同步采集 10s 内运动员姿态数据（以视频的方式，后处理得到姿态数据）和力数据，采集频率均设定为 50Hz。图 2.4 为测力数据采集与处理软件界面，界面左上方为风速控制，界面左下方为天平数据存储，界面右侧为实时显示的天平六分量力数据与曲线。采集完成后，分别保存姿态数据和力数据以方便后续处理。图 2.5 为现场同步采集工作照片。

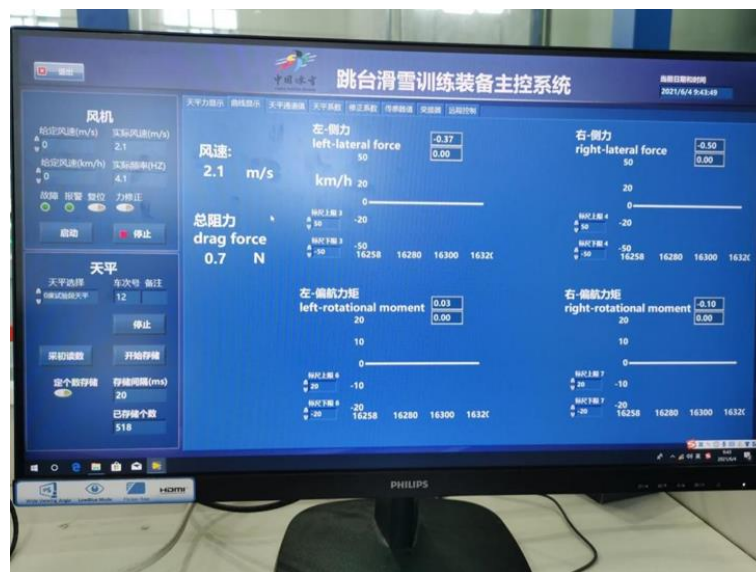


图 2.4 测力数据采集与处理软件界面



图 2.5 姿态捕捉系统与天平测力现场同步采集

## 2.2 验证分析

试验验证的主要目的是针对姿态的气动减阻，因此，将阻力与姿态数据综合进行分析。

### 2.2.1 关节角度

运动员助滑过程中阻力相当大一部分为压差阻力，降低压差阻力最直接手段的是减小人体的迎风面积，也就是在不影响起跳发力的情况下，通过姿态优化，尽量减小身体迎风面各关节角度。助滑阶段阻力（以阻力面积  $C_dA$  表示）与身体各关节角度相关性分析表明，风阻与髋关节角度（矢状面内躯干与大腿夹角）和膝关节角度（矢状面内大腿与小腿夹角）相关性较高，其次为踝关节角度（矢状面内小腿与地面夹角）。以运动员 A 数据为例，如表 2.1 和图 2.6 中所示，相关系数在 0.95 以上。因此要降低风阻，应尽量减小髋、膝、踝关节角度。

表 2.1 运动员  $AC_dA$  与姿态角相关系数

数据号	左肩	右肩	左髋	右髋	右膝	左膝	右踝	左踝
-----	----	----	----	----	----	----	----	----

20210610175508	0.95	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.96	0.95
20210610175350	0.58	0.87	0.99	0.99	0.99	0.99	0.95	0.98

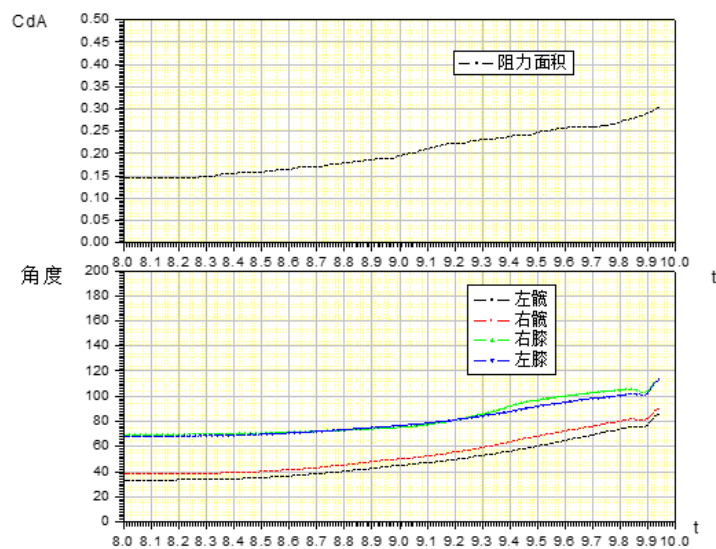


图 2.6  $C_dA$  与髌、膝角度相关性曲线图

表 2.2 给出了运动员 A 等运动员姿态减阻优化典型的数据结果，可以看出，通过减小髌、膝、踝角度，减阻效果明显，气动减阻率达到 5% 以上，这也就意味着出台速度可以提高 0.25m/s 以上，飞行距离增加 2.5m 以上。当跳台滑雪运动员沿着助滑坡下滑时，最主要任务是维持滑行过程中的动态平衡和加速稳定性，最小化空气阻力，最小化雪板与雪面摩擦力，获得更高的起跳初速度。

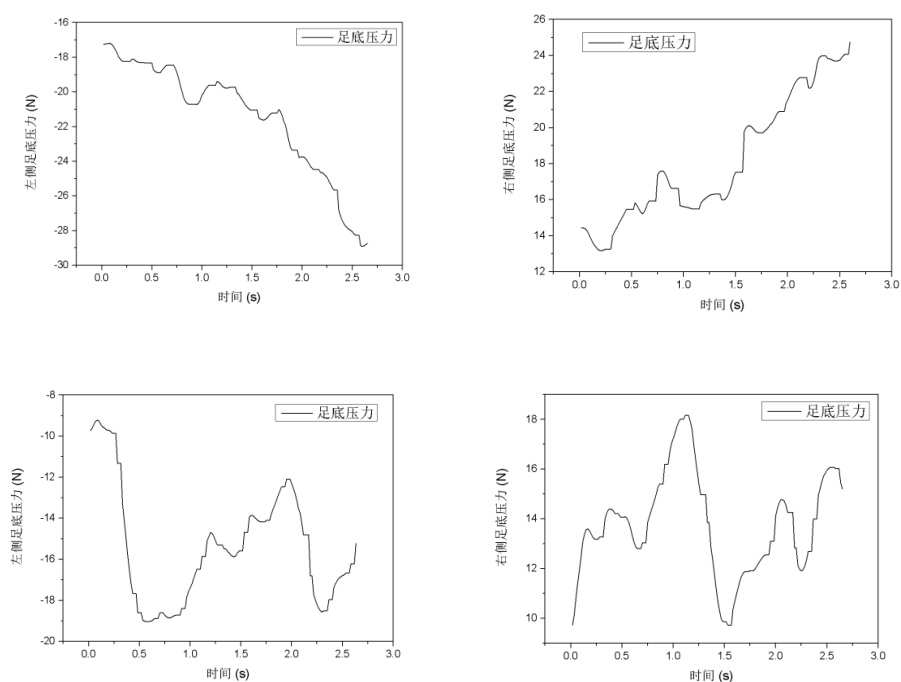
表 2.2  $C_dA$  与姿态角相关系数

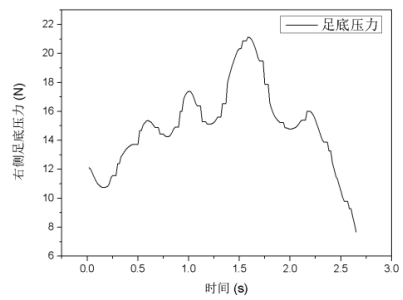
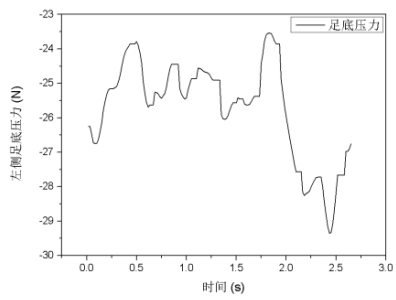
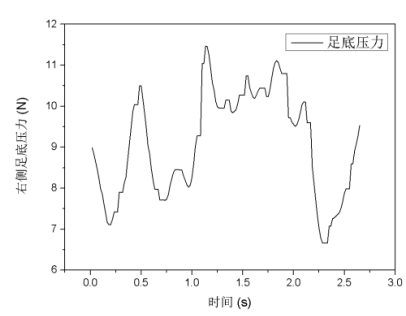
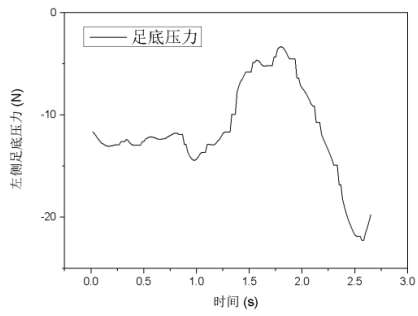
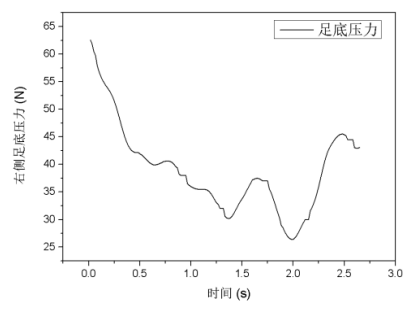
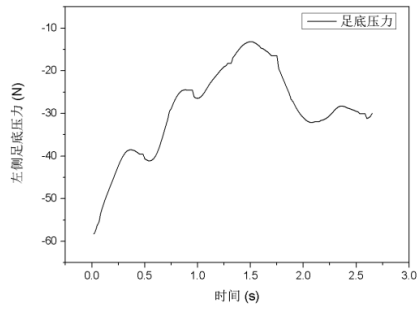
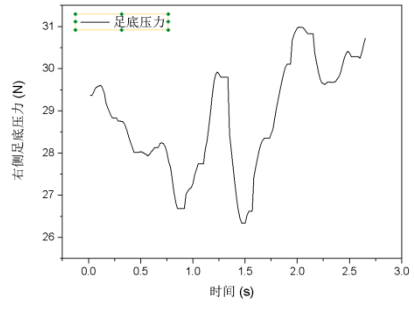
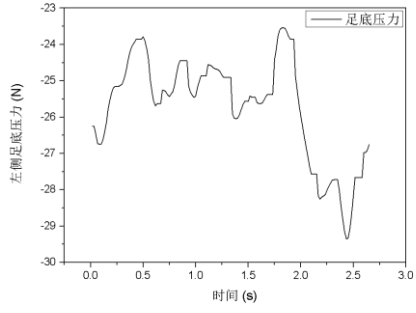
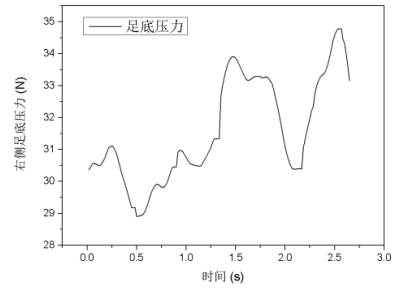
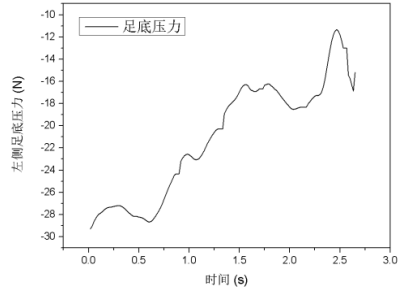
	$C_dA$	左髌	右髌	右膝	左膝	右踝	左踝
运动员 A	0.1683	40.90	47.28	81.17	81.94	77.06	76.30
	0.1596	36.84	40.52	77.91	79.11	74.93	76.80
运动员 B	0.1773	39.86	38.80	86.70	88.12	80.72	79.16
	0.1684	34.25	39.11	86.16	85.24	78.17	78.12
运动员 C	0.1741	38.62	44.77	92.28	89.06	82.22	87.23
	0.1560	35.85	38.36	81.90	84.28	79.73	79.71

运动员D	0.1737	36.38	35.40	79.35	80.02	76.20	76.66
	0.1633	37.96	35.90	73.86	81.62	72.98	73.99
运动员E	0.1582	41.42	47.90	78.72	80.56	84.85	77.86
	0.1405	38.56	40.14	80.51	77.63	75.73	71.17
运动员F	0.1603	39.68	37.89	65.87	68.04	77.38	70.70
	0.1483	33.39	33.23	64.48	62.97	77.06	73.08
运动员G	0.1330	38.56	35.63	81.85	84.23	73.26	70.58
	0.1231	35.07	35.94	76.59	77.12	68.52	65.81
运动员H	0.1504	43.53	46.13	79.90	80.97	74.52	72.48
	0.1356	40.30	48.67	73.28	73.52	65.56	67.55

### 2.2.2 天平（侧向）力

跳台滑雪助滑阶段，运动员在两条固定的滑雪道内下滑，运动员双脚侧向力和旋转力矩都会导致滑雪板与雪道侧壁相剐蹭，这也是降低运动员出台速度的主要影响因素之一。参与本次测试运动员左、右脚侧向力结果如图 2.7 所示。





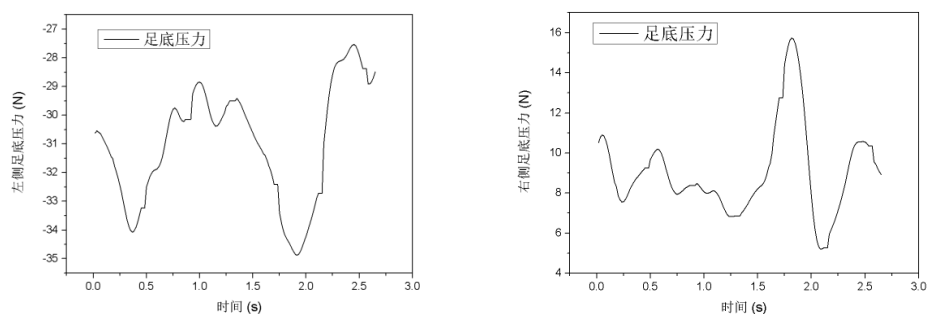


图 2.7 运动员助滑阶段左右脚侧向力

### 2.2.3 起跳模式

为验证不同起跳姿态对气动阻力的影响，起跳姿态根据不同运动员（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 5 种起跳姿态下，同时分别测定髋关节角度、膝关节角度、踝关节角度和运动员阻力参数。

从起跳动作关节角度分析，运动员在起跳过程中踝关节角度均变化不大，踝关节角度均保持在约  $60^\circ$ ，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，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和膝关节角度的数值和变化趋势。其中，髋关节角度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变化的大小、速度和时机应与髋关节角度一致，在动作过程中应做到髋关节角度和膝关节角度变化同步，才能使动作的能量得到最大节省。

从空气阻力角度分析，在起跳初始的助滑时，应使髋关节角度和膝关节角度尽量降低，采用更低的蹲踞式姿势，从而降低阻力系数。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。

1) 运动员 A (起跳模式一，图 2.8a) 起跳时，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 B (起跳模式二，图 2.8b) 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) 运动员 C (起跳模式三，图 2.8c) 是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 D (起跳模式四，图 2.8d) 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 E (起跳模式五, 图 2.8e) 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。

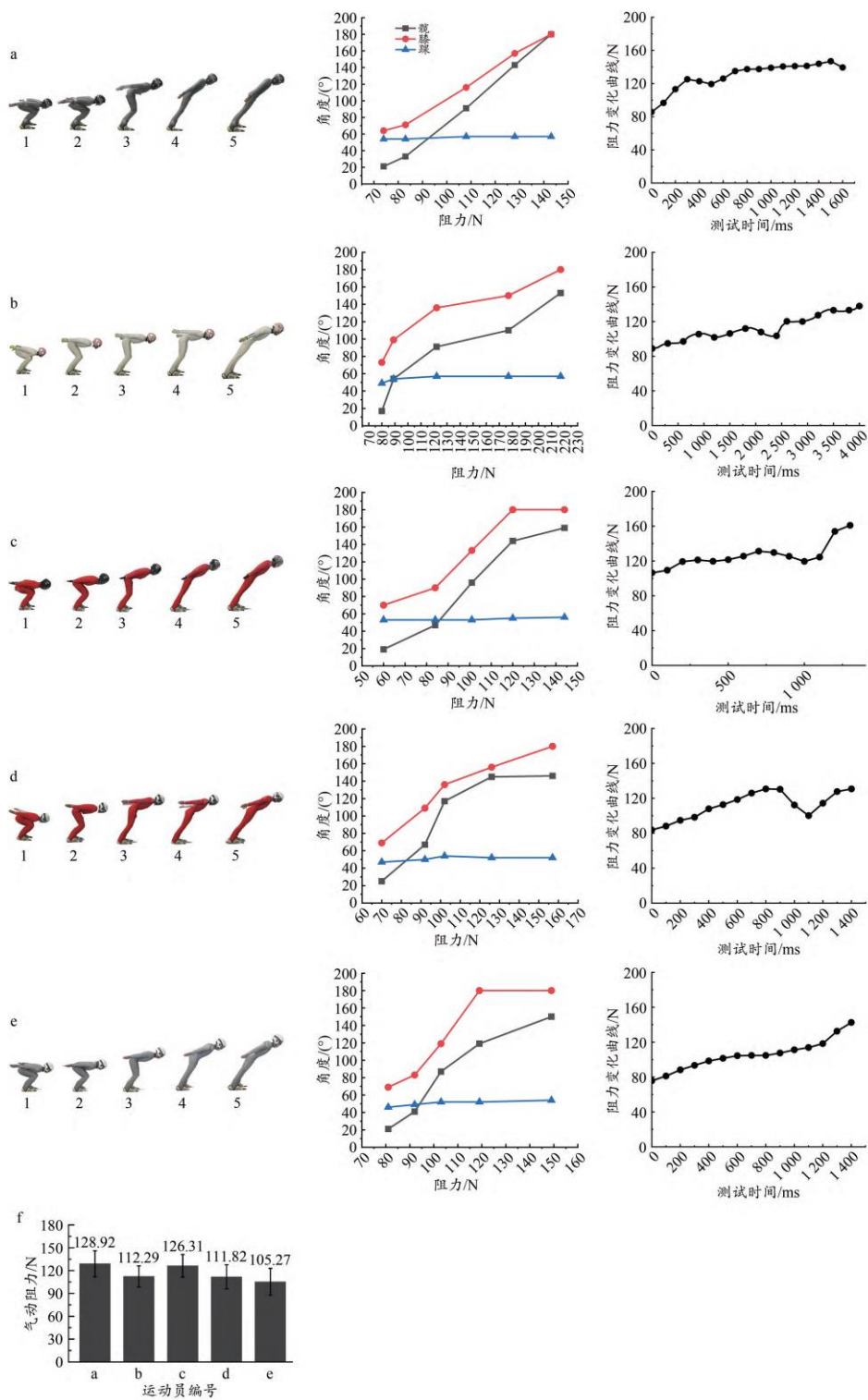


图 2.8 不同运动员在起跳中动作姿态的气动阻力比较

5 种起跳动作模式过程中产生的平均空气阻力，模式五最小为 105.27 N，模式一最大为 128.92 N，最佳姿态的减阻率为 18.34%（图 2.8f）。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期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，运动员采用模式二起跳时，蹬伸时间延长至 2 倍以上，其整个起跳的平均风阻也有所升高。

### 3. 飞行阶段关节角度和雪板角度

#### 3.1 试验验证

##### 3.1.1 模型与网格

通过扫描冬奥会跳台滑雪运动员 A 的飞行姿态，再利用 3D 动画建模技术所建立的真实人体模型，逼真度高，但建模时间较长。以运动员 A 为典型案例，进行了 3D 扫描的精细化建模，如图 3.1 所示。

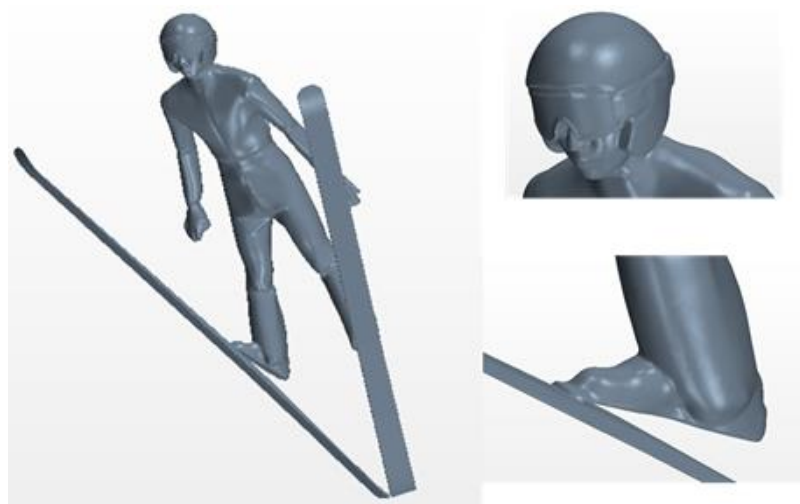


图 3.1 精细化运动员 A 模型

3D 扫描模型采用了 STARCCM+生成的多面体网格。网格示意图如图 3.2 所示。在运动员身体较狭窄的部位均采用了网格加密，保证了网格过渡性，以满足精度要求。

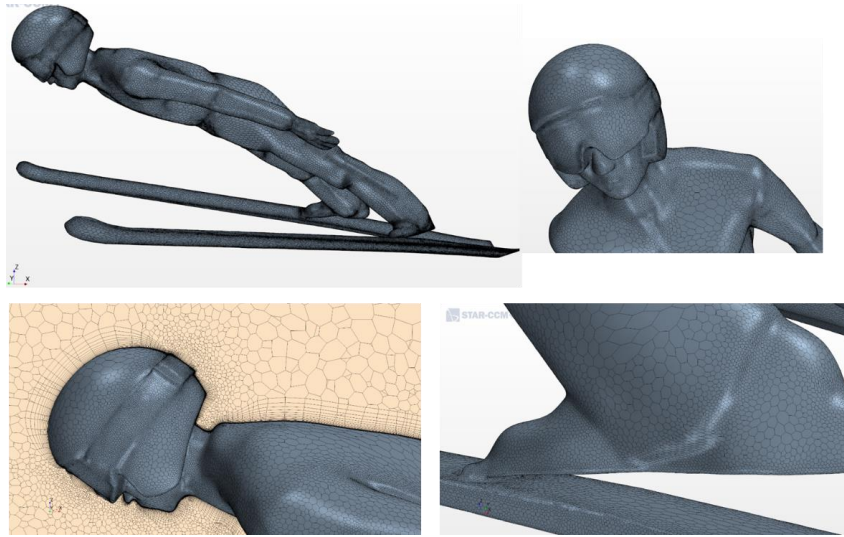


图 3.2 精细化模型网格图

### 3.1.2 CFD 计算

计算流体力学的控制方程采用三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程。此方程组由包括描述流体运动的质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律方程，以及给出热力学关系式的状态方程组成。在笛卡尔坐标系下，若不考虑体积力和外部热源，这些方程的量纲唯一的守恒形式可写为（这里以特征长度  $L$  及自由来流参数，包括声速  $c_\infty$ 、温度  $T_\infty$ 、粘性系数  $\mu_\infty$ 、密度  $\rho_\infty$  作为特征变量）：

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = \frac{M_\infty}{\text{Re}_\infty} \left( \frac{\partial \mathbf{F}_v}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}_v}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}_v}{\partial z} \right) \quad (3.1)$$

其中， $M_\infty$  为自由来流的马赫数， $\text{Re}_\infty = \frac{\rho_\infty V_\infty L}{\mu_\infty}$  为自由来流的雷诺数。式中， $\mathbf{Q}$  为守恒变量，表示为：

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho e \end{bmatrix}$$

$\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$  分别为三个坐标方向的无粘通量矢量，表示为：

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ (\rho e + p)u \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho uv \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ (\rho e + p)v \end{bmatrix}; \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho uw \\ \rho vw \\ \rho w^2 + p \\ (\rho e + p)w \end{bmatrix}$$

$\mathbf{F}_v, \mathbf{G}_v, \mathbf{H}_v$  分别为三个坐标方向的粘性通量矢量，表示为：

$$\mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} + kT_x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} + kT_y \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H}_v = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz} + kT_z \end{bmatrix}$$

其中，应力项为：

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xx} &= \frac{2}{3}\mu \left( 2\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{yy} &= \frac{2}{3}\mu \left( 2\frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \tau_{zz} &= \frac{2}{3}\mu \left( 2\frac{\partial w}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \end{aligned} \right\}; \quad \left. \begin{aligned} \tau_{xy} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) = \tau_{yx} \\ \tau_{xz} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \tau_{zx} \\ \tau_{yz} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) = \tau_{zy} \end{aligned} \right\}$$

压力由完全气体状态方程给出，即：

$$p = (\gamma - 1) \left[ \rho e - \frac{\rho}{2} (u^2 + v^2 + w^2) \right] \quad (3.2)$$

### 3.1.3 计算状态及边界条件

针对运动员 A 精细化模型开展了一系列影响因素的精确定常计算，典型影响因素包括运动员小腿与滑板夹角，雪板 V 角（左右雪板夹角），髋关节夹角等，夹角选取范围参考了运动员 A 运动员平时训练时的波动角度范围，如小腿

与滑雪板夹角为  $15^\circ$ 、 $17^\circ$ 、 $19^\circ$ 、 $21^\circ$ ，雪板  $V$  角为  $32^\circ$ 、 $35^\circ$ 、 $38^\circ$ ，髋关节角度为  $161^\circ$ 、 $165^\circ$ 、 $169^\circ$ 、 $173^\circ$ 。计算来流边界为远场自由流边界。获得定常计算结果后，结合快速评估方法程序获得不同姿态或速度对飞行轨迹和距离的影响。

### 3.1.4 快速评估方法程序

在获得运动员在空中飞行时的定常气动力后，可结合一套用于快速评估运动员飞行轨迹和飞行距离的评估程序，用于直观判断空中跳台初期运动员所受气动力对飞行轨迹和飞行距离的影响。该程序参考了飞行器虚拟飞行的概念。程序输入为跳台滑雪运动员的所受的定常气动力计算结果，以及运动时间，初始水平速度和垂直速度，程序输出为运动员飞行轨迹以及落点位置。运动员在实际飞行中，由自身控制尽量保持姿态不变，在起跳后的约 3 秒内属于调整稳定姿态阶段，可将运动员视为刚体，忽略运动员身体各部分的变化，受重力的影响会产生  $10^\circ$  以内绕重心位置的微小角度俯仰方向偏转。在每一个时间段  $\Delta t$  内，认为气动力不变，应用运动定律计算  $\Delta t$  时间内的位移和速度，应用此速度大小和方向计算出  $\Delta t$  后的气动力，计算该气动力下的运动。每一离散时间的气动力均发生变化，此气动力应用插值方法获得，无需再次计算，将每一时间段内的气动力应用运动学方程，求解该段时间内的位移和速度，将所有离散时间段内的位移进行求和，即可获得整个飞行过程的运动轨迹。

### 3.2 验证分析

飞行阶段姿态角定义如图 3.3 所示，其中， $\alpha_1$  为矢状面内滑雪板与腿部夹角， $\alpha_1 = 15 \sim 21^\circ$ ，为滑雪板与水平方向角度，本次计算中  $\alpha_2$  均为  $0$ ， $\alpha_3$  为来流方向与水平方向角度，计算迎角范围  $0^\circ - 35^\circ$ ，每  $5^\circ$  间隔。

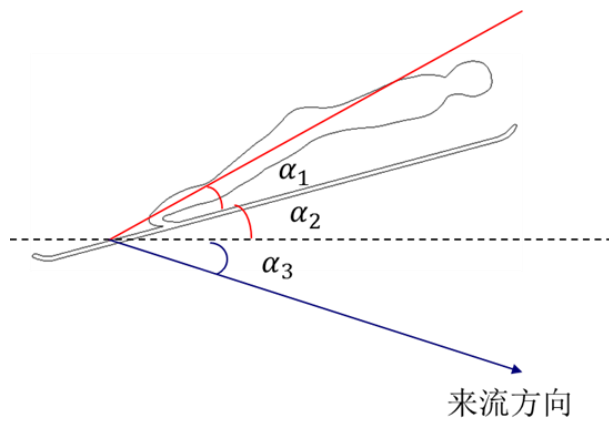


图 3.3 精细化模型角度定义

### 3.2.1 轨迹预测

为将定常计算得到的气动力转换成飞行轨迹和距离，需提前获得气动力系数随攻角的变化曲线，获得气动力系数函数公式，并应用到快速评估方法程序中。表 3.1 为运动员 A 模型腿部夹角  $15^\circ$ ，滑板 V 夹角  $32^\circ$ ，相对风速为  $25\text{m/s}$  时的气动力计算结果，图 3.4 显示了气动力变化曲线公式和拟合的曲线表达式。

表 3.1 定常气动力随攻角变化表

迎角	升力系数	阻力系数
0	3.27E-02	1.11E-01
5	1.09E-01	1.22E-01
10	2.07E-01	1.18E-01
15	3.49E-01	1.10E-01
25	5.62E-01	8.17E-02
30	7.11E-01	6.95E-02
35	8.26E-01	6.50E-02

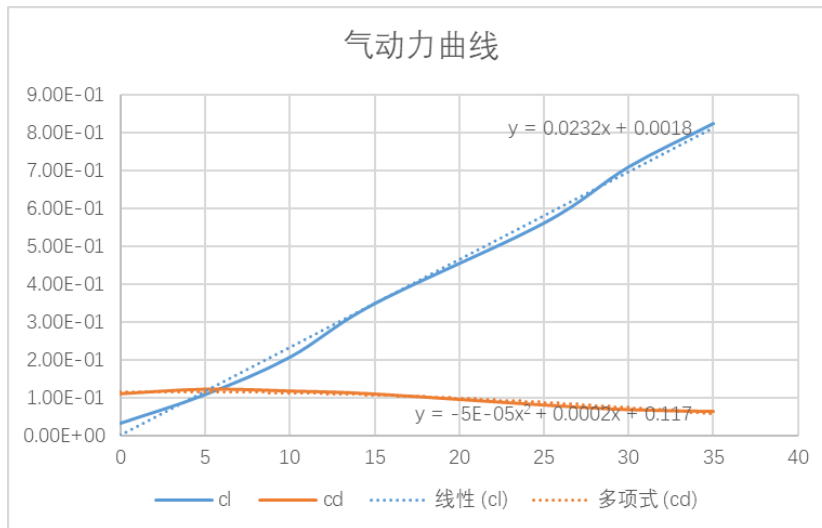


图 3.4 气动力系数随攻角变化曲线

### 3.2.2 小腿与雪板夹角

根据运动员实际跳台训练的数据，计算得到出台水平速度均选为 29m/s，出台垂直速度均选为 2m/s，图 3.5 显示了小腿与雪板夹角为 15°、17°、19°、21° 时的飞行轨迹。

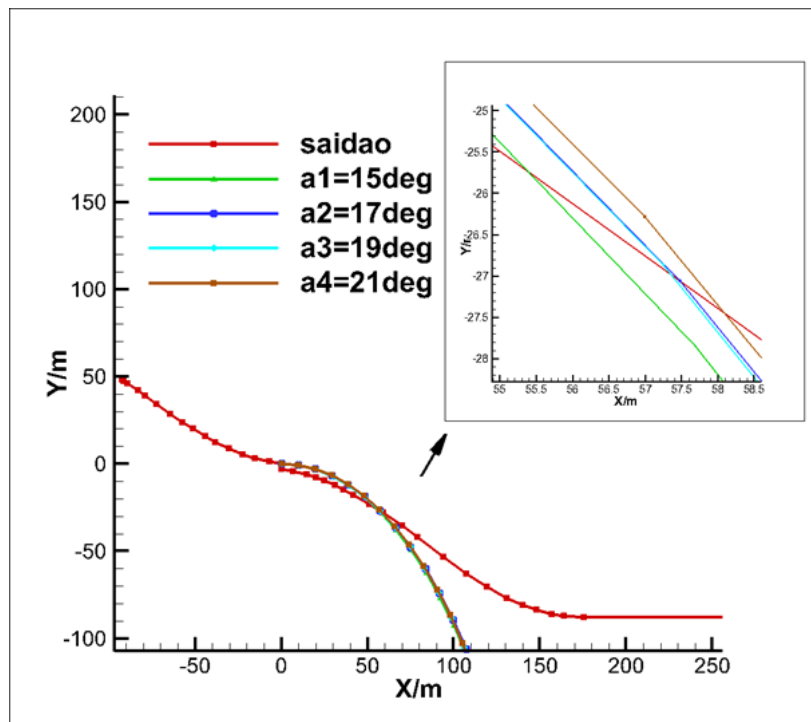


图 3.5 不同小腿与雪板夹角飞行轨迹

表 3.5 显示了具体距离值， $17^\circ$  距 15 度提升较大，与  $19^\circ$  及  $21^\circ$  的差异不明显，均可获较远的飞行距离，从数据上看，建议运动员两腿夹角能够达到  $17^\circ$  以上。

表 3.5 小腿与雪板夹角对飞行距离的影响

小腿与雪板夹角	雪板 V 角	髋关节角度	水平初始速度 (m/s)	垂直初始速度 (m/s)	运动员体重 (kg)	赛道距离 (m)	水平飞行距离(m)	垂直下落距离(m)
<b>15</b>	32	165	29	2	53	116.54	100.54	59.43
<b>17</b>	32	165	29	2	53	120.14	103.44	61.58
<b>19</b>	32	165	29	2	53	119.16	102.65	60.91
<b>21</b>	32	165	29	2	53	120.90	104.05	61.98

### 3.2.3 雪板 V 角

根据运动员实际跳台训练的数据，计算得到出台水平速度均选为  $29\text{m/s}$ ，出台垂直速度均选为  $2\text{m/s}$ ，图 3.6 显示了运动轨迹。固定腿部夹角  $15^\circ$ ，髋关节夹角  $165^\circ$ ，雪板 V 角为  $32^\circ$ 、 $35^\circ$  和  $38^\circ$  时的影响。

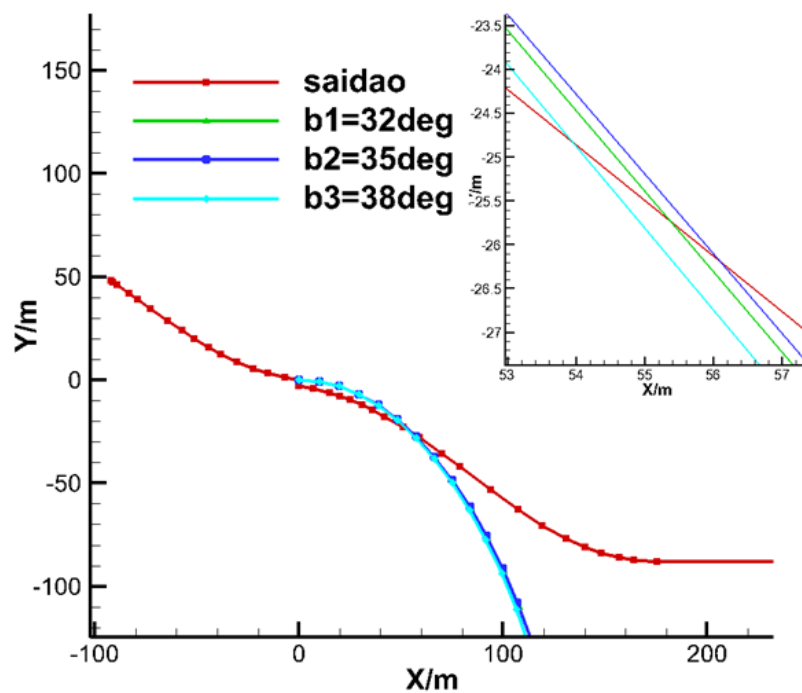


图 3.6 不同雪板 V 夹角飞行轨迹

表 3.6 显示了具体距离值，其中，35° 角度所获得的距离值要远于其他两个夹角，为最优夹角，其次为 32° 角度。但是，张开如此宽度的滑雪板夹角的飞行姿态可能会使运动员飞行变得不稳定。

表 3.6 雪板 V 角对飞行距离的影响

小腿与滑雪板夹角	雪板 V 角	髋关节角度	水平初始速度 (m/s)	垂直初始速度 (m/s)	运动员体重 (kg)	赛道距离 (m)	水平飞行距离(m)	垂直下落距离(m)
15	<b>32</b>	165	29	2	53	116.54	100.54	59.43
15	<b>35</b>	165	29	2	53	117.20	101.08	59.68
15	<b>38</b>	165	29	2	53	112.44	97.26	56.88

### 3.2.4 髋关节角度

根据运动员实际跳台训练的数据，计算得到出台水平速度均选为 29m/s，出台垂直速度均选为 2m/s，表 3.7 计算结果表明，髋关节夹角达到 165° 以上较为有利。

表 3.7 髋关节角度对飞行距离的影响

小腿与滑雪板夹角	雪板 V 角	髋关节角度	水平初始速度 (m/s)	垂直初始速度 (m/s)	运动员体重 (kg)	赛道距离 (m)	水平飞行距离(m)	垂直下落距离(m)
15	32	<b>162</b>	29	2	53	110.49	95.70	55.60
15	32	<b>165</b>	29	2	53	116.54	100.54	59.43
15	32	<b>169</b>	29	2	53	117.64	101.43	59.98
15	32	<b>173</b>	29	2	53	117.42	101.25	59.91

四、本标准采用国际和国外先进标准的，说明采标程度，以及与国内外同类标准水平的对比情况。

本标准在编制过程中，未收集到相同的国内外标准，本标准未采标。

### 五、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准力求与其他现行国家标准的有关要求相协调，兼顾标准的可操作性和对产品要求的全面性。经分析，本标准与现行相关法律、法规、规章无不协

调之处，且贯彻了我国的有关法律、法规和强制性国家标准，符合《行业标准管理办法》等规章的规定。

## 六、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准的制定过程中未出现重大的分歧意见。

## 七、作为强制性标准或推荐性标准的建议及其理由（注：（二）、（三）强制性标准编辑内容）

建议本标准作为推荐性行业标准。

## 八、贯彻标准的要求措施建议（包括政策措施、组织措施、技术措施、过渡办法、宣贯培训、试点示范和配套资金等内容）

标准实施后实施后，采取一系列措施进行宣贯和培训是至关重要的。这些措施确保所有相关人员都能理解和正确应用新标准。以下是一些建议措施：

**组织宣贯会议：**安排一系列会议，向教练员、运动员、技术人员等相关人员介绍标准。在会议上，详细解释标准的内容、目的和期望效果。

**开展专业培训：**为教练员和技术人员提供专门的培训课程，强调风洞训练的技术要点和安全措施。通过实践课程和模拟训练，提高实际操作能力。

**制定培训材料：**编制详细的培训手册和指导材料，包括视频、教程和案例研究。将这些材料分发给所有相关人员，以供自学和参考。

**实施在线教育平台：**利用在线平台提供培训内容，便于更广泛的受众学习。包括互动课程和测试，以确保知识的吸收和理解。

**实地演练和模拟：**在风洞环境中进行实地模拟演练，以帮助运动员和教练员熟悉新标准。提供反馈和调整建议，以优化训练效果。

**持续监控和评估：**定期评估培训效果，确保标准被正确实施。收集反馈，对标准或培训内容进行调整。

建立反馈机制：建立一个反馈系统，允许教练员、运动员和技术人员提出问题和建议。定期审查反馈，以持续改进标准和培训过程。

强调安全意识：在所有培训和宣传材料中强调安全操作的重要性。确保所有参与者都清楚了解安全规程和紧急应对措施。

#### **九、废止现行有关标准的建议**

本标准制定标准，无废止相关标准的建议。

#### **十、本标准编制说明的附件**

无。