

文章编号: 1004-7220(2021)03-0407-08

运动员姿态对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响

胡齐^{1,2}, 刘宇²

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

摘要:目的 探讨运动员姿态(包括上半身弯曲角度以及身体与滑雪板夹角)对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响。方法 将跳台滑雪运动员与滑雪板作为1个多体系统,采用部分时均(partially averaged Navier-Stokes, PANS)湍流模型,并通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法数值模拟,预测不同运动员姿态下跳台滑雪空中飞行空气动力学特性。上半身弯曲角度计算工况包括10°、14°、18°、22°和26°,身体与滑雪板夹角计算工况包括8°、12°、16°、20°和24°。结果 受上半身弯曲角度增大变化的影响,多体系统、运动员以及滑雪板的升力、阻力,滑雪板的俯仰力矩均呈现单调递减趋势,但总升阻比先增大后减小;多体系统的俯仰力矩先减小后增大;运动员的俯仰力矩先微幅增大后减小。受身体与滑雪板夹角增大变化的影响,多体系统以及滑雪板的升力、阻力均先增大后减小再增大,但总升阻比先减小后增大再减小;运动员的升力、阻力以及俯仰力矩均呈现单调递增趋势;多体系统以及滑雪板的俯仰力矩均先增大后减小。上半身弯曲角度对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响普遍显著于身体与滑雪板夹角的影响。结论 上半身弯曲角度的优选范围为14°~18°,身体与滑雪板夹角的优选范围为16°~20°。运动员姿态(包括上半身弯曲角度以及身体与滑雪板夹角)对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响机制能够为比赛预判与决策提供有效的辅助支持,也为运动员空中飞行稳定性控制与技术训练提供科学指导。

关键词: 气动特性; 跳台滑雪; 上半身弯曲角度; 身体与滑雪板夹角; 计算流体力学

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2021.03.018

Effects of Athlete's Posture on Aerodynamic Characteristics During Flight in Ski Jumping

HU Qi^{1,2}, LIU Yu²

(1. China Institute of Sport Science, Beijing 100061, China; 2. School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

Abstract: Objective To investigate the effects of athlete's posture (including bending angle of upper body and angle between body and skis) on aerodynamic characteristics during flight in ski jumping. **Methods** The athlete and skis were regarded as a multi-body system. By using partially averaged Navier-Stokes (PANS) turbulence model and numerical simulation of computational fluid dynamics (CFD), the aerodynamic characteristics during flight under different postures were predicted. The calculation conditions for bending angle of upper body were 10°, 14°, 18°, 22° and 26°, and the calculation conditions of angle between body and skis were 8°, 12°, 16°, 20° and 24°. **Results** As the bending angle of upper body increased, the lift force and drag force of the multi-body system, the athlete and skis, and the pitch moment of skis all showed a monotonously decreasing trend, but the

收稿日期: 2020-06-01; 修回日期: 2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(11802068), 国家重点研发计划项目(2019YFF0302004, 2018YFF0300500), 国家体育总局体育科学研究所基
本科研业务费项目(基本 19-06)

通信作者: 刘宇, 教授, 博士生导师, E-mail: yuliu@sus.edu.cn

ratio of total lift force to total drag force increased first and then decreased. Meanwhile, the pitch moment of the multi-body system decreased first and then increased, and the pitch moment of athlete increased slightly and then decreased. As the angle between body and skis increased, the lift force and drag force of the multi-body system and skis increased first, then decreased and then increased, but the ratio of total lift force to total drag force decreased first, then increased and then decreased. Meanwhile, the lift force, drag force and pitch moment of the athlete increased monotonously, and the pitch moment of the multi-body system and the skis increased first and then decreased. The effect of bending angle of upper body on aerodynamic characteristics during flight in ski jumping was generally significantly larger than that of angle between body and skis. **Conclusions** The optimal range for bending angle of upper body is 14° - 18° , and the optimal range of angle between body and skis is 16° - 20° . The influence mechanism for bending angle of upper body and angle between body and skis on aerodynamic characteristics during flight in ski jumping can provide effective auxiliary support for on-the-spot prediction and decisionmaking, as well as scientific guidance for flight stability control and technical training for athletes.

Key words: aerodynamic characteristics; ski jumping; bending angle of upper body; angle between body and skis; computational fluid dynamics (CFD)

整个跳台滑雪过程通常分为助滑、起跳、飞行和着陆4个不同阶段,而且主要涉及弹道学和空气动力学两方面,两者都对跳台滑雪运动员提出了特殊的要求,如应最大限度地提高升力并且减小阻力。弹道学因素包括运动员从跳台上起跳位置和速度;空气动力学因素包括运动员/滑雪板多系统的气动特性,即速度、姿态、环境风、服装、滑雪板长度等^[1]。一般说来,飞行阶段被认为是跳台滑雪全过程气动特性体现最为明显的部分,不少研究人员采用风洞实验测量或计算机模拟与现场测量相结合等方法,对飞行阶段气动特性开展相关研究^[2-11]。为了能直观地显示或分析运动员周围的流场,计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)是首选的方法。该技术能够分析在运动过程中气动力、压力分布和详细流场等信息,已被广泛应用于自行车、雪车等竞技项目中^[12-13]。尽管CFD被认为是未来跳台滑雪空气动力学研究的重要工具,但目前报道的CFD研究较少,尤其是飞行阶段的CFD研究更少^[14-22]。Keizo等^[15]通过分析在起跳过程中运动员姿态对气动特性的影响发现,起跳过程中气动特性在较短时间内发生动态变化,不同起跳方式的气动特性差异较大。Gardan等^[14]研究表明,在飞行阶段早期,速度对升力系数和阻力系数的影响很小,而迎风角对运动员升力和阻力的影响很大。滑雪板气动特性在运动员/滑雪板多系统中起着更为重要的作用,故在关注运动员姿态同时不能忽略滑雪板姿态^[21]。

综上所述,国内外报道姿态与跳台滑雪空中飞行气动特性的CFD研究主要集中于空中飞行速度、迎风角、滑雪板姿态等方面,鲜有关于运动员身体姿态的CFD研究^[19]。然而,除环境风外,运动员身体姿态不仅与跳台滑雪运动表现密切相关,而且对跳台滑雪空中飞行安全非常重要^[22-23]。因此,掌握运动员姿态对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响机制十分必要。本文建立运动员/滑雪板多系统的精细化三维模型与网格模型,采用PANS(partially averaged Navier-Stokes)湍流模型进行CFD数值仿真,获取不同上半身弯曲角度以及不同身体与滑雪板夹角下多系统的力和力矩以及流场形态,分析不同运动员姿态对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为跳台滑雪运动员/滑雪板多系统。根据Müller等^[24]统计分析结果,跳台滑雪运动员的身体形态特征选取平均值,即身高177 cm,身体质量指数(body mass index, BMI) 19.5 kg/m^2 ,躯干(坐高)与身高比0.532,滑雪板长258 cm,宽11.5 cm。跳台滑雪运动员在空中飞行时姿态参数包括迎风角 φ 、滑雪板与速度方向夹角 α 、身体与滑雪板夹角 θ 、上半身弯曲角度 β 、滑雪板夹角 λ (见图1)。其中,身体与滑雪板夹角为平行于伸直腿且过髋关节中心点的直线与滑雪板的夹角,上半身弯

曲角度为平行于伸直腿且过髋关节中心点的直线与髋关节中心点和头顶点之间连线的夹角。

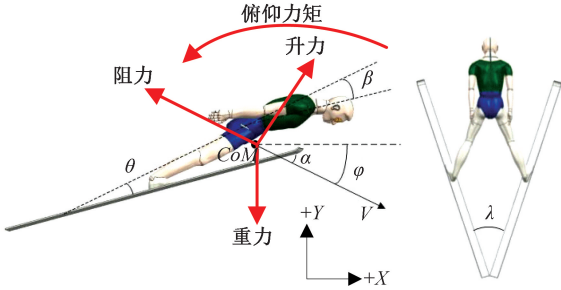


图 1 空中飞行多体系统姿态参数及受力情况

Fig.1 Posture parameters and forces acting on the athlete/skis system during flight

1.2 研究方法

1.2.1 控制方程 采用大涡模拟技术能够更加有效地对钝体周围流动分离情况进行数值预测^[21-22]。为了获得更精确的结果,本文采用 PANS 湍流模型,其控制方程表达式如下:

$$\frac{\partial(\rho k_u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j k_u)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \left(\mu + \frac{\mu_u}{\sigma_u} \right) \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \right] + P_{ku} - \rho \varepsilon_u \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon_u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \varepsilon_u)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \left(\mu + \frac{\mu_u}{\sigma_u} \right) \frac{\partial \varepsilon_u}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1}^* P_{ku} \frac{\varepsilon_u}{k_u} - C_{\varepsilon 2}^* \rho \frac{\varepsilon_u^2}{k_u} \quad (2)$$

式中: U_j 为已分解流场速度; t 为时间; ρ 为流体密度; μ 为介质黏性系数; μ_u 为湍流黏性系数; f_k 为未分解湍动能比率; f_ε 为未分解湍动能耗散率比率; k_u 为未分解局部时均化湍动能; ε_u 为未分解局部时均化湍动能耗散率。其中:

$$f_k = \frac{k_u}{k} \quad (3)$$

$$f_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$\mu_u = \rho C_\mu \frac{k_u^2}{\varepsilon_u} \quad (5)$$

$$\sigma_u = \frac{f_k^2}{f_\varepsilon} \quad (6)$$

$$C_{\varepsilon 2}^* = C_{\varepsilon 1}^* + \frac{f_k}{f_\varepsilon} (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}^*) \quad (7)$$

$$\eta = (2S_{ij} \cdot S_{ij})^{1/2} \frac{k_u f_\varepsilon}{\varepsilon_u f_k} \quad (8)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

$$C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \quad (10)$$

式中: $C_\mu = 0.0845$; $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$; $C_{\varepsilon 1} = 1.42$; $C_{\varepsilon 2} = 1.68$; $\eta_0 = 4.377$; $\beta = 0.012$ 。

采用有限体积法对控制方程进行离散计算,压力和速度的耦合采用 SIMPLEC 算法,时间采用二阶差分格式进行离散,湍动能以及速度项采用二阶迎风格式,时间步长为 0.1 ms。

1.2.2 模型建立与网格无关性验证 根据研究对象结构特征以及空中飞行姿态参数,建立跳台滑雪运动员/滑雪板多体系统的三维实体模型,对运动员身体特征进行精细化建模,手指、耳朵、面部、肩膀、胯等部位特征可以从图 1 中清晰分辨。

跳台滑雪运动员/滑雪板多体系统计算区域的尺寸为长 18.5 m、宽 7.0 m、高 9.5 m(见图 2)。考虑到尾流存在流动分离以及运动员身体外形特征可能会影响流场等情况,对跳台滑雪运动员/滑雪板多体系统精细化三维实体模型分区划分网格模型,大致分为运动员身体表面区域、滑雪板表面区域、运动员上臂结合处后侧尾流区域、腰胯结合处后侧尾流区域、运动员其他部位后侧尾流区域、滑雪板后侧尾流区域以及远离运动员与滑雪板区域等。

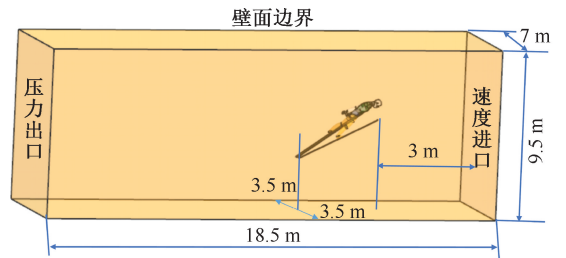


图 2 计算区域

Fig.2 Computational domain

为了满足 PANS 模型计算要求,运动员周边采用相应的网格加密策略,且本文的网格划分策略在文献[21-22]中已获得验证。即针对上述模型,每

个分区域选定4种网格密度,在各自分区域内进行不同程度的均匀加密,进行网格无关性验证(见表1)。结果表明,4种网格验证计算获得的升阻比均在1.95左右。由此可见,即使选定 10^7 个网格节点的计算域离散方案,也能够准确预测多体系统的空气动力学性能。

表1 网格无关性验证结果

Tab.1 Results of grid-independency test

参数	离散方案1	离散方案2	离散方案3	离散方案4
网格总数	10 000 000	14 660 000	19 870 000	28 380 000
升阻比	1.949	1.948	1.951	1.949

1.3 边界条件与计算工况

边界条件的设置如下:①进口设置为速度进口,进口速度根据飞行速度设定;②出口设置为压力出口,压力为大气压101.325 kPa;③中间截面为周期性条件;④其他壁面为无滑移边界条件;⑤气体为不可压缩空气;⑥在常重力下,重力加速度 $g_0=9.807 \text{ m/s}^2$ 。

本文对不同运动员姿态下跳台滑雪空中飞行气动特性进行CFD研究,即不同的上半身弯曲角度以及不同的身体与滑雪板夹角(见表2)。针对每一种工况分别进行CFD数值模拟,提取多体系统的受力及力矩情况,直观地显示多体系统周围的流场信息。

表3 不同上半身弯曲角度工况下力学特性

Tab.4 Mechanical characteristics at different bending angles of upper body

弯曲角度/ (°)	总升力/ N	总阻力/ N	总升 阻比	俯仰力矩/ (N·m)	运动员 升力/N	滑雪板 升力/N	运动员 阻力/N	滑雪板 阻力/N	运动员俯仰力 矩/(N·m)	滑雪板俯仰力 矩/(N·m)
10	303.80	162.86	1.874	-144.14	121.00	182.80	63.12	99.74	27.70	-171.84
14	297.54	156.36	1.899	-141.18	117.12	180.42	57.38	98.98	28.44	-169.62
18	288.22	152.68	1.888	-141.00	109.66	178.56	55.32	97.36	25.40	-166.40
22	280.46	151.44	1.852	-150.24	103.14	177.32	55.08	96.36	14.52	-164.76
26	275.32	150.66	1.827	-153.48	98.74	176.58	54.72	95.94	11.10	-164.58

表4 不同身体与滑雪板夹角工况下力学特性

Tab.5 Mechanical characteristics at different angles between body and skis

夹角/ (°)	总升力/ N	总阻力/ N	总升 阻比	俯仰力矩/ (N·m)	运动员 升力/N	滑雪板 升力/N	运动员 阻力/N	滑雪板 阻力/N	运动员俯仰力 矩/(N·m)	滑雪板俯仰力 矩/(N·m)
8	265.36	140.02	1.895	-148.32	101.28	164.08	46.62	93.40	20.10	-168.42
12	270.04	144.66	1.867	-144.70	104.82	165.22	49.86	94.80	23.06	-167.76
16	288.22	152.68	1.888	-141.00	109.66	178.56	55.32	97.36	25.40	-166.40
20	279.16	145.10	1.924	-137.84	111.84	167.32	56.98	88.12	26.64	-164.48
24	282.48	154.08	1.833	-139.76	114.38	168.10	58.22	95.86	28.00	-167.76

表2 空中飞行各姿态参数取值及计算工况

Tab.2 Values of posture parameters and calculation conditions during flight

参数	上半身弯曲角度	身体与滑雪板
	计算工况	夹角计算工况
速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	29	29
迎风角/(°)	30	30
滑雪板与速度方向夹角/(°)	30	30
滑雪板夹角/(°)	28	28
身体与滑雪板夹角/(°)	16	8/12/16/20/24
上半身弯曲角度/(°)	10/14/18/22/26	18

2 结果

2.1 力和力矩

作用于运动员/滑雪板多体系统上空气动力可分为升力和阻力,而且这些力的作用点绝大多数不会在运动员/滑雪板多体系统质心上,故极有可能会产生相应的力矩。表3、4列出了不同运动员姿态下运动员/滑雪板多体系统的力学特性结果。图3、4显示了运动员/滑雪板多体系统的力学特性随运动员姿态变化曲线。结果中各项力均为作用在运动员/滑雪板多体系统或运动员或滑雪板上同一性质的合力,各项力矩为是相对于运动员/滑雪板多体系统质心的力矩(“+”代表力矩作用后使多体系统向后仰,“-”代表力矩作用后使多体系统向前倾),升阻比由升力除以阻力计算得到。

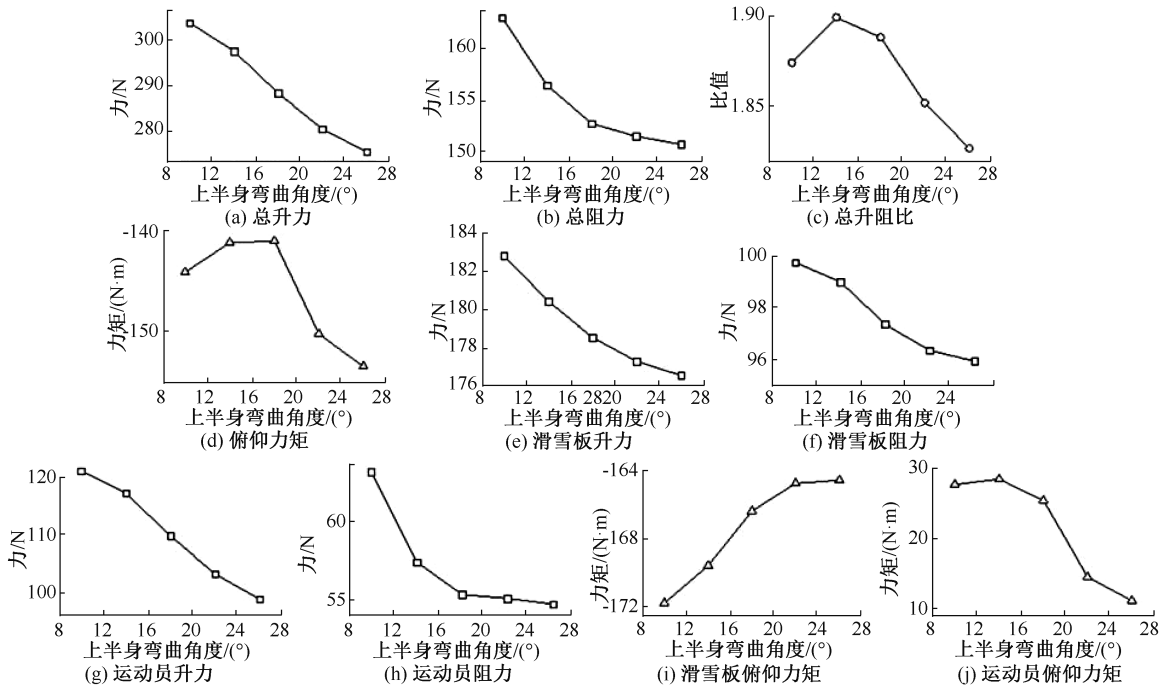


图 3 不同上半身弯曲角度工况下力学特性变化曲线

Fig.3 Variation of mechanical characteristics with different bending angles of upper body (a) Total lift force, (b) Total drag force, (c) Ratio of total lift force to total drag force, (d) Total pitch moment, (e) Lift force of skis, (f) Drag force of skis, (g) Lift force of athlete, (h) Drag force of athlete, (i) Pitch moment of skis, (j) Pitch moment of athlete

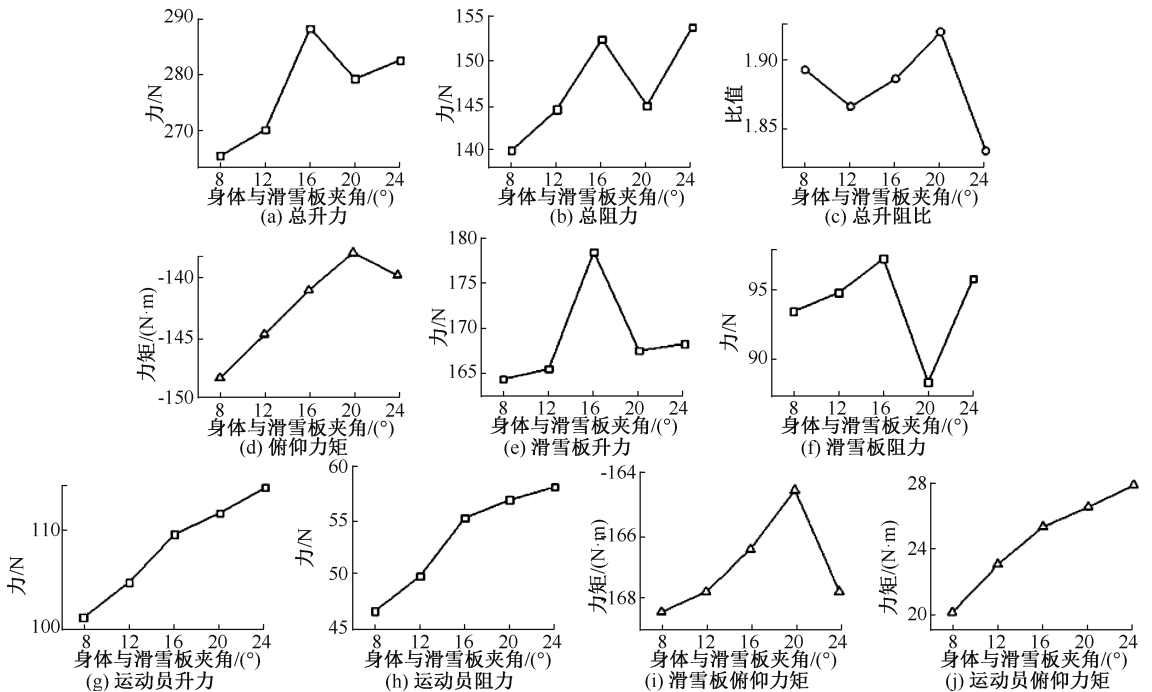


图 4 不同身体与滑雪板夹角工况下力学特性变化曲线

Fig.4 Variation of mechanical characteristics with different angles between body and skis (a) Total lift force, (b) Total drag force, (c) Ratio of total lift force to total drag force, (d) Total pitch moment, (e) Lift force of skis, (f) Drag force of skis, (g) Lift force of athlete, (h) Drag force of athlete, (i) Pitch moment of skis, (j) Pitch moment of athlete

由不同上半身弯曲角度下运动员/滑雪板多体系统的力学特性变化曲线可知,受上半身弯曲角度增大的影响,多体系统、运动员以及滑雪板的升力、阻力均呈现单调递减趋势,但总升阻比先增大后减小。多体系统的俯仰力矩先小幅减小后大幅增大,即当 $\beta \leq 18^\circ$ 时,俯仰力矩小幅减小;当 $\beta > 18^\circ$ 时,俯仰力矩大幅增大。运动员的俯仰力矩先小幅增大后减小,即当 $\beta \leq 14^\circ$ 时,俯仰力矩小幅增大;当 $\beta > 14^\circ$ 时,俯仰力矩减小。滑雪板的俯仰力矩单调递减,即先大幅减小($\beta \leq 22^\circ$ 之前),之后小幅减小。多体系统的俯仰力矩与滑雪板的俯仰力矩均是产生向前倾的效果。多体系统总升力减小幅值为 28.48 N,总阻力减小幅值为 12.20 N,俯仰力矩增大幅值为 12.48 N·m(见图 3)。

由不同身体与滑雪板夹角下运动员/滑雪板多体系统的力学特性变化曲线可知,受身体与滑雪板夹角增大的影响,多体系统以及滑雪板的升力、阻力均先增大后减小再增大,但总升阻比先减小后增大再减小。运动员的升力、阻力以及俯仰力矩均呈现单调递增趋势。多体系统以及滑雪板的俯仰力

矩均是产生向前倾的效果,且其俯仰力矩变化趋势一致,先增大后减小,即当 $\theta \leq 20^\circ$ 时,俯仰力矩随夹角增大而增大;当 $\theta > 20^\circ$ 时,俯仰力矩随夹角增大而减小。多体系统总升力增大幅值为 22.86 N,总阻力增大幅值为 14.06 N,俯仰力矩减小幅值为 10.48 N·m(见图 4)。

2.2 流场形态

不同上半身弯曲角度与不同身体与滑雪板夹角下涡流分布与气流速度流线如图 5、6 所示。运动员身后以及滑雪板后面的气流形态均主要以涡流结构形式出现,此结构会加速能量耗散。同时,气流速度在运动员以及滑雪板上均发生了流动分离。随着上半身弯曲角度的变化,流线速度变化不明显,但涡流形态变化比较明显,运动员身后以及滑雪板后面的涡流结构逐步减小(见图 5)。随着身体与滑雪板夹角的变化,流线速度变化不明显,但涡流形态变化比较明显,涡流结构强度变化存在一定的反复。当 $\theta = 16^\circ$ 时,后侧的涡流结构也相对最低,气流速度流线也相对最为流畅(见图 6)。此外,运动员身后的涡流结构也逐步增大。

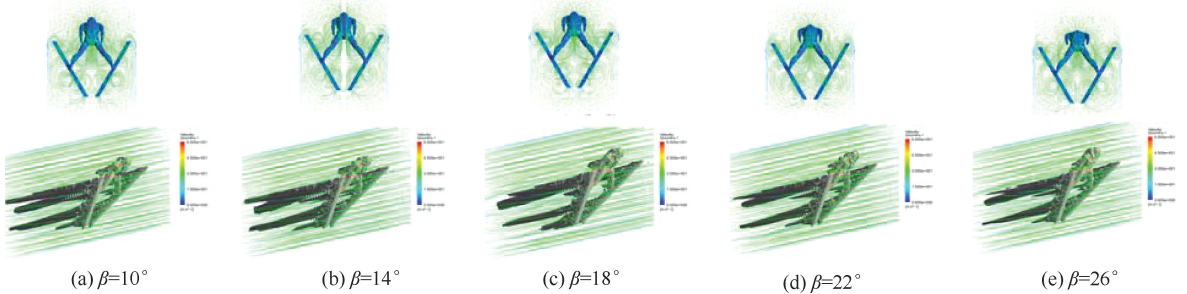


图 5 不同上半身弯曲角度工况下流场形态

Fig.5 Flow field form at different bending angles of upper body (a) $\beta = 10^\circ$, (b) $\beta = 14^\circ$, (c) $\beta = 18^\circ$, (d) $\beta = 22^\circ$, (e) $\beta = 26^\circ$

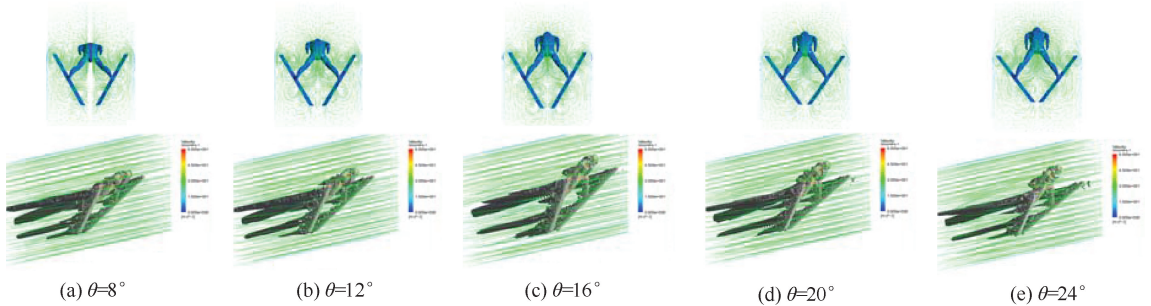


图 6 不同身体与滑雪板夹角工况下流场形态

Fig.6 Flow field form at different angles between body and skis (a) $\theta = 8^\circ$, (b) $\theta = 12^\circ$, (c) $\theta = 16^\circ$, (d) $\theta = 20^\circ$, (e) $\theta = 24^\circ$

3 讨论

Müller 等^[25]以及 Schmolzer 等^[8]统计分析了一流水平跳台滑雪运动员在飞行稳定阶段各姿态参数的实际测量结果,并给出这些姿态参数通常的变化范围,即 $\varphi = 25^\circ \sim 40^\circ$ 、 $\alpha = 25^\circ \sim 40^\circ$ 、 $\theta = 10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $\beta = 10^\circ \sim 25^\circ$ 、 $\lambda = 20^\circ \sim 40^\circ$ 、 $v = 25 \sim 32$ m/s。同时,研究认为,建议优选 $\lambda = 24^\circ \sim 32^\circ$ ^[21]。本研究中, φ 、 α 、 θ 、 β 、 λ 、 v 等姿态参数取值在上述范围内或者覆盖上述范围,故本文结果具有较好的普适性。

Gardan 等^[14]通过总结风洞试验测量以及数值计算结果,报道了在 $\varphi = 29^\circ$ 、 $\alpha = 29^\circ$ 、 $\lambda = 27.9^\circ$ 、 $\beta = 16.6^\circ$ 、 $\theta = 17.4^\circ$ 的空中飞行姿态条件下总升阻比为 1.89。本研究中,在 $\varphi = 30^\circ$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\lambda = 28^\circ$ 、 $\beta = 18^\circ$ 、 $\theta = 16^\circ$ 的空中飞行姿态条件下,总升阻比为 1.888。两者的结果非常接近,验证了本文 CFD 数值模拟的正确性。

不同上半身弯曲角度不仅改变了运动员自身的流动外形,而且对滑雪板后侧的流场产生一定的影响。多体系统的总升力与总阻力随上半身弯曲角度增大变化趋势一致,均呈现单调递减趋势,但总升阻比随上半身弯曲角度增大先增大后减小。同时,多体系统的俯仰力矩随上半身弯曲角度增大先小幅减小后大幅增大,俯仰力矩越大,产生向前倾的效果越明显,对运动员的稳定飞行越不利(见表 3、图 4)。因此,从寻求相对最优总升阻比以及空中飞行稳定性的角度出发,建议优选的上半身弯曲角度范围 $\theta = 14^\circ \sim 18^\circ$ 。

不同身体与滑雪板夹角不仅改变了运动员自身的流动外形,而且对滑雪板后侧的流场产生一定的影响。多体系统的总升力与总阻力随夹角增大变化趋势相对一致,均随夹角增大先增大后减小再增大,但总升阻比随夹角增大先减小后增大再减小。同时,多体系统的俯仰力矩随夹角增大先增大后减小,俯仰力矩越大,产生向前倾的效果越明显,对运动员的稳定飞行越不利(见表 4、图 5)。因此,从寻求相对最优总升阻比以及空中飞行稳定性的角度出发,建议优选的身体与滑雪板夹角范围 $\beta = 16^\circ \sim 20^\circ$ 。

从流场形态结果看出,随着上半身弯曲角度的增大,运动员身后以及滑雪板后面的涡流结构逐步

减小,说明受上半身弯曲角度的影响较大,多体系统产生的力变化较为明显,且变化规律也与之之前获取的力学特性数值统计结果相符。随着身体与滑雪板夹角的增大,涡流结构强度变化存在一定的反复。当 $\theta = 16^\circ$ 时,后侧的涡流结构强度也相对最低,而且运动员身后的涡流结构也逐步增大。该结果说明受身体与滑雪板夹角的影响较大,多体系统及运动员产生的力变化较为明显,且变化规律也与之之前获取的力学特性数值统计结果相符。

Lee 等^[19]开展了基于升阻比以及稳定性的跳台滑雪运动员飞行姿势优化 CFD 研究,获得 $\beta = 26.014^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 的运动员姿态最优结果。此结果并未在本文建议优选的上半身弯曲角度范围内,分析其中原因可能是 Lee 等^[19]所建运动员模型过于简化,尤其是运动员上半身,如将运动员上躯干简化成长方体,将手臂简化成紧贴着上躯干的柱台。若对运动员身体特征过于简化,容易引发因运动员周边流场分布仿真预测不准,以及气动升力、气动阻力的数值预测误差较大等问题。

此外,从多体系统力学特性结果的幅值变化情况来看,不同上半身弯曲角度对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响普遍显著于不同身体与滑雪板夹角对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响,但不同身体与滑雪板夹角工况下力学特性变化存在一定的波动。需要指出的是,本文未考虑运动员手臂位置对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响。在不同上半身弯曲角度以及不同身体与滑雪板夹角工况下,运动员手臂位置存在比较明显的差异,尤其是不同身体与滑雪板夹角工况下位置变化更为明显,手臂位置的影响可能会更大一些,而且解释不同身体与滑雪板夹角工况下力学特性变化波动的原因也许能从运动员手臂位置对气动特性的影响机制中找出。因此,运动员手臂位置对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响是需进一步研究的重要内容。

4 结论

(1) 不同的上半身弯曲角度以及不同的身体与滑雪板夹角均对跳台滑雪空中飞行气动特性产生一定影响。相较而言,上半身弯曲角度的影响普遍显著于身体与滑雪板夹角的影响,但身体与滑雪板夹角的影响情况较为复杂,其气动特性变化存在

一定的波动。这些影响机制可通过风洞实验进一步探究验证,同时运动员手臂位置对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响也需进一步探究。

(2) 从寻求相对最优总升阻比以及空中飞行稳定性的角度出发,建议优选的上半身弯曲角度范围为 $14^{\circ}\sim 18^{\circ}$,建议优选的身体与滑雪板夹角范围为 $16^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。

(3) 运动员姿态(包括上半身弯曲角度以及身体与滑雪板夹角)对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响机制能够为比赛预判与决策提供有效的辅助支持,也为运动员空中飞行稳定性控制与技术训练提供科学指导。

参考文献:

- [1] 胡齐, 张文毅, 陈骐. 跳台滑雪空气动力学研究进展[J]. 中国体育科技, 2018, 54(5): 132-139.
- [2] SCHWAMEDER H. Biomechanics research in ski jumping: 1991-2006 [J]. Sport Biomech, 2008, 7(1): 114-136.
- [3] MURAKAMI M, IWASE M, SEO K, *et al.* High-speed video image analysis of ski jumping flight posture [J]. Sports Eng, 2014, 17(4): 217-225.
- [4] JUNG A, STAAT M, MULLER W. Flight style optimization in ski jumping on normal, large, and ski flying hills [J]. J Biomech, 2014, 47(3): 716-722.
- [5] MULLER W. Performance factors in ski jumping [J]. J Biomech, 2006, 39(1): 192-213.
- [6] MURAKAMI M, IWASE M, SEO K, *et al.* High-speed video image analysis of ski jumping flight posture [J]. Sports Eng, 2014, 17(4): 217-225.
- [7] SCHMOLZER B, MULLER W. The importance of being light: Aerodynamic forces and weight in ski jumping [J]. J Biomech, 2002, 35(8): 1059-1069.
- [8] SCHMOLZER B, MULLER W. Individual flight styles in ski jumping: Results obtained during Olympic Games competitions [J]. J Biomech, 2005, 38(5): 1055-1065.
- [9] SEO K, WATANABE I, MURAKAMI M. Aerodynamic force data for a V-style ski jumping flight [J]. Sports Eng, 2004, 7(1): 31-39.
- [10] VIRMAVIRTA M, ISOLEHTO J, KOMI P, *et al.* Characteristics of the early flight phase in the Olympic ski jumping competition [J]. J Biomech, 2005, 38(11): 2157-2163.
- [11] 王志选, 李润, 关佐恒, 等. 跳台滑雪空中飞行初始姿态的实验研究[J]. 体育科学, 1998, 18(2): 1-5.
- [12] MANNION P, TOPARLAR Y, BLOCKEN B, *et al.* Improving CFD prediction of drag on Paralympic tandem athletes: Influence of grid resolution and turbulence model [J]. Sports Eng, 2018, 21(2): 123-135.
- [13] 胡齐, 王向东, 刘宇. 雪车项目空气动力学研究进展[J]. 医用生物力学, 2020, 35(4): 377-383.
- HU Q, WANG XD, LIU Y. Research progress of bobsleigh aerodynamics [J]. J Med Biomech, 2020, 35(4): 377-383.
- [14] GARDAN N, SCHNEIDER A, POLIDORI G, *et al.* Numerical investigation of the early flight phase in ski-jumping [J]. J Biomech, 2017, 59(1): 29-34.
- [15] KEIZO Y, MAKOTO T, JUN I, *et al.* Effect of posture on the aerodynamic characteristics during take-off in ski jumping [J]. J Biomech, 2016, 49(15): 3688-3696.
- [16] MEILE W, REISENBERGER E, MAYER M, *et al.* Aerodynamics of ski jumping: experiments and CFD simulations [J]. Exp Fluids, 2006, 41(6): 949-964.
- [17] NØRSTRUD H, ØYE I J. On CFD simulation of ski jumping [J]. Comput Fluid Dyn Sport Simulation, 2009, 72: 63-82.
- [18] RYU M, CHO L, CHO J. Aerodynamic analysis on postures of ski jumpers during flight using computational fluid dynamics [J]. T Jpn Soc Aeronaut S, 2015, 58(4): 204-212.
- [19] LEE KD, PARK MJ, KIM KY. Optimization of ski jumper's posture considering lift-to-drag ratio and stability [J]. J Biomech, 2012, 45(12): 2125-2132.
- [20] 陈志峰. 跳台滑雪运动空中飞行阶段的 CFD 研究[J]. 浙江体育科学, 2014, 36(2): 121-124.
- [21] 胡齐, 陈骐, 张文毅. 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, 2018, 38(7): 42-49.
- [22] 胡齐, 刘宇. 环境风对跳台滑雪空中飞行气动特性的影响[J]. 体育科学, 2020, 40(3): 54-63.
- [23] JUNG A, MULLER W, STAAT M. Optimization of the flight technique in ski jumping: The influence of wind [J]. J Biomech, 2019, 52(3): 190-193.
- [24] MULLER W, GROSCHL W, MULLER R, *et al.* Underweight in ski jumping: The solution of the problem [J]. Sports Med, 2006, 27(11): 926-934.
- [25] MULLER W, PLATZER D, SCHMOLZER B. Dynamics of human flight on skis: Improvements in safety and fairness in ski jumping [J]. J Biomech, 1996, 29(8): 1061-1068.