

文章编号: 1674-8190(2024)04-162-09

0.75 m×0.50 m 结冰风洞气动—热流场品质评估

魏龙涛, 刘森云, 王桥, 郭奇灵

(中国空气动力研究与发展中心 结冰与防除冰重点实验室, 绵阳 621000)

摘要: 结冰风洞气动—热流场品质是结冰风洞开展试验应用的先决条件, 为评估0.75 m×0.50 m结冰风洞的气流场和热流场品质, 依照SAE ARP 5905结冰风洞标准, 对0.75 m×0.50 m结冰风洞的气流场和热流场开展符合性校测试验, 考察试验段中心截面的气流速度场、方向场和温度场品质, 获得试验段气流速度修正关系和气流总温修正关系。结果表明: 试验段气流速度空间最大偏差小于±2%, 且试验段气流速度空间均匀性会随着气流速度的增大而得到改善; 试验段气流偏角空间最大偏差小于0.8°; 气流总温在-20℃以内时, 空间均匀性可达到±1℃, 气流总温为-30℃时, 空间均匀性可达±2℃; 0.75 m×0.50 m结冰风洞的气动—热流场品质符合SAE ARP 5905要求。

关键词: 结冰风洞; 气动流场; 气流偏角; 温度场; 流场品质

中图分类号: V211.74

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.18

The quality evaluation of aero-thermal flowfield in 0.75 m×0.50 m icing wind tunnel

WEI Longtao, LIU Senyun, WANG Qiao, GUO Qiling

(Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The quality of aero-thermal flowfield of the icing wind tunnel is the precondition for its experimental application. In order to evaluate the quality of the aerodynamic flowfield and the thermodynamic flowfield of 0.75 m×0.50 m icing wind tunnel, the compliance calibration test of the aerodynamic flowfield and thermal flowfield of the 0.75 m×0.50 m icing wind tunnel is carried out according to the SAE ARP 5905 icing wind tunnel standard, the quality of the aerodynamic flowfield, air flow angularity and thermodynamic flowfield of the center section of the test section are investigated, and the airflow velocity correction relationship and airflow temperature correction relationship of the test section are obtained. The results show that the maximum deviation of aerodynamic flowfield is less than ±2%, and the uniformity of aerodynamic flowfield is improved with the increase of airspeeds. The maximum deviation of air flow angularity is less than 0.8°. While the airflow total temperature is within -20℃, the spatial uniformity can reach ±1℃, and when the airflow total temperature is -30℃, the spatial uniformity can reach ±2℃. The quality of aero-thermal flowfield of the 0.75 m×0.50 m icing wind tunnel meets the requirement of SAE ARP 5905 under the main test conditions.

Key words: icing wind tunnel; aerodynamic flowfield; air flow angularity; thermal flowfield; flowfield quality

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-11-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(12002364); 国家科技重大专项(J2019-V-0013-0108)

通信作者: 刘森云(1986—), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: liusenyun@cardc.cn

引用格式: 魏龙涛, 刘森云, 王桥, 等. 0.75 m×0.50 m结冰风洞气动—热流场品质评估[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 162-170.

WEI Longtao, LIU Senyun, WANG Qiao, et al. The quality evaluation of aero-thermal flowfield in 0.75 m×0.50 m icing wind tunnel[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 162-170. (in Chinese)

0 引言

飞机穿过含有过冷水滴的云层时,迎风部件会出现结冰现象^[1]。不同结冰的形态和分布会对飞机的飞行性能产生不同的影响^[2-4]。

结冰风洞是研究飞机及其部件结冰问题的重要试验设施,在结冰机理研究、防除冰性能验证和结冰适航取证等领域扮演着不可或缺的角色^[5-8]。结冰风洞的气流场和热流场品质是结冰风洞性能评估的关键指标。美国NASA IRT对结冰风洞开展了多期气流场和热流场校测试验^[9-14],对其风洞的流场品质进行了评估,为风洞试验提供支撑。2011年,NASA IRT对制冷系统进行了升级优化,将原来的板式换热器更换为交错式换热器,使用压力测量耙、温度格栅等对风洞流场进行了校测,结果表明,速度场满足相关标准要求,但温度场在较低温度时会有超出指标的点存在。意大利CI-RA IWT结冰风洞制冷系统^[15-16]使用R507作为制冷剂,其校测装置为探针移测装置,探针安装在装置前端,可实现在风洞测试截面的二维运动,并对风洞的气流场和温度场进行了校测,为后续的试验应用打下了坚实基础。中国空气动力研究与发展中心的3 m×2 m结冰风洞^[17-18]制冷系统为液氮制冷,在使用中也对气流场和温度场进行了多次符合性校测,对流场品质进行评估,其使用的校测装置为五孔探针排管架和温度格栅,根据2019年的测量结果可知,在低风速40 m/s工况下,模型区内气流速度存在超出±2%的区域,在低风速和低总温工况下,模型区内存在气流总温偏差超出±1℃的非均匀峰值区;2020年对制冷系统的设备性能进行了全面升级优化,并对升级优化后的热流场品质进行了评估^[19],在0、-5、-15℃三个典型气流总温条件下,模型区内气流总温空间偏差最大绝对值均小于1.0℃,相较于改造前最大偏差绝对值超过2.5℃,改造后的气流总温空间均匀性显著提升。

中国空气动力研究与发展中心于2023年新建了一座0.75 m×0.50 m结冰风洞,为验证该风洞是否已具备进行试验的基本条件,本文针对0.75 m×0.50 m结冰风洞,借鉴3 m×2 m结冰风洞的校测方法,开展气流场和热流场符合性校测试验,评估气流速度场、气流偏角和气流温度场的品质,以期获得气流速度和气流总温修正关系。

1 0.75 m×0.50 m结冰风洞简介

0.75 m×0.50 m结冰风洞是一座闭口回流式低速风洞(其轮廓图如图1所示),试验段尺寸为1.50 m(长)×0.75 m(宽)×0.50 m(高),主要包括制冷系统、动力系统和喷雾系统。制冷系统采用间接制冷方式,制冷剂为R507,制冷剂通过螺杆式制冷机组形成过冷液体对载冷剂(中孚4号)进行冷却,载冷剂通过不锈钢铝翅式热交换器对风洞内气流换热来控制气流温度,气流温度控制范围为-30℃~常温。动力系统利用风扇驱动气流流动,总功率为90 kW,气流速度控制范围为0~80 m/s。稳定段内设计为可更换移动部段,包含喷雾靶模块和阻尼网模块。本文气流场和热流场符合性验证研究,采用阻尼网模块。

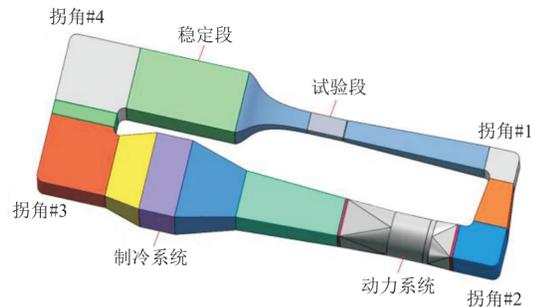


图1 0.75 m×0.50 m结冰风洞轮廓图
Fig. 1 Configuration of the 0.75 m×0.50 m icing wind tunnel

2 试验内容与方法

目前,结冰风洞流场校测研究主要依据 Calibration and acceptance of icing wind tunnels(简称为SAE ARP 5905)^[20]国际标准文件进行。标准中结冰风洞的气流场和热流场指标如表1所示。

表1 结冰风洞气流场和热流场品质指标
Table 1 Quality indexes of aerodynamic and thermodynamic flowfield of the icing wind tunnel

项目	$\Delta V/\%$	$\theta/(\circ)$	$T_s/^\circ\text{C}$	
			$-30^\circ\text{C} < T_s < 5^\circ\text{C}$	$T_s < -30^\circ\text{C}$
空间均匀性	±2	±2	±1.0	±2.0
时间稳定性	±2	—	±0.5	±2.0

气流总温(T_t)可以直接由总温探针测量,根据气流速度可以计算出相应的气流静温(T_s)。本文以试验段气流速度、气流偏角、气流总温的空间均

匀性和时间稳定性为研究对象,对 $0.75\text{ m}\times 0.50\text{ m}$ 结冰风洞的气流场和热流场品质进行研究。

2.1 试验仪器

2.1.1 方向动压组合探针和排管架装置

方向动压组合探针和排管架装置如图 2 所示。方向动压组合探针包含 1 个总压测压孔,4 个气流偏角测压孔和 8 个静压测压孔(如图 3 所示)。探针上有一红色标记点,安装时,标记点正对正上方。排管架尺寸为厚 20 mm、宽 200 mm、高 450 mm,共有 7 个探针安装孔,安装孔间距 60 mm,第 4 个探针安装孔处于风洞水平中间平面,排管架与风洞下壁板固连。



图 2 方向动压组合探针和装置
Fig. 2 Five-hole probe and devices

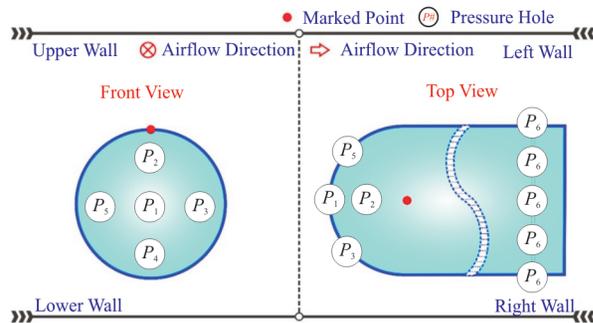


图 3 方向动压组合探针示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the five-hole probe

2.1.2 总温探针和温度格栅

试验段温度用总温探针直接测得,探针和格栅如图 4 所示。总温探针为 PT1000 电阻式温度传感器,探针长度为 100 mm,直径为 6 mm,测温范围为 $-50\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度格栅由 5 个垂直构件组成,垂直构件厚 15 mm、宽 100 mm,相邻间距 75 mm,每个垂直构件有 5 个探针安装孔,安装孔间距为 113 mm。



图 4 总温探针和温度格栅
Fig. 4 Total temperature probe and temperature grid

2.2 试验方法

2.2.1 气流速度和气流偏角

气流速度和气流偏角用方向动压组合探针同时测量,试验工况如表 2 所示,其中试验段气流速度取 20、40、60 和 80 m/s,间隔 20 m/s,共 4 个速度测量点。方向动压组合探针测量点矩阵如图 5 所示,点(0,0)为试验段中心位置测量点, x 方向(试验段横向)和 y 方向(试验段纵向)各 7 个测量点,共 49 个测量点,测量间距均为 60 mm,可覆盖试验段 x 方向 48% 区域和试验段 y 方向 72% 区域。

表 2 气流场试验工况

Table 2 Test conditions of aerodynamic flowfield

参数	数值
位置	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7
$V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	20,40,60,80

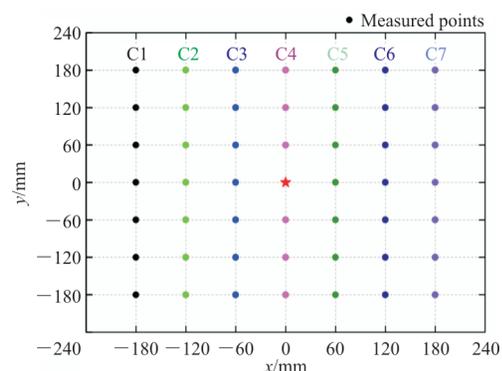


图 5 方向动压组合探针测量点矩阵
Fig. 5 Location matrix of measuring points of the five-hole flow angle probe

试验时,首先测量试验段中心(C4列)位置,然后依次测量两侧剩余的 6 个位置,各测点压力采集时间 60 s,采样频率 2 Hz(参考《低速风洞和高速风洞流场品质要求》^[21]中动压稳定性测量)。

试验段气流速度计算公式为

$$V_{TS} = \sqrt{\frac{0.574qT_1}{P_s}} \quad (1)$$

式中: q 为动压,由探针测量总压和静压计算所得; T_1 为试验段气流总温,由于风洞控制总温探针与试验段位置较近,认为风洞总温探针测量温度即为试验段气流总温; P_s 为试验段气流静压。

试验段气流速度空间均匀性以测量截面中心位置的平均气流速度作为基准,采用速度比空间偏差(ΔV_s)表征:

$$\Delta V_s = \frac{V_i - \bar{V}}{\bar{V}} \quad (2)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

式中: V_i 为第*i*个测量点的气流速度; \bar{V} 为测量截面的平均气流速度。

气流速度时间稳定性以中心位置的速度时间平均值(V_C)_{mt}为基准,采用速度时间偏差(ΔV_T)表征:

$$\Delta V_T = \frac{V_C - (V_C)_{mt}}{(V_C)_{mt}} \times 100\% \quad (4)$$

利用试验段气流速度(V_{TS})与风洞控制气流速度(V_{WT}),获得试验段中心线处气流速度修正关系,表示为

$$V_{TS} = K_V V_{WT} \quad (5)$$

式中: K_V 为气流速度修正系数。

气流俯仰角 α 、气流偏航角 β 和气流偏角 θ 的计算公式^[20]如下:

$$\alpha = K_{0,\alpha} + K_{1,\alpha} C_\alpha + \Delta\alpha \quad (6)$$

$$\beta = K_{0,\beta} + K_{2,\beta} C_\beta + \Delta\beta \quad (7)$$

$$C_\alpha = \frac{P_4 - P_2}{P_1 - P_6} \quad (8)$$

$$C_\beta = \frac{P_5 - P_3}{P_1 - P_6} \quad (9)$$

$$\theta = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \quad (10)$$

式中: P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 分别为方向组合探针对应测压孔测得的气流压力, P_1 为总压, P_6 为静压; $K_{0,\alpha}$ 、 $K_{1,\alpha}$ 为俯仰角系数, $K_{0,\beta}$ 和 $K_{2,\beta}$ 为偏航角系数,探针标定时获得; $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 为探针安装偏角,探针安装时测得。

2.2.2 气流温度

气流温度试验工况如表3所示,气流总温选取 -30 、 -20 、 -10 和 0 °C,气流速度选取 20 、 40 、 60 m/s。气流总温探针测量矩阵如图6所示, T_{13} 为试验段中心位置测量点,共25个测量点, x 方向测

量点间距为 113 mm, y 方向测量点间距为 75 mm,占据试验段 x 和 y 方向的区域均为 60% 。

表3 气流总温试验工况

Table 3 Test conditions of airflow total temperature

参数	数值
T_1 /°C	$-30, -20, -10$
V /(m·s ⁻¹)	$20, 40, 60$

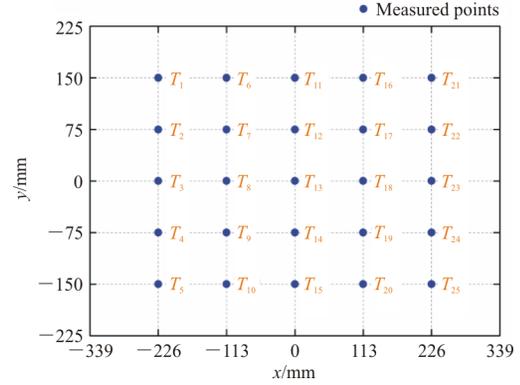


图6 温度探针测量点矩阵

Fig. 6 Location matrix of measuring points of the temperature probe

试验时,同时测量25个测量点的气流总温,温度每间隔 1 s采集 1 次,共采集 120 s(参考文献[19])。对气流总温(T_{probe})进行修正,得到试验段实际气流总温:

$$T_i = \frac{T_{probe} + 273.15}{R_r} - 273.15 \quad (11)$$

式中: R_r 为探针总温恢复率。

以中心位置气流平均总温(T_C)_{mt}为基准,分别采用气流总温空间偏差(ΔT_s)和气流总温时间偏差(ΔT_T)表征气流总温空间分布和气流总温时间稳定性:

$$\Delta T_s = (T_i)_{mt} - (T_C)_{mt} \quad (12)$$

$$\Delta T_T = T_C - (T_C)_{mt} \quad (13)$$

最后,获得试验段中心线处气流总温(T_{TS})与风洞控制气流总温(T_{WT})的修正关系,表示为

$$T_{TS} = K_T T_{WT} \quad (14)$$

式中: K_T 为气流总温修正系数。

3 结果与分析

3.1 气流速度结果

4个测试速度(20 、 40 、 60 和 80 m/s)对应的试验段气流速度空间分布云图如图7所示,可以看

出:各工况下,试验段内气流速度空间分布均匀性较好,测量区域内的最大空间偏差均在 $\pm 2\%$ 范围内;随着气流速度增大,气流空间分布均匀性逐渐变好,当气流速度分别为60和80 m/s时,气流速度空间偏差最大绝对值分别为0.75%和0.62%。

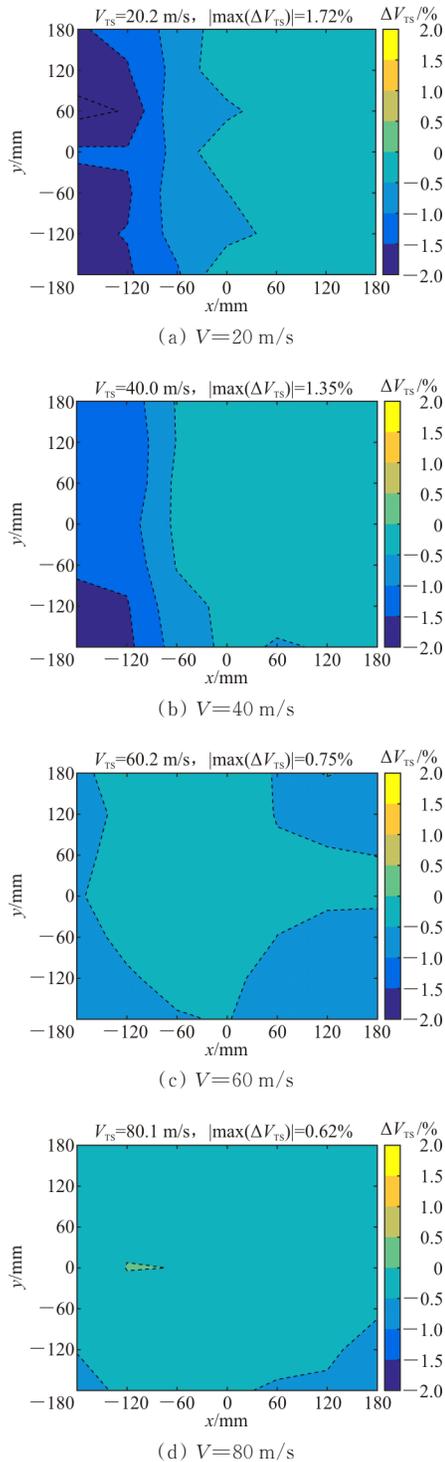


图7 试验段气流速度空间分布云图
Fig. 7 Spatial distribution of the airspeeds in the test section

20、40、60和80 m/s 4个速度对应的试验段中心位置气流速度时间偏差变化曲线如图8所示。

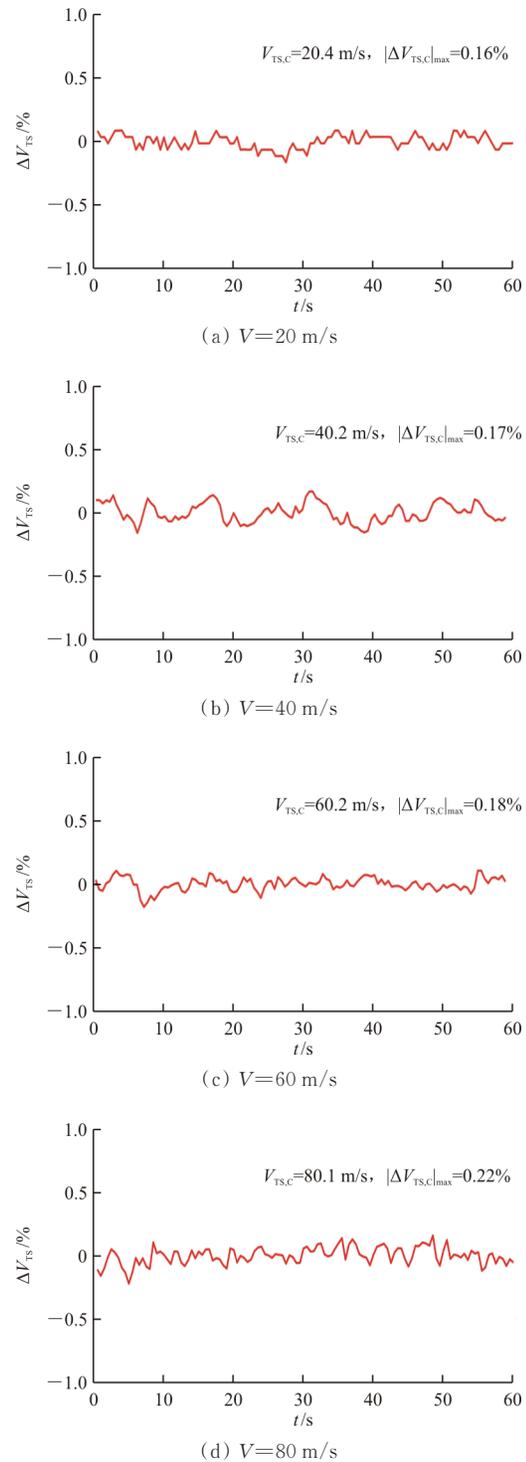


图8 试验段中心位置气流速度时间偏差变化曲线
Fig. 8 Time variation of the airspeeds deviation in the center position of the test section

从图8可以看出:各工况下,试验段中心线处气流速度时间稳定性很好,各试验速度下对应的

时间偏差最大绝对值分别为 0.16%、0.17%、0.18%、0.22%；随着气流速度增大，试验中心线处的气流速度时间稳定性反而有所下降。

试验段中心位置处气流速度修正关系如图 9 所示，拟合公式为

$$\begin{cases} V_{TS} = 1.001V_{WT} + 0.0596 \\ R^2 = 1 \end{cases} \quad (15)$$

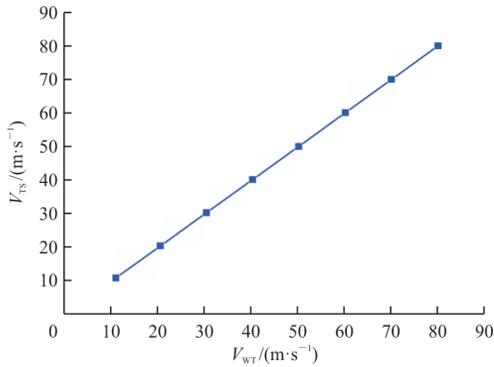
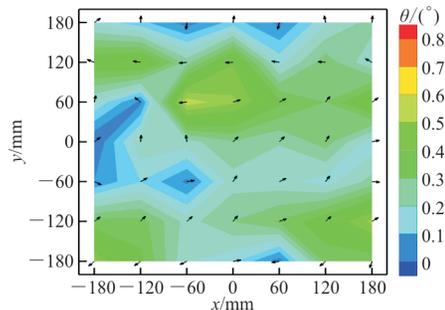


图 9 试验段中心位置气流速度修正关系

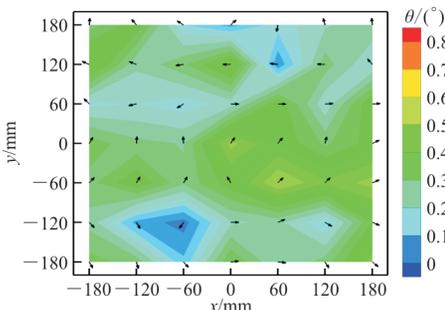
Fig. 9 Correction relationships of the airspeeds in the center position of the test section

3.2 气流偏角结果

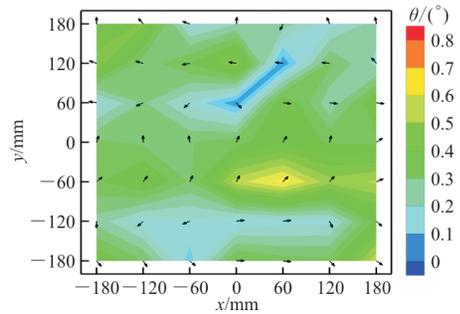
气流速度为 20、40、60 和 80 m/s 时试验段气流偏角空间云图如图 10 所示，可以看出：各工况下，测量区域内的气流偏角空间分布均匀性较好，最大偏差均小于 0.8°。



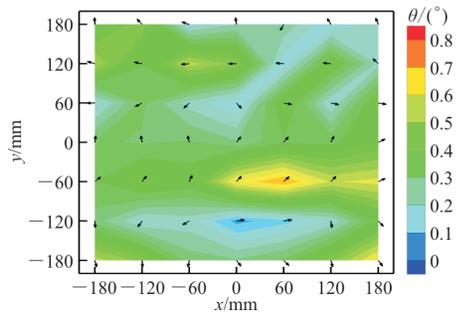
(a) V=20 m/s



(b) V=40 m/s



(c) V=60 m/s



(d) V=80 m/s

图 10 试验段气流偏角空间分布云图

Fig. 10 Spatial distribution of the airflow angularity in the test section

3.3 气流温度结果

20、40、60 m/s 气流速度条件下，气流总温分别为 -10、-20 和 -30 °C 时的试验段气流总温分布云图如图 11 所示，可以看出：气流总温为 -10 和 -20 °C 时，测量区域内的气流总温空间偏差基本均在 ±1 °C 以内，个别工况出现了总温偏差超过 ±1 °C 的非均匀峰值区，例如图 11(f) 中气流速度 60 m/s、气流总温 -20 °C 工况下，云图中右下区域黄色位置为偏差超出 ±1 °C 区域，最大偏差绝对值为 1.12 °C，但非均匀峰值区均处在测量区域边界处，且所占比例很小；气流总温为 -30 °C 时，测量区域内的气流总温空间偏差均在 ±2 °C 内，最大偏差绝对值为 1.57 °C。整体来看，随着气流总温的下降，气流总温空间均匀性会逐渐降低；相对而言，气流速度为 40 m/s 时，气流总温的空间均匀性最好。

20、40、60 m/s 气流速度条件下，气流总温分别为 -10、-20 和 -30 °C 时的试验段中心位置气流总温时间偏差变化曲线如图 12 所示，可以看出：各工况下，试验段中心线处气流总温时间稳定性很好，最大偏差绝对值为 0.07 °C，均小于 0.5 °C。

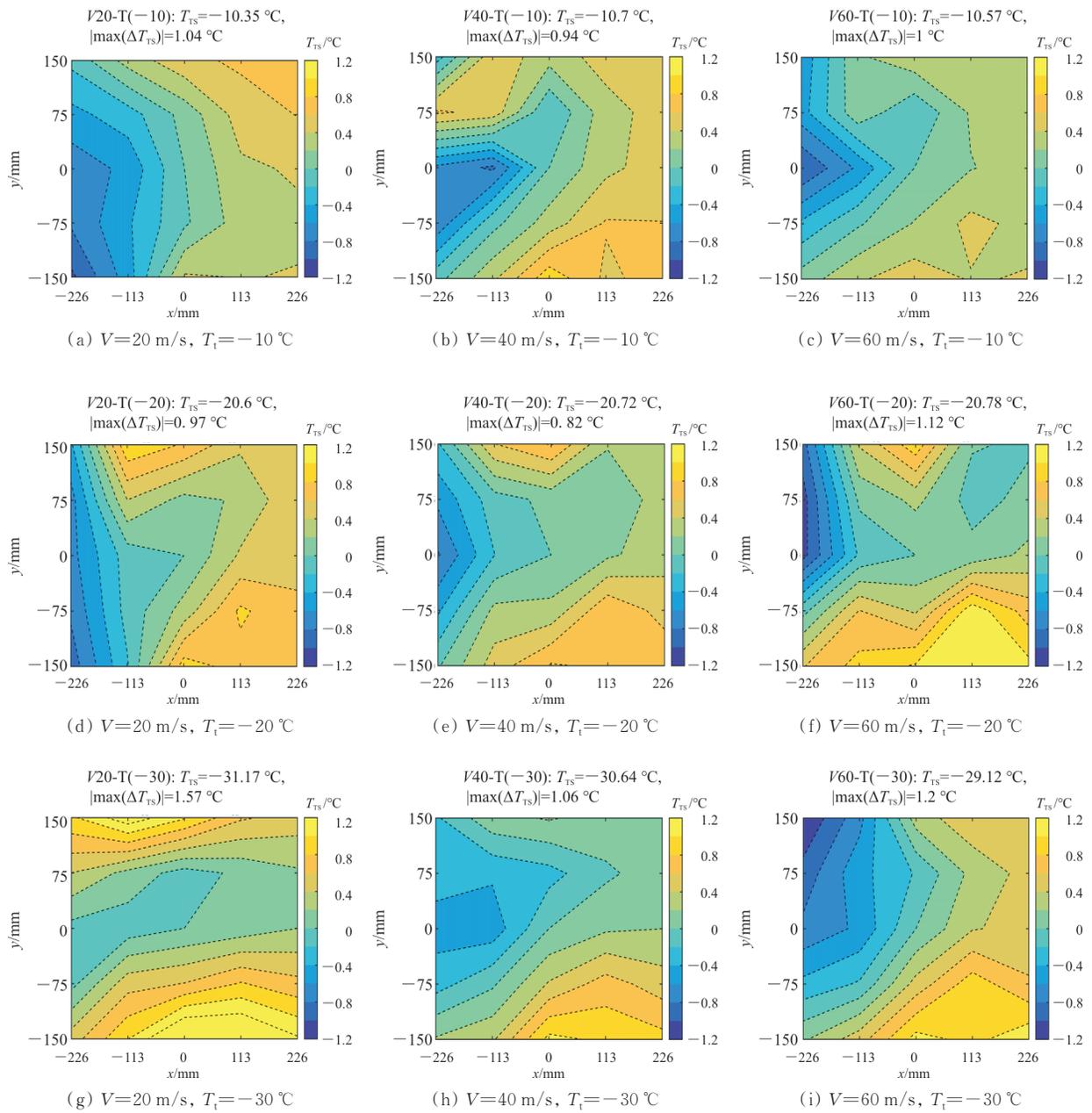
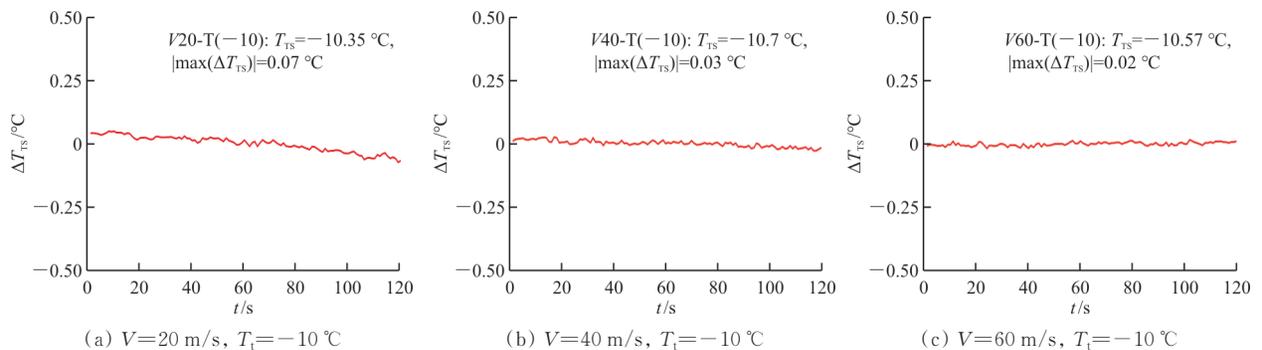


图 11 试验段气流总温空间分布云图

Fig. 11 Spatial distribution of the airflow total temperature in the test section



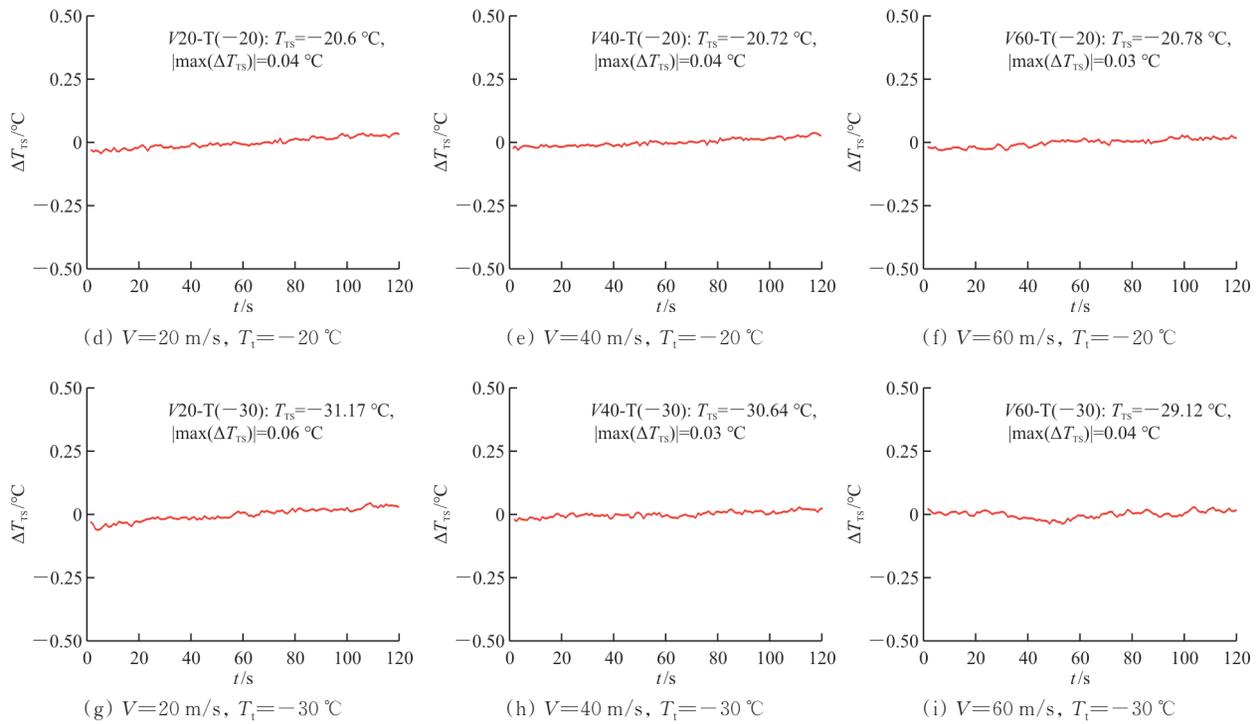


图 12 试验段中心位置气流总温时间变化曲线

Fig. 12 Time variation curve of airflow total temperature at the center position in the test section

试验段中心位置气流总温修正关系如图 13 所示, 拟合公式为

$$\begin{cases} T_{TS} = 1.016 5 T_{WT} - 0.159 5 \\ R^2 = 0.999 6 \end{cases} \quad (16)$$

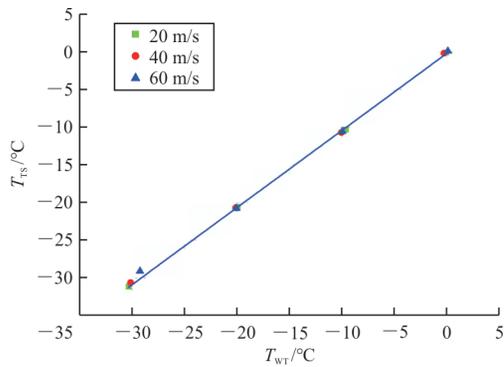


图 13 试验段中心位置气流总温修正关系

Fig. 13 Correction relationship of the airflow total temperature in the center position of the test section

4 结 论

1) 结冰风洞的气流场品质很好, 优于 SAE ARP 5905 中气流场的指标要求, 随着气流速度增加, 气流速度场的空间均匀性会得到进一步改善。

2) 结冰风洞的热流场品质较好, 基本满足

SAE ARP 5905 中温度场的指标要求, 个别工况下存在超出指标的非均匀峰值区, 但非均匀峰值区处在测量区域边界处, 且所占比例很小, 对温度场的整体影响较小。

参考文献

- [1] 林贵平, 卜雪琴, 申晓斌, 等. 飞机结冰与防除冰技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
LIN Guiping, BU Xueqin, SHEN Xiaobin, et al. Aircraft icing and anti-icing technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2016. (in Chinese)
- [2] 郭向东, 王梓旭, 李明, 等. 结冰风洞中液滴过冷特性数值研究 [J]. 航空学报, 2017, 38(10): 76-84.
GUO Xiangdong, WANG Zixu, LI Ming, et al. Numerical study of supercooling characteristics of droplet in icing wind tunnel [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(10): 76-84. (in Chinese)
- [3] 王梓旭, 沈浩, 郭龙, 等. 3 m × 2 m 结冰风洞云雾参数校准方法 [J]. 实验流体力学, 2018, 32(2): 61-67.
WANG Zixu, SHEN Hao, GUO Long, et al. Cloud calibration method of 3 m × 2 m icing wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2018, 32(2): 61-67. (in Chinese)
- [4] 范洁川, 于涛. 飞机结冰风洞试验模拟研究 [J]. 实验流体力学, 2007, 21(1): 1-7.
FAN Jiechuan, YU Tao. A study of simulation for airplane

- icing tests in icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2007, 21(1): 1-7. (in Chinese)
- [5] 倪章松, 刘森云, 王桥, 等. 3 m×2 m 结冰风洞试验技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2019, 33(6): 46-53.
NI Zhangsong, LIU Senyun, WANG Qiao, et al. Research progress of test technologies for 3 m×2 m icing wind tunnel [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2019, 33(6): 46-53. (in Chinese)
- [6] 张兴焕, 张平涛, 彭博, 等. 基于机器学习的结冰风洞温度场预测[J]. *实验流体力学*, 2022, 36(5): 8-15.
ZHANG Xinghuan, ZHANG Pingtao, PENG Bo, et al. Prediction of icing wind tunnel temperature field with machine learning[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(5): 8-15. (in Chinese)
- [7] 陈舒越, 郭向东, 王梓旭, 等. 结冰风洞过冷大水滴粒径测量初步研究[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(3): 22-29.
CHEN Shuyue, GUO Xiangdong, WANG Zixu, et al. Preliminary research on size measurement of supercooled large droplet in icing wind tunnel[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(3): 22-29. (in Chinese)
- [8] 郭向东, 张平涛, 赵照, 等. 大型结冰风洞云雾场适航应用符合性验证[J]. *航空学报*, 2020, 41(10): 184-195.
GUO Xiangdong, ZHANG Pingtao, ZHAO Zhao, et al. Airworthiness application compliance verification of cloud flowfield in large wind tunnel[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(10): 184-195. (in Chinese)
- [9] STEEN L E, IDE R F, LOBO S L, et al. NASA Glenn icing research tunnel: 2014 and 2015 cloud calibration procedures and results: NASA/TM-2015-218758 [R]. US: NASA, 2015.
- [10] BARS I P, CHRISTINE M, ARRINGTON, et al. Aero-thermal calibration of the NASA Glenn icing research tunnel [C]// 4th AIAA Atmospheric and Space Environments Conference. New Orleans, Louisiana: AIAA, 2012: 1-17.
- [11] STEEN L E, ZANTE J F V, BROEREN A P, et al. Flow quality surveys in the settling chamber of the NASA Glenn icing research tunnel [C]// 4th AIAA Atmospheric and Space Environemnts Conference. New Orleans, Louisiana: AIAA, 2011: 1-26.
- [12] IRVINE T B, KEVDZIJA S L, SHELDON D W, et al. Overview of the icing and flow quality improvements program for the NASA-Glenn Icing Research Tunnel [C]// 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 2001: 1-38.
- [13] GONSALEZ J C, ARPINGTON E A, CURRY M R. Quality surveys of the NASA Glenn icing research tunnel [C]// 39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: AIAA, 2001: 1-23.
- [14] BHARGAVA C, LOTH E, POTAPCZUK M. Aerodynamic simulations of the NASA Glenn icing research tunnel [C]// 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 2003: 1-15.
- [15] ESPOSITO B M, RAGNI A, FERRIGNO F, et al. Cloud calibration update of the CIRA icing wind tunnel: SAE Technical Paper Series 2003-01-2312 [R]. US: SAE, 2003.
- [16] VECCHIONE L, LEONE G. An overview of the CIRA icing wind tunnel [C]// 41st Aerospace Science Meeting and Exhibit, Reno, Nevada: AIAA, 2003: 1-15.
- [17] 郭向东, 张平涛, 赵献礼, 等. 大型结冰风洞热流场符合性验证[J]. *实验流体力学*, 2020, 34(5): 79-88.
GUO Xiangdong, ZHANG Pingtao, ZHAO Xianli, et al. The compliance verification of the thermodynamic flowfield in the large icing wind tunnel [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechnaics*, 2020, 34(5): 79-88. (in Chinese)
- [18] 郭向东, 柳庆林, 赖庆仁, 等. 大型结冰风洞气流场适航符合性验证[J]. *空气动力学报*, 2021, 39(2): 184-195.
GUO Xiangdong, LIU Qinglin, LAI Qingren, et al. Airworthiness compliance verification of aerodynamic flowfield of a large-scale icing wind tunnel [J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2021, 39(2): 184-195. (in Chinese)
- [19] 郭向东, 张平涛, 张珂, 等. 3 m×2 m 结冰风洞热流场品质提高及评估[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(4): 41-45.
GUO Xiangdong, ZHANG Pingtao, ZHANG Ke, et al. Improvement and evaluation of thermal flow-field quality in CARD C icing wind tunnel [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(4): 41-51. (in Chinese)
- [20] SAE. Calibration and acceptance of icing wind tunnels: SAE ARP 5905[S]. US: SAE, 2009.
- [21] 中国人民解放军总装备部. 低速风洞和高速风洞流场品质要求: GJB 1179A—2012[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2012.
The General Equipment Department of PLA. Requirement for quality of low and high speed wind tunnels: GJB 1179A—2012[S]. Beijing: The General Equipment Department of PLA, 2012. (in Chinese)

(编辑:马文静)