

国内首座人工影响天气亚音速云雾环境风洞的设计与流场品质测试

扈勇 杨洋* 赵利伟 邓育鹏 侯劭禹 李林

(河北省人工影响天气中心, 石家庄 050021)

摘要 为真实模拟人工影响天气机载探测设备动态工作环境, 提高机载探测设备检测水平, 推动国产机载探测设备研发, 本文设计一种回流式闭口风洞。风洞主体包括试验段、扩散段、拐角段、动力段、换热段、稳定段、收缩段、预留段等部分。风洞最大外形尺寸为 $31.33\text{ m} \times 10.18\text{ m} \times 5.436\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高), 试验段截面尺寸为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$, 稳定风速范围为 $30\sim 150\text{ m/s}$ 。经流场校测, 风洞流场品质指标: 风速范围、动压稳定性、落差系数、湍流度、气流温度、轴向静压梯度、方向场及动压场等均达到 GJB1179A-2012 合格要求, 能够满足机载设备的检测需求。风洞的气动和结构设计合理, 可为今后类似风洞的设计和建造提供参考。

关键词 亚音速风洞; 云雾环境风洞; 人工影响天气; 机载探测设备

中图分类号: P412 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20240178 **文献标识码:** A

引言

随着人工影响天气事业的发展, 飞机增雨的重要性日益显著^[1-3], 飞机增雨具有作业面积广、催化效能高的优势, 能够做到对空中云微物理参数的精确探测、迅速响应和实时控制, 但是飞机增雨效果好坏严重依赖机载探测设备稳定性。当前国内主要增雨飞机上在用的机载探测设备几乎全部为国外进口, 严重制约着人工影响天气事业的高质量发展。随着国家机载设备技术保障平台在石家庄建成并投入使用, 为提供真实环境模拟, 配套研发一套亚音速云雾环境风洞, 为机载探测提供科技支撑, 助力人工影响天气高质量发展。

本文基于人工影响天气机载设备实际业务需求, 详细介绍了国内首座人工影响天气领域亚音速云雾环境风洞的设计和流场品质测试, 为以后类似的风洞设计和建造提供参考。

1 风洞总体概况

风洞按气流流动方式, 分为闭口回流式和开口

直流动式, 其中闭口回流式风洞为封闭的环状结构, 空气在风洞内循环流动, 能够实现精确控制气流速度和方向, 测试条件一致性好, 适合进行科学的研究和详细分析^[4-10]。亚音速云雾环境风洞设计采用闭口回流式, 主要试验测试对象为机载探测设备和特种气象测量仪器, 包括大气参数综合测量、飞机测温测湿设备、云水含量测定设备等。建成后应能保证所有机载探测设备的试验与相关测试设备能够可靠运行, 并在风洞试验运行中保证风洞设备与实验仪器设备便于操作、检查以及调整。风洞洞体主要包括闭口试验段、第一扩散段、第一拐角段、回流段、第二拐角段、动力段、第二扩散段、第三拐角段、第四拐角段、大角扩散段、换热段、稳定段(整流段)、收缩段、真空预留段、换热器预留段、喷雾靶预留段。洞体内含有拐角导流片、蜂窝器、阻尼网、换热器等内置构件。风洞结构如图 1 所示。

风洞主体的中心轴线长轴距离为 28.09 m , 短轴距离为 5.71 m , 采用卧式布置, 最大外形尺寸为 31.33 m (长) $\times 10.18\text{ m}$ (宽) $\times 5.436\text{ m}$ (高), 中心标高 $+2.9\text{ m}$ (相对厂房地面)。风洞洞体选用 16MnDR

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

河北省“十三五”云水资源开发利用工程——人工影响天气风洞系统建设项目资助

作者简介: 扈勇, 男, 1982 年生, 本科, 高级工程师, 主要从事人工影响天气研究, Email: 13931853133@139.com

收稿日期: 2024 年 5 月 31 日; 定稿日期: 2024 年 11 月 19 日

* 通信作者, Email: yangyang@hebwmo.cn

©《气象科技》编辑部 (CC BY-NC-ND 4.0)

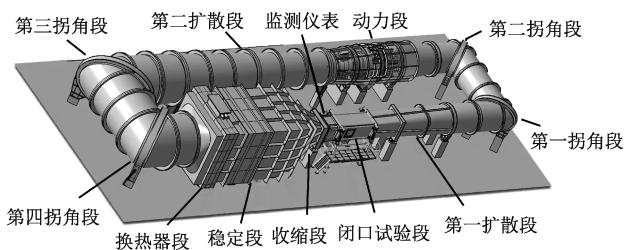


图 1 风洞主体结构

Fig. 1 The main structure of wind tunnel

材质,结构强度按照 -40°C 低温、40 kPa 真空条件设计。风洞可真实模拟机载设备工作环境,洞体相应位置预留温度模拟系统、高度模拟系统、喷雾系统接口,以便未来功能扩展为低温、结冰风洞时无需进行结构性修改,提高功能扩展的可能性并降低扩展成本。必要时可将 1 拐打开,此操作可将风洞由回流结构改为直流结构,满足特殊试验的要求。

2 主要技术参数

2.1 试验段

本风洞在进行试验段尺寸设计时充分考虑了人工增雨飞机搭载的探测设备的实际尺寸,结合被测仪器截面积与试验段截面积的占比要小于 5% 的测试要求,设计试验段截面尺寸 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$,试验段长度根据被测模型的尺寸结合设计经验选择 2.5 倍试验段水力直径,即长度设计为 3 m。为了使试验段的静压接近洞外环境压力,消除模型轴向压力梯度,在试验段末端开设 60 mm 的调压缝。同时为消除闭口试验段壁面边界层加厚对试验段风速的影响,试验段左右两侧壁面采用可调 0.5° 扩展角度的布置形式^[11-16]。

2.2 扩散段

扩散段的主要作用是降低气流速度,将动压能量转化为静压能量,减少能量损失。包括第一扩散段和第二扩散段,其中第一扩散段位于试验段之后,引起的能量损失比较大,占风洞损失的 30% 左右,其性能主要由面积比和扩散角决定^[17-20]。由于本风洞预留设计真空试验工况,为减小压力不均匀引起的压力集中,将第一扩散段设计为方变圆段,第一扩散段到大角扩散段之间的部段均为圆形截面。考虑避免气流分离及减小压力损失的要求,以及前后尺寸约束,将第一扩散段设计为:入口 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 的方形截面,出口为内径 2.1 m 的圆形截面,长

8.79 m,扩散角 5.78° ,前后面积比 2.35。第二扩散段设计原则与第一扩散段类似,设计为:入口直径 2.4 m 的圆形截面,出口为 3.5 m 的圆形截面,长 14.45 m,扩散角 3.98° ,前后面积比 2.13。

2.3 拐角段

在回流式风洞中,气流沿洞体循环一次转 360° 。在单回流风洞中,气流需通过四个 90° 拐角。拐角是风洞的重要部件,气流在四个拐角的压力损失在风洞总压力损失中占有很大部分,尤其是气流速度较高的第一、第二拐角,因此拐角处需要设计拐角导流片,用于防止气流分离和改善流动^[21]。

由于第一、第二拐角段气流速度较高,需要重点关注降低压损,因此导流片通常布置的稀疏一些,导流片长度相对较长;而第三、四拐角导流片对进入稳定段的气流品质有较大影响,因此应布置的较为紧密,相应弦长也较短。因此拐角导流片设计为:第一、第二拐角段采用双圆弧导流片,包含 11 个导流片,翼型弦长 540 mm。第三、四拐角段采用圆弧弯板导流片,包含 19 个导流片,圆弧弯板长 785 mm,半径 500 mm。

2.4 动力段

由于气流与洞体壁面的摩擦损失、在各段内的流动损失、经过试验件时的损失等原因,气体压力和能量会随之降低,为保持试验段气流的流速,就需要不断补充能量。风机的作用是为风洞提供运行的动力,驱动气流以稳定的状态在洞体内持续流动,它是风洞的关键部件,直接关系到风洞能否达到设计的试验状态^[22-23]。通过测量与反馈试验段流速,风洞控制系统实时自动调节风机的运行状态,以补偿能量损失并维持设定的流速。

动力段直径 2.4 m,桨毂直径 1.6 m,桨毂比 0.67,动力段长度 6.2 m。为防止试验件脱落或其他物品对风扇桨叶造成破坏,在第一过渡段后安装一层防护网,孔径 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm}$,丝径 1 mm。动力段前设置过渡段,过渡段根据风机整流罩型面进行优化设计,避免因为扩散角过大导致气流分离。

2.5 大角扩散段

大角扩散段主要作用是对气流起减速作用,将动压能转换为静压能,减少能量损失。在稳定段之前设置大角扩散段,此段为圆变方段,入口为直径 3.5 m 的圆形截面,出口为 $4.2\text{ m} \times 4.2\text{ m}$ 的方形截面,长 1.6 m,扩散角为 38.58° 。为防止气流分离,

中点处设置1道防分离网,孔径30 mm×30 mm,丝径10 mm。

2.6 稳定段

稳定段位于第四拐角段之后,收缩段之前。风洞内的气流在经过风机,再经过扩散段以及第三、第四拐角段之后,气流的湍流度是比较高的,甚至还可能存在大尺寸的漩涡。稳定段的主要作用是稳定气流压力,降低气流速度,消除气流漩涡、导直气流、降低流场湍流度,为收缩段入口提供均匀稳定的流场,以保证试验段的流场品质。稳定段的设计主要在于选择合适的收缩比,设计必要的整流装置,如蜂窝器和阻尼网^[24]。

稳定段的截面根据收缩比设计为4.2 m×4.2 m的方形截面,长5 m,沿气流方向分别为换热段、整流段和预留段。换热段内布置换热器,并预留1 m长空间用于未来建设低温工况的二级换热器。

整流段内布置3层阻尼网和1个蜂窝器。其中1层阻尼网布置于蜂窝器上游,2层阻尼网布置于蜂窝器下游。蜂窝器单元截面形状为正六边形,轴向长度为150 mm,芯格尺寸为15 mm,壁厚0.15 mm,蜂窝器长细比为10;阻尼网截面为正方形,孔径1 mm,丝径0.25 mm,开孔率为64%。另外,在三道阻尼网后预留未来喷雾耙的安装接口与替换结构。

2.7 收缩段

收缩段位于稳定段和试验段之间,是将稳定段截面尺寸平滑地过渡到试验段入口尺寸,同时使气流在无分离流的情况下加速到试验段入口截面所需的气流参数^[25-26]。收缩段入口尺寸为4.2 m×4.2 m,出口尺寸为1.2 m×1.2 m,长度为5.5 m,收缩比12.25。收缩段采用双三次曲线,型面曲线公式为:

$$\frac{R - R_2}{R_1 - R_2} = \begin{cases} 1 - \frac{1}{x_m^2} (x/L)^3, & (x/L) \leq x_m \\ \frac{1}{(1-x_m)^2} [1 - (x/L)]^3, & (x/L) > x_m \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_1 为收缩段入口截面半径(m), R_2 为收缩段出口截面半径(m), L 为收缩段长度(m), R 为轴向距离为 x 处的截面半径(m), x_m 为定值0.5。

3 流场品质

亚音速云雾环境风洞指标设计参照《低速风洞和高速风洞流场品质要求》(GJB1179A-2012)^[27]和

《风洞控制系统设计及检定准则》(GJB 5221-2004)^[28]对流场品质要求,同时综合考虑以下先进性指标:①满足机载探测设备迎风面积不超过试验段截面积5%;②风速可覆盖主流人工增雨飞机的巡航速度,真实还原探测仪器飞行的外部气流状态;③风洞试验段尺寸可满足双机载设备并行使用的试验需求^[29-32]。

目前云物理探测主流机型为空中国王350型飞机和新舟60飞机,考虑其空中探测或巡航速度,并结合机载探测设备工况,风洞流场品质测试选取80 m/s、100 m/s和120 m/s三种风速进行测试。在1 min内连续测量模型区中心处的动压值,1 min测量次数为120次,动压稳定性系数 η 计算如下:

$$\eta = \frac{q_{\max} - q_{\min}}{q_{\max} + q_{\min}} \quad (2)$$

式中: q_{\max} 为1 min内最大动压(Pa), q_{\min} 为1 min内最小动压(Pa)。

不同风速下风洞动压稳定性见图2。当风速为80 m/s时,动压稳定性为0.18%;当风速为100 m/s时,动压稳定性为0.27%;当风速为120 m/s时,动压稳定性为0.34%。

使用静压管测量沿试验段中心线的静压分布,闭口试验段的截面尺寸为1.2 m×1.2 m,长度为3 m,沿风洞中轴线取距试验段入口截面0.15~2.55 m共12个点为轴向静压梯度的测点。在常用动压 $\Delta P = 3968$ Pa(试验速度80 m/s)、常用动压 $\Delta P = 6178$ Pa(试验速度100 m/s)和常用动压 $\Delta P = 8850$ Pa(试验速度120 m/s)下测出沿试验段中心线的静压分布,计算得到各点的压强系数。各测点静压系数 C_p 计算如下:

$$C_p = \frac{(P - P_c)\xi}{q} \quad (3)$$

式中: P 为各测量点静压(Pa), P_c 为参考点静压(Pa), ξ 为探测管单管的修正系数, q 为试验段参考点动压(Pa)。

绘制 C_p -X曲线。求出模型区的轴向静压梯度:

$$\frac{dC_p}{dX} = \frac{m \sum_{i=1}^m X_i C_{pi} - \sum_{i=1}^m C_{pi} \sum_{i=1}^m X_i}{m \sum_{i=1}^m X_i^2 - (\sum_{i=1}^m X_i)^2} \quad (4)$$

式中: X_i 为第*i*测点距试验段入口的距离, C_{pi} 为第*i*测点的压力系数, m 为测量点数。

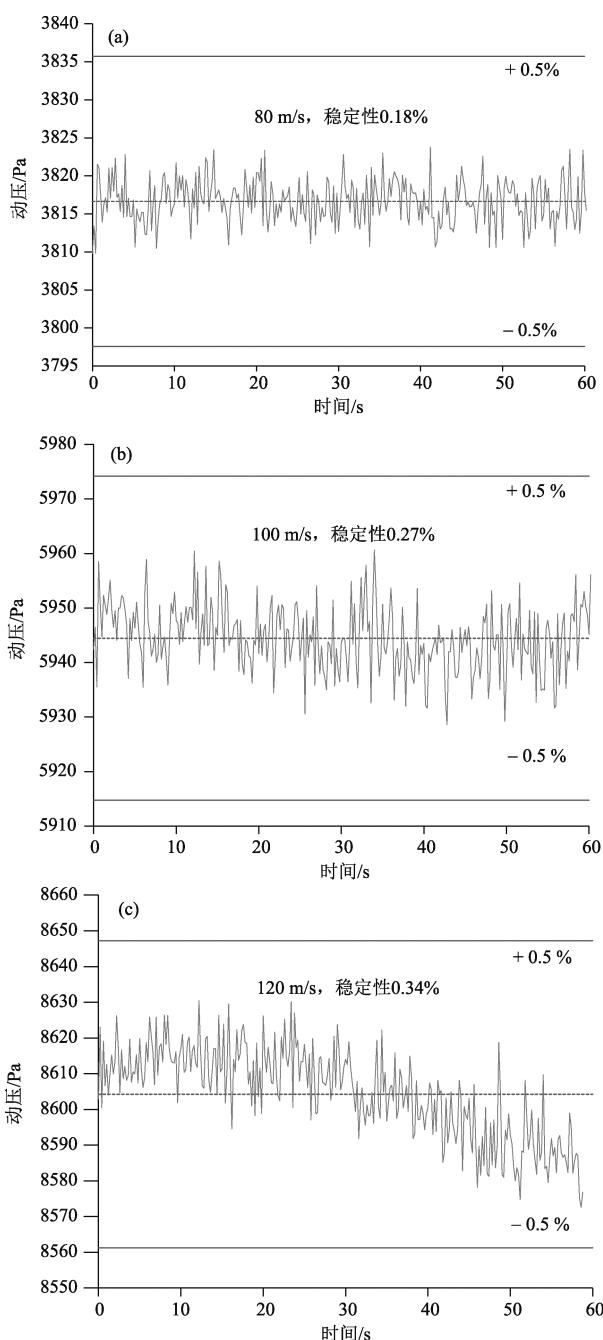


图 2 80 m/s (a)、100 m/s (b) 和 120 m/s (c) 风速下风洞动压稳定性对比

(绿线为模型区域中心处平均动压值)

Fig. 2 The dynamic pressure stability of the wind tunnel at wind speeds of 80 m/s (a), 100 m/s (b) and 120 m/s (c)
(The green line represents the dynamic pressure value at the center of the model area)

不同风速下风洞轴向静压梯度测试结果见图 3。当风速为 80 m/s 时, 轴向静压梯度为 0.00446; 当

风速为 100 m/s 时, 轴向静压梯度为 0.00426; 当风速为 120 m/s 时, 轴向静压梯度为 0.00481。均满足轴向静压梯度小于或等于 0.005 的合格指标。

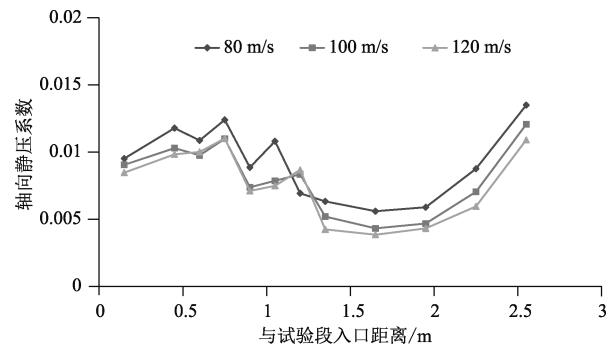


图 3 80 m/s (a)、100 m/s (b) 和 120 m/s (c) 风速下风洞轴向静压梯度对比

Fig. 3 The axial static pressure gradient of the wind tunnel at wind speeds of 80 m/s (a), 100 m/s (b) and 120 m/s (c)

在常用动压 $\Delta P = 3968 \text{ Pa}$ (试验速度 80 m/s)、常用动压 $\Delta P = 6178 \text{ Pa}$ (试验速度 100 m/s) 和常用动压 $\Delta P = 8850 \text{ Pa}$ (试验速度 120 m/s) 下测出距试验段入口截面 1.2 m 截面的动压场, 测量截面上共 5 排 5 列, 共计 25 个有效测点。

用皮托管组成排管测量的试验段动压场, 每个测点位置的动压场系数计算如下:

$$\bar{q} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m q_i \quad (5)$$

$$\mu_i = \frac{q_i - \bar{q}}{\bar{q}} = \frac{q_i}{\bar{q}} - 1 \quad (6)$$

式中: μ_i 为第 i 点动压场系数, q_i 为第 i 点动压 (Pa), \bar{q} 为模型区内各测点动压平均值 (Pa), m 为模型区内动压测量点数。

不同风速下风洞动压场系数分布见图 4。结果表明, 在 80 m/s 风速下动压场系数小于或等于 0.5% 的合格率为 80%; 在 100 m/s 和 120 m/s 风速下, 动压场系数合格率为 76%; 均满足《低速风洞和高速风洞流场品质要求》中的合格率达到 75% 的指标。

风洞整体流场测试结果见表 1。流场校测结果显示风洞流场指标全面达到设计要求, 满足 GJB1179A-2012^[27] 合格指标。

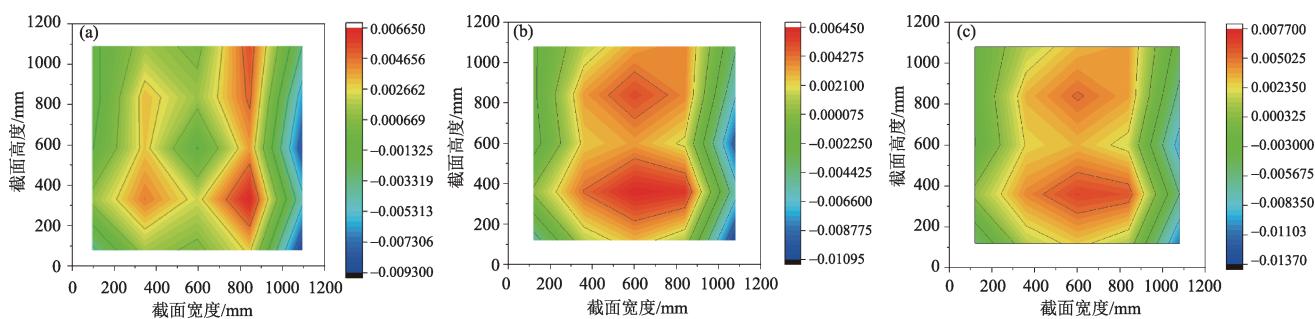


图 4 80 m/s (a)、100 m/s (b) 和 120 m/s (c) 风速下试验段中心截面动压场系数分布对比

(实际截面为南北方向且垂直于地面,以截面底端边界为y轴,向南为正方向;以截面北侧边界为z轴,向上为正方向)

Fig. 4 The dynamic pressure field coefficient distribution of the central section of the test section at wind speeds of 80 m/s (a), 100 m/s (b), and 120 m/s (c)

(The actual section is north-south direction and perpendicular to the ground, with the bottom boundary of the section as the y-axis and southward as the positive direction; taking the north boundary of the section as the z-axis and the upward direction as the positive direction)

表 1 风洞流场校测试验结果

Table 1 The results of wind tunnel flow field calibration test

试验段测试内容	指标要求	实测结果
尺寸	1.2 m(宽)×1.2 m(高)	1.2 m(宽)×1.2 m(高)
空风洞最大风速	150 m/s	150 m/s
最小稳定风速	30 m/s	30 m/s
动压稳定性	常用风速范围内,模型区中心,闭口试验段动压稳定性系数≤0.5%	80 m/s时,动压稳定性系数=0.18%; 100 m/s时,动压稳定性系数=0.27%; 120 m/s时,动压稳定性系数=0.34%
参考点动压修正系数 (落差系数)	动压修正系数≤0.002	动压修正系数=0.0014
湍流度	模型区,闭口试验段湍流度≤0.2%	60 m/s时,湍流度=0.123%; 80 m/s时,湍流度=0.086%; 100 m/s时,湍流度=0.098%
气流温度	常用动压下,试验段气流温度上升速率≤15 °C/h,最高温度≤45 °C	100 m/s时,气流温度上升速率=1.31 °C/h, 最高温度8.30 °C
轴向静压梯度	模型区,沿试验段中心线轴向静压梯度≤0.005/m	80 m/s时,轴向静压梯度=0.00446; 100 m/s时,轴向静压梯度=0.00426; 120 m/s时,轴向静压梯度=0.00481
方向场 (局部流向角)	常用风速范围内,模型区闭口试验段局部气流偏角合格区域(俯仰角≤0.5°,偏航角≤0.5°)达到75%	80 m/s时,合格区域为87%; 100 m/s时,合格区域为87%; 120 m/s时,合格区域为80%
动压场	常用风速范围内,模型区闭口试验段动压场系数≤0.5%的合格区域达到75%	80 m/s时,合格区域为80%; 100 m/s时,合格区域为76%; 120 m/s时,合格区域为76%

4 结论

(1)根据机载探测设备测试需求,设计了国内首座人工影响天气亚音速云雾环境风洞,风洞为闭口回流式,整体尺寸为31.33 m(长)×10.18 m(宽)×5.436 m(高);试验段截面尺寸为1.2 m×1.2 m,试

验段长度为3 m,收缩比为12.25。

(2)经风洞性能测试:风洞试验段最小稳定风速为30 m/s,最大风速为150 m/s,动压稳定性小于0.5%,湍流度小于0.2%;风速为100 m/s时,温升为1.31 °C/h。风洞流场指标全面达到GJB1179A-2012合格指标。

(3) 该风洞气动和结构设计合理,具有试验段尺寸大、风速范围广、流场性能优等优点,能够满足人工影响天气机载探测设备的检测需求。可开展机载探测设备、传感器、航空仪表、无人机及相关部件的气动性能测试、对比验证、工作可靠性、与连接体(或机体)耦合作用等相关试验。

参考文献

- [1] 陈焘,高月忠,严天鹤,等.青藏高原东南缘洱海流域人工增雨效果评估[J].气象科技,2024,52(4):583-591. Chen T, Gao Y Z, Yan T H, et al. Evaluation and analysis of artificial rainfall enhancement in Erhai basin on southeastern edge of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2024, 52(4): 583-591.
- [2] 杨永龙,钱莉,李天江,等.祁连山北坡东段2010—2020年人工增雨试验效果检验评估[J].气象科技,2023,51(4):595-604. Yang Y L, Qian L, Li T J, et al. Inspection and evaluation of artificial precipitation enhancement test effectiveness in east part of north slope of Qilian Mountains during period of 2010-2020 [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2023, 51(4): 595-604.
- [3] 李斌,郑博华,王红岩,等.基于气溶胶激光雷达观测的人工消减雾霾作业效果分析[J].气象科技,2023,51(5):728-737. Li B, Zheng B H, Wang H Y, et al. Effect analysis of artificial haze dispersal based on aerosol lidar [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2023, 51(5): 728-737.
- [4] 孔诗媛,刘昕,边泽强,等.气象用90 m/s回流开闭两用强风风洞设计[J].气象科技,2021,49(1):7-11. Kong S Y, Liu X, Bian Z Q, et al. Design of 90 m/s circumfluence open/closed dual-purpose strong wind tunnel for meteorological application [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(1): 7-11.
- [5] 刘帅,热依汗古丽·木沙,金阿芳.小型风洞实验设计与布局方法的优化[J].黑龙江科学,2024,15(6):156-158+161. Liu S, Masha R Y H G L, Jin A F. Design and layout optimization of small wind tunnel experiments [J]. Heilongjiang Science (in Chinese), 2024, 15(6): 156-158+161.
- [6] 陈啸东,钱作勤,张羽佳.低温试验室内小型风洞设计及结冰过程试验[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(2):292-297. Chen X D, Qian Z Q, Zhang Y J. Design of a small wind tunnel in a low temperature test chamber and experimental of the icing process [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering) (in Chinese), 2024, 48(2): 292-297.
- [7] 赵峰,耿子海,张超,等.汽车风洞高品质流场气动设计方法[J].应用物理,2024,14(5):352-370. Zhao F, Geng Z H, Zhang C, et al. Method of aerodynamic design for high-quality flow field of automotive wind tunnel [J]. Applied Physics (in Chinese), 2024, 14(5): 352-370.
- [8] 王小兰,张雪芬,张婷,等.气象观测设备测试与试验系统设计与实现[J].气象科技,2021,49(5):707-715. Wang X L, Zhang X F, Zhang T, et al. Design and implementation of test and experiment system for meteorological observation equipment [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(5): 707-715.
- [9] 郑健,卢会国.基于互相关的小型化低功耗超声波风速风向仪设计[J].气象科技,2024,52(1):27-36. Zheng J, Lu H G. Miniaturized low power ultrasonic anemometer based on cross-correlation [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2024, 52(1): 27-36.
- [10] 黄心跃,刘赟,张苗苗.一种多轴风洞试验装置路径规划与防碰撞设计[J].测控技术,2024,43(3):85-91. Huang X Y, Liu Y, Zhang M M. Path planning and anti-collision design of a multi-axis wind tunnel test equipment [J]. Measurement & Control Technology (in Chinese), 2024, 43(3): 85-91.
- [11] 廖鹏,傅继阳,马文勇,等.风洞试验段闭口与开口模式下流场的数值模拟与实验研究[J].工程力学,2022,39(S1):164-172. Liao P, Fu J Y, Ma W Y, et al. Numerical simulation and experimental study of flow field in closed and open modes of wind tunnel test section [J]. Engineering Mechanics (in Chinese), 2022, 39(S1):164-172.
- [12] 胡丹梅,陈云浩,张升华,等.回流式低速风洞试验段流场特性实验研究[J].上海电力大学学报,2021,37(4):313-317+323. Hu D M, Chen Y H, Zhang K H, et al. Experimental research on flow field characteristics of the low speed closed circuit wind tunnel test section [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power (in Chinese), 2021, 37(4): 313-317+323.
- [13] 高广军,张琰,刘操,等.运动边界对冰雪风洞试验段流场特性影响研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1320-1333. Gao G J, Zhang Y, Liu C, et al. Research on the influence of moving boundary conditions on flow characteristics inside the test section of the ice-snow wind tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering (in Chinese), 2024, 21(4): 1320-1333.
- [14] 李松奎,贺晓雷,边泽强,等.螺旋桨测风仪风洞测试及不确定度分析[J].气象科技,2021,49(4):524-528. Li S K, He X L, Bian Z Q, et al. Measurement and uncertainty analysis of propeller anemometer in wind tunnel [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(4): 524-528.
- [15] 黄敏,卢会国,王保强,等.超声测风传感器在回路风洞中的测试[J].气象科技,2016,44(1):14-18. Huang M, Lu H G, Wang B Q, et al. Testing of ultrasonic wind sensors in circuit wind tunnel [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2016, 44(1): 14-18.
- [16] 张好运,廖思耀,范广军.基于汽车实际行驶姿态的气动力风洞试验分析[J].科学技术创新,2024(1):43-46. Zhang H Y, Liao S Y, Fan G J. Aerodynamic wind tunnel test analysis based on actual vehicle driving attitude [J]. Scientific and Technological Innovation (in Chinese), 2024(1): 43-46.

- [17] 麻越垠, 聂旭涛, 陈万华, 等. 基于响应面法的低温风洞扩散段热力学模型修正[J]. 实验流体力学, 2017, 31(4): 71-78.
Ma Y Y, Nie X T, Chen W H, et al. Thermodynamics model updating of cryogenic wind tunnel diffuser based on response surface method [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics (in Chinese), 2017, 31(4): 71-78.
- [18] 杨志刚, 周晓利, 李启良, 等. 扩散角对汽车风洞扩散段流动的影响[J]. 实验流体力学, 2010, 24(6): 69-72. Yang Z G, Zhou X L, Li Q L, et al. Effects of diffuser angle on diffuser flow of automotive wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics (in Chinese), 2010, 24(6): 69-72.
- [19] 张志秋, 陈振华, 聂旭涛, 等. 基于固固热耦合低温风洞扩散段热力学特性分析[J]. 实验流体力学, 2016, 30(6): 18-25. Zhang Z Q, Chen Z H, Nie X T, et al. Thermodynamic characteristic analysis of the cryogenic wind tunnel diffuser section based on fluid-thermal-structural coupling [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics (in Chinese), 2016, 30(6): 18-25.
- [20] 张惠林, 赵峰, 易卫, 等. 扩散段洞壁位置度偏差对汽车风洞流场影响的试验研究[J]. 应用物理, 2024, 14(1): 10-18. Zhang H L, Zhao F, Yi W, et al. Experimental study on the influence of diffusion-section wall position deviation on the flow field of automobile wind tunnel [J]. Applied Physics (in Chinese), 2024, 14(1): 10-18.
- [21] 邹琳, 熊灿, 胡勇, 等. 低速风洞拐角段的流动控制减阻研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 39(1): 12-15. Zou L, Xiong C, Hu Y, et al. Numerical study of flow control and drag reduction on the corner of low-speed wind tunnel [J]. Journal of Wuhan University of Technology (in Chinese), 2015, 39(1): 12-15.
- [22] 刘慧芳. 基于ABAQUS的大型风洞动力段结构有限元分析及研究[J]. 航空制造技术, 2014, 57(8): 94-97+101. Liu H F. Finite element analysis and study on fan stage structure of large wind tunnel based on ABAQUS [J]. Aeronautical Manufacturing Technology (in Chinese), 2014, 57(8): 94-97+101.
- [23] 姜广, 刘禹鹏, 王振宇. 风力机叶片气动噪声风洞试验及数值计算[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(2): 280-287. Jiang G, Liu Y P, Wang Z Y. Wind tunnel test and numerical calculation of aerodynamic noise of wind turbine airfoils [J]. Noise and Vibration Control (in Chinese), 2024, 44(2): 280-287.
- [24] 赵鑫, 张利珍, 李运泽, 等. 砂尘环境试验风洞稳定段和收缩段的数值模拟研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(4): 19-22. Zhao X, Zhang L Z, Li Y Z, et al. Study on numerical simulation of stabilization and contraction of sand/dust environmental test tunnel [J]. Equipment Environmental Engineering (in Chinese), 2007, 4(4): 19-22.
- [25] 刘卫红, 姚磊, 余永生, 等. 航空声学引导风洞收缩段边界层修正的数值模拟和实验研究[J]. 实验流体力学, 2015, 29(3): 93-98. Liu W H, Yao L, Yu Y S, et al. Numerical and experimental researches on contraction boundary correction for pilot aeroacoustic wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics (in Chinese), 2015, 29(3): 93-98.
- [26] 严雪阳, 李中龙, 俞宗汉, 等. 基于内收缩比可调的二元TB-CC进气道风洞试验及起动特性分析[J]. 航空发动机, 2024, 50(1): 50-56. Yan X Y, Li Z L, Yu Z H, et al. Wind tunnel test and starting characteristics analysis of two-dimensional TBCC inlet based on variable internal contraction ratio [J]. Aeroengine (in Chinese), 2024, 50(1): 50-56.
- [27] 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. People's Liberation Army General Armaments Department. Requirement for flow quality of low and high speed wind tunnels:GJB 1179A—2012(in Chinese)[S]. Beijing: People's Liberation Army General Armaments Department, 2012.
- [28] 中国人民解放军总装备部. 风洞控制系统设计及检定准则:GJB 5221-2004[S]. 北京:中国人民解放军总装备部, 2004. People's Liberation Army General Armaments Department. Wind tunnel control system design and calibration criteria: GJB 5221-2004(in Chinese)[S]. Beijing: People's Liberation Army General Armaments Department, 2004.
- [29] 刘艳欣, 朱乐乐, 陆文斌, 等. 真空吸式风洞三维非定常流场时空特性[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(1): 105-113. Liu Y X, Zhu L L, Lu W B, et al. Space-time characteristics of three-dimensional unsteady flow field in a vacuum suction wind tunnel [J]. Journal of Detection & Control (in Chinese), 2024, 46(1): 105-113.
- [30] 刘江涛, 廖威, 孔鹏, 等. 立式风洞新型方向场动压场组合测量装置[J]. 兵工自动化, 2024, 43(2): 28-34. Liu J T, Liao W, Kong P, et al. A new combined measuring device for directional field and dynamic pressure field in vertical wind tunnel [J]. Ordnance Industry Automation (in Chinese), 2024, 43(2): 28-34.
- [31] 黄开诱, 田立丰, 杨瑞, 等. 超声速变马赫数风洞流场参数线性变化验证[J]. 航空工程进展, 2024, 15(1): 69-78. Huang K Y, Tian L F, Yang R, et al. Linear change verification of flow field parameters in supersonic continuously variable Mach number wind tunnel [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering (in Chinese), 2024, 15(1): 69-78.
- [32] 李帆, 王志超, 晏天, 等. 试验风场的阻塞效应优化验证[J]. 气象科技, 2021, 49(3): 336-341. Li F, Wang Z C, Yan T, et al. Optimization and improvement of wind tunnel field test [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 2021, 49(3): 336-341.

Design and Flow Field Quality Test of First Weather Modification Subsonic Cloud Environment Wind Tunnel in China

HU Yong YANG Yang ZHAO Liwei DENG Yupeng HOU Shaoyu LI Lin

(Weather Modification Center of Hebei Province, Shijiazhuang 050021)

Abstract: With the development of artificial weather modification efforts, the importance of aircraft for cloud seeding becomes increasingly significant. The effectiveness of aircraft for cloud seeding heavily relies on the stability of onboard detection equipment. To effectively simulate the dynamic operational environment of airborne detection equipment used in artificial weather modification and to enhance the detection capabilities of such equipment, this study presents a design for a recirculating closed-circuit wind tunnel. The primary structure comprises several sections: the test section, diffuser section, corner section, power section, heat exchange section, stabilisation section, contraction section, and reserved section. The interior contains built-in components such as corner guide deflectors, cellular devices, damping screens, heat exchangers, etc. The wind tunnel is arranged horizontally, with a centreline length of 28.09 m and a short axis distance of 5.71 m. The maximum dimensions of the wind tunnel are 31.33 m × 10.18 m × 5.436 m (length × width × height), while the cross-sectional dimensions of the test segment measure 1.2 m × 1.2 m with a stable wind speed range from 30 to 150 m/s. The actual sizes of the airborne detection instruments are taken into account in the design of the test section. Based on a contraction ratio of 12.25, the stable section is designed with a square cross-section of 4.2 m × 4.2 m. The diameter of the power section is set at 2.4 m. To prevent damage to the fan blade from test pieces or other objects, a protective net is installed in front of the power section. To verify the rationality of the wind tunnel design, the flow field quality of the wind tunnel is tested according to the “Low-Speed and High-Speed Wind Tunnel Flow Field Quality Requirements” (GJB1179A-2012) and the “Wind Tunnel Control System Design and Checking Guidelines” (GJB 5221-2004). Following flow field calibration tests, various quality indicators—including wind speed range, dynamic pressure stability, drop coefficient, turbulence intensity, airflow temperature variations, axial static pressure gradient as well as directional and dynamic pressure fields are confirmed to meet GJB1179A-2012 standards and adequately fulfil the testing requirements for airborne equipment. Specifically, the dynamic pressure stability is less than 0.5%, and the turbulence intensity is less than 0.2%. When the wind speed is 100 m/s, the temperature rise is 1.31 °C/h. The aerodynamic and structural design principles applied in this wind tunnel are reasonable and may serve as valuable references for future designs and constructions of similar facilities.

Keywords: subsonic wind tunnel; cloud environment wind tunnel; weather modification; airborne detection equipment

Received: 2024-5-31 Accepted: 2024-11-19

© Editorial Office of *Meteorological Science and Technology* (CC BY-NC-ND 4.0)