

doi: 10.7690/bgzdh.2022.01.012

## 基于双塔结构的立式风洞流场校测架测控系统

刘欢, 宋晋, 魏然

(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:** 针对立式风洞垂直试验段流场性能测试要求, 设计基于双塔结构的校测架系统。全闭环交流伺服控制系统使上、下丝杠连接板带动排管架做高精度同步或单步定位控制; 配合控制系统实现空间定位, 由方向动压组合探头和 DSM 电子扫描阀组成的测量系统实现了方向场、动压场、轴向静压梯度等参数的校测。结果表明: 在  $v=35$  m/s 时, 各截面合格区域面积均达到 75% 以上。应用该系统成功完成了立式风洞流场校测任务, 测量数据准确, 校测结果满足国军标要求。

**关键词:** 垂直试验段; 流场校测; 双塔结构; 测控系统

**中图分类号:** V211.74 **文献标志码:** A

## Measurement and Control System of Vertical Wind Tunnel Flow Field Calibration Frame Based on Double-tower Structure

Liu Huan, Song Jin, Wei Ran

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

**Abstract:** According to the requirements of flow field performance test in the vertical test section of vertical wind tunnel, a calibration frame system based on double-tower structure is designed. The full closed loop AC servo control system makes the upper and lower screw connecting plates drive the rack to do high precision synchronous or single-step positioning control; the space positioning is realized by cooperating with the control system, and the calibration of parameters such as directional field, dynamic pressure field and axial static pressure gradient is realized by the measurement system composed of directional dynamic pressure combination probe and DSM electronic scanning valve. The results show that when  $v = 35$  m/s, the qualified area of each section is more than 75%. The system has successfully completed the task of vertical wind tunnel flow field calibration, the measurement data is accurate, and the calibration results meet the requirements of the national military standard.

**Keywords:** vertical test section; flow field calibration; twin tower structure; measurement and control system

### 0 引言

风洞是一种能由人工产生和控制气流以模拟飞行器或物体周围气体的流动, 并可量度气流对试验模型的作用以及观察物理现象的一种管道状实验设备, 是进行空气动力试验最常用、最有效的工具<sup>[1]</sup>。模型在风洞试验过程中, 要求试验段气流的各项参数在时间和空间的各点上都是均匀的, 还必须满足相似准则对气流提出的要求; 因此, 风洞试验段的流场品质测量评估, 是新建、改造或使用一定年限后的风洞必须开展的项目<sup>[2]</sup>。校测架是用来支撑风洞试验段流场测试仪器的装置。项目针对某风洞流场测试多种支撑状态, 优化设计校测架装置, 配套高性价比测控系统, 满足多状态试验支撑、流场测试要求。据公开文献显示, 国内某大型水平风洞已使用类似校测架开展过流场校测, 但在垂直风洞试

验段尚未有相关文献报道。

### 1 双塔结构校测架装置

某立式风洞为开口试验段, 横截面为圆形, 直径为  $\Phi 5$  m, 试验段高度为 7.5 m, 最高风速为 50 m/s, 主要用于飞机尾旋/改出特性试验<sup>[3-4]</sup>。在风洞使用一定年限后, 需要对其进行流场校测, 试验过程中, 使用的支撑装置为双塔结构校测架装置。根据试验段测量坐标轴系定义,  $Z$  轴沿试验段中轴线垂直向上;  $X$  轴垂直于移动支撑架导轨(即平行于风洞剖面), 指向南方;  $Y$  轴与其余 2 轴垂直, 满足右手系, 指向东方; 坐标轴原点位于试验段出口平面与中轴线交点处。

依据流校试验要求, 校测架装置共有 2 种运行状态: 1) 采用单塔结构支撑测试仪器沿  $X$  轴前后移动定位, 如图 1 所示。用于测量参考点动压稳定性、

收稿日期: 2021-09-29; 修回日期: 2021-10-28

作者简介: 刘欢(1998—), 女, 四川人, 工程师, 从事低速风洞测控技术、非接触测量技术研究。E-mail: 431327260@qq.com。

动压修正系数、轴向静压梯度、湍流度、气流温升和气流噪声等。2) 采用双塔结构支撑测试仪器沿 Z 轴在不同测试截面上下移动定位, 如图 2 所示, 用于测量气流的方向场和动压场。

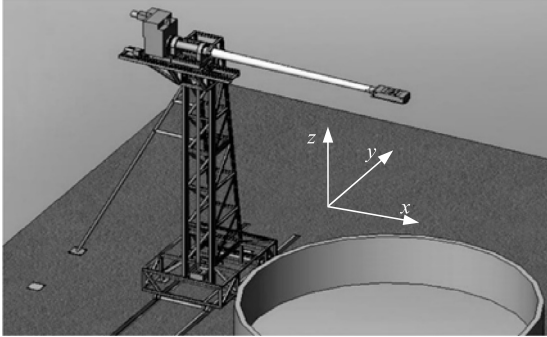


图 1 伞试验支撑装置单塔支撑 3 维

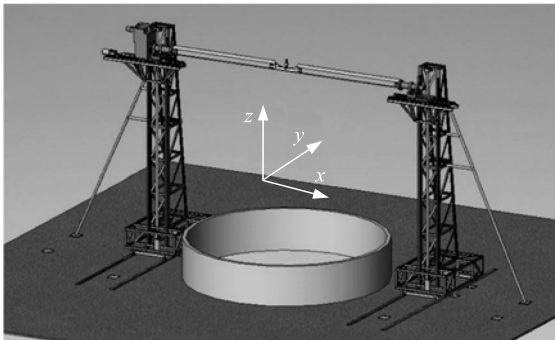


图 2 伞试验支撑装置双塔支撑 3 维

## 2 控制系统设计与应用

### 2.1 控制系统硬件

根据机构受力分析、系统功能和技术指标等要求, X 向机构安装在 HIWIN 法兰加宽型 45 滚珠直线导轨上, 使用的驱动装置为安川伺服电机, 型号为 SGMJV-04AAA6C/SGDV-2RA01A, 该电机额定输出扭矩为 1.27 N·m, 转速可达到 3 000 r/min; 配套的 NEUGART 减速器, 型号 PLE60-012, 减速比为 12。Z 向机构是通过伺服减速电机、滚转直线导轨副带动支架、滚珠丝杠及其他调节结构在 2 根竖直导轨上沿垂直方向上下升降, 驱动装置使用安川伺服电机, 型号 SGMGH-20ACA6C/SGDM-20ADA, 该电机额定输出扭矩 11.5 N·m, 转速可达到 1 500 r/min; 配套的邦飞利蜗轮蜗杆减速器, 型号 W75UD30 10 P100 B5 B7, 减速比为 10<sup>[5]</sup>。

但 Z 向机构的南北轴有时需带动排管架同步运行, 因此南北 2 驱动采用相同的高性能安川伺服系统、高精度绝对位置编码器及配备高性能的西门子 FM357-2 联动模块来实现同步模式。当 Z 向机构的南北轴带动排管架同步运行时, PLC 通过对绝对

位置编码器实时中断查询南北 2 电机的实际同步精度, 根据同步精度是否处在允许的容差范围内, 决定是否停止电机运行, 进行复位处理, 确保实时保护。

控制器采用西门子 S7-300 PLC 自动化系统, 其内部包含了 CPU315-2DP CPU 模块、FM357-2 多轴联动模块、SM321 数字量输入模块及 SM322 数字量输出模块。上位控制计算机通过西门子 CP5621 通信卡及专用通信电缆与 PLC 通信, PLC 接到控制指令后会按照相应的控制策略, 通过定位模块的脉冲和方向信号控制相应伺服驱动器, 从而通过外部位置闭环控制伺服驱动系统, 实施精确定位。运行过程中, 伺服系统状态、各轴限位情况、各轴具体位置、PLC 运行状态等均实时反馈至 PLC 核心控制器, 再上传至主控计算机, 实时监控。控制系统硬件组成如图 3 所示。

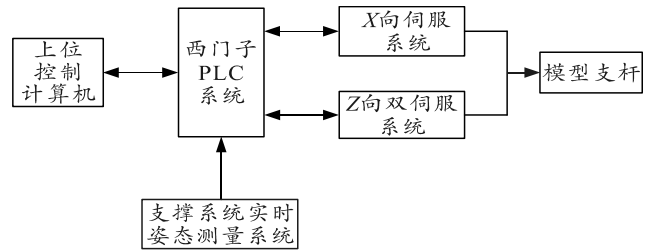


图 3 校测装置控制系统硬件

### 2.2 控制系统软件

控制系统软件包括远程计算机监控软件和 PLC 控制等。远程计算机监控软件采用 Lab Windows/CVI 编程软件进行开发, PLC 控制软件采用 STEP7、Cvi、WinCC flexible 等软件设计。远程计算机监控软件与 PLC 之间的通信是通过在 Prosave 软件包基础上采用 CVI 编程来实现。软件实现南北双塔电机单独运行或同步运行之间的转换、系统急停、实际位置显示、限位报警、运行速度设定等功能<sup>[6-8]</sup>。控制系统软件界面如图 4 所示。

## 3 测量系统设计与应用

风洞流场校测内容包括参考点动压修正系数、动压稳定性、轴向静压梯度、湍流度、气流温升、气流噪声、动压场和方向场 8 个项目, 各项内容试验方法基本一致, 测试仪器不同。笔者以方向场测量为例介绍测量系统设计与应用。

### 3.1 测量内容

方向场包括局部气流偏角和平均气流偏角, 通常采用五孔探针组成排管测量试验段局部气流偏

角。流场校测时，在风洞轴线每个测试截面上，以风洞轴心为中心，15 根五孔探针成排，布置间距约为 365 mm，压力测量点为 90 个。校测架带动排管架在截面 Z 轴等于 0.5, 2, 3.5 m, Y 轴等于 -2.555~

2.555 m,  $\Delta Y=0.365$  m 移动，每根探针的测压孔通过测压软管与电子扫描阀连接，探针将感受到的压力信号传递给电子扫描阀测量，测压参考点为风洞外的大气压<sup>[9]</sup>，风洞动力系统采用稳转速开车。

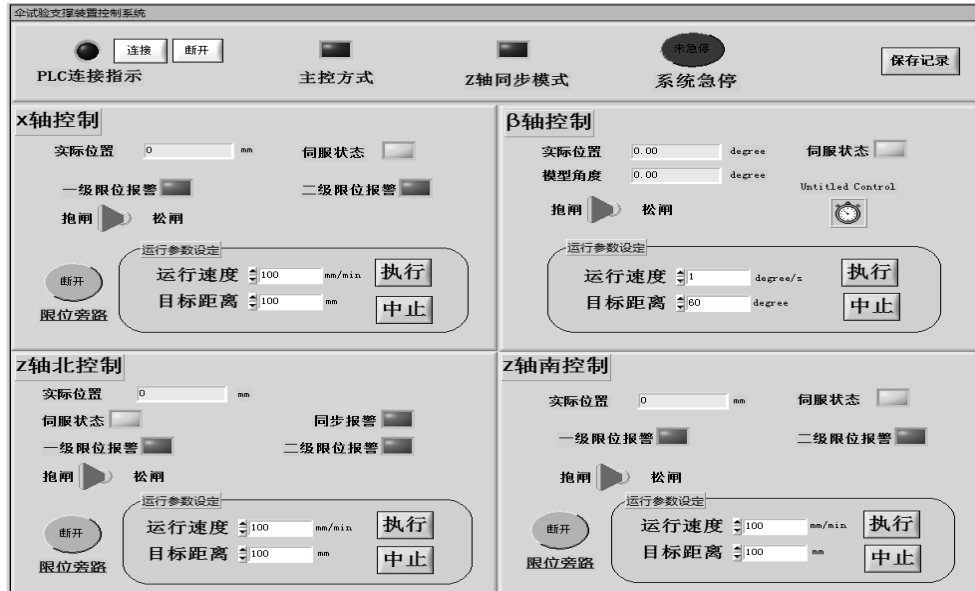


图 4 控制系统软件界面

### 3.2 测量设备

方向场测试设备主要由 DSM4000 电子扫描阀系统、五孔探针和测量计算机组成。

五孔探针共有 15 根，每根探针引出 6 根测压管，由长至短分别为总压  $P_{总}$ 、上孔压力  $P_{上}$ 、右孔压力  $P_{右}$ 、下孔压力  $P_{下}$ 、左孔压力  $P_{左}$ 、静压  $P_{静}$ 。 $P_{上}$ 、 $P_{下}$  用于测量气流方向与探针轴线的夹角  $\alpha$ ， $P_{左}$ 、 $P_{右}$  用于测量气流方向与探针轴线的夹角  $\beta$ ， $P_{总}$  用于测量总压<sup>[10-11]</sup>。在初始安装时对探针姿态进行调校，保证探针轴线与试验段轴线一致。

试验时，电子扫描阀系统通过探针管路感受待测压力，输出对应的模拟信号，经过系统内部的信号放大和模数转换，将数据传输到测量计算机端<sup>[12]</sup>。

### 3.3 数据处理及分析

依照以下公式计算待测点的气流偏角：

$$C_{p\alpha} = (P_{下} - P_{上}) / (P_{总} - P_{静}); \quad (1)$$

$$C_{p\beta} = (P_{右} - P_{左}) / (P_{总} - P_{静}); \quad (2)$$

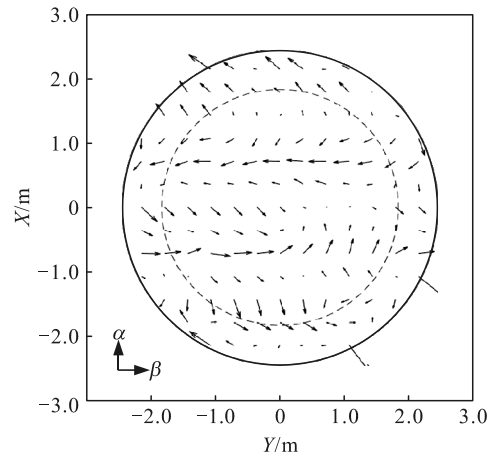
$$\Delta\alpha = K_{\alpha} C_{p\alpha} + a + \Delta\alpha_{安}; \quad (3)$$

$$\Delta\beta = K_{\beta} C_{p\beta} + b + \Delta\beta_{安}. \quad (4)$$

式中： $C_{p\alpha}$  为五孔探针迎角方向压差系数； $C_{p\beta}$  为五孔探针侧滑角方向压差系数； $\Delta\alpha$  为迎角方向局部气

流偏角； $\Delta\beta$  为侧滑角方向局部气流偏角； $K_{\alpha}$ 、 $a$  为迎角方向压差偏角校正系数； $K_{\beta}$ 、 $b$  为侧滑角方向压差偏角校正系数； $\Delta\alpha_{安}$  为迎角方向初始安装偏角； $\Delta\beta_{安}$  为侧滑角方向初始安装偏角。

图 5 为对应截面的测试结果。GJB1179A—2012《低速风洞和高速风洞流场品质要求》中明确指出，试验区域按风洞试验段尺寸的 70% 计算(图 5 中虚线圆)，合格指标为待测区域  $|\Delta\alpha| \leq 0.8^{\circ}$  及  $|\Delta\beta| \leq 0.8^{\circ}$  达到 75%。以测试风速  $v=35$  m/s 为例，在  $Z=0.5$ 、2.0、3.5 m 3 个测试截面下，合格区域面积占比分别为 80.5%、78.2%、75.4%，均达到国军标合格指标。



(a)  $Z=500$  mm,  $v=35$  m/s

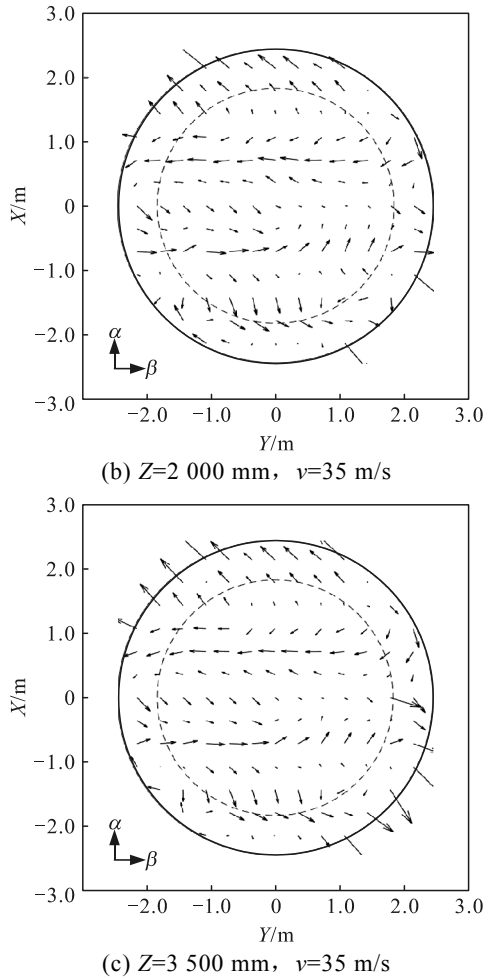


图 5 方向场测试结果

#### 4 结束语

针对立式风洞垂直试验段流场测试要求,设计并实现了基于双塔结构的校测架装置,采用全闭环交流伺服控制系统,控制排管架做高精度空间定位,满足了测量系统安装及移动的需求。试验结果表明:该系统自动化程度高,结构稳定可靠,其控制系统移动定位精度高,测量系统数据准确,风洞

流场校测数据满足国军标对低速风洞流场的相关指标要求,实现了预期的技术要求,对类似的其他工程技术项目具有一定的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 高丽敏,刘哲,蔡明,等. 4种风洞收缩段流场特性对比[J]. 航空动力学报, 2020, 35(8): 1695-1705.
- [2] 魏然.  $\Phi 5\ \text{m}$ 立式风洞流场校测试验报告[R]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心, 2020.
- [3] 祝长江,吕波,虞择斌,等.  $\Phi 5\ \text{m}$ 立式风洞结构设计[J]. 实验流体力学, 2010, 24(2): 93-96.
- [4] 颜巍. 立式风洞与立式风洞试验[J]. 民用飞机设计与研究, 2016(3): 52-55.
- [5] 兰宇. 立式风洞伞试验支撑装置控制系统研制[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2018.
- [6] 陈天毅,倪喜卓,杜立强,等. 风洞模型电动推杆Y机构运动同步控制系统建模与仿真性能分析[J]. 现代制造工程, 2020(8): 72-81.
- [7] 贾波凯,李文杰,卢训,等. 基于LabView和PLC的低速机喷油器试验台测控系统设计[J]. 内燃机, 2020(5): 35-38.
- [8] 丁俊鹏. PLC测控系统的功能的开发[J]. 化学工程与装备, 2020(8): 132-133.
- [9] 熊建军,王辉,马军,等. 基于龙门结构的风洞流场校测架测控系统设计与应用[J]. 测控技术, 2014, 33(12): 85-87.
- [10] 高强,田夫,王晓放,等. 五孔探针形变与振动对透平机械复杂流场测量精度的影响[J]. 测控技术, 2017, 31(3): 196-200.
- [11] 陈德华,王瑞波,刘光远,等. 2.4 m跨声速风洞槽壁试验段调试及流场校测[J]. 实验流体力学, 2013, 27(4): 66-70.
- [12] 曾星,顾光武,张文清,等. 风洞通用压力扫描阀综合数据采集系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(2): 211-212.