

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.011

# 某航空声学风洞控制系统

杨孝松, 郭守春, 杜立强, 盖文, 陈俊宏

(中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为降低飞行器、地面交通工具等的噪声, 设计一种航空声学风洞控制系统。介绍风洞控制系统各部分功能, 根据声学风洞控制系统的特点, 对其技术难题进行分析, 通过调节风扇电机的转速来实现试验段速压的闭环控制, 对风洞模型支撑机构进行设计, 根据试验配置内容选取控制流程完成风洞运行控制任务, 并开展相关性能指标测试。调试结果表明: 该系统运行稳定可靠, 各项控制性能均达到或优于技术指标要求。

**关键词:** 风洞; 光纤环网; 流场控制; 协调控制; T-CPU

**中国分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## Control System for Certain Type Aero-acoustic Wind Tunnel

Yang Xiaosong, Guo Shouchun, Du Liqiang, Gai Wen, Chen Junhong

(Facility Design &amp; Test Technology Institute, China Aerodynamics Research &amp; Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The control system for the aero-acoustic wind tunnel is designed to reduce the noises of aircrafts, vehicles, etc. The subsystems are described, and according to the characteristics of control system, the key technical issues are analyzed. The closed-loop control of the test section pressure is realized by adjusting the fan motor speed. The model support mechanism is designed. The operations of the wind tunnel are completed by selecting the control flow according to the test configuration. The performance of control system is tested, and the results show that the control system can run steadily and reliably, and every performance has met or been better than the technical requirement.

**Keywords:** wind tunnel; optical fiber ring network; flow field control; coordination control; T-CPU

### 0 引言

随着科学技术的发展, 噪声指标在军用、民用飞行器以及地面交通设备的性能参数中占据越来越重要的地位。这些设备的噪声性能以及相应的噪声控制技术也逐渐成为空气动力学研究中的重点内容<sup>[1]</sup>。为降低军民用飞行器、地面交通工具等的噪声, 发展气动噪声试验技术, 需要能进行噪声测试的试验环境<sup>[2]</sup>。

与其他试验方法相比, 声学风洞试验具有经济、实用、先行、安全等优点, 据此, 建设某航空声学风洞, 主要通过消声的方法使试验段具有极低背景噪声, 以保证对模型声源的噪声进行精确地测量。

作为风洞的重要组成部分, 风洞控制系统具有以下主要特点: 控制子系统多, 且多数需在试验过程中进行监控, 数据传输量大, 对控制系统网络架构的实时性和可靠性要求较高; 流场控制的稳态精度、抗扰动性能以及控制参数适应性要求高; 尾撑机构等运动机构存在多轴协调运动要求, 且定位精度要求高等。为保证各项性能指标的实现, 需要有

针对性地对风洞控制系统开展设计, 最终保证风洞试验的精细化程度以及风洞的安全可靠运行。

### 1 控制系统总体设计及网络架构

如图 1, 某航空声学风洞由风扇段、扩散段、换热器段、拐角段、稳定段、收缩段、消声室、试验段(含开口和闭口试验段)等部段组成。

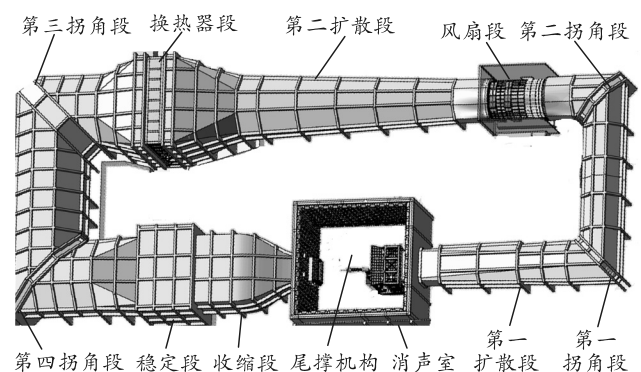


图 1 风洞总体结构

该风洞控制系统按功能设计分为运控管理、风洞状态预置、风洞运行控制以及风洞安全监控部分。运控管理部分主要对风洞控制系统实施统一的

收稿日期: 2020-04-22; 修回日期: 2020-05-15

作者简介: 杨孝松(1983—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事机电一体化、计算机控制研究。E-mail: mel\_yxs@126.com。

运控指挥，对吹风试验数据和设备状态数据进行有效的存储管理。运控管理部分主要包括运行管理计算机、状态监控计算机、数据库服务器、数据查询机等。运行管理计算机是风洞的主控计算机和运行控制中心，负责统一计划调度和协调指挥整个声学风洞控制系统的高效运行，实现程序优化和采集同步，完成风洞的吹风试验任务；状态监控计算机主要负责风洞状态、过程状态和试验数据的直观显示，形象地将吹风试验状态和数据呈现在有关人员面前；数据库服务器主要对吹风试验数据、设备状态数据、测量采集数据等进行综合管理，以方便试验数据的存储、管理、查询、报表、出图等；数据查询计算机也称为客户计算机，供客户等相关人员对吹风试验数据的事后查询等，以方便其了解、分析和掌握吹风试验情况。

风洞状态预置部分主要包括闭口试验段顶盖、补偿段以及收集器等部段的控制。这些部段需要在风洞试验前执行操作控制，而在风洞试验过程中，无需执行操作控制。此部分系统的控制器采用西门子 S7-300 系列 PLC，驱动器采用西门子 G120 系列变频器或 S120 系列伺服驱动器。

风洞运行控制部分主要包括风洞冷却控制系统、流场控制系统、尾撑机构控制系统、腹撑机构控制系统等，需要在风洞试验过程中实时执行操作

控制。尾撑机构采用电液伺服驱动方式，控制器采用西门子 T-CPU 系列产品；腹撑机构采用伺服电机驱动方式，驱动器采用 S120 系列伺服驱动器，控制器也采用西门子 T-CPU 系列产品；其余系统的控制器均采用西门子 S7-300 系列 PLC。

风洞安全监控部分主要用于实现控制系统的网络软件组态及数据传输、监测风洞试验准备和运行阶段的设备状态、对异常状态进行报警、紧急停车等功能。安全监控系统控制器选用西门子 S7-300 系列 PLC。

在网络架构方面，考虑到该风洞尺寸大、现场电磁环境复杂，控制系统采取光纤环形主干网、PROFINET 工业以太网、PROFIBUS 现场总线网相结合的综合网络作为控制系统总体网络架构(如图 2)。光纤环网具有传输距离长、电磁兼容性好，且兼具冗余功能，任一节点发生故障，不会影响整个网络的数据传输，大大提高控制网络的可靠性<sup>[3-4]</sup>；PROFINET 通信结合 iRT 等时间同步技术，解决了网络传输的数据堵塞风暴、时间不确定性和响应快速性等的问题，各子系统之间以 PROFINET I-Device 技术互为 I/O 设备进行通信，从而满足控制系统的实时性要求；各子系统内部，对于短距离、通信实时性要求不高的，可采用 PROFIBUS-DP 通信方式，提高系统的经济性。

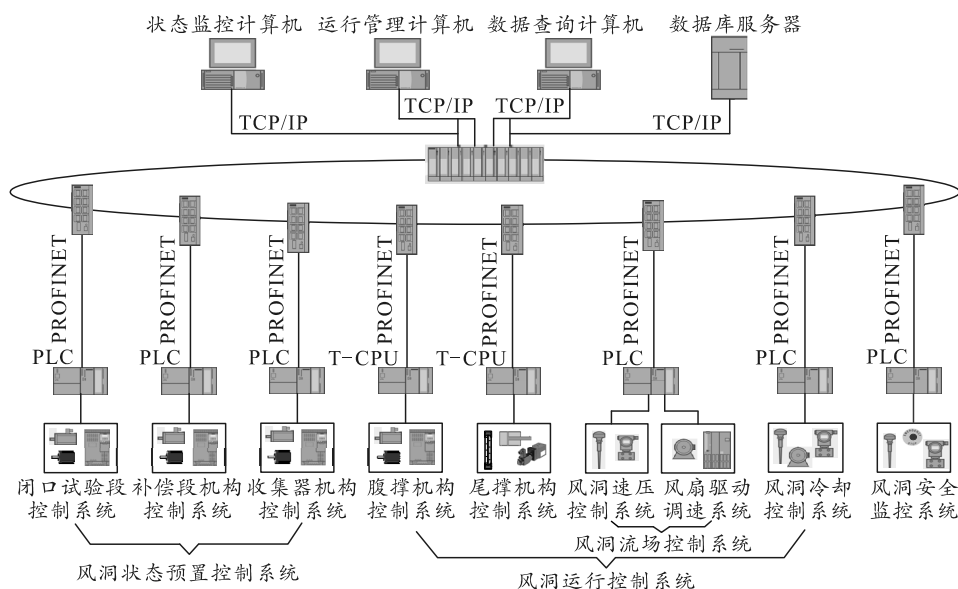


图 2 控制系统网络架构

## 2 主要控制子系统设计实现

对风洞试验结果影响较大的子系统主要包括风洞流场控制系统、尾撑机构控制系统和风洞运行管理系统等。

### 2.1 风洞流场控制系统

该风洞的流场通过电机驱动风扇来建立，而风洞试验要求获得稳定的目标速压值，流场控制通过调节风扇电机的转速来实现试验段速压的闭环控制。

风扇电机转速的稳定性直接影响风洞流场的稳定性，而风洞气流自身存在的压力脉动、试验模型姿态变化，均会使风扇负载产生变化，影响风扇电机转速的稳定性，进而反过来加剧风洞气流的扰动，严重的会导致整个风洞流场控制的失稳。为了提高风扇电机转速的稳定性，提高流场控制系统的抗扰性和鲁棒性，风扇电机转速采用闭环控制，与速压闭环控制一起构成串级控制系统<sup>[5-6]</sup>。其中，风扇电机转速控制为内回路，试验段速压控制为外回路。

流场控制系统中，风扇电机转速作为控制点，试验段速压作为检测点。在风扇电机转速闭环控制中，风扇的负载特性确定了风扇电机转速的上升及下降需要较长的时间；同时，由于风洞尺寸较大，控制点与检测点之间距离超过 200 m，风扇电机转速改变导致试验段流场变化也需要一定的时间；因此，流场控制系统又是一个大滞后系统。为了克服大滞后可能带来的超调和振荡，提高系统响应速度，在串级控制的基础上加入风扇电机转速前馈环节，提高流场控制系统性能。流场控制原理如图 3。图中： $p_s$  为试验段速压设定值； $p_r$  为试验段速压实际值； $\Delta p$  为速压偏差； $n_s$  为风扇电机转速给定值； $n_r$  为风扇电机转速实际值。

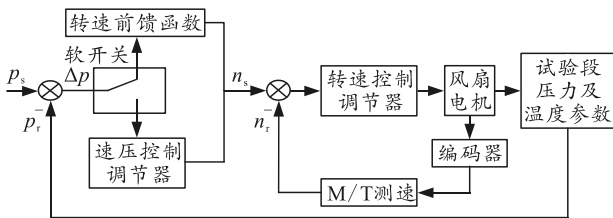


图 3 流场控制原理

### 2.1.1 风扇电机转速控制

风扇驱动采用变频调速方式。风扇驱动电机采用高压变频器异步电动机，功率为 12.5 MW，电机调速范围为 0~360 r/min；配置冷却风机、润滑油站、电加热器等作为保证风扇电机正常运行的辅助设备；电机绕组和轴承配置温度传感器，用于监测电机温度；电机轴系配置振动传感器，用于监测电机运行时轴系的振动状态。

变频器选用 H 桥单元级联型高压大功率变频器，由移相变压器、预充电装置、功率单元、内循环水冷系统等组成。配置外循环冷却水系统，通过换热器与内循环水冷系统进行热交换，带走变频器运行产生的热量。

风扇电机转速控制系统组成如图 4。

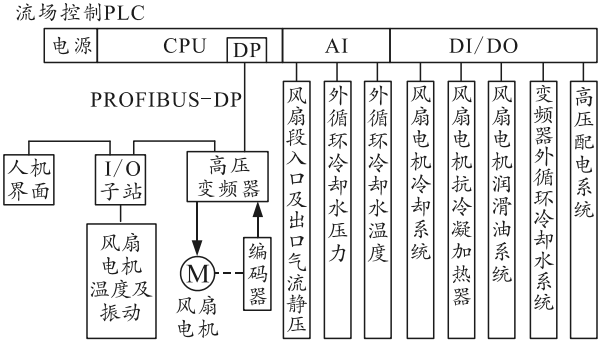


图 4 风扇电机转速控制系统组成

系统对风扇电机转速控制精度要求较高(转速稳态控制精度要求优于 0.03%)，对变频器的调速性能也提出了较高的要求。影响风扇电机稳态转速精度的主要因素包括电机转速反馈精度、变频器谐波引起的纹波转矩、变频器调速控制算法等<sup>[7-8]</sup>。为保证风扇电机转速控制精度，针对性地采取以下措施：

- 1) 风扇电机转速反馈方面，采用高分辨率增量编码器，结合变频器的 M/T 测速法，保证在全转速范围内都具备很高的转速检测精度；
- 2) 纹波控制方面，采用单极倍频 SPWM 算法、移相载波 PWM 算法，降低谐波电流，减少转矩脉动；
- 3) 调速控制算法方面，采用矢量控制技术，对电流环和转速环设计合理的调节器，按照时域分析法中的工程 2 阶最佳算法对调节器的控制参数进行整定<sup>[5]</sup>，以获得最优的控制性能。

### 2.1.2 速压控制

流场控制系统为大滞后系统，过早投入速压闭环控制，容易产生超调，甚至导致系统震荡，给试验模型带来危害；因此，可设置一个误差域 $[-\epsilon_1, \epsilon_1]$ ，当速压偏差  $\Delta p$  在误差域外时，触发转速前馈环节，预先调节风扇电机转速至目标值，然后切入到速压闭环控制。

转速前馈环节为试验段速压值与风扇电机转速值的对应关系函数，可将风扇电机全转速范围切割成若干个转速阶梯，记录每个电机转速阶梯下对应的试验段速压值，再进行二次或三次多项式函数拟合即可获得。

为保证系统快速调节的同时，又不会产生超调和振荡，速压闭环控制采用积分分离 PI 算法<sup>[9]</sup>：当速压偏差较大时，只让比例部分起作用，以快速减少偏差；当偏差减少到一定程度后，再投入积分，最终消除稳态偏差。积分分离算法表达式为

$$u(k) = K_p e(k) + C_i K_i T_{sam} \sum_{i=1}^k e(i) \quad (1)$$

式中： $C_1 = \begin{cases} 1, & |e(i)| \leq \delta \\ 0, & |e(i)| > \delta \end{cases}$ ， $\delta$  为常数； $u(k)$  为本次输出；

$e(k)$  为本次误差； $K_p$  为比例系数； $K_I$  为积分时间； $T_{sam}$  为采样周期。

### 2.2 尾撑机构控制系统设计

风洞模型支撑机构有腹撑机构和尾撑机构 2 种，较之于腹撑机构，尾撑机构更复杂、控制难度更大。

尾撑机构由变角度机构和 Y 向机构组成。变角度机构由迎角机构、前侧滑角机构和后侧滑角机构组成。变角度机构安装在 Y 向机构的单支板上，单支板固定在箱型机架上，并通过箱型梁两侧 4 根直线运动导轨安装在地面的地坑内。尾撑机构总体结构如图 5。

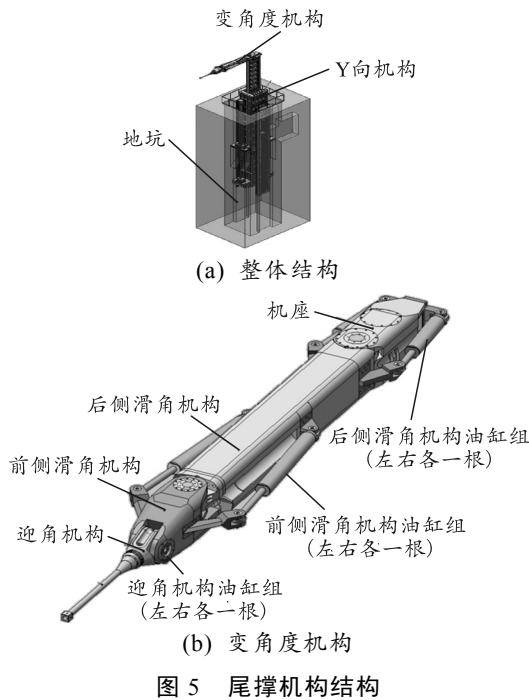


图 5 尾撑机构结构

尾撑机构控制系统主要完成尾撑试验模型迎角和侧滑角的控制。

主要技术指标要求为：

- 1) 迎角变化范围： $-15^\circ \sim 90^\circ$ ；
- 2) 侧滑角变化范围： $-30^\circ \sim 30^\circ$ ；
- 3) 迎角和侧滑角最大试验速度： $1 (^\circ)/s$ ，回零速度为  $2 (^\circ)/s$ ；
- 4) 迎角和侧滑角度定位精度：优于  $0.02^\circ$ 。

尾撑机构采用液压伺服驱动方式，尾撑机构控制系统通过驱动迎角机构油缸、前侧滑角机构油缸、后侧滑角机构油缸和 Y 向机构油缸的直线运动，实现模型姿态角度的连续调节和精确定位，并保证模

型中心始终处于风洞中心轴线上。

尾撑机构总质量约 80 t，各液压轴的负载质量和固有频率迥异，Y 向机构运动行程达 8 m，且存在大惯性和超越负载问题；因此，尾撑机构是一个复杂的机电液系统<sup>[10-11]</sup>。同时，尾撑机构存在着“变迎角、定侧滑角”“定迎角、变侧滑角”以及“变迎角、变侧滑角”等多种运动工况，对各自由度机构间的协调运动控制也提出了较高要求。

尾撑机构控制的主要关键技术包括：

1) 各运动机构的运行特性以及各机构间的运动关系解算；

2) 大型液压驱动机构的稳定精确定位；

3) 多自由度机构间的协调运动控制。

尾撑机构控制系统以西门子 T-CPU 为核心控制器，配合西门子 IM174 接口模块，完成尾撑机构协调运动及精确定位控制、角度状态数据采集以及安全联锁。

尾撑机构控制原理如图 6。

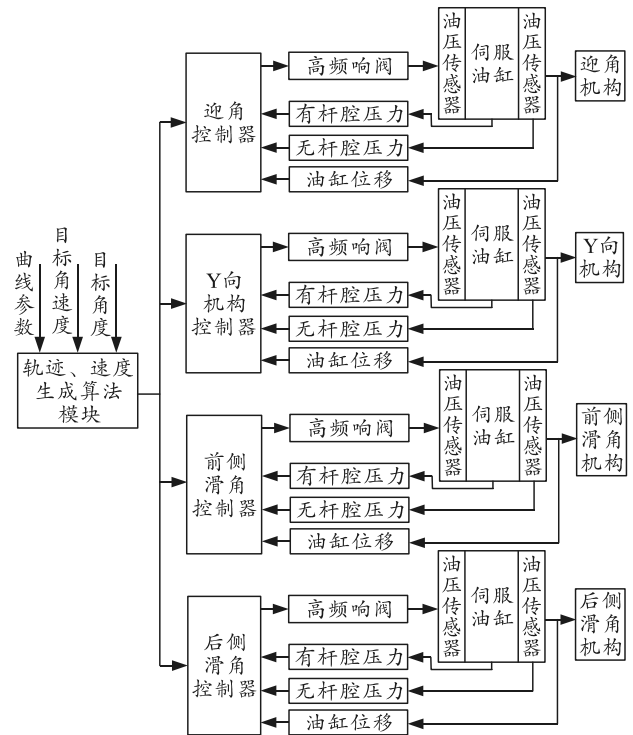


图 6 尾撑机构控制原理

尾撑机构采用插补定位与预估控制相结合的多轴同步协调控制技术。在油缸预定速度特性曲线基础上，当大误差范围时，利用预估控制原理，预设各轴运动轨迹使其快速接近目标位置；当进入指定误差带时，采用基于误差的插补逼近方式，逐步消除误差，达到设定位置。在多轴协调运动控制方面，引入虚拟主轴原理，将目标控制量设为虚拟主轴，

各控制实轴随虚拟主轴的目标位置变化实时跟随，以解决各运动轴的协调运行及控制偏差实时在线修正问题。

### 2.3 风洞运行管理系统

风洞运行管理系统的主要工作是在风洞运行管理计算机上开发风洞运行管理软件，以实现风洞试验流程设定、风洞试验工况选择、各控制子系统远程监控、系统故障提示、数据显示和存储、历史数据回放等功能。

风洞运行管理主程序结构设计为工作和事件处理 2 个并行的循环。工作循环使用定时循环结构实现，用于处理主要的控制逻辑；事件处理循环使用 while 循环结构实现，用于处理主界面上试验控制部

分的按钮命令。软件的运行(线程)结构如图 7。

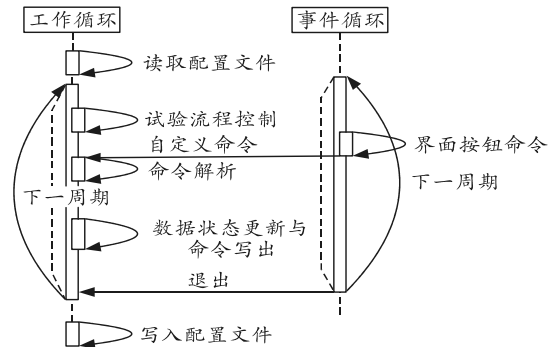


图 7 风洞运行管理程序主程序结构

风洞运行管理程序根据试验配置内容选取相应的控制流程完成风洞运行控制任务。运行管理程序相应的逻辑流程如图 8。

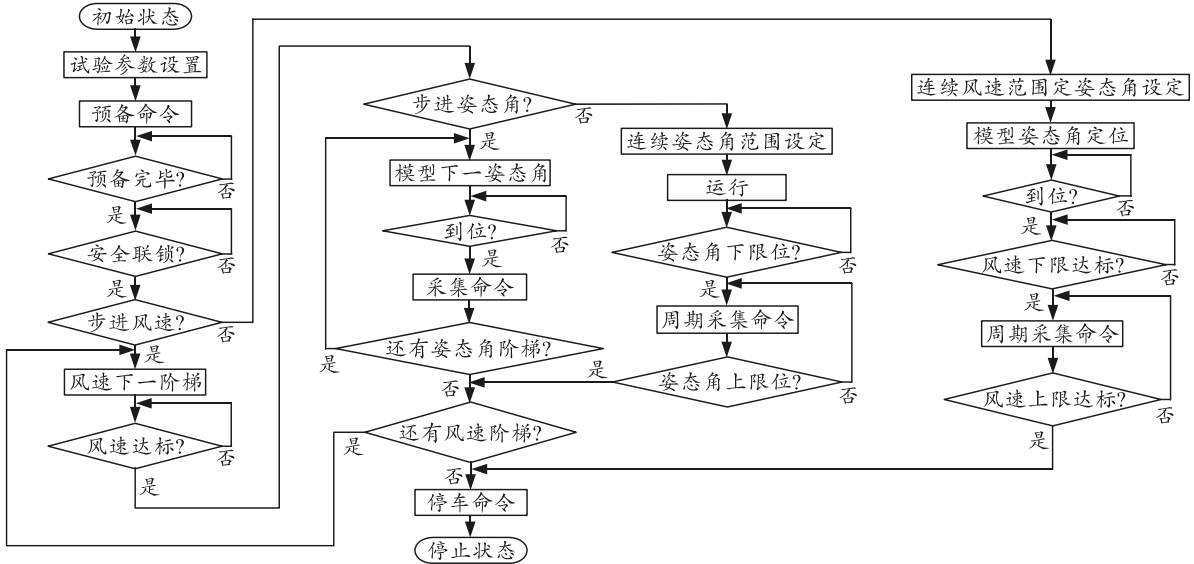


图 8 试验程序流程

### 3 调试结果与分析

控制系统完成了安装调试内容，可开展相关性性能指标测试工作。主要子系统的测试结果如表 1。

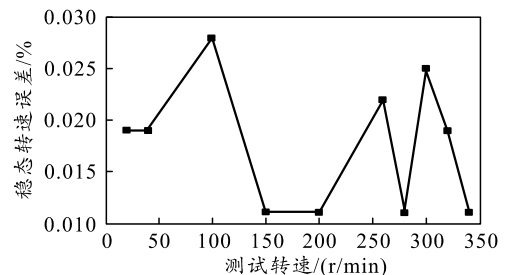
表 1 控制子系统测试结果

测试项目	测试结果	指标要求
试验段速压控制精度/%	0.2(40~120 m/s)	0.2
风扇电机转速控制精度/%	0.027	0.03
尾撑机构迎角定位精度/(°)	±0.016	±0.02
尾撑机构侧滑角定位精度/(°)	±0.011	±0.02
腹撑机构迎角定位精度/(°)	±0.01	±0.02
腹撑机构侧滑角定位精度/(°)	±0.01	±0.02
补偿段翻板定位精度/mm	±0.32	±0.5
收集器翻板定位精度/mm	±0.3	±1

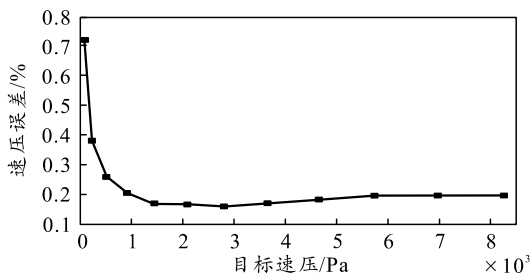
由表可知，各控制子系统的性能均达到或优于技术指标要求。

图 9 为流场控制的测试结果。可以看出：风扇电机转速控制精度可以保证在 0.03%以内，满足技

术指标要求。试验段速压在 920~8 500 Pa(对应试验段风速 40~120 m/s)的控制精度可以保证在 0.2%以内，满足技术指标要求；在 920 Pa 以下，控制精度较差，且目标速压越低，稳态速压控制精度越差，这是因为速压稳态精度以当前给定速压值为考核标准，目标速压值越低，传感器自身的采集误差以及风洞自身的压力脉动对速压精度的影响就越大；因此，在低速压区，速压稳态精度较低。



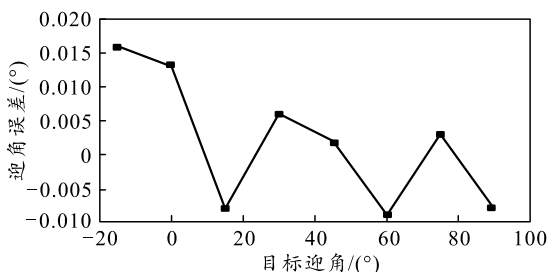
(a) 风扇电机转速控制精度测试



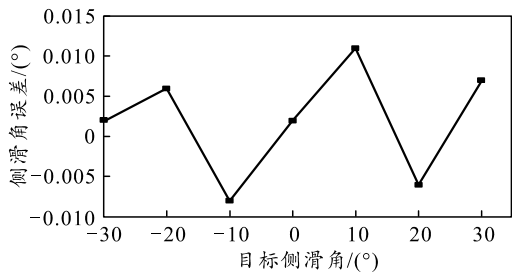
(b) 试验段速压控制精度测试

图 9 流场控制系统测试结果

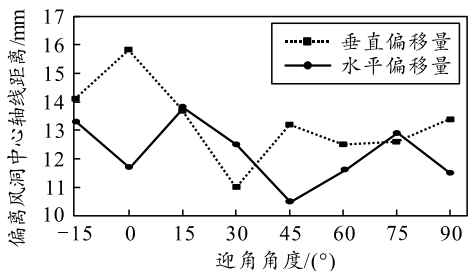
图 10 为尾撑机构控制系统的测试结果。可以看出：尾撑机构迎角和侧滑角定位精度均能保证在  $\pm 0.016^\circ$  以内，优于  $\pm 0.02^\circ$  的技术指标要求。在四轴协调运动时，试验模型中心与风洞中轴线的垂直偏差和水平偏差均能保证在 20 mm 以内，协调控制性能较好。



(a) 尾撑机构迎角定位精度测试



(b) 尾撑机构侧滑角定位精度测试



(c) 不同迎角下的模型中心与风洞中轴线的偏移量

图 10 尾撑机构控制系统测试结果

## 4 结论

风洞控制系统采用基于 PROFINET 通信的光纤环网网络架构，兼顾了数据传输的实时性、控制网络的可靠性以及网络组态的高效性。流场控制系统采用带转速前馈的串级控制方式，结合调节器设计，保证了流场控制效果。尾撑机构采用多核心控制器，将逻辑控制和运动控制分离开来，使运动控制的高速短周期精密控制成为可能，不致受到其他外围低速受控对象的影响，保证运动机构的定位精度和协调控制性能。该控制系统现已投运，各项性能完全满足风洞试验要求，对后续类似风洞控制系统的研制具有借鉴意义。

## 参考文献：

- [1] 李鹏, 汤更生, 余永生, 等. 航空声学风洞的声学设计研究[J]. 试验流体力学, 2011, 25(3): 82-86.
- [2] 于涛, 范洁川, 贾元胜. 现代航空声学风洞技术现状与发展[J]. 试验流体力学, 2007, 21(3): 86-91.
- [3] 张宇辉. 基于工业以太网的控制系统关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [4] 孟保国, 张燕梅, 彭书萍. 光纤环网中建立数据传输模型的方法研究[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(5): 1865-1868.
- [5] 高川, 刘烽, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 63-70.
- [6] 许锋, 袁未末, 罗雄麟. 大系统的常规控制系统结构设计[J]. 计算机与应用化学, 2017, 34(9): 661-668.
- [7] 李广贺. 级联 H 桥变换器矢量控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [8] LIU K Z, YOKOO M, KONDO K, et al. New adaptive vector control methods for induction motors with simpler structure and better performance[J]. Control Theory and Technology, 2015, 13(2): 173-183.
- [9] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 110-111.
- [10] 苏东海, 韩国惠, 于江华, 等. 液压同步控制系统及其应用[J]. 沈阳工业大学学报, 2005, 27(4): 364-367.
- [11] 刘念, 王帆, 李树成. 5.5 m×4 m 声学风洞尾撑系统机电液联合建模与仿真研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(14): 151-155.