

doi: 10.7690/bgzdh.2013.02.018

## 某超声速风洞测控系统

高川, 刘烽, 周波, 周润, 喻波

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 622661)

**摘要:** 针对大型暂冲型超声速风洞的特点, 设计某超声速风洞测控系统。介绍该系统的总体设计、各子系统关键技术, 如总压串级控制、迎角机构冗余控制、OPC等技术的应用和相关技术指标, 分析风洞运行的控制方式, 给出第一期流场调试和标模试验结果。试验结果表明: 该系统能实现控制节点分散, 指挥调度集中、信号测量采集精准的设计要求, 具有较高的自动化程度和拓展能力, 利于国内自主开发。

**关键词:** 超声速风洞; 现场总线; 测量系统; 控制系统

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Measure and Control System of the Supersonic Wind Tunnel

Gao Chuan, Liu Feng, Zhou Bo, Zhou Run, Yu Bo

(High Speed Institute of China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 622661, China)

**Abstract:** Aiming at the characteristics of large-scale intermittent type supersonic wind tunnel, designs measure and control system for the certain type supersonic wind tunnel. Introduces the general design of the system, key technical applying as general cascade pressure control, redundancy control of attack angle equipment, OPC, etc. and relate technical targets of subsystems, analyzes control mode of the wind tunnel running, gives results of the first term flow field calibration test and standard model test. The results show that the system can realize the design requirement of control dispersing node, concentrate command and dispatch, accurate measurement of signal collecting. It also has high automation level and expending ability and is easy to be domestic development.

**Key words:** supersonic wind tunnel; filed bus; measure system; control system

### 0 引言

某风洞是中国空气动力研究与发展中心(China aerodynamics research and development center, CARD)的一座下吹—引射式暂冲型超声速增压风洞, 试验马赫数范围为 1.50~4.25。风洞于 2007 年 4 月开工建设, 2010 年底建成并投入使用, 是目前亚洲口径最大的超声速风洞, 与 2.4 m×2.4 m 跨声速风洞配套使用, 形成了我国完整的 2 m 量级高速风洞试验平台, 实现了飞行器型号研制地面模拟平台的跨越式发展。

测控系统担负着风洞试验安全运行的任务。由于该风洞洞体结构复杂, 控制部位分散, 采用了复杂的全挠性壁喷管技术, 同时大型超声速暂冲型风洞存在较大的冲击载荷影响, 因此对风洞测控系统的研制提出了很高要求。设计者以风洞运行安全可靠为前提, 综合采用了国内外的先进技术和成熟产品, 成功研制了风洞测控系统, 并兼顾了系统的先进性和经济性。

### 1 风洞测控系统总体设计

该风洞结构主要由进气管路、多级阀门、稳定

段、挠性壁喷管段、试验段、超扩段和引射器等部段组成, 如图 1 所示。风洞测控系统的任务, 就是完成各阀门启闭、柔壁型面、模型姿态、超扩段开度、洞体充气密封、油源等的控制和对风洞流场和模型气动参数的测量, 监控风洞关键部位的运行状态, 实现风洞试验的安全运行。

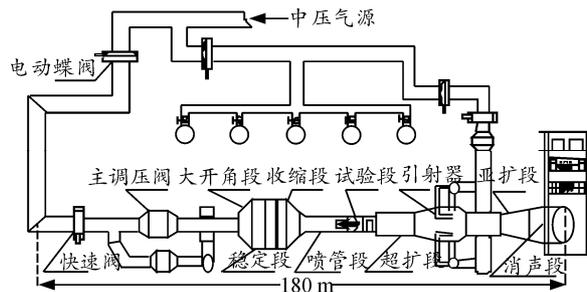


图 1 某超声速风洞结构轮廓

风洞执行机构遍布洞体的各个环节, 测量、控制对象分散, 必须保证它们在风洞运行中的协调可靠, 例如调压阀控制、稳定段总压监控、挠性喷管型面控制、风洞连接部段充气密封监控、模型迎角支撑装置监控等, 需要测量与控制的节点近 200 处。为此, 风洞测控系统设计采用了基于现场总线和网

收稿日期: 2012-08-03; 修回日期: 2012-09-03

作者简介: 高川(1987—), 男, 湖北人, 工学学士, 助理工程师, 从事测控技术与仪器研究。

络化的开放式集散结构,如图 2 所示,该结构分为监控级网络和现场级网络,监控级网络主要由工业 PC、工作站和服务器等组成,位于风洞控制中心,用于风洞状态监控、试验运行管理、信号测量管理、数据处理与分析、试验数据显示及与其他网络的通信等;现场级网络主要由 PXI 控制器、PLC 可编程控制器和 DAQ 系统等组成,位于风洞现场,用于风洞过程和模型姿态控制、风洞状态控制、液压系统油源控制、挠性喷管型面控制、安全连锁控制和试验数据采集等。

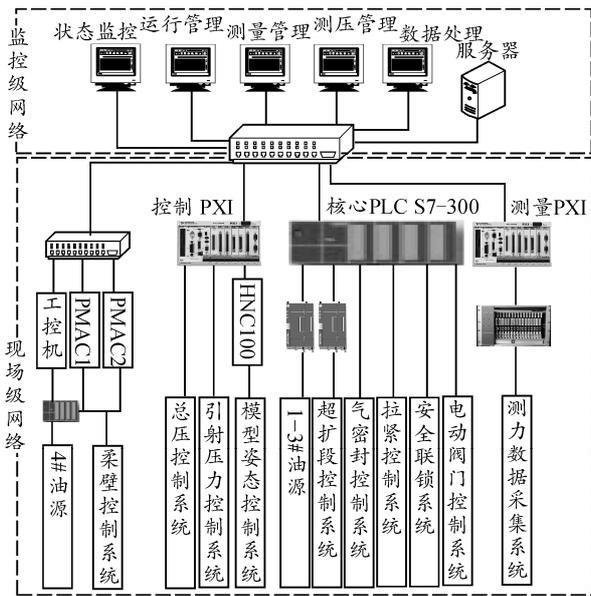


图 2 FL-28 风洞测控系统结构

该结构适应了风洞自身的设计特点,使各子系统既能够独立完成自身功能,又能实现统一指挥控制,满足风洞试验运行需求的同时使系统功能更加扩展,性能不断提高,使用更加便捷<sup>[1]</sup>。

### 1.1 控制系统

根据系统的功能设计和风洞运行操作的逻辑关系,将风洞控制系统分为风洞运行管理系统、风洞状态监控系统和挠性喷管型面控制系统 3 大部分。

#### 1.1.1 风洞运行管理系统

风洞运行管理系统是风洞的控制核心,它通过上位运行管理机启动控制 PXI 系统,由 RT 嵌入式控制器完成风洞总压、引射器压力和模型姿态角的控制。

该系统以运行管理计算机为上位机,控制 PXI 系统为下位机,主要对总压控制系统、引射压力控制系统和模型迎角控制系统 3 大关键子系统进行控制管理。风洞试验前,操作人员根据试验任务单要

求,输入总压、攻角信息、阀门预置开度等相关参数,然后将参数下载至控制 PXI 系统的 RT 嵌入式控制器,进入试验准备状态,下达开始试验命令后,根据预置攻角阶梯数或其他判断条件,完成一次风洞试验。风洞运行过程中控制 PXI 系统的 RT 嵌入式控制器即使与上位机的通信网络瘫痪,也能自行完成紧急停止的试验流程,该设计相对 CARD C 已有各风洞测控系统,大大增强了系统运行的可靠性。

总压控制是风洞安全运行的关键子系统,它既要精确控制调压阀,使风洞稳定段压力达到试验所需总压,又要确保洞体内部压力处于安全压力范围。综合各方面因素考虑,该子系统压力反馈使用了精度均为 0.05%,量程分别为 50PSI、100PSI 和 300PSI 的 3 组传感器,测点安装于风洞稳定段内,试验时根据工作压力范围对传感器进行相应选择,以保证总压控制精度。由于该风洞具有稳定段体积大,充气时间长特点,总压调节与主调压阀动作控制存在较大的时间滞后,如果只用压力闭环调节,很难在较短时间内稳定总压;因此,控制系统采用了外环总压调节、内环位置调节的双闭环策略,很好地解决了总压滞后这一难题,实现了控制系统的高效可靠,其控制原理如图 3<sup>[2]</sup>。

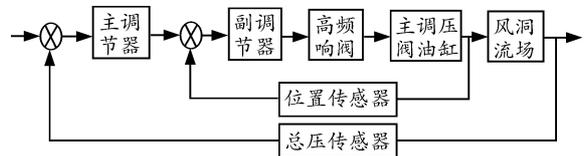


图 3 总压控制策略

引射压力控制系统使用 1 个 300PSI 量程的传感器,控制过程与总压控制系统相同。经过调试,常压试验时总压控制精度为 0.2%,增压试验时为 0.5%;引射压力控制精度为 0.5%

模型迎角支撑装置是直接承受风洞冲击载荷的关键部件,机构运动范围为 $-20^{\circ}\sim+30^{\circ}$ 。为确保试验模型和洞体的安全,模型迎角控制采用了由 2 套 Rexroth 公司的 HNC100 数字控制器构成的冗余系统,如图 4 所示。其中主 HNC100 通过高精度位移调节高频响阀驱动伺服油缸,实现模型迎角的精确控制;副 HNC100 则是在主 HNC100 出现故障时自动切换,控制模型迎角快速回零,防止风洞试验紧急停止时产生的冲击载荷损坏模型及其支撑装置,危及风洞安全,迎角回零通过高精度位移调节高频响阀和快速位移调节高频响阀并行作用实现。迎角系统的 2 套油缸内部均安装有绝对精度 0.01 mm 的

MTS 磁致伸缩位移传感器，一个为数字量输出，一个为模拟量输出<sup>[3]</sup>。

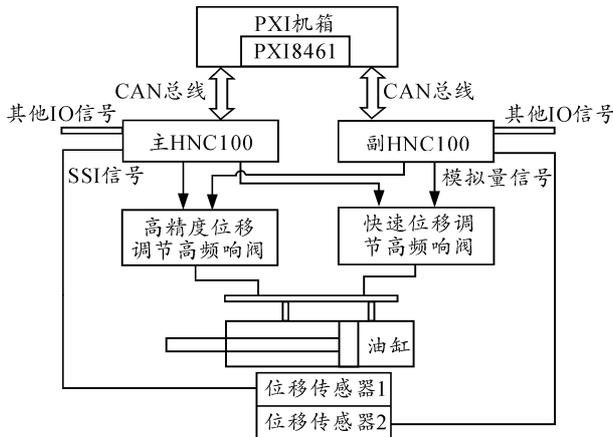


图 4 迎角控制系统结构

经系统调试，迎角机构控制精度可达±0.02°，运动速度为 3(°)/s。

### 1.1.2 风洞状态监控系统

风洞运行过程中，对各环节的状态监控是保证风洞安全的基础，系统以 PLC S7-300 为核心，完成超扩段调节片、洞体充气密封、移动部件拉紧、油源、电动旁路阀等系统的监控，以及对气源压力、风洞各部段压力、各部段阀门开闭、工作门开闭、测控电源、挠性喷管控制等系统的状态进行监视，它与风洞运行管理系统进行实时通讯，完成相关执行机构在风洞试验前的准备和吹风过程中的安全联锁工作，其结构框图如图 5 所示。

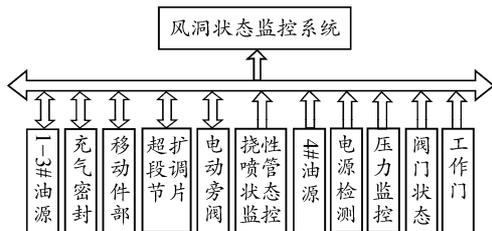


图 5 风洞状态监控系统结构

### 1.1.3 挠性喷管型面控制系统

风洞采用二元多支点全挠性壁喷管，通过电气—机械—液压方式调节喷管型面，实现超声速马赫数的改变。挠性壁调节执行机构共 24 组，对称布置在挠性喷管段上、下壁，每套执行机构由一组蜗轮蜗杆和一组对称布置的液压油缸组成，包括交流伺服驱动系统、蜗轮蜗杆减速器、定位丝杆机构、定位螺母、油缸和多圈式绝对光电编码器等部件，如图 6 所示。挠性喷管型面在试验前预调，定位精度为±0.1 mm，成型时间约为 15 min。

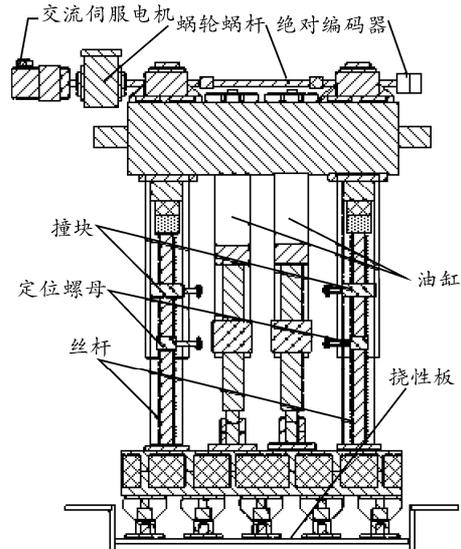


图 6 挠性壁执行机构组成结构

挠性喷管型面控制系统由交流伺服系统和 PLC 控制器组成，工作原理为：机械定位—低压成型—高压锁紧。它使用 1 台工控机作为现场上位管理机，通过网络发送指定马赫数型面的位置参数至 PMAC 交流伺服控制系统，控制每套执行机构的定位螺母到达相应位置，由绝对编码器进行位置反馈。当所有执行机构的定位螺母到位后，PLC 控制 4#油源为油缸低压供油，使挠性壁板低速弯曲成型，直至检测到挠性壁板所有触点的到位信号，再将油缸的油压升高至工作压力，使挠性壁板弯曲型面高压锁紧，然后系统向风洞状态监控系统发送就绪信号，即完成系统的试验准备过程。

## 1.2 测量系统

风洞测量系统主要完成风洞流场参数测量、常规测力/测压试验，由风洞测力数据采集系统和测压数据采集系统组成(不含风洞特种试验信号测量系统)。

风洞测力数据采集系统主要完成天平信号和流场参数的采集和处理，它由前置传感器、天平、放大器和 PXI 采集系统等组成，其中测量通道数为 64，测量精度为 0.03%，最高采样率为 20 kHz<sup>[4]</sup>。风洞试验过程中，该系统进行信号的实时采集、相关试验参数的实时显示、原始数据保存和试验数据的计算处理，它通过网络与风洞运行管理系统通讯，完成风洞测力试验的信号测量与数据处理，其系统结构如图 7 所示。

风洞采用 PSI 8400 电子扫描阀作为风洞测压数据采集系统，主要完成流场压力参数测量和模型测压试验。系统最大测压点数为 2 048(可扩展)，最高

采集速度为  $1 \times 10^5$  次/s, 测量精度为 0.03%<sup>[5]</sup>。电子扫描阀模块可以安装于试验模型内部, 也可以通过气路引至洞体外进行测压, 同时具有实时校准功能, 系统结构如图 8 所示。

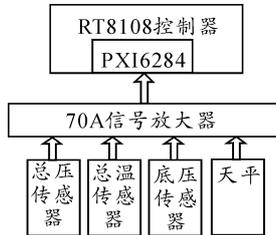


图 7 测力数据采集系统结构组成

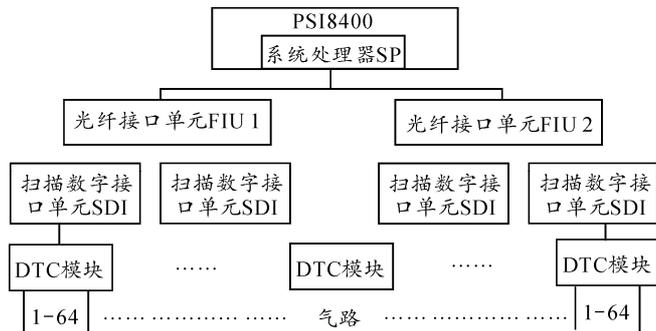


图 8 测压数据采集系统结构

### 2 风洞运行控制方式

根据风洞的特点, 为完成不同试验的要求, 测控系统研制结合洞体结构设计, 设置了下吹式、引射启动式、引射下吹式 3 种风洞运行方式, 其运行流程如图 9 所示。

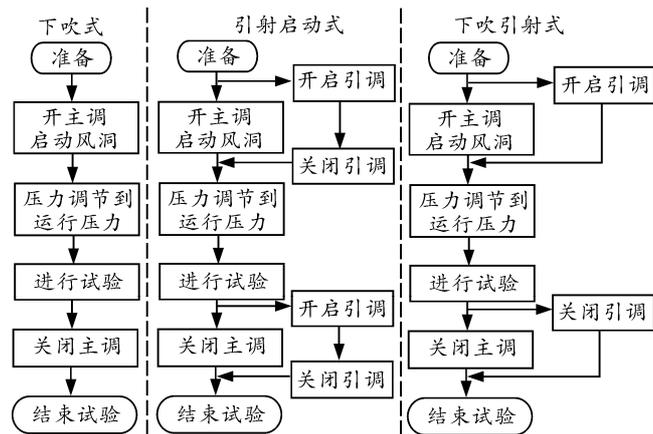


图 9 运行方式流程

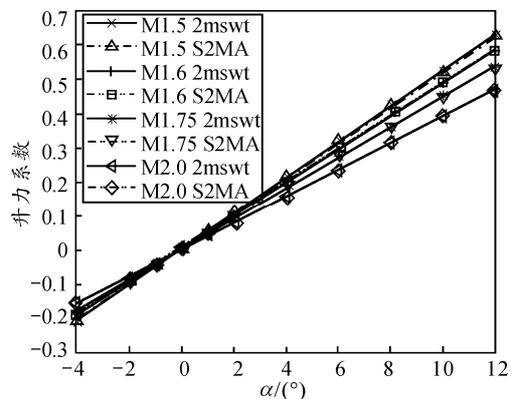
下吹式: 在风洞运行过程中, 首先给出启动压力调节主调压阀到预置开度进行风洞的启动, 流场建立后将调压阀调节至运行压力开度, 稳定段进入压力闭环调节, 直至完成预定试验后关机。下吹式运行方式中引射器不工作, 主要用于常压试验和增压试验。

引射启动式: 按稳定段和引射器集气室运行压力设定主调压阀和引射调压阀的初始开度, 同时启动主调压阀和引射调压阀, 流场建立后关闭引射器, 稳定段进入压力闭环调节, 完成预定试验后, 启动引射调压阀到初始开度, 再同时关闭主调压阀和引射调压阀, 完成风洞关机。引射启动运行方式可以大幅度降低风洞启动和关机时的冲击载荷, 在进行高马赫数常压试验或者某些特种试验时, 为了避免试验模型和天平遭到毁坏, 需要采用该运行方式保证试验安全, 其不足是试验时能耗显著增加。

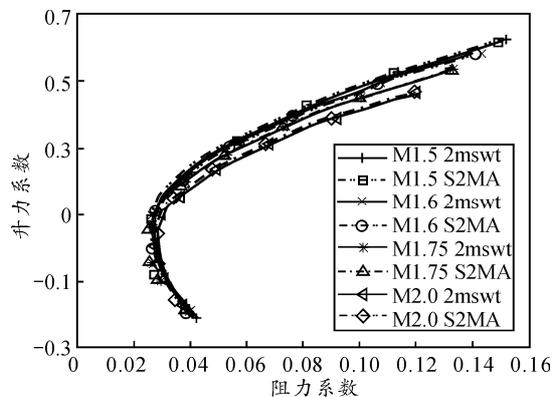
下吹引射式: 按稳定段和引射器集气室运行压力设定主调压阀和引射调压阀的初始开度, 同时启动主调压阀和引射调压阀, 稳定段和引射器集气室进入压力闭环调节, 完成预定试验后, 同时关闭主调压阀和引射调压阀。下吹引射式运行方式用于降速压试验, 实现风洞试验雷诺数的扩展。

### 3 风洞调试与应用

风洞建成后, 进行了流场调试和标模试验, 以获得风洞的性能控制参数、挠性喷管型面参数、模型试验区的流场指标和标模的对比试验结果。



(a) 升力系数曲线



(b) 极曲线

图 10 某超声速风洞与 S2MA 风洞标模试验结果对比曲线