

基于 PROFINET 和 VXI 总线的 1.2 m 风洞 测控系统设计与实现

荣祥森, 邓章林, 贾霜, 杨海滨, 马列波

(中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对 1.2 m 风洞测控系统存在的不足, 对其测控系统进行了重新设计; 该测控系统设计方案被详细阐述, 主要是基于 PLC 及总线技术设计新的系统, 采用 PROFINET 通讯和 VXI 系统搭建整个风洞测控系统; 形成基于现场总线、功能分散、指挥集中的开放式集散系统; 详细介绍了项目的实施情况和关键技术, 说明了调试及应用情况, 最后给出了主要结论; 结果表明: 新的测控系统, 不仅提高了 1.2 m 风洞试验自动化水平, 而且提高了风洞安全性和运行效率, 风洞试验能力得到整体提升。

关键词: 风洞; VXI 总线; 测控系统; 控制策略

Design and Implementation of 1.2 m Wind Tunnel Measurement and Control System Based on PROFINET and VXI bus

Rong Xiangsen, Deng Zhanglin, Jia Shuang, Yang Haibin, Ma Liebo

(China Aerodynamics Research and Development Center, high speed Aerodynamics institute, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the flaw of measurement and control system in the 1.2 m×1.2 m wind Tunnel, a new generation of measurement and control system is researched and developed. The design of the measurement and control system is described in detail, Mainly design a new system based on PLC and fieldbus technology, using PROFINET communication and VXI system construct the wind tunnel measurement and control system, form a function dispersion, centralized command, open distributed system based on the fieldbus, and defines implementary condition and solved technique in detail, explains commissioning and application condition, finally the main conclusions drawn. the test results demonstrate that this system is good. The new measurement and control system not only improves the automation level of the 1.2 meter wind tunnel test, but also improves the safety and efficiency of the wind tunnel, and the wind tunnel test capability is improved as a whole.

Keywords: wind tunnel; VXI bus; measurement and control system; control strategy

0 引言

1.2 m×1.2 m 跨超声速风洞是一座半回流暂冲式跨超声速风洞, 是我国先进飞行器研制重要地面试验模拟平台。在国家重点型号、重大工程研制中发挥了不可替代的重要作用, 是我国战斗机和战略战术导弹研制试验的主力风洞^[1]。原有的 1.2 m 风洞测控系统采用的是 Client/Server 体系结构和 VXI 总线技术、计算机与传统的继电器相结合的集中式控制系统。该系统以 VXI 总线为基本框架, 将控制与测量合为一体。但近年来, 由于试验任务的增加, 风洞设备运行频繁, 风洞的测控系统逐渐暴露出不足: 部分设备老化严重, 无法很好地满足试验发展的需求; 控制系统结构不尽合理, 可靠性低会导致一个环节或子系统出现故障从而使整个系统无法运行, 自动化程度低给风洞安全运行带来了隐患。

本次设计任务是重新构建测控系统。采用计算机与 PLC 控制技术, 结合现场总线, 形成基于现场总线、功能分散、指挥集中的开放式集散系统, 形成信号采集传输可

靠性高、便于实时监测和故障分析的可靠性系统。使 1.2 m 风洞整体能力得到大幅的提升。

1 测控系统总体设计

1.1 设计指标

1) 提高 1.2 m 风洞可靠性和自动化水平, 实现 1.2 m 风洞试验吹风流程自动化;

2) 实现柔壁型面各节点机构(定位螺母)位置控制精度为±0.01 mm。

1.2 总体设计

1.2 m 风洞控制系统主要包括阀门控制系统、引射器控制系统、柔壁喷管控制系统、模型迎角控制系统、栅指控制系统、超扩段控制系统、安全联锁控制系统等。

本次设计主要包括阀门控制系统、柔壁喷管控制系统、模型迎角控制系统、测量系统适应性改造等。

采用 PROFINET 通讯和 VXI 总线搭建整个风洞测控系统框架。阀门、迎角、柔壁喷管控制系统作为子站点。考虑到网络的可靠性, 本系统采用环网结构, 可确保在一条传输链路出现故障时, 使用备用通信链路。系统布线采用光缆。在测控间可完全操作现场设备, 监测其运行状态, 异常报警, 并保证其数据传输的实时性。每个站均可手动/自动操作, 操作站可通过触摸屏现场控制, 或者通过按钮

收稿日期: 2018-10-18; 修回日期: 2018-12-04。

作者简介: 荣祥森(1978-), 男, 山东郓城人, 硕士, 主要从事风洞设备机电一体化方向的研究。

进行现场控制，以保证系统的安全性要求。新测控系统结构原理参见图 1。

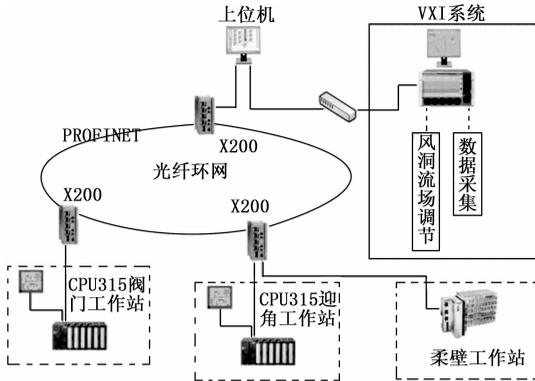


图 1 测控系统结构图

2 系统详细设计

2.1 阀门控制系统

阀门控制系统包括闸阀系统、蝶阀系统和调压阀系统。

闸阀系统包括闸阀和闸旁阀，由电机驱动。蝶阀系统由蝶阀和蝶旁阀组成。蝶阀由液压油缸驱动，蝶旁阀是由电机驱动。

该系统保留原有驱动设备和执行机构不变，阀门控制系统作为子站点。通过 PLC 实现对阀门系统的远程控制，通过 HMI 实现现场控制，并同时完成开关状态采集和气源压力、围带压力、蝶阀后压力等模拟量采集。对调压阀同样是通过 PLC 和 HMI 实现本地/远程开关控制。而调压阀的位置伺服控制仍采用 VXI 系统和伺服驱动器相结合的控制方式。阀门控制原理图参见图 2。

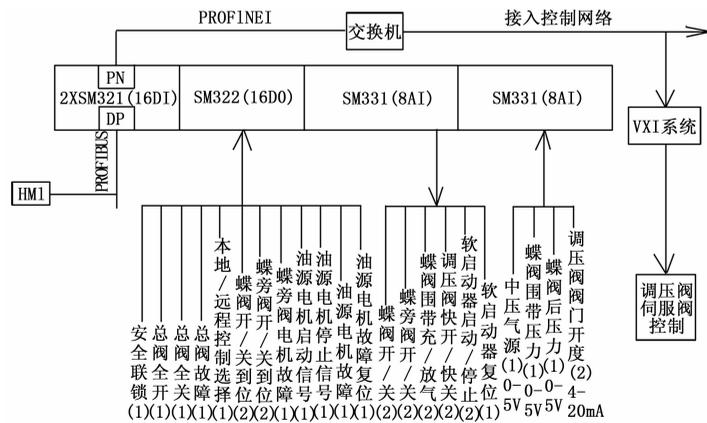


图 2 阀门控制 PLC 原理图

为了保证设备人员的安全，保护蝶阀的密封围带。进行阀门系统操作时，在 PLC 程序上做了充分设计。在控制间进行打开蝶旁阀操作时，只有在安全联锁正常时方可进行。在每次试验开车前先打开蝶旁阀，使蝶阀前后压力两平衡，再给蝶阀围带放气，直到围带内压力与蝶阀前后压力实现“三平衡”才打开蝶阀。关车时，是先关蝶阀，给围带充气，再关蝶旁阀。实现了阀门系统顺序控制。

2.2 柔壁喷管控制系统

柔壁喷管是该风洞的核心部件，为二元多支点全柔壁

喷管。主要由上下梁，左、右侧壁，上下柔板，执行机构及框架组成。喷管上下柔板分别由 15 套执行机构通过液压—电气系统控制，使其在两平行侧壁之间改变型面并定位，以得到各 M 数下的柔板型面。执行机构是采用机械定位，液压成型并锁紧，对于确保型面的准确定位和定位的重复性精度起关键作用^[2]。机构传动原理图如图 3。

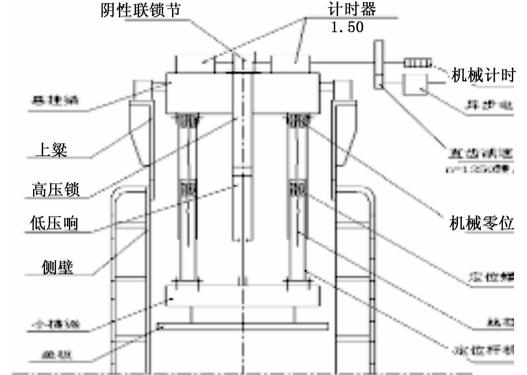


图 3 执行机构传动原理图

1.2 m 风洞柔壁喷管型面驱动电机均为三相异步交流电动机，上下各 15 个节点。电机功率 0.55 kW，额定转速 1380 r/min，带电磁制动。

整个驱动执行系统包括柔壁型面定位控制系统共有电机（含电磁制动）30 台，交流变频器 30 台，选用了台达 MV300 系列，带通讯 DP 卡。30 台电磁换向阀、1 台柔壁低压油源电机、1 台柔壁高压油源电机及其他外围设备构成。反馈系统由 30 个多圈旋转绝对式编码器、30 个拉线绝对式编码器、120 个微动开关、60 个压力变送器及其他外围设备构成。控制系统总体结构如图 4。

主要由柔壁型面控制管理计算机（上位机）、柔壁型面控制 PLC（下位机）、驱动执行系统与反馈系统组成。柔壁型面控制 PLC 由 1 台触摸屏、1 台 CX5130 嵌入式控制器、2 个 EtherCAT 总线耦合器、18 个 8 通道数字量输入模块、13 个 8 通道数字量输出模块、8 个 8 通道模拟量输入模块、4 个 DP 模块和 3 个末端端子模块组成。

柔壁型面控制管理计算机、触摸屏与 CX5130 嵌入式控制器通过 TCP/IP 通讯，CX5130 嵌入式控制器与分布在柔壁上下的 PLC 功能模块通过 EtherCAT 总线通讯，柔壁型面控制 PLC 与多圈旋转绝对式编码器、拉线绝对式编码器、交流变频器通过 Profibus—DP 总线通讯。

多圈旋转绝对式编码器的选择，定位螺母行走距离最长的节点为 750 mm，编码器旋转一圈对应定位螺母距离为 0.1 mm，因此编码器需要的总圈数为 7 500 圈。该方案中选取的编码器总圈数为 8 192，旋转编码器单圈精度为 4 096，编码器每个数对应 0.000 024 4 mm，在零点时编码器读数最大。倍福 PLC 读取的旋转编码器值与旋转编码器实际值存在高低八位的转化问题，所以需先对旋转编码器值进行转换，比如：旋转编码器值为 00FF865A，而 PLC 读取值为 FF005A86，所以需要使用 PLC 内部 ROL 指令（循环移位）将 PLC 读取值转换为旋转编码器实际值。电机实现定位螺母

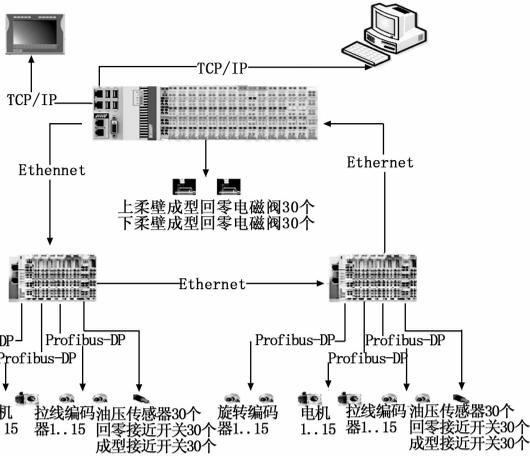


图 4 控制系统结构图

精确定位的控制方法为: PLC 控制电机行走目标位置, 通过旋转编码器反馈的实时位置, 形成闭环控制。

压力变送器量程: 0~16 MPa, 信号输出形式: 4~20 mA。倍福 PLC 模拟量采集模块 (4~20 mA) 对应数字量: 0~32 767, 油压传感器压力值 (MPa) = 模块数字量/32 767×16。

该子系统安全连锁内容如下: 所有执行机构均通过多圈绝对式旋转编码器位置反馈设置软限位, 保证机构运行在可控行程范围内; 定位螺母调节过程中, 柔壁型面控制 PLC 对多圈绝对式旋转编码器实时进行位置检测, 当对应变频器工作状态为运行而位置反馈值无变化时, 立刻停止电机运动, 并向柔壁型面控制管理计算机和安全连锁系统发出“喷管故障”信号。

柔壁型面控制系统主要实现的功能如图 5: 控制驱动电机运转, 实现定位螺母精确定位, 协调油源系统实现油缸回零、低压成型, 高压锁紧等操作; 柔壁

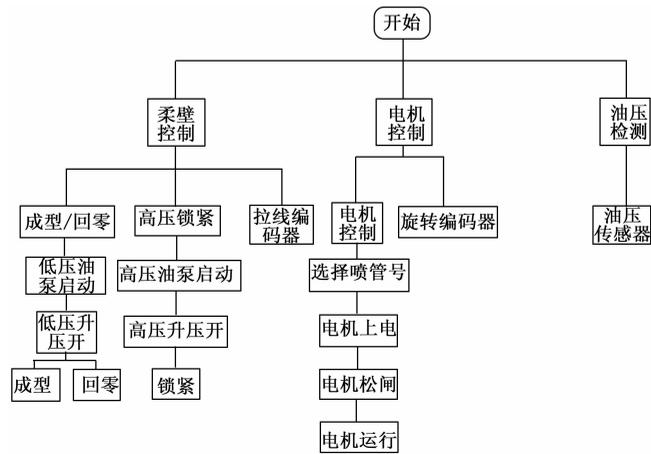


图 5 软件功能图

定位螺母位置的显示; 柔壁每组执行机构移动套筒到位情况、柔壁油缸油压、柔壁喉道监测点油缸运行行程的监视。实现了对柔壁喷管系统螺母的精确定位, 柔板的成型、锁死, 关键环节的监测。

2.3 迎角控制系统

模型迎角控制系统分为全模迎角控制和半模迎角控制两部分, 均包含自动和手动控制功能, 通过控制台选择开关切换。

自动控制部分保留原有 VXI 系统和伺服驱动器相结合的控制方式, 对试验过程中的模型迎角进行控制; 保留控制台手动控制功能, 由转换开关实现全模/半模、手动/自动切换; 通过 PLC 实现模型迎角手动控制和油源系统启停控制; 新增迎角油源系统软启动; 现场控制有控制箱和手操器两种控制功能, 手操器方便在更换迎角机构时使用; 远程由上位机控制, 通过 TCP/IP 协议向模型迎角 PLC 发送指令实现。迎角控制原理图参见图 6。

2.4 风洞流场调节和数据采集系统

该系统是在原有的 VXI 系统基础上改造而成的。主要

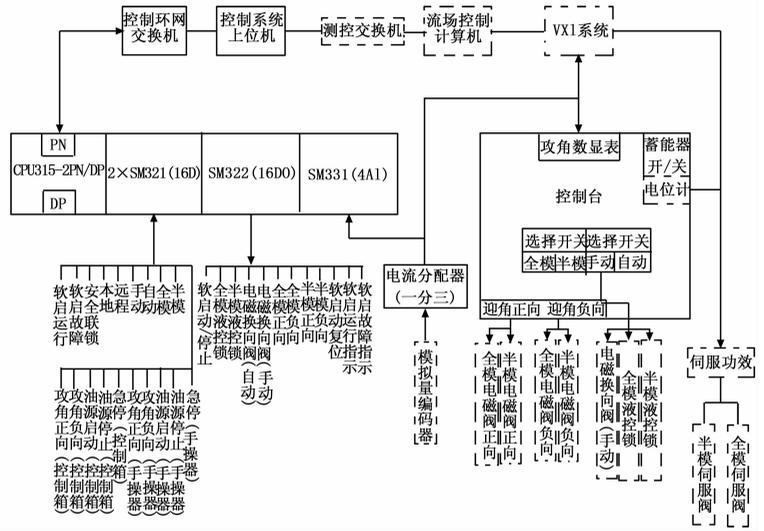


图 6 迎角控制 PLC 原理图

完成风洞的流场调节和数据的采集。VXI 系统控制原理图如图 7。

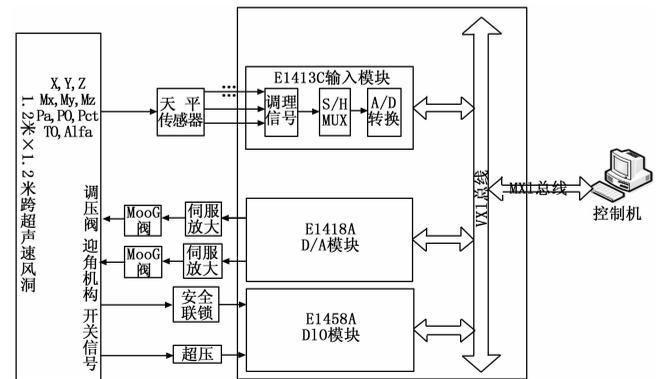


图 7 VXI 系统原理图

计算机通过 E1413C A/D 模块采集由总压和静压传感器测量得前室总压和驻室静压, 计算出实际的 M 数值与给定值进行比较。若马赫数偏差在要求范围内, 通过采集卡采集该 M 数下各气动参数, 否则按 PID 算法输出新的控制量, 经 E1418A—D/A 转换由伺服驱动器变换为电流信号驱动电液

伺服阀控制调节阀开度,从而达到控制马赫数和总压目的^[3]。

压力调节算法采用增量式 PID 控制算法,由比例、积分、微分控制的增量式 PID 控制算法为^[4]:

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]$$

为保证系统稳定性,跨声速 M 数控制采用分段调节即先调总压后调 M 数的控制方式。启动段采用的是比例-微分调节器,而在变迎角阶梯是采用纯比例调节器。 M 数的名义控制精度为 0.005。超声速试验时启动段采用比例-微分调节器,而变迎角阶梯时采用比例-积分调节器。总压的控制精度为 0.003。

2.5 上位机系统

上位机实现的功能是完成各子系统的监控和 VXI 系统进行通讯完成风洞吹风流程。主程序设计采用多线程设计思想进行构建,其中主要包括通讯及数据处理线程、操作线程、事件及报警记录线程等。上位机和 PLC 采用 TCP 通讯方式,其中 PLC 做 TCP 服务器,上位机做客户端,上位机运行软件后,自动与 PLC 建立 TCP 通讯链接,完成数据的收发功能。上位机采用通讯 VI: 建立通讯链接 VI CONNECT; 接收 VI RETCP; 发送 VI SENDTCP。上位机和 VXI 系统通过 TCP/IP 通讯,通过命令字完成两系统的交互。

3 关键技术

3.1 柔壁定位螺母变频控制定位精度问题

实现定位螺母精确定位的控制方法为: PLC 控制电机行走目标位置,通过旋转编码器反馈的实时位置,计算比率决定电机运行速度,待电机低速走到接近目标位置时停止电机,然后判断旋转编码器实际值与目标值差值是否在 0.01mm 内,若在则变频器停止并抱闸。各节点根据行程的不同采用了不同的控制策略^[5]。

三段速的判定方式为: 比率 = (目标位置 - 实际位置) / 总距离。电机控制速度 = 输入值 / 100。

应用于行走距离较长的站点,三段速的临界点为: 高速: 比率 > 0.05; 中速: 0.005 < 比率 ≤ 0.05; 低速: 0.0005 < 比率 ≤ 0.005。比率 ≤ 0.0005 后,先停止,然后判断旋转编码器实际值与目标值差值是否在 0.01 mm 内,若在则变频器停止并抱闸,若不在则继续运行直到差值在 0.01 mm 内。

应用于行走距离较短的站点,三段速的临界点为: 高速: 比率 > 0.15; 中速: 0.1 < 比率 ≤ 0.15; 低速: 0.005 < 比率 ≤ 0.1。比率 ≤ 0.005 后,先停止,然后判断旋转编码器实际值与目标值差值是否在 0.01 mm 内,若在则变频器停止并抱闸,若不在则继续运行直到差值在 0.01 mm 内。通过优化控制策略,实现了电机精确定位。

3.2 网络通讯可靠性问题

本系统采用 PROFINET 将 PLC 连接到环网控制交换机,而 PROFINE 交换机选用具有管理和诊断功能的模块^[6]。同时,还做以下考虑: 所有网络接插件及电缆均选用西门子原装产品,最大限度保证通讯硬件平台的兼容性和可靠性;另外,硬件上采用环网结构,保障了通讯的可靠性;软件组态及编程中均考虑对网络状况的监视与诊断,

并利用网络交换机的故障信号触点。

4 调试结果及实际应用情况

笔者对整个系统进行了调试。经过对系统各模块逐步测试,硬件正常,软件逻辑满足设计要求,实现了开车流程自动化。柔壁喷管控制系统中柔壁型面各节点机构(定位螺母)位置经过调试,最终目标值和实际值的差值始终在 0.01 mm 以内。表 1 为其中一次从 1# 喷管定位到 0# 喷管的情况。

测控系统动态调试完成后,进行了标模试验,选取 2016 年维修月后试验流校数据和本期试验数据进行比较,数据重复性良好,数据结果达到了国军标要求。

表 1 机构定位参数表

0# 喷管	上柔壁(机械计数器)			下柔壁(机械计数器)		
	目标值	实际值	差值	目标值	实际值	差值
1 号电机	205	205	0	269	268	1
2 号电机	391	390	1	625	624	0
3 号电机	503	504	1	888	888	0
4 号电机	557	557	0	916	917	1
5 号电机	367	366	1	801	801	0
6 号电机	241	241	0	720	721	1
7 号电机	252	252	0	638	639	1
8 号电机	196	196	0	580	580	0
9 号电机	257	256	1	333	333	0
10 号电机	160	161	1	570	570	0
11 号电机	383	383	0	663	662	1
12 号电机	588	588	0	948	948	0
13 号电机	531	530	1	1038	1038	0
14 号电机	429	429	0	794	794	0
15 号电机	613	613	0	885	884	1

注:机械计数器 100 个数=1 mm。

5 主要结论

1) 新系统达到了预期实现的技术指标。控制精度高。柔壁型面各节点机构(定位螺母)位置控制精度为 ±0.01 mm。柔壁型面各节点机构(定位螺母)位置由当前位置到目标位置最长调节时间由大于 25 分钟缩短到 11 分钟,操作人员由 2 人减为 1 人。

2) 实现了 1.2 m 风洞试验吹风流程自动化,提高了试验效率。

3) 地面调试和风洞试验验证表明,新设计的集散式测控系统运行稳定可靠,操作方便,维护简便,试验结果合理可靠,表明测控系统改造项目取得了圆满成功。

测控系统改造项目的成功,不仅提高了风洞试验自动化水平,而且提高了 1.2 m 风洞安全性、运行效率,风洞试验能力得到整体提升,具有一定的应用和推广价值^[7-8]。

参考文献:

- [1] 荣祥森. 1.2 米×1.2 米跨超声速风洞通风除湿系统及控制系统大修方案 [Z]. CARDC-2, 2016.