

基于现场总线和实时网络的某射流风洞安全连锁与状态监控系统研制及应用

黄昊宇, 凌忠伟, 刘为杰, 吴琦, 肖晋

(中国空气动力研究与发展中心 高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对某射流风洞系统架构复杂、控制对象及液压机构多、模型支撑机构调节灵活、马赫数连续变化可调的特点, 研制了一套专用的安全连锁与状态监控系统; 该系统充分利用 Profinet 等先进现场总线和实时网络技术, 搭建了基于西门子 S7-1500 系列 PLC 为核心控制器的硬件平台, 并自主研发了实时监控软件系统, 解决了多层/多源控制子系统之间的快速数据交换、试验前仿真运行模拟策略等技术问题, 建立了可靠的安全连锁逻辑与三级关车机制; 系统静态动态测试表明, 该系统适用马赫数 0.3~3.5 区间内的风洞试验, 快速阀关闭时间优于 10 s, 调压阀关闭时间优于 2 s, 压力监测精度优于 0.1%, 阀门开度监测精度优于 0.1 mm, 监测与控制调节周期优于 100 ms, 系统运行稳定流畅, 数据实时准确, 为风洞人员及设备安全提供了必要的软件保障。

关键词: 实时网络; 射流; 风洞; 安全连锁; 状态监测

Development and Application of Safety Interlock and Status Monitoring System for Jet Wind Tunnel Based on Field Bus and Real-time Network

HUANG Haoyu, LING Zhongwei, LIU Weijie, WU Qi, XIAO Jin

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

Abstract: Jet wind tunnel system has the characteristics of complex architecture, multiple control objects and hydraulic mechanisms, flexible adjustment of model support mechanisms, and continuous adjustable Mach numbers, a special safety interlock and status monitoring system is developed. The system fully utilizes advanced field bus and real-time network technologies such as Profinet, builds a hardware platform based on Siemens S7-1500 series PLC as the core controller, and independently develops a real-time monitoring software system. It solves technical problems such as fast data exchange between multi-layer or multi-source control subsystems, simulation operation strategy before testing, and establishes reliable safety interlocking logic and three-level shutdown mechanism. The static and dynamic testing results of the system show that it is suitable for wind tunnel tests with a range of 0.3~3.5 Ma, the opening and closing time of the fast valve is better than 10 s, that of the pressure regulating valve is better than 2 s, the pressure monitoring accuracy is better than 0.1%, the valve opening monitoring accuracy is better than 0.1 mm, the monitoring and control adjustment cycle is better than 100 ms, the system operates stably and smoothly, and the data are real-time and accurate, providing necessary software and hardware guarantees for the safety of wind tunnel personnel and equipment.

Keywords: real-time network; jet; wind; safety interlock; status monitoring

0 引言

安全连锁与状态监控系统是风洞重要系统之一, 关系到整个风洞试验的运行安全。它通过对风洞控制系统各子系统的状态在线监测和控制, 在系统出现故障、设备状态超出安全范围时, 对整个控制系统实施连锁保护措施, 确保人员和设备的安全^[1-3]。

本文中的某速自由射流风洞(以下简称射流风洞)作为我国首座速域涵盖亚跨超三声速的大型开口式射流风洞, 该设备由主气路、主气路阀门(包括总阀及均压阀、快速阀及均压阀、调压阀)、前室(包括大角扩开段、稳定段、

收缩段)、喷管、试验舱、收集器、引射气路、引射气路阀门、引射器、扩压器、排气消声装置和相关的测控系统等构成, 其气动轮廓如图 1 所示。射流风洞采用“直流下吹一引射式”布局, 利用半柔壁喷管调节试验马赫数, 并配置引射器实现降速压运行。在设备控制方面, 射流风洞测控系统采用开放式集散系统^[4], 按照“功能分散, 指挥集中”设计思路, 整个风洞测控系统划分为多个功能分散的子系统, 包括网络系统、核心控制系统、安全连锁与状态监控系统、半柔壁喷管型面控制系统、四自由度机构控制系统、油源控制系统、辅助控制系统、测量系统等。该风洞与其他风洞相比, 具有系统架构复杂、控制对象及液

收稿日期: 2024-05-19; 修回日期: 2024-06-03。

作者简介: 黄昊宇(1980-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 黄昊宇, 凌忠伟, 刘为杰, 等. 基于现场总线和实时网络的某射流风洞安全连锁与状态监控系统研制及应用[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 215-221.

压机构多、模型支撑机构调节灵活、马赫数连续变化可调的突出优点，可开展进气道/发动机相容性试验、分离安全性试验、虚拟飞行试验等多类特种试验^[5-7]。而在这一系列特种试验中，风洞的运行安全显得尤为重要，为防止试验过程中因设备准备条件不足或风洞洞体、试验模型及测控系统设备状态异常等引发的不安全因素对风洞试验和参试人员产生不必要的损失和伤害，需要有针对性地设计和建立一套运行稳定可靠、系统架构先进、控制策略合理的安全连锁与状态监控系统。

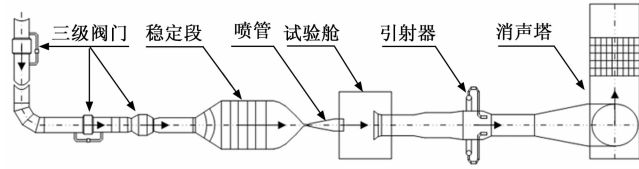


图 1 某射流风洞气轮机轮廓图

1 系统研制指标和方案

1.1 主要技术指标

根据射流风洞试验实际需求，新研制的安全连锁与状态监控系统应满足不同马赫数条件下对压力/阀位/开关信号等状态的监测、作动机构/控制设备的远程控制等方面的性能需求，主要技术指标如下：

- 1) 适用试验马赫数范围： $Ma=0.3\sim 3.5$ ；
- 2) 快速阀开闭时间优于 10 s；

- 3) 调压阀开闭时间优于 2 s；
- 4) 压力监测精准度优于 0.1%；
- 5) 阀门开度监测精准度优于 0.1 mm；
- 6) 监测与控制调节周期优于 100 ms；
- 7) 其他要求：数字量信号输入应进行光电隔离，重要传感器的模拟信号均须经过信号调理部件进行隔离滤波处理。

1.2 总体方案

射流风洞安全连锁与状态监控系统采用基于现场总线和实时网络的开放式集散系统，功能分散，指挥集中。利用该架构的便利，风洞各测控子系统通过 PLC 系统 I/O 模块对现场设备进行直接操控和监测，而安全连锁与状态监控系统通过 Profinet 和 TCP/IP 光纤环网对各个分系统的状态进行监控^[8-9]，并在测控大厅安全连锁与状态监控计算机上集中显示、记录和处理。同时，为保证网络异常时，仍然能够控制关键子系统实施停车流程保证运行安全，安全连锁与状态监控系统通过硬件连接方式对各个子系统的信号进行冗余检测和连锁控制。安全连锁与状态监控系统提供一整套连锁控制机制，对整个试验设备运行流程中的故障和危险情况进行及时适当的处置，从而保证整个风洞运行安全。整个射流风洞的连锁控制机制划分为 3 个层级：第一层级为风洞各控制子系统自身的安全连锁控制，即子系统内部设备的故障信号由其自身监测和处理，与其他系统不产生关联，但需要向安全连锁与状态监控系统上

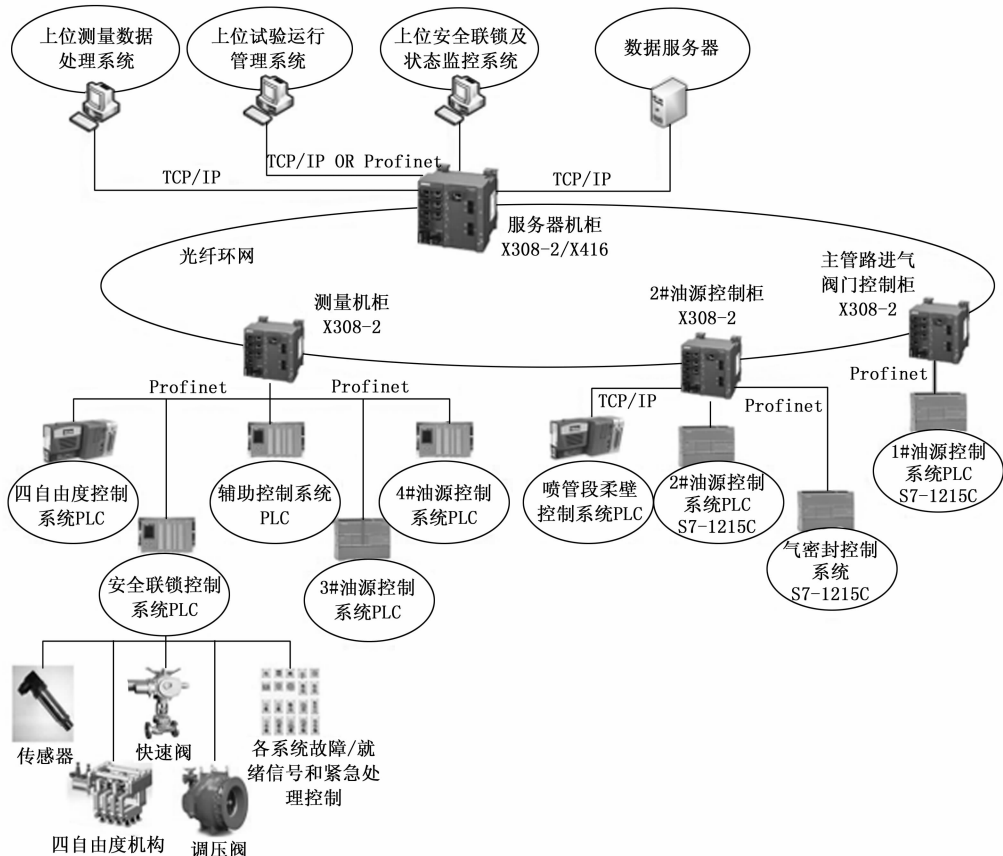


图 2 系统整体拓扑架构图

报故障信号并自身做好相应的记录; 第二层级为整个设备流程控制过程中风洞各控制子系统之间连锁控制以及一些关键参数的连锁控制, 主要由安全连锁与状态监控系统完成; 第三层级为独立连锁控制功能层, 采用硬件的逻辑控制链, 保证在网络连接失效以及安全连锁与状态监控系统和核心控制系统都失效的情况依然能够实现设备紧急停车。整个系统整体拓扑架构如图 2 所示。

安全连锁与状态监控系统实现如下功能: 1) 系统状态检测、显示与远程控制功能; 2) 设备运行连锁; 3) 异常报警和处置; 4) 安全关车功能; 5) 上位机监控功能; 6) 控制台功能。

2 硬件系统设计

安全连锁与状态监控系统组成包括上位机、PLC 控制系统 (包括 CPU 模块、电源模块、DI 模块、DO 模块、AI 模块、HMI 触摸屏、开关电源、线性电源、硬件逻辑电路、专用控制柜等)、远程控制台、传感器系统、信号调理部件、连锁开关、光纤环网等, 如图 3 所示。

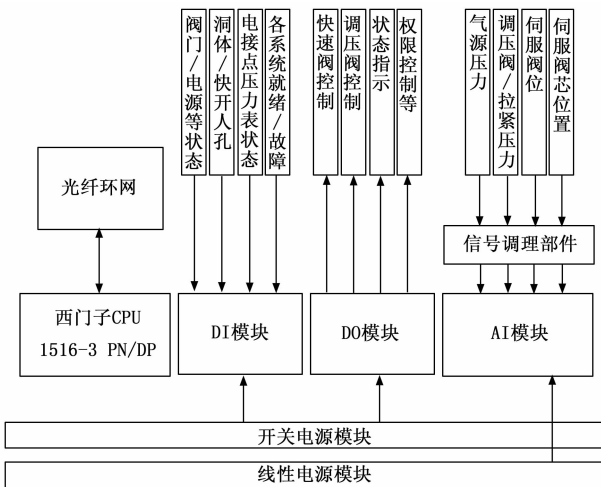


图 3 硬件拓扑架构图

2.1 PLC 控制系统

按照测控系统总体设计的要求, 为方便备品备件以及兼顾当前和今后一段时间技术先进性的要求, 硬件系统采用了采用一套 S7-1500 系列 PLC 为核心控制器, 系统可接入 2 个 ProfiNet 和 1 个 Profibus-DP 总线设备, 可实现 64 通道数字量输入和数字量输出、24 通道模拟量输入, 可满足射流风洞监视、控制、异常、紧急停车等多种类型上百个信号的输入输出, 可实现现场触摸屏操控和远程监控两块功能需求^[10]。

2.2 传感器系统

传感器系统是数据监测的最前端, 负责状态数据的感知。除风洞其他测控子系统配置的传感器外, 直接接入安全连锁与状态监控系统的传感器类型有 3 类:

1) 压力传感器: 监测快速阀阀前、调压阀前后、稳定段总压以及引射器集气室压力。压力监测精度要求不高,

采用综合精度 $\pm 0.1\% F.S \max$ 的 GE UNIK5000 系列表压传感器监测气流压力。

2) 倾角传感器: 实时监测四自由度机构迎角值, 用于二级关车控制机构回零时判断迎角机构控制方向, 并实现迎角机构零位判定。倾角传感器采用 Sherborne Sensor 重力感应式倾角传感器。该传感器选型为 LOSC-90L, 采用直流供电, $\pm 90^\circ$ 倾角测量范围, 4~20 mA 模拟输出, 抗 1 500 g 冲击, 分辨率为 0.013° 。

3) 编码器: 实时监测四自由度机构侧滑角位置, 间接监测侧滑角, 用于 PLC 回零时判断侧滑角机构控制方向, 并实现侧滑角机构零位判定。编码器初步采用帝尔多圈绝对值编码器。由于模拟量信号的抗干扰性不高, 侧滑角机构编码器采用 ProfiNet 通讯或者 Profibus-DP 接口。

2.3 连锁开关

为实现风洞关键点位的连锁控制, 系统加入了两处连锁开关:

1) 配置电接点压力表, 监控风洞稳定段总压以及引射器集气室压力超限情况。选用了量程为 0.1~1.5 MPa 的文特斯电接点压力表。

2) 在测控大厅远程控制台设置急停按钮, 在试验舱内设置洞内有人按钮。两按钮为串联关系, 正常状态下, 按钮保持常闭状态, 紧急情况下, 按钮拍下, 相应串联回路断开, PLC 控制系统检测信号置零, 上位机三级报警提示。

3 关键设备/环节控制方法

3.1 阀门控制

该风洞主进气管路和引射管路均设置阀门系统, 实现管路气流流量控制。主进气管路和引射管路阀门各包含有总阀及均压阀、快速阀以及均压阀、调压阀等 5 个阀门。在远程模式下, 总阀及均压阀、快速阀均压阀由风洞辅助控制系统 PLC 直接控制, 而快速阀和调压阀均纳入安全连锁机制, 除接受风洞核心控制系统的直接控制外, 还需接受安全连锁和状态监控系统的冗余控制, 以便在紧急情况下, 实施连锁控制, 保证设备安全。两类阀门具体控制过程为:

1) 调压阀: 正常运行时, 风洞核心控制系统打开调压阀主液控锁, 并发出控制信号 (模拟量), 通过伺服比例阀控制油缸运动, 实现调压阀开度调节^[11]; 紧急情况下, 风洞安全连锁与状态监控系统接管调压阀控制, 关闭主液控锁, 切断伺服比例阀和油缸间管路, 打开辅液控锁, 通过液压换向控制阀组驱动油缸运动, 使调压阀以设定速度关闭。调压阀控制原理如图 4 所示。

2) 快速阀: 正常运行时, 由风洞核心控制系统控制换向阀, 实现快速阀启闭控制; 紧急情况下, 风洞安全连锁与状态监控系统自动切换权限, 切断关闭风洞核心控制系统的快速阀控制电路, 再通过自身的控制电路, 使其先导电磁换向阀失电, 实现快速阀紧急关闭。快速阀控制原理如图 5 所示。

3) 紧急关车时, 安全连锁系统同时触发主进气管路调

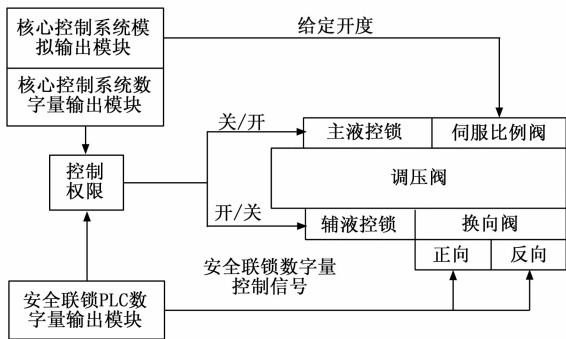


图 4 调压阀控制原理图

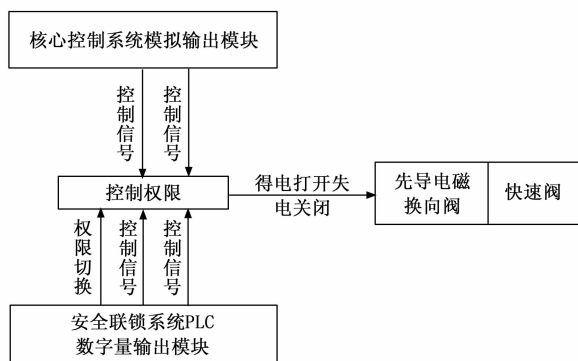


图 5 快速阀控制原理图

压阀和引射管路调压阀以及两个管路上的快速阀的关闭动作，减少冲击和振动，实现风洞安全关车。

3.2 超压安全连锁保护

在试验过程中，系统稳定段总压过高、引射器集气室压力、调压阀后压力过高（主调压阀、主旁路调压阀以及引射调压阀）等情况，系统将引发超压保护机制^[12]。其中，超压保护共分 3 级：分别是核心控制系统软件保护、安全联锁系统 PLC 软件保护和电接点压力表超限硬关车保护。对于 3 级超压保护的要求是核心控制系统软件保护压力不大于安全联锁控制系统 PLC 软件保护压力，同时安全联锁控制系统 PLC 软件保护压力不大于电接点压力表超限硬关车保护。

具体保护措施如下：

1) 当稳定段总压大于核心控制系统设置的稳定段总压上限值时，核心控制系统按照预先要求的关车时序实现一级关车；

2) 当稳定段总压大于安全联锁控制系统 PLC 设置的稳定段总压上限值时，安全联锁控制系统 PLC 将风洞运行控制权切换过来，安全联锁控制系统 PLC 按照预先要求的关车时序安全关车；

3) 当稳定段总压大于电接点压力表设定二级超压值时，通过硬件连锁，直接关闭主进气管路和引射管路的快速阀，确保风洞的安全运行，电接点压力表二级超压连锁与测控间控制台急停按钮形成最高级别安全连锁功能；

4) 引射器集气室压力过高与稳定段总压保护方式一致；

5) 调压阀后压力由安全连锁与状态监控系统 PLC 实时监测，压力超压（超过 PLC 设定值）后，PLC 通过继电器与紧急停车硬件安全连锁电路串联，实施连锁保护。

4 软件系统设计

安全连锁与状态监控软件系统包含上位机软件、下位机软件和 HMI 软件三部分。系统前端 PLC 通过直连传感器/连锁开关/网络数据包等途径完成风洞各试验装备的状态监测和控制，上位机和 PLC 通过 OPC 实现数据与信息的传递和交互，HMI 和 PLC 通过地址映射的方式直接调用实数据与信息的传递和交互^[13-14]。由上位机或 HMI 设置 I/O 信号的处理参数，下发阀门控制指令、四自由度机构控制指令、油源系统控制指令、气密封系统控制指令和试验流程控制指令等，完成安全连锁关键状态、开车条件、一级/二级/三级报警、阀门状态、压力状态、各系统关键状态信息等的监视，并实现设备状态集中显示、分系统的远程控制、连锁控制、故障分类和报警、二级紧急关车等功能。

4.1 上位机软件

上位机软件运行于风洞测控间安全连锁与状态监控系统上位机内，包含启动与自检、系统参数管理、设备运行状态监控、安全连锁/报警及异常处理和设备运行数据记录/管理等 5 个基本功能。上位机软件基于 LabVIEW2016、博图 V15 等语言平台开发而成^[15]，软件功能及主检测界面如图 6、图 7 所示。

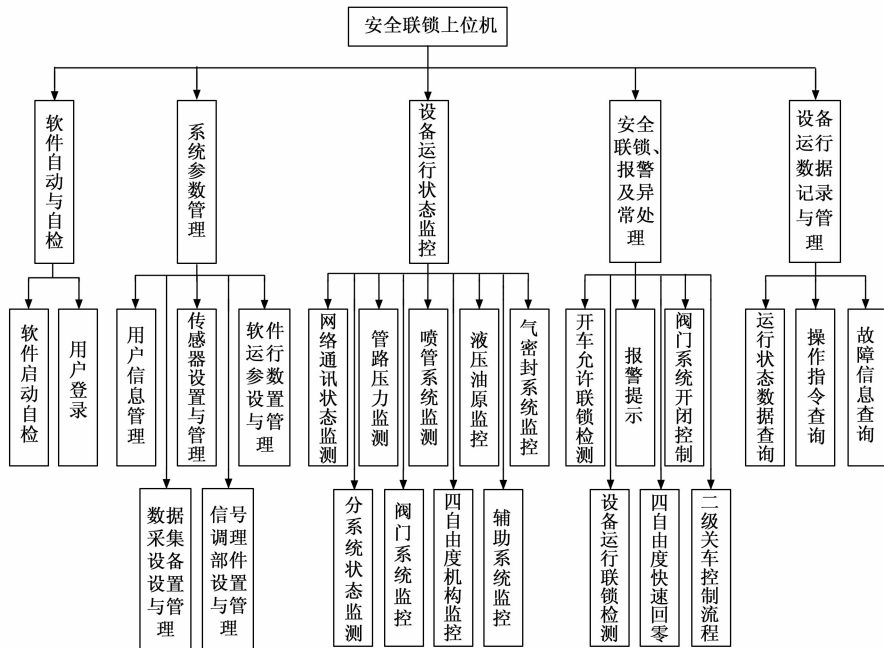


图 6 上位机软件功能

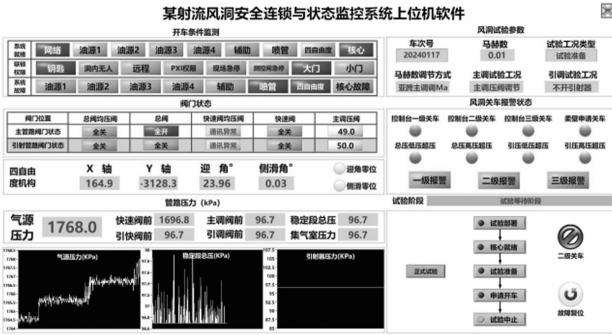


图 7 上位机软件主检测界面

4.2 下位机软件

下位机软件运行于风洞试验大厅安全连锁与运行状态监控系统控制柜内的西门子 PLC 控制器中。下位机软件详细功能如图 8 所示, 软件主要通过与核心控制系统、四自由度机构、喷管柔壁、油源、辅助、气密封等控制系统的通讯及 PLC 系统对现场信息的采集, 实现风洞试验启动前对试验运行相关设备的状态检查和远程控制; 风洞试验前和试验过程中对整个风洞的关键状态参数进行完整监视、汇总分析、对外发布(至上位机); PXI 核心控制系统安全连锁失效时, 自动接管风洞控制权限, 能够实现对进气管路阀门系统的开/关控制、四自由度机构紧急回零控制; 具备系统异常报警、PLC 安全关车功能, 响应控制台相关手动操作功能。

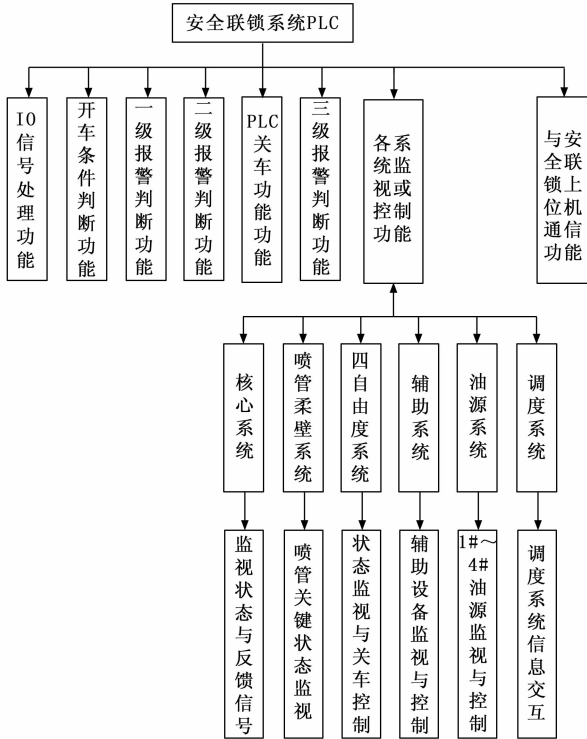


图 8 下位机软件功能

4.3 HMI 软件

HMI 软件运行于风洞试验大厅安全连锁与状态监控系统控制柜面板的触摸屏中。HMI 软件主界面如图 9 所示。

功能主要由软件启动与自检、设备运行状态监控、安全连锁/报警及异常处理等 3 部分组成。



图 9 HMI 软件主界面图

5 关键技术难点及解决办法

5.1 系统之间快速信息交换方法设计

射流风洞安全连锁与状态监控系统参与试验的设备、子系统多, 需要采集、控制的状态点多, 属于多源多平台控制系统, 因此监控系统需要对试验中众多物理变化量作出及时响应, 以确保试验质量和安全。对于此问题, 实际施工过程中, 系统采用现场总线+实时网络多层分类方式进行及时通讯, 其中: 下位机软件通过 Profinet-IO 协议与辅助系统、气密封系统和调度系统等进行信息交互, 响应回复时间小于 2 ms; 上位机软件通过 OPC DA Client 与四自由度机构控制系统和半挠性喷管型面控制系统通讯, 通过 TCP/IP Ethernet 与安全连锁系统下位机和油源控制系统进行信息交互, 响应回复时间小于 100 ms, 通过现场硬件电路及采集设备采集风洞关键信息并实现二级关车, 通过 PSP 共享变量的方式获取风洞核心控制系统关键点位的压力。

同时, 为实时检测各系统之间数据通讯是否正常, 系统设计了一套简单有效的通讯握手监测策略, 方法为: 安全连锁与状态监控系统 PLC 发出统一时长的脉冲方波序列(占空比: 50%), 各子系统收到后逻辑取反, 再返回给安全连锁与状态监控系统, 系统 PLC 通过检测发送序列和返回序列的相位关系确定网络通讯故障。

5.2 风洞安全运行策略设计优化

在风洞试验过程中, 为了保障风洞试验安全进行, 需要有效的风洞安全运行控制方法。原有的安全控制方法仅适用于常规生产型风洞, 对于试验空间大模型状态复杂、危险系数更大的高速自由射流风洞试验, 需要重新设计优化安全运行控制方法, 以保证风洞安全连锁与状态监控策略能够对设备关键信号进行实时监测并确保风洞安全关车控制策略具有常见几类试验的普适性。为解决此问题, 主要采取了以下措施:

1) 建立基于分层的设备运行信息监测。风洞各控制子系统自身具备独立完整的运行监测与连锁功能^[16-17], 同时

在顶层上，建立风洞总体的安全连锁与运行状态监测系统。

2) 设计完备的开车允许连锁及运行关车连锁逻辑，如图 10 所示。当风洞尚未开始运行时，只有当测控网络通讯正常、关键阀门打开且均压、子系统就绪且故障信号解除等条件全部满足时，风洞方可开车启动^[18-19]；如在风洞运行过程中，出现油源停机、一二级关车申请、压力超压等任一异常，则按预定关车权限及关车流程，停止风洞运行。

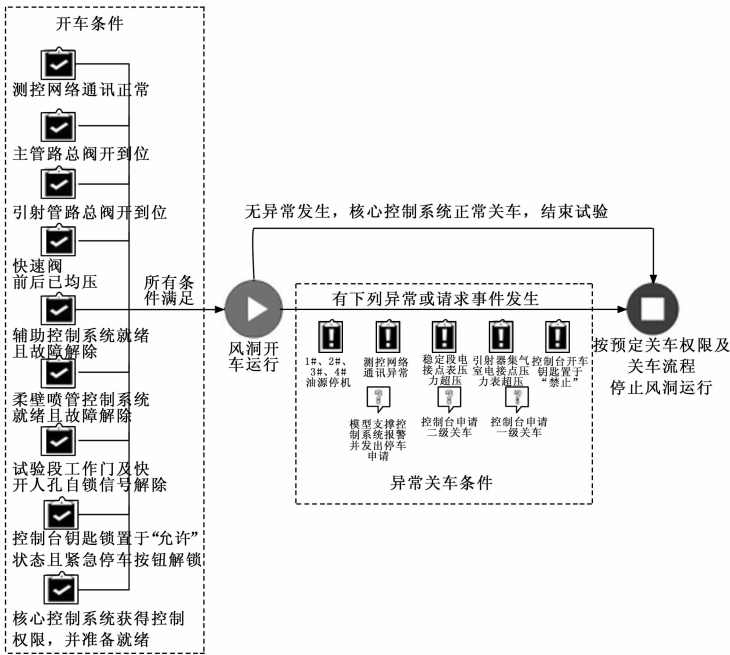


图 10 开车允许及运行关车连锁逻辑

3) 建立三级关车机制。设计核心控制系统安全关车（一级）、安全连锁系统 PLC 紧急关车（二级）、控制回路硬件紧急关车（三级）等三级关车机制^[8]，并设计独立的迎角、侧滑角机构回零和阀门快速关闭控制回路，确保出现异常时可靠关车。图 11 为安全连锁系统执行的二级关车流程。

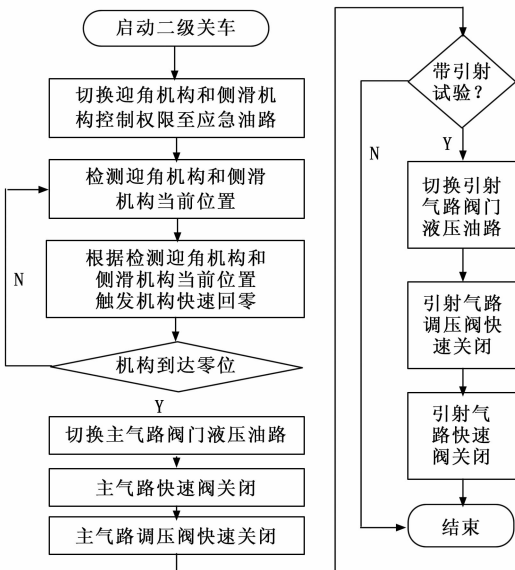


图 11 安全连锁系统二级关车流程

4) 采用风洞模拟运行技术进行风洞启动前的仿真检测。风洞正式启动前，通过仿真模拟运行核查各子系统及设备工况，检验运行流程的准确性。

6 系统动态验证试验

系统建成后，做了两方面联调测试，内容包括系统静态功能测试、动态功能测试试验。

6.1 静态功能测试

静态系统性能测试在无风状态下进行，依次完成了以下内容：

- 1) 系统供电与网络通讯测试。
- 2) PLC 控制系统通道测试，包括继电器控制、压力信号采集、调压阀阀位信号采集、倾角传感器/编码器信号采集等。
- 3) 单动/联动功能测试，包括阀门控制、四自由度机构控制、半挠性喷管型面控制等子系统状态监测/远程操作。
- 4) 主要技术指标测试，包括压力和阀门位移等传感器监测精度、阀门开闭时间、四自由度攻角和侧滑角回零速度、数据通讯与控制调节周期等指标。
- 5) 安全连锁与报警功能测试，包括子系统报警、一二三级关车流程等。

经过上述各项静态测试，结果表明系统硬件组态和网络通讯正常，设备及软件单/联动功能稳定正常，数据动态刷新实时且准确无误，报警反映及时明晰，符合预期指标要求。

6.2 动态功能测试试验

开展了典型马赫数标模和型号试验验证，试验马赫数 $M=0.4\sim 3.5$ ，测试一切正常，表明系统具备了风洞运行状态的实时监测与显示，具备试验前洞体条件（如阀门系统开闭、收集器位置调整、喷管成型控制、油源控制、充气密封控制等）更换的远程/本地控制功能；具备试验准备阶段检测设备的就绪情况，并在异常情况下显示报警信息的功能；具备试验中因异常报警实现安全关车或紧急关车的功能。图 12 为某试验油源系统远程监控界面，图 13 为某次试验流场控制异常，采用二级关车后的温度段压力及喷管出口静压的变化曲线图，从图中看出，系统实现了异常状态下的风洞平稳关车^[20]。



图 12 某试验油源系统远程监控界面

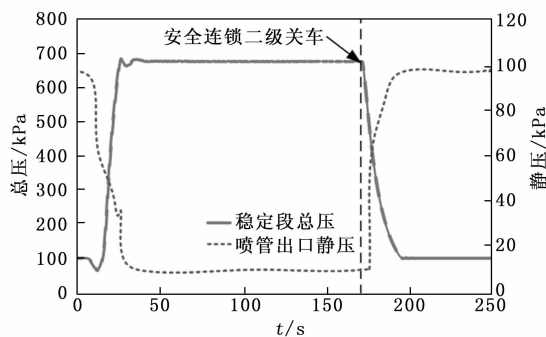


图13 某试验二级关车总静压曲线

7 结束语

某射流风洞充分利用现场总线和实时网络技术, 建立了开放式、分布式安全连锁与状态监控系统, 该系统通过Profinet实现了对风洞各子系统状态的监控, 具备了I/O信号处理、油源系统控制、关键阀门控制、气密封系统控制、异常报警、安全关车、控制台相关手动操作响应、试验数据存储与查询等功能, 优化完善了风洞试验前仿真运行模拟策略, 建立了安全连锁逻辑与三级关车机制, 经多项试验验证, 该系统运行稳定流畅, 数据实时准确, 有效地保障了风洞安全运行。

参考文献:

[1] 施洪昌. 高低速风洞测量与控制系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

[2] 王发祥. 高速风洞试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[3] 唐志共. 高超声速气动力试验 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.

[4] 荣祥森, 邓章林, 贾霜, 等. 基于PROFINET和VXI总线的1.2m风洞测控系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (5): 87-95.

[5] TIAN J, LING Z, LIU W, et al. Flow field control for 2-meter high-speed free-jet wind tunnel [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36 (10): 77-89.

(上接第214页)

[21] DING R, CHENG M, JIANG L, et al. Active fault-tolerant control for electro-hydraulic systems with an independent metering valve against valve faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68 (8): 7221-7232.

[22] 赵斯力根, 王静远, 张晓明. 混合动力电动汽车构型优化设计方法研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2024, 50 (1): 60-67.

[23] XU Z, DENG W, SHEN H, et al. Extended-state-observer-based adaptive prescribed performance control for hydraulic systems with full-state constraints [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27 (6): 5615-5625.

[24] AMENT M R, HURLEY S E, VOORHEES M, et al. Balancing hydraulic control and phosphorus removal in bioretention media amended with drinking water treatment residuals [J].

[6] LUO T Y, HUANG Z Q, LIN X D, et al. Prediction of the performance of the pressure-regulating valve in a large high-speed jet wind tunnel [J]. J. AIP Advances, 2023, 13: 105301.

[7] LUO T Y, HUANG Z Q, LIN X D, et al. Improving the quality of the supersonic flow field of free-jet wind tunnels [J]. J. AIP Advances, 2024, 14: 015250.

[8] 谢明伟, 宋巍巍, 王飞, 等. 基于实时以太网的某连续式风洞安全连锁系统 [J]. 兵工自动化, 2016, 35 (9): 50-53.

[9] 阎成, 邓晓旻, 高峰, 等. 基于分布式测控技术的风洞运行状态监测系统 [J]. 兵工自动化, 2013, 32 (2): 67-70.

[10] 褚卫华, 林辰龙, 谢明伟. 0.6 m 暂冲式跨超声速风洞控制系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (8): 69-73.

[11] 褚卫华, 汤更生, 王帆. 2 m×2 m 超声速风洞流场控制策略研究与实现 [J]. 实验流体力学, 2012, 10: 98-102.

[12] 张伟. XX 风洞测控软件设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.

[13] 郁文山, 马永一, 苏北辰, 等. 基于LabVIEW和OPC的2.4 m 风洞安全连锁系统 [J]. 自动化与仪器仪表, 2014, 172 (2): 72-74.

[14] 秦永晋, 郭亮, 付力扬, 等. 基于LabVIEW的大功率海上风电机组增速箱轴承试验机测控系统设计 [J]. 制造技术与机床, 2022, 7: 85-90.

[15] 李乐斌, 马建, 吕卫星, 等. 基于PLC的低温精馏装置控制系统设计与实现 [J]. 低温工程, 2021, 6: 37-39.

[16] 陈海峰, 黄叙辉, 凌忠伟, 等. 0.6米暂冲式跨超声速风洞测控系统研制 [J]. 自动化与仪器仪表, 2021, 4: 35-39.

[17] 荣祥森. 0.6米风洞新一代测控系统研制 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[18] 朱福成. 基于PXI总线的风机控制系统 [J]. 测控技术, 2013, 12: 87-89.

[19] 马列波, 高鹏, 陈海峰, 等. 某亚跨超声速风洞安全连锁控制系统研制 [J]. 测控技术, 2021, 9: 96-101.

[20] 马列波, 高鹏, 陈海峰, 等. 基于组态方式的风洞运行安全关车控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 114-118.

[25] PEREIRA D F, DA COSTA LOPES F, WATANABE E H. Non-linear model predictive control for the energy management of fuel cell hybrid electric vehicles in real time [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 68 (4): 3213-3223.

[26] ZHU R, YANG Q, LIU Y, et al. Sliding mode robust control of hydraulic drive unit of hydraulic quadruped robot [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2022, 20 (4): 1336-1350.

[27] ORTEGA SANDOVAL A D, S RENSEN J, RODRIGUEZ J P, et al. Hydrologic-hydraulic assessment of SUDS control capacity using different modeling approaches: a case study in Bogotá, Colombia [J]. Water Science & Technology, 2023, 87 (12): 3124-3145.