

基于 EtherCAT 和 LabVIEW 的风洞安全联锁及状态监测系统设计

邓章林, 贾霜, 阎成

(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: 安全联锁与状态监控系统是保障风洞运行安全的重要系统, 基于 EtherCAT 环网实现了风洞联锁和监控信号的实时、可靠采集, 构建了多网络融合的联锁与状态监控系统; 介绍了系统的硬件组成和软件总体功能, 利用 TwinCAT2 设计下位机安全联锁软件, 实现了吹风前和吹风过程中的联锁策略, 保障了风洞运行安全; 基于 LabVIEW 开发了状态监测软件, 通过 TCP/IP、OPC 等多种通信协议实现了多网络数据利用, 利用 LabVIEW DSC 多个子模块实现了数据存储与查询功能, 利于数据溯源; 应用结果表面, 系统具有良好的实时性和可靠性, 功能完备、界面友好, 在使用过程中有效保证了风洞及设备安全, 并为设备性能分析提供有效分析手段。

关键词: 风洞; 安全联锁; 状态监测; LabVIEW; EtherCAT

Design of Safety Interlocking and State Monitoring System Based on EtherCAT and LabVIEW

Deng Zhanglin, Jia Shuang, Yan Cheng

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

Abstract: The safety interlocking and state monitoring system is important for wind tunnel to keep safety. The signals about safety interlocking and state monitoring are collected in real-time and reliably through EtherCAT looped network. The system joins in several networks. The equipment components of the system and function of software are introduced. The software of PLC part that makes safety locking strategies before and during blowing come true is designed by TwinCAT2, which protects the safety of wind tunnel. The state monitoring software designed by LabVIEW2015. The system utilizes data from several networks through TCP/IP, OPC and so on, and has the function to store and search data by using several submodule of LabVIEW DSC, which makes the tracing to the source easily. The application results show that the system has good real-time performance and reliability, complete functions and friendly interface. It effectively guarantees the safety of wind tunnel and equipment in the use process, and provides effective analysis means for equipment performance analysis.

Keywords: wind tunnel; safety interlocking; state monitoring; LabVIEW; EtherCAT

0 引言

1.2 米×1.2 米半回流暂冲式跨超声速风洞(简称 1.2 米风洞)安全联锁系统是控制系统的重要子系统之一, 主要作用是通过对一些影响风洞设备和人员安全的设备和环节进行联锁控制, 确保人员和设备的安全^[1]。状态监控系统作为设备使用和维护中很好的辅助手段^[2-4], 在机械、电力及风洞等领域都有广泛的应用。

本文基于 1.2 米风洞安全联锁系统信号覆盖不全、缺少设备监控系统的现状, 利用 EtherCAT 总线技术实现安全联锁信号冗余采集, 增大联锁信号覆盖范围, 并对重点设备状态实现监测, 选用 LabVIEW 作为上位机软件开发平台^[5], 利用多种通讯方式获取更广泛监测数据, 实现了功能完善、实时性好、监测分析能力强的安全联锁与状态监

控系统。

1 总体设计

1.2 米风洞安全联锁及状态监控系统作为保障风洞安全的重要系统, 系统对实时性、可靠性具有很高要求。传统的线缆直连接方式有很好的实时性, 但针对大量监测点, 线缆走线复杂。本系统选择德国倍福 CX5010 作为安全联锁系统下位 PLC, 其具备 EtherCAT 通讯协议, 满足了实时性和可靠性要求^[6-9]。安全联锁网络利用分布式子站点采集安全联锁信号和部分分散设备状态信息, 并通过 EtherCAT 网络组态, 主站点以硬连接方式与 VXI 系统相连, 实现吹风试验的安全联锁和应急报警; 安全联锁上位机具有多网卡, 分别连接安全联锁网络、测控网、自主式网络。在安全联锁网络中作为系统上位机, 对安全联锁 PLC 下位机数据实现显示与存储、故障预警等; 测控网络中通过 OPC 获取控制系统上位机关于柔壁喷管控制系统运行状态信号, 并与测量上位机通信获取吹风车次及试验马赫数等信息; 自主式网络中将通过 Modbus 协议发布控制系统状态监测信

收稿日期: 2019-06-30; 修回日期: 2019-07-27。

作者简介: 邓章林(1983-), 男, 四川简阳人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞自动控制技术方向的研究。

号给自主式系统服务器,实现故障诊断。系统总体组成原理如图1所示。

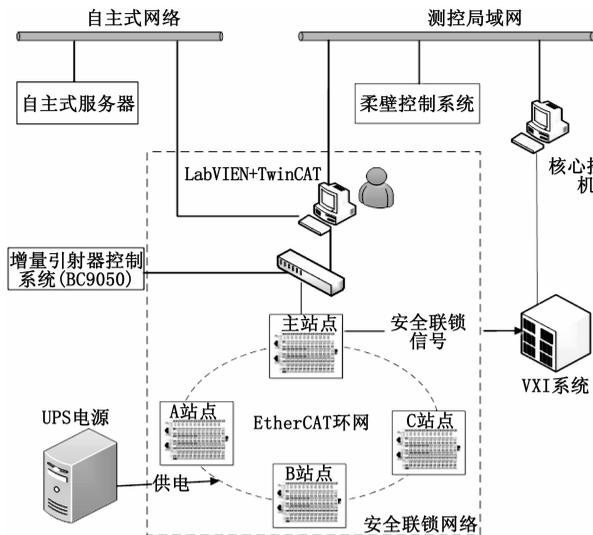


图1 安全联锁与状态监测系统组成原理图

2 系统硬件平台设计

2.1 联锁及监测信号配置

安全联锁信号主要针对影响风洞运行安全、影响试验正常进行的设备状态进行选取,而监测信号主要为重点设备运行状态,其状态直接影响风洞运行性能或者设备安全等。本文联锁与监测信号主要包括以下几大类:

1) 开闭联锁,包括风洞超扩段合拢状态、试验段挂钩状态、亚扩段人孔、超扩段内壁应急按钮、增量引射器人孔状态检测,此类信号均为数字量信号,确保试验前各风洞洞体设备处于关闭状态。

2) 压力联锁,包括风洞调压阀后和前室电接点压力表(一级安全联锁),为数字量信号;调压阀后和前室压力变送器(二级安全联锁),为模拟量信号。在联锁策略中,先触发二级安全联锁,再触发一级安全联锁,分别确保试验安全和风洞设备安全。

3) 电源状态,对控制系统电源进行监控,以此掌握整个风洞电源系统状态,特别在风洞停电时及时发现,并通过控制系统自动应急处理实现风洞安全关闭。

4) 设备状态,1.2米风洞主要控制系统均采用电液伺服系统,对液压系统主要工作参数如压力、温度和液位的状态监测^[10],有利于掌握液压系统的性能,确保相应设备安全。风洞试验前需调整增量引射器、柔壁喷管状态以满足试验对洞体条件的要求,其状态监测也尤为重要。

2.2 PLC 硬件平台

本文构建基于EtherCAT总线技术的PLC硬件平台,选择德国BECKHOFF系列产品。主站点选择嵌入式控制器CX5010,从站则选用EK1100耦合器实现站点间通讯,并连接EtherCAT端子模块完成信号采集,包括数字量输入模块EL1008、数字量输出模块EL2008、模拟量输入模

块EL3058、Modbus通讯模式EL6022、EtherCAT通讯扩展模块等,PLC硬件平台配置如图2所示。

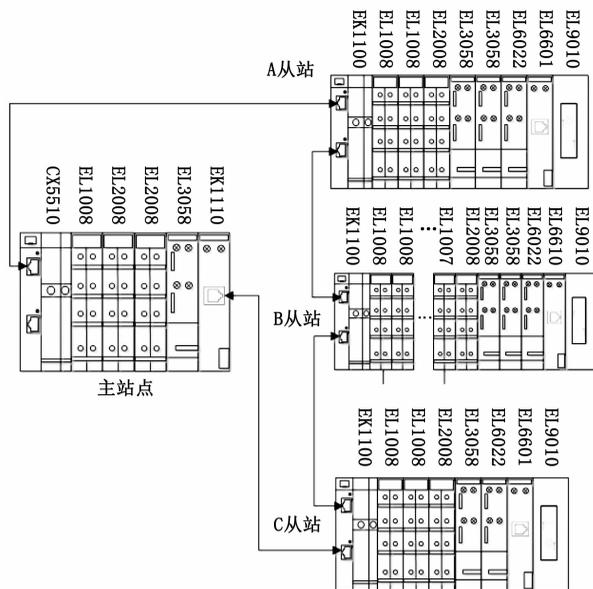


图2 PLC硬件平台配置

2.3 传感器配置

传感器主要实现各模拟量信号采集,采集硬件为EL3058模拟量输入模块和EL6022串口端子模块,传感器主要包括:

1) 压力传感器,包括油源压力传感器和气体压力传感器,压力测量范围为0~20 MPa,均采用24VDC供电、两线制麦克MPM483传感器,输出信号为标准4~20 mA模拟量电流信号。

2) 油源系统油温液位传感器,采用余姚环工PB8701一体式传感器,油温量程为0~60℃,液位量程为0~1000 mm,供电为24VDC,输出两路标准4~20 mA模拟量电流信号,并具有一路数显输出,供现场监测油温显示使用。

3) 电量参数仪,选用施耐德DM2305系列,输入电压25~450 V,测量精度可达0.3% FS,通过RS485协议实现电压信号采集。

3 软件设计

1.2米风洞安全联锁及状态监测系统软件根据功能特点,主要包含两部分:PLC下位机软件 and 上位机软件。下位机PLC软件位于CX5010控制器内,采用TwinCAT2实现下位机软件编写。上位机通过以太网与测控系统、自主式系统相连,且各系统软件平台各异,包括LabVIEW、CVI、InTouch等。上位机软件设计需要涉及多网络、多系统,笔者采用了图形化的编程环境LabVIEW^[11]软件进行设计,通过OPC、TCP/IP、Modbus等多种网络协议,实现联锁及状态监控信号的获取与发布,系统整体数据流如图3所示。

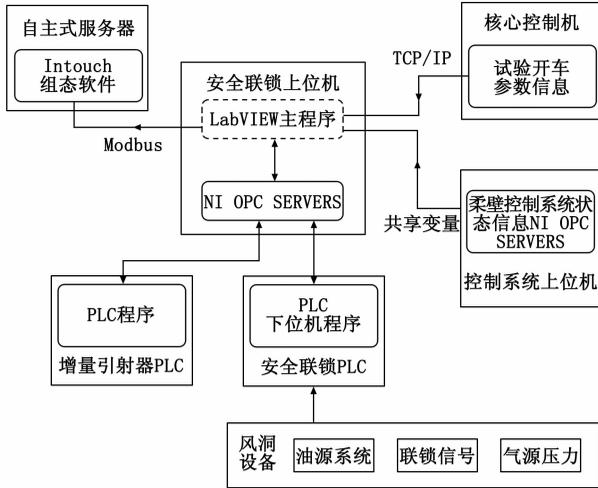


图 3 软件设计数据流图

3.1 PLC 下位机软件设计

PLC 软件运行于 CX5010 实时内核中，具有响应时间快的特点，主要完成安全联锁信号数据采集处理、安全联锁策略，并以 DO 输出方式向 VXI 系统、阀门和迎角控制系统、操作控制台传送安全联锁信号，实现风洞安全联锁功能。

3.1.1 系统组态

联锁信号包含开关量状态、模拟量状态等，通过倍福采集模块实现采集，采集信号的数据处理，首先需要利用 TwinCAT2 软件的 System Manager 模块实现对硬件 I/O 模块的组态，利用 PLC Control 模块定义变量，并在 System Manager 中建立变量与硬件之间的映射关系，进而在 PLC 中可以获取硬件采集信号，并对采集信号进行物理意义处理，整合利用数据并进行相应输出控制。

3.1.2 联锁策略

联锁策略主要根据风洞运行安全的需要，由采集到的单个联锁信号或者多个联锁信号的组合，对风洞各系统运行进行联锁控制的策略。按运行时间主要分为风洞启动开车安全联锁和风洞停车安全联锁。

1) 风洞启动安全联锁：安全联锁系统在风洞启动时对开闭联锁进行检查，包括超扩段合拢、试验段挂钩、应急按钮、亚扩段人孔、增量引射器人孔，并对动力电、洞体状态（包括阀门、增量引射器开度、柔壁喷管型面等）、油源状态信息进行检测（如图 4 所示），确保在风洞开车启动前，风洞相应设备处于关闭及正常运行状态。

在启动安全联锁中，所有的开闭联锁为与的关系，任一条件不满足联锁信号均不正常，控制上位机将不能开始试验。同时，控制上位机也接收安全联锁系统发送的动力电信号、洞体条件和油源状态信号，如若出现异常，也不能开始试验、开启风洞。

2) 风洞运行过程中的停车联锁：风洞运行过程中出现某些紧急情况将启动停车程序，主要为开闭联锁信号异常、动力电停电、运行压力超压。系统通过 485 总线与电量参

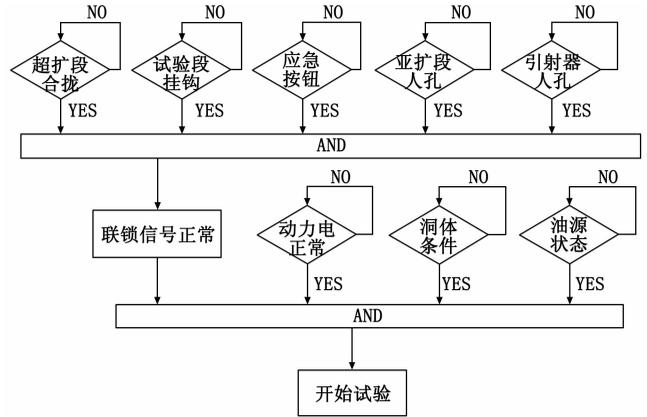


图 4 风洞启动安全联锁策略

数仪通信，获取动力电信号，若停电，向 VXI 系统输出动力电停电异常信号；吹风试验过程中设置超压一级、二级联锁机制，二级联锁的超压压力值低于一级联锁超压压力值，实现风洞多重保护，若其中一个超压，即向 VXI 系统输出运行压力超压信号。在联锁信号异常、动力电停电和运行压力超压任一情况发生时，风洞将启动紧急停车流程，流程如图 5 所示。

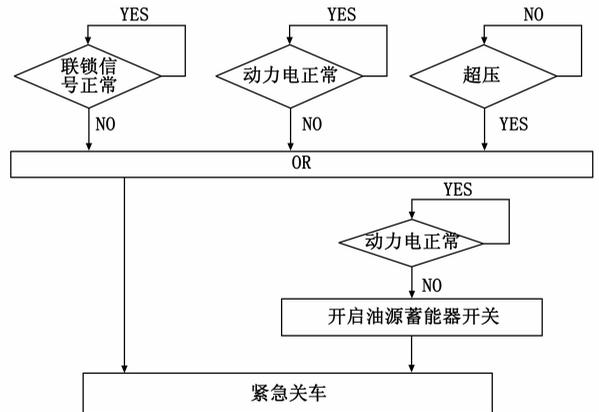


图 5 风洞紧急停车安全联锁策略

3.2 上位机软件设计

上位机软件采用 LabVIEW 2015 设计开发，主要实现数据处理与监测、数据记录与查询、数据发布等功能。

3.2.1 功能设计

3.2.1.1 数据处理与监测

对安全联锁上位机系统网络中的全部数据进行组织管理，包括实时数据库、历史数据库等，通过界面组态等手段，实现风洞联锁信号、阀门、柔壁、增量引射器等系统的实时检测与显示。

此项功能主要实现数据的实时刷新与显示，设计中采用 LabVIEW DSC 功能模块实现，主要开发流程包括：设备驱动配置、变量配置和数据绑定等。

1) 设备驱动配置：NI OPC Server2013 中集成了很多厂家的 PLC 通信模块，且通信周期 ≤ 100 ms，可便利地获取 PLC 数据信息。在 NI OPC Server2013 新建通讯通道，

并配置其 PLC Device ID、安全联锁 PLC TPY 文件、通道号, 见图 6 所示。



图 6 设备驱动配置图

2) 变量配置: 安全联锁上位机与下位机通信方式为 OPC, 通过 OPC Server2013 配置通讯变量, 建立 LabVIEW 与 PLC 通信通道, 实现两者间数据传输。

3) 数据绑定: 变量配置完成后, 变量与安全联锁状态监测软件中控件绑定后才能读/写。数据绑定在控件属性窗口中操作, 数据绑定如图 7 所示。



图 7 数据绑定窗口

4) 数据通信: 安全联锁与状态监测软件与其他设备进行通信主要采用了 TCP/IP、串口和 Modbus 通讯协议。

(1) TCP/IP 通信模块: 安全联锁上位机与测量系统计算机通信获取相关信息与数据, 采用 TCP/IP 通信协议进行通信。设计 TCP/IP 通信程序, 侦听 TCP 读取从测控计算机传输给安全联锁上位机的车次号、马赫数、开车信号等消息。

(2) 串口通信模块: 安全联锁上位机与直线性电源(普源精电 D8321A 和安捷伦 E4634) 通信获取相关信息与数据。根据电源通讯接口选用串口 (VISA) 进行通信, 首先需要配置串口端口号或者 IP 地址, 再输入电源读写字符串指令读取通道电压电流状态, 指令字符串如下所示:

```

:INST CH1
:MEASure:VOLTage:DC? (* 通道 1 电压 *)
:INST CH2
:MEASure:VOLTage:DC? (* 通道 2 电压 *)
:INST CH3
:MEASure:VOLTage:DC? (* 通道 3 电压 *)
:INST CH1
:MEASure:CURRent:DC? (* 通道 1 电流 *)
:INST CH2
:MEASure:CURRent:DC? (* 通道 1 电流 *)
:INST CH3
:MEASure:CURRent:DC? (* 通道 1 电流 *)

```

3.2.1.2 数据存储与查询

安全联锁与状态监测数据除实时显示外, 还需要有追溯功能, 便于通过过程数据分析, 进而分析设备性能状况。因此, 软件需实现变量数据存储与查询功能。数据存储功能使用 LabVIEW DSC 功能模块实现, 将变量信息存储在 NI 数据库中。数据存入数据库配置方法如图 8 所示。



图 8 数据存储配置

软件调用 Historical Trend (DSC) 子 VI 模块, 实现了查询起始时间和终止时间的选择、数据历史曲线查询显示功能。为了方便查询使用图形化语言设计了车次号的刷新选择和变量的刷新选择程序。软件调用 Alarm & Event Query 子 VI 模块, 在报警显示界面实现了查询起始时间和终止时间的选择、历史报警信息查询显示功能, 在主界面设计调用 read alarm 子 VI 实时显示报警信息。

3.2.1.3 基于 Modbus 协议的数据上传

软件采用 Modbus 协议进行数据上传, 程序内使用循环调用“Read Variable”VI 依次读取柔壁系统和安全联锁系统库文件中变量的值, 再调用“Write Variable”VI 将相应的值写入到“TOALMSS”MODBUS 库文件变量地址中, InTouch 软件通过 Modbus 协议实现数据读取。

3.2.2 界面设计

根据软件功能划分和监测信号站点分布等特点, 软件主要包含 7 个子界面, 如图 9 所示。软件界面主要实现人机交互, 需要具有较好的人机界面。根据监测系统多、状态

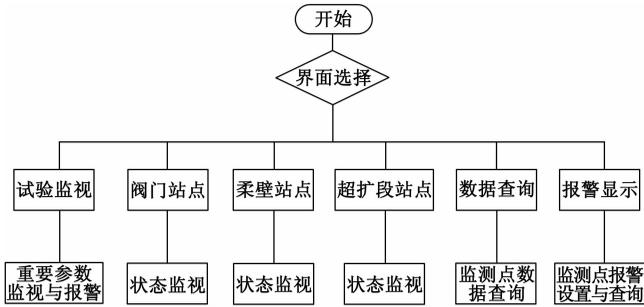


图 9 安全联锁与状态监测软件组成

信号广等特点，对软件主界面，即试验监视界面进行分区设置，一共分为 9 个功能区：界面切换区、压力显示区、阀门状态显示区、迎角机构状态显示区、柔壁成型状态显示区、风洞密封与人孔监视区、油源状态显示区、报警显示区和试验运行参数显示区，如图 10 所示。

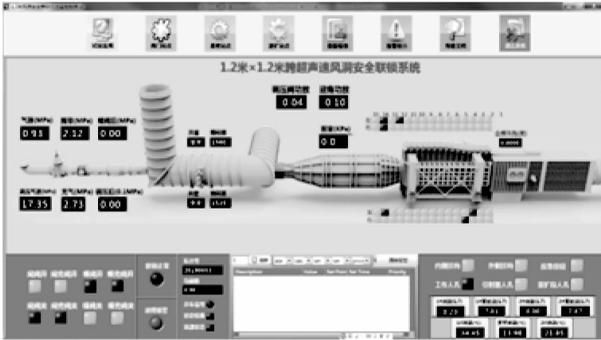


图 10 安全联锁与状态监测上位机主界面

4 应用效果分析

1.2 米风洞安全联锁与状态监控系统建成以后已运行两年，一直应用于风洞试验过程中，有效保障了风洞试验和人员设备安全。在风洞状态检查、运行压力差压、动力电停电等突发情况下均能准确报警并触发紧急关车流程。对所有监测点数据的查询及回溯分析，通过数据对设备运行状态进行准确定量分析，便于掌握风洞设备性能状态，应用效果明显。

如系统运行期间，曾多次准确应对风洞超压报警，将风洞运行压力限制在当前超压压力值，并向控制系统上位机发出超压警报，触发应急关车流程，保证了风洞运行安全。报警显示界面中报警信息可对单个或者多个变量进行查询，并对报警信号进行确认。如图 11 所示为某次跨声速试验时的超压报警信息，由于试验模型在大攻角时堵塞度太大，致使总压持续增加，触发风洞前室^[1]电接点压力表超压。

针对本系统联锁和监测信号多，根据吹风车次和时间类别，设置了数据查询界面。通过车次号和时间段可对系统中各变量进行查询，并可对显示曲线进行多种设置。图 12 给出按照车次号查询的 1# 油源进出口压力数据曲线图，通过对进出口油压的分析，可以有效掌握油缸和液压阀组的工作状态，进而掌握设备性能状态。



图 11 历史报警信息查询界面

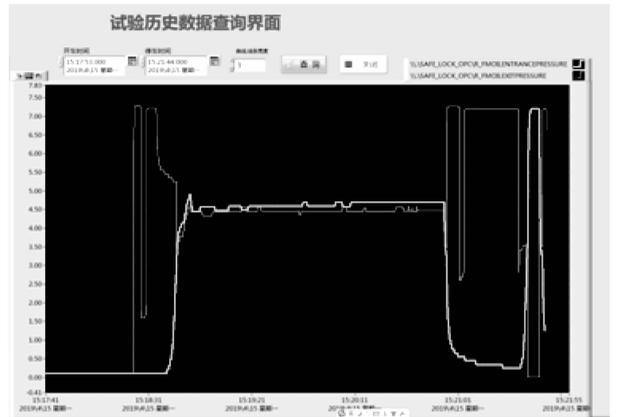


图 12 吹风车次及历史数据查询界面

5 结论

1.2 米风洞安全联锁系统根据安全联锁对象分布特点，基于 EtherCAT 总线网络，构建分布式站点采集安全联锁对象数据，设置主站点对安全联锁进行集中处理。下位机通过 TwinCAT2 编程实现了安全联锁功能，上位机通过多种网络通讯协议，获取了较为全面的风洞设备运行数据，利用 LabVIEW 强大的设计功能实现了友好的用户界面和数据查询，实现风洞运行状态信号的监测显示与查询分析。系统建成运行结果表面，系统在出现紧急情况时，联锁策略均能及时响应，并给操作人员发出即时警告，系统实时性和可靠性均有可靠保证；系统各子界面功能分配清晰、各项监测报警功能完备、用户界面友好，并实现历史数据和报警数据的详细查询功能，有效保证了风洞洞体本身和其他设备安全，并为设备性能分析提供有效分析手段，为其他类似系统建设提供了经验借鉴。

参考文献：

[1] 王新功, 邓晓曼, 等. FL-24 风洞性能与使用 [M]. 中国空气动力研究与发展中心高速空气动力研究所, 2005: 6.
 [2] 许飞云, 胡建中, 贾民平, 等. 嵌入式旋转机械状态监控与故障诊断系统研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2004, 34 (6): 761-765.