

doi: 10.7690/bgzdh.2016.09.012

基于实时以太网的某连续式风洞安全连锁系统

谢明伟, 宋巍巍, 王 飞, 顾光武

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

摘要: 针对连续式风洞设备运行时间长、系统构成复杂和安全性要求高的特点, 建立一种基于实时以太网的某连续式风洞安全连锁系统。采用 ProfiNet 实时以太网为网络平台, 建立安全连锁系统结构, 通过软、硬件相互冗余的连锁功能设计实现连续式风洞信号监测和安全连锁控制功能。采用环网技术提高网络传输的可靠性, 采用分层多级连锁技术使得数据传输更加完备, 有效提高风洞的运行效率。分析结果表明: 该系统结构简单、稳定性强, 完全满足该连续式风洞的安全运行监控功能。

关键词: 连续式风洞; 实时以太网; 安全连锁; 冗余控制; 分布式系统

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Safety Interlock System of Certain Type Continuous Wind Tunnel Based on Real-time Ethernet

Xie Mingwei, Song Weiwei, Wang Fei, Gu Guangwu

(Institute of Equipment Design & Test Technology, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the features of long running time, complex system structure and high safety requirement of continuous wind tunnel equipment, establish safety interlock system. Use ProfiNet real time Ethernet as network platform, establish safety interlock system structure, design and realize continuous wind tunnel signal monitoring and safety interlock control function by mutual redundancy of software and hardware. Use loop network technology to improve network transmission reliability, adopt hierarchical multilevel interlock technology to make data transmission better, effectively improve efficiency of wind tunnel. The analysis results show that: the system has advantages of simple structure and stability, it can totally satisfy safety running monitoring requirement of continuous wind tunnel.

Keywords: continuous wind tunnel; real-time ethernet; safety interlock; redundancy control; distributed control system

0 引言

风洞是研究各类设备空气动力学特征的重要试验设备, 风洞的安全运行是风洞试验结果可靠性的重要保障。风洞安全连锁系统是风洞安全运行的重要保障系统。该系统通过对风洞不同试验条件下各分系统运行状态和风洞重要运行参数的监测, 通过建立不同的连锁规则, 保障风洞在出现异常的情况下, 可以根据出现异常的紧急状态, 对风洞进行相应的关车操作, 确保风洞设备的安全运行^[1]。连续式风洞由于运行时间长、试验状态多, 在试验过程中往往需要对各个分系统运行状态进行长时间监测, 通过分系统关键运行参数及其试验状态来判断整个风洞系统是否运行正常。

在以往的风洞测控系统中, 风洞安全连锁主要通过通过对风洞关键参数的独立监控实现连锁功能, 各分系统的运行状态通过硬件连接的系统异常信号来判断分系统运行状态^[2]。该方法虽可以实现风洞运

行安全监控功能, 但若想要对各分系统进行更全面的状态监控, 则需要更复杂的系统连线、现场安装和调试。

随着网络的不断发展, 实时以太网已经越来越多地应用于工业领域, ProfiNet 工业实时以太网是目前应用较多的实时以太网。该连续式风洞结构复杂、系统组成多、各系统之间参数交互多, 若采用传统的安全连锁系统结构形式, 该风洞的安全连锁系统结构将非常庞大, 系统运行的安全性和可靠性将大大降低; 因此, 笔者结合实时以太网技术的优点, 采用 ProfiNet 工业实时以太网为核心, 构建连续式风洞的安全连锁系统。

1 ProfiNet 工业实时以太网

ProfiNet 实时以太网是由 Profibus International(PI)组织提出的基于以太网的自动化标准。从 2004 年 4 月开始, PI 与 Interbus Club 总线俱乐部联合负责开发与制定标准。ProfiNet 构成从

收稿日期: 2016-05-05; 修回日期: 2016-06-10

作者简介: 谢明伟(1980—), 男, 陕西人, 硕士, 工程师, 从事风洞测控系统设计研究。

I/O 级直至协调管理级的基于组件的分布式自动化系统的体系结构方案，并可以将 Profibus 技术和 Interbus 现场总线技术在整个系统中无缝地集成^[3]，能为紧要任务提供最低限度的性能保证服务，同时也能为非紧要任务提供尽力服务。

ProfiNet 技术为当前的自动化用户提供了一个简单、可靠、完整和高性能的工业以太网平台的解决方案^[4]。ProfiNet 实时以太网的特点主要如下：

1) 系统的开放性、实时性、稳定性好。以太网以前主要用于商业和办公系统，性能稳定可靠，西门子把以太网引入工业现场，替代以前用 Profibus 总线连接底层设备的状况，从而保证了大量底层设备的正常通信。

2) 网络拓扑结构能够实现灵活多样的网络组态。由于硬件上的改进，使用网络交换机容易组成星型、树型等系统架构。

3) 基于 TCP/IP 的标准以太网，系统兼容性好，资源共享能力强，容易实现各种信息技术的集成。

2 安全连锁系统结构

该连续式风洞测控系统按照集散式结构，根据各分系统实现的功能，将测控系统划分为 9 个分系统，分别是：核心控制系统、动力控制系统、换热器控制系统、安全连锁系统、柔壁控制系统、模型姿态控制系统、辅助控制系统以及参数测试系统。测控系统结构如图 1 所示。

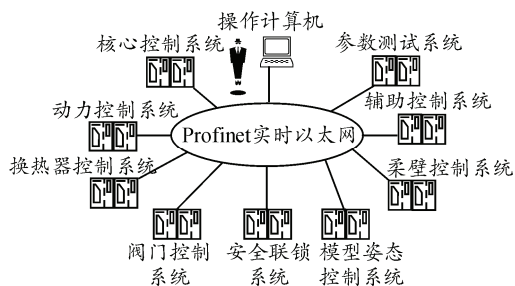


图 1 测控系统结构

该风洞测控系统以 ProfiNet 为网络平台，采用环网形式连接各分系统，以确保在某一分系统出现异常的情况下，其余网络节点仍然可以正常传输数据，提高测控网络的可靠性。

该风洞的安全连锁功能根据异常出现时对风洞运行影响的不同分为 3 级连锁。

1) 1 级为分系统内部安全连锁。每个分系统在运行过程中，根据自身设备的运行特性，对系统内的设备安全进行连锁控制，保证各子设备的安全运行，其方法主要是通过机构限位来确保机构的运行

安全。在风洞运行过程中，整个风洞的 1 级安全连锁功能由核心控制系统来完成，核心控制系统在试验过程中，对风洞运行的关键参数进行监控，若发现风洞压力等关键运行参数异常，核心控制系统按照相关流程进行处理，确保风洞安全运行。

2) 2 级为软件级安全连锁。安全连锁系统通过实时以太网网络，将各分系统的运行参数信息进行汇总和监控，以软件编程方式建立风洞运行安全规则。通过建立风洞安全运行专家数据库，来判断和区分风洞运行过程中出现异常的故障等级，并进行相应的操作。

3) 3 级为硬件级安全连锁。该级主要用于防范安全连锁系统自身运行出现异常或安全连锁软件未能正确对风洞故障进行处理的情况下，通过纯硬件逻辑连锁来确保风洞的安全运行。

3 硬件连锁功能设计

硬件连锁功能主要分试验前硬件连锁、试验过程中硬件连锁和关车硬件连锁。

3.1 试验状态检查硬件连锁设计

试验前的硬件安全连锁，主要通过硬件逻辑方式判断风洞状态是否满足试验要求。首先，风洞洞体满足试验要求，如试验段驻室大门关到位、充气密封压力正常、柔壁型面满足试验要求等；其次，各分系统准备就绪，为确保安全连锁系统与各分系统的硬件故障信号均无异常，该信号采用低有效方式，即使硬件电缆连接出现异常或分系统网络出现异常，安全连锁系统同样可获取分系统的异常信号。

为确保风洞吹风试验的可靠有效，在开车前硬件连锁中增加“吹风允许”信号，该信号只有在试验负责人认为可以开始试验时才给出，提高试验的安全性。

在风洞试验准备过程中，可能出现试验段驻室内人员为撤离驻室大门已关闭的情况，为保障驻室内人员的安全，在驻室内设置“洞内有人”按钮，通过硬件逻辑接入试验前的硬件连锁，当“洞内有人”按钮按下时，试验前的硬件连锁条件不能满足试验要求。若试验过程中出现“洞内有人”按钮按下，风洞即可根据紧急停车时序进行操作，通过硬件连锁确保现场人员安全。

3.2 试验过程中的硬件安全连锁设计

在风洞试验过程中，若核心控制系统出现异常，此时试验不能正常运行，安全连锁系统需对控制权

限进行切换,实现系统的安全关车。安全连锁系统对核心系统故障的判断通过 2 种硬件方式实现。一种是对稳定段总压通过电接点压力表的方式进行监测。预先设置电接点压力表的压力报警值,当安全连锁系统监测到稳定段压力超过第 1 报警值时,向核心系统发出系统异常信号,若安全连锁系统监测到稳定段压力超过第 2 报警值,则直接切换控制权,向各分系统发送紧急停车指令。各分系统根据紧急停车时序运行相关功能。

3.3 硬件关车功能设计

硬件关车功能主要针对试验过程中,核心控制系统和安全连锁控制系统均出现异常的极端情况。此时,需通过纯硬件方式,实现风洞的关车操作。

在测控间操作台设置“正常时序关车”和“紧急关车”按钮,通过硬件逻辑方式实现关车操作。当“正常时序关车”按钮按下时,安全连锁控制系统根据正常关车流程向各分系统发送关车指令;当“紧急关车”按钮按下时,安全连锁系统通过硬件直接实现动力系统紧急停车和阀门系统相关动作。

4 软件连锁功能设计

该连续式风洞的 ProfiNet 实时以太网是以西门子的 S7-300 系列 PLC 为硬件平台进行设计的,通过实时以太网,将各分系统的关键参数通过网络映射至安全连锁系统^[5]。在安全连锁系统和各分系统之间完成 ProfiNet 实时以太网通信后,根据风洞运行安全的需要,安全连锁系统将各分系统的关键参数通过软件进行连锁,实现风洞的软件连锁,风洞开车条件连锁以及风洞软件关车条件连锁。

该连续式风洞软件安全连锁功能分为 3 层。第 1 层由各分系统实现系统内部设备的安全连锁,确保分系统设备的安全;第 2 层由核心控制系统软件实现风洞运行的安全连锁,确保试验过程中风洞的安全运行;第 3 层由安全连锁系统软件实现风洞的安全连锁,安全连锁系统对稳定段压力等关键参数,采用传感器和电接点压力表等监测方式,通过软件连锁确保风洞的安全运行。通过 3 个层级的软件安全连锁,确保风洞运行过程中的设备和人员的安全。

安全连锁系统在对各分系统的运行参数进行汇总后,将分系统与设备安全相关的关键参数纳入软件安全连锁。按照关键参数故障对人员和设备的威胁程度,将风洞故障信号分为表 1 中的安全、临界和危险 3 个等级。根据故障信号的危险程度,将风洞故障信号分为报警信号和紧急停车信号^[6]。

表 1 风洞故障信号危险程度分类

级别	危险程度	可能导致后果
I	安全的	不会对人员和设备造成危害
II	临界的	处于事故边缘暂不会危害人员和设备
III	危险的	会造成人员伤亡或设备损坏

报警信号一般用来处理如换热器控制系统、辅助控制系统等网络出现异常,或稳定段总温出现异常、充气密封压力低于报警值等异常情况,这些异常情况不会对风洞安全运行产生影响。此时,安全连锁系统向核心控制系统发送报警信号,由操作人员根据试验进程进行处理。

紧急停车信号用来处理某些威胁风洞安全运行的异常信号,如柔壁控制系统故障、稳定段压力超过第 2 报警值、动力系统故障等重要故障。当安全连锁系统检测到紧急停车相关信号,立刻切换控制权,由安全连锁系统控制风洞实现紧急停车操作。

5 安全连锁系统关车功能设计

该连续式风洞在吹风试验过程中,由于功能多、构成复杂,有时可能出现一些不可预知的异常情况,如传感器等电器设备的运行故障等。根据风洞运行故障的不同,将该风洞运行故障分为一般故障和紧急故障。一般故障是指风洞某系统功能出现异常但不威胁风洞安全运行的故障;紧急故障是指该故障出现威胁风洞设备的安全运行的故障。根据不同的故障等级,将该连续式风洞的关车功能分为正常关车、一般性故障关车和紧急停车 3 种状态。试验过程中 3 种关车状态时序流程如图 2 所示。

5.1 正常关车功能设计

在该连续式风洞试验运行过程中,若未发现异常报警信号,则由风洞核心控制系统按照正常试验流程进行风洞试验;在试验结束后,根据该风洞运行的正常关车流程进行关车操作。

5.2 一般性故障关车功能设计

在该连续式风洞试验运行过程中,安全连锁系统若检测到如密封围带压力降低、主控系统异常、半柔壁控制系统异常、风洞洞体压力超过报警值、测控系统网络异常等风洞一般性故障信号,则由安全连锁系统向操作人员发出报警信号,同时按照一般性故障关车时序,向各个分系统发送一般性故障关车指令,完成风洞一般性故障关车操作。若安全连锁系统软件未按照关车时序进行相关操作,可以通过测控间操作台的一般性故障关车按钮通过硬件进行关车操作。

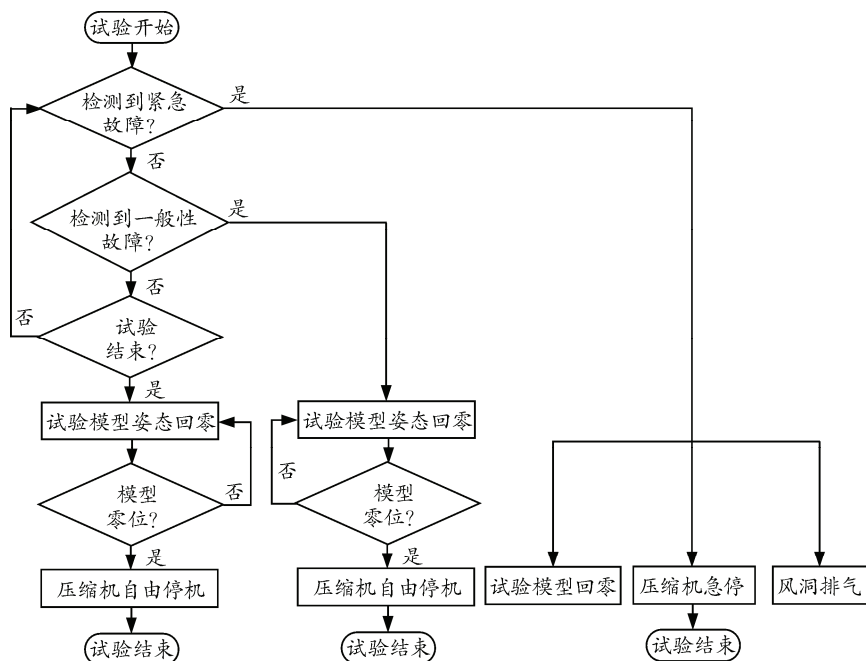


图2 关车时序流程

5.3 紧急停车功能设计

在该连续式风洞试验运行过程中，安全连锁系统若检测到如动力系统故障、压缩机喘振、半柔壁控制系统故障、模型控制系统故障等信号时，安全连锁系统立即向动力系统发送紧急停车信号，进行压缩机急停操作；同时，向模型姿态控制系统发送模型回零信号，向阀门控制系统发送风洞排气信号，按照风洞急停时序结束风洞试验。在试验过程中，若操作人员发现风洞出现异常需紧急停止试验时，可通过设置在测控间和试验大厅的紧急停车按钮，按照紧急停车时序结束风洞试验。

6 安全连锁功能调试

在风洞进行全系统联合调试之前，需对安全连锁系统功能进行仿真调试，其中包括安全连锁系统与各分系统之间的信号传输调试以及安全连锁系统对故障信号的检测和分类处理调试。

在对安全连锁系统与分系统间的信号进行调试时，需对通过网络传输的信号和通过硬件传输的信号进行相应检查调试，待所有系统间的通信及硬件系统均工作正常后，开始进行关键故障信号的检测和分类处理调试。

关键故障信号检测和分类处理调试，需特别对临界故障和危险故障进行仿真调试，以检验安全连锁系统的运行是否满足风洞试验安全要求。在对临界故障进行调试时，随机挑选故障信号进行仿真，检测安全连锁系统是否能够正确检测到故障信号并

进行报警和记录；在对危险故障信号进行调试时，需对每个危险信号逐一进行仿真，检测安全连锁系统是否能够对该类信号进行正确分类并及时进行正确处理。

7 结束语

在该连续式风洞安全连锁系统设计中，通过软件和硬件2种方式，采用分系统内部连锁、核心控制系统连锁和安全连锁系统连锁等多种途径，实现了该连续式风洞运行安全的连锁功能。通过风洞实际运行检验，该连续式风洞安全连锁系统便于风洞试验人员全面了解运行状态，提高了风洞试验效率。极大地增加了风洞运行的安全性和可靠性。

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，2001：278-280.
- [2] 王发祥. 高速风洞试验[M]. 北京：国防工业出版社，2003：62-73.
- [3] 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.
- [4] 施华，程雪. PROFINET在交通隧道监控系统中的运用[J]. 中国仪器仪表，2011(增刊)：123-124.
- [5] 王磊，李木国，王静，等. 基于EtherCAT协议现场级实时以太网控制系统研究[J]. 计算机工程与设计，2011，32(7)：2294-2297.
- [6] 杜宁，芮伟，秦建华. 2.4 m跨声速风洞涡轮动力模拟器安全监控系统[J]. 兵工自动化，2007，26(4)：81-82.