

doi: 10.7690/bgzd.2019.09.009

某跨超声速风洞运行监测及故障诊断系统

陈海峰, 高鹏, 阎成, 郭涛, 冯一

(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: 为满足某跨超声速风洞的试验效率和安全可靠运行要求, 对风洞运行监测及故障诊断技术进行研究。系统硬件采用分级结构采集运行状态参数, 软件系统分析采集数据, 实现在线监测、报警预警、故障诊断的功能, 并分析对报警预警策略设置及故障诊断的关键技术。实际应用结果表明: 该系统可长期、可靠、有效地运行, 具有一定的实用参考价值。

关键词: 跨超声速风洞; 网络总线; 运行监测; 故障诊断; 专家系统

中图分类号: TP274 **文献标志码:** A

Operation Monitoring and Fault Diagnosis System for Certain Type Transonic Wind Tunnel

Chen Haifeng, Gao Peng, Yan Cheng, Guo Tao, Feng Yi

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

Abstract: In order to meet the test efficiency and safe and reliable operation requirements of a transonic wind tunnel, the operation monitoring and fault diagnosis technology of the wind tunnel was studied. The system hardware adopts hierarchical structure to collect operation state parameters, uses software system analysis to collect data, realizes online monitoring, alarm and early warning, fault diagnosis functions, and analyses the key technology of alarm and early warning strategy setting and fault diagnosis. The practical application results show that the system can operate for a long time reliably and effectively, and has certain practical reference value.

Keywords: transonic wind tunnel; network bus; operation monitoring; fault diagnosis; expert system

0 引言

某跨超声速风洞是一座引射下吹式暂冲型三音速风洞, 马赫数范围 0.4~4.5, 总压和马赫数控制精度分别优于 0.3%和 0.003。该风洞具有试验马赫数范围宽、模型攻角跨度大、试验模型可投放和观察视野广等特点, 并具备开展进气道、动导数、自由飞等特种试验的能力^[1]。近年来, 随着先进飞行器研制的不断发展, 以及风洞配套设施的建设和完善, 该风洞承担的试验任务也日趋繁重, 试验难度愈来愈高, 对风洞的安全可靠运行提出了更高的要求^[2]。笔者对风洞运行监测及故障诊断技术进行研究, 对报警预警及故障诊断的关键技术进行分析, 以提高风洞的安全运行水平。

1 系统硬件设计

系统硬件采用了分级结构。笔者主要对硬件总体架构及基本功能、风洞现场监测点布置、下位数据采集系统及滤波放大器进行分析。上位机设备所选的计算机及网络产品由常用的标准货架产品搭建, 只进行简要介绍。

1.1 硬件总体架构及基本功能

系统硬件总体结构见图 1, 由上位机设备、下位机设备和风洞现场监测点 3 大部分组成。上位机设备由计算机及网络组成, 主要包括状态数据服务器、防火墙和相关网络设备^[3]; 下位机设备主要包括工控机-PXI 数据采集系统、信号调理系统; 风洞现场监测点须能表征风洞运行状态, 有风洞各部位运行压力参数、风洞运行机构位置参数、现场安全连锁、限位反馈和稳压电源供电信息等。

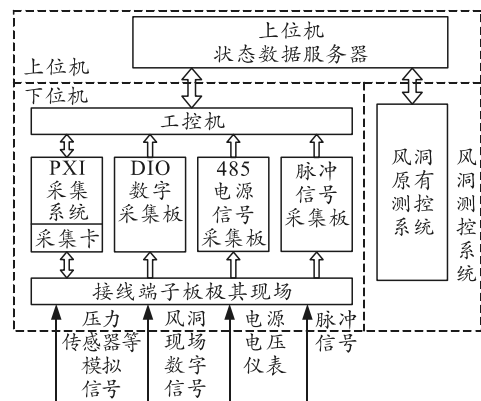


图 1 硬件总体架构

收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-06-28

作者简介: 陈海峰(1980—), 男, 山东人, 硕士, 工程师, 从事风洞测控技术及仪器研究。E-mail: 16251520@qq.com。

上位机状态数据服务器安装有监测显示软件、运行参数数据库，以实现存储和管理从下位机传送过来的风洞运行实时状态数据和各特征参数，完成状态预警和故障诊断；下位机设备结合风洞现场监测点负责风洞运行现场各种信号的采集、存储和数据处理，对相关数据进行特征参数提取，完成实时运行状态监测和数据发送。

1.2 系统监测点布置

风洞各段由很多监测信息共同表征风洞运行状态，为保证监测及诊断的准确性，系统中监测点的确定和布置至关重要。监测点的选择与布置直接影响风洞运行故障分析、诊断决策的正确与否。风洞运行监测及故障诊断系统监测点布置遵循以下基本原则^[4]：

- 1) 监测点布置应能反映风洞运行状态所要求的参数；
- 2) 风洞运行现场多电机拖动，监测点布置需尽量避免高电磁干扰区域；
- 3) 安装时不能破坏风洞管道及设备，尤其压力传感器的安装不能破坏风洞洞体；
- 4) 安装监测点不能对现有风洞测控设备产生影响；
- 5) 压力监测点安装位置尽可能靠近该点控制传感器位置；
- 6) 运行监测系统，测点精度要求不需太高，考虑到经济性原则，传感器可选择精度一般的即可。

1.3 数据采集系统设计

数据采集系统采用 PXI-工控机的结构，硬件组成见图 2，系统基于先进的计算机技术，具有结构简单、功能模块化、系统扩展性好、监测通道多、实时性好和经济实用的特点。

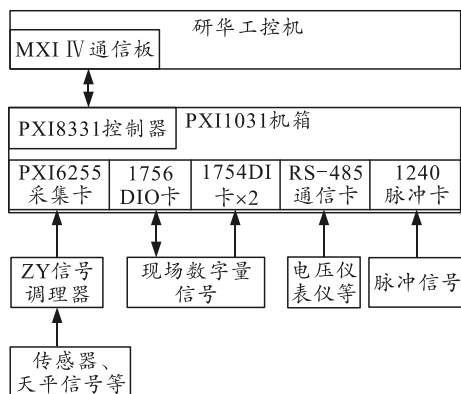


图 2 数据采集系统硬件组成

跨超声速风洞的气流流经阀门、试验段和扩压

段时会产生很大的气流脉动和低频噪声^[5]，传感器（主要包括压力传感器和天平）输出的电压信号，在传输过程中受各种干扰，有气流脉动造成的输出信号低频干扰、外界干扰引入的电气噪声等。为保证数据的准确性，必须对采集信号进行滤波放大^[6]。系统选用的滤波放大器是基于耦合差分放大原理而设计的一种放大器，具有输入阻抗高、共模电压范围高、共模抑制比高、精度高、线性度高、零漂小和噪声低等特点^[7-8]。

传感器信号经滤波放大器进行信号调理后，由 PXI-6255 数据采集卡进行采集。开关量监测点通过 1756、1754DIO 板卡采集；电源电压等通过 RS-485 通信卡采集；脉冲信号通过 1240 脉冲板采集，工业控制计算机循环读取采集的数据，经过分析处理存储在本地。

2 系统软件设计

系统完成现场监测信号采集后，软件系统对采集数据进行分析处理，实现在线监测、报警预警、故障诊断的功能。

2.1 系统网络拓扑结构

系统的网络拓扑结构选择总线型结构，软件运行为客户端/服务器(C/S)方式，其拓扑结构见图 3。系统的网络拓扑结构主要节点包括状态数据服务器、监测中心客户端、原风洞测控系统、有防火墙安全保护的内部办公局域网、数据采集机及打印显示设备等，系统通过网络与原风洞测控系统实现互联，可以相互交换数据。

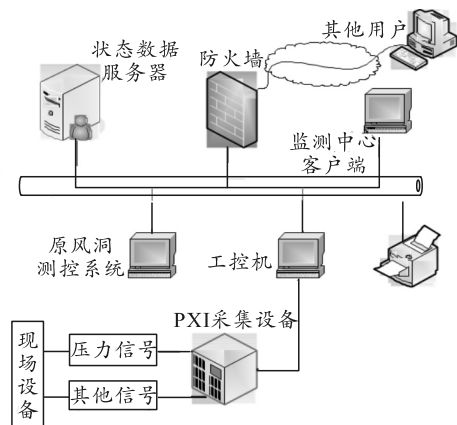


图 3 系统软件整体网络拓扑

整个状态监测系统的工作逻辑：风洞现场数据实时采集、数据的预处理和数据存储主要由数据采集系统完成，通过网络将数据上传至数据服务器中，状态监测和故障诊断程序可以随时调用数据服

务器中的数据。系统监测的实时数据、历史数据、报警数据、风洞运行参数信息和专家故障诊断系统存储在数据库服务器子系统中。软件的整体数据流如图 4 所示。

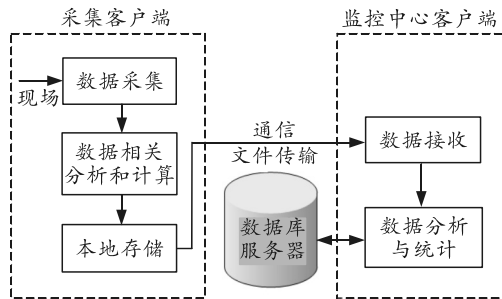


图 4 软件的整体数据流

2.2 下位机数据采集软件

风洞运行时各部段工作压力、天平测值及其他信息通过传感器与前端信号处理器转换为电压信号,通过 A/D 转换器将电压信号转换成计算机可以读取的二进制数据,下位采集计算机采集转换之后的二进制信号,并对其进行计算、整理,特征值提取,得到运行监测系统需要的风洞运行参数。

下位机基于 LabWindows/CVI 软件平台进行开发,采集软件开发的思路:直接调用 NI 公司的库函数,充分利用软件平台资源,避免对硬件的底层访问,以缩短采集软件开发的时间,方便实现数据采集。

2.3 上位机运行监测及故障诊断软件

上位机软件采用模块化结构,功能模块见图 5,主要包括参数设置、通信、界面显示、专家故障诊断及预警示警 5 个功能模块。通过通信子程序将下位机采集的各种工况信号同风洞运行参数比较,特征值提取后查询专家故障诊断系统,实现预警示警、故障诊断功能。

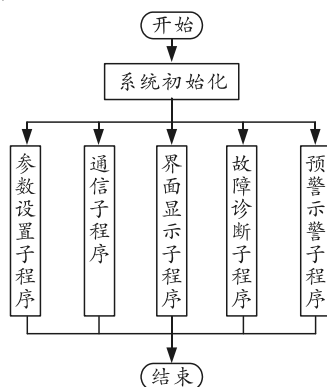


图 5 上位机功能模块

上位机软件采用 LabWindows/CVI 与 Microsoft

SQL Server 结合完成,其中 LabWindows/CVI 完成人机界面功能,包括监测界面显示、参数设置、预警报警及故障诊断提示等功能。SQL Server 负责数据库功能,通过建立数据表,保存采集到的风洞各种状态信息的特征值,进而实现对风洞运行实时或历史运行状态的运行监测和故障诊断,给操作人员提供数据的存储、更新、删除和查询。

系统数据库软件还可以根据记录保存每次风洞试验的运行状态参数,通过数据的积累、比较和总结,发现影响试验数据精度的因素,确保风洞试验依据给定的试验条件进行,进而优化风洞运行参数,改进风洞现有试验控制方式;同时,通过不断总结风洞岗位人员的工作经验,为及时快速地排除风洞设备故障进行指导,从技术上提高风洞运行水平。

3 关键技术

3.1 报警预警策略设置

根据以往总结的规律或观测得到的可能性前兆,进行正确的预警设置,可以在危险发生之前,向参试人员发出紧急信号,报告危险情况,从而最大程度地减低危害所造成的损失的行为^[9]。

预警设置采用分级的方法,风洞参试人员及周边环境的安全是最高预警级别,当风洞管道超过安全工作压力时,无论试验模型或子设备处于何种状态,该系统马上发出最高级别预警并通知风洞控制系统切断气源,以免产生破坏性危险。其他级别根据风洞实际运行情况,依据气流是否可控或子设备是否工作正常,进行不同级别的预警设置。预警规则设置见图 6,以总压超压为例与目标压力比较,根据不同的压力超差范围,分别完成一级、二级、三级报警。

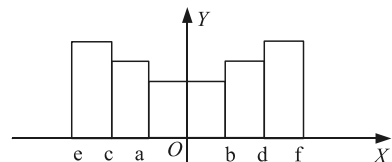


图 6 指标预警分级

该三级预警方法为基本的指标预警^[10]。另外,风洞运行流场稳定后,压力波动应该很小,此时,如果在较短时间内突然增大或者减少 $N \text{ kPa}/0.1 \text{ s}$ (预警值 N 可根据实际监测结果进行适当调整)时,系统也发出预警,该种预警方法即为突变预警。

3.2 故障诊断

系统故障诊断的决策依据是专家系统。专家系

统是将风洞试验专家和参试人员积累的故障诊断及解决方案, 根据故障产生的特点录入到数据库中生成程序系统^[11]。

系统通过采集风洞各监测点反馈的工况信号, 对信号调理转换后进行特征值提取, 将特征值与专家系统相匹配^[12], 运用人工智能技术, 经验推理和判断, 做出决策, 给出解决方案^[13], 以保证设备的可靠、安全运行。运行监测及故障诊断过程的原理见图 7。

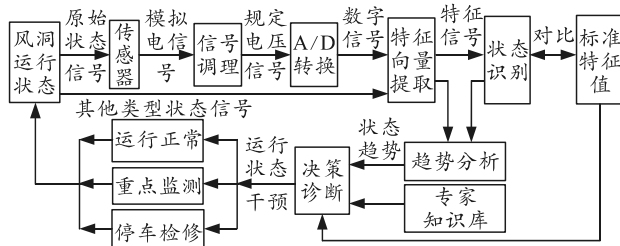


图 7 运行状态监测及故障诊断原理

专家系统的完善, 依赖于系统使用过程中的长期积累, 其完善程度, 对于系统故障诊断的水平和能力具有决定作用。系统完善后, 可以方便实现历史预警信息、故障诊断方案的查询分析功能, 可以模拟岗位专家, 解决风洞运行时现场的问题, 另外, 专家故障解决方案可以作为培训教案, 丰富新同志和岗位人员操作知识和经验, 专家系统的完善程度直接决定故障诊断系统的现场实际应用效果。

4 应用情况

本项目在完成硬件设计、软件编写、现场安装调试后, 系统即在风洞现场投入使用, 在风洞试验运行期间, 全天候 24 h 运行, 系统硬件运行稳定可靠、数据采集精准, 软件结构合理规范、界面友好、操作简便、软件功能完善, 累计监测 3 000 余次风洞启动。

试验现场运行表明: 该系统可以长期、可靠、有效地运行, 为风洞的安全运行提供在线监测、报警预警、状态分析、性能评价和故障诊断等功能。系统的报警及诊断结果对该风洞安全运行和检修具有实际指导意义。

5 结论

系统的研制成功和投入使用, 使该风洞开始将运行监测及故障诊断技术用于指导风洞的安全运行

生产, 提高了风洞的安全运行水平, 具有一定的实用参考价值, 主要包括以下几点:

1) 系统为风洞的安全运行提供技术保障。通过现场监测点的反馈信息, 可以判断风洞各个系统和部段的工作是否正常, 减少故障发生的概率。

2) 系统通过对风洞运行状态参数的积累、比较和总结, 可以优化风洞运行参数, 改进风洞控制方式, 提高风洞运行水平。

3) 系统可以不断记录操作人员的工作经验, 记录专家解决问题的思路方法, 为风洞解决故障和检修提供指导。

参考文献:

- [1] 凌忠伟, 夏明主. 某风洞性能手册[Z]. 绵阳: 中国空气动力研究与发展中心高速所, 2011.
- [2] 高川, 刘烽, 周波, 等. 某超声速风洞测控系统[J]. 兵工自动化, 2013, 34(2): 63-66.
- [3] 阎成, 邓晓曼, 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, 34(2): 67-70.
- [4] 吴世林, 梅宏, 高峰. 水轮发电机组状态监测及故障诊断系统的硬件系统设计[J]. 云南水力发电, 2002, 18(2): 53-55.
- [5] 王发祥, 徐明方, 李建强, 等. 高速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 129.
- [6] 恽起麟. 风洞实验数据的误差与修正[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 73-80.
- [7] 施洪昌. 风洞数据采集技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 21-23.
- [8] 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: 95-108.
- [9] 景国勋, 杨玉中. 矿山重大危险源辨识、评价及预警技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012: 7-9.
- [10] 中国安全生产协会注册安全工程师工作委员会. 安全生产管理知识[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2008: 117-118.
- [11] AMIRAT Y, BENBOUZID M E H. A brief status on condition monitoring and fault diagnosis in wind energy conversion systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009(13): 2629-2636.
- [12] DANIEL F L, MICHEL B H. Real-time fault diagnosis of nonlinear systems[J]. Nonlinear Analysis, 2009, 71: 2665-2673.
- [13] 张正松. 旋转机械振动监测及故障诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991: 421-426.