

doi: 10.7690/bgzdh.2026.02.008

3 维可视化安全联锁系统研制及应用

金志伟, 景川, 邢盼, 蒋文静

(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 2.4 m 跨声速风洞运行监控缺少统一的基础显示平台, 无法全面、准确、集中监测风洞整体运行情况, 提出基于数字化技术研制 3 维可视化安全联锁监控系统。将风洞洞体、流场及主要执行机构等的总体态势以 3 维视图方式进行呈现, 对油源、气密封、电源等系统的状态进行远程在线监控。在控制系统出现故障、设备状态超出安全范围、模型出现剧烈抖动等情况时, 及时对整个风洞系统实施联锁保护, 同时解决风洞运行过程中监控内容过于繁杂及分散等问题, 并优化完善设备故障的告警功能。结果表明: 该系统在投入 2.4 m 跨声速风洞日常应用时, 能够满足风洞运行的安全监控要求, 使用效果良好。

关键词: 风洞; 监控; 3 维可视化; 安全联锁系统

中图分类号: V211.74 **文献标志码:** A

Development and Application of 3D Visualization Safety Interlocking System

Jin Zhiwei, Jing Chuan, Xing Pan, Jiang Wenjing

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

Abstract: In view of the lack of a unified basic display platform for the operation monitoring of 2.4 m transonic wind tunnel, which can not comprehensively, accurately and centrally monitor the overall operation of the wind tunnel, a three-dimensional visual safety interlocking monitoring system based on digital technology is proposed. The overall situation of the wind tunnel body, flow field and main actuators is presented in a three-dimensional view, and the status of the oil source, gas seal, power supply and other systems is monitored remotely and online. When the control system fails, the equipment status exceeds the safety range, and the model shakes violently, the interlocking protection of the whole wind tunnel system is implemented in time, and the problems of too complicated and scattered monitoring contents in the operation process of the wind tunnel are solved, and the alarm function of the equipment failure is optimized and improved. The results show that the system has been put into daily application in 2.4 m transonic wind tunnel, which can meet the safety monitoring requirements of wind tunnel operation, and the application effect is good.

Keywords: wind tunnel; monitoring; 3D visualization; safety interlock system

0 引言

2.4 m 跨声速风洞(以下简称 2.4 m 风洞)作为国内大口径跨声速风洞, 是我国独立自主研制各种先进飞行器可以依赖的重要跨声速气动力试验平台。2.4 m 风洞建成并投入运行 20 余年, 其试验运行过程需监控的内容十分繁多且比较分散, 目前缺乏统一的显示平台将全部监控信息进行有效整合, 无法全面、准确地实时监测风洞的整体运行情况, 不利于风洞的安全可靠运行^[1]。笔者提出基于数字化技术研制 2.4 m 风洞 3 维可视化安全联锁监控系统, 将风洞洞体、流场及主要执行机构等的总体态势以 3 维视图方式进行呈现, 同时对油源、气密封、电源等系统的状态进行远程在线监控。在控制系统出现故障、设备状态超出安全范围、模型出现剧烈抖动等情况时, 及时对整个风洞系统实施联锁保护, 有效地确保人员和设备的安全, 保证风洞试验过程

的安全可靠。

1 3 维可视化安全联锁系统简介

2.4 m 风洞 3 维可视化安全联锁监控系统作为风洞运行状态监控的核心系统, 担负着风洞现场设备状态、模型运行状态、环境等监测以及各类设备告警提示的功能, 对保障试验现场的人员与设备安全起到至关重要的作用。根据该系统功能需求设计了 6 个主要的子模块, 定义如图 1 所示。

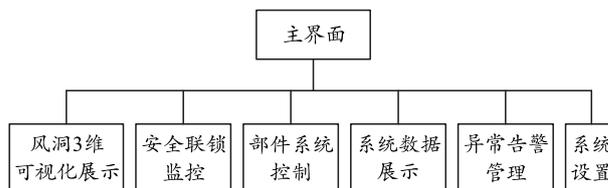


图 1 系统组成

主要包括风洞 3 维可视化主界面、系统数据展示、部件系统控制、安全联锁监控、异常告警管理

收稿日期: 2024-11-12; 修回日期: 2024-12-12

第一作者: 金志伟(1976—), 男, 山东人, 硕士。

和系统设置等功能模块^[2]。

该系统通过 OPC 协议与风洞控制的核心 PLC 系统进行实时通信,从 PLC 系统读取各执行机构运行的状态信息,以及油源系统的压力、液位、温

度,气密封系统压力以及电源电压等设备参数进行远程监控,并以 3 维可视化的方式,形象直观地将与风洞运行相关的各类关键信息显示在测控间大屏幕上^[3],其工作原理如图 2 所示。

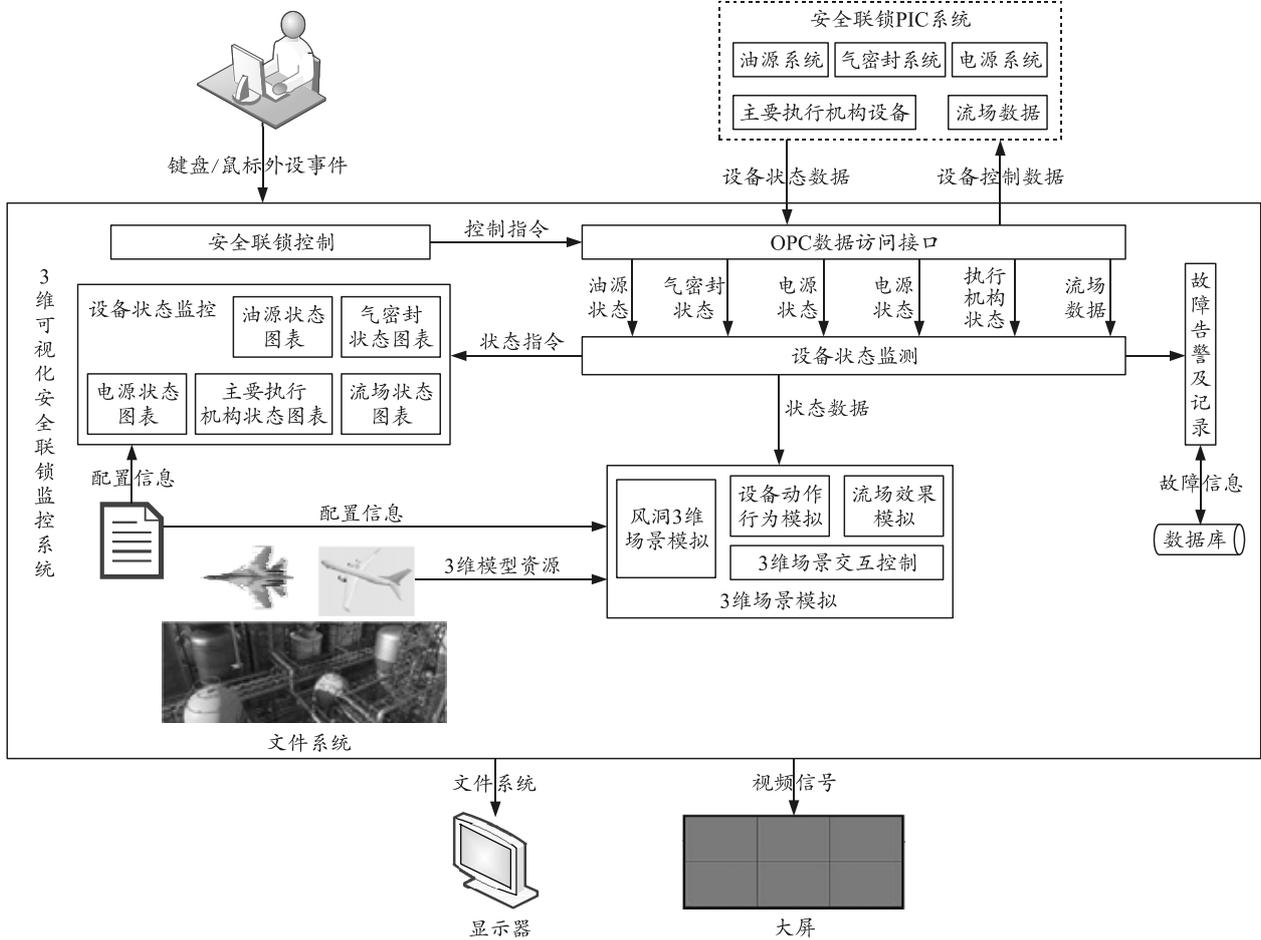


图 2 系统工作原理

2 系统功能设计

2.4 m 风洞 3 维可视化安全连锁监控系统作为唯一的显示平台,为了能够全面、实时、准确地监测并显示整个风洞的运行情况,必须满足以下功能要求:

- 1) 3 维立体的人机交互界面,显示整个风洞的组成情况,并展示主要设备和机构。
- 2) 与风洞控制核心 PLC 进行实时通信,实现安全连锁控制、油源系统监控、气密封等系统的远程状态监测与告警。
- 3) 模型姿态、主调压阀、主排气阀、栅指等主要执行机构的远程状态监测。
- 4) 风洞试验过程中流场相关压力信息的实时监测和曲线显示。
- 5) 具备安全连锁系统相关设备的故障检测与

告警功能,同时具备故障日志及维修记录录入和导出功能。

6) 以 3 维视图的方式显示试验模型的运行情况,并在主界面相关窗口实时显示模型的视频监控画面。

7) 针对主要的执行机构提供独立的 3 维模型,当机构的状态信息发生改变时,实时新的数据控制机构 3 维模型运动,以动画方式展示机构的运行状态;同时,提供 3 维场景交互功能,通过鼠标选取风洞中的关键设备和机构,被选中部件以高亮特写的方式进行区别显示,点击后显示该设备的具体监测数据或运行状态。

8) 实现风洞流场数据的 3 维可视化模拟,形象展示风洞试验过程中,气流的流动状态以及随流场变化的不同效果。

9) 当设备出现故障告警信息时能及时提示, 同时将告警信息以日志方式存储入数据库, 方便后期查询分析。

3 系统设计与实现

3 维可视化安全联锁系统采用 C# 语言进行编程^[4]。2.4 m 风洞 3 维可视化安全联锁监控系统主界面整合了原风洞的所有监控内容, 形象具体地显示了风洞的整体运行情况, 并在不同区域详细显示风洞相关的关键信息, 使工作人员可以全面准确地掌握风洞的实时运行情况, 保证了风洞的安全可靠运行。

主界面左侧为风洞相关信息及设备运行参数显示区域; 正中为风洞运行状态显示区, 上方为风洞运行时流场实时数据曲线, 下方为该菜单栏; 右侧为实时监控视频显示区。

3.1 信息显示

系统主界面左侧为风洞相关信息及设备运行参数显示区域, 包括: 风洞现场环境信息, 指挥调度系统信息及试验工况信息, 闸阀、油源及气密封系统运行参数显示, 洞内人员信息, 试验用天平各元的实时数据等内容^[5]。环境信息、指挥调度系统信息、试验工况信息、试验用天平各元的实时数据等内容均通过 TCP/IP 从试验网获取。

3 维可视化安全联锁监控系统与风洞控制 PLC 系统建立连接后, 创建独立的风洞状态数据监测线程, 并获取 2.4 m 风洞油源、气密封、闸阀等系统的设备状态参数, 同时对运行状态进行远程监控, 在闸阀系统不到位, 油源系统压力、液位、温度或气密封系统压力等参数异常时发出警报。以油源系统为例, 图 3 为油源系统监控流程。

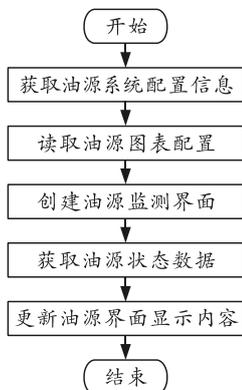


图 3 油源系统监控流程

当系统从获取的风洞运行状态数据中检测到故障告警信息时, 会在主界面 3 维洞体模型上以高亮

标识的形式提示故障位置, 并可以在选中后放大特写故障设备, 查询其具体参数及运行状态。同时自动生成故障告警日志文件, 并将该日志生成时间、故障设备名称、设备运行异常数据、故障告警级别及本次试验信息等相关内容存储至数据库中, 便于后期对故障告警的查询分析, 其系统故障告警流程如图 4 所示。

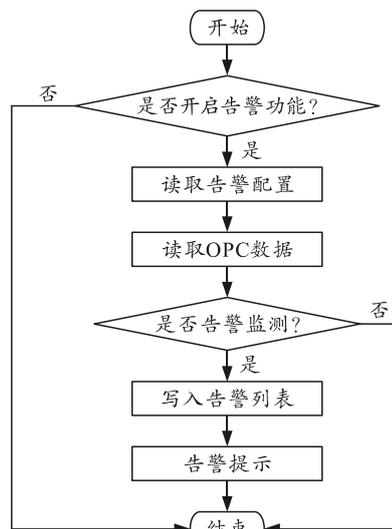


图 4 系统故障告警流程

3.2 3 维显示

系统主界面正中为风洞运行状态显示区, 通过 OPC 协议与风洞核心控制系统建立数据通信, 以高于 100 ms 的采样周期实时获取风洞运行时流场数据, 以及模型姿态数据, 并通过曲线的方式实时进行显示, 风洞流场数据包括了总压、静压、马赫数等关键信息。

本系统对 2.4 m 风洞洞体进行了全尺寸 3 维建模, 风洞洞体模拟显示功能用于加载 3 维模型资源, 在 3 维空间中构建虚拟风洞试验的基础环境, 建立风洞主体模型、各部段相关设备和子系统的模型, 通过 3 维图形渲染引擎将 3 维虚拟风洞场景画面通过 GPU 渲染绘制, 并输出至显示终端和拼接屏等外部设备, 形象直观地展示风洞的组成情况, 包括各个主要执行机构的外观、位置、分布、运行响应状态等信息。在风洞试验过程中, 系统实时获取风洞流场等相关数据, 并以试验数据为驱动实时仿真显示风洞内流场的变化、模型姿态变化, 以及相关执行机构的运行状态, 以 3 维视图的形式全面、真实地展示 2.4 m 风洞吹风的全过程, 其风洞 3 维模拟显示流程如图 5 所示。