

Φ1 米高超声速风洞自主式维修保障系统设计

李杰¹, 朱涛¹, 许晓斌¹, 蔺元辰², 吕超¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 为了解决 Φ1 米量级高超声速风洞装备试修矛盾, 提高风洞参试效率并拓展风洞技术性能, 实现风洞装备管理信息化和过程质量控制精细化, 满足国家高超声速武器装备和航天飞行器研制中地面试验的需求, 提出了建设 Φ1 米量级高超声速风洞自主式维修保障系统; 文章分析了风洞的设备组成、运行方式、试验任务特点以及风洞装备维修保障的现状, 按照“增强的基于状态维修”的装备保障新模式, 进行了系统设计架构, 明确了硬件系统组成和软件各模块的功能; 对风洞装备故障模式分析、基于振动特性分析的诊断和测试技术、基于应变特性分析的诊断和测试技术等关键性问题进行了实验探索与验证。

关键词: Φ1 米高超声速风洞; 自主式保障系统; 基于状态维修

Design of Autonomic Logistics System on Φ1m HWT

Li Jie¹, Zhu Tao¹, Xu Xiaobin¹, Man Yuanchen², Lv Chao¹

(1. China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Corp., Beijing 100041, China)

Abstract: It is put forward to build an autonomic logistics system on Φ1m hypersonic wind tunnel (HWT) for solving the contradiction between the testing task and maintenance of equipments, for increasing the test efficiency and technical capabilities, and for realizing the informational equipment management and the refined quality control. The components, operation mode, task characteristics and problems in current maintenance support of the Φ1m HWT is analyzed in this paper. The autonomic logistics system is designed to confirm the component of the hardware and the function of the software based on the CBM+. Some pivotal problems are discussed and validated through the experiments such as failure mode analyzing, the diagnoses and testing technique based on vibration characteristic analysis and strain characteristic analysis.

Keywords: Φ1m hypersonic wind tunnel; autonomic logistics system; CBM+

0 引言

Φ1 米量级高超声速风洞是我国口径最大、试验能力最强的常规高超声速风洞, 主要承担高超声速武器装备和航天飞行器的地面试验任务, 是我国新型武器装备研制的关键试验设备。以往, 该风洞的维修工作主要采用定期维修和故障维修相结合的模式, 其优点是可以有计划地安排维修活动, 故障原因容易诊断。自 2013 年经过搬迁和配套建设以后, 风洞设备结构的复杂程度大幅增加, 设备智能化水平和技术集成度显著提高。目前, 该风洞的试验任务非常饱满, 需要风洞能长期持续地正常运行, 上述维修模式已明显暴露出维修不足和维修过剩现象, 难以满足对装备维修保障的预见性、及时性、精确性的要求, 装备试修矛盾日益突出。

为了解决风洞装备试修矛盾, 提高风洞参试效率并进一步拓展风洞技术性能, 实现风洞装备管理信息化和过程控制精细化, 满足国家高超声速武器装备和航天飞行器研制中地面试验的需求, 提出了建设 Φ1 米量级高超声速风洞自主式维修保障系统。文章分析了风洞的设备组成、运行方式、试验任务特点以及风洞装备维修保障的现状, 按照“增强的基于状态维修 (CBM+)”的装备保障新模式, 进行了系统架构设计, 确定

了硬件系统组成和软件各模块的功能, 对关键性问题进行了探索性验证。

1 自主式维修保障及其体系架构

自主式维修保障是美国空军在研制 F35 联合攻击战斗机 (JSF) 项目时首先提出并应用的一种新型保障模式^[1-8]。它是一种能自己管理其相关的军事器材、设施、人员、采购、维修和运输的军事实体和系统, 使装备具有自动诊断其维修需求并将这些需求通知地面以便维修人员及时采取保障措施的能力。它是基于状态维修 (CBM)、故障预测与健康管理 (PHM) 的扩展和优化, 具有信息化和自动化的特点, 有很高的保障质量和效率^[3]。

CBM 是指基于内置的传感器或外置的监测设备对设备运行状态进行实时的测试, 从而对其技术状况进行实时评估的一整套维修措施。其宗旨是只有在需要维修的客观证据时才进行维修, 同时保证设备的安全、可靠并降低使用和维修费用。增强的基于状态的维修 (CBM+) 是在 CBM 基础上的发展, 将一些新兴的和改进的维修技术、方法、程序引入到维修实践中, 其更注重状态的监测和故障的诊断。CBM+ 能够把故障消灭在萌芽状态, 计划性更符合实际, 其核心是状态监测、故障诊断和健康预测。

Φ1 米量级高超声速风洞是一座冲吹吸式常规高超声速风洞, 由高压气源和真空系统、蓄热式加热器、喷管、试验段、扩压器、冷却器等组成, 并配套风洞运行控制和监视系

收稿日期: 2015-07-07; 修回日期: 2015-09-14。

作者简介: 李杰 (1979-), 男, 河南范县人, 研究生, 助理研究员, 主要从事高超声速风洞试验和运行控制技术方向的研究。

统、数据采集和处理系统、模型机构系统、纹影系统、加热温控系统、冷却水系统等设备。其中高压气源和真空系统由电动截止阀、气动快速球阀、电液调压阀、液压角式热阀、真空闸板阀等 80 余台套各类阀门以及高压、真空管道和连接法兰组成, 实现风洞的快速启闭和压力温度的精确调控。模型机构由步进电机、涡轮蜗杆以及液压装置驱动, 实现风洞吹风时试验模型的运动控制和姿态调整。风洞各马赫数喷管的出口直径均为 1 m, 最大流量 160 kg/s, 运行时间最长 80 s, 风洞设备要承受较大的冲击载荷和振动, 容易造成设备疲劳而引发故障。

$\Phi 1$ 米量级高超声速风洞自主式维修保障系统选取故障频率较高或设备风险系数较大的 DN250 气动快速球阀、GCD2000 真空闸板阀、DN150 电液调压阀、高压管道弯头、喷管、扩压器、模型机构等关键设备和重点部位作为监测对象。维修保障系统按照 OSA-CBM 标准, 通过 7 个模块实现系统的各项功能, 如图 1 所示。

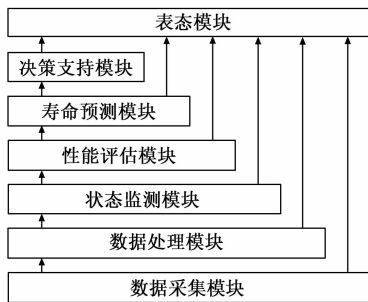


图 1 自主式维修保障系统的体系结构图

从体系架构和逻辑层次上采用面向对象的分布式结构, 自下而上划分为 4 个层次, 即传感器层、数据采集层、业务层和表示层, 如图 2 所示。

传感器层负责完成 DN250 气动快速球阀、模型机构等风洞关键设备和重点部位的振动、应变、位移等技术状态参数的采集和传输, 包括振动、应变、位移、转速、温度等不同类型的传感器。

数据采集层完成对所有传感器输出信号及其他信息的转换处理。根据设备工作方式和传感器输出信号的实际特点, 选择合适的数据采集板卡, 并融合风洞现行主控系统和数据采集系统中已经采集的压力、温度、设备开闭状态信号等必要数据。采集设备按照 Modbus/TCP 协议、OPC 协议等方式实现数据的通讯和交互。

业务层完成系统业务应用层面的工作, 包括数据管理、状态监测、性能评估、寿命预测和决策支持等模块。数据管理模块对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、装备数据库等。状态监测模块通过界面的模型开发和组态, 实现数据结果、统计结果、预测结果以及维修保障的人机交互和终端显示。性能评估模块对采集到的数据进行分析评价, 包括针对设备建立故障模型, 采用故障推理机进行推理, 诊断和定位故障。决策支持模块在性能评估、故障诊断和预测的基础上, 实现与风洞业务流程相结合的多要素综合维修决策, 形成最佳维修策略。

表示层直接体现用户应用, 包括用户接入认证、信息浏览、信息发布、服务定位和维修流程管理等内容。

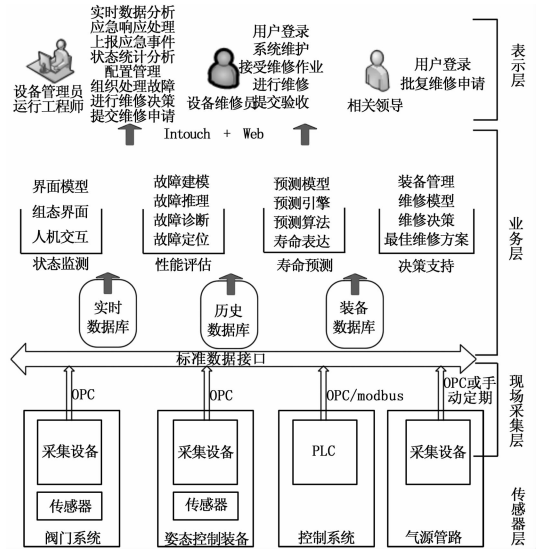


图 2 自主式维修保障系统的系统架构

2 系统硬件设计

$\Phi 1$ 米量级高超声速风洞自主式维修保障系统由硬件和软件两部分组成。硬件设备包括传感器系统、数据采集系统、数据传输网络、服务器系统、终端显控设备和供配电装置等, 如图 3 所示。

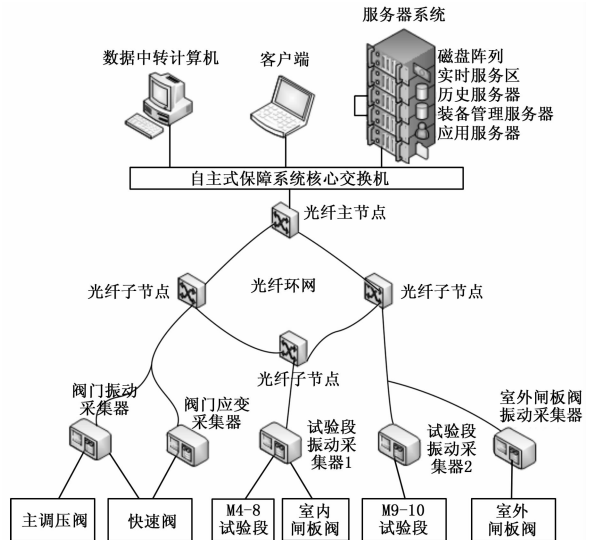


图 3 系统硬件组成图

传感器系统即为分布在关键阀门、模型机构、高压管道弯头等重点部位的各种传感器, 如振动加速度传感器、应变计、温度传感器、位移传感器等, 完成设备状态感知和信号输出。

数据采集系统由多个数据采集设备组成, 每个设备为网络中的一个节点, 完成与之对应的传感器信号的模式转换和调理工作, 并将采集数据经信息网络上上传至服务器系统中。

数据传输网络采用光纤环网将现场数据采集设备连接在一起, 与服务器系统和终端显示系统组成维修保障局域网, 并通过数据中转收发机与风洞现行测控局域网之间连接。在所级科研网中增加装备管理服务器, 支持与科研网中的其他设备互联互通。实现与测控间其他设备的信息互连网络, 如试验管理

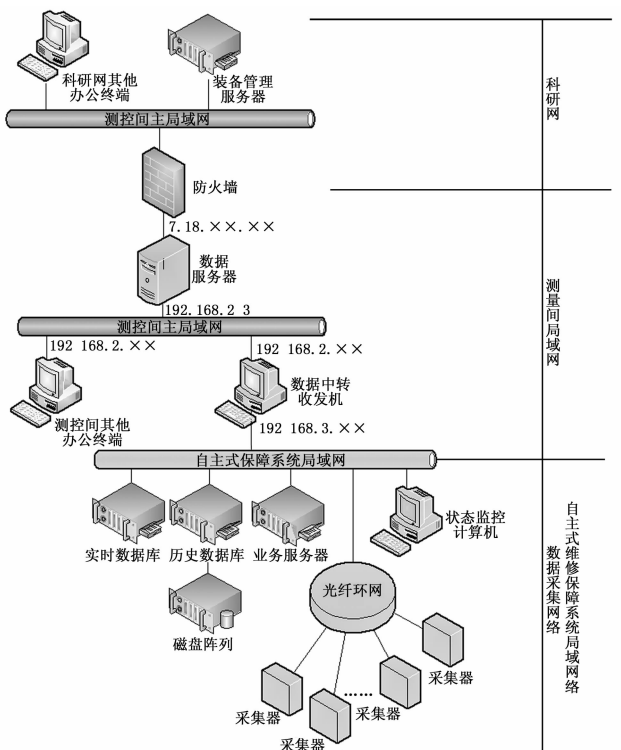


图 4 数据传输网络拓扑图

机、控制系统、测量系统等，交互指令或数据，测控间局域网依赖于三层交换机构建，满足用户数和传输的要求。

服务器系统包括实时数据库服务器、历史数据库服务器、业务数据库服务器、Web 应用服务器、装备管理服务器、磁磁盘阵列、三层交换机、客户端工作站等，为软件功能平台的运行提供物理载体，实现所有数据安全可靠地存储、提取和分析。各服务器之间的控制关系和数据交互关系如图 5 所示。

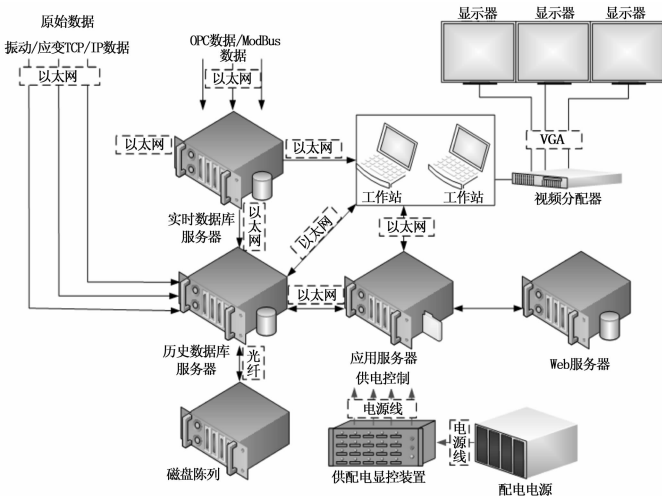


图 5 服务器系统控制关系和数据交互关系示意图

终端监控系统实现各种信息和数据结果在测控间内的集中状态显示和监控。供电系统实现对自主式维修保障系统中各个组成单元的统一安全地供电。

3 系统软件设计

按照 OSA-CBM 开放式体系架构，风洞自主式维修保障系统的工作流程为：前端传感器和数据采集设备完成风洞关键部位的状态监测，通过数据通讯协议将数据传输给实时数据库，由实时数据库完成风洞运行状态的实时收集、存储和发布显示；通过对实时数据库的访问和整理，得到历史数据库，在故障诊断和故障预测方法的支持下，完成设备的故障诊断和预测，形成故障设备的维修需求信息；在装备数据库中的人力资源、备品备件、试验计划等信息的支持下，形成最佳维修策略；在装备管理服务器中完成维修流程的上报、审批、组织实施和总结验收。

按照“状态监测—故障诊断—性能评估—动态管理”的模式，系统软件平台包括数据中转管理软件包、技术状态管理软件包、装备信息化管理软件包、数据库管理软件包等 4 个软件包和实时数据库、历史数据库、装备数据库、专家知识库、系统信息库、维修决策库等 6 个数据库，如图 6 所示。

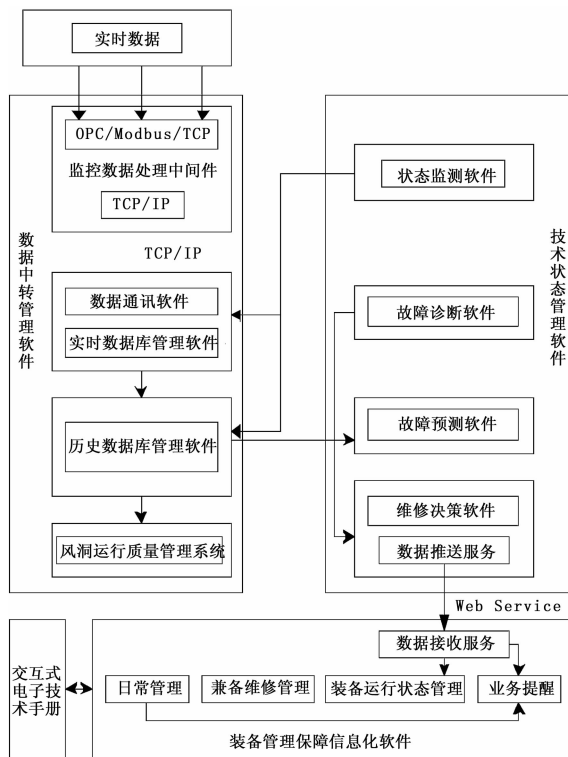


图 6 系统软件组成及工作原理

数据中转管理软件负责设备状态采集软件的配置和维护，实现 OPC、ModBus 等数据协议到自主式维修保障系统数据协议的转换，负责数据的传输和数据库的保存，进行实时数据的网络分发，完成历史数据的压缩存储和查询处理等工作。

状态监测软件负责风洞试验设备运行状态的在线监测与显示，对监测信息进行初步诊断与分析，得到设备的早期预警或报警信息，实现风洞运行的全过程、全自动的网络化健康状态监测，实现风洞试验设备的故障诊断结论的实时显示，并能够将所有状态数据保存到历史数据库中。

故障诊断和故障预测软件采用开放式、迭代特征的平台框架，能够对专家系统知识库进行管理，实现基于规则和案例的

诊断方法, 可以根据历史数据建立故障模型和预测模型, 具备可扩展的诊断、预测引擎, 支持预测算法的动态调整与更换, 具有实时故障诊断、定位、预测和报警能力。

装备保障信息化管理软件完成装备的日常管理工作, 可实现装备全寿命周期的状态管理和维护, 负责装备维护保养、仪器仪表计量检定的计划制定、自动提醒和作业记录的全过程管理, 实现自主式装备维修管理的业务流程, 网络化完成决策生成、上报、审批、组织实施和检查验收, 具备装备运行状态综合评价以及管理查询功能。

4 关键性问题和探索性试验

$\Phi 1$ 米量级高超声速风洞自主式维修保障系统设计中的关键性问题主要有风洞装备故障模式分析、基于振动特性分析的诊断和预测技术、基于应变特性分析的诊断和预测技术等。

4.1 风洞装备故障模式分析

$\Phi 1$ 米量级高超声速风洞由风洞本体、高压气源和真空系统、加热器系统、冷却器系统等九个分系统组成, 包含 280 余台套单体设备和部件。各种设备因性能原理、运行环境和工作方式的不同而具有不同的故障模式。在状态监测方式和传感器选型时, 需要着重分析主要监测对象的故障机理, 判断故障的产生原因和发展过程, 采用适合的传感器技术和信号分析技术, 提取状态特征参数, 以达到实时判断装备运行性能和故障恶劣程度的目的。

4.2 基于振动特性分析的诊断和测试技术

开展机械或机电系统诊断分析需要丰富的专家经验, 采用频谱分析、相关分析等, 提取包含在振动信号中的故障信息。风洞系统的结构复杂, 振动特性具有相互关联性, 当某一位置发生异常振动时, 不可避免会对周围的机械结构带来影响; 此外, 由于本身特性差异, 故障的产生还与不同设备对振动烈度的耐受能力有关。以上诸多因素为本项目中进行振动信号的自动分析、故障特征提取、故障诊断和定位带来困难, 是需要解决的关键技术之一。为了解决这个问题, 建立风洞中不同设备的振动评估阈值体系, 发现潜在性故障并开展故障预测工作, 对真空闸板阀、高压管道弯头部、调压阀、模型机构底座和弯刀等设备和部位进行了振动测试的摸底试验。

图 7 给出测量真空闸板阀在开闭动作时振动信号的传感器布置示意图, 在电机外壳、连接套、阀体顶部、阀体侧面和阀体前面分布安装振动加速度传感器。连接套部位的振动传感器 x 、 y 、 Z 向的频域信号如图 8 所示。由图可知, 频谱主要集中在 2.5 kHz 以下, 常见峰值出现在 1.75 kHz。 Y 向与 x 向相似, z 方向的振动稳定性不如 x 和 y 方向, 可知在运行期间 z 方向的结构配合可能会有问题。对 z 向 2.5~8.0 kHz 之间的信号进行识别, 可能代表着设备的某种异常。

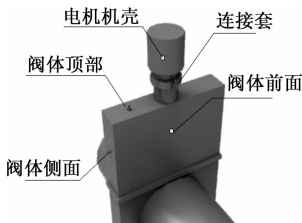


图 7 真空闸板阀振动加速度传感器安装布置图

4.3 基于应变特性分析的诊断和测试技术

由于应变测试能够准确检测到设备的运行过程, 利用这一特点可以对有规律运行的设备进行技术状态识别。气动快速球阀是气缸驱动阀杆和球阀转动完成开启和关闭的。随着阀门使用次数的增加, 球阀与阀座以及阀杆与连接套之间由于结构磨损呈现出摩擦力增大的趋势, 会导致阀门工作时应力增加。因此, 通过测量阀杆或连接套的应力大小能够反映出阀门内部系统的摩擦情况, 进行阀门故障诊断和健康预测。

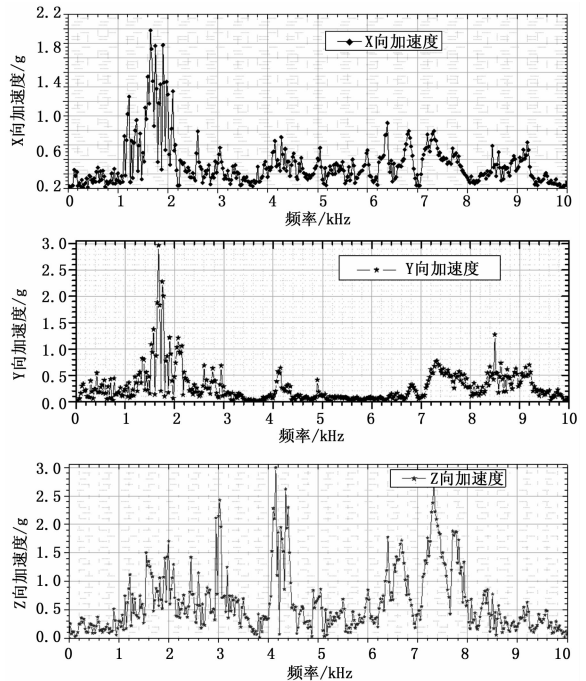


图 8 连接套部位振动传感器频域信号

图 9 给出气动快速球阀应变计安装布置图, 在阀门开启时的应变信号和主应力曲线如图 10 所示。

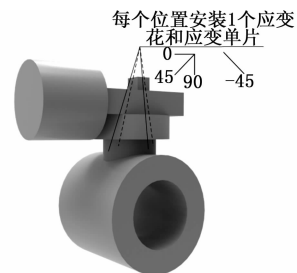


图 9 气动快速球阀应变计安装布置图

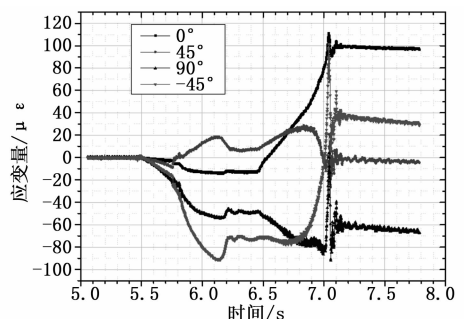


图 10 气动快速球阀开启时应变计信号和主应力曲线