

面向风洞群的装备自主式维修保障系统框架设计与实现

顾 艺¹, 车兵辉¹, 曹 宇², 王新林¹, 王仙勇², 郑 磊²

(1. 中国空气动力研究与发展中心低速所, 四川绵阳 622762; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 基于 CBM 的风洞自主式维修保障系统在多座风洞中已经得到成功应用, 在夯实基础、积累成果的前提下, 着眼于实现适应多座风洞联合保障的架构, 应用虚拟化、云计算、光纤通讯、故障诊断、故障预测、统一设备编码、IETM 等多项先进技术, 设计并研制了一套面向风洞群的开放式装备自主维修保障系统, 实现了各风洞在自主式维修保障功能上独立和在存储及计算资源上共享的有机结合, 进一步提高了装备保障效率, 有效节约了物理资源, 其开放性使得系统随时可以根据需要扩充虚拟集群, 为集群型装备的自主式维修保障系统建设提供了先进的技术参考方案。

关键词: 风洞群; 装备保障; 自主式维修; 虚拟化技术

Framework Design and Implementation of ALMSS For Wind Tunnel Group

Gu Yi¹, Che Binhui¹, Cao Yu², Wang Xinlin¹, Wang Xianyong², Zheng Lei²

(1. Low Speed Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 622762, China;

2. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co. LTD, Beijing 100041, China)

Abstract: Autonomous logistics maintenance support system (ALMSS) based on CBM has been applied successfully in several wind tunnels. For implementing the framework which adapts wind tunnel group's co-support, it has designed and developed an open-type ALMSS on the basis of accumulating experience and achievement, which has applied lots of advanced technology such as virtualization, cloud computing, optical fibre communication, fault diagnosis, failure prediction, unified equipment coding, IETM etc. The open-type ALMSS has realized organic combination between independence of function of ALMSS and share of resource of memory and calculation. It has improved the efficiency of equipment support further and has saved the physical resource effectively. Because of the openness, the system can extend the virtual cluster at any time according to demand. This framework has offered an advanced technology scheme for developing ALMSS for cluster-type equipment.

Keywords: wind tunnel group; equipment support; autonomous maintenance; virtualization technology

0 引言

基于 CBM (Condition Based Maintenance, 状态维修) 的装备维修保障模式 (或称健康管理模式), 其主旨在于实现装备维修由传统的基于故障的事后维修或基于时间周期的计划维修, 向基于状态的预测性维修的转变^[1]。此概念一经提出, 迅速引起各行业领域对于所属大型装备维修保障模式的革新。基于 CBM 的风洞自主式维修保障系统在我国多座风洞中已经得到成功应用, 如 4 米×3 米风洞、2.4 米跨声速风洞、Φ1 米高超声速风洞等^[2-4]。通过整体设计, 以基于计算机技术的在线监测和故障诊断技术为关键途径, 建立了“状态监测—故障诊断—性能评估—动态管理”的装备运行管理新模式, 切实提高了装备管理保障的信息化、实时化、智能化、规范化程度, 增强了装备维修的预见性, 提高了装备保障效率。

由于越来越多的风洞装备加入自主式维修保障系统建设行列, 针对每一座风洞, 从零开始建设一套独立运行的

自主保障软、硬件系统, 显然存在项目重复建设、资源冗余浪费的问题; 同时, 由于不同风洞的性能、功用不同, 所关注的监测参量及故障预测诊断的手段方法有很大不同, 因此, 不同风洞的自主保障系统也无法复制照搬。在 Φ3.2 米风洞自主式维修保障系统建设中, 着眼于实现适应多座风洞联合保障的架构, 从手段提升、能力提升、范围扩大的角度, 对自主式维修保障系统的软硬件组成、功能性能及技术指标等进行优化, 设计并研制了一套面向风洞群的开放式装备自主式维修保障系统。

1 总体设计

面向风洞群的装备自主式维修保障系统, 针对系统内每一座风洞的动力控制系统、模型支撑系统、测量控制系统等关键子系统, 承担着状态监测、技术性能评估、故障诊断与预测、智慧维修决策、装备管理等综合保障任务。

1.1 系统设计思想

1) 沿袭基于 CBM 的装备维修保障模式, 以设备的状态信息驱动业务管理进程, 提高维修保障过程的信息化、智能化水平;

2) 按照 OSA-CBM+体系结构七个功能层次分布^[5], 根据风洞应用实际需求, 抽取其中的数据采集层、数据层、

收稿日期: 2018-06-14; 修回日期: 2018-08-07。

作者简介: 顾 艺(1975-), 女, 江西南昌人, 高级工程师, 主要从事低速风洞试验测量与控制方向的研究工作。

业务层、管理层等 4 个层次进行系统架构，定义不同层次间的数据接口和通讯协议；

3) 采用高性能物理服务器和虚拟化软件平台，在共享物理资源的基础上，应用虚拟化技术实现装备物联网与云计算系统的建设及风洞群的综合管理；

4) 在深入研究各类设备故障机理的基础上，丰富故障诊断预测的方法手段，开放诊断预测规则算法的接口，提高故障诊断智能化、自动化能力，减少虚警发生，提高故障预测与诊断的精准度；

5) 应用 IETM (交互式电子技术手册) 技术，提高装备技术资料在维修保障中的贡献度，增加装备现场管理功能，构建包含装备管理业务的增强型交互式电子技术手册；

6) 面向风洞群，构建顶层统一的装备管理业务平台，实现对装备基本信息、技术状态、维护保养、实力库存等日常统一管理，采用信息化手段实现装备的三化管理；

7) 大力推行软件国产化设计，增强自有知识产权比重，响应国家关于自主可控的能力要求。

1.2 系统架构

风洞自主式维修保障系统的保障对象主要是动力控制系统、模型支撑系统、测量控制系统等子系统监控关键重点部位所涉及到的温度、湿度、振动、转速、电压、电流等物理量，由数据采集层、数据层、业务层和管理层组成的系统架构如图 1 所示。



图 1 系统架构

数据采集层通过部署针对性的传感器及对应的采集设备完成风洞现场各类状态参量的信息采集；同时，IETM 终端能够通过拍照、录入等手段收集必要的现场数据，作为对在线数据采集的有效补充。通过现场光纤网络和风洞测控局域网传输，实现所有采集数据的可靠传输。

数据层通过虚拟化服务平台构建系统的数据存储机制，即应用虚拟化技术将物理服务器虚拟为多台相对独立的虚拟化服务器，在各风洞对应的虚拟化服务器上存储各自的实时和历史数据库，装备管理数据库存储在独立的专用物

理服务器上，共同为业务层应用提供数据支持。

业务层对经网络上传的数据开展分析、计算和判断，具有实时监测和显示报警的功能，根据状态进行应急响应及故障的建模、推理、定位、预测，并智能化地提供维修决策。

管理层直接体现用户应用，实现对装备的基本信息、技术状态、维护保养、实力、库存等装备日常管理等业务工作。

1.3 系统组成

系统从功能上划分为 4 个部分：一是面向各风洞的状态在线监测系统，包括布置于各风洞各装备底层各监测部位的传感器和数采系统，以及布置于各风洞现场的状态监控管理平台；二是增强型 IETM，包括管理、创编、运行 3 个平台；三是与装管业务配套的所有风洞统一使用的装备管理信息系统；四是面向风洞群共用的服务器和网络资源平台。系统组成如图 2 所示。

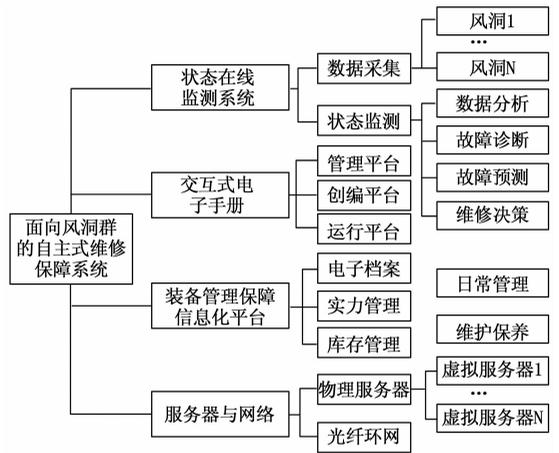


图 2 系统组成

2 硬件实现

2.1 硬件拓扑结构

该系统是建立在多座风洞之上，具备标准化、开放式、信息化和智能化能力的独立系统。其硬件系统组成和拓扑结构如图 3 所示。

2.2 前端传感器和数采系统

传感器系统是数据监测的最前端，负责装备状态数据的感知。传感器分布在风洞各子系统、各部

段、各设备中，实时监测自主保障系统所关注的重要参量。针对风洞的动力系统，其主要故障现象是轴承摩擦、不对中、不平衡、结构松动等。为监测动力系统的早期故障，在风洞电机及轴承上部署了多个振动、温度、转速传感器；针对模型支撑机构，主要故障现象是结构松动、齿轮损伤、轴承对中不良等，为监测支撑机构的早期故障，在驱动电机、减速机、齿轮副等处部署了振动、温度、转速传感器；针对模型姿态控制系统，除通过 OPC 方式共享控制软件已有监测参量，还对伺服系统部署了电压、电流传感器，以对姿态控制系统进行全面监测。

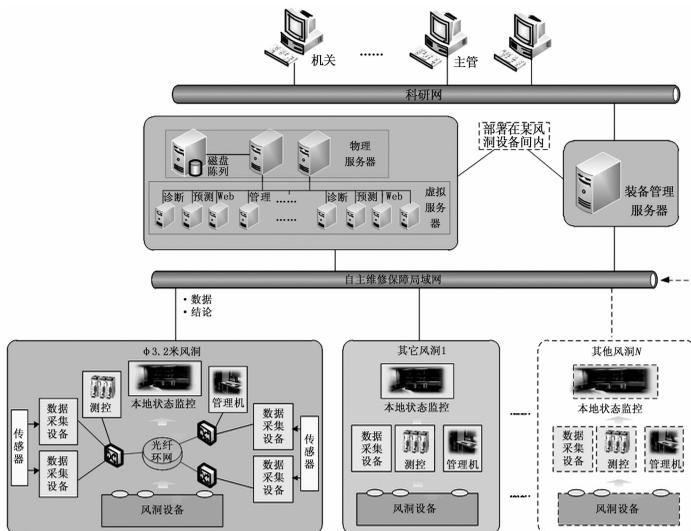


图 3 系统硬件拓扑结构

数采系统由多个数据采集设备组成, 包括振动信号采集设备和面向缓变量的嵌入式采集设备。通过配置处理器和采集板卡, 完成振动、转速、温度、电流、电压等信号的采集和信号特征值的初步提取, 以 OPC、Modbus、TCP/IP 等协议方式传输到实时数据库中。

2.3 网络系统

为构建面向多风洞的自主保障系统网络, 在每个风洞部署了三类交换机。第一类是风洞交换机, 进行风洞与办公科研网的数据传输; 第二类是自主保障系统交换机, 进行自主保障系统内各类数据传输, 与现有的风洞测控网交换机平行; 第三类是针对前端数采设备搭建的光纤环网交换机, 因传感器分布零散, 在相对集中的片区布置环网交换机接入光纤环网, 通过设定主节点和子节点并在节点之间运行环网协议, 可大幅提高数据传输的可靠性和稳定性。

风洞现场自主保障网络与现有测控网统一设计, 统一分配地址, 实现有机融合, 以提高系统的易用性和网络传输的可靠性。

2.4 虚拟计算资源平台

IaaS (Infrastructure as a Service, 基础设施即服务) 是通过服务器、存储设备、网络及其它硬件资源的配合使用, 利用虚拟化技术进行整合, 提供数据存储、容灾备份及运行环境等基础服务, 实现计算、存储和网络资源的共享、高效利用和动态分配, 并支持业务应用在资源之间的快速迁移的架构^[6]。在本系统中, 应用了这一架构, 采用两台高性能浪潮服务器作为中心物理服务器, 采用磁盘阵列对数据进行存储。基于虚拟化平台软件浪潮云海 OS 3.0, 将两台物理服务器虚拟为多台相对独立的虚拟服务器, 应用虚拟网卡技术, 为每一台虚拟服务器分配网络地址, 从而构建了一个虚拟化的服务器集群, 并可随时根据需要进行虚拟集群的扩充构建。

2.5 显示控制终端

采用大屏幕触控一体机作为系统的显示控制终端, 部

署在各风洞试验现场, 接入自主保障系统网络, 实时接收显示该风洞各类数据信息、故障诊断预测信息、状态报警信息等, 并可进行故障报警的信息处理操作: 对虚警信息选择忽略操作; 对疑似的故障信息可根据其相关机理选择适用的故障分析方法, 进行实时或离线的分析诊断处理; 对确认的故障信息, 触发维修辅助决策, 形成维修意见并上报。触控一体机自身运行操作系统和组态软件, 支持触摸控制, 人机交互性好, 用户操作简洁明了。

2.6 IETM 工作站及移动运行终端

IETM 系统的管理和创编平台, 运行在一台独立的 IETM 创编工作站上, IETM 手册在工作站上经创编完成后, 发布成为一个数据包, 运行平台对数据包进行解压加载即可实现手册的浏览显示。应用便携式平板电脑作为 IETM 运行平台的载体, 在风洞现场游走移动时随身携带, 一方面为设备的维护维修、故障排查处理等提供相关的技术资料图纸, 另一方面为装备的日常检查维护、故障状况上报等提供现场记录功能, 在接入自主保障系统网络时进行装管文档的同步上传或下载。

3 软件组成与部署

3.1 软件组成

根据系统的架构和组成, 配套软件主要是 3 个大部分: 装备的技术状态监控管理系统、装备管理信息系统和 IETM 制作运行系统。软件的运行模式和相互之间的关联如图 4 所示。

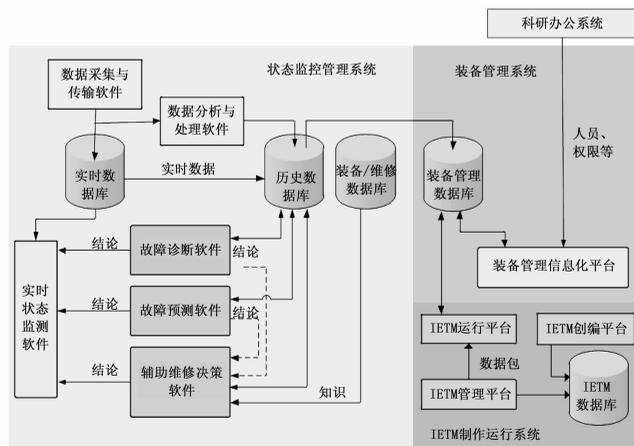


图 4 系统软件组成与结构关系

3.2 状态监控管理系统

分布在风洞现场的各个数据采集设备, 由前端数采传输软件完成数据采集、预处理和传输到实时数据库的操作, 同时由数据分析与处理软件提取更为丰富的有价值信息发送到历史数据库, 基于历史数据库的全部信息和相应知识, 由故障诊断软件和故障预测软件对设备性能进行评定, 发现故障问题及时报警, 发现潜在性问题及时预警, 同时触发维修辅助决策软件, 调用装备信息和维修知识, 形成维

修意见。

实时状态监测软件部署在显示控制终端,以 InTouch 组态软件^[7]为基础,以 Wonderware 平台高可靠性的 DAServer 实时采集软件构建数据采集和传输信道,支持海量数据实时显示和高频刷新,支持快速响应与安全控制,可编写自定义算法对数据进行分析 and 解释,接口组件丰富,显示效果直观。实时状态监测软件同时还将数据分发给故障诊断和预测模块,并将故障诊断、预测结果及维修决策软件推送的维修意见等结论信息予以显示。

3.3 装备管理信息系统

装备信息数据库部署在一台独立的物理服务器上,采用双网卡的方式实现装备管理信息系统在自主保障系统和科研办公系统的同时运行。基于 B/S 模式构建了能够管理所有风洞所属装备的全生命周期的信息化平台,以装备的采购、入库、使用、维护、维修、计量、日常检查、综合统计等业务流程为基础,牵引形成由事件驱动的动态可控的信息系统。

3.4 IETM 制作运行平台

将 GJB6600 作为 IETM 系统开发标准体系,采用 B/S、C/S 结合的体系结构,由管理平台(C/S)、创编平台(C/S)和运行平台(B/S)组成风洞 IETM 软件系统^[8],3 个软件既互相独立,又互相联系。管理平台主要负责进行数据和 IETM 制作流程的管理,包括 IETM 手册项目的管理、数据模块的管理、编码管理以及手册的发布出版等;创编平台完成 GJB6600 中定义的八类数据模块^[9]的编辑制作,存储于 IETM 公共源数据库中供调用;运行平台对管理平台发布出版的手册数据包进行解压及载入,利用通用浏览器进行数据信息的访问,包含的定制化装备管理功能可进行现场装备技术状态(数据或照片)的记录和相关的备品备件查询,并与装备管理数据库实现同步数据交互。

由于风洞系统所属装备繁多,为了提高现场装管工作效率,引入了二维码技术。将设备在 IETM 系统中的编码,以二维码的形式在设备所在现场展现。通过运行平台扫描二维码,实现设备在运行平台中的快速准确定位,并进行相关数据的调用。

4 关键技术及创新点

本系统的核心在于面向集群型装备构建开放式的自主维修综合保障的架构,重点要解决资源共享及优化分配、故障诊断预测算法的多适用性和多装备管理现场与办公平台的信息实时同步等问题。

4.1 资源一体化管理

基于虚拟化技术构建了面向风洞群的集中式服务系统,实现了中心服务系统的异构资源一体化管理,支持按需进行动态配置,大大提升了系统平台的灵活性、扩展性、可靠性。

虚拟资源平台的架构如图 5 所示,分为 4 个层次:虚拟层、应用层、表示层、运维层。虚拟层构建在物理硬件之上,在功能上主要是完成物理资源的池化与重新组合。基于 Hypervisor 实现计算资源的池化,基于分布式存储/集中

式存储实现存储资源的池化,基于虚拟交换机和虚拟路由器实现网络资源的池化,从而形成了统一的计算池、存储池和网络池,再通过按需组合构建虚拟主机和虚拟机群对外提供服务。在虚拟层之上构建应用层,实现高级的业务逻辑,表示层用于对外交互,运维层进行系统的安装、部署和安全管理等。

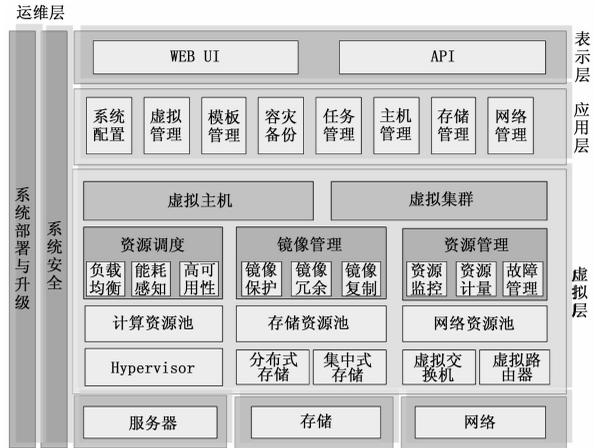


图 5 虚拟资源平台层次架构

由于各个风洞的数据源和保障对象不同,数据分析、故障诊断和预测软件很难进行归一化处理,因此,在实际应用中,按照风洞来划分虚拟服务器的功能和软件应用,使得各风洞的自主保障系统在功能上各自独立,在存储计算资源上共享,并可随时进行风洞集群的扩充或资源之间的迁移,构建了一个开放式的自主保障系统框架。

4.2 复杂故障诊断方法

结合风洞试验与装备特性,采用专家系统诊断、案例诊断和定制算法诊断相结合的方法,并以标准化的访问接口支持增加新的诊断模式,实现对试验装备复杂故障的诊断定位能力。

将技术领域专家的经验知识表示为 IF<条件> THEN <结论>的规则形式,按照规则对实时接收到的监测数据进行判断,是目前最成熟稳定、应用最广的专家系统诊断方法,优点是易于设计集成,执行效率高,适应性广,缺点是灵活性差,如果专家知识发生偏颇,将导致错误的诊断结论^[10]。在工程实践中,设备的历史故障记录对当前发生的故障的诊断有着较高的贡献价值,在发生相似故障现象的情况下,采用解决过去问题的方案来解决现有问题,往往一击而中。案例诊断方法提供规范的案例描述框架,包括基本信息、故障现象、原因分析、解决对策、效果评价等,将历史故障及解决方法完整地描述出来,同时提供高效多元的检索技术,包括独立搜索引擎、元搜索引擎、联想功能等,实现当前故障相关案例的快速准确查找。基于定制算法的故障诊断重点应用了内存的动态申请管理和多种算法的兼容性并行调用等技术,使之满足不同类型算法提出的不同需求。风洞故障主要发生在轴承类部件和齿轮类部件。为此,设计了基于频率识别及阶比分析的轴类

部件故障诊断、基于轴心轨迹分析的轴类部件不对中诊断、基于 HHT 的轴承损伤诊断、基于共振解调算法的齿轮类部件故障诊断等多种算法, 作为对专家诊断和案例诊断的有效补充, 三管齐下, 共同保障复杂故障的诊断。

4.3 增强型 IETM

本系统所研制的 IETM 系统, 除了严格按照 GJB6600 标准体系创作 IETM 手册, 实现风洞装备技术资料电子化、规范化、集中化, 还专门增加了装备现场管理的业务功能, 主要体现在日常班组检查、维护保养、故障及维修情况的现场记录和备品备件信息的现场查询等方面, 在现场即可实现与服务于所有装备的管理办公平台的信息同步。与典型 IETM 系统的纯技术支持相比, 增加提供了业务支持, 提升了装备现场管理的措施手段, 提高了装管工作效率和信息化、智能化程度, 实现了多装备现场工作和统一办公平台的信息实时同步。

5 实验结果与分析

5.1 实验内容与结果

由于产生实际故障对风洞系统造成的损伤修复代价较高, 因此在实验中通过故障注入的方式引发典型应用案例, 来验证系统的功能性和业务流程的正确性。具体过程如下: 将自主保障系统所监测的某风洞某运动机构的电机转速设定为 8rpm, 同时将该电机的温度设定为 50℃, 根据该运动机构的专家系统诊断规则之一: 电机转速 < 10rpm & 电机温度 > 40℃, 状态在线监测系统判断该电机可能发生堵转, 在显示控制终端的主界面发出报警信号。现场工作人员点开报警信号后, 可选择“忽略/确认/修改”的操作, “忽略”用于认定为虚假警报的情况, “修改”用于故障诊断规则不合适的情况, 可立即对这一规则进行修改, “确认”为真实故障。自主保障系统按照专家系统诊断结论, 自动生成“维修意见单”, 在选择机关业务科相关人员后, 推送至装备管理信息系统, 同时在办公系统发起维修业务审批流程。审批结束后, 维修人员在风洞现场通过 IETM 终端下载维修任务单领受维修任务, 同时利用 IETM 所带资料辅助维修及查找备品备件信息。维修结束后, 在 IETM 终端填写维修记录, 确认现场维修完成, 并上传到装备管理信息系统, 进入维修验收流程。设备负责人在装备管理信息系统的办公平台端补充维修总结报告、实际产生费用等信息后, 提交机关业务科, 经同意验收后, 结束维修流程。此后, 在装备管理信息系统中点击“维修记录”可查看到这一维修项目。

在上述实验中, 系统主要功能均正常实现, 业务流程正确完整, 基本达到了系统研制目标。

5.2 系统效能分析

从定性角度来说, 基于 CBM 的自主式维修保障系统, 在装备使用过程中的状态监测、故障诊断、故障预测、维修管理、运行安全性、维修效率、维修经济性和及时性等方面, 较传统的维修方式, 均有阶跃性的效能提升, 如: 可全面、实时、连续地进行系统状态数据的记录, 实现了

快捷查询和随时回放; 可进行在线故障诊断、预测和报警, 装备运行安全性得到提升; 维修管理智能化程度和技术资料对维修的贡献程度显著提高, 维修主动及时, 装备保障能力强、效率高。

从应用效果来说, 面向风洞群的自主式维修保障系统的成效具体体现在以下 3 个方面: 一是解决了基础硬件平台资源管理统一的问题, 平台灵活性大大增强, 同时也避免了重复建设和资源过度冗余浪费的问题; 二是解决了维修资源管理统一的问题, 利用 IETM 终端将装备管理信息的办公平台端和多个风洞现场端联系起来, 确保装备信息的实时一致性, 维修业务实现了闭环管理; 三是解决了故障诊断定制算法开放化管理的问题, 在用户层面允许以标准接口增加或修改算法, 提高了定制算法在多风洞不同装备的故障诊断上的适应性。

6 总结

风洞自主式维修保障系统自建设以来, 通过经验技术的积累, 不断创新思路, 优化体系架构, 引入机器智慧先进技术, 从针对单座风洞的较为单纯的信息化系统, 发展为面向风洞集群的独立自主与高度集成有机结合的综合智能系统。开放化设计使得系统能力可以得到不断地扩充和增长, 通过积累风洞运行过程中的大量数据和知识, 不断更新优化已有的规则结构, 为维修保障提供更为准确的技术支持。大力推行软件国产化自主化, 采用面向使用者而不是面向开发者的应用模式, 降低使用难度, 提升使用体验好感度。面向风洞群的自主式维修保障系统设计, 为集群型装备的自主维修保障系统建设提供了先进的技术参考方案。

参考文献:

- [1] 李志国, 美军武器装备维修与保障现状及其启示 [J]. 国防科技, 2014, 12 (6): 83-86.
- [2] 马国辉, 4 米×3 米风洞自主式维修保障系统信息化平台设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
- [3] 刘龙兵, 郁文山等, 基于 OPC 的状态监测系统在 2.4 m 风洞的设计与实现 [J]. 自动化与仪器仪表, 2017 (4): 62-64.
- [4] 李 杰, 朱 涛, 等, Φ1 米高超声速风洞自主式维修保障系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016 (2): 126-129.
- [5] 吴高杰, 基于 OSA-CBM 的设备健康管理体系统结构研究 [J]. 价值工程, 2017 (1): 75-77.
- [6] 张 力, 云计算 IaaS 实例研究综述 [J]. 软件导刊, 2017 (8): 208-210.
- [7] 宋 元, 吴勇航, 等, 基于 InTouch 的风洞自主式维修保障系统监控软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015 (12): 4229-4232.
- [8] 顾 艺, 廖亚军, 等, 基于 GJB6600 的风洞 IETM 系统 [J]. 兵工自动化, 2016 (7): 57-61.
- [9] 中国人民解放军总装备部, GJB6600: 装备交互式电子技术手册 [S]. 中华人民共和国国家军用标准, 2008-2009.
- [10] 刘 玲, 张 西, 等, 故障诊断技术的现状与发展 [J]. 理论与算法, 2016 (2): 62-63.