

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107611

飞机飞行安全综合监控与支持系统设计*

崔展博^{1,2} 景博¹ 焦晓璇¹ 潘晋新¹ 王生龙¹ 张艺檬²

(1.空军工程大学航空工程学院 西安 710038; 2.石家庄海山实业发展总公司技术中心 石家庄 050208)

摘要:针对飞机动态采集集成度高、时序模块故障波动无序,幅度大,伪周期性等难以实时故障诊断的问题,借助飞测试性验证综合平台为仿真平台,建立基于量子神经网络和趋势推演的自修正安全预警模型,设计了一种适应多机型的实时飞行安全监控系统,分别采用9种不同功能模式进行对比分析,仿真效果拟选用3种评价准则进行综合分析,仿真结果表明本文提出的飞行安全综合监控系统无论输出精度(误差均低于10%),还是预测效果的稳定性都优于市场民用FDMS系统。

关键词: 动态采集;实时监控和决策;故障诊断;采集与综合处理;波动无序;测试性验证

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Comprehensive monitoring and support system design of
airplane flight safetyCui Zhanbo^{1,2} Jing Bo¹ Jiao Xiaoxuan¹ Pan Jinxin¹ Wang Shenglong¹ Zhang Yimeng²

(1. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Technical Center, Shijiazhuang Haishan Industrial Development Corporation, Shijiazhuang 050208, China)

Abstract: Aimed at the problem of real-time fault diagnosis of the aircraft dynamic acquisition integration, timing module fault fluctuations, and the aid of flying testivity verification integrated platforms, based on quantum neural network and trend the self-correction safety warning model designed a real-time flight safety monitoring system that adapts to a multi-machine type, which uses nine different functional modes to compare analysis. Simulation effects are integrated with three evaluation criteria, and the simulation results show this article. Flight safety integrated monitoring systems regardless of output accuracy (less than 10% of the error), or the stability of the prediction effect is superior to the market civilian FDMS system.

Keywords: dynamic acquisition; real-time monitoring and decision; fault diagnosis; collection and comprehensive processing; fluctuations; testic verification

0 引言

国外大型航空航天公司飞行安全综合监控技术集成上进行了广泛的尝试,并成功研制了一系列的产品案例,获得了一定的经济效益,飞行安全综合监控已成为国外新一代武器装备研制和实现自主式保障的一项核心技术。国内在飞行安全综合监控技术研究上起步较晚,目前主要研究方向仍集中关注在算法模型仿真验证上尝试,穆腾飞等^[1]学者基于现有理论知识与先前工程经验创新性地提出一套民用飞机健康管理策略,孙侠生等^[2]国内联合研究团队在飞机复合材料结构健康监测技术研究方面的研究进展,冯维

超^[3]基于机载振动监测系统的直升机飞行状态识别方法,但是具体功能模块仍不完善,功能交联逻辑不够清晰,距离生成仍具有一定的距离,沈意平等^[4]学者提出将该系统应用于曲面铝板损伤监测模拟实验,验证了该系统测试信号的有效性和损伤定位结果的准确性,方旭等^[5]学者提出飞机结构健康监测系统数据处理及在线应用,但因系统体系架构标准的缺失^[6],在系统搭建的过程中存在盲目性与片面性。此外由于航空装备的工作环境恶劣^[7],导致其故障诊断与预测容易受到外界因素的影响^[8],造成故障数据可靠程度不高^[9]、诊断预测的准确性实时性低、测试诊断费用高等问题。目前国外同类系统最具代表性^[10]的为广泛装

收稿日期:2021-08-16

* 基金项目:“十三五”装备预研共用技术和领域基金(41402010102)、陕西省自然科学基金(2017JQ6034)、军委科技委创新特区项目(JKJW2020701)资助

备在 F-15、F-18、F-22、幻影-2000、B-2 以及民航军民机上的飞行数据管理系统(FDMS)^[11]。FDMS 通过采集记录机上航电总线数据,并通过地空数据链系统(ACARS)传输到地面,从而实现军民机单机特性、发动机状态监控,操纵质量评估和航线安全引导等功能。

国内学者在飞行安全综合监控平台的研究上通常以得到健康状态数据为目标,孙学富等^[12]针对军民机研制生产过程中为试飞验证而设计的测试环境,以某型飞机监测系统为范例,提出了大跨度监控台设计实现、监控台和机柜整合设计,忽略了系统的运行效率与架构合理性,没有将智能化时代最新科技研究成果运用在平台结构优化上,制约了系统的应用与推广进程。因此,开发涵盖飞行安全综合监控技术全流程的、架构合理的、通用化、高性能机载设备 PHM 开发平台对于推广飞行安全综合监控技术应用具有重要意义。国内“十三五”期间,FDMS 相关技术在各个渠道获得了高度的关注和快速的研究发展,一大批预研、基金课题的支持以及航空航天领域型号的拓展,为 FDMS 技术从理念、方法向技术、应用的转化提供了直接的推动力。然而必须承认,国内虽然在一大批型号中将 FDMS 技术作为重点发展的一环,但前期的研究和技术攻关大都停留在顶层体系框架设计、FDMS 算法、仿真验证等层面,尚有多项关键技术亟待突破,距离实际应用尚存较大距离,技术成熟度较低^[13]。一方面,验证和评估工作需要兼顾现有基础储备以及验证未来平台演进和发展的空间;另一方面,诸如 FDMS 算法的算法精度、准确度、稳定性、鲁棒性等,需要建立科学、规范的验证和评估体系。

国内在飞机飞行状态监控和飞行数据处理方面,使用最为普遍的方法是利用飞行后卸载和分析飞参数据,重现空中飞行过程^[14],存在时间滞后性,且只能对飞行状态进行事后监控分析,不具备飞行安全信息综合监控、故障实时诊断^[15]、危险飞行状态预警和特情辅助决策等功能,无法满足全时域飞行安全监控与辅助支持需求。本文设计的飞行安全综合监控与支持系统是一种适应多机型的全时域多层次的安全监控与支持平台,在总体技术水平上与国外 FDMS 系统相当,尤其是使用数据深度挖掘应用方面优势明显,相比 FDMS 系统增加了智能专家判读、故障实时告警和特情处置等功能,适用范围更加广泛,对确保飞机飞行安全,提升航空维修效能具有重要作用。

1 飞行安全综合监控与支持系统设计

1.1 飞行安全综合监控与支持系统架构

飞行安全综合监控与支持系统开发平台系统功能通过数据传递实现相应的系统能力,在系统与系统边界外组合部分之间进行数据传输需要经过组件接口,因此需要将组件间的功能交互分配到组件交换接口上。飞行安全综合监控与支持系统主要由机载分系统、通信链路分系统和地面综合信息处理分系统 3 部分组成,具体内容及信息流向框

图如图 1 所示,平台管理员外部实体与开发平台交互的接口为可视化软件接口,传感器与系统的接口为传递模拟信号的电线。系统架构图通过运行实体间接口的定义将系统功能进行整合得到飞行安全综合监控与支持系统开发平台系统架构。

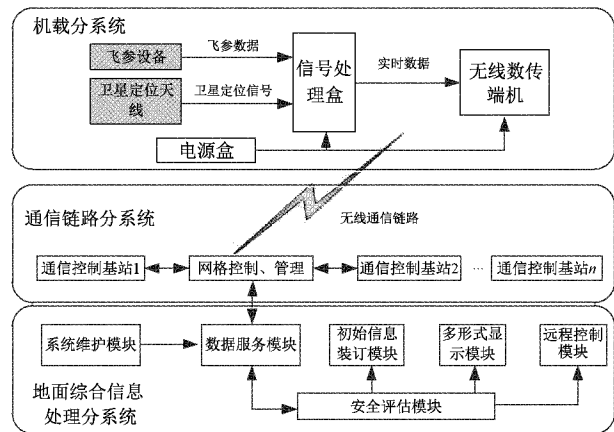


图 1 飞行安全综合监控与支持系统组成框图

机载分系统主要由信号处理盒、电源盒、数传天线、卫星定位天线和无线数传端机组成。信号处理盒与机载总线系统交联,实时采集飞参等机载系统参数,完成数据的解析、分帧,同时接收卫星信号接收机发送的经/纬度、高度等信息,经过数据分析、过滤、组包后向无线数传端机输出数据包。无线数传端机用于组建空-空、空-地无线通信链路,将实时训练数据发布给无线数传网络中的其它参训军民机和通信链路分系统。电源盒为机载分系统提供 +5 V 和 +28 V 电源。

通信链路分系统由通信控制基站、网络控制和信息管理设备等组成,实现参训军民机训练数据的实时接收、融合,完成通信链路中网络容量、频率、时隙分配和转信数量等工作模式的配置管理,并通过地面有线信道将接收到的数据传输给显示预警分系统。为满足全时域监控和评估的要求,根据训练区域和飞行任务情况,特别是超低空使用的特点,可配置多台通信控制基站,在统一的时隙控制和指令管理下,实现使用数据的组网传输。

地面综合信息处理分系统由飞行信息综合监控台、检测校验设备等组成。飞行信息综合监控台主要包括数据服务、数据库、初始信息装订、多形式显示(二维电子地图、三维飞行场景、座舱重构、列表曲线)、安全评估、特情处置、系统维护和远程监控等模块。检测校验设备用于系统机载分系统的原位检测。

1.2 功能模块设计

1) 机载分系统设计

信号处理盒接收机载总线信息,并综合经纬度、高度信息打包处理后发送给无线数传端机,无线数传端机采用对称加密、非对称加密相结合的复合加密算法对飞行数据进

行高强度加密,并在完成通信链路入网请求后,采用多路时分多址方式,进行数据发送。

(1)信号数据采集与处理模块

在信号数据采集与处理的系统实现中,应考虑采集设备的性能需求,如采样率、通道数等。数据采集设备对于采集到的物理量应具有滤波、清洗等数据预处理的能力,以提高数据的可用性。为满足设备故障诊断、寿命预测等设备健康管理需求,飞行安全综合监控开发平台应具备离线健康管理与在线健康管理两种能力,既满足战时维修保障快速性的需要,又能够在时间充裕的前提下追求更高的准确性。因此平台应提供大数据挖掘的能力,为海量数据的挖掘及离线健康管理提供计算平台,以满足健康管理准确性这一非功能性需求,信号处理模块将总线数据、经/纬度、高度和时间信息,整理成指定格式的数据包,按照分配的时间隙,发送到无线数传端机,功能模块设计如图2所示。

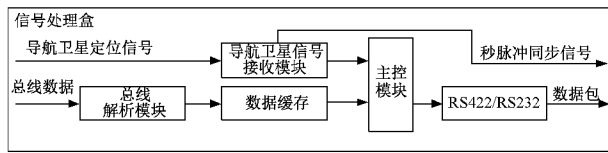


图2 信号处理盒功能模块设计

(2)无线数传端机(逻辑功能分解与分配)

在逻辑架构建立阶段开始将系统内部功能实现流程的黑盒打开,从系统实现方法逻辑的角度对逻辑功能进行捕获。在系统分析的基础上对系统功能进行进一步分解,得到逻辑功能分解框图。其中,在逻辑分析阶段对“可视化显示与命令解析”、“数据存储”、“数据挖掘”3个功能进行了分解。无线数传端机用于组建系统无线通信链路,实现地面控制指令的接收和训练数据的空-空、空-地分发。工作原理和功能框图如图3所示。

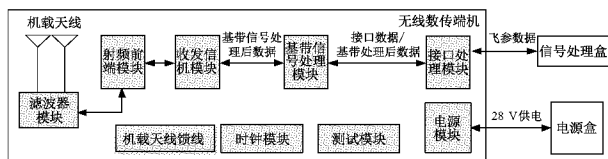


图3 逻辑功能分解框图

2)通信链路分系统设计

(1)通信逻辑场景控制基站

通信逻辑场景通过以逻辑模块为生命线的泳道图建立,通信控制基站为系统的无线数据地面接收设备,与无线数传端机共同构成无线通信链路,在逻辑架构建立阶段为满足系统需求对系统逻辑的执行模块进行了定义,在网络控制设备和信息管理的统一管理下实现参训军民用飞机数据的实时解密还原、调制和接收,功能模块。通过定义逻辑模块之间的相互作用实现对系统能力实现流程的描述,如图4所示。

(2)网络控制和信息管理设备

网络控制和信息管理设备负责控制通信控制基站响应

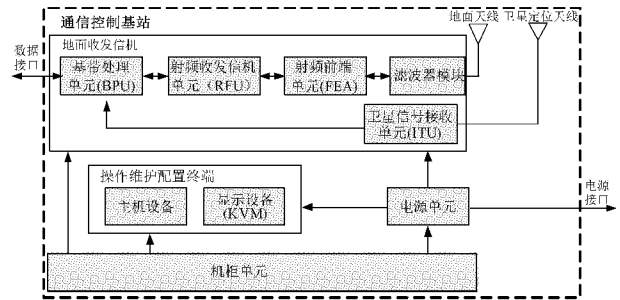


图4 通信控制基站功能模块设计

无线数传端机的入网请求指令,动态划分时隙和分配时间片、刷新周期等,将各个通信控制基站收到的参训军民用飞机下传的数据进行汇总、筛选、打包处理后通过交换机等地面有线组网器材,发送给显示预警分系统。无线通信链路的刷新周期及时隙划分如图5所示。

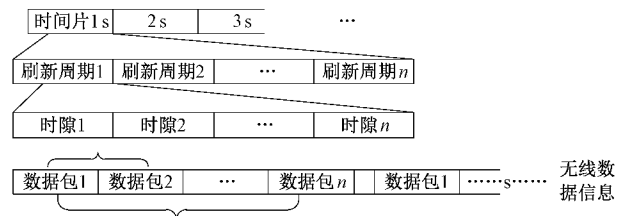


图5 无线数据网络的刷新周期及时隙划分

3)飞行信息综合监控台设计

飞行信息综合监控台接收到通信链路分系统发送的数据后,主要完成数据的解析、网络分发、同步存储、多形式显示、安全评估、实时告警和特情处置等功能。同时远程监控模块负责通过地面通信网络,实现飞行动态的远程共享,功能模块设计如图6所示。

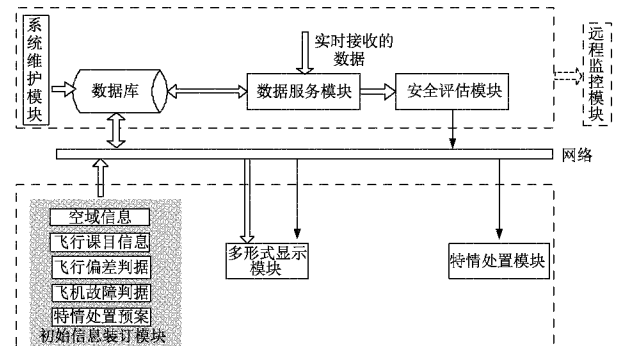


图6 飞行信息综合监控台功能模块设计

(1)数据服务模块

数据服务模块主要用于对接收的飞行数据进行解析、存储和分发,功能模块设计如图7所示。

(2)初始信息装订模块

初始信息装订模块主要完成飞行课目信息、军民用飞机故障判据、飞行偏差判据、特情处置预案和空域信息的预先装订,以飞行课目信息装订、规则编辑和空域信息装订等

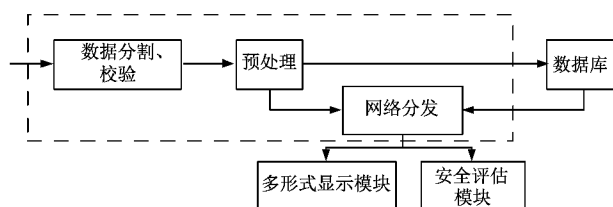


图 7 数据服务模块功能模块设计

界面实现用户交互,特情处置预案直接以离线网页的形式存储于数据库中。工作原理如图 8 所示。

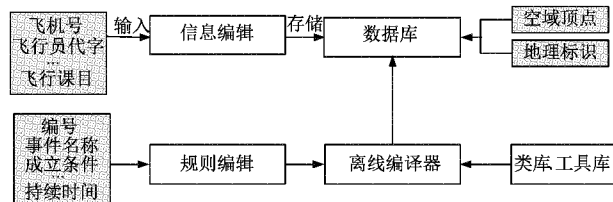


图 8 初始信息装订模块功能设计

(3)多形式显示模块

多形式显示模块主要由二维场景显示、三维场景显示、座舱重构显示和列表曲线显示 4 部分组成。它们接收通信控制基站通过网络发送的各种数据以及安全评估模块提供的告警信息,并实时显示输出。同时结合三维地形数据和参训军民用飞机的实时空间位置,通过计算将近地告警信息提供给安全评估模块,由安全评估模块转发到其他模块。工作原理如图 9 所示。

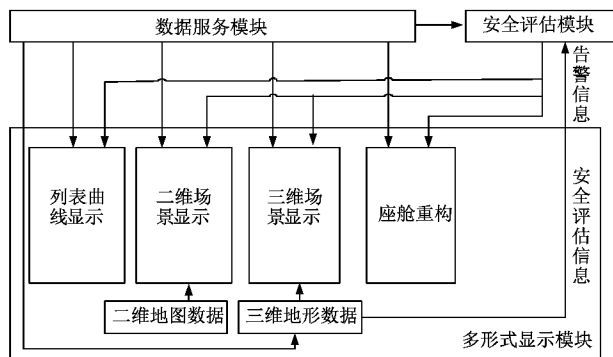


图 9 多形式显示模块设计

(4)安全评估模块

安全评估模块主要实现军民用飞机故障告警和飞行安全评估功能,依据智能专家判据库中的军民用飞机故障判据和飞行安全判据对飞行数据进行快速判别分析,确认军民用飞机是否发生故障,并及时发布飞行安全评估信息功能模块设计如图 10 所示。

当出现告警信息时,通过窗口列表的形式分别显示事件类型、军民用飞机号、事件名称、发生时刻、相关参数等主要信息,并以声音和影像的形式进行同步警示。同时告警信息发送到多形式显示模块驱动其进行相应的告警显示,发送到特情处置模块调用相应处置预案。

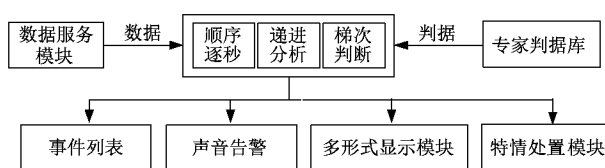


图 10 安全评估模块设计

(5)远程监控模块

远程监控模块主要是依托现有地面军事通信网络,通过本场数据服务器进行数据网络分发,利用远程数据终端上预装的数据处理软件,以多种形式实时再现训练过程。工作原理如图 11 所示。

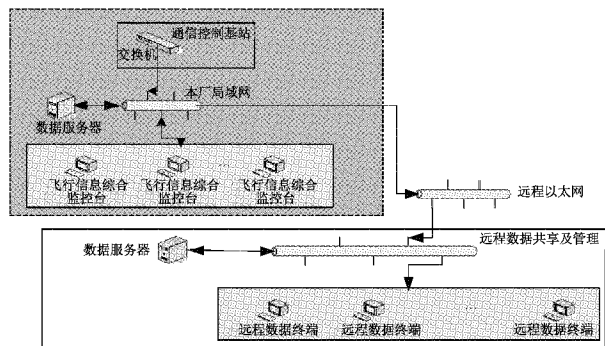


图 11 远程监控模块设计

2 基于主动安全的飞行安全监控体系构建

目前,飞机在日常使用过程中,为及时掌握装备工作状态,保证飞行安全,普遍采用的是飞行前地面状态检查,飞行后利用飞参数据对比分析的方法,这种安全监控手段在时间上具有滞后性,只有在故障或者隐患出现以及军民用飞机返航着陆后,才能做出有效的反应。而军民用飞机在空中过程中,只能依靠二次雷达和空地通话等有限方式对空中情况进行掌控,获得信息量有限,受飞行人员和地面指挥人员主观影响大,在监控时域上存在缺失,信息完整性和可靠性存在较大缺陷。为解决上述问题,本项目引入主动安全理念,构建了飞行安全监控体系,主要包括:1)构建了按照专业归属、危险类别、危害程度进行划分归类的主动安全分析评估原则、程序和方法,改变了以往事后判别处理的被动安全监控模式,提出了事前跟踪评估处理的主动安全支持模式;2)基于智能专家系统和模式识别技术,构建了自学习型分级智能判据库,解决了以往单一的数值型静态判据证据支撑单薄,相关判据间交叉性较弱的问题;3)建立了多缓冲休眠式并行算法和弹性缓冲、不定频插值算法,设计了三维飞行场景、二维电子地图、参数动态变化回溯和座舱信息重构软件,实现了飞行状态的多形式实时显示,解决了海量飞行数据的协调接收、并行显示刷新和平滑分布等一系列难题,为辅助决策指挥提供了直观、可靠地技术手段。

2.1 基于量子神经网络和趋势推演的自修正安全预警模型

要实现危险事件的预警,必须结合大量的故障案例,分析其发生前和发生时的特征状态演化规律,通过深度挖掘,建立数学推演模型,并将当前实时的飞行数据进行推演计算,得到可能发生的若干危险事件的概率,从而实现影响安全的状态和操作的趋势判断和实时预警。为实现以上目的,系统设计了基于量子神经网络和趋势推演的自修正安全预警模型。

1) 构建了概率预测的量子神经网络模型

飞行过程中的各个危险事件特征之间具有交差性和不确定性的特点,且危险发生具有突变性。为实现危险概率的准确预测,结合神经计算与量子计算这两种算法的优势,采用波函数构建突变系统,以权重波函数逼近神经网络权值的方法设计了基于权重波函数的量子神经预测网络模型。

波函数:

$$|\psi(\theta)\rangle = |\psi(t_0)\rangle \otimes |\psi(T)\rangle \quad (1)$$

权重波函数:

$$|W\rangle = (F^T F)^{-1} (\langle\psi(t_0)|\psi(t_0)\rangle) F^T |\psi(T)\rangle \quad (2)$$

反转量子态干涉效应:

$$U_c |\psi(\theta)\rangle = U_{DFT}^{-1} |\psi(t_0)\rangle \langle\psi(t_0)|\psi(t_0)\rangle \langle 0| - I U_{DFT} (I - 2|\psi(T)\rangle\langle\psi(T)|) |\psi(\theta)\rangle = |\psi(\theta + \phi)\rangle \quad (3)$$

其中, $|\psi(t_0)\rangle$ 为波函数基态, $|\psi(T)\rangle$ 为预测值, I 为单位矩阵, N 为网络迭代次数, $\sin\phi = 2\sqrt{N-1}/N$ 。

该网络采用权重波函数来演化量子神经网络的权值,具有非线性、并行、纠缠和干涉的特性,在飞行状态实时监控过程中,利用飞行数据对量子神经网络进行训练,根据输入的数据特征预测各类危险事件的发生概率,得出准确的诊断和预测结果。

2) 基于事例推理修正预测结果

经过量子神经网络预测后,可得到当前数据状态模式与故障模式之间的概率映射关系。但由于该种映射属于静态映射,在故障预测时会存在预测的结果和最终的故障模式可能会存在偏差的问题,主要是因为故障的发生不仅由故障发生前的状态决定,而且还和状态的演化速度有关。为解决这个问题,设计了基于事例推理(CBR)算法与量子神经网络融合的综合推理模型(如图 12 所示),用训练后的神经网络产生的特征权重来控制事例推理的过程,将神经网络的数据推理预测结果与匹配的事例结果互相验证,使得推理和决策更加准确和透明。

2.2 大容量数据实时传输

为满足系统对无线数据传输容量的要求,系统无线网络采用多路时分多址、动态入网、实时分配时隙和时隙复用的模式,提高了时隙的利用效率,减少了系统无效资源的占用。为保证时隙的正交性,系统采用的定时脉冲为导航定位卫星产生的授时脉冲,并考虑到系统在卫星通信发生中断时无线网络传输的可靠性,设计了 GPS/BD 双

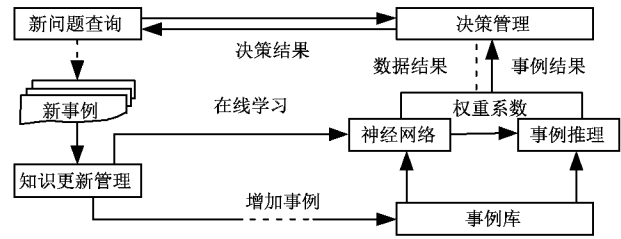


图 12 神经网络与 CBR 推理的融合模型

模卫星信号接收模块,为系统提供高精度秒脉冲同步信号和经/纬度、时间信息。同时,为解决复杂地形和无线通信信道环境下的数据传输干扰问题,系统采用载波侦听/冲突检测多址、智能天线和窄波抗干扰等技术,以多个高增益的动态窄波束动态分别跟踪多个期望信号,最大限度抑制窄波束以外的干扰信号,确保无线通信质量。

2.3 系统机载设备通用化设计

由于不同机型的机载数据总线标准不同,如果系统机载设备不能自动快速匹配总线状态,对于不同机型需研制不同数据采集设备,无法实现机载设备的通用化。为解决这些问题,系统采用自适应寻址和状态辨识技术,在硬件和软件两方面进行了自适应寻址设计:首先,在信号处理盒中设计了自适应寻址接口,根据解析数据中的状态标识,自动控制硬件针脚的电平组合,依据不同组合状态区分不同的总线标准,实现对多种机型总线状态的自动识别;其次,开发了状态辨识软件,通过辨识硬件的寻址结果,寻找软件的状态函数入口地址,匹配解析函数模型,实现不同机型数据的自适应解析。

软件采用覆盖式和扩充式的注入方法,可以在保留现有状态的基础上进行新状态的扩充,增加状态类型,减少状态冗余。

2.4 飞行数据综合解析处理

采用矢量叠加、数据属性动态映射和分组分级匹配扫描算法,创建了飞行数据综合解析模型。基于功率平衡准则和相关参数修正的数据预处理方法,有效地处理了原始数据中的野值和缺失值等异常数据,为实时分析提供了可靠的信息源;将单一的数据点扩展为时间维延展矩阵,充分利用了数据的时序性,丰富了特征的信息含量;通过特征的分阶段维数约减,优先利用误差项最小的特征量,间接优化了特征量的组合效率,实现了海量数据快速的模式匹配。

2.5 远程数据共享的实时性和连续性

系统的远程监控模块功能实现主要依托地面军事通信网络,数据传输中必然遇到远程网络实际带宽难以控制的问题,同时保证数据的实时性和连续性比较困难。为此采用了减少带宽占用和本地数据缓冲的方案,在远程网络(信道)上只传输通信控制基站输出的参数数据,基站所需带宽不大于 96 kbit/s,远距数据传输的实时性得到保证,同时本场数据服务器在融合数据的同时进行数据缓存,防止数据间断,保证向远程监控模块发送数据的完整性和连续性。

3 系统测试

3.1 仿真环境搭建

为了评估飞机飞行安全综合监控系统的实用性,本文以测试性验证综合平台为仿真平台,借助团队已积累了大量的研究成果,建立了测试性验证综合平台(图 13)振动、传输数据和湿度三综合试验平台(图 14)等多个实验平台,可为本项目的研究提供可靠的实验数据来源。实验所用的设备,验证环境和故障模式数据由石家庄海山实业发展总公司提供。

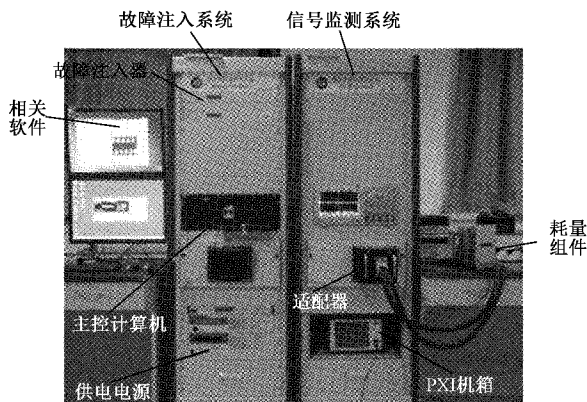


图 13 测试性验证综合平台

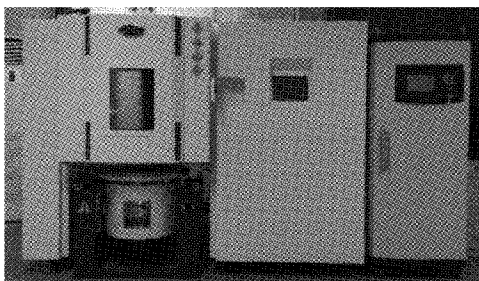


图 14 振动、传输数据和湿度三综合试验平台

3.2 仿真效果分析

为了评估飞机飞行安全综合监控系统的实用性,本文以 BOcchuangNet 为仿真平台,分别采用数据刷新率、无线

网络资源管理、飞行数据管理方式、系统延时率、飞行数据网络远程共享、智能专家判读、飞行安全评估、故障实时告警、辅助特情处置等功能预测对象为选择某民用市场民用 FDMS 系统航电产品通电测试段内的 1 920 个传输变化数据(每隔 15 s 的此产品振动监测变化值为一个采样时刻数据)作为训练样本,预测产品性能变化趋势,利用图 13、14 所示的测试环境,其中图 15 为施加随机加随机,本文设计系统产品性能监测曲线(从上到下依次 5 条信号监测),第 3 条线为实际响应效果,第 2、4 条为误差接受范围,第 1、5 条为误差阈值,通过仿真检测效果对比分析(该试验是模拟飞机飞行中环境影响),表明本系统具有较高可靠性,抗冲击能力强。

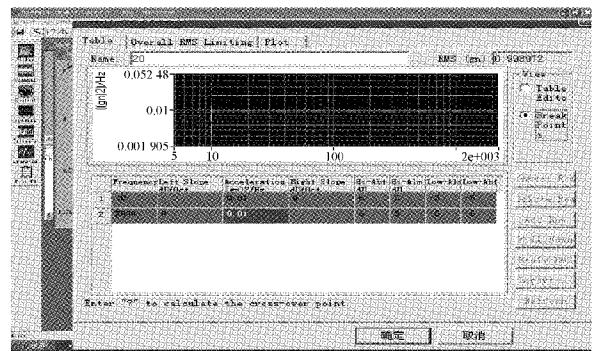


图 15 随机加随机产品性能监测曲线

通过本系统网络设置参数的跟踪监测,本系统与国内外同类产品主要功能和性能的对比如表 1 所示,模型仿真的寿命预测结果与机载设备物理模型相一致,本文的飞行安全综合监控与支持系统是一种适应多机型的全时域多层次的安全监控与支持平台,在总体技术水平上与国外 FDMS 系统相当,与真实工作情况相统一,能够对数据进行无线刷新,飞行数据实时回传、系统延时率不大于 800 ms 飞行数据网络远程共享、故障实时告警、辅助特情处置,尤其是使用数据深度挖掘应用方面优势明显,相比 FDMS 系统增加了智能专家判读、故障实时告警和特情处置等功能,选取本系统的仿真测试数据进行对比,仿真效果拟选用 3 种评价准则进行综合分析,适用范围更加广泛,有利于下一步工程实践的开展。

表 1 主要功能和性能误差对比

主要功能和指标	归一化均方根误差	均方误差	平均绝对百分比误差	市场民用 FDMS 系统	本系统
数据刷新率	1.199 2	972.154 0	5.844 5	无线刷新率 2 Hz	无线刷新率 2~20 Hz
无线网络资源管理	0.347 8	541.771 4	4.490 3	2~20 Hz	有
飞行数据管理方式	0.307 8	948.496 2	2.006 5	有	实时回传,实时分析
系统延时率	0.308 5	679.701 2	2.312 3	实时回传,事后回放	不大于 800 ms
飞行数据网络远程共享	1.904 2	491.798 4	9.729 0	不大于 1 s	有
智能专家判读	0.283 9	362.296 3	3.868 7	有	有
飞行安全评估	0.792 4	649.289 3	4.638 4	无	有
故障实时告警	0.322 6	744.860 2	2.540 6	有	有
辅助特情处置	1.165 5	865.040 0	5.718 2	无	有

评价公式如下:

1) 平均绝对百分比误差

$$mape = \frac{100}{q} \sum_{i=1}^q \frac{|y_{pre}(i) - y_{real}(i)|}{y_{real}(i)} \quad (4)$$

2) 归一化均方根误差

$$nrmse = \sqrt{\frac{1}{q \|y_{real}\|^2} \sum_{i=1}^q (y_{real}(i) - y_{pre}(i))^2} \quad (5)$$

3) 均方误差

$$mse = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q (y_{real}(i) - y_{pre}(i))^2 \quad (6)$$

式中: $y_{real}(i)$ 表征传输数据变化验证真实数据; $y_{pre}(i)$ 为预测点; q 表征传输数据变化预测点数, 不同模型预测效果如表 1 所示。

由预测对比结果可知, 本文提出的基飞机飞行安全综合监控系统, 不同的评价准则的预测效果均优于市场民用 FDMS 系统。系统延时率波动不大, 但预测精度不高, 系统无线刷新率 2~20 Hz, 具备宽频带传输能力。飞行数据管理方式加入实时回传及实时分析, 因此导致模型预测效果不够理想。但系统延时率和运算速度上具有明显优势 (不大于 800 ms), 且适合于小样本处理 (数据点数小于 4 000)。而本文提出的飞行安全综合监控系统无论输出精度 (误差均低于 10%), 还是预测效果的稳定性都远优于市场民用 FDMS 系统。

4 结 论

该项目针对飞机飞行安全问题, 深入开展了飞行安全实时监控和决策支持研究, 提出了将防范关口前移的飞行安全主动监控理念, 构建了按照专业归属、危险类别、危害程度进行划分归类的主动安全分析评估原则、程序和方法, 研制了适应多机型的实时飞行安全监控系统, 实现了飞机飞行状态综合监控、故障实时诊断、危险飞行状态预警和特情辅助决策等功能, 采用自适应寻址、状态辨识、矢量叠加和数据属性动态映射方法, 构建了不同类型飞机动态监控与支持信息的采集与综合处理数学模型, 设计了自适应动态寻优通用接口, 攻克了不同机型总线数据、经/纬度、高度和时间等信息规定时隙内的抽取难题, 实现了不同机型飞行数据的动态采集和实时解析。综合运用多路时分多址、智能天线、智能组网和窄带抗干扰技术, 创建了由无线数传端机和通信控制基站组成的空地无线复合通信链路, 突破了远程网络带宽限制和大容量飞行数据的实时下传、加密传输与处理等关键技术, 保证了大容量空地数据传输的实时性和连续性。采用量子神经网络技术和趋势推测方法, 建立了具有故障判别、隐患预测、特情处置辅助决策等功能的开放式分级智能规则数据库, 解决了飞行安全信息的智能分析评估难题, 实现了危及飞行安全事件的提前预测和实时告警。

参考文献

- [1] 穆腾飞, 李忠剑, 戴喜妹. 飞机结构健康监测技术[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(3): 35-41.
- [2] 孙侠生, 肖迎春, 白生宝, 等. 民用飞机复合材料结构健康监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 53-63, 2.
- [3] 冯维超. 基于机载振动监测系统的直升机飞行状态识别方法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 133-136.
- [4] 沈意平, 陈齐林, 王送来, 等. 基于 CRIO 和无线传输的结构损伤主动监测系统[J]. 测控技术, 2020, 39(6): 100-103, 127.
- [5] 方旭, 薛景锋, 宋昊, 等. 飞机结构健康监测系统数据处理及在线应用[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 1-7.
- [6] 刘洋, 韩泉泉, 赵娜. 无人机地面综合监控系统设计与实现[J]. 电子设计工程, 2016, 24(14): 110-112, 115.
- [7] 刘莉雯, 张天伟, 茹斌. 多参数融合的飞行品质评估模型的建立[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(6): 1262-1268.
- [8] 赵琳, 康瑛瑶, 程建华, 等. 组合导航的集中式容错卡尔曼滤波算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(6): 845-850.
- [9] 王永华, 马英权. 某型航空活塞发动机监控系统的设计[J]. 电子技术, 2020, 49(5): 13-15.
- [10] 任可, 王合超, 周跃飞, 等. 通航综合航电系统飞参数据筛查和清洗分析[J]. 中国科技信息, 2019(24): 31-32.
- [11] 杨瑞景, 柴剑珩, 李勇辉, 等. 无人机地面综合监控系统设计与实现[J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(11): 73-75.
- [12] 孙学富. 某飞机监测系统结构设计[J]. 中国科技信息, 2019(13): 48-50.
- [13] 叶冰, 徐茜, 郝朝. 飞行试验综合安全监控技术[J]. 计算机测量与控制, 2019, 27(6): 100-103.
- [14] 张建立. 飞行器测控设备综合管控系统设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [15] 刘海颖, 冯成涛, 王惠南. 一种惯性辅助卫星导航系统及其完好性检测方法[J]. 宇航学报, 2011, 32(4): 775-780.

作者简介

崔展博, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为仪器与测试技术、故障预测预健康管理、飞控系统自动检测技术等。

E-mail: 5721cuizhanbo@163.com

景博, 教授, 主要研究方向为故障预测与健康管理和测试性设计、传感器网络与信息融合。

E-mail: jingbo_sensor@163.com

焦晓璇, 讲师, 主要研究方向为信息融合、故障诊断与预测。

E-mail: 564325155@qq.com

潘晋新, 硕士研究生, 主要研究方向为故障预测与健康管理和测试性设计。

E-mail: 1091313541@qq.com

王生龙, 硕士研究生, 主要研究方向为智能检测与健康管理和测试性设计。

E-mail: 893662821@qq.com

张艺檬, 助理工程师, 主要研究方向为仪器与测试技术。

E-mail: 345831518@qq.com