

文章编号:1671-1637(2011)04-0119-08

大型客机运行监控与健康管理系统设计

马小骏^{1,2}, 左洪福¹, 刘 昕²

(1. 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国商用飞机有限责任公司, 上海 200241)

摘要:总结了大型客机实时运行监控与健康管理的现状,介绍了C919大型客机的健康管理系统的总体架构,将其划分为实时监控、健康状况趋势分析和预测以及故障诊断与维修决策3个功能模块。分析了实现该系统的实时地面监控技术、趋势分析及预测方法、剩余寿命预测方法、故障诊断算法、维修决策方法以及系统验证仿真技术等6个关键技术和方法,并对本领域的研究和应用进行了展望。研究表明:通过对飞机进行实时运行监控,能够降低排故时间,提高航班正点率,易于飞机的调配,提高飞机的利用率;通过对飞机进行健康管理,使技术人员能更有效地制定维修任务,控制维修间隔,实现预防性维护和视情维修,从而大大降低维修成本,提高飞机的可靠性及经济性,同时也能为飞机的设计提供改善依据。

关键词:大型客机;实时监控;健康管理;故障诊断;故障预测;维修决策

中图分类号:V271.1 **文献标志码:**A

System design of operation monitoring and health management for large passenger aircraft

MA Xiao-jun^{1,2}, ZUO Hong-fu¹, LIU Xin²(1. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China;
2. Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The research statuses of real-time operation monitoring and health management for large passenger aircraft were reviewed, the general frame of health management system for C919 aircraft was presented, and it was divided into three modules such as real-time monitoring, trend analysis and prediction of health condition, fault diagnosis and maintenance strategies. Six key technologies and methods of achieving the system were analyzed including real-time monitoring technology on ground, trend analysis and prediction method, remaining life prediction method, fault diagnosis algorithm, maintenance decision method, system validation and simulation technologies, and related researches and applications in this field were prospected. Analysis result shows that real-time operation monitoring for aircraft can reduce troubleshooting time, improve on-time performance and availability, and schedule flight easily. Health management for aircraft can help engineers effectively make maintenance tasks and control maintenance interval, implement preventive maintenance and condition-based maintenance, lower maintenance cost greatly, enhance reliability and economy, and provide improvement references for aircraft design. 3 figs, 13 refs.

Key words: large passenger aircraft; real-time monitoring; health management; fault diagnosis; fault prognostic; maintenance strategy

收稿日期:2011-07-18

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国民用航空总局联合资助基金项目(60939003)

作者简介:马小骏(1962-),男,陕西绥德人,南京航空航天大学工学博士研究生,从事飞机结构可靠性与维修决策研究。

导师简介:左洪福(1959-),男,湖南茶陵人,南京航空航天大学教授。

Author resumes: MA Xiao-jun(1962-), male, doctoral student, +86-25-84895772, maxiaojun@comac.cc; ZUO Hong-fu(1959-), male, professor, +86-25-84891098, rms@nuaa.edu.cn.

0 引 言

随着世界经济的持续发展,中国的民航运输业面临着激烈的竞争和挑战。随着中国大飞机项目的启动以及相关研究的逐步展开,研究飞机发动机、飞机设备及各个子系统运行状态,并对其进行监控、故障诊断和故障隔离,发挥实时监控与健康管理的飞机运营中的作用,能使航空公司及时有效地掌握飞机的健康状况,从容不迫地安排维护维修工作,避免耗时长、成本高的维修延误,有计划、轻松地解决维修问题,降低其维修和运营成本。而对于乘客、货运公司等终端客户,飞机更准点的运营节约了客户的时间,为客户创造了价值^[1-3]。实时监控与健康管理的飞机及其组成部分健康状况的管理活动的统称^[4],以飞机系统和部件在飞行中的参数及维护数据为基础,评估系统和部件的健康状态,分析和预测是否会出现潜在的故障。在以上信息的支持下,结合维修计划、航班安排、最低设备清单等工具,综合决策和安排维护维修工作,实现飞机从定期维修及事后维修向视情维修的转变。

新一代商用飞机要求航空电子系统、飞行管理系统和其他机载设备安全可靠,确保各项功能正常发挥和安全可靠地飞行。本文结合中国大型客机研制计划实施这一重大工程背景,总结了大型客机运行实时监控与健康管理的现状,论述了中国商用飞机有限责任公司在该领域内所做的研究工作和开展的关键技术研究,并对将来的研究工作提出了进一步的展望。

1 国内外研究现状

现代大型飞机的实时监控与健康管理的飞机是在机内测试(Built-in Test, BIT)技术的基础上发展起来的。进入20世纪80年代,技术先进国家采用飞行数据记录仪(Flight Data Record, FDR),根据所记录的数据进行状态监控取得成功,并得到推广;

20世纪90年代中期,不少航空器制造商和航空公司又利用空地数据链对飞机的状态进行监控,将数据服务于航务、机务等部门。中国民航也从采用飞行数据记录仪所记录的数据进行飞行事故分析,发展到具备利用飞机通信寻址和报告系统(Aircraft Communications Addressing and Reporting System, ACARS)和甚高频空地数据链对飞机的状态进行监控的条件^[5]。先进民航飞机所采用的预测和健康管理系统的飞机可以通过诊断、预测和异常状态推理程序来确定飞机可能出现的故障,并生成状态报告。在飞行过程中,如果预测和健康管理系统的状态报告对近期任务产生影响,则通过机载超高频设备直接传送给地面站,在飞机到达下一站之前,地勤人员可以提前做好维修方案,确保航班高效运行。自20世纪90年代末以来,实时监控与健康管理的飞机向测试、监控、诊断、预测和维修管理一体化方向发展,并从最初侧重的电子系统扩展到由电子、机械、结构、动力等各主要分系统形成的综合故障诊断、预测与健康管理系统的^[6-7]。

1.1 国外研究现状

美国早在20世纪70年代便由NASA提出了航天器综合健康管理(Integrated Vehicle Health Management, IVHM)的概念^[8]。进入21世纪后,在新一代发射技术计划的带动下,一个由多家研究中心组成的联合团队应运而生,致力于进行综合系统健康监测(Integrated Systems Health Management, ISHM)研究^[9-11]。美国海军发起的开放架构状态维修(Open System Architecture Condition-Based Maintenance, OSA-CBM)的研究^[12],代表了今后复杂系统综合健康管理(Complex System Integrated Health Management, CSIHM)结构的发展方向。

波音公司和洛克西德·马丁公司在投标下一代联合攻击战斗机时,都在其设计中综合了预测与健康管理能力的设计。此后波音公司也将PHM技术应用到民用航空领域,并开发了相应的飞机健康管理系统的(Airplane Health Management, AHM),目前已在日本、新加坡、法国、美利坚等航空公司的客运和货运飞机上大量应用,用来保证航空公司减少飞行延误及航班取消等事件,实现高效率、低成本运营。

空中客车公司将健康管理思想引入到飞机的实时运行监控中,开发了AIRMAN(Aircraft Maintenance

nance Analysis)系统,实现了对飞机的实时监控及故障诊断,并提供排故建议。目前在空客大部分在役飞机上已经试用了一种飞机安全监测系统,主要包括飞行追踪及燃油监控,能够提供飞行追踪、资源监控和卫星电话的功能,并且在飞行结束后可根据用户需求提供各种结构形式的飞行总结报告,辅助飞机的综合维护及管理。空中客车公司最新设计的A380飞机已经将环保及安全性设计提升到了前所未有的地位,并且基于这个设计理念,进行了多项新技术的研究及应用。在能源日益紧张的情况下,对飞机进行飞行状态监测和燃油控制,有效利用资源,也是飞机设计的必然趋势。

1.2 国内研究现状

国内在飞行器实时监控与健康管理系统研究方面起步较晚,但近年来也逐步认识到这方面工作的重要性及迫切性。自“十五”以来,在航空系统故障诊断领域开展了多项预先研究项目,在飞机状态监测方面已经开展广泛的研究,如飞机健康状态管理及预测系统、直升机健康管理系统(HUMS)、远程故障诊断系统等,并在故障诊断技术研究等相关领域有了较大的突破。南京航空航天大学、重庆大学、华中科技大学、哈尔滨工业大学等单位在实时监控和结构健康监测的研究中也取得许多成果^[13],如自适应复合材料、光纤智能结构的实时监控与快速修复,利用声发射技术、小波分析、神经网络对损伤进行定位等。

国内航空公司也在这方面开展了有益的探索与实践。南方航空公司于2006年开发了飞机远程诊断系统并获得专利,其开发的系统已经应用于南方航空公司机务工程部维修控制中心、运行控制中心以及各分公司维修基地,改变了民航机务维修排故的传统模式;东方航空公司于2007年实现了无线QAR技术,这些监控系统和技术开发都大大促进了航空公司对飞机实时监控和健康管理的水平。目前国内能进行实时监控的主要机型有A320、A330、A340、B737NG、B747-400、B777、ERJ145(50座)等,国内三大航空公司及海南航空公司、深圳航空公司、厦门航空公司等都在对其主要机队进行实时监控,并将实时监控的主要部门AOC(运控中心)、MCC(维修控制中心)、LMD(航线部)引向更多部门,如工程技术部门、质量管理部门等。中国国际航空公司2009年开始应用波音飞机健康管理(AHM)系统监控该公司新一代B737机队的航行状况,今年扩大了其使用范围,监控该运营商旗下B777和B747-

400机队的飞行状况。

2 大型客机健康管理系统模块设计

针对中国正在研制的大型客机,其维修性、可靠性、经济性是贯穿大型客机设计、制造和使用等环节的关键指标,传统飞机在系统的维护维修方面,以定期维护和事后维修为主,采用多、勤、细来预防系统故障,遇到故障发生时,则临时安排相应的维修任务,往往措手不及,导致飞机停场维修,耗费大量时间和成本,这种方式不仅耗费资源,而且效率低下。在大型客机的研制过程中,引入运行实时监控和健康管理系统正是改变这种现状的核心技术。

现代飞机已经装备了先进的机载数据采集、数据管理系统、机载维护系统,也已具备空地数据传输的通信系统。飞机的运行过程中产生大量的信息和数据,可经ACARS等采集并向地面传输,这些信息随着时间的推移而越来越多。但是这些信息和数据目前并没有得到充分有效的利用,如果能够有效地利用现有的相关维护资源如CMCS(Central Maintenance Computing System)产生的维护信息,ACMS(Aircraft Condition Monitoring System)产生的飞机实时状态参数报文及参数记录文件,结合智能诊断、预测分析,综合历史维护经验,则能及时有效地掌握飞机的健康状况^[5],及时发现和报告飞机潜在故障趋势及已经发生的故障,提前制定维修方案,极大地减少非例行工作量所占比例,从而提高维修效率,减少飞机运行和维护的费用,同时提高飞机的利用率和飞行安全性,实现对飞机进行全系统的健康管理,实现预防性维护和视情维修工作。

为实现上述最终目的,中国商用飞机有限责任公司在C919大型客机研制初期即对该领域展开了深入研究,在系统总体架构设计中,把实时监控与健康管理系统划分成3个模块,分别是实时监控模块、健康状况趋势分析及预测模块、故障诊断与维修决策模块,整个系统的功能架构见图1。

2.1 实时监控模块

在整个系统架构设计中,将实时监控模块定义为实时获取航行中飞机各类运营状态的信息处理平台,实现实时掌握飞机状态的功能。实时监控模块的数据来源于飞机在运行过程中实时上传的各类ACARS报文,通过对报文的接收和解码,得到飞机的实时故障信息、关键参数信息以及实时航行动态信息等。通过这一模块,航空公司和飞机制造商可以及时有效地掌握大型客机的实时运营状况,并在



图1 实时监控与健康功能架构

Fig.1 Functional scheme of real-time monitoring and health management

出现某些等级的严重故障信息时,在飞机降落之前,提前组织力量诊断故障的可能来源,分析排故方案,调配维修人员、地面工具及航材资源,提前做好充分的准备,以便在飞机降落后第一时间迅速解决故障问题,最大限度地减少停场维修的时间,从而提高效率,节约成本。

2.2 健康状况趋势分析及预测

由于空地实时通信链路的通讯费用较高,无法全面传送飞机各系统的实时参数、各种警告级别的ACMS报文、CMCS故障信息以及维护数据,这些数据保存在飞机的飞行记录器及中央维护系统中,通过航后下载获得这些数据,对于分析掌握飞机的健康状况,是非常有益的数据源。

在整个系统架构设计中,将健康状况趋势分析及预测模块定义为日常各类飞行数据的处理、分析、统计和预测平台,能处理每日所有航班的飞行数据,通过数据分析,得到飞机的运营安全状态和可靠性,并通过对飞行参数的变化趋势分析及超限分析,实现对潜在故障隐患的预测功能。

健康状况趋势分析及预测模块的主要数据来源是航后下载数据,即飞行记录器数据(QAR、DAR、SAR数据)和中央维护系统维护数据(CMCF维护数据)。通过对这类数据的译码和分析统计,自动探测预定义的飞行事件,并分级预警。同时通过对飞机参数的状态变化趋势分析,结合系统原理特性,得到系统的健康状况,以期在尚未发生故障或者事故时,提前标识潜在的风险,提高安全性,在飞机的全寿命周期内提供一个健康状况监控平台,进而实现对单架飞机乃至全机队的健康状况进行管理。

2.3 故障诊断与维修决策模块

在整个系统架构设计中,将故障诊断与维修决策模块定义为故障信息处理及维修工作安排的智能分析决策支持平台。

本模块包含故障诊断专家系统子模块和维修决策支持子模块。故障诊断专家系统子模块的处理对象为各种形式的故障信息,通过多种人工智能逻辑推理算法,给出可能的维修方案,提高诊断和维修的效率,这一子模块的数据来源包括两类,即实时监控获得的故障信息与机组或地勤人员报告的故障信息。维修决策支持子模块的驱动数据主要分为两类,一类是故障诊断专家系统得到的故障诊断结论,也可以是人工诊断得到的结论,另一类是健康状况趋势分析及预测系统分析得到的系统潜在故障信息。维修决策支持子模块在有上述两类驱动信息输入时,结合最低设备清单(Minimum Equipment List, MEL)、构型缺损清单(Configuration Deviation List, CDL)、航班计划、定期维修计划、可用航材情况等信息,进行综合考虑,以决定是否安排维护维修工作,什么时候进行等问题。

通过故障诊断与维修决策模块,综合分析得到预防性维护维修方案,最终实现视情维修。同时通过数据管理,不断丰富知识库的内容,使系统不断丰富、成长。整个实时监控与健康管理系统详细系统架构及信息流向关系见图2。

综上所述,大型客机运行实时监控与健康管理的最终目的是要实现飞机健康状况及时、有效、准确的把握,以此为基础实现预防性维护和视情维修。各相关系统模块主要完成以下基本功能:实时监控功能,实时获取飞机的运营状况,其中包括重要故障信息及重要系统参数信息;故障诊断功能,能根据故障信息(无论是实时监控的还是航后报告的),自动分析判断出故障的根源,并提出排除故障的方案;航后飞行数据下载及管理功能,能实现航后飞行数据记录器数据及中央系统数据的下载、译码、管理功能,这些数据是进行健康状况分析和预测及标识出潜在故障隐患的基础;健康状况分析、预测功能,能对飞行数据、中央维护信息进行译码、分析,并评价当前设备处于其健康退化过程中的哪一种健康状态,是正常状态、性能下降状态或是功能失效状态,标识出潜在的故障隐患;预测设备未来的健康状态,即研究下一次任务之内设备能否正常完成其功能要求,以及研究设备的剩余寿命的大小;具有人工干预的能力,能提供纠正措施,启动纠正问题的措施,在来不及的场合则启动故障保护的措施;维修决策功能,根据故障诊断的结论、健康状况分析预测的结论,评价故障的影响,结合运营计划、定期维修计划等,提出视情维修方案。

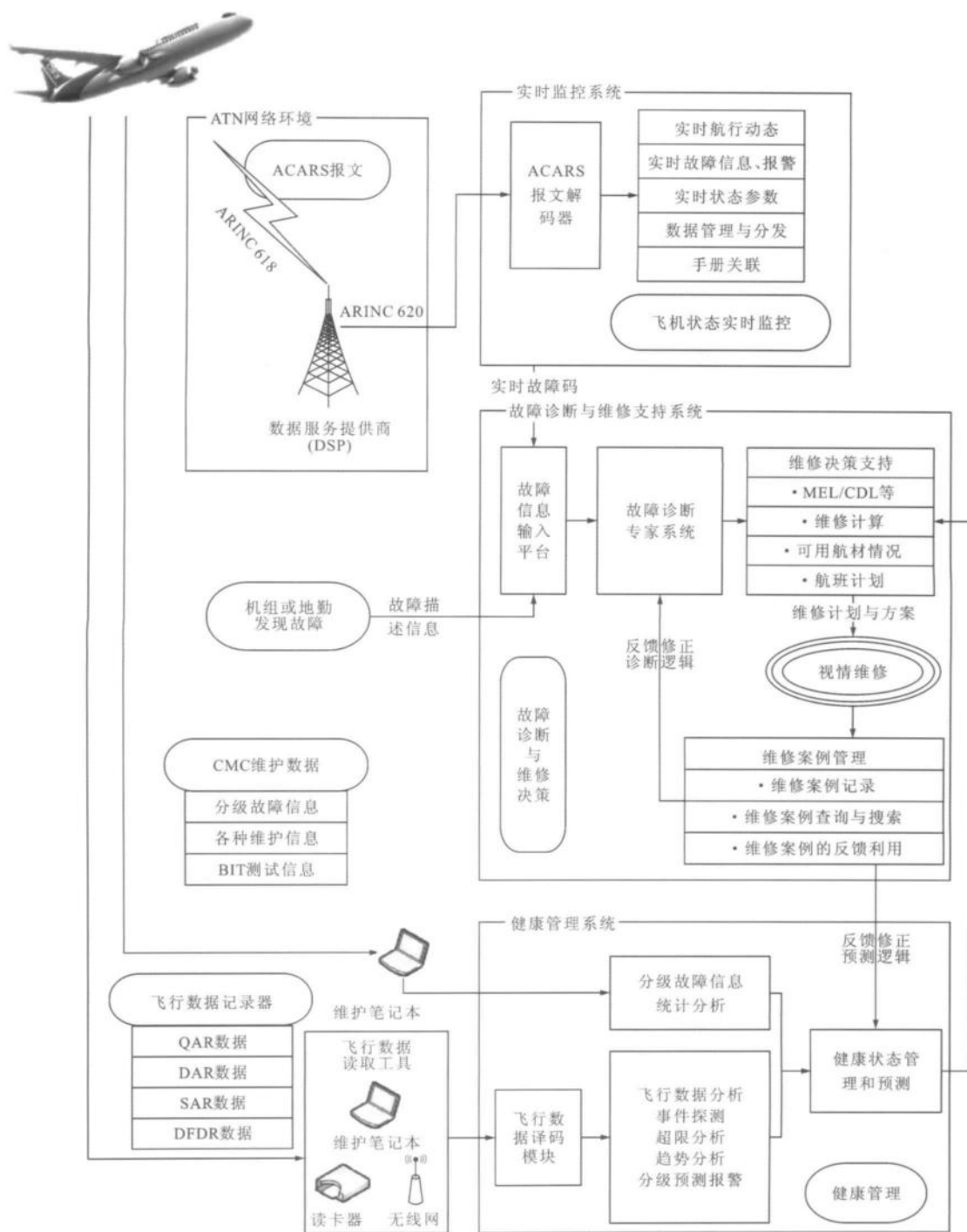


图2 实时监控与健康管理信息流

Fig. 2 Information flow of real-time monitoring and health management

3 健康管理系统关键技术与方法

中国商用飞机有限责任公司在健康管理系统的研发的总体框架下,对各模块所需要的技术展开研究攻关。关键技术主要包括机载及地面系统软、硬件新技术,这些技术的研究与实现需要应用并融合通用基础技术与各相关专业领域的新技术两方面知

识,对于中国大型客机的技术现状而言,尚需经历概念及基础研究阶段,主要有以下几个关键技术和方法需要展开深入研究。

3.1 地面实时监控技术

地面实时监控系統主要由地面实时监控軟件系統、地面數據管理系統、空地數據鏈路及飛行報告管理系統組成。機載系統是信息流的源頭,在無線通

信带宽以及通信网络的经济性制约下,先进的编码与实时传输技术是提高系统的效能与经济性的保证,因此,机载系统对信息如何进行编码和实时传输是地面实时监控技术需要首先研究的内容。其次,地面监控系统的建模、测试等相关技术的应用研究也必不可少。

3.2 趋势分析及预测方法

基于对飞机关键系统和发动机信息的监控以及趋势分析,预测其状态演化,进而对飞机的健康状态进行趋势分析及预测。这方面的研究重点是健康状态趋势分析和预测的分析方法,需要通过对飞机系统原理的充分研究,确定影响飞机系统健康状况的关键参数,并掌握标识故障隐患的分析算法。此外,分析算法还需要在实践中经历长时间的检验和修正。

技术难点和风险主要在于:飞机所需实时监控参数的制定及报警阈值设定,飞机性能预测和结构剩余寿命预测技术的可实施性,健康管理数据库的构建等。

3.3 剩余寿命预测方法

飞机运营之后,一些重要系统和动力装置就会产生可靠性、状态和故障数据,寿命预测一般有2种方法:从传统的可靠性工程角度出发,基于失效历史数据,由不同失效模式下的寿命规律进行剩余寿命预测;基于失效物理模型,进而预测特定状态下的条件剩余寿命。此外,更全面的方法是混合了失效物理模型和寿命数据的方法,可以同时基于可靠性、状态和故障信息来预测剩余寿命。

3.4 故障诊断算法

故障诊断基于获取的信息、历史航班数据、实时飞行数据和已有的诊断知识,针对确定的监控对象,建立相应的状态分析、诊断模型,通过一定的分析算法,对故障定位、定性和定因,并给出相应排除故障方法。通过故障诊断算法,辅助排故人员分析,提高消除故障的效率,大大缩减故障诊断过程,节约时间成本。其中故障诊断分析算法是研究重点之一,合理的故障诊断分析算法是提高故障诊断准确程度和效率的重要保证。本研究可以从基于手册信息自动链接、基于系统原理的人工智能自动分析、基于历史案例数据挖掘等几个方面入手展开。

3.5 维修决策方法

根据诊断的结果,可采取不同的维修策略,排除系统故障,恢复系统的使用功能。基于实现视情维修的目标,在展开前述研究工作的基础上,还需要展开维修决策方法的研究。

根据飞机设计研制、运营使用与维修的要求,需要对其维修任务进行规划设计,包括航线和送修的工作,如一些来自于维修方案的工程指令是定时维修任务,可以根据一些智能决策方法确定其维修时间、维修等级、程度等内容,也可用马尔可夫决策模型等方法结合机会维修建模方法,来决策多部件的维修程度和维修范围。这些使用阶段的维修任务决策支持方法不仅可以根据实际状态来决策维修任务的种类、工作的间隔等,也有助于改进初始的维修方案,从而实现维修任务的闭环控制。

在健康管理系统中,决策支持是健康管理系统的最终结果,实现视情维修则是健康管理的最终目标。决策支持技术需要解决以下问题:维修任务的形式化描述;确定健康管理的决策模型;选择决策模式;根据健康管理任务,确定决策类型;定义一种度量机制,确定不同决策的优先级。

3.6 系统验证及仿真技术

为了保证大型客机运行实时监控与健康管理技术系统总体架构的合理性、先进性,验证和确定系统的数据接口和通讯协议,为系统的进一步设计研究工作提供验证基础和技术积累,降低系统的研制风险,需要对系统的设计进行仿真验证试验。在大型客机运行实时监控与健康管理技术系统仿真试验中,需要开展对系统体系架构、数据接口、与其他系统的交联关系、通信协议、操作流程等方面的仿真,从而通过原理仿真获得系统的设计输入。考虑到与系统交联的设备较多,因此,对于系统的关键整件,采用真实的物理效应模型进行仿真。同时,出于试验成本和控制方面的考虑,对于外围接口设备和大量成员设备,可利用通用计算机及其软件进行仿真。

大型客机运行实时监控与健康管理系统仿真平台采用半物理仿真的方法进行系统的验证,利用真实机载设备搭建机载状态监控与健康管理系统计算机,利用计算机虚拟一个数字化飞机,仿真与状态监控与健康管理系统计算机交联的所有信号。整个仿真平台主要由仿真目标系统、仿真成员子系统、地面处理系统组成,见图3。

除了以上几点,随着综合程度的不断提高和模块化结构的采用,更多的制造厂商都参与到了大型飞机的研制中来,无论是在规模、数量以及系统之间的交联关系更显复杂,这些都对实时监控与健康管理系统的设计与综合提出了更多和更高的要求。

4 展 望

对于主制造商而言,实时监控和健康管理能及

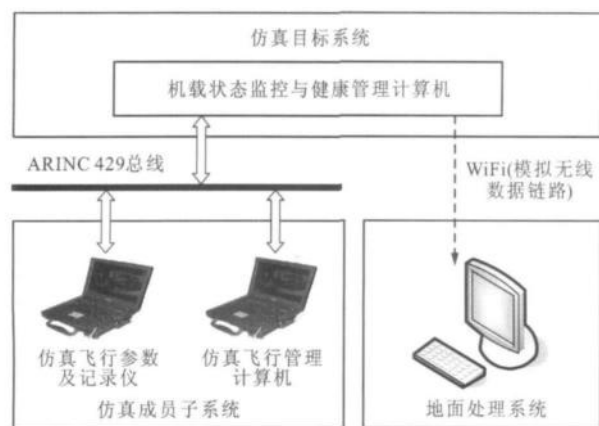


图3 系统仿真验证平台

Fig. 3 Platform of system simulation and validation

时准确地提供飞机或整个机队的有关信息,对于在需要的时候为航空公司提供充分的服务方面有着非常重要的意义,此外,这些信息在经过设计开发人员的比较、研究后,可以为飞机的设计改进提供依据。为提高维修质量,应加快新技术的应用,推动维修决策的信息化、智能化和科学化,使相关技术朝实时化、智能化、综合化、网络化方向发展,而开放的体系结构是此项技术发展前进的关键要素,无论是故障诊断算法、健康状况分析与预测算法、剩余寿命预测算法、维修决策支持算法等都不是一蹴而就的,而是要在日常的运营中不断检验、修正、完善。需要开发能够方便地进行修正算法的工具,真正能够处理现实不确定性问题的诊断和预测方法,提高故障诊断与预测精度,扩展健康监控的应用对象范围;利用采集的信息,对飞机零部件、子系统、整机或机队实现可靠性监控以及飞机的寿命预测与健康评估;采用多维修策略下的维修任务决策与维修资源调度技术,实现维修任务决策支持和维修资源合理调度;开发出大型客机运行实时监控与健康管理系统,形成大型客机运行实时监控与健康管理的理论方法、标准、技术和体系。

5 结 语

本文针对大型飞机实时监控和健康管理系统研究的需求,总结了大型飞机实时监控与健康管理的现状,重点介绍了 C919 大型飞机的健康管理系统总体架构及主要的功能模块,分析了实现该功能需要的关键技术。

目前,中国商用飞机有限责任公司作为承载国产大型客机研发、制造、客服任务的主体,已经着力开展大型客机实时监控和健康管理系统研究。下一步,应重点研究用于实现实时监控和健康管理的键支

撑技术,如实时状态监测技术、可靠性和寿命预测技术、系统集成技术等,以期在不久的将来,在 C919 大型客机上实现实时监控和健康管理系统功能。

参考文献:

References :

- [1] REVELEY M S, BRIGGS J L, THOMAS M A, et al. An examination of commercial aviation accidents and incidents related to integrated vehicle health management[C]// AIAA. 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA 2009-7124. Hilton Head: AIAA, 2009: 1-14.
- [2] WANG R, FIGUEROA F. Sensor area network (SAN) for integrated system health management[C]// AIAA. AIAA Infotech@ Aerospace Conference, AIAA 2009-2035. Seattle: AIAA, 2009: 1-4.
- [3] ZHAO Xiao-liang, QIAN Tao, MEI Gang, et al. Wireless ultrasonic transducer network for airframe structure health management[C]// AIAA. AIAA Infotech@ Aerospace Conference, AIAA 2009-1940. Seattle: AIAA, 2009: 1-7.
- [4] 崔建国,李忠海,吕 瑞,等.现代大型飞机的关键技术——健康管理技术研究[C]//中国航空学会.中国航空学会 2007 年学术年会.深圳:中国航空学会,2007:1-5.
CUI Jian-guo, LI Zhong-hai, LU Rui, et al. Research on PHM technologies for modern large commercial aircrafts[C]// Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. 2007 Annual Meeting of Chinese Society of Aeronautics and Astronautics. Shenzhen: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1-5. (in Chinese)
- [5] 王旭辉.飞机飞行安全实时监控关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
WANG Xu-hui. Research on key techniques of real-time monitoring for aircraft flight safety[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [6] FIGUEROA F, SCHMALZEL J, WALKER M, et al. Integrated system health management: foundational concepts, approach, and implementation[C]// AIAA. AIAA Infotech@ Aerospace Conference, AIAA 2009-1915. Seattle: AIAA, 2009: 1-14.
- [7] FIGUEROA F, AGUILAR R, SCHWABACHER M, et al. Integrated system health management (ISHM) for test stand and J-2X engine: core implementation[C]// AIAA. 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2008-5135. Hartford: AIAA, 2008: 1-8.
- [8] PETTIT C D, BARKHOUDARIAN S, DAUMANN A G, et al. Reusable rocket engine advanced health management system: architecture and technology evaluation summary[C]// AIAA. 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 99-2527. Los Angeles: AIAA, 1999: 1-10.
- [9] AGUILAR R, LUU C, SANTI L M, et al. Real-time simu-

lation for verification and validation of diagnostic and prognostic algorithms[C]//AIAA. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2005-3717. Tucson: AIAA, 2005: 1-8.

- [10] BARKHOUDARIAN S. Real-time on-board HMS/Inspection capability for propulsion and power systems[C]//AIAA. 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA 2005-3716. Tucson: AIAA, 2005: 1-6.
- [11] AASENG G B, PATTERSON-HINE A, GARCIA-GALAN C. A review of system health state determination methods[C]//AIAA. 1st Space Exploration Conference: Continuing the Voyage of Discovery, AIAA 2005-2528. Orlando: AIAA,

2005: 1-13.

- [12] 高占宝,梁旭,李行善.复杂系统综合健康管理[J].测控技术,2005,24(8): 1-5.
GAO Zhan-bao, LIANG Xu, LI Xing-shan. Complex system integrated health management[J]. Measurement & Control Technology, 2005, 24(8): 1-5. (in Chinese)
- [13] 袁慎芳,邱雷,王强,等.压电-光纤综合结构健康监测系统的研究及验证[J].航空学报,2009,30(2):348-356.
YUAN Shen-fang, QIU Lei, WANG Qiang, et al. Application research of a hybrid piezoelectric-optic fiber integrated structural health monitoring system[J]. ACTA Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 348-356. (in Chinese)

(上接第 113 页)

中 1 170 万条路径仅需要 72 s,完全能够满足中心式诱导的实时性需求。但是,由于可获取的实际城市路网资源有限,采用更多具有代表性的城市路网对本文方法进行测试研究以及对最短路径算法的可并行化程度进行不断挖掘是未来研究的重点。

参 考 文 献 :

References :

- [1] TOMKEWITSCH R V. Dynamic route guidance and interactive transport management with ALI-SCOUT [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1991, 40(1): 45-50.
- [2] 张赫,杨兆升,王伟.基于实时交通流信息的中心式动态路径诱导系统行车路线优化技术研究[J].公路交通科技,2004,21(9):91-94.
ZHANG He, YANG Zhao-sheng, WANG Wei. Research on vehicle route optimization of centrally dynamic route guidance systems based on real-time traffic flow information [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(9): 91-94. (in Chinese)
- [3] DEO N, PANG Chi-yin. Shortest path algorithms: taxonomy and annotation[J]. Networks, 1984, 14(2): 275-323.
- [4] O'CEARBHAILL E A, O'MAHONY M. Parallel implementation of a transportation network model [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2005, 65(1): 1-14.
- [5] 王媛.大范围战略交通协调控制系统关键技术研究[D].长春:吉林大学,2009.
WANG Yuan. Research on key technologies of large-scale strategic traffic coordination and control system[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [6] 李丽丽.基于拓扑关系的导航电子地图增量更新关键技术研究[D].长春:吉林大学,2009.
LI Li-li. Key technology research of incremental updating of

electronic navigation map based on topological relationship[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)

- [7] 陈洁,陆锋.一种基于双端队列的交通网络最短路径 Pallottino 优化算法[J].中国图象图形学报,2006,11(3): 419-424.
CHEN Jie, LU Feng. An optimization algorithm of Pallottino implemented with two queues in transportation network[J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(3): 419-424. (in Chinese)
- [8] SUNDELL H, TSIGAS P. Lock-free deques and doubly linked lists[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2008, 68(7): 1008-1020.
- [9] MEYERHENKE H, MONIEN B, SAUERWALD T. A new diffusion-based multilevel algorithm for computing graph partitions[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2009, 69(9): 750-761.
- [10] KARYPIS G, KUMAR V. Multilevel k -way partitioning scheme for irregular graphs [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 1998, 58(1): 96-129.
- [11] ZHAN F B, NOON C E. Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks[J]. Transportation Science, 1998, 32(1): 65-73.
- [12] ZHAN F B. Three fastest shortest path algorithms on real road networks: data structures and procedures[J]. Journal of Geographic Information and Decision Analysis, 1997, 1(1): 70-82.
- [13] MEYER U. Design and analysis of sequential and parallel single-source shortest-paths algorithms [D]. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2002.
- [14] MEYER U, SANDERS P. Δ -stepping: a parallelizable shortest path algorithm[J]. Journal of Algorithms, 2003, 49(1): 114-152.
- [15] KARYPIS G, KUMAR V. Multilevel k -way hypergraph partitioning[J]. VLSI Design, 2000, 11(3): 343-348.