飞机液压泵源预测与健康管理系统

赵四军 王少萍 尚耀星

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘 要：针对飞机液压泵源系统高可靠性和维修保障性要求，根据液压泵源系统故障特点提出了飞机液压泵源预测与健康管理系统的体系结构总体方案，描述了泵源预测与健康管理系统体系结构各层的功能，并对机载液压泵源健康监测系统和地面维护管理系统关键技术进行了研究. 基于数字信号处理器设计了机载液压泵源健康监测系统和地面维护管理数据库，给出了鲁棒、快速和智能的故障诊断算法，为典型液压泵源系统故障预测和后勤保障提供了有效的方法，实现了液压泵源系统预测与健康管理的功能.

关 键 词：预测与健康管理；液压泵源系统；体系结构；故障预测

中图分类号：TH 39

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0014-04

Prognostics and health management system of hydraulic power supply

Zhao Sijun Wang Shaoping Shang Yaoxing

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: With the requirement of high reliability and indemnificatory of on-board hydraulic power supply system, the general structure of prognostics and health management (PHM) of hydraulic power supply system based on its fault mechanism was presented, the function of every layer in PHM of hydraulic power supply was described, and the key technology of on-board PHM system and ground maintenance system was studied. Considering the rapid calculation requirement, the on-board PHM and ground database of maintenance based on digital signal processor was designed. Intelligent diagnosis algorithm and effective fault prognostics were realized. The correctness and validity of the structure of PHM of hydraulic power supply system were tested and verified though the experiments.

Key words: prognostics and health management; hydraulic pump system; architecture; failure prognostics

随着现代战争对武器装备任务出勤率和战备完好率要求的提高，加之测试、仪器、信号分析和计算机技术飞速发展，目前武器装备大量采用健康管理系统以实现状态监测、故障诊断和寿命预测，从而有效降低武器装备的事故率，节省维修费用.

预测与健康管理(PHM, Prognostics and Health Management)代表了一种方法的转变，即从传统的基于传感器的诊断转向基于智能系统的预测，从反应性的维修转向在准确时间对准确的部位进行准确维修的主动积极的活动.

国外健康管理技术已经从方案设计阶段发展到工程验证阶段. 霍尼维尔公司在波音777飞机检查与维护监测控制台和航电维护与使用保障系统中利用健康管理技术取得良好效益. 在军机方面，采用健康管理技术的联合攻击机，保障设备减少50%，维护人员减少20%～40%[1].

国内预测与健康管理的研究刚刚起步，北京航空航天大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学、某飞机设计研究所等单位尝试PHM关键技术初

收稿日期：2008-12-05

基金项目：航空科技创新基金资助项目(08D51010)；863高科技计划资助项目(2009AA04Z412)

作者简介：赵四军(1979—)，男，河南南阳人，博士生，windowsunzhao@yeah.net.

步研究[2-3].但到目前为止,国内尚未出现实用的PHM系统,基本还停留在集成体系结构和关键技术的探讨.由于液压泵源系统是飞机起飞、飞行操纵、着陆过程的关键系统,因此对其进行预测与健康管理具有重要的理论与工程应用价值[4-5].

本文提出了飞机液压泵源健康管理系统的体系结构,并对机载健康监测系统和地面维护系统进行了研究,通过健康管理试验平台实现液压泵源系统典型渐进性故障的预测和诊断.

1　飞机液压泵源 PHM 系统体系结构

1.1　飞机液压泵源 PHM 系统结构设计

根据飞行过程中实时监控和地面后勤保障与维修的需要,借鉴美国 F-35 的故障预测与健康管理系统的组成结构,本文提出如图 1 所示的飞机液压泵源 PHM 系统,主要包括机载液压泵源健康监测系统和地面维护管理系统两部分.

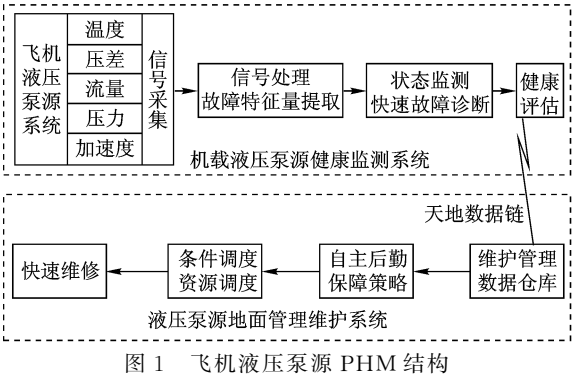


图 1　飞机液压泵源 PHM 结构

图 1 中,机载液压泵源健康监测系统可以实时监测飞机泵源系统健康状态,实时诊断系统或部件故障,并进行智能推理实现故障定位,从而采取有效措施防止故障蔓延而影响飞行安全,提供当前有效资源的状态信息;同时,通过天地数据链系统将飞机泵源系统状态传给地面系统,为系统后勤保障和指挥决策提供依据.地面维护管理系统负责接收飞行中泵源系统记录的数据,并进行数据处理,判断它们的健康状况,对系统或部件的故障进行预先估计,根据故障预测模型进行寿命预测,以决定是否对出现故障或即将发生故障的部件或系统进行替换和维护,并动态调整维修资源,生成自主后勤保障策略.

1.2　飞机液压泵源 PHM 系统分层设计

PHM 的分层设计是实现标准化体系结构的关键,下面给出了体系结构各个分层.

1) 数据采集层.本层依托分布式传感器网络,把采集到的信号数据转换成健康管理系统所要求的形式.

2) 信号处理层.鉴于液压泵源系统固有流固耦合影响,传感器检测到的信号容易受到干扰,采用倒谱包络、Hilbert 变换、小波变换等鲁棒信号处理方法.

3) 状态监测层.根据液压泵源系统故障特点,采用多传感器信息融合等智能故障诊断算法和自适应故障阈值进行典型故障的状态监测与故障诊断.

4) 健康评估层.将当前状态和故障信息与其退化规律比较,评价其健康状况.

5) 预测层.根据系统未来运行剖面和当前健康状态,依据液压能源系统性能退化规律预测故障.

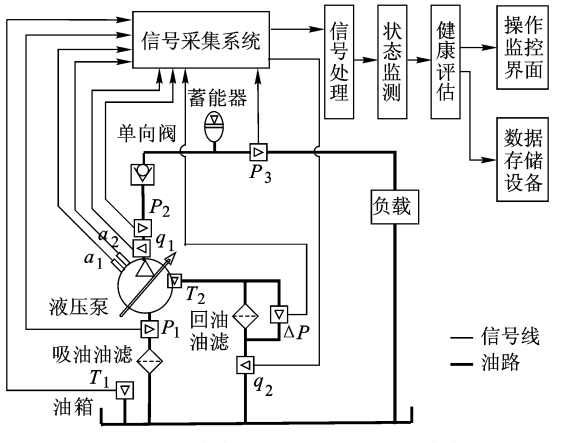
6) 决策支持层.根据下层信息并结合专家系统对泵源系统进行维修决策和重构策略研究.

7) 健康表达层.该层应具有和其它层通讯的能力,提供 PHM 系统与用户的人机接口.

2　机载液压泵源健康监测系统

2.1　机载液压泵源健康监测系统设计

机载液压泵源健康监测系统主要实现前 4 层的功能,它的组成主要为分布式传感器网络和嵌入式健康管理系统(图 2).



a_1,a_2—加速度传感器;P_1,P_2,P_3—压力传感器;
T_1,T_2—温度传感器;ΔP—压差传感器;q_1,q_2—流量传感器.

图 2　机载液压泵源健康监测系统

监测系统通过检测传感器信号,进行信号处理和快速故障特征提取,生成健康记录.嵌入式健康监测系统将监测到的重大故障上报机载泵源监控界面,监测数据存入存储器中作为健康记录,并将故障数据和实时状态通过天地通讯数据链传输至地面维护管理系统.

图2中，a_1，a_2 分别测量泵壳体轴向及径向加速度；P_1，P_2 分别测量泵入口、出口压力；T_1，T_2 分别测量油箱、泵壳体温度；ΔP 测量回油油滤两端压差信号；q_1，q_2 分别测量泵出口和回油流量.

2.2 机载液压泵源健康监测系统关键技术

2.2.1 鲁棒故障特征提取

由于泵源系统故障机理复杂，故障特征提取困难，故障信息模糊性强. 根据机载液压系统的特点和结构，优化设计多传感器布局，用尽量少的传感器捕获更多的故障信息，采用小波变换、Hilbert包络等方法可以有效去除环境干扰和流固耦合的影响，从而突出故障信号特征.

2.2.2 高效快速故障诊断算法

由于机载健康监测系统强调的是实时监控和快速诊断，通过智能推理实现准确故障定位，因此研究高效快速的故障诊断算法对于机载系统尤为重要. 粗糙集可以刻画具有不精确、不确定和不完整信息，而液压系统传感器感知的信息正好有此特性，可以使用粗糙集来实现高效快速的故障诊断.

2.2.3 故障预测

PHM较传统的故障诊断系统最鲜明的特点是可以实现故障预测，飞机液压系统故障预测是健康管理系统中最困难的部分，也是健康管理系统中最关键的部分. 实践和理论表明，灰色模型所需样本量小，模型表达式与计算简单，便于应用[6]，因此可以利用历史数据应用灰色预测方法对泵源系统进行故障预测.

3 地面维护管理系统

地面维护管理系统(图3)以维护管理数据仓库为核心，实时接受空地数据链传输的飞行数据，更新仓储维护的后勤数据和泵源系统的维修数据，对于特定泵源系统结合先验知识和设计模型评价其健康状况，对系统或部件的故障进行预先估计，根据故障预测模型进行寿命预测. 通过专家知识库决定是否对已出现故障或即将发生故障的部件或系统进行替换和维护，并动态调整维修资源，以实现快速维修.

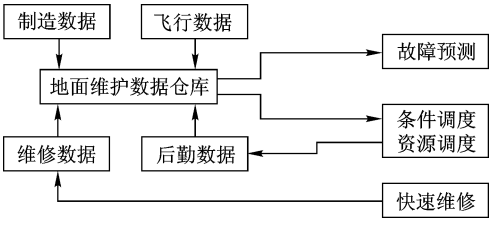


图3 地面维护管理系统

4 飞机液压泵源PHM系统验证

为了验证本文提出的飞机液压泵源健康管理系统，根据健康管理系统的核心结构，搭建基于DSP(Digital Signal Processor)的健康管理试验平台，如图4所示.

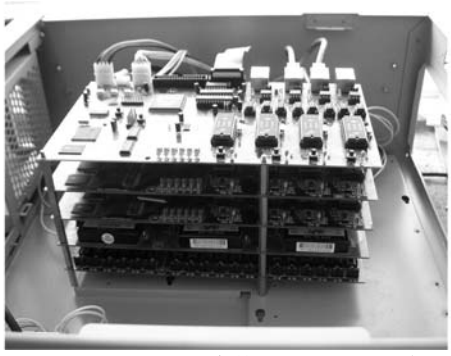


图4 液压泵源健康管理系统试验平台

4.1 机载液压泵源健康监测系统

基于DSP的机载嵌入式健康监控平台采集泵源系统传感器信号，利用DSP的快速运算能力进行信号处理后通过快速故障诊断算法判断泵源是否发生故障，如果发生压力或者流量突变等对泵源当前性能造成重大影响的显性故障，则发出报警. 如果发生的是对泵源当前性能不造成直接影响的渐进性故障，则根据故障模型和使用包线预测此故障何时会对系统功能造成影响，并通过无线网络将故障数据传输到地面管理维护系统.

当发生柱塞球头游隙增大故障时，引起泵的附加振动，频率成分复杂，会将一些特征频率点处的信号淹没，造成故障泵特征频率点处轴向振动能量信噪比之和远远低于正常泵，游隙越大，信噪比越小. 通过计算泵轴频率的1到9次谐波频率点处功率谱幅值与其邻域内功率谱均值的比率之和(特征频率点的信噪比之和)，可以判断是否发生游隙增大故障. 在故障诊断算法中，对采集的泵源轴向振动信号通过Hilbert变换进行包络，平滑功率谱，然后计算其特征频率点的信噪比之和，对比阈值，即可快速判断游隙增大故障.

图5和图6为机载健康监测系统得到的正常泵与柱塞游隙增大故障泵振动频谱图.

图7为实际记录的泵源柱塞游隙增大故障退化曲线和机载健康监测系统利用灰色预测模型得到的柱塞泵游隙增大故障退化曲线.

4.2 地面维护系统

根据实验室条件，地面维护管理系统工作的

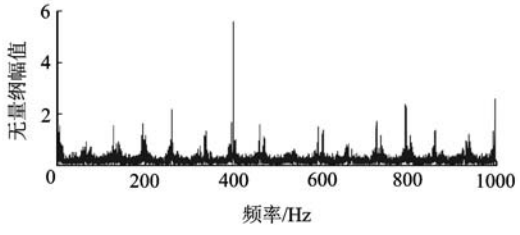


图 5　正常泵振动频谱图

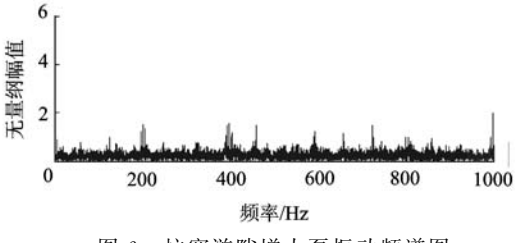


图 6　柱塞游隙增大泵振动频谱图

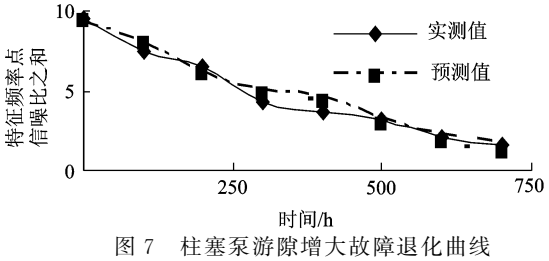


图 7　柱塞泵游隙增大故障退化曲线

重点放在飞机液压泵源系统健康管理知识库构建和维修决策支持研究. 建立飞机液压系统故障模式数据库、特征算法库、案例知识库、故障模型库、诊断/预测算法数据库、推理与决策算法库、运行资源和维修资源库. 其中故障模型库、运行维修资源库通过数据接口与数据库管理系统交互信息. 核心调度模块是本部分研究的关键,它完成特征算法、诊断与预测算法和推理与决策算法的管理,有效地根据实时检测的液压系统健康状态将机载系统与后勤保障衔接起来,向用户提供机载液压泵源系统所必需的信息,生成快速维修策略. 图 8 为飞机液压泵源系统 PHM 知识库.

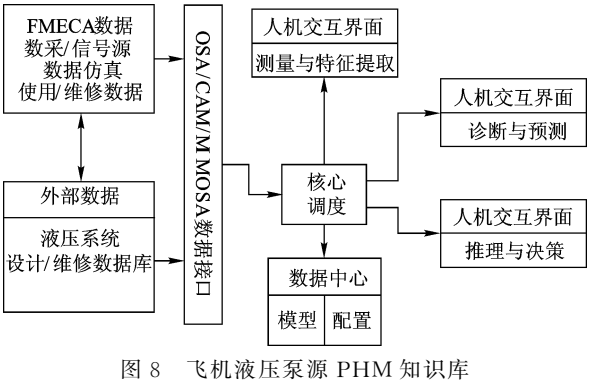


图 8　飞机液压泵源 PHM 知识库

5　结 束 语

PHM 是我国新一代大型飞机故障诊断体系的发展方向,对提高飞机安全性能、提高维修保障效率、降低寿命周期费用、提高战斗力将起到重要作用.

通过对飞机液压泵源 PHM 系统的研究可以得出下面的结论:①由于下一代大型飞机具有高度智能、高度复杂,分层融合式的体系结构,将飞机液压泵源 PHM 系统划分为机载健康监控系统和地面维护管理系统的方案,适合于大型飞机的采用. ②飞机液压泵源 PHM 系统作为一个复杂的系统工程,是飞机的一个有机组成部分,而不是附加的部件,必须在新机型号设计中加以考虑.

参考文献 (References)

[1] 王宝珍. 预测与健康管理技术的发展与应用[J]. 测控技术, 2008,27(2): 5－8
Wang Baozhen. Evolution and application of PHM technologies[J]. Measurement & Control Technology, 2008, 27(2): 5－8(in Chinese)

[2] 曾声奎,吴际. 故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空学报,2005,26(5):626－632
Zeng Shengkui, Wu Ji. Status and perspectives of prognostic and health management technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626－632(in Chinese)

[3] 张叔农,谢劲松,康锐. 电子产品健康监控和故障预测技术框架[J]. 测控技术,2007,26(2): 12－16
Zhang Shunong, Xie Jinsong, Kang Rui. Framework of prognostic and monitoring technologies of electronic products[J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(2): 12－16 (in Chinese)

[4] 王少萍,苑中魁,杨光琴. 液压泵信息融合故障诊断[J]. 中国机械工程,2005,16(4): 327－331
Wang Shaoping, Yuan Zhongkui, Yang Guangqin. Study on fault diagnosis of data fussion in hydraulic pump[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(4): 327－331(in Chinese)

[5] 王少萍. 液压泵计算机辅助测试与故障诊断研究[D]. 北京: 北京航空航天大学自动控制系,1994
Wang Shaoping. Computer aided test and fault diagnosis to hydraulic pump[D]. Beijing: Department of Automatic Control, Beihang University of Aeronautics and Astronautics, 1994(in Chinese)

[6] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1986
Deng Julong. Gray forecasting & decision-making[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1986(in Chinese)

(编　辑:刘登敏)