

轻型飞机健康管理及故障预测的应用^{*}

Application of Prognostics and Health Management on Light Aircraft

中国民用航空飞行学院 卢俊文 朱新宇 郑 波
西南交通大学电气工程学院 王倩莹

〔摘要〕 随着轻型飞机的大量使用,其可靠性和可用性不断面临新的挑战。因此,轻型飞机的健康管理及预测(PHM)技术显得日益重要,它不仅能够保证飞行安全,同时也可以降低使用成本、合理安排维修计划。针对目前尚未成熟的 PHM 技术,本文首先对轻型飞机 PHM 系统的框架以及受益进行了分析。其次,讨论了轻型飞机 PHM 系统设计与分析中的关键问题。最后,阐述了轻型飞机 PHM 技术应用的关键技术难题以及未来发展方向。

关键词: 健康管理及预测 轻型飞机 故障诊断及预测 维修

〔ABSTRACT〕 To face new challenges appearing in reliability and availability of more and more light aircraft, Prognostics and Health Management (PHM) is proposed and shows great power in guiding maintenance plan and cutting related costs. However, the aviation application of PHM is still immature until now. In this paper, some important points on light aircraft PHM are discussed. Firstly, framework, architecture and benefit for light aircraft PHM is analyzed. Then, the key design and analysis problems of light aircraft PHM system are reviewed. Finally, the anticipated challenges and future direction are provided, suggesting those areas in which further improvements are necessary.

Keywords: PHM Light aircraft Fault diagnosis and prognostics Maintenance

随着人类对复杂、昂贵机器的使用以及全球性的激烈竞争,研究人员不断开发新的技术手段来增强产品工作的有效性、降低维修成本^[1]。过去的几十年里,人工、半自动或全自动的故障诊断及预测在民用和军用市场中得到了广泛应用^[2]。预测是指通过评估产品偏离正常工作状态的程度来对产品的可靠性进行判定。健康

管理系统是事先对失效进行预测的程序集合。故障预测与健康管理工作(Prognostics and Health Management, PHM)能够在系统生命周期内确保其安全健康的工作,它包含故障诊断、预测以及健康管理3部分,能够完成对目标故障的探测与定位,同时可以预测目标的剩余寿命并做出合理的维修决策,从而最大限度地满足用户需求^[3]。

尤其在可靠性要求很高的航空领域,PHM 技术显得更加重要。同时,对于当前高度数字化的飞机,相关数据的采集变得更为容易,将其大量地应用在 PHM 系统中,进而提高系统对故障诊断及预测的精确性。一个完善的 PHM 系统具有以下几个方面的优势:能够改变维修的策略,实现视情维修(Condition-Based Maintenance, CBM),可以减少用来测试的设备以及维修人员的工作量^[4]。

从美军获取的数据可知,飞机等武器系统的维修和使用费用占到整个寿命周期总费用的 72%,其中 1/3 的费用是由于不必要的维修所产生的。比起使用费用,维修费用的降低显得更加容易^[5]。PHM 技术的引入能够减少备件、维修设备并减低人力成本。

随着国内低空空域的开放,轻型通用飞机将大量地投入使用,这势必导致轻型飞机的维修工作量大大增加,为了确保飞行安全,节约运营成本,将 PHM 系统应用到轻型飞机中是很有必要的。

1 PHM 系统框架体系需要考虑的关键问题

对于所有的复杂系统(如航空器)都具有两个必备模块:用于工作的能源和通信机制。这两个模块与系统体系所实现的功能紧密联系在一起。PHM 系统的输入与输出的方式变化多样,甚至多种方式结合(环境、机械、电器、热、声、视觉、触觉等的信号),系统必须能够对这些输入、输出进行较好的处理^[6]。PHM 系统框架下实现的系统功能要与用户或使用者的要求保持一致^[7]。PHM 系统一般由多种类型的子系统组成,其中大部分为航空电子系统,如命令与数据处理子系统和电源系统。

^{*} 国家自然科学基金民航联合基金重点项目(U1233202);中国民用航空飞行学院青年基金(Q2012-003)资助。

1.1 能量供应

为 PHM 系统提供能量的方式是多种多样的,可以由外部提供,也可由内部提供。系统所需能量是由子系统和组件实现功能的多少以及复杂性所决定的^[8]。能量的供给也要考虑子系统和组件的密集度以及位置分布。同时需要分析 PHM 系统在不同工作模式下的能量消耗率使其能够满足各种工作状态以及子系统的能量需求。

能量源对整个 PHM 系统起着关键性的作用,要确保满足所有的负载要求以及续航要求,同时要有足够的能量裕度来应对特殊情况。在考虑电气失效管理的能量裕度时,设计者需要优先考虑系统内部故障检测、隔离以及恢复,对失效反应的及时性和有效性^[9]。

在一些 PHM 系统或其子系统中,能量的供应方式不仅仅局限于电能,也可以是热能或机械能(用在某些作动系统中)。要依据实际的需要以及可行性来确定所需能量的供应方式。

1.2 数据的通信

数据通信对于 PHM 系统非常重要,无论是无线、有线信号,必须确保数据通信的可靠性,信号交换协议必须要考虑到系统所受外界环境的影响,同时要为系统做出正确控制预留足够时间^[10]。同时,在选择通信方式时要考虑故障容限和裕度管理。数据通信规则也受到系统组件的类型以及兼容性的限制。

为了信号传输的方便,传感器采集到的模拟信号往往需要转换为数字信号。传感器的敏感度、布置等都是数据通信需要考虑的关键问题。

2 PHM 系统的设计与应用研究

图 1 为典型的 PHM 系统设计图,描述了构成 PHM 系统设计的主要组成模块。该系统具有反馈功能,能够可靠地完成数据收集以及分析,这对系统的故障预测和诊断是至关重要的。图 2 为 PHM 系统离线与在线部分实现框架图,离线与在线部分相互补充,构成了功能完整的 PHM 系统。

2.1 技术权衡研究

技术权衡研究主要是为了使系统对故障诊断和预测达到一个最佳平衡状态^[3]。技术权衡技术的目标有:(1)支持系统工程过程的决策需求;(2)评估待选项(要求、功能、配

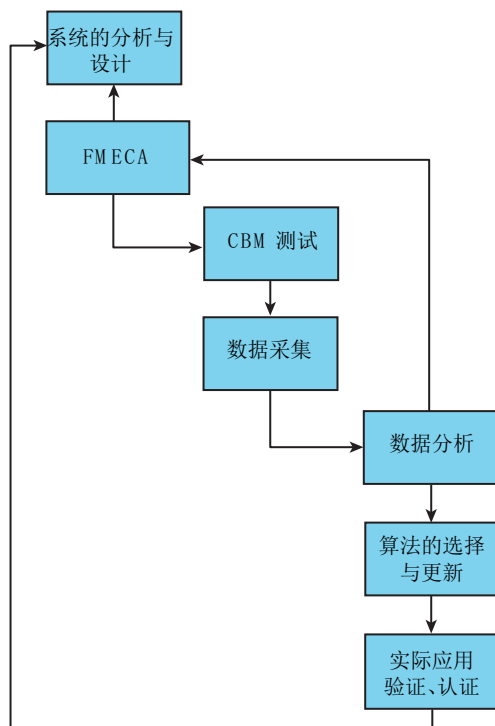


图1 PHM 系统的集成设计

Fig.1 Integrated approach to PHM design.

置);(3)集成并考虑所有的因素;(4)推荐最佳的解决方法;(5)发展并修正系统的概念;(6)判断是否需要进一步综合性分析,做出取舍。

其中,一种比较成熟的技术权衡研究遵循被称为集成产品与过程设计(Integrated Product and Process Design, IPPD)方法^[11]。IPPD 的功能包括:(1)建立需要;(2)问题描述;(3)建立目标值;(4)产生可行的选择方

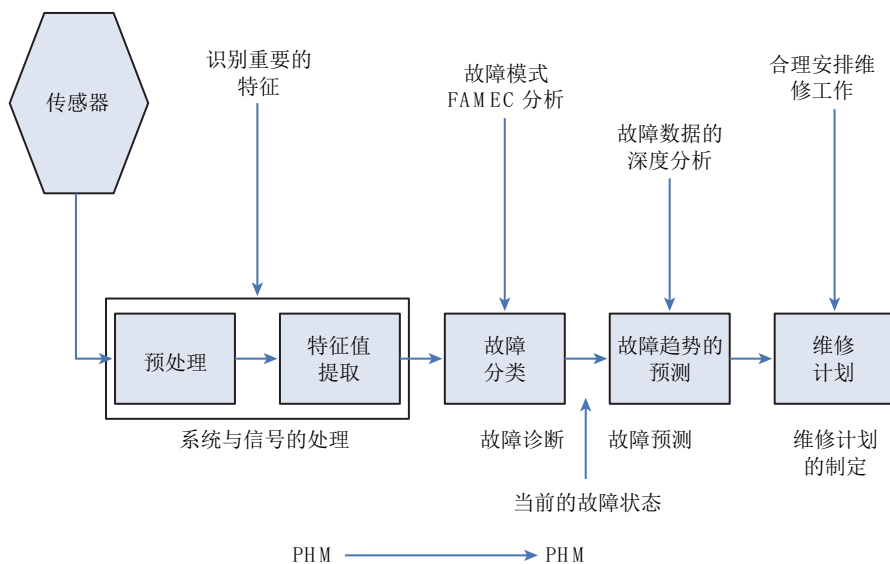


图2 PHM 系统的实现框架图

Fig.2 PHM cycle

案;(5)做出决策。

美国国防部进行的 IPPD 研究主要针对技术预测与技术鉴别、评估以及选择(Technology Identification, Evaluation and Selection, TIES)。故障诊断与预测相关的研究属于 TIES 类别。进行 IPPD 研究能够完成以下任务:(1)定义问题,使用质量功能展开(Quality Function Deployment, QFD)工具来获取“客户”需求,定义综合设计分析,鉴别组件功能,监控和测试需求等^[12];(2)设定具体取值,建立取值目标以及可行性限;(3)进行可行性选择;(4)进行选择;(5)最终做出决定。

图 3 给出了实施 IPPD 的重要工具以及相互联系,其中, QFD 用来获取客户需求和定义设计综合分析。

2.2 FMECA 分析

理解失效机制的原理是设计 PHM 系统的基础, FMECA 分析为设计者提供了对失效分析的综合框架。通过 FMECA 分析能够找到相关失效事件的根本原因。为达到这一目的,需要定义失效的模式、重要度、发生频率以及可测试性。先进的 FMECA 分析可以得到最优故障特征的算法,检测和隔离早期故障,并且预测出重要部件的剩余寿命。FMECA 可以集成到现有的管理控制和数据获取或其他的数据管理和控制中心中,进而便捷地为使用者提供识别失效事件和事件根源的信息。

2.3 CBM 测试 - 计划的系统设计

通过 CBM 测试 - 计划来确定 PHM 系统所需仪器、数据采集装置、测试程序,并且获取故障数据,进而来训练和验证故障诊断与预测的算法。测试计划的一般流程为:

- (1) 判别系统的工作模式;
- (2) 依据相关控制变量和田口方法来对故障模式进行判别^[13];
- (3) 选择传感器的类型以及数据采集的装置;
- (4) 使用基于正交表的田口矩阵进行多级实验;
- (5) 决定在基线和故障数据下的测试次数及其类型,进而满足用户需求、预算等;
- (6) 选择传感器并进行校准精确。

2.4 性能的评估

PHM 系统需要满足多目标的要求,为用户提供多

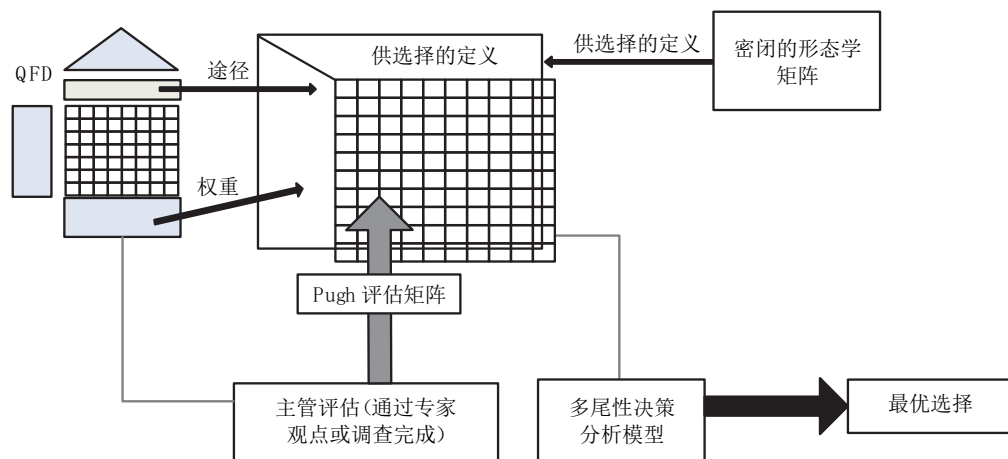


图3 实施IPPD的工具及其相互联系

Fig.3 Tools and their interaction for implementing the IPPD approach

种有用信息,如机务维修人员、飞行员以及系统设计人员等^[14]。进而协助维修人员在最佳时间做出维修,保证飞机的最大利用率和安全性。

对 PHM 系统的性能评估主要是从技术和经济两个层面展开的。这里从经济角度评估 PHM 系统的性能,不仅能反应新技术的优势,而且能够显示出经济上的可行性^[15]。结合维修、使用情况的成本 - 效益分析所涉及的内容有:

- (1) 评估传统维修手段下,所产生的使用、维修等费用分析;
- (2) 隐形成本分析,传统维修模式(如故障后维修、定时维修)带来的损失成本分析;
- (3) 对引入 PHM 系统带来的设备、人员培训等费用分析;
- (4) 引入 PHM 系统后,对整个生命周期内的成本 - 效益合计。

2.5 PHM 系统的验证与适航认证

只有 PHM 系统经过验证与适航认证之后,才能真正在飞机中得到广泛应用^[16]。PHM 系统的验证是为了满足系统的设计要求。系统性能标准是系统验证的基础,一个成功的 PHM 系统会对下面的问题给出肯定的回答,“构建的系统是否能够在设定的约束条件下满足所有设计需求?”^[17]

目前,还没有专门针对 PHM 系统硬件和软件的官方适航认证文件,主要还是基于军用、民用飞机的适航文件基础之上对其进行认证。早在 1992 年,文件 RTCA/D0-178B(航空系统以及设备中关于软件的认证)已经对航空系统软件的适航认证做出了规定^[18]。2000 年的 RTCA/D0-254 对航空电子设备硬件做出了相关适航认证要求^[19]。2008 年, MIL-HDBK-516B 规定了航空器系统的适航认证标准^[20]。近来,由 Honeywell 研

制的健康与使用监测系统(Health and Usage Monitoring Systems, HUMS)已经在美国军用直升机上得到了使用。美国军方的航空工程指挥部(Aviation Engineering Directorate, AED)对HUMS以及基于HUMS的维修适航标准进行了规定,并出版了相关的手册^[21]。

总之,PHM系统的验证与适航认证是一个复杂的系统工程,需要多部门、多学科领域工程技术人员共同完成。

3 总结与展望

PHM涉及多学科和众多研究领域,需要各种高新技术(如新型传感器技术、在线监测技术等),又需要坚实的基础理论(如新型故障诊断与预测理论等)作为支撑。目前PHM的重要地位已经得到工程界的广泛认同,工程需求也日益增加,随着大量轻型飞机的使用,为了节约维修和运营成本,保证飞行安全,在轻型飞机中引入PHM系统将成为必然。然而国内PHM的研究无论是技术上还是理论上离实际要求还有不小差距,需要研究人员开展更加深入的研究。

目前,PHM的理论以及具体实现中,存在着许多技术难题。本文主要分析了轻型飞机对PHM技术需求以及相关的技术问题,同样适用于其他行业。为了搭建轻型飞机的PHM系统,应该在以下方面进行深入研究:

(1) PHM系统软件开放性的研究,通过不断升级、更新来增强系统的可维护性、稳定性;

(2) 研究PHM技术的标准,为PHM技术广泛应用打下基础;

(3) 研究PHM系统的自我修复功能;

(4) 新型传感器技术,异种传感器数据融合传输技术、传感器嵌入技术,传感器布置优化以及布线技术;

(5) 新引进的PHM系统与飞机系统本身的兼容问题,包括电源的供给等;

(6) PHM系统本身的耐久性问题,包括飞机在实际运行中PHM系统的耐久性、系统传感器的维修、更换以及系统其他部件的维修;

(7) 考虑到飞机服役环境的复杂性,研究PHM的故障诊断与预测算法,增强系统的鲁棒性以减少误判和虚警。

综上所述,通过攻关相关的技术难题,得到适航当局的认可,将PHM系统应用到轻型飞机中,具有很大的经济价值和实际意义。

参考文献

[1] Boeing. 787 GoldCare-airplane business solutions [EB/OL]. [2011-10-01]. <http://www.boeing.com/commercial/goldcare/index>.

[2] Zeng S K, Pecht M G, Wu J. The development of prognostic and health management (PHM). *Aviation Transaction*, 2005, 26(5):626-633.

[3] Vachtsevanos G, Lewis F, Roemer M, et al. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems. John Wiley & Sons Inc, 2006.

[4] Khak A, Tiemo J. Influence of prognostic health management on logistic supply chain. *IProceedings of the 2006 American Control Conference*, 2006.

[5] Boller C, Chang F K, Fujino Y. Encyclopedia of structural health monitoring. John Wiley & Sons Inc, 2009.

[6] Propes, Lee S, et al. A real-time architecture for prognostic enhancements to diagnostic systems. *Knoxville Proceeding of Marcon 2002 Conference*, 2002.

[7] Maier M W, Reichtin E. The art of systems architecting. CRC Press, 2002.

[8] Marbach P R. Directed energy weapon system architecture to meet network centric operations requirements. *The 16th Annual International Symposium Proceedings*, 2006.

[9] Hempstead M, Tripathi N, Mauro P, et al. An ultra low power system architecture for sensor network applications. *32nd International Symposium on Computer Architecture*, 2005.

[10] Ames Research Center NASA. Ames Technology Capabilities and Facilities. Design principles for robust ISHM [EB/OL]. [2008-08-05] http://www.nasa.gov/centers/ames/research/technology-onepaggers/design_principles.html

[11] Schrage, DeLaurentis D, Taggart K. FCS study: IPPD concept development process for future combat systems. *AIAA MDO Specialists Meeting*, 2002.

[12] Sullivan P. Quality function deployment. *Quality Progress*, 1986, 19(6):39-50.

[13] Montgomery C. Experimental design for product and process design and development. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1999, 48(2):159-177.

[14] Menzies T, Pecheur C. Verification and validation and artificial intelligence. *Advances in Computers*, 2005(65):153-201.

[15] He H B, Zhao J M, Xu C A. Cost-benefit model for PHM. *Procedia Environmental Sciences*, 2011(10):759-764.

[16] Kessler S S, Amaratunga K S, Wardle B L. An assessment of durability requirements for aircraft structural health monitoring sensors. *Proceedings of the 5th International Workshop on Structural Health Monitoring*, 2005.

[17] Orsagh F, Roemer M J. Development of metrics for mechanical diagnostic technique qualification and validation. *COMADEM Conference*, 2000.

[18] RTCA SC167, RTCA/D0-178B: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification[S], 1992.

[19] RTCA D0-254: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware[S], 2000.

[20] Department of Defense, MIL-HDBK-516B Handbook: Airworthiness Certification Criteria[S], 2008.

[21] Aviation Engineering Directorate, ADS-79-HDBK: Aeronautical Design Standard Handbook for Condition Based Maintenance Systems for US Army Aircraft[S], 2009.

(责编 深蓝)