

# 飞机机电系统 PHM 技术方案研究

王景霖<sup>1,2</sup>, 林泽力<sup>1,2</sup>, 郑 国<sup>2</sup>, 何 泳<sup>1</sup>

(1. 故障诊断与健康管理系统航空科技重点实验室, 上海 201601;

2. 上海航空测控技术研究所, 上海 201601)

**摘要:** 针对目前飞机 PHM 系统难以精确设计的技术瓶颈, 并为了满足提高飞机故障诊断与健康管理系统能力的目标要求, 文章在大量调研并参考国内外飞机 PHM 系统设计经验的基础上, 结合国内针对 PHM 设计的特殊背景, 通过对飞机机电系统进行了深入分析与研究, 提出了一种针对飞机机电系统 PHM 总体方案架构思想; 文章给出了机电系统 PHM 区域管理器结构的设计思路及机电系统 PHM 区域管理器设计, 开展机电系统 aFMECA 分析, 明确了该系统设计的指导思想、功能和组成, 并着重论述了各主要功能模块的设计方案, 最后形成了飞机机电系统 PHM 技术方案, 对于促进国内 PHM 技术的发展具有重要作用, 同时也为其他武器装备的 PHM 技术的研究具有一定的指导作用。

**关键词:** 飞机机电系统; 故障诊断; 区域级; PHM

## Research on PHM Technology for Aircraft Electrical and Mechanical System

Wang Jinglin<sup>1,2</sup>, Lin Zeli<sup>1,2</sup>, Zheng Guo<sup>2</sup>, He Yong<sup>1</sup>

(1. Key Lab. of Aviation Fault Diagnosis and Health Management Technology, Shanghai 201601, China;

2. AVIC Shanghai Aero Measurement & Control Technology Research Institute, Shanghai 201601, China)

**Abstract:** Aiming at the technical bottleneck of the PHM system, which is difficult to be accurately designed, and to meet the requirements of improving the technical capability of aircraft fault diagnosis and health management. In this paper, based on a large number of research and reference to the domestic and foreign aircraft PHM system design experience, combined with the specific background of domestic PHM design. Through in-depth analysis and Research on the mechanical and electrical system of the aircraft, a new method for the PHM system of the aircraft mechanical and electrical system is proposed. In this paper, the design idea of the structure of mechanical and electrical system PHM and the design of the mechanical and electrical system PHM is presented. The aFMECA analysis of the mechanical and electrical system is carried out. The guiding ideology, function and composition of the system are defined, and the design scheme of the main functional modules is discussed. At last, the PHM technology scheme of the electromechanical system is formed, which has important function for promoting the development of PHM technology in China, and it has some guidance for the research of PHM technology.

**Keywords:** mechanical electronic system of aircraft; fault diagnosis; regional level; PHM

## 0 引言

随着对飞机系统可靠性要求越来越高, 飞机预测与健康管理系统 (prognostics and health management, PHM) 技术的研究越来越受到人们的欢迎。飞机 PHM 技术综合采用各种信息技术、人工智能技术等领域的技术手段, 对飞机进行故障诊断与健康管理系统, 以强大的测试与诊断能力及非常低的虚警率确保飞机完成各种既定任务或者以最短的时间完成各种任务准备<sup>[1]</sup>。

飞机 PHM 技术不仅具有各种故障诊断、预测、及监测等功能, 而且其还能结合智能信息技术, 实现飞机的自主综合保障<sup>[2]</sup>。据美国联邦 (FAA) 和国家运输委员会 (NTSB) 的统计结果表明, 在飞机上应用故障诊断与健康管理系统, 可显著提高飞机的架次出动率, 极大提升飞机的使用效能和完成既定任务的能力, 减少地面维护和修理的停机时间, 节约维修费用<sup>[3]</sup>。

## 1 机电系统 PHM 设计总要求

以飞机机电系统为例, 开展机电系统 PHM 区域管理器架构设计, 建立机电系统区域管理器设计方法。

收稿日期: 2015-10-08; 修回日期: 2015-12-04。

作者简介: 王景霖 (1984-), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事飞行器智能维护方向的研究。

### 1.1 功能要求

机电系统区域管理器接收成员系统信息, 在机电系统层次上进一步综合诊断分析成员系统诊断结果, 得出系统的工作状态及故障对系统功能影响程度, 发送相关信息给飞机级管理器进行全机诊断决策, 主要实现。

1) 成员系统诊断综合、集成:

集成成员系统诊断模型, 实现对成员系统的故障诊断。

2) 系统关联诊断分析:

解决因飞机其他系统的工作状态的变化或机电系统内部成员之间的相互影响引起的成员系统故障的误判。

3) 系统健康评估及信息管理:

对成员级给出的故障信息进行管理, 根据综合诊断分析的结果, 去除误报的故障信息; 根据诊断结果评估系统当前何种健康状态, 综合给出当前状态对系统功能实现的影响分析结果<sup>[4]</sup>。

### 1.2 机电系统结构

机电系统通常由十一个成员系统组成, 分别为液压系统、燃油系统、供电系统、环控与热管理系统、防火系统、机外照明系统、发动机辅助系统、座舱盖系统、起落架系统、武器舱门驱动系统以及生命保障供气系统<sup>[5]</sup>, 同时机电系统与飞机附件机匣有着紧密的联系 (飞机附件机匣通过液压泵、燃油增压泵、交流发电机、回油泵以及燃气涡轮起动机传动与机电系统

交联), 机电系统组成见图 1。

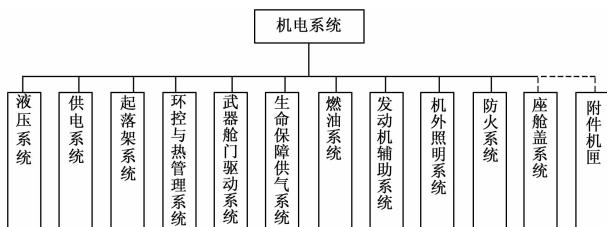


图 1 机电系统结构

## 2 机电系统 PHM 区域管理器结构

### 2.1 OSA-CBM 体系结构

根据国际标准化组织颁布的 ISO-13374 状态监视指南, 综合监视系统的功能由 6 个功能模块组成 (见图 2), 分别是数据采集、数据处理、状态检测、健康评估、预测评估、咨询生成, 执行该指南的一个范例为基于状态维修的开放系统体系结构 (OSA-CBM)<sup>[6]</sup>, 结构图见图 3。

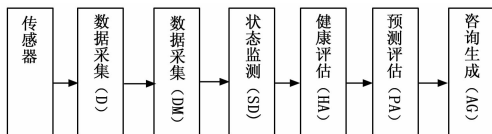


图 2 综合监视系统功能模块

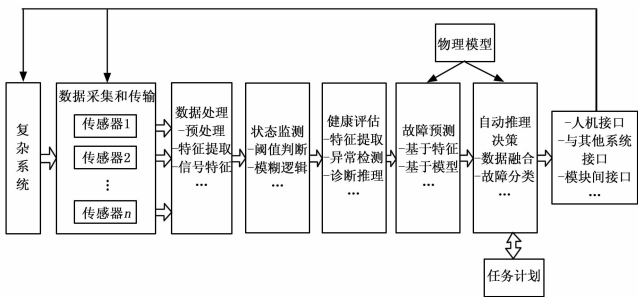


图 3 OSA-CBM 结构图

飞机系统 PHM 中成员系统、区域管理器、飞机管理器之间的关系。

### 2.2 接口关系

飞机 PHM 成员系统、区域管理器以及飞机管理器的接口交联关系见图 4 (以机电系统为例)。

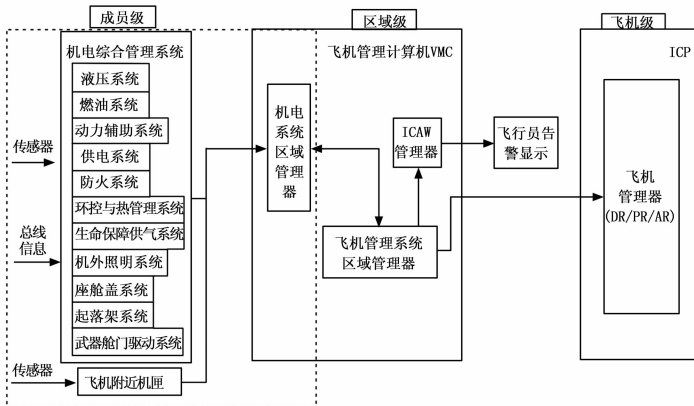


图 4 飞机 PHM 系统各级交联关系

电系统 PHM 区域管理器接收飞机管理系统区域管理器传来的飞机工作状态信息, 发送健康评估信息给飞机管理系统区域管理器, 为飞机级综合决策提供依据<sup>[7]</sup>。机电系统 PHM 区域管理器内部结构见图 5。

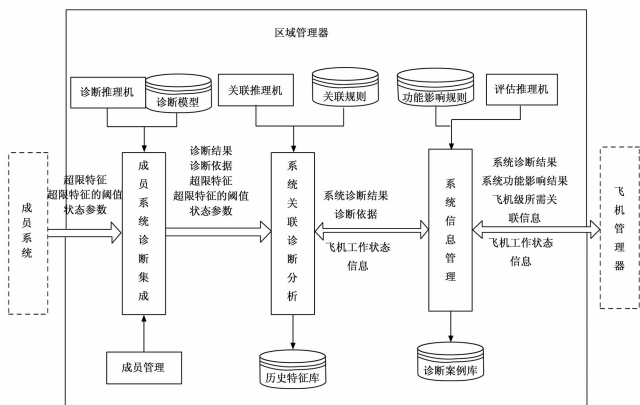


图 5 机电系统 PHM 区域管理器结构

机电系统 PHM 区域管理器由三大模块组成, 分别是成员系统诊断综合集成模块、系统关联诊断分析模块以及系统健康评估及信息管理模块。

## 3 机电系统 PHM 区域管理器设计

机电系统 PHM 区域管理器设计实施流程见图 6。主要分为以下几个步骤。

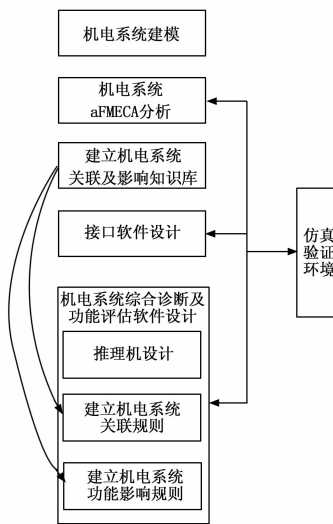


图 6 机电系统 PHM 区域管理器设计实施流程

- 1) 机电系统建模: 根据机电系统的工作机理和形成机制, 构建机电系统模型;
- 2) 完成机电系统 aFMECA 分析;
- 3) 建立机电系统关联及影响知识库;
- 4) 完成软件的接口设计工作, 如系统接口、数据接口等;

5) 完成机电系统综合诊断及功能评估软件设计工作, 主要实现各种推理机的设计、机电系统的关联规则的设计以及建立机电系统功能影响规则;

6) 在完成以上工作的基础上, 还要对机电系统 aFME-

机电系统 PHM 区域管理器与机电综合管理系统交联; 机

CA 分析、接口软件设计及机电系统综合诊断及功能评估软件设计等在仿真环境下进行验证。

### 3.1 系统功能建模

分析飞机机电系统中的各成员系统的组成以及各成员系统间的功能依存关系, 建立起机电系统的功能模型 (见图 7)。

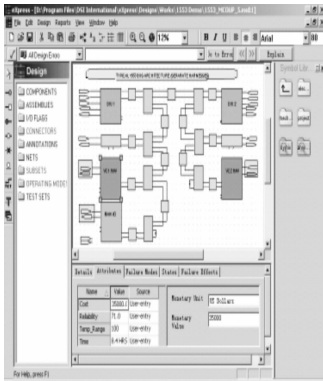


图 7 机电系统成员系统功能建模分析

### 3.2 开展机电系统 aFMECA 分析

在机电系统功能建模的基础上开展 aFMECA (扩展的故障模式影响、危害度分析), 即在传统的 aFMECA 之外, 根据状态监测、故障诊断、预测和健康管理需要, 分别对传感器采集策略、监测参数、故障征兆信号等相关信息进行全面分析。aMECA 表需要描述故障征兆与故障模式及其影响、应测参数、应布传感器及其采集策略之间的大部分因果联系, 并将上述关联因素之间的映射关系链以表格的形式 (如表 1) 表达出来。aFMECA 表的建立是做好 PHM 的基础, 需要大量的历史数据和专家经验支持。根据各子系统 aFMECA 结果, 基于共有的监测参数及机电系统功能模型, 找出因果关系中的上下位对象, 从而确定机电系统关联分析的子系统对象。并将于关联分析相关的故障模式、故障原因、监测参数、关联关系等信息反映在机电系统 aFMECA 表 (见表 2) 中。

表 1 子系统 aFMECA 分析表

子系统名称	功能	故障模式	故障原因	故障征兆	故障影响			传感器所在分系统	传感器所附部件	故障检测方法	处理措施
					局部影响	上一级影响	最终影响				

表 2 机电系统 aFMECA 分析表

子系统名称	功能	故障模式	故障原因	监测参数	关联子系统	关联子系统功能	关联子系统故障	关联子系统故障原因	关联子系统故障征兆	关联子系统监测参数	监测参数相互关系

### 3.3 机电系统与其他系统的关联分析

在机电系统 aFMECA 分析的基础上, 分析成员系统监测参数与外部因素 (发动机、飞行状态) 的关系, 采用多变量回归分析建立起各监测参数与外部因素的关系模型, 明确监测参数随外部因素的变化规律。

### 3.4 建立成员系统关联及功能影响知识库

根据 aFMECA 分析结果, 建立机电系统成员系统的关联知识库。关联知识库的主要内容为:

- 1) 机电系统各成员系统的功能关联 (相互联系、因果);
- 2) 机电系统各成员系统之间部件的关联;
- 3) 机电系统各成员系统监测参数的关联 (相互联系、因果);
- 4) 机电系统各成员系统功能故障下监测参数的关联 (相互联系、因果);
- 5) 机电系统故障状态、监测参数与系统功能实现水平的关系。

### 3.5 机电系统故障综合诊断及功能影响分析 (基于规则的推理机)

#### 1) 基于规则的推理机设计:

基于规则的推理机主要与知识库一起进行诊断工作, 在推理机中, 领域知识被提取到规则集, 由知识库管理, 系统使用这些规则和工作中的内存信息来求解问题, 当规则的 IF 部分与工作内存中的信息相匹配时, 系统执行规则 THEN 部分所指定的行为, 判断出现何种故障。

#### 2) 关联分析规则的设计:

在关联分析中关键的是关联规则的建立, 方案中根据 aFMECA 分析结果和机电系统关联知识库内容建立相应的关联规则。

#### 3) 机电系统内部关联分析规则:

设计机电系统内部关联分析规则, 解决机电系统内部成员系统之间的相互影响而引起的成员系统故障误判的问题。

#### 4) 机电系统与外系统关联分析规则:

设计机电系统与外系统关联分析规则, 解决因飞机其他系统的工作状态的变化引起的成员系统故障的误判问题。

#### 5) 机电系统故障对功能影响分析规则设计:

设计机电系统功能影响分析规则, 实现根据综合诊断分析的结果对机电系统功能的影响评估, 给出对机电系统功能影响结果。

#### 6) 诊断分析流程:

诊断分析的流程如图 8 所示。

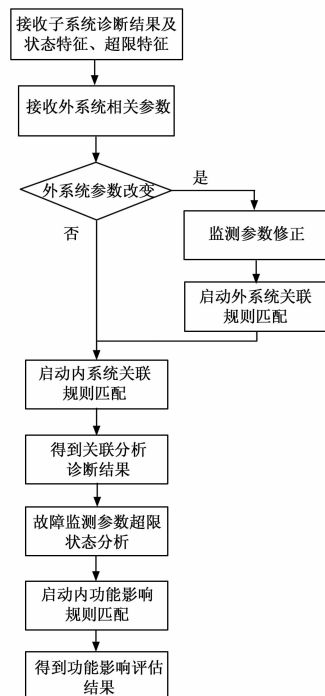


图 8 诊断分析流程

### 4 结论

本文在对国内飞机 PHM 系统设计参考资料进行调研与深入分析的基础上, 结合国外飞机 PHM 系统的设计经验, 以飞机机电系统为具体研究对象, 开展了飞机 PHM 系统区域管理器设计与实现方案研究, 及系统功能模块研究等, 在此基础上, 提出了飞机机电系统 PHM 总体可行性方案, 并详细讲述了各主要功能模块的设计方法。因此, 通过本文中相关技术的研究, 飞机 PHM 系统在未来的发展中, 随着各种先进算法的研究与发展, 能够实现对飞机进行实时故障诊断、预测以及健康管理等活动, 从而实现对飞机的自主综合和保障活动, 提高飞机的完成既定任务的能力。

#### 参考文献:

[1] Pecht M. Prognostics and health management of electronics [M]. Wiley Online Library, 2008.

[2] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM concept: potential impact on aging aircraft problems [A]. In Aerospace Conference Proceedings, 2002. IEEE [C], 2002; 6-3021-6-3026 vol. 6.

[3] 熊泽涛, 邱雷, 刘彬, 等. 飞机架构 PHM 及其关键技术 [J]. 测控技术, 2012, 31: 198-201.

[4] Tao X, Lu C, Lu C, etc. An approach to performance assessment and fault diagnosis for rotating machinery equipment [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, 2013 (1): 1-16.

[5] 派克·迈克尔, 康锐. 故障诊断, 预测与系统健康管理 [M]. 香港: 香港城市大学故障预测与系统健康管理研究中心, 2010.

[6] 莫固良, 单添敏等. 飞机(直升机)健康监测与预测系统发展与展望 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33 (6): 925-930.

[7] 黄蓝, 沈勇, 莫固良等. 航空故障诊断与健康管理工作 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.



(上接第 162 页)

表 7 CAN 总线命令帧接收及应答帧发送

	ID	Data0~Data7
发送 ZD-B001	22010000	00 00 00 00 00 00 00 aa
接收 TX-G001	ID28~ID21=73H ID20~ID13=01H	18 19 1a 1b aa aa aa aa
接收 TY-G001	ID28~ID21=75H ID20~ID13=01H	1c 1d 1e 1f aa aa aa aa
接收 TZ-G001	ID28~ID21=77H ID20~ID13=01H	20 21 22 23 aa aa aa aa
接收 TS-G001	ID28~ID21=79H ID20~ID13=01H	24 25 26 27 aa aa aa aa

测试结果如表所示, 实际测试结果表明陀螺模拟器可以满足需求。

### 6 结论

在对陀螺模拟器的工作原理和需求进行分析的基础上, 设计了一个基于 FPGA 的多接口集成陀螺模拟器, 可以模拟真实陀螺的接口数据流向和时序关系, 控制方式简单, 可靠性高, 通用性强。

本设计采用 FPGA 作为主控芯片, 将 4 路 RS-422 总线、2 路 CAN 总线和 1 路 RS-485 总线接口集成在单个模拟器模块上, 实现了对小卫星平台上的平台陀螺和捷联式惯导平台中陀螺的正常工作状态的接口信号的模拟。基于模块化开发的固件, 可以方便的适应多种陀螺模拟任务。测试结果表明该陀螺模拟器可以正常工作, 并通过修改部分参数可以模拟不同型号的陀螺输出, 具有良好的通用性。

本文设计的星载陀螺模拟器主要是针对正常工作状态下的陀螺接口进行模拟, 如果需要进行更加复杂的故障或异常工作

模式模拟, 还需要进行固件的扩展设计。

#### 参考文献:

[1] 林来兴, 张小琳. 现代小卫星与大众化空间时代 [J]. 航天器工程, 2015, 3: 75-84.

[2] 林来兴. 协同小卫星系统和服务 [J]. 航天器工程, 2013, 22: 110-118.

[3] 张艳娥, 常江, 秦洁. 现代小卫星技术与应用专题讲座(一)第 1 讲现代小卫星技术现状与发展 [J]. 军事通信技术, 2006, 2 (2): 71-76.

[4] 詹亚锋, 马正新, 曹志刚. 现代微小卫星技术及发展趋势 [J]. 电子学报, 2000, 28: 102-106.

[5] 张宗麟. 惯性导航与组合导航 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

[6] 赵光权, 徐彝, 张毅刚. 小卫星测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3): 503-505.

[7] 吴锦杰, 张斌斌, 项军华, 等. 基于部件模拟等效器的卫星姿态控制仿真系统 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (4): 641-644.

[8] Li J, Chai M. Design of 1553B avionics bus interface chip based on FPGA [A]. 2011 International Conference on IEEE Electronics, Communications and Control (ICECC) [C]. 2011; 3642-3645.

[9] 赵剑, 尤政, 张高飞. 小卫星常用数据总线技术 [J]. 中国航天, 2007, 2: 35-37.

[10] 张文凯, 关桂霞, 赵海盟, 等. 小卫星模拟系统中多路串行通信系统设计 [J]. 计算机应用, 2013, 33 (12): 3477-3481.

[11] 赵光权, 郑博, 梁军. 小卫星通用模拟器设计 [A]. 2009 中国仪器仪表与测控技术大会 [C]. 2009.

[12] Ben Y Y, Chai Y L, Wei G, et al. Analysis of Error for a Rotating Strap-Down Inertial Navigation System with Fibro Gyro [J]. Journal of Marine Science & Application, 2010, 9 (4): 419-424.

[13] Lefevre H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Artech house, 2014.

[14] Farsi M, Ratcliff K, Barbosa M. An overview of controller area network [J]. Computing & Control Engineering Journal, 1999, 10 (3): 113-120.