

民用客机 PHM 地面支持系统体系结构研究

付 昕¹, 王 菲^{2,3,4}, 熊 毅^{2,3,4}, 房红征^{2,3,4}, 李 蕊^{2,3,4}

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 201200; 2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

3. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室, 北京 100041;

4. 轨道交通装备全寿命周期状态监测与智能管理技术与应用北京市工程实验室, 北京 100041)

摘要: 故障预测与健康管理系统已用于检测和诊断设备的故障, 并评估其健康状态, 目的是提高设备的可靠性、安全性并减少其维护成本; 民用客机故障预测与健康管理系统是保障飞机安全运营的关键技术, 其架构是决定 PHM 技术应用是否成功的关键; 在分析总结典型故障预测与健康管理系统架构的基础上, 提出了一种基于 SOA 架构, 双总线技术的民用客机 PHM 地面支持系统架构设计方法, 实现了信息资源的共享, 保障了系统的飞行安全; 开发了基于 SOA 架构和双总线的民用客机软件系统, 已经成功应用于某型国产民用客机; 通过系统实现和试用, 验证结果表明, 提出的系统架构设计方法的有效性, 以此为基础设计的 PHM 地面支持系统方案可为航空公司构建更完善的运营支持系统提供参考。

关键词: 故障预测与健康管理系统; 地面支持系统; SOA 架构; 双总线技术

Study of the Architecture of the Civil Aircraft Prognostics and Health Management Ground Support System

Fu Xin¹, Wang Fei^{2,3,4}, Xiong Yi^{2,3,4}, Fang Hongzheng^{2,3,4}, Li Rui^{2,3,4}

(1. Shanghai Aircraft Design and Research institute, Shanghai 201200, China;

2. Beijing Aerospace Measure & Control Corp., Ltd., Beijing 100041, China;

3. Beijing Key Laboratory of High-speed Transport Intelligent Diagnostic and Health Management, Beijing 100041, China;

4. Beijing Engineering Laboratory of Rail Transportation Equipment Life Cycle Condition Monitoring and Intelligent Management Technology and Application)

Abstract: Prognostics and Health Management has been applied to detect and diagnose device faults and assess its health status, with aiming to enhance device reliability, safety, and reduce its maintenance costs. Civil aircraft Prognostics and Health Management Ground Support System is the key technology to ensure the safe operation of aircraft, and the architecture is the key to determine the success of PHM technology applications. On the basis of research on typical PHM software architectures, a software architecture based on SOA and Dual bus technology is proposed to share the information and ensure the flight safety. And the prognostics and health management system for civil aircrafts based on SOA and dual bus is developed, which is being successfully used in a certain type of native civil aircraft. The experiment system tests verified the effectiveness of the proposed PHM software architectures, the design of the PHM ground support system based on the proposed method can provide a reference of building a more perfect maintenance system for civil aircrafts.

Keywords: prognostics and health management; ground support system; service-oriented architecture (SOA); dual bus technology

0 引言

近年来, 电子技术、信息技术和自动化水平等快速发展, 现代民用飞机日益趋于大型化、复杂化、高速化和自动化, 随之带来的是民用飞机系统的规模扩大, 性能要求日益提高, 系统各部件耦合性增强。这就导致引发飞机故障的因素众多, 故障表现形式多样化, 各故障间存在着复杂的耦合关系。这不仅增加飞机的安全隐患, 影响飞机的正常运行, 也为飞机的排故维修增加了难度, 还给飞机的

安全运营带来了隐患。因此, 各国均将飞机健康管理相关技术作为提高飞机可靠性、保障飞机运营安全, 实现飞机视情维修的关键技术。例如, 美国在《航空安全计划》中将飞机健康管理相关技术列入未来影响航空发展的首要关键技术, 并制定、实施了飞行器综合健康管理 (IVHM) 专项预研计划。

民航故障诊断与健康管理系统 (Prognostics and Health Management, PHM) 是一项复杂的系统工程, 而 PHM 框架结构作为 PHM 技术的顶层规划与设计, 对于 PHM 技术的成功应用发挥着至关重要的作用。目前国外主要从基于 PHM 应用需求的物理框架与基于 PHM 功能需求的软件框架结构出发对 PHM 体系结构进行研究, 形成了相应的

收稿日期: 2018-07-21; 修回日期: 2018-08-07。

作者简介: 付昕 (1983-), 女, 江西临川人, 硕士, 高级工程师, 主要从事机载维护系统设计等方向的研究。

PHM 架构体系, 开发出具有实时监测与诊断功能的机载系统与地面支持系统, 并在实际中取得了成功应用, 实现了与维修性能工具箱等其他数字解决方案的无缝集成。例如, 波音公司的 AHM 系统、空客公司的 AIRMAN 系统等。我国相较于国外, 民用 PHM 技术发展起步较晚, 对于民机 PHM 技术体系结构还停留在理论研究阶段。李勇等结合当前装甲装备维修保障的需求, 设计了一种面向服务的 PHM 体系结构^[1], 将系统拆分成不同粒度的模块, 各模块间互不影响。系统通过调用各模块的服务接口, 实现系统功能, 提高系统的可用性与灵活性, 有效地满足当前装甲装备 PHM 系统分布式应用环境的要求。国内以航空发动机为对象, 提出了具有一般普适性的航空发动机 PHM 系统架构^[2]。文献[3]总结了 PHM 系统的功能

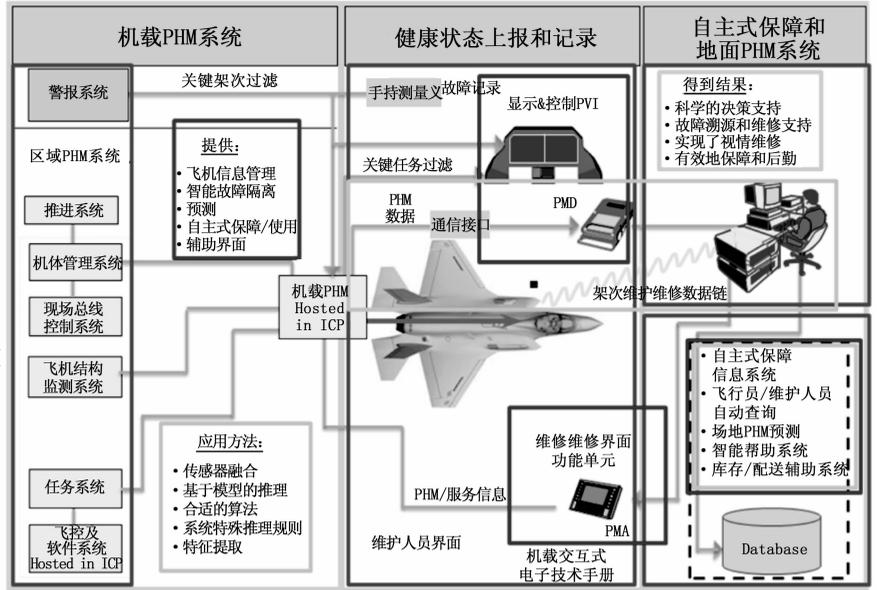


图 1 F-35 PHM 系统架构示意图

要素, 基于现有标准与规范, 设计出一种开放的 PHM 体系结构, 保障 PHM 系统设计的模块化、层次化、开放化以及跨平台的特性, 提高系统集成效率。文献[4]在分析美国 JSF 飞机的 PHM 系统结构基础上, 对我国军用飞机 PHM 技术的相关概念、体系结构、工程设计以及组织开发进行了初步研究。此外, 也有文献对航天器等领域的 PHM 地面支持系统平台架构开展了研究^[5-6]。然而, 上述对于 PHM 系统架构的研究主要集中于航空发动机、军机、装甲装备等对象, 缺乏对民机 PHM 地面支持系统的体系结构设计的研究。

本文在分析总结国内外飞机健康管理地面系统功能的基础上, 以顶层要求、系统设计到闭环仿真验证为主线, 提出了面向服务的民用客机 PHM 地面支持系统体系结构设计方法, 有助于实现信息资源的共享并保障系统的运营服务质量。

1 典型 PHM 系统体系结构分析

1.1 美国 F-35 战机 PHM 体系

美国 F-35 战机采用的是分布式的 PHM 体系架构, 主要从软硬件监控层、分系统管理层、平台管理层三层结构来进行规划与设计的, 如图 1 所示。软硬件监控层主要用于收集飞机传感器采集的原始数据, 该层由飞机现有传感器和数量尽可能少的 PHM 专用传感器以及一些高级算法构成的虚拟传感器组成。分系统管理层主要用来处理来自软硬件监控层的数据, 获取各分系统的健康管理信息。分析管理层由多个系统级区域管理器构成, 每个管理器有由软件推理机或功能软件模块组成, 利用神经网络、数据融合等推理技术, 完成多信源的数据融合。平台管理层是在分系统管理层的基础上, 综合各分系统的信息, 得到飞机整

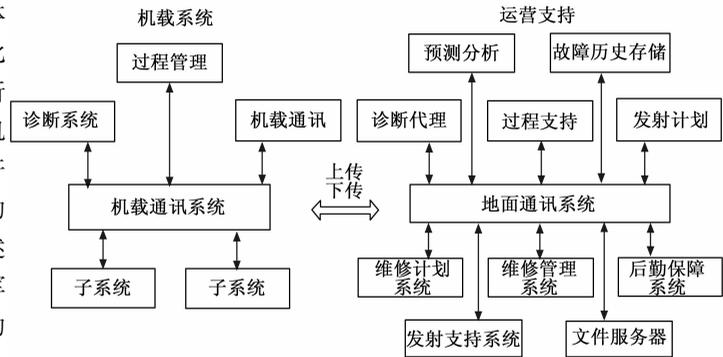


图 2 NASA 和波音的 IVHM 架构示意图

体的健康评估信息。

该系统分为机载 PHM 系统和地面 PHM 系统两个部分。机载 PHM 系统主要完成状态数据获取和实时性要求高的状态监测和系统报警工作。地面 PHM 系统完成如状态趋势分析、剩余寿命预测、维修计划优化、维修工作范围制定、维修成本管理等需要复杂模型计算与决策工作。

1.2 飞行器综合健康管理 IVHM 框架

飞行器综合健康管理 IVHM 框架是由 NASA 和波音在内的多个组织联合提出的^[7]。该框架定义了 11 个机载管理功能模块, 包括结构系统、推进系统和航电系统等子系统, 主要完成子系统的在线故障检测、诊断和报警以及飞行任务的决策等, 在保障飞行安全性的基础上, 提高飞行器的出勤可靠度。地面 IVHM 系统负责收集更为广泛的信息和资源, 完成对航空器的故障诊断、预测和维护等, 并将分析结果及时传输至地面维护系统与后勤保障系统。地面维护系统根据诊断分析结果合理制定维修计划, 实现人员与维护资源的优化配置。

按照数据、信息、知识、决策的管理过程和信息传递过程, IVHM 系统又可分为传感器层、信号处理层、状态监测层、诊断处理层、预测处理层、决策支持层、表达层。传感器层用于采集布置在飞行器上的各种传感器和飞行器系统的各总线数据。信号处理层是完成对各种采集数据进行相应的处理、分析、特征提取等, 将信号转变为有用数据。状态监测层是将信号特征与期望值或操作阈值进行比较获得相应的状态指示或报警。诊断处理层获取监控层数据, 判断监测系统、子系统或部件健康状态是否下降, 生成诊断记录并以一定置信度提出可能的故障状态。预测处理层结合未来使用包线对设备未来健康状态进行评估, 报告某时刻的健康状态或者评估在特定使用包线下设备的剩余寿命。决策支持层根据诊断和预测数据提出建议, 包括维护保障安排、调整设备操作配置以完成目标任务、调整任务的计划等。表达层为操作人员提供人机交互界面, 从而方便快捷获取所需数据。

1.3 PHM 体系结构基本特征

基于上述两节中典型 PHM 体系结构分析, 得出 PHM 系统体系基本特征, 主要包括:

1) 多层次的体系结构设计。通过功能分层实现与物理系统的平行组织, 降低系统设计与开发复杂性, 便于后续系统集成。

2) 多平台分布式。物理上, PHM 系统可由多个子系统组成。系统的功能实现需要多个对象系统/平台间的通力协作, 单个对象系统奔溃又不会影响系统的运行, 提高系统的可用性与扩展性。

3) 标准化、模块化设计方法。PHM 系统在设计过程中, 往往需要集成大量的软/硬件组件, 这些大都由不同的供应商提供。因此, 需要制定标准的、开放的接口规范集成不同的功能部件, 实现系统的模块化。

4) 高实时性。实时监控是 PHM 系统的基础。在此基础上, 评估关键部件的剩余寿命, 结合实时采集信息制定相应策略, 即时发送至地面保障系统, 因此, 有较高的实时性要求。

2 民用客机 PHM 地面支持系统结构设计

2.1 民用客机 PHM 地面支持系统的功能要素

民用客机 PHM 地面支持系统功能主要包括数据收发与处理、实时监控、故障诊断、健康评估、预测评估五项基本功能。包括:

1) 数据接收与处理。该功能是民用客机 PHM 地面支持系统运行的基础与关键, 主要包括空地实时数据处理、航后数据处理两个部分。空地实时数据处理功能主要是对实时接收的 ACARS 链路数据进行解析和存储的。航后数据处理功能主要是对航后 QAR 数据进行译码处理, 以此获取特征参数进行监控。

2) 实时监控功能。实时监控功能通过接收数据收发与处理功能传输的 ACARS 报文与译码数据, 实时监控航班信息与航行状态, 及时反映飞机的超限事件、异常事件与故障信息, 并给出相应的排查与维护建议。

3) 故障诊断功能。根据系统获取的故障信息, 通过一定的算法逻辑, 综合应用维修手册与维修历史案例, 快速对飞机故障进行诊断, 并给出相应的维修排查方案^[8]。

4) 健康评估功能。通过实时监控、故障诊断功能以及历史监测与维护数据, 给出飞机的综合健康评估结果, 指出可能出现的失效情况与发生概率, 为维护人员的工作提供辅助决策支持^[9]。

5) 预测评估功能。利用飞机的海量历史数据与实时飞行数据等信息, 加载预测模型, 对飞机性能、典型系统、关键部件未来的健康状态和失效模式进行评估, 给出飞机典型系统及其关键部件未来的健康状态发展趋势, 估计系统的剩余使用寿命, 以便工作人员提前做好维修准备^[10]。

2.2 面向服务的民用客机 PHM 地面支持系统体系结构

面向服务的体系结构 (SOA, Service-Oriented Architecture) 是一种建立在现有中间件技术和分布式计算概念的基础上构建分布式系统的软件工程方法。结合上一章分析结论, 从民用客机地面支持系统的功能需求出发, 以实时性、扩展性、安全性、可靠性、兼容性、实用性、灵活性为准则, 基于 SOA 双总线架构设计民用客机 PHM 地面支持系统的体系结构, 如图 3 所示。

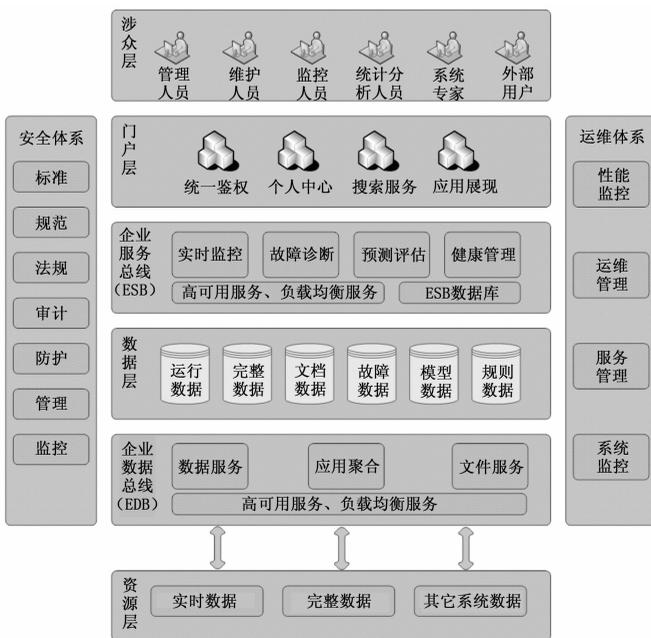


图 3 民机 PHM 地面支持系统架构

SOA 双总线架构是以服务总线作为信息传输枢纽, 以数据总线作为主数据共享平台的软件架构。通过二者之间的协同作用, 完成数据与服务的集成, 实现系统的“高内

聚低耦合”，提高软件的服务生命力。

企业数据总线是系统数据采集处理平台的核心。企业数据总线上运行实时监控、监控管理等标准数据服务，为上层应用提供统一的数据视图。一方面，可以将系统数据采集、处理功能划分为一个松散耦合的服务，实现系统功能间的松耦合，使得系统在稳定运行的同时，具备足够的可重用性；另一方面，可以很好的扩展系统功能，而不会对原有功能产生影响，提高了系统的可扩展性和良好的可维护性。同时，通过企业数据总线，很好满足系统分布式应用要求。

企业服务总线系统主要完成系统应用服务的整合以及数据整合，并采用硬件集群及软件集群相配合的方式实现高可用及均衡负载，保证了系统的水平、垂直扩展能力，为其提供高性能处理能力。此外，服务总线还为上层用户和其它业务应用系统提供细粒度、可编排流程的业务服务。通过对对服务的组合装配可快速响应复杂多变的用户需求。

基于 SOA 双总线的民用客机 PHM 地面支持系统体系结构又包括应用层、业务服务平台（企业服务总线 ESB）、数据层、数据采集处理平台（企业数据总线）、安全体系、运维体系。应用层主要为企业统一访问门户、系统消息统一管理平台的各类最终用户服务，并作为数据统一的发布平台为各类航空业务应用系统提供业务数据服务。业务服务平台主要负责对系统各类应用服务进行统一管理，为上层应用提供服务响应。数据层主要负责管理、维护、备份和归档系统各类业务数据、系统用户数据、系统配置数据等。数据采集处理平台（企业数据总线 EDB）主要负责对各数据源业务数据的收集、梳理、清洗、整合、处理、发布等过程，形成业务数据的统一信息视图。同时，也能根据上层应用要求，将报文通过 ACARS 数据链拍发给飞机。主要实现数据服务、文件服务和应用聚合等服务。安全体系主要是保证系统运行的合规性，保障系统运行的安全、可靠。运维体系为系统提供稳定、持续、可监控的服务管控功能，保证 SOA 双总线系统安全可靠运行。

设备ID	设备名称	设备类型	设备位置	设备状态	设备健康度	设备维护记录
CA1310	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1312	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1314	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1316	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1318	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1320	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1322	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1324	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1326	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1328	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1330	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1332	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1334	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1336	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1338	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1340	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1342	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1344	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1346	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1348	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1350	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1352	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1354	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1356	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1358	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1360	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1362	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1364	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1366	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1368	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1370	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1372	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1374	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1376	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1378	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1380	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1382	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1384	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1386	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1388	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1390	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1392	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1394	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1396	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1398	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27
CA1400	波音 737	波音 737	0802 01 47	正常	100%	2017-10-27

图 4 民机 PHM 地面支持系统界面图

3 系统实现

基于 SOA 双总线架构，采用 Java 编程语言设计民用客

机 PHM 地面支持原型系统，系统主界面如下图所示^[11]。目前该系统已成功应用于某型号民用客机，为数百架客机提供实时监控与故障诊断功能，有效地保障了飞机的运行安全。

4 结论

本文通过分析典型 PHM 系统体系结构，总结得出 PHM 体系结构的基本特征。结合民机 PHM 地面系统的功能需求，提出了一种基于 SOA 架构，双总线技术的民用客机 PHM 地面支持系统架构设计方法。在保障系统稳定性、可扩展性、可维护性以及高性能处理能力的基础上，很好地满足系统分布式的应用需求与灵活的业务需求变化，为后续系统的开发和运行管理打下了坚实的基础。

参考文献:

[1] 李 勇, 常天庆, 白 帆, 等. 面向服务的装甲装备 PHM 体系结构研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (7): 1880 - 1903.

[2] 尉询楷, 冯 悦, 刘 芳, 等. 航空发动机健康管理系统的架构研究 [C]. 第五届中国航空学会青年科技论坛, 南昌, 江西, 2012.

[3] 潘全文, 李 天, 李行善. 预测与健康管理系统体系结构研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007 (S): 32 - 37.

[4] 陈 青, 张观海, 刘 琪. 飞机预测与健康管理体系结构浅析 [J]. 飞机设计, 2011, 31 (2): 51 - 58.

[5] Fang H Z, Sun B, Fan H Z, et al. Design of the spacecraft health management ground support system based—on big data [A]. 68th International Astronautical Congress 2017 [C]. Adelaide, Australia, 2017.

[6] Fang H Z, Shi H, Luo K, et al. Technology of the space station health management integrated engineering environment and virtual test [A]. 64th International Astronautical Congress 2013 [C]. Beijing, 2013.

[7] Clancy D J. Model—based system—level health management for reusable launch vehicles [A]. AIAA Space Conference [C]. Long Beach, California, 2000: 1—8.

[8] 房红征, 熊 毅, 史 慧, 等. 基于案例和规则融合的民用客机故障诊断系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (10): 15 - 17.

[9] 黄加阳, 刘 昕, 柏文华, 等. 民用飞机健康状态评估方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (10): 3256 - 3258.

[10] Li R, Fang H Z, Xiong Y, et al. Fault prediction technology of civil aircraft based on QAR data [A]. 2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC 2017) [C]. Shanghai, 2017.

[11] Wang F, Pan S L, Xiong Y, et al. Research on software architecture of prognostics and health management system for civil aircraft [A]. 2017 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC 2017) [C]. Shanghai, 2017.