

新一代航空电子故障预测与健康管理系统综述

杨军祥, 田 泽, 李成文, 杨 涛, 王纯委, 刘 宇

(中国航空计算技术研究所, 西安 710119)

摘要: PHM 作为一种新的综合化系统检测、故障诊断、故障预测及健康管理技术, 是提高系统可用性、维修效率和降低寿命周期成本的重要手段, 已成为未来飞机航空电子系统设计的一项关键技术和重要目标之一; 文中从 PHM 技术和航空电子系统的发展角度, 介绍了 PHM 技术发展趋势和面临挑战, 重点对航空电子故障预测及健康管理 (APHM) 系统设计, 如层次化体系结构、功能要求, 以及故障预测、健康评估、系统维护等关键技术进行了详细讨论, 并给出了一种合理的系统健康诊断解决方案, 最后总结探讨了 PHM 技术的一些发展趋势。

关键词: 航空电子; PHM; 层次化结构

Summary of New Generation Avionics Prognostics and Health Management System

Yang Junxiang, Tian Ze, Li Chengwen, Yang Tao, Wang Chunwei, Liu Yu

(Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710119, China)

Abstract: PHM (Prognostics and Health Management), as a kind of new integrated system diagnosis, fault Prognostics and health management technology, is the main method to improve the system availability, maintenance efficiency, and reduce the life-cycle cost, has become a key technology and one of the important goals of future aircraft avionics system design. This article from the perspective of the development of PHM technology and avionics system, introduces the PHM technology trends and challenges, and emphatically to Avionics PHM (APHM) system design, such as hierarchical system structure, the functional requirements, health assessing, fault prognostics system maintenance and key technology are discussed in detail, given a reasonable avionics system health diagnosis solutions and finally discussed some development trends about PHM technologies.

Key words: avionics; prognostics and health management; hierarchical structure

0 引言

至今航空电子系统已经历了 4 代创新性发展, 其性能日益先进, 功能日益强大, 这给机载电子系统的故障诊断、预测及维修保障带来新的挑战。传统的基于机内测试 (BIT)、离线测试的诊断方式和“病后医治”(事后维修) 的维护方式, 由于其自身局限性、虚警率高、不能复现 (CND) 故障率高, 以及存在使用安全风险、维修效率低、维护成本高等问题, 已突出“力不从心”和斑斑劣势。为了提高航电系统的可用性和安全性, 减少间歇性故障和无故障发现 (NFF), 并降低全寿命周期维护成本, 一种集实时状态监测、健康诊断、故障预测及维修决策为一体的故障预测与健康管理系统 (PHM) 技术需求尤为迫切, 且与先导式 3R 维修方式^[1], 已成为未来先进航空系统设计的重要目标之一。关于 PHM, 美国马里兰大学的 Michael G. Pecht 教授定义: “故障预测是指通过评价产品与其期望的正常工作状态的偏离或性能退化程度来预告其未来可靠性的过程; 健康管理是指以抢先和迅速利用有利时机的方式来响应故障预知的一组程序”^[2], 其核心思想是: (1) 利用系统传感器数据, 借助智能推理 (如物理模型、数据融合、模糊逻辑及专家系统等) 来评估系统完成功能的状态; (2) 根据预

测数据、可用资源及使用需求给出维修决策支持。

经过近 20 年的研究和探索, PHM 技术已取得进步和成功应用, 但目前仍处于概念研究和技术开发阶段, 缺乏统一的标准, 并存在尚待突破的关键技术; 另外现有的标准, 如机械信息管理开放式系统联盟 (MIMOSA) 标准、国际标准化组织的 ISO-13374 标准等, 仅给出 PHM 系统设计的一般性概念和总体框架, 而未涉及系统设计的深层次建议, 如结构选型、特征提取、数据融合、预测模型等, 需要系统设计者深入研究分析, 并给出合理的解决方案。

1 PHM 技术发展及面临挑战

1.1 PHM 技术发展趋势

PHM 概念最早是 20 世纪 90 年代末, 由美国在联合攻击机 (JSF) 开发计划中提出而发展起来的一种用于复杂电子系统或关键系统的状态感知、故障预测、健康评估及维修决策支持的综合诊断、预测及保障管理技术。与传统的脱节式“检测-诊断-维修”方式相比, 它是一种允许在产品或系统的真实应用条件下, 对其可靠性进行评估的方法^[2]。PHM 是 BIT、状态监测技术的继承和发展, 是未来航空和任务系统状态监测、故障诊断、健康评估及故障预测技术发展的必然趋势, 其发展历程及趋势如图 1 所示。

2000 年美国国防部将 PHM 列入《军用关键技术》报告中, 得到政府、军工及工业部门的大力支持和发展的^[3], 并取得重大研究成果, 如美空军 JSF 战机的 PHM 系统、陆军直升机的健康与使用监测系统 (HUMS)、海军的综合状态评估系统 (IACS), 以及 Boeing 公司开发的飞机健康管理 (AHM) 系

收稿日期:2013-10-30; 修回日期:2013-12-28。

作者简介:杨军祥(1963-),男,陕西泾阳人,硕士,研究员,主要从事航电系统核心计算平台、综合任务管理系统方向的研究。

田 泽(1964-),男,陕西扶风人,博士,研究员,主要从事航空电子组装、专用集成电路方向的研究。

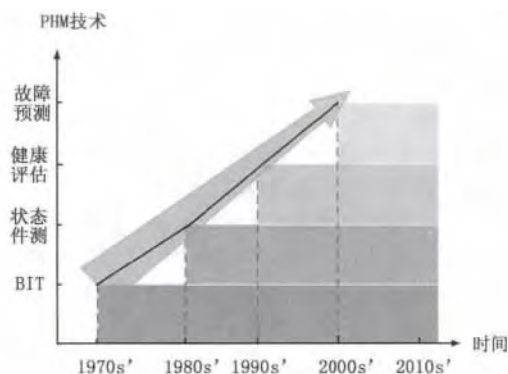


图1 PHM技术发展趋势图

统、飞机状态监测系统（ACMS）等。随着技术不断发展，PHM已演变成为世界范围内的一项研究热点，备受关注。2006年美国防工业协会公布了NDIA电子产品预测技术工作组最终报告草案，在该报告中针对电子产品的PHM技术研发现状及存在问题，确定了4个领域开发需求（即设计与分析评价工具、电子预测技术、失效物理模型、环境和事件检测硬件），规划了PHM技术发展方向，并计划在未来5—8年内完成技术开发^[4]。目前，国外已形成两大标准体系，即ISO—13374规范和MIMOSA的系列标准。标准规定了PHM系统的功能和接口、基于状态维修的开放式体系结构（OSA—CBM）及相应的描述语言，如统一建模语言（UML）、抽象接口描述语言（AIDL）、扩展标注语言（XML）等。NDIA需求定义和OSA—CBM标准制定，将极大推进PHM技术发展。

1.2 PHM研究面临的挑战

PHM是一种复杂的跨学科的分布式综合处理系统，涉及包括传感器探测、信号处理、数据传输、数据处理（包括数据融合、知识推理、评估分析等）、故障预测（包括故障建模、故障预警、剩余寿命预计等）、数据库管理及人机接口等技术，其系统设计和开发将会面临诸多挑战，经分析归纳为5个方面，即①PHM系统架构选型；②剩余寿命预测；③间歇性故障预测；④性能参数特征提取或门限设置；⑤累积损伤模型或算法。

2 航电PHM系统设计

2.1 层次化分布式体系架构

体系架构是一个系统总体“骨架”，对于系统，尤其是复杂航空和任务系统的设计极其重要，因为任何功能划分、功能接口及其通信上的不匹配或失衡均会严重影响整个系统性能发挥。因此，参照北大西洋公约组织（NATO）的航空电子系统结构委员会联合标准（ASAAC）所推荐的通用系统管理模型^[5]，如图2所示，APHM系统设计将采用一种具有3层功能的、分布式处理体系结构，即系统层、子系统层及资源元素层，其中飞机层是PHM系统的最高层，资源元素层是PHM系统的最底层；PHM中间层，具有双重角色，向高一层提供服务支持，向下一层提供各种操作控制。

APHM层：负责整个航电系统内部各子系统PHM管理、状态监测、故障诊断、健康评估、故障预测，并向上层PHM提供故障报告、通信服务。子系统PHM层：负责各子系统级PHM管理、BIT测试、状态监测、故障处理、故障诊断和隔离各设备/模块故障，并实现层间的通信服务，确保子系统运行安全。设备PHM层：负责各设备/模块内部BIT、状态监

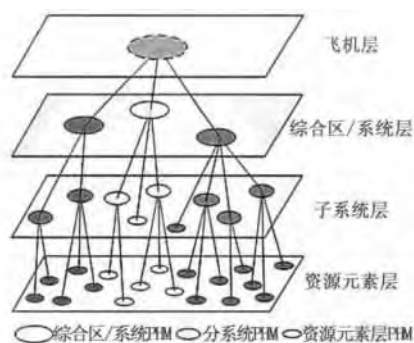


图2 APHM系统层次化结构

测、功能组件故障管理，并实现与SPHM通信服务。

2.2 功能组成与要求

参照MIMOSA标准定义的7层OSA—CBM模型，按功能将APHM系统划分为5个功能层，即数据采集与预处理、数据监测、故障预测与健康评估、维修决策支持和人机接口，其层次化结构如图3所示。APHM系统功能将分别由机载PHM和地面PHM两部分系统来协同完成，其中机载PHM系统功能分别由航电系统、子系统、设备/模块分布处理实现，并提供人机交互接口、与地面维护系统通信接口。由于各层具有相对独立的功能，低一层向较高一层提供相应操作和服务支持。只要各层之间的协议保持不变，任何一层的设计修改均不会引起整个航电PHM系统更改及相关认证。因此这种层次化体系结构既可简化APHM系统设计的复杂度，又可便于各功能层独立开发，并可降低系统维护成本。APHM系统各层功能要求如下：

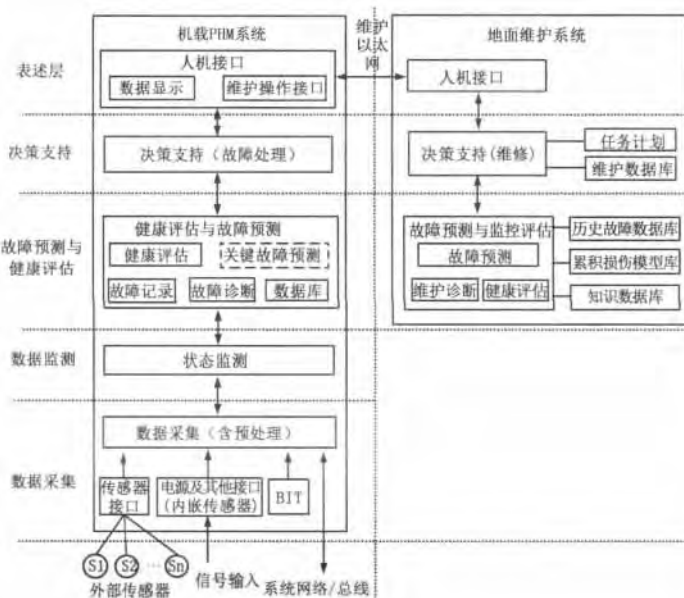


图3 PHM系统层式功能框图

（1）数据采集与预处理：实现各航电子系统、设备或模块的传感器数据存取，单/多通道信号处理，数据转换、信号滤波、数据重组和分类（特征提取）、以及数据传输功能；

（2）状态监测：实现各航电子系统、设备性能参数、运行状态、工作载荷、环境条件的实时监控，以及来自其他子系统或设备的状态和性能参数监测，与系统期望值或操作极限进行比较，给出所要求的状态及健康等级；

(3) 健康评估与故障预测: 实现健康评估、故障预测功能, 其中健康评估是根据来自状态监测层的各子系统或设备数据、维修历史数据、知识库数据, 进行数据融合及故障诊断, 确定被监测系统、子系统或设备是否性能退化、性能退化程度及故障发生的概率; 故障预测是根据被监测对象的工作包线、环境参数及预测模型等进行分析计算, 评估被监测系统或设备的未来健康状态趋势或估计剩余使用寿命 (RUL);

(4) 维护决策: 为了完成任务或任务剖面的修改, 综合考虑设备的历史故障、未来任务剖面、高一单元目标及资源限制后, 提供与维修活动相关的维修建议/预案;

(5) 表述层: 是系统的最高层, 实现系统的人-机接口功能, 包括各被监测子系统或设备的状态显示、故障告警及维护操作接口功能, 并具备向下各层的数据存取能力。

3 APHM 关键技术与方法

3.1 故障预测

由于航电系统包含设备种类众多、数量巨大, 且每个设备又由数百上千种元器件组成, 其故障模式、失效机理不尽相同; 元器件失效时间短, 其故障影响错综复杂, 这极大地增加了系统故障预测的难度和不确定性; 另外目前尚无一种成熟的技术可供借鉴, 如何构建系统的预测模型或算法已成为系统研究的关键技术之一。在国外, 用于故障预测方法很多, 归纳起来主要有 3 种: ①累积损伤预测法, 一种基于失效物理 (PoF) 建模、寿命周期载荷及失效机理知识的可靠性评估方法, 它综合考虑了产品的性能、工作载荷及实际环境条件, 是目前较为流行的一种故障预测方法, 如寿命损耗监测 (LCM) 方法^[2], 为航电设备乃至电子产品的剩余寿命预测提供了明确的研究方向; ②故障征兆监测法, 即一种基于“电子元件/设备故障发生前性能参数或特征物理量出现明显变化的事实或统计数据”而构建预测模型方法, 如工作电流、温度、匹配阻抗等, 为系统设计提供另一种解决思路; ③故障预警监测法, 选用内置预警电路芯片或板上设置预警电路 (canary devices) 进行故障预测的方法, 要求预警电路与被监测电路拥有相同的故障模式和失效机理, 且其失效率比被监测电路更高。目前基于该方法的 CMOS 工艺的预警元件已开始商业化, 可用于监测半导体因静电放电、热载流子、绝缘介质击穿等引起的失效现象^[6]。APHM 系统设计采用了前两种方法相结合的一种综合方法, 并选择温度应力及工作电流作为环境监测参数, 获得良好收效。

3.2 监测性能参数选择

鉴于航电和任务系统的复杂性、数量巨大及电子产品的故障特征 (如难于检测、失效时间短等), 选择何种性能参数来监测变得异常困难, 为此 APHM 系统将采用一种多级性能监测方法, 即系统设计由航电系统、子系统、设备提出各自的性能监测特征参数, 并分布加以实施; 同时由于环境应力, 尤其恶劣环境条件及过应力对于机载设备寿命影响巨大, 据美国空军总部对某沿海基地使用产品故障调查分析: 损坏或故障中 52% 是由于环境因素引起的, 其中温度占 40%、振动占 27%、湿度占 19%^[7]。另外基于电子元件/设备故障前, 其工作电流会出现明显变化的事实, 因此除设备特征参数外, APHM 系统设计将选取其工作电流、温度应力作为重要的监测参数, 并由各设备、子系统分布实现。同时由于不同环境条件下, 设备的工作温度、电流各不相同, 因此系统开发应分别进行测量取

样, 选取合理的系统容限, 并经过试验验证, 以确保系统预测的精度及确定性。

3.3 间歇性故障预测

间歇性故障 (IF) 和无故障发现是指不能鉴定的故障、未来 CND 故障或是具有特殊失效模式和失效机理的故障。长期以来, 间歇性故障一直困扰着航电系统的健康诊断及使用维护, 是机载电子系统设计面临的一大难题。据资料表明: 在航空电子产品中所有故障的 40%~85% 属于 CND 故障, 占到维修费用的 90% 以上^[4]。发生间歇性故障的原因众多, 但除检测算法缺陷外, 其主要原因是测试不充分、环境条件发生变化及信号连接点存在接触不良问题。目前, 针对此类故障, 尚无有效的解决方案, 但系统设计可通过以下几种方法得以缓解, 即①增加测试充分性, 可通过多种测试算法的融合来消除单一算法所带来的局限性或缺陷, 同时增加测试强度 (如测试向量复杂性、故障相关性等); ②增加测试监测点, 尤其是环境应力 (如温度、振动、湿度等) 及工作电流的监测, 通过多源数据来消除单通道测试的局限性及误差; ③研发新的损伤预测模型, 以适应间歇性故障的预测。

3.4 系统维护

PHM 系统将作为航空电子系统的一个重要组成部分, 将实现系统的维护管理任务, 其设计应兼容系统的实时维护处理和地面维修决策功能, 如图 4 所示。对于预测到某子系统/设备即将发生故障或“确诊”故障, 一方面将根据 PHM 健康诊断报告, 实时进行故障处理 (如数据显示、告警及故障记录), 同时向系统管理者或地面维护系统提供故障报告。系统管理者可进行故障处理及实时系统维护, 即根据系统“蓝图”、可利用资源及故障处理策略, 进行系统重构或资源重组 (包括冗余切换、功能降低等) 的容错处理, 确保系统或子系统安全运行; 另一方面地面维护系统将融合相关数据 (包括状态、历史故障、维护数据等), 进行数据比对、包线拟合、知识推理、评估分析及预测计算等, 最终给出系统维修方案或决策支持。不难发现, 如果将故障预测功能驻留于机载电子系统中, 即可实现系统的实时状态监测、故障预测及维修决策。

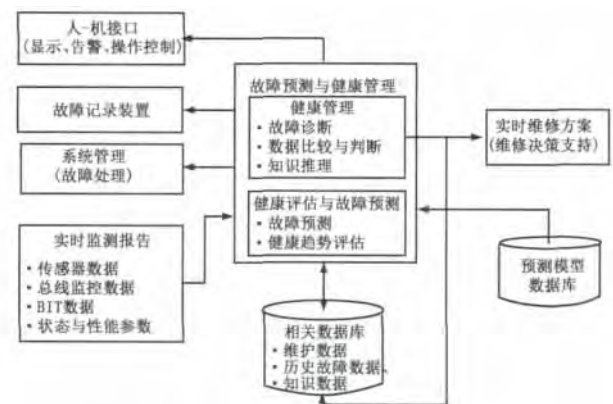


图 4 系统维护功能框图

3.5 系统设计考虑

继 F-35 飞机成功应用后, PHM 技术已成为先进航电系统的重要标志之一, 如何构建总体架构? 如何将其融入航电系统或设备设计中? 如何兼顾机载故障处理、地面维护系统设

(下转第 978 页)

表 3 例 2 测试结果

t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7
0	0	0	0	0	0	0
t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}
0	1	0	0	0	0	0
t_{15}	t_{16}	t_{17}	t_{18}	t_{19}	t_{20}	t_{21}
0	0	0	0	0	0	0

排除正常模块, 得到可疑模块: $\Delta U = U - G$, $\Delta U = \{c_{14}\}$

因为 $|\Delta U| = 1$, 所以故障模块为 c_{14} 灵敏度控制单元。

通过以上 2 个例子可以验证, 雷达综合诊断可以根据 BIT 和 ATE 测试结果将故障定位到模块一级, 所以测试实例符合要求, 诊断系统能够完成预先要求的诊断功能。

5 结束语

通过对基于多信号模型的诊断方法研究, 以及多信号模型的建立和故障—测试相关性矩阵的获取, 完成了机载设备综合诊断方案设计, 并以机载雷达为例, 验证了诊断方法的可行性, 为机载设备的生产和维护提供了重要的保障。同时, 本文只是以机载气象雷达为实例进行了验证, 还应对机载设备结构和功能进行深入的了解, 对模型进行调整和修改, 以此增加故障诊断的准确性和可靠性。

(上接第 974 页)

计, 是 APHM 系统设计面临的又一个棘手问题, 对此经过多年系统研究提出几点设计考虑, 即①采用开放式结构及标准化设计, 各功能接口遵从相关工业标准或接口定义, 方便各种故障诊断与预测方法的不断完善, 实现即插即用^[8], 并便于不同供应商产品的引入、系统集成, 同时可提高系统的灵活性和扩展性; ②硬件提倡采用内嵌传感器的集成电路或超大规模集成电路 (VLSI) 设计, 如多芯片模块 (MCM)、芯片上系统 (SoC) 等, 可简化系统硬件设计, 便于智能传感器集成, 同时可减少元器件种类和数量, 进而减少故障模式及失效机理种类, 提高航电设备/模块预测的确定性; ③空—地系统协同设计, APHM 系统设计既要进行合理的空—地功能划分, 又要兼顾机载 PHM 系统与系统管理 (包括任务管理、故障处理、资源管理等)、与地面维护系统设计, 实现机载 PHM 系统的实时状态监测、综合诊断、故障处理, 以及地面维护系统的健康评估、故障预测及维修决策 (包括维修、替换、报废等)。目前, 民机多采用这种空—地式 PHM 系统设计, 并取得良好效果, 如 B-777 飞机状态监控系统 (ACMS), B-787 机载维护系统 (OMS) 及其地面维护系统。

4 总结与展望

采用 PHM 技术和自主式保障系统, 可使飞机的故障不能复现 (CND) 率减少 82%, 维护人员减少 20%~40%, 后勤规模减少 50%, 出动架次率提高 25%, 使飞机的使用与保障费用比过去的机种减少了 50% 以上^[9]。因此, PHM 已成为新一代航空电子系统设计的一项关键技术, 是未来确保系统安全运行、提高可用性、降低寿命周期成本的一项重要技术手段, 必将得到大力发展。文中提出 APHM 系统的层次化分布式系统结构、关键技术及其解决方法, 对于未来航空电子系统, 乃至其他的复杂电子系统的 PHM 技术研究及系统设计具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 田雨. ATE 测试平台通用性与故障诊断的研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [2] 李光升. 基于 BP 神经网络的装甲车辆电源系统故障诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (10): 2719-2722.
- [3] 孔令宽. 基于多信号模型的卫星故障诊断技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [4] 曲建岭, 王新. 面向故障诊断的自动测试系统 [J]. 测控技术, 2009, 28 (3): 1-4.
- [5] 龙兵. 多信号建模与故障诊断方法及其在航天器中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [6] 石君友, 张鑫, 邹天刚. 多信号建模与诊断策略设计技术应用 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (4): 811-815.
- [7] Mathur A, Deb S, Pattipati K R. Modeling and real-time diagnostics in TEAM-RT [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. 1998: 1610-1614.
- [8] Deb S, Raghavan K R P, et al. Multi-signal flow graphs: a novel approach for system testability analysis and fault diagnosis [J]. IEEE Aerospace and Electronics Magazine, 1995, 10 (5): 14-25.
- [9] Deb S, Mathur A, Pattipati K R, et al. De-centralized real-time monitoring and diagnosis [J]. Proc. IEEE Trans on SMC, 1998: 2998-3003.

鉴于目前故障预测技术尚处于研究阶段, 因此 APHM 系统还不具备故障预测功能, 尚需做进一步研究, 但相信随着嵌入式智能传感器技术、电子预测技术、高速数据处理技术的不断发展及故障预测算法的不断优化改进, PHM 技术必然会用于航空电子系统, 并呈现出以下的发展趋势, 即①逐步由系统级粗粒度方式趋向于模块级细粒度方式, 状态监测与健康管理的更全面更精确; ②逐步由简单的逻辑判断趋向于更为复杂的知识推理、专家系统, 故障诊断和定位更准确更可信; ③逐步由监视模式趋向于“监视—控制”一体化模式, 并逐渐融入系统管理与控制, 健康管理与系统控制的耦合度更高更紧密。

参考文献:

- [1] 姜兴旺, 景博, 张劼, 等. 综合飞行器故障预测与健康管理系统研究 [J]. 航空维修与工程, 2008, (5): 37-40.
- [2] Pecht M G. Prognostics and Health Management of Electronic [M]. SUA: John Wiley & Sons, 2008. 1-133.
- [3] 赵兵, 夏良华, 满强, 等. 设备健康管理系统的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (5): 1024-1026.
- [4] 于晓伟, 张宝珍. 国外电子产品故障预测技术发展 [J]. 测控技术, 2008, 27 (s): 209-211.
- [5] NATO Military Committee. STANAG 4626 Part II (draft1), Modular and Open Avionics Architectures Part II: Software [S]. Brussels: NATO, 2004.
- [6] 韩国泰. 航空电子的故障预测与健康管理的健康管理技术 [J]. 航空电子技术, 2009, 40 (1): 30-38.
- [7] 章新瑞, 任占勇. 可靠性试验中环境应力与产品故障机理间关系研究 [J]. 环境技术, 2000, (5): 7-11.
- [8] 曾声奎, Pecht M G, 吴际. 故障预测与健康管理的 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5): 626-632.
- [9] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理的健康管理技术的发展及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (5): 591-594.