

典型机电系统 PHM 评价指标分析

隆金波, 曲昌琦, 蒋觉义, 曾照洋, 陈 忱, 杜 宝

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

摘要: PHM 评价指标是装备健康管理系统设计输入与目标要求, 也是对 PHM 系统进行验收核查的评价依据; 目前国内航空主机所、科研院所与高校开展了大量的 PHM 技术研究和工程设计应用工作, 但由于缺乏 PHM 系统指标体系的建立, 导致研制方在 PHM 系统设计阶段难以明确功能性能要求, 验证方在定型阶段缺乏统一的评价参考标准, 使 PHM 系统的工程化进程缓慢; 文章以典型机电系统为研究对象, 通过剖析国外先进的 PHM 技术标准与规范文件, 结合装备典型机电系统 PHM 系统的能力需求, 从机电系统 PHM 的监测及诊断指标、预测指标、决策及评价指标三个维度分析和梳理 PHM 评价指标, 建立了适用于装备设计与验证需求的机电系统 PHM 评价指标体系, 解决了装备 PHM 系统设计中缺乏设计依据与验证评价指标的问题。

关键词: PHM; 评价指标; 机电系统; 标准; 验证

Research on PHM Evaluation Index and Life Prediction Model of Typical Electromechanical System

Long Jinbo, Qu Changqi, Jiang Jueyi, Zeng Zhaoyang, Chen Chen, Du Bao

(AVIC China Aero-poly Technology Establishment, Beijing 100028, China)

Abstract: PHM evaluation index is not only the design input and objective requirements of PHM system, but also the evaluation basis of PHM system acceptance and verification. Lots of PHM technology research and engineering design application work have been carried out in recent years. However, due to the lack of PHM system index system, which makes the engineering process of PHM system slow. Taking the typical electromechanical system as the research object, this paper analyzes and combs the PHM evaluation index from the three dimensions of monitoring and diagnosis index, prediction index, decision-making and evaluation index by analyzing the foreign advanced PHM technical standards and specification documents and combining with the capability requirements of PHM system equipped with typical electromechanical system. The PHM evaluation index system of mechanical and electrical system is established to meet the requirements of equipment design and verification, which solves the problem of lack of design basis and verification evaluation index in equipment PHM system design.

Keywords: PHM; evaluating indicator; electromechanical system; standards; verification

0 引言

现代装备要求快速出动任务、保障规模小、机动水平高, 需要在维修时能够及时处理故障, 提高战备完好率, 较少备件并降低寿命周期费用, 这些需求要求装备系统具有较高的故障预测、健康评估与维修决策支持的能力。故障预测与健康评估技术 (PHM, prognostics and health management) 作为支撑装备综合保障的新型技术, 已成为装备实现高效保障、智能维修的关键使能技术^[1-2], 当前 PHM 技术已在装备的航空发动机、航电、机电等关键系统开展了广泛的研究, 并取得了显著进展^[3-4]。

PHM 技术实现了装备系统从健康状态监测的方式向系统容错控制、自愈调控和智能维修决策的转变, 从被动的计划维修活动转向了预测性维修模式, 从而实现了装备维修活动的时间准确性和部位准确性^[5]。机电系统作为通用装备的

重要组成部分, 其可靠性水平直接影响整机的使用保障及维修活动, 是装备系统 PHM 设计中关键和重要的组成部分。

PHM 系统参数和评价指标是开展相关技术研究的设计输入与目标要求, 也是对 PHM 成果进行验收核查的评价依据。国内航空主机所、科研院所与高校开展了大量的 PHM 技术的研究工作^[6], 对技术的概念、内涵有了清晰的认识, 对 PHM 系统与相关模型算法的研究和理论水平有了显著的提高和成效, 并在某些装备制造中进行了工程应用, 但由于缺乏 PHM 系统参数与指标体系的建立, 导致设计阶段设计方难以明确 PHM 功能与性能的要求, 定型阶段使用方缺乏统一的验收评价标准, 使 PHM 系统工程的熟化进程缓慢。

本文结合装备典型机电系统 PHM 系统的能力需求, 通过分析国外技术发展和标准现状, 建立满足适用于装备设计与验证需求的机电 PHM 系统参数体系与评价指标, 解决

收稿日期: 2021-04-19; 修回日期: 2021-05-13。

基金项目: 国家自然科学基金(71801198)。

作者简介: 隆金波(1988-), 甘肃古浪人, 男, 硕士, 工程师, 主要从事故障预测与健康研究方向的研究。

引用格式: 隆金波, 曲昌琦, 蒋觉义, 等. 典型机电系统 PHM 评价指标分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 255-259.

装备 PHM 系统开发中缺乏设计依据与评价指标的问题。

1 PHM 技术发展

在技术发展方面,国外 PHM 技术经历了外部测试、机内测试技术 (BIT, Built-in Test)、智能 BIT 技术、综合诊断技术、PHM 共 5 个阶段^[4]。同时在维修决策技术方面,国外的发展也经历了事后维修、计划性预防性维护、基于状态的维护 (CBM)、智能维护^[6]几个阶段。PHM 技术在装备应用方面,也从过去的部件与分系统级逐渐发展到覆盖至平台级,通过逐步完善,PHM 技术目前已形成了精简化、智能化、标准化的技术方法和技术体系^[7]。

我国 PHM 的研究起源于 20 世纪 50 年代,近年来,以高校和研究所为主力的研究团队在 PHM 系统结构、关键技术、智能故障诊断及预测算法方面都有了研究和应用。政府和行业对 PHM 研究都进行了大力支持,并将很多 PHM 相关的课题列入了“863”发展计划^[8-10]。北京航空航天大学谢劲松^[11]等人在 PHM 系统硬件验证平台方面进行了研究设计,并实现了验证平台与机载系统的融合;王晗中^[12]等人在雷达雷达装备维修保障系统方面进行了研究和应用,提高了系统故障诊断和剩余寿命预测的能力;罗华^[13]等人在无人机 PHM 技术方面进行了 PHM 拓扑结构和逻辑体系的研究。

国内在 PHM 技术研究和应用方面当前处于技术探索和型号初步实践阶段^[14],但目前在国内尚无体系化的 PHM 系统评价指标体系作牵引。随着 PHM 系统工程化应用的不断推进,PHM 评价指标对于装备 PHM 系统研制和核查验证的需求将会越来越紧迫。

2 PHM 评价指标标准研究

状态监测技术和故障诊断技术经过多年的应用发展,在技术方面已形成了较为完善的标准体系用于系统验证和产品检验^[15]。国际标准化组织 (ISO)、国际电子电气工程师协会 (IEEE)、机械信息管理开放标准联盟 (MIMOSA)、美国汽车工程师学会 (SAE)、美国联邦航空管理局 (FAA) 和美国陆军 (US ARMY) 等组织和机构陆续制定并开发了一系列标准、指南和规范。这些标准从多层面、多角度对 PHM 系统主要内容进行了规范化约束^[15-17]。

PHM 系统的验证指标体系不仅是开展相关技术研究的设计输入与目标要求,也是对 PHM 成果进行验收检查的评价依据^[18]。国外在 PHM 评价指标方面也发布了相关的标准,较为通用的标准有 ARP 5783《健康与使用监测指标》和 AIR5909《发动机健康管理系统的诊断和预测指标》两箱标准,下面对 2 项标准进行研究分析。

2.1 ARP 5783《健康与使用监测指标》

ARP5783 标准作为一项标准工程实践的指南,其目的是为旋翼与固定翼飞机等装备的健康与使用监测系统诊断算法性能评估提供参考。该标准首次发布于 2008 年 2 月,并于 2012 年 10 月以及 2018 年 5 月重新确认状态有效。该标准提供的健康与使用监测指标主要是出于两类需求:一是确保诊断算法能够保持在一个可接受的低虚警率的同时检测出故障,以提高操作的安全性;二是降低基于高性能诊断算法的操作所产生的成本。ARP5783 推荐的指标的主要用途可分为以下几类:

- 1) 衡量算法在检测故障时的有效性;
- 2) 衡量算法对虚警的抑制能力;
- 3) 评估算法对多故障、电磁瞬态、飞行条件、不同润滑状态及其它环境变量的灵敏度;
- 4) 建立算法装机使用的接收准则;
- 5) 评估算法执行故障诊断分类的性能。

在 ARP5783 标准中推荐了“有效性度量”、“分类能力度量”、“数据采集性能”3 类 PHM 指标,如图 1 所示。

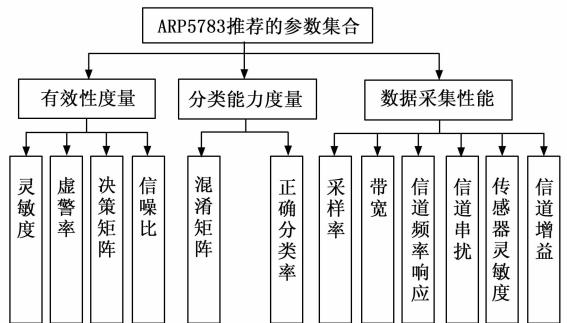


图 1 ARP5783 中获取的参数集合

2.2 AIR5909《发动机 PHM 系统诊断和预测指标》

AIR5909 系列标准作为一项包含工程参考数据、历史信息及技术协作的资料文件,其主要目的是为飞行器发动机健康管理 (EHM) 中预测算法提供性能评估指标,首次发布于 2016 年 2 月。AIR5909 在提供发动机预测方法、预测性能评估参数的同时,也提出了应用建议与注意事项,以增强标准的可操作性,AIR5909 中提取的指标如图 2 所示。

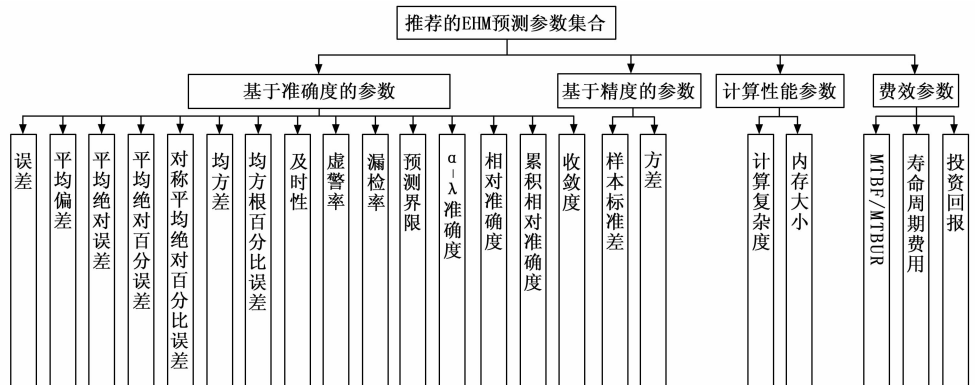


图 2 AIR5909 中获取的预测性能参数指标

3 机电系统 PHM 评价指标体系构建

3.1 指标体系构建思路

PHM 系统的验证指标体系不仅是开展相关技术研究的设计输入与目标要求, 也是对 PHM 成果进行验收核查的评价依据。

本文在对国内外 PHM 技术发展、标准发展、功能性能、评价指标等的对比与剖析的基础上, 将构建 PHM 功能与性能评价指标体系的基本思路确定为: 主要从 AIR5909、ARP5783 中提取 PHM 功能性能评价指标, 从 CAP753、ARP1839 等标准中分析提炼对于 PHM 系统功能的定性要求, 随后融合上述三方面的内容, 构建 PHM 功能与性能评价指标体系。

3.2 评价指标筛选

通过对 PHM 发展现状、PHM 标准现状、机电系统 PHM 功能/性能及参数分析, 结合机电 PHM 能力需求分析, 初步构建 PHM 系统评价指标, PHM 指标体系主要包括 PHM 状态监测及诊断指标、预测指标、维修决策与评价指标三部分。

3.2.1 监测及诊断指标

机电 PHM 系统的检测及诊断功能主要用于完成早期故障检测、故障隔离识别, 从诊断算法性能评价的角度来看, 本文将将其评价因子分解为如下 4 类:

1) 统计分析: 直升机机电系统级诊断评估的性能统计随着时间收集在各种分系统或部件上呈现出的多种故障模式数据;

2) 准确性/精度: 此类指标能够衡量在噪声、不确定性影响下机电系统 PHM 的诊断评估的置信度;

3) 鲁棒性: 考虑可能改变诊断结果的各种因素(环境、使用、设计等)的影响后, 对算法的敏感性或鲁棒性进行评价。

4) 响应时间: 此类指标用于评价预测算法在保持准确性和精度的前提下完成故障诊断以促成及时制定行动决策的能力, 在实际应用中往往难以准确获取。

所筛选的监测及诊断指标如表 1 所示。

3.2.2 预测指标

机电系统 PHM 的预测功能主要用于预计系统/部件的剩余使用寿命, 然而预测结果的不确定性是难以避免的, 因此需要对预测算法的性能进行准确评价。预测性能指标分为在线预测性能指标和离线预测性能指标, 如表 2 所示。

3.2.3 决策评价指标

机电系统 PHM 相关技术的应用可以通过消除虚警、不必要的拆卸和不能复现指示, 有效降低产品或系统的寿命周期费用, 并且能够在减少测试与保障设备、减少人力与备件等方面缩小后勤保障规模。因此, 可以通过对 PHM 技术的实施效果进行费效分析, 利用成本效益风险评价指标定量反映系统 PHM 在经济性上表现出的水平。决策评价指标分为系统整体费效、维修效率、局部测试布局合理性三个方面, 如表 3 所示。

表 1 监测及诊断指标

类别	名称	说明
统计分析	混淆矩阵	为记录 PHM 系统的诊断结果(正确或不正确), 随后分析其性能, 经加权来表达一段时间内的比率。
	检测准确性	正确分类案例数与想定总数之比, 用于评估 PHM 系统的整体诊断准确性。
	检测率	检测到故障数与系统实际发生故障的想定总数。
	漏检率	未检出故障次数与实际发生故障数的比率
	虚警率	检测出故障数与实际没有故障的想定数的比率
	错误肯定置信度	度量诊断算法错误检测异常的频率和置信上限
	接收器运行特性	接收器运行特性(ROC)给出错误肯定(FP)与否定(FN)间权衡的总览。
	检测能力	估计诊断算法在 ROC 曲线的范围内虚警(FP)或漏检(FN)的总偏差
	隔离性能矩阵	可以支持故障监测, 并用于隔离各种故障模式。
	正确分类率	沿隔离性能矩阵的对角线的各个要素之和
	错误分类率	隔离性能矩阵中所有非对角线元素之和计算
	模糊度	隔离组大小, 指以相应的概率隔离出一定数量的可能故障的集合
准确性/精度	误差	用于定义实际输出与希望输出之间的偏差。
	样本标准偏差	度量误差相对于样本误差均值的分散度/广度。
	样本均值绝对偏差	估算误差的分散度/广度的估计值。
鲁棒性	检测门限值	度量诊断算法能够以规定的置信度检测最小严重性基本真值的能力
	检测敏感性	度量诊断算法在两种状态水平下的成功函数的差异。
	检测稳定性	度量一个故障变化期间的置信度值的变动范围
	检测稳定性系数	结果不变化的持续时间占自首个检测信号以来逝去的总时间的百分比

表 2 监测及诊断指标

类别	名称	说明
离线	预测范围	用于确定算法以希望置信度提供最大提前告警的时间
	$\alpha-\lambda$ 性能	表征一个算法的性能随着接近寿命终结的改进程度
	预测虚警率	错误肯定率(虚警 FP)和错误否定率(漏检 FN)的扩展
	相对准确度	
	收敛率	定量表示随着预测随时间的更新, 预测性能改进的收敛速率
	敏感性	度量一个预测算法对输入的变化或外部干扰的敏感程度的一个指标
在线	RUL 在线精度指数	RUL 在线精度指数(RUL-OPI)量化和跟踪所预计的 RUL 分布的精度
	动态标准偏差	用于定量表示预测值在一个时间窗口 Δ 内的稳定性

表 3 决策评价指标

类别	名称	说明
整体费效	投资回报率	用来评估部署一个 PHM 系统获得的收益
	全寿命周期费用 LCC	即采集费用、运行费用和维护费用的总和
维修效率	MTBF	体现产品在规定时间内保持功能的一种能力
	MTTR	平均修复时间,描述产品由故障状态转为工作状态时修理时间的平均值
	MTBUR	平均非计划拆换间隔时间
局部测试合理性	测试布局费效比	基于不同方案的覆盖率值及总体费用信息,计算测试点方案的布局费效比
	测试策略效率	一种评价测试点布局的指标,该指标要求测试点布局和诊断策略应尽量少且保持对称性

3.3 评价指标体系构建

基于上述分析结果,并结合指标间的关联性分析,可以得出以下结论。

从信息获取难度上来看:考虑到机电 PHM 系统对于对关键部件实时监测与告警指示的意义,应首选获取难度较低的可测试与可计算指标,即应剔除诊断性能评价指标中的响应时间相关指标(信息难以获取)、传感器能力评价中的物理特性相关指标(不可测试或计算)。

从指标适用范围上来看:适用于 PHM 系统整体、关键部件的评价指标有明显区分,同时 EHM 的特殊地位也使得系统顶层评价指标中也有部分适用于发动机功能性能评价,考虑到前文中提出的指标体系整体逻辑层次性原则,因此不将适用对象层次作为主要的指标筛选标准。此外,对于适用对象类型上来看,初选指标中针对在线预测性能的相关指标在当前的 PHM 技术状态与条件下难以实现,因此剔除此类指标,并简化原架构中预测性能评价指标的下层结构,典型机电系统 PHM 评价指标体系如图 3 所示。

4 PHM 评价指标适用性分析

对于上文形成的各项指标,其评价方向、侧重点、意义、机理不尽相同,导致了指标适用范围之间存在差异,尤其是在针对典型机电系统不同类型的监测对象时有必要明确各项指标的适用范围。

4.1 PHM 评价指标适用性分析流程

首先对机电 PHM 系统要求进行分析,分析对象的监测与诊断性能要求和预测性能要求,然后对照 PHM 评价指标体系进行指标获取难度和指标获取成本分析。在指标获取难度方面,对可测试指标进行测试难度分析、对可计算指标进行计算难度和准确度分析;在指标获取成本方面,分析测试环境搭建成本要求、测试周期要求和测试样本量要求。经过以上两个维度的分析,本着测试难度适中、测试成本可接受的原则,形成了完全适用类指标和选择适用类指标两个等级,PHM 评价指标适用性分析流程如图 4 所示。

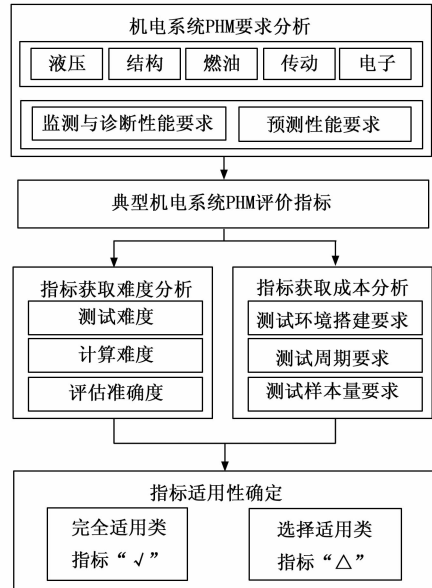


图 4 PHM 评价指标适用性分析流程

4.2 PHM 评价指标适用性等级

完全适用性指标可完全覆盖对象 PHM 的性能评价要求,且指标测试难度低、计算方法明确、测试费用不高且测试周期较短,如在电子系统 PHM 评价过程中,检测率、漏检率、检测门限值等评价指标的符合性均可量化描述,指标计算和获取有特定的理论计算依据,指标可通过软硬件故障注入试验等方式快速获取,此类标准定义为完全适用类标准。

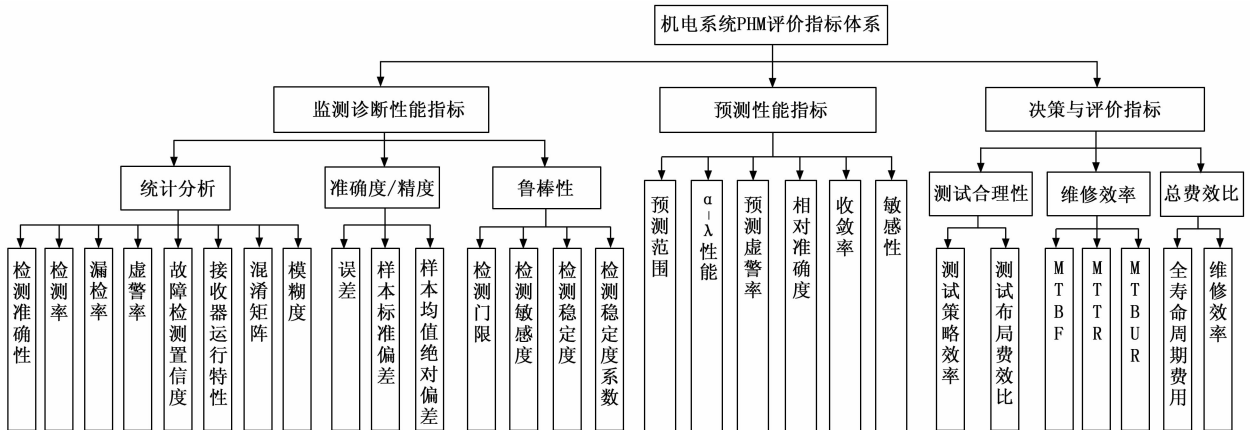


图 3 典型机电系统 PHM 评价指标体系

部分适用类标准: 指标可部分覆盖评价该对象 PHM 系统的功能性能, 且有部分指标虽可作为评价该系统的依据, 但验证评价过程中指标获取难度较大, 成本较高, 部分指标评价结果准确度较低, 且部分指标无法定量描述, 评价客观度较低, 部分指标只能参考类似系统或经验进行定性评价, 如在液压、燃油、结构等系统或部件中, 针对监测率、漏检率等指标, 由于系统的退化类故障模式较多, 指标验证过程中故障注入试验时间长, 且由于试验样本数量的局限性, 评价结果的置信度较低, 大多数情况下只能依靠同类型号产品或这理论计算值定性评价, 指标的适用性有一定的局限性。

典型机电系统 PHM 评价指标体系的适用性分析结果如表 4 所示。

表 4 评价指标适用性分析结果

类别	指标名称	适用的监测对象						
		液压	结构	燃油	传动	电子	电源	
监测与诊断性能评价	混淆矩阵	△	√	√	△	√	√	
	检测准确性	√	√	√	√	√	√	
	检测率	△	△	△	△	√	√	
	漏检率	△	△	△	△	√	√	
	虚警率	△	△	△	△	√	√	
	错误肯定置信度	√	√	√	√	√	√	
	接收器运行特性	√	√	√	√	√	√	
	检测能力	√	√	√	√	√	√	
	隔离性能矩阵	△	△	△	△	√	√	
	正确分类率	△	△	△	△	√	√	
	错误分类率	△	△	△	△	√	√	
	模糊度	△	△	△	△	√	√	
准确性/精度	误差	√	√	√	√	√	△	
	基于误差的指标	√	√	√	√	√	△	
	样本标准偏差	√	√	√	√	√	△	
	平均绝对偏差	√	√	√	√	√	△	
鲁棒性	检测门限值	√	√	√	√	√	△	
	检测敏感性	√	√	√	√	√	△	
	检测稳定性	√	√	√	√	√	△	
响应时间	检测稳定性系数	√	√	√	√	√	△	
	检测时间	√	√	√	√	√	√	
	隔离时间	√	√	√	√	√	√	
预测性能评价	离线	预测范围	√	√	√	√	△	△
	α - λ 性能	√	√	√	√	△	△	
	预测虚警率	△	△	△	△	△	√	
	相对准度	√	√	√	√	△	√	
	收敛率	√	√	√	√	△	√	
	敏感性	√	√	√	√	△	√	
在线	RUL 在线精度指数	√	△	△	△	△	△	
	动态标准偏差	√	△	△	△	△	△	
	关键- α 性能度量	√	△	△	△	△	△	

备注:√——完全适用;△——部分适用/有选择地适用。

5 结束语

评价指标是 PHM 系统设计输入与目标要求, 也是对

PHM 研制成果进行验收核查的评价依据。本文在分析国内外 PHM 技术发展和标准发展的基础上, 分析国外先进健康管理标准中推荐的 PHM 评价指标, 从指标适用性的角度进行分析和筛选, 构建了面向典型机电系统的 PHM 评价指标体系, 为典型机电 PHM 系统的设计和验证提供了依据。

参考文献:

- [1] Tsui K L, Chen N, Zhou Q, et al. Prognostics and health management: A review on data driven approaches [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015: 1-17.
- [2] Esteves M A M, Nunes E P. Prognostics health management: perspectives in engineering systems reliability prognostics [A]. Safety and Reliability of Complex Engineered Systems, 2015: 2423-2431.
- [3] Osik L. Using the prognostic and health management program on the air force's next generation reusable launch vehicle [A]. AIAA [C]. 2012.
- [4] Leonardo R R, Yoneyama T. How aircraft operators can benefit from PHM techniques [A]. IEEE Aero-space Conference [C]. Big Sky. 2012.
- [5] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与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.
- [6] 张宝珍, 曾天翔. PHM: 实现 F-35 经济可承受性目标的关键使能技术 [J]. 航空维修与工程, 2005 (6): 20-23.
- [7] 周晓军. 生产系统智能维护决策及优化技术研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
- [8] 程科. 飞机操纵系统状态监测与故障预测方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] 相江. 基于多子波支持向量机航电设备健康管理关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [10] 彭宇, 刘大同, 彭喜元. 故障预测与健康管理技术综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24 (1): 1-9.
- [11] 谢劲松, 何丽靖, 吕端, 等. 健康监控和故障预测的机载硬件平台设计 [A]. 中国航空学会 2007 年学术年会 [C]. 2007.
- [12] 王晗中, 杨江平, 王世华. 基于 PHM 的雷达装备维修保障研究 [J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19 (4): 83-86.
- [13] 罗华, 戎皓, 彭乐林, 等. 无人机故障预测与健康管理研究 [J]. 飞机设计, 2009, 29 (4): 52-55.
- [14] 景博, 汤巍, 黄以锋, 等. 故障预测与健康管理系统相关标准综述 [J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28 (12): 1301-1307.
- [15] 冯辅周, 司爱威, 邢伟, 等. 故障预测与健康管理技术的应用与发展 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23 (6): 1-6.
- [16] Lee J, Liao L, Lapira E, et al. Informatics Platform for designing and deploying e-manufacturing systems [J]. Collaborative Design & Planning for Digital Manufacturing, 2009: 1-35.
- [17] Zeng Z Y, Ren Z Y, Wu Y Q. Research on indexes and verification technology of airborne PHM system [A]. 2010 International conference on PHM [C]. Maeau, 2010.
- [18] 景博, 杨洲, 等. 故障预测与健康管理验证与确认方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (21): 23-27.