

装备故障预测与健康管理能力验证评估技术

闻 化, 胡志伟

(空军装备部 驻北京地区第二军事代表室, 北京 100142)

摘要: 预测和健康管理 (PHM) 是提升装备战斗力水平的重要保证, 在装备设计阶段并行开展可测性设计是提高 PHM 能力的主要手段, 而 PHM 技术的验证和评估是建立诊断与预测系统可信度的一个重要步骤; 文章首先给出了面向 PHM 系统验证技术的国内外研究现状, 然后, 分析 PHM 指标的验证方法和技术框架; 后面给出的 PHM 系统验证的指标体系, 最后, 点明了故障预测与健康管理系统验证与评估方法要关注的问题, 明确了未来的发展趋势。

关键词: PHM 验证; 指标评估

Validation and Evaluation Techniques of Equipment PHM System

Wen Hua, Hu Zhiwei

(Air Force Equipment Department, Beijing 100142, China)

Abstract: PHM is an important guarantee to improve the combat effectiveness of equipment. Concurrent testability design in equipment design stage is the main shortcoming of improving PHM capability. Verification and evaluation of PHM is an important step to establish the reliability of diagnostic and prognosis system. This paper presents the research status of testability design for PHM. Then, the validation method and technical framework of PHM indicators are analyzed. Later, the index system of PHM system verification is given. Finally, the paper points out the problems that should be paid attention to in the methods of fault prognostic and health management system verification and evaluation, and clarifies the development trend in the future.

Keywords: verification of PHM; evaluation of indicator

0 引言

在 21 世纪的新型、高科技、网络化军事战争中, 各种新型军事装备的系统可靠性、安全性、测试性、保障性的要求有极大的提高, 装备的系统预测与健康管理技术是保障装备安全运行、自主作战、降低维修保障复杂性的重要内容, 是发展新型装备的必要的关键技术。在军用装备中应用 PHM 技术已成为国内外科技研发的重要发展趋势, 复杂装备故障预测与健康管理技术正在被越来越多的重视, 大量被用于军事国防、航空航天武器装备中, 发展为自主式后勤保障系统的重要基础。

故障预测与健康管理技术是实现武器装备基于功能的维修, 自主式保障和响应后勤等新思想、新方案的关键技术。这一技术的实现将维修变成了基于状态的维修, 使装备维修保障理念由以往的注重维修变为注重预防, 继而真正从传统上的时候维修和定期维修转变为主动性的基于状态维修。PHM 在设计上实现后, PHM 系统的工作效能的指标验证工作就显得更为重要。虽然, 在某些武器装备中已经初步应用了相应的 PHM 系统, 但对 PHM 系统的指标验证课题仍然具有严重的挑战性。

目前, PHM 系统的指标验证技术在国内外的研究水平还严重不足, 关键技术的突破还存在瓶颈, 某些重要技术

方面的研究还是还存在一定空白。该技术面临的困难, 主要体现在以下两方面: 故障数据获取困难; 验证指标及技术框架不够通用和明确。这些都需要在装备的 PHM 系统验证工作中进行重点的攻关和研究。

1 测试性/PHM 系统验证技术研究现状

测试性/PHM 系统的验证工作是武器装备全寿命周期各个阶段的重要环节, 对武器装备测试性/PHM 系统状态的准确评估和有效提升优化起着重要的支撑作用。目前, 美国和俄罗斯等军事强国对装备测试性/PHM 系统的试验与评定技术都非常重视, 并有比较深入的研究。

目前, 国外对测试性设计的验证评价主要基于利用测试性设计分析平台和虚拟验证试验技术两种方式来解决。近几十年来, 美国国防部一直把建模与仿真技术列为“国防关键技术”的重点项目, 并逐渐加强了这方面的组织领导, 重点开发了分布式交互仿真技术、半实物仿真技术以及虚拟试验技术等。近年来美国强调仿真和建模技术在武器装备试验中的应用和开发。例如, 为减少导弹的采购费用, 开发了某导弹的虚拟试验场, 并在红石技术试验中心研发构造了仿真/试验验收设施。Mr. Douglas 等对某型直升机的测试性设计进行了建模仿真工具的初始验证。俄罗斯利用武器系统的仿真、建模及验证技术, 研究了装备的试验与评估方法。最新部署的“白杨”-M 导弹的试验与评估工作, 体现了技术新方向^[1]。

对于 PHM 系统的验证, 实际运作时通常采用搭建 PHM 系统试验台来进行。试验台的数据可以来自各个时期

收稿日期:2019-08-19; 修回日期:2019-09-16。

作者简介: 闻 化 (1971-), 男, 河南商丘人, 高级工程师, 主要从事故障预测与健康管理能力方向的研究。

的历史数据，也可以通过各种故障注入方式得到。不同的试验台可以对不同的装备，以及装备的不同时期的测试性/PHM 系统的设计进行验证与评估。

在美国，PHM 验证系统的一些案例如表 1 所示。

表 1 美国典型的几种 PHM 验证系统案例^[2]

JSF 的 PHM 验证平台	波音公司 PITAUMS 的度量评估工具 (MET)	美国海军增强为型预测诊断系统的验证平台
应用对象: 联合攻击战斗机; 特点: 基于网络的综合软件应用集成来提供验证与评估	应用对象: 波音的 RITAUMS 项目 特点: 利用原形数据库内的数据和信息进行算法验证	应用对象: 美国海军 特点: 采用了蒙特卡罗模拟法产生大量的统计基准来评估诊断和预测算法

在国内，装备的实验与评定可以追溯到 20 世纪 60 年代，军内外一大批专家对战略武器的各种战技指标进行了试验与评估工作。目前，随着国内对装备的试验与评定工作的不断重视和深入研究，武器装备的综合试验评定工作的各个方向都在大力开展，以期以最小的代价、最优的策略来实现最为准确的试验与评定。测试性验证方面，主要开展了实物试验验证和虚拟验证两方面的工作。

北京航天测控利用 Modelica 语言开发了针对测试性虚拟验证的软件平台，实现了从板级到 SRU 级的故障仿真和虚拟验证。赵晨旭 2011 年首次提出了测试性虚拟验证的方法和技术框架及流程，使用了 Multisim10 和 Matlab 搭建了测试性虚拟验证系统，并将该系统应用于直升机航向姿态系统的测试性验证^[1]。在测试性试验验证方面，在某型飞机研制阶段，采用基于故障注入的方法，依据定数试验最低可接受值方案设计了试验方案，以随机抽样的方式确定样本，构成了完整的测试性试验验证流程。虽然测试性验证试验得到了一定程度上的工程应用，但依然存在样本抽样人工干预、评估结果准确率低等问题。

国内在装备 PHM 技术方面也开展了一些相关研究，主要集中在各种飞行器的 PHM 系统的研制上，并且已经有了比较好的技术积累，但是在 PHM 系统的验证方面同国外的差距还很大，由于国内没有成功的经验可以借鉴，并且涉及到了大量的新技术和新理论，因此，在 PHM 的验证与评估方面，国内的技术研究甚少，基本处于起步阶段。与美国 F35 的 PHM 验证与评估技术相比，发展严重滞后。同时，各研究单位的研究方向不同，缺乏技术研究体系，也造成了在技术论证、装备研制的过程中存在很大的技术突破难度和风险。

目前，如何结合装备的系统设计、测试性设计、可靠性设计以及维修性设计过程，有效提出并完善 PHM 系统的验证试验程序以及验证试验及评估方法是需要备受关注的问题和方向。

2 PHM 系统验证与评估的框架结构及常用方法

PHM 系统的主要功能如图 1 所示，为了满足使用保障

及维护能力的需求，PHM 系统需要实现 6 个功能模块，分别为：①故障检测、故障隔离及性能监控功能；②关键系统与部件的故障预测能力；③剩余寿命预测能力；④故障选择性报告能力；⑤辅助决策和资源管理能力；⑥性能趋势跟踪能力。所涉及的重要关键技术包括：

- ①数据采集技术；
- ②数据处理及特征提取技术；
- ③故障预测及健康评估技术；
- ④信息资源管理与决策技术；
- ⑤PHM 系统的验证技术。

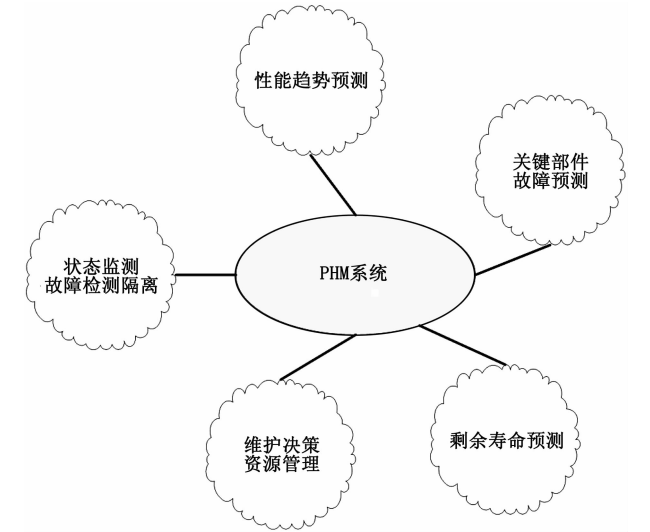


图 1 PHM 系统的主要功能

PHM 系统非常复杂，而且不同应用领域的 PHM 系统也各不相同，一旦投入使用，更改系统设计的成本和工作量将非常巨大，为了，避免出现这种情况，要在装备的研发过程和生命周期，来对其 PHM 系统的开展全面的可信的验证与评估工作。

所以，PHM 系统验证与评估工作要从 PHM 系统的论证阶段即开始考虑，要贯穿从设计、研制、应用的整个全过程。PHM 的验证评估要与 PHM 系统的设计相结合，既要考虑 PHM 系统本身的功能和性能实现，又要综合考虑应用装备的功能、效能以及各种测试性/PHM 系统的自身功能的可扩展性。PHM 系统的验证结果能不能达到当初的设计要求，并且能够对完善设计提出有效的反馈意见，是装备设计开发成熟化以及应用部署的关键环节。

PHM 系统的验证工作的一般原则如下：

- 1) 验证工作要贯穿 PHM 系统的全生命周期过程；
- 2) 验证工作要全面、系统，尽量覆盖整个系统的各个层级；
- 3) 在满足系统安全性以及自主保障的要求下，尽可能保证验证结果的准确度。
- 4) 遵循并行工作的设计原则，PHM 系统的开发和验证要同步开展，并在程序和技术上加以统一。

2.1 PHM 验证的框架结构

PHM 系统的验证与评估在 PHM 系统研发的各个阶段的框架结构如图 2 所示。

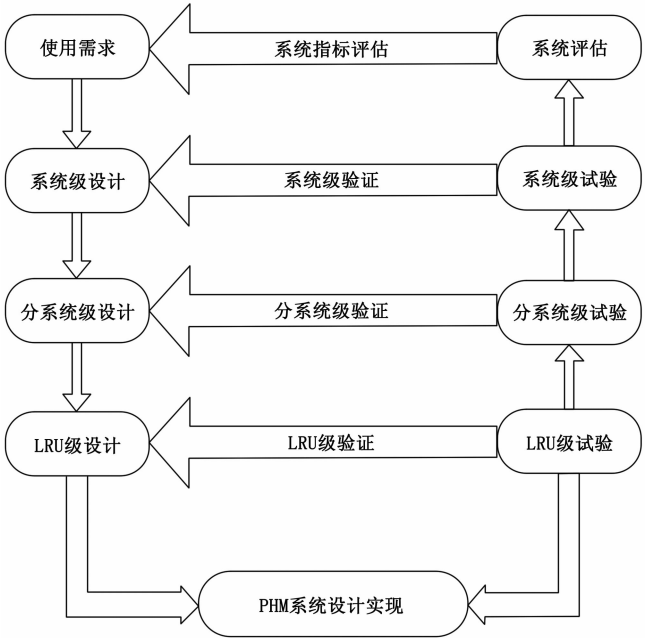


图 2 PHM 系统的验证评估框架

各个阶段的工作如下^[3]：

- 1) PHM 系统论证阶段：本阶段针对特定系统进行 PHM 系统设计的可行性分析，根据可行性分析结果及其系统应用需求对系统的 PHM 进行操作定义；
- 2) PHM 系统设计阶段：确定对象对 PHM 系统的设计需求，进行 PHM 系统的顶层架构设计，明确 PHM 系统的软硬件详细设计方案；
- 3) PHM 系统开发阶段：PHM 系统各单元的软硬件设计、系统的集成安装、PHM 系统的各分单元及系统调试使用、PHM 系统的验证及反馈；
- 4) PHM 系统使用阶段：不断完善 PHM 系统的性能及进行反馈修正。

PHM 系统的验证评估需要利用一系列的体现系统的健康管理和预测的指标来体现和衡量，这些指标要能体现 PHM 系统“及时”、“准确”的检测、隔离、跟踪和预测故障的能力。PHM 的验证系统包括软件验证和硬件验证，两种验证方式相辅相成，共同完成对 PHM 系统的验证和性能评估。PHM 验证系统的结构设计如图 3 所示。

PHM 验证系统可以采用分层的确认方式，将系统的每一个层级进行量化，先从底层的各种指标开始，然后向上传递，并最终得到一个系统的 PHM 验证指标，每一层的评估依据由下一层的结果提供，然后形成累计的 PHM 能力指标验证结果。指标评估模块包括对各子系统的检测、隔离和预测指标的评估。PHM 验证系统依照各种验证评估标准和准则对相应的指标和性能进行计算和评估，给出 PHM 设计相应的设计反馈，为 PHM 系统设计者提供有效建议。

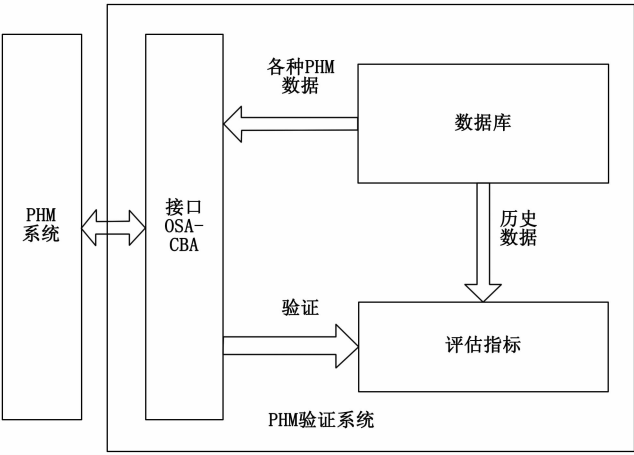


图 3 PHM 验证系统结构图

2.2 PHM 系统验证方法

PHM 系统的验证方法根据系统的不同验证要求、不同的验证层次以及不同的验证条件，可以有以下几类方法可供选择，如图 4 所示。

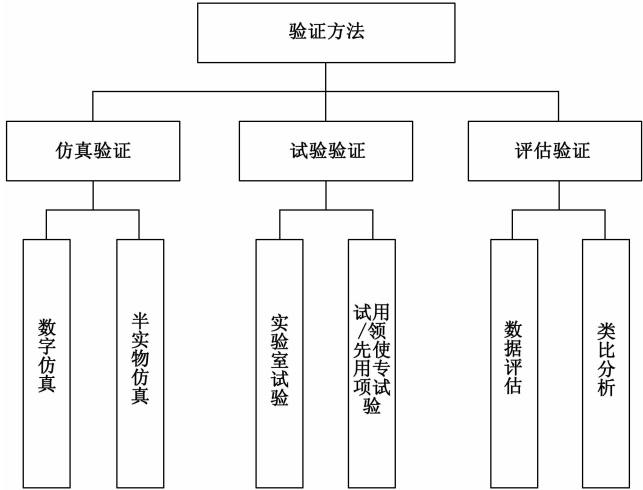


图 4 PHM 系统验证方法分类

1) PHM 系统仿真验证方法。

仿真验证方法包括数字仿真方法和半实物仿真方法。其原理即用仿真模型代替实物来进行验证试验，主要针对不适合做实物试验的，且对安全性要求比较高的设备。利用装备的实物或半实物仿真平台，采用故障注入的方式来验证 PHM 系统的各个方面的指标体系。

2) PHM 系统验证试验方法。

按照设定的试验技术和试验程序，对验证对象实物进行故障和故障趋势的模拟和注入，对相关数据进行分析、处理、计算和评估，最终得到被验证对相的各种参数指标是否符合设计要求的一种验证方法。

3) PHM 系统的评估验证方法。

分析验证方法适合在装备试用阶段进行，一般情况下可以与装备的现场试验相结合。分析验证方法采用类比法

和仿真法来实现。所谓类比法，即将待验证的 PHM 系统与已经通过验证的相似的 PHM 系统的结构、功能、故障模式和故障机理、使用与维修环境等进行各方面的对比分析，得出待验证 PHM 系统的验证结果。所谓仿真方法，需要建立 PHM 系统的数学模型，通过对数学模型的仿真分析和研究，以得出 PHM 系统是否满足要求的一种方法。

各验证方法选择的优先顺序如表 2 所示。

表 2 PHM 验证方法优选顺序及原则

试验验证方法	评估验证方法	仿真验证方法	综合验证方法
可信度最高,是验证定量要求的首选,如果是关键重要设备通常优选实验室方法,如果是区域级的定量要求,优选专项验证试验方法	对于大型设备的样本量少,数据量不足,且有高指标要求的可以采用.其中,类比法最简单,可优选选用	对于定量验证要求,如果工作条件不具备,可以加以补充	当采用单一验证方法不能达到验证目的,可以采用多种方法综合验证

3 PHM 系统验证的参数和指标体系

3.1 验证与评价指标体系

PHM 系统的参数和指标体系的确定，要依据 PHM 系统的功能、性能、组成和设计的工作模式为基础，在此基础上结合 PHM 系统设计中的能力、使能和物体特性的参数，确定出 PHM 系统的验证和评价指标。

- 其验证的具体内容如下：
- 1) 故障诊断算法能力的验证包括：故障诊断的实时性；故障诊断的准确性；故障诊断的隔离能力；故障诊断的鲁棒性。其常规指标有故障检测率、故障隔离率、虚警率等。
- 2) 故障预测与健康管理能力的验证包括：早期检测的灵敏性、故障辨识的准确性以及系统失效时间的预测准确性。其常规指标有故障预测算法的验证、剩余寿命预测的验证以及状态控制和故障重构的验证。
- 建立故障诊断与健康管理系统的验证与评价指标体系，应当遵循完整性原则、非相容性原则、客观性原则、等。
- 1) 完整性原则：应能全面体现验证系统的各方面特征；
- 2) 非相容性原则：各个指标相互独立，不能互相代替，也不能互相包容；
- 3) 客观性原则：选择指标时，立场要客观，不掺入主观意愿，要真是反映验证对象的客观情况；
- 4) 简洁性原则：为减少工作量，避免混乱，去繁从简，指标应尽量简单明了；
- 5) 规范性原则：选择指标要具有通用性，便于理解和收集信息。

目前常用的 PHM 系统各类能力指标的具体内容如表 3 所示。

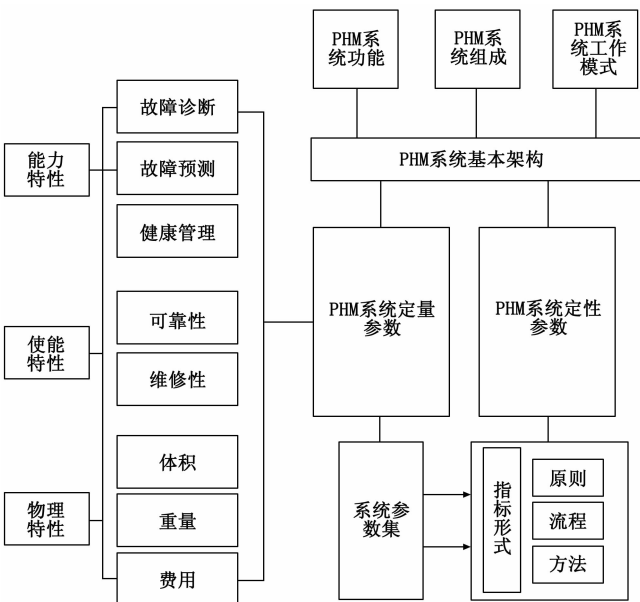


图 5 PHM 系统的验证和评价指标

表 3 PHM 系统能力参数表

故障检测能力指标	故障隔离能力指标	故障跟踪能力指标	故障预测能力指标
1. 故障检测率	1. 故障隔离率	1. 故障可跟踪率	1. 故障预测率
2. 故障正确检测率	2. 故障正确隔离率	2. 故障正确跟踪率	2. 故障正确预测率
3. 故障检测时间	3. 故障隔离时间	3. 故障跟踪时间	3. 故障预测时间
4. 平均故障检测时间	4. 平均故障隔离时间		4. 准确性标尺
5. 最大故障检测时间	5. 最大故障隔离时间		5. 精确性标尺
6. 单点故障检测率	6. 隔离分类率		6. 健壮性标尺
7. 虚警率	7. 最大模糊组规模		7. 计算性能标尺

3.2 故障诊断的验证与评价指标体系^[4]

故障诊断的验证与评估内容包括常规的故障检测能力、故障隔离能力以及虚警抑制能力。

定义 1：故障检测率（FDR）为在一定时间内，PHM 系统正确检测到的故障数与实际发生的故障数之比，用百分数表示，其数学表达式为：

$$FDR = \frac{\sum f_i \in F_{cd}\lambda_i}{\sum f_i \in F_{A}\lambda_i}$$

式中， λ_i 为 i 第个故障模式的故障率。

定义 2：故障检测时间（FDT）为从检测开始到检测结果得出所经历的时间。

定义 3：虚警率（FAR）。

虚警率（FAR）指在规定的时间内发生的总虚警数与同一时间内的故障显示总数之比。数学表达式为：

$$FAR = \frac{N_{FA}}{N} = \frac{N_{FA}}{N_F + N_{FA}} \times 100\%$$

式中， N_{FA} 为虚警指示次数； N_F 为正确故障指示次数； N

为指示总次数。

定义 4: 故障隔离率 (FIR) 为在规定的工作时间内, PHM 系统正确隔离到可更换单元数不大于 L 时的故障数与可检测的故障数 (NCD) 之比, 用百分比表示, 其数学表达式为:

$$FIR = \frac{\sum_{f_i \in F_{\alpha}} \lambda_{Li}}{\sum_{f_i \in F_{\alpha}} \lambda_i}$$

定义 5: 故障隔离时间 (FIT) 是指从故障隔离开始到故障隔离完成所经历的时间。

定义 6: 模糊度 (Ambiguity Group Sie)

模糊组中包含的可更换单元数。

3.3 故障跟踪与预测的验证指标体系

定义 7: 故障可跟踪率 (FTR) 为 PHM 系统能跟踪故障数与系统中能被检测的故障数之比, 其数学表达式为:

$$FTR = \frac{\sum_{f_i \in F_{CT}\lambda_i}}{\sum_{f_i \in F_{CD}\lambda_i}}$$

定义 8: 故障正确跟踪率 (FCTR) 定义为在规定的时间内 T 内, PHM 系统正确跟踪或监测的故障数与系统中被正确检测的故障数之比, 其数学表达式为:

$$FCTR = \frac{\sum_{f_i \in F_{CT}\lambda_i}}{\sum_{f_i \in F_{CD}\lambda_i}}$$

定义 9: 故障跟踪时间 (FTT) 是指从 PHM 系统开始跟踪/监控故障演化得过程到完成对表征故障严重程度的所有征兆参数进行监控所经历的时间。

定义 10: 故障预测率 (FPR) 定义为 PHM 系统中能被预测的故障数与系统中能被检测的故障数之比, 其数学表达式为:

$$FPR = \frac{\sum_{f_i \in F_{CP}\lambda_i}}{\sum_{f_i \in F_{CD}\lambda_i}}$$

定义 11: 故障正确预测率 (FCPR) 定义为在规定的时间内 T 内, PHM 系统正确预测的故障数与系统中可被检测的故障数之比, 其数学表达式为:

$$FCPR = \frac{\sum_{f_i \in F_{CP}\lambda_i}}{\sum_{f_i \in F_{CD}\lambda_i}}$$

定义 12: 故障预测时间 (FPT) 是指 PHM 系统从故障预测开始到给出满足要求的故障预测结果所经历的时间。

此外, 有关预测能力度量指标的还有准确性指标、精确性指标、灵敏性指标等。

定义 13: 准确性指标 (Accuracy-based Metrics)^[2]。

准确性是对失效时间的点估计值与实际失效时间接近程度的度量。利用预测的误差范围指标来衡量。

定义 14: 精确性指标 (Precision-based Metrics)^[2]。

精确性指标衡量的是剩余寿命所覆盖区间的狭窄程度指标, 由大量试验所产生的预测值的方差所定义。该预测

区间包括上下边界。窄度越小表示预测精度越高。

定义 15: 灵敏性指标 (Robustness-based Metrics)^[2]。

灵敏性指标反映故障预测算法对系统输入变化或外部干扰的敏感程度。一般指标有: Brier 评分和敏感性。

4 总结

近年来, 随着复杂武器装备的综合化、复杂化、智能化的程度的不断提高, 装备故障预测与健康管理系统 (PHM) 技术日益完善, 技术研究的广度和深度都得到了很大的发展。国内外都出现了大量的针对不同领域的故障诊断与预测模型和算法, 初步建立了故障预测与健康管理系统。但是, 由于复杂装备的故障机理难以获取, 各种试验环境条件不足, 一方面不利于这些技术成果的改进和创新, 另一方面与不利于 PHM 系统在装备中的应用推广, 因此, 对于装备故障预测与健康管理系统验证与评价工作成为了一个非常具有挑战性和迫切需要解决的关键问题。

参考文献:

- [1] 童陈敏. 基于 Modelica 的测试性虚拟验证技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [2] 李 潘, 蒋觉义. PHM 系统验证指标研究 [J]. 航空标准化与质量, 2013, (2) 36-40.
- [3] 景 博, 杨 洲, 张 劼, 等. 故障预测与健康管理系统验证与确认方法综述 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (21): 23-27.
- [4] 谭晓栋. 面向装备健康状态评估的可测性设计关键技术研究. [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [5] 熊大顺, 李颖晖, 杨 健, 等. 预测与健康管理系统验证与确认方法研究 [J]. 试验与评价技术, 2013, 21 (8) 2142-2145.
- [6] 曾声奎, Pecht M, 吴 际. 故障预测与健康管理系统 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5): 626-632.
- [7] 郭阳明, 蔡小斌, 张宝珍, 等. 故障预测与健康状态管理技术综述 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 1626 (9): 1213-1216.
- [8] 单 珊, 冯玉光, 奚文俊. PHM 中预测性能评价方法的发展与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 32 (12): 3909-3912.
- [9] 冯振声, 黄考利. 陆军导弹武器系统测试性研究 [J]. 火力与指挥控制, 2004 (5): 88-90.
- [10] Roemer M, Dzakowic J, Qrsagh R, et al. Validation and Verification of Prognostic and Health Management Technologies [J]. IEEE Aerospace, 2005.
- [11] 杨述明. 面向装备健康管理的可测性技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [12] Saxena A, Celaya J, Saha B. Evaluating algorithm performance metrics tailored for prognostics [C]. Proceedings of the 2008 IEEE Aerospace Conference, 2008.