

基于融合技术的电子产品 PHM 系统研究

刘倩倩, 王红霞, 尹明

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 针对故障预测与健康管理 (PHM) 的复杂性, 对融合技术进行了深入的分析, 提出了一种基于神经网络的特征融合方法, 融合结果最大限度的给出决策分析所需要的特征信息, 提高了故障诊断的可靠性; 在预测方法上, 提出了一种基于故障预兆监控与推理和失效物理 (PoF) 模型方法相融合的预测方法, 充分利用了每种预测方法的优势, 故障预兆监控与推理的方法能够提供故障诊断功能, 而失效物理 (PoF) 模型的方法则有助于确定故障根源, 融合预测方法能更加及时准确的预测故障; 融合技术丰富了 PHM 的理论体系, 提高了其实用价值。

关键词: 故障预测与健康管理; 特征融合; 预测方法融合

Study of Electronic PHM System Based on Information Fusion

Liu Qianqian, Wang Hongxia, Yin Ming

(School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Concerned with the complexity of prognostic and health management, this paper proposed an algorithm of fusing data based on neural network. The proposed method has a high accuracy, which contains plentiful information for fault diagnosis. Two theory methods that combined the method of fault prediction based on data and the method of Physics-of-Failure models, which take full advantage of each method. On the one hand, the method of fault prediction based on data can find out whether the fault is existed. On the other hand, the method of Physics-of-Failure models can provide us the root of fault. The efficiency and accuracy of fault prediction were both quite higher based on the approach of fusion prognostics, which enrich the theory system of prognostic and health management and strengthen the practical value.

Keywords: prognostic and health management; feature fusion; prediction fusion

0 引言

随着科学技术的迅猛发展, 现代电子系统日渐复杂化和大型化, 其功能也日趋丰富, 结构也越来越复杂, 因电子系统故障停止而造成的损失也将会大大增加。传统的维修一般使用两种方法: 预防性维修和故障性维修^[1]。这两种方法都伴随着巨大的维护费用或者巨大的风险和维修费用。在这两种极端方法之间的一种方法: 视情维修, 是基于设备当前状态评估是否需要维修, 由于视情维修要求系统自身具有对其故障进行预测并对其健康状态进行管理的能力, 也由此产生了故障预测与健康管理 (prognostic and health management, PHM) 概念。PHM 是利用尽可能少的传感器采集系统的各种数据信息, 借助智能推理算法 (如物理模型、神经网络^[2] 等) 来评估系统自身的健康状态, 在系统发生故障前进行预测, 并结合各种可利用的资源信息提供一系列的维修保障措施以实现系统的视情维修。PHM 系统正在成为新一代的飞机、舰船和车辆等系统设计和使用中的一个重要组成部分。PHM 系统一般应具备故障检测、故障隔离、性能检测、故障预测、健康管理、部件寿命追踪等能力^[3]。

据传输、特征提取、状态监测、故障诊断、故障预测、保障决策等环节。目前传感器的高精度、集成化、可靠性等方面可以保证数据的采集与传输。文中针对特征提取与故障诊断及故障预测方面, 对 PHM 技术进行研究。本文综合目前的研究热点和难点, 研究了融合技术在 PHM 系统中的应用, 融合技术是多层次、多方面的处理过程, 文中研究了电子产品 PHM 系统中特征融合和预测方法的融合, 如图 1 所示。

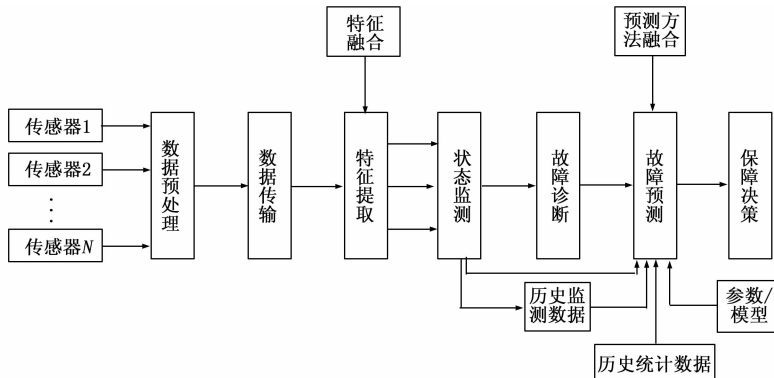


图 1 基于融合技术的 PHM 系统

1 特征融合

融合的基本原理是: 充分利用传感器资源, 通过对各种传感器及人工观测信息的合理支配与使用, 将各种传感器在空间和时间上的互补与冗余信息依据某种优化准则或算法组合来, 产生对观测对象的一致性解释和描述。通过对信息的优化组合来导出更多的有效信息。

收稿日期: 2014-03-31; 修回日期: 2014-05-12。

基金项目: 国防预研基金(914A27020113JB11393)。

作者简介: 刘倩倩(1984-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事电子技术、故障预测方向的研究。

PHM 系统是针对电子系统的早期故障进行预测和识别, 而早期故障特征的微弱性大大增加了故障诊断的难度, 因此如何有效地从测试点测试数据中辨别出故障特征显得尤为重要。随着电子系统越来越复杂化, 测试点较多, 每个测试点都包含了电子系统的状态信息, 提取单一测试点或者单一的信息有时并不能最大限度地表征电路的故障特征, 因此 PHM 系统中需要使用多传感器技术进行多种信息的监测, 并对这些传感器的信息进行融合, 以提高故障定位的准确性和可靠性。

当传感器采集到信息或者数据不正常时说明系统中出现故障征兆。由于每种故障的征兆都对应着故障空间中的多种可能故障, 而故障空间中的每种故障也可能引发多种故障征兆。为了提高故障诊断的可靠性, 在确定具体故障源时, 需要对传感器采集到的数据进行综合处理, 从而得出更为可信的结论^[4]。由于传感器的原始测试数据数量太大, 如果这些数据未经预处理就进行融合, 付出的处理代价较高, 需要对来自各类传感器的原始数据先进行特征提取, 然后对特征信息进行融合, 如图 2 所示。

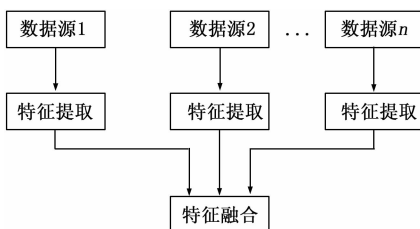


图 2 特征融合

特征融合先对来自传感器的原始信息进行特征提取, 然后对特征信息进行综合分析和处理。这些特征向量包含在一个比较大的单个特征向量中, 这个特征向量被用在用于决策的特别分类模型中, 如将轴承滑油中颗粒含量和大小信息与震动特征信息融合可获得轴承健康状态信息。常用的方法有神经网络、聚类算法和模板匹配等。由于神经网络具有信息分布式存储方法、大规模自适应并行处理和高度的容错能力等, 特别是学习能力、容错能力和高度的非线性映射能力, 因此文中采用神经网络的方法。如图 3 所示。

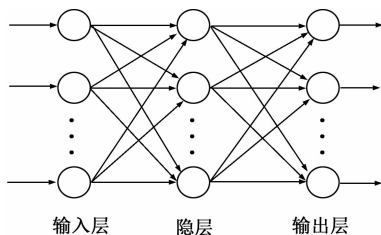


图 3 神经网络

神经网络的输入层与输出层神经元个数可以按照解决问题的需求来进行设计, 难点在于隐层数的选取。隐层单元数设定太少, 就有可能无法训练网络, 或者通过训练的网络鲁棒性太差, 抗噪能力低; 隐层单元数设定太多就会拉长学习时间, 而误差也未必能达到最低。目前常用的选取隐层节点的经验公式为:

$$n_H = \sqrt{n_0 + n_1} + l$$

其中: n_H 为隐层节点数; n_1 为输入层节点数; n_0 为输出层节点数; l 为 1~10 之间的整数^[5]。

用神经网络融合方法首先对从传感器测得的数据进行预处理完成特征提取及数据配准, 同时, 将所提取的特征数据输入

神经网络模式识别器, 神经网络模式识别器进行特征级数据融合, 以识别出系统的特征数据, 并输入到模糊专家系统进行决策级融合。专家系统推理时, 从知识库和数据库中取出领域规则和参数, 与特征数据进行匹配(融合)。最后, 决策出被测系统的运行状态、设备工作状况和故障。

特征层融合实现了可观的信息压缩, 有利于实时处理, 并且由于所提取的特征直接与决策分析有关, 因而融合结果能最大限度的给出决策分析所需要的特征信息。

2 预测方法融合

PHM 系统显著的特征就是具有故障预测的能力, 故障预测是指综合利用各种数据信息如监测的参数、使用状况、当前的环境和工作条件、早先的试验数据、历史经验等, 并借助各种推理技术如数学物理模型、人工智能等评估部件或系统的剩余使用寿命, 预计其未来的健康状态。

2.1 预测方法

目前国内外在对电子产品进行 PHM 时采用的方法主要分为 3 类: (1) 基于保险和预警装置的方法; (2) 基于故障预兆监控与推理的方法; (3) 基于失效物理 (PoF) 模型的方法^[6]。

2.1.1 基于保险和预警装置的方法

安装电子产品中的预警装置就是通过特别的耗损故障机制, 提供故障的早期警告。预警装置的无故障时间可根据实际产品的无故障时间进行预校准。由于位置的原因, 这些预警装置具有与实际产品极为相似的依存性。造成电路降级的应力包括电压、电流、温度、湿度等。由于运行应力相同, 因此预计两个电路的损坏率也相同。但是预警装置旨在通过增加装置结构上的应力, 从而使故障更快发生, 在相同的环境和运行负载条件下, 预警装置更快发生故障, 以提示实际产品也即将发生故障。可通过校准预警装置来提供充足的故障早期预警即预测距离, 从而进行维修。

例如通过减少预警电路的线路直径来增加其电流密度, 而随着电流密度的增加, 预警电路产生的热量也比正常使用电路产生的热量大, 继而导致热应力增加。随着时间的推移, 应力增加到一定程度便使预警电路先于电子产品发生失效, 从而提供故障的早期预警。比如, 在低周疲劳连接件和腐蚀件中设置预警电路评估失效机理, 利用故障预测芯片来监测晶体管的“时间相关绝缘击穿”(TDDB) 等都属于这类方法。

2.1.2 基于故障预兆监控与推理的方法

故障预兆是针对即将到来的故障而显示出的一种数据事件或趋势。预兆暗示通常表现为可测量变量的改变, 且这种变量与后续故障相关联。进行故障预兆 PHM 是通过将传感器嵌入到电子产品中以搜集和分析与故障密切相关的参数(比如性能参数)来实现的。由于电子产品的失效机理千差万别, 所以其失效征兆也多种多样。而对于同一种失效模式, 也可能有多个征兆与之对应。比如, 利用关键参数的变化来预测故障, 利用焊接件焊点的电阻变化来预测电子产品的残余寿命, 利用动态功耗来预测电路故障等都属于这一类方法。

目前, 利用各种变量来开发早期故障检测和故障预测系统, 其中电量包括在系统内部的不同位置持续监控到电流、电压和温度等。除了传感器信息等, 人们还对负载、吞吐量、队列长度和比特错误率等软件性能参数进行跟踪。实施 PHM 前, 通过监控不同变量的信号来进行特征描述, 以建立“健

康”系统的多元状态估计技术 (MSET) 模型。一旦使用了这些数据建立了健康模型, 便可将其用于预测某一特定变量的信号, 而这一变量是在所有变量间已知关联的基础之上。

2.1.3 基于失效物理 (PoF) 模型的方法。

该方法是基于物理失效和原位监测对电子产品实际的使用寿命周期载荷进行搜集与分析, 来评估产品的退化趋势。寿命周期载荷是指产品寿命期内所承受的全部外部载荷条件。电子产品寿命周期中的典型阶段包括制造、储存、处理、运行和非运行等。在整个寿命周期中, 可能会以单独不同的组合方式对产品造成性能或物理降级, 从而缩短其使用寿命。产品降级的程度和速度取决于产品承受负载 (使用率、频率和严重程度) 的幅度和时长。如果可以现场测量这些负载, 那么负载信息便可与 PoF 模型结合使用, 来估算累计负载造成的产品降级程度。

为建立复合载荷累积损伤模型, 需要在电子产品中嵌入一个或多个传感器来检测影响产品可靠性的外部载荷。例如寿命损耗监测 (LCM) 法即属于这类方法^[7]。

2.2 融合预测方法

故障预兆监控与推理的方法可检测故障和间歇性表现 (具有良好的诊断功能), 但该方法无法区分不同故障模式或机理, 如果没有产品参数的完整历史信息, 该方法很难完成剩余寿命估计。PoF 方法可对已知载荷条件和故障机理进行损伤估计, 估计不同载荷条件下的剩余寿命, 预测非工作条件下或产品参数不可监控情况下的剩余寿命, 但该方法局限在于无法检测产品的故障或间歇性表现 (诊断), 另外如果存在交互的故障机理, 则难以估计剩余寿命。

融合预测方法就是将故障预兆监控与推理的方法和失效物理 (PoF) 模型的方法结合进行预测, 以利用各自的优势来实现 PHM 系统的所有目标。经故障预兆监控与推理的方法能够提供诊断功能, 而失效物理 (PoF) 模型的方法则有助于确定故障根源, 并提供系统参数的阈值和故障定义, 从而支持剩余寿命预测。具体融合方法如图 4 所示。

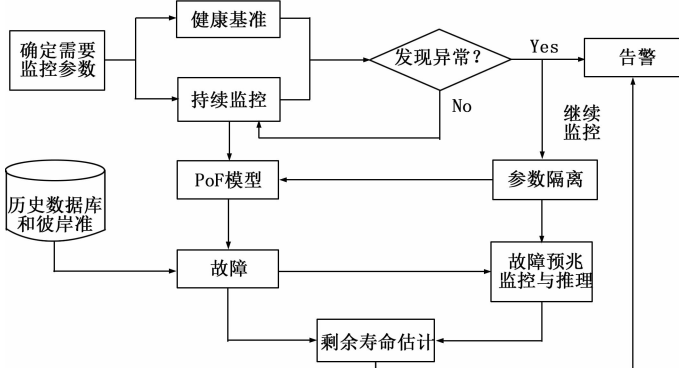


图 4 融合预测方法

融合方法的第一步是确定将要监控的参数。监控流程包括感应并记录环境参数以及工作和非工作状态下的产品参数。这可为模型和算法提供必要的信息, 来供检测和预测产品状态使用。

第二步, PHM 传感器系统根据这些参数的监控以及信息的获取、处理和存储方式, 提供处理方法, 通过融合故障预兆监控与推理的方法和失效物理 (PoF) 模型的方法, 即可选择出合适的方法对传感器数据进行实时分析。

另外, 基准数据是在确定产品正常工作的前提下, 结合不

同的运行状态和载荷条件来进行搜集的。随后根据提取的特征, 健康基准将于监控数据的特征进行比较来检测异常。

第三步, 通过对数据分析, 当检测到异常表现时, 隔离造成该异常的参数。找出反映或者导致产品性能变化的参数, 这对于确定或者检测产品故障至关重要。可用 PoF 模型方法来确定故障并进行参数隔离。

第四步, 完成参数隔离后, 选择 PoF 模型将隔离参数作主要输入, 根据输入来选择合适的故障预兆监控与推理的方法来估计剩余寿命。例如, 产品故障或降级过程的马尔科夫模型, 取决于在不同状态下对产品的状态转移进行建模^[8]。这些状态可用于对不同的故障机理, 或者超出选定 PoF 模型所定义的故障阈值等情形进行建模。

PoF 模型将数据与模型对故障的定义相关联, 确定故障征兆, 从而用于产品故障的早期告警和预测。用故障阈值、回归分析等方法对重要参数与时间进行 Trend 函数计算。将参数超过故障阈值的时间估计为产品无故障工作时间^[9]。这样通过异常检测、参数隔离、PoF 模型以及故障预兆监控与推理的方法得出的信息相结合, 来对产品剩余寿命进行估计。系统根据估计的剩余寿命设置告警来提供产品合理的修复或更新时间。

3 结束语

电子产品 PHM 技术已成为国内外科技研发的重要发展趋势, 本文研究了融合技术在 PHM 中的应用, 针对传感器测得数据信息的复杂性提出了基于神经网络的特征融合, 融合后的特征提高了预测的可靠性。为了实现故障检测、隔离以及剩余寿命估计, 结合故障预兆监控与推理的方法和失效物理 (PoF) 模型的方法各自的优势了局限, 将两种方法相结合, 这种融合预测方法更加及时准确分析故障根源、预测剩余寿命, 实现了故障预测和健康管理的目标。

参考文献:

[1] 许丽佳. 电子系统的故障预测与健康管理技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
 [2] 孙波, 张雷, 王华茂. 卫星 PHM 系统设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 554-559.
 [3] Hess A, Calvello G, Dabney T. PHM a key enabler for the JSF autonomic logistics support concept [A]. Aerospace Conference 2004. Proceedings. 2004 IEEE [C]. Volume 6.
 [4] 孙博, 康锐, 谢劲松. 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述 [J]. 系统工程与电子技术, 2007; 29 (10): 1762-1766.
 [5] 余琼芳. 基于小波分析及数据融合的电气火灾预报系统及应用研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
 [6] 派克·迈克尔, 康锐. 故障诊断、预测与系统健康管理 [D]. 香港: 香港城市大学, 2010.
 [7] Valentin R, Osterman M, Bob Newman. Remaining Life Assessment of Aging Electronics in Avionic Applications [A]. The Annual Reliability and Maintainability [C]. 2003 Proceedings. 2003; 313-318.
 [8] Zhang X, Xu R, Kwan C, et al. An integrated approach to bearing fault diagnostics and prognostics [A]. Proceedings of the 2005 American Control Conference [C]. 2005 (4): 2750-2755.
 [9] 郭阳明, 蔡小斌, 张宝珍, 翟正军. 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, 16 (9): 1213-1219.