

doi: 10.7690/bgzd.2016.01.009

机械设备故障预测与健康管理的综述

孙旭升¹, 周刚¹, 于洋², 李凤宇¹

(1. 海军工程大学核能科学与工程系, 武汉 430033; 2. 海装重庆局, 重庆 430000)

摘要: 针对事后维修和定期维修在很多领域已经不能满足维修保障要求的问题, 提出一种故障预测与健康管理的视情维修技术。介绍 PHM 技术的概念和目的, 阐述 PHM 系统的结构功能、设计步骤以及关键技术, 简要比较概括了 15 种故障预测方法的优缺点, 分析了当前发展 PHM 技术需要解决的问题。分析结果表明: 该技术对维护机械设备安全性、可靠性, 节约维修保障成本有十分重要的意义。

关键词: 机械设备; PHM; 设计步骤; 关键技术; 故障预测方法

中图分类号: TP203 **文献标志码:** A

Overview of Prognostics and Health Management of Mechanical Equipment

Sun Xusheng¹, Zhou Gang¹, Yu Yang², Li Fengyu¹

(1. Department of Nuclear Science & Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Bureau of Chongqing, Naval Armament Department, Chongqing 430000, China)

Abstract: To solve the problem that breakdown maintenance and periodic maintenance can't meet the needs of maintenance support in many fields, a condition based maintenance technology called prognostics and health management (PHM) is proposed. The conception and significance of the PHM technology are introduced. The structure and function divisions, design procedure and key technologies of PHM system are stated. Fifteen fault prediction methods are compared each other. Problems of developing PHM technology are analyzed. The results show that the technology is important for mechanical equipments to preserve safety and reliability, while it is equally important for maintenance cost saving.

Keywords: mechanical equipment; PHM; design procedure; key technologies; fault prediction methods

0 引言

随着机械设备结构和功能日益复杂和自动化程度日益提升, 使用者对设备安全性和可靠性的要求越来越高, 事后维修和定期维修在很多领域已经不能满足维修保障要求。故障预测与健康管理的视情维修技术 (prognostics and health management, PHM) 技术可以维护机械设备的安全性、可靠性, 节约维修保障成本。从 20 世纪 70 年代起, PHM 系统逐步在工程中应用, 其中 A-7E 飞机的发动机监控系统是早期 PHM 技术工程应用的典型案例^[1]。当前美军 F-35 JSF 所采用的 PHM 系统代表了美军 PHM 技术所能达到的最高水平^[2-3]。

1 PHM 技术目的

维修技术大致经历了事后维修、定期维修和视情维修 3 个阶段^[2]。PHM 技术是利用先进传感器集成收集设备数据, 结合其他有效信息, 借助合适的算法模型对目标对象进行故障预测, 同时提供维修保障决策及实施计划的一种视情维修技术。

诊断是对已经发生的故障进行分析并确定其原因, 事后维修也可以说是基于诊断技术的维修。定期维修是一种预防性维修, 维修频率不易把握, 若

维修过于频繁, 虽然保证了设备的安全性和可靠性, 但会造成资源浪费; 如果维修间隔过长, 设备的安全性和可靠性又难以保证, 失去了预防性维修的意义。故障预测技术是比故障诊断技术更为先进的维修保障方式^[4-5], PHM 技术通过采用适当的故障预测方法, 提升了维修保障系统在准确时间对准确部位进行准确维修的能力^[6]。应用 PHM 技术对设备进行维修保障可以了解以下 4 个问题: 1) 当前设备的运行状态; 2) 设备何时会出现故障; 3) 何种故障会出现; 4) 应该采取何种维修措施。

2 PHM 系统设计

2.1 PHM 系统结构

PHM 的概念和框架是由维修技术以及诊断和预测技术发展而来, 诊断和预测技术起源于医学领域, 后来逐步应用于维修领域^[4]。波音公司提出的基于逻辑分层的健康管理体系统结构成为 PHM 系统顶层设计的基本思想^[3]。该体系框架结构将 PHM 系统分成 7 个功能模块: 数据获取层、数据处理层、状态监测层、诊断预测层、健康评估层、决策支持层和显示层^[2-3,7-8]。PHM 系统结构功能如图 1 所示。

PHM 系统还应该与自主式保障系统互联, 当诊

收稿日期: 2015-09-02; 修回日期: 2015-10-09

作者简介: 孙旭升(1991—), 男, 山东人, 在读硕士, 从事舰船核动力控制与运行研究。

断出故障发生或预测会有故障将会发生时, PHM 系统的决策信息要及时传递给自主式保障系统。这样可以有效地减少备件储存, 合理地安排人员进行维修保障任务。

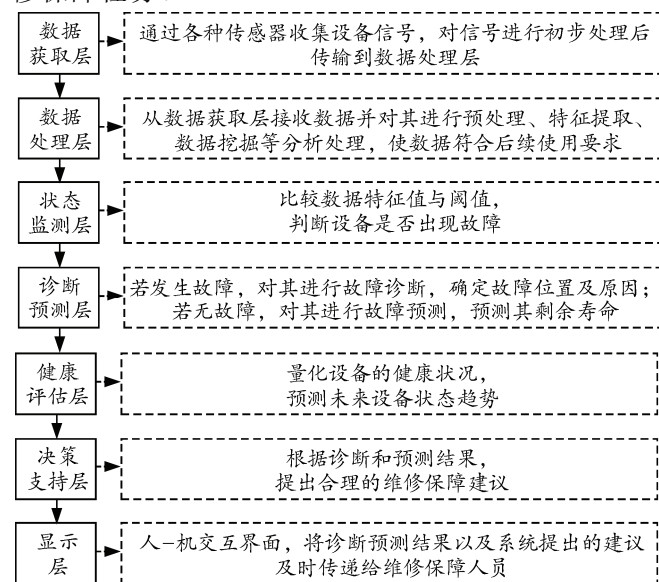


图 1 PHM 系统结构功能

2.2 PHM 系统设计步骤

机械设备故障一般分为突变故障和渐变故障。突变故障出现前, 设备参数无明显征兆, 难以预测; 因此, PHM 技术主要应用于对渐变故障的维修保障。

在设计 PHM 系统时要考虑目标设备的特点, 按以下 5 步设计 PHM 系统: 1) 选择设备的关键部件 (所谓关键部件是指其一旦发生故障会给设备造成十分严重影响的部件) 进行故障预测与健康管理; 2) 剔除噪声、错误信号、冗余信号等, 筛选有效信号, 选择合理工具进行数据处理以提取特征值; 3) 根据数据选择恰当的硬件和软件以支持数据处理及数据传输, 将信号数据转化成设备状态信息并输出给使用者及维修保障人员; 4) 选择设计合理人-机界面, 达到良好的可视化效果, 方便设备使用者和维修保障人员决策; 5) 建立完整的设备保障回收体系, 从设备投入使用到设备报废回收都可以提前合理计划, 以达到节约资源、保护环境的可持续目标。

此外, 积累数据也很重要。设计数据、实验数据、故障数据、维修数据还有正常运行数据对于完善数据库都有重要意义, 数据库越完善, 决策的可靠性就越有保证。

3 PHM 系统的核心技术

3.1 PHM 系统 2 大功能

顾名思义, PHM 系统的 2 大功能分别是故障预

测和健康管理。故障预测是前提基础, 健康管理是最终目的。

故障预测是根据目标设备当前的使用状态, 结合其结构特性、运行环境及历史数据, 采用合理的模型算法对将来可能发生的故障做出判断, 预测故障的性质、类别、程度、原因及部位^[1,5,9]。在 PHM 系统中, 故障预测功能由数据获取层、数据处理层、状态监测层和诊断预测层共同完成。故障预测在机械设备和电子设备 2 个领域经历了不同的发展历程, 主要体现在方法和参数的选择有所不同。

PHM 系统健康管理功能主要体现在健康评估层、决策支持层和显示层。当诊断有故障发生时, 决策支持层能迅速准确地根据诊断结果实施应急措施。当预测到故障可能会发生时, 决策支持层要结合设备的运行环境, 给出合理的后期运行方案。同时决策支持层要将相关信息及时传递给操纵人员和自助式保障系统。健康管理目标能够顺利实现的前提条件是得出准确可信的故障诊断和预测结果。

无误故障预测是 PHM; 因此, 故障预测技术是 PHM 技术的核心技术, 是突出 PHM 技术优于以往维修保障技术的关键, 故障预测结果的准确性会直接影响到 PHM 系统决策的优劣。

3.2 故障预测技术

对目标设备进行故障预测与健康管理, 首先要选择关键设备, 更重要的是要选择设备参数和故障预测方法。设备参数和故障预测方法的选择直接影响到整个系统的预测结果和决策, 进而对后续的维修保障工作产生影响。

通过振动信号分析和油液分析可较好地反映机械设备的工作状态; 因此, 振动信号和油液是故障预测中较为常用的参数^[4,10]。此外, 还有压力、温度和电流等参数, 它们可用于机械设备的故障预测。

目前已有不少故障预测方法被提出, 但其分类标准尚未统一^[1-2,4-5,7,11]。可以将故障预测方法大致分为 3 类: 基于模型的故障预测、基于知识的故障预测和基于数据的故障预测。

基于模型的故障预测方法是在设备数学模型已知时, 结合设备当前运行状态进行预测的方法。这类故障预测方法结果较为准确, 但精确模型的建立十分困难, 甚至无法建立。当前基于模型的故障预测方法在裂纹扩展预测方面有较好的应用^[12-14]。

基于知识的故障预测方法是根据相关领域专家经验, 结合设备实际运行情况进行预测的方法。这

类故障预测方法结果的准确性要依赖于知识来源的正确性和推理机制的合理性。典型基于知识的故障预测方法有：专家系统和模糊逻辑。

基于数据的故障预测方法是针对复杂设备，利用大量的历史数据进行预测的方法。这类预测方法避免了复杂的数学模型和专家经验，但是数据的不

完整性会降低预测结果的可信度。典型基于数据的故障预测方法有：神经网络和隐马尔可夫模型。

在选择故障预测方法时，要综合考虑目标设备的特性、数据类型以及算法的难易，还要通过实际检验确保预测结果的可靠性。表 1 总结概括了一些故障预测方法的作用、优点和不足。

表 1 故障预测方法比较

故障预测方法	作用	优点	不足
时域分析 ^[12,15-16]	直接利用波形 比较不同信号	可直接显示信号的不同	相比较频域分析等方法可提供的信息量较少
傅里叶变换 ^[12,16]	把信号分解成不同频率的正弦波来进行频域分心	适用于平稳信号； 可对信号频域分析	无法实时分析； 对非平稳信号效果不好
短时傅里叶变换/维格纳-威利分布 ^[12,17]	同时对信号进行时域和频域分心	适用于非平稳信号； 可提供信号的时-频信息； 信息可以图像方式给出；	计算量较大； 分辨率不高
希尔伯特-黄变换 ^[18]	把信号分解成有限本征模态函数，显示信号的时-频能量分布	适用性好，适用于非平稳、非线性信号	计算量较大； 依赖经验数据，缺乏理论基础
主成分分析 ^[12,19]	通过将原始数据转换成互不相关的特征数据已达到减少数据维数的目的	降低原始数据的维数而且能保留原始数据的信息	线性转换； 适用性不强
费希尔线性判别 ^[12]	找到一个映射可以把原始数据降为最小维数	在保持数据分辨率的前提下把数据减少到最低维数	线性降维
高斯混合模型 ^[12,20]	融合多个高斯概率密度函数	可以以任意精度接近任意分布	参数选择对模型预测性能影响较大 混合函数数目不易确定 输出值无界时模型不准确； 参数选择对模型预测性能影响较大
逻辑回归 ^[12,21]	找出描述输入与输出关系最确切的模型	输出值在 0~1 之间时模型比较准确	不适用于特征分布非高斯分布的数据
统计模式识别 ^[22]	计算数据的特征分布与已有模型的相似度		
粒子滤波 ^[23]	基于蒙特卡洛方法 通过寻找一组在状态空间中传播的随机样本来近似的表示概率密度函数	适用于非线性、非高斯分布噪声； 相比其他滤波算法更为准确	高维数据计算量大； 要先建立系统动力学模型
卡尔曼滤波 ^[12,24-26]	基于贝叶斯方法，以线性、无偏、最小方差为准则递推估值	计算量较小； 预测精度高； 具有较好的关于模型不确定性的鲁棒性	只适用于线性系统； 要先建立系统测量模型； 噪声对算法有较大影响
神经网络 ^[2,4,12,26-29]	模拟人的神经系统，通过已知数据训练，建立输入输出的关系	适用性良好，对复杂系统(包括非线性、非平稳过程)适用	需要大量数据进行训练； 选择神经网络结构的标准不统一
专家系统 ^[30-31]	建立一个有大量专门知识与经验的计算机程序进行预测	可以不断修改原知识或学习新知识	知识库的建立需要经过长时间积累
模糊技术 ^[32-33]	利用故障征兆与故障原因之间的不确定关系进行预测	适用于数据较少且无法获得精确模型的系统； 预测诊断过程更接近人的判断过程	需要较为准确的隶属度函数； 准确度较低
支持矢量机 ^[12,34]	找到最大间隔超平面对数据进行分类	适用于小样本、非线性的系统； 采用核函数，准确度较高	核函数的选择标准不确定
隐马尔可夫模型 ^[2,35-37]	描述随机过程统计特性的概率	适用于非平稳系统； 适用于并发故障	需要大量数据建模

4 总结

PHM 系统融合了故障诊断技术、故障预测技术以及自主式保障技术等技术，可以提高设备安全性、可靠性，减少设备的故障率，保持设备合理的维修频率，节约人力物力资源。虽然有一些 PHM 系统已经在工程中得以应用，但要进一步发展 PHM 技术还需要解决几个问题：1) 虽然 PHM 技术在技术上可能实现，但是当前还没有一种系统的模式来设计和实施故障预测与健康管理的；2) 当前很多 PHM

方法只针对特定对象，没有普遍适用的 PHM 方法，选择 PHM 方法(主要是故障诊断和预测方法)的标准也有待确定^[4,38]；3) 缺少可视化的工具来优化 PHM 信息输出及决策支持。当前 PHM 技术是维修保障技术的前沿技术，将来还可能会在气象学、决策学、经济学等领域得到广泛应用。

参考文献：

[1] 曾声奎, Michael G. Pecht, 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, 2006, 26(5):

- 626-632.
- [2] 邵新杰, 曹立军, 田广, 等. 复杂装备故障预测与健康
管理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 23-45.
- [3] 罗荣蒸, 孙波, 张雷, 等. 航天器预测与健康
管理技术研究[J]. 航天器工程, 2013, 22(4): 95-102.
- [4] Lee Jay, Wu Fangji, Zhao Wenyu, et al. Prognostics and
health management design for rotary machinery
systems-Reviews, methodology and applications[J].
Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 42:
314-334.
- [5] 左宪章, 康健, 李浩, 等. 故障预测技术综述[J]. 火力
与指挥控制, 2010, 35(1): 1-5.
- [6] 马剑, 吕琛, 陶来发, 等. 船舶主推进系统故障预测与
健康管理设计[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(S):
119-124.
- [7] 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):
1762-1767.
- [8] 杨洲, 景博, 张劼, 等. 飞机故障预测与健康
管理应用模式研究[J]. 计算机测量与控制, 2011,
19(9): 2061-2063(2101).
- [9] 艾红, 周东华. 动态系统的故障预测方法[J]. 中
国科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(S1): 222-225.
- [10] 冯玲, 张春良, 岳夏. 核动力设备状态监测技术
的研究[J]. 机械工程与自动化, 2009(1): 112-114.
- [11] 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.
- [12] 上海航空测控技术研究所. 航空故障诊断与
健康管理技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013:
109-201.
- [13] Li Y, Kurfess T R, Liang Y. Stochastic Prognostics
for Rolling Element Bearings[J]. Mechanical Systems
and Signal Processing, 2000, 14(5): 747-762.
- [14] Ray A, Tangirala S. Stochastic Modeling of Fatigue
Crack Dynamics for Online Failure Prognostics[J].
IEEE Transactions on Control Systems Technology,
1996, 4(4): 443-451.
- [15] 王金福, 李富才. 机械故障诊断技术中的信号
处理方法: 时域分析[J]. 噪声与振动控制, 2013,
2(2): 128-132.
- [16] 钱强. 振动监测技术在旋转机械故障诊断中的
应用[J]. 噪声与振动控制, 2014(2): 164-168.
- [17] Ferguson B G, Quinn B G. Application of the
short-time Fourier transform and the Winger-Ville
distribution to the acoustic localization of aircraft[J].
Journal of the Acoustical Society of America,
1994(96): 821-827.
- [18] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical
mode decomposition and the Hilbert spectrum for
nonlinear and non-stationary time series analysis[J].
Proceedings of the Royal Society of London, 1998,
454: 903-995.
- [19] 曾庆虎, 邱静, 刘冠军, 等. 基于 KPCA-HSMM
设备退化状态识别与故障预测方法研究[J]. 仪
器仪表学报, 2009, 30(7): 1341-1346.
- [20] Reynolds D A. A Gaussian mixture modeling
approach to text-independent speaker identification[D].
Georgia Institute of Technology, 1992.
- [21] Yan J, Lee J. Degradation assessment and fault
modes classification using logistic regression[J].
Journal of Manufacture Science and Engineering,
2005, 127: 912-914.
- [22] Sohn H, Farrar C R, Hunter N F, et al. Structural
health monitoring using statistical pattern recognition[J].
Journal of Dynamic Systems, Measurement and
Control, 2001, 123: 706-711.
- [23] Arulampalam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A
tutorial on particle filters for online nonlinear/non-
Gaussian-Bayesian tracking[J]. IEEE Transaction on
Signal Processing, 2002, 50: 174-188.
- [24] 薛子云, 杨江天, 朱衡君. 机械故障预测模型
综述[J]. 机械强度, 2006, 28(S): 60-65.
- [25] 陈敏泽, 周东华. 一种基于强跟踪滤波器的
自适应故障预报方法[J]. 上海海运学院学报,
2001, 22(3): 35-45.
- [26] 孔学东, 恩云飞, 陆裕东, 等. 电子产品故障
预测与健康管理的: 应用构架与实践[M]. 北
京: 电子工业出版社, 2013: 27-39.
- [27] 雷晓彝, 李曙伟, 阳杰, 等. 基于小波包: 灰
色神经网络的机电作动系统故障预测[J]. 计
算机测量与控制, 2014, 22(4): 1704-1707.
- [28] 杜耀武, 蒋伟康. 基于人工神经网络的大型
机械系统的剩余寿命预报模型[J]. 机械强度,
1997, 19(1): 5-8.
- [29] 吕琛, 栾家辉, 王立梅, 等. 故障诊断与预
测: 原理、技术及应用[M]. 北京: 北京航空航
天大学出版社, 2012: 215-245.
- [30] 黄大荣, 黄席越, 范敏, 等. 基于卡尔曼滤
波和专家系统的混合故障预测研究[J]. 计
算机仿真, 2005, 22(9): 150-152.
- [31] Biagetti T, Sciubba E. Automatic Diagnostics
and Prognostics of Energy Conversion Processes
via Knowledge Based Systems[J]. Energy, 2004,
29(12-15): 1553-2572.
- [32] 雷继尧, 何世德. 机械故障诊断基础知识[M].
西安: 西安交通大学出版社, 1991: 22-35.
- [33] 周刚. 核动力装置智能控制与故障诊断[Z].
北京: 中国原子能出版社, 2013.
- [34] 毛伟, 余刃, 陆古兵. 基于 LS-SVM 方法的
某核电站主泵故障诊断[J]. 海军工程大学学
报, 2012, 24(5): 82-85.
- [35] Ying Peng, Ming Dong. A hybrid approach of
HMM and grey model for age-dependent health
prediction of engineering assets[J]. Expert Sys
tems with Applications, 2011, 38: 12946-12953.
- [36] Andrew K. S. Jardine, Lin Daming, Dragan
Banjevic. A review on machinery diagnostics and
prognostics implementing condition-based
maintenance[J]. Mechanical Systems and Signal
Processing, 2006, 20: 1483-1510.
- [37] 李劲播, 江志钢, 岳夏. 基于 CGHMM 的核
电装备主泵状态监测与故障诊断技术的研究
[J]. 现代机械, 2010(1): 29-31.
- [38] 杨占才, 安茂春, 王红. 对发展故障预测和
健康管理技术的探讨[J]. 测控技术, 2012,
31(11): 107-110.