

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.04.005

变频机组故障预测与健康管理系统

杨新宇^{1,2}, 马齐爽¹, 张琳², 张强²

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

2. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051)

摘要:针对某型武器系统发电机组可靠性和维修保障性要求高的问题,根据变频发电机组系统故障特点提出了变频机组故障预测与健康管理系统的体系结构总体方案,研究了故障预测与健康管理系统体系结构各层的功能,探讨了某型变频机组健康监测系统关键技术。基于工业控制计算机设计了健康监测系统,提出了以 Hilbert 变换技术为核心的快速和智能的故障诊断算法,并通过实验验证了其有效性。系统实现了变频机组故障预测与健康管理的基本功能,为典型变频发电机组系统故障预测和保障提供了有效的方法。

关键词:故障;预测;健康管理;变频机组;PHM 结构

中图分类号:TM307

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)04-033-06

Research on prognostics and health management system of frequency convector

YANG Xinyu^{1,2}, MA Qishuang¹, ZHANG Lin², ZHANG Qiang²

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To meet the requirement of high reliability and indemnificatory to power supply system of certain weapon system, the general structure of prognostics and health management (PHM) of frequency converter system based on its fault mechanism is presented, the function of every layer in PHM of frequency converter system is explored, and the key technology of PHM system is studied. By considering the rapid calculation requirement, PHM and database of maintenance based on industry personal computer are designed. Intelligent diagnosis algorithm and effective fault prognostics based on the Hilbert transform technology are proposed. The correctness and validity of the structure of PHM of frequency converter system are tested and verified through the experiments. The system fulfils the basic functions of prognostics and health management for frequency converter system. It provides an effective method of prognostics and protection for typical frequency converter system.

Key words: faults; prediction; health management; frequency converter system; PHM architecture

收稿日期:2014-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273156)

作者简介:杨新宇(1979-),男,北京航空航天大学博士研究生,空军工程大学讲师,主要从事电力系统自动检测及故障预测研究。(E-mail) yangxinyu_2004@163.com。

故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 技术是指利用尽可能少的传感器采集系统的各种数据信息, 借助各种智能推理算法 (如物理模型、神经网络、数据融合、模糊逻辑、专家系统等) 来评估系统自身的健康状态, 在系统故障发生前对其故障进行预测, 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^[1-4]。随着 PHM 技术在军事和民用领域的广泛应用, 世界各国对 PHM 技术的兴趣日渐浓厚。PHM 已成为国外新一代装备研制和实现自主式保障的一项核心技术, 是 21 世纪提高复杂系统可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性和降低寿命周期费用的一项非常有前途的军民两用技术, 是研制复杂装备必须掌握的关键技术之一^[5-7]。对电机故障监测与诊断的研究是当前电机界研究的热点之一。从研究的种类上来说, 目前电机故障监测与诊断技术研究的比较多且取得较好效果的是大型发电机和鼠笼式异步电机, 对中、小型电机的故障监测与诊断的研究还比较少^[8-10]。

某型变频机组属于中、小型电机系统, 由 1 台三相异步电动机和 1 台中频同步发电机组成, 主要用来将三相 50 Hz、380 V 工频电源变换为三相 400 Hz、220 V 中频电源, 为武器系统提供可靠电源。其工作可靠与否, 直接关系武器系统整体作战效能的发挥。文中设计了 1 套以计算机为平台的变频机组故障预测与健康管理系统, 期望实现对机组的状态监测、故障诊断和寿命预测, 从而有效降低武器装备的故障率, 节省维修费用。

1 变频机组 PHM 体系结构设计

1.1 变频机组 PHM 系统总体结构

变频机组故障预测与健康管理系统组成框图如图 1 所示。

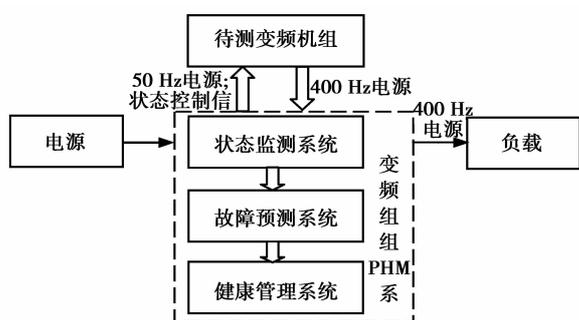


图 1 变频机组故障预测与健康管理系统框图

整个系统由调压电源、变频机组、负载、故障预测与健康管理系统等部分组成。其中, 故障预测与健康管理系统包括状态监测系统、故障诊断及健康管理系系统。

电源负责为待测变频机组提供 50 Hz 工频电源, 负载用于模拟实际负载, 测试不同功率输出情况下变频机组的工作情况。变频机组 PHM 系统中, 状态检测系统主要完成监控功能, 可以根据需要向待测变频机组发出启动、转并联、送电等状态控制信号, 更重要的是可以检测变频机组的各种电能参数, 便于监控和故障诊断; 故障预测系统依据变频机组参数建立机组状态模型, 然后对提取到的变频机组重要参数进行辨识, 形成对故障信号的预先判断; 健康管理系系统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、前期的试验数据、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。

1.2 变频机组 PHM 系统结构设计

由于变频机组结构功能划分明确, 其 PHM 系统逻辑结构采用集中式结构。信息处理核心是以工控机为基础的中央管理控制器, 负责收集、解释用于评估的所有信号。对应健康管理行为的需要, PHM 体系结构具体划分为 5 个模块。

1) 信号采集与处理模块。完成 PHM 系统所需基础数据的采集与处理。信号采集部分利用各型传感器完成对变频机组实时监测信息的采集, 数据处理单元根据故障预测需要随采集数据进行滤波、特征提取, 以利于故障预测。

2) 状态监测模块。接受来自信号采集与处理模块的数据, 结合其他模块数据及自身状态设置, 完成对变频机组各独立模块的状态分析, 如综合分析判断电动机、调压系统、励磁回路等各模块状态结果。

3) 健康评估与预测模块。接受各状态监测模块数据, 结合健康模块相关结论算法, 形成评估模型, 评估子系统健康状态及整个变频机组大系统的健康状态信息, 并完成机组未来状态的健康估计, 包括剩余寿命等参数估计。

4) 自动推理决策模块。接受来自状态监测、健康评估和故障预测部分的数据, 根据系统未来运行剖面 and 当前健康状态, 根据推理决策产生更换、维修活动等建议决策。

5) 接口表达模块。PHM 系统的交互接口, 包括状态监测模块的警告信息显示及健康评估、预测

和决策支持模块的数据信息表示等,也包括系统中各模块之间的通信联系。

2 变频机组状态监测系统设计

变频机组监测系统主要实现信号采集及处理功能。为了提高检测的可靠性和准确性,文中以工控机为硬件基础、以虚拟仪器技术为软件基础构建监测系统。采用较为先进的分布式微机测控技术和计算机网络技术实现多任务、多进程实时并发处理,满足不同层次操作要求及测试要求。系统从硬件结构上可以分为:以工控机为基础的控制决策核心;以多功能卡、串口扩展卡、信号调理板、继电器输出板等为基础的信号处理与监测部分;以综合电量监测仪(50 Hz、400 Hz)、红外测温装置、绝缘电阻测试仪、直流电参数测量表等为基础的传感器信息采集部分;以及交流负载等外围辅助设备。

2.1 系统硬件设计

系统硬件框图如图2所示。监控对象包括电源

模块、变频机组和负载。在PHM系统硬件电路设计中,数据采集和信号调理是整个检测系统的关键环节。信号采集系统完成对系统不同输入和输出情况下关键特征参数的采集,包括变频机组关键部分的电动机、发电机、励磁回路、调压器等部分电压、电流、温度等。由综合电量监测仪、红外测温装置、绝缘电阻测试仪、霍尔型电流互感器等传感器变换来的电信号输入仪器的信号调理电路,经信号调理电路进行放大、滤波,然后再经数据采集卡存入内存,整个过程由软件控制。研究选用研华公司的PCI-1710多功能数据采集卡保证数据及时准确传输,其采样数率可达100 kHz,采样通道的增益可编程,具有4K采样FIFO缓冲器,有可编程触发器/定时器。用DMA方式进行多通道高速数据采集,把采集到的数据存储到内存数组中,然后从该数组提取出每个参数的采集数据,直接对这些数据进行分析处理。

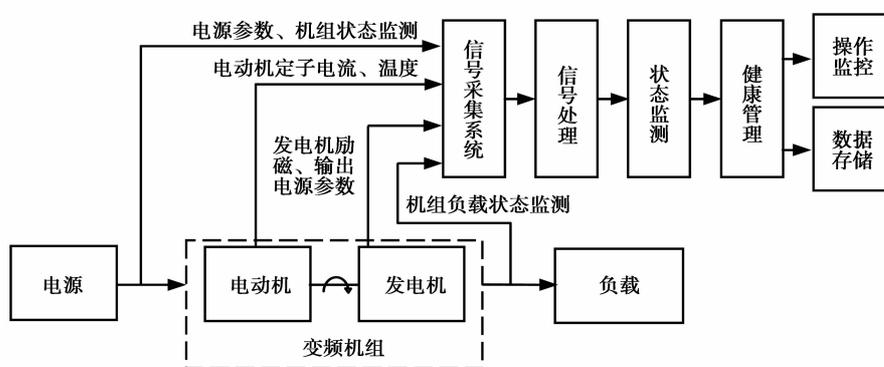


图2 变频机组健康监测系统框图

信号调理电路的基本作用就是放大和预滤波,抑制干扰噪声信号的高频分量,将频带压缩以降低采样频率,避免产生混淆。电路采用的调理方式包括放大、隔离、滤波、线性化、防止电磁干扰等。状态监测部分除完成基本的对参数的超限判断,更要针对不同组成部分,利用已有故障预测算法进行分析、做出故障判断与预测。健康管理部分除完成操作监控、数据存储等基本功能,主要结合整个系统不同运行状态下的状态,分析判断变频机组最终运行状态。

2.2 系统软件设计

变频机组监测系统测试的主要参数包括电动机三相电源参数、发电机三相电源参数、变频机组温

度、励磁电压和励磁电流等。为了便于实时监控机组的运行,软件增加了电动机参数曲线和发电机参数曲线的实时波形显示,相应波形可通过虚拟示波器显示出来,同时将波形保存在指定的数据库中。根据软件的设计思想,数据流图以主控计算机为核心,组成实时测试系统、数据库系统和故障预测系统。实时测试系统包括人机界面、信号采集和输出报警。数据库系统可进行测试数据的管理、记录、查询和报表打印,构成数据分析系统,具体结构如图3所示。系统采用了Data控件和数据访问对象这2种与Jet数据库引擎接口的方法,用DAO创建数据库,用Data控件来绑定访问数据库。系统测试界面如图4所示。

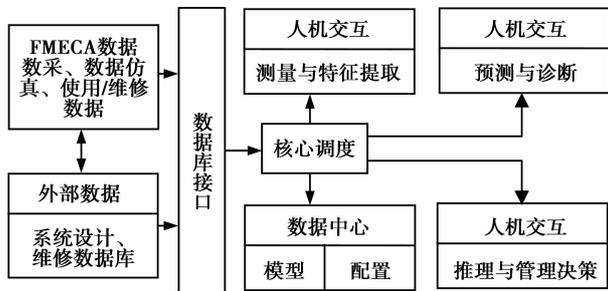


图 3 变频发电机组 PHM 系统数据库结构

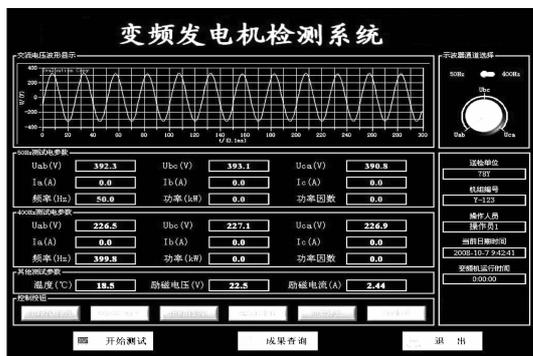


图 4 测试系统主界面

3 故障预测及健康管理系统设计

健康评估和故障诊断是 PHM 系统的核心部分，健康评估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、前期的试验数据、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。

3.1 电机系统故障预测技术

目前，应用于故障预测的方法根据系统复杂程

度、预测能力和使用范围大致可分为 3 类：基于统计分布的方法、数据驱动的方法和基于模型的方法^[11-12]。由于系统的研究对象是确定的，从而可以根据变频机组各种已知参数分别建立异步电动机和同步发电机的物理模型，再对实时测试的数据进行分析处理，结合模型进行故障判断及预测，具体工作工程如图 5 所示。测试过程中，利用神经网络理论，设计先进的特征提取技术和具有良好性能的分类器应用于电机系统故障预测与诊断。

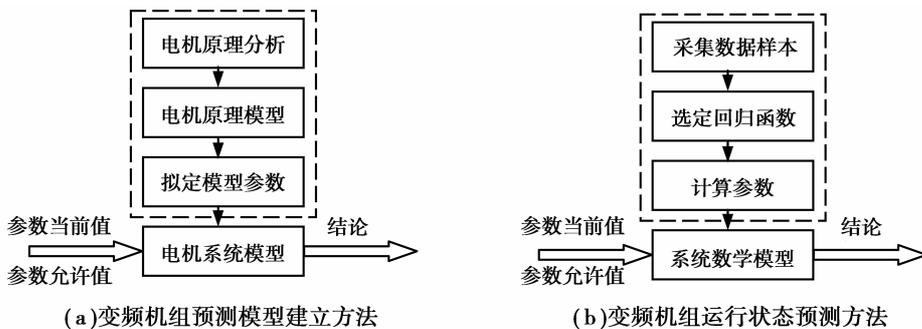
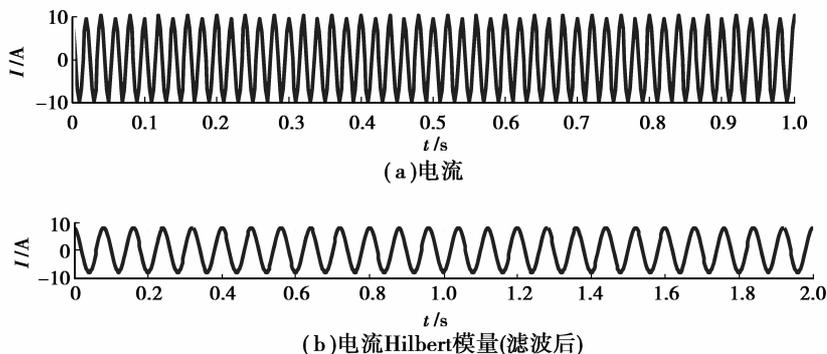


图 5 基于模型的电机故障预测方法

以异步电动机气隙偏心故障为例，设计了基于经验模态分解的异步电机定子短路故障和轴承故障诊断方法。例如，在异步电机 $s=0.015$, $f_1=50$ Hz, $p=2$ 情况下，检测到定子 A 相故障电流及其 Hilbert

模量如图 6 所示，其电流信号拟合为 $i_{Af}(t) = 10\cos(2\pi f_1 t) + 0.2\cos[(f_1 - f_r)2\pi t] + 0.2\cos[(f_1 + f_r)2\pi t]$ ，式中 $f_r = (1-s)f_1/p$ 。



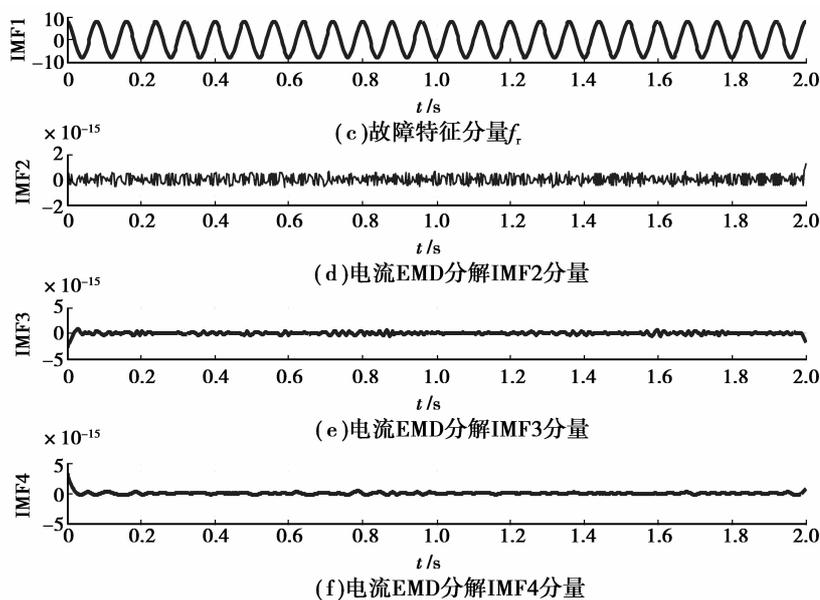


图6 A相故障电流及其Hilbert模量

根据设计算法,先对故障电流进行Hilbert变换,滤去Hilbert模信号中的直流分量,然后进行EMD分解。仿真结果如图6(c)~(f)所示,可以得到4个IMF分量,IMF1即为需要提取的 f_r 分量。选取0~1s作为分析对象来研究,可见, f_r 分量可以通过EMD分解得到准确的分离,其频率为24.62Hz,幅值为8,与理论模型计算值比较,分离出的IMF1分量即可作为故障的判据。仿真结果还表明:该方法精度高,即使在异步电动机发生轻微断条故障时,也能够成功提取故障特征分量,可作为有效的故障预测方法。

3.2 健康管理系统设计

健康管理系统主要是基于电机系统的故障诊断技术,结合寿命可靠性预测方法建立系统的健康管理系统。在分析寿命数据及失效过程模型化问题中,常用到一些参数模型,它们在相当广泛的范围内具有实用性。这些分布主要有指数分布、威布尔分布、对数正态分布^[12-14]。指数分布简单,在电子设备中应用很广,预测难度较大;威布尔分布也许是世界上使用最广泛的寿命分布,它是美国军标指定的适合于机电设备失效模型为寿命分布,可进行寿命预测;对数正态分布尽管有 t 值较大时危险函数递减这样不好的特性,但仍被应用到很多描述寿命分布的场合。变频发电机组作为典型的机电设备,因此建立以威布尔失效模式为主的寿命预测方法。

剩余寿命预测方法概括可分为数据驱动预测和模型驱动的预测。数据驱动预测主要用于原理尚不

清楚的系统,缺点是强烈依赖于系统运行数据的质量和量。模型驱动的预测主要用于能建立准确数学模型的地方,其优点是把系统机理知识用于监测,建立了衰减参数与选择预测特征之间的功能映射^[15]。混合方法能够综合前两者的优势。文中以模型为主的混合方法建立一个比较准确的系统数学模型,它含有反映环境因素和使用时间的变量,变量的系数由具体运行数据给出。

4 结论

虽然各种PHM系统已逐步开始得到应用,但还没有达到工程实用化的程度,目前还仅在部分关键的系统、部件中应用。但是PHM是大型复杂系统故障诊断体系的发展方向,对提高武器系统安全性能、提高维修保障效率、降低寿命周期费用、提高战斗力将起到重要作用。通过对变频发电机组PHM系统的研究,实现了变频机组故障预测与健康管理系统的基本功能,为未来电源装备高度智能、高度复杂、分层融合式的体系结构的预测与管理提供有益探索,在以后的设计与实践中还必须不断完善和提高。

参考文献:

- [1] 张宝珍. 国外综合诊断、预测和健康管理系统的发展及应用[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 591-594.
ZHANG Baozhen. Development and application of integrated diagnostics, prognostics and health management technologies of abroad [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(5): 591-594.

- [2] 连光耀,吕晓明,黄考利,等. 基于 PHM 的电子装备故障预测系统实现关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 1959-1961.
LIAN Guangyao, Lü Xiaoming, HUANG Kaoli, et al. Study of key realization technology for fault prediction system of electronic equipment based on PHM [J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(9): 1959-1961.
- [3] 时旺,孙宇锋,王自力,等. PHM 系统机器故障预测模型研究[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(10): 29-35.
SHI Wang, SUN Yufeng, WANG Zili, et al. A Study of PHM System and Its Fault Forecasting Model [J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(10): 29-35.
- [4] 赵四军,王少萍,尚耀星. 飞机液压泵源预测与健康管理系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(1): 14-17.
ZHAO Sijun, WANG Shaoping, SHANG Yaoping. Prognostics and health management system of hydraulic power supply [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(1): 14-17.
- [5] 张叔农,谢劲松,康锐. 电子产品健康监控和故障预测技术框架[J]. 测控技术, 2007, 26(2): 12-16.
ZHANG Shunong, XIE Jinsong, KANG Rui. Framework of Prognostic and Health Monitoring Technologies of Electronic Products [J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(2): 12-16.
- [6] Wilkinson C, Humphrey D, Vermeire B, et al. Prognostic and health management for avionics [C] // Proceedings of 2004 IEEE Aerospace Conference, March 6-13, 2004, [S. l.]: Piscataway: IEEE Press, 2004, 5: 3435-3447.
- [7] 张莉,袁海文,吕弘,等. 独立电源多智能体信息融合故障诊断方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(8): 937-940.
ZHANG Li, YUAN Haiwen, Lü Hong, et al. Fault diagnosis for independent power-supply system using multi-agent information fusion [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(8): 937-940.
- [8] Pecht M G. Prognostics and health management of electronics [M]. New York: Wiley-Interscience, 2008.
- [9] Dorj E, Chen C, Pecht M. A bayesian hidden markov model-based approach for anomaly detection in electronic aystems [C] // Proceedings of 2013 IEEE Aerospace Conference, March 2-9, 2013, Big Sky, Montana. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-10.
- [10] Pecht M, Jaai R. A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems[J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(3): 317-323.
- [11] Sikorska J Z, Hodkiewicz M, Ma L. Prognostic modeling options for remaining useful life estimation by industry[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2010, 25(5): 1803-1836.
- [12] Yang R G, Ren M W. Wavelet denoising using principal component analysis [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 1073-1076.
- [13] Kunche S, Chen C, Pecht M. Optimized diagnostic model combination for improving diagnostic accuracy [C] // Proceedings of 2013 IEEE Aerospace Conference, March 2-9, 2013, Big Sky, Montana. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-10.
- [14] Vichare N M, Pecht M G. Prognostics and health management of electronics [J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1): 222-229.
- [15] 胡友强,余嘉,李鹏华. 数据驱动的在线 MW-MSPCA 故障诊断[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(4): 100-106.
HU Youqiang, YU Jia, LI Penghua. Online MW-MSPCA data-driven fault diagnosis [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(4): 100-106.

(编辑 詹燕平)