

doi: 10.7690/bgzd.2014.01.009

故障预测与健康管理在舰用柴油机中的应用

周志才, 刘东风, 石新发

(海军工程大学青岛油液检测分析中心, 山东 青岛 266012)

摘要: 为解决舰用柴油机传统事后维修和计划维修的诊断能力不足、经济可承受能力差等问题, 应用故障预测与健康管理 (prognostics and health management, PHM) 的理念进行研究。在分析柴油机常见故障的基础上, 建立舰用柴油机动力装置的 PHM 体系结构, 对其中主要功能模块进行分析, 提出 PHM 在舰用柴油机中应用尚需解决的问题。该研究为实现舰用柴油机的健康管理奠定了理论基础, 对现有装备的维修保障和预研装备的设计开发具有一定参考价值 and 指导意义。

关键词: 柴油机; 故障预测与健康管理; 动力装置; PHM

中图分类号: TJ03 **文献标志码:** A

Application of Prognostics and Health Management in Marine Diesel Engine

Zhou Zhicai, Liu Dongfeng, Shi Xinfu

(Qingdao Oil Detection & Analysis Center, Naval University of Engineering, Qingdao 266012, China)

Abstract: Prognostics and health management (PHM) was presented to solve the problems of predetermined maintenance and corrective maintenance such as insufficient diagnostic capacity and poor economic affordability of marine diesel engine. In the paper, the common faults of diesel engine are analyzed, the PHM system structure of marine diesel engine was set up, and the main functional modules are analyzed. Finally, the problems of PHM in marine diesel engine in the application were put forwards. The study provides a theoretical basis for the realization of marine diesel engine health management, and it provides reference value and direction to the repair guarantee of the existing equipment and design of advanced equipment.

Keywords: diesel engine; prognostics and health management; power device; PHM

0 引言

柴油机作为最常用的动力机械设备, 广泛应用于石油矿场、固定发电、铁路牵引、工程机械及舰船等领域, 朝着大型化、高速化、精密化方向发展。新型舰艇中, 柴油机动力装置仍占绝大多数, 柴油机故障的发生影响了舰艇战备的完好性和使命任务的完成, 甚至可能危及人身安全。有资料显示, 舰艇装备的保障与维修费用约占整个寿命周期费用的 70% 以上, 其中动力装置的维修费用约占整个舰艇维修费用的 1/3; 因此, 从安全性和经济性考虑, 柴油机作为舰艇主要动力装置, 仍是舰艇装备维修保障工作的重点。

传统的事后维修和定期计划维修方式存在着诊断能力差、测试结果无法对未来状态进行预测和经济可承受性较差等不足, 因此有必要实现视情维修或基于状态的维修 (condition-based maintenance, CBM)。为了适应信息化战争的需求, 基于复杂系统可靠性、安全性、经济性考虑, 以预测技术为核心的故障预测和健康管理 (prognostics and health management, PHM)^[1-2] 策略获得越来越多的重视和

应用, 发展为自主式后勤保障系统的重要基础。

PHM 技术早在 2000 年就被列入美国国防部的《军用关键技术》报告^[3]中, 联合攻击战斗机 (JSF) 在设计时就引入了 PHM 设计, 其主要设计目标就是拥有良好的经济可承受性、任务完成率、维修可靠性。国内许多学者对 PHM 技术理论进行了研究^[4], 赵四军等人对 PHM 技术在民航发动机、电子系统、飞机液压泵、雷达系统和潜射导弹发射装置等领域进行了理论研究^[5-10]。资料表明^[3]: PHM 可显著降低维修、使用和维修保障费用, 提高复杂装备的可靠性和战斗力, 其关键技术研究及系统应用对我军现有装备和预研装备向着信息化、智能化和数字化方向发展具有深远的影响。目前, PHM 在理论层面研究较多, 实际工程应用尚少。大部分的装备维修保障还停留在事后维修和计划维修的层次, 远未达到视情维修的水平, 严重阻碍了装备跨越式发展, 也是维修保障费用居高不下的主要原因; 因此, 笔者对 PHM 在舰用柴油机中的应用进行研究, 以准确地控制故障风险, 科学确定维修需求, 合理权衡安全和经济的矛盾, 提高装备的利用率。

收稿日期: 2013-08-21; 修回日期: 2013-09-09

基金项目: 国防装备研究基金资助项目 (ZJ201181)

作者简介: 周志才 (1987—), 男, 山东人, 在读博士, 从事舰船动力装置状态监测与故障诊断研究。

1 舰用柴油机常见故障

由于柴油机自身结构非常复杂，其故障形式多种多样。根据柴油机故障部位的不同，表 1 是由英国柴油机工程师和用户协会出版的报告所得出的停机故障分类^[11]。

表 1 柴油机故障分类

| 故障分类 | 故障出现率/% |
|------------------------|---------|
| 喷油设备及供油系统故障 | 27.0 |
| 漏水故障 | 17.3 |
| 阀门及阀座故障 | 11.9 |
| 轴承故障 | 7.0 |
| 活塞组件故障 | 6.6 |
| 漏油及润滑系统故障 | 5.2 |
| 涡轮增压系统故障(包括外来物侵入造成的故障) | 4.4 |
| 齿轮及驱动装置故障 | 3.9 |
| 调速器齿轮故障 | 3.9 |
| 燃油泄漏 | 3.5 |
| 漏气 | 3.2 |
| 除某些专门标题外的其他破坏及破裂 | 2.5 |
| 其他故障 | 2.5 |
| 基座故障 | 0.9 |
| 曲轴故障 | 0.2 |

针对表 1 中的柴油机常见故障，国内外学者提出了许多相关的故障诊断方法，归结起来可分为热力性能参数监测诊断、振动噪声信号监测诊断、油液监测诊断和人工智能诊断等方法。上述故障诊断方法的研究应用也只能实现系统或部件单一故障的事后维修和部分的预防维修，若要完全实现柴油机系统的故障预测和健康管理，必须有一个综合状态监测、故障诊断和预测、健康管理等功能的系统。

2 PHM 简介

PHM 是指采用先进的传感器技术获取和采集与系统状态属性有关的特征参数，然后和有用的信息进行关联，借助智能算法和模型进行诊断、分析、预测，并管理系统或设备的工作状态^[12]。该策略最大程度地利用传统的故障特征检测技术，并综合先进的软件建模和智能诊断预测方法，来获得虚警率几乎为零的精确故障检测和系统的健康管理。

PHM 包括故障预测 (prognostics) 和健康管理

(health management)。故障预测是指根据系统现在的性能状态和历史监测数据评估部件或系统的剩余寿命，预测未来的健康状态；健康管理是根据诊断和预测信息、可用维修资源和使用要求做出适当维修决策，实现状态管理^[13]。

工程应用及技术分析结果表明，PHM 的应用对装备的保障具有以下重要意义：1) 减少备件、保障设备、维修人力等保障资源需求，降低维修保障费用；2) 减少维修次数，缩短维修时间，提高战备完好率；3) 健康感知，减少任务过程中故障引起的风险，提高任务成功率^[14]。

3 舰用柴油机 PHM 系统

为了实现柴油动力装置的故障预测和健康管管理，必须从系统论的观点来看整个舰用柴油机的结构组成。具体而言，柴油机系统可划分为燃烧室组件、进排气系统、曲柄连杆机构、润滑系统、冷却系统、燃油供给系统、配气机构和调速系统等^[15]。

不同于电子器件可内置预警元件进行预防性的监测报警，柴油机动力装置机械部件的监测除了在系统本身的测试性设计阶段预留部分测试点和接口之外，只能通过外置测试设备对系统状态进行监测，状态参数的获取和故障特征的提取存在一定困难。

3.1 舰用柴油机 PHM 层次划分

根据前面提到的几种柴油机常用故障类型和故障模式，结合美国波音公司制定的 OSA-CBM 体系结构构建舰用柴油机的故障预测与健康管理系统结构^[16](如图 1)。舰用柴油机 PHM 系统采用分层融合式体系结构，初步分为 3 个层次：平台级 PHM、系统/部件级 PHM、模块/单元级 PHM。各个层次 PHM 间提供独立的、标准的软/硬件接口形式。在模块/单元层次获得信号的评估，将采集到的状态信息送入系统层次进行故障特征提取、数据融合处理、诊断预测、分析决策，在平台层次上进行故障信息和维修信息的显示，以供人员进行保障决策。

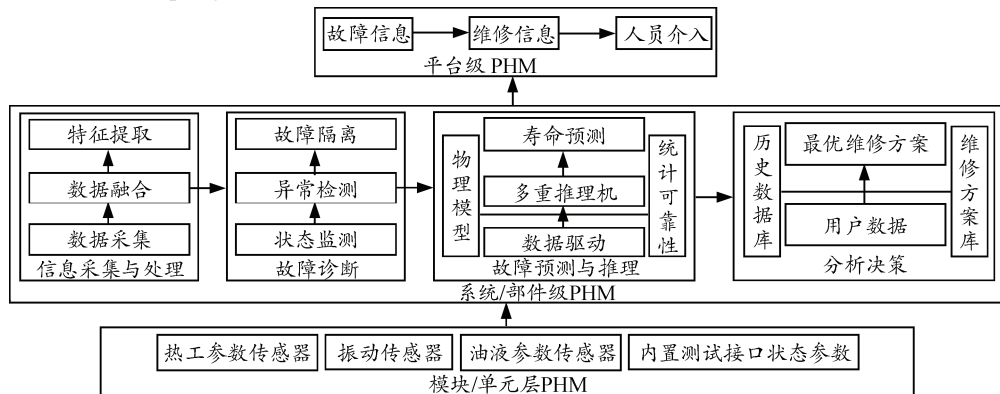


图 1 舰用柴油机故障预测与健康管理系统体系结构

1) 平台级 PHM。

获取整个柴油机系统的健康状态及其变化趋势, 并报告给相关的人员; 在故障发生前期, 能够预测得到确切故障类型和严重程度, 并执行相关的维修决策; 提供必要的信息交互接口, 以便实现工作人员和 PHM 系统的交互。

2) 系统/部件级 PHM。

通过获取模块/单元层的数据和信息, 进行融合处理, 实现系统/部件异常检测、增强的故障诊断及关键部件的寿命预测, 并进行维修方案的决策分析。

3) 模块/单元层 PHM。

对于电子器件, 一般模块设计有相应的内部测试机制(BIT), 满足系统对模块状态的可测试性的要求; 对于机械构件, 主要通过嵌入单元传感器完成状态信息的获取。

3.2 主要模块功能分析

舰用柴油机动力装置不同于其他装备系统, 要求必须能够长时间不间断地运行, 并且能够在多种复杂工况下进行切换。柴油机系统包括大量的机械元件和电器元件, 结构复杂, 故障模式比较多, 为了实现其故障预测与健康管理的, 针对其关键功能模块进行阐述分析。

1) 信息采集与处理模块。

通过热工参数传感器、振动信号传感器、油液参数传感器以及内置传感器等获得柴油机系统的运行状态参数, 完成数据的采集、转换以及数据的传输, 并对接收的信号和数据进行维数压缩、形式变换、排除干扰、冗余信号、对故障特征信息精细化, 提取故障特征, 形成故障待检模式^[17-18]。

2) 故障诊断模块。

常用的故障诊断方法有热工参数分析、振动分析、油液分析, 该模块接收来自传感器层的信息资源并完成各种信息数据的融合处理, 然后综合利用各种智能方法对故障进行诊断和隔离。对数据存储单元中预先设定的失效判据(历史数据、阈值、物理模型失效值)与当前获取的数据进行比较来监测系统当前状态是否正常; 当存在异常时, 结合柴油机动力装置的各种健康历史状态数据、工作状态以及维修历史记录等信息, 综合智能诊断方法确定故障模式、严重程度、部位及原因^[19]。

3) 故障预测推理模块。

故障预测推理是 PHM 的重要特点, 通过检测和监控故障部件的先兆指示, 结合历史故障数据或物理模型采取一种或多种预测方法结合的方式进行实时剩余寿命预测。主要的故障预测方法^[4]有: 基

于模型(model-driven)的故障预测技术、基于数据驱动(data-driven)的故障预测技术、基于统计可靠性(reliability and statistics based)的故障预测技术。

4) 分析决策模块。

接收来自故障诊断和预测推理模块的信息, 综合诊断预测结果、FMECA 表、设备的任务性质及相关信息, 判断能否完成其任务功能以及采取何种控制措施等, 并提供维修需求信息以供维修保障人员维修决策, 保证舰用柴油机动力装置功能的实现。

4 结论与展望

笔者针对柴油机常见故障对故障机理进行了分析, 结合舰用柴油机动力装置的特点构建了其 PHM 层次结构, 并就主要功能模块进行了分析。下一步, 笔者将对其相关技术进行研究, 开发舰用柴油机 PHM 系统软件, 真正实现 PHM 在舰用柴油机动力装置中的应用。

为了实现 PHM 在舰用柴油机动力装置中的应用, 以下工作还有待进一步加强: 1) 研发能适应柴油机复杂工作环境的先进传感器; 2) 研发无线数据传输技术, 扩展 PHM 中间层数据处理能力; 3) 综合各故障预测与决策技术, 开发舰用柴油机动力装置的 PHM 软件系统。

参考文献:

- [1] Hess A, Fila L. The joint strike fighter (JSF) PHM Concept: Potential impact on aging aircraft problems[C]. Montana: Proceedings of IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA, 2002: 3021-3026.
- [2] Keith M J, Raymond R B. Diagnostics to Prognostics-A product availability technology evolution[C]. Orlando: The 53rd Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS 2007), FL, USA, 2007: 113-118.
- [3] 张宝珍. 预测与健康管理技术的发展及应用[J]. 测控技术, 2008, 27(2): 5-7.
- [4] 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.
- [5] 戎翔. 民航发动机健康管理中的寿命预测与维修决策方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008: 10-13.
- [6] 马宁, 吕琛. 飞机故障预测与健康管理的框架研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 207-209.
- [7] 孙博, 赵宇, 黄伟. 电子产品健康监测和故障预测方法的案例研究[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 1012-1016.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王春健, 马亮, 范红军. 潜射导弹发射装置故障预测与健康管理研究[J]. 机械设计与制造, 2012, (3): 259-261.