

doi: 10.7690/bgzdh.2014.10.005

状态维修关键技术及应用的研究现状与展望

张仕新, 咎翔, 李浩, 韩朝帅

(装甲兵工程学院技术保障工程系, 北京 100072)

摘要: 为实现装甲装备的精确保障, 减少维修保障费用, 论述状态维修关键技术及应用的研究现状与展望。介绍状态维修的基本原理、开放式体系结构、产生和发展。分析状态维修的关键技术——状态参数预测、状态评估和维修决策的研究现状, 对不同方法的特点作了评价。研究状态维修在国内外的应用情况, 并在分析现状的基础上指出状态维修存在的不足和未来发展趋势。该研究对装甲装备实现精确保障, 减少维修保障费用具有重要意义。

关键词: 状态维修; 关键技术; 应用; 现状; 展望

中图分类号: TJ81 **文献标志码:** A

Research Status and Prospect of Condition-Based Maintenance Key Technology and Application

Zhang Shixin, Zan Xiang, Li Hao, Han Chaoshuai

(Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: To realize accurate support of armored equipment and reduce maintenance cost, status and prospect of CBM(condition-based maintenance) is discussed. Introduce theory of CBM is included about basic principle, OSA(open system architecture), production and development of CBM. Research status about technical condition parameter prediction, technical condition evaluation and maintenance decision-making is considered the key technology of CBM, Characteristics of every method about which is evaluated. At the same time, application of CBM in home and aboard is researched. It is forward that detail, key technology breach and organizational management are supposed to be the research in need of improvement based on result from analysis about current research status.

Keywords: CBM; key technology; application; status; prospect

0 引言

随着高新技术的应用, 装备的故障规律和故障模式日趋复杂化, 定时维修的适用范围逐步减小, 使得状态维修(condition-based maintenance, CBM)逐步得到重视和推广。CBM可以充分利用装备的剩余寿命, 在保证可靠性的前提下提高装备的可用度。对于装甲装备实现精确保障, 减少维修保障费用具有重要的意义; 因此, 笔者对其进行研究。

1 状态维修相关理论

1.1 状态维修的基本原理

大部分故障的发生是一个逐渐变化的过程, 这个过程可用如图1的P-F曲线表示。其中O点为故障萌起点, 即状态劣化的实际起点; P点为潜在故障点(potential failure), 从这点开始异常的状态可以通过现有的技术手段准确地检测; F点为功能故障点(functional failure), 即装备最终失效的时间点。从P点到F点之间的时间长度称为P-F间隔^[1-2]。

CBM的基本原理是当P-F间隔期足够长, 在P点和F点之间能够通过一定的手段, 检测出装备的故障征兆, 采取一定的维修措施, 可以预防装备功能故障发生。

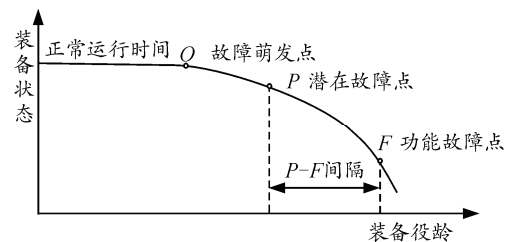


图1 P-F间隔曲线

1.2 状态维修开放体系结构

美国的机械信息管理开发系统联盟(machinery information management open system alliances, MIMOSA)等一些组织联合提出了状态维修开放系统结构(open system architecture for condition-based maintenance, OSA-CBM)^[3-4], 以此来描述CBM实现的基本流程, 如图2所示。

收稿日期: 2014-04-20; 修回日期: 2014-05-09

作者简介: 张仕新(1971—), 男, 河北人, 满族, 博士, 副教授, 从事装备维修理论与技术研究。

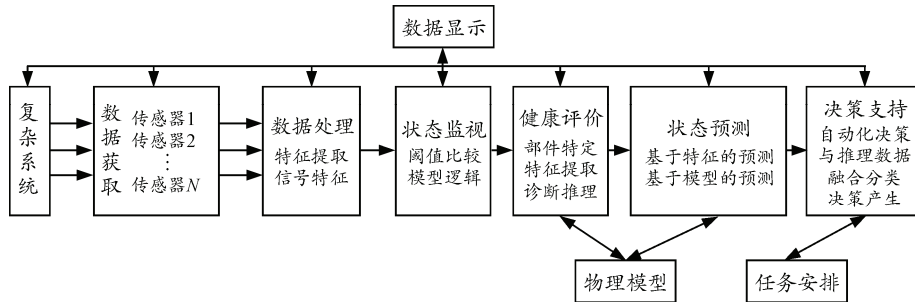


图 2 OSA-CBM 的组成结构

该结构将 CBM 分为 7 大模块^[5]，分别为：

- 1) 数据获取模块 (data acquisition)：通过传感器获取状态信息；
- 2) 数据处理模块 (data manipulation)：将获取的信息进行信号处理和特征提取；
- 3) 状态监视模块 (condition monitor)：将状态特征同预先设定的极限或阈值进行比较，输出的结果为状态指示信息 (如偏低、偏高、正常等)；
- 4) 健康评价模块 (health assessment)：确定被监测部分是否退化，产生诊断记录；
- 5) 状态预测模块 (prognostics)：根据目前的状态预测将来的情况；
- 6) 决策支持模块 (decision support)：根据状态评估和状态预测结果，提出维修建议以及相应的维修方案；
- 7) 数据显示模块 (presentation)：从任意一层获得信息。

1.3 状态维修的产生与发展

CBM 的理论产生于 20 世纪 40 年代末期，美国的格兰德河 (Rio Grande) 铁路部门通过监测润滑油中金属元素的浓度来确定内燃机车的运行状况并预测其元件故障，取得了不错的经济效益，这被认为是 CBM 应用的萌芽。

美军从中受到启发，逐步开始在一些军用装备的维修上开始探索这种技术的应用。20 世纪 70 年代^[6]，由于测试技术、信号处理技术、信息传输技术以及计算机技术的快速发展，状态监测技术在 CBM 中的基础性作用日益突出。

在 2001 年，美国国防部维修技术高级指导小组^[7] (maintenance technology senior steering group, MTSSG) 开展了增强型状态维修^[8] (condition-based maintenance plus, CBM+) 项目。CBM+ 以 CBM 为基础，综合应用相关的技术和方法来增强系统的 CBM 能力，以状态信息的传输与处理技术和维修决

策分析技术为技术核心，提高系统可靠度、可用度和安全性的一种维修方式。CBM+ 引入了以可靠性为中心的维修 (reliability centered maintenance, RCM) 的分析方法，综合考虑修复性维修、预防性等维修理念，根据具体情况确定最佳的方式 (doing the right maintenance)^[9]。CBM+ 的核心是通过 RCM 分析及其他相关程序与技术分析得出的结论确定维修计划。CBM+ 结构如图 3 所示。

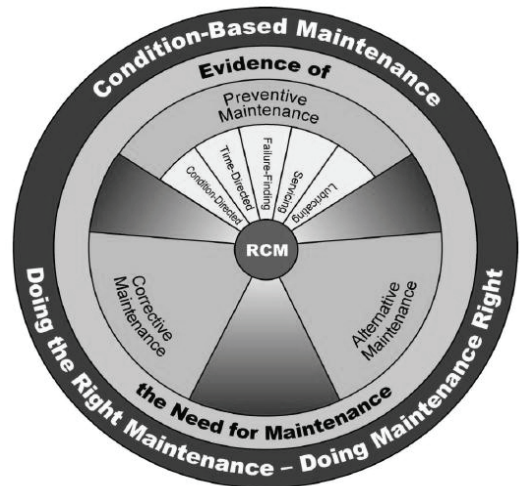


图 3 CBM+ 结构

2 状态维修关键技术的研究现状

2.1 状态参数预测方法的研究现状

在绝大多数情况下，通过状态信息检测获得的特征参数并不能完全反映出装备的真实状态，只是间接地表现出装备的状态，这样的状态信息成为状态参数。由于大多数状态参数的变化是一种时间序列下连续变化，因此状态参数的预测通常比直接进行状态预测的准确性要高。

状态参数的预测是一种时间序列的预测，其主要的工作就是利用时间序列上的检测数据作为样本进行预测。状态参数的预测方法主要有基于概率统计的预测和基于自学习方法的预测 2 类。

1) 基于概率统计方法的预测。

基于概率统计的预测方法，主要包括时间序列模型、数据平滑模型和回归预测模型。Xu 等^[10]利用 Lyapunov 指数建立混沌时间序列模型，对大型旋转设备的状态参数进行预测。Zhan 等^[11]建立了自回归的数据滑动平均模型，并应用于传动箱的旋转部件参数劣化程度预测之中。刘震等^[12]建立了基于加权隐马尔可夫的自回归状态预测模型，并运用该模型对电子系统的 BIT 状态参数进行了预测，收到了不错的效果。该类方法需要大量数据作为支撑，对样本的要求较高。同时，此类方法对线性系统预测的精度较高，对于非线性系统指在一定范围内可以达到精度的要求，对于长期预测不具备适用性。

2) 基于自学习方法的预测。

自学习的方法包括灰预测、支持向量机预测以及人工神经网络预测等。郑长松等^[13]将改进欧拉算法与灰预测相结合，通过对油液光谱分析数据的趋势进行了预测，有效地捕捉了综合传动故障的征兆信息。王红军等^[14]基于支持向量机理论，建立了机械系统状态组合预测模型，并且对旋转注水机的状态参数进行了预测，收到了不错的效果。

人工神经网络根据学习方式和方法的不同分为^[15]感知神经网络(代表类型为 BP 网络)、自组织神经网络(代表类型为 ART 网络)、线性神经网络、径向基神经网络(代表类型为 RBF 网络)以及反馈神经网络(代表为 Elman 网络)。其中，徐贵斌等^[16]利用在线学习的 BP 神经网络对状态依赖型故障进行了预测，并且通过仿真验证了模型的有效性。杨虞微等^[17]通过结构自适应径向基神经网络进行建模，对油液光谱数据进行了预测。刘剑慰等^[18]针对 GPS 导航系统的非线性特点，通过卡尔曼滤波建立 Elman 神经网络模型预测模型，提高故障检测的概率。

基于自学习方法的预测对于非线性系统具有很强的适应性，并且不同的方法具有各自的特点，所以，有不同的适用范围，如灰预测擅长通过小样本进行预测。此类方法预测与基于概率统计的预测方法相比，预测精度显著提高。

2.2 状态评估的研究现状

状态评估是利用状态检测数据和历史数据中的特征参数评估装备状态，维修决策提供支持。利用准确的状态参数预测数据，可以对未来一段时间的

状态进行评估。状态评估研究的关键^[19]是确立状态参数与评估之间的映射关系，而特征参数权重^[20]的合理分配是核心问题。常用的赋权方法分为主观赋权法、客观赋权法和综合赋权法。

1) 主观赋权法。

主观赋权法大多是通过专家的相关先验知识，以及通过这些知识对事物做出的合理判断给出权重。层次分析法和 D-S 证据理论是其中的典型代表。俞乾等^[21]利用层次分析法对变压器的状态给予了量化方法评估，有效地评估了变压器的运行状态。翁艳^[22]通过层次分析法建立了评价的层次结构，利用专家打分和变权的原理进行了桥梁状态的健康评估。李伟等^[23]运用 D-S 证据理论建立了超速离心机运行健康状态综合评估方法，并且验证了该方法的有效性。主观赋权法处理问题的过程相对简单，并且可以充分利用专家的知识 and 经验，紧贴实际。此类方法评估的准确性过多依赖专家的个人因素，处理问题过程中受人为因素干扰较大。

2) 客观赋权法。

客观赋权法根据状态参数的原始数据所包含的信息进行权重分析，有主成分分析、熵值法等方法。孙宜权等^[24]通过跟踪发动机振动信号，将核主成分分析引入柴油发动机状态评估，大幅度提高了识别精度。刘敏红^[25]利用熵值理论，建立了单指标营养状态指数和熵权耦合模型，对湖泊综合营养状态进行了评估。此类方法得到的权重值客观，能够有效地提升评估的准确性，但是需要大量的数据作为支撑，对数据的全面性有很高的要求。

3) 综合赋权法。

综合赋权法的方式多样，有的综合运用主、客观 2 种方法共同作用得到权重，如程峻等^[26]通过对大量样本数据的分析，综合运用熵值法与改进层次分析法相结合的方式得到评价指标的权重值，对变压器的运行状态进行了评估，收到了不错的效果。有的则不直接给出权重，而是以结构参数的形式进行描述，如贝叶斯网络和神经网络等。安实等^[27]利用贝叶斯网络，建立了卫星型号系统状态评估模型，并计算出卫星型号研制系统的状态。Gao 等^[28]通过振动参数建立了轴承状态评估模型，建立神经网络模型，有效地判别了轴承的状态。此类方法使用范围广，能够发现数据所隐含的信息，已经逐渐成为状态评估的一种重要方法。

2.3 维修决策的研究现状

维修决策是 CBM 的关键步骤，也是连接 CBM 关键技术和 CBM 应用之间的重要纽带。CBM 决策模型主要以数理统计理论和随机过程为基础，主要的建模方法有随机滤波模型、比例风险模型和马尔可夫模型。Wang 等^[29]通过随机滤波模型，建立条件剩余寿命的概率密度分布函数，并依据平均剩余寿命动态地进行维修行为预测。满强等^[30]运用威布尔比例风险模型，建立了基于状态信息的故障率模型，确定了安全性要求下的最优维修决策。程志君等^[31]提出一类基于马尔可夫决策过程迭代算法，确定系统了最优检测时间间隔与维修状态阈值。

3 状态维修应用的研究现状

3.1 国外状态维修应用的研究现状

为了满足 CBM 对于故障预测和健康管理能力的相关要求在，产生了故障预测与状态管理 (prognostics and health management, PHM) 系统^[32]，该系统利用传感器采集各种状态信息，并通过智能推理算法评估健康状态，在设备发生故障前进行预测，并提供一系列的维修保障措施实现 CBM。在国外尤其是以美国，PHM 系统应用已经十分广泛。

美国空军利用混合传感器技术^[33]增强 CBM 的故障诊断和检测能力，提出了从全系统的角度考虑、以系统工程的观点、根据装备需要和装备结构布置传感器进行状态信息采集的观点。美军航空兵部经过研究，针对直升机的旋转件设计了状态监控系统，给出各种型号的直升机监控零部件清单^[34]。以 CH-47D 直升机^[35]为例，以前后螺旋桨为核心布置监控系统，重点采集选旋转轴、减震器、铰接螺栓等关键零部件的振动信号。CH-47D 监控零部件清单如图 4 所示。

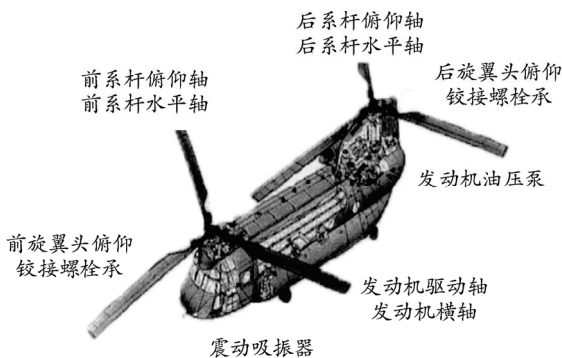


图 4 CH-47D 直升机监控零部件

美国海军在 PHM 的基础上开发了综合状态评

估系统 (integrated condition assessment system, ICAS)。

美国陆军启动了“陆军诊断改进计划”(army diagnostic improvement program, ADIP)，根据该计划要求，美国坦克-汽车发展工程研究中心 (tank-automotive research development and engineering center, TADEC) 针对陆军装备开展 CBM 应用开展了大量研究。

TADEC 研究了陆军实施状态维修的系统框架，系统^[36]主要由数据监测系统 (data bus)、便携式维修辅助系统 (portable maintenance aid) 和健康数据管理系统 (health data management system) 3 大部分组成，如图 5 所示。该系统通过嵌入式传感器建立数据采集体系，通过网络传递状态信息，利用数据处理系统进行数据分析并得出决策结果，3 大部分相互支持，为实施 CBM 提供了基本系统框架。

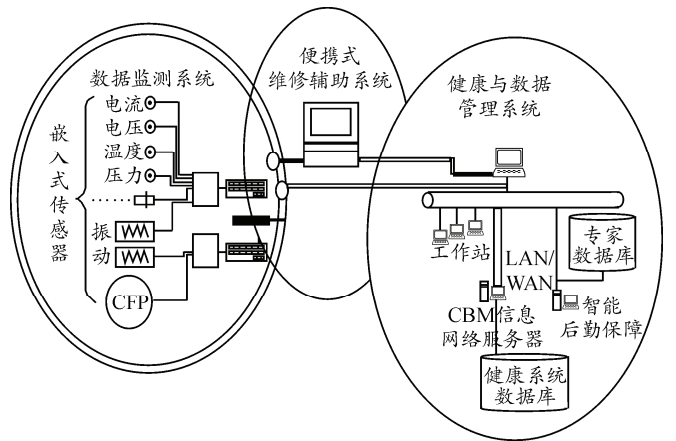


图 5 CBM 系统框架

为了满足 CBM 的要求，TADEC 还设计了状态在线监测系统^[37]，整套系统主要由数字化平台 (digital platforms)、信息平台 (platform information)、健康管理 (health management)、维修条件支持 (conditional based maintenance) 和状态预测 (prognostics) 5 大部分组成。

3.2 国内状态维修应用的研究现状

我国 CBM 的应用研究起步较晚，但是发展迅速。在开展 CBM 应用的研究工作时，大多按照搭建系统框架、突破关键环节、健全组织管理的流程，将技术运用研究和组织管理研究同步进行。

1) 系统框架研究。

军械工程学院的马飒飒等^[3]分析状态维修理论，研究了 CBM 决策流程，如图 6 所示。该流程以关键部位状态信息采集和特征辨识为基础，综合

考虑个别部件性能下降和多个部件性能下降对装备产生的影响，结合我军实行的三级维修体制决策维修时机与修理级别。

空军工程大学的胡建波^[38]结合 OSA-CBM 体系结构，为航空装备实施综合 CBM 设计了系统框架，如图 7 所示。

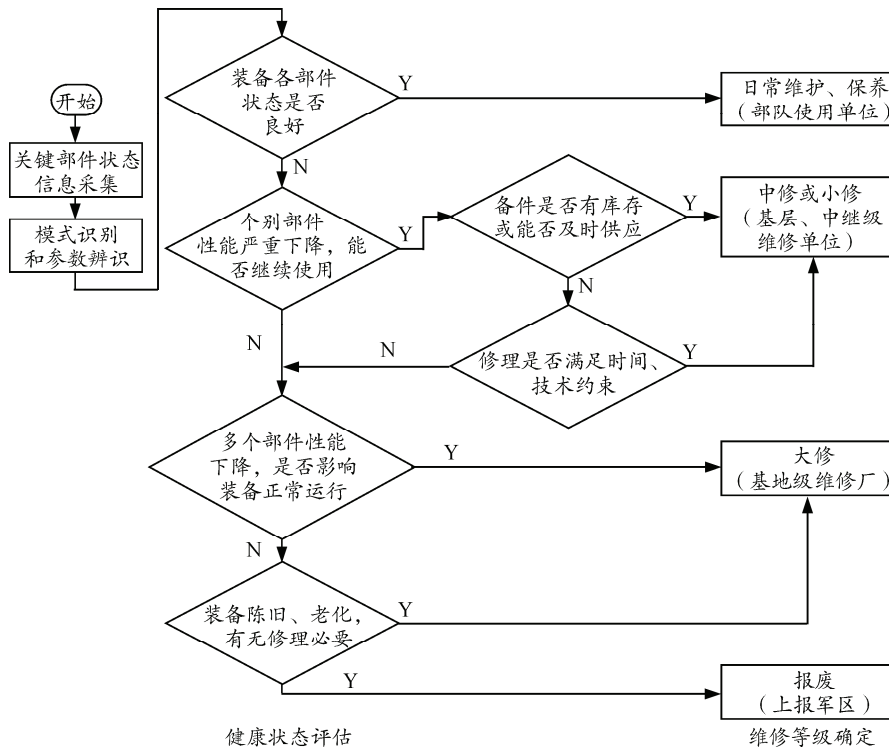


图 6 CBM 实施流程

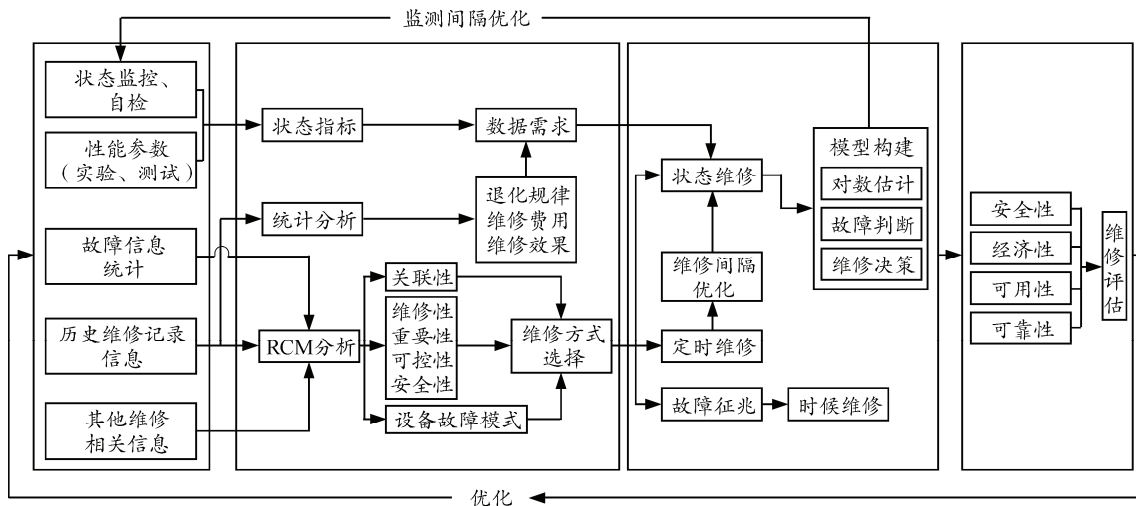


图 7 综合 CBM 系统框架

该系统框以 RCM 分析为基础，综合 CBM 信息为支撑，合理地选择维修方式，目的是以最小的代价保持和恢复装备的可靠性，并提出了在现有维修模式的基础上，逐步加大实施 CBM 比重的 CBM 应用模式。

2) 关键技术应用研究。

韩新平等^[39]研究了以先进传感器技术为依托

的 CBM 状态监控技术，并研究了基于故障模式影响分析的传感器选择流程，确保采集信号有效的传感器安装原则，以及提出了数据传输与预处理的相关要求。

连光耀等^[40]针对电子装备的故障预测系统的关键环节进行了研究，根据系统的应用范围和预测精度，提出了基于统计、基于数据驱动和基于模型

3 个层次的预测方法,为不同种类装备的故障预测开发故障预测系统提供了支持。

姚建刚等^[41]针对电力设备建立了安全状态评估体系,提出 1 套基于 J2EE 三层架构和 Web2.0 的评估系统,实现了状态评估的系统化。

郝晋峰等^[42]综合运用 Visual Studio、Net 以及 Matlab 等程序,开发了自行火炮状态的维修决策支持系统,实现了 CBM 维修决策的智能化。

3) CBM 组织管理模式研究。

马飒飒等^[3]提出建立远程智能维修管理体系,将 CBM 与我军三级维修体制相结合的相关建议。黄爱梅等^[43]研究了 CBM 对装备维修的影响,认为 CBM 将推动维修体制的转变,一体化保障机构的产生和维修作业机制的改变。

4 总结与展望

4.1 现存不足

经过几十年的发展,对 CBM 研究日益深入,尤其是近年来对于 CBM 应用方面的研究逐渐得到重视。但对 CBM 的研究尚存在许多不足,主要体现在以下方面:

1) CBM 研究重视技术而缺少管理决策。即对于前端的支持技术,诸如数据采集和状态监测等技术做了大量的研究,也取得了不错的效果,形成了相对成熟的技术。但对于如何从大量的数据中提取有用信息进行准确的状态评估,对于如何融合多重信息进行维修决策也缺乏系统的研究。

2) 对于状态维修技术的研究大多停留在需求层面。对支撑状态维修实施的技术提出了许多原则和要求,设计了许多实施框架,但框架内的一些关键步骤没有成熟的技术作为支撑,难免成为纸上谈兵。在遇到关键技术问题时,往往对于所需的技术提出了较多的要求,可是对于如何解决问题,怎样才能对现有技术改进使其符合要求,或是研发怎样的新技术等方面仍然研究不足。

3) 构建了许多 CBM 实施系统流程图,但大多数没有将这些流程与我军现行的维修体制、制度相结合进行考虑。一些具体的步骤并没有明确责任区分。同时由于没有实践的证明,这些流程的合理性存在疑问,能否应用尚需实践的证明。

4) 研究多从宏观入手,很少从基于状态维修理论解决实际出发去解决问题。大多数研究目前停留在宏观层面上,很少利用 CBM 的原则解决具体问题,使得目前的 CBM 应用研究空洞,缺少令人信

服的实例。

4.2 发展趋势

1) 对于 CBM 应用方面的研究逐渐由宏观设计向细节研究发展。现在 CBM 实施的基本框架已经逐渐成型,并且相对成熟。许多研究人员开始从细节着手,需找 CBM 应用方面存在的难点,提出一些解决问题的方法,帮助 CBM 尽快的推广应用。

2) 关键技术的突破成为研究重点。CBM 的实施在各个层次都有需要突破的关键技术,只要突破了这些瓶颈,问题就可以迎刃而解了。因此,应该将研究重点放在关键技术的研究上,力求实现突破。

3) CBM 实施管理层面的研究开始同步进行。过去对于 CBM 应用过于偏重技术,但是维修是技术与管理 2 大方面工作的综合体。只有同时做好了维修管理方面的研究,CBM 才能真正的得以实施。所以,对于 CBM 管理方面的研究也开始同步进行,以便促进 CBM 更好的应用。

参考文献:

- [1] 冯廷敏,杨剑锋,唐静. RCM 中潜在故障的净 P-F 间隔评判与维修策略[J]. 中国设备工程, 2008(8): 21-23.
- [2] 何江清,王波. 军用装备基于状态的维修理论研究[J]. 舰船电子工程, 2009(12): 42-44.
- [3] 马飒飒,贾希胜,夏良华. 军队装备维修工程 CBM 综述[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2): 111-116.
- [4] 殷苏东,陈旭华. 基于状态的维修研究现状与发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(6): 1530-1535.
- [5] 武小悦. 武器装备 CBM 体系结构技术及其研究[J]. 国防科技, 2005, 11: 22-23.
- [6] 美国国防部. 基于状态的维修评估报告[R]. 美国: 美国国防部, 2000.
- [7] The DOD of the USA. Condition Based Maintenance Plus (CBM+) for Materiel Maintenance[R]. DOD Instruction, 2007.
- [8] 胡剑波. 军事装备维修保障技术概论[M]. 北京: 解放军出版社, 2010: 170.
- [9] 王瑞朝,王远达,郭俊强. CBM+:航空维修保障新趋势[J]. 国防科技, 2009(1): 11-15.
- [10] Xu Xiaoli, Zhu Chunmei, Zhang Jianming. Trend Prediction Method Based on the Largest Lyapunov Exponent for Large Rotating Machine Equipments[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 18(4): 433-436.
- [11] Zhan Y M, Mechefske C K. Robust Detection of Gearbox Deteriorations Using Compromised Autoregressive Modeling and Kolmogorov-Smirnov Test Statistic-Part I: Compromised Autoregressive Modeling with the Aid of Hypothesis Tests and Simulation Analysis[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2007, 21: 1953-1982.

- [12] 刘震, 王厚军, 龙兵, 等. 一种基于加权隐马尔可夫的自回归状态预测模型[J]. 电子学报, 2009(10): 2113-2118.
- [13] 郑长松, 马彪. 改进欧拉算法在油液光谱分析趋势预测中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1078-1082.
- [14] 王红军, 张建民, 徐小力. 基于支持向量机的机械系统状态组合预测模型研究[J]. 振动工程学报, 2006, 19(2): 242-245.
- [15] 张德丰. MATLAB神经网络应用设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 157-196.
- [16] 徐贵斌, 周东华. 基于在线学习神经网络的状态依赖型故障预测[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2010, 44(7): 1251-1254.
- [17] 杨虞微, 陈果. 基于结构自适应径向神经网络的油样光谱数据建模[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 98-101.
- [18] 刘剑慰, 姜斌. 基于卡尔曼滤波的GPS导航系统故障检测[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(增刊2): 46-49.
- [19] 张耀辉, 王少华, 韩小孩, 等. 状态维修决策的研究现状与展望[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013(2): 6-13.
- [20] 李登峰. 模糊多目标多人决策和对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 138-200.
- [21] 俞乾, 李卫国, 罗日成. 基于层次分析法的大型变压器状态评价量化方法研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2011, 38(10): 56-60.
- [22] 翁艳. 某公路桥梁承载能力评估[J]. 山西建筑, 2009, 35(24): 333-334.
- [23] 李伟, 刘波峰, 林挺宇, 等. 基于D-S证据理论的超速离心机健康状态评估方法[J]. 仪表技术与传感器, 2011, 18(4): 97-99.
- [24] 孙宜权, 张英堂, 李志宁, 等. 基于核主成分分析的柴油机技术状态评估[J]. 车用发动机, 2012(2): 89-92.
- [25] 刘敏红. 熵值理论在饮用水源地富营养化评价中的应用研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11699-11700.
- [26] 程崧, 王宇, 余轩, 等. 电力变压器运行状态综合评判指标的权重确定[J]. 中国电力, 2011, 44(4): 26-30.
- [27] 安实, 龙江. 基于贝叶斯网络的卫星型号系统状态评估模型[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(5): 548-551.
- [28] Gao R X, Wang C T. A Neural Network Approach to Bearing Health Assessment[C]//2006 International Joint Conference on Neural Networks, Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Vancouver. BC: Neural Networks, 2006: 899-906.
- [29] Wang W. A Model to Predict the Residual Life of Rolling Element Bearings Given Monitored Condition Information to Date[J]. IMA J. Management Mathematics, 2002(13): 3-16.
- [30] 满强, 陈丽, 夏良华. 基于比例风险模型的状态维修决策研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(6): 36-39.
- [31] 程志君, 杨征, 谭林. 基于机会策略的复杂系统视情维修决策模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(6): 168-173.
- [32] 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.
- [33] Richard C, Millar. Integrated Instrumentation and Sensor Systems Enabling Condition-Based Maintenance of Aerospace Equipment[R]. TARDEC Technical Report 2012.
- [34] 杨宇航, 高伏, 李丹, 等. 美军直升机基于状态的维修[J]. 航空科学技术, 2013(1): 27-30.
- [35] Stephen M, Dickerson. CH-47D Rotating System Fault Sensing for Condition Based Maintenance[R]. TARDEC Technical Report, 2011.
- [36] Tom Udvar. Condition Based Maintenance[R]. TARDEC Technical Report, 2008.
- [37] David Gorsich, Ken Fischer. Ground Vehicle Condition Based Maintenance[R]. TARDEC Technical Report, 2010.
- [38] 胡剑波, 葛小凯, 王瑛, 等. 航空装备综合状态维修框架研究[J]. 空军航空大学学报: 自然科学版, 2011, 6(12): 1-6.
- [39] 韩新平, 张国海, 胡国栋, 等. CBM在车辆维修中关键技术研究[J]. 物流科技, 2012(5): 86-88.
- [40] 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.
- [41] 姚建刚, 肖辉耀, 章建, 等. 电力设备运行安全状态评估系统的方案设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(1): 52-57.
- [42] 郝晋峰, 李敏, 史宪铭, 等. 自行火炮状态维修决策支持系统[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(3): 161-164.
- [43] 黄爱梅, 董蕙茹. 基于状态的维修对飞机装备维修的影响研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2010(2): 122-125.