

以可靠性为中心的智能维修决策模型

刘文彬¹, 王庆锋¹, 高金吉¹, 钟鑫¹, 梁国华²

(1. 北京化工大学 化工安全教育部工程研究中心, 北京 100029;

2. 中国石化股份有限公司茂名分公司机动部, 广东 茂名 525011)

摘要: 为了避免目前国内石油化工行业普遍存在的“维修不足或维修过剩”现象, 根据石油化工工业设备管理特点, 将以可靠性为中心的维修与状态维修相结合, 建立了以可靠性为中心的智能维修决策模型, 用以确定预防性维修需求、优化维修管理制度、指导设备维修决策。结果表明: 制定的维修策略计划具有很强的针对性, 制定的维修任务更具科学性。

关键词: 以可靠性为中心的维修; 智能维修; 决策模型; 预防性维修

中图分类号: TH 17

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)05-0672-06

Reliability-centered Intelligent Maintenance Decision-making Model

LIU Wen-bin¹, WANG Qing-feng¹, GAO Jin-ji¹, ZHONG Xin¹, LIANG Guo-hua²

(1. Chemical Safety Engineering Research Center of the Ministry of Education,

Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2. China Petroleum and Chemical Corporation Maoming Branch, Maoming 525011, Guangdong, China)

Abstract: Reliability-centered maintenance is an internationally common systematic engineering approach, which is used to determine the preventive maintenance requirements and optimize maintenance management system. Different from the traditional breakdown maintenance, time-based maintenance, condition-based maintenance, and other maintenance management modes, it can help to avoid “insufficient or excessive maintenance”. According to the characteristics of management over equipments in petroleum and chemical industries, a reliability-centered intelligent maintenance decision-making model is established and utilized to guide equipment maintenance. Results show that this strategic maintenance plan bears the property of being more purposeful, and the maintenance tasks can be more scientific.

Key words: reliability-centered maintenance; intelligent maintenance; decision-making model; preventive maintenance

目前中国石化企业设备维修管理基本处于传统的管理模式^[1], 企业设备管理不完善, 人为因素影响较大, “多检测、多维修、多保养、多多益善”和“故障后再维修”的传统维修思想仍占主流。非计划停机次数较多, 设备故障停机对安全、环境、生产和维

修成本等影响较大, 生产设备具有较大的不可控性。为了充分利用有限的维修资源并提高维修的有效性, 必须对旋转机械的维修方式进行优化^[2]。大型机组的在线监测系统和重要机泵的离线检测仪器的推广应用, 在预测或诊断设备早期故障及其发展趋

收稿日期: 2010-03-22.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAK02B02); 国家自然科学基金重点资助项目(50635010).

作者简介: 刘文彬(1979—), 男, 讲师, 主要从事大型旋转机械实时监测网络、故障诊断、设备安全风险信息管理信息化方面的研究, E-mail: liuwb1437@263.net.

势、制定有针对性的预测性维修任务、避免或减缓设备故障后果方面发挥了重要作用。据统计,石化企业故障维修和停机损失费用已占到生产成本的30%~40%^[3],设备故障造成安全、环境事故频发,其中有些甚至是灾难性的。而提高设备运转的可靠性、可用性和可维修性迫切需要对关键设备进行识别和分类。国内外“以可靠性为中心的维修(reliability centered maintenance, RCM)”应用中的一个突出问题是:大多数 RCM 决策基于分析者的经验和定性判断,决策过程缺乏模型支持。因此,研究 RCM 决策模型非常必要^[4]。针对石化企业管理现状,本文研究了以可靠性为中心的智能维修决策模型,它包含了预测维修、预防维修和主动维修任务,关注高风险的设备、高风险的故障模式和高风险的安全、环境、生产损失和维修成本后果,它采用优化的维修策略任务使维修资源得到合理利用、工人检修工作量降低、设备故障频率降低且故障影响降到最小。

1 RCM

RCM 是国际上通用的用以确定装备预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程方法^[1]。RCM 是一种维修理念、维修策略和维修模式,它通过对设备进行功能故障频率及后果严重程度分析,采用风险矩阵逻辑决断的方法确定故障模式风险等级和设备重要度。按照以最少的资源消耗保持设备固有可靠性和安全性的原则,确定降低设备风险的

检查、维护、操作策略并制定优化的检查/维护任务工作包,用于指导日常的设备检查和维护^[5]。RCM 理念认为:设备并不是越频繁维修就越可靠;设备管理要从管理故障模式转到管理故障影响和故障后果。

设备故障是设备风险管理研究的重点,降低设备故障频率(probability of failure, PoF)和故障后果(consequences of failure, CoF)是降低设备风险的主要途径。石化行业设备故障频率是指该设备在现有的设备维护管理体制下统计分析得出的故障历史发生次数或同类设备在类似装置上统计分析得出的故障频率数值。故障后果影响主要从安全影响、环境影响、生产影响和维修成本影响4个方面来考虑。设备的风险(R)可以表示为

$$R = \text{PoF} \times \text{CoF} \quad (1)$$

设备故障模式风险通常从安全风险、环境风险、生产损失风险、维修成本风险4个方面来评估,其风险等级取决于4个风险等级的最高级。一个设备通常有若干个故障模式,最高的故障模式风险等级决定了设备的重要度(风险等级)。

2 RCM 评估

RCM 评估过程^[6]包括制定 RCM 计划、项目开工会、确定实施范围、数据收集和统计分析、系统划分和功能描述、FMEA、设备重要度确定、制定维护策略任务、RCM 报告、执行。具体评估工作流程如图1所示。

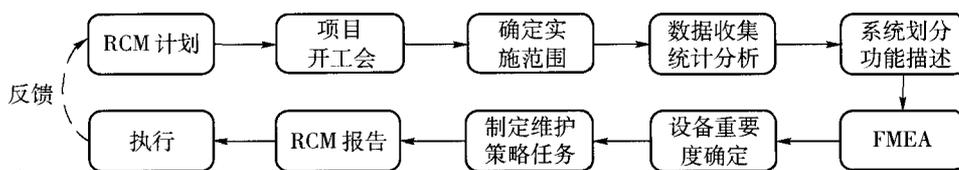


图1 RCM 评估工作流程

Fig. 1 RCM assessment flow chart

2.1 制定 RCM 计划

RCM 是一种管理制度和管理文化,它有别于传统的设备管理制度模式,需要领导者和决策者的大力支持和推动;同时,RCM 又是一项系统工程,它需要制定和贯彻可靠性数据、维修性数据采集以及交换管理制度。RCM 计划通常是以保证全厂的设备可用性和安全性为目的。

2.2 项目开工会

RCM 项目开工会的主要目的是成立 RCM 评估小组,明确 RCM 小组成员的职责和任务。RCM 小组成员一般由机械、电气、仪表、工艺、安全、可靠性

等方面经验丰富的专家组成。

2.3 确定实施范围

根据 RCM 实施计划,生产装置全部设备、生产装置子系统全部设备、单台设备都可以作为 RCM 的研究对象。单台设备的可靠性研究以其关键零部件为研究对象。

2.4 数据收集和统计分析

RCM 风险评估需要收集设备技术文档资料、运行数据资料、故障性数据资料、维修性数据资料和标准化的故障数据资料等。故障性数据包括设备故障模式、故障部位、故障原因、故障发现时间等;维修性

数据包括故障模式、故障开始时间、故障结束时间、检修开始时间、检修结束时间、故障根本原因分析、故障影响(安全、环境、生产、维修成本)等;平均故障间隔时间(mean time between failure, MTBF)、平均故障修复时间(mean time to repair, MTTR)、潜在故障-故障发生间隔期(P-F)、PoF 和 CoF 等是统计分析数据。

2.5 系统划分和功能描述

流程工业生产工艺一般有若干个系统组成,每个系统在工艺生产中的作用不同,不同系统中的设备故障发生对生产造成的影响也不一定相同。系统划分的主要目的是把工艺系统分成功能相对独立的若干子系统,通过系统功能界定,界定系统包含的工艺设备种类、数量等。

2.6 FMEA

FMEA 是通过量化 PoF、CoF,用风险的逻辑决断办法量化计算故障模式风险等级并进行排序。故障模式的风险从安全、环境、生产损失、维修成本4个方面的影响来评价,分别称为安全风险、环境风险、生产损失风险、维修成本风险。故障模式风险等级分为高风险(H)、中风险(M)、低风险(L)3个等级。FMEA 就是通过一定的逻辑判断法则,筛选出高、中风险的故障模式。按照“关键的少数、次要的多数”原则,对筛选出的故障模式进行分析确认。

2.7 设备重要度确定

设备重要度确定就是确定设备的风险等级。FMEA 筛选出设备的故障模式只要有一个是高风险等级则设备就是高风险设备;FMEA 筛选出的故障模式风险等级全部为低风险等级时,则设备的重要度为低风险设备;其余定义为中风险设备。

2.8 制定维修策略任务

RCM 制定的维修策略一般分为主动性维修策略和默认维修策略。其中,默认维修策略包括被动维修策略,即事后维修,需要采取纠正性的维修任务;对于隐蔽性故障则要采取故障检查任务,通过定期校验、定期试验的方法执行故障检查任务;对于故障频率次数较多或故障影响后果较大的设备则需要考虑设计变更来根除故障根源。预测性维修和预防性维修是主动维修的内容,其中,视情况维修属于预测性维修的内容,预测性维修任务主要依靠状态监测系统或工具,通过对设备状态量的监测和分析,进而诊断或预测设备早期故障,并以此为依据指导设备管理人员制定降低设备运行风险的有针对性的维

修任务。视情况维修任务依靠的状态监测系统或工具可以概括为润滑油分析、红外热像分析、电机电流分析、设备性能监测分析、超声波分析、腐蚀监测分析和外观检查分析等^[7]。预防性维修主要包括定期恢复、定期报废、机会恢复、机会报废等任务,它以时间排程形式规定了清洗、润滑、更换、检查、检测等任务,是基于日期的维修任务。

2.9 RCM 报告

RCM 报告是风险评估的内容输出,其中,检查/维护任务工作包是重点内容,是降低设备风险、保持设备固有安全性和可靠性的措施,它包括以下几部分:设备及故障风险等级、维修作业分类、执行作业设备的运行状态、负责维修作业的部门、执行作业的工种、执行作业前的准备工作、执行作业需要的零部件、预防性维修任务以及最佳维修周期等。

2.10 执行

执行环节就是具体执行 RCM 风险评估制定的检查/维护工作任务包等风险降低措施,是实现 RCM 风险评估目标的关键环节。

3 基于 RCM 分析的维修决策模型的建立

设备管理的目的是通过控制成本和风险,确保设备在全生命周期范围内安全和高效运行。基于风险的设备管理特点概括为:基于风险的检查/维护策略是基础;保持工厂范围内设备的可用性、安全性是 RCM 管理目标;RCM 可以对设备进行风险等级划分、制定降低设备风险的检查/维护策略;风险降低检查/维护策略制定和设备风险等级相关。

基于风险的设备管理是智能维修决策模型建立的基础。目前,中国石油化工行业设备管理基本处于传统的管理模式:企业设备管理不完善、设备基础管理薄弱、日常维护数据及检修记录数据不全、设备管理缺乏系统性、人为因素影响较大、维修资源分配不合理、设备可用性和可靠性较低、安全事故频出。现代企业管理要求保证工厂范围内设备的可用性和安全性,这对传统的设备管理是一个巨大的挑战。本文根据企业设备管理现状和设备管理发展趋势,建立了一种以可靠性为中心的智能维修决策模型。如图2所示,该模型采用 RCM 为评估工具进行关键设备的识别和分类,根据设备风险高低和风险影响合理分配维修资源并采取有针对性的风险降低措施;它采用优化的预防性维修和预测维修策略,通过对设备运行状态进行在线监测和离线检测,自动或人工预知设备早期故障或掌握故障发展趋势,进

而加强对设备的异常管理,防止灾难事故发生;通过检查/维护任务专家调整,加强对设备检查/维护作

业的过程管理和质量控制;通过评估检查/维护作业的有效性,加强对设备的绩效管理.

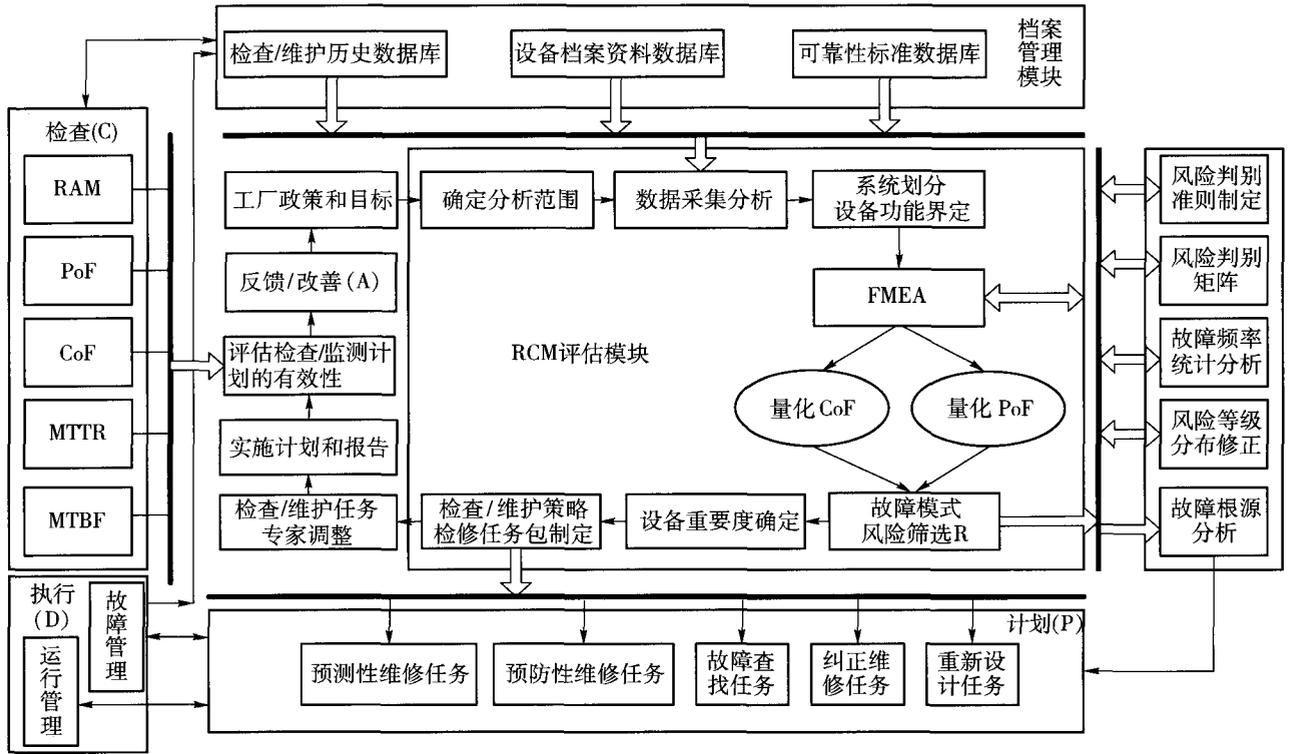


图 2 以可靠性为中心的智能维修决策模型

Fig. 2 Reliability-centered intelligent maintenance decision-making model

以可靠性为中心的智能维修决策模型信息输入内容是档案管理块内容:检查/维护历史数据库、档案管理资料数据库、可靠性标准数据库等. 它们是 RCM 评估分析需要的基础数据,同时档案管理也是企业设备管理最基础的工作^[8]. 通过人机对话接口,管理者根据工厂政策和目标制定 RCM 风险可接受准则、风险判别矩阵和故障频率统计分析,进而进行 FMEA 分析,并根据 FMEA 结果进行风险分布修正. 对于高风险的设备故障,建议进行故障根源分析(root cause analysis, RCA),找出故障发生的根本原因并制定故障根除措施,优化检查/维护任务工作包. 以可靠性为中心的智能维修决策模型信息输出内容是和设备风险等级相关的检查/维护任务工作包,它包含了预测性、预防性、故障查找等维修任务,具体输出内容如 RCM 报告. 维修决策输出内容是降低设备风险、提高设备可靠性、可用性和安全性的工作计划(plan),是 RCM 评估工厂政策和目标的出发点.

设备运行管理和故障管理执行 (do) RCM 优化的检查/维护任务,设备的运行数据、故障数据和维修性数据按照可靠性标准数据格式保存在档案管理

模块中,作为检查/维护历史数据.

设备绩效管理指标是评估检查/维护任务有效性的检查环节 (check),它通过 RAM (reliability, availability and maintainability)^[9] (可靠性、可用性和可维修性)、PoF、CoF、MTBF、MTTR 等指标量化设备运行绩效. 量化数据统计分析结果按照可靠性标注数据格式保存在检查/维护历史数据库中.

管理者通过评估检查/维护任务的有效性,调整 (adjustment) RCM 工厂政策和目标. 以可靠性为中心的维修决策经过 PDCA (plan—do—check—adjustment) 循环,完成设备风险管理的螺旋上升过程.

4 基于 RCM 分析的智能维修执行过程

设备风险管理要求对高、中风险的设备制定具体的能够降低风险的检查/维护策略. 每台设备的检查/维护策略包含若干个检修任务包,每个检修任务包又由维修任务列表组成,维修任务列表不仅包括了清洗、润滑、检查、更换、报废、检测等任务清单,而且还包括执行具体任务所需要的人、工、机具、材料等信息. 维修计划包含很多维修项目,维修项目由设备标签、维修任务列表组成. 一部分维修计划

采用人工调度的办法,采用定期恢复、定期报废、机会恢复、机会报废等方式执行;另一部分维修计划根据最新监控视情况维修. 在专业工程师最终确认执

行维修任务后,通过 ERP (enterprise resource planning) 开维修工单执行具体的维修作业^[10]. 图3所示为以可靠性为中心的智能维修过程.

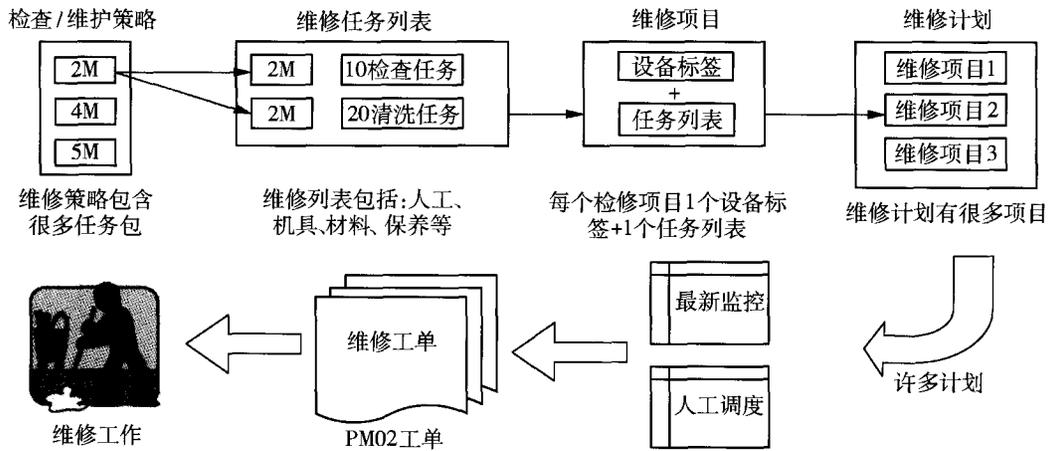


图3 以可靠性为中心的智能维修过程

Fig.3 Reliability-centered intelligent maintenance process

如图4所示,通过最新监控技术确定执行维修作业的时机,从而产生预测性维修任务. 高风险旋转机械设备建议采用在线监测方式,其他高、中风险机泵群建议采用离线监测的方式. 状态监测测量可以为温度、振动、超声波、声发射、润滑油液分析等状态量,通过人工或系统自动分析功能对设备进行故障预测和故障诊断,专业工程师通过缺陷/故障管理、设备异常管理等专业审批流程确定具体的预测性维修任务.

备完整性管理信息化平台. 该平台以 RCM 风险分析为基础,对某石化公司 100 万吨/年催化装置进行了动设备风险评估. 该装置共有动设备 61 台,包括:离心泵 56 台、离心式压缩机 3 台、轴流式压缩机 1 台,烟气轮机 1 台,汽轮机 1 台. 在 FMEA 分析中,对总共 61 台设备的 316 种故障模式进行风险等级分类,其中,高风险故障模式 29 个,占故障模式总数的 9.1%;中风险故障模式 53 个,占故障模式总数的 16.7%;低风险故障模式 234 个,占故障模式总数的 74.2%. 在设备重要度确定中,对所分析的 61 台动设备进行风险等级分类,高风险 12 台,占动设备总数的 19.6%;中风险 30 台,占动设备总数的

5 应用

按图2智能维修决策模型建立了某石化公司设

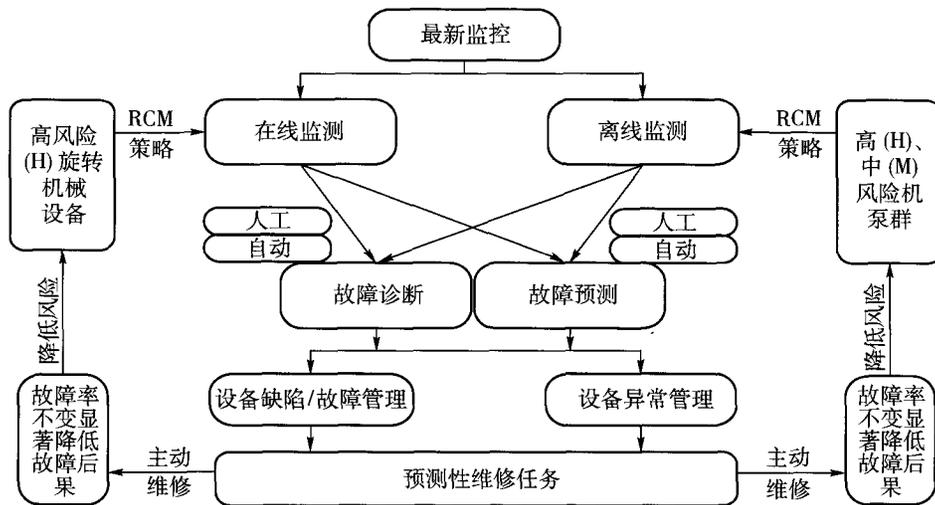


图4 最新监控维修任务

Fig.4 Latest monitoring maintenance tasks

49.1%;低风险19台,占动设备总数的31.3%。

经FMEA分析,高、中风险的故障模式主要集中在振动或异响、轴承温度高、流量低、密封泄露等方面。分别采用振动监测分析、温度测量、流量监测、外观检查等手段来监测振动或异响、轴承温度高、流量低、密封泄露等故障,通过最新监控手段(图4)来预测或诊断故障发生及故障发展趋势。以烟气轮机为例,该机组为双级烟气透平,配有Bently3500机组保护系统,传统的维修管理模式是监测轴振动、轴位移、轴瓦温度、转速、烟气流量等状态参数,当参数达到规定的报警、联锁停车限值时采用故障后维修管理模式,设备故障和设备维修不可控、生产损失较大、维修准备不足造成设备修复时间较长。经过RCM分析并建立了以可靠性维修为中心的智能维修决策系统,RCM维修策略建议该烟气透平采用最新状态监控系统,通过监测和分析轴振动、轴位移等状态参数预测或诊断转子不平衡、轴心线不对中、转子摩擦、轴瓦油膜涡动或振荡、转子叶片变形等故障。采用最新状态监控系统后,当轴振动、轴位移等状态参数达到报警或联锁停机限值前,工作人员不仅可以通过频谱分析工具诊断故障部位、故障原因,而且可以预测故障发展趋势和剩余工作寿命。按照图3所示的智能维修过程,维修工程师可以事先制定维修需要的零部件、耗材、人工、机具及检修预案等计划,该维修计划执行可以采用机会维修的方式,也可采取状态维修的方式。预知维修和机会维修策略,不仅可以显著降低故障后果,而且使故障修复或恢复所用时间大大降低。

6 结论

1) 以可靠性为中心的维修决策模型适合石油化工等流程工业设备管理特点,有助于帮助企业建立以可靠性为中心的维修管理机制。

2) 采用以可靠性为中心的维修决策模型制定的维修策略计划具有很强的针对性和科学性,制定的任务包含预测性维修任务及预防性维修任务。

3) 以可靠性为中心的维修决策模型以设备风险管理为核心,根据设备风险等级合理分配维修资源。

4) 以可靠性为中心的维修决策模型以降低设备风险为核心,制定有针对性的检查/维护策略,有效保证了设备运行的安全性和可靠性。

5) 风险管理是一项系统化、制度化的工程,涉及到设备管理制度和管理文化的变革。对企业设备管

理决策者、工程技术人员、设备操作、维护人员等进行风险管理技术知识的培训是一项长期的任务。

参考文献:

- [1] DESHPANDE V S, MODAK J P. Application of RCM to a medium scale industry [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2002, 77(1): 31-43.
- [2] 郭丽杰, 高金吉, 王庆锋, 等. 石化旋转机械维修方式优化[J]. *机械设计*, 2009, 26(11): 61-64.
GUO Li-jie, GAO Jin-ji, WANG Qing-feng, et al. The optimization of rotating machinery maintenance way in the petrochemical enterprise [J]. *Mechanical Design*, 2009, 26(11): 61-64. (in Chinese)
- [3] ETI M C, OGAJI S O T, PROBERT S D. Reducing the cost of preventive maintenance (PM) through adopting a proactive reliability-focused culture [J]. *Applied Energy*, 2006, 83(11): 1235-1248.
- [4] 贾希胜, 贾云献, 温亮. 以可靠性为中心的维修及其模型支持[J]. *军械工程学院学报*, 2004, 16(1): 15-18.
JIA Xi-sheng, JIA Yun-xian, WEN Liang. The reliability centered maintenance model and its support [J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2004, 16(1): 15-18. (in Chinese)
- [5] AGRAWAL V K, GANDHI O P. Reliability-centered maintenance [C] // *Proceedings of SERC School on RAM*. IIT Delhi, India; [s. n.], 1997: 145-152.
- [6] The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space. JA1012 A guide to the reliability-centered maintenance (RCM) standard [S]. Warrendale, PA, USA: SAE, 2002: 1-57.
- [7] GABBAR H A, YAMASHITA H, SUZUKI K. Computer-aided RCM-based plant maintenance management system [J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2003, 19(5): 449-458.
- [8] MOORE W J, STARR A G. An intelligent maintenance system for continuous cost-based prioritization of maintenance activities [J]. *Computers in Industry*, 2006, 57(6): 595-606.
- [9] HERDER P M, van LUIJK J A, BRUIJNOOGE J. Industrial application of RAM modeling development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan plant at GE industrial, plastics [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93: 501-508.
- [10] PERES F, BOUZAIENE L, BOCQUET J-C. Anticipating aging failure using feedback data and expert judgment [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2007, 92(2): 200-210.

(责任编辑 刘 潇)