

DOI: 10.7652/xjtuxb201306022

风险维修策略在石化系统检修周期优化中的应用

杨庆浩^{1,2}, 胡海军², 王明坤², 乔玉龙³

(1. 西安科技大学材料科学与工程学院, 710054, 西安; 2. 西安交通大学化学工程与技术学院, 710049, 西安;

3. 长庆油田分公司第一采气场, 710061, 西安)

摘要: 对石化装备定期维修和定期检修两种模式中的维修效果进行分析,应用比例役龄消减模型和包含非理想检测维修的延迟时间模型计算设备的可靠度。对基于风险的维修策略进行改进,提出计算设备故障概率消减的主观方法和客观方法,以便使子系统的风险低于可接受风险准则;提出一种包含非理想维修的维修和检测周期优化模型。将基于风险的维修策略应用到重整反应系统检测优化中,结果表明,当进料换热器 E201A/B、反应器 R201~R204、水冷器 E202A/B 和空冷器 A201 的检测周期为 9 个月时,子系统的风险可以满足风险准则的要求。

关键词: 维修效果;基于风险的维修;检修优化;重整反应系统

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0130-07

Inspection/Maintenance Optimization for Petrochemical System by Risk Based Maintenance Strategy

YANG Qinghao^{1,2}, HU Haijun², WANG Mingkun², QIAO Yulong³

(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. The No. 1 Gas Production Plant of Petro China Changqing Oilfield Company, Xi'an 710061, China)

Abstract: The maintenance effect in strategy of periodic preventive maintenance and periodic inspection/maintenance for petrochemical equipment is discussed. The proportional age reduction model and the delay time model with imperfect inspection maintenance are used to evaluate the equipment reliability. Improving the risk based maintenance (RBM) strategy, both objective and subjective methods are given to determine the reduction of equipment failure probability to keep subsystem risk under acceptable risk criterion. A model involving imperfect maintenance is presented to determine the optimal maintenance and inspection intervals. The improved RBM strategy is applied to the inspection optimization of a reforming reaction system (RRS). The results show that the risks of all subsystems in the RRS are acceptable when the inspection intervals of heat exchanger E201A/B, reactor R201~R204, water cooler E202A/B and air cooler A201 are reduced to 9 months.

Keywords: maintenance effect; risk based maintenance; inspection/maintenance optimization; reforming reaction system

石油化工系统运行在高温、高压或腐蚀的环境下,一直是重大事故的多发地,维修可以提高石化装

收稿日期: 2012-12-20。 作者简介: 杨庆浩(1977—),男,讲师;胡海军(通信作者),男,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105295)。

网络出版时间: 2013-04-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130417.1134.001.html>

备和系统的可靠性及安全性。随着石油化工系统规模和复杂程度的增加,维修所需要的人力和物力都在持续增长。据统计,在炼油企业中从事维修的人员多于总人数的 30%^[1]。化工企业中总的维修费用约占企业运行费用的 20%~50%^[2]。因此,对石化系统的维修策略进行优化,在确保系统安全的前提下降低维修费用,具有重要的理论研究意义和工程应用价值。

维修策略优化一直受到众多学者的关注,文献[1-5]对维修策略的种类和优化模型进行综述。主要的维修策略包括以固定周期维修为主的预防性维修(PM)策略、视情维修(CBM)策略、以可靠性为中心的维修(RCM)策略,以及近年发展起来的基于风险的维修(RBM)策略。石油化工系统中的 80%风险是由 20%的关键设备带来的^[6],集中维修资源对关键设备进行维修并提高其可靠性,既能有效地降低系统的风险,又能节省维修费用。RBM 将风险作为确定设备维修优先顺序的准则,仅对超出风险要求的设备制定预防维修计划,在维修费用和 risk 两个方面同时达到最优,比较适合于石油化工系统的维修策略优化。

RBM 策略在工程中已经得到成功的应用。文献[7]提出了一个完整的 RBM 策略,假设设备维修效果是理想的,利用故障树技术和指数评分方法计算故障概率和后果,采用“逆故障树方法”计算设备的最大许可概率,并由此确定设备的预防维修周期。文献[8]将该策略成功地应用到环氧乙烷生产装置中,计算系统发生火灾、爆炸事故的风险,并用社会风险接受准则和个人风险接受准则对系统风险值进行评价,制定新的维修计划,使得系统风险满足要求。文献[9]对发电厂企业实施 RBM 策略来减少经济损失风险。文献[10]为 RBM 策略补充了一种贝叶斯方法来计算故障概率。文献[11]为过程企业提出了实施 RBM 策略的过程和实例。文献[12]应用 RBM 策略对某 300 MW 机组数字电液(DEH)控制系统的维修计划进行分析优化,将 DEH 控制系统分成 4 个子系统,风险分析和评价结果表明,4 个子系统的风险均超出可接受风险,并由此对各子系统下的设备维修周期进行了优化。文献[13]在 RCM 决策方法上引入了风险评价的内容,并根据评价结果进行逻辑决断分析,最后对中石化某乙烯装置旋转机械进行案例分析,提出了维修和监测、检测建议。

然而,在上述研究中,制定维修计划时都假设设备采用固定周期的预防维修方式,而且维修后设备达到“好如新”的状态,这与工程实际不符。在石化系统中,动设备普遍按固定周期进行预防性维修(即定期维修模式),而静设备一般按固定周期进行检测并根据检测结果判断是否进行维修(即定期检修模式),另外小修和中修也不能将设备恢复到“好如新”状态。

本文分析了石化装备的维修模式和维修效果,考虑其对可靠性的影响,提出了两种确定设备故障概率消减幅度的方法,应用 RBM 策略对某石化系统中的关键设备制定优化的维修方案,使系统的风险满足风险准则的要求。研究结果对石化系统风险分析和维修优化具有重要的指导意义。

1 石化装备的维修模式和效果

1.1 维修模式

目前,石油化工企业采用的维修方式包括定期维修、定期检修、日常维护、定期更换以及抢修等。按照石油化工设备维护规定和手册^[14],大部分动设备(机泵)需要执行定期维修,如定期进行小修、中修和大修。大部分静设备(换热器、储罐、反应器)需要执行定期检修,如对换热器进行定期外部检测和内部检测,如果检测时发现缺陷,则进行维修。日常维护是指按天、周对设备进行擦拭、清扫、润滑、调整等一般护理,一般认为对设备的可靠性没有影响。定期更换主要针对易损耗、低值部件,如爆破片、垫片等。早期大部分石化装备执行的是抢修和定期大修相结合的方式,随着预防维修等理念的深入,这种方式逐步转变为定期维修或定期检修。

除日常维护外,石油化工设备主要执行定期维修和定期检修,周期如表 1 所示。

表 1 部分石油化工设备检测和预防维修的周期^[14]

序号	设备类别	小修周期	中修或检测	大修周期
		/月	周期/月	/月
1	机泵	3	6~12	24~36
2	离心式压缩机	3	6~12	24~36
3	电机、发电机	3	6~12	24~36
4	压力容器		12	24~36
5	加热炉		12	24~36
6	管线		12	24~36

1.2 维修效果

根据维修效果,维修活动通常分为3类^[3]。

(1)理想维修。理想维修可以发现和修理设备所有的隐患或缺陷,修后的设备如同新的一样,即达到“好如新”状态。理想维修等同于更换。

(2)最小维修。最小维修仅使设备恢复运行,几乎不对部件缺陷进行修理,修理前后设备的故障率不发生变化,修后的设备和修前的设备一样,即达到“坏如旧”状态。

(3)非理想维修。维修的效果介于最小维修和理想维修之间的维修称为非理想维修。经过非理想维修后,设备消除了部分缺陷,能重新运行,但比全新设备更容易发生故障。产生非理想维修的原因包括:①维修方法或技术手段的限制;②维修资源的限制;③维修质量的限制^[15]。

根据维修效果的定义,日常维护可以认为是最小维修。在定期维修中,小修如果是更换垫片、校正、更换油封等工作,也可以认为是最小维修。大修是最彻底、最全面的维修,大修会对设备进行检测,尽量消除潜在隐患和缺陷,大修后的设备基本等同于新设备,因此其效果可以认为是理想的。从内容上看,中修一般包括小修内容,中修的效果一般会比小修的好,但中修仅对关键部件进行检测和预防维修,其维修效果比大修的效果差,因此可以认为是非理想维修。在定期检修中,如果在检测时发现缺陷,则立即进行维修,此时的维修称为检测维修。由于生产的要求,检测维修要在尽可能短的时间内完成,另外如果缺陷能拖到大修时再修理,则尽量不对设备进行修理,以减少停工时间。检测维修不一定能完全修理设备所有的缺陷,故其效果可以认为是非理想的。

如果设备在预防维修或检测维修的间隔内发生故障,则进行事后维修(故障维修),此时设备一般会进行停机修理,多数情况下设备需要从流程中切换出来,如有备用设备则将其投入工作。故障维修中清扫环境、准备零件、修理等环节的平均耗时会比预防维修(检测维修)长,因此可以进行更多的检测,维修也比较充分。另外,设备发生故障时,其可靠性会受到更多的关注,此时除了修理受损部件外,还要尽量检测和修理其他缺陷部件,防止设备在短时间内再次发生故障。因此,两种模式中的故障维修可认为是理想维修。

2 石化装备的可靠性分析

可靠性是计算风险、制定维修计划的基础。对

采用定期维修模式的设备,假设其故障率服从双参数的威布尔分布,且用比例役龄模型^[16]描述其“故障-维修”的过程,则其可靠性为

$$R(x, T) = \exp \left\{ - \sum_{i=1}^k \Lambda_i(iT) - \Lambda_{k+1}(x) \right\} \quad (1)$$

式中: x 为当前时间(月); T 为预防维修周期(月); $k = \lfloor x/T \rfloor$; $\Lambda_i(x) = \left(\frac{x - \rho(i-1)T}{\theta} \right)^\beta - \left(\frac{(i-1)T - \rho(i-1)T}{\theta} \right)^\beta$; β, θ 为威布尔分布的形状参数(月)和尺度参数; ρ 为提高因子,表示维修效果, $\rho \in [0, 1]$ 。

对于采用定期检修模式的设备,采用包含非理想维修模型的延迟时间模型描述其“故障-维修”过程规律,其可靠度为^[15]

$$R(x, T) = \sum_{i=0}^k P_m(i, T) \left(1 - \int_0^{x-iT} g_{i+1}(u) du + \int_{(k-i)T}^{x-iT} g_{i+1}(u) \bar{F}_{i+1}(x-iT-u) du \right) \quad (2)$$

式中

$$P_m(k, T) = \sum_{i=0}^{k-1} P_m(i, T) \int_{(k-i-1)T}^{(k-i)T} g_{i+1}(u) \bar{F}_{i+1}((k-i)T-u) du$$

$$g_{i+1}(u) = \lambda(u + \Delta_i) \exp \left\{ - \int_{\Delta_i}^{u+\Delta_i} \lambda(s) ds \right\}$$

$\lambda(u)$ 为缺陷初始的瞬时发生率; $\bar{F}_{i+1}(v) = \exp \left\{ - \int_{\Delta_i}^{v+\Delta_i} h(s) ds \right\}$, $h(s)$ 为故障初始的瞬时发生率。

3 基于风险的维修策略优化

3.1 基于风险的维修

应用RBM策略前需要将系统划分为多个子系统,子系统由共同完成某一特定的功能设备组成,是进行风险评定的最小单位^[7-9, 11]。划分子系统后,需要对这些子系统逐个应用RBM策略确定维修计划,流程如图1所示。

RBM策略主要包括6个步骤^[5]。

(1)危害分析:分析系统可能出现的危害(人员伤亡、环境污染和经济损失),并挖掘造成这些危害的原因和过程^[7]。在石油化工系统中,设备故障引起系统停机的概率比引起人员伤亡、环境污染的概率高得多,而且系统停机的单日经济损失比较大,因此将系统产生高额经济损失作为主要的危害。将这种危害定义为系统故障,并以系统故障为顶事件,子系统故障作为中间事件,设备故障作为底事件,根据系统的工艺流程、功能结构和操作逻辑,建立起故障树,分析设备故障对系统产生经济损失的影响。

(2)后果计算:计算设备和子系统故障的后果。

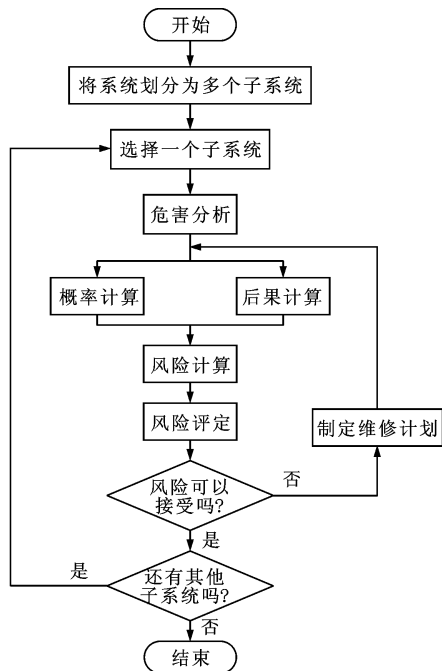


图1 RBM策略工作流程图

设备故障的经济后果可以由故障平均维修费用、平均停工时间以及单位时间停机损失估算得出。子系统的经济后果是其包含设备的经济后果的平均值。

(3) 概率计算: 计算子系统故障的概率。如果底事件是设备故障, 则底事件的概率即设备的故障概率, 由底事件的概率计算子系统故障的概率。

(4) 风险计算: 子系统的风险值为子系统故障概率和故障后果的乘积。

(5) 风险评定: 判断子系统风险值是否可以接受。由企业平均运行成本计算子系统的平均经济损失, 由此确定子系统的可接受风险水平。如果子系统的风险高于可接受风险水平, 则该子系统是高风险子系统, 需要对其所属设备制定新的维修计划。

(6) 制定维修计划: 确定高风险子系统中设备的维修或检测周期。高风险子系统需要降低其故障概率, 根据风险准则的要求, 计算高风险子系统包含设备的最大许可故障概率, 由此计算设备的优化维修周期, 使设备的故障概率小于其最大许可故障概率。

目前, RBM策略研究仅考虑设备采用定期维修模式而且维修效果是理想的情况, 导致步骤3中的概率和步骤6中的维修周期计算不准确。此外, 制定维修计划时认为所有的设备都可以通过预防维修降低故障概率, 忽略了设备故障率可以服从指数分布的情况。本文针对这些不足进行修正。

3.2 维修计划

由于石化装备主要采用定期维修和定期检修方

式, 考虑到非理想维修的作用, 步骤3中的底事件的概率为

$$q = 1 - R(x, T) \quad (3)$$

式中: $R(x, T)$ 根据式(1)和式(2)计算得出。

高风险子系统需要对其包含设备的维修计划进行修正, 以降低子系统的风险值。首先要计算设备的最大许可故障概率, 并由此计算出设备新的维修或检测周期。

如果底事件是设备发生故障, 子系统故障的概率 Q 可表示为

$$Q = f(q_1, q_2, \dots, q_{N_q}) \quad (4)$$

式中: $f(\cdot)$ 为概率函数; q_i 为第 i 个事件的发生概率, 由式(3)确定; N_q 为底事件数量。

对设备进行定期维修或定期检修活动, 减小设备的故障概率, 从而降低子系统故障的概率。然而, 设备的故障率可能服从指数分布, 则定期维修和定期检修对故障概率无影响, 此时不需要进行预防性维修。假设一个子系统中有 N_w 个设备的寿命不服从指数分布 ($N_w \leq N_q$), 为了降低顶事件的发生概率, 前 N_w 个设备需要将其累积故障率从 q_i 降到 $\theta_i q_i$ ($0 < \theta_i \leq 1, 0 < i \leq N_w$), 此时顶事件的概率为

$$Q' = f(\theta_1 q_1, \dots, \theta_i q_i, \dots, \theta_{N_w} q_{N_w}, q_{N_w+1}, \dots, q_{N_q}) \quad (5)$$

式中: θ_i 为第 i 个底事件的故障概率消减系数; N_w 为子系统中寿命不服从指数分布的设备总数。

Q' 可以根据风险准则预先确定。 Q' 是子系统的最大许可故障概率, 如果子系统的概率超过该值, 则子系统的风险不能满足风险准则的要求。 θ_i 表示各设备降低故障概率的幅度, θ_i 受设备的可靠性、可靠性提高费用和运行要求的制约。改善串联系统中设备的可靠度对提高系统可靠度的效果更好; 静设备的检测、维修费用一般比动设备的费用高, 增加动设备的维修次数来提高系统的可靠度会比较经济。考虑以上因素, 企业的专家对提高何种设备的可靠度会有所偏重, 因此可以根据专家的主观意见确定各设备故障概率消减比例。另一方面, 子系统一般是由结构、功能类似的设备组成的, 系统中设备降低故障概率的难度和费用相差不大, 如果没有特殊要求, 可以让子系统中的所有设备按同一个比例降低其故障概率。

基于以上原因, 本文提出两种计算故障概率消减系数 θ_i 的方法。

(1) 主观方法。假设各设备按比例 $\theta_i = w_i \theta^*$ 降低其故障概率, 其中 θ^* 为故障概率降低的基本比例

单位, w_i 为各设备的权重系数。专家根据设备可靠度改善的难度、费用和相对重要性对 w_i 进行评分, 并对 w_i 进行归一化处理。将 $\theta_i = w_i \theta^*$ 代入式(5), 运用迭代法求得 θ^* , 最后得到 θ_i 。

(2)客观方法。假设所有设备按相同的比例消减其故障概率, 即令 $\theta_i = \theta_0 = \text{const}(0 < i \leq N_w)$ 。将 θ_0 代入式(5), 运用迭代法可以获得 θ_0 的数值解。求得 θ_i 后, 则设备的最大许可故障概率 $q_i^* = \theta_i q_i$ 。

石油化工系统会以固定周期 T^* ($T^* = 24 \sim 36$ 月) 执行大修, 大修是下一个更新过程的起始点。风险准则规定了在一个时间间隔 ΔT ($T^* > \Delta T$) 内, 子系统的最大可接受风险值(通常 $\Delta T = 12$ 月)。为了满足子系统在每个 ΔT 内的风险都满足风险准则的要求, 本文提出一种非理想维修周期的优化模型, 即

$$\left. \begin{aligned} \max \quad & f = T_i \\ \text{约束条件} \quad & 1 - R_i(N\Delta T, T_i) \leq Nq_i^* \\ & N = 1, 2, \dots, N_s \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: N_s 为在一个大修周期内上述时间间隔的总数, $N_s = \lfloor T^* / \Delta T \rfloor$; T_i 为第 i 个设备的预防维修周期或检测周期(月), 是决策变量; $R_i(N\Delta T, T_i)$ 采用式(1)和式(2)计算。周期 T_i 越长, 则在一个大修期间内进行的检测或维修次数越少, 总费用越低。在炼油企业, 所有的设备大修周期是相同的。令 $T^* = (N_i + 1)T_i$, 式(5)等价于

$$\left. \begin{aligned} \min \quad & f = N_i \\ \text{约束条件} \quad & 1 - R_i\left(N\Delta T, \frac{T^*}{N_i + 1}\right) \leq Nq_i^* \\ & N = 1, 2, \dots, N_i \\ & N_i = 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: N_i 为第 i 个设备在大修期间的维修或检测次数。

计算出各设备的最小检测或维修次数 N_i , 即可求出对应的周期 T_i 。周期 T_i 还需要根据企业的运行要求进行调整。

4 基于风险的维修策略的应用

对某石化企业连续重整装置的重整反应应用 RBM 进行维修优化。首先根据设备的维修记录对其可靠性参数进行估计, 计算设备的可靠性; 然后根据设备故障的平均维修费用、平均停工时间以及单位时间停机损失估算故障后果; 最后计算各设备的

风险值。将该系统分为 9 个子系统, 其中每个设备的风险如表 2 所示^[15]。

以重整反应系统产生高额经济损失为顶事件建立故障树, 其中子系统故障为中间事件, 设备故障为底事件。子系统的故障概率由式(4)计算得出, 子系统的故障后果为其下属设备故障后果的概率加权平均值, 即

$$C_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^{N_q} q_i C_{\text{eq},i} / \sum_{i=1}^{N_q} q_i \quad (8)$$

式中: $C_{\text{eq},i}$ 为子系统中第 i 个设备的平均故障后果(万元)。

表 2 设备的故障概率和故障后果^[15]

序号	子系统名称	设备	q_i	$C_{\text{eq},i}$ /万元
1	1# 氢气压缩子系统	氢气压缩机 K201	0.195 7	19.115
		汽轮机 T201	0.105 8	14.464
2	进料换热子系统	换热器 E201A/B	0.327 7	40.848
3	反应子系统	反应器 R201 ~R204	0.135 2	54.263
4	加热子系统	加热炉 H201ACD/B	0.264 9	34.322
5	冷却子系统	空冷器 A201	0.068 1	59.495
		水冷器 E202A/B	0.300 9	41.432
6	分离子系统	分离罐 D201	0.158 8	57.590
		分离罐 D202A/B	0.105 1	30.901
7	增压泵子系统	增压泵 P201A/S	0.518 1	1.820
8	2# 氢气压缩子系统	氢气压缩机 K202A/B/C/D	0.512 9	1.492
		高压吸收罐 D204	0.080 4	58.110
9	吸收子系统			

经济损失的风险准则并没有统一的标准, 可以根据企业的年维修费用和停机损失确定该准则^[9]。据统计, 连续重整系统中每个子系统的故障损失约为 15.238 15 万元 $\cdot \text{a}^{-1}$, 由此确定子系统的可接受风险水平为 15 万元 $\cdot \text{a}^{-1}$ ^[15]。经济风险准则为: 如果子系统的经济损失风险不超过 15 万元 $\cdot \text{a}^{-1}$, 则风险可以接受。如果子系统的风险不能满足风险准则的要求, 则需要对其所包含的设备进行维修优化, 使子系统的风险降低到 15 万元 $\cdot \text{a}^{-1}$ 以下。各子系统风险评定结果如表 3 所示。

表 3 子系统风险分析结果

序号	子系统	Q	C _{sys} /万元	风险值/ 万元·a ⁻¹	评定 结果
1	1# 氢气压缩 子系统	0.280 8	17.483	4.909	接受
2	进料换热子 系统	0.548 0	40.848	22.385	不接受
3	反应子系统	0.440 7	54.263	23.913	不接受
4	加热子系统	0.459 7	34.322	15.778	接受
5	冷却子系统	0.544 5	43.268	23.560	不接受
6	分离子系统	0.326 3	42.386	13.831	接受
7	增压泵 子系统	0.767 8	1.820	1.397	接受
8	2# 氢气压 缩子系统	0.943 7	1.492	1.408	接受
9	高压吸收子 系统	0.080 3	58.110	4.671	接受

根据该准则,进料换热子系统、反应子系统和冷却子系统不能通过风险评定,需要对其所包含的设备重新制定维修计划。加热子系统的风险略高于可接受风险水平,为了避免维修过量,因此不需重新制定其下属设备的维修计划。

在一个大修周期(3 a)内,这 3 个子系统每年内的风险值都要满足风险准则的要求,由此计算出各子系统 1 a 内的最大许可故障概率。由于这 3 个子系统内设备的结构、功能类似,因此可采用等比例方法确定设备的故障概率消减系数,并对式(5)进行迭代,计算出设备的最大许可故障概率,根据式(7),计算出设备满足风险准则要求的理论最优维修周期,计算结果如表 4 所示。

如果严格遵循风险准则的要求,需要将进料换热器 E201A/B、反应器 R201~R204 和水冷器

E202A/B 的检测周期调整为 6 个月,但过短的检测周期会消耗较多的人力物力。如果将这几个设备的检测周期调整为 9 个月,由此给各子系统增加的风险可以忽略,此时 3 个子系统中的所有设备均按同一周期检测,便于施工和管理。分析结果表明,按等比例方法确定设备故障概率降低幅度是合理的,改进后的 RBM 策略可以更合理地为非理想维修条件下的石油化工设备制定最优检测周期。本文的研究成果为 RBM 策略在石油化工系统中的应用打下基础,为提高石油化工企业的经济性和安全性提供了理论依据和技术支持。

5 结 论

(1)维修模式和维修效果会影响石化设备的故障过程和可靠性。对石化企业中的定期维修和定期检修的效果进行分析,定期维修中的小修可认为是最小维修,中修可认为是非理想维修,定期检修中的检测维修可以认为是理想维修,在这两种维修方式中,故障后的维修或定期大修都是理想维修。

(2)建立了计算设备故障概率的消减系数的主观方法和客观方法,并提出一种计算非理想维修周期的优化模型,从而对 RBM 策略进行改进,使 RBM 策略能为执行定期维修、定期检修的设备制定非理想维修条件下的维修、检测周期。

(3)将改进后的 RBM 策略应用于某重整反应系统的维修优化中。将系统划分为 9 个子系统,确定子系统可接受风险水平为 15 万元·a⁻¹。风险评定结果表明,进料换热子系统、反应子系统和冷却子系统的风险值超标,需要对其制定新的维修计划。当进料换热器 E201A/B、反应器 R201~R204、水冷器 E202A/B、空冷器 A201 的优化检测周期为 9 个月时,子系统的风险可以满足风险准则的要求。改进后的 RBM 策略可以更合理地为非理想维修条件下的石油化工设备制定最优检测周期。

表 4 案例维修优化结果

序号	子系统	设备	θ_i	q_i^*	T_i /月	调整后检测周期 /月	调整后系统风险 /万元·a ⁻¹
1	进料换热子系统	E201A/B	0.624	0.204 5	6	9	17.074
2	反应子系统	R201~R204	0.575	0.077 9	6	9	15.220
3	冷却子系统	A201	0.582	0.039 7	9	9	16.396
		E202A/B	0.582	0.175 2	6	9	

参考文献:

- [1] DEKKER R. Applications of maintenance optimization models: a review and analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 51(3): 229-240.
- [2] TAN J S, KRAMER M A. A general framework for preventive maintenance optimization in chemical process operations [J]. Computers & Chemical Engineering, 1997, 21(12): 1451-1469.
- [3] PHAM H, WANG H. Imperfect maintenance [J]. European Journal of Operational Research, 1996, 94(3): 425-438.
- [4] WANG H. A survey of maintenance policies of deteriorating systems [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 139(3): 469-489.
- [5] ARUNRAJ N S, MAITI J. Risk-based maintenance: techniques and applications [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 142(3): 653-661.
- [6] American Petroleum Institute. API 581 based resource document: risk based inspection [S]. Washington DC, USA: American Petroleum Institute, 2000.
- [7] KHAN F I, HADDARA M M. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2003, 16(6): 561-573.
- [8] KHAN F I, HADDARA M R. Risk-based maintenance of ethylene oxide production facilities [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 108(3): 147-159.
- [9] KRISHNASAMY L, KHAN F I, HADDARA M. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2005, 18(1): 69-81.
- [10] APELAND S, AVEN T. Risk based maintenance optimization: foundational issues [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 67(3): 285-292.
- [11] KHAN F I, HADDARA M. Risk-based maintenance (RBM): a new approach for process plant inspection and maintenance [J]. Process Safety Progress, 2004, 23(4): 252-265.
- [12] 董玉亮, 王旭丹, 顾煜炯. 基于风险的维修决策及其在电站设备中的应用 [J]. 现代电力, 2008, 25(2): 51-56.
DONG Yuliang, WANG Xudan, GU Yujiong. Risk-based maintenance decision and its application to power plant equipment [J]. Modern Electric Power, 2008, 25(2): 51-56.
- [13] 郭丽杰, 高金吉, 杨剑锋, 等. 石化旋转机械基于风险的维修决策研究 [J]. 北京化工大学学报: 自然科学版, 2009, 36(2): 87-91.
GUO Lijie, GAO Jinji, YANG Jianfeng. An approach to risk-based maintenance decision-making for a petrochemical rotary machine [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2009, 36(2): 87-91.
- [14] 中国石油化工股份有限公司. 石油化工设备维护检修规程: 第一册 通用设备 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2008: 157-531.
- [15] 胡海军. 石油化工复杂系统可靠性、风险及维修策略研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- [16] SHIN I, LIM T J, LIE C H. Estimating parameters of intensity function and maintenance effect for repairable unit [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 54(1): 1-10.

(编辑 杜秀杰)

(上接第129页)

- LIU Zujun, WANG Jiuling, YI Kechu. Symbol timing synchronization using interpolated matched filters [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(2): 1550-1554.
- [9] 刘学, 焦淑红. 拟蒙特卡罗自适应粒子滤波的机载无源定位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(9): 34-39.
LIU Xue, JIAO Shuhong. Quasi Monte-Carlo adaptive particle filter for airborne passive location [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(9): 34-39.
- [10] NI Qiang, DU Weina, ZHANG Wenjun. Adaptive motion vector re-sampling for fast fade and dissolve transitions on MPEG video [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2005, 51(4): 1341-1345.
- [11] DESJARDINS A E, VAKOC B J, SUTER M J. Real-time FPGA processing for high-speed optical frequency domain imaging [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2009, 28(9): 1468-1472.
- [12] ALAGHA N S, KABAL P. Generalized raised-cosine filters [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 47(7): 989-997.
- [13] JOHANSSON H, GUSTAFSSON O. Linear-phase FIR interpolation, decimation, and m th-band filters utilizing the Farrow structure [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2005, 52(10): 2197-2207.

(编辑 葛赵青 武红江)