

催化重整装置健康度评价

王 珠¹, 肖既磊¹, 董秀娟², 姚 源³

(1. 中国石油大学(北京)信息科学与工程学院, 北京 102249;

2. 国家管网集团北京管道有限公司, 北京 100101;

3. 中国石油化工股份有限公司安庆分公司, 安徽 安庆 246002)

摘要: 对炼化装置的健康评价主要关注故障检测和故障诊断领域, 这种技术仅能监测现场装置是否存在故障, 难以发现装置在长期运行过程中可能出现的潜在异常或故障; 为解决这一问题, 提出了一种针对装置级别的健康度评价体系, 该评价体系建立了包括工艺分组健康度、安全联锁健康度和能耗环保健康度 3 个方面的评价指标, 进而计算出催化重整装置整体的健康度; 将装置按级划分, 并采用层次分析法确定各级权重, 接着通过控制回路异常检测技术结合设定的打分规则, 计算出工艺分组健康度; 根据预警机制复现安全联锁系统, 并分析能耗环保指标, 得到装置整体评价结果; 将文章提出的评价体系应用于某炼化厂催化重整装置, 试验结果表明, 该方法能够对催化重整装置进行定量和合理的评价。

关键词: 石油; 催化重整; 安全; 安全联锁系统; 层次分析法; 评价

Health Evaluation on Catalytic Reforming Units

WANG Zhu¹, XIAO Jilei¹, DONG Xiujuan², YAO Yuan³

(1. College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. PipeChina Beijing Pipeline Co., Ltd., Beijing 100101, China;

3. Anqing Branch, China Petrochemical Co., Ltd., Anqing 246002, China)

Abstract: The health evaluation of refinery units mainly focuses on the fields of fault detection and fault diagnosis. This technology can only monitor whether there is a fault in field devices, but it is difficult to find potential abnormalities or faults that perhaps occur during the long-term operation of devices. To solve this problem, a novel device-level health evaluation system is proposed. The evaluation system establishes three evaluation indexes, including the process grouping health, safety interlock health and energy consumption and environmental health, so as to calculate the overall health of the catalytic reforming units. The reforming units are divided by all levels, the weighting of each level is determined by using the hierarchical analysis, and then the control loop anomaly detection technique combined with scoring rules is applied to calculate the process group health. The safety interlock system is reproduced according to the early warning mechanism, and the energy consumption and environmental protection indicators are analyzed to obtain the overall evaluation results of the devices. The proposed evaluation system is applied to a catalytic reforming unit in a certain refinery. Experimental results show that the method can provides a quantitative and reasonable evaluation of catalytic reforming units.

Keywords: petroleum; catalytic reforming; safety; safety interlock system; analytic hierarchy process; evaluation

0 引言

催化重整装置是炼化企业中最常见的装置之一, 其将石脑油转化为高辛烷值汽油及用于石化加工的芳烃。随着炼化企业对于产品质量和安全生产的要求不断提高^[1-2], 传统的故障检测方法已无法满足现代炼化企业的需求, 如何在安全生产的同时还能保障产品质量这一问题亟待解决。这就需要建立可视化的装置健康程度评估指标, 对目标装置进行“体检”, 及早发现装置的潜在故障, 避免因故障导致装置停车影响产品质量。

为了确保化工过程安全并稳定地运行, 故障诊断一直

是化工领域的专家重点研究的方向, 经过几十年的研究, 提出了各种故障诊断的模型以及算法^[3]。目前炼化系统常见故障诊断方法主要分为基于模型的诊断方法、基于数据驱动的诊断方法和基于神经网络的诊断方法^[4-6]。其中具体的诊断方法主要有符号有向图法(SDG, signed directed graph)^[7]、小波变化法^[8]、相关分析法^[9]、BP(Back Propagation)神经网络^[10]、自组织映射(Sam, self-organizing map)神经网络^[11]等。但是, 上述的故障诊断技术解决的是故障发生之后, 定位故障位置, 分析故障原因及故障程度的问题^[12], 且异常诊断结果表征的是系统部件级的健康

收稿日期: 2023-07-19; 修回日期: 2023-12-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61703434); 中国石油大学(北京)科研基金项目(2462020YXZZ023)。

作者简介: 王 珠(1989-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 王 珠, 肖既磊, 董秀娟, 等. 催化重整装置健康度评价[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(8): 329-335.

状态,不能体现系统的整体健康状态。目前,对炼化装置健康评价也主要集中在故障检测与诊断方面,没有建立对整个炼化装置健康状况的评价体系。面向复杂系统健康评估研究的是整体系统的健康度问题,其方法主要有基于物理模型的系统健康评估^[13-14]、基于加权模型的系统健康评估^[15-16]、基于故障树模型的系统健康评估^[17]和基于变结构单调关联系统模型的系统健康评估^[18]。该方法目前应用于航空航天、电力电子等领域,炼化领域应用较少。

研究复杂系统的健康评价方法后,结合催化重整装置的特点,本文提出了一种针对催化重整装置的健康度评价体系。基于评价体系开发出一套催化重整装置健康度评价软件,试验结果表明,该方法能够实时监控催化重整装置运行状态并给出装置健康度的合理评价。同时该方法也可扩展应用于其他炼化装置的健康状况评价中。

1 健康度的定义及等级划分

1.1 健康度的定义

健康度是一个综合的定量指标,是对催化重整装置整体健康状态的定量度量^[19]。催化重整装置的健康度由工艺分组健康度、安全联锁健康度和能耗环保健康度 3 个方面综合计算得出。定义催化重整装置的综合健康度为 HD ,工艺分组健康度为 HP ,安全联锁健康度为 HS ,能耗环保健康度为 HE 。根据专家经验将权重分别设置为 $W_{HP} = 0.7$, $W_{HS} = 0.2$, $W_{HE} = 0.1$ 。现场安全联锁实际触发时属于特殊情况,此时催化重整装置综合健康度会立刻降低。综上所述,催化重整装置健康度指标 HD 可以表示为:

$$\begin{cases} HD = 0.7HP + 0.2HS + 0.1HE, (\text{未实际触发 SIS}) \\ HD \in \{0, 20\}, (\text{实际触发 SIS}) \end{cases} \quad (1)$$

式中,工艺健康度 HP 、安全联锁健康度 HS 、能耗环保健康度 HE 和综合健康度 HD 取值均在 $[0, 100]$ 区间内。

1.2 催化重整装置健康等级划分

催化重整装置综合健康度 HD 取值为 $[0, 100]$,当取值为 0 时,表示装置处于最差的健康状态;取值为 100 时,表示装置处于最优的健康状态。使用四分法划分装置的综合健康状态等级,分别为健康、亚健康、故障边缘和故障^[20]。健康等级与装置健康状态的关系如表 1 所示。

表 1 催化重整装置健康状态等级划分

序号	取值范围	健康状态等级	健康状态描述
1	$80 \leq HD \leq 100$	健康	健康
2	$60 \leq HD < 80$	亚健康	正常
3	$40 \leq HD < 60$	故障边缘	接近故障边缘
4	$0 \leq HD < 40$	故障	故障

2 催化重整装置综合健康度的计算方法

2.1 健康度计算方法

催化重整装置各个子系统的健康度和装置综合健康度的计算方法如图 1 所示。首先计算控制回路小组健康度、

工艺单元健康度和工段健康度,再通过加权规则得到工艺分组健康度;安全联锁健康度计算采用扣分规则,装置内每条安全联锁预警时都会扣分,根据累计预警情况得到最终装置安全联锁健康度。能耗环保健康度基于能耗系统关键指标和废气回收系统的关键指标,通过线性映射得到能耗环保健康度。

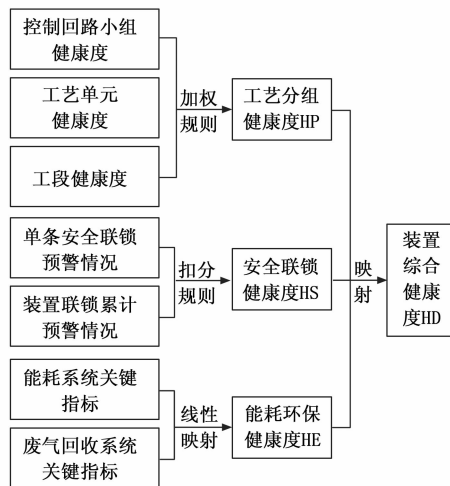


图 1 催化重整装置健康度计算方法图

2.2 工艺分组健康度的计算方法

2.2.1 关键工艺分组选取规则

不管是在简单化工过程还是在复杂化工过程中,影响产品质量和保证装置正常稳定生产的相关工艺参数均直接或间接地处于控制与监测范围内。装置健康度评价体系的关键工艺参数大部分包含于控制回路内,即能够反映装置健康状况的工艺参数与其关联的控制回路一一对应,找出关键的工艺参数的同时也找出了其对应的关键控制回路。

关键工艺分组的选取规则如下:

1) 故障原因。为保证装置正常稳定生产,需要对整个工艺装置频发故障的原因进行统计和分析,确定可反应装置处于故障状态的相关工艺变量。

2) 影响馏出口指标的相关工艺变量。完整的工艺过程通常可以分成多个简单的工艺工段,每个工段的产物质量和数量(即馏出口指标)都会对整个工艺的最终产品质量造成影响,因此,对于一个复杂工艺过程,分析影响馏出口指标的相关工艺变量即是对影响产品质量的相关工艺变量进行分析。

在工艺参数选取完成后,对催化重整装置的工艺按级进行划分并对核心参数进行分组,如图 2 所示。

2.2.2 工艺分组健康度打分规则

定义催化重整装置的工艺分组健康度为 HP ,根据上节内容,催化重整装置按照工段、工艺单元、控制回路小组可以分为 3 个层次,即按照工艺可以分为 N 个工段,每个工段可以分为 M 个工艺单元,每个工艺单元又包含 K 个控制回路小组。记工段为 P_1, P_2, \dots, P_N ,每个工段包含的

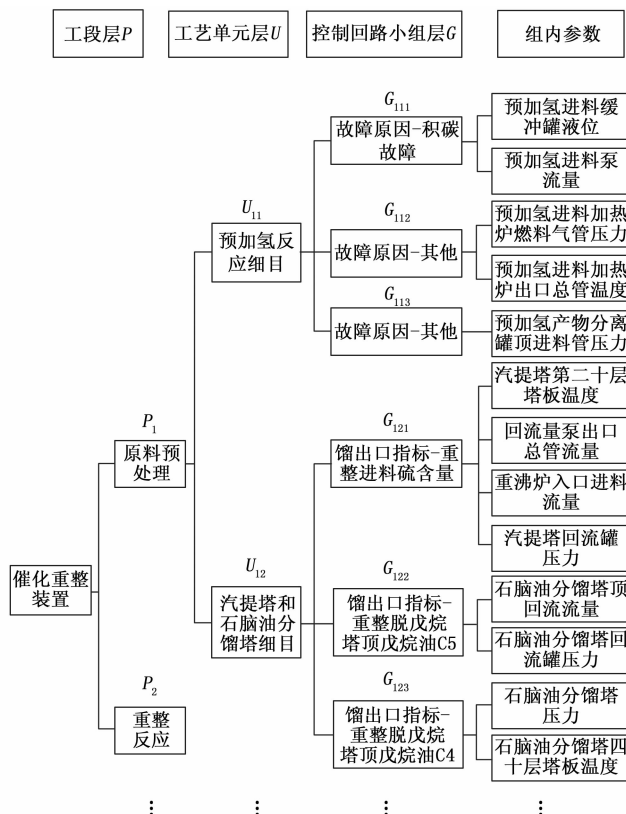


图 2 催化重整装置层级划分图

工艺单元记为 $U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{iM}$ (其中 $i=1, 2, \dots, N$), 每个工艺单元包含的控制回路小组记为 G_{ijk} (其中 $i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, K$) 每个控制回路小组 G_{ijk} 的得分与其权重 g_{ijk} 相乘, 得到工艺单元 $U_{i,j}$ 的分数:

$$U_{ij} = \sum_{k=1}^K g_{ijk} \cdot G_{ijk} \quad (2)$$

每个工艺单元 U_{ij} 的得分与相应权重 u_{ij} 相乘, 得到工段 P_i 的分数:

$$P_i = \sum_{j=1}^M u_{ij} \cdot U_{ij} \quad (3)$$

每个工段 P_i 的得分与相应权重 p_i 相乘, 最终得到工艺分组健康度 HP :

$$HP = \sum_{i=1}^N p_i \cdot P_i \quad (4)$$

其中: 权重 g_{ijk}, u_{ij} 和 p_i 通过层次分析法 (AHP) 计算得出, 且每个权重之和为 1, 即 $\sum_{k=1}^K g_{ijk} = 1, \sum_{j=1}^M u_{ij} = 1, \sum_{i=1}^N p_i = 1$ 。

2.2.3 层次分析法确定权重系数

层次分析法可以将复杂的问题整理成有序的递接层次结构, 通过专家的决策意见得出相同层级指标之间两两重要性的比较结果, 计算得出每个评价指标的权重, 从而将难以量化的定性决策一定程度上转化为定量分析^[21]。层次分析法降低了决策者主观判断的影响, 极大提高了决策的有效性、可靠性和可比性^[22]。

层次分析法确定各组长权的步骤如下:

1) 划定分析层次结构, 装置分为 3 个层级, 从上至下层次结构分别为工段层、工艺单元层和控制回路小组层。

2) 构造判断矩阵, 以预加氢反应细目 U_{11} 为例, 其相邻下级控制回路小组层次中的因素合集为 $\{G_{111}, G_{112}, G_{113}\}$, 通过两两比较得到 $b_{ij} = f(G_i/G_j)$ 。 b_{ij} 为要素 i 与要素 j 重要性比较结果, 判断矩阵元素 b_{ij} 的标度方法如表 2 所示。

表 2 判断矩阵标度表

因素 B_i 比因素 B_j	$b_{ij} = f(G_i/G_j)$ 取值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
两相邻判断的中间	2, 4, 6, 8

通过以上规则两两比较得到判断矩阵 B :

$$B = (b_{ij})_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{3} & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{7} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $b_{ij} = \frac{1}{b_{ji}}$, 当 $i=j$ 时, $b_{ij} = 1$ 。

3) 判断矩阵的一致性检验, 判断矩阵在满足判断逻辑的情况下是否取值合理^[23-24]。其最大特征值 λ_{max} 通过如下方程式求得:

$$|B - \lambda E| = 0 \quad (6)$$

计算得出 $\lambda_{max} = 3.07$, 根据式 (7) 求得判断矩阵 B 的一致性指标:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7)$$

式中, CI 为一致性指标, $n=3$, 计算得出 $CI=0.033$ 。不同矩阵阶数下一致性指标 RI 可依据表 3 查到。

表 3 不同矩阵阶数下 RI 取值

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.32	1.41

对判断矩阵进行一致性检验:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

式中, 当 $CR < 0.1$ 时, 则说明判断矩阵 B 满足条件, 计算得出 $CR=0.057$, 满足条件。

4) 确定权重向量并归一化, 根据判断矩阵 B , 求出其最大特征根 λ_{max} 所对应的特征向量 $W = [W_1 \ W_2 \ \dots \ W_n]^T$ 。方程如下:

$$BW = \lambda_{max} W \quad (9)$$

所求特征向量 W 经归一化, $W = [0.2828 \ 0.6434 \ 0.0738]^T$ 即为预加氢反应细目 U_{11} 下控制回路小组的权重分

配,即归一化的特征向量 W 对应式 (2) 中该控制回路小组权重 g_{ijk} 。

上述步骤为确定预加氢反应细目 U_{11} 工艺单元层次下各控制回路小组所对应的权重,多次利用层次分析法即可计算出所有工艺单元层次下控制回路小组的权重 g_{ijk} 。利用层次分析法确定工艺单元的权重 u_{ij} 和工段的权重 p_i 与计算控制回路小组的权重 g_{ijk} 步骤相同。

2.2.4 控制回路异常诊断与打分规则

工艺分组健康度评价的基础与核心在于控制回路小组的打分。为了对控制回路小组进行评分,则需采用相关技术对控制回路进行异常诊断,诊断结果结合预先设定的打分规则计算出控制回路小组的健康度分数。本文采用王珠团队^[25]提出的一种相关分析法—聚类—支持向量描述(SVDD, support vector data description)方法对控制回路进行异常诊断。

2.2.4.1 控制回路异常诊断技术

该故障诊断技术首先需要建立控制回路内部关于被控对象的模型,通过采集控制回路中测量变量(PV)和操纵变量(MV)的历史时序数据,将数据分段并对每段数据采用相关分析法辨识得到有限脉冲响应模型参数。其次,利用 K-means 聚类算法将辨识出的模型参数进行有效聚类。最后,针对每个类别下模型参数的数据集,利用支持向量数据描述 SVDD 方法训练并建立超球体,每个超球体对应一种工况,基于历史巡检数据对训练得到的超球体进行解释,确定超球体的实际意义。

控制回路异常诊断模型的输出结果为控制回路是否异常,若异常,将异常原因上报系统,其输出结果情况如下:

- 1) 正常。包含模型数量最多的类别定义为正常类;
- 2) 一般异常。包含数量较少的类别定义为工况异常,数量越少异常级别越高;
- 3) 显著异常。在线诊断结果不属于任何一类或执行机构或者检测仪表发生异常的情况。

2.2.4.2 控制回路小组打分规则

定义控制回路小组为 G_{ijk} , 设一个控制回路小组内共有 n 条控制回路,根据上节控制回路异常诊断模型的输出结果对每条控制回路进行打分,分别记为 C_1, C_2, \dots, C_n 。其中,正常状态的控制回路得到的分数最高记 3 分,一般异常状态的控制回路得到的分数次之,记 1 分,显著异常状态的控制回路得到的分数最低记 0 分。则可计算出控制回路小组的预警百分数(CP),先计算出控制回路小组的健康度得分占小组满分的比例,100%减去该比例即得到回路预警百分数,回路预警百分数的计算公式如下:

$$CP = \left(1 - \frac{C_1 + C_2 + \dots + C_n}{3n}\right) \times 100\% \quad (10)$$

其中: C_1, C_2, \dots, C_n 为单条控制回路的分数,取值范围包含 {0, 1, 3} 这 3 个值。

回路预警百分数可以作为一个指标,用于衡量控制回路小组的整体健康状况,当回路预警百分数较高时,说明

该控制回路小组内的控制回路大多处于异常状态,该控制回路小组的健康状况较差;当回路预警百分数较低时,说明该控制回路小组内的控制回路健康状况较好。控制回路小组是根据故障原因进行分组的,当回路预警百分数较高时说明该控制回路小组分组依据的故障原因出现的概率越高,反之亦然。

控制回路小组健康度依据回路预警百分数的情况打分,具体如表 4 所示。

表 4 控制回路小组打分表

序号	CP 取值范围	控制回路分数
1	$0 \leq CP < 20$	100~80
2	$20 \leq CP < 40$	80~60
3	$40 \leq CP < 60$	60~40
4	$60 \leq CP < 80$	40~20
5	$80 \leq CP < 100$	20~0

2.3 安全联锁健康度的计算方法

2.3.1 安全联锁触发的预警机制

一旦装置处于安全联锁系统的管控状态,便会对企业产生一定的经济利益损失^[26-27]。因此,需要对处于安全联锁系统监测中的关键工艺参数进行加强监控,并设置报警线。一旦关键参数超出波动范围,触发报警线,立即分析相关原因并及时上报系统,以便提前管控,避免不必要的损失。安全联锁触发的预警机制设置如下:

- 1) 建立 SIS 输入参数的有效预警区间(接近实际安全联锁触发值但尚未触发的区间);
- 2) 在催化重整装置健康度软件端复现催化重整装置的完整安全联锁逻辑;
- 3) 实现安全联锁接近触发前的整条逻辑线有效预警,并对异常原因进行定位(关键参数位号的潜在故障预警)。

2.3.2 安全联锁健康度打分规则

定义催化重整装置的安全联锁健康度为 HS , 设装置共有 L 条安全联锁,其分值分别记为 S_1, S_2, \dots, S_L 。安全联锁健康度采用扣分法进行评分,满分为 100 分。当安全联锁回路触发预警时扣分,不触发时不扣分,若扣分值累计超过 100 分则安全联锁健康处于最差情况,此时取最低分 0 分。综上所述,催化重整装置安全联锁健康度指标 HS 可以表示为:

$$HS = \begin{cases} 100 - (S_1 + S_2 + \dots + S_L), & (S_1 + S_2 + \dots + S_L) < 100 \\ 0, & (S_1 + S_2 + \dots + S_L) > 100 \end{cases} \quad (11)$$

式中, $(S_1 + S_2 + \dots + S_L)$ 为催化重整装置所有安全联锁累计扣分值之和。

催化重整装置中每一条安全联锁都是关键联锁,安全联锁健康大部分情况应该都是满分,只有极特殊的情况才会达到预警触发值,当安全联锁健康度指标 HS 位于预警触发值区间时表示装置处于很危险的情况。将安全联锁按

照重要性程度分为 3 种, 不同重要程度对应不同扣分值, 扣分情况如表 5 所示。

表 5 催化重整装置安全联锁扣分值

序号	联锁重要程度	扣分值
1	一般重要	20
2	次级重要	30
3	非常重要	40

2.3.3 单条安全联锁预警触发规则

选取单条联锁一年内正常工况运行下工艺参数实时值的中位数, 将中位数与触发值作差, 得到一个区间, 将该区间分为 5 段, 当联锁实时值位于接近联锁触发值的 1/5 区间内触发预警。其中, 以一年内正常工况运行下实时值的中位数作为安全联锁预警的参考基准, 这种选取方式可以减少异常值对安全联锁预警值的影响。预警区间选择接近联锁触发值的 1/5 区间, 这种区间划分方式可以避免一些小波动而导致的误报, 同时也能及时发现异常情况。预警区间的划分如图 3 所示。

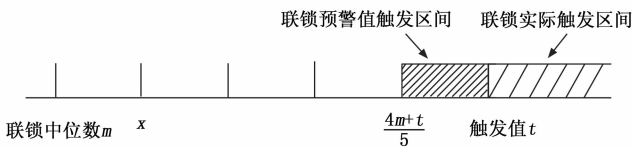


图 3 安全联锁预警触发区间划分图

图 3 中, m 为一年内正常工况运行下的联锁值中位数, t 为联锁触发值, x 为当前联锁的实时值。根据安全联锁预警规则, 将联锁中位数 m 至触发值 t 的区间 $[m, t]$ 分为 5 段, 靠近触发值 t 的区间 $[\frac{4m+t}{5}, t]$ 为联锁预警触发区间, 当联锁实时值 x 落在此区间内则表示联锁逻辑输入置 1。一条完整的安全联锁可能有多个输入信号, 输入信号经过逻辑控制器 (三取二逻辑、与或非等) 再到执行单元, 执行相关联锁动作。一个输入信号的逻辑输入置 1 不一定会触发联锁, 只有当该条联锁的执行单元动作时才表示触发联锁, 此时该条联锁会扣相应的分数。

2.3.4 安全联锁复现实例

以催化重整装置原料预处理工段下预加氢反应工艺单元的预加氢进料加热炉 F-101 联锁为例。该条联锁设置 3 台流量变送器和 3 台压力变送器, 3 台流量变送器组成三取二的流量低低联锁, 3 台压力变送器组成三取二压力低低联锁。当 3 台流量变送器中任何两个或以上达到设定流量低低值或 3 台压力变送器任何两个或以上达到压力低低设定值时, 联锁触发执行停预加氢进料加热炉 F-101 操作。联锁逻辑如图 4 所示。

经查询, 预加氢循环氢流量低低一年内正常工况运行下的联锁值中位数为 24 000 标立方米每小时 (Nm^3/h), 联锁实际触发值为 9 862 Nm^3/h , 按照预警触发规则, 计算出 $[9\ 862, 12\ 689]$ 为流量低低联锁预警区间; 长明灯燃料气

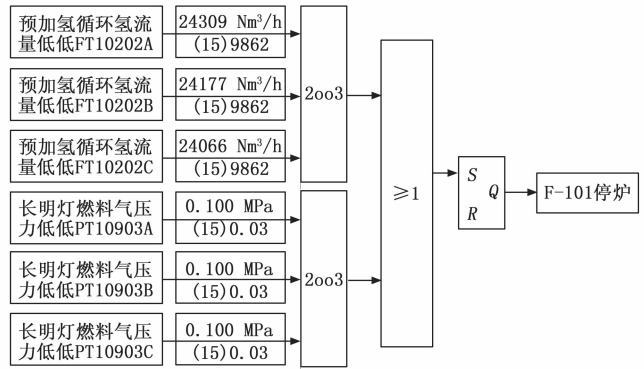


图 4 预加氢进料加热炉 F-101 安全联锁逻辑图

压力低低一年内正常工况运行下的联锁值中位数为 0.1 MPa, 联锁实际触发值为 0.03 MPa, 计算出 $[0.03, 0.044]$ 为压力低低联锁预警区间。在 C# 健康度软件端根据预警机制复现该条联锁的伪代码如下所示:

Begin

1) 获取 3 台流量变送器和 3 台压力变送器的实时测量值

```
int[] flowValues = new int[3];
int[] pressureValues = new int[3];
for (int i = 0; i < 3; i++)
{
    flowValues[i] = 获取流量变送器测量值(i);
    pressureValues[i] = 获取压力变送器测量值(i);
}
```

2) 判断联锁逻辑 (2oo3)

```
bool flowLowLow =
((flowValues[0] <= 12689 && flowValues[1] <= 12689) ||
(flowValues[0] <= 12689 && flowValues[2] <= 12689) ||
(flowValues[1] <= 12689 && flowValues[2] <= 12689));
bool pressureLowLow =
((pressureValues[0] <= 0.044 && pressureValues[1] <= 0.044) ||
(pressureValues[0] <= 0.044 && pressureValues[2] <= 0.044) ||
(pressureValues[1] <= 0.044 && pressureValues[2] <= 0.044));
```

3) 执行联锁控制并计算安全联锁健康度 HS

```
if (flowLowLow || pressureLowLow)
{
    触发联锁控制信号, 执行停预加氢进料加热炉 F-101 操作;
    HS = HS - 30; // 计算安全联锁健康度;
}
else
{
    取消联锁控制信号;
}
END
```

2.4 能耗环保健康度的计算方法

化工企业在生产的过程中会产生大量的工业废水、废气，而这种工业废水、废气中含有大量有毒物质和重金属，对环境造成的危害较大^[28-29]。因此，能耗环保也是炼化装置健康度评价的一个重要指标。能耗环保打分标准依据国标，《炼油单位产品能源消耗限额》(GB 30251-2013)^[30]和《石油炼制工业污染物排放标准》(GB 31570-2015)^[31]。能耗环保健康度的计算主要依据化工企业能耗系统和废气回收系统内部的关键指标，在装置生产一定质量数量的产品时，取能耗最低、废气回收效率最高时的能耗环保健康度为 100 分，取能耗最高、废气回收效率最低时的能耗环保健康度为 0 分，其他分数可通过线性映射的方法对应计算得到。能耗环保健康度 HE 计算如下式：

$$HE = \begin{cases} 100, & x < m \\ 100 \left(\frac{x-t}{m-t} \right), & m \leq x < t \\ 0, & x \geq t \end{cases} \quad (12)$$

式中， m 为能耗环保指标由满分开始下降的临界点， t 为指标降低为 0 分的点， x 为指标当前的实时值。

由函数图像表述，如图 5 所示。

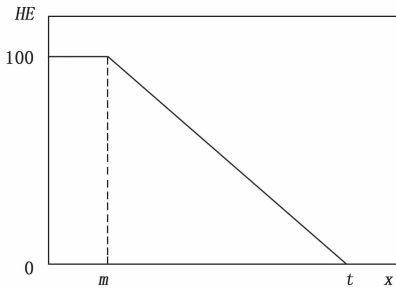


图 5 能耗环保指标得分计算函数

3 催化重整装置健康度评价仿真与实现

3.1 健康度评价部署

催化重整装置健康度评价软件采用 C# 语言开发，其中评价规则等算法写在后台计算程序中，利用 Windows Forms 技术进行前端界面设计，数据的存储与管理采用关系型数据库 SQL Server。为实现催化重整装置健康度的实时计算功能，需要跟不同的系统进行数据交互，通过 API 接口等方式将数据源读取至健康度服务器的数据库，利用服务器查询，并从中调取特定时间间隔内的最新数据计算当前时刻催化重整装置的健康度。其中，不同系统交互的数据有如下几种：

- 1) 工艺分组实时数据，将回路在线预警软件输出的关键控制回路异常情况与异常等级写入健康度软件数据库，用于计算工艺分组健康度；
- 2) 安全联锁实时数据，读取 SIS 系统中关键工艺参数的实时值，用于计算安全联锁健康度；
- 3) 能耗环保实时数据，工厂内目前已有一套能耗环保系统，实时读取该系统的指标并写入催化重整装置健

康度的数据库内，用于计算能耗环保健康度。

3.2 健康度评价实现

催化重整装置健康度评价主界面如图 6 所示。右侧界面上端显示目前安全联锁是否触发，界面下方用柱状图直观地展示装置当前与历史健康度趋势。上方界面为故障预警信息提示，点击“查看”按钮可以详细查看故障原因。



图 6 催化重整装置健康度软件界面

图 6 中的 3 个选项卡，“控制回路故障预警”、“安全联锁故障预警”和“能耗环保故障预警”点开后将弹出关于该选项异常原因深入分析的子界面。

1) 控制回路故障预警子界面，显示诊断结果、诊断解释、原因列表等内容。具体包括异常控制回路所涉及工艺分组（同时给出组别异常原因及出现概率），此概率为控制回路小组的预警百分数 CP 。关于该界面显示的控制回路故障预警，针对的是回路中被控对象动态特性异常的报警，该报警的产生应该在现场已有位号报警线触发之前就产生，是对潜在性故障的提前性预警，目的是提前发现工况的异常或者关键设备的潜在性故障，与现场已有位号报警系统并不冲突，两者是相辅相成的关系。

2) 安全联锁故障预警子界面，显示预警联锁的联锁位号、诊断结果、联锁触发的执行机构信息。具体包括引起整条逻辑线预警的工艺参数实时值与预警线，以及该条逻辑线的重要性陈述。

3) 能耗环保故障预警子界面，显示异常关键指标实时值以及分数等，并给出相关指标影响健康度的分析结果。

3.3 健康度软件参数整定

在软件测试阶段若发现设定的打分规则不合理，则需对软件内部计算规则的相关参数进行整定，直至软件根据历史信息得到的异常提示、诊断信息、装置健康度分值具有合理化解释时即表示装置健康度评价模型训练完成。

工艺分组健康度评价规则中，可整定的相关参数有各层次的权重系数、控制回路小组打分的分值设置、回路预警百分数映射到工艺分组的分值；安全联锁健康度评价规则中，可调整安全联锁预警触发的区间范围和安全联锁预

警触发时扣分的分值; 能耗环保健康度评分规则中, 可调整关键指标预警的区间范围和分数映射方法。

4 结束语

本文从装置一级出发, 提出了一种针对催化重整装置的综合健康评价体系, 该评价体系由工艺分组健康度、安全联锁健康度和能耗环保健康度共同构成。其中工艺分组健康度采用相关分析法、K-means 聚类和支持向量数据描述 (SVDD) 对控制回路进行故障诊断, 结合层次分析法和专家系统中的产生式规则计算得出, 既考虑了单条控制回路的影响又考虑了不同控制回路之间耦合性的影响。与传统故障诊断方法不同, 本文创新性地提出了安全联锁故障预警的打分规则, 设置报警线, 对安全联锁系统进行预警, 提前管控, 以免装置进入安全联锁监控状态造成经济损失。

本文提出的装置健康度评价体系侧重于发现关键控制回路与关键联锁在长期运行过程中的潜在异常或故障, 将这些潜在安全隐患及时报送, 做出有效的在线故障预警, 并执行工艺操作优化及巡检维护。最后, 将该评价体系部署到某炼化厂催化重整装置, 仿真结果验证了该评价体系的合理性和有效性, 有助于提高装置的安全有效运行, 降低维护成本, 提高生产效率。

参考文献:

[1] 宋 冰, 马玉鑫, 方永锋, 等. 基于 LSNPE 算法的化工过程故障检测 [J]. 化工学报, 2014, 65 (2): 620-627.

[2] 边双微. 田纳西-伊斯曼化工过程的故障诊断 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[3] 戴一阳, 赵劲松, 陈丙珍. 化工过程混合故障诊断系统的应用 [J]. 化工学报, 2010, 61 (2): 342-346.

[4] 胡瑾秋, 张来斌, 王安琪. 基于格兰杰因果关系检验的炼化系统故障根原因诊断方法 [J]. 石油学报 (石油加工), 2016, 32 (6): 1266-1272.

[5] 文成林, 吕菲亚, 包哲静, 等. 基于数据驱动的微小故障诊断方法综述 [J]. 自动化学报, 2016, 42 (9): 1285-1299.

[6] 刘 俊. 基于机器学习的工业过程故障诊断 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

[7] CHEN X Y, YAN X F. Fault diagnosis in chemical process based on self-organizing map integrated with Fisher discriminant analysis [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2013, 21 (4): 382-387.

[8] 邓 勇, 师奕兵. 基于相关分析的非线性模拟电路参数型故障诊断方法 [J]. 控制与决策, 2011, 26 (9): 1407-1411.

[9] 马丽萍, 石炎福, 余华瑞. 小波分析及其在化工信号分析处理中的应用及展望 [J]. 化工进展, 2005, 10 (2): 147-153.

[10] ZHANG Z Q, WU C G, ZHANG B K, et al. SDG multiple fault diagnosis by real-time inverse inference [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 87 (2): 173-189.

[11] VENKATASUBRAMANIAN V, CHAN K. A neural network methodology for process fault diagnosis [J]. AIChE Journal,

1989, 35 (12): 1993-2002.

[12] 全 权, 崔 根, 赵峙尧, 等. 面向复杂系统健康评估的若干思考 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2023, 53 (3): 601-628.

[13] EMRAN B J, NAJJARAN H. A review of quadrotor: an underactuated mechanical system [J]. Annual Reviews in Control, 2018, 46 (4): 165-180.

[14] QUAN Q, CUI G, DU G X. Controllable probability and optimization of multicopters [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 119 (5): 110-122.

[15] 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.

[16] 张炳江. 层次分析法及其应用案例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.

[17] 李彦锋. 复杂系统动态故障树分析的新方法及其应用研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[18] CAI K Y. Variable-structure coherent systems [J]. International Journal of General Systems, 2005, 34 (6): 639-672.

[19] 冯志刚, 王 祁. 基于模糊数据融合的液氢供应系统健康评价方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2006, 36 (5): 751-756.

[20] 曹正洪, 沈继红. 基于模糊集理论的传感器健康度评价方法 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14 (5): 79-83.

[21] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18 (5): 148-153.

[22] KVASSAY M, ZAITSEVA E, LEVASHENKO V, et al. Binary decision diagrams in reliability analysis of standard system structures [C] // International Conference on Information and Digital Technologies. IEEE, 2016: 164-172.

[23] 蒋丽英, 王 蕾, 席剑辉. 航空发动机磨损趋势变权重组合预测技术研究 [J]. 计算机工程与应用, 2011, 47 (28): 228-231.

[24] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2000.

[25] 王 珠, 吴岩松, 王少贤, 等. 炼化装置中检测仪表与执行机构的异常诊断 [J]. 化工自动化及仪表, 2023, 50 (1): 88-94.

[26] 袁汉福, 王睿熙, 隋永芳, 等. 联锁逻辑图中复位开关的设计应用 [J]. 流程工业, 2022, 9 (10): 36-38.

[27] KLEIN M. The value of safety instrumented systems [J]. Chemical Engineering, 2019, 126 (3): 50-51.

[28] 阚子建. 化工企业废水处理现状及处理工艺研究 [J]. 化工管理, 2022, 10 (27): 27-29.

[29] 王志朴, 刘艳升, 张海兵. 面向化工专业的《水污染控制工程》课程教学改革探索 [J]. 广东化工, 2021, 48 (7): 245-246.

[30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 炼油单位产品能源消耗限额: GB 30251-2013 [S]. 北京: 质检出版社, 2013.

[31] 国家环境保护总局. 石油炼制工业污染物排放标准: GB 31570-2015 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.