

## 基于模糊操作模式的砷盐除钴过程操作参数协同优化

伍铁斌<sup>1,2</sup> 阳春华<sup>1</sup> 李勇刚<sup>1</sup> 朱红求<sup>1</sup> 桂卫华<sup>1</sup>

**摘要** 针对湿法炼锌砷盐除钴过程工况变化频繁和操作参数之间具有强耦合关系, 导致操作参数优化困难的问题, 提出了一种基于模糊操作模式的操作参数协同优化方法. 根据大量的砷盐除钴工业运行数据, 提炼初始操作模式库, 根据入口工况参数, 采用模糊匹配方法检索出相似操作模式, 在操作模式重用时综合考虑系统参数缓慢变化和资源消耗的特点, 然后采用灰色模糊最小二乘支持向量机 (Least squares support vector machine, LSSVM) 评估操作模式重用后的操作参数的可行性, 并根据评估结果采用模糊专家规则修正操作参数. 在工况发生变化时, 系统能自动优化设定操作参数. 工业验证结果表明, 本文提出的操作参数协同优化方法保证了生产稳定, 可有效提高净化后溶液中钴离子浓度的合格率和降低锌粉的消耗.

**关键词** 操作模式, 操作参数, 协同优化, 模糊, 评估

**引用格式** 伍铁斌, 阳春华, 李勇刚, 朱红求, 桂卫华. 基于模糊操作模式的砷盐除钴过程操作参数协同优化. 自动化学报, 2014, 40(8): 1690–1698

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2014.01690

## Fuzzy Operational-pattern Based Operating Parameters Collaborative Optimization of Cobalt Removal Process with Arsenic Salt

WU Tie-Bin<sup>1,2</sup> YANG Chun-Hua<sup>1</sup> LI Yong-Gang<sup>1</sup> ZHU Hong-Qiu<sup>1</sup> GUI Wei-Hua<sup>1</sup>

**Abstract** In the process of cobalt removal with arsenic salt in zinc hydrometallurgy, since the work conditions change frequently and the operating parameters couple strongly, it is difficult to optimize the operating parameters. To solve the problem, a method of operating parameters collaborative optimization based on fuzzy operational-pattern is proposed. The initial operational-pattern library is abstracted from the abundant industrial operating data of the cobalt removal process. A fuzzy matching method is adopted to search for similar operational-patterns according to the entrance working parameters. When the operational-pattern is reused, the slow change of system parameters and the characteristics of energy consumption should be considered comprehensively. Then the gray fuzzy least squares support vector machine (LSSVM) is used to evaluate the feasibility of operation parameter after reusing, and the operating parameters will be modified by fuzzy expert rules according to the evaluation result. When the working conditions change, the system can optimize and set the operating parameters automatically. The industrial test results show that the proposed operating parameters collaborative optimization method can ensure a stable production process running increase the qualified rate of outlet cobalt concentration, and help reduce zinc consumption effectively.

**Key words** Operational-pattern, operating parameters, collaborative optimization, fuzzy, evaluation

**Citation** Wu Tie-Bin, Yang Chun-Hua, Li Yong-Gang, Zhu Hong-Qiu, Gui Wei-Hua. Fuzzy operational-pattern based operating parameters collaborative optimization of cobalt removal process with arsenic salt. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 1690–1698

收稿日期 2013-06-17 录用日期 2013-12-31  
Manuscript received June 17, 2013; accepted December 31, 2013

国家自然科学基金 (61174133, 61273159, 61273185), 国家杰出青年科学基金 (61025015), 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAF03B05) 资助

Supported by National Natural Science Foundation (61174133, 61273159, 61273185), National Science Fund for Distinguished Young Scholars of China (61025015), and National “Twelfth Five-Year” Plan for Science & Technology Support (2012BAF03B05)

本文责任编辑 宋士吉

Recommended by Associate Editor SONG Shi-Ji

1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083 2. 湖南人文科技学院机电工程系 娄底 417000

1. School of Information Science and Engineering, Central

湿法炼锌过程中, 硫酸锌溶液中钴离子浓度过高会引起锌电解“烧板”, 显著降低电流的效率<sup>[1]</sup>. 砷盐净化除钴是通过添加锌粉、砷盐和硫酸锌溶液电解后的废硫酸 (简称“废酸”), 将硫酸锌溶液中的钴离子浓度降到适合电解的程度; 其中锌粉是影响砷盐除钴过程生产成本最主要的因素, 因此, 在保证钴离子浓度达标的同时, 要尽可能降低锌粉消耗. 文献 [2] 研究证明了砷盐除钴中钴离子以 CoAs 合金

South University, Changsha 410083 2. Department of electrical and Mechanical Engineering, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000

的形式沉淀, 当没有砷盐或砷盐浓度很低的情况下, 即使大量添加锌粉, 除钴效果也非常差; 文献 [3] 研究了在温度、锌粉添加量等固定的情况下, 不同砷盐添加量的除钴效果; 文献 [4] 通过实验证明了砷盐能提高除钴的效率; 适量的砷盐能促进钴离子的沉淀和抑制钴的复溶. 文献 [2-4] 从机理的角度研究了砷盐与锌粉的作用, 砷盐与锌粉对净化除钴的影响具有很强的耦合性, 仅单一考虑锌粉或砷盐的添加量的优化, 都难以取得好的除钴效果和有效的节约锌粉. 目前, 有文献研究了净化除钴过程单一操作参数—锌粉的优化<sup>[5]</sup>. 针对具体的复杂工业过程, 一般采用不同的优化控制方法<sup>[6-9]</sup>, 如文献 [8] 采用基于多目标评估的混合智能控制算法控制竖炉焙烧过程, 文献 [9] 将操作模式优化方法应用于铜闪速熔炼过程, 都取得了很好的应用效果; 这些优化控制方法对砷盐净化除钴过程的优化具有重要借鉴意义.

砷盐除钴过程环境恶劣, 关键工艺指标—钴离子浓度难以在线检测, 而钴离子浓度与操作参数氧化还原电位 (Oxidation-reduction potential, ORP) (根据溶液的 ORP 检测值控制锌粉添加, 见第 1 节)、砷盐、废酸添加量之间具有强非线性的关系, 并且随入口工况参数除铜后液流量、杂质离子浓度等的变化而呈非线性变化; 操作员根据砷盐净化除钴过程入口工况参数优化设定 ORP、砷盐、废酸等操作参数, 操作参数设定是否合理取决于操作员的经验. 由于受设备、前后工段和企业生产目标等的影响, 除钴反应器入口的除铜后溶液流量频繁、大幅度波动; 并受国内资源条件的制约, 矿源复杂, 经常出现溶液中铜、钴等杂质离子大幅度波动; 操作参数 ORP 和砷盐之间具有强耦合、非线性的关系, 并且前、后除钴反应器之间有强耦合关系, 造成操作员难以及时或正确地调整操作参数设定值, 可能造成锌粉消耗过高或关键工艺指标不达标. 单操作参数优化无法保证砷盐除钴过程优化运行, 因此, 必须进行操作参数协同优化.

针对砷盐除钴过程的复杂性, 本文提出了基于模糊操作模式的砷盐添加量和 4 个反应器的 ORP 协同优化方法. 通过对砷盐除钴机理的深入研究, 并结合工业生产实际情况, 研究提出了砷盐添加量的方程式, 降低了砷盐添加的盲目性. 根据实际生产中积累的大量工业运行数据, 提炼出初始操作模式; 并根据入口工况条件参数, 匹配出相似的操作模式, 考虑到砷盐净化除钴工段强腐蚀性的恶劣环境, 导致系统参数随时间发生变化, 造成相同工况下最优

操作参数发生漂移, 并考虑各操作模式的锌粉消耗不一样, 在操作模式重用时对不同时间和不同锌粉消耗的操作模式解赋予不同的加权值, 增强了重用结果的可靠性, 并为降低锌粉消耗创造了条件. 由于关键的工艺指标—钴离子浓度不能在线检测, 而且砷盐除钴为大时滞过程, 所以必须评价重用后的操作参数的合理性, 本文采用灰色模糊最小二乘支持向量机 (Least squares support vector machine, LSSVM) 预估在该操作参数下工艺指标是否达标, 然后根据预估结果采用模糊专家规则修正效果不理想的操作参数. 工业验证结果表明, 本文提出的操作参数协同优化方法保证了生产的稳定, 提高了出口钴离子的合格率, 并降低了锌粉的消耗.

## 1 砷盐净化除钴过程分析

砷盐除钴工艺流程如图 1 所示. 通过向第一个反应器添加砷盐和返回浓密机底流, 以及向 4 个反应器中连续添加锌粉; 使得钴离子浓度呈梯度下降.

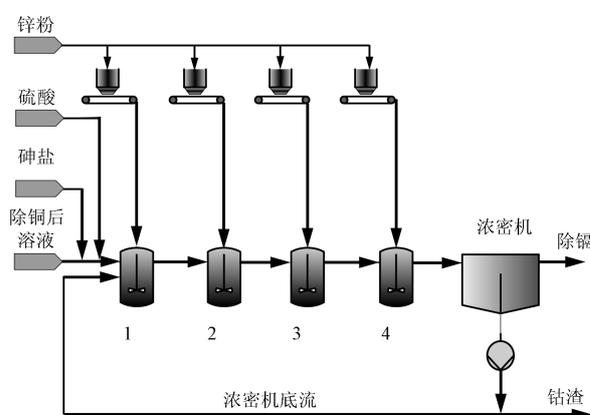


图 1 砷盐净化除钴工艺流程

Fig. 1 The process of cobalt remove with arsenic salt

砷盐除钴过程中影响因素多, 下面分为操作参数和入口工况参数两大类进行分析.

影响砷盐除钴的操作参数主要有:

### 1) 锌粉添加量

影响锌粉消耗的主要因素是溶液中的砷盐、铜离子和钴离子等杂质离子, 由于除铜后溶液流量、溶液中杂质离子浓度和砷盐添加量的大幅度波动, 造成锌粉添加量难以优化设定; 经常出现关键工艺指标—钴离子浓度不达标和锌粉浪费严重的情况.

奥托昆普研究得出砷盐除钴属于氧化还原反应, 可以通过氧化还原电位 (ORP) 控制锌粉的添加<sup>[10]</sup>; 相同条件下, 锌粉添加得越多, ORP 越负, 溶液还原能力越强, 除钴效率越高; 但当 ORP 太负时, 会大

量生成氢气和剧毒气体  $\text{AsH}_3$ , 且氢离子与钴离子是竞争还原的关系, 会导致除钴效果较差. ORP 能实时检测, 采用 ORP 控制锌粉的添加, 在很大程度上克服了锌粉添加的盲目性.

但是 ORP 是混合电位<sup>[11]</sup>, 受溶液温度、铜、钴离子浓度、砷盐等因素的影响; 而且 4 个反应器 ORP 的不同优化设定值 (决定了各个反应器的锌粉添加量), 即使在总的锌粉添加量相同的情况下, 除钴效果也可能有较大的区别. 因此, 优化设定 4 个反应器的 ORP 仍然困难.

## 2) 砷盐添加量

合适的砷盐添加量能显著提高除钴效率; 但是砷盐还原时消耗锌粉, 添加太过量会增大锌粉的消耗, 而且会抑制钴离子还原, 造成钴镍渣处理变得困难; 而添加过少又不利于除钴, 会出现已经沉淀的钴复溶, 甚至造成大量添加锌粉 (ORP 特别负) 也无法有效除钴的情况, 同样会造成锌粉的浪费.

显然, ORP 和砷盐的添加量之间具有强耦合、非线性的关系, 只有同时进行优化, 才能在保证钴离子浓度达标的同时, 最大限度地节约锌粉.

为防止砷盐的盲目添加, 根据工业运行数据和砷盐除钴机理 (钴、镍离子被还原后与砷结合生成  $\text{CoAs}$ 、 $\text{NiAs}$  的合金, 铜离子一部分被还原生成单质  $\text{Cu}$ , 一部分被还原后与砷结合生成  $\text{Cu}_3\text{As}$ <sup>[4]</sup>), 研究建立了如式 (1) 所示的砷盐添加方法:

$$n_{\text{As}} = \alpha \times \left( \frac{1}{3} n_{\text{Cu}} \right) + n_{\text{Co}} + n_{\text{Ni}} \quad (1)$$

其中,  $n_{\text{Cu}}$ 、 $n_{\text{Co}}$  和  $n_{\text{Ni}}$  分别为单位时间内随除铜后溶液流入反应器的铜、钴和镍离子总的摩尔量;  $n_{\text{As}}$  表示单位时间内所需要的砷的摩尔量;  $\alpha$  为调节系数 ( $30\% \leq \alpha \leq 90\%$ ).

根据铜离子浓度与除铜后溶液流量和其他入口工况参数优化设定调节系数  $\alpha$ , 保证适量的砷盐添加量, 由于砷盐添加量与锌粉添加量具有耦合关系, 因此, 该系数仍然难以确定.

此外, 硫酸添加量 (硫酸添加量控制见文献 [12]) 与浓密机底流返回流量 (根据除铜后液流量按比例控制浓密机底流返回流量) 对砷盐除钴也有影响.

影响砷盐除钴过程的入口工况参数有:

### 1) 铜离子

Fugleberg 的研究表明, 溶液中适量的铜离子对除钴反应有利<sup>[10]</sup>. 但是铜离子浓度太高时, 会抑制钴离子的还原; 铜离子过少, 生成的新鲜合金  $\text{Cu}_3\text{As}$  过少, 造成除钴效率显著降低; 因此, 当铜离子浓度特别大时, 砷盐调整系数  $\alpha$  取较小的值, 反之, 取较

大的值, 保证合适的砷盐添加量, 弥补铜离子不足的影响; 铜离子是影响砷盐调整系数  $\alpha$  最主要的因素之一. 铜离子浓度远大于其他杂质离子的浓度 (杂质离子浓度每 2 个小时化验一次), 是影响锌粉消耗的重要因素.

### 2) 除铜后溶液流量

砷盐除钴反应器入口的溶液中, 除铜后溶液流量远大于其他溶液流量, 它的大小直接影响净化除钴时间的长短, 因此, 流量越大, 相同条件下, ORP 设定值必须越负, 保证溶液的还原能力足够的强, 在较短时间内将钴离子浓度降至符合电解要求的浓度, 反之, ORP 优化设定值可以相对正些, 减小锌粉的消耗; 另外, 除铜后溶液流量越大, 单位时间内进入除钴反应器的铜、钴和镍等杂质离子越多, 将极大地影响砷盐、锌粉的添加量, 对废酸的添加量和底流返回量也有非常大的影响.

此外, 除铜后溶液的温度、溶液中的镍离子<sup>[4]</sup>也影响钴离子的还原.

根据以上分析知, 砷盐除钴过程入口工况参数的频繁、大幅度的波动和操作参数之间强耦合、非线性关系, 使得操作参数优化设定非常困难.

## 2 基于模糊操作模式的操作参数协同优化

### 2.1 砷盐除钴过程操作参数协同优化框架

基于模糊操作模式的操作参数协同优化框架如图 2 所示. 图中,  $I$  为入口的工况参数, 分别为: 除铜后溶液流量 ( $i_1$ , 单位:  $\text{m}^3/\text{h}$ )、除铜后溶液中铜离子浓度 ( $i_2$ , 单位:  $\text{mg}/\text{L}$ )、钴离子浓度 ( $i_3$ , 单位:  $\text{mg}/\text{L}$ )、镍离子浓度 ( $i_4$ , 单位:  $\text{mg}/\text{L}$ )、溶液温度 ( $i_5$ , 单位:  $^\circ\text{C}$ );  $\gamma^*$  为工艺指标—钴离子浓度目标值,  $\tilde{p}(t)$  为操作参数—砷盐与 4 个反应器 ORP (单位:  $\text{mV}$ ) 的预设设定值 ( $\tilde{p}_1(t) - \tilde{p}_5(t)$ ),  $p(t)$  为优化设定值.

### 2.2 基于模糊操作模式的操作参数预设设定

#### 1) 操作模式定义

考虑到砷盐除钴过程不仅要保证工艺指标达标, 而且要尽可能地减小锌粉的消耗, 本文将生产过程的资源消耗引入操作模式.

**定义 1.** 在某工况条件下 ( $L$  维)、对应的操作参数 ( $m$  维) 和相应的资源消耗 (1 维) 组成一个操作模式, 即:

$$Q_k = [I_k^T, P_k^T, EC_k^T, H_k^T]^T = [i_{1,k}, \dots, i_{L,k}, p_{1,k}, \dots, p_{m,k}, eC_{1,k}, h_{1,k}]^T \quad (2)$$

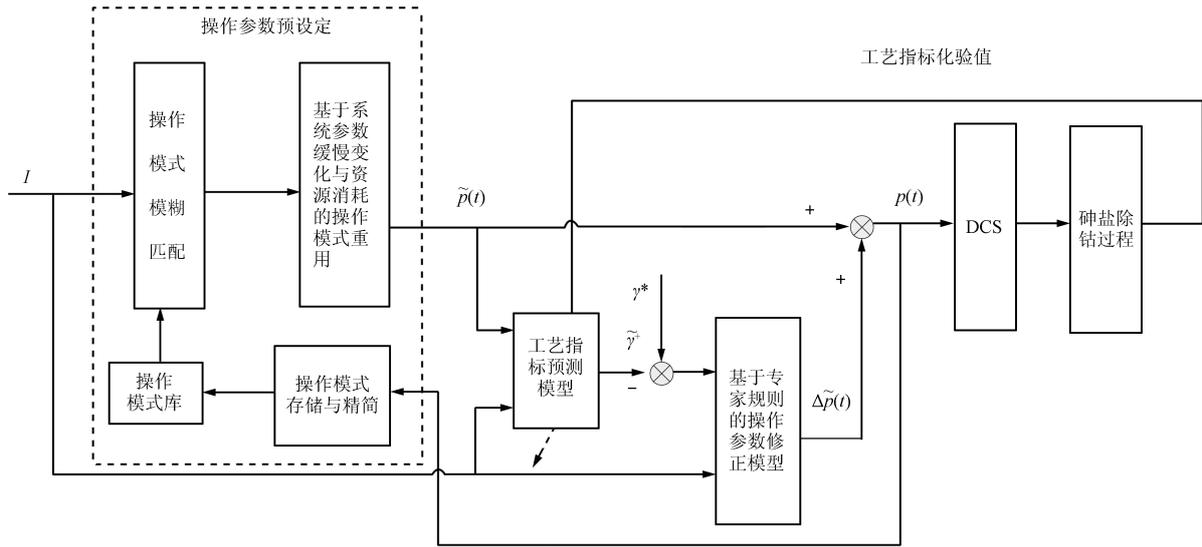


图 2 神盐除钴过程操作参数协同优化框架

Fig. 2 Operating parameters collaborative optimization framework of purification-cobalt with arsenic salt

其中,  $I^T$  表示某工况条件,  $P^T$  为操作参数,  $EC^T$  表示资源消耗,  $H^T$  表示操作模式产生的时间,  $Q_k$  表示第  $k$  个操作模式,  $k = 1, \dots, K$ ,  $K$  为操作模式的数量。

操作模式库的构造是操作模式优化中至关重要的一步。根据实际生产数据和专家经验, 选取除铜后液流量等 5 个变量为操作模式的工况条件参数; 操作参数为神盐添加量和 4 个反应器的 ORP 设定值; 资源消耗为 4 个反应器锌粉添加量的总和 (单位时间内消耗的神盐的成本不足锌粉的 1/50, 而且只有当神盐的添加量与 ORP 匹配合理时, 锌粉的消耗才可能达到较优, 所以在计算资源消耗时没有考虑神盐添加量), 经数据时序关系对应后将工况总结成操作模式的形式; 并根据实际生产中积累的大量工业运行数据, 提炼出初始操作模式, 完成操作模式库的构造。

### 2) 模糊操作模式匹配

操作模式中工况条件的描述与合理的推理方式, 是制约操作模式优化方法的重要因素。在解决问题时, 人们经常使用经验推理, 经验具有模糊性和启发性, 而操作模式优化方法本质上与人类的经验推理极为类似, 本身具有一定的模糊性, 而且神盐除钴过程中, 如离子浓度的大小、流量的大小, 都是相对的和模糊的, 因此, 在工况条件的描述与推理过程中都采用模糊的方法, 模糊的方法是解决一些不确定性描述的重要方法<sup>[13]</sup>, 模糊推理接近于人类解决问题最原始的思维方式, 可以弥补操作模式匹配时漏解

的缺陷、改善求解的质量, 满足复杂的实际问题优化的需要, 也是解决操作模式结构自适应的有效方法。

#### a) 模糊隶属度函数

本文采用容易计算、形状简单且与其他较复杂的隶属函数差别较小的三角形隶属函数。论域  $U$  到  $[0, 1]$  区间的任一映射  $\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{A}}(x) : U \rightarrow [0, 1]$ , 都确定  $U$  的一个模糊子集  $\tilde{A}$ ,  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  表示元素  $x (x \in \mathbf{R})$  属于模糊子集  $\tilde{A}$  的程度或等级,  $\tilde{A}$  是一个凸模糊集。模糊子集  $\tilde{A}$  的三角隶属度函数表述为

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (3)$$

#### b) 模糊操作模式表述

先将入口工况参数  $i_{l,k} (l = 1, 2, \dots, 5; k = 1, \dots, K)$  映射到一个标准化论域  $U$ , 隶属度函数用  $\mu_{\tilde{A}}(i_{l,k})$  表示,  $\tilde{A}_n \in \tilde{A} (n = 1, 2, \dots, N)$  是模糊语言变量的数目,  $\sum_{n=1}^N \mu_{\tilde{A}_n}(i_{l,k}) = 1$ 。本文模糊集  $\tilde{A}$  分为 7 个语言变量, 分别是  $\tilde{A}_1 = \text{NB}$  (负大),  $\tilde{A}_2 = \text{NM}$  (负中),  $\tilde{A}_3 = \text{NS}$  (负小),  $\tilde{A}_4 = \text{ZO}$  (零),  $\tilde{A}_5 = \text{PS}$  (正小),  $\tilde{A}_6 = \text{PM}$  (正中),  $\tilde{A}_7 = \text{PB}$  (正大), 如图 3 所示。

模糊操作模式的表述如下:

$$Q_k = [I_k^T, P_k^T, EC_k^T, H_k^T]^T = [\mu(i_{1,k}), \mu(i_{2,k}), \dots, \mu(i_{5,k}), p_{1,k}, \dots, p_{m,k}, e_{1,k}, h_{1,k}]^T \quad (4)$$

式中,  $\mu(i_{1,k}) = (\mu_{\tilde{A}_1}(i_{1,k}), \dots, \mu_{\tilde{A}_7}(i_{1,k}))$ ,  $\dots$ ,  
 $\mu(i_{5,k}) = (\mu_{\tilde{A}_1}(i_{5,k}), \dots, \mu_{\tilde{A}_7}(i_{5,k}))$ .

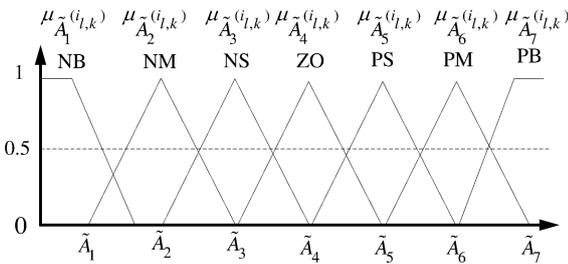


图3 模糊子集及隶属度函数

Fig. 3 Fuzzy subset and membership function

### c) 模糊操作模式匹配

根据模糊相似度来衡量当前工况条件与已有操作模式工况条件的相似程度, 匹配出符合要求的操作模式. 假设待求的操作模式的工况条件为  $I^I$  (Input case), 已有操作模式的工况条件模糊描述为  $I^R$  (Retrieved case), 本文研究提出如式 (5) 所示的模糊相似度计算方法.

$$\text{Sim}(F^I, F^R) = \sum_{l=1}^L w_l \left[ \left( \frac{1}{2} \times \sum_{n=1}^N (\mu_{\tilde{A}_n}(i_l^R) \wedge \mu_{\tilde{A}_n}(i_l^I)) \right) + \left( 1 - \frac{1}{2} \times \sum_{n=1}^N (\mu_{\tilde{A}_n}(i_l^R) \vee \mu_{\tilde{A}_n}(i_l^I)) \right) \right] \quad (5)$$

$w_l$  ( $\sum_{l=1}^L w_l = 1$ ) 为权重, 根据专家经验确定各工况参数的权重.

该模糊相似度计算方法采用了“与”和“或”算子, 综合了各特征变量在各模糊等级  $\tilde{A}_n$  上的高端信息与低端信息. 能很好地反映出两个模糊向量之间的相近程度.

将相似度大于某一个阈值的操作模式全部匹配出来 (如果检索出的操作模式小于  $Z$  个, 则将阈值减小 0.05, 直到搜索出  $Z$  个或者阈值小于 0.7).

一般情况下, 操作模式库中不存在与待求操作模式工况条件完全匹配的操作模式, 因此, 匹配出的操作模式的解不能直接作为待求操作模式的解, 必须对相似操作模式的解 (操作参数) 进行重用.

### 3) 面向参数缓慢变化与资源消耗的操作模式重用

砷盐除钴过程强噪音、强酸性和强腐蚀性的恶劣环境, 造成系统参数发生缓慢变化, 导致相同入口工况参数下的最优操作参数发生变化, 时间越久远

的操作模式借鉴意义越小<sup>[14]</sup>, 故应该赋予越小的权重; 另外, 资源消耗越大 (本文为 4 个反应器的锌粉消耗总和) 的操作模式应该赋予的权重越小, 以节约资源. 假设共匹配出  $R$  个操作模式, 那么第  $r$  个操作模式的权重  $\beta_r$  为

$$\beta_r = \lambda_1 \left( (1 - \varepsilon_1) \times \frac{T_R - T_r}{T_R} + \varepsilon_1 \right) + \lambda_2 \left( (1 - \varepsilon_2) \times \frac{e_{\max} - e_r}{e_{\max} - e_{\min}} + \varepsilon_2 \right) \quad (6)$$

其中, 与待求操作模式时间间隔最短的 (本文时间间隔以月为单位) 为  $T_1$  (定义  $T_1 = 0$ ),  $T_R$  表示离待求操作模式时间最远的案例;  $e_{\max}$  表示匹配出的操作模式中 4 个反应器锌粉消耗之和的最大值,  $e_{\min}$  表示锌粉消耗之和最小值;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \in [0, 1]$  的常数, 本文都取 0.35;  $\lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1]$  的常数 ( $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ ), 本文取相同权重 0.5.

假设在操作模式库中匹配到的  $R$  个案例对应的操作参数  $P_r = (p_{r,1}, p_{r,2}, p_{r,3}, p_{r,4}, p_{r,5})$ ; 待求操作模式的操作参数为  $P = (p_1, p_2, p_3, p_4, p_5)$ , 则

$$p_s = \frac{\sum_{r=1}^R \beta_r \times p_{r,s}}{\sum_{r=1}^R \beta_r}, \quad s = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

该操作模式重用综合考虑了砷盐除钴过程中的资源消耗和砷盐除钴系统参数缓慢变化的特点, 既保证了操作参数的有效性, 又可以使得资源消耗 (锌粉消耗之和) 最少.

由于砷盐除钴过程长流程和大时滞的特性, 操作参数对关键工艺指标钴离子浓度的影响不会立即生效, 如果将式 (7) 的操作参数作为设定值, 并根据当前的实际控制效果评估操作参数的可行性, 显然是不合理的, 将无法保证钴离子浓度达标和降低锌粉消耗; 如果根据出口的钴离子化验值评估操作参数的可行性, 具有很大的时滞性, 一旦出现钴离子浓度不达标, 将有大量硫酸锌溶液达不到电解的要求. 因此, 必须预估操作模式重用后的操作参数的可行性, 本文采用灰色模糊 LSSVM 预测 (灰色模糊 LSSVM 模型构建的详细步骤见文献 [15]) 最后一个反应器出口的钴离子浓度, 评估操作参数是否合理, 并根据预测的结果采用专家规则修正操作参数.

### 2.3 基于模糊专家规则的操作参数修正

由于砷盐除钴过程的长流程、非线性和过程的复杂性, 导致钴离子的预测值与实际值会存在一定误差, 而有些误差是在允许范围内的, 如果采用点优

化(即将某一个钴离子浓度作为优化点), 将导致频繁的调整操作参数设定值, 而砷盐除钴过程的复杂性和大滞后性并不允许频繁的调整操作参数设定值。因此, 本系统优化时采用区间优化, 根据出口钴离子浓度不超过 0.5 mg/L 的生产指标要求, 根据专家经验和生产数据统计分析得到一个最优的钴离子浓度区间 [0.42 mg/L, 0.48 mg/L]。

预测的钴离子浓度与最优钴离子浓度最优区间的偏差用  $\Delta\text{Co}^{2+}$  表示, 小于最优区间的下限时为负, 大于上限则为正。

如果偏差为正或负, 则采用专家规则对砷盐调整系数  $\alpha$  和 ORP (等同于锌粉) 的预设值进行修正,  $\alpha$  和 ORP 的修正量分别用  $\Delta\alpha$  和  $\Delta\text{ORP}$  表示。

由于钴离子浓度偏差  $\Delta\text{Co}^{2+}$  和  $\Delta\text{ORP}$  的大小是相对的、模糊的, 所以用模糊的语言来描述其大小。  $\Delta\text{Co}^{2+}$  的基本论域为 [0.21, 0.21] mg/L,  $\Delta\text{Co}^{2+}$  的基本论域为 [-9%, 9%],  $\Delta\text{ORP}$  的基本论域为 [-18, 18] mV。模糊化后都分别用 7 个模糊子集表示: [NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB], 其含义依次为“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正小”、“正中”和“正大”。模糊隶属度函数都选取常用的“三角隶属度函数”。

由于砷盐除钴的效果不仅与操作参数有关, 还与入口工况参数相关, 因此, 在进行操作参数修正时, 不仅要考虑钴离子浓度预测值与钴离子浓度最优区间的偏差, 还要考虑影响大、变化频繁的入口工况参数——除铜后液流量与溶液中的铜离子浓度; 为便于表述和理解, 用语言变量 Small、Medium 和 Large 描述入口工况参数中除铜后溶液流量 (Flow\_Cu) 和铜离子浓度 ( $\text{Cu}^{2+}$ ) 的大小, 分别对应除铜后溶液流量 [100, 180]、(180, 260] 和 (260, 350]  $\text{m}^3/\text{h}$ , 以及除铜后溶液中铜离子浓度 [50, 200]、(200, 400] 和 (400, 700] mg/L。

部分操作参数修正的模糊专家规则如下:

$R_1$ : 如果  $\Delta\text{Co}^{2+}$  为 NB, Flow\_Cu 为 Large, 且  $\text{Cu}^{2+}$  为 Large, 则  $\Delta\alpha$  为 NB,  $\Delta\text{ORP}_j$  为 PB ( $j = 1, 2, 3, 4$ , 即 4 个除钴反应器 ORP 的修正值)。

此工况下, 除铜后溶液流量非常大, 铜离子浓度也很大, 预测的钴离子浓度远小于最优的钴离子浓度区间的下限, 所以 ORP 设定相对太负, 故根据专家经验将 ORP 调正, 另外铜离子浓度较高, 砷盐调整系数可以适当减少, 减少砷盐添加量的同时也降低了锌粉消耗;

⋮

$R_5$ : 如果  $\Delta\text{Co}^{2+}$  为 NS, Flow\_Cu 为 Large,

且  $\text{Cu}^{2+}$  为 Small, 则  $\Delta\alpha$  取 ZO,  $\Delta\text{ORP}_j$  取 PS ( $j = 1, 2, 3, 4$ ).

⋮

$R_8$ : 如果  $\Delta\text{Co}^{2+}$  为 PB, Flow\_Cu 为 Medium, 且  $\text{Cu}^{2+}$  为 Small, 则  $\Delta\alpha$  取 PM,  $\Delta\text{ORP}_j$  取 NB ( $j = 1, 2, 3, 4$ ).

⋮

$R_h$ : 如果  $\Delta\text{Co}^{2+}$  为 PS, Flow\_Cu 为 Small, 且  $\text{Cu}^{2+}$  为 Large, 则  $\Delta\alpha$  取 ZO,  $\Delta\text{ORP}_j$  取 NS ( $j = 1, 2, 3, 4$ ).

⋮

由于通过操作模式重用后的操作参数离较优值相差不远, 故只需要根据专家经验进行小幅度调整即可取得较好的优化控制效果。

## 2.4 操作模式库的存储与精简

操作模式库会随着时间的推移不断增加, 为了将操作模式库控制在一定规模内, 必须对操作模式库进行维护。

存储与操作模式库中相似度小于 0.95, 且实际控制效果很好的操作模式。如果相似度大于 0.95, 但是操作参数明显不同, 且实际控制效果很好, 则存储该操作模式。为控制操作模式库的规模, 对操作模式库中相似度大于 0.98 的操作模式, 仅保留离当前时间最近的 2 个操作模式。

通过对新操作模式的选择性存储和对时间久远的操作模式进行精简, 在控制操作模式库规模的同时, 也保证了操作模式库的典型性和实用性。

本节通过对砷盐除钴过程的深入研究, 提出了如图 2 所示的操作参数协同优化方法。首先从砷盐除钴过程生产数据中提炼出初始的优良操作模式, 并采用模糊的方法表述操作模式, 根据入口的工况参数的模糊描述, 匹配出相似的操作模式, 然后对匹配出的操作模式进行重用, 重用时充分考虑了系统参数变化与资源消耗的特点; 针对该过程工艺指标化验的大时滞特点, 采用灰色模糊 LSSVM 预估重用后的操作参数的效果, 并根据预估结果, 采用相应的模糊专家规则修正效果不理想的操作参数; 为保证操作模式库中操作模式的典型性、实用性, 对新操作模式进行选择性的存储和对时间久远的操作模式进行选择性的精简。

## 3 工业验证结果分析

2012 年 6 月和 7 月, 在某锌冶炼企业砷盐净化除钴工序, 对基本操作模式和模糊操作模式协同优

化方法进行了工业验证实验. 表 1 列举了 6 组数据 (其中  $i_1 \sim i_5$  和  $p_1 \sim p_5$  的含义见第 2.1 节,  $ec$  为 4 个反应器锌粉消耗之和,  $OUT\_Co^{2+}$  为出口钴离子浓度). 显然, A 组 (A1, A2 和 A3) 入口工况参数几乎相同, A1 组 (采用人工经验, 简称“方法 1”) 在入口铜离子浓度非常大的情况下, 砷盐调整系数设置过大, 且 ORP 设定值偏正, 导致单位时间内锌粉消耗较高和出口钴离子浓度超标, A2 组 (采用基本操作模式, 简称“方法 2”) 和 A3 组 (采用本文提出的模糊操作模式协同优化方法, 简称“方法 3”) 的砷盐调整系数与 ORP 优化设定值更为合理, 在节约锌粉的同时保证了出口钴离子浓度达标. B 组 (B1, B2 和 B3) 入口工况参数也几乎相同, B3 组采用本文提出的模糊操作模式协同优化方法比人工经验和基本的操作模式能节约更多的锌粉, 并能保证钴离子浓度在较优的范围.

为客观比较 3 种方法的优化效果, 各取连续 10 天的工业验证数据进行对比, 入口工况参数的平均值 (流量和温度每 20 分钟记录一次数据、离子浓度每 2 小时记录一次数据求平均值) 如表 2 所示, 在入口工况参数几乎一样的条件下, 其锌粉消耗和出口钴离子浓度分别如图 4 ~ 图 6 所示.

三种方法优化控制效果的统计结果如表 3 所示.

由图 4 ~ 图 6 和表 3 可知, 人工经验 (方法 1) 的设定值不太合理, 使得出口钴离子浓度波动较大, 有 12.5% 的钴离子浓度达不到生产指标要求 (超过 0.5 mg/L), 平均锌粉添加量 (单位: kg/h) 也较高; 采用基本的操作模式方法 (方法 2), 与方法 1 相比,

钴离子合格率提高了 4.1%, 锌粉节约了 5.06%; 采用本文提出的模糊操作模式方法 (方法 3), 钴离子合格率提高了 6.7%, 锌粉节约了 8.23%, 验证了本文提出的模糊操作模式协同优化方法的有效性.

表 3 三种方法优化控制效果的统计结果

Table 3 Statistical results of the three methods

	钴离子合格率 (%)	平均锌粉添加量 (kg/h)
方法 1	87.5	195.6
方法 2	91.6	185.7
方法 3	94.2	179.5

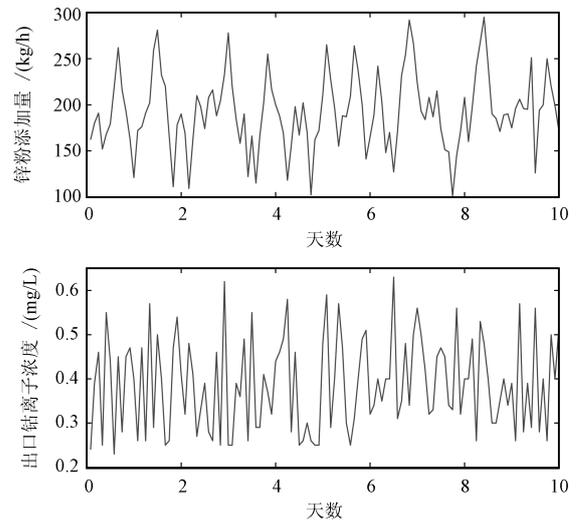


图 4 基于人工经验的工艺指标与锌粉消耗

Fig. 4 Process index and zinc consumption based on artificial experience

表 1 不同操作参数下的锌粉消耗与工艺指标对比

Table 1 Zinc consumption in comparison with process index under different operating parameters

时间	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$ec$	$OUT\_Co^{2+}$
A1 2012/4/10	230	502	35	15	74	56%	-542	-626	-619	-618	248	0.52
A2 2012/6/2	232	503	35	16	74	46%	-547	-633	-627	-633	227	0.49
A3 2012/6/21	230	505	36	15	73	38%	-552	-631	-628	-625	215	0.45
B1 2012/5/11	191	312	27	10	76	48%	-569	-638	-632	-630	192	0.32
B2 2012/6/7	190	315	28	9	76	44%	-551	-632	-629	-622	176	0.39
B3 2012/6/18	192	313	27	11	77	39%	-546	-625	-619	-620	153	0.42

表 2 入口工况参数的平均值

Table 2 Average value of working condition parameters at the inlet

时间	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$i_4$	$i_5$
方法 1 2012/4/27 ~ 2012/5/6	221.3	285.3	27.2	11.5	75.7
方法 2 2012/6/3 ~ 2012/6/12	220.9	287.5	27.5	11.6	75.2
方法 3 2012/6/23 ~ 2012/7/2	222.1	286.2	27.1	11.5	75.1

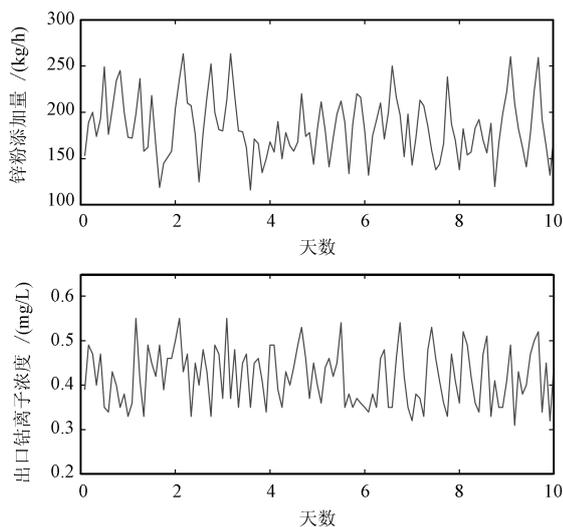


图5 基于基本操作模式的工艺指标与锌粉消耗

Fig. 5 Process index and zinc consumption based on basic operation mode

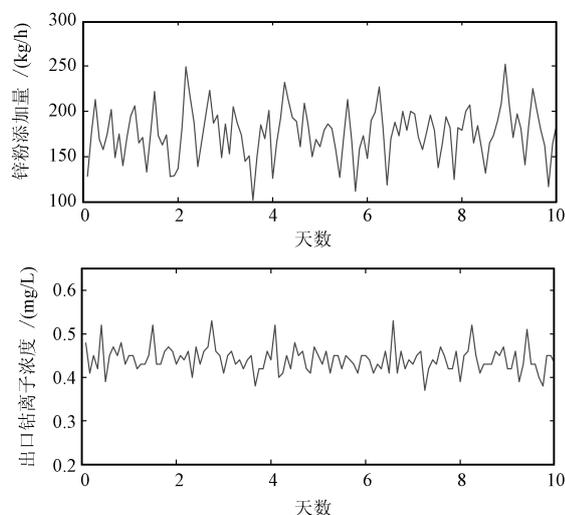


图6 基于模糊操作模式的工艺指标与锌粉消耗

Fig. 6 Process index and zinc consumption based on fuzzy operation mode

## 4 结论

神盐除钴过程化学和物理反应共存, 生产流程长达 5~8 小时, 矿源的多样性使得溶液中杂质离子波动大, 关键的工艺参数钴离子不能在线测量, 导致神盐和锌粉的优化设定极为困难. 针对神盐除钴过程的复杂特点, 提出了由基于模糊操作模式的操作参数协同优化方法, 该方法能在工况发生变化时, 自动调整操作参数的优化设定值. 工业验证结果表明, 该方法提高了关键工艺指标——出口钴离子浓度达标

率, 且出口钴离子浓度相对平稳, 锌粉消耗降低, 效果较为明显.

## References

- 1 Bockman O, Østvold T. Products formed during cobalt cementation on zinc in zinc sulfate electrolytes. *Hydrometallurgy*, 2000, **54**(2-3): 65-78
- 2 Tozawa K, Nishimura T, Akahori M, Malaga M A. Comparison between purification processes for zinc leach solutions with arsenic and antimony trioxides. *Hydrometallurgy*, 1992, **30**(1-3): 445-461
- 3 Yamashita S, Okubo M, Goto S, Hata K. Purification of zinc leaching solution — mechanism of removal of cobalt by zinc dust with arsenious oxide and copper ion. *Metallurgical Review of MMIJ*, 1997, **14**(1): 37-52
- 4 Järi N. Statistical analysis of cobalt removal from zinc electrolyte using the arsenic-activated process. *Hydrometallurgy*, 2004, **73**(1-2): 123-132
- 5 Wang L Y, Gui W H, Teo K L, Loxton R, Yang C H. Optimal control problems arising in the zinc sulphate electrolyte purification process. *Journal of Global Optimization*, 2012, **54**(2): 307-323
- 6 Gui Wei-Hua, Yang Chun-Hua, Chen Xiao-Fang, Wang Ya-Lin. Modeling and optimization problems and challenges arising in nonferrous metallurgical processes. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(3): 197-207 (桂卫华, 阳春华, 陈晓方, 王雅琳. 有色冶金过程建模与优化的若干问题及挑战. *自动化学报*, 2013, **39**(3): 197-207)
- 7 Zhang Jia-Yan, Ma Zhong-Hai, Qian Xiao-Bin, Li Shao-Ming, Lang Jia-Hong. Application of optimal control strategy to converter gas recovery system. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(6): 1017-1024 (章家岩, 马中海, 钱晓斌, 李绍铭, 郎佳红. 转炉煤气回收系统优化控制策略应用. *自动化学报*, 2012, **38**(6): 1017-1024)
- 8 Yan A J, Chai T Y, Yu W, Xu Z. Multi-objective evaluation-based hybrid intelligent control optimization for shaft furnace roasting process. *Control Engineering Practice*, 2012, **20**(9): 857-868
- 9 Gui Wei-Hua, Yang Chun-Hua, Li Yong-Gang, He Jian-Jun, Yin Lin-Zi. Data-driven operational-pattern optimization for copper flash smelting process. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 717-724 (桂卫华, 阳春华, 李勇刚, 贺建军, 尹林子. 基于数据驱动的铜闪速熔炼过程操作模式优化及应用. *自动化学报*, 2009, **35**(6): 717-724)
- 10 Fugleberg S, Jarvinen A, Yllo E. Recent development in solution purification at Outokumpu Zinc Plant, Kokkola. *World Zinc*, 1993, **93**(1): 241-247
- 11 Khanal S K, Huang J C. ORP-based oxygenation for sulfide control in anaerobic treatment of high-sulfate wastewater. *Water Research*, 2003, **37**(9): 2053-2062
- 12 Yang Chun-Hua, Zhu Hong-Qiu, Gui Wei-Hua, Wu Tie-Bin, Zhang Quan-Du, Wei Wen-Wu, Hu Zhi-Kun, Li Yong-Gang, Sun Bei, Lin Tian-Shui. Spent Acid Dosage Control in Cobalt Removal with Arsenic in Zinc Hydrometallurgy, CHN. Patent 201210204301, October 2012 (阳春华, 朱红求, 桂卫华, 伍铁斌, 张权度, 魏文武, 胡志坤, 李勇刚, 孙备, 林天水. 一种锌湿法冶炼神盐净化除钴过程废酸添加控制方法, 中国, 201210204301, 2012 年 10 月)

- 13 de Mántaras R L, Bridge D, Mcsherry D. Case-based reasoning: an overview. *AI Communications*, 1997, **10**(1): 21–29
- 14 Lin C F, Wang S D. Fuzzy support vector machines. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, **13**(2): 464–471
- 15 Wu Tie-Bin, Yang Chun-Hua, Sun Bei, Zhu Hong-Qiu, Li Yong-Gang. Grey fuzzy-LSSVM forecasting model and its application in cobalt removal from zinc electrolyte. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, **22**(8): 2382–2386 (伍铁斌, 阳春华, 孙备, 朱红球, 李勇刚. 灰色模糊 LSSVM 预测模型在锌净化除钴中的应用. *中国有色金属学报*, 2012, **22**(8): 2382–2386)



**伍铁斌** 中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为复杂工业过程建模、控制与优化.

E-mail: wutiebin81@163.com

(**WU Tie-Bin** Ph. D. candidate at the School of Information Science and Engineering, Central South University.

His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process.)



**阳春华** 博士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 智能自动化控制系统. 本文通信作者.

E-mail: ychh@mail.csu.edu.cn

(**YANG Chun-Hua** Ph. D., professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. Her research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, and intelligent automation control system. Corresponding author of this paper.)



**李勇刚** 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制.

E-mail: liyonggang@mail.csu.edu.cn

(**LI Yong-Gang** Professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process.)



**朱红求** 中南大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制.

E-mail: zhuhongqiu@mail.csu.edu.cn

(**ZHU Hong-Qiu** Associate professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process.)



**桂卫华** 中南大学信息科学与工程学院教授, 中国工程院院士. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 工业大系统控制理论与应用.

E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn

(**GUI Wei-Hua** Professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University, academician of Chinese Academy of Engineering. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process and industrial large system control theory and application.)