

基于控制周期计算的锌液净化除铜过程优化控制

张凤雪, 阳春华, 周晓君[†], 桂卫华

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 净化除铜过程是锌直接浸出冶炼工艺中硫酸锌溶液净化的第1个步骤, 其效果直接影响着后续工序的正常进行以及最终锌产品的质量. 本文针对除铜过程中控制周期与锌粉添加量不确定性, 造成出口铜离子浓度波动大及锌粉浪费等问题, 研究基于控制周期的除铜过程锌粉添加优化控制方法. 首先通过分析反应器中氧化还原电位(oxidation-reduction-potential, ORP)与锌粉的时序变化关系计算除铜过程反应响应时间, 然后分析响应时间的统计特性, 从而确定锌粉控制周期. 在确定控制周期的基础上, 采用基于控制周期的固定节点控制参数化方法, 从而将最优控制求解问题转化为非线性规划问题. 最后, 采用状态转移算法对该非线性规划问题进行求解. 采集工业现场数据进行实验证明了该优化控制方法的有效性, 为类似的净化过程的优化控制提供了新思路.

关键词: 除铜过程; 优化控制; 控制周期; 控制参数化; 状态转移算法

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Optimal control based on control period calculation for copper removal process of zinc solution purification

ZHANG Feng-xue, YANG Chun-hua, ZHOU Xiao-jun[†], GUI Wei-hua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The copper removal process is the first step in zinc solution purification of direct leaching of zinc hydrometallurgy, and its result has a significant impact on the follow-up process and the quality of the final product. In the copper removal process, the undetermined control period and addition amount of zinc-powder always lead to the fluctuation of outlet copper concentration and the waste of zinc powder. In order to solve this problem, an optimal control strategy based on control period calculation for copper removal process is proposed. First, the sequential relationship between oxidation-reduction-potential (ORP) and zinc powder is analyzed to calculate the response time of copper removal process, and then the control period is obtained by analyzing the statistical characteristic of response time. Next, the optimal control problem is transformed into a nonlinear mathematical programming problem by the fixed-node control parameterization method. Furthermore, the state transition algorithm is applied to solve the nonlinear mathematical programming problem. And the simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: copper removal process; optimal control; control period; control parameterization; state transition algorithm

1 引言(Introduction)

锌直接浸出冶炼工艺由磨矿、直接浸出、净化、电积、熔铸5部分构成^[1]. 净化过程通过添加锌粉除去浸出后的硫酸锌溶液中有害的杂质离子, 为电积过程提供合格的新液. 锌粉添加量决定了除铜生产稳定性与产品质量, 锌粉添加量过多, 出口铜离子浓度过低, 后续除杂活化剂不足; 锌粉添加量过低, 出口铜离子浓度过高, 易降低电积效率. 实际生产中, 矿源变化与工况波动, 以及除铜反应机理的复杂性, 造成操作员难

以及时准确控制锌粉添加量. 由于锌粉控制周期和锌粉添加量往往由人工经验决定, 使得出口铜离子波动较大, 产品质量难以稳定. 因此在工业生产过程中采用优化控制思想: 在工业过程处在最佳工况环境下, 优化调整过程控制量, 使生产条件达到最优的状态, 以满足生产要求.

针对复杂工业生产过程的反应影响因素、反应过程建模、优化控制等问题国内外研究人员进行了大量的研究^[2-10]. Sun等^[11]针对湿法炼锌除钴镍过程建立

收稿日期: 2016-08-16; 录用日期: 2017-06-12.

[†]通信作者. E-mail: michael.x.zhou@csu.edu.cn; Tel.: +86 13787052648.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(61503416, 61533021, 61773403), 探索项目(7131253), 中央高校基本科研业务费专项资金(2016zzts350)及高等学校学科创新引智计划(B17048)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61503416, 61533021, 61773403), Key Exploration Project (7131253), Fundamental Research Funds for Central Universities of Central South University (2016zzts350) and 111 Project (B17048).

了一种基于氧化还原电位的钴离子浓度预测模型, 并将数据驱动补偿法与该动态模型相结合以解决精确度问题. Xie等^[12]将沉铁过程的机理模型与误差补偿模型相结合, 建立了一种基于参数辨识的亚铁离子浓度预测的动态模型, 并采用在线更新策略来预测硫酸锌溶液中亚铁离子浓度. Ma等^[13]针对铝土矿连续磨矿过程球磨机节能降耗问题以及铝土矿来源复杂、品位差异大等特点, 建立了状态空间浓度预测模型和粒级质量平衡加权多模型细度预测模型, 提出了球磨机多目标多模型预测控制方法. Chai等^[14]提出了一种针对复杂工业过程优化运行的混合智能控制方法, 该方法由控制回路与设定模型、前馈补偿与反馈补偿器、工艺指标预报模型、故障工况诊断和容错控制器组成. Yang等^[15]针对铝冶炼工业过程提出了一种基于综合模型和分层理论的优化设定模型, 采用机理知识分析和智能技术提高了生料浆的品质.

针对湿法炼锌净化除铜过程, Laatikainen等^[16]研究了温度对湿法炼锌净化除铜过程反应进行的影响, 并通过大量的实验分析得到了除铜过程最适宜的反应温度. Zhang等^[17]详细研究了除铜过程两个主反应的反应动力学模型, 得到了基于竞争反应关系的动力学模型, 并进行了动态模型的参数辨识. 而现阶段针对除铜过程的优化控制方法的研究还比较少, 但一些控制方法在其它类似的工业过程中已有应用, Li等^[18]针对湿法炼锌净化过程, 建立了交互CSTR模型, 并采用控制参数化方法进行模型的优化求解. Loxton等^[19]提出了一种基于改进控制参数化的计算方法来解决控制信号不断变化的优化问题, 并将此计算方法成功应用到了捕鱼技术、列车控制以及化学工程中. 现本

文将控制参数化方法引入到除铜过程中, 从而进行锌粉的优化控制.

在采用优化控制思想解决复杂工业的问题中, 控制周期的设置尤为重要, 直接影响了整体的控制效果. 控制周期时间过短时, 不利于观察控制效果; 频繁的调节易造成过程扰动, 不利于长流程生产稳定; 同时控制周期过短, 会使锌粉来不及完全反应造成浪费. 控制时间周期过长, 难以及时满足反应器内铜离子浓度变化所需锌粉添加量, 出口铜离子浓度极易超标, 不利于除铜过程稳定运行. 因此, 本文的新颖性体现在以下3个方面: 首先在湿法炼锌净化除铜过程的一些已经完成的研究基础上, 建立除铜过程的优化控制模型, 将其转换成锌粉添加量的优化问题; 然后提出了基于控制周期的固定节点控制参数化方法, 该方法不同于常规控制参数化方法的随意确定控制周期, 而是先对实际生产数据进行了大量的统计学分析, 然后计算锌粉添加的控制周期, 使得控制周期的确定不再具有盲目性; 最后本文采用新型的全局最优状态转移算法^[20]在满足出口铜离子浓度达标的基础上求解最优的锌粉添加量, 既节约了锌粉的添加量又稳定了出口铜离子浓度.

2 除铜过程机理模型 (Mechanism model of copper removal process)

2.1 除铜过程工艺 (Copper removal process)

锌直接冶炼的浸出过程中存在未能除去的杂质离子如铜、镉、钴、镍及少量砷、锑、锆等, 这些杂质对电积过程有很大的危害. 因此必须在电积过程之前通过净化过程将其降低到足够低的范围内. 净化过程一般采用3段净化方案, 其基本流程如图1所示.

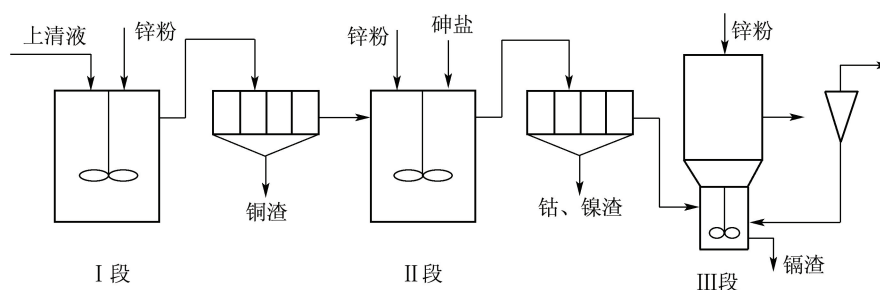


图 1 净化过程示意图

Fig. 1 The technical process of purification

净化过程首先进行的是除铜过程, 这是因为铜离子是所有杂质中含量最高的, 而且在溶液中铜离子标准电势较大, 会首先和锌粉进行反应^[21]. 除铜过程的详细工艺流程如图2所示, 浸出后的硫酸锌溶液流入两个串联的反应器, 通过在反应釜中持续添加锌粉, 使得溶液中的铜离子形成以单质铜和氧化亚铜为主的沉淀分离除去. 除铜后液经过浓密机固液分离后,

液体部分将溢流至除钴镍工段, 产生的铜渣进行回收利用, 还有小部分含固底流将作为晶种重新加入到第1个反应器, 从而促进氧化亚铜的形成, 达到节约锌粉的目的.

除铜过程最终要完成的目标是将出口铜离子稳定在200~400 mg/L的范围内. 这主要是因为后续的除钴镍过程中, 需要少量铜离子作为活化剂, 实验证

明200~400 mg/L的范围有利于加快除钴镍过程进行的速度;然后,在此基础上尽量减小铜离子浓度的波动也是十分必要的,只有保证稳定才能更好的调控后续除钴镍工段砷盐和锌粉的添加量.

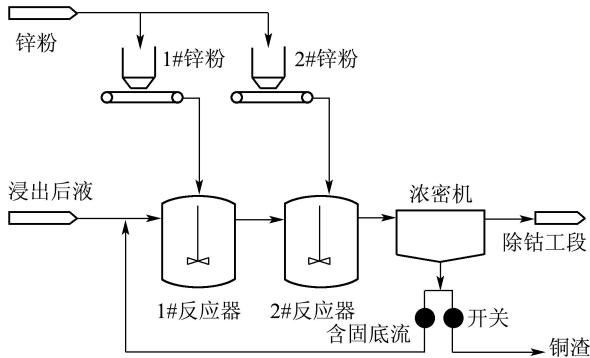
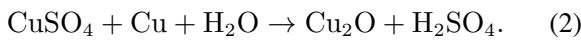
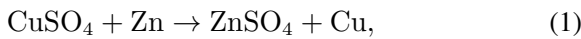


图2 除铜流程示意图

Fig. 2 The technical process of copper removal

2.2 除铜过程动态模型 (Kinetic model of copper removal process)

除铜过程发生的主要化学反应如式(1)–(2)所示:



反应器中铜离子浓度的变化主要受上述两个化学反应的影响,在实际工业中,每一个反应器都可以被视作一个CSTR系统,且两个反应器中铜离子变化规律可用以下动态方程来表示^[18]:

$$\begin{cases} \dot{C}_{\text{Cu}^{2+},1} = \frac{Q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},1}^0 - \frac{Q+q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},1} - r_{\text{Cu}^{2+},1}, \\ \dot{C}_{\text{Cu}^{2+},2} = \frac{Q+q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},1} - \frac{Q+q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},2} - r_{\text{Cu}^{2+},2}, \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\dot{C}_{\text{Cu}^{2+},i}$ 分别是第*i*个反应器中铜离子浓度变化速率; $C_{\text{Cu}^{2+},i}^0$ 分别是第*i*个反应器中入口的铜离子浓度; $C_{\text{Cu}^{2+},i}$ 分别是第*i*个反应器中铜离子浓度; V 是反应器的体积; Q 和 q 分别为入口溶液的流量和返回底流溶液的流量; $r_{\text{Cu}^{2+},i}$ 分别为第*i*个反应器内铜离子的反应速率($i = 1, 2$).

根据冶金过程化学反应动力学和除铜过程的竞争反应,该反应的反应速率为^[16]

$$\begin{cases} r_{\text{Cu}^{2+},1} = (k_1G_{\text{Zn},1} + k_2)C_{\text{Cu}^{2+},1}, \\ r_{\text{Cu}^{2+},2} = (k_1G_{\text{Zn},2} + k_3)C_{\text{Cu}^{2+},2}, \end{cases} \quad (4)$$

其中: k_1, k_2, k_3 为待辨识参数; $C_{\text{Cu}^{2+},i}$ 分别是第*i*个反应器中铜离子浓度; $G_{\text{Zn},i}$ 为第*i*个反应器中所需锌粉的重量.

由于从第1个反应器流出口的铜离子浓度应为第2

个反应器入口的铜离子浓度,则

$$C_{\text{Cu}^{2+},2}^0 = C_{\text{Cu}^{2+},1}. \quad (5)$$

将式(4)–(5)代入式(3)中,则两个反应器的动态模型可以转换为

$$\begin{cases} \dot{C}_{\text{Cu}^{2+},1} = \frac{Q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},1}^0 - \frac{Q+q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},1} - (k_1G_{\text{Zn},1} + k_2)C_{\text{Cu}^{2+},1}, \\ \dot{C}_{\text{Cu}^{2+},2} = \frac{Q+q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},1} - \frac{Q+q}{V}C_{\text{Cu}^{2+},2} - (k_1G_{\text{Zn},2} + k_3)C_{\text{Cu}^{2+},2}. \end{cases} \quad (6)$$

由上述分析可知,除铜过程的控制量为锌粉添加量,设状态变量为 $x = [C_{\text{Cu}^{2+},1}, C_{\text{Cu}^{2+},2}]$, 初始状态变量为 $x_0 = C_{\text{Cu}^{2+},1}^0$, 控制量 $u = [G_{\text{Zn},1}, G_{\text{Zn},2}]$, 则可得除铜过程的状态模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{Q}{V}x_0 - \frac{Q+q}{V}x_1 - (k_1u_1 + k_2)x_1, \\ \dot{x}_2 = \frac{Q+q}{V}x_1 - \frac{Q+q}{V}x_2 - (k_1u_2 + k_3)x_2. \end{cases} \quad (7)$$

3 控制周期的计算(The calculation of control period)

在湿法炼锌净化除铜过程中,对锌粉的添加量进行优化时,控制周期的设置尤为重要且直接影响了整体的控制效果.控制周期时间过短时,不利于观察控制效果;频繁的调节易造成过程扰动,不利于长流程生产稳定;同时控制周期过短,会使锌粉来不及完全反应造成浪费.控制时间周期过长,难以及时满足反应器内铜离子浓度变化所需锌粉添加量,出口铜离子浓度极易超标,不利于除铜过程稳定运行.因此,控制周期的设置需满足能够在溶液内铜离子浓度达标时进行及时调节.

在工业运行中,ORP值与溶液中的铜离子浓度有着—一对应的关系,ORP值的变化可以反应溶液中铜离子浓度的变化.在稳定的入口离子浓度下,某一段时间添加锌粉后,经过一段时间反应器中的铜离子浓度会达到极小值,同样ORP值的变化曲线也会出现极小值,则这一段时间间隔称为响应时间 T .

图3为反应器中锌粉和ORP的变化曲线以及响应时间的示意图,采用统计学方法多组反应过程响应时间进行分布统计,获得响应时间的样本分布,进而确定控制周期.

基于统计学方法的控制周期计算步骤如下:

步骤 1 基于工业运行现场采集的数据,建立反应釜中ORP及锌粉含量随时间变化的曲线,确定锌粉含量的极大值与ORP的极小值的对应关系,即两条曲线中波峰和波谷之间的对应关系.

步骤 2 基于上述获得的曲线, 采用式(8)计算从锌粉添加到反应完全的时间(即响应时间 T):

$$T = T_c(\text{ORP}) - T_t(\text{Zn}), \quad (8)$$

其中: $T_t(\text{Zn})$ 是反应釜中锌粉含量变化曲线的波峰值对应的时间, $T_c(\text{ORP})$ 是ORP变化曲线上后出现的第一个波谷值对应的时间.

步骤 3 对获得的多组响应时间数据进行概率纸检验, 从而判断数据分布的正态性.

步骤 4 若数据服从正态分布, 则建立数据的正态分布曲线; 若数据不服从正态分布, 则先采用数据转换的方法将数据正态化, 然后再建立正态分布曲线.

步骤 5 根据正态分布曲线得到各响应时间样本的分布律, 然后计算置信水平为 α 的响应时间置信区间 $[T_a, T_b]$.

步骤 6 计算分布于置信区间 $[T_a, T_b]$ 内的响应时间均值, 以此均值作为锌粉添加的控制周期 T^* .

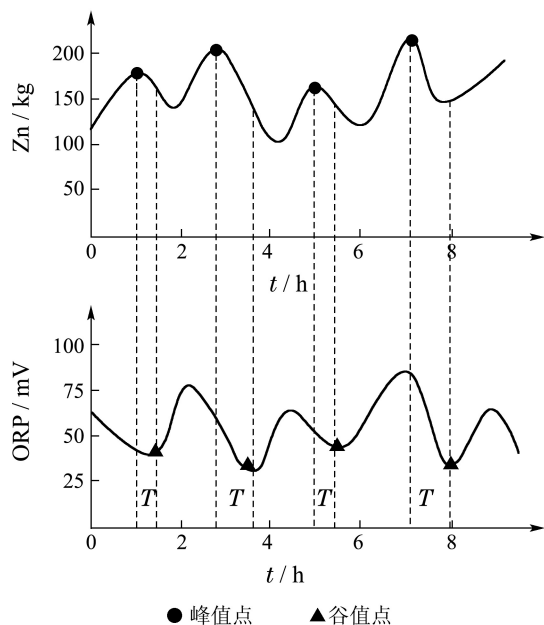


图 3 锌粉与ORP变化曲线

Fig. 3 The changing curves of Zn and ORP

4 除铜过程锌粉添加优化控制(Optimal control of copper removal process)

4.1 除铜过程锌粉添加优化控制模型 (Optimal control model of copper removal process)

1) 除铜过程优化控制目标函数.

湿法炼锌净化除铜过程不仅要保证反应器出口的铜离子质量浓度在 $200 \sim 400 \text{ mg/L}$ 之间, 而且还要合理的控制锌粉的添加量. 如果锌粉添加量太低, 则会使得反应器出口铜离子浓度超标, 影响整个流程的净化效果; 如果锌粉添加量太高, 则会造成后续工段所需的铜离子浓度不足, 且造成了锌粉的浪费. 综合考

虑, 在反应过程中尽量使得反应器出口铜离子浓度达标的情况下锌粉的添加量最小. 结合式(7), 除铜过程锌粉添加优化控制的目标函数为

$$\min J = \int_0^{t_f} [u_1^2(t) + u_2^2(t)] dt, \quad (9)$$

其中: t_f 为硫酸锌溶液在反应器中的平均停留时间; J 为锌粉添加优化控制目标函数.

值得注意的是, 实际除铜工业运行中, t_f 的值一般通过 $t_f = V/Q$ 计算获得. 此外本文的锌粉添加优化控制模型以离子浓度某一化验时刻作为起始时间0, 计算时间跨度 t_f 内反应器中最优锌粉添加量, 再以下一化验时刻为起始时间0, 求解下一个时间跨度内的最优锌粉添加量, 如此反复实现长流程的优化控制.

2) 除铜过程状态方程.

除铜过程的动力学模型描述的是反应过程中铜离子的变化规律, 其状态方程可由式(7)得

$$\dot{x} = A_1 x + A_2 x_0 + \psi(x, u) := f(x, u, t), \quad (10)$$

其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{Q+q}{V} & 0 \\ 0 & -\frac{Q+q}{V} \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \frac{Q}{V} & 0 \\ 0 & \frac{Q+q}{V} \end{bmatrix},$$

$$\psi(x, u) = \begin{bmatrix} -(k_1 u_1 + k_2) x_1 \\ -(k_1 u_2 + k_3) x_2 \end{bmatrix}.$$

3) 终端条件约束.

除铜过程实际工业运行要求2号反应器出口的铜离子浓度在 $200 \sim 400 \text{ mg/L}$ 之间. 设该范围为 $[C_{\text{Cu}^{2+}, \text{min}}, C_{\text{Cu}^{2+}, \text{max}}]$, 则终端约束条件为

$$C_{\text{Cu}^{2+}, \text{min}} \leq x_2(t_f) \leq C_{\text{Cu}^{2+}, \text{max}}. \quad (11)$$

因此, 除铜过程锌粉添加优化控制是: 寻找最优的控制量 $u^*(t)$, 使得目标函数 J 最小, 且满足终端约束条件. 该最优控制问题可描述为

$$u^* = \min J = \int_0^{t_f} [u_1^2(t) + u_2^2(t)] dt,$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \dot{x} = f(x, u, t), \\ x_0 = C_{\text{Cu}^{2+}, 1}^0, \\ C_{\text{Cu}^{2+}, \text{min}} \leq x_2(t_f) \leq C_{\text{Cu}^{2+}, \text{max}}. \end{cases} \quad (12)$$

问题 1 求解式(12)所描述的锌粉添加优化控制模型的最优锌粉添加量.

4.2 基于控制周期的控制参数化方法(Control parameterization method based on control period)

除铜过程的控制问题具有很强的非线性并带有连

续状态不等式约束,控制量与状态量之间存在很强的耦合,传统方法难以实现求解,控制参数化方法的思想正是为解决这一问题而提出^[21-22].控制参数化方法利用非线性问题分段化的思想将时间区间 $[0, t_f]$ 划分为一系列连续的子区间,控制量根据区间划分来分段,并且用适当的样条函数逼近,从而将相应的优化问题转换为求解一系列最优控制参数的非线性规划.而子区间的划分直接关系到这种方法对控制量的近似程度,因此本文基于第3章的控制周期的计算,提出了一种基于控制周期的控制参数化方法,使得划分的每一个子区间长度等于控制周期 T^* ,进而将问题1转换为易于求解的非线性规划问题.

为采用控制参数化方法将最优控制问题转换为近似问题,把优化模型求解时间区间 $[0, t_f]$ 分成 N 个子区间 $[t_{n-1}, t_n](n = 1, 2, \dots, N)$,如下所示

$$0 = t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_{N-1} < t_N = t_f, \quad (13)$$

其中 $T^* = t_n - t_{n-1}$,即 $N = \frac{t_f}{T^*}$.

由于优化计算模型的控制量为2维向量,定义一系列常数向量 $\boldsymbol{\kappa}^n \in \mathbb{R}^2, n = 1, 2, \dots, N$,则

$$\boldsymbol{\kappa} = [\boldsymbol{\kappa}^1 \ \boldsymbol{\kappa}^2 \ \dots \ \boldsymbol{\kappa}^N] = \begin{bmatrix} \kappa_1^1 & \kappa_2^1 & \dots & \kappa_1^N \\ \kappa_1^2 & \kappa_2^2 & \dots & \kappa_2^N \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中: κ_1^n 为第 n 段时间内第1个反应器中锌粉添加量; κ_2^n 为第 n 段时间内第2个反应器中锌粉添加量.

将问题1的控制量设计为与常数向量 $\boldsymbol{\kappa}^n$ 有关的分段常函数,则

$$\mathbf{u}^N(t|\boldsymbol{\kappa}) = \sum_{n=1}^N \boldsymbol{\kappa}^n \theta_{[t_{n-1}, t_n)}(t), \quad (15)$$

其中: $t_n(n = 0, 1, \dots, N - 1)$ 是控制量的切换时间点;函数 $\theta_{[t_{n-1}, t_n)}(t)$ 定义如下:

$$\theta_{[t_{n-1}, t_n)}(t) = \begin{cases} 1, & t \in [t_{n-1}, t_n), \\ 0, & \text{其他}. \end{cases} \quad (16)$$

当 $t = t_f$ 时,控制量为

$$\mathbf{u}^N(t_f|\boldsymbol{\kappa}) = \mathbf{u}^N(t_f^-|\boldsymbol{\kappa}) = \lim_{t \rightarrow t_f^-} \mathbf{u}^N(t|\boldsymbol{\kappa}). \quad (17)$$

将分段常函数控制量式(15)代入系统动态方程,有

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \boldsymbol{\kappa}^i) \theta_{[t_{n-1}, t_n)}(t), \quad t \in [0, t_f]. \quad (18)$$

优化计算模型(27)的终端不等式约束变为

$$\begin{cases} x_2(t_f|\mathbf{u}^N(t_f|\boldsymbol{\kappa})) - C_{Cu^{2+}, \max} \leq 0, \\ C_{Cu^{2+}, \min} - x_2(t_f|\mathbf{u}^N(t_f|\boldsymbol{\kappa})) \leq 0, \end{cases} \quad (19)$$

则最优控制问题1转换成了易于求解的非线性规划问题2:

问题2 优化选择参数向量 $\boldsymbol{\kappa}^n$,使得如下目标函数值最小且满足约束条件(19)

$$\min J_1 = \sum_{n=1}^N [\boldsymbol{\kappa}_1^n \theta_{[t_{n-1}, t_n)}(t)]^2 + [\boldsymbol{\kappa}_2^n \theta_{[t_{n-1}, t_n)}(t)]^2. \quad (20)$$

问题2是非线性规划问题,可以用许多优化算法进行求解.本文采用的是近年来刚提出的一种全局优化算法——状态转移算法(state transition algorithm, STA)^[20]进行求解,且其在求解实际工程优化问题上的有效性和优越性已被大量证实^[23-32].

4.3 状态转移算法(State transition algorithm)

状态转移算法借鉴状态及状态转移的概念,将待优化问题的解理解为状态,优化算法的思想理解为状态转移,求解待优化问题的过程便是一个状态转移过程.该状态转移过程具有如下形式:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = A_k \mathbf{x}_k + B_k \mathbf{u}_k, \\ y_{k+1} = f(\mathbf{x}_{k+1}), \end{cases} \quad (21)$$

其中: $\mathbf{x}_k \in \mathbb{R}^n$ 表示一个状态,对应待优化问题的一个解; A_k, B_k 为状态转移矩阵,可理解为优化算法的算子; \mathbf{u}_k 为状态 \mathbf{x}_k 及历史状态的函数; f 为目标函数.

状态转移算法的算子主要包括以下4个核心操作算子:

1) 旋转变换算子

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha \frac{1}{n \|\mathbf{x}_k\|_2} R_r \mathbf{x}_k, \quad (22)$$

其中 α 为旋转因子; $R_r \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是一个随机矩阵,且元素的取值在 $[-1, 1]$ 范围内; $\|\cdot\|_2$ 为向量的2范数.

2) 平移变换算子

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \beta R_t \frac{\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}}{\|\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_{k-1}\|_2}, \quad (23)$$

其中 β 为平移因子; $R_t \in \mathbb{R}$ 为一随机变量,取值在 $[0, 1]$ 范围内.

3) 伸缩变换算子

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \gamma R_e \mathbf{x}_k, \quad (24)$$

其中 γ 为伸缩因子; $R_e \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为一元素服从高斯分布的随机对角矩阵.

4) 坐标变换算子

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \delta R_a \mathbf{x}_k, \quad (25)$$

其中 δ 为坐标因子; $R_a \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为一元素服从高斯分布且仅有一个随机位置为非零值的随机对角矩阵.

采用状态转移算法求解优化问题的步骤为

步骤1 随机产生一个初始解 $\text{Best}_k = \text{Best}$,设置算法参数 $\alpha = \alpha_{\max} = 1, \alpha_{\min} = 1e - 4, \beta = 1, \gamma = 1, \delta = 1, f_c = 2, k = 0$ ^[20];

步骤2 基于当前最好解 Best_k ,利用伸缩变换操作产生 SE 个样本,并利用更新策略更新当前最好解,如果当前最好解有变动,执行平移变换操作并以同样的机制更新当前最好解 Best_k ;

步骤 3 基于当前最好解 $Best_k$, 利用旋转变换操作产生 SE 个样本, 并利用更新策略更新当前最好解, 如果当前最好解有变动, 执行平移变换操作并以同样的机制更新当前最好解 $Best_k$;

步骤 4 基于当前最好解 $Best_k$, 利用坐标搜索操作产生 SE 个样本, 并利用更新策略更新当前最好解, 如果当前最好解有变动, 执行平移变换操作并以同样的机制更新当前最好解 $Best_k$;

步骤 5 置 $k = k + 1$, 若 $\alpha < \alpha_{min}$, 置 $\alpha = \alpha_{max}$, 否则置 $\alpha = \frac{\alpha}{f_c}$, 然后重返步骤2直到终止条件满足。

5 数值仿真及结果分析(The analysis of simulation results)

以某湿法炼锌企业除铜过程2个反应器为实验仿真对象, 流程生产数据采集于2014年。

首先从工业现场采集的数据中选取700组ORP和锌粉数据, 根据第3章提出的控制周期计算步骤确定控制周期。

从图4可以看出, 计算得到的响应时间数据分布在一条直线上, 通过概率纸检验, 确定所选取的数据服从正态分布。该数据的正态分布曲线和直方图如图5所示。其均值和置信区间等结果的统计如表1所示, 根据表中统计结果可知计算得到的控制周期为18.12 min, 即每调整1次控制量要求持续18.12分钟。

表 1 数据统计结果

Table 1 Result of data statistics

置信水平/%	置信区间/min	均值/min	控制周期/min
95	[17.71, 18.53]	18.12	18.12

由于除铜过程现场实行的是8小时倒班工作制, 所以采用本文所提的优化控制方法对2014年某天的一班8小时进行数值仿真实验。

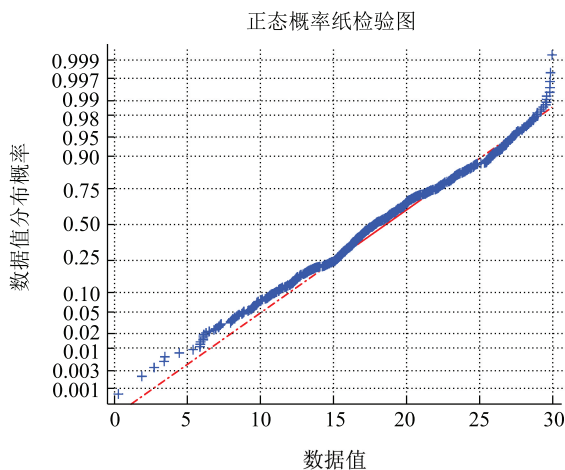


图 4 数据的正态概率纸检验

Fig. 4 Normal probability plot of data

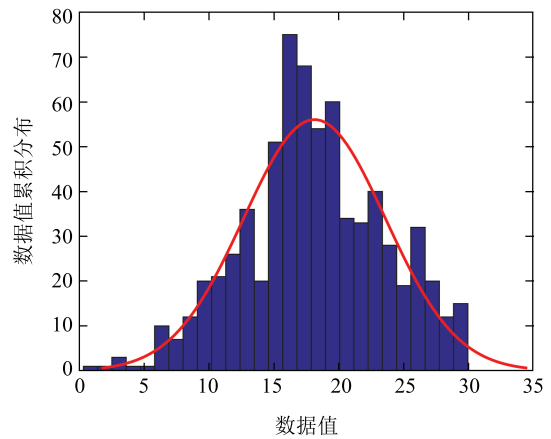


图 5 数据的正态分布曲线和直方图

Fig. 5 The normal distribution curve and histogram of data

由于状态转移算法具有随机性, 所以本文采用随机生成的初始值进行了100次问题求解, 并采用了遗传算法 (genetic algorithm, GA) 和粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 与状态转移算法进行了对比, 3种算法的最大迭代次数和种群大小是相同的, 分别为20和30。另外, 在粒子群算法中, $c_1 = c_2 = 1$, w 从0.9至0.4进行线性递减。对于遗传算法, 本文调用的MATLAB遗传算法工具箱v1.2进行问题的求解。最后采用显著性水平为0.05的秩和检验方法对两种对比算法的结果分别与状态转移算法的结果进行显著性分析。其统计结果如表2所示。

表 2 3种算法求解结果统计

Table 2 Comparison of three different algorithm

	Mean Value±Std Dev	Rate/%
状态转移算法(STA)	8.35E-5±1.68E-5	97
遗传算法(GA)	6.97E-4±1.00E-4(-)	91
粒子群优化算法(PSO)	9.41E-4±7.90E-5(-)	94

表2中采用了2种性能指标比较3种优化算法, 其中Mean Value±Std Dev表示所求解的目标函数 J_1 样本的平均值与标准偏差, (-)表示采用秩和检验进行显著性分析后两种对比算法的结果样本与状态转移算法的结果样本服从不同分布, 这种性能指标可以用来评价3种算法的求解精度; Rate表示100次运行中求得的目标函数值小于 10^{-3} 所占的比例, 可以用来评价3种算法求解问题的成功率。从中可以看出状态转移算法的求解精度和成功率都要优于遗传算法和粒子群优化算法。

选取状态转移算法求解的结果与人工经验操作进行对比, 其仿真实验结果如图6-8所示。图6和图7分别表示2个除铜反应器优化控制计算所得的锌粉添加量和人工经验操作的锌粉添加量对比结果。图8为优化控制和人工经验操作相应的2#反应器出口的铜离子

浓度. 表3统计了仿真时间8小时内优化控制和人工经验操作的锌粉总添加量以及相应的2#反应器出口铜离子浓度的标准差.

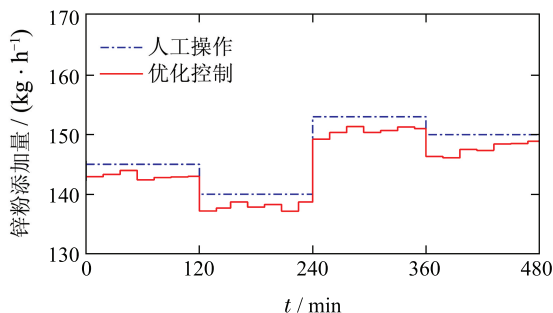


图6 1# 反应器锌粉添加量对比

Fig. 6 Comparison of zinc addition between optimal control and artificial manipulation in 1# reactor

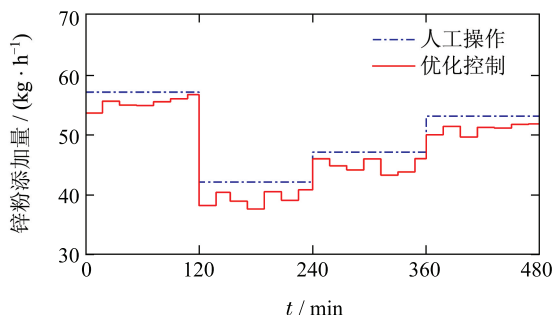


图7 2# 反应器锌粉添加量对比

Fig. 7 Comparison of zinc addition between optimal control and artificial manipulation in 2# reactor

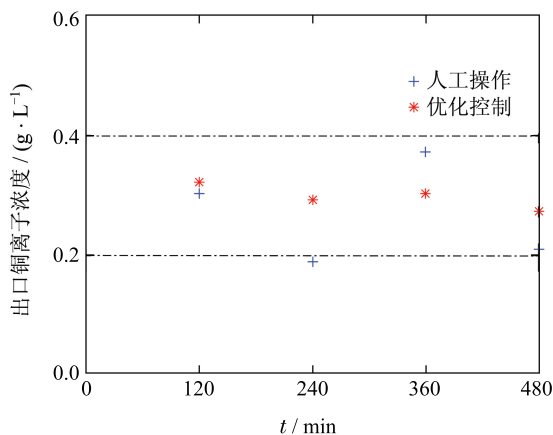


图8 2# 反应器出口铜离子浓度对比

Fig. 8 Comparison of outlet copper ion between optimal control and artificial manipulation in 2# reactor

由图6-8和表3可知, 实际除铜工业过程中工作人员往往凭经验添加过量的锌粉, 从而确保2#反应器出口的铜离子浓度在工艺要求的范围之内, 从而造成了锌粉浪费, 增加了生产成本. 而且, 由于人工经验操作的不及时和盲目性, 使得2#反应器出口的铜离子浓度波动大, 不利于后续流程的稳定生产. 而本文所提出

的优化控制方法所计算的锌粉添加量要低于人工操作使用的锌粉, 同时减小了2#反应器出口的铜离子浓度的波动性.

表3 优化控制和人工操作统计结果对比

Table 3 Statistical comparison results of optimal control and artificial manipulation

	优化控制	人工操作
1# 反应器锌粉添加量/kg	1002	1176
2# 反应器锌粉添加量/kg	274	398
2# 反应器出口Cu ²⁺ 浓度标准差	0.02	0.13

6 结论(Conclusions)

锌湿法冶炼除铜过程反应机理复杂、矿源多变、锌粉添加的控制周期不确定性及控制量准确度低, 使得出口铜离子浓度波动大, 产品质量不稳定. 针对该问题, 本文提出了基于控制周期计算的除铜过程优化控制方法. 该方法分析了反应器中ORP与锌粉的时序关系, 采用统计学方法确定最优控制周期. 在控制周期确定的基础上, 根据除铜过程竞争反应动态模型, 采用基于控制周期的固定节点控制参数化方法将无穷维动态优化问题转化为有穷维的非线性规划问题, 并采用状态转移算法求解锌粉的优化添加量. 仿真结果表明, 论文提出的优化控制方法能够有效降低除铜过程的锌粉添加量, 与人工经验添加相比一工作班可节约近298 kg锌粉. 除此之外, 出口铜离子浓度的标准差结果表明该方法还可以减小反应器出口的铜离子浓度波动情况, 为实际生产过程提供了相应的操作指导.

参考文献(References):

- [1] SUN Dekun. The progress of the zinc smelting technology at home and abroad [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2004, 6(3): 1-5. (孙德堃. 国内外锌冶炼技术的新进展 [J]. 中国有色冶金, 2004, 6(3): 1-5.)
- [2] FILIPPOU D. Innovative hydrometallurgical processes for the primary processing of zinc [J]. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review*, 2004, 25(3): 205-252.
- [3] AHMED I M, EL Y A. Cementation of copper from spent copper-pickle sulfate solution by zinc ash [J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 110(1/2/3/4): 62-66.
- [4] YAHIAOUI. Experimental design for copper cementation process in fixed bed reactor using two-level factorial design [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2010, 3(3): 187-190.
- [5] JIN Yanghua, WU Shixue. The dynamics of copper replacement on the surface of iron powder [J]. *Materials Review*, 2007, 21(S1): 226-229. (金洋华, 吴世学. 铁粉表面置换镀铜的动力学 [J]. 材料导报, 2007, 21(S1): 226-229.)
- [6] GUI Weihua, YANG Chunhua, LI Yonggang, et al. Data-driven operational-pattern optimization for copper flash smelting process [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 717-724. (桂卫华, 阳春华, 李勇刚, 等. 基于数据驱动的铜闪速熔炼过程操作模式优化及应用 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 717-724.)

- [7] YE J X, XU H L, FENG E M, et al. Optimization of a fed-batch bioreactor for 1, 3-propanediol production using hybrid nonlinear optimal control [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(10): 1556 – 1569.
- [8] SUN B, GUI W H, WANG Y L, et al. Intelligent optimal setting control of a cobalt removal process [J]. *Journal of Process Control*, 2014, 24(5): 586 – 599.
- [9] CHAI T Y, DING J L, WU F H. Hybrid intelligent control for optimal operation of shaft furnace roasting process [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(3): 264 – 275.
- [10] ZHOU Xiaojun, YANG Chunhua, GUI Weihua. Modeling and control of nonferrous metallurgical processes on the perspective of global optimization [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(9): 1158–1169.
(周晓君, 阳春华, 桂卫华. 全局优化视角下的有色冶金过程建模与控制 [J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(9): 1158 – 1169.)
- [11] SUN B, GUI W H, WU T B. An integrated prediction model of cobalt ion concentration based on oxidation-reduction potential [J]. *Hydrometallurgy*, 2013, 140(11): 102 – 110.
- [12] XIE Y F, XIE S W, CHEN X F, et al. An integrated predictive model with an online updating strategy for iron precipitation in zinc hydrometallurgy [J]. *Hydrometallurgy*, 2015, 151(1): 62 – 72.
- [13] MA Tianyu, GUI Weihua. Optimal control for continuous bauxite grinding process in ball-mill [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(10): 1339 – 1347.
(马天雨, 桂卫华. 铝土矿连续磨矿过程球磨机优化控制 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(10): 1339 – 1347.)
- [14] CHAI Tianyou, DING Jinliang, WANG Hong, et al. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(5): 505 – 515.
(柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法 [J]. *自动化学报*, 2008, 34(5): 505 – 515.)
- [15] YANG C H, GUI W H, KONG L S, et al. Modeling and optimal-setting control of blending process in a metallurgical industry [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, 33(7): 1289 – 1297.
- [16] LAATIKAINEN K, LAHTINEN M, LAATIKAINEN M. Copper removal by chelating adsorption in solution purification of hydrometallurgical zinc production [J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 104(1): 14 – 19.
- [17] ZHANG B, YANG C H, ZHU H Q. Kinetic modeling and parameter estimation for competing reactions in copper removal process from zinc sulfate solution [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(48): 17074 – 17086.
- [18] LI Y G, GUI W H, TEO K L, et al. Optimal control for zinc solution purification based on interacting CSTR models [J]. *Journal of Process Control*, 2012, 22(10): 1878 – 1889.
- [19] LOXTON R, LIN Q, TEO K L. Minimizing control variation in nonlinear optimal control [J]. *Automatica*, 2013, 49(9): 2652 – 2664.
- [20] ZHOU X J, YANG C H, GUI W H. State transition algorithm [J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2012, 8(4): 1039 – 1056.
- [21] GOH C J, TEO K L. Control parametrization: a unified approach to optimal control problems with general constraints [J]. *Automatica*, 1988, 24(1): 3 – 18.
- [22] TEO K L, GOH C J. A computational method for combined optimal parameter selection and optimal control problems with general constraints [J]. *Anziam Journal*, 1988, 30(3): 350 – 364.
- [23] ZHOU X J, GAO D Y, SIMPSON A R. Optimal design of water distribution networks by a discrete state transition algorithm [J]. *Engineering Optimization*, 2015, 26(1): 603 – 628.
- [24] WANG Y L, HE H, ZHOU X J. Optimization of both operating costs and energy efficiency in the alumina evaporation process by a multi-objective state transition algorithm [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2015, 94(1): 53 – 65.
- [25] WANG G W, YANG C H, ZHU H Q. State-transition-algorithm-based resolution for overlapping linear sweep voltammetric peaks with high signal ratio [J]. *Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems*, 2015, 151(1): 61 – 70.
- [26] ZHANG F X, YANG C H, ZHOU X J, et al. Fractional-order PID controller tuning using continuous state transition algorithm [J]. *Neural Computing and Applications*, 2016, DOI: 10.1007/s00521-016-2605-0.
- [27] DONG Tianxue, YANG Chunhua, ZHOU Xiaojun, et al. A novel discrete state transition algorithm for staff assignment problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(10): 1378 – 1388.
(董天雪, 阳春华, 周晓君, 等. 一种求解企业员工指派问题的离散状态转移算法 [J]. *控制理论与应用*, 2016, 33(10): 1378 – 1388.)
- [28] YANG Chunhua, TANG Xiaolin, ZHOU Xiaojun, et al. A discrete state transition algorithm for traveling salesman problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(8): 1040 – 1046.
(阳春华, 唐小林, 周晓君, 等. 一种求解旅行商问题的离散状态转移算法 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(8): 1040 – 1046.)
- [29] HAN J, YANG C H, ZHOU X J, et al. A new multi-threshold image segmentation approach using state transition algorithm [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, 44: 588 – 601.
- [30] ZHOU X J, GAO D Y, YANG C H, et al. Discrete state transition algorithm for unconstrained integer optimization problems [J]. *Neurocomputing*, 2016, 173: 864 – 874.
- [31] ZHOU X J, YANG C H, GUI W H. Nonlinear system identification and control using state transition algorithm [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 226(1): 169 – 179.
- [32] SHI Y H, Russell C E. Empirical study of particle swarm optimization [C]//*Proceedings of IEEE International Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. Washington: IEEE, 1999: 1945 – 1950.

作者简介:

张风雪 (1992–), 女, 博士研究生, 目前研究方向为复杂工业过程建模与优化控制、最优化与最优控制, 优化算法及其应用, E-mail: fengxuezhang@csu.edu.cn;

阳春华 (1965–), 女, 教授, 博士生导师, 目前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与装置、智能信息处理技术, E-mail: ychh@csu.edu.cn;

周晓君 (1986–), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为复杂工业过程建模与优化控制、对偶理论、最优化理论、算法及其应用, E-mail: michael.x.zhou@csu.edu.cn;

桂卫华 (1950–), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为工业大系统递阶和分散控制理论及应用、复杂生产过程建模、优化与控制, E-mail: gwh@csu.edu.cn.