

引文格式:费鹏宇,王新春,杨培宏,等.基于遗传算法优化的稀土氧化物浓度模糊控制策略研究[J].中国有色冶金,2025,54(1):76-84.

FEI Pengyu, WANG Xinchun, YANG Peihong, et al. Fuzzy control strategy of rare earth oxide concentration based on genetic algorithm optimization[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025,54(1):76-84.

# 基于遗传算法优化的稀土氧化物浓度模糊控制策略研究

费鹏宇,王新春,杨培宏,王震

(内蒙古科技大学 自动化与电气工程学院,内蒙古 包头 014010)

[摘要] 针对当前稀土电解工业自动化水平较低的问题,提出一种基于遗传算法(GA)优化的稀土氧化物浓度模糊控制方法,该方法结合稀土熔盐电解工艺的特点,分析槽电阻、稀土氧化物浓度以及下料速率之间的关系,以确定相应的浓度控制策略。利用遗传算法的迭代寻优能力,实现对模糊控制的量化因子与比例因子的动态调整,进而得到一个性能较好的模糊控制器。通过 Simulink 进行仿真验证,结果表明,当比例因子和量化因子  $K_p$ 、 $K_{cc}$ 、 $K_{cl}$  分别为 0.01、0.03 和 7.94 时系统达到最优,模糊控制器超调量为 0.1%,调节时间为 16 s,相比于传统 PID 控制和模糊控制均有所改善。实际工程应用结果表明,该模糊控制方法可以将稀土氧化物浓度控制在理想区域内,能够满足现场稀土熔盐电解的工作需求。由于此方法采用遗传算法进行优化,在稀土氧化物浓度控制这种复杂系统中需要较多的计算资源和时间,后续可考虑对算法进行改进,以提高优化效率和精度。

[关键词] 稀土熔盐电解;稀土氧化物浓度;槽电阻;下料速率;遗传算法;模糊控制

[中图分类号] TF803.2<sup>+</sup>7;TP391 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)01-0076-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/TF.2025.01.009

## 0 引言

稀土是一种不可再生的重要资源,在国防、科技和新能源等方面有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。目前,稀土冶炼的主要技术手段为熔盐电解和湿法冶金,其中,熔盐电解法因其资源利用率高、可控性强以及对环境友好等特点,在我国得到普遍使用<sup>[2]</sup>。根据现场调查显示,目前大部分国内稀土厂均采用人工填料的方式,氧化稀土的添加量全凭操作人员的经验掌握<sup>[3]</sup>,导致在生产过程中无法准确控制电解槽中氧化稀土的含量。稀土氧化物添加的合理性会直接对电解槽中的物质平衡状况产生影响,进而影响到产品的质量和电解效率<sup>[4]</sup>。

通过查阅近年来的文献资料,现有研究多以稀土本身材料性质为主,针对氧化稀土浓度控制的研究还相对较少,目前氧化稀土浓度的测定还停留在实验室阶段<sup>[5-8]</sup>。因此,研究稀土熔盐电解过程中稀土氧化物浓度控制对进一步提高稀土产能、节约成本和减少污染等具有重要的意义。

本文借助遗传算法对模糊控制的参数进行优化,以改善系统的控制性能。遗传算法是一种受生物进化理论启发的智能演化算法,模拟了生物进化中的自然选择和遗传机制,通过迭代来寻求最优解,其以良好的全局搜索和对多样性保持的能力,近年来在控制领域得到了广泛应用<sup>[9]</sup>。因此,采用遗传算法对模糊控制参数进行优化调整,能够有效提高系统的响应速度和抗干扰能力。

## 1 稀土电解过程中稀土氧化物浓度控制分析

### 1.1 氧化物浓度与槽电阻的关系

稀土电解下料的控制目标是维持电解槽中稀土

[收稿日期] 2024-09-26

[第一作者] 费鹏宇(1999—),男,汉族,内蒙古锡林浩特人,硕士研究生,研究方向为稀土电解智能控制。

[通信作者] 王新春(1974—),男,汉族,内蒙古包头人,硕士,副教授,研究方向为电力电子技术和嵌入式系统。

[基金项目] 国家重点研发计划(2023YFB3506800)。

氧化物的浓度在一个合理区间,从而确保电解槽稳定运行在较窄的稀土氧化物低浓度区域。稀土电解和铝电解的生产过程十分相似,其共同理论基础是,在槽况稳定而且极距的变化对阳极底的形态几乎没有影响的情况下,似在电阻(或表观槽电阻,简称为槽电阻)、浓度和极距之间存在特定的关系,如图1所示。其中 $D$ 表示极距, $m$ 表示极距变化量。

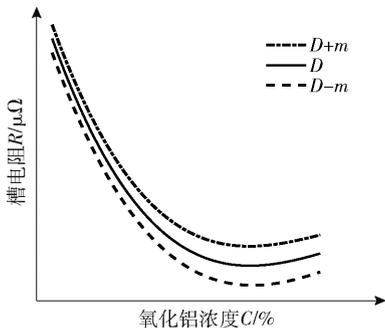


图1 槽电阻-氧化铝浓度曲线

Fig. 1 Cell resistance-alumina concentration curve

从图1中可见,在固定极距的情况下,氧化铝浓度与槽电阻之间呈现出类似“U型”的定性关系<sup>[10]</sup>。这表明,极距的改变主要影响到槽电阻与氧化铝浓度关系曲线的高度,实际上并未改变其整体形状,因此,如果忽略极距变化带来的影响,那么控制系统就能够依靠跟踪氧化铝浓度变化过程中的槽电阻的相应变化来识别出氧化铝浓度所处的阶段。通过借鉴铝电解领域的相关经验和理论应用在稀土电解工艺上,基于槽电阻与氧化物浓度的关系,设计一种应用在稀土电解中的稀土氧化物浓度模糊控制器。这一控制器能够根据实时的槽电阻情况,调节下料速率,从而改变氧化稀土的浓度,以确保稀土电解槽稳定运行在适宜的浓度范围内<sup>[11]</sup>。目前在稀土电解工艺中,槽电压和槽电流是两个十分重要的控制信号,可以通过控制器中的采样装置进行在线实时同步采集。槽电阻的采样值通常由槽电压 $U$ 、槽电流 $I$ 的采样值计算得到详见式(1)。这些值在进行滤波处理后,被用作稀土电解过程实时控制的主要参数。

$$R_0(n) = \frac{U(n) - B}{I(n)} \quad (1)$$

式中: $R_0(n)$ 表示在 $t_n$ 时刻的原始槽电阻(即采样值); $U(n)$ 表示在 $t_n$ 时刻槽电压采样值; $I(n)$ 表示在 $t_n$ 时刻槽电流采样值; $B$ 表示其他电压降,需要根据各生产厂家设备参数的不同而设定。

槽电阻 $R$ 对氧化物浓度 $C$ 的变化率 $\frac{dR}{dC}$ 与槽电阻 $R$ 对时间 $t$ 的变化率 $\frac{dR}{dt}$ 之间存在式(2)所示关系。

$$\frac{dR}{dt} = \frac{dR}{dC} \frac{dC}{dt} \quad (2)$$

当控制系统以特定的速率安排下料使得 $\frac{dC}{dt} \neq 0$

且基本保持恒定时,斜率 $\frac{dR}{dt}$ 可以近似与 $\frac{dR}{dC}$ 成正比的关系。槽电阻的变化速率可用来反映氧化稀土浓度的范围,因此通过监测槽电阻的变化趋势可以了解氧化稀土在电解过程中的浓度变化情况,如图2所示。

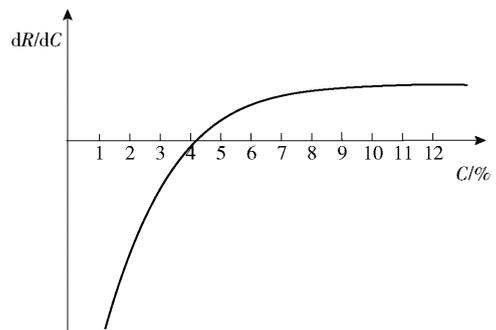


图2 槽电阻变化率-氧化稀土浓度关系曲线

Fig. 2 Cell resistance change rate-rare earth oxide concentration relationship curve

将电阻变化率与浓度关系曲线划分成低、中、高浓度区,如图3所示。下料速率变化的程度越大,电阻斜率就越大,对稀土氧化物浓度变化的反应也越显著。

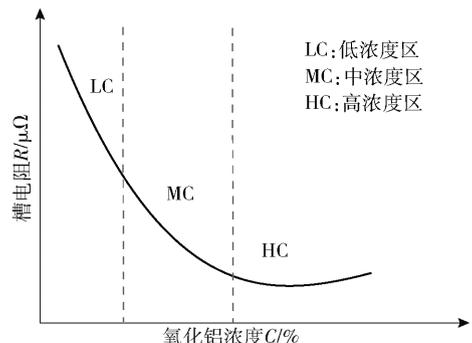


图3 槽电阻-氧化物浓度区域划分

Fig. 3 Cell resistance-oxide concentration zonation

根据上述分析,保持适当的稀土氧化物浓度在稀土熔盐电解中显得尤为重要。过高的浓度会对金属的纯度产生直接影响,同时也可能导致槽电阻的变化缓慢;相反,过低的稀土氧化物浓度则可能引发阳极效应,导致电解过程中能耗增加,需要及时加以控制和调整。在低浓度区域下,稀土氧化物浓度的波动和变化会更为敏感和迅速。因此,为了维持稀土熔盐电解的高效和稳定,合理的稀土氧化物浓度应该位于不会触发阳极效应的低浓度区域。也就是将槽电阻维持在以人工设定电阻值为中心的目标区域内,这样可以更好保障生产顺利进行。在铝电解领域中经过大量的研究和实验得到氧化铝浓度的最佳范围是 1.5% ~ 3.5% 之间。综合考虑铝电解领域的控制经验、稀土元素复杂的化学性质以及现场工作人员的实践总结后,可以得出结论,稀土电解过程中稀土氧化物的理想浓度区域为 2.0% ~ 3.0%,此时电解槽内状态稳定并且具有较高的电流效率和较低的能耗<sup>[12]</sup>。

### 1.2 目标电阻值的选取

不同稀土厂家设定的目标电阻值会有所差别,目标电阻值的设计通常根据电解槽的电压平衡方程计算得到。稀土电解槽槽电压总体划分为 5 个不同的部分,分别是结构压降、熔体电压降、分解电压降、阴极以及阳极电压降<sup>[13]</sup>。随着电解质中稀土氧化物浓度变化的只有熔体压降,即式(1)计算槽电阻所需要的槽电压。

电解槽各部分电压降可以通过稀土电解槽工艺参数和各结构的物性参数计算得到,详见式(3)。

$$V_{\text{总}} = V_{\text{结构}} + V_{\text{熔}} + V_{\text{分解}} + V_{\text{阴}} + V_{\text{阳}} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{总}}$ 为总槽电压,通过对现场 6 kA 电解槽各部分进行分段式测量得到  $V_{\text{总}} = 9.24 \text{ V}$ ;  $V_{\text{结构}}$ 指结构压降,在总槽电压中占据较大的比例,经数字电压表测量可得  $V_{\text{结构}} = 2.93 \text{ V}$ ;  $V_{\text{分解}}$ 为分解电压,工业生产槽上测定分解电压较为困难,一般认为稀土电解槽的分解电压经验值为 1.65 V 左右;  $V_{\text{阴}}$ 和  $V_{\text{阳}}$ 为阴极和阳极的电压降,可根据欧姆定律计算得出  $V_{\text{阴}} = 0.274 \text{ V}$ ,  $V_{\text{阳}} = 0.485 \text{ V}$ ;  $V_{\text{熔}}$ 为熔体压降,通过计算测量出的电解槽内其他各部分电压相减获得其相应数值。

将各部分的相关压降带入式(3),得到  $V_{\text{熔}} = 3.901 \text{ V}$ 。将熔体压降 3.901 V 和槽电流 6 000 A 带入式(1)中,计算得到目标电阻值为 650  $\mu\Omega$ 。

## 2 系统控制方法

### 2.1 模糊控制算法

模糊控制是一种基于语言描述和模糊逻辑的控制方法,其通过对输入量的模糊化、模糊推理和解模糊化等过程,实现对被控对象的控制。相较于传统 PID 控制方法,模糊控制系统能够更好处理非线性、不确定性系统,并能有效弥补传统控制方法的缺陷。其采用模糊集合理论来表达和处理模糊信息,利用模糊规则和模糊推理实现决策过程,从而实现复杂系统的精准控制和优化调节。计算机控制技术的引入使得模糊控制系统具有更高的智能化和自适应性,适用于各种工业和科学领域的控制问题<sup>[14]</sup>。模糊控制可以根据系统误差的变化实时调整控制参数,从而提高系统的控制精度并增强系统的稳定性,其原理如图 4 所示。

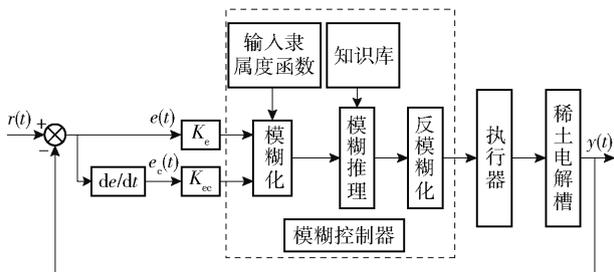


图 4 模糊控制器结构框图

Fig. 4 Block diagram of fuzzy controller structure

根据控制需求,确定模糊控制器有 2 个输入量,分别为槽电阻变化量  $e(t)$  及槽电阻变化率  $e_c(t)$ ; 输出为稀土氧化物的下料速率  $u$ 。为使稀土氧化物浓度处于合理区域,通过对稀土电解槽特性的深入研究,并参照现行模糊控制器的设计策略,设置输入、输出的模糊论域分别为:  $E = [-3, 3]$ ;  $EC = [-3, 3]$ ;  $N = [-6, 6]$ 。实际论域和模糊论域之间可以通过引入量化因子和比例因子来建立联系,从而实现两者之间的有效映射和转换<sup>[15]</sup>。

量化因子与比例因子的选取由模糊论域和变量的实际值决定。设槽电阻与设定电阻误差  $e$  的实际论域为  $[R_1, R_2]$ , 且  $|R_1| \neq |R_2|$ , 则量化因子  $K_e$  表达为式(4)。

$$K_e = \frac{2n}{R_2 - R_1} \quad (4)$$

将设定槽电阻与实际槽电阻的偏差变化率记为

$ec$ , 设实际论域为  $[R_3, R_4]$ , 且  $|R_3| \neq |R_4|$ , 则量化因子  $K_{ec}$  表达为式(5)。

$$K_{ec} = \frac{2m}{R_4 - R_3} \quad (5)$$

设输出  $u$  为下料速率, 设实际论域为  $[U_1, U_2]$ , 且  $|U_1| \neq |U_2|$ , 则比例因子  $K_u$  为式(6)。

$$K_u = \frac{U_2 - U_1}{2i} \quad (6)$$

式(4) ~ (6) 中:  $n, m, i$  分别表示模糊论域的上限值。

设定变量  $e, ec$  和  $u$  的实际论域为  $e = [-30, 30], ec = [-8, 8], u = [0, 5]$ , 则根据上式计算出量化因子与比例因子为  $K_e = 0.1, K_{ec} = 0.375, K_u = 0.417$ 。

输入输出变量的基本论域相对应的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$ , 即  $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$ 。输出的隶属度函数选择三角型, 模糊推理方法选择 Mamdani min-max 法。模糊控制规则是模糊控制的核心部分, 通常基于人的经验来制定, 其合理性会直接影响控制器的控制效果。通过对稀土熔盐电解过程中输入、输出量的分析, 并结合实际生产情况得到模糊规则表(表1), 根据表1在 MATLAB 中设置好控制规则, 可以观察到模糊控制规则曲面, 如图5所示。

在去模糊化时, 考虑到模糊子集的权重和中心值等信息, 为保证模糊控制系统的性能和稳定性, 采用重心法对经过模糊推理后的系统进行解模糊化。利用 MATLAB 的 Simulink 工具搭建模糊控制器的仿真, 给定输入信号为人工设定槽电阻  $650 \mu\Omega$ , Simulink 仿真模型如图6所示。将模型的参数进行调整并对其进行仿真验证, 可以观测到模糊控制器的控制效果, 如图7所示。

通过图7可以得到, 模糊控制的超调量约为9%, 调节时间约为25s, 其控制效果并不理想。另

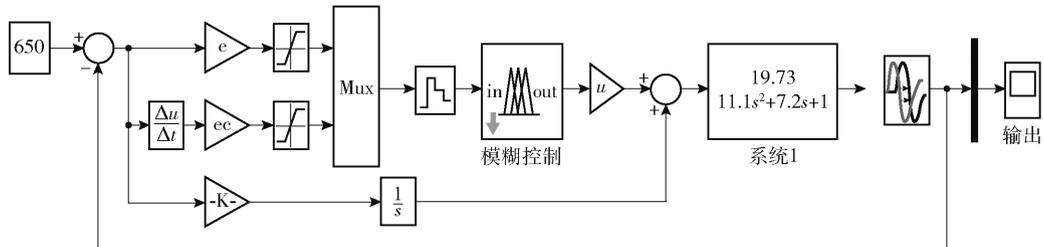


图6 模糊控制 Simulink 仿真模型

Fig.6 Fuzzy control Simulink simulation model

表1 模糊推理规则表

Table 1 The fuzzy inference rule table

N	E							
	EC	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z	
NM	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z	
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PM	PM	
Z	NB	NB	NM	Z	PM	PB	PB	
PS	NM	NM	Z	PS	PM	PB	PB	
PM	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB	
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB	

注: E 和 EC 表示两输入量的模糊论域; N 表示输出量的模糊论域;  $\{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$  表示输入输出变量的模糊集合  $\{负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大\}$ 。

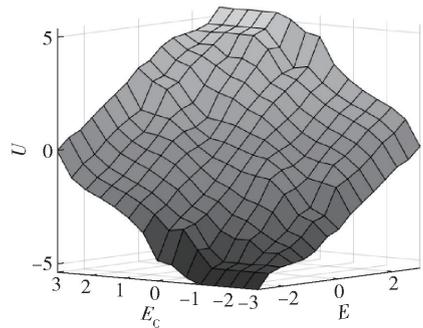


图5 模糊控制规则曲面图

Fig.5 Fuzzy control rule surface diagram

一个影响模糊控制性能的重要因素就是对于量化因子和模糊因子的选取, 然而这些参数大多依赖经验, 并且参数在模糊控制器设置好后是不可调整的, 因此还存在对模糊控制优化的空间。

## 2.2 遗传算法优化模糊控制

遗传算法(GA)是一种高效的全局搜索方法, 具有处理多参数最优化问题的能力<sup>[16]</sup>。传统模糊控制器的参数整定依赖于人的知识和经验, 存在一定

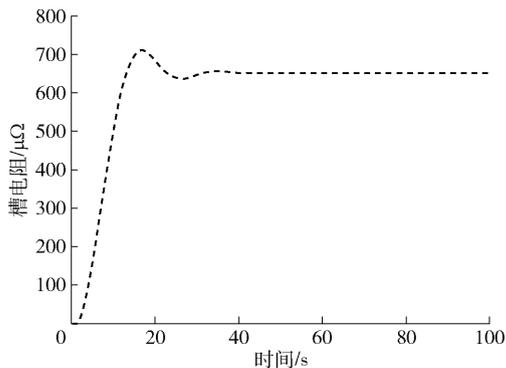


图7 模糊控制器控制效果

Fig. 7 Fuzzy controller control effect

的限制。因此本文在模糊控制理论上,通过遗传算法对模糊控制中需要实时调整的比例因子和量化因子进行寻优处理,得到输出性能更好的参数<sup>[17]</sup>,其控制原理如图8所示。

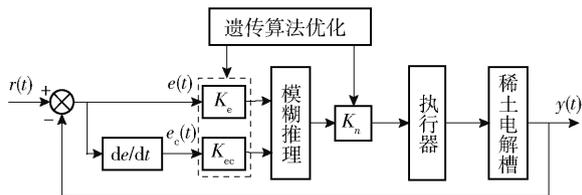


图8 遗传算法优化模糊控制原理图

Fig. 8 Genetic algorithm optimized fuzzy control schematic

遗传算法的具体过程如下所述。

1) 染色体编码在遗传算法中,常见的编码方式包括二进制编码、自然数编码、实数编码和树形编码等,本文选择实数编码作为遗传算法的编码方式。将待优化的量化因子和比例因子作为个体中的基因,系统不断对以上参数进行寻优,改善原有模糊控制器的性能。

2) 适应度函数适应度函数的计算是遗传算法运行的关键一环,直接影响到染色体的选择,因此对于算法的功能十分重要<sup>[18]</sup>。为寻找模糊控制器量化因子和比例因子的最优值,选择时间乘绝对误差积分(Integral of Time and Absolute Error, ITAE)最佳性能指标作为目标函数,从而其适应性函数可描述为式(7)。

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (7)$$

式中:J表示ITAE性能指标;e(t)为绝对误差;t为

时间。

3) 选择操作选择操作的目的是在进化过程中用于选择优秀个体,该操作决定了哪些个体将被传递到下一代,并决定了进化过程中的多样性。在选择策略方面,本文采用锦标赛法,即每轮从群体中随机选择一定数量的个体,然后根据表现选择出最优秀的个体,将其保留并纳入下一代种群。这个选择过程会循环进行,直至新种群的规模达到原种群规模为止。锦标赛法的优势在于能够有效保留优秀个体、减少不良个体的影响,并通过竞争选择促进种群进化。

4) 交叉、变异操作。交叉操作主要是将两个父代个体的染色体片段互相交换,产生一组新的后代个体;变异操作主要是对个体的染色体进行随机的改变,引入新的基因信息。根据实际情况,选取交叉概率 $P_c$ 为0.8,变异概率 $P_m$ 为0.2,种群中个体数量取为20。

5) 终止条件将进化代数作为遗传算法终止参数,设定最大进化代数为30,当达到指定代数则终止运算,并将当前族群中的最优个体作为最优解输出。具体的遗传算法优化模糊控制的寻优流程如图9所示。

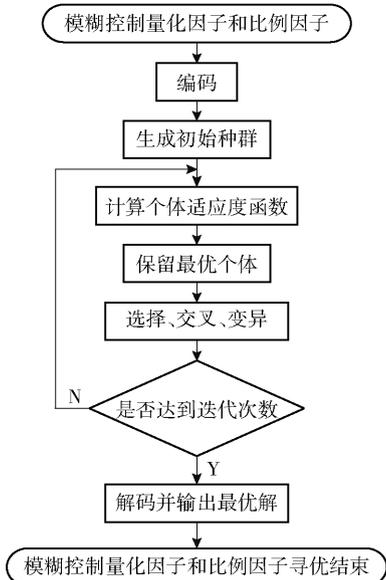


图9 基于遗传算法的模糊控制流程图  
Fig. 9 Block diagram of fuzzy control process based on genetic algorithm

### 3 仿真模型与仿真结果

为验证该方法的可行性,在 MATLAB/Simulink 环境下对基于遗传算法优化的稀土氧化物浓度模糊控制策略进行了仿真研究。鉴于稀土电解槽内部变化是一个复杂的化学反应过程,难以通过机理方法

建立准确的数学模型,因此通过测量下料速率与槽电阻等数据,利用系统辨识的方法建立该系统的传递函数模型。为了对比不同控制方法的控制效果,将遗传算法优化后的模糊控制与传统 PID 控制和模糊控制三种控制方法进行比较,Simulink 仿真模型如图 10 所示,仿真结果如图 11 所示。

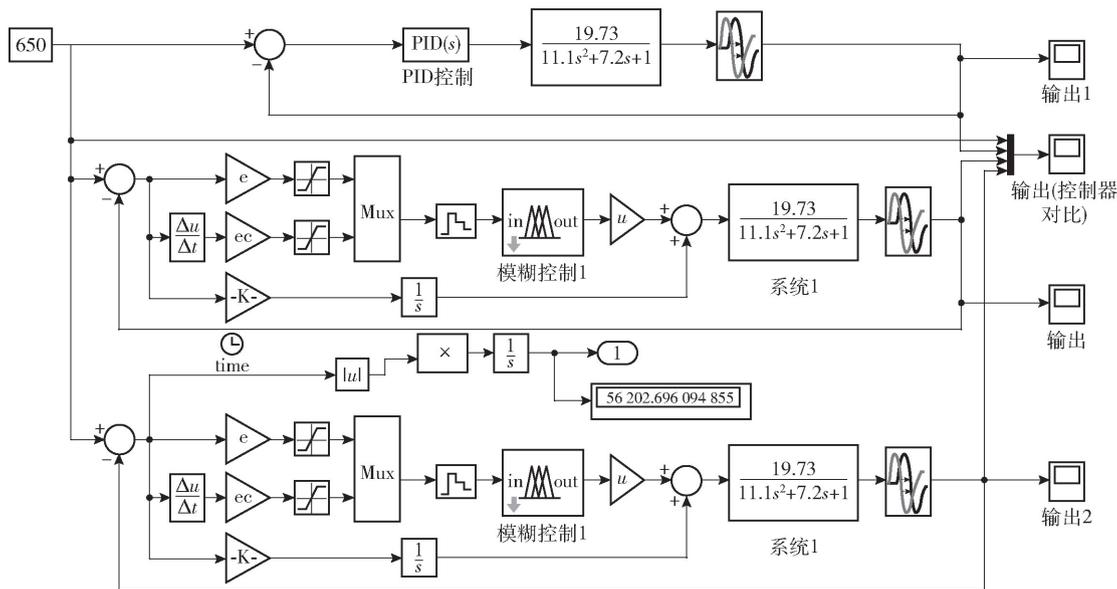


图 10 Simulink 仿真模型

Fig. 10 Simulink model

由图 11(a)可以看出,经过遗传算法优化后得到最优的比例因子  $K_e$  为 0.01,  $K_{ec}$  为 0.03, 量化因子  $K_u$  为 7.94。从图 11(b)可以得到最优适应值为 22 617。图 11(c)为经过遗传算法优化的模糊控制仿真结果,与传统 PID 控制和模糊控制的仿真结果进行对比,选取 PID 参数为  $K_p = 0.03$ 、 $K_i = 0.012$ 、 $K_d = 0.1$ , 三种控制策略参数对比结果见表 2。由图 11(c)和表 2 可知,遗传算法优化的模糊控制在超调量方面相比于 PID 控制和模糊控制得到了很大程度改善。

表 2 不同控制方式下的参数比较

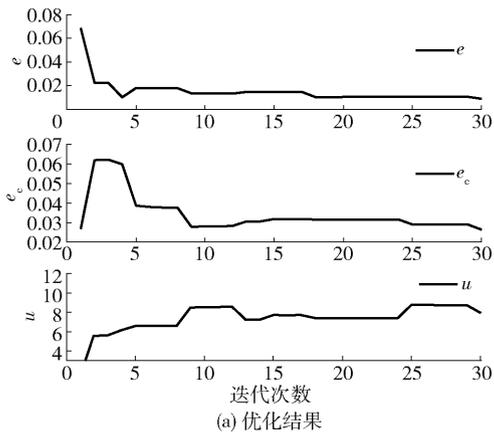
Table 2 Comparison of parameters in different control modes

控制策略	超调量/%	调节时间/s	峰值时间/s
PID	21	46	19
模糊控制	9	25	16
GA 优化模糊控制	0.1	16	14

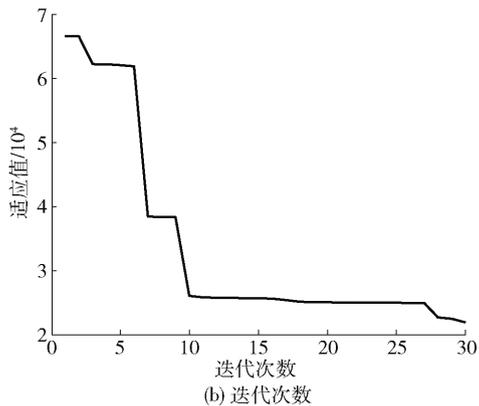
在调节时间上,遗传算法优化的模糊控制比经典 PID 控制缩短了约 65.2%,比模糊控制缩短了约 45%。在峰值时间上,遗传算法优化的模糊控制比经典 PID 控制减少了约 26.3%,比模糊控制减少了约 12.5%。

### 4 实际工程验证

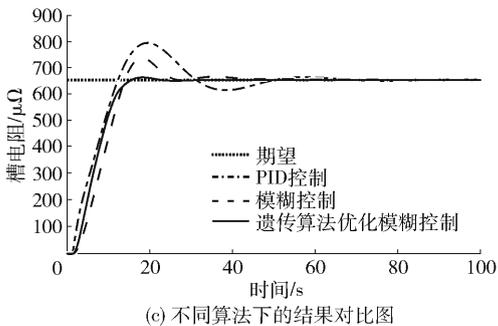
为验证采用遗传算法优化的模糊控制策略后稀土氧化物浓度能否控制在合理区域,对包头某稀土厂多台电解槽进行了取样分析。综合考虑采集、测试和分析每个取样点需要的时间和成本,选择采集电解槽内 4 个点的稀土氧化物浓度平均值来代表该电解槽总体浓度。为使这 4 个点的浓度值更具代表性,选取电解槽内石墨阳极与阴极之间的中心位置作为采集点,这样可以较好覆盖电解槽的整个区域,符合现场实际的生产情况,具体电解槽结构及测点示意如图 12 所示。稀土氧化物浓度数据通过现场采集电解质样品并由实验室化验获取,表 3 是对其中某台稀土电解槽的 4 点(A1、A2、A3、A4)连续跟



(a) 优化结果



(b) 迭代次数



(c) 不同算法下的结果对比图

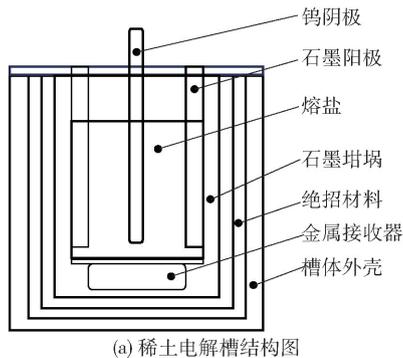
图 11 仿真结果

Fig. 11 Simulation results

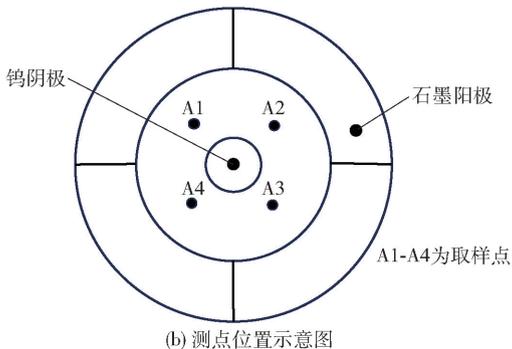
踪 240 min 的稀土氧化物浓度测试值的优化前后对比(每 30 min 一组)。

由表 3 可知,电解槽内部分测点的浓度受到温度、下料量、槽型和人工采集等因素的影响会与理想范围存在一定的偏差,但优化后的总体浓度均值相较于优化前可以更好的维持在低浓度目标区域内。稀土氧化物浓度波动在 2.0% ~ 3.0% 范围,各测点变化趋势一致,没有出现浓度大范围波动的情况。

对该电解槽优化前后的槽电压、槽电流信号进行采样,采样频率设置为 1 Hz,并通过上述式(1)计



(a) 稀土电解槽结构图



(b) 测点位置示意图

图 12 6 kA 稀土电解槽的结构及测点位置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the structure of the 6 kA rare-earth electrolyzer and the location of the measurement points

算得到槽电阻数据。将优化前后的槽电阻数据进行对比,具体控制效果如图 13 所示。

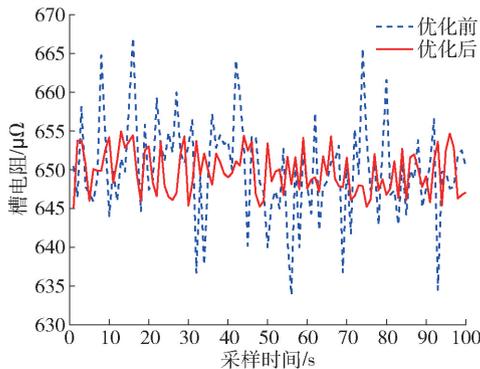


图 13 槽电阻控制效果对比图

Fig. 13 Cell resistance control effect comparison

由图 13 可见,优化前的槽电阻信号(即原始信号)稳定在 630  $\mu\Omega$  至 670  $\mu\Omega$  的范围内。通过遗传算法优化后的模糊控制,可以实现将槽电阻控制在 645  $\mu\Omega$  到 655  $\mu\Omega$  的范围内。经过对比,优化后的模糊控制具有更优秀的控制效果。

表3 稀土氧化物浓度跟踪测试值

Table 3 Rare earth oxide concentration tracking test values

取样点	稀土氧化物浓度/%									
	优化前					优化后				
	A1	A2	A3	A4	均值	A1	A2	A3	A4	均值
1 <sup>#</sup>	1.56	1.66	2.15	2.23	1.90	2.10	2.02	2.79	2.63	2.39
2 <sup>#</sup>	1.72	1.98	2.34	2.08	2.03	1.94	2.75	2.71	2.20	2.40
3 <sup>#</sup>	1.97	2.04	1.72	2.49	2.06	2.59	2.15	1.82	2.86	2.36
4 <sup>#</sup>	1.80	1.58	1.92	2.05	1.84	2.58	2.11	2.88	2.62	2.55
5 <sup>#</sup>	2.12	2.32	2.73	2.46	2.41	2.06	2.08	2.71	2.63	2.37
6 <sup>#</sup>	1.64	2.12	1.72	2.34	1.96	1.91	2.34	2.13	2.42	2.20
7 <sup>#</sup>	1.76	1.79	1.95	2.06	1.89	2.66	2.09	2.53	2.08	2.34
8 <sup>#</sup>	1.31	1.58	1.93	1.56	1.60	2.12	1.86	2.49	2.14	2.15

## 5 结论

本文提出一种基于遗传算法优化的模糊控制策略,该方法对氧化稀土浓度模糊控制器的量化因子和比例因子进行寻优,以实现稀土熔盐电解过程中稀土氧化物浓度的精确控制。通过 MATLAB/Simulink 进行仿真实验,仿真结果表明,当比例因子和量化因子  $K_e$ 、 $K_{ec}$ 、 $K_u$  分别为 0.01、0.03 和 7.94 时系统达到最优。相较于传统 PID 控制器和模糊控制器,采用遗传算法进一步优化后的模糊控制系统响应速度更快且几乎无超调。实际工程应用结果表明,基于遗传算法优化的模糊控制方法可以将稀土氧化物浓度控制在理想区域内,能够满足现场稀土熔盐电解的工作需求。由于该方法采用遗传算法进行优化,优化过程需要较多的计算资源和时间,尤其是在稀土氧化物浓度控制这种复杂系统中,后续可以考虑对遗传算法进行改进,以提高优化的效率和精度。

### [参考文献]

- [1] 林河成. 我国稀土工业的发展及对策[J]. 中国有色冶金, 2004, 33(2): 24-29.  
LIN Hecheng. Development and countermove of rare-earth industry in China[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2004, 33(2): 24-29.
- [2] 郭探, 王世栋, 叶秀深, 等. 熔盐电解法制备稀土合金研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2012, 42(9): 1328-1336.  
GUO Tan, WANG Shidong, YE Xiushen, et al. Research progress in the preparation of rare earth alloys by molten salt electrolysis method[J]. Scientia Sinica (Chimica), 2012, 42(9): 1328-1336.
- [3] 颜世宏, 李宗安, 赵斌, 等. 我国稀土金属产业现状及其发展

前景[J]. 稀土, 2005(2): 81-86.

YAN Shihong, LI Zongan, ZHAO Bin, et al. China's rare earth metals industry status and its development prospects[J]. Chinese Rare Earths, 2005(2): 81-86.

- [4] 杨培宏, 王新春, 刘玉宝, 等. 稀土熔盐电解智能控制系统研究与应用[J]. 稀土, 2022, 43(3): 34-10003.  
YANG Peihong, WANG Xinchun, LIU Yubao, et al. Research and application of intelligent control system of rare earth molten salt electrolysis[J]. Chinese Rare Earths, 2022, 43(3): 34-10003.
- [5] 王祥生, 王志强, 陈德宏, 等. 稀土金属制备技术发展及现状[J]. 稀土, 2015, 36(5): 123-132.  
WANG Xiangsheng, WANG Zhiqiang, CHEN Dehong, et al. Development and status quo of rare earth metals preparation technologie[J]. Chinese Rare Earths, 2015, 36(5): 123-132.
- [6] YIN T Q, XUE Y, YAN Y D, et al. Recovery and separation of rare earth elements by molten salt electrolysis[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2021, 28(6): 899-914.
- [7] XI X L, FENG M, ZHANG L W, et al. Applications of molten salt and progress of molten salt electrolysis in secondary metal resource recovery[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2020, 27(12): 1599-1617.
- [8] 于兵, 刘玉宝, 张全军, 等. 熔盐电解法制备镨铈合金的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(4): 90-95.  
YU Bing, LIU Yubao, ZHANG Quanjun, et al. Preparation of Pr-Nd-Ce alloys by molten salt electrolysis[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(4): 90-95.
- [9] 李瑾瑾, 易文俊, 管军, 等. 基于遗传算法的电动舵机系统模糊 PID 控制[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 142(3): 162-167.  
LI Cuicui, YI Wenjun, GUAN Jun, et al. Fuzzy PID control of electric actuator system based on genetic algorithm[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(3): 162-167.

- [10] 刘业翔, 李劼. 现代铝电解[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 388.  
LIU Yexiang, LI Jie. Modern aluminum electrolysis [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 388.
- [11] 尚海, 王新春. 基于模糊控制的氧化稀土浓度控制研究[J]. 电工技术, 2022(20): 13-15.  
SHANG Hai, WANG Xinchun. Study on concentration control of rare earth oxide based on fuzzy control[J]. Electric Engineering, 2022(20): 13-15.
- [12] 白文波. 复杂电解质体系下铝电解过程中氧化铝浓度的控制探讨[J]. 科学技术创新, 2018, (36): 53-54.  
BAI Wenbo. Discussion on the control of alumina concentration in aluminum electrolysis process under complex electrolyte system [J]. Scientific and Technological Innovation, 2018, (36): 53-54.
- [13] 陈国华, 王小青, 张志宏, 等. 稀土熔盐电解槽的电压平衡计算[J]. 稀土, 2013, 34(1): 86-89.  
CHEN Guohua, WANG Xiaoqing, ZHANG Zhihong, et al. Calculation of voltage balance of rare earth electrolytic cell[J]. Chinese Rare Earths, 2013, 34(1): 86-89.
- [14] 杨世勇, 徐国林. 控制与PID控制的对比及其复合控制[J]. 自动化技术与应用, 2011, 30(11): 21-25.  
YANG Shiyong, XU Guolin. Comparison and composite of fuzzy control and PID control [J]. Techniques of Automation and Applications, 2011, 30(11): 21-25.
- [15] 杨昕红, 刘长文. 基于MATLAB的直流无刷电机模糊PID控制设计[J]. 仪表技术与传感器, 2019(11): 105-108.  
YANG Xinhong, LIU Changwen. Fuzzy PID Control Design of Brushless DC motor based on MATLAB [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(11): 105-108.
- [16] 张秋尧, 高自成, 贾国海, 等. 基于遗传算法的芦苇笋采收机模糊PID控制策略研究[J]. 液压与气动, 2023, 47(1): 103-110.  
ZHANG Qiuyao, GAO Zicheng, JIA Guohai, et al. Research on fuzzy PID control strategy of reed shoot harvester based on genetic algorithm [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2023, 47(1): 103-110.
- [17] 张威, 何锋. 基于GA优化模糊PID的纯电动汽车动力总成温度控制[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(3): 21-25.  
ZHANG Wei, HE Feng. Temperature control of pure electric vehicle powertrain based on GA-optimized fuzzy PID [J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2023, 61(3): 21-25.
- [18] 孙嘉梁, 符晓. 遗传算法优化的移相全桥变换器模糊PID控制[J]. 测控技术, 2022, 41(5): 113-118.  
SUN Jialiang, FU Xiao. Fuzzy PID control of phase shift full-bridge converter optimized by genetic algorithm [J]. Measurement & Control Technology, 2022, 41(5): 113-118.

## Fuzzy control strategy of rare earth oxide concentration based on genetic algorithm optimization

FEI Pengyu, WANG Xinchun, YANG Peihong, WANG Zhen

(School of Automation and Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** Aiming at the current low level of automation in rare earth electrolysis industry, a fuzzy control method of rare earth oxide concentration based on genetic algorithm (GA) optimization is proposed. Combined with the characteristics of rare earth molten salt electrolysis process, the relationship between cell resistance, rare earth oxide concentration and discharging rate is analyzed to determine the corresponding concentration control strategy. The iterative optimization ability of the genetic algorithm is used to realize the dynamic adjustment of the quantization factor and the scale factor of the fuzzy control, so as to obtain a fuzzy controller with better performance. Simulation verification is carried out through Simulink, and the results show that when the scale factor and quantization factor  $K_e$ ,  $K_{ec}$ ,  $K_u$  are 0.01, 0.03 and 7.94 respectively, the system reaches the optimal, the overshoot of the fuzzy controller is 0.1%, and the adjustment time is 16 s, which is improved compared with the traditional PID control and fuzzy control. The practical engineering application results show that the fuzzy control method can control the concentration of rare earth oxide in the ideal area, which can meet the working requirements of rare earth molten salt electrolysis on site. Because this method is optimized by genetic algorithm, more computing resources and time are needed in the complex system of rare earth oxide concentration control. In the future, the algorithm should be improved to improve the optimization efficiency and accuracy.

**Key words:** rare earth molten salt electrolysis; rare earth oxide concentration; cell resistance; discharging rate; genetic algorithm; fuzzy control