

# 稀土萃取过程智能控制系统优化技术

赵石平

广西国盛稀土新材料有限公司 广西 崇左 532200

**摘要：**稀土萃取过程中，由于稀土具有多相传质、反应复杂等特性，在稀土萃取时容易出现非线性时变特点，在一定范围影响了稀土萃取的总体效率。在智能技术不断发展背景下，通过将神经网络、模糊控制、遗传算法等智能方法相结合能够实现稀土萃取智能控制系统优化，能打破了传统控制对严格数学模型的依赖。文章分析稀土萃取工艺，解析稀土萃取过程特性分析，结合稀土萃取工艺实际，提出了基于多种智能技术的优化方案，有效提升了萃取过程的稳定性与效率，保障产品纯度，降低能耗，为稀土萃取过程调控提供有益的技术方案。

**关键词：**稀土萃取；控制系统；智能技术

## 引言

稀土萃取过程因其多相传质、复杂的反应和多参数耦合的性质而具有较强的非线性时变特点，传统的控制技术难以达到理想的控制效果。随着智能制造技术的不断发展，一种全新的智能控制优化技术可以很好地解决上述问题。将神经网络、模糊控制、遗传算法等多种智能方法有机地结合起来，可以通过打破传统控制必须有严格的数学模型的前提条件来提高稀土萃取过程的稳定性以及效率。

## 1 稀土萃取工艺简介

目前，工业上常用的稀土萃取分离方法主要是溶剂萃取法。该方法的基本原理是利用稀土元素在有机相和水相之间分配系数的差异，通过多次的萃取、洗涤和反萃操作，实现单一稀土元素的分离提纯。在溶剂萃取法中，混合澄清槽是应用最为广泛的萃取设备之一。它由一系列的混合室和澄清室组成，混合室的作用是使有机相和水相充分接触、混合，促进稀土元素在两相之间的传质。澄清室则是让混合后的两相进行分层，实现有机相和水相的分离，如图1所示。从图中可以清晰地看到混合室和澄清室的布局以及两相的流动方向。

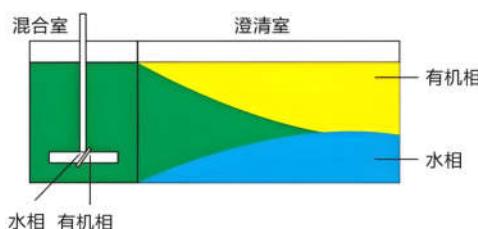


图1 混合澄清槽的结构示意图

**作者简介：**赵石平（1984.9.30），男，汉族，籍贯：湖南湘潭，本科，职称助理工程师，研究方向：机械设计制造及其自动化（或稀土智能制造）

## 2 过程特性分析

### 2.1 非线性

在稀土的萃取过程中，包括分配系数、传质速率等在内的诸多重要参数和操作参数存在非线性的关系。例如，同样的温度条件下，随着温度的增大，其分配系数并未按线性的方式增加，而是随着不同温度区间变化的速率不同。由于非线性的特点，所以不能简单的采用线性模型来表示整个提取过程，不利于过程的控制。

### 2.2 多变量耦合

对于整个萃取过程，其诸多的变量间是具有密切耦合的关系的，在实际运行过程中如果进料流量发生变化，则会导致混合室的两相接触时间与传质效率变化，进而一定程度上影响到萃取效果以及产品的纯度。除此之外进料流量变化同样会对温度、酸度等产生一定影响，这种多变量间的耦合性，就注定了无法只通过调控某一个变量从而实现对整个系统的控制作用，必须对多变量进行协同调节。

### 2.3 参数时变

随着萃取过程的进行，料液的组成不断变化，而有机相的性能也会不断衰退。随着萃取次数增加，原有的有机相可能会由于使用时间较长等原因使得其萃取能力变弱，导致分配系数变化。因此针对不同工艺阶段下的关键控制参数，控制系统需要有很强的自适应性，及时调整控制策略来适应生产过程的变化。

## 3 稀土萃取过程智能控制系统优化技术应用

### 3.1 基于神经网络的萃取过程建模技术应用

基于神经网络的萃取过程建模技术，是指建立一种描述稀土萃取过程输入输出关系的网络模型。要想建立上述模型，首先要确定输入变量和输出变量，输入变量一般是稀土进料浓度、进料流量、有机相流量、萃取体

系温度、酸度等萃取工艺的工艺参数。而输出变量则是反映萃取过程主要影响因素的参数，包括萃取率、分离系数。对于已获取过程数据之前进行数据清洗、数据归一化等一系列前期准备工作，从而去除数据噪声及异常值，减少其对于模型训练的影响。而在神经网络的结构上，由于它属于多使用多层前馈网络。而输入层神经元个数等于输入变量维数，输出层神经元个数等于输出变量维数，隐藏层层数和神经元个数是需要通过不断地调试得到的最佳的模型结构。

此外，模型训练的过程就是不断的调整网络各层之间连接权值与偏置的过程，在训练过程中，利用反向传播算法，把实际输出与期望输出之间的误差从输出层反向传播到输入层，并利用梯度下降法更新权值与偏置，不断的减小模型误差。且通过合理的分配数据，把数据分为训练集、验证集和测试集，用验证集衡量该模型是否存在过拟合的情况，如果存在就及时停止，若不存在就继续训练下去，直到该模型的误差小于阈值或者是训练次数达到了规定的最大值，就停止训练。

### 3.2 模糊PID控制技术应用

模糊PID控制是指利用模糊控制与PID控制相结合的一种控制方法，其首先要确定模糊控制器的输入和输出变量，通常选择系统的偏差和偏差的变化率为模糊控制器的输入。其中偏差就是指系统实际值与给定值之差，偏差变化率表示的是偏差随时间的变化率。输出变量是指PID控制器的3个参数修正量，分别为比例系数修正量、积分时间修正量以及微分时间修正量。在该技术运用的过程中，需对输入、输出变量进行模糊化处理。模糊化就是把精确的数值量转换成模糊集合，首先要确定变量的模糊论域及隶属度函数。模糊论域一般是根据该变量的实际情况选取，至于隶属度函数的选取一般可以选择三角形或梯形函数，通过隶属度函数可知每个数值隶属于每个模糊集合的程度。此后，即根据操作人员的经验或专家知识制定模糊控制规则，用“IF—THEN”的方式表示，如“IF”偏差大、“偏差的变化率大”、

“THEN”比例系数修正量为“正大”，等等。这些规则组成了模糊控制规则库，其本质是对应于某实际系统所作的实际工作经验或专家经验，因而可以说模糊控制中的“模糊性”是来源于人的经验和知识。在得到模糊控制规则后，需要进行模糊推理。模糊推理是根据输入变量的模糊值和模糊控制规则，得出输出变量的模糊集合。常用的模糊推理方法有Mamdani法等。最后，对模糊推理得到的输出模糊集合进行清晰化处理，将其转换为精确的数值量，即得到PID参数的修正量，进而对PID控

制器的参数进行在线调整。

### 3.3 遗传算法优化技术应用

对遗传算法优化技术应用于稀土萃取过程控制时，首先要对优化问题予以描述：其一是要确定作为优化目标的相关变量，一般该类问题下作为优化对象的都是萃取过程中的可调参数，包括有机相流量、萃取级数、反萃剂浓度、搅拌强度等；然后要确定好相应的取值范围。

目标函数的构建是遗传算法应用的关键步骤。根据萃取过程的优化目标建立目标函数，要把多种优化指标合并为一个单一的目标函数，或者把各项指标视作不同的目标进行多目标优化，在建立目标函数时要兼顾各个指标的优先级，在权重上做出区别对待。遗传算法实现了初始化种群，计算适应度，选择，交叉，变异等功能，其中初始化种群是指用一定的方式产生一个随机种群，种群中每个个体都表示一组优化变量取值；每个个体由若干个特征值编码构成，通常使用实数编码法来提高优化精度和效率。其中，适应度函数是用来评价某一优良程度的一个量，一般它随着目标函数的优化方向而增大，即当目标函数越大（或越小）的时候，对应的适应度值也越大（或越小）。而在计算适应度时，我们只需把个体的变量代入到目标函数中求出函数值，然后通过某种办法将其转换成适应度值即可。根据个体的适应度值从当前种群中选择一些个体作为下一代父代参与遗传算子的运算。一般的常用于选择的操作为轮盘赌选择、锦标赛选择等。

而交叉是将两个亲本的个体的部分基因位置互换而得到子代个体的方法，以增加种群的多样性和鲁棒性；交叉概率决定了被选取的染色体发生交叉的可能性。变异是在一些特殊位置上变更个体的某些基因的方式，是为了防止算法陷入局部极值，一般设置较小的变异概率。循环迭代直至满足结束条件：即可，设定的最大进化次数或者适应值到达稳定状态，则得到当前最优个体作为最后得到的参数组合。

### 3.4 专家系统辅助控制技术应用

基于专家系统辅助控制的应用首先要建立系统的知识库，其中包括稀土萃取相关领域的各类知识如基本理论知识、工艺操作要求、设备工作参数范围以及常见问题解决办法，同时也包含了还有表示知识的形式主要有产生式规则、框架、语义网等内容，其中最常用的是产生式规则，其规则表达形式主要就是“IF条件，THEN结论”的形式，其中最简单的应用条件是由前面给出的结果制约后面的实现路径。

专家系统辅助控制技术中，推理机是组成专家系统

的最重要部分之一，它根据输入的信息以及知识库中的规则做出判断和推理，得到相应的结果。推理机推理的方式有正向推理、反向推理及混合推理，其中，正向推理是从给定的事实出发，运用规则推出结论；反向推理是先确定目标结论，再寻找有关的支持这种结论的事实；混合推理则融合正向推理和反向推理。而在稀土萃取过程智能控制系统优化过程中，数据库用以保存专家系统运行过程中萃取过实时采集的各种参数等数据，因此要求数据库有很好的数据管理能力，保证各种数据的一致性和完整性。此外，解释器可以解析专家系统中所做的推理过程和推论结果，可以让用户明白它做出这一推论的原因，是根据哪些规则或者哪几条事实信息来作出判断的。解释器一般会在推理的过程中保存使用过的规则以及事实，并用自然语言描述出来。同时，专家系统还需要具备知识获取机制，即不断收集新知识并将其存放到知识库中，如此就能全面的对稀土萃取过程智能控制系统进行全面控制。

#### 4 实验验证与结果分析

##### 4.1 实验数据采集与处理

为了检验稀土萃取过程智能控制系统的优化技术是否有效，在某稀土冶炼厂的生产线上对该系统进行了1个月的运行实验，并且采集了这段时间内的进料浓度、进料流量、有机相流量、温度、酸度、萃取率、产品纯度和能耗等各类数据。

数据采集完毕后，对待采集数据清洗、异常值处理和归一化前期清洗。其中，数据清洗是清除掉一些无用的信息或者错误的数据以及噪音信号，此外，使用 $3\sigma$ 准则进行异常值的处理，对于所有大于 $\mu \pm 3\sigma$ 的数据视作异常值并将其邻近的点进行替换；对数据进行归一化，可以将数据归到[0, 1]范围内，从而提高模型训练的速度与精度。

##### 4.2 实验结果分析

###### 4.2.1 控制效果对比分析

比较智能控制系统和传统控制系统的控制效果发现，智能控制系统可保证萃取率处于较高水平且变化较小，而传统控制系统提取率变化较大且总体水平低于智能控制系统。由实践数据分析可知：智能控制系统平均萃取率92.5%，比传统控制系统高4.2%；最大萃取率波动

幅度为1.2%，比传统控制系统降低65%。

从产品纯度看，智能控制系统生产产品的纯度均值为99.93%，纯度达标率为100%。传统控制系统生产产品的纯度均值为99.85%，纯度达标率为92%，说明使用智能控制系统可以更好的保证产品质量的稳定性与可靠性。

##### 4.2.2 能耗分析

对于两种控制系统能耗进行了统计数据对比分析可知，采用智能控制系统后，单位产品的能耗为850kWh/t，比采用传统控制系统的能耗930kWh/t降低8.6%。依据该稀土冶炼厂设计年产能力来计算，使用智能控制系统后，该厂每年可节省能耗约50万kWh，节能效果显著。

##### 4.2.3 动态响应性能分析

原料成分出现突然变化时，比较两种控制系统的动态响应性能实验结果表明：智能控制系统能在10分钟内将萃取过程调整到稳定状态，而传统控制需要25分钟以上才能稳定，由此说明智能控制系统的动态响应速度更快，抗干扰能力更强，更能适应原料成分的变化。

#### 5 结语

稀土萃取过程智能控制系统优化技术通过整合神经网络建模、模糊PID控制、遗传算法优化及专家系统辅助等技术，实现对复杂萃取过程的全面调整与控制。稀土萃取过程中，该技术无需依赖精确机理模型，能有效应对过程非线性与参数时变特性。而稀土萃取过程智能控制系统优化的过程中，还需不断地创新智能技术、大数据等前卫技术的联合运用，以增强稀土萃取过程智能控制效果，确保各项工序能够高效、安全的开展。

#### 参考文献

- [1] 贺琳,李忠虎.稀土沉淀中模糊自调整PID的给料流量智能控制系统研究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2018,(02):141-142.
- [2] 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(03):34-40.
- [3] 侯成虎.稀土液体物料自动计量控制系统的[J].机械研究与应用,2022,35(03):65-67+70.
- [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(03):34-40.D
- [5] 黄德晟.离子型稀土原地浸矿的浸矿液配制自动控制系统研究[J].工业控制计算机,2022,35(12):146-148.