

文章编号: 1004 - 0609(2004)01 - 0142 - 07

# 面向生产目标的铅锌烧结过程 智能集成建模与优化控制技术<sup>①</sup>

杜玉晓, 吴敏, 桂卫华

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 采用主元分析、神经网络、专家系统等多种智能化方法, 建立了铅锌烧结过程中烧结块产量质量模型, 并由此得到了铅锌烧结过程的优化控制目标函数。并采用聚类搜索、专家系统对生产目标函数进行了优化, 以实现操作参数的优化控制。提出的面向生产目标的智能集成建模与优化控制技术, 较好地解决了多输入、多输出、强非线性、强耦合性复杂工业过程的优化控制问题, 实现了高产、低耗、优质的生产目标, 为复杂工业过程的建模与优化控制提供了一种实用的工程实现方法。

**关键词:** 铅锌烧结过程; 智能集成建模; 集成优化控制; 专家系统; 聚类搜索

中图分类号: TP273

文献标识码: A

## Intelligent integrated modelling and optimization control technology of product-orient for lead-zinc sintering process

DU Yu-xiao, WU Min, GUI Wei-hua

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

**Abstract:** The compositive agglomerate model for lead-zinc sintering process was proposed, which synthesizing a lot of intelligent technique, including principal components analysis, neural network, expert system and so on. And the target function was deduced. The optimization parameters was calculated using the cluster searching, expert system. The integrated intelligent modeling and optimization control technique provides an efficient and applied way to resolve the problem of modeling and optimization control for the complex multiple input & multiple output, strong nonlinear, strong coupling industrial process. The practical application realizes the goal of high yield, low cost and high quality.

**Key words:** lead-zinc sintering process; intelligent integrated modeling; integrated optimization control; expert system; cluster search arithmetic

密闭鼓风铅锌炉冶炼过程是一种火法铅锌冶炼技术, 称为 ISP(imperial smelting process) 法, 具有其它工艺无法比拟的优势。密闭鼓风铅锌炉冶炼技术合并了铅锌两种火法冶炼流程, 主要包括鼓风烧结焙烧和密闭鼓风炉还原熔炼两个工艺过程<sup>[1]</sup>。铅锌烧结过程是一个复杂的物理化学过程, 可以分为干燥、加热、反应、烧结 4 个阶段, 包括水分的蒸发与冷凝、固体物料的分解、氧化还原反应、固相

反应以及化学物的熔化与冷凝等<sup>[2]</sup>。对于这种具有大滞后、时变、强非线性、强耦合特性的多输入多输出复杂工业过程, 用传统方法或者单一的先进控制方法很难获得好的控制效果。国内外对于烧结过程特别是铁矿石烧结过程的研究取得了一定进展, 在实际生产过程中有效地提高了烧结生产过程的自动化控制水平<sup>[3]</sup>。

日本川崎钢铁公司从 20 世纪 80 年代初开始致

① 基金项目: 国家计委高技术产业化示范工程资助项目([2000]2498); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002GB312203)

收稿日期: 2003-02-21; 修订日期: 2003-06-10

作者简介: 杜玉晓(1973-), 男, 博士研究生。

通讯作者: 杜玉晓, 电话: 0731-8830394; E-mail: yuxiaodu@sohu.com

力于烧结操作指导系统(OGS)的研究与开发, 控制烧结料层的透气性及热值水平, 通过实现烧结过程的标准化和自动化, 使料层透气性及烧结矿质量稳定<sup>[4]</sup>。日本住友金属公司鹿岛厂开发的铁矿石综合模拟模型, 利用原料的粒度组成、制粒水分和料层中的视密度等数据来预测烧结前的料层透气性<sup>[5]</sup>。中南大学提出了透气性中心控制策略和烧结终点预报策略, 解决了烧结过程控制的长时滞问题<sup>[6]</sup>; 北京科技大学在烧结过程基本理论研究和实际应用方面取得许多突破性进展, 提出了一系列很有价值的数学模型<sup>[7]</sup>。目前国内外关于烧结过程控制的研究, 大部分都是集中在铁矿石的烧结领域, 以吸风烧结为主, 所建立的模型与实际的工业生产模型还有一定差距, 仅解决了烧结过程中的局部参数优化问题。相对于铁矿石烧结过程, 密闭鼓风烧结过程的建模与优化控制研究还在起步阶段, 对整个烧结机理的分析、烧结过程模型的建立、烧结过程的参数优化控制还需要作进一步深入的研究。

本文以韶关冶炼厂的铅锌密闭鼓风烧结过程的研究为背景, 提出了面向生产目标的智能集成优化控制技术。首先提出了以烧结块产量质量为中心的优化控制思想, 介绍了智能集成优化技术的两个组成部分: 智能集成建模技术和智能优化控制技术。智能集成建模技术结合主元分析、神经网络、专家系统等多种智能化方法, 建立了烧结块产量质量模型, 并由此得到了铅锌烧结过程的优化控制目标函数。智能优化控制技术采用聚类搜索、专家系统进行生产目标函数的优化, 实现了操作参数的优化控制。

## 1 系统结构

烧结过程的控制分为烧结矿化学成分的控制、烧结过程状态的控制和烧结能控制<sup>[3]</sup>, 要实现高产、低耗、优质的生产目标, 就要提高烧结块的产量, 保证烧结块的质量(工艺要求烧结块的含铅量控制在 18% ~ 22% 之间, 烧结块的含硫量控制在 1% 以内)。

铅锌烧结过程的实时数据由  $\mu$ XL 集散控制系统采集并实时显示, 操作人员指令通过 DCS 键盘输入后直接进行烧结过程控制, 系统控制周期为 1s。智能优化控制系统与底层的  $\mu$ XL 集散控制系统通过串口采用专用的通信协议进行通信, 数据刷新周期为 1mm, 控制通信周期为 3mm。采用偶校验、和校验以及数据滤波的方法保证数据通信的可靠性, 数据刷新速度为  $1\text{min}^{-1}$  时可满足智能优化控制系统对实时性的要求。

铅锌烧结过程智能集成优化控制系统主要包括智能集成建模和集成优化控制 2 个部分: 1) 智能集成建模包括烧结块产量神经网络模型、烧结块含铅量神经网络模型、烧结块含硫量神经网络模型、综合工况模型; 2) 集成优化控制主要包括聚类搜索算法和优化操作专家系统。

铅锌烧结过程操作优化控制系统控制原理框图如图 1 所示。首先根据当前的烧结混合料成分和工况参数进行烧结块产量  $B_k$  和烧结块含铅量  $B_{Pb}$ 、烧结块含硫量  $B_S$  预测, 然后根据综合工况模型计算

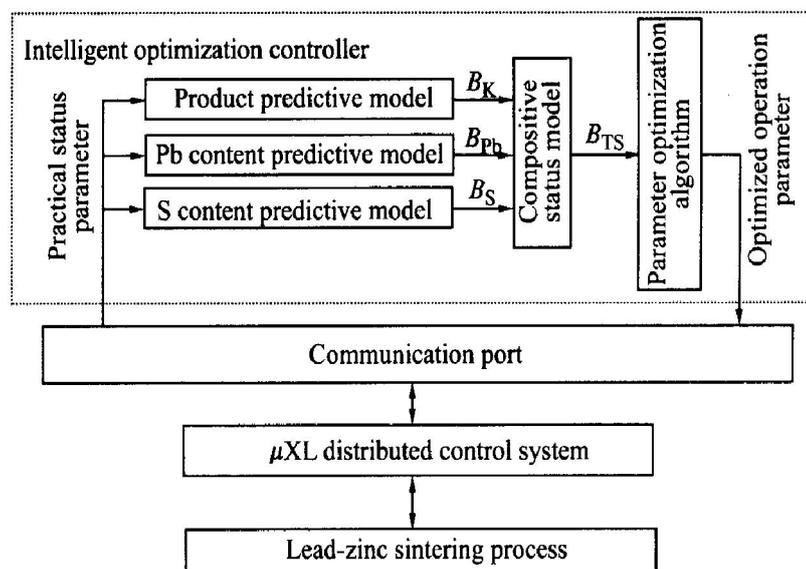


图 1 烧结过程智能优化控制系统原理框图

Fig. 1 Principle frame of intelligent optimization control system for sintering process

出当前的综合工况指标  $S_{TS}$ ，再根据专家判断模型判断当前的综合工况。如果非优，则进行参数优化；如果为优，则继续保持当前综合工况；操作优化样本库中保存有大量的各种不同物料成分情况下的优化操作参数，事实上相当于保存了历史上大量的优化操作专家经验。采用传统的优化策略，收敛速度慢，耗时长，为此采用聚类搜索结合专家系统的方法，进行操作参数的寻优。获得最优的操作参数或者优化专家指导规则用于烧结过程的优化控制。

## 2 智能集成建模技术

对于复杂的多输入多输出铅锌烧结过程，采用数学模型结合知识模型进行集成建模：采用神经网络建立烧结块产量预测模型、烧结块含铅量预测模型、烧结块含硫量预测模型，通过分析和处理大量历史数据，结合专家经验，确定烧结块产量、含铅量、含硫量对综合工况的加权系数，获得了综合工况模型；建立专家判断模型，进行综合工况的判断（优、良、中、差）。同时确定烧结过程的控制目标函数，为实现智能优化控制提供了数学基础。

### 2.1 数据分析与处理

通过对现场数据的分析，可以把数据分为两大类：烧结块的产量数据（每 8h 统计一次），混合料的成分和烧结块的成分分析数据（每 2h 采样一次）：主要包括混合料的含铅量、含锌量、含铜量、含铁量、含硫量、 $\text{SiO}_2$  含量等共 13 种成分分析数据；烧结过程工况状态信息（每 3min 采样一次）：主要包括精矿流量、返粉流量、台车速度、点火温度、烟气温度、风箱风量、风箱压力等几十个数据。影响烧结块产量质量的因素有很多，采用机理分析和主元分析可降低输入变量维数，减小烧结过程综合工况建模的复杂性，进一步有效地进行烧结过程的优化控制。

#### 1) 基于机理的分析

混合料的含水量直接影响烧结过程的透气性，促进脱硫反应；混合料含硫量关系到烧结过程的热条件，是影响烧结块质量和烧结作业的主要因素；混合料含铅量是烧结块的重要成分，它直接影响所有的烧结参数，特别对烧结块的强度和硬度有较重要的影响，同时在烧结过程中是一种有效的硬化剂；混合料中二氧化硅是一种加硬剂，它和烧结块

的硬度成线性关系；混合料中石灰石在烧结过程中的分解反应对过程起调热作用，防止炉料过早结块，可以提高烧结块的空隙度。台车速度也是影响烧结过程的重要因素，在透气性好的时候，可以适当提高台车速度，以提高烧结块的产量；点火温度随着炉料性质的不同而异，直接影响二次点火；影响烧结过程工况的操作参数主要包括：1<sup>#</sup> 新鲜风机风量、2<sup>#</sup> 新鲜风机风量、2<sup>#</sup> 返烟风机风量、风量精矿流量、返粉流量。0<sup>#</sup> 风机主要用于吸风点火，1<sup>#</sup> 返烟风机主要用于热循环，一般不参与参数的优化调节。炉料的粒级分布和料层厚度虽然对透气性也有一定的影响，考虑到现场检测条件的限制，不将其作为模型的输入变量。

通过机理分析可以得到烧结块产量质量的主要影响因素有：混合料含铅量、混合料含锌量、混合料含硫量、混合料含水量、混合料二氧化硅含量、混合料氧化钙含量、1<sup>#</sup> 新鲜风机风量、2<sup>#</sup> 新鲜风机风量、2<sup>#</sup> 返烟风机风量、1<sup>#</sup> 返烟风机风量、台车速度、精矿流量、返粉流量。

铅锌烧结配料过程包括一次配料和二次配料，一次配料的配比直接由调度给定，不进行优化操作；二次配料主要是通过调整精矿返粉比来控制混合料的含硫量。因此，在物料成分中，能够控制的就是混合料含硫量，其它成分在优化控制中作为不可控制量。

#### 2) 主元分析

主元分析又名主成分分析或主元素分析，是将研究对象的多个相关变量（指标）化为少数几个不相关变量的一种多元统计方法，作为一个数据减维和揭示变量间线性相关关系的工具<sup>[8]</sup>。

在机理分析的基础上，通过计算对应的主元矩阵、相关系数矩阵和荷载矩阵，在保证特征抽取率的基础上取前 3 个主元对输入变量进行相关性分析，最终确定烧结块综合工况模型的输入变量：混合料含铅量 ( $R_{Pb}$ )、混合料含锌量 ( $R_{Zn}$ )、混合料含硫量 ( $R_S$ )、混合料含水量 ( $R_W$ )、1<sup>#</sup> 新鲜风机风量 ( $Q_1$ )、2<sup>#</sup> 新鲜风机风量 ( $Q_2$ )、2<sup>#</sup> 返烟风机风量 ( $Q_3$ )、台车速度 ( $V_{cl}$ )、精矿流量 ( $J_K$ )、返粉流量 ( $F_F$ )。

通过机理分析，确定了影响综合工况（即烧结块产量质量）的重要因素；通过主元分析，对变量之间、变量与烧结块产量质量的相关性进行了研究，从而剔除了与烧结块产量质量相关性较小的变量。在保证不损失重要输入变量信息的前提下，尽可能降低综合工况模型的复杂性。

## 2.2 综合工况模型

在建立烧结块产量质量模型的过程中, 为了减小模型的复杂程度, 提高网络的收敛速度, 统一采用三层结构的 BP 神经网络。为了减小模型的预测误差, 适当加大隐层神经元的个数。经反复测试, 在保证收敛性和误差较小的条件下确定神经网络的结构: 输入变量 10 个, 隐层神经元 30 个, 输出变量 1 个, 500 组样本, 学习率为 0.001, 神经网络模型结构如图 2 所示,

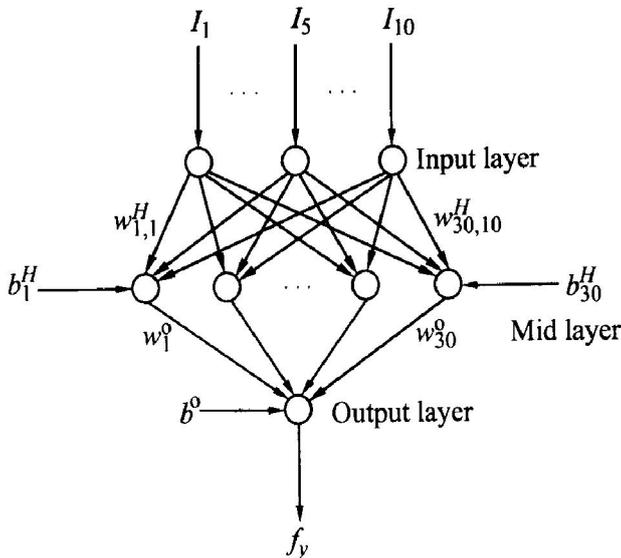


图 2 神经网络模型  
Fig. 2 Model of neural network

图 2 所示的神经网络模型可表示为

$$f_y = \sum_{i=1}^{30} w_i^O \text{tansig} \left( \sum_{j=1}^{10} w_{i,j}^H I_j + b_i^H \right) + b^O \quad (1)$$

式中  $w_{i,j}^H$  为对应第  $i$  个隐层神经元第  $j$  个输入变量的权值,  $b_i^H$  为对应第  $i$  个隐层神经元的阈值,  $w_i^O$  为对应第  $i$  个隐层神经元隐层到输出层的权值,  $b^O$  输出神经元的阈值,  $\text{tansig}(x)$  为神经网络的转移函数, 即:

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + \exp(-2x)} - 1 \quad (2)$$

采用  $f_y$  表示由式(1)描述的三层非线性神经网络模型, 其中下标  $y$  表示模型的输出变量。用  $f_{BK}$ 、 $f_{BS}$ 、 $f_{BPb}$  分别表示烧结块产量、含硫量和含铅量对应的神经网络模型函数。

烧结块产量神经网络模型

$$B_k = f_{BK}(R_{Pb}, R_{Zn}, R_S, R_W, Q_1, Q_2, Q_3, V_{el}, J_K, F_F) \quad (3)$$

烧结块含硫量神经网络模型

$$B_S = f_{BS}(R_{Pb}, R_{Zn}, R_S, R_W, Q_1, Q_2, Q_3, V_{el}, J_K, F_F) \quad (4)$$

烧结块含铅量神经网络模型

$$B_{Pb} = f_{BPb}(R_{Pb}, R_{Zn}, R_S, R_W, Q_1, Q_2, Q_3, V_{el}, J_K, F_F) \quad (5)$$

综合工况模型

$$S_{TS} = \alpha_1 B_k + \alpha_2 B_S + \alpha_3 B_{Pb} = f_{STS}(R_{Pb}, R_{Zn}, R_S, R_W, Q_1, Q_2, Q_3, V_{el}, J_K, F_F) \quad (6)$$

式中  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为烧结块产量、烧结块含硫量和烧结块含铅量对综合工况指数的影响因子。根据计算获得的  $S_{TS}$  值, 结合专家判断模型将综合工况指数分为: 优、良、中、差 4 个区间。如果当前的综合工况指数落在“优”区间, 则保持当前的操作参数; 如果当前的综合工况指数落在“非优”区间, 则调用参数优化算法, 给出操作优化指导。

式(6)中  $R_{Pb}$ 、 $R_{Zn}$  取当前物料成分的测量值, 在一次配料中由工艺调度人员给出, 不参与二次配料和参数优化环节。为此, 整个烧结过程的控制目标函数可由式(6)简化后确定

$$S_{TS} = \alpha_1 B_k + \alpha_2 B_S + \alpha_3 B_{Pb} = f_{STS}(R_S, R_W, Q_1, Q_2, Q_3, V_{el}, J_K, F_F) \quad (7)$$

根据铅锌烧结过程的工艺要求, 确定控制目标函数的边界约束条件

$$\begin{cases} 5 < R_S < 9, & 3 < R_W < 7, \\ 10 < Q_1 < 20, \\ 10 < Q_3 < 35, & 1.3 < V_{el} < 1.74, \\ 10 < J_K < 60, & 10 < F_F < 250 \end{cases}$$

将对应于操作参数  $x$  ( $R_S, R_W, Q_1, Q_2, Q_3, V_{el}, J_K, F_F$ ) 的函数值  $S_{TS}$  称为烧结过程的操作参数优化度, 它反映出在操作参数  $x$  条件下烧结过程综合工况的优化程度。

这样铅锌密闭鼓风烧结过程的优化就可以描述为一个多输入、多输出、多约束条件下的非线性函数优化问题。

## 3 集成优化控制算法

烧结过程的控制目标函数的求解问题属于非线性函数的多变量优化, 很难用单纯的数学方法求解, 必须借助数学模型和智能化方法。文中采用聚类搜索算法和专家系统相结合的方法有效地解决了多输入多输出、强非线性、多约束条件下的控制目标函数优化问题。

专家系统使用某个领域专家的经验知识, 以知识为处理对象, 以启发性方法为主进行处理, 在处

理中常用推理等方法，模仿人类解决专门问题的方法来解决该领域的问题，对大型知识库进行操作。聚类分析按照物以类聚的思想，对未知类别的样本集根据样本之间的相似程度分类，相似的归为一类，不相似的归为另一类的一种数值分类方法。由于优化专家样本库数据量大，并且在不断地学习更新，如果采用普通的遍历搜索算法，耗时太长，为提高优化搜索的效率，采用聚类搜索算法。

### 3.1 优化控制思想

智能优化控制器主要包括一个优化专家样本数据库，一个优化专家规则库，两个自学习机构，专家推理与协调算法，聚类搜索算法，控制原理图如图3所示。

自学习机构通过对控制系统的在线监督与评价，学习控制对象的未知信息，有效地充实与修改知识库的内容，使整个控制系统的特性逐步得到改善<sup>[9, 10]</sup>。

优化样本库中存有大量的各种工况条件下的专家优化操作样本，可以由专家添加，同时也可以通过“自学习机构1”不断地在线学习更新。优化样本库中一方面包括历史上的优化操作参数，如：混合料含硫量、混合料含水量、1#新鲜风机风量、2#新鲜风机风量、2#返烟风机风量、台车速度、精矿流量、返粉流量；另一方面包括反映历史优良工况的状态参数，如：混合料含铅量、混合料含锌量、混合料的二氧化硅含量、1#新鲜风机压力、2#新鲜风机压力、2#返烟风机压力、10#风箱温度、11#风箱温度。

优化规则库存有优化专家操作规则，可以用产生式规则的形式进行描述

$R^{\#}$  : If 条件 Then 动作。

优化规则可以由专家添加，同时也可以通过“自学习机构2”不断地在线学习更新。

优化规则库中主要保存的是各种工况条件下的优化操作规则，如：

- 1) If 透气性差 And 混合料含水量高 Then 降低混合料含水量；
- 2) If 烧结块含硫高 Then 减小精矿返粉比；
- 3) If 透气性好 Then 提高台车速度； ...

专家推理与协调部分通过在线获得控制系统的状态和数据，实时检测控制系统的性能，运用知识库中的规则进行推理，确定有关协调操作，从而对控制对象实施有效的控制。

基本优化控制思想为：过程和状态信息通过信息与处理存入数据库中，通过自学习机构和专家推理与协调进行优化专家样本库和优化专家规则库的更新；反映当前工况的数据作为用于加权聚类搜索的中心，通过对优化样本库进行聚类搜索，获得类似于当前工况一类优化操作样本。然后对此类操作优化样本进行遍历搜索，在遍历搜索过程中利用前面获得的综合工况判断模型对聚类搜索获得的操作参数进行优化度判定，以确定搜索到的优化操作参数在当前的工况条件下是否可以优化工况。同时利用专家规则库对搜索到的优化操作参数进行合法性判断，如果没有合法的优化操作参数，则仅以规则形式给出优化操作指导；如果存在合法的优化操作参数，则选取优化度最高的作为最终的优化操作参数。

### 3.2 专家聚类优化算法

采用专家系统结合聚类搜索的方法进行参数的优化操作，步骤如下：

第1步：采用简单的最短距离系统聚类方法对

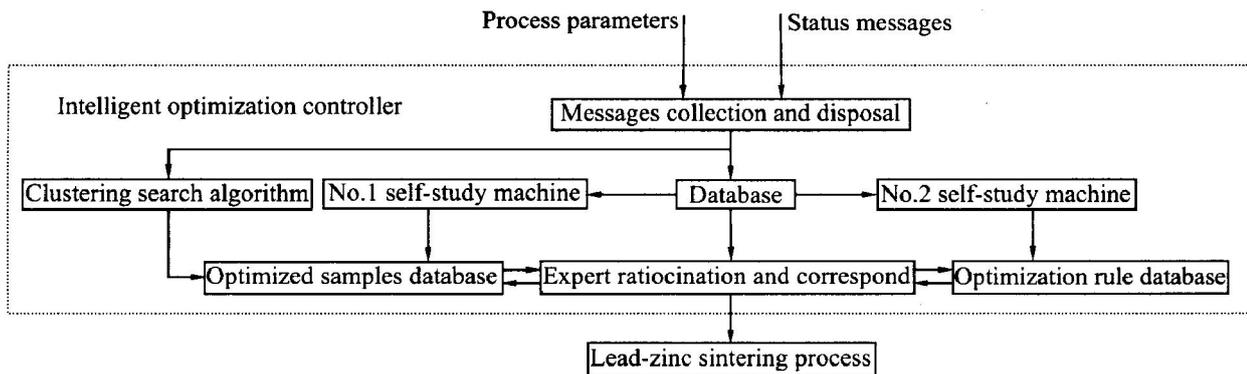


图3 智能优化控制原理框图

Fig. 3 Principle frame of intelligent optimization control

操作优化样本库中的混合料含铅量、混合料含锌量、混合料的二氧化硅含量、1<sup>#</sup> 新鲜风机压力、2<sup>#</sup> 新鲜风机压力、2<sup>#</sup> 返烟风机压力、10<sup>#</sup> 风箱温度、11<sup>#</sup> 风箱温度(以上参数反映出历史上的典型工况)进行加权聚类, 将优化样本分为  $n$  大类, 第  $i$  类的类中心为  $Cen_i$ 。

第 2 步: 计算当前工况样本数据与各类类中心的距离, 计算得到的距离反映出各类历史典型工况数据与当前工况相接近程度, 选取距离最短的类作为遍历优化搜索的目标, 类中的优化操作样本为:

$$x_i^* (R_S^*, R_W^*, Q_1^*, Q_2^*, Q_3^*, V_{cl}^*, J_k^*, F_F^*)$$

第 3 步: 对  $x_i^*$  进行合法性校验, 一方面用烧结过程的控制目标函数中的工艺约束条件进行合法性验证, 另一方面采用优化专家规则库进行合法性校验, 以剔除不符合工艺要求和专家优化操作经验的样本。如果在此类中不存在合法的优化操作样本, 则直接根据当前的工况条件采用专家推理与协调给出专家优化操作规则。如果优化操作样本合法, 则进入第四步进行优化度分析。

第 4 步: 将  $x_i^*$  代入综合工况模型式(7)中, 可以得到

$$S_{TSi}^* = f_{STS}(x_i^*) \\ = f_{STS}(R_S^*, R_W^*, Q_1^*, Q_2^*, Q_3^*, V_{cl}^*, J_k^*, F_F^*)' \quad (8)$$

如果样本  $x_i^*$  对应的优化度大于当前操作参数的优化度, 则可以作为一个操作的优化操作参数。在遍历搜索优化样本类后, 以优化度最高的样本作为最终的优化操作样本, 直接用于烧结过程的控制。

## 4 实际运行结果分析

对烧结块产量质量模型部分运行结果(10000 组历史数据)进行分析, 烧结块产量神经网络预测模型的均方差为 6.9%; 烧结块含铅量神经网络预测模型的均方差为 4.7%、烧结块含硫量预测模型的均方差为 8.6%。可见综合工况模型可以很好地预测工况状态(优、良、中、差), 对烧结块产量质量的实时预测也有较高的精度, 解决了烧结块产量质量预测中存在的大滞后问题, 为实现烧结过程的实时优化控制提供了有效的指导。

对现场运行数据进行分析, 当综合工况为“差”时, 优化控制算法的有效率达到 100%, 表明通过智能优化算法可以以 100% 的有效率搜索到一组操作参数, 将当前工况优化到优、良或者中的综合工况状态; 当综合工况为“中”时, 优化控制算法的有效率达到 91.6%; 当综合工况为“良”时, 优化控制

算法的有效率达到 83.4%。在无法采用聚类搜索专家优化算法时, 可以通过给出优化专家操作规则, 进行操作指导。从前面运行结果可看出本文提出的集成优化控制算法在实际生产过程中具有较高的优化有效率。

图 4 给出了部分系统运行结果, 横坐标为实际的历史数据样本点, 样本点之间的时间间隔为 3min。图 4(a) 中的纵坐标表示烧结块的产量, 图 4(b) 中的纵坐标表示烧结块的含硫量。其中曲线为对应的实际工况, 散点为操作参数优化算法的结果。

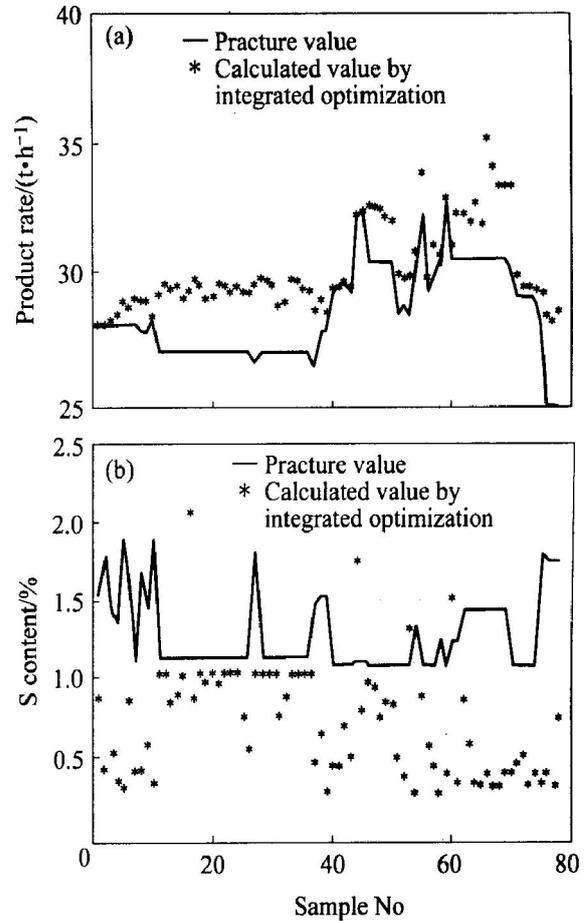


图 4 实际优化运行结果

Fig. 4 Practical optimization results

- (a) —Production of sintering block;  
(b) —Content of S in sintering block

由图 4 可以看出: 进行优化操作可以显著提高烧结块的产量, 在烧结块含硫超标的情况下可以通过优化操作将含硫量降低到合适的水平( $< 1\%$ ), 烧结块的含铅量也可以控制在合适的范围内, 较好地满足了高产、优质的生产目标。

## 5 结论

以铅锌烧结过程的建模与优化控制为背景, 采

用主元分析、BP神经网络结合模糊专家规则进行非线性集成建模,获得了比较理想的烧结过程综合工况模型。采用的聚类搜索专家优化算法,具有全局收敛、先进性和高效性的特点。根据此模型建立的以综合工况为中心的烧结过程操作参数优化控制系统,可以提高烧结机的结块率和烧结块的质量,提高铅锌的直收率,取得显著的效益。本文提出的面向生产目标的集成建模优化技术为复杂工业过程的建模和优化控制提供了一种有效可行的工程实现方法,可以推广运用到其他复杂工业过程。

## REFERENCES

- [1] 胡新. 铅锌密闭鼓风炉熔炼技术 10 年来的发展[J]. 有色冶炼, 1994(4): 11-14.  
HU Xin. Advances of the ISP techniques in last ten years [J]. Non-Ferrous Smelting, 1994(4): 11-14.
- [2] 《铜铅锌冶炼参考设计资料》编写组. 铜铅锌冶炼参考设计资料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1979. 129-133.  
The Group of Editor of 《The Reference Design Manual of the Smelting of Cu, Pb and Zn》. The Reference Design Manual of the Smelting of Cu, Pb and Zn[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1979. 129-133.
- [3] 王海东, 邱冠周, 黄圣生. 烧结过程控制技术的发展[J]. 矿冶工程, 1999, 19(3): 3-6.  
WANG Haidong, QIU Guanzhou, HUANG Shengsheng. Advances in control techniques of sintering process [J]. 1999, 19(3): 3-6.
- [4] 谢良贤. 烧结过程自动控制技术的发展[J]. 冶金自动化, 1994, 18(6): 7-11.  
XIE Liangxian. Development of automatic control technology for agglomeration process[J]. Metallurgical Industry Automation, 1994, 18(6): 7-11.
- [5] 李桃. 烧结过程智能实时操作指导系统的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2000. 15.  
LI Tao. Research on Intelligent Realtime System for Operation Guiding in Sintering Process[D]. Changsha: Central South University, 2000. 15.
- [6] 范晓慧, 黄天正, 陈 蕊. 以透气性中心控制策略和烧结终点预报策略[J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(6): 535-537.  
FAN Xiaohui, HUANG Tianzheng, CHEN Jin. Control strategy of center on permeability and predictive strategy of burn-through point [J]. Journal of Central South University of Technology, 1998, 29(6): 535-537.
- [7] 周取定, 孔令坛. 铁矿石造块理论及工艺[J]. 北京: 冶金工业出版社, 1989. 19-27.  
ZHOU Qurding, KONG Lintan. The Theory and Technology of Iron Ore Agglomeration[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1989. 19-27.
- [8] 张 林, 胡 波. 基于主元分析和 Fuzzy Art 模型的人脸识别算法[J]. 电路与系统学报, 1999, 4(3): 9-17.  
ZHANG Lin, HU Bo. Face recognition based on principal component analysis and fuzzy art neural model [J]. Journal of Circuits and Systems, 1999, 4(3): 9-17.
- [9] 杜玉晓, 吴 敏, 桂卫华, 等. 铅锌烧结过程透气性的混沌遗传算法神经网络模型[A]. 过程控制科学技术与应用会议论文集[C]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 205-209.  
DU Yuxiao, WU Min, GUI Weihua, et al. The neural network model of permeability of lead & zinc smelting process based on chaotic optimization genetic algorithm [A]. Proceeding of Process Control Science Technology and Applications [C]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002. 205-209.
- [10] WU Min, SHE Jinhua, Nakano M. An expert control system using neural networks for the electrolytic process in zinc hydrometallurgy[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2001, 14(5): 589-598.

(编辑 龙怀中)