

文章编号: 1002-0411(2002)02-176-04

# 炼铜转炉优化操作智能决策支持系统的开发与研制

姚俊峰<sup>1</sup> 梅 焱<sup>1</sup> 彭小奇<sup>1</sup> 江金宏<sup>2</sup> 周安梁<sup>2</sup> 吴东华<sup>2</sup>

(1. 中南大学热工设备仿真与优化研究所 长沙 410083; 2. 贵溪冶炼厂 贵溪 335424)

**摘要:** 对炼铜转炉优化操作智能决策支持系统(IDSS)的开发步骤、总体结构和基本功能做了介绍,该系统具有自学习和自适应的特点,将其应用于生产实践,经过三个多月的试运行,用该系统优化出的操作参数指导生产,各项生产指标显著提高.粗铜产量提高 6.0%,冷料处理量提高 8%,平均炉寿从原来的 213 炉至少提高到 235 炉,由粗铜产量增加直接创造的经济效益达 2640 万元/年.\*

**关键词:** 模式识别;神经网络;混沌遗传算法;智能决策;支持系统

中图分类号: TP13

文献标识码: B

## STUDY OF INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR OPERATIONAL OPTIMIZATION OF COPPER CONVERTER

YAO Jun-feng<sup>1</sup> MEI Chi<sup>1</sup> PENG Xiao-qi<sup>1</sup> JIANG Jin-hong<sup>2</sup>  
ZHOU An-liang<sup>2</sup> WU Dong-hua<sup>2</sup>

(1. Institute on Simulation and Optimization of Pyro-installations, Central South University, Changsha, China 410083,  
2. Guixi Smelter, Guixi, China 335424)

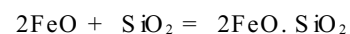
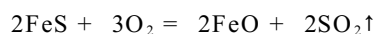
**Abstract:** In this paper, the development steps, overall structure and basic functions for the IDSS of operational optimization of copper converter are introduced. The system is of self-study and self-adaption characteristics. It is applied to copper converter and every production quota is obviously improved under the guidance of IDSS after three month characteristics runningtest. The copper productivity is improved by 6 percent, the weight of cold input is increased by 8 percent and the average converter life-span is improved from 213 to 235. The economic effect reaches 26.4 million RMB produced by the increased productivity of coarse copper.

**Keywords:** pattern identification; neural network; chaos genetic algorithm; intelligent decision; support system

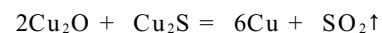
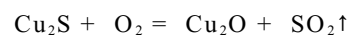
### 1 引言(Introduction)

铜精矿经闪速炉熔炼,除去精矿中的脉石和部分硫、铁,产出冰铜(Cu+Fe+S 约占 80-95%).冰铜由包子吊车装入转炉,进行送风吹炼,把冰铜中的硫和铁几乎全部氧化除去而得到粗铜(Cu98.5%).炼铜转炉是将铜锬进行送风吹炼,把铜锬中的硫和铁几乎全部氧化除去而得到粗铜(Cu98.5%),铜锬的吹炼过程分为造渣期(造渣一期 S<sub>1</sub> 和造渣二期 S<sub>2</sub>)和造铜期(B 期)两个阶段<sup>[1]</sup>.

在造渣期,从风口向炉内熔体中鼓入空气,使冰铜中的硫化亚铁被氧化,生成氧化亚铁和二氧化硫,氧化亚铁再与加入转炉的熔剂中的二氧化硅进行造渣反应.造渣过程的主要化学反应为:



在造铜期,留在炉内的白冰铜(主要以 Cu<sub>2</sub>S 的形式存在)与鼓入炉内的氧反应,生成粗铜和二氧化硫.其主要化学反应为



铜锬的吹炼因现场检测计量设备不完善,很难利用精确的物料平衡与热平衡数学模型进行决策.而人工智能优化方法对这类复杂、非线性、时变的生产过程具有很好的描述能力,作者综合应用常规的物料平衡与热平衡模型、化学计量法、有限差分法<sup>[2]</sup>、超松弛迭代法<sup>[3]</sup>、模式识别、人工神经网络<sup>[4]</sup>

与混沌遗传算法<sup>[5]</sup>, 开发出炼铜转炉优化操作智能决策支持系统. 生产实践表明, 系统能对实际生产过程进行优化决策, 达到节能降耗、提高产量的目的.

## 2 IDSS 的开发步骤 (Development procedure of IDSS)

2.1 软件分析 操作者的需求分析和软件的功能分析<sup>[6]</sup>.

2.2 软件框架设计 总体设计、总体流程设计、模块分解.

2.3 软件具体设计 数据设计、模型设计、知识设计和界面设计. 数据设计包括数据文件设计, 数据传输设计和动态数据交换设计; 模型设计包括物料平衡与热平衡模型, 模式识别、人工神经网络与混沌遗传算法的设计; 知识设计指知识库设计; 界面设计包括主界面中要反映信息的取舍和信息的集中设计.

2.4 程序编制 将物料平衡与热平衡模型、化学计量法、有限差分法、超松弛迭代法、模式识别算法、

BP 算法与混沌遗传算法(CGA)由数学表示转变为程序语言表达; 建立一些必要的知识库, 数据传输的程序设计.

2.5 将数据模块、算法模块、知识库集成为 IDSS 系统 包括解各模块的接口问题、模块集成和形成 IDSS 系统.

## 3 IDSS 的主要功能与总体结构 (Main function and frame of the IDSS)

“炼铜转炉优化操作智能决策支持系统”(IDSS)采用结构化程序设计方法, 面向转炉操作者, 使用在当今世界范围内广泛流行的操作系统和语言环境进行编程, 如 Windows98, Visual C++ 6.0 等. 图形用户界面优美、友好, 实时采集的风量数据、炉内温度和主要成分(Cu, Fe, S)全部在显示屏幕上以动态曲线的方式进行输出. 系统软件的结构框图如图 1 所示, 系统的主要模块及功能如表 1 所示.

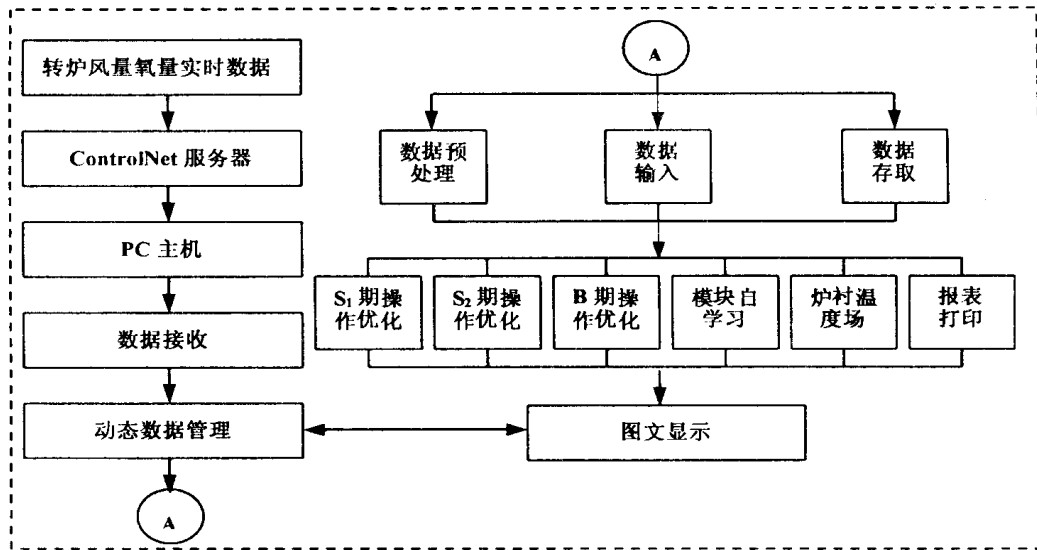


图 1 软件系统结构图

Fig. 1 The system structure chart of the Software

表 1 系统的主要模块及功能

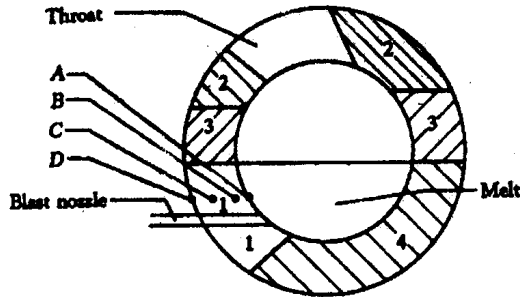
Tab. 1 Main modules and function of IDSS

模块类别	主要功能
数据接收	通过数据文件与其它模块进行数据通信
图文显示	结果输出及实时动态数据显示
动态数据管理	动态存放转炉操作参数
数据存取	内存与外存数据传递
报表打印	转炉操作参数的打印输出
风口温度预报	应用热平衡模块对风口区温度进行预报
粗铜量预报	应用神经网络对 B 期末粗铜量、底渣量进行预报
渣成分预报	应用神经网络对渣量及渣中 Cu, SiO <sub>2</sub> , Fe 进行预报
过程优化	通过调整冷料、富氧率、鼓风量来调整炉温

## 4 主要模块的设计思想(Design philosophy of main modules)

### 4.1 炉衬温度场的计算

转炉炉衬的分区图<sup>[7]</sup>如图 2 所示.



1—风口区; 2—炉口区; 3—气相区; 4—熔体区

图 2 转炉炉衬分区图

Fig. 2 The zoning map of converter lining

转炉炉衬温度场模型中的温度可通过各个不同区域的数值计算求解, 其主要步骤为:

- (1) 自动划分炉衬四个区域的网格并编号.
- (2) 初始化炉衬内各点的温度

$$T[a][b] = T_4 + (T_1 - T_4) \times (a - 1) / (b - 1)$$

其中  $a, b$  为径向和轴向的节点个数.

- (3) 利用超松弛迭代法求解各单元温度, 取松弛系数  $\omega = 1.2$ , 即

$$T_i^{(k+1)} = T_i^{(k)} + \omega [b_i - a_{i1}T_1^{(k+1)} - \dots -$$

$$a_{i,i-1}T_{i-1}^{(k)} - \dots - a_{i,i}T_i^{(k)} - \dots - a_{i,N}T_N^{(k)}] a_{i,1}$$

式中,  $T_i^{(k+1)}, T_i^{(k)}$  分别为单元  $i$  第  $k+1$  次和第  $k$  次迭代的温度, 迭代的收敛判据为

$$|T_i^{(k+1)} - T_i^{(k)}| \leq 0.25$$

即各单元的最大温度误差低于 0.25, 计算实践表明一般迭代 15 次左右, 温度场计算过程即可收敛.

### 4.2 S 期熔剂加入制度优化

- (1) 数据采集

以生产现场 480 炉数据为研究对象, 以渣中  $\text{Cu} < 5\%$ ,  $\text{SiO}_2/\text{Fe} = 0.5 \sim 0.53$  为约束条件, 共取出 354 个样本.

- (2) 预处理

对得到的样本进行自标准化<sup>[8]</sup>、过滤噪音、求变量相关性、合并相关系数很大的变量、根据变量对目标的影响程度, 去掉影响小的变量, 得到 297 个对象样本, 特征变量为冰铜量、冰铜含  $\text{Cu}$ 、冰铜含  $\text{Fe}$ 、冰铜含  $\text{S}$ 、加入的床下物.

- (3) 选分类图找优化信息

对由(2)得到的样本集进行 PCA(主成分分析)、ODP(最优判别平面)、PLS(偏最小二乘法)三种空间变换, 分别得到各自分类最好的二维映照图, 从中选出最好的分类图, 在此空间研究优化信息.

- (4) 核对优化信息:

用近邻加权类中心法分析优化方向, 对所选类型的优化信息进行核对.

- (5) 确定神经网络结构

使用 PLS-BPN 对训练样本建模, 输入元为 PLS 计算出来的训练样本的得分, 输出元为熔剂量, 用留  $N$  法交叉检验确定网络结构为输入元 5 个、隐节点 15 个和输出节点 1 个.

### 4.3 S 期最佳鼓风制度

- (1) 数据采集

以生产现场 480 炉数据为研究对象, 出渣温度为  $1250 \pm 10^\circ\text{C}$  为约束条件, 共取得 421 个样本.

- (2) 预处理

对得到的样本进行自标准化、过滤噪音、求变量相关性并合并相关系数很大的变量、根据变量对目标的贡献, 去掉分类贡献小的变量, 得到对象样本 358 个, 特征变量为冰铜量、冰铜含  $\text{Cu}$ 、加入的床下物、吹炼时间、总鼓风量、富氧量.

- (3) 选分类图找优化信息

对由(2)得到的样本集进行 PCA(主成分分析)、ODP(最优判别平面)、PLS(偏最小二乘法)三种空间变换, 分别得到各自分类最好的二维映照图, 从中选出最好的分类图, 在此空间研究优化信息.

- (4) 核对优化信息

用近邻加权类中心法分析优化方向, 对由上所得的优化信息进行核对;

- (5) 确定神经网络结构

使用 PLS-BPN 对训练样本建模, 输入元为 PLS 计算出来的训练样本的得分, 输出元为出渣温度, 用留  $N$  法交叉检验确定网络结构为输入元 6 个、隐节点 20 个和输出节点 1 个.

- (6) 用混沌遗传算法寻找更优点

为了探索更优的工艺条件, 以 PLS-BPN 得到的网络计算适合度, 对适合度函数进行变换

$$f(T) = \max(-|T - 1250|)$$

固定冰铜量、冰铜品位、床下物, 使吹炼时间、总鼓风量、总氧量在训练集给出的数据范围地基础上延伸  $\pm 5\%$  进行变化, 应用遗传算法进行寻优最优点对应的变量的得分, 然后利用逆映照求出其所对应的工艺条件.

#### 4.4 S 期在线显示(温度,成分,主要物相)

参数显示主要包括熔体温度、熔体中 Cu、熔体中 Fe 和优化鼓风强度的优化参数的显示和在线参数的显示,前三者的计算方法是常规的物料平衡与热量平衡为基础,在已有的 200 炉历史数据基础上,算出每隔 1 分钟的熔体温度和成分数据,然后对这些数据分别进行曲线拟合,得出每条曲线的拟合参数,以每炉冰铜量、冰铜含 Cu、冰铜含 S、冰铜含 Fe、熔剂量、床下物、吹炼时间、鼓风强度和富氧率为神经网络的输入参数,曲线的拟合参数为输出参数,经训练后,对特定的输入模式,可给出特定的输出模式.经过不断自学习,可达到模拟吹炼过程显示参数的目的.

动态参数的显示以优化模型为基础,将其表示为在线鼓风强度和富氧率的函数,

$$T = T_0 + (Q_1 - Q_0) \times \frac{\eta_1}{\eta_0} \times k_1$$

$$Cu = Cu_0 + (Q_1 - Q_0) \times \frac{\eta_1}{\eta_0} \times k_2$$

$$Fe = Fe_0 + (Q_1 - Q_0) \times \frac{\eta_1}{\eta_0} \times k_3$$

式中  $T, Cu, Fe, Q_1, \eta_1$  为实际炉温、熔体含铜、熔体含铁、实时风量、实时富氧率;  $T_0, Cu_0, Fe_0, Q_0, \eta_0$  为优化后的炉温、铜百分比、铁百分比、优化风量、优化富氧率;  $k_1, k_2, k_3$  分别为各个可调参数.

#### 4.5 S 期渣量及成分预测

##### (1) 数据采集

以生产现场 780 炉数据为研究对象,共取得 645 个样本(包括 S1 期和 S2 期).

##### (2) 预处理

对得到的样本进行自标准化、过滤噪音、求变量相关性并合并相关系数很大的变量、根据变量对目标的贡献,去掉分类贡献小的变量,得到对象样本 580 个,特征变量为冰铜量、冰铜含 Cu、加入的床下物、吹炼时间、总鼓风量、总富氧量.

##### (3) 确定神经网络结构

使用 BPN 对训练样本建模,输入元为各特征变量的不同取值,输出元为渣量、渣含 Cu、渣含 SiO<sub>2</sub>、渣含 Fe.用留 N 法交叉检验确定网络结构为输入元 6 个、隐节点 30 个和输出节点 4 个.

#### 4.6 自学习

为了提高神经网络的适应性与预报准确性,需对建立网络模型用的历史数据进行不断更新,才能使网络模型能够与生产数据比较吻合,更能反映最

新的操作参数变化与生产指标的关系.考虑到计算机资源的问题,样本最大数目限制为 600 个,样本数如果超过 600,则自动删除第一个样本,新样本添加到最后一个样本后面.另外每输入一个样本还要对其是否为优类样本进行判断,如果不是则不进入样本集.最后让该网络进行自学习即可.

## 5 应用效果(Application effect)

在生产中使用这种人工智能的操作优化离线指导系统,能根据生产现场实际操作情况进行生产过程优化决策和吹炼终点预报,在物料全部加入后可提前预报出该炉的产渣量和产铜量,方便操作人员控制生产过程,避免误操作,大大减少生产操作事故,能有效地提高生产技术经济指标.

(1) 经过三个多月的试运行,在不改变任何设备的情况下,产量提高 6.0%;

(2) 在当前冷料量供应不足的情况下使冷料处理量提高 7.8%;

(3) 转炉炉衬的消耗从 0.235cm/炉降低到 0.192cm/炉,使平均炉寿从原来的 213 炉至少提高到 235 炉.

(4) 按年产铜 20 万吨计算,铜价为 18000 元/吨,粗铜成本 15800 元/吨,由粗铜产量增加直接创造的经济效益达 2640 万元/年;

(5) 炉衬温度场的解析计算为操作人员随时了解炉衬内的温度分布情况,尤其是最易受损的风口区 and 炉口区的温度状况.

(6) 该软件的成功运行为炼铜转炉实现在线优化控制打下了重要的技术基础.

## 参 考 文 献(References)

- 1 朱祖泽,马克毅. 铜冶金学. 昆明: 云南科技出版社. 1995
- 2 梅 焜. 冶金传递过程原理. 长沙: 中南工业大学出版社. 1986
- 3 伯 登, 费尔斯著, 陈建宏译. 数值分析. 北京: 世界图书出版社, 1995
- 4 王耀南等. 智能控制系统. 长沙: 湖南大学出版社. 1996
- 5 姚俊峰, 梅 焜等. 混沌遗传算法及其优化效率评价. 中国 2000 年机器人学大会论文集. 长沙, 2000
- 6 陈文颖, 方 栋等. 大气污染总量控制规划智能决策支持系统的开发与研究. 中国环境科学. 1997, 17(1): 30~ 33
- 7 姚俊峰, 梅 焜等. 卧式转炉炉衬温度场的数值模拟. 中国有色金属学报. 2000, 10(4): 546~ 550
- 8 刘洪霖, 包 宏. 化工冶金过程人工智能优化. 北京: 冶金工业出版社. 1999

## 作者简介

姚俊峰(1973- ), 男, 博士生. 研究领域为人工智能、神经网络、模式识别和混沌遗传算法及其工业应用.