

# 烧结法生产氧化铝生料浆的配料专家系统设计

阳春华, 段小刚, 王雅琳, 桂卫华

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 基于烧结法生产氧化铝生料浆的配料机理和长期积累的专家经验知识, 建立了生料浆质量预测模型, 开发了适应于生料浆配料生产特点的专家优化配料系统。根据实际生产和配料机理, 提出了产生式规则的知识表示形式, 结合规则集分类原理, 设计了生料浆配料的专家知识库。通过规则集之间的有知识搜索、规则集内部的前向推理、规则前提和结论之间的哈希算法的有机结合来实现推理机制, 从而实现专家系统的优化配比计算。实际结果表明: 该专家系统优化配比计算速度快、效率高, 既提高了生料浆质量, 又稳定了生产。

**关键词:** 配料; 专家系统; 知识库; 推理机

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2005)04-648-05

## Blending expert system for raw mix slurry in production of alumina with sintering process

YANG Chun-hua, DUAN Xiao-gang, WANG Ya-lin, GUI Wei-hua

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

**Abstract:** Based on the blending theory of raw mix slurry in production of alumina with sintering and on the knowledge from experts, the predictive model of quality of raw mix slurry was presented, and a blending expert system adapting productive features of raw mix slurry in production of alumina with sintering was developed. According to the actual production and blending theory, the knowledge expression form of production rule and the classified principle of rule collection were used, and a blending expert knowledge base of raw mix slurry was designed. Then the inference engine was realized through the hybrid of heuristic search among the rule collections forward chaining in the interior rule collection and Hash algorithm between the precondition and the conclusion of the rule, which implements the match computation. The blending expert system was put into service in an alumina smeltery. The actual running results show that the system implements the computation of blending ratio fast and efficiently, improves the quality of raw mix slurry and stabilizes industrial production.

**Key words:** blending; expert system; knowledge base; inference engine

烧结法生产氧化铝的生料浆配料过程是一个具有强耦合、纯滞后和显著不确定性的复杂工业过程<sup>[1]</sup>, 它生产出的生料浆直接送往烧结窑烧成熟料。熟料的成分和质量对于整个工艺有重要影响,

生料浆质量直接影响熟料质量<sup>[2]</sup>, 因此, 研究烧结法生产氧化铝的生料浆配料过程控制有重要的意义。传统的方法是根据生料浆配料和熟料烧制过程的测量数据, 通过经验公式、方程组求解和线性规划等方

收稿日期: 2004-06-12

基金项目: 国家“973”重点基础研究发展规划项目(2002CB31200)

作者简介: 阳春华(1965-), 女, 湖南双峰人, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程控制、智能自动化控制与装置, 实时系统容错调度技术等研究

论文联系人: 段小刚, 男, 硕士; 电话: 0731-8830394-4(O); E-mail: xiaogang.duan@163.com

法建立预测生料浆和熟料质量的数学模型, 并由此决定配比。然而, 由于数学模型难于准确地描述生料浆配料过程和熟料各参数间的复杂关系, 仅仅基于数学模型的传统方法难以获得精确的配料比。专家系统作为一种基于知识的智能系统, 自 20 世纪 80 年代初期进入商业应用以来, 得到了巨大发展。今天, 它已被广泛地应用到商业、科学、工程、制造以及其他领域<sup>[3]</sup>。鉴于它所表现出来的在层次结构、控制方法、知识表达上的灵活性, 在冶金、冶炼、化工等行业的复杂工业生产过程控制中, 得到了成功应用<sup>[4,5]</sup>, 而在烧结配料<sup>[6]</sup>生产过程中, 专家系统通过了仿真实验, 在焦炉配煤<sup>[2]</sup>等配料生产过程中, 专家系统已经取得实际成效。为此, 本文作者引入基于模型的专家控制系统<sup>[7]</sup>, 结合有知识搜索、前向推理和哈希算法的推理机制, 实现快速获得精确的配料比。

## 1 系统总体结构

氧化铝厂生料浆配料生产过程是: 根据确定的配比, 由集散控制系统实现铝土矿、石灰、煤、碱粉、碱液的精确下料和实时监控, 将各原料混合经管磨机湿磨制成生料浆送入烧结窑烧成熟料。铝土矿等各物料的配比由工程技术人员根据各物料的质量、生料浆和熟料成分的检测数据、配料环境以及长期的配料经验确定, 由于铝土矿品种多、各物料成分变化以及生料浆和熟料成分检测存在纯时延等原因, 人工确定配比工作量大、准确性低, 造成生料浆质量波动大。若有精确的配比作为集散控制系统的给定, 则可以稳定生料浆的质量, 建立适合烧结法氧化铝配料生产特点的专家系统, 其系统总体结构如图 1 所示。

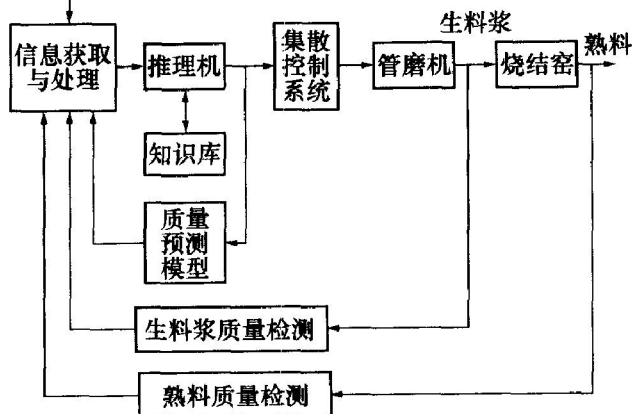


图 1 专家系统总体框图

Fig. 1 General diagram of expert system

专家系统基于烧结法氧化铝生料浆配料生产的工艺特点和长期配料的经验知识, 根据给定的熟料或生料浆质量指标以及各单种物料的质量状况, 结合配料生产的历史数据, 计算满足质量指标的初始配比; 然后, 根据专家知识库的内容和各单种物料的质量及其配比, 利用质量预测模型预测生料浆或熟料质量, 再将预测的生料浆或熟料的质量指标与给定的指标进行比较, 利用推理机调用知识库中的知识进行推理以调整初始配比, 这样通过“比较—质量预测—推理机推理—再比较—再预测—再推理”的反复循环过程, 直至生料浆的质量指标满足给定指标要求; 最后, 将符合要求的配比传递给下一级的集散控制系统用于指导生产。

## 2 知识库设计

知识库是专家系统的核心, 其主要功能是存储和管理生料浆配料的原理性知识、专家经验知识以及有关数据等, 为推理机提供优化配比所需的规则知识。

### 2.1 知识获取

该系统的知识来源于专家经验、烧结法生产氧化铝的生料浆配料机理以及相关的资料。系统索取的原始参数包括: 铝土矿、硅渣液、石灰等入磨各物料的质量数据, 管磨机的各物料实际下料量, 生料浆的氧化铝、氧化钠、水等成分的含量, 熟料的铝、铁、硅等成分的含量, 生料浆或熟料的质量指标等。根据这些参数, 系统推理出适合该条件的配比。

### 2.2 知识表示

本系统的规则具有量多、复杂、相互耦合的特点。系统的参数或状态繁多, 彼此之间相互影响, 相互制约。一个参数或状态发生变化, 势必引起别的参数或状态也发生改变, 从而使问题复杂化, 比如: 要提高铝硅比, 其途径是要么增加铝的含量, 要么减少硅的含量, 前者会引起碱比降低, 后者会引起钙硅比升高。对此复杂的规则知识, 如果采用常规、单一的匹配推理机制, 势必减缓推理速度, 降低推理效率。为了使推理既快速灵活, 又效率高, 就需要有一个好的知识表示形式<sup>[8]</sup>。知识表示有一阶谓词、产生式、框架式和语义网络等几种, 但由于产生式方法表现形式直观、有利于知识的提取与形式化, 问题求解符合人的认识过程, 从而成为应用最为简单也最为成熟的一种知识表示法, 是目前知识库系统中使用最普遍的一种方法<sup>[9,11]</sup>。

一个产生式规则的一般形式为  $P \rightarrow Q$ , 或者为  $\text{IF } P \text{ THEN } Q$ 。其中:  $P$  表示一组前提或状态;  $Q$  表示结论或动作, 其含义是“如果前提  $P$  满足, 那么可

以推出结论  $Q$ ”。本系统知识的巴科斯范式 BNF<sup>[12]</sup> 描述如下:

```

<产生式规则> ::= <规则集名> <规则号>
IF<规则前提> THEN<规则结论> <规则解释>
<规则集名> ::= <字符串>
<规则号> ::= <整型数>
<规则前提> ::= <比较单元集>
<比较单元集> ::= <比较单元> <标志符>
{ <比较单元> <标志符> }
<比较单元> ::= <属性名称> <运算符>
<值>
<属性名称> ::= <字符串>
<运算符> ::= “>”|“<”|“≤”|“≥”|“∈”|
“=”|“≠”
<值> ::= <常量值> | <区间>
<常量值> ::= <整数> | <小数> |
<字符串>
<区间> ::= [ 属性值, 常量值]
<标志符> ::= <布尔类型数>
<规则结论> ::= <操作编号> <操作单元集>
<操作编号> ::= <整型数>
<操作单元集> ::= <操作单元>
{ <操作单元> }
<操作单元> ::= <属性名称> <操作符>
( <属性名称> | <值> )
<属性名称> ::= <字符串>
<操作符> ::= “+”|“-”|“×”|“/”
<值> ::= <常量值> | <变量值>
<常量值> ::= <整数> | <小数>
<变量值> ::= <整数> | <小数>
<规则解释> ::= <字符串> | NULL
    
```

上述知识表示是为烧结法生产氧化铝的生料浆配料而设计的,在使用时作如下特殊说明:

**a. 规则集名。**规则集名是为规则数目而设置的,基于实际生产和配料机理是“以铝硅比指标为主线,添加调整矿为辅佐”的调整思路,这为规则集分类提供了依据。根据铝硅比的质量要求设置分类:以  $E$  表示铝硅比的误差,设  $M$  为一个比较小的正数,以  $E < -M$ ,  $|E| \leq M$  和  $E > M$  为标准,将符合某个条件的规则放在一起,组成一个规则集;将不符合上述条件的规则也组成一个规则集。

**b. 操作单元。**在具体调整配比时,由于配料生产本身涉及很多计算,既使作为规则的结论部分,也涉及数学运算。比如:如果需要提高铝硅比和降低碱比,且水的含量大于 36%,该台磨开,则降低该磨入磨碱液量;如果铝硅比和钙硅比不变,碱比需要提高且水的含量小于 36% 及该台磨开,则增加该磨入

磨碱液量。其中,所降低的入磨碱液量和增加的入磨碱液量都是需要计算的量,其具体计算方法是:该磨入磨碱液量等于当前入磨碱液量减去或加上碱比乘以一个比例系数,用公式表示如下:

$$V_i = V_i \pm \alpha Y. \quad (1)$$

式中:  $V_i$  为所开磨的入磨碱液体积;  $\alpha$  为比例系数;  $Y$  为碱比。

### 2.3 数据库的设计与实现

根据知识表示形式,可以设计数据表的各个物理结构。在建库时,根据配料机理和长期的专家经验对每个规则集内部的规则进行优先级排序,把优先级最强的排在每一类的前面,优先级最弱的排在末尾。在将规则输入数据库时,按照分类顺序输入,这样一个规则集的规则排放在一起,不仅有利于知识库的构建和对知识库的管理与维护,而且能缩小搜索范围,提高推理机速度和效率。

根据本系统知识库的特点,在具体建库时,将规则的前提和结论分别建立一个数据表。在 Access 中首先创建一个空的数据库;然后,在数据库中添加规则前提表和结论表;再创建 ODBC 数据源并进行配置;最后,以 CRecordSet 类为基类,公有派生规则的前提类 CConditionSet 和结论类 CResultSet。

## 3 推理机

全面高效的推理机制是专家系统的关键<sup>[13]</sup>,且推理机制应与上述知识库、数据库的表示方法一致。考虑生料浆配料生产的特点,推理机采用有知识搜索、前向推理、哈希算法三者有机结合的方式进行推理。

有知识搜索是利用已知信息和某些控制性知识,对将要搜索的结点的搜索路径进行预先估计,从中选择最有希望达到的结点进行优先搜索,以避免无效搜索,提高推理速度。如上所述,对规则进行分类,即划分成结点,建立起点到规则集节点的一级树。若利用估价函数事先能预知进入哪个规则集进行优先搜索,则能减少搜索时间,提高搜索效率。基于这种思想,首先是建立估价函数  $e(k)$ :

$$e(k) = A(k) - B(k); \quad (2)$$

$$A(k) = \sum_{i=0}^m a_i R_i(k-i) + \sum_{j=0}^n b_j G_j(k-j);$$

$$B(k) = \sum_{l=0}^p c_l C_l(k).$$

式中:  $i = 0, 1, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n; l = 0, 1, \dots, p; e(k)$  为当前时刻生料浆预测铝硅比和当前时刻各台管磨机铝硅比的偏差量;  $A(k)$  和  $B(k)$  分别为当前时刻生料浆的预测铝硅比和当前时刻各台管磨机铝硅

比的加权;  $R_i(k-i)$  为  $k-i$  时刻的生料浆铝硅比;  $G_j(k-j)$  为  $k-j$  时刻的熟料铝硅比;  $C_l(k)$  为当前时刻单台管磨机铝硅比;  $a_i, b_j$  和  $c_l$  为加权系数;  $p$  为管磨机的台数。然后根据  $e(k)$  的值, 结合规则集分类原理, 利用 SQL 语句将符合要求的规则集加载到内存。

当取出某个规则集后, 在规则集内部采用前向推理, 其推理算法如图 2 所示。记录指针首先指向该规则集的第 1 条记录, 令  $i=1$ , 然后匹配该规则前提的比较单元  $i$ , 若匹配不成功且该规则集没有结束, 则记录指针移到下一条记录继续匹配; 若比较单元  $i$  匹配成功且标志符  $i$  为假(F), 则调用结论; 如果标志符为真(T)且  $i$  等于该规则前提的比较单元数  $S$ , 则记录指针到下一条记录继续匹配, 否则令  $i=i+1$ , 继续匹配。如此反复循环比较, 直至成功匹配某条规则前提为止。

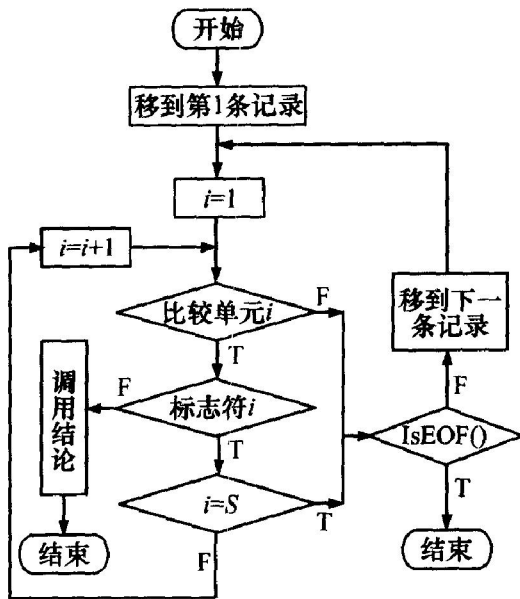


图 2 前向推理框图

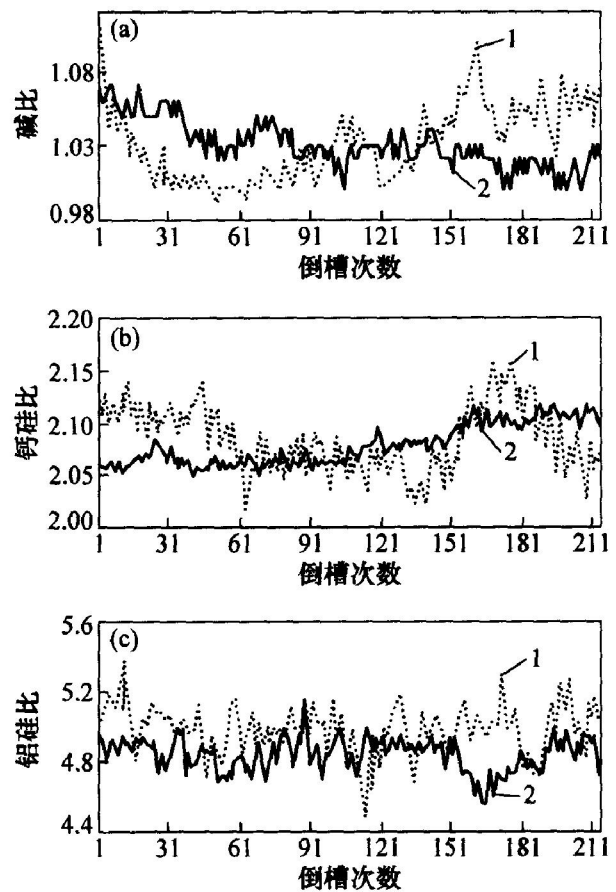
Fig. 2 Frame diagram of forward chaining

当规则前提匹配成功后, 需在结论库中查找该条规则所对应的操作。传统的查找方法是按记录从头到尾逐一扫描结论库, 直到找到相对应的记录, 这样需要执行额外的比对操作, 随着记录的数目增多, 比对次数增多, 推理速度势必减缓。而采用哈希算法可以弥补这一缺陷, 它不需要任何额外的比对操作, 即可直接指向最终的目标, 从而使推理既快速又高效。MFC 的 CMap 模板类为此提供了一种实现哈希算法的途径, 在具体实现时, 首先用 CMap 类声明一个 CConToResultMap 对象; 然后用 CMap 类的成员函数 SetAt() 建立其条件和结论的一一对应关系, 在推理时, 其成员函数 LookUp() 可以不做任何比对操作, 直接定位到该规则所对应的结论。

## 4 运行效果

系统于 2004 年 9 月投入现场开始试运行, 该系统确定配比的时间不到 1 s, 配比准确性高、生料浆质量好且稳定。没有使用该系统时, 配料技术人员确定配比需要 0.5~1 h, 且配比准确性低, 生料浆质量不好, 波动大。

根据试运行阶段所搜集的数据, 以系统投入使用之前的 2003 年 7 月的生料浆质量指标与使用本系统之后的 2005 年 3 月的生料浆质量指标进行比较, 结果如图 3 所示。可见, 无论是碱比、钙硅比还是铝硅比, 本系统配制的生料浆质量好且成分稳定。



a) 倒槽次数与碱比; (b) 倒槽次数与钙硅比; (c) 倒槽次数与铝硅比  
1—未使用该系统; 2—使用该系统

图 3 专家系统的运行效果

Fig. 3 Running effect of expert system

## 5 结论

a. 在知识表示上采用产生式方法而设计的知识表示形式, 符合领域专家的思维习惯, 便于领域知识的获取和表达, 有效地解决了知识获取的“瓶颈”问题。

b. 在推理上采用有知识搜索、前向推理和哈希

算法三者有机结合的方式,提高了推理机的推理速度和效率。

c. 系统自投入试运行后,系统优化配比计算所在 1 s 内完成,生料浆成分稳定,满足质量指标要求。

#### 参考文献:

- [1] 王冠,郑秀萍,张陶红,等. 氧化铝生产过程的 MES 体系结构[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34(4): 440-442.  
WANG Guan, ZHENG Xiurping, ZHANG Taohong, *et al.* Research of manufacturing execution system architecture in alumina production process [J]. Journal of Central South University of Technology, 2003, 34(4): 440-442.
- [2] 陈红武. 烧结法氧化铝生料浆配料算法的改进[J]. 世界有色金属, 2001(12): 36-41.  
CHEN Hongwu. Improvement on burden calculation for raw mix slurry in production of alumina with sintering process [J]. World Nonferrous Metals, 2001(12): 36-41.
- [3] 刘宝赋,廖志忠,李言俊. 故障诊断专家系统知识库编辑和维护系统[J]. 计算机工程与应用, 2002(21): 36-38.  
LIU Baofu, LIAO Zhirong, LI Yanjun. Knowledge base edit and maintenance system for fault diagnosis expert system [J]. Computer Engineering and Applications, 2002(21): 36-38.
- [4] 阳春华,沈德耀,吴敏. 焦炉配煤专家系统的定性定量综合设计方法[J]. 自动化学报, 2000, 26(2): 226-232.  
YANG Chunhua, SHEN Deyao, WU Min. Synthesis of qualitative and quantitative methods in a coal blending expert system for coke oven [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(2): 226-232.
- [5] Ishizuka M, Kobayashi S. Expert system [M]. Tokyo: Maruzen, 1991.
- [6] 牛秦洲,叶恒舟,吴一峰. 烧结厂烧结配料专家系统设计[J]. 桂林工学院学报, 2002, 22(4): 391-395.  
NIU Qinzhou, YE Hengzhou, WU Yifeng. Design of a mine blending expert system for sinter plant [J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 2002, 22(4): 391-395.
- [7] Efstathiou J. Expert system in process control [M]. Essex: Longman, 1989.
- [8] 蔡自兴,徐光祐. 人工智能及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.  
CAI Zixing, XU Guangyou. Artificial intelligence: principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [9] 曹文君. 知识库系统原理及其应用[M]. 上海:复旦大学出版社, 1995.  
CAO Wenjun. The principle of knowledge base system and application [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1995.
- [10] 王浩宇,蔡瑞英. 一种面向对象推理模型及其知识表示[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(3): 20-24.  
WANG Haoyu, CAI Ruiming. An object-oriented inference model and its knowledge representation [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2002, 24(3): 20-24.
- [11] 梁维中. 缸体铸件质量专家系统知识库的实现[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2001, 6(2): 96-98.  
LIANG Weizhong. The realization of knowledge base of quality assurance expert system for casting [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2001, 6(2): 96-98.
- [12] Fakhruddin M H, Neal P J, de Pennington A. A functional approach to redesign [J]. Engineering with Computers, 1994, 10(3): 125-139.
- [13] 彭云建,申群太. 基于面向对象编程技术的调度操作票专家系统[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2002, 33(3): 313-316.  
PENG Yunjian, SHEN Quntao. Operation scheduling expert system for transmission net of electric power on database and object oriented program technic [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2002, 33(3): 313-316.