

文章编号: 1001-0920(2009)12-1909-03

基于专家知识的字典序优化决策方法及工业应用

孔玲爽^{1,2}, 阳春华¹, 朱红求¹, 桂卫华¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南文理学院 电气与信息工程学院, 湖南 常德 415000)

摘要: 为有效实现有色冶金配料过程的实时优化, 首先根据氧化铝配料过程特点, 建立一种字典序区间目标规划模型; 然后通过整理长期积累的专家经验知识, 构建了具有优先级的分类知识库; 接着基于专家知识库的分类结构, 提出一种字典序专家推理策略, 以实现区间约束条件下的多质量指标的优化控制. 工业应用结果表明, 所提出的方法能够很好地实现生料浆质量的优化控制, 为其他有色冶金工业配料过程的控制提供了一种优化模式.

关键词: 配料; 优化; 字典序; 专家知识

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Expert-knowledge-based lexicographic order optimal decision method and its industrial application

KONG Ling-shuang^{1,2}, YANG Chun-hua¹, ZHU Hong-qiu¹, GUI Wei-hua¹

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. College of Communication and Electric Engineering, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, China. Correspondent; KONG Ling-shuang, E-mail: lshkong@mail.csu.edu.cn)

Abstract: In order to effectively solve the real-time optimization problem in the raw material blending process of nonferrous metal production, an interval lexicographic goal programming mode is proposed based on the characteristics of alumina blending process. Then, a kind of classificatory knowledge base with precedence is constructed by coordinating the expert knowledge accumulated in long-term production. Based on the knowledge base, a kind of lexicographic reasoning strategy is proposed to realize the optimal control of multiple quality indexes with interval constraints. The results of industrial application show that, the proposed method can realize the optimal control of slurry quality indexes, which provides a good optimization mode for other blending processes of nonferrous metal production.

Key words: Raw material blending; Optimization; Lexicographic order; Expert knowledge

1 引言

配料问题广泛存在于冶金、石化、电力、制药等许多流程工业中,其实质是将各种原料按一定的配比进行混合,配制出满足生产指标要求的一种或多种产品.其原料配比的合理性不仅有助于稳定配料质量,降低原料成本,而且对于后续工序产品质量的提高和能源消耗的降低具有重要意义.因此,配料问题的优化控制在各个行业得到了较为广泛的研究与应用^[1-3].对于易于建立数学模型的简单配料过程,线性规划或非线性规划是一种有效的配比优化计算方法^[4-6].然而,在一些复杂的配料过程中,由于难以建立精确的数学模型,大多采用神经网络、专家系

统、遗传算法等智能方法,或这些智能方法的综合以及与传统方法的集成等诸多方法实现配料过程的优化控制^[7-9].在这些应用中,根据优化决策者的不同偏好,建立了具有不同结构的优化模型,优化算法也不尽相同.因此,目前关于配料问题的研究尚缺乏一种统一的优化模式.

在氧化铝、铅锌、铜等有色金属冶炼的配料过程中,配料产品的质量往往是企业最为关心的问题,而其质量通常由多个指标参数来表征.例如,氧化铝配料过程中,配料产品(生料浆)的质量指标参数包括铝硅比、碱比、钙比等多个参数.在实际生产过程中,为每个质量指标参数给定一个理想变化区间,通过

收稿日期: 2008-12-25; 修回日期: 2009-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60634020,60874069,60804037); 湖南省教育厅科研项目(09C705)

作者简介: 孔玲爽(1979—),女,河北任县人,博士生,从事复杂工业过程建模与优化控制等研究; 阳春华(1965—),女,湖南双峰人,教授,博士生导师,从事复杂工业过程优化控制、智能化自动化系统等研究.

调整原料配比来控制产品质量指标尽可能在所要求的区间范围内. 然而, 冶金配料过程原料种类繁多, 指标参数之间存在严重冲突, 一种原料的变化往往会导致多个指标参数受到影响, 因而难以获得同时满足多个指标要求的最优配比. 为此, 操作工人调整配比时往往会考虑每个指标的不同重要度, 并积累了大量的生产经验. 根据有色冶金配料过程的特点, 本文将字典序目标规划模型应用于氧化铝配料过程, 建立一种配比优化决策的字典序区间目标规划模型, 并通过整理专家经验知识, 构建了具有优先级结构的分类知识库; 然后基于知识库结构, 设计了一种字典序专家推理方法, 以实现原料配比的实时优化计算. 实际工业运行结果表明, 所得优化结果能更好地反映出决策者对不同质量指标的评价, 获得满意的控制效果.

2 字典序

研究多目标优化问题, 首先应考虑如何在目标空间进行向量目标之间的比较问题. 与数量目标值之间只需按实数序比较大小的情况不同, 向量目标值之间的比较通常要按决策者的偏好选用不同意义的关系或序^[10]. 字典序是 Euclid 空间 $R^m (m \geq 1)$ 上最基本的偏好关系之一.

设 $v = (v_1, v_2, \dots, v_m)^T$, 记集合

$$L = \{v \in R^m \setminus v_1 > 0; \text{ or } v_1 = 0, v_2 > 0; \dots; \text{ or } v_1 = \dots = v_{m-1} = 0, v_m > 0; v_1 = \dots = v_m = 0\}. \quad (1)$$

这里称 L 为 R^m 中的字典锥.

定义 1 设 $a, b \in R^m$, 则:

- 1) $a \preceq b \Leftrightarrow b - a \in L$;
- 2) $a < b \Leftrightarrow b - a \in L \setminus \{0\}$;
- 3) $a \sim b \Leftrightarrow b - a \in L \cap (-L) = \{0\}$.

由此定义的序称为字典序, 符号 $\preceq, <$ 和 \sim 表示两向量间的二元关系. 若两向量之间有二元关系 \preceq 和 $<$, 则它们的分量之间要按先后次序作对应的实数大小比较; 若有二元关系 \sim , 则它们的所有分量依次都相同, 因而 \sim 也即 $=$. 例如

$$\begin{aligned} a \preceq b &\text{ 即 } a_1 < b_1; \\ \text{or } a_1 &= b_1, a_2 < b_2; \dots; \\ \text{or } a_1 &= b_1, \dots, a_{m-1} = b_{m-1}, a_m < b_m; \\ \text{or } a_1 &= b_1, \dots, a_m = b_m. \end{aligned} \quad (2)$$

3 字典序目标规划模型

3.1 字典序目标规划基本模型

字典序目标规划是一种用目标偏差的有序向量

衡量多目标模型目标达成度的字典序最小方法, 基本数学模型为:

$$\begin{aligned} \text{求 } x &= (x_1, x_2, \dots, x_n), \text{ 使} \\ \text{lexmin } &\{g_1(d_1^+, d_1^-), g_2(d_2^+, d_2^-), \\ &\dots, g_k(d_k^+, d_k^-), \dots\}; \\ \text{s. t. } &f_i(x) + d_i^- - d_i^+ = b_i, \\ &d_i^+, d_i^- > 0, i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (3)$$

其中: x 为 n 维决策向量, lexmin 表示按字典序极小化目标向量, b_i 为目标 i 的理想目标值, d_i^+ 为目标 i 偏离目标值的正偏差, d_i^- 为目标 i 偏离目标值的负偏差, $g_i(d_i^+, d_i^-)$ 为第 i 个优先级别目标偏差变量的函数, k 为优先次序数, m 为全部目标数.

3.2 字典序区间目标规划模型

氧化铝配料过程中, 通过混合各种原料配制成的生料浆的质量指标主要有铝硅比、碱比和钙比, 并按照“以铝硅比为主线, 碱比、钙比依次跟进”的思路调整配比. 生料浆各质量指标的理想值不是一个单值, 而往往是一个区间. 考虑指标的区间要求, 设定铝硅比为一级优化目标, 碱比和钙比依次次之, 建立用于原料配比优化决策的字典序区间目标规划模型如下:

$$\begin{aligned} \text{lexmin } &\{g_1 = d_1^+ + d_1^-, g_2 = d_2^+ + d_2^-, \\ &g_3 = d_3^+ + d_3^-\}; \\ \text{s. t. } &d_i^+ = [f_i(x) - \bar{b}_i] \vee 0, \\ &d_i^- = [\bar{b}_i - f_i(x)] \vee 0, \\ &d_i^+, d_i^- > 0, \\ &x_j \geq 0, i = 1, 2, 3, j = 1, 2, \dots, K. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $x = (x_1, x_2, \dots, x_K)$ 为决策变量, x_j 为第 j 种原料的下料量, K 为原料种类; $[\bar{b}_i, \underline{b}_i]$ 为第 i 个目标的理想目标区间, \bar{b}_i 为区间上限, \underline{b}_i 为区间下限; d_i^+ 为目标 i 偏离目标区间的正偏差, d_i^- 为目标 i 偏离目标值的负偏差; $f_i(x)$ 为目标 i 的函数, 即 $f_1(x)$ 为铝硅比的函数, $f_2(x)$ 和 $f_3(x)$ 分别为碱比的函数和钙比的函数, 定义如下:

$$f_1(x) = \sum_{j=1}^K A_j x_j \bigg/ \sum_{j=1}^K S_j x_j, \quad (6)$$

$$f_2(x) = \frac{1.654 \sum_{j=1}^K N_j x_j}{\sum_{j=1}^K A_j x_j + 0.6375 \sum_{j=1}^K F_j x_j}, \quad (7)$$

$$f_3(x) = \frac{1.071 \sum_{i=1}^K C_i x_j}{\sum_{i=1}^K S_j x_j}. \quad (8)$$

式中: C_j, N_j, S_j, F_j 和 A_j 分别表示第 i 种原料中 $\text{CaO}, \text{Na}_2\text{O}, \text{SiO}_2, \text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 Al_2O_3 的质量百分比.

4 基于专家知识的字典序推理策略

4.1 专家知识库

专家知识库用于存储生料浆配料过程中的专家知识条目. 由于氧化铝配料原料种类多, 约束指标多, 且一种物料量的变化同时影响多个指标值. 结合各指标不同的重要度, 知识库中的配料规则组织成“铝硅比规则集 R_1 ”, “碱比规则集 R_2 ”和“钙比规则集 R_3 ”3 大类, 规则表示的通式为

$$\text{Rule}(\text{RGNo}, \text{RNo}, \text{ConList}, \text{ConNo}). \quad (9)$$

其中:RGNo 为类号;RNo 为规则在该知识类内的编号, 按规则强度由大到小排序;ConList 为条件单元集, 形如“((ConNO₁, Tag₁), (ConNO₂, Tag₂), ..., (ConNO_k, Tag_k))”, Tag 为条件结束标志符;ConNo 为结论号, 此结论号对应结论库中专家操作, 如

(01,001,((A/S 合格,0),([C/S] 合格,0),
([N/R] 合格,1)),0101).

该规则表示 01 类规则中 001 条为:IFA/S 合格 AND[C/S] 合格 AND[N/R] 合格, THEN 调用编号为 0101 的结论. 在此规则中, 0101 的结论是“保持配比不变”.

4.2 字典序推理策略

根据专家知识库的组织结构, 配比推理策略根据 $g_i (i = 1, 2, 3)$ 的值按字典序依次优化目标值, 即首先根据 g_1 优化原料配比, 控制铝硅比在要求范围内; 然后依次根据 g_2 和 g_3 继续优化配比, 控制碱比和钙比在要求范围内. 具体推理过程如图 1 所示.

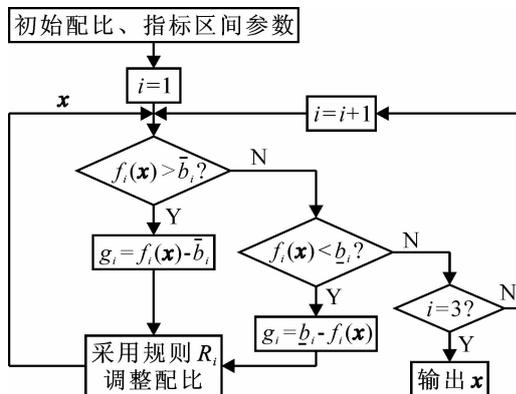


图 1 字典序推理策略

5 工业应用

基于所提出的字典序优化方法开发的氧化铝生料浆配料系统, 经过长期的现场测试后应用于国内某氧化铝厂的配料生产, 实现原料配比的在线优化. 图 2 显示了系统运行后连续 1 个月内的生料浆质量指标生产情况.

由图 2 可以看出: 3 个指标基本上都能保持在要求范围内, 尤其铝硅比的合格率几乎达到了 100%;

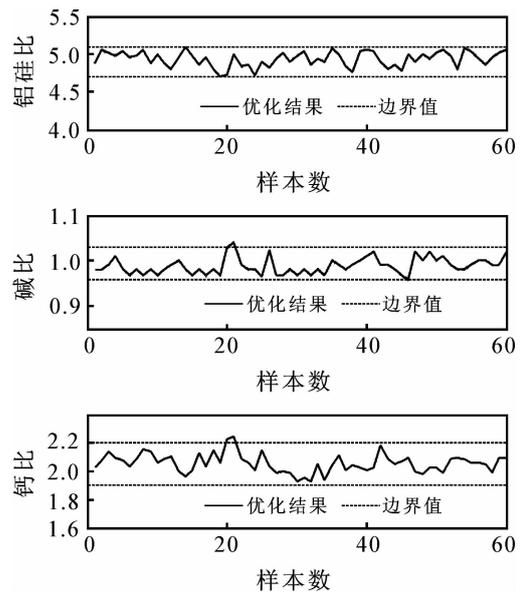


图 2 工业应用结果

碱比和钙比有 1 到 2 个样本点超出了要求上限, 这是因为原料存量不足, 致使现场无法完全按优化结果进行配料而造成的. 在原料不足的情况下, 系统会根据指标优先级调整原料配比, 配制出满足生产要求的生料浆.

6 结 论

针对有色冶金配料过程往往具有指标多、耦合严重、区间约束等特点, 本文以氧化铝生料浆配料过程为对象, 提出了一种字典序区间目标规划模型和一种基于专家知识的字典序优化推理决策方法. 工业应用结果表明, 所提出的方法不仅能够保证生料浆各个指标值在要求范围内, 而且能够反映决策者对不同的质量指标的评价, 可为其他有色冶金配料过程的控制提供一个优化模式.

参考文献 (References)

[1] Bányász Cs, Keviczky L, István V. A novel adaptive control system for raw materials blending [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23(1): 87-96.
 [2] Yang C H, Gui W H, Kong L S, et al. A genetic-algorithm-based optimal scheduling system for full-filled tanks in the processing of starting materials for alumina production [J]. Canadian J of Chemical Engineering, 2008, 86(4): 813-821.
 [3] 阳春华, 温丽敏, 朱红球, 等. 基于满意优化的氧化铝生料浆调配方法 [J]. 控制与决策, 2008, 23(10): 1172-1176.
 (Yang C H, Wen L M, Zhu H Q, et al. Satisfactory optimization of raw slurry arrangement for the process of alumina production [J]. Control and Decision, 2008, 23(10): 1172-1176.)