

文章编号: 1001-0920(2013)01-0120-05

铜闪速熔炼过程操作模式快速匹配策略

桂卫华, 刘建华, 谢永芳

(中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 在利用相似模式的归纳与综合实现铜闪速熔炼过程多操作参数同步优化的过程中, 针对模式库庞大引起相似模式发现效率低的问题, 提出了两级模式快速匹配方法. 该方法采用主元分析实现属性权重设定, 通过构造模式间相似性度量准则, 并在初级匹配准则中引入柯西不等式, 以减少计算复杂度, 快速缩小次级匹配的搜索范围, 提高模式匹配速度. UCI数据集仿真和实际生产数据应用结果验证了该方法的有效性和可行性.

关键词: 铜闪速熔炼过程; 操作模式; 模式匹配; 柯西不等式; 主元分析

中图分类号: TP29; TP391.4

文献标志码: A

Operational pattern fast matching strategy for copper flash smelting process

GUI Wei-hua, LIU Jian-hua, XIE Yong-fang

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China. Correspondent: XIE Yong-fang, E-mail: yfxie@csu.edu.cn)

Abstract: The operational parameters can be optimized synchronously by inducting and synthesizing similar operational patterns. For the drawback of the low efficiency of pattern matching caused by huge pattern case, a two-state pattern matching quickly strategy is proposed. The attribute weights are set by using principal component analysis(PCA) in advance, and the similarity measure between patterns is also constructed. In order to improve the pattern matching speed, the Cauchy-Schwarz inequality is introduced in primary pattern matching, which can be used to reduce the computational complexity and narrow the searching scope for secondary pattern matching. Simulation results based on UCI data sets and actual running data collected from a copper flash smelting process are given to verify the effectiveness and feasibility.

Key words: copper flash smelting process; operational pattern; pattern matching; Cauchy-Schwarz inequality; principal component analysis

0 引言

铜闪速熔炼是指将深度脱水的精矿粉末在闪速炉喷嘴处与空气、氧气和辅助燃料混合, 然后从反应塔顶部喷入并发生迅速反应, 形成熔融硫化物和氧化物的混合熔体, 下降到反应塔底部, 在沉淀池中汇集并沉淀分离, 最终形成铜硫、炉渣和烟气. 铜闪速熔炼过程中, 冰铜温度、冰铜品位和渣中铁硅比是衡量熔炼过程质量优劣的 3 大工艺指标, 只有稳定这 3 大指标, 才可以实现后续吹炼和硫酸生产过程的稳定^[1]. 铜闪速熔炼过程操作参数多且相互关联, 使得在熔炼过程中需要同时调整多个操作参数, 才能保证 3 大工艺指标的的稳定, 以获得更有效的生产效益和节能降耗

效果^[2].

为了实现铜闪速熔炼过程操作参数的优化调整, 文献[3-4]通过建立过程输入输出之间的关系模型, 采用智能优化算法获取最优操作参数, 成果的工业应用对稳定生产、提高产品产量和质量发挥了一定作用. 但铜闪速熔炼过程反应机理复杂, 关键工艺参数无法实时测量, 导致模型精度较低, 应用效果有限. 在铜闪速熔炼过程积累了大量反映生产运行规律和工艺参数之间关系潜在信息的数据^[5], 从这些数据中挖掘有效信息, 研究基于数据的操作参数优化方法, 智能获取指导生产过程优化运行知识, 具有重要的理论意义和应用价值^[6]. 为此, 桂卫华等^[7-8]首次提出了基

收稿日期: 2011-10-08; 修回日期: 2011-12-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61104135, 60904077); 国家 863 计划项目(2009AA04Z137); 中央科研基本业务费中南大学国家杰青培育专项基金项目(2011JQ009); 湖南省自然科学基金项目(09JJ13122).

作者简介: 桂卫华(1950—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂工业过程建模及优化控制、分散鲁棒控制及故障诊断等研究; 刘建华(1981—), 男, 博士生, 从事复杂有色冶金过程优化控制、数据挖掘的研究.

于数据的铜闪速熔炼过程操作模式优化方法,阐述了操作模式的构建、分解及优化技术.在基于数据的操作模式优化过程中,操作模式匹配是操作模式优化成功的关键,直接关系到优化的性能.操作模式匹配策略的研究重点主要集中在模式匹配精度与速度上,常用的模式匹配策略主要有归纳推理策略、对照匹配策略和最近邻策略等^[9-10].归纳推理策略和对照匹配策略将组成模式的各属性等同考虑,在进行模式匹配时往往会忽略或掩盖重要的特征属性^[11],匹配精度不高.最近邻法采用“特征属性权重值法”区别各特征属性的重要程度,利用PCA技术选择属性权重可以有效避免专家咨询法的主观性和粗糙集方法样本选择的非随意性^[12-14],应用较为广泛.

本文在文献[7-8]关于操作模式描述与优良操作模式库形成的基础上,着重研究面向铜闪速熔炼过程操作参数优化的操作模式快速匹配策略.基于铜闪速熔炼过程机理分析,确定铜闪速熔炼过程的操作模式匹配对象与被匹配对象.为了确保模式匹配精度,利用PCA技术确定各属性特征权重,并采用特征属性权重值法进行模式间的相似性度量,经过两级匹配过程实现相似操作模式集的快速获取:初级匹配时,在欧几里德距离相似性度量准则中引入柯西不等式^[15],将操作模式匹配对象各分量之间的综合度量转化为范数间的比较,快速缩小匹配范围,形成粗选操作模式集;次级匹配时,在较小范围的粗选操作模式集中进行度量,获取满足阈值条件的相似操作模式集.采用UCI数据集验证所提出方法的正确性,并结合实际生产数据给出应用结果的分析与讨论.

1 铜闪速熔炼过程操作模式快速匹配过程

在铜闪速熔炼过程中,精矿、造渣剂等混合物以规定的速率加入到闪速炉中,通过优化调整反应塔风量、氧量和造渣剂加入量等操作参数,实现冰铜温度、冰铜品位和渣中铁硅比3大工艺指标的稳定^[16].将描述工况的原矿量和原矿中Cu, Fe, S, SiO₂的质量百分含量组成的向量 $I_k = [i_k^1, i_k^2, \dots, i_k^5]^T (k = 1, 2, \dots, n)$ 定义为条件参数.其中: $i_k^j (j = 1, 2, \dots, 5)$ 表示第k个样本的第j个条件参数对应的值,n为样本容量.将需要优化调整的反应塔风量、氧量和造渣剂加入量形成的向量 $U_k = [u_k^1, u_k^2, u_k^3]^T (k = 1, 2, \dots, n)$ 定义为操作参数.其中: $u_k^j (j = 1, 2, 3)$ 表示第k个样本的第j个操作参数对应的值,n表示样本容量.将条件参数和操作参数组成的向量 $Q_k = [I_k^T, U_k^T]^T$ 定义为操作模式^[7-8].

基于数据的铜闪速熔炼过程操作模式优化本质是结合操作模式的综合评价指标^[7],通过分析工况条件参数与相似操作工况集条件参数之间的差异,智能

协调对应的操作参数,实现铜闪速熔炼过程稳定优化运行.为此,首先应以当前工况的条件参数作为操作模式的匹配对象,以优良操作模式库中相应的条件参数作为被匹配对象,通过度量匹配对象与被匹配对象之间的相似程度^[17],实现相似操作模式集的获取.

本文在文献[7-8]关于优良操作模式库形成的基础上,提取优良操作模式库中条件参数相应的数据集,采用PCA技术完成各分量属性权重的设定,同时借助载荷矩阵实现匹配对象与被匹配对象库的构建.在此基础上,以欧几里德距离作为相似性度量准则,采用分级匹配策略实现操作模式的快速匹配.初级匹配过程中,通过在相似性度量准则中引入柯西不等式,利用匹配对象与被匹配对象相应范数间的比较取代各分量间的综合度量,可以减少模式匹配计算复杂度,快速形成用于次级匹配所需的粗选操作模式集;结合相似性度量准则,在粗选操作模式集中实现操作模式的次级匹配,获取相似操作模式集,用于操作模式优化.操作模式快速匹配过程如图1所示.

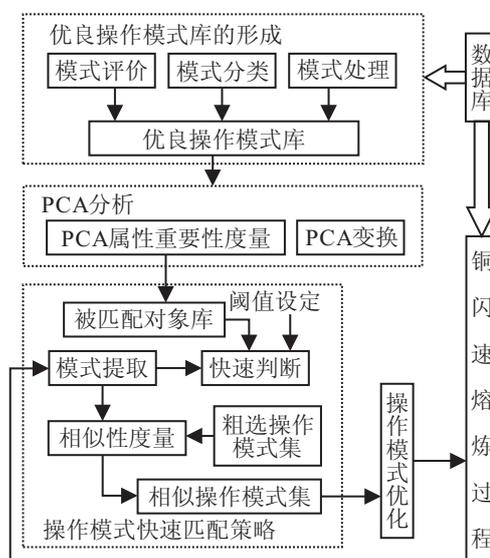


图1 操作模式快速匹配过程框架

2 属性重要性度量及匹配对象的构建

2.1 基于PCA的属性重要性度量

PCA分析的主要思想是通过构造原变量的线性组合,形成一系列互不相关的新变量,并利用新变量来描述数据的主要信息^[18].不同的分量对于数据信息量的表示程度是不同的,信息量的多少主要由各分量所对应的特征值来度量.基于此,可以将各分量所对应特征值的贡献率作为相应分量的属性权系数.

为了消除各参数量纲不同带来的影响,首先对操作模式进行归一化处理.将已按列零均值标准化处理后的操作模式记为 $Q_k = [I_k^T, U_k^T]^T$,其中 I_k^T 和 U_k^T 的意义同前文.设 $I \in R^{n \times 5}$ 为由 Q_k 中相应 I_k 组成的矩阵,即

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_1^1 & i_1^2 & \cdots & i_1^5 \\ i_2^1 & i_2^2 & \cdots & i_2^5 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_n^1 & i_n^2 & \cdots & i_n^5 \end{bmatrix}_{n \times 5}, \quad (1)$$

定义 \mathbf{I} 的协方差矩阵为

$$\text{Cov}(\mathbf{I}) = \frac{\mathbf{I}^T \mathbf{I}}{n-1}. \quad (2)$$

对式 (2) 进行正交分解, 有

$$\text{Cov}(\mathbf{I}) = \frac{\mathbf{I}^T \mathbf{I}}{n-1} = \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{P}^T. \quad (3)$$

其中: $\mathbf{D} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_5)$ 为协方差矩阵的特征根矩阵, 且 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_5$; $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_5]$ 为特征向量, 称为载荷矩阵.

根据各分量的贡献情况, 选择前 m ($1 < m \leq 5$) 个主分量作为条件参数的新变量, 并定义新变量的第 i ($i = 1, 2, \dots, m$) 个分量的权系数 (贡献率) 为

$$\omega_i = \left(\lambda_i / \sum_{j=1}^m \lambda_j \right) \times 100\%. \quad (4)$$

2.2 匹配对象与被匹配对象的构建

操作模式之间的相似性度量应在由前 m 个分量构成的特征空间中进行. 为此, 需要在新特征空间中构造操作模式的匹配对象与被匹配对象. 设一个新出现工况的条件参数为 $\mathbf{I}_0 = [i_0^1, i_0^2, \dots, i_0^5]^T$, 将 \mathbf{I}_0 通过载荷矩阵 $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \dots, \mathbf{p}_5]$ 映射到新特征空间的向量 $\hat{\mathbf{I}}_0$ 定义为匹配对象, 有

$$\hat{\mathbf{I}}_0 = \mathbf{I}_0 \mathbf{P}^T = [\hat{i}_0^1, \hat{i}_0^2, \dots, \hat{i}_0^5]^T. \quad (5)$$

将优良操作模式库中相应的条件参数数据集 \mathbf{I} 通过载荷矩阵映射到新特征空间所组成的集合称为被匹配对象库, 有

$$\hat{\mathbf{I}}_k = \mathbf{I}_k^T \mathbf{P} = [\hat{i}_k^1, \hat{i}_k^2, \dots, \hat{i}_k^5]^T, \quad (6)$$

其中 $\hat{\mathbf{I}}_k$ 为第 k 个被匹配对象.

3 基于柯西不等式的快速搜索判断准则

3.1 模式相似性判断准则

基于数据的操作模式匹配主要是指根据设定的阈值 α , 结合匹配对象与被匹配对象之间的相似度进行相似操作模式匹配. 匹配对象 $\hat{\mathbf{I}}_0$ 与被匹配对象 $\hat{\mathbf{I}}_k$ 之间的相似度采用欧几里德距离公式进行度量, 即

$$s_k = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (\hat{i}_0^j - \hat{i}_k^j)^2 / \sum_{j=1}^m \omega_j}, \quad (7)$$

其中 \hat{i}_0^j , \hat{i}_k^j 分别表示匹配对象 $\hat{\mathbf{I}}_0$ 与第 k 个被匹配对象 $\hat{\mathbf{I}}_k$ 中的第 j 个参数. 匹配对象 $\hat{\mathbf{I}}_0$ 与被匹配对象 $\hat{\mathbf{I}}_k$ 越相似, s_k 值越小, 当 $s_k = 0$ 时, 表明两个匹配对象完全相似.

设定相似度阈值 α , 当 $s_k \leq \alpha$ 时, 认为匹配成功, 即当

$$s_k = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (\hat{i}_0^j - \hat{i}_k^j)^2 / \sum_{j=1}^m \omega_j} \leq \alpha \quad (8)$$

时, 匹配成功, 同时将第 k 个被匹配对象所对应的原优良操作模式库中的操作模式标记为相似操作模式. 由式 (8) 可得

$$\|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_k\|^2 + \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_0\|^2 - 2 \sum_{j=1}^m \omega_j \hat{i}_0^j \hat{i}_k^j \leq \alpha^2 \sum_{i=1}^m \omega_j, \quad (9)$$

即

$$\|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_k\|^2 + \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_0\|^2 - \alpha^2 \sum_{i=1}^m \omega_j \leq 2 \sum_{j=1}^m \omega_j \hat{i}_0^j \hat{i}_k^j. \quad (10)$$

由柯西不等式可知

$$\|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_k\|^2 + \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_0\|^2 - \alpha^2 \sum_{i=1}^m \omega_j \leq 2 \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_k\| \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_0\|, \quad (11)$$

移项可得

$$\|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_k\|^2 + \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_0\|^2 - 2 \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_k\| \|\sqrt{\omega_j} \hat{\mathbf{I}}_0\| \leq \alpha^2 \sum_{i=1}^m \omega_j. \quad (12)$$

在式 (8) 中通过引入柯西不等式, 扩大了操作模式的匹配范围, 使得满足式 (8) 的操作模式也必须满足式 (12), 但满足式 (12) 的操作模式未必同时满足式 (8). 式 (12) 通过柯西不等式的引入将操作模式各参数间的综合比较转变为范数间的比较, 可以快速排除相似度较小的操作模式, 避免不必要的计算, 有效减少了计算复杂度. 为此, 可以直接将式 (12) 作为初级匹配过程中粗选相似性度量准则, 获得用于次级匹配的粗选操作模式集, 使操作模式的次级匹配过程只需在粗选操作模式集中进行度量, 有效缩小了操作模式的匹配范围, 提高了模式匹配速度.

3.2 算法复杂度分析

本文所提出匹配策略的优越性在于通过构造相似性快速判断准则, 减少模式匹配的计算复杂度, 进而提高模式匹配速度. 以具有 k 维的 n 个优良操作模式形成的操作模式库为例, 采用式 (8) 进行遍历搜索时需要进行 $n(2k+1)$ 次乘除运算、 n 次开方运算、 $n(3k-1)$ 次加减运算和 n 次比较运算, 最终获得满足阈值条件的相似操作模式集. 本文提出的匹配策略进行初次匹配时主要通过比较范数获取粗选操作模式集, 与操作模式对应的范数可以在匹配之前进行运算. 初级匹配需进行 $3n$ 次乘除运算、 $2n$ 次加减运算和 n 次比较运算, 假设共获取 r 个粗选操作模式, 次级匹配需要进行 $r(2k+1)$ 次乘除运算、 r 次开方运算、 $r(3k-1)$ 次加减运算和 r 次比较运算, 获取与遍历搜

索策略同样精度的操作模式集. 因此, 本文匹配策略共需进行 $3n + r(2k + 1)$ 次乘除运算、 $2n + r(3k - 1)$ 个加减运算、 $n + r$ 次开方运算和 $n + r$ 次比较运算. 与遍历搜索法相比, 本文提出的匹配策略可以减少约 $(2k + 1)(n - r) - 3n$ 次乘除运算和 $(3k - 1)(n - r) - 2n$ 次加减运算, 而且当 $r \ll n$ 时, 可以有效减少计算量, 提高模式匹配速度, 且在实际操作模式匹配过程中, 条件 $r \ll n$ 总可以得到满足.

3.3 UCI 数据集仿真

为了验证本文所提匹配策略的有效性, 采用 UCI 数据集中的 wine quality-white 数据集进行验证, 该数据集共有 4 898 组样本, 包括 11 个条件属性和 1 个酒类质量决策属性, 通过 11 个条件属性决策 White wine 的质量类别. 为此, 将 11 个条件属性作为匹配对象, 为保证匹配精度, 在对样本进行 PCA 分析确定属性权重的过程中, 选择所有的 PCA 主元, 并将所有样本进行 PCA 变换, 以形成“被匹配对象库”. 从“被匹配对象库”中随机选择 20 个样本作为匹配对象, 采用欧式距离作为相似性度量公式, 从相似性度量开始计时, 设定不同的阈值, 采用遍历搜索与本文搜索方法进行比较. 结果如表 1 所示.

表 1 UCI 数据集仿真结果对比表

阈值	遍历搜索 时间/s	本文策略		节省 时间/%
		搜索时间/s	粗选个数	
0.1	0.1563	0.0469	782	69.99
0.2	0.1561	0.0625	1442	59.96
0.5	0.1563	0.1250	2917	20.03
0.7	0.1564	0.1487	3600	4.92
0.8	0.1563	0.1563	3901	0.00
0.9	0.1563	0.1719	4167	-9.98

由表 1 可知, 两种方法最终获得相同的相似样本, 表明本文策略与遍历搜索策略具有相同的匹配精度. 另一方面, 随着阈值的增加, 遍历搜索所需时间基本保持不变, 平均用时为 0.1563 s. 而采用本文匹配策略, 当阈值增大到使初级匹配的粗选样本个数达到一定程度时 (约 3 900), 匹配所需时间将不小于遍历搜索所耗时间, 但当设定的阈值使得粗选样本个数小于该数量时, 匹配所需时间明显小于遍历搜索所耗时间, 且在进行相似样本的选择过程中, 该条件总可以得到满足.

4 铜闪速熔炼过程实际数据应用分析

结合某冶炼厂铜闪速熔炼过程 2007 年 8 月~2010 年 7 月间的实际生产数据, 将铜精矿原矿量, 原矿中的 Cu, Fe, S, SiO₂ 质量百分含量、反应塔风量、氧量和造渣剂加入量形成的向量作为一个操作模式^[7-8], 所有生产数据对应的操作模式所组成的集合

为操作模式库.

基于铜闪速熔炼过程机理和实际生产数据分析, 定义铜闪速熔炼过程的综合工况评判指标^[7-8]为

$$y = \beta_1 \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)^2 + \beta_2 \left(1 - \frac{G}{G_0}\right)^2 + \beta_3 \left(1 - \frac{C}{C_0}\right)^2. \quad (13)$$

其中: T, G, C 分别为冰铜温度、冰铜品位和渣中铁硅比值; T_0, G_0, C_0 分别为相应的期望工艺指标, 实际生产过程中分别为 1 225 °C, 0.58, 1.3; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为权重, 经验取值为 0.3, 0.4, 0.3. 综合工况指标越小, 工况越好, 根据式 (13), 将综合工况评判值 $y \leq 0.01$ 时所对应的操作模式设定为优良操作模式, 利用操作模式智能分类方法^[17], 从操作模式库中发现 204 430 个优良操作模式. 若以组成操作模式的条件参数作为匹配对象, 则需提取优良操作模式库中相应的条件参数数据组成条件参数数据矩阵, 利用属性权重设定方法, 获得的新变量权重分别为

$$\omega = [0.3324, 0.2328, 0.1706, 0.1583, 0.1059]^T,$$

载荷向量矩阵为

$P =$

$$\begin{bmatrix} -0.5979 & 0.2847 & -0.0729 & 0.2197 & -0.7127 \\ -0.4817 & -0.0752 & -0.5525 & -0.6339 & 0.2351 \\ -0.2506 & -0.6165 & 0.6217 & -0.3560 & -0.2094 \\ -0.2437 & -0.6498 & -0.3333 & 0.6155 & 0.1687 \\ 0.5370 & -0.3331 & -0.4379 & -0.2107 & -0.6037 \end{bmatrix}.$$

将优良操作模式库对应的条件参数通过载荷向量矩阵 P 映射到由新分量组成的特征空间上, 作为操作模式的被匹配对象. 从优良操作模式库中随机选择 50 个操作模式进行验证, 并与遍历搜索时间进行比较, 在设定不同的阈值时, 两种方法的平均搜索时间和粗选操作模式个数如表 2 所示.

表 2 铜闪速熔炼过程实际数据集应用结果对比表

阈值	遍历搜索 时间/s	本文策略		节省 时间/%
		搜索时间/s	粗选个数	
0.04	8.2451	3.6418	982	55.83
0.1	8.2481	3.8957	1598	52.77
0.5	8.2510	5.1951	20894	37.04
0.6	8.5415	6.5482	86519	23.34
0.7	8.6249	8.6457	124160	-0.24
0.9	8.6249	9.5418	157514	-10.63

由表 2 可见, 本文所提策略匹配所需时间随着粗选模式数的增加而增加, 这是因为在次级匹配过程中, 粗选模式被重复进行计算, 且随着相似性阈值的增加, 粗选模式个数也会逐渐增加, 当粗选模式个数达到一定值时, 匹配过程所耗时间将大于遍历搜索时间, 此时阈值接近 0.7, 实际应用时, 一般要求阈值 $\alpha \leq 0.1$.

从优良操作模式库的分布可知,当阈值 $\alpha \leq 0.1$ 时,粗选操作模式样本个数远小于操作模式总数,此时,采用本文所提的匹配策略可以节省时间 50% 以上,进一步表明了本文所提出策略的有效性和合理性。

5 结 论

为了及时提供基于数据的操作模式优化所需的相似操作模式集,满足铜闪速熔炼过程实时控制的需求,相似操作模式集的获取策略除了需要保证操作模式的匹配精度外,还应尽量提高操作模式匹配速度。本文首先借助 PCA 技术实现属性权重的设定,形成“被匹配对象库”,通过二者之间的特征属性加权比较,确保操作模式匹配的可靠性。在以欧几里德距离作为操作模式之间的相似性度量准则中,通过引入柯西不等式,构造了操作模式初级匹配快速判断准则,减少了相似度计算复杂度,快速确定粗选操作模式集,并在此基础上进行操作模式的次级匹配,确定满足阈值的相似操作模式集。算法复杂性分析和数据集仿真结果表明,当所选相似度阈值使得初级匹配获得的粗选操作模式个数小于某一指定值时(实际应用时,该条件总可以得到满足),本文所提出方法不仅可以有效确保操作模式的匹配精度,还可以有效减少模式匹配时间,提高模式匹配速度。

参考文献(References)

- [1] Higgins D R, Gray N B, Davidson M R. Simulating particle agglomeration in the flash smelting reaction shaft[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(14): 1251-1265.
- [2] 胡志坤, 桂卫华, 阳春华, 等. 铜转炉吹炼过程熔剂加入量的模糊操作模式挖掘方法[J]. *控制与决策*, 2010, 25(11): 1689-1692.
(Hu Z K, Gui W H, Yang C H, et al. A mining method for fuzzy operational patterns of the amount of flux in the process of copper converter[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(11): 1689-1692.)
- [3] Gui W H, Wang L Y, Yang C H, et al. Intelligent prediction model of matter grade in copper flash smelting process[J]. *Trans on Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(5): 1075-1081.
- [4] Sanchez-Corrales V M, Valera-Gonzalez J A, Flores-Perez P, et al. Mass balance calculations in copper flash smelting by means of genetic algorithms[J]. *J of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2004, 56(12): 29-32.
- [5] Ashish S, Dale E S. Pattern matching in historical batch data using PCA[J]. *IEEE on Control Systems Magazine*, 2002, 22(5): 53-63.
- [6] 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 641-649.
(Chai T Y. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories[J]. *Acta automatica Sinica*, 2009, 35(6): 641-649.)
- [7] 桂卫华, 阳春华, 李勇刚, 等. 基于数据驱动的铜闪速熔炼过程操作模式优化及应用[J]. *自动化学报*, 2009, 35(6): 717-724.
(Gui W H, Yang C H, Li Y G, et al. Data-driven operational pattern optimization for copper flash smelting process[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 717-724.)
- [8] Peng X B, Gui W H, Li Y G, et al. Operational pattern optimization for copper flash smelting process based on pattern decomposition of fuzzy neural networks[C]. 2007 IEEE Int Conf on Control and Automation. Guangzhou, 2007: 2328-2333.
- [9] Chen Y J, Chen Y M, Wang C B, et al. Developing a multi-layer reference design retrieval technology for knowledge management in engineering design[J]. *Expert Systems with Applications*, 2005, 29(4): 839-866.
- [10] Yan L, Simon C K, Sankar K P. Combining feature reduction and case selection in building CBR classifiers[J]. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 2006, 18(3): 415-429.
- [11] 廖洪富, 李敬敏, 姚进, 等. 基于多层动态索引的相似炉型检索方法研究[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(4): 225-229.
(Liao H F, Li J M, Yao J, et al. Research on the retrieval method of similar blast furnace profile based on multilayer dynamic index[J]. *J of SiChuan University: Engineering Science Edition*, 2010, 42(4): 225-229.)
- [12] 罗来鹏, 刘二根. 一种新的属性重要性度量及其规则获取[J]. *计算机工程与应用*, 2007, 43(22): 170-172.
(Luo L P, Liu E G. New message of significance of attributes and its rule acquiring[J]. *Computer Engineering and Application*, 2007, 43(22): 170-172.)
- [13] Wan S, Lei T C, Chou T Y. A novel data mining technique of analysis and classification for landslide problems[J]. *Nat Hazards*, 2010, 52(1): 211-230.
- [14] Wang W, Zhang X L, Gombault S. Constructing attribute weights from computer audit data for effective intrusion detection[J]. *J of Systems and Software*, 2009, 82(12): 1974-1981.
- [15] Cheol S, Jong B R. A fast search algorithm for vector quantization using L2-norm pyramid of code-words[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2002, 11(1): 10-15.
- [16] Chen H R, Mei, C, Xie K, et al. Operation optimization of concentrate burner in copper flash smelting furnace[J]. *Trans on Nonferrous Metals Society of China*, 2004, 14(3): 631-636.