第 41 卷 第 1 期 自 动 化 学 报 Vol. 41, No. 1
2015 年 1 月 ACTA AUTOMATICA SINICA January, 2015

基于熵权–可拓理论的高炉软熔带位置状态模糊综合评判方法

杨贵军 [1] 蒋朝辉 [1] 桂卫华 [1] 阳春华 [1] 谢永芳 [1]

摘 要 针对高炉 (Blast furnace, BF) 软熔带位置状态影响因素复杂多样且具有层次性和模糊性的特点, 提出了基于熵权–可拓理论的高炉软熔带位置状态两级模糊综合评判的新方法. 首先, 在对高炉生产过程参数进行整理、分类的基础上, 采用可拓理论和熵权法确定第一级评判的隶属矩阵和模糊权向量, 进行一级模糊评判. 其次, 以一级评判结果矩阵构成第二级评判的隶属矩阵, 并结合层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 确定的第二级模糊权向量, 进行二级模糊评判. 利用物元的可拓性定性分析和可拓集合论的关联函数定量计算相结合的方法, 实现对高炉软熔带位置状态的两级模糊综合评判. 最后, 以某钢铁厂 2 650 m^3 高炉为实例对其软熔带位置状态进行综合评判, 所得结果与现场实际情况吻合良好.

关键词 高炉软熔带, 可拓理论, 熵权, 层次分析法, 两级模糊评判

引用格式 杨贵军, 蒋朝辉, 桂卫华, 阳春华, 谢永芳. 基于熵权–可拓理论的高炉软熔带位置状态模糊综合评判方法. 自动化学报, 2015, **41**(1): 75−83

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140232

Fuzzy Synthesis Evaluation Method for Position State of Blast Furnace Cohesive Zone Based on Entropy Weight Extension Theory

YANG Gui-Jun[1] JIANG Zhao-Hui[1] GUI Wei-Hua[1] YANG Chun-Hua[1] XIE Yong-Fang[1]

Abstract As the position state of blast furnace (BF) cohesive zone is influenced by various complex factors, which have hierarchical and fuzzy characteristics, a two-stage fuzzy synthesis evaluation method based on entropy weight extension theory is proposed. Using the extension theory and entropy weight method, the membership matrixes and fuzzy weight vectors of the first-stage are determined for the first-stage fuzzy evaluation, which is based on the work of organizing and classifying the process data of BF. Then, after determining the second-stage fuzzy weight vector by utilizing the analytic hierarchy process (AHP), the membership matrix of the second-stage fuzzy evaluation is generated on the basis of the result matrixes of the first-stage fuzzy evaluation. Thus, the two-stage fuzzy evaluation of the position state of BF cohesive zone can be carried out with not only qualitative analysis with extension of matter-element but also quantitative calculation with correlation function of extension set theory. A case study of a 2 650 m^3 steel plant is carried out to verify the proposed method. It can be seen from the verification that the proposed method can reflect the practical situation well.

Key words Blast furnace (BF) cohesive zone, extension theory, entropy weight, analytic hierarchy process (AHP), two-stage fuzzy evaluation

Citation Yang Gui-Jun, Jiang Zhao-Hui, Gui Wei-Hua, Yang Chun-Hua, Xie Yong-Fang. Fuzzy synthesis evaluation method for position state of blast furnace cohesive zone based on entropy weight extension theory. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 75−83

高炉 (Blast furnace, BF) 炼铁是钢铁生产过程中 CO_2 排放的主要工序和能耗最大的环节, 其软熔带位置状态 (如偏高、良好、偏低) 是反映高炉能否高效运行的关键指标. 若软熔带位置偏高, 则块状带体积减小, 间接还原区缩减, 使高炉利用系数和煤气利用率降低, 焦比升高, 能耗增加; 若软熔带位置偏低, 则高温区下移, 碳溶反应加剧, 焦炭负荷增高, 同时滴落带体积减小, 影响液态渣铁分离, 降低铁水质量. 可见软熔带位置状态严重影响高炉的能耗和铁水质量. 然而, 软熔带的位置现仍无法实时、准确地探测, 导致对软熔带位置的调节盲目, 致使高炉能耗高、铁水质量不稳定. 因此, 研究应用非接触式方法正确判断软熔带的位置状态, 对指导现场操作人员正确调整操作制度, 改善炉内透气性, 提高煤气利用率, 减少 CO_2 排放和降低焦比, 实现优质、低耗、绿色炼铁具有重要的意义.

近年来, 国内外学者对高炉软熔带位置的研究

收稿日期 2014-04-08 录用日期 2014-09-01
Manuscript received April 8, 2014; accepted September 1, 2014
国家自然科学基金重大项目 (61290325), 国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (61321003), 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2013zzts226) 资助
Supported by the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (61290325), Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (61321003), and Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University (2013zzts226)
本文责任编委 倪茂林
Recommended by Associate Editor NI Mao-Lin
1. 中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083
1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083

主要从两个方向开展: 1) 开发硬件装置直接测定, 如放射性同位素 (Radioactive isotope, RI) 法、时间区域反射仪 (Time domain reflectometer, TDR) 法、光脉冲信号法等; 2) 通过研究高炉内部多相态耦合流动和传热传质机理, 运用数值仿真技术实现全高炉的静态模拟, 获得炉内温度场分布模型, 并结合炉料的软熔温度信息间接推定高炉软熔带位置状态[1−3]. 由于高炉的高温密闭、强氧化还原反应环境等因素, 致使直接测定法仅适用于实验研究, 无法应用于高炉炼铁生产操作过程; 同时炉内相场耦合严重、反应机理复杂, 利用数学模型间接确定软熔带位置的数值模拟计算时间长, 仅能用于离线的静态模拟和教学分析, 无法为高炉操作提供实时指导. 高炉检测装备众多, 获得的实际生产数据量大, 这些数据隐含了丰富的软熔带位置状态信息, 为研究利用实际生产过程数据中的有效信息来实现非接触式的实时评判高炉软熔带位置状态提供了基础.

目前, 对高炉软熔带位置状态的有效评判方法鲜有报道, 现场操作者根据高炉检测仪表的实时检测数据, 结合经验对软熔带位置状态进行评判, 再调整相应的操作. 由于影响软熔带位置状态因素众多且存在矛盾, 检测值存在不确定性、模糊性等问题, 导致操作者评判时会出现不一致, 甚至矛盾的情况. 可拓学 (Extenics)[4] 利用形式化的工具, 从定性和定量两个角度来研究解决矛盾问题, 它能准确评判一个或多个对象 (包括事物、策略、方法等) 的优劣、所属类别, 或对所获信息进行甄别, 已经在很多领域得到应用[5−8], 为采用可拓理论进行高炉软熔带位置状态的评判提供了参考. 然而, 高炉检测参数具有多源异构、不确定性和强干扰等特点, 采用可拓理论进行软熔带位置状态评判时还要解决如下问题: 1) 高炉检测的参数复杂多样、时空耦合特性明显, 使得参数的合理分类十分困难; 2) 操作者凭经验进行工况判定和调节控制, 具有主观性, 致使确定参数评判指标困难; 3) 参数检测值的不确定性特征, 使得各参数对评判目标影响的权重存在不确定性, 直接影响评判结果的可信度. 为解决上述问题, 本文通过研究高炉冶炼工艺特点, 分析炉体不同部位检测数据在反映软熔带位置状态信息时呈现的差异性、层次性和模糊性等特征, 对高炉生产过程参数进行整理与合理分类; 根据现场操作经验, 并结合工程实际, 采用熵权法确定参数客观权重; 运用模糊数学原理, 提出基于可拓理论的高炉软熔带位置状态两级模糊综合评判的新方法.

1 高炉软熔带位置状态的两级模糊综合评判模型

模糊综合评判法是一种基于模糊数学原理, 对受多个因素影响的事件作出综合评判的方法. 它能较好地解决具有模糊、难以量化和不确定性等特征对象的状态评判问题, 具有结果清晰、系统性强的特点. 模糊综合评判主要涉及 4 个要素: 评语集 V、因素集 X、隶属矩阵 M 和模糊权向量 $\boldsymbol{A}$. 根据影响因素的层次性, 模糊综合评判可分为一级和多级模糊综合评判. 本文采用两级模糊综合评判, 结构框图如图 1 所示.

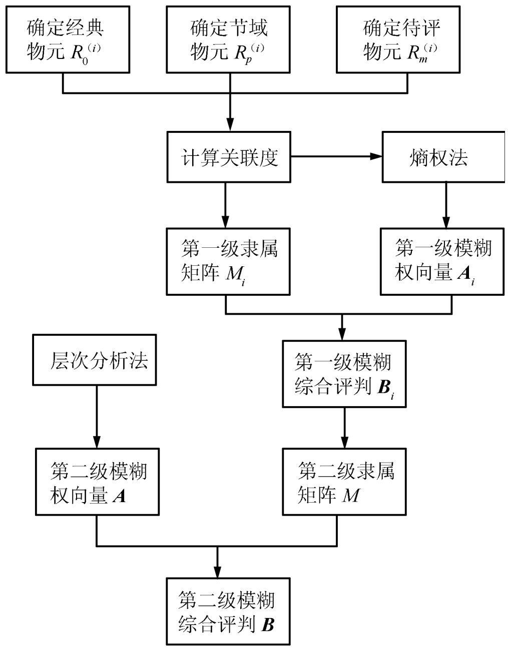


图 1 两级模糊综合评判结构图

Fig. 1 The structure of two-stage fuzzy synthesis evaluation

1.1 确定评语集和因素集

高炉软熔带位置状态主要受到原料、高炉操作制度等因素的影响, 状态信息隐含在煤气利用率、炉顶温度、铁水温度等过程参数中. 因此, 本文设评语集 $V = \{偏高, 良好, 偏低\}$, 代表高炉软熔带的三种位置状态.

本文通过深入分析某高炉所能检测的参数, 结合工程实际和现场操作人员的经验, 将与软熔带位置状态相关的参数分为炉顶状态参数、炉身状态参数、炉底状态参数、生产原料参数、生产指标参数等 5 类, 并作为第一级因素集 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$. 每类参数中选取 n_i 个参数作为第二级因素集 $X_i = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \cdots, x_{n_i}^{(i)}\}$ $(i = 1, 2, \cdots, 5)$. 由此, 建立高炉软熔带位置状态评判的两级因素集, 如图 2 所示.

炉顶状态参数 X_1: 煤气主管温度 $x_1^{(1)}$、十字测温 $^1x_2^{(1)}$、十字测温 $^2x_3^{(1)}$、十字测温 $^3x_4^{(1)}$、顶温 $^1x_5^{(1)}$、顶温 $^2x_6^{(1)}$、CO $\%x_7^{(1)}$、CO_2 $\%x_8^{(1)}$、炉顶压力 $x_9^{(1)}$、

全压差 $x_{10}^{(1)}$. 其中, $x_2^{(1)}$、$x_3^{(1)}$、$x_4^{(1)}$ 分别为十字测温仪中心、1/2 半径、最外围测点平均温度; $x_5^{(1)}$、$x_6^{(1)}$ 分别为东南与西南、东北与西北测点平均温度.

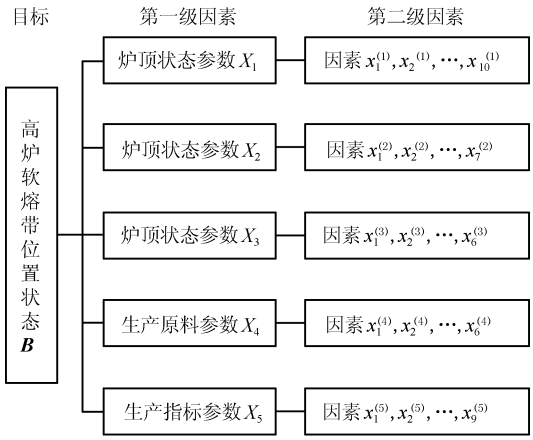


图 2　高炉软熔带位置状态评判两级因素集

Fig. 2　Two-stage factor sets of the position state of BF cohesive zone

炉身状态参数 X_2: 冷却壁温度 ${}^1x_1^{(2)}$、冷却壁温度 ${}^2x_2^{(2)}$、冷却壁温度 ${}^3x_3^{(2)}$、冷却壁温度 ${}^4x_4^{(2)}$、炉身静压 ${}^1x_5^{(2)}$、炉身静压 ${}^2x_6^{(2)}$、炉身静压 ${}^3x_7^{(2)}$. 其中, $x_1^{(2)}$、$x_2^{(2)}$、$x_3^{(2)}$、$x_4^{(2)}$ 分别为炉身第 6、7、8、9 层冷却壁测点平均温度, $x_5^{(2)}$、$x_6^{(2)}$、$x_7^{(2)}$ 分别为炉身第 6、8、10 层静压测点平均静压.

炉底状态参数 X_3: 铁水温度 $x_1^{(3)}$、铁水硅含量 $[\mathrm{Si}]x_2^{(3)}$、铁水钛含量 $[\mathrm{Ti}]x_3^{(3)}$、炉渣碱度 ($\mathrm{CaO/SiO_2}$) $x_4^{(3)}$、热风温度 $x_5^{(3)}$、冷风流量 $x_6^{(3)}$.

生产原料参数 X_4: 焦炭量 $x_1^{(4)}$、焦丁量 $x_2^{(4)}$、溶剂量 $x_3^{(4)}$、烧结矿量 $x_4^{(4)}$、球团矿量 $x_5^{(4)}$、矿粒度 $x_6^{(4)}$.

生产指标参数 X_5: 利用系数 $x_1^{(5)}$、综合焦比 $x_2^{(5)}$、燃料比 $x_3^{(5)}$、透气性指数 $x_4^{(5)}$、煤气利用率 $x_5^{(5)}$、阻力系数 $x_6^{(5)}$、鼓风动能 $x_7^{(5)}$、理论燃烧温度 $x_8^{(5)}$、喷煤量 $x_9^{(5)}$.

1.2　一级模糊综合评判

通过引入可拓理论建立物元模型, 计算待评判物元与各位置状态的关联度, 建立第一级模糊评判的隶属矩阵 M_i, 同时应用熵权法确定模糊权向量 $\boldsymbol{A}_i$, 对第二级因素集 $X_i = \{x_1^{(i)}, x_2^{(i)}, \cdots, x_{n_i}^{(i)}\}$ $(i = 1, 2, \cdots, 5)$ 进行第一级模糊 (单因素) 评判.

1.2.1　可拓理论确定隶属矩阵

可拓学以物元理论和可拓集合为基础, 建立物元模型, 并通过关联函数实现定性与定量相结合对待评判物元进行评判, 从而更全面地确定各因素对各评语集的隶属度. 物元是事物、特征及事物关于该特征的量值三要素组成的基本元, 用有序三元组 $R = (N, C, V)$ 来表示, (N: 事物, C: 特征, V: N 关于 C 所取的量值). 基于可拓理论确定隶属矩阵的步骤如下:

步骤 1. 参数无量纲化

因素集中各参数的量纲不同, 存在不可公度性问题, 需要对各参数进行无量纲化处理, 通过数值变换来消除指标间的量纲影响. 方法如下:

$$v_k = \begin{cases} \dfrac{\tilde{v}_k - \min(\tilde{v}_k)}{\max(\tilde{v}_k) - \min(\tilde{v}_k)} & \text{越大越好的参数 (效益型)} \\ \dfrac{\max(\tilde{v}_k) - \tilde{v}_k}{\max(\tilde{v}_k) - \min(\tilde{v}_k)} & \text{越小越好的参数 (成本型)} \end{cases} \tag{1}$$

其中, $\tilde{v}_k$ 、v_k 分别为第 k $(k = 1, 2, \cdots, 38)$ 个参数无量纲化前、后取值, $\max(\tilde{v}_k)$、$\min(\tilde{v}_k)$ 分别为第 k 个参数无量纲化前的最大和最小量值.

步骤 2. 确定各参数的经典域

本文中经典域是指各参数相对于高炉软熔带的三种位置状态 {偏高, 良好, 偏低} 的取值范围, 经典物元表示为

$$R_0{}^{(i)} = \begin{bmatrix} N_{0j}, & c_1, & \langle a_{0j1}, b_{0j1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{0j2}, b_{0j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{n_i}, & \langle a_{0jn_i}, b_{0jn_i} \rangle \end{bmatrix} \tag{2}$$

其中, $R_0^{(i)}$ 为第 i $(i = 1, 2, \cdots, 5)$ 类参数的经典物元, N_{0j} $(j = 1, 2, 3)$ 为高炉软熔带的三种位置状态, $\langle a_{0jk}, b_{0jk} \rangle$ 表示第 k $(k = 1, 2, \cdots, n_i)$ 个参数 c_k 的量值值域, 即经典域.

步骤 3. 确定各参数的节域

本文中节域是指反应高炉软熔带位置状态的各参数总体取值范围, 节域物元表示为

$$R_p{}^{(i)} = \begin{bmatrix} N_p, & c_1, & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{n_i}, & \langle a_{pn_i}, b_{pn_i} \rangle \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中, $R_p^{(i)}$ 为第 i $(i = 1, 2, \cdots, 5)$ 类参数的节域物元, N_p 表示高炉软熔带位置状态全体, $\langle a_{pk}, b_{pk} \rangle$ $(k = 1, 2, \cdots, n_i)$ 表示参数 c_k 的值域, 即节域.

步骤 4. 确定待评判物元

根据现场采集结果, 将数据分类和无量纲化处理, 第 i 类参数的待评判物元为

$$R_m{}^{(i)} = \begin{bmatrix} N_m, & c_1, & v_{m1} \\ & c_2, & v_{m2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{n_i}, & v_{mn_i} \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中, N_m 为待识别位置状态, v_{mk} 为第 k ($k=1,2,\cdots,n_i$) 个参数 c_k 的检测值.

步骤 5. 计算待评判物元与高炉软熔带各位置状态的关联度

令 $v_{0jk}=\langle a_{0jk},b_{0jk}\rangle$, $v_{pk}=\langle a_{pk},b_{pk}\rangle$, 则第 i 类参数中第 k 个参数的检测值 v_{mk} 与第 j 种位置状态量值值域的关联度为

$$m_{kj}^{(i)}=\begin{cases}\dfrac{\rho(v_{mk},v_{0jk})}{\rho(v_{mk},v_{0jk})-\rho(v_{mk},v_{pk})}, & v_{mk}\notin v_{0jk}\\ -\rho(v_{mk},v_{0jk}), & v_{mk}\in v_{0jk}\end{cases}\tag{5}$$

其中, $\rho(v_{mk},v_{0jk})=|v_{mk}-(a_{0jk}+b_{0jk})/2|-(b_{0jk}-a_{0jk})/2$, $\rho(v_{mk},v_{pk})=|v_{mk}-(a_{pk}+b_{pk})/2|-(b_{pk}-a_{pk})/2$.

根据式 (2) ∼ (5), 分别计算各类参数的待评判物元与高炉软熔带三种位置状态的关联度, 确定 5 类参数单因素评判隶属矩阵为

$$M_i=(m_{kj}^{(i)})_{n_i\times 3}=\begin{bmatrix} m_{11}^{(i)} & m_{12}^{(i)} & m_{13}^{(i)}\\ m_{21}^{(i)} & m_{22}^{(i)} & m_{23}^{(i)}\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ m_{n_i1}^{(i)} & m_{n_i2}^{(i)} & m_{n_i3}^{(i)}\end{bmatrix}.$$

1.2.2 熵权法确定模糊权向量

权重反映了各参数对评判目标的重要程度, 直接关系到评判结果的可信度, 是综合评判中的一个核心问题. 熵权法[9−10] 是根据参数量值变异程度所反映的信息量大小确定权重的客观赋权法, 适用于多对象、多特征的综合评判, 评判结果依据客观信息, 在很大程度上避免了人为主观因素的干扰.

假设高炉软熔带位置状态评判模型中共有 m (本文 $m=3$) 种位置状态, 每类 (共 5 类) 参数含 n_i ($i=1,2,\cdots,5$) 个参数, 构建判断矩阵 P_i, 该判断矩阵为隶属矩阵 M_i 的转置, 即 $P_i=(p_{jk}^{(i)})={M_i}^{\rm T}$, $j=1,2,\cdots,m, k=1,2,\cdots,n_i$. 熵权法确定模糊权向量的步骤如下:

步骤 1. 将判断矩阵 P_i 归一化处理, 方便起见, 归一化后矩阵仍记为 P_i.

步骤 2. 求出各参数 $x_k^{(i)}$ 的熵 $e_k^{(i)}$:

$$e_k^{(i)}=-\frac{1}{\ln m}\cdot\sum_{j=1}^{m}(f_{jk}^{(i)}\cdot\ln f_{jk}^{(i)})\tag{6}$$

其中, $x_k^{(i)}$ 为第 i 类参数中的第 k 个参数, $i=1,2,\cdots,5$, $k=1,2,\cdots,n_i$. $f_{jk}^{(i)}=p_{jk}^{(i)}/\sum_{j=1}^{m}p_{jk}^{(i)}$, 若 $f_{jk}^{(i)}=0$, 则 $\ln f_{jk}^{(i)}$ 无意义, 应对 $f_{jk}^{(i)}$ 进行修正: $f_{jk}^{(i)}=(1+p_{jk}^{(i)})/\sum_{j=1}^{m}(1+p_{jk}^{(i)})$.

步骤 3. 计算各参数 $x_k^{(i)}$ 的熵权 $a_k^{(i)}$

$$a_k^{(i)}=\frac{1-e_k^{(i)}}{\sum\limits_{k=1}^{n_i}(1-e_k^{(i)})}=\frac{1-e_k^{(i)}}{n_i-\sum\limits_{k=1}^{n_i}e_k^{(i)}}\tag{7}$$

$\boldsymbol{A}_i=[a_1^{(i)},a_2^{(i)},\cdots,a_{n_i}^{(i)}]$, 且满足 $\sum_{k=1}^{n_i}a_k^{(i)}=1$.

1.2.3 单因素评判模型

结合隶属矩阵 M_i 和模糊权向量 $\boldsymbol{A}_i$, 运用加权平均模糊评判原则进行合成运算, 则第 i ($i=1,2,\cdots,5$) 类参数的模糊综合评判结果 $\boldsymbol{B}_i$ 为

$$\boldsymbol{B}_i=\boldsymbol{A}_i\cdot M_i=[\ b_{i1}\quad b_{i2}\quad b_{i3}\ ]\tag{8}$$

1.3 二级模糊综合评判

1.3.1 层次分析法确定模糊权向量

层次分析法[11−12] 通过引入合适标度, 对同层次中各因素用数值方式将相对重要性给出判断. 根据两两比较的标度[13], 结合 GO-STOP 模型的参数权重分配结果[14] 和高炉操作者经验, 构造判断矩阵 D, 如表 1 所示.

表 1 判断矩阵

Table 1 Judgment matrix

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	2	$\frac{1}{3}$
X_2	2	1	$\frac{1}{2}$	3	1
X_3	3	2	1	3	2
X_4	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{3}$
X_5	3	1	$\frac{1}{2}$	3	1

由于很难求得判断矩阵 D 精确的特征根和特征向量, 采用方根法近似求解最大特征根 $\lambda_{\max}$ 和归一化后特征向量 $\boldsymbol{W}$, 步骤如下:

步骤 1. 判断矩阵 D 的元素按行相乘, 并将结果开 n 次方根:

$$\bar{w}_i=\left(\prod_{j=1}^{n}d_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}\tag{9}$$

步骤 2. 对向量 $\bar{\boldsymbol{W}}$ 归一化

$$w_i=\frac{\bar{w}_i}{\sum\limits_{k=1}^{n}\bar{w}_k}\tag{10}$$

步骤 3. 求判断矩阵 D 的最大特征根 $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(D\boldsymbol{W})_i}{w_i}\tag{11}$$

利用表 1, 联立式 (9) ∼ 式 (11), 求得 $\lambda_{\max} = 5.110$, $\boldsymbol{W} = [0.114, 0.214, 0.357, 0.080, 0.235]^{\mathrm{T}}$.

步骤 4. 判断矩阵的一致性检验

判断矩阵是应用文献 [14] 及高炉操作者经验构造而成的, 难免存在误差. 为确保结论更好地符合实际状况, 需对判断矩阵进行一致性检验, 检验公式为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \tag{12}$$

式中, CI 为一致性指标, n 为判断矩阵阶数, CR 为一致性比率, RI 为平均随机一致性指标, 取值如表 2 所示.

表 2　平均随机一致性指标取值

Table 2　Values of average stochastic coincidence indicators

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

当 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵的不一致性程度在容许范围内, 否则, 需重新构造判断矩阵 D. 此处 $CR = 0.0246 < 0.1$, 通过一致性检验, 求得权重向量 $\boldsymbol{W}$ 有效, 则第二级模糊权向量 $\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{W})^{\mathrm{T}} = [0.114, 0.214, 0.357, 0.080, 0.235]$.

1.3.2　二级模糊评判模型

以第一级模糊评判结果 $\boldsymbol{B}_i$ 构成隶属矩阵, 结合第二级模糊权向量 $\boldsymbol{A}$, 按加权平均型合成运算对第一级因素集 $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5\}$ 进行二级模糊评判, 表达式为

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{A} \cdot M = [\ b_1 \quad b_2 \quad b_3\ ] \tag{13}$$

其中, $M = [\boldsymbol{B}_1 \quad \boldsymbol{B}_2 \quad \boldsymbol{B}_3 \quad \boldsymbol{B}_4 \quad \boldsymbol{B}_5]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{B}$ 为两级模糊综合评判最终结果. 根据最大隶属度原则, 取向量 $\boldsymbol{B}$ 中最大元素所对应的评语集元素作为评判结果.

2　实例分析

选取某钢铁厂 2 650 m^3 高炉在 2014 年 2 月 20 日至 3 月 20 日期间的不同工况下工业现场生产数据 116 组, 并以其中 1 组数据为例进行详细分析, 对其软熔带位置状态进行两级模糊综合评判, 验证本文所提方法的有效性和正确性.

2.1　一级模糊综合评判

分析高炉操作经验和生产历史数据, 采用本文的参数整理方法将它们分为 5 类, 即炉顶状态参数、炉身状态参数、炉底状态参数、生产原料参数、生产指标参数, 分别记为: X_1、X_2、X_3、X_4、X_5. 利用式 (1) 对 5 类参数的单因素指标和现场实测待评数据进行无量纲化处理, 其结果如表 3 ∼ 表 7 所示.

表 3　炉顶状态参数的单因素指标与待评数据

Table 3　Single-factor index and evaluation data of BF top

主要参数	偏高	良好	偏低	待评估值
$x_1^{(1)}$	0.648 ∼ 1.00	0.217 ∼ 0.648	0.00 ∼ 0.217	0.432
$x_2^{(1)}$	0.643 ∼ 1.00	0.242 ∼ 0.643	0.00 ∼ 0.242	0.676
$x_3^{(1)}$	0.606 ∼ 1.00	0.233 ∼ 0.606	0.00 ∼ 0.233	0.622
$x_4^{(1)}$	0.468 ∼ 1.00	0.152 ∼ 0.468	0.00 ∼ 0.152	0.420
$x_5^{(1)}$	0.681 ∼ 1.00	0.300 ∼ 0.681	0.00 ∼ 0.300	0.668
$x_6^{(1)}$	0.763 ∼ 1.00	0.233 ∼ 0.763	0.00 ∼ 0.233	0.683
$x_7^{(1)}$	0.768 ∼ 1.00	0.440 ∼ 0.768	0.00 ∼ 0.440	0.604
$x_8^{(1)}$	0.00 ∼ 0.268	0.268 ∼ 0.587	0.587 ∼ 1.00	0.572
$x_9^{(1)}$	0.00 ∼ 0.574	0.574 ∼ 0.767	0.767 ∼ 1.00	0.672
$x_{10}^{(1)}$	0.00 ∼ 0.540	0.540 ∼ 0.864	0.864 ∼ 1.00	0.702

表 4　炉身状态参数的单因素指标与待评数据

Table 4　Single-factor index and evaluation data of BF stack

主要参数	偏高	良好	偏低	待评估值
$x_1^{(2)}$	0.00 ∼ 0.252	0.252 ∼ 0.764	0.764 ∼ 1.00	0.373
$x_2^{(2)}$	0.00 ∼ 0.260	0.260 ∼ 0.832	0.832 ∼ 1.00	0.311
$x_3^{(2)}$	0.00 ∼ 0.275	0.275 ∼ 0.855	0.855 ∼ 1.00	0.158
$x_4^{(2)}$	0.00 ∼ 0.126	0.126 ∼ 0.759	0.759 ∼ 1.00	0.585
$x_5^{(2)}$	0.703 ∼ 1.00	0.371 ∼ 0.703	0.00 ∼ 0.371	0.621
$x_6^{(2)}$	0.626 ∼ 1.00	0.252 ∼ 0.626	0.00 ∼ 0.252	0.551
$x_7^{(2)}$	0.787 ∼ 1.00	0.422 ∼ 0.787	0.00 ∼ 0.422	0.714

表 5　炉底状态参数的单因素指标与待评数据

Table 5　Single-factor index and evaluation data of BF bottom

主要参数	偏高	良好	偏低	待评估值
$x_1^{(3)}$	0.00 ∼ 0.391	0.391 ∼ 0.623	0.623 ∼ 1.00	0.496
$x_2^{(3)}$	0.00 ∼ 0.434	0.437 ∼ 0.832	0.832 ∼ 1.00	0.669
$x_3^{(3)}$	0.00 ∼ 0.365	0.365 ∼ 0.768	0.768 ∼ 1.00	0.650
$x_4^{(3)}$	0.00 ∼ 0.461	0.461 ∼ 0.679	0.679 ∼ 1.00	0.572
$x_5^{(3)}$	0.00 ∼ 0.144	0.144 ∼ 0.654	0.654 ∼ 1.00	0.335
$x_6^{(3)}$	0.00 ∼ 0.089	0.089 ∼ 0.833	0.833 ∼ 1.00	0.141

表 6　生产原料参数的单因素指标与待评数据

Table 6　Single-factor index and evaluation data of production raw material parameters

主要参数	偏高	良好	偏低	待评估值
$x_1^{(4)}$	0.00 ∼ 0.267	0.267 ∼ 0.638	0.638 ∼ 1.00	0.444
$x_2^{(4)}$	0.00 ∼ 0.297	0.297 ∼ 0.753	0.753 ∼ 1.00	0.544
$x_3^{(4)}$	0.00 ∼ 0.287	0.287 ∼ 0.812	0.812 ∼ 1.00	0.614
$x_4^{(4)}$	0.00 ∼ 0.488	0.488 ∼ 0.740	0.740 ∼ 1.00	0.624
$x_5^{(4)}$	0.00 ∼ 0.414	0.414 ∼ 0.809	0.809 ∼ 1.00	0.576
$x_6^{(4)}$	0.796 ∼ 1.00	0.372 ∼ 0.796	0.00 ∼ 0.372	0.647

表 7 生产指标参数的单因素指标与待评数据

Table 7 Single-factor index and evaluation data of production index parameters

主要参数	偏高	良好	偏低	待评估值
$x_1^{(5)}$	0.946 ~ 1.00	0.462 ~ 0.946	0.00 ~ 0.462	0.686
$x_2^{(5)}$	0.00 ~ 0.495	0.495 ~ 0.740	0.740 ~ 1.00	0.657
$x_3^{(5)}$	0.00 ~ 0.590	0.590 ~ 0.856	0.856 ~ 1.00	0.765
$x_4^{(5)}$	0.794 ~ 1.00	0.553 ~ 0.794	0.00 ~ 0.553	0.667
$x_5^{(5)}$	0.251 ~ 0.635	0.635 ~ 1.00	0.00 ~ 0.251	0.593
$x_6^{(5)}$	0.262 ~ 1.00	0.084 ~ 0.261	0.00 ~ 0.084	0.198
$x_7^{(5)}$	0.00 ~ 0.390	0.390 ~ 0.667	0.667 ~ 1.00	0.661
$x_8^{(5)}$	0.00 ~ 0.314	0.314 ~ 0.534	0.534 ~ 1.00	0.435
$x_9^{(5)}$	0.00 ~ 0.147	0.147 ~ 0.485	0.485 ~ 1.00	0.437

根据无量纲化后的各类参数单因素指标和待评数据, 采用可拓理论和熵权法确定第一级评判的隶属矩阵和模糊权向量, 进行单因素评判 (仅以表 3 炉顶状态参数 X_1 为例详述, 其他表略), 步骤如下:

步骤 1. 确定高炉软熔带位置状态的经典域:

$$R_{01}{}^{(1)}=\begin{bmatrix} \text{偏高}, & c_1, & \langle 0.648, 1.00\rangle \\ & c_2, & \langle 0.643, 1.00\rangle \\ & c_3, & \langle 0.606, 1.00\rangle \\ & c_4, & \langle 0.468, 1.00\rangle \\ & c_5, & \langle 0.681, 1.00\rangle \\ & c_6, & \langle 0.763, 1.00\rangle \\ & c_7, & \langle 0.768, 1.00\rangle \\ & c_8, & \langle 0.00, 0.268\rangle \\ & c_9, & \langle 0.00, 0.574\rangle \\ & c_{10}, & \langle 0.00, 0.540\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{02}{}^{(1)}=\begin{bmatrix} \text{良好}, & c_1, & \langle 0.217, 0.648\rangle \\ & c_2, & \langle 0.242, 0.643\rangle \\ & c_3, & \langle 0.233, 0.606\rangle \\ & c_4, & \langle 0.152, 0.468\rangle \\ & c_5, & \langle 0.300, 0.681\rangle \\ & c_6, & \langle 0.233, 0.763\rangle \\ & c_7, & \langle 0.440, 0.768\rangle \\ & c_8, & \langle 0.268, 0.587\rangle \\ & c_9, & \langle 0.574, 0.767\rangle \\ & c_{10}, & \langle 0.540, 0.864\rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{03}{}^{(1)}=\begin{bmatrix} \text{偏低}, & c_1, & \langle 0.00, 0.217\rangle \\ & c_2, & \langle 0.00, 0.242\rangle \\ & c_3, & \langle 0.00, 0.233\rangle \\ & c_4, & \langle 0.00, 0.152\rangle \\ & c_5, & \langle 0.00, 0.300\rangle \\ & c_6, & \langle 0.00, 0.233\rangle \\ & c_7, & \langle 0.00, 0.440\rangle \\ & c_8, & \langle 0.587, 1.00\rangle \\ & c_9, & \langle 0.767, 1.00\rangle \\ & c_{10}, & \langle 0.864, 1.00\rangle \end{bmatrix}$$

步骤 2. 确定高炉软熔带位置状态的节域:

$$R_p{}^{(1)}=\begin{bmatrix} \text{位置状态}, & c_1, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_2, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_3, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_4, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_5, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_6, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_7, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_8, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_9, & \langle 0.00, 1.00\rangle \\ & c_{10}, & \langle 0.00, 1.00\rangle \end{bmatrix}$$

步骤 3. 确定待评判物元:

$$R_m{}^{(1)}=\begin{bmatrix} N_m, & c_1, & 0.432 \\ & c_2, & 0.676 \\ & c_3, & 0.622 \\ & c_4, & 0.420 \\ & c_5, & 0.668 \\ & c_6, & 0.683 \\ & c_7, & 0.604 \\ & c_8, & 0.572 \\ & c_9, & 0.672 \\ & c_{10}, & 0.702 \end{bmatrix}$$

步骤 4. 根据式 (2) ~ 式 (5), 计算待评判物元与高炉软熔带各位置状态的关联度, 建立隶属矩阵:

$$M_1=\begin{bmatrix} -0.333 & 0.215 & -0.333 \\ 0.033 & -0.092 & -0.572 \\ 0.016 & -0.289 & -0.507 \\ -0.103 & 0.048 & -0.389 \\ -0.038 & 0.013 & -0.526 \\ -0.202 & 0.080 & -0.587 \\ -0.292 & 0.164 & -0.292 \\ -0.416 & 0.016 & -0.035 \\ -0.229 & 0.095 & -0.225 \\ -0.353 & 0.162 & -0.352 \end{bmatrix}$$

步骤 5. 采用第 1.2.2 节中方法构建判断矩阵 $(P_1 = M_1{}^{\mathrm{T}})$, 求得各参数的熵值如表 8 所示.

表 8 高炉炉顶各参数的熵值

Table 8 Entropy values of each parameter of BF top

因素	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	$x_3^{(1)}$	$x_4^{(1)}$	$x_5^{(1)}$
熵 $e_k^{(1)}$	0.631	0.923	0.857	0.912	0.925
因素	$x_6^{(1)}$	$x_7^{(1)}$	$x_8^{(1)}$	$x_9^{(1)}$	$x_{10}^{(1)}$
熵 $e_k^{(1)}$	0.900	0.631	0.634	0.954	0.946

步骤 6. 根据式 (7), 计算各参数的熵权, 得第一级模糊权向量

$$\boldsymbol{A}_1 = [\ 0.218 \quad 0.046 \quad 0.085 \quad 0.052 \quad 0.045 \quad 0.059 \quad 0.219 \quad 0.217 \quad 0.027 \quad 0.032\ ]$$

步骤 7. 根据式 (8), 计算得到炉顶状态参数的第一级模糊综合评判结果为

$$\boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{A}_1\cdot\boldsymbol{M}_1=\left[\begin{array}{lll}-0.261 & 0.073 & -0.309\end{array}\right]$$

步骤 8. 同理, 根据表 (4) ∼ 表 (7), 依次计算其余 4 类参数 (X_2、X_3、X_4、X_5) 的待评判物元与高炉软熔带各位置状态的关联度, 建立隶属矩阵, 结果分别为

$$M_2=\left[\begin{array}{ccc}-0.245 & 0.121 & -0.512\\ -0.140 & 0.051 & -0.627\\ 0.118 & -0.428 & -0.816\\ -0.525 & 0.174 & -0.296\\ -0.178 & 0.082 & -0.397\\ -0.143 & 0.075 & -0.400\\ -0.204 & 0.074 & -0.505\end{array}\right]$$

$$M_3=\left[\begin{array}{ccc}-0.174 & 0.105 & -0.205\\ -0.413 & 0.163 & -0.330\\ -0.449 & 0.118 & -0.252\\ -0.207 & 0.106 & -0.200\\ -0.363 & 0.191 & -0.488\\ -0.269 & 0.052 & -0.831\end{array}\right]$$

$$M_4=\left[\begin{array}{ccc}-0.285 & 0.177 & -0.305\\ -0.351 & 0.209 & -0.315\\ -0.459 & 0.198 & -0.339\\ -0.266 & 0.116 & -0.235\\ -0.277 & 0.162 & -0.355\\ -0.296 & 0.148 & -0.439\end{array}\right]$$

$$M_5=\left[\begin{array}{ccc}-0.453 & 0.224 & -0.416\\ -0.322 & 0.082 & -0.194\\ -0.428 & 0.091 & -0.279\\ -0.276 & 0.114 & -0.255\\ 0.042 & -0.094 & -0.456\\ -0.244 & 0.064 & -0.365\\ -0.445 & 0.006 & -0.017\\ -0.218 & 0.098 & -0.184\\ -0.399 & 0.049 & -0.101\end{array}\right]$$

步骤 9. 采用熵权法确定其余 4 类参数的模糊权向量, 分别为

$$\boldsymbol{A}_2=\left[\begin{array}{lllll}0.157 & 0.091 & 0.159 & 0.205 & 0.144\\ 0.119 & 0.125\end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{A}_3=\left[\begin{array}{lllll}0.135 & 0.136 & 0.159 & 0.136 & 0.138\\ 0.296\end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{A}_4=\left[\begin{array}{lllll}0.220 & 0.207 & 0.155 & 0.199 & 0.167\\ 0.052\end{array}\right]$$

$$\boldsymbol{A}_5=\left[\begin{array}{lllll}0.144 & 0.053 & 0.051 & 0.144 & 0.050\\ 0.099 & 0.304 & 0.047 & 0.108\end{array}\right]$$

步骤 10. 根据式 (8), 计算得到其余 4 类参数的第一级模糊综合评判结果, 分别为

$$\boldsymbol{B}_2=\boldsymbol{A}_2\cdot M_2=[-0.208\quad 0.021\quad -0.496]$$

$$\boldsymbol{B}_3=\boldsymbol{A}_3\cdot M_3=[-0.309\quad 0.111\quad -0.453]$$

$$\boldsymbol{B}_4=\boldsymbol{A}_4\cdot M_4=[-0.321\quad 0.171\quad -0.314]$$

$$\boldsymbol{B}_5=\boldsymbol{A}_5\cdot M_5=[-0.354\quad 0.071\quad -0.205]$$

2.2　二级模糊综合评判

再对第一级因素集 $\boldsymbol{X}=\{X_1,X_2,X_3,X_4,X_5\}$ 作二级模糊评判, 隶属矩阵 M 由第一级模糊综合评判结果矩阵 $\boldsymbol{B}_i$ 构成, 表示为

$$M=\left[\begin{array}{c}\boldsymbol{B}_1\\ \boldsymbol{B}_2\\ \boldsymbol{B}_3\\ \boldsymbol{B}_4\\ \boldsymbol{B}_5\end{array}\right]=\left[\begin{array}{ccc}-0.261 & 0.073 & -0.309\\ -0.208 & 0.021 & -0.496\\ -0.309 & 0.111 & -0.453\\ -0.321 & 0.171 & -0.314\\ -0.354 & 0.071 & -0.205\end{array}\right]$$

结合第二级模糊权向量 $\boldsymbol{A}$, 利用式 (13), 计算第二级模糊综合评判结果为

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{A}\cdot M=[-0.293\quad 0.083\quad -0.376]$$

根据最大隶属度原则, 结果向量 $\boldsymbol{B}$ 中元素满足 $b_2=\max\{b_1,b_2,b_3\}=0.083>0$. 因此, 根据对现场实测待评数据的评判, 得出当前高炉软熔带处于良好的位置状态.

为验证所得结果的有效性和正确性, 采用实际现场数据和操作人员的经验, 分析高炉料面中心偏移度、中心温度指数、边缘温度指数等指标, 性能分别处于一般、良好、良好状态, 煤气利用率大于 47 %, 高炉煤气流分布在良好的性能状态; 铁水中硅含量在 (0.30, 0.60) % 之间, 硫含量在 (0.015, 0.040) % 之间, 铁水温度在 (1 495, 1 525) °C 之间, 高炉的铁水质量维持在较高水平. 综上分析, 现场高炉此时正运行在优质、高产的良好状态, 高炉软熔带正处于一个高度适当的位置, 与本文方法分析结果一致, 表明本文方法分析结果能够较好的反映高炉实时运行情况.

同理, 运用本文方法分析其他 115 组工业数据相对应的软熔带位置状态, 并与根据高炉实际运行状态和操作人员经验评判的位置状态进行比较, 吻合情况如表 9 所示. 从表 9 可知, 本文方法在不同

表9 评判结果比较

Table 9 Comparison of evaluation results

	偏高	良好	偏低
现场评判结果 (组)	9	93	14
本文方法结果 (与现场吻合数) (组)	10(8)	88(85)	18(12)
吻合率 (%)	88.89	91.40	85.71

工况下的评判稳定度较高 (> 85%), 能较好地反映工业现场高炉软熔带位置的实际状态, 评判结果为高炉冶炼过程的现场操作提供了有效检测信息, 可在一定程度上降低操作的盲目性, 同时为高炉生产过程实现减小 CO_2 排放、降低焦比、降低能耗物耗等生产目标创造了条件.

3 结论

本文针对高炉软熔带位置状态影响因素复杂多样、模糊难量化的问题, 提出了一种基于熵权–可拓理论的两级模糊综合评判方法. 在整理分类高炉生产过程参数基础上, 建立物元模型确定单因素评判的隶属矩阵, 同时引入熵权法确定模糊权向量; 结合单因素评判结果构成的隶属矩阵和采用层次分析法确定的模糊权向量进行第二级模糊评判, 实现客观全面地评判高炉软熔带位置状态. 实例验证表明, 该方法最大限度地利用了现场实际检测数据隐含的软熔带位置状态信息, 得出与实际吻合良好的软熔带位置状态评判结果.

References

1 Shi Yan-Bin. Study on Modeling and Simulation of Blast Furnace Process Based on CFD/NHT Analysis [Ph. D. dissertation], Shandong University, China, 2006.
(史岩彬. 基于 CFD/NHT 分析技术的高炉炼铁过程建模与仿真研究 [博士学位论文], 山东大学, 中国, 2006.)

2 Dong K F, Yu A B, Burgess J M, Pinson D, Chew S, Zulli P. Modelling of multiphase flow in ironmaking blast furnace. *The Journal of the American Chemical Society*, 2009, **48**(1): 214−226

3 Zhou C Q. Visualizing the future in steel manufacturing. *The Iron & Steel Technology*, 2011, **8**(1): 37−50

4 Cai Wen, Yang Chun-Yan. Basic theory and methodology on extenics. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(13): 1190−1199
(蔡文, 杨春燕. 可拓学的基础理论与方法体系. 科学通报, 2013, **58**(13): 1190−1199)

5 Wong H, Hu Ba Q. Application of improved extension evaluation method to water quality evaluation. *Journal of Hydrology*, 2014, **509**: 539−548

6 Weng G Q, Zhou W W, Qi J. Research on comprehensive evaluation of regional power quality based on multistage extension method. In: Proceedings of the 2011 Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2011. 1−4

7 Chen H C. Partial discharge identification system for high voltage power transformers using fractal feature based extension method. *Science, Measurement & Technology, IET*, 2013, **7**(2): 77−84

8 Zhu C H, Shen N Q, Wang T, Huang Xo, Chen D J. Study on danger evaluation of debris flow using extension method. In: Proceedings of the 2012 International Conference on Systems and Informatics. Yantai, China: IEEE, 2012. 1352−1355

9 Xu Y J, Wang Y C, Miu X D. Multi-attribute decision making method for air target threat evaluation based on intuitionistic fuzzy sets. *IEEE Systems Engineering and Electronics*, 2012, **23**(6): 891−897

10 Xia H, Jia Z P, Sha E H M. Research of trust model based on fuzzy theory in mobile ad hoc networks. *Information Security, IET*, 2014, **8**(2): 88−103

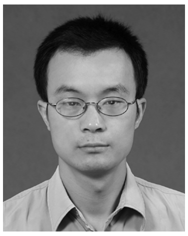
11 Wu Qi, Liu Jing, Xiong Fu-Li, Liu Xiao-Jun. The fuzzy wavelet classifier machine with penalizing hybrid noises from complex diagnosis system. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 773−779
(吴奇, 刘静, 熊福力, 刘晓军. 惩罚复杂诊断系统混合噪音的模糊小波分类机. 自动化学报, 2009, **35**(6): 773−779)

12 Li C X, Anavatti S G, Ray T. Analytical hierarchy process using fuzzy inference technique for real-time route guidance system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(1): 84−93

13 Qin Guo-Hua, Zhou Mei-Dan, Ye Hai-Chao, Huang Hua-Ping, Li Yi-Ran. AHP-based fixture locator selection. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2014, **20**(2): 326−332
(秦国华, 周美丹, 叶海潮, 黄华平, 李怡冉. 基于 AHP 的夹具定位元件选择方法. 计算机集成制造系统, 2014, **20**(2): 326−332)

14 Fang Wen, Lin Cheng-Cheng, Tao Hua, Ding De-Kang. Perfection and optimization of model for determination of 3BF condition. *Bao-Steel Technology*, 2002, (2): 47−51
(方文, 林成城, 陶华, 丁德康. 宝钢三高炉炉况判定模型的完善和优化. 宝钢技术, 2002, (2): 47−51)

杨贵军 中南大学信息科学与工程学院硕士研究生. 主要研究方向为工业过程建模与优化控制研究, 智能控制系统.
E-mail: yang_0505@csu.edu.cn
(**YANG Gui-Jun** Master student at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, and intelligent control system.)



蒋朝辉 博士, 中南大学信息科学与工程学院副教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 广义大系统控制理论与应用. 本文通信作者.
E-mail: jzh0903@csu.edu.cn
(**JIANG Zhao-Hui** Ph. D., associate professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, descriptor large systems control theory and application. Corresponding author of this paper.)

阳春华 博士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 智能自动化控制系统. E-mail: ychh@mail.csu.edu.cn
(**YANG Chun-Hua** Ph. D., professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. Her research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, and intelligent automation control system.)

桂卫华 中国工程院院士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与优化控制, 工业大系统控制理论与应用.
E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn
(**GUI Wei-Hua** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, industrial large system control theory and application.)

谢永芳 博士, 中南大学信息科学与工程学院教授. 主要研究方向为复杂工业过程建模与控制, 分散鲁棒控制.
E-mail: yfxie@mail.csu.edu.cn
(**XIE Yong-Fang** Ph. D., professor at the School of Information Science and Engineering, Central South University. His research interest covers modeling and optimal control of complex industrial process, and distributed robust control.)