



Fuzzy comprehensive evaluation of hearth thermal state in blast furnace smelting process

Kai YU¹, Guimei CUI^{2*}, Zhaoguo JIANG², Xiang MA³, Yong ZHANG²

1. College of Science, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China

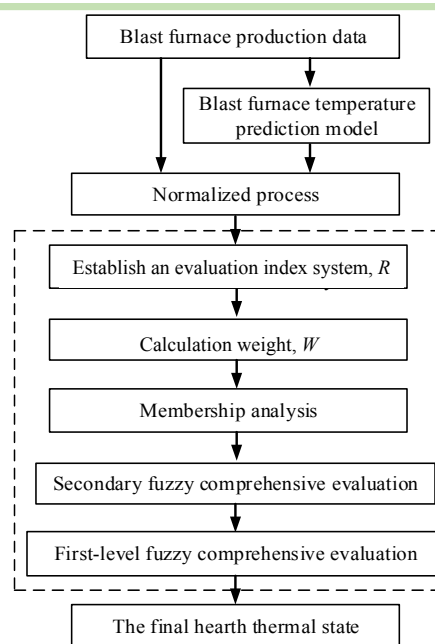
2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China

3. Inner Mongolia Baotou Steel Union Limited Liability Company, Baotou, Inner Mongolia 014010, China

Abstract: The hearth thermal state is an important index to reflect the operation state of blast furnace hearth, which has guiding significance for the operation of blast furnace (BF) in high yield, energy saving and emission reduction. The iron-making is carried out in a closed container with high temperature and pressure. It is a complex industrial process with multivariable, distributed, strong coupling and time-varying condition. In addition, the production conditions of the blast furnace often fluctuate, resulting in the same state does not necessarily mean that the temperature of the hearth is same. The comprehensive evaluation of hearth thermal state by the blast furnace operator is inevitably affected by personal subjective factors, it also has problems of uncertainty and fuzziness. Based on the furnace temperature prediction, according to the actual production situation and expert experience, the important parameters which represented the thermal state of the blast furnace hearth were analyzed and extracted, and the comprehensive evaluation index system of the hearth thermal state was established in this work. Then,

a two-stage fuzzy comprehensive evaluation model of blast furnace hearth thermal state (too low, low, suitable, high, too high) by using statistical method was built to determine the weights of evaluation indexes and the membership degree function. Finally, the comprehensive evaluation of hearth thermal state to 2500 m³ blast furnace was applied to evaluate the thermal state of hearth comprehensively. At the same time, the evaluation was used to compare with the actual operation situation. From the comparison results, there were 794 groups matched perfectly ($d=0$) in the evaluation results of the model, accounting for 74.21%. There were 245 groups matched reliably ($d=\pm 1$), accounting for 22.90%, and the matching rate reached 97.11%. The evaluation model provided an accurate and reliable basis for realizing the stable thermal state of the blast furnace hearth and producing energy saving and emission reduction.

Key words: blast furnace; hearth thermal state; fuzzy comprehensive evaluation; expert knowledge; time series



收稿: 2019-05-13, 修回: 2019-08-26, 网络发表: 2019-09-30, Received: 2019-05-13, Revised: 2019-08-26, Published online: 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 61763039; 61763038)

作者简介: 于凯(1963-), 男, 内蒙古自治区包头市人, 副教授, 高级工程师, 从事热物理及应用研究, E-mail: yukai@imust.cn; 崔桂梅, 通讯联系人, E-mail: cguimei1@163.com.

引用格式: 于凯, 崔桂梅, 蒋召国, 等. 高炉冶炼过程中炉缸热状态模糊综合评价. 过程工程学报, 2020, 20(4): 424-431.

Yu K, Cui G M, Jiang Z G, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of hearth thermal state in blast furnace smelting process (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(4): 424-431, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219225.

高炉冶炼过程中炉缸热状态模糊综合评价

于凯¹, 崔桂梅^{2*}, 蒋召国², 马祥³, 张勇²

1. 内蒙古科技大学理学院, 内蒙古 包头 014010

2. 内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014010

3. 内蒙古包头钢联有限责任公司, 内蒙古 包头 014010

摘 要: 基于炉温预测与多参数信息, 以 2500 m³ 高炉为对象, 依据实际生产情况与专家经验, 分析、提取了表征高炉炉缸运行热状态的重要参数, 建立了炉缸热状态综合评价指标体系和高炉炉缸热状态两级模糊综合评价模型, 利用统计法确定评价指标权重与隶属度函数。与实际运行情况比较, 模型评价结果匹配率高达 97.11%, 与实际一致, 且实时、准确有效。

关键词: 高炉; 炉缸热状态; 模糊综合评价; 专家知识; 时间序列

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)04-0424-08

1 前言

高炉炼铁是钢铁冶金生产过程的关键工序, 也是能耗和 CO₂ 排放最大的环节, 高炉正向大规模、高效益、低能耗、自动化方向发展^[1]。高炉炉温的稳定是炼铁过程高产、顺行的必要条件。炉温过高, 焦比升高, 能耗增加, 高炉利用系数、煤气利用率降低, 高炉寿命缩短; 炉温过低, 炉内反应热提供不足, 甚至出现炉缸堆积、炉缸冻结等故障, 准确、实时判断高炉炉温对冶炼过程极其重要。位于高炉下部的炉缸是煤粉、焦炭等燃料燃烧的关键区域, 是炼铁过程所需热量的主要来源。高炉操作者判断高炉炉温首先要判断炉缸温度, 因高炉炼铁在高温、高压密闭容器中进行, 是具有多变量、分布性、强耦合、时变性的复杂工业过程, 炉缸温度不可实时测得, 需铁水排出炉缸后, 通过检测铁水的化学温度(铁水硅含量[Si])及物理温度(铁水温度 T_{Fe})判断炉温, 采取上、下部调节措施, 预防炉缸温度波动, 保证炉温稳定。但炉温检测的滞后时间长, 炉缸温度难免会有波动。随着检测技术、控制理论在高炉中的应用, 专家和学者结合冶炼机理、专家经验和统计方法、智能算法, 用高炉冶炼过程积累的海量数据建立多种炉温预测模型^[2-5], 实现[Si]和 T_{Fe} 预测。生产实践中, 专家依靠经验知识, 利用[Si]或 T_{Fe} 单一变量表征炉缸温度, 或[Si]和 T_{Fe} 两变量综合评价炉缸温度。但因高炉生产条件时常波动及高炉冶炼过程的复杂性, 状态相同时炉缸温度不一定相同, 判断时难免受个人主观因素影响, 存在不确定性、模糊性等问题, 有可能出现判断不一致甚至矛盾的情况, 一旦判断失误, 损失重大。目前, 对高炉炉缸温度的有效评价方法鲜有报道。

模糊综合评价方法是一种基于模糊数学, 利用模糊线性变换原理和最大隶属度原则的综合评价方法^[5-8], 多种综合评价方法中, 模糊综合评价法适合在含高炉冶炼系统的复杂环境及工况中对设备状态进行客观、准确地评价^[9]。Xiao 等^[10]结合高炉冶炼工艺特点, 对影响软熔带位置的众多参数进行了提取、分类, 采用熵权法确定参数权重, 提出了基于可拓理论的高炉软熔带位置状态两级模糊综合评价的新方法, 验证评价效果良好。欧阳曙光等^[11]结合高炉喷吹混合煤实际情况, 建立了高炉喷吹用煤性能评价指标体系和模糊综合评价模型, 实现了高炉配煤方案的科学筛选, 确保了高炉喷煤系统可靠运行。

本工作以某 2500 m³ 高炉为研究对象, 基于 T-S 模糊神经网络炉温预测模型^[12], 依据实际生产情况与专家经验, 分析提取表征高炉炉缸运行热状态的重要参数, 建立炉缸热状态综合评价指标体系; 利用统计法确定评价指标权重与隶属度函数, 建立高炉炉缸热状态两级模糊综合评价模型, 得到炉缸的热状态(过低、偏低、合适、偏高、过高), 与实际生产对比, 验证了模型的有效性, 为实现高炉炉缸热状态稳定、生产节能减排提供准确可靠的依据。

2 模糊综合评价原理

模糊综合评价法主要解决具有多因素、多层次的复杂系统状态评价问题, 以隶属函数为桥梁, 有效克服模糊性、随机性和难以量化的影响, 得到清晰、客观、全面的评价结果。对具体系统而言, 模糊综合评价一般包括 4 个要素: 评价指标体系 R 、评价等级 S 、权重向量 W 和隶属矩阵 U 。根据系统运行特点, 选取与被评价对

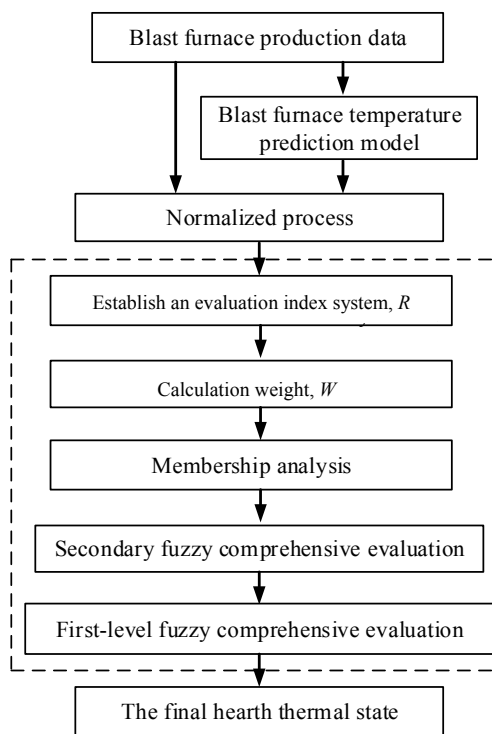


图 1 两级模糊综合评价原理图

Fig.1 Principle diagram of two-stage fuzzy comprehensive evaluation

象相关的因素, 建立综合评价指标体系, 根据影响程度与客观统计规律合理计算指标的权重与隶属度, 经模糊运算, 准确判断评价对象所在的评价等级。本工作建立的模糊综合评价模型如图 1 所示。

3 模糊综合评价指标体系建立

高炉冶炼是复杂过程, 高炉实时检测参数近百个, 但反映高炉热状态的铁水硅含量 $[\text{Si}]$ 、铁水温度 T_{Fe} 不能实时测得, 一些参数与操作指标直接或间接地反映高炉 $[\text{Si}]$ 和 T_{Fe} , 如风量、风温、压差、透气性、富氧率等。崔桂梅等^[2]利用这些参数建立了 T_{Fe} 与 $[\text{Si}]$ 的 T-S 模糊神经网络预测模型, T_{Fe} 与 $[\text{Si}]$ 的预测值涵盖了历史参数对当前炉温的影响信息。另外, 高炉冶炼的滞后性大决定了高炉炉温是随时间缓慢变化的复杂动态过程, 之前的炉温会对当前炉温产生一定影响, 但随时间推移, 影响逐步减弱。炉缸热状态评价具有炉温时间序列的重要特征^[4]。本工作依专家经验, 选取 T_{Fe} 和 $[\text{Si}]$ 为一级评价指标, 记作 $R=\{R_1, R_2\}=\{T_{\text{Fe}}, [\text{Si}]\}$, T_{Fe} 与 $[\text{Si}]$ 的前两炉、前一炉、当前炉预测值时间序列作为二级评价指标, 记作 $\{R_{11}, R_{12}, R_{13}\}$ 与 $\{R_{21}, R_{22}, R_{23}\}$ 。综上所述, 高炉炉缸热状态模糊综合评价指标体系 R 如图 2 所示。

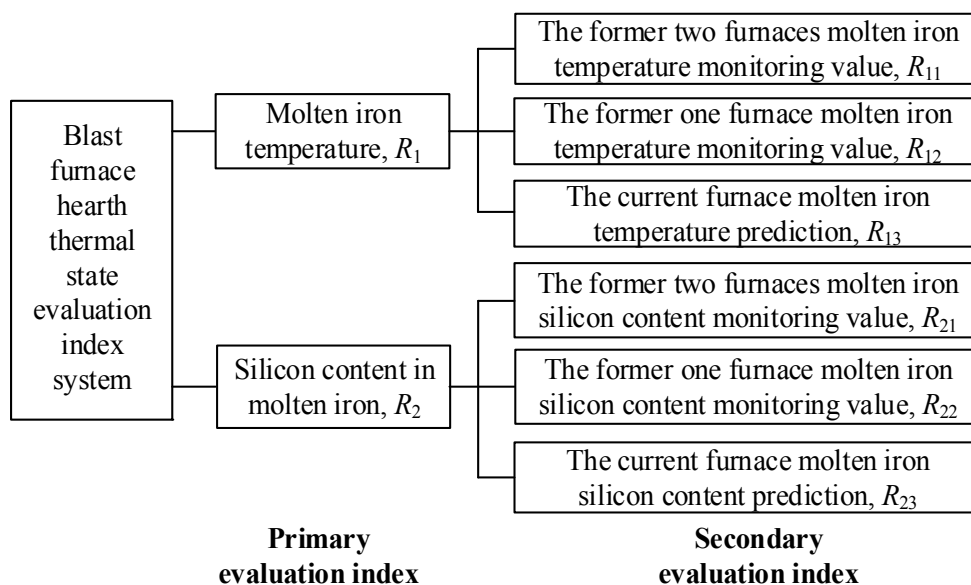


图 2 高炉炉缸热状态评价指标体系

Fig.2 Evaluation index system of hearth thermal state of blast furnace

4 高炉炉缸热状态模糊综合评价模型

4.1 归一化处理

在建立的指标体系中, T_{Fe} 与 $[\text{Si}]$ 有着不同的物理意

义与量化单位, 为消除不同指标间量纲的差异, 采用最大最小法进行归一化处理, 其归一化函数如下:

$$d(x) = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \quad (1)$$

式中， x_{\max} 和 x_{\min} 分别为指标参数的最大值和最小值， $d(x)$ 为归一化数据。

4.2 权重计算

不同评价指标对评价对象的影响程度不同，在建立指标体系后，根据级间、指标间的相对重要性计算合理的权重。确定权重方法主要有主观专家经验法与客观数据统计法^[13-15]。前者依据炼铁专家总结的各级评价指标对评价等级的影响程度，主观确定各级评价指标的权重；后者利用各级评价指标的监测数据，用统计学方法计算各级评价指标的权重。前者易实现，主观性强；后者基于大量数据统计分析，客观性强。高炉人工操作模式下，高炉存储的海量历史数据，这些数据隐含丰富的炉缸热状态信息和高炉专家决策经验知识。本工作综合两种方法，先根据高炉专家经验确定出各级指标的权值，再利用监测数据的统计学方法进行微调，权重计算过程如下：

(1) 专家经验主观赋权：依据专家打分机制确定各级指标权重。

$$q_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{ij} (i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m) \tag{2}$$

式中， q_j 为第 j 个指标参数权重， n 为专家总数， m 为指标参数总数， s_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标打分。

(2) 熵权法客观赋权：利用各参数熵值所提供的信息量大小来确定权重 w_i ^[16]。

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \tag{3}$$

式中， d_i 为差异性系数。
综合 2 种方法计算指标参数，最终权重 W_i 为

$$W_i = (q_i + w_i) / 2 \tag{4}$$

由公式(4)得到 T_{Fe} 与 $[Si]$ 一级评价权重向量 $W = [W_1, W_2]$ ，二级评价指标权重向量 $w_1 = [w_{11}, w_{12}, w_{13}]$ ， $w_2 = [w_{21}, w_{22}, w_{23}]$ ，具体见表 1。

表 1 权重向量赋值

Table 1 Assignments of weight vector

Weight	Weight vector
W	$[0.7, 0.3]^T$
w_1	$[0.05, 0.15, 0.80]^T$
w_2	$[0.04, 0.14, 0.82]^T$

4.3 区域划分与隶属度分析

高炉实际运行中，专家依据经验知识将 T_{Fe} 与 $[Si]$ 的区域划分为 5 个评价等级：过低、偏低、合适、偏高、过高(见表 2)，分别记为 s_1, s_2, s_3, s_4, s_5 ，共同组成高炉炉缸的热状态集合 S 。其中 s_2, s_3, s_4 是高炉运行的正常状态， s_1, s_5 属于故障状态。高炉操作者为节约能源，在保证出铁符合指标的前提下，尽量降低炉缸的热状态。

表 2 炉缸热状态的区域划分

Table 2 Region division of hearth thermal state

Grade of evaluation	Too low	Low	Suitable	High	Too high
$T_{Fe}/^{\circ}C$	$T_{Fe(min)} \sim 1475$	$1475 \sim 1490$	$1490 \sim 1500$	$1500 \sim 1515$	$1515 \sim T_{Fe(max)}$
$[Si]/\%$	$[Si]_{(min)} \sim 0.34$	$0.34 \sim 0.50$	$0.50 \sim 0.75$	$0.75 \sim 0.90$	$0.90 \sim [Si]_{(max)}$

确定隶属度函数的方法有模糊统计法、德尔菲法、二元对比排序法、逻辑推理法、典型隶属函数近似法等。隶属函数的选择从实际出发，研究数据变化趋势，统计数据分布特点。

本工作对炉缸热状态的评价结果具有实时性，根据专家经验对 1070 组炉缸热状态数据评价，利用前 500 组数据建模，用相同 1070 组数据进行验证，将 T_{Fe} 与 $[Si]$ 的数据分为过低、偏低、合适、偏高、过高五类，图 3 和 4 分别为 T_{Fe} 与 $[Si]$ 过低、偏低、合适、偏高的频数直方图，统计指标分别见表 3 和 4，利用典型隶属函数近似法确定二级评价指标对评价等级的隶属度函数。在高炉平稳运行的基础上，建立优化模型。过高的高炉炉缸热状态是异常状态，超出模型评价的范围。

选 Z 型分布函数用于数据偏小的区间；高斯型分布

函数用于中间部分数据的区间；S 型分布函数用于数据偏大的区间，三种分布函数的表达式如下：

(1) Z 型分布函数形式：

$$u(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \tag{5}$$

(2) 高斯型分布函数形式：

$$u(x) = e^{-\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \tag{6}$$

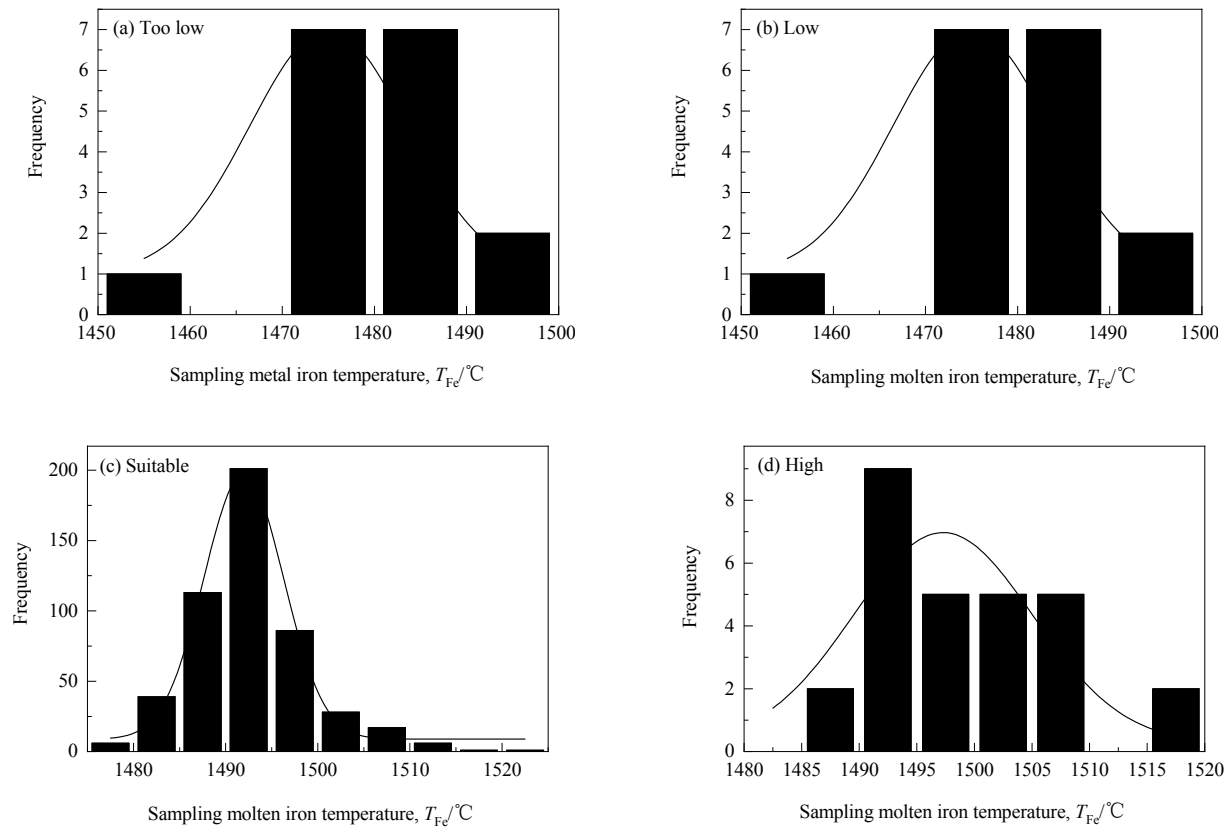


图 3 不同温度铁水的频数直方图
Fig.3 Frequency histograms of different molten iron temperatures

表 3 不同铁水温度的统计指标
Table 3 Statistical indexes of different molten iron temperatures

Grade of evaluation	Sampling molten iron temperature, $T_{Fe}/^{\circ}C$				
	Minimum	Maximum	Media	Average	Standard deviation
Too low	1454	1494	1477	1478.2	11.49
Low	1463	1511	1486	1486.6	6.96
Suitable	1476	1516	1491	1491.8	6.57
High	1485	1520	1498	1500.0	8.98
Too high	—	—	—	—	—

(3) S 型分布函数形式:

$$u(x)=\begin{cases} 0, & x\leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a\leq x\leq \frac{a+b}{2} \\ 1-2\left(\frac{x-b}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2}\leq x\leq b \\ 1, & x\geq b \end{cases} \quad (7)$$

式中, a 、 b 分别为对应等级的标准值, μ 、 σ 分别为随机标量的均值和标准差。

根据实际生产情况并结合各种分布函数的特点, 本工作过低评价等级的隶属度选 Z 型; 偏低、合适和偏高评价等级的隶属度函数选高斯型; 过高评价等级的隶属

度用 S 型。 T_{Fe} 与 $[Si]$ 的二级评价指标对各评价等级隶属度函数的参数见表 5。

4.4 二级模糊综合评价

根据隶属度函数分别计算二级评价指标属于状态空间 $S=\{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}$ 的隶属度矩阵 U_i 为

$$U_i=\begin{bmatrix} u_{s_1}(d_{i1}) & u_{s_2}(d_{i1}) & u_{s_3}(d_{i1}) & u_{s_4}(d_{i1}) & u_{s_5}(d_{i1}) \\ u_{s_1}(d_{i2}) & u_{s_2}(d_{i2}) & u_{s_3}(d_{i2}) & u_{s_4}(d_{i2}) & u_{s_5}(d_{i2}) \\ u_{s_1}(d_{i3}) & u_{s_2}(d_{i3}) & u_{s_3}(d_{i3}) & u_{s_4}(d_{i3}) & u_{s_5}(d_{i3}) \end{bmatrix}, i=1, 2 \quad (8)$$

式中, $u_{s_k}(d_{ij})$ ($i=1, 2; j=1, 2, 3; k=1, 2, \dots, 5$) 表示 R_{ij} 相对评价等级 s_k 的隶属度。

选取某一时刻 T 的 $\{R_{11}, R_{12}, R_{13}\}=\{1481, 1483, 480\}$, $\{R_{21}, R_{22}, R_{23}\}=\{0.50, 0.40, 0.48\}$ 为例(下同), 计算

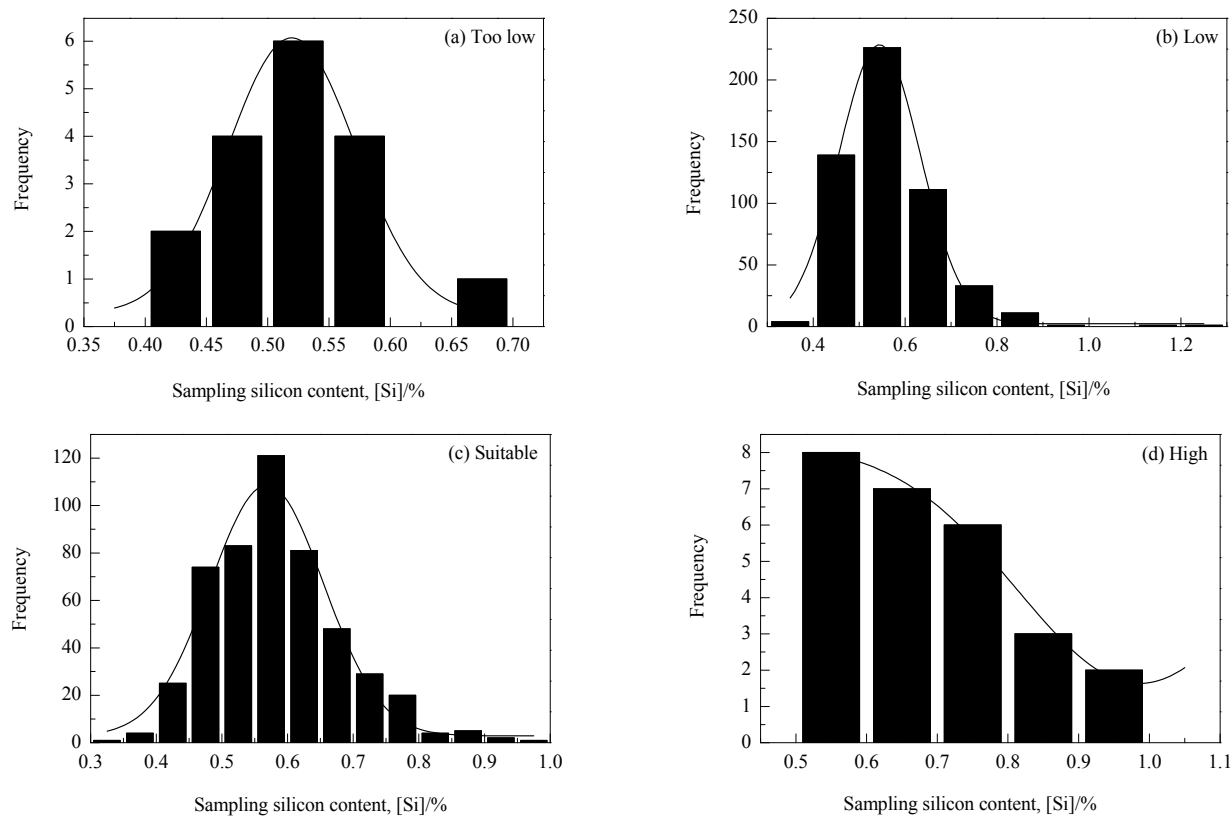


图 4 不同硅含量铁水的频数直方图
Fig.4 Frequency histograms of different silicon contents in molten iron

表 4 不同硅含量铁水的统计指标

Table 4 Statistical indexes of different silicon contents in molten iron

Grade of evaluation	Sampling silicon content, [Si]/%				
	Minimum	Maximum	Media	Average	Standard deviation
Too low	0.33	0.57	0.48	0.469	0.073
Low	0.36	0.87	0.54	0.559	0.093
Suitable	0.38	0.95	0.58	0.578	0.099
High	0.52	1.03	0.71	0.715	0.134
Too high	—	—	—	—	—

表 5 隶属度函数的参数

Table 5 Parameters of membership function

Grade of evaluation		Too low		Low		Suitable		High		Too high	
		<i>a</i>	<i>b</i>	μ	σ	μ	σ	μ	σ	<i>a</i>	<i>b</i>
Before	$T_{Fe}/^{\circ}C$	1450	1470	1475	7.3	1495	6.6	1515	8.3	1510	1530
normalization	[Si]/%	0.125	0.35	0.375	0.09	0.625	0.075	0.875	0.075	0.9	0.125
After	$T_{Fe}/^{\circ}C$	0.190	0.340	0.370	0.070	0.580	0.066	0.790	0.063	0.780	0.930
normalization	[Si]/%	0.08	0.26	0.27	0.07	0.47	0.06	0.69	0.06	0.68	0.87

T_{Fe} 与 [Si] 二级评价指标隶属度矩阵 U_1 和 U_2 分别为

$$U_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.3697 & 0.2416 & 0.0002 & 0 \\ 0 & 0.9575 & 0.0163 & 0.0001 & 0 \\ 0 & 0.7599 & 0.0567 & 0.0001 & 0 \end{bmatrix}$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.0034 & 0.9663 & 0.0030 & 0 \\ 0.0181 & 0.9948 & 0.0008 & 0 & 0 \\ 0.9753 & 0.1007 & 0.0001 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

利用二级评价指标的隶属度矩阵 U_i 及权值向量 w_i 计算二级评价指标综合评价结果向量 B_i :

$$B_i = w_i U_i = [b_i(s_1), b_i(s_2), b_i(s_3), b_i(s_4), b_i(s_5)], i=1, 2 \quad (9)$$

式中, $b_i(s_j)$ 为一级指标 R_i 下二级指标对评价等级 s_j 的综合评价结果。 T 时刻二级评价指标的综合评价结果向量为 $B_1=w_1U_1=[0, 0.77, 0.0599, 0.0001, 0]$, $B_2=w_2U_2=[0.783, 0.2299, 0.0484, 0.0002, 0]$ 。

4.5 一级模糊综合评价

由二级模糊综合评价结果向量构成一级评价指标的隶属度矩阵为

$$B=[B_1, B_2]^T = \begin{bmatrix} 0 & 0.77 & 0.0599 & 0.0001 & 0 \\ 0.783 & 0.2299 & 0.0484 & 0.0002 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

热状态综合评价向量 E 为

$$E = WB = [e_1, e_2, e_3, e_4, e_5] \quad (11)$$

式中, $e_1 \sim e_5$ 分别为 5 个评价等级的隶属度数值。依据最大隶属度原则选 $e_1 \sim e_5$ 中最大值对应的评价等级, 即为炉缸热状态的最终评价结果。 T 时刻一级评价指标综合评价结果向量为 $E=[0.2349, 0.608, 0.0564, 0.0001, 0]$,

$e_2=0.608$ 为最大值, 表明 T 时刻炉缸热状态判断结果为偏低。

5 仿真结果与讨论

采集高炉 1070 组监测数据, 应用预测模型与两级模糊综合模型评价高炉炉缸热状态, 并与实际运行比较, 结果见表 6, 其中 d 为模型评价结果与实际之差。完全匹配($d=0$)有 794 组, 占 74.21%; 可靠匹配($d=\pm 1$)有 245 组, 占 22.90%, 匹配率达 97.11%。由此可见, 本工作建立的高炉炉缸热状态模糊综合评价模型匹配度较高, 能准确有效评断高炉炉缸的热状态, 为高炉操作者对冶炼过程上部、下部调制决策提供实时有效的指导信息, 降低了高炉操作者操作的盲目性, 有效地避免操作者决策失误, 避免炉缸温度过高或过低, 保证炉温平稳, 为高炉冶炼过程运行优化提供了条件, 对实现高炉顺行、高产与节能减排具有积极的指导作用。

表 6 评价结果比较
Table 6 Comparison of evaluation results

Difference between model evaluation and practice result, d	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
Number of matching group	0	0	11	115	794	130	17	3	0
Percentage/%	0.00	0.00	1.03	10.75	74.21	12.15	1.58	0.28	0.00

6 结 论

本工作针对炉缸热状态对高炉运行的重要性, 运用高炉冶炼过程数据建立了基于高炉数据与专家知识的高炉炉缸热状态两级模糊综合评价模型, 对高炉炉缸热状态进行综合评价, 得到如下结论:

(1) 通过利用某高炉实际监测的 1070 组数据, 建立了炉缸热状态的两级模糊综合评价模型, 并与实际运行情况对比分析, 模型的评价结果中完全匹配($d=0$)有 794 组, 占 74.21%; 可靠匹配($d=\pm 1$)有 245 组, 占 22.90%, 匹配率达 97.11%。

(2) 该模型对炉缸热状态的评价结果实时、准确, 为高炉操作者提供炉缸热状态判断。

参考文献

[1] 周平, 王宏, 柴天佑, 等. 高炉炼铁过程多元铁水质量指标多输出支持向量机回归建模 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(6): 1-8.
Zhou P, Wang H, Chai T Y, et al. Multi-output support vector regression modeling for multivariate molten iron quality indices in blast furnace ironmaking process [J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(6): 1-8.

[2] 崔桂梅, 李静, 张勇, 等. 基于 T-S 模糊神经网络模型的高炉铁

水温度预测建模 [J]. 钢铁, 2013, 48(11): 11-15.

Cui G M, Li J, Zhang Y, et al. Prediction modeling study for blast furnace hot metal temperature based on T-S fuzzy neural network model [J]. Iron and Steel, 2013, 48(11): 11-15.

[3] Xia X, Hua C C, Tang Y G, et al. Modeling of the hot metal silicon content in blast furnace using support vector machine optimized by an improved particle swarm optimizer [J]. Neural Computing & Applications, 2016, 27(6): 1451-1461.

[4] 崔桂梅, 蒋召国, 詹万鹏, 等. 基于时间序列的神经网络高炉炉温预测 [J]. 冶金自动化, 2015, 39(5): 15-21.

Cui G M, Jiang Z G, Zhan W P, et al. Prediction of blast furnace temperature using neural network based on time series [J]. Metallurgical Industry Automation, 2015, 39(5): 15-21.

[5] Gao C H, Ling J, Luo S H. Modeling of the thermal state change of blast furnace hearth with support vector machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1134-1145.

[6] 黄必清, 何焱, 王婷艳. 基于模糊综合评价的海上直驱风电机组运行状态评估 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015, 55(5): 543-549.

Huang B Q, He Y, Wang T Y. Fuzzy synthetic evaluation of the operational status of offshore direct-drive wind turbines [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(5): 543-549.

[7] 肖运启, 王昆朋, 贺贯举, 等. 基于趋势预测的大型风电机组运行状态模糊综合评价 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2132-2139.

Xiao Y Q, Wang K P, He G J, et al. Fuzzy comprehensive

- evaluation for operating condition of large-scale wind turbines based on trend predication [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2132–2139.
- [8] 杨贵军, 蒋朝辉, 桂卫华, 等. 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 [J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 75–83.
- Yang G J, Jiang C H, Gui W H, et al. Fuzzy synthesis evaluation method for position state of blast furnace cohesive zone based on entropy weight extension theory [J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 75–83.
- [9] 李凤华, 李勇俊, 杨正坤, 等. 不完全信息下的威胁处置效果模糊评估 [J]. 通信学报, 2019, 40(4): 117–127.
- Li F H, Li Y J, Yang Z K, et al. Fuzzy evaluation for response effectiveness in cases of incomplete information [J]. Journal on Communications, 2019, 40(4): 117–127.
- [10] Xiao Y Q, Wang K P, He G J, et al. An operating condition fuzzy assessment strategy for large scale doubly-fed wind power generation system [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2014, 6(3): 1–14.
- [11] 欧阳曙光, 吴天礼, 刘凤, 等. 基于模糊综合评价的高炉配煤方案筛选研究 [J]. 煤质技术, 2012, 2: 1–4.
- Ouyang S G, Wu T L, Liu F, et al. Study on selection of coal blending scheme for blast furnace based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Coal Quality Technology, 2012, 2: 1–4.
- [12] Cui G M, Jiang Z G, Liu P L, et al. Prediction of blast furnace temperature based on multi-information fusion of image and data [C]//Institute of Electrical and Electronic Engineers. Proceedings of 2018 Chinese Automation Congress. 2018: 2317–2322.
- [13] 安进, 徐廷学, 曾翔, 等. 组合赋权下的装备质量状态信息融合评估方法 [J]. 控制与决策, 2018, 33(9): 1693–1698.
- An J, Xu T X, Zeng X, et al. Equipment quality condition assessment under fusion information based on combination weighting [J]. Control and Decision, 2018, 33(9): 1693–1698.
- [14] Liu H B, Ai Y L, Li Y D. Condition assessment model for subsection vacuum switch in service based on fuzzy synthetic evaluation [J]. International Journal of Control and Automation, 2016, 9(4): 313–324.
- [15] Song R J, Chen Y. Fuzzy synthetic evaluation of relay protection based on variable weight value [J]. International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering, 2015, 10(11): 143–152.
- [16] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究 [J]. 管理学报, 2010, 7(1): 34–42.
- Zhang H, Zhang M, Chi G T. An evaluation model of science and technology based on entropy weight method and its empirical study [J]. Journal of Management, 2010, 7(1): 34–42.