

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201602050

应用熵权-TOPSIS 法的加热炉炉温在线设定模型

董晓旭¹, 何安瑞¹, 孙文权¹, 汪 净², 李正涛²

(1. 高效轧制国家工程研究中心(北京科技大学), 北京 100083; 2. 湖南华菱涟源钢铁有限公司 2250 热轧板厂, 湖南 娄底 417009)

摘 要: 为解决加热炉中同时存在多块状态不同的板坯而导致加热策略不同的问题, 针对每个板坯的实时情况, 以单个炉区为研究对象, 结合熵权法和 TOPSIS 法的中间过程, 提出一种熵权-TOPSIS 法. 引入特殊钢种等级概念, 对不同的钢种进行量化处理, 并将其与板坯温差、当前位置和板坯厚度共同作为评价指标; 结合熵权法对评价指标差异性的要求和 TOPSIS 法对样本方案的加权方法, 把客观熵权作为 TOPSIS 法计算贴近度的权值, 归一化后得到最终的板坯综合权重, 利用此权重对控制段炉温进行最终设定. 分别数值模拟了固定数值模型与熵权-TOPSIS 模型, 对比结果表明: 与固定权值模型相比, 使用本模型后, 板坯平均温差下降了 5.05 ℃, 最大温差下降了 7.77 ℃. 炉温平均波动值减小了 8.98 ℃.

关键词: 钢坯加热炉; 板坯; 炉温设定; 炉温优化; 熵权-TOPSIS 法

中图分类号: TF31 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)07-0119-06

On-line temperature setup model of reheating furnace based on entropy weight-topsis method

DONG Xiaoxu¹, HE Anrui¹, SUN Wenquan¹, WANG Jing², LI Zhengtao²

(1. National Engineering Research Center of Advanced Rolling (University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China; 2. 2250 Hot Strip Mill, HunanValin LY Steel Co., Ltd., Loudi 417009, Hunan, China)

Abstract: To deal with the difference of heating strategy resulted from the different conditions of the slabs, a kind of entropy weight-TOPSIS method is proposed, which takes a single furnace zone as the research object and combines with the intermediate process of entropy weight and TOPSIS. A concept of special steel grade level is introduced to quantify steel grade, which is taken as the evaluation indexes with the slab temperature difference, slab location and thickness. This model combines the requirements for the difference of evaluation index in the entropy weight method and the weighted method of TOPSIS. The objective entropy weight is used as the closeness degree of the TOPSIS method, and by normalizing it the final weight of the slab is obtained and the temperature of control zone can be set. The simulation results show that, compared with the fixed weight model, the average and maximum temperature difference are decreased by 5.05 ℃ and 7.77 ℃, and the fluctuation value of furnace temperature is reduced by 8.98 ℃.

Keywords: reheating furnace; slabs; furnace temperature setup; furnace temperature optimization; entropy weight-TOPSIS method

加热炉是连接连铸和轧键的关键中间设备, 起到加热板坯, 使之达到轧制温度的作用. 因此, 为了获得好的加热质量, 减少氧化烧损, 节能降耗, 需要针对不同钢种、规格的板坯, 优化其升温曲线, 并据此对加热炉每个控制段设定相应的炉温. Fujii 等^[1]建立基于混合逻辑动态模型表示的控制模型, 解决了温度控制问题; Steinboeck 等^[2]用准牛顿方法求解非线性无约束的动态优化问题; Han 等^[3]对加热炉进行了三维非定常数值模拟, 对板坯最佳停留时

间进行了优化; Steinboeck 等^[4]以加热炉温度的计划参考轨迹优化实现板坯热量的增加; 杨业建等^[5]通过优化计算得到板坯的理想升温曲线和相应的炉温制度; 孟祥^[6]提出了基于内点法的加热炉炉温优化模型的求解算法, 得到稳态条件下的炉温设定值; 景会成等^[7]以最小化燃料消耗为目标函数, 利用可变容差法求得炉温的最优分布. 在权值分配问题中, Duan 等^[8]用出版数, 影响因子和引用率等评价指标, 采用熵权-TOPSIS 法对期刊进行评价; 虽然 Thakur 等^[9]和 Deere 等^[10]分别将 TOPSIS 法应用于工程领域, 但对于加热炉控制领域却鲜有人涉及.

在实际生产中, 每个控制段内会同时加热多块板坯, 各个板坯所处的状态不同, 其对当前控制段的炉温要求也不尽相同, 因此需要根据当前控制段内

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 国家自然科学基金(51404021); 北京市自然科学基金(3154035); 中央高校基本科研业务费(FRF-TP-15-060A3)

作者简介: 董晓旭(1988—), 男, 博士研究生;
何安瑞(1972—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 何安瑞, harui@ustb.edu.cn

所有板坯的需求调节当前控制段的炉温设定。

本文首先通过传热模型和炉温优化模型,得出针对单块板坯的最佳加热策略;然后引入在线变权重方法——熵权-TOPSIS 法(entropy weight-technique for order preference by similarity to ideal solution, EW-TOPSIS)对每块板坯对应的炉温设定不同的权值,从而加权得到本控制段内的综合炉温设定值。

1 炉温优化模型

1.1 传热模型

考虑到在线应用和模型的精度,本文采用二维非稳态方程进行板坯温度的求解。加热炉横断面方向上的炉温是近似相等的,可以认为板坯长度方向的温度也相等。建立板坯二维导热模型:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right).$$

式中: c 为板坯的比热容, $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$; λ 为板坯的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为单元温度, K ; ρ 为板坯的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; x 和 y 为板坯宽度和厚度方向的长度, m ; τ 为时间, s 。

采用总括热吸收率法计算板坯边界条件,并认为板坯边界的热流密度是相同的,总括热吸收率法表示的热流密度为

$$q = \sigma \Phi_{\text{CF}} (T_{\text{f}}^4 - T_{\text{s}}^4).$$

式中: q 为热流密度, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, $\sigma = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; Φ_{CF} 为总括热吸收率; T_{f} 和 T_{s} 分别为炉温和板坯表面温度, K 。根据板坯内部传热模型和边界条件,本文建立二维交替隐式差分模型:在 $t \sim t + 1/2$ 时刻, y 方向隐式, x 方向显式;在 $t + 1/2 \sim t + 1$ 时刻: x 方向隐式, y 方向显式。采用追赶法求解方程组,即可求得每个时间步长内所有单元的温度,以此作为炉温优化和设定模型的基础。

1.2 炉温优化模型

炉温优化是在板坯传热数学模型基础上,通过考虑板坯加热温度的要求,优化计算得到板坯在加热过程中的炉温制度及当前加热条件下的理想升温曲线,进而实现加热炉的热工优化控制^[11]。文献[12-13]分别建立了基于炉温的目标函数,并采用不同的优化方法对单块板坯所对应的炉温进行了计算。本文将加热炉模型分为热回收段、预热段、加热一段、加热二段、均热段,这 5 个控制段的炉温即为优化的目标温度。把 5 个控制段的炉温拟合即可得到理想的炉温曲线。由 1.1 节中的传热模型,可得到板坯的理想升温曲线和相应的炉温设定。根据加热炉生产的工艺要求,如果板坯表面温度对炉长的积分值最小,

则加热过程的能耗最小,建立如下目标函数:

$$J = \min \int_0^L T_{\text{s}}(l) dl.$$

式中: T_{s} 为加热过程中板坯表面温度的平均值, K ; L 为炉长, m 。求得目标炉温使得 J 的值最小,即 $\min J$ 。根据断面温差、表面温差、升温速度等工艺要求,建立如下约束条件:

$$(T_{\text{s}}(t + \Delta t) - T_{\text{s}}(t)) / \Delta t \leq \Delta T_{\text{s}(\text{max})}^{\text{v}},$$

$$|T_{\text{s}} - T^*| \leq \Delta T,$$

$$T_{\text{s}} - T_{\text{c}} \leq \Delta T_{\text{s}(\text{max})},$$

$$T_{\text{fmin}}(i) \leq T_{\text{f}}(i) \leq T_{\text{fmax}}(i).$$

式中: Δt 为时间步长, s ; $\Delta T_{\text{s}(\text{max})}^{\text{v}}$ 为最大升温速率, K/s ; T^* 为目标出炉温度, K ; ΔT 为出炉目标最大温差, K ; T_{c} 为板坯中心温度, K ; $\Delta T_{\text{s}(\text{max})}$ 为出炉最大断面温差, K ; T_{f} 为炉温, K ; T_{fmin} 和 T_{fmax} 分别为炉温上下限, K ; i 为炉段。根据以上目标函数和约束条件,采用遗传算法得到针对某块板坯的最优加热策略和升温曲线。炉温优化流程图如图 1 所示。

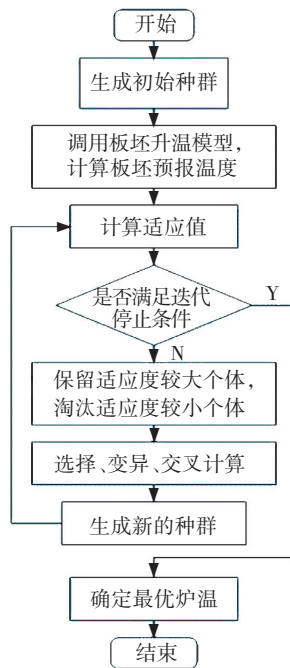


图 1 炉温优化程序框图

Fig.1 The diagram of temperature optimization program

2 熵权-TOPSIS 法

以上的炉温优化过程是针对单块板坯的,即每块板坯对应一个最优升温曲线和炉温设定值。还需要综合考虑当前控制段内所有板坯的不同状态对炉温进行综合设定。

在一般的多目标决策问题中,无论是评价指标还是待评项目往往是固定的,只需要根据固定值进行离线优化计算即可。但是在加热炉生产中,由于板坯的移动和温度的变化,其评价指标和待评项目

(板坯的属性和板坯)是不断变化的,且这种变化会有成千上万种,如果对每一种情况进行专家判定,工作量巨大. 而主观赋权评价法是根据决策者对各项评价指标的主观重视程度来赋值的一种方法^[14],所以其不可能应用在在线炉温设定上.

在客观赋权评价法中,熵权法操作性和客观性强. 其基本原理是某指标的数值差异越大,则信息熵越小,该指标提供的信息量越大,其权重便越大^[15]. 但是熵权表示的是各指标竞争的激烈程度,而不是各指标的实际重要程度. 当所有熵值都趋近于 1 时,即使微小的差距都会引起熵权成倍数地变化,导致部分指标被赋予了与其重要性不符合的权重^[16]. TOPSIS 法是一种逼近理想解法的排序方法,该方法反映了备选方案和理想方案位置上的一致性,是由 HWANG 等^[17]首先提出的. TOPSIS 模型是一种距离综合评价法,通过在目标空间中定义一个测度,以此测量目标靠近正理想解和远离负理想解的程度来评估方案的权重. 但是 TOPSIS 法在构造加权规范化矩阵的过程中需要用到主观权重,因此本文用熵权代替此权重.

1) 设有 m 个待评项目,也就是板坯数; n 个评价指标,也就是板坯当前属性,即温差、位置、厚度、钢种;形成原始数据矩阵 $X = (x_{ij})_{m \times n}$,并对其进行标准化得到矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}.$$

2) 计算第 j 个属性下第 i 个板坯指标值的比重 p_{ij} :

$$p_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij}, \quad j = 1, 2, \cdots, n.$$

3) 计算第 j 个属性的熵值 e_j :

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij}, \quad k = \frac{1}{\ln m}, \quad j = 1, 2, \cdots, n.$$

4) 计算第 j 个属性的熵权 w_j :

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)}, \quad j = 1, 2, \cdots, n.$$

5) 将熵权 w_j 与目标矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 中对应的指标相乘,得到规范化矩阵 $V = (v_{ij})_{m \times n}$:

$$V = w_j \cdot R = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix}.$$

6) 确定理想解和负理想解:

$$v^+ = (v_1^+, v_2^+, \cdots, v_n^+) = \{ \max v_{ij} \mid i = 1, 2, \cdots, m \};$$
$$v^- = (v_1^-, v_2^-, \cdots, v_n^-) = \{ \min v_{ij} \mid i = 1, 2, \cdots, m \}.$$

7) 计算对象到理想解和负理想解的距离:

$$s_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \cdots, m;$$
$$s_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \cdots, m.$$

8) 计算相对贴近度:

$$c_i = s_i^+ / (s_i^+ + s_i^-) \quad (0 \leq c_i \leq 1), \quad i = 1, 2, \cdots, m.$$

9) 把相对贴近度归一化得到每块板坯的权值:

$$q_i = c_i / \sum_{i=1}^m c_i, \quad i = 1, 2, \cdots, m.$$

板坯实时温度是炉温设定必须考虑的因素,板坯温度的高低直接影响当前炉温的设定值. 在板坯前进的过程中,距离出炉门越近的板坯,其温度影响更大,所以板坯在控制段内的位置也会影响炉温设定值. 不同的钢种,对于其温度要求的严格性也不相同,部分钢种对温度要求较为严格,必须保证其出炉温度达到目标值. 因此,本文引入特殊钢种等级的概念,对不同的钢种,根据其温度严格性的要求不同划分不同的等级. 此外,由于板坯厚度不同,其加热时间也不同,所以还必须考虑板坯厚度的影响.

根据以上几点,本文选取的评价指标为板坯当前温度与理想温度的差值、板坯在当前控制段的位置、板坯厚度和特殊钢种等级. 待评方案为每个板坯对应的炉温设定值. 本文提出的炉温综合设定程序的框图如图 2 所示.



图 2 炉温综合设定程序框图

Fig.2 The diagram of temperature comprehensive setting program

3 加热炉炉温综合优化设定结果及分析

3.1 优化条件

根据某热轧厂的实际情况,以加热二段为当前控制段,其长度为 13.2 m. 根据布料中对板坯间隙的要求,控制段内最大的板坯数量为 8,以 1.45 m 宽的板坯为例. 设板坯以 54 mm/s 的速度匀速前进. 为了使仿真实验更符合生产实际,随着板坯向前运动,首先依次装入 8 块按照理想加热曲线加热的板

坯(I1 组板坯),即板坯无温度偏差,再依次装入有温度偏差的 16 块板坯(S 组板坯),最后再装入 8 块无温度偏差的板坯(I2 组板坯).

16 块板坯均为实际生产数据,其中钢种等级越大代表板坯对温度的要求越严格. 以 Q235B、SPHC、Q345B、W600 等 4 个钢种为例,计算出升温曲线和加热二段的炉温设定值. 其初始基本数据如表 1 所示,为使数据信息更符合工程实际,现将温度单位转换为℃.

表 1 模拟实验板坯初始参数

Table 1 Simulated experimental initial parameters of slab

板坯编号	钢种	钢种等级	厚度/mm	当前理想板温/℃	温度偏差/℃	加热二段优化炉温/℃
S1	W600	1	230	1 020	20	1 226
S2	W600	1	230	1 020	23	1 233
S3	SPHC	2	230	1 030	33	1 238
S4	W600	1	230	1 020	19	1 226
S5	Q345B	3	250	1 068	29	1 273
S6	Q345B	3	250	1 068	41	1 273
S7	Q345B	3	250	1 068	38	1 273
S8	Q235B	4	250	1 080	43	1 285
S9	SPHC	2	240	1 050	35	1 233
S10	SPHC	2	240	1 050	30	1 235
S11	SPHC	2	240	1 050	28	1 233
S12	SPHC	2	240	1 050	34	1 246
S13	W600	1	230	1 048	27	1 263
S14	Q235B	4	230	1 077	24	1 285
S15	Q235B	4	230	1 077	20	1 285
S16	Q235B	4	230	1 077	18	1 285

3.2 结果及分析

在开始阶段,首先对炉温进行一次加权计算并设定计算炉温. 每当控制段内有新的板坯进入后,重新进行计算. 根据图 2 程序框图,建立综合炉温设定模型,对 16 块板坯进行仿真计算,结果见表 2.

表 2 实验前后温差对比

Table 2 Comparison of temperature difference before and after experiment

板坯编号	初始温度差/℃	实验后温度差/℃
S1	20	3.19
S2	23	4.89
S3	33	8.41
S4	19	1.48
S5	29	5.65
S6	41	11.42
S7	38	10.19
S8	43	13.58
S9	35	8.53
S10	30	9.26
S11	28	7.25
S12	34	8.63
S13	27	9.81
S14	24	3.49
S15	20	1.62
S16	18	-0.11

由表 2 可知,在当前控制段使用综合炉温设定值后,板坯实际温度与理想温度的温差实现较大幅度的下降. 各板坯在炉内的温差变化见图 3. 由图 3 可以看出,无论板坯的初始温差为多少,在经过当前加热段后,板坯温差均有下降且基本没有超调即高于理想板温的情况出现.

为了体现模型在综合炉温设定方面的优势,选取工业生产中常用的炉温权值设定方法与本文的模型进行比较. 工业生产中常用的方法为固定权值模型,此模型只考虑板坯位置,即本段中距离出炉门最近的板坯的设定炉温即为本控制段的炉温. 此外,本文还选取了原始的熵权模型来进行对比,对比结果如表 3 所示.

从表 3 可看出,在相同初始温差情况下,与另外两个模型相比,采用熵权-TOPSIS 模型后,板坯平均温差分别多下降了 3.71℃ 和 5.05℃. 在规格发生变化时,这种现象更为明显(见图 4).

相较其他两种模型,应用本文提出的方法,规格变化时板坯温度受到的影响最小. S5、S9 和 S13 分别为换规格后的第一块板坯:S5 温差比熵权法小 3.65℃,比固定权值法小 6.18℃;S9 温差比熵权法小 4.08℃,比固定权值法小 7.24℃;S13 温差比熵权法小 3.33℃,比固定权值法小 3.83℃.

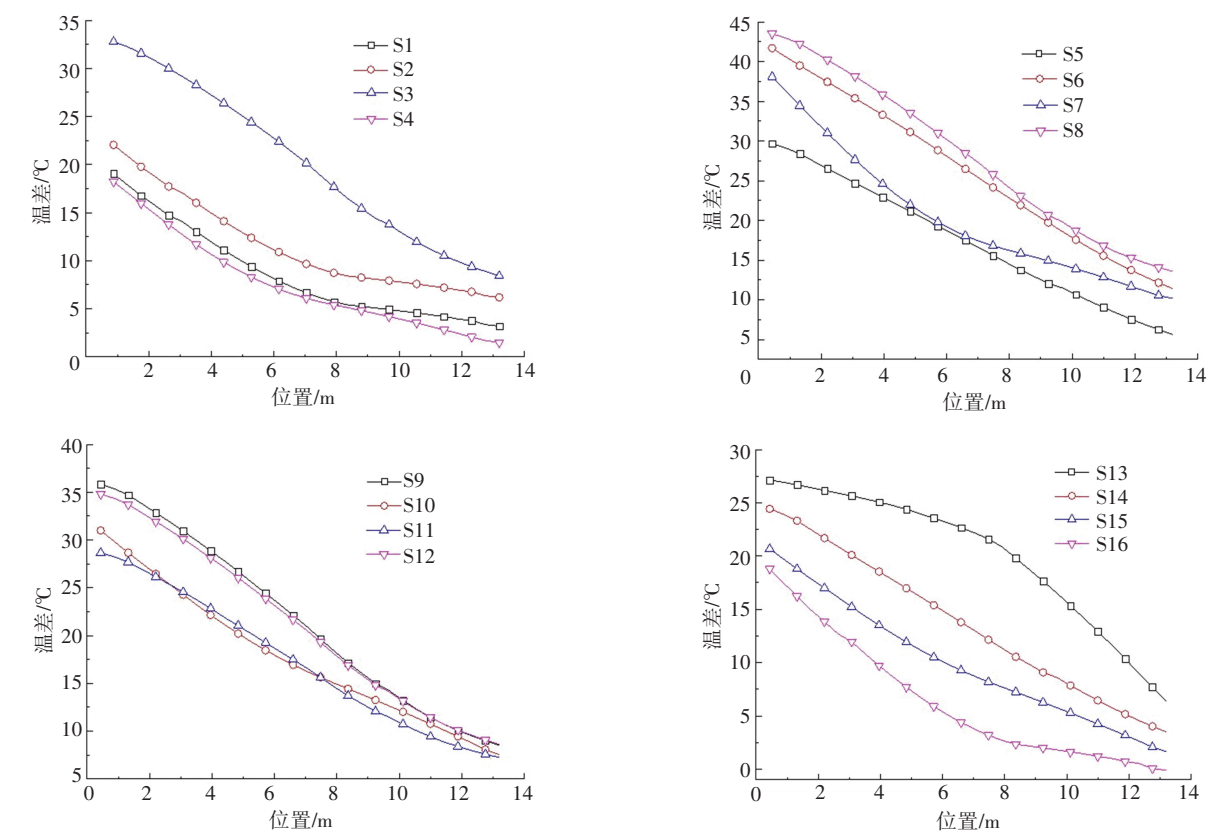


图 3 S 组板坯的温差变化

Fig.3 Temperature difference of slab in S group

表 3 3 种模型实验数据对比

Table 3 Experimental data comparison of three models ℃

模型	平均温差		最大温差
	实验前	实验后	实验后
熵权-TOPSIS 法	28.86	6.51	13.58
熵权法	28.86	10.22	18.73
固定权值法	28.86	11.56	21.35

由图 4 可知,板坯温差在每个模型的设定炉温下均有所下降. 对于固定权值模型,由于距离出炉门最

近的板坯的权值为 1,所以 S1 和 S2 的温差相对较小,甚至低于熵权-TOPSIS 模型;但是随着 S 组板坯陆续进入控制段,对于相邻两块温度相差较大的板坯,炉温设定会产生较大的波动,从而导致升温较慢或过烧现象. 对于原始熵权法模型,板坯的炉温减小量比固定权值模型要大,但是如第 2 节所说,熵权表示的是各指标竞争的激烈程度,而不是各指标的实际重要程度,温度和板坯位置的微小变化会导致设定值出现较大偏差,体现了此模型的不稳定性.

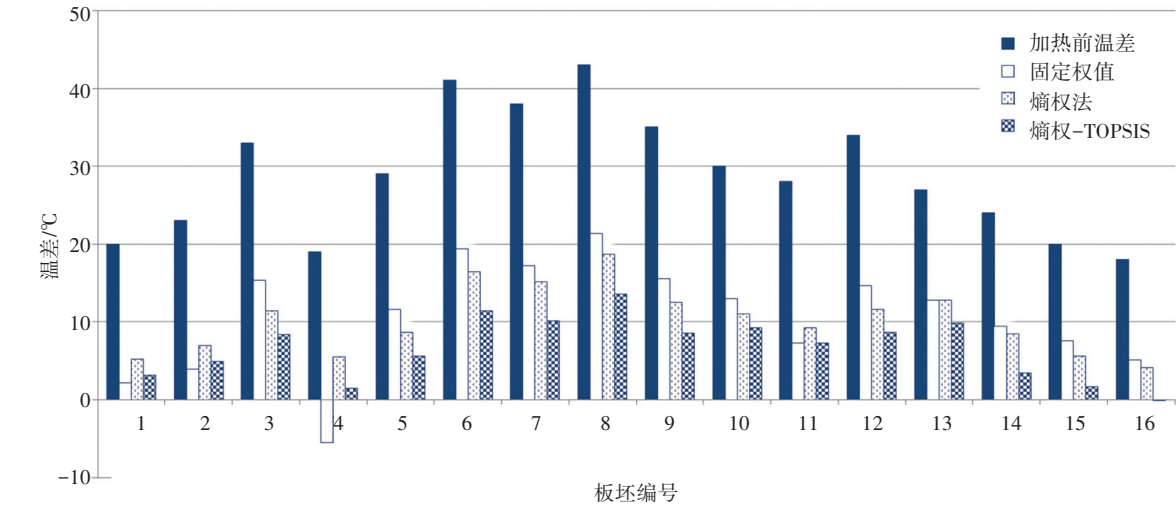


图 4 S 组板坯的温差变化

Fig.4 Temperature difference of slabs in the three models

图 5 为两种模型下的炉温设定变化情况,固定权值的模型设定值始终与距离出炉门最近的板坯所对应的炉温相同;熵权-TOPSIS 法则综合了所有在控制段内的板坯数据,因此其炉温变化相对较小,其中平均炉温波动值为 $13.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大炉温波动值为 $51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而采用固定权值的模型平均炉温波动值为 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大炉温波动值为 $59\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

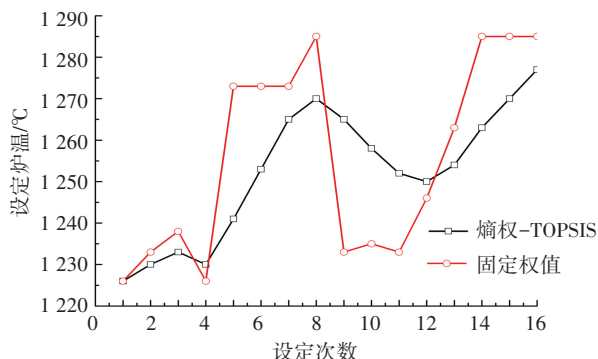


图 5 两种模型下的炉温设定值变化情况

Fig.5 The temperature setting value changes of furnace in the two models

4 结 论

1) 引入特殊钢种等级概念,根据板坯出炉温度要求严格性的差异,将不同钢种分成不同等级,并确定其权重,大大增强了模型的灵活性和全面性。在炉区中板坯发生更迭时,模型进行一次计算,避免了多次计算而造成的频繁改变炉温的情况。

2) 本文模型针对单个控制段内的板坯进行计算,避免了针对所有在炉板坯进行计算时数据量过大的问题,且炉温变化较为平缓。平均炉温波动值为 $13.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大炉温波动值为 $51\text{ }^{\circ}\text{C}$,大大低于固定权值方法所设定的炉温,也避免了固定权值模型中炉温变化量过大而影响板坯加热的效果。

3) 采用改进型熵权-TOPSIS 法的在线炉温设定模型,反映了一个控制段内所有板坯的当前属性,通过对待评因素的分析确定出当前的综合炉温设定值。与固定权值模型和原始熵权模型相比,本文模型更全面地考虑加热段内的所有板坯,大幅度降低了所有板坯的温差,与固定权值法相比,其平均温差下降 $5.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差下降 $7.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献

- [1] FUJII S, URAYAMA K, KASHIMA K, et al. Simultaneous optimization of charging scheduling and heating control in reheating furnace [J]. Tetsu-to-Hagane, 2010, 96(7): 434-442.
- [2] STEINBOECK A, WILD D, KUGI A. Nonlinear model predictive control of a continuous slab reheating furnace[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(4): 495-508. DOI:10.1016/j.conengprac.2012.11.012.
- [3] HAN S, CHANG D. Optimum residence time analysis for a walking beam type reheating furnace[J]. International Journal of Heat &

Mass Transfer, 2012, 55(s15/16): 4079-4087. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.049.

- [4] STEINBOECK A, GRAICHEN K, WILD D, et al. Model-based trajectory planning, optimization, and open-loop control of a continuous slab reheating furnace [J]. Journal of Process Control, 2011, 21(2): 279-292.
- [5] 杨业建, 姜泽毅, 张欣欣, 等. 基于目标钢温的加热炉在线动态优化控制[J]. 冶金自动化, 2012, 36(1): 19.
YANG Y J, JIANG Z Y, ZHANG X X, et al. On-line dynamic optimization control of heating furnace based on target billet temperature [J]. Metallurgical Industry Automation, 2012, 36(1): 19.
- [6] 孟祥. 生产工况切换下的步进梁加热炉炉温优化方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
MENG X. Research on optimization methods of furnace temperature in walking beam reheating furnace with operating mode's switch [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [7] 景会成, 刘小清. 加热炉稳态炉温设定的优化方法研究[J]. 冶金自动化, 2015, 39(1): 48-51.
JING H C, LIU X Q. Research on optimization of reheating furnace temperature setting [J]. Metallurgical Industry Automation, 2015, 39(1): 48-51.
- [8] DUAN Wentao, ZHANG Yuanbiao, NIE He. Journals Evaluation and the Application Based on Entropy-TOPSIS [J]. Engineering Management Research, 2015, 4(1): 30-37.
- [9] THAKUR A, BHATIA O S. Selection of automotive brake friction materials using hybrid entropy-TOPSIS approach[J]. Journal of Scientific and Engineering Research, 2016, 3(1): 122-128.
- [10] DEERE S J, GALEAER. A systematic methodology to assess the impact of human factors in ship design [J]. Applied Mathematical Modeling, 2009, 33(2): 867-883.
- [11] 杨业建. 板坯热轧区段生产调度及加热炉优化控制[D]. 北京: 北京科技大学, 2011.
YANG Y J. Production scheduling in the slab hot rolling plant and optimal control of reheating[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2011.
- [12] JANG J Y, HUANG J B. Optimization of a slab heating pattern for minimum energy consumption in a walking-beam type reheating furnace [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 85: 313-321. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.029.
- [13] 李冰洁. 基于 WinCC 组态软件的加热炉炉温优化与仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
LI B J. Temperature optimization and simulation research of reheating furnace based on winCC configuration software [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [14] 孙德忠, 喻登科, 田野. 一种基于专家组合多重相关的主观赋权方法[J]. 统计与决策, 2012(19): 88-90.
SUN D Z, YU D K, TIAN Y. A subjective weight method based on multiple correlation of expert combination [J]. Statistics and Decision, 2012(19): 88-90.
- [15] YANG H J, HAN W, ZENG T, et al. Failure risk assessment of the power system transmission line based on an improved entropy method [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 333-335: 1514-1517.
- [16] 郭金维, 蒲绪强, 高祥, 等. 一种改进的多目标决策指标权重计算方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2014, 41(6): 118-125.
GUO J W, PU X Q, GAO X, et al. Improved method on weights determination of indexes in multi-objective decision [J]. Journal of Xidian University, 2014, 41(6): 118-125.
- [17] HWANG C L, YOON K S. Multiple attribute decision making [M]. New York: Springer Verlag, 1981: 29-56. (编辑 杨波)