

文章编号: 1004- 0609(1999)03- 0631- 05

变焦混沌优化焦炉燃烧专家控制系统^①

金 敏 沈德耀

(中南工业大学信息工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 针对湖南涟源钢厂焦化生产存在的主要问题, 在分析炼焦生产工艺的基础上, 提出集变焦混沌优化技术和专家控制方法为一体的焦炉燃烧控制系统设计方案, 给出了系统的总体设计思想和结构框图, 详细阐述了系统的工作原理。实验结果表明了该控制方案的有效性。

关键词: 混沌优化; 变焦搜索; 专家前馈控制; 焦炉燃烧

中图分类号: TP273. 3

文献标识码: A

焦炉炼焦过程中, 决定焦炉寿命的关键因素是炉温的稳定性。本文针对湖南涟源钢厂(以下简称涟钢)焦炉生产目前存在的炉温波动频繁的现象, 借鉴国内外焦炉燃烧自动化技术改造的先进经验, 将混沌优化变焦搜索技术和智能控制专家系统理论成果运用于焦炉燃烧控制, 设计出基于变焦混沌优化的焦炉燃烧专家控制系统。该系统具有稳定焦炉炉温、延长焦炉炉龄、提高焦炭质量和节约能源的控制效果。

1 目前生产存在的主要问题

涟钢2[#]焦炉原设计炉龄为20年, 实际已运行23年, 延长焦炉炉龄的任务刻不容缓。延长炉龄的关键在于焦炉炉温的稳定性, 涟钢焦化厂为稳定炉温采用人工调节煤气压力的方法, 但该方法存在以下两点明显的缺点:

(1) 通过调节煤气压力来稳定炉温的调节方式存在不合理性

加热煤气中灰尘和杂质的存在导致蓄热室经常性被堵, 在堵塞程度变化的情况下, 煤气压力和流量之间不存在稳定的对应关系。如在保证压力稳定的情况下, 随着堵塞程度的加重, 煤气流量不断降低, 炉温因此随之下落, 因此即使压力稳定也不能保证炉温稳定。

(2) 人工调节炉温的不及时性

煤气压力频繁的波动使得人工手动调节压力稳定炉温的方法明显表现出不及时性。实际上, 由于焦炉煤气压力在不断变化, 因而煤气流量和炉温也在不断变化。炉温过高时, 烧坏焦炉的耐火材料, 缩短焦炉寿命, 同时炼制出过火焦意味着能源被浪费; 炉温过低时, 焦炭不能在作业结焦时间内正常成熟, 形成生焦, 降低了焦炭质量。因此, 寻求有效的稳定炉温的调节方式成为控制焦炉燃烧的主要问题。

2 系统总体设计思想及结构框图

2.1 系统总体设计思想

(1) 采用变焦混沌优化方法优化立火道温度设定值

目前广泛使用的随机优化方法如模拟退火法、遗传算法等只能通过按某种概率接受“劣化”解的方式才能跳出局部最优解, 因而搜索效率低。变焦混沌优化方法利用混沌运动具有的遍历性、随机性、规律性的特点, 能够在解空间按自身规律不重复的遍历所有状态, 因而避免了陷入局部最优, 且在搜索过程中引入变焦操作, 大大提高了搜索速度。本文采用变焦混沌优化方法优化在配合煤水分含量、作业结焦

① 收稿日期: 1998- 06- 08; 修回日期: 1998- 09- 24

金 敏(1972-), 女, 博士研究生

时间、作业焦饼结焦温度不同的条件下立火道温度的设定值,使得煤气流量能耗最小。

(2) 确定以调节煤气流量来稳定炉温的调节方式

炼焦机理和连钢实践表明,无论压力波动程度和蓄热室堵塞程度如何,在煤气热值、配合煤水分含量及结焦时间在一段时间内相对稳定的情况下,煤气流量和炉温存在一定的正比关系,这就意味流量稳定则炉温稳定,调节流量就能够调节炉温,而调节流量稳定炉温的关键环节之一是选用准确可靠的电磁流量计。

(3) 设计基于数学模型和规则模型相结合的煤气流量前馈专家控制系统

由于炼焦生产工艺的复杂性,难以用数学模型来准确描述,因此仅仅基于数学模型设计该系统,很难获得理想的效果。近年来,基于规则模型的专家控制系统技术已广泛应用到自动控制领域,将基于炼焦机理的数学模型和由连钢多年炼焦经验总结而成的规则模型相结合,建立煤气流量前馈专家控制系统,可以较准确地反映炼焦工艺,从而设定煤气流量值。

(4) 加入炉温校正环节

由于炼焦工艺的复杂性和现场干扰的多样性,煤气流量前馈专家控制系统基于负荷求出的供给煤气流量总会有些误差,如果这些误差保留下来而不校正,立火道温度实际值和设定值就会有偏差,因此加入炉温校正环节,将测温仪测得的立火道温度实际值作为控制变量,

对前馈专家控制系统设定的煤气流量进行修正,从而使立火道温度准确稳定于设定值。

2.2 系统总体结构框图

基于以上设计思想的焦炉燃烧变焦混沌优化专家控制系统总体结构框图如图1所示。

3 立火道温度设定值变焦混沌优化方法

3.1 优化命题

优化立火道温度设定值的目的在于节约能源和提高焦炭质量,故优化命题归结为:以能耗最小为目标函数,以指定配合煤水分含量、作业结焦时间、作业焦饼结焦温度为约束条件,寻求最佳立火道温度设定值。数学表示为:

$$\min_{(T^*)} E = f(\theta, d, t, \theta_c)$$

$$\text{s. t. } \theta \in [1300, 1350]$$

$$d \in O(d^*, \varepsilon)$$

$$t \in O(t^*, \delta)$$

$$\theta \in O(\theta_c^*, \phi)$$

式中 E 为煤气量能耗, θ 为立火道温度实际值, θ^* 为立火道温度优化设定值, d 为配合煤水分含量, d^* 为配合煤水分指定含量, t 为实际结焦时间, t^* 为作业结焦时间; θ_c 为焦饼实际结焦温度, θ_c^* 为作业焦饼结焦温度, $f(\cdot)$ 为能耗目标函数, $O(\cdot)$ 表示邻域, ε 为邻域偏差。

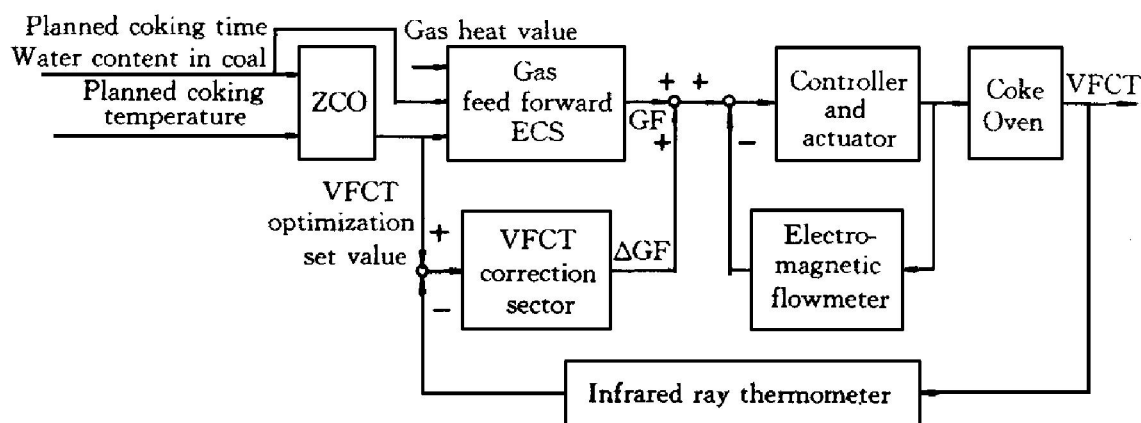


图1 系统总体结构框图

Fig.1 Block diagram of overall system

ZCO—Zoom Chaos Optimization; GF—Gas Flow; VFCT—Vertical Fire Channel Temperature

3.2 变焦混沌优化方法

Step 1 引入混沌状态

混沌状态选用 Logistic 映射^[2]:

$$x_{n+1}=4x_n(1-x_n)$$
$$(0\leqslant x_0\leqslant 1, n=0,1,2\cdots)$$

(1)

Step 2 进行一次载波

将混沌变量 x_{n+1} 引入到优化变量 x'_{n+1} 中, 并将其遍历范围放大到优化变量的取值范围。

$$x'_{n+1}=1300+50x_{n+1}$$

(2)

Step 3 算法初始化

第一步 $k=1$, 赋予式(1)初值 $x_n=x_0$, 则

$$x_1=4x_0(1-x_0)$$

令 $x^*=x_0$, 则

$$x'^*=1300+50x^*$$

再令 $\theta^*=x'^*$ 则 $f^*=f(\theta^*)$

由于炼焦机理的复杂性, 目标函数 $f(\bullet)$ 的解析表达式无法获取, 而混沌优化方法对目标函数的唯一要求是“具有对优化性能的评估能力”, 其表达方式可以是定性、定量、非线性、不可微、不可导等任意形式, 因而具有广泛的适应性。本文 $f(\bullet)$ 即利用涟钢焦化生产的历史数据记录对能耗大小进行评估。

Step 4 用混沌变量进行迭代搜索

第 k 步 令 $k=k+1$, 得 $x_k=4x_{k-1}(1-x_{k-1})$, $x'_k=1300+50x_k$ 。

令 $\theta_k=x'_k$, 得 $f_k=f(\theta_k)$ 。

IF $f_k\leqslant f^*$ THEN $x^*=x_k$, $x'^*=1300+50x^*$, $\theta^*=x'^*$, $f^*=f_k$

ELSE 放弃 x_k

END IF

Step 5 进行二此载波

如果经过 Step 4 的若干步搜索, f^* 都保持不变, 表示搜索已进入最优解的邻域。为加快搜索速度, 在搜索空间进行变焦操作, 通过二次载波缩小遍历范围, 以便在近似最优解的邻域内进行细搜索, 从而大大提高搜索速度。反之, 返回 Step 4。

二次载波方法为: $x''_{n+1}=x'^*+5x_{n+1}$

式中 x'^* 为当前最优解; $5x_{n+1}$ 为遍历区间缩小 10 倍后的混沌变量。

Step 6 用二次载波后的混沌变量继续迭代搜索

令 $k=k+1$, 得 $x_k=4x_{k-1}(1-x_{k-1})$,

$$x''_k=x'^*+5x_k$$

令 $\theta_k=x''_k$, 得 $f_k=f(\theta_k)$

IF $f_k\leqslant f^*$ THEN $x^*=x_k$, $x''^*=x'^*+5x^*$, $\theta^*=x''^*$, $f^*=f_k$

ELSE 放弃 x_k

END IF

Step 7 如果满足中止判据则中止搜索, 输出最优解 θ^* , f^* 。反之, 返回 Step 6。

3.3 优化结果

采用上述变焦混沌优化方法, 对配合煤水分含量为 11%、作业结焦时间为 19 h、作业焦饼结焦温度为 1 230 ℃时的立火道温度设定值进行寻优, 初值 X_0 取 0.2, 搜索 50 步后即可得表 1 结果, 最优立火道温度设定值为 1 320 ℃, 对应最小能耗 6 050 kJ/kg; 而采用现场经验公式设定立火道温度的最优值为 1 322 ℃, 对应最小能耗为 6 230 kJ/kg。表明采用变焦混沌优化方法具有节能 2.89% 的作用, 且操作简单, 搜索效率高。

表 1 变焦混沌优化结果

Table 1 Optimization results of zoom chaos search

Item	Zoom chaos optimization method	Experiential Equation optimization method
Search steps	50	—
VFCT optimization set value	1 320 ℃	1 322 ℃
Minimum energy consumption	6 050 kJ•kg ⁻¹	6 230 kJ•kg ⁻¹

4 煤气流量前馈专家控制系统

4.1 数学模型

根据炼焦机理热平衡原理, 参照美国凯撒公司 COHC 系统^[5]和法国索莫尔公司 CRAPO 系统^[4]耗热模型, 结合涟钢焦炉生产实际情况, 建立如下涟钢焦炉耗热数学模型:

$$V = \frac{(N \cdot G) \cdot q \cdot K_e}{\tau \cdot (Q \cdot K_g - C \cdot \theta)} \quad (2)$$

式中 V —加热煤气流量, Nm^3/h , 预测值;
 N —炭化室孔数; G —每孔炭化室装湿煤量, kg ;
 q —湿煤耗热量, kJ/kg , 由规则模型确定;
 τ —结焦时间, h ; Q —湿煤气低发热值, kJ/m^3 ;
 C —煤气比热值, kJ/kg ; θ —立火道温度设定值, $^{\circ}\text{C}$;
 K_e —环境温度、湿度校正因子, 由规则模型确定;
 K_g —煤气流量校正因子^[1]

$$K_g = K_\rho \cdot K_p \cdot K_T \cdot K_c$$

K_ρ —密度校正因子

$$K_\rho = \sqrt{\frac{(\rho_0 + f_1)(0.804 + f_1)}{(\rho_0 + f_2)(0.804 + f_2)}}$$

式中 ρ_0 —标准状态下煤气密度, kg/Nm^3 ;
 f_1, f_2 —对应 T_1, T_2 温度下, 煤气中水汽含量(kg/m^3);

$$K_p$$
—压力校正因子, $K_p = \sqrt{p_1/p_2}$

式中 p_1 —设计流量孔板的实际煤气绝对压力, Pa ;
 p_2 —煤气实际压力, Pa ;

$$K_T$$
—温度校正因子, $K_T = \sqrt{T_1/T_2}$

式中 T_1 —设计流量孔板的实际绝对温度, K ;
 T_2 —煤气实际绝对温度, K ;

$$K_c$$
—换向校正因子, $K_c = (60 - m \cdot t_c) / 60$

式中 m —焦炉在 1h 内的换向次数; t_c —换向持续时间, min 。

4.2 规则模型

(1) 表示方法

专家系统中常用知识表示方法有产生式规则表示法、框架表示法、语义网络表示法、谓词逻辑表示法和剧本表示法, 本系统考虑到控制的实时性和易实现性要求, 采用产生式规则表示 q 和 K_e 的经验值, 形式为:

R# : IF CONDITIONS
 THEN RESULTS:

设定环境温度 20°C 、湿度适中时 K_e 为 1。从炼钢历史生产数据中提取 n 条环境温度为 20°C 且湿度适中、煤水分含量为 7% 的 n 条记录, 将其中的 $V, N, G, K_e, \tau, Q, K_g, C$ 和 θ 代入 (2) 式, 得到 n 个 q 数据, 其加权平均

值即煤水分含量为 7% 时的 q 经验值, 存于专家系统知识库中; 依上方法, 可得到煤水分含量从最低 (7%) 到最高 (15%) 时对应的经验值, 分别存于专家系统知识库中。例如:

R1: IF 煤水分含量为 7% ~ 8%

THEN q 为 2320kJ/kg ;

R2: IF 煤水分含量为 12% ~ 13%

THEN q 为 2451kJ/kg ;

同理, 采集若干组环境温度和湿度分布均匀的历史生产数据, 代入式 (2), 经数据处理, 得到对应环境参数的一组 K_e 规则模型, 存于专家系统的知识库中。

(2) 推理机构

推理实质是一种搜索。不同类型的专家控制系统都有各自不同的特性, 而区别它们的重要特征之一就是搜索方法。专家系统中一般有正向推理、反向推理、事件驱动等多种推理策略, 本系统采用数据驱动的正向推理方法。用户输入的现场实时数据 (包括煤水分含量、环境温度、湿度参数等) 组成一事实库, 推理机构将事实库中的数据与知识库中的规则一一匹配并进行冲突消解, 推理成功则推理任务结束, 并将搜索到的 q 及 K_e 经验值送给数学模型以完成所需煤气流量的预报。

4.3 基于数学模型和规则模型的专家系统工作原理

如图 2 所示。

4.4 专家系统的特点

(1) 自学习功能

为使前馈专家控制系统对炉体老化等干扰量有较强的自适应功能, 加入专家自学习功能, 定期将焦炉生产的新数据输入到事实库中, 由推理机构决策出新的 q 和 K_e 值, 更新知识库中的对应的老的 q 和 K_e 经验数据。

(2) 较高的控制实时性

系统采用 Windows 作为运行环境, 运用面向对象的编程机制, 对用户输入采用消息响应方式, 实现和操作都十分方便。运用 DDE 动态数据交换技术, 在数据采集程序和应用程序之间建立起动态数据交换链路; 采用自动交换方

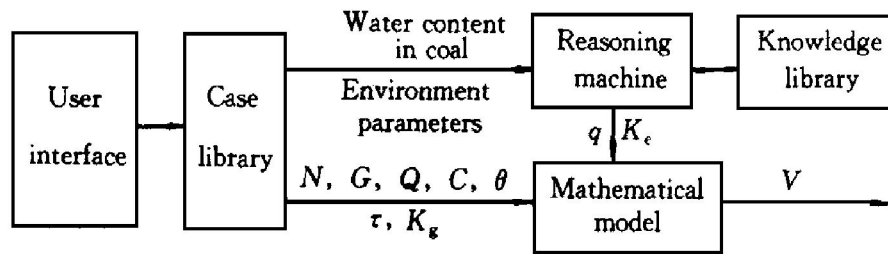


图2 专家系统工作原理

Fig. 2 Working principles of ECS

式,一旦数据采集程序采集到数据变化,则应用程序中该数据将被立即自动修改,这就克服了在以往的工业控制系统中,基于DOS环境的两个独立应用程序之间只能通过文件等数据存储方式来传递数据的效率低的缺陷,提高了专家系统控制的实时性。

5 炉温校正环节

炉温校正环节将由红外线测温仪检测到的立火道温度实际值与设定值比较,根据误差大小给出煤气流量的校正值 ΔV ,由 V 和 ΔV 共同作用于生产过程,调节煤气流量达到稳定控制立火道温度的目的。由于焦炉是个热容大惯性对象,采用WAS算法,其调节周期应不小于4倍对象惯性时间常数,所以校正环节可采

用红外线测温仪,定时测量立火道温度,实现非连续控制校正,不仅是可行而且是有效。

REFERENCES

- 1 Astrom K J. In: Proceedings of the first European Control Conference, 1991, 3: 23~ 28.
- 2 Kenlin M P. IEEE Control Systems, 1993, 1: 12.
- 3 Yao Shaozhang(姚邵章). Coking(炼焦学). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 4.
- 4 Dan Yongfeng(单永丰). Fuel & Chemical Process (燃料与化工), 1985, 3: 316.
- 5 Wu Xianqing(邬显青). Fuel & Chemical Process(燃料与化工), 1989, 5: 228.
- 6 Li Bing(李兵). Control Theory and Applications (控制理论与应用), 1997, 4: 613.
- 7 Bao Liwei(鲍立威). Control and Decision(控制与决策), 1996, 2: 296.

Zoom chaos optimization expert control system for coke oven combustion

Jin Min, Shen Deyao

College of Information Engineering

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

Abstract: Aimed at the main problems existing in Lianyuan coking production, Hunan, with the analysis of coking process, a new control strategy was proposed, which integrates the technique of Zoom Chaos Optimization (ZCO) with the method of Expert Control System (ECS) for Coke Oven Combustion (COC). The system design framework was presented and its working principles were described in detail. The application results demonstrated its feasibility and effectiveness

Key words: chaos optimization; zoom search; feedforward expert control; coke oven gas combustion

(编辑 何学锋)