

[文章编号] 1004- 0609(2002)02- 0393- 05

智能大功率电弧炉自动控制系统^①

陈峻岭¹, 罗 安¹, 李正国¹, 陈瑞诺²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 韶关冶炼厂, 韶关 512000)

[摘 要] 将模糊专家控制、神经网络控制等智能控制技术运用到智能大功率电弧炉自动控制系统, 实现了电弧炉三相电流和温度双闭环控制。该系统已成功在广东韶关冶炼厂运行, 运行结果表明该系统控制精度高, 可靠性好, 提高了电极升降的快速性和定位精度, 确保电极平稳调节, 保证了电弧炉三相电流的平衡和温度的稳定, 获得了很好的控制效果和经济效益。

[关键词] 电弧炉; 模糊专家; 神经网络

[中图分类号] TP 273⁺. 5

[文献标识码] A

在冶金行业中, 电弧炉(EAF)由一台特种变压器的三相交流电供电, 三相交流电流通过 3 个上下移动的电极直接加热炉内金属。在电弧炉冶炼过程中^[1], 三相交流电弧炉的电力负载是不稳定、不对称的, 特别是在熔化期, 由于电弧燃烧不稳定, 常常发生断弧、短路及料块移动现象, 因而造成负载严重不对称; 在电炉运行时, 电极调节器调整不当或其它人为的原因也会造成电弧炉三相电流不对称, 因此电弧炉三相电流平衡和温度的稳定很难控制。目前, 电弧炉三相电极的电控装置大都是模拟手动控制装置^[2], 冶炼过程完全依靠工人手动调节, 电极控制不稳, 劳动强度大, 并且由于工人的经验不同, 冶炼的效果分散性很大; 模拟调节器的参数设定后, 在冶炼中不易修改, 在冶炼的不同阶段, 控制效果很难一致, 系统容易振荡, 增加电极的消耗, 不能保证三相电流的平衡输入, 产品质量不稳定; 冶炼过程的信息不能及时准确地记录, 从而难以优化冶炼工艺和提高管理水平。电弧炉是冶金行业的重要设备和耗能大户, 采用先进技术进行技术改造是节能降耗、提高产量和质量的有力手段, 为此我们研制了智能大功率电弧炉自动控制系统, 在实际运用中取得了良好的效果。

1 系统控制方案

电弧炉控制参数主要有温度和电弧电流平衡。电弧炉系统本身具有非线性、大滞后、多变量、强

耦合的复合特点, 该控制系统采用电流闭环和温度闭环双闭环控制, 其控制系统结构如图 1 所示。温度外环采用基于神经元的自适应 PID 控制器^[3~5]。由于电流负载端相当于三角形连接, 因而三相电流相互耦合^[6], 若不采用解耦措施, 按简单传统的控制方法, 一次扰动要经过若干次调节才能使三相电流恢复到平衡点, 这样调节过程加长, 超调增大, 电极升降传动机构频繁动作, 缩短了传动机构的维修周期和使用寿命。而理想的调节效果是, 通过解耦措施, 在只检测三相线电流而不增加任何其它检测量的前提下, 当三相电流超过允许偏差时, 控制器一次并行地给出三相电极的调节量, 使其一次调节到位, 避开繁琐的系统建模过程且力求系统简单可靠, 又不增加观测数据, 为此电流内环采用模糊专家解耦控制器。

1.1 神经元 PID 自适应温度调节器

温度调节器用神经元 PID 自适应控制器^[7, 8], 其结构如图 2 所示, 输入为温度设定值 T_g , 输出为实际温度值 T , 神经网络的输出即为电弧炉输入 $I(k)$, 神经元学习控制所需的状态量为 X_1, X_2, X_3 。其中,

$$X_1(k) = T_g - T = En(k) \quad (1)$$

$$X_2(k) = En(k) - En(k-1) \quad (2)$$

$$X_3(k) = En(k) - 2En(k-1) + En(k-2) \quad (3)$$

取 $z(k) = X_1(k) = T_g - T = En(k)$ 为性能指标,

① [基金项目] 国家计委自动化高技术专项项目(计投资[2000]2498 号)
[作者简介] 陈峻岭(1976-), 男, 硕士研究生。

[收稿日期] 2001- 04- 05; [修订日期] 2001- 05- 30

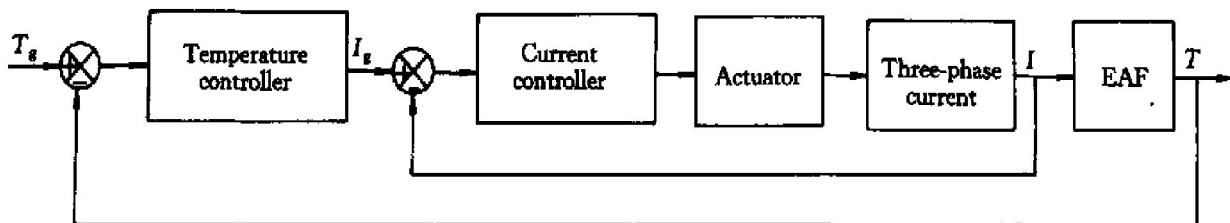


图 1 控制系统总体结构框图

Fig. 1 Structure block diagram of control system of EAF

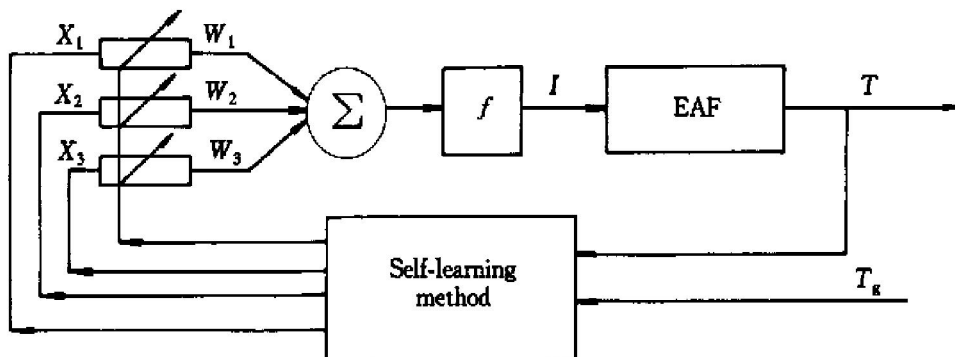


图 2 神经元 PID 自适应温度调节器结构框图

Fig. 2 Structure block diagram of self-tuning neural-network-based PID temperature controller

神经元通过关联搜索来产生控制信号, 即

$$I(k) = I(k-1) + K \sum_{i=1}^3 W_i(k) X_i(k) \quad (4)$$

式中 $W_i(k)$ 为对应 $X_i(k)$ 的加权系数, K 为神经元的比例系数, $K > 0$ 。

这里采用有监督 Hebb 学习算法在线进行自适应调整加权值 $W_i(k)$, $W_i(k)$ 与神经元的输入、输出和输出偏差的相关函数有关, 即

$$W_i(k+1) = (1-c) W_i(k) + \eta r_i(k) \quad (5)$$

$$r_i(k) = z(k) I(k) X_i(k) \quad (6)$$

式中 $r_i(k)$ 一递进信号, 随过程进行逐渐衰减; $z(k)$ 一输出误差信号, $z(k) = X_1(k) = T_g - T = En(k)$; η —学习速率, $\eta > 0$; c —常数, $0 \leq c < 1$ 。

为保证这种神经元自适应 PID 控制的收敛性和鲁棒性, 为此将上述算法规范化处理可得

$$I(k) = I(k-1) + K \sum_{i=1}^3 W'_i(k) X_i(k) \quad (7)$$

$$W'_i(k) = \frac{W_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |W_i(k)|} \quad (8)$$

$$W_1(k+1) = W_1(k) + \eta_1 z(k) I(k) X_1(k) \quad (9)$$

$$W_2(k+1) = W_2(k) + \eta_2 z(k) I(k) X_2(k) \quad (10)$$

$$W_3(k+1) = W_3(k) + \eta_3 z(k) I(k) X_3(k) \quad (11)$$

式中 η_1, η_2, η_3 为积分、比例、微分的学习速率, 且取 $c = 0$ 。

这里对积分、比例、微分分别采用了不同的学习速率 η_1, η_2, η_3 , 在线来训练神经元的权值 W_1, W_2, W_3 , 使控制器适应被控对象结构参数及环境的变化, η_1, η_2, η_3 其取值可先由现场实验和仿真来确定。该调节器利用神经元的自学习功能, 间接地完成了 PID 控制器参数的自动整定。

1.2 模糊专家解耦电流调节器

模糊专家解耦控制^[9,10]是对熟练工人操作经验的总结, 在综合工艺过程和现场环境等条件下, 利用大量的定性先验知识, 建立模糊的、推理的、逻辑的知识库和推理方式, 利用专家经验进行控制。专家模糊解耦调节器结构如图 3 所示, 输入为三相电流偏差值, 输出为三相电极升降的调节量, 用于调节三相电极, 实现三相电流平衡控制。

模糊变量的模糊子集如下:

A 相电流偏差量 E_{ia} : {NM, NS, 0, PS, PM};

B 相电流偏差量 E_{ib} : {NM, NS, 0, PS, PM};

C 相电流偏差量 E_{ic} : {NM, NS, 0, PS, PM};

一号电机调节量 U_1 : {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB};

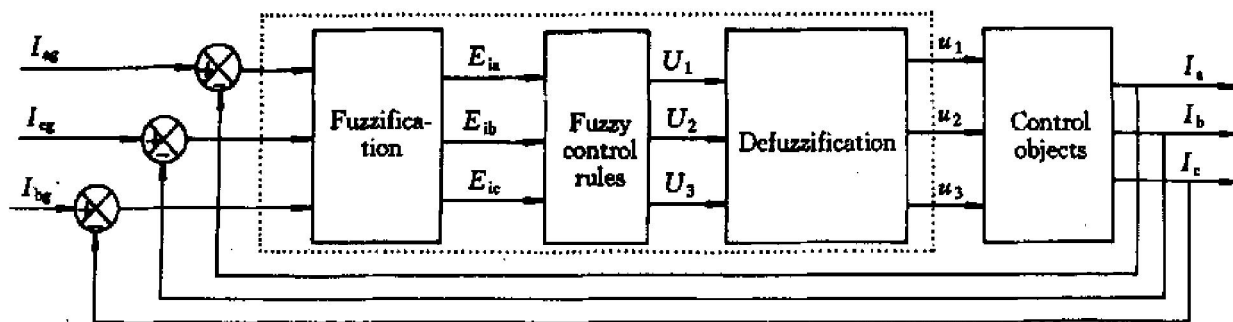


图 3 模糊专家解耦电流调节器结构框图

Fig. 3 Structure block diagram of fuzzy-expert current controller

二号电机调节量 U_2 : {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB};

三号电机调节量 U_3 : {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}。

根据专家经验总结规则如下:

1) IF E_{ia} = PM AND E_{ib} = PM AND E_{ic} = PM, THEN U_1 = PB, U_2 = PB, U_3 = PB;

2) IF E_{ia} = PM AND E_{ib} = PM AND E_{ic} = PS, THEN U_1 = PB, U_2 = PM, U_3 = PM;

3) IF E_{ia} = PM AND E_{ib} = PM AND E_{ic} = 0, THEN U_1 = PB, U_2 = PM, U_3 = PS;

4) IF E_{ia} = PM AND E_{ib} = PM AND E_{ic} = NS, THEN U_1 = PM, U_2 = PS, U_3 = 0;

5) IF E_{ia} = PM AND E_{ib} = PM AND E_{ic} = NM, THEN U_1 = PM, U_2 = NS, U_3 = NS;

.....

123) IF E_{ia} = NM AND E_{ib} = NM AND E_{ic} = 0, THEN U_1 = NB, U_2 = NM, U_3 = NS;

124) IF E_{ia} = NM AND E_{ib} = NM AND E_{ic} = NS, THEN U_1 = NB, U_2 = NM, U_3 = NM;

125) IF E_{ia} = NM AND E_{ib} = NM AND E_{ic} = NM, THEN U_1 = NB, U_2 = NB, U_3 = NB。

根据以上规则进行控制, 合理调整参数, 可以对三相电弧炉这一类强耦合非线性多变量对象实现有效控制。

2 系统实现

2.1 系统硬件实现

根据工业现场的环境, 组成了以研华工业控制计算机为核心的计算机控制系统, 其控制系统结构框图如图 4 所示。计算机通过采集电弧弧压、弧流、温度、行程开关等信号, 按照温度设定, 根据智能控制算法控制输出, 控制 3 台电动机的正传、反转,

带动 3 个电极上升、下降, 从而可改变电弧炉三相弧压、弧流的大小, 实现三相电流平衡和电弧炉的温度控制。

2.2 硬件设计及优化

为保证系统检测的精度以及运行的可靠性, 在硬件电路的设计上采用以下方法:

1) 选用带高分辨率的彩色显示器和键盘的工业级一体化工作站, 选用工业级 586 主板和 CPU。

2) 电流、电压变送器全部采用磁平衡原理设计的高线性宽频带交流变送器, 频率范围 0~150 kHz。

3) 数据采集卡采用原装台湾研华高速、高精度工业级数据采集卡, 数据采集卡参数为: 分辨率 12 bit, 采样速度 330 kHz, 2 kB FIFO。

4) 采用电压隔离输入输出卡。

5) 所有硬件电路的设计及布线均由 Protel 自动完成, 结构合理, 抗干扰性强。

6) 采用大功率无触点电机控制装置。

2.3 系统软件实现

软件系统是用 Borland 公司最新可视化软件 Delphi5 作为平台, 在 Windows 98 环境下开发完成, 其软件结构框图如图 5 所示。

3 结论

针对电弧炉的非线性、大滞后、多变量、强耦合等复合特点, 设计了智能大功率电弧炉自动控制系统, 采用电流和温度的双闭环控制, 结合智能控制算法, 保证了电弧电流的平衡和温度的稳定。该系统成功运用到广东韶关冶炼厂中, 设定电弧炉温度 1100 °C, 三相电流 4000 A, 经实际连续观察,

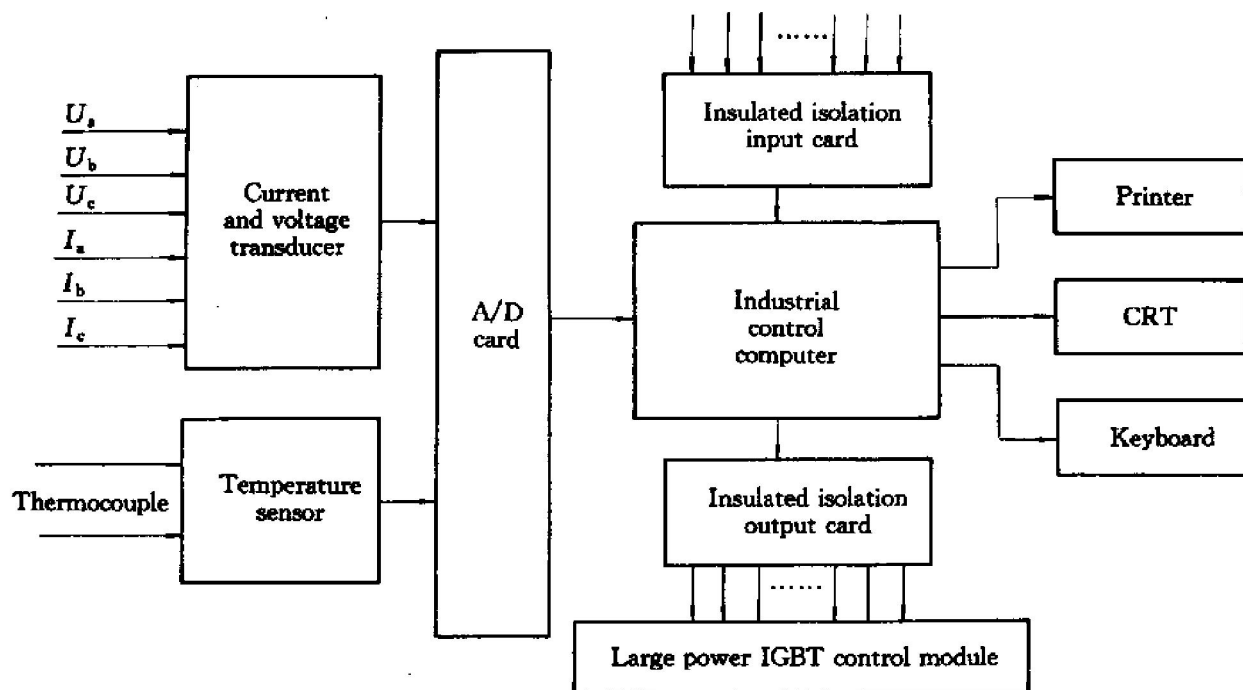


图 4 电弧炉系统硬件结构框图

Fig. 4 Hardware structure block diagram of control system of EAF

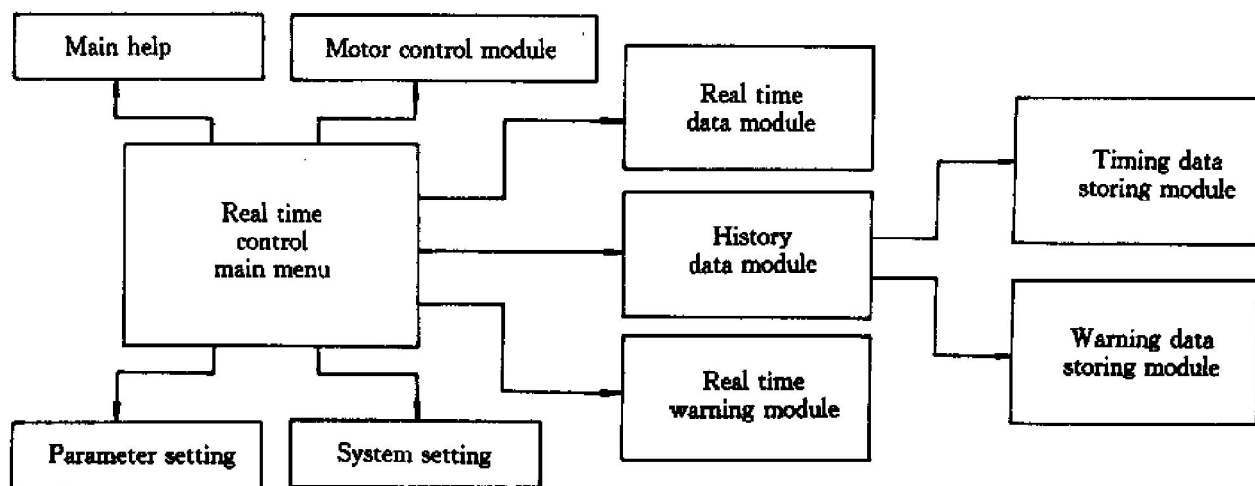


图 5 软件系统结构框图

Fig. 5 Software structure block diagram of control system of EAF

温度偏差小于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，稳定电流偏差不大于 100 A 。实际运行结果表明该系统控制精度高，可靠性好，提高了电极升降的快速性和定位精度，可确保电极平稳调节，达到三相电流的平衡和电弧炉温度的稳定，同时改善劳动强度、降低电耗、提高产品的质量，具有很好的社会效益及推广应用价值。

[REFERENCES]

- [1] 王顺晃, 舒迪前. 智能控制系统及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 205- 216.
WANG Shun-huang, SHU Di-qian. Intelligent Control System and Application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999. 205- 216.
- [2] 武维善. 大型电弧炉计算机控制系统 [J]. 西安建筑科技大学学报, 1997, 29(1): 30- 38.
WU Wei-shan. Computer control system for large-scale EAF [J]. J Xi'an Univ of Arch & Tech, 1997, 29(1): 30- 38.
- [3] Wang Q P, Tarn D L, Wang T C. Event-based intelligent control system of carbide electric arc furnace(CEAF) [A]. Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. 2000. 471- 476.
- [4] Rangaswamy T R, Shanmugam J, Mohammed K P. Fuzzy based automatic control system for an electric arc furnace [J]. ISM TECH/EXPO Technology Update Congress Processing, 2001, 413(1): 347- 357.
- [5] 王寅, 荣冈. 一种基于神经网络自组织模糊系统 [J]. 控制理论与应用, 1999, 16(3): 455- 457.
WANG Yin, RONG Gang. The system of fuzzy self-or-

- ganizing based on neural networks [J]. Control Theory & Application, 1999, 16(3): 455–457.
- [6] 武 骏, 李士琦. 交流电弧炉三相不平衡供电的研究 [J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(2): 10–14.
WU Jun, LI Shi-qi. Study on the asymmetrical three-phase power input of AC-EAF [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2000, 12(2): 10–14.
- [7] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999. 147–149.
TAO Yong-hua, YIN Yi-xin, GE Lu-sheng. New Type PID Control and Application [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1999. 147–149.
- [8] 杨拥民. 自适应调节器在电弧炉控制中的应用 [J]. 自动化学报, 1998, 24(2): 278–280.
YANG Yong-min. Application of adaptive controller to the EAF control [J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(2): 278–280.
- [9] 荣 莉, 柴天佑, 钱小龙. 加热炉过程控制技术的新策略—智能控制 [J]. 控制与决策, 2000, 15(3): 269–273.
RONG Li, CAI Tian-you, QIAN Xiao-long. New scheme of process control for reheating furnace—intelligent control [J]. Control and Decision, 2000, 15(3): 269–273.
- [10] 姚恩秀, 袁 丁, 袁 工. 模糊专家系统在铝电解控制中的应用 [J]. 基础自动化, 2000, 7(1): 9–14.
YAO En-xiu, YUAN Ding, YUAN Gong. Application of fuzzy expert control system for the aluminium electrolysis control [J]. Basic Automation, 2000, 7(1): 9–14.

Intelligent automatic control system of large-power EAF

CHEN Jun-ling¹, LUO An¹, LI Zheng-guo¹, CHEN Ru-nuo²

(1. College of Information Science & Engineering, Central South University,
Changsha 410083, China;

2. Shaoguan Smelter, Shaoguan 512000, China)

[Abstract] The technologies of neural network control and fuzzy expert control were used in the large-power EAF intelligent automatic control system, which realizes two closed loops control of three phase current and temperature of EAF, and assures three phase current equilibrium and temperature stabilization. The system was running in Shaoguan Smelter, which has gotten better control effect and economical benefit in fact.

[Key words] EAF; fuzzy expert; neural network

(编辑 袁赛前)