

## 智能自适应控制器在电石炉上的应用

李 涛

(天津理工学院计算机工程系·天津, 300191)

**摘要:** 本文根据电石炉电气特性和生产实践经验, 提出了智能自适应控制方案, 推导了系统的数学模型并给出求解方法, 该系统已在现场运行成功.

**关键词:** 自适应; 微型机; 智能控制

### 1 引言

电石炉是一个大量消耗电能的冶炼炉, 小型炉负荷电流变化快、操作紧张、工作环境恶劣. 为此, 我们研制了微机电流控制系统, 经过生产运行, 取得令人满意的效果. 另外, 系统还具有负荷电流越限声光报警, 功耗自动计量、定时打印、手动自动无干扰切换功能. 该课题通过了省级技术鉴定, 受到与会专家好评.

### 2 电石生产简介

电石是生石灰和碳素材料(焦炭、无烟煤或石油焦)在高温条件下通过还原反应而生成, 热能依靠通过插入电炉内的三相电极的强大电流而产生, 每个电极和一个卷拍机相连、卷拍机由电机拖动, 当电流通过电极时, 在电极和熔融原料之间产生一部分电弧, 电弧下边为熔融原料形成的阻抗体, 每相电流都有两部分组成, 一部分从电极穿过电弧和阻抗体到炉底(主回路), 另一部分从电极经炉料上层到另一电极(支路), 因炉料上层电阻比深层电阻大的多, 因此, 支路电流远小于主回路电流, 炉内电气特性如图 1.

其中  $U_A, U_B, U_C$  分别为三相变压器二次电压的有效值, 有

$$U_A = U_B = U_C = U.$$

$Z_A, Z_B, Z_C$  为主回路,  $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$  为支路阻抗,  $I_A, I_B, I_C$  分别为三个主回路电流的有效值.

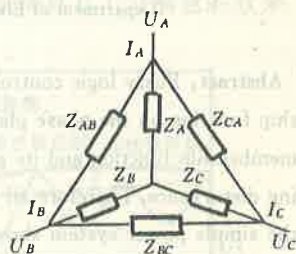


图 1 炉内电气特性

### 3 控制方案

#### 3.1 控制思路

由电石炉的电气特性和生产实践证明: 电石炉是一个具有分布参数的多输入多输出互相耦合的时变系统, 对于这样一个比较复杂的系统, 我们采用专家式控制器对问题求解, 首先用专家系统解耦, 其次, 用自适应控制策略对互相独立的每个回路进行调节.

#### 3.2 专家式控制器的结构和工作原理

##### 3.2.1 控制器结构

其中  $\vec{H} = (h_A, h_B, h_C)$  为控制规则集的输出.  $\vec{R} = (R_A, R_B, R_C)$  为三相电流的给定值, 有  $R_A =$

$R_B = R_C = R$ ,  $\vec{I}(t) = (I_A(t), I_B(t), I_C(t))$  为三相电流在线测量值,  $\vec{V}(t) = (V_A(t), V_B(t), V_C(t))$  为三相电机转速. 特征识别与信息处理的作用是提取电机的运行状态  $\vec{V}(t)$ , 提取电流的测量值  $\vec{I}(t)$  并将后者与给定值求差:  $\Delta \vec{I}(t) = \vec{R} - \vec{I}(t)$ , 另外计算差值的变化率  $\frac{d\Delta \vec{I}(t)}{dt}$ .

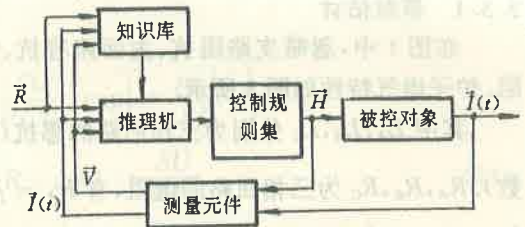


图2 专家式控制器结构

知识库包括三部分内容, 第一部分是数据信息, 它包括电机运行状态、误差函数及其

导数, 还有报警参数(极限)误差及其允许超过极限误差的最大时间. 第二部分是学习装置, 它的任务是利用在线测量值不断更新上述数据的信息. 第三部分是推理时要用到的有关知识, 它们是解耦的一些控制策略.

a) 只要发现某相电流误差超过极限值, 那么, 就对该相进行调节.

b) 在当前没有调节任何一相电流的情况下, 若发现只有一相电流有误差, 则调节该相.

c) 在当前没有调节任何一相电流的情况下, 若发现多相电流有误差, 则选择电流变化较快者优先调节.

d) 在调节一相的同时, 若发现别的相电流又有误差, 而且该误差逐渐增加, 则同时调两相.

我们用产生式规则描述上述知识.

规则  $R_1$  IF  $|\Delta I_i(t)| > M$ , THEN  $X_i = AC_i$ ; (1)

规则  $R_2$  IF  $\vec{V}(t) = 0$  AND  $(\Delta I_i(t) \neq 0, \Delta I_j(t) = \Delta I_k(t) = 0, i \neq j \neq k)$  THEN  $X_i = AC_i$ ; (2)

规则  $R_3$  IF  $\vec{V}(T) = 0$  AND  $(\Delta \vec{I}(t) \neq 0, \frac{d\Delta I_i(t)}{dt} = \max_{j=A,B,C} \left\{ \frac{d\Delta I_j(t)}{dt} \right\})$  THEN  $X_i = AC_i$ ; (3)

规则  $R_4$  IF  $V_i(t) \neq 0$  AND  $(\Delta I_j(t) \neq 0, \frac{d\Delta I_j(t)}{dt} > 0, i \neq j)$  THEN  $(X_i = AC_i$  AND  $X_j = AC_j)$ . (4)

在上述规则中,  $i, j, k$  可任表  $A, B, C$ .  $M_A, M_B, M_C$  分别表示三相电流的极限误差.

$AC_A, AC_B, AC_C$  分别表示三相电流的自适应控制律.

推理机采用前向推理方法, 逐次判别上述规则的条件, 满足则执行, 否则继续搜索.

控制规则集包括与  $A, B, C$  三相电流相对应的三个回路的自适应控制律 ( $AC_A, AC_B, AC_C$ ).

### 3.2.2 控制器工作原理

三相电机和三相负荷电流在线测量值, 经特征识别与信息处理后, 送知识库与推理机, 推理机在知识库的规则集中进行搜索, 将符合条件的规则挑选出来, 以指令形式送往控制规则集, 后者按照推理机输出的指令要求, 对指定相电流采用自适应控制律进行调节.

### 3.3 自适应控制律

#### 3.3.1 参数估计

在图1中,忽略支路阻抗、主回路容抗、短网和电极电阻.炉子电气特性如图3所示.

其中  $L_A, L_B, L_C$  分别为三相回路的感抗(等效为集中参数),  $R_A, R_B, R_C$  为三相回路的电阻,有  $R_A = \rho_A \frac{h_A}{S}, R_B = \rho_B \frac{h_B}{S}, R_C = \rho_C \frac{h_C}{S}$ , 其中  $\rho_A, \rho_B, \rho_C$  为电阻系数(等效为集中参数),  $S$  为炉料电阻体的横截面积(近似等于电极横截面积),  $h_A, h_B, h_C$  分别为三个电阻体的长度(电极端头到炉底之间的距离).考虑  $A$  相回路,有方程

$$L_A \frac{dI_A(t)}{dt} + \frac{h_A}{S} \rho_A I_A(t) = U. \quad (5)$$

对参数  $L_A, \rho_A$  进行估计.因

$$h_A(t) = h_A^\circ \pm Kvt. \quad (6)$$

其中  $h_A^\circ$  为平衡状态时电极入炉深度,  $v$  为电机转速,  $K$  为减速器变比.电极上升时式中“ $\pm$ ”号取正,下降时取负.将(6)代入(5)得

$$L_A \frac{dI_A(t)}{dt} + \frac{h_A^\circ \pm Kvt}{S} \rho_A I_A(t) = V. \quad (7)$$

在调节电极的过程中,令采样周期为  $T$ , 可得  $I_A(t)$  的一系列观测值  $\{I_A(i)\} (i = 1, 2, \dots, n+1)$ , 将方程改写成差分形式:

$$\frac{I_A(i+1) - I_A(i)}{T} L_A + \frac{(h_A^\circ \pm Kvt_i) I_A(i)}{S} \rho_A = U. \quad (8)$$

令

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{L}_A \\ \hat{\rho}_A \end{bmatrix}, \quad x = \frac{1}{T_S} \begin{bmatrix} [I_A(2) - I_A(1)] & (h_A^\circ \pm Kvt_1) I_A(1) \\ [I_A(3) - I_A(2)] & (h_A^\circ \pm Kvt_2) I_A(2) \\ \vdots & \vdots \\ [I_A(n+1) - I_A(n)] & (h_A^\circ \pm Kvt_n) I_A(n) \end{bmatrix}, \quad Y = U \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$t_i = iT, \quad (i = 1, 2, \dots, n+1).$$

当  $I_A > R$  时,矩阵  $X$  中的“ $\pm$ ”号取+,否则取-.由最小二乘法得

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (9)$$

#### 3.3.2 控制器设计

控制结构框图如图4所示.

若某一时刻( $t=0$ ),由于系统参数发生变化( $L_A = L_A', \rho_A = \rho_A'$ )导致输出电流发生变化( $I_A = I_A' \neq R$ ),计算最佳控制规律  $h_A^*$  (电极入炉深度),当  $h_A^*$  送入被控对象时,后者的稳态响应取希望值  $R$ ,考虑过渡过程,有

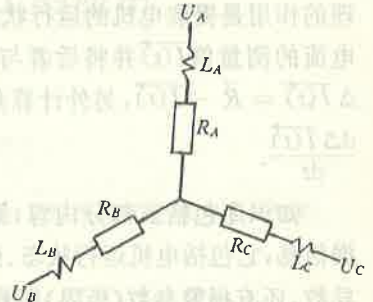


图3 简化的炉内电气特性

$$\begin{cases} \hat{L}_A' \frac{dI_A(t)}{dt} + \frac{h_A^*}{S} \hat{\rho}_A' I_A(t) = U, \\ I_A(0) = I_A' \end{cases} \quad (10)$$

显然, 
$$I_A(t) = \frac{SU}{\hat{\rho}_A' h_A^*} + \left( I_A' - \frac{SU}{\hat{\rho}_A' h_A^*} \right) \exp \left[ -\frac{\rho_A' h_A^*}{S L_A'} \right],$$

于是 
$$\lim_{t \rightarrow \infty} I_A(t) = \frac{SU}{\hat{\rho}_A' h_A^*} = R \quad \therefore h_A^* = \frac{SU}{R \hat{\rho}_A'}. \quad (11)$$

### 3.3.3 计算步骤

a) 当电流出现偏差时,启动电机正转或反转(视电流偏差正负而定),在此过程中对方程参数进行估计. b) 将估计值代入方程,对方程求解,计算最佳电极入炉深度  $h_A^*$ . c) 调节电极入炉深度使其等于  $h_A^*$ ,于是输出电流的偏差得以消除.

## 4 微型机控制系统

结构框图如图 5.

该系统由测量元件,转换部件,微机、I/O 接口、执行部件等组成,整个系统工作过程简述如下:

系统上电后,主机对各部件的状态进行检查,当确认它们均完好无误时,系统进入巡检控制流程,首先对有关部件进行初始化,其次定时轮流采样,三相电流经测量元件转换成电压信号,在微机控制下依次送入转换部件,后者把它们变成数字量再送入微机,当微机接到这些数字信息后,按照控制方案的规定运行一套行之有效的控制程序,将所得结果送到 I/O 接口部件,后者通过执行机构控制电极上升或下降,使三相电流保持均衡、恒定、保证炉况在最佳状态下运行,当电流超越允许范围时,在进行自动调节的同时,发出声光报警信号,提醒操作人员引起注意,必要时进行人工干预,另外,系统还为操作人员提供了了解生产运行情况,参与控制工作的手段,使操作人员对系统管理十分方便.

## 5 运行结果

负荷电流由电源变压器经电流互感器变换后通过电流表指示,生产提出的控制范围为 170A ~ 190A,在我们选定采样周期为 15ms,参数估计时间为



图 4 自适应控制器结构

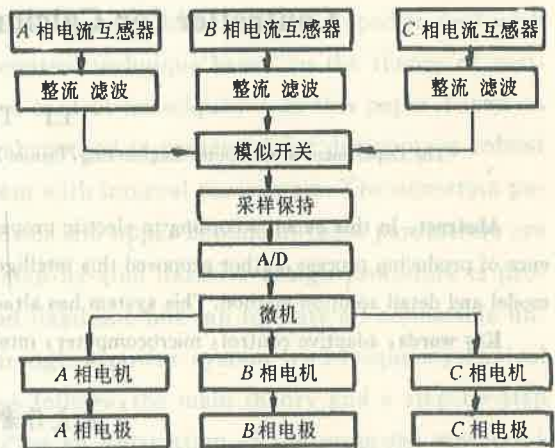


图 5 微型机控制系统



图 6 电流运行曲线

0.3s,更新控制周期为1s,电流给定值  $R = 175A$ ,阈值为  $175A \pm 5A$  的情况下,经测试组随机抽测六次,每次考察10分钟,结果如下:

次 数	负 荷 电 流(A)	次 数	负 荷 电 流(A)
1	172~175	4	170~173
2	170~172	5	170~174
3	180~183	6	175~177

投入生产运行后,不仅把操作人员从紧张的劳动环境中解放出来,而且控制效果和原来人工操作相比,有了明显改善,电流偏差消除快,起伏小,三相电流差异小,在原料品质相同的条件下,综合经济指标约提高5%左右。

### 参 考 文 献

- [1] 南京大学数学系计算数学专业.常微分方程数值解法.北京:科学出版社,1979
- [2] 蔡自兴.智能控制.北京:电子工业出版社,1990
- [3] 李清泉.自适应控制系统理论设计与应用.北京:科学出版社,1990

## Application of Intelligent Adaptive Controller for Calcium Carbide Furnace

LI Tao

(The Department of Computer Engineering, Tianjin Insititue of Technology • Tianjin, 300191, PRC)

**Abstract:** In this paper, according to electric property of calcium carbide furnace and practical experience of producing process, author proposed this intelligent adaptive control plan, and set up its mathematic model and detail solution method. This system has alraedy been succeeded in the practice operation.

**Key words:** adaptive control; microcomputer; intelligent control

### 本文作者简介

李 涛 1937年生,天津理工学院副教授,主要研究方向,计算机控制。

