

微机快速自寻优模糊控制原理及其应用^①

田成方^② 李晋宏^③

(北方工业大学)

王学寅^④

(延边师范学院)

摘 要

该文给出了已在锤熔炉和还原炉上成功应用的微机快速自寻优模糊(Fuzzy)控制的原理与工作特点,包括结构、工艺特点、控制任务与目的、算法、参数确定原则以及控制方案的选定等。

关键词: 模糊, 模糊控制, PID, FSFC

模糊控制的共同特点是,控制对象往往不能用确切的数学模型来描述,其结构参数一般不很清楚或难以求得,且控制规则只有以语言的形式做定性的表达。本文推出的快速自寻优模糊控制理论和应用技术,可以实现在线自动调节参数。它的优越性在于:可使调节器的工作参数在线自动调整和优化,调节策略能在线自选择以及实现对多种干扰的快速综合校正,使工业生产过程控制在最佳运行状态。本项成果在北京高熔炉金属材料厂等有色金属企业的锤熔炉和还原炉上应用,取得了良好的经济和社会效益^[1,2,3]。

1 定值控制中的快速自寻优模糊控制理论及应用

定值调节的主要品质指标为:响应速度、超调量、稳定误差、衰减比和调节时间等。而控制器的最佳化不仅取决于调节规律的选择,更重要的是工作参数的整定。例如 PID 调节器放大倍数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的整定,对调节器的品质指标起重要作用。以 K_p 值的整定为例,在常规的比例调节器中,

K_p 值通常是固定不变的,或是阶段性的,是造成稳态误差的主要因素。尤其在控温过程中,加大 K_p 值有助于减少稳态误差和提高响应速度,但 K_p 值过大,则系统的振荡加剧,甚至导致恶性发散振荡。人们早已意识到, K_p 值在调节过程中不应固定不变。在起调时, K_p 值可选大些,以克服各种调节环节的滞后,提高响应速度;在过程中期, K_p 值应适合情况逐渐减小,以防止超调量过大出现急剧振荡;在过程后期又要相应地增加 K_p 值,以克服稳态误差。在常规控制系统中,实现 K_p 值的在线自动整定是有一定难度的。而利用快速自寻优模糊控制技术,则很容易达到 K_p 值的在线动态自动整定^[4,5]。

同理,也能利用快速自寻优模糊控制技术实现 PI、PD 以及 PID 调节器工作参数的在线动态自动整定,达到理想的调节品质^[2,6]。

图 1 是快速自寻优模糊控制系统在定值控制中的框图,其中 $\Delta K_p(I_1, J_1)$, $\Delta K_i(I_2, J_2)$, $\Delta K_d(I_3, J_3)$ 为自寻优模糊控制机构根据输出的偏差和偏差变化而确定的比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 的修正量;

B_k, B_i, B_d 为比例因子;

①于 1990 年 10 月 27 日收到

②教授;③助教;④付教授

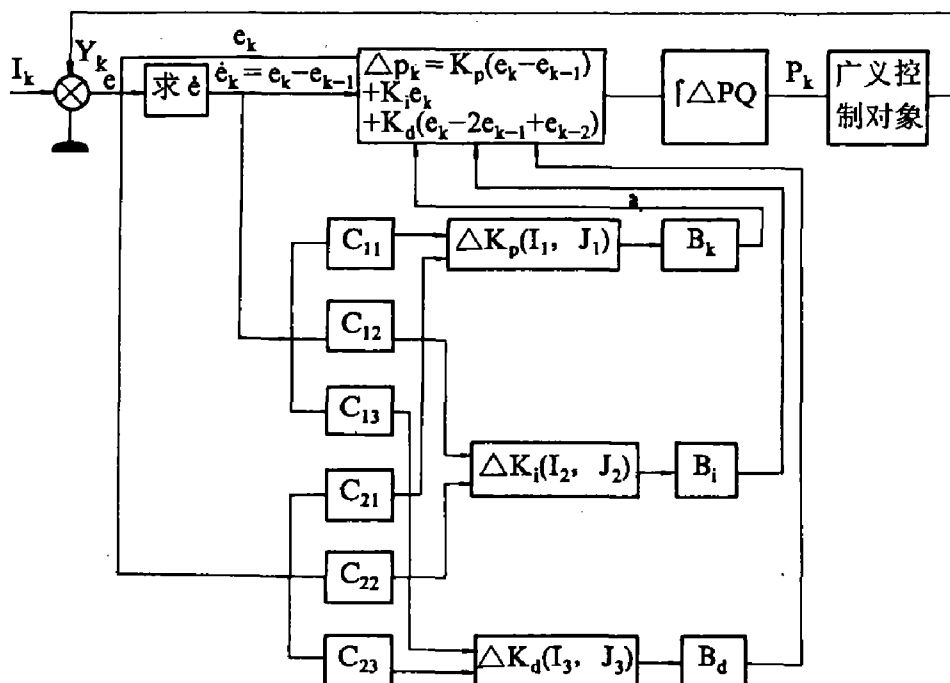


图1 快速自寻优模糊控制系统框图

$C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}$ 为量化因子。

$$K_p(K) = K_p(K-1) + B_k \Delta K_p(I_1, J_1);$$

$$K_i(K) = K_i(K-1) + B_i \Delta K_i(I_2, J_2);$$

$$K_d(K) = K_d(K-1) + B_d \Delta K_d(I_3, J_3)$$

把操作者在控制过程中的经验总结成相应的控制规则，用多组条件语句来描述。为了对PID调节器的参数进行在线自动修正，将误差 e 和误差变化率 $\dot{e}$ 作为条件，组成快速自寻优模糊控制器，对 K_p 、 K_i 和 K_d 的自动修正。按 e 和 $\dot{e}$ 分别对于 K_p 、 K_i 和 K_d 的影响程度概括出三张控制规则表，求出模糊关系 R 。根据模糊关系 R ，对输入量 e 和 $\dot{e}$ 的各个档次的每一个值进行计算，分别求出对应的输出量，制成 $\Delta K_p(I_1, J_1)$ ， $\Delta K_i(I_2, J_2)$ ， $\Delta K_d(I_3, J_3)$ 的模糊控制表(从略)。控制过程为：由实测误差 e 及其变化率 $\dot{e}$ 通过量化因子 C_{11}, C_{12}, C_{13} 和 C_{21}, C_{22}, C_{23} 变换成模糊集论域里的元素，由此对应控制表中的增量或减量 $\Delta K_p(I_1, J_1)$ ， $\Delta K_i(I_2, J_2)$ ， $\Delta K_d(I_3, J_3)$ ，并通过比例因子 B_1, B_2, B_3 转换得到实际的修正量 ΔK_p ， ΔK_i ， ΔK_d ，从而实现参数 K_p ， K_i ， K_d 的自动快速修正^[6,7]。

图2是一种简便易行的模糊逻辑比例快速自寻优控制器程序框图。其模糊运算的算法如

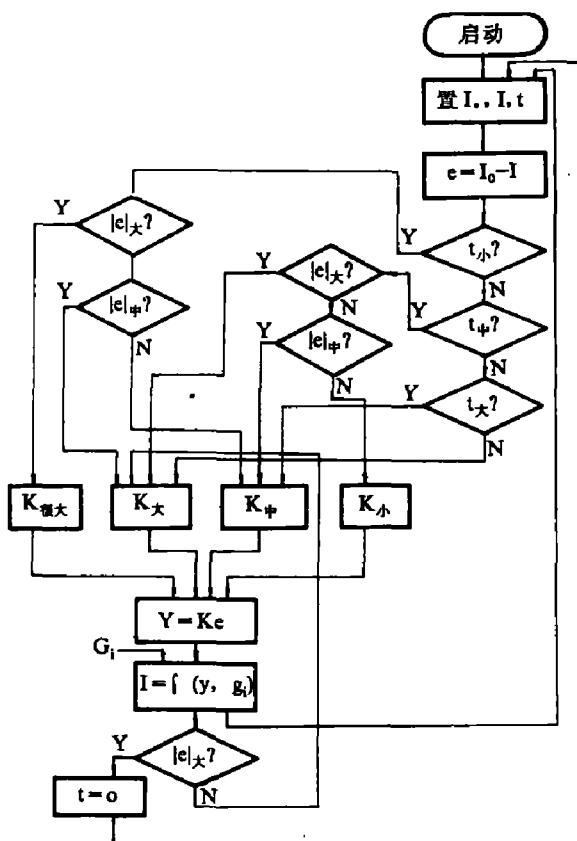


图2 比例调节快速自寻优模糊控制程序框图

下^[6,8]

```

10   $t \leftarrow 0$       “赋初值”.
20   $t \leftarrow t+1$     “时间采样”.
30  if  $t$  小, then {if  $|e|$  大, then  $K$  很大, else [if  $|e|$  中, then  $K$  大, else  $K$  中]}, else {if  $t$  中, then [if  $|e|$  大, then  $K$  大, else (if  $|e|$  中, then  $K$  中, else  $K$  小), else [if  $t$  大, then  $K$  中, else  $K$  大]}.
40  if  $G_i$ , then go to 10, else  $K$  大 “ $i=1, 2, \dots, n$ ”
50  if  $I_o$ , then go to 10, else  $K$  大.

```

其中, 10 对应于每次调节过程的开始, 20 为时间采样, 30 为多重条件语句, 40 是套有条件语句的循环语句; 对于多种干扰源中每个干扰作用, 便执行一次 40; 50 是条件语句, 每变动一次给定值, 便执行一次 50。在运行中, 时间参数 t 模糊化为四档(小, 中, 大, 很大); 偏差 $|e|$ 模糊化为三档(大, 中, 小); 放大倍数 K 模糊化为四档(很大, 大, 中, 小)。

这种方案, 模糊语言虽比较粗略, 但实现的 K 值在线自动整定, 提高了调节系统的调节品质。在稳态误差、响应速度、超调量和调节时间等调节品质方面大大超过常规比例调节器的相应品质。

在前馈调节系统中, 自寻优模糊控制器还可以简化前馈校正系统的结构。在常规前馈调节系统中, 对每种干扰都要配置一个校正装置。为了简化调节系统, 只能选择一些影响大的干扰配以相应的前馈校正器。如果用自寻优前馈模糊控制器, 就可同时校正多种干扰的影响。如上述第 40 条多重条件语句构成的模糊前馈校正, 就可达到此目的。为此要增加下列模糊逻辑判断语句:

```

if  $G_1 = FL_{11}$ , then {if  $G_2 = FL_{21}$ , then [if  $\dots$ , then (if  $G_n = FL_{nb}$ , then  $Y = FL_b$ , else  $Y = FL_{b+1}$ ) ], else [if  $G_2 = FT_{22}$ , then  $\dots$  ] } , else {if  $G_1 = FL_{12}$ , then [if  $G_2 = FL_{21}$ , then  $\dots$  ], else [  $\dots$  ]}

```

其中: $G_1, G_2, \dots, G_n$ 为各干扰因素, 应

按其影响大小在该语句中依次由左向右排列。

$FL_{11}, FL_{12}, \dots$ 为 G_1 的模糊语言值; $\dots, FL_{n1}, FL_{n2}, FL_{n(b+1)}$ 为 G_n 的语言值。

$FL_1, FL_2, \dots, FL_{b+1}$ 都是本语句结论 Y 的模糊语言值^[4,6]。

2 模型参考快速自寻优模糊控制理论及应用

在工业控制中, 有一些对象(例如有色金属冶炼与加工行业中的工业炉窑系统的自动控制), 难以建立精确的数学模型, 或者由于过程本身的非线性、时变及大滞后特性, 使现有的控制理论难以凑效。但是按生产工艺要求和手工控制经验所形成的工艺模型, 利用模型参考快速自寻优模糊控制理论, 可以获得良好的控制效果。

图 3 是模型参考快速自寻优模糊控制系统框图。其中, A 是按生产工艺要求和手工控制经验组成的工艺模型; B 为快速自寻优模糊控制机构, 其输入变量为误差 e 和误差变化率 $\dot{e}$, 其输出变量为 PI 调节器的比例系数 K_1 和积分系数 K_2 的调整量 ΔK_1 和 ΔK_2 , 其结构工作机理同图 1 所述。

参考模型为已知, 基本分为两种阶段: 上升阶段和保持阶段, 其给定值由时间序列发生器 A 产生。由于本系统是一个模型跟随过程, 误差要求在 0.1% 左右, 因此要求精选量化因子 $C_{11}, C_{21}, C_{12}, C_{22}$ 和比例因子 B_1 和 B_2 , 求出模糊控制表^[8,9]。

系数 K_1 和 K_2 在控制过程中所起的主导作用是随着过程而变化的, 尤其是积分系数 K_2 , 如果在过程前段所引起的 $\int K_2 dt$ 积得太多, 会影响比例环节的控制作用, 而且引起在后段的变化大小, 也会使稳态静差无法得到控制。为解决这个问题, 用一个解耦函数来实现 K_1 和 K_2 的解耦, 目的是在前段加强比例系数 K_1 的作用, 减少 K_2 的影响; 在后段加强 K_2 的作用, 以减少 K_1 的影响。这个解耦函数 $f(t)$ 必然是一个递增函数, 并且必须跟随着

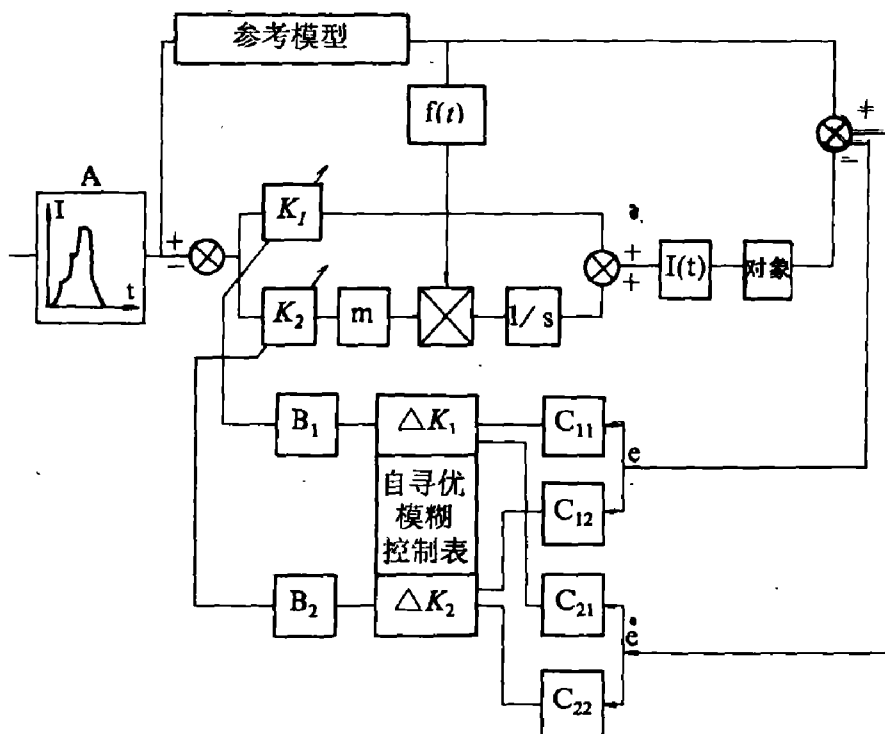


图3 模型参考快速自寻优模糊控制系统图

程的变化。参考模型输出值为已知递增函数，是对过程变化的反映，取解耦函数 $f(t) = mIs$ ，并参加积分运算。其中 m 为系数， Is 为参考模型输出值。于是调节器算式为：

$$I(nT) = I(nT-T) + K_1(nT)[e(nT) - e(nT-T)] + mI_s(nT) \cdot K_2(nT) \cdot e(nT)$$

$$K_1(nT) = K_1(nT-T) + B_1 \Delta K_1(I_1, J_1)$$

$$K_2(nT) = K_2(nT-T) + B_2 \Delta K_2(I_2, J_2)$$

首先，可以粗略地选择各参数 K_1 、 K_2 、 B_1 、 B_2 、 C_{11} 、 C_{12} 、 C_{21} 、 C_{22} 、 T (采样周期)、 m (解耦系数) 等。运行初期可能引起较大误差和上下波动，随着快速自寻优模糊控制系统对 K_1 和 K_2 的修正，其误差逐渐减小， K_1 和 K_2 趋于优选值，使控制精度进一步提高。该系统适应对象的非线性和参数扰动，并有较强的抗随机干扰和抗阶跃干扰的能力，即具有良好的“鲁棒性”^[10,11]。

3 带修正因子的快速自寻优模糊控制原理及其应用^[6,8]

自从模糊控制器诞生之日起，人们就着眼

于模糊控制规则调整问题的研究。在一般情况下，如最佳控制系统参数寻优，自适应控制系统的参数调节，以及人工操作模糊控制模型参数辨识等场合，均需对控制规则进行调整。为此推出下列修正因子的控制规则：

二维修正因子规则：

$$I(t) = [\alpha e(t) + (1-\alpha)\dot{e}(t)] \quad (1)$$

三维修正因子规则：

$$I(t) = [\alpha\beta e(t) + (1-\alpha)\beta\dot{e}(t) + (1-\beta)\ddot{e}(t)] \quad (2)$$

(1)、(2)式中， α 、 β 是介于 0 和 1 之间的实数。通过调整系数 α 、 β ，可以对模糊控制规则进行修正。这里应当着重指出的是，以 α 、 β 作为调整参数不仅方便易行，而且具有深刻的物理意义，因为 α 、 β 值的取大取小，直接表示为偏差 e 和偏差一、二阶导数 $\dot{e}$ 和 $\ddot{e}$ 的加权程度，这恰好反映了操作者进行控制活动的思维特点。例如，在被控制对象阶次高时，对偏差一、二阶导数 $\dot{e}$ 和 $\ddot{e}$ 的加权值就应大于偏差 e 的加权值，因此 α 、 β 要取小一些的值；反之，在被控制对象的阶次较低时，对偏差一、二阶导数 $\dot{e}$ 和 $\ddot{e}$ 的加权值就应该小于对偏差 e 的加权值，因此 α 、 β 要取大一些的

值^[6,12]。

一般带修正因子的自寻优模糊控制系统的结构如图4所示。其中, 偏差 e 和偏差一、二阶导数 $\dot{e}$ 和 $\ddot{e}$ 为自寻优模糊控制器的输入信息。为了把控制规则中偏差 e 所对应的语言变量 E 表示成模糊集 E , 通常把它分成若干个档级; 同理偏差一、二阶导数 $\dot{e}$ 、 $\ddot{e}$ 所对应的语言量变量 $\dot{E}$ 、 $\ddot{E}$, 也必须分成若干个档级, 这一步称之为离散化和模糊化。然后经带修正因子的自寻优模糊控制算法修正运算得出控制语言变量模糊集 I , 再经过模糊决策得到确切

控制量 $I(t)$ 去控制被控对象。采用三维修正因子控制, 可以一表多用, 且信息总量充分利用, 体现快、优特点, 克服了常规模糊控制器“鲁棒性”差的缺点。

由于 α 、 β 是相互制约的和相互影响的因子参数, 如果按着模糊控制规则, 用模糊关系 R 的模糊合成运算方法, 制成由 e 、 $\dot{e}$ 和 $\ddot{e}$ 变化而确定 α 、 β 值的模糊控制表, 就可实现在线调节 α 、 β 值, 从而达到对模糊工业对象(即黑箱或灰箱系统)的最佳控制^[6,9,13]。

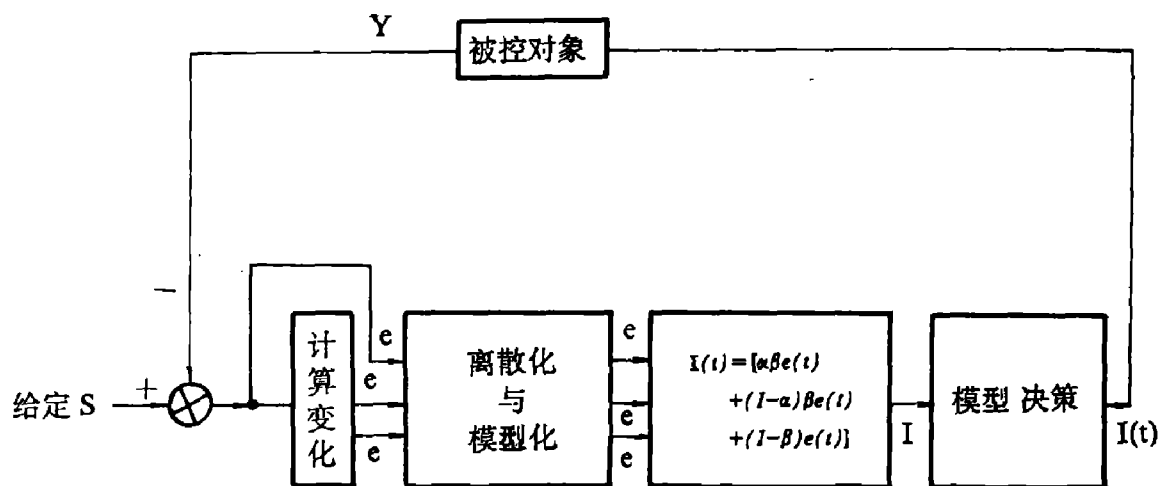


图4 带修正因子的自寻优模糊控制系统框图

参 考 文 献

- 1 Zadeh L A. 模糊集合、语言变量及模糊逻辑。北京: 科学出版社, 1982
- 2 王学慧, 田成方. 微机模糊控制理论及其应用。北京: 电子工业出版社, 1987
- 3 王学慧, 田成方. 微机工业控制技术。北京: 原子能出版社, 1987
- 4 涂象初, 汪培庄. 模糊数学, 1985, (3): 81-85
- 5 涂象初. 北京工业大学学报, 1986, 12 (2): 7-19
- 6 田成方. 见: 计算机和工业自动化中的应用中外研讨会论文集, 1990
- 7 冯德益. 模糊数学方法与应用。北京: 地震出版社, 1983
- 8 李晋宏. 见: 第三届全国青年计算机工作者会议交流论文, 1991
- 9 (法) 杜布瓦 D, 普哈德 H. 模糊集与模糊系统理论应用。南京: 江苏科技出版社, 1987
- 10 Arnold K. Fuzzy Mathematical Models In Engineering and Management Science. Amsterdam: Elsevier Science, Publishers B. V., 1988
- 11 Abraham K. Fuzzy Mathematical Techniques With Applications. Reading, Mass, Addison-Wesley Publishing company, 1986
- 12 楼世博. 模糊数学。北京: 科学出版社, 1983
- 13 汪培庄. 模糊集合论及其应用。上海: 上海科技出版社, 1983