

文章编号: 1671-7848(2007)04-0383-04

模糊控制与状态反馈控制的内在联系

韩忠旭^{1,2}, 吕秀红³

(1. 中国电力科学研究院, 电厂自动化研究所, 北京 100085;
2. 北京国电智深控制技术有限公司, 北京 100085; 3. 北京和利时控制技术有限公司, 北京 100085)



摘 要: 模糊控制通常取输出与设定值的误差和误差的变化速率作为控制器的输入量, 相当于经典控制中的输出反馈控制。从纯数学的角度出发, 系统的某变量及其各阶导数又可以看成是系统的各个状态。以可分段线性化的、参数慢时变的系统为研究对象, 根据模糊控制的本质对其进行解析研究, 并通过对控制量的分析, 与状态反馈控制进行类比, 从中找出模糊控制和状态反馈控制的本质联系, 这些控制量都是状态的函数。

关键词: 模糊控制; 状态反馈; 状态观测器; 增量式函数观测器; 内在联系
中图分类号: TP 273 文献标识码: A

Essential Relation Between Fuzzy Controller and State Feedback Control

HAN Zhong-xu^{1,2}, LÜ Xiu-hong³

(1. Power Plant Automation Department, China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;
2. Beijing Guodian Zhishen Control Technology Ltd, Beijing 100085, China; 3. Beijing Holisys Ltd, Beijing 100085, China)

Abstract: The fuzzy-control problem is discussed, which usually takes the error and the error derivative between the output and the set point of the system as the inputs of the controller. The output feedback control of the classical control possesses the same sense. From the mathematical point of view, the variable and its derivatives of the system can be seen as the each state of the system. The system which is linear in each sect and whose parameter changes slowly is studied. The control process is on resolved based fuzzy-control. The essential relationship between the fuzzy-control and the state-feedback control is presented, which is the control that variable is the function of the state. And analogy between the state feedback and fuzzy-control is drawn by analyzing the control variable.

Key words: fuzzy-control; state feedback; state observer; IFO- $K\Delta x$; essential relation

1 引言

近 20 年来, 模糊控制已被应用于工业控制领域。在热工自动化领域, 围绕被控对象通常是具有非线性、参数慢时变、以及迟滞与大惯性并存的多变量系统这一控制难点, 模糊控制的研究工作也随之展开^[1~11], 在这些研究工作中, 有的已在控制工程中取得了应用^[14,11]。

普通模糊控制的基本原理, 是取输出与设定值的误差和误差的变化速率作为模糊控制器的输入量, 相当于经典控制中的输出反馈控制^[12]。但由普通的模糊控制器来控制纯滞后、大惯性系统时, 不但系统的稳定性能差, 而且当稳态误差或跟随误差较小时易出现振荡现象, 这主要是由纯滞后时间常数引起的。

为解决稳态精度差的问题, 多年来自动化领域的许多学者进行了不懈的探索, 文献^[13]概要地回顾了文献^[14~18]为提高模糊控制的稳态性能所进

行的研究工作。此外, 文献^[19,20]对普通模糊控制基本原理的研究方面, 分别证明了输入为 e 和 de , 输出为 u , 采用查表法的模糊控制器无法消除静差, 及采用线性控制规则和非线性解模糊算法, 输出为 du 的二维模糊控制器结构是全局性的多值继电器与局部的非线性 PI 控制器的和, 当输入 e 和 de 均很小时, 典型模糊控制器近似于线性 PI 控制器。

基于增量式函数观测器(IFO- $K\Delta x$)^[21,22]的状态反馈 + PID 调节的控制系统, 近年来在热控领域进行了许多有益的工程实践^[23~26], 观测事实表明, 模糊控制与状态反馈确有内在的联系, 模糊控制器与基于 IFO- $K\Delta x$ 的状态反馈 + PID 调节的设计概念有兼容的地方, 相关的内在机理研究和相应的哲学思考, 值得研究工作者关注。

2 观测事实

一台 300 MW 单元机组锅炉再热蒸汽温度控制

系统的趋势图，如图 1 所示。

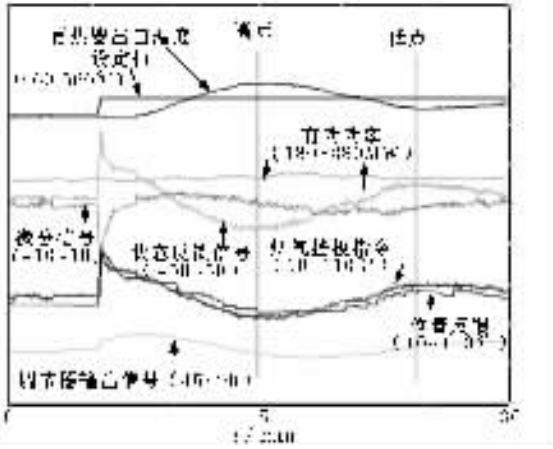


图 1 基于 IFO-KΔx 的状态反馈 + PID 调节的趋势图

Fig. 1 The trend of state feedback based on IFO-KΔx plus PID

再热蒸汽温度的调节手段是通过改变烟气挡板开度，使得烟气再循环流量发生变化，控制系统采用了基于 IFO-KΔx 的状态反馈 + PID 调节的控制方案。从图 1 中可见，状态反馈控制信号与再热蒸汽温度的变化率有关，而 PID 调节器的输出信号则与再热蒸汽温度及其设定值的偏差有关，两者的综合作用形成开度指令。

3 数学分析

1) 被控对象为二阶单入单出系统的情形 假设所论被控对象是可以分段线性化的，则二阶单入单出系统的状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} u, y = [c_1 \quad c_2] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

输出与设定值 (r 为设定值) 的误差 e 、误差的变化速率 \dot{e} 可表示为

$$e = y - r = c_1 x_1 + c_2 x_2 - r \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{e} = \dot{y} = c_1 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 = c_1 (a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + b_1 u) + \\ c_2 (a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + b_2 u) = (c_1 a_{11} + c_2 a_{21}) x_1 + \\ (c_1 a_{12} + c_2 a_{22}) x_2 + (c_1 b_1 + c_2 b_2) u \end{aligned} \quad (3)$$

若采用模糊控制，通常有下述过程^[12]：

①将输入变量模糊化 即输入变量乘以相应的量化因子 K_e, K_c ：

$$E = K_e e, EC = K_c \dot{e} \quad (4)$$

由于模糊集论域中的每个模糊语言都是整数，则需将式(2)，式(3)所得结果取整，进而完成模糊化过程。

②模糊推理 即由模糊化后的输入量 E, EC 和模糊控制规则 R_e, R_c 根据推理的合成规则进行模糊决策，得到模糊控制量，若将误差 E ，误差的

变化速率 EC 及控制量 u 的论域取为相同，则模糊决策可用解析表达式^[12]： $u = - \langle (E + EC) \rangle$ 表示 (函数 $\langle \rangle$ 为取整函数)，则可将过程简化为

$$u \approx - \frac{1}{2} (E + EC) \quad (5)$$

③非模糊化 将模糊控制量 u 转换为精确量 u ，即将 u 乘以比例因子 K_u ：

$$u = K_u \cdot \underline{u} \quad (6)$$

由式(4)~式(6)可得：

$$u \approx - \left(\frac{1}{2} K_u K_e e + \frac{1}{2} K_u K_c \dot{e} \right) = k'_1 e + k'_2 \dot{e} \quad (7)$$

将式(2)，式(3)代入式(7)式得：

$$\begin{aligned} u = f(e, \dot{e}) = k'_1 (c_1 x_1 + c_2 x_2 - r) + k'_2 [(c_1 a_{11} + \\ c_2 a_{21}) x_1 + (c_1 a_{12} + c_2 a_{22}) x_2 + (c_1 b_1 + \\ c_2 b_2) u] = \frac{k'_1 c_1 + k'_2 (c_1 a_{11} + c_2 a_{21})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)} x_1 + \\ \frac{k'_1 c_2 + k'_2 (c_1 a_{12} + c_2 a_{22})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)} x_2 - \frac{k'_1 r}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)} = \\ \frac{\sum_{i=1}^2 [k'_1 c_i + k'_2 \sum_{j=1}^2 (c_j a_{ji})] x_i}{1 - k'_2 \sum_{i=1}^2 c_i b_i} - \frac{k'_1 r}{1 - k'_2 \sum_{i=1}^2 c_i b_i} \end{aligned} \quad (8)$$

若采用状态反馈控制，则其控制量为

$$u = kx - vr = k_1 x_1 + k_2 x_2 - vr \quad (9)$$

式中， k_1, k_2 为反馈系数； v 为设定值系数。

2) 被控对象为三阶单入单出系统的情形

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} u$$

$$y = [c_1 \quad c_2 \quad c_3] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

则输出与设定值的误差 e ，误差的变化速率 \dot{e} ，误差变化的加速度 \ddot{e} 可表示为(r 为设定值)：

$$e = y - r = c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 - r = \sum_{i=1}^3 c_i x_i - r \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \dot{e} = \dot{y} = c_1 \dot{x}_1 + c_2 \dot{x}_2 + c_3 \dot{x}_3 = c_1 (a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \\ a_{13} x_3 + b_1 u) + c_2 (a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + b_2 u) + \\ c_3 (a_{31} x_1 + a_{32} x_2 + a_{33} x_3 + b_3 u) = (c_1 a_{11} + \\ c_2 a_{21} + c_3 a_{31}) x_1 + (c_1 a_{12} + c_2 a_{22} + c_3 a_{32}) x_2 + \\ (c_1 a_{13} + c_2 a_{23} + c_3 a_{33}) x_3 + (c_1 b_1 + c_2 b_2 + \\ c_3 b_3) u = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 c_j a_{ji} x_i + \sum_{i=1}^3 c_i b_i u \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \ddot{e} = \ddot{y} = (c_1 a_{11} + c_2 a_{21} + c_3 a_{31}) \dot{x}_1 + (c_1 a_{12} + \\ c_2 a_{22} + c_3 a_{32}) \dot{x}_2 + (c_1 a_{13} + c_2 a_{23} + c_3 a_{33}) \dot{x}_3 + \\ (c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3) \dot{u} = (c_1 a_{11} + \\ c_2 a_{21} + c_3 a_{31}) (a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + b_1 u) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (c_1 a_{12} + c_2 a_{22} + c_3 a_{32}) \dot{x}_1 + a_{21} x_1 + a_{22} x_2 + a_{23} x_3 + b_2 u) + \\
 & (c_1 a_{13} + c_2 a_{23} + c_3 a_{33}) \dot{x}_2 + a_{31} x_1 + a_{32} x_2 + a_{33} x_3 + b_3 u) + \\
 & (c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3) \ddot{u} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_k a_{kj} a_{ji} x_i + \\
 & \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_k a_{kj} b_i u + \sum_{i=1}^3 c_i b_i \ddot{u} \quad (13)
 \end{aligned}$$

若只取误差 e 和误差的变化速率 \dot{e} 进行模糊控制，按照前述对于二阶系统的简化方法可得：

$$\begin{aligned}
 u = f(e, \dot{e}) = & k'_1 (c_1 x_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 - r) + \\
 & k'_2 (c_1 a_{11} + c_2 a_{21} + c_3 a_{31}) x_1 + k'_2 (c_1 a_{12} + \\
 & c_2 a_{22} + c_3 a_{32}) x_2 + k'_2 (c_1 a_{13} + c_2 a_{23} + \\
 & c_3 a_{33}) x_3 + k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3) u = \\
 & [k'_1 c_1 + k'_2 (c_1 a_{11} + c_2 a_{21} + c_3 a_{31})] x_1 + \\
 & [k'_1 c_2 + k'_2 (c_1 a_{12} + c_2 a_{22} + c_3 a_{32})] x_2 + \\
 & [k'_1 c_3 + k'_2 (c_1 a_{13} + c_2 a_{23} + c_3 a_{33})] x_3 + \\
 & k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2 + c_3 b_3) u - k'_1 r \quad (14)
 \end{aligned}$$

其中 k'_1, k'_2 和式(7)中意义相同，则整理可得：

$$u = \frac{\sum_{i=1}^3 [k'_1 c_i + k'_2 \sum_{j=1}^3 (c_j a_{ji})] x_i}{1 - k'_2 \sum_{i=1}^3 c_i b_i} - \frac{k'_1 r}{1 - k'_2 \sum_{i=1}^3 c_i b_i} \quad (15)$$

若取误差 e ，误差的变化速率 \dot{e} ，误差变化的加速率 \ddot{e} 进行模糊控制，则其控制量简化后可由下述微分方程确定。

$$\begin{aligned}
 u = & \sum_{i=1}^3 [k'_1 c_i + k'_2 \sum_{j=1}^3 (c_j a_{ji})] x_i + k'_2 \sum_{i=1}^3 c_i b_i u - \\
 & k'_1 r + k'_3 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_k a_{kj} a_{ji} x_i + \\
 & k'_3 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 c_k a_{kj} b_i u + k'_3 \sum_{i=1}^3 c_i b_i \ddot{u} \quad (16)
 \end{aligned}$$

式中， $k'_1 = -\frac{1}{3} K_u K_e$ ； $k'_2 = -\frac{1}{3} K_u K_c$ ； $k'_3 = -\frac{1}{3} \times K_u K_{cc}$ ； K_u 为比例因子； K_e, K_c, K_{cc} 分别为 e, \dot{e}, \ddot{e} 的量化因子。

若采用状态反馈控制，则三阶单入单出系统的控制量：

$$u = kx - vr = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 - vr \quad (17)$$

式中， k_1, k_2, k_3 是状态反馈系数； v 是设定值的系数。

4 模糊控制与状态反馈控制的内在联系

由式(8)与式(9)比较可以看出，两式形式上是相同的，都是状态的函数。模糊控制本质是非线性函数，经简化后式(8)为线性函数。从模糊控制的表面上看，其控制变量 u 是随误差、误差的导数变化而变化的，而实质上误差和误差导数还是

由状态的变化引起的，这一点可由式(2)和式(3)清楚看出，所以模糊控制的本质是状态的函数。

对于二阶系统，若取误差 e 和误差的变化速率 \dot{e} 进行模糊控制，由式(8)与式(9)比较可以看出：

$$\begin{cases} \frac{k'_1 c_1 + k'_2 (c_1 a_{11} + c_2 a_{21})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)} = k_1 \\ \frac{k'_1 c_2 + k'_2 (c_1 a_{12} + c_2 a_{22})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)} = k_2 \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{k'_1}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)} = v \quad (19)$$

要求 k'_1 和 k'_2 两个变量同时满足式(18)中的两个二元一次方程，在代数学中是可有解的，解得 k'_1 和 k'_2 后再由式(19)确定 v 。按上述匹配参数后，模糊控制与状态反馈控制似乎等价，但实质上还存在一个重要的差异，式(9)中按状态反馈极点配置定理求取的状态反馈增益系数 k_1 和 k_2 一经确定就不再与被控对象有关，而式(8)中等效的状态反馈增益 $\frac{k'_1 c_1 + k'_2 (c_1 a_{11} + c_2 a_{21})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)}$ 和 $\frac{k'_1 c_2 + k'_2 (c_1 a_{12} + c_2 a_{22})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)}$ 却与 $b_1, b_2, c_1, c_2, a_{11}, a_{21}, a_{12}, a_{22}$ 等被控对象的特性有关。若被控对象是参数慢时变或具有不确定性，则式(8)中等效状态反馈增益 $\frac{k'_1 c_1 + k'_2 (c_1 a_{11} + c_2 a_{21})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)}$ 和 $\frac{k'_1 c_2 + k'_2 (c_1 a_{12} + c_2 a_{22})}{1 - k'_2 (c_1 b_1 + c_2 b_2)}$ 也就同样具有了时变性

或不确定性，而通过调整 k'_1 和 k'_2 去克服这种时变性或不确定性是难以实现的。

对于三阶以上(包括三阶)的系统，若只取误差 e 和误差的变化速率 \dot{e} 进行模糊控制，由式(15)与式(17)比较可以看出，两式形式上是相同的，进而可得：

$$k_p = \frac{k'_1 c_p + k'_2 \sum_{j=1}^3 (c_j a_{jp})}{1 - k'_2 \sum_{i=1}^3 c_i b_i} \quad (p = 1, 2, 3) \quad (20)$$

$$\frac{k'_1}{1 - k'_2 \sum_{i=1}^3 c_i b_i} = v \quad (21)$$

选定 k'_1 和 k'_2 ，可以通过式(20)，计算得到状态反馈系数 k_1, k_2, k_3 ，但反过来，如果选定状态反馈系数 k_1, k_2, k_3 ，若想通过式(20)求取 k'_1 和 k'_2 ，问题就变为要两个变量同时满足式(20)中的三个二元一次方程，这在代数学中除了特殊情形外，一般情况下是无解的，即对于三阶以上(包括三阶)的系统，若只取误差 e 和误差的变化速率 \dot{e} 进行模糊控制，则通常不能够像状态反馈控制那样任意配置极点。

5 结 语

对普通模糊控制器及控制规则的解析,推断出其控制量在本质上是状态的函数。但对于三阶以上(包括三阶)的系统,若只取误差 e 和误差的变化速率 \dot{e} 进行模糊控制,则通常情况不能象状态反馈控制那样任意配置极点。若增加误差变化的加速率 \ddot{e} 进行模糊控制,由式(16)知其情形已十分复杂。

由受控系统参数变化所产生的不确定性,会导致其控制量中等效状态反馈系数的变化,进而对系统的稳定性产生不确定性影响。

模糊控制器与基于观测器的状态反馈+PID调节的设计概念有兼容的地方,内在机理尚待进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 柴天佑,刘红波,张晶涛,等.基于模糊推理和自适应控制的协调控制系统设计新方法及其应用[J].中国电机工程学报,2000,20(4):14-18.(Chai Tianyou, Liu Hongbo, Zhang Jingtao, et al. Novel design method for the coordinated control system based on fuzzy reasoning and adaptive control and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(4):14-18.)
- [2] 何玉彬,王晓予,闫桂荣.神经网络在线学习模糊自适应控制及其应用[J].中国电机工程学报,2000,20(10):67-74.(He Yubin, Wang Xiaoyu, Yan Guirong. Neural network online learning fuzzy adaptive control and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10):67-74.)
- [3] 李益国,吕震中,沈炯.火电单元机组负荷模糊内模控制及其仿真研究[J].中国电机工程学报,2002,22(4):90-93.(Li Yiguo, Lü Zhenzhong, Shen Jiong. Fuzzy internal model control on the load system of a thermal power unit and its simulating study[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4):90-93.)
- [4] 胡一倩,吕剑虹,张铁军.一类自适应模糊控制方法研究及在锅炉汽温控制中的应用[J].中国电机工程学报,2003,23(1):136-140.(Hu Yiqian, Lü Jianhong, Zhang Tiejun. A kind of adaptive fuzzy control method and its application to steam temperature control of the boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1):136-140.)
- [5] 荣雅君,莫春霞,袁石文.过热汽温模糊神经网络预测控制器的设计[J].中国电机工程学报,2003,23(1):177-180.(Rong Yajun, Dou Chunxia, Yuan Shiwen. A design of fuzzy neural network forecast controller on super-heater temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1):177-180.)
- [6] 陈彦桥,刘吉臻,谭文.模糊多模型控制及其对500MW单元机组协调控制系统的仿真研究[J].中国电机工程学报,2003,23(10):199-203.(Chen Yanqiao, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. A fuzzy multi-model control and simulation of coordinated control system for 500MW boiler-turbine unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):199-203.)
- [7] 王国玉,梅华,韩璞,等.主汽温系统模糊自适应预测函数控制[J].中国电机工程学报,2003,23(10):230-235.(Wang Guoyu, Mei Hua, Han Pu, et al. Fuzzy adaptive predictive functional control in main steam temperature system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10):230-235.)
- [8] 栾秀春,李士勇,张宇.单元机组的T-S模糊协调控制系统及其LMI分析[J].中国电机工程学报,2005,25(19):91-95.(Luan Xiuchun, Li Shiyong, Zhang Yu. T-S fuzzy coordinated control system for power unit and its analysis using LMI[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19):91-95.)
- [9] 栾秀春,李士勇,吴建军,等.基于模糊状态观测器的单元机组T-S模糊协调控制系统[J].中国电机工程学报,2006,26(4):76-81.(Luan Xiuchun, Li Shiyong, Wu Jianjun, et al. Takagi-Sugeno fuzzy coordinated control system based on fuzzy state observer for power[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(4):76-81.)
- [10] 王广军,沈曙光,彭晓艳.延迟系统的一种模糊增量控制方法及应用[J].中国电机工程学报,2006,26(19):93-96.(Wang Guangjun, Shen Shuguang, Peng Xiaoyan. A fuzzy increment control method of delay system and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19):93-96.)
- [11] 韩忠旭,齐小红,孙颖.采用模拟柔性模糊预给煤控制提高AGC响应速率的方法及其应用[J].电网技术,2006,30(增刊2):1-6.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong, Sun Ying. The method heightening response rate to AGC by analog flexible fuzzy pre-feed coal control and its application[J]. Power System Technology, 2006, 30(S2):1-6.)
- [12] 李士勇.模糊控制,神经控制和智能控制论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1996.(Li Shiyong. Fuzzy control, neural control and intelligent cybernetics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996.)
- [13] 李娟.一种改善稳态性能的模糊控制器[J].控制与决策,2002,17(5):617-620.(Li Juan. A fuzzy controller to improve the steady state performance[J]. Control and Decision, 2002, 17(5):617-620.)
- [14] 卢朝晖,石光明.时变对象模糊控制稳态性能的提高[J].信息与控制,1995,24(4):59-62.(Lu Zhaohui, Shi Guangming. Improving of steady state performance of time-varying processes in fuzzy control[J]. Information and Control, 1995, 24(4):59-62.)
- [15] 贾磊,朱摩西.用域缩小逼近法消除模糊控制器的余差[J].信息与控制,1995,24(4):251-256.(Jia Lei, Zhu Moxi. Eliminating steady-state error of fuzzy controller with the successive approximation of universe of discourse[J]. Information and Control, 1995, 24(4):251-256.)
- [16] 范晓英,陆培新,陈文楷.一种新型的模糊控制器[J].控制理论与应用,1995,12(5):597-601.(Fan Xiaoying, Lu Peixin, Chen Wenkai. A new type of fuzzy controller[J]. Control Theory and Application, 1995, 12(5):597-601.)
- [17] 李华.一种自适应模糊控制器的设计方法[J].电气自动化,1998,20(1):35-37.(Li Hua. A design method of self-adaptive fuzzy controller[J]. Electrical Drive Automation, 1998, 20(1):35-37.)
- [18] 路兆梅,于跃海.多项式重置增量型模糊控制器[J].东南大学学报,1999,29(1):49-53.(Lu Zhaomei, Yu Yuehai. Polynomial reset incremental fuzzy controller[J]. J of Southeast University, 1999, 29(1):49-53.)
- [19] 李娟,陈佳娟.模糊控制静差产生原因的理论分析[J].甘肃科技,2000,16(3):28-30.(Li Juan, Chen Jiajuan. The theory analysis of causing the static error for fuzzy control[J]. Gansu Science and Technology, 2000, 16(3):28-30.)
- [20] 张乃尧.典型模糊控制器的结构分析[J].模糊系统与数学,1997,21(2):10-21.(Zhang Naiyao. Structure analysis of typical fuzzy controllers[J]. Fuzzy System and Mathematic, 1997, 21(2):10-21.)
- [21] 韩忠旭.增量式函数观测器的概念及其状态反馈控制系统的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(4):210-216.(Han Zhongxu. Concept of increment function observer and its application in state feedback control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4):210-216.)
- [22] 韩忠旭,齐小红.增量式函数观测器成立的充要条件[J].中国电机工程学报,2006,26(23):78-82.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong. The sufficient and necessary conditions of increment function observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23):78-82.)
- [23] 韩忠旭,黄焕袍,张智,等.基于状态观测器的状态反馈控制在300MW单元机组协调控制系统中的应用[J].中国电力,2004,37(4):60-65.(Han Zhongxu, Huang Huapao, Zhang Zhi, et al. Application of state feedback based on state observer in the coordinated control system of 300 MW unit plant[J]. China Electric Power, 2004, 37(4):60-65.)
- [24] 韩忠旭,王毓学,曲云,等.基于IFO-K Δ x的状态反馈在平凉4×300MW单元机组中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(12):233-237.(Han Zhongxu, Wang Yuxue, Qu Yun, et al. Application of state feedback based on IFO-K Δ x in 4×300MW generator unit of pingling power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12):233-237.)
- [25] 韩忠旭,齐小红,潘钢,等.本生直流炉机炉协调控制系统的设计新方法及其工程应用[J].中国电机工程学报,2005,25(21):121-127.(Han Zhongxu, Qi Xiaohong, Pan Gang, et al. A new design method of coordinate control system for once-through boiler and its engineering application[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21):121-127.)
- [26] 韩忠旭,张智,刘敏,等.北仑1和2号600MW单元机组协调控制系统的设计与应用[J].中国电机工程学报,2006,26(18):126-132.(Han Zhongxu, Zhang Zhi, Liu Min, et al. Application and design of coordinated control system for No.1 & 2 600MW unit of Beilun power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18):126-132.)