

暖通空调系统的新型模糊自调节 PID 控制

吕红丽¹, 郭秀英²

(1. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 山东 济南 250101; 2. 石家庄铁道大学 数理系, 河北 石家庄 050043)

摘要: 针对暖通空调系统中由于存在高度非线性, 外部扰动, 多变量等因素而难以控制的现状, 提出一种利用模糊控制器的解析表达式实时调节 PD 控制器各参数的新型模糊 PD 控制算法。闭环系统中的模糊模型在发挥控制作用的同时, 作为调节器实现了对 PID 控制器各参数的在线自适应调节, 并且给出了具体控制算法设计。仿真结果表明与传统 PID 控制器相比, 这一新型模糊 PD 控制器具有超调量小, 调节时间短, 鲁棒性强等优良的控制性能。

关键词: 模糊控制器; PID 控制器; 自调节; HVAC 系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)04-0061-06

0 引言

暖通空调系统 (Heating Ventilating and Air-Conditioning systems 简称 HVAC 系统) 由蒸发器回路、压缩机回路、冷凝器回路、空气回路等多个子系统组成, 是一个存在温度、湿度、流速等多个相互作用变量的典型的高度非线性时变系统^[1]。由于外部扰动等不确定性因素的影响, 很难建立全局意义上的数学模型精确描述 HVAC 系统的动态过程, 给 HVAC 系统的控制带来很大困难, 使得 HVAC 系统的建模与控制成为研究热点之一。近年来, 不同的控制策略已经应用到 HVAC 系统全局控制或者局部控制中^[1-5]。Bi 和 Cai 等针对温度和压力控制环路提出一种先进的自调节 PD 控制器^[1]。Ghiaus 采用简单的模糊模型描述了热交换的非线性过程, 控制结果比传统的 PD 控制具有更好的稳定性能^[5]。

由于 PD 控制器具有原理简单、容易实现、成本低廉等特点, 在实际工业过程控制中, 被广泛应用。但是, 实际 HVAC 过程一般存在非线性、外部扰动、参数不确定等特点, 单纯的 PID 控制很难使系统获得满意的控制效果。而且在 HVAC 系统中, PD 控制器是基于特定的冷负载设计, 实际的冷负载对系统影响是时变的^[1-2], 因此, 难以克服外界扰动等不确定性对 HVAC 系统的影响, 鲁棒性较差, 不能实现对参考轨迹的良好跟踪。模糊控制器区别于其它控制器最显著的特点是无需建立系统精确的数学模型, 而且具有较强的鲁棒性^[3-5]。因此, 模糊 PID 控制作为一类使用广泛的控制算法一直以来都是控制领域一个热点研究方向^[6-10]。

为了实现 PD 控制器的参数在线自调整, 进一步完善模糊控制器的性能, 本文提出一种新型的模糊 PID 控制算法。该方法的实质是利用模糊控制器结构分析的解析表达式实时调节 PID 控制器的比例、积分、微分参数, 并且成功应用于 HVAC 系统的空气处理机组的温度控制中。仿真结果表明与传统 PID 控制器相比, 这一新型模糊 PD 控制器具有超调量降低, 调节时间缩短, 鲁棒性增强等显著特点, 从而为 HVAC 系统的工业过程控制提供了一种快速精确的实时控制算法。

1 HVAC 系统中的空气处理机描述

考虑 HVAC 系统的空气处理机组 (air handling unit 简称 AHU), 它由冷却盘管, 控制风阀, 过滤器, 回风机, 送风机和节流控制阀等组成 (如图 1 所示), 系统中存在冷凝水和空气两个物理回路。通过冷凝水调节阀的调节, 温度为 $T_{chw,i}$ 的冷凝水以流速 m_{chw} 从冷却塔中流出来, 经过与冷却盘管外部温度为 T_{ai} 的空

收稿日期: 2010-04-28

作者简介: 吕红丽 女 1978 年出生 讲师

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

气进行热交换, 冷凝水的温度上升至 T_{chw} 。盘管外部提供的空气是通过风扇的动力进入蒸发器的, 干球温度, 湿球温度, 蒸发器内的空气流速分别是 T_{ab} , T_{awb} 和 \dot{m}_a , 通过与蒸发器里的冷凝水进行热交换, 空气流出时的干球温度, 湿球温度分别下降到 T_{ao} , T_{aow} 。

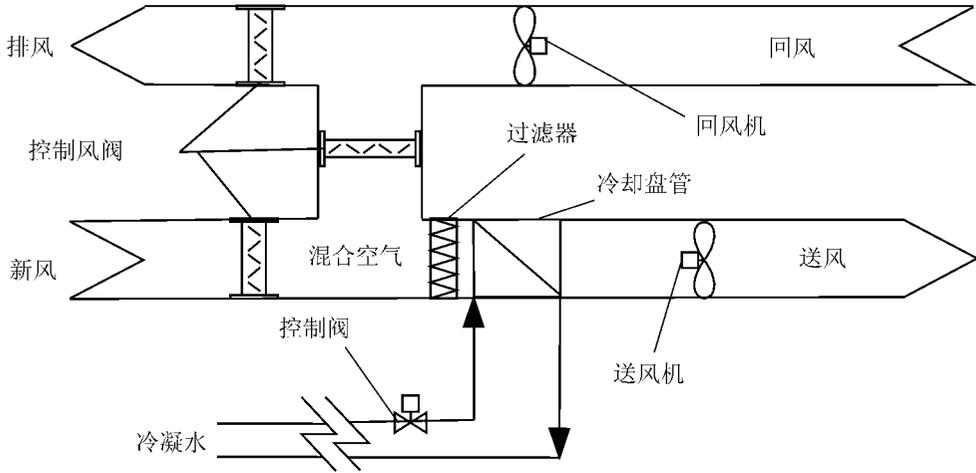


图 1 空气处理机 AHU 的结构图

回风机的干球温度 T_{ao} 是 AHU 系统的输出变量, 冷凝水的流速 \dot{m}_{chw} 是可操作变量即 AHU 系统的输入变量, 假设进入蒸发器的冷凝水温度 $T_{chw i}$ 是常数, 水流速 \dot{m}_a 是根据空调房间的冷却负载需求变化的, 这两个变量作为 AHU 系统的扰动考虑。因此, 系统输出 T_{ao} 可以描述为

$$T_{ao} = f(\dot{m}_{chw}, \dot{m}_a, T_{ais}, T_{chw i}) \quad (1)$$

式中, f 是一非线性时变函数, 由于寻找精确的数学模型描述 AHU 系统的全过程非常困难, 在不同的外界条件下维持 AHU 系统在一个特定的冷却温度在实际工程中是一个很大的挑战。

在稳定状态下, 式 (1) 可以直接表达成

$$Q = \frac{c_1 \dot{m}_a^e}{1 + c_2 (\dot{m}_a / \dot{m}_{chw})^e} (T_{ai} - T_{chw i}) \quad (2)$$

$$Q = c_{chw} \dot{m}_{chw} (T_{chw o} - T_{chw i}) = c_a \dot{m}_a (T_{ai} - T_{ao}) \quad (3)$$

式中, Q 是冷却负载; c_{chw} 和 c_a 是冷凝水和空气的比热值; c_b , c_2 , e 是 AHU 的系统参数。组合式 (2) 和式 (3), T_{ao} 可以描述为

$$T_{ao} = T_{ai} - \frac{(c_1 / c_a) \dot{m}_a^{e-1} \dot{m}_{chw}^e}{\dot{m}_{chw} + c_2 \dot{m}_a^e} (T_{ai} - T_{chw i}) \quad (4)$$

由于空气和水的热交换等动态过程的传递响应非常复杂, 只能在很小的区间上采用下面的一阶加时滞模型进行较准确的估计^[2]

$$\frac{T_{ao}(s)}{\dot{m}_{chw}(s)} = \frac{K_{chw} e^{-L_{chw}s}}{1 + T_{chw}s} \quad (5a)$$

$$\frac{T_{ao}(s)}{\dot{m}_a(s)} = \frac{K_a e^{-L_a s}}{1 + T_a s} \quad (5b)$$

这里, K_{chw} , T_{chw} , L_{chw} , K_a , T_a 和 L_a 分别是冷凝水和空气回路的过程增益, 时间常数, 时间滞后, 它们是随着空气和水的流速变化的。如果空气流速或水流速高, 则时间常数和时滞后将成反比降低。

2 模糊参数自调节 PID 控制器的设计

2.1 系统结构描述

传统的模糊 PID 控制器一般可分为两类, 一类是利用模糊模型作为调节器来整定 PID 控制器的三个参数 K_p , K_i , K_d 的值^[8], 从而优化 PID 控制器的控制性能; 另一类是模糊模型作为控制器与 PID 控制器根据某种性能指标进行切换^[9]。但是, 以上的模糊 PID 控制器研究存在的一个共同特点是根据专家经验—

次性离线建立模糊模型之后, 只是在每一个采样时刻通过模糊控制规则和模糊推理过程对 PID 的参数进行调节, 这样虽然能满足一般控制系统的控制要求, 但是难以克服系统参数摄动或外部扰动对系统造成的影响。因此本文基于在每一个采样时刻在线求解模糊控制器结构分析的解析表达式, 获取 PD 控制器的比例、积分、微分参数, 不断克服系统参数摄动和外界扰动等不确定因素对系统造成的影响, 最终使得系统输出 y_t 达到设定值 y_0 , 从而形成一种新型模糊参数自调节 PD 控制器, 并且为实际应用提供了一种快速精确的实时控制算法。

考虑被控对象为单输入单输出 AHU 系统的如图 2 所示的闭环系统。为简洁起见, t 采样时刻的回风机干球温度 T_{ao} 记作 y_t , t 采样时刻的冷凝水水流速 \dot{m}_{dhw} 记作 u_t 。图 2 中 PID 控制器是一般意义下的常规 PID 控制器, 其参数初始值采用常规设计方法设定, 系统输出 y_t 的误差和误差变化率 e_t, r_t 分别作为模糊控制器的输入变量, u_t 和 u_f 分别是 PID 控制器和模糊控制器的输出。

2.2 模糊控制器的设计

首先设计系统的模糊调节控制器。分别选取误差 e_t 及其差分 r_t 作为模糊模型的输入变量, 即 $e_t = y_0 - y_t, r_t = \Delta e_t = e_t - e_{t-1}$, 输出变量为 u_f , 引入比例因子 G_e, G_r, G_u , 使模糊控制器的输入输出变量正规化, 即 $e^* = G_e e_t, r^* = G_r r_t, u_f = G_u u_t^*, e^*, r^* \in [-1, 1], u_f^* \in [-1, 1]$ 。模糊控制器的具体结构和参数设计如下^[11-12]:

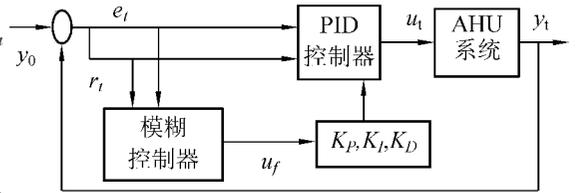


图 2 新型模糊参数自调节 PID 控制器

(1) 输入、输出变量 e^*, r^*, u_f^* 均采用对称、均匀分布、全交迭的三角形隶属函数, 模糊控制器的输入变量 e^*, r^* 的值均有 $N = 2J + 1$ 个模糊数, 分别用 E_i 和 R_j 表示, 模糊控制器输出变量 u_f^* 的值有 $2N - 1 = 4J + 1 \geq 5$ 模糊数, 用 U_k 代表, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, 2N - 1$ 。

(2) 采用线性模糊控制规则。由于 e^* 和 r^* 各有 N 个模糊数, 所以共有 N^2 条模糊控制规则。模糊控制规则的一般式为:

$R_{ij}: \text{IF } e^* \text{ is } E_i \text{ and } r^* \text{ is } R_j, \text{ THEN } u_f^* \text{ is } U_k, \text{ 其中, } k = i + j, i, j = 1, 2, \dots, N.$

(3) 选择模糊模型的模糊算子: and 算子选用取小运算 (min), or 算子采用有界和运算 (sum)。

(4) 解模糊采用重心法, 由于输出模糊变量的对称性, 通过解模糊获得的输出精确值是 U_k 中 $\mu(u_f^*) = 1$ 对应的点, 即

$$u_f^* = \frac{\int_e^f \mu(u^*) du^*}{\int_e^f \mu(u^*) du^*} = \frac{e+f}{2}$$

不失一般性, 对于图 2 所示的闭环系统, 任意时刻 t 产生的误差及其变化率 e^*, r^* , 一定存在 $i, j - J \leq i, j \leq J - 1$ 使得 $iS \leq e^* \leq (i+1)S, jS \leq r^* \leq (j+1)S - J \leq i, j \leq J - 1$, 其中 $S = 1/J$ 。因此经过模糊推理可得 u_f^* 的解析表达式如下^[12]

$$u_f^* = \begin{cases} (i+j+1)S + \frac{S [e^* - (i+0.5)S] + [r^* - (j+0.5)S]}{S - |e^* - (i+0.5)S|} & (C_1, C_2, C_5, C_6) \\ (i+j+1)S + \frac{S [e^* - (i+0.5)S] + [r^* - (j+0.5)S]}{S - |r^* - (j+0.5)S|} & (C_3, C_4, C_7, C_8) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $C_i, i = 1, 2, \dots, 8$ 是对 e^*, r^* 所在区域的几何划分 (具体参见图 3), 输入输出变量在所激活的四条规则中不同区域的隶属度及激活度如表 1 所示。

表 1 四条规则在不同区域的激活度

区域	R_1	R_2	R_3	R_4	$\sum \omega(i, j)$
C_1 和 C_2	$\mu_{j-1}(r^*)$	$\mu_j(r^*)$	$\mu_i(e^*)$	$\mu_i(e^*)$	$1 + 2\mu_i(e^*)$
C_3 和 C_4	$\mu_{i-1}(e^*)$	$\mu_i(e^*)$	$\mu_j(r^*)$	$\mu_j(r^*)$	$1 + 2\mu_j(r^*)$
C_5 和 C_6	$\mu_{i-1}(e^*)$	$\mu_{i-1}(e^*)$	$\mu_{j+1}(r^*)$	$\mu_j(r^*)$	$1 + 2\mu_{i-1}(e^*)$
C_7 和 C_8	$\mu_{i-1}(e^*)$	$\mu_{i-1}(e^*)$	$\mu_{j+1}(r^*)$	$\mu_i(e^*)$	$1 + 2\mu_{i-1}(e^*)$

显然,该模糊控制器的结构解析表达式是一个全局的二维多值继电器与一个局部的非线性 PD 控制器的和。整理得到

$$\begin{cases} u_f^* = \Phi_C(i, j) + \Phi_L(i, j), \Phi_C(i, j) = \frac{i+j+1}{N-1} = (i+j+1)S, (-J \leq i, j \leq J-1) \\ \Phi_L(i, j) = K_D(e^*, r^*) [r^* - (j+0.5)S] + K_P(e^*, r^*) [e^* - (i+0.5)S] \\ K_P(e^*, r^*) = K_D(e^*, r^*) = \begin{cases} \frac{S}{2[S - |e^* - (i+0.5)S|]} (C_1, C_2, C_5, C_6) \\ \frac{S}{2[S - |r^* - (j+0.5)S|]} (C_3, C_4, C_7, C_8) \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

于是,经过以上的推理不难看出,在任意时刻 t 均可以从模糊控制器的解析表达式获取 PID 控制器的参数 $K_P(e^*, r^*)$ 和 $K_D(e^*, r^*)$ 。

以上讨论中模糊控制器的输出是直接选取的被控系统的输入 u_f , 所以模糊模型调节了 PID 控制器的比例系数和微分系数,如果把被控系统的输入的差分 Δu_f 作为模糊控制器的输出建立新的规则库和模糊推理过程,模糊模型的解析表达式(7)将变成

$$\begin{cases} \Delta u_f^* = \Phi_C(i, j) + \Phi_L(i, j), \Phi_C(i, j) = \frac{i+j+1}{N-1} = (i+j+1)S, (-J \leq i, j \leq J-1) \\ \Phi_L(i, j) = K_P(e^*, r^*) [r^* - (j+0.5)S] + K_I(e^*, r^*) [e^* - (i+0.5)S] \end{cases} \quad (8)$$

此时的模糊控制器调节 PID 控制器参数是比例系数和积分系数。因此,本文所提出的模糊参数自调节 PID 控制器对 PID 控制器各个参数 K_P, K_I, K_D 均可以实现在线自适应调节,具有广泛的应用价值。

2.3 模糊自调节 PID 控制器的设计

在模糊控制器调节参数之前首先需要设计初始的常规 PID 控制器,其表达式为

$$u_t = K_P \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (9)$$

式中, $e(t) = e_t = y_0 - y_t$ 为误差,它是模糊调节器的输入变量; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数; $K_P, K_I = K_P/T_i, K_D = K_P T_d$ 分别为 PID 控制器的初始比例、积分和微分增益系数。

针对 AHU 系统的实际被控过程一般都存在非线性、外部扰动、参数不确定等特点,采用 2.2 节设计的模糊控制器在线实时调节 PID 控制器的参数,即 PID 控制器的输入变量:误差 $e(t) = e_t = y_0 - y_t$, 误差变化率 $r(t) = e(t) - e(t-1)$ 和误差积分 $de(t)/dt$ 所对应的系数。在任意时刻 t 从模糊控制器的解析表达式获取 PID 控制器的参数 $K_P(e^*, r^*)$ 和 $K_D(e^*, r^*)$ 之后,重新带入(9)中就完成了 t 时刻模糊控制器对 PID 控制器的在线参数自调节。在 $t+1$ 时刻,通过(7)计算出模糊控制器的输出 u_f , 从而得到 $t+1$ 时刻比例系数、微分系数调节系数,完成对 PID 控制器的在线参数自调节,如此继续下去,通过模糊系统的自适应调节作用, PID 控制器实现了实时调节,最终使系统达到稳定状态。

综上所述,本文所提出的新型模糊参数自调节 PID 控制器的设计步骤简述如下:①通过采集到的大量输入输出数据,基于专家经验采用模糊聚类等辨识方法建立被控对象的模糊控制器和初始 PID 控制器;②在 t 时刻 e_t, r_t 的初始值作为模糊控制器的输入,得到其输出 u_f , 计算 u_f 的解析表达式从中获得 PID 控制器的参数 $K_P(e^*, r^*)$ 和 $K_D(e^*, r^*)$;③用②得到的 K_P 和 K_D , 分别代替初始 PID 控制器的比例系数 K_P 和微分系数 K_D , 这样就完成了一次模糊控制器对 PID 控制器参数的调节作用;④将 PID 控制器输出作用于被控对象得到系统输出变量 y_t , 计算 $t+1$ 时刻的误差及其变化率 e_t, r_t , 返回到第②步。

3 仿真实验

为了验证这一新型模糊参数自调节 PID 控制器的控制性能,针对第 2 节所描述的 AHU 系统,在现场

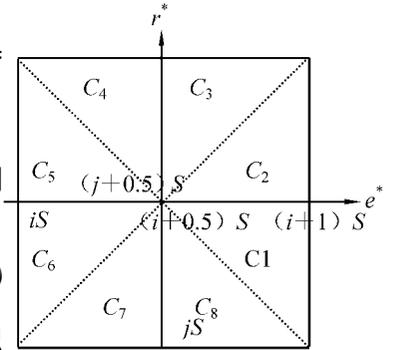


图 3 e^*, r^* 所在的八个区域

采集大量的输入输出实验数据的基础上,通过 MATLAB7.0 软件中的 TOOLBOX 进行了具体的仿真实验,从而确保这一算法的可行性。

根据第 2 节模糊控制器的设计,首先建立 AHU 系统的如表 2 所示的模糊规则集合,其中输入输出变量的隶属函数如图 4 所示,建模实验中选取 $J = 2$,输入变量模糊集合为个 $N = 2J + 1 = 5$,而输出变量模糊集合为个 $4J + 1$ 。然后建立系统的初始 PD 控制器,运用第 2 3 节总结的设计步骤,运用本文提出的模糊参数调节 PID 控制器实现了对 AHU 系统的在线实时控制,得到图 5 所示的仿真结果(其中,假设 AHU 系统的输出变量,即回风机的干球温度 T_{ao} 的设定值为单位 1)。从仿真结果比较中容易看到,通过采用本文提出的新型模糊参数自调节 PID 控制器,AHU 系统的输出响应的超调量降低,上升时间明显减小,收敛速度加快,控制效果明显优于常规的 PID 控制器。并且提高了系统的鲁棒性。

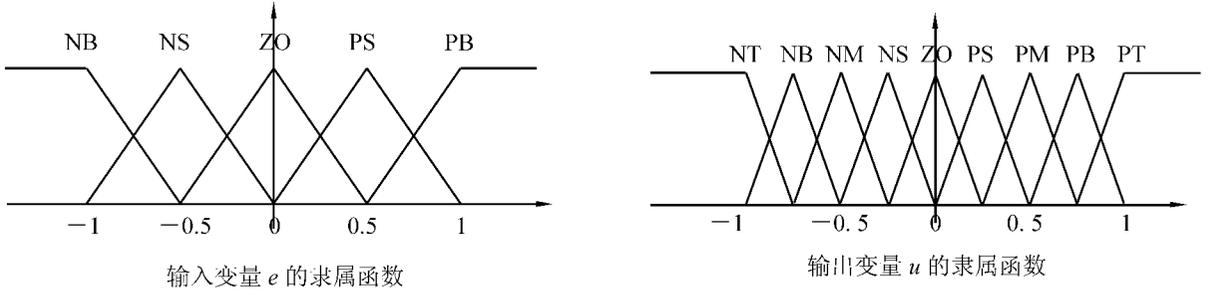


图 4 AHU 系统输入输出变量的隶属函数集合

表 2 模糊控制器规则表

r	e				
	NP	NS	ZO	PS	PB
NB	NT	NB	NM	NS	ZO
NS	NB	NM	NS	ZO	PS
ZO	NM	MS	ZO	PS	PM
PS	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PT

4 结语

HVAC 系统是存在高度非线性,时变特征以及扰动和不确定性等因素的复杂多变量系统,针对 HVAC 系统难以控制的现状,本文提出了一种新型模糊参数自调节 PID 控制器,它充分发挥了模糊模型对难以建立精确数学模型的复杂系统的控制功能和调节功能,同时利用 PD 控制器结构简单的优势,从模糊控制器的解析表达式实时获取 PD 控制器的各种参数,实现了 PID 控制器的自适应调节。仿真结果表明,此种方法与传统 PID 控制器相比较,不仅对被控对象参数的变化适应能力强,而且在对象模型结构发生较大改变的情况下也能获得较好的控制效果,比常规的 PID 控制器具有鲁棒性强,超调量小等更加优良的控制性能。本文提出的这种新型模糊 PID 控制成功的应用于 HVAC 系统的 AHU 单元回风干球温度的控制中,体现了该方法的实用性。因此对于一般的存在着高度的非线性,时变特征以及扰动和不确定等因素的复杂系统,也适用于本文提出的算法进行控制。

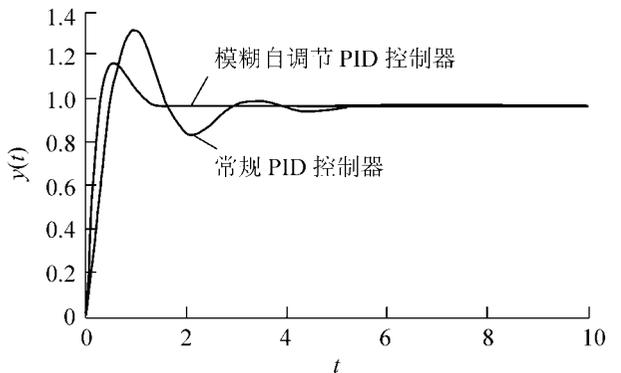


图 5 控制效果比较

参 考 文 献

[1] Bi Q, Cai W J, Guo Q. Advanced controller auto tuning and its application in HVAC systems [J]. Control Engineering Practice

- [2] Kasahara M, Matsuba T. Design and tuning of robust PID controller for HVAC systems[J]. ASHRAE Trans. 1999, 105(2): 154-166
- [3] He M, Cai W, Li S. Multiple fuzzy model-based temperature predictive control for HVAC systems[J]. Information sciences. 2005, 169: 155-174
- [4] Teeter J, Chow M Y. Application of functional link neural network to HVAC thermal dynamic system identification[J]. IEEE Trans. On Industrial Electronic, 1998, 45: 170-175
- [5] Ghiaus C. Fuzzy model and control of a fan-coil[J]. Energy and Buildings. 2001, 33: 545-551.
- [6] Li Wei, Chang Xiaoguang. Application of hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller to combustion control of stoker-fired boilers[J]. Fuzzy sets and systems. 2000, 111: 267-284
- [7] James Carvajal, Chen Guanrong, Hak Ognen. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation and stability analysis[J]. Information sciences. 2000, 123: 249-270
- [8] Wu Zhijia, Masaharu. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J]. Fuzzy sets and systems. 1996, 78(1): 23-35.
- [9] 刘红波, 李少远, 柴天佑. 一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用 [J]. 控制与决策, 2003, 18(5): 615-618
- [10] 修智宏, 任光. 模糊控制器的实时精确算法与优化设计 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 20: 116-119.
- [11] Hao Ying. Analytical structure of a two-output fuzzy controller and its relation to PI and multilevel relay controllers[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1994, 63: 21-33.
- [12] Lv Hongli, Jia Lei. Structure analysis of typical fuzzy controllers using different fuzzy reasoning[C] //Proceeding of the 5th world congress on intelligent control and automation. Hangzhou: IEEE, 2004: 2561-2565.

Novel Fuzzy Self-tuning PID Controller for Control of HVAC Systems

Lv Hongli¹, Guo Xuying²

(1. Information and Electrical Engineering School of Shandong Architectural University, Jinan 250101, China

2. School of Mathematics and Physics of Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract In heating, ventilating and air-conditioning systems (HVAC), there exist severe nonlinearity, time-varying nature, disturbances and uncertainty. A novel fuzzy PID controller is proposed and applied to the HVAC systems. The structure resolution expression of the function between input and output of fuzzy controller is used to tune the real-time parameters of the PID controller. The fuzzy PID controller takes the advantages of simple structure of PID controller sufficiently, and at same time the fuzzy model acts as a controller to tune PID controller on line. Then the concrete algorithm of the fuzzy PID controller is given. The simulation results demonstrate the validities of this novel fuzzy parameters self-tuning PID controller compared with the conventional PID controllers.

Key words fuzzy controller; PID controller; self-tuning HVAC systems