

变风量空调系统末端变论域模糊控制

王成立, 卢建刚

(浙江大学 工业控制技术国家重点实验室, 杭州 310027)

(clwang@iipc.zju.edu.cn)

摘要:针对变风量空调系统非线性、时变性和难以建立精确模型的特点,提出一种具有自适应能力的变论域模糊控制,以提高控制系统的控制速度和精度,使系统具有更好的动态性能和准确性。在推导 VAV 末端装置模型的基础上,进行了仿真实验。仿真结果表明,与传统 PID 控制和常规模糊控制比较,变论域模糊控制提高了系统的动态特性和系统的稳态精度,从而使模糊控制器的性能得到了较大的改善,具有良好的控制效果。

关键词:变风量空调系统;变论域;模糊控制

中图分类号: TP273.4 **文献标志码:** A

Variable discourse fuzzy control of VAV air-conditioning terminal unit

WANG Cheng-li, LU Jian-gang

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: Concerning the nonlinearity, time-variant and imprecise model in the Variable Air Volume (VAV) air-conditioning systems, an adaptive variable discourse fuzzy control was proposed to improve the dynamic performance and accuracy of the control system. Based on derivation of VAV air-conditioning terminal model, simulation was conducted. The simulation results show that compared with the traditional PID control and conventional fuzzy control, variable discourse fuzzy control improves the system dynamic and static characteristics and steady state accuracy. Therefore, the fuzzy controller's performance has been greatly improved with good control effect.

Key words: Variable Air Volume (VAV) air-conditioning system; variable discourse; fuzzy control

0 引言

随着人们工作及生活环境的不断改善,建筑物能耗越来越大。据统计,目前中国建筑物能耗已经占全国总能耗的28%,其中暖通空调能耗占60%~70%,所以采用有效的空气调节方式对智能建筑系统节能具有重要的意义^[1]。中央空调房间温度控制是一个大滞后、非线性、时变的复杂控制系统,其特点是控制系统调节时间较长并产生明显的超调,采用传统的控制策略难以取得良好的控制品质。近年来,模糊控制在复杂的工业控制中也得到广泛使用^[2-3];而简单的模糊控制在变量分级不够多的情况下,在平衡点附近会有小的振荡现象。针对这种现象,提出了一种论域可变的模糊控制,并对系统进行了仿真实验。

1 VAV 空调房间温度建模

1.1 VAV 空调系统工作原理

变风量(Variable Air Volume, VAV)中央空调系统主要由空气处理机组和末端控制装置两部分构成^[4],典型的变风量空调系统空调空气处理部分的结构如图1所示。

VAV 空调系统主要是通过末端控制以室内调节区域温度的变化为控制依据,来控制送风机送风量的大小,从而实现房间温湿度的控制。

1.2 房间温度建模

空调房间实质是一个恒温室。为了研究方便,把图2中

的恒温室看成一个单容对象,在建立数学模型时,暂不考虑它的纯滞后。根据能力守恒定律,单位时间内进入恒温室的能量减去单位时间内由恒温室流出的能量等于恒温室中能量储蓄存量的变化率^[5],如图2所示。

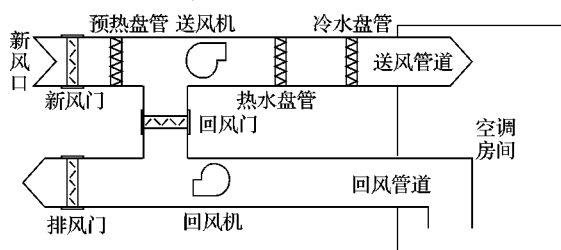


图1 VAV 空气处理部分

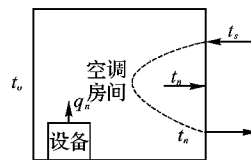


图2 空调房间对象

由此可得到如下关系式^[5]:

$$C_a \frac{dt_n}{dt} = (L\rho c t_s + q_n) - (L\rho c t_n + \frac{t_n - t_o}{R}) \quad (1)$$

其中: C_a 为房间内空气的容量系数, 单位 $\text{kJ}/^\circ\text{C}$; t_n 为室内空气温度, 单位 $^\circ\text{C}$; q_n 为室内设备散热量, 单位 W ; L 为送风量, 单位 m^3/s ; ρ 为空气密度, 单位 kg/m^3 ; c 为空气比热容, 单位

$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t_s 为送风温度,单位 $^\circ\text{C}$; R 为空调房间围护结构热阻,单位 $^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

利用自动控制原理中的非线性方程的线性化的增量方程法,并作适当推导可得到变风量方式下空调房间的数学表达式为^[5]:

$$\begin{cases} T_i \frac{d\Delta t_n}{dt} + \Delta t_n = K' \cdot \Delta L + K'' \cdot \Delta q_f \\ T_i = \frac{C_a}{L\rho c + R} \\ K' = \frac{\rho c(t_s - t_{n0})}{L\rho c + \frac{1}{R}} \\ K'' = \frac{1}{L\rho c + \frac{1}{R}} \\ \Delta q_f = \Delta q_n + \frac{\Delta t_o}{R} \end{cases} \quad (2)$$

其中: T_i 为恒温室的时间常数,单位为 h ; K' 为恒温室调节通道的放大系数; K'' 为恒温室扰动通道的放大系数; Δq_f 为室内外干扰量的变化换算成室温热量的变化。式(2)就是恒温室在变风量方式下的数学模型^[5],式中 ΔL 、 Δq_f 为恒温室的输入量; Δt_n 是恒温室的被调量。

将式(2)进行拉普拉斯变换得:

$$T_i s \Delta t_n(s) + \Delta t_n(s) = K' \Delta L(s) + K'' \Delta q_f(s) \quad (3)$$

由于送风量以及外界环境、室内散热量对室温的影响均有纯滞后过程,因此,考虑纯滞后时间 τ ,可得送风量与室温变化之间的传递函数为:

$$\frac{\Delta t_n(s)}{\Delta L(s)} = \frac{K' e^{-\tau s}}{T_i s + 1} \quad (4)$$

2 变论域模糊控制器的设计

通常,模糊控制器的量化因子是固定不变的,当控制系统的输出逐渐向零误差逼近时,最初给定的输入论域就使得模糊划分得较为粗糙,从而难以取得较高的控制精度。理想的状态应该是随着系统进入稳定状态,偏差实际值变小,其模糊论域也相应地缩小;反之亦然^[3,6]。所以本文提出一种变论域模糊控制器,用于变风量空调系统末端的温度控制。

2.1 控制系统描述

本文采用的变论域模糊控制器结构如图3所示。

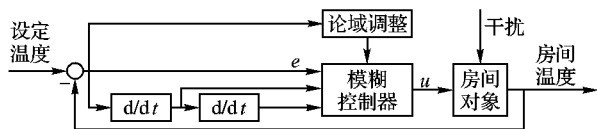


图3 变论域控制系统结构

该模糊控制器的输出为:

$$u = \text{fuzzy}(e, \dot{e}, \ddot{e}) - k_i \times \int e \, dt \quad (5)$$

其中积分项用于消除控制系统的稳态误差。

2.2 控制器设计

本文为温度控制控制系统设计了三输入、单输出的模糊控制器。模糊控制器的输入变量为误差 e 、误差的变化率 \dot{e} 和误差的变化率的导数 \ddot{e} , 输出为式(5)中的 u 。误差和误差的变化率以及输出 u 的语言变量为 NB、NM、NS、ZR、PS、PM、PB, 误差变化率的导数 \ddot{e} 的语言变量为 N、Z、P。它们各自的

初始论域分别为:

$$\begin{cases} e: [-E, E] \\ \dot{e}: [-EC, EC] \\ \ddot{e}: [-EEC, EEC] \\ u: [-U, U] \end{cases} \quad (6)$$

为了使论域能够自动调整,引入论域伸缩因子的概念^[6]:

$$\alpha(x) = 1 - \exp(-kx^2) \quad (7)$$

其中 $k > 0$, k 反映控制系统的灵敏度,它的大小影响论域的伸缩速度, k 值越大,论域的伸缩速度越快;反之亦然。

为了方便调整 k 的取值,文中只对误差采取了伸缩控制,误差变化率和输出根据误差论域的伸缩同比例地调节,误差变化率的导数不变化。实际论域和初始论域之间的关系为:

$$\begin{cases} E' = \alpha(e) \cdot E \\ EC' = \alpha(e) \\ U' = \alpha(e) \cdot U \end{cases} \quad (8)$$

根据以上控制规则并结合专家经验设计了房间温度模糊控制规则如表1~3所示。

表1 u 的模糊规则表 (\ddot{e} 为 N 时)

EC	E						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZR
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZR	ZR
NS	PB	PM	PM	PS	ZR	ZR	NS
ZR	PM	PM	PS	ZR	ZR	NS	NS
PS	PM	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM
PM	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM
PB	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM	NB

表2 u 的模糊规则表 (\ddot{e} 为 Z 时)

EC	E						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZR	ZR
NM	PB	PM	PM	PS	ZR	ZR	NS
NS	PM	PM	PS	ZR	ZR	NS	NS
ZR	PM	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM
PS	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM
PM	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZR	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表3 u 的模糊规则表 (\ddot{e} 为 P 时)

EC	E						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PM	PS	ZR	ZR	NS
NM	PM	PM	PS	ZR	ZR	NS	NS
NS	PM	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM
ZR	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM
PS	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM	NB
PM	ZR	NS	NS	NM	NM	NB	NB
PB	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NB

3 温度控制仿真研究

3.1 未引入伸缩因子时的模糊控制仿真

本文中的空调房间温度模型采用文献[7]中的传递函数:

$$G(s) = \frac{2}{80s + 1} e^{-60s} \quad (9)$$

假设房间设定温度为 25℃, 原室内温度为 27℃, 忽略干扰对系统的影响, 对房间进行温度调节。仿真各参数取值为: $E = 2.5$; $EC = 0.1$; $EEC = 0.05$; $K_i = 0.005$ 。采用 Matlab 软件进行仿真, 得到模糊控制仿真如图 4 所示。

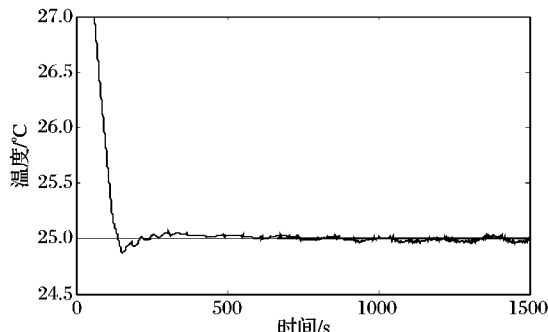


图 4 未引入伸缩因子时的模糊控制

从图 4 可以看出, 控制效果基本令人满意, 但是在平衡态附近出现了小的振荡。

3.2 变论域模糊控制仿真

变论域模糊控制引入的伸缩因子中, k 的大小会影响论域的伸缩快慢, 进而影响系统反应的快慢。为了防止系统动态响应变慢, 在系统出现最大超调量时(由 Matlab 程序进行判断), 引入变论域模糊控制, 并取 $k = 0.5$, 得到变论域模糊控制仿真如图 5 所示。

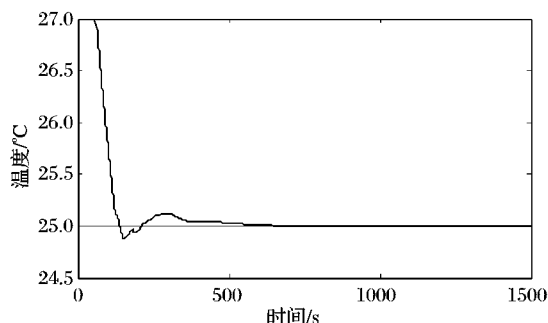


图 5 变论域模糊控制

从图 5 中可以明显看出, 变论域模糊控制可以有效消除系统振荡。

同时, 将变论域模糊控制与传统 PID 控制作比较, 利用 Ziegler-Nichols 方法整定方法得到 PID 参数 $K_p = 0.8$; $K_i = 0.0067$; $K_d = 24$, 如图 6 所示。对比可见, 常规 PID 控制的动

态过渡过程不太理想。

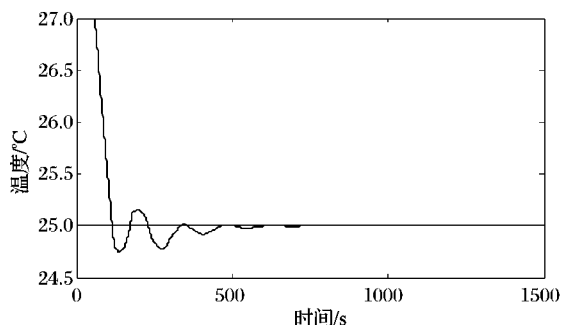


图 6 常规 PID 控制

4 结语

VAV 空调系统是一个典型的难以建立精确数学模型的非线性系统, 将模糊控制应用于 VAV 空调系统是个较好的解决方法; 而分级不够多的模糊控制常常在平衡点产生小振荡。为此, 本文提出具有自适应能力的变论域模糊控制, 仿真表明变论域模糊控制可以明显提高控制系统的动态特性和准确性。

参考文献:

- [1] 刘静姝, 魏东, 刘熙. 变风量空调系统温度模糊 PID 控制[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 98-102.
- [2] 马丙场, 倪国荣. 参数自调整模糊控制在中央空调控制系统中的应用[J]. 自动化技术与应用, 2003, 22(2): 9-12.
- [3] 胡玉玲, 曹建国. 变风量空调系统末端的变论域模糊 PID 控制[J]. 控制工程, 2008, 15(5): 564-567.
- [4] 付龙海, 李蒙. 基于 PID 神经网络解耦控制的变风量空调系统[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(1): 13-17.
- [5] 王建明, 李训铭. 变风量系统空调房间建模与特性参数估算[J]. 计算机仿真, 2002, 19(4): 69-72.
- [6] 文生平, 赵国平, 蔡康雄. 一种变论域模糊控制自适应算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 265-268.
- [7] 马少华, 毛宗磊, 马强, 等. 基于改进的粒子群 PID 控制在变风量系统中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报, 2009, 25(3): 600-604.
- [8] WANG L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 1993, 1(2): 146-155.
- [9] 朱瑞琪, 谢家泽, 吴业正. 制冷系统的综合优化控制模型[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 461-464.
- [10] OGATA K. Matlab for Control Engineers [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [11] (上接第 469 页)
- [13] YAKIMOV P I, MANOLOV E D, HRISTOV M H. Design and implementation of a V-F converter using FPAA [C]// 27th International Spring Seminar on Electronics Technology: Meeting the Challenges of Electronics Technology Progress. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 126-129.
- [14] SEKERLI M, BUTERA R J. An implementation of a simple neuron model in field programmable analog arrays [C]// Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 4564-4567.
- [15] LU HONGLI, DUAN PEIYONG. Direct conversion of PID controller to fuzzy controller method for robustness [C]// Proceedings of 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 790-794.
- [16] ADRIAN P F, NICOLAE V. Using an analog fuzzification circuit for real world application [C]// Proceedings of International Conference on Semiconductor 2000. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 281-284.
- [17] TAHA A K, KHATIB M M. Design of a fuzzy logic programmable membership function circuit [C]// Proceedings of the 17th National Radio Science Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2000: 1-6.
- [18] WANG JIANGJIANG, ZHANG CHUNFA, JING YOUYIN. Fuzzy immune self-tuning PID control of HVAC system [C]// Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 678-683.