

文章编号: 1001-0920(2006)12-1412-05

基于模糊线性化预测模型的HVAC系统温度控制

吕红丽¹, 贾磊¹, 王雷¹, 高瑞¹, CAIW en-jian²

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 南洋理工大学电力电子工程学院, 新加坡 639798)

摘要: 针对暖通空调(HVAC)系统难以控制的问题, 提出一种基于max-product推理的Mamdani模糊模型预测控制策略。首先利用一步模糊预测模型的结构分析得到其解析表达式, 获得系统在 $k+1$ 时刻的线性化预测模型; 然后基于模糊线性化模型进行模型预测控制器设计。对HVAC系统的仿真和实验结果表明, 该算法是一种跟踪性能好且鲁棒性强的有效控制算法。

关键词: HVAC系统; Mamdani模糊模型; 预测控制; 线性化

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Model Predictive Control Based on Fuzzy Linearization Technique for Temperature Control of HVAC Systems

LV Hong-li¹, JIA Lei¹, WANG Lei¹, GAO Rui¹, CAIW en-jian²

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798. Correspondent: LV Hong-li, Email: honglita@sohu.com)

Abstract: A new Mamdani fuzzy model predictive control strategy based on max-product inference is proposed in order to control the Heating, Ventilating and Air-conditioning (HVAC) systems. An expression is obtained via the structure analysis expression of the Mamdani fuzzy model. Then the fuzzy linearization predictive models at $k+1$ sampling instant and at P horizon predictive output are designed. Finally simulation results show that the proposed fuzzy model based on predictive control approach is effective for HVAC systems temperature control. Compared with the conventional PD control approaches, this fuzzy model predictive control approach has the advantages of less overshoot and shorter setting time.

Key words: HVAC systems; Mamdani fuzzy model; Predictive control; Linearization

1 引言

典型的暖通空调系统(HVAC系统)由蒸发器回路、压缩机回路、冷凝器回路、空气回路等组成。由于每个回路都存在温度、湿度、流速等多个相互作用的变量, 从而构成典型的高度非线性、时变性、耦合性和不确定性的复杂多变量系统, 很难建立从全局意义上描述系统动态过程的数学模型, 成为HVAC系统难以控制的主要原因。近年来, 不同的控制策略已应用于HVAC系统全局控制或局部控制^[1-4]。在实际工业过程控制中, PD控制器以其容易实现、成

本低廉等特点而被广泛应用。但是PD控制器是基于特定的冷负载设计的, 而实际的冷负载对系统的影响是时变的, 并且难以克服外界扰动的影响。

预测控制是在实际工业过程控制中产生的一种控制策略, 它汲取了现代控制理论中优化的思想, 利用预测模型和滚动优化策略, 通过反馈校正对系统进行在线优化和实时调节, 从而具有更强的鲁棒性。自Richalet描述了在脉冲响应基础上的模型预测启发控制以来^[5], 预测控制在理论及工业应用方面都取得了很大进展^[3]。

收稿日期: 2005-09-19; 修回日期: 2006-01-04

基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(03B5147)。

作者简介: 吕红丽(1978—), 女, 山东曲阜人, 博士生, 从事多变量系统、模糊控制等研究; 贾磊(1959—), 男, 济南人, 教授, 博士生导师, 从事预测控制、模糊控制等研究。

模糊控制和预测控制技术都是针对没有精确数学模型且带有不确定性的系统^[6], 二者结合在一起形成的模糊预测控制, 具有广阔的应用前景^[7,8]。现有的基于模糊预测模型的预测控制系统, 大多采用 Takagi-Sugeno 型模糊模型^[4], 而 T-S 模型对于复杂非线性系统的建模和辨识十分困难, 不利于实际系统的应用 Mamdani 型模糊模型的规则前件和后件均采用模糊集合的形式, 规则库可根据现场操作人员的经验和专家知识来建立。此外, 预测控制中的在线滚动优化和实时调节克服了规则中的不足, 增强了鲁棒性, 因此便于应用于工业过程。

本文提出一种基于 max-product 推理的 Mamdani 型模糊模型, 作为预测模型的预测控制算法, 并将这一模糊预测控制算法应用到 HVAC 系统中空气处理机组(AHU)的温度控制。仿真和实验结果表明了该算法控制的有效性和良好性能。

2 模糊线性化预测模型

本文提出的新型模糊线性化方法, 不需要在每个采样点进行估计或近似, 而是从 Mamdani 模糊模型结构分析的解析表达式, 直接实时计算出系统的线性化预测模型, 基于模糊线性化的模型可用一般的线性方法, 设计当前操作点的线性控制器。图 1 给出了系统的模糊预测控制框图。

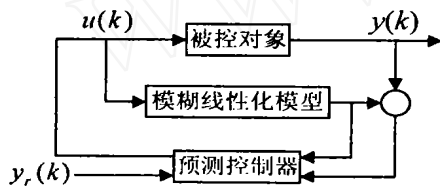


图 1 基于模糊线性化模型的预测控制

下面给出具体算法。假设单输入单输出高度非线性系统为

$$y(k+1) = f(y(k), u(k)). \quad (1)$$

其中: $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别是系统在 k 采样时刻的输入和输出变量, $f(\bullet)$ 是一个非线性函数。

利用模糊系统的通用逼近性^[9], 根据现场操作人员经验和专家知识以及采集到的大量输入输出实验数据, 建立系统(1)的 Mamdani 型模糊控制器 $F(y(k), u(k))$ 。具体设计参数如下所述:

输入输出变量的隶属函数 A_i, B_j, U_{i+j} 均采用对称、均匀分布、全交迭三角形隶属函数, 采用 max-product 模糊推理和等腰模糊数的蕴含运算^[10]。假设 $N = 2J + 1, S = 2/(N - 1) = 1/J$ 。线性模糊规则为

$$R_{i,j}: \text{ If } y(k) \text{ is } A_i \text{ and } u(k) \text{ is } B_j, \\ \text{ Then } y_m(k+1) \text{ is } U_{i+j},$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

在任意采样时刻 k , 对于非线性系统(1)的输入和输出变量 $u(k)$ 和 $y(k)$, 一定存在 $i, j: -J \leq i, j \leq J - 1$, 使得 $y(k) \in [iS, (i+1)S], u(k) \in [jS, (j+1)S]$ 。此时, $y(k)$ 属于模糊数 A_i 和 A_{i+1} , $u(k)$ 属于模糊数 B_j 和 B_{j+1} , 因此 $u(k)$ 和 $y(k)$ 只激活 4 条规则。经过 max-product 模糊推理和重心法解模糊, 得到模糊系统(2)在 k 时刻结构分析的解析表达式

$$y_m(k+1) = \frac{(i+j+1)S + \frac{2S^2\{[u(k)-(j+0.5)S] + [y(k)-(i+0.5)S]\}}{\frac{3}{2}S^2 + |[y(k)-(i+0.5)S] - [u(k)-(j+0.5)S]|} \mp 2[y(k)-(i+0.5)S][u(k)-(j+0.5)S]}}{2}$$

整理得

$$y_m(k+1) = (i+j+1)S + K_y[y(k) - (i+0.5)S] + K_u[u(k) - u(j+0.5)S], \quad (3)$$

其中

$$K_y = K_u = \frac{2S^2}{\frac{3}{2}S^2 + |[y(k)-(i+0.5)S] - [u(k)-(j+0.5)S]| \mp 2[y(k)-(i+0.5)S][u(k)-(j+0.5)S]} \quad (4)$$

显然, 在确定的时刻 k , 式(4)中的参数 i, j, S 均为常数, 模糊系统的解析表达式(3)是一种线性化形式, 因此可简化为如下线性表达式:

$$\begin{cases} y_m(k+1) = K_y y(k) + K_u u(k) + C(k), \\ C(k) = [(i+j+1) - K_y(i+0.5)S - K_u(j+0.5)S]. \end{cases} \quad (5)$$

其中 $C(k) = y(k+1) - (K_y y(k) + K_u u(k))$ 为模糊线性化预测模型与非线性系统之间的误差。

通过采用 max-product 模糊推理对 Mamdani 型模糊系统(2)进行结构分析, 得到其解析表达式, 进而获得非线性系统(1)在时刻 k 的一步线性化预测模型(5)。在此基础上, 便可基于线性模型(5)实现模糊预测控制。

3 预测控制器设计

为使被控过程跟踪设定值, 采用如下预测控制性能指标:

$$J = \sum_{i=1}^{N_y} (y_m(k+i) - y_r(k+i))^2 \quad (6)$$

其中 $y_r(k+i)$ ($i = 1, 2, \dots, N_y$) 为被控对象的输出设定值, N_y 为输出预测时段。

首先假设 $u(k) = u(k+1) = \dots = u(k+N_y)$, 讨论基于模糊预测模型的一步输出预测值。由预测

表 1 模糊控制器规则

$y_m(k+1)$	$y(k)$					
	NB	NS	ZO	PS	PB	
	NB	NT	NB	NM	NS	ZO
	NS	NB	NM	NS	ZO	PS
$u(k)$	ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
	PS	NS	ZO	PS	PM	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PT

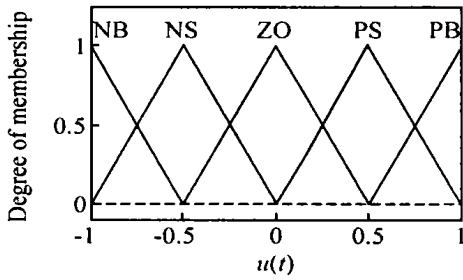


图 2 AHU 系统输入输出变量的隶属函数集合

域 $N_y = 20$, 控制时域 $N_u = 10$, 设定输出温度为 $t = 1$. 图 3 给出了采用本文控制策略的控制性能仿真结果, 并与常规 PD 控制器的控制效果进行比较

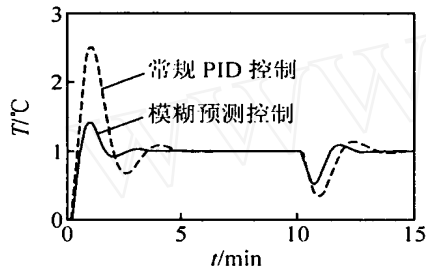


图 3 AHU 系统控制器性能仿真结果

仿真结果表明, 采用本文提出的基于 max-product 推理的 Mamdani 型模糊线性化预测控制算法, 通过冷凝水的流速来控制回风干球温度 T_{ao} 是有效的, 在初始条件下经过大约 4 min 的调节时间, 房间温度就能达到设定温度. 与常规的 PD 控制器相比, 模糊预测控制跟踪迅速, 超调量小, 调整时间短, 动态性能较好, 并且不存在稳态偏差. 由于模糊控制和预测控制都有很强的鲁棒性, 适合于存在不确定性的 AHU 系统的控制

4.2 HVAC 系统实验结果

在山东大学 HVAC 节能控制研究所实验室平台上 (如图 4 所示), 将该控制方法实际应用于 HVAC 系统的空气处理机组的温度控制. HVAC 系统由 3 个蒸发器, 3 个冷却塔, 3 个区域共 12 个房间和 3 组 AHU 系统组成. 所有电机 (包括风扇、泵、压缩机等) 设备都采用 VSD 装置. 采用如下模糊规则模型作了大量实验研究和测试, 得出了如图 5 所示

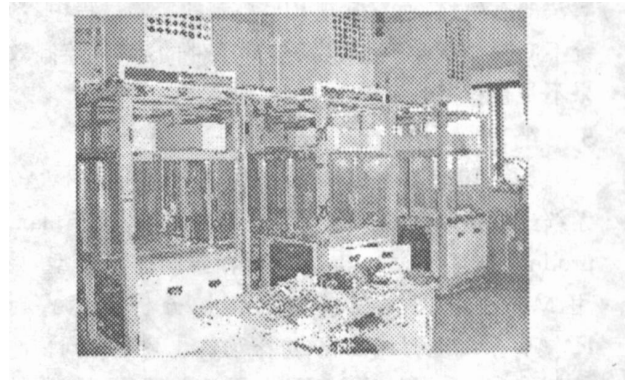
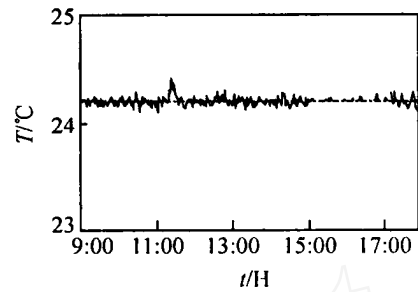
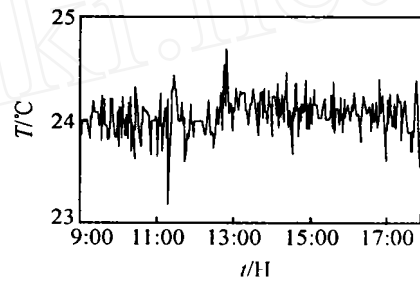


图 4 HVAC 系统的实验室装置



(a) 模糊预测控制



(b) 常规 PD 控制

图 5 AHU 系统实验结果

的实验效果

- R_1 : if $y(k) = P$ and $u(k) = P$ then $y_m(k+1) = PB$,
- R_2 : if $y(k) = P$ and $u(k) = Z$ then $y_m(k+1) = PS$,
- R_3 : if $y(k) = Z$ and $u(k) = N$ then $y_m(k+1) = NS$,
- R_4 : if $y(k) = N$ and $u(k) = N$ then $y_m(k+1) = NB$,
- R_5 : if $y(k) = N$ and $u(k) = P$ then $y_m(k+1) = ZO$.

其中 P, N, PB, PS, NB, NS, Z, ZO 分别表示对应的输入输出隶属函数

实验结果表明, 采用本文设计的模糊线性化预测控制方案, 对 HVAC 系统 AHU 机组的回风温度进行控制, 系统基本可以稳定地维持在设定值 24.2 左右, 表现出很强的鲁棒性, 体现了该控制

算法的有效性 而在常规PD控制的实验过程中,系统不断受到扰动变量以及外部条件的影响,控制效果不是很稳定

5 结 语

为了探讨具有复杂非线性时变特征的HVAC系统难以控制问题,本文提出一种新型的基于max-product推理的Mamdani型模糊预测控制模型 采用Mamdani型模糊模型的结构分析表达式对HVAC系统进行线性化,由滚动优化策略得到预测控制律,并通过反馈校正环节不断改善预测控制的性能,构成了HVAC系统的闭环优化控制 实验结果表明,该算法是一种跟踪误差较小且鲁棒性较强的有效控制算法 与常规的PD控制器相比,它具有超调量小、调整时间短等优良的动态性能

关于多输入多输出的模糊模型的预测控制问题,还有待于进一步研究 这也是作者今后努力的方向之一.

参考文献(References)

- [1] Salisbury T I. A Temperature Controller for VAV Air-handling Units Based on Simplified Physical Models[J]. *HVAC & Research*, 1998, 3(3): 264-279
- [2] Bi Q, Cai W J, Guo Q. Advanced Controller Auto-tuning and Its Application in HVAC Systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(6): 633-644
- [3] He M, Cai W, Li S. Multiple Fuzzy Model-based Temperature Predictive Control for HVAC Systems[J]. *Information Sciences*, 2005, 169(1): 155-174
- [4] Richard Thompson, Arthur Dexter. A Fuzzy Decision-making Approach to Temperature Control in Air-conditioning Systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(6): 689-698
- [5] Richalet J, Rault A, Testud J L, et al. Model Predictive Heuristic Control: Application to Industrial Processes[J]. *Automatica*, 1978, 14(5): 413-428
- [6] 樊晓平, 李艳. 交通信号自适应模糊控制器的设计及稳定性分析[J]. *控制与决策*, 2005, 20(2): 152-158 (Fan X P, Li Y. Design and Stability Analysis of the Adaptive Fuzzy Controller for Traffic Signal Control [J]. *Control and Decision*, 2005, 20(2): 152-158)
- [7] 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(1): 170-176
- [8] Liu X F, Dexter A. Fault-tolerant Supervisory Control of VAV Air-conditioning Systems [J]. *Energy and Building*, 2001, 33(4): 379-389
- [9] Cao S G, Rees N W, Feng G. Universal Fuzzy Controllers for a Class of Nonlinear Systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 122(16): 117-123
- [10] Lv H L, Jia L. Structure Analysis of Typical Fuzzy Controllers Using Different Fuzzy Reasoning [A]. *Proc of the 5th World Conf on Intelligent Control and Automation* [C]. Hangzhou, 2004: 2561-2565
- [11] Duan J, Sealey C W, Yan Y. Managing Banks' Duration Gaps When Interest Rates Are Stochastic and Equity Has Limited Liability [J]. *Int Review of Economics and Finance*, 1999, 8(3): 253-265
- [12] 张琦, 蒋馥. 期限结构模型在资产负债管理问题中应用的探讨[J]. *预测*, 2001, 20(2): 45-48 (Zhang Q, Jing F. Research on the Application of Term-structure Models in the Asset-liability Management Problem [J]. *Forecasting*, 2001, 20(2): 45-48)
- [13] 左晖. 利率变动下的存续期缺口管理和流量比例调整 [J]. *武汉理工大学学报(社会科学版)*, 2003, 16(5): 524-527. (Zuo H. Macaulay Duration Gap Management and Flux Ratio Adjustments in a Condition of Interest Rate Change [J]. *Wuhan University of Technology (Social Science Edition)*, 2003, 16(5): 524-527.)
- [14] Chi G T, Xu C, Li Y X. Optimal Decision-making Model of Asset-liability Portfolio for Banks [A]. *Proc of 2000 Int Conf on China Joins the World Trade Organization* [C]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 2000: 67-73

(上接第1411页)