

HVAC 系统的模糊预测函数控制器设计

吕红丽, 贾磊, 王雷, 高瑞

(山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061)

[摘要] 针对暖通空调 HVAC 系统中由于存在高度非线性、时变特征以及扰动和不确定性等因素而难以控制的特点, 提出基于 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊模型的预测函数控制器设计方法。该方法通过最小二乘辨识算法建立系统的模糊 T-S 模型, 然后基于模糊全局线性化预测模型, 采用预测函数控制算法设计系统控制律。仿真实验结果表明该算法是一种跟踪性能好、鲁棒性强的有效控制方法。与常规的 PID 控制器相比, 该方法具有超调量小、调整时间短等优良的动态性能。

[关键词] T-S 模糊模型; 预测函数控制; 最小二乘算法; HVAC 系统

[中图分类号] TP273 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)09-0065-04

1 引言

暖通空调系统 (HVAC, heating, ventilating, and air-conditioning systems) 中存在温度、湿度、压力等多个相互作用的变量, 由蒸发器回路、压缩机回路、冷凝器回路等多个子系统组成, 构成了高度非线性、时变特征和不确定多变量系统^[1]。因此很难建立全局意义上的数学模型来精确描述 HVAC 系统的动态过程, 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^[1-3]。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 PID 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 PID 控制具有更好的稳定性能^[2]。Moreira 等将一种新型的鲁棒模型预测控制应用到 HVAC 系统的控制中, 缩短了调节时间, 提高了系统的控制质量^[3]。在实际工业过程的控制中, 由于 PID 控制器具有容易实现、成本低廉、可靠性高等特点, 被广泛应用。但是实际的冷负载对系统影响是时变的, 而

PID 控制器是基于特定的冷负载设计的, 而且由于其结构简单, 难以克服外界扰动及不确定性对复杂 HVAC 系统的影响, 因此鲁棒性差, 不能实现对参考轨迹的良好跟踪。

预测函数控制最早是由 Richalet 和 Kuntze 等人在 20 世纪 80 年代后期提出的一种新型模型预测控制算法, 并成功应用于工业机器人的快速高精度跟踪控制^[4,5]。此后预测函数控制在理论上和工业应用中都取得了一系列研究成果^[6,7]。预测函数控制区别于其他预测控制算法的最大特点是注重控制量的结构形式, 把控制输入的结构视为确保控制系统性能的关键问题, 而且算法简单、计算量小, 同时具有良好的跟踪能力及较强的鲁棒性。为了克服传统 PID 控制效果不理想的缺点, 更好地提高预测函数控制的鲁棒性, 提出一种基于 Takagi (Sugeno 模糊模型的预测函数控制器设计方法, 并将其应用到 HVAC 系统的空气处理机组 (AHU, air handling unit) 的温度控制中。仿真结果表明了该算法是一种跟踪性能好, 鲁棒性强的有效控制方法。

[收稿日期] 2005-06-09; **修回日期** 2005-07-13

[基金项目] 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目 (031B5147)

[作者简介] 吕红丽 (1978-), 女, 山东曲阜市人, 山东大学博士研究生, 主要研究方向: 模糊控制, 预测控制, 多变量系统等

2 模糊 T-S 模型辨识

为设计基于模糊 T-S 模型的预测函数控制器, 首先必须建立系统的模糊 T-S 模型, 模糊辨识的主要目的是通过结构辨识和未知参数估计建立一组模糊规则集合, 从而能够准确描述系统输入输出变量之间的动态特性。采用 T-S 型模糊模型的一般结构表达式及其辨识方法^[8], 考虑单输入单输出非线性系统:

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

其中 $y_m(k)$, $u(k)$ 分别是系统在 k 时刻的输出, 输入变量, $f(\cdot)$ 是一个非线性函数。由于模糊系统的通用逼近性^[9], 一定存在满足以下结构的 T-S 型模糊系统无限逼近非线性系统式 (1):

$$R^j: \text{If } y_m(k) \text{ is } A_j \text{ Then } y_m(k+1) =$$

$$a_{mj}y_m(k) + b_{mj}u(k) + r_{mj}, j = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

其中, A_j 是 $y_m(k)$ 所属的模糊集合, $\mu_{A_j}(y_m(k))$ 表示 $y_m(k)$ 在集合 A_j 上的隶属度。 l 表示模糊模型的规则个数, 通过 Sum-product 模糊推理及加权平均法解模糊得到其全局线性模型

$$y_m(k+1) = \sum_{j=1}^l \beta_j(k) (a_{mj}y_m(k) + b_{mj}u(k) + r_{mj}) \quad (3)$$

其中

$$\beta_j = \mu_{A_j}(y_m(k)) / \sum_{j=1}^l \mu_{A_j}(y_m(k)), \text{ 且 } \sum_{j=1}^l \beta_j = 1.$$

确定了模糊模型的结构之后, 用最小二乘法辨识模糊模型式 (2) 的系统参数 a_{mj} , b_{mj} , r_{mj} , $j = 1, 2, \dots, l$ 。首先需要在动态过程中采集非线性系统式 (1) 的 $N+1$ 组 (N 足够大) 输入输出采样数据对, 然后令 $\psi_j(k) = [\beta_j(k) \ y_m(k) \ \beta_j(k) \ u(k) \ \beta_j(k)]$ 则由采样得到的输入输出数据对组成矩阵形式

$$\Psi_j = \begin{bmatrix} \beta_j(1)y_m(1) & \beta_j(1)u(1) & \beta_j(1) \\ \beta_j(2)y_m(2) & \beta_j(2)u(2) & \beta_j(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_j(N)y_m(N) & \beta_j(N)u(N) & \beta_j(N) \end{bmatrix},$$

由第 j 条规则构成的输出变量为 $y_m^j(k+1) = \beta_j y_m(k+1)$, 于是输出数据向量为

$$Y_m^j = \begin{bmatrix} \beta_j(1)y_m(2) \\ \beta_j(2)y_m(3) \\ \vdots \\ \beta_j(N)y_m(N+1) \end{bmatrix},$$

令 $\theta_j = [a_{mj} \ b_{mj} \ r_{mj}]^T$, 则 $y_m^j(k+1) = \psi_j(k)\theta_j$ 。根据最小二乘法得到第 j 条规则的模糊模型参数

$$\theta_j = (\Psi_j^T \Psi_j)^{-1} \Psi_j^T Y_m^j \quad (4)$$

同理可以辨识出所有模糊规则的模型参数, 从而得到系统的模糊模型的全局线性模型为

$$y_m(k+1) = a_m y_m(k) + b_m u(k) + r_m \quad (5)$$

其中 $a_m = \sum_{j=1}^l \beta_j(k) a_{mj}$, $b_m = \sum_{j=1}^l \beta_j(k) b_{mj}$, $r_m = \sum_{j=1}^l \beta_j(k) r_{mj}$ 。

3 模糊预测函数控制 (FPFC)

预测控制是基于动态过程的预测模型, 预测未来一段时域上的输出信号, 利用滚动优化技术, 通过使性能指标式

$$J(u, k) = \sum_{i=1}^H \alpha_i (y_p(k+i) - y_r(k+i))^2 + \sum_{i=1}^{N_u} \beta_i u(k+i-1)^2 \quad (6)$$

达到最小, 获得预测控制律, 将预测控制律的第一个元素作用于系统。其中 H , N_u 分别是输出预测和控制时域, α_i , β_i 分别是输出和输入加权系数, $y_p(k+i)$, $y_r(k+i)$, $u(k+i-1)$ 分别是预测输出、参考输出和控制量。

模糊预测函数控制 (FPFC) 是在系统 T-S 模糊模型式 (5) 的基础上, 对系统式 (1) 进行预测函数控制器设计。假设一步全局模糊 T-S 预测模型是一阶线性模型

$$y_p(k+1) = a_p y_p(k) + b_p u(k) + r_p \quad (7)$$

其中 a_p , b_p , r_p 是已知常数, 假设 $u(k) = u(k+1) = \dots = u(k+H)$ 且 $\lambda = 0$, 根据预测模型式 (7), 由当前预测输出 $y_p(k)$ 和控制输入 $u(k)$ 计算出未来 H 步的输出预测值

$$y_p(k+H) = y_p(k+1) = a_p^H y_p(k) + b_p \sum_{j=0}^{H-1} a_p^j u(k) + \sum_{j=0}^{H-1} a_p^j r_p(k) \quad (8)$$

参考输出信号模型选取微分方程

$$y_r(k+1) = a_r y_r(k) + b_r \omega(k) \quad (9)$$

其中, a_r , b_r 为已知常数并且满足 $b_r/(1-a_r) = 1$, $\omega(k)$ 为参考信号。

$$\text{于是 } y_r(k+1) = a_r y_r(k) + (1-a_r)\omega(k)$$

$$(10)$$

故 $k+H$ 时刻的参考轨迹预测值是

$$y_r(k+H) = a_r^H y_r(k) + (1 - a_r^H) \omega(k) \quad (11)$$

模糊预测函数控制的主要思想是使目标增量和模型输出增量相等。目标增量为预测参考信号 $y_r(k+H)$ 与实际过程输出信号 $y_m(k)$ 之间的差, 即

$$\Delta_m(k) = a_r^H y_r(k) + (1 - a_r^H) \omega(k) - y_m(k) \quad (12)$$

预测模型输出增量为

$$\Delta_p(k) = y_p(k+H) - y_p(k)$$

由式 (8) 知

$$\Delta_p(k) = a_p^H y_p(k) + b_p \sum_{j=0}^{H-1} a_p^j u(k) + \sum_{j=0}^{H-1} a_p^j r_p(k) - y_p(k) \quad (13)$$

由上述各方程及预测函数控制的目标, 即在 k 时刻通过 $\Delta_m(k) = \Delta_p(k)$ 得到 k 时刻的控制律为

$$u(k) = [a_r^H (y_r(k) - \omega(k)) + (\omega(k) - y_m(k))] / [b_p \sum_{j=0}^{H-1} a_p^j + (1 - a_p) y_p / b_p - r_p / b_p] \quad (14)$$

4 仿真结果

考虑 HVAC 系统的 AHU 单元, 它由蒸发器、风阀、回风机、冷凝水泵和节流控制阀等组成 (见图 1)。回风机的干球温度 T_{ao} 作为 AHU 系统的输出变量, 冷凝水的流速 \dot{m}_{chw} 是 AHU 系统的输入变量, 它们之间存在着以下关系:

$$T_{ao} = f(\dot{m}_{chw}, \dot{m}_a, T_{ai}, T_{chwi}) \quad (15)$$

其中, f 表示 AHU 系统的输入和状态变量之间的非线性时变函数, \dot{m}_a 表示进风流速, T_{ai} 表示进风干球温度, T_{chwi} 表示冷凝水进入蒸发器之前的温度。由于 AHU 系统的空气和冷凝水的动态特性相当复杂, 很难建立精确的数学模型, 根据现场操作人员的经验和专家知识以及采集到的 AHU 系统的大量输入输出实验数据, 采用最小二乘法建立 AHU 系统的 T-S 模糊规则集, 如式 (2) 形式。在此基础上, 用模糊预测函数控制算法对其进行控制。选取采样周期 $T = 10$ s, 输出预测时域 $H = 15T$, 设定值温度为 $y_r = 26^\circ\text{C}$, 对 AHU 系统进行了大量仿真实验, 获得了如图 2 所示的仿真结果。在此基础上, 在山东大学 HVAC 实验室设备平台上进行了实验研究, 得到了较满意的控制性能。

仿真结果表明, 采用基于 T-S 模糊模型的预

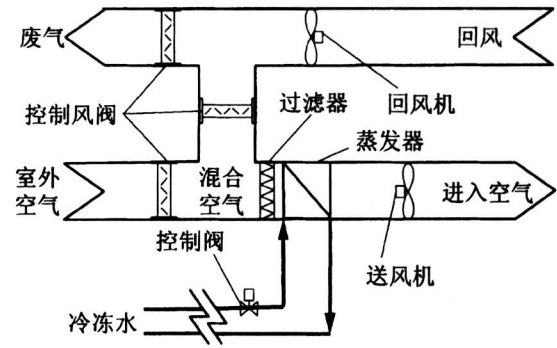


图 1 空气处理机 AHU 的结构图

Fig.1 Pilot plant of air handling unit

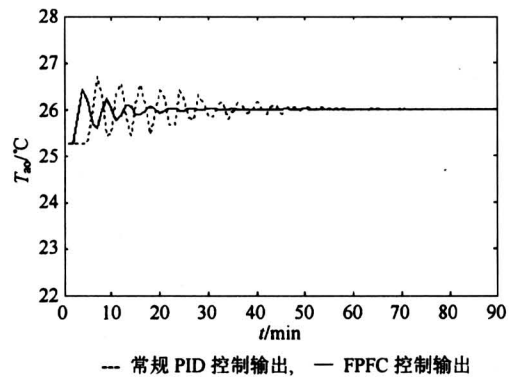


图 2 AHU 系统控制器性能的仿真结果

Fig.2 Simulation result of AHU systems controller performance

测函数控制算法, 在 AHU 系统中通过冷凝水的流速来控制回风干球温度是有效的, 从室温条件下经过约 16 min 的调节时间, 房间温度就能达到设定温度。与常规的 PID 控制器相比, FPFC 具有超调量小, 调整时间短等优良的动态性能, 并且不存在稳态偏差, 跟踪迅速。

5 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非线性系统, 针对 HVAC 系统难以控制的现状, 提出了一种新型的基于 T-S 模糊模型的预测函数控制器设计方法。应用到 AHU 系统中的仿真结果表明, 该算法是一种跟踪性能好、鲁棒性强的有效控制方法。与常规的 PID 控制器相比, 该方法具有超调量小、调整时间短等优良的动态性能。模糊 T-S 模型预测函数控制成功地应用于 HVAC 系统的 AHU 单元回风干球温度控制, 体现了该方法的实用性。并且说明该算法也适用于存在着高度非线性以及不确定性等因素

的复杂系统。下一步将研究基于更高阶的模糊 T-S 预测模型的预测函数控制。

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, 2000, 8: 633 ~ 644
- [2] Ghiaus C. Fuzzy model and control of a fan-coil [J]. Energy and Buildings, 2001, 33: 545 ~ 551
- [3] Moreira V D, Amaral W C, Ferreira P A. A new approach for robust model predictive control with an application to an air conditioning system [A]. The 2004 IEEE International Conference on Control Applications [C]. Taipei, 2004, 667 ~ 672
- [4] Richalet J, Atadoss S A, Arber C, et al. Predictive functional control: application to fast and accurate robots [A]. IFAC 10th World Congress [C]. Munich, PRG, 1987. 251 ~ 258
- [5] Kuntze H B, Jacubasch A, Richalet J, et al. On the predictive functional control of an elastic industrial robots [A]. Process 25th Control and Decision Conference [C]. Athens, Greece, 1986. 1877 ~ 1881
- [6] 席裕庚. 预测控制, 第一版 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993
- [7] 韩 璞, 王东风, 王国玉, 等. 多模型预测函数控制及其应用 [J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 378 ~ 381
- [8] Takagi S. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, 15: 116 ~ 132
- [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: 117 ~ 123

Predictive Functional Control Based on Fuzzy Model for HVAC Systems

Lu Hongli, Jia Lei, Wang Lei, Gao Rui

(*School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China*)

[**Abstract**] In HVAC systems, there exist severe nonlinearity, time-varying nature, disturbances and uncertainty. A novel predictive functional control strategy based on Takagi-Sugeno fuzzy model was developed in order to settle the difficulty to control HVAC systems. The T-S fuzzy model of controlled process was obtained using the least squares method, then basing on the fuzzy T-S global linear predictive model, the process was controlled by the predictive functional control strategy. Finally, the simulation results in HVAC systems control application showed that the proposed fuzzy model predictive functional control approach improves tracking effect and robustness. Compared with the conventional PID control approaches, this FPFC approach has better dynamical performance such as less overshoot and shorter regulation time, etc.

[**Key words**] T-S fuzzy model; predictive functional control; least squares method; HVAC systems