

室内热舒适环境的模糊关系矩阵模型控制系统

段培永¹, 吕红丽^{1,2†}, 冯俊娥², 刘聪聪^{1,4}, 李慧³

(1. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东大学数学学院, 山东 济南 250100;

3. 山东建筑大学热能工程学院, 山东 济南 250101; 4. 山东省邮电规划设计院有限公司建筑设计院, 山东 济南 250101)

摘要: 针对复杂非线性系统中多个输出不能解耦的控制问题, 基于实际系统的采样数据, 利用矩阵半张量积运算建立模糊关系矩阵模型, 得出一种新型模糊控制器设计方法. 将传统模糊控制中的推理过程和模糊规则的建立转化成矩阵运算, 有效避免了建模和控制的复杂性. 将其应用于室内热环境舒适度控制系统中, 基于室内外的温度、湿度等多个变量的采样数据对, 给出具体的模糊关系矩阵的建立过程, 设计得出新型模糊控制器. 仿真和实验结果表明, 该方法能够实现室内热环境的舒适度控制, 并且不需要进行多变量之间的解耦.

关键词: 矩阵半张量积; 模糊关系矩阵; 多输入多输出(MIMO)系统; 热舒适度控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Fuzzy relation matrix model control system for indoor thermal comfort

DUAN Pei-yong¹, LÜ Hong-li^{1,2†}, FENG Jun-e², LIU Cong-cong^{1,4}, LI Hui³

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

2. School of Mathematics, Shandong University, Jinan Shandong 250100, China;

3. School of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong 250101, China;

4. Architecture Design Institute, Shandong P&T Planning and Designing Institute Co., Ltd, Jinan Shandong 250101, China)

Abstract: For nonlinear control systems with multiple outputs which cannot be decoupled, we make use of the sampling data of the real system to obtain a fuzzy relation matrix model via the semi-tensor product (STP) operation of matrices, and design a novel fuzzy controller based on this model. In this method, the traditional fuzzy logic-reasoning and fuzzy rule-building in the fuzzy control system are converted into matrix algebraic computations, effectively reducing the complexity in modeling and control. This method has been applied to design the controller for indoor thermal comfort control. On the basis of the indoor and outdoor temperature, humidity etc., we calculate the fuzzy relation matrix and build the fuzzy controller. Experiments and simulation results show that this fuzzy controller can realize the optimal control of the thermal comfort system, without the need of decoupling multiple outputs.

Key words: semi-tensor product; fuzzy relation matrix; multi-input multi-output (MIMO) system; thermal comfort control

1 引言(Introduction)

室内外热舒适度控制系统的参数之间具有耦合、不确定性等相互关系, 构成了复杂的非线性多输入多输出(MIMO)系统. 而非线性MIMO系统中的耦合控制问题一直是人们研究的难点^[1-3]. 室内热环境的舒适性通常采用PMV(predicted mean vote)指标衡量^[4]. 在热舒适度控制方面中, 出现了基于最优化理论^[5]、模糊控制^[6]、预测算法^[7]、智能算法^[8]等基于PMV指标的控制方法. 室内热环境受到室内温度、湿度、风速和室外各种环境等多方面因素的影响. 但是现有居住环境热舒适度控制中, 很少考虑室内外温湿度等变量之间的耦合关系以及室外环境对室内

热环境的影响.

模糊控制自从产生以来, 由于不需要建立精确数学模型而被广泛应用到实际过程控制中^[9-10], 大大促进了难以建模的MIMO系统控制发展^[11-12]. 模糊控制中的T-S模型能够进行MIMO系统的设计, 但是局限于理论研究, 几乎很难应用于实际系统. 而在对实际系统的多输出模糊控制器设计中, 绝大多数是将其进行输出解耦转化为多个单输出系统的模糊控制器设计, 从而降低了控制精度. 而且模糊控制设计过程中的模糊推理和模糊规则的建立等过程很难被操作人员所接受, 传统的模糊控制策略难以实现对输出不能解耦系统的精确控制.

收稿日期: 2012-05-28; 收修改稿日期: 2012-10-15.

†通信作者. Tel.: +86 15964021432.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61004005, 61074070, 60974137); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2011FQ013, ZR2009GZ004); 山东省博士后创新基金资助项目(201202024); 山东省杰出青年基金资助项目(JQ201219); 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金资助项目(BS2011SF009); 山东省科技攻关资助项目(2009GG10001029).

近年来,程代展教授提出一种新的矩阵运算——半张量积^[13],将普通矩阵乘法推广到任意两个矩阵的乘法,在非线性控制系统分析方面特别是多变量系统的控制中得到了成功应用^[14-15].文献[16]将矩阵半张量积算法引入到模糊逻辑系统中,得出一种基于模糊关系矩阵的新型模糊控制器设计方法,能够有效地分析非线性控制系统.但是没有给出如何从实际系统采样数据中获取模糊关系矩阵的具体算法,本文弥补了这一不足,建立了基于输入输出数据对的模糊模型.这种方法不仅解决了多输出系统的耦合问题,而且直接用矩阵运算代替了模糊规则和模糊推理复杂过程,运算简便而且容易操作.

为了验证该新型模糊控制器的有效性,本文将该设计方法应用到智能环境的热舒适度控制中,能够成功实现室内热环境的控制.

2 基于矩阵半张量积的模糊控制器设计 (The design of fuzzy controller based on matrix semi-tensor product)

2.1 模糊集合的矩阵半张量积表示(The expression of matrix semi-tensor product based on fuzzy sets)

为便于下面叙述方便,首先介绍一些必需的符号与定义.设 $D_k = \{0, \frac{1}{K-1}, \frac{2}{K-1}, \dots, \frac{K-2}{K-1}\}$; $D_k^{m,n}$ 是元素在 D_k 中取值的 $m \times n$ 矩阵.

定义 1^[17] 设 $A \in D_k^{m,n}$, $B \in D_k^{p,q}$,且设 n 与 p 的最小公倍数为 α ,则矩阵 A 与 B 的半张量积,记作 $A \times B$,定义为

$$A \times B = (A \otimes I_{\frac{\alpha}{n}})(B \otimes I_{\frac{\alpha}{p}}). \quad (1)$$

注 1 在模糊逻辑系统的模糊关系合成运算中,由于上述定义中 $A = (a_{i,j})$, $B = (b_{i,j})$, \otimes 是Kronecker乘积,所以在模糊关系矩阵 A 与 B 的半张量积运算过程中,所有乘积运算为取小运算,所有求和运算为取大运算.

定义 2^[16] 设一个有限论域 E , $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$,若 A 是论域 E 上的一个模糊子集,则 A 可表示为

$$A = \frac{e_1}{\alpha_1} + \frac{e_2}{\alpha_2} + \dots + \frac{e_n}{\alpha_n}, \quad (2)$$

其中 $\alpha_i = \mu_A(e_i)$ 是元素 e_i 在模糊集 A 上的隶属度.模糊子集 A 按照列向量的形式可表示为

$$v_A = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T \in \mathbb{R}^n, \quad (3)$$

其中 \mathbb{R}^n 是 n 维实数空间.

传统的模糊关系矩阵都是针对两个论域而言,为了求解多论域之间的模糊关系矩阵,给出以下多变量模糊关系的定义.

定义 3^[16] 设 $A = \{a_{i_1, i_2, \dots, i_k} | i_j = 1, 2, \dots, n_j; j = 1, 2, \dots, k\}$ 是数据集,其下标 $i = i_1, i_2, \dots,$

i_k 是 k 重索引. $Id(i_1, i_2, \dots, i_k; n_1, n_2, \dots, n_k)$ 是数据索引顺序,若 $1 \leq s \leq k$, $i_s \leq i'_s$,则 a_{i_1, i_2, \dots, i_k} 排列在 $a_{i'_1, i'_2, \dots, i'_k}$ 之前. 设 $E^i = \{e_1^i, e_2^i, \dots, e_{n_i}^i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$,模糊关系矩阵的元素记为 $r_{j_1, j_2, \dots, j_k} = \mu_R(e_{j_1}^1, e_{j_2}^2, \dots, e_{j_k}^k)$, $j_t = 1, 2, \dots, n_t$, $t = 1, 2, \dots, k$. $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ 和 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ ($p + q = k$)是集合 $\{1, 2, \dots, k\}$ 中两个互补的子集.模糊关系矩阵 $M_R \in M_{(n_{\alpha_1} \times n_{\alpha_2} \times \dots \times n_{\alpha_p}) \times (n_{\beta_1} \times n_{\beta_2} \times \dots \times n_{\beta_q})}$ 的元素

$$r_{j_1, j_2, \dots, j_k}, j_t = 1, 2, \dots, n_t; t = 1, 2, \dots, k,$$

可按照 $Id(j_{\alpha_1}, j_{\alpha_2}, \dots, j_{\alpha_p}; n_{\alpha_1}, n_{\alpha_2}, \dots, n_{\alpha_p}) \times Id(j_{\beta_1}, j_{\beta_2}, \dots, j_{\beta_q}; n_{\beta_1}, n_{\beta_2}, \dots, n_{\beta_q})$ 的索引顺序排列.即 M_R 的行向量按照 $Id(j_{\alpha_1}, j_{\alpha_2}, \dots, j_{\alpha_p}; n_{\alpha_1}, n_{\alpha_2}, \dots, n_{\alpha_p})$ 的顺序排列,列向量按照 $Id(j_{\beta_1}, j_{\beta_2}, \dots, j_{\beta_q}; n_{\beta_1}, n_{\beta_2}, \dots, n_{\beta_q})$ 的顺序排列.

2.2 基于模糊关系矩阵的模糊控制器设计(The design of fuzzy controller based on fuzzy relation matrix)

在针对MIMO系统的模糊控制器设计中,为了简化模糊规则的建立和模糊推理过程,本节首先引出一种基于模糊关系矩阵的模糊控制器结构,如图1所示.基于矩阵的半张量积运算,通过直接建立输入输出变量之间的模糊关系结构矩阵得出模糊控制器.其与传统模糊控制器的区别在于舍弃了规则库,来实现传统结构下的数字化模糊控制.

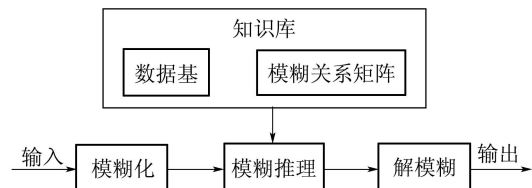


图1 基于模糊关系矩阵的模糊控制器结构

Fig. 1 The structure of fuzzy controller based-on fuzzy relation matrix

下面介绍一种对偶模糊结构.

定义 4^[16] 设 E 是论域, $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 是 E 上的模糊子集. (E, A) 构成了一个模糊结构,模糊子集 A_i 的支集记为 $\text{Supp}(A_i) = \{e \in E | \mu_{A_i}(e) \neq 0 \subset E\}$.

定义 5^[16] 设论域 E 是有序集.若 $\sup(\text{Supp}(A_i)) < \sup(\text{Supp}(A_{i+1}))$,则称 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 为基于隶属度的模糊关系集合.

定义 6^[16] 给定一个模糊结构 (E, A) ,其中: E 是有序集, A 是基于隶属度的模糊关系集合.若将 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ 看作论域, $e \in E$ 看作模糊集合,则 (A, E) 也构成模糊结构,且有下式成立:

$$v_e(A_i) = v_{A_i}(e), i = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

这种模糊结构\$(E, A)\$称为\$(A, E)\$的对偶模糊结构. 当\$A\$是有限集时, 对偶模糊结构存在有限的论域.

实际上, 模糊化过程就是寻找对偶模糊结构的过程. 假设被控系统有\$m\$个输入, \$p\$个输出, 则模糊控制器可表示为如下形式:

$$\Sigma \in f(Y_1 \times \dots \times Y_p \times U_1 \times \dots \times U_m), \quad (5)$$

其中: \$Y_i(i = 1, 2, \dots, p)\$和\$U_j(j = 1, 2, \dots, m)\$均已模糊化, \$\{Y_i\}\$是模糊控制器的输入, \$\{U_j\}\$是模糊控制器的输出. 模糊控制器的建立和运行过程可表述如下:

1) 将模糊集合\$Y_i\$和\$U_j\$按照隶属度表示如下:

$$\begin{cases} E_{Y_i} = \{y_1^i, \dots, y_{\alpha_i}^i\}, i = 1, \dots, p, \\ E_{U_j} = \{u_1^j, \dots, u_{\beta_j}^j\}, j = 1, \dots, m, \end{cases} \quad (6)$$

式中\$y_k^i(k = 1, \dots, \alpha_i)\$和\$u_q^j(q = 1, \dots, \beta_j)\$对应于模糊子集“负大”、“负中”、... . 由于采用对偶模糊结构, 所以\$Y_i\$和\$U_j\$的论域分别是\$E_{Y_i}\$和\$E_{U_j}\$, \$y_i \in Y_i\$和\$u_j \in U_j\$分别是论域\$E_{Y_i}\$和\$E_{U_j}\$上的模糊子集.

模糊控制器本质上就是模糊子集\$\{Y_1, \dots, Y_p\}\$, \$\{U_1, \dots, U_m\}\$之间的模糊关系, 即\$\Sigma\$是\$\prod_{i=1}^p Y_i \times \prod_{j=1}^m U_j\$上的模糊关系. 对应上述乘积空间中的每个变量, 它们的隶属度函数可表示为

$$\begin{cases} \mu_{\Sigma}(y_{\varepsilon_1}^1, \dots, y_{\varepsilon_p}^p, u_{\eta_1}^1, \dots, u_{\eta_m}^m) = \gamma_{\eta_1, \dots, \eta_m}^{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p}, \\ \varepsilon_i = 1, \dots, \alpha_i, i = 1, \dots, p, \\ \eta_j = 1, \dots, \beta_j, j = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (7)$$

按照\$Id(\eta_1, \dots, \eta_m; \beta_1, \dots, \beta_m) \times Id(\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p; \alpha_1, \dots, \alpha_p)\$的索引顺序, 将\$\{\gamma_{\eta_1, \dots, \eta_m}^{\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p}\}\$排列成一个矩阵如下所示:

$$\begin{pmatrix} \gamma_{1 \dots 1}^{1 \dots 1} & \gamma_{1 \dots 1}^{1 \dots 2} & \dots & \gamma_{1 \dots 1}^{1 \dots \alpha_p} & \dots & \gamma_{1 \dots 1}^{\alpha_1 \dots \alpha_p} \\ \gamma_{1 \dots 2}^{1 \dots 1} & \gamma_{1 \dots 2}^{1 \dots 2} & \dots & \gamma_{1 \dots 2}^{1 \dots \alpha_p} & \dots & \gamma_{1 \dots 2}^{\alpha_1 \dots \alpha_p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{\beta_1 \dots \beta_m}^{1 \dots 1} & \gamma_{\beta_1 \dots \beta_m}^{1 \dots 2} & \dots & \gamma_{\beta_1 \dots \beta_m}^{1 \dots \alpha_p} & \dots & \gamma_{\beta_1 \dots \beta_m}^{\alpha_1 \dots \alpha_p} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

如前所述, 一个模糊控制器实质上是输入输出变量之间的模糊关系, 模糊关系又可表示为矩阵形式. 因此, 一个模糊控制器中输入输出变量间的关系可直接用如式(8)所示的矩阵表示出来.

引理 1^[16] 设\$H = \{h_1, \dots, h_n\}\$, \$G = \{g_1, \dots, g_m\}\$, 模糊关系\$f: H \to G\$存在一个结构矩阵\$M_f \in D_k^{m \times n}\$. 它推广到矩阵形式\$f: f(H) \to f(G)\$, 并且满足: 1) \$v_{f(A)} = M_f \times v_A, \forall A \in f(H)\$; 2) \$v_{f^{-1}(B)} = M_f^T \times v_B, \forall B \in f(G)\$. 证明过程参见文献[16].

2) 给定一组模糊输入变量\$(y_1, \dots, y_p)\$, \$y_i \in Y_i, i = 1, \dots, p\$, 每一个变量分别进行模糊化后, 可表示为向量形式\$v_{y_i}, i = 1, \dots, p\$. 通过建立的模糊关系矩阵(如式(8)所示), 可以得出模糊控制器的全部输出变量\$u_j(j = 1, \dots, m)\$可表示为

$$\begin{aligned} \times_{j=1}^m v_{u_j} &= M_{\Sigma} \times_{i=1}^p v_{y_i} = \\ &[b_{1 \dots 11} \dots b_{1 \dots 1m} \quad b_{1 \dots 21} \dots b_{1 \dots 2m} \quad b_{1 \dots 31} \quad b_{m \dots mm}]. \end{aligned} \quad (9)$$

最后通过解模糊, 将模糊量转换为精确值输出, 即将模糊子集\$u \in f(U_1 \times \dots \times U_m)\$转换为精确值\$(u_1, \dots, u_m)\$输出. 文献[16]给出了多变量输出系统中解模糊的两种方法. 一种是JD法(joined defuzzification):

$$(u_1, \dots, u_m) = \sum_{j_1=1}^{\beta_1} \dots \sum_{j_m=1}^{\beta_m} \left(\frac{b_{j_1 \dots j_m}}{\sum_{i_1=1}^{\beta_1} \dots \sum_{i_m=1}^{\beta_m} b_{i_1 \dots i_m}} \right) \bar{\mu}_{U_{j_1}^{-1} \times \dots \times U_{j_m}^{-1}}(1). \quad (10)$$

另外一种SD(separated defuzzification)法:

$$u_{\alpha} = \sum_{j=1}^{\beta_{\alpha}} \left(\frac{b_j^{\alpha}}{\sum_{j=1}^{\beta_{\alpha}} b_j^{\alpha}} \right) \mu_{U_j^{\alpha}}^{-1}(1), \alpha = 1, \dots, m. \quad (11)$$

当\$m = 1\$时, JD法和SD法的结果相同. 通过实验方法可判定系统的输出变量之间的是否具有耦合关系. 当系统的输出变量之间具有耦合关系时, 宜采用JD法; 当输出变量相互独立时, 宜采用SD法.

3 室内热舒适度控制系统模型(Model of indoor thermal comfort control system)

3.1 室内环境热舒适度评价指标(Evaluation index of thermal comfort for indoor environment)

室内环境热舒适度控制的研究主要是通过控制和调节室内的温湿度等指标实现智能建筑家居环境的舒适性. 在热舒适度评价方面, Fanger教授提出的PMV指标最具代表性. 该指标综合考虑了影响人体热舒适度的各个因素, 代表了大多数人对热舒适度的评价, PMV指标的计算公式为^[4]

$$\begin{aligned} PMV &= (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{M - W - \\ &3.05 \times 10^{-3}[5733 - 6.99(M - W) - P_a] - \\ &0.42[(M - W) - 58.15] - 1.72 \times 10^{-5} \cdot \\ &M(5867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) - \\ &3.96 \times 10^{-8} f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - \\ &f_{cl} h_c(t_{cl} - t_a)\}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} t_{cl} &= 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{3.96 \times \\ &10^{-8} \times f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + \\ &f_{cl} h_c(t_{cl} - t_a)\}, \end{aligned} \quad (13)$$

其中: \$M\$为人体新陈代谢率(\$W/m^2\$); \$W\$为人体所作的机械功(\$W/m^2\$); \$P_a\$为人体周围空气的水蒸气分压力, 与空气湿度\$h_a\$有关(Pa); \$t_a\$为人体周围空气温度(\$^{\circ}C\$); \$t_r\$为房间的平均辐射温度(\$^{\circ}C\$); \$f_{cl}\$为穿衣服人体外表面积与裸身人体表面积之比; \$t_{cl}\$为衣服外表面积温度(\$^{\circ}C\$); \$h_c\$为表面传热系数(\$W/(m^2 \cdot K)\$); \$I_{cl}\$为衣服热阻(Clo).

$$h_c = \begin{cases} 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}, & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_a}, \\ 12.1\sqrt{v_a}, & 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_a}, \end{cases} \quad (14)$$

其中 v_a 为空气流速(m/s). 在实际计算过程中, 可以根据以下假设简化式(12)–(14):

- 1) 在一般成年人静坐和轻劳动时, 人体新陈代谢率 M 为 69.8 W/m^2 ;
- 2) 人体所做机械功 W 为 0 ;
- 3) 服装的面积系数取 1.1 ;
- 4) 夏季人体服装热阻为 0.5 Clo , 冬季人体服装热阻为 1.5 Clo ;
- 5) 夏季工况下, 室内风速取 0.2 m/s ; 冬季工况下, 室内风速取 0 m/s .

f_{cl} , t_{cl} 可由 I_{cl} 决定, h_c 是风速的函数. 基于上述假设下, PMV指标与空气温度、湿度、风速、平均辐射温度、衣服热阻和人体新陈代谢率6个变量有关. 一般情况下认为平均辐射温度等于空气温度. 因此, 将式(12)进行化简, 得出PMV的表达式为

$$PMV = f(t_a, h_a, v_a, t_r, I_{cl}, W). \quad (15)$$

当 $PMV \in [-0.5, +0.5]$ 时, 热环境处于舒适区; 当 $PMV = 0$ 时, 热环境处于最佳热舒适状态.

3.2 室内热舒适度控制系统模型(Model of indoor thermal comfort control system)

居住房间大多不是完全密闭的, 经常会受到室外环境的影响. 在空调环境下, 空调设备也会受到外界影响, 不可能准确达到预设状态, 即空调温度设定值与实际值往往会有偏差. 同时, 室内外环境的各变量间具有非线性、强耦合关系, 因此难以实现对室内热环境的控制. 本文主要分析在空调环境下, 室外环境对室内环境的影响, 建立室内外环境变量间的模糊关系模型, 为室内热舒适度控制提供有利条件. 室内热舒适度控制系统模型如图2所示.

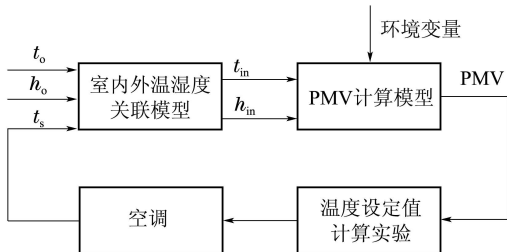


图2 热舒适度控制系统模型

Fig. 2 Model of thermal comfort control system

图2中: t_o 和 h_o 分别是室外的温度和湿度, t_s 是空调的温度设定值, t_{in} , h_{in} 分别是室内的温度和湿度. 室内外温湿度关联模型采用模糊控制模型分析, 输入是 t_s , t_o 和 h_o , 输出是 t_{in} 和 h_{in} . PMV计算模型采用式(12)进行计算. 该温湿度关联模型可表示为

$$(t_{in}, h_{in}) = \text{fuzzy}(t_s, t_o, h_o). \quad (16)$$

由 t_{in} , h_{in} 和其他环境变量值, 根据式(12)计算出室内PMV值. 根据PMV设定值 PMV^* , 通过温度设定值计算实验可得出室内空调温度的设定值. 温度设定值计算实验的流程图^[18]如图3所示.

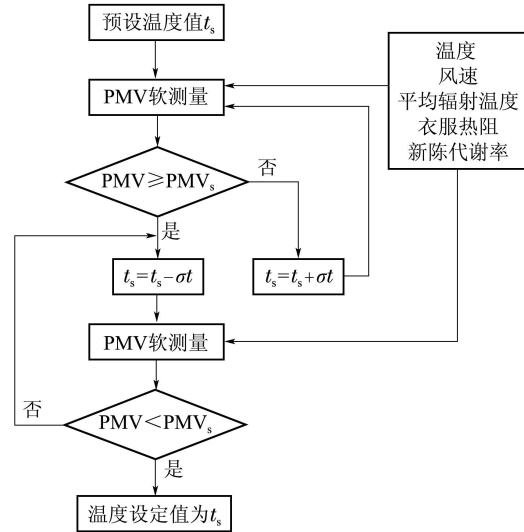


图3 温度设定值计算实验流程图

Fig. 3 Flowchart of determination for settings of temperature

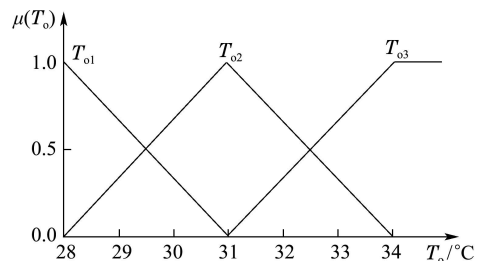
4 基于模糊关系矩阵模型的室内热舒适度控制(The indoor thermal comfort control based on fuzzy relation matrix)

4.1 对偶模糊结构的建立过程(The building of dual fuzzy structure)

室内热舒适度控制系统是一个多变量、强耦合的系统. 基于模糊关系矩阵模型的室内外温湿度的模糊控制器设计过程中, 首先要和传统模糊控制器一样, 建立模糊化、解模糊等环节, 而且为了通过矩阵表示实现代数运算, 还需转化成2.2节的对偶模糊结构. 具体设计过程如下:

1) 确定模糊控制器的结构. 其结构如图2所示, 确定模糊控制器的输入为3个变量: t_o , h_o 和 t_s ; 输出为两个变量: t_{in} 和 h_{in} .

2) 对每一个模糊语言变量进行模糊化, 主要包括论域、模糊子集和隶属度函数的选取和确定等. 为了简化计算, 每个变量均选择负大(NB)、中(ZO)和正大(PB)3个模糊子集, 隶属度函数均选择为对称均匀分布的三角形函数, 如图4所示.



(a) 室外温度

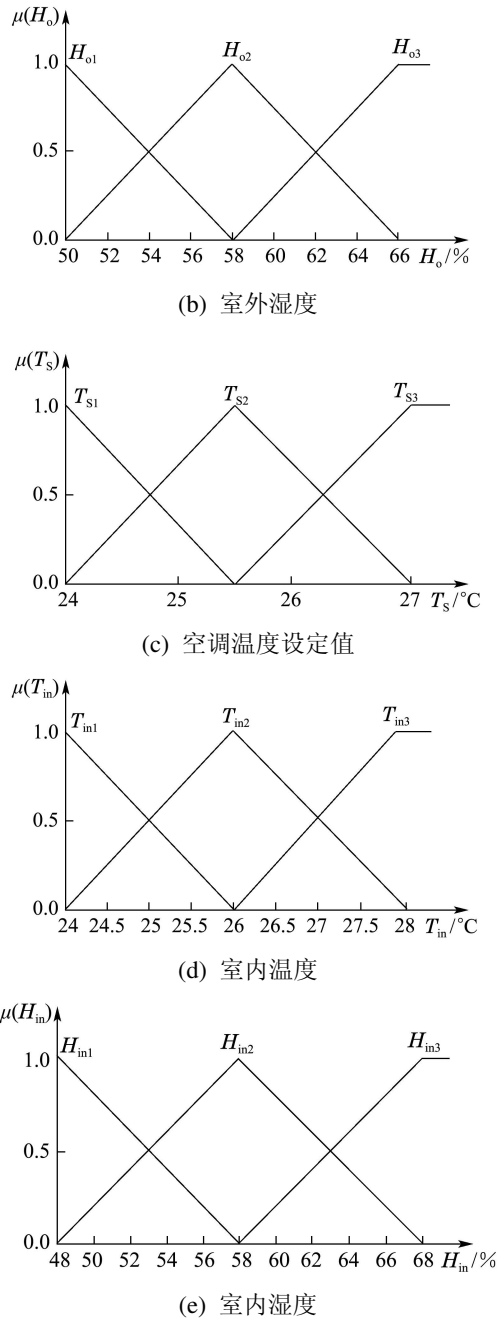


图 4 热环境系统中各变量的隶属度函数
Fig. 4 The membership functions of variables of indoor thermal environment

3) 确定模糊推理机制, 主要包括模糊命题连接词“与”和“或”的具体形式、定义模糊推理算子的具体形式. 在热环境控制系统中, 定义“与”为取小, “或”为取大, 采用“取大-取小”模糊推理算法.

4.2 基于采样数据对的模糊关系矩阵建立过程
(The building of fuzzy relation matrix based on sampling data sets)

模糊知识的获取和模糊关系矩阵的建立是该新型模糊控制器区别于传统模糊控制器的主要部分. 在新型模糊控制器中, 基于4.1节中建立的对偶模糊结构, 可直接利用系统的输入输出数据对得出模糊关系矩阵, 不仅代替了传统的复杂模糊规则建立的

过程, 而且解决了多变量模糊控制需要解耦的弊端. 在热环境控制系统中, 模糊关系矩阵的建立步骤为:

1) 现场采样获得系统的 N 组输入输出数据对, 如式(17)所示, 输入变量为 t_{oi}^* , h_{oi}^* 和 t_{si}^* , 输出变量为 $t_{in_i}^*$ 和 $h_{in_i}^*$.

$$(t_{oi}^*, h_{oi}^*, t_{si}^*, t_{in_i}^*, h_{in_i}^*), i = 1, \dots, N, \quad (17)$$

其中: t_{oi}^* 是第 i 组数据的室外温度值, h_{oi}^* 是第 i 组数据的室外湿度值, t_{si}^* 是第 i 组数据的空调温度设定值, $t_{in_i}^*$ 是第 i 组数据的室内温度值, $h_{in_i}^*$ 是第 i 组数据的室内湿度值.

2) 将测量到的数据分别进行模糊化, 转化成列向量表示形式. 第 i 组数据转化成的列向量为

$$\nu_{t_{oi}} = (\mu_{T_{o1}}(t_{oi}^*), \mu_{T_{o2}}(t_{oi}^*), \mu_{T_{o3}}(t_{oi}^*))^T, \quad (18)$$

$$\nu_{h_{oi}} = (\mu_{H_{o1}}(h_{oi}^*), \mu_{H_{o2}}(h_{oi}^*), \mu_{H_{o3}}(h_{oi}^*))^T, \quad (19)$$

$$\nu_{t_{si}} = (\mu_{T_{s1}}(t_{si}^*), \mu_{T_{s2}}(t_{si}^*), \mu_{T_{s3}}(t_{si}^*))^T, \quad (20)$$

$$\nu_{t_{in_i}} = (\mu_{T_{in1}}(t_{in_i}^*), \mu_{T_{in2}}(t_{in_i}^*), \mu_{T_{in3}}(t_{in_i}^*))^T, \quad (21)$$

$$\nu_{h_{in_i}} = (\mu_{H_{in1}}(h_{in_i}^*), \mu_{H_{in2}}(h_{in_i}^*), \mu_{H_{in3}}(h_{in_i}^*))^T. \quad (22)$$

3) 分别计算第 i 组数据的输入、输出关系矩阵, 可以表示为输入关系矩阵:

$$R_{t_{oi}, h_{oi}, t_{si}} = \nu_{t_{oi}} \times \nu_{h_{oi}} \times \nu_{t_{si}} = R_Y^i. \quad (23)$$

输出关系矩阵:

$$R_{t_{in_i}, h_{in_i}} = \nu_{t_{in_i}} \times \nu_{h_{in_i}} = R_U^i. \quad (24)$$

4) 计算第 i 组数据的模糊关系矩阵为

$$R^i = R_U^i \times (R_Y^i)^T. \quad (25)$$

5) 得到每组数据的模糊关系矩阵后, 总的模糊关系矩阵可表示为

$$R = \bigcup_{i=1}^N R^i. \quad (26)$$

4.3 室内环境热舒适度模糊控制的实现过程
(The realizing process of fuzzy controlling for indoor thermal comfort)

通过前两节的设计过程, 本文已经建立起室内外环境热舒适度的模糊关系矩阵模型, 将其在图2所示的系统中运行, 即可实现多变量模糊控制, 采集到系统的输入变量数据 t_{oi}^* , h_{oi}^* 和 t_{si}^* , 采用向量表示为 R_{In} , 通过模糊关系矩阵运算即可得出系统的输出变量的模糊集. 系统的出向量 R_{Out} 可表示为

$$R_{Out} = R \times R_{In} = (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{31}, b_{32}, b_{33}). \quad (27)$$

然后通过解模糊^[17]算法即可获得模糊控制器的输出变量, 即舒适度指标的控制律, 从而实现室内环境热舒适度的模糊控制. 本文的解模糊方法具体选用 JD 法, 计算公式为

$$(t'_{in}, h'_{in}) = \sum_{p=1}^3 \sum_{q=1}^3 \left(\frac{\sum_{q=1}^3 \sum_{q=1}^3 b_{p,q}}{b_{p,q} \times \mu_{T_{inp}^{-1}} \times \mu_{H_{inq}}} \right), \quad (28)$$

其中: $\mu_{T_{inp} \times H_{inq}}(t_{in}, h_{in}) = \mu_{T_{inp}}(t_{in}) \wedge \mu_{H_{inq}}(h_{in})$, \wedge 为取小运算.

5 实验与仿真(Experiment and simulation)

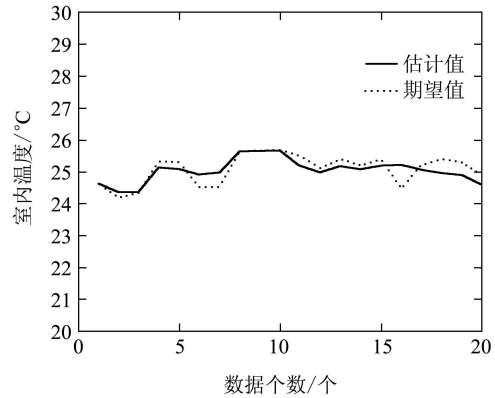
实验房间尺寸为长×宽×高=7.6m×7.2m×3.6m, 实验装置采用瑞典SWEMA公司的热舒适度测试系统, 一台由无线传感器网络控制的空调器和室外温湿度检测系统. 热舒适测试系统中集成了SWA03万向微风速及风温探头、HygroClip相对湿度及温度探头和Swema3000多功能主机. 若人为输入衣服热阻和新陈代谢率的数值, 则该测试系统能够自动计算出PMV值. 空调器制冷量为7500W, 能耗比为2.83. 当室内环境达到近似稳定时, 开始采集数据, 采样间隔为10min, 采样时间为2011年8月25-31日. 共采集了100组数据. 根据第4节中所述步骤, 得出模糊关系矩阵R如式(29)所示.

$$R \in \mathbb{R}^{9 \times 27} = \begin{pmatrix} 0 & 0.08 & 0.21 & 0 & 0.02 & 0.06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.19 & 0 & 0.04 & 0.11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.02 & 0 & 0 & 0.05 & 0.01 \\ 0 & 0.24 & 0.44 & 0 & 0.05 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.08 & 0.3 & 0 & 0.04 & 0.16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0.02 & 0 & 0.13 & 0.05 \\ 0 & 0.05 & 0.11 & 0 & 0.01 & 0.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.08 & 0 & 0.01 & 0.06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.09 & 0.03 & 0 & 0.14 & 0.04 \\ 0 & 0.09 & 0.18 & 0 & 0.03 & 0.09 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.07 & 0.28 & 0.24 & 0.12 & 0.19 & 0.02 & 0.04 & 0 \\ 0.01 & 0 & 0 & 0.12 & 0.23 & 0.02 & 0.01 & 0.59 & 0.13 \\ 0 & 0.35 & 0.37 & 0 & 0.07 & 0.15 & 0 & 0 & 0 \\ 0.03 & 0.19 & 0.25 & 0.26 & 0.14 & 0.33 & 0.02 & 0.02 & 0 \\ 0.02 & 0.01 & 0.03 & 0.13 & 0.22 & 0.17 & 0.02 & 0.48 & 0.15 \\ 0 & 0.08 & 0.12 & 0 & 0.06 & 0.13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.06 & 0.14 & 0.08 & 0.12 & 0.35 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0.02 & 0.04 & 0.07 & 0.17 & 0 & 0.3 & 0.11 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.02 & 0.02 & 0.01 & 0.2 & 0.24 & 0.01 & 0.03 & 0.08 & 0 \\ 0.01 & 0.01 & 0 & 0.1 & 0.12 & 0.01 & 0.02 & 0.19 & 0.02 \\ 0 & 0.01 & 0.02 & 0 & 0.03 & 0.04 & 0 & 0 & 0 \\ 0.04 & 0.02 & 0.05 & 0.25 & 0.27 & 0.23 & 0.02 & 0.11 & 0 \\ 0.02 & 0 & 0.01 & 0.12 & 0.13 & 0.11 & 0.01 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0.01 & 0 & 0.02 & 0.02 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0.02 & 0.04 & 0.04 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.02 & 0.02 & 0.05 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (29)$$

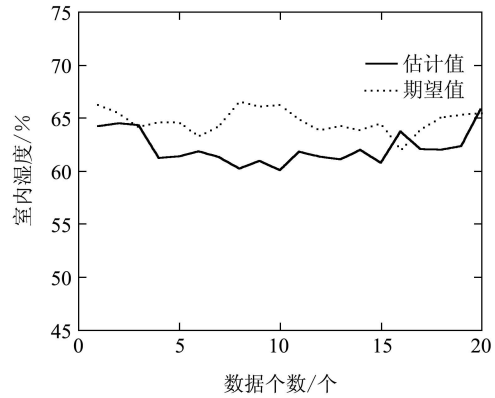
根据模糊关系矩阵R和输入关系矩阵, 通过解模糊算法即可得出热舒适度控制系统的温度、湿度值. 为了验证该方法的有效性, 选取部分未经测试的样本进行验证. 数据期望值与实际值的比较如图5所示.

示.

根据模糊控制器输出的室内温度、湿度值, 可计算出室内热环境的PMV值. 根据PMV值, 由温度设定值计算实验得出空调的温度设定值. 在不同的室外温度下, 通过调节空调的温度设定值, 即可实现室内热环境的控制, 并通过实验说明控制效果. 将PMV值依次设定为0, 0.2, 0.4, 在每个PMV设定值处均持续10min, 通过调节空调的温度设定值, 观察室内实际的PMV值跟随PMV设定值的效果如图6所示.



(a) 室内温度



(b) 室内湿度

图5 模糊控制器输出的期望值和估计值比较

Fig. 5 The comparison of expected value and estimated value of output of fuzzy controller

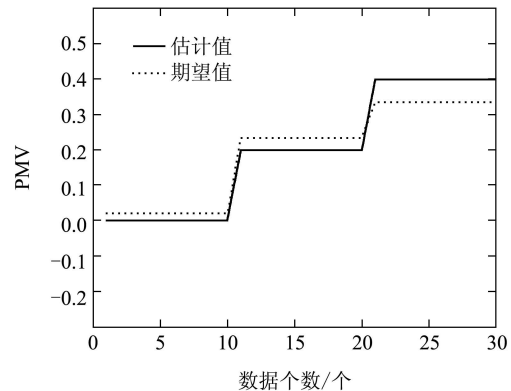


图6 PMV期望值与估计值比较

Fig. 6 The comparison of expected value and estimated value of PMV

6 结论(Conclusions)

基于矩阵半张量积运算的模糊控制器设计方法适用于分析输出不能解耦的MIMO系统. 本文给出如何从实际系统输入输出采样数据对建立模糊关系结构矩阵的方法并且将这种新型模糊控制器设计应用到室内热舒适度系统中, 实现了对热舒适度系统的多变量模糊控制. 该模糊控制器避免了原有模糊控制器中模糊规则建立的复杂过程, 运算简便. 该方法也可应用于其他无法进行多输出解耦的控制系统中, 在实际过程控制系统中容易实现, 因此具有广泛的应用前景.

参考文献(References):

- [1] 周平, 柴天佑. 多变量解耦控制的工业过程运行层次控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(2): 199 – 205.
(ZHOU Ping, CHAI Tianyou. Hierarchical control approach for industrial process operation based on multivariable decoupling control [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(2): 199 – 205.)
- [2] 朱康武, 顾临怡. 作业型遥控水下运载器的多变量backstepping鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1441 – 1446.
(ZHU Kangwu, GU Linyi. Multivariable backstepping robust control for work-class remotely operated vehicle [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1441 – 1446.)
- [3] LEE K H R. Robust adaptive fuzzy control by backstepping for a class of MIMO nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2011, 19(2): 265 – 275.
- [4] FANGER P O. *Thermal Comfort* [M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [5] SCHEATZLE D G. The development of PMV-based control for a residence in a hot and arid climate [J]. *ASHRAE Transaction*, 1991, 97(2): 1002 – 1019.
- [6] SIMONDS P. Thermal comfort and optimal energy use [J]. *ASHRAE Transaction*, 1993, 99(1): 1037 – 1048.
- [7] 史鸿钊. 基于预测算法的室内空气调节 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
(SHI Hongzhao. *Indoor air conditioning based on model predictive control* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.)
- [8] LIANG J, DU R. Design of intelligent comfort control system with human learning and minimum power control strategies [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(4): 517 – 528.
- [9] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. *Information and Control*, 1965, 8(1): 338 – 353.
- [10] LI P, YANG G. An adaptive fuzzy design for fault-tolerant control of MIMO nonlinear uncertain systems [J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2011, 9(2): 244 – 250.
- [11] LI T, WANG D, CHEN N. Adaptive fuzzy control of uncertain MIMO non-linear systems in blocktriangular forms [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2011, 63(1): 105 – 123.
- [12] 师五喜. 未知多变量非线性系统自适应模糊预测控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1399 – 1404.
(SHI Wuxi. Adaptive fuzzy predictive control for unknown multivariable nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(10): 1399 – 1404.)
- [13] CHENG D Z. A survey on semi-tensor product of matrices [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2007, 20(2): 304 – 322.
- [14] CHENG D Z, HU X M, WANG Y Z. Non-regular feedback linearization of nonlinear systems via a normal form algorithm [J]. *Automatica*, 2004, 40(3): 439 – 447.
- [15] CHENG D Z, FENG J, LV H. Solving fuzzy relational equations via semi-tensor product [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2012, 20(2): 390 – 396.
- [16] LV H, CHENG D Z, FENG J. Construction and optimization of fuzzy relation matrices model based-on semi-tensor product [C] // *Proceedings of the 31st Chinese Control Conference*. Hefei: IEEE, 2012: 3488 – 3493.
- [17] 程代展, 齐洪胜, 赵寅. 布尔网络的分析与控制——矩阵半张量积方法 [J]. 自动化学报, 2011, 37(5): 529 – 540.
(CHENG Daizhan, QI Hongsheng, ZHAO Yin. Analysis and control of boolean networks: a semi-tensor product approach [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(5): 529 – 540.)
- [18] 李慧, 张庆范, 段培永. 基于用户学习的智能动态热舒适度控制系统 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(2): 128 – 135.
(LI Hui, ZHANG Qingfan, DUAN Peiyong. Intelligent dynamic thermal comfort control system with users' learning [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(2): 128 – 135.)

作者简介:

段培永 (1968–), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事模糊控制、神经网络控制、数据挖掘、建筑智能环境与网络化控制的研究, E-mail: duanpeiyong@sdjzu.edu.cn;

吕红丽 (1978–), 女, 博士, 硕士生导师, 主要从事复杂系统建模、控制与仿真、智能环境与网络化控制的研究, E-mail: hllv@sdjzu.edu.cn;

冯俊娥 (1971–), 女, 博士生导师, 教授, 主要从事模糊系统、奇异系统、时滞系统与Itô随机系统的研究, E-mail: fengjune@sdjzu.edu.cn;

刘聪聪 (1987–), 女, 硕士研究生, 主要从事模糊控制、智能环境控制的研究, E-mail: lccsdjzu@126.com;

李慧 (1970–), 女, 博士, 副教授, 主要从事智能环境、人工智能和智能检测技术及应用的研究, E-mail: lhh@sdjzu.edu.cn.