

doi:10.3969/j.issn.1673-4785.2011.03.005

室内舒适性指标 PMV 的区间 II 型 T-S 模糊建模

陈滕^{1,2}, 李柠^{1,2}, 李少远^{1,2}

(1. 上海交通大学 自动化系, 上海 200240; 2. 上海交通大学 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 预测平均投票值 (PMV) 是室内热环境的标准化指标, 其涉及的数学模型复杂且存在不确定性, 不能适应实时控制的需要. 同时, 传统的采用一个 PMV 值评价热环境的方法具有局限性, 不能反映不同位置人体舒适感的差异. 为了处理测量噪声和人体因素带来的不确定性, 通过对室内空气流和传热计算流体动力学 (CFD) 模拟数值以准确描述 PMV 值, 建立了 PMV 的区间 II 型 T-S 模糊模型. 针对二阶模糊隶属度的确定问题, 在 G-K 聚类的基础上, 采用遗传算法对二阶隶属度函数的参数进行优选, 再由最小二乘法辨识得到后件参数. 仿真结果表明 II 型 T-S 模糊模型比 I 型更有效地减少了不确定性, 对模型精度的影响, 对动态过程和稳态数值都有很好的预测能力.

关键词: PMV; CFD; II 型模糊模型; 区间 T-S 模糊系统

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2011)03-0219-06

Interval type-2 T-S fuzzy modeling of the PMV thermal comfort index

CHEN Meng^{1,2}, LI Ning^{1,2}, LI Shaoyuan^{1,2}

(1. Department of Automation, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240, China; 2. Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education, Shanghai 200240, China)

Abstract: The predicted mean vote (PMV) index is widely used to evaluate the indoor thermal comfort with indoor environmental and human factors considered. However, PMV is difficult to control real-timely as its mathematical model is complicated and uncertain. Moreover, spatial distributions of environmental factors are neglected by using one PMV index in a room. In this paper, computational fluid dynamics (CFD) technology was applied for simulation of the environmental factors in order to accurately describe the PMV index. To deal with measurement noises or other system uncertainties, an interval type-2 fuzzy model of PMV was developed and a new GK-GA-based modeling method was proposed. The essential issue of type-2 fuzzy modeling lies in the appropriate choice of secondary membership functions. In this study, the primary membership function was gained through a Gustafson-Kessel (G-K) algorithm, and the secondary membership function was determined through a genetic algorithm (GA). The consequent parameter of the fuzzy rules was identified by a least squared algorithm. Simulation results show that the type-2 fuzzy model is superior to type-1 fuzzy model in minimizing the influence of uncertainties. The proposed method is effective and accurate.

Keywords: predicted mean vote; computational fluid dynamics; type-2 fuzzy modeling; interval T-S fuzzy systems

目前, 室内空调系统多以温度为控制目标, 但是采用温度控制不能提供真正符合人体需求的空气环境, 还会造成能源浪费. Fanger 教授在实验基础上得到的 PMV 热舒适模型^[1]是预测人体热舒适的标准

方法^[2]. 文献[3-5]讨论了变风量空调系统的 PMV 控制策略, 说明以 PMV 为控制目标比温度更节能. 但是由于 PMV 指标不能直接检测, 与人体热舒适感的影响因素存在着非线性关系, 需要通过迭代运算求得, 计算速度慢, 不能适应空调系统在线实时控制的需要. 现有的 PMV 预测模型主要包括神经网络^[6]和最小二乘向量机^[7]等.

然而, 传统采用一个 PMV 值评价整个房间热舒

收稿日期: 2010-11-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60934007, 61074061); 上海市科委基础研究重点资助项目 (10JC1403400).

通信作者: 李柠. E-mail: ning_li@sjtu.edu.cn.

适性的方法具有局限性,忽略了空间范围内人体舒适感的差异^[8-9];因此,考虑空间气体流动和传热过程造成的 PMV 分布,借助 CFD 技术对室内三维湍流流动和传热进行了数值模拟,从而构建出准确描述室内热舒适性的预测模型.笔者以所在实验室为研究对象,综合室内人员带来的不确定性和测量扰动,根据不同空调送风温度和速度下 PMV 分布变化采集样本,并且考虑到 T-S 模糊模型易于结合控制算法,以及区间 II 型模糊模型计算复杂度低、能有效处理不确定性和噪声,因此建立了室内 PMV 指标的区间 II 型 T-S 模糊模型.

区间 II 型 T-S 模糊建模由于其模型的优点,已经成为模糊建模的热点研究方向之一^[10-14].现有的区间 II 型 T-S 模糊建模主要是通过聚类算法(C 均值聚类、G-K 聚类、最小邻域算法等)确定模型结构,采用优化和辨识算法(BP 算法、最小二乘法、高斯混合模型方法等)确定模型参数^[10-12],还包括其他混合训练方法^[13-14]等.在确定二阶隶属度方面,

$$\begin{aligned} \text{PMV} &= [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \cdot (M - W) - \\ &3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99(M - W) - p_a] - 0.42(M - W - 58.2) - 1.7 \times 10^{-5} \times M(5867 - p_a) - \\ &0.0014 \times M(34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a), \\ t_{cl} &= 35.7 - 0.028(M - W) - I_{cl}\{3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl}[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl}h_c(t_{cl} - t_a)\}, \\ h_c &= \begin{cases} 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25}, & 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}}; \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}}, & 2.38 |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \sqrt{v_{ar}}. \end{cases} \end{aligned}$$

式中: M 为新陈代谢率, W/m^2 ; W 为人所作机械功, J ; I_{cl} 为衣服热阻, $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; f_{cl} 为衣着率; t_a 为人体周围空气温度, $^{\circ}\text{C}$; \bar{t}_r 为平均辐射温度, $^{\circ}\text{C}$; v_{ar} 为相对空气流速, m/s ; p_a 为水蒸汽分压力, Pa ; h_c 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_{cl} 为衣着表面温度, $^{\circ}\text{C}$.

可见,准确描述 PMV 需要考虑室内环境因素的动态特性和空间分布,包括空气温度、流速等.根据房间内空气通风换热过程的特点,室内空气流动为受迫对流和自然对流共同作用下的混合对流,假设室内空气各组元混合充分,空气混合物物性为常数,且密度变化满足 Bonssinesq 假设,则其自然对流满足质量、动量和能量守恒方程^[9]:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0,$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \nabla p,$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \lambda \nabla^2 T + S_T.$$

式中: \mathbf{v} 为空气流速, T 为空气温度, ρ 为空气密度, c_p 为空气比热, μ 为空气黏度, λ 为空气热传导率, S_T 为能量方程的热源项.

这些方法存在一些缺陷,如需要对样本进行预处理^[11],把一阶隶属度函数简单扩展为二阶^[14],同时优化前后件参数造成计算量加大^[13]等.对此,提出基于 GK-GA 的建模方法:由 GK 算法得到一阶隶属度函数中心,用基于模糊分割熵和基数的 GA 参数优化方法进行中心模糊化,再用最小二乘法辨识后件参数的上下界,得到具有理想结构的前后件参数的区间 II 型 T-S 模糊模型.最后通过仿真验证了这种方法对 PMV 建模的有效性.

1 数学模型

PMV 指标是基于体温调节和热平衡原理得出的,将人体的热舒适感分为 7 个等级,综合考虑了 4 个室内环境和 2 个人为因素,包括:空气温度、平均辐射温度、相对湿度、空气流速、人的新陈代谢率和服装热阻.国际标准化方法 ISO 7730^[2]给出了 PMV 的计算方法:

2 建模

2.1 区间 II 型 T-S 模糊模型

Mendel^[15]首先提出 II 型 T-S 模糊模型的形式,目前最普遍的 II 型 T-S 模糊模型的前件是 II 型模糊集,后件多项式系数是 I 型模糊集,其规则为

$$\begin{aligned} R^i: & \text{if } x_1 \text{ is } \tilde{Z}_1^i, x_2 \text{ is } \tilde{Z}_2^i, \dots, x_p \text{ is } \tilde{Z}_p^i, \\ \text{then } \tilde{y}^i &= f(x) = \tilde{w}_0 + \tilde{w}_1 x_1 + \dots + \tilde{w}_{i(p-1)} x_{p-1}, \\ & i = 1, 2, \dots, c. \end{aligned}$$

式中:前件 $\tilde{Z}_j^i (j=1, 2, \dots, p)$ 是 II 型模糊集;后件多项式系数 $\tilde{w}_{ij} (j=1, 2, \dots, p)$ 是 I 型模糊集.本文在建模时采用中心模糊化的高斯函数作为隶属度函数,对于每一个输入 x_j 其隶属度函数为

$$\tilde{u}_{Z_j^i}(x_j) = \exp\left(-\left(\frac{x_j - \tilde{b}_{ij}}{a_{ij}}\right)^2\right),$$

$$i = 1, 2, \dots, c, j = 1, 2, \dots, p.$$

区间 II 型模糊集是 II 型模糊集的一种特殊形式^[15-16],每个中心的隶属度都有确定的上下界,即

$$\tilde{u}_i = \prod_{j=1}^p \tilde{u}_{Z_j^i}(x) \in [u_i^l, u_i^r],$$

$$i = 1, 2, \dots, c, j = 1, 2, \dots, p.$$

后件参数区间集也有确定的上下界,得到每一条规则的输出区间为

$$\tilde{y}^i \in [y_i^l, y_i^r] = [w_{i0}^l, w_{i0}^r] + [w_{i1}^l, w_{i1}^r]x_1 + \dots + [w_{ip}^l, w_{ip}^r]x_p, i = 1, 2, \dots, c.$$

模型的降型集是一个区间 I 型模糊模型,即

$$\tilde{y}_m \in [y^l, y^r] = \left[\frac{\sum_{i=1}^c u_i^l y_i^l}{\sum_{i=1}^c u_i^l}, \frac{\sum_{i=1}^c u_i^r y_i^r}{\sum_{i=1}^c u_i^r} \right].$$

采用重心法^[17]得到模型的精确输出:

$$y_m = (y^l + y^r)/2.$$

可见,区间 II 型 T-S 模糊模型具备 II 型模糊模型能处理不确定性、区间模糊集计算复杂度低和 T-S 模糊模型易于结合控制的优点,是一种有实用价值的模型.

2.2 建模步骤

I 型模糊模型建模的主要问题是二阶隶属度的优选,主要有 BP 算法^[10]、分析样本数据^[11]、高斯混合模型^[12]、混合训练^[13-14]等方法.本文在确定一阶隶属度的基础上,引入隶属度函数的优选指标(模糊分割熵和分割基数),对聚类中心进行模糊化.建模方法分为 3 步:

1) 确定一阶隶属度.

由输入输出数据构造训练样本 X_1, X_2, \dots, X_N , 经 G-K 算法^[18]得到作为一阶高斯隶属度函数中心的聚类中心 $b_{ij} (i=1, 2, \dots, c, j=1, 2, \dots, p)$ 和样本隶属度 $u_{ik}^0 (i=1, 2, \dots, c, k=1, 2, \dots, N)$, 用 GA 算法优化并确定一阶隶属度函数的均值 $a_{ij} (i=1, 2, \dots, c, j=1, 2, \dots, p)$, 从而构造适应度函数:

$$f_{\text{fit1}} = \left| \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^c (u_i(X_k) - u_{ik}^0) \right|.$$

2) 确定二阶隶属度.

构造基于模糊分割熵和基数的适应度函数:

$$f_{\text{fit2}} = H^l + H^r + \frac{\lambda_1}{C^l} + \frac{\lambda_2}{C^r}. \quad (1)$$

式中: H^l 和 H^r 分别为模糊化聚类中心上下界 b_{ij}^l, b_{ij}^r 的模糊分割熵; C^l 和 C^r 分别为 b_{ij}^l, b_{ij}^r 的模糊分割基数^[19], 即:

$$H^l = - \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^c u_i^l(X_k) \lg(u_i^l(X_k)),$$

$$H^r = - \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^c u_i^r(X_k) \lg(u_i^r(X_k)),$$

$$C^l = \frac{1 - N_u^l/N}{N} \sum_{k=1}^N u_m^l(X_k),$$

$$C^r = \frac{1 - N_u^r/N}{N} \sum_{k=1}^N u_m^r(X_k),$$

$$u_m^l(X_k) = \max_{i=1,2,\dots,c} u_i^l(X_k),$$

$$u_m^r(X_k) = \max_{i=1,2,\dots,c} u_i^r(X_k),$$

$$k = 1, 2, \dots, N.$$

式中: N_u^l 和 N_u^r 分别为满足 $u_m^l(X_k) > \underline{u}_m^l$ 和 $u_m^r(X_k) > \underline{u}_m^r$ 的样本个数. 由 GA 算法分别在区间 $[\kappa_1 b_{ij}^l, b_{ij}^r]$ 和 $[b_{ij}^l, \kappa_r b_{ij}^r]$ 内搜索上下界 b_{ij}^l, b_{ij}^r .

式(1)中权系数 λ_1 和 λ_2 的选取原则是保证前后两项在同一数量级变化. κ_1 和 κ_r 则要确保 GA 在合适的搜索范围, 平衡寻优速度和建模精度. \underline{u}_m^l 和 \underline{u}_m^r 表示覆盖样本的最低隶属度值.

3) 确定后件参数.

在步骤 1) 和 2) 确定一阶和二阶隶属度函数的情况下, 采用最小二乘法辨识后件线性表达式系数的上下界 $w_{ij}^l, w_{ij}^r (i=1, 2, \dots, c, j=1, 2, \dots, p)$.

综上所述, 步骤 1) 对样本空间根据 I 型模糊集进行了划分, 步骤 2) 对步骤 1) 聚类得到的中心进行模糊化, 将 I 型模糊集扩展为 II 型. 本文引入样本分割的评价指标^[19]表征 II 型模糊集, 通过对样本空间的合理分割, 避免了与后件参数同时优化增加计算量. 其中模糊分割熵表征了中心的冗余程度, 体现对样本空间分割的典型性, 模糊分割基数反映中心对样本的覆盖程度. 最后通过后件参数辨识确定输出形式.

3 仿 真

本文的研究对象为笔者所在实验室房间, 长 5 m (x 方向)、宽 8 m (y 方向)、高 3.5 m (z 方向), 东墙、西墙及北墙为内墙, 南墙为玻璃窗. 空调系统有 1 个出风口、2 个回风口, 室内人员共 7 人. 房间模型如图 1 所示.

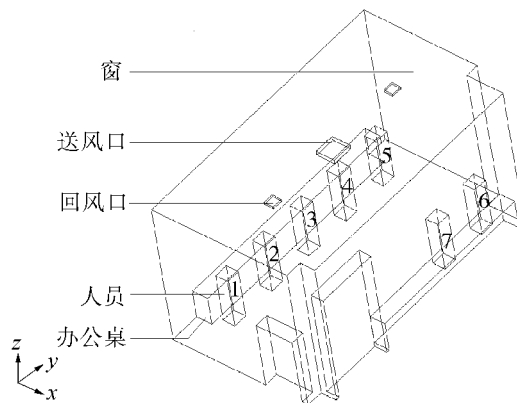


图 1 空调房间模型

Fig. 1 Air-conditioned room

实际空调房间涉及的传热和流动的边界问题非常复杂,将其边界条件简化如下:

1) 内墙和窗户的表面温度为 32 ℃;

2) 空调送风口为速度边界,垂直送风,出风口为自由出流边界;

3) 室内初始温度为 30 ℃,考虑重力和 1 个标准大气压环境。

采用 FLUENT 软件并使用 $k-\varepsilon$ 两方程模型,近壁区域采用壁面函数法对室内空气速度、温度与湿度分布进行三维数值模拟,计算室内人员的 PMV 指标。根据 ISO 7730 标准,影响 PMV 环境因素的选取如表 1 所示。

表 1 PMV 计算参数

Table 1 Calculation of PMV factors

参数	取值
空气温度	人员表面均值
平均辐射温度	低于空气温度
空气流速	人员表面均值
相对湿度	人员表面均值
新陈代谢率/(W/m ²)	58.2 ~ 69.8
衣着率	1.0
服装热阻/(m ² · K/W)	0.155

根据实验室空调的技术规格,使送风温度在 20 ~ 30 ℃、风速在 0 ~ 5 m/s 之间随机变化,湿度保持在 60%。人体新陈代谢率具有不确定性,在 58.2 ~ 69.8 W/m² 之间随机变化。采样时间间隔 $\Delta t = 1$ s,取 $k, k-1, k-2$ 时刻的空调送风温度和流速作为模型输入 $t(k), t(k-1), t(k-2)$ 和 $v(k), v(k-1), v(k-2)$,人员 1 的 PMV 指标作为模型输出 $y(k)$,并加入峰值 $\delta = 0.05$ 的白噪声作为测量噪声生成样本数据,归一化得到 $N = 297$ 组样本 $X_k = [v(k-2) \ v(k-1) \ v(k) \ t(k-2) \ t(k-1) \ t(k) \ y(k)]^T, k = 1, 2, \dots, N$,建立该人员 PMV 指标的区

间 II 型 T-S 模糊模型。令规则数 $c = 6$,经建模步骤 1) 得到参数阵 $A = (a_{ij})_{6 \times 7}, B = (b_{ij})_{6 \times 7}$ 如下:

$$A = \begin{bmatrix} 18.56 & 21.78 & 15.38 & 28.22 & 27.19 & 25.10 & 43.58 \\ 19.27 & 25.82 & 17.70 & 22.94 & 26.52 & 16.44 & 50.18 \\ 17.86 & 19.78 & 33.91 & 21.39 & 21.91 & 22.59 & 37.76 \\ 19.68 & 29.99 & 16.58 & 20.19 & 25.21 & 17.65 & 60.65 \\ 23.53 & 19.33 & 17.11 & 53.74 & 18.94 & 17.04 & 50.95 \\ 21.84 & 22.07 & 18.04 & 21.61 & 27.06 & 17.96 & 51.52 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 4.823 & 4.896 & 4.894 & 5.082 & 4.939 & 4.979 & 4.822 \\ 4.925 & 4.902 & 4.923 & 4.906 & 4.987 & 4.981 & 4.717 \\ 4.933 & 4.906 & 4.923 & 4.902 & 4.992 & 4.968 & 4.718 \\ 4.904 & 4.901 & 4.918 & 4.919 & 4.981 & 4.978 & 4.729 \\ 4.834 & 4.911 & 4.912 & 5.030 & 4.956 & 4.981 & 4.816 \\ 4.904 & 4.893 & 4.922 & 4.922 & 4.982 & 4.973 & 4.732 \end{bmatrix},$$

取 $\lambda_1 = \lambda_2 = 297, \kappa_1 = 0.5, \kappa_r = 1.5, \underline{u}_m^1 = \underline{u}_m^r = 0.8$,经步骤 2) 得到模糊化的隶属度函数中心参数阵 $B_1 = (b_{ij}^1)_{6 \times 7}, B_r = (b_{ij}^r)_{6 \times 7}$ 如下:

$$B_1 = \begin{bmatrix} 2.871 & 2.967 & 3.368 & 4.810 & 4.827 & 2.900 & 4.488 \\ 3.582 & 4.284 & 2.661 & 4.886 & 3.905 & 4.952 & 4.140 \\ 2.505 & 2.685 & 4.534 & 4.564 & 2.607 & 4.747 & 3.538 \\ 4.863 & 4.621 & 4.729 & 3.676 & 4.448 & 4.103 & 3.121 \\ 2.837 & 4.550 & 4.406 & 4.494 & 3.044 & 3.373 & 3.995 \\ 4.745 & 2.927 & 2.548 & 3.183 & 4.610 & 2.734 & 2.392 \end{bmatrix},$$

$$B_r = \begin{bmatrix} 5.393 & 5.476 & 7.207 & 5.110 & 5.263 & 4.991 & 4.915 \\ 5.021 & 5.931 & 5.015 & 5.058 & 5.100 & 5.249 & 4.947 \\ 5.946 & 4.931 & 5.350 & 6.106 & 7.133 & 5.400 & 6.470 \\ 7.340 & 5.534 & 7.361 & 5.880 & 6.897 & 7.372 & 6.275 \\ 4.927 & 6.953 & 5.546 & 5.669 & 6.034 & 7.103 & 5.615 \\ 7.000 & 5.297 & 6.903 & 6.782 & 6.142 & 5.468 & 7.044 \end{bmatrix}.$$

经步骤 3) 辨识得到后件参数阵 $W_1 = (w_{ij}^1)_{6 \times 7}, W_r = (w_{ij}^r)_{6 \times 7}$ 如下:

$$W_1 = \begin{bmatrix} 3.721 & -0.010 & 0.100 & -0.067 & -0.236 & -0.130 & -0.001 \\ 2.437 & 0.014 & -0.082 & -0.027 & 0.029 & -0.003 & -0.151 \\ -2.839 & -0.068 & -0.094 & 0.188 & 0.060 & -0.048 & 0.166 \\ -1.090 & -0.072 & -0.015 & 0.028 & 0.151 & 0.119 & 0.024 \\ -0.801 & 0.115 & -0.091 & 0.154 & -0.054 & 0.088 & 0.023 \\ -2.141 & 0.237 & -0.088 & -0.227 & 0.041 & -0.028 & -0.020 \end{bmatrix},$$

$$W_r = \begin{bmatrix} -0.311 & -0.058 & -0.013 & -0.015 & -0.073 & 0.007 & 0.022 \\ -0.264 & -0.157 & 0.032 & -0.050 & -0.082 & -0.038 & 0.080 \\ 1.234 & -0.054 & 0.053 & -0.002 & 0.025 & -0.105 & -0.013 \\ -2.200 & -0.071 & -0.073 & 0.033 & 0.302 & 0.007 & 0.149 \\ -2.569 & -0.083 & 0.120 & 0.041 & -0.004 & 0.157 & 0.059 \\ 8.198 & -0.230 & 0.137 & -0.288 & -0.203 & -0.093 & -0.086 \end{bmatrix}.$$

采用本文方法的建模效果如图 2 和图 3 所示,建模均方根误差 $\varepsilon_1 = 0.0508$ 。

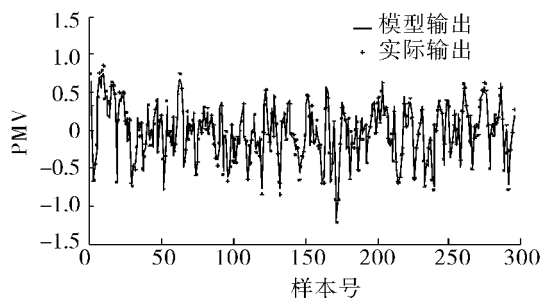


图 2 II 型模糊模型输出与实际输出的比较

Fig. 2 Comparison between the output of type-2 fuzzy model and the simulated output without noise

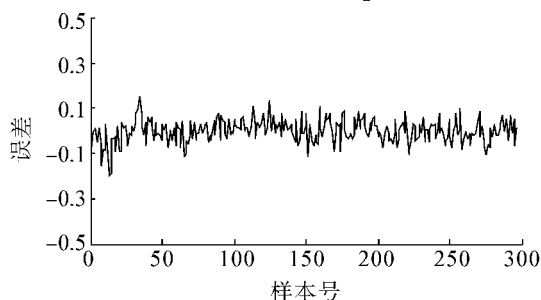


图 3 II 型模糊建模误差

Fig. 3 Error of modeling

若只采用 G-K 聚类和后件最小二乘辨识,亦可建立 I 型 T-S 模糊模型,此时建模均方根误差 $\varepsilon_2 = 0.201$,其建模效果如图 4 所示。

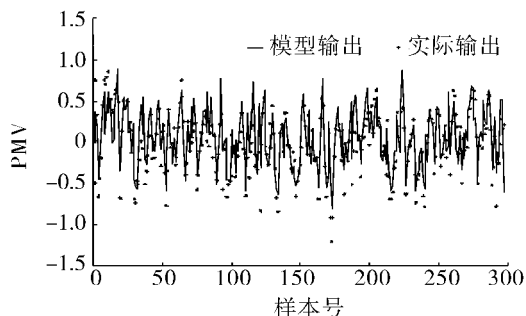
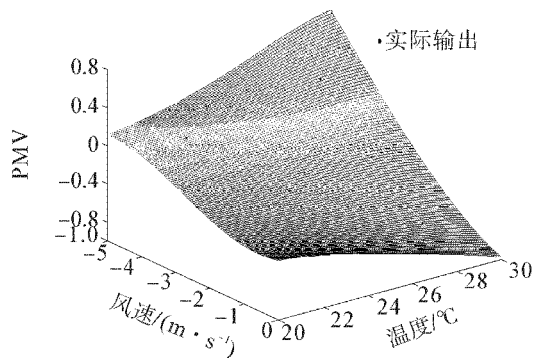


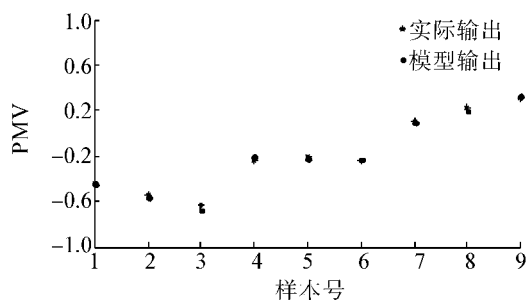
图 4 I 型模糊模型输出与实际输出的比较

Fig. 4 Comparison between the output of type-1 fuzzy model and the simulated output without noise

由图 2~4 可见,区间 II 型 T-S 模糊模型相比 I 型更好地克服了 PMV 模型的不确定因素和测量噪声,采用本文方法对过程动态的建模取得了更高的精度。在 FLUENT 环境下进一步验证该模型对不同工况下达到稳态的 PMV 预测值的准确性,分别对送风温度 $t = 22, 25, 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、风速 $v = 1, 2, 5, 4\text{ m/s}$ 的 9 种送风情况进行稳态数值模拟,将模拟得到的 PMV 值与模型的实际稳态输出作比较,如图 5 所示。由图 5 可见,模型对稳态热环境下的 PMV 指标的预测是可靠的。



(a) 模型稳态输出曲面和 9 种工况模拟值



(b) 9 种工况下模型预测值和模拟值

图 5 模型稳态输出和模拟值的比较

Fig. 5 Comparison between the steady output of type-2 fuzzy model and the simulated output

4 结束语

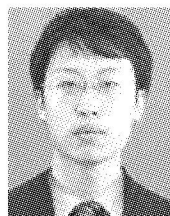
本文借助 CFD 数值模拟技术,对 PMV 指标建立了区间 II 型 T-S 模糊模型。仿真结果表明使用该方法相比 I 型模型更好地克服了人员带来的不确定性和测量扰动,取得了较好的建模效果。相比现有的结果,新提出的建模方法不依赖于先验知识和数据预处理,避免了同时优化前后件参数,减少了在线计算量。

参考文献:

- [1] FANGER P O. Thermal comfort[M]. Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 1970: 1-244.
- [2] ISO 7730. Moderate thermal environment—determination of PMV and PPD indices and specification of the condition for thermal comfort[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1994.
- [3] WANG Shengwei, XU Xinhua. Optimal and robust control of outdoor ventilation airflow rate for improving energy efficiency and IAQ[J]. Building and Environment, 2004, 39 (7): 763-773.
- [4] XU Xinhua, WANG Shengwei, SUN Zhongwei, et al. A model-based optimal ventilation control strategy of multi-zone VAV air-conditioning systems[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(1): 91-104.

- [5] MOSOLLY M, GHALI K, GHADDAR N. Optimal control strategy for a multi-zone air conditioning system using a genetic algorithm[J]. Energy, 2009, 34(1): 58-66.
- [6] 高立新, 白桦. 利用神经网络预测PMV指标[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(5): 70-71.
GAO Lixin, BAI Hua. Prediction of PMV index using neural network[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(5): 70-71.
- [7] 刘靖, 张子平, 姜凡, 等. 最小二乘支持向量机在热舒适性PMV指标预测中的应用研究[J]. 制冷空调与建筑机械, 2007, 28(6): 5-7.
LU Jing, ZHANG Ziping, JIANG Fan, et al. Research on the application of least square support vector machine in the prediction of PMV[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2007, 28(6): 5-7.
- [8] WANG Hanqing, HUANG Chunhua, LIU Zhiqiang, et al. Dynamic evaluation of thermal comfort environment of air-conditioned buildings[J]. Building and Environment, 2006, 41(11): 1522-1529.
- [9] HO S H, ROSARIO L, RAHMAN M M. Three dimensional analysis for hospital operating room thermal comfort and contaminant removal[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(10): 2080-2092.
- [10] FAZEL ZARANDI M H, TURKSEN I B, TORBI KASBI O. Type-2 fuzzy modeling for desulphurization of steel process[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(1): 157-171.
- [11] 廖倩芳, 李柠, 李少远. 一种数据驱动的 型T-S模糊建模方法[J]. 智能系统学报, 2009, 4(4): 303-308.
LAO Qianfang, LI Ning, LI Shaoyuan. A Type- T-S fuzzy modeling method for data-driven approaches [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2009, 4(4): 303-308.
- [12] 王梦灵, 李柠, 李少远. 带有测量噪声的 型T-S模糊建模[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 30(10): 1957-1961.
WANG Mengling, LI Ning, LI Shaoyuan. Type-2 T-S fuzzy modeling for the dynamic systems with measurement noise[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 30(10): 1957-1961.
- [13] MENDEZ G M, CASTILLO O. Interval type-2 TSK fuzzy logic systems using hybrid learning algorithm [C]//The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Reno, USA, 2005: 230-235.
- [14] MENDEZ G M, HERNANDEZ M A. Interval type-1 non-singleton type-2 TSK fuzzy logic systems using the hybrid training method RLS-BP[C]//Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence. Honolulu, USA, 2007: 370-374.
- [15] LANG Qilian, MENDEL J M. An introduction to type-2 TSK fuzzy logic systems [C]//IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings. Seoul, Korea, 1999: 1534-1539.
- [16] MENDEL J M. Interval type-2 fuzzy logic systems made simple[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2006, 14(6): 808-821.
- [17] QUN Ren, BARON L, BALAZINSKI M. Type-2 Takagi-Sugeno-Kang fuzzy logic modeling using subtractive clustering[C]//Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society. Montreal, Canada, 2006: 120-125.
- [18] GUSTAFSON D E, KESSELW C. Fuzzy clustering with a fuzzy covariance matrix[C]//IEEE Conference on Decision and Control Including the 17th Symposium on Adaptive Process. San Diego, USA, 1979: 761-766.
- [19] PAPADAKIS S E, THEOCHARIS JB. A GA-based fuzzy modeling approach for generating TSK models[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 131(2): 121-152.

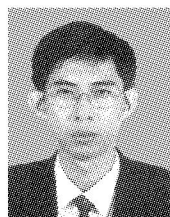
作者简介:



陈朦, 男, 1986年生, 硕士研究生, 主要研究方向为模糊建模与控制。



李柠, 女, 1974年生, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂系统建模与控制、智能控制等。先后承担并参加国家自然科学基金、国家“863”计划、上海市科研项目等10余项。2006年获得上海市自然科学一等奖(第三完成人)。发表学术论文50余篇, 其中被SCI、EI检索30余篇。



李少远, 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 上海市自动化学会理事长, 中国自动化学会控制理论专业委员会委员。主要研究方向为预测控制、自适应智能控制等。承担包括国家自然科学基金、国家“863”计划在内的国家级科研项目10余项。发表学术论文180余篇, 其中被SCI、EI检索100余篇。

)