

基于模糊感觉强度的无规则模糊逻辑系统的仿真设计

李玉姣^{*①} 王银河^②

^①(华南理工大学广州学院 广州 510800)

^②(广东工业大学自动化学院 广州 510006)

摘 要: 基于模糊逻辑方法在心理语言学研究领域的有效性, 该文提出基于模糊感知强度和韦伯定律的一类新的无规则模糊逻辑系统及其自适应控制应用的方法。首先, 应用心理物理学中的概念, 模糊逻辑系统的知识库是利用模糊感觉强度来描述专家经验感受; 模糊推理后应用广义韦伯定律进行解模糊得到系统输出。然后, 针对一类非线性系统, 利用构造的新的无规则模糊逻辑系统进行自适应控制设计, 得到相应的控制器和参数自适应律。最后, 通过 Duffing 混沌系统仿真算例验证了该文方法的可行性和有效性。

关键词: 模糊感觉强度; 韦伯定律; 无规则模糊系统; Duffing 混沌系统; 自适应控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)04-0979-06

DOI: 10.11999/JEIT170583

Simulation Design of Fuzzy Logic System Without Any Rules Based on Fuzzy Perception Intensity

LI Yujiao^① WANG Yinhe^②

^①(Guangzhou College, South China University of Technology, Guangzhou 510800, China)

^②(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the effectiveness of the fuzzy logic in the field of psychological linguistics research, this paper proposes a new kind of fuzzy logic system without any rules based on fuzzy perception intensity and Weber's law, and the method of adaptive control application. Firstly, applying the concept of psychophysics, the knowledge base of fuzzy logic system is constructed by fuzzy perception intensity, which describes expert's experience feelings. After fuzzy reasoning, the final output is obtained from defuzzification by generalized Weber's law. Secondly, for a class of nonlinear system, this new fuzzy logic system is adopted to design adaptive controller and parameter's adaptive laws. Finally, the feasibility and validity of the method are illustrated through the synchronization simulation about Duffing chaotic systems.

Key words: Fuzzy perception intensity; Weber's law; Fuzzy logic system without any rules; Duffing chaotic systems; Adaptive control

1 引言

在模糊控制理论中, 基于模糊 IF-THEN 规则的模糊逻辑系统常被用来逼近非线性动态系统模型中的未知非线性项。由于这种模糊逻辑系统通常采用乘积型逻辑推理和中心平均解模糊的方法, 因此其输出一般可以表示为某些模糊基函数的线性组合形式, 进而可以依据组合系数的估计值形成模糊自适应控制设计方法^[1]。现有的研究结果已经显示出这种形式的模糊自适应控制设计方法一般具有如下问题: 系统维数和模糊逼近精度的增加会导致模糊规

则数目成指数形式增加, 因而会造成“规则灾难”问题^[2-6], 在这种情况下, 如果自适应律数目随着模糊规则数目的增加而增加, 那么所设计的自适应控制器的计算量将会急剧增加, 从而加大了控制过程执行时间, 容易导致闭环系统失稳。

为了解决上述问题, 目前已有文献提出了几种减少自适应律数目的设计方法, 并取得了一些成果。从本质上说, 这些设计方法主要通过利用合并估计(模糊逻辑系统)内部参数(组合系数)^[7]或者通过引入外部参数的估计替代内部参数的估计^[8]的方法以达到减少自适应律数目的目的。仔细分析上述模糊逻辑系统的结构不难发现, 知识库采用 IF-THEN 型规则、解模糊采用中心平均的方法是造成“规则灾难”问题的主要原因, 也是造成自适应律数目急剧增加的主要原因。因此, 探索新的知识库表现形

收稿日期: 2017-06-15; 改回日期: 2017-12-14; 网络出版: 2018-01-23

*通信作者: 李玉姣 cherish20@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(61673120)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61673120)

式和解模糊方法也是解决“规则灾难”问题、减少自适应律数目的一个有效途径。有鉴于此,文献[9,10]提出了两种无规则的模糊逻辑系统,但其并没有给出减少自适应律的控制设计方法。

本文将模糊逻辑系统视为具有逻辑结构的感系统,从心理物理学角度重新考虑模糊逻辑系统的结构,构造了一种新的无规则模糊逻辑系统。这种无规则模糊逻辑系统仍然采用乘积逻辑进行推理,采用无规则的形式——若干个对输入变量的“模糊感觉强度”来构造知识库,采用心理物理学中的广义Weber定律^[11]和通常的数量平均法相结合的方法进行解模糊。这种基于模糊感觉强度的无规则模糊逻辑系统的输出可以表示为有限多个基函数的线性组合形式,而这些基函数的数目与模糊逻辑系统的输入变量的维数相同,这表明:针对一个具有有限维数的控制系统,如果利用这种模糊逻辑系统进行自适应控制,那么基于组合系数的自适应律的数目是固定不变的。与现有的模糊自适应控制方法相比较,文中所给出的方法不仅在一定程度上解决了“规则灾难”问题,而且相应地也在一定程度上减少了自适应律的数目。

2 广义 Weber 定律与模糊感觉强度

认知语言学是认知科学研究领域的一个重要分支,其中的行为主义认为人们的基本概念来自感知体验,人类的言语行为和人的其他行为一样,也是对刺激的反应,是联想的形成、实现和改变,是借助强化而获得的^[10]。因此,从对于语言的感知角度看,人的大脑神经系统可视为一个感觉系统。

在心理物理学研究领域,Weber定律针对感系统对刺激的主观感觉规律给出了定量描述,刺激强度与感觉强度服从Weber定律。Weber定律表明人类对两个刺激的最小感觉差异(差别感觉阈限)与原有刺激强度成正比例关系,即 $\Delta I/I = c$,其中 c 被称为韦伯常数(分数)^[12-15]。一般情况下,对于各种不同的感觉系统,Weber常数也各不相同。

值得注意的是Weber定律一般只适用于中等强度的刺激,对于不同强度的刺激,有式(1)所示的广义Weber定律^[11]:

$$\Delta y = k \frac{\Delta u}{u_0} \quad (1)$$

其中, k 是一个常数, y 是感觉系统的输出(感觉强度), u_0 是原始刺激量, $\Delta u = u - u_0$ 是基于 u_0 水平的刺激改变量, Δy 表示感觉系统输出的最大(感觉强度)改变量。

模糊逻辑系统由模糊化、知识库、推理机和解模糊等4个功能模块组成(如图1所示)。图中,知识库由若干条IF-THEN模糊规则组成;推理机不仅规定了规则间的模糊逻辑关系而且规定了从模糊输入到模糊输出之间的逻辑推理形式(一般采用乘积逻辑和Zadeh组合推理形式)。

模糊逻辑方法在心理语言学研究领域的有效性^[16]意味着可以将通常的模糊逻辑系统视为一种带有模糊逻辑和推理的感觉系统。在这种感觉系统中,知识库用来储存专家对于刺激输入的模糊感觉强度(用模糊集表示);推理机不仅规定这些模糊感觉强度间以及与模糊输入间的模糊逻辑关系,而且规定从模糊输入到模糊输出之间的模糊逻辑推理形式;广义Weber定律用来将最后的模糊输出解模糊化。

一般认为,专家对于某类刺激输入的(模糊)感觉强度来自于他(们)在过去的经验。在这里,专家对于某类刺激输入的感觉强度是指针对某一个关注目标,他(们)对这类刺激输入影响这个目标的程度体验,如果这种体验(经验)可以用模糊集合描述(模糊值),那么这种感觉强度就称为模糊感觉强度,例如针对某商品销售量这一目标,价格(刺激输入)影响销售量的模糊感觉强度可以是“高”、“低”等模糊值;又如针对某个有界闭区间上的二元连续函数 $f(x_1, x_2)$,刺激输入 x_1 和 x_2 影响函数 $f(x_1, x_2)$ 取值的模糊感觉强度可以是“大”、“中”、“小”等模糊值。因此,模糊感觉强度是专家对一类刺激反应程度的概括。本文提出的知识库是利用模糊感觉强度这一概念记载了专家以往的经验感受。

3 基于模糊感觉强度的无规则模糊逻辑系统

考虑基于韦伯-费希纳定律的新的无规则模糊逻辑系统,其结构如图2所示。图中,外界刺激量

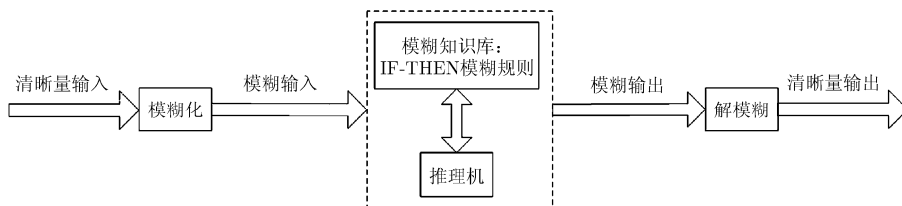


图1 通常的模糊逻辑系统结构示意图

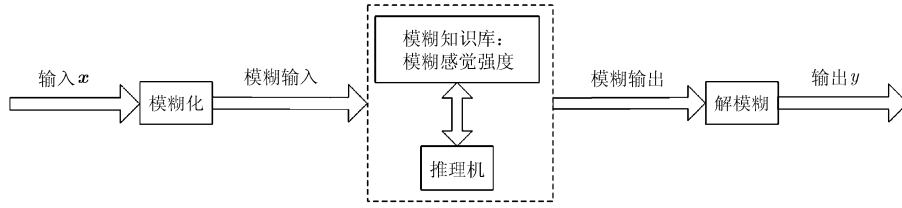


图 2 基于模糊感觉强度的无规则模糊逻辑系统示意图

$\mathbf{x} \in R^n$ 作为模糊逻辑系统输入变量，其论域为 $I = I_1 \times I_2 \times \dots \times I_n$ 。记刺激输入向量 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ ，系统输出为 y 。系统各模块功能构造如下：

模糊化 将刺激输入 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in R^n$ 进行模糊化，映射为论域上的模糊集 $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ ，模糊集 A_i 的隶属函数选为高斯型隶属函数，即

$$A_i(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - a_i}{\sigma_i}\right)^2\right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中， σ_i 和 a_i 是可适当调节的非零参数，且 $a_i \in I_i$ 。

知识库 记 $\{A_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i\}$ 为论域 U 上的一组模糊覆盖^[17]， A_{ij} 表示知识库中关于第 i 个刺激变量的第 j 个模糊感觉强度，其隶属函数记为 $A_{ij}(x_i)$ ，即知识库中储存了 $N = \sum_{i=1}^n N_i$ 个关于刺激变量的专家感觉经验知识，由图 3 形式所示。

x_1	x_2	\dots	x_n
A_{11}	A_{21}		A_{n1}
A_{12}	A_{22}	\dots	A_{n2}
\vdots	\vdots		\vdots
A_{1N_1}	A_{2N_2}		A_{nN_n}

图 3 模糊感觉知识库

模糊推理机与解模糊 针对一组真值数据 $\mathbf{x}^* = [x_1^* \ x_2^* \ \dots \ x_n^*]^T \in R^n$ 作为系统输入来说明模糊推理机的功能和解模糊化的过程。

(1) 当真值数据输入 $\mathbf{x}^* = [x_1^* \ x_2^* \ \dots \ x_n^*]^T$ 作为刺激量进入模糊逻辑系统后，首先经过模糊化映射到论域 U 上得到模糊集簇 $\{A_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ ，然后簇中的第 i 个模糊集合 A_i 分别激活模糊感觉知识库中对应刺激变量的专家经验感受知识——模糊感觉强度 A_{ij} ，即有模糊蕴含关系 $R_{ij} : A_i \rightarrow A_{ij}$ ，其隶属度函数记为 $\tilde{A}_{ij} = A_i \cdot A_{ij}$ 。

(2) 若 $\{A_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i\}$ 是模糊感

觉知识库中关于刺激输入变量 x_i 论域 I_i 上的一组模糊覆盖， $\{A_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i\}$ 是该论域上的一组开覆盖，则利用从属于开覆盖 $\{A_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i\}$ 的单位分解^[17] $\{\alpha_{ij}, i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N_i\}$ 形成关于刺激变量 x_i 的模糊知识加权平均 \tilde{A}_i ， \tilde{A}_i 表示关于刺激量 x_i 的综合模糊感觉强度，隶属度函数记为 $\tilde{A}_i(x_i) = \sum_{j=1}^{N_j} \alpha_{ij}(x_i) \tilde{A}_{ij}(x_i)$ 。

(3) 采用乘积推理可得 $\tilde{A}_i(x_i) = \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) \cdot A_i(x_i) A_{ij}(x_i)$ ，通过广义 Weber 定律 $\Delta y = k \frac{\Delta u}{u_0}$ 对

该模糊逻辑系统进行解模糊化可以得到

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \tilde{A}_i(x_i)}{\sum_{i=1}^n \tilde{A}_i(x_i)} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_i(x_i) A_{ij}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_i(x_i) A_{ij}(x_i)} \quad (3)$$

由单点模糊化可以将上述模糊逻辑系统的输出式(3)改写为

$$y = F(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n k_i p_i(x_i) = \boldsymbol{\vartheta}^T \mathbf{p}(\mathbf{x}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式(4)中， $\boldsymbol{\vartheta} = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n]^T$ ， k_i 是韦伯感知系数，根据输入刺激的不同，模糊感觉强度的不同，其值会不同；但对于同一个感觉对象在同等条件下进行同类型的输入刺激，该值为常数^[11]。 $p_i(x_i) =$

$$\frac{\sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_{ij}(x_i)}{\sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_{ij}(x_i)}$$

基函数， $\mathbf{p}(\mathbf{x}) = [p_1(x_1) \ p_2(x_2) \ \dots \ p_n(x_n)]^T$ 。

由以上可知，这种新的无规则模糊逻辑系统的输出可以表示为有限多个基函数的线性组合形式，其中，基函数的个数与模糊逻辑系统的输入变量的维数相同，与知识库中专家经验感觉强度的数目 N_i 无关，这表明：若利用构造的模糊逻辑系统来进行某系统的自适应控制设计时，在一定程度上可以解决“规则爆炸”问题，而且系统输出具有较少的可调参数。

4 系统描述及控制器的设计

考虑 n 阶非线性系统^[1]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^{(n)} &= f(\mathbf{x}) + g(\mathbf{x})u + d \\ y &= x \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, f 和 g 是未知的非线性连续函数, $\mathbf{x} = [x \ \dot{x} \ \dots \ x^{(n-1)}]^T \in \tilde{U} \subseteq R^n$ 表示系统的状态向量, \tilde{U} 是紧致闭集; $u \in R$ 是系统的控制输入, $y = x$ 是系统输出, d 是时变干扰。

为了控制设计的方便, 可以将系统式(5)改写为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}[f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u + d] \\ y &= x \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{O} & \mathbf{I}_{n-1} \\ 0 & \mathbf{O}^T \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}^T \\ 1 \end{bmatrix}$, \mathbf{O} 表示 $n-1$ 阶零向量, \mathbf{I}_{n-1} 表示 $n-1$ 阶单位矩阵。

控制目标: 假设系统不存在外部干扰 d , 基于构造的模糊逻辑系统式(4)设计反馈控制器 $u = u(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta})$ 和可调参数向量 $\boldsymbol{\vartheta}$ 的自适应律, 使系统输出 y 能跟踪任意给定的可微参考信号 $r(t)$ 。

针对上述控制目标, 提出式(7)的控制方案:

$$u = \frac{1}{\hat{g}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_g)} [-\hat{f}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_f) + r^n + \mathbf{h}^T \boldsymbol{\varepsilon}] \quad (7)$$

其中, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为跟踪误差。将式(7)代入系统式(5)中, 得到闭环控制系统方程为

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{(n)} + h_1 \boldsymbol{\varepsilon}^{(n-1)} + \dots + h_n \boldsymbol{\varepsilon} = 0 \quad (8)$$

选择适当的 $\mathbf{h} = [h_1 \ h_2 \ \dots \ h_n]^T$, 可使 $t \rightarrow \infty$ 时有 $\boldsymbol{\varepsilon}(t) \rightarrow 0$, 表明系统输出 y 可以收敛于给定信号 $r(t)$ 。而在实际应用中, 系统非线性函数 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x})$ 一般是不确定的, 所以, 控制方案中需用两个新的无规则模糊逻辑系统式(4)的输出 $\hat{f}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_f)$ 和 $\hat{g}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_g)$ 分别逼近非线性函数 $f(\mathbf{x})$ 和 $g(\mathbf{x})$, 即有

$$\hat{f}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_f) = \frac{\sum_{i=1}^n k_f^i \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_{ij}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_{ij}(x_i)} = \boldsymbol{\vartheta}_f^T \mathbf{p}_f(\mathbf{x}) \quad (9)$$

$$\hat{g}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_g) = \frac{\sum_{i=1}^n k_g^i \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_{ij}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{N_i} \alpha_{ij}(x_i) A_{ij}(x_i)} = \boldsymbol{\vartheta}_g^T \mathbf{p}_g(\mathbf{x}) \quad (10)$$

再结合文献[1]中提出的 Lyapunov 综合法, 得到可调参数的自适应律:

$$\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_f = -\lambda_1 \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{p}_f(\mathbf{x}) \quad (11)$$

$$\dot{\boldsymbol{\vartheta}}_g = -\lambda_2 \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{p}_g(\mathbf{x}) u_1 \quad (12)$$

式中, λ_1, λ_2 为正常数, \mathbf{P} 是一个正定矩阵且满足 Lyapunov 方程 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}$, 方程中 \mathbf{Q} 是一个任意的正定矩阵, \mathbf{A} 由模糊控制系统的闭环动态方程给出。

注1 虽然本文提出的模糊控制系统 $\hat{f}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_f)$ 、 $\hat{g}(\mathbf{x} | \boldsymbol{\vartheta}_g)$ 和参数自适应律的形式与文献[1]的完全一致, 但是控制方法中采用的模糊逻辑系统不同。本文采用的是一类新的无规则模糊逻辑系统, 其知识库里存储的是专家模糊感知强度, 变量论域模糊划分自由, 语言信息丰富; 参数自适应律和模糊基函数的数目是固定的, 均与系统输入变量的维数 n 相同, 与专家经验知识的数目 N_i 无关, 与文献[1]相比, 这在一定程度上解决了“规则爆炸”问题, 也极大地提升了在线计算速率。

定理1^[1] 考虑非线性系统式(5), 通过系统式(4)和参数自适应律式(11)、式(12)的共同作用, 最优模糊控制器式(7)能够实现系统输出跟踪控制目标, 使 $\boldsymbol{\varepsilon} \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$ 。

5 仿真算例

为了说明新的无规则模糊逻辑系统具有逼近某非线性函数的适用性和基于该系统的控制设计方法的有效性, 考虑二阶混沌系统的仿真控制, 其动态方程为

$$\ddot{x} = -0.1\dot{x} - x^3 + 10 \cos t + u \quad (13)$$

根据式(6)的形式, 可得 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。

$f(\mathbf{x}, t) = -0.1\dot{x} - x^3 + 10 \cos t$, $g(\mathbf{x}, t) = 1$, $d = 0$ 。若控制输入信号 $u(t) = 0$, 初始条件设为 $x_1(0) = x_2(0) = 2$, 系统响应时间设为 90 s 时, 仿真结果如图 4 所示。

应用文中控制方法进行仿真时, 假设 $f(\mathbf{x}, t)$ 是未知的, 记 $f(\mathbf{x}, t) = -0.1x - x^3 + 10 \cos t$, 用基于模糊感知强度构造的无规则模糊逻辑系统来近似 $f(\mathbf{x}, t)$ 。由图 4 知模糊系统输入刺激变量 x_1 和 x_2 的论域为: $U = I_1 \times I_2 = [-4, 4] \times [-10, 10]$, 对该论域进行模糊划分, 知识库中即储存了 5 个关于刺激变量 x_1 的模糊感知强度 $\{A_{1j}, j = 1, 2, \dots, 5\}$ 和 4 个关于刺激变量 x_2 的模糊感知强度 $\{A_{2j}, j = 1, 2, \dots, 4\}$, 并设计相应的高斯型隶属函数, 如图 5 所示。

综合应用上述构造的无规则模糊逻辑系统, 依照文中记号, 取参考信号 $r(t) = 0.5(\sin(0.5t) + 0.5 \sin(2t))$, 选择 $\mathbf{h} = [2 \ 1]^T$, $\mathbf{Q} = \text{diag}(2, 2)$ 。参数 $\lambda_1 = 6000$, 韦伯感知参数的自适应律初始值

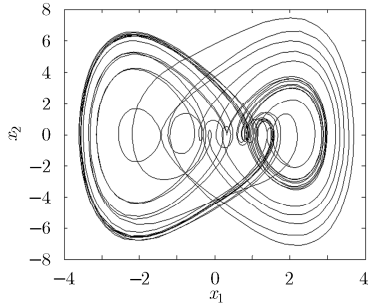


图 4 当 $u(t) = 0$ 和 $x_1(0) = x_2(0) = 2$ 时混沌系统在相平面的轨迹

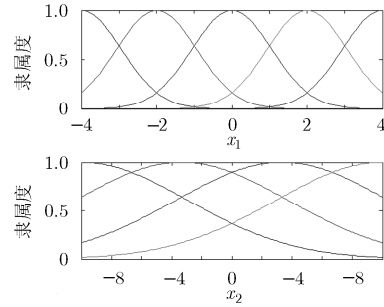


图 5 无规则模糊逻辑系统的知识库由混沌系刺激变量 x_1 和 x_2 的模糊感知强度

$\vartheta(0) = [0.1 \ 0.1]$ ，二阶混沌系统式(13)的状态初始值为 $x_1(0) = x_2(0) = 2$ ，输出仿真结果如图 6~图 8 所示。

从图 6 和图 7 可以看出，混沌系统的状态 x_1 的响应能快速跟随给定信号，状态 x_2 的响应也能在半分钟后跟随给定信号，图 8 的输出跟踪误差在可接受范围内。以上充分表明了这类无规则模糊逻辑系统的有效性及其控制方法的可行性。

仍针对该系统，将本文方法与文献[1]提出的基于 Mamdani 型模糊逻辑系统的控制方法进行比较，参考信号设为 $r(t) = 3\sin t$ 。仿真结果如图 9、图 10 所示。

由仿真结果可知，尽管两种控制方法都实现了

跟踪控制目标，但是，通过对比仿真图认为本文的跟踪控制效果更好，文献[1]存在一定的超调量。另外，文献[1]控制方法中采用的是有规则模糊逻辑系统，使用了 25 条模糊规则来逼近 $f(x)$ ，其自适应参数有 25 个，在线运算量大，而本文控制方法应用的是新的无规则模糊感觉系统，只用了 2 个自适应参数即可实现控制目标，明显减少计算量，验证了该控制方法的有效性。

6 结论

本文从心理物理学角度重新考虑模糊逻辑系统的结构，将模糊逻辑系统看作是具有逻辑结构的感覺系统，刺激变量的模糊感觉强度构成模糊系统的

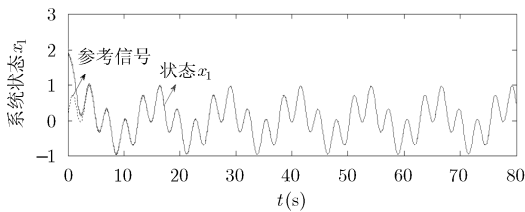


图 6 系统的输出跟踪轨迹 $y = x_1$

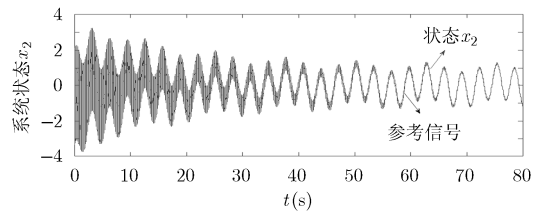


图 7 系统状态 x_2 的跟踪轨迹

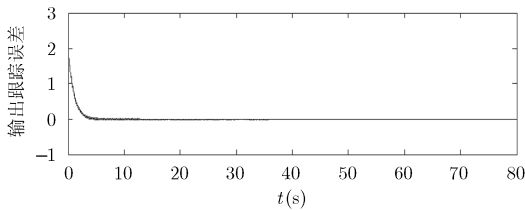


图 8 系统的输出跟踪误差 $\varepsilon = y - r(t)$

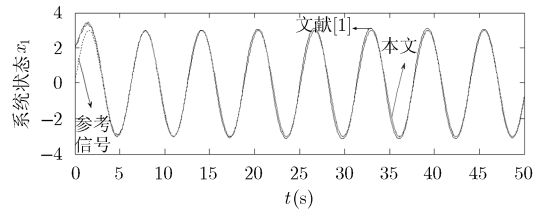


图 9 参考信号 $r(t) = 3\sin t$ 时系统状态 x_1 的跟踪对比曲线图

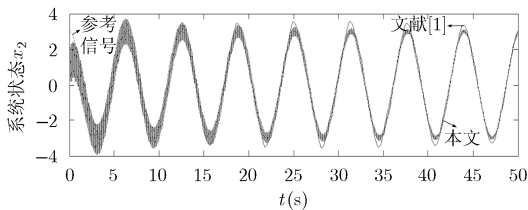


图 10 参考信号 $r(t) = 3\sin t$ 时系统状态 x_2 的跟踪对比曲线图

知识库，逻辑推理后应用广义韦伯定律解模糊得到系统输出，构造出一种新的无规则模糊逻辑系统。实验仿真算例表明，本文提出的控制方法有效，在线调试参数数目少，节约控制时间。无规则模糊逻辑系统中，各变量的模糊划分自由，具有丰富的语言可解释性，增强了系统控制方法应用的广泛性。

参考文献

- [1] 王立新, 著, 王迎军, 译. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1-371.
- [2] KROKAVEC D and FILASOVA A. One approach to design the fuzzy default detection filters for Takagi-Sugeno Models [C]. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham, 2016, 386: 19-33. doi: 10.1007/978-3-319-23180-8_2.
- [3] WANG L X and MENDEL J M. Fuzzy basis functions, universal approximation and least squares learning[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, 3(5): 807-814. doi: 10.1109/72.159070.
- [4] YING H. General SISO Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent are universal approximators[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 6(4): 582-587. doi: 10.1109/91.28456.
- [5] CASTRO J L. Fuzzy logic controllers are universal approximators[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 1995, 25(4): 629-635. doi: 10.1109/21.370193.
- [6] MAROUF S, ESFANJANI R M, AKBARI A, et al. T-S fuzzy controller design for stabilization of nonlinear networked control systems[J]. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2016, 50: 135-141. doi: 10.1016/j.engappai.2016.01.031.
- [7] LIU Y J, WANG W, TONG S C, et al. Robust adaptive tracking control for nonlinear systems based on bounds of fuzzy approximation parameters[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2010, 40(1): 170-184. doi: 10.1109/TSMCA.2009.2030164.
- [8] 范永青, 王银河, 罗亮. 带有伸缩器和饱和器的一类非线性系统模糊自适应控制设计[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(9): 1105-1110.
FAN Yongqing, WANG Yinhe, and LUO Liang. Fuzzy adaptive control design for a class of nonlinear systems with scalars and saturators[J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(9): 1105-1110.
- [9] WANG S T, CHUNG F L, LU J P, et al. Fuzzy inference systems with no any rule base and linearly parameter growth[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2004, 2: 185-192.
- [10] NOVÁK V and PERFILIEVA I. On the semantics of perception-based fuzzy logic deduction[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2004, 19(11): 1007-1031.
- [11] 李小平, 刘穿石. 新编基础心理学[M]. 南京: 南京师范大学出版社, 2007: 1-105.
LI Xiaoping and LIU Chuanshi. *New Basic Psychology*[M]. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 2007: 1-105.
- [12] SAKIYAMA T and GUNJI Y P. Directional ambiguity in trail-laying algorithms[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 34: 37-44. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2016.09.001.
- [13] HAN Xianhua and CHEN Yenwei. HEp-2 staining pattern recognition using stacked fisher network for encoding weber local descriptor[J]. *Pattern Recognition*, 2017, 63: 542-550. doi: org/10.1016/j.patcog.2016.09.025.
- [14] 邹小林, 冯国灿. 基于韦伯定律的过渡区提取及阈值分割[J]. *科学技术与工程*, 2013, 15(13): 4217-4222.
ZOU Xiaolin and FENG Guocan. Weber's law-based transition region extraction and thresholding[J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 15(13): 4217-4222.
- [15] 吕锐, 夏志华, 陈先意, 等. 基于韦伯二值感知特征的指纹活性检测[J]. *应用科学学报*, 2016, 34(5): 616-624.
LU Rui, XIA Zhihua, CHEN Xianyi, et al. Fingerprint liveness detection based on Weber binarized perception features[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2016, 34(5): 616-624.
- [16] TANENHAUS M K, 著, 桂诗春, 译. 心理语言学概述[J]. *当代语言学*, 1991, 1: 1-10.
TANENHAUS M K, GUI Shichun, translate. Summary of Psycholinguistics[J]. *Contemporary Linguistics*, 1991, 1: 1-10.
- [17] WANG Y H, LI Z Y, and ZHANG S Y. Approximation property of partition of unity and its applications[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2004, 2(3): 267-275. doi: 10.1007/s11768-004-0008-8.
- 李玉姣: 女, 1986年生, 助教, 主要研究方向为模糊自适应控制.
王银河: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为控制理论与控制工程、复杂网络的控制.