

# 基于状态估计的摩擦模糊建模与鲁棒自适应控制

王永富<sup>1,2</sup> 王殿辉<sup>2,3</sup> 柴天佑<sup>2</sup>

**摘要** 针对一类多自由度机械系统,研究了基于状态估计的摩擦模糊建模与鲁棒自适应控制问题.提出用模糊状态估计器估计摩擦模型中的不可测变量,并用严格正实和李雅普诺夫稳定性理论证明了状态估计误差的一致最终有界性.运用模糊状态估计结果设计了多变量鲁棒自适应控制器,其中摩擦模糊模型中的自适应参数是基于李雅普诺夫稳定性理论设计的,并证明了闭环系统跟踪误差的一致最终有界性.本文对多自由度质量、弹簧和摩擦阻尼系统进行的仿真,结果表明所提出的状态估计算法和自适应控制策略是有效的.

**关键词** 摩擦模型, 状态估计, 模糊建模, 自适应, 鲁棒控制  
**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2011.00245

## State Estimate-based Friction Fuzzy Modeling and Robust Adaptive Control

WANG Yong-Fu<sup>1,2</sup> WANG Dian-Hui<sup>2,3</sup>  
CHAI Tian-You<sup>2</sup>

**Abstract** This paper develops a fuzzy state estimate-based robust adaptive control scheme for a class of mechanical systems with multiple degrees of freedom. The unmeasurable state variables used in both modeling friction force and adaptive controller design are estimated by a fuzzy estimator. By strictly positive real lemma and Lyapunov stability theory, the ultimately uniform boundedness of the state estimation errors is ensured. This paper also proposes a multivariable robust control algorithm using the estimated states and adaptive fuzzy friction mode, where the updating rule for parameter adjustment in the fuzzy friction model is derived by Lyapunov theory. It is shown that the tracking error of the closed-loop system is ultimately uniformly bounded (UUB). A mass-spring-damping system with multiple degrees of freedom is employed in the simulation studies. Simulation results demonstrate the effectiveness of our proposed state-estimate based fuzzy friction modeling and adaptive control strategy.

**Key words** Friction model, state estimate, fuzzy modeling, adaptive, robust control

摩擦是一种复杂的、非线性的、具有不确定性的自然现象.人类目前对这一物理过程的了解还处在进一步探索阶段,还无法通过数学方法给出完全真实的精确描述.现实生活中

摩擦几乎无处不在,在有些情况下,摩擦是人们所期望的.如汽车的刹车系统利用了摩擦进行制动,但对于大多数机械系统而言,摩擦却成为提高系统性能的障碍,使系统响应出现爬行、振荡或稳态误差以及其他不可预料现象.因此,为提高机械系统的性能就必须减小或消除摩擦对系统性能的不利影响,解决摩擦问题对提高机电产品性能具有重要的理论和实际意义.

对非线性摩擦建立准确数学模型,无论是对认识摩擦现象,还是进行摩擦控制补偿都是十分重要的<sup>[1-3]</sup>.因此,有关摩擦建模的研究一直非常活跃,到目前为止,已提出的摩擦模型有几十种,主要分为静态摩擦模型和动态摩擦模型两大类.其中,静态摩擦模型主要包括 Coulomb 摩擦模型, Stribeck 摩擦模型和 Karnopp 摩擦模型等;动态摩擦模型主要包括 LuGre 摩擦模型和七参数摩擦模型等.这些模型是通过摩擦机理的研究和实验建立起来的参数化数学模型.这些模型对认识摩擦机理和控制补偿具有重要意义.但这些传统的摩擦机理模型也有如下不足: 1) 缺少一个比较直观的、具有明显物理意义且能够精确描述摩擦静态和动态特性的摩擦模型; 2) 人们提出了多种摩擦模型,但它们没有形成统一的描述形式,在实际应用中很难确定哪种摩擦模型更合适; 3) 现有的摩擦模型有的过于简化,易于实现控制补偿但很难保证控制精度,有的过于复杂,使得参数辨识很难、不易于实现控制补偿; 4) 现有这些摩擦模型从理论上很难把控制器设计与稳定性分析有机地结合起来.

由于传统摩擦机理模型的不足,近些年人们从智能建模与控制的角度出发,提出了用神经网络和模糊系统等方法对摩擦进行建模与控制,并取得了一定成果<sup>[4-5]</sup>.模糊方法能把摩擦专家领域知识、数据信息以及自适应等特性融合到模型中.这种具有自适应特性的智能方法更适合具有不确定特性的摩擦力的建模与补偿控制.

目前,无论是用传统方法还是智能方法,摩擦建模与补偿控制几乎都是在假设系统状态完全可测的情况下进行的.研究表明摩擦力是速度及位置的函数,因此为了获取摩擦力大小必须同时获得速度和位置的值.然而,在实际工程应用中,一般机械系统的位置通过编码器可以直接检测到,由于成本和噪声等原因使得速度很少直接检测.因此,研究有效的状态估计技术对摩擦建模与反馈控制具有一定的理论和实际意义.本文提出的方法与已有的文献不同之处在于,针对摩擦系统速度不可测的情况,进行摩擦模糊建模并将摩擦模糊模型用于控制器设计中.本文提出的方法适用于多自由度机械系统的建模与控制,对于多摩擦环节的机械系统具有普遍意义.

### 1 数学建模与问题描述

对于图 1 由质量、弹簧和阻尼构成的多自由度系统,在仅考虑摩擦阻尼的情况下,按照牛顿第二定律可以得到下面的微分方程:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = -F_{f_1} - k_1 y_1 - k_2 (y_1 - y_2) + u_1 \\ \vdots \\ m_p \ddot{y}_p = -F_{f_p} + k_p (y_{(p-1)} - y_p) + u_p \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $u_i$  是控制输入,  $F_{f_i}$  表示不确定摩擦力,  $k_i$  是刚性系数 ( $i = 1, \dots, p$ ). 设  $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_{2p})^T = (y_1, \dot{y}_1, \dots, y_p, \dot{y}_p)^T$  表示系统的状态向量,只有系统的输出向量  $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_p)^T$  是可检测的. 方程 (1) 可改写为如

收稿日期 2010-05-18 录用日期 2010-10-08  
Manuscript received May 18, 2010; accepted October 8, 2010  
国家自然科学基金 (50875042, 60821063, 50875039), 沈阳市科技基金 (F10-205-1-40) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (50875042, 60821063, 50875039) and Science and Technology Foundation of Shenyang City (F10-205-1-40)  
1. 东北大学机械能与自动化学院 沈阳 110004 2. 东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室 沈阳 110004 3. 澳大利亚拉筹伯大学计算机科学与计算机工程系 Melbourne VIC 3086  
1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, P. R. China 2. Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, P. R. China 3. Department of Computer Science and Computer Engineering, La Trobe University, Melbourne Victoria 3086, Australia

下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(F(\mathbf{x}) + H(\mathbf{y}) + \mathbf{G}\mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{x}$  表示该系统的状态变量,  $\mathbf{A} = \text{diag}\{A_1, \dots, A_p\}$ ,  $\mathbf{B} = \text{diag}\{B_1, \dots, B_p\}$ ,  $\mathbf{C}^T = \text{diag}\{C_1, \dots, C_p\}$ ,  $\mathbf{G} = \text{diag}\{1/m_1, \dots, 1/m_p\}$ ,  $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_p)^T$ ,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$F(\mathbf{x}) = - \begin{bmatrix} \frac{F_{f_1}}{m_1} \\ \vdots \\ \frac{F_{f_p}}{m_p} \end{bmatrix}, \quad H(\mathbf{y}) = \begin{bmatrix} \frac{-k_1 y_1 - k_2 (y_1 - y_2)}{m_1} \\ \vdots \\ \frac{k_p (y_{(p-1)} - y_p)}{m_p} \end{bmatrix}.$$

对于给定的系统参考输入信号  $\mathbf{y}_r = (y_{r_1}, \dots, y_{r_p})^T$ , 设  $\mathbf{x} = (x_1, \dot{x}_1, \dots, x_p, \dot{x}_p)^T$ ,  $\hat{\mathbf{x}} = (\hat{x}_1, \dot{\hat{x}}_1, \dots, \hat{x}_p, \dot{\hat{x}}_p)^T$  和  $\mathbf{Y}_r = (y_{r_1}, \dot{y}_{r_1}, \dots, y_{r_p}, \dot{y}_{r_p})^T$ , 那么跟踪误差为  $\mathbf{e} = \mathbf{Y}_r - \mathbf{x} = (e_1, \dot{e}_1, \dots, e_p, \dot{e}_p)^T$ , 状态估计误差为  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}} = (\tilde{x}_1, \dot{\tilde{x}}_1, \dots, \tilde{x}_p, \dot{\tilde{x}}_p)^T$ .

设计任务: 针对多自由度系统 (2), 设计基于状态估计的摩擦模糊模型和鲁棒自适应控制以便满足下面的要求: 1) 状态估计器能保证状态估计性能并且状态估计误差  $\tilde{\mathbf{x}}$  是一致最终有界的 (Ultimately uniformly bounded, UUB); 2) 鲁棒自适应控制器能保证跟踪性能并且跟踪误差  $\mathbf{e}$  也是一致最终有界的.

## 2 摩擦的模糊建模与状态估计

### 2.1 摩擦的模糊建模

由式 (1) 或 (2) 可以看出, 含有多个摩擦环节的摩擦力向量是一种不确定量, 并且建立该模型的状态也是不完全可测的. 所以构建下面基于状态估计的向量模糊系统逼近该摩擦力向量. 用自适应模糊逻辑系统  $\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  逼近式 (2) 中的摩擦力项  $F(\mathbf{x})$ , 其中,  $\hat{\Theta}$  是可调参数向量. 设  $\hat{F}_i(\hat{\mathbf{x}}_i, \hat{\Theta}_i)$  表示  $\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  的第  $i$  个分量, 采用单值模糊化、乘积运算、加权平均反模糊化可得 I 型模糊逻辑系统为

$$\hat{F}_i(\hat{\mathbf{x}}_i, \hat{\Theta}_i) = \xi_i^T(\hat{\mathbf{x}}_i) \hat{\Theta}_i, \quad i = 1, \dots, p \quad (3)$$

其中,  $\hat{\Theta}_i = (\hat{\theta}_{i1}, \dots, \hat{\theta}_{im_i})^T \in \mathbf{R}^{m_i}$  是可调参数向量,  $\xi_i(\hat{\mathbf{x}}_i) = (\xi_{i1}(\hat{\mathbf{x}}_i), \dots, \xi_{im_i}(\hat{\mathbf{x}}_i))^T \in \mathbf{R}^{m_i}$  是模糊基函数向量, 其中,  $\hat{\mathbf{x}}_i = (\hat{x}_{2i-1}, \hat{x}_{2i})^T$  且有  $m_i > 0$ . 模糊基函数  $\xi_{il}(\hat{\mathbf{x}}_i)$  定义如下

$$\xi_{il}(\hat{\mathbf{x}}_i) = \frac{\mu_{F_{2i-1}^l}(\hat{x}_{2i-1})\mu_{F_{2i}^l}(\hat{x}_{2i})}{\sum_{l=1}^{m_i} \mu_{F_{2i-1}^l}(\hat{x}_{2i-1})\mu_{F_{2i}^l}(\hat{x}_{2i})}, \quad l = 1, \dots, m_i \quad (4)$$

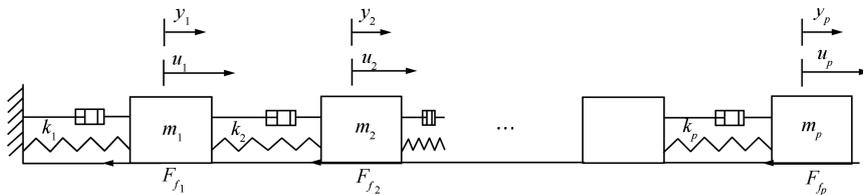


图 1 多自由度系统的示意图

Fig.1 Schematic view of multiple degrees of freedom system

其中,  $\mu_{F_{2i-1}^l}(\hat{x}_{2i-1})$  和  $\mu_{F_{2i}^l}(\hat{x}_{2i})$  是隶属函数.

最后模糊逻辑系统  $\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  可表示为

$$\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) = \mathbf{Y}(\hat{\mathbf{x}}) \hat{\Theta} \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{Y}(\hat{\mathbf{x}}) = \text{diag}\{\xi_1^T(\hat{\mathbf{x}}_1), \dots, \xi_p^T(\hat{\mathbf{x}}_p)\}$  是模糊基函数阵,  $\hat{\Theta} = (\hat{\Theta}_1^T, \dots, \hat{\Theta}_p^T)^T \in \mathbf{R}^m$  且有  $m = \sum_{i=1}^p m_i$ .

采用自适应模糊方法对状态不完全可观测的摩擦系统进行建模具有如下优点: 1) 众所周知, 摩擦是一种比较复杂的物理现象, 其动态特性有很大的不确定性, 人们至今也未能完全洞悉其机理. 如果采用自适应观测器和 Luenberger 观测器等传统方法对系统不可测变量进行估计, 被观测对象的结构通常需要已知, 因此, 这些方法被限制了在工程上的应用. 而采用自适应模糊方法不需要被观测对象精确的模型结构, 其系统模型可以使用模糊系统进行充分的逼近. 所以自适应模糊方法对解决不完全可观测的不确定摩擦系统的状态估计和自适应控制具有重要意义; 2) 传统的摩擦机理模型认为摩擦力只是速度的函数, 但文献 [4] 研究认为摩擦力与位置和速度都有关系, 也就是说摩擦力应是位置和速度的函数. 针对摩擦力与输入变量之间的不确定性, 文献 [5] 采用了模糊处理方法, 通过自适应调整隶属度函数的参数来决定摩擦力与位置和速度的关系; 3) 采用自适应模糊方法, 专家的经验知识便于以规则的形式嵌入到摩擦模糊模型中.

### 2.2 状态估计与误差系统

由于摩擦力估计 (5) 中的状态变量是不完全可测的, 为此构建下面的状态估计器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}(\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) + H(\mathbf{y}) + \mathbf{G}\mathbf{u} - \mathbf{v}) + \\ \quad \mathbf{K}_o(\mathbf{y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\hat{\mathbf{x}}$  是  $\mathbf{x}$  的估计,  $\mathbf{K}_o = \text{diag}\{\mathbf{K}_1, \dots, \mathbf{K}_p\}$  为估计器的增益, 系数的选择使  $\mathbf{A} - \mathbf{K}_o\mathbf{C}$  为稳定的, 其中,  $\mathbf{K}_i = (k_{i1}, k_{i2})^T$  ( $i = 1, \dots, p$ ).  $\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  是  $F(\mathbf{x})$  的估计量, 鲁棒监督补偿项  $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_p)^T$  是用来补偿逼近误差和估计误差.

由于  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}$  和  $\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}$ , 下面的状态估计误差可以得到:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{K}_o\mathbf{C})\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}(\tilde{F}(\tilde{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) + \mathbf{v}) \\ \tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\tilde{F}(\tilde{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  可表示如下形式:

$$\tilde{F}(\tilde{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) = F(\mathbf{x}) - \hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) \quad (8)$$

式 (7) 可改为如下形式:

$$\tilde{\mathbf{y}} = H(s)(\tilde{F}(\tilde{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) + \mathbf{v}) \quad (9)$$

其中,  $s$  表示微分算子  $d/dt$ .  $H(s)$  为一稳定的传递函数阵, 其状态空间实现为  $(A - K_o C, B, C)$ .

### 2.3 自适应模糊估计器

根据自适应模糊系统的万能逼近性质, 式 (2) 中的摩擦力项可用下面的模糊系统进行最优逼近:

$$F(\mathbf{x}) = Y(\mathbf{x})\Theta^* + \varepsilon \quad (10)$$

其中,  $\Theta^*$  为最优参数向量,  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_p)^T$  为最优逼近误差向量.

由式 (5) 可知, 摩擦力  $F(\mathbf{x})$  的自适应模糊估计为  $\tilde{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$ . 那么, 式 (8) 中的  $\tilde{F}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  可表示为如下形式:

$$\tilde{F}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) = Y(\mathbf{x})\Theta^* + \varepsilon - Y(\hat{\mathbf{x}})\hat{\Theta} \quad (11)$$

在式 (11) 中分别增加和减去一项  $Y(\hat{\mathbf{x}})\Theta^*$ , 经过几步直接运算, 式 (11) 可改写为

$$\tilde{F}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) = Y(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \varepsilon + \mathbf{w} \quad (12)$$

其中,  $\tilde{\Theta} = \Theta^* - \hat{\Theta}$  是自适应参数误差. 扰动项  $\mathbf{w}$  由下式给出:

$$\mathbf{w} = \tilde{Y}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}})\Theta^* \quad (13)$$

其中,  $\tilde{Y}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = Y(\mathbf{x}) - Y(\hat{\mathbf{x}})$  是模糊基函数误差阵,  $\mathbf{w} = (w_1, \dots, w_p)^T$ .

那么, 上面动态方程 (6) 和 (7) 可改写为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = A\hat{\mathbf{x}} + B(Y(\hat{\mathbf{x}})\hat{\Theta} + H(\mathbf{y}) + G\mathbf{u} - \mathbf{v}) + K_o(\mathbf{y} - C\hat{\mathbf{x}}) \\ \dot{\hat{\mathbf{y}}} = C\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = (A - K_o C)\tilde{\mathbf{x}} + B(Y(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \mathbf{v} + \mathbf{d}) \\ \dot{\tilde{\mathbf{y}}} = C\tilde{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{d} = \mathbf{w} + \varepsilon$  是总的不确定量, 由状态估计误差和逼近误差组成.

在式 (15) 中的输出估计误差  $\tilde{\mathbf{y}}$  可表示为

$$\tilde{\mathbf{y}} = H(s)L(s)(Y(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \mathbf{v} + \mathbf{d}) \quad (16)$$

其中,  $H(s)$  为一稳定的传递函数阵, 可以用  $(A - K_o C, B, C)$  来实现. 下面将采用类似文献 [6] 的严格正实 Lyapunov 设计方法分析状态估计误差的一致最终有界性.

### 2.4 稳定性分析

为了应用严格正实理论, 输出估计误差 (16) 可以写成下面的形式:

$$\tilde{\mathbf{y}} = H(s)L(s)(Y^l(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \mathbf{v}^l + \mathbf{d}^l) \quad (17)$$

其中,  $Y^l(\hat{\mathbf{x}}) = L^{-1}(s)Y(\hat{\mathbf{x}})$ ,  $\mathbf{v}^l = L^{-1}\mathbf{v}$ ,  $\mathbf{d}^l = L^{-1}\mathbf{d}$ . 选择一稳定的传递函数  $L(s)$ , 使  $H(s)L(s)$  是严格正实的.

根据文献 [6] 用到的 Kalman-Yakub-Popov 定理, 由于  $H(s)L(s)$  是严格正实的, 存在一对称正定矩阵  $P$  使得:

$$\begin{cases} A_c^T P + P A_c = -Q \\ P B_c = C_c^T \end{cases} \quad (18)$$

其中,  $Q$  是对称正定矩阵,  $A_c = A - K_o C$ ,  $B_c = \text{diag}\{B_{c_1}, \dots, B_{c_p}\}$  且有  $B_{c_i} = [b_{i1}, b_{i2}]^T$ ,  $C_c = C$ .

那么, 式 (17) 的状态空间实现表示如下

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{z}}} = A_c \tilde{\mathbf{z}} + B_c(Y^l(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \mathbf{v}^l + \mathbf{d}^l) \\ \tilde{\mathbf{y}} = C_c \tilde{\mathbf{z}} \end{cases} \quad (19)$$

**假设 1.** 假设  $d_i$  满足条件  $\|d_i\| \leq d_{iH}$ , 其中,  $d_{iH}$  是正的常数 ( $i = 1, \dots, p$ ).

总的不确定项  $d_i$  是由逼近误差和状态估计误差组成, 由万能逼近定理可知这种假设是合理的.

**定理 1.** 对于系统 (2) 满足上面的假设 1, 相应的状态估计器为式 (14),  $\hat{\Theta}$  的自适应律为式 (20), 其中,  $\mathbf{v}$  为式 (21) 的鲁棒补偿控制项.

$$\dot{\hat{\Theta}} = \gamma \text{Proj}(\hat{\Theta}, \hat{\Phi}) \quad (20)$$

$$\mathbf{v} = -S\rho, \quad \text{sgn}(\tilde{y}_i) = \begin{cases} 1, & \tilde{y}_i \geq 0 \\ -1, & \tilde{y}_i < 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中,  $\gamma > 0$ ,  $S = \text{diag}\{\text{sgn}(\tilde{y}_1), \dots, \text{sgn}(\tilde{y}_p)\}$ ,  $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_p)^T$  且有  $\rho_i \geq d_{iH}$ ,  $\hat{\Phi} = Y^l(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\mathbf{y}}$ ,

$$\text{Proj}(\hat{\Theta}, \hat{\Phi}) = \begin{cases} \hat{\Phi} - \frac{\hat{\Phi}^T \hat{\Theta}}{\|\hat{\Theta}\|^2} \hat{\Theta}, & \text{若 } \|\hat{\Theta}\| = M_{\hat{\Theta}} \text{ 且 } \hat{\Phi}^T \hat{\Theta} > 0 \\ \hat{\Phi}, & \text{其他} \end{cases}$$

那么状态估计误差  $\tilde{\mathbf{x}}(t)$  是一致最终有界的.

**证明.** 取 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{z}}^T P \tilde{\mathbf{z}} + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\Theta}^T \tilde{\Theta} \quad (22)$$

其中,  $P = P^T > 0$ . 微分式 (22) 可推出:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{z}}^T P \dot{\tilde{\mathbf{z}}} + \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{z}}}^T P \tilde{\mathbf{z}} + \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\tilde{\Theta}} \quad (23)$$

基于式 (19), 可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{z}}^T (A_c^T P + P A_c) \tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{z}}^T P B_c Y^l(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \\ &\quad \tilde{\mathbf{z}}^T P B_c \mathbf{v}^l + \tilde{\mathbf{z}}^T P B_c \mathbf{d}^l + \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\tilde{\Theta}} \end{aligned} \quad (24)$$

因为  $\tilde{\mathbf{z}}^T P B_c = \tilde{\mathbf{z}}^T C_c^T = \tilde{\mathbf{y}}^T$ ,  $\dot{\tilde{\Theta}} = -\dot{\hat{\Theta}}$ , 上式可以写成:

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \tilde{\mathbf{z}}^T Q \tilde{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{y}}^T (Y^l(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \mathbf{v}^l + \mathbf{d}^l) - \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\hat{\Theta}} \quad (25)$$

因为  $\tilde{\mathbf{y}}^T (\mathbf{v}^l + \mathbf{d}^l) \leq 0$ , 可以得到:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|\tilde{\mathbf{z}}\|^2 + \tilde{\mathbf{y}}^T Y^l(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} - \frac{1}{\gamma} \tilde{\Theta}^T \dot{\hat{\Theta}} \quad (26)$$

根据自适应律 (20), 可以得到:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \lambda_{\min}(Q) \|\tilde{\mathbf{z}}\|^2 \quad (27)$$

按照标准 Lyapunov 理论, 说明状态观测误差  $\tilde{\mathbf{z}}(t)$  和自适应参数误差  $\tilde{\Theta}$  是一致最终有界的. 为了说明状态估计误差  $\tilde{\mathbf{x}}(t)$  的有界性, 考虑方程 (15) 的估计误差, 轨迹可表示为如下形式:

$$\tilde{\mathbf{x}}(t) = \Phi(t, 0)\tilde{\mathbf{x}}(0) + \int_0^t \Phi(t, \tau) B U_1(\tau) d\tau \quad (28)$$

其中,  $\mathbf{U}_1 = Y(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + \mathbf{v} + \mathbf{d}$ . 由范数不等式及文献 [6] 中的引理 2.2 可得:

$$\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\| \leq C_1 + (C_2 + C_3\|\tilde{\Theta}\|_2^\alpha)\frac{1}{\sqrt{\alpha}} \quad (29)$$

其中,  $C_1$  是按指数衰减到零,  $C_2$  和  $C_3$  是正数. 因为  $\|\tilde{\Theta}\|$  是一致最终有界并结合上式可知  $\|\tilde{\mathbf{x}}(t)\|$  是一致最终有界的, 即设计任务 1) 达到.  $\square$

2.5 状态估计的仿真

把本文所提出的摩擦状态估计器用于图 2 系统的仿真, 该系统的动态模型为

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 = -F_{f_1} - k_1y_1 - k_2(y_1 - y_2) + u_1 \\ m_2\ddot{y}_2 = -F_{f_2} + k_2(y_1 - y_2) + u_2 \end{cases} \quad (30)$$

其中,  $k_1$  和  $k_2$  是刚性系数,  $F_{f_1}$  和  $F_{f_2}$  是摩擦力,  $u_1$  和  $u_2$  是控制输入,  $y_1$  和  $y_2$  是系统输出.

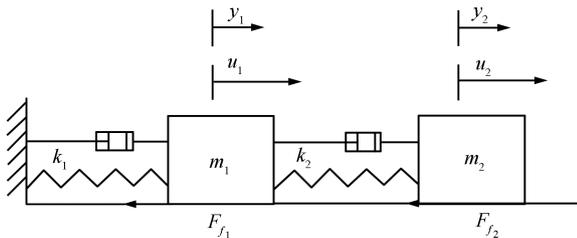


图 2 二自由度系统的示意图

Fig. 2 Schematic view of a two-degrees-of-freedom system

设  $x_1 = y_1, x_2 = \dot{y}_1, x_3 = y_2, x_4 = \dot{y}_2$ , 那么上面的方程 (30) 能改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}(F(\mathbf{x}) + H(\mathbf{y}) + \mathbf{G}\mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (31)$$

其中,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T, \mathbf{A} = \text{diag}\{A_1, A_2\}, \mathbf{B} = \text{diag}\{B_1, B_2\}, \mathbf{C}^T = \text{diag}\{C_1, C_2\}, \mathbf{u} = (u_1, u_2)^T,$

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C_i = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2$$

$F(\mathbf{x}) = [-F_{f_1}/m_1, -F_{f_2}/m_2]^T, G = [1/m_1 \ 0; 0 \ 1/m_2], H(\mathbf{y}) = [\frac{-k_1y_1 - k_2(y_1 - y_2)}{m_1}, \frac{k_2(y_1 - y_2)}{m_2}]^T$ . 系统参数选择:  $m_1 = 0.25 \text{ kg}, m_2 = 0.20 \text{ kg}, k_1 = 1.00 \text{ N/cm}, k_2 = 2.00 \text{ N/cm}$ . 仿真过程的摩擦力为  $F = \mu F_N$ , 其中的系数选择: 1)  $\mu = \mu_c \text{sgn}(\dot{x}_1)$ ; 2)  $\mu = \mu_c \text{sgn}(\dot{x}_3) + \mu_v \dot{x}_3$ ; 3)  $\mu = \mu_c \text{sgn}(\dot{x}_1) + (\mu_s - \mu_c)e^{-|\dot{x}_1|} + \mu_v \dot{x}_1$ . 在第一个仿真里, 图 2 中的  $F_{f_1}$  和  $F_{f_2}$  摩擦模型分别取 Couloumb 模型和 Couloumb + Viscous 摩擦模型. 在另一个仿真里, 将图 2 中的  $F_{f_1}$  的 Couloumb 模型换成一个较复杂的摩擦模型, 也就是 Stribeck 模型, 进一步考察系统的观测性能. 表 1 是三种摩擦模型的参数定义及给定值.

步骤 1. 变量  $\hat{x}_i$  的隶属度函数选择如下:  $\mu_{F_1^1} = 1/[1 + \exp(5(\hat{x}_i + 2))], \mu_{F_2^1} = \exp[-(\hat{x}_i + 1.5)^2], \mu_{F_3^1} = \exp[-(\hat{x}_i + 0.5)^2], \mu_{F_4^1} = \exp[-(\hat{x}_i - 0.5)^2], \mu_{F_5^1} = \exp[-(\hat{x}_i - 1.5)^2], \mu_{F_6^1} = 1/[1 + \exp(-5(\hat{x}_i - 2))]$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ). 建立如下的模糊规则库  $R_1^{(j)}$ : 若  $\hat{x}_1$  is  $F_1^j$  and

$\hat{x}_2$  is  $F_2^j$ , then  $F_{f_1}$  is  $G_1^j$  ( $j = 1, \dots, 6$ );  $R_2^{(j)}$ : 若  $\hat{x}_3$  is  $F_3^j$  and  $\hat{x}_4$  is  $F_4^j$ , then  $F_{f_2}$  is  $G_2^j$  ( $j = 1, \dots, 6$ ). 设

$$\xi_{1j}(\hat{\mathbf{x}}_1) = \frac{\mu_{F_1^j}(\hat{x}_1)\mu_{F_2^j}(\hat{x}_2)}{\sum_{j=1}^6 \mu_{F_1^j}(\hat{x}_1)\mu_{F_2^j}(\hat{x}_2)}$$

$$\xi_{2j}(\hat{\mathbf{x}}_2) = \frac{\mu_{F_3^j}(\hat{x}_3)\mu_{F_4^j}(\hat{x}_4)}{\sum_{j=1}^6 \mu_{F_3^j}(\hat{x}_3)\mu_{F_4^j}(\hat{x}_4)}$$

那么得到下面的模糊基函数:

$$\xi_1(\hat{\mathbf{x}}_1) = (\xi_{11}(\hat{\mathbf{x}}_1), \dots, \xi_{16}(\hat{\mathbf{x}}_1))^T$$

$$\xi_2(\hat{\mathbf{x}}_2) = (\xi_{21}(\hat{\mathbf{x}}_2), \dots, \xi_{26}(\hat{\mathbf{x}}_2))^T$$

步骤 2. 仿真参数选择:  $\gamma = 100, L^{-1} = 1/(S + 3), \rho = 15, K_o = [89 \ 184 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 89 \ 184]^T, \mathbf{x}(0) = (0.5, 0.0, -0.5, 0.0)^T, \hat{\mathbf{x}}(0) = (0.0, 0.0, 0.0, 0.0)^T, \hat{\Theta}_1(0) = \hat{\Theta}_2(0) = (-8, -6, -1, 3, 8, 1)^T$ .

步骤 3. 求解方程 (14), 可得摩擦状态估计器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + 89(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{\Theta}_1^T \xi_1(\hat{\mathbf{x}}_1) + \frac{-k_1y_1 - k_2(y_1 - y_2)}{m_1} + \frac{1}{m_1}u_1 - v_1 + 184(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \hat{x}_4 + 89(x_3 - \hat{x}_3) \\ \dot{\hat{x}}_4 = \hat{\Theta}_2^T \xi_2(\hat{\mathbf{x}}_2) + \frac{k_2(y_1 - y_2)}{m_2} + \frac{1}{m_2}u_2 - v_2 + 184(x_3 - \hat{x}_3) \\ u_1 = u_2 = \sin(2t) + \cos(20t) \end{cases} \quad (32)$$

步骤 4. 选择下面的参数自适应律

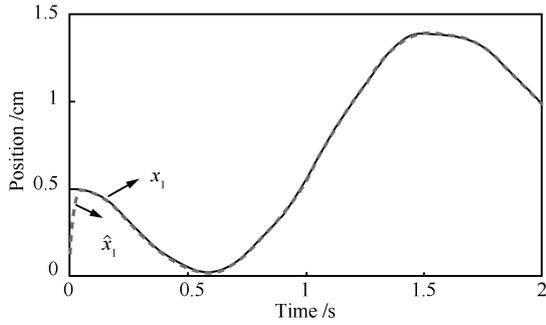
$$\begin{cases} \dot{\hat{\Theta}}_1 = \gamma \xi_1^l(\hat{\mathbf{x}}_1)(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{\Theta}}_2 = \gamma \xi_2^l(\hat{\mathbf{x}}_2)(x_3 - \hat{x}_3) \end{cases} \quad (33)$$

表 1 质量弹簧的摩擦模型参数

Table 1 Friction model parameters for spring-mass

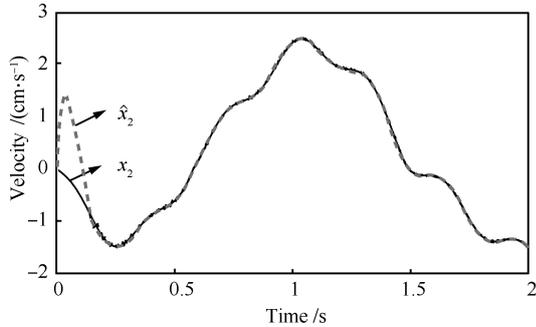
Parameter	Couloumb	Couloumb + Viscous	Stribeck
$\mu_c$	0.25	0.25	0.25
$\mu_v$	0.00	0.04	0.04
$\mu_s$	0.00	0.00	0.40

图 3 (a)~3 (d) 是图 2 中的  $F_{f_1}$  和  $F_{f_2}$  分别取 Couloumb 和 Couloumb + Viscous 摩擦时, 状态估计器所估计的位置与速度曲线和实际曲线. 而图 4 (a)~4 (d) 是图 2 中的  $F_{f_1}$  和  $F_{f_2}$  分别取 Stribeck 和 Couloumb + Viscous 摩擦时, 状态估计器所估计的位置与速度曲线和实际曲线. 在这个仿真里, 鲁棒补偿控制项为  $\mathbf{v} = (-10 \text{sgn}(x_1 - \hat{x}_1), -10 \text{sgn}(x_3 - \hat{x}_3))^T$ . 从仿真结果可以看出, 无论摩擦力取 Couloumb 摩擦模型, Couloumb + Viscous 摩擦模型还是 Stribeck 摩擦模型, 本文设计的摩擦状态估计器具有良好的状态估计效果, 完全可以用该估计状态对摩擦进行建模.



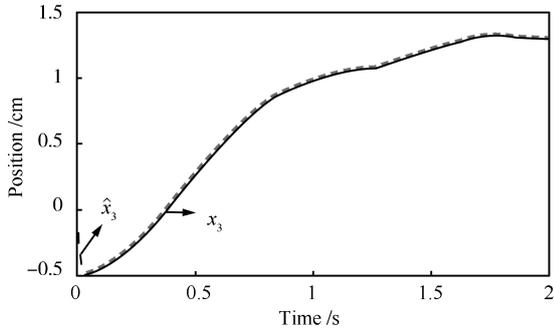
(a) 实际  $x_1$  与估计  $\hat{x}_1$

(a) Actual  $x_1$  and estimated  $\hat{x}_1$



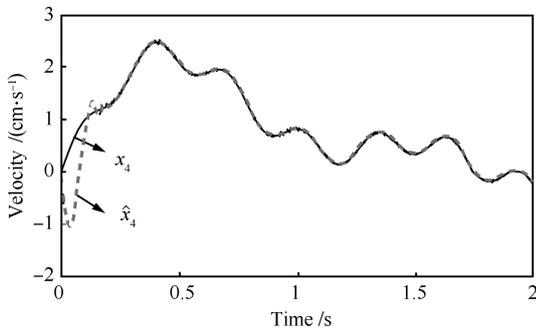
(b) 实际  $x_2$  与估计  $\hat{x}_2$

(b) Actual  $x_2$  and estimated  $\hat{x}_2$



(c) 实际  $x_3$  与估计  $\hat{x}_3$

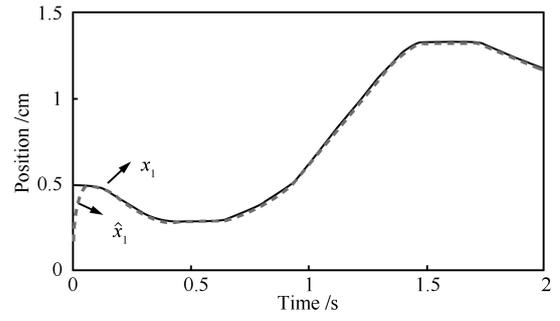
(c) Actual  $x_3$  and estimated  $\hat{x}_3$



(d) 实际  $x_4$  与估计  $\hat{x}_4$

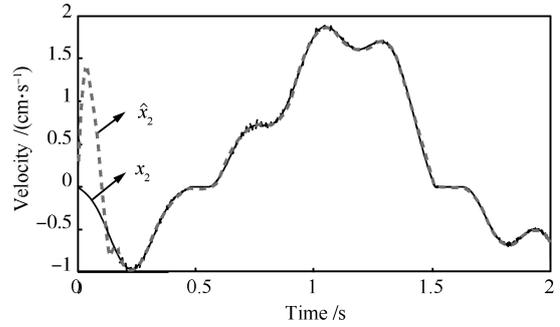
(d) Actual  $x_4$  and estimated  $\hat{x}_4$

图 3 实际状态  $\mathbf{x}$  和估计状态  $\hat{\mathbf{x}}$  (摩擦模型:  $m_1$  - Coulomb;  $m_2$  - Coulomb + Viscous)  
 Fig. 3 Actual state  $\mathbf{x}$  and estimated state  $\hat{\mathbf{x}}$  (friction model:  $m_1$  - Coulomb;  $m_2$  - Coulomb + Viscous)



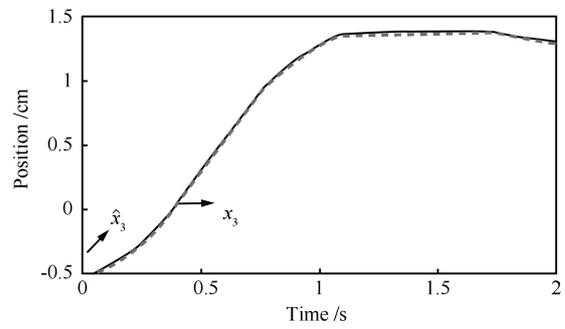
(a) 实际  $x_1$  与估计  $\hat{x}_1$

(a) Actual  $x_1$  and estimated  $\hat{x}_1$



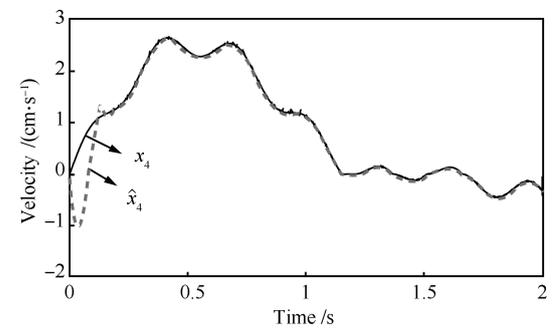
(b) 实际  $x_2$  与估计  $\hat{x}_2$

(b) Actual  $x_2$  and estimated  $\hat{x}_2$



(c) 实际  $x_3$  与估计  $\hat{x}_3$

(c) Actual  $x_3$  and estimated  $\hat{x}_3$



(d) 实际  $x_4$  与估计  $\hat{x}_4$

(d) Actual  $x_4$  and estimated  $\hat{x}_4$

图 4 实际状态  $\mathbf{x}$  和估计状态  $\hat{\mathbf{x}}$  (摩擦模型:  $m_1$  - Stribeck;  $m_2$  - Coulomb + Viscous)  
 Fig. 4 Actual state  $\mathbf{x}$  and estimated state  $\hat{\mathbf{x}}$  (friction model:  $m_1$  - Stribeck;  $m_2$  - Coulomb + Viscous)

### 3 鲁棒自适应控制器设计

#### 3.1 控制器设计

对于系统 (2), 如果系统状态可测且  $F(\mathbf{x})$  已知, 则理想控制律为

$$\mathbf{u} = G^{-1}[-F(\mathbf{x}) - H(\mathbf{y}) + \mathbf{y}_r^{(2)} + K_c \mathbf{e}] \quad (34)$$

把式 (34) 代入式 (2) 得:

$$\mathbf{E} + K_c \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (35)$$

其中,  $\mathbf{E} = (e_1^{(2)}, \dots, e_p^{(2)})^T$ , 显然如果取  $K_c = \text{diag}\{\mathbf{K}_1, \dots, \mathbf{K}_p\}$  且有  $\mathbf{K}_i = (k_{i1}, k_{i2})$  使系统为稳定的, 则有  $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = 0$ . 然而在系统状态不完全可测和  $F(\mathbf{x})$  未知情况下, 获得理想控制器 (34) 是不可能的. 在这种情况下, 采用前文所构造的模糊逻辑系统  $\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta})$  来逼近摩擦力项. 取控制律为

$$\mathbf{u} = G^{-1}[-\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) - H(\mathbf{y}) + \mathbf{y}_r^{(2)} + K_c \hat{\mathbf{e}} - \mathbf{u}_\alpha] \quad (36)$$

其中,  $\mathbf{u}_\alpha$  为鲁棒补偿控制. 应用式 (36) 到式 (2) 经过几步直接的运算后可得如下的跟踪误差方程:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} + B(\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) - F(\mathbf{x})) + B\mathbf{u}_\alpha - BK_c \hat{\mathbf{e}} \quad (37)$$

基于式 (12), 上面的方程可以写为

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}\mathbf{e} - BK_c \hat{\mathbf{e}} - B\mathbf{Y}(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} + B\mathbf{u}_\alpha - B\mathbf{d} \quad (38)$$

**定理 2.** 对于系统 (2), 如果采用控制方案 (39), 系统状态估计用式 (14), 自适应参数调节采用式 (20),

$$\begin{cases} \mathbf{u} = G^{-1}[-\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) - H(\mathbf{y}) + \mathbf{y}_r^{(2)} + K_c \hat{\mathbf{e}} - \mathbf{u}_\alpha] \\ \mathbf{u}_\alpha = -\mathbf{v} \end{cases} \quad (39)$$

那么跟踪误差是一致最终有界的.

**证明.** 考虑下面基本定义:

$$\tilde{\mathbf{e}} = \mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}} = (\mathbf{Y}_r - \mathbf{x}) - (\mathbf{Y}_r - \hat{\mathbf{x}}) = -\mathbf{x} + \hat{\mathbf{x}} = -\tilde{\mathbf{x}} \quad (40)$$

把式 (40) 代入式 (38), 经简单运算后可得:

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - BK_c)\mathbf{e} - B(\mathbf{Y}(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} - K_c \tilde{\mathbf{e}}) + B(\mathbf{u}_\alpha - \mathbf{d}) \quad (41)$$

方程 (41) 的轨迹可表示为

$$\mathbf{e}(t) = \Phi(t, 0)\mathbf{e}(0) + \int_0^t \Phi(t, \tau)B\mathbf{U}_2(\tau)d\tau \quad (42)$$

其中,  $\mathbf{U}_2 = \mathbf{Y}(\hat{\mathbf{x}})\tilde{\Theta} - K_c \tilde{\mathbf{e}} - \mathbf{u}_\alpha + \mathbf{d}$ . 由范数不等式及文献 [6] 中的引理 2.2 可得:

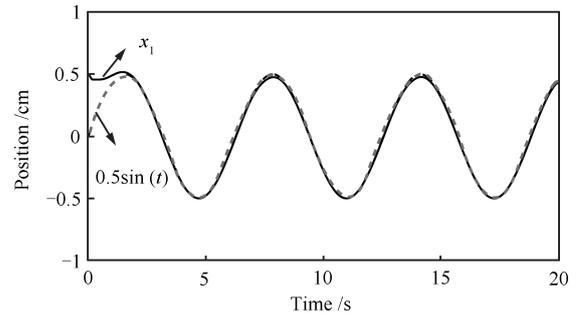
$$\|\mathbf{e}(t)\| \leq D_1 + (D_2 + D_3)\|\tilde{\Theta}\|_2^\alpha + D_4\|\tilde{\mathbf{e}}\|_2^\alpha \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \quad (43)$$

其中,  $D_1$  是按指数衰减到零,  $D_2, D_3$  和  $D_4$  是正数. 从前文已证  $\|\tilde{\Theta}\|$  和  $\|\tilde{\mathbf{e}}\|$  是一致最终有界并结合上式可知  $\|\mathbf{e}(t)\|$  是一致最终有界的, 即设计任务 2) 达到.  $\square$

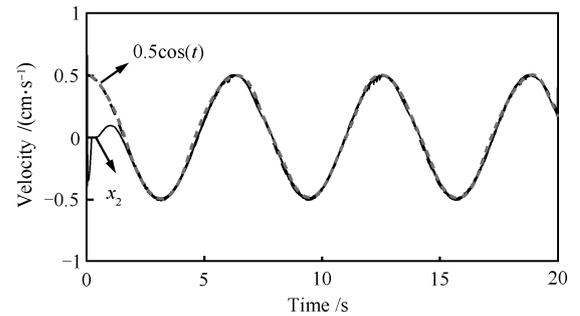
#### 3.2 控制器仿真

对于前面图 2 的机械系统, 用下面的鲁棒自适应控制器验证其跟踪效果.

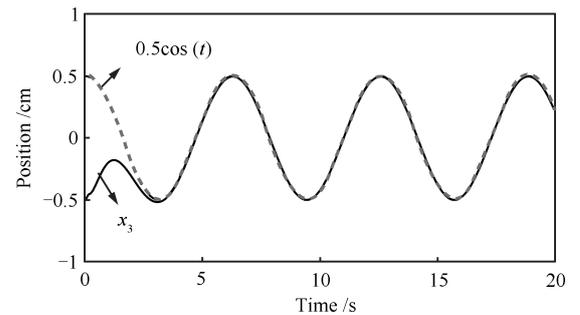
$$\mathbf{u} = G^{-1}[-\hat{F}(\hat{\mathbf{x}}, \hat{\Theta}) - H(\mathbf{y}) + \mathbf{y}_r^{(2)} + K_c \hat{\mathbf{e}} - \mathbf{u}_\alpha] \quad (44)$$



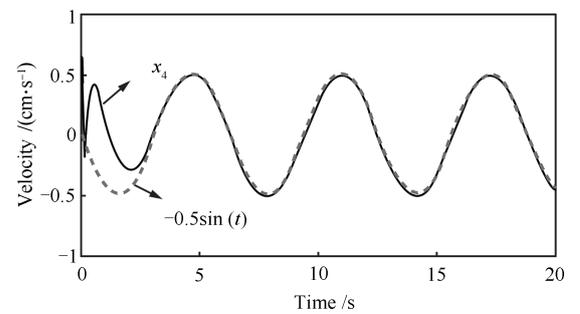
(a) 系统状态  $x_1$   
(a) System state  $x_1$



(b) 系统状态  $x_2$   
(b) System state  $x_2$



(c) 系统状态  $x_3$   
(c) System state  $x_3$



(d) 系统状态  $x_4$   
(d) System state  $x_4$

图 5 状态  $\mathbf{x}$  与参考输入  $\mathbf{y}_r$  的跟踪曲线

Fig. 5 Tracking responses of state  $\mathbf{x}$  and reference input  $\mathbf{y}_r$  for output-feedback controller

其中,  $K_c = [4 \ 4 \ 0 \ 0; 0 \ 0 \ 4 \ 4]$ ,  $\mathbf{u}_\alpha = -\mathbf{v}$ .

若图 2 中的  $F_{f_1}$  和  $F_{f_2}$  分别取 Couloumb 和 Couloumb + Viscous 摩擦模型, 鲁棒自适应模糊输出反馈控制器所形成的跟踪曲线和参考曲线如图 5, 该仿真参考输入信号取  $\mathbf{y}_r =$

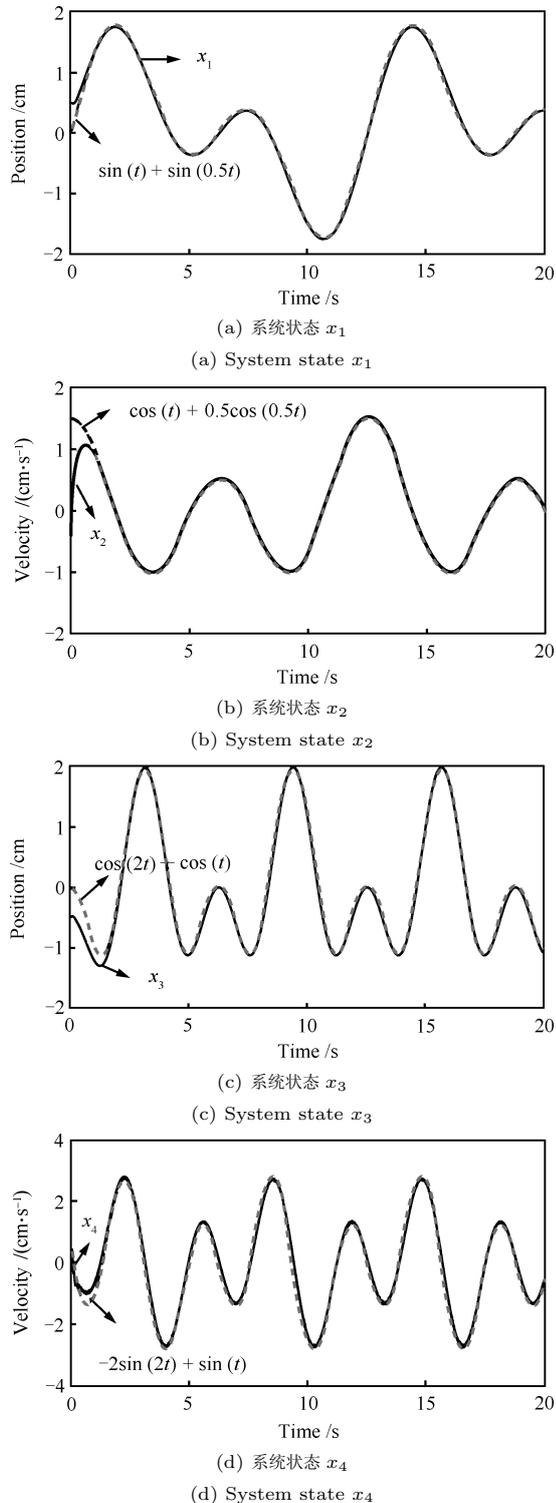


图 6 状态  $\mathbf{x}$  与参考输入  $\mathbf{y}_r$  的跟踪曲线

Fig. 6 Tracking responses of state  $\mathbf{x}$  and reference input  $\mathbf{y}_r$  for output-feedback controller

$(0.5 \sin(t), 0.5 \cos(t))^T$ . 图 6 是在  $F_{f_1}$  和  $F_{f_2}$  分别取 Stribeck 和 Couloumb + Viscous 摩擦模型, 该控制器所形成的跟踪曲线和参考曲线, 该仿真参考输入信号取  $\mathbf{y}_r = (\sin(t) + \sin(0.5), \cos(2t) - \cos(t))^T$ . 从仿真结果可以看出, 系统获得了良好的跟踪效果.

注 1. 从现有文献看<sup>[7-8]</sup>, 自适应参数的界都是在  $\|\Theta\| \leq M_\Theta$  情况下给定的, 这对于连续系统是正确的. 但计算机数值计算 (ODE45) 完全有可能使  $\|\Theta\| > M_\Theta$  的情况发生, 故在数值计算时应考虑这种情况. 所以本文式 (20) 中的  $\|\hat{\Theta}\| = M_\Theta$  的投影在仿真时应改成  $\|\hat{\Theta}\| \geq M_\Theta$ , 其他保持不变. 考虑到本文参数的实际意义, 这里  $M_\Theta$  的界取为  $6\sqrt{15}$ , 仿真时把自适应参数拓展为状态空间的增广.

## 4 结论

本文针对机械系统中普遍存在的摩擦问题进行了研究, 探讨了多自由度系统在摩擦力是未知的且状态不完全可测的情况下, 如何用基于状态估计的多个自适应模糊系统在线逼近非线性摩擦项. 为了建立基于状态估计的摩擦模糊模型, 本文对摩擦力中的状态变量进行了状态估计, 并用严格正实和 Lyapunov 理论保证了状态估计误差的一致有界性. 接下来, 对闭环系统误差的有界性进行了理论分析, 从仿真中可以看出采用该控制器可以获得良好的跟踪性能. 本文的方法虽然是以质量-弹簧-阻尼对象展开研究的, 但该方法对其他机械系统 (如机器人等) 也是适用的.

## References

- 1 Armstrong-Helouvry B, Dupot P, Wit D C C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for control of machines with friction. *Automatica*, 1994, **30**(7): 1083-1138
- 2 Cong Shuang. Two advanced control strategies for dynamic friction compensation. *Acta Automatica Sinica*, 1998, **24**(2): 236-240  
(丛爽. 两种补偿动态摩擦力的先进控制策略. *自动化学报*, 1998, **24**(2): 236-240)
- 3 Garcia C. Comparison of friction models applied to a control valve. *Control Engineering Practice*, 2008, **16**(10): 1231-1243
- 4 Selmic R R, Lewis F L. Neural-network approximation of piecewise continuous functions: application to friction compensation. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2002, **13**(3): 745-751
- 5 Wang Y F, Wang D H, Chai T Y. Modeling and control compensation of nonlinear friction using adaptive fuzzy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2009, **23**(8): 2445-2457
- 6 Kim Y H, Frank L L, Abdallah C T. A dynamic recurrent neural network based adaptive observer for a class of nonlinear systems. *Automatica*, 1997, **33**(8): 1539-1543
- 7 Wang L X. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, **1**(2): 146-155
- 8 Chang Y C. Robust tracking control for nonlinear MIMO systems via fuzzy approaches. *Automatica*, 2000, **36**(10): 1535-1545

**王永富** 东北大学机械工程与自动化学院副教授. 1998 年获得东北大学机械电子专业硕士学位, 2005 年获得东北大学控制理论与控制工程专业博士学位. 主要研究方向为机电系统的模糊建模与控制、数据挖掘以及信号处理. 本文通信作者. E-mail: yfwang@mail.neu.edu.cn

(**WANG Yong-Fu** Associate professor at the School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University. He received his master degree in mechanical engineering and Ph.D. degree in control theory and control engineering from Northeastern University in 1998 and 2005, respectively. His research interest covers fuzzy modeling and intelligent control of mechanical engineering, data mining and signal processing. Corresponding author of this paper.)

**王殿辉** 澳大利亚拉筹伯大学计算机科学与工程系副教授. 1995 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为数据挖掘技术在生物信息学领域, 多媒体信息处理及智能控制系统中的应用.

E-mail: dh.wang@latrobe.edu.au

(**WANG Dian-Hui** Associate professor in the Department of Computer Science and Computer Engineering, La Trobe University, Australia. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in 1995. His research interest covers data mining technique and its applications in bioinformatics, multimedia information processing, and intelligent control systems.)

**柴天佑** 中国工程院院士, 东北大学教授, IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士. 1985 年获得东北大学博士学位. 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制和流程工业综合自动化.

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

(**CHAI Tian-You** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. He received his Ph.D. degree from Northeastern University in 1985. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, and integrated automation of industrial process.)

---