



考虑摩擦力影响精密伺服系统的 鲁棒自适应控制

郑言海 庄显义 强盛 胡遇杰

(哈尔滨工业大学仿真中心 哈尔滨 150001)

(E-mail: yanhai-zh@hotmail.com)

摘 要 针对具有摩擦力扰动的精密伺服系统提出了一种鲁棒自适应控制方法. 首先, 对基于 bristle 模型的动态摩擦力模型进行了线性参数化, 该线性参数化过程包含了对 stribek 效应的线性参数化处理; 然后, 基于构造的 Lyapunov 函数设计全局渐近稳定自适应控制律, 并对闭环系统的跟踪性能进行了严格的理论分析. 仿真实验验证了算法的有效性.

关键词 摩擦力, 伺服系统, 鲁棒自适应控制, Lyapunov 函数

中图分类号 TP273

ROBUST ADAPTIVE CONTROL FOR HIGH-PRECISION SERVO-SYSTEM IN THE PRESENCE OF FRICTION EFFECTS

ZHENG Yan-Hai ZHUANG Xian-Yi QIANG Sheng HU Yu-Jie

(Control Engineering Department of Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(E-mail: yanhai-zh@hotmail.com)

Abstract In this paper, a robust adaptive controller is proposed for high precision servo system with friction. The dynamic friction model based on the bristle friction model is first linearized and parameterized, which includes linearization and parameterization of stribek effect; then, a global asymptotic stable adaptive control law is derived based on constructed Lyapunov function, and strict theoretical analysis is carried out for tracking performance of closed-loop system. Simulation proves the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words Friction, servo-system, robust adaptive control, Lyapunov function

1 引言

未知摩擦力扰动对伺服系统的跟踪精度有重要影响, 低速情况下其影响尤其明显, 往往

使系统产生低速爬行或极限环震荡. 摩擦力是一种非常复杂的非线性现象, 它包含粘滞、滞滑、stirbeck 效应以及速度依赖等多种非线性^[1]. 文献[2]中提出的基于 bristle 模型的动态模型是一种较为复杂的摩擦力模型, 同以往模型相比更充分地反映了摩擦力的本质, 具有更强的工程实用性.

尽管文献上已提出许多基于模型的自适应摩擦补偿方法, 但限于模型的非线性复杂性, 大多对摩擦力模型进行简化处理, 即部分线性参数在线估计, 非线性参数则直接给出经验值. 这样势必产生较大的模型失配, 大大降低了系统的性能. 本文算法采用基于 bristle 模型的动态摩擦力模型, 线性参数与非线性参数同时在线估计. 同以往算法相比本文算法实时在线估计了更多的摩擦力参数.

本文首先对复杂的用基于 bristle 模型的动态摩擦力模型进行了线性参数化处理, 然后基于构造的 Lyapunov 函数设计自适应控制律, 并通过仿真实验证明了算法的有效性.

2 问题描述

考虑如下伺服系统

$$J\ddot{y} = u - f(\mathbf{x}) \quad (1)$$

其中 J 为转动惯量, u 为控制力矩, $f(\mathbf{x})$ 为未知摩擦力矩. 我们的目的是设计一个控制器使得系统输出 y 渐近跟踪设定值 y_d , 为便于后面推导把上式表示成状态空间形式.

令 $x_1 = y$, $x_2 = \dot{y}$, $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2]^T$, 则

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J}(u - f(\mathbf{x})) \\ y = [1 \quad 0]\mathbf{x} \end{cases} \quad (2)$$

定义 1.

$$\mathbf{x}_d = [y_d \quad \dot{y}_d]^T, \quad \mathbf{e} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d = [e_1 \quad e_2]^T \quad (3), (4)$$

在此引入误差滤波器

$$F(s) = s + \beta \quad (5)$$

则滤波后误差

$$\mathbf{e}_f = F(s)\mathbf{e} = [\beta \quad 1]\mathbf{e} \quad (6)$$

从而可得下面误差形式的稳定状态空间方程

$$\dot{\mathbf{e}} = A_f\mathbf{e} + B_f\mathbf{e}_f \quad (7)$$

其中 A_f 为包含 β 参数的稳定矩阵, $B_f = [0 \quad 1]$.

3 摩擦力模型线性参数化

选取如下动态摩擦力模型^[2]

$$\dot{z} = v - \sigma_0 \frac{h(v)}{a_c + a_{s-c}e^{-\theta_s v^2}} \quad (8)$$

$$f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + a_v v, \quad h(v) = \frac{v}{\text{sat}(v/v_c)} \quad (9), (10)$$

而饱和函数

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 1 \\ x, & -1 < x \leq 1 \\ -1, & x < -1 \end{cases} \quad (11)$$

上式中 v 为接触面相对速度, $v = \dot{x}_1$; $[-v_c \ v_c]$ 为选定任意小区间, 但估计摩擦力对 v_c 选择并不敏感^[3]; z 为 bristle 形变, 稳态速度下, z 趋近于稳态值

$$z_s = \frac{1}{\sigma_0} [\alpha_c \text{sat}(v/v_c) + a_{s-c} e^{-\theta_s v^2} \text{sat}(v/v_c)] \quad (12)$$

从上式可看到 z_s 对任意速度 v 均有界. 把(9)式表示成如下参数化形式

$$f = \bar{\theta}^T \bar{\varphi}(v, \theta_s) \quad (13)$$

其中 $\bar{\theta} = [\alpha_v \ \alpha_c \ \alpha_{s-c}]^T$, $\bar{\varphi} = [v \ \text{sat}(v/v_c) \ \text{sat}(v/v_c) e^{-\theta_s v^2}]^T$.

在上式中我们注意到, Stribeck 参数非线性地出现在回归矢量中, 在以往的补偿算法中, 一般都直接给出经验值而不在线估计以简化计算. 由于 Stribeck 效应发生在低速区域, 所以本文采用下述方法对 Stribeck 效应进行了线性参数化处理是合理的.

定义 2.
$$\alpha_{s-c} \text{sat}(v/v_c) e^{-\theta_s v^2} = \sum_{i=1}^n \eta_i \text{sat}(v/v_c) |v|^i \quad (14)$$

因此, 摩擦力 f 可表示为

$$f = \theta^T \varphi, \quad \theta = [\alpha_v \ \alpha_c \ \eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_n]^T \quad (15), (16)$$

$$\varphi = [v \ \text{sat}(v/v_c) \ \text{sat}(v/v_c) |v| \ \text{sat}(v/v_c) |v|^2 \ \dots \ \text{sat}(v/v_c) |v|^n]^T \quad (17)$$

4 自适应控制器设计

4.1 控制律推导

定理 1. 对于构造的 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \bar{\theta} + \int_0^{e_f} \epsilon J Q(x) d\epsilon$, 存在控制律 u 和自适应律 $\dot{\hat{\theta}}$ 使得 $\dot{V} \leq 0$, 其中 $Q(x)$ 为加权函数, $Q(x) > 0$, Γ 为正定对角矩阵, $\bar{\theta} = \hat{\theta} - \theta$.

证明. 由(2)~(6)式可知, $x = [x_1 \ x_2]^T = [x_1 \ e_f + \dot{y}_d - [\beta \ 0]e]^T$, 令 $\rho = \dot{y}_d - [\beta \ 0]e$, 则 $Q(x)$ 可表示为 $Q(x_1, e_f + \rho)$. 那么,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= JQ(x) e_f \dot{e}_f + \int_0^{e_f} J \epsilon \left[\frac{\partial Q(x_1, \epsilon + \rho)}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial Q(x_1, \epsilon + \rho)}{\partial \rho} \dot{\rho} \right] d\epsilon + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} = \\ &= JQ(x) e_f \dot{e}_f + \int_0^{e_f} J \epsilon \left[\frac{\partial Q(x_1, \epsilon + \rho)}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \dot{\rho} \frac{\partial Q(x_1, \epsilon + \rho)}{\partial \epsilon} \right] d\epsilon + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} = \\ &= e_f Q(x) \left[-\theta^T \varphi + u + \frac{J}{Q(x)} (-\ddot{y}_d + [0 \ \beta]e) \right] + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} \end{aligned} \quad (18)$$

取控制律

$$u = \theta^T \varphi - \frac{J}{Q(x)} (-\ddot{y}_d + [0 \ \beta]e) - \frac{k e_f}{Q(x)}, \quad k > 0 \quad (19)$$

则

$$\dot{V} = -k e_f^2 - \bar{\theta}^T \varphi Q(x) e_f + \bar{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} \quad (20)$$

取自适应律

$$\dot{\theta} = \Gamma \varphi Q(x) e_f \quad (21)$$

则

$$\dot{V} = -k e_f^2 \leq 0 \quad (22)$$

证毕.

4.2 $Q(x)$ 选择

定理 2. 对于闭环系统(2),(19)和(21), 如果选择 $0 < Q(x) \leq q_0$, 则闭环系统有如下性质:

- i) 在任意有界初始条件 $x(0), x_d(0)$ 下, Lyapunov 函数 V 有界正定;
- ii) 滤波误差 $e_f \in L_2 \cap L_\infty$, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_f = 0$;
- iii) 控制量 u 有界, θ 有界;
- iv) 跟踪误差界

$$\|e\| \leq k_0 \|e(0)\| e^{-\beta_0 t} + \frac{k_0}{2\sqrt{k\beta_0}} (Jq_0 e_f^2(0) + \bar{\theta}^T(0) \Gamma^{-1} \bar{\theta}(0))^{1/2} \quad (23)$$

证明(略).

5 仿真

取转动惯量 $J = 2 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦力参数分别取为 $\alpha_c = 2.0 \text{N}$, $\alpha_{s-c} = 0.15 \text{N}$, $\alpha_v = 1.6 \text{Ns/m}$, $\theta_s = 10^6$, 初始值 $\theta = [0.0, 0.0, \dots, 0.0]^T$, $x(0) = [0.5, 0.0]^T$, $k = 1.0$, $Q(x) = 1.0$, $\Gamma = \text{diag}(12)$, $\beta_0 = 1.2$, $y_d = \sin(0.5t)$, 采样周期 $T = 0.05 \text{s}$.

从图 1~4 的仿真结果可看出, 位置及速度跟踪误差均渐近收敛到零, 控制力矩有界, 并且准确地估计出了摩擦力参数.

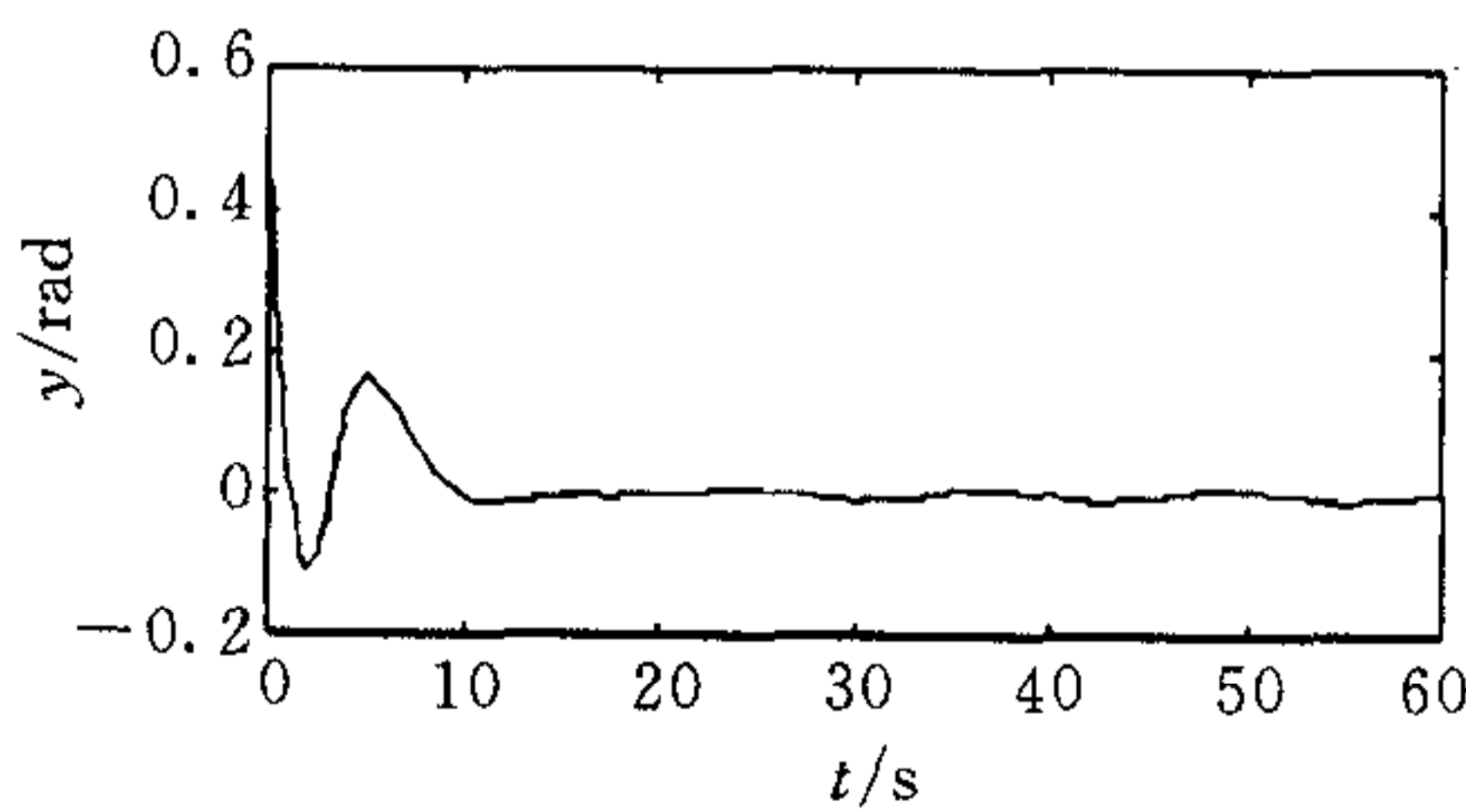


图 1 位置跟踪误差

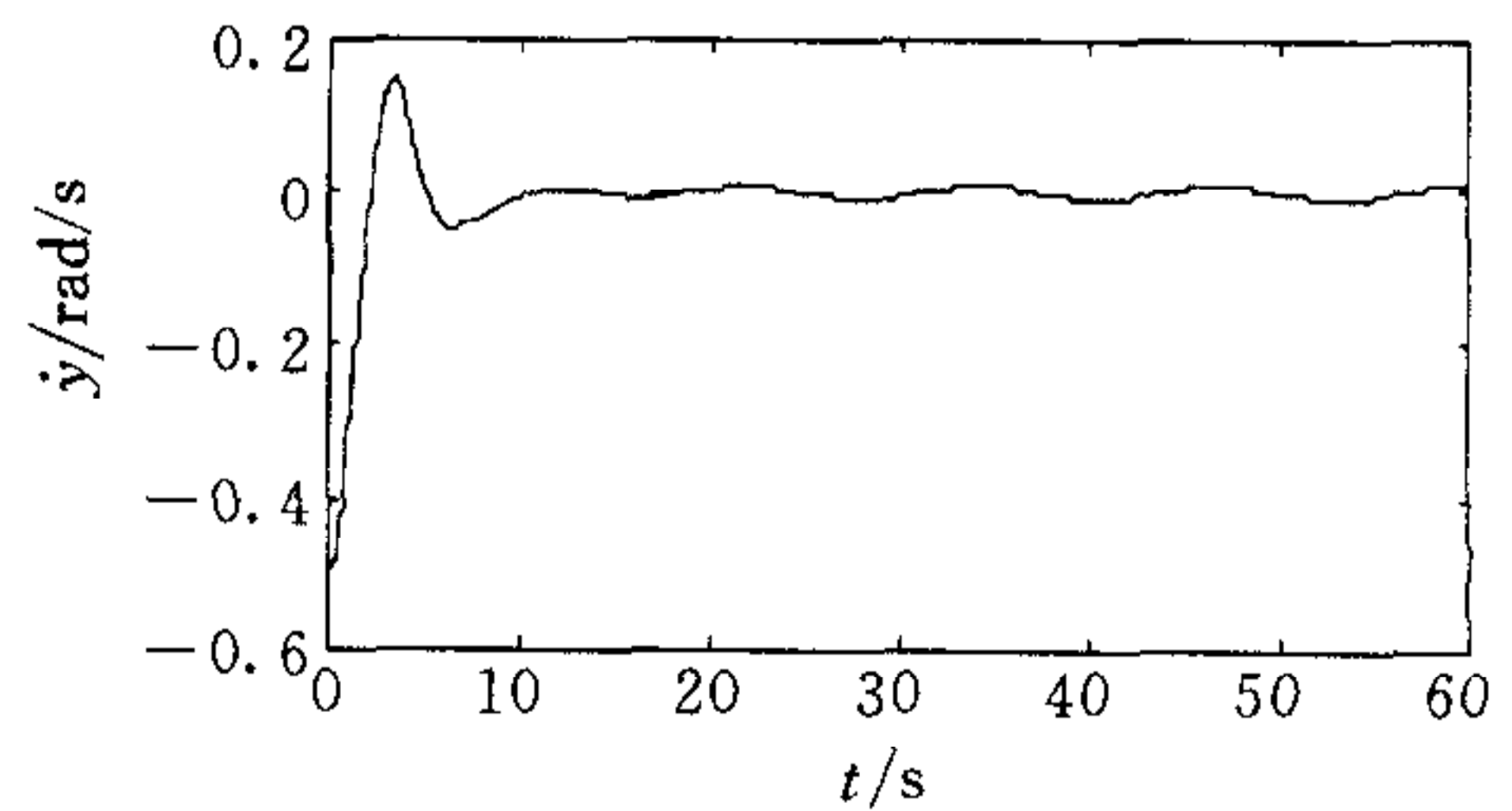


图 2 速度跟踪误差

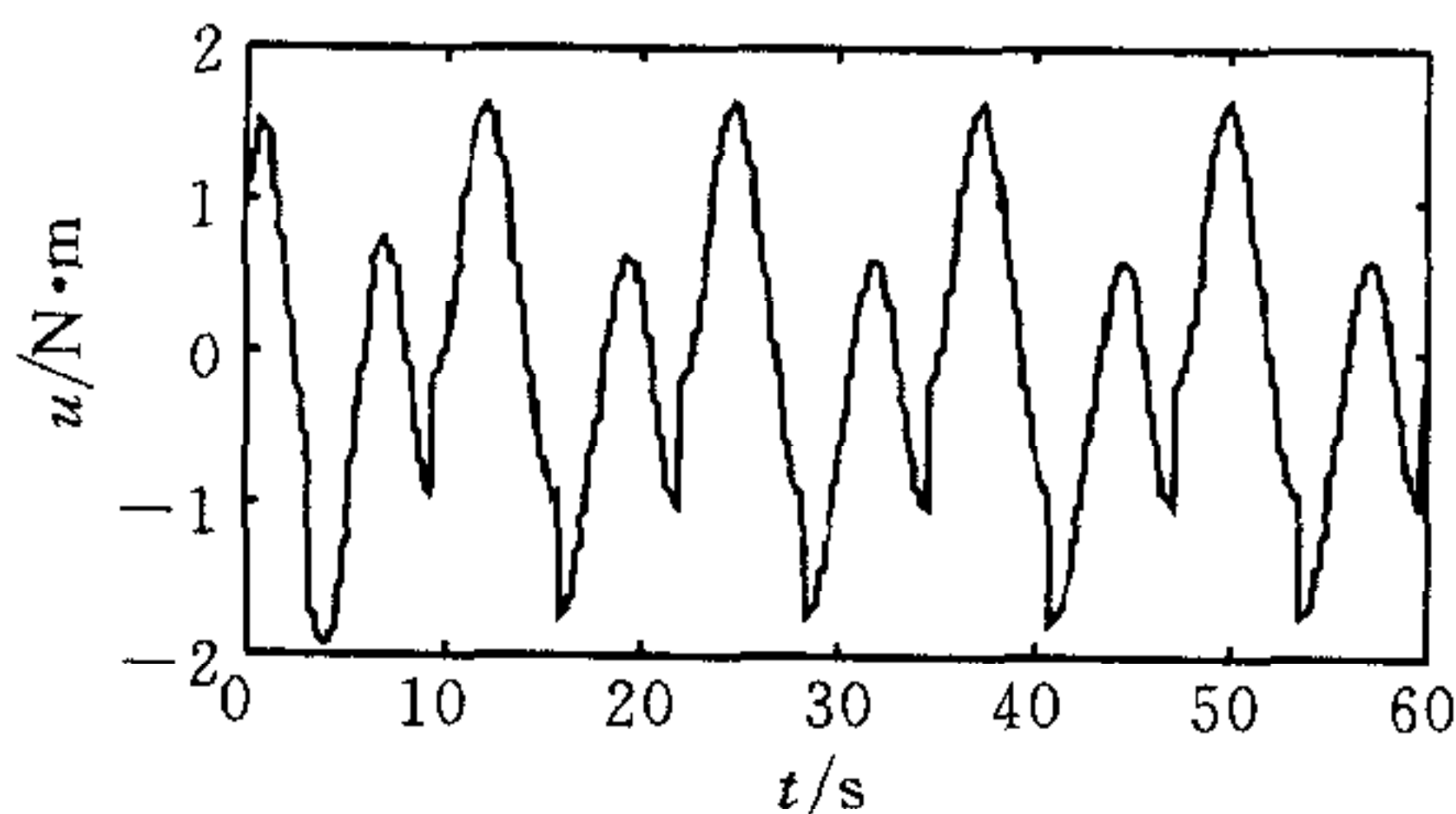


图 3 控制力矩

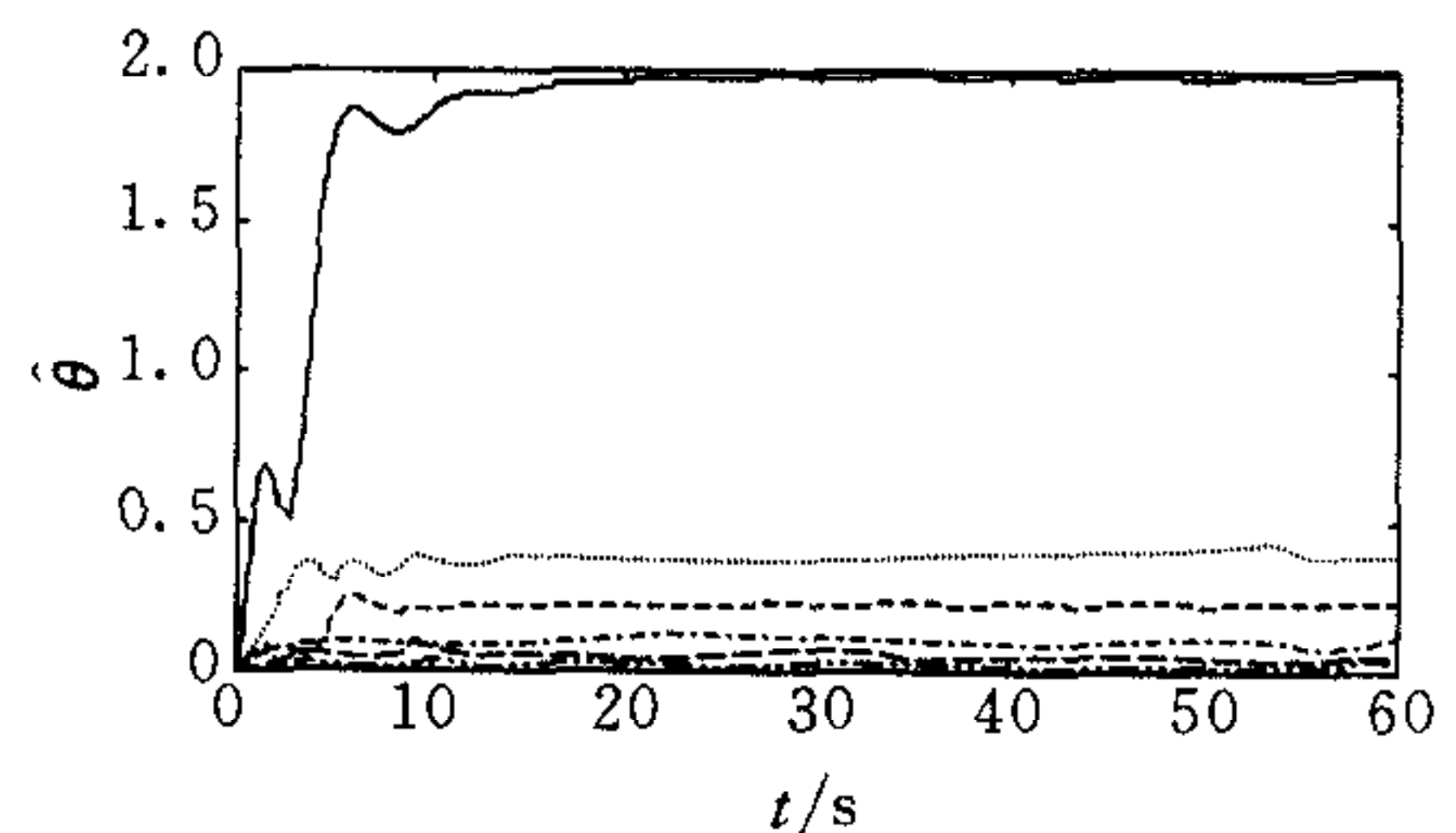


图 4 摩擦力参数估计

6 结论

本文研究了具有摩擦力扰动精密伺服系统的跟踪控制问题,采用了较为复杂的摩擦力模型,对摩擦力模型的线性参数化包含了对目前文献上很少处理的 Stribeck 效应的线性参数化.同大多有关摩擦力补偿文献的区别是本文算法不须单独建立摩擦力观测器,控制器与自适应律同时根据构造的 Lyapunov 导出.理论分析与仿真实验都证明该算法具有全局稳定性与收敛性,大大改善了伺服系统的低速特性,提高了跟踪性能.值得指出的是,本文为了算法推导简单,假定系统参数为定常值,对算法做适当修正可使其应用于变参数的场合.

参 考 文 献

- 1 Armstrong-Helouvry B, Dupont P, Canudas de wit C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control machines with friction. *Automatica*, 1994, **30**(7):1083~1138
- 2 Canudas de wit C, Olsson H, Astrom K J *et al.* A new model for control of systems with friction. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 1995, **2**:419~425

郑言海 博士生. 研究领域为鲁棒自适应控制、智能控制、最优控制和非线性控制.

庄显义 现为哈工大控制工程系教授,博士生导师.长期从事控制理论和伺服技术的教学与科研工作.

强 盛 博士生. 研究领域为神经网络和工业过程控制.

胡遇杰 2001 年于上海交通大学自动化系获硕士学位.研究方向为智能控制.

《自动化学报》征稿简则

一、《自动化学报》是中国自动化学会主办的高级学术期刊,每年出版六期.

二、本刊刊载自动化科学与技术领域的高水平学术论文和科学研究成果.内容包括:1.自动控制理论;2.系统理论与系统工程;3.自动化技术及其在国民经济各领域中的创造性应用;4.自动化系统计算机辅助技术;5.机器人与自动化;6.人工智能与智能控制;7.自动控制系统中的新概念、新原理、新方法、新设计;8.信息理论与信息处理技术,模式识别;9.自动化学科领域的其它重要问题.

三、本刊发表的文章以论文和短文两种形式为主,并不定期地发表综述与评论性文章、长论文、书刊评论、问题讨论、读者来信和国内外学术活动信息等.

四、本刊原则上只发表原始性稿件,但不排除刊登已在国内外学术会议上发表或准备发表的优秀论文的可能性(对于此种情况,作者必须如实说明).

五、作者投稿时需签署“作者承诺”.

六、来稿格式及要求

1. 来稿要求论点明确、论证充分、语言通顺、文字简练.一般定稿时论文不超过 6000 字;短文不超过 3000 字;其它形式文章视具体内容由编辑部决定.对重要成果进行系统、完整叙述的长论文字数可稍长.长论文稿件,作者在投稿时必须注明.

2. 稿件首页应包括下列内容:标题;作者姓名、工作单位、详细通讯地址(包括邮政编码)、E-mail、电话号码;论文摘要;关键词;用英文书写的上述内容.

3. 论文和短文的文章结构请参照本刊最近发表的文章格式.论文摘要在 200 字以内;短文 100 字左右.文中缩写词(中文或英文)须在首次出现时注明全称;公式、图、表均须分别用阿拉伯数字全文统一编号.

4. 计量单位一律用国际单位,即 SI 单位制.名词术语必须规范化、标准化,前后一致.外国人名、地名、书刊名称除已通用者外一律用原文.

(下转第 460 页)