

二自由度随动系统的自适应摩擦补偿

王红茹¹, 王建中²

1. 江苏科技大学机械工程学院, 江苏镇江 212003

2. 北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 为提高二自由度随动系统的跟踪精度, 针对系统中存在的摩擦扰动问题, 提出了一种基于 LuGre 模型的自适应摩擦补偿方法。该方法采用离线估计法对 LuGre 模型中未知参数进行估计, 采用非线性观测器和自适应律估计 LuGre 摩擦模型中的不可测状态变量和易变未知参数。最后利用 Lyapunov 方法证明了整个闭环系统的渐进稳定性。仿真实验表明, 该方法能有效补偿摩擦对二自由度随动系统低速性能的影响, 从而提高跟踪精度。

关键词 目标跟踪; 摩擦补偿; 双观测器结构; 自适应律; 二自由度随动系统

中图分类号 TP202

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.20.009

Adaptive Friction Compensation for 2-DOF Tracking System

WANG Hongru¹, WANG Jianzhong²

1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu Province, China

2. School of Mechatronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract In order to eliminate nonlinear effects of friction on 2-DOF tracking system and to improve its position-tracking accuracy, a novel adaptive friction compensation algorithm is proposed. Based on nonlinear characteristics of friction, a LuGre dynamic friction model is adopted to characterize friction in the 2-DOF tracking system. In this method, unknown parameters for the LuGre model are estimated in the manner of off-line; friction state and the inconstant parameters are estimated by using nonlinear observers and self-adaptive law. A Lyapunov-like argument proves the asymptotic stability of the whole closed-loop system. Experimental results indicate that the proposed method could effectively alleviate the influences of friction when the 2-DOF tracking system works with a lower speed, and could improve tracking accuracy for the 2-DOF tracking system accordingly.

Keywords target tracking; friction compensation; dual-observer structure; self-adaptive law; 2-DOF tracking system

0 引言

二自由度随动系统由于采用直流伺服电机作为驱动装置, 具有调速范围宽、过载能力强和运行平稳等优点。但是, 非线性摩擦的存在, 使系统产生较大的稳态误差, 低速运行时出现跳动式跟踪或爬行现象, 进而使系统的位置跟踪精度受到严重影响。为提高系统的跟踪性能, 必须抑制或消除摩擦对系统动静态性能的影响。为此, 国内外学者进行了大量研究, 提出了各种各样的摩擦补偿方法, 这些摩擦补偿方法可归结为两大类^[1-7]: 一是不依赖于摩擦模型的补偿方法, 即将摩擦看作干扰, 通过改变控制器结构或控制器参数提高系统的抗干扰能力, 进而达到抑制摩擦的目的; 二是基于摩擦

模型的补偿方法, 其基本思想是首先建立或选择适当的摩擦模型, 并根据此模型和系统的状态变量信息对摩擦力矩进行估计, 然后在控制力矩中加入该摩擦力矩的估计值, 消除摩擦对系统性能的影响。

本文提出一种基于 LuGre 模型和自适应观测器的动态摩擦补偿方法, 以提高二自由度随动系统的跟踪性能。与现有的摩擦补偿方法相比, 该方法具有易于参数辨识、便于计算机实现和精度高等优点。

1 二自由度随动系统动力学模型

二自由度随动系统由两套既相互独立又相互关联的直

收稿日期: 2010-11-10; 修回日期: 2011-05-31

基金项目: 江苏科技大学博士启动基金项目 (35020902)

作者简介: 王红茹, 讲师, 研究方向为机器人技术, 电子信箱: wanghr@126.com

流伺服系统组成,分别是高低伺服子系统和方位伺服子系统。本文以高低伺服子系统为例,研究摩擦对系统跟踪性能的影响,方位伺服子系统可类似处理,在此不再赘述。

1.1 考虑摩擦特性的系统动态模型

在二自由度随动系统中,摩擦力矩引起的抖动是影响系统精度的重要因素,主要体现为低速时跳动式跟踪现象和频繁换向时运动不连续性等。考虑摩擦效应的高低伺服子系统的简化模型如图1所示。

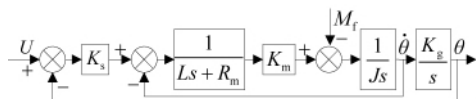


图1 含摩擦效应的高低伺服子系统简化模型
Fig. 1 Simplified model for tilting subsystem while considering friction

其中, θ 为随时间变化的角位移; U 为控制电压; K_s 为伺服驱动器等效增益; L 为电机电感常数; R_m 为电机电枢回路电阻; K_m 为力矩系数; J 为等效到电机转子上的转动惯量; M_t 为摩擦力矩; K_g 为等效传动比。

由于所选电机的电感常数非常小,在建立系统动态方程时,忽略其对电机动态特性的影响。则与图1对应的微分方程为

$$J\ddot{\theta} = -\frac{K_m}{R_m}\dot{\theta} + \frac{K_s K_m}{R_m}U - M_t \quad (1)$$

令 $\frac{JR_m}{K_s K_m} = b$, $\frac{1}{K_s} = a$, $\frac{R_m}{K_s K_m} M_t = M_f$, 则式(1)可简化为

$$b\ddot{\theta} = a\dot{\theta} + U - M_f \quad (2)$$

1.2 基于LuGre模型的系统动力学模型

表征不同摩擦特性的摩擦模型很多,如经典摩擦模型、Karnopp模型^[8]、Armstrong模型^[2]、Dahl模型^[9]、Bristle模型^[10]和LuGre模型^[11]等。其中,前3种仅表征了摩擦的静态特征,如静摩擦、库仑摩擦、黏滞摩擦和Stribeck影响,属于静态摩擦模型;后3种属于动态摩擦模型,不仅描述了摩擦的静特性,还体现了其动态特性,如摩擦的记忆性、最大静摩擦的可变性和stick-slip运动等。由于LuGre模型能更全面、简洁地描述摩擦的动静态特性,本文选用LuGre模型描述二自由度随动系统中存在的摩擦现象, M_f 满足如下方程:

$$M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dt} = \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} z \quad (4)$$

$$\sigma_0 s(\dot{\theta}) = M_c + (M_s - M_c) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s}\right)^2} \quad (5)$$

该摩擦模型全面而准确地体现了预滑移和滑移运动时摩擦力的特性。其中, z 为表征刚毛平均变形量的不可测状态变量, σ_0 、 σ_1 和 σ_2 分别为刚度系数、阻尼系数和黏滞摩擦系

数, M_c 和 M_s 分别为库仑摩擦力矩和静摩擦力矩, $\dot{\theta}_s$ 为Stribeck速度。式(5)描述了摩擦的Stribeck效应。

式(2)一式(5)描述了考虑摩擦影响的高低伺服子系统的动力学模型。联立式(2)一式(5),可得

$$b\ddot{\theta} = a\dot{\theta} + U - \sigma_0 z - \sigma_1 \dot{z} - \sigma_2 \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} z \quad (6)$$

其中, $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ 。

2 基于LuGre模型的自适应摩擦控制器设计

式(3)一式(5)构成的LuGre模型由 σ_0 、 σ_1 、 σ_2 、 M_c 、 M_s 和 $\dot{\theta}_s$ 6个参数和一个状态变量 z 表征。本文采用系统受到外力作用但处于静止状态时对 σ_0 和 σ_1 进行估计;采用系统处于稳定工作状态时测得的摩擦力矩估计 σ_2 、 M_c 、 M_s 和 $\dot{\theta}_s$;对于状态变量 z 采用两个非线性观测器进行估计。

2.1 摩擦模型参数估计

2.1.1 σ_0 和 σ 的估计

当系统受到电机驱动力作用而仍处于静止状态时,可假设 $z \approx \theta$,因此式(3)可化为

$$M_f \approx \sigma_0 \theta + \sigma_1 \dot{\theta} + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)可得

$$b\ddot{\theta} + (\sigma - a)\dot{\theta} + \sigma_0 \theta = U \quad (8)$$

对式(8)进行拉普拉斯变换可得

$$\frac{\theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{bs^2 + (\sigma - a)s + \sigma_0} \quad (9)$$

式(9)表明,当受到电机驱动作用而处于静止状态时,系统可近似为一个二阶系统。因此,可通过系统的阶跃响应估计 σ_0 和 σ 。

2.1.2 σ_2 、 M_c 、 M_s 和 $\dot{\theta}_s$ 的估计

当系统受到电机驱动力作用而作匀速运动时,由式(3)一式(5)可得静态模式下的 M_s 为

$$M_{ss} = [M_c + (M_s - M_c) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s}\right)^2}] \text{sgn}(\dot{\theta}) + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (10)$$

由式(2)可得

$$M_{ss} = a\dot{\theta} + U \quad (11)$$

式(11)表明系统的稳态摩擦力矩可通过不同的输入使其工作在不同的恒定速度获得,然后根据式(10)即可估计出 σ_2 、 M_c 、 M_s 和 $\dot{\theta}_s$ 。

根据估计出的 σ 和 σ_2 ,并由 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$ 即可得出 σ_1 的估计值。

2.2 具有摩擦估计的自适应控制器设计

二自由度随动系统属于典型的位置控制系统,自适应控制器的控制目标是在存在动态摩擦力的情况下使系统的输出跟踪期望的目标点。对于高低伺服子系统,定义系统误差方程为

$$e_1 = \theta - \theta_d \quad (12)$$

$$e_2 = \dot{e}_1 + k e_1 \quad (13)$$

其中, θ_d 为期望的目标点位置; k 为用户自定义的正实数。

对式(12)进行 Laplace 变换并整理, 得

$$\frac{e_1(s)}{e_2(s)} = \frac{1}{s+k} \quad (14)$$

由式(14)可知, $e_1(s)/e_2(s)$ 是一个稳定的函数, 因此, 如果 e_2 很小或按指数规律收敛为 0, 那么 e_1 也将很小或按指数规律收敛为 0。

根据式(6)、式(12)和式(13)可得

$$b \dot{e}_2 = a \dot{\theta} + U - \sigma_0 \dot{z} - \sigma_1 \dot{\theta} + \sigma_1 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} z - b(\ddot{\theta}_d - k \dot{e}_1) \quad (15)$$

式(15)中的 z 是不可测量的, 需要采用双观测器对其进行估计

$$\frac{d\hat{z}_0}{dt} = \dot{\theta} - \sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_0 + \delta_0 \quad (16)$$

$$\frac{d\hat{z}_1}{dt} = \dot{\theta} - \sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_1 + \delta_1 \quad (17)$$

其中, δ_0 和 δ_1 为所设计的观测器的动态项, $\hat{z}_0$ 和 $\hat{z}_1$ 为状态变量 z 的估计值, 其估计误差分别为

$$\frac{d\tilde{z}_0}{dt} = -\sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \tilde{z}_0 - \delta_0 \quad (18)$$

$$\frac{d\tilde{z}_1}{dt} = -\sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \tilde{z}_1 - \delta_1 \quad (19)$$

其中, $\tilde{z}_0 = z - \hat{z}_0$, $\tilde{z}_1 = z - \hat{z}_1$ 。

对式(2)所描述的伺服系统, 构造如下非线性控制律:

$$U = -c e_2 - a \dot{\theta} + \hat{\sigma}_0 \hat{z}_0 + \hat{\sigma} \dot{\theta} - \hat{\sigma}_1 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_1 + b(\ddot{\theta}_d - k \dot{e}_1) \quad (20)$$

其中, c 为正实数, $\hat{\sigma}_0$ 和 $\hat{\sigma}_1$ 分别是根据第 2.1 节所述方法求取的 σ_0 和 σ_1 估计值; $\hat{\sigma}$ 是 σ 的估计值 (由于在运动过程中 σ_2 极易变化, 因此有必要对 σ_2 进行重新估计)。

选择 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} (b e_2^2 + \sigma_0 \hat{z}_0^2 + \sigma_1 \hat{z}_1^2 + \sigma^2 / \alpha) \quad (21)$$

其中, α 为正的设计参数。

对式(21)求导, 并将式(15)一式(17)和式(20)代入整理, 得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -c e_2^2 - \sigma_0 \left(\frac{\hat{\sigma}}{\alpha} + e_2 \dot{\theta} \right) + \sigma_0 \hat{z}_0 (e_2 + \delta_0) - \sigma_1 \hat{z}_1 \left(\frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} e_2 + \delta_1 \right) - \\ & \sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_0^2 - \sigma_1 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_1^2 \end{aligned} \quad (22)$$

选择如下自适应更新律:

$$\dot{\hat{\sigma}} = -e_2 \alpha \dot{\theta} \quad (23)$$

$$\delta_1 = -e_2 \quad (24)$$

$$\delta_2 = \frac{\sigma_0 |\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} e_2 \quad (25)$$

将式(23)一式(25)代入式(22), 可得

$$\dot{V} = -c e_2^2 - \sigma_0 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_0^2 - \sigma_1 \frac{|\dot{\theta}|}{s(\dot{\theta})} \hat{z}_1^2 \leq -c e_2^2 \quad (26)$$

由于 $c > 0$, 可得 $\dot{V} < 0$ 。因此, 根据 Lyapunov 稳定定理可知, 所设计的控制器能保证系统全局渐进稳定。

3 仿真实验与结果分析

针对某二自由度随动系统, 本文进行了 LuGre 摩擦模型的参数辨识, 并对所提出的控制方法进行了计算机仿真。

根据本文提出的参数辨识方法, 对式(3)一式(5)所描述的 LuGre 摩擦模型中的未知参数进行辨识, 结果如表 1 所示。

表 1 LuGre 模型参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results for LuGre model

$M_c /$ (N·m)	$M_s /$ (N·m)	$\dot{\theta}_s /$ (rad·s ⁻¹)	$\sigma_0 /$ (N·m· rad ⁻¹)	$\sigma_1 /$ (N·m· s·rad ⁻¹)	$\sigma_2 /$ (N·m· s·rad ⁻¹)
0.32	0.4	0.02	8.30	4.40	1.38

由上述参数辨识结果, 分别运用本文提出的摩擦补偿控制器和 PD 位置控制器对某二自由度随动系统的高低伺服子系统进行低速位置跟踪。给定位置信号为 $\theta(t) = 0.1 \sin 0.2 \pi t$, 仿真结果如图 2 所示。

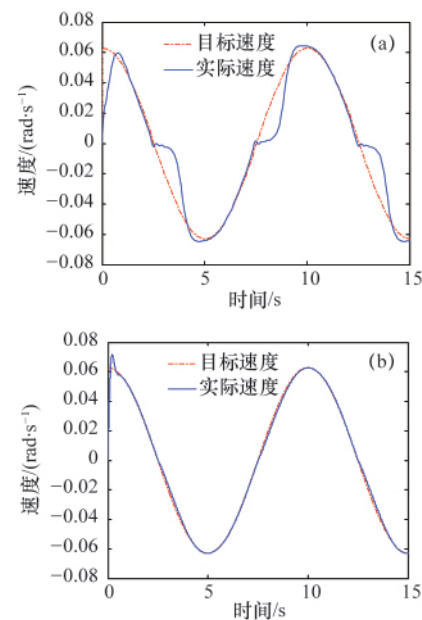


图 2 基于 PD 位置控制器(a)和基于自适应摩擦补偿(b)的速度跟踪

Fig.2 Speed tracking based on PD controller (a) and self-adaptive friction compensation (b)

由图 2 可以看出,本文所提出的摩擦补偿方法能有效克服速度过 0 时的波形畸变,进而抑制非线性摩擦对系统低速性能的影响,能明显提高系统的低速跟踪精度。

4 结论

为补偿二自由度随动系统中的摩擦扰动,本文提出了一种基于 LuGre 动态摩擦模型的自适应非线性补偿方法。LuGre 模型虽然能全面地描述系统的摩擦特性,但它包含多个未知参数和一个不可测状态变量,因此要实现基于该摩擦模型的补偿必须对其进行估计。本文采用离线估计和应用两个非线性观测器在线估计相结合的方法对 LuGre 摩擦模型进行估计。在此基础上,设计的基于 Lyapunov 稳定意义的自适应控制器能保证闭环系统的全局渐进稳定性。仿真实验表明,本文所提出的摩擦补偿方法能较好地抑制摩擦对系统低速性能的影响,进而提高系统的跟踪精度。

参考文献 (References)

- [1] Dupont P, Armstrong-Helouvry B. Compensation techniques for servo with friction[C]. American Control Conference, USA, San Francisco, USA, June 2-4, 1993.
- [2] Armstrong-Helouvry B, Dupont P, Canudas de Wit C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. *Automatica*, 1994, 30(7): 1083-1138.
- [3] 张锦江, 陈兴林, 冯汝鹏, 等. 基于摩擦自适应补偿的转台变结构控制

器设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(4): 38-39, 49, 59.

Zhang Jinjiang, Chen Xinglin, Feng Rupeng, et al. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2000, 32(4): 38-39, 49, 59.

- [4] Bona B, Indri M. Friction compensation in robotics: An overview[C]. 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, Seville, Spain, Dec 12-15, 2005.
- [5] Wahyudi, Tijani I B. Friction compensation for motion control system using multilayer feedforward network[C]. 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications, Amman, Jordan, May 27-29, 2008.
- [6] Jamaludin Z, Van Brussel H, Swevers J. Friction compensation of an XY feed table using friction-model-based feedforward and an inverse-model-based disturbance observer [J]. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 2009, 56(10): 3848-3853.
- [7] Mostefai L, Denai M, Hori Y. Robust tracking controller design with uncertain friction compensation based on a local modeling approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2010, 15(5): 746-756.
- [8] Kamopp D. Computer simulation of slip-stick friction in mechanical dynamic systems [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1985, 107(1): 100-103.
- [9] Dahl P. A solid friction model[R]. EI Segundo: Aerospace, 1968.
- [10] Haessiq D A, Friedland B. On the modeling and simulation of friction [C]. Proceedings of the American Control Conference, San Diego, CA, USA, May 23-25, 1990.
- [11] Canudas de Wit C, Olsson H, Astrom K J, et al. A new model for control of systems with friction [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(3): 419-425.

(责任编辑 代丽)

·学术动态·

“第二十四届全国空间探测学术讨论会”征文

由中国空间科学学会主办的“第二十四届全国空间探测学术讨论会”将于 2011 年 10 月 9—11 日在西安召开。

征文范围: 正在进行和建议的空间探测计划介绍, 空间探测专项技术发展综述; 月球探测、火星探测, 太阳、行星及其卫星以及太阳系小天体探测; 空间电场、磁场、电磁波、粒子探测新技术, GNSS 掩星与反射探测技术; 磁层与等离子体多时空尺度探测技术, 电离层和中高层大气探测技术; 临近空间、火箭与气球探测技术, 暗物质和暗能量探测技术; 与载人航天活动相关的探测技术; 空间探测数据处理、存储、传输与接收等公用技术; 对我国空间探测技术战略发展的建议。

征文截稿日期: 2011 年 7 月 30 日。

通信地址: 北京 8701 信箱。

联系电话: 010-62626308, 68382803; **电子信箱:** chengfeng@cssar.ac.cn。