

模糊推理在光电跟踪设备摩擦补偿中的应用

高振兴¹, 翟园林¹, 胡敏²

(1. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 浙江工业职业技术学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 利用模糊推理对基于 Stribeck 摩擦补偿模型的参数进行在线辨识, 使摩擦补偿量在数值上无限逼近真实的摩擦干扰; 通过建立伺服系统摩擦补偿模型, 仿真验证了该补偿方法的有效性, 并进一步在高精度光电跟踪平台上比较分析了有、无摩擦补偿的跟踪误差曲线, 验证了摩擦补偿效果, 实验表明该方法使过零波形畸变基本消失, 跟踪误差降低为原来的 20%, 显著提高了低速跟踪性能。

关键词: 光电跟踪; 模糊推理; 伺服系统; 摩擦补偿; Stribeck 模型; 低速跟踪

中图分类号: TP271.4⁺ **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)03-0082-04

Application of Fuzzy Interference in Friction Compensation Control of Electro-Optic Tracking Device

GAO Zhen-xing¹, ZHAI Yuan-lin¹, HU Min²

(1. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Fuzzy interference was used to identify the parameters of Stribeck friction compensation model online, and make it infinitely approximate to the real friction interruption in numerical value. A servo system friction compensation model was built up, and simulation was made to verify the validity of the method. In addition, a comparison was made to the tracking errors with and without friction compensation by using a highly accurate optical-electro tracking system, and the friction compensation effect was further verified. Experiment result showed that; 1) The wave aberration of zero passage basically disappeared and the tracking error was reduced to 20% of the original value; and 2) The low speed tracking performance was improved dramatically.

Key words: electro-optic tracking; fuzzy interference; servo system; friction compensation; Stribeck fraction model; low speed tracking

0 引言

高精度光电跟踪设备的伺服控制系统一般采用直流电机作为驱动装置, 但由于直流电机系统中存在非线性动态摩擦力, 会造成低速爬行、速度过零时波形畸变等问题, 严重影响设备的跟踪精度。因此, 需要采用适当的摩擦补偿方法来抑制或消除摩擦力矩对跟踪性能的影响。

摩擦补偿方法可分为基于非模型的摩擦补偿、基

于摩擦模型的补偿和基于智能控制的摩擦补偿。目前, 已提出的摩擦模型有^[1-4]库仑摩擦模型, 库仑摩擦模型 + 粘滞摩擦模型, 静摩擦 + 库仑摩擦 + 粘滞摩擦模型, Dahl 模型, Bliman and Sorine 模型, Bristle 模型, LuGre 模型和 Stribeck 模型。基于这些模型建立的摩擦补偿控制算法有基于 GMS 模型的摩擦补偿控制算法、基于库仑模型的摩擦补偿控制算法、基于 LuGre 模型的摩擦补偿控制算法和基于 Stribeck 模型的摩擦补偿控制算法。其中, LuGre 模型考虑了摩擦的动态特性, 准确地描述了摩擦特性, 但是该模型需要辨识的参数多, 应用难度大; 而 Stribeck 模型复杂度适中, 具有很高的工程应用价值, 但其有效性与伺服控制系统运行角速度值的测量精度有很大关系, 如果能够测量到

收稿日期: 2013-12-25

修回日期: 2014-05-23

作者简介: 高振兴(1979—), 男, 安徽砀山人, 本科, 研究方向为光电探测系统伺服控制技术。

较精确的角速度,就会达到很好的摩擦补偿效果。

由于在实际伺服系统中,很难建立电机摩擦环节的精确数学模型,因此,提出一种基于 Stribeck 模型的参数在线辨识的摩擦补偿方法,利用模糊推理对摩擦补偿模型参数进行辨识^[5-6],使摩擦补偿模型充分逼近伺服控制系统的摩擦干扰,从而有效提供伺服系统的跟踪精度。直流伺服系统的摩擦补偿控制结构如图 1 所示。

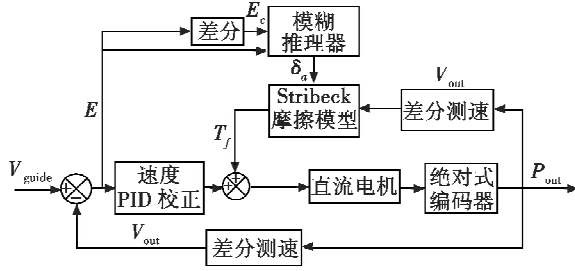


图 1 伺服系统摩擦补偿控制结构框图
Fig. 1 Servo system control structure with friction compensation

1 伺服系统摩擦补偿模型

1.1 Stribeck 摩擦模型

Stribeck 模型将摩擦分为 4 个阶段,即接触面弹性形变阶段、边界润滑阶段、部分液体润滑阶段和完全液体润滑阶段。分段函数为

$$T_f = \begin{cases} T_{slip}(\dot{\theta}) & \dot{\theta} \neq 0 \\ T_s & \dot{\theta} = 0 \text{ 且 } |T_s| < T_s \\ T_s \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) & \dot{\theta} = 0 \text{ 且 } |T_s| > T_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_f 为外力矩; T_s 为最大静摩擦力矩; $\dot{\theta}$ 为角速率; T_{slip} 是滑动时的摩擦力矩。其表达式为

$$T_{slip}(\dot{\theta}) = (T_c + (T_s - T_c) \cdot e^{-(\dot{\theta}/\dot{\theta}_s)^{\delta_s}} + K_v \cdot |\dot{\theta}|) \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (2)$$

式中: T_c 为库伦摩擦力矩; $\dot{\theta}_s$ 为临界 Stribeck 速率; K_v 为粘滞摩擦系数; δ_s 为经验参数(一般取 0.5~2)。若根据式(1)进行仿真,零速率检测较为困难,因而对其进行简化得到

$$T_f = \begin{cases} T_{slip} & |\dot{\theta}| > \alpha \\ T_{stick} & |\dot{\theta}| < \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中, α 为非常小的正数。角速率小于 α 时认为接触面没有相对滑动,即静摩擦阶段;角速率大于 α 时,接触面间产生相对滑动。

根据系统参数,取 $T_c = 1.2$, $T_s = 1.7$, $K_v = 0.6$, $\alpha = 0.06$, $\delta_s = 2$, $\alpha = 0.0001$, 则 Stribeck 曲线如图 2 中红线所示。

1.2 Stribeck 模型简化

由于 Stribeck 曲线具有非线性,在控制系统中计算量大,且不便调整,因此采用分段的线性函数来简化。为使分段函数曲线能更好地逼近 Stribeck 曲线,对式(2)进行求导得到式(4),以便确定 Stribeck 曲线的走向,即

$$D_{\dot{\theta}} = -(T_s - T_c) \cdot (\dot{\theta}/\dot{\theta}_s)^{\delta_s} \cdot \delta_s / \dot{\theta} \cdot e^{-(\dot{\theta}/\dot{\theta}_s)^{\delta_s}} + K_v \quad (4)$$

当 $\dot{\theta} > 2\dot{\theta}_s$ 时, $e^{-(\dot{\theta}/\dot{\theta}_s)^{\delta_s}} \approx 0$, 因此选取点 $((0, T_s)$, $(2\dot{\theta}_s, T_{slip}(2\dot{\theta}_s))$ 为第一条线段,第二条线段以 $(2\dot{\theta}_s, T_{slip}(2\dot{\theta}_s))$ 为起点, K_v 为斜率,则分段线性函数的表达式为

$$B = \begin{cases} \text{sgn}(\dot{\theta}) \cdot (A_1 \cdot \dot{\theta} + S_1) & \text{abs}(\dot{\theta}) < 2\dot{\theta}_s \\ \text{sgn}(\dot{\theta}) \cdot (A_2 \cdot \dot{\theta} + S_2) & \text{abs}(\dot{\theta}) > 2\dot{\theta}_s \end{cases} \quad (5)$$

式中: $A_1 = (T_s - T_c)/(2\dot{\theta}_s e^4) - (T_s - T_c)/(2\dot{\theta}_s)$; $S_1 = T_s$; $A_2 = K_v$; $S_2 = T_c + (T_s - T_c)/e^4$ 。

简化后的 Stribeck 曲线如图 2 中蓝色所示。

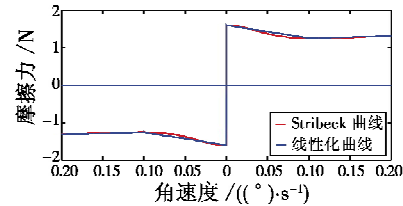


图 2 Stribeck 曲线及其线性化曲线

Fig. 2 Stribeck curve and its linerized curve

由图可知,线性分段函数虽不能完全复现 Stribeck 曲线,但在 $|\dot{\theta}| < 2\dot{\theta}_s$ 时能够反映出曲线的走向, $|\dot{\theta}| \geq 2\dot{\theta}_s$ 时基本能复现 Stribeck 曲线。因而可以利用式(5)来替代式(4)对摩擦力矩进行补偿。

1.3 直流电机数学模型

电机转速与输入电压的传递函数为

$$H(S) = \frac{K}{(T_m S + 1)(T_e S + 1)} \quad (6)$$

式中: K 为开环增益;电气时间常数 $T_e = L_a/R_a$, R_a 为电机电阻, L_a 为电机电感;机械时间常数 $T_m = J/F$, J 为折算到电机轴上的总转动惯量; $F = f + C_m \cdot K_b/R_a$, f 为总粘性摩擦系数, C_m 为电动机的转矩系数, K_b 为与电动机反电势有关的比例系数。

1.4 摩擦补偿模型

高精度光电跟踪设备主要用于跟踪低速飞行的目标,因此,只研究低速时,即 $|\dot{\theta}| < 2\dot{\theta}_s$ 这个速度范围内的摩擦模型,此时

$$B = \frac{T_s - T_c}{2\dot{\theta}_s e^4} - \frac{T_s - T_c}{2\dot{\theta}_s} + K_v \quad (7)$$

则直流伺服系统的摩擦补偿模型如图3所示。

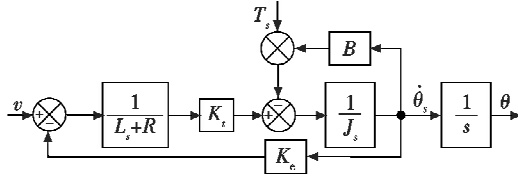


图3 伺服系统摩擦补偿模型

Fig. 3 Friction compensation model of the servo system

2 模糊推理应用

当速度较高时,摩擦力矩的影响可以通过PID控制算法进行补偿,本文中研究低速时的摩擦补偿问题,即 $|\dot{\theta}| < 2\dot{\theta}_s$ 这部分。 $S_1 = T_s$ 的值采用文献[5]中的方法易测得,只需对系数 A_1 进行整定即可,但 A_1 受多种因素的影响,不容易进行精准的测量^[7-9],因此采用模糊推理对摩擦参数进行在线辨识,以对 A_1 进行实时校正,达到较好的控制效果。

系统给定后,摩擦模型只是速度的函数,因此把速度误差 E 和速度误差的变化率 E_c 作为模糊推理的输入,将 A_1 的修正项 δ_a 作为模糊推理的输出。

模糊推理的实现方法为:

- 1) 以误差 E 和误差变化率 E_c 作为模糊推理的输入,以对式(4)的修正项 δ_a 作为模糊推理的输出;
- 2) 定义模糊子集NB, NM, NS, ZO, PS, PM和PB, 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大, $E = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, $E_c = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, $\delta_a = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$;
- 3) 制定模糊推理规则,采用 if E is e and E_c is e_c , then δ_a is δ_a , 根据 E_c , E 与摩擦补偿的大小关系制定模糊控制表(见表1)。

表1 模糊推理表

Table 1 Fuzzy inference table

E	E_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NS	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NM	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

- 4) 变量的模糊论域取 $E = \{-0.03, -0.02, -0.003, 0, 0.003, 0.02, 0.03\}$, $E_c = \{-0.01, 0.003, 0.001, 0, 0.001, 0.003, 0.01\}$, $\delta_a = \{-0.3, -0.1, -0.02, 0, 0.02, 0.1, 0.3\}$ 。

根据上面的模糊推理规则,经过查表和运算,得到 δ_a ,由 $A = A + \delta_a$ 实现对摩擦补偿模型的在线修正。

3 实验验证

3.1 仿真实验验证

在 Matlab 2008a 中,按照图3所示的框图搭建 Simulink 仿真图,取参数: $L = 0.00535$ H, $J = 0.8$ N·m, $R_s = 4.8$ Ω , $K_i = 5.6$, $K_c = 4.7$; B 的选取按式(7)进行, $T_s = 1.2$; $T_v = 1.6$; $K_v = 0.5$; $Q_s = 0.05$; $b_s = 2$; $R_s = 0.0001$; 引导信号 $V_{set} = \sin t$, 单位($^\circ$)/s。未进行摩擦补偿的正弦跟踪曲线见图4;采用上述方法在线修正摩擦补偿参数,进行摩擦补偿后的正弦跟踪曲线见图5。显然,图4中过零点时,由于摩擦力矩的影响,产生了过零波形畸变,会导致跟踪误差增大。由图5可知,速度过零点时,过零波形畸变基本消失,验证了该方法的正确性和有效性。

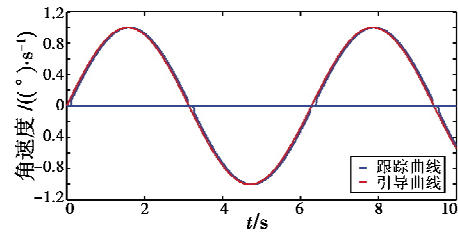


图4 未进行摩擦补偿的正弦跟踪曲线

Fig. 4 Sine wave tracking curve without friction compensation

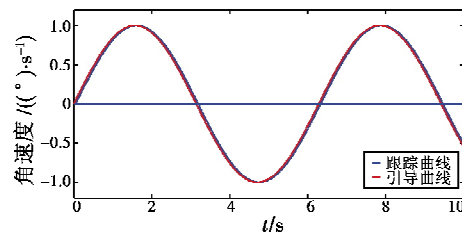
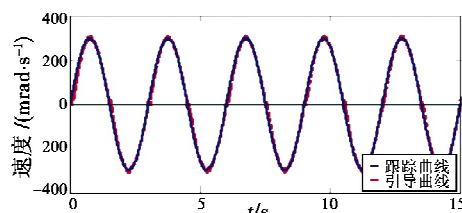


图5 进行摩擦补偿的正弦跟踪曲线

Fig. 5 Sine wave tracking curve with friction compensation

3.2 光电跟踪平台验证

为进一步证实该方法的实用性和工程应用价值,在某光电跟踪设备上验证。实验采用速度引导的模式进行,速度校正均采用经典PID控制算法,辅助以积分分离、抗积分饱和、均值滤波等PID改良算法。以 $300 \sin t$ (单位 mrad/s)作为速度引导值,有、无摩擦补偿的正弦跟踪曲线见图6,有、无摩擦补偿的误差曲线见图7。



a 有摩擦补偿

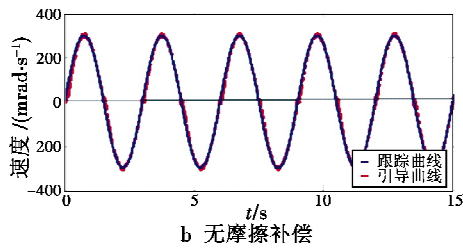


图6 有、无摩擦补偿的正弦跟踪曲线

Fig. 6 Sine wave tracking curve with/without friction compensation

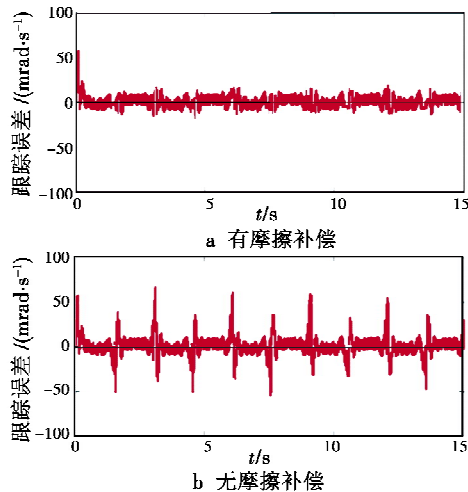


图7 有、无摩擦补偿的正弦跟踪误差曲线

Fig. 7 Sine wave tracking error curve with/without friction compensation

通过比较可知,无摩擦补偿时,速度过零点波形畸变明显,最大跟踪误差为 70 mrad/s;进行摩擦补偿后,过零波形畸变现象基本消失,最大跟踪误差为 15 mrad/s。因此,考虑摩擦补偿后,位置正弦跟踪过零的误差降低为原来的 20%,跟踪精度提高了近 5 倍,低速跟踪性能显著提高。

4 结论

从 Matlab 仿真和光电跟踪平台的实验验证结果可以看出,在采用传统的 PID 控制基础上,利用 Stribeck 摩擦模型及由模糊推理对参数进行在线辨识的方法对摩擦力矩进行补偿,可以改善系统的跟踪性能并提高跟踪精度,该补偿方法有很高的工程应用价值,可为高精度低速跟踪系统的摩擦补偿提供参考。

参考文献

[1] FEEMSTER M, VEDEGARBHA P, DAWSON D M, et al. Adaptive control techniques for friction compensation [J].

Mechatronics, 1998(3):125-145.

- [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]. Automatics, 1994, 30(7):1083-1138.
- [3] LISCHINSKY P, CANUDAS DE WIT C, MOREL G. Friction compensation for an industrial hydraulic robot[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(1):25-32.
- [4] 史永丽,侯朝桢. 基于自抗扰控制的伺服系统摩擦补偿研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(29):201-203. (SHI Y L, HOU C Z. Study on friction compensation in servo systems based on auto-disturbance-rejection control[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(29):201-203.)
- [5] 王忠山,王毅,苏宝库. 一种精密转台系统自适应摩擦补偿方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2007, 35(9):55-59. (WANG Z S, WANG Y, SU B K. An adaptive friction compensation method for high-precision turntable system[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2007, 35(9):55-59.)
- [6] 王璇,张娟梅,周阳. 含有 Stribeck 摩擦的高精度伺服系统相关分析辨识[J]. 光电工程, 2010, 37(12):143-146. (WANG X, ZHANG J M, ZHOU Y. Correlation analysis identification for high precision servo system with Stribeck friction[J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(12):143-146.)
- [7] 付永领,牛建军,王岩. Stribeck 模型模糊整定及其在转台控制中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 35(6):701-704. (FU Y L, NIU J J, WANG Y. Fuzzy tuning Stribeck model and its application on flight motion simulator control[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009, 35(6):701-704.)
- [8] 董立红. 基于遗传算法的直流伺服系统参数辨识及摩擦补偿控制[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(12):174-178. (DONG L H. Parameter identification of the DC servo systems and friction compensation control based on genetic algorithms[J]. Computer Engineering & Science, 2011, 33(12):174-178.)
- [9] 汤红诚,李著信. Matlab 在模糊 PID 伺服系统控制中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2003(s2):595-596, 602. (TANG H C, LI Z X. The use of Matlab in fuzzy PID servo system control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003(s2):595-596, 602.)