

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

石曛,程国扬.
基于自适应摩擦补偿的复合非线性
轨迹跟踪控制.
电机与控制应用,2021,48(9):14.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



Tz型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于自适应摩擦补偿的复合非线性 轨迹跟踪控制*

石 曠, 程国扬

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘 要: 伺服系统中存在的非线性摩擦环节, 往往会使系统的性能受到影响。针对电机伺服系统, 设计了一个复合非线性轨迹跟踪控制器, 并通过降阶扩展状态观测器对未测量的速度和未知扰动进行估计。为了消除摩擦力带来的不良影响, 在轨迹跟踪控制的基础上, 加入了自适应摩擦补偿环节。先通过 MATLAB 进行了仿真分析, 后将该方案应用于直流电机伺服系统进行试验验证。仿真与试验结果表明, 该自适应补偿方案能有效抑制摩擦产生的不利影响, 实现被控系统对目标轨迹快速准确的跟踪。

关键词: 伺服系统; 轨迹跟踪; 复合非线性控制; 摩擦补偿; 自适应

中图分类号: TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)09-0014-07

doi: 10.12177/emca.2021.077

Composite Nonlinear Trajectory Tracking Control Based on Adaptive Friction Compensation*

SHI Jian, CHENG Guoyang

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The existence of nonlinear friction often affects the performance of servo systems. A composite nonlinear trajectory tracking controller is designed for typical motor servo systems, and the unmeasured speed and unknown disturbance are estimated through a reduced-order extended state observer. In order to eliminate the adverse effects of friction, an adaptive friction compensation mechanism is added into the trajectory tracking controller. Simulation analysis is carried out through MATLAB, and then the control scheme is applied to a DC motor servo system for experimental verification. Simulation and experimental results show that the adaptive compensation scheme can effectively suppress the adverse effects of friction on the system, thereby enabling the controlled system to track the target trajectory quickly and accurately.

Key words: servo system; trajectory tracking; composite nonlinear control; friction compensation; adaptive

0 引 言

摩擦现象存在于伺服机构中产生相对运动(或趋势)的 2 个接触表面之间。摩擦力(或力矩)不但与运动速度和位移有关, 也与外部作用

力有关, 体现出复杂的非线性动态特性^[1]。特别是, 在运动速度趋于零时, 摩擦阻力的幅值反而增大, 这种 Stribeck 效应使摩擦在低速区域的影响更显著, 原因是伺服系统在接近目标位置时, 运动速度和控制力度通常均要减小, 而这时由于摩擦

收稿日期: 2021-06-01; 收到修改稿日期: 2021-07-18

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51977040)

作者简介: 石 曠(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为先进控制技术。

程国扬(1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向为控制工程与自动化、电气传动系统。

阻力变大,将导致系统减速乃至停顿下来,从而出现了稳态误差。若控制系统直接采用积分器来补偿摩擦阻力引起的静态误差,则积分器必须积累到足以克服最大静摩擦力的数值,系统才能由静止转为运动,而系统开始运动之后,摩擦阻力急剧变小(Stribeck 效应),但这时控制力度并未明显变化,将导致系统加速度增大而出现过冲。这就是伺服系统产生“爬行”现象和极限环振荡的根本原因。摩擦现象严重影响了伺服系统的性能,甚至威胁到系统的稳定性^[2-3],这在实际应用中意味着生产效率的降低和能源的浪费。因此,在设计伺服系统时,必须考虑采用适当的控制与补偿方法来消除摩擦对系统的影响,才能实现精确伺服控制^[4]。

由于摩擦的非线性、复杂性和可变性,摩擦补偿的研究往往存在许多困难,现有研究结果并没有达到让人满意的效果,目前还没有一种方法能完全消除摩擦带来的不利影响。研究人员主要从基于模型和不基于模型 2 方面进行摩擦补偿的研究。摩擦的机理较为复杂,难以建模,且摩擦力的大小可能取决于速度、位置、状态等,因此摩擦模型并不完全准确,又考虑到摩擦具有时变性,可以利用自适应技术对补偿器参数进行在线调整,从而改善摩擦补偿的效果^[5-6]。目前,国内外已经提出了各种各样的自适应技术,并应用于摩擦补偿中。文献[7]采用双观测器估计 LuGre 摩擦模型中的部分不确定性参数,提出非线性自适应反步摩擦补偿控制方法,提高了系统的控制性能。文献[8]提出基于自适应区间二型模糊逻辑系统对摩擦力进行补偿建模,并在该补偿方法的基础上设计一个鲁棒自适应控制器,提高了系统的跟踪性能。文献[9]提出了一种用于伺服机构速度控制的自适应扰动补偿方案,采用基于 LuGre 摩擦模型设计的摩擦补偿器,有效减小了反向运动时经常出现的大轮廓误差。文献[10]提出了一种带有摩擦观测器的自适应非线性控制方案,用于电动液压执行器的位置控制。文献[11]针对数控机床提出了一种对摩擦参数进行在线学习的方法,并生成摩擦补偿脉冲幅值函数,实现了摩擦的自适应补偿。

本文针对电机伺服系统,采用文献[12-13]中的控制方法,设计了一个带有扰动补偿的复合

非线性轨迹跟踪控制器,使伺服系统能对给定的目标轨迹信号进行跟踪。在轨迹跟踪控制器的基础上,加入了自适应摩擦补偿环节,进一步消除摩擦带来的不良影响,提升系统的控制性能,并通过对不同类型目标轨迹信号进行轨迹跟踪试验的方式验证该方法的有效性和自适应性。

1 复合非线性轨迹跟踪控制

本节为电机伺服系统设计一个轨迹跟踪控制律,实现对给定的目标轨迹的准确跟踪。系统的简化模型(假定摩擦力矩已预先补偿)如下^[13]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot [\text{sat}(u_c) + d] \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = [1 \ 0]$; y 为可量测的位置信号; v 为速度信号; d 为摩擦补偿之后的残余扰动信号,包括负载、模型确定性等因素; u_c 为控制输入信号,不含摩擦补偿; a 、 b 为系统模型参数; $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和限幅函数,其限幅值为 $u_{\max}$ 。

定义轨迹跟踪的误差信号为:

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} e_y(t) \\ e_v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(t) - r(t) \\ v(t) - \dot{r}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $e_y(t)$ 为位置误差; $e_v(t)$ 为速度误差; $r(t)$ 为有界的目标轨迹信号,其一阶和二阶导数均有界。

则可得:

$$\dot{e}_v(t) = a \cdot e_v(t) + b \cdot \bar{u}(t) \quad (3)$$

且有

$$\bar{u}(t) = \text{sat}[u_c(t)] + d(t) + \frac{a \cdot \dot{r}(t) - \ddot{r}(t)}{b} \quad (4)$$

则误差系统的动态方程为

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{e}(t) + \mathbf{B} \cdot \bar{u}(t) \quad (5)$$

针对系统式(5),采用文献[13]的方法,可设计一个复合非线性控制律,如下:

$$\bar{u}(t) = \{\mathbf{F} + \rho[e_y(t)] \cdot \mathbf{F}_n\} \cdot \mathbf{e}(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}$ 为状态反馈增益矩阵,使 $(\mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{F})$ 具有稳定的特征值,且系统的输出响应较快; $\mathbf{F}_n$ 为非线性反馈增益矩阵。

$\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{F}_n$ 分别如下所示:

$$\mathbf{F} = - \begin{bmatrix} \omega^2 & a + 2\zeta\omega \\ b & b \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$F_n = \begin{bmatrix} \frac{\omega^2}{b} & \frac{\omega}{b\zeta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: ζ 和 ω 为闭环主导极点的阻尼和自然频率。

$\rho[e_y(t)]$ 为非线性增益函数, 可选为

$$\rho[e_y(t)] = -\frac{\beta}{1 + \alpha \cdot |e_y(t)|} \quad (9)$$

式中: α, β 均为非负的可调参数。

为了对系统中未量测的速度信号和未知扰动进行估计, 接下来进行状态观测器的设计。考虑到扰动 d 是分段常值或慢变化的, 则 $\dot{d}=0$ 。将该方程与系统模型相结合, 可得到一个增广模型, 从而设计以下的降阶扩展状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{A}_0 \cdot \boldsymbol{\eta} + \mathbf{B}_0 \cdot \begin{bmatrix} \text{sat}(u_c) \\ y \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{v} \\ \hat{d} \end{bmatrix} = \boldsymbol{\eta} + \mathbf{C}_0 \cdot y \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}$ 为观测器内部状态量; $\hat{v}$ 和 $\hat{d}$ 分别为速度 v 和扰动 d 的估计值。

系数矩阵如下:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} -2\zeta_0\omega_0 & b \\ -\frac{\omega_0^2}{b} & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} a + 2\zeta_0\omega_0 \\ \frac{\omega_0^2}{b} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} b & (1 - 4\zeta_0^2)\omega_0^2 - 2a\zeta_0\omega_0 \\ 0 & -\frac{(a + 2\zeta_0\omega_0)\omega_0^2}{b} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ζ_0, ω_0 分别为观测器极点的阻尼系数与自然频率。

将观测器估计的值代入式(6), 可得:

$$\bar{u}(t) = [\mathbf{F} + \rho[e_y(t)] \cdot \mathbf{F}_n] \cdot \begin{bmatrix} y(t) - r(t) \\ \hat{v}(t) - \dot{r}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

再与式(4)相结合, 得到轨迹跟踪控制律为:

$$u_c(t) = \bar{u}(t) - f_d \cdot \hat{d}(t) - \frac{a \cdot \dot{r}(t) - \ddot{r}(t)}{b} \quad (13)$$

式中: f_d 为扰动补偿增益系数, 是一个可调参数, 取值范围为 $[0, 1]$, 其值越大, 则补偿效果越好, 但过大的 f_d 会使系统对噪声干扰较敏感。

2 自适应摩擦补偿

复合非线性轨迹跟踪控制律虽然可以在一定程度上进行扰动补偿, 提高伺服系统的性能, 但是系统中存在的时变非线性摩擦力矩会对系统的性能产生较大的影响。为了消除摩擦带来的不利影响, 需要对摩擦进行补偿, 本文使用的是自适应摩擦补偿方法。

本文中, 摩擦力矩建模为一个时变摩擦系数乘以一个分段函数, 如下^[14]:

$$d_f(t) = k_c(t) \cdot \sigma_0[\dot{y}(t), u(t), k_c(t)] \quad (14)$$

式中: $k_c(t)$ 为时变摩擦参数, 且 $k_c(t) \geq 0$; $\sigma_0(\cdot)$ 为一个分段函数。

$\sigma_0(\cdot)$ 定义如下:

$$\sigma_0[\dot{y}(t), u(t), k_c(t)] = \begin{cases} 1, & \dot{y}(t) > 0 \mid [\dot{y}(t) = 0 \& u(t) > k_c(t)] \\ -1, & \dot{y}(t) < 0 \mid [\dot{y}(t) = 0 \& u(t) < -k_c(t)] \\ \frac{u(t)}{k_c(t)}, & \dot{y}(t) = 0 \& |u(t)| \leq k_c(t) \end{cases} \quad (15)$$

虽然该摩擦模型不涉及复杂的数学计算, 但它包含了零速度下静摩擦力矩的主要特性, 且摩擦模型中的 $k_c(t)$ 为时变的, 因此, 该模型可以表示普遍的摩擦行为。

总控制输入 $u(t)$ 由轨迹跟踪控制的控制量 $u_c(t)$ 和摩擦补偿动作 $u_f(t)$ 组成, 即

$$u(t) = u_c(t) + u_f(t) \quad (16)$$

其中 $u_f(t)$ 定义为

$$u_f(t) = \hat{k}_c(t) \cdot \sigma_1[\dot{y}(t), u_c(t)] \quad (17)$$

式中: $\hat{k}_c(t)$ 为摩擦参数的估计值; $\sigma_1[\dot{y}(t), u_c(t)]$ 为改进的符号函数^[14]。

$\sigma_1[\dot{y}(t), u_c(t)]$ 定义如下:

$$\sigma_1[\dot{y}(t), u_c(t)] = \begin{cases} 1, & \dot{y}(t) > 0 \mid [\dot{y}(t) = 0 \& u_c(t) > 0] \\ -1, & \dot{y}(t) < 0 \mid [\dot{y}(t) = 0 \& u_c(t) < 0] \\ 0, & \dot{y}(t) = 0 \& u_c(t) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

改进的符号函数与标准 sgn 函数不同的地方是, 能确保一个足够的补偿动作。若使用标准的 sgn 函数, 则当速度为零 (即系统处于静止状态)

时,即使当前的位置不是期望的位置,摩擦补偿量也将变为零。因此,需要使用改进的 sgn 函数使系统的补偿能力进一步提高,在系统处于静止状态时,也能进行适当的补偿。只有在系统静止,且 $u_c(t)$ 为零的时候,才停止补偿。

参数 $\hat{k}_c(t)$ 使用如下的自适应更新规则^[14]:

$$\dot{\hat{k}}_c(t) = -\delta \cdot \sigma_1[\dot{y}(t), u_c(t)] \cdot [e_y(t) + \lambda \cdot e_y(t)] \quad (19)$$

式中: $e_y(t)$ 为位置误差; $e_v(t)$ 为速度误差; δ, λ 为用户定义的非负调优参数。

需要注意的是,在试验中, $y(t)$ 不可能完全等于 $r(t)$, 因此,补偿器总会保持活跃,这可能导致 $y(t)$ 在 $r(t)$ 附近产生抖振,因此需要引入死区 ε 来解决这个问题:当 $\dot{r}(t) = 0$ 且 $|e_y(t)| < \varepsilon$ 时,不进行补偿,即 $u_f(t) = \hat{k}_c(t) = 0$ 。

因此,系统的总控制输入为

$$u(t) = u_c(t) + \hat{k}_c(t) \cdot \sigma_1[\dot{y}(t), u_c(t)] \quad (20)$$

3 仿真验证

为了验证轨迹跟踪控制的效果以及自适应摩擦补偿的性能,进行仿真试验。

在仿真中,设置采样周期 $T_s = 0.1 \text{ ms}$, 二阶系统模型参数为, $a = -5, b = 260$; 轨迹跟踪控制算法的参数设置为, $\zeta = 0.3, \omega = 30 \text{ rad/s}, \zeta_0 = 0.8, \omega_0 = 100 \text{ rad/s}, \alpha = 10, \beta = 0.8, u_{\max} = 12 \text{ V}$; 摩擦补偿器的参数为, $\lambda = 25, \delta = 40, \varepsilon = 0.001$ 。

系统中的摩擦模型为

$$d_f(t) = k_c(t) \cdot \sigma_0[\dot{y}(t), u(t), k_c(t)] \quad (21)$$

$k_c(t)$ 为时变的摩擦参数:

$$k_c(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t \leq 2, \\ 2t - 3, & 2 < t \leq 4, \\ 5, & 4 < t \leq 6, \\ 17 - 2t, & 6 < t \leq 8. \end{cases} \quad (22)$$

在仿真中,给定一个正弦输入信号 $r(t) = \sin(\pi t + \pi/6)$, 系统中存在摩擦环节和一个值为 -0.5 V 的定常扰动(负载),通过仿真观察轨迹跟踪控制算法和自适应摩擦补偿的应用效果。图1~图3分别为无补偿($f_d = 0$ 且不补偿摩擦)、仅扰动补偿($f_d = 1$ 且不补偿摩擦)、扰动补偿加摩擦补偿3种情况的仿真结果。

从图1可以看出,如果既不补偿扰动也不加

入摩擦补偿,系统的输出信号与目标信号之间将出现明显的偏差,并且存在平顶现象,扰动和摩擦的存在导致了跟踪误差,而平顶现象主要是由摩擦导致的。从图1中还可以观察到,第2 s之后的跟踪效果明显不如第2 s之前的跟踪效果,这是因为摩擦力的大小发生了变化,随着摩擦力的增大,跟踪误差也越来越大,轨迹跟踪性能显著下降。

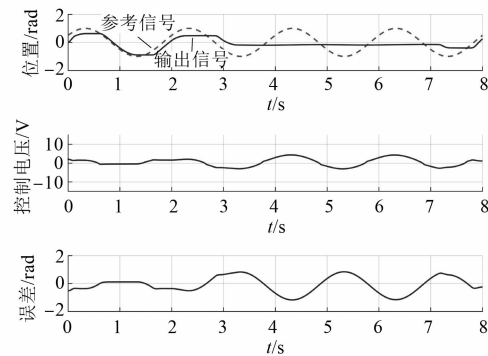


图1 无补偿时的正弦波跟踪仿真结果

从图2可以看出,扰动补偿的加入,减小了跟踪误差,但平顶现象仍然存在,这说明了扰动补偿虽能对系统中的定常扰动起到良好的抑制作用,但对系统中存在的时变摩擦并不能有效地加以抑制,因此,有必要引入额外的措施对摩擦环节进行补偿。

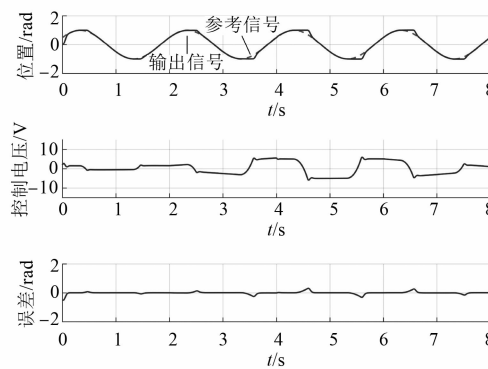


图2 仅扰动补偿的正弦波跟踪仿真结果

从图3中可以看出,在扰动补偿的基础上,再加入自适应摩擦补偿,系统的跟踪性能得到了很大的提升,消除了平顶现象,说明该补偿器有很好的补偿效果,能有效地消除摩擦环节带来的不良影响。

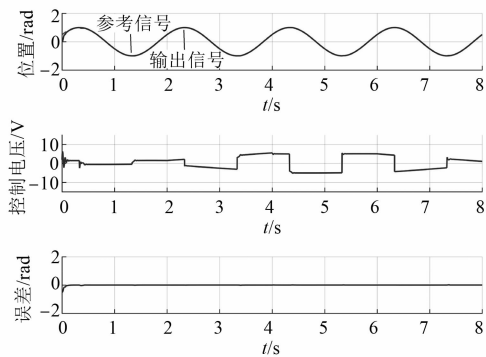


图3 扰动补偿加摩擦补偿的正弦波跟踪仿真结果

为了验证摩擦补偿方法的适应性,现将目标轨迹信号改为超越函数信号 $r(t) = 2 \cdot e^{\sin \pi t}$ 来测试轨迹跟踪效果,仿真结果如图4~图6所示。从图4可以看出,无补偿时,系统的跟踪性能较差,存在较大的跟踪误差和平顶现象。从图5可以看出,加入扰动补偿后,显著地减小了跟踪误差,但依然存在平顶现象。从图6可以看出,加入摩擦补偿后,原先存在的跟踪误差和平顶现象均被消除,系统能很好地对超越函数信号进行轨迹跟踪,摩擦补偿起到了令人满意的效果。仿真结果证明了该控制方法在不同的目标轨迹下也能实现摩擦补偿,具有自适应性。

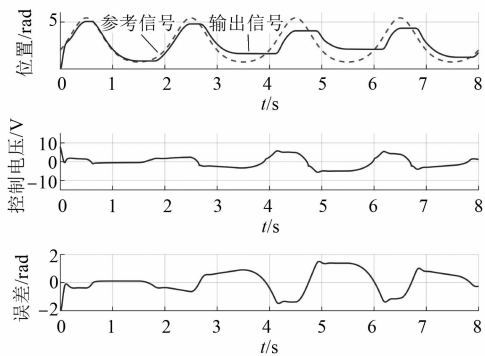


图4 无补偿时的仿真结果(超越函数)

4 试验验证

利用 TMS320F28335DSP 对复合非线性轨迹跟踪控制和自适应摩擦补偿算法进行编程,并通过一个直流电机伺服系统进行试验验证,如图7所示。

为了验证控制律中扰动补偿与自适应摩擦补

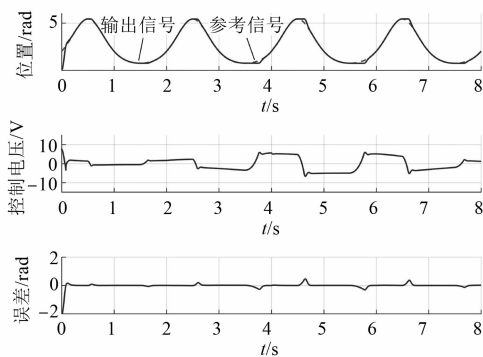


图5 仅扰动补偿的仿真结果(超越函数)

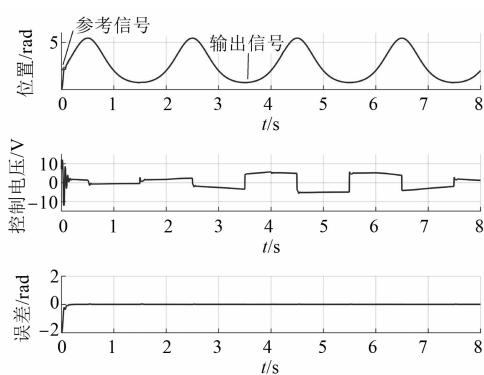


图6 扰动补偿加摩擦补偿的仿真结果(超越函数)

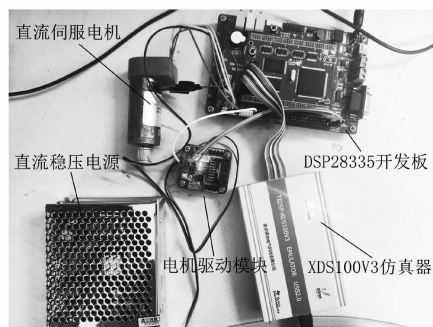


图7 直流电机伺服系统

偿的效果,将分别进行无补偿、有扰动补偿、扰动补偿加自适应摩擦补偿3种方案下的轨迹跟踪试验。试验中给定的输入信号为 $r(t) = \pi \sin 2\pi t$,并在程序中设置了一个方波信号,当方波处于高电平时,控制电机对目标轨迹进行跟踪,当处于低电平时,电机位置回零。既能看到完整的正弦波轨迹,又能看到轨迹跟踪的瞬态和稳态过程。试验的采样周期设为 $T_s = 2 \text{ ms}$,模型参数和控制律的参数设置均与仿真中相同,自适应补偿器的参数

设置为, $\lambda = 60, \delta = 4, \varepsilon = 0.001$ 。各方案的试验结果分别如图 8~图 10 所示。

由图 8 可以看出, 当控制律中无补偿($f_d = 0$)时, 系统的跟踪性能较差, 存在较大的稳态误差和明显的平顶现象。由图 9 可以看出, 加入扰动补偿(取 $f_d = 0.95$, 在控制精度和噪声敏感度之间折中), 能明显地改善系统的跟踪性能, 但仍然会存在平顶现象。由图 10 可以看到, 在扰动补偿的基础上加入自适应摩擦补偿之后, 几乎完全消除了平顶现象, 并且能够很好地进行轨迹跟踪, 降低了稳态误差, 提高了跟踪精度, 证明了所提摩擦补偿方法的有效性。

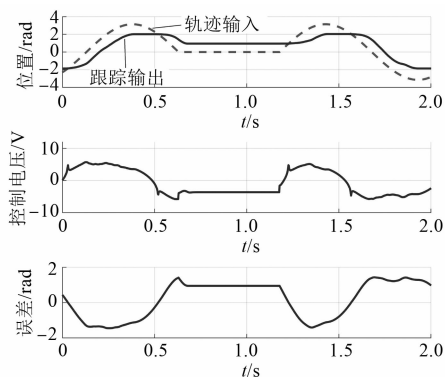


图 8 无补偿时的正弦波跟踪试验结果

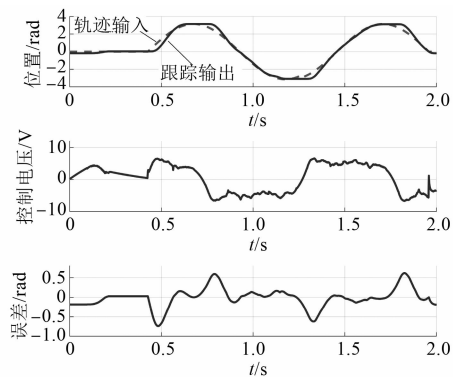


图 9 仅扰动补偿的正弦波跟踪试验结果

为了进一步验证该摩擦补偿方法的自适应性, 将输入信号改为超越函数信号 $r(t) = e^{\sin(4\pi t)}$, 再进行轨迹跟踪试验。试验结果如图 11、图 12 所示。从试验结果可以看出, 加入摩擦补偿后, 消除了原来存在的平顶现象和稳态误差, 使系统能对超越函数信号很好地进行轨迹跟踪, 说明该控制方案对不同类型的目标轨迹也能达到很好的跟

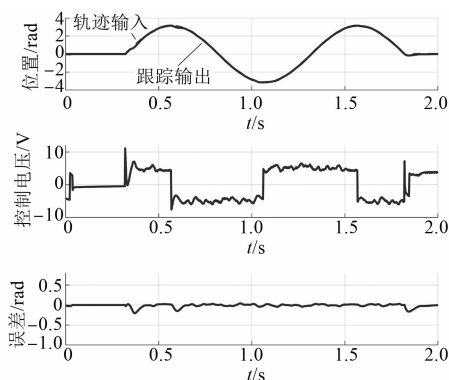


图 10 扰动补偿加摩擦补偿的正弦波跟踪试验结果

踪效果, 体现了摩擦补偿方法的适应性。

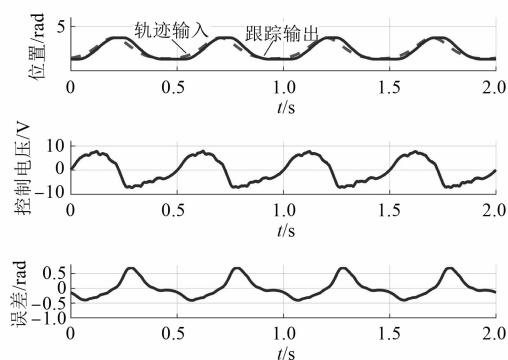


图 11 仅扰动补偿(摩擦不补偿)时的超越函数信号跟踪的试验结果

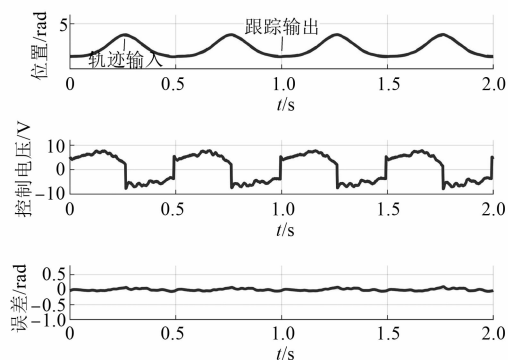


图 12 扰动补偿加摩擦补偿的超越函数信号跟踪的试验结果

5 结 语

针对电机伺服系统, 设计了一个带有扰动补偿的复合非线性轨迹跟踪控制器, 又考虑到系统中存在的非线性摩擦环节将导致系统性能的下

降,使其不能很好地对目标轨迹进行跟踪。因此,在轨迹跟踪控制的基础上,加入一个自适应摩擦补偿环节,以消除摩擦力对系统产生的不良影响。为了观察摩擦补偿的效果,在无补偿、仅扰动补偿、扰动补偿加自适应摩擦补偿3种情况下,进行了轨迹跟踪的仿真与试验。仿真与试验结果一致表明,复合非线性轨迹跟踪控制中的扰动补偿能有效改善系统的跟踪性能,但并不能很好地消除峰顶和谷底的平顶现象。而自适应摩擦补偿的加入,则消除了平顶现象,明显降低了系统的稳态误差,几乎完全消除了摩擦力带来的不良影响,实现系统对目标轨迹的准确跟踪,体现了该自适应摩擦补偿方法的有效性,并且通过给定一个不同类型的目标轨迹信号再次进行轨迹跟踪试验,证明了该方法对不同类型的目标信号也能很好地进行轨迹跟踪,具有期望的适应性。

【参考文献】

- [1] ARMSTRONG-HÉLOUVRY B, DUPONT P, DE WIT C C. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. *Automatica*, 1994, 30(7): 1083.
- [2] LEE W, LEE C, JEONG Y H, et al. Distributed component friction model for precision control of a feed drive system[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(4): 1966.
- [3] SAHA A, BHATTACHARYA B, WAHI P. A comparative study on the control of friction-driven oscillations by time-delayed feedback[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2010, 60: 15.
- [4] 马立,王敬萍,李丰甜,等.精密定位系统的摩擦力建模与补偿[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(1): 121.
- [5] 王健,蓝益鹏.基于Lyapunov稳定性理论的电励磁直线同步电机自适应控制[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(5): 7.
- [6] 刘扬,杨玮林,毕恺韬,等.基于干扰观测器的永磁同步直线电机自适应PID控制[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(4): 18.
- [7] 魏琼,焦宗夏,王君,等.基于LuGre模型的气动位置伺服系统摩擦补偿控制[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(20): 153.
- [8] 罗刚,王永富,柴天佑,等.基于区间二型模糊摩擦补偿的鲁棒自适应控制[J]. *自动化学报*, 2019, 45(7): 1298.
- [9] CHEN C, CHENG M. Adaptive disturbance compensation and load torque estimation for speed control of a servomechanism[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 59: 6.
- [10] KHEOWREE T, KUNTANAPREEDA S. Adaptive dynamic surface control of an electrohydraulic actuator with friction compensation[J]. *Asian Journal of Control*, 2015, 17(3): 855.
- [11] 冯斌,梅雪松,杨军,等.数控机床摩擦误差自适应补偿方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(11): 65.
- [12] CHENG G, PENG K. Robust composite nonlinear feedback control with application to a servo positioning system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(2): 1132.
- [13] 程国扬.鲁棒非线性伺服控制及应用[M].北京:科学出版社,2018.
- [14] VERBERT K A J, TÓTH R, BABUŠKA R. Adaptive friction compensation: a globally stable approach[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1): 351.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部