

基于摩擦补偿的直流伺服系统变增益自抗扰控制器

冯 宾, 樊卫华

(南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 针对摩擦非线性影响直流伺服系统控制性能的问题, 提出了一种基于 LuGre 模型的变增益自抗扰控制 (VGADRC) 方法。建立了含 LuGre 模型的直流伺服系统微分方程模型。基于该模型设计摩擦补偿与自抗扰控制 (ADRC) 相结合的复合控制器。该控制器在不增大观测器增益的前提下, 利用 LuGre 模型前馈补偿系统中的摩擦非线性, 同时减小量测噪声对系统的影响。此外, 为抑制传统线性扩张状态观测器 (LESO) 初始时刻引起的峰值问题, 采用三阶变增益线性扩张状态观测器 (VGLESO) 对系统中的总扰动进行估计。最后仿真结果表明, 采用所提控制方案能有效提高系统的低速跟踪性能和动态性能。

关键词: 直流伺服系统; 变增益自抗扰控制; LuGre 模型; 摩擦补偿; 量测噪声

中图分类号: TM33; TN820.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)01-0035-09

doi: 10.12177/emca.2022.155

Variable Gain Active Disturbance Rejection Controller for DC Servo System Based on Friction Compensation

FENG Bin, FAN Weihua

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The friction nonlinearity affects the control performance of the DC servo system. To solve this problem, a variable gain active disturbance rejection control (VGADRC) method is proposed. A differential equation model of the DC servo system with the LuGre model is established. Based on this model, a composite controller combining the friction compensation and the active disturbance rejection control (ADRC) is designed. Without increasing the observe gain, the LuGre model of the controller is used to feedforward compensate for the friction nonlinearity in the system. At the same time, the effect of measurement noise on the system is reduced. In addition, to suppress the initial moment peaking of the conventional linear extended state observer (LESO), the third-order variable gain linear extended state observer (VGLESO) is used to estimate the total disturbance in the system. Finally, the simulation results demonstrate that the proposed control method can effectively improve the low-speed tracking performance and dynamic performance of the system.

Key words: DC servo system; variable gain active disturbance rejection control (VGADRC); LuGre model; friction compensation; measurement noise

0 引 言

直流伺服系统作为雷达系统^[1]、光电对抗系统^[2]、精密数控机床^[3]以及机器人系统^[4]等重要核心部件,其性能直接影响上述设备的整体性

能。在伺服控制系统中,摩擦非线性是影响其稳态和动态性能的主要因素,可能使系统变得不稳定或者性能大大降低。特别在低速运行下,与中等或稳态速度运行相比,在速度换向时,摩擦非线性对直流伺服系统控制性能的影响占主导地位。

收稿日期: 2022-09-19; 收到修改稿日期: 2022-11-04

作者简介: 冯 宾(1995-),男,硕士研究生,研究方向为高精度伺服控制、自抗扰控制。

樊卫华(1975-),男,博士,副教授,研究方向为机器人控制、高性能伺服控制。

在低速跟踪和小阻尼时会引起跟踪误差较高、相位滞后、“滞滑”跳动、爬行和极限环振荡等问题。因此,为了提高直流伺服系统的低速跟踪精度和动态响应性能,需从摩擦补偿和控制器设计两方面同时入手。

为了克服摩擦非线性对直流伺服系统造成的影响,一种直接而有效的方法便是通过建立相对精确的摩擦模型,对存在直流伺服系统中的摩擦进行实时估计并加以补偿^[5]。常用的静态摩擦模型有 Stribeck 模型、Karnopp 模型和库伦摩擦模型等。但常用模型不能真实地反映摩擦的动态特性,因此不能获得良好的补偿效果。LuGre 摩擦模型采用两个接触面之间的鬃毛形变量来表征摩擦的动态特性,较为准确地描述了摩擦中的爬行、极限环振荡、变静摩擦力和斯特里贝克曲线等动态特性^[6],因此在理论和应用上受到许多学者的研究。目前,基于 LuGre 模型的控制方法主要有自适应鲁棒控制^[7]、滑模变结构控制^[8]、基于干扰观测器的补偿控制^[9]以及自抗扰控制(ADRC)^[10]等。文献[11]利用 LuGre 模型前馈补偿系统的摩擦,有效地改善了转台伺服系统的低速性能。文献[12]针对机电伺服系统低速阶段存在的摩擦非线性,提出一种基于非线性观测器摩擦补偿的自适应鲁棒控制器。该控制器利用 LuGre 模型前馈补偿摩擦非线性,并通过设计鲁棒项克服其他扰动,获得了较高的控制精度和较强的鲁棒性。文献[13]利用 LuGre 模型对光电稳定平台中的摩擦进行补偿,并通过扰动观测器对剩余的干扰进行补偿,实现了系统的高精度跟踪。文献[14]结合修正黏性摩擦 LuGre 模型建立系统的状态方程,根据反演思想设计自适应滑模控制器,提高了系统的跟踪性能。但这些方法很少能在减小摩擦非线性对系统的影响和提高系统跟踪性能的同时,改善系统的动态性能。

由 Han^[15]提出的 ADRC 是一种非线性补偿控制方法,通过扩张状态观测器实时估计系统中的总扰动并在控制信号中加以补偿。针对传统的 ADRC 结构复杂,参数众多且不够直观。文献[16]引入带宽的概念,提出了线性自抗扰控制(LADRC),推动了 ADRC 在工程领域中的应用。线性扩张状态观测器(LESO)作为 LADRC 的核心,可以将摩擦视为非线性扰动,对其实时估计并

在反馈信号中得到消除,从而抑制摩擦对系统性能的影响。但这要求 LESO 能够快速、精确地估计出摩擦。为了提高对摩擦的估计能力,LESO 就得选取较大的观测器增益,但受实际系统的带宽、量测噪声、采样时间等因素制约,观测器的增益是受限的^[17]。同时,常值高增益 LESO 由于初始时刻状态变量的估计值与系统中对应的真实值存在较大误差,会使 LESO 估计的扰动在初始时刻产生较大峰值,即存在初始峰值问题^[18]。当这样一个异常扰动直接补偿到控制器中,则会非常容易降低系统的动态性能。

综上,针对摩擦非线性影响直流伺服系统跟踪精度以及现有的控制方法不能改善系统动态性能的问题,本文提出一种基于 LuGre 模型前馈补偿的变增益自抗扰控制(VGADRC)方法。设计摩擦补偿与 ADRC 相结合的复合控制器,通过 LuGre 模型对摩擦进行前馈补偿,针对加入摩擦补偿后的系统,可能出现摩擦补偿过度或不足的现象,引入 ADRC 对其补偿,以提高系统的跟踪精度。此外,为抑制 LESO 在初始时刻产生的峰值现象,设计一种变增益线性扩张状态观测器(VGLESO),以提高系统的动态性能。最后,通过仿真验证所提控制方案在直流伺服系统中的有效性。

1 含摩擦的直流伺服系统数学模型

设直流伺服系统组成如图 1 所示,由控制器、功率放大器和直流电机组成。控制器根据角位置偏差计算得到控制量,控制量经过功率放大器放大后驱动直流电机转子转动。

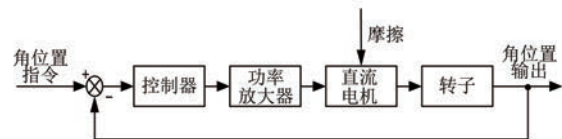


图 1 直流伺服系统组成结构图

因摩擦非线性是影响直流伺服系统低速性能的主要因素,故忽略其他非线性扰动,仅考虑摩擦非线性,简化后的直流伺服系统数学模型如图 2 所示。

图 2 中, u 为控制输入; k_p 为功率放大增益; U 为放大后的控制电压; k_e 为反电动势常数; L 为电

机的电枢电感; i 为电机的电枢电流; R 为电机的电枢电阻; k_m 为电机转矩常数; M_f 为摩擦力矩; J 为电机的转动惯量; θ 为电机的输出角度。

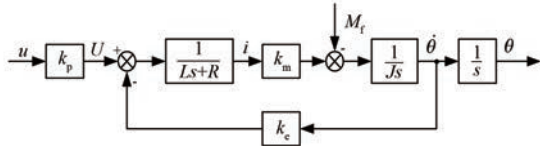


图2 含摩擦非线性的直流伺服系统结构图

根据直流伺服系统工作原理,由图2可得电压平衡方程和转矩方程:

$$\begin{cases} uk_p - k_c \dot{\theta} = L \frac{di}{dt} + Ri \\ k_m i - M_f = J \ddot{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\theta}$ 为电机的输出角速度, $\dot{\theta} = d\theta/dt$ 。

由于电机的电感很小,可以忽略,故式(1)可简化为

$$\ddot{\theta} = -\frac{k_m k_c}{JR} \dot{\theta} + \frac{k_p k_m}{JR} u - \frac{M_f}{J} \quad (2)$$

令 $m = \frac{JR}{k_m k_p}$, $a = -\frac{k_c}{k_p}$, $F_f = \frac{R}{k_m k_p} M_f$, 则式(2)重写为

$$m \ddot{\theta} = a \dot{\theta} + u - F_f \quad (3)$$

LuGre 模型描述如下:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = \dot{\theta} - \frac{\dot{\theta}(2/\pi) \arctan(k_f \dot{\theta})}{g(\dot{\theta})} z \\ M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{\theta} \\ g(\dot{\theta}) = \frac{M_c + (M_s - M_c) e^{-\left(\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_s}\right)^2}}{\sigma_0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: z 为鬃毛平均形变量; $\dot{\theta}$ 为两个接触面之间的相对速度,即电机的输出角速度; k_f 为逼近系数; σ_0 为刚性系数; σ_1 为阻尼系数; σ_2 为黏性系数; M_c 为库伦摩擦力矩; M_s 为最大静摩擦力矩; $\dot{\theta}_s$ 为 Stribeck 速度; $g(\dot{\theta})$ 为摩擦效应,恒大于零且与物体的材质、润滑度和温度等因素有关。

本文使用的 LuGre 模型参数为^[19], $M_c = 0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$, $M_s = 0.45 \text{ N}\cdot\text{m}$, $\sigma_0 = 10\ 000 \text{ N}\cdot\text{m}$, $\sigma_1 = 35 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, $\sigma_2 = 0.2 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$, $\dot{\theta}_s = 0.005 \text{ rad}/\text{s}$ 。

当系统处于稳态运行时, LuGre 模型可用来描述 Stribeck 摩擦,本文使用的 LuGre 模型所描述的 Stribeck 摩擦曲线如图3所示。

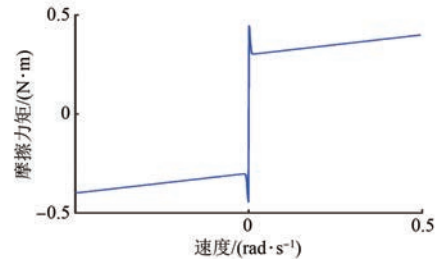


图3 Stribeck 摩擦曲线

由图3可知,系统在低速运行时,摩擦力矩具有以下两点特性:(1)摩擦力矩从静摩擦力矩到库伦摩擦力矩的快速转变,使得摩擦力矩具有负斜率特性;(2)系统在速度方向切换时,摩擦力矩具有不连续性。负斜率特性和不连续性所带来的爬行现象会大大降低系统的低速性能。因此,本文目的是设计控制器以补偿系统中的摩擦力矩。

2 VGADRC 设计

针对包含了摩擦非线性环节的直流伺服系统,常规的控制方法难以达到较高的控制精度,且系统响应时间长,为此设计 ADRC。本文设计的基于摩擦补偿的直流伺服系统 VGADRC 结构图如图4所示,该控制器是一种由前馈补偿控制与 ADRC 相结合的复合控制器,主要包含 LuGre 模型、线性跟踪微分器(LTD)、VGLESO 和线性状态误差反馈控制律(LSEF)四个部分。其中, LuGre 模型用来前馈补偿系统中的摩擦非线性, LTD 用来跟踪角位置指令并给出跟踪过程的近似微分信号, VGLESO 用来对系统的状态和系统中的总扰动进行估计, LSEF 用来对 VGLESO 估计的总扰动进行补偿。

下面分别介绍 LTD、VGLESO 和 LSEF 3 部分的设计。

2.1 LTD

通过 LuGre 模型来补偿系统中的摩擦非线性,可看作将 LuGre 模型输出的摩擦力矩,利用系数变换施加到控制输入端,即可补偿摩擦对系统的影响^[20]。对应图4,经过系数变换后的摩擦补偿力矩 F_{fc} 为

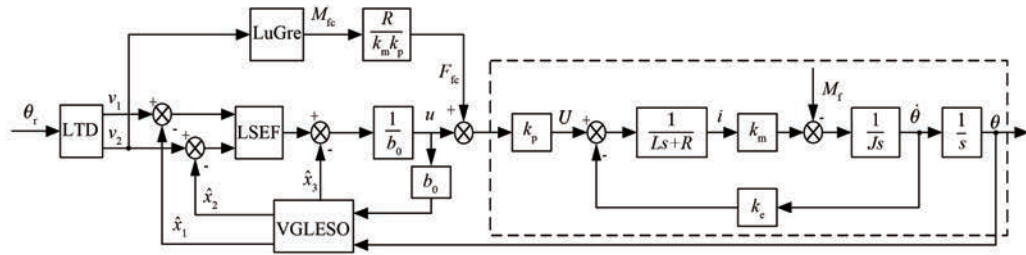


图4 基于摩擦补偿的直流伺服系统 VGADRC 结构图

$$F_{fc} = \frac{R}{k_m k_p} M_{fc} \quad (5)$$

式中: M_{fc} 为摩擦补偿力矩。

对直流伺服系统进行位置控制时, 由于期望信号为位置信号, 而 LuGre 模型的输入信号为速度信号, 为避免对给定位置信号进行微分引入噪声, 采用二阶跟踪微分器(TD)为指令信号安排过渡过程^[21]。

对于传统的 TD, 由于采用的是非线性函数, 不仅编程复杂且计算量大, 为便于系统设计, 将 TD 线性化, 描述如下^[22]:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -r^2(v_1 - \theta_r) - 2rv_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_r 为期望的位置信号; v_1 为安排过渡过程后的位置信号; v_2 为位置信号 θ_r 的近似微分信号; r 为跟踪因子。

2.2 VGLESO

对于固定摩擦参数的 LuGre 模型, 在实际工况条件下, 当系统的摩擦参数发生改变时, LuGre 模型所补偿的摩擦力矩会与实际的摩擦力矩产生差异, 导致摩擦过补偿或欠补偿的情况发生。为了对残余摩擦扰动进行抑制, 采用 LESO 对其估计和补偿。针对 LESO 初始时刻估计值与真实值不一致所引起的峰值现象, 一种三阶 VGLESO 设计如下。

对系统加入摩擦补偿力矩 M_{fc} 后, 则式(2)可改写为

$$\ddot{\theta} = -\frac{k_m k_e}{JR} \dot{\theta} + \frac{k_p k_m}{JR} u - \frac{M_f}{J} + \frac{M_{fc}}{J} \quad (7)$$

令 $a_1 = \frac{k_m k_e}{JR}$, $a_2 = \frac{1}{J}$, $b = \frac{k_p k_m}{JR}$, 且有 $b_0 \approx b$ 。

则式(7)可表示为

$$\ddot{\theta} = -a_1 \dot{\theta} + bu - a_2 M_f + a_2 M_{fc} \quad (8)$$

定义 $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$, 其中, $x_1 = \theta$ 为系统的角位置输出, $x_2 = \dot{x}_1$ 为系统的角速度输出, $x_3 = f = -a_1 \dot{\theta} + (b - b_0)u - a_2 M_f + a_2 M_{fc}$ 为系统的总扰动。

则式(8)的扩张状态方程可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = h \\ \theta = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_1, x_2, x_3 为状态变量; $h = \dot{f}$ 。

注1 上述中的总扰动 $f = -a_1 \dot{\theta} + (b - b_0)u - a_2 M_f + a_2 M_{fc}$ 由摩擦力矩、摩擦补偿力矩和系统未建模动态组成。

建立式(9)的扩张状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = l_1(t)x_1 - l_1(t)\hat{x}_1 + \hat{x}_2 \\ \dot{\hat{x}}_2 = l_2(t)x_1 - l_2(t)\hat{x}_1 + b_0 u + \hat{x}_3 \\ \dot{\hat{x}}_3 = l_3(t)x_1 - l_3(t)\hat{x}_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3$ 分别为状态 x_1, x_2, x_3 的估计值; $\mathbf{L}(t)$ 为观测器的时变增益, $\mathbf{L}(t) = [l_1(t) \ l_2(t) \ l_3(t)]^T$ 。

定义 $[e_1 \ e_2 \ e_3]^T = [x_1 - \hat{x}_1 \ x_2 - \hat{x}_2 \ x_3 - \hat{x}_3]^T$, 则由式(9)~式(10)可得, 观测器的估计误差方程为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - l_1(t)e_1 \\ \dot{e}_2 = e_3 - l_2(t)e_1 \\ \dot{e}_3 = h - l_3(t)e_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: e_1, e_2, e_3 分别为状态 x_1, x_2, x_3 的观测估计误差。

将式(11)写成矩阵的形式为

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{e} + \mathbf{b}h \quad (12)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}(t) = \begin{bmatrix} -l_1(t) & 1 & 0 \\ -l_2(t) & 0 & 1 \\ -l_3(t) & 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

为了设计出合适的 $\mathbf{L}(t) = [l_1(t) \ l_2(t) \ l_3(t)]^T$, 以确保式(12)是稳定的。利用引理1将式(11)转换成另一种等价形式:

$$\dot{z} = \mathbf{A}_c(t)z + \mathbf{b}_c h \quad (13)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}_c(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_1(t) & -a_2(t) & -a_3(t) \end{bmatrix}; \mathbf{b}_c =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; a_1(t), a_2(t) \text{ 和 } a_3(t) \text{ 为变增益的参数, 假定}$$

是光滑且有界的。

引理 若式(12)和式(13)是完全可控的, 则存在非奇异线性变换 $z = \mathbf{P}(t)e$, 使得式(12)与式(13)是等价的^[23]。

定义式(12)的可控性矩阵为

$$\mathbf{M}(t) = [\mathbf{M}_0(t) \ \mathbf{M}_1(t) \ \mathbf{M}_2(t)] \quad (14)$$

式中: $\mathbf{M}_0(t), \mathbf{M}_1(t), \mathbf{M}_2(t)$ 均为列向量。

由可控性矩阵有:

$$\begin{cases} \mathbf{M}_{i+1}(t) = -\mathbf{A}(t)\mathbf{M}_i(t) + \frac{d}{dt}\mathbf{M}_i(t), \\ i = 0, 1 \\ \mathbf{M}_0(t) = \mathbf{b} \end{cases} \quad (15)$$

则式(14)可重写为

$$\mathbf{M}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

同理, 定义式(13)的可控性矩阵为 $\mathbf{M}_c(t)$ 。由式(14)~式(15)可得, $\mathbf{M}_c(t)$ 可表示为

$$\mathbf{M}_c(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -a_3(t) \\ 1 & a_3(t) & -a_2(t) + a_3^2(t) + \dot{a}_3(t) \end{bmatrix} \quad (17)$$

由式(16)~式(17)可知, 式(12)~式(13)是完全可控的。故由引理可得, 存在非奇异线性变换 $z = \mathbf{P}(t)e$, 变换矩阵 $\mathbf{P}(t)$ 可表示为

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{M}_c(t)\mathbf{M}^{-1}(t) \quad (18)$$

使得式(12)与式(13)是等价的。

将 $z = \mathbf{P}(t)e$ 代入式(11)和式(12)可得:

$$\begin{cases} \mathbf{A}(t) = \mathbf{P}^{-1}(t)[\mathbf{A}_c(t)\mathbf{P}(t) - \dot{\mathbf{P}}(t)] \\ \mathbf{b} = \mathbf{P}^{-1}(t)\mathbf{b}_c \end{cases} \quad (19)$$

则由式(18)~式(19)可得, 观测器的时变增益 $l_1(t), l_2(t)$ 和 $l_3(t)$ 可由 $a_1(t), a_2(t), a_3(t)$ 及其导数表示为

$$\begin{cases} l_1(t) = a_3(t) \\ l_2(t) = a_2(t) - 2\dot{a}_3(t) \\ l_3(t) = a_1(t) + \ddot{a}_3(t) - \dot{a}_2(t) \end{cases} \quad (20)$$

至此, $\mathbf{L}(t) = [l_1(t) \ l_2(t) \ l_3(t)]^T$ 的设计问题也转变成如何设计变增益参数 $a_1(t), a_2(t)$ 和 $a_3(t)$ 以确保 VGLESO 是稳定的。

为了设计 $a_1(t), a_2(t)$ 和 $a_3(t)$, 本文采用微分算子谱理论, 通过分配合适的并行微分根 $\rho_i(t)$ 以得到 $a_1(t), a_2(t)$ 和 $a_3(t)$ 并确保 VGLESO 的稳定性和估计误差有界。

令式(12)的特征根为

$$\rho_i(t) = \bar{\rho}_i \omega(t), \quad i = 1, 2, 3 \quad (21)$$

式中: $\rho_i(t)$ 为 VGLESO 中的特征根; $\bar{\rho}_i$ 为 LESO 中的特征根; $\omega(t)$ 为时变函数。

选取 LESO 中的特征根为

$$\bar{\rho}_{1,2,3} = -\omega_0 \quad (22)$$

式中: ω_0 为观测器增益, $\omega_0 > 0$, 确保 LESO 的稳定。

根据微分算子谱理论, 变增益参数 $a_1(t), a_2(t)$ 和 $a_3(t)$ 选取以下形式^[24]:

$$\begin{cases} a_1(t) = -\bar{\rho}_1 \bar{\rho}_2 \bar{\rho}_3 \omega^3(t) \\ a_2(t) = (\bar{\rho}_1 \bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_1 \bar{\rho}_3 + \bar{\rho}_2 \bar{\rho}_3) \omega^2(t) + (\bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_3) \dot{\omega}(t) - \ddot{\omega}(t) / \omega(t) + 3\dot{\omega}^2(t) / \omega^2(t) \\ a_3(t) = -(\bar{\rho}_1 + \bar{\rho}_2 + \bar{\rho}_3) \omega(t) - 3\dot{\omega}(t) / \omega(t) \end{cases} \quad (23)$$

定义 $\omega_n(t) = \omega_0 \omega(t)$, 则由式(22)~式(23)可得:

$$\begin{cases} a_1(t) = \omega_n^3(t) \\ a_2(t) = 3\omega_n^2(t) - 3\dot{\omega}_n(t) - \ddot{\omega}_n(t) / \omega_n(t) + 3\dot{\omega}_n^2(t) / \omega_n^2(t) \\ a_3(t) = 3\omega_n(t) - 3\dot{\omega}_n(t) / \omega_n(t) \end{cases} \quad (24)$$

则式(20)可重写为

$$\begin{cases} l_1(t) = 3\omega_n(t) - 3\dot{\omega}_n(t)/\omega_n(t) \\ l_2(t) = 3\omega_n^2(t) - 9\dot{\omega}_n(t) + 5\ddot{\omega}_n(t)/\omega_n(t) - \\ \quad 3\dot{\omega}_n^2(t)/\omega_n^2(t) \\ l_3(t) = \omega_n^3(t) - 6\omega_n(t)\dot{\omega}_n(t) + 6\ddot{\omega}_n(t) - \\ \quad 2\ddot{\omega}_n(t)/\omega_n(t) + 2\dot{\omega}_n(t)\dot{\omega}_n(t)/\omega_n^2(t) \end{cases} \quad (25)$$

至此, $l_1(t)$ 、 $l_2(t)$ 和 $l_3(t)$ 的设计问题最终转化为 $\omega_n(t) = \omega_0 \omega(t)$ 中 $\omega(t)$ 的设计问题。本文选取时变函数 $\omega(t)$ 为

$$\omega(t) = \frac{1}{1 + e^{-kt}} \quad (26)$$

式中: k 为指数因子, 是正常数。

式(26)可以使 $\omega_n(t)$ 在初始阶段为一较小的值, 然后迅速增大到常值 ω_0 , 从而削弱初始阶段产生的峰值现象。

注 2 $\omega_n(t) = \omega_0 \omega(t)$ 中观测器增益 ω_0 的取值一般需根据性能指标、实际系统带宽与量测噪声之间综合考虑。时变函数 $\omega(t)$ 中指数因子 k 取值越大, 观测器增益增大到常值 ω_0 的速度越快, 对状态及扰动的估计越快, 但峰值抑制能力越弱。经过仿真调试, 本文 k 值取为 50。

2.3 LSEF

VGLESO 可实时估计出系统的总扰动, 并通过反馈控制律进行补偿, 方程如下:

$$u(t) = \frac{k_p(v_1 - \hat{x}_1) + k_d(v_2 - \hat{x}_2) - \hat{x}_3}{b_0} \quad (27)$$

式中: k_p 为比例系数; k_d 为微分系数。

增大 k_p 可以加快系统的响应速度, 但过大会引起系统振荡; 过小的 k_d 会使系统不稳定, 产生振荡发散^[25]。

注 3 通常情况下, 先将 k_p 选取为一个较大值, k_d 选取为一个较小值, 然后根据性能指标依次调整 k_p 和 k_d 。

3 仿真实验

为了验证所提摩擦补偿方案和 VGADRC 设计的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中建立直流伺服系统仿真模型进行仿真研究, 仿真中所使用的直流伺服系统模型参数为, $m = 0.49, a = -1.41$ 。

3.1 低速跟踪仿真

为了模拟实际应用中因摩擦参数发生变化, 前馈补偿不准的情况, 将式(5)中经过系数变换后的摩擦补偿力矩 F_{fc} 在仿真中取为 $0.90F_{fc}$, 并在系统输出端添加方差为 0.000 1% 的高斯白噪声, 以验证欠补偿和摩擦计算值不准时使用所提方法的有效性。

给定位置指令为 $\theta_r = 0.1 \sin(0.2\pi t)$ rad, 采用未加摩擦补偿且观测器增益 $\omega_0 = 100$, 未加摩擦补偿且观测器增益 $\omega_0 = 300$, 增加摩擦补偿且观测器增益 $\omega_0 = 100$ 三种控制方式比较低速跟踪性能。三种方式均采用 VGLESO, 其三种控制方式的控制器参数除了观测器增益不同外均为 $k_p = 2\ 500, k_d = 200, b_0 = 2, r = 50$ 。三种控制方式低速跟踪仿真曲线如图 5 和图 6 所示。其位置跟踪误差峰值和速度跟踪误差峰值如表 1 所示。

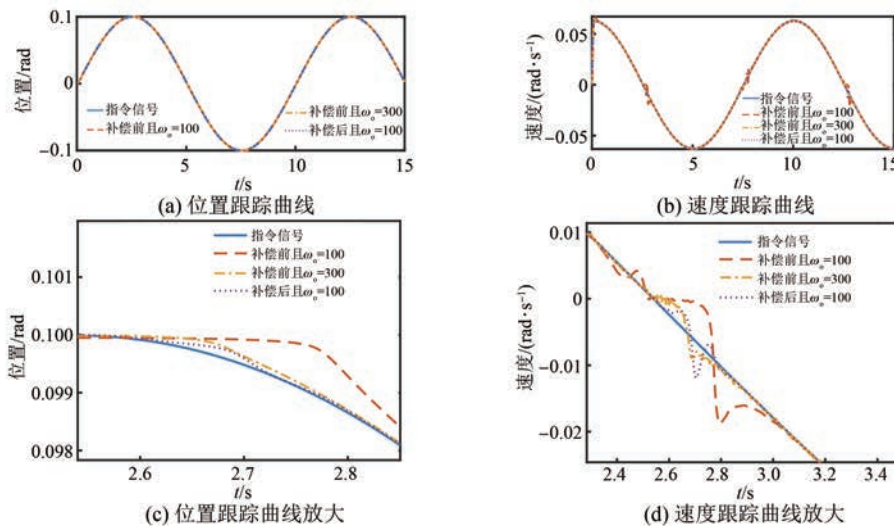


图 5 低速跟踪曲线

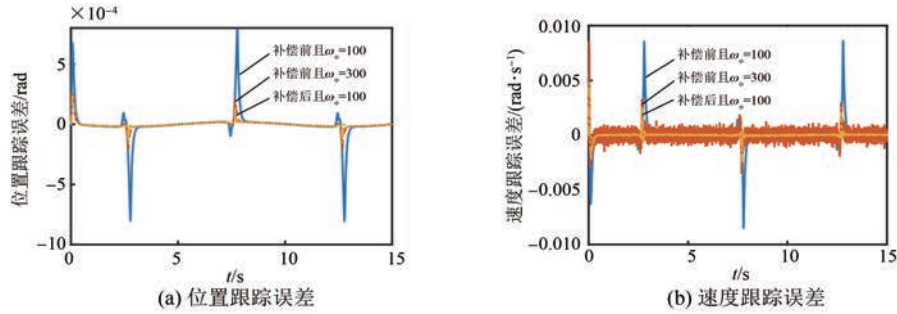


图 6 低速跟踪误差

表 1 不同方式下的跟踪误差峰值比较

跟踪误差	补偿前且	补偿前且	补偿后且
	$\omega_o = 100$	$\omega_o = 300$	$\omega_o = 100$
位置误差峰值/rad	0.000 79	0.000 21	0.000 15
速度误差峰值/(rad·s ⁻¹)	0.008 6	0.003 3	0.002 5

由图 5 可以看出,若未对摩擦进行补偿,系统在速度换向时,位置跟踪曲线和速度跟踪曲线分别出现“平顶”现象和“死区”现象。增大观测器增益 ω_o 。虽然可以使观测器更加快速和准确的估计摩擦扰动,从而减弱摩擦对系统的影响,但同时也放大了量测噪声,使得速度信号受到严重污染。而加入摩擦补偿后的系统,在不增大观测器增益且系统中存在欠补偿以及量测噪声的前提下,仍可以有效减弱摩擦带来的不良影响。

由图 6(a)和图 6(b)可得,位置跟踪误差和速度跟踪误差均存在一个较大的峰值,该峰值正是系统在换向时摩擦非线性所引起的位置平顶和速度死区所导致的。分析表 1 可得,采用摩擦补偿后的系统,其位置跟踪误差不超过 0.000 15 rad,速度跟踪误差不超过 0.002 5 rad/s,说明所设计的摩擦补偿方案能够有效降低系统的位置和速度跟踪误差,提高系统的低速跟踪精度。

为了验证所提 VGLESO 能较好地抑制初始时刻的峰值现象,对摩擦补偿过后的系统分别采用 LESO 和 VGLESO 进行控制,其控制器参数均为 $k_p = 2\ 500, k_d = 200, \omega_o = 100, b_0 = 2, r = 50$ 。两种控制方式下的低速跟踪误差曲线如图 7 所示。

由图 7 摩擦补偿后系统低速跟踪误差曲线可知,与 LESO 相比,采用 VGLESO 的控制器由于削弱了初始阶段的峰值现象,其初始时刻的位置跟踪误差和速度跟踪误差均有所减少。

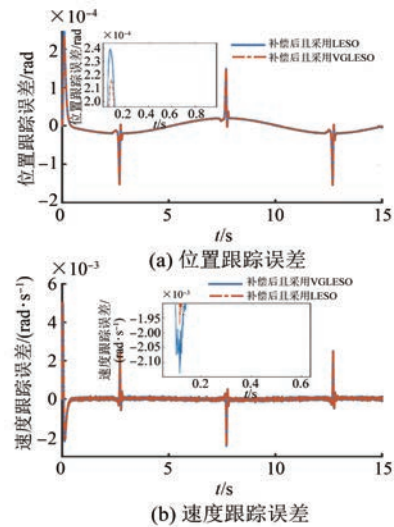


图 7 补偿后低速跟踪误差

3.2 暂态响应仿真

为进一步验证所提变增益控制方案可以有效抑制初始峰值现象。给定位置指令为阶跃信号 $\theta_r = 1\text{ rad}$,分别使用摩擦补偿前且采用 LESO、摩擦补偿后且采用 LESO 和摩擦补偿后且采用 VGLESO 三种方式进行控制。系统初始状态为 $\mathbf{x} = [0\ 0\ 0]^T$,LESO 和 VGLESO 初始状态均为 $\hat{\mathbf{x}} = [-0.01\ 0\ 0]^T$,三种控制方式的控制器参数经过反复调参后,选取最优值均为 $k_p = 3\ 000, k_d = 750, \omega_o = 100, b_0 = 2, r = 50$ 。图 8 为三种方式下的阶跃响应曲线,图 9 为 LESO 和 VGLESO 两种方式下的观测器增益变化曲线。

由图 8 和图 9 可知,无摩擦补偿且采用 LESO 控制方式下的阶跃响应超调量为 0.006 27 rad,有摩擦补偿且采用 LESO 控制方式的超调量为 0.004 82 rad,而有摩擦补偿且采用 VGLESO 方式下的阶跃响应无超调;采用 LESO 方式的控制器在 1 s 时仍未达到稳态值 1 rad,而采用 VGLESO

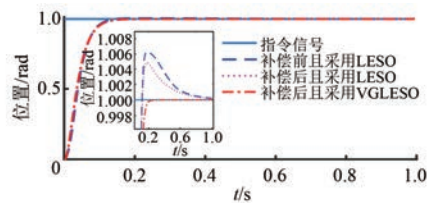


图8 位置阶跃响应

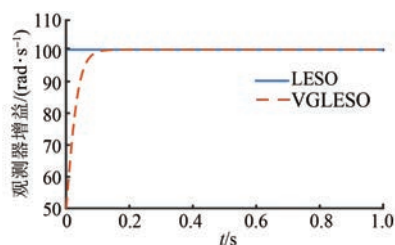


图9 观测器增益变化

方式的控制器在 0.3 s 时就达到稳态值 1 rad。这是因为 LESO 在初始阶段的观测器增益为一较大的常值 ω_o ，从而使系统出现了初始峰值。VGLESO 在初始阶段选择了较小的观测器增益，然后迅速增大至常值 ω_o ，所以较好地抑制了这一现象，改善了系统的动态性能。

4 结 语

为了抑制摩擦非线性对直流伺服系统控制性能的影响，本文设计了一种基于 LuGre 模型前馈补偿的 VGADRC，在不增大观测器增益的前提下，利用 LuGre 模型对系统低速区的摩擦非线性进行补偿，减弱了低速跟踪时产生的“平顶”和“死区”现象。同时，本文设计的 VGLESO，有效地抑制了传统观测器存在的初始峰值问题，提高了系统的动态性能。仿真结果表明，直流伺服系统的低速跟踪精度明显提高，位置阶跃响应快速无超调，验证了所提控制方案的有效性。

【参 考 文 献】

[1] 姜仁华, 刘闯, 宁银行, 等. 雷达伺服系统的高跟踪精度改进型自抗扰控制器 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 102.
 [2] 张通彤, 姜湖海, 岳巍, 等. 基于径向基函数神经网络的光电系统自适应控制 [J]. 兵工学报, 2022, 43(3): 556.
 [3] HUANG W, LIU C, HSU P, et al. Precision control

and compensation of servomotors and machine tools via the disturbance observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 420.

[4] MATTILA J, KOIVUMAKI J, CALDWELL D G, et al. A survey on control of hydraulic robotic manipulators with projection to future trends [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(2): 669.
 [5] 王正玺, 张葆, 李贤涛, 等. 航空光电稳定平台高性能摩擦力补偿方案 [J]. 航空学报, 2017, 38(12): 277.
 [6] YU Y, LI Y, LI J. Parameter identification and sensitivity analysis of an improved LuGre friction model for magnetorheological elastomer base isolator [J]. Meccanica, 2015, 50: 2691.
 [7] 郭健, 季晶晶, 杨帆, 等. 基于 LuGre 摩擦模型的伺服系统自适应鲁棒控制器 [J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 779.
 [8] 徐智浩, 李胜, 张瑞雷, 等. 基于 LuGre 摩擦模型的机械臂模糊神经网络控制 [J]. 控制与决策, 2014, 29(6): 1097.
 [9] 季画, 王爽, 黄苏融, 等. 基于扰动观测器的伺服系统扰动抑制研究 [J]. 微特电机, 2017, 45(4): 57.
 [10] LI M, ZHAO J, HU Y, et al. Active disturbance rejection position servo control of PMSLM based on reduced-order extended state observer [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2020, 6(2): 30.
 [11] 叶超, 崔宁豪, 马正雷, 等. 基于 LuGre 模型的伺服系统摩擦补偿策略研究 [J]. 微电机, 2019, 52(5): 53.
 [12] 李曦, 胡健, 姚建勇, 等. 基于观测器摩擦补偿的机电系统高精度控制 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(6): 1150.
 [13] 晋超琼, 张葆, 李贤涛, 等. 基于扰动观测器的光电稳定平台摩擦补偿策略 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(6): 1876.
 [14] 谭文斌, 李醒飞, 裘祖荣, 等. 基于改进型 LuGre 模型的自适应滑模摩擦补偿方法 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(5): 463.
 [15] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900.
 [16] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.

- [17] 陈志翔, 高钦和. 自适应扩张状态观测器收敛性分析与应用 [J]. 控制理论与应用, 2018, 35(11): 1697.
- [18] GUO B, ZHAO Z. Active disturbance rejection control: theoretical perspectives [J]. Communications in Information and Systems, 2015, 15(3): 361.
- [19] 杜仁慧, 吴益飞, 陈威, 等. 考虑 LuGre 摩擦的伺服系统自适应模糊控制 [J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1253.
- [20] 李浩东, 李长兵. 永磁同步伺服系统摩擦力和扰动补偿方法研究 [J]. 电机与控制应用, 2022, 49(1): 22.
- [21] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望 [J]. 控制理论与应用, 2017, 34(3): 281.
- [22] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 57.
- [23] SILVERMAN L. Transformation of time-variable systems to canonical (phase-variable) form [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(2): 300.
- [24] PU Z, YUAN R, YI J, et al. A class of adaptive extended state observers for nonlinear disturbed systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5858.
- [25] 郑伟, 董文妍, 张焕鑫, 等. 自抗扰控制器在位置伺服系统中的参数整定及仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(10): 3364.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被 JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)和 Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djykyzy/home>。

招聘信息

无锡市明通动力工业有限公司诚聘英才:

1、高压工业电机冷却器设计工程师 1 名,车间管理干部 1 名

2、电机设计工程师,任职要求:工业电机制造行业工程技术岗位 5 年及以上

3、生产、质量管理干部各 1 名,任职要求:工业电机或机制制造行业生产、质量管理岗位 3 年及以上

4、待遇从优

5、联系电话:0510-83322398