

# 基于改进自抗扰的永磁同步电机位置伺服系统

贾红敏, 张立广, 闫 翌

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 为了提高系统对未知扰动和参数变化的鲁棒性, 将自抗扰控制(ADRC)策略引入到永磁同步电机(PMSM)位置伺服系统中, 并对 ADRC 策略进行改进, 使系统满足高性能伺服控制要求。通过对 ADRC 中扩张状态观测器(ESO)结构的改进, 提高观测器对扰动的观测速度。同时, 针对 ADRC 中使用的转动惯量与实际惯量间存在误差, 会影响速度 ADRC 控制器中控制增益的选取, 采用在线惯量辨识方法, 实时调节控制器参数。综合以上 2 点改进措施, 分别设计转速环、位置环改进 ADRC 控制器, 从根本上提高系统的动态性能和抗扰动能力。最后, 通过仿真验证改进 ADRC 策略在 PMSM 位置伺服系统中的有效性。

**关键词:** 永磁同步电机; 位置伺服系统; 自抗扰控制; 改进扩张状态观测器; 转动惯量

**中图分类号:** TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)10-0033-07

**doi:** 10.12177/emca.2020.111

## Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo System Based on Improved Active Disturbance Rejection Control

JIA Hongmin, ZHANG Liguang, YAN Zhao

(College of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to improve the system's robustness to unknown disturbances and parameter changes, the active disturbance rejection control (ADRC) strategy is introduced into the permanent magnet synchronous motor (PMSM) position servo system, and the ADRC strategy is improved to make the system meet the requirements of high servo control performance. By improving the structure of the extended state observer (ESO) in ADRC, the observation speed of observer is increased. At the same time, in view of the error between the actual moment of inertia and the inertia used in ADRC, which affects the selection of the control gain in the speed ADRC controller, an online inertia identification method is adopted to adjust the controller parameter in real time. Based on the above two improvement measures, the improved ADRC controllers for the speed and position loops are designed, fundamentally improving the dynamic performance and anti-disturbance capability of the system. Finally, the effectiveness of the improved ADRC strategy in the PMSM position servo system is verified by simulation.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); position servo system; active disturbance rejection control (ADRC); improved extended state observer; moment of inertia

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、响应速度快、过载能力强、稳定性能好等优点, 广泛应

用于工业机器人、数控机床、武器随动系统等位置伺服控制领域。PMSM 是一个多变量、强耦合、时变的非线性控制对象。在实际应用中, 许多不确定的内外扰动又会导致控制器的性能下降。传统

收稿日期: 2020-06-09; 收到修改稿日期: 2020-07-23

作者简介: 贾红敏(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算机测控系统。

张立广(1979—), 男, 副教授, 研究方向为运动控制、智能控制。

闫 翌(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为计算机测控系统。

位置伺服系统仍以 PID 控制为主, PID 控制器具有结构简单、实用性强的特点,但其控制策略是依据线性非时变系统设计的,在面对非线性、模型参数时变的复杂系统时,难以兼顾系统的跟踪性能和抗扰性能<sup>[1-2]</sup>。

自抗扰控制(ADRC)技术是由韩京清<sup>[3-4]</sup>提出的一种不依赖被控对象数学模型的非线性控制方法,能够通过扩张状态观测器(ESO)实时观测系统的内外总扰动并进行前馈补偿,具有鲁棒性强、控制精度高等优点,已广泛应用于 PMSM 控制领域。基于非线性 ADRC 的思想, Gao 等<sup>[5-7]</sup>提出一种线性自抗扰控制器(LADRC),调节参数少、结构简单且参数整定方便,可根据控制对象的带宽设计控制器的参数。此外,由于 ESO 对扰动的观测性能依赖于系数  $b$ ,即转矩常数  $K_t$  与转动惯量的比值,通常  $K_t$  恒定,而系统的转动惯量会因为负载的不同而发生变化。在未知惯量或者变惯量的应用场合,如果不相应调整控制器的参数  $b$ ,系统的控制性能将很难得到保证,而目前分析转动惯量变化对转速环 ADRC 控制性能影响的文献较少。

针对以上问题,本文设计了一种 PMSM 改进自抗扰位置伺服系统。首先,对速度环 ADRC 控制器改进 ESO 部分,提高其对扰动的观测速度;再通过参数辨识的方法辨识出转动惯量并据此修正 ADRC 的参数  $b$ ,提升速度 ADRC 控制器的观测精度和抗扰性能;其次,设计基于改进 ESO 的位置环 ADRC 控制器,构建完整的 PMSM 位置伺服系统;最后,采用基于带宽的整定方法得到控制器各参数,并通过仿真验证改进 ADRC 在 PMSM 位置伺服系统中的有效性。

## 1 PMSM 数学模型

本文以表贴式 PMSM 为被控对象,在进行合理的假设后,建立  $d$ - $q$  旋转坐标系下的电压方程:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

电磁转矩和运动方程为

$$T_e - T_L - B\omega_r = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  为定子电压在  $d$ 、 $q$  轴的分量;  $R_s$ 、 $\psi_f$ 、 $\omega$  分别为定子电阻、转子磁链和转子电角速度;  $i_d$ 、 $i_q$  为定子电流在  $d$ 、 $q$  轴的分量;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电感,  $L_d = L_q$ ;  $T_e$  为电磁转矩;  $T_L$  为负载转矩;  $\omega_r$  为转子机械角速度;  $B$  为黏滞摩擦系数;  $J$  为转动惯量。

## 2 线性 ADRC 设计

线性 ADRC 由线性微分跟踪器(LTD)、线性扩张状态观测器(LESO)和线性状态误差反馈(LSEF)3部分组成<sup>[8]</sup>。本节详细讨论转速环一阶 LADRC 的设计方法。对于相同阶数的 LADRC,其控制器结构是统一的,可采用相同的设计方法<sup>[9]</sup>,在此对位置环一阶 LADRC 的设计不再叙述。

LADRC 的阶数由被控对象的阶数决定<sup>[10]</sup>,由于转速环、位置环均可表示为一阶系统数学模型,因此转速环、位置环控制器均设计为一阶 LADRC。LTD 主要用于对给定信号进行合理的过渡,缓和连续变化的给定信号和连续变化的反馈信号之间的矛盾。在 PMSM 位置伺服系统中,当位置环的给定信号为阶跃信号时,为了避免引起超调,位置环的 LTD 环节用一阶惯性环节  $1/(1+\tau s)$  设计,而转速环的给定是位置环的连续输出信号,则转速环 LTD 可以省略。

LESO 主要用来估计电机转速和转速环总扰动量。由式(2)和式(3)可得:

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J}(1.5p\psi_f i_q - B\omega_r - T_L) \quad (4)$$

将式(4)写成:

$$\dot{\omega}_r = f_\omega + b_0 i_q \quad (5)$$

式中:  $f_\omega$  表示转速环的内外总扰动量,  $f_\omega = (1.5p\psi_f i_q - B\omega_r - T_L)/J - b_0 i_q$ 。

令  $x_1 = \omega_r$ ,  $x_2 = f_\omega$ ,  $u = i_q$ , 将式(5)写成状态方程的形式:

$$\dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \quad (6)$$

为了方便设计 LESO,将式(6)用矩阵表示:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Eh \\ y = Cx \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ;  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ;  $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix}$ ;  $C = [1 \ 0]$ ;

$h$  为转速环总扰动量的一阶导数,  $h = \dot{f}_\omega$ 。

根据式(7), 结合 Luenberger 状态观测器<sup>[11]</sup>设计原则建立 LESO 的方程:

$$\begin{cases} \dot{z} = Az + Bu + L(x_1 - z_1) \\ y = Cz \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $L$  为 LESO 的增益矩阵,  $L = [\beta_1 \beta_2]^T$ ;  $x_1$  为转速的实际值;  $z_1$  为转速的观测值。

将式(8)展开可得:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}}_r = \dot{f}_\omega + b_0 i_q + \beta_1 (\omega_r - \hat{\omega}_r) \\ \dot{\hat{f}}_\omega = \beta_2 (\omega_r - \hat{\omega}_r) \end{cases} \quad (9)$$

LESEF 主要用于抵消扰动, 由式(5)可知要抵消转速环扰动量的影响, 应选取  $b_0 i_q = u_0 - \hat{f}_\omega$ , 则式(5)可表示为

$$\dot{\omega}_r = u_0 + f_\omega - \hat{f}_\omega \approx u_0 \quad (10)$$

由式(10)可知, 经过扰动补偿后, 转速环可以近似等效成纯积分环节, 因此选取比例控制作为线性控制率便可实现指令的无静差跟踪。即:

$$\begin{cases} u_0 = k_p (\omega_r^* - \hat{\omega}_r) \\ u = \frac{u_0 - \hat{f}_\omega}{b_0} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $u_0$  为线性控制率输出量;  $u$  为总控制量,  $u = i_q^*$ 。

转速环一阶 LADRC 的结构框图如图 1 所示。LADRC 参数整定采用基于带宽的整定方法<sup>[12]</sup>, 参数如下:

$$\begin{cases} K_P = \omega_{cv} \\ \beta_1 = 2\omega_o \\ \beta_2 = \omega_o^2 \\ \tau = 1/\omega_{cv} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\omega_{cv}$  为转速闭环带宽;  $\omega_o$  为 LESO 的带宽,  $\omega_o = 5 \sim 10\omega_{cv}$ 。

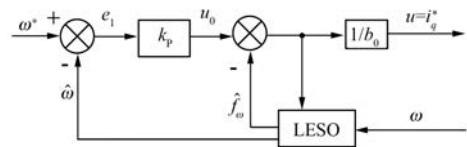


图 1 转速环一阶 LADRC 结构图

### 3 基于改进 LADRC 的 PMSM 位置伺服系统

针对速度环 LADRC 控制器中的扰动观测部分, 本文从优化 LESO 的结构和转动惯量辨识 2 个角度分别进行改进, 从根本上提升控制器对系统内外扰动和参数变化的观测速度和适应性。

#### 3.1 改进 LESO 设计

由式(9)可知 LESO 的状态方程表达式为

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 + b i_q \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e_1 \\ y = \omega_r \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $e_1$  为观测误差;  $z_2$  为总扰动观测值。

当  $e_1$  收敛至零时, 观测值  $z_1$  收敛至  $y$ , 观测值  $z_2$  收敛至  $f_\omega$ 。

由式(13)可得 LESO 中的相关传递函数为

$$\begin{cases} z_1(s) = \frac{\beta_1 s + \beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} \omega_r(s) + \frac{s}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} b i_q(s) \\ z_2(s) = -\frac{\beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} f_\omega(s) \end{cases} \quad (14)$$

##### 3.1.1 LESO 结构分析

根据式(13)的状态方程可得标准 LESO 结构框图, 由图 2 所示。由图 2 可知, 状态观测值  $z_1$ 、 $z_2$  均与观测误差  $e_1$  有关。其中, 总扰动观测值  $z_2$  由观测误差  $e_1$  对时间积分得到, 说明 LESO 在观测扰动时对误差信号  $e_1$  的利用率较低, 导致 LESO 对扰动  $f_\omega$  的观测速度较慢, 观测压力较大。

##### 3.1.2 带有误差比例反馈的新型 LESO 设计

为了提高 LESO 对扰动的观测速度, 可在扰动观测通道中增加观测误差  $e_1$  的比例增益通道, 来提高对观测误差  $e_1$  的利用率。新型 LESO 结构图如图 3 所示。

图 3 中新型 LESO 的状态方程表达式为

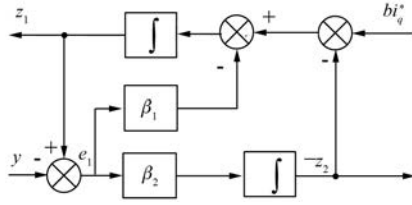


图2 标准 LESO 结构框图

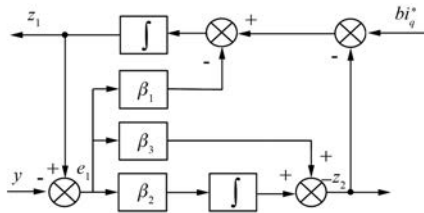


图3 新型 LESO 结构框图

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 e_1 + bi_q \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 e_1 - \beta_3 \dot{e}_1 \\ y = \omega_r \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\beta_3$  为观测误差  $e_1$  的微分增益系数。

由式 (15) 可得 LESO 中的相关传递函数为

$$\begin{cases} z_1(s) = \frac{(\beta_1 + \beta_3)s + \beta_2}{s^2 + (\beta_1 + \beta_3)s + \beta_2} \omega_r(s) + \frac{s}{s^2 + (\beta_1 + \beta_3)s + \beta_2} bi_q(s) \\ z_2(s) = -\frac{(\beta_2 + \beta_3)s}{s^2 + (\beta_1 + \beta_3)s + \beta_2} f_\omega(s) \end{cases} \quad (16)$$

由图 3 可知, 新型 LESO 的总扰动观测值  $z_2$  是误差  $e_1$  对时间比例积分的结果, 这提高了 ESO 对速度观测误差信息的利用率, 改善了 ESO 的扰动动态观测性能。对比式 (14)、式 (16) 可知, 在扰动观测通道中增加误差  $e_1$  的微分增益  $\beta_3 \dot{e}_1$ , 其实质是将  $z_1$  反馈通道系数  $\beta_1$  分解为 2 部分, 将部分反馈增益  $\beta_3 e_1$  分给扰动观测通道。新型 ESO 参数选取时, 在不影响转速跟踪性能的前提下, 为了方便调参, 令  $\beta_1 = \beta_3 = \omega_0$ 。但是由于直接引入误差  $e_1$  的比例反馈,  $\beta_3$  不宜过大, 避免引起扰动观测结果的振荡、超调。

为了验证改进 ESO 的观测性能, 分别搭建二阶标准 ESO 和二阶新型 ESO 仿真模型。设置观测

器带宽  $\omega_0 = 300$ , 标准 ESO 采用式 (12) 的参数整定规律, 新型 ESO 的参数选取为  $[\beta_1 \ \beta_2 \ \beta_3] = [300 \ 90 \ 000 \ 300]$ , 转速给定为 100 r/min, 在 0.2 s 时突加负载 5 N·m, 仿真结果如图 4 所示。由仿真波形可知, 2 种观测器均能对负载扰动进行准确辨识, 新型 ESO 的扰动观测速度比标准 ESO 的扰动观测速度更快, 这有利于系统及时的对扰动进行补偿。但新型 ESO 在观测速度提升的同时, 观测波动变大并伴有轻微超调。若想实现更理想的观测效果, 可对  $\beta_1$  和  $\beta_3$  进一步调整,  $\beta_3$  增大可加快观测速度却带来超调, 此时可增大  $\beta_1$  来减小超调。

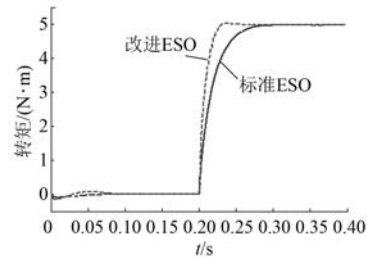


图4 2种 ESO 扰动观测波形

### 3.2 转动惯量辨识

由式 (16) 及式  $b = K_t / J$  可知, 速度 LADRC 控制器的参数中含有转动惯量成分, 当控制器中使用的惯量大于其真实值时, 观测值  $z_1$  会滞后于电机实际转速, 而观测误差  $e_1$  会通过积分器累积在观测值  $z_2$  中, 使观测值  $z_2$  小于系统实际扰动, 系统的动态性能和抗扰动性能均会受到影响。因此, 需要用辨识的方法对转动惯量进行辨识并实时修正系数  $b$ , 尽可能减小转动惯量误差对系统性能的影响, 实现系统对转动惯量变化的自适应。本文通过模型参考自适应算法对系统转动惯量进行辨识<sup>[13]</sup>。

式(2)的 PMSM 运动方程可改写为

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (17)$$

设系统采样时间为  $T_s$ ,  $k-1$  时刻的 PMSM 运动方程的离散形式为

$$T_e(k-1) = T_L(k-1) + \frac{J}{T_s} [\omega_r(k) - \omega_r(k-1)] \quad (18)$$

$k-2$  时刻 PMSM 运动方程的离散形式为

$$T_e(k-2) = T_L(k-2) + \frac{J}{T_s}[\omega_r(k-1) - \omega_r(k-2)] \quad (19)$$

由于系统采样周期  $T_s$  特别短,可认为一个采样周期内负载转矩几乎不变,令  $T_L(k-1) = T_L(k-2)$ ,  $\Delta T_e(k-1) = T_e(k-1) - T_e(k-2)$ ,  $b(k) = T_s/J$ , 将式(18)和式(19)相减并整理得到参考模型为

$$\omega_r(k) = 2\omega_r(k-1) - \omega_r(k-2) + b(k)\Delta T_e(k-1) \quad (20)$$

根据参考模型可以得到可调模型为

$$\omega_g(k) = 2\omega_r(k-1) - \omega_r(k-2) + b_g(k)\Delta T_e(k-1) \quad (21)$$

将参考模型和可调模型作差得到  $\Delta\omega$ :

$$\Delta\omega = \omega_r(k) - \omega_g(k) \quad (22)$$

利用 Popov 超稳定自适应理论设计自适应算法<sup>[14]</sup>为

$$b_g(k) = b_g(k-1) + \beta \frac{\Delta T_e(k-1)}{1 + \beta[\Delta T_e(k-1)]^2} \Delta\omega(k) \quad (23)$$

其中,自适应增益系数  $\beta$  越大,惯量辨识结果的收敛速度越快,而收敛精度则越低。

本文对位置环 LADRC 的改进是基于 3.1 节新型 LESO 设计的基础上完成的,可根据上述设计方法设计改进的位置环控制器。基于改进 ADRC 的 PMSM 位置伺服系统结构框图如图 5 所示。

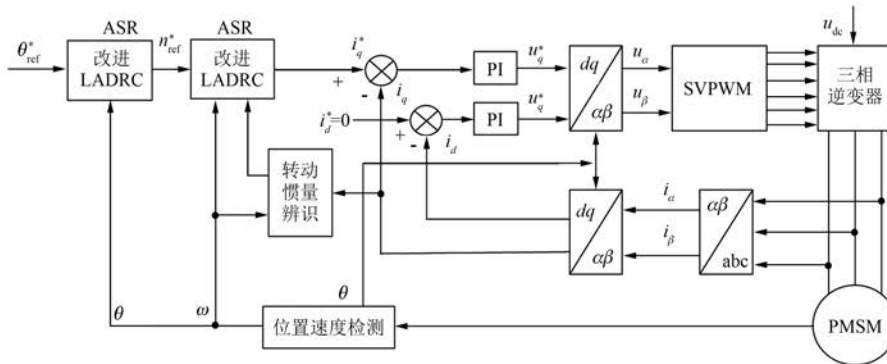


图 5 基于改进 ADRC 的位置伺服系统结构框图

### 4 仿真结果分析

为了验证改进 ADRC 在位置伺服系统中的控制效果,在 MATLAB/Simulink 平台下对系统进行仿真研究。仿真用 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻 $R_s/\Omega$	0.62
交直流电感 $L_q, L_d/mH$	2.075
极对数 $p$	4
转动惯量 $J/(10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2)$	3.617
转子磁链 $\psi_f/Wb$	0.071 47
摩擦系数 $B/(10^{-5} \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	9.444
额定转速 $n_N/(r\cdot\text{min}^{-1})$	2 000
额定转矩 $T_N/(N\cdot\text{m})$	10

仿真中,采用式(12)所表示的控制器参数整

定规律,转速环 LADRC 控制器参数选取为  $[\omega_{cv} \ \omega_{ov} \ b_0] = [1\ 000 \ 3\ 000 \ 7\ 000]$ ,同时位置环 LADRC 控制器参数选取为  $[\omega_{cp} \ \omega_{op} \ b_0] = [600 \ 1\ 800 \ 0.5]$ ,除了新型 LESO 的参数选取按  $\beta_1 = \beta_3 = \text{LESO}$  带宽外,改进前后 LADRC 的其他部分参数均相同。电流环仍采用 PI 控制器设计,PI 参数由西门子对称整定方法可得。用来获取转动惯量的模型参考自适应法中参数  $\beta = 20$ 。

#### 4.1 速度响应与抗扰性能仿真分析

为了验证采用改进 LADRC 控制后对速度控制特性的影响,给定转速为 500 r/min,空载起动,在 0.1 s 时突加 5 N·m 负载。采用 LADRC 控制、LADRC+转动惯量辨识改进控制和 LADRC+转动惯量辨识+ESO 结构改进控制下的速度响应和负载扰动曲线如图 6 所示。图 7 是 LADRC+转动惯量辨识了+ESO 结构改进控制过程中的 dq 轴电流波形和电磁转矩波形。

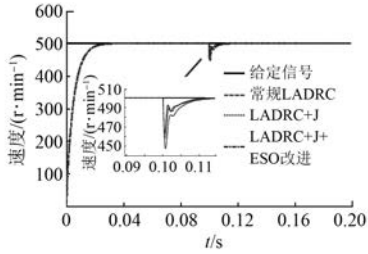


图6 改进LADRC速度响应和负载扰动对比曲线

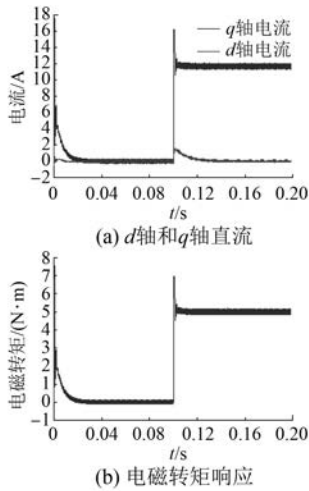


图7 改进LADRC的转矩响应和dq轴电流

由图6可以看出,LADRC控制改进前后的速度响应均很快,且无超调。同时由图4已知,电机空载时2种ESO的观测效果基本相同,因此LADRC控制和改进LADRC控制的速度响应曲线基本重合。在0.1s突加负载扰动时,改进LADRC控制下的转速波动更小,这是由于改进LADRC控制采用转动惯量扰动适应的方法,对扰动进行补偿降低了ESO的观测压力,增强了系统抗扰动能力。同时,由于对ESO结构改进,提高了扰动观测速度,使系统能及时对扰动进行补偿。从图7(a)可以看出,d轴电流除了在突加负载扰动时有一定的波动,其他阶段基本为零,符合 $i_d = 0$ 的控制效果。而q轴电流和图7(b)中的电磁转矩在突加负载扰动时出现了较大脉动,但经过短暂的调整迅速恢复到稳定值,其余时间段内,q轴电流和电磁转矩的响应较为平稳且脉动较小,因此转矩和电流响应特性良好。

#### 4.2 位置跟随与抗扰性能仿真分析

为了验证位置环的动态性能和抗扰动性能,

给定频率为1 Hz的正弦位置信号,电机空载启动,并在1 s时突加5 N·m负载。分别对采用LADRC控制和改进LADRC控制的位置伺服系统进行仿真,位置跟踪曲线如图8(a)所示;图8(b)为分别采用2种控制方式下突加负载时位置跟踪曲线的局部放大图;图8(c)为采用2种控制方式下位置误差对比曲线。

从图8(a)、图8(c)可以看出,采用LADRC控制和改进LADRC控制基本都能对连续变化的位置给定进行跟踪,满足位置伺服系统快速跟踪的要求。由图8(b)可以看出,在1 s时突加5 N·m负载,由于负载变化对系统转动惯量的影响,此时LADRC控制的位置跟踪误差最大为0.042 1 rad,而改进LADRC控制的位置跟踪误差最大为0.031 9 rad,后者位置误差明显小于前者,且改进LADRC控制下系统可以更快的恢复到稳态,恢复时间更短。这说明本文的改进LADRC控制策略能及时对扰动进行观测并补偿,并能准确辨识出转动惯量来修正ADRC的参数 $b$ ,使系统在惯量变化以及扰动较多的应用场合能够获得更好的动态性能和抗扰动能力,更适合高性能位置伺服控制的要求。

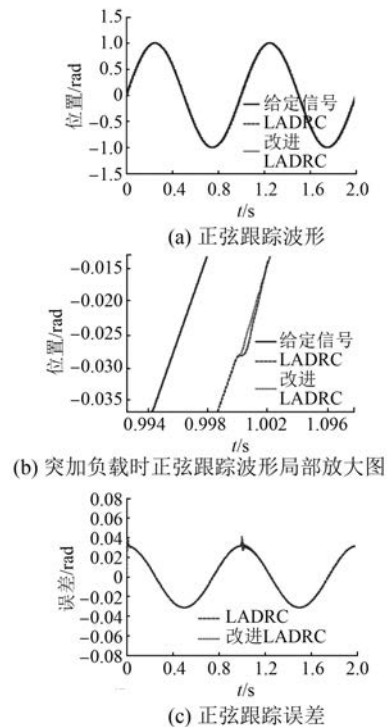


图8 突加负载扰动时正弦跟踪及误差对比

## 5 结 语

本文将 ADRC 算法应用于 PMSM 位置伺服系统中,从优化 ESO 的结构和对转动惯量辨识 2 个角度分别对 ADRC 控制器进行改进,设计了基于改进 ADRC 的 PMSM 位置伺服系统。仿真结果表明,改进 ADRC 控制策略提高了系统对扰动的观测速度和鲁棒性,能够有效抑制负载变化对系统性能的影响。与传统控制方法相比,采用改进 ADRC 后系统在响应速度和位置跟踪方面都具有更好的效果,同时系统对内外扰动的抵抗力大大增强,更能满足高性能伺服系统要求。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002(3): 13.
- [ 2 ] 孙凯, 许镇琳, 盖廓, 等. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 43.
- [ 3 ] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998(1): 19.
- [ 4 ] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1): 24.
- [ 5 ] GAO Z. Scaling and band width-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.
- [ 6 ] 曾岳南, 周斌, 郑雷, 等. 永磁同步电机一阶线性自抗扰控制器的设计[J]. 控制工程, 2017, 24(9): 1818.
- [ 7 ] 雷阳, 徐静, 郝强, 等. 基于带宽的永磁同步电机伺服控制器设计[J]. 南京理工大学学报, 2019, 43(6): 677.
- [ 8 ] 范婷, 唐彬彬, 郭小定. 基于降阶自抗扰的永磁同步电机调速系统[J]. 微电机, 2018, 51(7): 54.
- [ 9 ] 谢洋, 姜仁华, 刘亚云. 基于级联一阶自抗扰控制器的机载雷达伺服系统的设计[J]. 微电机, 2018, 51(5): 36.
- [ 10 ] 周斌. 永磁同步电机伺服系统自抗扰控制的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [ 11 ] LUENBERGER D. Observers for multivariable systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1966, 11(2): 190.
- [ 12 ] 唐彬彬, 徐道明, 吴若鹭. 永磁同步电机自抗扰控制调速系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 12.
- [ 13 ] 顾丽爱, 刘丽杰, 刘晓帆. 永磁同步电机转动惯量在线辨识关键技术研究[J]. 机械设计与制造, 2017(4): 29.
- [ 14 ] 刘敏层, 李广田, 杨子毛, 等. 基于 Popov 超稳定理论的 PMSM 转速辨识[J]. 大电机技术, 2017(3): 12.

### [ 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,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,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。