

基于负载转矩观测器的永磁同步电机改进线性自抗扰控制方法

袁浩仁 周福强 孙江宏

(北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘 要: 在实际应用中,自抗扰控制器中的扩张状态观测存在面对大幅变化的负载扰动时,无法保证估计补偿精度的问题。针对这一问题,提出了将负载转矩观测器观测到的负载扰动补偿到扩张状态观测器中来提高估测补偿精度的方案,并且使用电机中可以直接测量的角度数据作为已知量来设计负载转矩观测器,避免了将转速作为已知量引入微分误差的问题。仿真和实验结果表明,改进后的线性自抗扰控制器相比于传统线性自抗扰控制器,转速最大调量降低了 7.24%,在保证调节速度的同时,具有更优良的抗负载扰动性能。

关键词: 永磁同步电机;负载转矩观测器;线性自抗扰控制

中图分类号: TM341;TN60 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Improved linear active disturbance rejection control of PMSM based on load torque observation

Yuan Haoren Zhou Fuqiang Sun Jianghong

(Key Laboratory of Modern Measurement & Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In practical applications, the expansion state observation in self disturbance rejection controllers faces the problem of inability to guarantee estimation and compensation accuracy when faced with significantly changing load disturbances. A scheme is proposed to improve the estimation and compensation accuracy by compensating the load disturbance observed by the load torque observer to the extended state observer. The load torque observer is designed using angle data that can be directly measured in the motor as a known quantity, avoiding the problem of introducing differential errors by using the speed as a known quantity. The simulation and experimental results show that the improved linear active disturbance rejection controller reduces the maximum speed adjustment by 7.24% compared to the traditional linear active disturbance rejection controller, and has better anti load disturbance performance while ensuring the adjustment speed.

Keywords: permanent magnet synchronous motor;load torque observer;linear active disturbance rejection control

0 引 言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor,PMSM)因具有体积小、转矩惯性好、可靠性高、伺服系统优良的特点而在现代工业控制中得到广泛应用。但是 PMSM 是一个非线性、时变、多变量耦合的系统,难以建立精确的数学模型,且 PMSM 的应用场景复杂,传统的 PI 控制器由于参数固定、对电机的参数及负载变化敏感、鲁棒性差等缺点,无法满足工业上对伺服驱动控制器控制精度的要求。因此,针对 PMSM 伺服驱动系统的控制策略研究

成为近年来的研究热点。

近年来,国内外学者基于不同的控制方法提出了多种针对 PMSM 伺服驱动系统的控制结构方案。刘忠永等^[1]设计一种基于显示模型预测控制思想的高性能永磁同步电机控制策略,分别建立电流控制和转速控制的系统线性化模型,解决了状态之间耦合及非线性环节的影响;姜长泓等^[2]提出了改进指数趋近律的滑膜控制策略,有效提高了系统的趋近速率并削弱了系统的抖振;You 等^[3]提出了一种使用非线性增益的永磁同步电机自适应神经网络控制,提高了在系统参数不确定和外部扰动作用下的永磁同步电

机位置跟踪性能;刘颖等^[4]在滑膜变结构控制中引入干扰观测器,通过对外界干扰进行前馈补偿,降低了滑膜控制器中不连续项的幅值,有效的削弱了抖振;Qu等^[5]提出了一种新型的基于主动抗扰的PMSM驱动器滑膜电流控制方案,通过扩张状态观测器来实时估计内部扰动,使用估计后的内部扰动来实时更新滑膜电流控制的控制律,有效提高了控制系统的稳态和瞬态电流跟踪性能,并增强了内部扰动的鲁棒性;Viet等^[6]设计了一种带有负载转矩观测器的模糊滑模速度控制器,有效衰减震颤并准确跟踪PMSM的速度,提高了PMSM在模型参数和负载转矩变化下的控制鲁棒性。雷美琴等^[7]提出了一种基于精确反馈线性化控制的自抗扰控制方法,并采用了一种改进fal函数,有效提高了PMSM控制系统的响应速度和鲁棒性;尹诗荀等^[8]提出了一种基于延迟补偿的并行线性自抗扰控制策略,引入Smith预估器与自抗扰控制相结合,有效提高了控制系统对内部参数变化以及外部扰动的响应速度和精度;张臻等^[9]提出了一种改进变结构自抗扰控制策略,在基于变结构原理设计的扩张状态观测器中引入位置、速度的观测误差以实现状态变量的无差估计,采用基于指数趋近律设计的非线性状态误差反馈控制律实现线性控制与非线性控制的平滑过渡,并在此基础上引入位置跟踪误差,提高伺服系统的跟踪性能;吴刚琴等^[10]改进了一种基于黏菌优化算法的新型双幕次滑模积分速度控制器的模型预测控制算法,显著降低了电流脉动,提高了系统的抗干扰能力。兰永红等^[11]提出了一种基于干扰观测器的发推控制调速策略,针对外部动态干扰,利用系统状态变量构造干扰观测器,并将干扰观测器的设计问题转化为系统误差的稳定性问题,并采用反推控制策略设计系统控制器,使系统具有良好的速度跟踪、转矩响应及干扰抑制性能。卢志远等^[12]提出一种电流、转速复合的控制器设计方法,使用最速控制综合函数代替比例微分进行控制律设计,提高了系统的控制性能并优化参数配置方式,利用电流偏差反馈算法设计电流外环控制器保护硬件,使控制器具有更好的安全性能和抗干扰能力。

上述控制方法中,滑膜控制、模糊控制、延迟补偿、等控制技术虽能有效提高PMSM伺服驱动系统的控制性能,但是控制器的设计过程过于依赖准确的控制系统模型,且无法有效降低震荡引起的系统不稳定性及内外部存在的不确定性干扰对控制系统的影响。相比之下,自抗扰控制则具有结构简单、抗干扰能力强、不依赖具体控制系统模型等优点。Gao^[13]提出将所有控制器和扩张状态观测器简化为线性形式,并提出了线性自抗扰控制器,线性自抗扰控制技术在工程实际中得到了更广泛的应用。

线性自抗扰控制技术通过扩张状态观测器(extended state observer, ESO)实时估计并补偿控制系统的内外扰动,结合线性控制函数从而达到一个很好的控制效果。在基于线性自抗扰控制的永磁同步电机调速系统中,ESO需要同时估计转速、负载转矩扰动、电机参数的变化及控制系

统内外部存在的不确定性干扰。其中,负载转矩扰动的大幅度变化会加重ESO的估计补偿负担,从而降低自抗扰控制器的估计精度及补偿效果,限制了自抗扰控制器的控制性能^[14]。

针对上述问题,本文提出基于负载转矩观测器的永磁同步电机改进线性自抗扰控制方法,设计了负载转矩观测器对永磁同步电机进行负载观测得到负载扰动转矩,利用观测出的负载扰动转矩补偿ESO的估计项,降低ESO的观测负担。同时,为了避免因使用转速进行负载转矩观测而对负载转矩观测值引入更大的噪声,本文选择以测量角度作为可测状态变量进行负载转矩观测器的设计,以此实现降低ESO估计补偿负担,提高线性自抗扰控制精度的目的,并通过simulink仿真和电机驱动加载实验,验证了改进后的线性自抗扰控制方法具有更好的抗干扰能力及鲁棒性。

1 PMSM 数学模型

本文研究的是表贴式永磁同步电机,在同步旋转坐标系下建立永磁同步电机的数学模型^[15],其电压方程如下:

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

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 为定子电压; i_d 、 i_q 为定子电流; L_d 、 L_q 为定子电感,且 $L_d = L_q = L$; R_s 为定子电阻; p_n 为永磁同步电机的极对数; ω_e 为电角速度; ψ_f 为转子磁链数; T_L 为负载转矩; B 为粘滞摩擦系数; J 为转动惯量。

PMSM 机械运动方程为:

$$\dot{\omega} = \frac{3p_n \psi_f}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega - \frac{T_L}{J} = f(\omega, T_L) + b i_q \quad (3)$$

式中: ω 为电机转子机械角速度, $f(\omega, T_L) = -B\omega/J - T_L/J$; $b = p_n \psi_f/J$ 。

2 改进线性自抗扰控制器设计

针对一阶控制对象建立一阶对象方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, w) + bu \\ y = x \end{cases} \quad (4)$$

该一阶方程对应的一阶简化线性自抗扰控制器为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - y) \\ u = k_p(y^* - z_1) - z_2/b_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: x 为对象的状态变量; y 为其输出; y^* 为对象的期望输出; z_1 用于跟踪控制对象的状态变量 x , z_2 用于跟踪控制对象的内外部干扰; β_1 、 β_2 为扩张状态观测器的增益; b_0 是 b 的估计; k_p 是比例控制器增益; z_2/b_0 用于补偿内外

部干扰。

根据式(3)和(5),可得永磁同步电机的一阶线性自抗扰控制器为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - \omega) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - \omega) \\ u = k_p(\omega^* - z_1) - z_2/b_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\beta_1 = 2p, \beta_2 = p^2, p$ 是 ESO 的闭环期望极点。在该线性自抗扰控制器中, z_2 用于估计 PMSM 所受的内外干扰即:

$$z_2 \approx a(t) = f(\omega, T_L) + (b - b_0)i_q \quad (7)$$

当 PMSM 模型发生变化时, ESO 会对模型的变化 $f(\omega, T_L)$ 进行估计并补偿,所以 ESO 的估计补偿精度会对控制器的控制效果产生很大的影响。如果想要取得较好的控制效果,则需要 ESO 的估计补偿精度非常高才可以,但是 ESO 估计补偿干扰量变化幅度越大,估计补偿的精度就会越低,因此一种提高估计补偿精度的方法之一就是降低 ESO 估计补偿量变化幅度,在 PMSM 的一阶线性自抗扰控制器中, ESO 的估计补偿量为 $a(t)$, 其中 $f(\omega, T_L) = -B\omega/J - T_L/J$, 该项包含了 PMSM 所受外部负载变化及内部参数变化,当 PMSM 受到突加负载时, T_L 会产生大幅度变化,从而导致 ESO 估计补偿量的变化幅度变大,进而影响 ESO 的估计补偿精度。因此,设计负载转矩观测器对 PMSM 的负载转矩进行观测,将观测到的转矩变化补偿到控制量中的同时从 $f(\omega, T_L)$ 中去除,从而实现降低 ESO 估计补偿负担同时保证控制精度的目的。按照负载转矩补偿的思路设计 PMSM 调速系统一阶线性自抗扰控制器如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - \omega) + b_0 u - \hat{T}_L/J \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - \omega) \\ u = k_p(\omega^* - z_1) - z_2/b_0 + \hat{T}_L b_0/J \end{cases} \quad (8)$$

式中: \hat{T}_L 为负载转矩观测器的观测值。将观测值补偿到一阶线性自抗扰控制器中,那么 z_2 要估计的值变为:

$$z_2 \approx a'(t) = f(\omega, T_L) + (b - b_0)i_q + \frac{\hat{T}_L}{J} =$$

$$\frac{\hat{T}_L}{J} - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} + (b - b_0)i_q \quad (9)$$

只要保证负载转矩观测器的观测精度,那么在 z_1 准确跟踪 ω 的情况下, z_2 此时只需要估计扰动项 $-B\omega/J + (b - b_0)i_q$, 远小于式(7)所需估计的扰动项大小,让 ESO 估计该扰动项,从而达到减小估计负担并且保证估计精度的目的。一阶负载转矩补偿自抗扰控制器结构图如图 1 所示。

其中, ω^* 和 ω 分别为电机期望转速和电机实际转速; T_L/J 为负载转矩扰动估计值; z_2 是除去负载转矩干扰后其余扰动的估计值; z_1 是对实际转速 ω 的跟踪; u_0 为比例控制量输出, u 为补偿后控制量输出。

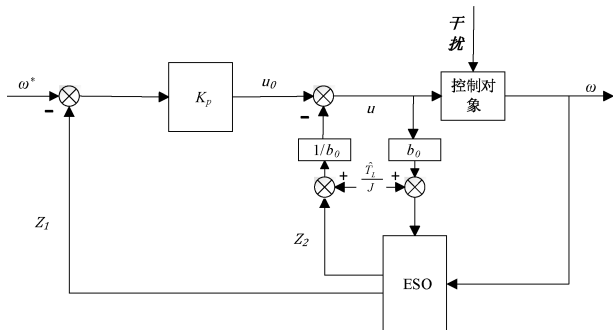


图 1 一阶负载转矩补偿自抗扰控制器

Fig. 1 First order load torque compensation linear active disturbance rejection controller

3 负载转矩观测器设计

传统全阶观测器观测负载转矩需要建立复杂的三阶系统,全阶观测器一般通过估测角度信息,然后对角度信息进行微分得到电机机械转速信息,这种方法无法避免估测角度信息和微分计算机械转速信息带来的累积误差,同时会引入微分放大的传感器噪声。对于 PMSM 调速控制系统,角度信息可以通过传感器测量得到,所以可以采用直接测量得到的角度信息代替观测器估测的角度信息,从而降低观测器的复杂程度。因此本文设计负载观测器选择角度信息作为可直接测量的状态变量,选取机械角速度和负载转矩作为需要估测的状态变量,对负载转矩观测器进行降阶处理,观测器的设计参考文献[16]。

状态变量选取 $x_a = \theta_m, x_b = [\omega_m \ T_L]$, 其中 θ_m 为直接测量的电机角度信息, ω_m 为需要估测的电机机械转速, T_L 为需要估测的电机负载转矩,控制量 $u = T_e$, 输出量 $y = \theta_m = x_a$ 。由式(3)可得:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m \quad (10)$$

由式(10)可得系统状态方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e \quad (11)$$

降阶观测器的系统描述方程如下:

对系统状态方程进行分块处理得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{aa} & F_{ab} \\ F_{ba} & F_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_a \\ G_b \end{bmatrix} u \quad (12)$$

$$y = [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(12)可得:

$$\dot{x}_a = \hat{y} = F_{aa}x_a + F_{ab}x_b + G_a u \quad (14)$$

$$\dot{x}_b = F_{ba}x_a + F_{bb}x_b + G_b u \quad (15)$$

式(15)中 $F_{ba}x_a + G_b u$ 为已知量,用作降阶观测器 x_b

的动态输入;将式(15)的已知项移动到方程的一边得:

$$\dot{y} - F_{aa}y - G_a u = F_{ab}x_b \quad (16)$$

式(16)左边为已知量即测量值,作为降阶观测器的输出 y' 。

建立新的负载转矩观测器如图2所示。

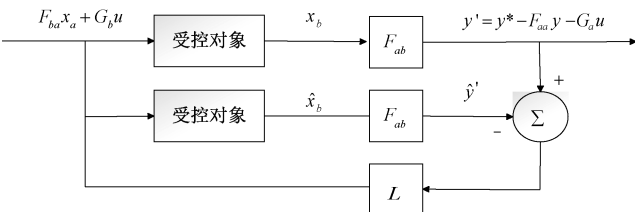


图2 负载转矩观测器设计框图

Fig. 2 Design block diagram of load torque observer

由图2可得降阶观测器方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_b &= (F_{bb} - LF_{ab})\hat{x}_b + (F_{ba} - LF_{aa})y + \\ &(G_b - LG_a)u + L\dot{y} \end{aligned} \quad (17)$$

式中:降阶观测器增益 $L = [l_1 \quad l_2]^T$ 。测量值微分 $\dot{y} =$

$\dot{\theta}_m$, 为避免微分将噪声放大,定义新的观测器状态为:

$$x_c = \hat{x}_b - Ly \quad (18)$$

利用该观测器状态,降阶观测器方程变为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= (F_{bb} - LF_{ab})\hat{x}_b + (F_{ba} - LF_{aa})y + \\ &(G_b - LG_a)u \end{aligned} \quad (19)$$

最后得到降阶观测器如下:

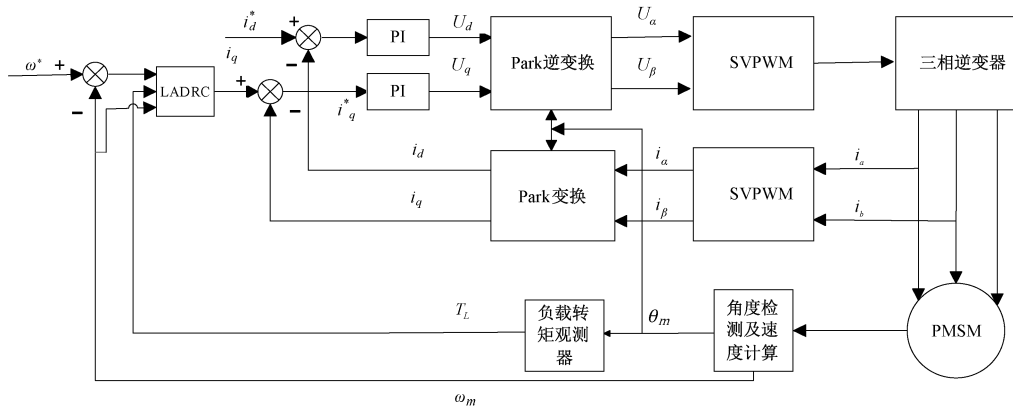


图3 控制系统框图

Fig. 3 Control system block diagram

4 仿真验证

为了验证本文所改进的一阶线性自抗扰控制器的有效性,在 simulink 平台上搭建仿真模型,并传统 LADRC 控制器进行对比验证,着重研究电机参考转速为 1 000 r/min 时系统的动态性能。

仿真实验中所使用永磁同步电机参数为:电机定子电阻为 0.958 Ω ,定子交轴电感 L_q 为 0.012 H,定子直轴电感

$$\begin{cases} \dot{\hat{\omega}} - l_1 \dot{y} = (-\frac{B_m}{J} - l_1)\hat{\omega}_m - \frac{1}{J}\hat{T}_L + \frac{3p_n\psi_f}{2J}i_q \\ \dot{\hat{T}}_L - l_2 \dot{y} = -l_2\hat{\omega}_m \end{cases} \quad (20)$$

反馈增益 L 可以通过主导二级极点配置确定,假设该二阶系统的指定期望极点为 α, β ,则观测器的期望特征根方程为:

$$s^2 - (\alpha + \beta)s + (\alpha\beta) = 0 \quad (21)$$

式(15)减去式(17)得到观测误差动态方程:

$$\dot{\tilde{x}} = (F_{bb} - LF_{ab})\tilde{x}_b \quad (22)$$

式(22)的特征方程为:

$$\det[sI - (F_{bb} - LF_{ab})\tilde{x}_b] =$$

$$s^2 + (\frac{B_m}{J} + l_1)s - \frac{1}{J}l_2 = 0 \quad (23)$$

将转矩观测器动态误差方程的特征方程式(23)配置成期望的特征根方程式(21),可得反馈增益:

$$\begin{cases} l_1 = -(\alpha + \beta) - \frac{B_m}{J} \\ l_2 = -J(\alpha\beta) \end{cases} \quad (24)$$

将负载转矩观测器应用到 PMSM 调速控制系统中,得到控制系统的结构框图如图3所示。速度环采用 LADRC 控制;负载转矩观测器根据电机的角度信息和 i_q 估测出电机的负载转矩;观测到的负载转矩补偿到 LADRC 控制量中并从内外部干扰项 $f(\omega, T_L)$ 中除去,实现降低 ESO 的估测负担,保证估测精度的目的。

L_d 为 0.012 H,转子惯量 J 为 0.003 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$,阻尼系数 B 为 0.008 $\text{N} \cdot \text{ms/rad}$,极对数 $p_n = 4$,永磁磁链 ψ_f 为 0.182 7 Wb。永磁同步电机采用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略,其中速度环分别采用传统线性自抗扰控制以及改进后的线性自抗扰控制进行对比仿真。

图4是在 0.2 s 时突加 4 $\text{N} \cdot \text{m}$ 负载、0.3 s 时突加 -4 $\text{N} \cdot \text{m}$ 负载后,转矩补偿线性自抗扰控制器与传统线性自抗扰控制器的速度响应对比图。从图中可以看出,面

对突加负载,转矩补偿线性自抗扰控制器比传统线性自抗扰控制器具有更好的抗干扰性能,转矩线性补偿自抗扰控制器的转速最大超调量为 0.9%,传统线性自抗扰控制器转速最大超调量为 3.7%。

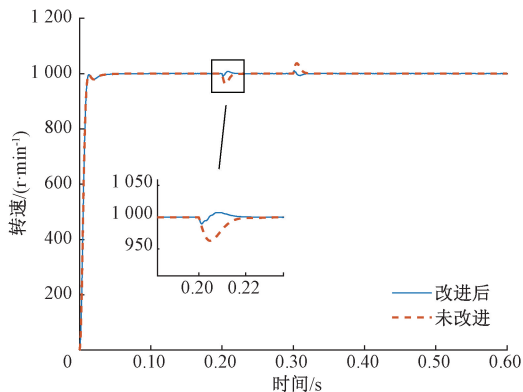


图 4 速度响应对比图

Fig. 4 Comparison of speed response

图 5 为改进前后两种控制器的控制量响应对比图,从图 5 中可以得到,转矩补偿线性自抗扰控制器的控制量的电流最大超调量为 6.64 A,调节时间为 0.21 s,传统线性自抗扰控制器的电流最大超调量为 5.76 A,调节时间为 0.22 s,相比之下,虽然转矩补偿线性自抗扰控制器电流最大超调量有所增大但是调节时间缩短了 50%。

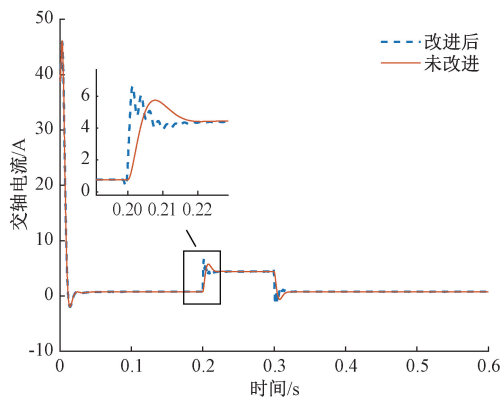


图 5 控制量响应对比图

Fig. 5 Comparison of control response

仿真结果表明,在控制器参数一致的情况下,转矩补偿自抗扰控制器相比于传统自抗扰控制器,具有更快的控制量调节速度以及更高的抗干扰能力。

图 6 为改进后自抗扰控制器中扩张状态观测器对电机转速的估计值与实际值的比较图。改进后扩张状态观测器的转速估计值与电机实际转速的最大误差为 0.8%,转速调节时间为 0.223 s。

图 7 为未改进自抗扰控制器中扩张状态观测器对电机转速的估计值与实际值的比较图。改进后扩张状态观测器的转速估计值与电机实际转速的最大误差为 1.7%,

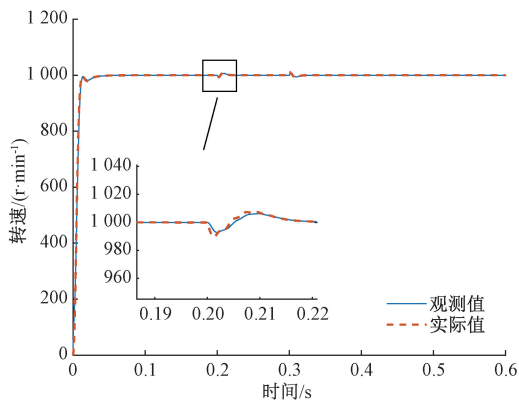


图 6 改进后转速估计效果对比图

Fig. 6 Comparison of Improved Speed Estimation Results

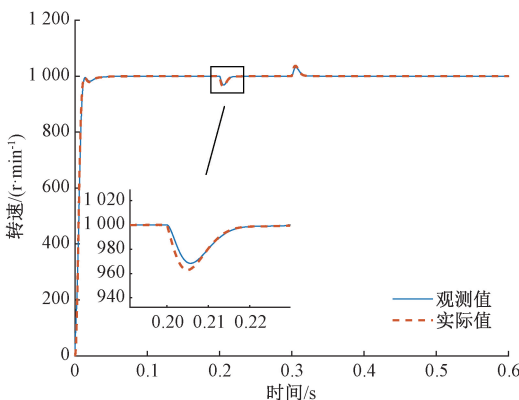


图 7 未改进转速估计效果对比图

Fig. 7 Comparison of unimproved speed estimation performance

转速调节时间为 0.228 s。

相比之下,改进后的自抗扰控制器在面对干扰时,调节时间缩短,转速的最大超调量减少,其扩张状态观测器对转速的跟踪误差更小,更加的高效准确。

5 实验验证

为进一步验证所提出的转矩补偿线性自抗扰控制器的性能,使用电机加载试验台进行 PMSM 加载试验,实验用电机加载试验台如图 8。

控制系统硬件平台如图 9 开发板采用搭载 STM32F407 微控制处理器的正点原子 ADK-DMF407 开发板,驱动板采用正点原子 ATK-PD6010B,将永磁同步电机与磁滞制动器连接,通过磁滞制动器给电机施加转矩来模拟电机运行过程中遇到的负载转矩干扰。

本文通过给电机施加同转速不同干扰转矩以及不同转速相同干扰转矩来进行对比实验,分析在不同的电机加载条件下,两种永磁同步电机调速控制系统的控制性能。

给定电机转速 500 r/min,负载干扰转矩为 1 N·m,两种控制系统的速度响应对比如图 10,此时,使用转矩补偿线性自抗扰控制器的电机调速系统转速最高为



图8 电机加载试验台
Fig. 8 Motor loading test bench

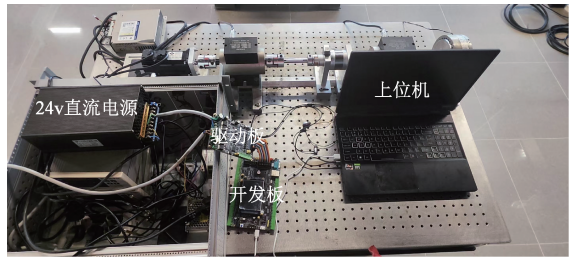


图9 控制系统硬件
Fig. 9 Hardware of control system

529.5 r/min,超调量为 5.9%,使用传统线性自抗扰控制器的电机调速系统转速最高为 559.5 r/min,超调量为 11.9%。

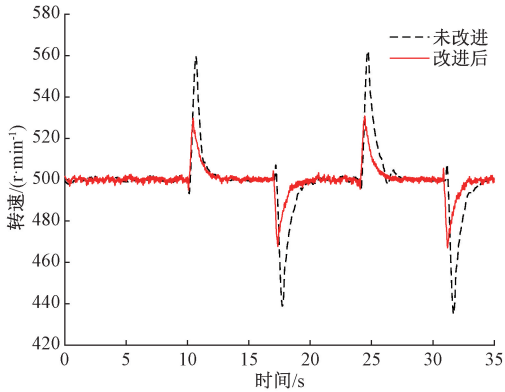


图10 500r/min,负载扰动 1 N·m 时,速度响应图
Fig. 10 Speed response diagram at 500 r/min and load disturbance 1 N·m

给定电机转速 500 r/min,负载干扰转矩为 0.5 N·m,两种控制系统的速度响应对比图如图 11,此时,使用转矩补偿线性自抗扰控制器的电机调速系统转速最高为 518.8 r/min,超调量为 3.8%,使用传统线性自抗扰控制器的电机调速系统转速最高为 531.7 r/min,超调量为 6.3%。

给定电机转速 250 r/min,负载干扰转矩为 0.5 N·m,两种控制系统的速度响应对比图如图 12。此时,使用转矩补偿线性自抗扰控制器的电机调速系统转速最高为 264.4 r/min,超调量为 5.76%,使用传统线性自抗扰控制器的电机调速系统转速最高为 282.5 r/min,超调量

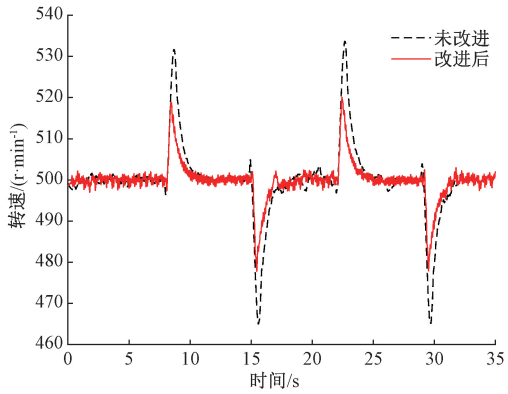


图11 500 r/min,负载扰动 0.5 N·m 时,速度响应图
Fig. 11 Speed response diagram at 500 r/min and load disturbance 0.5 N·m

为 13%。

图 13 为干扰转矩为 0.5 N·m 时的负载转矩观测器的跟踪图,跟踪误差的大小为 0.3%。

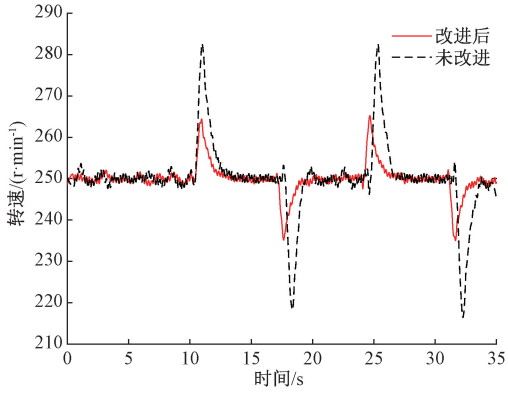


图12 250r/min,负载扰动 0.5 N·m 时,速度响应图
Fig. 12 Speed response diagram at 250 r/min and load disturbance 0.5 N·m

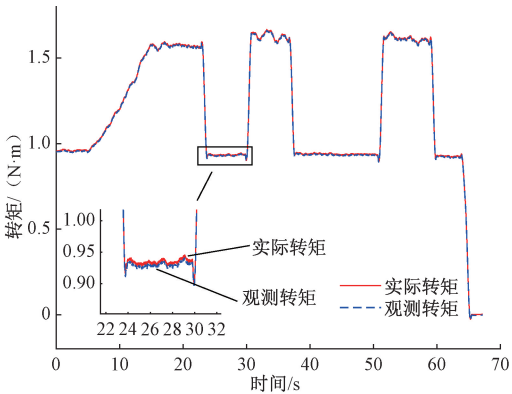


图13 0.5 N·m 负载转矩观测器跟踪效果图
Fig. 13 Tracking effect of 0.5 N·m load torque observer

图 14 为干扰转矩为 1 N·m 时的负载转矩观测器的跟踪图,跟踪误差的大小为 0.9%。

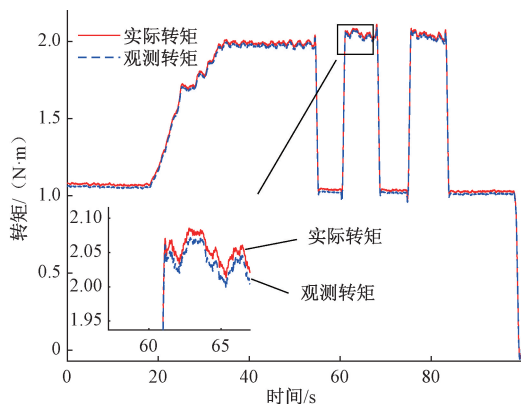


图 14 1 N·m 负载转矩观测器跟踪效果图

Fig. 14 Tracking effect of 1 N·m load torque observer

实验结果表明,控制器参数相同条件下,转矩补偿线性自抗扰控制器与传统线性自抗扰控制器在面对相同的负载干扰时,具有更加优越的抗干扰性能,转速最大超调量最高降低 7.24%;在面对相同强度的干扰时,转矩补偿线性自抗扰控制器调节速度达到稳定的响应速度也快于传统线性自抗扰控制器;在面对不同强度的干扰负载力矩以及电机转速时,改进后的线性自抗扰控制器不会因为负载条件的改变导致控制性能的变化,所设计的负载转矩观测器也可以保持良好的跟踪准确度。

6 结 论

针对线性自抗扰控制器中,扩张状态观测器在面对大幅度变化的负载扰动时,因估测补偿负担过重而无法保证估测补偿精度的问题,对扩张状态观测器进行改进,设计了负载转矩观测器用于降低扩张状态观测器的估测补偿负担。在此基础上,设计了改进的线性自抗扰控制器用于 PMSM 伺服控制系统的速度环控制中。最后,通过仿真和实验验证了改进后线性自抗扰控制器相比于传统线性自抗扰控制器具有更加优良的抗负载扰动性能。

参考文献

- [1] 刘忠永, 范涛, 何国林, 等. 高性能永磁同步电机显式模型预测控制算法研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6039-6058.
LIU ZH Y, FAN T, HE G L, et al. Research on explicit model predictive control algorithm for high performance permanent magnet synchronous motor[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (22): 6039-6058.
- [2] 姜长泓, 张凯皓, 张袅娜, 等. 改进指数趋近律的五相永磁同步电机滑模控制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 3975-3981.
JIANG CH H, ZHANG K H, ZHANG N N, et al. Sliding mode control of five phase permanent magnet

synchronous motor with improved exponential convergence law [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(10): 3975-3981.

- [3] YOU S, GIL J, KIM W. Adaptive neural network control using nonlinear information gain for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Trans Cybern, 2023, 53(3): 1392-1404.
- [4] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 80-85.
LIU Y, ZHOU B, FANG S CH. Sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on a novel disturbance observer [J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 30(9): 80-85.
- [5] QU L ZH, QIAO W, QU L Y. Active-disturbance-rejection-based sliding-mode current control for permanent-magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 (1): 751-760.
- [6] VIET Q L, HAN H C, ZHEN ZH Y. Fuzzy sliding mode speed controller for pm synchronous motors with a load torque observer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1530-1539.
- [7] 雷美琴, 马家庆, 陈昌盛, 等. 基于精确反馈线性化的 PMSM 自抗扰控制[J]. 电子测量技术, 2024, 47(17): 191-198.
LEI M Q, MA J Q, CHEN CH SH, et al. PMSM active disturbance rejection control based on precise feedback linearization [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(17): 191-198.
- [8] 尹诗荀, 郑志安, 朱俊杰. 基于延迟补偿的永磁同步电机机行自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 275-285.
YIN SH X, ZHENG ZH AN, ZHU J J. Parallel active disturbance rejection control of permanent magnet synchronous motor based on delay compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(3): 275-285.
- [9] 张臻, 周扬忠. 永磁同步电机位置伺服系统改进变结构自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5): 263-271.
ZHANG ZH, ZHOU Y ZH. Improvement of variable structure active disturbance rejection control for permanent magnet synchronous motor position servo system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 263-271.
- [10] 吴刚琴, 马家庆, 何志琴, 等. 基于 SMA 优化的 PMSM 模型预测控制[J]. 电子测量技术, 2025, 48(2): 14-20.
WU G Q, MA J Q, HE ZH Q, et al. PMSM model

- predictive control based on sma optimization [J]. Electronic Measurement Technology, 2025, 48 (2): 14-20.
- [11] 兰永红,黄奇卉,颜渐德.基于干扰观测器的永磁同步电机反推控制[J].电子测量与仪器学报,2017,31(9): 1524-1531.
- LAN Y H, HUANG Q H, YAN J D. Reverse control of permanent magnet synchronous motor based on disturbance observer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31 (9): 1524-1531.
- [12] 卢志远,柏受军,江明,等.改进的线性自抗扰永磁同步电机转速控制器设计[J].电子测量与仪器学报,2022, 36(4):73-81.
- LU ZH Y, BAI SH J, JIANG M, et al. Design of improved linear active disturbance rejection permanent magnet synchronous motor speed controller [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022,36(4):73-81.
- [13] GAO ZH Q. Active disturbance rejection control: A paradigm shift in feedback control system design[C]. American Control Conference, 2006: 2399-2405.
- [14] 刘志刚,李世华.基于永磁同步电机模型辨识与补偿的自抗扰控制器[J].中国电机工程学报,2008(24): 118-123.
- LIU ZH G, LI SH H. Self disturbance rejection controller based on permanent magnet synchronous motor model identification and compensation [J]. Proceeding of the CSEE, 2008(24):118-123.
- [15] 高雄,郭凯凯,丁志强,等.改进布谷鸟算法的永磁同步电机多参数辨识[J].微特电机,2024,52(10):37-42.
- GAO X, GUO K K, DING ZH Q, et al. Multi parameter identification of permanent magnet synchronous motor using improved cuckoo algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2024,52(10):37-42.
- [16] 张兵,唐猛,廖海洲.基于负载观测的PMSM滑模抗扰动自适应控制[J].工程设计学报,2013,20(5): 427-433.
- ZHANG B, TANG M, LIAO H ZH. PMSM sliding mode disturbance resistant adaptive control based on load observation[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2013,20(5):427-433.

作者简介

袁浩仁(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为机电一体化。

E-mail:yhr17803336832@163.com