

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211615

# 基于自适应积分滑模与扰动观测的多 PMSM 同步控制

张荣芸<sup>1</sup>, 周成龙<sup>1</sup>, 时培成<sup>2</sup>, 赵林峰<sup>3</sup>, 凤永乐<sup>1</sup>, 刘亚铭<sup>1</sup>

(1. 安徽工程大学机械工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽工程大学汽车新技术安徽省工程技术中心, 安徽 芜湖 241000; 3. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为了克服多电机差速失步振荡及同步稳定性变差等问题, 提出了基于新型自适应积分滑模和扰动观测的多 PMSM 同步控制方法。首先, 构建了一种改进型偏差耦合同步控制结构。其次, 设计了基于新型自适应积分滑模(new adaptive integral sliding mode control, NAISMC)的 PMSM 控制器。同时, 利用滑模扰动观测器(sliding mode disturbance observer, SMDO)对电机负载扰动进行观测, 并与改进的偏差耦合同步控制结构相结合, 提出了基于 NAISMC 与 SMDO 的多 PMSM 的改进型偏差耦合同步控制方法。最后, 进行了实验分析。其结果表明所提出的同步控制方法能有效地保证 4 个电机具有良好的同步性能, 提高了其抗扰动的能力, 确保了多电机同步的稳定性。  
**关键词:** 永磁同步电机; 多电机同步控制; 积分滑模控制; 扰动观测器; 偏差耦合控制

## Multi-PMSM synchronous control based on adaptive integral sliding mode and disturbance observation

ZHANG Rongyun<sup>1</sup>, ZHOU Chenglong<sup>1</sup>, SHI Peicheng<sup>2</sup>, ZHAO Linfeng<sup>3</sup>, FENG Yongle<sup>1</sup>, LIU Yaming<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Anhui Engineering and Technology Research Center for Automotive New Technology, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 3. School of Automobile and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** To overcome the problems of multi motor differential out-of-step oscillation and poor synchronization stability, a multi-PMSM synchronous control method based on a new adaptive integral sliding mode and disturbance observation is proposed. First, an improved bias-coupled synchronous control structure is constructed. Then, a PMSM controller based on a new adaptive integral sliding mode control (NAISMC) is designed. The sliding mode disturbance observer (SMDO) is used to observe the motor load disturbance, and is combined with an improved deviation coupling synchronous control structure. An improved multi-PMSM deviation coupling synchronous control method based on NAISMC and SMDO is proposed. Finally, experimental analysis is done. The results show that the synchronous control method proposed in this paper can effectively ensure that the four motors have good synchronization performance, improves their anti-disturbance ability, and ensures the stability of multi-motor synchronization.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51605003 and No. 51575001).

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); multi motor synchronous control; integral sliding mode control; disturbance observer; deviation coupling control

## 0 引言

多电机同步控制是电机运动学控制领域的重要组成部分, 被广泛应用于机械高精度加工、生产制

造、数控工业平台和新能源汽车等行业<sup>[1-2]</sup>。永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)的多电机同步控制是一个多参数高耦合的高阶时变非线性复杂系统, 其控制精度与控制性能在现代制造业与大型机器复杂传动系统中有着极其重要的作用和影响。因此, 为了提高多电机同步控制系统的控制性能, 对其控制结构和电机控制算法进行研究十分必要。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51605003, 51575001); 安徽省高校自然科学基金项目资助(KJ2020A0358); 安徽工程大学中青年拔尖人才培养计划项目资助

文献[3]提到当电机运动受到外界负载扰动等因素的影响时,调速系统转速波动较大。因此,为提高多电机同步控制精度与控制性能的稳定性,在多电机同步系统中转速是否及时反馈,控制结构是否合理,对其同步控制性能的改善十分重要。目前,比较常用的多电机同步控制结构主要有:主从控制<sup>[4-5]</sup>、虚拟主轴控制<sup>[6]</sup>、交叉耦合控制<sup>[7]</sup>、相邻交叉耦合控制<sup>[8]</sup>和偏差耦合控制<sup>[9]</sup>等控制结构。主从式同步控制结构简单,但属于并行控制,容易受外在环境影响,控制精度不高,主要用在大型传动机构中;虚拟主轴同步控制结构,其同步跟踪响应快,但其受虚拟参考转速和反馈转速的影响,易引起多电机同步系统失步或超调等问题。文献[10]提出了基于交叉耦合的双电机转速同步控制策略,并建立了基于线性扩张状态观测器的全阶速度环模型,交叉耦合控制结构和相邻交叉耦合控制结构虽能提高同步控制精度和电机的抗扰动性能,但算法复杂且不易实现,且该控制结构不适用于两个以上电机的同步控制。针对交叉耦合控制结构难以解决超过两个电机同步的问题,文献[11]利用均值耦合结构,提高了多电机同步控制精度,但该结构易受负载影响。也有学者将速度同步交叉耦合与主从式控制结构相结合,以便用于3个电机的速度同步,但该控制方法结构过于复杂<sup>[12]</sup>。文献[13]提出的传统偏差耦合结构是由交叉耦合结构发展而来,其将主电机与其他电机的同步误差乘以增益系数,再补偿给跟踪误差,能够使多电机系统迅速响应,从而提高同步控制精度。文献[14]针对传统偏差耦合结构启动过程中同步误差较大的问题,在同步误差控制器上设计了选择输出环节,提高了多电机同步性能。但单一的同步误差补偿形式,或其他多电机同步控制结构仍不能完全解决多电机同步系统转速跟踪过程中面临的一系列扰动问题。

同时,为进一步提高多电机同步控制精度,还有学者从电机控制算法方面进行研究。PMSM作为一个强耦合非线性系统,对参数变化响应迅速,易受外界干扰<sup>[15-17]</sup>。传统PI控制算法,其虽具有控制结构简单、参数便于调节等优点,但易受内部参数扰动影响,很难让多电机同步控制达到更好的效果。而滑模控制对参数扰动响应不明显,抗外界干扰能力强,系统结构稳定,且滑动模态可自行设计,滑模控制器中引入自适应控制算法可有效抑制系统参数变化和系统扰动带来的影响,相比其他算法,自适应滑模控制可有效削弱系统高频抖振<sup>[18]</sup>。文献[19]为了降低扰动参数对系统的影响,设计了参数自适

应滑模控制,提高了驱动系统的稳定性。文献[20]提出了基于自适应控制律的动态滑模控制器,降低系统抖振,提高了控制精度。另外,为了解决外界负载和实时总扰动的影响,提高电机控制效果,文献[21]采用了基于负载扰动观测的PMSM控制策略,提高了电机控制系统的稳定性。文献[22]将PMSM系统所有的未知非线性、参数不确定性和未知时变负载转矩扰动在内的外部扰动定义为摄动项,并通过设计扰动观测器来对其进行估计,实现对非线性系统的自适应反馈线性化控制。文献[23]提出了一种基于改进型扩张状态观测器的控制策略,提高了控制系统的自适应调节能力与控制精度。文献[24]针对滑模控制器中的开关函数易引起调速系统固有抖振的问题,设计了基于扩张状态观测器的滑模速度控制器,增强了系统的鲁棒性能。文献[25]对于传统PI速度环易引发系统因参数摄动而导致控制性能不佳的问题,提出了基于扩展滑模扰动观测器的超局部模型,提高了系统的抗扰性能。由此可见,电机控制算法与扰动观测器对于多电机同步控制系统提高控制精度和对抗外部扰动等方面有非常重要的作用,亦应对其进行研究。

综上所述,本文以滞环控制的永磁同步电机作为多电机同步控制的基础,针对外部负载扰动等因素造成的多电机同步性能较差的问题,在多电机同步的控制结构和单电机控制算法上进行改进,在传统偏差耦合控制结构的基础上增加了速度评测项,实现同步速度补偿,提出了一种改进型偏差耦合控制结构。同时建立了基于新型自适应趋近律积分滑模控制的PMSM控制系统。为了减小负载转矩对电机同步性能的影响,设计了负载扰动观测器,利用其对系统总扰动进行估计和补偿,构建了基于新型自适应积分滑模控制和扰动观测器的多PMSM改进偏差耦合同步控制系统。最后,对本文提出的多电机同步控制策略进行了实验验证,结果表明该控制策略具有良好的同步性能与抗干扰能力。

## 1 多PMSM改进型偏差耦合同步控制结构

在传统偏差耦合结构中,其同步速度补偿器主要是被控电机与其余电机的速度差,然后乘以相应的增益系数,再反馈到系统的控制器中<sup>[26]</sup>。本文基于传统偏差耦合结构,通过增加速度综合评测项来对同步补偿器进行改进,以描述被控电机与其他电机间的耦合关系,基于此建立了改进型偏差耦合控制结构,如图1所示。

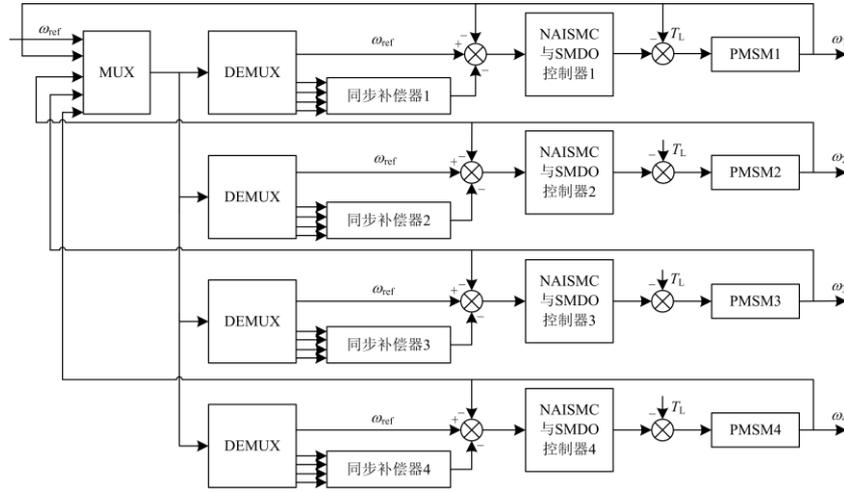


图 1 改进型偏差耦合控制结构图

Fig. 1 Structure diagram of improved deviation coupling control

以 PMSM1 同步补偿器为例, 来说明本文提出的改进型偏差耦合结构。

PMSM1 的速度跟踪误差表达式为

$$e_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_1 \quad (1)$$

PMSM1 传统的同步补偿器  $E_1$  设计为

$$E_1 = K_{12}(\omega_1 - \omega_2) + K_{13}(\omega_1 - \omega_3) + K_{14}(\omega_1 - \omega_4) \quad (2)$$

同理可分别求得另外 3 台电机的同步补偿误差  $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$ 。其中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 、 $\omega_4$  分别为对应电机的转速。 $K_{ij}$  ( $i=1,2,3,4; j=1,2,3,4$ ) 为相应的反馈增益补偿系数, 其值由受控电机  $i$  与其余电机  $j$  的转动惯量的比值决定, 可表示为

$$K_{ij} = \frac{J_i}{J_j} \quad (3)$$

本文研究 4 个不同电机的同步, 所以补偿增益系数各不相同, 由于这种同步补偿方式仅考虑到了被控电机和其他电机间的同步关系, 并没有明确描述与其他电机间的耦合关系, 故而本文引入了速度综合评测项  $\omega_p$ , 其定义如式(4)所示。

$$\omega_p = (\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}})/2 - \bar{\omega}_m \quad (4)$$

$$\bar{\omega}_m = \sum_{i=0}^n \frac{\omega_i}{n} \quad (5)$$

式中:  $\omega_{\text{max}}$ 、 $\omega_{\text{min}}$  分别是被控电机的转速最大值和转速最小值;  $\bar{\omega}_m$  是 4 个 PMSM 输出转速的平均值。

故改进后的转速同步误差补偿器  $E_1$  可由式(6)表示, 其结构示意图如图 2 所示。

$$E_1 = K_{12}(\omega_1 - \omega_2) + K_{13}(\omega_1 - \omega_3) + K_{14}(\omega_1 - \omega_4) + \omega_p \quad (6)$$

改进型同步误差补偿器能将多电机的跟踪误差和同步误差更好地结合在一起, 增加的速度综合评

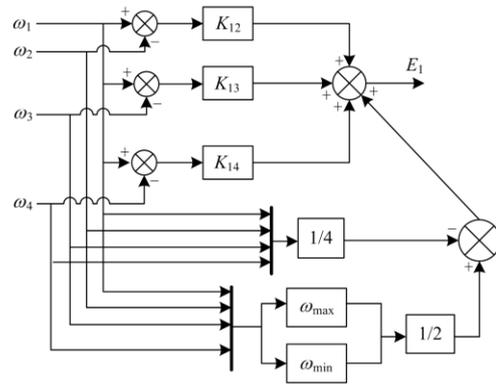


图 2 PMSM1 的改进型同步补偿器

Fig. 2 Improved synchronous compensator of PMSM1

测项  $\omega_p$  能将 4 个电机间的转速耦合在一起, 有效避免了因 4 个电机转速差异过大, 而对补偿效果产生的影响, 使转速补偿更加精确, 提高了同步控制效果。

对于多电机同步控制结构, 无论是以电机转速还是以位置作为补偿量, 并将其负反馈给转速环控制器, 都是为了补偿  $q$  轴启动电流, 使启动过程中多个不同电机具有良好的同步性能。因此, 还可从转速环控制器等方面, 结合先进算法提高单电机控制精度来改善多电机同步的控制精度与稳定性。

## 2 基于自适应积分滑模控制与扰动滑模观测器的 PMSM 控制系统

本文为了提高多电机同步控制系统中单个电机的精确控制性能, 采用了积分滑模面, 设计了基于积分滑模面的指数趋近律, 实现了 PMSM 自适应积分滑模控制器设计。为了减少负载扰动对同步系统

性能的影响, 利用基于积分滑模面的指数趋近律滑模观测器, 来观测负载转矩, 并将其反馈到 PMSM 控制中, 来提高多电机同步控制系统中单个 PMSM 的控制性能, 其控制原理如图 3 所示。

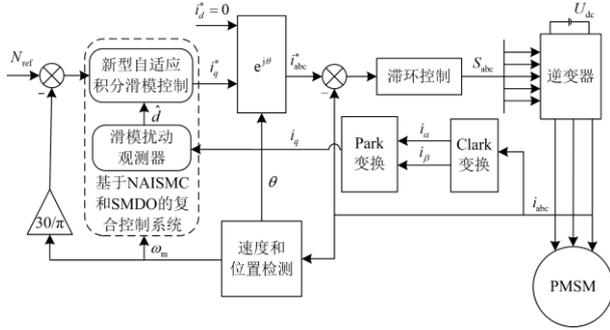


图 3 基于 NAISMC 与 SMDO 的滞环控制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of hysteresis control based on NAISMC and SMDO

### 2.1 新型自适应积分滑模控制器设计

本文以滞环控制的表贴式 PMSM 为研究对象, 其在  $d$ - $q$  坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} U_d = Ri_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_e \varphi_q \\ U_q = Ri_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_e \varphi_d \end{cases} \quad (7)$$

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (8)$$

电机机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (9)$$

式中:  $U_d$ 、 $U_q$  是  $dq$  轴电压;  $\varphi_q$ 、 $\varphi_d$  是定子磁链;  $\varphi_f$  是永磁体磁链;  $L_d$  和  $L_q$  分别是  $dq$  轴电感分量, 为方便研究本文取  $L_q = L_d$ ;  $R$  是定子电阻;  $\omega_e$  是电角速度;  $\omega_m$  是机械角速度;  $B$  是阻尼系数;  $T_e$  是电磁转矩, 且  $T_e = 1.5P_n \varphi_f i_q$ , 其中  $P_n$  是电机极对数;  $T_L$  是负载转矩;  $J$  是转动惯量。

根据式(1)定义, 则有

$$\dot{\mathcal{X}} = -\mathcal{C}\mathcal{X} \quad (10)$$

在进行表贴式 PMSM 控制系统设计时, 为了达到较好的控制效果, 采用  $i_d = 0$  控制, 并将式(10)、式(7)一式(9)联立, 整理可得

$$\dot{\mathcal{X}} = -\frac{3P_n \varphi_f}{2J} i_q + \frac{T_L}{J} + \frac{B\omega_m}{J} \quad (11)$$

令  $\mu = i_q^*$ ,  $A = \frac{1.5P_n \varphi_f}{J}$ ,  $h = \frac{B}{J}$ ,  $b = \frac{1}{J}$ 。把  $T_L$  当作负载扰动量, 并将式(11)写成状态方程的形式有

$$\begin{cases} x_1 = e_1 = \omega_{ref} - \omega_m \\ \dot{\mathcal{X}} = \mathcal{C}\mathcal{X} = -\mathcal{C}\mathcal{X}_m \\ x_2 = -A\mu + h\omega_m + b(T_L + \Delta T) \\ x_2 = \mathcal{X} \end{cases} \quad (12)$$

电机受负载转矩的作用, 会对电机控制器的控制效果产生影响。可将电机的总扰动视为内部参数摄动  $\Delta T$  以及外部负载  $T_L$  共同作用的结果, 将其定义为总扰动  $d$ , 则有

$$d = T_L + \Delta T \quad (13)$$

根据式(10)、式(12)和式(13)可知

$$x_2 = \mathcal{X} = \mathcal{C}\mathcal{X} = -\mathcal{C}\mathcal{X}_m = -bT_e + h\omega_m + bd \quad (14)$$

本文滑模控制采用了积分滑模面, 它可改善滑模运动的稳定性能, 使转矩输出平稳, 转速跟踪不会出现较大的波动。此外, 积分滑模面的使用还可以避免输入量出现高阶导数, 从而引发系统抖振和对控制律的设计产生影响。

令积分滑模面为

$$s = x_1 + \int (c_1 x_2 + c_2 x_1) dt \quad (15)$$

式中,  $c_1$ 、 $c_2$  为积分滑模的积分系数。

$$\dot{\mathcal{X}} = \mathcal{C}\mathcal{X} + c_1 x_2 + c_2 x_1 = (1 + c_1)\mathcal{C}\mathcal{X} + c_2 x_1 \quad (16)$$

若使趋近律  $\mathcal{X}$  趋向于零, 则有

$$x_1 = x(0)e^{-\frac{c_2}{1+c_1}t} \quad (17)$$

因此, 选择合适的  $c_1$ 、 $c_2$  的值可使输入量误差趋向于 0, 结合式(14)一式(16), 可得

$$\dot{\mathcal{X}} = -Au + h\omega_m + bd + c_1 x_2 + c_2 x_1 \quad (18)$$

由于滑模控制主要是由趋近和维持运动两部分组成, 一方面要快速接近滑模面, 另一方面在控制律作用下, 要能够在滑模面上不发生剧烈波动, 既要满足可达性, 还要满足平稳性, 传统指数趋近律滑模控制就是基于这两点提出的<sup>[27]</sup>。

因此, 本文设计了基于新型积分滑模面的自适应趋近律, 使切换模块相较于传统指数趋近律有自适应的特性, 切换过程更加平稳。

$$\dot{\mathcal{X}} = -\left[ \frac{k}{\alpha + (1-\alpha)e^{-\delta/s^2}} + \lambda/s^\beta \right] \text{sat}(s) - k_1 s \quad (19)$$

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sign}(s), & |s| \geq \rho \\ \frac{s}{\rho}, & |s| < \rho \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $0 < \alpha < 1$ ,  $k > 0$ ,  $\lambda > 0$ ,  $1 < \beta < 2$ ,  $k_1 > 0$ ,  $\rho > 0$ ,  $\delta > 0$ ;  $\rho$  是饱和函数边界层厚度值。

当输入的误差变量距离滑模面较远, 即  $|s|$  较大时, 切换项为  $k/\alpha + \lambda|s|^\beta$ , 能够使系统更快地收敛稳定, 使误差变量到达滑模面。当  $|s|$  较小时, 切换项系数变为  $k$ 。由于文中采用了饱和函数, 当  $|s|$  较小时, 误差变量在边界层切换时, 更加稳定, 使系统抖振减小。

对采用的自适应趋近律积分滑模控制方法, 可用 Lyapunov 函数证明其稳定性。

令  $V = \frac{1}{2}s^2$ , 则有

$\dot{V} = s\dot{s}$

$$\begin{cases} -/s/ \left[ \frac{k}{\alpha + (1-\alpha)e^{-\delta/|s|^2}} + \lambda/s^\beta \right] - k_1s^2, /s/ \geq \rho \\ -\frac{s^2}{\rho} \left[ \frac{k}{\alpha + (1-\alpha)e^{-\delta/|s|^2}} + \lambda/s^\beta \right] - k_1s^2, /s/ < \rho \end{cases} \quad (21)$$

由式(21)可知,  $\dot{V} < 0$ , 故而该控制器满足稳定原理, 可使输入变量误差趋于零, 提高滑模控制效果。

结合式(17)一式(19)可得  $q$  轴控制输出电流  $i_q^*$  为

$$\begin{aligned} i_q^* = & \frac{1}{A} [h\omega_m + bd + c_1x_2 + c_2x_1 + \\ & \left( \frac{k}{\alpha + (1-\alpha)e^{-\delta/|s|^2}} + \lambda/s^\beta \right) \text{sat}(s) + k_1s] \end{aligned} \quad (22)$$

## 2.2 扰动观测器设计

传统降阶负载转矩观测器<sup>[28]</sup>通过构建反馈增益矩阵来进行极点配置, 观测器的稳定性和能否快速收敛至负载转矩, 主要取决于选取合适的增益系数, 调节起来异常复杂, 收敛速度慢, 且很容易发生超调, 极不稳定。由式(22)可知, 新型自适应积分滑模控制器得到的控制量与总扰动  $d$  相关, 为了削弱外加负载等扰动对控制器性能的影响, 故而设计了基于新型趋近律的滑模扰动观测器(SMDO)来估计系统的总扰动  $d$ 。

因电机额定负载的限制, 对于 PMSM 电机来说, 认为负载作用变化缓慢, 故有

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (23)$$

根据式(14), 令转速  $\omega_m$  为输出量, 可得

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_m \\ \dot{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h & -b \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_m \\ d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} T_c \quad (24)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \omega_m \\ d \end{bmatrix} \quad (25)$$

转速与扰动估计量分别为  $\hat{\omega}_m$ 、 $\hat{d}$ , 根据式(24)和式(25)可知

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_m \\ \dot{\hat{d}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h & -b \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_m \\ \hat{d} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix} T_c + \begin{bmatrix} 1 \\ \gamma \end{bmatrix} h(e_\omega) \quad (26)$$

式中:  $\gamma$  是滑模增益系数;  $h(e_\omega)$  是对应转速差为输入量的控制律。

$$\begin{cases} x = e_\omega = \omega_m - \hat{\omega}_m \\ e_d = d - \hat{d} \end{cases} \quad (27)$$

根据式(24)一式(27)可知

$$\begin{cases} \dot{e}_\omega = -he_\omega - be_d - h(e_\omega) \\ \dot{e}_d = -\gamma h(e_\omega) \end{cases} \quad (28)$$

采用积分滑模面, 则有

$$s = e_\omega + \lambda_\omega \int e_\omega dt \quad (29)$$

式中,  $\lambda_\omega$  是积分滑模增益。

在传统的指数型趋近律基础之上, 结合传统积分滑模面, 设计了一种新型的趋近律, 用以估算系统的扰动  $d$ 。

新型趋近率设计为

$$\dot{s} = -qs - h(x)\text{sign}(s) \quad (30)$$

$$h(x) = \begin{cases} \frac{k_2/x}{1+|x|}, & /x/ \leq \eta \\ \frac{k_2}{\tau}, & /x/ > \eta \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $x$  是自变量误差;  $k_2$ 、 $q$  是趋近率系数;  $\eta$  是自变量边界层, 且  $\eta > 0$ ;  $0 < \tau < 0$ 。

根据 Lyapunov 稳定性判别可知, 令 Lyapunov 函数为  $V = \frac{1}{2}s^2$ , 则有

$$\dot{V} = s\dot{s} = \begin{cases} -k_2 \frac{|x|}{1+|x|} /s/ - qs^2, & /x/ \leq \eta \\ -\frac{k_2}{\tau} /s/ - qs^2, & /x/ > \eta \end{cases} \quad (32)$$

很明显  $\dot{V} < 0$ , 则该控制律满足稳定性原理。

可以把式(28)中的  $-be_d$  看作总的外在扰动  $d$ , 结合式(26)、式(28)一式(30), 可知控制律  $h(e_\omega)$  为

$$h(e_\omega) = (\lambda_\omega - h)e_\omega + qs + h(x)\text{sign}(s) \quad (33)$$

则外在扰动的估计值为

$$\hat{d} = b\gamma \int h(e_\omega) dt \quad (34)$$

综上所述, 结合式(22)可知考虑外在扰动的  $q$  轴控制电流为

$$\hat{i}_q^* = \frac{1}{A} [h\omega_m + b\hat{d} + c_1x_2 + c_2x_1 + (\frac{k}{\alpha + (1-\alpha)e^{-\delta/s^2}} + \lambda/s^\beta) \text{sat}(s) + k_1s] \quad (35)$$

通过式(34)可求得总的扰动估计值  $\hat{d}$ ，并将其代入式(35)中，可得考虑外在扰动的自适应积分滑模控制所需的最终  $q$  轴电流的控制输出量  $\hat{i}_q^*$ 。

### 2.3 稳定性分析

如式(35)所示，由于将系统总外在扰动估计值  $\hat{d}$  反馈到了  $q$  轴电流的控制输出电流中，下面来分析其稳定性。

令  $e_i = i_q^* - \hat{i}_q^*$ ，则有

$$e_i = i_q^* - \hat{i}_q^* = \frac{b}{A} (d - \hat{d}) \quad (36)$$

根据式(26)、式(28)和式(33)可知

$$\begin{cases} \dot{e}_d = d - \hat{d} = -Jh(e_\omega) \\ \dot{e}_q = -\gamma h(e_\omega) \end{cases} \quad (37)$$

由式(37)可知

$$e_d = c_d \int e_q \quad (38)$$

式中， $c_d$  是常数，要使 SMDO 的观测误差  $e_d$  趋向于零，则  $\gamma$  必须小于 0。

根据 Lyapunov 判别系统趋近律的稳定性，令  $V = \frac{1}{2} e_i^2$ ，则有

$$\dot{V} = e_i \dot{e}_i = \frac{b}{A} e_d \dot{e}_q = \frac{b}{A} \gamma J h^2(e_\omega) \leq 0 \quad (39)$$

由此可见，基于 SMDO 与 NAISMC 复合控制的转速环控制器满足系统稳定性原理，证明了系统控制律的稳定性。经分析，SMDO 观测的扰动作为电流补偿值反馈后，在很大程度上减小了 NAISMC 控制器的增益参数，同时削弱了系统抖振，提高了单电机控制性能，对多电机同步系统性能改善具有重要作用。

### 3 实验验证

为了验证 NAISMC 与 SMDO 控制器的控制效果，以及基于其控制的 PMSM 的多电机同步控制效果，搭建了如图 4 所示的多电机协同控制实验台架，主要由上位机、电机驱动箱、多 PMSM 协同驱动平衡车底盘构成。

在上位机的 Matlab/Simulink 环境中，建立如图 1 所示的多 PMSM 改进型偏差耦合同步控制模型，其中 PMSM 采用如图 3 所示的基于 NAISMC 与 SMDO 的复合控制，并生成其可执行代码，通过 CCS9.3.0

编译后生成可以在 DSP 中运行的 C 代码，连接上位机，实验台仿真器 XDS100V3 将代码烧录到 TMS320DSP28335 PGFA 中，控制箱控制单相桥式逆变器的驱动信号，使 PMSM 正常工作，上位机通过各串口接收实验输出数据信号，实现各实验所需参数的实时调节。

主要实验工况为：给定参考转速 1000 r/min，实验时在 0.1~0.2 s 对各电机施加 4 N·m 的负载转矩，在 0.25 s 分别给 4 个电机施加 2 N·m、4 N·m、6 N·m、8 N·m 的负载转矩，其他时间空载。各永磁同步电机参数如表 1 所示。

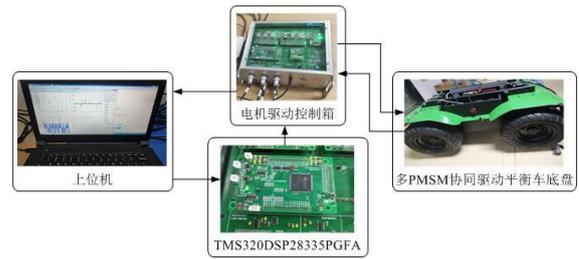


图 4 多电机协同控制实验台架

Fig. 4 Multi-motor cooperative control test bench

表 1 多电机同步系统参数

Table 1 Parameters of multi-motor system

电机	1	2	3	4
额定转速/(r/min)	3000	3000	3000	3000
$R_s/\Omega$	2.875	2.865	2.885	2.890
$L_d = L_q/\text{mH}$	$8.5 \times 10^{-3}$	$8.47 \times 10^{-3}$	$8.40 \times 10^{-3}$	$8.36 \times 10^{-3}$
$\psi_f/\text{Wb}$	0.175	0.180	0.182	0.192
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$0.850 \times 10^{-3}$	$0.865 \times 10^{-3}$	$0.95 \times 10^{-3}$	$0.985 \times 10^{-3}$
$B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	$0.80 \times 10^{-4}$	$0.80 \times 10^{-4}$	$0.75 \times 10^{-4}$	$0.75 \times 10^{-4}$
极对数 $n_p$	4	4	4	4

自适应积分滑模控制器中， $c_1$ 、 $c_2$  的取值要保证积分滑模面函数快速稳定地趋向于 0，将  $c_1$ 、 $c_2$  的取值按照倍数分别作出滑模面函数，且在 0.1 s 给电机施加负载转矩，如图 5 所示，可得当参数  $c_1 = 0.2$ ， $c_2 = 0.1$  时，自变量误差能平稳迅速无超调地到达滑模面，且当电机受到负载转矩作用后，抖振较小。因此，在后面的实验分析中，自适应滑模控制器的  $c_1$ 、 $c_2$  取值分别为 0.2 和 0.1。NASMC 和 SMDO 控制器参数如表 2 所示。

1) 为了验证本文提出的改进型偏差耦合同步控制结构的有效性，对单 PMSM 采用传统滑模控制，将传统的多 PMSM 偏差耦合同步控制和改进的多 PMSM 偏差耦合同步控制进行对比实验。传统偏差耦合同步结构实验结果如图 6、图 7 所示，改进

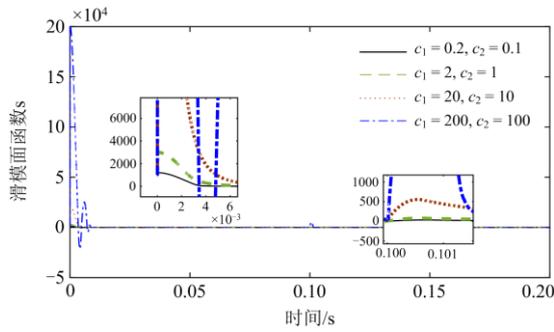


图 5 滑模面函数 s

Fig. 5 Sliding surface function s

表 2 控制器参数

Table 2 Controller parameters

NAISMC	SMDO
$c_1 = 0.2$	$\lambda_0 = 1.5$
$c_2 = 0.1$	$\gamma = 0.5$
$\delta = 85$	$\eta = 10$
$\alpha = 0.3$	$q = 250$
$k = 150$	$\tau = 0.1$
$\beta = 1.2$	$K_2 = 25$
$\lambda = 150$	—
$k_1 = 80$	—
$\rho = 0.01$	—

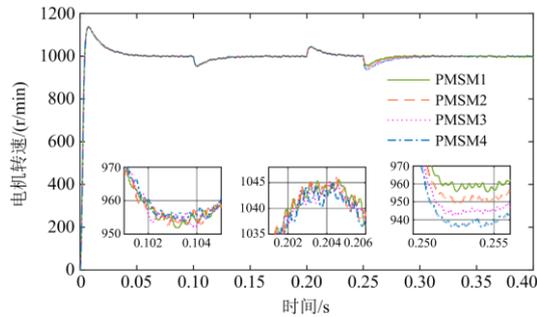


图 6 未改进偏差耦合控制的 4 电机转速实验曲线

Fig. 6 Four-motor speed curves without improved deviation coupling control

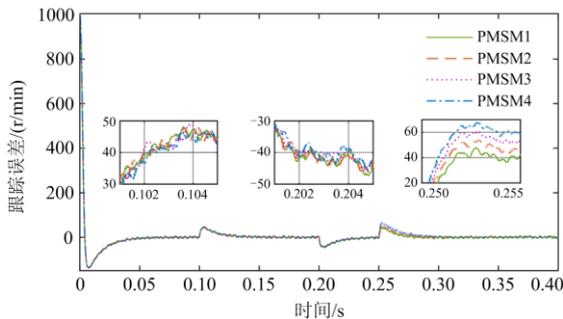


图 7 未改进偏差耦合控制的 4 电机转速跟踪误差实验曲线

Fig. 7 Four-motor speed tracking error curves without improved deviation coupling control

型的偏差耦合同步控制结构如图 8、图 9 所示, 其 PMSM1 与其他电机的转速同步误差如图 10—图 12 所示。

由图 6—图 12 的实验结果可知, 当单 PMSM 利用 SMC 控制时, 采用未改进的偏差耦合同步控制结构时, PMSM1 分别与 PMSM2、PMSM3 和 PMSM4 的转速同步误差均要比本文提出的改进偏差耦合同步控制结构的要大。因此, 由实验分析可知, 通过引入速度综合评测项对同步补偿器进行改

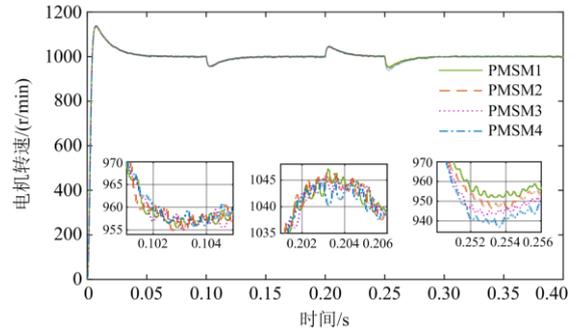


图 8 改进偏差耦合控制的 4 电机转速实验曲线

Fig. 8 Four-motor speed curves with improved deviation coupling control

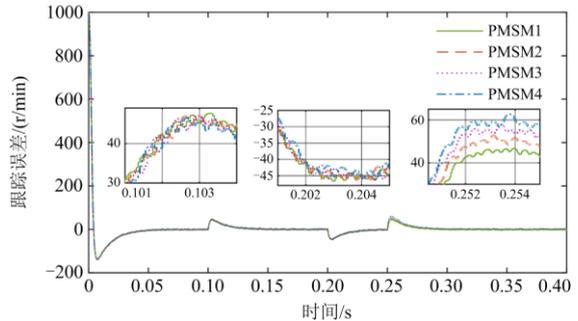


图 9 改进偏差耦合控制的 4 电机转速跟踪误差曲线

Fig. 9 Four-motor speed tracking error curves with improved deviation coupling control

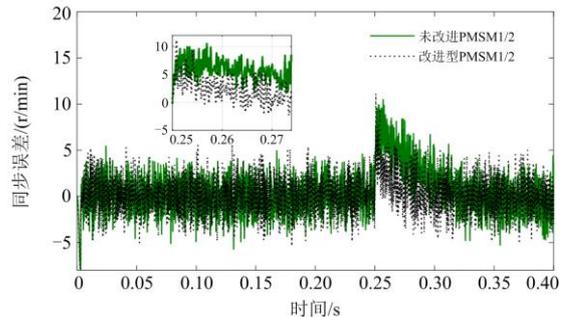


图 10 PMSM1 与 PMSM2 转速同步误差曲线

Fig. 10 Speed synchronization error curves of PMSM1 and PMSM2

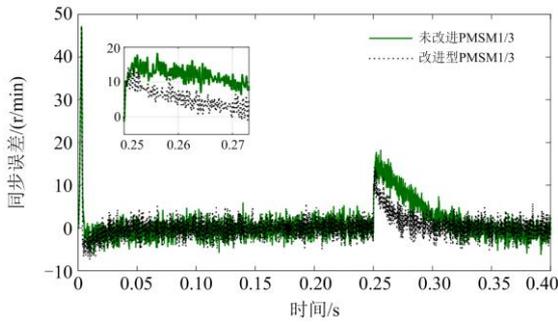


图 11 PMSM1 与 PMSM3 转速同步误差曲线  
Fig. 11 Speed synchronization error curves of PMSM1 and PMSM3

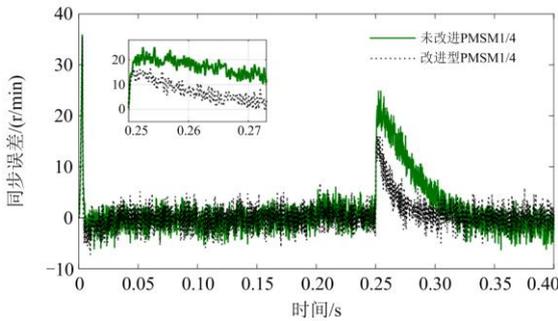


图 12 PMSM1 与 PMSM4 转速同步误差曲线  
Fig. 12 Speed synchronization error curves of PMSM1 and PMSM4

进, 能对被控电机与其他电机间的耦合关系进行更加贴合实际的描述, 说明本文提出的基于改进偏差耦合同步控制结构的多 PMSM 同步性能较传统偏差耦合同步控制结构优良。

2) 为了验证单 PMSM 采用 NAISMC 控制对多 PMSM 同步控制性能的改善, 基于改进的多 PMSM 偏差耦合控制结构, 单 PMSM 采用 NAISMC 控制, 来进行实验并与单 PMSM 采用传统 SMC 控制的同步控制效果进行对比。4 个电机的转速、跟踪误差以及电机 1 与其余 3 个电机的同步误差估计曲线如图 13—图 15 所示。

相比于基于改进偏差耦合的 SMC 控制的多 PMSM 同步控制(其实验结果如图 8 和图 9 所示), 基于改进偏差耦合的 NAISMC 控制的多电机同步控制, 受外在负载转矩影响较小, 各电机均能迅速跟踪上目标转速, 超调量亦有所下降。如图 13 和图 14 所示, 在 0.25 s 各电机受到不同负载转矩作用后, 各电机同步运动转速有较大波动, 但由图 15 和图 10—图 12 中结果对比可知, 基于改进偏差耦合的 NAISMC 控制的多 PMSM 同步控制的转速同步误差有较大减小, 说明基于改进偏差耦合的 NAISMC

控制的多 PMSM 同步控制系统的抗外在扰动能力有了一定提高, 使多电机同步控制精度得到了改善。

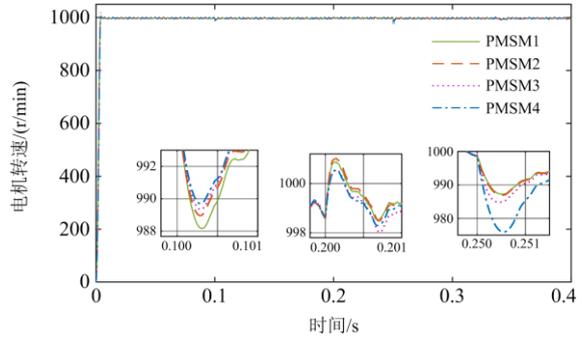


图 13 NAISMC 控制的 4 电机转速实验曲线

Fig. 13 Four-motor speed experimental curves of NAISMC

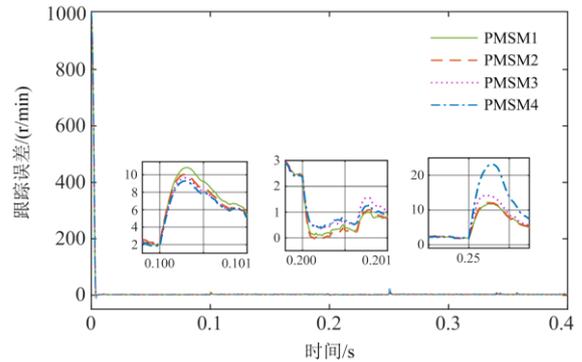


图 14 NAISMC 控制的 4 电机跟踪误差实验曲线

Fig. 14 Four-motor tracking error estimation curves of NAISMC

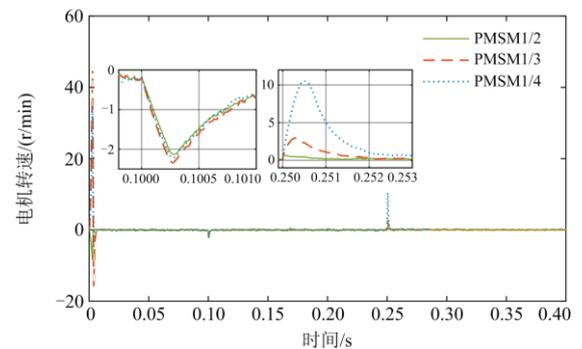


图 15 NAISMC 控制的 4 电机同步误差实验曲线

Fig. 15 Four-motor speed synchronization error curves of NAISMC

3) 为了验证扰动观测器对多 PMSM 同步控制性能的改善效果, 采用改进的多 PMSM 偏差耦合同步控制结构, 对单 PMSM 分别采用基于 NAISMC 与 SMDO 控制和基于 NAISMC 与传统观测器控制来进行实验对比分析。4 个电机的转速、跟踪误差、

负载转矩观测以及电机 1 与其余 3 个电机的同步误差估计曲线, 如图 16—图 23 所示。

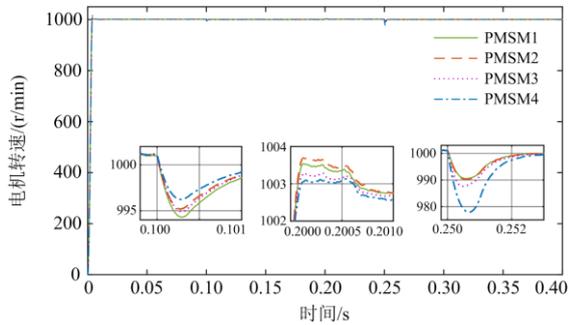


图 16 NAISMC 与传统观测器的 4 电机转速曲线  
Fig. 16 Four-motor speed curves of NAISMC and traditional observer

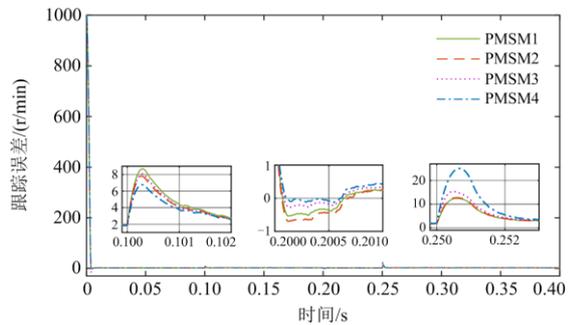


图 17 NAISMC 与传统观测器的 4 电机跟踪误差估计曲线  
Fig. 17 Four-motor tracking error estimation curves of NAISMC and traditional observer

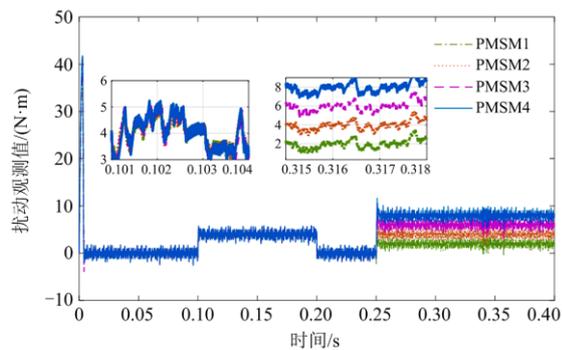


图 18 NAISMC 与传统观测器的 4 电机扰动观测曲线  
Fig. 18 Four-motor disturbance observation curves of NAISMC and traditional observer

图 18 是各电机扰动观测曲线, 其观测值在加载值附近且较为平稳; 图 19 是多电机同步误差实验曲线, 在 0.1~0.2 s 内施加 4 N·m 的脉冲负载后, 多电机同步误差在 0~2 r/min。从图 16、图 17 可以看出

各电机转速没有出现明显的降低, 大约在 0~9 r/min 以内。当在 0.25 s 后, 对各电机施加不同的持续负载作用时, 各电机转速降低约为 0~25 r/min, 多电机同步误差为 0~13 r/min。实验结果说明, 基于 NAISMC 与传统观测器复合控制的多电机同步控制, 相比于未有扰动观测的基于改进偏差耦合的 SMC 控制和 NAISMC 控制的多 PMSM 同步控制, 其具有非常好的同步性能, 且具有很强的抗扰能力, 提高了 PMSM 多电机同步控制的稳定性。

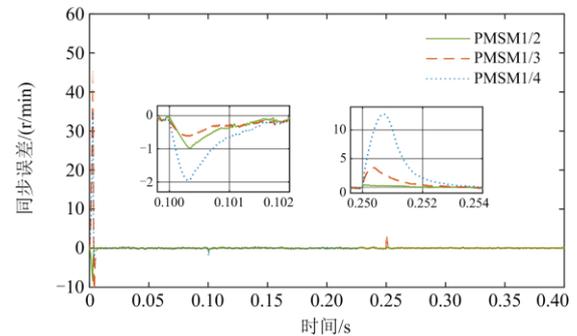


图 19 NAISMC 与传统观测器的 4 电机转速同步误差曲线  
Fig. 19 Four-motor speed synchronization error curves of NAISMC and traditional observer

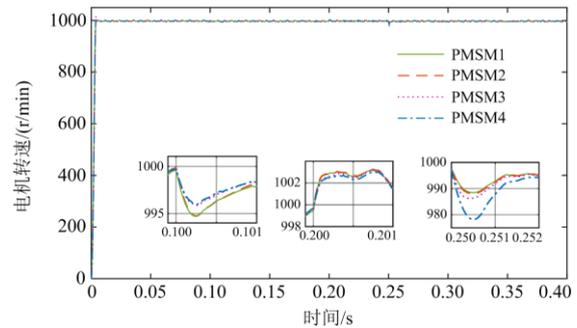


图 20 NAISMC 与 SMDO 的 4 电机转速曲线  
Fig. 20 Four-motor speed curves of NAISMC and SMDO

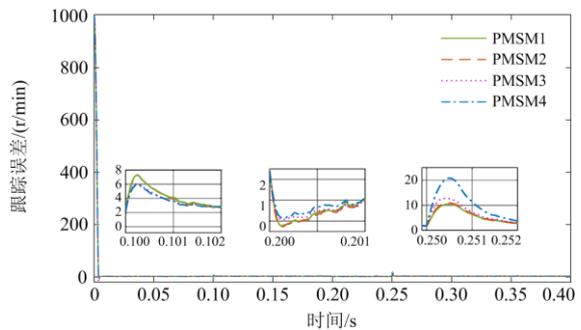


图 21 NAISMC 与 SMDO 的 4 电机跟踪误差估计曲线  
Fig. 21 Four-motor tracking error estimation curves of NAISMC and SMDO

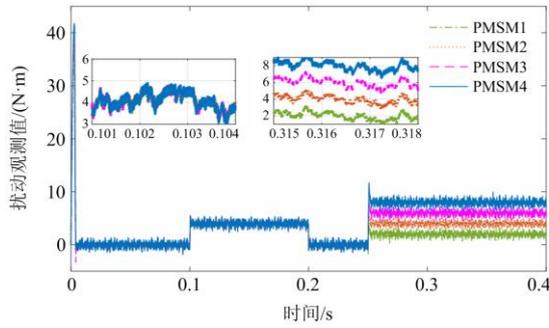


图 22 NAISMC 与 SMDO 的 4 电机扰动观测曲线  
Fig. 22 Four-motor disturbance observation curves of NAISMC and SMDO

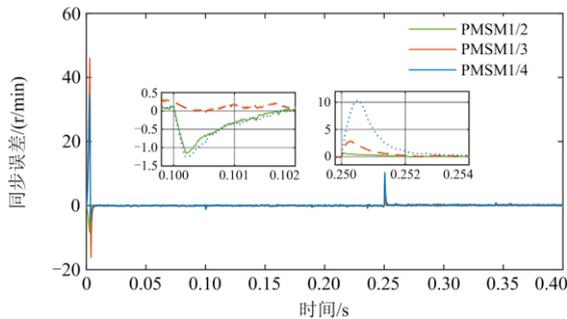


图 23 NAISMC 与 SMDO 的 4 电机转速同步误差曲线  
Fig. 23 Four-motor speed synchronization error curves of NAISMC and SMDO

图 22 是各电机负载转矩观测实验曲线,相较于 NAISMC 与传统观测器复合控制(如图 18 所示),其观测值平稳并且更加精确。图 23 是多电机同步误差实验曲线,在 0.1~0.2 s 内施加 4 N·m 的脉冲负载后,多电机同步误差在 0~1.2 r/min,从图 20、图 21 可以看出电机转速没有出现明显的降低,大约在 0~8 r/min 以内。当在 0.25 s 后,对各电机施加不同的持续负载作用时,电机转速降低约为 0~20 r/min,从图 23 可以看出多电机同步误差在 0~10 r/min。根据实验中的电机同步误差显示,转速和跟踪误差在加载和卸载时,其值都要比传统 SMC、NAISMC 与传统观测器综合控制的要小,能够在极短时间内恢复至目标转速,且受负载作用后各电机转速降低较小,各电机转速波动较小,稳定性强,控制效果良好,多电机同步性能参数与工作稳定性有了明显的提高。因此,实验结果说明,相比基于 NAISMC 与传统观测器综合控制的多 PMSM 同步控制,基于 NAISMC 与 SMDO 复合控制的多 PMSM 同步控制具有非常好的同步性能,且具有很强的抗扰能力,提高了 PMSM 多电机同步控制的稳定性和精度。

## 4 结论

本文设计了基于新型积分滑模面的自适应趋近律 PMSM 控制器(NAISMC),同时为了抵抗负载扰动,设计了基于新型趋近律的滑模扰动观测器(SMDO),实时观测系统扰动,并设计了基于 NAISMC 与 SMDO 复合控制的多 PMSM 改进型偏差耦合结构的同步控制策略。

1) 采用了改进型偏差耦合多 PMSM 同步结构,对于同步补偿器部分,增加了速度评测项,能够将各电机速度更好地结合在一起,避免了因各电机转速差异过大,而对多电机同步补偿产生的不利影响,有利于维持多电机系统稳定。

2) 由于外部负载扰动变化,会影响各电机的控制,设计了 SMDO,实时观测负载扰动变化,并将其反馈至多电机转速环控制器,提高多电机同步控制稳定性和同步控制精度。

3) 通过多电机同步系统在不同的负载工况下,将传统 SMC、NAISMC, NAISMC 与传统扰动观测器以及 NAISMC 与 SMDO 复合控制作对比分析,结果表明复合控制能有效地保证 4 个电机具有良好的跟踪性能与抗扰性能,确保了多电机同步的稳定性。为了验证本文控制方法的有效性,对多电机同步控制进行了实验验证,结果表明本文的控制方法有效地保证了 4 个电机具有良好的同步性能。

## 参考文献

- [1] 王毅波, 曹宽. 多电机同步控制技术发展简介[J]. 微特电机, 2019, 47(8): 69-73.  
WANG Yibo, CAO Kuan. Brief introduction of multi-motor synchronous control technology[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(8): 69-73.
- [2] ZHANG Rongyun, GONG Changfu, SHI Peicheng, et al. Research on chaos control of permanent magnet synchronous motor based on the synthetical sliding mode control of inverse system decoupling[J]. Journal of Vibration Control, 2020, 27(9-10): 1009-1019.
- [3] 金晶, 万衡, 黄金华. 汽车动力系统永磁同步电机稳定性控制[J]. 计算机仿真, 2018, 35(4): 84-87.  
JIN Jing, WAN Heng, HUANG Jinhua. Stability control of permanent magnet synchronous motor for automobile power system[J]. Computer Simulation, 2018, 35(4): 84-87.
- [4] 肖雄, 王健翔, 张勇军, 等. 一种优化的双电机主-从模型转矩预测控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5720-5730.  
XIAO Xiong, WANG Jianxiang, ZHANG Yongjun, et al.

- An optimized master-slave model predictive direct torque control scheme for the dual motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(24): 5720-5730.
- [5] CORDEIRO A, MANUEL J, PIRES V F. Performance of synchronized master-slave closed-loop control of AC electric drives using real time motion over Ethernet (RTMoE)[J]. Mechatronics, 2020, 69(4): 102400.
- [6] 董凡, 方攸同, 黄晓艳, 等. 同步控制策略在高速列车牵引电机中的应用[J]. 微电机, 2016, 49(8): 27-30, 39. DONG Fan, FANG Youtong, HUANG Xiaoyan, et al. Application of synchronization control on traction motors of high speed trains[J]. Micromotors, 2016, 49(8): 27-30, 39.
- [7] 周颖, 孙超, 王冬生, 等. 网络化电机同步的改进型交叉耦合预测控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 101-107, 115. ZHOU Ying, SUN Chao, WANG Dongsheng, et al. Improved cross-coupling predictive control of networked motor synchronization[J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(12): 101-107, 115.
- [8] 夏长亮, 李莉, 谷鑫, 等. 双永磁电机系统转速同步控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 1-8. XIA Changliang, LI Li, GU Xin, et al. Speed synchronization control of dual-PMSM system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 1-8.
- [9] SHI T, HAO L, QIANG G, et al. An improved relative coupling control structure for multi-motor speed synchronous driving system[J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(6): 451-457.
- [10] 耿强, 李亮, 周湛清, 等. 双永磁电机系统抗扰动转速同步控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(19): 6787-6796. GENG Qiang, LI Liang, ZHOU Zhanqing, et al. Speed synchronization control of disturbance rejection of dual-PMSM system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6787-6796.
- [11] 丁威, 杜钦君, 宋传明, 等. 均值耦合多电机滑模速度同步控制[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2): 159-170. DING Wei, DU Qinjun, SONG Chuanming, et al. Mean-coupled multi-motor sliding mode speed synchronization control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(2): 159-170.
- [12] FANG P, WANG Y, ZOU M, et al. Combined control strategy for synchronization control in multi-motor-pendulum vibration system[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 28(17-18): 2254-2267.
- [13] 姜志斌. 基于分数阶滑模的多电机同步控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014. JIANG Zhibin. Research on multi-motor synchronous control based on fractional order sliding mode control[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [14] 耿强, 王少炜, 周湛清, 等. 改进型偏差耦合多电机转速同步控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 474-482. GENG Qiang, WANG Shaowei, ZHOU Zhanqing, et al. Multi-motor speed synchronous control based on improved relative coupling structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 474-482.
- [15] 王雨虹, 张威, 韩冰, 等. 基于LMI的永磁同步电机鲁棒 $H^\infty$ 自补偿滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 81-90. WANG Yuhong, ZHANG Wei, HAN Bing, et al. Robust  $H^\infty$  self-compensation sliding mode control of a permanent magnet synchronous motor based on linear matrix inequality[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 81-90.
- [16] 姜哲, 卜飞飞, 潘子昊, 等. 永磁同步电机伺服系统改进型无差拍电流控制算法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 177-183. JIANG Zhe, BU Feifei, PAN Zihao, et al. Improved deadbeat current control algorithm for permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 177-183.
- [17] 陈汝兵, 曹太强, 郭筱瑛, 等. 基于MRAS的永磁同步电机无速度传感器控制[J]. 电测与仪表, 2021, 58(8): 179-184. CHEN Rubing, CAO Taiqiang, GUO Xiaoying, et al. Speed sensorless control of permanent magnet synchronous motors based on MRAS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(8): 179-184.
- [18] 黄宵宁, 倪双飞, 杨成顺, 等. 带指令滤波的直驱永磁风机自适应反推积分滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(22): 142-150. HUANG Xiaoning, NI Shuangfei, YANG Chengshun, et al. Adaptive backstepping integral sliding mode control of a direct-drive permanent magnet wind generator with a command-filter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 142-150.
- [19] 肖向华, 张丽, 朱孝勇, 等. 基于参数敏感自适应的漏磁可变式永磁电机无位置传感器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1606-1617. XIAO Xianghua, ZHANG Li, ZHU Xiaoyong, et al.

- Research on sensorless control of a variable leakage flux permanent magnet synchronous motor based on parameter sensitive adaption[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1606-1617.
- [20] 张康, 王丽梅. 基于反馈线性化的永磁直线同步电机自适应动态滑模控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4016-4024.
- ZHANG Kang, WANG Limei. Adaptive dynamic sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor based on feedback linearization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4016-4024.
- [21] 荀倩, 王培良, 蔡志端, 等. 基于负载转矩观测器的PMSM抗负载扰动控制策略[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(5): 36-41, 54.
- XUN Qian, WANG Peiliang, CAI Zhiduan, et al. Anti-load disturbance control strategy of PMSM based on load torque observer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(5): 36-41, 54.
- [22] CHEN J, YAO W, REN Y, et al. Nonlinear adaptive speed control of a permanent magnet synchronous motor: a perturbation estimation approach[J]. Control Engineering Practice, 2019, 85: 163-175.
- [23] 赵峰, 罗雯, 高锋阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 28-35.
- ZHAO Feng, LUO Wen, GAO Fengyang, et al. An improved sliding mode control for PMSM considering sliding mode chattering and disturbance compensation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 28-35.
- [24] 侯利民, 申鹤松, 李蕴倬, 等. 永磁同步电机调速系统的非线性鲁棒滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(6): 143-152.
- HOU Limin, SHEN Hesong, LI Yunzhuo, et al. Nonlinear robust sliding mode control of permanent magnet synchronous motor speed regulation system[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(6): 143-152.
- [25] 赵凯辉, 戴旺珂, 周瑞睿, 等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2375-2386.
- ZHAO Kaihui, DAI Wangke, ZHOU Ruirui, et al. Novel model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2375-2386.
- [26] 何晋, 曹鲁成, 李珂, 等. 改进型偏差耦合结构的多电机同步控制系统[J]. 兵工自动化, 2020, 39(3): 41-44, 52.
- HE Jin, CAO Lucheng, LI Ke, et al. Multi-motor synchronization control system with improved deviation coupling structure[J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(3): 41-44, 52.
- [27] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 933-944.
- LIU Jing, LI Hongwen, DENG Yongting. PMSM sliding-mode based on novel reaching law and disturbance observer[J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(6): 933-944.
- [28] 孙立明, 杨博. 基于扰动观测器的电力系统鲁棒滑模控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 124-132.
- SUN Liming, YANG Bo. Design of perturbation observer-based sliding-mode controller for power systems[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 124-132.

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-01-24

作者简介:

张荣芸(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为汽车系统动力学及控制、新能源汽车电机控制; E-mail: hanfengzhiwei@163.com

周成龙(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源汽车电机控制。E-mail: zclxhzi@163.com

(编辑 魏小丽)