

改进的双电机虚拟总轴同步控制^{*}

唐永聪 刘涛 张芳芳

(天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室 天津 300387)

摘要: 传统虚拟总轴控制策略中扭矩反馈存在较大时滞,当负载发生扰动时,电机之间转速和位置同步误差会不断增大,导致产品质量下降。针对这一问题,提出了改进的双电机虚拟总轴同步控制策略。在改进策略中,为提高弹性扭矩的反馈速度,采用滑模观测器观测将观测的负载转矩直接反馈给虚拟电机;为减小电机之间的位置差,在虚拟机械单元引入积分项。仿真结果表明,改进的控制策略提高了系统应对负载突变的能力,有效减小了电机间转速和位置同步误差,具有一定的实用价值。

关键词: 双电机同步;虚拟总轴;滑模观测器;负载转矩前馈

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4057

Improved dual motor synchronous technology of virtual shaft quality control

Tang Yongcong Liu Tao Zhang Fangfang

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In the process of load disturbance, the traditional electronic virtual line-shafting control strategy had a great error in the speed and position of motors due to the time lag of the virtual elastic torque feedback, which leads to the decrease of the quality of the produce. Aiming at this problem, It proposes an improved ELS control strategy. In this strategy, the sliding mode observer is designed to load torque, the observed load torque feedback to the virtual machine and feedforward compensation in real-time; in order to reduce the position error of motors, the integral term is introduced in the virtual machine unit. Simulation results show that the improved ELS can improve the ability of paper transmission unit to deal with the load change, and effectively reduce the speed and position synchronization error of motors, and has a certain practical value.

Keywords: dual motor synchronization; ELS; sliding mode observer; load torque feedforward

0 引言

在造纸等诸多领域中,多电机的协同控制一直是新的发展趋势。在造纸传输单元中,使用传统的机械轴驱动多电机时,虽然同步性能不错,但是传输距离短、输出功率小,所以研究代替传统机械轴驱动的多电机驱动方式具有较大的应用前景。目前,对于多电机的驱动方式主要包括主从控制、交叉耦合控制、偏差耦合控制和虚拟总轴(electronic virtual line-shafting, ELS)控制等^[1-5]。其中,ELS控制以其同步性能好、配置灵活、易于调节等优点更适合应用于对多电机转速和位置同步性能要求比较高的场合。

近几年,许多专家学者对于传统的ELS控制策略进行了研究。ELS控制系统是由虚拟电机、从属电机以及虚拟机械单元等部分组成。ELS控制策略以虚拟部分取代机

械长轴,它可以应对各种情况,而不需要机械轴驱动那样更改机械部件,其配置灵活简便,易于调节,便于观察。但是当某台从属电机发生较大负载扰动时,在反馈给虚拟电机的过程中,由于虚拟弹性扭矩的计算及反馈存在时间上的滞后,使得电机之间转速和位置同步误差增大,从而导致纸张发生褶皱、断裂和歪斜等问题^[6-10]。

针对上述存在的问题,本文提出了一种改进的ELS控制策略,即采用滑模变结构观测器观测从属电机负载转矩。滑模变结构控制是一种特殊的鲁棒控制方法,它的优点是可以克服系统的不确定性,对受到干扰的电机有着很强的鲁棒性,其控制算法简便,响应速度快,抗干扰能力强,非常适用于像造纸这类非线性电机的控制中^[11-15]。将观测到的负载转矩直接进行求和反馈给虚拟电机,并将其前馈补偿至从属电机的电流环上,这样能够有效地提高抗负载干扰

收稿日期:2017-05

* 基金项目:国家自然科学基金(51577134)、国家级大学生创新创业训练计划(201510058091)项目资助

的能力;同时在虚拟的机械单元引入积分环节,能够在一定程度上减小电机之间的位置误差,完善系统。仿真分析表明,相比传统的 ELS 控制策略,改进算法能够在保持传统算法同步性能较好的前提下,当负载受到干扰时,有效地提高两电机系统转速、位置的同步性能,大大地减小其误差,提高了纸张的质量,具有一定的应用价值。

1 虚拟总轴控制策略

虚拟总轴控制以其配置灵活、同步性能好、易于调节等优点更适合应用于对电机转速和位置同步性能要求比较高的行业。

1.1 传统的 ELS 控制策略

以两台电机为例,传统 ELS 控制策略结构如图 1 所示。

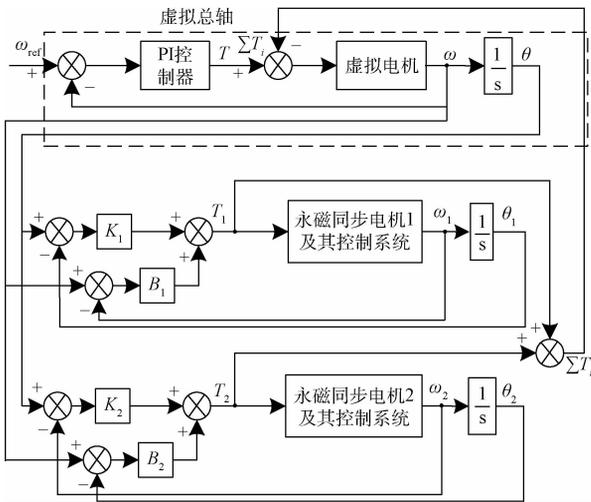


图 1 传统 ELS 控制结构

图 1 中, ω_{ref} 为系统给定转速; ω 、 θ 分别为虚拟电机输出的转速和位置, 作为各从属电机的转速和位置参考信号; ω_i ($i=1, 2$)、 θ_i ($i=1, 2$) 是从属电机的转速和位置信号; K_i ($i=1, 2$) 为虚拟机械内轴的刚度系数; B_i ($i=1, 2$) 为虚拟机械内轴的阻尼系数。 T 为虚拟电机的驱动力矩; T_i ($i=1, 2$) 为各从属电机反馈的虚拟弹性扭矩, 由胡克定理得虚拟弹性扭矩为

$$T_i = K_i \int (\omega - \omega_i) dt + B_i (\omega - \omega_i) \quad (1)$$

ELS 控制可以实现电机转速或位置的调节, 虚拟电机为从属电机提供转速 ω 或位置 θ 的参考信号。稳态时, 各从属电机跟随虚拟电机, 能够达到转速和位置同步, 虚拟总轴上力矩平衡关系式为:

$$T - \sum_{i=1}^n T_i = J_s \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2)$$

式中: J_s 为虚拟电机的转动惯量。

通过对传统 ELS 控制策略分析, 发现在负载发生扰动过程中, 由于虚拟弹性扭矩反馈存在时间上的滞后, 进而

造成多电机之间较大的转速和位置同步误差。最终会导致纸张传输过程发生褶皱、断裂和歪斜现象。

针对这个问题, 本文提出了改进的 ELS 控制策略。

1.2 改进的 ELS 控制策略

改进的 ELS 控制结构框图如图 2 所示。

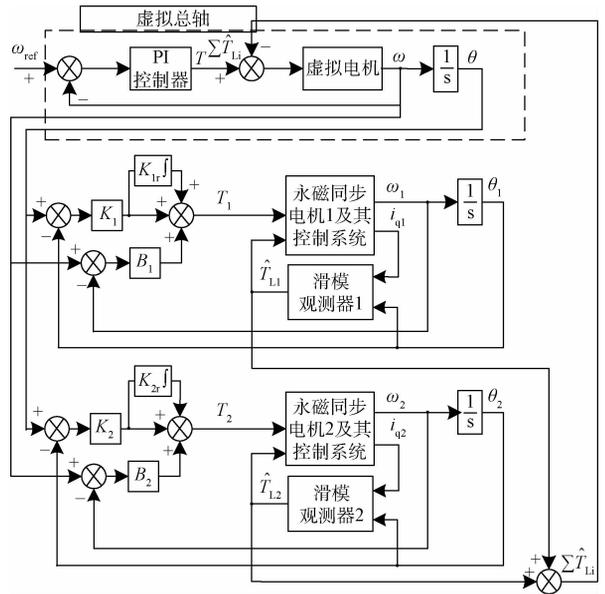


图 2 改进型 ELS 控制结构

图 2 中, \hat{T}_{L_i} ($i=1, 2$) 是第 i 台电机的负载转矩观测值。改进的 ELS 控制策略首先是在虚拟机械单元引入了积分项, 使虚拟机械轴具有无穷大的静态增益, 此时虚拟机械轴无形变, 这样使得系统在稳态工作时从属电机之间没有相对位置差; 其次是加入了滑模观测器, 将观测的负载转矩 \hat{T}_{L_i} ($i=1, 2$) 取代虚拟弹性扭矩 T_i ($i=1, 2$) 反馈回虚拟电机, 此时虚拟总轴上的力矩平衡关系式为:

$$T - \sum_{i=1}^n \hat{T}_{L_i} = J_s \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (3)$$

此时的虚拟弹性扭矩 T_i ($i=1, 2$) 为:

$$T_i = K_i (\theta - \theta_i) + B_i (\omega - \omega_i) + K_{ir} \int (\theta - \theta_i) dt \quad (4)$$

式中: K_{ir} 为虚拟机械内轴的刚度积分增益。

2 负载转矩滑模观测器的设计

2.1 PMSM 的数学模型

系统中包括 2 台 PMSM, 在对第 i ($i=1, 2$) 台电机建立数学模型时, 为了简化分析, 作如下假设: 1) 假设相绕组中感应电动势波形为正弦, 转子磁场在气隙空间分布为标准的正弦波; 2) 忽略定子铁芯饱和, 不计涡流和磁滞损耗; 3) 永磁材料的电导率为 0; 4) 转子上无阻尼绕组。电机采用最大转矩控制方式, 电压方程如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_{di} = R_{si}i_{di} - \omega_i L_{qi}i_{qi} + L_{di} \frac{di_{di}}{dt} \\ u_{qi} = R_{si}i_{qi} + \omega_i(\psi_{fi} + L_{qi}i_{qi}) + L_{qi} \frac{di_{qi}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_{di} , u_{qi} 分别为第 i 台电机定子电压的直轴与交轴分量; i_{di} , i_{qi} 分别为第 i 台电机定子电流的直轴与交轴分量; L_{di} , L_{qi} 分别为第 i 台电机的直、交轴电感; R_{si} 为第 i 台电机的定子绕组电阻; ω_i 为第 i 台电机的转速; ψ_{fi} 为第 i 台电机的转子磁链。

第 i 台 PMSM 的运动方程为:

$$T_{ei} - T_{Li} = J_i \frac{d\omega_{ri}}{dt} = \frac{J_i}{n_{pi}} \frac{d\omega_i}{dt} \quad (6)$$

式中: T_{ei} 为第 i 台电机的电磁转矩; T_{Li} 为第 i 台电机的负载转矩; n_{pi} 为第 i 台电机的极对数; ω_{ri} 为第 i 台电机的机械转速 ($\omega_{ri} = \omega_i/n_{pi}$); J_i 为第 i 台电机的转动惯量。

第 i 台 PMSM 的转矩方程为:

$$T_{ei} = \frac{3}{2} n_{pi} \psi_{fi} i_{qi} \quad (7)$$

2.2 负载转矩滑模观测器的设计

为了提高系统正常运动段的动态品质,利用指数趋近律概念设计滑模观测器,指数趋近律表达式为:

$$\dot{s} = -\epsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (\epsilon > 0, k > 0) \quad (8)$$

式中: $-ks$ 为指数趋近项, k 为正常数, $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数, ϵ 为正常数。

取第 i 台电机的位置 θ_i 和转速 ω_i 作为系统的状态变量,如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_{i1} = \dot{\theta}_i \\ \dot{x}_{i2} = \dot{\omega}_i = \frac{3n_{pi}^2 \psi_{fi} i_{qi}}{2J_i} - \frac{n_{pi}}{J_i} T_{Li} \end{cases} \quad (9)$$

定义变量如下:

$$\begin{cases} A_i = \frac{3n_{pi}^2 \psi_{fi}}{2J_i} \\ d_i = -\frac{n_{pi}}{J_i} T_{Li} \\ L_i = \frac{n_{pi}}{J_i} \\ u_i = i_{qi} \end{cases} \quad (10)$$

进一步整理式(9)得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{x}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} d_i \quad (11)$$

以电机转子位置 θ_i 和转速 ω_i 为观测对象,建立滑模观测器为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_{i1} \\ \dot{\hat{x}}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{i1} \\ \hat{x}_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ A_i \end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{i1} \\ W_{i2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)中 W_{i1} , W_{i2} 是指数趋近律函数,即为:

$$\begin{cases} W_{i1} = \epsilon_{i1} \operatorname{sgn}(\hat{x}_{i1} - x_{i1}) + k_{i1}(\hat{x}_{i1} - x_{i1}) \\ W_{i2} = \epsilon_{i2} \operatorname{sgn}(\hat{x}_{i2} - x_{i2}) + k_{i2}(\hat{x}_{i2} - x_{i2}) \end{cases} \quad (13)$$

定义电机转子位置 θ_i 和转速 ω_i 的观测误差为:

$$\begin{bmatrix} e_{i1} \\ e_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_{i1} \\ \hat{x}_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(12)与式(11)相减得电机转子位置 θ_i 和转速 ω_i 的观测误差导数为:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_{i1} \\ \dot{e}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{i1} \\ e_{i2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ L_i \end{bmatrix} T_{Li} + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{i1} \\ W_{i2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

定义滑模面 s_{i1} , s_{i2} 为:

$$\begin{bmatrix} s_{i1} \\ s_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{i1} & 0 \\ c_{i1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{i1} \\ e_{i2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: c_{i1} 为滑模面参数且 $c_{i1} > 0$ 。对 s_{i1} , s_{i2} 求导得:

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_{i1} \\ \dot{s}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{i1} & 0 \\ c_{i1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{e}_{i1} \\ \dot{e}_{i2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

当滑模观测器进入滑模面 $s_{i1} = 0$ 时,满足 $s_{i1} = \dot{s}_{i1} = 0$, 由 $s_{i1} = c_{i1}e_{i1}$ 得 $c_{i1}e_{i1} = c_{i1}\dot{e}_{i1} = 0$, 又有 $c_{i1} > 0$ 可得 $\dot{e}_{i1} = e_{i2} - W_{i1} = 0$, 即得:

$$e_{i2} = W_{i1} = \epsilon_{i1} \operatorname{sgn}e_{i1} + k_{i1}e_{i1} \quad (18)$$

同理当滑模观测器进入滑模面 $s_{i2} = 0$ 时,满足 $s_{i2} = \dot{s}_{i2} = 0$, 因 $s_{i2} = c_{i1}e_{i1} + e_{i2}$ 得 $c_{i1}e_{i1} + e_{i2} = c_{i1}\dot{e}_{i1} + \dot{e}_{i2} = 0$, 又有 $c_{i1}\dot{e}_{i1} = 0$ 得 $\dot{e}_{i2} = L_i T_{Li} - W_{i2}$, 即得:

$$L_i T_{Li} = W_{i2} = \epsilon_{i2} \operatorname{sgn}e_{i2} + k_{i2}e_{i2} \quad (19)$$

由式(19)可得观测器的输出为:

$$\hat{T}_{Li} = \frac{(\epsilon_{i2} \operatorname{sgn}e_{i2} + k_{i2}e_{i2})}{L_i} \quad (20)$$

取李雅普诺夫稳定性函数为:

$$V_{i1} = \frac{1}{2} s_{i1}^2 \quad (21)$$

对式(21)求导得:

$$\dot{V}_{i1} = s_{i1} \dot{s}_{i1} = s_{i1} [-\epsilon_{i1} \operatorname{sgn}(s_{i1}) - ks_{i1}] = -\epsilon_{i1} - k_{i1} s_{i1}^2 \quad (22)$$

易得:

$$\dot{V}_{i1} \leq 0 \quad (23)$$

即 V_{i1} 的导数负定,系统稳定,同理可证有关 s_{i2} 的李雅普诺夫函数的稳定性。由上面分析可知采用指数趋近律设计的观测器满足系统稳定性要求。

3 仿真结果分析

为了验证本文所提改进 ELS 控制策略可以有效地减小电机之间转速和位置同步误差,本文在 MATLAB/Simulink 环境下分别搭建了基于传统 ELS 控制和改进 ELS 控制两电机系统模型,2种控制结构中电机结构和参数完全一致。虚拟电机及从属电机的参数如表1所示。

实验初始条件设置如下:系统给定转速为 $\omega_{ref} = 600$ r/min;各虚拟机械内轴的刚度系数 $K_i = 3.00$, 阻尼系数 $B_i = 0.02$;各台电机初始负载 $T_{L1} = T_{L2} = 4$ N·m;指数趋近律的控制参数 $\epsilon_{i1} = 10$, $k_{i1} = 5000$, $\epsilon_{i2} = 2$, $k_{i2} = 100$ 。

表1 电机设计参数

参数	单位	虚拟电机	从属电机 1、2
绕组电阻	Ω	1.27	1.27
绕组电感	mH	8.05	8.05
极对数	—	2	2
转子磁链	Wb	0.5	0.5
转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{cm}^2$	50	27.2

模拟电机1负载突变情况,0.2 s时,电机1的负载 T_{L1} 由 $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突变为 $7 \text{ N} \cdot \text{m}$;0.6 s时,电机1的 T_{L1} 由 $7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 突变为 $4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

电机1受到负载扰动时,在两种不同控制策略下两台电机之间转速同步误差的对比如图3所示。

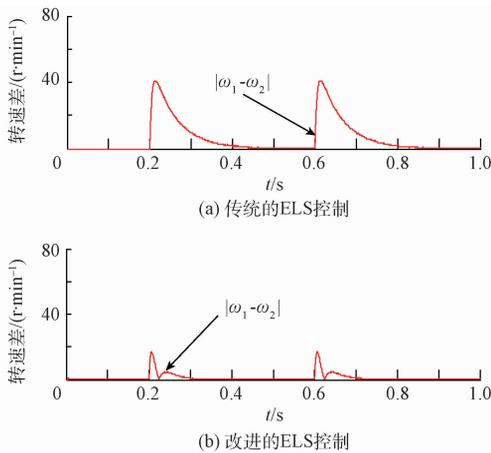


图3 电机1负载突变时两台电机转速同步误差

由图3中可以看出,对比传统 ELS 控制,改进的 ELS 控制明显降低了电机之间的转速同步误差,系统受负载变化影响较小,且转速同步误差恢复到初始状态的时间较短。

电机1受到负载扰动时,在2种不同控制策略下2台电机之间位置差的对比如图4所示。

由图4可以看出,对比传统 ELS 控制,改进的 ELS 控制策略因在虚拟机械单元中引入了积分项,可以较好地抑制电机之间因负载变化带来的位置差,系统的抗扰性较好。

由以上实验结果分析可知,改进的 ELS 控制策略可以在负载突变时,有效降低电机之间的转速和位置同步误差,提高纸张生产工艺质量。

4 结 论

本文以两永磁同步电机驱动系统为研究对象,通过对传统 ELS 控制策略进行研究分析,发现在负载发生扰动的过程中,传统控制策略由于虚拟弹性扭矩反馈存在时间滞后而导致多电机之间转速和位置同步误差较大。为了减小负载扰动对系统的影响,提高系统的抗扰能力,本文设计了改进 ELS 控制策略。

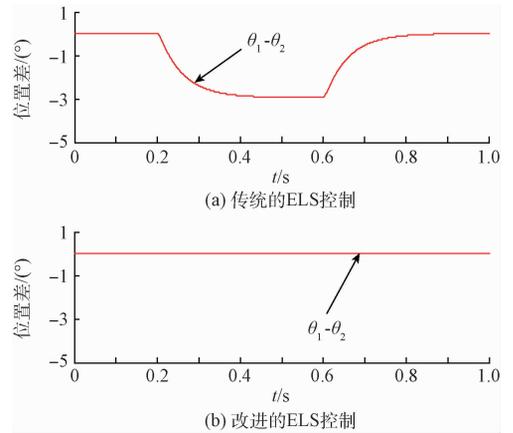


图4 电机1负载突变时两台电机的位置同步误差

改进的 ELS 控制策略在虚拟机械单元中引入了积分项,使得系统在稳态工作时电机之间的位置差近似为0;改进的 ELS 控制策略将观测的负载转矩直接求和反馈给虚拟电机,同时将其进行实时的前馈补偿,有效地减少了负载扰动时从属电机之间的转速差,提高了系统应对负载扰动的能力。

改进的 ELS 控制策略与传统的 ELS 控制策略相比,能有效提高系统应对扰动的能力,最终提高生产工艺质量。

参考文献

- [1] 刘洋,张斌,吴庆林,等.基于DSP的永磁同步电动机控制系统设计[J].电子测量技术,2016,39(1):88-92.
- [2] 唐姣姣.基于交叉耦合算法的双直线电机协同控制系统研究[D].合肥:安徽大学,2016.
- [3] 张守娟.随动系统的多电机同步控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [4] 高德超.多电机系统协同控制研究[D].济南:济南大学,2015.
- [5] 刘少军,张思雨.基于DSP控制的永磁同步电机变频调速系统的设计[J].国外电子测量技术,2016,35(1):84-88.
- [6] 刘然,孙建忠,罗亚琴,等.多电机滑模环形耦合同步控制策略研究[J].中国机械工程,2010(22):2662-2665.
- [7] 李红梅,陈涛.永磁同步电机参数辨识研究综述[J].电子测量与仪器学报,2015,29(5):638-647.
- [8] 张晓光,孙力,赵克.基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2012,32(3):111-116.
- [9] 李登举.基于滑模变结构控制与误差补偿技术的PMSLM精确定位方法研究[D].长春:吉林大学,2015.

- [10] 杨泽斌,董大伟,孙晓东,等. 无轴承异步电机转子质量偏心振动补偿控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 871-878.
- [11] 徐杰,刘旭峰. 多轴同步控制系统的转矩扰动研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1967-1973.
- [12] 张兰勇,曹岸,刘胜. 级联多电平变换器的新型混合PWM技术[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2234-2242.
- [13] 吴珂. 多电机驱动系统的特征建模与自适应控制[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [14] 班方圆,曹志敏. 基于灰色预测控制的电动舵机控制仿真研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 91-94.
- [15] 郭长欢,黄建. 基于RT-LAB的无刷直流电动机伺服系统半实物仿真[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(10): 22-27.

作者简介

唐永聪,1994年出生,本科,主要研究方向为多电机控制。

刘涛,1984年出生,工学博士,讲师,主要研究方向为多电机控制。

E-mail:taoliu@tju.edu.cn

张芳芳,1989年出生,硕士,主要研究方向为多电机控制。