

均值耦合多电机滑模速度同步控制

丁威¹, 杜钦君¹, 宋传明¹, 凌辉¹, 罗永刚¹, 黄蒙蒙²

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 255022, 山东淄博;
2. 山东宏济堂制药集团股份有限公司, 250100, 济南)

摘要: 针对传统阿胶制粒机多电机速度同步控制精度低和控制系统响应速度慢的问题,提出了一种无速度传感器的多电机均值耦合非奇异全局快速 Terminal 滑模速度同步控制方法。首先,设计转速自适应磁链观测器,避免了加热筒体温度较高导致电机速度传感器检测精度不足的问题;然后,利用均值耦合策略对多电机转速进行耦合控制,实现系统误差全局补偿,保证多电机速度误差同步收敛;其次,通过设计具有非线性函数的非奇异全局快速 Terminal 滑模面,实现电机速度误差在有限时间内全局快速收敛,并消除了 Terminal 滑模的奇异问题,提高了单电机速度跟踪精度,降低了多电机间速度同步误差;最后,利用 Lyapunov 函数证明了观测器和控制器的稳定性及收敛性。仿真与实验结果表明:速度观测器能够在 0.4 s 内实现速度跟踪,当系统存在负载扰动时,调节时间小于 0.05 s,具有良好的跟踪性能和稳态精度;与均值耦合滑模多电机速度同步控制相比,本文控制方法能够在 0.15 s 内实现对期望转速的跟踪,各电机同步误差调节时间减少了 1.2 s,响应速度快,能够有效抑制负载扰动,具有更好的动态调节能力、稳态精度和鲁棒性,可满足阿胶制粒工艺的要求。

关键词: 多电机;速度同步控制;无速度传感器;均值耦合;非奇异全局快速 Terminal 滑模

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202202017 **文章编号:** 0253-987X(2022)02-0159-12



OSID 码

A Synchronous Control Method for Mean-Coupled Sliding Mode
Speed of Multi-Motor

DING Wei¹, DU Qinjun¹, SONG Chuanming¹, LING Hui¹,
LUO Yonggang¹, HUANG Mengmeng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255022, China;
2. Shandong Hongjitang Pharmaceutical Group Co., Ltd., Jinan 250100, China)

Abstract: A speed synchronization control method without speed sensor for mean-coupled nonsingular global fast Terminal sliding mode of multi-motor is proposed to solve the problems of low speed synchronization control accuracy of multi-motor and slow response speed of control system in traditional asini coii colla granulator. Firstly, an adaptive flux speed observer is designed to avoid the problem of insufficient detection accuracy of the motor speed sensor caused by high temperature of the heating cylinder. Secondly, the mean coupling strategy is used to control the speed of multiple motors to realize the global compensation of system errors and ensure synchronous convergence of speed errors of multiple motors. Furthermore, a non-singular

global fast Terminal sliding mode surface with nonlinear functions is designed, and it realizes the global fast convergence of the motor speed error in finite time and eliminates the singularity problem of Terminal sliding mode. In addition, it also improves the speed tracking accuracy of a single motor and reduces the speed synchronization error among multiple motors. Finally, the stability and convergence of the observer and controller are proved by Lyapunov function. Simulation and experimental results show that the velocity observer can achieve velocity tracking within 0.4 s. When there is load disturbance in the system, the adjustment time is less than 0.05 s, and has good tracking performance and steady precision. Compared with the multi-motor speed synchronization control with mean coupled sliding mode, the proposed control method can realize the tracking of the expected speed in 0.15 s, and the synchronous error adjustment time of each motor reduces by 1.2 s to make each motor respond quickly and be able to effectively suppress the load disturbance. Therefore, the system has better dynamic adjustment ability, steady-state accuracy and robustness, and can meet the requirements of asini coii colla granulation process.

Keywords: multi-motor; speed synchronization control; speed sensorless; mean coupling; nonsingular global fast Terminal sliding mode

随着中医药的发展和科学技术的进步,现有的制药设备已经不能满足中医药现代化对药品品质的要求。阿胶制粒机的制粒质量,如阿胶粒的密度、大小、形态,都直接影响阿胶珠炮制的质量和企业效益^[1-2]。阿胶制粒机是由多电机与加热筒体构成的制粒设备,多电机之间、进给电机与加热筒体之间相互配合,实现由阿胶粉到阿胶粒的炮制过程。提高多电机的速度同步性能及控制系统响应速度,是保证制粒质量的核心。

因阿胶制粒机加热筒体温度较高,影响电机速度传感器检测精度,所以单电机速度跟踪控制性能低,多电机同步误差大。合理设计速度观测器,能够有效改善电机速度检测精度,增强驱动系统可靠性^[3]。

文献[4]根据感应电机静止坐标系下数学模型,构建自适应滑模观测器,通过估算感应电机转速,改善了系统的鲁棒性;文献[5]利用极点配置的方法设计了全阶观测器的反馈增益矩阵,提高了转速估计误差收敛的快速性;针对真空环境中真空干泵用屏蔽电机受温度场和热应力场时变性的影响,文献[6]设计了基于调制波模拟器的无速度传感器带速重投系统,提高了系统运行的可靠性。

目前,工业生产中多电机同步控制方式主要有机械结构同步与电同步。机械结构同步,包括通过齿轮、皮带等方式进行同步,其结构简单,但同步性能受机械结构和生产环境影响大,同步性能差^[7]。电同步包括并行控制、主从控制等非耦合控制和交叉耦合控制、偏差耦合控制、相邻交叉耦合控制、均值耦合控制等耦合控制^[8-10]。相较于机械结构同步

控制,非耦合同步控制方式虽不受机械结构的影响,但各电机之间不存在耦合,当发生扰动或负载发生变化时,会造成多电机速度同步误差增大,同步控制精度下降。

耦合控制的思想,即通过提高整个控制系统的耦合程度,使得单电机发生扰动或负载发生变化时,各电机间相互影响,协调控制,有利于降低速度同步误差。文献[11]提出的交叉耦合控制策略,实现了电机速度的耦合控制,但不适用于电机数目大于2的场合。文献[12]最先提出了偏差耦合控制,适用于电机数目大于2的场合,单台电机的速度补偿是由该电机转速与其他各电机转速作差之后求和得到的,虽然实现了全局耦合,但电机数目较多时,控制结构复杂,计算量大^[13]。为了在电机数目较多时,降低控制系统复杂程度,文献[14]提出了相邻交叉耦合的多电机速度同步控制方式,单电机仅考虑与之相邻的两台电机的速度同步,简化了电机较多时控制系统计算量,但非相邻电机之间速度同步存在一定滞后性^[15]。均值耦合控制,即将单电机的跟踪误差与多电机跟踪误差均值作差,作为速度同步控制的补偿,既保证耦合的全局性,又简化了计算量^[16]。虽然受扰动因素和负载变化时,各种耦合控制使多电机速度实现同步控制,但同步性能较差,系统响应速度较慢,系统抗干扰能力不强。

考虑阿胶制粒机结构特点和对多电机同步性能的要求,本文根据感应电机数学模型,构建转速自适应磁链观测器,在无速度传感器下准确测量电机转速;通过设计均值耦合函数,保证多台电机速度的耦

合控制;设计非奇异全局快速 Terminal 滑模速度控制器,使电机跟踪误差及同步误差在有限时间内收敛,提高了多电机速度同步精度,改善了控制系统鲁棒性;通过 Lyapunov 稳定性定理,证明了系统的稳定性和收敛能力;最后通过系统仿真与实验对控制策略进行了验证。

1 阿胶制粒异步电机数学模型

阿胶制粒机机械结构如图 1 所示。在制粒机运

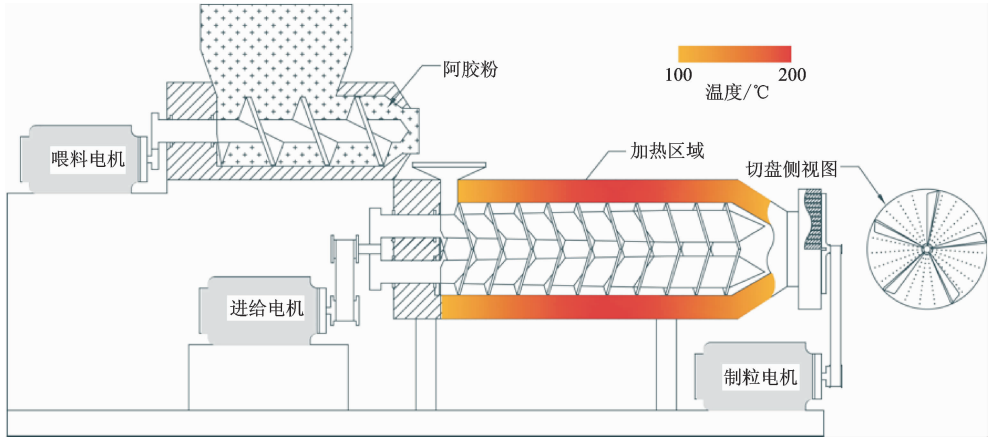


图 1 阿胶制粒机机械结构图

Fig. 1 Mechanical structure diagram of asini coii colla granulator

电动机原始动态模型存在复杂的电感矩阵和转矩方程。为了便于对异步电动机动态模型进行分析,根据坐标变化旋转磁动势相等的原则,定义笼型异步电动机在旋转正交坐标系(d - q 坐标系)下的数学模型为^[17-18]

$$\dot{x} = Ax + Bv \tag{1}$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} -\rho & \omega_1 & \lambda c & \lambda \omega \\ \omega_1 & -\rho & -\lambda \omega & \lambda c \\ cL_m & 0 & -c & \omega_1 - \omega \\ 0 & cL_m & -(\omega_1 - \omega) & -c \end{bmatrix}$$
$$x = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \psi_{dr} \quad \psi_{qr}]^T$$
$$v = [v_{ds} \quad v_{qs}]^T$$
$$B = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

其中, v 为电压, i 为电流, R 为电阻, ψ 为磁链, ω_1 为同步转速, ω 为转子转速, L 为电感, L_m 为定转子互感, $c=R_r/L_r$, $\rho=m(R_s+L_m^2R_r/L_r^2)$, $\lambda=mL_m/L_r$, $m=1/(\sigma L_s)$, $\sigma=1-L_m^2/(L_sL_r)$ 为电动机漏磁系数,下标 d 、 q 分别为 d - q 坐标系 d 轴分量和 q 轴分量,下标 r 为折算到定子侧的转子值,下标 s 为定子值。

行过程中,喂料电机与进给电机的协同程度影响着阿胶粒的密度,进给电机与制粒电机的协同程度影响着阿胶粒的大小、形态,阿胶粒的质量对炮制的阿胶珠的形态及遇水速溶性产生直接影响。

异步电动机结构简单、可靠性强,在阿胶制粒设备中被广泛应用,但单电机速度跟踪控制精度较低,抗干扰能力差;多电机协同程度低,控制系统动态响应慢,稳态精度低。三相静止坐标系下,异步电动机动态模型存在复杂的电磁耦合与能量转换,使异步

将定子电流作为系统输出,则系统输出方程为

$$y = Cx \tag{2}$$

式中: $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ 。

考虑摩擦系数对异步电动机的影响,定义异步电动机的机械运动方程^[19]为

$$\dot{\omega} = -a\omega + ki_{qs} - f \tag{3}$$

式中: $a=B/J$; $k=3n_pL_m\phi_{dr}/(4JL_r)$; $f=T_L/J$; B 为摩擦系数; J 为转动惯量; n_p 为电机极对数。

2 阿胶制粒电机同步控制系统结构

通过构建转速自适应磁链观测器,对结构复杂、温差较大的阿胶制粒设备电机进行准确的转速测量,以节约设备成本,提高控制系统可靠性。由于阿胶制粒设备由多台电机协同运行制粒,因此对于多台电机协同控制的系统,应用均值耦合控制策略,使跟踪误差和同步误差进行耦合。通过构建非奇异全局快速 Terminal 滑模控制器,使控制器根据耦合误差对控制电流量进行补偿,以提高控制系统响应速度,实现系统跟踪、同步误差在有限时间内的稳态收敛,增强系统鲁棒性。

根据式(1)所示异步电机,定义第 i 台电机的跟踪误差为

$$e_i(t) = \hat{\omega}_i(t) - \omega^*(t) \quad (4)$$

式中: $\hat{\omega}_i$ 为估计转速; ω^* 为期望转速,并定义 n 台电机期望转速相同。

定义第 i 台电机的同步误差为

$$e_{syi}(t) = \hat{\omega}_i(t) - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\omega}_i(t)}{n} = \hat{\omega}_i(t) - \omega_i^*(t) - \frac{\sum_{i=1}^n \hat{\omega}_i(t)}{n} + \omega_i^*(t) = e_i(t) - e_{eq}(t) \quad (5)$$

式中: $e_{eq}(t) = [\sum_{i=1}^n \hat{\omega}_i(t) - n\omega_i^*(t)]/n$, 为 n 台电机跟踪误差之和的平均值。

由式(4)和(5)可知,多电机速度均值耦合控制是通过求解电机速度跟踪误差、电机速度跟踪误差与各电机速度跟踪误差之和的平均值,对跟踪误差与误差平均值作差,求解各电机间的速度同步误差,实现控制器对跟踪误差与同步误差的同时补偿。均值耦合控制策略能够实现控制系统内所有电机的速度耦合,且计算量小,既提高了控制系统全局补偿能力,又能减小控制系统运算工作量。阿胶制粒机多电机同步控制系统结构如图2所示。

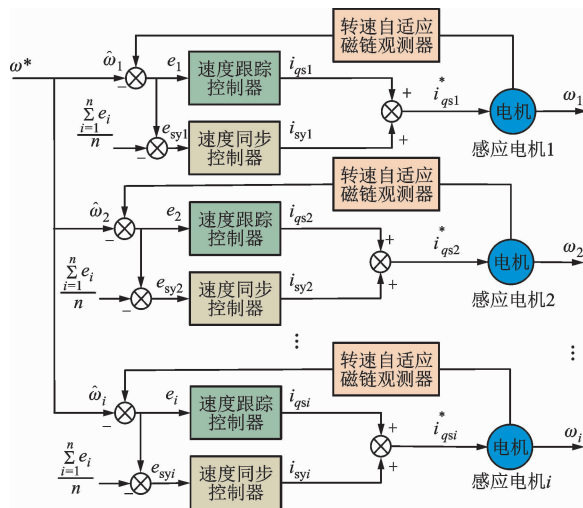


图2 阿胶制粒机多电机速度同步控制系统结构

Fig. 2 Speed synchronous control system structure of multi-motor of asini coii colla granulator

3 转速自适应磁链观测器的设计

合理构建转速自适应磁链观测器,能够避免因设备结构和加热筒体温度较高造成的阿胶制粒设备速度传感器安装困难、检测精度不高的问题,并能有

效提高控制系统可靠性和抗干扰能力,节约设备成本^[20-22]。通过设计转速自适应磁链观测器,对系统定子电流、转子磁通进行观测。定义转速自适应磁链观测器的数学模型为

$$\dot{\hat{x}} = \hat{A}\hat{x} + Bv + L(y - \hat{y}) \quad (6)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (7)$$

式中:上标符号“ $\hat{\cdot}$ ”表示估计; L 表示观测器的增益矩阵;当异步电机不存在速度传感器时,矩阵 A 存在未知参数 ω ,所以矩阵 A 为估计矩阵 $\hat{A}$ 。

将式(2)(7)代入式(6),并由式(1)减式(6)得

$$\dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax - A\hat{x} + A\hat{x} - \hat{A}\hat{x} - LC(x - \hat{x}) = (A - LC)(x - \hat{x}) + (A - \hat{A})\hat{x} \quad (8)$$

则观测器估计系统状态误差为

$$\dot{e}_x = (A - LC)e_x + e_\omega N\hat{x} \quad (9)$$

式中: $e_x = x - \hat{x}$ 为系统状态估计误差; $e_\omega = \omega - \hat{\omega}$ 为

$$\text{转子速度估计误差; } N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

由于矩阵 A 存在未知参数 ω ,因此利用 Lyapunov 定理构建 $\hat{\omega}$ 自适应模型。定义 Lyapunov 函数为

$$V(e_x, e_\omega) = e_x^T e_x + \alpha e_\omega^2 \quad (10)$$

式中: α 为常数。当 e_x, e_ω 为 0 时, $V(0, 0) = 0$; 且 $V(e_x, e_\omega) > 0, V(e_x, e_\omega)$ 正定。

由于 ω 变化很慢,因此将其认为是常数。将 $V(e_x, e_\omega)$ 对时间求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_x, e_\omega) &= \dot{e}_x^T e_x + e_x^T \dot{e}_x + 2\alpha e_\omega \dot{e}_\omega = \\ &= e_x^T [(A - LC)^T + (A - LC)] e_x + \\ &= \hat{x}^T e_\omega N^T e_x + e_x^T e_\omega N \hat{x} - 2\alpha e_\omega \dot{\omega} = \\ &= e_x^T [(A - LC)^T + (A - LC)] e_x + \\ &= 2\lambda e_\omega (e_{ids} \hat{\psi}_{qr} - e_{iqs} \hat{\psi}_{dr}) - 2\alpha e_\omega \dot{\omega} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $e_{ids} = i_{ds} - \hat{i}_{ds}$; $e_{iqs} = i_{qs} - \hat{i}_{qs}$ 。

若式(11)后两项之和为零,通过选取合适增益矩阵 L ,可以使 $A - LC$ 的特征值实部为负,使得 $\dot{V}(e_x, e_\omega) \leq 0, \dot{V}$ 负半定。令式(11)右侧第二项与第三项和为零,可得速度估计自适应率为

$$\dot{\hat{\omega}} = \frac{\lambda}{\alpha} (e_{ids} \hat{\psi}_{qr} - e_{iqs} \hat{\psi}_{dr}) \quad (12)$$

使得式(11)变为

$$\dot{V}(e_x, e_\omega) = e_x^T [(A - LC)^T + (A - LC)] e_x \quad (13)$$

定理 1: 如果存在一个函数 $V(x)$ 满足如下条

件,则自治系统 $\dot{x} = f(x)$ 的平衡点 $x=0$ 是渐进稳定的^[23]:

- (1) $\forall x \in$ 有界区域 $D, 0 \in D, V(x)$ 正定;
- (2) $\dot{V}(x)$ 在有界区域 $R \in D$ 内负半定;
- (3) 除 $x=0$ 之外,在 R 内的任意轨迹上 $\dot{V}(x) \neq 0$ 。

当时间趋于无穷大、 $\dot{V}(0, e_\omega) = 0$ 时, $e_x = 0$, 使得 $\dot{e}_x = 0$, 此时式(9)为

$$0 = e_\omega N \hat{x} \quad (14)$$

由于 $N, \hat{x}$ 不为零,所以当时间趋于无穷大时, $e_\omega = 0$, 使得 $\dot{V}(0, 0) = 0$ 。

由定理1可知,存在式(10)使得系统(11)渐进稳定,即当时间趋于无穷大时,系统估计状态 $\hat{x}$ 收敛于实际状态 x , 转子估计速度 $\hat{\omega}$ 收敛于实际速度 ω 。

4 多电机滑模控制器的设计

系统参数变化和扰动不灵敏、响应速度快等特点,使得滑模控制在工业控制领域得到了广泛应用。在滑模面合理地设计非线性函数,可以有效提高控制系统误差的收敛速度,选择合适的开关函数能够有效抑制滑模抖振^[24]。设计响应速度快、稳态误差小的单电机速度跟踪控制器,是多电机控制系统控制可靠运行的重要保障,设计各电机速度同步误差小、系统动态响应速度快的多电机控制系统,是改善阿胶制粒设备制粒质量的关键。

4.1 速度跟踪控制设计

在考虑不确定因素及参数摄动情况下,由式(3)可知,第 i 台电机的机械运动方程为

$$\dot{\omega}_i = -(a_i + \Delta a_i)\omega_i(t) + (k_i + \Delta k_i)i_{qsi}(t) - (f_i - \Delta f_i) \quad (15)$$

式中: $\Delta a_i, \Delta k_i, \Delta f_i$ 分别代表 a_i, k_i, f_i 的不确定因素。将式(15)代入式(4),并对式(4)求导得

$$\dot{e}_i(t) = \dot{\hat{\omega}}_i(t) - \dot{\omega}^*(t) = \dot{\omega}_i - \dot{e}_{\omega i}(t) - \dot{\omega}^*(t) = -a_i e_i(t) + u_i(t) + d_i(t) \quad (16)$$

$$u_i(t) = -a_i \omega^*(t) + k_i i_{qsi}(t) - f_i - \dot{\omega}^*(t) \quad (17)$$

$$d_i(t) = -\Delta a_i \omega_i(t) + \Delta k_i i_{qsi}(t) - \Delta f_i - \dot{e}_{\omega i}(t) \quad (18)$$

式中: $\dot{e}_{\omega i}(t) = \dot{\omega}_i(t) - \dot{\hat{\omega}}_i(t)$ 为机械转速估计误差变化率; $u_i(t)$ 为跟踪控制输入量; $d_i(t)$ 为不确定因素。

设跟踪误差函数的状态变量为

$$\left. \begin{aligned} x_{1i} &= e_i(t) \\ \dot{x}_{1i} &= \dot{e}_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

为了提高跟踪误差的收敛速度,滑模面引入非线性函数,使误差在有限时间内收敛至零。定义速度跟踪控制器非奇异全局快速 Terminal 滑模面为

$$S_i(t) = x_{1i} + \frac{1}{\beta} x_{2i}^{p/q} - h_i(t) \quad (20)$$

式中: $\beta > 0$ 为非线性部分增益; p, q 为正奇数,且 $p > q$; $h_i(t)$ 为跟踪控制全局滑模因子。 $h_i(t)$ 需同时满足

$$(1) h_i(0) = x_{1i}(0) + \frac{1}{\beta} x_{2i}^{p/q}(0);$$

$$(2) t \rightarrow \infty \text{ 时, } h_i(t) \rightarrow 0;$$

$$(3) h_i(t) \text{ 一阶可导。}$$

为满足以上条件,选取 $h_i(t)$ 为

$$h_i(t) = h_i(0) e_i^{-k_1 t}(t) \quad (21)$$

定义跟踪控制器滑模控制律为

$$u_i(t) = -\beta \frac{p}{q} x_{2i}^{2-p/q} + a_i x_{1i} + h_{1i}(t) - (D + \eta) \text{sgn} S_i \quad (22)$$

式中: $1 < p/q < 2$; $h_{1i}(t) = -\beta p x_{2i}^{1-p/q} \dot{h}_i(t)/q$; $0 \leq |d_i(t)| < D$; $0 < \eta$ 。

由式(17)(22)联立可得第 i 台电机跟踪控制电流 $i_{qsi}(t)$ 为

$$i_{qsi}(t) = \frac{1}{k_i} \left[-\beta \frac{p}{q} x_{2i}^{2-p/q} + a_i x_{1i} + h_{1i}(t) - (D + \eta) \text{sgn} S + a_i \omega_i^* + f_i + \dot{\omega}_i^* \right] \quad (23)$$

4.2 速度同步控制设计

为提高阿胶制粒机多电机运行协同性,提高制粒质量,设计多电机速度同步控制器,以各电机期望转速相同进行设计;若各电机转速不同,则需引入各电机转速比例系数^[25]。速度同步控制器设计思路与跟踪控制器相似,将式(15)代入式(5),并对式(5)求导得

$$\dot{e}_{s_{yi}}(t) = \dot{e}_i(t) - \dot{e}_{eq}(t) = -a_i e_i(t) + u_{s_{yi}}(t) + d_i(t) \quad (24)$$

$$u_{s_{yi}}(t) = -a_i \omega^*(t) + k_i \dot{e}_{s_{yi}}(t) - f_i - \dot{\omega}^*(t) - \dot{e}_{eq}(t) \quad (25)$$

式中: $u_{s_{yi}}(t)$ 为同步控制输入量。

同理,设同步误差函数的状态变量为

$$\left. \begin{aligned} x_{1s_{yi}} &= e_{s_{yi}}(t) \\ \dot{x}_{1s_{yi}} &= \dot{e}_{s_{yi}}(t) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

定义速度同步控制器非奇异全局快速 Terminal 滑模面为

$$S_{s_{yi}}(t) = x_{1s_{yi}} + \frac{1}{\beta} x_{2s_{yi}}^{p/q} - h_{s_{yi}}(t) \quad (27)$$

式中: $h_{syi}(t)$ 为同步控制全局滑模因子, 计算公式为

$$h_{syi}(t) = h_{syi}(0)e^{-k_1 t} \quad (28)$$

定义同步控制器滑模控制律为

$$u_{syi}(t) = -\beta \frac{p}{q} x_{2syi}^{2-p/q} + a_i x_{1syi} + h_{1syi}(t) - (D + \eta) \operatorname{sgn}(S_{syi}) \quad (29)$$

式中: $h_{1syi}(t) = -\beta p x_{2syi}^{1-p/q} \dot{h}_{syi}(t)/q$ 。

由式(25)、(29)联立可得第 i 台电机同步控制电流 $i_{syi}(t)$ 为

$$i_{syi}(t) = \frac{1}{k_i} \left[-\beta \frac{p}{q} x_{2i}^{2-p/q} + a_i x_{1syi} + h_{1syi}(t) - (D + \eta) \operatorname{sgn}(S_{syi}) + a_i \omega_i^* + f_i + \dot{\omega}_i^* + \dot{e}_{eq}(t) \right] \quad (30)$$

通过对速度跟踪控制器和速度同步控制器设计, 可得采用均值耦合的第 i 台电机的控制电流 i_{qsi}^* 为

$$i_{qsi}^*(t) = i_{qsi}(t) + i_{syi}(t) \quad (31)$$

4.3 控制器稳定性分析

为了验证均值耦合滑模控制器的稳定性, 构建 Lyapunov 函数为

$$V(t) = \frac{1}{2} S_i^2(t) + \frac{1}{2} S_{syi}^2(t) \quad (32)$$

式(32)对时间求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S_i \dot{S}_i + S_{syi} \dot{S}_{syi} = \\ &S_i \left[\dot{x}_{1i} + \frac{p}{\beta q} x_{2i}^{p/q-1} \dot{x}_{2i} - \dot{h}_i \right] + \\ &S_{syi} \left[\dot{x}_{1syi} + \frac{p}{\beta q} x_{2syi}^{p/q-1} \dot{x}_{2syi} - \dot{h}_{syi} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

根据式(19)(26), 将式(16)(24)代入式(33)可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= S_i \left\{ x_{2i} + \frac{p}{\beta q} x_{2i}^{p/q-1} [-a_i e_i(t) + u_i(t) + d_i(t)] - \dot{h}_i \right\} + \\ &S_{syi} \left\{ x_{1syi} + \frac{p}{\beta q} x_{2syi}^{p/q-1} [-a_i e_i(t) + u_{syi}(t) + d_i(t)] - \dot{h}_{syi} \right\} \end{aligned} \quad (34)$$

将式(22)(29)代入式(34)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \left\{ \frac{p}{\beta q} x_{2i}^{p/q-1} [-(D + \eta) |S_i| + d_i] \right\} + \\ &\left\{ \frac{p}{\beta q} x_{2syi}^{p/q-1} [-(D + \eta) |S_{syi}| + d_i] \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

由于 $1 < p/q < 2$, $\beta > 0$, p, q 为正奇数, 则有 $x_{2i}^{p/q-1} \geq 0$, 故有

$$\dot{V}(t) \leq -\frac{p}{\beta q} x_{2i}^{p/q-1} \eta |S_i| - \frac{p}{\beta q} x_{2syi}^{p/q-1} \eta |S_{syi}| \quad (36)$$

当 x_{2i} 或 x_{2syi} 不为零时, 由 Lyapunov 直接法可知, $V(0)=0$, $V(t)$ 为正定, 由式(36)可知, $\dot{V}(t)$ 为负定, 所以可知系统全局渐进稳定, 平衡点为零点; 当时间趋于无穷大时, S_i, S_{syi} 趋于零, 使得 e_i, e_{syi} 趋于零。

当 x_{2i} 或 x_{2syi} 为零时, 将式(22)、(29)分别代入式(19)、(26)可得

$$\begin{cases} \dot{x}_{2i} = -(D + \eta) \operatorname{sgn}(S_i) + d_i \\ \dot{x}_{2syi} = -(D + \eta) \operatorname{sgn}(S_{syi}) + d_i \end{cases} \quad (37)$$

由式(37)可知, 当 $S_i > 0$ 时, $\dot{x}_{2i} \leq -\eta$, 使得速度跟踪误差 e_i 快速下降; 当 $S_{syi} > 0$ 时, $\dot{x}_{2syi} \leq -\eta$, 使得速度同步误差 e_{syi} 快速下降; 当 $S_i < 0$ 时, $\dot{x}_{2i} > -\eta$, 使得速度跟踪误差 e_i 快速上升; 当 $S_{syi} < 0$ 时, $\dot{x}_{2syi} \geq -\eta$, 使得速度同步误差 e_{syi} 快速上升; 其相轨迹如图3所示。

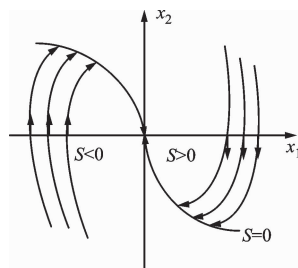


图3 控制系统相轨迹

Fig. 3 Phase trajectory of the control system

由图3可知, 当 x_{2i} 或 x_{2syi} 为零时, 在有限时间内实现滑模面趋于零, 系统稳定, 使得 e_i, e_{syi} 趋于零。

当滑模面 S 等于零时, 对式(20)、(27)进行简化分析得

$$S = x + \frac{1}{\beta} x^{p/q} - h(0)x^{-k_1 t} = 0 \quad (38)$$

由式(38)可知

$$\dot{x} = [\beta h(0)x^{-k_1 t} - \beta x]^{q/p} \quad (39)$$

由式(39)可知, 在 x 远离平衡点时, 系统的收敛速度由 $\beta h(0)x^{-k_1 t}$ 决定, 在 x 接近平衡点时, 系统的收敛速度由 $-\beta x$ 决定, 使线性滑动模态也能快速收敛, 保证了滑动模态的全局性。

由于式(22)、(29)定义的滑模控制律开关函数 $\operatorname{sgn}(S)$ 是不连续的, 控制信号突变会引起系统抖振, 因此用双曲正切函数 $\tanh(S/\tau)$ 来代替符号函数 $\operatorname{sgn}(S)$, 能够使控制信号更为平滑, 并降低控制信号的抖振。定义 $\tanh(S/\tau)$ 为

$$\tanh\left(\frac{S}{\tau}\right) = \frac{\exp(S/\tau) - \exp(-S/\tau)}{\exp(S/\tau) + \exp(-S/\tau)} \quad (40)$$

s,速度观测误差收敛至 0,转子磁链误差产生±0.14 Wb的误差波动,且经过 0.8 s 磁链误差收敛至 0。通过仿真实验可知,转速自适应磁链观测器具有良好的跟踪性能、自适应调节能力和较强的鲁棒性,通过构建观测器能够有效提高电机跟踪控制的可靠性,改善阿胶制粒设备多电机运行的协同性。

5.2 多电机同步运行仿真分析

根据阿胶制粒设备硬件结构和多电机速度同步控制系统结构图,选取 3 台异步电动机,构建多电机速度同步运行仿真模型。3 台电机参数如表 1 所示。本文控制器参数为: $\tau=0.02,\beta=0.6,p=9,q=5,k_1=130,D=50,\eta=2$ 。取各电机初始转子速度 $\omega^*=80\text{ rad/s}$,转矩 $T_{L1}=40\text{ N}\cdot\text{m},T_{L2}=45\text{ N}\cdot\text{m},T_{L3}=50\text{ N}\cdot\text{m}$,在 0.7 s 时,各电机负载突变至 $T_{L1}=80\text{ N}\cdot\text{m},T_{L2}=90\text{ N}\cdot\text{m},T_{L3}=100\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

依据上述参数设置,将本文所设计的 NTSMC 控制方案与速度跟踪控制器、速度同步控制器为指数趋近率传统滑模控制(SMC)均值耦合同步方案进行仿真比较。多电机速度同步控制比较如图 9 所示。

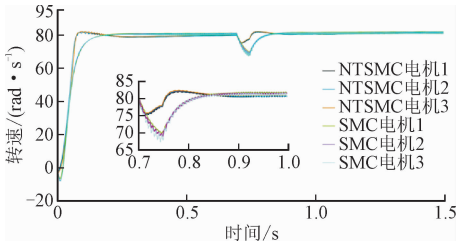
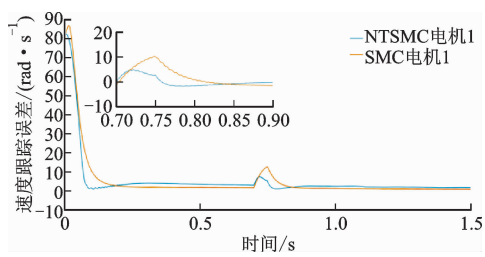


图 9 多电机转速同步控制比较

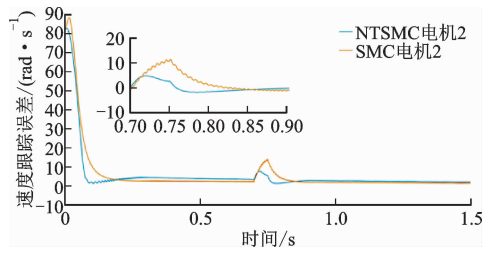
Fig. 9 Comparison of multi-motor speed synchronous control

由图 9 可知,在有载运行时,相较于均值耦合 SMC 控制,均值耦合 NTSMC 多电机控制具有较高的跟踪性能,对负载突变有良好动态调节能力和较强的鲁棒性,下面分别对各电机跟踪性能及各电机间同步性能进行分析。

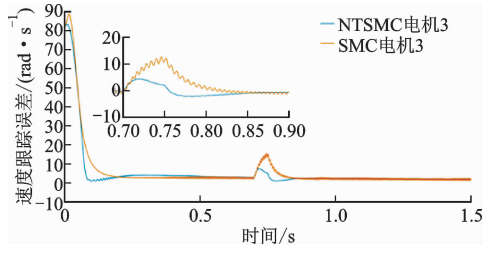
5.2.1 电机跟踪控制仿真分析 良好的速度跟踪性能能够提高多电机同步控制的可靠性。各电机速度跟踪误差如图 10 所示。由图 10 可知,与 SMC 电机速度跟踪控制器相比,各电机启动时,NTSMC 控制具有更好的速度跟踪性能,能够对期望转速快速跟踪,并保持稳态运行,SMC 控制时,速度跟踪时间较长,存在一定的静差;当各电机负载发生突变时,NTSMC 控制对负载扰动有较强的抑制能力,使速度跟随误差波动小,各电机经过控制器快速调节,在



(a) 电机 1 速度跟踪误差



(b) 电机 2 速度跟踪误差



(c) 电机 3 速度跟踪误差

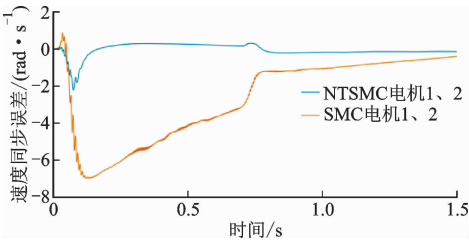
图 10 电机速度跟踪误差曲线

Fig. 10 Tracking error curve of motor speed

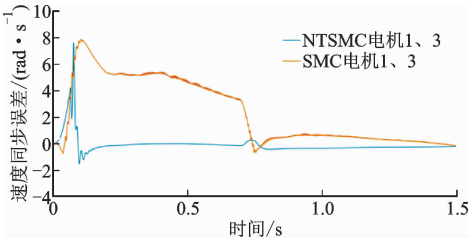
0.15 s 后,误差收敛至零,具有良好的鲁棒性和稳态性能;SMC 控制对负载扰动较敏感,会产生较大的误差波动,且随着突变负载的增大,抖振现象越发明显,不利于电机的稳态运行。

5.2.2 多电机同步控制仿真分析 多电机同步运行的动态调节能力和稳态性能直接影响着阿胶制粒设备制粒的品质。降低各电机间速度同步误差,提高多电机同步运行时控制系统鲁棒性是保证多电机同步运行的关键。各电机间速度同步误差如图 11 所示,电机同步误差均值如图 12 所示。

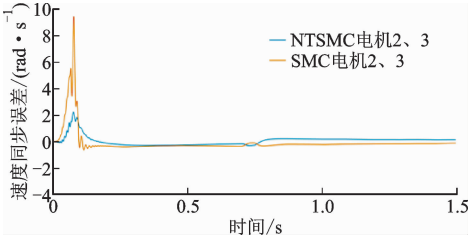
结合图 10,由图 11、图 12 可知,均值耦合 SMC 多电机同步控制方式,虽然能够使电机速度跟踪误差收敛,但各电机间存在一定的同步误差,且同步误差收敛速度慢,不利于整个阿胶制粒设备的稳态运行;当负载突变时,均值耦合 SMC 控制对电机间误差波动抑制能力较弱,动态调节能力较差。本文设计的滑模控制系统对外界扰动不敏感,且具有良好的鲁棒性,使均值耦合 NTSMC 多电机同步控制方



(a)电机 1 和电机 2 速度同步误差



(b)电机 1 和电机 3 速度同步误差



(c)电机 2 和电机 3 速度同步误差

图 11 多电机速度同步误差曲线

Fig. 11 Synchronization error curve of multi-motor speed

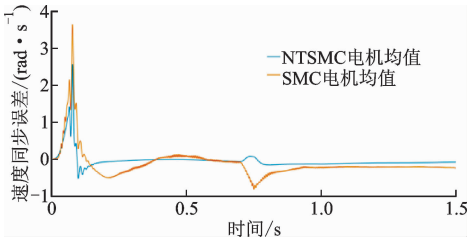


图 12 多电机速度同步误差均值曲线

Fig. 12 Mean speed synchronization error curve of multi-motor

式克服了均值耦合 SMC 多电机同步控制方式的不足。由仿真实验结果可知,各电机启动开始,经过 0.3 s 后,各电机间误差收敛至零,控制系统具有良好的动态调节能力,使阿胶制粒设备稳态运行能力得到提高;由式(5)可知,各电机之间相互耦合,能够实现对系统误差的全局补偿,且控制系统运算量小。当在 0.7 s 各电机负载分别发生突变时,对各电机间产生 0.5 rad/s 的误差波动,经 0.1 s 后,各电机误差快速收敛至零,充分提高了多电机同步控制动态性能和稳态精度,具有良好的鲁棒性。

5.3 多电机同步运行实验分析

为验证本文控制方法的真实性和准确性,以某制药集团有限公司 DXY65-III 型阿胶制粒机为控制对象进行实验验证。阿胶制粒机现场设备如图 13 所示,其结构包括 3 台异步电动机,以实现设备运行的喂料、进给以及制粒过程。

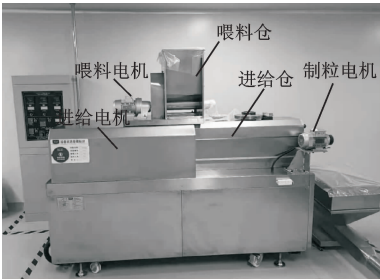


图 13 阿胶制粒机现场设备

Fig. 13 Field equipment of asini coii colla granulator

在阿胶制粒机实验平台中,将上位机作为人机交互平台,通过博途 V16 中 WinCC RT Advanced 开发人机交互界面,实现设备运行状态的有效监控;以西门子 S7-1500PLC 作为控制器,控制器 CPU 型号为 1511-1 PN,开关频率为 6 kHz;以 3 台西门子 G120 变频器作为各电机驱动装置。上位机与 S7-1500PLC、S7-1500PLC 与 G120 变频器分别以 Profinet 作为通信网络,以实现上位机与 PLC,PLC 与变频器之间的通信,其控制系统结构如图 14 所示。

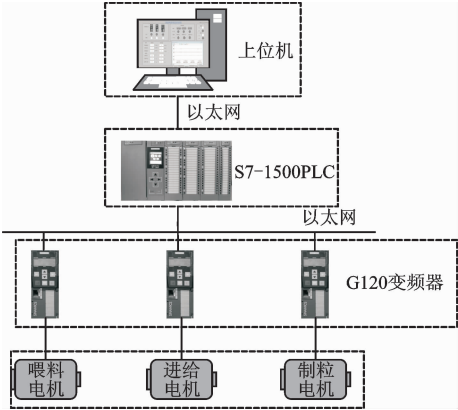


图 14 阿胶制粒机控制系统结构图

Fig. 14 Control system structure of donkey-hide gelatin pelletizer

阿胶制粒机运行中,多电机协同工作,实现了阿胶粒的生产。由于实际运行中各电机功能不同,因此,各电机运行转速不同。在带负载运行时,喂料电机转子速度为 70 rad/s,制粒电机为 80 rad/s,进给

电机为 60 rad/s 。为了验证本控制方法的系统响应速度和对扰动的抑制能力,在各电机转速达到期望值且阿胶制粒机稳定出料后,分别在喂料仓和进给仓突加物料,使喂料电机和进给电机负载分别突变,以验证系统性能。多电机控制转速实验波形如图 15 所示。

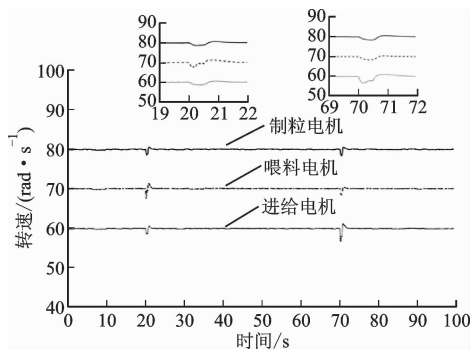


图 15 多电机运行转速

Fig. 15 Running speed of multiple motors

由图 15 可知,在额定工况下,3 台电机转速均能正常跟踪期望值,在设备运行稳定后,20 s 处给喂料仓突加物料会引起喂料电机转速发生波动,由于各电机的耦合作用,制粒电机、进给电机均产生转速波动;同理,在 70 s 处给进给仓突加物料,也会引起 3 台电机转速波动;突加物料引起的负载波动,并未造成 3 台电机转速的剧烈波动,且均能在 2 s 之内实现转速波动的有效调节;实验与仿真结果具有一致性,表明系统对于负载突变有良好的抑制能力和动态调节能力。

由于各电机期望转速不同,为了较直观地反映 3 台电机间的误差波动,以制粒电机转速为参考值,喂料电机与进给电机转速分别以参考文献[21]方法,乘以各电机间转速的比例系数进行实验验证,误差波形如图 16 所示。

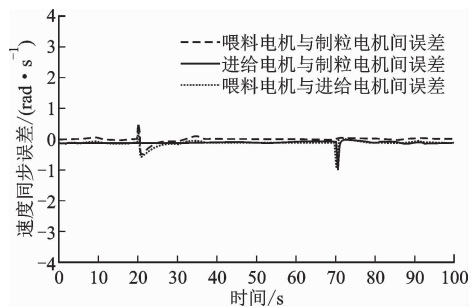


图 16 多电机速度误差波形

Fig. 16 Error waveform of multi-motor speed

由图 16 可知:设备平稳运行过程中,各电机间

转速误差均为零,具有良好的稳态精度;当分别给喂料仓与进给仓在 20 s 和 70 s 处突加物料时,喂料电机与进给电机负载产生突变,引起电机间转速误差产生 1 rad/s 的波动,且在 2 s 内电机间速度误差收敛至零。结合图 15 可知,在 20 s 处给喂料仓突加物料后,喂料电机与制粒电机在 $\pm 1 \text{ rad/s}$ 内产生速度误差波动,在 70 s 处给进给仓突加物料后,喂料电机与制粒电机速度误差虽未产生波动,但转速均产生波动,证明本文控制方法能够保证转速调节的快速性,且能够有效降低多电机同步的稳态误差。同理,进给电机与制粒电机的误差也反映了本文控制方法良好的动态性能和稳态精度。

6 结 论

针对阿胶制粒设备结构复杂、温差大,多电机速度同步控制精度低和控制系统响应速度慢的问题,提出了一种无速度传感器的多电机均值耦合 NTSMC 速度同步控制方法。

(1)根据异步电动机数学模型,构建转速自适应磁链观测器,通过对电机电压电流的检测,实现电机转子磁链观测和观测转速的自适应调整;利用 Lyapunov 稳定性定理对观测器全局渐进稳定进行了证明,保证了无转速传感器阿胶制粒机电机转速闭环控制的可靠性。

(2)通过构建均值耦合函数,设计 NTSMC 多电机速度跟踪控制器和同步控制器对系统误差全局补偿的同时,保证多电机速度误差的同步收敛,降低控制系统运算量;利用 Lyapunov 稳定性定理证明了多电机均值耦合 NTSMC 控制的稳定性,保证了多电机协同控制的可靠性。

(3)通过仿真与实验证明,用本文控制方法构建的转速自适应磁链观测器对负载突变、转速改变具有良好的动态调节能力和快速的跟踪性能;与均值耦合 SMC 多电机同步控制方法相比,本文控制方法各电机速度跟踪误差和各电机之间速度同步误差收敛更快,且不存在静态误差,具有更好的动态调节能力和稳态性能;对于发生负载突变,各电机跟踪误差和各电机间同步误差波动更小,且系统动态响应速度更快,能够使跟踪误差、同步误差快速收敛,具有更好的稳态精度和鲁棒性。

本文提出的无速度传感器的多电机速度同步控制方法,能够满足阿胶制粒机加工工艺的要求,对于速度传感器安装不便、多电机速度同步要求高的场合具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 燕娜娜,熊素琴,陈鸿平,等. 阿胶炮制历史沿革与现代研究进展 [J]. 中药材, 2018, 41(12): 2948-2952.
YAN Nana, XIONG Suqin, CHEN Hongping, et al. Historical evolution and modern research progress of the processing of asini coii colla gelatin [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2018, 41(12): 2948-2952.
- [2] 丁威,杜钦君,赵龙,等. 采用干扰观测器智能PID的电磁炒药机温度控制系统设计 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(5): 133-142.
DING Wei, DU Qinjun, ZHAO Long, et al. Design of temperature control system for electromagnetic stir-frying machine based on intelligent PID of disturbance observer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(5): 133-142.
- [3] 张洋,别朝红. 一种无速度传感器的双馈风力发电机滞环矢量控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(6): 109-113, 124.
ZHANG Yang, BIE Chaohong. Sensor-less hysteretic vector control of donbly-fed machine for wind power generators [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(6): 109-113, 124.
- [4] 高艳霞,陈静,范应鹏,等. 一种用于异步电机无速度传感器控制的自适应滑模观测器 [J]. 电机与控制学报, 2017, 21(4): 8-16.
GAO Yanxia, CHEN Jing, FAN Yingpeng, et al. Adaptive sliding mode observer based sensorless control system of induction motor [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(4): 8-16.
- [5] 张永昌,赵争鸣,张颖超,等. 基于全阶观测器的三电平逆变器异步电机无速度传感器矢量控制系统 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 34-40.
ZHANG Yongchang, ZHAO Zhengming, ZHANG Yingchao, et al. Sensorless vector control system of induction motor fed by three-level inverter using a full order observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 34-40.
- [6] 安跃军,张志恒,张振厚,等. 真空干泵用屏蔽电机无速度传感器带速重投控制系统 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2665-2675.
AN Yuejun, ZHANG Zhiheng, ZHANG Zhenhou, et al. Restarting at unknown speed with speed-sensorless control system of canned motor for vacuum dry pump [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2665-2675.
- [7] CHEN Chong, LIU Xing-Qiao. Three-motor synchronous speed-regulation system based on RBF neural network control [C] // 2010 First ACIS International Symposium on Cryptography, and Network Security, Data Mining and Knowledge Discovery, E-Commerce and Its Applications, and Embedded Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 405-409.
- [8] 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, 21(22): 2662-2665.
LIU Ran, SUN Jianzhong, LUO Yaqin, et al. Research on multi-motor sliding-mode synchronization control based on ring coupling strategy [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(22): 2662-2665.
- [9] MENGONI M, TANI A, ZARRI L, et al. Position control of a multi-motor drive based on series-connected five-phase tubular PM actuators [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2048-2058.
- [10] WU Yanjuan, CHENG Yanbin, WANG Yunliang. Research on a multi-motor coordinated control strategy based on fuzzy ring network control [J]. IEEE Access, 2020, 8: 39375-39388.
- [11] YEH S S, HSU P L. Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2002, 7(1): 44-51.
- [12] PEREZ-PINAL F J, CALDERON G, ARAUJO-VARGAS I. Relative coupling strategy [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1162-1166.
- [13] 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.
- [14] YANG Jiangzhao, LI Zexiang. A novel contour error estimation for position loop-based cross-coupled control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 643-655.
- [15] 常雪剑,彭博,刘凌,等. 新型非奇异终端滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 85-91, 99.
CHANG Xuejian, PENG Bo, LIU Ling, et al. A novel nonsingular terminal sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous mo-

- tor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(1): 85-91, 99.
- [16] 高苗苗. 基于滑模控制的多机械臂同步控制研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 13-16.
- [17] SUN Chenchen, GONG Guofang, YANG Huayong, et al. Fuzzy sliding mode control for synchronization of multiple induction motors drive [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 44(11): 3223-3234.
- [18] HAITHAM A R, ATIF I. High performance control of AC drives with MATLAB/Simulink models [M]. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley, 2012: 22-28.
- [19] SAGHAFINIA A, PING H W, UDDIN M N, et al. Adaptive fuzzy sliding-mode control into chattering-free IM drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 692-701.
- [20] 张永昌, 杨海涛. 异步电机无速度传感器模型预测控制 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2422-2429.
- ZHANG Yongchang, YANG Haitao. Model predictive control for speed sensorless induction motor drive [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2422-2429.
- [21] SUN Wei, GAO Jie, YU Yong, et al. Robustness improvement of speed estimation in speed-sensorless induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2525-2536.
- [22] LEE Y, SUL S K. Model-based sensorless control of an IPMSM with enhanced robustness against load disturbances based on position and speed estimator using a speed error [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2): 1448-1459.
- [23] GEROMEL J C, KOROGUI R H. Analysis and synthesis of robust control systems using linear parameter dependent lyapunov functions [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(12): 1984-1989.
- [24] WANG Aimeng, WEI Shengjun. Sliding mode control for permanent magnet synchronous motor drive based on an improved exponential reaching law [J]. IEEE Access, 2019, 7: 146866-146875.
- [25] 胥小勇, 孙宇, 蒋清海. 改进型相邻耦合结构的多电机比例同步控制 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1254-1260.
- XU Xiaoyong, SUN Yu, JIANG Qinghai. Improved adjacent cross-coupling control structure for multi-motor proportional synchronization control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1254-1260.

(编辑 亢列梅)