

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.04.011

无轴传动系统多电机同步控制方法研究*

迟晓妮, 周 锴

(杭州职业技术学院 青年汽车学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:为解决印刷设备可靠性差、印刷精度低、废品率高等问题,将多电机同步控制技术引入到了无轴传动系统中。对卷筒纸印刷机的结构和传动特点进行了分析,建立了永磁电机数学模型,设计了一种多电机速度同步控制系统;采用相邻交叉耦合控制策略,建立了跟踪误差和同步误差模型;设计了一种自适应滑模控制器,通过引入自适应变速趋近规律以及抖动消除方法,提高了系统的动态性能;利用 Matlab 仿真软件进行了实验分析。研究表明:电机之间同步误差可以控制在 $\pm 0.01\%$ 以内,仅需 0.05 s 就能够进入稳定状态;多电机同步控制方法具有精度高、抗干扰性能好、收敛速度快等特点。

关键词:无轴传动;相邻交叉耦合控制;滑模控制;同步控制

中图分类号:TH69;TH39;TP271

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)04-0397-05

Multi-motor synchronous control method for shaft-less drive system

CHI Xiao-ni, ZHOU Kai

(Youngman Automotive Institute, Hangzhou Vocational & Technical College, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor reliability, low precision and high rejection rate of printing equipment, multi-motor synchronous control technology was introduced into shaft-less transmission system. The structure and transmission characteristics of web press were studied, the mathematical model of permanent magnet motor was established, and a multi-motor speed synchronization control system was designed. The tracking error and synchronization error models were established by using the adjacent cross-coupling control strategy. An adaptive sliding mode controller was designed, in which the law of adaptive variable speed approach was adopted, and the anti-shake treatment was carried out to improve the dynamic performance of the system. Matlab software was used for simulation analysis. The results show that the synchronization error between motors can be controlled within $\pm 0.01\%$, and only 0.05 s is required to enter a stable state. Multi-motor synchronous control method has the characteristics of high precision, good anti-interference performance and fast convergence speed.

Key words: shaft-less transmission; adjacent cross-coupling control; sliding-mode control; synchronous control

0 引 言

通常情况下,传统机组式印刷机大多选用机械传动方式,但长时间运行后容易故障频发^[1-3]。为克服机械传动自身的不足,多电机无轴传动在印刷行业的应用越来越广泛。考虑到电机众多不确定因素,例如:负载扰动、参数漂移等,不同电机之间的同步控制肯定会受到影响,因此,实现多电机的同步控制具有重要意义^[48]。

当前,普遍使用的同步控制技术可分为:偏差耦合、相邻交叉耦合、交叉耦合、主-从控制算法等。主-从控制算法结构简单,但同步精度较低;交叉耦合或偏差耦合控制均能够确保同步控制精度,但是算法复杂;相对而言,相邻交叉耦合控制则能够解决上述问题^[9-13]。KOREN 等人^[14]首先提出了交叉耦合控制理念,但是研究只针对两台电机;PEREZ 等人^[15]将相邻交叉耦合策略应用到多电机同步控制,

收稿日期:2018-11-16

基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGG18E070001);杭州市科技计划项目(20160533B93);浙江省大学生科技创新新苗人才计划项目(2018R454011)

作者简介:迟晓妮(1979-),女,山东青岛人,硕士研究生,讲师,主要从事控制工程方面的研究。E-mail:chi_xiaoni@126.com

却整合了传统 PID 控制算法,虽然该算法参数易于整定,但是鲁棒性能较差,易受外部扰动的影响;马志刚等人^[16]提出了一种相邻交叉耦合滑模变结构多电机同步控制算法方法,虽然同步效果比较理想,但存在抖振现象。

为降低印刷机无轴传动过程中轴与轴之间的同步误差,提高印刷精度,本文将通过引入滑模变结构控制,并结合相邻交叉耦合控制,以实现多电机同步传动。

1 无轴传动系统

1.1 卷筒纸印刷机

卷筒纸印刷机简要结构如图 1 所示。

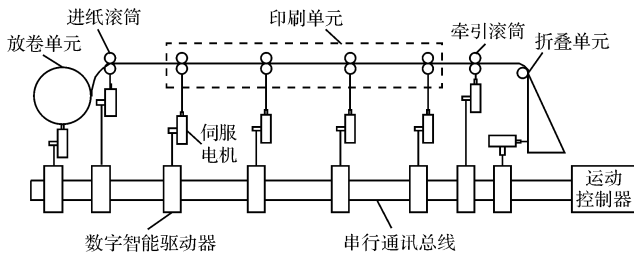


图 1 卷筒纸印刷机简要结构

该系统采用无轴传动,其机械结构简单,其控制平台是整个系统的关键,主要包括:运动控制器、通讯总线、电机驱动器、伺服电机等组件。

无轴传动系统利用电子长轴代替传统机械长轴,不同印刷单元单独驱动;伺服电机直接驱动各印刷滚筒;系统利用串行通讯总线连接不同驱动器,实现驱动器和控制器之间的实时通讯,确保各轴之间耦合,进而完成同步控制。通常情况下,无轴传动系统采用电子凸轮代替机械凸轮,能够克服机械装置的诸多不足,进一步提升无轴传动系统的性能。总体来说,无轴传动系统主要功能就是实现各个印刷机组的同步运动,对于一些辅助功能,可根据印刷过程特点具体制定。

1.2 永磁电机数学模型

在 $d-q$ 坐标系下,建立永磁同步电机数学模型,具体可表示为:

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

式中: u_d, u_q —定子电压; i_d, i_q —定子电流; L_s —定子电感; R —电阻; p_n —电机极对数; ω —角速度; ψ_f —永磁体磁链。

电机运动方程可表示为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q - T_L \quad (2)$$

式中: T_L —电机负载转矩; J —电机转动惯量。

2 多电机同步控制策略

2.1 相邻交叉耦合控制

对于具有 n 台电机的控制系统,定义第 i 台电机的跟踪误差为:

$$e_i(t) = \omega_i^*(t) - \omega_i(t) \quad (3)$$

式中: $\omega_i^*(t)$ —电机参考转速; $\omega_i(t)$ —电机实际转速。

在电机转速同步控制过程中,在满足 $e_i(t) \rightarrow 0$ 的前提下,要使 n 台电机的跟踪误差满足下式:

$$e_1(t) = \dots = e_i(t) = \dots = e_n(t) \quad (4)$$

根据电机相邻顺序,可定义电机之间的同步误差为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_n(t) = e_n(t) - e_1(t) \end{cases} \quad (5)$$

若 $\varepsilon_i(t) = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$ 均成立,就可以实现多电机同步控制的目标。从上式可以看出:同电机 i 相关的同步误差量包括 $\varepsilon_i(t)$ 和 $\varepsilon_{i-1}(t)$,即电机 i 只需要与电机 $i-1$ 和电机 $i+1$ 保持同步即可。

定义相邻 3 台电机之间的跟踪误差为:

$$\begin{cases} e_{(i-1)(i-1)}(t) = \omega^*(t) - \omega_{i-1}(t) \\ e_{ii}(t) = \omega^*(t) - \omega_i(t) \\ e_{(i+1)(i+1)}(t) = \omega^*(t) - \omega_{i+1}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $e_{(i-1)(i-1)}(t)$ —第 $i-1$ 台电机跟踪误差; $e_{ii}(t)$ —第 i 台电机跟踪误差; $e_{(i+1)(i+1)}(t)$ —第 $i+1$ 台电机跟踪误差; $\omega_{i-1}(t)$ —第 $i-1$ 台电机实际转速; $\omega_i(t)$ —第 i 台电机实际转速; $\omega_{i+1}(t)$ —第 $i+1$ 台电机实际转速。

定义任意相邻两台电机之间的同步误差为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{i(i-1)}(t) = e_{ii}(t) - e_{(i-1)(i-1)}(t) = \omega^*(t) - \omega_i(t) - (\omega^*(t) - \omega_{i-1}(t)) = -(\omega_i(t) - \omega_{i-1}(t)) \\ \varepsilon_{i(i+1)}(t) = e_{ii}(t) - e_{(i+1)(i+1)}(t) = \omega^*(t) - \omega_i(t) - (\omega^*(t) - \omega_{i+1}(t)) = -(\omega_i(t) - \omega_{i+1}(t)) \end{cases} \quad (7)$$

本研究对 n 台电机进行同步控制,将第 n 台电机和第 1 台电机进行耦合,从而组成相邻交叉耦合控制系统。多电机同步控制策略如图 2 所示。

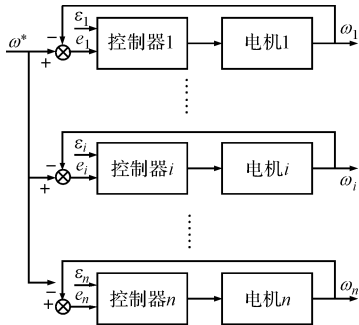


图 2 多电机同步控制策略

其电机控制器如图 3 所示。

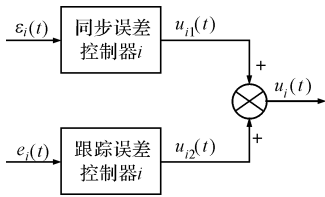


图 3 电机控制器

2.2 同步控制数学模型

为便于设计控制器,可定义电机系统状态变量为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega^* - \omega \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω —实际转速值; ω^* —参考转速值一般情况下,参考转速为常量,即 $\dot{\omega}^* = 0$; x_1 —跟踪误差。

另外,可将外界扰动 T_L 视作一种慢时变信号,满足 $T_L = 0$ 。那么电机数学模型的状态方程可描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega} = \frac{1}{J}(K_T i_q - T_L) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega} = -\frac{K_T}{J} \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9),跟踪误差数学模型可描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -bu_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_1 —跟踪误差控制器; $b = K_T/J$ 。

若以第 $i-1$ 台和第 $i+1$ 台电机作为研究对象,那么系统状态变量可表示为:

$$\begin{cases} e_1 = -(\omega_i - \omega_{i-1}) \\ e_2 = \dot{e}_1 = -(\dot{\omega}_i - \dot{\omega}_{i-1}) \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)求导,结合电机数学模型可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{K_T}{J}(i_{q(i)} - i_{q(i-1)}) + \frac{P_n}{J}(T_{L(i)} - T_{L(i-1)}) \\ \dot{e}_2 = \ddot{e}_1 = -\frac{K_T}{J} \frac{d(i_{q(i)} - i_{q(i-1)})}{dt} \end{cases} \quad (12)$$

可将式(12)简化处理,即可得到同步误差数学模型:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = -bu_2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_2 —同步误差控制器。

由式(10,13)可知:从形式上看,电机跟踪误差和同步误差完全相同。为便于设计,可将二者统一表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -bu \end{cases} \quad (14)$$

2.3 自适应滑模控制器

为提高系统的动态性能,本研究设计了一种自适应滑模控制器,其积分滑模面函数可表示为:

$$s = x_2 + \int (k_1 x_2 + k_2 x_1) dt \quad (15)$$

如果滑模控制处于理想状态,那么则存在 $s = \dot{s} = 0$, 此时有:

$$\ddot{x}_1 + k_1 \dot{x}_1 + k_2 x_1 = 0 \quad (16)$$

若 k_1 和 k_2 的数值选择合适,误差变量 x_1 就会趋向于零。为获取控制器的表达式,可对式(15)求导,同时将式(16)代入,即:

$$\dot{s} = \dot{x}_2 + k_1 x_2 + k_2 x_1 = -bu + k_1 x_2 + k_2 x_1 \quad (17)$$

基于自适应变速趋近规律,控制器表达式可以描述为:

$$u = \frac{1}{b} [k_1 x_2 + k_2 x_1 + (k + \alpha x_1) s + \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} \text{sgn}(s)] \quad (18)$$

为验证系统稳定性,可选择如下李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (19)$$

对式(19)求导,结合式(16,17)可以得到:

$$\begin{aligned} V = \dot{s}s &= s(\dot{x}_2 + k_1 x_2 + k_2 x_1) = \\ &= s(-bu + k_1 x_2 + k_2 x_1) \end{aligned} \quad (20)$$

结合式(18,20),可以得到:

$$\begin{aligned} V = s \left[-((k + \alpha \|x\|_1) s - \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} \text{sgn}(s)) \right] = \\ = -(k + \alpha \|x\|_1) s^2 - \varepsilon \frac{1}{1 + \alpha \|x\|_1} |s| \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

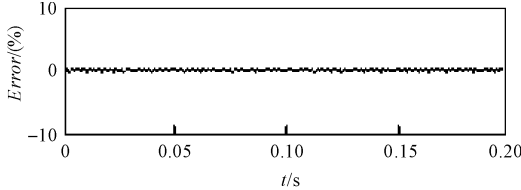
由式(21)可以看出:系统满足 $\dot{s}s < 0$ 的条件,可确保进入滑模动态。

从式(18)可以看出:控制器中包含切换函数。为削弱抖振,文中采用 sigmod 函数取代切换函数,即:

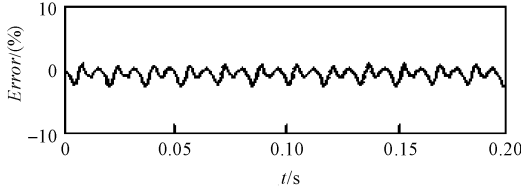
$$\text{sigmoid}(x) = \frac{2}{1 + e^{-\alpha x}} - 1 \quad (22)$$

式中： α —大于 0 的常数。

为验证消抖效果，文中针对滑模控制器进行仿真研究，结果如图 4 所示。



(a) sigmoid函数消抖



(b) sgn函数消抖

图 4 消抖效果图

由仿真结果可以看出：滑模控制器消抖效果理想，能够满足多电机同步控制要求。

3 仿真和结果分析

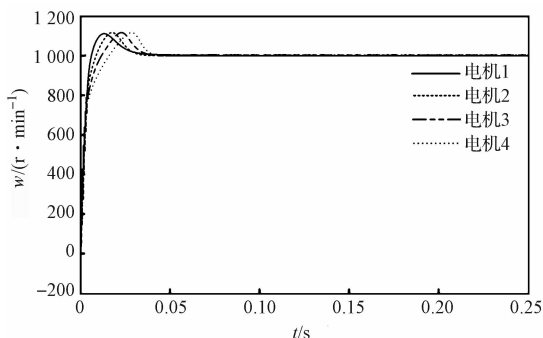
为验证所述方法的可行性和有效性，本文进行了仿真研究。选用 4 台相同电机，参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

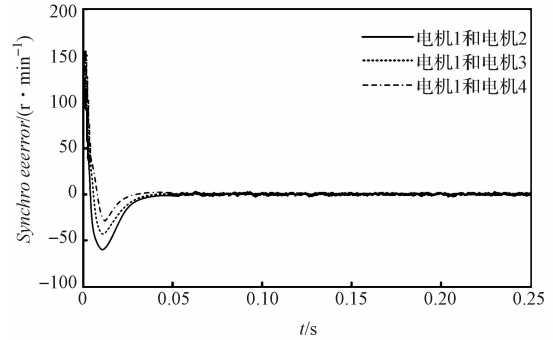
参数名称	数值大小
定子电阻/ Ω	1.8
定子电感/mH	8.7
磁链/Wb	0.175
极对数	4
转动惯量/ $(g \cdot m^2)$	0.8

为降低仿真过程计算量，仿真结果仅仅给出了电机 1 和电机 2、3、4 之间的转速同步误差。

首先，在空载条件下，本文设定电机参考转速为 1 000 r/min，进行仿真实验，结果如图 5 所示。



(a) 电机转速变化曲线

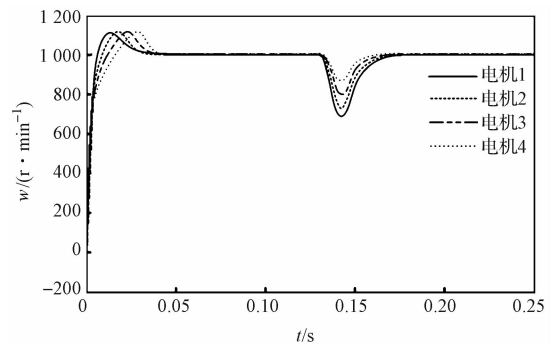


(b) 同步误差变化曲线

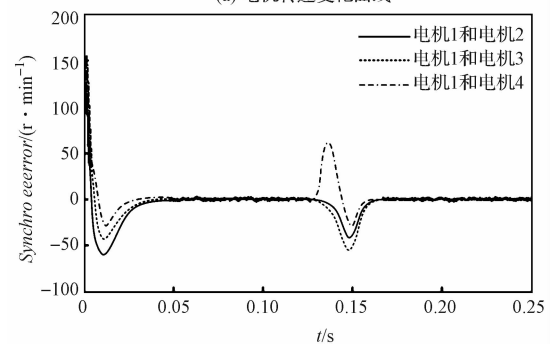
图 5 空载条件下仿真结果

从图 5 中可以看出：采用本文所述算法，电机可以较快地实现转速跟踪，而且同步误差会在很短的时间内收敛于零，耗时约为 0.05 s。可见，文中所述算法响应速度快、同步控制精度高。

为进一步验证所述方法的抗扰动能力，本文在仿真过程中突加一个 20 N·m 负载转矩，其仿真结果如图 6 所示。



(a) 电机转速变化曲线



(b) 同步误差变化曲线

图 6 干扰条件下仿真结果

从图 6 中可以看出：即使存在干扰，电机也能够较快地实现转速跟踪，最长耗时约为 0.06 s；而且同步误差会在很短的时间内收敛于零。可见，电机突加负载时采用文中所提算法具有明显的优越性。

综上所述，基于本文所述方法，多电机同步控制系统在启动阶段和突加负载阶段虽然也出现一定的同步

误差波动现象,但系统在很短时间内便进入了稳定状态。

4 结束语

以印刷设备的无轴传动系统为研究对象,为提高其精度,本文基于相邻交叉耦合控制提出了一种多电机同步控制策略,并引入了一种自适应滑模控制方法。

为验证所述方法的有效性,进行了仿真研究。研究表明:该控制方法可将同步误差控制在 $\pm 0.01\%$ 以内;而且收敛速度较快,仅需0.05 s就能够进入稳定状态;具有较好的抗干扰能力和鲁棒性。

参考文献 (References):

- [1] 曾超,杨喜军,唐厚君,等. 高速轮转式印刷设备无轴传动的应用[J]. 电气自动化,2015,37(3):33-36.
- [2] 马膺峻. 无轴套印控制系统综合控制策略的研究[D]. 沈阳:东北大学机械工程学院,2010.
- [3] 刘星桥,徐迎辉. 一种新型多电机同步控制平台研制[J]. 电机与控制应用,2016,43(9):8-13.
- [4] 李文春,赵德宗,任军. 基于全滑模面的多感应电机速度同步控制[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(9):110-117.
- [5] 马文华,张冬梅,刘昕彤,等. 多电机速度同步自适应积分滑模控制[J]. 包装工程,2017,38(15):121-125.
- [6] 袁雷,沈建清,肖飞,等. 插入式永磁低速同步电机非奇异终端滑模观测器设计[J]. 物理学报,2013,62(3):37-45.
- [7] 薛建峰,王景芹,杨昭. 多感应电机相邻交叉耦合快速终端滑模同步控制[J]. 包装工程,2017,38(7):173-177.
- [8] 曹玲芝,王宏,谢晓磊. 基于非线性滑模面的多PMSM变结构同步控制[J]. 微特电机,2015,43(6):62-65.
- [9] 程斯一,纪文刚,王志俊. 基于模糊PID的多伺服电机交叉耦合同步控制[J]. 北京石油化工学院学报,2014,22(4):54-57.
- [10] 张海燕,王伟,赵庆海. 无轴传动控制策略及仿真分析[J]. 自动化技术与应用,2007(3):105-108.
- [11] 张婧. 无轴传动印刷机同步控制系统的研究[D]. 武汉:华中科技大学机械学院,2012.
- [12] LIU R, SUN J Z, LUO Y Q, et al. Research on multi-motor synchronization control based on the ring coupling strategy for cutter-head driving system of shield machines [J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2011, 52(53): 65-72.
- [13] 曹玲芝,李春文,牛超,等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. 电机与控制学报,2008,12(5):586-592.
- [14] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer for manufacturing systems [J]. **ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control**, 1980, 102(4): 265-272.
- [15] PERE-PINAL F J, CALDERON G. Relative coupling strategy[C]. IEEE, IMDC 03. Madison Wisconsin, New York: IEEE, 2003.
- [16] 马志刚,赵志强,王保云. 改进型相邻交叉耦合结构的多电机同步控制[J]. 包装工程,2017,38(3):114-118.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

迟晓妮,周楷. 无轴传动系统多电机同步控制方法研究[J]. 机电工程,2019,36(4):397-401.

CHI Xiao-ni, ZHOU Kai. Multi-motor synchronous control method for shaft-less drive system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019, 36(4): 397-401.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>