

包装机械

多电机无轴传动同步控制策略

高振新, 孙建红

(南京理工大学, 南京 210094)

摘要: 目的 在印刷行业中, 电子轴的同步传动控制得到不断发展, 通过对其多电机的同步控制策略进行研究, 提高其生产效率和产品质量。方法 对比现有的几种同步控制方式, 并应用 Matlab 对这几种不同结构进行建模和仿真研究。结果 通过仿真分析, 发现现有的同步控制方式抗干扰性能和同步协调能力都不太理想, 而偏差耦合同步控制超调量大, 且主要应用于 2 台电机的同步, 因此, 提出了一种结合虚拟主轴控制方式的相邻耦合误差多电机同步控制策略。通过仿真数据分析, 其达到稳定的时间和超调量都比现有的同步控制小, 且抗干扰能力也得到了提高。结论 该策略可以提高多电机同步控制系统的同步跟随性能和抗干扰性能, 增强多电机电子轴传动的同步协调控制能力。

关键词: 无轴传动; 印刷业; 多电机同步控制策略

中图分类号: TS803.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)15-0144-06

Multi-motor Synchronization Control Strategy with Shaftless Drive

GAO Zhen-xin, SUN Jian-hong

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

ABSTRACT: In the printing industry, synchronous drive control of electronic shaft has been developed continuously. This work aims to study its motor synchronization control strategy and further improve production efficiency and product quality. The existing synchronization control ways were compared. Modeling and simulation were conducted for these several different structures by Matlab. The simulation analysis showed that the existing synchronization control ways had no ideal anti-disturbance performance and synchronous coordination ability. However, relative coupling synchronization control had big overshoot and was mainly applied to the synchronization of two motors. Therefore, an adjacent coupling error control strategy combined with virtual spindle motor synchronous control method was proposed. According to the analysis of its simulation data, the stable time and overshoot it got were both smaller than those of the existing ways and its anti-disturbance performance was also improved. In conclusion, this proposal can improve the synchronous tracking performance and anti-interference ability of the motor synchronization control system and enhance the motor electronic shaft synchronous coordination control ability.

KEY WORDS: shaftless drive; printing industry; multi-motor synchronization control strategy

目前, 在造纸、印染、装订等高精度、高转速传动系统中, 多电机同步控制一直是最核心的问题。同步技术的好坏直接影响着系统的可靠性和产品

的质量^[1-2]。多电机同步控制系统的关键技术是无轴传动控制技术(又称为电子轴传动技术), 各单元机组分别采用单独的伺服系统, 电子轴同步传动

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 产学研联合创新资金(前瞻性联合研究项目)(SBY2014020439)

作者简介: 高振新(1991—)男, 江苏人, 南京理工大学硕士生, 主攻电路与系统。

通讯作者: 孙建红(1966—)男, 江苏人, 硕士, 南京理工大学副教授, 主要研究方向为电路与系统。

控制对多电机的同步协调运动进行控制,实现多电机的同步运行。以电子轴传动系统为研究平台,对多电机同步控制策略进行了研究,分析现有的几种同步控制策略,并在此基础上提出一种高效的同步控制方式。

1 多电机同步控制策略研究

目前,多电机同步控制方式主要包括:主从控制、并行控制、交叉耦合控制、虚拟主轴控制、以及偏差耦合控制^[3-4]。其中大部分策略都是针对 2 台电机的同步控制问题提出的,随着产品的复杂化和对品质要求的增加,越来越多人的采用多电机 ($n>2$) 的同步控制系统。文中采用 3 轴同步控制,对各种同步策略进行研究分析。

1.1 多轴主从同步控制

主从同步控制^[5],是指一台电机作为主电机,另几台电机作为从电机,主电机的输出信号作为各从电机的输入信号。主从式同步结构的传动精度只受各从电机跟踪精度的影响,但是从电机跟随主电机的输出信号存在跟踪滞后,且误差会随着轴数增加而增加^[4],因此不适用于多电机同步控制,文中不再对其仿真研究。

1.2 并联运行同步控制

并联运行同步控制^[6],又称主令参考式同步。系统中每一电机接受同一指令单元的信号,各电机之间并联运行,其控制结构见图 1。

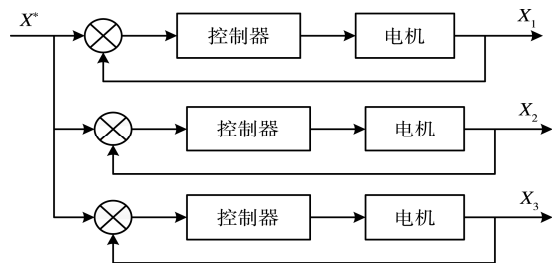


图 1 并联运行同步控制

Fig.1 Synchronization control on parallel running

各轴跟随同一输入信号指令,各轴之间有良好的同步性能,并相互独立运行,但是当任一轴受到扰动影响时,各轴之间没有反馈,会出现多伺服电机间不同步的情况,因此这种同步方式要求控制器具有较强的抗扰性能和较快的反应速度。

1.3 交叉耦合同步控制

交叉耦合同步控制^[7]是通过某个系数将两轴的同步误差分别反馈给两轴的控制器的,对两轴同步误差进行补偿。交叉耦合控制方式的轴间连接复杂,文献[7]中指出该控制策略多用于轮廓误差的控制中,且不适合 2 台以上电动机的同步,因此对于多电机 ($n>2$) 同步控制系统不适用,文中不对此方式进行研究。

1.4 虚拟主轴控制方式

虚拟主轴同步控制最早由 Lorenz 教授和 Meyer 教授提出^[8],其结构借鉴了机械长轴传动方式,并结合并联运行同步和主从式等同步控制方式。虚拟主轴同步控制系统结构见图 2。

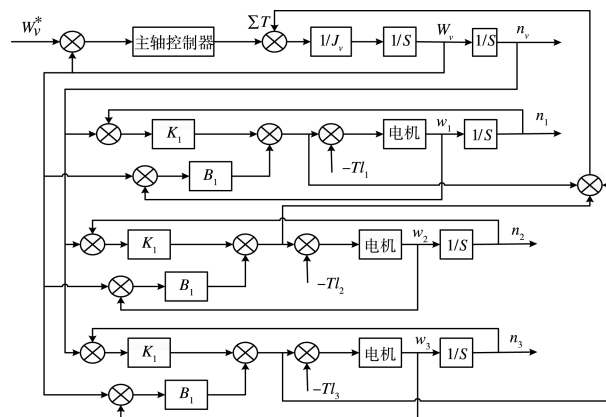


图 2 虚拟主轴同步控制方式

Fig.2 Mode of synchronous control on virtual axis

虚拟主轴系统的输入指令经过虚拟主轴作用后,将信号传递给各单元。负载单元的内轴转矩相加反馈给虚拟主轴,从而实现各单元之间的同步。

1.5 偏差耦合同步控制

偏差耦合同步控制方式^[9]是在交叉耦合控制的基础上进行改进,克服了其空间连接复杂的缺点,可应用于多轴同步,结构见图 3。偏差耦合同步控制方式的思想是将系统中一轴的反馈信号分别同其他轴的反馈信号做差,然后将得到的偏差信号相加作为该轴的补偿信号。

2 电机系统数学模型

在多电机同步控制系统中,其执行机构可选用直流电机、交流异步电机、或者永磁同步电机等。

无轴控制系统中,永磁同步电机由于结构简单、运行可靠,功率因数高、低速转矩大等优势被广泛使用。由于它是非线性、强耦合、多变量的系统,因此,不能像直流电机那样直接进行控制分析。需要通过矢量控制技术,将物理模型建立在三相静止坐标系上,然后通过两相静止坐标系转换到同步旋转坐标系,将其变成直流电机的特性并进行建模^[10-11]。

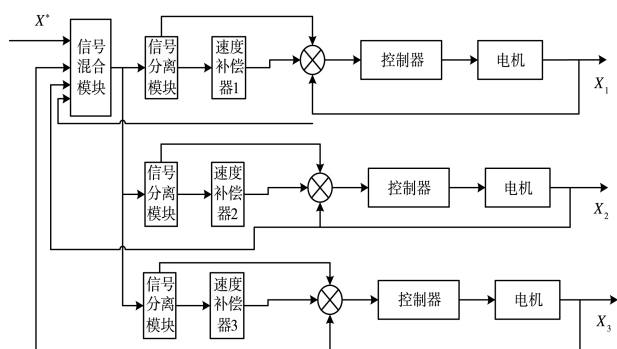


图3 偏差耦合同步控制方式

Fig.3 Mode of deviation coupling synchronization control

文献[12]中假设不考虑电机的铁心饱和,忽略电机中的涡流等损耗,各相绕组对称,不存在励磁电流。得到永磁电机简化模型为:

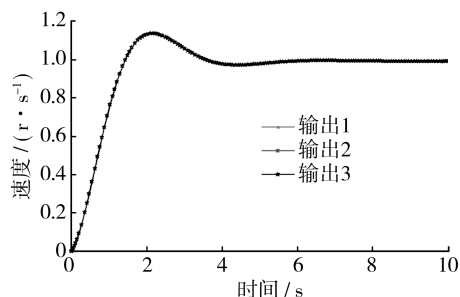
$$G = \frac{K_f}{J_s + B} \quad (1)$$

式中: G 为电机模型; B 为粘滞摩擦因数; K_f 为常值比例系数; J_s 为电机转动和负载的惯量总和。

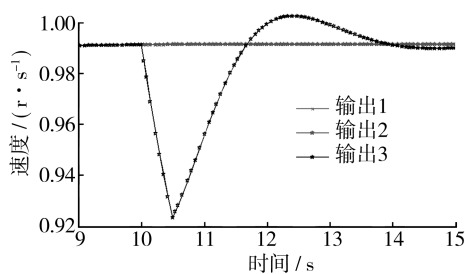
3 仿真及结果分析

根据第1节对控制方式的结构分析,以3个电机为例,采用相同的PID控制器和相同的永磁同步电机用几种控制方式进行Simulink仿真。其中,永磁同步电机的参数 $J_s=6.35 \text{ kg}$, $B=0.1 \text{ Ns/m}$, $K_f=1 \text{ N/A}$ 。PID控制参数^[13]分别取 $K_p=100$, $K_i=1.01$, $K_d=10$ 。选用单位阶跃函数作为典型测试输入,一个脉冲信号作为扰动输入。

并行式同步控制方式仿真见图4,可以看出3台电机同时启动,整个过程仿真误差为零,超调为16%左右,达到稳定时间在7s左右。10s时在输出轴3中加入扰动脉冲,由于各轴之间没有耦合,只有轴3的输出改变,其他两轴输出不变,因而同步性就会受到破坏。由此可见,同步控制器精度完全依赖个单元控制器和电机,也就不适合在干扰复杂的工业生产中应用。



a 并行式同步控制方式波形

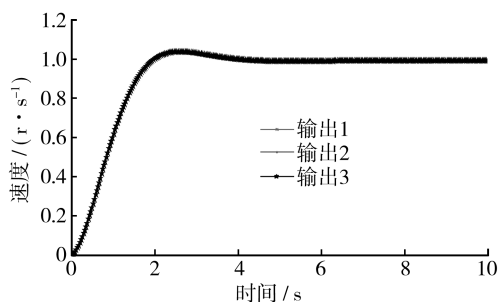


b 并行式中在(t+10)s加一扰动脉冲

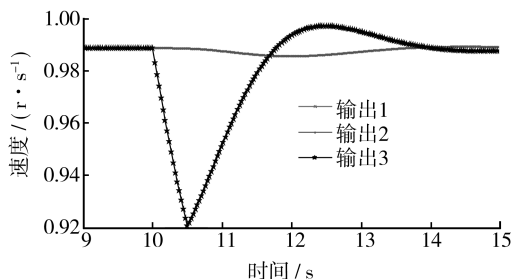
图4 并行式同步控制仿真

Fig.4 Parallel synchronous control simulation

虚拟主轴的同步控制仿真见图5。启动时,3台电机同时启动,同步性较好,仿真误差为零,且超调量较少,达到稳定时间为5s左右。10s时,在运动轴3中加入扰动脉冲,由图5b可知,当运动轴3受到扰动脉冲时,会影响到运动轴2和轴1的速度,运动轴2和轴1不得不牺牲掉一部分输出速度来换取轴间同步性能,但是轴2和轴3速度的降低更加缓慢、平稳。受扰动瞬间的同步误差较大。



a 虚拟主轴同步控制方式波形



b 在(t+10)s加一扰动脉冲

图5 虚拟主轴同步控制仿真

Fig.5 Synchronous control simulation of virtual axis

偏差耦合同步控制仿真情况见图 6。当启动时, 各轴跟随性较好, 同步误差为零, 存在较大超调, 在 6 s 后达到稳定。当在 10 s 时在运动轴 3 加入扰动, 其余两轴也受轴 3 的影响, 发生改变, 向着同步误差偏小的方向改变, 相对于上面几种同步控制方式具有较好的同步性能和抗扰动性。

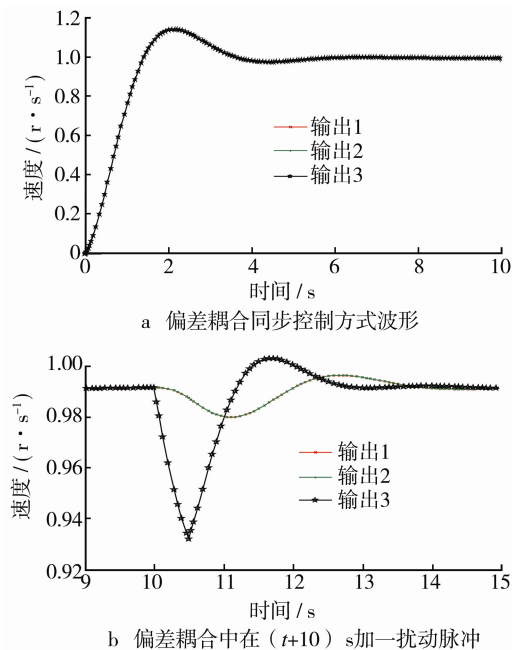


图 6 偏差耦合同步控制仿真

Fig.6 Deviation coupling synchronization control simulation

4 同步控制方式改进

现在应用比较广泛的是偏差耦合同步控制方式和虚拟主轴同步控制方式^[14-15]。偏差耦合同步控制主要是针对 2 台电机的同步控制问题, 在实际工程应用中, 对于多电机的同步控制系统, 很难确定合理的耦合补偿规律, 而且将所有轴上的输出状态耦合到每一轴的控制表达式中势必导致控制器运算复杂、在线计算工作量极大。

文献[16]提出了一种基于最小相关轴数的同步控制思想, 设计了基于相邻耦合误差的同步控制算法, 并通过理论分析和实验验证说明了其有效性。

对于 n 台电机轴的控制系統, 定义第 i 轴的跟踪误差为:

$$e_i = x_i^* - x_i \quad (2)$$

式中: x_i^* 表示第 i 轴的期望运行速度; x_i 表示第 i 轴的实际运行速度。假设各轴的速度同步比例系数 $a_i=1$, 可令 $x_i^*=x^*$ 。

按邻近次序定义同步误差 ε_i , 以三轴同步为例,

有:

$$\varepsilon_1 = e_1 - e_2 = (x^* - x_1) - (x^* - x_2) = x_2 - x_1 \quad (3)$$

$$\varepsilon_2 = e_2 - e_3 = (x^* - x_2) - (x^* - x_3) = x_3 - x_2 \quad (4)$$

$$\varepsilon_3 = e_3 - e_1 = (x^* - x_3) - (x^* - x_1) = x_1 - x_3 \quad (5)$$

在对每一轴实施控制时, 将偏差耦合中考虑所有轴的反馈状态改成仅仅考虑相邻两轴的状态。这样简便了对每一轴的控制。

对文献[16]的控制函数进行简化, 可得控制器输出为:

$$u_i = x^* + \Lambda e_i + \beta(\varepsilon_i - \varepsilon_{(i-1)}) \quad (6)$$

其中: β 为正耦合系数, 用于权衡控制器的跟随性能和同步性能; Λ 为正常数。这里令 β 和 Λ 等于 1, 则有:

$$u_1 = x^* + e_1 + \varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 2x^* - 3x_1 + x_2 + x_3 \quad (7)$$

$$u_2 = x^* + e_2 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 2x^* - 3x_2 + x_1 + x_3 \quad (8)$$

$$u_3 = x^* + e_3 + \varepsilon_3 - \varepsilon_2 = 2x^* - 3x_3 + x_1 + x_2 \quad (9)$$

由于虚拟主轴有着机械方式的固有特性, 并可以方便地调节主轴参数, 具有较好的动态性能、同步性和低超调量, 在多电机控制中应用也比较广泛。

文中将相邻耦合误差同步控制方式和虚拟主轴同步控制方式相结合, 将输入参考信号经过虚拟总轴作用后, 再输出, 其结构见图 7。

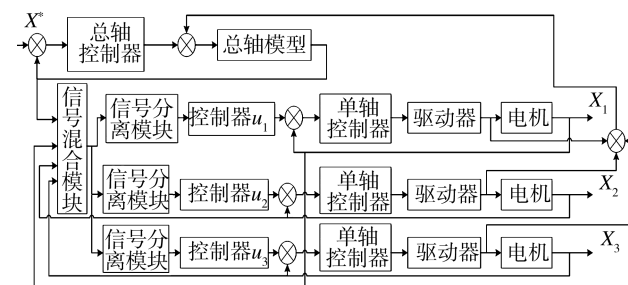


图 7 结合虚拟主轴控制方式的相邻耦合误差同步控制策略
Fig.7 Adjacent coupling error control strategy combined with virtual axis synchronous control method

改进后的同步控制方式的 SMI-ulink 仿真和波形见图 8。从图 8b 可以看出, 电机启动时, 超调量很小, 且各轴跟随性很好, 同步误差为接近于零。在 3 s 之前就趋向稳定, 相对于现有的几种同步方式, 稳定时间短。图 8c 是在 10 s 时, 在运动轴 3 加入扰动脉冲的波形图。运动轴 3 受到扰动时, 输出信号仅降到 0.948。与图 6b 比较可知, 受到同样扰动的偏差耦合控制方式的受扰轴的输出信号降到了 0.932, 说明改进后的同步控制方式有更强的抗干扰性能, 各轴之间的同步误差也比之前的要小一些。从图 8c 可以看出, 改进后的控制方式, 其

受扰后 3.5 s 就恢复稳定,也比偏差耦合的快了 1 s 的速度,具有更高的稳定性,因此,改进后的同步控制方式虽然还存在一点超调量和扰动误差,但相比之前的同步控制方式具有更高的稳定性、同步性、抗干扰能力和低超调现象。

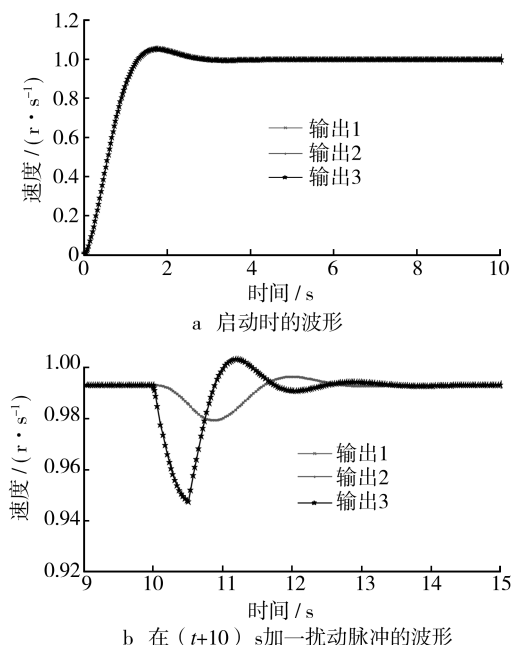


图 8 结合虚拟主轴控制方式的相邻耦合误差同步控制策略仿真

Fig.8 Adjacent coupling error synchronization control strategy simulation combined with virtual axis control mode

5 结语

基于印刷业中的多电机的同步控制技术为研究背景,比较了主从同步、并联运行同步、交叉耦合同步、虚拟主轴同步、偏差耦合同步这 5 种同步控制策略的结构,并建立了 Simulink 仿真模型对其进行了仿真对比,重点考察了启动过程、加载干扰不平衡过程中的同步性、稳定性、超调量和抗干扰能力。根据理论依据和仿真分析结果,改进了偏差耦合同步控制策略,并将其与虚拟主轴同步控制方式相结合。并对该控制策略进行了仿真分析,论证了其优越性,为造纸、印染、装订等印刷行业中的同步控制技术的研发提供了理论参考。对于仿真中依然存在的超调现象和一定的扰动误差问题,在之后的研究中将通过同步控制算法进一步优化。

参考文献:

[1] 涂晓曼. 无轴传动控制系统的分析与研究[D]. 上海:

华东理工大学, 2015.

TU Xiao-man. Analysis and Study of Shaftless Drive Control System[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2015.

[2] 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.

ZENG Chao, YANG Xi-jun, TANG Hou-jun, et al. High Speed Rotary Printing Equipment Shaftless Drive Application[J]. Electrical automation, 2015, 37(3): 33—36.

[3] 张海燕, 王伟, 赵庆海. 无轴传动控制策略及仿真分析[J]. 包装工程, 2007, 28(3): 105—108.

ZHANG Hai-yan, WANG Wei, ZHAO Qing-hai. Shaftless Drive Control Strategy and Simulation Analysis[J]. Journal of Packaging Engineering, 2007, 28(3): 105—108.

[4] 卫宏, 周国平, 申东琴. 凹印机电轴传动多电机同步控制策略[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 134—139.

WEI Hong, ZHOU Guo-ping, SHEN Dong-qin. Gravure Press Electronic Shaft Driving Motor Synchronization Control Strategy[J]. Journal of Packaging Engineering, 2015, 36(3): 134—139.

[5] SHIM H M, HONG J P, CHUNG S B. A Powered Wheelchair Controller Based on Master-slave Control Architecture Industrial Electronics[C]// IEEE International Symposium, 2001(3): 1553—1556.

[6] 刘福才, 张学莲, 刘立伟. 多级电机传动系统同步控制理论与应用研究[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 87—90.

LIU Fu-cai, ZHANG Xue-lian, LIU Li-wei. Multi-stage Synchronous Motor Drive System Control Theory and Application Research on What[J]. Control Engineering, 2002, 9(4): 87—90.

[7] KOREN Y. Cross-coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing Systems[J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1980, 102(12): 1324—1330.

[8] VALENZUELA M A, LORENZ R D. Electronic Line-shafting Control for Paper Machine Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 158—164.

[9] PEREZ-PINAI F, CALADERON G, ARAUJO I. Relative Coupling Strategy[J]. IEEE, IEMDC'03, Madison Wisconsin USA, 2003, 2(6): 1162—1166.

[10] 蒋毅. 多永磁电机传动系统的同步控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

JIANG Yi. Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System Control Strategy Study[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[11] 陈荣. 永磁同步电机控制系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

CHEN Rong. Permanent Magnet Synchronous Motor Control System[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2009.

[12] 魏代海, 邓开发, 吴承刚, 等. 基于凹版印刷机无轴传动的多轴同步控制研究[J]. 包装工程, 2014, 35

- (13): 105—109.
WEI Dai-hai, DENG Kai-fa, WU Cheng-gang, et al. Based on the Gravure Printing without Shaft Multi-axis Synchronous Control Study[J]. Journal of packaging engineering 2014, 35(13): 105—109.
- [13] 黄友锐, 曲立国. PID 控制器参数整定与实现[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
HUANG You-rui, QU Li-guo. The PID controller Parameter Setting and Implementation[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] 谢吉涛. 基于同步控制技术的单张纸输纸机传动系统的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013.
XIE Ji-tao. Sheet-fed Paper Machine Drive System Based on the Synchronization Control Technology [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [15] 张倩. 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, 2012.
ZHANG Qian. Shaftless Drive Printing Machine Synchronous Control System Research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [16] 张承慧, 石庆升, 程金. 一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 59—63.
ZHANG Cheng-hui, SHI Qing-sheng, CHENG Jin. A Motor Synchronization Control Strategy Based on Adjacent Coupling Error[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 59—63.