

无轴单张纸输纸机的同步控制

管力明^{1,2}, 林 剑²

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 杭州电子科技大学 新闻出版学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 无轴输纸机要求各驱动轴之间的运动保持严格的同步, 常规的PID控制在实际运行过程中很难满足高性能调速系统的要求. 本文在常规滑模变结构算法的基础上, 采用动态滑模变结构控制策略, 解决输纸机各运动轴速度和相位的同步控制问题. 在构建的实验平台上进行仿真实验, 结果表明, 动态积分滑模变结构控制能有效实现多电机同步控制, 满足系统响应速度和控制精度的要求.

关键词: 无轴传动; 输纸机; 动态滑模控制; 同步控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Synchronization control of sheet feeding machine of shaft-less drives

GUAN Li-ming^{1,2}, LIN Jian²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. School of Printing, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou Zhejiang 310018, China)

Abstract: Sheet-feeding machine with shaft-less drives needs a strict synchronization between the driving shafts. The conventional PID control is difficult to meet the requirements of the high-performance speed-regulating system in operation. Based on the traditional sliding-mode algorithms, we design a controller using the dynamical-integral sliding-mode control to achieve the synchronization between the speed and phase position of driving shafts in the sheet-feeding machine. The experimental results from the constructed setup show that the presented dynamical-integral sliding-mode controller is effective to the multi-motor synchronous drives system, and meets the requirements of response time and control accuracy of the system.

Key words: shaft-less drives; paper feeding machine; dynamical-integral sliding mode control; synchronization control

1 引言(Introduction)

随着伺服以及变频技术的迅猛发展, 传统传动印刷机逐步向无轴传动模式发展, 即由高性能的伺服电机独立驱动每个单元. 输纸机是现代印刷机的重要组成部分, 它的作用是自动、准确、平稳地将纸张按一定规律送到或定位至印刷装置, 其特点是运动部件多, 控制规律复杂^[1], 在无轴传动系统中各运动单元轴驱动电机的同步协调控制是最核心的问题, 其控制策略的优劣直接影响着输纸机的稳定性和可靠性. 因此, 近年来国内外广泛开展了输纸机无轴传动控制伺服系统方面的研究^[2~6], 如文献[2]利用PI和电子虚轴的控制思想解决输纸机中的同步控制, 文献[3]在分析输纸机电子轴的启动等动态过程的基础上, 提出了提高控制系统稳定性和适应性的方法; 文献[4]提出了PI和相对耦合的同步控制策略, 并在文献[5]中又提出了改进, 从而提高系统的动态

稳定性; 文献[6]则在电子虚轴的基础上提出了一种各轴电压的变换策略来控制速度同步; 国内山东大学、北人集团、浙江通业集团等也在积极开展这方面的跟踪和研究, 但国内尚无单张纸无轴输纸机产品^[7,8].

根据输纸机的工作要求, 要保证输纸的准确性, 不仅需要速度同步, 而且各轴之间还需保证相位同步^[1]. 本文基于主从控制和滑模变结构控制思想, 提出了单张纸输纸机的位置、速度、电流三闭环控制策略, 解决输纸机各运动轴的速度和相位的同步控制问题.

2 控制系统方案(Program of control system)

多轴同步控制可以根据给定位置(或速度)要求, 随机控制各传动轴的运动, 使之达到同步要求, 对于分纸轴、送纸辊轴、前规轴、侧规轴而言, 其运动控

制要求与印刷机压印滚筒在保持严格的转角位置同步关系的前提下保持速度同步关系;而对于传送线带驱动辊轴则要求在一个印刷周期内(即印刷机压印滚筒旋转一周),以预先设定的变速规律运动,但在每个印刷周期内,其转角起始位置与压印滚筒转角起始位置严格同步.可以看出,各运动轴的运动控制都需要与压印滚筒的运动严格协调同步,因此整个控制系统采用主从控制结构,将印刷机压印滚筒的转角和转速输出作为输纸机各运动轴驱动电机的转角和转速参考给定,从而把包括压印滚筒轴在内的6轴同步协调控制转化为2轴同步协调控制.

各运动轴驱动电机选用永磁同步电机,利用矢量变频器驱动;各轴装有高分辨率的编码器,实现转角和转速输出.输出通过总线反馈到相应的同步控制器,从而控制输纸机的各运动轴与印刷机压印滚筒的同步运动.系统控制结构如图1所示.

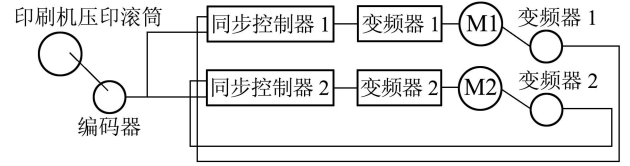


图1 控制系统结构

Fig. 1 Structure of the control system

各轴与压印滚筒的同步控制,均采用由电流环、速度环和位置环组成的三环串级结构,如图2所示。 θ_m^* 为压印滚筒转角,作为位置环指令转角; θ_m 为控制轴实际转角; $\omega_m^* + \Delta\omega_m^*$ 为速度环的给定角速度,其中 ω_m^* 为需要跟踪的压印滚筒角速度, $\Delta\omega_m^*$ 为位置环输出; ω_m 为被控轴实际角速度.为了适应印刷机高运转速度的需要,同步控制器要求具有快速的性能.为此电流环采用结构简单、相应速度快、可靠性高的PI控制,本文不多赘述.

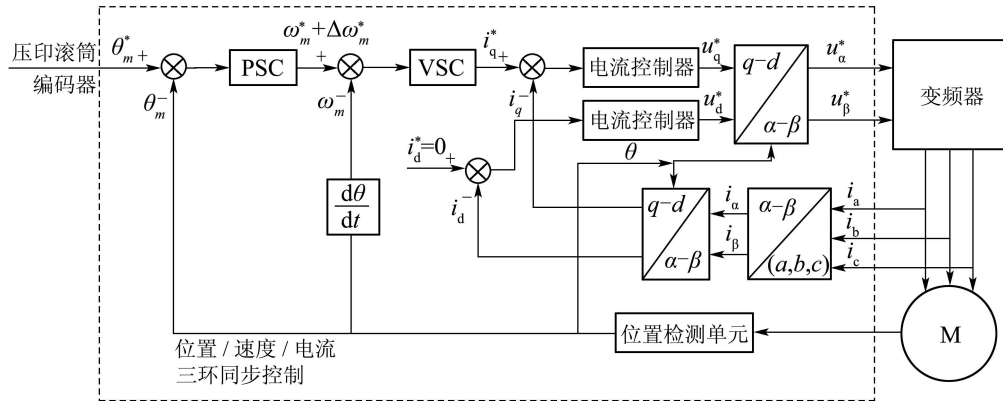


图2 各轴与压印滚筒同步控制的三环串级结构

Fig. 2 The three-loop cascade structure of the simultaneous control between axes and embossing roller

3 同步控制策略(Synchronization control strategy)

3.1 速度同步控制策略(Speed synchronization control strategy)

各轴同步控制中速度环的控制以印刷机压印滚筒转速为速度基准,各被控轴电机作为受控对象,根据本轴转速对基准轴转速进行动态跟踪,并利用变频调速器调节转速,构成速度闭环控制系统.

由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及外界干扰无关,具有良好的鲁棒性能,速度环采用动态积分滑模变结构控制,结合积分控制与动态滑模变结构控制的优点,在滑模切换函数中加入积分环节,消除滑模控制的稳态误差,在滑模面的

设计中,不仅依赖于系统状态,而且与系统输入甚至输入的一阶(或高阶)导数及其积分有关,因而到达律中不连续项的影响有相当部分转移到控制的一阶或高阶导数项中去,从而削弱系统的抖振.

根据滑模变结构控制理论,选取实际电机轴反馈角速度 ω_m 与指令角速度 $\omega_m^* + \Delta\omega_m^*$ 的偏差 $\Delta\omega_m$ 及其导数为滑模变结构控制器的输入, u 即为输出控制量 i_q . 设

$$\begin{aligned} x_1 &= \Delta\omega_m, x_2 = \dot{x}_1, \\ K_1 &= -\frac{B}{J}, K_2 = \frac{2P_n\varphi_n}{J}, \\ dt &= -\frac{T_L}{J} + \frac{B}{J}\omega_m, \end{aligned}$$

由永磁同步电机的状态方程可得

$$\begin{cases} x_2 = \frac{dx_1}{dt} = -\frac{B}{J}x_1 + \frac{2P_n\varphi_n}{J}u - \frac{T_L}{J} + \frac{B}{J}\omega_m = \\ K_1x_1 + K_2u + dt, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

取切换函数为跟踪误差及其导数与积分的线性组合[7]:

$$\begin{aligned} s(x) &= \lambda_0 \int_0^t x_1 d\tau + \lambda_1 x_1 + \lambda_2 \dot{x}_1 + \\ &\quad \cdots + \lambda_{n-1} x_1^{(n-2)} + x_1^{(n-1)} = \\ &\quad \lambda_0 \int_0^t x_1 d\tau + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i x_1^{i-1} + x_1^{n-1}. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $x_i = x^{(i-1)}, i \in \{1, \dots, n\}$ 为角速度跟踪误差及其各阶导数, 常数 λ_i 满足 Hurwitz 多项式 $p_n + \lambda_{n-1}p^{n-1} + \dots + \lambda_1 p + \lambda_0$, p 为拉普拉斯算子. 对于式(3)表示的系统, 需要速度和加速度信号, 因此只需对控制器进行一阶建模. 由式(2), 取滑模切换函数为

$$\begin{aligned} s(x) &= \lambda_0 \int_0^t x_1 d\tau + \lambda_1 x_1 + x_2 = \\ &\quad \lambda_0 \int_0^t x_1 d\tau + (\lambda_1 + K_1)x_1 + K_2 u + dt. \end{aligned} \quad (3)$$

由上式可以看出切换函数由系统输入及其微分组成, 因而该方法具有隐含积分特征.

由滑模存在条件 $s\dot{s} \leq -\gamma|s|, \gamma > 0$, 令 $\dot{s} = 0$, 得滑模控制控制律为

$$u = -\frac{1}{K_2} \int_0^t [(k_1|x_1| + k_2|u| + k_3 + \gamma)\text{sgn } s + \lambda_0 x_1] d\tau \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} \gamma &> 0, k_1 \geq \max|(\lambda_1 + \widetilde{K}_1)\widetilde{K}_1|, \\ k_2 &\geq \max|(\lambda_1 + \widetilde{K}_1)\widetilde{K}_2|, \\ k_3 &\geq \max|(\lambda_1 + \widetilde{K}_1)dt|. \end{aligned}$$

由上式可以看出, 控制输入信号 u 具有积分性质, 从而使系统输出平滑, 消除抖振.

3.2 位置同步控制策略(Location synchronization control strategy)

各轴同步控制中位置环的控制以印刷机压印滚筒转角位置为基准, 各被控轴电机为受控对象, 根据本轴转角对基准轴转角进行动态跟踪, 位置环的输出即为速度环的速度给定, 通过速度调节转角位置, 保证被控轴与压印滚筒转角位置同步.

位置环要求具有稳定平滑无超调的瞬态响应以及位置高精度跟踪控制, 因此位置环同样采用

滑模变结构控制. 由于变结构控制器的设计对被控系统模型精度要求不是很高, 因此将速度闭环系统等效为一个放大倍数为1, 时间常数为 T_v 的惯性环节, 如图3所示.

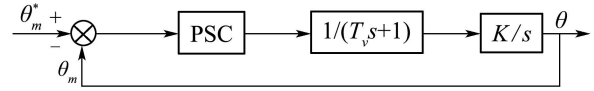


图3 位置环简化结构

Fig. 3 Simplified structure of position loop

选取控制轴转角位置 θ_m 与指令转角位置 θ_m^* 的偏差 $\Delta\theta_m$ 及其导数为滑模变结构控制器的输入, u 即为输出控制量 $\Delta\omega_m^*$.

令 $x_1 = \theta_m - \theta_m^*, x_2 = \dot{x}_1$, 状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T_v}x_2 - \frac{1}{T_v}u + \frac{1}{T_v}\dot{\theta}_m^*. \end{cases} \quad (5)$$

取滑模切换函数为:

$$s = cx_1 + x_2, \quad (6)$$

式中 c 为常数, 且 $c > 0$.

由滑模存在条件得其滑模控制控制律为:

$$u = \psi_{1p}x_1 + \psi_{2p}x_2 + \delta_p \text{sgn } s. \quad (7)$$

式中:

$$\psi_{1p} = \begin{cases} \alpha_{1p}, & x_1 s_p > 0, \\ \beta_{1p}, & x_1 s_p < 0, \end{cases} \quad \psi_{2p} = \begin{cases} \alpha_{2p}, & x_2 s_p > 0, \\ \beta_{2p}, & x_2 s_p < 0, \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{sgn } s = \begin{cases} 1, & s_p > 0, \\ -1, & s_p < 0. \end{cases} \quad (9)$$

由二阶系统变结构调节器参数公式, 代入状态方程式(5)中的相关系数, 可以得到位置环滑模变结构调节器参数为:

$$\begin{cases} \alpha_{1p} > 0, \beta_{1p} < 0, \\ \alpha_{2p} > T_v c - 1, \beta_{2p} < T_v c - 1, \\ \delta_p < |\dot{\theta}_m^*|. \end{cases} \quad (10)$$

4 实验仿真(Experimental simulation)

实验系统平台在J2108B胶印机飞达上进行改装, 拆去原与印刷主机运动传动的链轮链条传动机构、齿轮传动机构以及相应的机械轴驱动组合(包括驱动轴、离合器轴、制动轴、万向轴等), 将输纸装置的传动与主机分离. 飞达头分纸轴、送

纸辊轴改由永磁同步电机直接驱动,分纸轴电机带动原给纸头的凸轮轴转动,使旋转式气体分配阀、分纸吸嘴摆动凸轮、压脚吹嘴摆动凸轮、送纸吸嘴摆动偏心轮旋转,从而使给纸头工作;送纸辊轴电机直接驱动线带轴、送纸凸轮轴转动,使输纸带绕输纸台板旋转并作变速运动.由于J2108B胶印机的前规、侧规直接安装在印刷主机上,仍采用原驱动方案.为了简化实验系统,不考虑堆纸台的升降运动,直接人工操作.

利用上述结果进行了试验,实验主要针对位置环和速度环进行.电机参数为:定子相电阻 $2.8\ \Omega$,额定功率 $2.5\ \text{kW}$,额定转速 $3000\ \text{r/min}$,直轴电感 $8.5\ \text{mH}$,交轴电感 $8.5\ \text{mH}$,极对数为2,每对磁极磁通 $0.175\ \text{Wb}$,粘滞摩擦系数 B 为 0.001 ,折算到电机轴上的转动惯量 $1.6 \times 10^{-3}\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$,折算到电机轴上的负载转矩 $15\ \text{N} \cdot \text{m}$.取 $\lambda_0 = 380, \lambda_1 = 4, k_1 \geq 3, k_2 \geq 0.002, k_3 \geq 0.012, \gamma = 5$.

1) 开机.

开机后,印刷主机速度一般为 $1000\ \text{r/h} \sim 1500\ \text{r/h}$,称为运转速度,供操作人员检查机器运转情况.因此,实验在设定主机速度 $\omega = 0.4\ \text{rad/s}$ 下进行.图4所示为分纸轴和送纸辊轴在开机阶段的速度响应情况.可以看出,送纸辊轴的速度响应较慢,这是其转动惯量较大的原因.由于之前存在位置环控制,因此响应曲线输出存在一定时滞,同时分纸轴和送纸辊轴与压印滚筒的转角位置在开始时存在偏移,所以当速度达到 $0.4\ \text{rad/s}$ 时还会存在向上波动的情况,实现位置环和速度环的同步.

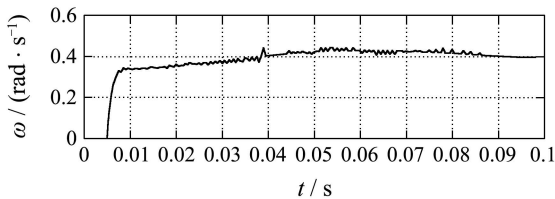


图 4(a) 送纸辊轴开机速度响应

Fig. 4(a) Speed response of feed shaft start-up

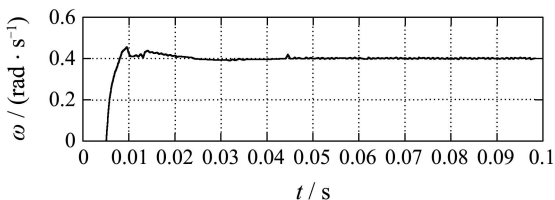


图 4 (b) 分纸轴开机速度响应

Fig. 4 (b) Speed response of combing shaft start-up

2) 主机转速波动.

运转检查正常后,操作人员可直接启动印刷机在印刷速度下工作,J2108胶印机一般工作在 $7500\ \text{r/h}$,最高运转速度 $10000\ \text{r/h}$.由于供电等因素,主机运转速度会产生波动,实验在设定印刷速度 $\omega = 2\ \text{rad/s}$ 工作情况下,设置印刷速度突变为 $\omega = 2.2\ \text{rad/s}$,图5和图6所示分别为送纸辊轴和分纸轴的速度突变响应曲线及误差输出曲线.

在上述不同实验条件下,飞达各部件运动平稳、协调准确.但由于J2108胶印机条件限制,在设定运转速度大于 $2.5\ \text{rad/s}$ 情况下,飞达振动明显.

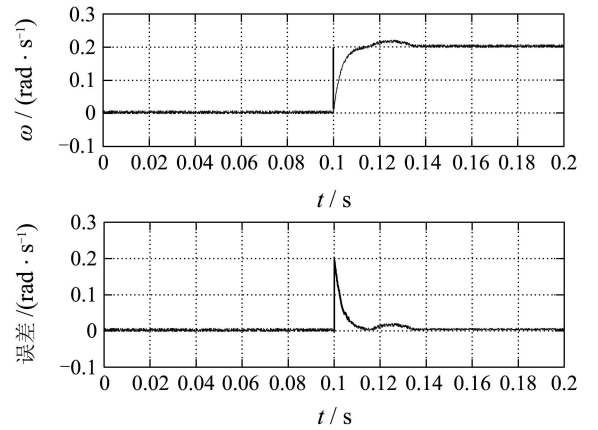


图 5 送纸辊轴速度突变响应曲线及误差输出曲线

Fig. 5 The speed mutation response curve and error output curve of feed shaft

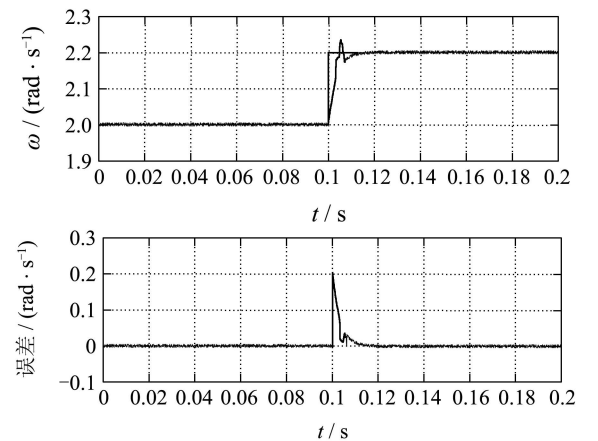


图 6 分纸轴速度突变响应曲线及误差输出曲线

Fig. 6 The speed mutation response curve and error output curve of combing shaft

5 结论(Conclusion)

本文根据无轴单张纸输纸机的同步控制要求,将动态积分滑模变结构控制引入输纸机控制系统,在构造的实验平台上证明了这种方法能明显地削弱抖振,并对给定速度和系统参数的变化其误差

能控制在0.1范围之内, 具有良好的稳态精度和鲁棒性。

参考文献(References):

- [1] 潘杰. 现代印刷机原理与结构[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
(PAN Jie. *Principle and Structure of the Modern Printing Press*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.)
- [2] VALENZUELA M A, ROBERT D L. Electronic line-shafting control for paper machine drives[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2001, 37(1): 158 – 163.
- [3] VALENZUELA M A, ROBERT D L. Startup and commissioning procedures for electronically line-shafted paper machine drives[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, 38(4): 966 – 973.
- [4] PEREZ PINAL F, CALDERON G, ARAUJO I. Relative coupling strategy[C] // *Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference*. New York: IEEE, 2003: 1162 – 1166.
- [5] PEREZ PINAL F. Improvement of the electronic line-shafting[C] // *PESC Record – IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*. New York: IEEE, 2004: 3260 – 3265.
- [6] FRANCISCO J P, CIRO N, RICARDO A. A novel speed control approach in parallel-connected induction motor by using a single inverter and electronic virtual line-shafting[C] // *PESC Record-IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*. New York: IEEE, 2005: 1339 – 1345.
- [7] 黄刚, 张昌凡. 印刷机数字化无轴传动技术研究综述[J]. 湖南工业大学学报, 2007, 21(6): 61 – 63.
(HUANG Gang, ZHANG Changfan. Research on digital shaftless drive technology in printing press[J]. *Journal of Hunan University of Technology*, 2007, 21(6): 61 – 63.)
- [8] 李峰. 无轴传动技术在印刷机中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
(LI Feng. *The research of shaft-less driving technology applied in printing machine*[D]. Jinan: Shandong University, 2006.)
- [9] 祝晓辉, 李颖晖. 基于扰动滑模观测器的永磁同步电机矢量控制[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(5): 456 – 461.
(ZHU Xiaohui, LI Yinghui. Vector control for PMSM based on disturbance SMO[J]. *Electric Machines and Control*, 2007, 11(5): 456 – 461.)
- [10] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407 – 418.
(LIU Jinkun, SUN Fuchun. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(3): 407 – 418.)
- [11] 吴春华, 陈国呈, 孙承波. 基于滑模观测器的无传感器永磁同步电机矢量控制系统[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(2): 1 – 3, 51.
(WU Chunhua, CHEN Guocheng, SUN Chengbo. Sliding mode observer for sensorless vector control of PMSM[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2006, 25(2): 1 – 3, 51.)
- [12] 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]. 电工电能新技术, 2002, 9(4): 87 – 89.
(LIU Fucan, ZHANG Xuelian, LIU Liwei. Synchronous control theory and practical study of multi-motor synchronous driving system[J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(4): 87 – 89.)

作者简介:

管力明 (1968—), 男, 副教授, 博士研究生, 目前研究方向为机电控制、胶印质量控制等, 在国内外学术刊物上公开发表论文30余篇, E-mail: glm@hdu.edu.cn;

林 剑 (1983—), 男, 助教, 研究方向为胶印质量控制, E-mail: linjian1001@hotmail.com.