

# 滑模变结构在收卷张力控制系统中的应用与仿真

杨 梅

(北京印刷学院, 北京 102600)

**摘要:** 为精确研究卷筒纸印刷机的收卷张力特性及控制策略,通过对无轴传动多机组印刷机实验平台收卷运动的分析,建立了一个较精确的收卷张力动力学模型。利用 MATLAB 构造了一个以交流永磁同步电机为执行机构的张力控制仿真系统,根据其非线性,设计了滑模变结构控制器,并与传统的 PID 控制进行了实验比较,结果表明滑模控制改进了张力控制系统的动静态特性。仿真模型综合考虑了多个张力扰动因素,更加接近实际印刷机系统,为将先进的控制理论引入印刷机收卷张力系统,搭建了一个更精确、便捷的仿真平台。

**关键词:** 滑模变结构; 张力控制; 仿真

**中图分类号:** TB486<sup>+</sup>.03; TS803 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)03-0044-05

## Application and Simulation of Sliding Mode Control in Winding Tension Control System

YANG Mei

(Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

**Abstract:** A precise dynamical model of winding tension was established by analyzing the shaftless multiple unit web press experimental platforms to characterize winding tension and establish control strategy. A tension control simulation system was constructed whose actuator was a permanent magnet synchronous motor by using MATLAB. For its nonlinear performance, a sliding mode variable structure controller was designed, and compared with the traditional PID control through experiment. The results showed that the sliding mode control strategy improves the dynamic and static characteristics of tension control system. Multi perturbation factors of winding tension were considered in the simulation model, which made the simulation model more close to the real web press system. A more precise and convenient simulation platform was constructed by bringing the advanced control strategy to winding tension of web press.

**Key words:** sliding mode control; tension control; simulation

张力控制系统在卷筒纸印刷机的电气配套产品中是极其重要的一个部分,良好的张力控制能确保印刷品的质量,提高印刷的生产效率。卷筒纸印刷机的纸张张力系统是一个非线性、强耦合、时变的复杂系统。建立准确的张力系统的数学模型是设计合理张力控制器和运用先进控制理论的前提。

课题组研发了无轴传动的机组式卷筒纸印刷机实验平台。文中通过分析该实验平台收卷装置各环节的受力及运动过程,建立了以永磁同步伺服电机为执行机构的纸张收卷张力控制系统数学模型,并引入了滑模变结构对其进行控制,构造了基于 MATLAB

的仿真系统。

## 1 收卷张力系统的数学模型

### 1.1 无轴传动收卷控制系统原理

无轴传动多机组卷筒纸印刷机实验平台由开卷、四色印刷单元、收卷等几部分组成,各个机组和收卷部分分别由不同的伺服电机来驱动。该实验平台通过工业网络可实现多机组的同步控制、多色套准控制及纸张的张力控制。文中以该卷筒纸印刷机的收卷张力控制系统为主要研究对象。收卷张力控制系统

收稿日期: 2012-09-08

基金项目: 北京市教委资助项目(KM201210015010)

作者简介: 杨梅(1977-),女,四川人,硕士,北京印刷学院讲师,主要从事计算机控制、印刷机控制系统的教学与研究。

采用串级控制方式,内环是张力控制系统执行机构交流永磁同步伺服电机的速度控制环,该环节是追踪无轴传动中的虚拟主轴转速。针对交流永磁同步电机的强耦合、非线性,采用滑模变结构设计其速度控制器。外环是串级控制的主控回路,张力传感器采集纸带张力信息,根据张力控制器的输出作用于伺服系统,以实现收卷张力的控制。原理见图 1。

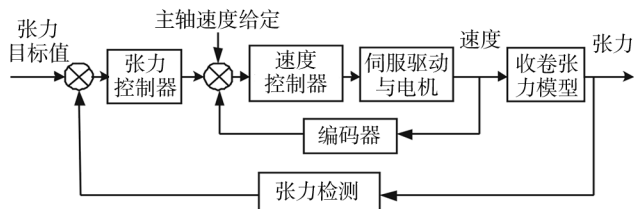


图 1 收卷张力控制系统原理

Fig. 1 Diagram of winding tension control system

## 1.2 收卷张力数学模型

收卷张力的动力学模型见图 2。

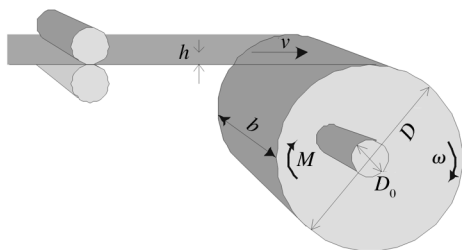


图 2 收卷张力动力学模型原理

Fig. 2 Diagram of winding tension dynamical model

图 2 中,  $M$  为伺服电机输出的电磁力矩;  $D$  为收卷卷径;  $D_0$  为卷辊直径;  $\omega$  为收卷辊的角速度;  $v$  为纸张线速度;  $b$  为纸卷宽度;  $h$  为纸卷厚度。

由此可得出纸张收卷的动态力矩平衡方程<sup>[1-6]</sup>:

$$\frac{d(J\omega)}{dt} = M - TD/2 - B_f(t)\omega \quad (1)$$

式中:  $T$  为纸卷张力;  $J$  为收卷辊的转动惯量,  $J_k$  为收卷辊上纸卷的转动惯量,  $J_0$  为收卷辊芯轴的转动惯量;  $B_f(t)$  为阻尼系数;  $D_1$  为纸卷初始直径;  $\rho$  为纸卷密度。

推导出张力:

$$T = 2 \left[ M - \frac{d(J\omega)}{dt} - B_f(t)\omega \right] / D \quad (2)$$

详细公式推导过程可参见文献[6], 最后得到收卷的张力为:

$$T = \frac{2M}{D} - \frac{4B_f}{D^2}v + \left[ \frac{8hJ_0}{D^4\pi} \frac{\rho b h}{4} \left( \frac{D_0}{D} \right)^4 - \frac{3}{4} \rho b h \right] v^2 + \left[ \frac{\rho b D_0^4 \pi}{8D^2} - \frac{\rho b D_0^4 \pi}{8} - \frac{4J_0}{D^2} \right] \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

由式(3)可知, 收卷张力同时受收卷线速度、卷径、纸辊直径、摩擦系数、卷筒纸辊转动惯量、纸张密度、纸张厚度等多个因素影响, 印刷机收卷张力是一时变、多变量强耦合、非线性的控制对象。

## 1.3 交流永磁同步电机数学模型

表面式永磁同步电机  $d, q$  坐标系下的电气方程<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q p \omega_m}{L_d} \\ -\frac{L_d p \omega_m}{L_2 q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\lambda p \omega_m}{L_q} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_e = 1.5 \lambda p i_q \quad (5)$$

机械方程:

$$\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} (T_e - F \omega_m - T_m) = \frac{1.5 \lambda p i_q}{J} - \frac{F \omega_m}{J} - \frac{T_m}{J} \quad (6)$$

当  $i_d = 0$  时的矢量控制:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_q} & -\frac{\lambda p}{L_p} \\ \frac{1.5 \lambda p}{J} & -\frac{F}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L_q} \\ -\frac{T_m}{J} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:  $L_q, L_d$  为  $q, d$  轴电感;  $R$  为定子绕组电阻;  $i_d, i_q$  为  $d, q$  轴电流;  $u_d, u_q$  为  $d, q$  轴电压;  $\omega_m$  为转子角速度;  $T_m$  为机械转矩;  $T_e$  为电磁转矩;  $\lambda$  为在定子侧由转子的永久磁铁感应的磁通;  $F$  为转子和负载的粘性摩擦;  $J$  为转子和负载的综合惯量;  $p$  为极对数。

## 1.4 滑模变结构控制器设计<sup>[8-10]</sup>

选取状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{mref} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 \end{cases} \quad (8)$$

速度环滑模控制器输入为  $x_1, x_2$ , 输出为  $u = i_{qref}$  交轴给定电流。

速度调节器的状态方程组:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1.5 \lambda p i_q}{J} + \frac{F \omega_m}{J} + \frac{T_m}{J} \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m \end{cases} \quad (9)$$

确定转速滑模面:

$$S = x_1 + c \int_0^t x_1 dt = \omega_{mref} - \omega_m + c \int_0^t (\omega_{mref} - \omega_m) dt \quad (10)$$

$$\dot{S} = \dot{x}_1 + cx_1 \quad (11)$$

采用指数趋近律的方法来确定变结构控制律,以满足能达性条件:

$$S\dot{S} < 0 \quad (12)$$

$$\dot{S} = -ks - a\text{sign}(S) \quad (13)$$

其中  $a > 0, k > 0$ , 即:

$$\dot{S} = \dot{x}_1 + cx_1 = -ks - a\text{sign}(S) \quad (14)$$

求得控制器输出:

$$i_q = \frac{J}{1.5\lambda p} \left[ \frac{F}{J} \omega_m + \frac{T_m}{J} + c(\omega_{mref} - \omega_m) + kS + a\text{sign}(S) \right] \quad (15)$$

## 2 仿真模型

### 2.1 张力控制系统仿真模型

该系统是在 MATLAB R2010b/Simulink 7.6 软件中建立的系统仿真模型。借助 Simulink 开放的环境,利用多个标准模块自行建立了一些新的 Subsystem (子系统),并对其封装、编辑,成为多个具有特定功能的独立模块。

收卷张力仿真控制系统主要由收卷张力模型、永磁同步电机模型、张力控制器、速度控制器等组成,见图 3。其中张力控制采用 PID 算法,速度控制器采用

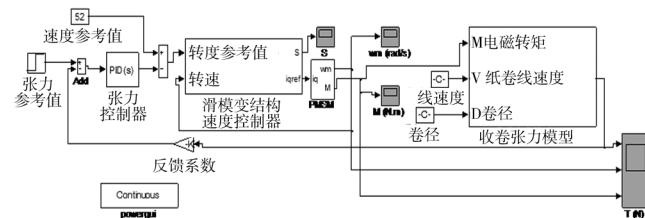


图 3 收卷张力滑模变结构控制系统仿真

Fig. 3 Simulation block diagram of winding tension system controlled by sliding model control strategy

滑模变结构控制器。

### 2.2 收卷张力模型

根据式(3)构建收卷张力仿真模型,见图 4。

### 2.3 永磁同步电机模块

交流永磁同步电机在三相定子绕组之间、定子和

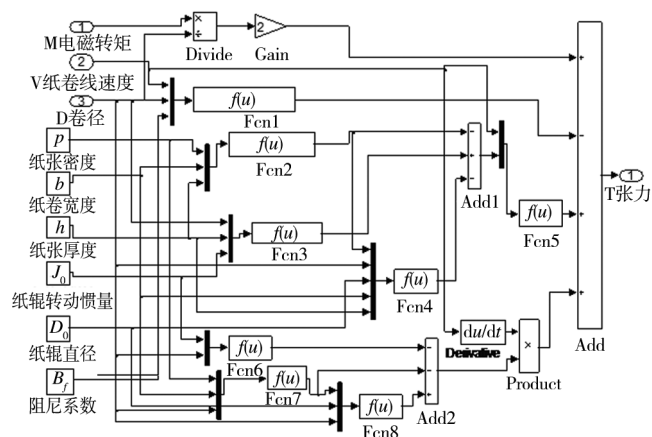


图 4 收卷张力仿真模型

Fig. 4 Simulation model of winding tension control

永磁转子间都存在着非线性的关系。收卷张力仿真系统参考 MATLAB 中的永磁同步电机模块构造了 PMSM 子系统, PMSM 子系统由 2/3 坐标变换单元、PWM 逆变器和永磁同步电机组成。永磁同步电机控制模块包含 2 个控制环, 控制内环调节永磁同步电机的定子电流, 控制外环调节永磁同步电机的转速。如式(7)所分析, 通过调整交轴给定电流输入  $i_{qref}$  的大小可实现对永磁同步电机转矩  $T_e = M$  的控制, 见图 5。

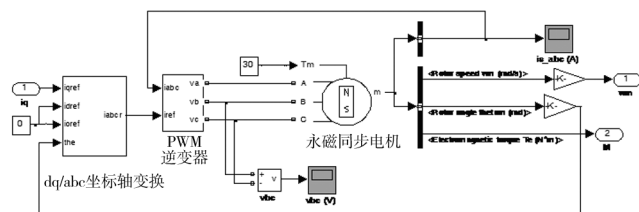


图 5 PMSM 子系统

Fig. 5 PMSM subsystem

在卷筒纸印刷机的收卷张力控制伺服系统中, 通过张力传感器将纸张的实时张力值反馈到控制系统中, 将参考张力值与所测得的实时张力值比较后, 计算出是增大还是减小交流永磁同步电机输出转矩的控制信号, 接收到信号的伺服驱动器经过运算后, 输出控制指令给电机, 电机通过调整其运行状态, 从而达到参考张力的控制要求。

### 2.4 滑模变结构速度控制器模型

根据式(15), 滑模变结构速度控制器仿真模型, 见图 6。

根据式(10), 其中滑模面的仿真模型见图 7。

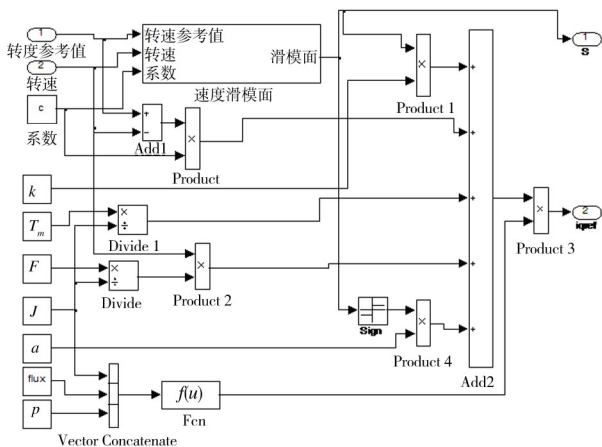


图6 滑模变结构速度控制器仿真模型

Fig. 6 Simulation model of speed sliding controller

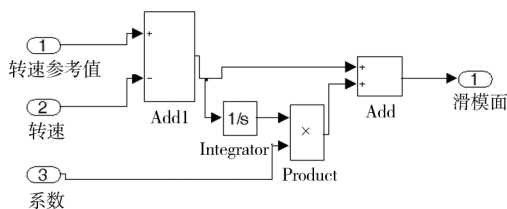


图7 滑模面的仿真模型

Fig. 7 Simulation model of speed sliding control surface

仿真系统采用 Mask 封装、编辑界面见图 8。这

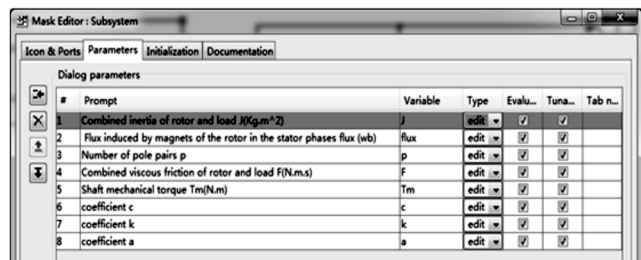


图8 封装滑模变结构速度控制器模块界面

Fig. 8 Interface of encapsulated speed sliding controller module

些参数的设置便于将影响滑模变结构速度控制器的因素考虑进来,便于各种变量值的更改。

### 3 仿真实验及结果

按照图 3 所示系统对印刷机张力控制系统进行仿真,假定为收卷初始状态,卷径为初始值,给定张力为最大值,线速度在印刷机平稳运行时可以认为是恒定值。根据式(15)可知,改变参数  $c, k, a$  可以调整滑模变结构的控制作用,即调节图 8 中的参数 6, 7, 8 可

得到速度调节器的不同控制效果。滑模变结构控制运用于收卷张力控制系统中所得到的仿真曲线见图 9: 第 1 条曲线为外环的收卷张力  $T$  的响应曲线, 第 2

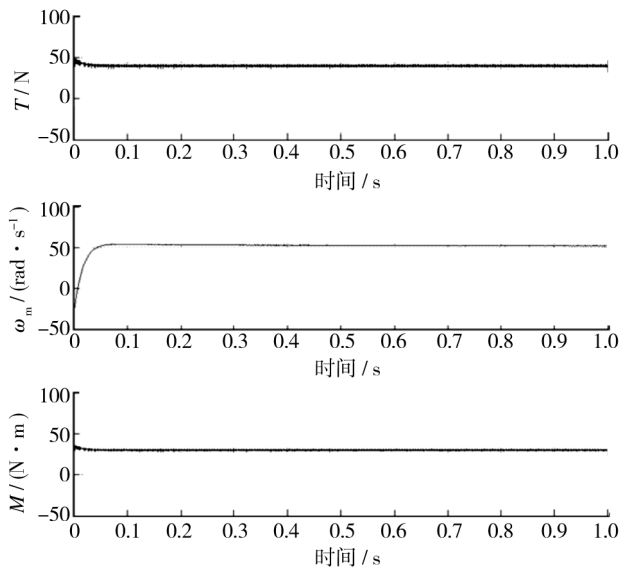


图9 滑模变结构控制仿真曲线

Fig. 9 Simulation result curve of speed sliding control

和第 3 条曲线分别为内环的转子角速度  $\omega_m$  和电磁转矩  $M$  的响应曲线。由图 9 可知,在滑模变结构的控制下,转速的阶跃响应在 0.05 s 就稳定了,没有超调量,张力和转矩也很快就达到稳定值。

同样的仿真系统,将速度控制器换成 PID 算法时,得到的响应曲线,见图 10。如图 10 所示,双 PID

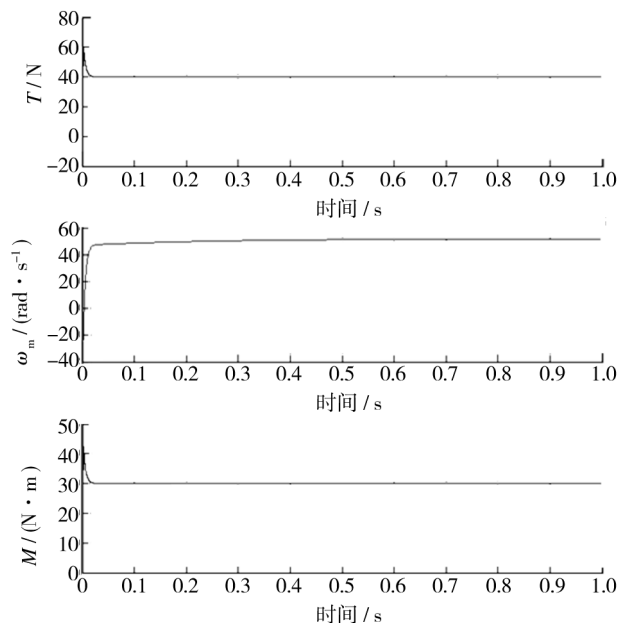


图10 双PID控制仿真曲线

Fig. 10 Simulation result curve of double PID control system

的控制方式下,转速调节较慢,0.5 s 稳定,张力和转矩响应都有较大的超调量。收卷张力控制系统中,综合转速、张力、转矩的响应曲线,在系统调节的动态性能和稳态性能方面,滑模变结构的控制方法较纯 PID 的控制效果更好。

## 4 结语

以无轴传动卷筒纸印刷机为研究对象,建立了一个涵盖多种扰动因素的收卷张力动力学模型,为在印刷机上引入智能张力控制器奠定基础。设计了滑模变结构控制器,构造了一个以交流永磁同步电机为执行机构的张力控制仿真系统。通过仿真实验表明,在收卷张力控制系统中,滑模变结构控制较传统的 PID 控制具有更有好的动、静态特性。

### 参考文献:

- [1] GASSMANN V, KNITTEL D. Modeling of a Winding Machine Using Genetic Programming [C]. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, 2000: 398 - 402.
- [2] BASTOGNE T, NOURA H. Application of Subspace Methods to the Identification of a Winding Process [C]. Proceedings of the 4th European Control Conference, Brussels, 2002.
- [3] 许建中. 凹版机张力-速度自适应解耦控制的研究 [D]. 长沙:中南大学,2008.
- XU Jian-zhong. Gravure Machine Tension-speed Self-adaptive Decoupling Control Research [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [4] 肖超. 凹版印刷机张力控制系统 [D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- XIAO Chao. The Research on Tension Control System of Gravure Printing Machine [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010.
- [5] 王磊. 电线加塑恒张力模糊变结构控制系统的研究 [D]. 内蒙古:内蒙古科技大学,2008.
- WANG Lei. The Research for Tension Fuzzy Variable: Structure Control System of Electric Cable Plastic Wrapping Process [D]. Inner Mongolia University of Science and Technology, 2008.
- [6] 杨梅,续明进. 基于 MATLAB 的卷筒纸印刷机张力控制系统的建模与仿真 [J]. 包装工程, 2011, 32(7): 22-25.
- YANG Mei, XU Ming-jin. Modeling and Simulation of Tension Control System in Web Press Based on MATLAB [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 22-25.
- [7] DESSAINT Louis A, CHAMPAGNE R. Permanent Magnet Synchronous Machine [K]. Math Works, Ins, 2007.
- [8] 王志宇,王长松,范普成,等. 基于滑模变结构的永磁同步电机调速系统设计 [J]. 微电机, 2011, 44(6): 52-56.
- WANG Zhi-yu, WANG Chang-song, FAN Pu-cheng. Design of the PMSM Governing System Based on Sliding Mode Control Strategy [J]. Micromotors, 2011, 44(6): 52-56.
- [9] 王鑫,黄巍. 滑模变结构 PI 控制的 PMSM 伺服系统 [J]. 伺服控制, 2011(1): 23-27.
- WANG Xin, HUANG Wei. PMSM Servo System Controlled by Sliding Mode PI Control Strategy [J]. Servo Control, 2011(1): 23-27.
- [10] 李星宇,汪沛. 基于滑模变结构控制的 PMSM 建模仿真 [J]. 四川兵工学报, 2012, 33(4): 82-87.
- LI Xing-yu, WANG Pei. Modeling and Simulation of PMSM Based on Sliding Mode Control Strategy [J]. Sichuan Ordnance Journal, 2012, 33(4): 82-87.