

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.023

织机经纱张力自适应滑模控制器的设计与仿真^{*}

孙 哲, 吴震宇, 武传宇, 金英子^{*}

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对织机送经卷取系统中的经纱张力控制问题,对被控对象的动力学模型和经纱张力的控制算法进行了研究,分析了织机开口机构的周期性运动对经纱张力的影响,采用了正弦信号模拟控制系统的外界干扰,提出并设计了一种自适应滑模控制器以用于经纱张力控制,利用其滑模控制算法应对被控对象模型中的参数不确定性和其自适应控制算法对外界干扰进行了学习,并与一个PID控制器和一个传统滑模控制器进行了对比。研究结果表明,该自适应滑模控制器可以应对被控对象模型中的参数不确定性,能够实现对外界干扰的有效学习和精确补偿,具有鲁棒性强、控制精度高等优点。

关键词:织机;送经卷取机构;经纱张力;自适应滑模控制

中图分类号:TH39;TS103.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1124-04

Design and simulation of an adaptive sliding mode controller for loom warp tension control

SUN Zhe, WU Zhen-yu, WU Chuan-yu, JIN Ying-zi

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at warp tension control of a let-off and take-up system of a loom, dynamical plant models and effective control techniques for warp tension control were investigated. The influence of periodic shedding motions was analyzed and a sinusoidal signal was utilized to simulate the external disturbance of the system. An adaptive sliding mode controller was designed for warp tension control, of which the sliding mode control method was utilized to handle parametric uncertainties and the adaptation method was utilized to estimate the external disturbance. A PID controller and a conventional sliding mode controller were proposed for comparison. The results indicate that the proposed adaptive sliding mode controller possesses strong robustness and excellent control performance due to its capability of handling the parametric uncertainties existing in the plant model and compensating for the external disturbance of the system effectively.

Key words: loom; let-off and take-up system; warp tension; adaptive sliding mode control

0 引言

织机送经机构除了要按织造需求适时送出相应长度的经纱外,还要使经纱保持一定的张力,因为经纱张力会直接影响到纺织品的产量和质量。如果经纱承受的张力平稳,可以有效抑制开车痕等现象。经纱张力

的控制性能将会影响经纱张力的波动,从而影响织机的车速和效率,并最终影响织物的质量^[1]。因此,合理的经纱张力控制方法对于提高织机生产效率和纺织品质量具有重大意义。

近年来,越来越多智能化、自动化的控制方法开始走进人们的视野,被应用于织机送经机构以维持经纱

收稿日期:2015-03-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51276172);浙江省自然科学基金资助项目(LY14E060003)

作者简介:孙 哲(1989-),男,安徽合肥人,主要从事织机经纱张力控制方面的研究。E-mail:sun310zhe@163.com

通信联系人:金英子,女,教授,博士生导师。E-mail:jn.yz@163.com

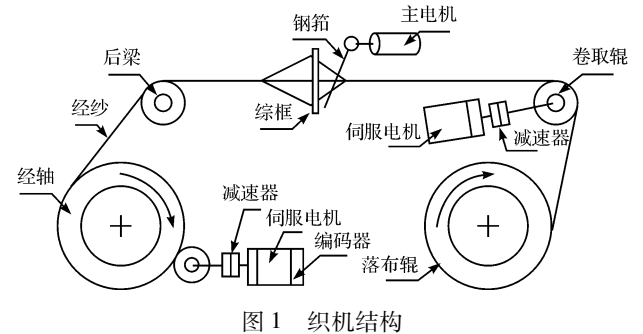
张力的恒定。刘官正^[2]提出了一种基于 Kalman 滤波器的 RBF 神经网络整定 PID 控制,在经纱张力控制上取得了良好的控制效果。林坤^[3]将单神经元自适应控制应用于织机送经系统,具有良好的跟随特性,能有效改善系统的动态性能。张荣臻^[4]将模糊专家控制和模糊神经网络控制应用于织机送经卷取机构中经纱张力的控制,保证了控制系统的控制精度和鲁棒性。

目前织机经纱张力控制方法中比较普遍的有 PID 控制、模糊 PID 控制和神经网络控制等,而自适应滑模控制^[5]方法在织机上的应用很少。

本研究将针对织机送经卷取系统设计一种自适应滑模控制器,并对其进行研究和分析。

1 被控对象动力学模型的建立

织机的结构简图如图 1 所示,主要包括开口机构、引纬机构、打纬机构、送经机构和卷取机构等。综框在开口机构的作用下将经纱提起或下拉,形成一个菱形的梭口,让纬纱通过梭口后,综框回位使梭口闭合,让经纱夹持住纬纱。随后,纬纱在钢筘的前向摆动作用下被打向织口。同时,卷取机构将织物卷入落布辊,送经机构驱动织轴转动送出一定量的经纱,从而维持经纱张力恒定。



织机中的卷取辊一般是恒速转动的,所以,为了维持经纱张力恒定,系统主要的控制对象是驱动经轴转动的伺服电机,通过控制其转矩而控制经轴转动速度,从而控制经轴送经量,以维持经纱张力恒定。因为综框大约是以 5 Hz 的频率在开口机构的带动下进行启闭运动,这个启闭运动是周期性的,加之开口运动对经纱张力改变的模型十分复杂,本研究可以近似地用一个频率为 5 Hz 的正弦信号来模拟综框启闭运动对经纱张力的影响,即系统的外界干扰。

后梁上安装有经纱张力传感器,检测到的经纱张力即系统输出;而除去外界干扰下的线性系统被控对象的传递函数的表达式为^[6-7]:

2
$$G = \frac{163.453}{12.527 s^2 + 28.962 s + 1.572} \tag{1}$$

2 自适应滑模控制器的设计

自适应滑模控制系统结构图如图 2 所示。

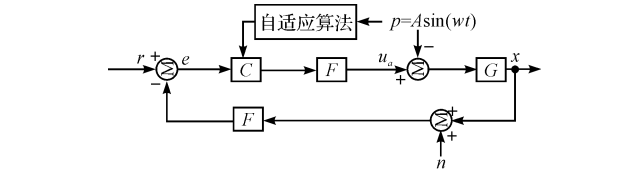


图 2 自适应滑模控制系统结构图
C—所要设计的自适应滑模控制器;F—低通滤波器;r—参考信号;x—系统输出;e—跟踪误差信号;u_a—所设计的自适应滑模控制器输出信号;n—传感器检测到的附加噪声

在图 2 中,其传递函数为:

2
$$F = \frac{1}{s/(2\pi f) + 1} \tag{2}$$

式中:f—截止频率。

为了方便设计自适应滑模控制器,笔者用字母表示传递函数 G:

3
$$G = \frac{a}{bs^2 + cs + d} \tag{3}$$

因为参数 a 体现的是对控制器输出信号 u 的放大程度,而送经电机减速器的传动比等参数相对精确,可以认为 a 是精确的。

给出参数 b, c 和 d 的上限:

4
$$\begin{cases} \bar{b} = 13.779 \\ \bar{c} = 31.858 \\ \bar{d} = 1.729 \end{cases} \tag{4}$$

定义跟踪误差 e 为:

5
$$e = r - x \tag{5}$$

定义滑动变量 S 为:

6
$$S = \dot{e} + \lambda e \tag{6}$$

式中:λ>0。

设计出自适应滑模控制器输出信号为:

7
$$u_a = \frac{1}{a} (\bar{b}|\dot{r}| + \bar{b}\lambda|\dot{e}| + \bar{c}|\dot{x}| + \bar{d}|x|) \text{sign}(S) + KS + \hat{A}\sin(\omega t) \tag{7}$$

式中:K>0;sign(S)—关于滑动变量 S 的符号函数;Ĥ—A 的估计值,其包含的自适应算法如下:

8
$$\dot{\hat{A}} = \rho \sin(\omega t) S \tag{8}$$

式中:ρ—自适应增益^[8],ρ>0,它的选取将会影响到自适应算法对参数 A 估计的速率及准确度,进而影响到能否快速有效地补偿外界干扰。

针对同一个被控对象模型,本研究用一个 PID 控

制器^[9]和一个滑模控制器与所设计的自适应滑模控制器进行比较。

PID 控制器输出信号 u_p 如下^[10]：

$$u_p = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9)$$

式中：跟踪误差 e 的定义同式(4)； k_p, k_i, k_d —比例增益、积分增益和微分增益。

给滑模控制器输出信号也引入低通滤波器 F ，并将滑模控制器输出信号设计为：

$$u_s = \frac{1}{a}(\bar{b}|\ddot{r}| + \bar{b}\lambda|\dot{e}| + \bar{c}|x| + \bar{d}|x| + a\bar{A})\text{sign}(S) + KS \quad (10)$$

式中：参数 $a, e, \lambda, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}, K$ ，符号函数 $\text{sign}(S)$ 的定义及选取与式(4)和式(7)一致； $\bar{A}$ —参数 A 的上限，其取值如下：

$$\bar{A} = 1.65 \quad (11)$$

3 系统稳定性证明与仿真结果分析

为了证明自适应滑模控制系统的稳定性，定义李雅普诺夫函数 V 为：

$$V = \frac{1}{2}S^2 + \frac{a}{2\rho b}(A - \hat{A})^2 \quad (12)$$

经过式(13)的推导，得到李雅普诺夫函数 V 的一阶导 $\dot{V} \leq 0$ ，证明了控制系统的稳定。本研究经过不断地调试，对 3 种控制器的控制参数赋值如下：

$$\lambda = 12, K = 1.85, \rho = 20$$

$$k_p = 8, k_i = 0.3, k_d = 1.2 \quad (14)$$

给定经纱张力值 r 为：

$$r = 1 \text{ N} \quad (15)$$

噪声 n 采用一个均值为 0.000 01 N、方差为 0.00 01 N² 的随机噪声信号。滤波器 F 的截止频率 f 被设置为 10 Hz。为了进一步减小抖振，本研究采用饱和函数 $\text{sat}(S)$ 来替代式(7)和式(10)中的符号函数 $\text{sign}(S)$ ^[11]，饱和函数的表达式如下：

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} \frac{S}{0.9} & |S| < 0.9 \\ \text{sign}(S) & |S| \geq 0.9 \end{cases} \quad (16)$$

本研究运用 Simulink 对这 3 种控制器进行仿真，采用固定步长的设置和欧拉-1 型的仿真运算解法，将采样周期设置为：

$$T_s = 0.001 \text{ sec} \quad (17)$$

得到的仿真对比结果如图(3~5)所示。

$$\dot{V} = \dot{S}S + \frac{a}{\rho b}(A - \hat{A})(A - \dot{\hat{A}}) =$$

$$S\dot{S} - \frac{a}{\rho b}(A - \hat{A})\rho\sin(\omega t)S =$$

$$S\dot{S} - \frac{a}{b}(A - \hat{A})\sin(\omega t)S =$$

$$S(\ddot{r} - \ddot{x} + \lambda\dot{e}) - \frac{a}{b}(A - \hat{A})\sin(\omega t)S =$$

$$S[\ddot{r} + \lambda\dot{e} + \frac{c}{b}\dot{x} + \frac{d}{b}x + \frac{a}{b}A\sin(\omega t) -$$

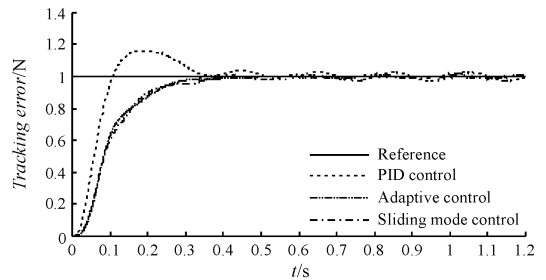
$$\frac{1}{b}(\bar{b}|\ddot{r}| + \bar{b}\lambda|\dot{e}| + \bar{c}|\dot{x}| + \bar{d}|x|)\text{sign}(S) -$$

$$\frac{aK}{b}S - \frac{a}{b}\dot{\hat{A}}\sin(\omega t)] - \frac{a}{b}(A - \hat{A})\sin(\omega t)S =$$

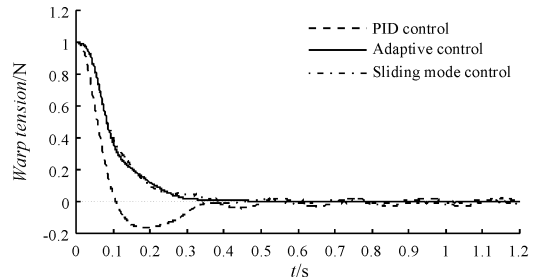
$$-\frac{aK}{b}S^2 + \left(\ddot{r}S - \frac{\bar{b}}{b}|\ddot{r}||S|\right) + \left(\lambda\dot{e}S - \frac{\bar{b}}{b}\lambda|\dot{e}||S|\right) +$$

$$\left(\frac{c}{b}\dot{x}S - \frac{\bar{c}}{b}|\dot{x}||S|\right) + \left(\frac{d}{b}xS - \frac{\bar{d}}{b}|x||S|\right) \leq 0 \quad (13)$$

瞬态响应下 3 种控制器控制性能的对比结果如图 3 所示。结果显示，PID 控制器的上升时间最短，但是进入稳态的时间最长，约为 0.6 s，且存在较大超调。滑模和自适应滑模控制器的上升时间稍长，但是几乎没有超调，进入稳态的时间也较短，仅为 0.4 s 左右，意味着跟踪误差可以更快地收敛到一个有界区域内。



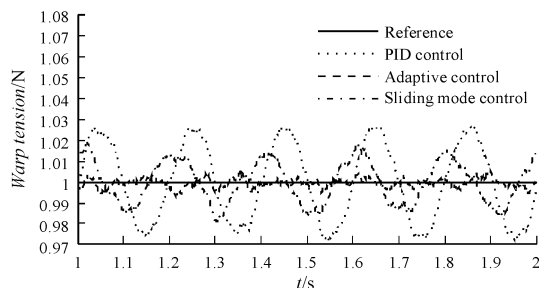
(a) 张力跟踪曲线



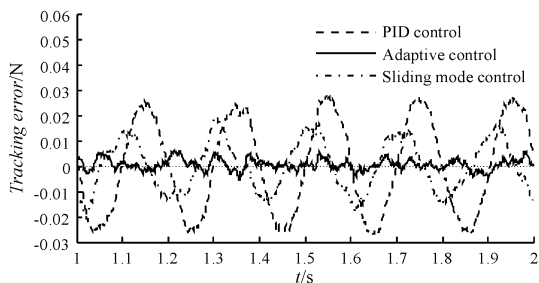
(b) 跟踪误差曲线

图 3 瞬态响应下 3 种控制器性能比较

稳态下 3 种控制器控制性能的对比结果如图 4 所示。因为外界干扰 p 的存在，3 种控制器作用下的系统输出信号都会围绕参考信号上、下波动，但波动幅度有所不同。PID 控制器的稳态误差最大，其峰值约为 0.028 N；其次是滑模控制器，误差峰值为 0.019 N 左右；自适应滑模控制器的稳态误差最小，其峰值在 0.01 N 以下。



(a) 张力跟踪曲线



(b) 跟踪误差曲线

图4 稳态下3种控制器性能比较

控制器输出信号如图5所示。

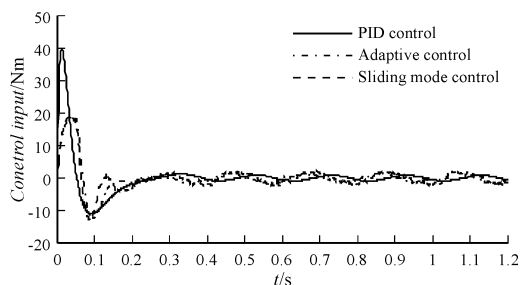


图5 控制器输出信号曲线

图5显示,在响应开始时PID控制器的控制量约为 $40\text{ N}\cdot\text{m}$,而滑模和自适应滑模控制器的控制量峰值约为 $20\text{ N}\cdot\text{m}$ 。虽经滤波,滑模类控制器输出信号的抖振仍比PID控制器稍大,这归因于它们较强的非连续性,但是抖振对控制性能的影响基本可以忽略。可见,自适应滑模控制不仅可以保证控制系统的鲁棒性,而且可以通过自适应算法学习出系统的外界干扰并进行有效地补偿,其控制性能优于PID控制和传统滑模控制。

4 结束语

笔者研究了经纱张力控制的被控对象和控制方法,考虑到被控模型的非线性特性,采用了正弦信号来模拟系统外界干扰,设计了一种自适应滑模控制器,运用李雅普诺夫判据证明了控制系统的稳定,并运用低通滤波器过滤了系统输出信号中的高频噪声。

本研究对自适应滑模控制器和一个PID控制器、一个传统滑模控制器进行了仿真对比,结果表明,所设计的自适应滑模控制器具有响应快、无超调、稳态误差小、鲁棒性强等优点,具有广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 陈家新,施广军,杨立新. 剑杆织机经纱张力数学模型及仿真[J]. 东华大学学报,2012,38(4):465-470.
- [2] 刘官正. 织机经纱张力控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2008.
- [3] 林 坤. 基于自适应算法的电子送经卷取控制系统设计[D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院,2010.
- [4] 张荣臻. 织机经纱张力智能控制策略研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2010.
- [5] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [6] 周其洪. 新型高速织机的关键控制技术研究[D]. 上海:上海大学机电工程与自动化学院,2008.
- [7] 刘卫东,常安涛,刘和进,等. 基于AT9261和CAN总线的高档织机控制器上位机系统设计[J]. 轻工机械,2013,31(5):41-44.
- [8] TAN K K, HUANG S N, JIANG X. Friction modeling and adaptive compensation using a relay feedback approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2001, 48(1):169-176.
- [9] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- [10] 王衍平. 单神经元PID算法在包装机温控系统中的应用[J]. 包装与食品机械,2013(3):69-72.
- [11] UTKIN V. Sliding mode control in electro-mechanical systems[M]. New York: Taylor & Francis, 2009.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

孙 哲,吴震宇,武传宇,等. 织机经纱张力自适应滑模控制器的设计与仿真[J]. 机电工程,2015,32(8):1124-1127.

SUN Zhe, WU Zhen-yu, WU Chuan-yu, et al. Design and simulation of an adaptive sliding mode controller for loom warp tension control[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015,32(8):1124-1127.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>