

基于滑模控制算法的复卷机张力控制系统设计

赵明冬, 陈慧丽

(郑州科技学院, 郑州 450064)

摘要: **目的** 为了改善造纸行业中复卷机张力控制系统的控制性能, 提高产品的质量和可靠性, 同时消除传统趋近律方法的抖振现象。**方法** 提出一种改进的自适应趋近律方法, 并在此基础上提出一种基于滑模控制算法的复卷机张力控制系统。**结果** 通过仿真结果比较分析, 与传统 PID 控制算法相比, 文中所提滑模控制算法具有更好的动态性能。**结论** 该算法具有较快的动态响应速度和较强的抗扰动能力。

关键词: 复卷机; 磁粉离合器; 趋近律方法; 滑模控制

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)13-0180-04

Tension Control System Design of Rewinder Based on Sliding-mode Control Algorithm

ZHAO Ming-dong, CHEN Hui-li

(Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the control performance of tension control system of rewinder in the papermaking industry and the product quality and reliability, and eliminate the chattering phenomenon of traditional reaching law method. An improved adaptive reaching law method was proposed, based on which a rewinder tension control system based on sliding-model control algorithm was put forward. Compared with traditional PID control algorithm, the comparative analysis on the simulation results showed that the proposed sliding-model control algorithm had better dynamic property. Such algorithm has a lot of good control advantages, such as fast dynamic response and strong anti-disturbance capability.

KEY WORDS: rewinder; magnetic particle clutch; reaching law method; sliding-mode control

复卷机作为造纸行业的一种重要设备, 在卷筒纸生产过程中是最后一道工序, 为了生产出高质量的纸张, 必然要求其具有较好的动态响应速度和较为稳定的控制性能^[1-3]。尤其在卷取纸张时, 通常要求复卷机张力控制系统能够输出稳定的张力, 以提高产品的质量和性能, 它的性能好坏直接影响纸张的质量。另外, 由于 PID 控制算法具有控制器结构较简单、控制器参数便于整定等诸多优点, 因此目前大多数复卷机张力控制系统仍然采用 PID 控制策略。复卷机张力控制系统具有时变性、负载扰动多等特点, 是一个典型的复杂非线性系统^[4-7]。由上可知, 采用传统的 PID 控制策略难以达到较好的控制品质, 不能满足实际生产的需要。

随着现代控制技术的发展, 一些先进控制算法逐步被提出, 并被应用到复卷机张力控制系统中^[8-9]。

滑模控制是一类特殊的非线性控制算法, 由于其具有动态响应速度快、对系统参数摄动及外部扰动不敏感等诸多优点而被广泛应用^[10-13]。有关滑模控制在复卷机张力控制系统方面的应用, 目前相关的文献鲜有报道, 因此, 研究滑模控制在复卷机张力控制系统方面的应用具有重要的现实意义。为了提高复卷机的控制性能, 文中首先建立复卷机系统的状态空间数学模型, 并在传统指数趋近律的基础上, 提出一种自适应趋近律方法, 以改善滑模控制的控制性能, 进而提出一种基于滑模控制算法的复卷机张力控制系统。

1 复卷机张力控制系统的数学建模

典型复卷机张力控制系统, 见图 1, 可以看出, 复卷机张力控制系统的工作原理为通过张力检测器实时检测实际输出的张力值, 并与张力给定值进行实

收稿日期: 2017-01-17

作者简介: 赵明冬 (1981—), 男, 郑州科技学院讲师, 主要研究方向为电子与通信系统。

时比较, 在控制器的作用下, 通过调节磁粉离合器的励磁电流, 进而控制复卷机的张力输出, 即使在受到外界扰动的影响下, 控制转矩也能够稳定输出。

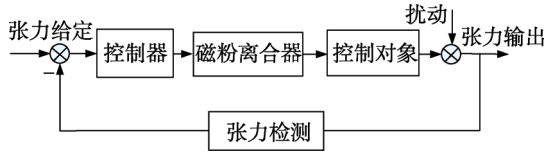


图 1 复卷机张力控制系统

Fig.1 Control diagram of tension control system of winder

对于图 1 中的磁粉离合器, 由于激励电流与输出力矩两者之间存在一种线性关系, 考虑到磁粉离合器具有滞后的特性。为了便于系统建模, 可以采用包含滞后特性的一阶惯性环节表示, 即:

$$G_1(s) = \frac{M(s)}{I(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: $M(s)$, $I(s)$ 分别为输出力矩和励磁电流; K_m , T_m 分别为增益和滞后时间常数。

另外, 磁粉离合器的输出力矩和张力之间的关系可以表示为:

$$G_2(s) = \frac{T(s)}{M(s)} = \frac{1}{\beta K s / R + R} \quad (2)$$

式中: $T(s)$ 为输出张力; K 为纸带参数, 且满足 $K=L_0/EA$ 。

此时, 复卷机张力控制系统的数学模型可表示为:

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{K_m}{(T_m s + 1)(\beta K s / R + R)} e^{-\tau s} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 该系统的数学模型为具有滞后特性的二阶系统。为了便于后期控制器的设计, 系统中的纯时滞环节 $e^{-\tau s}$ 可近似为:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1 - \tau s / 2}{1 + \tau s / 2} \quad (4)$$

将式(3)代入到式(4)可得:

$$G(s) = \frac{ms + n}{as^3 + bs^2 + cs + d} \quad (5)$$

式中: 分母中的参数 $a = \beta K T_m \tau$, $b = T_m \tau R^2 + 2\beta K T_m + \beta K \tau$, $c = 2R^2 + \tau R^2 + 2\beta K$, $d = 2R^2$; 分子中的参数 $m = K_m R \tau$, $n = 2K_m R$ 。

根据经典自动控制原理, 将式(5)转换为状态方程形式的数学模型, 即:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (6)$$

$$y = Cx \quad (7)$$

式中: $x = [x_1, x_2, x_3]^T$ 为系统的状态变量; y 为系统的张力输出; u 为控制器, 且控制器的参数满足

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -d & -c & -b \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = [n \ m \ 0]。$$

2 基于趋近律方法的滑模控制器设计

2.1 新型趋近律方法

目前, 常用的指数趋近律方法为^[14-15]:

$$\dot{s} = -ks - \mu \operatorname{sgn}(s), k, \mu > 0 \quad (8)$$

为了保证该方法具有较好的控制性能, 通常在增大 k 值的同时减小 μ 值。这样一方面可以保证系统具有快速的收敛特性, 另一方面消弱了系统抖阵的影响。 k 和 μ 的数值一旦确定, 就不能根据系统的状态变量距离平衡点的距离而自适应调整。为了进一步提高传统指数趋近律的趋近速度, 文中提出一种变指数自适应趋近律方法, 即:

$$\dot{s} = -ks - \mu \|x\|^2 \operatorname{sgn}(s) \quad (9)$$

式中: $\|x\| = \sum_{i=1}^n |x_i|$ 为系统状态变量的一阶范数。

从式(9)可以看出, 当系统的状态变量距离平衡点较远时, 系统的状态轨迹主要以指数方式 $\dot{s} = -ks$ 快速趋近滑模面, 之后变速项 $\dot{s} = -\mu \|x\|^2 \operatorname{sgn}(s)$ 起关键作用。在系统状态变量刚进入滑模面时, $\|x\|^2$ 较大, 而 k 较小, 将使得 $\mu \|x\|^2$ 较小, 滑模运动的幅度较小, 避免产生较大的抖振。滑模带宽度与 $\|x\|^2$ 成正比例, 滑模运动的幅度随着 $\|x\|^2$ 的减小而逐渐衰减, 最终稳定于原点, 从而有效抑制了系统抖振现象。

2.2 滑模控制器设计

为了便于控制器的设计, 首先定义系统的滑模面为:

$$s = c_1 x_1 + c_2 x_2 + x_3 \quad (10)$$

式中: $c_1, c_2 > 0$ 为设计参数, 且满足 Hurwitz 条件。

对于式(10)所示的滑模面, 为了保证多项式 $p^2 + c_2 p + c_1$ 满足 Hurwitz 条件, 且控制器的参数选取为 $c_2 = 2\lambda, c_1 = \lambda^2 (\lambda > 0)$ 。

对式(10)求导, 并将式(6)代入可得:

$$\dot{s} = c_1 x_2 + c_2 x_3 + \dot{x}_3 = (c_1 - c)x_2 + (c_2 - b)x_3 - dx_1 + u \quad (11)$$

采用式(9)所示的趋近律, 可得到控制器 μ 的表达式为:

$$u = dx_1 - (c_1 - c)x_2 - (c_2 - b)x_3 + ks + \mu \|x\|^2 \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

为了分析控制器的稳定性, 定义 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (13)$$

对式(13)进行求导, 并将式(11)和(12)代入可得:

$$\dot{V} = s \dot{s} = -ks^2 - \mu \|x\|^2 |s| \quad (14)$$

由于设计参数 $k, \mu > 0$, 此时 $\dot{V} \leq 0$ 成立, 即满足

Lyapunov 稳定性定理, 能保证系统进入滑动态。

3 仿真实验分析

为验证文中设计控制算法的可行性和有效性, 使用 Matlab/Simulink 仿真软件进行仿真建模。文中采用文献[8]所提供的复卷机参数进行仿真, 根据相关参数, 可计算复卷机的状态空间数学模型, 即:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -927.25 & -2503.75 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (15)$$

$$y = [112.5 \quad -28.13 \quad 0]x \quad (16)$$

仿真中, 滑模控制器的参数选取为 $\lambda=4$, $k=100$, $\mu=10$, 并将张力给定值设定为 500 N。为了便于比较分析, 不考虑外界扰动的情况下, 当控制器分别采用传统 PID 控制和文中所提滑模控制时的仿真结果见图 2。

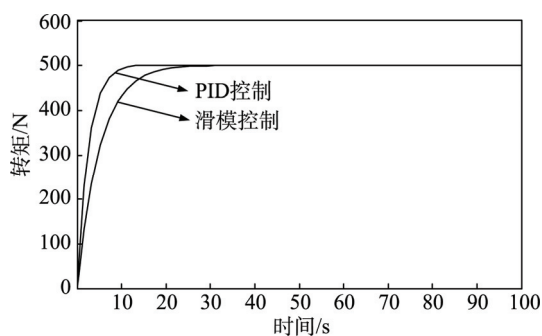


图 2 不考虑扰动下的张力输出的仿真结果
Fig.2 Simulation results without disturbance

由图 2 可以看出, 在传统 PID 控制的作用下, 虽然实际张力输出也能够跟张力给定值, 但调节时间较长, 约为 30 s。相反, 在文中所提控制算法作用下, 实际张力输出能够快速跟踪给定值, 且调节时间较短, 相比传统 PID 控制减少了一半的时间, 用时约为 15 s。在不考虑外界扰动的情况下, 文中所提算法具有较快的动态响应速度, 能够快速跟踪给定值。

为了验证系统的抗扰动能力, 复卷机控制系统在突加负载扰动时的仿真结果见图 3。其中, 仿真条件设置为在 $t=50$ s 时突加负载力矩 10 N, 且控制器参数保持不变。由图 3 中可以看出, 在文中所提控制算法作用下, 系统的实际张力输出能够快速跟踪上张力给定值, 用时约为 8 s。可见, 在考虑扰动的情况下, 采用文中所提算法具有明显的优越性。

综上所述, 采用文中所提控制算法时, 无论是稳态条件下还是动态条件下, 系统都能快速跟踪上张力给定值。可见, 文中所提算法具有较好的抗干扰能力和较强的鲁棒性。

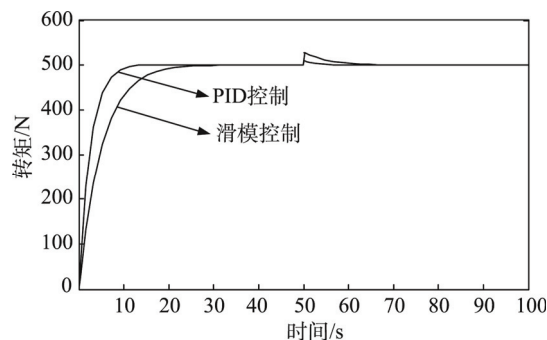


图 3 考虑扰动下的张力输出的仿真结果
Fig.3 Simulation results with disturbance

4 结语

复卷机作为造纸行业的重要设备, 为了提高复卷机张力控制系统的控制性能, 文中首先建立了系统的状态空间数学模型, 采用滑模控制强鲁棒性的特性, 基于文中所提的自适应趋近律方法, 设计了一种基于滑模控制算法的复卷机张力控制系统, 通过仿真比较分析, 验证了所提算法具有较好的控制性能和较强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 孟彦京, 周斌, 刘圆圆. 基于模糊自适应 PID 算法的复卷机退纸辊张力控制[J]. 中国造纸, 2011, 30(2): 41—44.
MENG Yan-jing, ZHOU Bin, LIU Yuan-yuan. Paper Tension Control of Rewinder Based Fuzzy Adaptive PID Algorithm[J]. China Pulp, 2011, 30(2): 41—44.
- [2] 李伟, 王友权, 董继先, 等. 新型控制方法在复卷机运行中的应用[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 162—164.
LI Wei, WANG You-quan, DONG Ji-xian, et al. Application of New Control Method in Rewinder[J]. Packing Engineering, 2016, 37(15): 162—164.
- [3] 陈丽霞. 复卷机控制系统及传动系统的设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
CHEN Li-xia. Automation Control System and Drive Control System of Winder[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [4] 景兵辉, 孟彦京. 复卷机传动控制系统方案选择与分析比较[J]. 中国造纸, 2012, 31(10): 54—57.
JING Bing-hui, MENG Yan-jing. Rewinding Machine Drive Control System Scheme Selection and Comparative Analysis[J]. China Pulp, 2012, 31(10): 54—57.
- [5] 孟彦京, 马文明. 复卷机复卷部件的受力分析与控制设计[J]. 纸和造纸, 2015, 34(2): 23—26.
MENG Yan-jing, MA Wen-ming. Force Analysis and Structure Design of the Roll Parts in Rewinder[J]. Paper and Paper Making, 2015, 34(2): 23—26.
- [6] 何金保, 郭帅, 何永义, 等. 基于遗传优化的张力模糊控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(3): 243—248.

- HE Jin-bao, GUO Shuai, HE Yong-yi, et al. A Fuzzy Tension-controller Based on Genetic Algorithm(GA) [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(3): 243—248.
- [7] 陈克复. 制浆造纸机械与设备[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013.
- CHEN Ke-fu. *Pulp and Paper Machinery and Equipment*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2013.
- [8] 李伟, 王友权, 董继先, 等. 基于自调整内模控制法的复卷机张力控制的设计与仿真[J]. *包装工程*, 2016, 37(11): 149—152.
- LI Wei, WANG You-quan, DONG Ji-xian, et al. Design and Simulation of Tension Control System of Winder Based on Self-Tuning Internal Model Control Method [J]. *Packaging Engineering*, 2016, 37(11): 149—152.
- [9] 陈景文. 前馈控制技术在复卷机底辊控制中的应用[J]. *造纸科学与技术*, 2015, 34(1): 78—81.
- CHEN Jing-wen. The Feed-Forward Control in the Application of the Bottom Roll of Rewinder[J]. *Paper Science & Technology*, 2015, 34(1): 78—81.
- [10] FENG Y, ZHENG J F, YU X H, et al. Hybrid Terminal Sliding-mode Observer Design Method for a Permanent-Magnet Synchronous Motor Control System[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(4): 1270—1278.
- [11] 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.
- YUAN Lei, SHEN Jian-qing, XIAO Fei, et al. Non-singular Terminal Sliding-mode Observer Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive at Very Low-speed[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(3): 37—45.
- [12] 姚琼荃, 宋立忠, 温洪. 离散变结构控制系统的比例-等速-变速控制[J]. *控制与决策*, 2000, 15(3): 229—332.
- YAO Qiong-hui, SONG Li-zhong, WEN Hong. Proportional-constant-variable Rate Control for Discrete-Time Variable Structure Systems[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(3): 229—332.
- [13] YUAN L, XIAO F, XIAO J Q, et al. Sensorless Control of High-power Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives at Very Low Speed[J]. *IET Electric Power Applications*, 2013, 7(3): 199—206.
- [14] QIAN W Z, PANDA S K, XU J X. Speed Ripple Minimization in PM Synchronous Motor Using Iterative Learning Control[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(1): 53—61.
- [15] WANG Ai-meng, JIA Xing-wang, DONG Shu-hui. A New Exponential Reaching Law of Sliding Mode Control to Improve Performance of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49(5): 2409—2412.