

## 卷绕过程交叉耦合非线性控制研究<sup>①</sup>

彭宝营<sup>②\*</sup> 蔡力钢\* 李启光\*\* 韩秋实\*\* 杨庆东\*\*

( \* 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京 100124)

( \*\* 北京信息科技大学机电工程学院 北京 100192)

**摘 要** 为提高卷绕系统的控制精度及鲁棒性,以卷材张力与收卷线速度为控制目标,首先提出了收卷线速度控制方案及张力与放卷速度解耦控制方案。其次,分析了卷绕过程中弹性变形、卷绕结构、负载变化、张力传感器等非线性因素对卷绕控制的影响,将交叉耦合控制的思想引入卷绕过程控制,设计了交叉耦合非线性 PID 控制器来补偿控制卷绕系统的张力与收卷绕线速度。在卷绕实验台上进行了交叉耦合控制实验,与张力与收卷绕线速度独立控制相比,所设计的交叉耦合非线性控制器能较好地应对卷绕过程中的非线性问题,提高了卷绕系统的鲁棒性及控制精度。

**关键词** 卷绕设备,交叉耦合,非线性 PID,张力控制

## 0 引 言

卷绕过程普遍存在于印刷、包装、线切割、电火花、晶体加工、轧钢、纤维、造纸、塑料薄膜、电线、纺织、磁带等行业中,其典型特征是需要控制卷材的张力,即卷取物体时保持物体相互拉长或者绷紧的力,使得设备顺利地进行卷绕或加工。带材或线材的收放卷张力对产品的质量起着至关重要的作用,均需要采用张力及复杂的运动控制<sup>[1-3]</sup>。文献[4-6]从不同角度对卷绕系统的控制方案进行了研究,提出了不同的张力控制方式和系统位置误差补偿方法,得到了一些有益的结果。文献[7-10]采用模糊控制、神经网络、自适应控制等方法对卷绕过程中的张力智能控制进行了研究,并进行了仿真。

上述研究大多集中于张力与卷绕速度独立控制及多轴位置补偿。卷绕过程中,张力决定了卷绕过程的稳定性,卷绕速度决定了卷绕的效率。二者相互影响,相互制约,存在耦合关系。一方面,张力的波动会引起卷绕速度的变化;另一方面,卷绕线速度的变化又会影响张力的稳定性。而卷绕过程中,又存在着大量的非线性和不确定性因素,卷绕线速度

与张力呈非线性关系变化,张力与线速度独立控制的方法难以达到满意的控制效果。交叉耦合控制是多目标耦合控制的有效方法<sup>[11,12]</sup>,常用于多轴同步运动控制,而非线性 PID 控制器在一定程度上又能克服了线性 PID 控制器的不足,增强系统的鲁棒性。本文由此将交叉耦合非线性控制引入卷绕过程控制,实现张力与卷绕速度的融合控制,进一步提高系统的鲁棒性及控制精度。

## 1 卷绕系统控制方案

### 1.1 卷绕系统的基本构成

卷绕系统的基本构成如图 1 所示,主要包括收

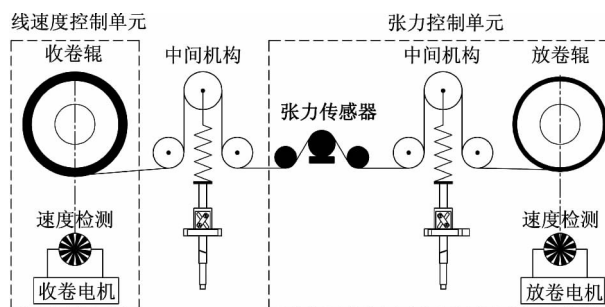


图 1 卷绕系统的基本构成

① 国家科技支撑计划(2012BAF13B00),北京市自然科学基金重点项目(KZ201211232039)和北京市高等学校人才强教(PHR201106132)资助项目。

② 男,1980年生,博士后;研究方向:数控技术与装备;联系人,E-mail:pengbaoying@126.com  
(收稿日期:2012-12-05)

卷辊电机、收卷辊、中间机构、连接机构、张力传感器、放卷辊电机、放卷辊及速度检测装置等。中间机构往往包括传动、导向及缓冲等环节。

卷绕系统控制的核心是卷的效率及稳定性,因此,以卷绕过程中的收卷线速度与张力为控制目标,将卷绕控制分为线速度控制单元及张力控制单元。线速度控制单元主要指收卷部分,卷绕速度通常指收卷线速度;张力控制单元则主要包括张力传感器、中间机构及放卷部分。

## 1.2 收卷线速度控制方案的提出

随着卷绕过程的进行,收卷辊半径不断变化,其线速度也不断变化,而且中间的缓冲、导向及排线环节也造成了一定程度的线速度波动。因此,对收卷速度采用闭环控制,收卷线速度指令经运动 PID 直接驱动收卷部件,其控制原理图如图 2 所示。

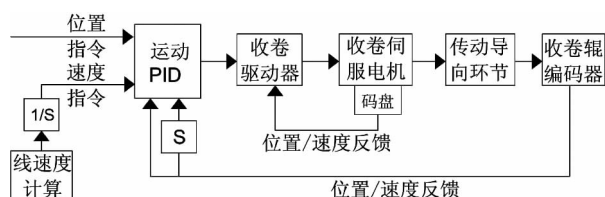


图 2 收卷线速度控制原理图

收卷辊的线速度与卷辊半径、卷材直径、卷绕圈数等有关,需根据卷绕情况进行实时修改收卷的基速度,才能保持整个卷绕过程中卷绕线速度的恒定。采用闭环卷绕线速度控制时,其线速计算公式为

$$F_v = \frac{180V_t}{\pi(R_0 - N \times r)} \quad (1)$$

式中, $F_v$  为收卷速度,单位为  $^\circ/\text{s}$ ;  $V_t$  为线速度期望值,单位为  $\text{mm}/\text{s}$ ;  $R_0$  为收卷辊半径,单位为  $\text{mm}$ ;  $N$  为卷绕圈数;  $r$  为卷材厚度或半径。

## 1.3 张力与放卷速度解耦控制方案的提出

放卷部分的张力控制原理图如图 3 所示。采用伺服环级联的方法,外环为张力控制环,内环为放卷速度环。将张力传感器反馈的信号进行滤波处理,

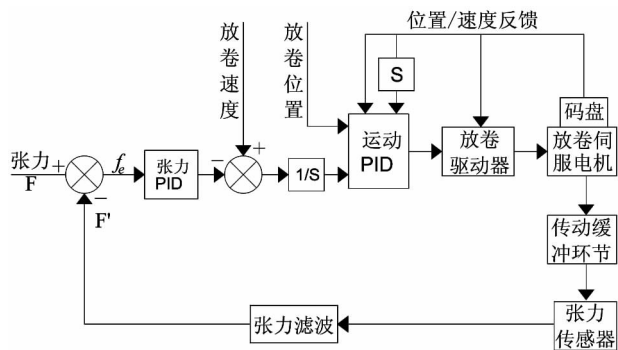


图 3 放卷张力控制原理图

与指令张力信号相减,作为张力控制误差  $f_e$ 。经过张力 PID 控制输出速度变化指令。经过运动 PID 驱动放卷部件运动。虽然张力外环响应较慢且干扰大,但内环速度环响应快且稳定,实现了张力与放卷速度的解耦,保证了系统的稳定运行。

## 2 卷绕系统交叉耦合非线性控制器设计

### 2.1 卷绕系统交叉耦合控制方案设计

交叉耦合控制考虑多个控制目标之间的相互影响,通过耦合误差对控制目标进行补偿控制,进一步减少控制误差,综合提高控制精度<sup>[13]</sup>。

卷绕系统的张力与收卷辊线速度精度及稳定性是卷绕系统的主要控制目标。根据卷绕系统的基本原理,设计卷绕系统交叉耦合控制原理图如图 4 所示。当控制系统发出张力与线速度指令时,系统存在张力误差  $f_e$  与线速度误差  $V_e$ ,分别乘以耦合增益  $G_f$ 、 $G_v$  后形成耦合控制反馈  $\varepsilon$ ,与耦合控制指令  $\varepsilon_{\text{cmd}}$  之差  $e$  经过非线性 PID 控制器运算后形成补偿量  $u$ ,与耦合增益相乘后得到张力控制耦合补偿量  $f_{\text{cp}}$  与  $V_{\text{cp}}$ ,与 PID 输出叠加,形成最终的张力及线速度控制指令  $u_f$  与  $u_v$ 。通过耦合控制目标  $\varepsilon_{\text{cmd}}$  的整体非线性控制,提高卷绕系统的鲁棒性及控制精度。

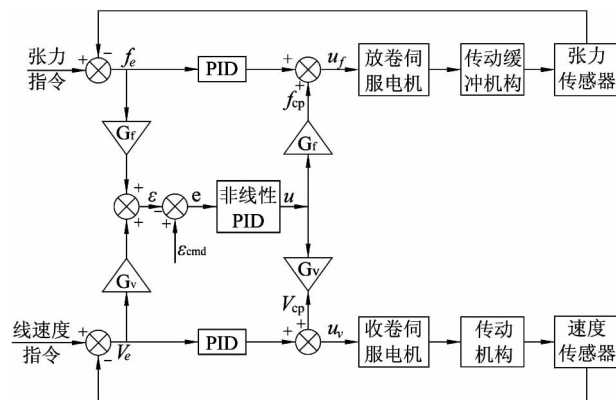


图 4 卷绕系统交叉耦合控制方案原理图

### 2.2 卷绕过程非线性影响因素分析

卷绕过程系统受到各种非线性因素的干扰,主要体现在:

(1) 卷材弹性变形干扰。张力是物料受到外力而发生弹性形变产生的内应力,在形变范围内,它与物料的弹性模量和形变率有关;物料要进行传送,需要维持一定的线速度;由于工艺的需要,有时需要改变线速度,而线速度的改变会改变物料的形变率,从而使得张力发生改变。由此可见,张力和线速度是

存在强耦合的。

(2)收卷辊与放卷辊负载变化巨大<sup>[14]</sup>。随着卷绕过程的进行,料辊的半径不断变化,并且从卷绕的开始到结束,负载往往有十倍甚至几十倍的变化。而与此矛盾的是常规的控制参数只能整定在某个工作点上,这样控制器在某些区域内就会面临性能降低甚至整定失败的结局。

(3)卷绕机构干扰。为了减缓张力变化及使卷材分布均匀,卷绕设备往往需要排线、缓冲、导向及传动环节。但这些机构不可避免地造成对速度大小及方向的干扰。此外,如卷筒不圆、料辊偏心、卷材分布不均等非线性因素,都会影响张力。

(4)张力传感器性能问题。目前,张力传感器普遍为电阻应变计组成的桥式电路进行检测和转换,其精度及动态响应性能远不能与光电编码器、光栅、磁栅等位置传感器相比,存在响应滞后与响应非线性,且容易受到随机信号干扰。

### 2.3 卷绕设备交叉耦合非线性 PID 算法推导

卷绕控制中系统存在大量的非线性环节,定值 PID 补偿控制的方法很难取得满意的控制效果。非线性 PID 如果非线性函数中的各项参数选择适当,能够使控制系统既达到响应快,又无超调现象。另外,由于非线性 PID 中的参数能够随控制误差变化而变化,因而其抗干扰能力也大大超过常规线性 PID 控制<sup>[15]</sup>。一般系统的阶跃响应如图 5 所示。

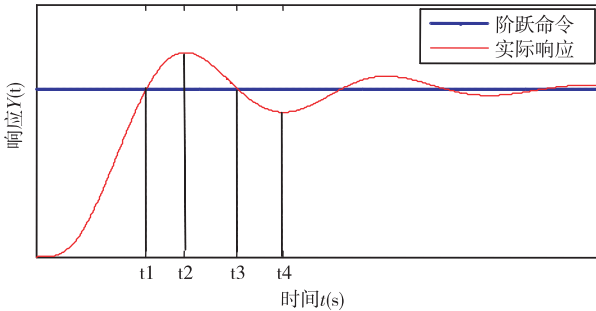


图 5 一般系统的阶跃响应

为减小控制误差抑制误差变化趋势,在  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  时刻,比例  $K_p$ 、积分  $K_i$ 、微分  $K_d$  的变化过程如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

表 1 非线性 PID 阶跃响应参数变化过程

|       | 0 - $t_1$ | $t_1$ - $t_2$ | $t_2$ - $t_3$ | $t_3$ - $t_4$ |
|-------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| $K_p$ | 由大变小      | 逐渐增大          | 逐渐减小          | 逐渐增大          |
| $K_i$ | 由小变大      | 逐渐减小          | 逐渐增大          | 逐渐减小          |
| $K_d$ | 由小变大      | 继续增大          | 先小后大          | 逐渐增大          |

非线性 PID 在不同响应区域,比例、积分、微分分别取不同的值,其变化趋势可用双曲函数及 e 指数函数表示。 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的连续时域计算公式分别如下式所示:

$$K_p(e(t)) = a_p + b_p[1 - \text{sech}(c_p e(t))] \quad (2)$$

$$K_i(e(t)) = a_i \text{sech}(b_i e(t)) \quad (3)$$

$$K_d(e(t)) = a_d + b_d / (1 + c_d \exp(d_d e(t))) \quad (4)$$

式中, $a_p$ 、 $b_p$ 、 $c_p$ 、 $a_i$ 、 $b_i$ 、 $a_d$ 、 $b_d$ 、 $c_d$ 、 $d_d$  均为正实数,通过调整  $c_p$ 、 $b_i$ 、 $d_d$  的大小可以分别调整  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的变化速率。

交叉耦合非线性 PID 控制器以张力、收卷线速度耦合误差为输入,其计算公式如下式所示:

$$e(t) = \varepsilon_{cmd}(t) - G_f(t)f_e(t) - G_v(t)V_e(t) \quad (5)$$

按照式(2)、式(3)、式(4)所示的非线性 PID 参数计算方法,将  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的瞬时值代入增量式 PID 公式,即可得到交叉耦合非线性 PID 输出量  $u$  的计算公式:

$$u(t) = K_p(e(t))e(t) + K_i(e(t)) \int_0^t e(t) dt + K_d(e(t)) \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

交叉耦合非线性控制输出量  $u$  与张力及线速度耦合增益相乘后,即得到各轴的补偿量计算公式:

$$\begin{cases} f_{cp}(t) = G_f(t)u(t) \\ V_{cp}(t) = G_v(t)u(t) \end{cases} \quad (7)$$

最终得到张力输出指令  $u_f$  与收卷线速度输出指令  $u_v$  计算公式如下:

$$\begin{cases} u_f(t) = K_{pf}(f_e(t))f_e(t) + K_{if}(f_e(t)) \int_0^t f_e(t) dt + K_{df}(f_e(t)) \frac{df_e(t)}{dt} + f_{cp}(t) \\ u_v(t) = K_{pv}(V_e(t))e(t) + K_{iv}(V_e(t)) \int_0^t V_e(t) dt + K_{dv}(V_e(t)) \frac{dV_e(t)}{dt} + V_{cp}(t) \end{cases} \quad (8)$$

## 3 交叉耦合非线性控制卷绕实验

搭建张力卷绕实验平台,对卷绕系统的交叉耦合控制效果进行实验验证。

### 3.1 卷绕实验平台

设计了卷绕系统实验平台,该平台具有卷绕机

构、排线机构、缓冲机构。收、放线功能可以交替运行,使卷线循环使用。张力卷绕实验设备的构成原理图如图 6 所示。

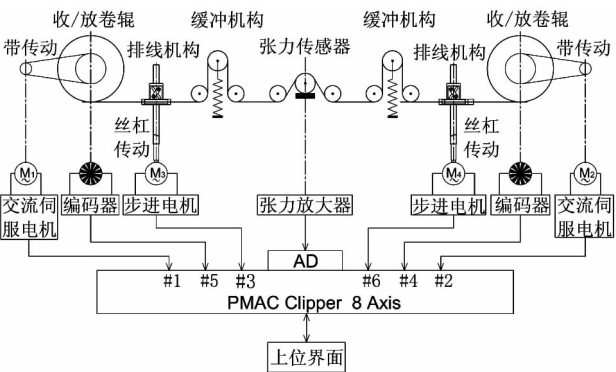


图 6 张力卷绕实验平台原理图

该平台的控制器为可编程多轴控制器 (programmable multi-axis controller, PMAC) 8 轴开放式运动控制器。收、放卷绕电机为交流伺服电机,通过联轴器与小带轮连接,小带轮经过同步带及大带轮与卷辊连接。卷线存储在卷辊上,卷辊前端装有编码器,用以检测卷辊转速。收、放电机分别带动各自相应的卷辊旋转,实现上线、下线过程。两侧的排线装置为步进电机 + 丝杠结构,带动排线装置往复直线移动,实现卷线在卷辊按照一定的要求排布。张力传感器用于测量卷材的张力值。缓冲、导向机构主要用于减小排线对系统造成的冲击,防止张力出现剧烈变化。

3.2 卷绕控制程序开发

PMAC 是集运动轴控制、PLC 控制及数据采集的多功能运动控制器,提供了前台、后台 PLC。其前台 PLC0,执行优先级高于其他的 PLC 程序,每个伺服周期执行一次。

为了实现收放卷运动、两侧排线运动及张力控制,开发了运动程序、前后台 PLC 程序相结合的底层控制程序。张力卷绕实验台底层运动控制程序整体框图,如图 7 所示。

为了提高交叉耦合控制的实时性,将交叉耦合控制程序写入 PLC0,其程序框图如图 8 所示。其中计算非线性耦合参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  时,将式(2)、式(3)、式(4)所示的非线性 PID 计算公式,采用泰勒公式对的双曲函数及 e 指数展开,写成多项式离散形式。

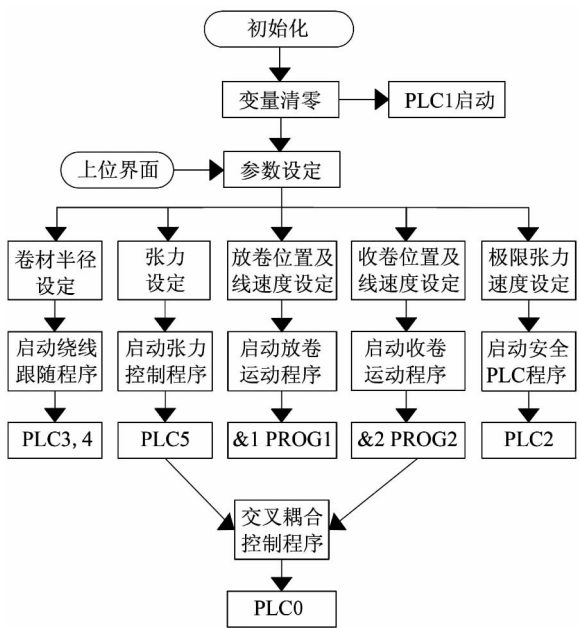


图 7 卷绕实验台整体运动控制程序框图

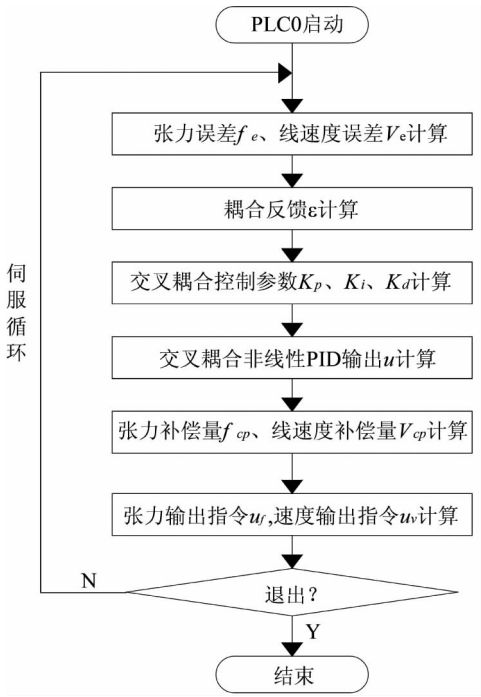


图 8 卷绕实验台交叉耦合控制程序框图

3.3 卷绕控制实验

进行张力、收卷线速度独立控制与交叉耦合控制对比实验,验证控制效果。通过上位控制界面,设置张力指令为:10N;卷取线速度为 40mm/s。

交叉耦合非线性 PID 控制的参数为  $a_p = 8$ ,  $b_p = 8$ ,  $c_p = 0.8$ ,  $a_i = 0.3$ ,  $b_i = 0.1$ ,  $a_d = 0.05$ ,  $b_d = 10$ ,  $c_d = 0.8$ ,  $d_d = 0.5$ 。考虑到张力与线速度的量纲,设置耦合增益系数  $G_f = 2$ ,  $G_v = 1$ 。将参数分别写入运动控

制程序及 PLC 程序。利用 VC 6.0 结合多线程技术开发了数据采集程序,采集周期为 10ms。同时采集张力值及 Windows 系统时间,采集交叉耦合非线性卷绕控制过程中的  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  的值,得到交叉耦合控制 PID 参数在线变化过程曲线如图 9 所示。

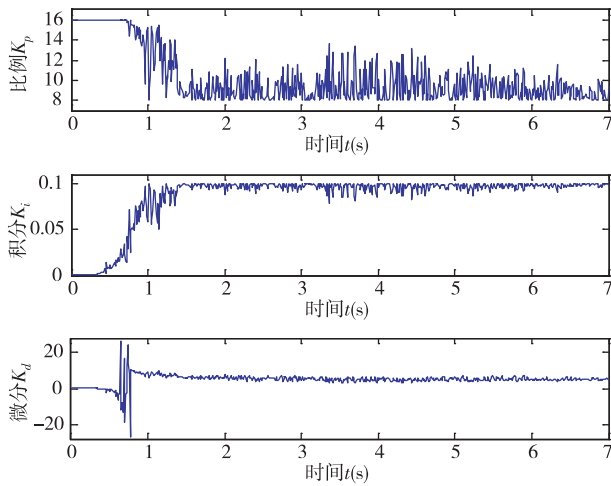


图 9 交叉耦合非线性控制参数在线变化过程曲线

得到独立控制与非线性交叉耦合控制张力曲线前后对比如图 10 所示。

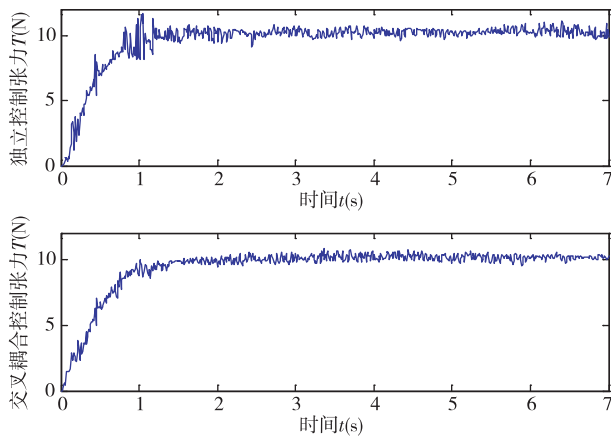


图 10 独立控制与交叉耦合非线性控制张力曲线

采集非线性交叉耦合控制收卷辊线速度前后对比如图 11 所示。

卷绕过程独立控制与交叉耦合非线性控制实验结果比较如表 2 所示。可以看出,交叉耦合非线性 PID 控制能够根据误差情况在线调整控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ,张力响应的超调量、调节时间、稳态波动率、收卷线速度平稳度均得到明显改善。卷绕过程交叉耦合非线性 PID 控制方式改善了张力控制性能,同

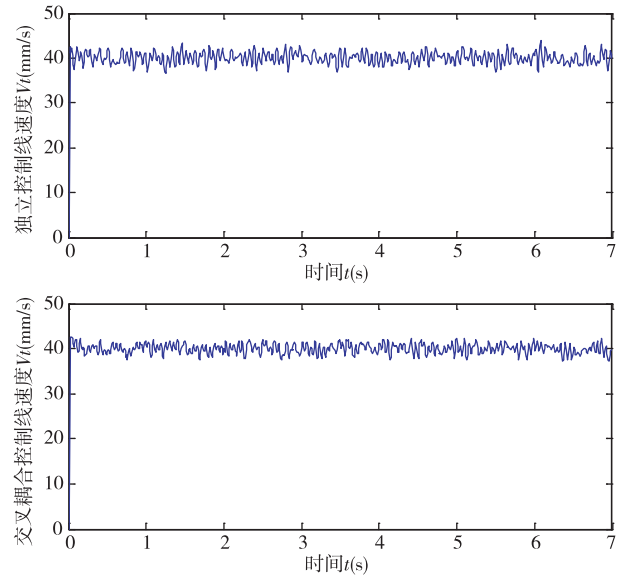


图 11 独立控制与交叉耦合非线性控制收卷线速度曲线

时一定程度上也降低了收卷辊的恒线速度波动,卷绕综合效果得到明显改善。

表 2 独立控制与交叉耦合非线性控制实验结果分析

| 控制方法   | 指标     |        |         |       |
|--------|--------|--------|---------|-------|
|        | 张力超调量  | 张力调节时间 | 张力稳态波动率 | 线速度方差 |
| 独立控制   | 16.26% | 1.28s  | 22.5%   | 1.31  |
| 交叉耦合 D | 7.91%  | 1.14s  | 19.97%  | 1.08  |

## 4 结 论

(1)对放卷进行张力伺服环级联解耦控制、对收卷进行速度闭环控制的方案,能够保持卷绕过程的进行,是一种切实可行的方案。

(2)所设计交叉耦合非线性控制策略能够根据耦合误差大小及变化趋势在线调整补偿控制量,同时提高张力与收卷线速度的控制精度及鲁棒性。实验结果表明了该控制策略的有效性,可以推广到其它卷绕设备的过程控制领域,具有一定参考价值。

## 参考文献

- [1] 张义兵,戴瑜兴.多线切割机线张力控制系统设计实现.机械工程学报,2009,45(5):295-299.
- [2] 李仲德,杨卫东.冷连轧机厚度和张力系统的多变量解耦鲁棒控制.控制理论与应用,2011,28(4):581-586.
- [3] 陈建魁,尹周平,熊有伦.一种基于 PMAC 的非连续卷绕张力控制方法.华中科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):1-4.

- [ 4 ] Wang L, Yang J C, Han X Q, et al. The Research on Controlling Method of Loom Warp Tension. In: Proceedings of 2009 Second International Symposium on Computational Intelligence and Design, Changsha, China, 2009. 115-118
- [ 5 ] Koc H, Knittel D, Mathelin M, et al. Modeling and robust control of winding systems for elastic webs. In: Proceedings of IEEE Transactions on Control Systems Technology, Tokyo, Japan, 1999. 197-208
- [ 6 ] Imamura T, Kuroiwa T, Terashima K, et al. Design and tension control of filament winding system. In: Proceedings of IEEE Transactions on Systems Man, and Cybernetics, Tokyo, Japan, 1999. 660-670.
- [ 7 ] Hu L Y, Zhu X L, Zheng D, et al. Numerical simulation of fuzzy-PID tension control system based on rotary MRF damper In: Proceedings of International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Hangzhou, China, 2009. 133-137
- [ 8 ] Li L, Yang J C, Zhao Y L, et al. The application of fuzzy-PID and multi-neuron adaptive PID control algorithm in the control of warp tension. In: Proceedings of International Conference on Computer Engineering and Technology, Chengdu, China, 2010. 7678-7681
- [ 9 ] Liu X Q, Zhang X M. Three-motor synchronous decoupling control based on BP neural network. In: Proceedings of International Conference on Control and Decision Conference, Guilin, China. 2009. 5365-5368
- [ 10 ] Li L, Yang J C, Zhao Y L, et al. The control algorithm research of the warp tension based on single neuron adaptive PID. In: Proceedings of International Conference on the 2nd International Conference on Future Computer and Communication, Wuhan, China, 2010. 2427-2431
- [ 11 ] Cheng M Y, Lee C C. Motion controller design for contour-following tasks based on real-time contour error estimation. In: Proceedings of IEEE Transactions on Industrial Electronics, Harbin, China 2007. 1686-1695.
- [ 12 ] Kwon O, Choe S, Heo H. A study on the dual-servo system using improved cross-coupling control method. In: Proceedings of International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, Italy, 2011. 1-4
- [ 13 ] Yeh S, Hsu P. A new approach to bi-axial cross-coupled control. In: Proceedings of IEEE Transactions on Control Applications, Hawaii, USA, 2000. 168 -173
- [ 14 ] 钟天庆, 王庆丰, 王海波. 大惯性双向变张力电液比例张力控制系统的研究. 浙江大学学报:工学版, 2007, 41(8): 1394-1399
- [ 15 ] 孙伟, 周阳花, 奚茂龙. 非线性 PID 控制器参数优化方法. 计算机工程与应用, 2010, 46(28): 246-248
- [ 16 ] Homayoun Seraji. A New Class of Nonlinear PID Controllers with Robotic Applications. *Journal of Robotic Systems*, 1997, 15(3): 161-181

## Research on nonlinear cross-coupled control in winding process

Peng Baoying<sup>\*</sup>, Cai Ligang<sup>\*</sup>, Li Qiguang<sup>\*\*</sup>, Han Qiushi<sup>\*\*</sup>, Yang Qingdong<sup>\*\*</sup>

( <sup>\*</sup> College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124 )

( <sup>\*\*</sup> The College of Mechanical Engineering, Beijing Information Science &  
Technology University, Beijing 100192 )

### Abstract

To improve the accuracy and robustness of winding control systems and inhibit the nonlinear interference factors during the winding process, choosing the winding tension and the winding line speed as control objectives, the study of nonlinear cross-coupled control for winding process was conducted. Firstly, an unwinding roller velocity control method and a decoupling control scheme between the tension and the winding linear speed were proposed. Secondly, some nonlinear factors impacting on winding control in the winding process, such as elastic deformation, winding structure, load change, tension sensor, etc., were analyzed, and a nonlinear cross-coupled PID controller was designed to compensate the tension and winding speed. The constant winding experiments were performed on the coil experimental device. Experimental results shows that compared with the independent control method, the proposed nonlinear cross-coupled control method can deal with nonlinear problems in the winding process, and greatly improve the robustness and control precision of winding control systems.

**Key words:** winding equipment, cross-coupled, nonlinear control PID, tension control