

FFS 重膜印刷机收卷部双锥度张力控制方法

曲宝军, 范增华, 李学伟, 李洪强
(山东理工大学, 淄博 255049)

摘要: **目的** 解决 FFS 重包装膜在高速印刷过程中带卷过大所引起的卷膜中心处皱折和端面不齐等产品质量问题。**方法** 提出一种双锥度张力控制方法, 通过对收卷张力和辊筒压力分别采用锥度张力控制来有效控制卷膜内部张力的分布, 令卷膜内部张力分布更加均匀。基于等效张力的概念, 对卷膜中的单元体进行受力分析, 得到卷膜受力和卷膜自身张力的变化规律。建立卷膜张力的数学模型, 对双锥度控制方法的性能进行理论分析。**结果** 通过集成到设计的平台上, 对所提出方法的有效性进行验证, 实验结果表明该方法使收卷张力更加稳定, 可减少卷膜内层抓心变形, 产品合格率提高至 98% 以上。**结论** 实验结果验证了所提出方法和研制装置的有效性, 可有效解决产品出现的质量问题。

关键词: 张力控制; 双锥度; 收卷机; 卷膜

中图分类号: TB486; TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0147-05

A Double Taper Tension Control Method for Winding of FFS Heavy-film Press

QU Bao-jun, FAN Zeng-hua, LI Xue-wei, LI Hong-qiang
(Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the product quality problems like wrinkles at the center of rolling film and the uneven end face caused by excessively large winding coil when the FFS heavy packaging film was printed at a high speed. A method of double taper tension control was proposed. The distribution of tension inside the rolling film was effectively controlled by means of taper tension control applied on the winding tension and roller pressure, which made the tension inside the rolling film distributed more evenly. The stress analysis was carried out on the unit in the rolling film. Accordingly, the stress and tension change law of rolling film were obtained. The mathematical model of rolling film tension was established, and the performance of double taper control method was analyzed theoretically. Integrated into the design platform, the effectiveness of the proposed method was verified. The experimental results showed that the method enabled the winding tension to be more stable, which could reduce the inner heart deformation of rolling film and improve the product percent of pass to over 98%. The effectiveness of the proposed method and the developed platform is validated by the experiment results, and the product quality problem incurred can be solved effectively.

KEY WORDS: tension control; double taper; roller; rolling film

FFS 重包装膜在包装快速、一次成型、无污染、材料节省、人工成本低、密封防潮性良好和印刷性能好等方面占据优势地位^[1-3]。印刷时薄膜首先由单工位放卷装置进行恒张力放卷, 再经电晕处理装置进行打花拉毛, 然后经印刷装置进行上墨着色, 并经移位压花折边装置进行辊压花纹、M 折边成型, 最后进入收卷装置进行收卷^[4-6]。

在收卷过程中, 随着卷径变大, 膜卷内部张力和压力分布不均会造成膜卷靠内芯处常出现皱折或挤成锥形突出。收卷结束后出现的皱褶严重影响产品质量^[7-9]。Knittel 等^[10]提出了抑制速度与张力波动的鲁棒控制策略, 理论分析了速度与张力的耦合关系, 并通过了仿真验证控制策略的有效性。李钢等^[11]基于磁流变液的智能材料, 研制了用于张力控制的传动装

收稿日期: 2017-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(51505265); 山东省自然科学基金(ZR2017QEE003); 山东省高等学校科技计划项目(J17KA037)

作者简介: 曲宝军(1981—), 男, 硕士, 山东理工大学讲师, 主要研究方向为包装机械测控系统开发。

置。面向卷筒纸印刷机的收卷张力特性及控制策略。杨梅^[12]设计了滑模变结构控制器,并仿真分析了张力控制系统的动静态特性。王瑞超等^[13]提出了基于模糊神经网络的薄膜收卷锥度张力控制策略,调节收卷转速来间接补偿张力。杨娅君等^[14]理论分析了收卷进程中卷筒内张力和应变的分布。

基于前人的研究工作,文中针对薄膜收卷的质量问题,提出了被动摩擦、表面中心、主动间隙三合一收卷双锥度控制的卷绕方式,并通过建立的数学模型论证了双锥度控制的优势,最后将所设计的控制系统集成到印刷设备上,并对其有效性进行实验验证。

1 收卷部双锥度张力控制方案

印刷机收卷部的双锥度张力控制的结构见图1,主要包括张力传感器、直线电子尺、PLC控制器、伺服控制器及伺服电机、收卷卷筒、收卷表面辊、比例阀控制的收卷压臂装置。收卷卷筒两侧用收卷压臂气缸压紧于表面辊上靠摩擦力带动而收卷,因而收卷辊的线速度始终与表面辊一致。锥度张力控制器实时调节收卷辊的速度来间接补偿张力,保证整机张力平衡,以达到张力锥度控制。同时,将收卷压臂对膜卷恒定压力的控制设计为收卷压臂对膜卷的锥度压力控制,最终实现表面辊与卷筒之间的锥度控制和收卷压臂对膜卷锥度压力控制的双锥度控制。整个控制过程采用反馈调节机制,由直线电子尺测出当前收卷的卷径,回馈到控制系统中,由锥度张力控制器计算出新的张力设定值,再经由张力传感器测量出当前膜卷张力并反馈给PLC。实时调节收卷辊的速度以达到张力锥度控制。同时,根据新的压力设定值进一步调节比例阀,实现收卷压臂对膜卷的锥度压力控制。

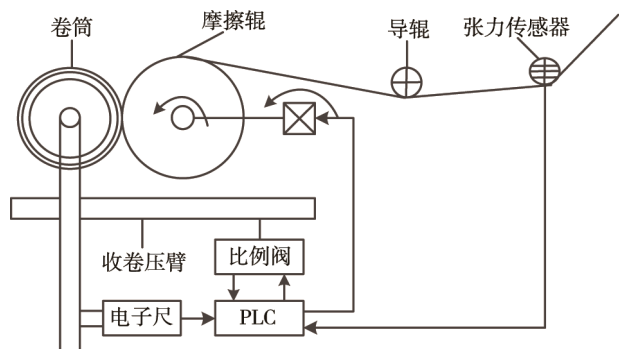


图1 收卷部双锥度张力控制

Fig.1 Double taper tension control of winding

张力是由于相邻辊之间存在速度差而产生的一种内应力,所以只需要调节收卷辊和放卷辊的线速度差即可控制薄膜的张力,基本控制原理见图2。薄膜在印刷过程时存在多个中间环节和不可测因素增加了张力控制的难度。文中设定印刷辊为恒线速度,收

卷辊和放卷辊以锥度张力控制器计算的值为目标值,与各自工位的张力实际值进行比较,基于模糊神经网络PID控制器对收卷电机和放卷电机进行微调,调控收卷辊的速度来间接补偿张力,从而实现收卷部的锥度张力控制。模糊神经网络PID控制器可以根据被控过程的运行状态在线进行自动调整,给出适当的控制量,进一步改善控制效果,以达到模糊自适应控制的目的,能有效解决印刷机张力控制的非线性难题。如图2所示,以锥度张力值与张力实测值的偏差与偏差变化率为输入量,通过模糊神经网络反馈控制器进行预测,预测的结果送到电机伺服控制器。同时,通过补偿返回和模糊神经网络辨识器的反馈,与预测结果相比较得到差值,再传给电机伺服控制器,从而获取合理的调整量,实现有效控制,输出合理转速。

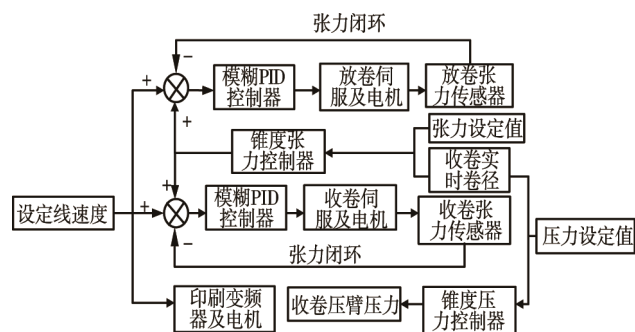


图2 印刷机双锥度张力控制原理

Fig.2 Control principle of double taper tension control of the press

2 恒定张力和压力下膜卷受力分析

在恒定张力和压力的张力控制系统下,收卷过程中外力对薄膜的影响并不会造成其强度不足而直接损坏,因此薄膜的受力形式满足广义胡克定律。薄膜厚度为 d ,收卷折边处为4层薄膜厚度,即为 $4d$ 。卷筒在收卷过程中受自身惯性影响进行自转,因此卷芯支撑轴承处的摩擦力由膜卷张力 f 和摩擦辊与卷筒的接触面上的摩擦力 F 互相抵消,见式(1)。

$$(F - f)R = 2\mu m R_z \quad (1)$$

式中: m 为当前收卷卷筒的质量; R_z 为卷芯轴承半径; μ 为轴承摩擦因数,式中的摩擦因数 μ 很小,可近似膜卷张力 f 与接触面摩擦力 F 相等($f=F$)。

在收卷过程中,摩擦辊与卷筒接触面上的薄膜受到挤压产生变形,因此经过摩擦辊与卷筒的接触面以后,薄膜的实际张力要比张力设定值大,但无法通过拉取摩擦辊与卷筒的接触面处的薄膜来均衡未通过摩擦辊与卷筒的接触面部分薄膜的张力差,于是残余了一部分等效张力 f' ,即:

$$f' = \rho F_{en} \quad (2)$$

式中: ρ 为等效张力系数; F_{en} 为辊筒压力。

收卷中的等效张力系数与接触面积相关,接触面积越小,等效张力系数越大。文中假定收卷过程中辊筒与卷筒的接触宽度一定,即接触面积一定,等效张力系数为定值,因此,卷入卷筒薄膜的剩余张力 f_n 包含卷绕时施加在带材上的张力 f_0 与辊筒压力合成的等效张力 f' ,即:

$$f_n = f_0 + f' \quad (3)$$

柔软的薄膜在收卷过程中没有弯曲应力,只受到拉力、压力和摩擦力的影响。当薄膜卷入卷筒时受到来自卷筒和摩擦辊的压力、张力控制系统提供的张力以及摩擦辊和卷筒提供的摩擦力。卷绕时,摩擦辊与卷筒接触面处的薄膜受到辊筒压力产生的环向应力 σ' 为^[15]:

$$\sigma' = -\frac{F_e R_i^2}{I \delta (R_j^2 - R_0^2)} \left(1 - \frac{R_0^2}{R_i^2} \right) \quad (4)$$

式中: δ 为薄膜宽度; I 为摩擦辊与卷筒的接触宽度; R_i 为第 i 层膜卷半径; R_j 为第 j 层膜卷半径。

压力产生的环向应力 σ' 会使薄膜产生一定的张力缩减 f'' , 又因辊筒压力相对卷筒而言为不均匀的压力, 辊筒压力造成了卷筒所受压力分布不均匀, 导致了质量问题的产生。根据弹性叠加原理, 可认为第 i 层膜上的内应力为初始内应力和受到第 i 层外的薄膜施加的压力后产生的应力变化之和, 卷筒内危险位置薄膜的张力 $f_{(R_i, R_j)}$ 分布见式 (5)。

$$f_{(R_i, R_j)} = f_0 + f' - f'' - \int_{R_i}^{R_j} \frac{(f + f') R dR}{R^2 + (1 - 2\mu) R_0^2} \cdot \left[1 - \frac{(1 - 2\mu) R_0^2}{R_i^2} \right] \quad (5)$$

$$= f_0 + f' - f'' - A$$

式中: $A = \frac{f_0 + f'}{2} \left[1 - \frac{(1 - 2\mu) R_0^2}{R_i^2} \right] \ln \frac{R_j^2 + (1 - 2\mu) R_0^2}{R_i^2 + (1 - 2\mu) R_0^2}$;
 μ 为泊松比。

设卷芯直径为 0.17 m, 最大卷径分别为 1.0, 1.2, 1.6 m, 薄膜泊松比为 0.3, 初始收卷张力值为 15 kN, 计算得的恒张力收卷内张力的分布见图 3。分析结果表明, 在恒张力收卷控制下, 卷膜的外半径越大, 内层膜产生负张力的越大, 外层膜对内层膜施加的压力就越大, 最终导致卷筒内层薄膜的张力变为负值。在负张力的作用下, 卷筒内层极易产生褶皱, 从而导致质量问题。

3 双锥度张力控制的膜卷受力分析

薄膜的张力分布可知, 卷膜的初始张力越大, 薄膜的张力分布越不均匀, 卷筒内膜卷越容易出现质量问题。初始张力太小, 又不能维持正常收卷工作。摩擦辊提供的压力太大, 也会造成张力分布更加不均匀的情况, 如果摩擦辊提供的压力太小, 则无法提供足够的卷筒张力。文中分别从锥度张力和双锥度张力控制模式下进一步分析卷膜的张力分布。

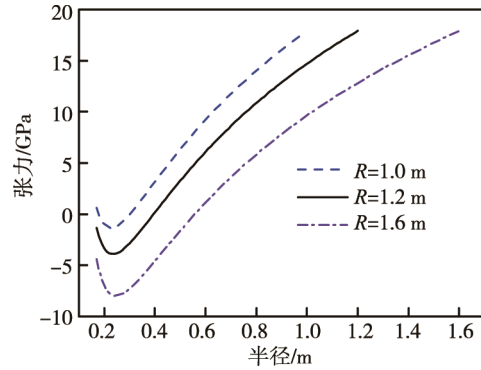


图 3 恒张力下不同卷径的收卷内张力分布
Fig.3 The tension distribution of different rolling diameters in winding under constant tension

3.1 锥度控制的卷膜张力分析

在恒定压力下锥度控制卷膜张力时, 由式 (5) 可求得卷筒内危险位置薄膜的张力分布见式 (6)。

$$f_{(R_i, R_j)} = (1 - K) \left(f_0 + \frac{f'}{1 - K} - B \right) + KC - f'' \quad (6)$$

式中:

$$B = \left(\frac{f_0}{2} + \frac{f'}{2 - 2K} \right) \left(1 - \frac{(1 - 2\mu) R_0^2}{R_i^2} \right) \ln \frac{R_j^2 + (1 - 2\mu) R_0^2}{R_i^2 + (1 - 2\mu) R_0^2};$$

$$C = \frac{f_0 R_0}{R_i} - f_0 R_0 \sqrt{(1 - 2\mu) R_0^2} \left(\frac{1}{(1 - 2\mu) R_0^2} - \frac{1}{R_i^2} \right);$$

$$\arctan \left(\sqrt{(1 - 2\mu) R_0^2} \frac{R_j - R_i}{(1 - 2\mu) R_0^2 + R_j R_i} \right).$$

设最大卷径为 1.6 m, 不同锥度系数下的收卷内张力的分布见图 4。分析结果表明, 在薄膜卷入卷筒时采用锥度控制来逐渐减小张力可以令外层薄膜对内层薄膜的压力减小。其值域减小, 使卷筒内的张力分布比较均匀且锥度系数越大, 内张力分布越均匀, 负张力出现的情形越少。

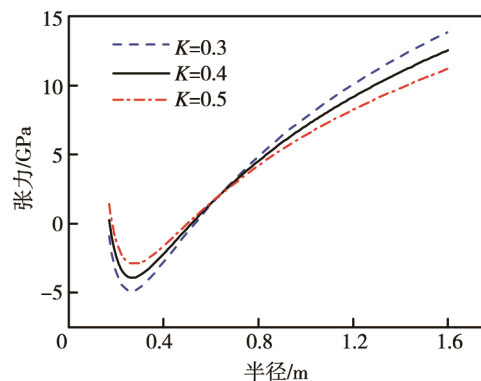


图 4 锥度收卷内张力分布
Fig.4 The tension distribution under taper winding

3.2 双锥度控制的薄膜收卷张力分析

双锥度控制的薄膜收卷张力是对恒定压力下锥度控制卷膜张力的改进, 将收卷压臂对膜卷恒定压力

控制设计为收卷压臂对膜卷的锥度压力控制,实现摩擦辊与卷筒之间的锥度控制和收卷压臂对膜卷锥度压力控制的双锥度控制。摩擦辊提供的压力值应满足提供的摩擦力来平衡张力控制的需要,所以需在可控范围内尽量缩小压力设定值,收卷压臂的压力 F_c 的锥度控制设定值与张力变化方式保持一致。由式(5)可以得出卷筒内危险位置薄膜的张力分布。

$$f_{(R_i, R_j)} = (1-K)[f_0 + f' - D] + KE - f'' \quad (7)$$

式中:

$$D = \frac{f_0 + f'}{2} \left(1 - \frac{(1-2\mu)R_0^2}{R_i^2} \right) \ln \frac{R_j^2 + (1-2\mu)R_0^2}{R_i^2 + (1-2\mu)R_0^2};$$

$$E = \frac{(f_0 + f')R_0}{R_i} - (f_0 + f') \left(\frac{1}{(1-2\mu)R_0^2} - \frac{1}{R_i^2} \right);$$

$$R_0^2 \sqrt{1-2\mu} \arctan \left(R_0 \sqrt{1-2\mu} \frac{R_j - R_i}{(1-2\mu)R_0^2 + R_j R_i} \right).$$

收卷过程中的张力系数为 $K=0.5$, 其他几何参数和材料参数与前面一致。锥度压力和恒压力下的卷膜内张力分布见图5。由图5可知,在锥度控制卷膜张力的基础上,摩擦辊提供的压力逐渐减小,可以使外层薄膜对内层薄膜的压力分布函数的值域进一步减小,产生负张力的区域相对减小,使得卷材内部的张力分布更加均匀,减少了因内层负张力导致的质量问题。

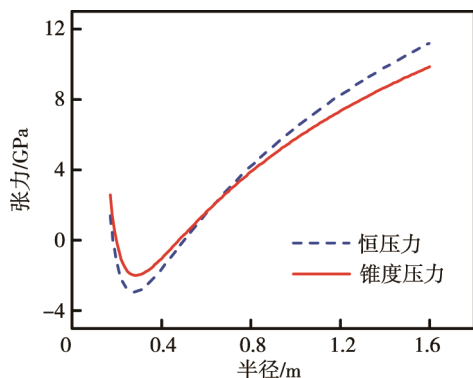


图5 不同压力控制方式下的收卷内张力分布

Fig.5 The tension distribution in winding with different pressure control methods

4 实验

为了验证膜卷的产品质量,将基于设计的双锥度张力控制系统集成到FFS重膜印刷机组中,见图6。

该机组以刚性气胀轴为卷芯,基材选用的是PE(LLDPE, LDPE, HDPE等)原料,膜厚度为100~200 μm ,收卷辊筒芯为170 mm,额定满卷直径为800 mm,膜最大宽度为800 mm,膜卷要求内部处于200 N的均匀内张力分布状态。牵引辊电机和收卷辊电机由西门子MM440系列变频器控制,系统采用TX-030TD张力传感器,可在线实时测试张力值和膜

卷卷径。具体现场调试过程:将牵引辊线速度逐步升高到130 m/min,收卷辊线速度也相应提高,稳定运行5 min后,系统进行一次换卷,以130 m/min的速度完整地进行一次收卷,在收满卷后再一次换卷;张力传感器显示卷径在170~230 mm时,以250 N的恒张力收卷,卷径在230~800 mm时张力呈锥度递减,在整个收卷过程中实际张力始终在设定张力上下波动且波动范围较小,张力控制效果良好。由于薄膜层之间都夹有一定的空气(12%~18%),在恒定的张力条件下会出现外层薄膜将内层薄膜压皱的现象。基于双锥度张力控制实质上是使薄膜的张力由大到小按照锥度进行递减,既要保证卷取过程中张力的相对稳定,又要满足薄膜卷内紧外松对张力变化的要求。随着母卷直径的增加,薄膜的张力自动进行衰减,减小了折皱的出现。

在此印刷机组连线生产后,完成了185, 160, 120 μm 等不同厚度薄膜的收卷及换卷过程,在50次的换卷过程中,薄膜均无出现明显变形和褶皱现象。实验结果表明,相对于改进前的控制效果,基于双锥度控制的收卷方式下的产品合格率达到98%以上,基于双锥度控制的收卷方式收卷效果良好,端面平齐且无皱折,质量可靠。

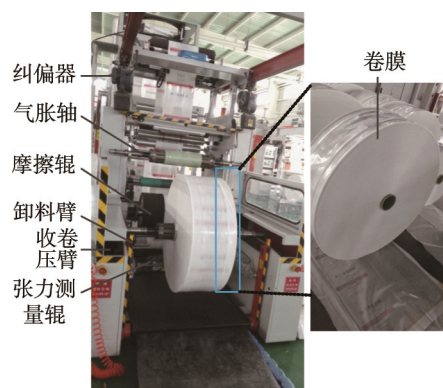


图6 薄膜收卷装置

Fig.6 Film winding device

5 结语

针对FFS重膜印刷机收卷部的收卷张力控制,设计了基于双锥度的张力控制方案。理论建模分析了卷膜受力和卷膜自身张力的变化规律,证明了双锥度控制方法的优越性能。最终把所提出的控制方法应用到FFS重膜印刷机组中,并长期运行。实验结果表明,基于双锥度张力控制的方法使收卷张力更加稳定,收卷效果良好,减少了卷芯内层抓心变形,保证了产品质量,具有潜在的广阔应用前景。

参考文献:

- [1] BAE S, KIM H, LEE Y, et al. Roll-to-roll Production

- of 30-inch Grapheme Films for Transparent Electrodes [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(8): 574—578.
- [2] DUTTA P K, TRIPATHI S, MEHROTRA G K, et al. Perspectives for Chitosan Based Antimicrobial Films in Food Applications[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(4): 1173—1182.
- [3] ELSABEE M Z, ABDON E S. Chitosan Based Edible Films and Coatings: A Review[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2013, 33(4): 1819—1841.
- [4] SUMISLAWSKA M, GYFTAKIS K N, KAVANAGH D F, et al. The Impact of Thermal Degradation on Properties of Electrical Machine Winding Insulation Material[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(4): 2951—2960.
- [5] LI Z, LI H, LIN F, et al. Lifetime Improvement of Metallized Film Capacitors by Inner Pressure Strengthening[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 3063—3068.
- [6] ZHANG J, LIU Z. A Cylinder Type Small Diameter Cloth Tube Winding Machine[J]. *Mechanical Engineer*, 2012, 8: 106.
- [7] 王砚, 聂子恒, 武吉梅, 等. 非均匀张力作用下运动薄膜的稳定性研究[J]. *西安理工大学学报*, 2016, 32(1): 58—62.
WANG Yan, NIE Zi-heng, WU Ji-mei, et al. The Study of Stability of the Moving Membrane under Non-uniform Tension[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2016, 32(1): 58—62.
- [8] 张文庆, 王凡. 薄膜收卷张力控制动力学分析[J]. *科技视界*, 2014(28): 60—61.
ZHANG Wen-qing, WANG Fan. The Dynamic Analysis on the Rolling thin Film Tension Control System[J]. *Science & Technology Vision*, 2014(28): 60—61.
- [9] 胥小勇, 孙宇, 蒋清海. 薄膜张力控制系统的建模与设计[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(18): 2452—2457.
XU Xiao-yong, SUN Yu, JIANG Qing-hai. Modeling and Design of a Film Tension Control System[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(18): 2452—2457.
- [10] KNITTEL D, LAROCHE E, GIGAN D, et al. Tension Control for Winding Systems with Two-degrees-of-freedom H Controllers[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(1): 113—120.
- [11] 李钢, 孙宇. 摩擦收卷中柔幅材料力学建模及张力控制策略研究[J]. *包装工程*, 2009, 30(10): 90—92.
LI Gang, SUN Yu. Study of Mechanical Model and Tension Control Strategy of Soft and Wide Sheet in New Surface Winder[J]. *Packaging Engineering*, 2009, 30(10): 90—92.
- [12] 杨梅. 滑模变结构在收卷张力控制系统中的应用与仿真[J]. *包装工程*, 2013, 34(3): 44—48.
YANG Mei. Application and Simulation of Sliding Mode Control in Winding Tension Control System[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(3): 44—48.
- [13] 王瑞超, 孙宇, 胥小勇. 基于模糊神经网络的薄膜收卷锥度张力控制系统[J]. *化工自动化及仪表*, 2013, 40(3): 316—320.
WANG Rui-chao, SUN Yu, XU Xiao-yong. A Taper Tension Control System Based on the Fuzzy Neural Network[J]. *Chemical Automation and Instrument*, 2013, 40(3): 316—320.
- [14] 杨娅君, 陈德传. 收卷中的张力及其控制[J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(5): 691—693.
YANG Ya-jun, CHEN De-zhuan. The Tension and Its Control upon Rolling-up[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 691—693.
- [15] 杨娅君, 郭乙木. 纺织物带材收卷后的应力分布[J]. *纺织学报*, 2003, 24(6): 564—566.
YANG Ya-jun, GUO Yi-mu. The Stress Distribution after the Textile Band Rolled[J]. *Journal of Textile Research*, 2003, 24(6): 564—566.