

薄膜传输系统导向辊牵引特性研究

马利娥¹, 邵明月², 武吉梅^{1,2}, 刘善慧¹, 刘定强¹

(1. 西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048;

2. 西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在建立导向辊的牵引力模型的基础上, 分析了导向辊牵引特性的影响因素及变化规律, 给出了薄膜与导向辊的包角、薄膜张力和牵引力的变化关系, 分析了摩擦系数、包角和张力的变化对薄膜和导向辊速差的影响。为薄膜传输系统导向辊的选用和薄膜的稳定传输奠定了理论基础, 为提高薄膜产品的加工质量和效率提供了理论依据。

关键词: 薄膜传输系统; 导向辊; 牵引特性

中图分类号: TS803.6

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)04-0462-06

Research on traction characteristics of the guide roller in the web transfer system

MA Li'e¹, SHAO Mingyue², WU Jimei^{1,2}, LIU Shanhui¹, LIU Dingqiang¹

(1. School of Printing, Packing Engineering and Digital Media Technology, Xi'an University of Technology,

Xi'an 710048, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In this paper, the guide roller traction model is established and the impact factors and the change laws of the guide rollers traction characteristics are studied. The guide rollers performance parameters are studied such as the wrap angle, the web tension, the friction coefficient and the speed differences to ensure the stable operation of the web transmission system. So as to it lays the theoretical foundation for the selection of the guide roller and the stable transmission of the web. And a theoretical basis can be provided for improving the processing quality and efficiency of the web products.

Key words: web transfer system; guide roller; traction characteristics

在薄膜传输系统中最常见和最重要的部件是各类辊子。辊子有主动辊和被动辊之分。主动辊由单独电机驱动, 可给薄膜施加张力和改变薄膜特性, 对薄膜起牵引作用, 通常包括牵引辊、印辊、复合辊和涂布辊等^[1]。被动辊指的是设备中的导向辊, 它是一种随动部件, 靠薄膜与导向辊表面的摩擦力带动旋转, 起导入、改变薄膜运动方向和支撑运动薄膜等作用。薄膜对导向辊的牵引力即为导向辊受到的薄膜对它的摩擦力, 也可以表述为薄膜通过导向辊时, 导向辊受到前后两段薄膜的张力差。牵引力大小的影响因素就是本文要研究的薄膜传输系统导向辊的牵引特性。

薄膜传输中要求张力恒定, 无颤振和偏移, 否则会产生套印不准、薄膜变形、褶皱和划伤等

缺陷, 影响薄膜的加工精度和效率^[2-4]。薄膜对导向辊的牵引特性和薄膜的张力、薄膜和导向辊的表面特性以及速差有关, 薄膜和导向辊之间的速差是造成薄膜划伤、褶皱和偏移等不稳定现象的主要因素之一。

2001年 Budinski^[5]应用绞盘方程原理, 通过实验测量薄膜的摩擦系数, 并根据 ASTM G-143 绞盘摩擦测试的标准测试了薄膜和导向辊接触时的摩擦系数, 模拟了随包角变化时柔性材料摩擦系数的变化规律。2010年, Brake^[6]研究了导向辊的不平行度对运动薄膜横向位移的影响及薄膜与导向辊之间的摩擦力的变化。Ducotey^[7]等研究了开槽的导向辊(矩形槽、三角形槽和螺旋槽等)对薄膜传输的影响, 研究表明, 改变导向辊的表面结构可以改善薄膜

收稿日期: 2015-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305341, 51505376, 11272253); 陕西省自然科学基金资助项目(2016JM5023)

作者简介: 马利娥, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为机械动力学。E-mail: malie@xaut.edu.cn

传输的质量。2011年,Beisel^[8]研究了薄膜传输系统的两种不稳定现象,其中一种是导向辊处薄膜的褶皱问题,将此处薄膜视为壳,采用了与应力有关的非线性有限元法进行研究。2012年 Hashimoto^[9]采用接触力学的理论研究了纸带和导向辊之间的摩擦特性。2013年 Branca^[10]研究了偏心导向辊和非圆导向辊对两导向辊之间的薄膜张力和速度的影响,为所查阅文献中首次将导向辊的参数引入到张力和速度控制模型中的学者。2013年, Tan^[11]等人研究了薄膜传输系统薄膜在辊子之间滑移的现象,用实验方法分析薄膜侧向滑移的原因,并用仿真实验表明薄膜的张力和速度对薄膜牵引特性的影响。2014年马利娥等人^[12-16]采用有限元分析方法研究了导向辊的挠曲变形,并对导向辊进行了结构优化,研究了导向辊壁厚对挠曲变形的影响。

目前薄膜张力、薄膜和导向辊之间的速差等参数对导向辊牵引特性的影响研究未见报道。本文拟建立导向辊的牵引力模型,研究导向辊的牵引特性影响因素及其变化规律。

1 导向辊牵引力模型的建立

薄膜经过第 $(i-1)$ 个导向辊时的受力示意图如图1所示,薄膜的运动速度为 v_{i-1} ,进入第 $(i-1)$ 个导向辊的张力为 T_{i-1} ,在第 $(i-1)$ 个导向辊的输出侧的薄膜张力为 T_i ;薄膜和导向辊之间的摩擦力为 f_{i-1} ,薄膜对导向辊的正压力为 N_{i-1} 。

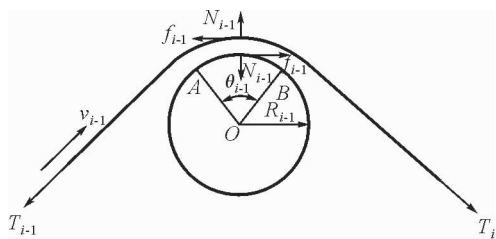


图1 导向辊与薄膜的受力图

Fig. 1 Mechanical model of web and idle roller

在薄膜和导向辊的包角 θ_{i-1} 的接触区域取一个薄膜微元体(如图2所示),对薄膜微元体分别在 x 方向和 y 方向进行受力平衡分析,则薄膜受到的摩擦力和正压力分别如式(1)和(2)所示。

$$df_{i-1} = -T \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) + (T + dT) \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) = dT \cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (1)$$

$$dN_{i-1} = T \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + (T + dT) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = (2T + dT) \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (2)$$

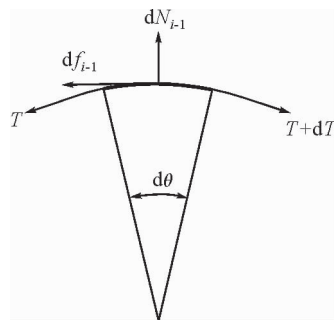


图2 包角区域薄膜微元受力图

Fig. 2 Mechanical model of a micro web element in the contact area

因为 $d\theta \approx 0$,则 $\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \approx \frac{d\theta}{2}$, $\cos\left(\frac{d\theta}{2}\right) \approx 1$,忽略二阶无穷小量,力平衡方程(1)和(2)可以写为:

$$df_{i-1} = dT \quad (3)$$

$$dN_{i-1} = T d\theta \quad (4)$$

$$df_{i-1} = \mu dN_{i-1} \quad (5)$$

式中, μ 为薄膜与导向辊间的摩擦系数。

联立方程(3)、(4)和(5),得:

$$dT/T = \mu d\theta \quad (6)$$

对方程(6)在整个包角的起始点和薄膜微元体之间的区域积分,可得:

$$\int_{T_{i-1}}^T \frac{dT}{T} = \mu \int_0^{\theta} d\theta$$

求解得:

$$T = T_{i-1} e^{\mu\theta} \quad (7)$$

将方程(7)代入方程(4),并在整个包角区域积分,可得:

$$N_{i-1} = \int_{\text{contact}} dN_{i-1} = T_{i-1} \int_0^{\theta_{i-1}} e^{\mu\theta} d\theta = \frac{T_{i-1}}{\mu} [e^{\mu\theta_{i-1}} - 1] \quad (8)$$

对方程(3)在整个包角区域积分,可得

$$f_{i-1} = T_i - T_{i-1} = T_{i-1} (e^{\mu\theta_{i-1}} - 1) \quad (9)$$

1) 如果薄膜和导向辊之间为纯滚动,摩擦系数 μ 为静摩擦系数 μ_0 ,则有:

$$f_{i-1} = T_{i-1} (e^{\mu_0\theta_{i-1}} - 1) \quad (10)$$

方程(10)表示薄膜对导向辊在接触区域产生的摩擦力。该摩擦力 f_{i-1} 即为第 $i-1$ 个导向辊处薄膜与导向辊之间为纯滚动时薄膜对导向辊的牵引力。

由(9)式可得:

$$T_i = T_{i-1} e^{\mu\theta_{i-1}} \quad (11)$$

2) 当薄膜和导向辊之间有相对滑动时,即当薄膜传输速度 v_i 和导向辊的圆周速度 $v_{r,i}$ ($v_{r,i} = R_{i,i} \omega_i$)

不同时,薄膜和导向辊之间有相对滑动,此时薄膜对导向辊的牵引力模型比较复杂^[17-19],涉及到静摩擦力、库伦摩擦力和粘性摩擦力,它们之间的关系如图 3 所示,可表达为:

$$f_i = a \cdot \text{sign}(v_i - v_{r,i}) + b(v_i - v_{r,i}) + c \cdot \delta(v_i - v_{r,i})$$

(12)

式中, a 为库伦摩擦力, b 为摩擦特性斜率, c 为静摩擦力。其中:

$$a = \mu' N_i$$
$$c = \mu_0 N_i$$
$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$\text{sign}(x) = \begin{cases} -1 & \text{if } x < 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ 1 & \text{if } x > 0 \end{cases}$$

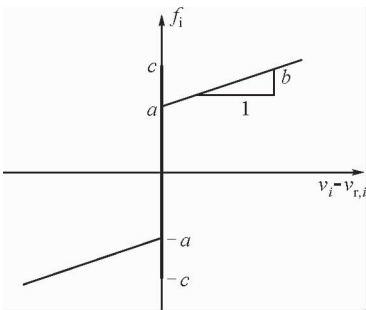


图 3 薄膜和导向辊的牵引力模型

Fig. 3 Traction model of the web and idle roller

如果第 $i-1$ 个导向辊在薄膜的带动之下转动,转动有相对滑动时,即 $v_{i-1} > v_{r,i-1}$,根据公式(12)可得:

$$f_{i-1} = \mu' N_{i-1} + b(v_{i-1} - v_{r,i-1})$$

(13)

将(8)式代入(13)式可得:

$$f_{i-1} = \frac{\mu'}{\mu} T_{i-1} (e^{\mu \theta_{i-1}} - 1) + b(v_{i-1} - v_{r,i-1})$$

(14)

当薄膜和导向辊之间有相对滑动时,根据公式(14),薄膜对导向辊的牵引力不仅与薄膜的张力、薄膜与导向辊的包角和薄膜与导向辊间的摩擦系数有关,还与薄膜和导向辊的速差有关。

2 导向辊牵引特性的影响因素研究

当薄膜和导向辊之间为纯滚动时,根据公式(10),牵引力与薄膜的张力、薄膜与导向辊的包角及薄膜与导向辊间的摩擦系数有关。研究薄膜对导向辊的牵引特性就是研究薄膜对导向辊牵引力的影响因素及其变化规律。

为了直观显示薄膜对导向辊的牵引特性,分析

牵引力和速差的影响因素及变化规律,本文以陕西西北人 FR-400 凹版印刷机中薄膜和导向辊的参数为依据,对导向辊的牵引力模型进行计算和分析。薄膜和导向辊的基本参数如表 1 所示。

表 1 薄膜和导向辊参数

Tab. 1 The parameters of idle roller and web

名称	参数	数值	单位
薄膜的横截面积	A	5.0×10^{-6}	m^2
薄膜的弹性模量	E	2.1×10^9	Pa
粘性摩擦系数	b	1 800	Ns/m
静摩擦系数	μ_0	0.1	
摩擦系数	μ	0.1	
库伦摩擦系数	μ'	0.02	
薄膜张力	T	200	N

2.1 薄膜张力对牵引力的影响

导向辊结构的时域分析结果表明^[20],导向辊的不平衡激励引起了导向辊挠度值的瞬态响应,薄膜经过导向辊时,这个瞬态响应会使得薄膜张力发生扰动。研究不平衡激励引起的导向辊瞬态响应时,不平衡激励是由导向辊进行动平衡后的不平衡质量的离心力产生的,在导向辊装配后不平衡质量还会产生变化,因此此处取导向辊中间截面的节点的瞬时响应规律研究薄膜经过导向辊时的张力变化。根据在不平衡激励的作用下,导向辊的瞬态响应曲线,计算模拟得出考虑导向辊不平衡激励时,薄膜的张力变化为:

$$T = 200 + 0.42 \times \left[0.2 \times \sin\left(4\pi t - \frac{\pi}{2}\right) + 1.8 \right]$$

张力扰动规律的表现如图 4 所示。分析图 4 可知,在导向辊的不平衡激励作用下,薄膜经过导向辊时张力在 200.76 N/m 发生扰动,扰动的幅值为 0.085 N/m,扰动的变化周期为 0.5 s。

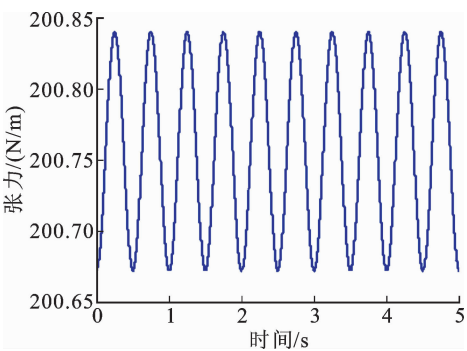


图 4 导向辊不平衡激励引起的张力扰动

Fig. 4 Tension disturbance caused by the unbalanced incentives

当薄膜张力在 30 N/m 和 200 N/m 之间变化时,根据公式(10)及表 1 的参数,计算得出薄膜对导向辊的牵引力和张力之间的变化规律如图 5 所示。由图 5 可知,随着张力的增加牵引力也快速增加,薄膜和导向辊之间包角越大,牵引力的增大幅度也越大。

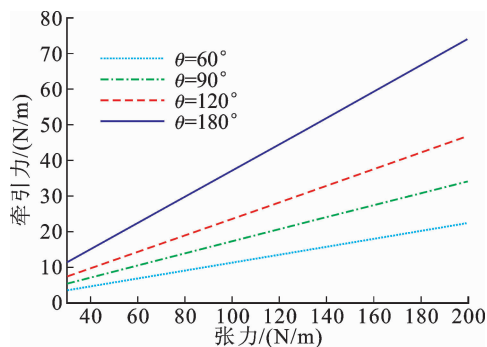


图 5 牵引力与张力的变化规律

Fig. 5 Variation law of traction and tension

考虑图 4 所示的张力扰动,当包角为 60°时,根据表 1 中的薄膜和导向辊的参数,在导向辊的不平衡激励作用下计算得出,薄膜对导向辊的牵引力的扰动变化规律如图 6 所示。

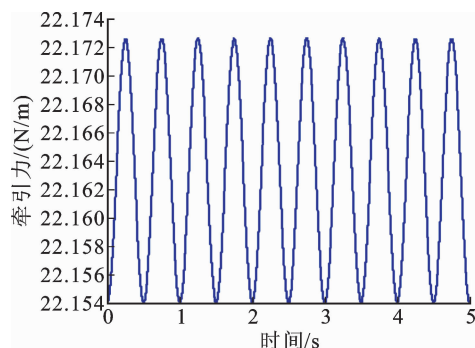


图 6 包角为 60°时牵引力的变化规律

Fig. 6 Traction force variation law when the wrap angle is 60 degree

由图 6 可知,在导向辊的不平衡激励的作用下牵引力也随着张力的扰动而呈现周期性变化。包角为 60°时牵引力扰动的幅值为 0.093 N/m,经计算,当 μ 分别为 0.15、0.2 和 0.25 时与 $\mu = 0.1$ 时得出的结论相同,可见此种情况下摩擦系数对牵引力的影响不明显。

2.2 导向辊包角对牵引力的影响

当薄膜与导向辊的包角在 60°到 180°之间时,根据公式(10)及表 1 的参数,计算得出不同张力条件下薄膜对导向辊的牵引力和包角之间的变化规律如图 7 所示。

由图 7 可知,薄膜对导向辊的牵引力随包角的

增大呈现趋近于正比例规律的增大趋势。随着包角的增大,导向辊的牵引力增长趋势很大。牵引力越大,薄膜经过导向辊时的张力变化就越大,因此实际生产过程中,在能满足导向辊稳定运转的前提下,尽量设计小包角的导向辊支承关系。

综合来看,薄膜和导向辊的包角对牵引力的影响最为明显。

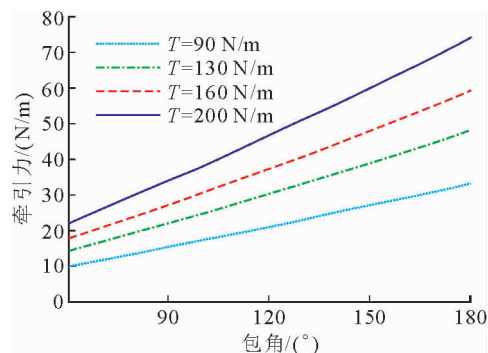


图 7 牵引力和包角的关系

Fig. 7 The relationship between traction force and the wrap angle

3 薄膜和导向辊之间的速差分析

薄膜传输速度和导向辊圆周速度的差值为薄膜和导向辊之间的速差。

由公式(14)可知其他参数不变,薄膜和导向辊之间的速差与牵引力成正比关系,速差越大,牵引力越大。此外薄膜和导向辊之间的速差是造成薄膜划伤、皱褶和偏移等不稳定现象的主要因素之一。速差的变化规律影响薄膜对导向辊的牵引特性。

当薄膜与导向辊的速差在 0 m/s 到 0.1 m/s 之间时,根据公式(14)及表 1 的参数,计算得出不同包角条件下薄膜对导向辊的牵引力和速差之间的变化规律如图 8 所示。

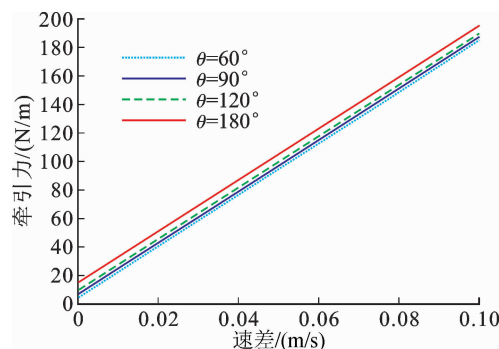


图 8 牵引力和速差的关系

Fig. 8 The traction force and the speed difference

由图 8 可知,薄膜对导向辊的牵引力随速差的

增大而增大,呈正比关系。此外随着包角的增大,导向辊的牵引力也增大。

将(8)式和(9)式代入(13)式可得:

$$v_{i-1} = v_{r,i-1} + \frac{T_{i-1}}{b} (e^{\mu\theta_{i-1}} - 1) \left(1 - \frac{\mu'}{\mu}\right) \quad (15)$$

则薄膜和导向辊之间的速差为:

$$\Delta v = v_{i-1} - v_{r,i-1} = \frac{T_{i-1}}{b} (e^{\mu\theta_{i-1}} - 1) \left(1 - \frac{\mu'}{\mu}\right) \quad (16)$$

根据公式(16)可知,速差与薄膜的张力、薄膜与导向辊之间的包角、薄膜和导向辊之间的摩擦系数有关,而与薄膜自身的传输速度无关。

3.1 摩擦系数和包角对速差的影响

当导向辊与薄膜的包角在 60°到 180°之间时,根据公式(16)及表 1 的参数,计算得出速差和包角之间的变化规律如图 9 所示。

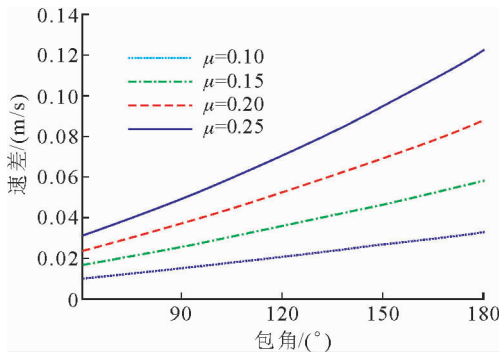


图 9 速差和包角及摩擦系数的关系

Fig. 9 Relationship between speed difference and wrap angle and friction coefficient

从图 9 可知,首先,速差随着包角的增大呈现指数形式增大,但增大的幅值相比薄膜的传输速度并不大(FR400 北人凹版印刷机的薄膜传输速度在 0.83 m/s至 6.67 m/s 之间)。其次,速差随着摩擦系数 μ 的增大而增大,当摩擦系数 $\mu=0.1$ 时,速差随包角的增大而增大的趋势最为缓慢。

3.2 张力对速差的影响

当摩擦系数 $\mu = 0.1$,包角 θ 在 60°、90°、120°、180°时,根据公式(16)及表 1 的参数,计算得出速差和张力之间的变化规律如图 10 所示。

由图 10 可知,包角一定时,速差随着张力的增大而增大,但增大的幅度很小。当张力一定时,速差随包角的增大而增大。当 $\mu = 0.1$,包角为 60°时,速差随着张力扰动的变化而呈现周期性变化,如图 11 所示。

当 μ 分别为 0.15,0.2,0.25 时与 $\mu = 0.1$ 时得出的结论相同。

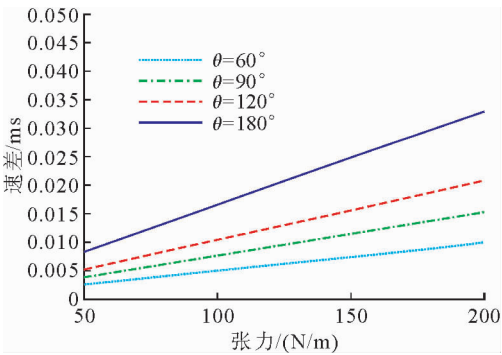


图 10 速差和张力的关系

Fig. 10 Relationship between speed difference and tension

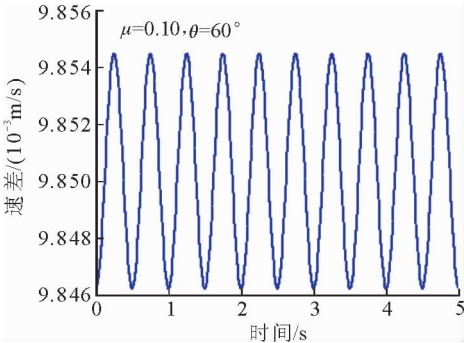


图 11 速差和张力扰动的关系

Fig. 11 Relationship between speed difference and tension disturbances

4 结 论

1) 通过研究薄膜传输系统导向辊的牵引特性,可知薄膜对导向辊的牵引力随包角的增大而增大。因此实际生产过程中,在能满足导向辊稳定运转的前提下,尽量设计小包角的导向辊支承关系。

2) 研究了导向辊牵引特性与张力的关系,得出在导向辊的不平衡激励的作用下牵引力也随着张力的扰动而呈现周期性变化。

3) 研究了薄膜和导向辊速差的影响因素和变化规律。综合来看,薄膜和导向辊的包角和摩擦系数对速差的影响比较明显。

4) 通过研究薄膜传输系统导向辊的牵引特性和速差的影响因素,得出了速差与牵引力的关系。摩擦系数和张力一定时,包角越大,速差越大,导向辊的牵引力越大;包角和张力一定时,摩擦系数越大,速差越大,导向辊的牵引力越大;包角和摩擦系数一定时,张力越大,速差越大,导向辊的牵引力越大;在导向辊的不平衡激励的作用下牵引力和速差也随着张力的扰动而呈现周期性变化。

因此薄膜和导向辊的包角、摩擦系数、薄膜张力

和速差是影响导向辊牵引特性的主要因素,在实际生产中要合理选用导向辊。以上研究提供了能保证薄膜稳定运行的导向辊的性能参数,从而为薄膜传输系统导向辊的选用和薄膜的稳定传输奠定理论基础,为提高薄膜产品的加工质量和效率提供理论依据。

参考文献:

- [1] SONDERGAARD R R, HOSEL M, KREBS F C. Roll-to-Roll fabrication of large area functional organic materials(Review)[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2013, 51(1):16-34.
- [2] BANICHUK N, JERONEN J, KURKI M, et al. On the limit velocity and buckling phenomena of axially moving orthotropic membranes and plates[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, 48(13): 2015-2025.
- [3] NGUYEN Q C, NGO Q H, HONG K S. Transverse vibration control of axially moving web systems by regulation of axial tension[C]//International Conference on Control, Automation and Systems, 2010: 1936-1940.
- [4] NGUYEN Q C, HONG K S. Stabilization of an axially moving web via regulation of axial velocity[J]. *Journal of Sound and Vibration*. 2011, 330(20): 4676-4688.
- [5] BUDINSKI K G. Friction of plastic webs[J]. *Tribology International*, 2001, 34(9): 625-633.
- [6] BRAKE M R, WICKERT J A. Tilted guides with friction in web conveyance systems[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(21): 2952-2957.
- [7] DUCOTEY K S, GOOD J K. A numerical algorithm for determining the traction between a web and a circumferentially grooved Roller[J]. *Journal of Tribology*, 2000, 122(3): 578-584.
- [8] BEISEL J A, GOOD J K. The instability of webs in transport[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2011, 78(1):1-7.
- [9] HASHIMOTO H. Friction characteristics between paper and steel roller under mixed lubrication[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2012, 226(12): 1127-1140.
- [10] BRANCA C, PAGILLA P R, REID K N. Governing equations for web tension and web velocity in the presence of nonideal rollers[J]. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 2013, 135(1): 011018.
- [11] TAN Henny, MA Wenjing, BU Binglu, et al. Study of web guide slippage phenomena in roll-to-roll embossing system[C]//IEEE 2013. 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). 2013, 1772-1777.
- [12] MA Li'e, MEI Xuesong, WU Jimei, et al. The modeling and simulation of the guide roller in web processing system[C]//2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering, ISEEE 2014: 1766-1769.
- [13] 马利娥,梅雪松,李彦峰,等. 薄膜传输系统导向辊的力学特性分析[J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(11): 86-91.
- [14] MA Li'e, MEI Xuesong, LI Yanfeng, et al. Mechanical behaviors of guide Roller in web transfer system[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(11): 86-91.
- [15] MA Li'e, WU Jimei, MEI Xuesong. Active vibration control of moving web with varying density[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2013, 32(4): 323-334.
- [16] WU Jimei, LEI Wenjiao, WU Qiumin, et al. Transverse Vibration Characteristics and Stabilization of a Moving Membrane with Elastic Supports[J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2014, 33(1): 65-78.
- [17] 马利娥,邵明月,吴志勇等. 凹版印刷机导向辊的挠曲变形研究[J]. *西安理工大学学报*, 2015, 31(2): 159-163.
- [18] MA Li'e, SHAO Mingyue, WU Zhiyong, et al. Research on the deflection of the guide roller in gravure printing machine[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2015, 31(2): 159-163.
- [19] DWIVEDULA R V, PAGILLA P R. Modeling of web slip on a roller and its effect on web tension dynamics [C]//Orlando, Florida USA, 2005-5-11. 2005 ASME International Mechanical Engineering Congress And Explosion. 2005:1-8.
- [20] 刘国平. 机械系统中的摩擦模型及仿真[D]. 西安:西安理工大学, 2007.
- [21] LIU Guoping. Friction model and simulation in mechanical system[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007.
- [22] 黄俊,李晓宁. 气缸低速运动摩擦力模型的研究[J]. *机床与液压*, 2005, (11): 73-74.
- [23] HUANG Jun, LI Xiaoning. Study on friction force model of cylinder in low-speed motion[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2005, (11): 73-74.
- [24] 马利娥,吴志勇,武吉梅,等. 凹版印刷机中导向辊的挠曲变形分析及结构优化[J]. *包装工程*, 2014, 35(13): 100-104.
- [25] MA Li'e, WU Zhiyong, WU Jimei, et al. Flexural deflection analysis and structure optimization of guide roller in gravure printing machine[J]. *Packaging Engineering*, 2014, 35(13): 100-104.

(责任编辑 王卫勋,王绪迪)