

凹版印刷机导向辊的挠曲变形分析及结构优化

马利娥¹, 吴志勇¹, 武吉梅¹, 万清泉¹, 李彦锋², 李征²

(1. 西安理工大学, 西安 710048;

2. 陕西西北人印刷机械有限责任公司, 渭南 714000)

摘要: **目的** 导向辊是保证凹版印刷机印刷薄膜稳定传输最重要的部件, 导向辊在薄膜张力及重力作用下容易发生挠曲变形。对导向辊进行挠曲变形分析和结构优化, 在保证挠曲变形不影响薄膜套印精度的前提下, 提高导向辊的随动性。**方法** 根据导向辊自身结构特点, 基于Ansys将导向辊简化为多体组合的连续简支梁模型, 通过施加弹簧单元来仿真轴承对导向辊的作用, 对不同壁厚的导向辊进行挠曲变形仿真分析, 分析导向辊挠曲变形对印刷套印精度的影响。**结果** 对导向辊建立了多体组合的有限元模型, 得到了导向辊的挠曲变形曲线。当导向辊直径为 $\phi 120$ mm, 筒体长为1100 mm, 轴头长为110 mm, 薄膜和导向辊的包角为 90° 时, 工程实际使用的4.5 mm壁厚导向辊的最大挠曲变形值为51.208。**结论** 导向辊最大挠曲变形发生在导向辊轴线方向的中间位置, 其变形值随壁厚的增加而降低, 壁厚对导向辊的挠曲变形影响较为明显, 根据文中研究结果, 对导向辊结构的壁厚进行优化后, 导向辊的随动性得到了提高, 从而可以提高薄膜传输质量。

关键词: 导向辊; 薄膜; 有限元分析; 挠曲变形

中图分类号: TS803.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)13-0100-05

Flexural Deflection Analysis and Structure Optimization of Guide Roller in Gravure Printing Machine

MA Li-e¹, WU Zhi-yong¹, WU Ji-mei¹, WAN Qing-quan¹, LI Yan-feng², LI Zheng²

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Beiren Printing Machinery Co., Ltd., Weinan 714000, China)

ABSTRACT: Objective The guide roller is an important part to ensure the stable transmission of the printing web in gravure printing. Bending deformation occurs in the roller due to the web tension and the gravity of the roller. Flexural deflection analysis and structure optimal design were developed in order to improve the follow-up property of the guide roller. **Methods** According to the guide roller's own structure characteristics, the guide roller was simplified to a continuous beam model based on Ansys software. A spring element was used to simulate the effect of the bearings. Rollers with different wall thickness were analyzed. The relationship between printing precision and the roller deformation was analyzed. **Results** A multi-body combination finite element model was established for flexural deflection analysis. When the radius of the guide roller was $\phi 120$ mm, the length of roller body was 1100 mm, the length of the shaft head was 110 mm, the wrap angle between the web and the guide roller was 90 degrees, the wall thickness of the guide roller was 4.5 mm in engineering practical use. **Conclusion** The maximum deformation occurred in the middle of the guide roller in axial direction. With the increase of wall thickness, the deformation value increased. The effect of wall thickness on the bending

收稿日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11272253, 51305341, 11202159); 陕西省教育厅基金(12JK0689)

作者简介: 马利娥(1973—), 女, 陕西西安人, 博士, 主要研究方向为印刷设备设计及机械动力学。

deformation of the guide roller was obvious. According to the results of this paper, the follow-up property of the guide roller was improved after optimization of the wall thickness. So the web transfer quality could also be improved.

KEY WORDS: guide roller; web; finite element analysis; flexural deflection

薄膜是软包装材料的统称,以卷的形式储存和加工,加工过程也是薄膜传输过程。典型的薄膜加工设备是凹版印刷机(见图1),一般由放卷、放卷牵引、印刷、收卷牵引及收卷等部分组成,在每2个部分之间的印刷薄膜都由导向辊对其进行导入、定向和支撑,薄膜传输过程见图2。导向辊是薄膜传输设备中数量最多、分布最广、影响最大的部件。



图1 凹版印刷机

Fig.1 Gravure printing machine

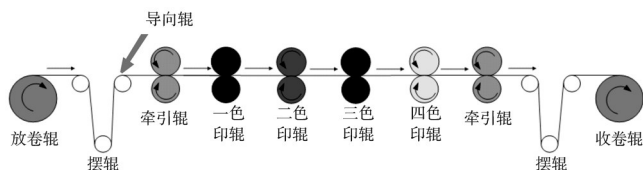


图2 薄膜传输示意

Fig.2 Schematic diagram of web handling

导向辊的结构和力学特性对薄膜的传输稳定性有着重要的影响,是薄膜发生皱褶、偏移、振动、划伤和套印不准的主要原因,对薄膜加工速度和精度的提高起着决定性作用^[1-4]。2009年Tran^[5]利用激光传感器测量了薄膜与导向辊环形间隙入口处的薄膜振幅,并与稳态偏微分方程的数值计算结果进行了比较。2012年Hashimoto^[6]采用接触力学理论研究了纸带和导向辊之间的摩擦特性。2011年Beisel^[7]研究了薄膜传输系统的2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,采用与应力有关的非线性有限元法进行了研究。2012年Pagilla^[8]指出运动薄膜的共振频率与导向辊的转动惯量有关。

2013年Branca^[1]研究了偏心导向辊和非圆导向辊对两导向辊之间薄膜的张力和速度的影响,为所查阅文献中首次将导向辊的参数引入到张力和速度的控制模型中。目前关于导向辊对薄膜传输稳定性的研究,主要集中在导向辊的安装和加工精度等方面,对导向辊的自身力学特性等研究鲜见报道。

凹版印刷机导向辊在薄膜张力及重力作用下容易发生挠曲变形。文中首先分析导向辊的结构特点,建立导向辊的有限元分析模型,在此基础上对比研究不同壁厚导向辊的挠曲变形,对导向辊结构进行仿真研究,为工程实际和深入研究导向辊对薄膜传输稳定性的影响奠定基础。

1 导向辊有限元分析模型的建立

1.1 导向辊的结构特点

导向辊筒体由铝合金(6005)型材加工而成^[9]。导向辊的轴头与辊身通常采用热装形式,以减小导向辊圆周方向的扰动。导向辊结构及主要零件见图3。堵头与轴头通过热装配形成如图3中堵头与轴头的装配体,然后分别与筒体两端热装配,得到导向辊结构。

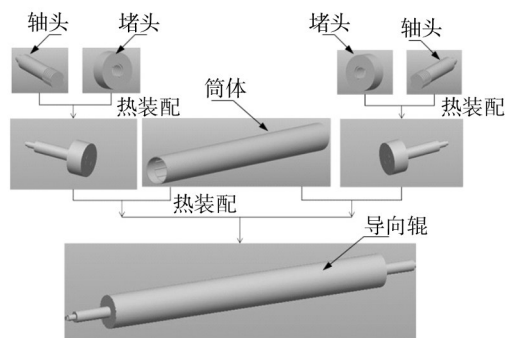


图3 导向辊结构及主要零件

Fig.3 Guide roller and its parts

1.2 导向辊结构有限元分析模型的创建

根据导向辊的结构特点对其进行有限元模型创

建^[10-12]。首先建立导向辊内部加强筋,其次将导向辊筒体拆分为2个薄壁环,堵头拆分为2部分,轴头拆分为4部分,进行导向辊结构模型的建立。导向辊三维模型使用的单元类型为3D solid185,支轴选用梁单元 Beam188,轴承对导向辊的作用用 Combination14 单元模拟。导向辊结构的有限元模型见图4。

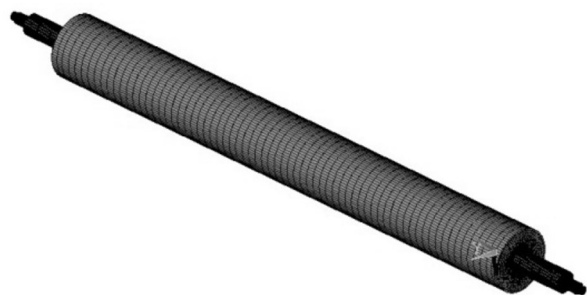


图4 导向辊结构的有限元模型

Fig.4 Finite element model of guide roll

通常导向辊由轴承支撑,轴承则通过支轴固定于墙板内,以便于更换和安装。为真实模拟与墙板连接的支轴对导向辊轴承及导向辊的作用,对实体模型划分单元后,通过在导向辊轴端轴承连接处与梁的中心节点建立直线梁单元,仿真支轴对轴承及导向辊的作用。梁类型为实心圆柱,半径为0.0075 m,长度为0.046 m。文中通过在Ansys中施加弹簧单元来仿真轴承对导向辊的作用^[13-14],经过分析计算得到,代替轴承对导向辊作用的弹簧单元的刚度 K 为 1.6325×10^7 N/m。整个有限元模型单元数量为64 956,节点总数为78 912。

2 导向辊结构的挠曲变形分析

2.1 边界条件及载荷的确定

文中研究的导向辊直径为 $\phi 120$ mm,筒体长为1100 mm,轴头长为110 mm。将薄膜与导向辊接触区域对应的导向辊的圆心角称为薄膜与导向辊的包角 θ (见图5),薄膜在传输时处于受拉状态,薄膜张力为 T ,导向辊所受压力为 P 。通常印刷薄膜张力为3~30 kg/m,选取薄膜张力为20 kg/m,包角 θ 为 90° ,薄膜幅面宽度为1050 mm,通过计算得到导向辊所受压力 P 为291 N,转化为面压,面压力大小为 2940.577 N/m²。

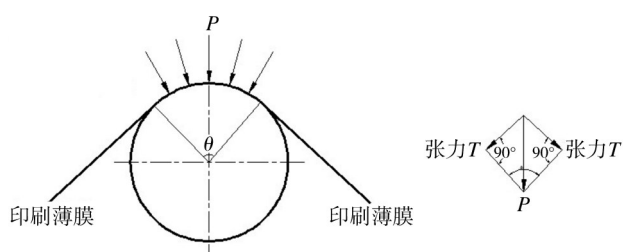


图5 薄膜张力与导向辊压力示意

Fig.5 Schematic diagram of film tension and the guide roller pressure

对梁单元外节点位移施加全约束的边界条件,在 x 轴正方向施加重力加速度为 9.8 N/kg^[15-16],施加完载荷和边界条件的导向辊的有限元模型见图6。图6中红线表示筒体表面载荷的大小及方向,梁两端约束节点所有自由度, K_0 表示弹簧单元 Combination14,仿真轴承对导向辊结构的弹性支撑作用。

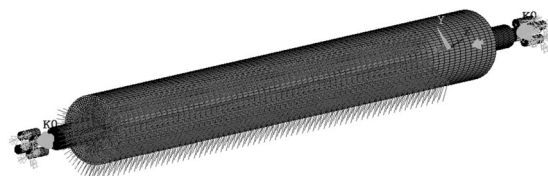


图6 导向辊边界条件及载荷有限元模型

Fig.6 Finite element model of boundary conditions and loading of the guide roller

2.2 导向辊的挠曲变形分析

对筒体壁厚为4.5 mm导向辊进行挠曲变形分析,该导向辊的挠曲变形云图见图7。

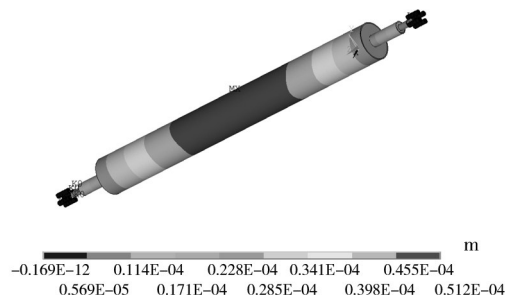


图7 导向辊的挠曲变形云图

Fig.7 Deformation nephogram of guide roller after flexural deformation analysis

由图7可知,导向辊最大变形发生在辊体中间处,并向两边依次减小。由仿真过程可知,导向辊最大位移发生在辊体中间位置处,其变形值随着壁厚的增加而降低,当辊体壁厚为4.5 mm时,变形值为51.208 μm ;筒体壁厚为4.5 mm的导向辊的挠曲变形曲线见图8。

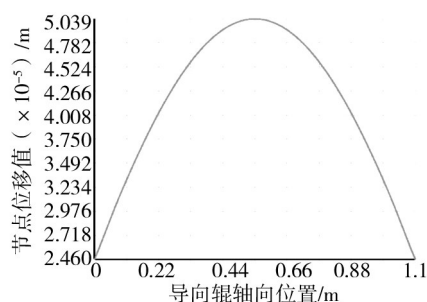


图8 导向辊的挠曲变形曲线

Fig.8 Flexural deflection curve of guide roll

3 导向辊结构的优化

3.1 导向辊挠曲变形对薄膜套印精度的影响

根据凹版印刷机套印精度行业标准,薄膜印刷套印误差须小于0.1 mm。现假定此套印误差全部由薄膜经过导向辊时在运动方向的拉伸变形产生,而该拉伸变形全部由导向辊的最大挠曲变形引起^[17],导向辊和薄膜的位置关系见图9。

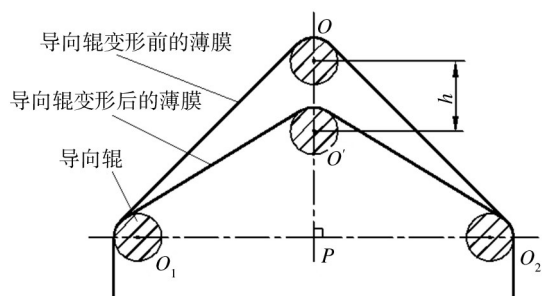


图9 导向辊和薄膜的位置关系

Fig.9 Mutual location relationship of the web and the roller

薄膜对导向辊O的包角为90°,导向辊O₁和导向辊O₂是与导向辊O相邻的两导向辊。OPO₁的连线构成了等腰直角三角形,设O₁P的距离为a。O'为导向辊在薄膜张力和重力作用下发生挠曲变形的圆心位置,挠曲变形的最大值为h,则O'P的距离为a-h。当

导向辊O发生挠曲变形时,印刷薄膜经过导向辊O时产生的拉伸变形为:

$$\delta = 2(OO_1 - O'O_1) = 2(\sqrt{2a} - \sqrt{a^2 + (a-h)^2}) \quad (1)$$

由套印误差得到,导向辊挠曲变形前与挠曲变形后印刷薄膜的拉伸变形不允许大于0.1 mm,即:

$$\delta = 2(\sqrt{2a} - \sqrt{a^2 + (a-h)^2}) \leq 0.1 \quad (2)$$

当相邻两导向辊之间的距离为薄膜宽度1050 mm时,给定安全系数0.9,导向辊在包角中心处最大变形值h满足 $h \leq 63.64 \mu\text{m}$ 。根据以上分析计算,当导向辊筒体壁厚为4.5 mm时,导向辊最大变形值为51.208 μm ,小于变形临界值63.64 μm ,说明导向辊的结构还可以进一步优化。

3.2 导向辊的随动性

在薄膜传输过程中,导向辊起导入运动薄膜、改变薄膜运动方向和支撑运动薄膜等作用。导向辊由运动薄膜与导向辊表面的摩擦力(牵引力)带动旋转,是一种随动部件。导向辊的随动性是指导向辊跟随薄膜运动,与薄膜保持同步转动的能力。

导向辊的转动转矩为料膜与导向辊之间的摩擦力所产生的力矩,可以得出:

$$\mu \cdot P \cdot R = J \cdot \varepsilon \quad (3)$$

式中: μ 为料膜与导向辊之间的摩擦因数; P 为料膜张力引起对导向辊的压力; J 为导向辊的转动惯量; ε 为角加速度。导向辊的随动性用角加速度的比值来表示,将该比值称为导向辊的随动比,以表征导向辊的随动性能。

3.3 导向辊结构的优化

降低壁厚是提高导向辊随动性较为可行的方法^[18-19]。根据变形分析和工程实际选择确定筒体壁厚的典型值为3.5 mm和4.0 mm,进行结构优化。对筒体壁厚为3.5 mm和4.0 mm的导向辊施加见2.1节所述的载荷和边界条件,进行挠曲变形分析。为了增加对比性,对筒体壁厚为3.5,4.0,4.5 mm的导向辊筒体表面分别进行坐标节点的数据提取,选取 $\pm x$ 方向节点处的位移值,提取数据的节点坐标与位移值见表1。

根据表1可知,壁厚对导向辊的挠曲变形影响比较明显,导向辊筒体壁厚为3.5 mm时,导向辊最大变形值为56.205 μm ,小于变形临界值63.64 μm 。导向

表1 导向辊筒体表面节点坐标值与位移值

Tab.1 Coordinates and displacement of the node on the roller surface

节点坐标			节点位移值/ μm		
x	y	z	3.5 mm壁厚	4.0 mm壁厚	4.5 mm壁厚
-0.06	0	1.04	25.428	24.948	24.601
-0.06	0	0.49	56.205	53.359	51.208
-0.06	0	-0.06	25.428	24.933	24.602
0.06	0	1.04	25.435	24.940	24.608
0.06	0	0.49	55.148	52.387	50.300
0.06	0	-0.06	25.436	24.941	24.594

辊筒体壁厚越小,导向辊的质量越小,导向辊的转动惯量也越小,导向辊的随动性就好。根据3.2节的计算方法,壁厚为4.5 mm的导向辊的随动比为0.92,而壁厚为3.5 mm的导向辊的随动比则可提高为0.982。所以,文中所研究的导向辊的筒体壁厚选用3.5 mm。

4 结语

文中主要分析了导向辊的结构特点,建立了多体组合的有限元模型,对导向辊进行了挠曲变形分析。分析了薄膜印刷套印精度和导向辊挠曲变形的关系,在此基础上对导向辊结构进行了优化。分析研究结果表明,导向辊最大变形发生在导向辊轴线方向中间位置处,其变形值随着壁厚的增加而降低,壁厚对导向辊的挠曲变形影响较为明显。对导向辊结构的壁厚进行优化后,导向辊的随动性得到了提高,从而可以提高薄膜传输质量。

参考文献:

[1] 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): 11—18.

[2] KIM C H, JO J, LEE S H. Design of Roll-to-roll Printing Equipment with Multiple Printing Methods for Multi-layer Printing[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(6): 065001.

[3] CEDROWSKA A, MARYNOWSKI K. Dynamic Behavior of an Axially Moving Wide Web[J]. Journal of Theroetical and Applied Mechanics, 2012, 50(4): 903—911.

[4] PAGILLA P R, DIAO Y. Resonant Frequencies in Web

Process Lines Due to Idle Rollers and Spans[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control—transactions of the ASME, 2011, 133(6): 061018.

[5] TRAN S B Q, YOO Y H, KO J H. Experimental and Numerical Study of Air Entrainment between Web and Spirally Grooved Roller[J]. Journal of Tribology—transactions of the ASME, 2009, 131(2): 021502.

[6] 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.

[7] BEISEL J A, GOOD J K. The Instability of Webs in Transport [J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(1): 1—7.

[8] PAGILLA P R, DIAO Y. Resonant Frequencies in Web Process Lines Due to Idle Rollers and Spans[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control—transactions of the ASME, 2011, 133(6): 061018.

[9] 王晓敏. 薄膜导向辊的加工要点[J]. 印刷技术, 2012(18): 54—55.

WANG Xiao-min. Processing Main Methods of Web Roll[J]. Printing Technology, 2012(18): 54—55.

[10] 吴斌方, 袁博, 严明霞, 等. 基于UG和ANSYS软件的瓦楞辊振动与模态分析[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 55—58.

WU Bin-fang, YUAN Bo, YAN Ming-xia, et al. Vibration and Modal Analysis of Corrugated Roller Based on UG and ANSYS Software[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 55—58.

[11] 袁清珂, 杜亚男, 王同乐, 等. 印刷机滚筒的模态分析[J]. 包装工程, 2011, 32(15): 102—105.

YUAN Qing-ke, DU Ya-nan, WANG Tong-le, et al. Modal Analysis of Printing Cylinder[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(15): 102—105.

[12] 郑子君, 陈璞, 王大钧. 杆、梁有限元模型的模态的振荡性质[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 79—83.

ZHENG Zi-jun, CHEN Pu, WANG Da-jun. Oscillation Property of Modes for FE Models of Bars and Beams[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 79—83.

[13] 田红亮, 方子帆, 朱大林, 等. 固定接触界面切向静弹性刚度问题研究[J]. 应用力学学报, 2011, 28(5): 458—464.

TIAN Hong-liang, FANG Zi-fan, ZHU Da-lin, et al. Investigation on Tangential Static Elastic Stiffness of Fixed Contact Interface[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011, 28(5): 458—464.

[14] ALI N J, GARCIA J M. Experimental Studies on the Dynamic

(下转第127页)

- 的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(17): 105—108.
- WANG Huan-mei, CHEN Guang-xue, CUI Xiao-meng, et al. Effect of Paper Chromaticity on Gray Balance in Color Printing[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(17): 105—108.
- [4] 刘太庆, 王晓红. 基于距离加权的灰平衡数据获取的改进方法[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 141—143.
- LIU Tai-qing, WANG Xiao-hong. A Corrective Way to Acquire Gray Balance Data Based on Weight Distance Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 141—143.
- [5] 陈丽娜, 刘真. 多色分色模型中中性灰的调控[J]. 包装工程, 2013, 34(7): 81—83.
- CHEN Li-na, LIU Zhen. Gray Balance Setting Method for Multi-color Separation Model[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(7): 81—83.
- [6] 张岩, 魏庆葆. 基于GCR的CMY与C'M'Y'K转换算法[J]. 包装工程, 2010, 31(5): 21—29.
- ZHANG Yan, WEI Qing-bao. The Conversion Algorithm of CMY and C' M' Y' K Based on GCR[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(5): 27—29.
- [7] KAI Li, HONG Guang-sun, WEN Yan-jiang. The Standard Parameters Research in Digital Printing by G7 Technology[J]. Applied Mechanics and Mechatronics Automation, 2012, 182—183: 348—351.
- [8] WANG Zhen-rong, TANG Wan-you. Research on the Gray Balance of Ink-Jet Printing Based on G7[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 329: 429—433.
- [9] URABE, HITOSHI. Color Management from Scene to Hard-copy for Prepress Process[J]. Journal of the Society of Photographic Science and Technology of Japan, 2011, 72(2): 78—84.
- [10] NUSSBAUM P, HARDEBERG J Y. Print Quality Evaluation and Applied Colour Management in Coldset Offset Newspaper Print[J]. Color Research & Application, 2012, 27(2): 82—91.
- [11] SHARMA A. Measuring the Quality of ICC Profiles and Color Management Software[J]. The Seybold Report Analyzing Publishing Technologies, 2005, 4(20): 10—16.
- [12] YU Qing-xue, LUO Yun-hui, LIN Mao-hai, et al. Comparisons and Analyses of Image Softproofing Under Different Profile Rendering Intents[J]. Computer Engineering and Networking, 2014, 277: 617—624.
- [13] LIU Shi-de, XIE Geng, WEI Bin, et al. Obtaining Reference ICC Profile by Reversed Color Matching Method and Tracing Correction[J]. Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on, 2010, 5: 2367—2370.
- [14] XIN Hua-jun, LIU Yu. Influence Analysis of Color Input Target to the Scanner Color Characteristic[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 262: 123—126.
- [15] DILAWARI J S, KHANNA R. Developing ICC Profile Using Gray Level Control in Offset Printing Process[J]. Computer Science and Network Security, 2012, 12(10): 16—19.

(上接第104页)

- Characteristics of Rolling Element Bearings[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J—Journal of Engineering Tribology, 2010, 224(7): 659—666.
- [15] 许曼, 丁毅. 基于ANSYS的模切机机架结构性能分析及优化设计[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 73—74.
- XU Man, DING Yi. Structure Property Analysis and Optimal Design of Die-cutting Machine's Housing Based on ANSYS[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 73—74.
- [16] 商跃进. 有限元原理与ANSYS应用指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- SHANG Yue-jin. The Finite Element Theory and ANSYS Application Guidelines[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [17] KIM C H, YOU H I, LEE S H. Register Control of Roll to roll Gravure-offset Printing Equipment Considering Time Difference between Measurement and Actuation[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C—Journal of Mechanical Engineering Science, 2012, 226(11): 2726—2738.
- [18] 魏玉杰, 贺红林. 书本打包机推书机构结构动力学分析[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 5—9.
- WEI Yu-jie, HE Hong-lin. Structural Dynamic Analysis of Pushing Mechanism of Book Packer[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13): 5—9.
- [19] 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.