

纸张在纸道出口的无约束动态变形研究

王冰¹, 杨继全²

(1. 南京师范大学, 南京 210046; 2. 江苏省三维打印装备与制造重点实验室, 南京 210042)

摘要: **目的** 研究仅在重力作用下纸张进给过程中, 在纸道出口处的无约束动态变形。 **方法** 建立了纸张通过纸道出口的运动模型, 应用非线性方程描述纸张的动态变形, 通过数值计算方法对纸张动态变形运动进行了求解, 分析了不同速度和出口角度对纸张变形的影响。 **结果** 进给速度由100 mm/s增加到500 mm/s时, 纸张最大曲率由0.0058减小到0.0029, 纸张的弯曲变形量随着进给速度的增加而减小; 纸张出口角度由20°增加到40°时, 纸张下降高度由36.1 mm减小到28.5 mm。 **结论** 通过调整纸张进给速度和纸道的出口角度, 改变纸张端部的运动位置, 为纸张进给过程中准确到达预定位置提供了设计依据。

关键词: 纸张进给; 动态变形; 数值分析

中图分类号: TH-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)23-0116-05

Unconstrained & Dynamic Deformation of Paper Feeding

WANG Bing¹, YANG Ji-quan²

(1. Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing 210042, China)

ABSTRACT: The unconstrained dynamic deformation of feeding paper at the outlet of the paper path under gravity was studied. Kinematic model was established for the paper passing the paper path outlet. The dynamic deformation of paper was described through nonlinear equations. The dynamic deformation motion of paper was solved by numerical calculation. The effects of different speed and outlet angle on the paper deformation were analyzed. When the feeding speed was increased from 100 mm/s to 500 mm/s, the maximal curvature of paper was reduced from 0.0058 to 0.0029, and the bending deformation of paper decreased with the increasing feeding speed. When the paper outlet angle was increased from 20° to 40°, the paper descending height decreased from 36.1 mm to 28.5 mm. The motion position of the paper edge could be changed by adjusting the paper feeding speed and the outlet angle of the paper path, which provided design reference for the accurate pre-estimated positioning of paper feeding.

KEY WORDS: paper feeding; dynamic deformation; numerical analysis

目前, 复印机中纸张进给系统的主要作用是实现纸盒内存放纸张的单张分离, 并自动有序地传送至转印、定影等复印工位, 系统包括纸盒、送纸单元、传送单元、对位单元、翻转单元。纸盒用于存放纸张, 包括机身中的纸盒和旁路的送纸托盘。送纸单元也可称为分离单元, 常采用沟槽制动、纸角分离爪、摩擦制动、供纸与反向辊等装置实现单张纸分离。传送单元

任务是有序传送分离后的纸张至转印等工位, 通常包括多组传送辊和用于故障检测的传感器组。为保证复印图像的准确, 在纸张进入转印前, 需要对纸张位置进行校准, 因此纸张进给系统还包括多组对位辊组成的定位单元。典型复印机纸张进给系统各单元的位置以及纸路传送方向见图1。

国内外许多学者都对纸张进给问题进行了分析

收稿日期: 2015-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61273243); 江苏省三维打印装备与制造重点实验室项目(BM2013006)

作者简介: 王冰(1982—), 女, 辽宁本溪人, 博士, 主要研究方向为机电一体化。

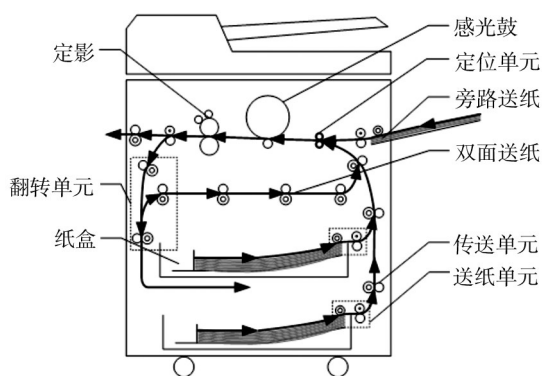


图1 复印机纸张进给系统

Fig.1 Diagram of paper feeding system of copy machine

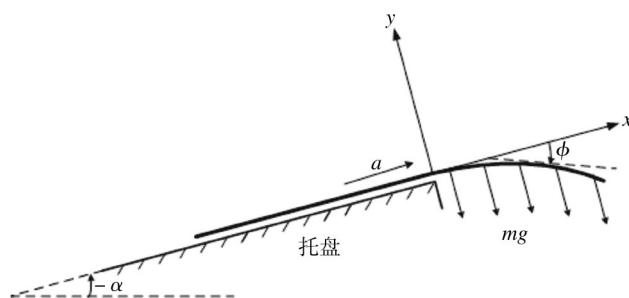
研究, Benson^[1]利用非线性理论推导了弹性纸张在通过具有摩擦通道时的两种可能变形, 指出纸张在通过具有摩擦的通道时会发生较大的变形而导致动作失败, 文章中给出了描述物体变形的数学模型, 得到了两种可能发生的变形。其中一种变形符合物体在通道中发生堵塞的现象, 指出了发生变形的影响因素为: 通道的高度、弹性体的曲率、摩擦因数、通道的倾斜度。Adams 和 Benson^[2]分析了弹性纸张通过平行刚性轨道的后屈曲, 主要应用于解决纸张传输过程中的堵塞问题, 如复印机中的卡纸问题, 他们将卡纸过程分为3个部分, 第1是纸张未与轨道上表面接触时的屈曲, 第2是纸张与轨道上表面相切时的屈曲, 第3是纸张一部分与轨道上表面重和时的屈曲。得到的结论为平行轨道过宽或过窄都会引起纸张的堵塞, 且轨道的摩擦基本对变形无影响。Benson^[3]研究了光滑纸张在空气层的支撑下的运动方程, 计算了纸张在空气层的支撑下, 给定初速度至运动停止所需要的时间, 得出了纸张的弯曲程度将会对这一结果产生影响, 为纸张的自由滑动分析提供理论依据。西安交通大学的杨胜军、马军星、陈雪峰等人^[4-7]分别运用板壳元对纸张的力学特性进行了有限元分析, 利用小波有限元理论分析了办公纸张定影过程的运动边界条件, 建立了纸张定影过程的二维稳态、瞬态非线性温度场数值模型。从本质上说, 无论是薄板壳元还是小波有限元, 都忽略了纸张厚度的差异, 阻碍了分析研究实际的纸张运动现象, 如卡纸、双张、纸张的起皱与卷曲等。

复印机送纸单元在完成纸张的单张分离输出之后, 纸张将进入传送单元, 准确地进入到传送单元, 并且在传送过程中避免发生卷曲, 使纸张能够平稳地从一个纸道过渡到下一个纸道是非常关键的。这个过渡过程是无约束的, 可以看作是一个悬臂梁结构, 由

于纸张的轻质柔性特性, 在这个过渡过程中会发生大变形, 从而影响纸张的进给和传送。在高速复印机中, 纸张的速度可以达到2 m/s, 纸张为不可伸缩材料, 变形完全取决于弯曲, 所以问题归为非线性弹性理论。应用非线性弹性理论分析复印机中纸张传送的非线性静态变形, 研究以恒定速度仅在重力作用下纸张通过水平通道, 在出口处的动态变形, 以及纸张在具有一定角度的纸道和纸张以一定的加速度进给的动态变形。

1 纸张运动方程

某一时刻对纸张进行加载的模型见图2。

图2 t 时刻纸张的运动模型Fig.2 Kinematic model of paper at any time t

纸张在纸道以外的部分受分布力作用, 包括重力和内力, 忽略静电引力等其他分布力的作用。由于纸张的轻质柔性特性, 纸张在纸道以外的部分会发生较大变形, 所以为非线性问题。简化纸张在纸道出口处的模型为悬臂梁, 纸张不可伸缩, 即在梁的中性轴方向无应力。 s 为纸张上任意点, $s=0$ 为纸张坐标原点, 即在纸张的尾端, $s=L$ 为纸张最前端, L 为纸张长度, $s=c$ 为纸道出口处。 xy 坐标系由纸张原始位置确定, 纸道出口处为坐标原点, 沿纸张前进方向为 x 正方向, 出口角度为, 纸张上任意点 s 的切线方向与 x 轴夹角为 φ , 顺时针方向为正。由于纸张的不可延伸性, 纸道外纸张上的任意点在任意时刻都可以用建立的 xy 坐标系描述。

$$x(s) = \int_c^s \cos(\varphi(\bar{s})) d\bar{s}, \quad x(s, t) \quad (1)$$

$$y(s) = \int_c^s \sin(\varphi(\bar{s})) d\bar{s}, \quad y(s, t) \quad (2)$$

s 点的曲率和曲率半径为:

$$k(s) = \frac{\partial \varphi}{\partial s} \quad (3)$$

$$r(s) = \frac{1}{k(s)} \quad (4)$$

任意 t 时刻纸张的边界条件:

$$\varphi_c = 0 \quad (\text{出口处纸张的曲率为} 0) \quad (5)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial s}(L) = k_0 \quad (\text{在纸张最前端} s=L \text{ 处的曲率为初始曲率}) \quad (6)$$

纸张模型为柔性悬臂梁,根据柔性杆原理^[8],由剪切力平衡推导得到:

$$D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = V_x(s) \sin \varphi - V_y(s) \cos \varphi \quad (7)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (8)$$

$$V_x = \int_s^L f_x(\bar{s}) d\bar{s} \quad (9)$$

$$V_y = \int_s^L f_y(\bar{s}) d\bar{s} \quad (10)$$

式中: D 为抗弯刚度; V_x 为 x 方向的剪切力; V_y 为 y 方向的剪切力。

纸张在只受重力的情况下,内力分布函数为:

$$f_x = mg \sin \alpha - mx'' \quad (11)$$

$$f_y = mg \cos \alpha - my'' \quad (12)$$

式中: x'' , y'' 为纸张上任意点 s 的加速度。

将式(11)和(12)代入式(7),有:

$$D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = \sin \varphi \int_s^L (mg \sin \alpha - mx'') d\bar{s} - \cos \varphi \int_s^L (mg \cos \alpha - my'') d\bar{s} \quad (13)$$

为简化运动方程中的积分,定义形变势为:

$$u = \int_s^L x(\bar{s}) d\bar{s} \quad (14)$$

$$v = \int_s^L y(\bar{s}) d\bar{s} \quad (15)$$

分别联立式(1)和(14)及式(2)和(15),得到:

$$u = \int_s^L \int_c^{\bar{s}} \cos \varphi d\bar{s} d\bar{s} \quad (16)$$

$$v = \int_s^L \int_c^{\bar{s}} \sin \varphi d\bar{s} d\bar{s} \quad (17)$$

边界条件为:

$$u(L) = 0, \quad v(L) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial s}(c) = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial s}(c) = 0 \quad (19)$$

将形变势函数 u, v 对 s 求二阶偏导数,有:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = -\cos \varphi \quad (20)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial s^2} = -\sin \varphi \quad (21)$$

则:

$$u'' = \int_s^L x'' d\bar{s} \quad (22)$$

$$v'' = \int_s^L y'' d\bar{s} \quad (23)$$

将式(22)和(23)代入式(13),得到:

$$D \frac{\partial^2 \varphi}{\partial s^2} = mg(L-s)(\sin \varphi \sin \alpha - \cos \varphi \cos \alpha) - mu'' \sin \varphi + mv'' \cos \varphi \quad (24)$$

方程(20)、(21)和(24)构成关于 φ, u, v 在任意时刻 t 的3个偏微分方程,(18)和(19)、(5)和(6)为边界条件,由此可以求得纸张在任意时刻的弯曲变形。

2 纸张运动的数值求解

纸张在一定速度下运动,在任意时刻的变形是不同的,假设在非常小的时间段内纸张的变形很小,使用有限差分法进行数值计算,将纸张运动变形在时间上进行离散化,在某一时刻将纸张在空间上进行离散化。

将纸张离散成空间点,用离散的时间段描述纸张在任意时刻的位置及变形。初始条件为纸张全部在纸道内,且纸张前端在纸道出口边缘,根据运动方程计算纸张的运动,直到纸张全部滑出纸道且纸张尾端在出口边缘处,在每一个时间步纸张总有部分在纸道内,纸道内的纸张离散点与纸道出口处的值相等,计算纸道出口以外的纸张在任意时间的变形。用泰勒级数对变量进行展开,得到线性近似为:

$$\sin \varphi \approx \sin \varphi^* + (\varphi - \varphi^*)(\cos \varphi^*) \quad (25)$$

$$\cos \varphi \approx \cos \varphi^* - (\varphi - \varphi^*)(\sin \varphi^*) \quad (26)$$

$$u'' \sin \varphi \approx [u''^* + (u'' - u''^*)][\sin \varphi^* + (\varphi - \varphi^*) \cos \varphi^*] \approx -u''^* \varphi^* \cos \varphi^* + u''^* \varphi \cos \varphi^* + u'' \sin \varphi^* \quad (27)$$

$$v'' \sin \varphi \approx [v''^* + (v'' - v''^*)][\cos \varphi^* - (\varphi - \varphi^*) \sin \varphi^*] \approx v''^* \varphi^* \sin \varphi^* - v''^* \varphi \sin \varphi^* + v'' \cos \varphi^* \quad (28)$$

上标“*”表示 $t-1$ 时刻的变量值, t 时刻和 $t-1$ 时刻时间间隔很小, u 和 u^* 之间的差值很小,可以忽略二阶及以上量。

分别在空间和时间上对 u, v 进行微分计算,采用一阶中心插分对 s 求微分,采用一阶向后插分对时间 t 求微分:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial s^2} = \frac{u_{i-1,j} 2u_{i,j} + u_{i+1,j}}{\Delta s^2} \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{u_{i,j} - 2u_{i,j-1} + u_{i,j-2}}{\Delta s^2} \quad (30)$$

下标*i,j*代表空间离散和时间离散序号。

运动方程经过整理后,等号左边为未知量,等号右边为已知量。

$$u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j} - \Delta s^2 \varphi_{i,j} \sin \varphi_{i,j}^* = \Delta s^2 (-\cos \varphi_{i,j}^* - \varphi_{i,j}^* \sin \varphi_{i,j}^*) \quad (31)$$

$$v_{i-1,j} - 2v_{i,j} + v_{i+1,j} + \Delta s^2 \varphi_{i,j} \cos \varphi_{i,j}^* = \Delta s^2 (-\sin \varphi_{i,j}^* + \varphi_{i,j}^* \cos \varphi_{i,j}^*) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} & \varphi_{i-1,j} - \frac{\Delta s^2}{D} mg(L-s)(\sin \alpha \cos \varphi_{i,j}^* + \cos \alpha \sin \varphi_{i,j}^*) \varphi_{i,j} - \\ & 2\varphi_{i,j} + \frac{\Delta s^2}{D} m(u''^* \cos \varphi_{i,j}^* + v''^* \sin \varphi_{i,j}^*) \varphi_{i,j} + \varphi_{i+1,j} + \\ & \frac{\Delta s^2}{D \Delta t^2} m(\sin \varphi_{i,j}^* u_{i,j} - \cos \varphi_{i,j}^* v_{i,j}) = \frac{\Delta s^2}{D} mg(L-s) \cdot \\ & [\sin \alpha (\sin \varphi_{i,j}^* - \varphi_{i,j}^* \cos \varphi_{i,j}^*) - \cos \alpha (\cos \varphi_{i,j}^* + \varphi_{i,j}^* \sin \varphi_{i,j}^*)] + \\ & \frac{\Delta s^2}{D} m(u''^* \cos \varphi_{i,j}^* + v''^* \sin \varphi_{i,j}^*) \varphi_{i,j} + \frac{\Delta s^2}{D \Delta t^2} m[(2u_{i,j-1} - \\ & u_{i,j-2}) \sin \varphi_{i,j}^* - (2v_{i,j-1} - v_{i,j-2}) \cos \varphi_{i,j}^*] \end{aligned} \quad (33)$$

式(31)—(33)改为如下形式:

$$\mathbf{Az} = \mathbf{b} \quad (34)$$

式中,向量**b**为已知量,矩阵**A**为未知量系数,向量**z**为当前时刻未知量,即:

$$\mathbf{z} = \{u_c, v_c, u_{c+1}, \varphi_{c+1}, v_{c+1}, \dots, u_{N+1}, \varphi_{N+1}, v_{N+1}, \varphi_N\}^T \quad (35)$$

下标*c*表示为出口处的点,下标*N*表示为纸张最前端的点,在边界处 $u_N = 0, \varphi_c = 0, v_N = 0$ 。公式(31)—(33)组成3阶非对称偏微分方程组。求解程序流程见图3。

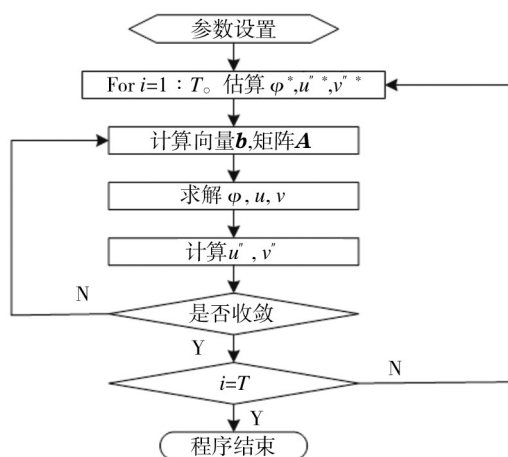


图3 数值计算程序流程

Fig.3 Flowchart of numerical calculation

3 纸张在纸道出口的动态变形分析

通过数值模拟计算,分析不同情况下纸张在出口处以外的动态变形情况。在只受重力的情况下,纸张以恒定的速度在出口角度为水平的情况下,各时刻的变形见图4。数值计算参数为:70 g/m²的A4纸张,规格为长297 mm、宽210 mm,纸张厚度为0.11 mm,恒定速度为300 mm/s,通过平幼妹^[9]的方法测得抗弯刚度为7.7058 × 10² N/mm²。

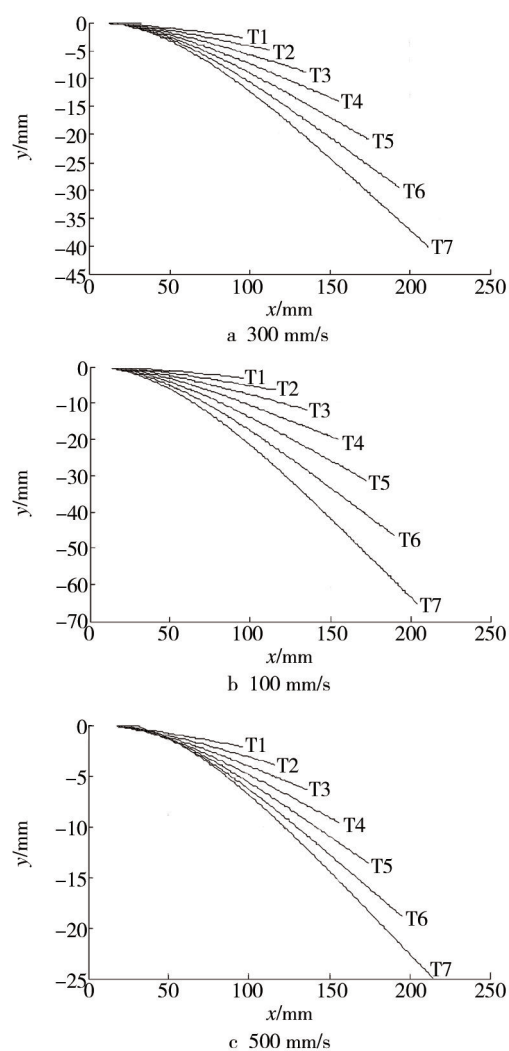


图4 纸张以不同的速度从水平纸道出来各时刻的变形

Fig.4 Deformation of paper coming out from the outlet of horizontal paper path with different speed

数值计算中,每一时间段纸张向外伸出20 mm的增量,最终伸出量为217 mm,纸张保留80 mm在纸道内。图4中的结果显示,纸张的外伸量越小,则纸张的变形越小,所以初始时刻的变形可以用线性梁理论进行近似分析,随着外伸量的增加,需要用非线性理论

进行计算。在纸张的输送过程中,纸张端部的运动状态非常关键,它将受到纸张内力以及纸张其他参数的影响。

从图4得出纸张进给速度由100 mm/s增加到500 mm/s时,纸张最大曲率由0.0058减小到0.0029,纸张的弯曲变形量随着进给速度的增加而减小。将纸张外伸217 mm时刻的各速度的变形情况进行对比,可以看出纸张进给速度的增加使纸张进给的时间缩短,即纸张弯曲下垂的时间缩短,所以纸张的弯曲程度降低。

分析纸道出口为非水平的情况下,纸张以恒定速度出来的变形情况。纸张进给速度为300 mm/s,其他参数与图4数值计算参数一致的情况下,分别设置纸道的出口角度为 $\alpha=20^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=40^\circ$,得到各角度纸张在外伸量为217 mm时刻的弯曲变形,见图5。纸张出口角度由 20° 增加到 40° 时,纸张下降高度由36.1 mm减小到28.5 mm。由图7可以看出,改变纸道的出口角度可以调整纸张端部运动位置。

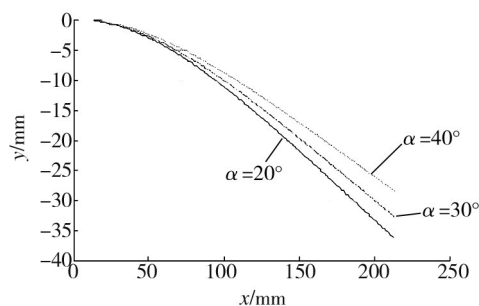


图5 纸张以300 mm/s速度不同纸道出口角度外伸217 mm时刻的变形

Fig.5 Deformation of paper with overhang of 217 mm from paper path outlet with different angles at 300 mm/s

4 结语

通过对纸张在纸道出口的无约束运动进行研究,建立了运动方程,使用数值分析方法对纸张在纸道出口的无约束运动方程进行求解分析,得到结论:纸张的弯曲变形量随着进给速度的增加而减小;调整纸道的出口角度和纸张进给速度可以改变纸张端部的运动位置,为纸张进给过程中准确到达预定位置提供了设计依据。在下一步的工作中,将通过实验验证结论的正确性。

参考文献:

[1] BENSON R C. The Deformation of a Thin, Incomplete, Elastic Ring in a Frictional Channel[J]. Journal of Applied Mechan-

ics, 1981, 48: 895—899.

- [2] ADAMS G G, BENSON R C. Postbuckling of an Elastic Plate in a Rigid Channel[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1986, 28: 153—162.
- [3] Benson R C. The Slippery Sheet[J]. ASME Journal of Tribology, 1995, 117: 47—52.
- [4] 杨胜军, 马军星. 基于小波有限元方法的复印纸张温度场仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(9): 1243—1248.
- YANG Sheng-jun, MA Jun-xing. Simulation of Temperature Field of Copier Paper Based on Wavelet Finite Element Method[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(9): 1243—1248.
- [5] 杨胜军, 陈雪峰. 纸张在复印过程中的非线性瞬态温度场分析研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(11): 1163—1166.
- YANG Sheng-jun, CHEN Xue-feng. Transient Nonlinear Temperature Field of Copier Paper in the Process of Xerox by Finite Element Method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(11): 1163—1166.
- [6] 陈雪峰, 李兵, 何正嘉, 等. 办公纸张不同有限元计算模型的研究[J]. 小型微型计算机系统, 2004, 25(1): 152—154.
- CHEN Xue-feng, LI Bing, HE Zheng-jia, et al. Study of Different Finite Element Model of Office Paper[J]. Journal of Mini-Micro System, 2004, 25(1): 152—154.
- [7] 杨胜军. 区间B-样条小波有限元理论及工程应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- YANG Sheng-jun. Theory of Finite Element of B-Spline Wavelet on the Interval and Its Engineering Application[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [8] FRISCH-FAY R. Flexible Bar[M]. Butterworths[h1] Scientific Publications, 1962
- [9] 平幼妹. 用悬臂梁的大挠度理论测定纸的抗弯刚度[J]. 天津商学院学报, 1993, 13(1): 1—7.
- PING You-mei. Measuring the Bending Stiffness of Paper by Using the Theory of Large Deflections of a Cantilever Beam[J]. Journal of Tianjin University of Commerce, 1993, 13(1): 1—7.
- [10] 钱进, 刘浩, 徐红春. 超声波双张控制器: 中国, ZL200720046355.X[P]. 2008—08—27.
- QIAN Jin, LIU Hao, XU Chun-hong. Ultrasonic Double Sheet Control: China, ZL200720046355.X[P]. 2008—08—27.
- [11] 李伟, 张海燕. 印刷设备新型纸张定位系统设计[J]. 包装工程, 2007, 28(10): 104—106.
- LI Wei, ZHANG Hai-yan. Design of New Type Sheet Positioning System for Printing Press[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(10): 104—106.
- [12] 王珏. 送纸胶辊用橡胶材料的开发[J]. 世界橡胶工业, 2006, 33(12): 24—28.

(下转第134页)

参考文献:

- [1] ROGERS G. A Generalized Clapper-Yule Model of Halftone Reflectance[J]. Color Res Appl, 2000, 25: 402—407.
- [2] 臧冬娟, 张逸新, 刘春林. Clapper-Yule 光谱预测模型[J]. 包装工程, 2007, 28(4): 51—53.
ZANG Dong-juan, ZHANG Yi-xin, LIU Chun-lin. Clapper-Yule Prediction Model[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(4): 51—53.
- [3] 王麒, 张逸新. 商标印刷色彩预测 Clapper-Yule 模型[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 131—134.
WANG Qi, ZHANG Yi-xin. Clapper-Yule Model for Color Prediction in Logo Printing[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 131—134.
- [4] CLAPPER F R, YULE J A C. Effect of Multiple Internal Reflections on the Densities of Halftone Prints on Paper[J]. Opt Soc Am, 1953, 43: 600—603.
- [5] HBERT M, HERSCH R D. Extending the Clapper-Yule Model to Rough Printing Supports[J]. Opt Soc Am, 2005, 22: 1952—1967.
- [6] HERSCH R D. Spectral Prediction Model for Color Prints on Paper with Fluorescent Additives[J]. Appl Opt, 2008, 47: 6711—6722.
- [7] HERSCH R D, EMMEL P, COLLAUD F. Spectral Reflection and Dot Surface Prediction Models for Color Halftone Prints[J]. Electron Imaging, 2005, 14: 033001.
- [8] 杜艳君, 张逸新. 经典色彩呈色模型[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 99—101.
DU Yan-jun, ZHANG Yi-xin. The Classical Prediction Model of Color Halftone Prints[J]. Packaging Engineering, 2006, 27(2): 99—101.
- [9] 田东文, 张逸新, 王庆娟. 双面半色调图像的光谱反射率色彩精确预测模型[J]. 光子学报, 2010, 39(11): 1982—1987.
TIAN Dong-wen, ZHANG Yi-xin, WANG Qing-juan. Color Precise Prediction Model of Spectral Reflectance for Recto-verso Halftone Images[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 1982—1987.
- [10] HERSCH R D, BRICHON M, BUGNON T, et al. Riepenhoff, Deducing Ink Thickness Variations by a Spectral Prediction Model[J]. Color Res Appl, 2009(34): 432—442.
- [11] HBERT M, HERSCH R D. Analyzing Halftone Dot Blurring by Extended Spectral Prediction Models[J]. J Opt Soc Am A, 2010, 27: 6—12.
- [12] 王庆娟, 张逸新, 等. 基于荧光基 Clapper-Yule 光谱模型的墨层厚度变化预测[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 90—93.
WANG Qing-juan, ZHANG Yi-xin, et al. Prediction of Ink Thickness Variation Based on Fluorescent Clapper-Yule Spectral Model[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 90—93.
- [13] 王琪, 周小凡. 基于网点结构形态的印刷色彩再现研究[J]. 包装工程, 2012, 33(23): 109—113.
WANG Qi, ZHOU Xiao-fan. Research of Printing Color Reproduction Based on Dot Structure Form[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(23): 109—113.
- [14] 梁金星, 李聪, 陈聪梅, 等. 基于颜色分割的印版网点面积率测量方法[J]. 包装学报, 2015, 7(1): 61—65.
LIANG Jin-xing, LI Chong, CHEN Chong-mei, et al. Dot Area Coverage Percentage Measurement Method for Plate Based on Color Segmentation[J]. Packaging Journal, 2015, 7(1): 61—65.
- [15] 徐咏驰, 周世生, 徐锦林. 分程 Clapper-Yule 模型中分程系数与波长的关系[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(5): 677—681.
XU Yong-chi, ZHOU Shi-sheng, XU Jin-lin. The Relationship between the Propagation Distance Coefficient and the Wavelength in the Long and Short Distance Clapper-Yule Model[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(5): 677—681.
- [16] 孟婕. 印刷中颜色预测模型的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
MENG Jie. Prediction Model of Printing Color[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.

(上接第 120 页)

- WANG Yue. The Development of Rubber Material in Paper Feeding[J]. World Rubber industry, 2006, 33(12): 24—28.
- [13] 王冰, 王兆伍. 纸张在弹性胶辊夹持下接触区域的数值分析[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 13—17.
WANG Bing, WANG Zhao-wu. Numerical Analysis of Paper Nipped in Rubber Rollers[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 13—17.
- [14] 李航, 袁英才, 张阳. 裱纸机压合部纸张受力分析及辊子分布的优化设计[J]. 包装工程, 2007, 28(12): 74—76.
LI Hang, YUAN Ying-cai, ZHANG Yang. Force Analysis of Pressing Part Paper Laminator and Optimum Design of Roller [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(12): 74—76.
- [15] TIMOSHENKO S P, GOODIER N. Theory of Elasticity[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
TIMOSHENKO S P, N. Goodier N. Theory of Elasticity[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [16] 宋钊. 纸板厚度方向的力学模型建立[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 52—55.
SONG Zhao. Establishment of Mechanical Model in the Thickness Direction of Paperboard Materials[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 52—55.