

机械与过程控制

一种利用重叠分离机制进行纸张分离的变形力研究

柴德望¹, 丁千¹, 张泉²

(1.天津大学 力学系, 天津 300350; 2.恒银金融科技股份有限公司博士后科研工作站, 天津 300308)

摘要:目的 研究纸张在重叠分离送纸机构中所受变形力的特点,为纸张运动摩擦分析提供依据。方法 首先推导公式得出纸张正常分离条件,把纸张作为弹性梁模型,利用 Clapeyron 三弯矩定理分析纸张表面的变形力。结果 纸张在重叠区域变形力正比于交叠量;剥离轮的宽度越大,变形力越大;变形力随着剥离轮与送钞轮的左边距的增加先减小后增大;送钞轮宽度对变形力的影响不大。结论 通过对弹性梁模型的分析,获得了纸张在重叠区域变形力随结构参数变化的影响规律,并得到了能使纸张受力均衡的剥离轮和送钞轮的左边距值,为重叠机构的设计提供参考。

关键词:重叠分离机构;弹性梁模型;三弯矩定理;变形力

中图分类号: TS206 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)21-0139-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.025

Deformation Force of Paper Sheet Separated by the Overlap Separation Mechanism

CHAI De-wang¹, DING Qian¹, ZHANG Quan²

(1.Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2.Post-doctoral Research Station, Cashway Fintech Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

ABSTRACT: The work aims to study the deformation force features of the paper sheet which is passing through the overlap separation mechanism to provide basis for its kinetic friction analysis. Firstly, the formula was derived to obtain the normal separation condition of paper sheet. Then, with the paper sheet as the elastic beam model, the deformation force acting on the paper sheet surfaces was analyzed with the Clapeyron's theorem of three moments. The results showed that the deformation force of paper sheet in the overlap area was proportional to the overlap. The wider the gate-roller was, the greater the deformation force was. The deformation force decreased and then increased with the increase of the edge distance of the gate-roller and feed-roller at the left side. The width of the feed-roller had hardly any effect on the deformation force. Based on the analysis of elastic beam model, the law of influence of paper sheet's deformation force in the overlap area changing with the structural parameters is obtained and the values of the edge distance of the gate-roller and feed-roller at the left side are acquired to provide reference for the design of overlap mechanism.

KEY WORDS: overlap separation mechanism; elastic beam model; theorem of three moments; deformation force

很多现代日常设备包含媒介传输系统,如复印机、打印机、ATM 机等。卡纸和重张是办公设备使用过程中的常见故障,直接影响办公设备的工作效率和质量。研究表明,引起卡纸的主要原因是送纸机构设计不合理。在 ATM 机中,重叠分离机构用于纸张的快速准确分离,是设备运行的重要步骤。当纸张进入重叠夹缝,变形力和摩擦力作用在纸张接触表面使其分离,但由于摩擦条件的变化和纸张处于不同的情形(折角、缺角、褶皱等),传送失效和重张的现象

在分离设备中时有发生^[1-2]。在设计分离机构时,常采用数值计算方法来分析纸张受力行为,获得相关参数的影响规律,提高可靠性。

在对纸张的分析中,一些学者把纸张简化为弹性梁模型,分析纸张的变形和摩擦力^[1,3]。另一些学者^[4-6]把纸张简化成弹簧-梁-质量块模型,分析卷曲变形、纸张堆叠、卡纸停转等行为。陈雪峰^[7]用不同的有限元法分析了纸张的静态特性,结果表明等参元模型比板壳元模型计算量少、精度高。鲍照等^[8]推导

收稿日期: 2018-07-19

作者简介: 柴德望(1984—),男,博士,主要研究方向为摩擦分析、非线性动力学。

通信作者: 丁千(1963—),男,博士,天津大学教授,主要研究方向为非线性动力学、振动与控制。

了纸张运动方程，并利用 Recurdyn 软件分析送纸机构，分析卡纸现象及影响因素。一些学者^[9-12]对运动纸张受到的库伦摩擦力进行了修正，并进行数值模拟，讨论了相关参数的影响。这些分析方法都能为结构设计提供参考，但鲜有对重叠机构各支点的受力和稳定性进行分析。

1 重叠摩擦分离的结构

纸张存储形式可以是水平形式或垂直形式^[13]。竖直存储时的重叠分离机构见图 1，包括 3 组轮（挖钞轮、送钞轮、剥离轮）和推板。送钞轮和剥离轮在轴

向排列上有偏移，在径向方向上有重叠。当推板移动时，压力首先产生于固定挖钞轮机构的弹簧。托板与重叠机构的竖向距离为一个挖钞冲程 h_0 ，挖钞轮高摩擦区部分 A 的弧长大于挖钞冲程，使得钞票受摩擦力的作用能够顺利到达重叠分离机构。当高摩擦部分 A 接触第一张纸的时候，纸张开始通过挖钞轮和送钞轮的旋转陆续被带出，一旦纸张进入重叠夹缝，就会产生波变形，产生变形力。在夹缝区纸张的有效变形宽度为 b 。在挖钞轮和送钞轮的传输力与固定的剥离轮的抵抗力的同时作用下，实现纸张间的分离。

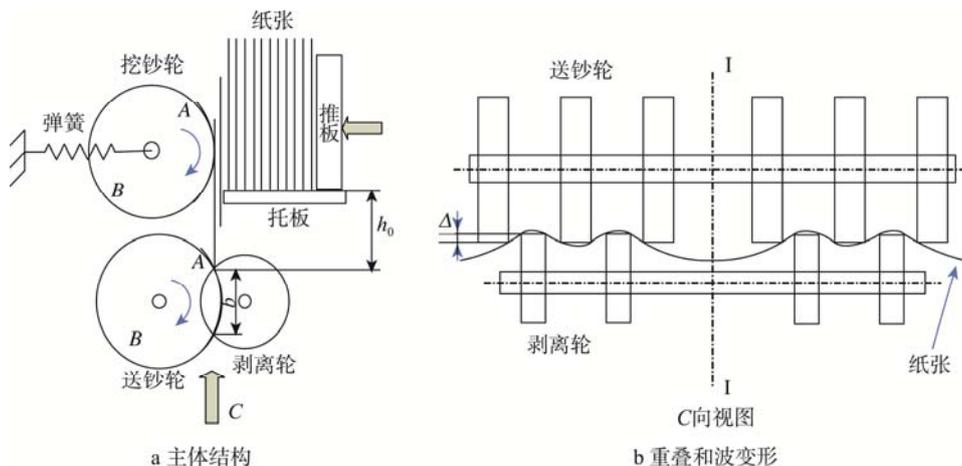


图 1 分离机理
Fig.1 Separation mechanism

2 正常分离的条件

一旦纸张进入重叠区域，可应用库仑摩擦定律来获得摩擦力。纸张受力分析见图 2。当仅有 1 张纸进入重叠夹缝区时，正常的传输条件是传输力大于抵抗力，可用方程 (1) 描述；当 2 张纸同时进入夹缝区时，第 1 张纸的传输力大于抵抗力，第 2 张纸刚好相反，正常分离条件可表示为方程 (2) 和方程 (3)^[1]。

$$W\mu_{fs} + W_p\mu_{ps} - W\mu_{gs1} - W_p\mu_{s1s2} \geq 0 \quad (1)$$

$$W\mu_{fs} + W_p\mu_{ps} - W\mu_{s1s2} - W_p\mu_{s1s2} \geq 0 \quad (2)$$

$$W\mu_{s1s2} + W\mu_{gs2} + W_p\mu_{s1s2} - W_p\mu_{s2s3} \leq 0 \quad (3)$$

式中：下标 f, g, p 分别为送钞轮，剥离轮和挖钞轮， s 为纸； μ 为摩擦因数；1—3 为第 1 张到第 3 张纸。

通常存在以下关系： $\mu_{gs} > \mu_{fs} > \mu_{s1s2}$ ， $\mu_{gs1} = \mu_{gs2} = \mu_{gs}$ ，因此，仅考虑方程 (1)，忽略方程 (2)。最终，正常分离条件见式 (4)^[1]。

$$\frac{\mu_{s1s2} - \mu_{s2s3}}{\mu_{gs} - \mu_{s1s2}} \leq \frac{W}{W_p} \leq \frac{\mu_{ps} - \mu_{s1s2}}{\mu_{gs} - \mu_{fs}} \quad (4)$$

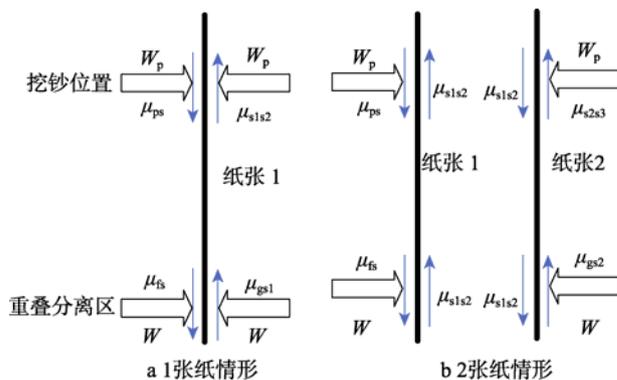


图 2 分离力分析
Fig.2 Analysis of separation forces

利用方程 (4)，可以讨论传送失效和重张的送纸缺陷。当摩擦因数变大或者变小，方程 (4) 的后半部分或者前半部分不满足，因此会发生传送失效或者重张。下面讨论变形力的计算。

3 重叠夹缝区的变形力计算

在正常分离条件中，变形力的值是关键因素。文中用简单的弹性梁模型来预估夹缝中变形力值。根据

对称性，考虑到中间送钞轮的间隙比较大，只关注左半部分。为了更易获得变形力，将模型颠倒，把纸张看成是连续的弹性梁，并被 3 个送钞轮支撑于点 1—4；而位于上方的剥离轮施加压力于点 5—8，与送钞轮的重叠量为 Δ ；纸张受到送钞轮的接触反力 R_1 到 R_4 ，受到剥离轮的压力 W_1 到 W_4 ，因而总的变形力为：

$$W = 2 \sum_{i=1}^4 W_i = 2 \sum_{i=1}^4 R_i \quad (5)$$

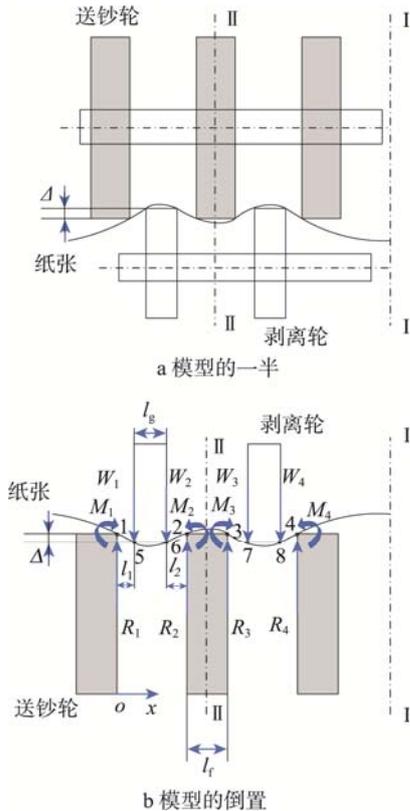


图 3 重叠夹持的变形力

Fig.3 Deformation force in the overlap nip

图 3 中， l_f, l_g 为送钞轮和剥离轮的宽度； l_1, l_2 为剥离轮和送钞轮的边距； $M_1—M_4$ 分别为点 1 到点 4 的弯矩。考虑到对称性，有以下的关系：

$$W_1 = W_4, W_2 = W_3 \quad (6)$$

$$R_1 = R_4, R_2 = R_3 \quad (7)$$

$$M_1 = M_4, M_2 = M_3 \quad (8)$$

利用 Clapeyron 三弯矩定理^[14]计算施加力、节点弯矩、倾角和跨度之间的关系。在点 1—2 和点 2—3 的 2 个跨度中，存在以下关系：

$$M_1(l_1 + l_2 + l_g) + 2M_2(l_1 + l_2 + l_g + l_f) + M_3l_f = -6EI(\theta_2 + \theta_3) \quad (9)$$

式中： θ_2 和 θ_3 为当集中力分别作用在点 1—2 跨度或者点 2—3 跨度时在点 2 处产生的倾角； EI 为纸张的弯曲刚度（ E 为弹性模量， I 为纸张的几何惯性矩）。

下面分析点 1 到点 4 的弯矩和点 2 处的倾角 θ_2 和 θ_3 。由于在点 2—3 跨度没有力施加，于是得到：

$$\theta_3 = 0 \quad (10)$$

由于点 1 和点 4 处没有约束，则有：

$$M_1 = M_4 = 0 \quad (11)$$

最终，式（9）可被简化为：

$$M_2(2l_1 + 2l_2 + 2l_g + 3l_f) = -6EI\theta_2 \quad (12)$$

只考虑集中力 W_1 和 W_2 作用在点 1—2 的跨度上，可以求得倾角 θ_2 ：

$$\theta_2 = \theta_{w_1} + \theta_{w_2} = -\frac{1}{6EI(l_1 + l_2 + l_g)} [W_1(2l_1 + l_2 + l_g)l_1(l_2 + l_g) + W_2(2l_1 + l_2 + 2l_g)l_2(l_1 + l_g)] \quad (13)$$

联立方程（12）和（13）获得：

$$M_2 = -\frac{1}{(l_1 + l_2 + l_g)(2l_1 + 2l_2 + 2l_g + 3l_f)} [W_1(2l_1 + l_2 + l_g)l_1(l_2 + l_g) + W_2(2l_1 + l_2 + 2l_g)l_2(l_1 + l_g)] \quad (14)$$

再者，在点 1 到点 2 的跨度上，点 5 和点 6 处的偏移量可由力 W_1, W_2 和弯矩 M_2 分别作用引起挠度的叠加来获得。根据实际中钞票与滚轮的位置关系，令点 5 和点 6 的偏移量与重叠量 Δ 相等，得到下面的方程：

$$\delta_{x=l_1}(\text{point 5}) = (\delta_{w_1} + \delta_{w_2} + \delta_{M_2})|_{x=l_1} = \Delta \quad (15)$$

$$\delta'_{x=l_1+l_g}(\text{point 6}) = (\delta'_{w_1} + \delta'_{w_2} + \delta'_{M_2})|_{x=l_1+l_g} = \Delta \quad (16)$$

式中： X 为施加载荷点在轴向上离点 1 的距离； $\delta_{w_1}, \delta_{w_2}, \delta_{w_3}$ 分别为力 W_1, W_2 和弯矩 M_2 在点 5 处引起的偏移； $\delta'_{w_1}, \delta'_{w_2}, \delta'_{w_3}$ 分别为力 W_1, W_2 和弯矩 M_2 在点 6 处引起的偏移。可分别求得：

$$\delta_{w_1}|_{x=l_1} = \frac{W_1(l_2 + l_g)^2 l_1^2}{3EI(l_1 + l_g + l_2)} \quad (17)$$

$$\delta_{w_2}|_{x=l_1} = \frac{W_2 l_1 l_2}{6EI(l_1 + l_g + l_2)} [2l_1 l_2 + l_g^2 + 2l_g(l_1 + l_2)] \quad (18)$$

$$\delta_{M_2}|_{x=l_1} = \frac{M_2 l_1}{6EI(l_1 + l_g + l_2)} [(l_2 + l_g)^2 + 2l_1(l_2 + l_g)] \quad (19)$$

$$\delta'_{w_1}|_{x=l_1+l_g} = \frac{W_1 l_1 l_2}{6EI(l_1 + l_g + l_2)} [2l_1 l_2 + l_g^2 + 2l_g(l_1 + l_2)] \quad (20)$$

$$\delta'_{w_2}|_{x=l_1+l_g} = \frac{W_2 l_2^2 (l_1 + l_g)^2}{3EI(l_1 + l_g + l_2)} \quad (21)$$

$$\delta'_{M_2}|_{x=l_1+l_g} = \frac{M_2 (l_1 + l_g)}{6EI(l_1 + l_g + l_2)} [2l_2(l_1 + l_g) + l_2^2] \quad (22)$$

将式（17—22）代入到式（15—16），并与式（14）联立成方程组，可以求得 W_1, W_2 和弯矩 M_2 。再代入式（5）可求出变形力 W 。

为了验证模型的正确性，当 $l_1 = l_2 = l$ 时，以文献

[1]中的模型为参数, 计算得到的结果与文献[1]对比见图4, 可以看出结果具有很好的一致性, 可以应用到后面的模型计算中。

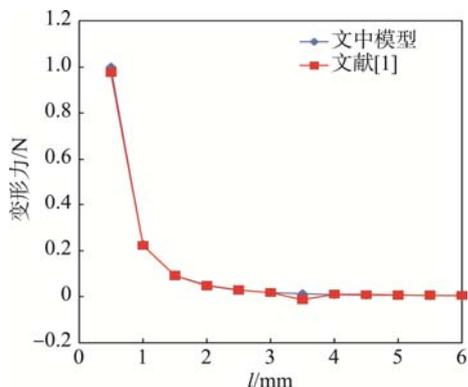


图4 与文献[1]模型对比的结果
Fig.4 Results of contrast with the model in literature [1]

4 主要结构参数的影响

参考图3b, 重叠机构的主要参数为 $l_1=1.24$ mm, $l_2=1.08$ mm, $l_g=3.88$ mm, $l_f=2.2$ mm, $\Delta=0.525$ mm; 纸币的参数: 纸币长度 $l=155$ mm, 宽度 $b_s=55$ mm, 厚度 $d=0.1$ mm, 有效变形宽度 $b=6$ mm, 弹性模量 $E=2250$ N/mm²。

若 l_g 和 l_f 的值固定, 即固定了送钞轮和剥离轮的宽度; 若送钞轮的轮间距固定, 则 $l_1+l_2=2.32$ mm 的值为定值。下面分析 W_1 , W_2 和变形力 W 随着 l_1 变化的情况。

由计算结果图5可以看出, 随着 l_1 的增加, W_1 单调减少, W_2 单调增加, 而变形力 W 先减小后增大。当 l_1 值大约为 1.24 mm 时, W_1 , W_2 的值相等, 即剥离轮的两端与纸币的竖向压力相等, 此时的变形力也是最小。根据文献[15], 当纸币在行进时如果受到轮的压力不相等, 会导致摩擦力不一致并引起纸币偏斜, 因此剥离轮与纸币的接触点压力相等的话, 会减小纸币偏斜的发生。此时剥离轮的最佳位置应为1点与2点跨度的中间位置偏右。后面取最优值 $l_1=1.24$ mm 及 $l_2=1.08$ mm 进行参数计算分析。

当送钞轮的有效接触宽度 l_f 变化时, W_1 , W_2 和 W 的变化趋势见图6。可以看出, 随着 l_f 的变化, W_1 , W_2 和 W 的值几乎不变, 因此 l_f 对变形力的影响可以忽略不计。

当剥离轮宽度 l_g 变化时, W_1 , W_2 和 W 的变化趋势见图7。可以看出, 随着 l_g 的增加, W_1 , W_2 和 W 的值单调增加, 也就是说, 若送钞轮的间距固定, 剥离轮越宽, 相应的与送钞轮的间距 l_1 , l_2 就变小, 导致压力值增加。

当交叠量 Δ 变化时, W_1 , W_2 和 W 的变化趋势见图8。可以看出, 随着交叠量 Δ 的增加, W_1 , W_2 和 W

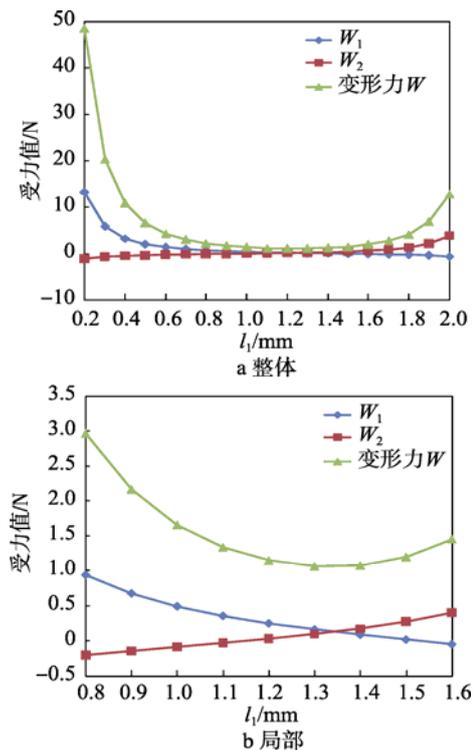


图5 W_1 , W_2 和 W 的值随 l_1 的变化情况
Fig.5 W_1 , W_2 and W changing with l_1

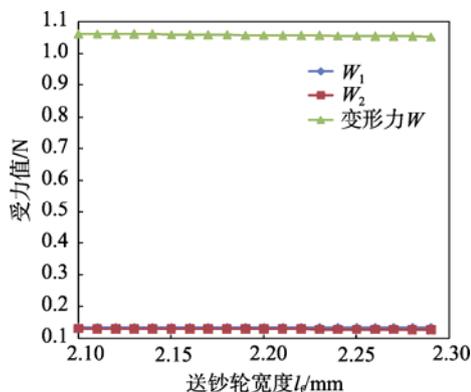


图6 W_1 , W_2 和 W 的值随 l_f 的变化情况
Fig.6 W_1 , W_2 and W changing with l_f

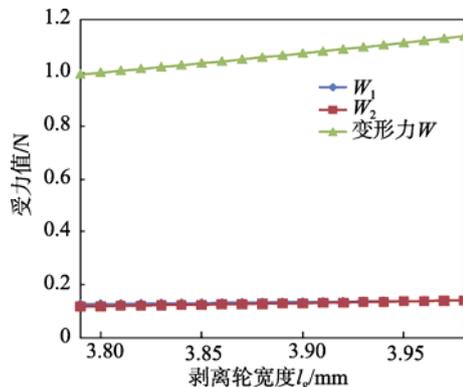


图7 W_1 , W_2 和 W 的值随 l_g 的变化情况
Fig.7 W_1 , W_2 and W changing with l_g

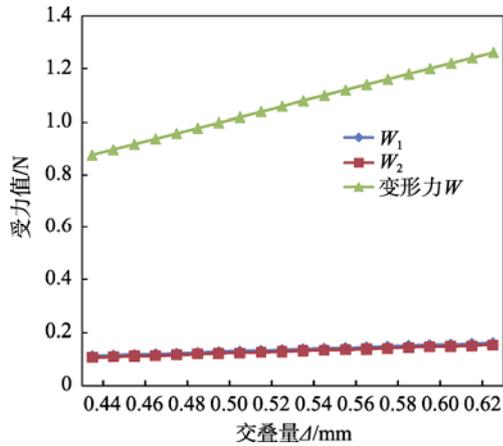


图 8 W_1 , W_2 和 W 的值随 Δ 的变化情况
Fig.8 W_1 , W_2 and W changing with Δ

的值单调增加,但并不是越大越好。因为在交叠夹持之前,纸币受挖钞轮的作用向下运动基本是平的,进入重叠区域发生波形弯曲,若交叠量过大会增加纸币进入交叠量的难度。

5 结语

利用弹性梁模型分析了在重叠分离机构中纸张的变形力,得出变形力与重叠分离机构主要参数的关系,即变形力正比于交叠量与剥离轮宽度,送钞轮有效接触宽度对变形力的影响甚微,随着剥离轮与送钞轮左边距的增加,变形力先减小后增加。为了纸张受力均衡使得传输更加平稳,剥离轮与送钞轮的左边距值 l_1 要略大于右边距 l_2 。可为重叠机构的设计提供参考。

参考文献:

- [1] CHENG H, IKEDA H, YOSHIDA K. Numerical Analysis on Paper Sheet Separation Using the Overlap Separation Mechanism[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2010, 4(1): 249—256.
- [2] KIM H, LEE J. Parameter Analysis and Optimization of Paper Feeding Devices to Minimize Jamming and Simultaneous Feeding of Multiple Pages[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2011, 225(11): 2673—2684.
- [3] YOON Y K, KAEK Y K, YOON J H. Analysis of Double Feeding on the Notes Separation Mechanism[C]// ASME 15th Annual Information Storage and Processing Systems Conference, Extended Abstract, 2005.
- [4] YOSHIDA K, HAGIWARA N, AIDA M. Sheet Stick and Jamming Caused by Creasing and Curling[J]. Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1995, 61(590): 3945—3951.
- [5] YOSHIDA K. Dynamic Analysis of Sheet Deformation Using Spring-Mass-Beam Model[J]. Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, 1997, 63(615): 475—481.
- [6] URAOKA A, RAHN C D. Simulation of a Sheet-Handling Machine[J]. Communications in Non-linear Science and Numerical Simulation, 2009, 14: 1617—1626.
- [7] 陈雪峰, 李兵, 何正嘉. 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. Study of Different Finite Element Model of Office Paper[J]. Mini-Micro Systems, 2004, 25(1): 152—154.
- [8] 鲍照, 郑百林, 张锴, 等. 送纸机构纸张控制方程及卡纸现象数值分析[J]. 力学季刊, 2015, 36(2): 307—315.
BAO Zhao, ZHENG Bai-lin, ZHANG Kai, et al. Governing Equation of Paper Control and Numerical Analysis of Paper Jam[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(2): 307—315.
- [9] 许天河. 走纸机构之动态分析与测量[D]. 台湾: 国立清华大学, 2001.
XU Tian-he. Dynamic Analysis and Measurement of Paper Feeding Mechanism[D]. Taiwan: National Tsing Hua University, 2001.
- [10] 凌杰, 王兆伍, 范贤军. 复印机送纸机构的动态仿真与分析[J]. 机械制造与自动化, 2009(5): 108—110.
LING Jie, WANG Zhao-wu, FAN Xian-jun. Dynamic Simulation and Analysis of Paper Feeding Mechanism of Copiers[J]. Journal of Mechanical Manufacturing and Automation, 2009(5): 108—110.
- [11] 王冰, 王兆伍. 复印机摩擦力分离进纸的数值模拟[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2010, 24(3): 96—99.
WANG Bing, WANG Zhao-wu. Numerical Simulation for Friction Separation of Paper Feed in Copier[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2010, 24(3): 96—99.
- [12] 范先虎. ATM 挖钞机构动力学仿真分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
FAN Xian-hu. Dynamic Simulation and Analysis on Picking Bill Mechanism of ATM[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [13] MIDDLETON D E S, COWPLAND W. The Friction of Currency Bills[J]. Wear, 1996, 193: 126—131.
- [14] 王世斌, 亢一澜. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
WANG Shi-bin, KANG Yi-lan. Strength of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [15] SHIGEO Y, TETSUYA M. Skew Simulation of a Paper Transferred by Rubber Rollers in Printers[J]. Microsystem Technologies, 2007, 13: 959—964.