

丝网印版变形对印刷位置精度的建模及分析

肖港贤¹, 何邦贵¹, 陶鑫¹, 夏家良², 王琪²

(1.昆明理工大学 机电工程学院, 昆明 650000; 2.云南九九彩印有限公司, 昆明 650000)

摘要: **目的** 研究丝网印版变形对印刷位置精度的影响, 建立关于丝网印版变形的理论计算模型和有限元模型。**方法** 根据实际调研, 构建丝网印版三维模型, 分析丝网印版可能的变形及其对印刷位置精度的影响, 建立关于网距、图文位置、预张力等参数的理论计算模型; 将丝网印版合理简化后, 构建有限元模型并计算分析。**结果** 随网距的增大, x 、 y 2 个方向上的位置误差均增大, 且增大趋势近似二次曲线; 图文位置对 x 向位置误差的影响趋势近似三次曲线, 但与 y 向位置误差之间存在线性正相关关系, 在丝网印版中心位置处的误差接近于 0; 预张力与位置误差之间存在线性负相关关系。**结论** 丝网印版变形的理论计算模型与有限元模型的分析计算结果基本吻合, 该模型能较好地预测各参数对位置精度的影响, 为控制印刷位置精度的参数选择提供了指导。

关键词: 位置精度; 网距; 图文位置; 预张力; 有限元分析

中图分类号: TS871.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)07-0204-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.07.023

Modeling and Analysis of Screen Printing Plate Deformation on Printing Position Accuracy

XIAO Gang-xian¹, HE Bang-gui¹, TAO Xin¹, XIA Jia-liang², WANG Qi²

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650000, China; 2. Yunnan Jiujiu Color Printing Co., Ltd., Kunming 650000, China)

ABSTRACT: The work aims to establish a theoretical calculation model and a finite element model of screen printing plate deformation to study the effects of screen printing plate deformation on printing position accuracy. Based on the actual investigation, a three-dimensional model of screen printing plates was constructed. The possible deformation of screen printing plates and its effects on the accuracy of printing position was analyzed. A theoretical calculation model of screen distance, graphic position, pretension and other parameters was established. After the screen printing plate was reasonably simplified, a finite element model was constructed and calculated and analyzed. The results showed that the position error in both x and y directions increased with the increase of network distance, and the increasing trend was similar to the quadratic curve. The effect trend of graphic position on x -direction position error was similar to cubic curve, but there was a linear positive correlation with y -direction position error, and the position error in the center of screen printing plate was close to zero. There was a linear negative correlation between pretension and position error. The research shows that the theoretical calculation model of screen printing plate deformation is basically consistent with the finite element model. The model can better predict the effects of various parameters on position accuracy and guide the selection of parameters according to the printing position accuracy.

KEY WORDS: position accuracy; network distance; graphic position; pretension; finite element analysis

收稿日期: 2022-04-26

基金项目: 云南省科技计划 (202104AR040018); 云南九九彩印有限公司合作项目 (649320200029)

作者简介: 肖港贤 (1997—), 男, 硕士生, 主攻数字化设计与制造。

通信作者: 何邦贵 (1963—), 男, 教授, 主要研究方向为机械创新设计与制造、包装印刷新材料等。

丝网印刷指利用丝网印版上仅有图文部分网孔能透过油墨这一原理来进行印刷的一种印刷方法, 丝网印版是其中的关键部件^[1]。丝网印刷具有承印物广泛、版面柔软、印刷压力小、墨层覆盖力强、立体感强等优点, 在烟标印刷、电子印刷等行业中具有不可替代的优势^[2]。在印刷品质量评价体系中, 印刷位置精度是评价印刷品质量是否合格的重要指标之一, 尤其烟标印刷及电子印刷行业对印刷品图文位置精度有更高的要求。位置精度过低会直接导致印刷品质量降低, 甚至报废^[3], 因此, 建立丝网印刷变形对位置精度影响的模型能够指导丝网印刷参数的确定, 以确保印刷品位置精度达标, 从而提高丝网印刷产品的质量, 其分析结果具有较好的实际意义。

丝网印刷作为现代四大印刷方法之一, 对其印刷原理及印刷质量影响因素研究已经较为成熟, 也有较多的研究者分析过丝网印刷质量的影响因素。Owczarek 等^[4-5]通过理论分析与实验验证建立了包括丝网目数、刮刀速度、网距等数 10 个参数的丝网印刷过程的多参数模型, 该模型描述了刮印时印刷浆料的流动模式; 沈钰等^[6]将丝网等效为连续介质的薄膜并进行张力仿真计算, 建立了丝网与张力计耦合的力学状态模型, 并通过实验的方法进行验证分析; 刘富^[7]将 TRIZ 流分析方法应用于丝网印版模型, 对丝网印刷系统组件进行功能属性和参数流分析, 得出了解决丝网印刷中矛盾问题的概念模型; 刘世朴等^[8]构建了丝网印刷中油墨转移的理论分析模型, 应用流体动力学原理对油墨转移过程中油墨转移速度与压强参数之间的函数关系进行研究, 分析了油墨转移率的影响参数, 并对分析结果进行仿真验证; 田野等^[9]针对丝网印刷中刮刀角度、刮刀速度、网距、刮印压力这 4 个参数设计正交试验, 得出各参数对印刷线条表面粗糙度和宽度的影响, 分析出丝网印刷的最优工艺条件; 李婧伟^[10]从理论上对影响丝网印刷位置精度的因素进行了定性分析, 得出了丝网变形与印刷位置精度之间的理论关系, 并预测了网框变形对位置精度的影响。

综上所述, 关于丝网印刷油墨转移的理论研究及实验研究已经较为成熟, 在丝网印刷中变形对印刷位置精度的影响也有一定的基础研究, 但是已有研究均只是从理论上分析了可能对位置精度产生影响的因素, 并未进行深入分析, 未能进行仿真验证或者实验验证, 且未能将丝网变形与网框变形对位置精度的影响综合起来分析。本文将首先从理论上分析变形对位置精度的影响, 然后建立有限元模型, 通过有限元模型与理论模型相互验证的方法验证两者的正确性。本研究旨在建立模型, 该模型能够较精确地预测给定预张力、网距等参数时图文印刷的位置精度, 为丝网印版各参数的确定提供参考。

1 丝网印刷及其模型

丝网印刷工艺流程包括印前、印刷、印后三大阶段, 印前工艺的核心为丝网印版的制版; 印后工艺主要包括干燥、质量检查等^[11]。丝网印版与承印物之间的固定间距称之为网距, 在印刷时, 刮刀下降将丝网压在承印物上, 以一定的刮印压力及刮印速度将油墨刮印在承印物上, 实现图文的印刷; 刮印完成后, 丝网在预张力的作用下与承印物分离, 刮刀上升并回到原位, 完成一次印刷动作。

本文研究的对象为丝网印版, 通过在云南九九彩印有限公司的实际调研, 根据实际测量的数据, 建立丝网印版的三维模型, 如图 1 所示。模型中, 网框长度为 1 200 mm, 宽度为 1 000 mm, 高度为 36 mm, 丝网长度为 1 200 mm, 丝网宽度为 1 000 mm, 丝网厚度为 0.1 mm, 刮刀长度为 600 mm。该尺寸的丝网印版为企业实际生产中应用最为广泛的一种印版, 以该模型为分析对象具有较好的代表性。

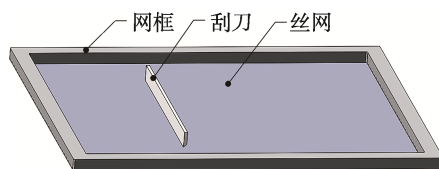


图 1 丝网印版三维模型
Fig.1 3D model of screen printing plates

2 理论计算模型

在平面印刷中, 印刷位置精度可分解为互相垂直的 2 个方向的位置精度, 具体到丝网印刷中, 该 2 个方向为刮刀运动方向与刮刀长度方向, 为便于后续表述, 文中将刮刀运动方向规定为 x 向, 刮刀长度方向为 y 向, 两者相互垂直, x 向平行于网框长度方向, y 向平行于网框宽度方向。在丝网印版中, 对印刷位置精度产生影响的变形主要分为两部分, 一是绷网预张力下网框的变形, 二是刮印过程中丝网因刮刀下压产生的变形^[10]。

2.1 x 向位置精度分析

2.1.1 x 向丝网变形分析

x 向丝网二维模型示意图如图 2 所示, 图 2 中 L 表示框内丝网长度, d 表示网距, A 点为所要印刷的图文点, B 点为 A 点正投影点, 即 B 点为设计上 A 点图文所要印刷的位置, C 点为 A 点实际印刷位置。 A 点距离左侧网框距离为 x , C 点距离左侧网框距离为 x_1 , 由于网框的变形及丝网印刷时的变形, C 点并非始终与 B 点重合, 即出现位置误差, 印刷位置精度即位置误差大小。

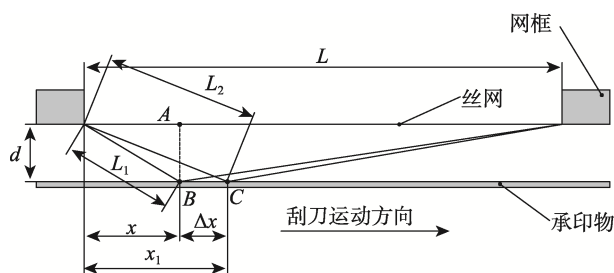


图2 x向丝网印版变形示意图
Fig.2 Schematic diagram of screen printing plate deformation in x-direction

根据图2中所示的几何关系,因丝网变形导致的x向位置误差 μ 为:

$$\mu = x_1 - x \quad (1)$$

根据弹性力学可得:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (2)$$

式中: ε_1 为A点左侧丝网段的伸长率; ε_2 为丝网的总伸长率。

根据式(2)并结合图2所示几何关系可得:

$$\mu = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{Z^2 + x^2} + \sqrt{Z^2 + (L-x)^2} - L}{L} x + x \right]^2 - Z^2} - x \quad (3)$$

2.1.2 x向网框变形分析

在丝网的预张力作用下,网框会向网版中心产生弯曲变形,从而导致图文印刷位置误差,网框变形示意图如图3所示。图3中实线为未受预张力时网框的形状,虚线表示网框在预张力 F 作用下的形状。

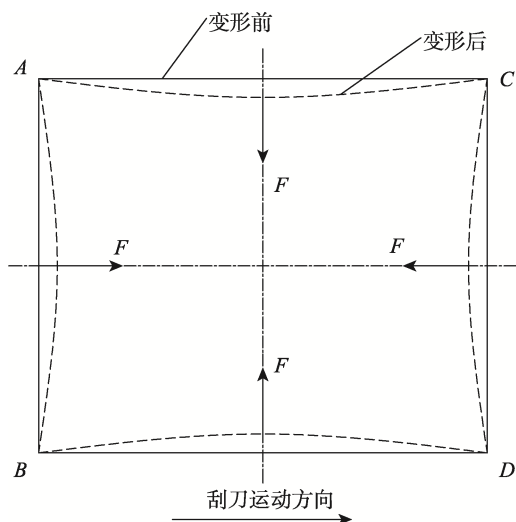


图3 网框变形示意图
Fig.3 Schematic diagram of mesh frame deformation

由图3结合理论力学知识可知,网框的四边分别向网版中心弯曲,网框的弯曲变形会直接导致图文印刷位置的变化。由图3可知,AB边与CD边的弯曲

变形将对x向位置精度产生影响。分析网框变形时,将网框边简化为梁,该梁两端固定,丝网预张力即为施加于梁上的均布载荷,梁的最大挠度将对图文位置带来最大的误差。由材料力学知识可得:

$$\omega_{\max} = \frac{FHL^4}{384EI} \quad (4)$$

式中: $\omega_{\max}$ 为最大挠度; F 为丝网预张力; H 为网框高度; l 为x向网框边长; E 为弹性模量; I 为惯性矩。根据调研所得,文中印版网框的四边由截面为中空矩形铝合金型材焊接而成,其型材截面如图4所示。图4中 H 表示型材总高度,亦为网框高度, h 表示型材中空部分的高度, B 表示型材截面总宽度, b 表示型材中空部分宽度。

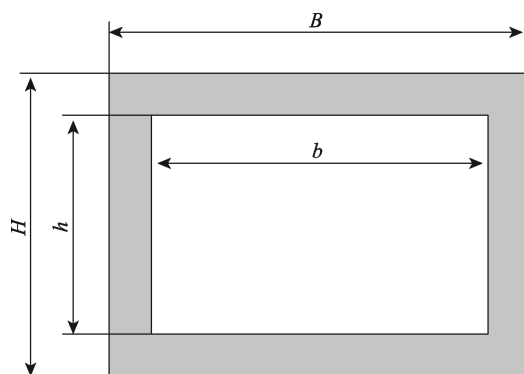


图4 型材截面
Fig.4 Section of profile

由力学知识可知,网框的中心线保持不变,故因网框变形产生的图文位置误差见式(5)。

$$\sigma = \frac{\frac{L}{2} - x}{\frac{L}{2}} \omega_{\max} \quad (5)$$

式中: σ 为网框变形导致的位置误差。

整理式(4)、式(5)可得:

$$\sigma = \frac{FHL^4}{32E(BH^3 - bh^3)} \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \quad (6)$$

2.1.3 x向总位置误差

x向的总位置误差 Δx 为丝网变形导致的位置误差 μ 与网框变形造成的误差 σ 的叠加,故x向的总位置误差:

$$\Delta x = \sqrt{\left[\frac{\sqrt{Z^2 + x^2} + \sqrt{Z^2 + (L-x)^2} - L}{L} x + x \right]^2 - Z^2} - x + \frac{FHL^4}{32E(BH^3 - bh^3)} \left(1 - \frac{2x}{L}\right) \quad (7)$$

2.2 y向位置精度分析

2.2.1 y向丝网变形分析

y向丝网二维模型示意图如图5所示,在丝网印

刷工艺中, y 向图文一般布置在正中, 故刮刀两端与网框内壁的间距相同, 图中 l_0 表示刮刀长度, l_1 表示刮刀至网框内侧的距离, d 表示网距, D 点为所要印刷的图文点, y 表示 D 点距离中心线的距离, D 点在中心线右侧时 y 值为正。

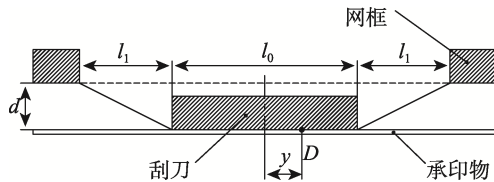


图 5 y 向丝网印版变形示意图
Fig.5 Schematic diagram of screen printing plate deformation in y -direction

印刷时丝网因刮刀下压产生变形, 由几何关系可得:

$$\varepsilon_3 = \frac{2\sqrt{d^2 + l_1^2} - 2l_1}{2l_1 + l} \quad (8)$$

式中: ε_3 为丝网 y 向伸长率。

由力学知识可知:

$$\tau = \frac{2\sqrt{d^2 + l_1^2} - 2l_1}{2l_1 + l} y \quad (9)$$

式中: τ 为 y 向因丝网变形产生的位置误差。

2.2.2 y 向网框变形分析

由图 3 可知, 网框的 AC 边与 BD 边的弯曲变形将对 y 向位置精度产生影响, y 向网框变形分析的原理与 x 向网框变形一致, 在此处本文不再赘述, 通过分析可得 y 向网框变形导致的位置误差:

$$\rho = \frac{yFHL^4}{32EN(BH^3 - bh^3)} \quad (10)$$

式中: ρ 为网框变形造成的误差。

2.2.3 y 向总变形

y 向的总位置误差 Δy 为丝网变形导致的位置误差 τ 与网框变形造成的误差 ρ 的叠加, 因 y 向丝网图文布置具有对称性, 故有:

$$\Delta y = \frac{2\sqrt{d^2 + l_1^2} - 2l_1}{2l_1 + l} y - \frac{yFHL^4}{32EN(BH^3 - bh^3)} \quad (11)$$

3 丝网印版变形的有限元分析

3.1 有限元模型参数设置

本文采用有限元模型与理论计算模型相对照的方式来验证两者的正确性, 在选取同样参数的情况下, 若理论计算数值与有限元分析结果相近且误差在允许范围内, 则说明该理论计算模型能较好地预测丝网印版变形影响下的印刷位置精度。

在对丝网印版的有限元分析中, 将丝网等效为具有各向异性的连续介质膜是一种常用的简化方法, 有学者用该方法取得了较好的研究结果^[12-13], 故文中将丝网简化为膜进行分析。网框选择常用的铝合金, 丝网材料为聚酯, 查阅相关资料^[14-15], 可得丝网与网框的材料参数如表 1 所示。

表 1 丝网与网框材料参数
Tab.1 Material parameters of screen and frame

材料	x 向弹性模量/MPa	y 向弹性模量/MPa	泊松比
网框	71 000	71 000	0.33
丝网	2 837	3 651	0.389

3.2 丝网印版模型的网格划分

合适的网格划分精度既可以保证分析结果的精确度, 也能保证分析过程的效率。经研究发现, 网格划分精度从 12 mm 逐渐提高到 1 mm 的过程中, 仿真结果的应力值、位移等数据均十分接近。为提高分析过程的效率, 在保证分析结果的可靠性前提下, 对丝网印版模型中的网框和丝网分别进行网格划分控制, 网框网格精度设置为 12 mm, 丝网网格精度设置为 10 mm, 面网格剖分方法选用四边形。应用 Ansys Workbench 进行网格划分后的模型如图 6 所示。

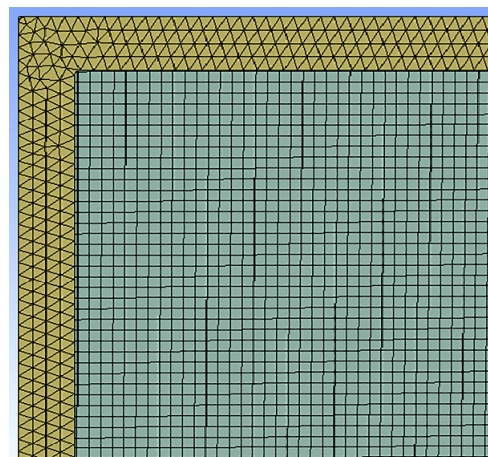


图 6 丝网印版模型网格划分
Fig.6 Meshing of screen printing plate model

3.3 不同参数对位置精度的影响

由理论计算模型可知, 网距、图文位置、预张力将对印刷位置精度产生影响, 在对丝网印版模型进行有限元分析时, 上述 3 个参数即为有限元仿真模型的 3 种外载荷, 分别调整三者的数值大小并进行仿真计算, 可得到不同参数对位置精度的影响。在本文所建立的丝网印版模型中, $E=71\ 000$ MPa、 $L=1\ 100$ mm、

$l=900\text{ mm}$ 、 $b_{\text{总}}=50\text{ mm}$ 、 $b=46\text{ mm}$ 、 $h_{\text{总}}=36\text{ mm}$ 、 $h=32\text{ mm}$ 、 $M=600\text{ mm}$ 、 $M_1=150\text{ mm}$ 。以印刷起始点位置,即 $x=150\text{ mm}$ 处为例,在网距为 10 mm ,预张力大小设置为 $2\,000\text{ N/m}$ 的条件下,其仿真结果如图7所示。丝网印版总的变形云图(即图7)表示在刮刀下压 10 mm 网距的外载荷下,丝网印版整体的变形量。在Workbench中定向变形可通过添加路径的方法读取到不同图文位置处的 x 向变形和 y 向变形,即读出 x 向和 y 向的印刷位置精度。通过设置不同的网距、预张力等参数依次进行仿真计算,最终可得到各不同参数条件下对应的印刷位置精度。

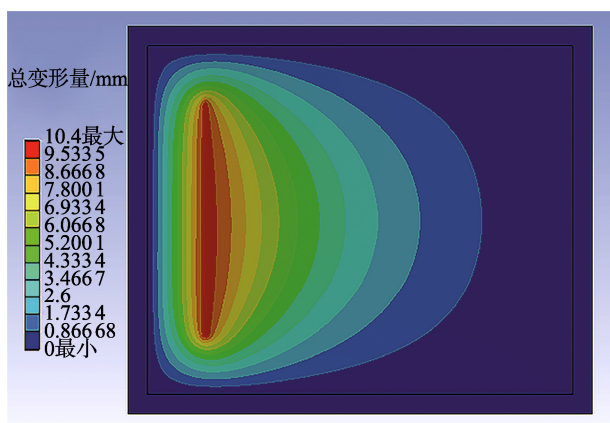


图7 丝网印版变形云图
Fig.7 Deformation pattern of screen printing plate model

3.3.1 网距对位置精度的影响

网距是丝网印刷中一个重要的工艺参数,网距的存在使得丝网在刮印后能够及时与承印物剥离。根据实际生产中要求, x 向图文位置的取值最小为 150 mm ,且无论印刷什么样的产品,在 x 向 $150\sim 350\text{ mm}$ 范围内总是存在图文,故本研究以 150 、 250 、 350 mm 这3个具有一定代表性的 x 向位置为例,分别分析在生产中最常用的预张力值 $2\,000\text{ N/m}$ 下不同网距对 x

向位置精度的影响;而在 y 向上, $50\sim 200\text{ mm}$ 内总是存在图文,故文中 y 向选取 100 、 150 、 200 mm 这3个位置为例,分析网距对 y 向位置精度的影响,对理论模型和有限元模型进行相互验证。用Origin软件画出理论计算与有限元计算的曲线图,如图8所示,误差值的负号表示方向。

由图8可知,在不同图文位置处有限元计算的 x 向误差和 y 向误差与网距之间的相关趋势与理论计算模型较为符合,说明理论计算模型能够较好地预测印刷位置误差与网距之间的关系;随着网距的增大,印刷位置误差也增大,且增速呈上升趋势;图文位置越靠近网框,印刷位置误差越大。

3.3.2 图文位置对位置精度的影响

图文位置是指所印刷的图文在丝网印版上的位置,其位置关系取决于丝网印版上的图文布局。生产实际中可能应用到的最大网距为 15 mm ,本研究中以 $d=5\text{ mm}$ 、 $d=10\text{ mm}$ 、 $d=15\text{ mm}$ 3个不同的网距为例,分别分析在最常用预张力值 $2\,000\text{ N/m}$ 下不同图文位置对印刷位置精度的影响,用Origin软件画出理论计算与有限元计算的曲线图,如图9所示,误差值的负号表示方向。

由图9可知,在不同网距下有限元计算的印刷位置误差与图文位置之间的相关趋势与理论计算模型较为符合,说明理论计算模型能够较好地预测印刷位置误差与图文位置之间的关系。由图9a可知,在网版中心,即 $x=550\text{ mm}$ 处 x 向位置误差接近于0,图文位置越靠近网框, x 向误差增大,且呈增速上升趋势;网距对 x 向的位置误差也有较大影响,网距的增大会明显加剧 x 向位置误差的增大趋势。由图9b可知, y 向误差与图文位置之间存在线性关系,在网版中心处,即 $y=0\text{ mm}$ 时, y 向误差趋向于0;随着网距的增大, y 向误差与图文位置的相关性曲线斜率明显增大,即网距越大, y 向误差随图文变化的趋势越显著。

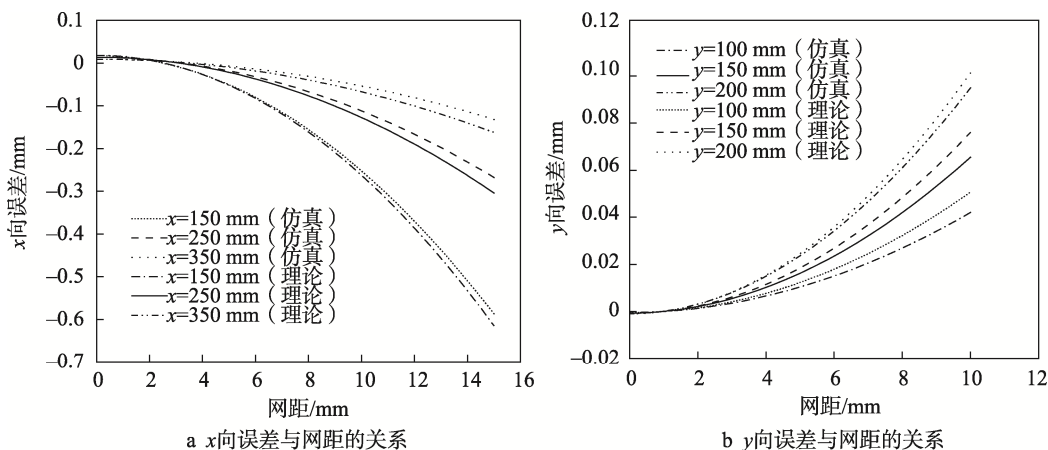
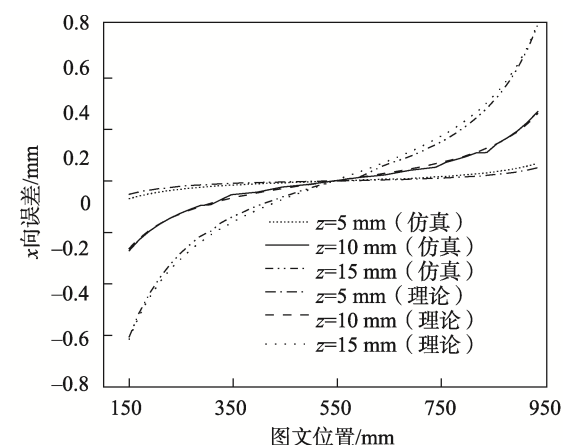
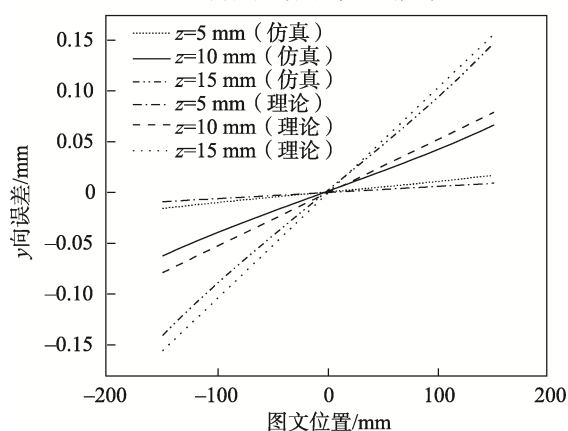


图8 位置误差与网距间的关系

Fig.8 Relationship between position error and screen distance



a x向误差与图文位置的关系



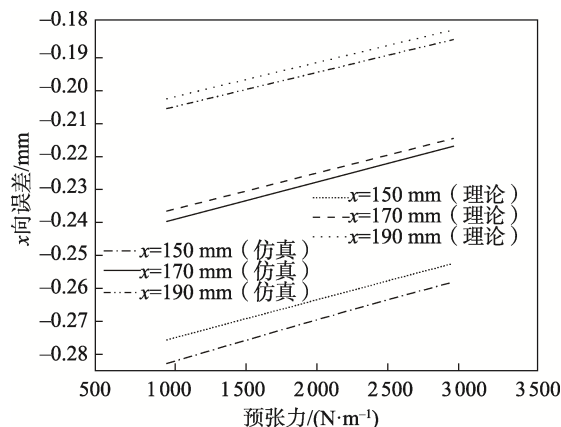
b y向误差与图文位置的关系

图 9 位置误差与图文位置间的关系
Fig.9 Relationship between position error and graphic position

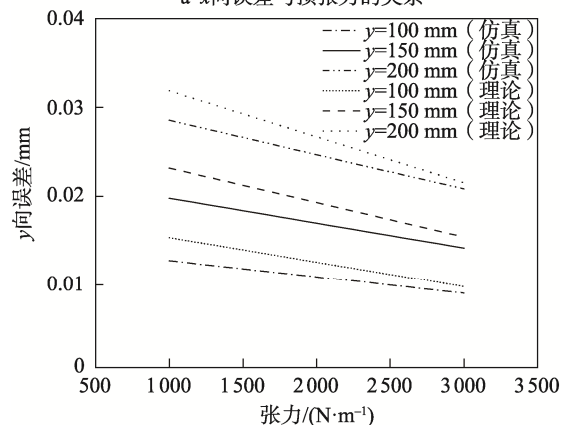
3.3.3 预张力对位置精度的影响

预张力是丝网印版进行绷网时的重要参数,在预张力的作用下网框将向网版中心产生弯曲变形,进而影响印刷时的位置精度。文中以 $x=150\text{ mm}$ 、 $x=170\text{ mm}$ 、 $x=190\text{ mm}$ 3 个不同的图文位置为例,分别分析网距为 10 mm 时不同预张力对 x 向位置精度的影响,对理论模型和有限元模型进行相互验证。用 Origin 软件画出理论计算与有限元计算的曲线图,如图 10 所示,误差值的负号表示方向。

由图 10 可知,不同图文位置处有限元计算的印刷位置误差与预张力之间的相关趋势与理论计算模型较为符合,说明理论计算模型能够较好地预测印刷位置误差与预张力之间的关系;印刷位置误差与预张力之间存在线性关系,且两者之间为负相关,即增大丝网预张力能一定程度上减小图文的印刷位置误差;图文位置越靠近网框,印刷位置误差也越大,但不同图文位置处预张力对印刷误差影响程度基本相同。由图 10b 可知,仿真曲线与理论计算模型的曲线的斜率存在误差,产生该误差的原因为刮刀刃端点与丝网接触时会产生应力集中,从而影响有限元计算的结果。



a x向误差与预张力的关系



b y向误差与预张力的关系

图 10 位置误差与预张力间的关系
Fig.10 Relationship between position error and pretension

4 结语

为研究丝网印版变形对印刷位置精度的影响,文中构建印刷位置精度关于网距、图文位置、预张力等参数的理论计算模型,并经过合理的简化构建了有限元模型,通过两者相互对照的方法验证了两者的正确性。结果表明,该理论计算模型和有限元模型能够较好地预测网距、图文位置、预张力等参数对位置误差的影响,给出预张力、网距等参数与印刷位置精度之间的较为精确的对应关系。根据此模型,当确定上述 3 个参数后可以预测印刷位置精度,将预测值与工艺要求的印刷位置精度对比,即可判断在预设的参数下印刷能否满足印刷位置精度要求;反之,亦可根据给定的印刷位置精度,通过模型反推网距、预张力等参数的取值范围,具有一定的实际应用价值。在生产实际中应用此模型可以为确定预张力、网距等参数提供指导,减少参数调整的盲目性,从而减少生产前的打样次数,达到降低成本和提高生产效率的目的。

参考文献:

- [1] RIEMER D E. The Theoretical Fundamentals of the

- Screen Printing Process[J]. Microelectronics International, 1989, 6(1): 8-17.
- [2] ZHANG Ying, ZHU Yuan-yuan, ZHENG Shuang-hao, et al. Ink Formulation, Scalable Applications and Challenging Perspectives of Screen Printing for Emerging Printed Microelectronics[J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 63(2): 498-513.
- [3] LEE E, CHOI Y M, LEE S H, et al. Enhancement of Printing Overlay Accuracy by Reducing the Effects of Mark Deformations[J]. Microelectronic Engineering, 2017, 180(1): 8-14.
- [4] OWCZAREK J A, HOWLAND F L. A Study of the Off-Contact Screen Printing Process I Model of the Printing Process and Some Results Derived from Experiments[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1990, 13(2): 358-367.
- [5] OWCZAREK J A, HOWLAND F L. A Study of the Off-Contact Screen Printing Process II Analysis of the Model of the Printing Process[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1990, 13(2): 368-375.
- [6] 沈钰, 马丙辉, 李东升. 基于有限元的丝网张力计受力分析[J]. 中国计量学院学报, 2012, 23(3): 284-288.
SHEN Yu, MA Bing-hui, LI Dong-sheng. Force Analysis of Silk Tension Meters Based on Finite Element Method[J]. Journal of China Jiliang University, 2012, 23(3): 284-288.
- [7] 刘富. 基于 TRIZ 流分析的丝网印刷电子关键技术研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2019: 8-15.
LIU Fu. Study on Key Technologies of Screen Printing Electronics Based on TRIZ Flow Analysis[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 8-15.
- [8] 刘世朴, 李艳, 田野, 等. 网版印刷导电油墨转移机理及仿真研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(5): 231-241.
LIU Shi-pu, LI Yan, TIAN Ye, et al. Screen Printing Conductive Ink Transfer Mechanism and Simulation Research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(5): 231-241.
- [9] 田野, 李艳, 袁英才, 等. 丝网印刷电子工艺参数对印刷质量的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 250-259.
TIAN Ye, LI Yan, YUAN Ying-cai, et al. Influence of Screen Printing Electronic Process Parameters on Printing Quality[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 250-259.
- [10] 李婧伟. 精细丝网印刷技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 29-33.
LI Jing-wei. Study on Fine Screen Printing Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 29-33.
- [11] 陈晨, 褚夫强, 孙加振. 有版印刷技术在柔性电子制造领域的应用及进展[J]. 网印工业, 2020(9): 49-52.
CHEN Chen, CHU Fu-qiang, SUN Jia-zhen. Application and Progress of Plate Printing Technology in Flexible Electronics Manufacturing Field[J]. Screen Printing Industry, 2020(9): 49-52.
- [12] BAEK S M, LEE W J, KIM S, et al. Design of an Equivalent Dielectric Film Using Periodic Patterned Screen Printing and Prediction of Dielectric Constants Based on Equivalent Circuit Method[J]. Composite Structures, 2021, 271(3): 271-274.
- [13] 韩国静. 大幅面丝网印刷机的结构分析与优化[D]. 西安: 西安理工大学, 2010: 17—20.
HAN Guo-jing. Structure Analysis and Optimization of Large Format Screen Printing Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2010: 17-20.
- [14] NIVELLE P, TSANAKAS J A, POORTMANS J, et al. Stress and Strain Within Photovoltaic Modules Using the Finite Element Method: A Critical Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 145: 145-151.
- [15] VALTER C, CAROLA C, CAROLA P. Mechanical Modelling of Monofilament Technical Textiles[J]. Computational Materials Science, 2008, 42(4): 679-691.
- [16] 潘志刚, 陈艺鸣. 涤纶单丝丝网[J]. 丝网印刷, 1991(6): 11-16.
PAN Zhi-gang, CHEN Yi-ming. Polyester Monofilament Screen[J]. Screen Printing, 1991(6): 11-16.

责任编辑: 曾钰婵