

柔性版印刷压力检测方法研究

季陈浩^{1,2,3}, 李文浩^{1,2,3}, 唐梅娜^{1,2,3}, 程浩璞^{1,2,3}, 张 博^{1,2,3}, 袁英才^{1,2,3,4*}

¹北京印刷学院数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京

²北京印刷学院印刷装备北京市高等学校工程研究中心, 北京

³北京印刷学院机电工程学院, 北京

⁴北京印刷学院北京市印刷电子工程技术研究中心, 北京

收稿日期: 2026年6月24日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月28日

摘 要

印刷压力是柔性版印刷工艺的核心参数, 其大小与分布直接影响油墨转移效率和印刷品质量。本文主要针对柔性版印刷压力检测方法研究。首先, 基于赫兹接触理论和串联等效刚度模型, 建立“印版-贴版胶带”复合结构的接触压力分布模型, 分析胶带超弹性对等效刚度的影响机制。其次, 采用RunesKeeRP-C30-ST薄膜压力传感器厚度为0.44 mm、量程为0~30 MPa, 建立动态压力检测系统, 完成传感器的基本标定用此工具确定拟合决定系数为 $R^2 = 0.9976$ 。对于传感器厚度引入的系统误差, 提出滚筒间间隙补偿与刚度修正相结合的综合修正方法, 使测量偏差从修正前的 $\pm 7.3\%$ 降低至 $\pm 2.8\%$ 。在柔性版印刷机上进行不同合压量下的实测实验, 获取左、中、右三个特殊位置的压力数据, 理论模型计算值与实测值相差较小, 其中最大相对误差6.1%, 验证了模型的有效性。研究结果为柔性版印刷工艺参数优化和质量控制提供了理论依据。

关键词

柔性版印刷, 印刷压力检测, 薄膜压力传感器, 传感器补偿, 印刷工艺

Research on Detection Methods of Printing Pressure in Flexographic Printing

Chenhao Ji^{1,2,3}, Wenhao Li^{1,2,3}, Meina Tang^{1,2,3}, Haopu Cheng^{1,2,3}, Bo Zhang^{1,2,3},
Yingcai Yuan^{1,2,3,4*}

¹Beijing Key Laboratory of Digital Printing Equipment, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

²Beijing Higher Education Institution Engineering Research Center for Printing Equipment, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

³School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

⁴Beijing Engineering Research Center of Printed Electronics, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: June 24, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 季陈浩, 李文浩, 唐梅娜, 程浩璞, 张博, 袁英才. 柔性版印刷压力检测方法研究[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(4): 786-794. DOI: 10.12677/jsta.2026.144075

Abstract

Printing pressure is a core parameter in the flexographic printing process, and its magnitude and distribution directly affect ink transfer efficiency and print quality. This paper primarily investigates the detection methods of flexographic printing pressure. First, based on Hertzian contact theory and a series equivalent stiffness model, a contact pressure distribution model for the “printing plate-mounting tape” composite structure is established to analyze the influence mechanism of the tape’s hyperelasticity on the equivalent stiffness. A dynamic pressure detection system is developed using the RunesKeeRP-C30-ST thin-film pressure sensor (0.44 mm in thickness, with a range of 0~30 MPa), and the basic calibration of the sensor is completed, yielding a coefficient of determination for the fitting of $R^2 = 0.9976$. To address the systematic error introduced by the sensor’s thickness, a comprehensive correction method combining roller gap compensation and stiffness correction is proposed, which reduces the measurement deviation from $\pm 7.3\%$ before correction to $\pm 2.8\%$. Experimental measurements are conducted on a flexographic printing machine under different impression settings to obtain pressure data at three specific positions: left, middle, and right. The theoretical model calculations show a small deviation from the measured values, with a maximum relative error of 6.1%, verifying the effectiveness of the model. The research findings provide a theoretical basis for the optimization of flexographic printing process parameters and quality control.

Keywords

Flexographic Printing, Printing Pressure Detection, Thin-Film Pressure Sensor, Sensor Compensation, Printing Process

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

柔性版印刷是最主要的印刷方式之一，在包装、标签印刷领域有着广泛的应用。印刷压力是油墨转移的重要影响因素，合理的印刷压力设置不仅可以保证油墨的稳定转移，还能有效减少网点扩大、降低印版磨损、延长印版使用寿命。柔性版常采用具有弹性的感光树脂材料，印刷压力更容易引起柔性版的变形，因此对柔性版印刷压力进行精确检测具有重要的工程意义和实用价值。

国外对印刷压力相关研究主要有：瑞典皇家理工学院的 Rydefalk 等学者[1] [2]采用有限元方法对柔性版印刷压印区的横向应力变化进行数值模拟，深入分析压印区接触压力分布与基材粗糙度、硬度等因素之间的耦合关系；Rydefalk [2]进一步探讨印刷压印区结构力学特性对油墨转移行为的影响机制，为压力检测与控制方案优化提供理论依据。Pereira [3]系统阐述了压力传感器的工作原理及静动态标定方法，为印刷压力传感器的选型与标定提供了通用性技术参考。Bould 等[4]考虑柔性版的压缩弹性模量非线性特性，建立了柔性版接触区压力分布的解析模型。Bohan 等[5]利用薄膜压力传感器阵列实验研究了柔印过程的压力分布。Johnson 等[6]采用薄膜压力传感器对柔印 CI 型印刷机的动态压印力进行了实测，获得了压印区的实时压力分布数据，Rydefalk 等[7]通过实验室印刷实验，分离了最大压力和压区长度两个参数，研究它们对柔版印刷质量的独立影响。国内，袁英才等[8]建立了柔性印版的最大印刷压强、印刷压力与合压量的关系模型，并进行了实测试验。刘庆华和李丽[9]综述了压阻式柔性压力传感器的研究进展，

为柔性薄膜传感器在印刷压力检测中的应用提供了技术储备。本文以柔性版印刷压力检测方法为研究对象，重点开展以下工作：(1) 构建基于薄膜压力传感器的动态检测系统，完成传感器的标定实验及精度评估；(2) 针对传感器厚度引入的几何和力学误差，提出综合修正方法。

2. 柔性版印刷压力检测系统

柔性版印刷压力检测系统以薄膜压力传感器为核心元件，配合多通道数据采集系统和上位机软件，实现压力的动态采集与分析。薄膜传感器基于压阻效应工作，受压力作用时内部压阻材料电阻发生变化，通过外部电路转换为电压信号输出。选用 RunesKeeRP-C30-ST [10]，参数见表 1。

Table 1. Main technical parameters of the RunesKee thin-film pressure sensor
表 1. RunesKee 薄膜压力传感器主要技术参数

参数名称	技术指标	参数名称	技术指标
厚度	0.44 mm	有效感应面积	100 πmm ²
量程	0~30 MPa	响应时间	<5 ms
重复性误差	≤±1%F.S.	非线性误差	≤±2% F.S.
工作温度	-20°C~60°C		

薄膜压力传感器具有非线性响应特征，需要对其进行多点标定校准，以确保检测结果准确可靠[11]。首先，在薄膜传感器上选取 6 个点位进行，其操作界面如图 1 所示：



Figure 1. Interface for determining the calibration position of the sensor
图 1. 传感器确定标定位置界面

用于标定的砝码质量分别为 1000 g、2000 g、3000 g、4000 g、5000 g 和 6000 g，使用标准砝码组进行标定。在环境温度保持在 23℃左右，相对湿度在 85%以下，将薄膜传感器放置在测试台上，其感压面需与标准压力源的参考平面保持同一水平，以确保受力一致，再依将标准砝码放到 6 个点位上，对各个点进行标定，薄膜压力传感器标定示意图如图 2。

在薄膜压力传感器的标定执行页面显示的结果符合使用条件，则说明操作有效[12]，为评估传感器的重复性，按上述步骤对每个点位重复加载 - 卸载循环至少 3 次，取多次测量结果的均值用于标定曲线拟合，同时计算各点的标准差用于不确定度评估。

传感器检测结果显示，其输出 AD 值与压力呈良好的单调递增关系。在低压段(0~2MPa)近似线性，而在高压段则呈现轻微的非线性。采用最小二乘法进行三次多项式拟合，数学模型如式(1)所示：

$$P = a_0 + a_1V + a_2V^2 + a_3V^3 \tag{1}$$

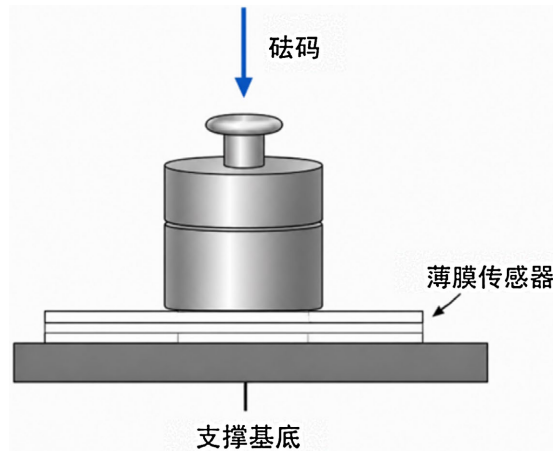


Figure 2. Schematic diagram of thin-film pressure sensor calibration
图 2. 薄膜压力传感器标定示意图

式(1)中,拟合系数 $a_0 \sim a_3$ 由标定数据确定。该拟合模型的决定系数 $R^2 = 0.9976$, 表明拟合精度较高。经三次重复实验验证,最大偏差小于 2% 重复性良好,满足工程应用需求。

3. 柔性版印刷压力分析

在柔性版印刷过程中,印刷压力的产生源于印版滚筒与压印滚筒之间的相互作用[13]。二者中心距小于两滚筒半径之和,则两滚筒处于合压状态。两滚筒半径之和与中心距的差值被称为合压量,这是衡量滚筒间压缩程度的关键参数。

在合压过程中,随着合压量的增大,柔性版及贴版胶带会发生弹性压缩变形。这种变形会形成一个压印带[14]。滚筒表面的弹性材料受到挤压,产生反作用力,即印刷压力。接触面积的大小与合压量直接相关:合压量越大,接触面积越广,印刷压力也随之增大[15]。印刷压力可用以下公式表示:

$$P_{max} = \frac{E_{eq} \cdot \delta_{max}}{h_{eq}} \quad (2)$$

式(2)中, P_{max} 为最大印刷压力, kN; E_{eq} 为材料的等效弹性模量, MPa; δ_{max} 为全压量, mm; h_{eq} 为柔性版和贴版胶带厚度, mm。

忽略柔性版与贴版胶带层间的相对滑动,可将其简化为串联复合弹性系统,这种复合结构的等效弹性模量 E_{eq} 满足以下关系:

$$\frac{1}{E_{eq}} = \frac{h_p}{E_p h_{eq}} + \frac{h_t}{E_t h_{eq}} \quad (3)$$

式(3)中, h_p 为柔性版厚度, mm; h_t 为贴版胶带厚度, mm; E_p 为柔性版的弹性模量, MPa; E_t 为贴版胶带的弹性模量, MPa。

柔性版常由树脂材料,贴版胶带为泡棉材料,均为超弹性材料,二者在印刷压力作用下会发生变形,且在卸载后能恢复原状。柔性版材料和贴版胶带的超弹性特性分别满足 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型[16],关于 Mooney-Rivlin 模型超弹性最核心的定义式:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \quad (4)$$

式中 σ : 应力, W : 应变能密度函数,通常表示为主伸长率($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)或应变不变量(I_1, I_2, I_3)的函数, ε :

应变。材料受力变形时，外力做的功全部转化为弹性能储存在材料内部，卸载时会完全释放。对于各向同性的不可压缩超弹性材料，其应变能函数 W 可表示为变形张量不变量的函数：

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (5)$$

其中 I_1 和 I_2 分别为第一和第二应变不变量， $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 为主伸长率。由不可压缩条件有 $I_3 = (\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3)^2 = 1$ 对于单轴压缩状态，设 $\lambda_1 = \lambda$ ，则 $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-\frac{1}{2}}$

Mooney-Rivlin 模型的应变能函数为：

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (6)$$

其中 C_{10} 和 C_{01} 为材料常数，可通过单轴压缩实验数据拟合得到。由该模型可进一步导出工程应力 σ 伸长率 λ 的关系：

$$\sigma = 2(\lambda - \lambda^{-2})(C_{10} + C_{01}\lambda^{-1}) \quad (7)$$

该关系式呈现明显的非线性特征：在小变形阶段，应力增长较缓；随着变形的增大，应力增长速度加快，表现为“应变硬化”现象[17]。正是这一非线性特征，使得超弹性材料在印刷合压过程中展现出与线弹性材料完全不同的力学响应 Yeoh 模型，其公式为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3 \quad (8)$$

公式(8)中 W 代表应变能， C_{10}, C_{20}, C_{30} 代表材料参数， I_1 是应变不变量。

4. 印刷压力检测补偿与修正

薄膜传感器检测印刷压力时，由于薄膜传感器介入，改变了印版滚筒和压印滚筒接触状态，如图 3 所示，需要对检测结果进行补偿和修正。其中，针对传感器介入导致的接触间隙变化，建立合压量补偿模型；针对传感器介入导致的系统刚度变化，建立刚度修正模型。

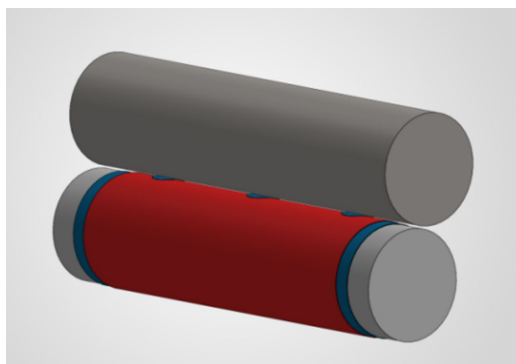


Figure 3. Contact detection model of the thin-film sensor
图 3. 薄膜传感器检测接触模型

4.1. 印刷压力数据的几何补偿模型

使用薄膜压力传感器进行测量时，传感器的物理介入改变了滚筒间的接触几何条件。传感器不仅占据压缩空间，其自身压缩变形还会分担合压行程。若直接读取传感器数值，得到的是“传感器介入后”等效压强，而非真实压强[18]。为了消除这一系统误差，必须建立基于几何空间占用的非线性补偿模型，将测量值还原为真实工况值[19]。建立传感器压缩量的非线性补偿模型。传感器压缩率与压强的关系为：

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta h_s}{h_{s0}} = f(P_s) \quad (9)$$

在式(9)中 ε_s : 传感器压缩率, Δh_s : 厚度压缩变化量(单位: mm), h_{s0} 为原始厚度(单位: mm); $f(P_s)$ 为压缩率函数, 由厂家数据进行分段线性插值得出。由此, 实际接触间隙 δ_{real} 与设定间隙 δ_{set} 的关系满足以下补偿方程:

$$\delta_{real} = \delta_{set} + h_{s0} [1 - f(P_{exp})] \quad (10)$$

在式(10)中 P_{exp} 为测得的压强值(单位: Pa 或 MPa)。已知测量压强 P_{exp} , 反求在无传感器状态下, 仅由 δ_{set} 产生的真实压强 P_{corr} 。本研究采用迭代反演法求解真实压强 P_{corr} , 用来还原无传感器状态下的真实接触条件[20]。首先初始化, 设定初始猜测压强 $P^{(0)} = P_{exp}$ 。然后计算印版压缩量: 利用当前压强 $P^{(k)}$, 结合印版的超弹性本构方程(或标定曲线), 计算印版在当前状态下的理论压缩量 $\delta_{plate}(P^{(k)})$ 。位移残差校验: 检查是否满足几何约束:

$$|\delta_{plate}(P^{(k)}) - \delta_{set}| < \epsilon \quad (11)$$

其中 ϵ 为收敛精度(如 10^{-4} mm)。迭代更新: 若不满足, 根据残差调整压强猜测值 $P^{(k+1)}$, 直至收敛。最终收敛值即为真实压强 P_{corr} 。本研究中选用的传感器厚度 h_{s0} 确实对原始测量数据产生了显著的几何干扰, 但这正是引入上述补偿模型的必要前提。通过严格的位移协调计算, 剔除了 h_{s0} 带来的系统误差, 验证了该补偿方法在处理非零厚度传感器数据时的有效性。

4.2. 复合结构弹性模量的力学修正

基于多层介质接触理论, 传感器-印版-胶带三层复合结构的等效弹性模量为:

$$\frac{1}{E_{eff}} = \frac{h_p/E_p + h_t/E_t + h_s/E_s}{h_p + h_t + h_s} \quad (12)$$

无传感器时仅印版和胶带的等效弹性模量为式(3), 式(12)中 E_s 为传感器材料弹性模量, 由于传感器材料弹性模量 E_s 远大于印版 E_p 和胶带 E_t , 引入传感器后的系统等效模量 E_{eff} 显著大于无传感器时的 E_{eq} , 这种刚度失配会导致测量区域的局部接触刚度增大, 使得测量值偏离真实值。为了修正这一力学特性差异带来的误差, 为此, 引入修正系数 β 来表征这种刚度失配对压力测量的影响, 真实压强与测量压强的关系修正为:

$$P_{real} = \beta \cdot P_m \quad (13)$$

式(13)中的综合修正系数 β 本质上反映了引入传感器介质后接触区等效弹性模量的变化。由于传感器的加入改变了原有的印版-滚筒接触体系, 使得接触区域的综合刚度发生偏移。基于多层介质接触理论, 可将含传感器的接触区视为新的弹性半空间, 其等效弹性模量 E_{eff} 与无传感器时的理论模量 E_{eq} 存在函数关系。因此 β 值可由两者的比值推导得出:

$$\beta = \frac{E_{eff}}{E_{eq}} = f(h_{s0}, E_s, E_p, \dots) \quad (14)$$

式(14)中 h_{s0} , E_s 分别为传感器的厚度与模量。该推导表明 β 并非恒定常数, 而是随合压力(影响接触深度与应力分布)及材料属性动态变化的物理量。

5. 检测系统验证

5.1. 实验设备与条件

实验在柔性版印刷机上进行，主要参数见表 2。

Table 2. Main parameters of the experimental equipment
表 2. 实验设备主要参数

参数	指标
印版滚筒直径	70 mm
压印滚筒直径	70 mm
印刷速度	5 m/min
合压量调节	手动旋钮，0~0.5 mm
印版型号及厚度	G1220250425013 厚 1.14 mm
贴版胶带型号及厚度	德莎厚 0.44 mm

实验室温度 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 $50\% \pm 5\%$ 。每个合压量重复 3 次取均值。通过 1:1 建模如图 4 所示，对合压量调节机构进行标定，建立旋钮转角与实际合压量的关系曲线。标定发现，调节特性在低合压量区灵敏度较高旋转每度约 0.002 mm，高合压量区灵敏度降低旋转每度约 0.001 mm，呈非线性特征。传感器的分布位置如上文图 3 状态进行布置，分别为位置是距离印版滚筒端面 50 mm 的位置和滚筒中心位置，呈左中右三点分布，用来减轻因不同位置合压量不同对实验造成的影响。

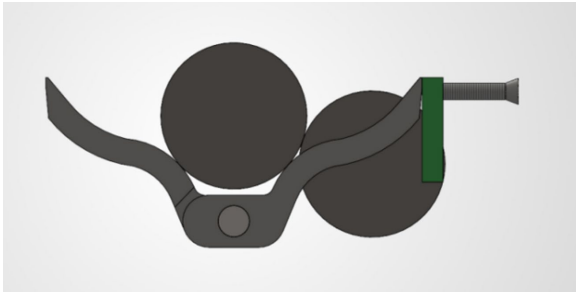


Figure 4. Modeling of the impression pressure adjustment mechanism
图 4. 合压量调节机构建模

5.2. 理论计算值与实测值及修正模型对比分析

柔性版和贴版胶带均属于超弹性材料，其力学行为可通过超弹性本构模型描述。在本研究中，针对贴版胶带，采用 Mooney-Rivlin 模型进行表征，通过单轴压缩实验数据拟合，得到其材料常数为 $C_{10} = 0.85 \text{ MPa}$ 、 $C_{01} = 0.21 \text{ MPa}$ ，也得到柔性版和贴版胶带的弹性模量的拟合曲线为式(15)：

$$E(\delta) = 1150\delta^3 - 185\delta^2 + 26.5\delta + 7.2 \quad (15)$$

在模型计算中，当压缩量 $\delta = 0.1 \text{ mm}$ 时，由理论计算得到割线模量 $E_{eq} = 9.15 \text{ MPa}$ 。该模量可作为柔性版材料在特定变形下的等效弹性模量，用于后续力学分析。柔印机滚筒半径取实测值，即

$$R_1 = R_2 = 35 \text{ mm}。$$

为验证有效性，对前后数据进行分析。实验选取了多种合压量结果显示，未修正时，测量值与理论

值之间的最大偏差达到 $\pm 7.3\%$ ，通过引入上述的修正方法，最大偏差显著降低至 $\pm 2.8\%$ 。这一结果表明，修正算法能够有效抑制由材料特性、接触状态及测量系统带来的误差，显著提升测量精度。理论与实测值对比见图 5。

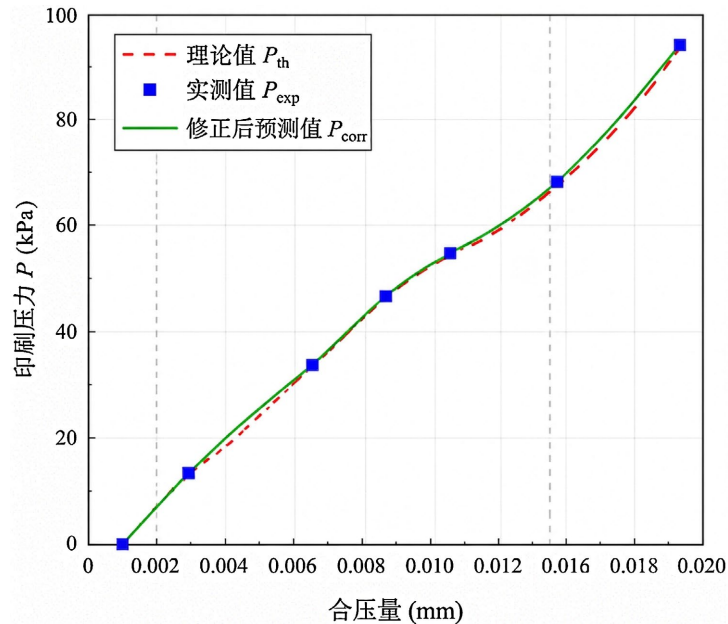


Figure 5. Theoretical vs. measured values and distribution of corrected data

图 5. 理论值与实测值对比及修正后数据分布

当压力低于约 35 kPa 时，传感器处于小变形阶段，此时采用修正系数 $\beta = 1.063$ ，随着载荷进一步增加，传感器逐渐进入大变形阶段，对应修正系数调整为 $\beta = 1.054$ 。结合上文中修正和补偿模型，分析图 5 可见：(1) 全合压量范围内理论值与实测值吻合良好，最大误差 6.1%，中高压段稳定在 2.5%~3.0%，验证了模型的准确性。(2) $\delta = 0.0025$ mm 时误差略大(6.1%)，因极小变形下传感器信噪比降低。(3) 理论值系统性地略低于实测值(差值约 1~2 KPa)，可能原因是大变形下 Mooney-Rivlin 模型对纯压缩状态的描述精度有限，而且在修正中会受到原本薄膜传感器的影响弹性模量以及硬度接触面积变小导致压强略大。

进一步分析发现，修正效果得益于 β 值会有自适应调整方式。此方式根据合压量和测量位置的不同，不断变化优化修正系数，从而匹配实际物理过程[21]。实验数据表明，在合压量较小例如 0.0025 mm 时， β 值取 1.12 即可达到较好修正效果；而在合压量较大例如 0.015 mm 时， β 值需调整至 1.18 以应对更大的非线性效应。这种自适应特性使得修正算法在不同工况下均能保持良好的适用性。

经综合修正后，测量最大偏差从补偿前的 $\pm 7.3\%$ 降低至 $\pm 2.8\%$ ，验证了修正算法的有效性。

6. 结论

本文对柔性版印刷压力检测方法进行研究，主要完成了以下工作并得出相应结论：

(1) 以 RunesKeeRP-C30-ST 薄膜压力传感器为核心，构建柔性版印刷压力检测系统。在传感器有效感应区域选取 6 个点位进行标定，采用最小二乘多项式拟合建立输入 - 输出映射关系，拟合决定系数 $R^2 = 0.9976$ ，拟合精度良好，满足工程应用需求。

(2) 基于赫兹接触理论和串联等效刚度模型，建立“柔性版 - 贴版胶带”复合结构的接触压力分析模型，揭示柔性版印刷压力与合压量之间的非线性关系。

(3) 针对传感器厚度引入的接触间隙变化和局部刚度增大问题, 提出基于几何厚度与刚度失配的综合修正算法。经修正后, 测量最大偏差从修正前的 $\pm 7.3\%$ 显著降低至 $\pm 2.8\%$, 验证了修正策略的有效性。

(4) 完成柔性版印刷压力测试实验。实验表明印刷压力随合压量呈显著非线性增长, 滚筒两端压力略高于中部; 检测系统实测值与理论计算值基本吻合, 最大相对误差 6.1%, 中高压段稳定在 2.5%~3.0%, 验证了柔性版印刷压力检测系统的准确性。综上所述, 本文构建的检测系统与误差修正策略能为柔性版印刷压力检测提供可靠的理论依据与数据支撑。

基金项目

智能与绿色柔版印刷重点实验室 2024 年度招标课题(ZBKT202402)。

参考文献

- [1] Rydefalk, C., Hagman, A., Kulachenko, A. and Thorman, S. (2025) Simulations of Lateral Stress Variations in a Flexographic Print Nip. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, **41**, 315-326. <https://doi.org/10.1515/npprj-2025-0019>
- [2] Rydefalk, C. (2024) Structural and Mechanical Aspects in the Print Nip and Their Effect on the Ink Transfer in Flexographic Packaging Printing. KTH Royal Institute of Technology.
- [3] Pereira, J.D. (2024) Pressure Sensors: Working Principles of Static and Dynamic Calibration. *Sensors*, **24**, Article No. 629. <https://doi.org/10.3390/s24020629>
- [4] Bould, D.C., Claypole, T.C. and Bohan, M.F.J. (2004) An Investigation into Plate Deformation in Flexographic Printing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **218**, 1499-1511. <https://doi.org/10.1243/0954405042418428>
- [5] Bohan, M.F.J., Townsend, P., Hamblyn, S.M., et al. (2003) Evaluation of Pressures in Flexographic Printing. *Proceedings of the 55th TAGA Annual Technical Conference*, Montreal, 311-320.
- [6] Johnson, J., Rättö, P., Lestelius, M. and Järnström, L. (2003) Dynamic Nip Pressure in a Flexographic CI-Printing Press. *TAGA Proceedings 2003*, Montreal, 357-374.
- [7] Rydefalk, C., Thorman, S., Hagman, A., et al. (2024) Separating the Effects of Maximum Pressure and Printing Nip Length on Flexographic Print Quality. *Journal of Print and Media Technology Research*, **13**, 199-211.
- [8] 袁英才, 刘德喜, 徐嘉妮, 等. 柔性版印刷机印刷压力与合压量关系研究[J]. 北京印刷学院学报, 2020, 28(4): 147-150.
- [9] 刘庆华, 李丽. 压阻式柔性压力传感器的研究进展[J]. 安徽化工, 2025, 51(1): 1-6.
- [10] RunesKee Technology (2024) Thin Film Pressure Software Manual. <https://www.runeskee.com/en/nd.jsp?id=162>
- [11] 刘晓娜, 任娟, 张裕祥, 等. 柔性压力传感器信号采集电路及标定方法研究[J]. 电子测试, 2024(4): 24-29.
- [12] 孙路. MEMS 汽车压力传感器的标定算法研究[J]. 汽车电器, 2025(3): 73-76.
- [13] Valdec, D., Tomrlin, R., Hajdek, K. and Miljković, P. (2022) Influence of the Polymer Plate Thickness on the Plate Distortion Factor in Flexography. *Tehnički Glasnik*, **16**, 47-52. <https://doi.org/10.31803/tg-20210629221349>
- [14] 徐嘉妮, 袁英才, 李艳, 等. 滚筒跳动对柔性版印刷质量的影响[J]. 包装工程, 2022, 43(9): 264-269.
- [15] 张明远, 李建华. 柔性版印刷技术发展现状与趋势[J]. 印刷技术, 2020, 45(3): 12-18.
- [16] Yeoh, O.H. (1993) Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, **66**, 754-771. <https://doi.org/10.5254/1.3538343>
- [17] 方剑. GTT 网纹辊技术 开启柔印新思维[J]. 印刷技术, 2019(9): 6-7.
- [18] 乔俊伟, 罗尧成. 中国柔性版印刷发展现状与趋势分析[J]. 出版与印刷, 2020(4): 60-66.
- [19] 范振宇, 袁英才, 李艳, 等. 柔性版超弹性现象对线条微观变形影响研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2024(1): 77-82.
- [20] 刘瑛, 张勇, 吕克洪, 邱静, 刘冠军. PMMA/石墨烯异质压力传感器及传感特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 99-106.
- [21] Johnson, K.L. (1985) *Contact Mechanics*. Cambridge University Press.