

柔印机印刷压力测量方法综述

姚 雨^{1,2}, 武淑琴^{1,2*}, 石书博^{1,2}, 董心如^{1,2}, 戈 阁^{1,2}, 孙宇轩^{1,2}, 马金戈^{1,2}

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北京印刷学院机电工程学院, 北京

收稿日期: 2026年8月12日; 录用日期: 2026年9月19日; 发布日期: 2026年9月30日

摘 要

介绍了柔性版印刷机印刷压力来源及其对印刷质量的影响, 综述了国内外对柔印机印刷压力测量、预测、控制的研究进展与关键技术; 分类讨论了各种测量方法的优缺点, 总结了辊间印刷压力建模的动力学方法, 指出了现有印刷压力调节方法的不足, 综合考虑柔印生产实际、传感器技术与电子技术的进步、精密制造的需求与工业5.0的落地, 指明了柔印机印刷压力直接动态测量方法的实际意义与未来发展方向, 同时对使用类似辊压制造的机器的压区压力测试均有借鉴意义。

关键词

柔印, 印刷压力, 传感器, 印刷压力测量, 印刷压力建模, 印刷压力控制

Review of Printing Pressure Measurement Methods for Flexographic Printing Presses

Yu Yao^{1,2}, Shuqin Wu^{1,2*}, Shubo Shi^{1,2}, Xinru Dong^{1,2}, Ge Ge^{1,2}, Yuxuan Sun^{1,2}, Jing Ma^{1,2}

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

²School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: August 12, 2026; accepted: September 19, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

This paper introduces the sources of printing pressure in flexographic printing presses and their influence on print quality, and reviews the domestic and international research progress and key technologies in the measurement, prediction, and control of printing pressure in flexographic printing. It classifies and discusses the advantages and disadvantages of various measurement methods, summarizes the dynamics-based modeling methods for inter-roller printing pressure, and points out the deficiencies of existing pressure adjustment methods. Considering the practical conditions

*通讯作者 Email: wushuqin@bigc.edu.cn

文章引用: 姚雨, 武淑琴, 石书博, 董心如, 戈阁, 孙宇轩, 马金戈. 柔印机印刷压力测量方法综述[J]. 仪器与设备, 2026, 14(3): 446-460. DOI: 10.12677/iae.2026.143049

of flexographic production, advances in sensor and electronic technologies, the demand for precision manufacturing, and the implementation of Industry 5.0, the paper clarifies the practical significance and future development direction of direct dynamic measurement of printing pressure in flexographic printing presses. It may also serve as a reference for nip pressure testing of machines with similar roll-compression manufacturing configurations.

Keywords

Flexography, Printing Pressure, Sensor, Printing Pressure Measurement, Printing Pressure Modeling, Printing Pressure Control

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

柔性版印刷是指使用柔性印版、通过网纹辊和传墨辊传递油墨的印刷方式[1]。柔性版印刷由于其显著的环保特性,在国内包装、标签等市场占有率逐年上涨,表现出强劲的增长势头和发展潜力;国外市场中,在美国包装印刷市场占比达到 70%以上、在西欧国家中占比大约 50%。总体来说,柔性版印刷在国内外市场占比巨大、不容忽视[2]。如图 1 所示,柔印机通过印版滚筒和压印滚筒的挤压作用,使油墨按规则转印至承印物上,两滚筒间施加的压力称为印刷压力,柔性版印刷压力通常在 0.1~0.5 MPa [1],印刷精度通常在 10~50 μm [3]-[5]。印刷压力直接影响印刷质量,印刷压力过小,不足以保证油墨转移数量;印刷压力过大,会导致压印滚筒的变形,从而导致印刷网点变形等问题[1]。要使柔性版印刷等辊对辊印刷方式满足精密制造领域的需求(精度 1~10 μm)、具备更强的竞争力,需要对辊间印刷压力进行更为准确地测量与控制。因此,印刷压力的测量与控制成为印刷质量进一步提升、扩大印刷市场、印刷技术前进的关键问题;其中,印刷压力的直接准确测量更是印刷压力控制的基础。

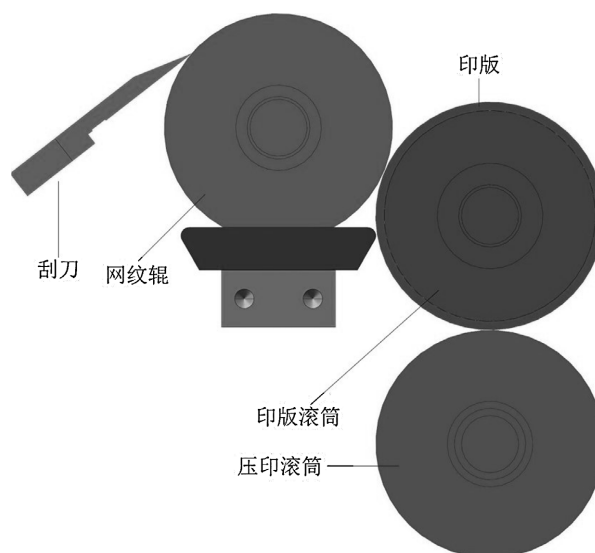


Figure 1. Side view of the core structure of a typical flexographic printing press

图 1. 典型柔印机印刷核心结构侧视图

本文涉及的关键文献如下表 1 所示，对柔印机印刷压力从测量、理论建模、预测与控制三个方面分步进行综述。将柔印机印刷压力的测量方法从直接与间接、动态与非动态两个维度进行分类；直接测量是指通过将压力传感器等放置于印版滚筒与压印滚筒接触区或者接近区域且不干扰原本印刷效果的测量方法，间接测量是指不直接测量压力、而是通过其他受印刷压力影响的物理量间接反映压力的变化情况的测量方法；非动态测量是指测量时需要柔印机处于非生产状态，动态测量是指在柔印机印刷生产过程中能够实时测量、不受柔印机状态影响。将印刷压力建模分为传统建模与多因素耦合建模；传统建模是指通过合理简化便于使用经典物理理论描述的方法，多因素耦合作用建模是指不止考虑静态滚筒几何尺寸、力学特性，还要考虑实际印刷工况中的众多影响因素，例如：油墨、承印物、滚筒制造装配误差等。最后对现有的印刷压力测量、预测、控制方法存在的问题与解决方案进行了探讨总结以及发展方向。

Table 1. Compilation and classification of key literature
表 1. 关键文献整理与分类

年份	测量方法 分类	国别	文献编号	研究内容
2009	直接动态 测量	国外	[6]	提出凹版印刷机印刷压力检测方法，将应变片埋置于凹版版面下方，并通过无线收发装置获取旋转传感器数据，实现印刷压力曲线测量。
2009	直接动态 测量	国外	[7]	提出印刷单元压区压力及压力分布测量方法，将多种压力传感器按不同方向布置在印刷机不同位置，包括橡皮布背面，以获得横向和纵向压力分布。
2012	直接动态 测量	国外	[26]	在高速旋转造纸机辊筒中布置光纤光栅传感器阵列，实现压力与温度连续监测，并提出旋转辊筒测量系统的数据无线传输方案。
2023	直接动态 测量	国外	[27]	设计用于自动铺丝的智能辊筒，在辊筒表面布置柔性电容传感器阵列并集成数据采集与传输电路，实现铺丝压力感知。
2025	直接动态 测量	国外	[28]	在智能辊筒基础上扩展法向与三轴应力测量传感器阵列，用于自动铺丝过程中的多方向接触应力测量。
2003	直接非动 态测量	国外	[11]	围绕中心压印式柔印机动态压区压力开展测量研究，为后续柔印压区压力峰值估算与传感器校正提供实验基础。
2004	直接非动 态测量	国外	[10]	针对传感器尺寸接近压区长度时的测量误差，提出估算最大印刷压力的计算程序，用于更准确校正柔印中心压印机动态峰值压力。
2011	直接非动 态测量	国内	[13]	提出印刷压力测量装置及信号处理方案，用压力传感器获取压力相关信号，但文中未明确说明传感器与印刷机压区的具体连接方式。
2021	直接非动 态测量	国内	[8]	针对凹版印刷机辊筒间压力建立理论模型并进行有限元分析，采用感压胶片进行实验验证，属于直接非动态测量与模型验证结合。
2024	直接非动 态测量	国内	[12]	提出印刷压力调节控制系统和压力传感器信号处理电路，用于印刷压力检测与调节，但传感器具体安装连接方式仍不够明确。
1982	间接动态 测量	国外	[17]	提出印刷压力控制装置，将压力传感器布置在滚筒轴承中并靠近压力中心线，同时给出信号处理与控制电路，为间接动态测量和闭环调压提供早期方案。
2009	间接动态 测量	国内	[15]	使用应变式压力传感器监测胶印机辊筒支架变形，通过结构受力与变形关系间接得到印刷压力，属于间接动态测量思路。
2010	间接动态 测量	国内	[18]	通过在两辊筒接触区域放置检测片获取接触面积，并据此估算印刷压力大小，属于基于接触面积的间接压力检测方法。
2016	间接动态 测量	国内	[19]	在测量肩铁距离的基础上提出印刷压力与肩铁距离的关系式，为通过滚筒/肩铁间距间接确定与调整印刷压力提供依据。

续表

2022	间接动态测量	国外	[20]	将温度传感器与距离传感器集成在滚筒内部,并采用导电滑环传输数据,以补偿环境变化导致的温漂并提高辊间状态监测稳定性。
2022	间接动态测量	国外	[24]	在轧机背衬轴承人为空腔中布置光纤传感器,利用光学信号随温度与压力变化的特性监测机械系统负载和热安全状态。
2025	间接动态测量	国内	[14]	提出将压力传感器埋入施压辊辊体外侧内壁的印刷压力调节装置,为避免传感器直接置于压区提供思路,但文中缺少实际验证结果。
2008	印刷压力建模	国内	[35]	以三辊轧管为对象,基于 Navier-Stokes 方程、流函数法和能量法建立变形区速度场与平均单位压力公式,为相似辊压结构的压力建模提供方法启示。
2010	印刷压力建模	国内	[32]	建立压印滚筒-橡皮滚筒挤压有限元模型,并用 Fuji 压力测试系统验证,发现轴向压力分布近似 M 形,为胶印压力分布建模提供依据。
2010	印刷压力建模	国外	[33]	将瓦楞纸板柔印后印中的条纹问题归因于压区压力周期变化,结合非线性有限元、印刷实验和流体转移模型建立瓦楞结构、压区压力、油墨转移与印刷密度之间的因果链。
2012	印刷压力建模	国外	[29]	以 Hertz 接触和弹性层模型为基础,分析辊式软光刻中 PDMS 微结构印章与基底的接触压力、微结构塌陷、表面能、辊位移和过程窗口关系。
2012	印刷压力建模	国外	[30]	围绕两个圆柱之间的压力作用建立接触力学分析模型,用于解释胶印滚筒等金属-橡胶或橡胶-橡胶接触中的压力与压缩变形关系。
2013	印刷压力建模	国外	[31]	建立滚筒压缩量、接触区宽度和夹紧力之间的关系,将杨氏模量、泊松比、辊半径等因素纳入胶印墨辊/润湿辊接触分析。
2020	印刷压力建模	国外	[34]	指出高速印刷下纸板、橡皮布和聚合物印版的黏弹性不可忽略,推导承印物在不同理论模型下的印刷压力变化规律。
2009	印刷压力控制	国外	[36]	设计五轴柔性定位卷对卷多层微接触印刷机架,显著降低轴间耦合,为后续高精度压力与位置控制系统提供机械结构基础,但控制方式仍偏开环。
2010	印刷压力控制	国外	[39]	针对卷对卷印刷辊筒跳动引起的压力波动,提出结合遗传算法的气动压力动态控制模型,通过辊间间隙间接调控印刷压力。
2016	印刷压力控制	国内	[37]	在柔性定位卷对卷印刷结构基础上,结合位移传感器、负载传感器、解耦控制、PID 和串级控制,实现高精度定位、套准与压力控制。
2017	印刷压力控制	国内	[38]	进一步发展柔性结构多层卷对卷印刷系统,利用传感器反馈与控制策略提高层间套准、定位和印刷过程稳定性。
2017	印刷压力控制	国外	[40]	提出空气阻尼器与音圈电机并联的混合执行结构,由空气阻尼器承担静态力、音圈电机补偿动态扰动,提高辊跳动、偏心、圆度和圆柱度误差下的压力抗扰性能。
2018	印刷压力控制	国外	[41]	将辊筒跳动视为卷对卷压力不均匀的可预测来源,通过辊间间隙和跳动补偿实现印刷压力均匀化。
2020	印刷压力控制	国外	[16]	利用频响函数和时间延迟预测器补偿辊跳动,并采用自适应前馈控制削弱补偿后的残余周期压力误差,实现卷对卷印刷压力均匀化。
2021	印刷压力控制	国外	[42]	将压印辊和版辊沿宽度方向分为多个测点,测量旋转可重复跳动,建立包含接触压力、负载传感器测力和辊跳动的状态空间模型,并用于交叉耦合扭矩控制。

2. 直接测量方法

2.1. 直接动态测量

直接动态测量是指在印刷生产过程中能够直接得到辊间印刷压力值的测量方法,国内外学者在平板

印刷与凹印装备上提出此分类下的方法,一般做法是将压力传感器放置于辊筒与包裹辊筒的橡皮布之间,优点是橡皮布对传感器起到了保护作用并且其形变特性消除了传感器厚度对印刷本身的影响,缺点是测量区域与压印区域间隔一层橡皮导致了误差的存在,难点是传感器本身随着辊筒做旋转运动、其电力来源与数据传输需要针对解决且前端的传感器需要良好的防潮防水、重复精度、寿命、体积。日本国立印刷局胜侯谦二等[6]于上世纪 80 年代提出了一种凹版印刷机的印刷压力检测方法及其检测系统,该发明将应变片埋置于凹版版面下方,并通过无线收发装置接受旋转中的压力传感器数据,数据处理流程如图 2 所示。芬兰汇川集团与芬兰美卓公司[7]于 2009 年公开了一种用于测量印刷机印刷单元压力分布的方法及装置,该专利在压力传感器的放置方式上做出了改进,通过使用多种压力传感器以不同方向放置在印刷机不同位置(包括放置在橡皮布背面)得到了横向和纵向的压力分布。目前国内暂未在公开文献中检索到柔印装备中印刷压力的直接动态测量方法。在碳纤维制造领域,加拿大不列颠哥伦比亚大学 Xiulun Yin [8][9]设计了智能辊筒,如图 3 所示,在滚筒内部集成了数据采集与传输电路并利用辊筒表面均布的电容传感器,实现了铺丝机铺丝压力的精确控制。铺丝机滚筒的工作环境与柔印机压印滚筒类似,均是通过滚筒自身的挤压作用完成对应的生产动作,该智能滚筒实现了直接动态的测量方法,通过阵列电容传感器重建了压印接触区域的三维压力数据,并通过无线方式完成了数据传输,值得借鉴,但铺丝不需要面对复杂的液体环境,在防水方面需要做针对性改进。

直接动态测量方法在以下共性方面面临挑战:旋转工况下传感器的供电与数据传输、前端器件在防潮防水、重复精度、寿命与体积方面的综合约束,以及橡皮布间隔层使测量面偏离真实压区所引入的误差;目前该方法在柔印装备中仍缺乏公开的工程化方案。较有潜力的突破口是将阵列式压力传感器与

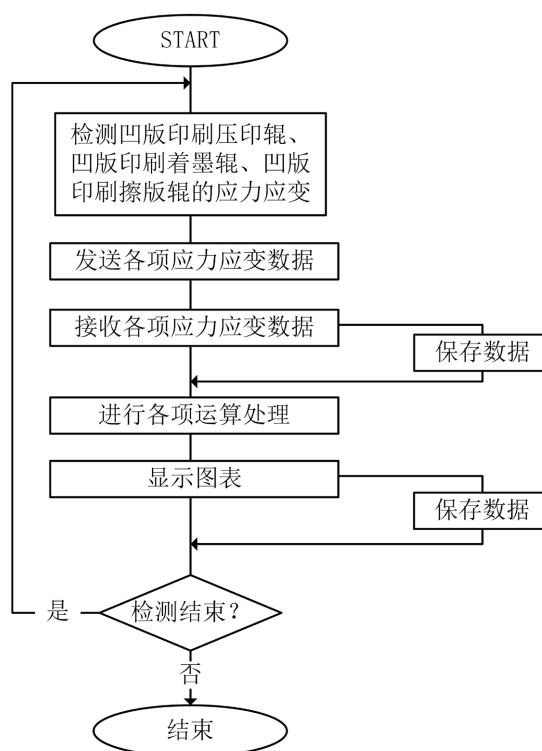


Figure 2. Data processing workflow for gravure printing pressure data (redrawn based on Ref. [6])

图 2. 凹印印刷压力数据处理流程(根据文献[6]重绘)

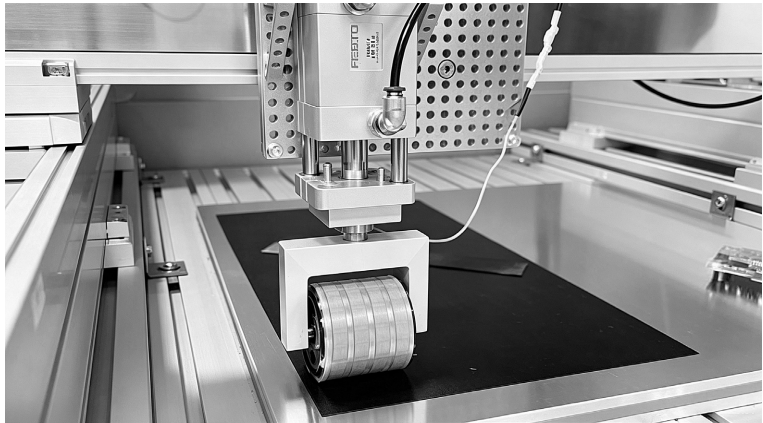


Figure 3. Photograph of a carbon fibre smart filament-laying roller (cited from Ref. [9])
图 3. 碳纤维智能铺丝滚筒实物图(引自文献[9])

采集传输电路集成于辊筒内部，以无线方式重建压区三维压力分布，并针对柔印油墨与清洗液环境补强防水与抗污染能力，使直接动态测量能够从凹印、铺丝等相邻工况迁移到柔印压区。

2.2. 直接非动态测量

直接非动态测量是指需要在非印刷生产状态(例如走纸实验等条件)下才能实施测量得到辊间印刷压力值的测量方法，这类方法经常用于停产状态下的压力调试，常用的实验用具包括一次性感压胶片、附着于承印物表面的一次性压力传感器，以及可复用的压区宽度检测尺，缺点是停机状态下各种影响因素与真实生产时不一定相同，并且不能在印刷生产时实时测得印刷压力。北京印刷学院边亚超[10]在对凹版印刷机辊筒间压力进行理论建模与有限元分析的基础上，并使用感压胶片[11]对其进行了实验验证。瑞典国家研究院纸浆研究所 Blohm [12]与卡尔斯塔德大学 Johanna Johnson [13]提出了在传感器尺寸与压印区长度接近情况下估算最大印刷压力的计算程序，更准确地校正了峰值印刷压力，传感器布置如图 4

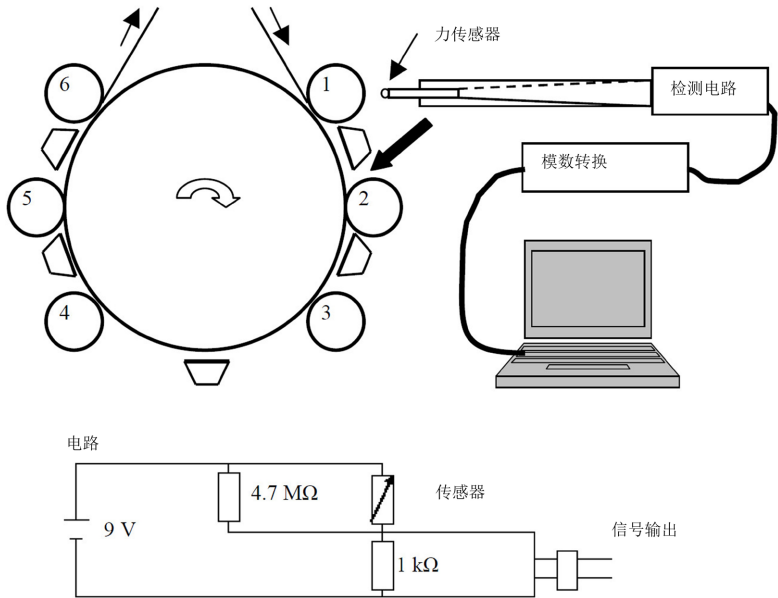


Figure 4. Direct, non-dynamic sensor arrangement (redrawn based on Ref. [12] [13])
图 4. 直接非动态测量传感器布置(根据文献[12] [13]重绘)

所示。另外,北京印刷学院张睿[14]和张改梅[15]等各自提出了一种印刷压力测量和调节控制系统,说明了得到压力传感器数据所需要的信号处理电路,但是未明确指出压力传感器与印刷机是如何连接的。

3. 间接测量方法

3.1. 间接动态测量方法

间接测量方法的测量对象众多,包括如下:压区宽度、辊筒支架形变、辊筒轴承压力、滚筒距离、肩铁距离、图文信息(墨量、色彩、尺寸),基本都属于间接动态测量方法,可以在印刷生产过程中使用,缺点是测量对象与印刷压力的关系需要理论建模再应用到实际测量,理论建模的精度达到一定要求就需要建模的全面、逻辑正确,然而理论建模往往不能考虑到所有影响印刷压力变化的因素、也不能通过数学物理关系明确地量化测量对象与印刷压力的关系,例如温度变化对印刷压力的影响。有众多学者通过改变压力传感器的测量位置即测量对象来避免直接放置在辊间接触区域带来的供电、数据传输、干扰、传感器性能要求等难题:张涛等[16]发明了一种调节印刷压力的装置,其压力传感器埋于施压辊辊体外侧内壁,但是没有实际的验证结果;陈勋等[17]使用应变式压力传感器监测辊筒支架上的变形间接得到印刷压力;如图5所示,Young-Man Choi [18]等通过在印刷辊筒与其调压结构的连接处放置压力传感器间接测量水平的印刷压力大小,理论上来说这样测得的数据是准确的,但是与辊间压力的关系需要理论验证且受两辊筒接触方式影响较大;德国国营印刷设备联合企业 Veb Kombinat Polygraph [19]于1982年公开了一项名为印刷压力控制装置的发明专利,该专利提出将压力传感器置于滚筒轴承内与压力中心线重合的位置,并说明了信号处理与控制电路。

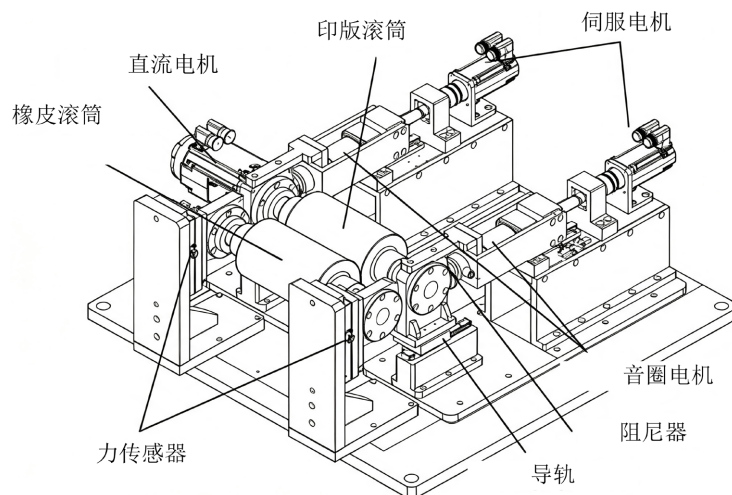


Figure 5. Experimental setup for indirect dynamic measurement methods (redrawn based on Ref. [18])

图 5. 间接动态测量方法实验装置(根据文献[18]重绘)

除了广泛应用压力传感器测量印刷压力,众多学者使用温度传感器、距离传感器、宽度传感器间接测量与印刷压力变化相关的物理量。天津大学邱超等[20]在两辊筒直接接触区域放置检测片测得接触面积后估算印刷压力的大小,估算原理如图6所示。由于两辊筒间距离直接影响着印刷压力的大小,因此使用距离传感器的方法较多,但是测量距离的位置有多种:李来平等[21]在测量肩铁距离的基础上,提出了印刷压力与肩铁距离的关系式,为间接测量实际应用提供了依据;日本东洋制罐株式会社的高树伊织等[22]于2022年公开了印刷机及其状态监测方法,该方法将温度与距离传感器集成在滚筒内部,解决了由于环境变化导致的传感器温漂现象引发的距离传感器测量不准确的问题,并使用导电滑环解决了无线

传输受杂波影响的问题,提高了监测系统准确性与稳定性。

公开文献中,除了使用辊对辊机构进行印刷的机械装备以外,还有众多工业制造领域的装备在使用辊对辊机构:轧制、压延、造纸、铺丝。在轧制领域, Eugenio 等[23]在轧制机背衬轴承上的人为空腔中使用光栅传感器,利用光的折射率随环境温度、压力等因素的变化,实现了对机械系统负载情况的监控,光栅传感器在轧制机中的安装位置如图 7 所示;ABB 公司的 Stressometer systems 系统[24]通过在辊筒内部排列磁传感器来检测带钢的横向张力变化,且循环使用寿命超过 20 年。如图 8 所示,在造纸领域,德国光子技术研究所 Wolfgang [25]在造纸机压机部分均布光栅传感器阵列 DTG 得到了辊筒压力测量结果,并提出了测量系统数据无线传输方案。上述制造领域的装备虽非柔印机,但其辊对辊接触与高速旋转工况相近,轴承空腔或辊内布置光栅、磁传感器并实现长期在线监测,以及造纸机压区光栅阵列与无线传输,对柔印间接动态测量具有工程借鉴意义。需要注意的是,轧制与造纸的压强量级和接触刚度明显高于柔印,传感器量程、防护与标定不能直接套用。就间接动态测量整体而言,共性挑战在于测点不在真实压区,印刷压力需由支架变形、轴承受力、辊缝或温度等物理量经模型反演得到,精度受建模完备性及温度、速度等因素制约;较有潜力的突破口是将辊内多传感器集成与温漂补偿、导电滑环或无线

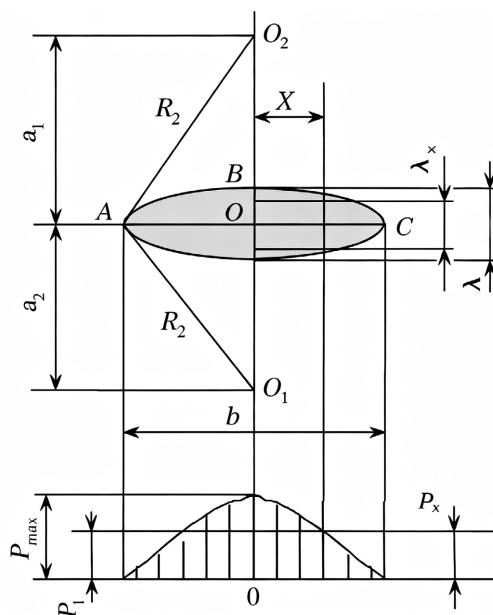


Figure 6. Principles of printing pressure estimation (redrawn based on Ref. [20])

图 6. 印刷压力估算原理(根据文献[20]重绘)

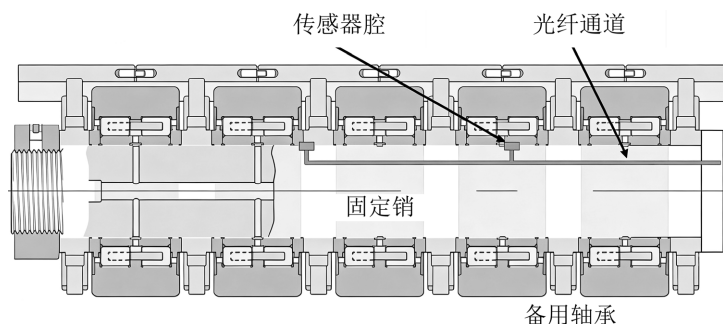


Figure 7. Installation locations for grating sensors in rolling mills (redrawn based on Ref. [23])

图 7. 光栅传感器在轧机中的安装位置(根据文献[23]重绘)

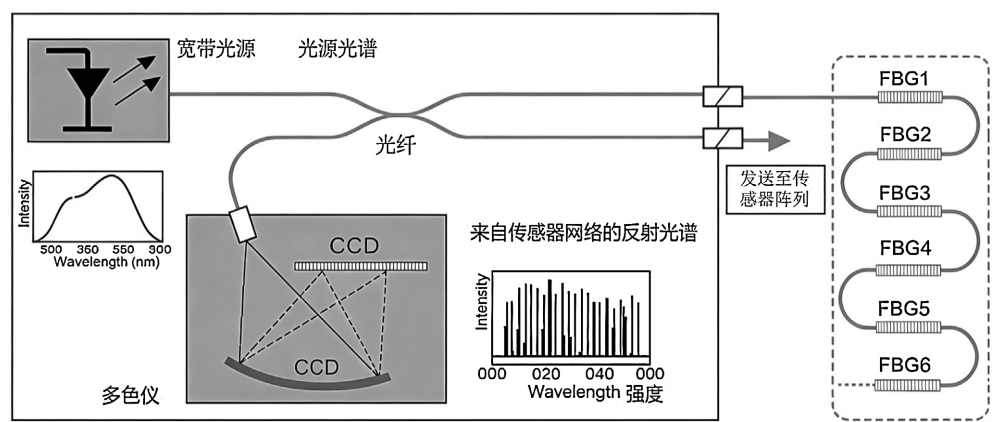


Figure 8. Principles of measurement in grating sensor arrays (redrawn based on Ref. [25])
图 8. 光栅传感器阵列测量原理(根据文献[25]重绘)

传输结合起来，并针对柔印低压区建立可标定的映射关系。

3.2. 间接非动态测量方法

传统的印刷压力手工测量方法是 将尺子塞入压印区域，调节辊间距离至合适，由此方法衍生出了自动化完成压印区宽度测量的工具。Nip Width Indicator 公司[26]发布了手持式的压区宽度测量仪器，可以直接显示压印区域宽度；Countroll 公司[27]在基本的测量压区宽度功能之上，增加了无线数据传输功能，进一步提高了压力调节效率。Tesksan 公司[28]将上述“尺子”形式的传感器做成了平面，可以反应整体压印区域的压力分布。这些需要插入到压印区域的仪器都存在无法对印刷过程中的印刷压力进行测量的缺点。

3.3. 测量方法总结

现有印刷压力测量方法可从直接与间接、动态与非动态两个维度进行分类。如图 9 所示，从精度、实时性、鲁棒性、成本、寿命、产业价值六个方面对上述测量方法进行比较。直接非动态测量方法，

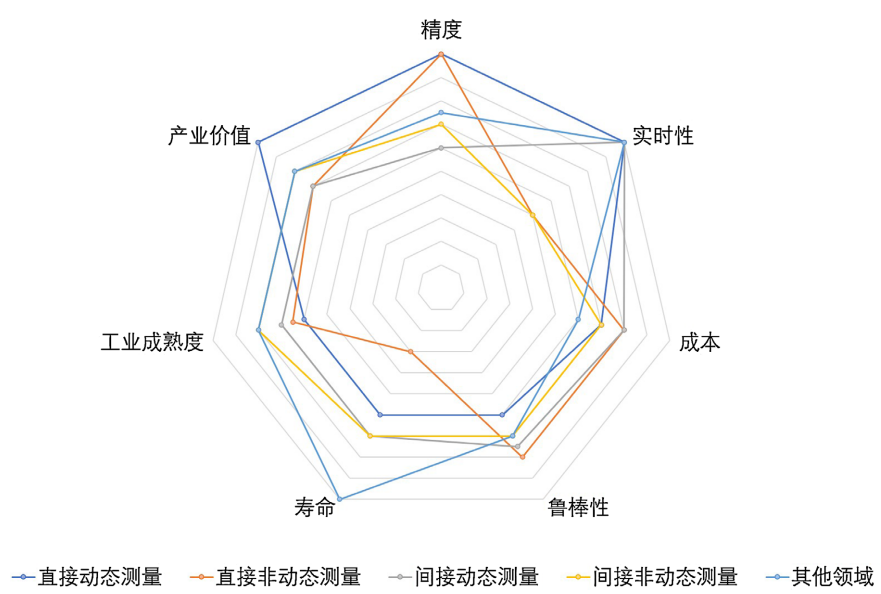


Figure 9. Comparison chart of key parameters for radar-based printing pressure measurement methods
图 9. 印刷压力测量方法关键参数雷达比较图

如感压胶片、压区宽度测量尺和平面压力传感片等,操作相对简单,能够直观反映压区压力或接触状态,适用于设备调试和实验验证,但难以反映真实生产过程中的动态压力变化。间接动态测量方法通过辊筒支架变形、轴承受力、辊间距离、肩铁距离、图文质量或温度变化等物理量推算印刷压力,具有在线应用潜力,但其测量精度依赖于压力与被测量之间的映射模型,容易受到滚筒制造误差、材料黏弹性、温度、速度、油墨状态和承印物性质等多因素影响。相比之下,直接动态测量能够在印刷生产过程中直接获取辊间压力信息,是实现印刷压力闭环控制和压力场重构的理想方案,但目前在柔印装备中的公开研究和工程应用仍较少,仍面临传感器嵌入、信号无线传输、供电、耐压耐磨、测量扰动和长期稳定性等关键难题。

4. 辊间印刷压力理论建模

传统的辊间压力建模多以 Hertz 接触为代表,把“辊对辊”或“辊对平面”的印刷压区抽象成接触力学,一般考虑滚筒半径、接触区宽度、承印物压缩量、材料杨氏模量与泊松比。麻省理工学院 Petrzalka [29] 的辊式软光刻建模直接以 Hertz 接触和弹性层模型为基础,把 PDMS 微结构印章与基底之间的接触压力、微结构塌陷、表面能、辊位移和过程窗口联系起来,显示当特征尺度降至微米级时,辊位移和几何扰动对接触压力极端敏感;华沙理工大学 Jurkiewicz 与 Pyryev [30] [31] 的胶印滚筒/墨辊压力模型也沿用了接触力学框架,一篇针对胶印滚筒,使用非线性橡皮布应力-应变模型,建立压力、压缩量和接触区宽度之间的关系;另一篇针对胶印墨辊/润湿辊中的金属-橡胶接触,把杨氏模量、泊松比、辊半径、夹紧力、压缩量和接触宽度联系起来。张少华等[32]在经验理论和 Hertz 接触之外,用 ABAQUS 建立压印滚筒-橡皮滚筒挤压模型,并用 Fuji FPD9210 压力测试系统验证,得出轴向压力近似 M 形,仿真模型与结果如图 10 所示。这类以接触力学为基础的研究缺陷在于没有考虑不同印刷速度下,材料松弛和粘弹性恢复的影响。

瑞典中部大学 Holmvall [33]把瓦楞纸板柔性版印刷中的“条纹”问题归结为压区压力周期性变化,采用非线性有限元、印刷实验和流体转移模型,建立了“瓦楞结构-压区压力-油墨转移-印刷密度”的因果链。其所建压区是钢辊芯、衬垫、粘版膜、印版与承印物构成的多层异质堆叠:钢辊芯取线弹性,开孔聚氨酯泡沫衬垫采用 Hill-Ogden 可压缩泡沫超弹性,粘版膜(Mylar)取线弹性,感光聚合物印版采用 Mooney-Rivlin 超弹性以计入有限应变,承印物取正交各向异性线弹性。Holmvall 将上述材料一律按弹性处理,应力与应变一一对应、卸载完全回弹。参数研究表明,对瓦楞柔印压区压力波动贡献最大的是感光聚合物印版和面纸。

Yang [34]在引言中明确引用 Holmvall 的柔印压区力学工作,并指出其模型多把材料视为弹性体。实验室压区压力测量多为准静态,而柔印车速达 300~600 m/min 时压区驻留仅数毫秒,黏性项(应力与应变率成正比)会压过弹性项,因而同一几何间隙下峰值压力、有效压区宽度和波形对称性随转速变化,Hertz 接触或纯弹性有限元无法给出唯一的压力结果。Yang 将印版、橡皮布、衬垫泡沫和纸板作为压区叠层

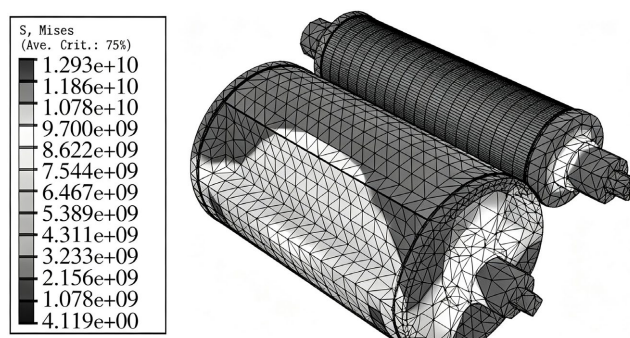


Figure 10. Simulation results for offset printing cylinder compression (redrawn based on Ref. [32])

图 10. 胶印滚筒挤压仿真结果(根据文献[32]重绘)

的基本块,以弹簧-阻尼单元由已知几何压缩反演压区压力——生产调机给出的是间隙而非压力,应变率与车速成正比。分别取 Maxwell 模型(弹黏串联)时、Kelvin-Voigt 模型(弹黏并联)时、多层 Burgers 模型时、产生三类可观测后果:速度硬化;压力波形不对称、峰值偏离几何中心;有效压区宽度随本构反向变化——Maxwell 材料车速升高时压区变宽, Kelvin-Voigt 材料车速升高时压区变窄。衬垫蠕变还会造成班次内压力的缓慢漂移。

油墨流变进一步增加了压力建模的耦合维度。Holmval [33]在流体转移模型中采用 Navier-Stokes 方程与扩散界面两相流;但在柔印真实时间与长度尺度上,油墨更接近弹性凝胶而非可自由渗流的流体,油墨与纤维的作用集中于最表层、渗透深度小于纤维厚度,控制转移量的主因是真实接触面积,而接触面积由压区压力和表面形貌决定。Holmval 承认尚未实现流固双向耦合。柔印轻压印刷条件下油墨膜厚约 $2\sim 15\ \mu\text{m}$,与压缩量同量级,省略油墨层所引入的误差较胶印更大。

与印刷压力相似的轧制压力研究提供了另一条方法。如图 11 所示哈尔滨工业大学 Sun 与太原理工大学 Yuan [35]在 2008 年进一步针对三辊轧管,用 Navier-Stokes 方程和流函数法建立铸轧变形区速度场,强调必须根据真实物理模型建立速度边界和压力场,用能量法建立变形区许可速度场,推导平均单位压力公式,并用现场铝管轧制数据验证。虽然不是印刷研究,但对相似辊压结构的印刷压力建模有方法启示:压力不能仅靠经验公式给出,而应由几何、材料流变、速度场或变形场共同决定。

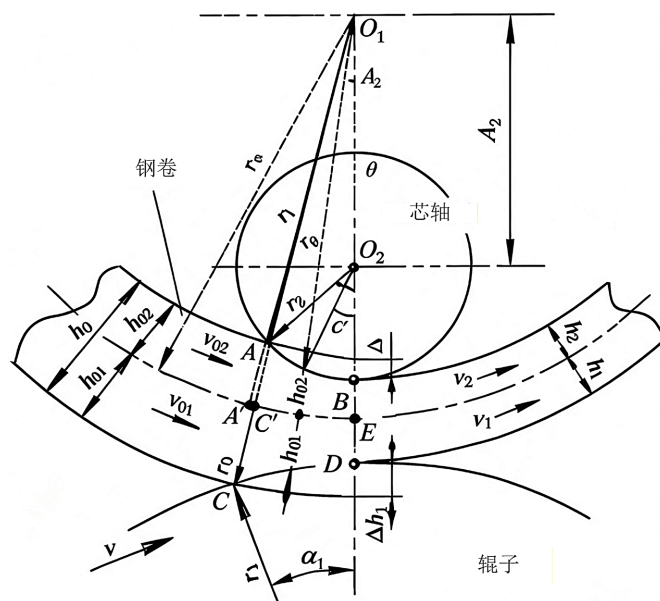


Figure 11. Theory of pressure modelling in three-roll rolling (redrawn based on Ref. [35])
图 11. 三辊轧制压力建模理论(根据文献[35]重绘)

柔印压区压力建模之所以复杂,是因为多层异质本构不能并成一个等效 Hertz 模量,应变率随车速使黏性项改变峰值、对称性与有效宽度并造成速度硬化与转周残余变形,且油墨在柔印尺度上更接近弹性凝胶、压力场与流体场必须耦合。Petrzelka、Jurkiewicz 与 Pyryev 以及张少华等[29]-[32]的 Hertz 接触、弹性层和 ABAQUS 弹性挤压忽略了时间尺度;Sun 与 Yuan [35]的轧管流场建模提供了速度场与压力场应由真实物理模型共同决定的方法启示,但并不能替代柔印压区内多层黏弹性与油墨凝胶弹性的耦合描述。

总结来看,印刷压力建模考虑的影响因素愈发全面、建模计算场景更加贴近实际生产,包括从构成印刷运动的机械结构及其材料特性到实际印刷生产过程带来的工况变量。

5. 辊间印刷压力控制

由于得到印刷压力值的研究较少,印刷压力控制指标暂无统一标准。这里以控制领域的稳定性、准确性、快速性作为综述分类属性。印刷压力控制面临辊间压印区域压力均匀性、准确性、鲁棒性、控制极值等控制指标。辊筒偏心、圆度与圆柱度误差以及径向跳动使两辊轴距按转周周期变化;高刚度滚珠丝杠将微米级几何误差映射为周期性力波动,构成印刷压力控制必须面对的典型扰动。如图 12 所示,麻省理工学院 Baldesi 等[36]原创性地设计了五轴柔性定位结构的印刷机架,实现系统轴间耦合仅为 8%,但控制框架仍然是开环调节;香港中文大学 Xi Zhou [37]与 Chenglin Li [38]在此结构基础之上,利用电容位移传感器、涡流传感器和负载传感器进行实时反馈,采用解耦控制、PID 控制和串级控制来抑制跨轴与跨平台耦合,使用视觉算法用于层间套准,实现了百纳米级别的定位与套印精度以及 0.5 N 级别的压力控制精度,控制方法框图与控制效果如图 13 所示。Zhou [37]在同源实验中给出了更细的开环与闭环对照:开环下一整转印刷力波动约 10N,来源为偏心与印版包辊接缝;闭环后辊两端位置差不大于 500 nm (约 $\pm 2 \mu\text{rad}$),2 N 力台阶无超调,纳米图案印刷所需力约为 $3 \pm 0.025 \text{ N}$ 。解耦与串级 PID 能够压低慢变平行度误差和力偏置,但对转频谐波扰动存在相位滞后,难以单独消除周期性跳动。

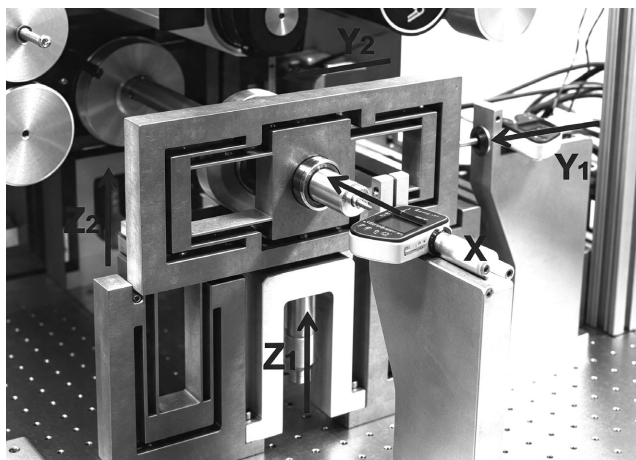


Figure 12. Photograph of a five-axis flexible positioning mechanism (redrawn based on Ref. [36])

图 12. 五轴柔性定位机构实物图(引自文献[36])

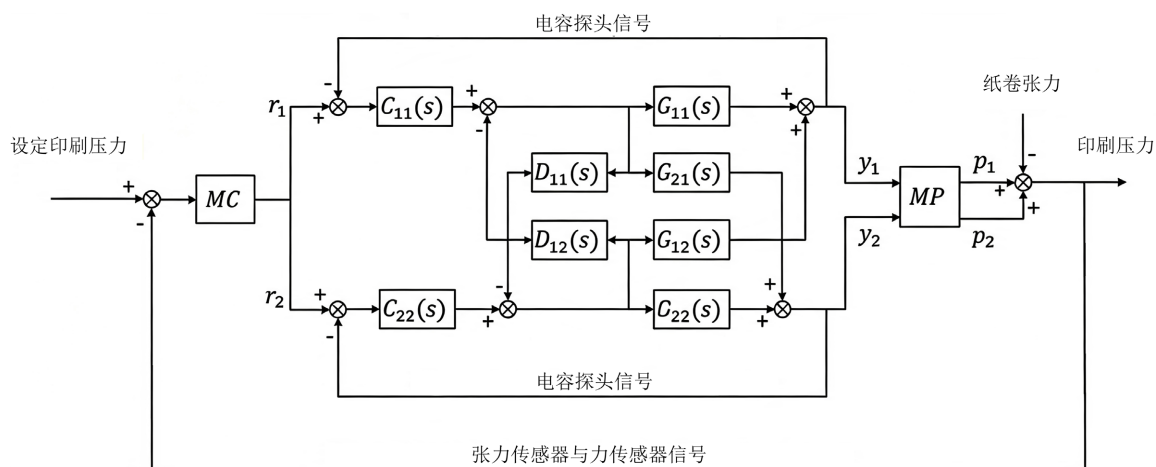


Figure 13. Block diagram of decoupling, PID and cascaded control (redrawn based on Ref. [37])

图 13. 解耦、PID、串级控制框图(根据文献[37]重绘)

2010 年韩国亚洲大学 Kyung-Hyun Choi 等[39]通过辊间间隙间接控制印刷压力, 针对卷对卷印刷中的辊筒跳动做了深入研究, 提出了结合遗传算法的气动压力动态控制模型: 通过 MATLAB 仿真显示整定时间约为 0.175~0.2 s, 稳态误差为 3.3%。其原理是把辊间间隙当作间接压力, 以气动执行器结合反步或全状态反馈并由遗传算法整定; 气动回路带宽有限, 对转周内高频跳动的抑制能力受此约束。2017 年韩国亚洲大学 Young-Man Choi [18]发现传统滚珠丝杠等高刚度机构在辊跳动下会引起较大的周期性力波动, 实验单独采用音圈电机虽然响应快, 但连续出力不足, 于是提出空气阻尼器与音圈电机并联的混合执行结构; 由空气阻尼器承担静态印刷力, 由音圈电机基于负载传感器反馈补偿动态扰动; 实验结果显示抗干扰性能更好, 尤其是抑制由偏心、圆度误差和圆柱度误差引起的周期性压力扰动; 10 N 阶跃在 ± 0.5 N 幅度内约 70 ms 稳定。

2018 年韩国忠南大学 Youngjin Kim [40]也通过辊间间隙间接控制印刷压力, 把辊跳动作为压力不均匀的可预测来源。其做法是先测辊形与径向跳动, 再选择初始相位使两辊几何误差匹配, 以几何前馈降低周期性压力不均匀。2020 年韩国忠南大学 Jihyeon Kim [41]利用频响函数和时间延迟预测器进行补偿, 再针对补偿后仍由重复跳动引起的残余周期误差, 采用自适应前馈控制进一步均匀化压力。该策略用辊形预测压力, 以频响函数描述执行器到负载或压力的传递, 用时间延迟预测器补偿测量滞后, 再按谐波更新自适应前馈以吸收残余转周周期误差, 因而适合重复性谐波扰动。2021 年韩国忠南大学 Jimin Park [42]的工作则进一步解决此前研究中“负载传感器力不等于真实接触印刷压力”的问题: 将压印辊和版辊沿宽度方向划分为 25 个测点, 测量旋转可重复跳动, 并借鉴半车模型建立包含接触印刷压力、负载传感器测力和辊跳动的状态空间模型, 再将估计出的接触压力用于单独驱动交叉耦合扭矩控制, 提高了压力控制精度和抗扰性能。负载传感器力相对真实接触印刷压力存在幅值误差与时间滞后, 沿宽向密布测点是为了由可重复跳动估计接触压力。需要指出的是, 上述工作控制的仍是辊间间隙或轴承负载而非压区压力场, 补偿对象主要是几何跳动, 尚未把印版与衬垫的黏弹性恢复以及油墨 tack 当作扰动。现有前馈与自适应策略对周期性机械扰动有效, 但对速度硬化、转周残余变形和油墨分裂力, 仍缺少以直接压力为反馈的闭环。

6. 结论与展望

总体来看, 柔印机印刷压力研究仍存在以下不足: 一是直接动态测量方法在柔印装备中的公开研究较少, 缺乏成熟可靠的工程化方案; 二是现有测量方法对压力空间分布、时间变化和真实生产状态的描述能力不足; 三是印刷压力建模仍以简化接触模型为主, 对多材料、多场耦合和高速动态工况考虑不够充分; 四是压力控制与印刷质量评价之间尚未形成统一的量化关系, 压力测量、压力预测和质量控制之间缺少完整闭环。针对上述问题, 未来研究可重点从以下几个方面展开: 开发适用于旋转辊筒压区的薄型化、高灵敏度、耐疲劳压力传感器; 建立面向柔印工况的动态压力标定与误差补偿方法; 发展融合压力、位移、温度、图像和振动等多源信息的压力场重构技术; 构建考虑材料黏弹性、滚筒误差和油墨转移过程的多因素耦合模型; 探索基于直接压力反馈和印刷质量反馈的闭环控制方法。

印刷压力是影响柔性版印刷质量、设备稳定性和工艺一致性的关键工艺参数。随着包装印刷、功能印刷和精密辊对辊制造向高速化、高精度化和智能化方向发展, 传统依靠经验调节、压区宽度判断和停机检测的压力调节方式已难以满足高质量柔印生产需求。实现印刷压力的准确测量、可靠建模与在线控制, 是提高柔印装备制造水平和印刷质量稳定性的基础。其中, 柔印机印刷压力测量技术不仅对提升柔性版印刷质量具有重要意义, 也可为凹印、胶印、涂布、压延、造纸、轧制和自动铺丝等具有辊对辊接触特征的制造装备提供参考。随着传感器技术、电子技术、智能制造和工业 5.0 的发展, 印刷压力的直接动态测量与智能控制将成为柔印装备高精度化、数字化和绿色化发展的重要支撑方向。

基金项目

北京印刷学院校级项目：数字化印刷装备北京市重点实验室建设项目(KYCPT202508)。

参考文献

- [1] 陈虹. 印刷设备概论[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2022.
- [2] 李伟. 我国柔版印刷市场[J]. 广东印刷, 2020(4): 23.
- [3] Sreenilayam, S.P., Ahad, I.U., Nicolosi, V., *et al.* (2020) Advanced Materials of Printed Wearables for Physiological Parameter Monitoring. *Materials Today*, **32**, 147-177.
- [4] Grau, G. and Subramanian, V. (2020) Dimensional Scaling of High-Speed Printed Organic Transistors Enabling High-Frequency Operation. *Flexible and Printed Electronics*, **5**, Article 014013.
- [5] Kim, S., Sojoudi, H., Zhao, H., Mariappan, D., McKinley, G.H., Gleason, K.K., *et al.* (2016) Ultrathin High-Resolution Flexographic Printing Using Nanoporous Stamps. *Science Advances*, **2**, [page]. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601660>
- [6] 謙二勝俣, 史朗古藤. 凹版印刷機の押圧力検出方法及びその検出システム[P]. 日本专利, JPB 004362653. 2009-11-11.
- [7] Pitkänen, T., Lannes, P., Sundquist, M., *et al.* (2009) Method and Arrangement for Measuring the Nip Pressure and/or Pressure Profile in the Nip of a Printing Unit of a Printing Press. WO2009101251A2. <https://patents.google.com/patent/WO2009101251A2/en?q=WO2009101251A2>
- [8] Yin, X., Chen, Z., Bakhshi, N., Tong, O., Xiong, X., Chen, Y., *et al.* (2023) Smart Roller: Soft Sensor Array for Automated Fiber Placement. *Advanced Sensor Research*, **2**, Article 2200074. <https://doi.org/10.1002/adsr.202200074>
- [9] Yin, X., Picciotto, C., Chen, Y., Bakhshi, N., Chen, Z., Gao, J., *et al.* (2025) Smart Roller: Normal and Three-Axis Stress Measurement Sensor Array for Automated Fiber Placement. *Electroactive Polymer Actuators, Sensors, and Devices (EAPAD) 2025*, **13431**, Article 1343118. <https://doi.org/10.1117/12.3053040>
- [10] 边亚超. 雕刻凹版印刷压力测试方法及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京印刷学院, 2021.
- [11] 富士胶片中国. 压力测量胶片[EB/OL]. <https://www.fujifilm.com.cn/cn/zh-hans/business/inspection/measurement-film/prescale>, 2026-06-06.
- [12] Johnson, J., Rättö, P., Lestelius, M. and Blohm, E. (2004) Measuring the Dynamic Pressure in a Flexographic Central Impression Printing Press. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, **19**, 84-88. <https://doi.org/10.3183/npprj-2004-19-01-p084-088>
- [13] Johnson, J., Rättö, P., Lestelius, M. and Blohm, E. (2003) Dynamic Nip Pressure in a Flexographic CI. Printing Press.
- [14] 张睿, 张丁予, 高振清, 等. 一种印刷压力调节控制系统[P]. 中国专利, CN202322616491. 2024-05-14.
- [15] 张改梅, 王辉, 蔡栋生. 一种印刷压力测量装置[P]. 中国专利, CN202088659U. 2011-12-28.
- [16] 张涛, 张钧波, 王鹏. 一种调节印刷压力的装置[P]. 中国专利, CN202421461388. 2025-04-01.
- [17] 陈勋. 胶印机印刷压力检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [18] Choi, Y.M., Kang, D., Lim, S., *et al.* (2017) High-Precision Printing Force Control System for Roll-to-Roll Manufacturing. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **22**, 2351-2358. <https://doi.org/10.1109/tmech.2017.2724578>
- [19] Tappert Hans-Jiirgen, C., Dresden, H.S., Radebeul, H.J., *et al.* (1982) Device for Printing-Pressure Control. US Patent No. US4351237A. https://patents.google.com/patent/US4351237A/en?q=US-4351237-A_1
- [20] 邱超, 吴江, 徐丹辉. 印刷压力检测仪器的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2010(9): 33-35.
- [21] 李来平, 冯淑芳. 单张纸胶印机印刷压力的确定与调整[J]. 印刷技术, 2016(15): 45-46.
- [22] Takatori, I., Hokamura, H. and Hatano, O. (2022) Printing Machine and Method of Monitoring State Thereof. US Patent No. 20220055364.
- [23] Brusa, E., Delprete, C. and Giorio, L. (2022) Smart Manufacturing in Rolling Process Based on Thermal Safety Monitoring by Fiber Optics Sensors Equipping Mill Bearings. *Applied Sciences*, **12**, Article 4186. <https://doi.org/10.3390/app12094186>
- [24] ABB(中国)有限公司. Solid Measuring Rolls for Every Application [Z/OL]. <https://www.abb.com/global/en/areas/automation/measurement-analytics/force-measurement/flatness-measurement/measuring-roll>, 2026-08-08.

- [25] Ecke, W., Schmitt, M.W., Shieh, Y., Lindner, E. and Willsch, R. (2012) Continuous Pressure and Temperature Monitoring in Fast Rotating Paper Machine Rolls Using Optical FBG Sensor Technology. *SPIE Proceedings*, **8421**, 8421AZ. <https://doi.org/10.1117/12.970314>
- [26] NIP Control (n.d.) Nip Width Indicator. <https://www.nipcontrol.com/applications>
- [27] COUNTROLL (n.d.) Precision Matters: Why Nip Measurement is Essential for Roller Performance. <https://www.countroll.com/en/news/why-nip-measurement-is-essential-for-roller-performance/>
- [28] TEKSCAN (n.d.) Nip Measurement. <https://www.tekscan.com/products-solutions/nip-measurement#:~:text=.Supports high temp sensors>
- [29] Petrzalka, J.E. (2012) Contact Region Fidelity, Sensitivity, and Control in Roll-Based Soft Lithography. Massachusetts Institute of Technology.
- [30] Jurkiewicz, A. and Pyryev, Y. (2012) Analysis of Pressure Force between Two Cylinders. *Automation and Robotics*, 11-14.
- [31] Jurkiewicz, A. and Pyryev, Y. (2013) Relationship in between Compression of the Rollers and Contact Area Width and the Clamp Force. *Automation and Robotics*, **4**, 31-36.
- [32] 张少华, 王仪明, 武淑琴, 等. 胶印机印刷压力分布规律的理论及实验研究[J]. 包装工程, 2010, 31(7): 60-62.
- [33] Holmval, M. (2010) Nip Mechanics, Hydrodynamics and Print Quality in Flexo Post-Printing.
- [34] Yang, L. (2020) Printing Dynamics: Nip Pressure and Its Relationship with Materials' Viscoelasticity. *Journal of Packaging Technology and Research*, **4**, 145-156. <https://doi.org/10.1007/s41783-020-00091-z>
- [35] Sun, B. and Yuan, S. (2008) Average Unit Pressure Formula for Three-Roll Tube Rolling. *Journal of Iron and Steel Research International*, **15**, 38-41. [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(08\)60141-7](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(08)60141-7)
- [36] Baldesi, P. (2009) Design and Development of High Precision Five-Axis Positioning System for Roll-to-Roll Multi-Layer Microcontact Printing. Massachusetts Institute of Technology.
- [37] Zhou, X., Wang, D., Wang, J. and Chen, S. (2016) Precision Design and Control of a Flexure-Based Roll-to-Roll Printing System. *Precision Engineering*, **45**, 332-341. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.03.010>
- [38] Li, C.L. and Chen, S.C. (2017) A Flexure-Based Multi-Layer Roll-to-Roll Printing System. *32nd Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, Charlotte, 29 October-3 November 2017, 393-397.
- [39] Choi, K.H., Thanh, T.T., Su, Y.B. and Kim, D. (2010) Printing Pressure Control Algorithm of Roll-to-Roll Web System for Printed Electronics. In: *Frontiers of Assembly and Manufacturing*, Springer, 187-209. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14116-4_16
- [40] Kim, Y., Kim, M., Kim, T., Kim, J. and Oh, D. (2018) Printing Pressure Uniformization of a Roll-to-Roll System Using Roll Runout. *Microsystem Technologies*, **24**, 4561-4568. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-3941-z>
- [41] Kim, J., Kim, Y., Kim, T., Lee, B., Park, J. and Oh, D. (2020) Printing Pressure Uniformization through Adaptive Feed-forward Control in Roll-to-Roll Printing Process. *Microsystem Technologies*, **26**, 265-273. <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04640-8>
- [42] Park, J., Kim, Y., Kim, H., Kim, J. and Oh, D. (2021) Contact Printing Pressure Uniformization in Roll-to-Roll Process Using Individual Drive Cross-Coupled Torque Control. *Microsystem Technologies*, **27**, 2515-2522. <https://doi.org/10.1007/s00542-021-05213-4>