

基于LBP-色差分析的激光打印文件朱墨时序的 量化识别研究

宁势强^{1,2}, 李忠达¹

(1. 中国政法大学刑事司法学院, 北京 100088; 2. 北京信诺司法鉴定所, 北京 100083)

摘要 激光打印文件中的朱墨时序判断是文件检验领域的重点问题之一。传统检验方法存在主观性强、缺乏量化依据的局限。实验通过模拟“先墨后朱”和“先朱后墨”两类情形,采集不同印油与激光打印墨迹交叉部位的显微图像,结合色差计算(CIE1976公式)与局部二值模式分析法,量化识别朱墨交叉区域的色彩差异变化规律。研究发现,“先墨后朱”情况下,印油形成不均匀的色彩分布,色差值较高,范围为9.6~37.5,纹理特征较为分散;而“先朱后墨”情况下,墨迹相对均匀地覆盖在印油上,色差值较低,范围为1.82~5.36,纹理特征较为集中。“先墨后朱”交叉部位的色差值明显高于“先朱后墨”,且印油种类也会对色差值造成影响。这种差异为激光打印文件朱墨时序鉴定提供了稳定的量化判断依据,能够有效提升检验的客观性。

关键词 激光打印; 朱墨时序; 量化识别; LBP; 色差计算

中图分类号 D918.92

文献标志码 A

Quantitative Recognition of Ink Sequence in Laser-Printed Documents Based on LBP-Color Difference Analysis

NING Shiqiang^{1,2}, LI Zhongda¹

(1. School of Criminal Justice, China University of Political Science and Law, Beijing 100088, China;

2. Beijing Xinnuo Judicial Appraisal Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: The determination of the chronological order of red seals and black printed text in laser-printed documents is one of the key issues in the field of document examination. Traditional examination methods have limitations due to their strong subjectivity and lack of quantitative basis. Experiments were conducted by simulating two typical scenarios: “black first, red second” and “red first, black second”. Microscopic images of the overlapping areas between different types of ink and laser-printed text were collected. By combining color difference calculation (CIE1976 formula) and the Local Binary Pattern analysis method, the variation patterns of color differences in the overlapping areas were quantitatively identified. The results showed that, in the “black first, red second” scenario, the ink formed an uneven color distribution with relatively high color difference values, ranging from 9.6 to 37.5, and the texture features were relatively dispersed. In contrast, in the “red first, black second” scenario, the printed text covered the ink relatively uniformly with lower color difference values, ranging from 1.82 to 5.36, and the texture

收稿日期 2024-11-12

基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金中国政法大学科研创新项目(20ZFQ82005);北京市创新训练项目(S202110053037)。

第一作者简介 宁势强(1988—),男,黑龙江牡丹江人,博士,讲师。研究方向为司法鉴定。E-mail:ningshq@126.com

features were more concentrated. The color difference in the overlapping areas of “black first, red second” was significantly higher than that of “red first, black second”, and the color difference value was also influenced by the type of ink. This difference provides a stable quantitative basis for the chronological order determination of red and black marks in laser-printed documents, effectively improving the objectivity of the examination process.

Key words: laser printing; ink sequence; quantitative recognition; LBP; color difference calculation

0 引言

激光打印文件中朱墨时序的检验一直是文件检验领域的重要研究课题。目前,朱墨时序的检验方法主要分为传统物证分析与理化检验分析两大类。其中,传统物证分析聚焦于激光打印字迹与印章印油的交叉覆盖关系,重点观察字迹的连续性、印油的分布状况等特征,多采用体式显微检验与荧光检验等方法。尽管这些方法具有一定的直观性,但高度依赖鉴定人员的经验判断,在复杂案件中难以确保检验结果的准确性。为提升检验结果的客观性,学者们开始尝试将量化分析引入传统检验流程,以增强检验结果的可验证性^[1-4]。在理化检验分析研究中,学者们关注到朱墨交叉鉴定的准确性与印油的化学组成密切相关,进而提出了采用拉曼光谱技术分析印油成分^[5]、利用“提取-展开”一体化的薄层色谱方法研究光敏印油分类^[6]等研究内容,为朱墨时序检验提供了新的解决思路。

然而,在当前的鉴定实务中朱墨时序的判断仍以传统物证分析方法为主。在“先墨后朱”类型的案件中,通常通过显微镜观察激光打印墨迹表面的印油覆盖情况,以是否出现黄绿色痕迹作为判断依据^[7]。此种鉴定方法已得到业界普遍认可,但其本质仍属于传统物证分析的内容,难以摆脱主观性强、缺乏量化标准的固有局限。为此,本文引入局部二值模式(Local Binary Pattern, LBP)和色差公式,对不同类型印油在激光打印字迹表面的分布特征进行微观观察与量化分析,探索构建基于显微图像特征的量化检验方法,以期缓解现有技术中对经验判断的依赖,为朱墨时序鉴定提供更为科学、可验证的技术手段。

1 激光打印文件朱墨时序的量化识别模型的构建

1.1 激光打印墨迹墨面图像采集

图像采集是后续颜色差异与纹理分布分析的数据基础,也是实现朱墨时序量化识别的前提保障。

因此,有必要建立统一的标准化图像采集流程。本模型的图像采集流程如下:在激光打印的典型文稿中选择具有代表性的打印字迹样本,利用基恩士 VHX-100F 超景深三维显微镜,在统一且稳定的光照条件下对朱墨交叉区域进行显微拍摄,得到统一分辨率的墨面图像。拍摄过程中将镜头聚焦于激光打印形成的连续性较好的墨迹区域,即墨迹表面较为平整的部分,以清晰反映墨粉分布与印油痕迹之间的典型交互特征。同时,为避免外界干扰,采集过程中对纸张背景区域、非目标墨点区域进行适当屏蔽,并对采集得到的图像进行预处理,包括灰度归一化、裁剪目标区域等图像处理,确保图像质量满足后续数字化分析的要求。

1.2 激光打印墨面印油量化识别模型构建

为了对印油与激光打印墨迹交叉部分特征进行定量识别,本研究提出基于颜色明显程度与分布均匀程度的双指标识别模型。该模型的构建分为两步进行:(1)基于高分辨率显微图像采集到的墨迹表面与印油分布区域图像,利用 Lab 色差分析法计算印油分布区域(黄绿色区域)与纯黑色墨面区域之间的颜色差异程度,以表征印油痕迹的颜色明显程度;(2)通过 LBP 法对印油分布区域的纹理特征进行数字化提取,以获得印油在墨面上分布的均匀程度指标。综合利用色差值(ΔE)与 LBP 纹理特征指标,建立识别各类典型分布模式的定量阈值与模型判定标准,从而实现印油种类及朱墨时序的数字化分类识别。

1.2.1 基于色差公式分析的颜色识别

本研究拟采用国际通用的 Lab 色彩空间对激光打印文件与印章交叉部位进行颜色分析。Lab 色彩空间是一种基于人类视觉感知的色彩模型,其中 L 表示颜色的亮度值, a 表示红绿通道色彩值, b 表示蓝黄通道色彩值。Lab 色彩空间可客观、数字化地描述颜色的视觉差异。在 Lab 空间中,两个颜色之间的色差可通过色差公式(CIE1976 公式)来计算,即公式(1)。

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad (1)$$

式中, L_1 、 a_1 、 b_1 分别为基准色的色彩值, L_2 、 a_2 、 b_2 分别为对比色的色彩值, ΔE 即为两者之间的色差值。

采用 Lab 色差分析, 而非绝对色值进行判断, 是基于以下两点考虑: 首先, 实际检验过程中, 印油盖印动作与墨粉浓度不稳定, 难以提供统一标准的绝对颜色参考值; 其次, 图像采集过程中光源条件、环境因素等会导致所采集图像的绝对色彩值与原始物理颜色存在误差。通过严格控制图像采集过程中的光照环境、拍摄距离与仪器参数, 能够确保所获得的 Lab 色差值的相对稳定性, 避免绝对色值波动对结果造成干扰。

在采集并预处理后的朱墨交叉显微图像中, 在未沾染黄绿色印油的纯墨面区域随机选取若干个色点, 计算平均色值记为 Lab_1 ; 再在印油沉积区域随机选取 30 个色点, 求取这些色点的平均 Lab 值记为 Lab_2 。随后应用上述色差公式计算 Lab_1 与 Lab_2 之间的色差值 (ΔE), 以量化表示黄绿色印油在激光打印墨迹表面的颜色明显程度。该色差指标可作为进一步判别印油分布模式的重要定量特征。

1.2.2 基于 LBP 分析的分布均匀程度识别

印油在激光打印墨面上的分布均匀程度是进行朱墨时序鉴定的重要指标之一。为了实现对印油分布特征的客观量化, 本模型采用 LBP 进行纹理分析。LBP 是一种经典的纹理分类特征算法, 广泛应用于计算机视觉领域的图像分析任务中, 具有计算简单、高效稳定的优势。

传统的 LBP 方法是以 3×3 像素窗口为基本单位, 对窗口中心像素与其周围 8 个邻域像素的灰度值进行比较。当邻域像素灰度值低于中心像素时, 将该邻域像素赋值为 0, 反之则赋值为 1, 随后根据邻域像素赋值的二进制序列, 得到一个 8 位二进制数, 再转化为十进制作为该中心像素的 LBP 纹理特征值。传统 LBP 计算公式为公式(2)。

$$LBP_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} sign(g_p - g_c) 2^p$$

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, P, R 为窗口中心像素的坐标, p 表示邻域内第 p 个像素, g_p 为邻域像素灰度值, g_c 为中心像素灰度值, $sign(x)$ 为符号函数。传统的局部二值模式中, 一个像素的特征值会包含邻域像素的位置信息,

即形成一个 8 位二进制数字作为特征值 ($p=8$ 时)。

本研究所关注的印油分布均匀程度并不需要传统 LBP 方法中像素的具体位置信息, 而仅需描述印油像素的局部分布密集程度。因此, 本研究对 LBP 算法进行了适当改进: 仅统计 3×3 窗口内邻域像素灰度大于中心像素的像素数量 (即赋值为 1 的邻域像素个数), 并将这一数量作为改进后的 LBP 特征值 (记为 LBP')。LBP' 特征值范围限制在 $0 \sim 8$ 之间, 当窗口内邻域像素数值为 8 时, 表示中心像素周围像素灰度均大于中心像素; 当 LBP' 小于 8 时, 则说明印油像素分布具有一定程度的不连续性或不均匀性, 可表示为公式(3)。

$$LBP'_{P,R} = \sum_{p=0}^{P-1} sign(g_p - g_c)$$

$$sign(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (3)$$

在印油分布较均匀的情况下, 随机像素周围的邻域中印油分布 (灰度值) 变化较多, LBP' 特征值通常会较为分散地分布在 $1 \sim 8$ 之间。反之, 若印油集中于特定区域或分布不均匀, LBP' 特征值将更多地集中在 8 附近。由此, 一张采集图像上的各个 LBP' 特征值的像素数量即可通过直方图表现出来。将特征值为 $1 \sim 7$ 的像素数量求和与特征值为 8 的像素数量的比值来标识均匀度, 记录为 ρ , 如公式(4)。

$$\rho = \frac{\sum_{t=1}^7 a_t}{a_8} \quad (4)$$

式中, t 为特征值标识, a_t 为特征值为 t 的像素总数。

1.2.3 基于 LBP-色差分析模型的确立

本研究拟结合上述 Lab 色差分析法与 LBP 纹理分析法, 形成完整的印油分布特征识别模型。该模型的具体流程为: 对采集到的墨面印油图像进行图像预处理, 分别提取 Lab 色差值 (ΔE) 与 LBP' 分布均匀系数 (ρ), 然后将这两个特征值作为量化指标, 针对不同印油分布类型进行数据比较与分析, 实现对墨迹墨面印油特征的客观、准确识别。基于 LBP-色差分析来进行数字化印油性识别模型流程图如图 1 所示。

2 实验设计

为了验证并完善前述激光打印墨迹印油分布特征的数字识别模型, 进一步探讨不同类型印油在

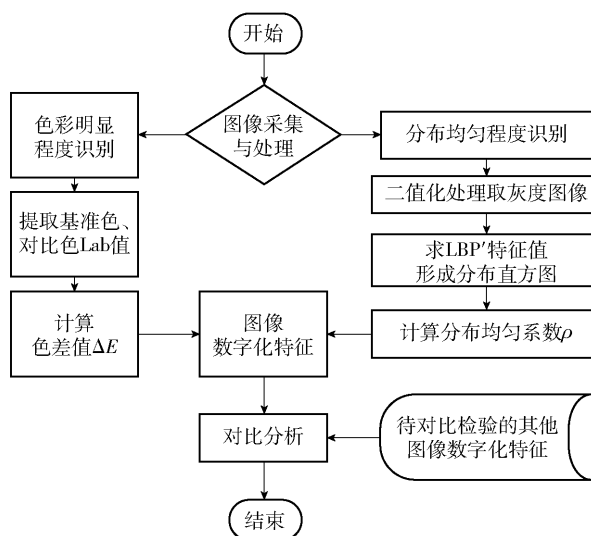


图1 墨面印油痕迹识别流程

激光打印墨迹表面形成的黄绿色痕迹分布特征,本研究通过精细控制盖印活动中的各项变量,设计了系统的盖印实验。实验以不同性质印油及“朱墨时序”交叉部位的显微分布特征为观察对象,采用色差分析法与 LBP 纹理分析法,对印油的显微分布特征进行量化分析与比较,以确定数字化识别模型的可靠性与适用范围。

2.1 实验材料与设备

2.1.1 实验材料

(1)印油:为提高实验结论的实用性与代表性,根据京东电商平台办公耗材销量排名,选择市场流行且具有代表性的 10 种朱红色办公印油作为实验材料(如表 1),涵盖了不同品牌、不同性质(油性、水性、光敏)的产品,以确保实验结果的全面性与实务贴合性。

表 1 实验选用印油目录

编号	印油品牌	印油型号	印油性质	印油描述
1	Deli(得力)	9864	油性	“秒干油性”
2	Deli(得力)	9870	油性	“快干油性”
3	Deli(得力)	9893	水性	“秒干水性”
4	MG(晨光)	97513	油性	无
5	MG(晨光)	97520	油性	无
6	MG(晨光)	97525	水性	无
7	Simma(西玛)	21532	油性	无
8	Shachihata(国产旗牌)	EHP-2	油性	无
9	Shachihata(日产旗牌)	HGN-2	油性	无
10	MG(晨光)	97529	油性	光敏印油

(2)印章:铜章、木质章、牛角章、胶皮章和光敏印章。

(3)纸张:选取京东电商平台销量前 5 位的办公用纸品牌(如表 2)。

表 2 实验选用打印用纸目录

编号	品牌型号	纸张标准	纸张规格	纸张重量
1	得力珊瑚海	Q/NDL97	A4	70 g/m ²
2	晨光	Q/APYVQAF4	A4	70 g/m ²
3	天章纸业	Q/TZ-10	A4	70 g/m ²
4	墨子文化	Q/MZWH001-2023	A4	70 g/m ²
5	亚太森博	Q/ASGD-1	A4	70 g/m ²

2.1.2 实验设备

Canon MF5950dw 激光打印机;VHX-100F 超景深三维显微镜;Adobe Photoshop 2024;SPSS 统计软件。

2.2 实验条件与影响因素控制

2.2.1 印章材料的影响

印章材质可能影响印油的分布状态。由于不同材质表面对印油吸附能力不同,印油在墨迹表面的扩散或沉积特征存在差异。本实验选取铜质、木质、牛角质、胶皮质和光敏印章进行盖印实验。其中光敏印章由于其自储墨的性质,仅使用 10 号油性光敏印油进行盖印,其他 4 种印章分别蘸取表 1 所列的 1 至 9 号不同印油,在相同盖印力度、相同纸张、相同印油蘸取量条件下在激光打印文件上进行盖印。

在排除盖印力度、纸张材料等干扰因素后,发现不同材质的印章在印油分布的颜色明显程度和均匀程度上未显示出显著性差异。因此,印章材质不是影响印油显微分布特征的关键因素,可在实验中统一处理、简化变量控制。

为保持实验的一致性和可重复性,正式实验 1 至 9 号印油采用胶皮印章,10 号印油采用同一光敏印章,以减少因印章材质差异导致的系统误差。

2.2.2 盖印力度影响

盖印力度可能通过影响印油与墨迹表面的接触压力,进而改变印油的扩散范围和沉积状态。为明确盖印力度对印油分布特征的影响,本研究通过预实验对盖印力度进行了测试。选取 20 名不同性别和体型的受试者,使用铜章按照轻(10 N ± 5 N)、中(20 N ± 5 N)、重(30 N ± 5 N)3 档力度,分别蘸取表 1 所列 1 至 9 号印油在激光打印文件上进行盖印,采集实验样本的显微图像,并对不同力度下的分布

特征进行分析。

在轻、中、重 3 档力度下,特征存在显著性差异:在轻力度下,印油痕迹的颜色明显程度较低,分布较为离散;在重力度下,印油痕迹颜色明显程度增大,但由于印油被挤压扩散,呈现均匀状态;在中等力度下,印油痕迹在颜色明显程度与均匀程度之间表现为最佳平衡状态。因此,正式实验统一采用中等力度(20 N ± 5 N)进行盖印,以获得颜色明显程度与分布均匀程度的最佳平衡状态。

2.2.3 纸张材料影响

不同类型的纸张在纤维密度、表面平滑度和对印油的吸附能力上存在差异,可能影响印油在墨迹表面的沉积与扩散特征。为明确纸张类型对实验结果的影响,本研究通过预实验对不同纸张类型进行了测试,选用胶皮印章以中等力度(20 N ± 5 N)蘸取表 1 中 1 至 9 号印油,分别在表 2 中 1 至 5 号纸张的激光打印文件上盖印印文样本,采集显微图像进行分析。

1 至 5 号纸张上印油分布情况未见显著性差异,在粗糙纸张表面,印油痕迹的轮廓清晰度略有降低,但整体分布模式相近。因此,纸张材料对实验结果的影响较小,正式实验统一采用销量最高、纤维密度和吸附能力稳定的 1 号“得力珊瑚海”(型号 Q/NDL97) A4 纸张,以确保实验条件的一致性。

2.2.4 蘸取印油量影响

蘸取印油量直接决定印油在墨迹表面的沉积厚度和饱和程度,进而影响颜色明显程度和均匀度。为明确蘸取量对印油分布的影响,本研究分别设置少(1 次蘸取)、中(2 次蘸取)、多(3 次蘸取)3 档蘸取量。在相同盖印力度(20 N ± 5 N)下选用胶皮章在“得力珊瑚海”(型号 Q/NDL97) A4 纸张的激光打印文件上,分别蘸取 1 ~ 9 号印油盖印印文样本,采集显微图像进行分析。

在蘸取量较少(1 次)时,印油痕迹颜色与均匀度均较差;在蘸取量较多(3 次)时,印油出现扩散现象,颜色较深,印油堆积严重;在蘸取量中等(2 次)时,印油颜色与均匀度较好。因此,正式实验统一采用中等蘸取量(2 次蘸取),以确保颜色明显程度与均匀度之间的平衡。

2.3 实验步骤

2.3.1 样本制备

按照 2.2 中确定的控制变量和实验条件,制备“先墨后朱”的实验样本:

(1) 选择“得力珊瑚海”型号 Q/NDL97 的 A4 纸,用 Canon MF5950dw 激光打印机制作激光打印文件;

(2) 室温、避光、干燥的环境下将上述打印字迹纸张静置 24 h;

(3) 使用胶皮印章、光敏印章(仅限光敏印油),蘸取表 1 所列举的不同印油,每次蘸取印油量控制为中等量(20 N ± 5 N 的力度,蘸取 2 次印油),在激光打印字迹的纸张表面,按照中等力度(20 N ± 5 N)进行盖印,每种印油制作 10 个盖印样本,编号为 1 至 10。

按照 2.2 中确定的控制变量和实验条件,制备“先朱后墨”的实验样本:

(1) 使用胶皮印章、光敏印章(仅限光敏印油),蘸取表 1 所列举的不同印油,每次蘸取印油量控制为中等量(20 N ± 5 N 的力度,蘸取 2 次印油),在空白“得力珊瑚海”型号 Q/NDL97 的 A4 纸上,按照中等力度(20 N ± 5 N)进行盖印,每种印油制作 10 个盖印样本,编号为 11 至 20;

(2) 室温、避光、干燥的环境下将上述印章样本纸张静置 24 h;

(3) 用 Canon MF5950dw 激光打印机在上述盖印印章样本的纸张上打印字迹。

2.3.2 显微图像采集

使用 VHX-100F 超景深三维显微镜,在样本文件形成室温、避光、干燥保存 30 天后,对 20 个印文样本的朱墨交叉区域进行显微拍摄。为避免图像采集偏差,设置统一的 500 倍放大倍率,1 600 × 1 200 分辨率。

在显微镜下,分别对墨迹与印油交叉处进行拍摄,获得不同交叉部位的图像。由于“先朱后墨”样本墨面反映较为稳定,色差变化较小,各样本采集 1 张图像;“先墨后朱”样本交叉处墨迹面反映的黄绿光之间存在色差,为保证实验的准确性,在黄绿光处按照色调变化,分别随机取样本亮处、中间色调、暗处各采集 1 张图像,各样本共采集 3 张图像;采集的显微图像以 JPEG 格式保存,确保数据完整和未经压缩。

2.3.3 图像预处理

使用 Photoshop 软件对采集图像进行标准化处理:使用 Photoshop 软件将色彩模式切换转换为 Lab 色彩空间;使用色阶工具,以“明度(L)”通道将灰度归一化至[0,255],统一图像颜色信息;确保图像质

量一致。使用 Photoshop 软件去除交叉区域外的纸张背景和非目标墨迹区域, 裁剪提取目标区域图像, 完成对图像的去噪、裁剪工作, 分别提取墨迹区域与印油痕迹区域的颜色数值, 以便进行精确的色彩分析。

2.3.4 颜色明显程度量化分析

对“先墨后朱”文件上交叉部位的颜色明显程度量化分析步骤如下:

(1) 在“先墨后朱”文件上没有黄绿色印油反映区域, 使用 Photoshop 内置颜色取样器, 将取样大小设置为“5×5 平均”, 随机选取 30 个色点, 提取 Lab 色彩值, 求取其平均值记为 $Lab_1(L_1, a_1, b_1)$;

(2) 在上述文件上存在黄绿色印油反映区域, 使用 Photoshop 内置颜色取样器, 将取样大小设置为“5×5 平均”, 随机选取 30 个色点, 提取 Lab 色彩值, 求取其平均值记为 $Lab_2(L_2, a_2, b_2)$;

(3) 利用 CIE1976 色差公式, 计算 Lab_1 与 Lab_2 之间的色差 ΔE ;

(4) 记录每个样本的色差值 ΔE , 作为颜色明显程度的量化指标, 记为数据组 ΔE_1 。

对“先朱后墨”文件上交叉部位的颜色明显程度量化分析步骤如下:

(1) 在“先朱后墨”文件上颜色反映较深的区域, 使用 Photoshop 内置颜色取样器, 将取样大小设置为“5×5 平均”, 随机选取 30 个色点, 提取 Lab 色彩值, 求取其平均值记为 $Lab_3(L_3, a_3, b_3)$;

(2) 在上述文件上颜色反映较淡的区域, 使用 Photoshop 内置颜色取样器, 将取样大小设置为“5×5 平均”, 随机选取 30 个色点, 提取 Lab 色彩值, 求取其平均值记为 $Lab_4(L_4, a_4, b_4)$;

(3) 利用 CIE1976 色差公式, 计算 Lab_3 与 Lab_4 之间的色差 ΔE ;

(4) 记录每个样本的色差值 ΔE , 作为颜色明显程度的量化指标, 记为数据组 ΔE_2 。

2.3.5 分布均匀程度量化分析

对“先墨后朱”的文件图像按照色值进行二值化处理, 利用 LBP 算法计算图像各像素的 LBP' 特征值并统计图像中各 LBP' 特征值像素的分布数量, 同时计算每个样本特征值为 1~7 的像素数量求和与特征值为 8 的像素数量的比值, 求得分布均匀系数 ρ 。

鉴于“先墨后朱”样本和“先朱后墨”样本在色彩分布和特征表现上的差异性, 本文仅对“先墨后朱”样本进行了均匀度的量化分析, 而未对“先朱后墨”样本进行类似的分析。

“先墨后朱”样本在色彩分布上存在较大的不均匀性, 主要表现为墨迹与印油的交叉区域中。由于墨迹与印油在渗透性、吸附性和扩散性上的不同, 导致色彩交叉区域呈现出复杂的微观结构特征。这种复杂的交叉结构使得色彩分布在空间上出现较为明显的梯度变化, 进而影响了图像的均匀性。这种情况下, 采用 LBP 算法进行量化分析, 能够通过计算各像素的 LBP' 特征值, 统计不同特征值的像素数量, 进一步通过特征值比值来评估其均匀度, 具有较高的研究价值。

相比之下, “先朱后墨”样本在色彩分布上的表现较为稳定。由于印油的覆盖能力和扩散性较强, 后续覆盖的墨迹在表面形成均匀的涂层, 导致色彩之间的过渡区域较少, 色差不明显。因此, 对于“先朱后墨”样本, 均匀度的量化分析难以揭示复杂的结构特征, 量化分析的实际意义有限。因此, 本研究选择将分析重点放在“先墨后朱”样本上, 通过均匀度的定量评估, 揭示其在色彩叠加和交互作用过程中的微观规律。

2.3.6 数据的统计

统计两种文件上不同印油样本的 ΔE 与 ρ 值, 分别计算其平均值、标准差和变异系数, 并使用 SPSS 统计软件, 采用单因素方差分析 (ANOVA) 法, 分析两种类型文件上不同性质印油之间 ΔE 与 ρ 值的显著性差异。

通过回归分析, 探索 ΔE 与 ρ 值与印油性质之间的相关性, 建立统计模型。

3 结果分析

3.1 颜色明显程度分析

通过 CIE1976 色差公式计算所得色差 ΔE_1 值如表 3 所示。为进一步分析印油性质对 ΔE_1 值的影响, 采用 SPSS 软件进行 ANOVA 分析, 结果如表 4。采用相同方法计算“先朱后墨”情况下的色差 ΔE_2 , 结果如表 5。通过 SPSS 软件, 以印油性质为因子, 对 ΔE_2 中数据做 ANOVA 分析单因素方差, 结果如表 6。

对表 3~表 6 分析可知, 在相同的盖印力度、印油蘸取次数和光照条件下, “先朱后墨”方式盖印的印文, 其墨迹表面色差与印油性质无显著关联 (显著性 >0.05)。且“先朱后墨”形成的印文, 其色差 ΔE 居于 1.82~5.36 之间, 小于“先墨后朱”形成的 ΔE 色差范围 (9.6~37.5)。

表 3 “先墨后朱”各款印油色差统计

数据组	印油种类									
	Deli 9870	Deli 9864	Deli 9893 (水性)	MG 97513	MG 97520	MG 97525 (水性)	Simma 21532	Shachihata HGN-2	Shachihata EHP-2	MG 97529 (光敏)
ΔE_{1-1}	11.4	33.9	27	24.8	18.5	23.2	17	16.9	14.6	19.2
ΔE_{1-2}	11.9	37.5	24.2	21.1	14.5	27.9	21.4	16.9	19.2	20.6
ΔE_{1-3}	9.6	30.4	31.5	22.5	19.9	27.4	20.9	19	20.8	20.8

表 4 “先墨后朱”色差 ΔE_1 ANOVA 分析结果

数据组	分析项目					
	区间	平方和	自由度	均方	F	显著性
ΔE_{1-1}	组间	49.506	1	49.506	1.143	0.316
	组内	346.379	8	43.297	-	-
	总计	395.885	9	-	-	-
ΔE_{1-2}	组间	51.302	1	51.302	0.974	0.353
	组内	421.534	8	52.692	-	-
	总计	472.836	9	-	-	-
ΔE_{1-3}	组间	128.522	1	128.522	4.428	0.068
	组内	232.174	8	29.022	-	-
	总计	360.696	9	-	-	-

表 5 “先朱后墨”全部朱墨重叠取样处色差统计

色值数据	印油种类										
	Deli 9870	Deli 9864	Deli 9893 (水性)	MG 97513	MG 97520	MG 97525 (水性)	Simma 21532	Shachihata HGN-2	Shachihata EHP-2	MG 97529 (光敏)	
Lab ₃	L ₃	30.5	35.6	33.7	34.1	37.5	39	35	34.2	39	38.1
	a ₃	-4.5	-4.2	-5.2	-3.3	-4.1	-2.7	-3.1	-3	-5.5	-5
	b ₃	19.9	22.1	21.8	22.5	23.5	23.8	23.6	23.1	23.5	23
Lab ₄	L ₄	33.9	37.3	37.9	37.5	40.6	42.5	45.8	36.8	41.9	40.9
	a ₄	-1.3	-4.1	-5.5	-5	-5.6	-3.7	-4.7	-4.2	-6.2	-6.1
	b ₄	22.4	23.2	23.1	24.4	24.9	26.1	23.5	23.6	25.2	24.2
ΔE_2		5.36	2.01	4.4	4.27	3.68	4.25	1.82	2.91	3.42	3.26

表 6 “先朱后墨”色差 ΔE_2 ANOVA 分析结果

ΔE_2	平方和	自由度	均方	F	显著性
组间	1.548	1	1.548	1.325	0.283
组内	9.349	8	1.169	-	-
总计	10.898	9	-	-	-

由表 3 和表 4 可知,在相同的盖印力度、印油蘸取次数和光照条件下,“先墨后朱”方式盖印的印文,其墨迹表面色差情况与印油性质无显著关联,3 组数据显著性均大于 0.05。

进一步分析表 1 结果可以发现,色差水平最高的 Deli9864 印油的标签为“秒干油性”,提示其成分可能与其他油性印油存在差异,可能包含水性速干成分,因而可能导致色差水平异常。

为探讨 Deli9864 的影响,将该型号的数据排除后,重新对剩余 9 种数据进行 ANOVA 分析方差,结果如表 7 所示。

由表 7 可知,去除 Deli9864 数据后, ΔE_1 中 3 组数据在组间和组内的方差分析均显示出显著差异(显著性 < 0.05)。这表明在相同盖印力度、印油蘸取次数和光照条件下,不同印油性质之间的色差 ΔE 值存在显著关联性。特别是水性印油在黄绿色色差反映上表现更为明显, ΔE 值较高,提示水性印油与油性印油在色彩反射特性上的本质差异。

3.2 分布均匀程度分析

以 Deli9864 第 2 处采样点为例,其 LBP' 分析结果如图 2 所示。

表 7 “先墨后朱”色差 ΔE_1 ANOVA 分析结果
(去除 Deli9864)

数据组	分析项目					
	区间	平方和	自由度	均方	F	显著性
ΔE_{1-1}	组间	90.187	1	90.187	5.707	0.048
	组内	110.629	7	15.804	-	-
	总计	200.816	8	-	-	-
ΔE_{1-2}	组间	102.240	1	102.240	8.239	0.024
	组内	86.862	7	12.409	-	-
	总计	189.102	8	-	-	-
ΔE_{1-3}	组间	167.556	1	167.556	9.784	0.017
	组内	119.879	7	17.126	-	-
	总计	287.436	8	-	-	-

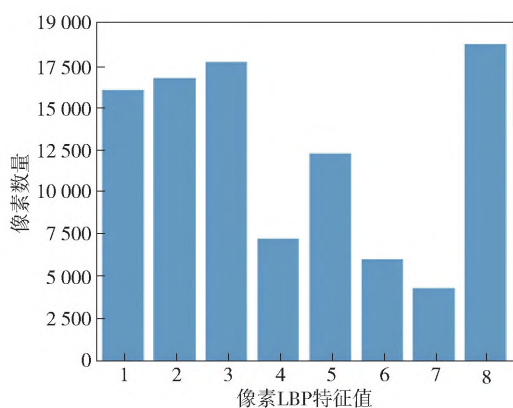


图 2 Deli9864 LBP'特征值分布图

从图 2 可以看出,特征值为 1、2、3 的像素数量分别约为:16 000、16 750 和 17 750,已基本与特征值为 8 的像素数量(约 18 750)相当,表明特征值在像素间的分布较为均匀。因此,可以判定该样本的色彩分布较为均匀。特征值为 1~7 的像素数量总数约是特征值为 8 的像素数量的 440%。

而以 Simma21532 第 2 处采样点为例,其 LBP' 分析结果如图 3 所示。

从图 3 可见,特征值为 1~7 的像素数量远低于特征值为 8 的像素数量(约 90 000),说明特征值在像素间的分布极端化,色彩分布不平均。特征值为

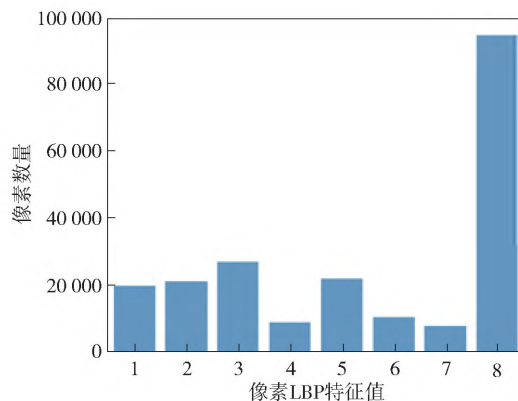


图 3 Simma21532 LBP'特征值分布图

1~7 的像素数量总数约是特征值为 8 的像素数量的 133%。

以 Deli9893 第 1 处采样点作为参照,其 LBP' 分析结果如图 4 所示。

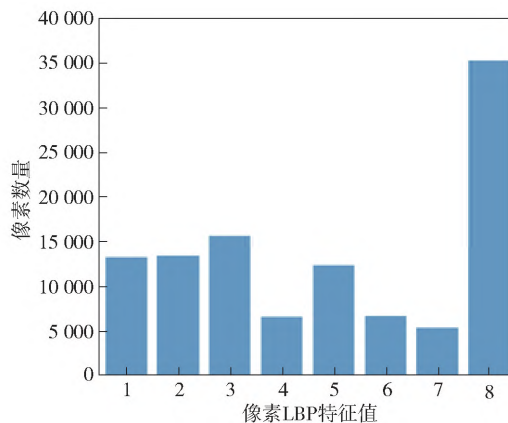


图 4 Deli9893 LBP'特征值分布图

结果显示, Deli9893 的均匀程度略高于 Simma21532。特征值为 1~7 的像素数量总数(约 72 500)约是特征值为 8 的像素数量(约 35 000)的 210%。

为了进一步量化不同印油在“先墨后朱”情况下的分布均匀程度,将特征值为 1~7 的像素数量总数与特征值为 8 的像素数量的比值来标识均匀度,记录为 ρ ,结果如表 8 所示。

表 8 不同种类印油均匀度统计

印油种类	Deli 9870	Deli 9864	Deli 9893 (水性)	MG 97513	MG 97520	MG 97525 (水性)	Simma 21532	Shachihata HGN-2	Shachihata EHP-2	MG 97529 (光敏)
ρ	3.2	4.4	2.1	1.3	1.1	2.1	1.3	1.1	1.7	1.2

为分析印油性质与均匀度之间的关系,使用 SPSS 软件对 ρ 值进行 ANOVA 分析,结果如表 9

所示。

从表 9 中可以看出,在相同的盖印力度、印油蘸

取次数和光照条件下,黄绿色痕迹的分布均匀程度与印油性质之间未表现出显著关联(显著性 >0.05)。

表 9 “先墨后朱”均匀度 ρ ANOVA 分析结果

ρ	平方和	自由度	均方	F	显著性
组间	0.056	1	0.056	0.043	0.841
组内	10.469	8	1.309	-	-
总计	10.525	9	-	-	-

在不同印油中, Deli9864 的均匀度最高, 达到 4.4, 其次为 Deli9870, 为 3.2。这是由于 Deli9864 包含水性速干成分, 与其他油性印油在成分上存在差异, 进而导致在微观结构中形成不同的色彩分布模式。此外, Deli9870 的 ρ 值相对较高, 可能与印台的材质和吸附特性有关, 导致盖印后墨迹的饱和度低于其他印油, 形成较少的黄绿色色块和色斑积聚, 特征值为 8 的像素数量相对减少, 进而使 ρ 值升高。

为进一步确认 Deli9864 和 Deli9870 对 ρ 值的异常影响, 将这两组异常数据排除后, 使用 SPSS 软件对 ρ 值进行 ANOVA 分析, 结果如表 10 所示。

表 10 “先墨后朱”均匀度 ρ ANOVA 分析结果 (去除异常值)

ρ	平方和	自由度	均方	F	显著性
组间	1.000	1	1.000	24.171	0.003
组内	0.248	6	0.041	-	-
总计	1.249	7	-	-	-

在去除 Deli9864 和 Deli9870 数据后, 均匀度 ρ 值在不同印油类型之间的差异达到统计学显著性水平(显著性 <0.05)。这表明, 在相同的盖印力度、印油蘸取次数和光照条件下, 印油性质与色彩分布的均匀程度存在显著关联。

进一步分析发现, 水性印油的均匀程度普遍高于油性印油, 这可能与水性印油在纸张纤维中的渗透性和扩散特性更强有关, 从而在微观层面形成更均匀的色彩覆盖。

3.3 ΔE 与 ρ 值差异成因分析

在“先墨后朱”实验中, ΔE 值和 ρ 值普遍较高, ΔE 值通常在 9.6 ~ 37.5 之间, ρ 值范围在 1.1 ~ 4.4 之间。这是由激光打印文件中的墨粉层特性决定的。激光打印墨粉在加热定影后, 形成具有较强吸附性和较弱扩散性的粗糙表面, 印油在其表面会形成不均匀分布。此时, 随着印油种类不同二者波动也较大, 水性印油的 ΔE 值(平均为 26.89)与 ρ 值(均值为 2.1)显著高于油性印油的 ΔE 值(平均为

18.18)和 ρ 值(均值为 1.28)。这是因为水性印油通常以水及如乙二醇、丙二醇等低黏度极性溶剂为分散介质^[8], 使得印油流动性和扩散性较强。同时水性印油含有的表面活性剂和分散剂, 有效降低了表面张力^[9], 使印油在墨迹表面迅速润散, 结合其依赖水分蒸发的干燥机制, 最终形成范围广、厚度薄且较均匀的色料层。这种色料层平整度高, 有利于光线的有序反射, 从而表现出较高的 ΔE 值和 ρ 值。相较之下, 油性印油以长链烃类为主^[8], 黏度较大、流动性差、扩散性弱, 色料易集中沉积在局部区域, 且油性印油是通过空气氧化形成氧化膜实现干燥^[10], 干燥后表面不平整, 导致光线散射增强, 色彩反射效率下降, ΔE 和 ρ 值都相对较低。

在“先朱后墨”实验中, ΔE 值较低且相对稳定, 集中在 1.82 ~ 5.36 之间。这主要是因为激光打印机在已有印油的纸张上打印字迹时, 墨粉通过加热定影能够牢固地覆盖在印油表面, 形成均匀且完整的涂层, 避免了颜色反射的不均匀性。在这种时序下, 由于墨粉覆盖均匀, 反射光线一致性较强, ΔE 值波动较小, ρ 值较低且分布均匀。墨粉加热定影时形成稳定的覆盖层, 减少了因印油特性差异而带来的色差变化, 使得 ΔE 值较低且稳定。

4 结果应用展望

4.1 色差计算在朱墨时序判断中的应用

通过实验统计分析, 不同的朱墨时序在激光打印墨迹表面的色彩表现存在明显差异。“先朱后墨”情况下, ΔE 值集中在 1.82 ~ 5.36 之间, 均值约为 3.14, 标准差为 1.18, 表现出稳定和一致的色差水平, 且与印油性质之间不存在显著关联。

相比之下, “先墨后朱”情况下, ΔE 值的波动范围在 9.6 ~ 37.5 之间, 均值约为 21.5, 标准差为 6.55, 呈现出更大的波动幅度。通过 ANOVA 分析, 发现 ΔE 值与印油性质之间存在统计学上的显著差异。

根据进一步分析显示, 在“先墨后朱”情况下, ΔE 值最高的印油为 Deli9864, 其色差值为 33.9, 远高于其他印油, 说明 Deli9864 在成分上可能与其他油性印油存在差异。Deli9864 标签中标注为“秒干油性”, 说明其可能含有水性速干成分, 因而在色彩反射特性上表现出更高的色差水平。

剔除 Deli9864 后, ΔE 值在不同印油之间的差异依然显著。这表明, 印油性质在“先墨后朱”情况

下对色差存在显著影响,特别是水性印油的色差值通常高于油性印油。

因此,色差值的取值范围和波动程度可以作为区分朱墨时序的重要依据:

当 ΔE 值在 1.82 ~ 5.36 之间,且 ρ 值波动幅度较小,可判断为“先朱后墨”;

当 ΔE 值在 9.6 ~ 37.5 之间,且 ρ 值波动幅度较大,可判断为“先墨后朱”,尤其是当 ΔE 值超过 25 时,可能为水性印油所致。

4.2 印油性质在激光打印墨迹上的分布特征应用

通过色差分析与 LBP 算法对不同印油在激光打印墨迹上的分布特征进行量化分析,发现不同性质的印油在色彩分布和均匀性方面表现出明显差异。对于水性印油而言,在“先墨后朱”情况下,水性印油形成的黄绿色痕迹 ΔE 值在 23.2 ~ 31.5 之间,均值为 26.89,标准差为 2.95。LBP'特征值分布中,特征值为 1 ~ 7 的像素数量与特征值 8 的像素数量的比值(ρ 值)均值为 2.1。

对于油性印油而言,在“先墨后朱”情况下,油性印油形成的黄绿色痕迹色差 ΔE 值在 9.6 ~ 24.8 之间(排除 Deli9864),均值为 18.18,标准差 3.9。LBP'特征值分布中, ρ 值在 1.1 ~ 1.7 之间,均值为 1.28。通过建立色差(ΔE)和均匀度(ρ 值)的量化标准,可以为朱墨时序检验提供更精确的技术支持和判断依据。

5 结论

本研究选取了 10 种不同性质的印油,采用 CIE1976 色差分析和 LBP 特征值分析法,探究了不同印油在激光打印墨迹上的分布特征。结果表明,“先朱后墨”情况下,墨迹表面 ΔE 值在 1.82 ~ 5.36 之间,明显小于“先墨后朱”情况下的 9.6 ~ 37.5,表明“先朱后墨”时墨层覆盖降低了色彩反射的差异性。

在分布均匀性方面,水性印油在墨迹表面呈现更为均匀的分布特征。实验中,水性印油的均匀度 ρ 值为 2.1,显著高于油性印油的 ρ 值 1.28。

在品牌差异性特征方面,相同印油性质、不同品牌的印油,在色差值、分布均匀程度量化结果上存在共性,并未产生明显差异。

本研究在较理想条件下初步验证了基于 LBP-色差分析的朱墨时序识别方法的可行性,未来仍有若干研究工作需进一步推进。首先,当前研究聚焦

于稳定盖印条件下印油在墨面上的分布规律,未来将拓展至实际检验中常见的复杂情形,如印文模糊、重复盖印、纸张折痕等非理想状态下的样本,以提高模型的适用性;其次,现阶段分析仅限于二维墨面图像,后续研究将引入三维成像与表面轮廓分析手段,探讨墨粉堆积结构对印油扩散与干燥行为的影响机制,完善对三维交互特征的建模;再次,为揭示印油分布的时间演化特征,未来计划设计多时间点的样本采集方案,分析不同印油在墨面上沉积、变色与扩散的历时性变化过程;最后,鉴于同一性质类别下不同品牌印油的成分差异^[11],本研究所构建的种属特征模型仍需通过扩大样本库、增加品牌类型进一步验证其适应范围,以提升模型的精度与实用价值。

参 考 文 献

- [1] 曹淑瑞,徐嘉屿,田洁,等. RGB 颜色数字化特征在手写文件朱墨时序检验中的应用[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版),2023,29(3):1-9.
- [2] 谢刘阳,谢明仁. 打印文件朱墨时序显微镜检验方法研究综述[J]. 广东公安科技,2020,28(3):14-16.
- [3] 衡磊,孟朝阳. 基于颜色数字化特征的朱墨时序判断研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版),2017,23(1):4-9.
- [4] 吴翔,胡稳定. 基于荧光检验的激光打印字迹和印文时序系统分析[J/OL]. 刑事技术,1-8[2025-03-14]. <https://doi.org/10.16467/j.1008-3650.2024.0069>.
- [5] 韩伟,黄建同,王皓. 利用拉曼光谱技术对印泥和印油种类的鉴别[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版),2016,22(2):28-32.
- [6] 朱毅,李彪. 新型薄层色谱法区分光敏印油的实验研究[J]. 广东公安科技,2018(3):30-32.
- [7] 田洁,苏泓滔,游嘉德,等. 多维表观特征分析在朱墨时序鉴定实务中的应用[J]. 广东公安科技,2022,30(4):8-12.
- [8] 章晴. 水性印油印迹的主要成分分析与稳定性研究[D]. 北京:北京化工大学,2011.
- [9] 辛秀兰. 水性油墨[M]. 第2版. 北京:化学工业出版社,2012.
- [10] 陈永常. 纸张、油墨的性能及印刷适性[M]. 北京:化学工业出版社,2004:244.
- [11] 章晴,邹积鑫,石高军,等. 采用 HPLC 区分环保水性印油印迹种类[J]. 刑事技术,2010(2):37-39.

(责任编辑 炼 铮)