

烟标二维码等级影响因素及其质量控制研究

刘琳琳¹, 刘晓畅^{1,2}, 蒋斌³, 孟令东¹, 刘思龙¹

(1. 西安理工大学, 西安 710048; 2. 广东阿诺捷喷墨科技有限公司, 广东 东莞 523808;

3. 湛江卷烟包装材料印刷有限公司, 广东 湛江 524000)

摘要: **目的** 解决烟草包装上二维码质量控制的问题, 为二维码的质量控制提供技术支持。**方法** 设计正交实验, 利用方差分析法确定影响二维码质量等级的关键生产参数, 并使用多元线性回归算法建模二维码质量。**结果** 发现在生产中二维码的符号反差、固有图形污损、调制比的评级最不稳定, 是质量控制的关键; 不同基底表面能对墨滴扩散产生影响, 建立了调制比和固有图形污损的质量预测模型。**结论** 强调评级参数及其影响因素对质量控制的重要性, 利用建模算法实现二维码质量控制, 并指出质量预测模型对支持二维码的质量控制具有重要意义。

关键词: 二维码等级; 烟包; 正交实验分析; 质量控制

中图分类号: TB487 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3563(2024)15-0186-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.15.021

Level Affecting Factors and Quality Control of Cigarette Label QR Code

LIU Linlin¹, LIU Xiaochang^{1,2}, JIANG Bin³, MENG Lingdong¹, LIU Silong¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Guangdong Arojet Inkjet Technology Co., Ltd., Guangdong Dongguan 523808, China; 3. Zhanjiang Cigarette Packing Printing Co., Ltd., Guangdong Zhanjiang 524000, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem in the quality control of QR code on cigarette packaging, to provide technical support for quality control of QR code. An orthogonal experiment was designed to determine the key production parameters affecting the quality level of QR code by variance analysis, and the quality of QR code was modeled by multiple linear regression algorithm. It was found that the symbol contrast, inherent graphic fouling and modulation index rating of QR code were the most unstable in production, which were the keys to quality control. Different substrate surface energy had an effect on droplet diffusion, and a quality prediction model of modulation and inherent pattern fouling was established. The importance of rating parameters and their affecting factors to quality control is emphasized, and the quality control of QR code is realized by modeling algorithm. It is pointed out that the quality prediction model is of great significance to support the quality control of QR code.

KEY WORDS: QR code level; cigarette packaging; orthogonal experimental analysis; quality control

自 2021 年起, 按照中国烟草总局要求, 中烟公司开始在烟包上增加至少 B 级的二维码。当前, 烟包企业在二维码质量控制上遇到两大问题: 一是离线抽检不能确保高合格率; 二是质量控制依赖经验, 缺乏科学方法。对二维码的质量控制已有相关学者开展了

相应的研究工作, 张姗姗等^[1]通过制作二维码测试样本, 分析了二维码图像的灰度变化和几何变化对二维码评级参数的影响, 为通过二维码图像特征进行二维码在线质量检测以及质量控制提供了参考依据。2023 年以大恒图像为代表的不少国内厂商也推出了二

码在线等级检测系统, 弥补了离线抽检方式的不足。关于二维码等级的质量控制, 曾凡齐等^[2]在对烟包二维码质量提升研究中发现二维码的白底设计、位置设计会影响二维码的最终质量; 董明民^[3]进行了烟盒二维码质量优化研究, 分析了喷码工艺参数对二维码质量的影响, 并确定了最优参数组合以提高二维码质量, 一定程度上达到了优化二维码质量的目的。总而言之, 相关科研机构及企业在烟包二维码的在线质量检测方面已经取得一定的研究成果, 但是缺乏将检测结果用于质量控制的理论模型的研究, 不能为二维码的质量控制提供科学的指导。

本文将围绕二维码等级及其主要影响因素展开研究, 利用正交实验以及方差分析法, 确定质量控制建模的主要喷码工艺参数, 并建立可用于二维码等级预测的质量控制模型, 探讨利用质量控制模型替代人工经验判断来实现二维码质量控制的可行性。

1 二维码质量控制建模分析

1.1 压电喷墨质量控制分析

压电式喷墨印刷是目前数字印刷中最常用的技术之一, 其是利用电脉冲信号驱动压电陶瓷元件 (PZT) 使之发生瞬间形变, 最终导致墨水腔室内体积变化, 促使油墨从喷嘴中喷出形成墨滴, 最终在承印材料上形成图文。

墨滴的喷射受到多种因素的影响, Stow 等^[4-5]的研究中表明墨滴的喷射效果与墨水的自身物理特性存在一定关系, 其中主要与墨水的黏度以及表面张力有关; 刘春格等^[6]、史永晶等^[7]的研究中还发现, 墨滴的喷射效果除了与墨水的性质有关外, 还与喷头的结构、喷嘴的尺寸、喷印驱动参数等因素有关; 李强^[8]在对烟包二维码喷印质量的探讨中详细叙述了二维码设计、墨层表面张力、喷头类型、喷印参数等因素对二维码印刷质量的影响。

前人研究指出墨滴的喷射效果与墨水的黏度、表面张力以及喷头结构、喷嘴尺寸、喷印驱动参数等因素密切相关。特别在烟包二维码喷印质量方面的探讨中, 二维码设计、墨层表面张力、喷头类型、喷印参数都被确认与印刷质量息息相关。因此, 喷墨印刷的质量控制需要综合考虑多个影响因素及其相互影响的复杂性, 实际生产中需充分考虑这些因素和其权重, 以提高印刷质量的稳定性和可控性。

1.2 多元线性回归算法

质量控制建模是将质量控制理论用数学模型的方法表示出来, 用于对生产过程中质量控制的指导。目前常见的质量控制建模算法有多元回归、人工神经网络、自组织数据挖掘等算法^[9-11]。多元线性回归算法是一种针对一个因变量与多个自变量之间定量关系研究的数学方法, 可解决工程实践中, 多个自变量

影响单一因变量的问题, 其回归预测模型的总体回归方程^[12]为:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot X_1 + \dots + \beta_i X_i \tag{1}$$

在具体计算和分析过程中, 一般利用最小二乘法快速获得回归系数的估计值, 然后对系数矩阵进行求解^[12]:

$$\beta' = (X^T \cdot X)^{-1} X^T \cdot y = \left(\sum x_i \cdot x_i^T \right)^{-1} \left(\sum x_i \cdot y_i \right) \tag{2}$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_i$ 为总体的回归系数; Y 为因变量; $X_1, X_2, \dots, X_i$ 为多个自变量。

在烟包喷码生产过程中, 对喷码设备参数的调整是主要质量控制手段。在此过程中, 往往需要通过喷头电压、喷印温度、喷印速度等多个参数的协同调整来实现对喷印质量的控制, 多元线性回归算法适合解决这类多因素耦合问题, 且最终的模型具有良好的解释性, 因此本文选择多元线性回归算法用于质量控制建模。

2 实验

2.1 实验材料及设备

实验材料: 银镭射复合纸, 珠海红塔仁恒包装股份有限公司; 银镭射转移纸, 中国光群集团; 白卡纸, 湖北骏马纸业有限公司; 介质纸, 上海紫江集团; 胶印白墨, 立美特 UVH-100D-2; 柔印白墨, 布瑞特 BUF-6012。

喷印设备: 高速单张喷码平台, 广东阿诺捷喷墨科技有限公司, 打印精度为 600 dpi, 最高速度为 100 m/min, 喷头型号为理光 G5; 海德堡速霸 CX 系列十四色胶印, 德国海德堡印刷机械股份有限公司。

测量仪器: REA TransWin 32 条码检测仪, 德国 REA 测量技术有限公司。

2.2 实验内容

本研究首先利用海德堡十四色胶印机分别对银镭射复合纸 (B)、银镭射转移纸 (C) 及介质纸 (D), 采用胶印白墨 1 遍 (OP1)、胶印白墨 2 遍 (OP2) 以及柔印白墨 1 遍 (FP1) 3 种工艺印刷二维码的白底, 白卡纸 (A) 不印刷白底, 最后得到 10 种不同白底工艺及纸张组合的承印基底, 并对 10 种承印基底进行编号, 如表 1 所示。

表 1 不同承印材料及白底工艺组合
Tab.1 Process combinations of different substrates and white background

纸张	OP1	OP2	FP1
白卡纸		A	
复合纸	B-1	B-2	B-3
转移纸	C-1	C-2	C-3
介质纸	D-1	D-2	D-3

其次为探究承印基底表面能对二维码打印质量的影响,本研究还选用3种不同型号的达因笔分别测试了上述承印基底的达因值并记录。完成承印基底制备和达因值的测试后,选择喷头电压(a)、喷头温度(b)、喷印速度(c)、黑条百分比(d)作为因素,选取不同的水平设计了正交实验,正交实验是用少量的实验点来获得整个实验区域的丰富实验数据^[13],可以很好地适用于本研究的实验设计。如表2所示,为正交实验的因素水平表。

表2 喷码工艺参数正交因素水平
Tab.2 Orthogonal factor level of inkjet process parameters

因素水平	a/V	$b/^{\circ}C$	$c/(m \cdot min^{-1})$	$d/\%$
T1	15	43	60	70
T2	16	45	70	75
T3	17	47	80	80
T4	18	49	90	85
T5	19	51		90

最终正交实验共有25种喷印工艺参数组合,利用单张喷码平台上的3个喷印模组在表1所列的10种承印基底上,采用正交实验中所述的工艺参数组合喷印二维码,每个模组喷印5个二维码,最终得到250份实验样张,每1个喷印模组得到1250份数据,3个喷印模组共3750份二维码数据。利用REA TransWin 32条码检测仪对二维码进行检测,记录各项评级参数的等级,每1个二维码测量3次取平均值,将平均值作为该二维码的最终检测等级。最后利用单因素方差分析法对所得数据进行分析,将对二维码等级影响显著的工艺参数用于二维码质量控制的数学建模。

3 结果与分析

3.1 二维码主要评级参数的确定

计算不同评级参数的平均值及标准误差并绘制折线,如图1所示。从图1中可看出,SC、MOD、FPD的平均值都在2.9左右且标准误差较大,而DEC、UEC、AN、GN的平均值在4.0左右且无明显的误差,可知SC、MOD、FPD会随着喷墨工艺参数的变化而变化且评级等级普遍较低,而DEC、UEC、AN、GN不随喷码工艺参数的变化而发生明显变化,评级稳定维持在4.0等级左右。因此能够确定SC、MOD、FPD是在烟包二维码的质量控制中需要优先考虑的主要评级参数,可通过对SC、MOD、FPD的控制,以提高二维码的最终等级。

3.2 主要评级参数的影响因素分析

3.2.1 二维码最高反射率对SC与FPD评级影响分析

图2展示了不同的材料及不同白底印刷工艺的

二维码承印基底的最高反射率与主要评级参数之间的关系。可以看出,随着最高反射率的不断增大,SC呈上升趋势,但MOD及FPD呈下降趋势;为此,利用SPSS软件进一步分析了SC、MOD、FPD与二维码最高反射率之间的相关性,二维码最高反射率与二维码的SC存在明显的正相关性,皮尔逊相关性系数为0.990;与MOD和FPD存在明显的负相关性,皮尔逊相关性系数分别为-0.917、-0.812。由此可知,二维码最高反射率对SC、MOD、FPD都存在一定影响。

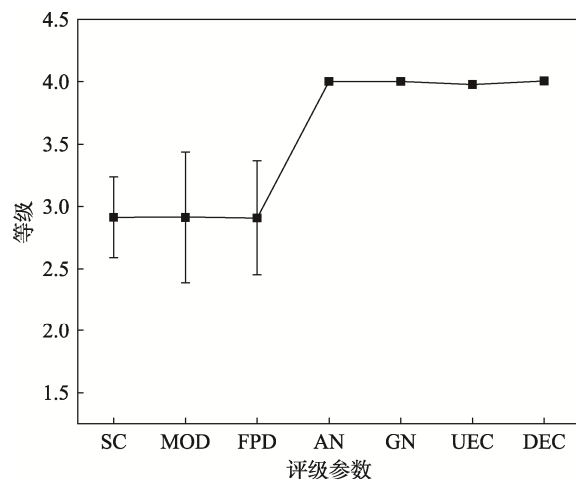


图1 不同评级参数分布
Fig.1 Distribution of different rating parameters

按照GB/T 23704—2017, SC即二维码浅色与深色模块反射率的差值。深色模块反射率主要受墨水黑度影响,墨水一经选定后通常不变。而浅色模块反射率则取决于承印基底及其白底工艺。因此,不更换打印墨水时,基底的反射率越高,SC等级越高。FPD反映二维码的污损程度,是模块颜色反转导致的。模块对比度越大,因墨水扩散或卫星滴引起的污损越容易识别,FPD等级也越低。

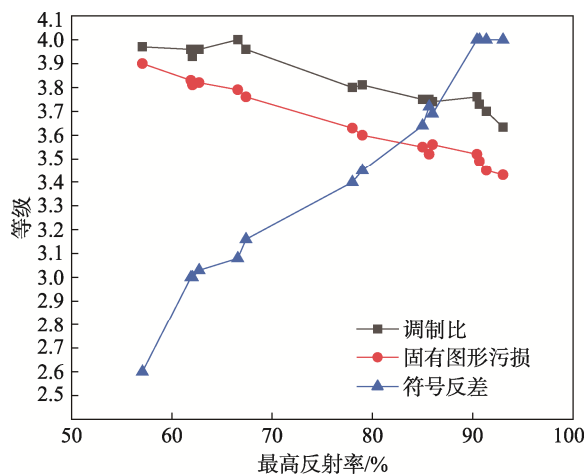


图2 承印基底最高反射率对主要评级参数的影响
Fig.2 Effect of the highest reflectivity of substrate on key rating parameters

3.2.2 二维码最高反射率对 MOD 评级影响分析

GB/T 23704—2017 中 MOD 表示深色模块或浅色模块反射率的一致性, 二维码符号的 MOD 通常情况下由模块 MOD 中最小的评级表示, 其中模块的 MOD (M) 计算公式为:

$$M = \frac{2|R - G|}{S} \tag{3}$$

式中: R 为模块的反射率; G 为二维码图像的整体阈值; S 为符号反差。

GB/T 23704—2017 与 ISO/IEC 15415 对图像的整体阈值都是用符号内最大亮度值、最小亮度值的中间值来表示, 因此式 (3) 中的 G 可以表示为式 (4)。

$$G = \frac{G_{\max} - G_{\min}}{2} \tag{4}$$

式中: $G_{\max}$ 为符号图像的最大亮度 (灰度); $G_{\min}$ 为符号图像的最小亮度 (灰度)。

再根据 Lambertian 反射模型的基本关系, 可以得到图像的亮度 (灰度) 与表面反射率之间的关系, 图像的亮度与表面反射率的关系可以表示为式 (5)。

$$G = I \cdot R \cdot \cos \theta \tag{5}$$

式中: G 为图像亮度; I 为光源强度; R 为表面的反射率; θ 为光线与表面法线之间的夹角。

那么在光源强度和光照角度一定的情况下, MOD 就只与二维码符号模块的反射率有关, 则式 (3) 中的 MOD 可以表示为式 (6)。

$$\begin{cases} \frac{R}{R_{\max} - R_{\min}} - I \cos \theta & R > G (\text{深色模块}) \\ I \cos \theta - \frac{R}{R_{\max} - R_{\min}} & G > R (\text{浅色模块}) \end{cases} \tag{6}$$

因此, 从式 (6) 可知, 评价深色模块的 MOD 时, 模块反射率和符号的最低反射率不变的情况下, 二维码的最高反射率越高, SC 等级越高, 则深色模块的 MOD 等级就越低; 评价浅色模块的 MOD 时, 二维码的最高反射率越高, SC 等级越高, 浅色模块的 MOD 等级会越高。

烟包上二维码通常有黑色的码字和白色的背景, 背景多采用稳定性良好的胶印或柔印技术打印, 致使浅色模块的反射率具有较好的一致性。而黑色码字则是由易受喷头状态和墨水材质影响的喷墨打印技术完成, 导致深色模块反射率的一致性相对较低。因此对烟包二维码进行 MOD 评级时, 深色模块的反射率一致性是重点考量因素, 这也解释了为什么在 3.2.1 节中二维码最高反射率与 MOD 评级呈负相关性。

3.2.3 承印基底表面能对主要评级参数影响分析

图 3a 为柔印白底工艺的二维码图像, 图 3b 为胶印一遍白底工艺的二维码图像, 图 3c 为胶印两遍白底工艺的二维码图像, 图 3d 为无白底白卡纸的二维码图像。可以看出图 3a 的图像边缘相比于图 3 中 b、

c、d 更加光滑, 没有出现明显的墨滴扩散, 其中图 3d 的边缘最粗糙, 墨滴扩散现象最明显。墨水的扩散主要和墨水与承印底材之间的相互作用有关。本实验中不同材料所用的喷墨打印墨水相同, 因此在上述现象中, 主要考虑不同承印底材之间的差异对墨滴扩散的影响。

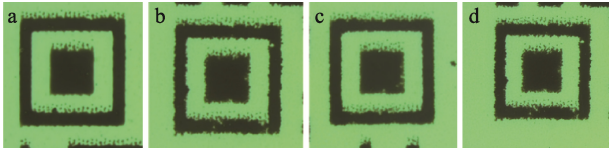


图 3 同一喷码工艺参数下不同承印基底二维码质量
Fig.3 Quality of QR codes on different substrates under the same inkjet process parameters

固体承印物的表面能是影响承印物与液滴之间相互作用的重要因素, 可通过达因法简单评估。在本研究中, 采用了达因笔来测试不同承印物基底的表面能。如表 3 展示了 A、B、C、D 4 种承印基底的达因值, 达因值越大说明其表面能越大。如图 4 所展示, 在相同的喷码工艺参数下, 未印刷白墨的白卡纸二维码的印刷增量最大, 达到-58, 胶印白底约为-63, 柔版印刷白底最小。图 5 进一步展示了在同一工艺参数下, 印刷增量对二维码 MOD 与 FPD 影响的情况, 根据 GB/T 23704—2017, "印刷增量"可以衡量墨滴的扩散程度, 图 4 结果显示印刷增量越大, 二维码 MOD 及 FPD 的评级越低。

这说明不同基底的达因值会直接影响印刷墨滴的扩散行为, 进而影响 MOD 与 FPD 的评级。因而在进行二维码质量控制时, 也需要重视承印基底的表面能对二维码品质的影响。

表 3 不同白底工艺的基底的达因值
Tab.3 Dyne values of substrates under different white background processes

工艺	达因值
柔印白底	<36
1 遍胶印白底	≈38
2 遍胶印白底	≈38
白卡 (无白墨)	>40

3.2.4 设备工艺参数对主要评级参数的影响分析

在结果分析中发现, 二维码的主要评级参数中, SC 取决于符号的最高反射率和最低反射率之间的差异。最高反射率与承印材料相关, 最低反射率则与墨水的深度有关。因此, 本部分仅考虑设备工艺参数对 MOD 和 FPD 的影响。

通过对正交实验结果的方差分析, 分别得到喷码工艺参数对 MOD 及 FPD 影响的方差分析结果, 如表 4

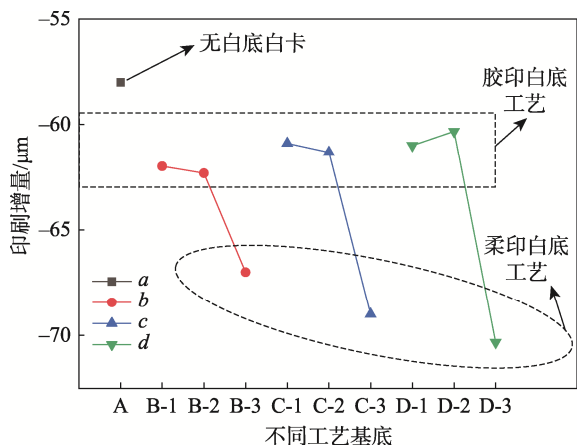


图4 同一喷码工艺参数下不同承印基底
二维码印刷增量

Fig.4 Increment of QR code printed on different
substrates under the same inkjet
process parameters

所示。表中 S 为总偏差平方和, f 为自由度, F 是服从自由度 f_a 和 f_e 的 F 分布, F 的计算公式见式 (7)。

$$F = \frac{S_a \cdot f_e}{f_a \cdot S_e} \quad (7)$$

式中: S_a 为 a 因素的平均偏差平方和; f_a 为 a 因素对应的自由度; S_e 为实验误差的平均偏差平方和; f_e 为实验误差对应的自由度。本文在显著性水平 α 为 0.01、0.05、0.1 时研究了喷头电压 (a)、喷印速度 (c)、黑条百分比 (d) 和喷印温度 (b) 对二维码的调制比 (MOD) 和固有图形污损 (FPD) 的影响。结果表明, 喷头电压、喷印速度和黑条百分比在 $\alpha=0.05$ 时对二维码质量有显著影响, 尤其是黑条百分比影响最大, 其次是喷头电压, 而喷印速度影响最小。相对地, 喷印温度对二维码的 MOD 和 FPD 没有显著影响。

黑条百分比影响墨量和打印模块的粗细, 对二维码等级有直接影响。喷头电压则控制墨滴大小和速度, 电压变化影响墨滴飞行, 可能引致模块脏污, 进而影响二维码评级。喷印速度则影响墨滴形态和精确落点, 关系到二维码评级。

因此, 研究决定选用黑条百分比 (d)、喷头电压 (a)、喷印速度 (c) 作为主要参数进行质量控制建模, 从而指导二维码质量控制。

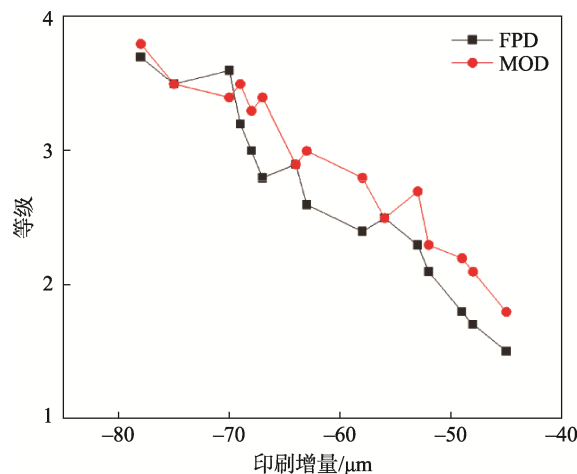


图5 同一喷码工艺参数下印刷增量对
二维码 MOD 及 FPD 的影响

Fig.5 Effect of printing increment on QR
code MOD and FPD under the same inkjet
process parameters

3.3 二维码预测性质量控制建模

本研究使用 SPSS 软件并利用正交实验数据及实际生产数据, 分别建立了 MOD 和 FPD 与喷头电压、喷印速度、黑条百分比之间的三元线性回归模型, 最终模型如式 (8)、(9) 所示, 其中 X_1 为喷头电压、 X_2 为喷印速度、 X_3 为黑条百分比, Y_1 为 MOD、 Y_2 为 FPD。

$$Y_1 = -0.385X_1 - 0.017X_2 - 0.09X_3 + 18.409 \quad (8)$$

$$Y_2 = -0.335X_1 - 0.021X_2 - 0.08X_3 + 17.259 \quad (9)$$

对所建立的多元回归模型进行 F 检验以及各自变量之间的相关性进行 T 检验, 模型建立时设定的 α 值为 0.05 (α 为显著性水平), 则 $F_{0.05}=9.277$, $T_{0.05}=2.353$ 。MOD 多元回归模型的 F 值为 49.417, FPD 多元回归模型的 F 值为 44.043, 2 个模型的 F 值都大于 $F_{0.05}$, 表明 2 个模型都具有明显的线性显著性。2 个模型的回归系数对应的 T 值如表 5 所示, 可知 $|T_i| > T_\alpha$, 说明自变量对因变量影响显著。综上, 通过模型显著性检验与系数相关性检验结果可知, 本文所构建的质量预测模型自变量与因变量之间的线性关系具有显著性, 可以用于不同喷码工艺参数下的 MOD 及 FPD 等级的预测, 训练数据中调制比的预测误差为 0.102 6,

表 4 MOD 和 FPD 的方差分析
Tab.4 Analysis of Variance for MOD and FPD

因素	MOD			FPD			$F_{0.01}$	$F_{0.05}$	$F_{0.1}$
	S	f	F	S	f	F			
a	23.549	4	24.782	17.234	4	23.810	6.42	3.63	2.69
b	1.458	4	1.534	1.479	4	2.044	6.42	3.63	2.69
c	2.982	3	4.184	4.836	3	8.080	6.99	3.86	2.81
d	36.855	4	38.785	29.533	4	40.802	6.42	3.63	2.69
误差	14.016	9		10.676	9				

固有图形的污损为 0.203 4。为进一步验证模型的准确性,按 2.1 节所述的正交实验设计方法重新设计了正交实验,并采集了正交实验的 MOD 与 FPD 实测数据与模型预测数据进行比较,并绘制了图 6。图 6a 为 MOD 的实测值与预测值关系,图 6b 为 FPD 的实测值与预测值关系。从图 6 可知模型对 MOD 及 FPD 都有较高的预测精度,说明利用质量预测模型进行二维码的质量控制是可行的,模型可以作为二维码质量控制的理论指导。

表 5 回归模型的 T 值分布
Tab.5 Distribution of T values in regression model

回归系数	β_1	β_2	β_3
调制比	-17.235	-3.293	-31.307
固有图形污损	-14.410	-2.359	-25.681

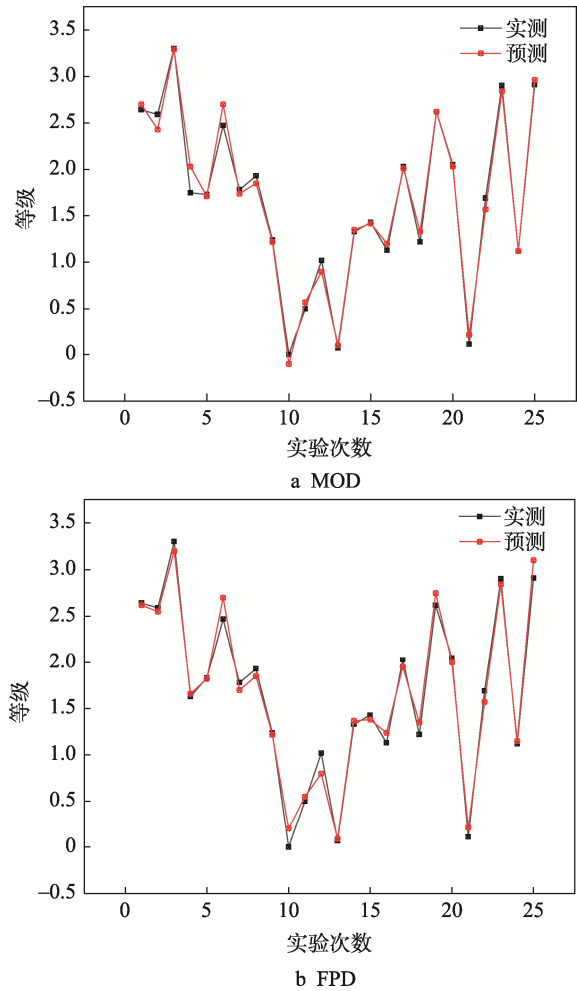


图 6 调制比及固有图形污损预测值与实测值比较
Fig.6 Comparison between the predicted and measured values of modulation ratio and inherent pattern fouling

4 结语

本文针对烟包二维码生产过程质量控制进行了

正交实验,收集和测试相关数据,分析并建模,研究结果如下:

- 1) 提出符号反差 (SC)、调制比 (MOD)、固有图形污损 (FPD) 是主要评级参数,其中 SC 与基底反射率和墨水反射率相关,而 MOD、FPD 受基底和墨水特性以及喷码工艺参数影响。
 - 2) 喷码工艺参数中,黑条百分比、喷头电压对 MOD、FPD 影响大,喷印速度影响较小,而喷印温度影响不明显。
 - 3) 承印基底表面能会影响二维码喷印质量,表面能越大,扩散越明显,可能导致脏污,影响评级。
- 在研究基础上,利用多元线性回归算法建立了喷码工艺参数与 MOD、FPD 的质量预测模型,具有良好线性显著性和预测精度,可指导二维码生产过程的质量控制。

参考文献:

[1] 张姗姗,邱紫欣,李强,等. 二维码印刷质量参数的影响因素分析[J]. 包装学报, 2022, 14(6): 57-62.
ZHANG S S, QIU Z X, LI Q, et al. Analysis of Influencing Factors on Printing Quality Parameters of QR Code[J]. Packaging Journal, 2022, 14(6): 57-62.

[2] 曾凡齐,欧立国. 烟包可变二维码喷印质量提升探讨[J]. 印刷技术, 2022(1): 26-30.
ZENG F Q, OU L G. Discussion on the Improvement of the Quality of Variable Two-Dimensional Code Printing Of Cigarette Packs[J]. Printing Technology, 2022(1): 26-30.

[3] 董明民. 烟标可变二维码喷印数值模拟及质量优化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
DONG M M. Research on Numerical Simulation and Quality Optimization of Variable Two-Dimensional Code Printing of Cigarette Label[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

[4] STOW C D, HADFIELD M G. An Experimental Investigation of Fluid Flow Resulting from the Impact of a Water Drop with an Unyielding Dry Surface[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1981, 373(1755): 419-441.

[5] PIMBLEY W T, LEE H C. Satellite Droplet Formation in a Liquid Jet[J]. IBM Journal of Research and Development, 1977, 21(1): 21-30.

[6] 刘春格,唐正宁. 基于压电喷墨印刷的墨滴速度大小的理论研究[J]. 包装工程, 2010, 31(15): 36-38.
LIU C G, TANG Z N. Theoretical Research of the Ink Droplet Velocity Based on Piezoelectric Inkjet Printing[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(15): 36-38.

- [7] 史永晶. 基于喷墨印刷的 OTFT 的制备与性能研究——电极材料的喷墨实验与模拟研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
- SHI Y J. Study on Preparation and Performance of OTFT Based on Ink-Jet Printing — Ink-Jet Experiment and Simulation of Electrode Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.
- [8] 李强. 烟包二维码喷印质量的探讨[J]. 印刷技术, 2023(5): 25-27.
- LI Q. Discussion on the Quality of Two-Dimensional Code Printing of Cigarette Packs[J]. Printing Technology, 2023(5): 25-27.
- [9] SUN C H, CHEN J H, SHEU L J. Quality Control of the Injection Molding Process Using an EWMA Predictor and Minimum-Variance Controller[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1): 63-70.
- [10] TONCICH D, REWAL N, FRIEDL C. Predicting Part Quality in Injection Molding Using Artificial Neural Networks[J]. Journal of Injection Molding Technology, 1998, 2(3): 109-119.
- [11] 张飞. 注塑过程的闭环多变量质量控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZHANG F. Research on Closed-Loop Multivariable Quality Control of Injection Molding Process[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [12] 江岭, 贾会远. 统计学[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2007: 154-156.
- JIANG L, JIA H Y. Statistics[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2007: 154-156.
- [13] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- REN L Q. Optimum Design and Analysis of Experiments[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.