

丝网印刷工艺对印刷电路导电性能的影响研究

金琳

(上海出版印刷高等专科学校 印刷包装工程系, 上海 200093)

摘要: **目的** 丝网印刷电子技术已被广泛应用于生物医疗、传感器及电子电路等领域, 研究刮刀角度、离网间距、刮刀压力对印刷电路导电性能的影响, 对提升工业生产过程中印刷电子产品的精确度和质量具有重要意义。**方法** 利用丝网印刷设备和检测仪器对刮刀角度、离网间距、刮刀压力进行正交试验, 探索最优工艺条件, 并用多参数对比试验对正交试验结果进行验证。**结果** 通过正交试验得到最佳方案为 $c_2a_1b_2$ 或 $c_2b_2a_1$, 由多参数对比试验得到以下结果: 当离网间距为 1.0 mm 或 1.4 mm, 刮刀角度为 60° , 当刮刀压力等效间距为 1.1 mm 时, 对应线条阻值最小; 当刮刀压力等效间距为 1 cm, 离网间距为 0.8 mm 时, 线条不同位置阻值的波动范围最小。**结论** 离网间距对印刷电路导电性能的影响最明显, 其次是刮刀压力, 最后是刮刀角度; 试验结果验证了正交试验设计在研究印刷电路导电性能方面的可靠性, 但在研究阻值稳定性方面存在些许不足。

关键词: 丝网印刷; 正交试验; 印刷电路; 导电性能

中图分类号: TS801.1/TN41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)03-0194-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.03.023

Impact of Screen Printing Technology on Electrical Conductivity of Printed Circuits

JIN Lin

(Department of Printing and Packaging Engineering, Shanghai Publishing and
Printing College, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: It is well known that screen printing electronic technology has been widely used in the fields of biomedical engineering, sensors, and electronic circuits. Investigating the effects of scraper angle, off-grid spacing, and blade pressure on the electrical conductivity of printed circuits is crucial for enhancing the accuracy and quality of printed electronic products in industrial production. Orthogonal experiments were conducted to investigate the effects of blade angle, off-grid distance, and blade pressure using screen printing equipment and testing instruments to determine the optimal process conditions for screen printing. Subsequently, these optimal conditions were validated through multi-parameter comparative experiments. The optimal solution obtained through orthogonal experiments was either $c_2a_1b_2$ or $c_2b_2a_1$. Results from multi-parameter comparative experiments indicated that the minimum line resistance value corresponded to an off-grid spacing of 1.0 mm or 1.4 mm, a blade angle of 60° , and an equivalent distance for blade pressure of 1.1 mm. Additionally, when the equivalent distance for blade pressure was set at 1.0 cm and the off-grid spacing at 0.8 mm, the fluctuation range of resistance values at different positions along the lines was minimized. The experimental results indicate that the most significant factor affecting the conductivity of printed circuit is the off-grid distance, followed by blade pressure and finally blade angle. The experimental results validate the reliability of orthogonal

experimental design in studying the conductive performance of printed circuits. However, there are some shortcomings in its application to the investigation of resistance stability.

KEY WORDS: screen printing; orthogonal experiment; printed circuits; conductivity

印刷电子是一种将印刷技术与电子技术相结合的先进技术,因其具有低成本、柔性化、绿色环保等特点,被认为是电子元件制备技术的重要发展方向。目前,印刷电子已被广泛应用于生物医疗、传感器及电子电路等先进制造领域^[1]。

印刷电子使用的印刷方式主要有喷墨印刷、丝网印刷、凹版印刷、喷涂及其他混合印刷,其中丝网印刷因具有成本低、操作简单、可大规模印刷的优势,在印刷电子领域得到了广泛的研究和应用。丝网印刷在印刷电子领域的应用主要集中在 2 个方面:一是采用丝网印刷方式制备具有高导电性能的图案,二是采用丝网印刷制造传感器或传感器电极等^[2]。无论是印制高导电性能的图案,还是制作传感器,对印制产品的导电性能检测都是产品进入市场前必不可少的工序。因此,探讨丝网印刷工艺对印刷电路导电性能的影响,对促进工业生产过程中印刷电子产品的精确度和质量提升具有积极作用。

丝网印刷工艺中,影响印刷精确度和质量的因素较多,通过分析参考文献筛选出对高精细丝网印刷品质量影响最大的几个因素:刮刀角度、离网间距、刮刀压力^[3],本文选择这几项因素对印刷电路导电性能的影响进行试验研究。

1 试验

1.1 评价指标建立和产品试验设计图

研究丝网印刷工艺对印刷电路导电性能的影响,需建立印刷电子产品导电性能的评价指标。印刷电子产品中最基础的组件为线性电路,因此选择丝网印刷线性电路的电阻值和不同位置的阻值波动范围,作为评价印刷电子产品导电性能的评价指标^[4]。

试验采用平压平丝网印刷方式,印刷宽度分别为 0.2、0.4、0.6 mm 的线条,考虑到印刷时刮板往复运

动造成丝网变形,会对印刷电子产品导电性能产生影响^[5],将线条均匀分割成 A、B、C、D 4 段,每段线条长为 40 mm,每段用 20 mm 的空白距离隔开,如图 1 所示。

1.2 主要材料和仪器

试验仪器:丝网印刷试验台(昆山东远 ATMAGP)、烘干箱(上海一恒 BPG-9040)、电阻测量仪(FLUKE CATIII)、数字显示搅拌机(BROOK FIELD LVT)。

试验材料:钢制精细丝网版(400 目,感光胶层为 10 μm ,绷网张力为 30 N)、导电银浆、丝网网版清洗液、铜版纸、刮墨刀等。

试验所用导电银浆品牌方为杜邦(5025),可认定导电银浆的基本参数是稳定的。在设计试验时,选择试验的环境温度为 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$,环境相对湿度为 $(50\pm 5)\%$ 。在该环境下,可认定导电银浆的黏度基本不变^[6]。

1.3 因素水平的确定

此次试验采用正交试验设计法。正交试验设计法是指根据正交性从全面试验中筛选出最具代表性的点进行试验分析,是一种经济、高效、快速的试验设计方法^[7]。综合李茜^[8]、刘世朴等^[9]、田野等^[10]对丝网印刷导电油墨转移率影响因素的研究,确定正交试验的每个因素取 3 个水平。因油墨转移率与印刷压力紧密相关,且丝网印刷压力随刮刀移动而改变^[11],为便于测量,将印刷压力转化为印刷时刮刀下移的距离进行等效测量。结合考虑所使用的承印材料、丝网版的网线数、绷网张力、印刷速度等因素以及钢制丝网版印刷的经验,选择刮刀压力等效间距的因素水平分别为 1.0、1.1、1.2 cm,刮刀角度的因素水平分别为 60° 、 65° 、 70° ^[12]。根据刘富^[13]对丝网印刷质量影响因素的研究及对钢制丝网版材质和绷网张力等因素的考虑,选择离网间距的因素水平为 0.8、1.0、1.2 mm。详细因素水平见表 1。

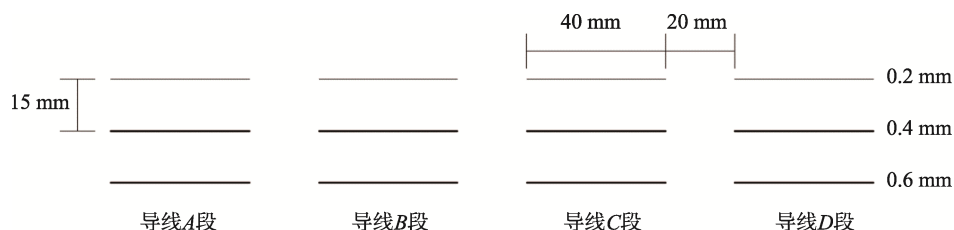


图 1 印制导电线条设计
Fig.1 Design of printed conductive lines

表 1 因素水平
Tab.1 Factor level

水平	因素		
	刮刀角度 $a/(^{\circ})$	刮刀压力等效间距 b/cm	离网间距 c/mm
1	60	1.0	0.8
2	65	1.1	1.0
3	70	1.2	1.2

1.4 正交试验方案设计

根据正交试验要求, 本试验为三因素三水平试验, 可选用正交表 $L_9(3^3)$, 具体正交试验方案如表 2 所示。为保障试验的准确性, 选择 400 目钢制丝网版, 根据前期印刷试验经验, 确定刮板速度为 100 mm/s。

表 2 正交试验方案
Tab.2 Orthogonal experimental scheme

试验编号	试验因素		
	刮刀 角度 a	刮刀压力等效 间距 b	离网 间距 c
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

1.5 试验步骤

丝网印刷导电线条导电性能测试试验步骤如图 2 所示。

2 结果与分析

2.1 分析正交试验结果, 确定优选试验方案

试验结束后, 采用狄克逊准则清除试验数据坏值^[14], 计算试验数据的均值并填写到数据分析表中。使用综合平衡法对数据分析表进行分析, 首先计算各因素的极差, 得到影响试验的主次因素, 然后将导电线条阻值作为评价指标对结果进行比对分析, 最后找出丝网印刷参数最佳组合方案^[10,15]。

2.1.1 计算极差, 确定主次因素

K_i 表示任意一列印刷工艺参数 (刮刀角度、刮刀压力等效间距、离网间距) 水平号为 i 时所对应的试验数据之和。 k_i 表示任意一列印刷工艺参数因素取水平 i 时, 所得试验数据的算术平均值。 k_i 的计算见式 (1)。

$$k_i = \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

式中: s 为正交试验方案里任意一列印刷工艺参数因素水平出现的次数。

极差 R 的方程见式 (2) ~ (3)。

$$R = \max \{K_1, K_2, K_3\} - \min \{K_1, K_2, K_3\} \quad (2)$$

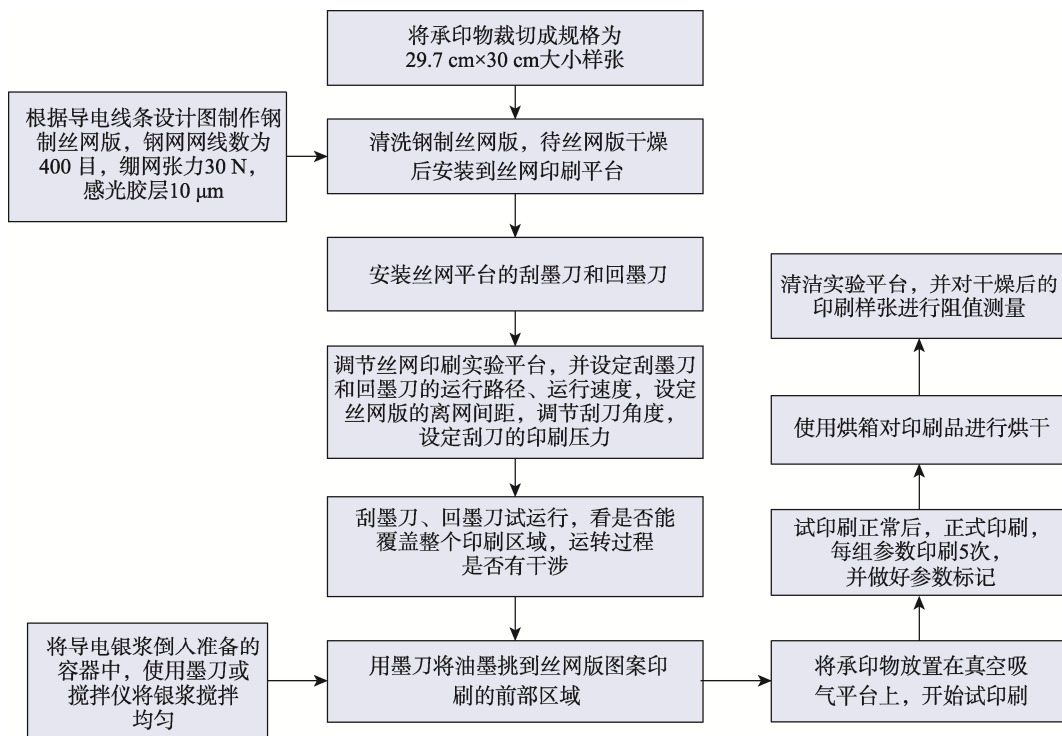


图 2 试验流程

Fig.2 Experimental procedure flow chart

或

$$R=\max \left\{k_1, k_2, k_3\right\}-\min \left\{k_1, k_2, k_3\right\} \quad (3)$$

极差 R 数值的不同,代表各因素水平的变换对试验结果的影响不同。 R 值越大,表示该列因素的数值在试验过程中的改变对试验评价指标造成的影响越大,也就是说, R 数值最大的列,其对应的因素水平对试验所测数值影响最大,即主要因素^[10]。

2.1.2 优选试验方案的选择原则

优选试验方案是指在试验过程中得到的各因素水平最优的组合。最优水平的判定与试验的评价指标有关,若指标需要越大越好,则采用 K_i (或 k_i) 中最

大数值对应的水平,反之则需采用指标数值最小对应的水平^[10]。本次试验中,导电线条的电阻较小为佳,因此采用指标数值最小对应的水平。

2.1.3 根据试验数据确定优选试验方案

通过试验测量发现,当刮刀角度为 70°时,印制的大部分导电线条出现断点,无法准确测量出线条的电阻值,因此可认为刮刀角度为 70°对应的试验编号 7、8、9 无效。剔除无效试验编号后,由正交试验得到 6 组有效的试验值(表 3)。试验中 A 段、B 段、C 段、D 段导电线条电阻的测量数据处理如表 4~7 所示。

表 3 印制导电线条电阻试验数据
Tab.3 Resistance test date of printed conductive lines Ω/cm

编号	印制导电线条电阻			
	A 段印制导线	B 段印制导线	C 段印制导线	D 段印制导线
1($a_1b_1c_1$)	9.83	11.05	10.25	1.45
2($a_1b_2c_2$)	7.53	7.75	7.20	6.48
3($a_1b_3c_3$)	1.63	1.78	1.08	1.20
4($a_2b_1c_2$)	1.38	9.90	1.20	1.18
5($a_2b_2c_3$)	1.78	14.05	15.08	14.53
6($a_2b_3c_1$)	1.75	1.38	1.18	1.03

表 4 A 段导电线条电阻的数据处理
Tab.4 Resistance date processing of section A conductive line Ω/cm

试验因素	刮刀角度 a	刮刀压力等效间距 b	离网间距 c	主次因素	优选方案
K_1	1.9	88.8	90.3	cba	$c_2b_2a_1$
K_2	151.6	81.2	79.6		
K_3	—	105.5	105.6		
k_1	41.3	44.4	45.15		
k_2	50.5	40.6	39.8		
k_3	—	5.75	5.8		
极差 R	11.2	1.15	13.0		

表 5 B 段导电线条电阻的数据处理
Tab.5 Resistance date processing of section B conductive line Ω/cm

试验因素	刮刀角度 a	刮刀压力等效间距 b	离网间距 c	主次因素	优选方案
K_1	130.3	8.8	97.7	cba	$c_2b_1a_1$
K_2	149.3	87.2	70.6		
K_3	—	108.6	111.3		
k_1	4.43	41.9	48.85		
k_2	49.76	4.6	35.6		
k_3	—	54.3	55.65		
极差 R	6.33	8.27	1.57		

表 6 C 段导电线条电阻的数据处理
Tab.6 Resistance date processing of section C conductive line

Ω/cm

试验因素	刮刀角度 a	刮刀压力等效间距 b	离网间距 c	主次因素	优选方案
K_1	118.1	89.8	9.7		
K_2	161.8	89.1	77.6		
K_3	—	101.0	108.6		
k_1	39.37	44.9	46.85	cab	$c_2a_1b_2$
k_2	5.93	44.55	38.8		
k_3	—	50.5	54.3		
极差 R	14.6	5.95	15.5		

表 7 D 段导电线条电阻的数据处理
Tab.7 Resistance date processing of section D conductive line

Ω/cm

试验因素	刮刀角度 a	刮刀压力等效间距 b	离网间距 c	主次因素	优选方案
K_1	128.5	10.5	97.9		
K_2	158.9	84.0	78.6		
K_3	—	100.9	110.9		
k_1	4.83	51.25	48.95	cab	$c_2a_1b_2$
k_2	5.97	42.0	39.3		
k_3	—	50.45	55.45		
极差 R	10.14	9.25	16.15		

根据优选试验方案的选择原则,拟定丝网印刷导电线条的最佳水平组合。由表 4~7 可知,A 段、B 段、C 段、D 段导电线条的最佳水平组合(优选方案)分别为 $c_2b_2a_1$ 、 $c_2b_1a_1$ 、 $c_2a_1b_2$ 、 $c_2a_1b_2$ 。

根据极差 R 和优选方案对导电线条进行综合评价,因素 c (离网间距)在优选方案中第一位置出现的频率最多,因此选择 c 为主要因素,根据试验数据出现的频率,倾向以 c_2 为优。因素 a 和 b 第二位置出现的频率相等,因此选择因素 a 或 b 为次主要因素,根据试验数据出现的频率,倾向以 a_1 或 b_2 为优。综上分析可知,对印制线条导电性能影响最大的因素为 c (离网间距),其次为 a (刮刀角度)或 b (刮刀压力等效间距),导电线条最优印刷工艺参数可设置为 $c_2a_1b_2$ 或 $c_2b_2a_1$ 。

2.2 对比分析丝网试验参数对印制电路电阻的影响

为进一步检验正交试验结果,确定优选试验方案的可靠性,采用多参数对比试验法对导电线条的电阻进行测量,并评价丝网试验参数对导电线条的影响,测量结果及对比分析如下。

2.2.1 刮刀角度、刮刀压力对导电线条电阻的影响

当刮刀角度为 65° ,离网间距分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 mm,刮刀压力等效间距分别为 1、1.1、1.2 cm 时,线条电阻阻值如图 3 所示。由图 3 可明显

看出,当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,绝大部分阻值为 40~60 Ω,极少数阻值<40 Ω;当刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,大部分阻值为 40~60 Ω,少部分阻值<40 Ω,但阻值<40 Ω 的部分明显多于刮刀压力等效间距为 1 cm 时;当刮刀压力等效间距为 1.2 cm 时,绝大部分阻值为 50~80 Ω。对图 3 中相同位置的阻值取平均值,然后进行不同刮刀压力条件下的对比分析,结果表明,当刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,大部分位置的电阻小于或等于其他刮刀压力下的电阻;当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,不同位置线条阻值的波动范围较小。

因此可认为,当刮刀角度为 65° ,刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,导电线条的电阻小于其他刮刀压力下印制的导电线条电阻的概率较大;当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,不同位置线条阻值的波动范围较小。

当刮刀角度为 60° ,离网间距分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 mm,刮刀压力等效间距分别为 1、1.1、1.2 cm 时,线条电阻阻值如图 4 所示。由图 4 可明显看出,当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,几乎所有阻值为 30~50 Ω;当刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,大部分阻值为 30~50 Ω,部分阻值>50 Ω,少数阻值<30 Ω;当刮刀压力等效间距为 1.2 cm 时,绝大部分阻值为 40~60 Ω,极少数阻值为 30~40 Ω。对图 4 中相同位置的阻值取平均值,然后进行不同刮刀压力条件下的对比分析,结果表明,当刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,

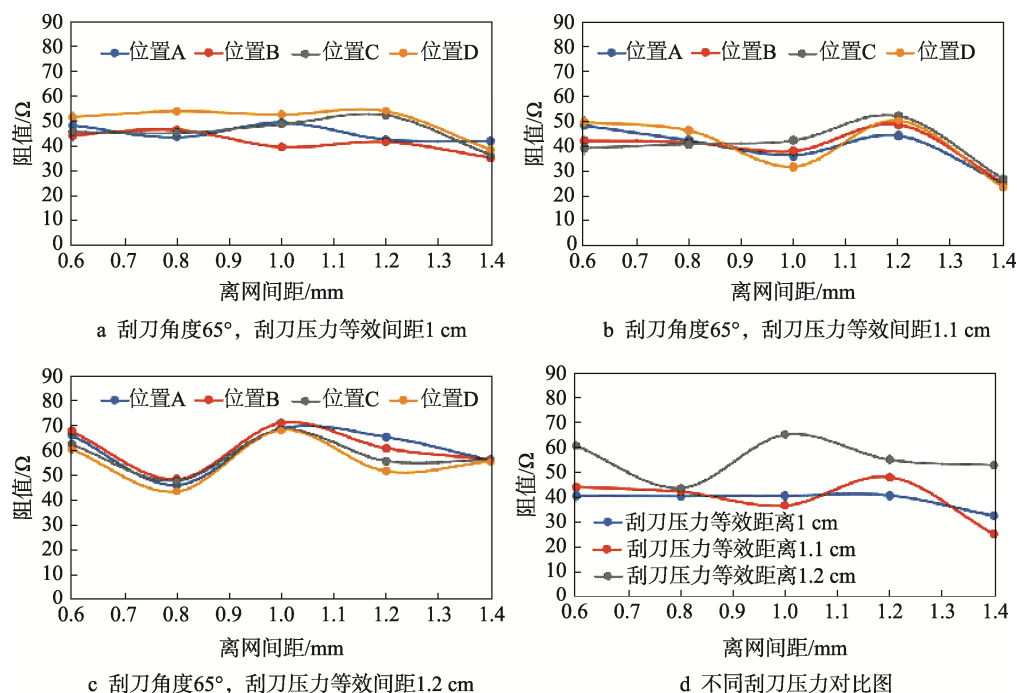


图 3 不同刮刀压力和离网间距下线条阻值及其对比分析 (刮刀角度: 65°)

Fig.3 Comparison and analysis of line resistance values under different blade pressure and off-grid distance (blade angle: 65°)

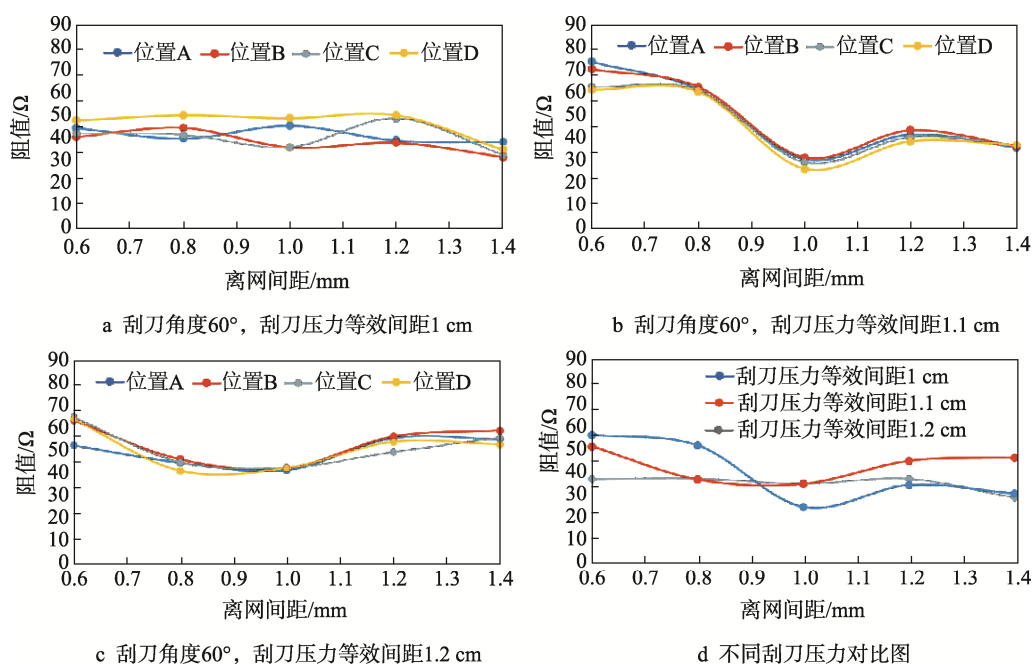


图 4 不同刮刀压力和离网间距下线条阻值及其对比分析 (刮刀角度: 60°)

Fig.4 Comparison and analysis of line resistance values under different blade pressure and off-grid distance (blade angle: 60°)

大部分位置的电阻小于或等于其他刮刀压力下的电阻;当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,不同位置线条阻值的波动范围较小。

因此可认为,当刮刀角度为 60°,刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,导电线条的电阻小于其他刮刀压力下印制的导电线条电阻的概率较大;当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,不同位置线条阻值的波动范围较小。

将图 3 和图 4 中的各图进行对比,可明显看出,图 3 中大部分位置的线条阻值大于图 4 中对应位置的线条阻值,因此可认为在其他参数不变的情况下,刮刀角度为 60°时印制线条的阻值低于刮刀角度为 65°时的阻值。

综上所述,从印制线条的阻值大小考虑,当刮刀角度为 60°时,其导电性能优于其他同类试验参数;

刮刀压力等效间距为 1.1 cm 时,其导电性能优于其他同类试验参数;从印制线条不同位置阻值的波动范围考虑,当刮刀压力等效间距为 1 cm 时,其导电性能优于其他同类试验参数。

2.2.2 刮刀压力和离网间距对导电线条电阻的影响

当刮刀角度为 65° ,刮刀压力等效间距为 1 cm,离网间距分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 mm 时,线条阻值如图 5 所示。由图 5 可明显看出,只有离网间距为 0.8 mm 时,线条电阻的阻值更趋向水平直线,说明在该参数下印制线条的电阻阻值的波动范围更加稳定。对图 5 中相同位置的阻值取平均值,然后进行不同离网间距的对比分析,结果表明,离网间距为

1.4 mm 时,线条阻值小于其他离网间距下同等宽度线条的阻值。

当刮刀角度为 65° ,刮刀压力等效间距为 1.1 cm,离网间距分别为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 mm 时,线条阻值如图 6 所示。由图 6 可明显看出,只有离网间距为 0.8 mm 时,线条电阻的阻值更趋向水平直线,说明在该参数下印制线条的电阻阻值的波动范围更加稳定。对图 6 中相同位置的阻值取平均值,然后进行不同离网间距的对比分析,结果表明,当离网间距为 1.4 mm 时,线条阻值小于其他离网间距下同等宽度线条的阻值;当离网间距为 1.0 mm 时,印制线条的阻值也相对较小。

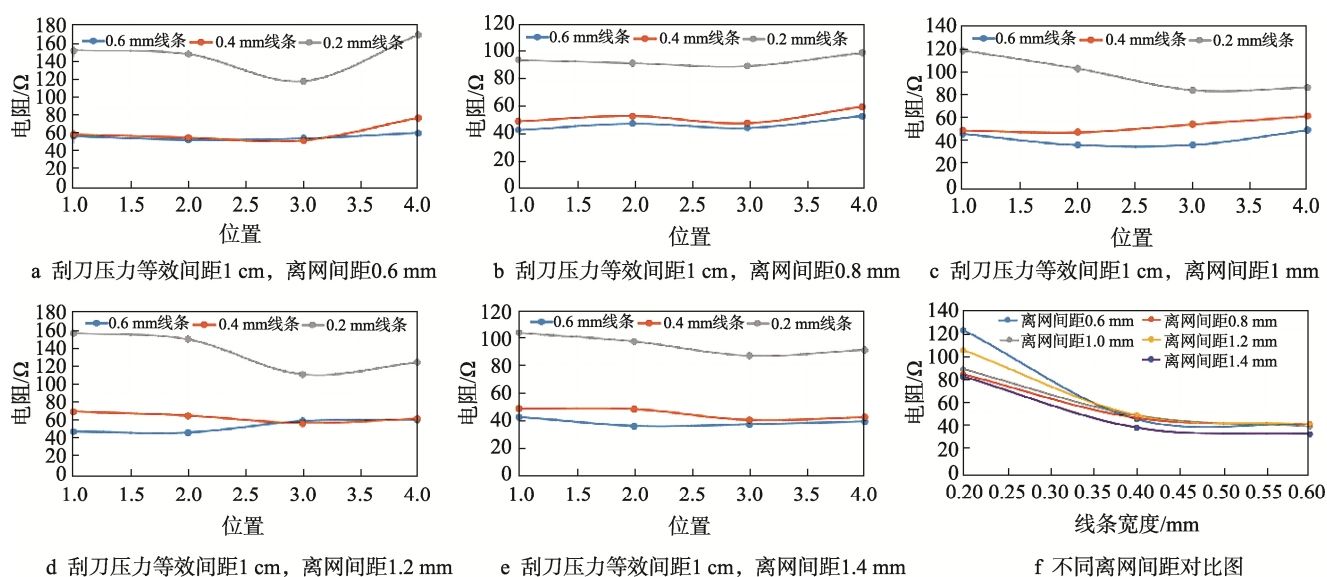


图 5 不同离网间距下线条阻值及其对比分析 (刮刀角度: 65° , 刮刀压力等效间距: 1 cm)

Fig.5 Comparison and analysis of line resistance values under different off-grid distance (blade angle: 65° , equivalent distance for blade pressure: 1 cm)

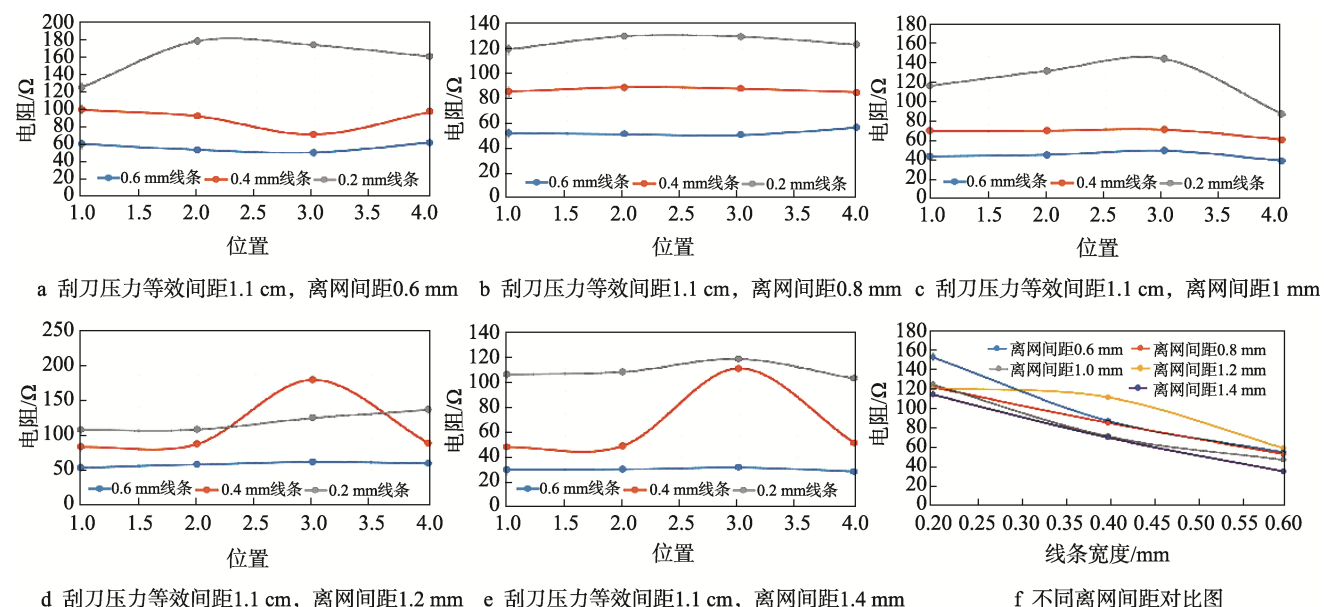


图 6 不同离网间距下线条阻值及其对比分析 (刮刀角度: 65° , 刮刀压力等效间距: 1.1 cm)

Fig.6 Comparison and analysis of line resistance values under different off-grid distance (blade angle: 65° , equivalent distance for blade pressure: 1.1 cm)

当刮刀角度为 60° , 刮刀压力等效间距为 1 cm , 离网间距分别为 0.6 、 0.8 、 1.0 、 1.2 、 1.4 mm 时, 线条阻值如图 7 所示。由图 7 可明显看出, 只有离网间距为 0.8 mm 时, 线条电阻的阻值更趋向水平直线, 说明在该参数下印制线条的电阻阻值的波动范围更加稳定。对图 7 中相同位置的阻值取平均值, 然后进行不同离网间距的对比分析, 结果表明, 当离网间距为 1.0 mm 时, 线条阻值小于其他离网间距下同宽度线条的阻值; 当离网间距为 1.4 mm 时, 印制线条的阻值也相对较小。

当刮刀角度为 60° , 刮刀压力等效间距为 1.1 cm , 离网间距分别为 0.6 、 0.8 、 1.0 、 1.2 、 1.4 mm 时, 印制线条的阻值如图 8 所示。由图 8 可明显看出, 只有

离网间距为 0.8 mm 时, 线条电阻的阻值更趋向水平直线, 说明在该参数下印制线条的电阻阻值的波动范围更加稳定。对图 8 中相同位置的阻值取平均值, 然后进行不同离网间距的对比分析, 结果表明, 当离网间距为 1.4 mm 时, 线条阻值小于其他离网间距下同宽度线条的阻值; 当离网间距为 1.0 mm 时, 印制线条的阻值也相对较小。

综上所述, 从印制线条的阻值大小考虑, 当离网间距为 1.0 mm 或 1.4 mm 时, 其导电性能优于其他同类试验参数, 其中离网间距为 1.4 mm 时, 获得较小阻值的概率最大; 从印制线条不同位置阻值的波动范围考虑, 当离网间距为 0.8 mm 时, 其导电性能优于其他同类试验参数。

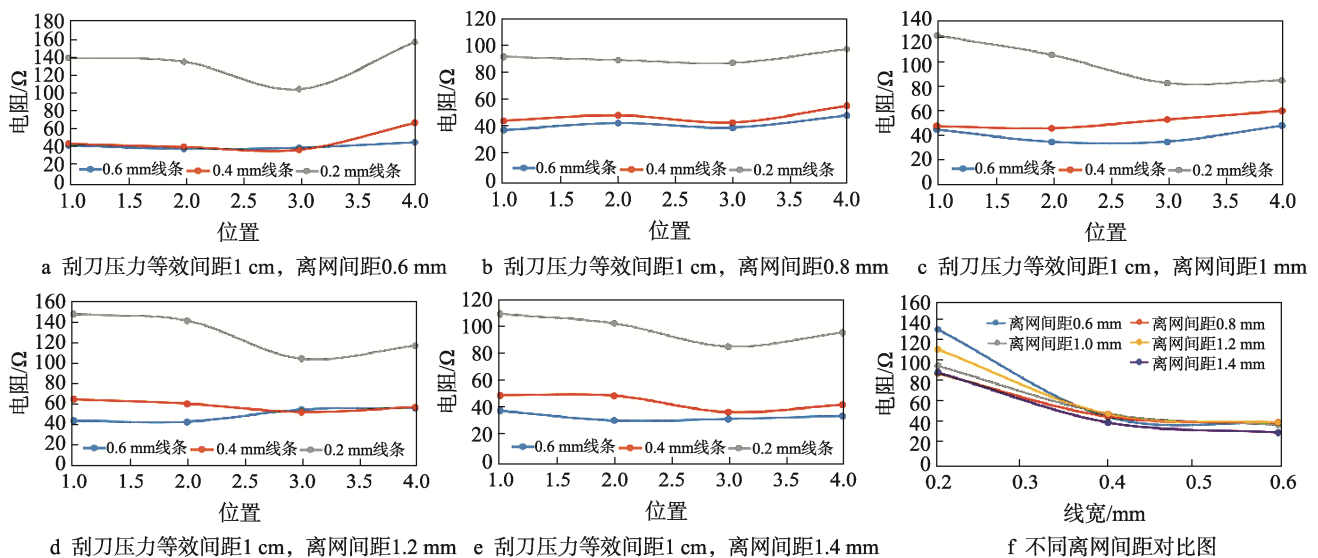


图 7 不同离网间距下线条阻值及其对比分析 (刮刀角度: 60° , 刮刀压力等效间距: 1 cm)

Fig.7 Comparison and analysis of line resistance values under different off-grid distance (blade angle: 60° , equivalent distance for blade pressure: 1 cm)

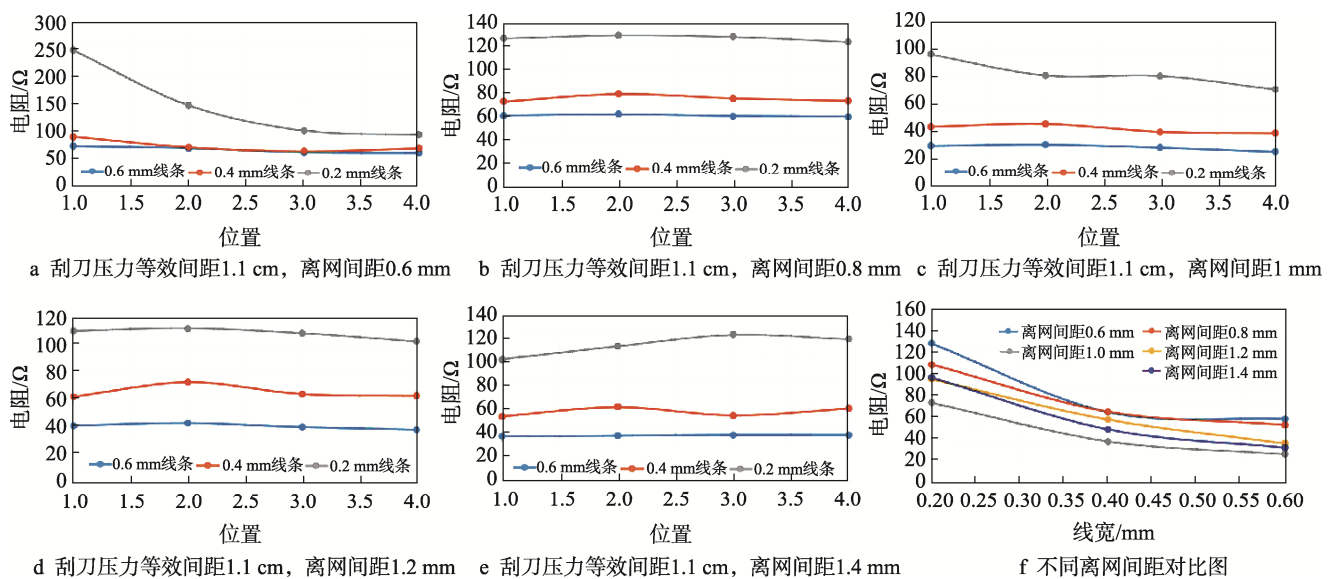


图 8 不同离网间距下线条阻值及其对比分析 (刮刀角度: 60° , 刮刀压力等效间距: 1.1 cm)

Fig.8 Comparison and analysis of line resistance values under different off-grid distance (blade angle: 60° , equivalent distance for blade pressure: 1.1 cm)

3 结语

以刮刀角度、离网间距、刮刀压力等参数作为正交试验的因素水平,并进行丝网印刷线条导电性能正交试验,对试验结果进行分析得到最佳工艺参数选择。线条导电性能主要影响因素为离网间距,其次为刮刀压力和刮刀角度,最优试验方案为离网间距 1.0 mm、刮刀角度 60°、刮刀压力等效间距 1.1 cm。采用多因素对比试验法对印刷线条的电阻进行测量和评价,试验结果表明,从印制线条的阻值大小考虑,当离网间距为 1.0 mm 或 1.4 mm,刮刀角度为 60°,刮刀压力等效间距为 1.1 mm 时,其导电性能优于其他同类试验参数,这与正交试验的结果相吻合,验证了正交试验的可靠性;从印制线条不同位置阻值的波动范围考虑,当刮刀压力等效间距为 1 cm,离网间距为 0.8 mm 时,其导电性能优于其他同类试验参数,这一点从正交试验结果无法看出,说明正交试验在印制线条导电性能研究方面还存在不足。

参考文献:

- [1] 刘力,杨柳,陈裕意. 浅谈印刷电子技术的特点及发展前景分析[J]. 信息记录材料, 2022, 23(3): 11-12.
LIU L, YANG L, CHEN Y Y. A Brief Discussion on the Characteristics and Development Prospect Analysis of Printed Electronics Technology[J]. Information Recording Materials, 2022, 23(3): 11-12.
- [2] 张彦辉. 印刷电子的丝网印刷关键技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018: 5-7.
ZHANG Y H. Research on Key Technologies of Screen Printing for Printed Electronics [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2018:5-7.
- [3] 李婧伟. 精细丝网印刷技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 3-10.
LI J W. Study on Fine Screen Printing Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 3-10.
- [4] 李克伟, 谢森培, 李康, 等. 织物/纸基柔性印刷电子薄膜导电性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 200-206.
LI K W, XIE S P, LI K, et al. Study on Conductivity of Fabric/Paper-Based Flexible Printed Electronic Films[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 200-206.
- [5] 肖港贤, 何邦贵, 陶鑫, 等. 丝网印版变形对印刷位置精度的建模及分析[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 204-210.
XIAO G X, HE B G, TAO X, et al. Modeling and Analysis of Screen Printing Plate Deformation on Printing Position Accuracy [J]. Packaging Engineering, 2023, 44(7): 204-210.
- [6] 李路海, 莫黎昕, 冉军, 等. 导电油墨及其应用技术进展[J]. 影像科学与光化学, 2014, 32(4): 393-401.
LI L H, MO L X, RAN J, et al. Conductive Ink and Its Application Technology Progress[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2014, 32(4): 393-401.
- [7] 杨淑男, 刘彦平. 谈正交试验设计方法的推广与应用[J]. 质量春秋, 2011(2): 48-50.
YANG S N, LIU Y P. On the Extension and Application of Orthogonal Experimental Design Method [J]. Quality Spring and Autumn, 2011(2): 48-50.
- [8] 李茜. 基于丝网印刷导电油墨转移率的影响因素研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2019: 23-26.
LI Q. Study on the Factors Affecting the Transfer Rate of Conductive Ink Based on Screen Printing[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 23-26.
- [9] 刘世朴, 李艳, 张彦辉. 精细丝网印刷电子影响因素及试验研究[J]. 包装工程, 2020, 41(13): 243-250.
LIU S P, LI Y, ZHANG Y H. Influencing Factors and Experimental Research of Fine Screen Printing Electrons[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 243-250.
- [10] 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 Y, LI Y, YUAN Y C, et al. Influence of Screen Printing Electronic Process Parameters on Printing Quality[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(5): 250-259.
- [11] 王永秋. 影响丝网印刷质量的工艺参数分析[J]. 网印工业, 2018(1): 34-37.
WANG Y Q. Analysis of Process Parameters Affecting Screen Printing Quality[J]. Screen Printing Industry, 2018(1): 34-37.
- [12] 李飞. 丝网印刷工艺与参数研究—精细丝网印刷工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2007: 15-20.
LI F. Study on Screen Printing Technology and Parameters-Study on Fine Screen Printing Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2007: 15-20.
- [13] 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: 38-47.
LIU F. Research on Key Technologies of Screen Printing Electronics Based on TRIZ Flow Analysis [D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2019: 38-47.
- [14] 邱轶兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
QIU Y B. Experimental Design and Data Processing[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [15] HONG H, HU J Y, YAN X. Effect of the Basic Surface Properties of Woven Lining Fabric on Printing Precision and Electrical Performance of Screen-Printed Conductive Lines[J]. Textile Research Journal, 2020, 90(11/12): 1212-1223.