

高频 RFID 标签天线丝网印刷工艺

刘薇, 陈广学, 张育思
(华南理工大学, 广州 510640)

摘要: **目的** 研究不同丝网印刷工艺对 RFID 标签性能的影响, 得到最优丝网印刷工艺条件组合。**方法** 研究印刷速度、刮印压力、刮印角度、固化条件等参数变化对天线性能参数的影响。**结果** 当刮刀速度为 50~70 m/min 时, 天线的阻抗稳定, 印刷成品质量好, 天线的可识别距离最大; 刮印压力的最优值为 100 N/m 左右, 刮刀角度应大于 40°, 固化温度大于 110 °C, 固化时间应在 20~40 min 之间。**结论** 标签阻抗随刮刀速度呈现 U 形变化, 而最大识别距离呈现相反趋势; 标签阻抗随刮刀压力和刮刀角度均成 U 形变化趋势; 天线阻抗随着固化时间和固化温度的升高而降低, 最大识别距离呈现相反趋势。

关键词: RFID 电子标签; 刮刀速度; 固化条件; 识别距离

中图分类号: TS896 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0219-06

Screen Printing Technology of HF RFID Tag Antenna

LIU Wei, CHEN Guang-xue, ZHANG Yu-si
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of different screen printing processes on the performance of RFID tag, so as to obtain the combination of optimal screen printing process conditions. The effects of the scraper blade with different speed, pressure, angle and curing conditions on properties of RFID tag antenna were tested. The better quality of RFID tag antenna was obtained when scraper blade speed was between 50~70 m/min, pressure around 100 N/m, angle larger than 40°, curing temperature larger than 110 °C and curing time between 20~40 min. The results showed that the antenna's impedance took on an U-shape variation tendency with speed, pressure and angle of scraper blade. The recognizable distance performed opposite. The antenna's impedance decreased with curing time and temperature. However, the recognizable distance showed an opposite tendency.

KEY WORDS: RFID electronic tag; scraper blade speed; curing condition; recognizable distance

RFID 电子标签通过空间耦合实现无接触信息传递, 并通过所传递的信息实现识别目标的自动识别技术^[1]。在产品包装、生产制造、交通运输、物资调配、商品防伪、超市管理等行业都有着广阔的应用前景^[2-3]。我国当前 RFID 的应用和发展还面临着一些关键技术的问题和挑战, 其中 RFID 标签的价格是 RFID 技术推广过程中存在的 key 问题之一, 目前生产 RFID 天线的生产方式有蚀刻法、电镀法、直接

印刷法, 前两者均会产生大量金属废料和化学废液, 而直接印刷法采用导电油墨印刷天线代替腐蚀铜天线, 并使用成本较低的纸基、PET 基材可开发出满足低成本高性能电子标签的生产线, 是当下实现规模化生产的需要, 也是 RFID 技术普及应用的关键。丝网印刷可以较好地控制印刷成品的墨层厚度, 而不同的油墨厚度对于不同工作频率的电子标签有着不同的效果; 定位准确度可达到 0.01 mm, 确保了印刷电路

收稿日期: 2016-07-18

作者简介: 刘薇 (1992—), 女, 华南理工大学硕士生, 主攻印刷包装材料与印前图文处理。

通讯作者: 陈广学 (1963—), 男, 博士, 华南理工大学教授、博导, 主要研究方向为印刷包装功能材料、图文信息处理、印刷电子及 3D 打印等。

的准确性;承印物范围广,可配合不同的包装材料的要求。RFID 电子标签的印制以丝网印刷为首选,因此,研究丝网印刷过程中印刷工艺及固化条件对标签天线性能的影响规律,能够帮助印刷企业选择最佳的印刷参数组合,从而全面提高印刷电子标签的品质。

近年来,国内外研究主要是基于理论以及 RFID 相关电子特性的测试,并未实际测量其读取距离,而 RFID 的实际读取距离是其应用最重要且最直接的体现方面,能获得最大读取距离的印刷工艺控制条件对市场有着极其重要的指导意义。S.Cichos 等^[4]的研究表明,通过丝网印刷方式将导电油墨印制到 PET、PVC 或聚酰亚胺基片上制成天线可实现大批量生产并降低成本和加工时间。徐磊等^[5]研究表明丝网印刷 RFID 标签天线的电阻受印刷工艺与固化条件影响较大。王森等^[6]分析了标签天线的阻抗的计算方法,并从天线油墨厚度、导电油墨性质 2 个方面对天线电阻进行了分析。何雪梅等^[7]采用卷到卷全自动丝网印刷机在纸基上印刷导电银浆,通过正交优化实验研究刮板与网版的承印角度等因素对天线性能的影响并优化结果得到最佳工艺参数。

1 RFID 标签天线的辐射频率及标签天线设计

1.1 天线辐射效率

对于无源 RFID 电子标签而言,标签芯片的能量来自于标签天线的电磁辐射,标签天线的电磁辐射的大小直接影响到 RFID 电子标签的阅读距离。由于天线在工作过程中存在传导损耗(由于天线的有限电导率产生的损耗)、介电损耗(由于传导电介质材料产生的损耗)等,因此实际辐射的电磁波功率要比发射功率小。天线辐射效率是天线辐射总功率和天线从馈线得到的净功率之比,若采用电阻形式,天线的辐射效率可简单定义为^[8]:

$$\eta = \frac{\text{天线辐射功率}}{\text{全部天线接收功率}} = \frac{R_r}{R_l + R_r} \quad (1)$$

式中: R_l 为天线的损耗电阻; R_r 为天线的辐射电阻。可以看出,要提高天线的辐射效率,就要尽可能提高天线的辐射电阻,降低天线的损耗阻抗^[9]。

1.2 HF 频段的 RFID 标签天线设计

HF 频段的 RFID 标签天线是基于磁偶极子理论设计的,天线通常为线圈结构。线圈天线结构参数有:圈数 N 、最外圈边长 a 和 b 、线宽 w 、线间距 s 。其中,最外圈边长 a 和 b 由具体应用的标签尺寸决定;一般,线宽 w 为毫米级;根据线圈感应电压的要求可以估算圈数 N ^[10-12]。

对于 N 匝的情况,既有正互感(有相同电流方向的导电段间的互感)也有负互感(有相反电流方向的导

电段间的互感),总电感 L_T 为:

$$L_T = L_0 - M_+ - M_- \quad (2)$$

式中: L_T 为总电感(μH); L_0 为所有直线段自电感之和; M_+ 为正互感之和; M_- 为负互感之和。根据复合截面导线原理,可以推出 N 匝线圈的电感估算公式:

$$L = \frac{\mu_0 n^q}{\pi} [b_0 \ln a_0 + a_0 \ln b_0] - \frac{\mu_0 (a_0 + b_0)}{\pi} \left\{ n \ln [0.2236(w+t)] + 2(n-1) \ln \frac{(n-1)p}{2} \right\} \quad (3)$$

$$p = s + w, a_0 = a - np, b_0 = b - np$$

式中: μ_0 为磁感应强度,数值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; n 为线圈匝数; q 为线圈指数,印刷天线 q 为 1.7~1.8; t 为线圈厚度; w 为线圈宽度; s 为线圈间距; a, b 为天线最外圈边长。

RFID 标签芯片的输入电容一般在 20~100 pF 之间,为了满足标签高频工作频率 13.56 MHz,通常将标签天线的电感设在 2~6 μH 。实验所用的 RFID 天线结构见图 1,该天线有 7 匝,最外圈边长为 65×40 mm,线宽 0.8 mm,线间距为 1.0 mm,线匝厚度为 0.012 mm。该线圈的耦合电容约为 3 pF^[13],电感值约为 2.5 μH 。

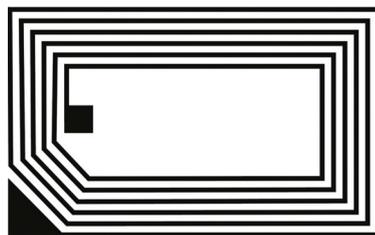


图 1 实验所用 RFID 标签天线
Fig.1 RFID tag antenna for experiment

2 丝网印刷实验设计

丝网印刷过程中,各工艺参数都会对 RFID 标签天线的阻抗产生影响,丝网印刷刮印过程见图 2。



图 2 丝网刮印过程
Fig.2 Scraper printing process of screen printing

丝网印刷 RFID 天线的电阻由天线墨层厚度和导电油墨本身的导电性能两方面决定^[6]。在丝网印刷印制 RFID 标签天线的时候,需要对各参数进行对比分析得出较优的参数组合,从而提高 RFID 标签天线的性能。对于选定的导电油墨,由于丝网工艺不同导致墨层厚度的变化是主要影响因素。实际印刷过程中丝网墨层厚度 H 由丝网结构参数和印刷工艺条件共同决定,其主要影响参数决定以下函数:

$$H = f(n, d, m, \delta, \theta, \xi, \tau, a, p, v, \varepsilon, T, t, x) \quad (4)$$

式中: H 为墨层厚度; n 为网版目数; d 为丝线直径; m 为丝网材料; δ 为网孔形状; θ 为刮刀角度; ξ 为刮刀硬度; τ 为油墨粘度; a 为上墨量; p 为刮刀压力; v 为刮印速度; ε 为印刷环境; T 为固化温度; t 为固化时间; x 为人为因素。

文中主要研究印刷工艺对 RFID 性能的影响, 故选取刮刀速度 v , 刮刀压力 p , 刮刀角度 θ , 固化温度 T , 固化时间 t 等参数进行研究分析。

实验设备及材料: 科之艺 SCIEN-ART 丝网印刷机(加网线数为 350 目/inch, 1 inch=0.0254 m), 中科纳导电银浆(Ag 粒子质量分数为 60%, 粘度为 10~14 Pa·s, 附着力的 ISO 等级为 0~1 级, 硬度 ≥ 2 H), 双面光滑铜版纸, 测量电阻的万用表, 温度可控的烘干箱; 美国 ST 微电 SR176 Wafer 芯片(工作频率为 13.56 MHz, 副载频为 847 kHz, 存储容量 176 bits, 阅读距离为 2~15 cm); GAO 233013 手持式读写器(工作频率 13.56 MHz \pm 7 kHz, 支持 ISO15693/ISO14443 协议, 阅读距离 5~15 cm); 安装了 DEMO 系统的电脑(用于读写 RFID 电子标签的信息)。

印刷环境为恒温恒湿条件下环境温度 23 °C, 湿度 60%。识别距离测试环境: 实验过程要避免其他干扰场强和干扰信号频率的干扰, 实验场地无障碍物及其他电磁信号发射源, 同时尽量避免场地周围物体反射 RFID 天线所发出的电磁信号, 测试过程中尽量避免人或其他物体的运动对该空间电磁场分布产生扰动。实验步骤如下所述。

1) 在刮刀压力为 100 N/m, 刮板角度为 75°的条件下, 设置刮刀速度分别为 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 m/min 下印制天线, 每组印制 5 个标签, 印制后将天线放在烘干箱固化, 固化温度为 80 °C, 固化时间为 30 min, 用万用表测量天线的电阻, 求天线电阻的平均值。

2) 测量 1) 中天线的可识别最大距离。将印刷好的天线贴片装上芯片; 然后读写器通过 USB 接口与电脑相连接, 打开 DEMO 系统; 接着将不同刮刀速度印刷后的标签水平置于读写器正前方, 测试标签的最大读写距离, 取平均值; 最后将标签水平置于读写器上方和下方、左边和右边, 测试标签的最大读写距离, 取平均值。

3) 在刮印速度为 50 m/min, 刮板角度为 75°的条件下, 设置刮刀压力分别为 40, 70, 100, 130, 160 N/m 下印制天线, 每组印制 5 个标签, 印制后将天线放在烘干箱固化, 固化温度为 80 °C, 固化时间为 30 min, 用万用表测量天线的电阻, 求天线电阻的平均值。

4) 在刮印速度为 50 m/min、刮印压力为 100 N/m 的条件下, 设置刮刀角度分别为 30°, 40°, 50°, 60°, 70°

下印制天线, 每组印制 5 个标签, 印制后将天线放在烘干箱固化, 固化温度为 80 °C, 固化时间为 30 min, 用万用表测量天线的电阻, 求天线电阻的平均值。

5) 在刮刀刮印速度为 50 m/min, 刮刀压力为 100 N/m, 刮板角度为 75°的条件下印刷天线, 印制后将天线放在烘烤箱中固化, 固化温度设为 70 °C, 固化时间分别为 1, 10, 20, 30, 40 min, 每组温度印制 5 个标签, 用万用表测量天线的电阻, 求不同温度下天线电阻的平均值, 求平均值; 将固化温度设为 80, 90, 100, 110 °C, 重复实验步骤 5)。可识别距离的测试参考步骤 2)。

3 结果与讨论

3.1 刮刀速度对 RFID 标签天线性能的影响

由图 3 可知, RFID 电子标签天线的电阻随着刮印速度的增加而呈现 U 型变化。由此可以看出, 在刮印速度较小时, 阻抗随着刮印速度的增大而减小, 在刮印速度为 50~70 m/min 之间时, 天线阻抗趋于稳定, 超过 70 m/min 时, 阻抗值随着刮印速度增加而增加。这是由于在刮印速度较小时, 导电油墨的 Ag 粒子容易堵塞丝网的网孔, 油墨的通过性差, 造成天线的导电 Ag 粒子密度下降, 导电性能降低。当刮印速度适中的时候, 导电油墨的通过性能良好, 导电 Ag 粒子很好地转移到承印物上, 阻抗降低, 导电性能提高。当刮印速度太大时, 油墨从丝网转移到承印物上的停留时间短, 印刷时的给墨量不足, 降低了天线的导电性能, 而且印刷速度过快容易使得承印物在网印后墨迹上出现气泡, 影响印刷质量, 因此, 印刷 RFID 标签天线时要将刮印速度控制在 50~70 m/min 范围内, 才能保证油墨的填充量和 Ag 粒子的含量, 使得 RFID 标签天线的阻抗小。

由图 4 可以看出, 电子标签前方和左右的读写距离, 以及上下的读写距离由电子标签天线辐射的方向决定, 水平方向的辐射大, 而垂直方向的辐射小^[14]。随着刮刀速度的增大, 标签的阅读距离先增大后减小, 且变化规律与标签阻抗的变化规律(见图 3 与图

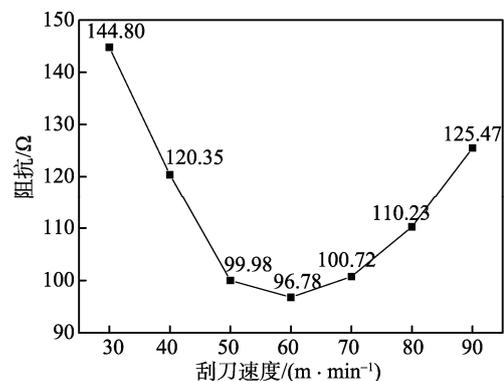


图 3 刮刀速度与标签天线阻抗的关系

Fig.3 The relationships between scraper blade speed and tag antenna's impedance

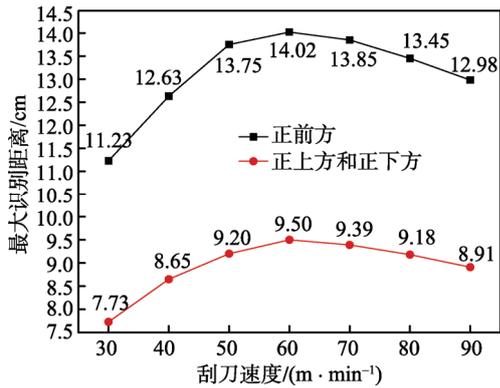


图4 不同刮刀速度下 RFID 标签天线阅读距离的关系
Fig.4 The relationships between RFID tag antenna recognizable distances at different scraper blade speeds

4) 相反, 由此可见, 标签阻抗越大, 其阅读距离越小。这是因为当天线电阻增加后, 会引起标签谐振频率与品质因子下降, 从而降低了其可识别距离。

3.2 刮刀压力对 RFID 标签天线性能的影响

由图 5 可知, RFID 电子标签天线的电阻随着刮印压力的增加亦呈现 U 型变化。由此可以看出, 在刮印压力较小时, 阻抗随着刮印压力的增大而减小, 刮印压力在 70~130 N/m 之间时, 天线阻抗趋于稳定, 超过 130 N/m 时阻抗值随着刮印压力的增加而增加。这是由于在刮印压力较小时, 导电油墨通过丝网转移到承印物上的油墨量较少, 导电能力降低。当刮印压力适中的时候, 导电油墨的转移量大, 阻抗降低, 导电性能提高。当刮印压力太大超过丝网的承受范围时, 丝网会产生形变, 使得导电油墨被挤压到了天线形状的外围, 天线的边缘印迹模糊, 分辨率下降, 阻抗增大, 导电能力下降。印刷过程中压印力过大可能导致刮板弯曲, 刮板与丝网和承印物之间不是线接触而是面接触, 这样每次刮印都不能将油墨刮干净, 这些残留在刮板上的油墨经过一定的时间会结膜, 从而造成糊版, 因此, 印刷 RFID 标签天线的时候要控制好刮印压力在 70~130 N/m 的范围内, 才能保证油墨的转移量(过墨量)和天线边缘的清晰度, 使得 RFID

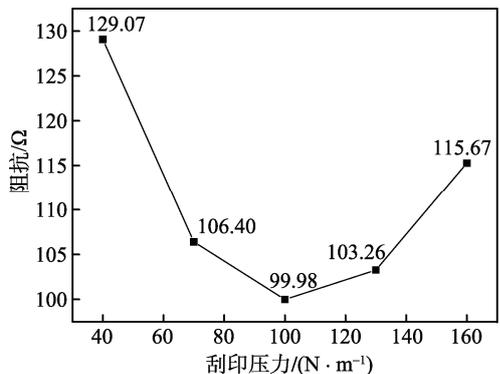


图5 刮刀压力与标签天线阻抗的关系
Fig.5 The relationships between scraper blade pressure and tag antenna's impedance

标签天线的阻抗小。

3.3 刮刀角度对 RFID 标签天线性能的影响

由图 6 可知, 刮刀角度小于 40°时, 标签天线的阻抗很大, 当刮刀角度大于 40°时, 阻抗值趋于稳定, 在 50°左右时有最小值, 当刮刀角度大于 50°时, 又呈现上升趋势, 刮刀角度与垂直作用于油墨的压力相关, 刮板的刮印角度 α 越大时, 垂直方向挤压油墨通过丝网网孔分力越大, 则油墨的转移量也就越大, 转移到承印材料上的油墨也相应越多, 这将导致印刷 RFID 标签天线的墨膜的致密性降低, RFID 标签天线的方阻值增大。但是当角度增大到一定程度时, 角度对压力的影响会越来越小, 而且压力增大到一定程度也会导致天线的边缘印迹模糊, 分辨率下降, 阻抗增大, 导电能力下降, 故而在刮印角度为 50°之后, 天线的阻抗变化相对较缓慢, 且呈上升趋势。由此可以看出, 丝网印刷 RFID 标签天线时, 刮刀角度应大于 40°。

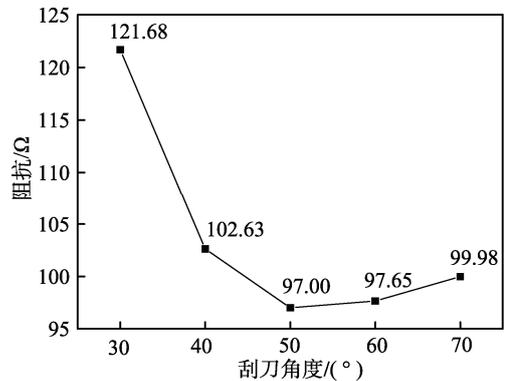


图6 刮刀角度与标签天线阻抗的关系
Fig.6 The relationships between scraper blade angle and tag antenna's impedance

3.4 固化条件对 RFID 标签天线性能的影响

由图 7—8 可知, 随着固化时间的增加, 标签阻抗不断降低, 降低幅度减小, 最后趋于稳定; 随着固化温度的提高, 标签阻抗不断降低, 降低的幅度减小, 最后趋于一个稳定值。这是因为, 导电油墨的固化时间和固化温度通过影响氧化结膜固化和有机连结剂的挥发, 进而影响导电油墨的固化。当固化时间一定时, 固化温度升高, 氧化结膜反应速率更大, 有机连结剂的挥发速度也更快, 天线油墨的固化更全面, 油墨内部颗粒致密度更高, 油墨中的银粒子之间的间隙减小, 接触更良好, 形成渗流效应, 从而提高了天线的导电率, 电阻下降。在固化时间相同的情况下, 随着反应时间的推移, 氧化结膜反应进行得越全面, 有机连结剂的挥发也更全面, 油墨内部颗粒致密度更高^[15], 油墨中的银粒子之间的间隙减小, 接触更良好, 形成渗流效应, 从而提高了天线的导电率, 电阻下降; 如时间长了, 反应会慢慢地趋于稳定, 故而后面的降低幅度小。

由图 9 可知, 随着固化时间和固化温度的升高,

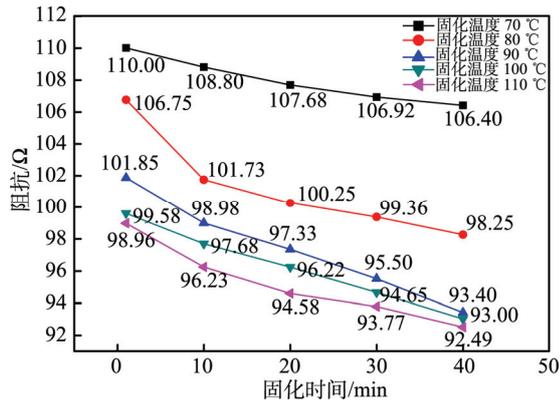


图 7 固化时间与标签天线阻抗的关系

Fig.7 The relationships between curing time and tag antenna's impedance

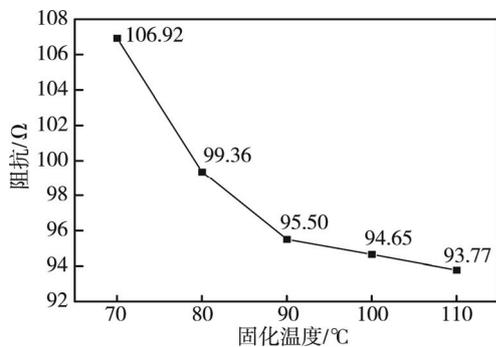


图 8 固化时间 30 min 时固化温度与标签天线的阻抗关系

Fig.8 The relationships between curing temperature and tag antenna's impedance when curing time is 30 min

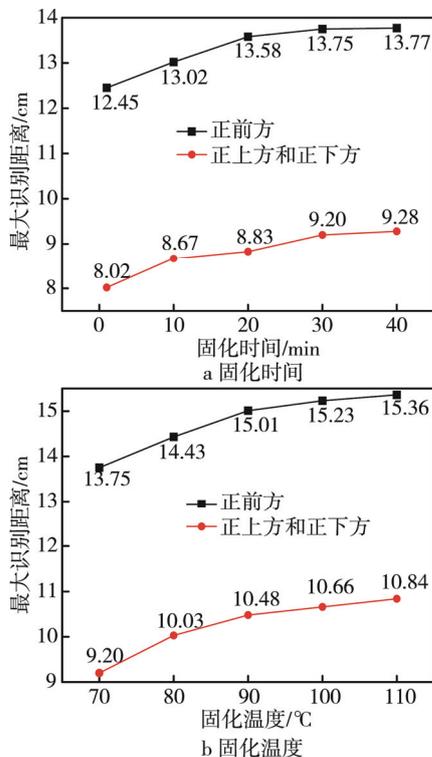


图 9 不同条件下 RFID 标签天线阅读距离的关系

Fig.9 The relationships between RFID tag antenna recognizable distances under different conditions

电子标签的可识别距离有所增加。这是因为随着温度的升高，氧化结膜反应速率更大，有机连结剂的挥发速度也更快，天线油墨的固化更全面，油墨内部颗粒致密度更高，油墨中的银粒子之间的间隙减小，接触更良好，形成渗流效应，从而提高了天线的导电率，电阻下降，由阅读距离的计算公式可知^[3]，标签的读写距离增大。在固化时间相同的情况下，随着反应时间的推移，氧化结膜反应进行得越全面，有机连结剂的挥发也更全面，油墨内部颗粒致密度更高，油墨中的银粒子之间的间隙减小，接触更良好，形成渗流效应，从而提高了天线的导电率，电阻下降，标签的读写距离增大；但是由于实验用的电子标签在进行阅读距离的实验之前已经放置了一段时间，所以在固化时间方面存在一定的误差。

4 结语

实验所涉及的 RFID 标签天线的工作频率为 13.56 MHz，根据天线的辐射效率、阻抗匹配、读取范围等性能参数，设计匝数为 7，外边长为 65×40 mm，线宽为 0.8 mm，线间距为 1 mm 的矩形螺旋天线。接着通过实验研究了导电油墨刮刀速度、刮印压力、刮印角度、固化条件等对天线性能参数的影响，实验数据分析表明，标签阻抗随刮刀速度呈现 U 形变化，而最大识别距离呈现相反趋势；标签阻抗随刮刀压力和刮刀角度均成 U 形变化趋势；天线阻抗随着固化时间和固化温度的升高而降低，最大识别距离呈现相反趋势。当刮刀速度为 50~70 m/min 时，天线的阻抗稳定，印刷成品质量好，天线的可识别距离最大；刮印压力的最优值为 100 N/m 左右，刮刀角度应大于 40°，固化温度大于 110 °C，固化时间应处于 20~40 min。

参考文献：

- [1] KIM Y H, LEE B Y, YANG S G, et al. Use of Copper Ink for Fabricating Conductive Electrodes and RFID Antenna Tags by Screen Printing[J]. Current Applied Physics, 2012(12): 473—478.
- [2] TONI B, SARI L M. The Effect of Conductive Ink Layer Thickness on the Functioning of Printed UHF RFID Antenna[J]. Proceedings of the IEEE, 2010(9): 1620—1628.
- [3] 马长胜, 刘贤锋. RFID 技术应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
MA Chang-sheng, LIU Xian-feng. RFID Technology Application[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.
- [4] CICHOS S, HABERLAND J, REICHL. Performance Analysis of Polymer Based Antenna-Coils for RFID, Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics[C]// Polytronic and Internationa, 2002(2): 2—4.

- [5] 徐磊, 黄辉明, 孙道恒. RFID 标签天线的丝网印刷[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2009, 48(6): 835—839.
XU Lei, HUANG Hui-ming, SUN Dao-heng. Screen Printing of RFID Tag Antennae[J]. Journal of Xiamen University (Natural science), 2009, 48(6): 835—839.
- [6] 王森, 钱军浩. RFID 丝印墨层厚度影响因素的研究[J]. 包装工程, 2011, 32(19): 97—100.
WANG Sen, QIAN Jun-hao. Study on Influencing Factors of Ink Thickness by RFID Screen Printing[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 97—100.
- [7] 何雪梅, 何为, 陈苑明, 等. 卷到卷丝网印刷 RFID 天线的工艺优化研究[J]. 印制电路信息, 2011(4): 117—120.
HE Xue-mei, HE Wei, CHEN Yuan-ming, et al. Study on Process Parameters of RFID Antenna Printed with Roll to Roll Technology[J]. Printed Circuit Information, 2011(4): 117—120.
- [8] 曹丽娜, 钱军浩. 导电油墨厚度对 RFID 标签天线辐射效率的影响[J]. 包装工程, 2012, 33(5): 122—125.
CAO Li-na, QIAN Jun-hao. Influence of Conductive Ink Thickness on Radiation Efficiency of RFID Tag Antenna[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(5): 122—125.
- [9] 谭彪. 一种改进的测量天线辐射效率的方法[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2006, 15(1): 37—39.
TAN Biao. An Improved Method for the Measurement of Antenna Radiation Efficiency[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology(Natural sciences edition), 2016, 15(1): 37—39.
- [10] 许毅, 陈建. RFID 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
XU Yi, CHEN Jian. The Theory and Application of RFID[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [11] KANG K Y, LEE Y G, SHIN D O. Performance Improvements of Pouch-type Flexible Thin-Film Lithium-Ion Batteries by Modifying Sequential Screen-Printing Process[J]. Electrochemical Acta, 2014(138): 294—301.
- [12] JOSE F S, FRANCISCO M L, DANICK B, et al. Properties and Printability of Inkjet and Screen-Printed Silver Patterns for RFID Antennas[J]. Journal of Electronic Materials, 2014(43): 604—617.
- [13] PHILIPS S. I-code Coil Design Guide[J]. Product Specification, 2002(3): 29—32.
- [14] 郇息明, 陆小明. 通信天线的特性和应用浅析[J]. 江苏水利, 2004(4): 31—32.
LI Xi-ming, LU Xiao-ming. The Property and Application of Telecommunication Antenna[J]. Jiangsu Water Resources, 2004(4): 31—32.
- [15] WU Wei, YANG Shuang-lei, ZHANG Shao-feng, et al. Fabrication, Characterization and Screen Printing of Conductive Ink Based on Carbon Ag Core-Shell Nanoparticles[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2014, 427(8): 15—19.