

基于无源 RFID 标签天线的印刷质量评价模型研究

曹丽娜, 钱军浩

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 为评价无源 RFID 标签天线的印刷质量, 对无源 RFID 标签天线的质量性能进行了理论分析。针对成品后的天线性能与仿真后的天线性能间存在的差异, 在丝网印刷的条件下, 以 RFID 标签天线间的间隙偏差、天线厚度偏差和最大阅读距离偏差为自变量, 建立了评价无源 RFID 标签天线印刷质量的数学线性回归模型, 为 RFID 标签天线在生产过程中的优化提供了一定指导。

关键词: RFID 标签天线; 油墨厚度; 阻抗匹配; 质量评价

中图分类号: TS802.2; TS851⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)09-0126-04

Study of Printing Quality Evaluation Model of Passive RFID Tag Antennas

CAO Li-na, QIAN Jun-hao

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: The quality performances of passive RFID tag antennas were analyzed in theory. According to the differences between the measured and simulation of antenna performance, under screen printing conditions, Linear regression model was established using the gap, thickness and maximum reading distance as three independent variables to evaluate the printing quality of RFID tag antennas. The purpose was to provide guidance for optimization of RFID tag antennas in practical production.

Key words: RFID tag antennas; ink layer; impedance matching; quality evaluation

目前, 全球物联网产业体系处于建立和完善的过程之中, 要实现物联网像互联网一样在人们日常生活中的普及, 一个首要的问题就是物联网的技术关键——RFID 电子标签天线的制作。现在国内外制作 RFID 电子标签的方法有柔性版印刷、丝网印刷以及近几年兴起的喷墨印刷等^[1-2], 这些方法虽然较传统方法有很多优势, 但是直接印刷 RFID 电子标签天线也存在很多不足。特别是对于无源 UHF 频段的电子标签天线, 由于超高频段标签要求的天线的辐射效率很高, 在实际印制过程中往往与采用仿真软件仿真的结果存在一定的差异。为了对印制出的标签天线进行客观的质量评价, 为实际高质量、大批量地印刷标签天线提供一定的理论依据, 文中以无源 RFID 电子标签天线为研究对象, 建立了 RFID 电子标签天线质量评价的数学线性回归模型。

1 无源 RFID 标签天线质量性能的理论分析

1.1 RFID 标签天线的阅读距离

无源 RFID 电子标签工作所需要的能量主要来自阅读器产生的电磁场, 而天线在理论上阅读的最大距离^[3]为:

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}}} = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\frac{P_t G_t G_r (1-s)}{P_{th}}}} = \frac{c}{4\pi f \sqrt{\frac{P_t G_t G_r (1-s)}{P_{th}}}} \quad (1)$$

式中: P_{th} 为电子标签芯片的最小门限电压; s 为反射系数; G_r 为天线的增益; c 为光的传播速度; f 为标签天线的工作频率; $P_t G_t$ 为阅读器的等效辐射功率, 即 EIRP, 它的大小由当地政府决定。对于特定的工作频率和芯片, 阅读器的读写距离取决于天线的增益和反射系数。由式(1)看出, 当天线的反射系数为

收稿日期: 2012-02-22

作者简介: 曹丽娜(1987—), 女, 山东临沂人, 江南大学硕士生, 主功 RFID 电子标签直接印刷法的性能优化。

0 时,阅读器的读写距离最大。上述列举的影响天线最大阅读距离的各个因素中,标签工作的频率是变化范围最大的,频率的计算公式为:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

式中: L 为标签天线的电感; C 为标签天线的电容。

1.2 RFID 标签天线与芯片阻抗的共轭匹配^[3-5]

电子标签在工作时,其内部可以等效为图 1 所示的电路图。

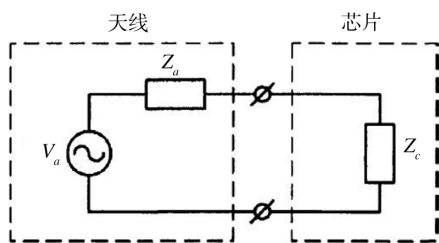


图 1 RFID Tag 在工作时的等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of RFID tag in working condition

图 1 中, $Z_a = R_a + jX_a$, $Z_c = R_c + jX_c$, 其中, Z_a 和 Z_c 分别表示天线和芯片的阻抗。功率的传输系数 τ 是电子标签芯片的接收功率 P_c 与电子标签天线接收的最大有用功率 P_{amax} 之比,即:

$$P_c = \tau P_{amax} \quad (3)$$

公式(3)可以变形为

$$\tau = \frac{P_c}{P_{amax}} = \frac{4R_a R_c}{|Z_a + Z_c|^2} \quad (4)$$

(4)式可以重新写成:

$$\tau = \frac{4R_a R_c}{|R_a + jX_a + R_c + jX_c|^2} = \frac{4R_a R_c}{|(R_a + R_c) + j(X_c + X_a)|^2} \quad (5)$$

根据(1)式,最大阅读距离在 $S=0$, 即 $\tau=1$ 时取得,代入式(5)中可以得出电子标签天线和芯片阻抗共轭匹配时, $R_a = R_c$, $X_c = -X_a$ 。

以上理论推导可以看出,对于不同的芯片而言,印制 RFID 电子标签天线要想实现最大阅读距离,天线的阻抗必须根据芯片的阻抗进行合理的调整,达到共轭匹配,从而实现 RFID 电子标签的最佳性能。

1.3 RFID 标签天线电阻与导电油墨

天线的电阻主要取决于导电油墨的厚度、宽度及

所用导电物质的电阻率,可以表示为:

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{\rho L}{ab} \quad (6)$$

式中: L 为天线的长度; ρ 为天线的电阻率; S 为天线的横截面积; a 为天线的宽度; b 为天线的厚度。

理论上,由公式(6)可知,针对特定的导电油墨,天线的读写性能取决于所用导电油墨的厚度、宽度。但是,不同频率的 RFID 电子标签所需导电油墨的厚度和宽度各异^[6]。

在实际印制 RFID 标签天线的过程中,印制出的天线,无论是常用的偶极子天线,还是稍微复杂的微带贴片天线,成品后测得的各项性能总是同用 HFSS 等仿真软件建模的仿真结果在数值上存在一定的差异^[7-8],加之标签天线在印制过程中不存在套印精度和网点扩大率等问题,所以传统的一些评价印刷质量的方法在 RFID 标签天线的质量评价中不适用。为了更好地评价 RFID 电子标签天线的性能,建立 RFID 标签天线质量评价模型十分必要。

2 建立 RFID 标签天线质量评价数学模型

通过上述 RFID 标签质量性能的理论分析可知,影响标签质量性能的最主要因素为天线的电容、电感和成品后天线的电阻 R (主要受宽度和厚度影响)。在丝网印刷过程中,印刷压力、刮板速度、承印物材质(纸张或者 PET 材料)、导电油墨及其固化温度和固化时间等参数的变化,最终会导致成品后标签天线电阻的变化。由文献[6]可知,丝网印刷工艺以及油墨固化情况会对天线的电感和电容产生一定的影响,由公式(1)可知,电容和电感最终影响 RFID 电子标签天线的阅读距离。

2.1 RFID 标签天线质量评价模型的提出

在通过大量实验样品分析线圈之间间隙误差约为其宽度误差的 2 倍的前提下,参照文献[9]及文献[5]的标签质量评价模型,针对特定的导电油墨和特定的印刷承印基材,并考虑到各个变量对成品后标签天线质量性能的影响不是等效的,以最终成品后的 RFID 标签天线线圈与线圈之间的间隙偏差、导电油墨的厚度偏差和天线的最大阅读距离偏差 3 个变化量,建立数学线性回归模型,模型的表达式为:

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varphi \quad (7)$$

式中: Y 为天线印品质量; $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为线性回

归系数; φ 为随机误差。定义 $X_1=\Delta a^2$, $X_2=\Delta b^2$, $X_3=\Delta R^2$, 其中, Δa 表示天线线圈之间的实际间隙和理论间隙之差, Δb 表示导电油墨的实际厚度和理论厚度之差, ΔR 表示天线的实际最大阅读距离与理论最大阅读距离之差。具体计算公式为:

$$\begin{cases} \Delta a=a_1^*-a_1 \\ \Delta b=b_1^*-b_1 \\ \Delta R=R_1^*-R_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: a_1^* , b_1^* , R_1^* 分别表示天线的实际间隙、导电油墨的实际厚度和天线的实际阅读距离; a_1 , b_1 , R_1 分别表示标签天线的理论间隙、导电油墨的理论厚度和天线的理论阅读距离。由于文献[5]中关于标签天线的印品质量评价 $\Delta M=\sqrt{(\Delta a)^2+(\Delta b)^2+(\Delta R)^2}$, 各个参数的误差对印品质量的影响是等效的, 致使实际衡量质量标准的过程中存在很大的误差, 为了合理评价 RFID 电子标签天线的印品质量, 将线性回归模型的数学表达式表示为:

$$Y=\vartheta+\beta_1(a_1^*-a_1)^2+\beta_2(b_1^*-b_1)^2+\beta_3(R_1^*-$$

$$R_1)^2+\varphi \quad (9)$$

即:

$$Y=\vartheta+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\beta_3 X_3+\varphi \quad (10)$$

式中: $Y=\Delta M^2$

2.2 实验数据的取值

通过实验获得印刷工艺参数,进而采用最小二乘法求得上述模型中的各回归系数。实验采用丝网印刷的方式,改变印刷压力、固化温度、刮板速度分别制作 5 份 RFID 电子标签天线线圈,每一次印刷都取 5 份中最靠近理论值的那个。线圈的基底材料为 PET,厚度为 0.2 mm。要求天线线圈的圈数为 5 圈,线圈的理论间隙为 2 mm,宽度为 2.5 mm,导电油墨厚度为 13 mm,其中规定 EIRP 为 4 W,选取芯片的灵敏度为 12 μ W,通过模拟软件 HFSS11 仿真天线在 915 MHz 下的天线增益为 $G_R=0.5$ dBi。天线的实际阅读距离由公式(1)计算得出,天线实际宽度(间隙差)、导电油墨的实际厚度都可以在显微镜下测得。实验室中记录了一系列的印刷数据,见表 1。

表 1 印制 RFID 电子标签天线线圈的数据

Tab.1 The data of printed RFID tags antenna coil

印制次数	线圈之间的间隙/mm	导电油墨的厚度/mm	最大读写距离/m	线圈的间隙偏差 Δa /mm	导电油墨的厚度偏差 Δb /mm	读写距离偏差 ΔR /m	电子标签天线印品质量 ΔM
理论	2.00	13.0	8.5				
实际 1 次	2.31	6.9	8.2	0.31	-6.1	-0.3	6.115
实际 2 次	2.26	11.4	7.6	0.26	-1.6	-0.9	1.854
实际 3 次	2.18	11.9	6.5	0.18	-1.1	-2.0	2.290
实际 4 次	2.60	12.5	5.0	0.60	-0.5	-3.5	3.602
实际 5 次	2.51	11.9	6.2	0.51	-1.1	-2.3	2.601
实际 6 次	2.25	7.1	7.3	0.25	-5.9	-1.2	6.026

2.3 用 MATLAB 软件求解标签天线质量评价的线性回归模型

由于时间限制,仅通过实验取出 X_1 , X_2 , X_3 的 6 组数据,分别为: $X_1=[0.096\ 1\ 0.067\ 6\ 0.032\ 4\ 0.360\ 0\ 0.260\ 1\ 0.062\ 5]$; $X_2=[37.21\ 2.56\ 1.21\ 0.25\ 1.21\ 34.81]$; $X_3=[0.090\ 0.814\ 12.25\ 5.29\ 1.44]$; $Y=[37.393\ 3.347\ 5.244\ 12.974\ 6.675\ 36.312]$ 。通过 MATLAB,求得 Y 与 X_1 , X_2 , X_3 的散点图,见图 2。

利用 MATLAB 软件运行后得到的线性回归方程的系数 $b=(\vartheta,\beta_1,\beta_2,\beta_3)=(-0.058\ 2,1.238\ 8,1.000\ 9,1.000\ 9)$,最终将评价 RFID 电子标签印品

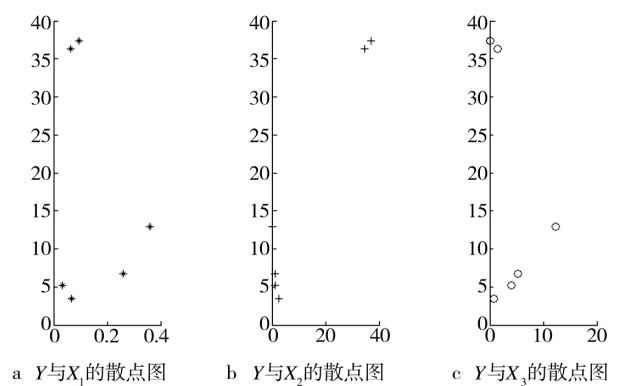


图 2 RFID 质量评价中 Y 与 3 个自变量 X_1 , X_2 , X_3 的散点图
Fig.2 The scatter plot chart between Y and three independent variable X_1 , X_2 , X_3 in RFID evaluation

质量的数学线性回归模型表示为:

$$Y = -0.0582 + 1.2388X_1 + 1.0009X_2 + 1.0009X_3 \quad (11)$$

$$\Delta M = \sqrt{-0.0582 + 1.2388(\Delta a)^2 + 1.0009(\Delta b)^2 + 1.0009(\Delta R)^2} \quad (12)$$

RFID 电子标签天线在实际生产过程中质量评价的精确性。通过公式(12),不但可以准确评价成品后标签天线的印品质量,还可以很明显地看出与其它两个变量相比,印刷标签天线中线圈与线圈之间的间隙偏差对成品后的 RFID 电子标签天线的质量影响最大,从而为 RFID 标签天线在生产过程中的优化提供了一些指导。

3 结语

随着物联网时代的到来,RFID 电子标签发挥的作用日渐突出。RFID 电子标签天线虽然可以采用印刷的方法生产,但是却不能够像印刷法生产出的纸张、画册一样,采用传统的印刷质量评价方法来评价。笔者主要从理论上分析了影响标签天线质量性能的因素,在保证其他条件相同的情况下,选取线圈与线圈之间的间隙偏差、导电油墨的厚度差和天线的最大阅读距离偏差为直角坐标系的 3 个分量,进而建立评价标签天线性能的数学线性回归模型。通过模型可以客观地评价生产出的标签天线的质量性能是否符合要求,为 RFID 标签天线的普及和优化提供了一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 唐宝玲. 电子标签(RFID)天线的印制技术[J]. 印制电路信息, 2007(6): 24, 27.
TANG Bao-ling. The Printing Technology of RFID Tag Antennas[J]. Printed Circuit Information, 2007(6): 24, 27.
- [2] 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 Fac-

式中: Y 为印品质量; X_1, X_2, X_3 分别为生产过程中线圈间隙偏差的平方。此数学线性回归模型可以将文献[5]中的数学模型修正为公式(12), 提高了

- tors of Ink Thickness by RFID Screen Printing[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 97—100.
- [3] 赵万年. 电子标签天线的研究与设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2009.
ZHAO Wan-nian. The Research and Design of Tag Antenna[D]. Xi'an: Xibei University Master's Thesis, 2009.
- [4] PENTTILA K, SYDANHEIMOL Keskilani M. Radar Cross-Section Analysis for Passive RFID Systems[J]. IEEE Proc Microw Antennas Propag, 2006, 153(1): 103—109.
- [5] 刘彩凤. 基于神经网络的 RFID 标签天线印刷品质的优化研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
LIU Cai-feng. The Optimization Study of Antenna RFID Label Printing Quality with the Establishment of Neural Network Model[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [6] VIRTANEN J. Passive UHF Inkjet-printed Narrow-line RFID Tags[J]. Ieee Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010(9): 440—443.
- [7] ESTES R H. The Effect of Porosity on Mechanical, Electrical and the Thermal Characteristics of Conductive Die-attach Adhesives[J]. Solid State Technol, 1984(8): 191—195.
- [8] 吴杰, 唐正宁. 设备特征化过程中的三棱柱插值与多项式回归算法研究[J]. 包装工程, 2011, 32(2): 77—80.
WU Jie, TANG Zheng-ning. Research on Prism Interpolation and Polynomial Regression Algorithm in Equipment Characterization Process[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(2): 77—80.
- [9] 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(11): 835—839.
XU Lei, HUANG Hui-ming, SUN Dao-heng. The Screen Printing of RFID Tag Antenna[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2009(11): 835—839.