

导电油墨厚度对 RFID 标签天线辐射效率的影响

曹丽娜, 钱军浩

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 为提高 RFID 电子标签天线的辐射效率, 从理论上分析了影响标签天线辐射效率的一系列因素, 以偶极子和叠缝隙 2 种天线为研究对象, 研究了导电油墨厚度对 RFID 标签天线的辐射效率的影响。结果表明: 决定天线的辐射效率的是印刷标签天线所用的总油墨量, 而不是整个天线结构中不同区域内油墨的分布情况。为实际 RFID 电子标签生产中导电油墨的控制和改进, 提供一些指导。

关键词: RFID 标签天线; 导电油墨; 油墨厚度; 辐射效率

中图分类号: TS802.3; TS851⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)05-0122-04

Influence of Conductive Ink Thickness on Radiation Efficiency of RFID Tag Antenna

CAO Li-na, QIAN Jun-hao

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A series of factors influencing tag antenna's radiation efficiency was analyzed. The influence of conductive ink layer thickness on RFID tag antenna's radiation efficiency was studied using dipole and bow-tie antennas as object. The results showed that the factor influencing antenna's radiation efficiency is the total amount of conductive ink used, not how it is distributed throughout the structures. The purpose was to provide guidance for control and improvement of the conductive ink in actual production of RFID tag antennas.

Key words: RFID tag antenna; conductive ink; ink layer; radiation efficiency

通过印刷方法来制造 RFID 电子标签天线是近几年来热门的研究领域之一, 与传统方法相比, 采用印刷法制造的 RFID 电子标签在生产成本和原料用量上具有很大的优势。尽管直接印刷 RFID 标签天线法具有一定的优势, 但是目前这项技术还不能像生活中印刷报刊一样大批量的投入到 RFID 标签天线的生产中, 原因^[1]主要有: 一是 RFID 标签天线的性能远不如传统方法制造的 RFID 标签天线性能好; 二是生产 RFID 电子标签的成本还是处于一个居高不下的状态。文中主要是从天线的辐射效率、导电油墨的墨层厚度两者与生产成本的矛盾关系出发, 通过实验探讨 RFID 电子标签天线辐射效率与导电油墨的墨层厚度的关系, 为以后提高 RFID 电子标签天线的质量提供一些指导。

1 RFID 标签天线印刷法的概述

一般 RFID 电子标签的制作分为微型芯片的制作、天线的制造以及将芯片与线圈两端点相连接进行最后的组合成品 3 个步骤。微型芯片可以按照半导体制造的通用方法进行制造, 目前该技术已经很成熟^[2]。标签制造的方法却有很多种, 例如铜线绕制法、蚀刻法、电镀法、直接印刷法等等, 其中目前研究最热门的就是 RFID 电子标签天线直接印刷法, RFID 标签天线印刷是一种直接用导电油墨在绝缘基板上印刷导电路径形成天线的方式^[3]。在这个过程中起主要作用的就是导电油墨, 导电油墨的导电性能的好坏直接关系到标签成品后, RFID 标签天线的辐射效率和传输距离。

收稿日期: 2011-11-07

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

目前,在我国对于低频段的 RFID 电子标签的研究已经基本成熟,制造成本较低,但是对高频段和微频段的 RFID 标签天线的研究还较少,技术不够成熟。原因主要是对于无源 RFID 高频电子标签来说,标签天线的辐射效率还得不到提升,而且高频 RFID 标签制造成本居高不下。从标签天线的性能(特别是天线的辐射效率)和制造成本出发,Chew 等人经过实验制作和成本分析测试后认为^[4]:采用印刷技术、导电油墨制造 RFID 标签天线,是突破标签成本的根本途径。直接印刷标签天线用的导电油墨是金属粒子(金属银或金属铜)以片状的形状混合到普通油墨中去形成的,并且金属颗粒的粗糙度和重叠度为油墨的导电创造了条件,这些油墨会在印刷机的作用下印刷到承印材料(纸质或塑料)上^[5],因此,运用印刷导电技术来生产 RFID 电子标签天线具有很大的潜力。

2 导电油墨与 RFID 标签天线的辐射效率

2.1 RFID 电子标签天线的辐射效率

天线的辐射效率在 RFID 电子标签中是一个重要的因素,特别是对于无源 RFID 电子标签来说,芯片获得能量主要是来自 RFID 电子标签天线的电磁辐射。RFID 电子标签天线低的辐射效率会导致 RFID 低的传输距离。一般的 RFID 电子标签按照频率可分为低频、中高频、超高频 3 种类型,不同频率的电子标签要求的传输距离和辐射效率也是不同的。

天线的辐射效率用于衡量天线将高频电流或导波能量转换为无线电波能量的有效程度,它是天线辐射的总功率和天线从馈线得到的净功率之比^[6]。若采用电阻形式就可以简单表示为:

$$\text{辐射效率} = \frac{\text{辐射电阻}}{\text{辐射电阻} + \text{损耗电阻}} \quad (1)$$

由式(1)可以看出,提高天线辐射效率的途径就是尽可能提高辐射电阻,降低损耗电阻。而对于一般的偶极子天线的辐射电阻的计算式为^[7]:

$$R_{\text{辐射}} = \frac{30}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |F(\theta, \varphi)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (2)$$

其中: θ 为辐射角度。

$$F(\theta, \varphi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2} \cos \theta\right)}{\sin \theta} \quad (3)$$

当 $\theta = 90^\circ$ 时 $F(\theta, \varphi)$ 取得最大值,此时天线的辐射电阻取得最大值。通常情况下导电油墨的用量对

天线的辐射电阻影响不大,辐射电阻仅仅取决于天线的设计结构和辐射角度。因此在使用导电油墨直接印刷 RFID 电子标签天线时,导电油墨主要是通过影响天线的阻抗从而影响天线的辐射效率。RFID 标签天线设计时,应满足天线阻抗与芯片输入阻抗共轭匹配,从而使数据载体芯片获得最大功率传输,芯片达到最大被识别距离^[8]。在 RFID 系统设计中,阻抗对于天线的性能极其重要。对于一般的方形天线,阻抗的计算式为:

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{\rho L}{ab} \quad (4)$$

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。

式(4)说明了阻抗的影响因素为天线的长度、宽度、厚度和电阻率 4 个因素。

2.2 导电油墨与标签阻抗

从提高 RFID 标签天线的辐射效率来说,天线的阻抗越小越好,即制作 RFID 标签天线所用的导电油墨的量越多越好,印刷天线的宽度越宽越好。从 RFID 电子标签的制造成本和长远利益来看,运用导电油墨制成的 RFID 标签天线至少还存在着 2 个主要的不足之处^[9]:第一,与固体金属制成的导体相比(蚀刻技术),导电油墨一般是夹杂少量金属(Ag 或 Cu)为基础制成的,所以用导电油墨印刷的 RFID 标签天线的导电能力远远不如直接用金属制成的天线;第二,用印刷法印制 RFID 标签天线一直以来存在着一个矛盾,即辐射效率和成本的矛盾,因此针对不同频率的 RFID 电子标签,合理地控制导电油墨的用量显得尤为重要。

2.3 RFID 标签天线辐射效率与导电油墨量的关系

RFID 标签天线的设计结构有多种类型,考虑到降低生产成本问题,特别是对于高频 RFID 电子标签,应该尽可能将标签天线的结构设计趋向小型化,并且根据 RFID 标签天线的不同频率来合理分配油墨的用量。油墨的墨层厚度与天线的阻抗都会影响 RFID 电子标签天线的辐射效率。在实际印制不同设计结构的 RFID 电子标签天线的过程中,根据式(4),往往将电流密度大的地方印刷导电油墨的墨层比其他区域厚一些,这虽然降低了天线的一些阻抗,但是天线的辐射效率归根结底还是受导电油墨总用量的影响更大一些。

3 实验验证

选择用印刷机制造频率为 868 MHz, 长度为 163 mm, 宽度为 2 mm 的偶极子天线, 以及频率为 868 MHz, 长度为 124 mm, 倾角为 30° 的叠缝隙天线, 它们的电流密度分布见图 1 和 2。



图 1 半波长偶极子天线的电流密度分布

Fig. 1 Current density distribution in half wavelength dipole antenna



图 2 计算机模拟网格叠缝隙天线的电流密度分布

Fig. 2 Current density distribution in computer simulated meshing bow-tie antenna

根据它们的电流密度分布来分配油墨的用量, 在印刷过程中电流密度大的区域用的油墨量要多一些, 印刷成品后天线的厚度要厚一些, 见图 3。

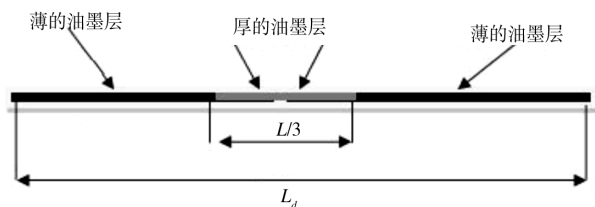


图 3 墨层厚度在偶极子天线上的分布情况

Fig. 3 Distribution of ink thickness on dipole antenna

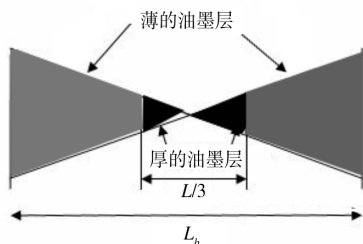


图 4 墨层厚度在叠缝隙天线上的分布情况

Fig. 4 Distribution of ink thickness on bow-tie antenna

3.1 材料与仪器

实验材料: “大洲”牌 7445JP 导电银浆, PET 片基, 不同含量的银微粒填充量; 实验仪器: 柔性版印刷机, 安装有 Ansoft 公司的 HFSS EM 仿真软件的计算机, 光学显微镜, 某型号的直流电阻电桥, 微波辐射计。

3.2 方法

主要采用对比方法, 分析出标签天线各个区域用同一厚度印刷和各区用不同厚度来印刷对 RFID 标签天线辐射效率的影响。

3.3 过程

1) 用 3 种不同的导电油墨量, 采用均一厚度和不同厚度来印刷偶极子天线, 用直流电阻桥来测出各自的阻抗(多次测量取平均值)。

2) 用微波辐射计来测量各个天线的辐射效率, 取平均值。采用同样方法记录叠缝隙天线的数值。

3) 记录用仿真软件模拟的辐射效率和所用油墨的量。

4) 将测量的结果与所用的油墨量列表分析, 见表 1。

表 1 具有不同导体阻抗的偶极子天线的辐射效率

Tab. 1 Radiation efficiency for printed dipole antennas with different resistance

	偶极子天 线的阻抗/ ($\text{m}\Omega \cdot \text{sq}^{-1}$)	模拟的 辐射效率 /%	实际的 辐射效率 /%	相对 油墨量 /%	所用油 墨总量 / mm^3
总结构	2 395	38	29	21	1.4
总结构	238	81	78	40	2.7
总结构	51	95	93	100	6.6
内 1/3	103				
外 2/3	6 720	34	32	31	2.1
内 1/3	60				
外 2/3	1 012	73	57	48	3.2
内 1/3	52				
外 2/3	213	89	83	45	3.0

目前, 标签天线印制的最高厚度一般在 $15 \sim 20 \mu\text{m}$, 阻抗为 $50 \sim 52 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ 。由于在相同的工作频率内, 缝隙天线比偶极子天线表面区域要大, 所以缝隙天线的阻抗一般选择在 $54 \text{ m}\Omega/\text{sq}^{[9]}$ 。相对油墨量就是以此为标准, 将所用的总的最高油墨量设为 100%, 其他的与其相比较得出的。

3.4 实验结果分析与处理

从上面的数据分析, 对于采用均一厚度印制的标签天线, 例如偶极子天线, 导电油墨的相对用量从

表 2 具有不同导体阻抗的叠缝隙天线的辐射效率

Tab.2 Radiation efficiency for printed bow-tie antennas with different resistance

	叠缝隙天 线的阻抗/ (mΩ·sq ⁻¹)	模拟的 辐射效率 /%	实际的 辐射效率 /%	相对 油墨量 /%	所用油 墨总量 /mm ³
总结构	3 242	58	54	18	7.4
总结构	178	95	81	44	18
总结构	54	98	93	100	41
内 1/3	86	92	87	21	8.6
外 2/3	1 097				
内 1/3	41	92	76	33	14
外 2/3	1 154				
内 1/3	35	97	89	47	19
外 2/3	211				

40%增加到 100%，天线的实际辐射效率仅从 78%增加到 93%，即油墨量增加了 60%，而天线的辐射效率仅增加了 15%。这和油墨量从 21%增加到 40%，天线的实际辐射效率从 29%增加到 78%，即油墨量增加了 19%，天线的辐射效率增加了 49%相比，前者增长变化不大。考虑到制造成本，印刷 RFID 标签天线所用的相对油墨量在 40%左右是最佳的。

在标签天线印制采用最佳墨量的情况下，从表 1 可以看出，对于偶极子天线，第 3 行中相对油墨量为 40%时，实际辐射效率为 78%，这和最后一行中油墨相对用量 45%，实际辐射效率 80%相比差不多。同样对于缝隙天线，采用不同油墨厚度中的最后一行，油墨用量为 47%，辐射效率为 89%，与采用相同厚度印制天线，油墨用量为 44%，实际辐射效率为 81%相比也是近似的。结果表明：天线的辐射效率受印制标签天线所用总的油墨量的影响，而不是不同区域所用油墨的厚度。

4 结语

为了提高 RFID 电子标签的天线的接收性能和辐射效率，必须认真把握好导电油墨对天线的影 响。通过理论分析导电油墨的用量以及印刷成品后天线的厚度、宽度等对标签天线的辐射效率的影响。结果表明：不同结构的天线所用导电油墨的总量与不同区域印刷不同油墨厚度两者相比，前者对标签天线的辐射效率影响更大，为标签天线辐射性能的研究提供了一些参考。

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] 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.

[3] 李婧伟,唐正宁,王志宏. 基于印制电路板精细丝网印刷过程的数学模型研究[J]. 包装工程, 2008,29(2):94—95.
LI Jing-wei, TANG Zheng-ning, WANG Zhi-hong. Study of the Mathematical Model for Fine Screen Printing Process of Print Circuit Board[J]. Packaging Engineering, 2008,29(2):94—95.

[4] FOSTER P R, BURBERRY R A. Antenna Problems in RFID Systems [C]. RFID Technology Colloquium, IEEE, 1999:1—3.

[5] 刘彩凤. 基于导电银浆流变特性的导线印刷品质分析与控制[J]. 包装工程, 2009,30(5):54—59.
LIU Cai-feng. Wire Printing Quality Analysis and Control Based on Rheological Characteristic of Conductive Silver Pulp[J]. Packaging Engineering, 2009,30(5):54—59.

[6] 廖连常,林士杰. 用微波辐射计测量天线的辐射效率[J]. 电子科学学刊, 1991,13(6):597—601.
LIAO Lian-chang, LIN Shi-jie. Using Microwave Radiometer to Measure Antenna Radiation Efficiency[J]. Journal of Electronics, 1991,13(6):597—601.

[7] 吕锋,徐宇白. 偶极子 RFID 标签天线的优化设计与研究[J]. 武汉理工大学报, 2009,31(3):352—354.
LV Feng, XU Yu-bai. The Design and Optimization Studies of Dipole RFID Tags[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(3):352—354.

[8] 张明涛. 用于 RFID 系统的天线设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.
ZHANG Ming-tao. The Antenna Design For RFID System [D]. Xi'an:Xi'an Electronic and Science University, 2007.

[9] SIDE' N J, FEIN M K, KOPTYUG A, et al. Printed Antennas with Variable Conductive Ink Layer Thickness [J]. IET Microw Antennas Propag, 2007, 1(2):401—407.