

# 喷墨印刷技术在超高频天线制作中的应用

唐正宁, 刘春格

江南大学物联网工程学院, 江苏无锡 214122

**摘要** 研究了喷墨印刷技术在超高频天线制作中的应用, 理论上分析了超高频天线的结构、电感值和喷墨膜层厚度, 由此引入分析影响墨滴铺展因素的必要性。在此基础上, 利用软件模拟的方法来分析, 借助软件中的 VOF 模型数值模拟和分析墨滴速度、墨滴大小对墨滴碰撞铺展过程的影响情况, 结果发现只有控制好影响墨滴碰撞铺展的因素才有可能印刷出性能(导电性等)良好的超高频天线。提出了一些墨滴速度、墨滴尺寸的控制标准, 如在其他条件一定的情况下, 墨滴的速度最好越小, 以免发生墨滴的反弹、飞溅等不良的现象; 根据具体条件确定合适的墨滴速度大小。这些工作为分析控制墨滴铺展的参数提供了理论依据, 并对喷墨印刷技术在超高频天线制作中参数的调节与控制提供了信息。

**关键词** 喷墨印刷; 超高频天线; 墨滴铺展; VOF 模型

中图分类号 TS853.5

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)23-0077-04

## Application of Inkjet Printing Technology in the Production of UHF Antennas

TANG Zhengning, LIU Chungu

School of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu Province, China

**Abstract** This paper studies the application of inkjet printing technology in the production of UHF antennas, and the focuses are on the droplet spreading on the substrate. The structure and inductance of UHF antenna and the ink printing film thickness are analyzed theoretically, and on this basis factors affecting the droplet spreading are discussed. The droplet velocity and droplet size are two important factors, which are analyzed by numerical simulations and the VOF model. It is shown that these two factors should be carefully determined in order that the droplet can spread normally and the quality of UHF antenna can be ensured. A number of routines are proposed for controlling drop velocity and drop size. For example, when other conditions are fixed, in order to avoid the drop to rebound and splash or other undesirable phenomena, the drop speed should be as small as possible, of course, it should be in line with specific conditions. This paper provides some useful guidance for analyzing the parameters influencing the droplet spreading, and for regulating and controlling parameters when the ink-jet printing technology is used in the production of UHF antennas.

**Keywords** inkjet printing; UHF antennas; droplet spreading; VOF model

### 0 引言

喷墨印刷是一种液滴喷射技术, 通过计算机控制, 将相应的图形、位置信息转换为脉冲信号, 控制喷墨头移动和墨滴大小, 并使断裂的墨滴沉积到指定位置形成线条和图案<sup>[1]</sup>。由于液滴喷射所产生的液滴体积极小, 喷头与被喷涂基底表面并不发生接触, 液滴沉积的形状可以得到有效控制, 而且

喷墨印刷是一种定量精确的沉积技术, 能将各种材料沉积在承印材料上成膜, 因此, 喷墨印刷技术在制造业中具有广泛的发展前景<sup>[2-3]</sup>。

### 1 超高频天线的结构

超高频天线以其独特的优势在射频识别技术(Radio

收稿日期: 2010-06-08; 修回日期: 2010-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(60776056)

作者简介: 唐正宁, 教授, 研究方向为图像成像理论与技术、印刷质量过程控制及包装印刷方法等, 电子信箱: tangzhengning@126.com

Frequency Identification, RFID) 电子标签中得到了广泛应用与快速发展。超高频天线有很多种, 其中, 弯折偶极子天线是实现 RFID 标签天线小型化的有效途径, 尤其是弯折角度为  $90^\circ$  的弯折偶极子天线应用最为广泛<sup>[9]</sup>。为了简化研究, 本文以弯折单极子天线为例, 其结构图如图 1, 其中,  $l$  为弯折节的横向长度,  $s$  为弯折节的纵向长度。

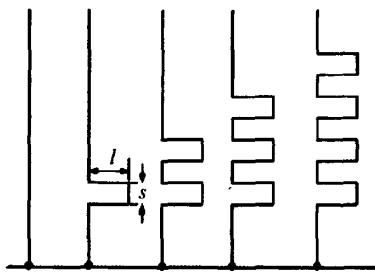


图 1 弯折单极子天线的结构图

Fig. 1 Structure diagram of bent monopole antenna

对于高度为  $h$  的细线单极子天线, 其等效自感为<sup>[9]</sup>

$$L_s = \frac{\mu}{\pi} h \left[ \ln \left( 4 \frac{h}{d} \right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中,  $d$  为单极子天线直径,  $\mu$  为磁导率。

每个弯折节的电感可以通过等效传输线模型来确定, 每个弯折节的特性阻抗为

$$z_0 = 276 \lg \left( \frac{2s}{d} \right) \quad (2)$$

则每个弯折节的等效电感  $L_M$  可以通过其输入阻抗确定, 即

$$L_M = \frac{|z_0 \tan(\beta l)|}{\omega} \quad (3)$$

式中,  $\beta$  为自由空间中的传播常数,  $\omega$  为角频率。

因此, 高度为  $h$  的弯折单极子天线的电感  $L$  为

$$L = L_s + NL_M \quad (4)$$

式中  $N$  为弯折节的个数。

综上所述, 弯折偶极子天线的电感  $L$  是  $\mu, h, d, s, \beta, \omega, N$  的函数, 即

$$L = L_s + NL_M = f(\mu, h, d, s, \beta, \omega, N) \quad (5)$$

天线的电感值与天线的结构尺寸有很大的关系, 而天线的电感值关系到天线工作频段、识别距离、天线增益、驻波比、带宽特性、方向图特性、极化特性等诸多非常敏感和关键的特性指标。经分析天线印刷制造后的结构尺寸误差主要存在于天线的直径, 即宽度和厚度的制造误差上。

这就需要分析喷墨印刷后膜层的厚度和宽度。印刷后膜层厚度  $T$  与宽度  $W$  的计算式<sup>[10]</sup>为

$$W = (n-1) \cdot D_p + 2D \quad (6)$$

$$T = \frac{4\pi^2 xy \lambda}{3[2D + (x-1) \cdot D_p] \cdot [2D + (y-1) \cdot D_p]} \quad (7)$$

式(6)、式(7)中,  $n$  为印刷的点数,  $D_p$  为印刷方向的点间距,  $D$

为墨滴的铺展半径,  $r$  为墨滴的初始半径,  $x$  为印刷方向的像素数,  $y$  为垂直方向的像素数,  $\lambda$  为墨水中颗粒的含量,  $D_p$  为垂直方向的点间距。

由式(6)、式(7)可知, 喷墨印刷的膜层宽度、厚度与墨水颗粒含量、打印精度、墨滴的铺展半径等有关。

通过以上分析可知, 喷墨印刷技术在超高频天线制作中对其的影响因素有墨滴的铺展半径、打印精度、墨水中颗粒含量等。所以可通过分析墨滴铺展半径、打印精度等影响因素, 据其结果来分析喷墨印刷参数对超高频天线制作的影响。下面重点分析喷墨印刷参数对墨滴铺展的影响因素。

## 2 墨滴铺展的理论基础

液滴以不同速度撞击基板可能发生反弹、沉积、飞溅(液滴一部分沉积, 另一部分以二次液滴的形式反弹)3种现象<sup>[11]</sup>。当然, 在喷墨印刷用于制造中时希望液滴沉积, 对于超高频天线的制作来说, 希望液滴在基板中沉积时尽量降低墨滴的铺展半径。

在喷墨印刷工艺中影响液滴铺展的因素有液滴大小、速度、撞击角度等。墨滴铺展分为两个阶段, 即碰撞阶段和流平阶段。碰撞铺展的驱动力为墨滴的动能, 流平铺展的驱动力为润湿和表面张力。

当墨滴到达平面时, 形状将由最初的球状变为薄饼状, 铺展量由驱动力和抵抗力来决定。驱动力即为液滴的动能, 抵抗力为液滴的黏力和表面张力, 接触角即可以促进墨滴的铺展也可以抵抗墨滴的铺展。

可用  $W_c$  描述墨滴动能和表面能的相对大小:

$$W_c = \frac{\rho v^2 d_0}{\delta} \quad (8)$$

式中,  $\rho$  为液体密度,  $v$  为碰撞速度,  $d_0$  为碰撞前的直径,  $\delta$  为液体的表面张力。当  $W_c$  较大时, 说明墨滴的动能可以克服液体的表面能, 铺展能发生; 当  $W_c$  较小时, 即低碰撞速度, 液滴将保持球状, 铺展不能发生。

可用  $R_c$  描述墨滴动能和黏性抵抗能的相对大小:

$$R_c = \frac{\rho v d_0}{\eta} \quad (9)$$

式中,  $\eta$  为液体的黏度。当  $R_c$  较大时说明墨滴的动能可以克服液体的黏性抵抗能, 铺展能发生。高黏度油墨抵抗铺展的原因是存在黏性耗散。

在喷墨印刷工艺中, 根据选择的合适的参数值, 可以估计无量纲数  $W_c$  和  $R_c$  的大小, 进而从理论上去判断铺展能否发生, 最终可以在一定程度上调节参数的值。

由于墨滴的碰撞铺展时间极短, 大概几微妙, 这使得墨滴碰撞, 通过试验很难观察到; 另外, 墨滴就像传媒介质一样, 承载着喷头的各参数的信息, 并把此信息传递给承印物, 最终呈现出成型物, 所以下面通过软件模拟主要分析墨滴速度、墨滴大小对其铺展的影响。

### 3 模型建立

借助 Fluent 软件模拟墨滴的铺展, 进而分析墨滴速度、墨滴大小对铺展的影响。由于在液滴降落过程中, 液滴始终保持轴对称, 所以, 液滴降落过程中参数的求解简化为一个二维轴对称问题。选用 VOF 方法模拟跟踪气液界面的变化过程, 进而获得液滴在基底的变化过程。其简化模型及网格划分如图 2 所示, 其中, 上边为压力入口, 右边为压力出口, 中线为对称轴, 底边为基板, 圆形区域为墨滴, 其他区域为空气。由于液滴在基底铺展过程中, 基底表面的张力对其影响很大, 所以, 在 VOF 模型中考虑了壁面黏附, 设置了相关的表面张力和接触角; 同时, 关注液滴变化过程某一时刻的形态, 因此选用适于瞬态的 PISO 算法, 对相关的参数进行调整。

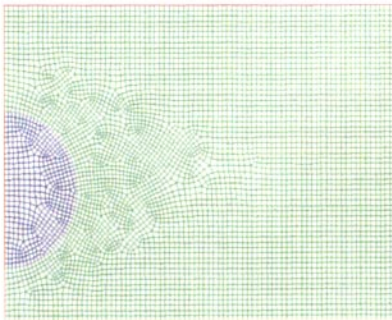


图 2 简化模型和网格划分

Fig. 2 Sketch of model and mesh

在该模拟模型中, 令基板是一个不透水、无孔表面, 表面张力是常数 (72mN/m), 接触角为  $60^\circ$ , 采用水作为液体。

### 4 数值分析与讨论

图 3 是速度不同时, 在相同的时间段内墨滴的铺展情况, 其墨滴铺展半径为  $30\mu\text{m}$ 。

由图 3 可以看出, 当墨滴碰撞速度小时, 也就是沉积发生时, 墨滴在基板上的铺展直径随着碰撞速度的降低而减小, 如 4、2.5、1.75m/s 时; 但当墨滴碰撞速度大时, 便会发生飞溅, 甚至发生反弹, 出现卫星滴, 如 10、6m/s 时。很显然在超高频天线制作时, 希望液滴发生沉积, 且尽量增大膜层的厚度, 这就要求墨滴的碰撞速度尽量越小越好, 避免墨滴发生飞溅和反弹而出现卫星滴, 影响天线的印刷质量。

当不考虑空气阻力时, 可以根据能量守恒定律来估算墨滴的碰撞速度; 当考虑空气阻力时, Range 和 Feuillebois 得出了墨滴撞击速度的经验公式<sup>[7]</sup>:

$$V(H) = \sqrt{\frac{g}{\alpha} [1 - \exp(1 - 2\alpha H)]} \quad (10)$$

式中,  $H$  是液滴滴落的高度;  $g$  为重力加速度;  $\alpha = \frac{3C_f \rho_a}{8\rho_* R_*}$ , 其中  $\rho_a$  为空气密度,  $\rho_*$  为水密度,  $C_f$  为液体比热容。由此可得出, 若要降低墨滴的碰撞速度, 可以增长喷嘴与承印物间的距离。另外也可通过控制喷头的参数, 如压电喷墨印刷, 通过降低驱动电压值达到降低碰撞速度的目的。

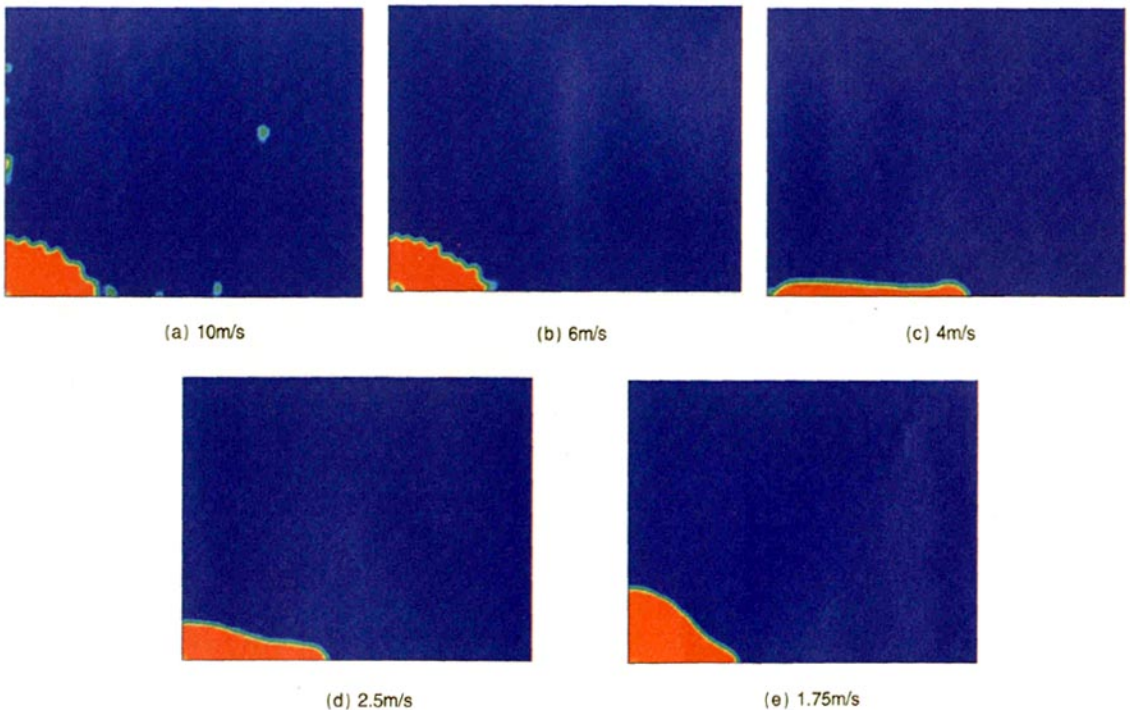


图 3 速度不同时墨滴形变示意图

Fig. 3 Schematic diagram of surface change of droplet under different velocities

图4是墨滴大小不同时,在相同的时间段内墨滴的铺展情况,墨滴速度为2.5m/s。

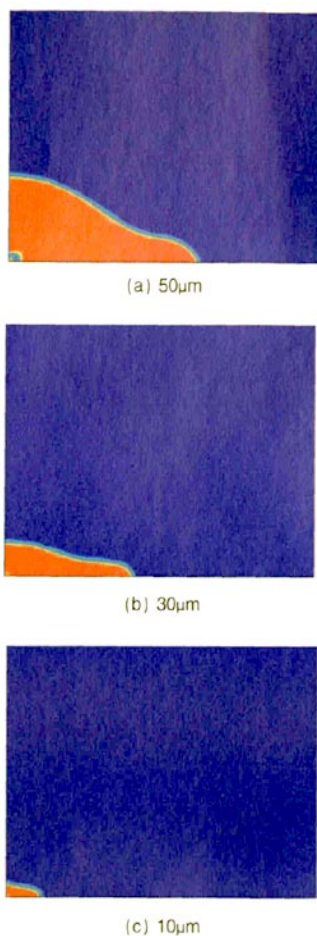


图4 不同直径时墨滴形变示意图

Fig. 4 Schematic diagram of surface changes of droplet at different diameters

墨滴铺展因子 $d^*$ 可用墨滴的铺展直径 $D$ 与初始直径 $d_i$ 之比描述<sup>[8]</sup>,即

$$d^* = \frac{D}{d_i} \quad (11)$$

结合图4可知,墨滴铺展因子随着墨滴直径的增大而增加。对于超高频天线制作希望墨滴的铺展因子尽量小,这就需要根据实际情况选择合适大小的墨滴,控制好影响墨滴大小的因素,值得注意的是墨滴的大小也影响墨滴的速度。对压电喷墨印刷来说,墨滴的大小可以由下面公式求出。

当压电元件没受任何机械应力,只在驱动电压 $U$ 下发生的位移 $\Delta y$ 为<sup>[9]</sup>

$$\frac{\Delta y}{h_p} = d_{33} E_3 = \frac{d_{33} U}{h_p} \quad (12)$$

有

$$\Delta y = d_{33} U \quad (13)$$

其中, $h_p$ 为喷枪至出口的长度, $d_{33}$ 为压电系数, $E_3$ 为电场强度。而压电驱动器的体积位移 $\Delta v$ 可以表示为

$$\Delta v = \Delta y \cdot l_p \cdot b_p \quad (14)$$

$l_p, b_p$ 分别为喷嘴通道的长度和宽度。由压电喷头所喷出的液滴的体积 $v_{液}$ 是压电驱动器的体积位移的一半,可得

$$v_{液} = \frac{\Delta v}{2} = \frac{d_{33} U \cdot l_p \cdot b_p}{2} \quad (15)$$

由此可知,液滴的大小与喷头的结构参数有很紧密的关系,要合理控制喷头的参数,当然也与外界环境有关。

## 5 结论

喷墨印刷技术是超高频天线制作的主要技术,本文通过软件模拟了墨滴速度、墨滴大小对墨滴的沉积的影响。通过模拟可知,只有控制好墨滴速度、墨滴大小才有可能印刷出高质量的超高频天线。另外,其他参数如墨滴黏度、承印物粗糙度等的影响也需考虑,借助试验能更好地分析各参数对墨滴铺展的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 高琛, 黄孙祥, 陈雷. 液滴喷射技术的应用进展 [J]. 无机材料学报, 2004, 19(4): 714-722.  
Gao Chen, Huang Sunxiang, Chen Lei. *Journal of Inorganic Materials*, 2004, 19(4): 714-722.
- [2] 董海荣, 唐正宁. 喷墨印刷膜层宽度和厚度的分析计算 [J]. 包装工程, 2008, 89(1): 89-111.  
Dong Hairong, Tang Zhengning. *Packing Engineering*, 2008, 89(1): 89-111.
- [3] 刘赵森, 刘华敏, 张谭. 液滴喷射技术在全聚合物薄膜晶体管制备中的应用 [J]. 科技导报, 2008, 26(13): 44-48.  
Liu Zhaomiao, Liu Huamin, Zhang Tan. *Science & Technology Review*, 2008, 26(13): 44-48.
- [4] 王琪, 阮成礼, 张梅. 梯形弯折线单极子天线的谐振特性 [J]. 电讯技术, 2004, 99(4): 99-102.  
Wang Qi, Ruan Chengli, Zhang Mei. *Telecommunication Engineering*, 2004, 99(4): 99-102.
- [5] Best S R, Morrow J D. Limitations of inductive circuit model representations of meander line antennas [J]. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2003, 6(1): 852-855.
- [6] 曾祥辉, 杨方, 齐乐华, 等. 液滴喷射过程中碰撞的形态及流场模拟分析 [J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(4): 529-532.  
Zeng Xianghui, Yang Fang, Qi Lehua, et al. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(4): 529-532.
- [7] Kawanam T, Yamada M, Fukusako S, et al. Solidification characteristics of a droplet on a horizontal cooled wall [J]. *Heat Transfer-Japanese Research*, 1997, 26(7): 469-472.
- [8] 顾小萍, 唐正宁. 对喷墨印刷中油墨铺展和渗透的研究 [J]. 包装工程, 2005, 26(5): 98-100.  
Gu Xiaoping, Tang Zhengning. *Packing Engineering*, 2005, 26(5): 98-100.
- [9] Wijshoff H. Structure and fluid dynamics in piezo inkjet printheads [D]. Netherlands: The R&D Department, Océ Technologies B.V., 2008.

(责任编辑 岳臣)

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>





## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>