

一种 13.56 MHz 射频标签仿真模型的设计

赵东艳, 符令, 胡毅, 原义栋

(北京南瑞智芯微电子科技有限公司, 北京 100192)

摘要: 实现了一种基于 MP300 读卡器电路的射频前端电路仿真模型。通过对读卡器的发射线圈及场强标定线圈等进行分析和建模, 结合 ISO14443 对 RFID 模拟前端电路的要求, 搭建了与测试条件高度吻合的仿真电路模型。模型中射频发射线圈、场强标定线圈及标签线圈之间的电磁耦合用耦合系数 k 表示。经测试验证, 该仿真模型在 1.5 A/m~7.5 A/m 场强下对待测卡片电源获取、时钟获取、信号解调、信号调制及信号串扰等方面的仿真结果与实际测试结果的一致性较好, 能帮助模拟前端芯片设计快速收敛至设计目标。

关键词: 13.56 MHz 标签; 仿真模型; 场强标定; 串扰仿真

中图分类号: TN492

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)16-0026-04

Design of a 13.56 MHz RFID simulation and verify models

Zhao Dongyan, Fu ling, Hu Yi, Yuan Yidong

(Communication & Power Utilization Technology Branch Company of State Grid Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: This paper introduces a sort of 13.56 MHz RF front-end circuits simulation model based on the P300 RFID reader circuit. Combined with the requirements of Type-A RFID in ISO14443, we put forward this simulation circuit model which is highly consistent with the MP300 testing environments according to analyzing and modeling the reader antenna, field strength calibration coil and so on. We use the coupling coefficient " k " to denote electromagnetic coupling among the reader antenna, field strength calibration coils and card antenna coils in this model. After chip test, the simulation results are the same with the testing results in all the aspects of power transmitting, clock acquisition, signal demodulation, signal modulation and signal crosstalk between the reader and card. Therefore, this simulation model can afford great help for RF front-end designers to converge their design to the target accurately and rapidly.

Key words: 13.56 MHz RFID; simulation model; field strength; calibrating simulation of crosstalk

随着 IC 卡安全技术的不断进步, 13.56 MHz 的 IC 卡应用领域不断增加。近年来银行卡等金融领域已经开始试点 13.56 MHz 非接触 IC 卡的使用。13.56 MHz 非接触 IC 卡为无源卡, 卡片不但需要从读卡器的磁场中获取电源、时钟, 还需要在磁场中完成较高速率的数据通信(最大 848 kb/s)^[1]。由于卡片电路功耗、卡片解调电路、卡片调制电路及时钟电路的信号和能量均通过天线传输, 电路间串扰很难通过理论推导得出。利用传统的仿真电路模型很难将协议量化为设计指标, 也很难仿真不同线圈之间的互感和串扰。本文提出了一种基于 MP300 读卡器中发射天线的电路仿真模型, 结合场强标定线圈的电感模型。将 ISO14443 协议要求量化为具体的设计指标, 可对芯片的调制、解调、时钟及电源获取等方面性能

进行精准的仿真^[2]。该仿真模型还可仿真芯片功耗变化和调制解调信号的相互干扰, 在设计阶段验证芯片的读写距离等性能并保证芯片的可靠性。

1 测试平台分析

在卡片评估中采用基于 MP300 读卡器的 13.56 MHz 非接触卡片测试验证套件, 套件包含阅读器 MP300、发射天线和示波器。MP300 主要功能是产生符合 ISO14443 协议的调制信号并接收卡片返回的负载调制信号; 发射天线的主要功能是与卡片进行电磁交互, 场强标定线圈的作用是对发射线圈发射的场强进行标定。

为使卡片设计达到协议所规定的性能指标, 在设计之前需要搭建与测试平台一致的仿真验证模型, 以模拟电路测试中的能量传递、时钟传递和数据传输等紧密精

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 29

硬件纵横

Hardware Technique

合的电磁关系^[3]。

1.1 信号源模型

对于 MP300 读卡器,模型中可以通过 port 源实现。用示波器抓取 MP300 输出信号,将其存为 spectre 所需格式,并将 spectre 中 port 源输出阻抗设为 50 Ω。利用 vpw1 功能读取上述保存波形结果即可实现与 MP300 功能一致的读卡器信号源。

1.2 发射天线模型

发射天线是 13.56 MHz 射频信号发射和接收的主要部分。发射天线将信号源信号通过线圈发射到空间中,在线圈中部形成均匀的磁场;场强标定线圈耦合空间磁场产生电压,通过示波器读出电压值与标准值进行比较,确定线圈所处位置处的磁场强度;完成场强标定和校准后,将卡片放置在场强标定线圈处即可在标定场强下完成卡片在指定场强下的功能和性能测试。

射频发射天线线圈由 4 圈直径为 7 cm 的印刷电路板铜线构成,线宽为 1.2 mm,厚度为 35 μm。4 圈中两圈为发射线圈,两圈为接地补偿线圈,接地补偿线圈与发射线圈串联,中间抽头后经过电阻接地。发射线圈的主要参数有电感、寄生电容和寄生电阻。

线圈的电感可用流过线圈电流和其包围线圈的磁通量来表示^[4],线圈的电感值为:

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{N\Phi}{I} = \frac{NBA}{I} = \frac{N\mu_0\mu_r HA}{I} \quad (1)$$

其中, N 是线圈的匝数, A 是线圈所围空间面积, I 是通过线圈的电流, μ_0 是真空磁导率, μ_r 是相对磁导率, H 是磁场强度。

对于圆形线圈回路,当导线直径 d 与线圈回路直径 D 关系满足 $d \ll D$ 时,线圈的电感值可以表示为^[4]:

$$L = N^2 \mu_0 \frac{D}{2} \times \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (2)$$

根据测试协议,取 D 为 70 mm, d 为 1.2 mm, N 为 2,得到线圈的电感约为 0.71 μH。

PCB 走线也会引入一定的电阻,天线线圈的电阻公式为:

$$R_{\text{int}} = l \times \frac{\rho}{A} = \pi D \times \frac{\rho}{A} = \frac{4\rho}{D} \quad (3)$$

发射天线的寄生电阻约为 0.29 Ω。对于天线线圈还需考虑寄生电感、电容和电阻。寄生电感和电容主要是由 PCB 走线的过孔引入,可以分别表示为:

$$L_p = N_v \times 5.08h \left[\ln\left(\frac{4h}{d_2}\right) + 1 \right] \quad (4)$$

$$C_p = N_v \times 1.41\epsilon h \times \frac{d_2}{d_1 - d_2} \quad (5)$$

其中, N_v 是过孔个数, d_1 是过孔外径, d_2 是过孔内径, h 为过孔的长度(以上尺寸的单位均为英寸)。天线由过孔引入的寄生电感约为 3.3 nH,寄生电容约为 10.8 pF,线圈的寄生电阻约为几十毫欧姆。

1.3 场强标定线圈模型

场强标定线圈由单圈长方形线圈构成,输出端接高输入阻抗示波器探头。校准线圈放置在待测卡片将要放置的位置,输出端连接示波器。通过电压的峰值可以对测量待测卡片处的场强值进行标定,还可对读卡器发射的信号调制深度等参数进行测量。场强标定线圈如图 1 所示。



图 1 场强标定线圈

标定线圈工作原理是利用线圈互感耦合磁场产生电压,其寄生电感和电容对互感影响较小,故建模中只考虑电感。对于长方形天线,电感值与天线的几何尺寸与磁介质常数相关,电感值可以表示为:

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left[a \ln \frac{2ab}{r(a+b)} + b \ln \frac{2ab}{r(b+d)} - 2(a+b-d) + \frac{a+b}{4} \right] \quad (6)$$

校准线圈长 72 mm,宽 42 mm,铜线线宽 0.5 mm。由式(6)计算可得,校准线圈的电感值为 0.25 μH。在校准线圈的仿真模型建模中还需要考虑示波器探头引入的电容,测试中使用示波器的探头输入电容约为 14 pF。

1.4 线圈的互感

在测试套件中,射频发射线圈、场强标定线圈、待测卡片之间的能量和信号传输通过互感完成^[5]。

互感描述的是两个导体回路通过磁场介质耦合的连接关系,通过两个导体回路的磁通量 Ψ_{12} 由导体回路的面积、相对位置及介质的磁导率决定。相互平行的两个导体回路磁场强度分布曲线有很大的相识性,导体回路之间的互感可表示为:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{I_1} = \frac{B_{2(l_1)} N_2 A_2}{I_1} \quad (7)$$

互感是对电感之间的耦合磁通量的定量描述,在电路模型中一般是利用耦合系数 k 定性描述电感之间的耦合关系^[6],耦合系数与互感的的关系为:

$$k = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (8)$$

对于测试电路中涉及的平行、共心导体回路,线圈的耦合系数可以表示为:

$$k_{(d)} = \frac{r_{\text{小}}^2 r_{\text{大}}^2}{\sqrt{r_{\text{大}} r_{\text{小}} \times (\sqrt{d^2 + r_{\text{大}}^2})^3}} \quad (9)$$

其中, d 是共心平行的线圈间的距离, $r_{\text{大}}$ 和 $r_{\text{小}}$ 分别是较大和较小线圈直径。

2 仿真平台模型

在卡片测试中,读卡器与卡片的数据通信流程是:射
《微型机与应用》2013 年 第 32 卷 第 16 期

硬件纵横 Hardware Technique

频发射线圈发射恒定磁场,场强标定线圈耦合电压并校准磁场;待测卡片通过卡内线圈耦合磁场中能量及调制信号;卡片内数字电路响应磁场中指令返回相应的负载调制信号、读卡器耦合卡片的负载调制信号并解析返回数据。

通过对上述通信过程的分析,为搭建符合测试套件的仿真模型,需要对射频发射线圈与场强标定线圈间的互感、射频发射线圈与待测卡片间的互感进行分析计算。使用各线圈间的耦合系数即可建立线圈间的电磁场连接关系,实现测试电路中不同电感的互联。

根据电磁场特性,平行线圈的电流流向相同磁场相互增强时耦合系数为正,电流流向相反磁场相互削弱时耦合系数为负。场强标定线圈和待测卡片的电流方向与射频发射线圈的电流方向均相反,耦合系数都为负值。将MP300测试套件中各部分的电感值、几何尺寸及磁导率等参数代入式(9)中可得到各线圈间的互感,如表1所示。

表1 线圈间耦合系数

耦合系数	发射线圈	标定线圈	卡片线圈
发射线圈	-	-0.30	-0.31
标定线圈	-0.30	-	X
卡片线圈	-0.31	X	-

表1中,“-”表示不存在耦合系数;“X”表示该耦合系数对平台性能影响较小,可以忽略。

根据上述分析搭建仿真模型,如图2所示。模型中场强检测输出端口为校准线圈的电压输出端口,作用是观测场强大小;50Ω信号源是射频发射天线的输入端口,在仿真中要求信号源内阻为50Ω;卡片天线A和卡片天线B是芯片的天线输入端,在仿真中直接连到芯片的天线PAD上。



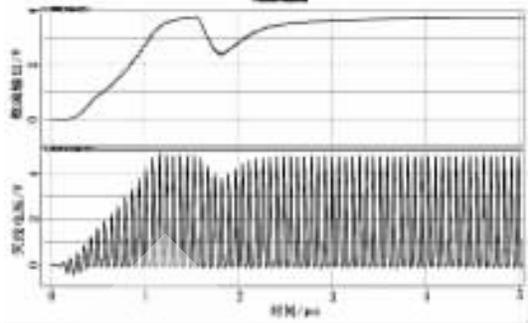
图2 仿真平台模型

3 仿真及测试结果

在芯片测试中,从能量传输、信号传输、时钟传输及能量、信号与时钟之间的串扰等方面对仿真结果和实际测试结果进行了对比,以验证文中电路仿真模型的准确性和实用性。

图3显示了在卡片进场阶段天线电压和电源获取情况,图3(a)是仿真结果,图3(b)为测试结果。通过仿真平台在设计阶段即发现由于低压差线性稳压器输出端的大滤波电容导致天线电压下降的现象。测试结果中,芯片天线电压和整流电路的波动情况与仿真结果基本一致。

《微型机与应用》2013年第32卷第16期



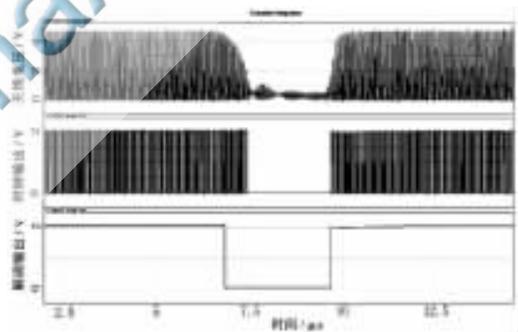
(a) 仿真波形



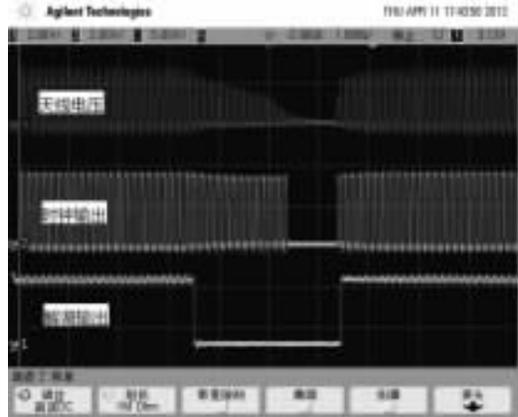
(b) 测试波形

图3 进场时天线电压和整流输出电压仿真

图4展示了待测卡片在场内的时钟和解调信号获取情况。在接收解调信号阶段,卡片与天线间的互感会



(a) 仿真波形



(b) 测试波形

图4 时钟及信号解调

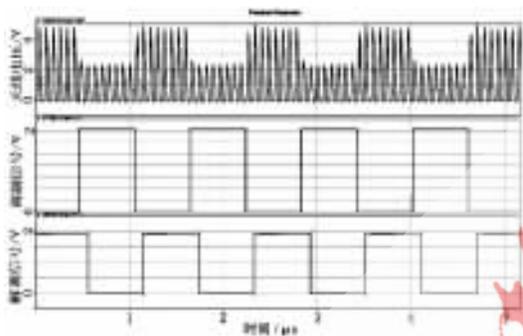
欢迎网上投稿 www.pcachina.com

硬件纵横

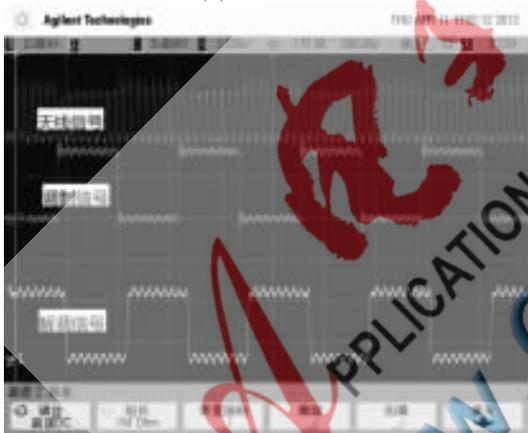
Hardware Technique

使卡片天线端的信号下降较为缓慢,时钟输出则是天线信号降低到时钟电路翻转电压点后停止。图 4(a)和图 4(b)在天线电压下降较慢和时钟持续时间等方面相似。仿真模型能较为准确地预见天线端电压变化情况。

图 5 列出了卡片天线端电压波形随负载调制信号变化情况和调制对解调电路的干扰。在调制阶段天线电压变化较大,由于电路的环路增益有限,在调制信号翻转处天线的波形出现了一定的过冲,电路设计中经过适当的环路增益控制即可抑制电压过冲到合理的范围。利用该电路仿真平台还可以在 design 阶段预测调制电路对解调电路的干扰。测试结果显示,仿真模型在调制信号变化对天线电压的干扰和解调电路的干扰情况与实测



(a) 仿真波形



(b) 测试波形

图 5 调制及信号串扰

结果基本一致。仿真平台能准确仿真调制、解调及天线电压之间的串扰。

本文实现了基于 MP300 读卡器测试电路的 13.56 MHz 射频卡片射频前端仿真模型。通过对线圈几何外形和电磁特性的分析,得到了线圈的电感及互感等参数,将电磁关系较为复杂的测试电路抽象为结构简单的仿真模型。通过该仿真模型能量化及考核芯片的各项性能指标,加快了射频前端电路设计向设计指标收敛的过程。经测试验证,该仿真模型在电源获取、时钟获取、信号解调、信号调制及电源、解调、调制的相互干扰等方面的仿真结果与测试结果一致。

参考文献

- [1] ISO/IEC 10373-6:2011(E) Identification cards Test methods part 6:proximity cards[S]. 2011.
- [2] ISO/IEC 14443-2:2010(E) Identification cards Contactless integrated circuit cards Proximity cards[S]. 2010.
- [3] BASAT S S, KYUTAE L, LASKAR J, et al. Design and modeling of embedded 13.56 MHz RFID antennas[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005:64-67.
- [4] FINKENZELLER K. 射频识别技术(第三版)[M]. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [5] 师建英. 非接触式射频 IC 卡的设计与研究[D]. 保定:河北大学, 2006.
- [6] 仲方强. 基于 13.56 MHz 的射频识别关键技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2007.

(收稿日期:2013-05-29)

作者简介:

赵东艳,女,1970 年生,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统自动化。

符令,男,1985 年生,硕士,主要研究方向:模拟 IC 设计。

胡毅,男,1981 年生,硕士,主要研究方向:模拟 IC 设计。