

基于多项式的弯折偶极子射频识别标签天线阻抗预测研究

洪涛^{*①} 贺则昊^① 蒋天齐^② 王翠^① 陈家焱^①

^①(中国计量大学质量与安全工程学院 杭州 310018)

^②(杭州质慧信息技术有限公司 杭州 310018)

摘要: 为解决射频识别(RFID)标签天线设计中阻抗计算速度慢的问题的过程中, 针对其中较为复杂的阻抗耦合情况, 该文提出一种基于多项式的弯折偶极子RFID标签天线阻抗预测方法。首先使用基于天线尺寸的阻抗变换与线性化假设建立模型假设; 然后在具体的天线结构中收集数据并进行相关性分析与回归拟合验证假设正确性; 最后实验验证使用该方法进行的阻抗预测相对于计算机仿真的准确性、高效性与普适性。试验结果表明, 使用该方法替代计算机进行弯折偶极子RFID标签天线阻抗计算时, 其预测阻抗相对于计算机仿真结果在保持较高预测准确率的同时极大地缩短了阻抗计算时间, 同时该方法在中国应用频段上针对不同弯折次数的弯折偶极子RFID标签天线仍然适用。

关键词: 射频识别; 天线阻抗; 预测模型

中图分类号: TN821

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)04-1098-08

DOI: 10.11999/JEIT200598

Research on Impedance Prediction of Radio Frequency Identification Tag Antenna with Folded Dipole Based on Polynomial

HONG Tao^① HE Zehao^① JIANG Tianqi^② WANG Cui^① CHEN Jiayan^①

^①(College of Quality & Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

^②(Hangzhou Zhuhui Information Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: In the process of solving the problem of slow impedance calculation speed in the design of Radio Frequency Identification (RFID) tag antenna, a method of impedance prediction based on polynomial for folded dipole RFID tag antenna is proposed in view of the complex impedance coupling. Firstly, impedance transformation based on antenna size and linearization assumption are used to establish model hypothesis. Then the data are collected from the antenna structure and the correlation analysis and regression fitting are carried out to verify the validity of the hypothesis. Finally, the accuracy, efficiency and universality of the impedance prediction method compared with computer simulation are verified by experiments. The experimental results show that the predicted impedance can greatly shorten the calculation time while maintaining high prediction accuracy when the proposed method replace computer to calculate the impedance of the folded dipole RFID tag antenna, and the method is still applicable to the RFID tag antenna with different bending times in the frequency band used in China.

Key words: Radio Frequency Identification (RFID); Impedance of the antenna; Calculated model

1 引言

伴随射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)技术研究与应用的大规模展开^[1,2],

标签天线的需求量剧增, 其中弯折偶极子RFID标签天线以其结构简单、阻抗变化灵活的特性成为目前实际生产与应用中的主流。在实际应用中, 如RFID标签传感器检测对象的区别^[3,4], 化学测量领域^[5]和动态目标定位领域^[6]传感器所处环境的差异, 都对天线结构提出了差异化要求, 必将导致天线阻抗发生变化, 影响阻抗匹配。在标签天线的传统设计过程中, 为保持天线的阻抗匹配, 设计者首先会根据应用对象尺寸与所处环境等要求随机产生

收稿日期: 2020-07-20; 改回日期: 2020-12-22; 网络出版: 2020-12-30

*通信作者: 洪涛 hongtao@cjljlu.edu.cn

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E050015)

Foundation Item: Zhejiang Basic Public Welfare Research Project (LGG19E050015)

一批基本结构相同、局部尺寸有差异的天线样本, 然后借助计算机仿真软件依次计算其阻抗。在计算完成后, 筛选其中阻抗匹配程度最高的天线作为设计结果。若所有结果都不理想, 则会按照经验对天线结构的局部尺寸进行微调, 建立新一批天线样本并重复上述步骤。在上述设计方法中, 每一次微调模型后都需要大量时间等待计算机初始化天线结构并计算阻抗, 设计效率被计算机仿真次数与速度所限制, 设计时间在等待仿真结果中浪费, 因此如何快速获得标签天线的阻抗值成为提高设计效率的研究重点。

在弯折偶极子天线阻抗计算的研究过程中, Choo等人^[7]将T型匹配网络等效为变压器模型, 并给出了互感系数的计算方法。Mohammed等人^[8]也提出了自己的互感系数计算公式并给出匹配环阻抗计算的方法。在此基础上, 傅舟等人^[9]对弯折偶极子辐射臂的各项结构参数进行了定性的分析阐述, 王瑞娜等人^[10]、Faudzi等人^[11]、Zhang等人^[12]分别使用变压器模型的耦合方式设计各自的标签天线。Bong等人^[13]在使用变压器模型的同时使用二端口网络进一步优化匹配环阻抗的计算方法。但是上述文献都没有给出RFID标签天线阻抗完整的数值计算过程, 事实上, 由于变压器模型较为复杂, 设计者在设计标签天线时所使用的方法从根本上来讲仍然是花费大量时间等待计算机仿真软件计算结果的模式。同时, 在使用仿真软件并通过阻抗计算方法得到标签天线阻抗、匹配环及偶极子辐射臂阻抗后, 由于互感系数为平方项, 若使用变压器模型反求互感系数, 可能会出现无解的情况。

针对以上情况, 本文提出一种基于多项式的弯折偶极子RFID标签天线阻抗预测方法。在前人对导体阻抗研究的基础及合理假设的前提下, 通过计算机仿真收集数据并进行相关性分析、回归拟合的方式获得使用天线结构长度预测天线阻抗的方程。利用本方程能够有效代替后续计算机仿真计算阻抗的过程, 在保持阻抗预测结果相对于计算机仿真的准确性的同时极大地缩短了阻抗计算时间, 从而提高了天线设计效率。

2 弯折偶极子RFID标签天线结构及其阻抗预测方法流程

2.1 弯折偶极子RFID标签天线结构

本文所述弯折偶极子RFID标签天线(以下简称“标签天线”)由印制电路板(Printed Circuit Boards, PCB)基板与弯折偶极子天线构成。标签天线结构如图1所示。PCB基板由长度为 X , 宽度为 Y , 厚度为 s_1 的FR4材料构成, 其相对介电常数 $\epsilon_r=4.5$ 。弯折偶极子标签天线材料为厚度 $s_2=3.5\times 10^{-5}$ m的铜, 电导率为 $\sigma=5.8\times 10^7$ S/m。

将弯折偶极子天线分为匹配环与弯折偶极子辐射臂两个单元。匹配环是一段连接天线馈电端口的矩形导体走线, 长为 X_m , 宽为 d , 导体线宽为 b_2 。弯折偶极子辐射臂连接在匹配环两侧并按规律向外 90° 翻折形成, 翻折间隔为 w , 中轴线向上、下两方向延伸长度均为 h , 线宽为 b_1 , 单侧弯折偶极子辐射臂的单侧弯折次数 N , 单侧弯折水平方向的长度为 X_d 。考虑到实际情况, 上述参数需满足式(1)的条件

$$\left. \begin{aligned} X_m + 2X_d < X \\ 2(h + b_1) < Y \\ d + b_2 < Y/2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

2.2 标签天线阻抗预测方法流程

导体阻抗计算公式能够使用结构尺寸分别导出匹配环阻抗 Z_m 与弯折偶极子辐射臂阻抗 Z_d ^[14-18], 但弯折偶极子辐射臂并不直接连接于馈电端口两端, 故 Z_d 向匹配环一侧换算的过程通常难以用常规电路模型准确描述。传统标签天线设计中基本避开耦合问题而使用有限元等算法对标签天线阻抗 Z_{in} 进行反复计算。本研究将基础射频理论与数理统计的方法相结合, 把弯折偶极子辐射臂阻抗转换到标签天线端口两端并在此基础上提出基于线性关系的假设模型替代耦合模型, 最终建立方程预测标签天线阻抗, 流程图如图2所示。

在利用导体阻抗公式由天线结构长度导出匹配环阻抗与弯折偶极子辐射臂阻抗的基础上, 将弯折偶极子辐射臂阻抗等效到天线端口两端, 利用目前的研究成果, 在等效过程中对弯折偶极子辐射臂阻

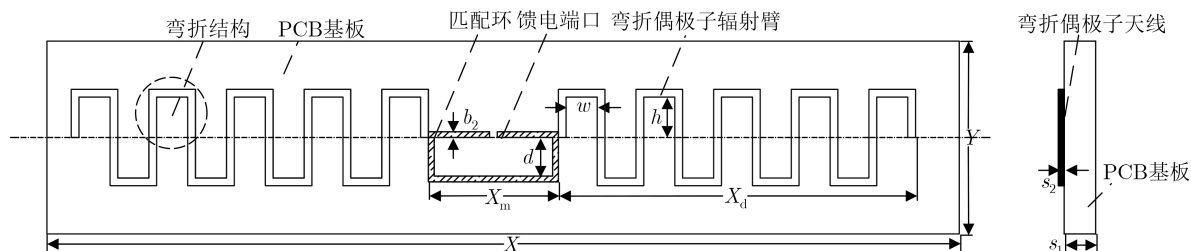


图1 标签天线正视与侧视图

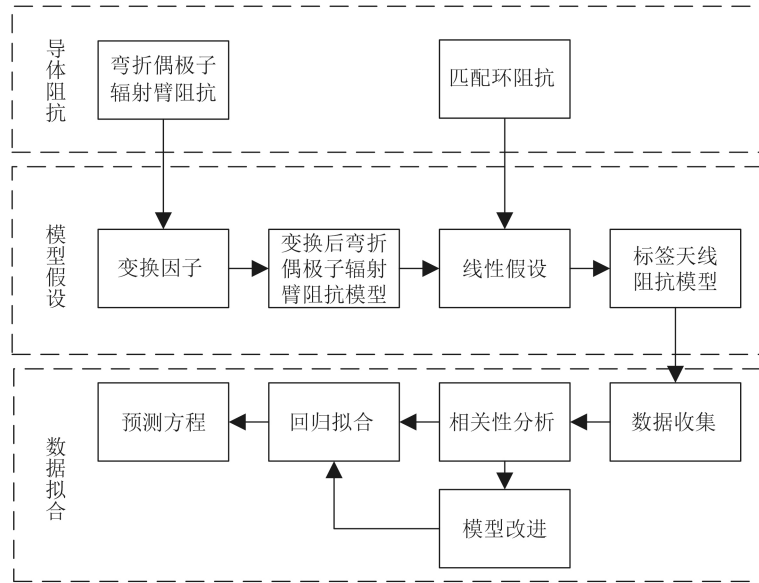


图2 标签天线阻抗预测方程获取流程图

抗进行相应变换，形成弯折偶极子天线阻抗的虚部与实部模型假设。进一步地，在对给定范围内的结构长度及阻抗数据进行相关性分析、回归拟合后，最终验证模型假设并获得完整的标签天线阻抗预测方程，该方程能够用于预测同结构下的标签天线阻抗。使用基于上述流程所形成的标签天线阻抗预测方法取代传统计算机仿真可以有效降低标签天线阻抗计算时间以达到提高设计效率的目的。

3 标签天线阻抗预测模型假设的建立

RFID标签天线的阻抗可以由电阻和电抗表示为

$$\begin{aligned}
 Z_{d\text{-tran}} &= \text{Re}_{d\text{-tran}} + j \cdot \text{Im}_{d\text{-tran}} \\
 &= Z_d \cdot \left(\alpha_1 \cdot w + \alpha_2 \cdot X_m + \alpha_3 \cdot \frac{b_1}{b_2} + \alpha_4 \cdot b_1 + \alpha_5 \cdot X_m \cdot d \right) \\
 &= (\text{Re}_d + j \cdot \text{Im}_d) \left(\alpha_1 w + \alpha_2 X_m + \alpha_3 \frac{b_1}{b_2} + \alpha_4 b_1 + \alpha_5 X_m d \right) \\
 &= \Psi \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}_d w & \text{Re}_d X_m & \text{Re}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Re}_d b_1 & \text{Re}_d X_m d \end{bmatrix}^T \\
 &\quad + j \cdot \Psi \cdot \begin{bmatrix} \text{Im}_d w & \text{Im}_d X_m & \text{Im}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Im}_d b_1 & \text{Im}_d X_m d \end{bmatrix}^T
 \end{aligned} \tag{3}$$

其中， $\text{Re}_{d\text{-tran}}$ 、 $\text{Im}_{d\text{-tran}}$ 、 Re_d 、 Im_d 分别是 $Z_{d\text{-tran}}$ 和 Z_d 的实部与虚部， j 为虚数单位， Ψ 是由5个未知数组成的矩阵， $\psi = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5]$ 。

Z_d 由 $2N$ 个可以被等效为平行传输线的弯折结构的输入阻抗 Z_i 组成^[14]。弯折结构特征阻抗为 Z_0 ，终端负载为 Z_L ，其输入阻抗为

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_L + j \cdot Z_0 \tan(2\pi h/\lambda)}{Z_0 + j \cdot Z_L \tan(2\pi h/\lambda)} \tag{4}$$

其中， λ 为工作频点为 f 标签天线所接收与发射电磁波的波长^[15]；特征阻抗 Z_0 使用等效后的平行传输线^[16,17]表示； Z_L 为平行传输线的负载。

$$Z_{in} = \text{Re}_{in} + j \cdot \text{Im}_{in} \tag{2}$$

其中， Re_{in} 、 Im_{in} 分别为标签天线阻抗 Z_{in} 的实部与虚部。本文拟分别对实部与虚部提出耦合模型假设。

3.1 考虑天线尺寸的阻抗变换

从Mohammed等人^[8]所提分割系数可以看出，弯折偶极子辐射臂向馈电端口两端等效后的阻抗在与弯折偶极子辐射臂阻抗有关的同时必然与天线结构尺寸相关。因此，本文提出变换后弯折偶极子辐射臂阻抗 $Z_{d\text{-tran}}$ 的概念并定义 $Z_{d\text{-tran}}$ 与弯折偶极子辐射臂阻抗 Z_d 及部分天线结构参数的表达式为

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda &= c \cdot f^{-1} \cdot \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{s}{h \times 2 + 2 \times b_1} \right)^{-0.5} \right)^{-0.5} \\
 Z_0 &= \frac{\eta}{\pi} \lg \frac{4w}{b_1} \\
 Z_L &= \frac{w}{2\pi b_1} \left(\frac{\pi f \mu_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

c 为理想情况下电磁波波速，取 3×10^8 m/s， η 是自由空间波阻抗，取 $377 \ \Omega$ 。将式(3)中 $\text{Re}_d \cdot w$ 、 $\text{Re}_d \cdot X_m$ 、 $\text{Re}_d \cdot b_1/b_2$ 、 $\text{Re}_d \cdot b_1$ 、 $\text{Re}_d \cdot X_m \cdot d$ 、 $\text{Im}_d \cdot w$ 、

$\text{Im}_d \cdot X_m$, $\text{Im}_d \cdot b_1/b_2$, $\text{Im}_d \cdot b_1$, $\text{Im}_d \cdot X_m \cdot d$ 称为弯折偶极子辐射臂阻抗变换因子, 且变换后的弯折偶极子辐射臂阻抗实部与虚部分别与其对应的变换因子线性相关。

3.2 基于线性关系的阻抗预测模型

对于标签天线阻抗虚部 Im_{in} , 假设 Im_{in} 与匹配环阻抗实部 Re_m 、虚部 Im_m 及 $\text{Re}_{d\text{-tran}}$, $\text{Im}_{d\text{-tran}}$ 线性相关

$$\text{Im}_{in} = \gamma_1 \cdot \text{Re}_m + \gamma_2 \cdot \text{Im}_m + \gamma_3 \cdot \text{Re}_{d\text{-tran}} + \gamma_4 \cdot \text{Im}_{d\text{-tran}} + \Gamma_1 \quad (6)$$

其中, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$ 为待拟合系数, Γ_1 为常数项, 联立式(3)、式(6)可以得到

$$\begin{aligned} \text{Im}_{in} = & \Gamma_1 + k_1 \cdot \text{Re}_m + k_2 \cdot \text{Im}_m \\ & + \mathbf{K}_3 \times \begin{bmatrix} \text{Re}_d w & \text{Re}_d X_m & \text{Re}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Re}_d b_1 & \text{Re}_d X_m d \end{bmatrix}^T \\ & + \mathbf{K}_4 \times \begin{bmatrix} \text{Im}_d w & \text{Im}_d X_m & \text{Im}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Im}_d b_1 & \text{Im}_d X_m d \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $k_1 = \gamma_1$, $k_2 = \gamma_2$, $\mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4$ 为未知常数构成的 1×5 阶矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_3 = \gamma_3 \Psi &= [k_{31} \ k_{32} \ k_{33} \ k_{34} \ k_{35}] \\ \mathbf{K}_4 = \gamma_4 \Psi &= [k_{41} \ k_{42} \ k_{43} \ k_{44} \ k_{45}] \end{aligned} \quad (8)$$

对于矩形导体走线所构成的匹配环, 其阻抗 Z_m 被等效为辐射电阻 R_r 、导体损耗电阻 R_s 及导体电感 L 的串联, 其中将走线线宽减半使窄金属带等效为金属导线^[18]

$$\left. \begin{aligned} Z_m &= \text{Re}_m + j \cdot \text{Im}_m = R_r + R_s + j \cdot 2\pi f L \\ R_r &= 31171 \left(\frac{d \cdot X_m}{\lambda^2} \right)^2 \\ R_s &= \frac{2(d + X_m)}{2\pi b_2} \left(\frac{\pi f \mu_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \\ L &= \frac{\mu_0}{\pi} \left[d \cdot \ln \frac{4dX_m}{b_2(d+p)} + X_m \cdot \ln \frac{4dX_m}{b_2(X_m+p)} \right. \\ &\quad \left. + 2(p - d - X_m) + \frac{1}{4}(d + X_m) \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, $p = \sqrt{d^2 + X_m^2}$ 。其中, μ_0 为真空磁导率, 取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ 。同理, 对于 Re_{in} 建立假设, 可得

$$\begin{aligned} \text{Re}_{in} = & \Gamma_2 + t_1 \cdot \text{Re}_m + t_2 \cdot \text{Im}_m \\ & + \mathbf{T}_3 \times \begin{bmatrix} \text{Re}_d w & \text{Re}_d X_m & \text{Re}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Re}_d b_1 & \text{Re}_d X_m d \end{bmatrix}^T \\ & + \mathbf{T}_4 \times \begin{bmatrix} \text{Im}_d w & \text{Im}_d X_m & \text{Im}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Im}_d b_1 & \text{Im}_d X_m d \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (10)$$

其中, Γ_2 为常数项; t_1, t_2 为待拟合系数; $\mathbf{T}_3, \mathbf{T}_4$ 为未知参数构成的 1×5 阶矩阵

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_3 &= [t_{31} \ t_{32} \ t_{33} \ t_{34} \ t_{35}] \\ \mathbf{T}_4 &= [t_{41} \ t_{42} \ t_{43} \ t_{44} \ t_{45}] \end{aligned} \quad (11)$$

至此, 标签天线阻抗的耦合模型假设分别由式(7)与式(10)给出, 为验证模型所选取自变量的正确性并回归模型中未知参数的值, 需要收集模型数据并处理分析。

4 标签天线阻抗预测模型假设的验证

4.1 标签天线结构尺寸与阻抗数据收集

本文使用CPU型号为Inter Pentium G2020 @ 2.9 GHz, 内存容量为2 GB的计算机运行HFSS17.2。设置标签天线基板长度 $X=0.1 \text{ m}$ 、宽度 $Y=0.12 \text{ m}$ 、厚度 $s_1=0.001 \text{ m}$ 。另外, 为增强模型准确性, 本文在标签天线阻抗预测过程中始终保持单侧弯折次数 N 不发生变化并设置 $N=9$, 在 $9.2 \times 10^8 \text{ Hz}$ 的频率下进行仿真实验。实验分别为6组结构变量 b_1, b_2, d, h, X_m, w 选取3个常用水平, 并使其满足式(1)的约束条件。进一步地, 收集6组结构变量下的随机509种组合及其阻抗仿真结果作为标签天线预测模型假设的验证数据。结构变量取值如表1所示。

经过导体阻抗运算与天线阻抗仿真后, 在相关性分析的基础上回归 $k_1, k_2, \mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4, t_1, t_2, \mathbf{T}_3, \mathbf{T}_4$, 完成模型假设的验证。

4.2 标签天线阻抗预测模型相关性分析

为验证模型假设中自变量的变化是否影响阻抗值, 分别对 Im_{in} 与 Re_{in} 的各自假设的自变量进行相关性分析, 图3给出了两者与自变量的相关性分析结果(本文相关性系数均以绝对值表示)。

在图3(b)中, 各个自变量与因变量之间的相关性系数均不大于0.7, 因此需要对模型进行改进。考虑到标签天线阻抗实部 Re_{in} 在实际意义上就是电路中串联的电阻, 其值总是 >0 的特性, 对模型因变量取对数, 此时标签天线阻抗对数实部耦合模型为

$$\begin{aligned} \lg(\text{Re}_{in}) = & \Gamma_2 + t_1 \cdot \text{Re}_m + t_2 \cdot \text{Im}_m \\ & + \mathbf{T}_3 \times \begin{bmatrix} \text{Re}_d w & \text{Re}_d X_m & \text{Re}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Re}_d b_1 & \text{Re}_d X_m d \end{bmatrix}^T \\ & + \mathbf{T}_4 \times \begin{bmatrix} \text{Im}_d w & \text{Im}_d X_m & \text{Im}_d \frac{b_1}{b_2} & \text{Im}_d b_1 & \text{Im}_d X_m d \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (12)$$

表1 $N=9$ 的结构变量取值($\times 10^{-3} \text{ m}$)

序号	b_1	b_2	d	h	X_m	w
1	0.8	0.7	3.0	3.5	8.0	1.0
2	1.0	1.0	3.7	4.0	10.0	2.0
3	1.2	1.3	4.4	4.5	12.0	3.0

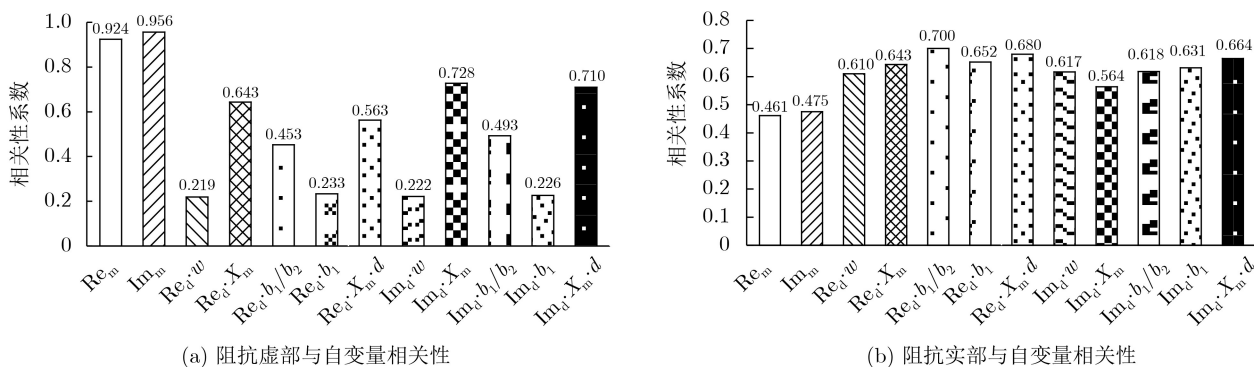


图3 阻抗与自变量相关性

对阻抗对数实部与自变量进行相关性分析，如图4所示。

在图3(a)与图4中对相关性系数高于0.7的变量进行自相关分析，标签天线阻抗耦合模型为

$$\left. \begin{aligned} \text{Im}_{in} &= k_2 \cdot \text{Im}_m + k_{42} \cdot \text{Im}_d X_m \\ &\quad + k_{45} \cdot \text{Im}_d X_m d + \Gamma_1 \\ \lg(\text{Re}_{in}) &= t_{31} \cdot \text{Re}_d \cdot w + t_{33} \cdot \text{Re}_d \cdot b_1/b_2 \\ &\quad + t_{44} \cdot \text{Im}_d \cdot b_1 + t_{45} \cdot \text{Im}_d \cdot X_m \cdot d \\ &\quad + \Gamma_2 \end{aligned} \right\} (13)$$

4.3 标签天线阻抗预测模型线性回归

使用仿真数据对式(13)进行回归拟合，得到

$$\left. \begin{aligned} \text{Im}_{in} &= 1.235\text{Im}_m + 0.03\text{Im}_d \cdot X_m \\ &\quad + 0.001\text{Im}_d \cdot X_m \cdot d - 5.712 \\ \lg(\text{Re}_{in}) &= -42.719\text{Re}_d \cdot w + 308.003\text{Re}_d \cdot b_1/b_2 \\ &\quad + 0.002\text{Im}_d \cdot b_1 + 5.689 \times 10^{-5} \cdot \text{Im}_d \\ &\quad \cdot X_m \cdot d - 1.301 \end{aligned} \right\} (14)$$

其中，阻抗虚部的拟合优度达到96.6%，D-W检验值为1.834，对数阻抗实部的拟合优度为83.3%，D-W检验值为2.001，两方程皆不存在自相关性。同时，两方程的自变量显著性检验水平p值均小于0.05，VIF值均小于3，说明自变量显著影响因变量的结果，方程具有统计学意义且方程不存在多重共线性。

阻抗虚部与实部预测模型评价指标分别如图5、图6所示，图5(a)、图6(a)为阻抗虚部预测模型

P-P图，图5(b)、图6(b)是标准化残差散点图。图5(a)、图6(a)中各点近似呈一条直线，图5(b)、图6(b)中绝大多数样本的标准化残差都在-2~2，可以看出预测模型样本残差基本符合正态分布，模型整体拟合效果较好。综上，本文所提出标签天线阻抗预测模型得到验证。

5 标签天线阻抗预测方法性能验证

阻抗预测方法在天线设计中用于取代传统计算机仿真，因此有必要在证明模型假设的正确性后，对该方法在工作频段上的适用性、阻抗预测相对于计算机仿真的准确性、高效性进行分析。

5.1 阻抗预测方法性能验证方案

由于模型假设的验证中仅使用了9次单侧弯折的标签天线作为验证对象，因此需要对本文所提方

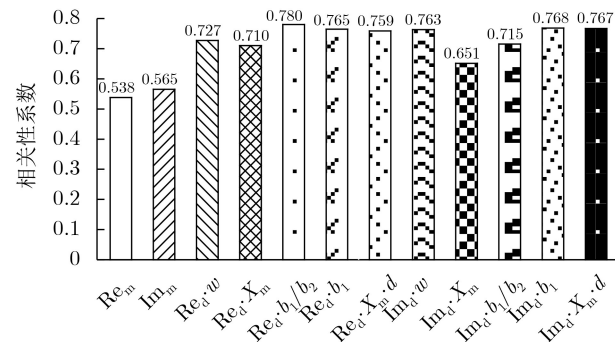


图4 阻抗对数实部与自变量相关性

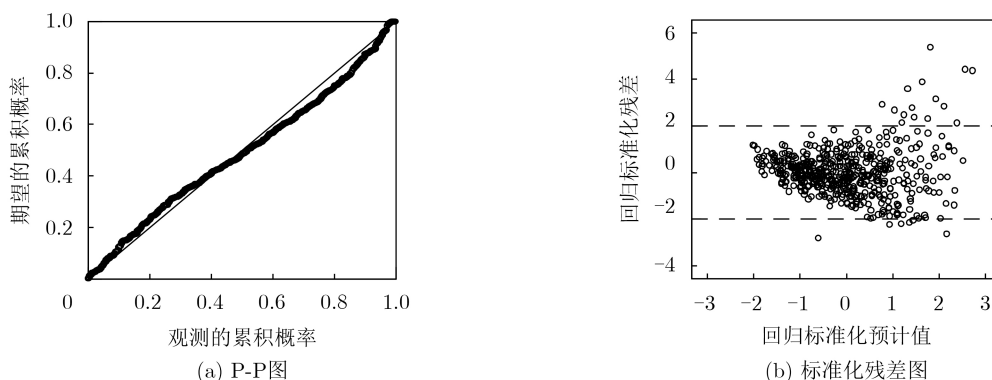


图5 阻抗虚部预测模型评价指标

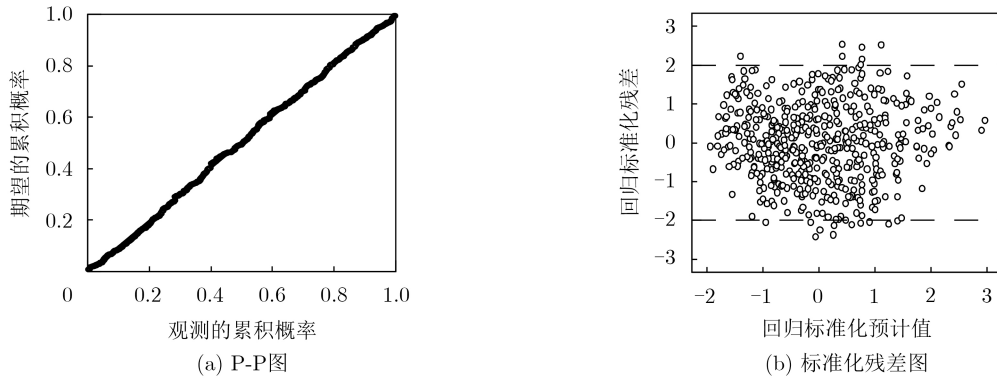


图6 阻抗实部预测模型评价指标

法在其他弯折次数下的阻抗预测性能做进一步验证。同时，考虑到工业和信息化部发布的相关标准规定中国800 MHz/900 MHz频段RFID技术的具体使用频率为920~925 MHz，为进一步说明所提出方法在实际工作频率范围内的适用性，提出以下验证实验：不同于假设验证时所使用的单侧弯折9次的标签天线，验证实验在其他的标签天线单侧弯折次数上建立阻抗预测模型，同时在规定频段两端即920 MHz与925 MHz上对标签天线进行多次阻抗预测与计算机仿真，统计比较阻抗预测值相对于计算机仿真结果的准确性及阻抗预测所节约的时间。

5.2 评价指标

为了说明本文所提阻抗预测方法能否替代计算机仿真过程，需要评价预测方程的输出阻抗值能否准确预测计算机仿真结果，因此从拟合优度 R^2 和平均偏离度 E 两个维度对预测方程输出阻抗进行评价；另外，使用设计效率 η 来对比两种弯折偶极子天线设计方法的效率，其计算公式为

$$\left. \begin{aligned} R^2 &= \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{4096} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{4096} (y_i - \bar{y}_i)^2} \right) \times 100\% \\ E &= \frac{1}{4096} \cdot \sum_{i=1}^{4096} |(y_i - \hat{y}_i)/y_i| \times 100\% \\ \eta &= \frac{T_1}{T_2} \end{aligned} \right\} (15)$$

其中， y_i 为第*i*个天线的计算机仿真阻抗； \hat{y}_i 为第*i*个天线的预测阻抗； \bar{y}_i 为实际输出的平均值； T_1 为标签天线阻抗预测所花费的时间； T_2 为计算机仿真软件所花费的时间。拟合优度 R^2 是用来表示模型拟合性的值，值越高表示模型拟合性越好；平均偏离度 E 指计算机仿真输出与预测阻抗之差的绝对值所占计算机仿真输出值比例的均值，值越小说明预测输出阻抗与计算机输出结果越接近； η 越小则本文所提方法的效率越高。

5.3 实验过程与结果分析

5.3.1 实验过程

本次实验选取单侧弯折次数为7的标签天线，用于建立模型并验证的各结构变量取值如表2所示，使用前3行结构取值并仿真用于建模。进一步地，花费61.13 h收集表2中测试组数据在920 MHz与925 MHz频点上的阻抗以完成模型验证，共获得4096组数据。

经过数据分析后得到阻抗预测方程为

$$\left. \begin{aligned} \text{Im}_{in} &= 1.278\text{Im}_m + 0.004\text{Im}_d \cdot X_m - 6.619 \\ \lg(\text{Re}_{in}) &= 0.010\text{Im}_m + 2.423\text{Re}_d \cdot X_m \cdot d \\ &\quad + 5.586 \times 10^{-5} \cdot \text{Im}_d \cdot X_m - 1.090 \end{aligned} \right\} (16)$$

5.3.2 标签天线阻抗预测准确性分析

使用式(16)与表2中数据对标签天线在两个频点上的阻抗进行预测，并进一步使用式(15)对预测数据的准确性进行分析，准确性评价指标如表3所示。

从表3可以看出：预测阻抗实部与虚部的拟合优度保持在80%与95%附近，说明建立阻抗耦合模

表2 $N=7$ 时结构变量取值($\times 10^{-3}$ m)

组别	序号	b_1	b_2	d	h	X_m	w
训练组	1	0.70	0.60	2.30	2.70	6.00	1.50
	2	0.90	0.80	3.30	4.30	9.00	1.90
	3	1.10	1.00	4.30	4.90	12.00	2.30
测试组	4	0.75	0.65	2.40	2.90	8.00	1.60
	5	0.85	0.75	3.00	3.50	9.00	1.80
	6	0.95	0.85	3.60	4.10	10.00	2.00
	7	1.05	0.95	4.20	4.70	11.00	2.20

表3 准确性评价指标(%)

		R^2	E
920 MHz	实部对比	80.9	11.67
	虚部对比	97.6	2.07
925 MHz	实部对比	79.9	11.71
	虚部对比	94.8	2.50

型时的假设基本成立。同时,与计算机仿真的阻抗相比,阻抗实部预测的平均偏离度基本保持在11.7%左右,虚部平均偏离度基本保持在2.3%左右,标签天线阻抗的整体拟合效果较好。

考虑到相关标准规定的中国RFID应用频段为920~925 MHz,而表3中实部与虚部在该频段两端的拟合优度差异仅为1%和2.8%,准确性指标基本保持一致。由此本文所提方法在中国频段内的适用性较强。

最后,验证实验是在9次弯折的标签天线上完成的,对比假设验证中7次弯折标签天线,认为本文所提方法在不同弯折次数的弯折偶极子标签天线中都适用。

5.3.3 标签天线阻抗预测效率分析

为证明本文所提方法在阻抗预测耗时上的优越性,统计阻抗预测过程中数据预处理、建立模型、阻抗输出的时间。阻抗预测与计算机仿真耗时的对比如表4所示。

表4 耗时对比(h)

	数据收集	建立预测方程	阻抗输出	总耗时
计算机仿真	\	\	61.13	61.13
阻抗预测	10.30	0.30	0	10.60

对于阻抗预测,其主要时间花费在数据收集上,预测方程建立所需数据的仿真共花费10.3 h,建立预测方程后,阻抗输出的耗时基本为0。对于计算机仿真,无需人为建立阻抗模型,但其仿真计算时间过长,达到61.13 h。比较两者耗时可以看出:基于多项式的阻抗预测方法在耗时上远优于计算机仿真,在对4096组数据进行预测时,其耗时仅为计算机仿真的17.34%。在标签天线设计的阻抗计算环节中极大地缩减了计算时间,提高了标签天线设计效率。

6 结束语

考虑到弯折偶极子RFID标签天线设计过程中反复的阻抗计算所产生的巨大时间消耗,本文针对其中的阻抗计算环节提出一种基于多项式的标签天线阻抗预测方法,并得出如下结论与展望:

(1) 相对于传统标签天线设计方法中的使用计算机仿真反复进行的阻抗计算过程,本文所提出的基于多项式的标签天线阻抗预测方法在保持预测阻抗相对于计算机仿真的准确性的同时极大地缩短了计算时间。

(2) 经过实验验证,本方法在中国应用频段上针对不同弯折次数的弯折偶极子RFID标签天线阻抗预测仍然适用。

(3) 虽然本文主要研究对象是弯折偶极子RFID标签天线,但所提方法的核心在于使用实验数据对同结构下的标签天线阻抗进行预测,该思想未来仍能应用于其他结构形式的RFID标签天线阻抗预测中。

参考文献

- [1] COLELLA R and CATARINUCCI L. Electromagnetic design of UHF RFID tags enabling a novel method to retrieve sensor data[J]. *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, 2018, 2(1): 23-30. doi: 10.1109/JRFID.2018.2822689.
- [2] BAEK J J, KIM S W, PARK K H, et al. Design and performance evaluation of 13.56-MHz passive RFID for E-skin sensor application[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018, 28(12): 1074-1076. doi: 10.1109/LMWC.2018.2876764.
- [3] OMER M, TIAN Guiyun, GAO Bin, et al. Passive UHF RFID tag as a sensor for crack depths[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(23): 9867-9873. doi: 10.1109/JSEN.2018.2872174.
- [4] CHAKARAVARTHI G, LOGAKANNAN K P, PHILIP J, et al. Reusable passive wireless RFID sensor for strain measurement on metals[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(12): 5143-5150. doi: 10.1109/JSEN.2018.2831903.
- [5] HILLIER A J R, MAKAROVAITE V, GOURLAY C W, et al. A passive UHF RFID dielectric sensor for aqueous electrolytes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5389-5395. doi: 10.1109/JSEN.2019.2909353.
- [6] 刘冉, 梁高丽, 王姮, 等. 融合射频识别和激光信息的动态目标定位[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(11): 2590-2597. doi: 10.11999/JEIT171088.
- LIU Ran, LIANG Gaoli, WANG Heng, et al. Dynamic object localization based on radio frequency identification and laser information[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2590-2597. doi: 10.11999/JEIT171088.
- [7] CHOO J, RYOO J, HONG J, et al. T-matching networks for the efficient matching of practical RFID tags[C]. 2009 European Microwave Conference, Rome, Italy, 2009: 5-8.
- [8] MOHAMMED N A, DEMAREST K R, and DEAVOURS D D. Analysis and synthesis of UHF RFID antennas using the embedded T-match[C]. 2010 IEEE International Conference on RFID, Orlando, USA, 2010: 230-236.
- [9] 傅舟, 罗国清. UHF频段RFID标签天线的小型化设计[J]. *电子器件*, 2013, 36(3): 295-298. doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2013.03.003.
- FU Zhou and LUO Guoqing. Design for the miniaturized RFID tag antenna in UHF band[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2013, 36(3): 295-298. doi: 10.3969/

- j.issn.1005-9490.2013.03.003.
- [10] 王瑞娜, 冯全源. 弯折线与T匹配结构的小型化射频识别标签天线[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(3): 65–69.
WANG Ruina and FENG Quanyuan. Meander-line and T matching structure of miniature RFID tag antenna[J]. *Journal of Detection & Control*, 2013, 35(3): 65–69.
- [11] FAUDZI N M, RASHID A N A, IBRAHIM A, *et al.* Microstrip dipole UHF-RFID tag antenna for metal object tagging[C]. 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 36–41.
- [12] ZHANG Yunjing, WANG Dan, and TONG Meisong. An adjustable quarter-wavelength meandered dipole antenna with slotted ground for metalically and airily mounted RFID tag[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(6): 2890–2898. doi: [10.1109/TAP.2017.2690535](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2690535).
- [13] BONG F L, LIM E H, and LO F L. Flexible folded-patch antenna with serrated edges for metal-mountable UHF RFID tag[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(2): 873–877. doi: [10.1109/TAP.2016.2633903](https://doi.org/10.1109/TAP.2016.2633903).
- [14] ENDO T, SUNAHARA Y, SATOH S, *et al.* Resonant frequency and radiation efficiency of meander line antennas[J]. *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, 2000, 83(1): 52–58. doi: [10.1002/\(SICI\)1520-6432\(200001\)83:1<52::AID-ECJB7>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-6432(200001)83:1<52::AID-ECJB7>3.0.CO;2-7).
- [15] 汪鑫, 王启东, 曹立强. 一种用于集成天线封装(AiP)的低剖面、低成本的毫米波微带天线设计[J]. 现代电子技术, 2017, 40(19): 1–5. doi: [10.16652/j.issn.1004-373x.2017.19.001](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2017.19.001).
WANG Xin, WANG Qidong, and CAO Liqiang. Design of a low-profile and low-cost millimeter-wave microstrip antenna for antenna-in-package (AiP) integration[J]. *Modern Electronics Technique*, 2017, 40(19): 1–5. doi: [10.16652/j.issn.1004-373x.2017.19.001](https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2017.19.001).
- [16] 胡中皓, 张麟今, 郭斌. 弯折线偶极子射频识别标签天线设计方法研究[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 162–165. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2011.01.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2011.01.042).
HU Zhonghao, ZHANG Linxi, and GUO Bin. One design method of meander-line dipole antennas for RFID applications[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(1): 162–165. doi: [10.3969/j.issn.1006-9348.2011.01.042](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-9348.2011.01.042).
- [17] DONG Gang, XIONG Wei, WU Zhaoyao, *et al.* Antenna-in-package system integrated with meander line antenna based on LTCC technology[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2016, 17(1): 67–73. doi: [10.1631/FITEE.1500167](https://doi.org/10.1631/FITEE.1500167).
- [18] 邓小莺, 汪勇, 何业军. 无源RFID电子标签天线理论与工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 65–66.
DENG Xiaoying, WANG Yong, and HE Yejun. *Antenna Theory and Engineering for Passive RFID Tag*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 65–66.
- 洪涛: 男, 1970年生, 高级工程师, 研究方向为RFID质量追溯系统.
贺则昊: 男, 1994年生, 硕士生, 研究方向为RFID天线设计.
蒋天齐: 男, 1991年生, 硕士, 研究方向为质量信息化.
王翠: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为RFID天线设计.
陈家焱: 男, 1979年生, 博士, 讲师, 研究方向为RFID质量追溯系统.

责任编辑: 余蓉