

植入安全工器具 RFID 标签的无线性能测试分析

邓元实^{1,2}, 蒲 维¹, 熊兴中³, 陈明举³, 苏 勤³, 陈 红³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3. 四川轻化工大学, 四川 宜宾 644000)

摘要: 电力安全工器具植入射频识别 (RFID) 标签后具有无线通信、定位、感知、数据交互、工作票联动等功能。针对 RFID 标签植入工器具后无线通信性能将受工器具材质等因素的影响而下降开展研究: 首先, 分析了 RFID 的传输特性与主要性能指标; 然后, 采用 HFSS 电磁仿真软件建立植入工器具 RFID 标签的仿真模型, 研究植入深度与材料的介电常数对 RFID 标签信号传输性能的影响; 最后, 搭建 RFID 性能测试平台, 测试不同介电常数与植入深度的读取距离以及输入匹配参数和谐振频率, 并对不同测试距离的信噪比和接收信号强度指示 (RSSI) 进行测试。研究表明, RFID 标签的植入深度与材料的介电常数将影响 RFID 的性能, 植入工器具的 RFID 芯片传输距离将减小。

关键词: RFID; 性能测试; 安全工器具; 介电常数

中图分类号: TP 391.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)03-0081-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240315

Analysis of Wireless Performance Test for Implanted RFID Tags in Safety Tools and Devices

DENG Yuanshi^{1,2}, PU Wei¹, XIONG Xingzhong³, CHEN Mingju³, SU Qin³, CHEN Hong³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China)

Abstract: The implantation of radio frequency identification (RFID) tags into electric safety tools and devices provides the functions of wireless communication, positioning, perception, data interaction and work ticket coordination. Aiming at the degradation of wireless communication performance of RFID-implanted tools and devices which is affected by their materials, the research is carried out. Firstly, the transmission characteristics and key performance indicators of RFID are analyzed. And then, a simulation model of an RFID tag implanted in tools and devices is established using the HFSS electromagnetic simulation software to investigate the impact of implantation depth and dielectric constant of the materials on the transmission performance of RFID tag signal. Finally, a RFID performance testing platform is constructed to measure the read distance for various dielectric constants and implantation depths, as well as input matching parameters and resonance frequency, and the signal-to-noise ratio (SNR) and received signal strength indication (RSSI) at different testing distances are tested. The research shows that the implantation depth and the dielectric constant of materials of RFID tags significantly affect the performance of RFID, resulting in a reduced transmission distance for the RFID chip implanted in tools and devices.

Key words: radio frequency identification (RFID); performance test; safety tools and devices; dielectric constant

0 引言

随着集成电路的飞速发展,射频识别(radio frequency identification, RFID)设备已实现了微型化,并在各个生产领域中得到了广泛的应用。特高频(ultra high frequency, UHF) RFID 电子标签具有体积小、阅读距离远的优点,已应用于电力生产的各类智能安全工器具的管理与检测,可实现电力安全工器具的无线通信、定位、感知、数据交互、工作票联动等功能,从而提升电力安全工器具全过程智能化管理水平,实现电力安全工器具优化配置和作业现场安全监管能力^[1],产生了显著的经济和社会效益。

RFID 电子标签由多个功能模块组成,内部结构复杂、种类繁多。电力智能工器具处于高温、高压、强电磁干扰等环境下时,不同频率的射频信号的传输性能会受到较大影响。同时,电力智能工器具种类多样,包括安全帽、安全带、安全绳、登杆脚扣、登高板、绝缘杆、携带型短路接地线等,各种工器具的材质也千差万别,对 RFID 无线信号的影响各不相同。故 RFID 标签植入工器具中,其性能差异较大,在入网、验收、使用等环节无法保证其实际应用场景和功能需求。因此,研究 RFID 标签植入工器具后的性能特性,根据工器具的特点制定 RFID 电子标签在不同结构与类型的安全工器具中的最优植入方式,是亟待解决的问题。

当前针对 RFID 无线通信的研究主要是对安全隐私、冲突问题以及无线干扰等问题进行研究,对 RFID 标签植入工器具后的性能问题研究比较少。如文献[2]为了优化植入轮胎中 RFID 标签的性能,增大阅读的阅读距离,建立 BP 神经网络模型实现对标签阅读距离的预测,并建立标签植入轮胎的优化方案。文献[3]为了确保 UHF RFID 对智能电能表的运行影响最小化,同时增强电能表工作时系统的稳定性,设计了 RFID 标签植入电能表抗射频干扰方案。文献[4]为了保证 RFID 标签在植入体内后避免引起动物或人体的不适,利用 EFAB 工艺设计小尺寸可植入 RFID 天线的结构,并验证该方案植入的性能。因此,对 RFID 标签植入电力工器具后的性能特性还有待深入研究。

下面依据电力场景无线干扰情况与电力安全工器具的特点,研究 UHF RFID 电子标签在不同介电材

质中的传输特性,构建 UHF RFID 电磁传输质量测试方法并对 UHF RFID 植入塑料材质的性能进行测试,为 RFID 植入电力智能工器具提供指导。

1 UHF RFID 的传输特性与性能指标

1.1 UHF 在不同介电材质中的传输特性

RFID 标签采用多个频段,包括 135 kHz 以下、13.56 MHz、860~928 MHz(UHF)、2.45 GHz 及 5.8 GHz 等频段。使用 800 MHz 以下的 RFID 采用近场区进行数据传输;使用 800 MHz 以上的频率和微波时,RFID 采用在远场区域内反射调制^[5]进行数据传输。所研究的是电力工器具管理使用的标签,其频段为 860~928 MHz,工作在远场区。

当 RFID 标签^[6]植入到电力安全工器具中,其传播特性将发生严重的改变。不同于自由空间的传播特性,电力工器具通常采用特殊的绝缘材质,电磁波传播特性会受到绝缘材质的电阻率、介电常数、介质损耗角等的影响^[7]。

电力工器具采用的绝缘材料由多种高分子材料混合构成。以塑料为例,主要成分是通过加聚或缩聚反应聚合而成的高分子化合物树脂,并填充增塑剂、稳定剂、润滑剂、色料等添加剂^[8]。电力工器具的电学性质与材料的电导率、介电常数和磁导率有关,而电学性质^[9]决定了植入 RFID 标签的性能。

绝缘塑料通常表现出非线性介质中的传播,由麦克斯韦方程可知电场 E 与磁场 H 的关系为

$$k \times E = \eta H \quad (1)$$

式中: η 为波阻抗; k 为波矢量。非线性介质是电介质参数为复数的情形,即 $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$,介质的磁导率为 μ ,此时

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon'} \left(1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon'} \left(1 - j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

电场传播方程具体表示为

$$E(z, t) = \begin{cases} Ae^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \varphi), & z < 0 \\ Ae^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z + \theta), & z > 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\alpha = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\beta = \omega \left\{ \frac{\mu \varepsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \right)^2} + 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k^2}{\mu \varepsilon}}$$

式中: A 为电场强度; z 为传播方向; φ 和 θ 为初始相位; ω 为角频率。

由式(4)可知,UHF电磁波在绝缘材质中传播,其强度随传播距离呈指数衰减^[10]。衰减系数 α 决定了电磁波传播性能,衰减系数 α 又与电导率 σ 成正比。要使电磁波的传播损耗越小,要求电导率 σ 就越小。因此,当RFID标签植入到绝缘材料中,其传输距离将受到极大的影响。应该考虑,电导率 σ 小的区域作为RFID标签的植入区域,以减小电磁波能量在塑料体中的损耗。

另一方面,除了电磁波传播的场强发生衰减外,传播的相位也将产生影响。通常,电力工器具采用的绝缘材料是一种掺杂的高分子材料,在外加电场的作用下产生极化现象,从而使RFID传输的电磁场能够储存以及耗散能量。

另外,电磁波在绝缘材质中波长 λ 可表示为

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\sqrt{2}}{f\sqrt{\mu\varepsilon}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中, f 为电磁波频率。

由式(5)可以看出,在绝缘材料中,RFID传输信号的波长 λ 与绝缘材料的 $\sqrt{\varepsilon}$ 呈反比,而RFID标签天线的尺寸与传输波长 λ 应该在同一个数量级。由此可知,当介电常数发生改变时,天线的尺寸也应该改变。通常绝缘材料的介电常数大于空气的介电常数,植入工器具的天线应相应地减小或改变天线的结构。

1.2 UHF RFID 标签天线主要性能参数

UHF RFID 标签天线主要的功能为电能向电磁波转换和电磁波定向辐射功能。天线性能指标主要包括辐射的方向性、增益、谐振频率、带宽和发射强度等。另外,可以通过峰值信噪比、接收信号强度(received signal strength indication, RSSI)、最大接受距离来衡量电磁场传播的质量。考虑到RFID标签植入到工器具的特殊性,天线与绝缘材质的匹配性、植入的深度、天线的结构也存在很大的联系。

1) UHF RFID 天线方向增益

一般情况下,RFID标签采用全向性天线或半全

向性天线。这样的RFID标签附在普通物体表面或植入到物体中时,能够在较大的区域内稳定实现数据的传输。

辐射强度与电场强度的平方成正比,在点源天线场强 E_0 的情况下,天线的方向性系数可表示为

$$D(\theta, \varphi) = \frac{E^2(\theta, \varphi)}{E_0^2} \quad (6)$$

式中, $E(\theta, \varphi)$ 为天线在 θ 方向某点产生的场强。

天线的增益在输入功率相同的条件下,可定义为实际天线与点源天线在同方向同一点产生的场强的平方的比值。

$$G = \frac{E_{\max}^2}{E_0^2} \quad (7)$$

2) UHF RFID 的谐振频率与带宽

天线一般具有固有的谐振频率,在此谐振频率为中心的频带为有效传输带宽。当电磁波的频率与谐振频率相同时,传输线路最高。天线的辐射方向性、阻抗等其他参数随频率而变,而谐振频率与天线的长度相关。

对于植入工器具的RFID标签,其工作的中心频率为915 MHz。因此,设计RFID天线时,应该将谐振频率设置在915 MHz附近。中国的RFID标签使用频率为840~845 MHz和920~925 MHz^[11],在带宽设计方面,也应该将国家规定的UHF频带范围设计在RFID带宽以内。

3) UHF RFID 有效识别距离

植入工器具后的RFID标签将使阅读距离变小。RFID标签的识别距离主要由读写器与标签的天线性能决定。RFID标签的激活距离 R_{tag} 是RFID天线刚好能够感应足够高的开启功率的最大距离。另外,读写器能够感应到RFID信号的最大距离为 R_{reader} 。要实现RFID信息的正常读取,要求读写器与标签的距离应该是这两个距离的较小值,即

$$R_e = \min\{R_{\text{tag}}, R_{\text{reader}}\}$$

在RFID标签系统,阅读器通过电源供电,其发生功率与检测灵敏度都较高。因此,RFID标签的识别距离通常为标签的激活距离,受限于标签的感应功率。如果RFID天线的功率传输系数为 τ ,根据弗林斯方程,RFID标签的最大读取距离为

$$R_{\text{tag}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{\text{th}}}} \quad (8)$$

式中: P_{th} 为RFID天线的最低开启功率; P_t 为读写器

的发射功率; G_t 为读写器的增益; G_r 为 RFID 天线的接收增益。

用反射因子 s 来表示功率利用率, s 与 τ 的关系为

$$\tau = 1 - |s|^2 \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (9)$$

当 $\tau = 1$ 时, RFID 标签的读取距离可以达到最大值^[12]。将式(9)代入式(8), RFID 标签的最大读取距离可以表示为

$$R_{\text{tag}} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r (1-s)^2}{P_{\text{th}}}} \quad (10)$$

因此,通过仿真得到不同塑料材料和不同天线尺寸情况下的标签反射系数值,就可以得到标签的读取距离。

4) UHF RFID 植入反射系数

反射系数 Γ 定义为反射波与入射波的比值,两种不同磁导率与介电参数的材质,一部分电磁波在界面上被反射回来,另一部分电磁波则透射过去。如图 1 所示,图中 μ_1, ε_1 分别为材料的磁导率与介电常数; μ_2, ε_2 分别为空气的磁导率与介电常数。

反射波与入射波的比值称之为反射系数 Γ , 关系式为

$$\Gamma = \frac{U_{\text{re}}}{U_{\text{in}}} \quad (11)$$

式中, U_{re} 、 U_{in} 分别为反射波、入射波。

由于材料材质特性、表面粗糙度等因素的影响,电磁反射^[13]过程中的一部分电磁波会损耗掉。反射电磁波的具体情况,可以通过仿真软件进行计算。

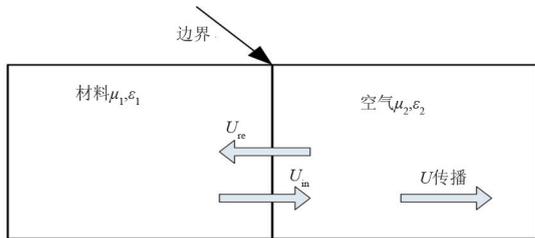


图 1 电磁反射原理

2 UHF RFID 标签植入绝缘材质中的传输性能分析

利用电磁仿真软件 Ansys HFSS 建立 RFID 标签植入不同介电参数绝缘材质下的三维结构仿真图,如图 2 所示。RFID 标签采用线状天线,外侧包裹的圆柱体即为绝缘材料^[14]。通过改变绝缘材料的不同介电参数值,就可以得到不同介电参数材料植入

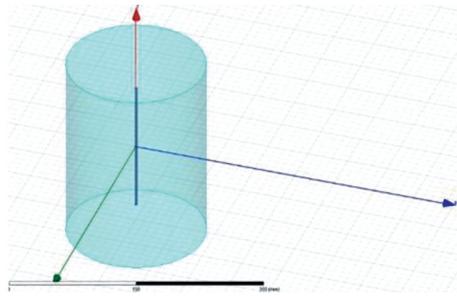


图 2 标签在材料内模型

RFID 标签的电场传播特性。

1) 介电常数对 RFID 性能的影响

选取不同的介电参数绝缘材料进行仿真分析,以此来研究不同介电参数的绝缘材质植入 RFID 标签的传输性能,记录 S_{11} ($S_{11} = 201\text{g}\Gamma$) 与谐振频率,如表 1 所示。表中给出了介电参数 1.0~5.0 间的 8 组不同介电参数的测试性能参数。

表 1 不同介电参数下的仿真值

组数	介电参数/ ($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)	S_{11}/dB	谐振频率/GHz
1	1.0(真空)	-27.169 0	0.916 0
2	1.5	-23.595 9	0.764 0
3	2.0	-18.142 6	0.671 0
4	2.5	-15.893 9	0.609 0
5	3.0	-14.624 7	0.563 0
6	3.5	-13.806 3	0.529 0
7	4.0	-13.272 5	0.501 0
8	5.0	-12.658 1	0.459 0

绝缘工器具与 RFID 芯片的封装材料的相对介电常数为 3,其对应的谐振频率在 500 MHz 左右(损耗最小的频率),RFID 芯片使用的 UHF 在 860~960 MHz,未实现谐振匹配。仅从介电强度的角度,RFID 标签芯片植入到工器具内部,为了实现信号的最优,可以选择 500 MHz 的频段。

不同介电参数下的仿真结果如图 3 所示。图中参数 MYMer1 代表介电常数,从图中可以看出,材料介电参数越大,它的 S_{11} 参数就越大,电磁波损耗得越严重。

研究分析可知,材料的介电参数将影响植入 RFID 标签天线的 S_{11} 与谐振频率,对 RFID 传输性能影响较大。仅通过改变 RFID 标签天线结构的同时需要综合考虑介电参数对天线性能的影响。

1) 植入深度对 RFID 性能的影响

将植入橡胶块不同深度下的 RFID 标签天线的结果进行研究,如图 4 所示。随着植入深度的增大, S_{11} 参数增大,也即反射系数逐渐增大。而且 S_{11} 参

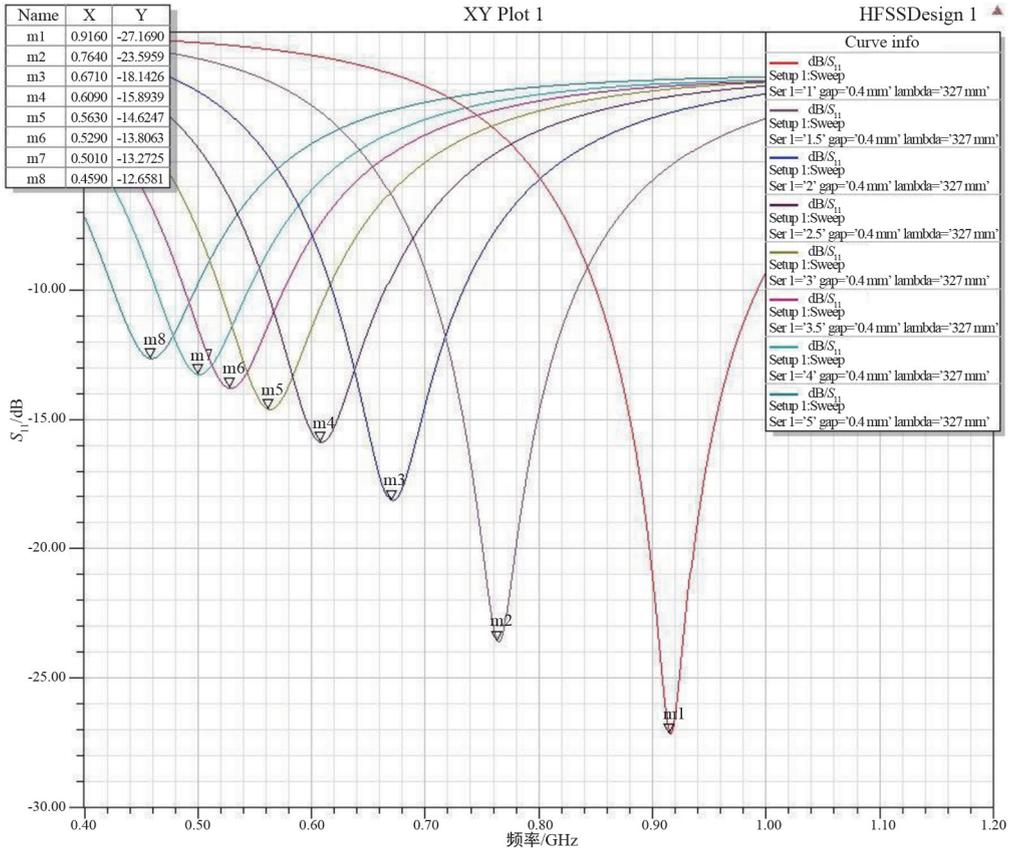


图 3 不同介电参数的仿真结果

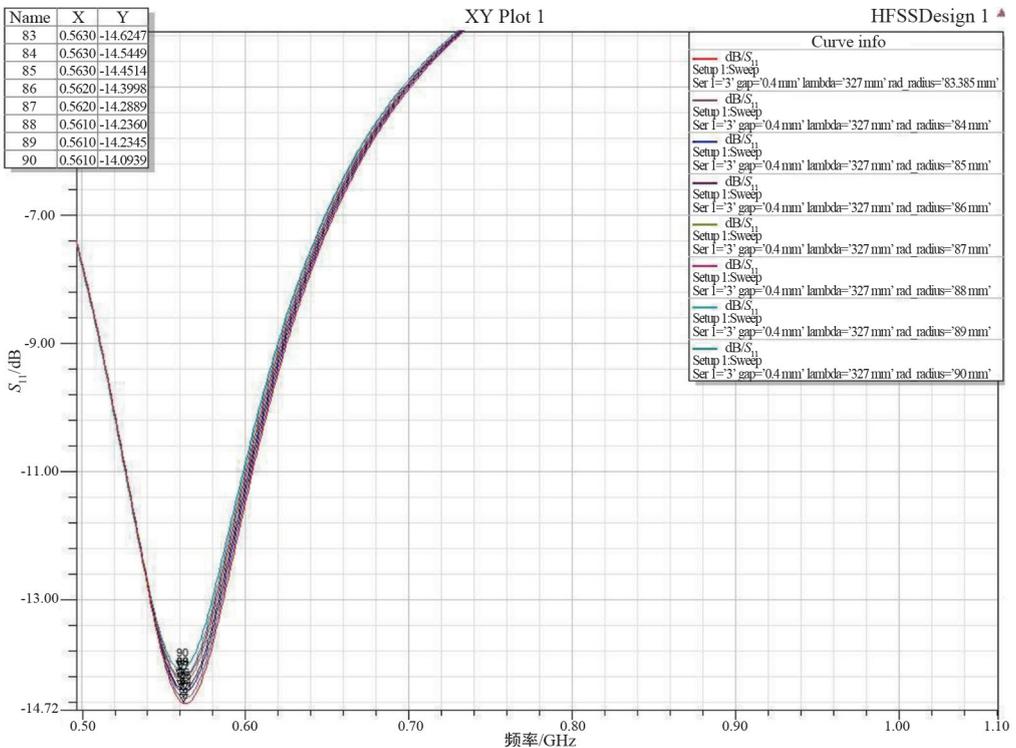


图 4 植入不同深度下的 RFID 标签天线的仿真结果

数最低点左移,即频率段逐渐降低。因此,标签应该尽可能植入浅一些。

为了排除其他方面的影响,在标签植入深度仿

真时,将其他影响参数设置成定值。表 2 列出了标签在不同深度下的仿真数据。图 5 为植入不同深度的 RSSI 值。

表 2 同种材质植入不同深度下的仿真值

组数	植入深度/mm	S_{11}/dB	谐振频率/GHz
1	83.386	-14.627 4	0.563 0
2	84.000	-14.544 9	0.563 0
3	85.000	-14.451 4	0.563 0
4	86.000	-14.399 8	0.562 0
5	87.000	-14.288 9	0.562 0
6	88.000	-14.236 0	0.561 0
7	89.000	-14.234 5	0.561 0
8	90.000	-14.093 9	0.561 0

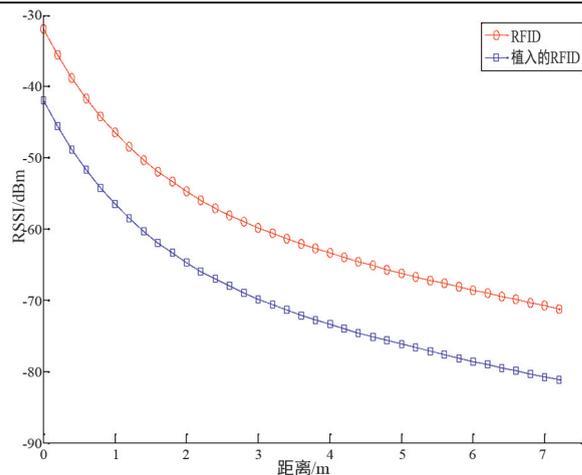


图 5 植入不同深度的 RSSI 值

由上述分析可知,从谐振频率角度分析植入深度与介电常数,植入工器具(工具器相对介电常数大于 3.0)的 RFID 标签采用的最佳频率为 560 MHz 左右。并且植入深度越深,RFID 信号就越弱。

3 结 论

RFID 电子标签在高温、高压、强电磁干扰等环境下,其射频信号的传输会受到较大的干扰,再加之 RFID 标签植入到工器具材质中,其性能将会下降。RFID 标签已广泛应用于电力工器具的管理中,而它植入后的传输特性还有待深入研究。上面对植入工器具 RFID 标签信号的性能进行了研究,分析了 RFID 的传输特性与主要性能指标,建立植入工器具 RFID 标签的仿真模型,研究了植入深度与材料的介电常数对 RFID 标签信号传输性能的影响。并搭建 RFID 性能测试平台,测试不同介电常数与标签植入深度的有效读取距离。研究表明,工器具的介电常数与标签植入深度都将影响 RFID 芯片读取性能,并且植入工器具后 RFID 的读取距离具有较大的降低。

参考文献

- [1] 张寒,陈鹏,张煜等.基于电子标签 RFID 技术的电力监测系统[J].集成电路应用,2020,37(12):186-187.
- [2] 齐艳丽.植入轮胎的 RFID 标签天线性能预测研究[D].青岛:青岛科技大学,2018.
- [3] 吴国瑞,苏家宇,李迪星,等.RFID 电能表抗射频干扰设计[J].自动化与仪器仪表,2019(3):62-64.
- [4] 郭东辉,陈华君.基于 EFAB 工艺的可植入 RFID 天线设计[J].福州大学学报(自然科学版),2007(3):409-414.
- [5] 熊昂宇.应用于 RFID 系统的近远场天线研究[D].大连:大连海事大学,2023.
- [6] 周利苹.UHF RFID 标签天线的研究与设计[D].北京:北京邮电大学,2018.
- [7] 罗伟.高增益 UHF RFID 无源抗金属标签天线研究与优化设计[D].重庆:重庆邮电大学,2023.
- [8] 王洋.应用于 UHF 频段的复合材料及在天线中的应用研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [9] 唐学锋.一种小型化 UHF 频段 RFID 标签天线的设计[J].湖州师范学院学报,2020,42(2):71-75.
- [10] 岑宣良.基于电磁波极化特性的 RFID 技术应用研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [11] 王丹,闫珂柱,郭福魁.一种宽频带 UHF RFID 标签天线的研究与设计[J].电子技术,2014,43(4):49-51.
- [12] 涂华婷.面向无芯片 UHF RFID 标签的织物基微带多谐振电路的设计、制备与性能评价[D].上海:东华大学,2022.
- [13] 宋廷强,齐艳丽.橡胶介电参数对智能轮胎电子标签的影响关系[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2017,38(5):107-111.
- [14] 宋丽娟.基于电磁仿真软件 HFSS 的 5G 天线设计[J].软件,2022,43(4):181-183.

作者简介:

邓元实(1985),男,高级工程师,主要从事安全技术研究与安全管理工作;

蒲维(1982),男,高级工程师,主要从事继电保护检测工作;

熊兴中(1971),男,博士,教授,研究方向为通信信号处理、IDMA 无线多址技术;

陈明举(1982),男,博士,教授,研究方向为图像处理、机器学习;

苏勤(1999),男,硕士研究生,研究方向为图像处理、射频信号;

陈红(1999),女,硕士研究生,研究方向为图像处理。

(收稿日期:2024-02-25)