

一种圆柱形滚动抗金属 RFID 标签天线的设计

吴 赤¹ 袁家德¹

WU Chi YUAN Jiade

摘 要

设计了一种可以在金属表面上任意滚动的超高频射频识别 (RFID) 标签天线。标签天线基于倒 F 天线, 采用呈圆柱状布局的六个曲面臂, 其中三个曲面臂通过馈电面与标签芯片的一端相连, 另外三个曲面臂通过接地面与标签芯片的另一端相连, 天线圆形短路面连接着六个曲面臂。标签天线在金属面上任意滚动时, 都具有稳定的工作性能。标签天线直径为 12 mm, 长度为 67 mm, 在有效全向辐射功率为 3.28 W 条件下, 实测最大识别距离达到 6.2 m。所提出的标签天线具有紧凑的尺寸、良好的读取范围以及可以在金属表面上滚动工作的优势, 适合应用于复杂工业物联网环境下的 RFID 系统中。

关键词

抗金属; 滚动; 标签天线; 超高频; 射频识别

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.03.003

0 引言

射频识别 (RFID) 是一种非接触式自动识别技术, 通过射频信号实现目标物体信息的识别。相比传统的条形码技术, RFID 技术具有高速读取、非视觉识别、实时追踪等优势, 为实现智能化、高效管理提供了强大支持。其中, 超高频 RFID 系统工作在 860 ~ 960 MHz 频段, 因其稳定性、经济性和较远的识别范围, 在物流供应、仓库管理、零售和生产自动化管理等各个领域得到了广泛应用^[1-3]。

RFID 系统主要由两个部分组成: RFID 读写器和 RFID 标签^[4], 其中 RFID 标签由标签天线和芯片组成, 是影响 RFID 系统整体性能的关键。在许多应用中, RFID 标签需要粘附到金属表面。然而, 标签非常容易受到外界环境条件的干扰, 特别是当标签靠近金属表面时, 会产生明显的失谐效应, 导致其性能显著恶化^[5-6]。为了解决这一挑战, 近年来学者们提出了许多研究方案^[7-14]。这些方案通常可以分为两类。第一类是在标签天线和金属表面之间增加额外的结构, 以保持标签天线在金属面上稳定的工作性能。例如, 在文献 [7-8] 中, 添加的电磁带隙结构调整了特定频段内反射波的相位, 这种调整使反射的电磁波与辐射波同相, 并消除了金属表面的破坏性影响。在文献 [9-10] 中, 添加的人工磁导体结构将背景金属与标签天线隔离开, 并增强了天线的增益。第二类是在金属表面存在的情况下直接设计和优化标签天线, 以增强天线的辐射性能。例如, 文献 [11-13] 采用了平面倒 F 天

线 (PIFA) 结构, 将金属面作为天线自身结构的一部分, 从而降低金属的影响。同样, 文献 [14] 提出了带有地平面的倒 “L” 天线设计。此外, 文献 [15] 采用蝶形折叠贴片天线与两个分裂环谐振器的组合, 以提高标签天线的阻抗匹配和辐射效率。然而, 上述这些标签天线存在一个明显的缺陷: 只有一个特定的表面能够与金属接触, 而当标签天线的其他表面与金属接触时, 其性能将受到影响。随着 RFID 技术应用的进一步扩展, 标签的放置方式也可能发生变化, 有时需要将 RFID 标签放置在金属上或靠近金属, 例如将标签悬挂在金属饰品或厢式货车等金属物体表面上, 或者安装了 RFID 标签的各种工具放置在金属柜中, 在这些复杂的金属环境中, 传统的抗金属标签就不再适用。

本文研究了一种可以在金属物体表面任意滚动的标签天线, 标签天线的各个面接触到金属物体时, 都会保持良好的工作性能。

1 天线结构

图 1 给出了本文所提出的圆柱形 RFID 标签天线的整体结构图, 其中图 1 (a) 为标签天线的立体结构图, 图 1 (b) 是其分解图。该标签天线是基于倒 F 天线演变而成的一种圆柱状六曲面臂天线, 六个曲面臂中, 一组是三个完全相同的曲面辐射臂 A, 另外一组是三个完全相同的曲面辐射臂 B。两组曲面臂通过前端圆形短路端连接。馈电面和接地面均为类 “Y” 形, 位于天线内部, 其中馈电面与辐射臂 A 和连接芯片的导片相连, 接地面与辐射臂 B 和连接芯片的导片相连。馈电面、接地面以及连接导片都是由厚度为 0.3 mm 的铜片制作而成, 六个曲面臂由柔性电路板制作而成。两个相同且

1. 福州大学物理与信息工程学院 福建福州 350108

[基金项目] 中国福州市重大科技项目 (编号: 2022ZD002)

厚度为 1 mm 的聚四氟乙烯塑料套筒（相对介电常数为 2.1，损耗正切角为 0.003）位于天线内部的左右两端，起到固定支撑天线的作用。标签芯片采用美国 Alien 公司的 H₃ 型号的芯片，该芯片在 915 MHz 处的阻抗为 $(27-j201) \Omega$ ，读取灵敏度为 -18 dBm。

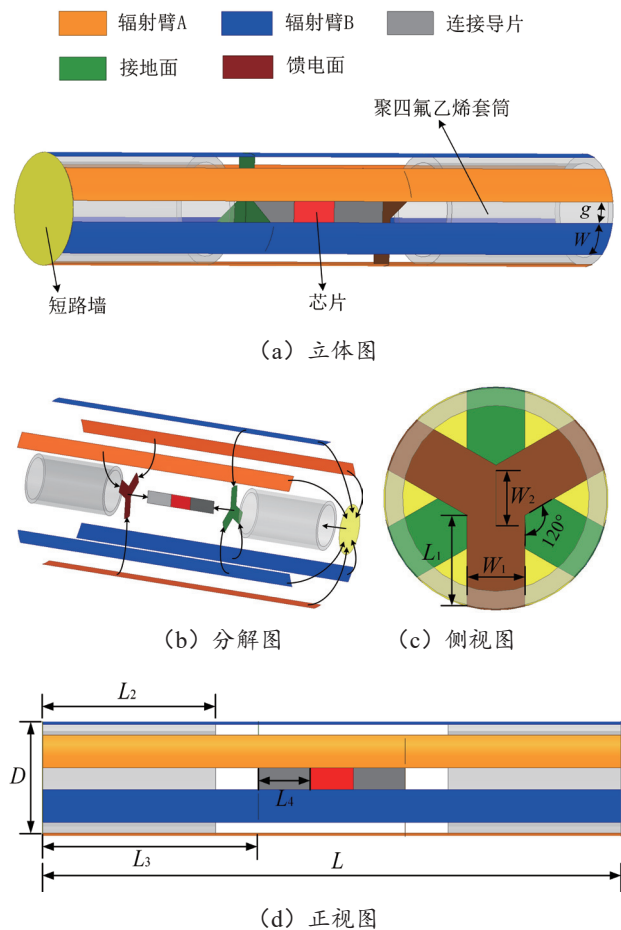


图 1 天线结构图

采用电磁仿真软件 ANSYS HFSS 对天线性能进行仿真优化，最优结构尺寸如表 1 所示。

表 1 标签天线结构尺寸

变量	尺寸/mm	变量	尺寸/mm
L	67.0	W	4.0
L_1	4.9	W_1	3.1
L_2	20.0	W_2	3.0
L_3	25.0	D	12
L_4	6.0	g	1.9

2 天线设计分析

本文提出的标签天线基于倒 F 天线结构，共六个辐射臂，当天线放置在金属物体表面上时，与背景金属面接触的天线臂可看作是接地平面，其余的天线臂会产生有效的辐射。所提出的标签天线在金属面上滚动时主要存在两种典型的状

态，其中状态 I 为辐射臂 A 中的一个臂与背景金属板接触，状态 II 为辐射臂 B 中的一个臂与背景金属板接触。由于所提出的天线结构具有一定的旋转对称性，所以分析天线在金属板上任意滚动时，其余的状态与这两种典型的状态存在一定的相似性。图 2 给出了天线在两种典型状态下的反射系数 S_{11} 曲线，从图中可以看出，标签天线两种典型状态下的中心频点分别为 903 MHz、904 MHz，表明天线在金属面上滚动的过程中频点变化范围很小。

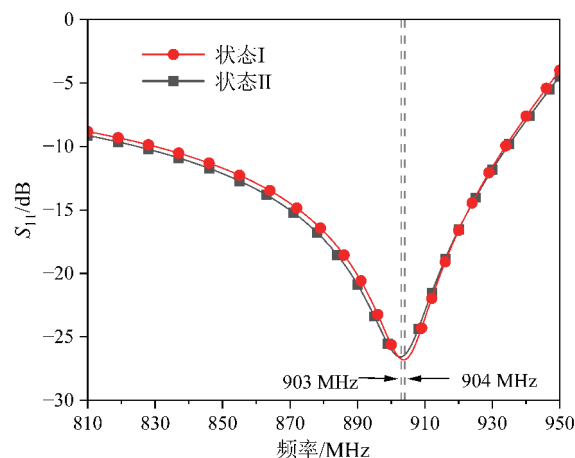


图 2 标签天线两种典型状态的 S_{11}

图 3 和图 4 给出了天线与背景金属板接触的两种典型状态以及在该状态下天线处于中心频率时的电流分布图。仿真中的背景金属板尺寸为 300 mm×400 mm，远大于天线自身尺寸，研究天线处于不同状态的性能时可将背景金属板视为无限大尺寸。为了增强图 3 和图 4 中电流的可视化效果，图中的模拟背景金属板只截取了一部分。

当天线处于状态 I 时，与背景金属板接触的一个辐射臂 A 可视为天线的接地平面，而未与金属板接触的其余天线臂能够产生辐射。图 3 给出了天线在中心频率 904 MHz 时的表面电流分布图，未与金属板接触的辐射臂 A 和 B 整个表面产生了强谐振电流，因此，在 904 MHz 谐振点处，未与金属板接触的辐射臂 A 和 B 起到主要的辐射作用。

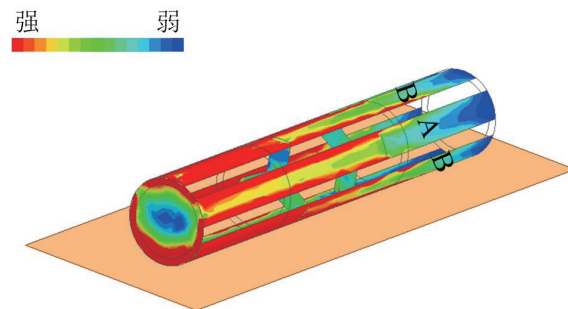


图 3 状态 I 电流分布

当天线处于状态 II 时，与背景金属板接触的一个辐射臂 B 可视为天线的接地平面，而未与金属板接触的其余天线臂

能够产生辐射。图 4 给出了天线在中心频率 903 MHz 时的表面电流分布图, 未与金属板接触的辐射臂 A 和 B 整个表面产生了强谐振电流, 表明了 903 MHz 谐振点处, 未与金属板接触的辐射臂 A 和 B 起到主要的辐射作用。

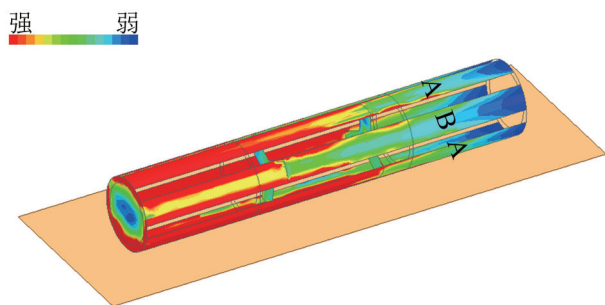


图 4 状态 II 电流分布

3 实验结果

根据表 1 中的仿真最优尺寸, 制作了标签实物, 如图 5 所示。



图 5 标签实物图

采用 Voyantic Tagformance Pro 测试系统测量标签天线的最大读取距离和灵敏度, 测试场景如图 6 所示。线极化阅读器天线用于发射信号和接收来自标签天线的反向散射信号, 待测标签放置在尺寸为 300 mm×400 mm 的背景金属板的中心。

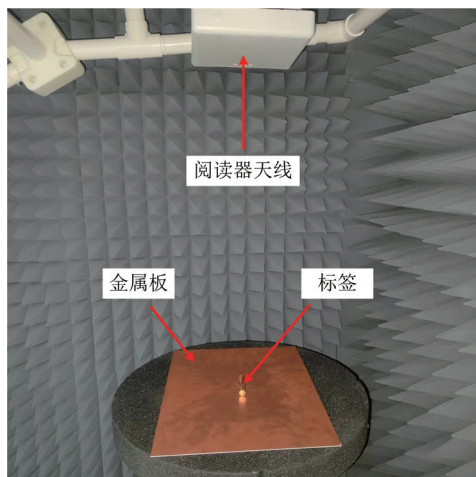


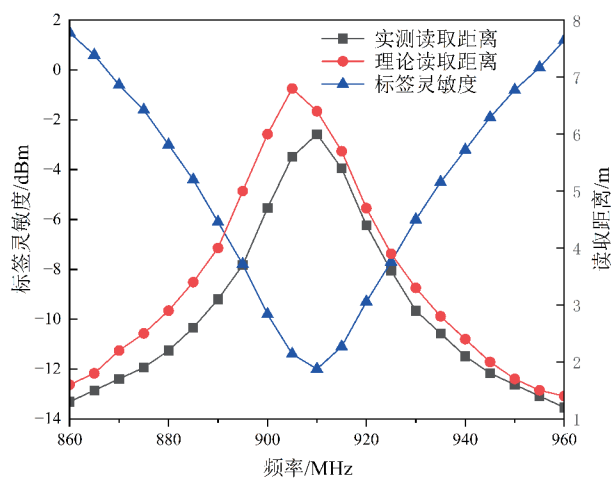
图 6 测试场景图

标签天线的最大读取距离可以通过弗里斯 (Friis) 传输方程^[16-17]计算:

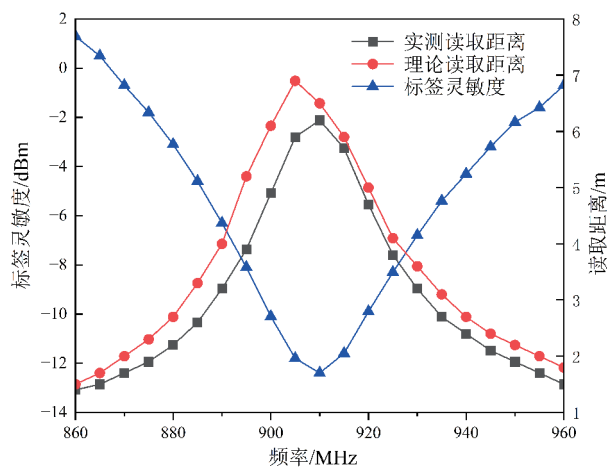
$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{EIRP} G_r \tau}{P_{th}}} \quad (1)$$

式中: d 是标签天线的最大读取距离, λ 是自由空间中的波长, P_{EIRP} 是阅读器的有效全向辐射功率, 在图 6 的测试系统中, P_{EIRP} 值为 3.28 W, G_r 为标签天线的实际增益, τ 是功率传输系数, P_{th} 是激活标签芯片所需的最小功率, 也就是芯片灵敏度。

标签天线两个典型状态下的理论与实测读取距离以及其灵敏度如图 7 所示。天线处于状态 I 时, 其在 904 MHz 处的理论读取距离为 6.8 m, 实测天线在 910 MHz 处获得最大读取距离为 6 m, 且获得最佳灵敏度为 -12 dBm; 天线处于状态 II 时, 其在 903 MHz 处的理论读取距离为 6.9 m, 实测天线在 910 MHz 处获得最大读取距离为 6.2 m, 且获得最佳灵敏度为 -12.3 dBm。理论与实测结果之间的差异是由不完美的制造和随频率变化的芯片阻抗的不确定性引起的。



(a) 状态 I



(b) 状态 II

图 7 标签天线两种状态下的读取距离与灵敏度

4 结论

本文提出了一种可以在金属表面上任意滚动的 RFID 标签天线,该天线呈圆柱状,具有较好的旋转对称性。本文研究了标签天线滚动时两个典型状态下的辐射原理,采用 Voyantic Tagformance Pro 测试系统测试了标签天线的灵敏度和读取距离。实测结果表明,本文所设计的标签天线不仅具有小尺寸、低频偏的特点,更重要的是当它在金属物体表面滚动时,其读取距离可达 6 m 以上,性能比较稳定,可以很好地应用于复杂金属环境下的 RFID 系统中。

参考文献:

- [1] SUBRAHMANNIAN A, BEHERA S K. Chipless RFID: a unique technology for mankind[J]. IEEE journal of radio frequency identification, 2022, 6:151-163.
- [2] WANG Y, PRETORIUS A J, ABBOSH A M. Low-Profile antenna with elevated toroid-shaped radiation for on-road reader of rfid-enabled vehicle registration plate[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64(4):1520-1525.
- [3] 谭立容,王从屹,伍瑞新.一种全球通用的小型超高频标签天线设计[J].电波科学学报,2012,27(4):663-666+679.
- [4] ARBOLEYA A, LAVIADA J, ALVAREZ-LOPEZ Y. Real-time tracking system based on rfid to prevent worker-vehicle accidents[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2021, 20(9):1794-1798.
- [5] UKKONEN L, SYDANHEIMO L, KIVIKOSKI M. Effects of metallic plate size on the performance of microstrip patch-type tag antennas for passive rfid[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2005, 4:410-413.
- [6] ZANNAS K, MATBOULY H E, DUROC Y, et al. A flipping UHF RFID sensor-tag for metallic environment compliant with ETSI/FCC bands[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2021, 69(3):1283-1292.
- [7] JIN C, CHEN J H, ZHANG B C, et al. Low-Cost mmWave metallic waveguide based on multilayer integrated vertical-EBG structure and its application to slot array antenna design[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, 70(3):2205-2213.
- [8] CHEN D X, YANG W C, CHE W Q. High-Gain patch antenna based on cylindrically projected EBG planes[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2018, 17(12): 2374-2378.
- [9] RIPIN N, LIM E H, BONG F L, et al. Miniature folded dipolar patch with embedded AMC for metal mountable tag design[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(5): 3525-3533.
- [10] WEI L, PING W. A compact UHF-RFID tag antenna with embedded AMC for metallic objects[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2023, 22(4): 873-877.
- [11] HIRVONEN M, PURSULA P, JAAKKOLA K, et al. Planar inverted-F antenna for radio frequency identification[J]. Electronics letters, 2004, 40(14):848-850.
- [12] KWON H, LEE B. Compact slotted planar inverted-F RFID tag mountable on metallic objects[J]. Electronics letters, 2005, 41(24):1308-1310.
- [13] LIU Y, ZHOU Y M, LIU G F, et al. Heptaband inverted-F antenna for metal-rimmed mobile phone applications[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2016, 15:996-999.
- [14] LEE Y H, LIM E H, BONG F L, et al. Loop-fed planar inverted-L antennas (PILAs) for omnidirectional UHF on-metal tag design[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(8):5864-5871.
- [15] LEE Y H, LIM E H, BONG, F L, et al. Bowtie-Shaped folded patch antenna with split ring resonators for UHF RFID tag design[J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2019, 67(6):4212-4217.
- [16] 柳敏瑞,田铭兴,陈小强,等.2.45 GHz 倒 F 型弯折印刷天线研究与应用[J].传感器与微系统,2023,42(2): 145-148+156.
- [17] VIRTANEN J, BJORNINEN T, UKKONEN L, et al. Passive UHF inkjet-printed narrow-line RFID tags[J]. IEEE antennas and wireless propagation letters, 2010, 9:440-443.

【作者简介】

吴赤(1999—),男,湖北十堰人,硕士研究生,研究方向:天线设计。

袁家德(1974—),男,江苏灌云人,教授,博士生导师,研究方向:通信天线、射频识别。

(收稿日期:2023-12-20)