

面向干式水表产品追溯的 RFID 标签天线设计 *

王 翠 , 洪 涛

(中国计量大学 质量与安全工程学院,浙江 杭州 310018)

摘要:为了实现干式水表制造过程产品追溯,以便对干式水表的质量和数量进行有效监测,根据干式水表的内部结构,设计了一款性能满足干式水表产品追溯的小型化抗金属超高频 PCB RFID 标签。该标签天线采用弯折偶极子结构,可嵌入到水表中。为改善金属环境中 RFID 标签天线的性能,基于干式水表的内部结构和尺寸的约束,通过对天线电小环进行内凹弯折结构设计、调试与仿真,发现对天线中心频点和回波损耗的影响程度,实现对标签天线的小型化设计。对标签天线样品实物进行实际距离测试和天线最低激活功率测试,验证了所设计的标签天线嵌入水表后的最大识读距离为 3.2 m,实际中心频点为 900 MHz,满足产品追溯的识读要求。

关键词:弯折偶极子天线;干式水表;抗金属;小型化;PCB

中图分类号: TN820

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.201197

中文引用格式: 王翠,洪涛. 面向干式水表产品追溯的 RFID 标签天线设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(9): 101–104, 116.

英文引用格式: Wang Cui, Hong Tao. Design of RFID tag antenna for quality traceability of dry-type water meter[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(9): 101–104, 116.

Design of RFID tag antenna for quality traceability of dry-type water meter

Wang Cui, Hong Tao

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

Abstract: In order to achieve the quality traceability of the dry-type water meter manufacturing process, so as to effectively monitor the quality and quantity of the dry-type water meter, according to the internal structure of the dry-type water meter, a miniaturized metal-resistant ultra-high frequency(UHF) printed circuit board(PCB)radio frequency identification(RFID) tags with performance to meet the quality traceability of the dry-type water meter is designed. The tag antenna adopts a bent dipole structure and can be embedded in a water meter. To improve the performance of RFID tag antennas in metal environments, based on the internal structure and size constraints of dry water meters, through the design, debugging and simulation of the concave bending structure of the antenna electric small loop, it discovers the degree of influence on the antenna center frequency and return loss, and realizes the miniaturization design of the tag antenna. The actual distance test and the minimum activation power test of the tag antenna sample verify that the maximum reading distance of the designed tag antenna after being embedded in the water meter is 3.2 m, and the actual center frequency is 900 MHz, which meets the reading requirements for quality traceability.

Key words: bent dipole antenna; dry-type water meter; metal-resistant; miniaturization; printed circuit board(PCB)

0 引言

干式水表,是指水表计量机构采用磁性元件传动,计数器不与被计量水接触的一种旋翼式水表,具有读数清晰、抄表方便、计量精确、经久耐用等特点,从而被广泛采用^[1-2]。为了保证干式水表的全生命周期产品追溯,必须将 RFID 电子标签安装在干式水表内部,但干式水表内部存在鼓轮转动轴、叶轮磁片等金属元件。在 RFID 超高频系统中,射频信号对金属环境^[3-4]十分敏感,当标签天线接近金属表面时,因电磁感应的影响,金属会产生涡流^[5-6],生成自身感应磁场,导致磁力线趋于平缓^[7-8],

无法穿过标签天线,RFID 标签无响应。这给应用于干式水表的 RFID 电子标签设计带来了难度。一种用于手术刀的 RFID 抗金属标签天线^[9]总体尺寸为 66 mm×5 mm,采用短路短截线结构,应用高介电常数介质基板达到小型化目的,可嵌入金属或者贴敷于金属表面,最大读距为 1 m,但该抗金属标签天线尺寸较大,且读距较小,不适用于内部结构复杂的干式水表。一种抗金属标签应用短路环偶极子天线结构^[10],其尺寸为 76 mm×3 mm,靠近金属表面,采用 FR4 材质,在 -10 dB 处带宽为 101 MHz,具有较好的抗金属效果,但其天线结构因干式水表固定装置和机芯的干扰无法在水表中实现。

针对以上内容,本文基于对 T 型结构、弯折加载、耦

* 基金项目:浙江省基础公益研究计划项目(LGG19E050015)

合结构的特点分析,通过对常用弯折偶极子天线电小环结构的设计和相关参数的调整,实现天线回波损耗调节,中心频点的移动,可有效地调整标签天线适应干式水表的内部结构,满足产品追溯的识读要求。

1 天线设计

1.1 标签的识别距离分析

标签天线能够被读写器天线识读的距离是标签天线在实际应用中的重要指标。其最大距离 l 通过弗里斯(Friis)传输方程^[11-12]计算得出:

$$l = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_T G_T G_R (1 - 10^{0.05 \times S_{II}})^2}{P_{Th}}} \quad (1)$$

式中, l 为读写器天线与标签之间的最大识读距离, λ 为工作环境的波长, P_T 为读写器天线发射的功率, G_T 为读写器天线的增益, G_R 为标签天线增益, S_{II} 为标签天线馈电口的回波损耗, P_{Th} 为应用芯片的最低激活功率。

通过式(1)可知,在保证读写器和标签芯片一致的情况下,标签天线最大识读距离由标签天线的回波损耗和增益决定。

1.2 天线结构设计

干式水表的结构如图 1 所示。水表上半部分由保护罩、机芯以及机芯的上下壳组成,材质均为塑料,其下半部分为表体,材质为金属黄铜。由于水表内部空间狭小且结构复杂,很难采购到适用的 RFID 电子标签将其安装在表内,以实现产品追溯。因此本文需要设计一款可抗金属影响的 RFID 电子标签,同时体积尽可能小。

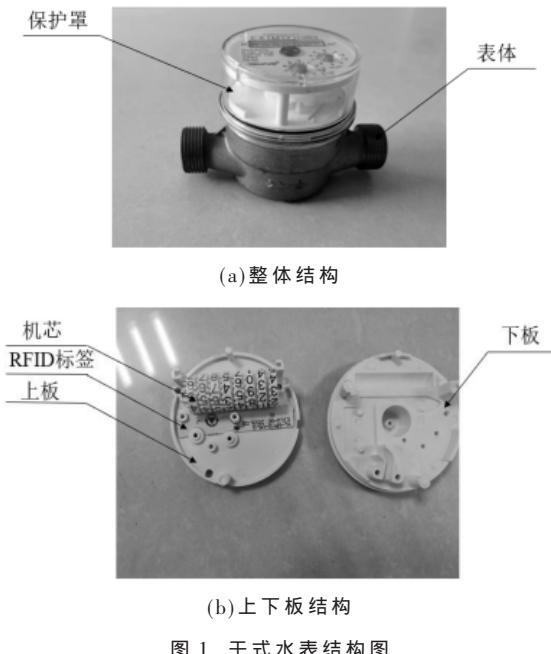


图 1 干式水表结构图

RFID 标签由基板、标签芯片、标签天线组成^[13]。为了加工方便,本次设计基板选用 FR4 材质;芯片采用 Alien Higgs4 芯片,该芯片阻抗为 $26-199 \text{ } \Omega$,体积小且具有较少的引脚个数,数据可保存 50 年,能满足本次设

计需要;标签天线设计则要综合考虑抗金属、体积、读写性能等各因素。文献[14]提出了一种偶极子天线,可实现较好的抗金属效果;文献[15]提出在满足天线谐振频率的前提下,通过对偶极子天线进行弯折,可减小天线的尺寸,适应各种不同的空间结构;文献[16]进一步对弯折偶极子天线的弯折次数、弯折高度和弯折角度进行了研究,可实现在减小体积的同时改善读写性能,但其指的是对弯折偶极子辐射臂的弯折,在固定基板结构上完成天线的参数指标较为受限;文献[11]通过改变馈电方式可实现标签天线性能的提高,如 T 型馈电、Y 型馈电、耦合馈电,但这些馈电结构在本文中因干式水表表芯和固定装置的限制并不适用。故本文在如图 2 所示常用弯折偶极子天线的基础上,应用弯折加载和改变馈电结构的方式对馈电口所在的电小环进行内凹弯折设计,见图 3。总体设计的天线结构图见图 4,外形尺寸为 $54 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$ 。电子标签可嵌入到干式水表中,安装示意图见图 5。

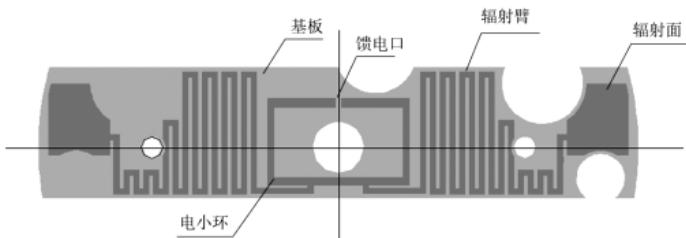


图 2 常用弯折偶极子天线

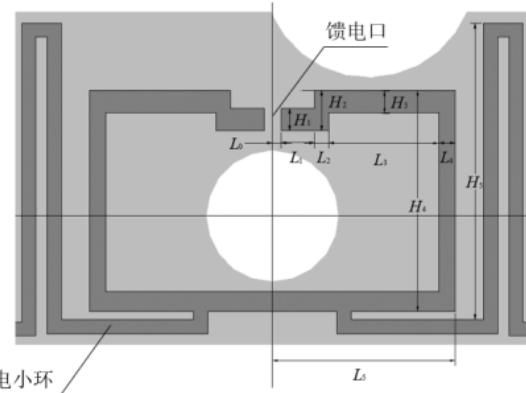


图 3 电小环内凹弯折结构

2 标签天线的参数分析与优化

基于标签天线最大识读距离分析和标签天线结构设计,为寻求本文所设计标签天线电小环的内凹弯折结构参数对回波损耗、中心频点的影响,在保证其他结构参数不变的情况下,应用 Ansoft HFSS16.2 天线对本文所设计标签天线电小环的部分参数 H_2 、 L_1 、 L_3 进行分析与优化。在天线结构参数 H_4 不变的情况下,弯折结构内凹深度用 $H_4=1.6 \text{ mm}+a$ 表示。由于在天线结构参数 L_5 、 L_2 不变的条件下 L_1 和 L_3 相互约束,其具体关系为 $L_1=0.6 \text{ mm}+b$ 、 $L_3=5.1 \text{ mm}-b$ 。于是对结构参数 H_2 、 L_1 、 L_3 分

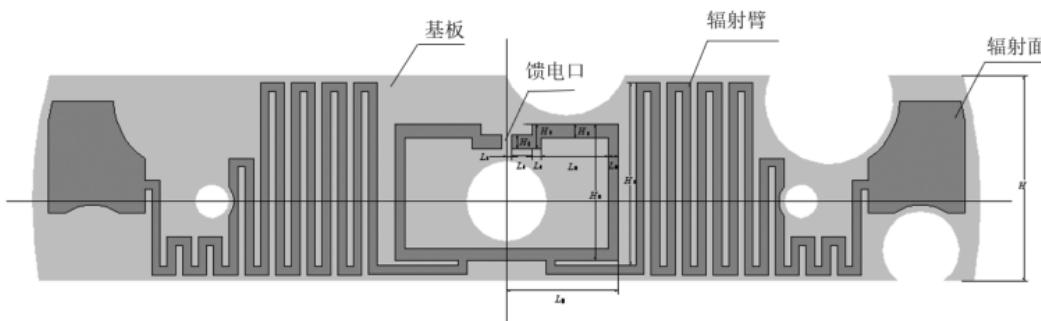


图 4 标签天线结构模型图

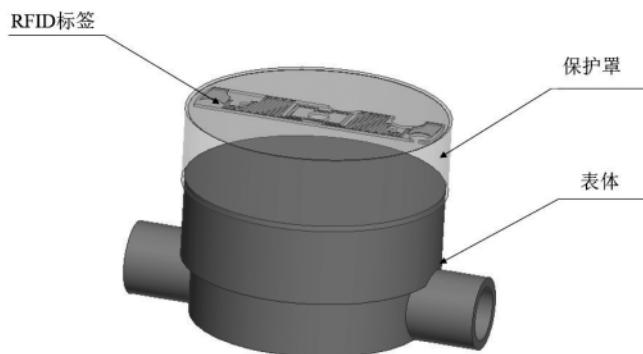


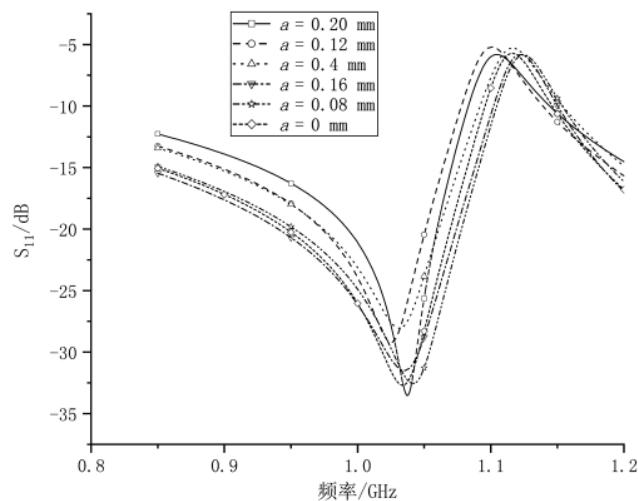
图 5 干式水表结构模型图

析转化为对变量 a 、 b 进行相关仿真及分析, a 和 b 的范围分别为 $a \in [0, 0.2]$, $b \in [0, 0.8]$ 。在基板结构和尺寸限制下, 该天线的主要参数范围如表 1 所示。仿真结果如图 6 和图 7 所示。

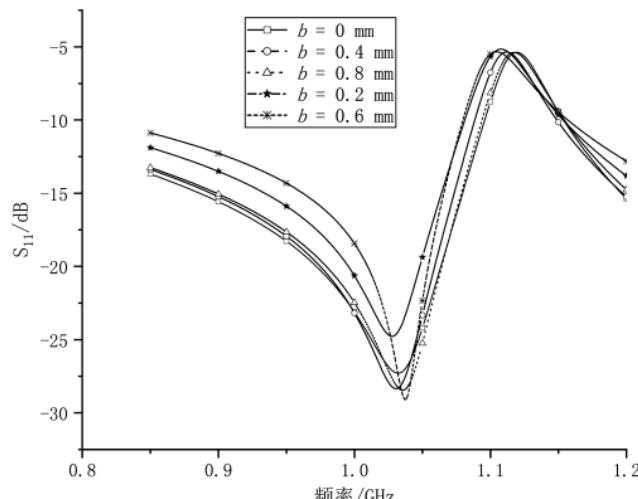
表 1 天线的主要参数取值范围

参数	取值/mm	参数	取值/mm
H	12.1	H_3	0.8
L	27.5	L_3	$5.1-b$
H_1	0.8	H_4	8.02
L_1	$0.6+b$	L_4	0.8
H_2	$1.6+a$	H_{51}	0.7
L_2	0.5	L_5	6.5

为直观表征标签天线结构参数影响, 对于 L_1 取经验值 1.2 mm。 L_1 保持不变的情况下, 对本文所设计的弯折偶极子天线结构参数 H_2 变化即动态变量 a 变化的回波损耗见图 6。从图 6 中可知, 参数 H_2 变化对天线的中心频率和回波损耗均存在着影响, 其中 $a=0.2$ mm, 即 $H_2=1.8$ mm 时中心频点达到 1.04 GHz, 回波损耗值为 -33.44 dB。当 $a=0.12$ mm, 即 $H_2=1.72$ mm 的中心频点为 1.03 GHz, 回波损耗为 -29.22 dB。故结构参数 H_2 对中心频率影响较小, 当 $H_2=1.8$ mm 时回波损耗最低。由于标签天线基板结构的限制, 结构参数 H_2 不能无限制加大, H_2 只能限制在小于等于 1.8 mm 的范围内, 且仿真时 a 的变化步长为 0.04 mm, 故该结构参数对回波损耗影响较大, 可有效提高标签天线的最大识读距离。

图 6 标签天线变量参数 a 变化的回波损耗

同样对于 H_2 取经验值 1.8 mm。 H_2 保持不变, 对天线结构参数 L_1 、 L_3 即变量参数 b 变化的回波损耗进行仿真, 其变化步长为 0.2 mm。标签天线变量参数 b 变化的回波损耗见图 7。由图 7 可知, 当 $b=0.6$ mm, 即 $L_1=1.2$ mm, $L_3=4.5$ mm, 回波损耗为 -33.452 dB, 中心频点为 1.04 GHz; 当 $b=0.4$ mm, 即 $L_1=1.0$ mm, $L_3=4.1$ mm, 其回波损耗为 -28.45 dB, 中心频点为 1.03 GHz。故结构参数 L_1 、 L_3 对

图 7 标签天线变量参数 b 变化的回波损耗

中心频率影响较小；当结构参数 $L_1=1.2\text{ mm}$, $L_3=4.5\text{ mm}$ 时, 回波损耗最低。由于变量参数 b 变化步长 0.2 mm 高于变量参数 a 变化步长 0.02 mm, 故结构参数 L_1 、 L_3 对天线的回波损耗影响较低, 对有效提高标签最大识读距离影响较小。

综上所述, 根据 L_1 、 L_3 、 H_2 对标签天线回波损耗的影响, 对其进行参数调优。调优结果: 当 $H_2=1.8\text{ mm}$ 和 $L_1=1.2\text{ mm}$, $L_3=4.5\text{ mm}$ 时回波损耗最低, 根据式(1), 标签天线得到最大的识读距离与回波损耗成负相关, 故此时标签天线得到识读距离最大。

3 实验验证与分析

3.1 标签天线实际距离测试

基于以上天线仿真试验, 本文设计标签天线的结构参数 $H_2=1.8\text{ mm}$ 和 $L_1=1.2\text{ mm}$ 、 $L_3=4.5\text{ mm}$, 其回波损耗、增益仿真结果如图 8 所示。从仿真结果可以看出天线的中心频点为 1.04 GHz, 当回波损耗低于 -15 dB, 带宽为 930 MHz~1.07 GHz。

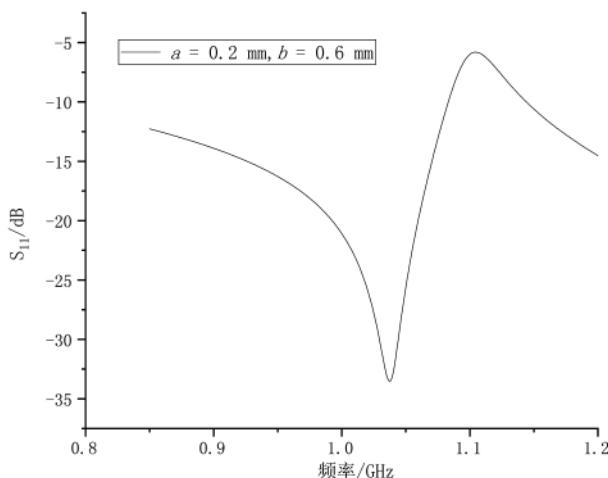


图 8 天线回波损耗仿真

将标签天线嵌入到干式水表中, 采用 Alien 定向读写器天线测试, 其工作频率为 922.5 MHz, 发射功率为 1 W, 增益为 8.6 dBi, 测试场景如图 9 所示。实际最大识读距离为 3.2 m, 满足实际需求。



图 9 标签天线的距离测试场景

3.2 标签天线最低激活功率测试

本文所设计天线应用 Ansoft HFSS16.2 仿真, 中心频点为 1.04 GHz, 实际最大识读距离为 3.2 m, 但是不能确定其实际中心频点是否在 920 MHz 附近。根据式(1), 当读距 l 确定时, 最低激活功率 P_T 与回波损耗成正相关, 即最低激活功率 P 和回波损耗 S_{11} 的趋势一致, 因此通过在微波暗室中测试裸标签和放入干式水表标签在 800 MHz~940 MHz 范围的最低激活功率验证实际环境中的中心频点。其测试场景见图 10 和图 11。

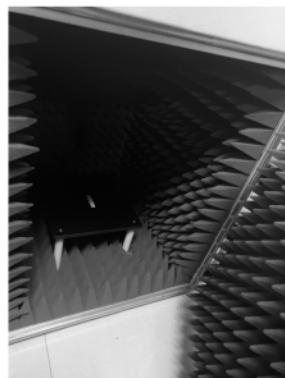


图 10 裸标签天线
测试场景



图 11 放入干式水表的
标签天线测试场景

随机抽取 6 个标签天线, 对裸标签和放入干式水表的标签进行测试, 测试结果见图 12 和图 13。根据图 12 裸标签在认可度可偏移 2 dBm 的条件下, 中心频点为 870 MHz, 带宽达 80 MHz 左右, 最低激活功率达 6.5 dBm。由图 13 可知, 放入干式水表的标签在认可度可偏移 2 dBm 的条件下, 带宽在 60 MHz 左右, 带宽变小, 中心频点右移, 为 900 MHz, 接近 920 MHz, 在国家超高频频段范围内, 且最低激活功率在 6 dBm 左右, 故通过 HFSS 仿真的中心频点为 1.04 GHz 的标签天线符合在实际应用中需求。

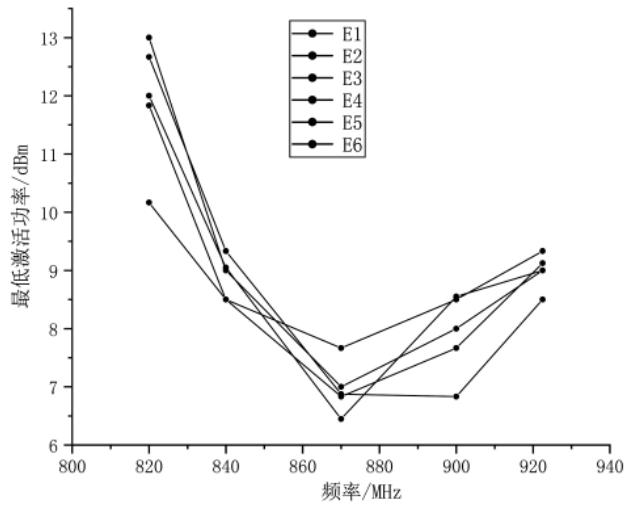


图 12 裸标签天线测试结果

(下转第 116 页)

- [4] KOVVALI N, BANAVAR M, SPANIAS A. An introduction to Kalman filtering with MATLAB examples[M]. Morgan & Claypool, 2014.
- [5] KALMAN R. A new approach to linear filtering and prediction problems[J]. Trans. ASME Ser. D. J. Basic Eng., 1960, 82: 35–45.
- [6] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊, 2009, 8(11): 32–34.
- [7] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 53–70, 121–169.
- [8] 鄂群, 门金柱, 姚科明. 贝叶斯多目标跟踪[M]. 第2版. 北京: 国防工业出版社, 2016: 37–60.

(收稿日期: 2021-03-24)

作者简介:

栾铸徵(1975-), 通信作者, 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 搜索雷达系统设计, E-mail: yangzhou0514@126.com。

俞成龙(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 火控雷达系统设计。

顾兵(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 搜索雷达系统设计。



扫码下载电子文档

(上接第104页)

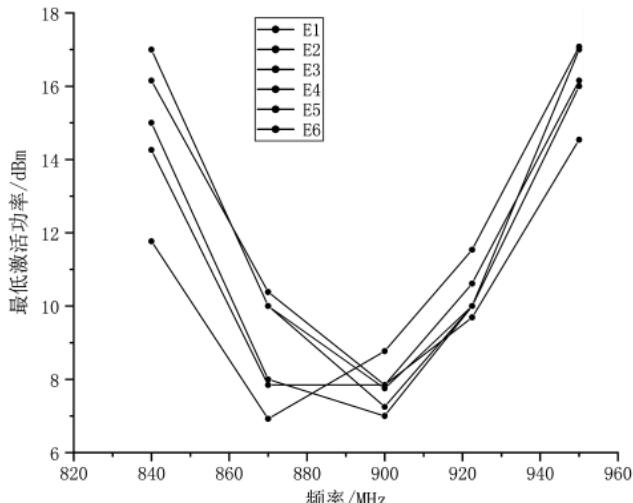


图13 放入干式水表的标签天线测试结果

4 结论

本文针对干式水表复杂的内部结构在PCB RFID弯折偶极子天线的基础上设计了一种内凹弯折的电小环结构, 尺寸为54 mm×11 mm, 读距离为3.2 m, 在完成天线小型化设计的同时满足了金属类干式水表产品追溯的现实要求。另一方面, 本文所设计的内凹弯折电小环结构为弯折偶极子天线适用不同结构的设计提供了新的思路, 未来可将其推广至更多的应用领域。

参考文献

- [1] 杨滨, 王振杰, 朱珍香, 等. 干式单流束水表流量性能误差原因分析[J]. 仪表技术, 2020(9): 24–26.
- [2] 陈硕, 刘丰, 唐旭晟, 等. 基于机器视觉技术的水表在线检定系统研究[J]. 计量学报, 2017, 38(4): 473–476.
- [3] 韩涛, Zhang Mingjun, 王红成, 等. 一种小型UHF RFID抗金属标签天线的设计[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 71–75.
- [4] 景裕文, 崔英花. 一种小型无源UHF抗金属标签天线的设计[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 13–16.
- [5] 赵犁, 郁笙, 虞俊俊. 金属介质对超高频RFID被动标签

读取效能的影响及可用于金属表面标签的设计[J]. 工程设计学报, 2006(6): 416–420, 430.

- [6] Wang Xiumei, Jiang Kaiming. Design of an UHF RFID Antimetal Tag Antenna[J]. International Core Journal of Engineering, 2020, 6(5).
- [7] 牛中奇, 朱满座, 卢智远, 等. 电磁场理论基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001.
- [8] 郭宗鑫, 张丕状, 姚金杰, 等. 基于RFID新型抗金属标签设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 115–119.
- [9] 代孝俊, 杜国宏, 邓伟, 等. 用于手术刀的抗金属无源RFID标签天线设计[J]. 微波学报, 2019, 35(2): 60–63.
- [10] 张同飞. 超高频RFID抗金属电子标签天线研究[C]//天津市电子学会、天津市仪器仪表学会. 第三十二届中国(天津)2018 IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集, 2018.
- [11] Huang Yi, BOYLE K. Antennas: from Theory to practice[M]. Wiley 2008.
- [12] 贺则昊, 洪涛, 陈家焱, 等. 智能仪表PCB集成化RFID标签天线设计优化[J]. 电子技术应用, 2020, 46(2): 62–66, 70.
- [13] 章伟. UHF RFID标签天线设计、仿真及实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [14] 李宏阳. RFID标签天线设计及工程应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [15] 赖晓铮, 张小燕, 赖声礼. 弯折线偶极子天线谐振特性的研究[J]. 微波学报, 2006(3): 18–22.
- [16] 唐智斌. 超高频RFID标签天线的设计与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

(收稿日期: 2020-12-12)

作者简介:

王翠(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为RFID天线设计。

洪涛(1970-), 通信作者, 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: RFID质量追溯系统研究, E-mail: hongtao@cjlu.edu.cn。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所