

煤矿井下物联网 UHF 射频识别标签天线设计

刘 健, 李国民

(西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对物联网在煤矿中的应用, 设计一种用于煤矿井下射频识别的被动式标签天线, 该天线采用平面曲折线偶极子结构, 天线的设计和分析是在以山西关底煤矿井下工作面参数为依据所构建的井下巷道模型中进行的, 鉴于巷道模型的侧壁可等效为电磁波的吸收边界条件, 设计采用时域有限积分技术。试验结果表明: 当射频标签从井上进入井下, 并置于中间位置时, 巷道对天线频偏的影响较小; 当标签从中间位置移到侧壁时, 巷道对天线频偏的影响较大。据此, 分别给出识别模式为阅读器固定、标签在巷道中间平移, 以及识别模式为阅读器平移、标签固定于巷道侧壁时, 标签天线的最佳结构和最优性能。

关键词: 物联网; 射频识别标签; 曲折线对称阵子; 反射系数; 方向图

中图分类号: TD679 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2012)09-0095-04

Design of UHF Frequency Identified Tag Antenna for Internet of Things in Underground Mine

LIU Jian, LI Guo-min

(School of Telecommunication and Information Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the application of the internet of things in coal mines, a passive type tag antenna applied to the radio frequency identification in underground mine was designed. A plane meanderline dipole structure was applied to the antenna. The design and analysis of the antenna was conducted in the underground mine roadway model established with the data of the underground coal mining face parameters in Shanxi Guandi Mine. Based on the absorption boundary condition of the equivalent electromagnetic wave in the sidewall of the roadway model, the time domain finite integration technology was applied to the design. The results showed that when the tag was in the underground mine from the mine surface and was in the middle position of the mine roadway, the mine roadway would have a low influence to the frequency difference of the antenna. When the tag was moved from the middle position to the sidewall, the mine roadway would have a high influence to the frequency difference of the antenna. Therefore, the identification mode individually provided was the reader fixed and the tag horizontally shifted in the middle of the mine roadway. When the identification mode was the reader with horizontal shift and the tag was fixed at the sidewall of the mine roadway, the tag would have the optimized structure and the best performances.

Key words: internet of things; UHF frequency identified tag; meanderline dipole; reflection coefficient; directional pattern

煤矿物联网是排查事故隐患, 提升安全生产, 协助矿难救援非常重要的技术措施之一^[1-2]。而物联网的核心是射频识别(RFID)技术。射频识别系统主要由载有物件信息的标签和识别标签信息的阅读器组成。工作模式包括主动式阅读和被动式阅读。由于在成本和技术复杂度方面的优势, 被动式

的应用领域更为广泛, 尤其适用于煤矿井下环境。被动式标签由天线和芯片组成, 天线性能的优劣直接影响系统的识别精度和阅读范围^[3]。对于地面环境, 已有各种标签天线的解决方案可供借鉴^[4-5]。然而, 对于井下空间, 则鲜有针对性强的方案可循。射频识别标签天线和应用的重要研究课

收稿日期: 2012-04-26; 责任编辑: 赵 瑞

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划资助项目(08JK353)

作者简介: 刘 健(1967—), 男, 陕西西安人, 讲师, 硕士。Tel: 029-83858068, E-mail: liujian02@xust.edu.cn

网络出版时间: 2012-09-17 10:33:18; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120917.1033.201209.95_025.html

引用格式: 刘 健, 李国民. 煤矿井下物联网 UHF 射频识别标签天线设计 [J]. 煤炭科学技术, 2012, 40 (9): 95-98.

题主要有：当标签从井上移至井下，且当标签贴于井下不同位置，天线性能如何变化；为适应不同巷道环境，如何设计具有可调谐功能的天线。基于此，笔者设计了应用于煤矿井下射频识别标签天线，该天线可与载有井下人员信息的芯片集成，形成人员信息标签，贴于工作服或工作帽上；也可与载有井下设备信息的芯片集成，形成设备信息标签，贴于设备上；还可与各种温度、湿度、压力和瓦斯浓度传感器集成，形成无线传感器标签，贴于矿井侧壁。标签天线通过分布于矿井内固定或移动阅读器的读取，将时间、位置、状态等人员信息，数量、位置、状态等物的信息以及传感器相关检测数据输入到物联网系统中，以提升井下人员的管理水平、矿难救援的效率、物流管理效率、产量统计精度、灾害预警能力等。笔者着重探讨了煤矿井下巷道对该天线性能的影响，并根据标签在巷道中位置的不同，给出优化后天线的性能以及标签天线的最佳解决方案。

1 标签天线特点

1) 支持工作频率在 UHF 频段的射频识别系统，在欧洲射频识别的标称频段为 866~868 MHz，北美射频识别的标称频段为 902~928 MHz，天线具备良好的阻抗频带特性。

2) 天线可在 860~960 MHz 的频段内实现简单而灵活的频率调谐，可根据应用场景的不同，调整天线结构，实现性能的最优化。

3) 天线印制在长 110 mm、宽 18 mm 的标签基片上，具有平面化、小型化的结构特点。

4) 天线设计针对射频识别在煤矿井下的 2 种应用架构：①阅读器固定、标签随物件和人的移动而移动，天线具有全向性辐射特性；②标签固定贴于井下巷道侧壁，阅读器随物件和人员的移动而移动，标签天线具有非全向性特性，其方向图的主瓣最大方向指向巷道空间。

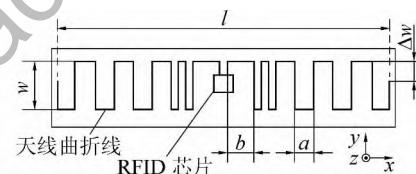
标签天线采用平面曲折线偶极子结构^[6]。曲折线增加了偶极子间的分布电容，使得天线在保持良好电磁性能的同时，具有更小的结构尺寸。在设计时，首先针对地面空间环境，设计出天线的结构，分析天线性能；其次，将天线移入煤矿井下，置于巷道中间，分析性能的变化，优化天线结构；再次，将天线贴于井下巷道的侧壁，分析性能的变

化，优化天线结构。天线的设计和分析在井下巷道模型中进行，模型模拟山西关底煤矿的工作面，数值计算采用时域有限积分技术（FIT）。天线的设计仅针对天线端口阻抗为 50Ω 的情况，而不考虑针对芯片阻抗的匹配问题^[7]，以及对金属物体的结构调整问题^[8]。

以下笔者将介绍天线的设计和数值算法，并对煤矿井下模型构建、天线性能、天线结构优化等进行分析。

2 天线设计和数值算法

鉴于全向性特性，天线结构为平面曲折线偶极子；曲折线采用非等间距，以增加天线的感性。天线材质为金属铜，厚度为 0.01 mm，印制在薄型可弯曲标签上。标签的厚度为 0.05 mm，材质为聚酯，介电常数为 3.5。天线结构如图 1 所示，这种结构可以在曲折线上打孔，伸缩偶极子的长度 Δw ，实现工作频点的调谐，以确保天线在不同材质上的最佳性能。



x—沿巷道长方向；y—沿巷道高方向；z—沿巷道宽方向；
l—偶极子总长度；w—偶极子宽度；a—曲折线节宽度；
b—曲折线与芯片馈线间的距离

图 1 标签天线结构

与地面自由空间不同，当标签位于煤矿井下时，应用环境由开放空间变为封闭空间。对于时域有限积分技术（FIT）^[9]而言，在设计天线时，则不再如自由空间一样，需要虚构一个由吸收边界（PBA）围成的计算区域，而可直接将巷道侧壁设定为吸收边界，边界介质为煤层，巷道空间为计算空间，并可根据环境的不同，调整吸收边界和计算空间的大小和形状。时域有限积分技术是设计和分析天线在煤矿井下性能有效而精确的方法之一。

根据时域有限积分技术，煤矿井下巷道空间离散生成一套剖分网格，网格为六面体，分别为基网格和伴随网格，相互正交、且相互嵌套。如果在基网格的棱边上、面上分别定义电场 e 和磁通 Φ ；在伴随网格的棱边上、面上分别定义磁场 h 和电通 d ，则离散后的麦克斯韦积分方程为

$$\begin{cases} \mathbf{C}e = -d\Phi/dt \\ \tilde{\mathbf{C}}h = (dd/dt + j) \\ \tilde{\mathbf{S}}d = q \\ \mathbf{S}\Phi = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中: 矩阵 \mathbf{C} 和 $\tilde{\mathbf{C}}$ 为离散旋度算子, 矩阵 \mathbf{S} 和 $\tilde{\mathbf{S}}$ 为离散梯度算子, 这些算子的拓扑结构与结构和边界相关, 只包含 0、1、-1 这 3 个元素; j 和 q 分别为离散电流和离散电荷。

采用煤矿井下巷道为吸收边界时, 煤层介质的影响由本构关系决定。离散后的本构关系为

$$\begin{cases} d \approx \mathbf{M}_e \\ b \approx \mathbf{M}_\mu h \\ j \approx \mathbf{M}_\sigma e + j_s \end{cases} \quad (2)$$

其中: \mathbf{M}_e 和 \mathbf{M}_μ 为介质的介电常数和磁导率矩阵; j_s 为离散的表面电流。此时, 煤层介质的介电常数决定吸收边界 e 和 d 的值; 煤层介质的磁导率决定 h 和 Φ 的值。为提升精度, 计算采用边界面网格加密技术。

3 煤矿井下模型和天线性能分析

为使设计和研究具有实用性和针对性, 井下巷道模型采用山西关底煤矿工作面的参数^[10-11], 模型为矩形横截面的波导结构, 宽度 3 m, 高度 3 m, 侧墙介质的介电常数与顶底面介质的介电常数相同, 模型的边墙为非理想的电边界, 介电常数为 4.5。这一模型满足射频识别在 915 MHz 频点、等效全向辐射功率 EIRP 为 4 W, 阅读距离至少为 2.5 m, 以及在 868 MHz、EIRP 为 3.3 W, 阅读距离至少为 2.2 m 的要求。研究表明, 巷道模型的横截面尺寸对频点位置影响较小, 而对频点谐振深度影响较大。根据煤矿井下巷道模型, 天线的结构尺寸如下: $l = 100$ mm, $a = 5.7$ mm, $b = 9$ mm, $w = 14$ mm。以天线位于巷道中间位置时的结构尺寸为模型, 采用时域有限积分技术, 针对位于地面自由空间、巷道中间位置以及贴于巷道侧壁 3 种情况, 计算天线的端口反射系数, 计算结果如图 2 所示。可见, 当天线由井上空间进入到井下空间, 置于巷道中间位置时, 在 800 ~ 900 MHz 频带内, 天线的工作频点有变化, 但在 50 MHz 内变化。因此, 可调整天线尺寸来调谐工作频点。如图 3 所示, 当偶极子伸缩长度 Δw 分别为 0、-6 和 -12 mm 时,

天线的工作频点对应 874、897 和 920 MHz, 覆盖 866 ~ 868 MHz 以及 902 ~ 928 MHz 的射频识别频段。当标签从巷道中间移到侧壁时, 天线频点变化较大, 须对结构进行优化, 以满足标签贴于巷道侧壁时天线的性能。

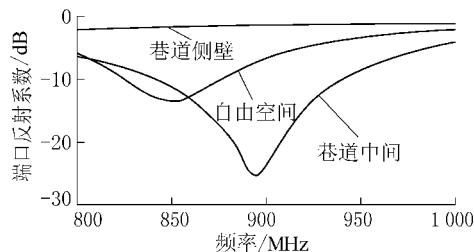


图 2 反射系数随安放场景的变化曲线

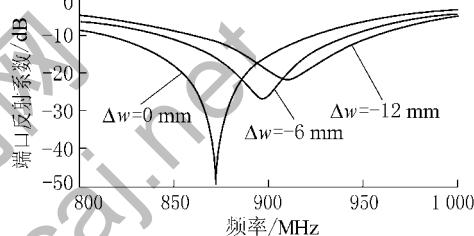


图 3 反射系数随偶极子臂长的变化曲线

4 天线结构优化和性能分析

1) 如图 2 所示, 当标点从巷道的中间位置移到侧壁, 并贴于侧壁之上时, 天线的工作频点偏向低频段。因此, 可以通过压缩结构尺寸来提升工作频点。优化后的天线结构如图 4 所示, 其尺寸如下: $l = 73$ mm, $a = 5$ mm, $b = 7$ mm, $w = 4$ mm。可通过调整天线末端曲折线节的长度 Δa , 调谐天线的频率, 当 Δa 取 3、5 和 7 mm 时, 对应的频点分别为 925、880 和 865 MHz, 可覆盖 866 ~ 868 MHz 以及 902 ~ 928 MHz 射频识别频段, 如图 5 所示。

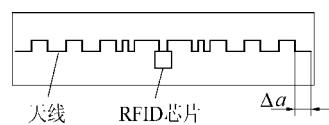


图 4 优化的井下巷道侧壁射频识别标签天线结构

2) 分析巷道对天线方向性的影响。在 900 MHz 频点, 天线的辐射功率随方向角的变化曲线如图 6 所示。图 6 为天线在 $y-z$ 平面的二维极坐标方向图, 其极轴数值为归一化的辐射功率电平值, 单位为 dBi。对比表明: 当标签在巷道中间时, 天线的方向图更接近全向辐射特性, 巷道对方向性的影响较小; 反之, 当标签在巷道侧壁时, 天

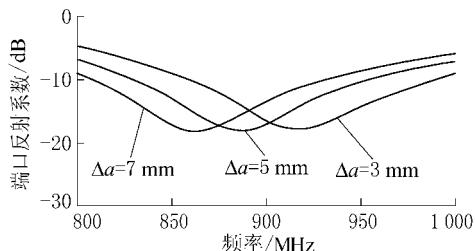


图5 反射系数随巷道侧壁天线偶极子臂长的变化曲线
线方向图呈现波瓣分裂，全向辐射特性恶化，巷道对天线辐射场的分布产生影响，导致天线的辐射能量向巷道内部空间集中。

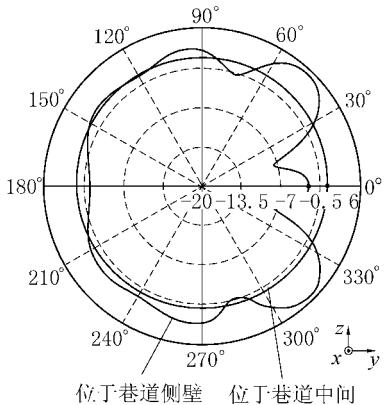


图6 天线辐射方向 ($y-z$ 平面)

5 结语

通过对平面曲折线偶极子标签天线和设计以及在煤矿井下巷道内性能的研究发现：当采用阅读器固定、标签在巷道中间平移的识别模式时，若标签从井上进入井下，巷道对天线性能的影响所引起的频偏较小，可采用在偶极子终端支节上打孔的方式，微调天线结构，修正工作频点，获得在射频识别系统的UHF频段（欧洲866~868 MHz、北美902~928 MHz）内的最佳接收和识别；当采用标签固定于巷道侧壁，阅读器移动的识别模式时，巷道对标签天线影响所产生的频偏较大，只能通过结构的改变，修正工作频点，以实现最佳的接收和识别。研究亦表明：巷道对位于其侧壁的标签天线的辐射分布影响明显，在设计和应用标签天线时，这一影响应予以足够的重视。该设计采用山西关底煤矿的巷道模型，其结论具有一定的技术、工程参考价值。需要指出的是，该设计仅对天线本身及其巷道影响进行了研究，并未涉及具体射频识别芯片的性能，标签结构中不包括用于阻抗调配的附加支节，为此，尚需进一步的研究和探讨。

参考文献：

- [1] 孙彦景，钱建生，李世银，等. 煤矿物连网络系统理论与关键技术 [J]. 煤炭科学技术，2011，39（2）：69~72.
- [2] 王军号，孟祥瑞. 物联网感知技术在煤矿瓦斯监测系统中的应用 [J]. 煤炭科学技术，2001，39（7）：64~69.
- [3] Finkenzeller K, 陈大才. 射频识别（RFID）技术 [M]. 2 版. 北京：电子工业出版社，1999.
- [4] Rida A H, Wang L, Based S. Design, Development and Integration of Novel Antennas for Miniaturized UHF RFID Tags [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagation, 2009, 57 (11): 3450~3457.
- [5] 柏科文. 射频识别标签天线的研究 [D]. 成都：电子科技大学，2009：24~40.
- [6] Balanis C A. Antenna Theory Analysis and Design [M]. 3 edition. Hoboken N J: John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [7] Marrocco G. The Art of UHF RFID Antenna Design: Impedance-Matching and Size-Reduction Techniques [J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 2008, 50 (1): 66~79.
- [8] Kim J S, Choi W, Choi G Y. UHF RFID Tag Antenna Using Two PIFAs Embedded in Metallic Objects [J]. Electronic Letters, 2008, 44 (20): 1181~1182.
- [9] Clemens M, Weiland T. Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Techniques [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2001, 32: 65~87.
- [10] Alfred G E, Robert L L, PETER F S. Theory of the Propagation of UHF Radio Waves [J]. IEEE Transaction on Antenna and Propagation, 1975, 23 (2): 192~205.
- [11] Zhang Y, Zheng G X, Sheng J H. Radio Propagation at 900 MHz in Underground Coal Mines [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2001, 49 (5): 757~762.

为方便读者系统查阅目前物联网在矿山领域研究及应用的相关文献，除本次组织的“物联网技术与应用”专题外，以下列举出近2年《煤炭科学技术》发表的有关物联网的部分文献目录，供读者参考。

- ◆ 孙彦景，钱建生，李世银，等. 煤矿物连网络系统理论与关键技术 [J]. 煤炭科学技术，2011，39（2）：69~72，79.
- ◆ 钱建生，马姗姗，孙彦景. 基于物联网的煤矿综合自动化系统设计 [J]. 煤炭科学技术，2011，39（2）：73~76.
- ◆ 王军号，孟祥瑞. 物联网感知技术在煤矿瓦斯监测系统中的应用 [J]. 煤炭科学技术，2011，39（7）：64~69.
- ◆ 张申，赵小虎. 论感知矿山物联网与矿山综合自动化 [J]. 煤炭科学技术，2012，40（1）：83~86，91.
- ◆ 王峰，路小琪，何凤有，等. 基于物联网的矿井提升机感知系统设计 [J]. 煤炭科学技术，2012，40（3）：83~86.
- ◆ 徐琨. 基于EPC GID-96矿用物联网标签编码方案研究 [J]. 煤炭科学技术，2012，40（5）：70~73.