

轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统的功率传递特性

胡圣波^{1,2}, 司兵³, 舒恒^{1,2}

(1. 贵州师范大学智能信息处理研究所, 贵阳 550001; 2. 贵州省教育厅 RFID 与传感网络工程中心, 贵阳 550001; 3. 贵州省新技术研究所, 贵阳 550001)

摘要: 轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统在轮胎生命周期管理和安全监控中将发挥十分重要的作用。为此, 该文研究了轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统功率传递特性。轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统中, 读写器和电子标签间的无线链路需要穿过空气和轮胎, 路径损耗主要包括空气-轮胎界面间的反射损耗和轮胎中的衰减。基于轮胎介电常数和空气-轮胎界面的边界条件, 研究轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统功率传递特性, 提出了一种基于终端开路同轴探针的轮胎介电常数的比对测量方法, 建立了轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统功率传递模型。数值分析表明, 提出的基于终端开路同轴探针的轮胎介电常数的比对测量方法误差小, 测量、仿真的反射系数差的绝对值小于 0.04, 而为了提高轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统读取距离和可靠性, 读写器天线应采用水平极化方式, 并且尽可能直视电子标签; 应合理设计电子标签嵌入轮胎的深度, 避免功率传递函数处于波谷位置。该研究可为轮胎嵌入式超高频无源 RFID 电子标签与胎压监测系统的设计提供参考。

关键词: 轮胎, RFID, 介电常数, 功率传递, 嵌入式

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.019

中图分类号: TN915

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0150-09

胡圣波, 司兵, 舒恒. 轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统的功率传递特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 150-158.

Hu Shengbo, Si Bing, Shu Heng. Power transmission performance for ultra high frequency embedded RFID system in tire[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 150-158. (in Chinese with English abstract)

0 引言

超高频无源 RFID (radio frequency identification devices) 电子标签作为传感节点, 可以避免传感节点的大型化以及采用电池供电。因此, 轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统已在欧美发达国家汽车轮胎的生命周期管理中得到广泛应用^[1-3]。例如, 根据北美汽车联合会 (AIAG) B-11 标准, Michelin 公司开发了轮胎嵌入式超高频无源 RFID 电子标签^[4]。此外, 为提高轮胎和轮胎操控系统的可靠性, 轮胎嵌入式超高频无源 RFID 电子标签与胎压监测系统的结合也引起了高度关注^[5-6]。

但是, 超高频无源 RFID 电子标签嵌入轮胎后将面临许多挑战。其中, 传输介质由自由空间变成轮胎后, 由于轮胎成分包含 6%~10% 的碳黑, 而碳黑是一种良导体, 会反射电磁波、使标签天线阻抗失谐, 从而大大降低系统读取距离。如 Michelin 公

司将超高频无源电子标签嵌入轮胎后, 电子标签读取距离由 60.96 cm (24 in) 下降到 7.62 cm (3 in)^[4]。普通 RFID 系统与轮胎嵌入式 RFID 的主要区别就在于轮胎介质, 而轮胎介质将使读写器发送的 RF 功率衰减, 从而影响系统读取距离和可靠性。因此, 为提高系统读取距离和可靠性, 研究轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统功率传递特性十分重要。

RFID 系统需要在读写器和电子标签间建立双向传播链路。前向链路中, 读写器向电子标签发送射频功率和数据; 后向链路中, 电子标签接收读写器发送的射频功率, 并采用后向散射调制的方式将标签数据传回读写器^[7]。

取决于读写器和电子标签通信环境, 文献[7-12]研究了包括路径损耗、衰落和功率传递系数在内的信道特性。实际上, 电子标签嵌入轮胎后, 读写器和电子标签间建立的双向链路需要穿越空气和轮胎 2 种不同介质。可见, 轮胎嵌入式 RFID 传播路径总损耗包括空气和汽车轮胎边界引起的反射损耗、汽车轮胎引起的衰减损耗以及电子标签天线引起的扩散损耗, 而这些损耗都与汽车轮胎的介电常数、空气和轮胎边界条件密切相关。因此, 本文将在分析轮胎介电常数的基础上, 研究超高频无源嵌

收稿日期: 2013-04-10 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 国家自然科学基金 (61362004), 国家物联网发展专项资金 (2011081), 贵州 RFID&WSN 创新团队

作者简介: 胡圣波 (1964-), 男 (汉族), 贵州, 教授, 博士, 射频技术。贵阳 贵州师范大学智能信息处理研究所, 550001。

Email: hsb@nssc.ac.cn

入式 RFID 系统功率传递特性并进行数值分析，以期对轮胎嵌入式超高频无源 RFID 电子标签与胎压监测系统的设计提供参考。

1 轮胎介电常数

1.1 介电常数

介电常数是表征材料介电特性的物理量，它直接反应材料边界电磁波的反射特性，以及材料内部电磁能量的衰减特性。相对于自由空间，各向同性材料的介电常数 ϵ^* 可表述成

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

式中， ϵ' 是 ϵ^* 的实部，表征介电材料储存的电磁能量；虚部 ϵ'' ，即介电损耗因子，表征介电材料吸收和衰减的电磁能量。而更重要的参数则是损耗角的正切 $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ [13-15]，它表征介电材料的相对损耗。

1.2 介电常数测量

测量材料介电常数的方法主要有终端开路同轴探针反射法、波导传输线法和谐振腔法[16-19]。与波导传输线法和谐振腔法相比，终端开路同轴探针反射法不需要加工特殊的测试设备，也不需要材料样品作破坏性成型处理，因此，终端开路同轴探针反射法运用得非常普遍[20-21]。

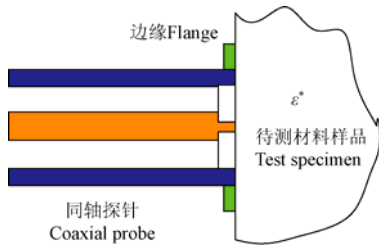


图 1 终端开路同轴探针反射测量
Fig.1 Open-ended coaxial probe

图 1 是终端开路同轴探针反射法示意图。这种方法要求探针与待测材料有很好的接触，而探针与待测材料间极小的空隙也会引起较大的测量误差。所以，终端开路同轴探针反射法要求探针与待测材料有很好的接触，并且待测材料要求平整。

如果终端开路同轴探针反射法测量的反射系数 $\Gamma = \Gamma' - j\Gamma''$ ，则待测材料介电常数可由下式计算得到[22-23]

$$\epsilon' = (A_e f)^{-1} \left(\frac{-2\Gamma''}{(1+\Gamma')^2 + \Gamma''^2} \right) \quad (3)$$

$$\epsilon'' = (A_e f)^{-1} \left(\frac{1-\Gamma'^2 - \Gamma''^2}{(1+\Gamma')^2 + \Gamma''^2} \right) \quad (4)$$

式中， A_e 是经验系数，取决于探针特性阻抗和待测

材料的大小； f 为工作频率，Hz。

因此，可采用比对的方法测量待测材料的介电常数。方法是，第一步：选定某个工作频率，选取已知介电常数 $\epsilon_1^* = \epsilon_1' - j\epsilon_1''$ 的标准材料，测量这个标准材料的反射系数为 $\Gamma_1 = \Gamma_1' - j\Gamma_1''$ ；第二步，在同样工作频率上，选取与标准材料同样大小的待测材料，如果测得的反射系数为 $\Gamma_2 = \Gamma_2' - j\Gamma_2''$ ，则可推导待测材料的介电常数为

$$\epsilon_2'' = \epsilon_1'' \left(\frac{-2\Gamma_2''}{(1+\Gamma_2')^2 + \Gamma_2''^2} \right) / \left(\frac{-2\Gamma_1''}{(1+\Gamma_1')^2 + \Gamma_1''^2} \right) \quad (5)$$

$$\epsilon_2' = \epsilon_1' \left(\frac{1-\Gamma_2'^2 - \Gamma_2''^2}{(1+\Gamma_2')^2 + \Gamma_2''^2} \right) / \left(\frac{1-\Gamma_1'^2 - \Gamma_1''^2}{(1+\Gamma_1')^2 + \Gamma_1''^2} \right) \quad (6)$$

1.3 轮胎介电常数测量装置

一般地，轮胎由胎冠、胎肩、胎侧，轮胎依附在支撑钢圈上，可在轮胎硫化、成型时嵌入 RFID 电子标签。图 2 是轮胎胎侧和 RFID 电子标签嵌入轮胎后的示意图，电子标签与轮胎钢圈平行。RFID 电子标签读取距离取决于轮胎介电常数、嵌入轮胎的位置[1]。

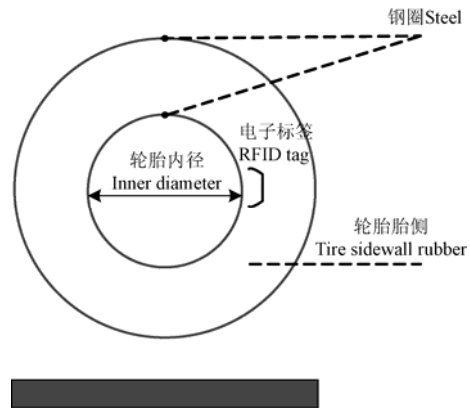


图 2 电子标签嵌入轮胎
Fig.2 Tag embedded in tire

终端开路同轴探针反射法测量轮胎介电常数应满足如下条件：1) 切割的轮胎态侧样品截面要平整，表面要平滑；2) 轮胎态侧样品具有半无限厚度，使电磁场的穿透厚度比轮胎态侧样品厚度小得多；3) 确保探针与轮胎态侧样品截面之间无空隙，使探针紧压轮胎态侧样品，直到矢量网络分析仪测量结果没有太大的变化。图 3 是一种测量装置，轮胎胎侧样品固定在探针架上，调节上下、左右紧固螺钉尽可能使探针与轮胎态侧样品截面之间无空隙。

1.4 基于 HFSS 的介电常数测量仿真验证

为验证终端开路同轴探针法测量介电常数的有效性，可采用基于 HFSS (high frequency structure

simulator) [24]的终端开路同轴探针测量模型仿真比较。具体方法是, 第一步, 基于 1.2 节提出测量方法, 确定待测材料的介电常数。第二步, 根据第一步确定的待测材料介电常数, 采用基于 HFSS 的终端开路同轴探针测量模型仿真计算待测材料反射系数。最后, 测量待测材料反射系数, 并与仿真计算反射系数相比较。

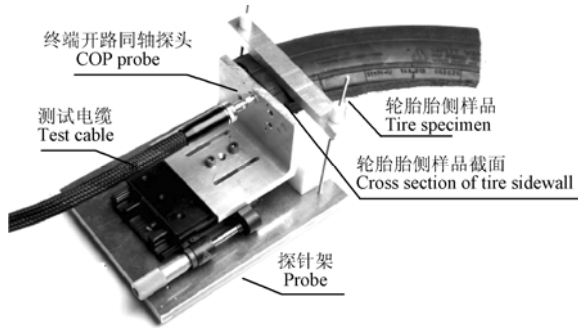


图 3 轮胎介电常数测量装置
Fig.3 Measurement setup for permittivity

终端开路同轴探针法测量介电常数的 HFSS 仿真模型如图 4 所示。图 4 中, 终端开路同轴探针由镀金黄铜的外导体和内导体组成, 内、外导体间填充聚四氟乙烯绝缘材料, 轮胎材料为一个圆柱体。为降低误差, 可用一个空气盒将以上仿真场景罩上。

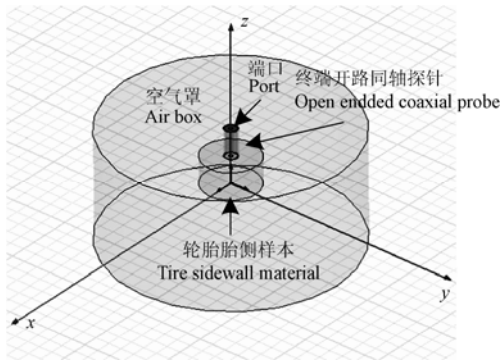


图 4 轮胎介电常数测量 HFSS 模型
Fig.4 Model of measurement setup for permittivity in HFSS

2 超高频无源 RFID 链路

无源 RFID 系统工作原理类似雷达。读写器通过前向链路向电子标签发送射频信号, 电子标接收读写器发送过来的射频信号, 转化成能量, 并由后向链路将标签数据传回读写器。

2.1 RFID 功率吸收系数

RFID 标签由芯片和天线组成。天线阻抗与芯片阻抗之间是否匹配决定了读写器发送的功率是被标签吸收或者反射。由于设计原因, 前、后向链路中, 芯片阻抗都不一样 [25-26], 即在 2 个不同值之

间切换, 如图 5 所示。一般地, 为优化前向链路的功率传递, 总使前向链路中芯片阻抗与天线阻抗共轭匹配, 即芯片完全吸收传递的功率。表明前向链路中芯片阻抗与天线阻抗共轭匹配情况, 可用功率吸收系数 τ 描述 [7,25]

$$\tau = \frac{4\text{Re}[Z_{ant}]\text{Re}[Z_{chip1}]}{\text{Re}[Z_{ant} + Z_{chip1}]^2 + \text{Im}[Z_{ant} + Z_{chip1}]^2} \quad (7)$$

式中, Re 为实部, Im 为虚部; Z_{ant} 是标签天线输入阻抗, Ω ; Z_{chip1} 是芯片阻抗, Ω 。功率吸收系数 τ 是芯片吸收到的功率与天线提供功率的比值。 τ 的最大值为 1, 表示天线提供功率被芯片完全吸收; τ 的最小值为 0, 表示天线提供功率完全没有被芯片吸收; 而所谓标签天线带宽就是满足某个 τ 值的功率频率范围。这也说明, 为提高 RFID 系统工作性能, 需要特别设计好电子标签天线。

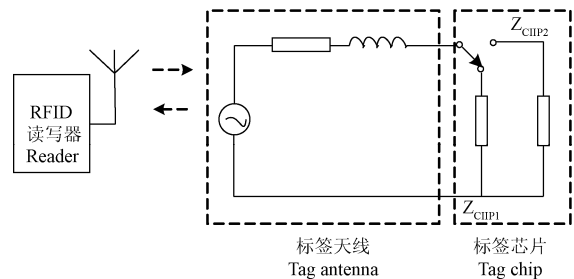


图 5 RFID 系统
Fig.5 RFID system with emphasis on RFID tag

2.2 RFID 前、后向链路传输系数

前向链路中, RFID 电子标签芯片吸收的功率可表示为

$$P_{chip} = \tau P_{tag} = \tau |S_{21}|^2 P_{TX.reader} \quad (8)$$

式中, P_{tag} 是标签天线输出端所能提供的功率, dBmW; S_{21} 是上行链路的传递系数; $P_{TX.reader}$ 是读写器发送的信号功率, dBmW。为保证可靠接收, P_{chip} 必须高于电子标签灵敏度, dBmW。

而后向链路中, 读写器接收到的标签信号功率可表示为

$$P_{RX.reader} = |S_{12}|^2 \eta P_{tag} = |S_{12}|^2 \eta |S_{21}|^2 P_{TX.reader} \quad (9)$$

式中, S_{12} 是后向链路的传递系数, η 是后向散射链路的调制效率。调制效率定义为标签散射功率与天线端口提供的全部功率之比, 这个值取决于天线阻抗 Z_{ant} 和芯片阻抗 Z_{chip1} 。

传递系数 S_{21} 和 S_{12} 取决于读写器和电子标签天线的特性以及信道特性, 比如路径损耗和衰落等。而真实的传输环境中, 前后向链路都是对称的, 即前后向功率传输系数一样, $|S_{12}|^2 = |S_{21}|^2$ 。

3 轮胎嵌入式超高频无源 RFID 功率传递模型

3.1 时隙波动方程

在时谐电场中，设介质的介电常数为 ε^* ，电导率和磁导率分别为 σ 、 μ ，场源大小随时间按正弦规律变化，变化角频率为 ω 。对于电磁波沿+z 方向传播，取时谐因子为 $e^{j\omega t}$ ，则时谐形波动方程可表示为^[27]

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \gamma^2 \mathbf{E} = 0 \quad (10)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \gamma^2 \mathbf{H} = 0 \quad (11)$$

$$-\gamma^2 = \omega^2 \mu \varepsilon^* (1 - j \tan \delta) = k^2 (1 - j \tan \delta) = \omega^2 \mu \varepsilon^* \quad (12)$$

式中， \mathbf{E} 是电场强度， \mathbf{H} 是磁场强度， γ 是复传播常数，介电常数为 $\varepsilon^* = \varepsilon'(1 - j \tan \delta)$ ， $k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon'}$ ， k 是对应的无损介质的波常数。

对于满足式 (10)、(11) 的平面波，由于 $\nabla^2 = \partial^2 / \partial z^2$ ，则上述方程的解可以表述为 $\mathbf{E}e^{\gamma z}$ 和 $\mathbf{H}e^{\gamma z}$ 的形式，则电磁场的瞬时值可表述为

$$\vec{E} = \text{Re} \{ \mathbf{E} e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \} \quad (13)$$

$$\vec{H} = \text{Re} \{ \mathbf{H} e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \} \quad (14)$$

式中介质的衰减因子 α 和相常数可分别表示为^[15]

$$\alpha = \omega \left(\frac{\mu \varepsilon'}{2} \right)^{1/2} \left[(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1 \right]^{1/2} \quad (15)$$

$$\beta = \omega \left(\frac{\mu \varepsilon'}{2} \right)^{1/2} \left[(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} + 1 \right]^{1/2} \quad (16)$$

从式 (13) 还可见，在介质材料中，电场强度大小随距离材料表面距离 z 增大而减小，并可写成

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \cos \beta z \quad (17)$$

写成功率形式

$$P = P_0 |\cos 2\beta z| e^{-2\alpha z} \quad (18)$$

3.2 轮胎嵌入式 RFID 系统功率传递

正如前述，与自由空间不同，轮胎嵌入式 RFID 系统传输链路需要穿越空气和汽车轮胎，即电磁波在轮胎与自由空间交界面的入射角为 θ_i ，如图 6 所示。

对于图 6a 所示自由空间场景，RFID 电子标签芯片吸收的功率为

$$\begin{aligned} P_{chip} &= \tau P_{tag} = \tau |S_{21}|^2 P_{TX.reader} \\ &= \tau \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 G_T P_{TX.reader} \end{aligned} \quad (19)$$

式中， λ 是电磁波在自由空间中的波长，m； R 是读写器与电子标签的距离，m； G_T 是电子标签天线

增益，dBi。

而对于图 6b 所示轮胎嵌入式场景，RFID 电子标签芯片吸收的能量则应修正为

$$\begin{aligned} P_{chip} &= \tau P_{tag} = \tau |S_{21}|^2 P_{TX.reader} \\ &= \tau \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1} \right)^2 |T_c|^2 |\cos 2\beta l| G_T e^{-2\alpha l} P_{TX.reader} \\ &= \tau \left(\frac{\lambda}{4\pi R_1} \right)^2 G_i T(f, \theta_i, l) P_{TX.reader} \end{aligned} \quad (20)$$

式中， $T(f, \theta_i, l) = |T_c|^2 |\cos 2\beta l| e^{-2\alpha l}$ ， R_1 是电磁波在自由空间中传播的距离，m； T_c 是自由空间与轮胎交界面电磁波的功率传递系数； $T(f, \theta_i, l)$ 是电磁波在轮胎中功率传递函数，取决于电磁波频率和入射角； α 是损耗因子，取决于轮胎的介电特性； l 是电磁波在轮胎中传播的距离，m。

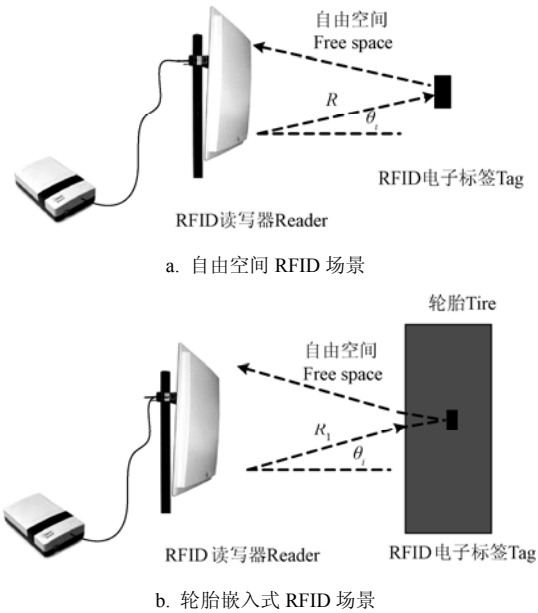


图 6 RFID 工作场景

Fig.6 RFID scenarios in free space and embedded in tire

如图 6b 中，当电磁波以入射角 θ_i 穿过轮胎与自由空间交界面时，需要考虑水平极化和垂直极化 2 种情况。

因此，根据边界条件：自由空间与轮胎交界面 $z=0$ ，电场、磁场正切分量连续，可以推得 T_c 为

情形一：水平极化

$$T_c = \frac{2\eta_1 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_0 \cos \theta_i} \quad (21)$$

情形二：垂直极化

$$T_c = \frac{2\eta_1 \cos \theta_i}{\eta_1 \cos \theta_i + \eta_0 \cos \theta_i} \quad (22)$$

4 数值分析及讨论

4.1 轮胎介电常数

4.1.1 轮胎介电常数的比对测量

轮胎介电常数的测量包括 2 个步骤:

第一步: 选取标准轮胎 CPC2205/55 R16 91V 中的一段, 测量反射系数。

频率为 866 MHz 时, 这种标准轮胎的介电常数为 $\epsilon' = 3.5$, $\epsilon'' = 0.105$ 。采用图 3 测量装置和 AV3629/A 微波矢量网络分析仪, 测得 100 MHz~5 GHz 时阻抗 Smith 圆图, 如图 7 所示。

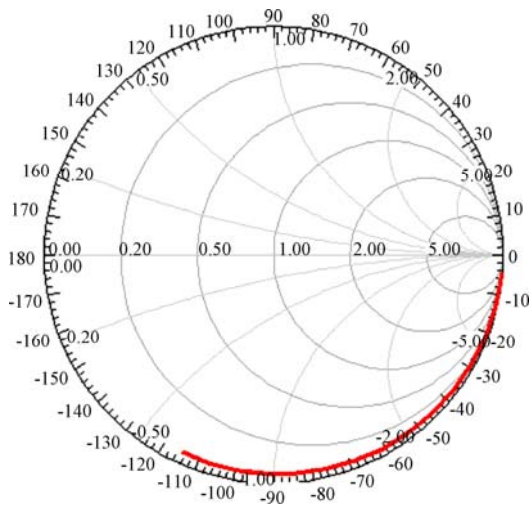


图 7 标准轮胎 Smith 反射系数圆图

Fig.7 Reflection coefficients Smith chart for standard tires.

第二步: 选取与标准材料同样大小的待测轮胎 (选取贵州轮胎股份有限公司 GL 274A 子午线轮胎), 测量反射系数。

采用图 3 测量装置和 AV3629/A 微波矢量网络分析仪, 测得 100 MHz~5 GHz 时阻抗 Smith 圆图, 如图 8 所示。根据式 (5)、(6), 可比对计算待测轮胎频率为 866 MHz 时的介电常数为 $\epsilon' = 3.78$, $\epsilon'' = 0.14$ 。

4.1.2 基于 HFSS 的仿真验证

根据 1.4 节论述的基于 HFSS 介电常数测量仿真验证方法, 仿真参数设置为:

- 1) 终端开路同轴探针。镀金黄铜内导体半径为 0.65 mm, 镀金黄铜外导体厚 0.35 mm。内、外导体间填充物为聚四氟乙烯绝缘材料, 厚度为 1.35 mm, 介电常数 ϵ' 为 2.1, 损耗因子 $\tan \delta = 0.001$ 。
- 2) 轮胎。半径为 10 mm, 高度为 10 mm。
- 3) 激励端口设为 wave, 阻抗为 50 Ω 。
- 4) 初始频率为 100 MHz, 截止频率为 5 GHz。
- 5) 轮胎介电常数为 $\epsilon' = 3.78$, $\epsilon'' = 0.14$ 。

基于以上设置, HFSS 仿真的反射系数 Smith 阻抗图如图 9 所示。图 10 为测量、仿真反射系数

实部、虚部差的绝对值示意, 图 11 为测量、仿真反射系数差的绝对值。比较图 10、图 11 可见, 误差都很小 (小于 0.04)。

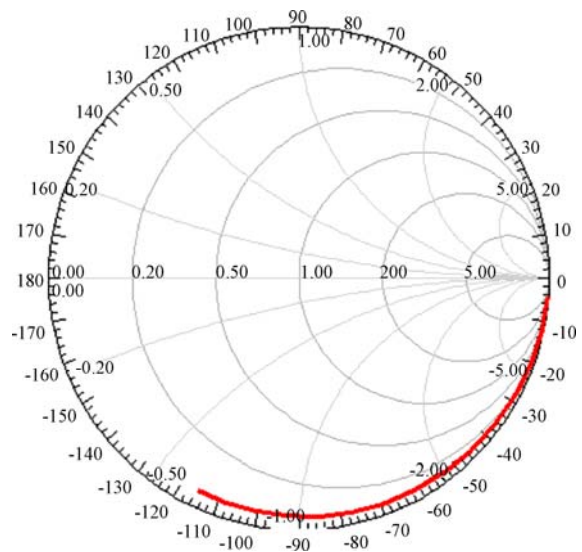


图 8 待测轮胎 Smith 反射系数圆图

Fig.8 Reflection coefficients Smith chart for test tires.

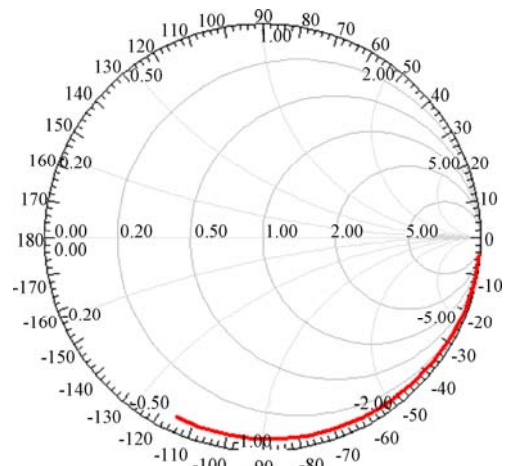


图 9 待测轮胎 Smith 反射系数仿真圆图

Fig.9 Simulation reflection coefficients Smith chart for tests tires

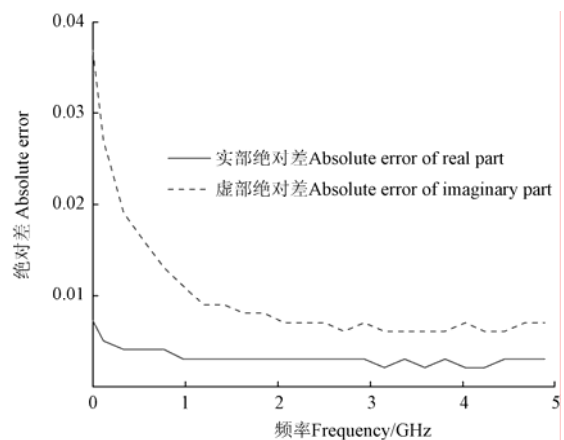


图 10 测量、仿真反射系数实部、虚部差的绝对值

Fig.10 Absolute error values of real part and imaginary part of measured and simulated reflection coefficient

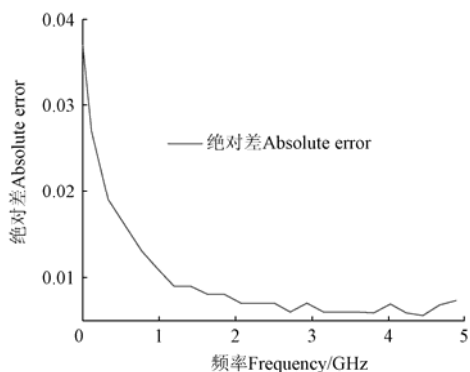


图 11 反射系数差的绝对值

Fig.11 Absolute error values of reflection coefficient

4.2 入射角 θ_i 对功率传递系数 T_c 的影响

根据 4.1 节仿真确定的 GL 274A 子午线轮胎在频率为 866 MHz 时对应的介电常数 $\epsilon' = 3.78$ ， $\epsilon'' = 0.14$ ，入射角设为 $0 \sim 90^\circ$ ，图 12 是水平极化和垂直极化时 T_c 关于入射角的变化曲线。

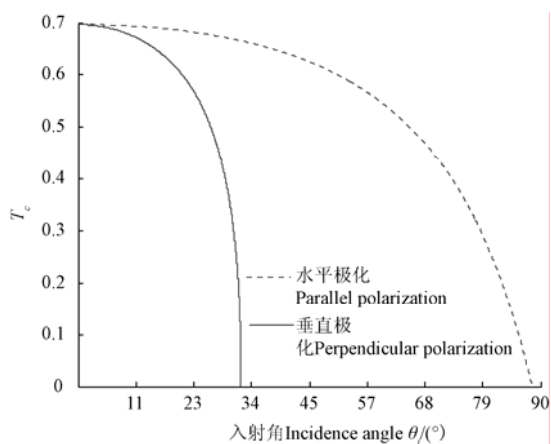


图 12 入射角 θ_i 对功率传递系数 T_c 的影响

Fig.12 Effects of θ_i on power transfer coefficient T_c

图 12 表明，轮胎嵌入式 RFID 系统功率传递不但取决于读写器增益，而且取决于读写器天线极化方式，这与文献[9,25,30]结论一致。更需要注意的是，垂直极化功率传递比水平极化下降更快。同时，无论读写器天线是水平极化方式，还是垂直方式，轮胎嵌入式 RFID 系统功率传递能力均随入射角的增加而减小。

这一结论可从图 13 所示环境中试验验证得到。图 13 中，远望谷公司 XC-RF807 读写器，读写器载频设为 866 MHz、功率设为 30 dBmW；选用远望谷 XC-AF26 型线极化天线（水平极化、垂直极化各一个），其增益大于 12.0 dBi，频率范围 840~868 MHz；GL274A 子午线轮胎与读写器距离为 1.0 m，标签嵌入轮胎深度为 9.0 mm。系统识别率^[28]与入射

角之间关系测试结果如图 14 所示。



图 13 测试环境

Fig.13 Experiment setup

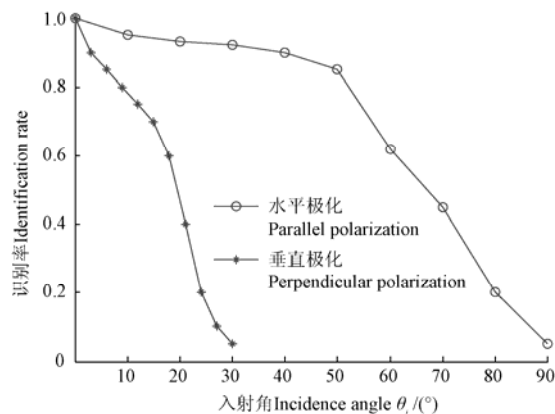


图 14 入射角与识别率之间关系

Fig.14 Relations θ_i and identification probability.

图 14 表明，轮胎嵌入式 RFID 系统识别率取决于读写器天线极化方式，垂直极化识别率下降比水平极化识别率下降快，也就是垂直极化功率传递比水平极化下降更快。同时，无论读写器天线是水平极化方式，还是垂直方式，轮胎嵌入式 RFID 系统识别率都随入射角增加而减小，也就是系统功率传递能力随入射角增加而减小。因此，为提高 RFID 系统读取距离和可靠性，应尽可能选择水平极化方式读写器天线，选用较小的入射角，并尽可能直视电子标签。

4.3 嵌入深度 l 对功率传递 $T(f, \theta_i, l)$ 的影响

为了方便，入射角设为 0° ，其余参数同前 2 小节。图 15 是功率传递函数 $T(f, \theta_i, l)$ 关于嵌入深度 l 的变化曲线。从图 15 可见， $T(f, \theta_i, l)$ 不但随 l 整体下降，而且随 l 出现波动。这一结论也可通过图 13 环境中试验验证得到。试验中，选取贵州轮胎股份有限公司 GL 274A 型 8 个子午胎。硫化轮胎时，标

签嵌入轮胎深度分别控制为 0.0 (标签粘贴在轮胎表面), 3.0, 6.0, 9.0, 12, 15, 18, 21 和 24 mm (因轮胎厚度有限, 嵌入深度只能到 24 mm)。系统识别率与嵌入深度 l 之间关系测试结果如图 16 所示。图 16 表明, 轮胎嵌入式 RFID 系统识别率不但随 l 整体下降, 而且随 l 出现波动, 也就是轮胎嵌入式 RFID 系统功率传递不但随 l 整体下降, 而且随 l 出现波动。这说明, 应合理设计选择电子标签嵌入轮胎的深度, 既要避免 $T(f, \theta_i, l)$ 处于波谷位置, 影响轮胎嵌入式 RFID 系统的标签读取能力, 又要考虑标签嵌入轮胎后受力情况, 避免标签嵌入轮胎后, 受力过大而被折断, 影响轮胎嵌入式 RFID 系统的标签读取能力。

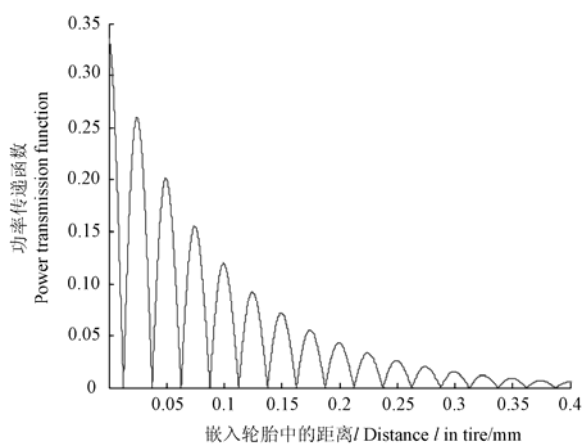


图 15 嵌入距离对功率传递函数的影响

Fig.15 Effects of l on power transfer function $T(f, \theta_i, l)$

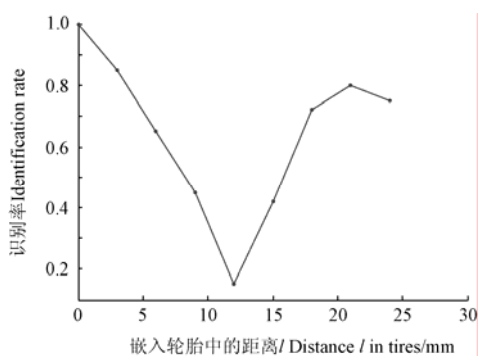


图 16 嵌入距离 l 与识别率之间关系

Fig.16 Relations l and identification probability.

5 结论

为提高轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统性能, 本文研究了轮胎嵌入式超高频无源 RFID 功率传递特性, 提出了一种基于端开路同轴探针的轮胎介电常数的比对测量方法, 建立了轮胎嵌入式超高频无源 RFID 功率传递模型, 进行了数值分析, 并得出了如下结论:

1) 仿真验证表明, 提出的终端开路同轴探针轮胎介电常数比对测量方法, 误差小。

2) 为提高 RFID 系统性能, 应优化设计标签天线, 使标签天线阻抗与芯片阻抗共轭匹配, 实现功率吸收最大化。

3) 基于建立的轮胎嵌入式超高频无源 RFID 功率传递模型, 通过数值分析, 结果表明: 为改善 RFID 系统通信能力, 读写器天线应采用水平极化方式, 并且尽可能直视电子标签; 应合理设计电子标签嵌入轮胎的深度, 避免功率传递函数 $T(f, \theta_i, l)$ 处于波谷位置和折断 RFID 电子标签, 影响轮胎嵌入式 RFID 系统的读取距离和可靠性。

[参 考 文 献]

- [1] Basat S, Lim K, Kim I, et al. Design and development of a miniaturized embedded UHF RFID tag for automotive tire applications[C]//Proceedings of the 55th Electronic Components and Technology Conference. Lake Buena Vista (USA), 2005: 860—870.
- [2] Safety Research & Strategies, Inc., USA. Tire Recalls and Tire Safety: The RFID Solution. 25 pages[EB/OL]. http://www.safetyresearch.net/Library/Recalls_RFID.pdf/. (2013-01-12).
- [3] RFID 24-7, USA. Michelin rolls out RFID-enabled tires for London Olympic.1 pages[EB/OL]. <http://www.rfid24-7.com/article/michelin-rolls-out-rfid-enabled-tires-for-london-olympics/>. (2012-12-05).
- [4] RFID Journal, USA. Michelin embeds RFID tags in tires[EB/OL]. <http://www.rfidjournal.com/article/view/269/1/1>. (2012-10-08)
- [5] RFID Journal, USA. RFID chip to monitor tire pressure [EB/OL]. <http://www.rfidjournal.com/article/view/93/1/1>. (2012-11-12).
- [6] Brzeska M, Pontes J, Chakam G A, et al. RF-design characterization and modeling of tyre pressure sensors[C]//Proceedings of the Second Europe Conference on Antenna and Propagation, Edinburgh (UK), 2007: 1—5.
- [7] Griffin J, Durgin G. Complete link budgets for backscatter-radio and RFID systems[J]. IEEE Antenna Propagation Magazine, 2009, 51(2): 11—25.
- [8] Kuester G, Novotny D. Forward and reverse link constraints in UHF RFID with Passive Tag[C]//IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Fort Lauderdale (USA), 2010: 680—685.
- [9] Nikitin P, Rao K. Antennas and propagation in UHF RFID systems[C]//Proceedings of IEEE International

- Conference on RFID, Las Vegas (USA), 2008: 277—288.
- [10] Su W, Beilke K M, Ha T T, et al. A reliability study of RFID technology in a fading channel[C]//Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, California (USA), 2007: 2124—2127.
- [11] Nikitin P, RAO K. Theory and measurement of backscattering from RFID tags[J]. IEEE Antenna Propagation Magazine, 2006, 48(6): 211—218.
- [12] Griffin J, Durgin G. Reduced fading for RFID tags with multiple antennas[C]//Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Hawaii (USA), 2007: 1201—1204.
- [13] Krupka J, Geyer R G. Loss-angle measurement, Wiley Encyclopaedias of Electrical and Electronics Engineering Online[M]. New York: Wiley, 1999.
- [14] Afsar M N, Birch J R, Clarke R N. The measurement of the properties of materials[C]//Proceedings of IEEE, 1986, 74(1): 183—199.
- [15] 景莘慧, 蒋全兴. 基于同轴线的传输/反射法测量射频材料的电磁参数[J]. 宇航学报, 2005, 26(5): 630—634. Jing Shenhui, Jiang Quanxing. Transmission/reflection method based on coaxial line for RF materials characterization measurement[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(5): 630—634. (in Chinese with English abstract)
- [16] Bobowski J S, Johnson T. Permittivity measurements of biological samples by open-ended coaxial line[J]. Progress In Electromagnetic Research B, 2012, 40: 159—183
- [17] Jing S, Ding D, Jing Q. Measurement of electromagnetic properties of materials using transmission/reflection method in coaxial line[C]//Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. Hangzhou (China), 2003: 129—135.
- [18] Jarvis J. RF materials characterization metrology at NBS/NIST: past and recent work, future directions and challenges[C]//Proceedings of Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kitchener, Canada, 2001: 265—268.
- [19] Thajudeen C, Hoorfar A, Ahmad F, et al. Measured complex permittivity of walls with different hydration levels and the effect on power estimation of TWRI target returns[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2011, 30(2): 177—199.
- [20] You K Y, Salleh J, Abbas Z. Effects of length and diameter of open-ended coaxial sensor on its reflection coefficient[J]. Radio Engineering, 2012, 21(1): 496—503.
- [21] Krupka J. Frequency domain complex permittivity measurements at microwave frequencies[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(1): 55—70.
- [22] Santos J, Garsia D, Eiras J A. Dielectric characterization of materials at microwave frequency range[J]. Materials Research Bulletin, 2003(6): 97—101.
- [23] Komarov V, Wang S, Tan J. Permittivity and Measurement[M]. New York: Wiley, 2005.
- [24] Ansys, USA. Ansys HFSS.1 pages [EB/OL]. [http://www.ansys.us/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Signal+Integrity+&+Power+Integrity/ANSYS+HFSS.\(2013-01-16\)](http://www.ansys.us/Products/Simulation+Technology/Electromagnetics/Signal+Integrity+&+Power+Integrity/ANSYS+HFSS.(2013-01-16)).
- [25] Grosinger J, Scholtz A L. Antennas and wave propagation in novel wireless sensing applications based on passive UHF RFID[J]. Elektrotechnik and Informationstechnik, 2011, 128(11/12): 408—412.
- [26] Nikitin P, Rao K, Martinez R. Sensitivity and impedance measurements of UHF RFID chips[J]. IEEE Microwave Theory and Techniques, 2009, 57(5):1 297—1302.
- [27] Hippel A V. Dielectrics and Waves[M]. New York: Wiley, 1954.
- [28] 胡圣波, 司兵, 李黔蜀, 等. 射频识别系统的可靠性及计算模型[J]. 信息与控制, 2012, 19(6): 479—484. Hu Shengbo, Si Bing, Li Qianshu, et al. Reliability of RFID systems and its computational models[J]. Information and Control, 2012, 19(6): 479—484. (in Chinese with English abstract)
- [29] Shepard S. Radio Frequency Identification[M]. New York McGraw-Hill, 2005.
- [30] 刘亚丽, 胡圣波, 鄢富玉. 嵌入式 RFID 系统识别率关键因子的分析[J]. 工程设计学报, 2012, 41(5): 571—577. Liu Yali, Hu Shengbo, Yan Fuyu. Analysis of the key factors for the identification probability in embedded RFID system[J]. Journal of Engineering Design, 2012, 41(5): 571—577. (in Chinese with English abstract)

Power transmission performance for ultra high frequency embedded RFID system in tire

Hu Shengbo^{1,2}, Si Bing³, Shu Heng^{1,2}

(1. Institute of Intelligent Information Processing, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Center for RFID and WSN Engineering, Department of Guizhou Education, Guiyang 550001, China;

3. Institute of New Technology, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China)

Abstract: Acting as sensors, passive radio frequency identification devices (RFID) tags can avoid sensor nodes bulky and realize battery-powered. So, ultra high frequency (UHF) passive RFID tags embedded in tires have a deep impact on tire life cycle management and tire monitoring, and have been used widely in the USA and the European Union. However, the transmission range is one of the hardest challenges in UHF passive RFID embedded in tires, because the rubber makes it harder to read the tag. The main difference between the common RFID and RFID embedded in tires is the communication medium, which attenuates RF power from the reader in RFID embedded in tires. To improve the transmission range and reliability of RFID embedded in tires, it is of great concern to study power transmission of wave propagation for UHF passive embedded RFID in tires, because the tags do not contain any battery and rely on the electromagnetic field for both power and communication. In this work, we studied the power transmissions for UHF passive embedded RFID in tires. In UHF passive embedded RFID systems in tires, the bidirectional radio link between reader and tags goes through air and tires. The total path loss is caused by several factors: reflection loss due to reflected power at tire-air boundaries, attenuation loss in the tires, and spreading loss which is simply due to the radiation properties of antenna. Each of these factors can be analyzed using the permittivity of tires and tire-air boundary conditions. So, the power transmissions are based on the permittivity of tires and tire-air boundary conditions. We use the OCP (open-ended coaxial probe) method to measure the permittivity of tires. By analyzing the radio link for UHF passive RFID, we establish a model of power transmissions of UHF embedded RFID in tires and make numerical analyses. Numerical analyses show that the error of the OCP methods for measuring the permittivity of tires is small, and the absolute error between the measured reflection coefficients and the simulated reflection coefficients is less than 0.04. It is suggested that the parallel polarization and normal incidence of wave should be chosen for improving the performance of the UHF embedded RFID in tires, and the depth embedded in tires should be chosen reasonably to avoid power transmission function locating valley also. In addition, it is necessary to optimize and design the antenna of tag for the impedance matching of tag antenna and chip. The research can provide a reference for the design of UHF passive RFID tags embedded in tires and TPMS (tire pressure monitoring system).

Key words: tires, RFID, permittivity, power transmission, embedded system

(责任编辑: 信世强)