

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104457

# 疫苗冷链运输中多环境交互作用时 RFID 系统分析与测试\*

佐  磊<sup>1,2</sup>  朱良帅<sup>1</sup>  尹柏强<sup>1,2</sup>  曹雪兵<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学  合肥  230009; 2. 合肥工业大学可再生能源接入电网技术国家地方联合工程实验室  合肥  230009)

**摘  要:**针对 UHF RFID 标签在疫苗运输密集环境下性能受互耦效应和液体环境影响的问题,从单标签在液体环境中阻抗变化的角度,基于电感耦合模型,利用二端口网络分析方法,推导出临近液体干扰和标签互耦效应作用下标签的互阻抗和功率传输系数的计算表达式。利用控制变量法设计仿真实验和实际测量,仿真测量结果表明,在多环境交互作用下,液体环境主要对标签的实部产生影响,标签的互耦效应主要对标签阻抗虚部产生影响;研究结果对标签设计以及标签在疫苗冷链运输中的应用有一定的指导意义。

**关键词:**射频识别;液体环境;互耦效应;互阻抗

**中图分类号:** TN821<sup>+</sup>.4      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 501.1015

## Analysis and testing of RFID systems during multiple environmental interactions in vaccine cold chain transportation

Zuo Lei<sup>1,2</sup>  Zhu Liangshuai<sup>1</sup>  Yin Baiqiang<sup>1,2</sup>  Cao Xuebing<sup>1</sup>

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory for Renewable Energy Access to Grid Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:**To address the problem that the performance of UHF RFID tags in the dense environment of vaccine transportation is affected by the mutual coupling effect and liquid environment, the computational expressions of mutual impedance and power transmission coefficient of tags under the action of proximity liquid interference and tag mutual coupling effect are derived from the perspective of impedance change of single tags in liquid environment based on inductive coupling model and using two-port network analysis method. Using the control variable method to design simulation experiments and actual measurements, the simulation measurement results show that under the interaction of multiple environments, the liquid environment mainly affects the real part of the label, and the mutual coupling effect of the label mainly affects the imaginary part of the label impedance; the research results have certain guiding significance for the label design and the application of the label in the cold chain transportation of vaccines.

**Keywords:**radio frequency identification; liquid environment; mutual coupling effect; mutual impedance

## 0  引  言

现代医学中,疫苗注射日益成为人们防控疾病的重要医疗手段,它每年挽救数十万的生命。新冠疫苗的研发与应用更加体现疫苗对病毒防疫的重要性,但是无论是国内的国药、科兴疫苗还是国外的 Moderna、BioNTech 的疫苗,其成分对储存温度十分敏感,任何温度的异常都会直接影响其质量,因此通过对疫苗冷链的实时监测,可

以保证其在运输和存储过程中质量始终是安全可靠的<sup>[1-2]</sup>。RFID 技术是基于无线射频技术的自动识别技术,因其识别过程无需“可视化”条件及人工参与,近年来集成有传感器的标签广泛应用于疫苗运输、结构健康监测、混凝土湿度监测、变压器状态监测等实际场景<sup>[3-6]</sup>,同时集成标签的设计,低功耗的传感器网络节点设计也日趋成熟<sup>[7-8]</sup>。然而,在疫苗运输的应用场景中,标签临近空间液体介质的非线性干扰和密集分布标签间的耦合效应同时作用于 RFID 系统,会导致系统性能显著

变化<sup>[9-11]</sup>。

文献[12]通过研究临近标签的几种贴附物对标签读取范围和阻抗的影响时指出,标签附近电场减小是造成读取范围减小的主要原因。文献[13]通过理论分析结合实验测量,指出 RFID 系统附近的液体能够吸收电磁波,使天线辐射效率降低,同时引起天线失谐。文献[14]讨论了一种新的共形标签天线模型,基于该模型,设计出可以直接应用于液体表面的标签。文献[15]通过研究液体对标签性能的影响发现液体的存在会增加天线等效电路中的损耗电阻。文献[12-15]分析了液体环境对 RFID 性能的影响以及如何提高标签在液体环境中的性能,并未考虑标签间互耦效应的影响。

文献[16]利用二端口网络分析标签之间的相互耦合,推导并验证了双标签与多标签之间的耦合具有同样的分析方式,并且计算出了标签之间的耦合电阻。文献[17]导出了标签处于彼此辐射近场区时的互阻抗计算表达式,并利用功率传输系数和反向调制因子分析了互耦效应对 RFID 系统性能的影响。文献[18]给出了无源 UHF RFID 系统链路预算模型,并指出标签天线与负载的阻抗匹配关系是影响 RFID 系统性能的关键因素。文献[19]基于二端口网络和八木阵列天线的理论,分析天线结构与互阻抗的关系,并解释标签天线传输系数和增益的变化原因。进而提出一种密集布放环境中的标签互阻设计方法。文献[20]提出一种表示多个天线的互耦网络模型,并采用不同单元间距、单元数目和不同种类天线对所提出的模型进行了验证。文献[16-20]对密集环境中的标签互耦效应研究都是基于自由空间或室内开阔等理想环境中,并未考虑标签临近空间中液体介质的影响。

综上所述,标签附近的液体介质<sup>[12-15]</sup>和标签间的互耦效应<sup>[16-20]</sup>是制约无源 UHF RFID 系统性能的两种关键因素,现有文献分别对两种因素影响 RFID 系统性能的机理进行了分析。但在药品管理、仓储、疫苗运输等实际应用中,液体介质和互耦效应同时作用于 RFID 系统,多因素耦合作用进一步提高了 RFID 系统性能分析与建模的复杂性。本文以疫苗运输中密集布放在液体环境中的无源双标签为研究对象,综合考虑标签耦合和液体环境影响,利用控制变量法来研究疫苗运输中液体环境下的标签耦合,基于二端口网络,推导出标签在液体环境下的互耦阻抗表达式,研究结果对标签天线设计以及在疫苗冷链运输中的应用具有一定的指导意义。

## 1 无源 UHF RFID 系统链路

无源 UHF RFID 系统读写器和标签之间是通过电磁波反向散射进行通信的,阅读器天线发射能量并激活标

签,通过连续载波信号给与标签指令的过程称为前向链路。标签通过改变自身负载,反向散射调制阅读器天线发射的连续波信号,将标签响应数据传送至阅读器的过程称为反向链路,文献[21]指出,标签识别的受限链路一般是前向链路,所以功率传输系数是制约系统性能的核心参数。

假设自由空间下,阅读器天线增益为  $G_r$ ,标签天线增益为  $G_t$ , $\lambda$  为自由空间波长, $P_t$  为标签获取功率, $P_{th}$  为芯片开启功率, $P_r$  为阅读器发射功率, $R_a$ 、 $R_c$  分别为标签天线和标签芯片电阻, $X_a$ 、 $X_c$  分别为标签天线和标签芯片电抗, $Z_a$ 、 $Z_c$  分别为标签天线和标签芯片的阻抗,阅读器和标签之间的距离为  $d_{r-a}$ ,则前向链路中天线的接收功率  $P_t$  为:

$$P_t = \frac{P_r G_r G_t \lambda^2}{4^2 \pi^2 d_{r-a}^2} \quad (1)$$

定义反射系数为  $\rho$ ,  $\rho = (Z_c - Z_a^*) / (Z_c + Z_a)$ ,其中  $Z_a^* = R_a - jX_a$ ,则标签芯片接收的功率  $P_{i-r}$  为:

$$P_{i-r} = P_t \tau = \frac{P_r G_r G_t R_a^2 \lambda^2}{4^2 \pi^2 d_{r-a}^2 |Z_a + Z_c|^2} \quad (2)$$

其中功率传输系数为:

$$\tau = 1 - |\rho|^2 = \frac{4R_a R_c}{|Z_a + Z_c|^2} \quad (3)$$

则当芯片的接收功率  $P_{i-r}$  大于芯片开启功率  $P_{th}$  时,标签芯片被激活工作。

反向链路中,标签天线的反向散射功率  $P_b$  为:

$$P_b = P_t K G_t = \frac{P_t G_t^2 G_r \lambda^2 R_a^2}{4\pi^2 d_{r-a}^2 |Z_a + Z_c|^2} \quad (4)$$

阻抗匹配因子  $K$  为:

$$K = |1 - \rho|^2 = \frac{4R_a^2}{|Z_a + Z_c|^2} \quad (5)$$

根据天线散射理论,天线电抗部分不向空间辐射能量,所以标签天线散射功率也可以表示为:

$$P_b = \frac{1}{2} I^2 R_a G_t \quad (6)$$

## 2 临近液体与标签互耦交互作用下 RFID 系统性能分析

### 2.1 液体环境下的标签阻抗

自由环境中,设定标签天线的辐射电阻为  $R_{air}$ ,当标签处于液体环境中的时候,由于液体环境对电磁波的吸收,此时的标签天线的辐射电阻  $R_a$  为液体环境影响产生的等效电阻  $R_{liq}$  与理想环境中的电阻  $R_{air}$  串联,标签天线在自由空间以及液体环境下的辐射电阻等效图<sup>[6]</sup>如图 1 所示。

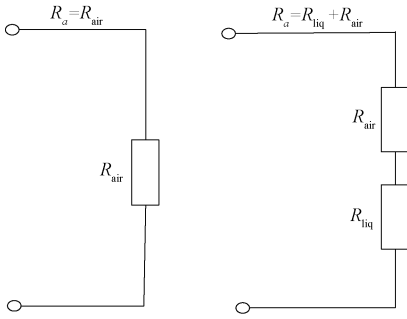


图1 自由空间以及液体环境下标签辐射电阻等效图

Fig. 1 Equivalent radiation resistance diagram of label in free space and liquid environment

## 2.2 交互作用下的标签互阻抗

分析可知,液体环境会对标签阻抗产生影响,为了研究疫苗运输过程中液体环境与标签耦合交互作用下标签性能变化,以布放在液体环境下的无源双标签为研究对象,在阅读天线远场区一前一后的布放两枚标签,两枚标签之间的距离设定为  $d$ ,标签距离液体环境的高度为  $h$ ,其布放场景如图2所示。

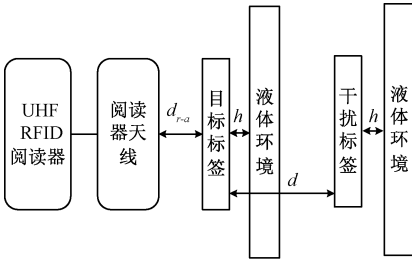


图2 液体与干扰标签交互作用场景

Fig. 2 Interaction scene between liquid and interference label

当阅读器天线阅读范围内存在多个标签时,目标标签天线的感应电压由阅读器辐射电磁波,以及其他标签的散射电磁波共同产生。

结合对液体环境下单标签性能分析,推导出液体环境下无源双标签的二端口模型如图3所示,  $V_1$ 、 $V_2$  分别为标签1、2单独位于阅读器辐射场时的标签天线感应电压,  $V_{21}$ 、 $V_{12}$  分别为标签1、2天线的散射电磁波在标签1、2产生的感应电压,  $Z_{21}$ 、 $Z_{12}$  分别为标签1、2之间的互阻抗,  $R_{liq1}$ 、 $R_{liq2}$  分别为液体环境影响下的等效电阻,自由环境中,标签1、2的自阻抗分别为  $Z_{11} = X_{a11} + R_{air11}$ ,  $Z_{22} = X_{a22} + R_{air22}$ ,液体影响条件下  $Z'_{11} = X_{a11} + R_{a11}$ ,  $Z'_{22} = X_{a22} + R_{a22}$ ,其中  $V_{12} = Z_{12} I_2$ ,  $V_{21} = Z_{21} I_1$ ,  $R_{a11} = R_{liq1} + R_{air11}$ ,  $R_{a22} = R_{liq2} + R_{air22}$ ,  $I_1$ 、 $I_2$  为标签天线的感应电流。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z'_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

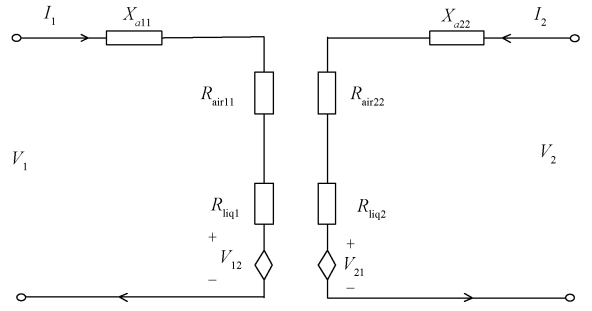


图3 液体环境下双标签等效二端口网络

Fig. 3 Dual label equivalent two port network in liquid environment

假定液体环境下标签1、2的增益分别为  $G_{t1}$ 、 $G_{t2}$ ,则标签2的散射功率  $P_{b2}$  为:

$$P_{b2} = 0.5 I_2^2 R_{a22} G_{t2} \quad (8)$$

由式(1)得标签天线1接收标签天线2的散射功率  $P'_a$  为:

$$P'_a = S_{12} A_{t1} = \frac{P_{b2} G_{t1} G_{t2} \lambda^2}{4^2 \pi^2 d_{12}^2} \quad (9)$$

其中,  $S_{12}$  为标签2在标签1处产生的电磁波密度,  $A_{t1}$  为标签1的有效辐射面积,由式(4)得标签天线1对标签天线2的辐射电磁波反向散射功率  $P_{b12}$  为:

$$P_{b12} = P'_a K_1 G_{t1} = \frac{I^2 G_{t1}^2 G_{t2} \lambda^2 R_{a11}^2 R_{a22}}{8 \pi^2 d_{12}^2 |X_{a11} + R_{a11}|^2} \quad (10)$$

$P_{b12}$  亦可表示为:

$$P_{b12} = \frac{1}{2} \frac{(Z_{12} I_2)^2}{|X_{a11} + R_{a11}|^2} R_{a11} G_{t1} \quad (11)$$

联立式(10)和(11)可得互阻抗表达式:

$$|Z_{12}| = \frac{\sqrt{R_{a11} R_{a22} G_{t1} G_{t2}}}{2 \pi d_{12} / \lambda} \quad (12)$$

$Z_{12}$  相位为  $\angle Z_{12} = \phi_2 + 2 \pi d_{12} / \lambda$ ,不失一般性,当阅读器天线辐射场存在  $n$  个标签时,有:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z'_{22} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z'_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$|Z_{ij}| = \frac{\sqrt{R_{aii} R_{ajj} G_{ti} G_{tj}}}{2 \pi d_{ij} / \lambda} \quad (14)$$

$Z_{ij}$  相位为  $\angle Z_{ij} = \phi_j + 2 \pi d_{ij} / \lambda$ ,可得,  $Z_{ij}$  具有互易性,则:

$$|Z_{ij}| = \frac{R_a \sqrt{G_{ti} G_{tj}}}{2 \pi d_{ij} / \lambda} \quad (15)$$

## 2.3 交互作用下的标签功率传输系数

由式(14)、(15)得液体环境下标签耦合后的阻抗实

部虚部分别为:

$$R_i = R_{aii} + \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} Z_{ij} \quad (16)$$

$$X_i = X_{aii} + \operatorname{Im} \sum_{j=1}^{n-1} Z_{ij} \quad (17)$$

其中  $R_{aii} = R_{airi} + R_{liqi}$ ,  $Z'_i = R_i + X_i$ 。此时标签  $i$  的传输系数为:

$$\tau_i = 4R_c R_{aii} / |Z_c + Z'_i|^2 \quad (18)$$

以双标签为例进行讨论,在双标签情况下,有:

$$\tau = \frac{4R_c R_a}{|Z_c + Z_a|^2} = \frac{4R_c \operatorname{Re}(R_{a11} + |Z_{12}|)}{|Z_c + Z'_{11} + Z_{12}|^2} = \frac{4R_c R_{a11}}{(R_c + R_{a11})^2 + (X_{12})^2} \quad (19)$$

其中  $X_{12} = I_m(Z_{12})$ , 分别讨论  $R_{a11}$  与  $X_{12}$  对传输系数的影响。 $R_{a11}$  对传输系数的影响:

$$\text{令 } R_{a11} = x, f(x) = \frac{4R_c x}{(R_c + x)^2 + (X_{12})^2}, f'(x) = \frac{2(R_c - x)}{((R_c + x)^2 + (X_{12})^2)^2}, \text{当 } R_c < x \text{ 时, } f'(x) < 0 \text{ 所以 } f(x) \text{ 单调在 } [R_c + \infty] \text{ 递增, 由此可得, } R_{a11} \text{ 越小, 目标标签的功率传输系数越大, 标签性能越好。}$$

$X_{12}$  对传输系数的影响: 由式 (19) 可以看出, 标签天线的互阻抗虚部  $X_{12}$  位于公式分母位置, 易得, 标签天线互阻抗虚部的增加, 会导致传输系数减小。

## 2.4 交互作用下的系统性能分析

本文采用 Ansoft HFSS 15.0 进行多标签液体环境下建模仿真验证, 仿真模型如图 4 所示, 在两标签下放置液体提供液体环境, 尺寸为  $80 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , 上方标签为目标标签, 下方标签为干扰标签, 设定测试频率为  $880 \sim 920 \text{ MHz}$ , 测量不同间距下的标签自身阻抗以及互阻抗值, 利用测得数据求目标标签的传输系数, 从而验证上述推理过程正确。

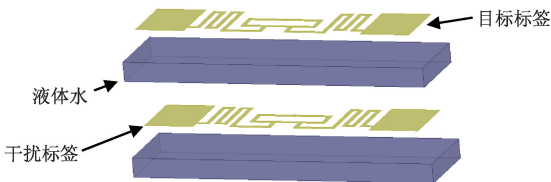
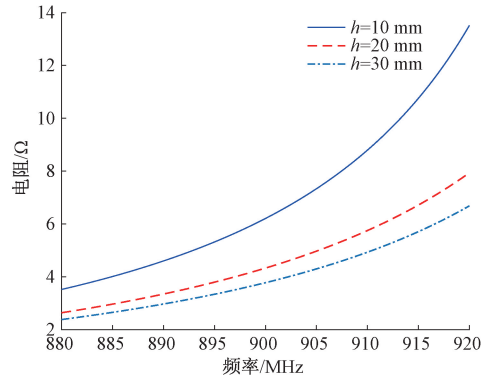


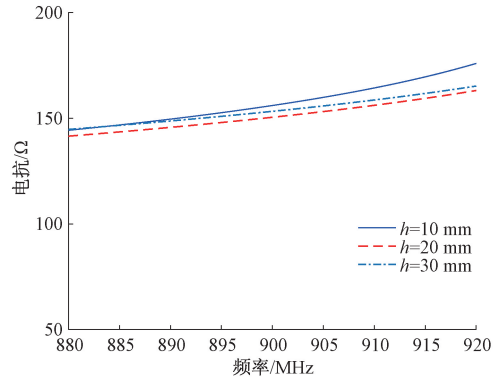
图 4 液体环境下标签天线的仿真模型

Fig. 4 Simulation model of label antenna in liquid environment

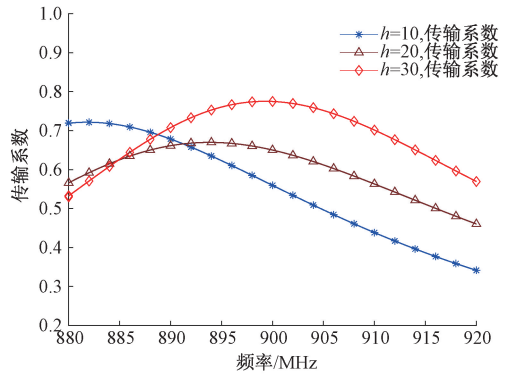
1) 仿真测试 1, 交互作用下液体环境对标签性能的影响。固定两标签之间的距离  $d$  为  $50 \text{ mm}$ , 设定标签距离液体环境的高度为  $h$ , 记录不同高度  $h$  下的  $880 \sim 920 \text{ MHz}$  的标签阻抗以及互阻抗大小, 利用式 (3) 计算标签在交互作用下的传输系数, 仿真测试结果如图 5 所示。



(a) 标签阻抗实部变化  
(a) Real part variation diagram of tag impedance



(b) 标签阻抗虚部变化  
(b) Imaginary part variation diagram of tag impedance



(c) 功率传输系数变化  
(c) Power transmission coefficient variation diagram

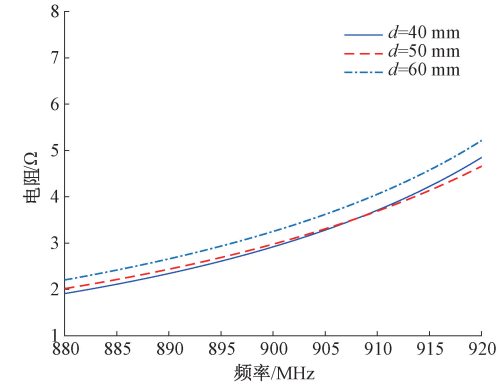
图 5 交互作用下液体对标签性能影响

Fig. 5 Influence of liquid on label performance under interaction

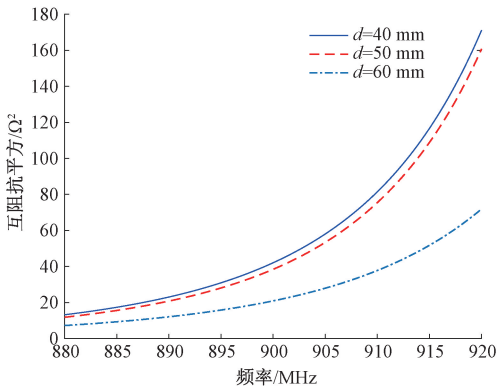
由图 5(a) 可以看出, 液体环境主要影响标签的阻抗实部, 且距离液体环境越近阻抗实部越大, 从图 5(b) 可以看出, 交互作用下, 当两标签距离一定时, 标签的电抗在标签距离液体环境高度改变时基本不变。从图 5(c) 可以看出, 功率传输系数的变动趋势和阻抗实部  $R_{a11}$  成反比, 且距离液体环境越远, 液体环境的影响作用越弱, 标签实部越小, 标签的功率传输系数越大, 仿真验证结果

和式(19)分析结果一致,且仿真实验验证,在同等条件下,液体对高频影响较大。

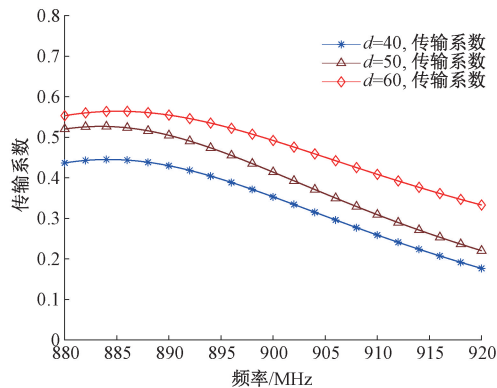
2) 仿真测试 2,交互作用下标签耦合对标签性能的影响。固定液体环境距离标签的距离  $h$  为 20 mm,设定标签之间的距离为  $d$ ,记录不同间距  $d$  下的 880 ~ 920 MHz 的阻抗以及互阻抗大小,利用式(3)计算标签在交互作用下的传输系数,仿真测试结果如图 6 所示。



(a) 标签阻抗实部变化  
(a) Real part variation diagram of tag impedance



(b) 标签阻抗虚部变化  
(b) Imaginary part variation diagram of tag impedance



(c) 功率传输系数变化  
(c) Power transmission coefficient variation diagram

图 6 交互作用下液体对标签性能影响

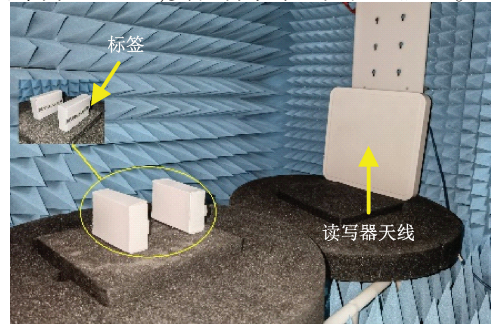
Fig. 6 Influence of liquid on label performance under interaction

由图 6(a)、(b)可以看出,标签之间的耦合主要影响标签阻抗虚部,标签的实部基本不变,且标签之间的距离越近,标签之间的互阻抗越大。从图 6(c)可以看出,传输系数的变动趋势和互阻抗虚部平方  $(X_{12})^2$  成反比,且标签距离越远,标签之间互阻抗虚部平方越小,标签的传输系数越大,仿真验证结果和式(19)分析结果一致。

### 3 实验测试结果及分析

式(3)中  $\tau = 1 - |\rho|^2$ 、式(4)中  $P_b = P_i K G_i$  和式(5)中  $K = 1 - |\rho|^2$  整理推导出式(20)  $P_b = P_i K G_i = P_i G_i (2 - \tau - 2\sqrt{1 - \tau})$ ,对式(20)中的参数  $\tau$  求导得  $P'_b = P_i G_i (1/\sqrt{1 - \tau} - 1)$ ,  $P'_b$  在区间  $[0, 1]$  中大于 0,所以说当  $\tau$  在  $[0, 1]$  区间内时,  $\tau$  越大标签的散射功率越大,相应的阅读器接收到标签的应答功率越大,所以实验测试中,采用标签应答信号功率用 RSSI 来反映标签的传输系数大小。

实验采用英频杰 (IMPINJ) 公司的 UHF RFID 芯片,包括阅读器 YND3002,阅读器天线 YND9028,以及标签 Alien9662, Alien9640,其中阅读器 YND9028 工作频率为 890~960 MHz,增益为 9.2 dBi,极化方式为圆极化,电压驻波比小于 1.3,实验在微波暗箱中进行,设定阅读器的发射功率为 30 dBm,实验场景布置如图 7 所示。



(a) 实验内部场景布置  
(a) Layout of the internal scene of the experiment



(b) 实验外部场景布置  
(b) Experimental external scene layout

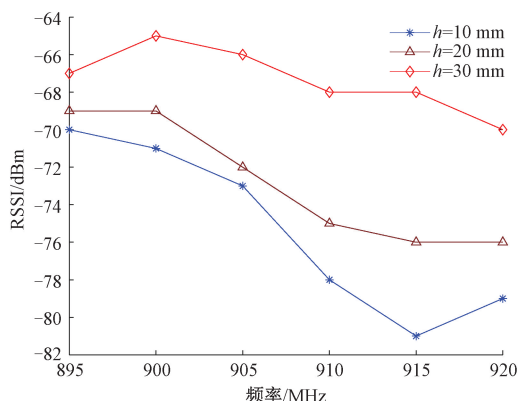
图 7 实验场景布置

Fig. 7 Experimental scene layout

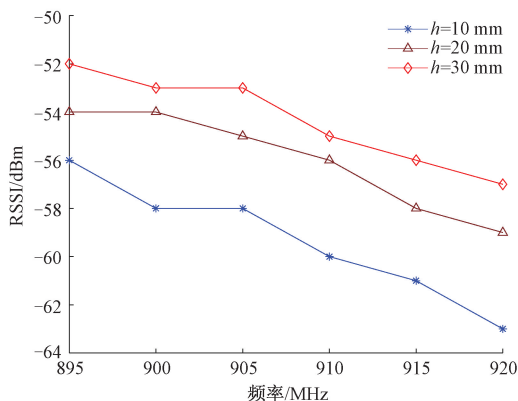
### 3.1 交互作用下液体对系统性能影响测试

实验布置模型如图 2 所示,布置场景如图 7(a)、(b) 所示,阅读器与目标标签的距离  $d_{r-a}$  固定为 120 cm,干扰标签与目标标签的距离为  $d$ ,标签和液体之间的距离为  $h$ 。

首先布置两标签之间的距离  $d$  为 50 mm,移动液体距离标签之间的距离分别为  $h=10, 20, 30$  mm,设定读写器的初始频率为 895 MHz,以 5 MHz 的频率步进,920 MHz 截止,记录不同距离  $h$ ,不同频率下的信号强度 (RSSI),通过距离  $h$  的改变,来反映交互作用下液体环境对标签性能的影响,标签 Alien9662 与标签 Alien9640 实验测试结果如图 8(a)、(b) 所示。



(a) 标签Alien9662测试结果  
(a) Label alien9662 test results



(b) 标签Alien9640测试结果  
(b) Label alien9640 test results

图 8 交互作用下液体对标签性能影响

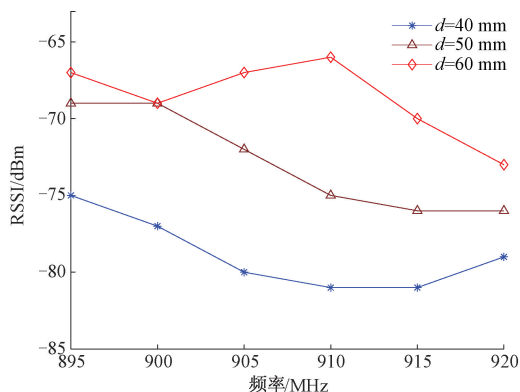
Fig. 8 Influence of liquid on label performance under interaction

由图 8(a)、(b) 可见, Alien9662 和 Alien9640 的 RSSI 随  $h$  的增大而增大, 随着频率的增大而减小, 变化范围分别为  $-81 \sim -65$  dBm 和  $-63 \sim -52$  dBm。这是由于当  $d$  固定时, 由式 (19) 及 4.3 节分析可知,  $h$  越大, 目标标签的阻抗实部  $R_{a11}$  越小, 标签的传输系数  $\tau$  越大, 故 RSSI 越大。测试结果表明, 标签与液体之间的距离越远, 标签受液体的边界条件影响越小, 标签的识别性能越好。所以,

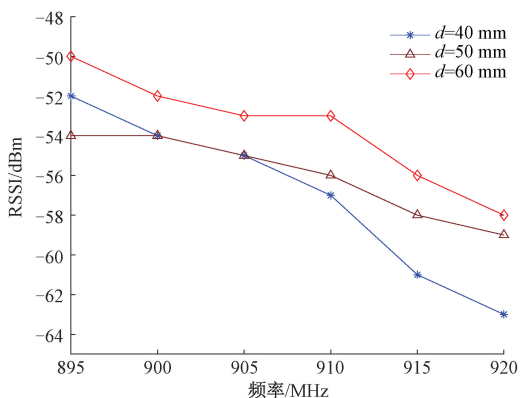
在实际应用中应当尽量增加标签距离液体的距离, 从而减小液体环境对标签性能的影响。

### 3.2 交互作用下标签互耦对系统性能影响测试

固定标签和液体之间的距离  $h$  分别 20 mm, 移动目标标签和干扰标签之间的距离分别为  $d=40, 50, 60$  mm, 设定读写器的初始频率为 895 MHz, 以 5 MHz 的频率步进, 920 MHz 截止, 记录不同距离  $d$ , 不同频率下的 RSSI, 通过距离  $d$  的改变, 来反映交互作用下标签耦合对标签整体性能影响。标签 Alien9662 与标签 Alien9640 实验测试结果如图 9 所示。



(a) 标签Alien9662测试结果  
(a) Label alien9662 test results



(b) 标签Alien9640测试结果  
(b) Label alien9640 test results

图 9 交互作用下标签耦合对标签性能影响

Fig. 9 Influence of tag coupling on tag performance under interaction

由图 9(a)、(b) 可见, Alien9662 和 Alien9640 的 RSSI 随  $d$  增大而增大, 随着频率的增大而减小, 变化范围分别为  $-81 \sim -66$  dBm 和  $-63 \sim -50$  dBm。这是由于当  $h$  固定时, 由式 (19) 及 4.3 节分析可知,  $d$  越大, 目标标签的互阻抗虚部  $X_{12}$  越小, 标签的传输系数  $\tau$  越大, 故 RSSI 越大。测试结果表明, 标签与标签之间的距离越远, 标签受互耦效应的影响越小, 标签的识别性能越好。所以在实际应用中, 应当适当增加标签之间的距离, 从而减小标签

之间的互耦效应对标签性能的影响。

3.3 多标签交互作用对系统性能影响测试

实验采用 9 个 Alien9640 标签,布置如图 10 所示,标签贴附在疫苗外包装,相邻标签之间的距离为  $d$ ,标签 5 位置固定,改变  $d$  的距离分别为 40、50、60 mm,设定读写器的初始频率为 895 MHz,以 5 MHz 的频率步进,920 MHz 截止,记录不同距离  $d$ ,不同频率下不同标签的 RSSI。

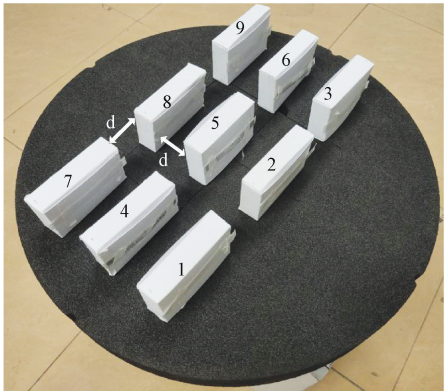


图 10 多标签实验布放图  
Fig. 10 Layout of multi label experiment

根据标签之间的相对位置,将标签分为 4 组,标签 5 为组 1,标签 4、6 为组 2,标签 2、8 为组 3,标签 1、3、7、9 为组 4,求得每组标签的平均 RSSI,表中数据单位为 dBm,根据表 1~3 记录数据,RSSI 随着距离的增大而增大,随着频率的增大而减小; $d=40$  mm 时组 1 到组 4 标签 RSSI 的变化范围分别为  $-64 \sim -61$  dBm,  $-63 \sim -65.7$  dBm,  $-67.5 \sim -63$  dBm,  $-62.5 \sim -57.5$  dBm; $d=50$  mm 时组 1 到组 4 标签 RSSI 的变化范围分别为  $-62 \sim -56$  dBm,  $-62 \sim -56.5$  dBm,  $-67 \sim -62$  dBm,  $-62.5 \sim -57.75$  dBm; $d=60$  mm 时组 1 到组 4 标签 RSSI 的变化范围分别为  $-60 \sim -55$  dBm,  $-62 \sim -55$  dBm,  $-62.5 \sim -55$  dBm,  $-63 \sim -58.25$  dBm。由式(19)可知,交互作用下,标签的返回系数会随着距离增大而增大,表 1~3 数据单调变化,在疫苗运输实际应用中,可以适当增大标签之间的距离,降低系统的工作频率。

表 1  $d=40$ mm 标签群读测试结果

| Table 1 Group reading test results of $d=40$ mm tag |       |        |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 频率/MHz                                              | 895   | 900    | 905   | 910   | 915   | 920   |
| 组 1                                                 | -61   | -62    | -63   | -64   | -65   | -64   |
| 组 2                                                 | -57   | -58    | -59.5 | -61   | -61   | -63   |
| 组 3                                                 | -63   | -63.5  | -65.5 | -66.5 | -67   | -67.5 |
| 组 4                                                 | -57.5 | -58.25 | -59.5 | -61.5 | -62.5 | -62.5 |

表 2  $d=50$  mm 标签群读测试结果

| Table 2 Group reading test results of $d=50$ mm tag |        |       |        |        |        |        |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 频率/MHz                                              | 895    | 900   | 905    | 910    | 915    | 920    |
| 组 1                                                 | -56    | -58   | -61    | -61    | -62    | -62    |
| 组 2                                                 | -56.5  | -57   | -59    | -60.5  | -61    | -62    |
| 组 3                                                 | -62    | -63.5 | -65    | -65.5  | -66.5  | -67    |
| 组 4                                                 | -57.75 | -58   | -59.25 | -60.25 | -61.75 | -62.25 |

表 3  $d=60$  mm 标签群读测试结果

| Table 3 Group reading test results of $d=60$ mm tag |        |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 频率/MHz                                              | 895    | 900   | 905   | 910   | 915   | 920   |
| 组 1                                                 | -55    | -56   | -57   | -59   | -61   | -60   |
| 组 2                                                 | -55    | -56   | -58.5 | -59.5 | -60   | -62   |
| 组 3                                                 | -62    | -63   | -64.5 | -65   | -65.5 | -65.5 |
| 组 4                                                 | -58.25 | -58.5 | -60.5 | -62   | -62.5 | -63   |

4 结 论

结合对液体环境下的单标签分析,推导出单标签在液体环境中的阻抗模型,多枚标签在液体环境下会同时受到液体介质的非线性干扰影响以及标签之间的互耦效应影响,多因素耦合作用会使 RFID 的系统性能受到较大影响,本文以密集布放液体环境下超高频射频识别系统中的无源双标签为研究对象,利用二端口网络分析方法,推导出液体环境下密集布放标签互阻抗,同时对液体环境下的互阻抗以及功率传输系数进行分析,理论分析和实验测试结果表明,液体环境主要影响标签的阻抗实部,标签之间的互耦效应主要影响标签的阻抗虚部,研究结果对标签设计以及标签在疫苗运输中的应用有一定的指导意义。

参考文献

[ 1 ] 闫建成,薛伟. 冷链物流实时监控系统的设计与实现[J]. 信息技术, 2016, 40(11):97-101.  
YAN J CH, XUE W. Design and implementation of real-time monitoring system for cold chain logistics [ J ]. Information Technology, 2016, 40(11):97-101.

[ 2 ] 王晓玲,马满增. 基于 GPRS 的冷链物流实时监控系统设计及实现[J]. 现代电子技术, 2017, 40(17):109-112.  
WANG X L, MA M Z. Design and implementation of GPRS-based real-time monitoring system for cold chain logistics [ J ]. Modern Electronics Technology, 2017, 40(17):109-112.

[ 3 ] 王思睿,薛严冰,宋智,等. 无芯片 RFID 湿度传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):125-131.

- WANG S R, XUE Y B, SONG ZH, et al. Chipless RFID humidity sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):125-131.
- [4] ZHANG J, TIAN G Y, MARINDRA A M J, et al. A review of passive RFID tag antenna-based sensors and systems for structural health monitoring applications[J]. Sensors, 2017, 17(2):265.
- [5] 苏圆圆, 何怡刚, 邓芳明, 等. 基于无源 RFID 的混凝土湿度监测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1235-1243.
- SU Y Y, HE Y G, DENG F M, et al. Research on passive RFID-based concrete moisture monitoring technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8):1235-1243.
- [6] 何怡刚, 汪涛, 施天成, 等. 基于 RFID 传感器标签与深度学习的变压器状态监测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(9):72-79.
- HE Y G, WANG T, SHI T CH, et al. Research on transformer condition monitoring method based on RFID sensor tags and deep learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(9):72-79.
- [7] 孙四通, 杨雯. 基于 RFID 传感器网络节点低功耗设计研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(20):176-182.
- SUN S T, YANG W. Research on low-power design of RFID-based sensor network nodes [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(20):176-182.
- [8] 刘伟峰, 庄奕琪, 齐增卫, 等. 无源超高频射频识别标签中嵌入式温度传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5):468-473.
- LIU W F, ZHUANG Y Q, QI Z W, et al. Design of embedded temperature sensors in passive UHF RFID tags[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2011, 25(5):468-473.
- [9] LIU W Y, GU Y H, LI B, et al. Enabling suspended sediment concentration detection with passive RFID tags[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(15):8663-8672.
- [10] WANG J, XIONG J, CHEN X J, et al. Simultaneous material identification and target imaging with commodity RFID devices [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, DOI:10.1109/TMC.2019.2946072.
- [11] MA H S, YI W, WANG K, et al. The optimization for hyperbolic positioning of UHF passive RFID tags[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(4):1590-1600.
- [12] KAO H L, CHO C L, XIU Y Z, et al. Bending effect of an inkjet-printed series-fed two-dipole antenna on a liquid crystal polymer substrate[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2014, 13:1172-1175.
- [13] 柳权, 何怡刚. 液体对超高频 RFID 标签性能影响研究[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(9):47-50.
- LIU Q, HE Y G. Study on the effect of liquid on the performance of UHF RFID tags[J]. Microelectronics and Computers, 2011, 28(9):47-50.
- [14] BJORNINEN T, ELSHERBENI A Z. Low-profile conformal UHF RFID tag antenna for integration with water bottles[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2011, 10:1147-1150.
- [15] SOHRAB A P, HUANG Y, HUSSEIN M, et al. A UHF RFID tag with improved performance on liquid bottles[J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2016, 15:1673-1676.
- [16] 佐磊, 何怡刚, 李兵, 等. 标签密集环境下天线互耦效应研究[J]. 物理学报, 2013, 62(4):1021-1029.
- ZUO L, HE Y G, LI B, et al. Study of antenna mutual coupling effect in tag-dense environment[J]. Journal of Physics, 2013, 62(4):1021-1029.
- [17] 何怡刚, 余培亮, 佐磊, 等. 高频 RFID 密集标签系统频率偏移预估研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(11):144-151.
- HE Y G, SHE P L, ZUO L, et al. Research on frequency offset prediction of high-frequency RFID dense tagging system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11):144-151.
- [18] 李忠建, 张雪凡, 叶旸, 等. 多标签环境下 RFID 系统的受限链路[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1):9-13.
- LI ZH J, ZHANG X F, YE Y, et al. Restricted links for RFID systems in multi-tag environments [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(1):9-13.
- [19] 彭章友, 任秀方, 孟春阳, 等. 超高频射频识别小间隔双标签天线增益特性研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7):1774-1778.
- PENG ZH Y, REN X F, MENG CH Y, et al. Gain characteristics of small spaced dual tag antenna for UHF radio frequency identification[J]. Journal of Electronics and Information, 2015, 37(7):1774-1778.
- [20] SILVA S D, OKONIEWSKI M, BELOSTOTSKI L. Antenna-array network model[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, DOI: 10.1109/TAP.2020.2981727.
- [21] 李兵, 周亚东, 林建州, 等. 金属环境下超高频 RFID 系统前向链路分析[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(12):33-35, 39.
- LI B, ZHOU Y D, LIN J ZH, et al. Forward link analysis of UHF RFID system in metallic environment[J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(12):33-35, 39.

## 作者简介



**佐磊**, 2013 年于湖南大学获得博士学位, 现为合肥工业大学副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为智能感知技术及应用、智能电网设备状态监测与评估。

E-mail: benzl0313@126.com

**Zuo Lei** received Ph. D. from Hunan University in 2013. Now he is an associated researched and M. Sc. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include Intelligent perception technology and application, state monitoring and evaluation of smart grid equipment.



**朱良帅**, 2019 年于石家庄铁道大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为射频识别技术与标签天线设计。

E-mail: zhuls0908@163.com

**Zhu Liangshuai** received B. Sc. from Shijiazhuang Tiedao University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate in Hefei University of Technology. His main research interests include RFID technology and tag IC design.



**尹柏强**(通信作者), 2014 年于湖南大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为 5G 无线通信、射频识别技术和电能质量先进检测与控制方法。

E-mail: yinbaiqiang123@163.com

**Yin Boqiang** (Corresponding author)

received his Ph. D. degree from Hunan University in 2014. He is now a professor and M. Sc. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include 5G wireless communication, radio frequency identification technology and advanced detection and control methods for power quality.



**曹雪兵**, 2020 年于莆田学院获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为抗金属标签天线设计与标签天线在恶劣环境中的性能分析。

E-mail: 1327414990@qq.com

**Cao Xuebing** received his B. Sc degree from Putian College in 2020 and is now a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include metal-resistant tag antenna design and performance analysis of tag antennas in harsh environment.