



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2307922

引用格式:张恩康,刘如强,王君香,等.面向地下探测的高场强射频识别天线优化设计[J].科学技术与工程,2025,25(1):278-283.

Zhang Enkang, Liu Ruqiang, Wang Junxiang, et al. Optimization design of high field strength RFID antenna for underground detection[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 278-283.

面向地下探测的高场强射频识别天线优化设计

张恩康¹, 刘如强¹, 王君香¹, 徐晟航¹, 张厚宝¹, 朱继轩^{2*}

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 青岛 266000; 2. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 武汉 430074)

摘要 目前,用于地下电缆射频识别(radio frequency identification,RFID)探测定位的传统紧密型线圈天线的性能不足严重制约了其探测定位距离的提高。提出了一种新型高场强分散型 RFID 线圈天线结构,在推导天线相关电气参数的基础上,以天线的磁场强度为目标函数,以其品质因数固定为约束条件,采用粒子群算法对天线的匝数和相邻两匝之间的匝间距进行了优化。最后,搭建了实验测试平台,测试结果表明,与传统紧密型 RFID 线圈天线相比,所设计的分散型 RFID 线圈天线将读取距离提高了 33.3%,同时明显增强了相同距离下的标签返回信号强度(received signal strength indication, RSSI),有助于提高基于 RSSI 的地下 RFID 定位方法的精度,这为地下电缆 RFID 探测定位的应用提供重要参考。

关键词 射频识别技术; 电感耦合; 线圈天线优化; 地下通信; 地下定位

中图分类号 TP391.45; **文献标志码** A

Optimization Design of High Field Strength RFID Antenna for Underground Detection

ZHANG En-kang¹, LIU Ru-qiang¹, WANG Jun-xiang¹, XU Sheng-hang¹,
ZHANG Hou-bao¹, ZHU Ji-xuan^{2*}

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

[Abstract] At present, the performance of the traditional centralized coil antenna used for radio frequency identification(RFID) detection and localization of underground cables is insufficient, which seriously restricts the improvement of its detection and localization distance. A new type of high field strength distributed RFID coil antenna structure was proposed. Based on the derivation of antenna related electrical parameters, the magnetic field strength of the coil antenna was taken as the objective function, and its quality factor was fixed as the constraint condition. Particle swarm optimization algorithm was employed to optimize the number of turns of the coil antenna and the turn spacing between adjacent two turns. Finally, an experimental test platform was built. The test results show that compared with the traditional centralized RFID coil antenna, the distributed RFID coil antenna increases the reading distance by 33.3%, significantly enhances the received signal strength indicator (RSSI) at the same distance, and helps to improve the accuracy of the underground RFID localization method based on RSSI, which provides an important reference for the application of RFID detection and localization of underground cables.

[Keywords] RFID; inductive coupling; coil antenna optimization; underground communication; underground localization

信号地下电缆是轨道交通信号系统的室内外设备信息采集和指令发布的通道^[1-2]。由于受地层地基的影响,常见的金属探测设备难以实现地下电缆的精确定位。通过电子标签对地下电缆进行无线标识的射频识别(radio frequency identification, RFID)有望为地下电缆的快速、准确、方便探测定位提供一种新的途径^[3-4]。该方法能够有效克服传统金属探测设备受地质等条件影响的局限性,在土壤

适用范围、操作便利性等方面具有先天性的优势。

由于地下土层的损耗随 RFID 工作频率的升高而增大,这使得低频 RFID 技术相比空气环境中的远距离超高频 RFID 技术具有明显的优势^[5-6],但传统紧密型低频 RFID 线圈天线的性能不足制约了其探测定位距离的提高,需要对其天线结构及尺寸特性进行优化设计研究。目前的研究主要是采用线圈阵列^[7]或聚焦多环结构^[8]来提高 RFID 天线的空

收稿日期:2023-10-11 修订日期:2024-07-04

基金项目:国家自然科学基金(52232013)

第一作者:张恩康(1992—),男,汉族,甘肃兰州人,工程师。研究方向:电力系统传感感知与维护。E-mail:964065488@qq.com。

*通信作者:朱继轩(1988—),男,汉族,湖北荆州人,博士,副教授。研究方向:地下无源 RFID 感知与定位。E-mail:zhujx@cug.edu.cn。

间磁场,但复杂的天线结构使得其分析方法和仿真比较困难,而且会不同程度地增大天线的尺寸。此外,文献[9]在 RFID 系统中引入中继线圈有效降低了传输损耗,将 RFID 工作距离扩展了 10 倍,这为地下 RFID 天线的性能增强提供了一种有效途径,但复杂的地下环境增加了中继线圈的安装难度。在与低频 RFID 工作原理类似的无线电能传输领域,文献[10]以传输效率最高为目标,优化了线圈参数,将传输效率提高了 43.4%。文献[11]以线圈品质因数最大化为衡量标准,研究设计了尺寸约束下线圈的最优匝数和匝间距,将系统的传能效率提升了 14.1%。文献[12]以线圈的互感内阻之比最大为优化目标,提出了一种基于灰狼算法的线圈参数优化方法,将系统的能量传输效率提高到 93%。线圈内阻的减小可以提高品质因数进而增大能量传递效率,这对无线电能传输是有利的,但在 RFID 系统中,还需关注数据传输过程,过高的品质因数会导致线圈天线的带宽减小,影响 RFID 系统数据传输的可靠性。

针对上述不足,现围绕提高地下 RFID 线圈天线性能的研究目标,设计新型地下 RFID 线圈天线结构,并对其品质因数进行约束,构建新的 RFID 天线参数优化设计方法。首先推导计算天线的电气参数,得到天线磁场、品质因数与天线参数之间的关系。之后,构建适用于 RFID 数据传输的天线参数优化目标及约束条件,引入优化算法计算得到最优的天线匝数和匝间距。最后,利用得到的设计参数,通过仿真对比和实验测试对所提新型地下 RFID 天线结构及其优化设计方法进行验证。

1 分散型 RFID 线圈天线结构及电气参数计算

1.1 天线结构

如图 1 所示为基于 RFID 技术的地下电缆探测定位系统。RFID 读写器线圈天线位于地面上,地下电缆每隔一段距离布置一个无源标签。读写器通过天线发射一定频率的电磁波信号,当无源标签通过电感耦合接收到信号时会产生感应电流,标签获得能量被激活并返回信息给读写器,进而获取电缆的类型、历史维护记录等信息。目前市面上现有的地下电缆 RFID 探测定位仪,如广州晨控公司产品 CK-GTR650,其探测 RFID 天线均采用传统的紧密型线圈天线,如图 2(a)所示。增加天线匝数可以大幅提高天线中心磁场的强度,然而由于天线电感值的限制,线圈天线的匝数无法有效增加。一种有效的办法可以考虑把传统的紧密型 RFID 线圈天线改

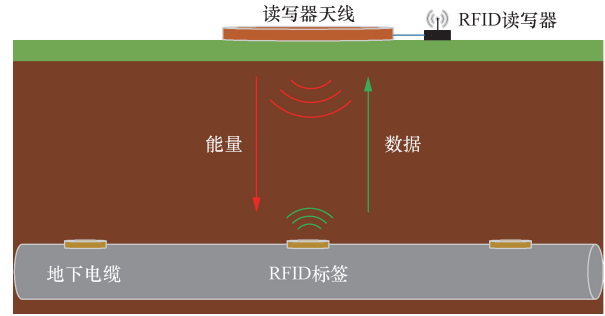
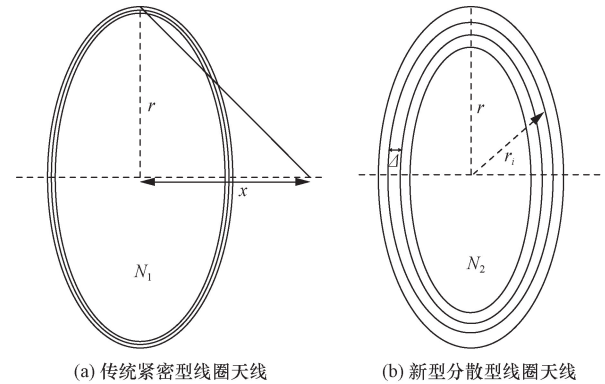


图 1 基于 RFID 技术的地下电缆探测定位系统
Fig. 1 Underground cable detection and localization system based on RFID technology



x 为线圈天线轴线上任意一点, r 为最外层线圈半径即线圈的最大半径; N_1 、 N_2 为匝数; r_i 为第 i 匝线圈的半径; Δ 为相邻两匝的匝间距

图 2 RFID 线圈天线结构

Fig. 2 RFID coil antenna structure

进为分散型 RFID 线圈天线,如图 2(b)所示,通过改变各匝之间的间距来增加天线的匝数,这样各匝线圈产生的磁场将在天线轴线处进行叠加,使得分散型天线产生的总磁场强于传统紧密型天线,进而提高地下 RFID 探测定位系统的性能。

1.2 天线电气参数计算

对于如图 2(b)所示的分散型线圈天线中,在进行电感计算的时候,分散型线圈天线可以认为是 N_2 个半径不同且相邻两匝之间具有相同匝间距的同心圆形线圈。

线圈由外层到内层第 i 匝线圈的半径 r_i 为

$$r_i = r - (i - 1)\Delta \quad (1)$$

根据线圈电感的经验计算公式,第 i 匝线圈的自感可计算为

$$L_i = \mu_0 r_i \left[\ln \left(\frac{16r_i}{d} \right) - 1.75 \right] \quad (2)$$

式(2)中: μ_0 为真空磁导率; d 为导线直径。线圈天线由外层到内层的第 i 匝线圈和第 j 匝线圈之间的互感 M_{ij} ^[13]为

$$M_{ij} = \mu_0 \sqrt{r_i r_j} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (3)$$

$$k = \sqrt{\frac{4r_i r_j}{(r_i + r_j)^2}} \quad (4)$$

式中: k 为Litz线的股数; $K(k)$ 和 $E(k)$ 分别为第一类和第二类完全椭圆积分。

根据式(1)~式(3),分散型RFID线圈天线的总电感量 L 可以表示为

$$L = \sum_i^{N_2} L_i + \sum_{i=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{N_2} M_{ij}(1 - \varphi_{ij}) \quad (5)$$

式(5)中:当 $i=j$ 时, $\varphi_{ij}=1$;当 $i \neq j$ 时, $\varphi_{ij}=0$ 。

同时,线圈天线的交流电阻直接影响天线的品质因数。为了降低天线导线的趋肤效应,降低其交流电阻,通常采用多股Litz线进行绕制^[14]。线圈天线的电阻 R ^[15]为

$$R = R_{dc} \left(1 + \frac{k \pi^3 d_{str}^6}{720 \Delta^2 \delta^4} \right) \quad (6)$$

式(6)中: d_{str} 为单股Litz线的直径; δ 为趋肤深度; R_{dc} 为线圈天线的直流电阻。其中趋肤深度是关于频率 f 、导线电导率 ρ 和导线磁导率 μ 的函数,表达式为

$$\delta(f, \rho, \mu) = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (7)$$

$$R_{dc} = \frac{4\rho}{k \pi d_{str}^2} \left[\sum_{i=1}^{N_2} (2\pi r_i) + (N_2 - 1)\Delta \right] \quad (8)$$

此外,线圈天线通电后在中心轴线将产生磁场,激活地下RFID标签进行正常工作。分散型RFID线圈天线的磁场可以由 N_2 匝同心圆形线圈产生的磁场进行叠加得到。根据毕奥-萨伐尔定律,分散型RFID线圈天线轴线上任意一点 x 处的磁场强度 H ^[16]为

$$H = \sum_{i=1}^{N_2} \frac{I r_i^2}{2(r_i^2 + x^2)^{3/2}} \quad (9)$$

式(9)中: I 为线圈天线的通电电流。

2 天线尺寸参数优化与仿真验证

2.1 天线尺寸参数优化

对于分散型线圈天线,增加天线匝数 N_2 虽然可以增加天线的磁场强度 H ,但将牺牲其品质因数 Q ,进而增加天线损耗并降低其效率。这是因为天线的电阻 R 随着匝数的增加而增大,当天线电感 L 一定时,电阻 R 增大意味着较低的天线品质因数 Q ,即

$$Q = \frac{2\pi f L}{R} \quad (10)$$

然而,天线的品质因数 Q 并非越大越好,其越大,天线带宽越小,将影响标签数据的传输。因此,可以考虑在天线品质因数 Q 为恒定值 Q_0 的前提下,以天线的磁场强度 H 最大化为优化目标来确定最佳的尺寸参数。

图3为不同匝数下,天线的 Q 随着匝间距的变化曲线。可以看出,不同的天线匝数,通过改变线圈天线的匝间距,可以调节天线的品质因数值,使得不同匝数的RFID读写器天线的品质因数相等,保证数据传输的带宽。因此,在高场强分散型RFID线圈天线参数优化中,将天线品质因数 Q 设定为恒定值是可行的。

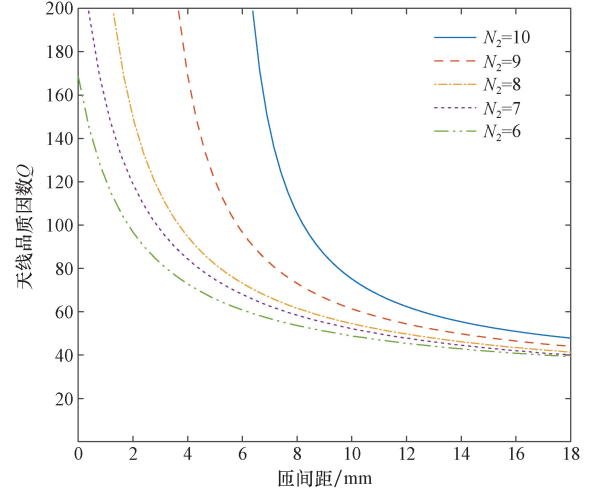


图3 天线的品质因数与匝间距的关系

Fig. 3 The relationship between the quality factor of antennas and the pitch between turns

天线尺寸参数包括匝数 N_2 、匝间距 Δ 、线圈天线最外层半径 r 、Litz线的股数 k 以及单股Litz线的直径 d_{str} 。根据式(9)可知,半径 r 越大,天线的磁场强度越大,但受地面RFID读写器外部尺寸的限制,半径 r 在这里取150 mm。同时,绕制的导线采用 800×0.1 mm的利兹线, k 取800, d_{str} 取0.1 mm。剩下的两个参数匝数 N_2 和匝间距 Δ 可以用粒子群算法优化得到。粒子群算法的基本步骤如下:首先,随机初始化一定数量的粒子,通过迭代来寻找问题的最优解;其次,在每一次迭代完成后每个粒子更新自己的位置;最后,将当前位置和群体最优位置对比,判断是否更接近最优解^[17]。

分散型RFID线圈天线的优化目标及相应的约束条件如下。

$$\begin{cases} \max(H) \\ Q = Q_0 \\ r_i = r - (i - 1)\Delta, i = 1, 2, \dots, N_2 \end{cases} \quad (11)$$

基于粒子群算法的线圈天线参数优化流程如图4所示,主要步骤如下。

步骤1 初始化粒子群的大小等参数,理论上粒子种群越大,所搜寻的空间越广,搜寻到最优解越容易,但是所需要的时间也越长,在这里设置粒子群的种群大小为150,最大迭代次数 K 为100。

步骤 2 根据自适应函数 H 计算每一个粒子的适应度, 并且计算粒子的惩罚项权重以及适应度值, 惩罚函数则是 $Q = Q_0$, 更新粒子的速度和位置, 计算粒子最优位置对应的值和对应惩罚项值。

步骤 3 迭代次数完成之后, 更新历史最优, 得到最大的 H , 然后根据这个最大值对应的最优粒子即可确定最优的匝数 N_2 和匝间距 Δ 。

利用 MATLAB 软件计算得到最优的天线匝数 N_2 和匝间距 Δ , 如图 5 所示。可知, 此时最优匝数为 9 匝, 匝间距为 8.7 mm, 此时分散型线圈天线的磁场强度达到最大值, 天线的性能达到最优。

对于图 2(a) 中的传统紧密型 RFID 线圈天线,

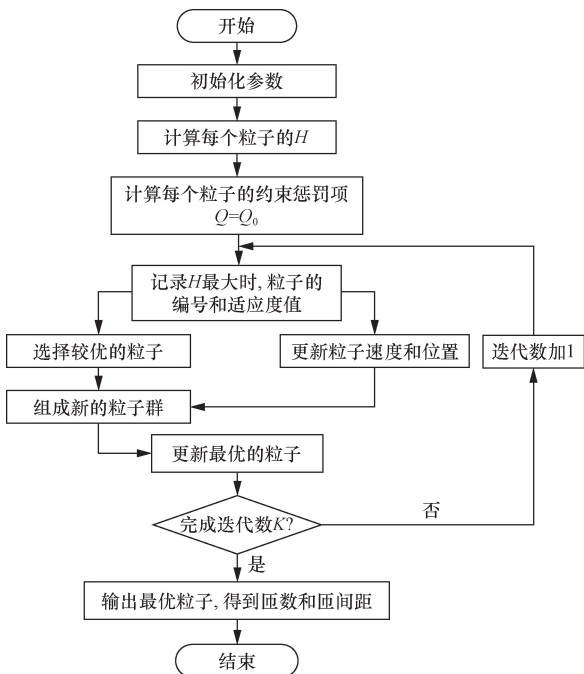


图 4 基于粒子群算法的线圈天线参数优化流程图
Fig. 4 Flow chart for optimizing coil antenna parameters based on particle swarm optimization algorithm

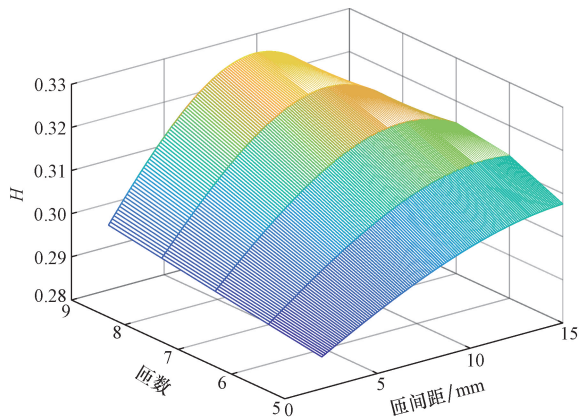


图 5 基于粒子群算法的线圈天线参数优化计算结果
Fig. 5 Optimization calculation results of coil antenna parameters based on particle swarm optimization algorithm

其参数同样可以采用以上方法进行优化, 只需将相邻两匝的匝间距 Δ 设定为 0 即可。可以得到: 在天线半径为 150 mm 时, 最优的天线匝数为 5。

2.2 天线中心磁场强度的仿真对比

为了验证天线参数的优化结果, 使用 ANSYS Maxwell 软件建立 9 匝分散型 RFID 线圈天线和传统 5 匝紧密型 RFID 线圈天线模型进行仿真, 如图 6 所示。天线半径为 150 mm, 工作频率设为地下低频 RFID 系统常用的 134.2 kHz, 将仿真求解器设为涡流场, 天线激励设为 0.4 A。

通过仿真计算可以得到, 紧密型 RFID 天线的电感为 20.16 μH , 此时天线的品质因数为 149.23, 优化后的分散型 RFID 天线的电感量为 32.28 μH , 此时的品质因数为 150.24, 两者的品质因数数值较为接近, 符合保证天线品质因数恒定的设计需求。图 7 为两种天线在中心平面的磁场强度分布, 其中颜色越深代表的磁场强度越大。可以看出, 在靠近中心位置, 分散型 RFID 天线产生的磁场强度远远大于传统的紧密型 RFID 线圈天线, 同理论分析结果一致。

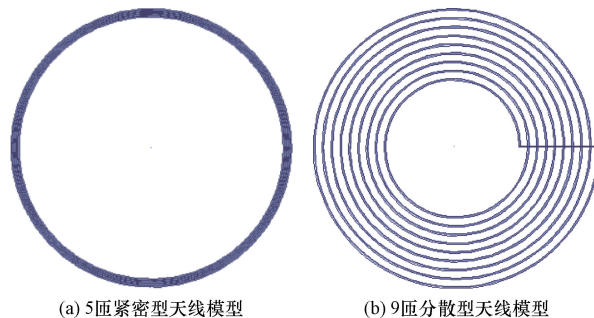


图 6 天线仿真模型
Fig. 6 Antenna simulation model

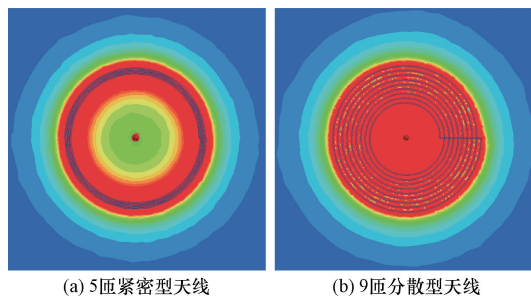


图 7 两种 RFID 天线中心平面的磁场分布
Fig. 7 The magnetic field distribution in the central plane of the two RFID antennas

3 实验测试

为了验证对 RFID 平面线圈天线结构的改进效果, 制作了 5 匝传统紧密型 RFID 线圈天线和不同匝数的分散型 RFID 线圈天线。利用 3D 打印技术制作天线骨架, 在骨架上进行天线绕制, 设计的天

线外径为 15 cm, 绕制的导线为 800 × 0.1 mm 的利兹线, 绕制的 RFID 线圈天线的实物图如图 8 所示。

使用 IM3590 电化学阻抗分析仪测量两种天线的参数, 设置频率为 134.2 kHz, 结果如表 1 所示。可以得到, 优化后的天线的品质因数与目标品质因数的偏差控制在 2% 以内, 对天线性能的影响可以忽略不计。

搭建如图 9 所示的实验测试平台, 包括读写器、上位机、标签、调谐电容以及刻度尺。由于设计的分散型天线的电感 L 都发生了改变, 因此在测试天线性能时需要调整天线的匹配电容, 使天线始终处于谐振状态。在测试过程中, 由于距离较近时所有天线都能对标签进行正常读取, 因此从 30 cm 处开始进行测量, 距离每隔 10 cm 采集一次。同时

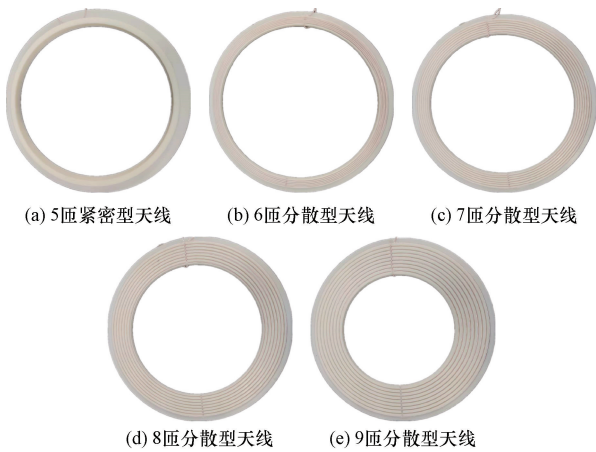


图 8 绕制的 RFID 线圈天线

Fig. 8 Winded RFID coil antenna

表 1 天线测量参数

Table 1 Measurement parameters of the antennas

天线类型	$L / \mu\text{H}$	$R / \text{m}\Omega$	Q	$(Q - Q_0) / Q_0 / \%$
5 匝紧密型	20.33	115.1	147.6	1.6
6 匝分散型	25.02	137.6	150.8	0.5
7 匝分散型	28.21	160.2	148.5	1.0
8 匝分散型	30.59	168.9	148.2	1.2
9 匝分散型	32.50	174.2	149.4	0.4

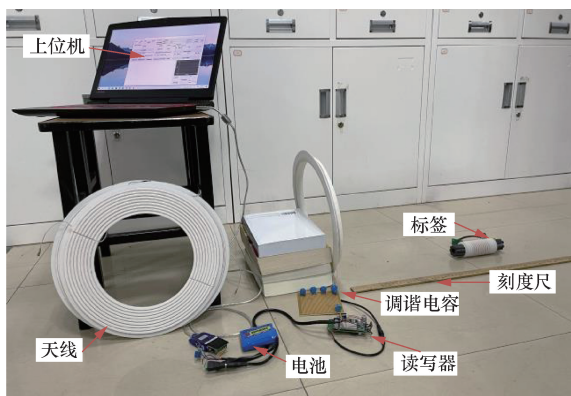


图 9 天线测试平台

Fig. 9 Antenna testing platform

利用上位机采集标签返回的返回信号强度值 (received signal strength indication, RSSI) 来判断标签所在位置的磁场强度大小, 测试结果如图 10 所示。

当 $\text{RSSI} > 90 \text{ dBm}$ 时, RFID 读写器才能正确读取标签信息。从图 10 可以看出, 传统紧密型天线在 90 cm 处 RSSI 降低至 91 dBm, 也就是说传统紧密型天线的最大读取距离在 90 cm 左右, 当距离增大到 100 cm 时, RSSI 降至 80 dBm, 此时只剩下环境噪声, 无法正确读取标签。然而, 所提出的分散型天线在 120 cm 处时 RSSI 才降低到 94 dBm, 实现了对标签读取距离的提升。同时, 9 匝分散型天线的标签读取距离最优, 这与前文粒子群算法的优化结果一致。此外, 在整个测试范围内, 分散型线圈天线的 RSSI 均高于传统紧密型线圈天线, 在增加其匝数后, RSSI 在相同位置也会增大。从 50 cm 开始, RSSI 的差值开始变大, 增强效果明显, 而从 80 cm 后, 紧密型天线无法读取标签, 分散型天线还能正常读取, 此时 RSSI 的差值又进一步增大。

综上, 传统紧密型 RFID 天线的标签读取距离在 80 cm 左右, 而新设计的分散型 RFID 天线的标签读取距离在 120 cm 左右, 读取距离增加了 33.3%。同时在相同距离下, 分散型 RFID 天线的 RSSI 明显大于传统紧密型 RFID 天线, 说明在整个磁场空间, 分散型 RFID 天线的磁场均强于传统紧密型 RFID 天线, 这有助于提高基于 RSSI 的地下电缆 RFID 定位方法的精度。通过新型分散型 RFID 探测天线增加地下电缆的探测距离和定位精度有助于满足近年来轨道交通地下电缆埋深逐渐增大的探测定位需求。

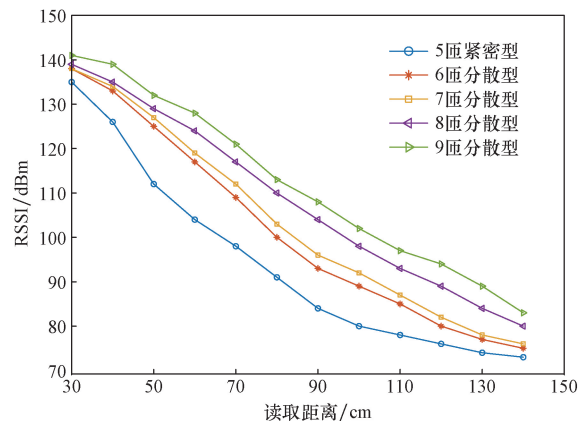


图 10 实验测试结果

Fig. 10 Experimental test results

4 结论

以提高地下 RFID 线圈天线性能为目标, 研究设计了一种新型高场强分散型 RFID 线圈天线。根据所设计的线圈天线结构, 推导了线圈天线电感、

内阻、磁场强度、品质因数等电气参数的理论表达式。与目前研究以传输效率、线圈品质因素、线圈的互感内阻之比等最大化为优化目标不同,现构建了适用于 RFID 数据传输的天线参数优化设计方法,在相同天线品质因素的约束下,以天线磁场强度最大化为优化目标,使用粒子群算法计算得到了最佳的天线匝数以及相邻两匝之间的匝间距。最后,基于 Maxwell 软件的仿真对比以及实验测试验证了天线的优化设计结果。与传统紧密型 RFID 线圈天线相比,设计的分散型 RFID 线圈天线将读取距离提高了 33.3%,同时明显增强了相同距离下的标签返回的 RSSI。研究成果可直接应用于目前的地下电缆 RFID 探测定位仪中,替代其传统的紧密型线圈天线,提升地下电缆的探测深度以及定位精度,在轨道交通的地下线缆信息化管理领域具有广泛的应用价值。同时,对于类似原理的磁感应通信系统的线圈优化设计有着参考价值。后续可研究非等匝间距的高场强地下 RFID 线圈天线及其参数优化方法,进一步提升地下电缆 RFID 探测定位系统的性能。

参 考 文 献

- [1] 鲜敏,李光耀. 铁路信号地下电缆路径识别系统研究[J]. 内燃机与配件, 2019(7): 180-181.
Xian Min, Li Guangyao. Research on path identification system of railway signal underground cable[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2019(7): 180-181.
- [2] 祝美灵,刘舒雨,韦依,等. 基于六线圈的地下电力电缆定位技术研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 176-180.
Zhu Meiling, Liu Shuyun, Wei Yi, et al. A novel underground cable positioning system based on six induction coils [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(3): 176-180.
- [3] 李云强,黄宪通,赵天翔,等. 基于 RFID 的共享自动感应车位锁系统[J]. 电子测量技术, 2021, 44(15): 38-43.
Li Yunqiang, Huang Xiantong, Zhao Tianxiang, et al. Design of automatic induction parking lock system based on RFID[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15): 38-43.
- [4] Zhu J, Jin C, Liu H. Mutual inductance modeling of two coaxial solenoid antennas with large ferrite core for underground RFID applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(8): 1-4.
- [5] 高振江,刘洲洲,张倩昀,等. 基于波导技术的无线地下传感网通信系统研究与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2020(6): 79-82.
Gao Zhenjiang, Liu Zhouzhou, Zhang Qianyun, et al. Research and implementation of wireless underground sensor network communication system based on waveguide technology [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(6): 79-82.
- [6] 刘宝衡,付天晖,王永斌. 电流场透地通信电场的数学建模与分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 12997-13001.
Liu Baoheng, Fu Tianhui, Wang Yongbin. Mathematical modeling and analysis for electric fields of current field through-the-earth communication[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(30): 12997-13001.
- [7] Diet A, Grzeskowiak M, Biancheri-Astier M, et al. Flexible serialized complementary coils for the detection of moving LF RFID tags [J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2019, 3(3): 183-190.
- [8] Grzeskowiak M, Diet A, Diao P S, et al. Pebbles tracking thanks to RFID LF multi-loops inductively coupled reader[J]. Progress in Electromagnetics Research C, 2014, 55: 129-137.
- [9] Sun Y, Kumar S, He S, et al. You foot the bill! attacking NFC with passive relays[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 8(2): 1197-1210.
- [10] 张民,闫一骅,杨环宇,等. 基于自谐振线圈参数优化的多中继无线供电系统效率提升研究[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1181-1190.
Zhang Min, Yan Yihua, Yang Huanyu, et al. Efficiency improvement of multi-relay wireless power transfer system based on self-resonance coil parameter optimization [J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1181-1190.
- [11] 张智娟,郑龙飞,杨瑞. 限定尺寸的无线电能传输线圈优化设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(9): 3626-3632.
Zhang Zhijuan, Zheng Longfei, Yang Rui. Optimal design of limited-size wireless power transmission coil[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(9): 3626-3632.
- [12] 余志斌,孙才智,张葛祥. 磁耦合谐振式无线电能传输系统线圈结构参数优化方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(13): 5559-5570.
Yu Zhibin, Sun Caizhi, Zhang Gexiang. Optimisation method of coil structure parameters in magnetic coupling resonance wireless power transfer system [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(13): 5559-5570.
- [13] 李中启,黄守道,袁小芳. 线圈非同轴时磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 151-159.
Li Zhongqi, Huang Shoudao, Yuan Xiaofang. Optimum efficiency analysis of wireless power transfer system via coupled magnetic resonances with lateral and angular misalignments [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 151-159.
- [14] 陈庆彬,范峰,汪金帅,等. 无线电能传输磁耦合系统 Litz 线圈交流电阻精确评估方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(24): 6294-6305.
Chen Qingbin, Fan Feng, Wang Jinshuai, et al. Accurate evaluation method of Litz coil AC resistance in wireless power transfer magnetically-coupled system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(24): 6294-6305.
- [15] Deng Q, Liu J, Czarkowski D, et al. Frequency-dependent resistance of Litz-wire square solenoid coils and quality factor optimization for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2825-2837.
- [16] 徐诗卉,张欢,姚辰,等. 电动汽车无线充电系统的精确定位方法[J]. 仪表技术与传感器, 2020(11): 59-63.
Xu Shihui, Zhang Huan, Yao Chen, et al. Fine positioning method for wireless charging system of electric vehicles [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(11): 59-63.
- [17] 李丽丽,李长伟,程勃,等. 基于改进粒子群算法的大地电磁反演[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11098-11107.
Li Lili, Li Changwei, Cheng Bo, et al. Magnetotelluric inversion based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(26): 11098-11107.