 DOI: https://doi.org/10.12349/iser.v5i9.3298

Research on the Optimization and Improvement of Key Parameters of Antennas in Vehicle-Ground Inductive Communication System

Bin Li

Beijing National Railway Research & Design Institute of Signal & Communication Group Co., Ltd., Beijing, 100073, China

Abstract

This paper conducts an in-depth analysis and optimization of the antenna design for the railway vehicle-ground inductive communication system. In response to issues such as weak communication signals and high error rates caused by the long distance between the vehicle's transmitting antenna and the ground inductive coil, the S-S type circuit topology model used in the system is analyzed. Based on the established circuit model, an electromagnetic simulation model was constructed for the on-vehicle antenna, and a solution for improving the antenna parameters of the vehicle-ground inductive system was proposed. The research findings can provide a reference for the design of various vehicle-ground inductive communication system schemes.

Keywords

electromagnetic compatibility; antenna parameter optimization; inductive loop

基于车—地感应通信系统天线关键参数优化改进方案的研究

李斌

北京全路通信信号研究设计院集团有限公司，中国 · 北京 100073

摘　要

论文深入分析并优化了铁路车—地感应通信系统的天线设计。针对车辆发送天线与地面感应线圈距离过远导致的通信信号弱、误码率高等问题，分析了系统中使用的S—S型电路拓扑模型。基于构建的电路模型，对车载天线构建了电磁仿真模型，并提出了改进车—地感应系统天线参数的解决方案，研究成果可为各类车—地感应通信系统方案的设计提供参考。

关键词

电磁兼容性；天线参数优化；感应环线

1 国内外车—地感应通信系统研究及应用现状分析

1.1 国内外车—地感应通信系统研究

车—地感应通信系统作为列车防护的关键技术，最初在欧洲的高速及中低速磁悬浮铁路中得到运用。应用线路如德国和奥地利的部分铁路线以及西班牙 AVE 和一些通勤铁路线上 [1]。当列车在超过 160km/h（99 英里 / 小时）的速度（德国）或 220km/h（140 英里 / 小时）的速度（西班牙）运行时，强制性要求列车使用该通信系统。近年来该通信系统还应用于国内外如吉隆坡轻轨、武汉地铁等线路，以提高城市轨道交通的运输能力 [2]。

车—地感应通信系统由地面设备根据信号和列车信息及线路条件等因素制定出列车运行速度曲线，并实时传送给车载设备，车载设备根据速度曲线实现列车运行控制与防护。当列车实际速度达到或超过防护速度时，车—地感应通信系统自动启动制动，保障列车安全 [3]。

车载天线安装在列车底部中心线位置，通过电磁感应实现与地面交叉感应环线之间的信息交互。车载天线与交叉感应环线之间的安装距离参数与车—地感应通信功能的稳定性息息相关。

1.2 车载天线测试条件分析

根据行业标准，车—地感应通信系统天线的测试条件需遵循一系列通用规范，测试时列车发送天线下表面与地面交叉感应环线的距离为 200mm（如图 1 所示）。

1.3 国内外车载天线与感应环线距离研究

在不同国家和地区应用车—地感应通信系统的铁路线路中，车载天线与感应环线之间的距离参数存在显著差异。如国内某条地铁线路交叉感应环线安装如图 2 所示。车载天

【作者简介】李斌（1987–），男，中国吉林梅河口人，硕士，工程师，从事通信信号、电磁兼容研究。

线下表面距离轨面不超过 100mm，环线与轨面几乎平齐，故车载天线距离环线不超过 200mm。

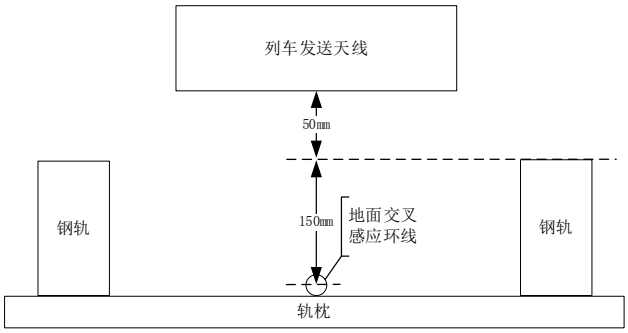

图 1 列车车载通信系统示意图

图 2 国内地铁某线交叉感应环线安装

UIC60 型钢轨是欧洲的主流钢轨之一，其钢轨轨面距离轨底的高度为 172mm，结合安装件尺寸和环线电缆直径（12mm）进行计算，环线距离轨面约为 150~160mm。

1.4 车载天线与感应环线距离参数分析

由 1.3 章节分析，现有的车—地感应通信系统设计中，车载发送天线与轨面的距离通常不超过 100mm，交叉感应环线与轨面几乎平齐，故车载天线距离交叉感应环线不超过 200mm。但近年来随着车—地通信系统之间互联互通，列车底部布线更加规范化等要求，安装于列车底部用于不同制式车—地通信的设备也随之增多，车—地感应系统天线安装高度也随之增高，通过对既有的车载天线的测试数据进行分析，既有车载发送天线与交叉感应环线之间的距离超过 300mm 后，车—地感应通信系统轨旁设备无法正常对车载发送的报文进行解析，而实际应用需求是车载发送天线下表面距离感应环线为 350mm（测试数据见表 1）[4]，得出车载天线与地面感应环线距离大是制约车—地感应通信系统正常通信的主因的推论，需通过搭建天线仿真模型 [5-7] 验证推论是否正确，并根据天线仿真结果提出车—地感应通信系统天线参数改进的方法。

表 1 车载发送天线与地面交叉感应环线收发功率关系表

车载输出电压（V）	车载输出电流（mA）	地面接收电压（V）	环线感应电流（mA）	测试结果（天线底面距环线 300mm，地面设备上电）
34.7	236	1.13	145.3	无接收帧
36.3	273	1.21	149.7	无接收帧
45.1	291	1.52	151.1	无接收帧

2 车—地感应通信系统车载天线仿真模型的研究

2.1 S–S 拓扑特性研究

车—地感应通信系统车载天线、地面交叉感应环线均采用电感、电容、电阻串联谐振的方法进行设计，因此运用 S-S 拓扑网络对车载天线和交叉感应环线从磁场域转换为电路域进行参数的理论计算推导，图 3 所示为车载发送天线与地面感应环线的 S-S（串联 - 串联）拓扑网络，其中 C_1、L_1、R_1 分别表示天线的串联补偿电容、电感量及天线的寄生电阻；C_2、L_2、R_2 分别表示地面感应环线的串联补偿电容、电感量及感应环线的寄生电阻；M 表示天线与环线间的互感量；V_i、R_L 分别表示发送天线的交流输入电压和感应环线的负载电阻。I_1、I_2 分别表示天线侧的谐振电流和感应环线的谐振电流。

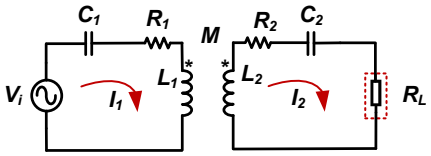

图 3 天线与感应环线间的 S–S 拓扑电路图

采用传统的完全谐振的补偿方式，即：

$$X_{L1} - X_{C1} = 0 \qquad X_{L2} - X_{C2} = 0 \tag{1}$$

利用基尔霍夫定理可将环路中的电流表示为：

$$I_P = \frac{R_1 + R_2}{R_1(R_1 + R_2) + \omega^2 M^2} V_i \qquad I_2 = \frac{j\omega M}{R_1(R_1 + R_2) + \omega^2 M^2} V_i \tag{2}$$

根据耦合系数计算公式可知，耦合系数 k 与互感 M 成正比例关系：

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \times L_2}} \tag{3}$$

由公式（3）运用变量控制法设置 L_1 和 L_2 不变，通过加长发送天线磁棒长度或增大磁棒面积，增大耦合系数 k，进而加大自感 M。

另外由于车—地感应通信系统中相较于 R_1、R_L、R_2 等电阻参数，互感 M 数值很小，因此由公式（2）可知，当自感 M 增大时，发送天线侧谐振电流 I_1 几乎不改变，交叉感应线圈侧的谐振电流 I_2 会增大；加大车载天线与交叉感应环线距离后，通过加长发送天线磁棒长度或增大磁棒面积的方式，可增强车—地感应通信系统车、地间通信信号强度。

2.2 车载天线仿真模型搭建

在电磁场仿真领域，ANSYS、COMSOL、ADS、XFDTD 等软件被广泛运用。论文采用 ANSYS 软件搭建仿真模型，ANSYS 软件可用于进行电磁仿真的模块包括 MAXWELL，HFSS，Slwave 等模块，基于车—地感应通信

系统的工作频率为 54kHz 附近，因此采用了 MAXWELL 模块进行电磁仿真 [8,9]，而系统电路部分采用了 MATLAB 软件进行仿真 [10,11]。

本次仿真中建立的发送天线和交叉感应环线模型参数分别如表 2 和表 3 所示。

在 Maxwell 模块中建立的发送天线和交叉感应环线整体模型图如图 4 所示。

表 2 发送天线模型参数

元件	材料	尺寸 (mm)
天线磁棒	铁氧体（μ=2500）	长 20 宽 20 高 235
漆包线圈（120 匝）	铜	长 20 宽 20 线径 1.25 匝间距 0.05

表 3 交叉感应环线模型参数

元件	材料	尺寸 (mm)
交叉感应环线	铜	长 20000 宽 717.5 线径 2

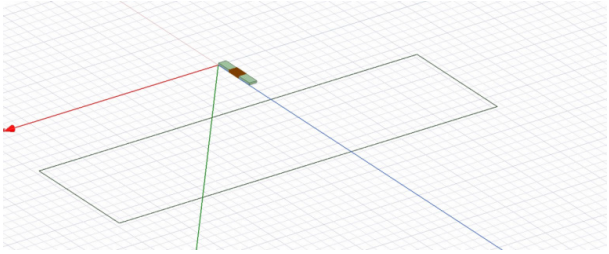

图 4 发送天线和交叉感应环线整体模型

仿真主要参数设置为：迭代次数 10；非线性误差 0.001；迭代误差限制 30%。

然后使用 MATLAB 软件进行外接电路仿真，车—地感应通信系统天线和交叉感应环线的等效电路模型如图5所示。

电路模型中的元件参数如表 4 所示。

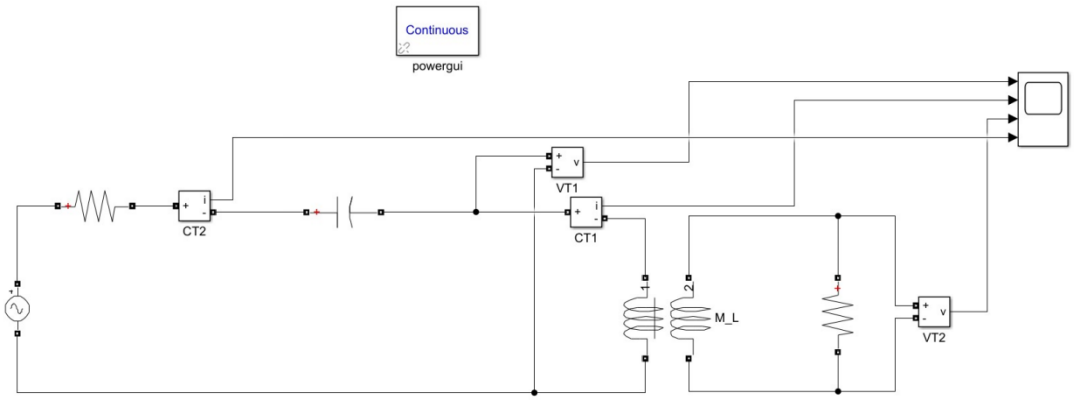

图 5 系统等效电路模型

表 4 电路模型元件参数

元件	参数
交流电压源	25V
发送侧谐振电容	
发送侧串联电阻	5Ω
接收侧串联电阻	720Ω

2.3 天线与感应环线相对高度对系统功率收发比影响仿真

本节主要通过控制变量法分析在控制其他因素基本相同的情况下，发送天线与感应环线之间的相对高度对系统功率收发比例的影响。

此时的发送天线的磁场分布图如图 6 所示（注：在本次仿真中磁场分布图的最大量程统一为 0.00004T，刻度为 0.000003T/ 色度）。

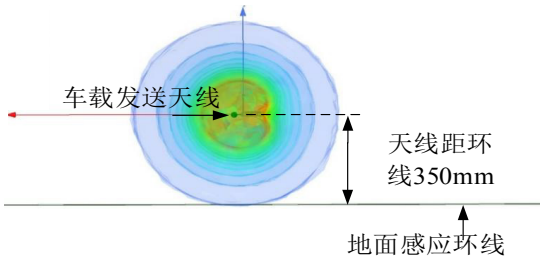

图 6 高度 350mm 磁场分布图

导入电路模型后，得到电路计算结果如表 5 所示。

由表 5 可知在频率为谐振频率 54kHz 时，接收侧与发送侧的电压幅值的比值为 -88.690dB-(-60dB)=-28.69dB，即：接收侧电压为发送侧电压的 0.0368 倍。

表 5 安装高度为 350mm 时的系统电流测量结果

F(kHz)	54
dB(C1,I)AC	-74.248
Db(C1,V)AC	-12.485
dB(E1,I)AC	-74.248
dB(E1,V)AC	-60
dB(R1,I)AC	-145.836
Db(R1,V)AC	-88.690

当发送天线模型与接收天线模型在高度差为 200mm 时，测得发送天线自感为 3.4766mH，此时的磁场分布图如图 7 所示。

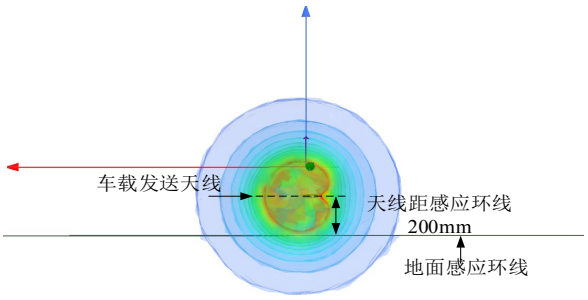

图 7 高度 200mm 磁场分布图

导入电路模型后，得到电路计算结果如表 6 所示。

表 6 安装高度为 200mm 时的系统电流测量结果

F(kHz)	54
dB(C1,I)AC	-74.490
Db(C1,V)AC	-12.727
dB(E1,I)AC	-74.490
dB(E1,V)AC	-60
dB(R1,I)AC	-140.549
Db(R1,V)AC	-83.403

由表 6 可知在频率为谐振频率 54kHz 时，接收侧与发送侧的电压幅值的比值为 -83.403dB-（-60dB）=-23.403dB，即：接收侧电压为发送侧电压的 0.0676 倍；由表 5 和表 6 天线仿真数据与天线实测数据进行比对一致，验证了天线仿真模型搭建是准确的。

由图 8 与图 9，表 5 与表 6 对比结果可知，当发送天线与接收天线的高度差由 350mm 将为 200mm 时，以电压比值表示的收发比增大了约 1.838 倍。

2.4 发送天线铁氧体磁棒长度改变对系统功率收发比影响仿真

本节主要通过控制变量法分析在控制其他因素基本相同的情况下，观察改变发送天线中铁氧体的长度对系统功率收发比例的影响， 将图 6 中所示模型（高度 350mm）设为实验组，并将图 6 模型中的铁氧体两侧各沿水平面拉伸 75mm, 为保持自感不变，将线圈匝数将为 88 匝后，线圈自感为 3.5035mH，与图 6 模型自感接近。

此时的磁场分布图如图 8 所示。

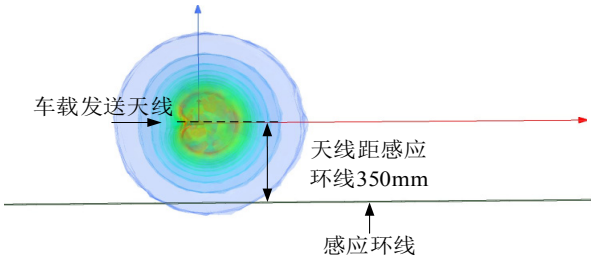

图 8 改变铁氧体长度后磁场分布图

导入电路模型后，得到电路计算结果如表 7 所示。

表 7 改变铁氧体长度后电路测量结果

F(kHz)	54
dB(C1,I)AC	-73.980
Db(C1,V)AC	-12.162
dB(E1,I)AC	-73.980
dB(E1,V)AC	-60
dB(R1,I)AC	-142.356
Db(R1,V)AC	-85.210

由表 7 可知在频率为谐振频率 54kHz 时，接收侧与发送侧的电压幅值的比值为 -85.210dB-（-60dB）=-25.210dB，即：接收侧电压为发送侧电压的 0.0549 倍。

由图 6 与图 8，表 5 与表 7 对比结果可知，当控制自感不变，加长铁氧体长度为 385mm 时，以电压比值表示的收发比增大了约 1.5 倍。

2.5 车载天线仿真模型数据分析

综合比对分析 2.4 章节发送天线铁氧体磁棒长度改变对系统功率收发比的影响的仿真结果，得出以下结论：系统功率收发比随发送天线内铁氧体长度加长而逐渐增大，当铁氧体长度由既有的 200mm 加长到 385mm 时，以电压比值表示的收发比增大了约 1.5 倍。

3 车载发送天线实际测试数据及分析

3.1 测试环境搭建

改进后的车载发送天线测试环境按照最新的参数配置进行搭建，并将图 1 中车载发送天线下表面距离交叉感应环线的高度调整至 350mm，发送天线测试环境搭建如图 9 所示。

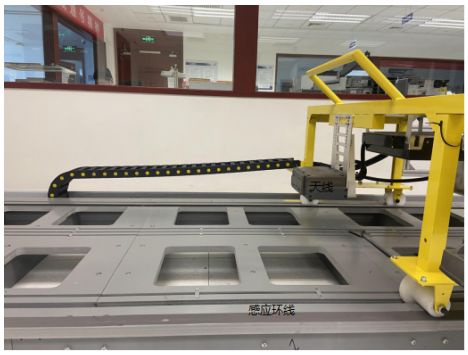

图 9 车载发送天线测试环境搭建

3.2 测试记录

改进参数后的车载发送天线输出功率测试见表 8。

表 8 改进参数后的车载发送天线输出功率测试表

天线距感应环线高度（mm）	天线输入电流（A）	天线输入电压（V）	地面环线感应电压（V）	测试结果
350	0.98	33.3	1.8	无接收帧
	1.24	45.4	2.47	有帧接收，误码率高
	1.28	47.7	2.63	帧接收正常

3.3 车载发送天线调整参数后的测试数据分析

通过调整天线磁棒长度参数，发送天线内的磁棒由 235mm 加长至 385mm，再减少磁棒上绕制漆包线的线圈数，控制了车载发送天线的电感量与既有发送天线基本保持一致，加长磁棒的天线，其磁场在空间的覆盖范围增大，从而能够满足发送天线距地面感应环线为 350mm 安装高度的最大应用需求 [12-14]。

4 结论

综合分析国内外车地感应通信系统的应用现状，本研究提出了针对性的天线参数优化方案，总结车载天线距离交叉感应环线的高度在 200mm 以内，已不适用于高铁列控系统各车—地通信系统之间互联互通的设计需求，针对车—地感应通信系统车载发送天线与地面交叉感应环线距离远造成车、地设备之间通信信号强度无法不够，导致车、地通信误码率高、无法正常通信等问题，分析了车载发送天线与地面交叉感应环线构成的 S—S 型串联—串联电路拓扑模型，并在构建的 S—S 电路模型基础上搭建了发送天线与交叉感应环线之间的电磁仿真模型，运用变量控制法改变发送天线磁棒长度参数，车—地感应通信系统改变天线参数后，通过实物测试验证了天线改进方法的可行性，车—地感应系统通信故障率得以降低，提升了系统的可用性和可靠性，保障了车—地感应通信系统运行的安全性，对后续磁悬浮交通设计提供重要参考。

参考文献

[1] Zustand der Eisenbahnfahrzeuge. Leittechnik. Teil 207-7:Fahrzeugeinrichtung. LZB 80 / l 80 State of the railway vehicles. Control and instrumentation technology. Part 207-7:On-board equipment. LZB 80 / I 80 (continuous automatic train-running control):VDE 0119-207-7-2004[S].

[2] 李宏伟,刘晓娟.移动自动闭塞系统分析及应用[J].重庆工学院学报(自然科学版),2007,21(12):157-160.

[3] 北京全路通信信号研究设计院集团有限公司[P].一种交叉感应环线系统的控制方法:CN201910019675.3[P]. 2021-04-13.

[4] 卢然.基于交叉感应环线的车地通信系统专项测试研究[J].铁路通信信号工程技术,2021,18(1):80-84.

[5] 宋瑞刚.基于交叉感应电缆环线的车—地通信系统建模与仿真研究[D].北京:北京交通大学,2016.

[6] 程兰珺.中低速磁悬浮列车悬浮电磁铁分析及仿真[J].中国科技纵横,2011(23):89-90+88.

[7] 吴冬华,冯程程,余进.磁浮列车非接触式供电技术[J].西南交通大学学报,2022,57(3):522-530.

[8] DENG Z G, ZHANG W H, WANG L, et al. A high-speed running test platform for high-temperature superconducting maglev[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022,32(4):3600905.1-3600905.5.

[9] WENBING TANG, LIYE XIAO, DONG XIA, et al. 2-D and 3-D Analytical Calculation of the Magnetic Field and Levitation Force Between Two Halbach Permanent Magnet Arrays[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2021,57(4):8300208-1-8300208-8.

[10] SPORLEDER, H. INSTITUTE of ELECTRIC and ELECTRONIC ENGINEER. Continuous automatic train control and cab signalling with the LZB 80[C]. //Main Line Railway Electrification, International Conference on,1989:40-46.

[11] Ozerov A, Denchik E. Train Control Systems for High Speed Rails[J]. JITA-APEIRON,2023,26(2):110-115.

[12] TOTOR N. Network Management Center for East European Railways[J]. Buletinul Ştiinţific al Universităţii Politehnica Timisoara–Seria Inginerie şi Management,2021,7(1&2):41-46.

[13] Mindur L, Mindur M. The development of high-speed rail in the Federal Republic of Germany between 2002-2020[J]. Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska,2022(117).

[14] Mindur L, Mindur M. The development of high-speed rail in the Federal Republic of Germany between 2002-2020[J]. Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska, 2022(117):110-115.