

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614891

地电极电流场透地通信系统负载阻抗建模*

徐 湛^{1,2}, 冯雪冬^{1,3}, 杨小龙^{1,2}, 张 旭^{1,2}

(1. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 102206; 2. 北京信息科技大学信息与通信工程学院 北京 102206; 3. 北京信息科技大学自动化学院 北京 102206)

摘 要:地电极电流场透地通信(TTE)系统为地下强遮蔽环境中的信息传输提供了一种有效手段。发射端负载阻抗决定了注入大地电流的大小,是影响系统传输性能的关键因素。然而,在固定电压激励条件下,现有透地通信传输模型通常以注入地层电流为起点分析系统性能,缺乏对发射端负载阻抗的定量建模,难以指导实际系统设计。针对上述问题,首先构建了由电极接触阻抗、导线阻抗和大地阻抗共同组成的负载阻抗模型。其次,基于各阻抗分量的物理形成机理,建立了导线阻抗和电极接触阻抗的等效电路模型,并推导出相应的数学表达式。通过测量系统整体负载阻抗,分离并提取出大地阻抗,进一步建立了大地阻抗与地层电导率之间的非线性回归模型,揭示出大地阻抗随电导率增加呈单调递减的变化规律。最后,在不同电极几何参数、土壤电导率和传输频率条件下,对所提出的负载阻抗模型进行了实验验证。实验结果表明,模型预测值与实测数据具有良好一致性,整体平均相对误差控制在 8% 以内,且极低频工作条件下负载阻抗对频率变化不敏感,验证了忽略电抗分量的合理性。该研究填补了透地通信系统负载阻抗定量建模的空白,为深入理解地电流场透地通信系统的传输特性提供了理论依据,可为电极结构优化及相关系统参数配置提供参考。

关键词:透地通信;地电极;负载阻抗模型;电极接触阻抗;大地阻抗

中图分类号: TH701 TN929.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Modeling of load impedance in electrode-based through-the-earth communication system

Xu Zhan^{1,2}, Feng Xuedong^{1,3}, Yang Xiaolong^{1,2}, Zhang Xu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China; 2. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China; 3. School of Automation, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China)

Abstract: Electrode-based through-the-earth (TTE) communication system provides an effective solution for information transmission in strongly shielded underground environments. The transmitter's load impedance determines the magnitude of the current injected into the earth and is a key factor affecting the system's transmission performance. However, under fixed-voltage excitation conditions, existing through-the-earth communication transmission models typically analyze system performance starting from the current injected into the formation, lacking a quantitative model of the transmitter-side load impedance, which makes it difficult to guide practical system design. To address these issues, this paper first develops a load impedance model consisting of electrode contact impedance, wire impedance, and earth impedance. Based on the physical mechanisms of each impedance component, equivalent circuit models for wire impedance and electrode contact impedance are proposed, along with corresponding mathematical expressions. By measuring the overall system load impedance, the earth impedance is separated and extracted, and a nonlinear regression model between earth impedance and soil conductivity is established, revealing that the earth impedance decreases monotonically with increasing conductivity. Finally, experimental validation of the proposed model is performed under different electrode geometries, soil conductivities, and transmission

收稿日期: 2026-01-23 Received Date: 2026-01-23

* 基金项目: 北京市科技新星计划(20240484645)项目资助

frequencies. The experimental results show that the predicted values of the model have good agreement with the measured data, with the average relative error maintained within 8%, and the load impedance is insensitive to frequency variation under extremely low-frequency operating conditions, verifying the rationality of neglecting the reactance component. This study fills the gap in quantitative modeling of load impedance for TTE communication systems, provides a theoretical basis for understanding the transmission characteristics of TTE communication systems, and offers a reference for electrode structure optimization and related system parameter configuration.

Keywords: through-the-earth communication; ground electrode; load impedance model; electrode contact impedance; earth impedance

0 引 言

在隧道、矿井等地下强遮蔽环境中,标准射频信号衰减严重,传统无线通信系统难以有效应用^[1]。而地电极电流场透地通信(through-the-earth, TTE)系统直接通过大地介质传输极低频(extremely low frequency, ELF)电流场信号,具备良好的穿透能力,是实现地下空间可靠通信的有效手段^[2]。在 TTE 系统中,发射机可近似为电流源,其工作性能主要取决于向大地中注入电流的能力。发射端负载阻抗直接决定了注入大地的电流幅值,从而影响接收信号强度及系统的有效通信距离^[3]。在负载阻抗的各组成部分中,大地阻抗对信号衰减特性起关键作用,其准确表征对于分析 TTE 信道传输特性具有重要意义^[4]。此外,等效负载还包括电极接触阻抗和导线阻抗^[5]。因此,迫切需要对 TTE 系统中的负载阻抗进行精确建模,以准确刻画其信道特性,优化发射端参数设计,并提升系统整体通信性能。

近期,文献[6-10]围绕透地通信信道中的大地阻抗测量及相关问题开展了深入研究。文献[6]指出,大地阻抗主要受大地介质电导率影响,并与电导率成反比关系。文献[7]提出,大地阻抗由电阻、电感和电容构成,其大小受土壤理化特性以及电流路径结构等多种因素的综合影响。文献[8]通过构建地电极电流场透地通信系统的电场解析模型,从理论层面探讨了大地阻抗在电流传播过程中的作用机制,系统揭示了其在信号衰减中的影响规律。文献[9]研究了不同岩层中大地阻抗与频率、电导率之间的关系,并通过实地实验验证了低频信号在低阻抗介质中具有更优的传播性能。文献[10]则指出,在极低频范围内,大地阻抗主要由地质电导率控制,受频率影响较小,通常可忽略其频率相关性。

尽管已有研究对大地阻抗进行了分析,但其仅构成系统总负载阻抗的一部分。相比之下,文献[11-15]从整体角度对 TTE 系统的等效总负载阻抗拟合与建模问题进行了研究。文献[11]提出,整体等效负载阻抗可等效为由电极接触阻抗、大地阻抗和导线阻抗串联组成的电路模型,但未对各阻抗分量给出明确的数学表达形式。文献[12]指出,电极接触阻抗是指电极与大地之间电流耦合过程中所体现的阻抗,通常由电阻性分量和与频率

相关的容抗或感抗构成。文献[13]进一步探讨了通过调控电极埋设深度和土壤条件来降低电极接触阻抗的方法,并强调电极接触阻抗受埋设深度、接触面积及土壤含水率等因素的综合影响。文献[14]的仿真结果表明,随着电极数量的增加,接收点电场强度明显增强,反映出等效负载阻抗的降低,有效提升了电流耦合效率和系统发射性能。文献[15]通过实验验证了电极结构及其布置方式对 TTE 系统总负载阻抗的显著影响,并提出了一种通过优化电极数量和形状来调节总负载阻抗的方法,从而提升系统传输性能。

文献[6-10]主要围绕 TTE 中的大地阻抗展开,从介质电导率、土壤理化特性、频率以及电流路径结构等方面分析其变化规律,揭示了大地阻抗在信号衰减和低频传播过程中的重要作用。然而,这类研究多基于现象性规律总结,缺乏从物理机理出发的定量建模;尚未形成适用于 ELF 条件的统一数学表达式;多数结论仅来源于有限场景下的实验数据,缺乏系统且具有泛化能力的实测支撑;同时,各影响因素之间的耦合关系尚未得到充分揭示,使得难以准确预测大地阻抗的变化及其对电流注入和通信性能的影响。另一方面,文献[11-15]从整体角度对透地通信系统的等效负载阻抗开展分析,通常将其表示为电极接触阻抗、大地阻抗和导线阻抗串联组成的电路模型,并探讨各阻抗分量对电流耦合效率和通信性能的影响。然而,这些研究尚未建立大地阻抗和电极接触阻抗各自的机理化电路模型及数学表达式,使整体负载阻抗难以精确量化,进而限制了透地通信系统的定量性能分析与工程化优化设计。综上所述,现有研究在大地阻抗表征和整体负载阻抗建模方面均存在定量模型不完善、参数耦合关系不明确等不足。因此,有必要构建一种能够在极低频条件下系统刻画电极接触阻抗、导线阻抗和大地阻抗的负载阻抗模型,为发射端结构设计和系统性能优化提供可靠的理论基础。

基于上述分析,本文对地电极电流场透地通信系统中的负载阻抗进行了系统建模研究。首先,基于各阻抗分量的物理形成机理,建立了导线阻抗和电极接触阻抗的等效电路模型,从电阻、电感和电容特性对其阻抗行为进行了刻画,并推导了相应的解析表达式,实现了导线及电极—土壤界面阻抗的定量表征。其次,通过系统实验测量获得发射端整体负载阻抗,在此基础上分离并提取

大地阻抗,进一步建立了描述大地阻抗与土壤电导率关系的非线性回归模型,定量刻画了大地阻抗对环境参数的依赖特性。最后,在不同电极几何结构、土壤电导率及传输频率等工况下,对所提出的负载阻抗模型进行了实验验证。结果表明,该模型能够准确地预测透地通信系统的负载阻抗,具有良好的工程适用性,可为电极结构优化及系统参数配置提供参考。

1 地电极电流场透地通信负载阻抗模型

如图1所示,地电极电流场透地通信系统将信号调制在电流上进行数据传输。在发送端,发射机将极低频电信号施加于发射电极,从而在地层中激励产生电流场^[16]。在接收端,接收机通过检测接收电极间的感应电压来实现通信^[17]。

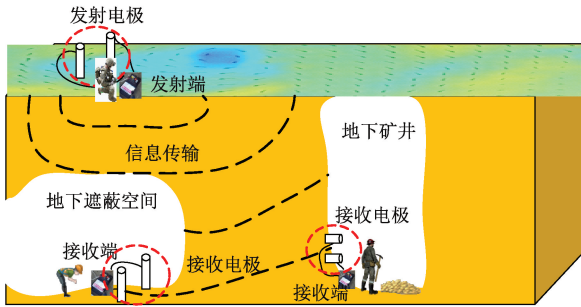


图1 地电极电流场透地通信系统

Fig. 1 Electrode-based through-the-earth (TTE) communication system

如图2所示,发射端通过一对导线与两根金属电极实现与地层的连接。其总负载阻抗并非固定常量,而是由多种因素共同决定,主要包括导线阻抗 Z_w 、大地阻抗 Z_e 以及电极接触阻抗 Z_c 。因此,为准确描述地电极电流场透地通信系统的传输特性,需要分别对 Z_w 、 Z_e 与 Z_c 建立阻抗模型,并在此基础上进一步构建总负载阻抗的整体模型。

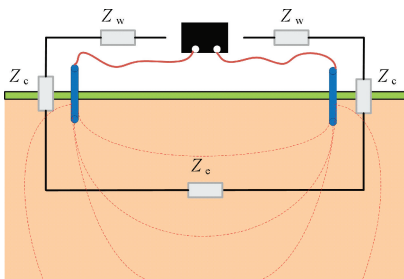


图2 地电极电流场透地通信系统

Fig. 2 Electrode-based through-the-earth (TTE) communication system

1.1 导线阻抗 Z_w

在地电极电流场透地通信系统中,电极间的连接通常采用数米至数十米的多芯铜线。在低频范围内,信号波长远大于导线长度,导线各处电压和电流变化近似同步,可忽略电磁传播及分布参数效应,导线可视为集总参数元件^[18]。此时,导线中电流分布基本均匀,趋肤效应尚不明显,其阻抗主要由欧姆电阻和自感效应共同决定,导线分布电容由于容抗数量级较高,其对应的电流贡献极小,可以忽略^[19]。基于上述分析,如图3所示,导线阻抗 Z_w 在低频范围内可近似为电感 L_w 与电阻 R_w 串联的形式进行建模。

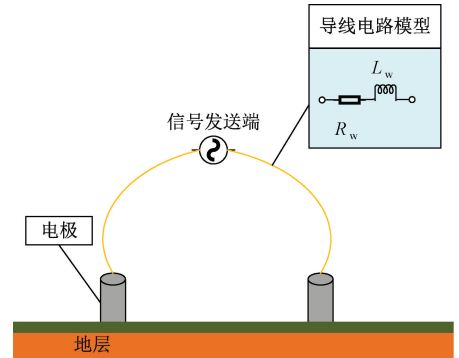


图3 导线阻抗模型

Fig. 3 Wire impedance model

一般情况下,系统与电极连接的导线直流电阻在 $0.02 \sim 0.33 \Omega/\text{m}$ 之间。导线阻抗模型中的电阻 R_w 和电感 L_w 可如式(1)和(2)所示^[20]。

$$R_w = \frac{\rho_w l_w}{\pi a_w^2} \quad (1)$$

$$L_w = 0.002 l_w \left[2.3 \ln \left(\frac{4l_w}{2a_w} \right) - 0.75 \right] \quad (2)$$

则导线阻抗 Z_w 如式(3)所示。

$$Z_w = R_w + j\omega L_w = \frac{\rho_w l_w}{\pi a_w^2} + j\omega \left(0.002 l_w \left(2.3 \ln \left(\frac{4l_w}{2a_w} \right) - 0.75 \right) \times 10^{-6} \right) \quad (3)$$

式中: a_w 是导线的半径(m); l_w 是导线的长度(m); ρ_w 是导线的电阻率; j 为虚数单位; ω 为信号角频率;电感 L_w 单位为 μH 。

1.2 接触阻抗 Z_c

地电极电流场透地通信系统通常采用如图4所示的长圆柱型金属电极。电极与大地(土壤)之间的电接触过程较为复杂,其接触阻抗一般可分为3部分:电极本体的金属电阻、金属-土壤界面产生的电化学阻抗以及由电流在电极邻近土壤中扩散形成的接地阻抗^[21]。其中,金属电阻相对较小,通常可以忽略;在直流或极低频条件

下,接地阻抗在整体阻抗中占据主导地位,而界面电化学反应则主要影响接触阻抗的频率响应特性。现有研究多将电极接触阻抗简化为接地阻抗,并采用分层电阻累积的方式进行近似建模,该方法能够较好反映低频条件下的阻性特征,但未能考虑界面极化引入的电容效应及其频率依赖性,因而难以对电极-土壤接触阻抗进行全面刻画^[22]。

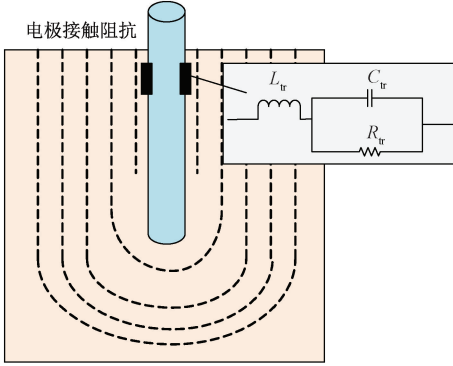


图 4 电极接触阻抗模型

Fig. 4 Electrode contact impedance model

为更全面描述电极-土壤接触阻抗在交流激励下的复合特性,本文在等效建模中同时考虑了电阻、电容和电感分量:1)电极表面及其邻近土壤中的电流传导路径会产生欧姆损耗,可等效为电阻分量 R_{tr} ^[23];2)金属-土壤界面处的电荷积累与释放(界面极化)使界面呈现电容特性,对应电容分量 C_{tr} ^[24];3)电流在电极及周围介质中形成回路并伴随磁场变化,将引入感应效应,可等效为电感分量 L_{tr} ^[25]。基于上述物理机理,本文构建了由电阻、电容和电感共同组成的电极接触阻抗等效电路模型,如图 4 所示。假设地下介质为均匀各向同性半空间,并基于长细电极近似,结合准静态电磁理论框架,得到了电阻分量 R_{tr} 、电容分量 C_{tr} 和电感分量 L_{tr} 的参数化表达式,如式(4)~(6)所示^[26-28]。

$$R_{tr} = \frac{1}{4\pi\sigma l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (4)$$

$$C_{tr} = 2\pi\epsilon l \left(\ln\left(\frac{2l}{a}\right)\right)^{-1} \quad (5)$$

$$L_{tr} = \frac{\mu l}{2\pi} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (6)$$

式中: a 为电极半径(单位为 m); l 为电极埋地深度(单位为 m); σ 为土壤电导率(单位为 S/m); ϵ 为土壤介电常数(单位为 F/m); μ 为土壤磁导率(单位为 H/m)。

在地电场场透地通信系统中,发射端可等效为由两根对称接地电极构成的两端子结构。由于 TTE 系统中电极间距通常远大于电极半径,可近似认为两电极周围的电流扩散区域互不干扰,因此其等效接触阻抗可表示

为两个单电极接触阻抗的串联组合,并仍可采用图 5 所示的 RLC(resistance-inductance-capacitance)串并联等效电路模型进行描述^[29]。

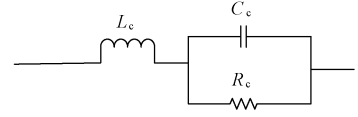


图 5 发送端电极接触阻抗模型

Fig. 5 Transmitter electrode contact impedance model

对于一对接地电极,其等效接触阻抗同样可分解为电阻分量 R_c 、电容分量 C_c 与电感分量 L_c , 如式(7)~(9)所示。

$$R_c = 2R_{tr} = \frac{1}{2\pi\sigma l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (7)$$

$$C_c = \frac{C_{tr}}{2} = \pi\epsilon l \left(\ln\left(\frac{2l}{a}\right)\right)^{-1} \quad (8)$$

$$L_c = 2L_{tr} = \frac{\mu l}{\pi} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (9)$$

则电极接触阻抗 Z_c 可如式(10)所示。

$$Z_c = \left(\frac{1}{R_c} + j\omega C_c\right)^{-1} + j\omega L_c = \frac{\ln\left(\frac{2l}{a}\right)}{2\pi\sigma l + j\omega\pi\epsilon l} + j\omega \frac{\mu l}{\pi} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (10)$$

式中: a 为电极半径(单位为 m); l 为电极埋地深度(单位为 m); σ 为土壤电导率(单位为 S/m); ϵ 为土壤介电常数(单位为 F/m); μ 为土壤磁导率(单位为 H/m); j 为虚数单位; ω 为信号角频率。

1.3 大地阻抗 Z_c

1) 大地阻抗影响因素分析

注入大地的电流主要通过欧姆传导、电解传导以及介质传导等机制实现。欧姆传导和电解传导对应传导电流,与大地的电阻特性相关^[30];介质传导则对应由交变电场引起的极化电流,与大地的电容特性相关^[31]。因此,大地阻抗的等效电路模型可分为电阻分量和电容分量两部分。此外,传导电流与极化电流在同一外加电压作用下并行存在,分别通过传导通道和极化通道传播,而非依次通过同一路径^[32]。因此,在等效电路建模中,大地阻抗的电阻分量与电容分量采用并联结构进行描述,并可用图 6 所示的势电阻模型进行等效表示。

在数学建模分析中,电路模型中电容分量的容抗($X_c = 1/(2\pi fC)$)随着频率的降低而显著增大。由于 TTE 系统工作在极低频段,频率 f 极小,导致电容的容抗趋近于无穷大,从而使电容支路中的极化电流几乎为零,该支路在电路中等效为开路。因此,在数学建模中,电容分量的影响可以忽略不计,大地阻抗可近似为纯电阻。

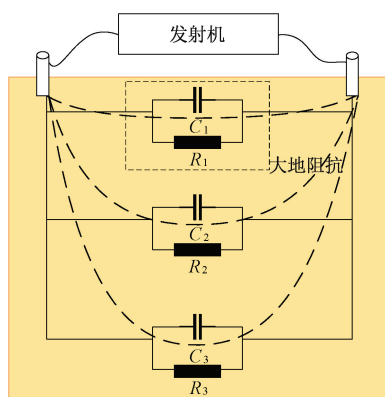


图6 大地阻抗的势电阻形式

Fig. 6 Potential resistance model of earth impedance

进一步地,大地阻抗是指电流脱离电极接触区后,在电极影响范围之外的土壤介质中传播时所表现出的阻抗特性^[33]。在此传播阶段,电极的几何参数(如尺寸和埋设深度)对电流分布的影响可以忽略。这是因为电流传播的距离远大于电极尺寸,电极几何仅影响接触区内的电流扩散过程,对脱离接触区后的远场传播影响极小^[34]。电极几何参数的影响已在电极接触阻抗模型中考虑,在大地阻抗的数学模型中无需再次考虑。从物理机理角度,大地阻抗主要由地层电导率主导^[35-36]。地层电导率反映了土壤中电子的传导能力,电导率越高,电流传导能力越强,土壤对电流的阻力越小,进而导致大地阻抗越低^[37]。因此,本文所定义的大地阻抗主要由地层电导率主导,而不依赖于电极几何参数。在极低频条件下,可以将地层电导率作为自变量,实测大地阻抗作为因变量,建立定量拟合关系。

2) 大地阻抗测量与拟合

为测量大地阻抗并拟合其与地层电导率之间的关系,本研究在北京市密云区河南寨镇提辖庄村开展了实际复杂地形试验。如图7所示,试验区面积约为 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ (约 $9 \times 10^4\text{ m}^2$)。试验场内共布设45个空间分散的测试点,分别分布于山地、林地、草地及农田等不同地貌单元,涵盖砂质土、黏性土以及碎石混合土等多种地质类型。各测试点实测电导率范围为 $0.006 \sim 0.08\text{ S/m}$,能够覆盖地电极电流场透地通信系统工程应用中的典型土壤电导率范围。

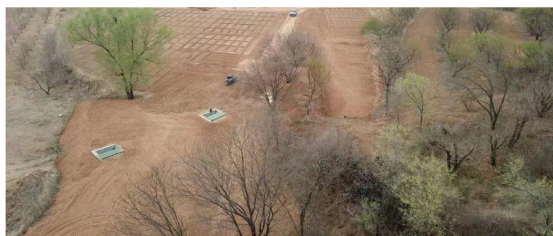


图7 复杂地形试验场

Fig. 7 Complex terrain test site

在每个测试点,所用电极为TTE通信系统常用的长圆柱型不锈钢电极,如图8所示,其尺寸为长度 $1\,000\text{ mm}$ 、直径 30 mm 。电极埋设深度 $l = 0.5\text{ m}$,半径 $a = 0.015\text{ m}$,以确保电极与大地充分接触;两电极间距固定为 5 m ,从而保证其间距远大于电极半径。



图8 长圆柱型不锈钢电极

Fig. 8 Elongated cylindrical stainless-steel electrode

在负载阻抗测量过程中,TTE通信系统统一发射幅值为 100 V 、频率为 10 Hz 、持续时间为 10 s 的正弦信号,以获取发射端的整体负载阻抗。如图9所示,具体测量方法为在发送端输出回路中串联一只小电阻,通过测量该电阻两端的电压降计算注入大地的电流,并结合发送端预设的输出电压,进一步求得整体负载阻抗的模值。同时,采用土壤电导率检测仪对各测试点的地层电导率进行测量。该仪器量程为 $0.00 \sim 10.00\text{ mS/cm}$,测量精度为 $\pm 2\%$ 。测试时,将探头插入两发射电极中心位置处的土壤中,以获取对应位置的土壤电导率。在实验过程中所使用的电导率检测仪及发送端主机如图10所示。为提高测量可靠性,每个测试点重复测量5次,取平均值作为该测试点电导率代表值。

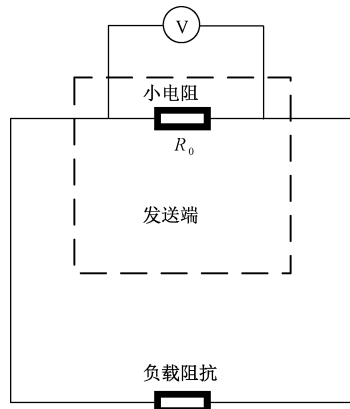


图9 整体负载阻抗测量示意图

Fig. 9 Schematic diagram of total load impedance measurement

在负载阻抗测量过程中,使用了长度为 5 m 、截面积为 2.5 mm^2 的铜导线,其阻抗约为 $0.03\text{ }\Omega$ 。由于TTE系统工作于极低频频段,在电极接触阻抗的电路模型中,串联电感分量对等效阻抗的影响可以忽略,而并联电容分量在该频段下的电流贡献也可忽略。因此,电极接触阻抗的数学模型可以近似为式(7)所示的纯电阻形式。在测得发射端整体负载阻抗后,结合电导率仪获得的地层



电导率仪

发送端主机

图 10 电导率检测仪与发送端主机

Fig. 10 Soil conductivity meter and transmitter unit

电导率,首先利用式(7)计算电极接触阻抗;然后,将计算得到的电极接触阻抗和已知的导线阻抗从整体负载阻抗中扣除,从而分离出对应的大地阻抗。部分测试点的整体负载阻抗、地层电导率,以及计算得到的部分电极接触阻抗和大地阻抗结果如表1所示。

表 1 部分测试点的负载阻抗、地层电导率、所计算的接触阻抗及大地阻抗

Table 1 Load impedance, soil conductivity, calculated contact impedance, and earth impedance at selected test points

地层电导率 $\sigma/(\text{S}\cdot\text{m}^{-1})$	负载阻抗 $ Z /\Omega$	接触阻抗 $ Z_e /\Omega$	大地阻抗 $ Z_e /\Omega$
0.018	103.09	74.27	28.79
0.020	95.52	66.84	28.65
0.016	116.12	83.55	32.54
0.013	139.85	102.83	36.99
0.008	223.40	167.10	56.27
0.007	248.35	185.67	62.65
0.006	290.77	222.80	67.94
0.009	202.01	148.53	53.45

由上一小节的分析可知,大地阻抗的数学模型主要取决于土壤电导率。在理想的均匀介质条件下,大地阻抗可表示为:

$$R = \frac{L}{\sigma A} \tag{11}$$

式中: R 为大地电阻; σ 为土壤电导率; L 为电流通过的路径长度; A 为导电路径的横截面积。

由式(11)可知,在理想均匀介质条件下,大地电阻与地层电导率成反比关系。然而,在实际传输过程中,电流在土壤中的扩散范围及分布形态会随介质电导率的变化而发生改变,从而影响等效传输路径长度 L 和导电截面积 A ^[38]。因此,在实际工况下,电导率与大地电阻之间通常表现为非线性关系。为揭示二者之间的对应规律,

本文基于大量实验数据开展了非线性回归分析,并采用最小二乘法进行参数拟合,其中部分测试点的数据列于表1。已有研究表明,此类非线性关系可通过对数型或指数型模型进行有效表征^[39-41]。基于上述分析,本文选取如式(12)所示的表达式作为回归模型:

$$Z_e = e^{a-b \times \ln(\sigma)} \tag{12}$$

式中: a 和 b 为待拟合的参数; σ 为大地电导率。经拟合后,最终得到的结果如式(13)所示。

$$Z_e = e^{0.27-0.77 \times \ln(\sigma)} \tag{13}$$

图11展示了45个实测点的大地阻抗实测值及拟合结果。由图11可以看出,所建立的拟合模型能够较好地刻画大地阻抗与地层电导率之间的对应关系。需要说明的是,式(13)为基于测量数据建立的回归模型,其中地层电导率 σ 以 S/m 为单位直接代入计算。模型输出的大地阻抗 Z_e 的单位为欧姆,其量纲信息已在回归拟合过程中隐含确定。

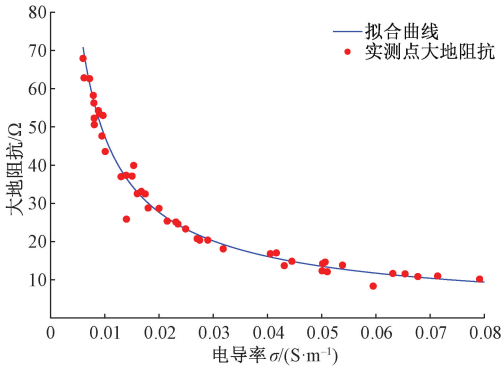


图 11 拟合曲线与实测点大地阻抗

Fig. 11 Fitted curve and measured earth impedance at test points

同时,为了进一步评估模型的拟合效果,采用决定系数 R^2 作为衡量指标。决定系数 R^2 用于衡量模型的拟合优度,其数值越接近1,表明模型对观测数据的拟合效果越好。决定系数如式(14)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS} = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_{e,i} - \hat{Z}_{e,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Z_{e,i} - \bar{Z}_{e,i})^2} \tag{14}$$

式中, RSS (残差平方和)表示大地阻抗的实测值与模型预测值之间的差异平方和,用于衡量模型的误差大小; TSS (总平方和)表示大地阻抗的实测值与其均值之间差异的平方和,衡量数据的总变异性; $Z_{e,i}$ 为第 i 个测试点大地阻抗的实测值; $\hat{Z}_{e,i}$ 为第 i 个测试点大地阻抗的模型预测值; $\bar{Z}_{e,i}$ 为所有实测大地阻抗的均值。通过计算,图11所示测试点的决定系数 $R^2 \approx 0.975$,表明所建立的模型能够较好地描述大地电阻与地层电导率之间的非线性关系。

综上所述,在地电极电流场透地通信系统中,大地阻抗与地层电导率之间的数学关系可如式(15)所示。

$$Z_e = e^{0.27-0.77 \times \ln(\sigma)} \quad (15)$$

该模型表明,随着地层电导率的增加,大地阻抗呈现单调递减的变化趋势。上述结论为揭示 TTE 通信系统中的大地阻抗特性及其变化规律提供了理论依据。

实际工程环境中,测试区域土壤往往存在岩石夹杂、多种材质混合以及同一材质局部非均匀分布等复杂情况。这些因素对大地阻抗的影响主要体现在土壤宏观导电能力的变化上,表现为电导率参数 σ 的差异^[42-43]。本文建立的回归模型以测试点实测电导率 σ 作为输入变量构建 Z_e 关系,因此在参数层面已综合反映不同地质结构及非均匀性对导电能力的影响。

如图 12 所示,前文构建的导线阻抗 Z_w 、大地阻抗 Z_e 和电极接触阻抗模型 Z_c ,共同构成了电流场透地通信系统负载阻抗模型。因此整体负载阻抗数学模型可如式(16)所示。

$$Z = Z_w + Z_e + Z_c =$$

$$\frac{\rho_w l_w}{\pi a_w^2} + j\omega \left(0.002 l_w \left(2.3 \ln \left(\frac{4l_w}{2a_w} \right) - 0.75 \right) \times 10^{-6} \right) + e^{0.27-0.77 \times \ln(\sigma)} + \frac{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)}{2\pi\sigma l + j\omega\pi\epsilon l} + j\omega \frac{\mu l}{\pi} \ln \left(\frac{2l}{a} \right) \quad (16)$$

式中: σ 为大地电导率; j 为虚数单位; ω 为信号角频率; a_w 为导线半径(单位为 m); l_w 为导线长度(单位为 m); ρ_w 为导线电阻率; μ 为土壤磁导率(单位为 H/m); a 为电极半径(单位为 m); l 为电极埋深(单位为 m); ϵ 为土壤介电常数(单位为 F/m)。

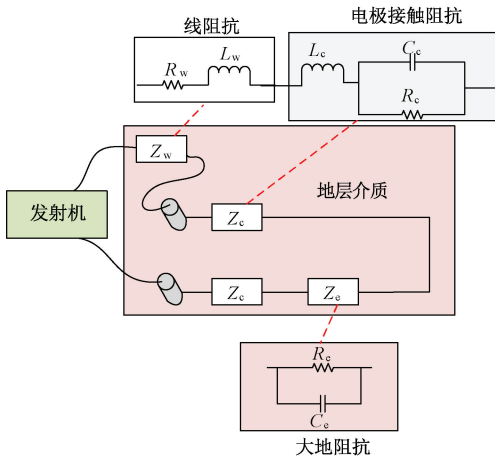


图 12 TTE 通信负载阻抗模型

Fig. 12 TTE communication load impedance model

在负载阻抗等效电路模型中,电感分量与电阻分量呈串联关系,电容分量与电阻分量呈并联关系。由于电感对应的感抗与频率成正比,在极低频条件下其影响可

以忽略;同时,电容对应的容抗随频率降低而显著增大,在该频段内电容支路近似呈开路状态,其作用亦可忽略。因此,在 TTE 系统的工作频段内,负载阻抗的数学模型可近似如式(17)所示。

$$Z = \frac{\rho_w l_w}{\pi a_w^2} + e^{0.27-0.77 \times \ln(\sigma)} + \frac{\ln \left(\frac{2l}{a} \right)}{2\pi\sigma l} \quad (17)$$

式中: σ 为大地电导率; a_w 为导线半径(单位为 m); l_w 为导线长度(单位为 m); ρ_w 为导线电阻率; a 为电极半径(单位为 m); l 为电极埋深(单位为 m)。

由式(17)可知,负载阻抗主要受电极结构参数及大地介质电导率的共同影响。在发射功率受限的条件下,可通过优化电极结构参数,或在电极周围土壤中采取提高电导率的措施(如掺入盐水)来有效降低负载阻抗,从而提升系统传输性能。与直接提高发射电压或发射功率相比,该方法能够在功率受限条件下实现性能改善,同时可降低因发射电压过高而带来的潜在安全风险。

2 负载阻抗模型实测验证

首先,为研究电极参数对负载阻抗模型的影响,本文在复杂地形试验场地中选取了如图 13 所示的 3 类土壤环境,开展了电流场透地通信系统负载阻抗模型的测试与验证。实验中同样采用土壤电导率检测仪测量土壤电导率,结果汇总于表 2。负载阻抗的测量方法同样是在发送端输出回路中串联一只小电阻,通过测量其电压降计算注入大地的电流,并结合发送端设备的预设电压得到整体负载阻抗的模值。TTE 通信系统发送 100 V、10 Hz、持续 10 s 的正弦信号。所用电极为如图 14 所示的长圆柱型不锈钢电极,尺寸为长度 1 000 mm、半径 15 mm。通过改变电极埋设深度,分析不同土壤环境下埋设深度对负载阻抗模型的影响。

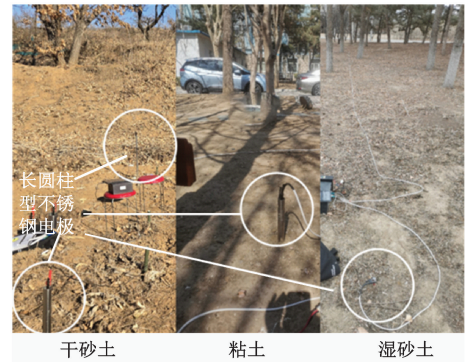


图 13 3 种土壤环境

Fig. 13 Three types of soil environments

表 2 3 种土壤环境及其电导率

Table 2 Three representative soil environments and their conductivities

土壤类型	电导率/(S·m ⁻¹)
干砂土	0.014
粘土	0.036
湿砂土	0.023



图 14 长圆柱型不锈钢电极

Fig. 14 Long cylindrical stainless-steel electrode

如图 15 所示,在 3 种不同土壤类型下,负载阻抗均随电极埋设深度的增加呈单调下降趋势。不同土壤环境下的阻抗水平差异显著:干砂土最高,湿砂土次之,粘土最低。该规律与 3 类土壤电导率差异一致(见表 2),即干砂土电导率最低而粘土电导率最高。根据所建立的负载阻抗模型,接触阻抗与大地阻抗均与土壤电导率成反比关系,因此电导率较低的土壤对应更高的负载阻抗水平。

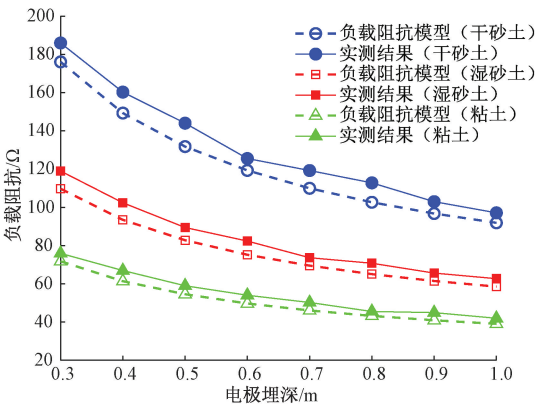


图 15 不同土壤环境下负载阻抗与电极埋设深度的关系

Fig. 15 Load impedance versus electrode burial depth under different soil environments

在同一土壤类型内部,实验过程中土壤成分与电导率保持不变,因此负载阻抗随埋设深度增加而下降的趋势并非由介质参数变化引起,而主要源于接触区几何扩散效应。根据接触阻抗模型 Z_c ,其电阻分量为 $\ln(2l/a)/(2\pi\sigma l)$ 。在 σ 为常数条件下,该项随埋深 l 增大呈下降趋势。其物理机制在于:电极插入长度增加改变了电流在电极-土壤接触区内的扩散几何形态,使等效扩散路径与扩散体积增大,单位电流密度降低,从而减小

接触阻抗分量,最终导致总负载阻抗下降。该结果表明,在本实验条件下,埋设深度对负载阻抗的影响主要体现为几何因素的调制作用。

模型预测与实测结果整体上基本一致,验证了所建立负载阻抗模型的合理性。从数值上看,实测阻抗整体略高于模型预测值,且在浅埋条件下偏差更为明显。统计结果表明,所有测试点的整体平均相对误差为 7.72%,最大相对误差为 9.90%。为区分模型误差与测量系统误差,估算了系统误差。负载阻抗由发送端预设电压 U_s 与串联采样电阻电压降 U_r 计算得到,表达式为 $Z = (U_s R_0)/U_r$,其中,预设电压 U_s 精度、采样电阻 R_0 精度和电压降 U_r 测量精度分别都为 $\pm 1\%$ 。按误差上限保守估算,系统误差不超过 $\pm 3\%$,显著低于实验统计得到的相对误差。因此,图 15 中理论值与实测值的差异主要来源于接触阻抗 Z_c 。模型中关于土壤均匀性及电极-土壤界面理想接触的假设,而非测量系统误差。在实际工况下,土壤局部非均匀性及界面接触不确定性导致额外接触阻抗分量,从而使实测阻抗略大。总体而言,模型误差较小,能够满足负载阻抗工程建模与分析的精度需求,表明所建立的模型具有良好的工程适用性。

为进一步验证模型在混合土壤结构条件下的适用性,本文在北京市密云区某山地测试点开展了实验。该测试点土壤属于典型的山地混合土壤,主要由沙土、粘土和腐殖质组成。其土壤结构示意图如图 16 所示,实际测试场景如图 17 所示。通过电导率检测仪测得混合土壤的电导率为 0.053 S/m,反映了该区域土壤的天然混合特性。除实验环境外,其他实验条件保持不变,实验中通过改变长圆柱型电极的埋设深度,分析混合土壤结构下埋设深度对负载阻抗模型的影响。

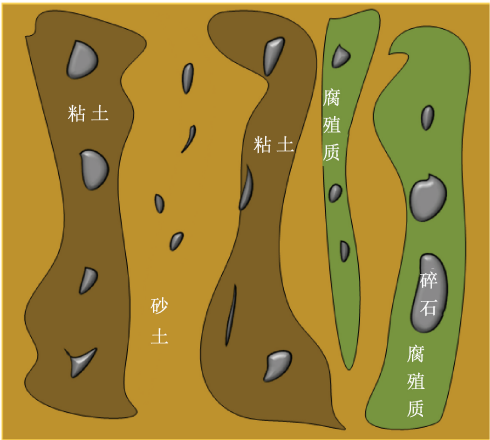


图 16 混合土壤结构示意图

Fig. 16 Schematic of mixed soil structure

如图 18 所示,在混合土壤结构下,负载阻抗随电极埋设深度的增加呈单调下降趋势。模型预测值与实测结



图 17 山地混合土壤测试点

Fig. 17 Mountain mixed soil testing point



图 19 地下封闭实验舱

Fig. 19 Underground enclosed experimental chamber

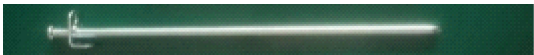


图 20 便携式电极

Fig. 20 Portable electrode

果基本一致,验证了所建立负载阻抗模型的合理性。实测阻抗略高于模型预测值,平均相对误差为 5.96%,最大相对误差为 7.94%。模型误差较小,足以满足混合土壤结构下负载阻抗分析的需求。这是因为模型是基于实测电导率构建的,混合土壤结构虽然由不同材质组成,但可以通过电导率检测仪测得的电导率来表征,因此模型具有较好的实用性。

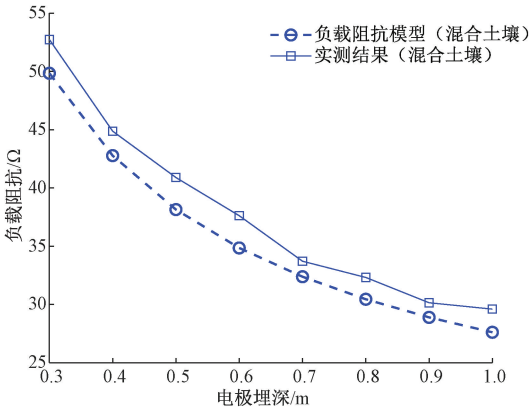


图 18 混合土壤结构下负载阻抗与电极埋深关系

Fig. 18 Load impedance versus electrode burial depth under mixed soil structure

其次,为进一步验证地层电导率对负载阻抗模型的影响,本文选取了如图 19 所示的地下封闭实验舱,通过加水调节土壤湿度以改变地层电导率。电导率及整体负载阻抗的测量方法与前述实验保持一致。实验过程中,TTE 通信系统发送幅值为 100 V、频率为 10 Hz、持续时间为 10 s 的正弦信号。在实验布置中采用了两种不同类型的电极:1)如图 20 所示的便携式电极,电极长度为 400 mm、半径为 5 mm,其下部结构可近似视为圆柱体,埋设深度为 0.3 m;2)如图 14 所示的长圆柱型电极,埋设深度为 0.5 m。

如图 21 所示,整体负载阻抗随地层电导率的增加呈单调递减趋势,其中在低电导率区下降更为显著,而在高

电导率区逐渐趋于平缓。对比两类电极可以发现,长圆柱型电极由于接触面积更大、埋设深度更深,其整体负载阻抗水平低于便携式电极。实验结果与模型预测在变化趋势和数值水平上保持良好一致性,验证了所提出负载阻抗模型的合理性。

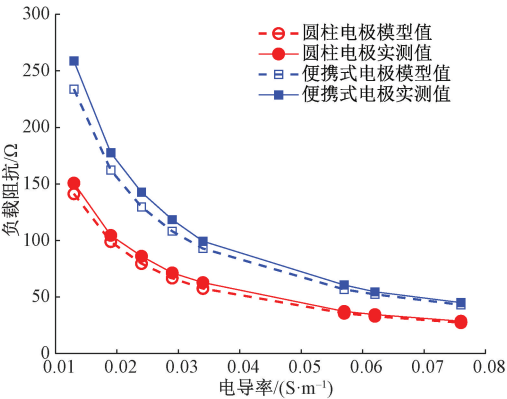


图 21 不同电极类型下负载阻抗与电导率的关系

Fig. 21 Load impedance versus conductivity for different electrode types

进一步误差分析结果表明,长圆柱型电极的实测值相对模型预测值的整体平均相对误差为 6.36%,最大相对误差为 9.18%;便携式电极对应的整体平均相对误差为 7.76%,最大相对误差为 10.62%。在低电导率条件下($\sigma < 0.05 \text{ S/m}$),两类电极的模型偏差更为明显,其平均相对误差分别为 7.35% 和 9.29%。这主要是由于土壤导电性较差时,电流扩散受限,对电极-土壤接触状态及介质非均匀性的敏感性增强,从而放大了模型简化假设与实际情况之间的偏差。随着地层电导率的提高($\sigma > 0.05 \text{ S/m}$),电流在介质中的扩散逐渐趋于均匀,上

述影响明显减弱,两类电极的平均相对误差分别降低至 4.72% 和 5.23%。总体而言,在不同电导率条件下,两类电极的平均相对误差均小于 8%,表明所建立的负载阻抗模型具有良好的适用性和工程可靠性。

最后,为验证极低频条件下负载阻抗与频率之间的关系,本文在如图 19 所示、电导率为 0.076 S/m 的地下封闭实验舱内开展了对比测试。实验中同样采用两类电极:1)如图 20 所示的便携式电极,埋设深度为 0.3 m;2)如图 14 所示的长圆柱型电极,埋设深度为 0.5 m。在测试过程中,TTE 通信系统在 5~40 Hz 的频率范围内以 5 Hz 为步长逐点注入信号,在每个频率点发送幅值为 100 V、持续时间为 10 s 的正弦信号,并测量对应的负载阻抗,其结果如图 22 所示。

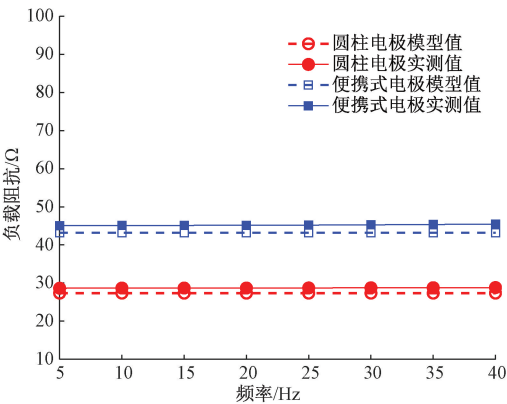


图 22 负载阻抗与频率的关系

Fig. 22 Load impedance versus frequency

如图 22 所示,在 5~40 Hz 的极低频范围内,两类电极的实测负载阻抗均基本保持稳定,整体变化率不足 1%,说明频率对抗阻的影响可以忽略。对比模型与实测结果发现,两者之间的差异在不同频率下维持在近似恒定水平,并未表现出随频率增加或减小的系统性偏移。这表明实测与模型之间的偏差主要来自电极-土壤接触条件、土壤非均匀性以及测量误差,而非频率相关效应。因此,在该频段内负载阻抗可近似视为与频率无关,模型中忽略电抗分量的处理是合理的。这不仅验证了模型在极低频条件下的适用性,同时也表明在极低频范围内载频选择对链路匹配与功率预算的影响可以忽略。

3 结 论

为系统研究地电极电流场透地通信系统的负载阻抗特性,并为工程应用提供理论依据,本文建立了一种由电极接触阻抗、导线阻抗和大地阻抗共同构成的发射端负

载阻抗模型,构建了相应的等效电路并推导了数学表达式。该模型能够系统刻画电极几何参数、埋设条件、地层电导率及工作频率等因素对 TTE 系统负载阻抗的影响。通过在多种典型土壤环境及地下封闭实验舱中开展对比实验,对所建立的负载阻抗模型进行了系统验证。实验结果表明,在不同土壤类型、电极埋设深度及地层电导率条件下,模型预测结果与实测负载阻抗保持良好一致性,表明该模型具有较高的建模精度和工程适用性。同时,实验结果进一步揭示了负载阻抗的变化规律:负载阻抗随电极埋设深度的增加整体呈下降趋势,并随地层电导率的提高表现出单调递减特性。此外,频率相关性实验结果表明,在极低频工作条件下,负载阻抗对频率变化不敏感,从实验角度验证了模型中忽略电抗分量处理的合理性。综上所述,本文提出的负载阻抗模型能够较为准确地表征 TTE 系统的负载阻抗特性,不仅为地电流场透地通信机理分析提供了可靠的理论支撑,也可为电极结构设计、电极埋设参数选择及系统性能优化提供有效参考。

参考文献

[1] Qin M, Zhang L M, Wu H J. Dielectric loss mech-anism in electromagnetic wave absorbing materials [J]. Advanced Science, 2022, 9(10) : 210553.

[2] Jantaupalee A, Wongsan R, Khamsalee P, et al. A study of radio wave propagation in the cave for developing the through-the-earth application [J]. International Journal of Geomate, 2024, 26(118) : 74-86.

[3] He J G, Yuan H, Su Z, et al. Analysis of information transmission characteristics based on adaptive ground electrode current field [J]. Applied Sciences, 2023, 13(7) : 4297.

[4] Sangprasad K, Puttiwongrak A, Inazumi S. Compre-hensive analysis of correlations between soil electrical resistivity and index geotechnical properties[J]. Results in Engineering, 2024, 23: 102696.

[5] Ngwenyama P L, Webber-Youngman R C W. A review of the applications of through-the-earth (TTE) commu-nication systems for underground mines [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024, 41(5) : 2291-2323.

[6] Batista R, Paulino J O S. Computing grounding resistance and impulse impedance of horizontal electrodes parallel or perpendicular to the interface of a vertically stratified soil using transmission line theory[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107060.

[7] Ma H L, Liu Er W, Wang R, et al. Antenna optimization for decode-and-forward relay in magnetic

- induction communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(3): 3449-3453.
- [8] 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.
- [9] Chaves B P, Braga A J. An analytical propagation model based on dyadic Green's functions for TTE communications in an arbitrary stratified soil[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2022, 70(11): 11240-11245.
- [10] Zhou C M, Snyder D P, Epstein B, et al. Measurement of ambient magnetic field noise for through-the-earth (TTE) communications and historical comparisons[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2024, 66(3): 720-727.
- [11] Zhang W H, Cao Z X, Wang X Y, et al. Modeling and measurement of through-the-earth communication based on ELF magnetic signals from permanent magnet mechanical antennas[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(1): 1209-1215.
- [12] Zhou C M, Damiano N. Wireless channel and electromagnetic environments for through-the-earth (TTE) communications in an underground coal mine[C]//2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2021: 158-160.
- [13] Levan D O. Novel communication channel model for signal propagation and loss through layered earth[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(8): 5393-5399.
- [14] Pruekchatsiri C, Jantaupalee A, Khamsalee P, et al. An experimental study of electrodes for through-the-earth 350 kHz MF communication [C]//2023 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2023: 1-2.
- [15] Khamsalee P, Wongsan R, Julthochai S, et al. Small loop antenna arrangement investigation for 350 kHz through-the-earth communications in limestone cave[C]//2024 12th International Electrical Engineering Congress (iEECON). 2024: 1-4.
- [16] 徐湛, 张旭, 杨小龙. 面向地电极电流场透地通信的两阶段长相关信号捕获方法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(12): 4504-4512.
- Xu Zhan, Zhang Xu, Yang Xiaolong. Two-stage long-correlation signal acquisition method for through-the-earth communication of the ground electrode current field[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(12): 4504-4512.
- [17] Damiano N W, Yan L C, Whisner B, et al. Simulation and measurement of through-the-earth, extremely low-frequency signals using copper-clad steel ground rods[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5088-5095.
- [18] 付国红, 雷泽宁, 程辉, 等. 岩矿石标本宽频带电性参数快速测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(2): 152-164.
- Fu Guohong, Lei Zening, Cheng Hui, et al. Rapid measurement method of broadband electrical parameters of rock and mineral specimens[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 152-164.
- [19] 刘权, 赵俊奎, 曹建元, 等. 基于辅助阻抗匹配支路的超声波时差测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 179-187.
- Liu Quan, Zhao Junkui, Cao Jianyuan, et al. Ultrasonic time-difference measurement system based on auxiliary impedance matching circuits [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 179-187.
- [20] Prasolov N D, Lihachev A I, Sokolov R V, et al. Frequency dependence measuring of skin-effect on metal wires with circular cross-section[J]. Technical Physics, 2024, 69(5): 1336-1340.
- [21] Xie R Z, Xie Y T, Li B Q, et al. Electrochemical impedance spectroscopy of sandy soil containing Cl^- , SO_4^{2-} and HCO_3^- [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2021, 16(12): 211211.
- [22] Koliushko D G, Rudenko S S, Vevenko V O. Application of the multilayer soil equivalence method in determining the normalized parameters of the grounding system [J]. Electrical Engineering and Electromechanics, 2025(4): 80.
- [23] Manjunath A D B, Harid N, Griffiths H, et al. Equivalent circuit models for soils and aqueous solutions under 2-terminal test configuration [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2022, 65(1):

- 225-234.
- [24] Sun F N, Chen Z W, Bai X L, et al. Theoretical and experimental bases for the equivalent circuit model for interpretation of silty soil at different temperatures[J]. *Heliyon*, 2023, 9(2): e12652.
- [25] Acho L, Pujol-Vázquez G, Gibergans-Báguena J. Electronic device and data processing method for soil resistivity analysis[J]. *Electronics*, 2021, 10(11): 1281.
- [26] Mehrabi S, Ostadzadeh S R. Validity of RLC equivalent circuit of grounding electrodes in combination with equivalent resistivity in two-layer soils and its application in transient analysis[J]. *Applied Electro-magnetics*, 2021, 9(1): 35-42.
- [27] Sunjerga A, Rubinstein M, Poljak D, et al. High-frequency response of a hemispherical grounding electrode[J]. *Electric Power Systems Research*, 2024, 226: 109877.
- [28] Kwon H, Kil Y, Kim S. A method for grounding resistance calculation of vertical electrode[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 224: 109718.
- [29] Zhu H Y, Wang B L, Soleimani M, et al. A wideband contactless electrical impedance tomography system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-14.
- [30] Qi Y Z, Wu Y X. Electrical conductivity of clayey rocks and soils: A non-linear model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(10): e2021GL097408.
- [31] Wan X S, Xia P, Lu J G, et al. Study on relationship between electrical conductivity and effective ion concentration in saline soils[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2025, 84(1): 17.
- [32] Brandão Faria J, Fernandes J P, Maló Machado V, et al. Frequency-dependent grounding impedance of a pair of hemispherical electrodes: inductive or capacitive behavior? [J]. *Energies*, 2024, 17(13): 3206.
- [33] De Araújo A R J, Colqui J S L, De Seixas C M, et al. Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil[J]. *Electric Power Systems Research*, 2021, 198: 107364.
- [34] Nor N M. Review: Factors affecting the performance of ground electrodes under high impulse currents[J]. *Energies*, 2023, 16(10): 4236.
- [35] Datsios Z G, Mikropoulos P N, Staikos E T. Methods for field measurement of the frequency-dependent soil electrical properties[C]//International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), 2019: 1328-1339.
- [36] Ma C L, Song M Q, Chen Z L, et al. Study of the effect of multi-scale soil electrical properties on the high-frequency response of substation grounding systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2026, 252: 112195.
- [37] 孙斌, 倪爽, 朱青, 等. 低耦合电磁式电导率测量系统的传感器优化设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(2): 131-138.
- Sun Bin, Ni Shuang, Zhu Qing, et al. Sensor optimization design of low coupling electromagnetic conductivity measurement system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(2): 131-138.
- [38] Denche G, Faleiro E, Asensio G, et al. Grounding electrodes with internal resistance: Application to feasibility study of the driven-rod method for modeling the soil electrical resistivity profile[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 5032.
- [39] Salariel B, De Silva H M J, Kordi B. Electromagnetic transient modeling of grounding electrodes buried in frequency dependent soil with variable water content[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 189: 106595.
- [40] Alsharari B, Olenko A, Abuel-Naga H. Modeling of electrical resistivity of soil based on geotechnical properties[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 141: 112966.
- [41] Soares Gerscovich D M, Vipulanadan C. Data analyses to correlate the soil properties to the electrical resistivity[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2023, 41(8): 4507-4528.
- [42] Sangprasat K, Puttiwongrak A, Inazumi S. Review of correlations between soil electrical resistivity and geotechnical properties[J]. *Geosciences*, 2025, 15(5): 166.
- [43] 张志诚, 苏中, 赵辉, 等. 基于RBFNN的地电流场强区域指纹库构建方法[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(3): 188-196.
- Zhang Zhicheng, Su Zhong, Zhao Hui, et al. Construction method of regional fingerprint database of ground current field strength based on RBFNN[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(3): 188-196.

作者简介



徐湛, 2004 年于北京理工大学获得学士学位, 2006 年于北京理工大学获得硕士学位, 2010 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学信息与通信工程学院教授, 主要研究方向为无线通信、数字信号处理及透地通信。

E-mail: xuzhan@bistu.edu.cn

Xu Zhan received his B.Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2004, received his M.Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2006, received his Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2010, now he is a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include wireless communications, digital signal processing and through-the-earth communication.



冯雪冬, 2021 年于华北电力大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学自动化学院在读硕士, 主要研究方向为透地通信。

E-mail: 2023020386@bistu.edu.cn

Feng Xuedong received his B.Sc. degree from North China Electric Power University in

2021, now he is a master student in the School of Automation, Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include through-the-earth communication.



杨小龙 (通信作者), 2013 年于天津大学仁爱学院获得学士学位, 2016 年于河北大学获得硕士学位, 2020 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学信息与通信工程学院副教授, 主要研究方向为智能无线通信与网络、无人机网络及透地通信。

E-mail: xiaolongyang@bistu.edu.cn

Yang Xiaolong (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Tianjin University Ren'ai College in 2013, received his M.Sc. degree from Hebei University in 2016, received his Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2020, now he is an associate professor in the School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include intelligent wireless communications and networks, UAV networks, and through-the-earth communication.