

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417700

多电极注入地电流场接地阻抗特性研究^{*}

孙振振^{1,2} 苏中^{1,2} 赵辉^{1,2} 张志诚^{1,2}

(1. 北京信息科技大学高动态导航技术北京市重点实验室 北京 100192;

2. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 100192)

摘要: 针对多电极注入地电流场信息传输接地阻抗难以实时估计的问题,提出了多电极注入地电流场接地阻抗实时估计方法。首先构建出由圆柱面和半球面组合的电极周围大地等势面,根据等势面分布建立多电极注入地电流场大地导体几何模型,通过等效导体长度积分对多电极注入地电流场接地阻抗进行估计。在山地、林地、田地、草地4种测试条件下,电极间距离分别设置为电极入地深度的0.14、0.57、1和1.4倍,进行4、6、8根电极和4、6、8、10、12根电极的电流注入实验,所提方法相对误差平均值为6.0%,实验结果表明,所提方法满足不同注入条件下接地阻抗实时估计要求。

关键词: 多电极注入;接地阻抗;电势;地电流场;大地导体

中图分类号: TN929.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510. 1040

Study on grounding impedance characteristics of multi-electrode injection ground current fields

Sun Zhenzhen^{1,2} Su Zhong^{1,2} Zhao Hui^{1,2} Zhang Zhicheng^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of High Dynamic Navigation Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to estimate the ground impedance of multi-electrode injected ground current field information transmission in real time, the real-time estimation method of multi-electrode injected ground current field ground impedance is proposed. Firstly, the geodesic equipotential surface around the electrodes is constructed by combining cylindrical and hemispherical surfaces, and the geodesic conductor geometry model of the current field of the multi-electrode injection ground is established according to the distribution of the equipotential surface, so that the ground impedance of the multi-electrode injection ground can be estimated through the integration of the length of the equivalent conductor. Under the four test conditions of mountain, forest, field and grassland, the distance between electrodes is set as 0.14, 0.57, 1 and 1.4 times of the depth of electrodes into the ground, and the current injection experiments are carried out for 4, 6 and 8 electrodes, and 4, 6, 8, 10 and 12 electrodes, and the average value of the relative error of the proposed method is 6.0%, and the experimental results show that the proposed method can meet the real-time ground impedance requirements under different injection conditions, estimation under different injection conditions.

Keywords: multi-electrode injection; ground impedance; electric potential; ground current field; a geodesic conductor

0 引言

基于电场的电容传感器,可以用来测量介质含水率^[1-2]。在电法勘探中,地电阻率观测作为一种有源观测手段,以人工供电的方式,实现有体积效应的主动探测,在中

短期地震监测预报和地下地质情况定量解释中发挥了重要作用^[3-4]。若供电频率范围为1~30 kHz,还可以在岩层或土层中形成电流场,通过两个检测电极检测信号电压实现信息传输^[5]。相较于电磁波,电流场透地信息传输具有天线尺寸小、结构简单、灵活性好等优势^[6-7]。但由于其传输

收稿日期:2024-12-22

* 基金项目:国家自然科学基金(61971048)、北京市自然科学基金(4244091)项目资助

信道一大地媒质电磁环境的复杂性及电流场在其中传输的衰减以及严重的干扰等因素,使实现远距离的地下无线传输一直存在困难。

中外学者为了解地下电流场的分布与传播特性,实现有效传输进行了大量研究工作。Damiano 等^[8]提出接收到的电场强度与发射机电流成正比,发射机电流应最大化以实现最大传输距离。徐湛等^[9]在导电半空间有限源地下电磁场模型的基础上,结合接触阻抗模型,建立了极低频地电极电流场路径损耗模型。张义鑫等^[10]在水下环境研究了极板大小等对信号衰减的影响。付国航等^[11]实验证明了在不增加发射功率的条件下,通过多电极注入电信号的方式可以有效提高检测端电势差。Xu 等^[12]对埋在地下的水平接地电极阻抗进行了研究,提出了多个电极内联阵列的并联接地阻抗模型。Pruekchatsiri 等^[13]进行了不同电极类型和数量的实验,表明选择合适的电极类型和数量对实现最佳信号传输和接收非常重要。Yan 等^[14]为实现 2 134 m 的远距离传输,采用 16 个电极串联进行信号注入,形成多电极注入地电流场,并根据测量的接地阻抗值来确定注入电压,但当注入电压有限制时,该方法可能失效。

综上所述,采用多电极注入的方式可以在不增加发射功率的条件下,提高注入电流,提升检测端电势差。由于在注入电压有限制的情况下,注入电流取决于接地阻抗,因此需要对其估计。本文将多电极注入时大地导体分为四段进行几何建模,通过等效导体长度积分估计接地阻抗,降低了估计误差。

1 模型与方法

1.1 多电极注入地电流场接地阻抗

用导线将打在大地上的多个电极串联之后再与电源相连形成多电极注入地电流场,六电极注入地电流场如图 1 所示。

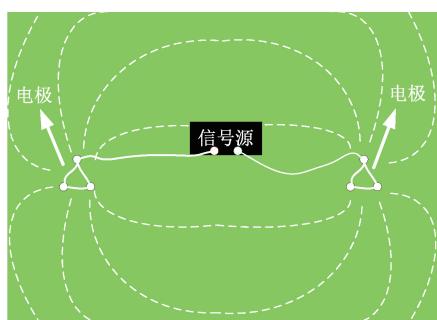


图 1 六电极注入地电流场

Fig. 1 Six electrodes injected into the ground current field

如图 2 所示,电极间总阻抗分为三部分:用于连接发射器和电极的导线阻抗 Z_w 、接触电极阻抗 Z_c 和电极之间的大地阻抗 Z_e 。张义恒^[15]提出 100 Hz~10 kHz 内,阻抗虚部远远小于实部。因此在低频情况下,多电极注入地电流场接地阻抗可视为接地电阻。

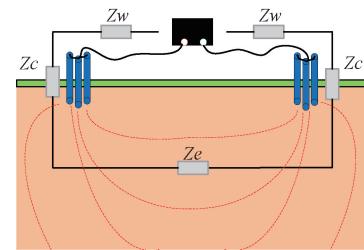


图 2 接地阻抗组成

Fig. 2 Ground impedance composition

接地电阻是电流由接地装置流入大地再经大地流向另一个接地体或向远处扩散所遇到的电阻,电极附近电流流散的截面最小,电流密度最大,所以接地电阻主要集中在电极附近。

1.2 大地导体电势分布特性

为了构建多电极注入地电流场接地阻抗模型,首先对电极周围大地的电势进行分析。当采用双电极向大地注入电流时,单侧单根电极周围大地等势面类似于圆柱面和半球面的组合,如图 3 所示。

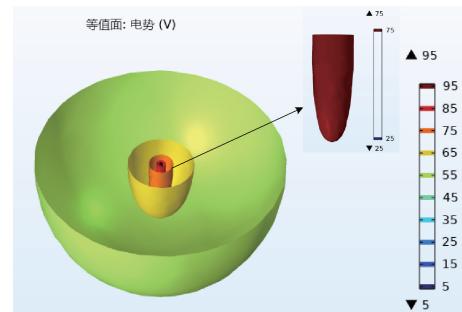


图 3 双电极注入电极周围电势

Fig. 3 Potential around the two-electrode injection electrode

一根半径为 a 、长度为 h 垂直埋于地中且上端与地面齐平的圆棒形接地电极如图 4 所示。

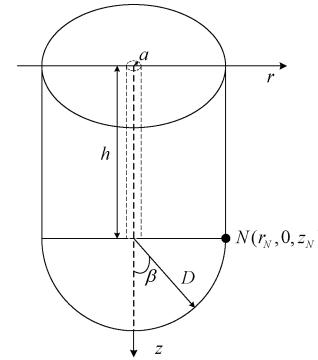


图 4 垂直于大地表面注入电极

Fig. 4 Injection of electrodes perpendicular to the earth's surface

时洪扬^[16]提出低频电流场可看作准静电场,其电位分布可根据恒定电场来研究。在恒定电场中,圆柱坐标系 (r, θ, z) 所表示的空间任意一点 $N(r_N, 0, z_N)$ 的电位如

式(1)所示^[17]。

$$V_N(r_N, z_N) = \frac{I}{4\pi h\sigma} \ln \frac{z_N + h + \sqrt{(z_N + h)^2 + r_N^2}}{z_N - h + \sqrt{(z_N - h)^2 + r_N^2}} \quad (1)$$

其中, I 为注入电流, h 为电极入地深度, σ 为电导率, 当 N 点位于圆柱面时 ($z_N \leq h$), 根据式(1)得 $V'_N(z_N)$ 为:

$$V'_N(z_N) = \frac{I}{4\pi h\sigma} \left(\frac{1}{\sqrt{(z_N + h)^2 + r_N^2}} - \frac{1}{\sqrt{(z_N - h)^2 + r_N^2}} \right) \quad (2)$$

根据式(2)可知, 对任意 r_N , $V'_N(z_N) < 0$, V_N 单调递减; 而当 r_N 增大时, $V'_N(z_N)$ 减小, 即 V_N 的变化率减小, 因此可将圆柱面视为等势面。

当 N 点位于半球面时 ($z_N > h$), 满足 $D^2 = (z_N - h)^2 + r_N^2$, 则:

$$\begin{cases} z_N = D \cos\beta + h \\ r_N = D \sin\beta \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)得, 半球面上任意一点电位 V_N 为:

$$V_N(D, \beta) =$$

$$\frac{I}{4\pi h\sigma} \ln \left(\frac{D \cos\beta + 2h + \sqrt{(D \cos\beta + 2h)^2 + (D \sin\beta)^2}}{D \cos\beta + D} \right) \quad (4)$$

将式(4)对 β 进行求导可得:

$$V'_N(\beta) = \frac{I}{4\pi h\sigma} \frac{D \sin\beta}{(D \cos\beta + D) \sqrt{D^2 + 4h^2 + 4hD \cos\beta}} \frac{(2h - D)(\sqrt{D^2 + 4h^2 + 4hD \cos\beta} + 2h - D) + 2hD(1 + \cos\beta)}{(D \cos\beta + 2h + \sqrt{D^2 + 4h^2 + 4hD \cos\beta})} \quad (5)$$

对式(5)进一步处理, 可得 $V'_N(\beta) > 0$, 当 D 增大时, $V'_N(\beta)$ 减小, 因此可将半球面视为等势面。

当采用四电极向大地注入电流时, 单侧双根电极周围大地电势分布如图 5 所示。

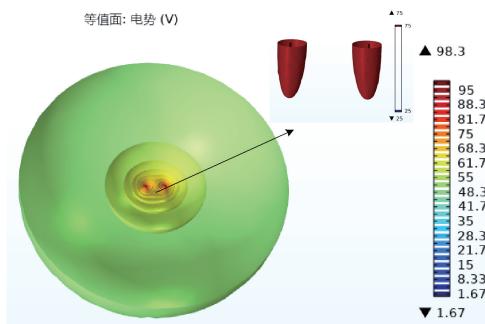


图 5 四电极注入电极周围电势

Fig. 5 Potential around the four-electrode injection electrode

对相距为 d 的单侧双电极注入地电流场电极周围大地电势进行研究, 如图 6 所示, 在直角坐标系中, 两个电极分别位于 $O_1(-0.5d, 0)$ 、 $O_2(0.5d, 0)$, p_1 点在第一象限内以

O_2 为圆心, 以 $0.5d$ 为半径的上半圆周上, p_1 与电极 O_1 、 O_2 的距离分别为 r_{11} 、 r_{12} , p_2 点在第一象限内以原点 $O(0, 0)$ 为圆心, 以 d 为半径的 $1/4$ 圆周上, p_2 与电极 O_1 、 O_2 的距离分别为 r_{21} 、 r_{22} 。

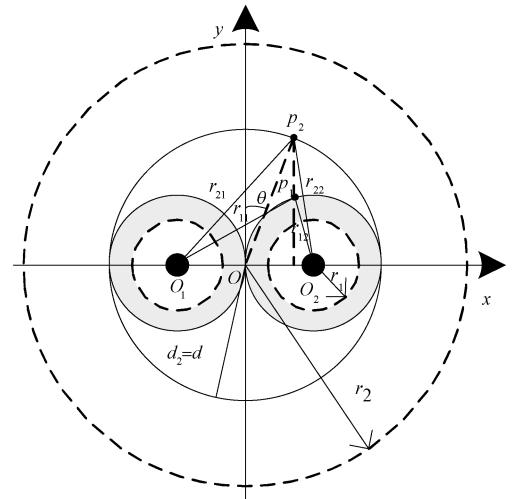


图 6 四电极注入电势分析

Fig. 6 Analysis of the four-electrode injection potential

根据叠加原理, 当 $z_N = 0$ 时, p_1 点电势 V_{p_1} 如式(6)所示, p_2 点电势 V_{p_2} 如式(7)所示。

$$V_{p_1} = \frac{I}{4\pi h\sigma} \left(\ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (r_{11})^2}}{-h + \sqrt{h^2 + (r_{11})^2}} + \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (r_{12})^2}}{-h + \sqrt{h^2 + (r_{12})^2}} \right) \quad (6)$$

$$V_{p_2} = \frac{I}{4\pi h\sigma} \left(\ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (r_{21})^2}}{-h + \sqrt{h^2 + (r_{21})^2}} + \ln \frac{h + \sqrt{h^2 + (r_{22})^2}}{-h + \sqrt{h^2 + (r_{22})^2}} \right) \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} r_{11} = \sqrt{(0.5d)^2 + 2d^2 \sin^2\theta} \\ r_{12} = 0.5d \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} r_{21} = \sqrt{(d \sin\theta + 0.5d)^2 + (d \cos\theta)^2} \\ r_{22} = \sqrt{(d \sin\theta - 0.5d)^2 + (d \cos\theta)^2} \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)代入式(6)并让 V_{p_1} 对 θ 进行求导, 得:

$$V'_{p_1}(\theta) = -\frac{4I \sin\theta \cos\theta}{\pi\sigma(1 + 8\sin^2\theta) \sqrt{h^2 + (0.5d)^2 + 2d^2 \sin^2\theta}} \quad (10)$$

将式(9)代入式(7)并让 V_{p_2} 对 θ 进行求导, 得:

$$V'_{p_2}(\theta) = \frac{Id^2 \cos\theta}{4\pi\sigma} \left(\frac{1}{r_{22}^2 \sqrt{h^2 + r_{22}^2}} - \frac{1}{r_{21}^2 \sqrt{h^2 + r_{21}^2}} \right) \quad (11)$$

根据式(10)、(11)可得, 对任意电极距离 d , 随 θ 增加, V'_{p_1} 单调递减, V'_{p_2} 单调递增。以 $I/h = 1 \text{ A/m}$ 、 $\sigma = 0.01$

$S/m, h = d = 0.5 \text{ m}, 0 \leq \theta \leq 0.5\pi$ 为例, V_{p_1}, V_{p_2} 随 θ 变化曲线如图 7 所示; 定义两个圆周上电势最大值与最小值比(最值比)为 $V_{p_{1-b}}, V_{p_{2-b}}$, 如图 8 所示; 在 $0.018h \ll d \leq 4h$ 范围内, $V_{p_{1-b}}, V_{p_{2-b}}$ 小于 1.5。

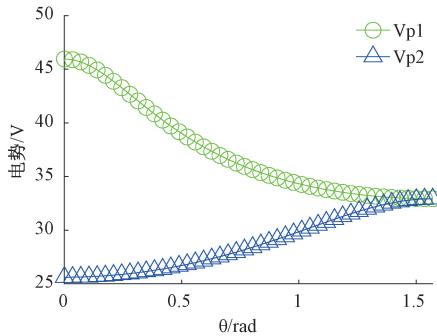


图 7 电势变化

Fig. 7 potential change

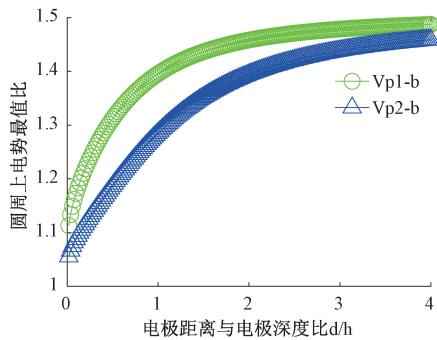


图 8 最值比

Fig. 8 Logarithmic ratio

由图 7 可知, 当 O_1, O_2 注入电流时, 以 O_2 为圆心, 以 $0.5d$ 为半径的圆周上点 p_1 电势最大值 $V_{p_1-\max}, V_{p_1-\min}$ 位置和以 O 为圆心, 以 d_2 为半径的圆周上点 p_2 电势最大值 $V_{p_2-\max}, V_{p_2-\min}$ 位置如图 9 所示。若仅考虑 O_3 注入电流时圆周上电势分布, 则圆周上点 p_1 电势最大值 $V_{O_3-\max}, V_{O_3-\min}$ 位置与 $V_{p_1-\max}, V_{p_1-\min}$ 相差 60° , 而 O_3 距 $V_{p_2-\min}$ 点的距离小于距 $V_{p_2-\max}$ 的距离, 即六电极注入地电流场, 仍可将电极为圆心, 以 $0.5d$ 为半径的圆周上点视为等电势, 将以电极中心 \bar{O} 为圆心, 以 d_3 为半径的圆周上点视为等电势。

综上, 对于 $2n$ 电极注入地电流场, 可将以电极为圆心, 以 $0.5d$ 为半径的圆周上点视为等电势, 将以电极中心 \bar{O} 为圆心, 以 d_n 为半径的圆周上点视为等电势, n 为单侧电极数量。

1.3 大地导体几何模型

由于工程上地电流场注入系统两侧电势高低不同的电极间的距离大于 10 倍的电极深度, 可以不考虑电极之间的相互影响, 将整个地电流场注入系统两侧电势高低不同的电极间的接地阻抗视为串联。

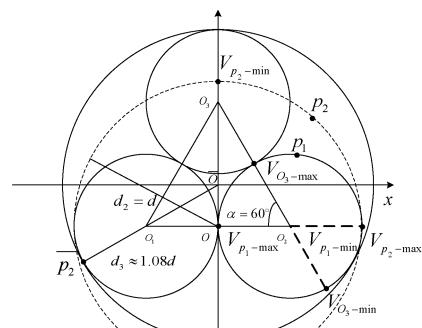


图 9 六电极注入电势分析

Fig. 9 Analysis of the injection potential of the six electrodes

对于双电极注入地电流场, 接地阻抗可视为两个长度无限大, 横截面积为 $S(r_1)$ 的等效导体相串联, $S(r_1)$ 如式(12)所示, 双电极注入大地导体几何模型如图 10 所示。

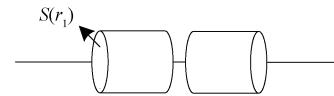


图 10 双电极注入大地导体

Fig. 10 Two electrodes injected into earth conductor

根据大地导体电势分布特性, 在图 6 中, 当 $r_1 < 0.5d$ 时, 以电极为圆心的圆上电势变化率随 r_1 减小而减小, 阻抗曲线在距棒距离为棒深度 40% 时开始饱和, 当 $\frac{r_1}{h} \geq 0.4$ 时, 即使在圆柱面上电势存在差异, 仍然可以将其视为等电势。因此当 $r_1 < 0.5d$ 时, 忽略电极间屏蔽作用, 将两个电极周围阻抗视为两个等效导体并联, 当 $r_1 \geq 0.5d$ 时, $r_2 \geq d_2$, 考虑到注入电极间的屏蔽作用, 将其简化为一个等效导体, 等效导体的中心在两根电极连线中心上。

对于四电极注入地电流场, 接地阻抗可视为 2 个长度为 $0.5d - a$ 、横截面积为 $S(r_1)$ 等效导体先并联再与 1 个长度为无限大、横截面积为 $S(r_2)$ 的等效导体串联, 再与 1 个长度为无限大、横截面积为 $S(r_2)$ 的等效导体串联, 最后再与 2 个长度为 $0.5d - a$ 、横截面积为 $S(r_1)$ 并联的等效导体串联。 $S(r_2)$ 如式(12)所示, 四电极注入大地导体几何模型如图 11 所示。

$$\begin{cases} S(r_1) = 2\pi r_1 h + 2\pi r_1^2, r_1 < \frac{d}{2} \\ S(r_2) = 2\pi r_2 h + 2\pi r_2^2, r_1 \geq \frac{d}{2}, r_2 \geq d_n \end{cases} \quad (12)$$



图 11 四电极注入大地导体

Fig. 11 Four electrodes injected into earth conductor

对于 $2n$ 电极注入地电流场, 接地阻抗可视为 n 个长度

为 $0.5d - a$ 、横截面积为 $S(r_1)$ 的等效导体先并联再与 1 个长度为无限大、横截面积为 $S(r_2)$ 的等效导体串联, 再与 1 个长度为无限大、横截面积为 $S(r_2)$ 的等效导体串联, 最后再与 n 个长度为 $0.5d - a$ 、横截面积为 $S(r_1)$ 并联的的等效导体串联。

1.4 多电极注入地电流场接地阻抗实时估计方法

对于一段长为 l 的线状导体, 如果电阻率 ρ 及截面 S 都均匀, 则其电阻 R 如式(13)所示。

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (13)$$

对于 $2n$ 电极注入地电流场, 根据大地导体几何模型, 通过等效导体长度积分可得多电极注入地电流场接地阻抗 R 如式(14)所示。

$$R = \begin{cases} 2 \int_a^{\infty} \rho \frac{dr_1}{S(r_1)}, & n = 1 \\ 2 \left(\int_a^{\frac{d}{2}} \rho \frac{dr_1}{n S(r_1)} + \int_{\frac{d}{2}}^{\infty} \rho \frac{dr_2}{S(r_2)} \right), & n > 1 \end{cases} \quad (14)$$

对式(14)进行化简得:

$$R = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sigma h} \ln \left(\frac{a+h}{a} \right), & n = 1 \\ \frac{1}{n \pi \sigma h} \ln \frac{d_n(h+a)}{a(d_n+2h)} + \frac{1}{\pi \sigma h} \ln \frac{d_n+h}{d_n}, & n > 1 \end{cases} \quad (15)$$

2 仿真验证与分析

2.1 不同数量电极注入仿真验证

在仿真环境下进行 2、4、6、8、10、12 电极注入仿真实验, 单侧电极按图 12 所示进行布设。文献[12]提出地面上土壤主要是潮湿的粘土, 电导率在 $0.01 \sim 0.05 \text{ S/m}$ 之间, 文献[15]提出土壤的相对介电常数为 $3 \sim 40$, 仿真环境参数设置如表 1 所示。

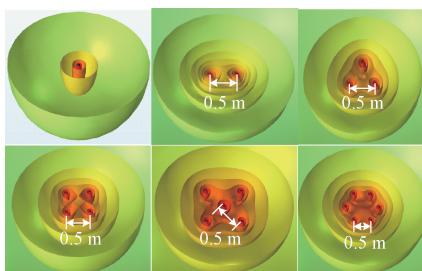


图 12 多电极注入单侧电极布设图

Fig. 12 Multi-electrode injection single side electrode layout

为验证所提多电极注入地电流场接地阻抗实时估计方法的优越性, 与文献[12]所提方法做对比, 在文献[12]中, 接地阻抗如式(16)所示。

$$R_d = \frac{R_L}{n\eta} \quad (16)$$

其中, η 为注入电极利用系数, R_L 为双电极接地阻抗, 如式(17)所示。

表 1 仿真环境参数

Table 1 Simulation environment parameters

仿真环境或条件	设置值
空气域/ m^3	$(3000+2\times15\times1000)^2\times(1500+15\times1000)$
土壤域/ m^3	$(3000+2\times15\times1000)^2\times(1500+15\times1000)$
电导率/($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	0.01
相对介电常数	5
网格大小	极细化
电极半径/m	0.0045
电极长度/m	0.35
电极材质	Steel AISI 4340
电极间距离/m	0.5
两侧距离/m	30
信号电压/V	100
信号频率/Hz	10

$$R_L = \frac{1}{\sigma \pi h} \ln \left(\frac{h}{a} \right) \quad (17)$$

接地阻抗估计方法相对误差 δ 如式(18)所示。

$$\delta = \frac{|R_M - R|}{R} \times 100\% \quad (18)$$

其中, R_M 为估计值, R 为仿真值或实测值。

仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同电极数量仿真

Table 2 Simulation with different number of electrodes

电极数	实测	文献[12]	本文方法	文献[12]	本文方法
	阻抗/ Ω	阻抗/ Ω	阻抗/ Ω	误差 δ	误差 δ
2	413.3	396.0	397.1	4.2	3.9
4	234.3	199.8	206.4	14.7	11.9
6	174.5	134.0	152.2	23.2	12.8
8	141.0	100.9	123.2	28.4	12.6
10	127.8	81.0	102.0	36.6	20.1
12	103.4	67.7	90.8	34.5	12.2
平均相对误差					23.6
					12.3

由表 2 可知, 注入电极数量从 2~12 变化时, 本文方法的相对误差平均值为 12.3%, 而文献[12]方法的相对误差平均值为 23.6%, 相对误差降低 11.3%。

2.2 不同电极距离与电极入地深度比注入仿真验证

多电极注入接地阻抗与双电极注入接地阻抗差异主要来自电极数量和电极距离与电极入地深度比(距深比), 继而在电极数量仿真验证的基础上进一步开展了不同距深比注入的仿真验证, 选择图 12 中的 4 电极注入和 8 电极注入。只改变电极距离, 其他仿真参数不变, 电极距深比随之改变, 本文以文献[12]距深比设置值 0.42 和 1.42 为基础, 进一步开展了距深比 0.29~2.29 情况下多电极注入的接地阻抗仿真, 仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同距深比仿真

Table 3 Simulation of different distance-to-depth ratios

电极数	距深比	实测阻抗/Ω	文献[12]阻抗/Ω	本文方法阻抗/Ω	文献[12]误差 δ	本文方法误差 δ
4	0.29	284.0	206.9	240.2	27.2	15.4
	0.57	259.8	202.4	221.6	22.1	14.7
	0.86	247.7	201.0	213.6	18.9	13.8
	1.14	239.4	200.2	209.2	16.4	12.6
	1.43	234.3	199.8	206.4	14.7	11.9
	1.71	230.3	199.5	204.6	13.4	11.2
	2	227.5	199.3	203.3	12.4	10.6
	2.29	224.7	199.1	202.4	11.4	9.9
8	0.29	212.5	108.6	179.5	48.9	15.5
	0.57	177.4	103.8	149.8	41.5	15.6
	0.86	159.6	102.2	136.2	36.0	14.7
	1.14	148.7	101.4	128.3	31.8	13.7
	1.43	141.0	100.9	123.2	28.4	12.6
	1.71	135.5	100.6	119.6	25.8	11.8
	2.00	131.4	100.4	116.9	23.6	11.1
	2.29	128.2	100.2	114.7	21.8	10.5
平均相对误差						24.6
						12.9

由表 3 可知, 距深比从 0.29~2.29 变化时, 本文方法的相对误差平均值为 12.9%, 而文献[12]方法的相对误差平均值为 24.6%, 相对误差降低 11.7%。

3 实测验证与分析

3.1 双电极注入接地阻抗估计方法实测验证与分析

如图 13 所示, 在不同环境条件下对所提双电极注入接地阻抗估计方法进行实测验证与分析。



图 13 测试环境

Fig. 13 Test environment

实验参数设置如表 4 所示, 测试结果如表 5 所示。

表 4 实验参数

Table 4 Experimental parameters

测试环境	电极半径/m	入地深度/m	两侧距离/m	信号幅值/V	信号频率/Hz
学校	0.015	1	27	100	10
公园	0.0045	0.35	30	100	10
大田	0.015	0.5	5	100	10

表 5 双电极接地阻抗测试结果

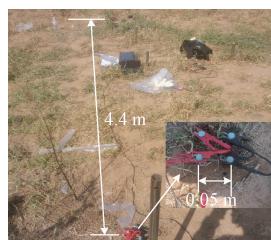
Table 5 Dual electrode ground impedance test results

测试地点	电导率/(S·m ⁻¹)	实测阻抗/Ω	本文方法阻抗/Ω	本文方法误差 δ
学校	0.0098	135.8	136.3	0.4
公园	0.0084	471.4	472.8	0.3
大田	0.0050	442.1	445.8	0.8

由表 5 可知, 双电极注入接地阻抗方法在不同环境条件下测试误差小于 1%, 证明了所提方法有效性。

3.2 多电极注入接地阻抗估计方法实测验证与分析

如图 14(a)~(d)所示, 在 4 种测试环境下首先分别进行双电极注入实验以获取土壤电导率, 再进行多电极的注入实验对阻抗估计方法进行验证, 电极与土壤间注入适量水并做泥土回填以保证电极与土壤充分接触。实验参数如表 6 所示。

(a) 山地
(a) Mountainous region(b) 林地
(b) Woodland

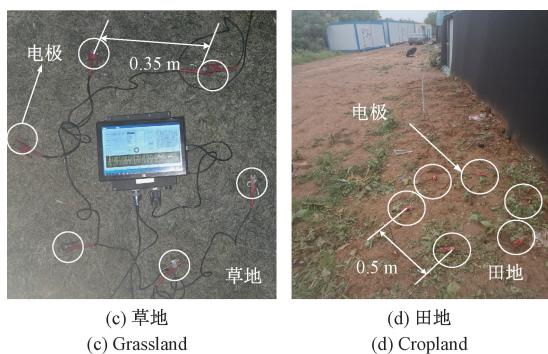


图 14 测试环境

Fig. 14 Test environment

表 6 实验参数

Table 6 Experimental parameters

环境	电极半径/m	电极长度/m	距深比	两侧距离/m	信号幅值/V	信号频率/Hz
山地	0.0045	0.35	0.14	4.4	100	10
田地	0.0045	0.35	1.40	30	100	10
林地	0.0045	0.35	0.57	10	100	10
草地	0.0045	0.35	1.00	5	100	10

根据式(17)计算电极附近等效电导率如表 7 所示。

表 7 电导率测量结果

Table 7 Conductivity measurement results

测试环境	电极数	实测阻抗/ Ω	等效电导率/($S \cdot m^{-1}$)
山地	2	169.4	0.0234
田地	2	105.8	0.0374
林地	2	746.1	0.0053
草地	2	378.4	0.0105

不同条件下多电极注入接地阻抗估计结果如表 8 所示,阻抗随注入电极数量变化曲线如图 15(a)~(d)所示。

由图 15 可知,不同注入条件下,本文方法明显优于文献[12]方法。由表 8 可知,16 组实验本文方法相对误差平均值为 6.0%,文献[12]方法相对误差平均值为 24.8%,所提方法相对误差减小 18.8%。所提阻抗估计方法在不同测试环境、不同电极数量、不同距深比情况下均有较好的估计效果。

根据理论分析结合图 12、15,当 4 电极注入时,由于将大地等势面视为圆柱面和半球面,导致等效导体横截面积比实际值偏大,所提方法阻抗估计结果比实测值偏小,随着电极数量增加,大地等势面与圆柱面和半球面更接近,估计误差减小。

此外,不同数量电极注入时,接地阻抗曲线斜率变小,即随着电极数量增加,注入电流提升效果将减弱,说明盲目增加注入电极数量不一定会取得很好的信号增强效果。

表 8 不同条件测试结果

Table 8 Test results under different conditions

距深比	电极数	实测阻抗/ Ω	文献[12]阻抗/ Ω	本文方法阻抗/ Ω	文献[12]误差 δ	本文方法误差 δ
(山地)	4	125.3	92.3	112.9	26.3	9.9
	6	107.8	64.9	102.3	39.8	6.7
	8	100.6	50.6	96.9	49.7	8.1
(林地)	4	430.7	381.4	417.5	11.4	3.1
	6	328.2	258.0	330.1	21.4	0.6
	8	268.5	195.6	282.2	27.1	5.1
(草地)	4	229.7	191.6	201.7	16.6	12.2
	6	159.0	128.8	152.6	19.0	4.0
	8	125.5	97.2	126.0	22.5	0.4
(田地)	10	102.0	78.2	105.1	23.4	3.1
	12	90.4	65.4	94.9	27.6	5.0
	4	61.9	53.4	55.2	13.8	10.9
(田地)	6	44.0	35.8	41.1	18.6	7.6
	8	35.4	27.0	34.0	23.8	7.0
	10	29.2	21.6	29.8	25.9	6.6
	12	25.7	18.1	27.0	29.6	5.6
平均相对误差						24.8
						6.0

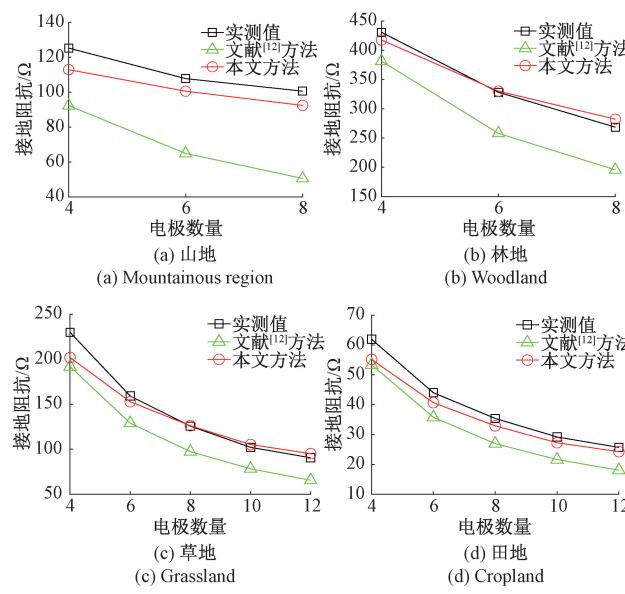


图 15 不同条件测试结果

Fig. 15 Test results under different conditions

反而会增加电极布设时间。

4 结 论

通过多电极注入电流的方式能有效降低接地阻抗,多电极注入地电流场接地阻抗值与注入电极数量和电极距离与电极入地深度比正相关。随着电极数量的增加,接地

阻抗减小,但比单电极注入阻抗并联要大。当注入电极数量和形状一定时,增加电极间距离与距深比可进一步降低接地阻抗。所提地电流场接地阻抗实时估计方法在不同注入条件下估计效果较好。

根据所提阻抗估计方法能够合理设置注入电极数量和距离,有效避免多电极注入地电流场电极布设盲目性,为多电极注入地电流场信息传输奠定了基础。

本研究没有考虑电极排布的影响,当相邻电极间距离相差较大或电极采用直线型等特殊排列时,大地导体几何模型误差可能会增大,后续还需进一步根据不同注入条件下大地电势分布优化大地导体几何模型,以降低接地阻抗估计误差。

参考文献

- [1] 王黎明,常硕,侯海军,等. FDR 土壤水分传感器测量重复性研究[J]. 电子测量与仪器学报,2023,37(1):231-238.
- WANG L M, CHANG SH, HOU H J, et al. Study on measurement repeatability of FDR soil moisture sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023,37(1):231-238.
- [2] 金庆鹏,刘璐,吕侃骏,等. 水泥混凝土含水率传感器设计与应用[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(6):225-232.
- JIN Q P, LIU L, LYU K J, et al. Design and application of water content sensor for cement concrete[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024,38(6): 225-232.
- [3] 李新艳,解滔,刘小鹏,等. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 M_(S)6.2 地震前地电阻率异常特征及机理分析[J]. 地球物理学报,2024,67(10):3721-3734.
- LI X Y, XIE T, LIU X P, et al. Characteristics and mechanism analysis of ground resistivity anomalies prior to the JiShishan M_(S)6.2 earthquake in Gansu on 18 December 2023[J]. Geophysical Journal, 2024, 67(10):3721-3734.
- [4] 余传涛,李子伦,薛俊杰. 深度学习在视电阻率快速反演中的研究与应用[J]. 地球物理学报,2024,67(11):4385-4399.
- YU CH T, LI Z L, XUE J J. Research and application of deep learning in fast inversion of apparent resistivity[J]. Geophysical Journal, 2024,67(11):4385-4399.
- [5] 杨天绘,易克初,田红心. 透地无线通信的弱信号捕获算法[J]. 信号处理,2017,33(7):978-984.
- YANG T H, YI K CH, TIAN H X. Weak signal capture algorithm for ground-penetrating wireless communication[J]. Signal Processing, 2017, 33 (7): 978-984.
- [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 B H, FU T H, WANG Y B. Mathematical modelling and analysis of current field through ground communication electric field[J]. Science, Technology and Engineering, 2021,21(30):12997-13001.
- [7] 付天晖,刘宝衡,王永斌. 透地无线通信研究综述[J]. 科学技术与工程,2021,21(17):6993-7001.
- FU T H, LIU B H, WANG Y B. A review of research on ground-penetrating wireless communication [J]. Science, Technology and Engineering, 2021, 21 (17): 6993-7001.
- [8] 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.
- [9] 徐湛,温晓雯,张淦. 极低频电流场透地通信路径损耗建模与分析[J]. 电讯技术,2024,64(3):376-381.
- XU ZH, WEN X W, ZHANG G. Modelling and analysis of path loss of very low frequency current field through ground communication[J]. Telecommunications Technology, 2024,64(3):376-381.
- [10] 张义鑫,张果. 水下回路通信电信号传输特性仿真研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(4):204-210.
- ZHANG Y X, ZHANG G. Simulation study on transmission characteristics of electrical signals for underwater loop communication [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(4):204-210.
- [11] 付国航,金建辉. 基于电流场的阵列极板水下通信系统仿真分析[J]. 电子技术应用,2024,50(4):48-52.
- FU G H, JIN J H. Simulation analysis of underwater communication system based on current field with arrayed polar plate [J]. Electronic Technology Application,2024,50(4): 48-52.
- [12] XU Y D, GUO L L, XUE W, et al. An optimal electric dipole antenna model and its field propagation [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2016, DOI:10.1155/2016/8601497.
- [13] 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). IEEE, 2023; 1-2.
- [14] YAN L C, ZHOU CH M, MIGUEL R, et al. E-fields of electrode-based through-the-earth (TTE)

- communication[C]. 2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2016: 1-8.
- [15] 张义恒. 基于 Chirp 信号的电流场透地通信系统设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
ZHANG Y H. Design and implementation of current field ground penetration communication system based on Chirp signal [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [16] 时洪扬. 半导电媒质中并行组合扩频通信技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
SHI H Y. Research on parallel combined spread spectrum communication technology in semiconducting media[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [17] 戴勇干. 接地极接地电阻计算公式应用分析与推荐公式[J]. 西北水电, 2022(2):92-96.
DAI Y G. Application analysis and recommended formula for calculation of grounding resistance of grounding electrode [J]. Northwest Hydropower, 2022(2):92-96.

作者简介

孙振振,硕士研究生,主要研究方向为自主定位。

E-mail:2022020407@bistu.edu.cn

苏中(通信作者),博士,教授,主要研究方向为高动态导航与控制、盲环境智能导航。

E-mail:sz@bistu.edu.cn