

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.208

# 接地网拓扑结构的组合源磁场叠加成像检测方法

田维光<sup>1</sup>, 刘龙欢<sup>1</sup>, 廖先<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 王浩文<sup>2</sup>, 付志红<sup>1</sup>

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 长江师范学院, 重庆 408100)

**摘要:** 现有研究中常通过电磁感应方法探测接地网拓扑结构, 针对该方法弱磁场测量困难, 提出了一种组合源磁场叠加成像检测方法。通过多根引下线向接地网周期性轮换注入电流, 不同注入方式使电流在接地网中呈现不同流向, 保证了接地网不同区域载流导体都能激发有效测量磁场, 结合二次开发的超宽带定位系统实时定位阵列式传感线圈测量位置, 实现了对地表水平  $x$ 、 $y$  方向感应磁场的扫描式测量, 最后采用形态学滤波方法消除异常数据干扰, 进而通过 Canny 边缘检测算子进行接地网拓扑提取。仿真与实验结果表明: 文中所述方法能够有效提高接地网拓扑结构的成像效果, 接地网网格导体定位精度误差不高于 3%。

**关键词:** 接地网; 组合源; 磁场; 拓扑结构; 边缘检测

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)11-090-12

## Combined source magnetic field superposition imaging detection method for grounding grid topology

TIAN Weiguang<sup>1</sup>, LIU Longhuan<sup>1</sup>, LIAO Xian<sup>1</sup>, Zhang Jing<sup>1</sup>,  
WANG Haowen<sup>2</sup>, FU Zhihong<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. Yangtze Normal University, Chongqing 408100, P. R. China)

**Abstract:** In response to the challenge of measuring weak magnetic field, this paper introduces a novel detection method, combining source magnetic field superposition imaging. The approach involves injecting current into the grounding grid through multiple down conductors in periodic rotation, each inducing different flow directions within the grounding grid. This variation ensures effective stimulation of measurement magnetic fields across different areas of the grounding grid. Integrated with an ultra-wideband positioning system, the method enables real-time location tracking of array sensing coil measurements in both  $x$  and  $y$  directions on the surface level. The induced magnetic field is scanned and abnormal data interference is eliminated using morphological filtering and Canny edge detection. Simulation and experimental results show that the proposed method effectively improve the imaging quality of grounding grid topology. Moreover, the positioning accuracy error for grounding grid conductors remains below 3%, validating the effectiveness of the proposed method.

**Keywords:** grounding grids; combined sources; magnetic field; topology; edge detection

收稿日期: 2023-02-08 网络出版日期: 2023-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51777017)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51777017).

作者简介: 田维光(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事接地网腐蚀诊断研究, (E-mail) 1512938928@qq.com。

通信作者: 付志红, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) fuzhihong@cqu.edu.cn。

碳钢是变电站接地网常用材料,常年埋于地下容易发生腐蚀,进而导致电气性能下降,危及电力系统的安全运行<sup>[1-6]</sup>。因此对老旧变电站进行接地网电气性能评估必不可少,而现有检测技术一般都基于接地网拓扑结构已知的情况<sup>[7-11]</sup>。电磁场法作为接地网拓扑检测的常用方法,由国外学者率先提出,Dawalibi<sup>[12]</sup>通过向接地网引下线注入电流测量地表电位,依据电位分布特征进行故障检测。Zhang等<sup>[13]</sup>和刘洋等<sup>[14]</sup>在此基础上提出了向接地网引下线注入正弦电流,测量地表磁感应强度峰值的方法获取接地网结构,但安全规程限制了注入电流的幅值大小,远离注入点的弱磁场区域难以有效测量,同时地表磁场需要进行高密度测量才能保证导体定位精度,工作量大。王文东<sup>[15]</sup>研制了组合脉冲源发射机,通过测量获取感应电压信号后使用有效值的方式进行成像,然而有效值的计算过程引入了新的误差且失去了原有感应电压信号特征。Fu等<sup>[16]</sup>针对变电站电磁干扰大,由感应磁场直接获取接地网拓扑结构困难,提出计算磁梯度应用小波边缘检测方法提取接地网拓扑结构,该方法对于测量数据的精确性要求较高且抗干扰性差。王文东等<sup>[17]</sup>提出通过形态学分水岭算法提取接地网拓扑结构,要求根据实际情况构建函数对数据进行背景补偿和信号增强,过程繁琐且容易造成误判。

综上,现有接地网结构的电磁探测方法主要有以下几点不足之处:一是远离电流注入点和抽出点区域弱磁场测量困难;二是磁场需要进行高密度测量,工作量大且数据处理繁杂;三是变电站电磁干扰大,容易产生异常数据。针对上述问题,提出了一种基于组合源的注入式电磁检测方法,保证了接地网不同区域载流导体都能激发有效测量磁场,在 100 kHz 的采样率下通过阵列式传感线圈对地表水平  $x$ 、 $y$  方向感应磁场进行扫描式测量,极大地提高了测量效率,考虑到变电站电磁干扰严重,提出了一种形态学边缘检测方法,能够有效消除异常数据干扰,提取出完整的接地网拓扑结构。

## 1 载流地网磁场分布特征

接地网导体的尺寸很小,一般使用截面为  $60\text{ mm}\times 6\text{ mm}$  的镀锌扁钢,相对于整个接地网地下空间而言可视为不计尺寸的有限长导体。如图 1(a)为接地网的等效模型,网格边长  $L$  为  $5\text{ m}$ ,埋于磁导率为  $\mu_0$  的单层土壤中,土壤电阻率为  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,埋深  $h$  为  $0.8\text{ m}$ ,取接地网网格中的一段竖直导体建立载流长直导体模型如图 1(b)所示。

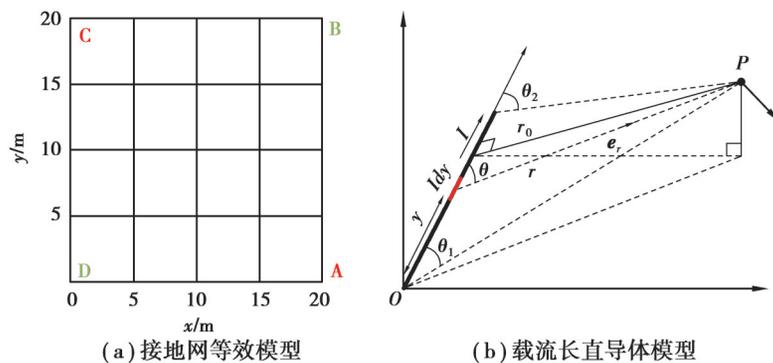


图 1 接地网载流导体模型

Fig. 1 Current-carrying conductor model of grounding grid

图 1(b) 中长直导体  $oc$  段中有电流  $I$  流动,  $P$  为地表任意一点,其中  $r$  表示电流元  $I dy$  到  $P$  点的距离,  $e_r$  表示其单位向量,  $r_0$  为  $P$  点到导体的垂直距离,  $q_1$ 、 $q_2$  分别表示  $P$  点同导体首末二端点连线与导体形成的夹角。忽略载流导体在土壤中的泄露电流,则依据毕奥-萨伐尔定律,该载流导体在空间某点  $P$  激发的磁感应强度为

$$B_P = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{oc} \frac{I dy \sin \theta}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2). \quad (1)$$

则可推导出有限长的载流导体在  $P$  点激发的磁感应强度与  $P$  点位置的函数关系式为

$$B_P = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \left( \frac{y - y_0}{x^2 + y^2 + h^2} - \frac{y - y_1}{r_0^2 + (y - y_1)^2} \right), \quad (2)$$

式中:  $r_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + h^2}$ ;  $(x,y)$  表示  $P$  点坐标,  $(x_0, y_0)$  和  $(x_1, y_1)$  分别表示载流导体的始端和终端位置坐标。由公式(2)可知, 对于垂直载流导体的地表测线来说, 会在导体正上方位置处出现磁场峰值, 因此可以通过磁场的峰值连通图来获取接地网拓扑结构。

网格形状的接地网由多段导体组成, 地表某点  $P$  的磁场可以看成是所有导体激发的3个方向磁场求矢量和组成。由平行于  $y$  轴的载流导体磁场分布特征可知, 在空间  $P$  点激发的磁场可以正交分解成  $x, z$  两个方向, 其中

$$\begin{cases} B_{px} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \left( \frac{y-y_0}{x^2+y^2+h^2} - \frac{y-y_1}{r_0^2+(y-y_1)^2} \right) \frac{h}{r_0}, \\ B_{pz} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \left( \frac{y-y_0}{x^2+y^2+h^2} - \frac{y-y_1}{r_0^2+(y-y_1)^2} \right) \frac{x-x_0}{r_0}. \end{cases} \quad (3)$$

同理, 对于平行于  $x$  轴的载流导体, 磁场可以分解成  $y, z$  两个方向。

对图1(a)中的接地网注入幅值为10 A的电流, A端口引下线作为注入点, C端口引下线作为抽出点。根据接地网导体中的电流分布情况进行地表磁场计算, 得到如图2所示的地表不同方向合成磁场分布图。可以看出, 图2(a)中地表水平  $x, y$  方向合成磁场能够准确地反映接地网拓扑结构, 图2(b)中地表  $x, y, z$  方向合成磁场在网格节点附近磁场相互干扰较大, 导致导体定位会存在较大偏差, 而图2(c)中  $x, z$  方向合成磁场和图2(d)中  $y, z$  方向合成磁场则难以直接反映出接地网拓扑结构, 因此后续实验通过测量水平  $x, y$  方向合成磁场来获取接地网拓扑结构。

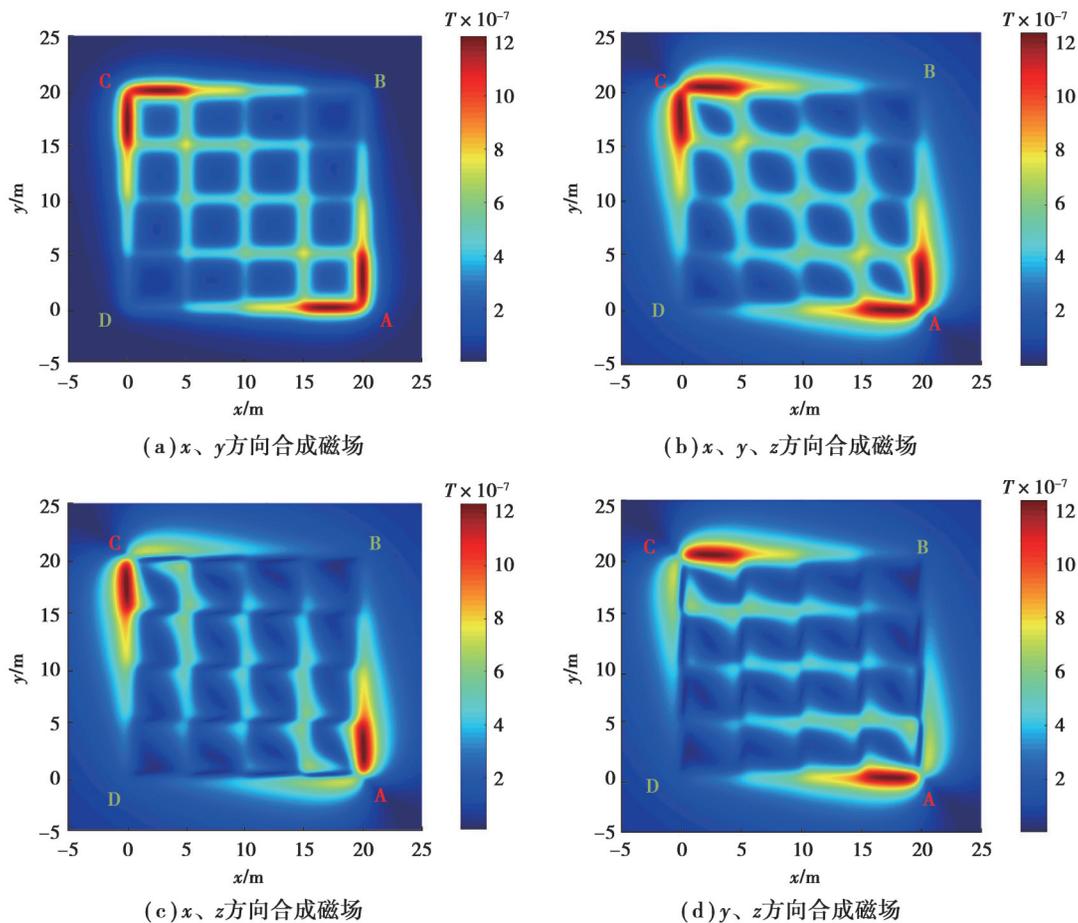


图2 地表不同方向合成磁场分布图

Fig. 2 Synthetic magnetic field distribution maps in different directions of the surface

地表水平  $x, y$  方向合成磁场  $B_{xy}$  为

$$B_{xy} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}. \quad (4)$$

从图 2 中还可以看出,远离注入点的弱磁场区域磁场峰值与注入点附近磁场峰值相差数倍,对于大型接地网来说差距更大,会造成弱磁场区域拓扑结构识别困难的问题。

## 2 组合源磁场叠加成像检测方法

### 2.1 组合源的磁场激发原理

接地网的电路结构可以近似看成纯电阻网络,向接地网注入电流构成的回路可以等效成线性电路,线性电路具有可加性和齐次性这 2 个重要特点。根据线性电路的叠加定理可对不同激励在接地网中的响应电流进行叠加,同理对电流激发的磁场也可以进行叠加。

由此,基于线性电路的叠加定理提出一种多点轮换发射方法。如图 3 所示,组合源发射机在一个发射周期  $T$  内通过 4 个通道轮换输出电流,不同通道连接了不同引下线,每次发射选取 A、B、C、D 中 2 个通道作为一次组合,共 6 种组合方式。在不移动设备位置的情况下,一个发射周期内可以多次改变电流注入方式,从而达到地网有效测量区域全覆盖的效果,其结果类似于多个单源组合注入,称其为组合源。

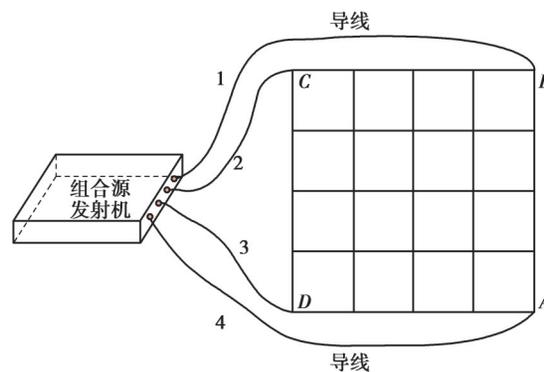


图 3 组合源发射示意图

Fig. 3 Schematic diagram of combined source emission

### 2.2 组合源仿真分析

建立图 1(a)中  $4 \times 4$  网格大小的接地网电磁仿真模型,相关参数不变。图 4 为接地网不同注入方式下的地表水平合成磁场仿真结果,图 4(a)为 A-B 注入电流、图 4(b)为 A-C 注入电流、图 4(c)为 A-D 注入电流、图 4(d)为组合源注入电流。从图中可以看出,单源注入电流情况下存在部分弱磁场区域成像不清晰,A-B 和 A-D 注入电流的情况下还存在对称区域导体磁场峰值特征消失等情况,如图中红色虚线标记处。组合源磁场叠加后明显增强了单源弱磁场区域的网格特征,所有网格导体上方的磁场峰值特征也都清晰可见,在不改变原有拓扑结构的基础上使整片磁场数值上分布更加均衡。

图 5 表示单源 A-D、B-D、C-D 注入与组合源注入在  $y=12.5$  m 处的水平磁场分布曲线,可以看出,组合源测线标记 3、4 处水平磁场最大最小峰值差约为  $0.32 \mu\text{T}$ ,而单源 CD 测线标记 1、2 处水平磁场最大最小峰值差约为  $0.81 \mu\text{T}$ ,进一步表明了组合源磁场分布更加均衡,可以提高成像效果。

综上,组合源不仅为弱磁场区域的有效测量提供了一种解决方法,也能够提高磁场的整体成像效果,在一定程度上还能够避免漏判或误判。

### 2.3 组合源激发磁场的阵列式测量方法

通过对超宽带定位系统装置的二次开发,使其与自身研发的数据采集与处理软件相结合,实现了阵列式接收线圈对地表水平  $x$ 、 $y$  方向感应磁场的扫描式测量。阵列式线圈共 12 组通道,每组通道含 2 个相互正交的线圈分别测量水平  $x$ 、 $y$  方向的磁场,测量宽度可达 1.2 m,每组线圈间距固定,线圈直径 8 cm,匝数 600 匝。如图 6 所示,超宽带定位系统采用 A、B、C、D 四个基站放于接地网地表四周,2 个定位基站标签位于阵列式线圈装置两端,可满足阵列式线圈装置任意方向拖动,每组线圈位置都能够准确实时定位,相较于固定测线的测量方式,该方法测量磁场更加灵活、高效。

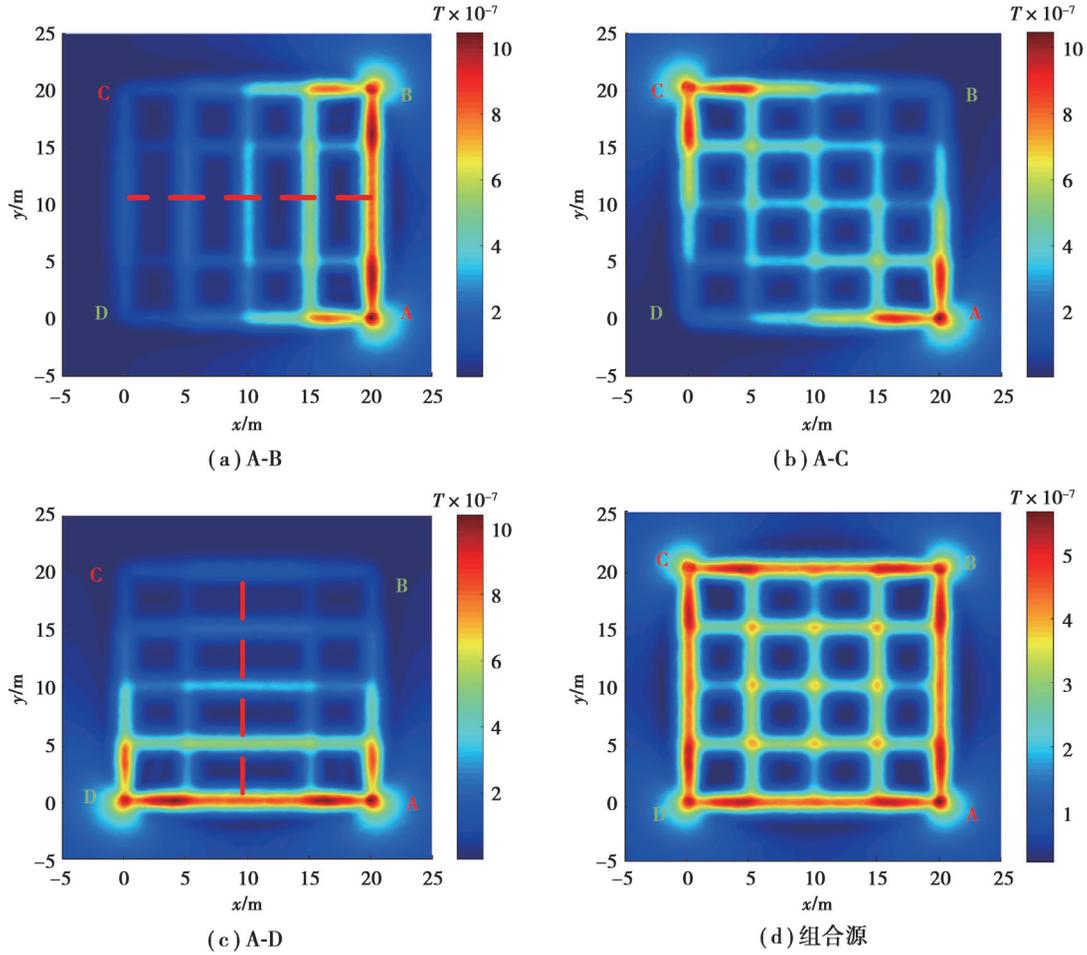


图4 单源与组合源成像对比

Fig. 4 Single-source versus combined-source imaging

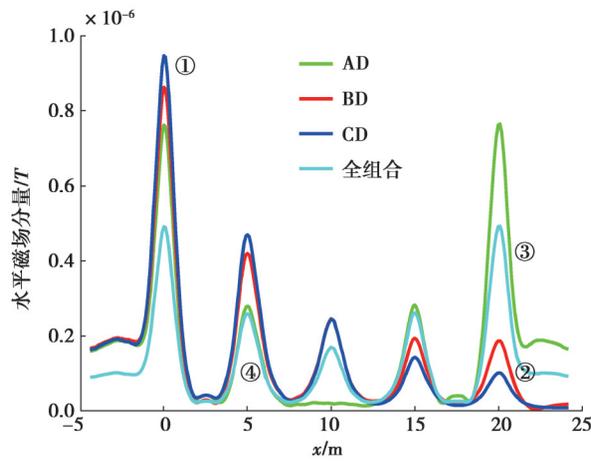


图5  $y=12.5$  m 不同注入方式下的磁场分布曲线

Fig. 5 Magnetic field distribution curve at  $y=12.5$  m under different injection methods

超宽带系统定位原理如公式(5),坐标  $(x_1, y_1, z_1) \sim (x_4, y_4, z_4)$  分别表示4个定位基站的位置信息,  $(x, y, z)$  表示标签的位置,  $R_1, R_2, R_3, R_4$  分别表示标签位置到4个基站之间的距离,测量时通过快速求解方程组实现标签的实时定位。

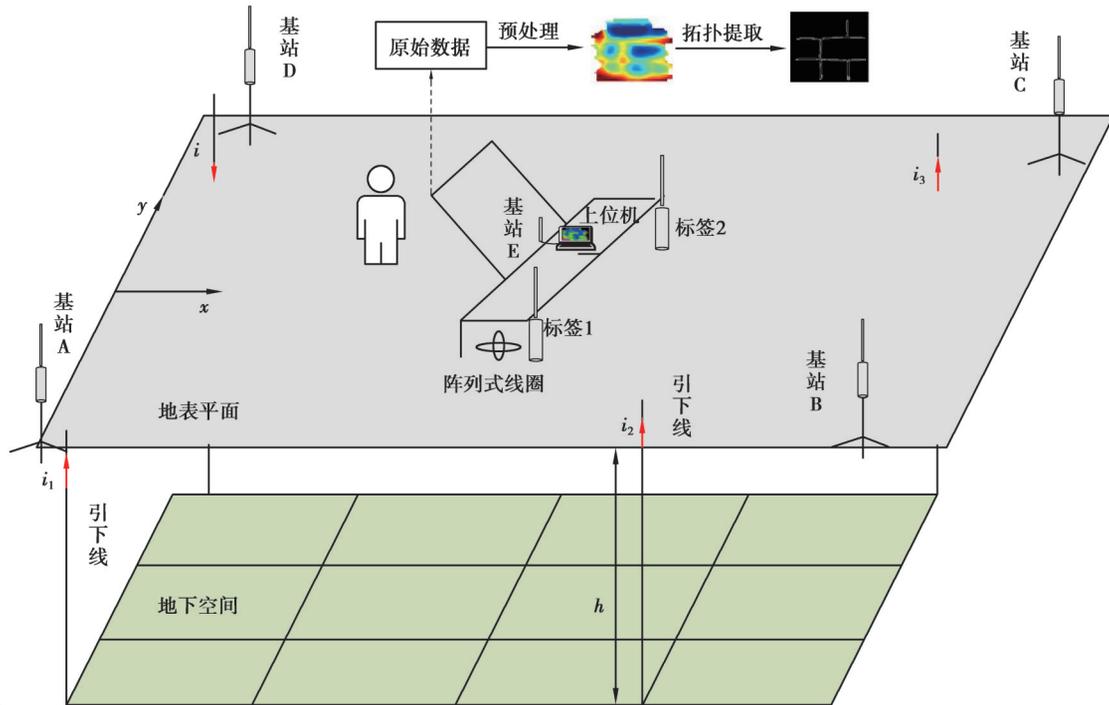


图 6 磁场测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of magnetic field measurement

$$\begin{cases} (x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2=R_1^2, \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2=R_2^2, \\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2=R_3^2, \\ (x-x_4)^2+(y-y_4)^2+(z-z_4)^2=R_4^2. \end{cases} \quad (5)$$

每组线圈位置公式为

$$x_m=x_1+\frac{(m-1)*(x_N-x_1)}{N-1}, \quad (6)$$

式中: $N$ 表示线圈传感器组数; $x_1、y_1$ 分别表示定位标签1的 $x$ 坐标和 $y$ 坐标,同时也是第一组线圈的坐标;同理 $x_N、y_N$ 代表标签2的坐标,也是最后一组线圈的坐标; $m$ 代表第 $m$ 组线圈, $x_m、y_m$ 表示第 $m$ 组线圈的坐标信息。

阵列式接收装置测量过程如图6所示,测量人员推动阵列式接收装置在100 kHz的采样率下连续测量,经过的每一个位置都能够采集到大量不同组合注入方式下的感应磁场数据,同时上位机可对测量到的数据实时处理,并绘制出测量区域的地表磁场分布图,有助于测量过程中判断出地下导体的大致位置和走向。

### 3 基于形态学的接地网拓扑边缘检测方法

边缘检测能够有效地提取图像边缘蕴含的丰富信息,其实质是提取图像中对象与背景间的交界线。边缘检测在直接处理图像时易受噪声干扰,致使边界检测不完整。形态学滤波器作为一种非线性滤波器,能够在保留图像原有信息的基础上,消除异常数据干扰,突出图像的几何特征,把形态学与边缘检测相结合可用于接地网拓扑结构的提取。

#### 3.1 形态滤波磁场特征提取原理

数学形态学是以集合论为基础的一种非线性分析理论,通过对目标图像的形态变换来实现结构分析和特征提取。它把图像视为一种点的集合,利用结构元素不断地在图像中移动来实现图像分析和处理的目的,而滤波效果则取决于结构元素大小和形状的选择。将磁场 $B_{xy}(x,y)$ 作为输入图像信号,用 $f(x,y)$ 表示,结构元素用 $b(x,y)$ 表示,其中 $(x,y)$ 表示图中像素点坐标, $D_f、D_b$ 分别表示 $f$ 和 $b$ 的定义域,符号 $\ominus、\oplus、\circ、\bullet$ 分别表示形态学中的腐蚀、膨胀、开运算、闭运算。

形态学操作一般都是基于腐蚀与膨胀运算,定义如下。

1) 腐蚀运算:

$$(f \ominus b)(s, t) = \min \{ f(s+x, t+y) - b(x, y) | (s+x), (t+y) \in D_f, (x, y) \in D_b \}. \quad (7)$$

腐蚀运算使图像高亮区域范围缩小,在消除毛刺和小桥的同时可突出磁场分布的网格特征。

2) 膨胀运算:

$$(f \oplus b)(s, t) = \max \{ f(s-x, t-y) + b(x, y) | (s-x), (t-y) \in D_f, (x, y) \in D_b \}. \quad (8)$$

膨胀运算使图像高亮区域扩张,通过膨胀可以将磁场分布中的裂缝进行填补。

3) 开运算:

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b. \quad (9)$$

先腐蚀后膨胀即为开运算,它可以平滑对象的轮廓并抑制信号的峰值噪声,用来消除信号的散点和毛刺,不改变原有拓扑特性。

4) 闭运算:

$$f \bullet b = (f \oplus b) \ominus b. \quad (10)$$

闭运算能够消除图像中狭窄的间断和细小的孔洞,并填补轮廓线中的断裂。

5) 顶帽运算:

$$f = f - f \circ b. \quad (11)$$

顶帽运算是图像减去图像的开运算。图像经顶帽运算后可以获取原图像灰度值较周围高的亮点。接地网磁场峰值位于网格导体正上方,在灰度图中也是最亮的区域,因此可以通过顶帽运算提取出磁场图像的峰值区域。

### 3.2 边缘检测接地网拓扑提取

形态学边缘检测拓扑提取流程如图7所示,选取不同大小的结构元素按流程操作后进行顶帽运算获取磁场分布图像的峰值区域,再通过 Canny 边缘检测算子提取出接地网拓扑结构。

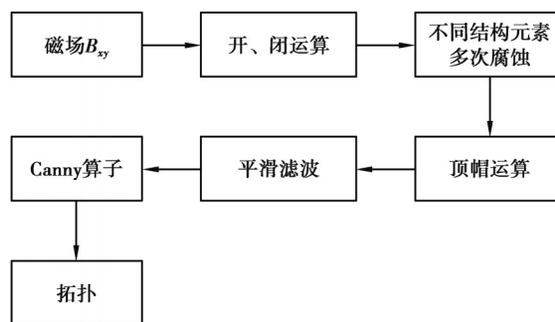


图7 拓扑提取流程

Fig. 7 Topology extraction process

对图4中A-C注入电流的仿真结果进行拓扑提取,图8(a)为拓扑提取流程中的顶帽运算结果,图8(b)为拓扑提取流程中 $x=1$  m处的磁场分布曲线变化情况。从图中可以看出,形态学处理后弱磁场峰值区域梯度变化明显增强,峰值特征更加容易识别。

图9(a)为直接 Canny 提取的拓扑结构,图9(b)为形态学边缘检测提取的拓扑结构。从图中可以看出,直接进行 Canny 边缘检测能够获取大部分的接地网拓扑结构,但是对于弱磁场区域来说,由于其磁场峰值区域梯度变化缓慢和易受异常数据干扰,导致难以有效识别。形态学边缘检测方法在消除干扰的同时加剧了磁场峰值区域梯度变化,提取到的拓扑结构更加完整、准确,鲁棒性也更好。

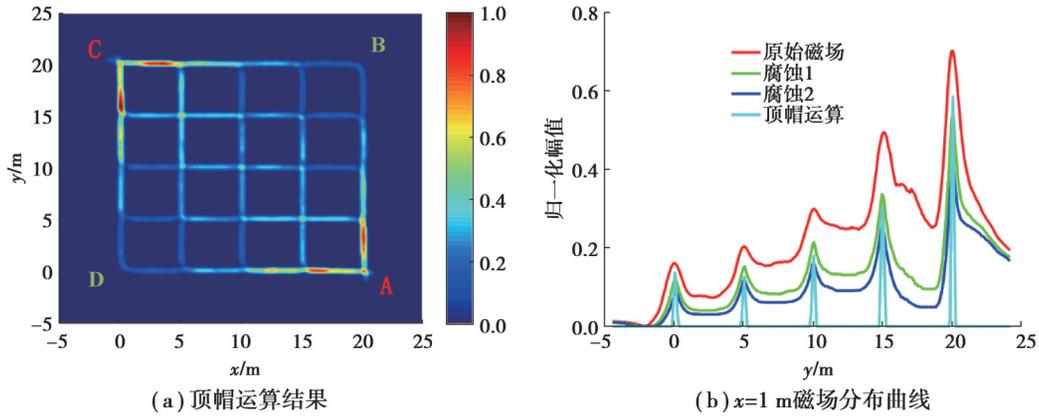


图 8 形态学处理结果

Fig. 8 Morphological processing results

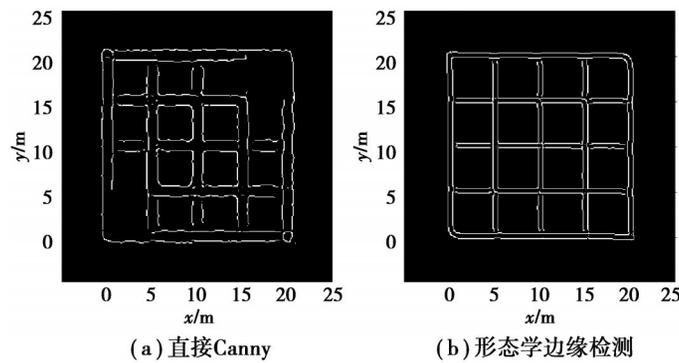


图 9 拓扑提取结果

Fig. 9 Topology extraction results

### 4 实验分析

研发的整套探测系统主要由组合源发射机、阵列式传感线圈、接收机、上位机、超宽带定位装置、数据采集与处理软件等组成,如图 10 所示。

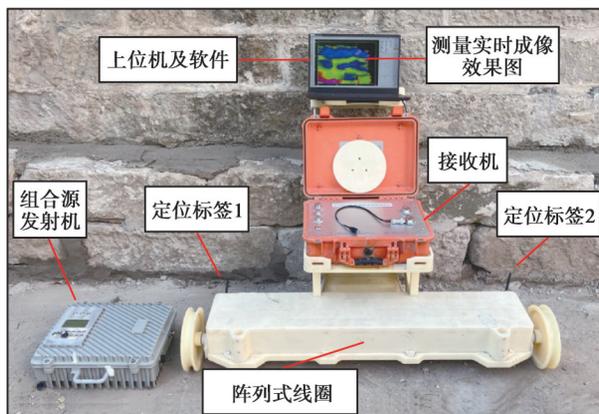


图 10 探测系统装置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the detection system equipment

在接地网试验场进行模拟实验,接地网由  $4 \times 3$  的网格组成,网格导体使用截面为  $60\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的镀锌扁钢,埋深  $h$  为  $0.8\text{ m}$ ,其他相关信息如图 11 所示。电流注入点如图选取 A、B、C、D,组合源发射机 4 个通道分别连接注入点处对应的引下线,选取以 D 为公共点的组合发射方式,即 A-D、B-D、C-D 在一个周期内轮换发射

幅值 10 A、频率 200 Hz 的脉冲电流。

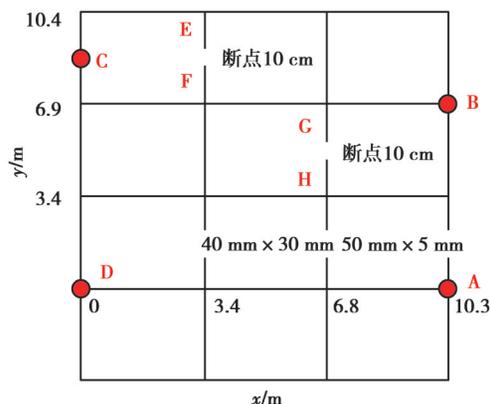


图 11 接地网试验场示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the grounding network experimental field

图 12(a)为接地网实验测量过程中上位机简化处理数据后,实时显示的测量区域感应电压分布图,图 12(b)是接地网试验场,红色实线表示接地网部分网格位置区域,红色标记 1、2、3 处都有引下线。



(a) 测量过程实时成像

(b) 实验场地

图 12 接地网实验现场

Fig. 12 Grounding grid experiment site

接收线圈感应电压可以表征感应磁场强度,后续通过感应电压信号峰值直接成像。扫描式测量在获取到大量无规则分布的感应磁场数据后,与传统固定测点一样,在绘图时先网格化平面,然后再求每一个划分网格点的感应磁场数值。假设网格距离为  $d$ ,则对于坐标为  $(x_0, y_0)$  的网格点  $M$ ,其感应磁场数值等于其半径  $r$  ( $r \leq d$ ) 内的所有测量数据点的感应磁场取均值。为了保证定位精度,本次实验  $d$  取 0.1 m,  $r$  取 0.1 m。

图 13 为阵列式测量的一条与  $y$  轴平行的  $x$  测线,  $x$  坐标位于 (3.3 m, 4.5 m) 范围内。由于测量到的感应电压峰值一般小于 100 mV,因此对  $y$  方向磁场的线圈感应电压峰值平方和取自然常数  $e$  为底的对数后成像,图中颜色图数值即表示感应电压取对数后的值。通过图中黑色实线标记处的峰值可以明显看出导体位置,如  $y$  在 3.35 m 处存在一根导体。

研发的数据处理软件可以提取出组合源不同注入方式下的感应电压数据,在对感应电压数据峰值取对数后绘制出如图 14 所示的感应电压分布图。其中接地网小部分边缘区域由于存在障碍物未测量,未测量到的部分用白化区域表示。

从图 14 中可以看出:A-D 注入情况只能得到水平方向导体拓扑结构,无法获取垂直方向;C-D 注入情况由于受到断点的影响,只能获取到注入点附近区域的部分网格特征;B-D 注入情况虽然能够获取到大部分拓扑结构,但是对于断点无法识别,同时也有可能产生误判;而组合源注入能够获取到测量区域完整的拓扑

结构,对于断点也能够准确识别,如组合源标记 1、2 处断点磁场陷落明显,同时组合源可结合单源成像结果对组合源成像断点位置进行复查,排除误判的可能性,提高拓扑识别的准确率。因此,组合源相较于单源在拓扑提取的完整度和准确率上都有巨大优势,对于大型接地网则更加明显。

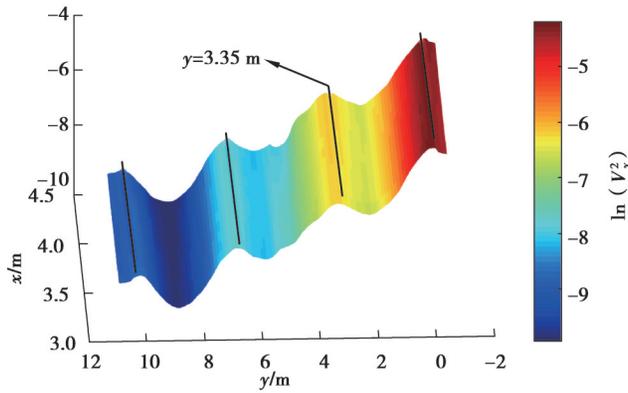


图 13 x 测线感应电压分布图

Fig. 13 x-line induced voltage distribution

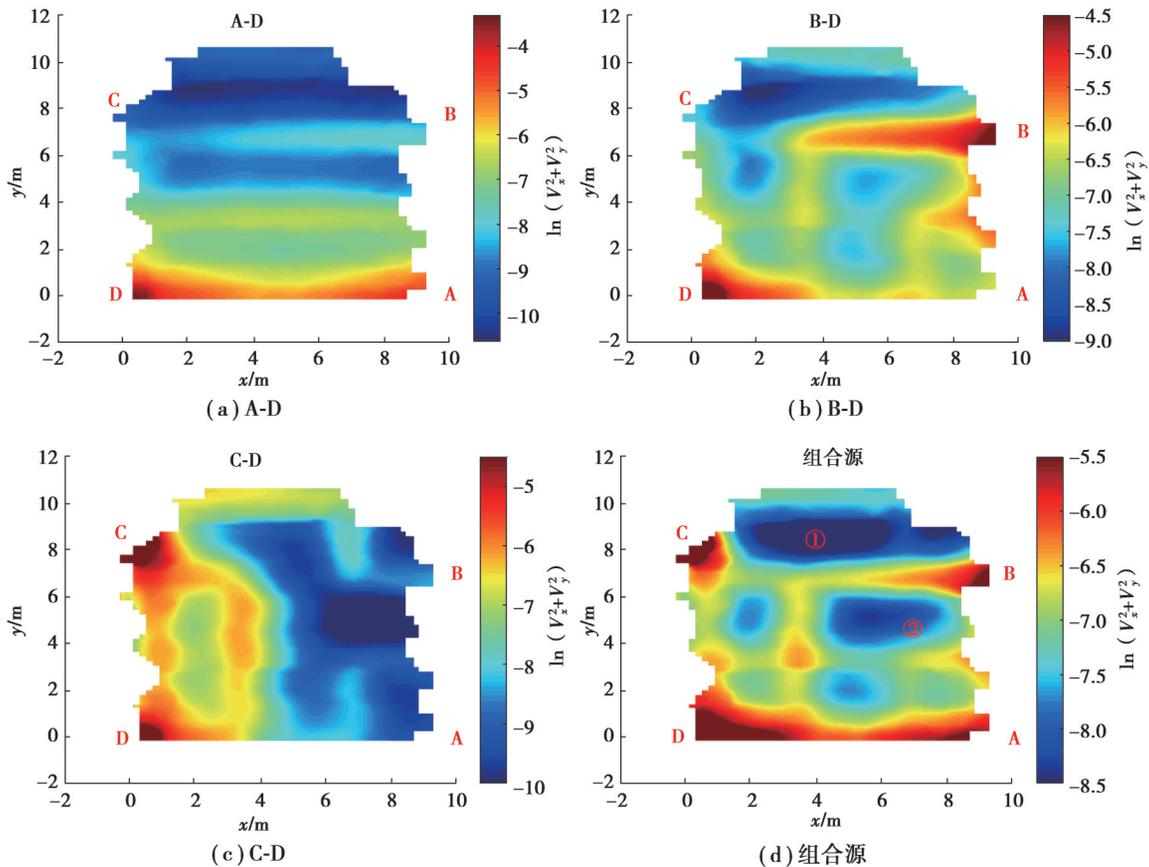


图 14 不同注入方式感应电压分布图

Fig. 14 Combined source imaging results

图 15 为组合源感应电压分布图的拓扑提取结果,从接地网拓扑提取结果来看,形态学边缘检测方法能够有效提取出测量区域完整的拓扑结构,抗干扰能力强。

结合不同测线的感应电压分布曲线和拓扑提取结果对接地网网格导体进行定位,可得到测量区域完整的接地网导体位置信息如表 1 所示,其中误差率定义为网格导体实际位置与定位位置之间的差值和网格长度的比值。

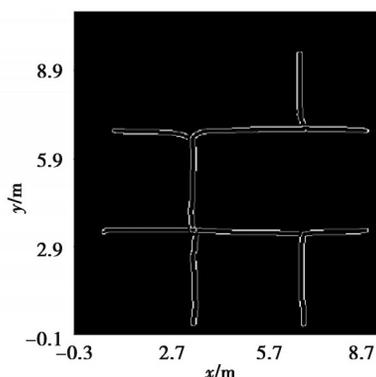


图15 拓扑提取结果

Fig. 15 Topology extraction results

表1 接地网的网格导体定位

Table 1 Grid conductor positioning of the grounding grid

$x, y$ 坐标	实际导体位置	探测导体位置	误差率/%	$x, y$ 坐标	实际导体位置	探测导体位置	误差率/%
$x_1$	0	0.08	2.3	$y_2$	3.4	3.34	1.8
$x_2$	3.4	3.35	1.5	$y_3$	6.9	6.83	2.1
$x_3$	6.8	6.89	2.6	$y_4$	10.4	10.31	2.9
$y_1$	0	0.05	1.5				

综上,组合源能够准确探测出测量区域完整的拓扑结构,结合形态学边缘检测方法进行拓扑提取,提取到的接地网网格导体位置误差不超过3%,表明了整套探测系统和检测方法的可靠性。

## 5 结论

1)针对单源探测接地网结构弱磁场区域难以有效测量,以及容易造成漏判或误判等问题,文中叠加定理提出了一种组合源磁场叠加成像检测方法,并搭建了仿真模型,验证了该方法的准确性。仿真与实验结果表明组合源探测效果优于单源,能探测到测量区域完整的拓扑结构、准确度高。

2)开发的整套探测系统,实现了系统化的探测流程,阵列式线圈结合超宽带定位系统扫描式测量地表水平 $x, y$ 方向感应磁场,解决了传统固定测线、测点测量磁场时工作量大和效率低下问题。

3)编写的软件首先在数据采集时可实时成像,有利于测量过程中判断出网格导体大致位置和走向,在数据处理时可直接提取出感应电压数据矩阵,减少了繁杂的工作量。

4)提出的基于形态学的接地网拓扑结构边缘检测方法,能够有效消除异常数据干扰和增强磁场峰值区域的梯度变化,边缘检测则可准确地提取出接地网拓扑结构,该方法抗干扰能力强,检测结果精确。

## 参考文献

- [1] 方乙君,柳松,王雄文,等.沿海地区变电站腐蚀现状及防腐措施研究[J].电气技术,2018,19(12):97-99,102.  
Fang Y J, Liu S, Wang X W, et al. Study on corrosion status and anti-corrosion measures of substations in coastal areas[J]. Electrical Engineering, 2018, 19(12): 97-99, 102. (in Chinese)
- [2] Hu H Z, Li Y Y, Fang M G, et al. Research on grounding grid corrosion detection based on hybrid artificial intelligence algorithm[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2022, 68(2): 241-262.
- [3] Chen C, Wu D, Pan B L, et al. Research on grounding grid conductor positioning based on pcb coil magnetic field sensor[C]// 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation. IEEE, 2020: 269-275.
- [4] Lu C J, Li L F, Liu Z X, et al. Location and corrosion detection of tower grounding conductors based on electromagnetic measurement[J]. Measurement, 2022, 199: 111469.
- [5] Song L B, Zhang C, Zhao C, et al. Influence of current on soil corrosion of galvanized steel of grounding grids[J]. Micromachines, 2022, 13(2): 190-200.

- [ 6 ] Zhang C, Liao Y X, Gao X, et al. Research advances of soil corrosion of grounding grids[J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 513-518.
- [ 7 ] 李星, 杨帆, 余晓, 等. 基于内源式电阻抗成像的接地网缺陷诊断逆问题研究[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5):902-909.  
Li X, Yang F, Yu X, et al. Research on inverse problem of grounding grid fault diagnosis based on inner-source EIT [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019,34(5):902-909. (in Chinese)
- [ 8 ] 詹花茂, 郭明鑫, 刘春江, 等. 基于正则化最小二乘法的接地网腐蚀状态评估方法[J]. *腐蚀与防护*, 2022, 43(6):79-85, 113.  
Zhan H M, Guo M X, Liu C J, et al. Corrosion state assessment method of grounding grid based on regularized least square method[J]. *Corrosion and Protection*, 2022,43(6):79-85,113. (in Chinese)
- [ 9 ] Xie H P, Yang F, Hua M S, et al. Grounding grid corrosion detection based on mini-batch gradient descent and greedy method [J]. *AIP Advances*, 2021, 11(6): 065034.
- [ 10 ] 孟宪峰. 基于电网络法的分布式接地网腐蚀检测装置设计[D]. 长春: 吉林大学, 2022.  
Meng X F. Design of distributed corrosion detection device of grounding grids based on electric network theory[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [ 11 ] Souza F A, Neto T R F, Magalhães F R P, et al. Predicting the grounding topology based on grounding impedance and the pattern recognition framework: a case study on one to four ground rods in straight line[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(4):1748-1757.
- [ 12 ] Dawalibi F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors part 2: ground networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1986, 1(4): 112-119.
- [ 13 ] Zhang B, Zhao Z B, Cui X, et al. Diagnosis of breaks in substation's grounding grid by using the electromagnetic method[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002,38(2):473-476.
- [ 14 ] 刘洋, 江明亮, 崔翔. 变电站接地网导体与网格结构探测方法[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(5): 167-173.  
Liu Y, Jiang M L, Cui X. Detecting method of conductors and mesh structure of substation's grounding grids[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(5): 167-173. (in Chinese)
- [ 15 ] 王文东. 接地网结构的组合脉冲源电磁检测方法 with 装置研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021.  
Wang W D. Research on detecting method and equipment of grounding grids structure using combined pulse source electromagnetic method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [ 16 ] Fu Z H, Song S Y, Wang X J, et al. Imaging the topology of grounding grids based on wavelet edge detection[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2018, 54(4): 1-8.
- [ 17 ] 王文东, 胡绪权, 徐正玉, 等. 基于形态滤波的接地网拓扑检测[J]. *电工技术学报*, 2021,36(17):3685-3692.  
Wang W D, Hu X Q, Fu Z H, et al. Topology detecting method of grounding grids based on morphological filtration [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021,36(17):3685-3692. (in Chinese)

(编辑 詹燕平)