

# 电力系统接地网状态智能成像检测方法

张来福<sup>1</sup>, 杨虹<sup>1</sup>, 刘国强<sup>2,3</sup>, 李艳红<sup>2,3</sup>

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 本文针对电力系统接地网腐蚀、断裂等故障的定位和定量评估问题, 提出一种接地网脉冲电磁逆散射成像新方法, 利用接地网及周围土壤介质电参数的综合差异性, 实现变电设备接地网电性参数幅值图像重建, 通过电参数异常反映接地网电参数及结构特性。本文分析了基于散射原理的接地网智能成像检测基本理论, 设计并研制了接地网状态智能检测系统, 进行了数值实验和接地网样本的测试实验。本文方法是窄脉冲发射、电磁检测、多次覆盖观测技术的结合, 适合接地网浅层探测, 成像分辨率高, 它为接地网提供了一种新的检测方法。

**关键词:** 接地网; 智能成像; 逆散射; 电参数

**DOI:** 10.12067/ATEEE1705091

**文章编号:** 1003-3076(2018)02-0076-07

**中图分类号:** TM15; TM71

## 1 引言

接地网在电力系统安全可靠运行方面起着重要的作用, 对保护站内工作人员的人身安全和各种电气设备的正常运行至关重要<sup>[1,2]</sup>, 其接地性能一直受到生产运行部门的重视<sup>[3]</sup>。镀锌钢是目前国内变电站地网较为常用的接地导体材料, 经过长时间的运行, 在多雨和沿海地区, 随着使用年限的增加, 镀锌钢易发生腐蚀。按照土壤腐蚀性的强弱不同, 接地导体在土壤中的年腐蚀率在 2.0 ~ 8.0mm 间不等<sup>[4]</sup>。除此之外, 在施工过程当中地网的不良焊接、虚焊、漏焊以及来自土壤的腐蚀、接地短路电流的电动力作用等, 都可引起接地网各均压带之间或接地引下线与均压带之间存在电气连接不良的故障点, 这些故障点不可避免地导致接地网的安全性能遭到严重破坏, 原来经过精心设计的接地网由于结构被改变, 不能为故障电流和雷电电流提供有效的泄流通道的, 人身安全和设备安全受到严重威胁。

为了实现在不停电和不开挖的情况下对接地网的故障进行诊断, 国内学者已经开展了很多工作。近年来, 故障诊断技术有很多新方法和相应的测量系统, 研究理论也不断完善, 基本形成了电网络分析

法<sup>[5-11]</sup>、电磁场分析法<sup>[12-14]</sup>及电化学方法等。电网络分析法中, 接地网局部腐蚀或断裂时地表电位差变化很小, 接地网节点间电阻值没有明显变化, 很难通过外部接地电阻、电位分布、接触电势等参数进行准确判断。电磁场分析法易受外界干扰, 影响测量的准确性, 进而影响腐蚀程度的判断。这两种方法主要针对小规模简单结构的接地网, 当用于大规模复杂结构的接地网时有较大难度, 而且无法获得电阻率图像, 难以实现故障的定量评估和精确定位。传统的电化学测量方法也难以准确地测量接地网金属的腐蚀状态。

为解决接地网腐蚀、断点等故障的精确定位和定量评估问题, 在变电站正常安全运行情况下, 快速准确地获得反映接地网导通性能状态的高分辨率电特性参数图像意义重大。而传统的地球物理探测成像方法难以满足超浅层和高分辨率的要求<sup>[15,16]</sup>。

本文针对上述方法的不足, 结合接地网埋深浅、结构复杂以及尺寸小的特点, 提出了一种新的检测方法——接地网状态智能成像检测新方法。本文方法基于散射原理<sup>[17-21]</sup>, 结合接地网状态智能检测系统, 利用接地网及周围土壤介质电参数的综合差异性, 实现变电设备接地网电性参数图像重建, 反映接

**收稿日期:** 2016-01-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51407175)、国家电网公司科技项目(SGSXDKY-PJKJ2015-004)

**作者简介:** 张来福(1967-), 男, 山西籍, 高级工程师, 博士, 主要从事高电压设备与技术;

杨虹(1982-), 女, 山西籍, 工程师, 硕士, 主要从事设备状态评价技术。

地网电参数及结构特性。本文方法为电力系统接地网的检测提供了一个全新的思路,有望为接地网腐蚀和断点等状态评估提供更直观和精确的诊断。

## 2 接地网状态智能成像检测原理

人工接地极按接地极的布置方式可分为水平(或以水平接地极为主)和垂直接地极两类,按接地极的数目可分为单独接地极和复合接地极。水平埋设的接地极常采用 40mm × 4mm 的扁钢或直径 16mm 的圆钢,可作放射形布置、成排布置或圆形布置。垂直埋设的接地极常采用直径为 40 ~ 50mm 的钢管或 40mm × 40mm × 4m ~ 50mm × 50mm × 5m 的角钢。垂直接地极的长度以 2.5m 左右为宜。相邻钢管或角钢之间的距离不应超过 3 ~ 5m,工程上,接地网埋深一般取 0.8m 或 0.6m<sup>[22]</sup>。

接地网状态智能成像基本原理如图 1 所示。在已知地下介质电性参数、激励源参数的情况下,可模拟接收机测量参数。采用脉冲激励源发射信号,在经过地下介质传播后,由接收机测量接收信号,最终实现从检测信号到接地网电参数的图像重建。

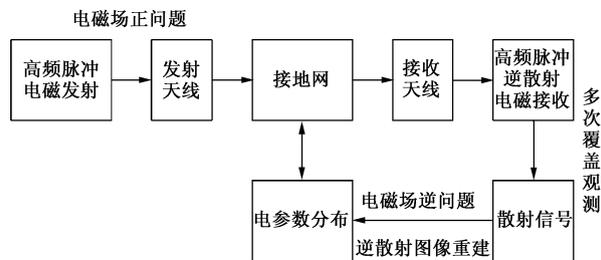


图 1 接地网状态智能成像原理

Fig. 1 Principle of intelligent imaging for power system grounding grid

接地网状态智能成像检测系统包括高频脉冲发射系统、发射天线、电磁接收系统、多个接收天线组成的接收阵列以及电参数成像系统,如图 2 所示。

接地网状态智能成像检测系统置于接地网上方地面,高频脉冲电磁发射系统发射高频窄脉冲信号,将高频窄脉冲信号通过发射天线定向发送到地面下的接地网,高频窄脉冲信号经地下介质传播后,由多个接收天线组成的接收阵列接收包含接地网信息的信号。采用多次覆盖的观测方法以提高分辨率,由电磁接收系统完成信号的全波形采集,对采集的包含接地网信息的数据进行处理,最终采用电磁散射成像技术进行数据的解释,实现地下超浅层接地网及周围介质电参数的图像重建。

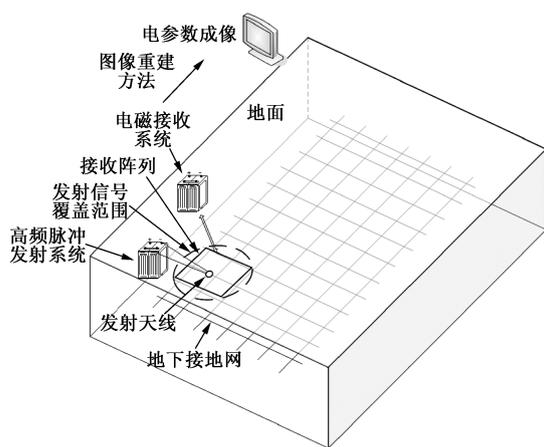


图 2 接地网状态智能成像检测系统

Fig. 2 Intelligent imaging system of grounding grid

接地网非均匀散射体的散射图如图 3 所示。定义  $E_{inc}(r)$  为入射场,即为假设不存在散射体时,激励源发射信号产生的场;  $E(r)$  为存在散射体时的总场;  $E_{sca}(r)$  为散射场。

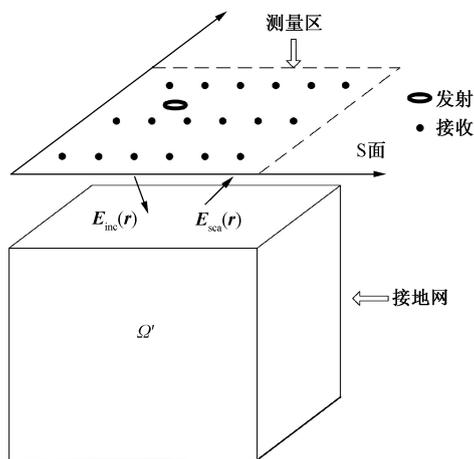


图 3 非均匀散射体的散射

Fig. 3 Scattering of non-uniform scattering material

根据麦克斯韦方程组,可推导出总场的方程为:

$$E(r) = E_{inc}(r) + \int_{\Omega'} dr' \bar{G}(r, r', k_b) \cdot [k^2(r') - k_b^2] E(r') \quad (1)$$

式中,  $k^2(r') - k_b^2 = O(r')$ ,  $k^2(r) = \omega^2 \mu \varepsilon(r) - i\omega \mu \sigma(r)$ , 为位置  $r$  函数;  $k_b$  为背景的波数,它可以是非均匀介质的波数,也可以是均匀背景的常数波数;  $\varepsilon(r)$  为实际的介电常数分布;  $\sigma(r)$  为实际的电导率分布;综合电参数  $O(r')$  可代表电参数的异常。式(1)中积分部分为散射体中的感应电流源对电场的贡献,即为散射场,计为  $E_{sca}(r)$ ;  $\bar{G}(r, r', k_b)$

为并矢格林函数,它是方程  $\nabla \times \nabla \times \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', k_b) - k_b^2 \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', k_b) = \bar{\mathbf{I}}\delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}')$  的解,其中  $\bar{\mathbf{I}}$  为单位算子。

对于散射问题,由于发射源电流  $J_s$  已知,  $\mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r})$  已知,实际介电常数  $\varepsilon(\mathbf{r})$  和电导率分布  $\sigma(\mathbf{r})$  已知,即  $k^2(\mathbf{r})$  已知,背景波数  $k_b^2$  已知,  $O(\mathbf{r}')$  已知,  $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', k_b)$  已知,采用已知条件可求解散射场。散射场的求解过程中可采用波昂近似或里托夫近似来实现。

在逆散射问题中,我们由散射体外部所测到的散射场推断散射体的性质,这是一种非侵入式的检测方法。在实际问题中,可以测得入射场。当散射体存在时,可以测得总场,从总场减去入射场即得散射体存在时的散射场。宽频脉冲逆散射图像重建问题解决的是测量的散射场信号到电参数图像重建的过程。

对于逆散射问题,散射场  $\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r})$  已知,  $\mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r})$  已知,背景值  $k_b^2$  已知,  $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', k_b)$  可求,  $k^2(\mathbf{r})$  为接地网电性参数,散射体内部  $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$  不可测,可通过近似来进行处理,最终求解  $k^2(\mathbf{r})$ ,即可求解出接地网及周围介质的  $O(\mathbf{r}')$ 。

散射场  $\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r})$  包含散射体的信息,散射场表达为:

$$\mathbf{E}_{sca}(\mathbf{r}) = \int_{\Omega'} d\mathbf{r}' \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', k_b) \cdot O(\mathbf{r}') \mathbf{E}_{inc}(\mathbf{r}') \quad (2)$$

设定目标函数  $\min_r \| \mathbf{E}_{sca测}(\mathbf{r}) - \mathbf{E}_{sca计算}(\mathbf{r}) \|_2$ , 其中  $\mathbf{E}_{sca测}(\mathbf{r})$  为实际测量到的散射场,  $\mathbf{E}_{sca计算}(\mathbf{r})$  为利用式(2)计算的散射场。

首先给定  $k^2(\mathbf{r}')$  一个初始估计值,即给定初始值  $O^{(0)}(\mathbf{r}')$ ,代入式(2),求得  $\mathbf{E}_{sca计算}(\mathbf{r})$ ,进而可以求得  $\Delta O(\mathbf{r}')$ 。

令  $O^{(1)}(\mathbf{r}') = O^{(0)}(\mathbf{r}') + \Delta O(\mathbf{r}')$ ,代入式(2),求得  $\mathbf{E}_{sca计算}(\mathbf{r})$ 。

将上述迭代过程一直重复,直到  $\min_r \| \mathbf{E}_{sca测}(\mathbf{r}) - \mathbf{E}_{sca计算}(\mathbf{r}) \|_2$ 、 $\| [O^{(k+1)}(\mathbf{r}') - O^{(k)}(\mathbf{r}')] / O^{(k)}(\mathbf{r}') \|_2$  均为极小值,即在误差范围内为止。最终求得  $O(\mathbf{r}')$ 。

在实际的接地网探测中,主要包含两种介质:土壤介质及接地网良导体介质,即成像区域中既有介电常数的变化,又有电导率的变化,材料和介质的差异性难以通过单纯的介电常数或电导率表征,需综

合利用电参数的变化特性,利用电参数  $O(\mathbf{r}')$  综合特性来反映介质的异常,更加有意义。 $O(\mathbf{r}')$  包含实部和虚部,其也可用幅值  $A'$  和相角  $\varphi$  来表示。本文通过重建幅值  $A'$  来反映电参数异常,实现对接地网状态的检测。

### 3 接地网状态智能成像检测系统

脉冲电磁发射系统为本文的研究工作提供激励电流,配合发射天线,实现向地下接地网发射宽频脉冲磁场,为散射场的形成提供入射场条件。电磁接收系统配合接收天线阵列实现散射场数据的完整获取,天线参数及布置方式等因素是影响散射场数据完整获取的重要因素。数据解释与成像系统最终完成数据处理和接地网电参数的图像重建。本文研制的接地网状态智能成像检测系统原理如图4所示。

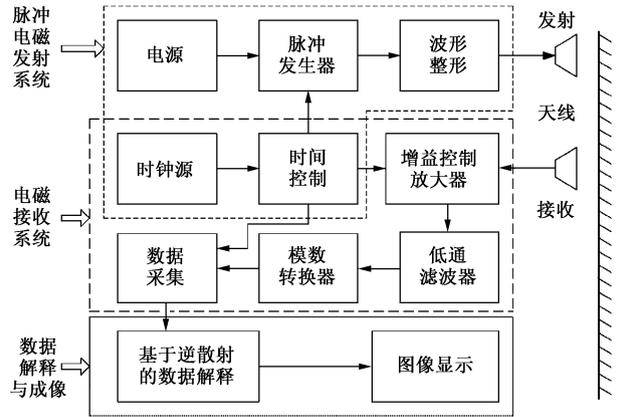


图4 接地网状态智能成像检测系统

Fig.4 Intelligent imaging detection system of grounding grid

#### 3.1 宽带信号产生

发射源宽带信号产生部分采用直接数字频率合成(DDS)技术,DDS是一种频率合成技术,可用于高频率、高分辨率和宽频带的信号合成器中,DDS的相位可控技术可用于相控阵雷达的数字波束合成中,其同时具有低成本、低功耗和快速转换时间等优点,已广泛使用在电信与电子仪器领域。DDS原理图如图5所示。

DDS具体实现过程为:输入控制模块控制频率整数控制模块实现整数控制,由频率整数控制模块和频率小数控制模块生成频率控制字,输出的控制字经过控制字调整模块转化为DDS的频率控制字,经过相位累加器累加相位后作为一个查表地址输送给地址调整模块,地址调整模块根据输出波形选择信号,调整地址值对应于波形存储器(ROM)中不同

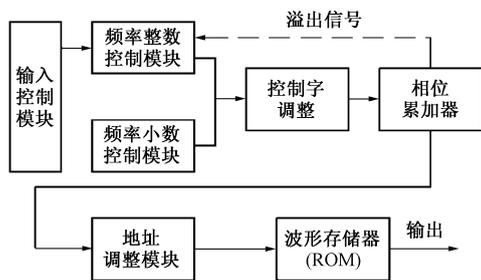


图5 直接数字频率合成原理图

Fig.5 Schematic of direct digital frequency synthesizer

波形的存储区域,最后根据查表的地址值输出所需数字波形。

DDS 输出信号的频率由式(3)给定:

$$f_0 = \frac{f_{clk}}{2^N} K \quad (3)$$

式中,  $f_0$  为输出频率;  $f_{clk}$  为系统基准时钟频率;  $N$  为累加器位数;  $K$  为输入频率控制字。理论上通过  $N$ 、 $K$  和  $f_{clk}$  的组合可以产生任一频率的输出。宽带信号的实现逻辑框图如图6所示,程序和波形仿真均由 QuartusII 11.0 来实现。

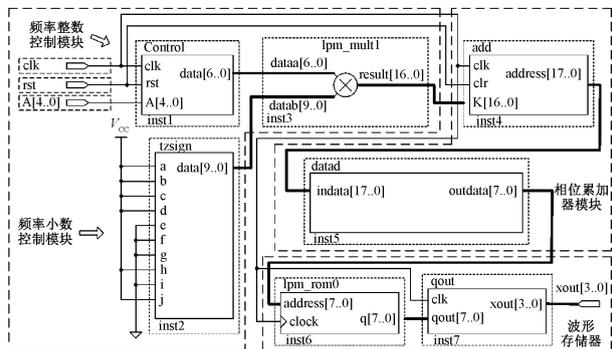


图6 宽带信号的实现逻辑框图

Fig.6 Logic schematic of wideband signal

在频率小数控制模块中, A 是频率选择控制, 其可连接外部控制来选择不同的频率输出。dataa 为频率控制字, datab 为调整系数, result 为经过控制字调整模块后输出的 DDS 频率控制字。参考时钟信号采用 50MHz, 相位累加器选择 8 位。

在相位累加器部分, result 为调整好的二进制的 DDS 频率控制字, clk 为 50MHz 参考时钟信号, clr 为系统复位信号, address 为相位累加器输出的相位值寻址信号。当一个脉冲来临时, 相位累加器将频率控制字与相位寄存器中存储的累加相位数据相加, 并把相加后的结果送至相位寄存器替换原来的累加相位数据, 累加器在下一个时钟脉冲来临时继续与

频率控制数据相加, 同时将累加得到的相位数据送到相位累加器的输出端, 作为相位寻址信号 address。ROM 模块完成波形的查表转换, 即相位到幅度的转换, 它的输入是相位累加器的累加相位输出, 即 ROM 的地址值, 输出为波形的幅度值。最终可输出频率可控的任意波形信号。

### 3.2 接收机系统

脉冲电磁接收机系统的作用为接收放大超宽带微弱信号。依靠精确定时系统实现对发射、接收、采样、信号处理等精确定时, 对超宽带脉冲电磁发射的回波信号进行高速采样, 然后通过信息处理软件算法实现回波信号的时域相关处理。

依据接地网埋深特点和对分辨率的要求, 本文研制的接收机工作频带为 0.2 ~ 1.2GHz。所研制的接收机系统组成如图7所示。

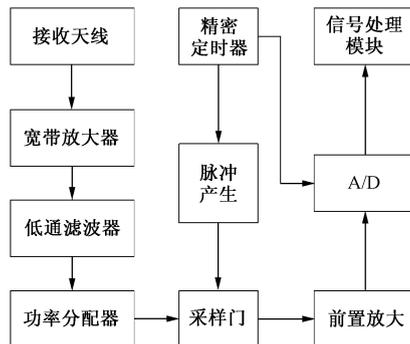


图7 研制的接收机系统组成

Fig.7 Component of receiver system

超宽带时域接收机由两路时域接收机系统组成。目标回波通过天线接收, 送入低噪声超宽带放大器进行放大, 之后经低通滤波器, 送入功率分配器, 再经过采样门进行模拟采样, 采样门输出信号通过前置放大器放大并平滑波形, 而后送入 A/D 转换器进行数字采样, 之后送入信号处理模块进行处理。为了减小信号传输中的不匹配和失真影响, 同时可有利于模块化、小型化, 将触发脉冲产生、采样门、前置放大集成到同一块电路板中。

### 3.3 观测方法

实现高质量的图像重建难以离开高效完整的数据, 观测方法决定了数据的完整性和有效性。观测方法的研究主要包括宽频天线的特性分析和观测方法。观测方法拟采用多次覆盖的观测方式进行观测。将大面积接地网进行分区, 分为多个子区域。在一个观测子区域内布置发射天线定向向地面下发射脉冲信号, 在发射天线覆盖范围内布置由多个接

收天线组成的接收阵列进行接收。在子区域内完成单次观测后,固定接收天线,在观测子区域内进行发射天线变角度、变位置的观测,实现子区域内的多次覆盖观测。在完成一个子区域内的观测后,发射天线和由接收天线组成的接收阵列移动到下一个子区域,以上一子区域内的观测方式在新的子区域内观测,新的子区域与观测完成的子区域具有部分重叠区,实现不同子区域交界处的重复覆盖观测。多次覆盖式观测方法如图8所示。

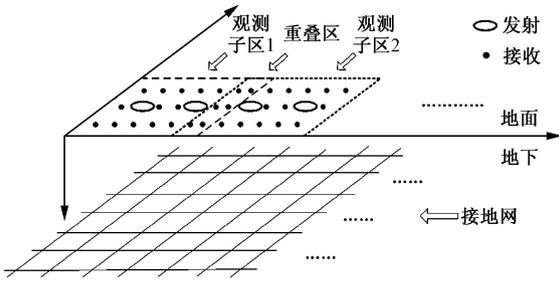


图8 多次覆盖式观测方式

Fig. 8 Observation of multi-coverage

拟可采用的另一种观测模式为扫描式观测方式,如图9所示。在大面积接地网区域进行扫描式观测,扫描天线阵列由一个发射天线和多个接收天线组成的接收阵列组成,多个接收天线并列排布,接收天线所覆盖的宽度即为扫描宽度。发射天线和接收天线阵列同时被向前拖动,完成接地网一个方向扫描后,在邻近的下一个宽度上进行往复的扫描,重复往复运动,最终实现整个接地网区域的扫描。

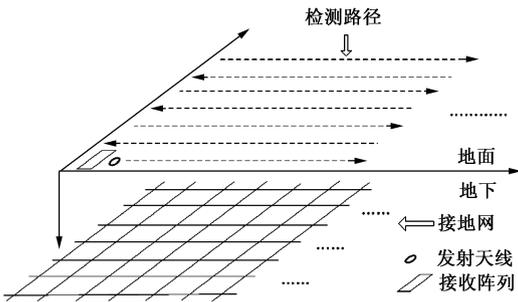


图9 扫描式观测方式

Fig. 9 Scanning observation method

### 4 实验

为了验证求解方法,进行数值实验和物理实验分析。

建立矩形样本模型,在方形区域嵌入不同电参

数分布的目标体,方形区域为土壤区域,电导率为0.01S/m,矩形区域为金属导体区域,土壤的相对介电常数设为7,而金属的相对介电常数一般不大于10,这里选为8,采用正问题分析所得到的观测数据进行图像重建计算,利用非线性阻尼最小二乘法求解雅克比矩阵,进行初步的电参数重建,得到电参数幅值 $A'$ 的变化,所建立的模型电参数 $O(\mathbf{r}')$ 幅值 $A'$ 归一化分布如图10(a)、图10(c)所示。采用模拟观测数据进行图像重建如图10(b)、图10(d)所示。重建的结果与模型进行比对,结果较吻合,可同时反映电参数及结构变化。

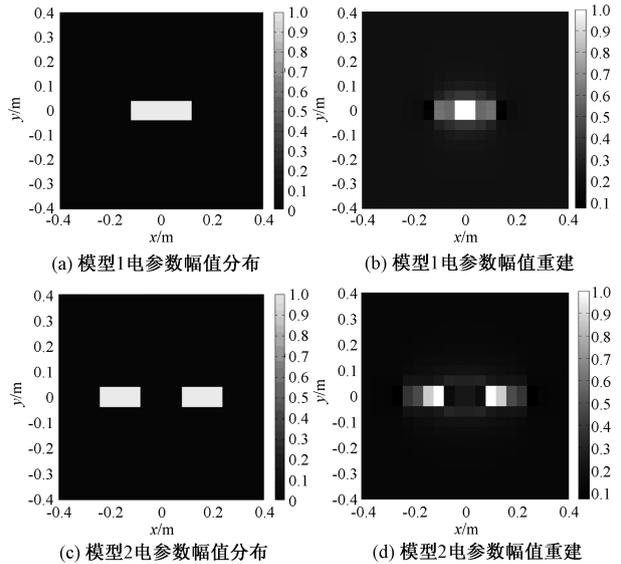


图10 数值实验归一化结果

Fig. 10 Numerical test result

在土壤介质中埋设接地网样品,进行测试实验和数据分析。设土壤为非磁性均匀介质,相对介电常数 $\epsilon_r$ 为7,电导率为0.01S/m,目标体接地网样品为镀锌钢理想导体,样品宽度为4cm,厚度为3mm,三根样品埋深分别为 $d_1 = 0.5\text{m}$ 、 $d_2 = 0.6\text{m}$ 、 $d_3 = 0.3\text{m}$ 。

实际测试数据的散射成像剖面图如图11(a)所示。对该实测数据去除相关噪声及背景信号,所埋设的接地网金属样品属于强散射体,对样品进行散射等位面分析,如图11(b)所示,其反映了目标体接地网样品电参数的变化。从电参数成像剖面图和等位面分析图中可分别得到,在 $x = 0.7\text{m}$ 、 $x = 1.1\text{m}$ 、 $x = 1.5\text{m}$ ,埋深大概对应 $d_1 = 0.5\text{m}$ 、 $d_2 = 0.6\text{m}$ 、 $d_3 = 0.3\text{m}$ 处可得到电参数异常,这与实际埋设的接地网样品相符合。

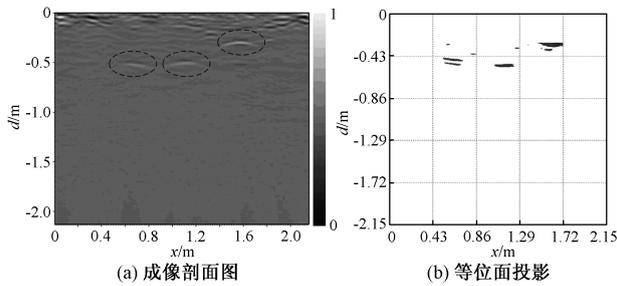


图 11 实测结果

Fig. 11 Test result

## 5 结论

本文提出的接地网状态智能成像检测新方法, 即接地网脉冲电磁逆散射多参数成像新方法, 结合了探地雷达的高频脉冲发射和电磁逆散射技术的优势。本文主要分析了接地网状态智能成像基本理论和成像检测系统, 并研制了接地网状态智能成像检测系统, 进行了数值实验, 对成像目标体进行了电参数图像重建, 取得了较好的结果。在数值实验的基础上, 埋设接地网样本, 进行了初步测试和分析, 实现了目标体的散射等位面分析, 结果表明其可反映电参数变化; 窄脉冲发射、散射成像与多次覆盖观测技术的结合与传统的瞬变电磁法相比, 分辨率更高; 窄脉冲发射、散射成像结合多次覆盖观测技术更适合电磁、土壤等复杂环境下的接地网浅层探测, 适应性更强。

本文的研究将为电力系统接地网故障诊断和状态评价提供一个全新而有效的方法, 形成超浅层、无接触测量的接地网状态智能成像新方法, 有望获得接地网腐蚀或断点的精确位置和状态参数, 为接地网腐蚀、断点等故障的定量化和精确定位提供了一个新的思路。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Amiri E, Sadeghi S H H, Moini R. A probabilistic approach for human safety evaluation of grounding grids in the transient regime [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2012, 27 (2): 945-952.
- [ 2 ] Bashir M, Sadeh J, Kamyab E, et al. Effect of increasing the grounding grid resistance of a ground system at a substation on the safety and transient overvoltage on the interior equipments [A]. 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) [C]. 2012. 1022-1027.
- [ 3 ] Sarajcev P, Vujevic S. A review of method for grounding grid analysis [A]. SoftCOM 2009 - 17th International Conference on Software, Telecommunications & Computer Networks [C]. 2009. 42-49.
- [ 4 ] 张蓬鹤 (Zhang Penghe). 基于接地系统频域特性的接地网缺陷诊断研究 (Research of defect diagnosis for grounding grid based on the frequency domain characteristic of grounding system) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2011. 1-2.
- [ 5 ] Salam M A, Ja'afar S, Ariffin M. Measurement of grounding resistance by U-shape and square grids [A]. TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference [C]. 2010. 102-105.
- [ 6 ] Castro M S, da Costa E G, Freire R C S, et al. Experimental impulse response of grounding systems [A]. 2012 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC) [C]. 2012. 148-151.
- [ 7 ] Castro M S, Freire R C S, Costa E G, et al. Wireless system for detecting high intensity current impulses applied to ground grids [A]. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. 2013. 1165-1169.
- [ 8 ] Liu Y, Xiao L, Tian J. Optimized corrosion diagnosis of large-scale grounding grid [A]. IEEE Power and Energy Society General Meeting [C]. 2010. 1-6.
- [ 9 ] Gomes L V, de Macedo E C T, Albuquerque T C, et al. Embedded system to grounding grid diagnosis of energized substations [A]. 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. 2012. 796-800.
- [ 10 ] 刘渝根, 吴立香, 王硕 (Liu Yugen, Wu Lixiang, Wang Shuo). 大中型接地网腐蚀优化诊断实用化分析 (Practicality analysis for optimized erosion diagnosis of large and grid medium-scale grounding grid) [J]. 重庆大学学报 (Journal of Chongqing University), 2008, 31 (4): 417-420.
- [ 11 ] 刘渝根, 田资, 钱国超, 等 (Liu Yugen, Tian Zi, Qian Guochao, et al.). 基于遗传算法的接地网腐蚀故障诊断研究 (Research of fault diagnosis of grounding grid corrosion based on genetic algorithm) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2013, 49 (7): 18-24.
- [ 12 ] Yan Ma, Karady G G, Kucuksari S. Testing continuity of grounding grid using the AC current injection method [A]. IEEE Power and Energy Society General Meeting [C]. 2010. 1-6.
- [ 13 ] Rodrigues N R V M, de Oliveira R M S, Carvalho L F P, et al. A method based on high frequency electromagnetic

- transients for fault location on grounding grids [A]. 2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC) [C]. 2013. 1-5.
- [14] 刘洋, 崔翔, 赵志斌, 等 (Liu Yang, Cui Xiang, Zhao Zhibin, et al.). 基于电磁感应原理的变电站接地网腐蚀诊断方法 (Method of corrosion diagnosis of substations' grounding grids based on electromagnetic induction theory) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2009, 29 (4): 97-103.
- [15] 于生宝, 王忠, 嵇艳鞠, 等 (Yu Shengbao, Wang Zhong, Ji Yanju, et al.). 瞬变电磁法浅层探测技术 (Time domain transient electromagnetic shallow prospecting) [J]. 电波科学学报 (Chinese Journal of Radio Science), 2006, 21 (2): 284-287.
- [16] 薛国强, 邓湘 (Xue Guoqiang, Deng Xiang). 瞬变电磁法对薄层的探测能力 (Capacity of Transient Electromagnetic (TEM) method for detecting thin layer) [J]. 石油地球物理勘探 (Oil Geophysical Prospecting), 2007, 42 (6): 709-713.
- [17] Hoi-Shun Lui, Persson M, Shuley N V Z. Joint time-frequency analysis of transient electromagnetic scattering from a subsurface target [J]. Antennas and Propagation Magazine, 2012, 54 (5): 109-130.
- [18] Gennarelli G, Soldovieri F. A linear inverse scattering algorithm for radar imaging in multipath environments [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10 (5): 1085-1089.
- [19] Gragnani G L, Diaz Mendez M. Improved electromagnetic inverse scattering procedure using non-radiating sources and scattering support reconstruction [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5 (15): 1822-1829.
- [20] Van den Bulcke Sara, Franchois S A, De Zutter D. Piecewise smoothed value picking regularization applied to 2-D TM and TE inverse scattering [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2013, 61 (6): 3261-3269.
- [21] Moriyama T, Oliveri G, Massa A, et al. Iterative multi-scaling strategy incorporated into time domain inverse scattering method for cross-borehole imaging [A]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. 2011. 846-849.
- [22] 杜松怀, 张筱慧 (Du Songhuai, Zhang Xiaohui). 电力系统接地技术 (Grounding technology in power system) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2011. 114-133.

## Intelligent imaging detection for power system grounding grid

ZHANG Lai-fu<sup>1</sup>, YANG Hong<sup>1</sup>, LIU Guo-qiang<sup>2,3</sup>, LI Yan-hong<sup>2,3</sup>

(1. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper proposes an electrical parameter imaging method for grounding grid by pulsed electromagnetic inverse scattering, that aims at accurate positioning and quantitative evaluation of corrosion and breakpoint for power system grounding grid. Based on the comprehensive electrical parameter diversity of grounding grid and soil, the new method intends to realize the image reconstruction of electrical parameter amplitude for grounding grid, the abnormality can reflect the electrical parameter and structure of grounding grid, and the basic theory of intelligent imaging detection for grounding grid based on scattering is analyzed in this paper. Intelligent imaging detection system for grounding grid is designed and developed. The numerical tests are carried out and the system has been tested. The combination of narrow pulse, inverse scattering imaging and multiple coverage observation can realize image reconstruction of electrical parameter, and at the meanwhile, it is appropriate for imaging characteristics for the shallow-depth and the demand of high-resolution of grounding grid, and that will provide a new detection method for grounding grid.

**Key words:** grounding grid; intelligent imaging; inverse scattering; electrical parameter