

接地网瞬变电磁诊断的电力噪声抑制方法研究

李波¹, 王浩文², 张林山¹, 沈映³, 曹敏¹, 邹京希¹, 付志红⁴, 钱国超¹

¹云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明

²长江师范学院, 重庆

³云南电网有限责任公司红河供电局, 云南 红河哈尼族彝族自治州

⁴重庆大学, 重庆

Email: 705097939@qq.com, 1130136400@qq.com

收稿日期: 2020年8月17日; 录用日期: 2020年8月28日; 发布日期: 2020年9月4日

摘要

作为新型的接地网缺陷诊断方法, 瞬变电磁法可以为地网状态检测和故障诊断提供无损检测。运行中的电网存在较强的电磁噪声, 对瞬变电磁信号形成干扰, 降低了探测信号的可靠性。本文针对电网电磁噪声的特点, 提出叠加采样法抑制工频高次谐波噪声的解决方案, 并依据瞬变电磁信号的采样特点改进了传统叠加采样法, 提高了方法对工频谐波的抑噪能力, 实验验证了本文所提方案的噪声抑制效果。

关键词

瞬变电磁, 工频干扰, 叠加采样, 降噪

Research on Power Noise Suppression Method for Transient Electromagnetic Diagnosis of Grounding Grid

Bo Li¹, Haowen Wang², Linshan Zhang¹, Ying Shen³, Min Cao¹, Jingxi Zou¹, Zhihong Fu⁴, Guochao Qian¹

¹Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming Yunnan

²Yangtze Normal University, Chongqing

³Honghe Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Hani-Yi Autonomous Prefecture of Honghe Yunnan

⁴Chongqing University, Chongqing

Email: 705097939@qq.com, 1130136400@qq.com

Received: Aug. 17th, 2020; accepted: Aug. 28th, 2020; published: Sep. 4th, 2020

文章引用: 李波, 王浩文, 张林山, 沈映, 曹敏, 邹京希, 付志红, 钱国超. 接地网瞬变电磁诊断的电力噪声抑制方法研究[J]. 电气工程, 2020, 8(3): 83-90. DOI: 10.12677/jee.2020.83010

Abstract

Transient electromagnetic methods can provide predictions and assessments for shallow geological hazards that compromise transmission projects. The electromagnetic noise of the power network causes interference to the transient electromagnetic signal, which reduces the reliability of the detection signal. In this paper, according to the characteristics of electromagnetic noise in the power grid, a solution is proposed to suppress the power frequency noise by using the superposition sampling method. According to the sampling characteristics of transient electromagnetic signals, the traditional superposition sampling method is improved and the noise suppression capability of the method is improved. The experiment proves the noise suppression effect of the proposed scheme.

Keywords

Transient Electromagnetic, Frequency Interference, Superimposed on Sampling, Noise Reduction

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

变电站的接地网是电力系统长期安全稳定运行的重要保障，国内电力系统的接地网多由扁钢焊接而成，由于短路电流及土壤的常年腐蚀，接地网导体会慢慢腐蚀变细，直至产生断点。研究接地网的无损检测手段，是地网状态检测和故障诊断领域的热点。瞬变电磁法(TEM)是继节点分析法[1] [2] [3]、大电流法[4] [5]、电化学方法[6] [7] [8]等传统方法之后的又一新型接地网缺陷诊断方法[9]。它通过发送线圈在地下建立一次脉冲磁场，在一次场间歇期间，形成地下涡流场并向下、向外扩散，称“圈流效应”，利用接收线圈观测二次涡流场，并经反演推断地层电阻率纵向分布，可形成纵向视电阻率断面图。

纵向视电阻率断面图在接地网导体上方测点的视电阻率值比其他点高很多，同时在接地网格中心的测点的视电阻率值比其他点低很多，而位于网格边缘导体和网格中心之间的测点的视电阻率值则介于二者之间[9]。然而，变电站所处强磁环境对 TEM 测量信号产生了严重干扰，含有电磁噪声的探测信号降低了纵向视电阻率断面图的分辨率，从而影响接地网缺陷诊断的可靠性。

本文针对变电站工频电磁环境，通过对常规叠加采样法对变电站工频干扰的抑制原理的研究，分析了其局限性，提出了基于双极性发射波形的相位匹配方案，分析了其在抑制工频高次谐波干扰方面的优势，提出了基于叠加采样的电磁噪声抑制方案。

2. 叠加采样法抑噪原理及其局限性

地质体内的感应涡流以指数规律衰减，由此产生的二次场晚期信号十分微弱，导致信噪比大幅降低，若考虑变电站工频及其高次谐波的影响，瞬变电磁测量信号可能被噪声淹没。

为研究电网电磁噪声对瞬变电磁探测信号的干扰特征，本文模拟了瞬变电磁仪器采集的变电站电磁噪声，如图 1 所示，除了 50 Hz 工频基波，还考虑有 2、3、4 次低频谐波以及 15、20、25 次高频谐波分

量噪声，其幅值是基波的 1%~5%之间。将噪声叠加到瞬变电磁探测信号后如图 2 所示，由于瞬变电磁信号持续时间较短，噪声的低频成分改变了信号的整体幅值，而噪声的高频成分降低了信号的平滑程度。考虑到电网基频的稳定性为 0.5%~1%，因此很难通过求解噪声的解析式完全消除电磁噪声对信号的干扰。

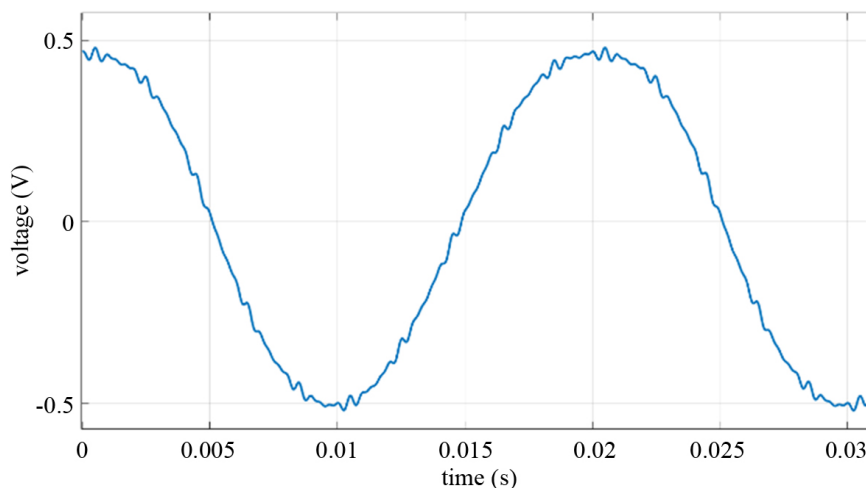


Figure 1. Power frequency and harmonic noise of Substation

图 1. 变电站工频及谐波噪声

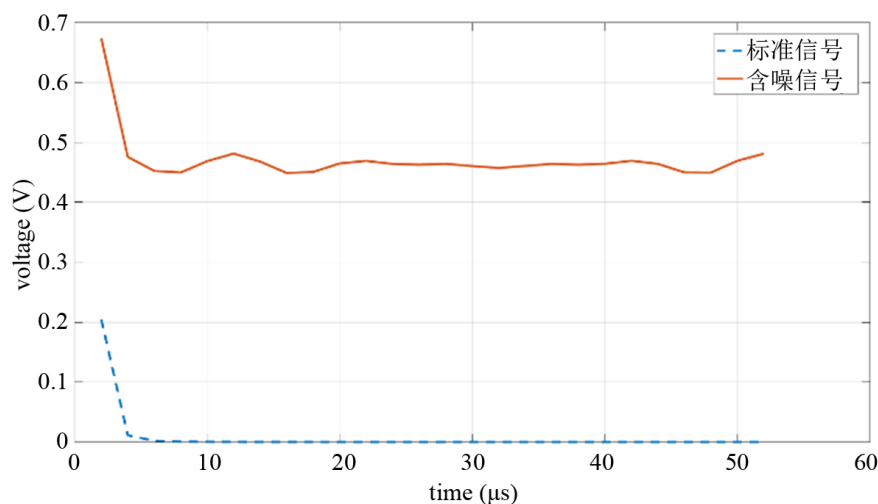


Figure 2. Influence of power frequency and its harmonic on TEM signal

图 2. 工频及其谐波对瞬变电磁探测信号的影响

叠加采样法是一种瞬变电磁仪器的常规抑噪途径，具体做法是对同一个测点的数据实施多次采集并将这些数据叠加。

设瞬变电磁采集的信号 $f(t)$ 由二次场信号 $f_s(t)$ 和噪声 $N(t)$ 构成

$$f(t) = f_s(t) + N(t) \quad (1)$$

设采样起始时刻为 t_k ，采样间隔为 T ，那么第 i 次采集的数据可表示为

$$f(t_k + iT) = f_s[t_k + (i-1)T] + N[t_k + (i-1)T] \quad (2)$$

若采样对象是周期信号，则

$$f_s(t_k + iT) \approx f_s(t_k) \quad (3)$$

对信号完成 n 次采集后叠加

$$\sum_{i=1}^n [t_k + (i-1)T] = nf_s(t_k) \quad (4)$$

噪声信号经过 n 次叠加后，会以统计规律增长，对叠加后的信号取平均值：

$$\sum_{i=1}^n f[t_k + (i-1)T] = \sqrt{N_1^2(t_k) + N_2^2(t_k) + \dots + N_n^2[t_k + (n-1)T]} \quad (5)$$

若噪声的等效均值是 $\bar{N}(t_k)$ ，在完成 n 次叠加采样后

$$\sum_{i=1}^n f[t_k + (i-1)T] = \sqrt{n[N(t_k)]^2} = \sqrt{n}\bar{N}(t_k) \quad (6)$$

因此， n 次叠加后输出信号的信噪比为

$$SNR = nf_s(t_k) / \sqrt{n}\bar{N}(t_k) = \sqrt{n}SNR_{before} \quad (7)$$

从(7)式看出，通过叠加采样处理后信号的信噪比是原信号的 \sqrt{n} 倍。然而，在实际应用中，叠加次数越多，探测速度越慢，对设备的信号处理能力的要求也越高，因此叠加次数是有限的。

对于如图 1 所示的电磁干扰信号，常规的叠加采样效果如图 3 所示，可见，叠加 500 次的信号噪声明显低于 100 次和 10 次，叠加采样法可以有效抑制变电站低频电磁噪声的强度，但对高频噪声的抑制能力有限。当叠加次数大于 100 次之后，输出的噪声强度衰减缓慢，这主要是由于瞬变电磁多采用双极性电流发送方式导致的。

双极性电流发送波形如图 4 所示，发送电流在一个周期 T 内平均分为极性相反的两个部分，接收机的两个采样区间分别位于两段梯形发送电流信号之后，通过将两个采样区间的数据对应相减后取其均值，可以有效抑制来自设备自身的噪声。常用的双极性波形的频率为 2^n ，因此，50 Hz 工频噪声波形在在同一周期的两个采样区间里往往存在一个相对固定的相位差 $t_d = T_{50}/f_T$ ，如图 4 所示，其中 f_T 表示双极性电流发送波形的频率， T_{50} 表示工频周期。这种以工频为主的电磁噪声在经过多次叠加采样处理之后仍然残余明显的谐波分量，如图 3 红色实线和黑色点线所示。

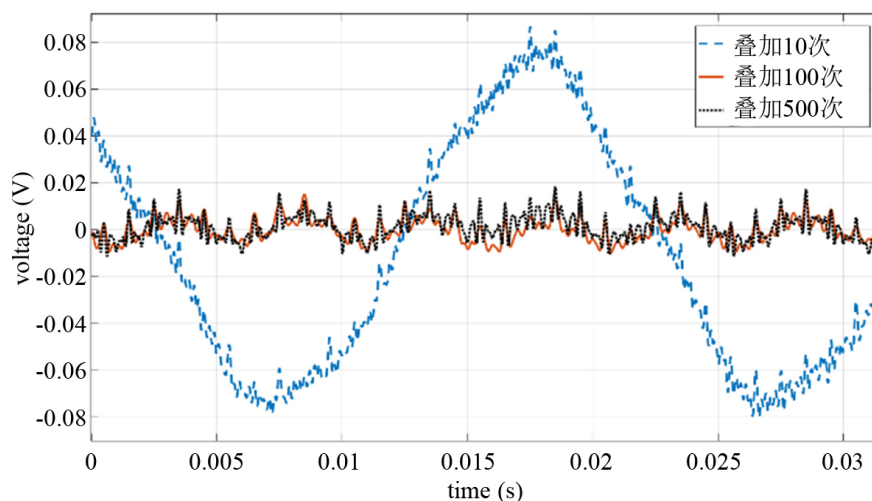


Figure 3. Suppression effect of superposition sampling method on power frequency noise
图 3. 叠加采样法对工频噪声的抑制效果

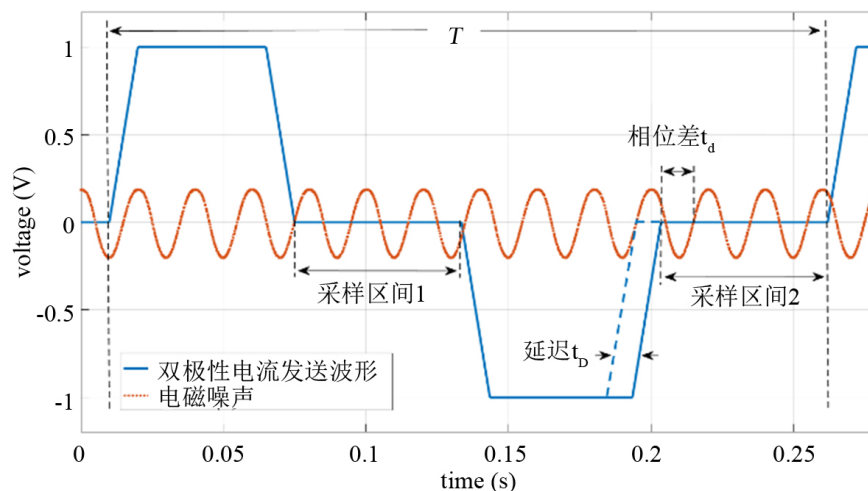


Figure 4. Schematic diagram of bipolar current transmission waveform

图 4. 双极性电流发送波形示意图

3. 基于双极性发射波形的相位匹配方案

为进一步提高叠加采样法对工频及其谐波的抑制效果，本文提出基于双极性发送波形的相位匹配法：考虑到工频噪声在同一个发送周期的两个采样区间存在相位差，可以将每个发送周期负向电流的关断触发信号设置一个延迟时间 $t_D = T_{50} - t_d$ ，如图 4 所示，经过相位匹配后负向电流的关断波形如虚线所示，其特征是工频噪声在两采样区间的相位保持一致；相位匹配法可以消除工频噪声在两个采样区间的相位差 t_d ，从而避免两个采样周期信号相减导致的再生谐波噪声；依据叠加采样法继续下一次叠加采样。

理论上，延迟时间 t_D 可以消除工频噪声两采样区间的相位差，从而显著提高叠加采样法对工频噪声的抑制能力，但实际的工频存在 0.5%~1% 的随机偏移，因此相位匹配法仍不能完全消除工频噪声。当双极性电流发送波形的频率为 8 Hz 时，对比改进后的相位匹配法与普通叠加采样法对工频噪声的抑制效果如图 5 所示，可见前者对工频及其谐波的抑噪能力更强。

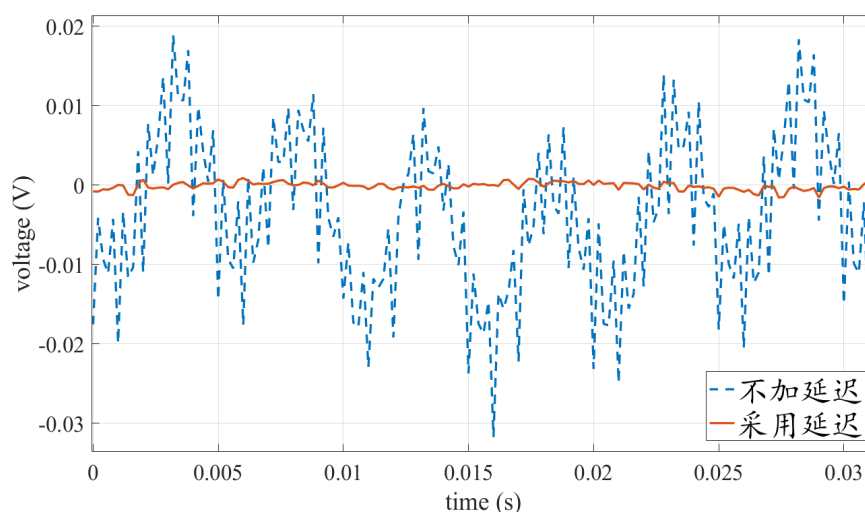


Figure 5. Effects comparison of two superposition processing methods on harmonics

图 5. 两种叠加处理方法对低频谐波的抑制效果对比

4. 效果验证

接地网模型如图 6 所示, 接地网由扁钢制成埋于地面以下 0.8 m, 在 x 方向有六根接地网导体, 每根导体长 18 m, 在 y 方向有四根接地网导体, 每根导体长 30 m, 导体横截面积均为 $5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 。在地面布置 27 个测点, 如图 6 所示, 若将靠近 $x = -9\text{ m}$ 处的测点作为 1 号测点, 则 17 号测点处于断点正上方。当发射线圈位于接地网格中心时, 接地网格与发射线圈耦合强烈, 在网格中产生很大的感应涡流, 由此产生的二次磁场强, 故而计算得到的视电阻率值低。

根据探测信号的视电阻率成像结果如图 7 所示, 其中横坐标表示测点序号, 纵坐标为视深度。需要注意的是, 视电阻率不表示目标的实际电阻率, 它只反映了目标和周围环境之间的电阻率的相对差异。当发射线圈从网格中心往网格边缘移动时, 发射线圈与接地网格的耦合慢慢减弱, 直到发射线圈位于导体正上方时出现最低值, 因此在地表处测得的二次场值也较低, 故而计算得到较大的视电阻率值, 如 5 号测点所示。由于第 11 号测点与第 23 号测点位于接地网交叉处, 故其成像结果略异于 5 号测点, 在其附近得到两个较大的视电阻率值。当接地网存在故障时, 在故障点附近这种规律性将被破坏, 如第 17 号测点所示。这也为接地网故障诊断提供了依据。

由图 7(a)可知, 来自电力传输线的工频及其高次谐波将导致瞬变电磁接收信号严重畸变, 第 3 号测点处出现假异常, 易误判为下方有扁钢; 由电磁干扰导致的噪点在纵向视电阻率断面图上随机分布, 导致 17 号和 23 号测点的成像特征模糊; 含有电磁噪声的探测信号降低了纵向视电阻率断面图的分辨率, 从而影响接地网缺陷诊断的可靠性。对含有噪声的数据使用相位匹配法处理后, 图 7(b)对判断接地网的情况反映清晰, 有利于提高接地网缺陷诊断的成功率, 因此本文提出的联合降噪法效果明显。

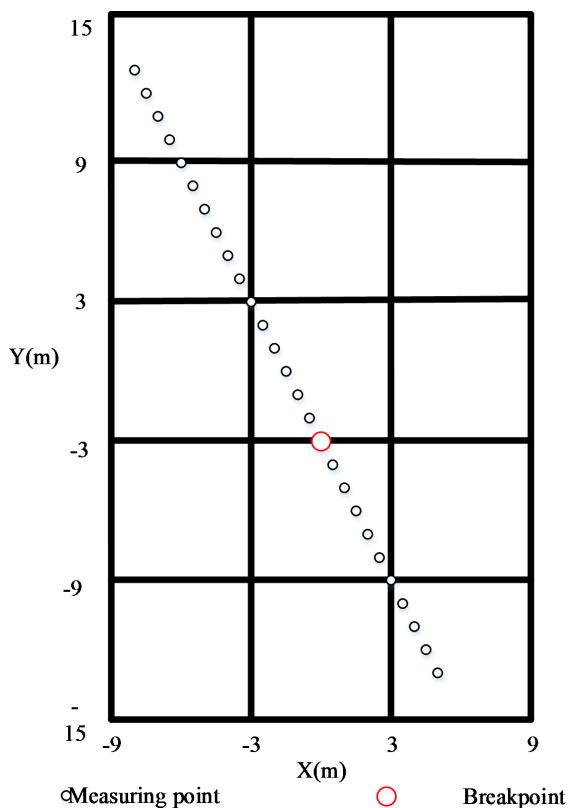


Figure 6. Schematic diagram of transient electromagnetic detection model
图 6. 瞬变电磁探测模型示意图

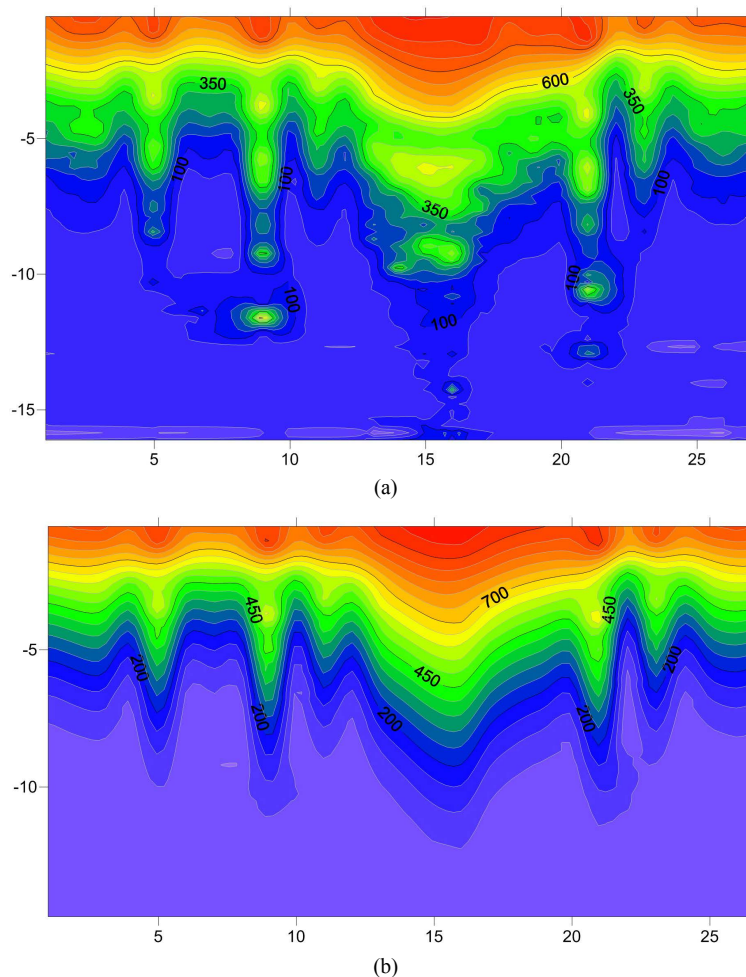


Figure 7. Comparison of denoising effects, (a) before; (b) after
 图 7. 去噪效果对比, (a) 去噪前; (b) 去噪后

5. 结语

本文分析了变电站等复杂电磁环境下工频及其高次谐波噪声对瞬变电磁探测信号的干扰特点, 提出了采用叠加采样法抑制高次谐波噪声的方案。针对瞬变电磁双极性电流发送波形的采样特点, 提出了改进的相位匹配法, 有效地解决了叠加过程中由相位差导致的低频谐波残余, 显著提升了含噪数据对地下目标体的分辨能力。

参考文献

- [1] 刘渝根, 滕永禧, 陈先禄, 等. 接地网导体状态的诊断方法[J]. 重庆大学学报, 2004(2): 92-95.
- [2] 许磊, 李琳. 基于电网络理论的变电站接地网腐蚀及断点诊断方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 270-276.
- [3] 李超. 接地网腐蚀状态预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春工业大学, 2018.
- [4] 刘宝成. 低电压大电流法检测接地网技术研究[J]. 华北电力技术, 1999(2): 7-8.
- [5] 俞飞, 覃明俊, 卫文君. 工频大电流法测量电厂接地电阻的抗干扰措施研究[J]. 企业技术开发, 2014, 33(16): 27-30.
- [6] 黄小琼. 接地网腐蚀速率弱极化检测及强极化状态评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [7] 张佳慧. 接地网腐蚀的电化学测量方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2016.

- [8] 李学腾. 基于电化学的接地网腐蚀检测方法研究[J]. 电子设计工程, 2020, 28(10): 56-59+64.
- [9] Yu, C.G., Fu, Z.H., Hou, X.Z., Tai, H.M. and Su, X.F. (2015) Break-Point Diagnosis of Grounding Grids Using Transient Electromagnetic Apparent Resistivity Imaging. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **30**, 2485-2491.
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2403308>