

# 直流接地极土壤电阻率建模方法研究

董晓虎<sup>1</sup>, 程 绳<sup>1</sup>, 王 维<sup>2</sup>, 杜 勇<sup>1</sup>, 姚其新<sup>1</sup>, 鲁海亮<sup>2</sup>, 侯新文<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国家电网湖北检修公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉

Email: weiwang@whu.edu.cn

收稿日期: 2020年9月16日; 录用日期: 2020年11月4日; 发布日期: 2020年11月11日

## 摘 要

直流接地极是直流输电工程的重要组成部分, 其周围土壤电阻率的分布情况, 直接影响到接地极的参数设计以及运行维护。为保证接地极的正常工作, 避免对接地极附近人身安全及设备性能造成影响, 有必要对接地极周边的土壤电阻率进行测试及建模。本文利用四极法和大地电磁法对接地极周边的土壤电阻率进行测试, 将这两种测试方法得到的结果进行对比, 综合分析了这两种方法在土壤电阻率测试方面各自的优缺点, 并通过本团队自主研发的反演软件对土壤电阻率进行建模, 最后根据该土壤模型计算得到的接地电阻值与参考值吻合度较高, 验证了本文提出方法的可靠性和准确性。

## 关键词

直流接地极, 土壤电阻率, 四极法, 大地电磁法

# Research on Soil Resistivity Modeling Method of DC Grounding Electrode

Xiaohu Dong<sup>1</sup>, Sheng Cheng<sup>1</sup>, Wei Wang<sup>2</sup>, Yong Du<sup>1</sup>, Qixin Yao<sup>1</sup>, Hailiang Lu<sup>2</sup>, Xinwen Hou<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hubei Electric Power Co., Ltd. Maintenance Company, State Grid, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan Hubei

Email: weiwang@whu.edu.cn

Received: Sep. 16<sup>th</sup>, 2020; accepted: Nov. 4<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 11<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

The DC ground electrode is an important part of the DC transmission project. The distribution of the soil resistivity around it directly affects the parameter design and operation and maintenance

文章引用: 董晓虎, 程绳, 王维, 杜勇, 姚其新, 鲁海亮, 侯新文. 直流接地极土壤电阻率建模方法研究[J]. 输配电工程与技术, 2020, 9(3): 27-38. DOI: 10.12677/tdet.2020.93004

of the ground electrode. In order to ensure the normal operation of the ground electrode and avoid affecting the personal safety and equipment performance near the ground electrode, it is necessary to test and model the soil resistivity around the ground electrode. In this paper, the four-pole method and the magnetotelluric method are used to test the soil resistivity around the ground electrode. The results obtained by these two test methods are compared, and the respective advantages and disadvantages of these two methods in soil resistivity testing are comprehensively analyzed. The soil resistivity is modeled by the inversion software independently developed by our team. Finally, the grounding resistance value calculated according to the soil model is in good agreement with the reference value, which verifies the reliability and accuracy of the method.

## Keywords

DC Ground Electrode, Soil Resistivity, Four-Pole Method, Magnetotelluric Method

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

随着我国输电容量的不断增大, 直流输电的优势也越来越明显。接地极作为直流输电的重要组成部分, 主要承担着泄放入地电流及钳制中性点电位的作用[1] [2] [3] [4]。当接地极处于单极大地回线运行方式时, 通过接地极流入大地的电流往往会达到数千安培, 长时间的大电流从接地极流过会对接地极产生一系列危害[5]。土壤作为接地极的载体, 为接地极提供泄流通道, 其电阻率的分布情况直接影响到接地极的运行状况。

我国于 1989 年正式投运的葛洲坝至上海南桥±500 kV 直流接地极, 在投入运行后一年多的时间内, 就接连发生过两次接地极的重大烧毁事故, 造成了巨额的经济损失[6]。事后对接地极进行了开挖检测, 发现接地导体腐蚀断裂, 周边土壤局部硬化, 引流电缆也发生了不同程度的烧毁。分析其原因主要是由于土壤自身电阻率的存在, 当电流从接地极往土壤中散流时, 造成土壤局部的温度升高, 引起土壤发热、硬化, 甚至是结壳, 最终影响到了接地极的正常运行[7]。

直流接地极运行安全性的主要影响因素包括直流极的散流、温升和腐蚀效应, 对直流接地极参数的测量和检查也主要涉及以上三个方面。但目前对接地极系统的仿真研究中, 为了简化计算模型, 往往忽略了接地极在运行过程中土壤参数的变化, 导致计算结果存在一定的误差[8]。所以, 在实际投运后对直流接地极周边广域深层的土壤参数进行实测和反演意义重大[9]。

苏杰等人通过对比发现, 可控音频大地电磁法所测土壤电阻率在很宽的一段频率范围内基本保持不变, 测试结果相对于 Schlumberger 更加准确[10]。朱德朋等人通过对磁法和大地电磁法的二维联合反演进行研究, 不仅发现了联合反演结果比常规单一方法的繁衍结果更加准确, 而且对磁法和大地电磁法数据二维联合反演的有效性和正确性进行了验证[11]。马成廉等人对工程上几种常用的测量大地土壤电阻率的方法的适用范围和特点进行了分析和比较, 认为大地电磁测深法更能满足特高压直流输电工程中接地极的实际要求, 具有显著优势和应用前景[12]。

通过以上的分析可知, 目前土壤电阻率的测试方法较多, 每种方法都有其各自适用的范围和特点, 大地电磁法尤其在特高压直流接地极的设计中表现出明显的优势。本文前期通过前期对直流接地极现场

的调研,采用四极法和大地电磁法联合测试的方法,对直接地极周边的土壤进行了测试,并利用反演软件 CDEGS 对测试结果进行了反演。通过对比分析两种方法的特点及适用范围,最终提出了接地极周边 0~33,537 米土壤电阻率的取值。为接地极后期运行与维护提供了基础土壤模型,同时也为接地极周边土壤电阻率的测试提供了一种参考方法。

## 2. 四极电法和大地电磁法的测试原理

### 2.1. 四极电法

四极电法测试原理如图 1 所示,稳压电源 E (如蓄电池)向外侧电极 A 和 B 施加电流 I,电流从电极 A 流入,通过电极 B 返回,这时将会在内电极上产生电势  $U_{CD}$ 。

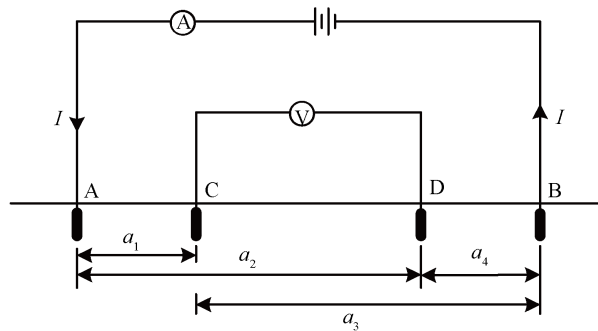


Figure 1. Schematic diagram of soil resistivity measurement  
图 1. 土壤电阻率测量原理图

将电流极 A 当做半球形电极,那么在距离 A 点  $x$  的任一点产生的电位  $V_A$  可表示为:

$$V_A = \frac{I\rho}{2\pi x} \quad (1)$$

同理,将电流极 B 近似看成半球形电极,则在距离 B 点  $x$  的任一点产生的电位  $V_B$  可表示为:

$$V_B = -\frac{I\rho}{2\pi x} \quad (2)$$

因此,电位极 C、D 的电位  $V_C$ 、 $V_D$  分别为:

$$V_C = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} \right) \quad (3)$$

$$V_D = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_4} \right) \quad (4)$$

则电位极 C、D 之间的电压  $U_{CD}$  为 C、D 的电位差:

$$U_{CD} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_3} + \frac{1}{a_4} \right) \quad (5)$$

从上式中可得出视在电阻率  $\rho$  为:

$$\rho = \frac{2\pi R}{\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2} - \frac{1}{a_3} + \frac{1}{a_4}} \quad (6)$$

式中,

$$R = \frac{U_{CD}}{I} \quad (7)$$

实际中为计算简便,测量时通常取四电极间距相等,此时称为等距四极法,也叫 Wenner 法[13]。这样土壤电阻率的计算公式简化为:  $\rho = 2\pi aR$ 。其中,  $a$  为电极间距。

## 2.2. 大地电磁法

大地电磁测深法(简称 MT 法)是一种地球物理勘探方法[14]。由于该方法具有探测深度大,野外施工简便等优点,在国内外得了广泛的应用,尤其是在地质勘探以及土壤电阻率测量等领域。大地电磁法主要工作原理其实是利用了电磁场的趋肤效应,由于地下存在天然的交变电磁场,当电磁场在地下传播时,地上接收到的电磁场能够反映出地下介质的电阻率分布信息,从而获取不同深度下的土壤电阻率[15]。趋肤深度公式为:

$$p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{f}} \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (8)$$

式中:  $p$  代表趋肤深度,单位为 m;  $\rho$  代表土壤电阻率,单位为  $\Omega \cdot m$ ;  $f$  代表频率,单位为 Hz [16]。

## 3. 土壤电阻率现场测试

### 3.1. 现场选址

本次测试选取我国三峡一常州 $\pm 500$  千伏直流输电工程以及三沪二回 $\pm 500$  千伏直流输电工程共用的青台极址,该极址为龙泉和团林两个换流站共用。极址位于湖北省当阳市草埠湖农场青台村,距离龙泉换流站约 42 公里处,距离团林换流站约 34 公里。其中龙泉换流站通过龙青接地极线路与极址中心的龙青中心塔相连,在通过架空线与四个方向上的子塔相连,最后通过入地电缆与极环相连。团林换流站通过林青接地极线路连到极址附近的林青终端塔上,然后通过入地电缆直接连到极环上。接地极现场布置如图 2 所示。

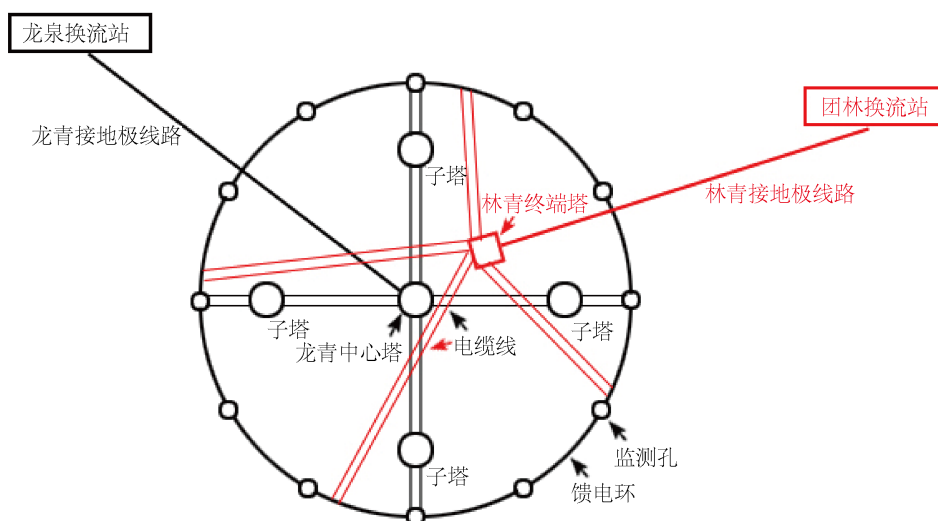


Figure 2. Longqing ground electrode and Linqing ground electrode share the Qingtai pole site  
图 2. 龙青接地极、林青接地极共用青台极址

本次土壤电阻率采用两种不同的方法进行测试：大地电磁测深法和四极法。根据现场的测量条件，四极法的布线采用两组 100 m 极距和一组 700 m 极距，100 m 极距布置在极环附近，为避开极环对四极法的影响，测量线离极环的距离应大于极距，所以 L1、L2 均距极环 100 m 以上，测点如图 3 所示。因 L3 总布线长度需在 2.1 km，极址附近需经过居民池塘和省道，所以 L3 在离极址直线距离 4 km 左右的地点测量。测点如图 4 所示。

由于大地电磁法主要是利用天然交变的电磁场进行勘探，与有源的勘探方法相比(如 CSAMT 法、TEM 法)，这种天然的交变电磁场信号相对较弱，所以大地电磁法 MT 在测量时选点较为苛刻，需要人文干扰小而且远离公路和高压输电线路，测点最终选取在离极址直线距离 2.6 km 左右的橘子林测量，坐标(纬度 30.619898，经度 111.894762)。测点如图 4 所示。

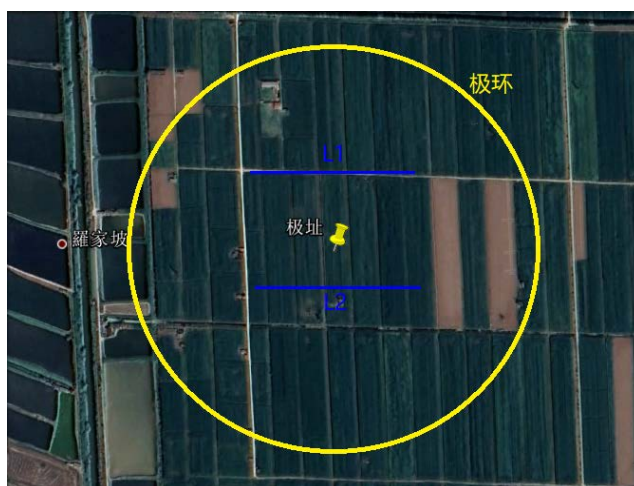


Figure 3. L1, L2 measuring line position

图 3. L1, L2 测线位置

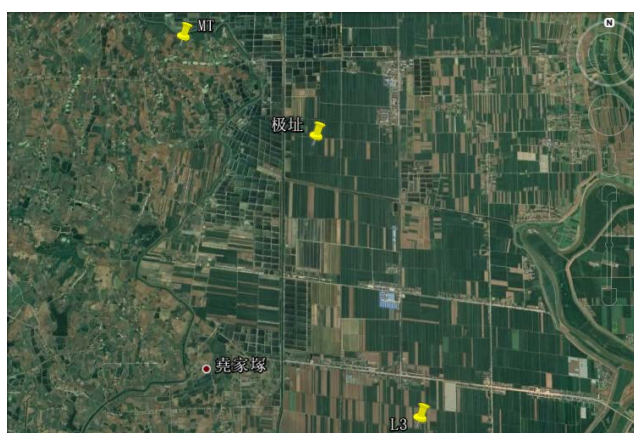


Figure 4. L3 survey line, MT survey point location

图 4. L3 测线, MT 测点位置

四极法测试选用的设备为 Megger 多功能直流电法仪。目前能够完成大地电磁法(MT)的仪器有多种，基本上全部都是进口。本次测试使用 V5-2000 系统是世界先进水平的电法勘探设备，由加拿大凤凰地球物理公司生产。它具有多功能、自动化程度高、测量精度高、多参数测量等优点。该系统由 V5-2000 电法多功能接收机等组成，如图 5 所示。

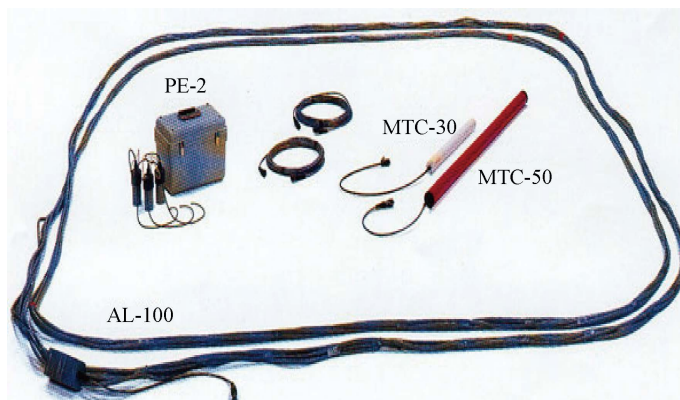


Figure 5. V5-2000 system magnetic sensors and electrodes  
图 5. V5-2000 系统磁传感器及电极

### 3.2. 测试结果及反演

#### 3.2.1. 四级法土壤电阻率测试结果与反演

四级法 L1, L2, L3 测量结果如表 1、表 2 所示。

Table 1. Measurement results of L1 and L2

表 1. L1, L2 的测量结果

L1		L2	
极距(m)	视在电阻( $\Omega$ )	极距(m)	视在电阻( $\Omega$ )
100	0.045	100	0.067
70	0.08	70	0.058
50	0.113	50	0.092
30	0.147	30	0.165
20	0.189	20	0.314
10	0.262	10	0.335
7	0.324	7	0.345
5	0.433	5	0.413
3	0.681	3	0.698
2	1.127	2	1.112
1	3.06	1	2.67

Table 2. L3 measurement results

表 2. L3 的测量结果

极距(m)	视在电阻( $\Omega$ )	极距(m)	视在电阻( $\Omega$ )
700	0.156	20	0.214
500	0.041	10	0.299
300	0.072	7	0.35
200	0.021	5	0.42
100	0.094	3	0.71
70	0.054	2	1.14
50	0.085	1	3.01
30	0.169	—	—

利用 Megger 多功能直流电法仪只能得到不同极距下对应土壤的视在电阻,还需要采用接地计算软件对各测线原始数据分别进行反演。本次测试采用的反演软件是由我们团队自主研发设计的,相比较于目前主流的土壤仿真软件 CDEGS 而言,本软件不仅操作界面简洁直观,对于一些初学者而言更加容易上手,而且可以针对不同的反演结果进行进一步的优化,使得到的土壤模型更加精确。

本团队自主研发的土壤反演软件的主界面如图 6 所示。只需三步:输入测量数据,输入反演初值,优化反演结果,就可以得到较为准确地土壤模型。以 L1 测线为例,得到反演结果如图 7 所示,从而得到 L1、L2、L3 不同的地层电阻率模型,如表 3~5 所示。

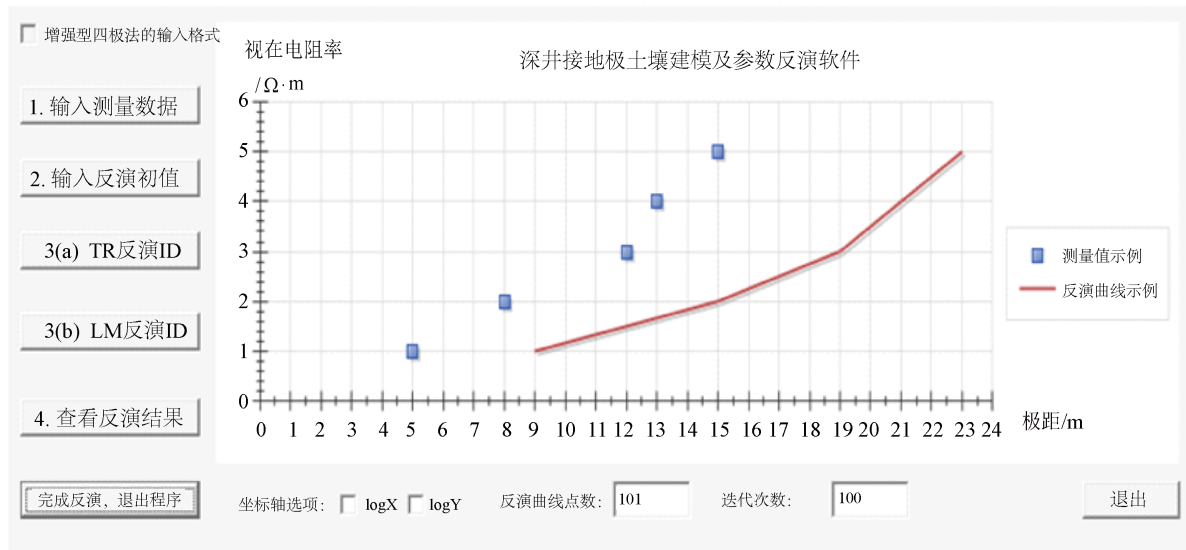


Figure 6. The main interface of the soil inversion software

图 6. 土壤反演软件主界面

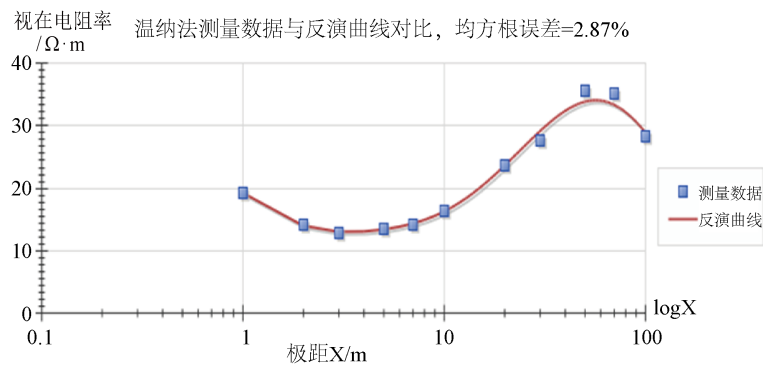


Figure 7. Inversion results of L1 survey line

图 7. L1 测线反演结果

Table 3. Inversion of soil layering model by L1 survey line

表 3. L1 测线反演土壤分层模型

层厚(m)	土壤电阻率(Ω·m)
0.64	27.07
1.29	10.99

## Continued

8.59	13.13
0.21	15.17
0.2	22.22
37.9	66.9
Infinite	10

**Table 4.** L2 line inversion soil layering model  
**表 4.** L2 测线反演土壤分层模型

层厚(m)	土壤电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )
1.37	17.98
0.21	13.26
2.36	6.4
8.2	67.41
0.19	31.81
Infinite	27.88

**Table 5.** L3 line inversion soil layering model  
**表 5.** L3 测线反演土壤分层模型

层厚(m)	土壤电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )
0.45	22.47
0.19	20.2
5.3	14.91
37.22	31.8
72.004	18.22
Infinite	2886.72

从 L1, L2 反演土壤模型可以看出, 接地极附近表层土壤电阻率非常低, 一般在  $30 \Omega\cdot\text{m}$  以内, 部分深度土壤电阻率稍高也未超过  $70 \Omega\cdot\text{m}$ 。这可能是由于该接地极位于耕田区域, 土质较为疏松且无砂石。L3 测线反演得到的土壤模型在深度为  $120 \text{ m}$  以内的土壤电阻率与 L1、L2 得到的模型吻合度较高, 而在  $120 \text{ m}$  以上时土壤电阻率突然增加, 这与实际的情况不符, 且 L3 测线的反演结果的均方根误差过大, 其最深层数据可信度不高, 所以通过四级法可以确定地表至  $120 \text{ m}$  埋深左右的土壤电阻率分布, 对于深层土壤的电阻率需要利用大地电磁法进行勘测。

### 3.2.2. 大地电磁法 MT 土壤电阻率测试结果

由于测量时间限制, MT 测试点只有一个, 因此无法进行二维反演。由于地下物质的电性存在各向异性, 所以 MT 采用 TE 和 TM 两种模式进行测试。在二维空间里, TE 模式是指极化方向平行于以电场为场源的构造走向, TM 模式是指极化方向垂直于以磁场为场源的构造走向。采用两种模式下得到的各地层土壤电阻率。

从 TE 模式反演结果来看, 该场地依照地下电阻率可以分为六个电性层: 从地表到深度  $63 \text{ m}$  左右为



第一层,电阻率为  $10.02 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $63 \text{ m}$  左右至深度  $413 \text{ m}$  左右为第二层,最大电阻率为  $12.71 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $9.28 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $11.65 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $413 \text{ m}$  左右至深度  $1059 \text{ m}$  左右为第三层,最大电阻率为  $13.827 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $13.07 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $13.42 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $1059 \text{ m}$  左右至深度  $3587 \text{ m}$  左右为第四层,最大电阻率为  $17.88 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $14.34 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $15.67 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $3587 \text{ m}$  左右至深度  $7719 \text{ m}$  左右为第五层,最大电阻率为  $36.6 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $17.41 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $18.24 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $7719 \text{ m}$  左右至深度  $33537 \text{ m}$  左右为第六层,最大电阻率为  $9.28 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $1.82 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $4.44 \Omega\cdot\text{m}$ 。

从 TM 模式反演结果来看,该场地依照地下电阻率也可以分为五个电性层,从地表到深度  $58.9 \text{ m}$  左右为第一层,电阻率为  $8.77 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $58.9 \text{ m}$  左右至深度  $1328 \text{ m}$  左右为第二层,最大电阻率为  $10.86 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $8.77 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $9.384 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $1328 \text{ m}$  左右至深度  $3614 \text{ m}$  左右为第三层,最大电阻率为  $18.155 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $10.13 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $14.64 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $3614 \text{ m}$  左右至深度  $7563 \text{ m}$  左右为第四层,最大电阻率为  $32.486 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $20.319 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $26.43 \Omega\cdot\text{m}$ ; 深度  $7563 \text{ m}$  左右至深度  $39820 \text{ m}$  左右为第五层,最大电阻率为  $19.87 \Omega\cdot\text{m}$ ,最小电阻率为  $4.67 \Omega\cdot\text{m}$ ,平均电阻率为  $8.5 \Omega\cdot\text{m}$ 。两种模式下土壤分层情况以及对应土壤电阻率如表 6 所示。

**Table 6.** MT inversion soil layering model

**表 6.** MT 反演土壤分层模型

TE 模式		TM 模式	
层厚(m)	土壤电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )	层厚(m)	土壤电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )
0~63	10.02	0~59	8.77
63~413	11.65	59~1328	9.38
413~1059	13.42	1328~3614	10.13
1059~3587	15.67	3614~7563	26.43
3587~7719	18.24	7563~39820	8.5
7719~33537	4.44		

## 4. 土壤电阻率综合分析验证

### 4.1. 土壤电阻率测试方法的分析比较

四极法和大地电磁法对不同深度范围土壤电阻率测试的精确度不同,直流电法几乎可以压制全部的地表干扰,但其测试深度有限;大地电磁 MT 法对较深范围内的土壤电阻率测试精度最高,而对地表的干扰压制能力较弱;对比四级法和大地电磁法的数据,可以看出  $700 \text{ m}$  极距四级法测量的深层结果不正确,大地电磁法的可信度更高一些。对比 TE 模式和 TM 模式可以发现,TE 模式比 TM 模式具有更好的纵向分辨能力,TM 模式比 TE 模式具有更好的横向分辨能力,所以综合考虑四极法和大地电磁法的测量结果,推荐本极址土壤层电阻率如表 7 所示。

采用了四极法和大地电磁法对接地极周围的土壤电阻率进行测试,反演结果显示接地极附近土壤电阻率可分为十二层,第一层深度  $0\sim 0.64 \text{ m}$ ,土壤电阻率为  $27.07 \Omega\cdot\text{m}$ ; 第二层深度为  $0.64\sim 1.93 \text{ m}$ ,土壤电阻率为  $10.99 \Omega\cdot\text{m}$ ; 第三层到第六层深度为  $1.93\sim 48.83 \text{ m}$ ,土壤电阻率在  $10 \Omega\cdot\text{m}\sim 20 \Omega\cdot\text{m}$  左右; 第七层深度为  $48.83\sim 120.83 \text{ m}$ ,土壤电阻率为  $66.9 \Omega\cdot\text{m}$ ; 第八层和第九层深度为  $120.83\sim 1059 \text{ m}$ ,土壤电阻率在  $10 \Omega\cdot\text{m}$  左右; 第十层深度为  $1059\sim 3587 \text{ m}$ ,土壤电阻率为  $15.67 \Omega\cdot\text{m}$ ; 第十一层深度为  $3587\sim 7719 \text{ m}$ ,土

壤电阻率为  $18.24 \Omega\cdot\text{m}$ ；第十二层深度为  $7719\sim 33537 \text{ m}$ ，土壤电阻率为  $4.44 \Omega\cdot\text{m}$ ，总的来说接地极附近的土壤电阻率比较低。

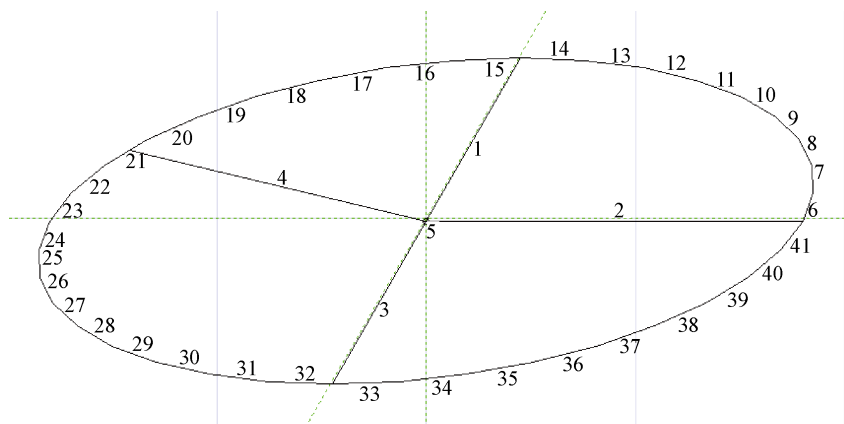
**Table 7.** Recommended soil resistivity  
**表 7.** 土壤电阻率推荐

深度(m)	土壤电阻率( $\Omega\cdot\text{m}$ )
0~0.64	27.07
0.64~1.93	10.99
1.93~10.52	13.13
10.52~10.73	15.17
10.73~10.93	22.22
10.93~48.83	18.22
48.83~120.83	66.9
120.83~413	11.65
413~1059	13.42
1059~3587	15.67
3587~7719	18.24
7719~33537	4.44

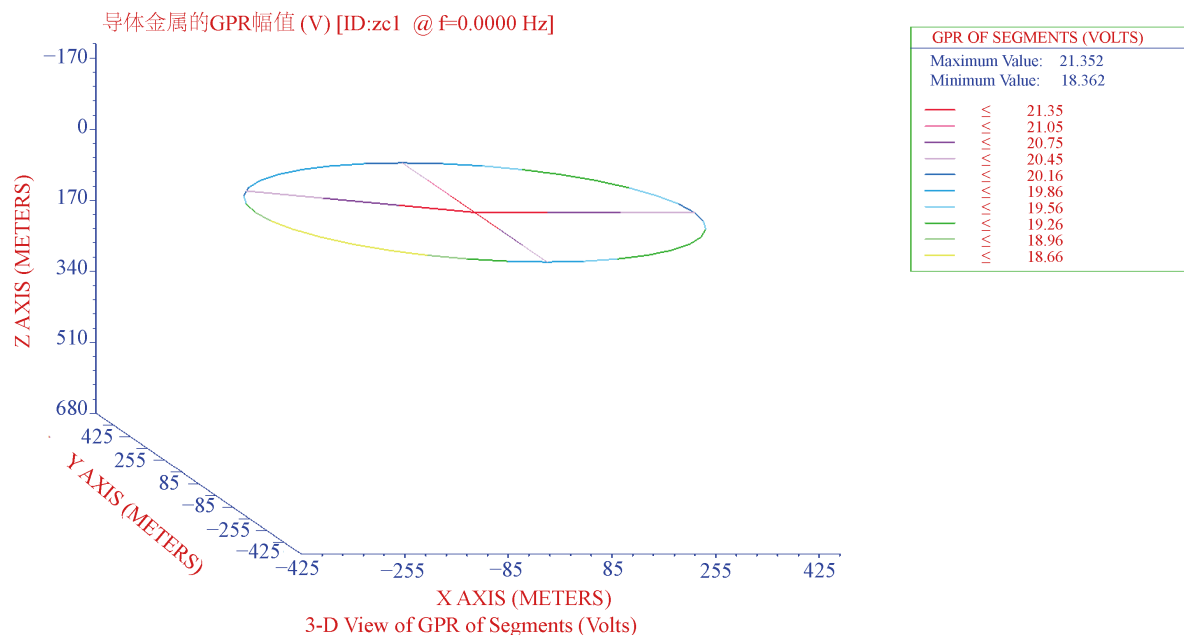
#### 4.2. 土壤电阻率测试结果的验证

为了进一步验证本文提出的四极法和大地电磁法综合反演方法的可靠性，有必要对反演得到的土壤模型进行分析和校验。查阅相关资料，得到该直流接地极的设计参数如下：青台接地极极址导电环采用圆形单环布置，直径  $720 \text{ m}$ ，极环材料为 60 圆钢，环长  $2260 \text{ m}$ ，埋深  $3 \text{ m}$ ，焦炭横截面  $0.65 \times 0.65 \text{ m}^2$ 。

在 CDEGS 中搭建相关的直流接地极模型如图 8 所示。相关参数设置：极环的相对电阻率为 10，相对磁导率为 636，焦炭的等效半径为  $0.37 \text{ m}$ ，电缆半径为  $0.02 \text{ m}$ ，激励为直流电流  $1000 \text{ A}$ 。接地极仿真模型搭建完成之后，将之前分析得到的土壤电阻率模型输入到软件中，通过仿真计算得到接地极导体表面的电势分布如图 9 所示。



**Figure 8.** Simulation model of DC ground electrode  
**图 8.** 直流接地极仿真模型



**Figure 9.** Electric potential distribution on the surface of the ground conductor  
**图 9.** 接地极导体表面电势分布

通过仿真软件, 计算得到直流接地极的接地电阻为  $0.021 \Omega$ , 查阅相关文献资料, 该接地极前期测试得到的接地电阻值为  $0.028 \sim 0.029 \Omega$  [17], 仿真值与测量值吻合较好, 从而验证了本文得到的土壤电阻率模型的准确性和可靠性。

### 4.3. 小结

综合分析比较了四极法和大地电磁法在土壤电阻率测试方面的优缺点, 针对各自方法的特点, 总结得到了接地极周边土壤电阻率模型, 并利用该模型计算出接地极的接地电阻, 与参考资料中的接地电阻值吻合度较高, 从而验证了本文提出的直流接地极周边土壤电阻率建模方法的可靠性和准确性。

## 5. 结论

1) 由于龙泉、团林共用青台接地极址位于耕地区域, 接地极附近土壤的电阻率普遍较低。大部分区域的土壤电阻率低于  $30 \Omega \cdot \text{m}$ , 电阻率最高区域的土壤电阻率为  $66.9 \Omega \cdot \text{m}$ ;

2) 在  $120 \text{ m}$  范围内, 四极法测量土壤电阻率的精度较高; 在  $120 \text{ m}$  以下时, 土壤电阻率突然增大, 反演结果均方根误差过大。表明四极法对浅层土壤电阻率测试的精度较高, 随着测试深度的增加, 大地电磁法的优势越来越明显;

3) 利用反演得到的土壤模型, 仿真计算得到接地极的接地电阻值为  $0.21 \Omega$ , 与该接地极前期测试得到的接地电阻值为  $0.028 \sim 0.029 \Omega$  吻合较好, 进一步验证了本文提出的土壤电阻率建模方法的有效性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 刘连光, 崔明德, 孙中明, 等.  $\pm 800 \text{ kV}$  直流接地极对交流电网的影响范围[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1243-1247.
- [2] 胡毅. 直流接地极电流对输电线路接地构件的腐蚀影响研究[J]. 中国电力, 2000, 3(1): 59-61.

- 
- [3] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 57-58.
- [4] 马成廉, 孙黎, 尚教会. 抗灾型电网安全风险评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(9): 12-18.
- [5] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 李景丽, 冯鹏, 栗超超. 深井型直流接地极散流机理研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(4): 87-94.
- [7] 陈坤汉, 杨道武, 朱志平, 杨海军. 接地网在土壤中的腐蚀特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2008(4): 39-42 + 46.
- [8] Nayel, M., Lu, B., Tian, Y., *et al.* (2012) Study of Soil Resistivity Measurements in Vertical Two-Layer Soil Model.
- [9] 颜喜平, 许根养, 敬亮兵, 张杰, 江龙才, 李志娟, 马福, 李景禄. 现场杆塔接地电阻和土壤电阻率测量存在问题及误差分析[J]. 电瓷避雷器, 2008(3): 38-41.
- [10] 苏杰, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 应用可控源音频大地电磁法的土壤电阻率测量[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 141-145.
- [11] 朱德朋. 磁法与大地电磁法数据二维联合反演研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [12] 马成廉, 刘利则, 徐冰, 等. 特高压直流输电接地极大地电阻率测量方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 6-10, 17.
- [13] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
- [14] 杨生. 大地电磁测深法环境噪声抑制研究及其应用[D]: [博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [15] 杨磊, 张志勇, 李曼, 等. 直流电阻率法与大地电磁法的二维联合反演[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 851-855.
- [16] 丁文伟. 直流电阻率法与音频大地电磁法二维联合反演研究[D]: [硕士学位论文]. 抚州: 东华理工大学, 2019.
- [17] 袁志军, 王峥.  $\pm 500$  kV 龙泉换流站接地极运行分析[J]. 华北电力技术, 2006(10): 52-54.