

## 如何准确测量接地电阻

**摘要：**本文介绍了如何准确测量接地电阻的原理、方法和经验。

**关键词：**接地装置，接地电阻，三极直线法，三极三角形法

### 1、前言

有人认为接地电阻的测量很简单而草率从事，不求甚解；有人认为接地电阻的测量不可能得到重复准确的结果而提出“废弃接地电阻”。两种态度都是不对的和不可取的。本文详细介绍了接地电阻的测量原理和常用的几种测量方法和经验，以助人们正确掌握它，获得准确的测量结果。

### 2、接地电阻的定义和表达式

#### 2.1 接地电阻的定义

接地电阻就是通过接地装置泄放电流时表现出的电阻，它在数值上等于流过接地装置入地的电流与这个电流产生的电压降之除。

$$R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

式中，U——接地装置的对地电压，即接地体与大地零电位参考点之间的电位差。

I——通过接地装置泄放入大地的电流。

经过运算，式（1）可演变成土壤介质的物理常数的表达式：

$$R = \frac{\xi \rho}{C} \quad (2)$$

式中， $\xi$ ——土壤的介电系数；

$\rho$ ——土壤的电阻率， $\Omega \cdot m$

C——接地装置的电容，F。

从式（2）可见，在一个确定的地方，由于土壤的介电系数和土壤电阻率是确定的，接地电阻的大小取决于接地装置自身的电容，而此电容又取决于接地装置的大小

和结构。为了得到小的接地电阻，要求接地网的设计使它有尽可能大的对地电容。另一方面，还可通过改变土壤（换土或用降阻剂），降低土壤的电阻率或增大土壤的介电系数来改变接地电阻的大小。

几种特殊接地电极的电容和其接地电阻举例：

$$\text{半球接地电极, } C=2\pi\epsilon b, \quad R = \frac{\rho}{2\pi b};$$

$$\text{半圆盘接地电极, } C=4\epsilon b, \quad R = \frac{\rho}{4b}。$$

式中，b 为半球或半圆盘的半径。

由上式可知，相同半径的半球接地极比半圆盘接地极的电容大约 1.6 倍，相应接地电阻低约 1.6 倍。这说明，采用球形或立体接地极比采用平面接地极效率高，节省材料。

## 2.2 单根接地极的接地电阻

单根接地电极的接地电阻的大小，主要取决于它的直径和长度。单根园管、园棒电极的接地电阻约为

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d} \quad (3)$$

式中，L 和 d 分别为管或棒的长和直径，单位米。

从式（3）可知，一根直径 50mm 的圆钢管，打入地中深度 2.5m，其电阻约为  $R = 0.3\rho$ 。防雷设计人应好好记住这个 0.3 的经验系数，它对于设计接地网很有帮助。

## 3、 接地电阻的测量原理

接地电阻的测量是按照公式（1）来进行的：给接地装置（接地极或接地网）施加一个电流 I，测量出接地极（网）上的电压 U，电压与电流相除，就得到了接地电阻。

看似简单，但是，这个电流如何正确的施加，这个电压如何测量准确，却并不是每个测量者都知道。本文向读者介绍的就是这方面的技术和经验。

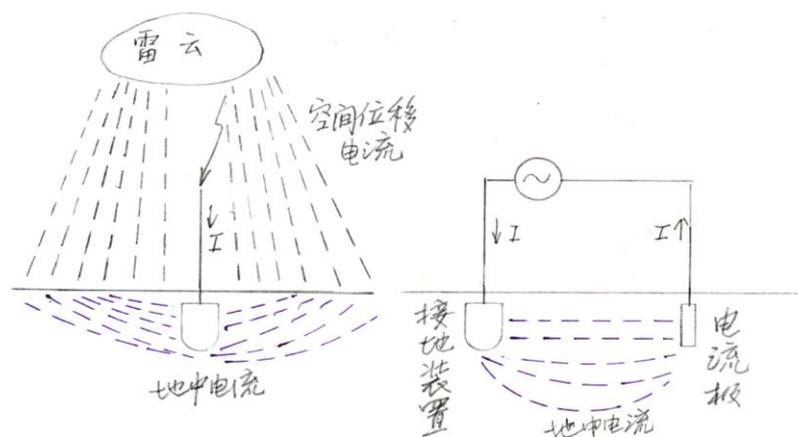
### 3.1 测量电流的施加与电流辅助极

在公式（1）中，测量电流是指“流过接地装置入地的电流”。这个电流与导线中流过的电流是不一样的。在导线中，电流沿导线流动，形成连续的闭合回路，其路径是确定的和可预见的。而“流过接地装置入地的电流”却扩散到大地里，流到很远很远的地方。它是如何形成闭合回路，以满足电流的连续性和闭合性规律呢？

如果这个电流是雷击形成的雷电流，这个电流是从雷云经过雷电放电通道进入接闪器和引下线，再经过接地装置向四周大地扩散传播，最后经过云——地之间的广大空间以位移电流的形式，回到雷云，满足电流的连续性与闭合性的规律，如图 1A 所示。

可是，我们在进行接地电阻测试时，为了能够向接地装置注入（施加）测试电流，我们首先必须解决电流的归路或收集问题。这就是必须找到或人为制作一个电流回路。

在三极直线法和三角形法测量接地电阻时需要在远方临时打一个辅助电流极，其目的就是为了给电流提供一个回路，如图 1B 所示。而在钳表法中，不需要打临时的辅助电流极，并不是电流不需要回路，而是要找寻现



A 雷电流的分布

B 测量接地电阻时的电流分布

图 1 地中电流分布图

成的可以作为回路的电路。图 1 描述了通过接地装置流入地中电流的场的分布，图 1A 是雷电流的场，这是一个向四周扩散的电流场，而图 1B 是测试电流的场，是一个

向一边扩散的畸变的电流场。

辅助电流极的出现使电流场的分布变得不均匀了，畸变了。辅助电流极离被测接地极（网）越近，电流场的畸变越大；辅助电流极越远，电流场的畸变越小，但测试工作量越大。因此，这里有一个合适的最佳的距离，在满足测试准确度的要求的情况下，使辅助电流极比较近。

### 3.2 测量电压与辅助电压极

公式（1）中的电压是指接地装置（网）与大地零电位参考点之间的电压。大地零电位参考点在哪里，如何取得，是接地电阻测试中的另一个重要问题。显然我们不可能到无穷远的地方去找零电位参考点，而是在一个较近的可以接受的地方寻找零电位参考点。

在接地电阻测量中，需要在选做零电位参考点的地方打一个辅助电压极，用一根导线将参考电位取回来，它与接地装置（网）的电位之差，就是我们需要的电压  $U$ 。要找一个真正的零电位参考点在现实测量工作中可能很不容易，但我们能够找到一个尽可能接近零电位的地方，或者其误差是可以接受的地方。如果这个点的电位不是真正的零电位，而是比零电位大一点，或小一点，那最后得到的电压和测得的接地电阻就会有或大或小的误差。多大的误差能够为我们所接受，这就需要通过测量结果来判断。在这里，不仅要了解测量原理，还要具备相应的实际测量经验。总之，为保证接地电阻测量的准确，关键就在于零电位参考点选取的正确与否以及对测量结果的判断。

大地零电位参考点在哪里呢？有的人有一种误解，认为大地总是处于零电位的。他们认为，地电位就是零电位，这是不正确的。其实，只要地中有电流流过，就有电压降，这儿的就不是零电位。没有电流流过的地，才是电气上的零电位地。因此，严格地说，零电位在离被测接地装置（网）很远的地方。对于单根金属管接地极来说，

离接地极的距离在 20m 以上才可以认为是零电位。

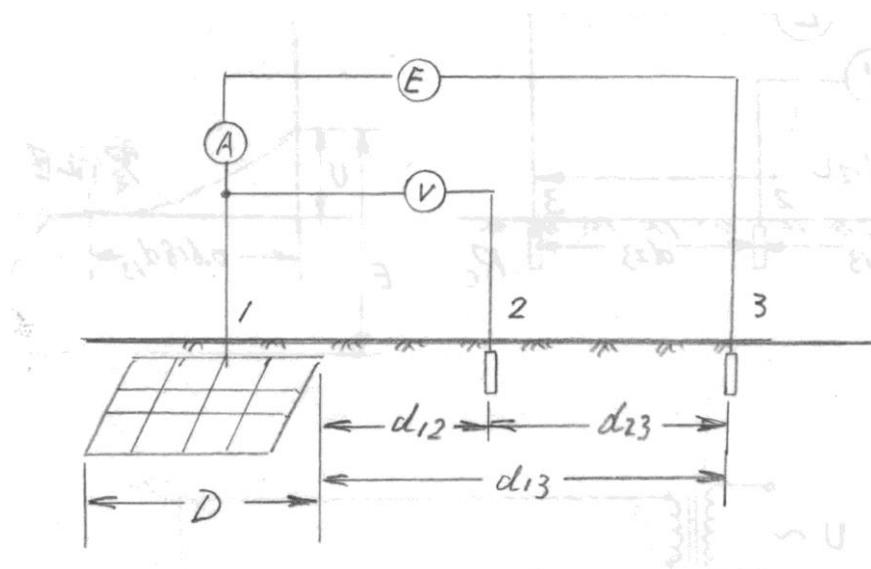
辅助电压极的任务就是取回零电位，因此怎样获得准确的零电位点，是测准接地电阻的关键。

## 4、 接地电阻测量的三极直线法

### 4.1 三极直线法的接线

三极直线法是接地电阻测试中使用最多和最普遍的方法，测试时被测接地网 1、电压辅助极 2 与电流辅助极 3 三点（极）按一直线布置，如图 2 所示。

在三极直线法测量中，这三个极如何布置呢，具体说，辅助电压极与辅助电流极与被测接地装置（网）的距离如何布置和掌握，这是测准接地电阻的关键之一。一般接地电阻测试仪器仪表都提供有两根辅助接地极，并配套有两根测试导线，一根 40m，另一根 20m。有些仪器，如日立 Kyoritsu 4150A 表，的配套导线还更短。用这样的配套导线能否获得准确的测量结果呢？这是每一个测量者都十分关心的问题。



E 测试电源 A 电流表 V 电压表

1 被测接地装置，2 电压极，3 电流极

D 接地网最大对角尺寸， $d_{13}$  接地网到电流极的距离

$d_{12}$  接地网到电压极的距离， $d_{23}$  电压极与电流极的距离

图 2 三极直线法测量接地电阻的接线

## 4.2 三极直线法的测量原理

按图 2 的接线，可以列出三个极的电压方程：

$$U_1 = R_1 I_1 + R_{12} I_2 + R_{13} I_3 \quad (4a)$$

$$U_2 = R_{21} I_1 + R_2 I_2 + R_{23} I_3 \quad (4b)$$

$$U_3 = R_{31} I_1 + R_{32} I_2 + R_3 I_3 \quad (4c)$$

式中， $I_1$ ——流入接地装置的电流。

$I_2$ ——流入电压极的电流。

$I_3$ ——流入电流极的电流。

$R_1$ ——接地装置 1 的自电阻，即接地装置的被测接地电阻。

$R_2$ ——电压极的自电阻。

$R_3$ ——电流极的自电阻。

$R_{23}$  和  $R_{32}$ ——电压极和电流极之间的互电阻，它们相等。

$R_{12}$  和  $R_{21}$ ——接地装置与电压极之间的互电阻，它们相等。

$R_{13}$  和  $R_{31}$ ——接地装置与电流极之间的互电阻，它们相等。

测试时电流是从接地装置流入大地，而从电流极流出，回到电源。取流入大地的电流方向为正，则  $I_1 = -I_3$ 。因为流过电压极的电流极小，故可以认为  $I_2 = 0$ 。又因三对互电阻相等： $R_{23} = R_{32}$ ， $R_{12} = R_{21}$ ， $R_{13} = R_{31}$ ，则方程组可改写为：

$$U_1 = R_1 I_1 - R_{13} I_1 \quad (5a)$$

$$U_2 = R_{12}I_1 - R_{23}I_1 \quad (5b)$$

$$U_3 = R_{13}I_1 - R_3I_1 \quad (5c)$$

由式 (5a) 一式 (5b), 得 U

$$U = I_1(R_1 + R_{23} - R_{12} - R_{13}) \quad (6)$$

由此可得接地电阻的测量值为:

$$R = \frac{U}{I_1} = R_1 + R_{23} - R_{12} - R_{13} \quad (7)$$

在式 (7) 的等式右边, 第一项  $R_1$  为接地装置接地电阻的真值, 于是, 后三项互电阻 ( $R_{23} - R_{12} - R_{13}$ ) 就为测量误差:

$$\Delta R = \frac{R - R_1}{R_1} \times 100\% = \frac{R_{23} - R_{12} - R_{13}}{R_1} \times 100\% \quad (8)$$

从式 (7) 和 (8) 可知, 测量误差由三个互电阻构成, 而互电阻又是由各电极的相对位置引起, 取决于各电极位置的布置。正确的电极位置的布置应使

$$R_{23} - R_{12} - R_{13} = 0 \quad (9)$$

则测量误差就可等于或接近于零。

如果电极周围土壤电阻率是均匀的, 两个极的互电阻与土壤电阻率成正比, 而与两电极间的距离成反比:

$$R_{23} = \frac{\rho}{2\pi d_{23}} = \frac{\rho}{2\pi d_{13}(1-\alpha)} \quad (10)$$

$$R_{12} = \frac{\rho}{2\pi d_{12}} = \frac{\rho}{2\pi d_{13}\alpha} \quad (11)$$

$$R_{13} = \frac{\rho}{2\pi d_{13}} \quad (12)$$

式中,  $\rho$ ——电极周围土壤电阻率;

$$\alpha = d_{12} / d_{13};$$

$d_{12}$ 、 $d_{13}$  和  $d_{23}$  分别为接地装置与电压极、接地装置与电流极和电压极与电流极之间的距离，如图 2 所示。

将式 (10)、(11) 和 (13) 代入 (9)，得：

$$\alpha^2 + \alpha - 1 = 0$$

此方程有两个解，舍去无意义的负数解，最后得： $\alpha = 0.618$ 。

即是说，为了使测量误差等于零，应将辅助电压极打在距接地装置边缘的距离为  $0.618d_{13}$  的地方。此法称 0.618 布极测量法，或补偿法。实际上，由于现场各种原因的影响，很难保证电压极打在这个准确的位置。再考虑  $d_{13}$  受现场选择的条件，可计算出在不同测量允许误差和  $d_{13}$  的情况下， $\alpha$  的具体范围如表 1 所示。

从表 1 可见， $d_{13}$  的距离越短，即电流辅助极的位置越近，保证测量准确度所要求的  $\alpha$  的区间越小，电压辅助极的准确位置越难掌握。

表 1 在不同的  $d_{13}$  距离下满足测量允许误差的  $\alpha$  值范围

允许测量误差 $\delta$	下列 $d_{13}$ 距离下的 $\alpha$ 值范围		
	5D	3D	2D
%			
5	0.56~0.67	0.59~0.65	0.59~0.63
10	0.50~0.71	0.55~0.68	0.58~0.66

注：D 为接地装置最大对角长度。

### 4.3 三极直线法电压极位置的调整

上面介绍了准确测量接地电阻要求的三电极的布置，表 1 所列  $\alpha$  的范围就是测量时布置电压极的位置。可是在实际现场条件下测量地区的土壤电阻率不一定是均匀的，由于各种沟道、岩石以及在地下还可能有各种金属管道，它们都将影响电流场的分布，给测量结果带来误差。

在具体测量中电压极位置的调整就是零电位准确位置的寻找。

通常是采用试探法找寻大地零电位点的准确位置。其方法就是在三极连成的直线上，在比表 1 所列  $\alpha$  的范围稍大的区域内，例如(0.5~0.7)  $d_{13}$  范围内，以  $d_{13}$  的 3% 为间距，连续打打 5~7 个电压辅助极，进行 5~7 个点的测量。在具体操作上，可以打一点测一点，拔起电压极再打下一点位，测下一个数据。对于电压极的每一个点位，可以测得一个接地电阻值。

#### 4.4 接地电阻测试结果的判断

以接地电阻为纵坐标，以距离为横坐标，将测得的几个接地电阻值描绘在一张坐标图上，形成一条接地电阻的曲线。如果其中有至少三个电阻值的连线趋势走平，那这个位置对应的接地电阻值就是其准确值。不绘图也可直接判断，在所有测得值中，如果有三个以上电阻值之间相对误差小于 3% 时，就取这几个值的平均值为最后的测量结果。

## 5、 接地电阻测量之三极三角形法

在某些情况下，在测量大型接地网的接地电阻时，由于地形的限制，很难将电流极打到 (3~5) D 远的地方。为缩短电流极的距离，可采用三角形法测量接地电阻。

三角形法是将辅助电压极与辅助电流极以夹角  $\theta$  向两个方向布置，接地装置、电压极与电流极三点呈等腰三角形，如图 3 所示。由于  $d_{12}=d_{13}$ ，所以  $R_{12}=R_{13}$ ，将此关系代入式 (9)，得：

$$R_{23}=2R_{13}$$

$$\text{因此, } d_{23} = \frac{d_{13}}{2}$$

由此计算出等腰三角形的顶角  $\theta = 29^\circ$ 。

经理论计算和实测表明, 当  $d_{12}=d_{13} \geq 2D$ ,  $\theta = 30^\circ$  时, 测量误差  $\delta \approx \pm 10\%$ 。

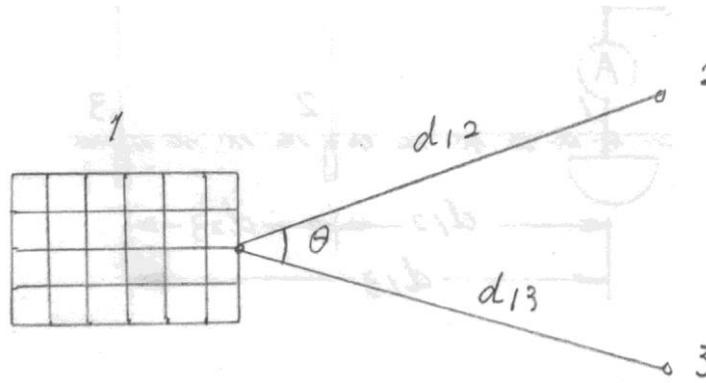


图3 三极三角形法测量接地电阻的接线

## 6、 现场接地电阻测量经验点滴

### 6.1、错误的测试操作

根据笔者观查, 在测量接地电阻方面常出现的不正确操作有以下几种。

#### (1) 电流极和电压极打在接地网以内

笔者曾到一个大型工厂讲课, 在讲课之前访问了工厂电气试验班, 参看了试验人员所做的避雷针接地电阻的试验报告。该厂电气试验负责人向我介绍, 他们买了一块新的接地电阻测试表, 日立 Kyoritsu 4150A 型, 用它测量接地电阻又快又准。这种仪表自带的电流、电压辅助极导线分别只有 25m 和 15m, 由于导线短, 测试工作量不大, 测试结果变化不大, 很“准确”。他还说, 他们近几年都这么测量, 从来没有出现过任何问题。我看到, 几页纸的试验报告, 几十根避雷针的测点的接地电阻结果都是 0.2 欧左右。我告诉他们, 不是你们工厂的避雷针没问题, 而是你们的测量方法有问题。你们的所谓测量结果根本不是避雷针的接地电阻, 只能是避雷针与工厂接地网之间的连接电阻。因为你们测量时打的电流、电压辅助极都位于工厂接地网之内, 还没有超出

接地网的范围。测量电流只在接地网内流，还没有流入周围土壤中。没有掌握正确的测量方法，不单是测不准的问题，而是测得的根本就不是接地电阻。所测的只能是避雷针与接地网之间的连接地电阻。

### (2) 不管接地网大小，都按 40m 和 20m 测量

不少人在测量接地电阻时不问接地网的大小，都按接地仪器仪表的说明书操作。仪表所带电流极和电压极的导线分别只有 40m 和 20m，所打电流极和电压极也只有 40m 和 20m 远。

对于接地装置对角尺寸不大于 10m 的小接地网，电流极和电压极采用 40m 和 20m 是可以的。但对于大型接地网，测量误差就大了。

### (3) 缺乏寻找零电位的操作

不少测量者只采用电压极的一个位置，测量一个接地电阻的数值，就完事大吉。他们没有通过电压极的移动来寻找零电位，所得结果是否正确，有多大误差，他们自己也不知道。

## 6.2、如何降低辅助电流极本身的接地电阻

如果辅助电流极本身的接地电阻太大，在一定的测量电压下，测量电流就很小，不仅影响测量灵敏度，而且测量误差也大。有时甚至测量仪器或仪表都没有反映，测不出结果来。

减小电流极接地电阻的方法有：加大接地极直径，增加长度，用多根电流极并联，给电流极周围注水，注盐水，降低它的接地电阻。

如果电流极周围有树，可巧妙地利用树当做电流极：将多根树的树皮轻轻削开一点，用裸铜线缠绕，并联起来，再与电流极并联，就组成了一个辅助电流极系统。在某些特殊场合，这种方法即省事又管用。

## 6.3、多种土壤电阻率地区的经验

当测量地区的土壤电阻率不均匀时，会影响零电位参考点的位置的寻找。如果主要土壤的电阻率为  $\rho_1$ ，当接地网与电压极之间存在一条高土壤电阻率  $\rho_2$  的地层， $\rho_2 > \rho_1$ ，例如凹陷的干涸沟道河床，零电位点距接地网的距离要小于  $0.618d_{13}$ 。随着  $\rho_2/\rho_1$  比值的增大，零电位点越靠近接地网。

当电压极与电流极之间有一条高土壤率的地层时，则零电位点的位置会比  $0.618d_{13}$  大。随着  $\rho_2/\rho_1$  比值的增大，零电位点离接地装置越远。

当测量地区的土壤为两层结构时，即有两种不相同的土壤电阻率时，应适当加大电流极的距离。

#### 6.4、水泥地不能打测量电极时

如果在城市地区周围都是水泥地难于打辅助电流极或电压极时，可用  $25 \times 25 \text{cm}^2$  钢板放在水泥地上，浇上盐水，代替测量电极，一般情况下就可进行测量了。

## 7、 小结

- (1) 在任何情况下，接地电阻都是可测的，只要掌握了正确的测量方法，也是能测准的。
- (2) 要准确测量接地电阻，辅助电流极距被测接地装置的距离  $d_{13}$  不能太小，至少应大于接地装置最大对角尺寸的 3 倍以上。电压极的位置在  $0.618d_{13}$  处，但测量时应前后移动电压极 5~7 个点位，测得 5~7 个接地电阻的数值，选择其中至少三个相互误差小于 3% 的数据，取其平均值为最后的测量结果。
- (3) 大型接地装置（网）接地电阻的测量是比较困难一些，但不是不可测。那种遇到困难就放弃测量，甚至提出“废弃接地电阻”的思想是因赋废食的懒汉思想。