

目次

前言 Ⅱ

IEEE 前言 Ⅳ

1 目的 1

2 范围 1

3 测试内容 1

4 定义 2

5 接地网测试时的安全措施 3

6 有关测量的一般性规定 4

7 土壤电阻率测量 6

8 接地阻抗..... 11

9 地面电位..... 17

10 冲击接地阻抗 18

11 模型试验 19

12 测量仪器 21

13 有关测量的其他事项 25

附录 A(提示的附录) 非同质土壤的地电参数 28

附录 B(提示的附录) 两层土壤模型参数的确定 29

附录 C(提示的附录) 电位降法的原理 30

前 言

本导则是根据美国标准 **ANSI/IEEE 81:1983《IEEE 接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和地面电位测量导则 第 1 部分：常规测量》**制定的，在技术内容上与该标准等同，编写格式也与该标准一致。

美国电气和电子工程师学会(IEEE)制定了大批有关电工和电子方面的标准。这些标准均以这些领域的研究成果为依据，具有先进性和实用性的特点，在国际电工界和电子界享有盛誉。**ANSI/IEEE 81:1983**的内容涉及接地系统各种参数的测量，被纳入美国国家标准编号。我国的国家标准对接地系统的设计和施工涉及较多，而对接地系统参数的测量涉及较少，引入 **ANSI/IEEE 81:1983**可充实这方面的内容。迄今该标准尚未修订。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C 均为提示的附录。

本标准由国家机械工业局提出。

本标准由全国建筑物电气装置标准化技术委员会归口。

本标准由电力工业部信息研究所、东北电管局、北京供电局等单位起草。

本标准由电力工业部信息研究所负责解释。

本标准主要起草人：戴耀基、孟庆波、陈淑芳。

IEEE 前言

为提高本导则的实用性,本导则分为两部分。第1部分《常规测量》,其内容包括不需要特殊高精设备、测量技术和没有特殊困难(在大型接地系统或存在异常高的交、直流杂散电流等情况时会有这种困难)的大多数现场测量,第1部分曾作重大修改。第2部分《特殊测量》将在以后制定,该部分意在提供一些测量方法,以便当存在一些特殊困难,按常规测量方法难于测量或测量不准时使用。特大的电站接地网和架空线路接地极就属于这种难于测量的接地系统。

本导则由电力系统仪器和测量委员会 **RLC** 分会土壤电阻率、接地阻抗和地面电位测量工作组编制。

接地系统的土壤电阻率、接地阻抗和
地面电位测量导则
第1部分：常规测量

GB/T 17949.1—2000

Guide for measuring earth resistivity,
ground impedance and earth surface potentials
of a ground system—Part 1: Normal measurements

1 目的

1.1 制定本标准的目的在于介绍接地电阻、接地阻抗、土壤电阻率、地电流形成的地面电位梯度等的测量技术现状,和用比例模型试验预测接地电阻和地面电位梯度的方法。本标准还介绍影响仪器选择和各种测量技术的因素。这些因素是:测量的目的、所要求的准确度、现有的仪器类型、误差产生的原因、所测的地或接地系统的特性等。

1.2 本标准可帮助技术人员取得准确、可靠的数据,并正确分析这些数据。本导则所提供的测试步骤,有利于人身和财产安全,并可防止对相邻运行设备的干扰。

2 范围

2.1 本标准的测试方法包括:

- (1) 测量从小型接地棒、接地板到电站大型接地系统等各种接地极的接地电阻和接地阻抗;
- (2) 测量地面电位,包括测量跨步电压、接触电压和等电位线;
- (3) 为完善工程设计,按比例模型试验法,在试验室内预测接地电阻和地面电位梯度;
- (4) 测定土壤电阻率。

2.2 本标准所列测试方法仅限于使用直流电流、周期性换向直流电流、正弦交流电流和冲击电流(用于测量冲击接地阻抗)。本导则没有包括所有可能的测试手段和测试方法。

2.3 由于测试中的可变因素很多,测试难以做到高度准确,因此要用现有的最合适的测试方法仔细地做试验,还要彻底了解误差产生的原因。

3 测试内容

3.1 测量接地电阻或接地阻抗,和测量由于地电流形成的地面电位梯度的目的为:

- (1) 验证新装接地系统的合适性;
- (2) 检查现有接地系统的变化情况;
- (3) 测定危险的跨步电压和接触电压;
- (4) 测定地面电位升(GPR),以便为电力线路和通信线路设计保护措施。

3.2 比例模型试验法有助于研究新式的接地系统。由于复杂的接地方式和复杂的土壤构造,用分析法难以充分研究这种新式的接地系统。

3.3 测量土壤电阻率有助于：

- (1) 估算拟建变电站或输电线路铁塔的接地电阻；
- (2) 估算地面电位梯度、跨步电压和接触电压；
- (3) 计算相邻近的电力线路和通信线路间的电感耦合；
- (4) 设计阴极保护系统；
- (5) 进行地质勘察。

4 定义

本章列出有关本导则的术语定义，由其他组织制定或批准的术语定义与本导则有关者也尽可能采用。

此处列出的定义仅适用于本导则，术语的其他解释见 ANSI/IEEE 100:1977《IEEE 电工和电子术语标准辞典》。

4.1 (接)地 **ground**

一种有意或非有意的导电连接，由于这种连接，可使电路或电气设备接到大地的或接到代替大地的、某种较大的导电体。

注：使用地的目的是：① 使连接到地的导体具有等于或近似于大地(或代替大地的导电体)的电位；② 引导地电流流入和流出大地(或代替大地的导电体)。

4.2 接地的 **grounded**

指将有关的系统、电路或设备与地连接。

4.3 地回电路 **ground-return circuit**

利用大地形成回路的电路。

4.4 (接)地电流 **ground current**

在大地或在接地极中流过的电流。

4.5 接地导体 **grounding conductor**

指构成地的导体，该导体将设备、电气器件、布线系统、或其他导体(通常指中性线)与接地极连接。

4.6 接地极 **grounding electrode**

构成地的一种导体。

4.7 接地连接 **grounding connection**

用来构成地的连接，系由接地导体、接地极和围绕接地极的大地(土壤)或代替大地的导电体组成。

4.8 (接)地网 **ground grid**

由埋在地中的互相连接的裸导体构成的一组接地极，用以为电气设备和金属结构提供共同的地。

注：为降低接地网电阻，接地网可连以辅助接地极。

4.9 (接)地均压网 **ground mat**

位于地面或地下、连接到地或接地网的一组裸导体，用以防范危险的接触电压。

注：接地均压网的通常形状是适当面积的接地板和接地格栅。

4.10 接地系统 **grounding system**

在规定区域内由所有互相连接的多个接地连接组成的系统。

4.11 (接地极)地电阻 **ground resistance(grounding electrode)**

接地极与电位为零的远方接地极之间的欧姆律电阻。

注：所谓远方是指一段距离，在此距离下，两个接地极的互阻基本为零。

4.12 接地极互阻 **mutual resistance of grounding electrodes**

指以欧姆为单位表示的，一个接地极 1 A 直流电流变量在另一接地极产生的电压变量。

4.13 电位 **electric potential**

指某点与被认为具有零电位的某等电位面(通常是远方地表面)间的电位差。

注:比零电位面高的点称为正电位,比零电位面低的点称为负电位。

4.14 等电位线 equipotential line or contour

在给定时间内具有等电位诸点的轨迹。

4.15 电位(曲)线 potential profile

指沿规定路径上,电位与距离的函数关系曲线。

4.16 表面电位梯度 surface-potential gradient

电位线的斜率,其轨迹与等电位线正交。

4.17 接触电压 touch voltage

接地的金属结构和地面上相隔一定距离处一点间的电位差。此距离通常等于最大的水平伸臂距离,约为1 m。

4.18 跨步电压 step voltage

地面一步距离的两点间的电位差,此距离取最大电位梯度方向上1 m的长度。

注:当工作人员站立在大地或某物之上,而有电流流过该大地或该物时,此电位差可能是危险的,在故障状态时尤其如此。

4.19 (材料)电阻率 resistivity(material)

有效电阻率 effective resistivity

指一种系数,其值等于材料内的电场强度除以传导电流密度。

4.20 耦合 coupling

在两个或两个以上电路或系统间,可进行一电路(系统)到另一电路(系统)功率或信号转换的效应。

注:耦合分为紧耦合和松耦合两种,在紧耦合时,各元件的诸变量间相位移较小。紧耦合各系统间有大的相互效应,这种效应可用系统矩阵的矢积表示。

4.21 电容耦合 coupling capacitance

在两个或两个以上电路间借助电路间电容的耦合。

4.22 电阻耦合 resistive coupling

在两个或两个以上电路间借助电路间电阻的耦合。

4.23 直接耦合 direct coupling

在两个或两个以上电路间借助电路共同的自感、电容、电阻或三者集合而形成的耦合。

4.24 电感耦合 inductive coupling

(1) 对于通信电路,本术语指两个或两个以上电路间借助电路间互感而形成的耦合。

注:电感耦合这一术语通常指互感所形成的耦合,而直接电感耦合这一术语指诸电路共同的自感所形成的耦合。

(2) 对于电力和通信电路,指相邻的电力电路和通信电路间因电感应、磁感应或电磁感应而形成的相互关系。

4.25 (架空线防雷保护用)接地极 counterpoise (overhead lines)(lightning protection)

指一个导体或一组导体,装设在输电线路下方,位于地面或地面上方,但绝大多数在地下,并与铁塔或电杆基础相连。

5 接地网测试时的安全措施

5.1 (变)电站接地网测试

在进行接地网测试时,如果电力系统发生涉及该接地网的故障,则在该接地网与远方零电位点间会有致命的电位差存在。

由于接地网测试内容之一是为电流极和电位极选定远方零电位点的位置,因此在选择电极引线时应考虑该引线能承受引线和接地网任何一点间可能出现的电位差。此电位差的大小可如此考虑,即在比

较大的(变)电站里,其接地网的接地阻抗应为 $0.05 \sim 0.5 \Omega$ 的数量级。假定通过该接地网的接地故障电流在 20 kA 的数量级,则对远方零电位点的电位(地电位升)可达 $1.0 \sim 10 \text{ kV}$ 的数量级。如接地阻抗及故障电流更高,则接地网电压的升高可超过 10 kV 。

上述情况表明,在手触试验引线时应倍加小心,决不允许通过人的两手或人体其他部分使可能具有高电位差的两点构成回路。虽然在人触及试验引线的同时,发生接地故障的可能性极少,但不应忽视这种可能性的存在。因此,在测量运行中的(变)电站接地网时,应使用绝缘鞋、绝缘手套、绝缘垫及采用其他防护手段。

在所有的情况下,应遵守有关专业组织所制定的安全程序和安全方法。

5.2 避雷器接地极测试

由于避雷器接地极通过的是时间很短的高幅值雷电流,这种接地极属于特殊的类型。雷电流幅值可能超过 $50\,000 \text{ A}$,对于一个有缺陷的避雷器,还要考虑其故障电流。由于避雷器断开接地极后,其底座电位可能升到线电位,因此不应断开避雷器接地极进行测量。只有在采取措施使避雷器放电电流减至最小时,才可测试其接地极。

5.3 小型独立接地极

这一措施涉及电流极周围可能出现的高电位梯度。如果像电位降法那样,使测量电流流入安放在远处的电流极,则在测试过程中,应不使好奇的人停留在电流极附近。在乡村,不应使放牧的牲畜走近电流极。

6 有关测量的一般性规定

6.1 复杂性

测量土壤电阻率、接地阻抗和地面电位梯度要比测量其他种类的电阻、阻抗和电位更为复杂。

可能需要进行多次测量并绘制曲线,杂散电流及其他因素通常会干扰测量工作。

由于电站附近地区的开发和工业的发展,为测量接地电阻而选择测棒的合适安放位置就越来越困难。此外架空地线、地下水管、电缆外皮等都可能使接地网畸变或扩大。

注:架空地线可因有意处置或因接触腐蚀而对地绝缘,因此低电压的测试结果与真实故障时的测试结果可能不同。

接地阻抗的测量应在接地网安装完毕后立即进行,以确定应接入接地网的接地部件无漏接。要考虑到以后安装的装置如水管、铁轨等将会改变所测的数据。还要考虑到,在接地网安装一年以后,由于土壤变得均匀坚实,接地阻抗通常会降低。

6.2 试验电极

在接地阻抗测量中,要用到电流极和电位极。

如果所采用的接地阻抗测量方法是两点法或三点法,则对两点法来说试验电极的阻抗与待测接地极的接地阻抗值相比较应可予以忽略,而对三点法来说,试验电极的阻抗与待测接地极的接地阻抗值应属于同一数量级。否则,测试结果就可能不正确。

显然,以上的限制使上述的测量方法仅适用于像住宅游泳池和小型低压配电变电站那样相对来说较小的接地网。

在采用电位降法测量接地阻抗时,对试验电极的要求不是如此严格。

理论上,试验电极的接地电阻不会影响测试结果,因为此因素已在测试方法中加以考虑。但实际上,试验电极的接地电阻值不应超过一定限度,否则,流过测量仪器的电流不足。这意味着:

- (1) 该电流低于仪器灵敏度的要求值;
- (2) 该电流和地中杂散电流属于同一数量级;
- (3) 上述二者均存在。

对于第一种情况,在测量现场可采取的唯一正确方法是提高测试电流。为此可提高电源电压,或降低试验电极的接地电阻。提高电源电压并不总是能办得到的,特别是在测量仪器配上手摇发电机时更是

如此。如提高电源电压可行,则应采取措施避免在试验电极和试验引线上出现危险电位。在采取特殊安全措施(如戴绝缘手套或穿着绝缘鞋)后,可将试验电极和试验引线上的最高安全电压提高到 100 V。

通常提高测试电流的最有效方法,是降低电流极的接地电阻。这可通过将电流极更深地打入土壤,在电流极周围泼水,或打辅助电极并和电流极并联方式实现。但在所泼的水中添加盐是无甚效果的,增加湿度才是最有效的。

通常,电流极和电位极的电阻值应符合所用仪器的要求。对普通的市场出售的仪器,电位极的接地电阻值可取 1 000 Ω ,有些制造商则声言他们的仪器允许采用 10 000 Ω 的电位极。

电流极的电阻通常应小于 500 Ω ,电流极的电阻值是电源电压和所要求的测试电流的函数。电源电压与电流极电阻的比值决定了流过所用仪器电流表的测试电流。按照经验,电流极电阻与待测接地极电阻的比值不应超过 1 000 比 1,最好是 100 比 1 或更小。

对于第二种情况,在进行直流电流测试时,测试电流应增加,以克服地中直流杂散电流的干扰效应。在用交流或周期性换向直流电流测试时,应选用不含杂散电流频率的测试电流。

6.3 直流杂散电流

土壤的导电是电解性导电,直流电流导致化学反应和使电位差具有极性。在各种类型的土壤间,和在土壤与金属间的电池效应,都产生直流电位。直流电位、极化、以及直流杂散电流都可能严重干扰直流电流测量。因此,在测量时常使用周期性换向直流电流,或使用规则的脉冲电流。然而,用周期性换向直流电流作电阻测量时,其多次所测值虽十分接近,却可能与按交流运行时的电阻值相差较多,因而不够准确。在有太阳感生光电电流(准直流)的地区还应采取特别措施。

6.4 交流杂散电流

地中交流杂散电流、待测接地系统的杂散电流、以及试验电极中的杂散电流使测量更为复杂化。为减少交流杂散电流对接地电阻测量的效应,可在测量时使用非杂散电流的频率。大多数测量仪器使用 50 Hz 到 100 Hz 的频率。为克服交流杂散电流的效应,常需要使用滤波器或窄频带测量仪器,或二者皆用。

6.5 大型接地系统阻抗的电抗分量

大型接地系统的接地阻抗可能非常低(可达 0.010 Ω),但其正交分量可能较大。在测量大型接地系统的工频接地阻抗时,应采取一些措施。对于这种测量,测试装置应在接近工频下工作,但测试频率应稍高或稍低于工频。为取得较高准确值,测试电流最低值不得小于 50 A,并应避开工频接地电流。本标准的第二部分《特殊测量》将规定大型接地系统的阻抗测量方法。

6.6 试验引线间的耦合

在测量低值接地阻抗时,试验引线间的耦合就变得重要起来。由于电流引线中电流的流动,耦合到电位引线而产生的任何电压,将直接叠加到所欲测量的电压上,因而产生测量误差。两条平行试验引线间工频的电感耦合所造成的误差可高达 0.1 Ω /100 m,其影响将是可观的。通常低接地阻抗总是出现在大面积接地网上,测量这种接地网就用得着长的试验引线,以便引到远方零电位点。

相反,小面积接地网通常有十分高的接地阻抗,可用较短的试验引线接到远方零电位点。因此,可以认为在测量大面积低阻抗接地网时,试验引线间的耦合是比较严重的。根据经验,对于接地阻抗为 10 Ω 或以上的接地网,其试验引线间的耦合通常可忽略;对于接地阻抗为 1 Ω 或以下的接地网,其试验引线间的耦合应予重视;而对于接地阻抗在 1~10 Ω 的接地网,其试验引线间的耦合应予考虑。

试验引线间的耦合可通过适当地安排电位引线和电流引线的走向而减小。在估计到试验引线间会有耦合时,应将电位引线和电流引线间的角度尽可能放大。

6.7 地下金属物

部分或完全埋地的金属物如铁轨、水管、或其他工业金属管道对测量结果会有很大的影响。

在土壤电阻率测试中,靠近测试场地的地下金属物常引起所测值的急剧下降。所测值降低的数值和程度,表明地下金属物的大小和深度。位于地下金属物附近的接地极的所测电阻,与无该地下金属物时

相比较,其值将下降较多。总之,在为防止通信干扰而测定有效地面电位升(GPR)时,不应忽视地下金属物的效应。在地下金属物上测量地面电位和电位梯度时,地面电位等位线会畸变,电位梯度会上升。

在需要测量土壤电阻率的地方,如怀疑有地下金属物,且能确定这些地下金属物的位置时,可通过将试验电极排列得与该地下金属物的走向垂直,来减少金属物对土壤电阻率测量结果的影响。此外,试验电极应尽可能远离地下金属物。

7 土壤电阻率测量

7.1 总则

不管测量土壤电阻率的目的如何,其测量技术实际上是一样的。但是对测试数据的分析却可能是多样的,在遇到有多种土壤电阻率的土壤时,情况更是如此。多种土壤电阻率引起额外的复杂性是通常现象,而在深度增加时土壤电阻率不变化也是很少有的现象。

土壤电阻率不仅随土壤的类型变化,且随温度、湿度、含盐量和土壤的紧密程度而变化(图1)。

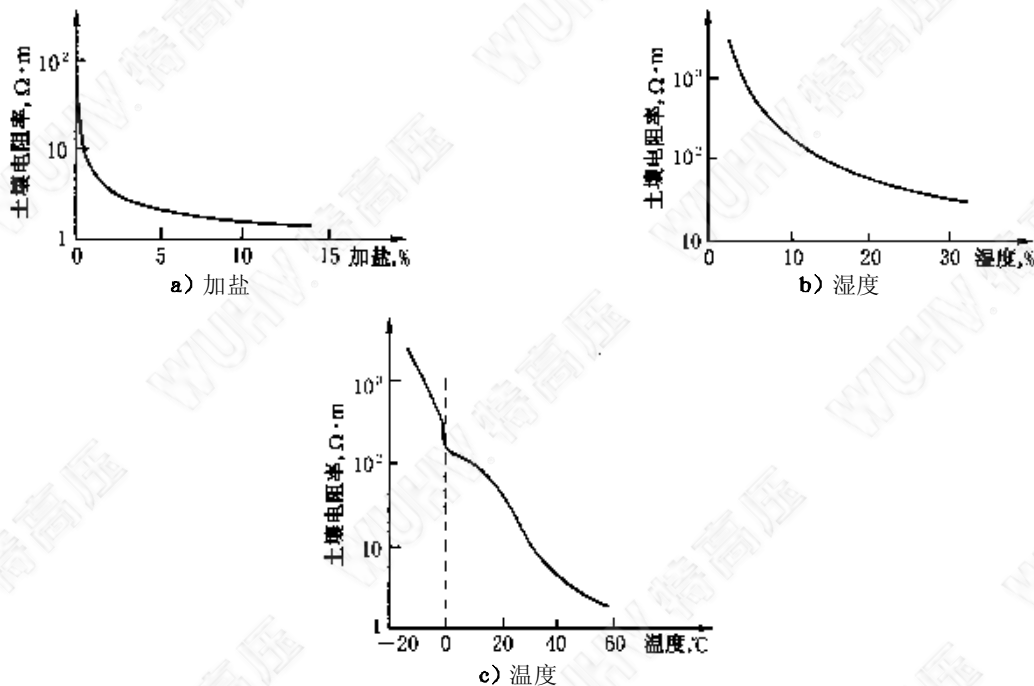


图1 土壤电阻率曲线

海水地区的土壤电阻率为 $0.01 \sim 1 \Omega \cdot m$; 砂岩地区的土壤电阻率能高到 $10^9 \Omega \cdot m$ 。温度自 $25^\circ C$ 向 $0^\circ C$ 下降时,土壤电阻率随之缓慢上升;在 $0^\circ C$ 以下,则迅速上升;而冻土(如冬天的表层土壤)的土壤电阻率可能非常地高。

表1列出各种土壤和各种岩石的电阻率,该表具有简明的优点。

通常土壤有若干层,层与层的土壤电阻率是不同的。土壤电阻率的横向变化也存在,但通常是渐变的,在测量地段附近可不考虑土壤电阻率的横向变化。

在大多数情况下,测量数据表明,土壤电阻率 ρ_a 主要是深度 z 的函数。为便于表达,此函数可写成如下式:

$$\rho_a = \phi(z) \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中: ρ_a ——土壤电阻率;

z ——深度。

函数 $\phi(z)$ 的特性一般说来不是简单的,因而为分析测试数据,最好先建立一个能给出最优近似值的简单的等值函数 ϕ_e 。对于电力线路和通信线路,取两个水平层的土壤构造和指数函数的土壤构造,可

得到较好的近似值,在进行接地系统设计时,该值是有用的。

接地极或临近接地极的地面电位梯度主要是上层土壤电阻率的函数。可是,接地极的接地电阻却主要是深层土壤电阻率的函数,在接地极非常大时更是如此。

注:在接地极埋在土壤电阻率特别高的上层土壤的极端情况下,上述结论不适用。

输电线路的工频接地参数受不同电阻率的各层土壤的影响,而载波频率、无线电频率或冲击波的地回路阻抗实际上仅仅受上层几米土壤层的影响。

上述情况说明需要对表层和深层土壤同时进行土壤电阻率的测量。用这种方法可取得许多数据,而对应每个数据,测试电流都和周围土壤电阻率的增量有关。

表 1 地质期和地质构造与土壤电阻率

土壤电阻率 $\Omega \cdot m$	第四纪	白垩纪 第三纪 第四纪	石炭纪 三叠纪	寒武纪 奥陶纪 泥盆纪	寒武纪前 和寒武纪
1(海水)		砂质粘土 粘土 白垩	白垩 暗色岩 辉绿岩 页岩 石灰石 砂岩	页岩 石灰石 砂岩 大理石	砂岩 石英岩 板石岩 花岗岩 片麻岩
10(特低)					
30(甚低)					
100(低)					
300(中)					
1 000(高)					
3 000(甚高)	表层为砂砾和 石子的土壤				
10 000(特高)					

7.2 测量土壤电阻率的方法

7.2.1 地质资料和土壤试样

通常,在要安装接地网的地方,总要进行大规模的土建工程。为此要进行地质勘探,以获取有关土壤特性和构造的大量资料。这对试图取得这些资料的电气工程师会大有帮助。用已知尺寸的土壤试样相对两面间所测得的电阻值,来确定土壤电阻率是不妥的,因为该值包含了土壤试样和电极的接触电阻,而这是未知的。

如果对土壤试样进行四端电阻测量,则可得到较准确的测定结果。电位端子的尺寸与试样的截面相比应较小,且应与电流端子相距较远,以保持试样的电流分布近于均匀。如果此距离与试样截面大边的尺寸相同,即足以满足测量要求。

然而,对试样进行电阻率测量,以得到土壤电阻率的有用近似值是困难的,且在某种情况下是不可能的。这是由于难于得到有代表性的、均匀的土壤试样,和难于在试验槽中复制原有土壤的紧密性和水分含量。

7.2.2 深度变化法(三点法)

此法又名三点法,用此法需多次测量接地电阻,每次测量时,被试电极的埋地深度需加深一给定量,其目的是迫使更多的测试电流流过深层土壤。所测的电阻值将反映深度增加时土壤电阻率的变化。通常被试电极是一根细长的棒。用细长的棒而不用其他型式的电极作被试电极,是因为细长的棒有两个重要优点:

- (1) 准确计算接地棒的理论接地电阻值比较简单,因而分析测试结果较容易;

(2) 将接地棒打入土壤的操作较容易。

用 8.2 条所述的任一方法,就可进行上述测量。然而,所测得的接地电阻值应尽可能准确,以便能与理论接地电阻值比较。因此,优先用电位降法测量较好。

深度变化法能测量到被试电极邻近地区(相当于该被试电极地下部分长度的 5~10 倍)的土壤特性。如要测量大体积的土壤,则应用四点法测量,因为将长的被试电极打入土壤是不现实的。

7.2.3 两点法

可用西坡(Shepard)土壤电阻率测定仪和相似的两点法在现场粗略地测量未经翻动过的土壤的电阻率。这种装置包括一个小的铁电极和一个更小的铁电极,二者都附在绝缘杆上。电池的正极通过一只毫安表连接到较小的电极上,而电池的负极则连接到另一电极。该仪器可在电池标称电压上校准,直接显示 $\Omega \cdot \text{cm}$ 值。这种仪器易于携带,通过将电极打入地中或挖掘坑土壤的侧壁或底部,可在短时间内对小块土壤进行大量测量。

7.2.4 四点法

要对大体积未翻动过的土壤进行土壤电阻率的测量,最准确的方法是四点法。将小电极埋入被测土壤呈一字排列的四个小洞中,埋入深度均为 b ,直线间隔均为 a 。测试电流 I 流入外侧两电极,而内侧两电极间的电位差 V 可用电位差计或高阻电压表测量。 V/I 即为用 Ω 表示的电阻 R 。

通常采用四点法的两种型式:

(1) 等距法或温纳(Wenner)法

采用此种方法时,电极按图 3a) 等距布置。设 a 为两邻近电极间距,则以 a, b 的单位表示的电阻率 ρ 为

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中: ρ ——视在土壤电阻率;

R ——所测电阻;

a ——电极间距;

b ——电极深度。

注: 视在土壤电阻率指与土壤电阻率真实值有区别的一种近似值,详见图 4 与附录 A。

必须说明,上式不适用于打入深度为 b 的接地棒,该式仅适用于埋在深度 b 的带绝缘连接线的小电极。然而实际上,四个电极通常置于间距为 a 的直线上,入地深度不超过 $0.1a$,因而可假定 $b=0$,则公式简化为:

$$\rho = 2\pi a R \quad \dots\dots\dots (3)$$

从而得出深度直到 a 的视在土壤电阻率。

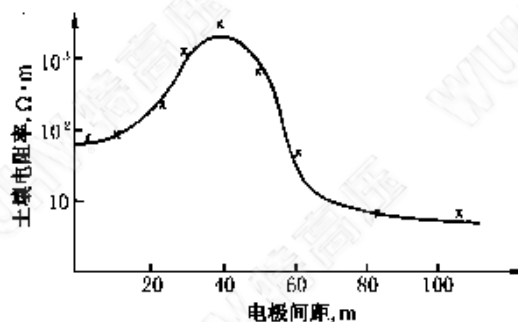


图 2 典型视在土壤电阻率曲线

在各种电极间距时得出的一组数据即为各种视在土壤电阻率,以该数据与间距的关系绘成曲线,即可判断该地区是否存在多种土壤层或是否有岩石层,还可判断其各自的电阻率和深度(图 2)。

(2) 非等距法或施伦贝格-巴莫(Schlumberger-Palmer)法

温纳(Wenner)法的一个缺点是当电极间距增到相当大时,内侧两个电极的电位差迅速下降,通常用仪器测不出如此低的电位差。为了能测量大间距电流极时的土壤电阻率,可用图 3b) 的布置方式。此时电位极布置在相应的电流极附近,如此可升高所测的电位差值。

此种布置的计算公式很易于确定,如果电极的埋地深度 b 与其距离 d 和 c 相较甚小时,则所测得电阻率可按下式计算:

$$\rho = \pi c(c+d)R/d \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中: ρ ——视在土壤电阻率;

R ——所测电阻;

c ——电流极与电位极间距;

d ——电位极间距。



图 3 四点法

7.3 测试数据的分析

对现场测试数据的分析或许是测量过程中最困难的部分。正如 7.1 条所述,由于土壤构造的不均匀性,土壤电阻率的变化是大而且复杂的。除少数情况外,有必要对土壤构造建立一个简单的等值模型,此模型取决于:

- (1) 测量的准确性和范围;
- (2) 所用的测量方法;
- (3) 所用数学的复杂性;
- (4) 测量的目的。

对于电力工程,在不使用过多数学的条件下,两层等值模型是足够准确的。

7.3.1 地质资料和土壤试样

为分析由地质勘探所提供的资料,不必用专门的工具或数学方程式。

7.3.2 深度变化法(三点法,附录 A)

在下列分析中,假定被试电极是一个打入深度为 l 的接地棒。与 l 相比较,接地棒的半径 r 是小的。对于其他型式的被试电极,其计算方法与以下所列者相似。

埋在同质土壤内的接地棒的接地电阻为:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad \dots\dots\dots (5)$$

或者为:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{4l}{r} - 1 \right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中: R ——接地电阻;

ρ ——视在土壤电阻率;

l ——接地棒埋深;

r ——接地棒半径。

此二式选用那一个,取决于近似的程度。从接地棒埋深的每一 l 值所测得的电阻值 R ,可得出视在土壤电阻率 ρ ,将 ρ 与对应的 l 值绘成曲线,可看出土壤电阻率随深度变化的情况。为更清楚起见,现假设从现场测试数据得出如图 4 所示的曲线。

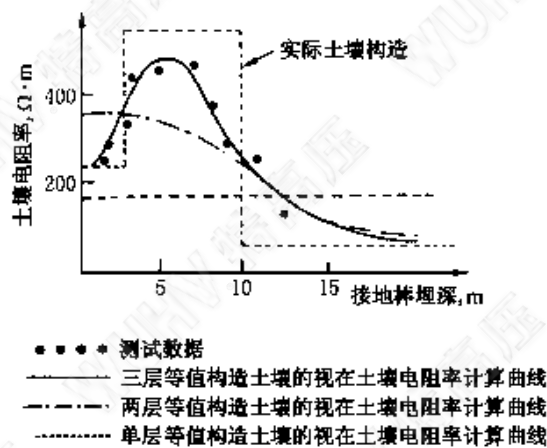


图4 土壤电阻率随深度的变化

从曲线可知,土壤构造至少可分为三层,在浅层土壤(深2~5 m),土壤电阻率为 $210\ \Omega\cdot\text{m}$,在中层土壤,土壤电阻率为浅层土壤的2~2.5倍,仅看曲线不易确定中层土壤的厚度,第三层土壤导电良好,其电阻率肯定低于 $100\ \Omega\cdot\text{m}$ 。然而,仅凭查看曲线还不可能得到真实值。可有两种办法取得真实值:

- (1) 将接地棒更深地打入土壤,继续测量;
- (2) 从所测的测据,用分析技术计算等值土壤构造。

继续增加测量次数肯定会有助于取得第三层的土壤电阻率,然而上两层的厚度仍不易于确定,而且,将接地棒打得很深可能是困难的和费用太大。其他的办法可以是:假定土壤是同质的;土壤是两层(或以上)的构造;土壤由电阻率随深度按简单的数学规律(线性,指数函数...)变化的土质构成等。

在这种土壤模型中接地棒的接地电阻是已知的,或者可以较容易地计算出来(附录A)。用简单的计算机程序或用试探法,就可得到与测试结果吻合得很好的土壤模型数据(附录B)。

前面已提到,用深度变化法无法测得距被试电极较远地区(距离大于被试电极地下部分长度的5~10倍)的土壤电阻率。

7.3.3 两点法

由于本法仅适用于测量小块土壤的电阻率,因此不用对测试数据进行分析。

7.3.4 四点法

四点法的分析法与7.3.2条三点法的分析法相似。在温纳(Wenner)布置中,所测的视在土壤电阻率与电极间距 a 的关系用曲线表示,此曲线即表示该土壤的构造。由于从曲线不易确定各层土壤的厚度,就有许多确定土壤层厚的经验方法如:

(1) 吉什-龙尼(The Gish and Rooney)法

该法通过土壤电阻率曲线形状的变化判断,在曲线曲率转折或变化时,与电极间距相等的深度处,开始出现另一层土壤。

(2) 兰开斯特-琼斯(The Lancaster-Jones)法

该法认为在出现曲率转折点时,即是下一层土壤,其深度为所对应电极间距的 $2/3$ 处。

然而,较好的办法还是采取如下的土壤模型:

- (a) 土壤的土壤电阻率不变化,即土壤是同质的;
- (b) 土壤有几个水平土壤层,每层土壤电阻率不变化(附录A);
- (c) 土壤有按指数函数变化的土壤电阻率(附录A)。

对于以上每一种模型,其视在土壤电阻率与各种土壤参数间的数学关系,应是已知的,或是易于计算的。某些经常使用的分析方法在附录B中有叙述。

现给出指数函数型及两层土壤模型的解法,使用合适的分析方法可得到与测试数据一致的曲线,从中得出所需的土壤参数,图5示出用土壤模型(b)和土壤模型(c)得出的曲线。

要根据测量目的选取最佳模型,通常用两层土壤模型能得到较好的结果。

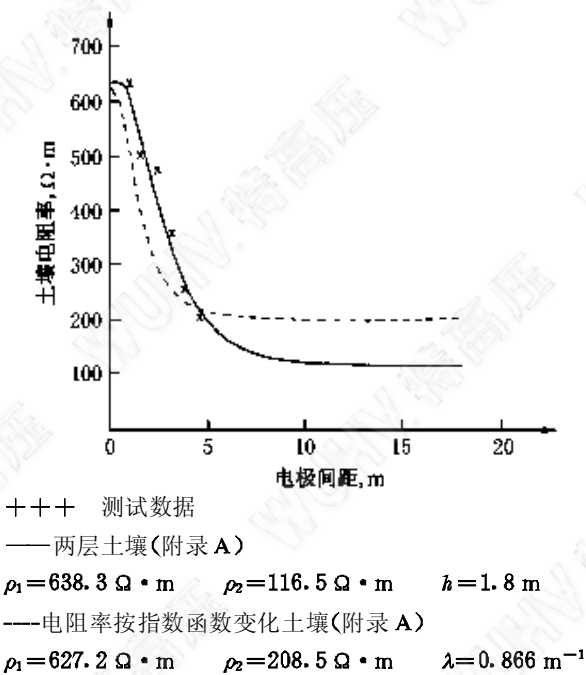


图 5 视在土壤电阻率与电极间距的关系实例

7.4 仪器

7.4.1 两点法

用西坡(Shepard)土壤电阻率测定仪或类似的仪器(7.2 条)。

7.4.2 四点法和深度变化法(三点法)

可使用下列任一种仪器(12 章):

- (1) 带电流表和高阻电压表的电源;
- (2) 比率欧姆表;
- (3) 双平衡电桥;
- (4) 单平衡变压器;
- (5) 感应极化发送器和接收器。

用不同的接线方式和端子,这些仪器既可测量接地电阻,也可测量土壤电阻率。

在感应极化测量中,间距通常要达到 1 000 m。由于间距长,其电阻往往小到几百分之一欧姆的数量级。这就要用带有高达 180 V 电池电源的灵敏直流电位差计测量。对于较短的间距,使用比率欧姆表、双平衡电桥、单平衡变压器就可以了。对于某些仪器,需对电位极的电阻进行校正,通常可从仪器制造厂得到校正系数。

感应极化发送器的额定功率通常为几百瓦。然而,对于大的间距或极高的上层土壤电阻率,可能需要用超过 1 000 W 的发送器。

8 接地阻抗

8.1 总则

一般说来,接地电路的阻抗是复数阻抗,包含电阻分量、电容分量和电感分量,所有这些分量都影响接地电路的载流能力。对于工频接地电路,接地电阻特别起作用,该电阻受接地电路范围内土壤电阻率的影响。电容分量和电感分量则对诸如与无线电通信和雷击有关的较高频率接地电路起作用。

测量接地阻抗的目的为:

- (1) 测定接地电路的真实阻抗;

- (2) 对计算值进行校核；
- (3) 确定：
 - (a) 由于电力系统接地故障电流引起的地面电位升高及在整个地段内的电位变化；
 - (b) 防雷保护接地极的适用性；
 - (c) 无线电发射机发射电路接地极的适用性；
- (4) 取得建筑物防雷保护,建筑物内设备防雷保护及有关人身安全所必须的设计数据。

为保证人身安全、绝缘足够和连续运行,应研究电力系统和通信系统的接地网,以确定接地故障时地面电位的变化情况。

8.1.1 特性

接地网的特性随土壤的成分和物理状态,以及随接地极的延伸范围和形状而变化。任何地方的土壤都是由电阻率大不相同的干土、湿土、石子、石板、砂石或其他自然材料等各种成分所分别组成。在某一地区,土壤可能是相对均匀的,而在另一些地区,土壤可能是由花岗石、沙子、或高电阻率的其他物质所组成,从而实际上与周围地区绝缘。接地网的特性(欧姆律电阻)还随季节而变化,季节影响土壤的温度、含水量和粘结性。

计算和经验表明,在给定土壤条件下,接地网的效果很大程度取决于接地网的总体尺寸。在接地网中增加埋地导体或接地棒多少有助于降低接地阻抗。随着埋地导体或接地棒的不断增加,其降低接地阻抗的效果相应减少。减少输电线路铁塔或杆柱的接地电阻的一个有效方法是安装辐向杆塔接地极。

在变电站或其他接地结构安装以后,随着每年周期性气候的变化,土壤会不断沉陷,从而在头一、两年使接地阻抗趋于下降。

由于接地网的接地电抗相对于接地电阻来说通常可忽略不计,因此其接地阻抗通常用接地电阻表示(对于接地阻抗低于 $0.5\ \Omega$ 的大型接地网及用于冲击或脉冲电流的接地极,此条不适用)。在接地网埋设一年或两年后,接地电阻值通常每年变化不会太大。虽然接地网可能埋设在地面下仅半米处,大型电站接地网的接地电阻似乎与埋设处土壤电阻率的变化无关。对于配备长接地棒的接地网,由于接地棒所接触的深层土壤一般不受气候条件(指温度和湿度的变化,这导致上层土壤电阻率变化)影响,这一条特别正确。然而,对于埋设在高土壤电阻率土层的接地网,或小型接地网(面积小于 $50\ \text{m}^2$),这一条就不适用。

大面积接地网为期 18 年的记录表明,其所测接地电阻值无甚变化,而在同一面积内的土壤电阻率测量表明土壤电阻率变化很大(在浅层达 17 : 1)。应该注意到,只有少量接地棒的接地网的接地电阻,可能紧随土壤电阻率测定所示的电阻而变化。这表明大面积接地网的接地电阻是正比于深层土壤电阻率测定值的,在该深层土壤,土壤电阻率变化较小。

某些从输电线路故障点到变电站接地网的接地故障电流,趋向于沿输电线路流过。平均电流路径的深度正比于土壤电阻率的平方根,而反比于频率的平方根。因而,接地电阻趋向于加大电流路径的横截面,而接地电抗趋向于减少其横截面,使其更靠近输电线路,这种趋向确定了远离接地极电流路径的模式。

8.1.2 接地电阻的理论值

从接地网到远方大地的接地电阻的计算值或理论值与所测值可能相差较大,其原因为:

- (1) 计算接地电阻所用的分析方法不合适。
- (2) 测量时的土壤条件不同,即测量时的土壤电阻率与计算时所采用的土壤电阻率不同。
- (3) 土壤电阻率测量不准或测量范围过小,如测试的次数不够、数据分散,电极间距和所用仪器不合适。
- (4) 土壤中有邻近的埋入金属物和接地线,这些可能转移一定量的测试电流。

为了减少土壤电阻率和接地电阻之间不对应的误差因素,建议在相似气候和湿度条件下进行土壤电阻率和接地电阻的测量。

如果所测的数值系作为设计接地网的依据,则应在各种气候条件下测量。这将有助于设计人员建立最严格或极限的条件,特别对于受季节条件影响大的小型接地网更有必要。

8.2 测量接地阻抗的方法

8.2.1 通则

本条仅涉及通常的测量方法,所用测量仪器参见第12章。在本条中把欧姆值称为电阻,此时应注意在待测接地网的欧姆值小于 $0.5\ \Omega$,且相对而言该接地网覆盖较大范围时,应将电抗分量考虑进去。对于接地阻抗高于 $1\ \Omega$ 的接地网,电抗分量无甚作用。为避免直流电流引起的极化效应,通常用交流电流或周期性换向直流电流测定接地网的接地电阻,交流电流的频率应接近工频。

8.2.1.1 两点法(电流表-电压表法)

用本法测量时,测得的电阻值是待测接地极和辅助接地极电阻值之和。与待测接地极的接地电阻相比较,辅助接地极的接地电阻被认为是可忽略的,因此用欧姆表示的所测电阻值即称为待测接地极的接地电阻值。

两点法通常应用于有金属自来水管系统,且管道接头无绝缘的建筑物的单根接地棒接地电阻的测定。该水管即辅助接地极,其接地电阻假定为 $1\ \Omega$ 数量级,与接地棒的最大允许接地电阻(通常为 $25\ \Omega$ 数量级)相比应较低。

显然,对于接地电阻值低的接地棒,此法的误差较大,但对于仅需进行粗测的场所,两点法是有用和合适的。

8.2.1.2 三点法

此法使用两个试验电极,其接地电阻分别为 r_2 、 r_3 ,待测接地极的接地电阻为 r_1 。每两对电极间的电阻为 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{23} ,此处:

$$r_{12} = r_1 + r_2, r_{13} = r_1 + r_3, r_{23} = r_2 + r_3$$

解联立方程,得:

$$r_1 = \frac{r_{12} - r_{23} + r_{13}}{2} \dots\dots\dots(7)$$

因此,借助测量每对电极的串联电阻值,并代入方程,可求出 r_1 的值。如果两个试验电极的接地电阻较待测接地极的接地电阻大许多,则每项测量的误差将在最后的结果中放大许多。测量时,电极间必须相距一定距离,否则计算结果可能变得荒谬,如出现零电阻或负电阻等。在测量单根接地极接地电阻时,三个电极相互间的距离应至少为 5 m ,最好为 10 m 或以上。对于具有较低接地电阻的较大面积的接地网来说,其间距应至少与接地网尺寸属同一数量级。对于大型变电站,此要求很难满足。因而如果需要高的准确度,宁愿采取电位降法。

8.2.1.3 比较法

采用本法时,通常使用和电位降法相同的电极形状,使待测接地极的接地电阻与一已知电阻比较。由于本法为比较法,在测试电流高到能保证足够灵敏度时,其欧姆读数与测试电流的大小无关。

8.2.1.4 多级大电流法和故障电流法

当需要在某个接地装置上取得特定数据时,可采用多级大电流试验。在发生实际接地故障时,可通过使用示波器或电站自动示波器,得到作为辅助资料的接地阻抗值。

多级大电流法和故障电流法所用的仪器是相同的,其目的是在一个或多个示波器上录取所选测点之间的电压。所要录取的电压值可能很高,为此需要配备电压互感器。可能出现的最大电压值,以及由此所需的电压互感器变比,应在测试前用实际测试电流下的电位降法测定。

另一个要注意的事项是示波器电路的校准,该电路由高电阻一次回路的电压互感器构成。该高电阻包括远方电位极及其串联长引线的电阻。可以在一次回路中加入一个所测电压,使该电压与测试时所使用的远方电位极及其引线串联,来校准示波器元件的偏差。

待测实际接地点的位置取决于所需的数据。但是在所有的情况下,对于 6.6 条所指出的试验回路间

的耦合,均应给出合适的允许误差。

8.2.1.5 电位降法

电位降法有若干变量,此法适用于所有各种接地阻抗测量。如第 6.5 条所述,大型接地网的接地阻抗小于 $0.5\ \Omega$ 时,其电抗分量可能较大,因此所测得值是阻抗,虽然术语上常称电阻,仍应视为阻抗。

此法包括将电流输入待测接地极,及记录该电流与该接地极和电位极间电压的关系。

要设置一个电流极,以便向待测接地极输入电流,如图 6 所示。

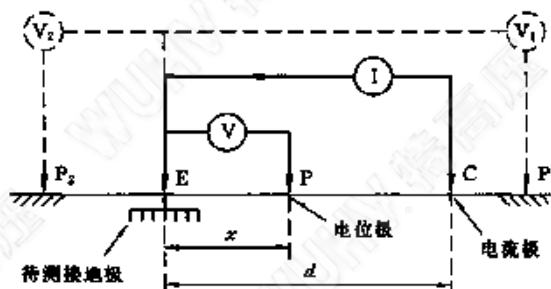


图 6 电位降法

流过待测接地极 E 和电流极 C 的电流 I 使地面电位变化。沿电极 C、P、E 方向的电位曲线如图 7 所示。以待测接地极 E 为参考点测量地面电位,为方便计,假定该 E 点电位为零电位。

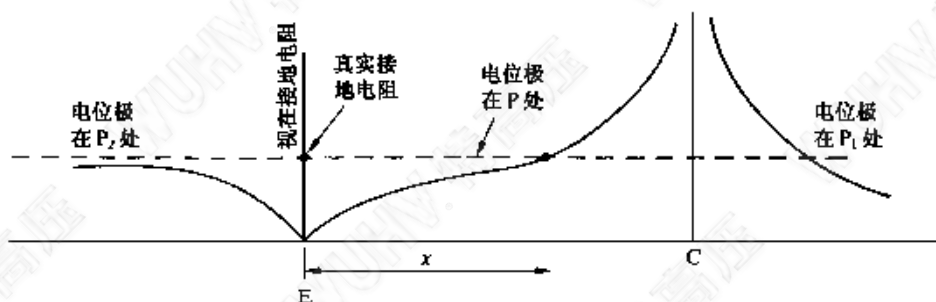


图 7 各种间距 x 时的视在接地电阻

电位降法的内容是画出比值 $V/I=R$ 随电位极间距 x 变化的曲线。电位极从待测接地极处开始,逐点向外移动,每一点测出一个视在接地阻抗值。画出视在接地阻抗随间距变化的曲线,该曲线转入水平阶段的欧姆值,即当作待测接地极的真实接地阻抗值(图 8)。

由于这种经验方法仅仅在水平段非常分明时,其结果才比较正确,因此在应用时要特别仔细。附录 C 对电位降法的原理作了说明。

为了取得曲线的水平部分,应将电流极置于待测接地极作用范围以外。该作用范围有时被称为变电站接地范围,在该范围以外,地电流所引起的地电位升高可忽略不计。理论上,待测接地极的作用范围可延伸到无穷远,实际上由于该作用范围与待测接地极距离的多次幂成反比,其作用范围是有限的。在测试接地电阻在 $1\ \Omega$ 及以下的接地网或多根深埋接地棒时,方考虑并测定其作用范围。对于像单根接地棒、杆塔基础(未与架空地线或地线相连)这样的小面积接地,可按 50 m 数量级的间距设置电流极,这在现场容易办到,此时待测接地极的作用可忽略。对于大型接地网,所要求的间距不切合实际或者无法实现。因此,曲线的水平部分难以得到,就要采用其他的分析方法。

对电位降法的理论分析表明,将电位极 P 置于电流极 C 的另一侧(P_2 处)时,常常导致所测的视在接地电阻值小于真实接地电阻值,说明这一点是重要的。

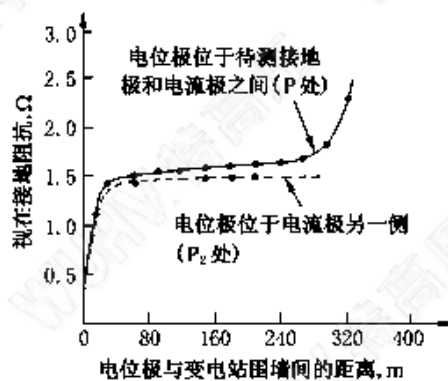


图 8 高阻抗接地系统实例

而当电位极置于电流极 **C** 同一侧,但远离该电流极(**P**₁ 处)时,则在某一具体位置处可测得真实的接地电阻值。

然而应当强调,将电位极置于 **P**₂ 位置可以将试验引线间的耦合大大减少。如果将 **P**₂ 和 **C** 间的距离放得相当大(相对于待测接地极 **E**),则有可能用此法得到待测接地极 **E** 真实接地电阻的下限值。

大型接地网的典型曲线如图 9 所示。该图的数据取自对一个约有 125 m×150 m 接地网的变电站的测试。图中的距离从变电站的围墙处开始计量,因此在曲线的 0 距离处,其接地阻抗不为零。曲线 **B** 是在电位极位于 **E** 和 **C** 间(**P** 处)时测得,而曲线 **A** 是在电位极位于电流极 **C** 另一侧(**P**₂ 处)时测得。

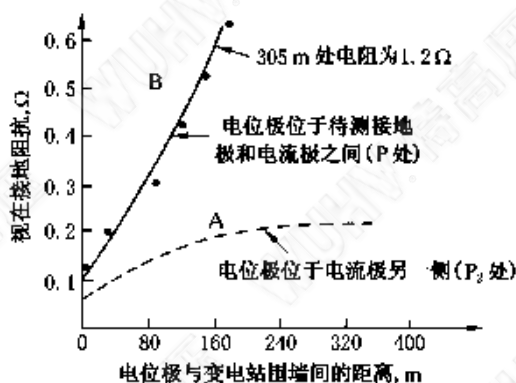


图 9 低阻抗接地系统实例

测试表明在电流极和变电站接地极间存在互阻,这就是曲线 **B** 未能变平的原因。曲线 **A** 倒似乎变平了,可从中求得待测接地极真实接地阻抗的下限值。

8.2.1.6 测试结果的分析

附录 **C** 表明,存在一个可得出待测接地极真实接地阻抗的电位极间距。

然而,要确定电位极的正确间距是困难的,如果接地网具有复杂的结构更是如此。电位极的正确间距也是土壤构造的函数,适用于小型接地网的这种函数关系如图 10 所示。

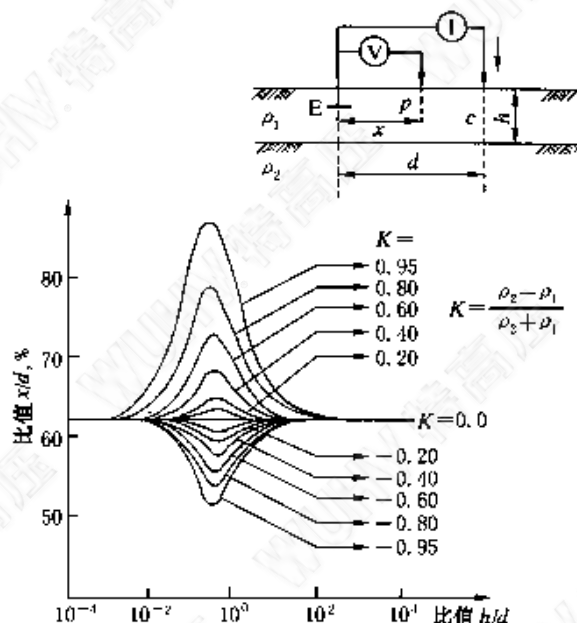


图 10 两层土壤时电位极的所需位置

图 10 表明,电位极的所需间距 x 应满足比值 $x/d = 0.618$ (当电位极 P 位于 E 、 C 之间,且土壤为同质时)。对于半圆小电极,这一结论最先被柯茨(E. B. Cudts)所证明。

以上表明,为了应用 61.8% 规则,应满足以下条件:

- (1) 有完全同质的土壤;
- (2) 有足够大的间距,以便电极可采取半圆的形式。

还要确定测量间距的参考原点。对于半圆形的接地极,原点是接地极的中心。对于大型接地网,有些专家提出了“电气中心”的概念,泰格(Tagge)根据电气中心的概念还提出了同质土壤大型接地网接地阻抗的测定方法。然而要说明的是,还没有证据表明该电气中心是一个像重心那样,不受电流极位置和特性影响的物理常数。

通常,取得满意测量结果的最好保证是得到可使互阻足够小,并使电位降曲线变平的间距。电位降法的主要优点是电位极和电流极的电阻可比待测接地极电阻大,而实质上又不影响测量准确度。

8.3 接地网完整性测试

本测试的目的在于确定接地网的各个部分是否由低阻铜导体相互联接。该铜导体与周围的低阻抗大地并联。

进行接地网完整性测试的最佳方法是通以大直流电流,并测定该电流所引起的电压降。如果欧姆表的灵敏度足够,也可用直读式欧姆表测量。

使用交流电流的电流表-电压表法不适用于这种测试。此时铜导体的电抗将被周围大地所形成的略低于铜导体的电抗所并联。如果通上交流电流对埋地铜导体持续试验,所得结果将是不确定的。

按照上述情况推理,可以认为对各具有工频时 0.1Ω 数量级接地阻抗,相距任何距离的两个接地网,要明显降低二者之间的阻抗实际上是不可能的。在两接地网间无论加接多大截面的铜导体,也不会降低二者之间的电抗。加接铜导体可降低电阻分量,利用该电阻分量可测定接地网的完整性。

实用的完整性测试方法,是将约 5 A 的电流通入接地网待校验的两点间,用毫伏计或手提式电位差计测量该两点间的电位差,从电流和电压读数计算出有效电阻值。从这些读数和算得的铜导体电阻,可以判定连接是否合格。对于两点间有直流电压的那些接地网,测试电流引起的电压变化可用于计算电阻。

对于运行中的大多数大型接地网,在所测的两点间,与要测的直流毫伏相较,尚有一相对较大的交流电压存在。对这种交流分量,可通过将一个 $20 \mu\text{F}$ 或以上电容器并联入毫伏表的动圈或电位差计的检

流计的方法,以减少其效应。最好选用液浸纸介质电容器,但一些新式的电解电容器,其泄漏很少,也可使用。

8.4 仪器

测量接地电阻的仪器与测量土壤电阻率的仪器相同,在第12章中将详述。

9 地面电位

9.1 等电位线

由于电流从接地极入地并沿地中路径流过,与电流路径正交的等电位面形状将与电流路径有关。等电位面间有相同的电位差,沿着规定的路径的等电位面密度确定了可能出现的跨步电压。在接地极附近,其梯度(跨步电压)将最高。

从接地极处开始,沿地面辐向所测得的等电位面间的距离,将随若干因数变化。这些因数包括:土壤电阻率大小,有无埋地管道、线管、铁路路轨、钢栅栏、电缆铠装,以及有无通过地电流的架空地线等。

第8.1条指出,某些接地故障电流可能会沿载流的输电线路地中返回电源。因而载有故障电流的输电线路下的地面电位梯度较邻近土壤地面电位梯度更陡。当故障发生在进入变电站的不同输电线路时,上述现象会导致等电位线的变化。因此仅仅通过测量接地极与其周围各个地点间的电阻,还不可能画出等电位线。

当等电位线画出以后,可以设想在给定故障条件下,等电位线间的电位差是正比于接地故障电流的大小。其前提是接地系统周围的土地在流过故障电流时,土壤电阻率没有变化。

9.2 等电位线测定

进行等电位线测定是为了查明在事故状况下接地电气装置附近的危险电位梯度。从一已知参考点测量接地电气装置周围各点的电压降,并画在位置图上。将等电位的各点连成线,就可画出等电位图。如果等电位线之间的电位差相同,则等电位线愈密,危险就愈大。为求出因接地故障电流所形成的实际电位梯度,可将接地故障电流与测试电流的比值乘以测试电流时的电位梯度。

最准确的电位梯度测量法是电流表-电压表法。测试时将50~100 A的恒定电流通过接地网流向远方电流极,并经绝缘导线流回。为了防止因接地网与电流极间距不当产生的互阻抗所引起的梯度畸变,应设置远方电流极。远方电流极的距离,对于小型接地网为300 m,对于较大接地网可为1.6 km或以上。应用高阻抗电压表在地面沿着从接地网辐向放射的各个电位线测量电位梯度。除非采用了合适的措施将杂散地电流屏蔽掉,否则测试电流应足够大以消除杂散地电流的影响。为了避免在多次测量中电位梯度的变化,应注意防止靠近接地网和电流极处的土壤被加热和烘干。测量的次数取决于经济性和所要求数据的详细程度。

当变电站接有一条以上的架空线路或地下电缆时,不同的架空线路或电缆的故障在变电站内及其周围所形成的电位梯度可能十分不同。同样,大型变电站不同地点的故障在变电站内及其周围所形成的电位梯度也不同。因此,按两种或两种以上的故障条件确定大型变电站内及其周围的地面电位梯度将是合适的。

埋地金属物如中性导线、电缆铠装、金属水管和气管等,地面金属结构如变电站附近的铁路路轨、栅栏、架空地线等,无论是否接入接地网,通常都对电位梯度产生较大的影响,在测量电位梯度时均应予以考虑。

当电位梯度的测定不经济时,可按接地电阻或土壤电阻率测量结果计算电位梯度。这种计算的准确度取决于测量的准确程度和接地网周围及其下土壤的变异程度。

这种计算可通过较少次数的电位梯度测量以检验其正确性。

9.3 跨步电压和接触电压

跨步电压和接触电压的大小可按现场测出的电位图量出,或用电流表-电压表法实地测量(图11)。跨步电压和接触电压值正比于地电流和表层土壤电阻率(假设深层土壤电阻率为常数)。

注：表层土壤电阻率的变化有时会增加地电阻，从而引起地电流的变化。因此在确定跨步电压和接触电压的变化时，要同时考虑表层土壤电阻率和地电流的变化。

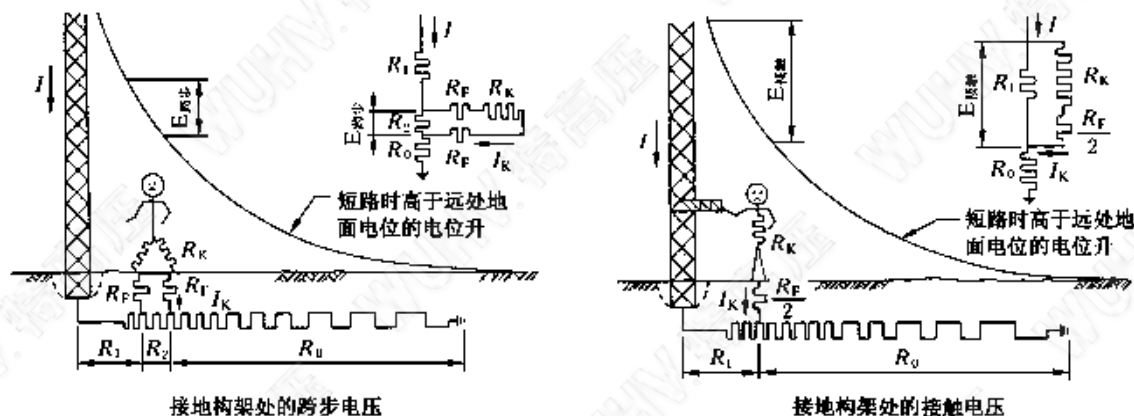


图 11 跨步电压和接触电压

10 冲击接地阻抗

10.1 接地系统的冲击接地阻抗

10.1.1 通则

许多接地系统是按暂态工况设计的，最常见的是按通过雷电冲击电流设计的。简单接地极的冲击接地阻抗与冲击电流的幅值有关，并按冲击波波形随时间变化。

冲击接地阻抗的非线性是由于在电场强度超过 $2.5 \sim 3 \text{ kV/cm}$ 时土壤的局部放电所引起。由于在接地极处电场强度达到最高值而放电，就将邻近接地极处的土壤层局部短路。因此，大冲击电流时接地系统的冲击接地阻抗比常规稳态方法所测得的阻抗要小，也比低幅值冲击电流时所测得的阻抗要小，在较低幅值冲击电流时土壤不会发生放电现象。

当用高陡度波头的冲击波对长达 300 m 以上延伸的各个接地极、接地线或接地条试验时，还观察到一种相反的效应，即在接地阻抗两端的电压降中有一个大的电感分量。瞬时阻抗通常是同一瞬间测得的所加瞬时电压和瞬时电流之商。在高陡度冲击波波头(或冲击电流突然增加)时，出现在接地电抗两端的附加电压分量被认为是接地阻抗的增加。

10.1.2 接地系统冲击接地阻抗的测量

由于冲击接地阻抗的非线性特性不能用模拟法或比例法测量，就得用实际幅值的电压和电流冲击波测定。为了进行这种测量，就需要采用由能量足够的高压冲击电流发生器、精密分压器、分流器和双线脉冲示波器组成的试验回路。雷电流取 $1 \sim 100 \text{ kA}$ 之间，典型的接地阻抗为 10Ω 数量级。

按照上述要求，电力部门在高压变电站用于测量绝缘配合的移动式冲击电流发生器可用于测量冲击接地阻抗。另一个可供选用的方法，是在高压试验室附近土壤中装置一个模拟接地系统，并将试验室冲击电流发生器及测量仪器接到该待测接地系统。

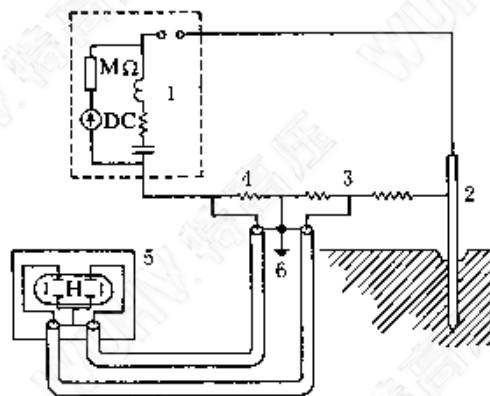
用于记录接地阻抗两端电压降和所加冲击电流的双线示波器需有一个参考接地极。如果冲击电流发生器的基础与待测接地系统间有足够大的距离，则可以冲击电流发生器的基础作为该参考接地极。按电压和电流示波图的连续时间间隔，逐点计算该二暂态量的商，即可得出冲击接地阻抗。

由于冲击接地阻抗的值取决于冲击电流的幅值和波形，以及接地极的形状和土壤类型，为了对测试数据进行更全面的分析并取得明确的结论，就得多进行几次测量。

还要注意可能出现的共态干扰，在分压器和分流器的接地点电位偏离参考接地极电位时，在测量回路会出现共态干扰。

10.1.3 测量电路

所用测量设备的接线如图 12 所示。



1—高压冲击电流发生器;2—待测接地极;3—高压分压器;4—分流器;
5—双线脉冲示波器;6—高压冲击电流发生器接地极

图 12 接地系统冲击接地阻抗的测量电路

测量接地棒或均布式接地系统的冲击接地阻抗需要用专门的设备,这种设备通常用于高压试验室。可通过将大电容器向冲击波成形网络放电,以产生高压和大电流冲击波。虽然可在测试现场临时凑成这种电路,但在大多数实际运用中还是使用移动式冲击电流发生器。在测量冲击接地阻抗时采用 $8/20\ \mu\text{s}$ 或 $4/10\ \mu\text{s}$ 的冲击电流波形。

除待测接地极以外,试验电路还得配有通过冲击电流发生器返回电流的辅助接地极。辅助接地极优先选用如变电站接地网和试验室接地网之类的均布式接地极,且其阻抗应比待测接地极阻抗小得多。

冲击电流发生器通过大电流分流器与辅助接地极连接。分流器的灵敏度应达到 ANSI/IEEE4:1978 《IEEE 高压试验技术标准》¹⁾ 的要求。待测接地极两端的电压降,优先选用按预期电压量程设计的电阻型分压器测量。应用短的和低阻抗引线直接将分流器和分压器的接地端连接到辅助接地极处。

分压器的测量性能应达到 ANSI/IEEE4:1978 的要求,分压器接到待测接地极的导线应尽可能地短。

通常用双线示波器进行电压和电流冲击波的同时记录。从分压器和分流器连接到示波器的两条同轴电缆应为等长,以免所记录的两个暂态量间出现时滞。由于冲击接地阻抗的曲线是按所记录的电压和电流的瞬时值之商而绘制,二者的时间坐标即使有很小的错位就会引起很大的误差,因此避免时滞尤为重要。

考虑到冲击接地阻抗的非线性特性,应以不同的波形和幅值的电流冲击波测量。每一组示波图可绘成一组冲击接地阻抗曲线,以表征在高低冲击电流时的接地性能。

11 模型试验

11.1 用途

模型试验的主要用途是预测真实土壤中有复杂接地极的近似接地电阻值,或预测复杂接地系统的近似地面电位梯度。对于这些,用别的方法是是不可能准确计算的。

11.2 模拟的标准和要求

模型试验的第一步是制作所模拟的土壤构造,经缩小的模型应遵守以下规定:

(1) 土壤模型和待测接地极的所有几何尺寸均应按统一的系数 μ_L 比例缩小。

(2) 当该模型由多层土壤组成时,其每层土壤电阻率对参考层土壤电阻率之比值应该等于其各自的实际土壤层所对应的比值。实际土壤层土壤电阻率与模型参考层土壤电阻率的比值为土壤电阻率比例系数 μ_ρ 。

采用说明:

1) 可参照 GB/T 16927.2—1997 执行。

当上述要求达到以后,为尽量减少由于电解槽尺寸有限所引起的误差,还应遵守以下事项:

(1) 为防止在直流小电流时由于电极极化现象所引起的误差,应使用交流电流。

(2) 接地极模型的电流密度应小于 0.1 A/cm^2 。

(3) 电位极应为无棱角的 $\phi 3$ 圆线,埋入深度不得超过 3 mm 。

(4) 接地极模型应按比例制作,为简化制造和保证必要的准确度,接地极模型应足够大。为试验方便,接地极模型也不应过大,一般取 $1:20$ 比例较妥。

(5) 电解槽的尺寸不应小于接地极模型最大尺寸的 5 倍,此时其误差小于在实际土壤所测数据的 10% 。

11.3 测量仪器

模型试验所需的物品为(图 13):

(1) 用绝缘材料制作的槽体一个。

(2) 在槽体内装入构成所模拟的各层土壤的各种材料,并配置妥当。上层应浇以盐溶液或硫酸铜溶液,以取得所要求的电阻率。第二层可用适当尺寸的混凝土块模拟。

(3) 待测接地极的比例模型。

(4) 一台可调压的交流电源,采用 $500\sim 1\,000 \text{ Hz}$ 范围的频率以消除引起电位畸变的电解极化现象。

(5) 一只内阻抗为 $5 \text{ k}\Omega/\text{V}$ 以上的电压表,最好用带零位检测示波器的电位差计。

(6) 一个电流极和一个铜线电位极。

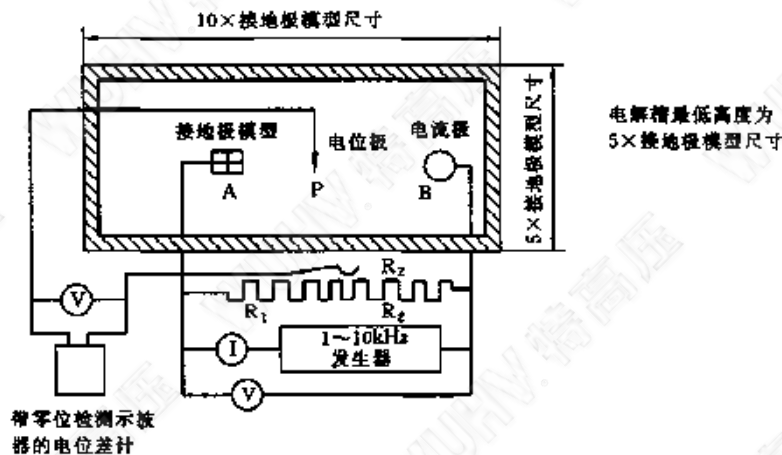


图 13 电解槽

11.4 电阻测量

(1) 将接地极模型和电流极悬挂在 A 和 B 处(AB 应至少为接地极模型尺寸的 $3\sim 4$ 倍)。

(2) 在 A 和 B 间通入小电流 $I(0.1\sim 0.5 \text{ A})$ 。

(3) 在 A 和 B 间放置电位极 P,使 $AP=0.618AB$,测量 AP 间电压 V 。

(4) 接地极模型接地电阻为(附录 C):

$$R_A = V/I \quad \dots\dots\dots (8)$$

11.5 电位测量

将接地极模型作为参考电位(零电位),在电解液面上移动电位极 P,即可测得电解液面上任一点的电位。当使用带零位检测示波器的电位差计时,调节 $R_1(R_1+R_2=R=\text{常数})$,使零位检测器的电流最小。所测得的电位 V_s ,对 R_1/R 以%表示,对 R_1V_P/R 以伏表示。

11.6 测量数据的分析

模型试验的数据应转换为实际的数据。

设下列系数为模型比例系数:

$$\begin{aligned}\mu_L &= L_{\text{real}}/L_{\text{model}} \\ \mu_\rho &= \rho_{\text{real}}/\rho_{\text{model}} \\ \mu_I &= I_{\text{real}}/I_{\text{model}}\end{aligned}$$

式中： μ_L ——长度比例系数；
 μ_ρ ——土壤电阻率比例系数；
 μ_I ——电流比例系数；
 L_{real} ——实际长度；
 L_{model} ——模型长度；
 ρ_{real} ——实际土壤电阻率；
 ρ_{model} ——模型参考层土壤电阻率；
 I_{real} ——实际试验电流；
 I_{model} ——模型试验电流。
则实际的接地电阻为：

$$R_{\text{real}} = R_{\text{model}}\mu_\rho/\mu_L \dots\dots\dots(9)$$

式中： R_{real} ——实际接地电阻；
 R_{model} ——模型接地电阻。
实际的地面电位为：

$$V_{\text{real}} = V_{\text{model}}\mu_I\mu_\rho/\mu_L \dots\dots\dots(10)$$

式中： V_{real} ——实际地面电位；
 V_{model} ——模型地面电位。

12 测量仪器

12.1 比率欧姆表(接地摇表)

测量接地电阻常用的仪表为比率欧姆表,其接线如图 14 所示。

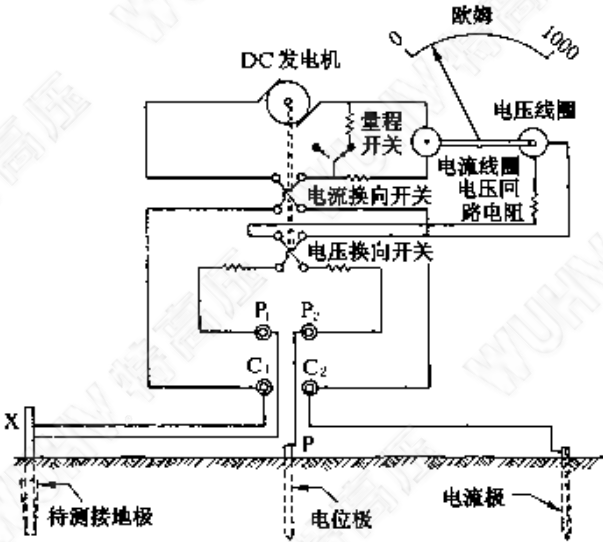


图 14 比率欧姆表

手摇直流发电机送出的电流被电流换向开关周期性反向,在待测接地极 X 和电流极 C 之间的大地中流过。在 X 和电位极 P 之间的电位降被电压换向开关换向。电压换向开关与电流换向开关同轴,因此二者同步动作。表计的线圈在永久磁铁磁场中转动,电流线圈产生的力矩使指针转向零位,而电压线圈产生的力矩使指针转向高位欧姆读数。通过这两个线圈的电流分别对应流过待测接地极的电流和电压

降,因此该仪表的刻度可以欧姆为单位表示。有一个量程开关分流电流,对刻度值进行分档。

将端子 P_1 和 C_1 (以及 P_2 和 C_2) 连在一起,该仪表即成为两端子欧姆表,可用于各种电阻测量。但如图 14 那样,将端子分别接于试验电极则是可取的。对于接地电阻大于 $1\ \Omega$ 的情况,可将端子 P_1 和 C_1 连在一起,通过一条共同的引线接到待测接地极。

仪表中的同步换向开关(电流和电压同时换向)使电压回路对杂散电压变得不灵敏。在大多数情况下,以手摇转速能消除较大的杂散电压效应。但在接地电阻小于 $0.5\ \Omega$ 而杂散电压大于 $10\ V$ 的极端情况下,以手摇转速取得正确读数会有困难。

12.2 双平衡电桥

测量接地电阻的桥式电路如图 15 所示。

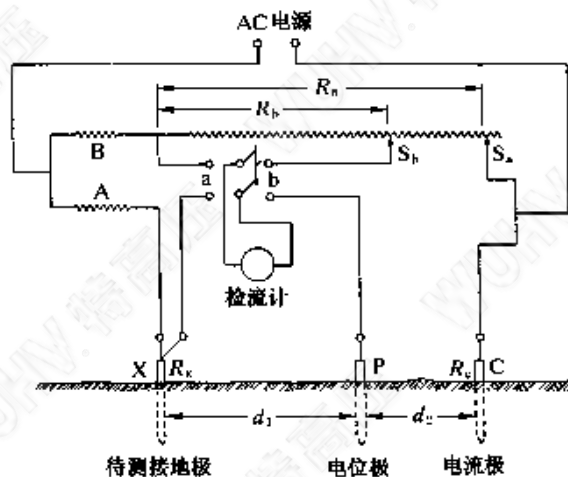


图 15 双平衡电桥

在桥式电路中从交流电源输出的电流流过两条并联回路。下层回路由固定电阻 A 、待测接地极 X 和电流极 C 组成。上层回路由固定电阻 B 和可滑线变阻器组成,在变阻器上有两个滑触头 S_a 和 S_b 与其接触。当检流计开关向左闭合时,调整滑触头 S_a ,使检流计指示为 0 。此时两条回路的电流反比于电阻 A 和电阻 B 。然后将检流计开关向右闭合,调整滑触头 S_b ,使检流计指示为 0 。此时 X 和 P 之间的电位降等于滑线变阻器 R_b 部分的电位降,待测接地极的电阻 R_x 即为:

$$R_x = R_b \frac{A}{B}$$

S_b 的滑动刻度可直接以 R_x 表示。

在测试高阻土壤时,交流电源可以是由干电池驱动的振子电源,而检流计可以是电话听筒或固态检测器。蜂鸣器的声音即使在交流杂散电流引起较大背景噪声时也能辨别出和平衡掉。 P 处电阻的作用仅仅是降低检流计的灵敏度。 C 处电阻过大可能限制所测电阻的量程。电极 P 和电极 C 的位置应按 8.2.1.5 条电位降法的原则确定。

12.3 单平衡变压器

用单平衡法进行桥式测量的原理如图 16 所示。

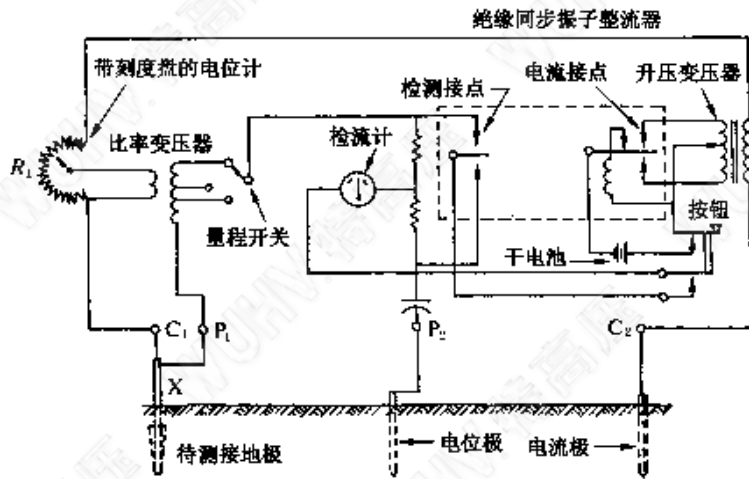


图 16 单平衡变压器

本仪器内有一个由干电池驱动的振子，该振子有两对接点。第一对接点用于变换变压器一次电流的方向，该变压器的输出电流流过电流极和待测接地极。第二对接点使平衡检流计显示方向，以指示滑线电阻刻度盘的值是大还是小。

调整滑线电阻的触头，使触头与电位极 P 等电位，检流计指示为零，此时滑线电阻 R_1 的一段电阻与待测接地极电阻有一定的比例关系。该滑线电阻可与扩程器配合以欧姆作刻度，扩程器由比率变压器的抽头构成，由量程开关选择抽头。由于在平衡时电位极回路的电流可忽略不计，电位极的电阻不会影响测量准确度，但对检流计的灵敏度会有影响。

该仪表对杂散电流不灵敏，仅在 12.1 条所述的极端情况下会有测量困难。

注：上述三种测量仪器常配备一种名叫防护端子的第五端子。如果试验电极的接地电阻较高，通过仪器的泄漏电流会使灵敏检流计产生微小的偏移，从而引起错误的读数。该防护端子可将这些泄漏电流旁路入地，以消除这种误差。

12.4 带电流表和高阻电压表的电源

任何一种测量接地电阻的方法对电流表都没有特殊要求。当没有杂散电压时，对电压表的要求仅仅是其阻抗应比电位极及试验引线的电阻要高。当测量流入待测接地极的电流所引起的电压时，必须考虑电位极的阻抗。显然，当使用高阻电压表时，产生的误差较小，而使用电子电压表时，误差可忽略不计。

当测到待测接地极中有杂散电流，且其所产生的电压与测试电流所引起的电压相较是大的时候，则在通入测试电流前，应在幅值和相位两方面将该杂散电压平衡掉。因为所平衡的杂散电压频率只能有一个，用于测量的电压表应为选频式电压表。通常在测量阻抗低于 0.5Ω 的大型接地系统时，才需要这种选频式电压表。

图 17 为用选频式电压表-电流表时的简化测量接线图。

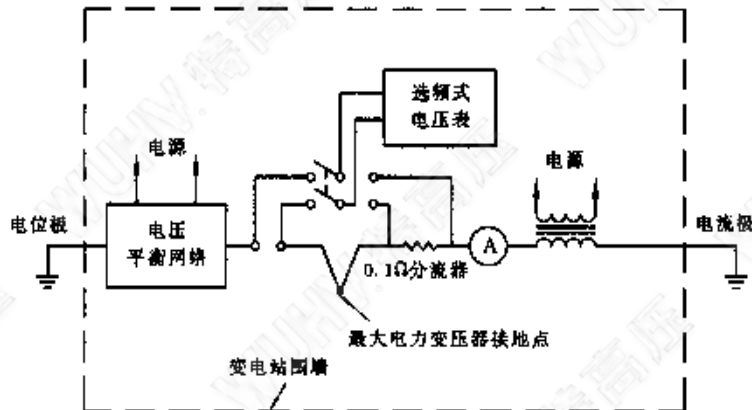


图 17 选频式电压表-电流表测量电路

通过测取 $0.1\ \Omega$ 分流器的电压降以测量测试电流,在用电压表测量电位极和待测接地极之间的电压时,则用一电流表监测此电流。这种方法是比率测量的一种方式,如此可将误差限制为仪表的刻度误差和分流器、扩程器的比率误差。

12.5 感应极化装置

这种仪器广泛应用于地电测量。这是一种很适合于土壤电阻率和地电阻测量的高灵敏度、带特殊测量电路和电源的四端型仪器。

该仪器由发送器和接收器两部分组成,如图 18 所示。

发送器和接收器(电压和电流)是彻底去耦的,这样对消除试验引线间的耦合有很大作用。

12.5.1 发送器

接收器测量回路的通断由发送器发出的电流脉冲触发控制,因而发送器和接收器间不需直接的电缆连接。发送器通过两个电极将直流大电流通入土壤,然后突然将该电流断开(通常可调的脉冲宽度相当于电流通断周期为 2 s 、 4 s 、 8 s)。

12.5.2 接收器

新式的接收器是高灵敏度集成电路测量器件,这可减少这种限时感应极化装置的重量和功率消耗,接收器的主要设计特点为:

- (1)能自动自我电位补偿;
- (2)配有抑制交流噪声的远方(大地)触发特殊滤波器;
- (3)具有抑制随机噪声的曲线形状鉴别和自动积分求和功能。

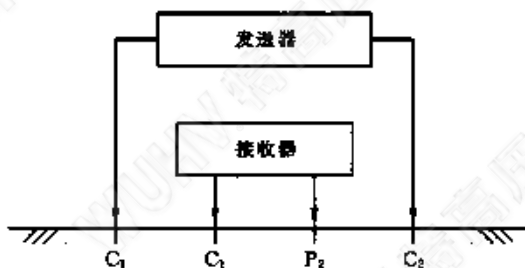


图 18 感应极化装置

12.5.3 主要优点

该装置便于现场人员沿测量路线操作接收器,必要时可用一台发送器配多台接收器,从而大大提高测量效率。由于该装置的抑制固有噪声能力强,可在紧靠诸如电力线路的寄生电噪声源处测量。在不增加功率消耗情况下,还可有效地测量更深土壤层。该装置还可完全消除引线间的耦合。最后,该装置重量轻,功率消耗小,便于大范围内移动和多种方式使用。

12.6 高频土壤电阻仪

这种新式的仪器用于在带电情况下(导线绝缘或不绝缘)测量输电线路铁塔(无专用接地极)的接地电阻。

由于测量时不靠近带电导线,可避免电击危险,测量原理见图 19。

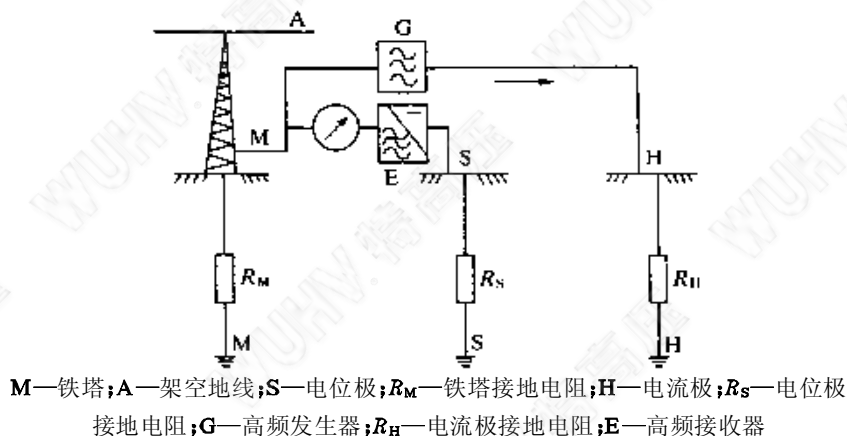


图 19 高频土壤电阻仪

高频土壤电阻仪是全晶体管式,电源用镍镉电池。高频发生器是 25 kHz 自激式功率振荡器。回路电流 i 流过电流极 H 和铁塔接地极 M。高频接收器 E 将所测电压与一参考内电压比较。

应注意该仪器是运用电位降法原理(带电导线的效应通过采用高频和补偿电路而消除)。因此,为取得可靠的数据,各电极间应保持足够间距。

13 有关测量的其他事项

土壤电阻率和接地电阻的测量是耗费体力的工作,在测量时如果测试设备不良更是如此。为了取得可靠数据,应选用高质量的测试仪器。同时,在许多情况下,为了打入接地棒、测量距离和卷绕试验引线,还需要特制的辅助设备。

13.1 试验电极的选择

最常用的电极是接地棒。由于在用榔头将铝棒打入硬土时,铝棒易于损坏,因此应选用钢接地棒而不用轻质铝棒。不应使用螺纹杆,因为螺纹杆会卷起泥土,在螺纹杆的螺纹面上形成空气层,从而引起高接触电阻。被打入的接地棒能挤实四周的土壤,使接触电阻变小。

电流极的电阻与电源串联,因此是影响测试电流的一个因素。如果该电流过小,则要打入另外的接地棒以降低电流极的电阻。在多岩石的土壤,宜将接地棒按与铅垂方向成一定角度斜行打入。倾斜的接地棒可躲开石头的顶部。

测量电位差用仪器的内阻应大于电位极的电阻,否则要打入另外的接地棒,以降低电位极的电阻。

13.2 试验引线的选择

由于在测量时,必须多次卷绕试验引线,因此应选用挠性引线。在确定试验引线的长度时,要考虑到现场的温度。引线的绝缘应不因低温而冻硬或破裂。试验引线的阻抗应较低,在测试低阻抗接地网时更应如此。

13.3 辅助设备的选择

下列设备有利于测量和缩短测量时间。

13.3.1 手锤

对于一般的土壤,为将接地棒打入 2~3 m 深,可用 2~4 kg 重的手锤。为避免接地棒过度抖动,手锤应沿接地棒轴向施力。

一种用于防止抖动的手锤由可卸夹头和滑锤二部分组成,如图 20 所示。

这种手锤的优点是,在不用辅助平台的条件下,工作人员就可在便于作业的高度上工作。同时打击接地棒的着力点距地面较近。

当遇上硬土或冻土,不可能用人力打入接地棒时,则要用机动锤。机动锤可用电动、气动或汽油机驱动。

13.3.2 距离测量

当距离不长时,用卷尺或测链测距较方便。当距离较长时,用里程表测距较实用且省时间。距离更长时,可查阅该地区的标有比例尺的地图。

13.3.3 线轴和小车

如果配上合适的小车,则将测试设备从一地搬到另一地和卷绕试验引线均可变得容易。

为了易于操作,小车应做得轻巧和紧凑。图 21 所示为一种配备四个线轴的轻便小车结构。线轴有弹簧储能机构,可自动卷绕试验引线,测试仪器置于小车上部,蓄电池、手锤、线夹以及其他手工工具置于小车下部。

13.4 测试注意事项

测试中最常出现的问题均由土壤中的杂散电流和两试验引线间的耦合所引起。

土壤的导电实际上是电解导电,因此在试验电极上会产生反电压。消除电解效应的简易方法是采用交流测试电流。如果该交流电流是工频,则电解作用不会完全消失,而交流工频杂散电流可能还会影响测试数据。在更高的频率时,电解作用可忽略不计,但试验引线的自阻抗和互阻抗增加,又会引出新的误差。此外,在进行接地阻抗测试时,高频的电抗分量值将与工频的电抗分量值不同。通常采用 80 Hz 数量级频率的折中办法是可取的。

如果使用直流电流,则电感和互阻抗的效应可消失,但电解作用则很强。这问题可通过周期性地反转直流电流的极性来解决。此时,电感和互阻抗的效应仅在暂态过程时比较明显,如果各个回路的时间常数足够低,这个效应可忽略不计。在电流换向时使电路完全断开的周期性换向直流电流,是进行接地电阻或土壤电阻率测量的最佳电源,但对于接地阻抗测量则并非如此。

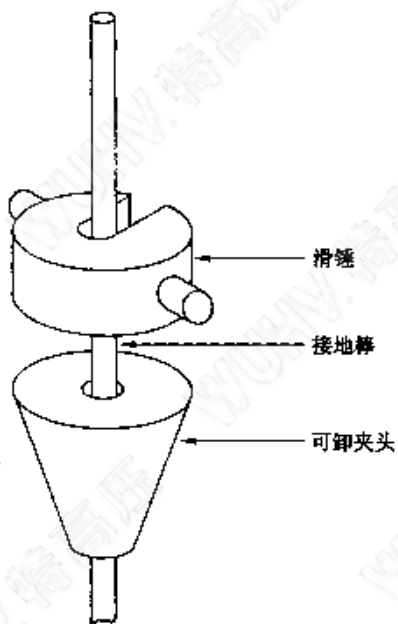


图 20 可卸夹头和滑锤

13.5 大型变电站的测量

如果待测接地极和试验电极之间的间距足够大,则用电位降法可得到满意的测试数据。对于大型变电站,用几盘试验引线可能不能达到足够的间距。此时可将一条出线断电,将测试电流通过该线路输入远方电流极。如果知道电话电缆的屏蔽因数,则在某些情况下,可用电话电缆作为电位引线使用。

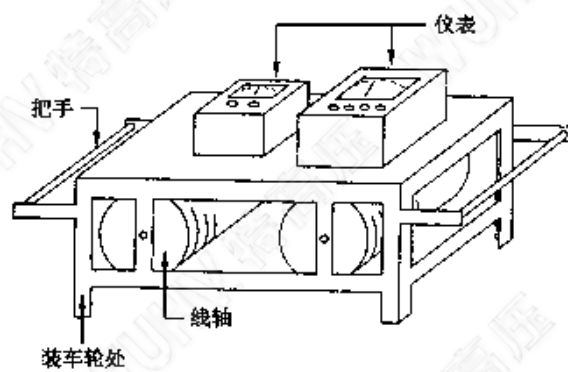


图 21 测试小车

附录 A

(提示的附录)

非同质土壤的地电参数

A1 两层土壤的视在土壤电阻率

两层土壤模型可用下列参数表示(图 A1):

上层土壤高度 h

上层土壤电阻率 ρ_1

下层土壤电阻率 ρ_2

K 为反射系数

$$K = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad \dots\dots\dots (A1)$$

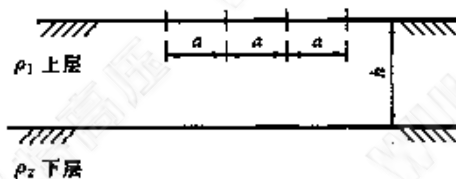


图 A1 两层土壤

用温纳(Wenner)法测定土壤电阻率(7.2条),可得出作为电极间距 a 函数的视在土壤电阻率。按照上述参数,视在土壤电阻率如下式所示。

$$\rho(a) = \rho_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2n \frac{h}{a} \right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2n \frac{h}{a} \right)^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (A2)$$

A2 按指数函数变化的视在土壤电阻率

按指数函数变化电阻率的土壤可用下列参数表示:

表层土壤电阻率 ρ_1

深层土壤电阻率 ρ_2

常数 λ

用温纳(Wenner)法测定土壤电阻率(7.2条),可得出如下式所示的作为电极间距 a 函数的视在土壤电阻率:

$$\rho(a) = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)e^{-\lambda a}(2 - e^{-\lambda a}) \quad \dots\dots\dots (A3)$$

A3 两层土壤中接地棒的接地电阻

埋在两层土壤中上层土壤内的埋深为 l 、半径为 r 的接地棒的接地电阻为:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \frac{2nh + l}{2nh - l} \quad \dots\dots\dots (A4)$$

其中 K 为反射系数,见式 A1。

注

1 由于 $0 \leq K \leq 1, h \geq l$, 因此仅仅无限级数的为首几项有效。

2 $K=0$ 相当于同质土壤,公式简化为:

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r} \quad \text{.....(A5)}$$

如果在某一现场测量接地棒各种埋地深度 $l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ (至少应有三种深度) 的接地电阻 $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, 通过解联立方程 A4, 可得出未知数 ρ_1, K 和 h 。

当进行三次以上的测量时, 可能会得到不合理或矛盾的数据。这表明不是测量不够准确就是所假定的同质土壤或两层土壤与实际不符。此时应采用四点法或温纳(Wenner)法, 取多个电极间距, 通过查对视在土壤电阻率曲线解释测试数据(7.2条)。

附 录 B

(提示的附录)

两层土壤模型参数的确定

本附录旨在使测量人员从所测得的土壤电阻率数据, 得到符合该土壤电阻率数据的土壤模型。本附录仅适用于两层土壤构造(图 A1)。

设 ρ^0 为四点法或温纳(Wenner)法所测得的视在土壤电阻率, ρ 为两层土壤构造的计算土壤电阻率。 ρ^0 和 ρ 均是电极间距的函数。 ρ 由式 A2 得出。

设 $\psi(\rho, K, h)$ 为误差函数, 则:

$$\psi(\rho_1, K, h) = \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^0 - \rho_m}{\rho_m^0} \right]^2 \quad \text{.....(B1)}$$

式中: N ——以电极间距 a 为参数所测土壤电阻率的总数。

为得到最佳的配合, ψ 必须最小。为确定使 ψ 最小的 ρ, K, h 值, 使用陡降法。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial \rho_1} &= -2 \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^0 - \rho}{\rho_m^0} \right] \frac{\partial \rho}{\partial \rho_1} \\ \frac{\partial \psi}{\partial \rho_2} &= -2 \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^0 - \rho}{\rho_m^0} \right] \frac{\partial \rho}{\partial \rho_2} \\ \frac{\partial \psi}{\partial h} &= -2 \sum_{m=1}^N \left[\frac{\rho_m^0 - \rho}{\rho_m^0} \right] \frac{\partial \rho}{\partial h} \quad \text{.....(B2)} \end{aligned}$$

及

$$\Delta \psi = \frac{\partial \psi}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1 + \frac{\partial \psi}{\partial \rho_2} \Delta \rho_2 + \frac{\partial \psi}{\partial h} \Delta h \quad \text{.....(B3)}$$

为使函数的计算收敛以取得所需的解, $\Delta \rho_1, \Delta \rho_2, \Delta h$ 应为:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_1 &= -\tau \frac{\partial \psi}{\partial \rho_1} \\ \Delta \rho_2 &= -\sigma \frac{\partial \psi}{\partial \rho_2} \\ \Delta h &= -\gamma \frac{\partial \psi}{\partial h} \quad \text{.....(B4)} \end{aligned}$$

τ, σ, γ 应为正值并足够小, 使所得的解具有所需的准确度。一般情况如 τ, σ, γ 的值能得出下列的解即可满意:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_1 &= -0.005 |\rho_1| \left(\frac{\partial \psi}{\partial \rho_1} \right) / \frac{\partial \psi}{\partial \rho_1} \\ \Delta \rho_2 &= -0.005 |\rho_2| \left(\frac{\partial \psi}{\partial \rho_2} \right) / \frac{\partial \psi}{\partial \rho_2} \\ \Delta h &= -0.005 |h| \left(\frac{\partial \psi}{\partial h} \right) / \frac{\partial \psi}{\partial h} \quad \text{.....(B5)} \end{aligned}$$

将式 B4 代入式 B3, 可得下式:

$$\Delta\psi = -\tau\left(\frac{\partial\psi}{\partial\rho_1}\right)^2 - \sigma\left(\frac{\partial\psi}{\partial\rho_2}\right)^2 - \gamma\left(\frac{\partial\psi}{\partial h}\right)^2 \quad \text{.....(B6)}$$

用式 A2 计算 ρ , 并设起始值为 $\rho_1^{(1)}$ 、 $\rho_2^{(1)}$ 、 $h^{(1)}$, 然后用式 B6 计算 $\Delta\psi$ 。如果 $|\Delta\psi| > \epsilon$, (ϵ 为所需准确度), 则再继续重复计算。

当重复计算到 k 次时, 得出 $\rho_1^{(k)}$ 、 $\rho_2^{(k)}$ 、 $h^{(k)}$ 如式 B7。

$$\begin{aligned} \rho_1^{(k)} &= \rho_1^{(k-1)} + \Delta\rho_1 \\ \rho_2^{(k)} &= \rho_2^{(k-1)} + \Delta\rho_2 \\ h^{(k)} &= h^{(k-1)} + \Delta h \end{aligned} \quad \text{.....(B7)}$$

当式 B6 中的 $\Delta\psi$ 为 $|\Delta\psi| \leq \epsilon$ 时 (式中 ϵ 为所需准确度), 停止计算。

按式 B5 计算 $\Delta\rho_1$ 、 $\Delta\rho_2$ 、 Δh , 为此要从式 B2 算出 $\frac{\partial\psi}{\partial\rho_1}$ 、 $\frac{\partial\psi}{\partial\rho_2}$ 、 $\frac{\partial\psi}{\partial h}$ 。式 B2 中的 $\frac{\partial\rho}{\partial\rho_1}$ 、 $\frac{\partial\rho}{\partial\rho_2}$ 、 $\frac{\partial\rho}{\partial h}$ 需从式 A2 导出的下式算出。

$$\begin{aligned} \frac{\partial\rho}{\partial\rho_1} &= 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 - \frac{n(1-K^2)}{2K} \right) \left(\frac{K^*}{\sqrt{A}} - \frac{K^*}{\sqrt{B}} \right) \right] \\ \frac{\partial\rho}{\partial\rho_2} &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2n}{K} (1-K^2) \left(\frac{K^*}{\sqrt{A}} - \frac{K^*}{\sqrt{B}} \right) \right] \\ \frac{\partial\rho}{\partial h} &= \frac{16\rho_1 h}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^*}{\sqrt{B^3}} - \frac{K^*}{\sqrt{A^3}} \right] \end{aligned} \quad \text{.....(B8)}$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= 1 + (2nh/a)^2 \\ B &= 4 + (2nh/a)^2 \end{aligned} \quad \text{.....(B9)}$$

ρ_1 、 ρ_2 、 h 为按式 B7 第 K 次算出的值。

本附录所提出的计算方法, 是确定两层土壤构造计算机程序的基础, 这种方法所得结果能与现场测试数据很好吻合。本导则正文图 5 是用本程序所算得的结果。

附 录 C

(提示的附录)

电位降法的原理

C1 基本定义和符号

(1) 如一个接地极 **E** 没有电流入地, 且与其他导电电极相距很远, 则该接地极的电位 P_E^E (GPR) 为零 (即远方地电位)。

(2) 如果有电流 I 通过该接地极入地, 该接地极电位升高到 $P_E^E = R_E I$, R_E 为接地极阻抗。如 $I = 1 \text{ A}$, 则 $P_E^E = V_E^E = R_E \cdot 1 = R_E$ 。

因此在本附录中, V_E^E 表示当 1 A 电流通过接地极 **E** 入地后的电位升高。 V_E^E 在数值上等于以欧姆表示的接地极阻抗。

(3) 假定在距接地极 **E** 一定距离处, 有电流极 **G** 注入电流 I 入地 (**E** 不传导任何电流)。由于地电位的升高, 原为零电位的接地极 **E** 将升为电位 P_E^G (这种现象称为电阻耦合)。如果 $I = 1 \text{ A}$, 则 $P_E^G = V_E^G$ (在数值上等于 **E** 和 **G** 之间的互阻)。

(4) 如果在电流极 **G** 通过 1 A 的同时, 接地极 **E** 也通过 1 A , 则接地极 **E** 的电位升将为 $V_E^E + V_E^G$ 。

计算 V_E^E 或 V_E^G 的理论公式较复杂,除较简单的土壤构造和电极形状外,本附录将不涉及。

C2 基本公式的推导

电位降法示于图 C1。

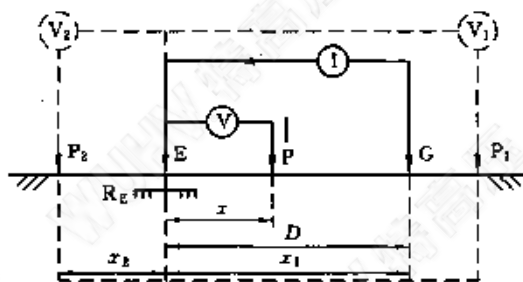


图 C1 电位降法

电位极 P 通过的电流 i 与电流 I 相较可忽略不计。在给定的时间 t 内,假定通过接地极 E 入地的电流 I 为正,而通过电流极 G 回流的电流为负。

按照上述定义和符号,得出下列公式:

$$U_P = V_P^E \cdot (I') + V_P^G \cdot (-I') \quad \text{.....(C1)}$$

$$U_E = V_E^E \cdot (I') + V_E^G \cdot (-I') \quad \text{.....(C2)}$$

式中: $I' = IA/1A$

U_P ——电位极 P 的电位或 GPR (相对于远方地电位);

U_E ——接地极 E 的电位或 GPR (相对于远方地电位)。

用电位降法测得的电压 V 为:

$$V = U_E - U_P$$

$$V = I' (V_E^E - V_E^G - V_P^E + V_P^G) \quad \text{.....(C3)}$$

V_E^E 为接地极 E 通过 $1A$ 电流所引起的电位升高,其值等于接地极 E 的阻抗 R_E ,因此,式 $C3$ 可改写为:

$$R = \frac{V}{I} = R_E + (V_P^G - V_E^G - V_P^E)/1A \quad \text{.....(C4)}$$

V_P^G 和 V_P^E 是各电极(E 、 G 、 P)间距、电极形状和土壤特性的函数。

C3 同质土壤

现按图 C1 所示的等值系统确定下列函数 η 、 ϕ 及 ψ (假设 η 、 ϕ 、 ψ 仅为距离 D 、 x 的函数):

$$V_E^G = \eta(D) \quad \text{.....(C5)}$$

$$V_P^G = \phi(D - x) \quad \text{.....(C6)}$$

$$V_P^E = \psi(x) \quad \text{.....(C7)}$$

按照式 $C4$,所测阻抗 $R = V/I$ 在下述条件下将等于实际阻抗 R_E ,即:

$$V_P^G - V_E^G - V_P^E = 0, \text{ 或}$$

$$\phi(D - x) - \eta(D) - \psi(x) = 0 \quad \text{.....(C8)}$$

C4 相同电极和大间距

如果接地极 E 和电流极 G 所引起的电位极电位相等,即 $\phi = \psi$,且 D 足够大,致 $V_E^G = \eta(D) \approx 0$,则式

$C8$ 简化为:

$$\phi(D - x) - \psi(x) = 0$$

从而 $x_0 = D/2$

即电位极 **P** 应置于接地极 **E** 和电流极 **G** 的中间位置。

C5 半圆式电极

如果接地极 **E** 和电流极 **G** 是半圆形,且其半径与 x 和 D 相较甚小,土壤又是同质的,则电位函数 ϕ, η, ψ 反比于半圆中心间的距离。如果坐标轴的原点位于半圆 **E** 的中心,则式 C8 简化为:

$$1/(D-x) - 1/D - 1/x = 0 \quad \dots\dots\dots (C9)$$

式 C9 的实根正好是电位极的位置 x_0 :

$$x_0 = 0.618D$$

这就是通常所说的 61.8% 规则。如果电位极 **P** 位于 P_2 (**E** 侧,图 C1),则式 C9 中的 $D-x$ 应改为 $D+x$ 。此时方程式仅有复数根。如果 **P** 位于 P_1 (**G** 侧,图 C1),则式 C9 中的 $D-x$ 应改为 $x-D$,式 C9 的实根为:

$$x_0 = 1.618D$$

C6 一般情况

如果土壤是非同质的,或接地极 **E**、电流极 **G** 为复杂形状,则函数 ϕ, η, ψ 难于计算,此时要用计算机计算。