



高等学校教材

# 电力系统接地技术

武汉水利电力学院 解广润 编



## 内 容 提 要

本书以电磁场理论为基础,结合电算和模拟实验介绍了均匀和不均匀土壤中接地电阻、跨步电势和接触电势的各种计算方法及工程实用公式,讨论了冲击接地问题、大地回流对直流和工频接地计算的影响问题以及接地电极的发热和腐蚀问题,对接地设计的安全问题以及接地工程中的测量方法也作了介绍。此外还阐述了用边界元法进行接地计算的原理,给出了计算程序。

本书系高等学校高电压技术及设备专业的选修课教材,也可供其它电力专业学生和研究生以及电力系统工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统接地技术/解广润编.-北京:中国电力出版社,1996.11 (1999重印)

高等学校教材

ISBN 7-80125-792-8

I.电… II.解… III.电力系统-接地系统-高等学校-教材 IV.TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第04262号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码 100044)

冶金印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

1991年5月第一版 1999年10月北京第三次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.75印张 352千字

印数 5301—8350册 定价 15.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

## 前 言

电力系统接地技术对电力系统的安全运行有着重要的影响，近年来发生过一系列由于接地不良而引起的重大事故。因此，电力系统接地技术是电工学术活动中十分活跃的一个分支，而且电子计算机的应用以及模拟技术的改进，也促进了接地技术研究的深入。

本书是高电压技术及设备专业的选修课教材。编者既力图使学生掌握接地技术的基本理论与概念，学会使用电子计算机及模拟实验方法解决接地问题的技巧；又力图结合工程实际问题的处理，使学生有分析与解决接地工程问题的能力，并对有关规程有一定了解。

本书在内容上力求反映近30年来国内外在接地技术上的进展，其中包括武汉水利电力学院接地教研组在多层土壤接地、直流接地、冲击接地及接地测量等方面的研究成果。在编写中除了参考国内外有关论文和规程外，第一、二、四章和十章是由陈慈萱教授编写的。

唐兴祚教授主审了本书，并提出了许多宝贵的意见，编者表示衷心的感谢。

欢迎读者批评指正。

编 者

1989年6月

# 目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 均匀土壤中的直流和工频接地电极	3
第一节 接地电阻和地中电位分布	3
第二节 几种简单几何形状的接地电极的接地电阻计算	4
一、圆棒形电极 二、圆环形电极 三、圆盘形电极	
第三节 直流接地电极和输电线路杆塔接地电极的接地电阻计算	12
一、各种水平接地电极 二、具有多根接地棒的垂直接地电极 三、水平接地体和垂直接地体组合的电极	
四、扁钢和角钢的等值半径 五、输电线路杆塔的典型接地装置	
第四节 发、变电站网状接地电极的接地电阻计算	21
一、发、变电站地网接地电阻的估算 二、垂直接地体对地网接地电阻的影响 三、用内插法计算地网的接地电阻	
第二章 不均匀土壤中的直流和工频接地电极	27
第一节 土壤在垂直于地面的方向分层时的电流场	27
一、用镜像法求双层土壤时的电流场 二、用拉普拉斯方程求双层土壤时的电流场 三、用拉普拉斯方程求多层土壤时的电流场	
第二节 双层土壤中的接地电极	36
一、双层土壤中的半球形接地电极 二、双层土壤中的圆环形接地电极 三、双层土壤中的垂直接地电极(镜像法) 四、双层土壤中的垂直接地电极(拉普拉斯方程法) 五、双层土壤中的水平接地电极	
第三节 双层土壤中接地电阻的实用计算公式	46
一、双层土壤中地网接地电阻的简化公式 二、双层土壤中水平接地电极的接地电阻简化公式	
第四节 土壤在水平方向不均匀时的接地电阻计算	52
一、水平方向有两种土壤时的垂直接地电极 二、水平方向不均匀的土壤中的地网 三、岸边接地电极	
第三章 冲击接地电阻	57
第一节 集中接地体的冲击接地电阻	57
第二节 伸长接地体的冲击接地电阻	61
第三节 发、变电站网格式地网的冲击接地电阻	76
第四章 大地回流	95
第一节 直流以大地为回路时的地中电流分布	95
一、大地为均匀土壤时 二、大地为不均匀土壤时	
第二节 交流以大地为回路时的地中电流分布	100
一、地中电流密度的计算 二、工频地中电流的特点	
第三节 交流以大地为回路时的线路阻抗	105
一、以大地为回路的单根导线的自感阻抗 二、考虑大地影响时两平行导线间的互感阻抗 三、三相输电线的零序阻抗 四、三相输电线中性线的零序阻抗	

第四节	交流以大地为回路时架空地线的分流作用 .....	110
一、	网内短路时的分流系数 $K_{r1}$ 二、网外短路时的分流系数 $K_{r2}$	
第五节	考虑大地回流影响时的接地电阻计算 .....	116
一、	计及深层回流作用时的直流感地电阻  二、计及工频回流作用时的工频接地电阻	
第五章	接地电极附近的大地表面电位分布 .....	118
第一节	跨步电势和接触电势 .....	118
第二节	几种简单几何形状的接地电极的跨步电势和接触电势计算 .....	119
一、	垂直接地电极的跨步电势和接触电势  二、圆环形接地电极的跨步电势和接触电势  三、圆盘形接地电极的跨步电势和接触电势  四、直线形水平接地电极的跨步电势和接触电势  五、放射形接地电极的跨步电势和接触电势	
第三节	网状接地电极的地表电位分布 .....	125
一、	方形地网的最大跨步电势计算公式  二、矩形地网的最大跨步电势  三、地网的最大接触电势	
第四节	作用在人体上的实际电压——跨步电压和接触电压 .....	133
第六章	接地装置的发热 .....	136
第一节	半球形电极时土壤的发热计算 .....	136
一、	电流长期经半球形电极流散时土壤的温升  二、电流短期经半球形电极流散时土壤的温升  三、土壤发热的过渡过程	
第二节	任意形状电极时土壤的发热计算 .....	139
第三节	直流感地电极的发热 .....	142
第四节	交流地网的热稳定 .....	145
第五节	接地线的截面选择 .....	149
第七章	接地电极的腐蚀及环境保护 .....	150
第一节	直流电流流经接地电极时的电化学反应 .....	150
第二节	直流感地电极的防腐 .....	151
一、	电极材料的选择  二、电极的防腐措施  三、电极的形状和结构	
第三节	交流接地网的腐蚀及其防护 .....	156
第四节	直流感地电流对金属管道的腐蚀及其防护 .....	158
第五节	其它环境保护 .....	161
一、	对交流系统的影响  二、对水中生物的影响  三、对船上磁罗盘的干扰	
第八章	接地电阻的测量 .....	164
第一节	接地电阻测量的基本原理 .....	164
一、	电压极和电流极成直线布置的情况  二、电压极和电流极按一定夹角布置的情况  三、电压极和电流极的互易性	
第二节	发、变电站地网的接地电阻测量 .....	169
一、	远离法在发、变电站地网接地电阻测量中的应用  二、补偿法在发、变电站地网接地电阻测量中的应用  三、地网中心位置不定时的接地电阻测量	
第三节	接地电阻测量中的干扰问题 .....	176
一、	工频干扰的消除  二、电压极和电流极引线间互感电势的消除  三、白噪声法	
第四节	常用的接地电阻测量仪器 .....	180
一、	流比计型接地电阻测量仪  二、电桥型接地电阻测量仪  三、电位计型接地电阻测量仪	
第九章	土壤电阻率及其测量 .....	185

第一节 土壤均匀情况下电阻率的测量 .....	186
一、三极法 二、四极法	
第二节 土壤不均匀情况下电阻率的测量 .....	189
一、大地具有两层结构时的视电阻率 二、土壤参数的确定 三、大地在水平方向有两种土壤时的视电阻率	
第三节 影响土壤电阻率的因素 .....	202
第四节 人工改善土壤电阻率的方法 .....	203
第十章 接地计算的数值分析及模拟实验 .....	206
第一节 边界元法 .....	206
一、用矩量法或加权余数法求解积分方程 二、加权余数法在接地计算的电流场中的应用 三、脉冲基函数下的电位计算系数 四、三角形基函数下的电位计算系数	
第二节 用边界元法进行接地计算的实例 .....	215
第三节 模拟实验技术 .....	220
第十一章 接地安全设计 .....	226
第一节 人体的安全电流和安全电压 .....	226
一、人体的安全电流 二、人体的电门 三、安全电压 四、人体允许的跨步电势和接触电势	
第二节 对接地电阻的要求 .....	230
一、对发、变电站地网接地电阻的要求 二、对线路杆塔接地电阻的要求 三、对直流接地电极接地电阻的要求	
第三节 地网的工频电位升高问题 .....	233
一、对向站外供电的三相四线制低压线路的隔离 二、对和站外相连的通讯线路的隔离 三、对铁路轨道和金属管道的隔离 四、阀式避雷器的反击过电压 五、站内短路所形成的流动波过电压	
第四节 安全设计的概率统计法 .....	236
一、人体所能耐受的电势的概率分布函数 二、人身安全事故概率	
第五节 低压系统的接零与接地保护 .....	240
一、接地保护 二、接零保护 三、重复接地	

## 绪 论

在电力系统中为了工作和安全的需要，常需将电力系统及其电气设备的某些部分与大地相连接，这就是接地。

例如为了降低电力设备的绝缘水平，我国在110kV及以上的电力系统中多采用中性点接地的运行方式，在两线一地的双极高压直流输电中也需将其中性点接地，这种接地称为工作接地。在交流系统中，正常情况下流过工作接地电极的电流是不大的不平衡电流，只是在系统发生接地故障时才会流过高达数十千安的短路电流，但持续时间不长（一般在0.5s左右），而直流系统在单极运行时，会有数以千安计的工作电流长期流过接地电极。

为了避免雷电的危害，避雷针、避雷线和避雷器等防雷设备都必须配以相应的接地装置以便把雷电流导入大地，这种接地称为防雷接地。流过防雷接地体的是时间很短（一般为数十微秒）的雷电流，其值有时可达数十至数百千安。

为了保证人身的安全，电气设备的外壳必须接地，这种接地称为保护接地。当电气设备绝缘损坏而使外壳带电时，流过保护接地体的故障电流应使相应的保护装置动作，切除已损坏的设备，或使外壳的电位在安全值以下，从而避免因电气设备外壳带电而造成的触电事故。

任何接地电极都存在有接地电阻。接地电阻是电流  $I$  经接地电极流入大地时，接地电极的电位  $V$  对  $I$  的比值，它主要是大地所呈现的电阻。接地电阻的大小除和大地的结构、土壤的电阻率有关外，还和接地体的几何尺寸和形状有关，在雷电冲击电流流过时还和流经接地体的冲击电流的幅值和波形有关。

由于接地电阻的存在，当有电流通过接地体时，将使接地电极及其周围的土壤发热；电流在接地电阻上的压降将引起接地电极电位的升高，可能使设备受到这一过电压（反击过电压）的作用而损坏；电流离开接地体在地中扩散时，在地面上出现的电位梯度会使人体遭受接触电势和跨步电势的作用。为此对接地电阻的值必须加以控制。

通常110kV及以上交流系统的工作接地电阻值  $R$  以保证短路电流  $I$  在接地体上的压降不超过2000V为原则，即  $R \leq \frac{2000}{I}$ ；但当  $I > 4000\text{A}$  时，可取  $R \leq 0.5\Omega$ 。高压直流输电系统由于可能需要长期通过较大的工作电流，此时发热问题相当严重，其工作接地电阻一般要求比交流系统低。

保护接地的接地电阻以保证故障电流能使相应的保护装置动作或使外壳的电位在安全值以下为原则，当接地电阻过大不能满足该要求时应采用保护接零及重复接地的方式。

防雷接地电阻一般取4~30Ω。

接地电阻的计算、跨步电势和接触电势的计算、土壤发热的计算以及电极防腐的措施是接地设计的关键。

在进行接地计算时必须知道接地体散流所涉及的范围内的土壤电阻率。当地网尺寸很大,散流所涉及的范围较大时,必须考虑深层土壤的作用。土壤电阻率及其分层情况要通过实际测量得出。

接地计算还和电流的频率以及电流在地中的流散方式有着密切的关系。

进行接地计算除了需要电流场的基础外,还需要有波过程和电磁场的基础。由于计算的复杂,除了某些简单几何形状的电极的接地计算可以用解析法求解外,在地网形状复杂或大地结构复杂时,很难得出解析解。计算机数值分析给复杂条件下的接地计算创造了条件。然而为方便起见,工程实际中往往希望有较为简单的计算公式,因此根据计算机数值计算的大量结果拟合出各种复杂条件下的接地计算的实用公式是一个值得进行的工作。

接地电阻的实际值需要在地网敷设完毕后通过实测得出。在进行接地电阻测量时,测量用电流极和电压极的位置及其引线的布置方式将直接影响到测量的正确性;在测量时如何消除各种干扰带来的误差也是一个需要重视的问题。

近年来,随着电力系统的发展,故障时经地网流散的电流愈来愈大,故障时地网的电位也随之升高,由于接地措施的缺陷而造成的事故也屡有发生,接地问题已得到人们的普遍重视。编者在这方面进行了大量的工作,其中一些成果编在本书中,希望本书能对接地技术的发展和研究起到一些促进作用。



# 第一章 均匀土壤中的直流 和工频接地电极

## 第一节 接地电阻和地中电位分布

接地电阻是电流  $I$  经接地电极流入大地时接地电极的电位  $V$  和  $I$  的比值。如不考虑大地回流的影响，则当一定的直流或工频电流经接地电极流入大地时，接地电极的电位即为接地电极与无穷远零位面之间的电位差，此时接地电阻也可定义为由接地电极到无穷远处的土壤的总电阻。

以图 1-1 所示的与地面齐平的处于均匀土壤中的半球形接地电极为例，设接地电极的半径为  $a$ ，由接地电极流入大地的电流为  $I$ ，土壤的电阻率为  $\rho$ ，则在离开球心为  $r$  的土壤中，电流密度  $J$  显然为

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1-1-1)$$

该处的电场强度  $E$  则为

$$E = J\rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1-1-2)$$

所以接地电极的电位（即由无穷远处到电极间的电压） $V$  为

$$V = - \int_{\infty}^a E dr = \frac{I\rho}{2\pi} \left. \frac{1}{r} \right|_{\infty}^a = \frac{I\rho}{2\pi a} \quad (1-1-3)$$

由此可得半球形接地电极的电阻  $R$  为

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1-1-4)$$

半球形接地电极的电阻也可直接由包围在接地电极外面的厚度为  $dr$  的各半球体薄壳的土壤电阻串联求得，即

$$R = \int_a^{\infty} \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \left. -\frac{\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \right|_a^{\infty} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1-1-5)$$

如果要计算由  $a$  到  $r$  之间的电阻  $R'$ ，则显然有

$$R' = \int_r^a \frac{\rho dr}{2\pi r^2} = \frac{\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{r} \right)$$

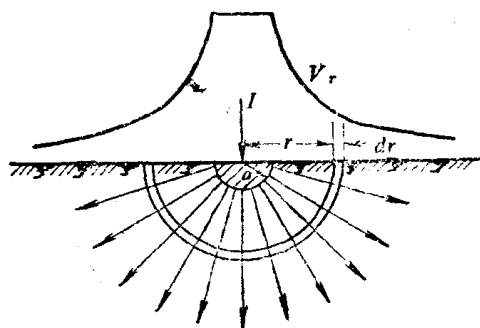


图 1-1 均匀土壤中的半球形接地电极

● 本书中接地电极的电位即为接地电极和零电位点间的电压，故可用欧姆定律公式。

$$= -\frac{\rho}{2\pi a} \left( 1 - \frac{a}{r} \right) = R \left( 1 - \frac{a}{r} \right) \quad (1-1-6)$$

上式中当  $r = 10a$  时, 将有

$$R' = 0.9R \quad (1-1-7)$$

即  $R'$  占  $R$  的 90%。可见离开接地电极距离为接地电极尺寸 10 倍以内的土壤对接地电阻起很大的作用。

由于直流或工频电流在大地中的流动呈现一个恒稳电流场, 这个场是和静电场相似的, 所以我们还可以直接利用静电场中电容  $C$  的公式来写出接地电阻  $R$  的公式, 即

$$R = \frac{\varepsilon\rho}{C} \quad (1-1-8)$$

式中  $\varepsilon$  和  $\rho$  分别为土壤的介电系数和电阻率,  $C$  为电极对无穷远处的电容。仍以上述半球形接地电极为例, 由静电场可求得圆球的电容为  $4\pi\varepsilon a$ , 半球的电容为

$$C = 2\pi\varepsilon a \quad (1-1-9)$$

利用式 (1-1-8) 即可求得半球形接地电极的电阻为

$$R = \frac{\varepsilon\rho}{2\pi\varepsilon a} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1-1-10)$$

不难看出, 在半球形接地电极的电流场中, 离球心  $r$  处的电位将为

$$V_r = - \int_{\infty}^r E dr = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1-1-11)$$

据此即可画出半球形接地电极周围的地面电位分布, 如图 1-1 所示。

$V_r$  也可写成

$$V_r = IR(r) \quad (1-1-12)$$

其中

$$R(r) = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (1-1-13)$$

即电流流经接地电极时电极周围土壤中各点的电位还可用该电流场的电流  $I$  和相应于所求电位点的某一电阻值  $R(r)$  的乘积来表示。这一电阻值  $R(r)$  可称为电流  $I$  和所求电位点间的互电阻系数, 相应地, 也可把表示电流  $I$  和电极自身电位间关系的系数称为自电阻系数。由式 (1-1-13) 可知, 半球形接地电极的自电阻系数为

$$R(a) = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (1-1-14)$$

显然, 自电阻系数也就是电极自身的接地电阻。

## 第二节 几种简单几何形状的接地电极的接地电阻计算

在接地工程中所遇到的接地电极的几何形状是多种多样的。当接地电极的形状简单而又比较规则时, 可以在采取一定近似后用解析法直接导出计算公式。常见的简单接地电极不外乎圆棒形、圆环形和圆盘形, 这些接地电极的计算也是以后复杂地网计算的基础,

## 一、圆棒形电极

我们先来分析一根处于无限大均匀媒质  $\rho$  中的圆棒电极。如图1-2所示，圆棒的长度为  $l$ ，直径  $d=2a$ ，经圆棒流入媒质的电流为  $I$ 。虽然由于端部效应，流入媒质的电流沿圆棒长度的分布是不均匀的，在两端较大，在中部较小；但是在  $l \gg a$  时，在近似计算中可忽略端部效应而认为流入媒质的电流沿圆棒长度均匀分布，且集中在圆棒的轴线上，也就是说，沿圆棒轴线流散的电流密度（或单位长轴线所流散的电流） $\delta$  为

$$\delta = \frac{I}{l} \quad (1-2-1)$$

根据图1-2，不难写出以圆柱坐标  $(r, \theta, z)$  所表示的空间任一点  $N(r_N, 0, z_N)$  的电位为

$$\begin{aligned} V_N &= \frac{\rho}{4\pi} \int_0^l \frac{\delta dz}{\sqrt{(z_N - z)^2 + r_N^2}} \\ &= \frac{\rho\delta}{4\pi} \ln \frac{z_N + \sqrt{z_N^2 + r_N^2}}{z_N - l + \sqrt{(z_N - l)^2 + r_N^2}} \end{aligned} \quad (1-2-2)$$

或 
$$V_N = \frac{\rho\delta}{4\pi} \left( \text{sh}^{-1} \frac{z_N}{r_N} - \text{sh}^{-1} \frac{z_N - l}{r_N} \right) \quad (1-2-3)$$

如果电极的电位  $V$  用沿电极长度中点表面（图1-2中P点）的电位  $V_P$  来表示，即取  $z_N = \frac{l}{2}$ ， $r_N = \frac{d}{2} = a$ ，则可得电极的电位为

$$\begin{aligned} V = V_P &= \frac{\rho\delta}{4\pi} \ln \frac{\frac{l}{2} + \sqrt{\left(\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}}{-\frac{l}{2} + \sqrt{\left(-\frac{l}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}} \\ &\approx \frac{\rho\delta}{2\pi} \ln \frac{2l}{d} \\ &= \frac{\rho I}{2\pi l} \ln \frac{l}{a} \end{aligned} \quad (1-2-4)$$

可见，用中点电位法计算所得的电极接地电阻为

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{a} \quad (1-2-5)$$

为了提高计算精度，还可在假定电流均匀分布的基础上采用平均电位法，即用导体各点电位的平均值作为导体的电位。在式(1-2-3)中令  $r_N = \frac{d}{2} = a$ ，用变量  $z$  取代  $z_N$ ，对变量  $z$  由零积分到  $l$ ，再用  $l$  去除，即可得导体的平均电位为

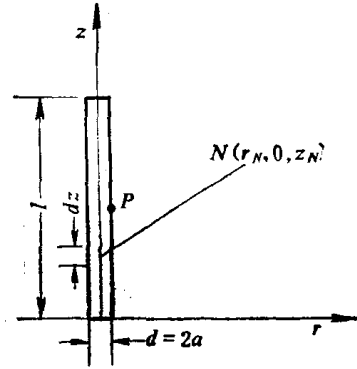


图 1-2 无限大均匀媒质中的圆棒电极

$$\begin{aligned}
 V_a &= \frac{\delta\rho}{4\pi l} \int_0^l \left( \text{sh}^{-1} \frac{z}{a} - \text{sh}^{-1} \frac{z-l}{a} \right) dz \\
 &= \frac{\rho I}{2\pi l} \left[ \frac{a}{l} + \text{sh}^{-1} \frac{l}{a} - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} \right] \\
 &= \frac{\rho I}{2\pi l} \left[ \frac{a}{l} + \ln \frac{l + \sqrt{l^2 + a^2}}{a} - \sqrt{1 + \left(\frac{a}{l}\right)^2} \right] \\
 &\approx \frac{\rho I}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (1-2-6)
 \end{aligned}$$

因此，用平均电位法所得的电极的接地电阻将为

$$R = \frac{V_a}{I} = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (1-2-7)$$

对长度为  $l$  的垂直埋于地中且上端与地面齐平的圆棒形接地电极，如图1-3所示，可假想在空气中还有一长  $l$  的镜像圆棒，构成长度为  $2l$  的圆棒电极，以使大地表面成为电流场的对称面。显然埋在地中的电极的接地电阻应为按无限大均匀媒质所求得长度为  $2l$  的圆棒的接地电阻的两倍。利用式(1-2-5)或式(1-2-7)不难求出图1-3的垂直接地电极的接地电阻为

$$R = 2 \frac{\rho}{2\pi(2l)} \ln \frac{2l}{a} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{a} \quad (\text{中点电位法}) \quad (1-2-8)$$

或

$$\begin{aligned}
 R &= 2 \frac{\rho}{2\pi(2l)} \left[ \ln \frac{2(2l)}{a} - 1 \right] \\
 &= \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{4l}{a} - 1 \right) \quad (\text{平均电位法}) \quad (1-2-9)
 \end{aligned}$$

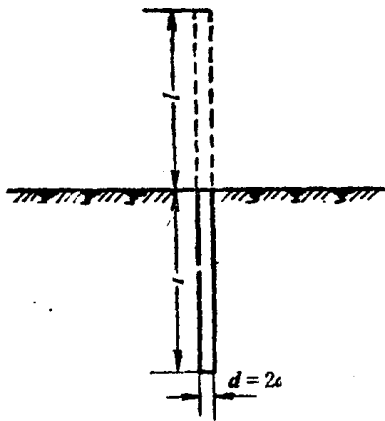


图 1-3 垂直埋于地中的圆棒接地电极

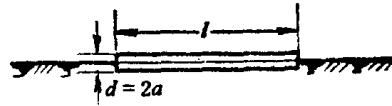


图 1-4 敷设在土壤表面的圆棒形接地电极

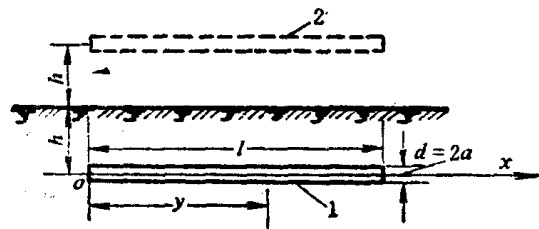


图 1-5 有一定埋深的水平接地电极

1—电极；2—镜像

对水平敷设在土壤表面的圆棒形接地电极，也可想象有一半留在空气中(图1-4)，因而其接地电阻将为由式(1-2-5)或式(1-2-7)所得结果的两倍，即有

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{l}{a} \quad (\text{中点电位法}) \quad (1-2-10)$$

或 
$$R = \frac{\rho}{\pi l} \left( \ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (\text{平均电位法}) \quad (1-2-11)$$

如图1-5所示, 当水平接地电极有一定埋深  $h$  时, 可设置镜象。此时电极 (图中1) 的电位  $V$  将为

$$V = R_{11}I + R_{12}I \quad (1-2-12)$$

式中  $R_{11}$  为电极的自电阻系数, 其值可由式 (1-2-5) 或式 (1-2-7) 求出, 即

$$R_{11} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{a} \quad (\text{中点电位法}) \quad (1-2-13)$$

或 
$$R_{11} = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (\text{平均电位法}) \quad (1-2-14)$$

$R_{12}$  为镜象和电极间的互电阻系数。不难看出, 当  $l \gg 2h \gg 2a$  时, 只要用  $2h$  取代式 (1-2-5) 或式 (1-2-7) 中的  $a$ , 即可求得

$$R_{12} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{2h} \quad (\text{中点电位法}) \quad (1-2-15)$$

或 
$$R_{12} = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{2h} - 1 \right) \quad (\text{平均电位法}) \quad (1-2-16)$$

这样, 由式 (1-2-12) 即可得埋深为  $h$  的水平接地电极的电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{hd} = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{l}{\sqrt{2ha}} \quad (\text{中点电位法}) \quad (1-2-17)$$

或 
$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{l^2}{hd} - 0.61 \right)$$

$$= \frac{\rho}{\pi l} \left( \ln \frac{2l}{\sqrt{2ha}} - 1 \right) \quad (\text{平均电位法}) \quad (1-2-18)$$

比较式 (1-2-10) 与式 (1-2-17) 以及式 (1-2-11) 与式 (1-2-18) 可知, 埋深为  $h$  的水平接地电极的接地电阻实际上相当于一个敷设在土壤表面的等值半径为  $\sqrt{2ha}$  的水平接地电极。

## 二、圆环形电极

同样, 先来分析一个处于无限大均匀媒质  $\rho$  中的圆环。如图1-6所示, 圆环由直径  $d = 2a$  的圆导体弯成, 环的直径  $D = 2b$ , 经圆环流入媒质的电流为  $I$ 。由于圆环的对称性, 电流  $I$  必然沿圆环的周长均匀流散。当  $b \gg a$  时,

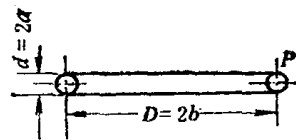


图 1-6 均匀媒质中的圆环

为便于计算, 可假设电流集中由圆导体的轴线散出, 因此沿轴线流散的电流密度将为

$$\delta = \frac{I}{2\pi b} \quad (1-2-19)$$

利用图1-7, 不难写出圆环周围空间任一点  $N(r, \theta, z)$  的电位为

$$V_N = \frac{\rho}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\delta b d\alpha}{\sqrt{z^2 + r^2 + b^2 - 2br \cos \alpha}} \quad (1-2-20)$$

令  $\alpha = \pi - 2\xi$ , 式 (1-2-20) 可改写为

$$V_N = \frac{\rho \delta b}{\pi} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r+b)^2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\xi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \xi}}$$

$$= \frac{\rho I}{2\pi^2} \frac{K(k)}{\sqrt{z^2 + (r+b)^2}} \quad (1-2-21)$$

其中  $k = \frac{2\sqrt{rb}}{\sqrt{z^2 + (r+b)^2}}$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\xi}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 \xi}} \quad (\text{为第一类椭圆积分})$$

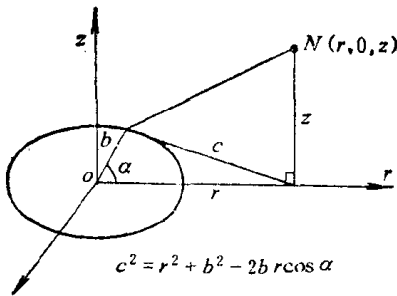


图 1-7 圆环周围电位计算

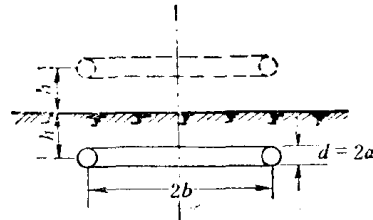


图 1-8 具有一定埋深的圆环接地电极

如果圆环的电位用其表面P点（见图1-6）的电位 $V_p$ 来代表，即取 $z=a$ ， $r=b$ ，则可得圆环的电位为

$$V = V_p = \frac{\rho I}{2\pi^2} \frac{K(k)}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}} = \frac{\rho I}{4\pi^2 b} kK(k) \quad (1-2-22)$$

其中  $k = \frac{2b}{\sqrt{a^2 + (2b)^2}}$

考虑到当  $b \gg a$  时，有

$$k^2 \approx 1 - \frac{a^2}{4b^2} \rightarrow 1$$

且有  $K(k)_{k \rightarrow 1} = \ln \frac{4}{\sqrt{1-k^2}} = \ln \frac{8b}{a}$

那么式(1-2-22)可简化为

$$V = \frac{\rho I}{4\pi^2 b} \ln \frac{8b}{a} \quad (1-2-23)$$

由此可得，处于无限大均匀媒质中的圆环的接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{4\pi^2 b} \ln \frac{8b}{a} \quad (1-2-24)$$

如图1-8所示，对埋深为 $h$ 的圆环接地电极，在计算时需考虑镜象的作用。显然，当  $b \gg 2h \gg 2a$  时，镜象和电极间的互电阻系数 $R_{12}$ 仍可利用式(1-2-23)求得

$$R_{12} = \frac{\rho}{4\pi^2 b} \ln \frac{8b}{2h} \quad (1-2-25)$$

这样，计及镜象后圆环电极的电位将为

$$\begin{aligned} V &= R_{11}I + R_{12}I \\ &= \frac{\rho I}{4\pi^2 b} \left( \ln \frac{8b}{a} + \ln \frac{8b}{2h} \right) \\ &= \frac{\rho I}{4\pi^2 b} \ln \frac{(8b)^2}{2ha} \\ &= \frac{\rho I}{2\pi^2 b} \ln \frac{8b}{\sqrt{2ha}} \end{aligned} \quad (1-2-26)$$

以圆环的周长  $l = 2\pi b$  代入式 (1-2-26) 后得

$$\begin{aligned} V &= \frac{\rho I}{2\pi l} \left[ \ln \frac{l^2}{hd} + \ln \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \right] \\ &= \frac{\rho I}{2\pi l} \left( \ln \frac{l^2}{hd} + 0.48 \right) \end{aligned} \quad (1-2-27)$$

由此可得埋深为  $h$  的圆环接地电极的接地电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left( \ln \frac{l^2}{hd} + 0.48 \right) \quad (1-2-28)$$

或

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 b} \ln \frac{8b}{\sqrt{2ha}} = \frac{\rho}{4\pi^2 b} \ln \frac{64b^2}{hd} \quad (1-2-29)$$

不难看出，它也相当于一个敷设在土壤表面的导体截面半径为  $\sqrt{2ha}$  的圆环接地电极的电阻。

### 三、圆盘形电极

当电流由圆盘电极向周围无限大均匀媒质流散时，流散电流在圆盘表面的分布是极不均匀的，此时如果仍采用假设电流由圆盘表面均匀流散的方法来求接地电阻，则即使应用平均电位法，仍会引起较大的误差。为了得到准确的计算公式，应直接从拉普拉斯方程出发求解。拉麦方法，即等位面 and 特定曲面组相吻合的电场的解法<sup>①</sup>，就是准确求解的方法之一。

拉麦方法告诉我们，以  $\theta$  为变量的一系列椭球形曲面组

$$\frac{x^2}{a^2 + \theta} + \frac{y^2}{b^2 + \theta} + \frac{z^2}{c^2 + \theta} = 1 \quad (1-2-30)$$

可以代表静电场中的等位面，而该曲面组在  $a = 0$ 、 $b = c$  和  $\theta = 0$  时即为一圆盘，这样利用由拉麦方法导出的椭球体的电容计算公式为

$$C = 8\pi\epsilon \left\{ \int_0^\infty [(a^2 + \theta)(b^2 + \theta)(c^2 + \theta)]^{-\frac{1}{2}} d\theta \right\}^{-1} \quad (1-2-31)$$

椭球带电体的电位为  $V$  时，周围空间任一点的电位计算公式为

① 解广润，高压静电场，上海科学技术出版社，1987年。

$$V = \frac{V_0 \int_0^{\infty} [(a^2 + \theta)(b^2 + \theta)(c^2 + \theta)]^{-\frac{1}{2}} d\theta}{\int_0^{\infty} [(a^2 + \theta)(b^2 + \theta)(c^2 + \theta)]^{-\frac{1}{2}} d\theta} \quad (1-2-32)$$

即可求出圆盘的电容为

$$\begin{aligned} C &= 8\pi\epsilon \left[ \int_0^{\infty} \theta^{-\frac{1}{2}} (b^2 + \theta)^{-1} d\theta \right]^{-1} \\ &= 8\pi\epsilon \left[ \frac{2}{b} \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{\theta}}{b} \Big|_0^{\infty} \right]^{-1} \\ &= 8\pi\epsilon \left[ \frac{2}{b} \left( \frac{\pi}{2} - 0 \right) \right]^{-1} = 8\epsilon b \end{aligned} \quad (1-2-33)$$

带电圆盘空间任一点的电位为

$$\begin{aligned} V &= \frac{V_0 \int_0^{\infty} \theta^{-\frac{1}{2}} (b^2 + \theta)^{-1} d\theta}{\int_0^{\infty} \theta^{-\frac{1}{2}} (b^2 + \theta)^{-1} d\theta} \\ &= \frac{2V_0}{\pi} \left( \frac{\pi}{2} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{\sqrt{\theta}}{b} \right) = \frac{2V_0}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \frac{b}{\sqrt{\theta}} \end{aligned} \quad (1-2-34)$$

在式(1-2-30)中, 令 $a=0$ ,  $b=c$ , 可得

$$\theta = \frac{1}{2} \left[ x^2 + y^2 + z^2 - b^2 + \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 - b^2)^2 + 4b^2 x^2} \right] \quad (1-2-35)$$

取 $x^2 + y^2 + z^2 = r^2$ , 将式(1-2-35)代入式(1-2-34)可得

$$V = \frac{2V_0}{\pi} \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \sqrt{2} b \left[ r^2 - b^2 + \sqrt{(r^2 - b^2)^2 + 4b^2 x^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (1-2-36)$$

利用式(1-1-8)和式(1-2-33), 即可求得处于无限大均匀媒质中圆盘电极的接地电阻

$$R = \frac{\epsilon\rho}{C} = \frac{\rho}{8b} \quad (1-2-37)$$

当电流 $I$ 经圆盘电极流散时, 圆盘电极的电位 $V_0$ 为

$$V_0 = \frac{\rho I}{8b} \quad (1-2-38)$$

圆盘电极周围媒质中任一点的电位为

$$V = \frac{\rho I}{4\pi b} \operatorname{tg}^{-1} \left\{ \sqrt{2} b \left[ r^2 - b^2 + \sqrt{(r^2 - b^2)^2 + 4b^2 x^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} \quad (1-2-39)$$

在求如图1-9所示的埋深为 $h$ 的圆盘接地电极的接地电阻时, 可先求出圆盘接地电极和其镜像间的互电阻系数 $R_{12}$ 。 $R_{12}$ 可由图1-10所示的电流由一极流出从另一极流入的电流场求得。此时圆盘1的电位 $V_1$ 和圆盘2的电位 $V_2$ 分别为



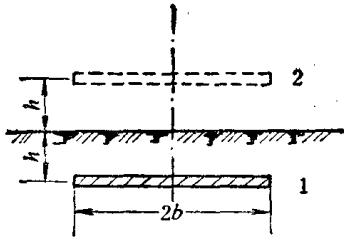


图 1-9 具有一定埋深的圆盘接地电极

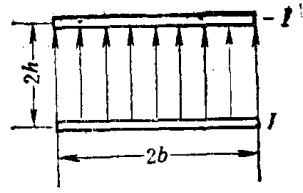


图 1-10 圆盘电极间的均匀电流场

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= R_{11}I - R_{12}I \\ V_2 &= R_{21}I - R_{22}I \end{aligned} \right\} \quad (1-2-40)$$

式中  $R_{11} = R_{22} = \frac{\rho}{8b}$ ,  $R_{12} = R_{21}$ 。由式 (1-2-40) 可得圆盘 1 和圆盘 2 间的电位差为

$$V_1 - V_2 = 2(R_{11} - R_{12})I \quad (1-2-41)$$

圆盘 1 和圆盘 2 间的电阻为

$$R' = \frac{V_1 - V_2}{I} = 2(R_{11} - R_{12}) \quad (1-2-42)$$

当  $h \ll b$ , 不计边缘效应时, 这一电阻  $R'$  又可由下述简单公式求出, 即

$$R' = \frac{2h\rho}{\pi b^2} \quad (1-2-43)$$

将式 (1-2-43) 代入式 (1-2-42), 即可求得

$$R_{12} = \frac{\rho}{8b} - \frac{\rho h}{\pi b^2} \quad (1-2-44)$$

利用式 (1-2-44), 根据图 1-9 可写出考虑镜象作用后圆盘接地电极的电位  $V$  为

$$\begin{aligned} V &= R_{11}I + R_{12}I \\ &= \frac{\rho}{4b} \left( 1 - \frac{4h}{\pi b} \right) I \end{aligned} \quad (1-2-45)$$

由此可得埋深为  $h$  的圆盘的接地电阻近似计算公式为

$$R = \frac{\rho}{4b} \left( 1 - \frac{4h}{\pi b} \right) \quad (1-2-46)$$

显然式 (1-2-46) 只适用于  $h \ll b$  的情况, 从工程实际出发, 可取  $h < 0.02b$ 。如果把地网用一占地面积相等的等值圆盘取代, 则在埋深为 0.8m 时, 地网的半径应大于 40m; 埋深为 0.6m 时, 地网的半径应大于 30m, 这完全可以满足工程实际的需要。

当  $h = 0$  时, 圆盘接地电极的接地电阻为  $\frac{\rho}{4b}$ ; 而当  $h \rightarrow \infty$  时, 则接地电阻应趋近于无限大均匀媒质时的  $\frac{\rho}{8b}$ 。圆盘接地电极在任意埋深时的接地电阻也可用下述内插公式近似计算