

S Y D L J D J S

实用

电力接地技术

李景禄 胡毅 刘春生 编著

SHIYONG
DIANLI
JIEDIJISHU



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

实用电力接地技术

李景祿 胡 毅 刘春生 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从电力工程的实际出发,重点解决发电厂、变电所、输配电线路杆塔接地的设计、施工、改造和运行维护的问题,同时还讨论了高层建筑、微波通信及计算机系统、直流工程的防雷接地。全书共分16章,包括基础知识,工频接地电阻,冲击接地电阻,架空线路杆塔的接地装置,发电厂、变电所的接地装置,降低发电厂、变电所接地装置工频接地电阻的措施,高层建筑防雷保护接地,配、用电设备的接地,微波通信及计算机系统的防雷接地,高压工程接地装置,接地装置的运行、发热、腐蚀及防腐措施,接地装置的试验、运行分析及改造以及接地降阻剂。

本书可供电力部门、通信部门中从事接地设计、施工和运行的工程技术人员阅读,同时也可供高等院校电力工程专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用电力接地技术/李景禄等编著. -北京:中国电力出版社,2001

ISBN 7-5083-0875-1

I. 实… II. 李… III. 接地保护装置 IV. TM862

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第078072号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

三河实验小学印刷厂印刷

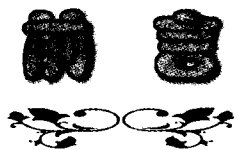
各地新华书店经售

*

2002年1月第一版 2002年1月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 377千字
印数 0001—4300册 定价 27.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



电力系统的接地问题是一个看似简单、而实际上却非常复杂又至关重要的问题，它直接关系到人身和设备的安全。特别是随着电力系统的发展，电网规模不断扩大，接地短路电流越来越大，各种微机监控设备的普遍应用，对接地的要求越来越高。对接地装置不仅对工频接地电阻，而且对冲击接地电阻、热稳定、设备接触电压、跨步电压、地电位干扰也有一系列的要求。以前由于接地装置的问题而引起的主设备损坏、变电所发电厂停运等事故已发生多起，都给电网的安全稳定运行带来了很大的危害，因而电力系统的接地问题必须受到充分的重视。

本书编写的目的，就是从电力工程的实际出发，重点解决发电厂、变电所、输配电线路杆塔接地的设计、施工、改造和运行维护的问题，同时还讨论了高层建筑、微波通信及计算机系统的防雷接地，以及直流工程的接地。本书在编写过程中，力求避免繁琐的理论和数学推导，而着重于实用，希望该书能成为电力系统工程技术人员手中的一本实用参考书，在解决实际的接地问题时能起到指导和借鉴作用。

本书的前三章介绍了接地技术的理论知识和基础知识，第四章到第十章重点介绍了架空线路、发电厂、变电所、高层建筑等实际接地工程的设计和施工问题，第十一章到第十六章介绍了接地装置的运行、试验和改造，以及降阻剂的使用问题。

本书的编写依据除了参照了若干接地书籍和电力行业的接地规程和标准外，还采纳了近10年来国内外对接地方面的研究成果。同时笔者近20年来一直从事发电厂、变电所、输电线路杆塔和高层建筑接地装置的试验、设计和工程施工工作，对接地工程进行了10多年的研究和探讨，所以该书也是笔者10多年来研究成果的总结。本书第一、二、三、六、七、八、九、十、十一、十二、十三、十五和十六章由长沙电力学院李景禄编写，第四、五章由武汉高压研究所胡毅编写，第十四章由信阳市电业局刘春生编写。

本书可供电力部门、通信部门中从事接地设计、施工和运行工作的工程技术人员阅读，同时也可作为高等院校电力工程专业师生的选学教材。

由于编者的水平有限，本书难免有错误和不足之处，敬请读者指正。

编者

2001年10月

EAAS406

●李景祿

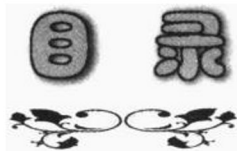
1955年生，1982年毕业于华中理工大学，现为长沙电力学院副教授。从1987年开始对输变电系统、高层建筑和微波通信系统接地装置进行了大量研究，并对许多接地装置进行了成功改造

●胡毅

1955年生，1982年毕业于华中科技大学，工学硕士，教授级高工。长期从事输电线路和带电作业研究，获多项国家专利和科技成果

●刘春生

1963年生，1983年毕业于华中工学院电力系水电站自动化专业，现在河南省信阳市电业局工作，华中科技大学在读工程硕士



前言

第一章 基础知识

第一节	大地的导电特性	1
第二节	土壤电阻率	4
第三节	水的电阻率	9
第四节	人工改善土壤电阻率的方法	11

第二章 工频接地电阻

第一节	工频接地电阻的基本概念	13
第二节	均匀土壤中的工频接地电极	17
第三节	不均匀土壤中的工频接地电阻	27
第四节	水下接地网的接地电阻	30
第五节	自然接地体的接地电阻	32

第三章 冲击接地电阻

第一节	冲击接地电阻的物理意义	37
第二节	冲击电位分布	41
第三节	外引接地装置	42
第四节	水平接地体上的波过程	43
第五节	发电厂、变电所网格式地网的冲击接地电阻	45

第四章 架空线路杆塔的接地装置

第一节	架空线路杆塔接地的意义及要求	53
第二节	架空线路杆塔接地电阻计算	55

第三节	架空线路杆塔接地的设计	60
第四节	架空线路杆塔接地装置的施工	62
第五节	降低杆塔接地电阻的措施	64
第六节	杆塔接地装置的运行及维护	65

第五章 发电厂、变电所的接地装置

第一节	发电厂、变电所接地的意义	67
第二节	发电厂、变电所接地的一般要求	68
第三节	发电厂、变电所网格式接地网的接地电阻计算	73
第四节	发电厂、变电所地面电位分布	78
第五节	跨步电压和接触电压	85
第六节	发电厂、变电所接地网的设计	87
第七节	发电厂、变电所接地装置的施工	90

第六章 降低发电厂、变电所接地装置工频接地电阻的措施

第一节	充分利用自然接地体降阻	93
第二节	外引接地装置	94
第三节	采用深井式接地极	94
第四节	扩网及设置水下地网	97
第五节	填充电阻率较低的物质或降阻剂人工改善土壤电阻率	98
第六节	发电厂、变电所的综合降阻措施	99

第七章 高层建筑的防雷保护接地

第一节	雷电流的效应	100
第二节	外部的保护	103
第三节	内部保护	106
第四节	高层建筑物接地的特点和要求	109
第五节	建筑物防雷接地实例分析	111

第八章 配、用电设备的接地

第一节	配、用电设备的接地要求	115
第二节	低压配电系统的接地型式	121
第三节	低压配电系统的人身安全保护措施	125

第四节	TN系统防止间接电击的具体措施	129
第五节	TT系统防止间接电击的具体措施	132
第六节	低压系统的接地与接零保护	135

第九章 微波通信站及计算机系统的防雷接地

第一节	微波通信站的防雷接地	139
第二节	调度楼内调度自动化设备的防雷接地	144
第三节	计算机及计算机网络的接地	146
第四节	发电厂、变电所微机控制设备的接地	150

第十章 高压直流工程接地装置

第一节	高压直流输电系统	152
第二节	高压直流换流站的接地装置	153
第三节	高压直流接地装置的投运试验	159
第四节	高压直流接地极发热及热扩散	161

第十一章 接地装置的运行

第一节	接地网的工频电位	163
第二节	地网电位升高及其限制措施	164
第三节	反击过电压及其保护	166
第四节	沿电缆沟敷设接地线的作用	172
第五节	冲击反击过电压	175

第十二章 接地装置的发热

第一节	接地装置的发热及计算	180
第二节	交流地网的热稳定	183
第三节	接地线的截面选择	186

第十三章 接地装置的腐蚀及防腐措施

第一节	接地装置的腐蚀机理分析	187
第二节	析氢腐蚀与吸氧腐蚀	190
第三节	接地装置的腐蚀环境	195

第四节	防止接地体腐蚀的主要措施	200
-----	--------------	-----

第十四章 接地装置试验

第一节	接地电阻的测量	206
第二节	土壤电阻率	216
第三节	测量接触电压、电位分布和跨步电压	218
第四节	连通试验和开挖检查	221

第十五章 接地装置的运行分析及改造

第一节	输电线路杆塔接地装置存在问题分析及处理	223
第二节	发电厂、变电所接地网存在问题分析	224
第三节	发电厂、变电所接地装置改造	227

第十六章 接地降阻剂

第一节	降阻剂的降阻机理	233
第二节	降阻剂的分类和应用	237
第三节	降阻剂的选择	239
第四节	高效膨润土降阻防腐剂	241
第五节	GPF-94 高效膨润土降阻防腐剂的工程应用	248

附录 A	《接地降阻剂暂行技术条件（修改稿）》	252
------	--------------------	-----

附录 B	k_{ms} 、 k_{mA} 取值表	257
------	-------------------------	-----

参考文献		260
------	--	-----

第一章

基础知识

第一节 大地的导电特性

接地电流在地中的分布状况，除了与电流的频率有关外，还和大地的导电特性有关，要解决电力系统的接地问题，就要了解和掌握大地的导电特性、电学性质和电气参数，从而选择合理正确的接地方式。

大地导电归结起来无非是两种导电方式，一种是电子导电，地下如有导体或半导体，比如金属矿物质等，就会形成电子导电，但大地导电主要是离子导电，即土壤中的各种无机盐类或酸、碱离解成的金属离子导电。而各类无机盐或酸、碱又必须在有水的情况下才能离解成导电的离子，换句话说，干燥的土壤或纯净的水是不导电或导电能力很差的。所以土壤电阻率的大小主要取决于土壤中导电离子的浓度和土壤中的含水量。土壤电阻率是土壤中所含导电离子浓度 A 的倒数 $\frac{1}{A}$ 和单位体积土壤含水量 B 的倒数 $\frac{1}{B}$ 的函数，即

$$\rho = f\left(\frac{1}{A}\right) \cdot f\left(\frac{1}{B}\right) \quad (1-1)$$

也就是说，土壤中所含导电离子浓度越高，土壤的导电性就越好， ρ 就越小；反之就越大。如沙河中，河底的 ρ 值很大，就是因为河底由于流水的冲刷，导电离子浓度较小所致。土壤越湿，含水量越多，导电性能就越好， ρ 值就越小；反之就越大。这就是接地体的接地电阻随土壤干湿度变化的原因。

从电工原理可以知道，通过接地体流入地中的总电流是由传导电流和位移电流两部分组成，判断地是导体或是半导体还是电介质，决定于地中同一点的传导电流密度和位移电流密度的比值。对于正弦电流，将麦克斯韦第一方程式应用于各向同性的大地介质，即磁场强度的旋度等于传导电流密度和位移电流密度的相量和

$$\text{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} \dot{E} + j\omega \epsilon \dot{E} \quad (1-2)$$

式中 \dot{H} ——磁场强度，A/m；
 \dot{E} ——电场强度，V/m；
 ω ——电流角频率， s^{-1} ；

ϵ ——介电常数, F/m;

ρ ——电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

式 (1-2) 右端第一项是传导电流密度 δ_c , 即

$$\delta_c = \frac{1}{\rho} \dot{E} \quad (1-3)$$

第二项是位移电流密度 δ_d , 即

$$\delta_d = j\omega\epsilon\dot{E} \quad (1-4)$$

δ_d 与 δ_c 相位差 90° 。从式 (1-2) 还可以看出, 电阻率 ρ 和介电系数 ϵ 是地的两种主要电气参数。 ρ 和 ϵ 以及电流的角频率, 决定了地中任一点的交变电流的分布。传导电流密度和位移电流密度绝对值之比为

$$K = \frac{\delta_c}{\delta_d} = \frac{1}{\omega\epsilon\rho} \quad (1-5)$$

其中

$$\omega = 2\pi f$$

$$\epsilon = \epsilon_r \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$$

式中 ω ——电流角频率, s^{-1} ;

ϵ ——介电系数, F/m;

ϵ_r ——相对介电系数;

ρ ——电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

地中电流的这两个分量, 虽然可以同时存在于地中的任一点上, 但在接地技术的研究中常常遇到其中一个分量远大于另一个分量, 使之有可能单独对其中一个分量进行研究, 从而使问题大大简化。由式 (1-5), 当 $K > 10$, 即 $\delta_c > 10\delta_d$, 可以不计位移电流, 地近似为导体; 当 $K < 0.1$, 即 $\delta_c < 0.1\delta_d$, 可以不计传导电流, 地近似为介电质; 当 $10 > K >$

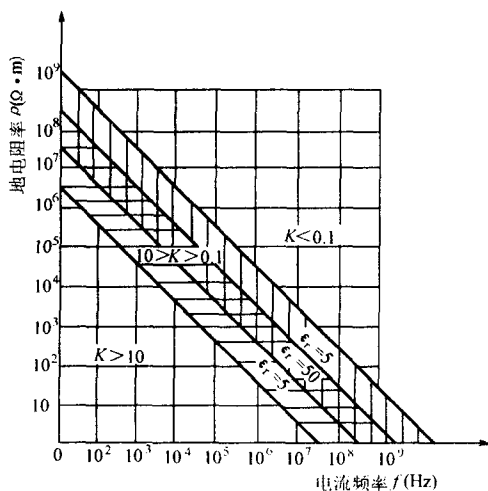


图 1-1 地电性的区分图

0.1, 即 $10\delta_d > \delta_c > 0.1\delta_d$, 地既是导体又是电介质。在大多数情况下, 地的相对介电系数在 $50 > \epsilon_r > 5$ 的范围内。利用这些值, 由式 (1-5) 可以计算出在 ρ 和 f 为何值时, 地可以近似认为是导体或是电介质。计算结果如图 1-1 所示。由图 1-1 可知, 当接地电流是低频 ($f < 1000\text{Hz}$) 电流时, 在 $\rho < 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ 的条件下, 可以忽略不计位移电流的影响, 只考虑传导电流。因此, 在研究工频接地时可以把地看成是导体。在冲击接地时, 在一般电阻率地区, 也只考虑传导电流的作用。只有在电阻率很高的地区, 才需要计入位移电流的影响。例如 $\rho = 1000 \Omega \cdot \text{m}$, $\epsilon_r = 9$, 取雷电流波

头为半余弦形，波头时间为 $3\mu\text{s}$ ，故雷电流波头的等值角频率为 $\omega = \frac{\pi}{3} \times 10^6 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ 。由式 (1-5) 得到 $K = 12$ ，即传导电流为位移电流的 12 倍。实际上，在一般雷电流等值频率及电阻率为 $2000\Omega \cdot \text{m}$ 的情况下，都可以不计位移电流，即不计电容效应的影响。此时，对于水平延长接地体，可以忽略波过程，使计算大大简化。

上面的计算，都是认为电阻率和相对介电系数是常数。然而，地的两种电气参数都与频率有关，特别是地的电阻率在高频情况下将会显著减少。在变频激发极化物探中发现，用不同频率的电流测量出的视在电阻率是不相同的，即使使用的频率很低，也可以发现地电阻率随频率增加而减少的现象。根据实验结果，地的电阻率有如下近似公式

$$\rho_f = \frac{\rho_0 \rho (1 + A \sqrt{jf})}{\rho + (\rho_0 + \rho) A \sqrt{jf}} \quad (1-6)$$

式中 ρ_f ——用频率 f 测量的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

ρ_0 ——用直流测量的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

ρ ——地中可被极化物体完全激发的电阻率， $\Omega \cdot \text{m}$ ；

f ——频率，Hz；

A ——常数。

从式 (1-6) 可以看出：当频率为零，即在直流的情况下， $\rho_f = \rho_0$ ，这是用直流电流测量的电阻率；当频率为无限大， $\rho_{f \rightarrow \infty} = \frac{\rho_0 \rho}{\rho_0 + \rho}$ ，电阻率是在直流情况下和地中可被极化

物体完全激发的电阻率的并联值，显然电阻率是减少了。 ρ_0 和 $\frac{\rho_0 \rho}{\rho_0 + \rho}$ 是地电阻率的两个极限。其中任一电阻率都是一个随频率而变化的可变复量。但是，目前要在接地技术中反应这种电阻率的变化还较困难。因此，目前在工程计算中将地电阻率认为是与频率无关。

此外，当地中电场强度超过某一数值后，电流和电压已不再是线性关系，而出现非线性现象。这种现象在导电矿物、潮湿或干燥的岩石以及土壤和水中均可以见到，这可能是因为电解溶液的电导在强电场中会显著增大；在干土壤中，由于颗粒间的空气间隙易于产生局部放电而使电导呈非线性。

地电阻率随地中电场强度的增加而平稳下降，如图 1-2 ~ 图 1-4 所示，图中各虚线与电场强度坐标的交点表示地的击穿强度。

除了 ρ 和 ϵ 两个电气参数外，还有导磁系数 μ 。由于计算接地体的外电感。对绝大多数地层（地中有磁铁矿的除外）来说，相对导磁系数接近

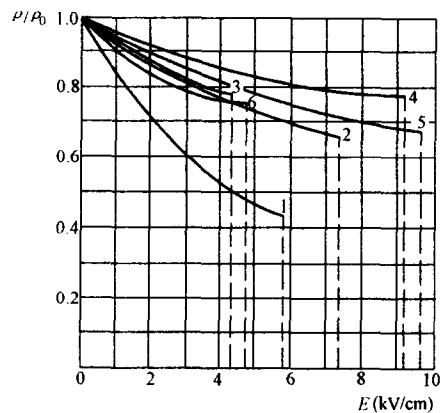


图 1-2 腐植土电阻率随电场强度的增加而下降曲线

- 1— $\rho_0 = 350\Omega \cdot \text{m}$ ； 2— $\rho_0 = 550\Omega \cdot \text{m}$ ；
 3— $\rho_0 = 1050\Omega \cdot \text{m}$ ； 4— $\rho_0 = 90\Omega \cdot \text{m}$ ；
 5— $\rho_0 = 35\Omega \cdot \text{m}$ ； 6— $\rho_0 = 22\Omega \cdot \text{m}$

于1,故通常把地的导磁系数 μ 都近似地认为等于真空的导磁系数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 。

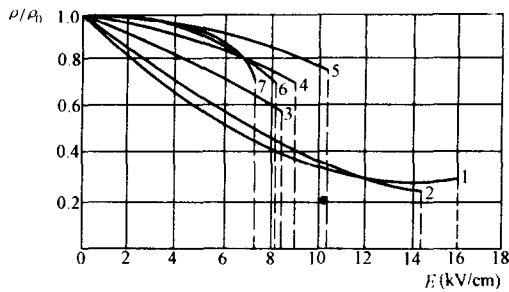


图 1-3 土壤电阻率随电场强度的增加而下降曲线

- 1— $\rho_0 = 2700\Omega \cdot \text{m}$; 2— $\rho_0 = 1000\Omega \cdot \text{m}$;
- 3— $\rho_0 = 250\Omega \cdot \text{m}$; 4— $\rho_0 = 160\Omega \cdot \text{m}$;
- 5— $\rho_0 = 140\Omega \cdot \text{m}$; 6— $\rho_0 = 120\Omega \cdot \text{m}$;
- 7— $\rho_0 = 70\Omega \cdot \text{m}$

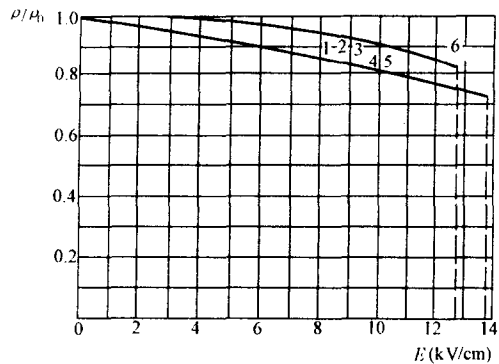


图 1-4 砂土电阻率随电场强度的增加而下降曲线

- 1— $\rho_0 = 3400\Omega \cdot \text{m}$; 2— $\rho_0 = 3100\Omega \cdot \text{m}$;
- 3— $\rho_0 = 2950\Omega \cdot \text{m}$; 4— $\rho_0 = 1600\Omega \cdot \text{m}$;
- 5— $\rho_0 = 500\Omega \cdot \text{m}$; 6— $\rho_0 = 450\Omega \cdot \text{m}$

第二节 土壤电阻率

土壤电阻率是接地工程的一个常用参数,直接影响接地装置接地电阻的大小、地网地面电位分布、跨步电压和设备接触电压。因而,了解和掌握土壤电阻率的特点,尤其是准确测出土壤电阻率,电阻率的分布和变化情况,对接地工程来说是非常重要的。

地电阻率的变化范围很大,在接地工程中常常遇到的电阻率从小到十几欧米,大到上万欧米。

大多数岩石、矿物和粘土在干燥状态下都是绝缘体,因而它们的电阻率主要决定于水分含量、电解溶液的性质及其浓度,具有离子的导电性能,电阻率随温度的增加而下降。

含水量对砂混合的粘土及砂的电阻率的影响如图 1-5 所示,在含水量约 15% 时与砂混合的粘土和温度的关系曲线如图 1-6 所示。从图 1-6 可以看出:与砂混合的粘土,当其中的水分从水到冰变化时,电阻率在 0℃ 时出现一个突然上升;当温度再下降时,电阻率出现明显的增大;而温度从 0℃ 上升时,电阻率仅平稳下降。

砂质土壤和粘土相比,砂层中虽然单个孔隙较大,但孔隙总个数不如粘土多,更主要的是粘土的透水性差,孔隙中的水不易流动,因而溶解并聚集了大量的盐分,所以粘土的电阻率比砂层低。这可以从图 1-5 中明显看出:含水量相同(约 15%),砂比与砂混合的粘土的电阻率约大 5 倍。

除了温度和含水量外,土壤的致密与否对电阻率的影响也是很大的。例如,当粘土的含水量为 10%,温度不变,单位压力由 1961Pa 增大到 19610Pa 时,电阻率可下降到原来的 65%。根据这个原因,宜将细土回填于接地体四周并夯实致密。

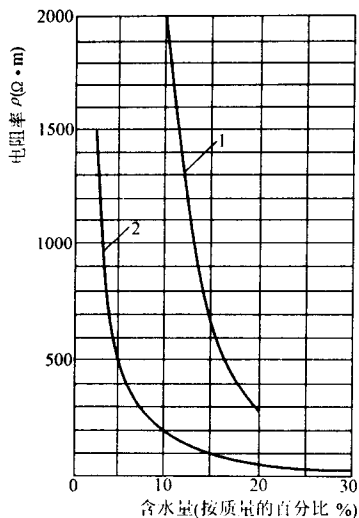


图 1-5 含水量对砂和与砂混合的粘土的电阻率的影响曲线
1—砂；2—与砂混合的粘土

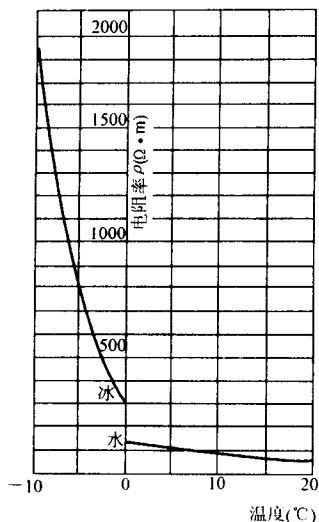


图 1-6 含水量约 15%，温度对与砂混合的粘土的电阻率的影响曲线

凡温度为零下，且含有冰的各种土层均称为冻土。若不含有冰，温度为零下的称为寒土。冻结状态持续三年或三年以上的土层为多年冻土。多年冻土的电阻率极高，可达未冻前土壤电阻率的数十倍，例如在西北某地的测量表明，未冻土与冻土的电阻率变化范围达 $500 \sim 15000 \Omega \cdot m$ 。

在多年冻土分布区，常常存在有局部没有冻土的地区，称为融区。一种是融土从地表向下穿透整个冻土层，称为贯通融区；另一种是融土未穿透整个冻土层，因而在融区下仍有多年冻土存在，叫作非贯通融区。多年冻土区的大河河床和湖泊下，在温泉的周围以及大型采暖建筑物下，往往形成贯通融区；而小河河床、部分河漫滩地，一般的采暖建筑物下则往往形成非贯通融区。利用这些融区来埋设接地体，是解决多年冻土地区接地的主要途径。

除粘土和矿物外，多孔含水岩石的电阻率可由经验公式得出，即

$$\rho = \rho_0 f^m s^{-n} \quad (1-7)$$

式中 ρ_0 ——填充于岩石孔隙中水的电阻率；

f ——孔隙度（孔隙的体积比）；

s ——水填充孔隙空间的比值；

m ——土壤固化程度系数；

n ——土壤含水率系数。

约有 30% 以上的孔隙空间为水填满时， n 值接近于 2。 m 值决定于固化程度或岩石的地质状况，松散的为 1.3 左右，变化到良好固结的古生代沉积的为 1.95 左右。

由式 (1-7) 可以看出，岩石的电阻率主要决定于它的含水量和水的电阻率，对于受

地下水浸渍的不光整的岩石，其电阻率常常是不太高的，例如在湖南某地测得在 10m 深以上砂质板岩的电阻率达 $4000\Omega \cdot m$ ，在 10m 深以下，则由 $4000\Omega \cdot m$ 逐渐减小为 $900\Omega \cdot m$ 。可见，埋于地下深处受地下水浸渍的岩层中的金属结构物，往往是良好的自然接地体，应加以利用。

一些矿体，主要有石墨、磁黄铁矿、黄铁矿、铅锌矿、黄铜矿和磁铁矿等具有较好的电子导电性能，在条件允许的条件下，可用 100~300 型钻机打孔，将接地极引到矿体上加以利用，这是一个十分有效的降低接地电阻的方法。

接地技术所涉及到的大地范围，从离开接地体几十米（研究电位分布）到几千米（研究接地电阻测量）。在这样一个大范围内，地电阻率往往是不均匀的。通常地层有层状和剖面结构，将增加接地计算的工作量或引起测量误差。如果地具有简单的两层结构时，用等极距四极法测量出的视电阻率 ρ_a 随极距 a 变化的曲线，可近似用下式表示

$$\rho_a = 2\pi a R_g = \rho_2 - (\rho_2 - \rho_1)e^{-\frac{a}{b}}(2 - e^{-\frac{a}{b}}) \quad (1-8)$$

式中 ρ_1 ——地表的电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

ρ_2 ——地层深处的电阻率， $\Omega \cdot m$ ；

a ——测量时的电极间距，m；

b ——视电阻率曲线常数，m；

R_g ——表计测得的视电阻， Ω 。

由式 (1-8) 可知：当 $a \ll b$ ，即电流极间距离很小时，由于绝大部分电流都从地表层流过，故测量出的电阻率趋近于地表的电阻率， $\rho_a = \rho_1$ ；当 $a \gg b$ ，即电流极间距离很大时，由于绝大部分电流都穿透到地层深处，故测量出的视电阻率趋近于地层深处的电阻率， $\rho_a \approx \rho_2$ 。

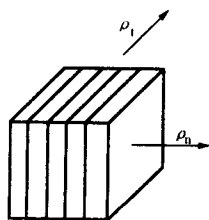


图 1-7 各向异性介质模型

b 值具有长度的单位，从 1m 变化到 100m， $b = 100m$ ，表示电阻率随深度变化缓慢； $b = 1m$ ，表示变化很快。 b 值可由在现场用等极距四极法测量的视电阻率曲线上斜率不等于零的一点取 a 、 ρ_1 、 ρ_2 及 ρ_a 代入式 (1-8) 求得。

即使在一个小范围内可以近似认为地层是均匀构造，但电阻率也表现出各相异性。沿层理方向的电阻率 ρ_1 小于沿垂直层理方向的电阻率 ρ_n （见图 1-7）。 ρ_n 与 ρ_1 之比的平方根 $\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_1}$ ，称为各向异性系数。表 1-1 列有典型地层的各向异性系数 λ 和 ρ_n/ρ_1 ，这也就是

在一个看来似乎是均匀地层的地区，但在不同的方向测量出的地电阻率，也常常发生测量结果不完全一致的原因之一。比如在广东乳源桂头 110kV 站址内，在同一地点，用同样的极距 $a = 10m$ ，但在互相垂直的两个方向测得的结果 ρ_1 为 $5526\Omega \cdot m$ ， ρ_2 却为 $4207\Omega \cdot m$ 。

表 1-2 和表 1-3 所列数据仅供参考，一般应以实测值作为设计依据，比如表 1-2 中的表层土夹石下层砾石，在表中 ρ 值为 600，而在广东乳源桂头这种土实测数据却高达 $5000\Omega \cdot m$ ，这就是说，同一种型式的土壤，在不同的地方差异很大。在山区，土壤由于不含无机盐类，所以土壤电阻率很高，而在平原由于施加农药和化学，地电阻率就会很小，甚至同一地区，地电阻率随着耕作也会变化。还需指出的是：在实验现场用简单接地

体测得的季节系数不适用于大型接地网，因为当地网面积很大时，入地电流的分布范围很大，它的接地电阻已不像简单接地体那样主要决定于地表浅层的电阻率，而是在很大程度上决定于地层深处的电阻率，因此，大型接地网的季节系数要比简单接地体小得多。

表 1-1 典型地层的各向异性系数

名 称	$\frac{\rho_n}{\rho_t}$	$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}}$	名 称	$\frac{\rho_n}{\rho_t}$	$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}}$
层理不明的粘土	1.04 ~ 1.10	1.02 ~ 1.05	泥质页岩	2.00 ~ 5.00	1.41 ~ 2.25
具有砂夹层的粘土	1.10 ~ 1.32	1.05 ~ 1.15	煤	3.00 ~ 6.50	1.73 ~ 2.55
成层砂岩	1.20 ~ 1.65	1.10 ~ 1.59	无烟煤	4.00 ~ 6.50	2.00 ~ 2.55
泥板岩	1.20 ~ 2.5	1.10 ~ 1.59	石墨页岩及石炭质页岩	4.00 ~ 7.50	2.00 ~ 2.75

表 1-2 土壤和水的电阻率参考值

类别	名 称	电阻率近似值 ($\Omega \cdot m$)	不同情况下电阻率的变化范围 ($\Omega \cdot m$)		
			较湿时 (一般地区、 多雨区)	较干时 (少雨区、 沙漠区)	地下水含 盐碱时
土	陶粘土	10	5 ~ 20	10 ~ 100	3 ~ 10
	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20	10 ~ 30	50 ~ 300	3 ~ 30
	捣碎的木炭	40	—	—	—
	黑土、园田土、陶土	50	30 ~ 100	50 ~ 300	10 ~ 30
	白垩土、粘土	60			
	砂质粘土	100	30 ~ 300	80 ~ 1000	10 ~ 80
	黄土	200	100 ~ 200	250	30
	含砂粘土、砂土	300	100 ~ 1000	1000 以上	30 ~ 100
	河滩中的砂	1300	800	1800	—
	煤	—	350	—	—
	多石土壤	400	—	—	—
	上层红色风化粘土下层红色页岩	500 (30% 湿度)	—	—	—
表层土夹石，下层砾石	600 (15% 湿度)	—	—	—	
砂	砂、砂砾	1000	250 ~ 1000	1000 ~ 2500	—
	砂层深度大于 10m，地下水较深的草原，地面粘土深度不大于 1.5m，底层多岩石	1000	—	—	—
岩石	砾石、碎石	5000	—	—	—
	多岩山地	5000	—	—	—
	花岗岩	20000	—	—	—

续表

类别	名称	电阻率近似值 ($\Omega \cdot m$)	不同情况下电阻率的变化范围 ($\Omega \cdot m$)		
			较湿时 (一般地区、 多雨区)	较干时 (少雨区、 沙漠区)	地下水含 盐碱时
混凝土	在水中	40 ~ 55	—	—	—
	在湿土中	100 ~ 200	—	—	—
	在干土中	500 ~ 1300	—	—	—
	在干燥的大气中	12000 ~ 18000	—	—	—
矿	金属矿石	0.01 ~ 1	—	—	—
水	海水	1 ~ 5	—	—	—
	湖水、池水	30	—	—	—
	泥水	15 ~ 20	—	—	—
	泉水	40 ~ 50	—	—	—
	地下水	20 ~ 70	—	—	—
	溪水	50 ~ 100	—	—	—
	河水	30 ~ 600	—	—	—

表 1-3

地的电阻率 ($\Omega \cdot m$) 和相对介电系数

序号	名称	电阻率 ρ ($\Omega \cdot m$)		相对介电常数 ϵ_r
		潮湿状态	干燥状态	
1	花岗岩	10^3	10^6	7 ~ 12
2	正长岩	10^3	10^6	13 ~ 14
3	闪长岩		10^6	8 ~ 9
4	辉长岩	10^4	10^6	
5	玄武岩		10^6	12
6	辉绿岩	10^4	10^7	
7	安山岩	10^3		
8	片麻岩	10^4	10^8	8 ~ 15
9	页岩	$10^2 \sim 10^3$		
10	大理岩	10^4	10^8	8
11	石灰岩	$10^2 \sim 10^3$	$10^8 \sim 10^9$	15
12	砂岩	$10 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^8$	9 ~ 11
13	煤	$10^2 \sim 10^4$	10^5	
14	粘土	$10 \sim 10^4$	10^7	
15	土壤	$10 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^4$	2 ~ 20
16	水			≈ 80