

21世纪 高等学校本科系列教材

接 地

(31)

陈先禄 刘渝根 黄 勇 编著

The background of the cover is a photograph of an electrical power system. On the left, a tall, lattice-structured steel tower supports several high-voltage power lines that stretch across the frame. In the foreground on the right, a large, grey, cylindrical transformer is visible, with various electrical connections and insulators on top. The sky is a clear, pale blue, and in the distance, some residential buildings can be seen. The overall scene is brightly lit, suggesting a sunny day.

重庆大学出版社

接 地

——

从农村金融改革到乡村振兴



接 地

陈先禄 刘渝根 黄 勇 编 著

重 庆 大 学 出 版 社

内 容 提 要

本书主要叙述接地的基本概念、基本原理,发电厂、变电站和输电线路接地的有关问题,降低接地电阻的方法,计算机及电子设备接地,接地参数的数值计算、现场测试和模拟试验的原理和方法以及接地装置的腐蚀机理和防腐措施。本书注重理论联系实际,并吸收国内外的新技术和新成果,可作为电工学科本科、研究生参考教材,也可供从事接地工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

接地/陈先禄编著. —重庆:重庆大学出版社,2001.8

ISBN 7-5624-2646-5

I. 接... II. 陈... III. 接地系统 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 04750 号

接 地

陈先禄 刘渝根 黄勇 编著

责任编辑:彭宁 版式设计:彭宁

责任校对:任卓惠 责任印制:张永洋

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400044

电话:(023)65102378 65105781

传真:(023)65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(市场营销部)

全国新华书店经销

重庆大学建大印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:10.5 字数:262千

2002年7月第1版 2002年7月第1次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2646-5/TM·81 定价:16.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

前言

接地技术已经有二百多年的发展历史,目前它已成为保障电力系统、电子设备和建筑设施等安全可靠运行和人身安全的重要技术措施之一。编写本书的目的是为了帮助学生了解接地的基本概念、基本原理和基本方法;熟悉发电厂、变电站接地设计的方法和步骤;了解国内外接地技术的最新发展。同时为了帮助从事接地工程的技术人员更好地理解 and 执行国家有关接地的规程和标准。因此,作者在编写本书时,既强调接地的基本概念,又注重接地工程的实际应用,重视技术结论或设计要点,同时尽可能反映国内外在接地技术方面的先进水平。本书还介绍了作者及其同事们长期从事接地技术研究取得的成果,以及为国内近百座 110 ~ 500kV 发电厂、变电站进行接地设计或咨询工作中所取得的经验和结论。

本书共分为 7 章,绪论、第 1 章、第 7 章由陈先禄教授编写,第 3 章、第 6 章由黄勇同志编写,第 2 章、第 4 章、第 5 章、由刘渝根同志编写。

在书稿的编写过程中,曾得到肖新华和刘黎两同志的大力支持,帮助收集整理资料和绘图。在校阅过程得到重庆大学出版社彭宁编辑的支持和热情帮助。对他们的辛勤劳动,作者表示衷心的感谢,同时也感谢对本书编写给予关心和帮助的同志们。

目 录

绪论	1
第1章 接地的基本原理	4
1.1 地电参数	4
1.2 地中电流分布	14
1.3 接地电阻	26
1.4 接触电压和跨步电压	38
1.5 接地参数的数值计算方法	42
1.6 接地和接零保护	49
第2章 发电厂、变电站接地	55
2.1 概述	55
2.2 发电厂、变电站地网的设计总原则	56
2.3 地网的设计步骤和方法	60
2.4 架空地线分流系数计算	68
2.5 接地网均压导体的不等间距布置方式	81
2.6 GIS装置的接地	84
第3章 输电线路杆塔接地	94
3.1 冲击接地特性	94
3.2 引外接地	102
3.3 输电线路杆塔接地	105
第4章 计算机及电子设备接地	113
4.1 计算机及电子设备接地的目的及要求	113
4.2 计算机及电子设备的接地方式	114
4.3 发电厂、变电站计算机接地	116
第5章 降低接地电阻的方法	122
5.1 几种简单的降低接地电阻的方法	122
5.2 深井接地	124
5.3 接地降阻剂	130
第6章 接地参数测试	136
6.1 土壤电阻率测试	136

6.2	接地电阻测试	140
6.3	影响接地参数测试的因素和限制措施	143
6.4	接触电压和跨步电压测试	145
6.5	冲击接地参数测试	146
6.6	接地模拟试验	147
第7章	接地装置的腐蚀及其防护	152
7.1	腐蚀的基本原理	153
7.2	腐蚀速度及其测试方法	156
7.3	金属在土壤中的腐蚀	157
7.4	腐蚀的防护	159
	参考文献	161

绪 论

二百多年来,接地技术已经从建筑物的一种防雷保护措施发展成为保障电气设备、建筑设施安全可靠运行和人身安全的重要技术措施之一。它涉及能源、军事、建筑、交通、电子通信、石油化工及家用电器等部门和行业,正愈来愈受到广大工程技术人员的普遍重视。

一、接地的基本概念和作用

关于接地的定义在不同的教科书中有不同的提法。通常认为接地是指电气系统的某些节点或电气设施的某些导电部分与地(包括大地,或范围比较广泛、能用来代替大地的等效导体)之间的电气连接。在国家标准 DL/T621—1997《交流电气装置的接地》中定义为:将电力系统或建筑物中电气装置、设施的某些导电部分经接地线连接至接地极。

接地的目的是利用地作为传导电流回路的一个元件,从而在正常、事故或遭受雷击的情况下将电气连接处的电位固定在某一允许的范围内,以保证人身和设备安全,维护系统和设施安全可靠地运行。

电气连接处与地相接触的导体称为接地体。若接地体为垂直埋设在地中的金属导体则称为垂直接地体;若接地体为水平埋设在地中的金属导体则称为水平接地体;若接地体为一组水平埋设的金属导体网格则称为水平接地网。若接地体为水平接地网和垂直接地体共同构成则称为复合(或立体)接地网。电气回路或电气设备与接地体之间的电气连线称为接地引线。接地引线、接地体统称为接地装置或接地系统。

由于地中电场和人工电场的影响,虽然没有电流经接地体向地中流散,但接地处仍存在一定的电位,它一般不超过 10V。在电气系统发生故障或遭受雷击的情况下,有电流经接地体向地中流散,这种流散电流称为入地电流。当存在入地电流时,接地处或接地体对无穷远处的电位称为接地电位或地电位升高。接地电位与接地电流之比称为接地电阻。

当电力系统发生接地短路故障或遭受雷击时,接地电位可达到几到几百千伏,这样高的电位可能使设备遭受反击而损坏其绝缘,或者造成设备误动作,影响供电的安全可靠性。同时,当电流在地中流散时,在地面上将出现梯度电压,此时人站在接地体附近地面上或在地上行走,可能遭受到接触电压和跨步电压的作用被电击。

在较高电压等级(110kV 及以上)的电力系统中,为了降低系统的内部过电压和绝缘水平,减少绝缘投资费用,保证继电自动装置和过电压保护装置可靠动作,须将系统的中性点

接地。

电流流进人体会发生触电事故,轻者受伤,重则导致死亡。据不完全统计,每年全国有几千人触电死亡。因电热老化或机械损伤等原因,往往使电气设备的绝缘损坏,会因漏电而使原来不带电的金属部分带电。如果金属外壳没有接地,则具有相电压,人碰到就很危险;若将金属外壳接地,就可以使大部分电流通过接地体而流散到地中,经分流后只有很小的电流经过人体,接触金属外壳的人员就不会发生危险。

雷电是大自然界极为壮观的声、光、热、电现象。它严重地影响着人类的生产活动和生活活动。接地是控制雷电的基本措施之一。对于雷电,大地是保持宇宙电系统平衡,消散雷电能量的终端。自从1745年富兰克林发明避雷针并用来保护圣·马诺教堂起,接地装置就与防雷装置同步发展。避雷针、避雷线、避雷器只有通过良好的接地装置才能将强大的雷电流引入大地耗散掉。为了避免因经接地体流入大地的电流所产生的接地电位升高对邻近的设备造成反击以及因此而使地面上的人体遭受接触电压和跨步电压的袭击,对接地装置应有严格的要求。

静电,在2600年前希腊人塔利斯发现了琥珀被其他物体摩擦后具有吸引轻小物体的能力的时候起就被人们所认识。但是在过去几千年的历史中,它没有像雷电那样凶猛,而且呈现出一幅温柔而又神秘的面孔,没有引起人们的重视。但是到了火箭和电子信息技术高度发展的今天,摩擦所产生的静电就足以使电子计算机元件损坏;微小的静电火花可能烧毁呼啸飞行的巨型火箭。特别是近几十年来,随着高分子聚合技术的发展及其原材料的使用,在工业生产和人们生活中,静电带来了不容忽视的影响和灾害。如石油、化工、兵工、船舶、航天工业等部门,由于静电常引起燃烧和爆炸。又如在高级宾馆、会堂,由于静电会使人们遭受电击产生不愉快,甚至发生二次事故。在呼啸飞掠长空的欧洲-I号火箭因静电引起爆炸以及成万吨石油油库因静电火灾爆炸等事件发生后,震惊了科学界。现在静电防护为发达国家所高度重视。比如美国国防部制订了静电防护规范。我国现正进行静电防护规范的制订工作。在静电防护措施中接地是基本措施之一,它有如下作用:泄漏带电体的静电荷;防止与带电体附近导体的感应而带电;限制带电体电位升高而产生静电放电。

随着电子技术日益向高频率、宽平带、高集成度、高可靠性和高精度方向发展,电磁干扰已成为系统和设备正常工作的突出障碍。所谓电磁干扰是指系统内部或外部的电噪声源的电压或电流通过传导或者电磁场辐射传到某一设备并影响该设备性能时,称为电磁干扰。由于电磁干扰的存在,轻则使系统或设备运行不稳定,严重者可使电子元件毁坏。对于新型模式(MOS)电子计算机,电压超过5V将导致误动作或元件损坏。避免和消除电磁干扰的主要方法之一就是接地或经屏蔽接地。

综上所述,接地是维护系统或设备正常运行(稳定性和可靠性),保障设备、设施和人身的安全,防止雷电和静电危害,抑制电磁干扰等必不可少的措施。目前接地技术愈来愈为人们所重视,国内外不少专家学者正对接地进行深入而广泛的研究。

二、研究内容和方法

接地的种类可以根据地电流的频率、接地的用途和设备、设施的不同来划分。根据接地电流的频率可分为交流(工频)接地、直流接地和冲击(包括雷电、操作波和核电磁脉冲)接地。直流电流在大地中流动会在接地体周围产生恒定电流场,工频电流也可以这样近似认为。在研究直流或工频接地时,要从恒定电场理论出发,研究地中电流的分布规律。表征接地装置性

能的重要参数是接地装置的接地电阻,接地电位升高,接地装置上土地表面的电位分布,接触电压和跨步电压。利用传导电流和位移电流在地中分布的相似性,电容和接地电阻互为倒数的关系,能够对简单接地体进行计算。对于复杂接地体,要从理论上对以上参数进行分析计算是很困难的,而且不切实际。过去采用简单接地体计算公式的组合或者用由实验总结出来的经验方式进行计算。国内外不少学者和专家从20世纪70年代开始研究接地参数的数值计算方法,中国、美国、加拿大、法国等都编制了接地计算程序,并用于工程之中。在冲击电流或雷电流通过接地体向大地流散时会在接地体周围产生瞬态电磁场,所以应该用瞬态电磁场理论来研究冲击接地。过去常常用冲击接地阻抗来量度冲击接地的作用。所谓冲击接地阻抗是指接地体对地冲击电压瞬时值与注入接地体的冲击电流瞬时值的比值。目前,在工程中常常用冲击接地电阻来表示冲击接地的作用。所谓冲击接地电阻是接地体对冲击电压的幅值与冲击电流幅值之比。接地体的工频接地电阻与冲击接地电阻之比称为冲击系数。

根据接地的不同用途可以将接地分为工作接地、保护接地、防雷接地和防静电及电磁干扰接地。所谓工作接地是指由于系统或设备工作运行的需要而进行的接地。比如电力系统中发电机和变压器中性点直接接地或经消弧线圈接地,直流系统接地和计算机的逻辑接地等。所谓保护接地是指为了保证人身安全,避免发生触电事故,将设备正常情况下不带电的金属部分(如外壳)与接地装置进行良好的金属连接。比如所有的电气设备和家用电器的外壳接地都是保护接地。所谓防雷接地是指为了将雷电引入地中,且减小雷电流通过时的地电位升高而进行的接地。例如避雷针、避雷线和避雷器接地,建筑物、易燃易爆危险品库房的重要防雷接地,输电线路杆塔防雷接地、计算机防雷接地等。所谓防静电和电磁干扰接地是指为了消除静电荷和抑制电磁干扰而进行的接地。比如用来加工、贮存、运输各种易燃易爆液体、气体、粉末状易燃产品的设备、贮存罐等进行的防静电接地,以及电子设备为防止电磁干扰进行的屏蔽接地等。

根据设备和设施的不同可将接地分为发(变)电站接地、输电线路杆塔接地、电子设备接地、计算机接地、高层建筑接地、微波塔接地等。

在进行接地装置设计时,首先要知道埋设接地装置处大地的土壤电阻率。测量土壤电阻率的方法常用文莱四极法。土壤的电阻率是由大地的地质结构决定的,由于地下竖直方向各层所含的物质不同,水平方向各部分的物质也可能不相同,具有随机性。所以大地土壤电阻率具有各向异性的特点,沿不同方向,用不同间距测量出的电阻率不同。若遇地下有可被极化的矿体,地的电阻率将随测量电流频率的变化而变化。因此,在工程中应重视对实测的电阻率数据的分析和处理。对于建设完备且准备投入运行的接地装置,为了验证设计计算的正确性和为运行提供可靠的数据,都必须进行现场实测。在实测中应注意消除各种干扰带来的误差。对于正在进行设计研究的接地装置,无法用实测的方法来确定它们的参数,为了研究它们的性能,常常将它们按缩小比例模型在电解槽和大型水(或砂)池中进行物理模拟试验,从模型上确定接地装置的结构和参数。重庆大学高压试验室建立了在国内外都比较大型的模拟水池($(10 \times 10 \times 2.5\text{m})^3$ 和5m直径的半球型砂池),利用它们对实际的变电所接地网进行模拟实验研究和接地理论探讨。今后,模拟试验的方法仍然是研究接地的重要方法之一。

本书共分为7章,第1章讲述接地的基本原理;第2章介绍发电厂、变电站接地的有关问题;第3章讲述输电线路杆塔接地,包括冲击接地的有关理论;第4章简单介绍计算机及电子设备接地;第5章介绍降低接地电阻的方法;第6章介绍接地参数的现场测试和模拟试验方法;第7章叙述接地装置的腐蚀及防护措施。

第 1 章

接地的基本原理

1.1 地电参数

人们为了进行正确合理的接地设计,需要了解电流在地中流动的分布规律,而地中电流的分布规律除了和电流的频率有关外,还决定于大地的电学性质。表征大地电学性质的主要参数是大地的电阻率、介电常数和导磁率。

据分析,在一般情况下,研究直流或工频接地时,可以把大地看成导体;而研究冲击接地时,在低地电阻率地区,只需考虑传导电流的作用,只有在地电阻率地区,才需考虑位移电流的影响。

1.1.1 地电阻率

电阻率是物质的基本属性,它非常明确地表征物质的导电性能。物质的电阻率是该物质单位立方体的电阻,用 ρ 表示,单位为欧[姆]·米,记为 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

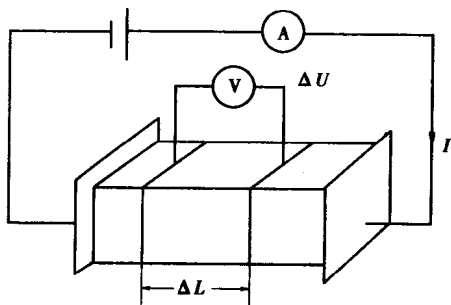


图 1.1 电阻率测试原理图

物质的电阻率一般可采用图 1.1 所示的方法来测量。将被测物质做成横截面积为 S ,长度为 L 的几何体,夹在两电极之间,并通以电流,分别用电流表、电压表测出回路中的电流 I 和电极两端的电压 U ,则电极间物质的电阻为 $R = \frac{U}{I}$,再由 $R = \rho \frac{L}{S}$ 计算出物质的电阻率为:

$$\rho = R \frac{S}{L} = \frac{U}{I} \cdot \frac{S}{L} \quad (1.1)$$

物质的电阻率与几何形状无关,而电阻则由其几何形状的大小决定。物质的电导率为电阻率的倒数,用 δ 表示,单位为西门子/米,记为 s/m 。

1921 年施兰伯格在法国首次将研究地下物质的电阻率用于地质的电法勘探中。电法勘探是以地壳中岩石和矿物的导电性差异为基础,通过观测与研究人工建立的地下电流场的分

布规律来达到区分地下物质的种类和分布情况的目的。在接地技术中,为了设计安全可靠而又经济的接地装置,也需要决定地中电流分布规律的地电阻率。有关地电阻率的测量方法将在第6章中介绍。下面介绍常见地下物质的电阻率,并讨论影响电阻率的主要因素。

地电阻率的变化范围很大,在接地工程中常常遇到电阻率小于 $500\Omega \cdot m$ 到大于 $5000\Omega \cdot m$ 的地层。表1.1列出常见地下物质的电阻率参考值。

表1.1 常见地中物质的电阻率

类别	名称	电阻率参考值/ $\Omega \cdot m$
泥 土	冲积土	5
	陶粘土	10
	泥炭、泥灰岩、沼泽地	20
	黑土、田园土、陶土、白垩土	50
	粘土	60
	砂质粘土	100
	黄土	200
	含砂粘土、砂土	300
	多石土壤	400
	上层红色风化粘土、下层红色页岩	500
表层土夹石、下层石子	600	
砂	砂子、砂砾	1 000
	地层深度大于10m,地下水在深处时草原的砂粒	1 000
	地层深度不大于1.5m,位于多岩石基底上软质粘土	1 000
岩 石	砾石、碎石	5 000
	多岩石地	4 000
	花岗岩	200 000
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
其 他	金属矿	0.01~1
	混凝土(在水中)	40~50
	混凝土(在湿土中)	100~200
	混凝土(在干土中)	500~1 300
	混凝土(在干燥的大气中)	12 000~18 000
	倒碎的木炭	40

从表1.1可以看出,岩石及土壤的电阻率有一定的变化范围,以下各种因素会使地电阻率发生变化。

1.1.1.1 地电阻率随外加电场的频率增加而减小

在变频激发极化物探中发现,用不同频率的电流测量的视在电阻率是不相同的,即使使用的频率很低,也可发现地电阻率随频率的增加而减小。

目前国内外对这种现象提出了电子导体和离子导电两种激发极化的假说^[2]。这种激发极化效应是指在充电和放电过程中,由于电化学作用引起缓慢变化的附加电场现象。无论哪种假说,都认为大地的视在电阻率随频率的增大而减小。由第一种假说,根据实验结果,地电阻率有如下近似的计算公式:

$$\rho_f = \frac{\rho_0 \rho (1 + A \sqrt{jf})}{\rho + (\rho_0 + \rho) A \sqrt{jf}} \quad (1.2)$$

式中: ρ_f ——用频率为 f 的电流测量的电阻率;
 ρ_0 ——用直流电流测量的电阻率;
 ρ ——地中可被极化物体完全激发的电阻率;
 A ——常数。

由(1.2)式可看出,当频率 $f=0$ 时, $\rho_f = \rho_0$,即直流情况下测得的电阻率。当频率为无穷大时, $\rho_f = \frac{\rho_0 \rho}{\rho + \rho_0}$,即电阻率为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,显然此时电阻率减小了。 ρ_0 和 $\frac{\rho_0 \rho}{\rho + \rho_0}$ 是地电阻率的两个极限值。其中任意频率下的电阻率都是依频率而异的可变复量。

1.1.1.2 地电阻率随电场强度的增加而下降

通过实验发现,当地中电场强度超过某一值后,电流和电压已不再是直线关系,而呈现出非线性的电学现象,电阻率随电场强度的增加而下降。在导电的矿物、潮湿或干燥的岩石以及土壤和水中均可以见到。对于这种非线性的电学现象,在潮湿的土壤中,有可能是因为电解溶液中电导在强电场中会增大;在干燥的土壤中,由于颗粒间的空气间隙易于产生局部放电而使

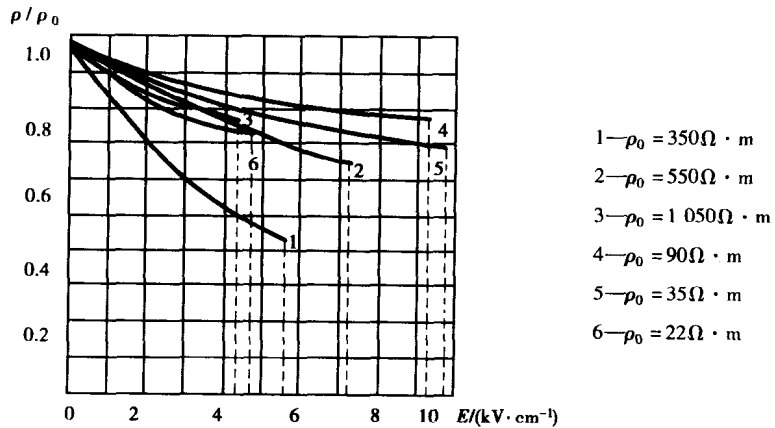


图 1.2 腐殖土壤电阻率与电场强度的关系

电导非线性。地电阻率随地中电场强度的增加而平稳的下降关系,如图 1.2 所示,图中各虚线与横坐标的交点,表示在该电阻率下的击穿场强。

1.1.1.3 地电阻率与其成分和结构的关系

多数岩石及土壤可以视为由均匀相连的胶结物与不同形状的岩石颗粒组成。它们的电阻率决定于这些胶结物和颗粒的电阻率、形状及其相对含量。若胶结物电阻率为 ρ_1 ，颗粒电阻率为 ρ_2 ，当岩石或矿物仅由这两种物质组成时，不同结构的岩石电阻率可由以下表达式来确定：

①球形颗粒

$$\rho = \frac{(\rho_1 + 2\rho_2) - (\rho_1 - \rho_2)V}{(\rho_1 + 2\rho_2) + 2(\rho_1 + \rho_2)V} \quad (1.3)$$

式中： V ——颗粒的体积百分含量。

②针状颗粒(其形状近似于拉长的旋转椭球体)

$$\rho_n = \rho_1 \frac{\rho_1 + \rho_2 - (\rho_1 - \rho_2)V}{\rho_1 + \rho_2 + (\rho_1 - \rho_2)V} \quad (1.4)$$

$$\rho_l = \rho_1 \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + (1 - V)\rho_2} \quad (1.5)$$

式中： ρ_n 和 ρ_l 分别为垂直于颗粒长轴和沿着颗粒长轴方向的电阻率，它们之间的关系为：

$$\rho_n - \rho_l = \rho_1 \frac{V(1 - V)(1 - \mu_{12})^2}{[1 + V + \mu_{12}(1 - V)][V + \mu_{12}(1 - V)]} \quad (1.6)$$

式中： $\mu_{12} = \rho_2/\rho_1$ ，由于 $V \leq 1$ 及 $(1 - \mu_{12})^2 \geq 0$ ，故有 $\rho_n - \rho_l \geq 0$ ，即 $\rho_n \geq \rho_l$ ，这说明，无论 ρ_1 和 ρ_2 及体积百分含量为任何值，垂直于颗粒长轴方向的岩石、矿物的电阻率总是大于沿着颗粒长轴方向的电阻率。

③圆片状颗粒(形状近似于压扁的旋转椭球体)

$$\rho_n = \rho_1(1 - V) + \rho_2 V \quad (1.7)$$

$$\rho_l = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 V + \rho_2(1 - V)} \quad (1.8)$$

式中： ρ_n 和 ρ_l 的含义与针状颗粒相同，它们之间有如下关系：

$$\rho_n - \rho_l = \rho_1 \frac{V(1 - V)(1 - \mu_{12})^2}{V + \mu_{12}(1 - V)} \geq 0$$

即 $\rho_n \geq \rho_l$ ，垂直于压扁颗粒的电阻率总是大于沿着颗粒压扁方向的电阻率。

根据分析，无论是高阻还是低阻颗粒，当其 $V < 60\%$ 时，整体岩石、矿物的电阻率 ρ 受 ρ_2 的影响较小，其值接近胶结物电阻率 ρ_1 ；只有当 $V \geq 60\%$ 时， ρ_2 才对 ρ 起作用。这是由于颗粒体积含量不大时，各颗粒是相互分离的，而胶结物是彼此连通的，故矿物颗粒对整体岩石、矿物电阻率影响不大，此时胶结物起主导作用。但当颗粒的体积相当大以至彼此连通时， ρ_2 则对整体岩石和矿物的电阻率有明显的影响。

通常，接地工程中涉及到的大地范围从离开接地体几十米(研究电位分布)到数千米(研究接地电阻测量)。在这样的范围内，地电阻率不是均匀的。通常地层具有水平层状和垂直分块结构，这两种结构的地层都是各向异性的。对于由两种电阻率不同的薄层交替分层的情况，可用电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 ，两层总厚度分别为 h_1 和 h_2 的模型来等效，如图1.3所示。用电阻并联的关系可推得：

$$\rho_n = \frac{h_1\rho_1 + h_2\rho_2}{h_1 + h_2} \quad (1.9)$$

$$\rho_t = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}} \quad (1.10)$$

式中： ρ_n 和 ρ_t 分别为垂直于分层方向和沿分层方向的电阻率。

由上两式可得：

$$\rho_n - \rho_t = \frac{h_1 h_2 (\rho_1 - \rho_2)^2}{(h_1 + h_2)(h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2)} \geq 0 \quad (1.11)$$

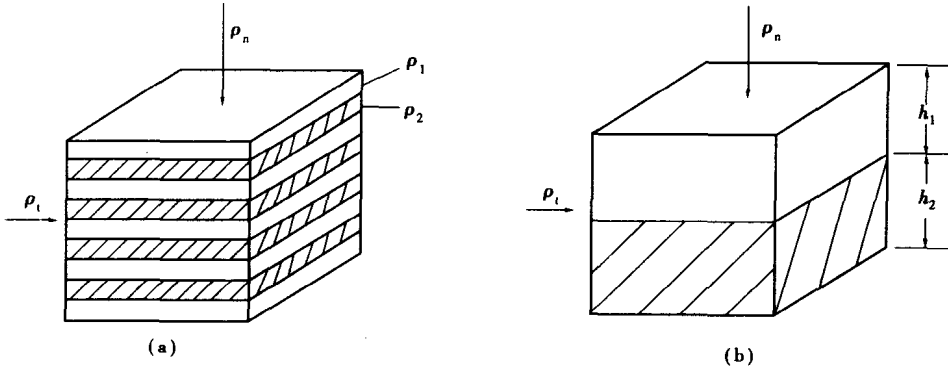


图 1.3 层状岩模型图
(a)实际构造 (b)等效模型

表 1.2 典型地层的各向异性系数

名 称	$\lambda = \sqrt{\rho_n/\rho_t}$	ρ_n/ρ_t
层理不明的粘土	1.02 ~ 1.05	1.04 ~ 1.10
具有夹石层的粘土	1.05 ~ 1.15	1.10 ~ 1.32
成层砂岩	1.10 ~ 1.59	1.20 ~ 1.65
泥板岩	1.10 ~ 1.59	1.20 ~ 2.50
泥质页岩	1.41 ~ 2.25	2.00 ~ 5.00
煤	1.73 ~ 2.55	3.00 ~ 6.50
无烟煤	2.00 ~ 2.55	4.00 ~ 6.50
石墨页岩及碳质页岩	2.00 ~ 2.75	4.00 ~ 7.50

故只要 $\rho_1 \neq \rho_2, h_1 \neq 0$ 和 $h_2 \neq 0$,则无论 ρ_1 和 ρ_2 及 h_1 和 h_2 值的大小如何,皆有 $\rho_n > \rho_t$,即总是垂直分层方向的电阻率大于沿分层方向的电阻率。通常用非各向同性系数 λ 和平均电阻率 ρ_m 来表示层状结构岩石的导电方向性和非各向同性性,它们的定义为:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} \quad (1.12)$$

$$\rho_m = \sqrt{\rho_n \rho_t} \quad (1.13)$$

常见典型地层的非各向同性系数 λ 和 ρ_n/ρ_t 列于表1.2中。

对于垂直分块结构地层,如图1.4。若两块电阻率分别为 ρ_1 和 ρ_2 ,面积为 A_1 和 A_2 的土壤,

其等值电阻率可按下式计算：

$$\rho_{eq} = \frac{(A_1 + A_2)\rho_1\rho_2}{A_2\rho_1 + A_1\rho_2} \quad (1.14)$$

1.1.1.4 地电阻率与地中所含水分的关系

在自然界的岩石、矿石及土壤中,或多或少地含有溶解盐的间隙水,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,具有离子导电性能。

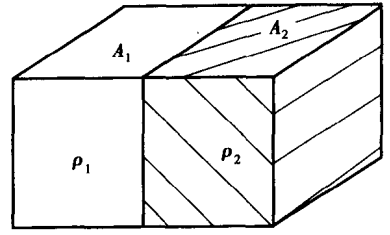


图 1.4 垂直分块结构

一般含水量大的岩石和土壤的电阻率较低,而含水量少的干燥岩石和土壤的电阻率则较高。岩石含水量的大小主要取决于岩石和土壤本身的孔隙度及当地水文地质条件。在地下水位面以下,岩石土壤孔隙中几乎充满了地下水,此时岩石含水量便等于岩石孔隙度。表 1.3 列出了几种常见岩石的孔隙度的测定值。

表 1.3 几种常见岩石的孔隙度

分 类	岩石名称	孔隙度/%
沉 积 岩	土 壤	20.0 ~ 69.4
	砂	15.0 ~ 63.2
	粘 土	10.1 ~ 62.9
	砾 石	20.2 ~ 37.7
	页 岩	1.5 ~ 44.8
	砂 石 灰 岩	2.0 ~ 18.4 0.7 ~ 10.0
变 质 岩	结 晶 石 灰 岩	0.9 ~ 8.6
	片 麻 岩	0.4 ~ 7.5
	大 理 石	0.1 ~ 2.1
火 成 岩	玄 武 岩	18.7
	安 石 岩	6.0
	辉 长 岩	0.4 ~ 1.9
	花 岗 岩	0.4 ~ 4.1
	辉 绿 岩	0.2 ~ 5.1
	闪 长 岩	0.4 ~ 4.0
	正 长 岩	0.9 ~ 2.9

处于地下水位面以上的岩石,通常也不是完全干燥的。因为大气中的水分通过降雨渗入地下,在渗透过程中由于岩石颗粒对水的吸附作用,岩石孔隙中能保持一部分水。一般孔隙直径愈小,吸水性愈强,岩石的含水量便越大,则电阻率较低。图 1.5 绘出了砂及砂混合的粘土的电阻率与含水量的关系。

从图 1.5 中曲线可以看出,在含水量相同的情况下,砂的电阻率较高。比如,在含水量为 15% 时,砂比砂混粘土的电阻率约大 5 倍。这是由于砂总的孔隙度不如粘土多,更主要的是由于粘土的透水性很差,孔隙中的水不易流动,因而溶解并聚集了大量的盐分,矿化度高,所以粘土的电阻率比砂低。

1.1.1.5 岩石电阻率与温度的关系

据实际资料表明,当岩石所处的外界温度发生改变时,其电阻率也会相应发生变化。这是

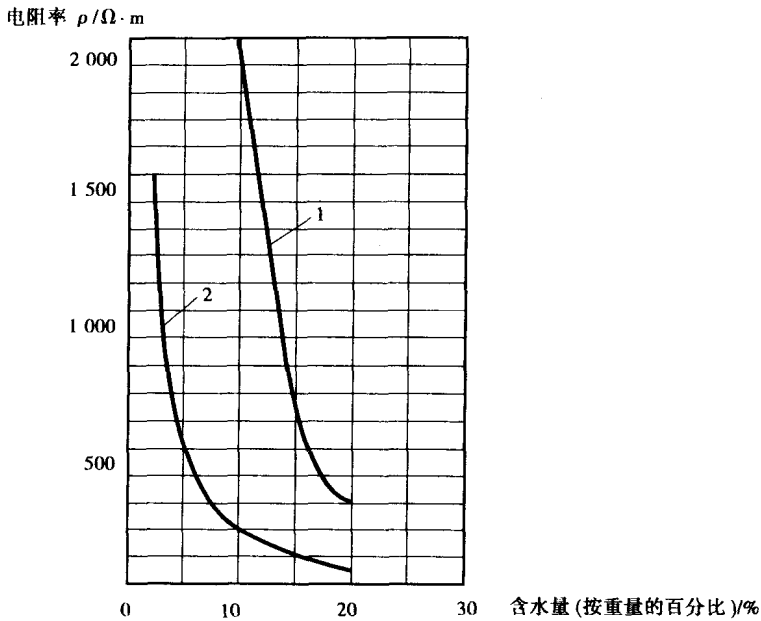
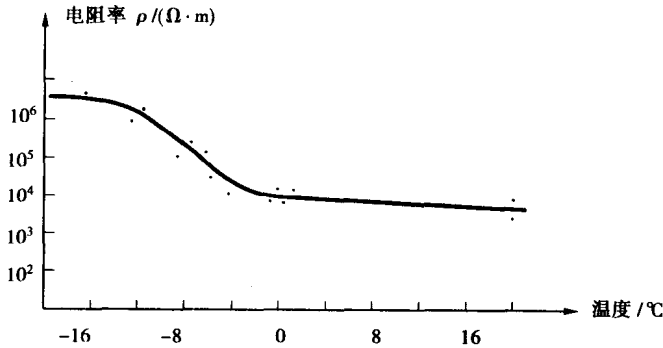


图 1.5 含水量对砂与砂混合的粘土的电阻率的影响

图中:1—砂;2—与砂混合的粘土

由于岩石、矿石中的所含水溶液的电阻率与温度有明显的变化关系。图 1.6 为一块砂岩样本



孔隙度 12, 湿度 1.5%

图 1.6 含水砂岩电阻率随温度变化的实测曲线

的电阻率随温度变化的实验观测曲线。从图中可以看出,在 0°C 以上的正温区内,随温度的升高,电阻率缓慢减小,变化不明显。这说明在常温条件下,温度的变化对岩石电阻率的影响并不大。然而在 0°C 以下的负温区,随温度的降低,含水岩石的电阻率明显增高,当温度下降到近 -20°C 时,电阻率高达 $10^6 \Omega \cdot m$,这是由于岩石孔隙中水溶液结冰后导电性能很差的缘故。

凡温度为负温或零温,且含有冰的各种土层均称为冻土;若不含冰,则称为寒土;冬季冻结,夏季全部融化的土层称为季节冻土。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,可达未冻土电阻率的数十倍。例如,在青海省木里多的多年冻土地区的测量结果表明,未冻土与冻土的电阻率变化范围达 $500 \sim 15\,000 \Omega \cdot m$ 。

此外,由于地壳常温带(自地表面深度 20 ~ 25m)以下,地温随深度的增加而变大。把地