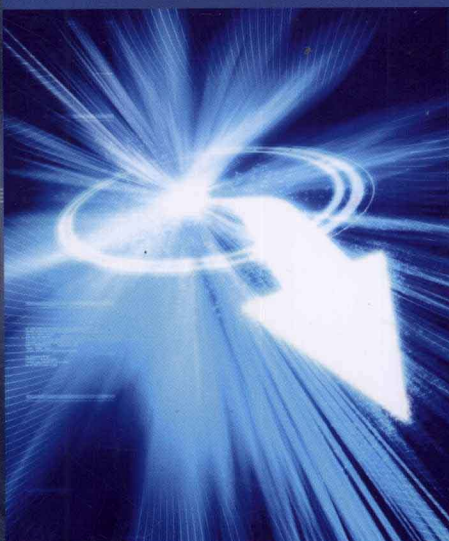


高密度电阻率法测深 原理及应用实例

周 杨 陈服军 陈桂珠 铁 瑛 徐 平 编著

GAOMIDU DIANZULÜFA CESHEN
YUANLI JI YINGYONG SHILI



黄河水利出版社

高密度电阻率法测深 原理及应用实例

周 杨 陈服军 陈桂珠 铁 瑛 徐 平 编著

黄 河 水 利 出 版 社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书对高密度电阻率法勘探的原理、基本理论和技术方法作了较为全面的论述,并给出了代表性的工程实例。全书共分六章,内容包括概述、常见地质特征的电学特性、高密度电阻率法的理论基础、高密度电阻率法的勘探技术、高密度电阻率法的数值模拟方法和高密度电阻率法的工程应用等。

本书概念清晰、结构紧凑、内容丰富、论述严谨、观点新颖,可供应用地球物理、水利水电地质勘察的工作者和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高密度电阻率法测深原理及应用实例/周杨等编
著. —郑州:黄河水利出版社,2012. 8
ISBN 978 - 7 - 5509 - 0335 - 7

I. ①高… II. ①周… III. ①电阻率法勘探 IV. ①
P631. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 192851 号

组稿编辑:王志宽 电话:0371 - 66024331 E-mail:wangzhikuan83@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:9.75

字数:225 千字

版次:2012 年 8 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2012 年 8 月第 1 次印刷

定价:29.00 元

前 言

高密度电阻率法是直流电阻率法中的一个分支,是在常规电法勘探基础上发展起来的一种地球物理勘察方法,而与常规的直流电阻率法相比,具备自身的优势。高密度电阻率法数据采集系统既包含了剖面观测系统,又包含了电测深观测系统,所以数据观测精度较高,包含了丰富的地电信息,从而在勘测地下不均匀电性体中取得了很好的效果,在工程地质勘探方面具有良好的应用前景。

本书第一章简要介绍了高密度电阻率法国内外研究现状、高密度电阻率法特点和应用;第二章阐述了常见地质特征的电学特性,其中包括了岩石、水、断层、溶洞、煤和煤矿地下采空区等,以及相关参数对各种地质特征电学特性的影响规律;第三章首先介绍了高密度电阻率法勘探的电场基本定律,以及地下电流密度随深度的变化和地下不均匀电阻率对电场的影响,然后讨论了高密度电阻率法勘探的测量原理;第四章从高密度电阻率法勘探设备、野外勘探技术和勘探数据处理三方面,系统地总结了高密度电阻率法的勘探技术;第五章针对目前常用的正反演方法,论述了常用的正反演方法的理论基础和分析模型;第六章基于上述高密度电阻率法的理论基础和勘探技术,重点阐述了高密度电阻率法在工程地质勘探中的应用。

本书编写人员及编写分工如下:第一章由黄河水利科学研究院的周杨编写,第二章由水利部机电研究所的陈服军编写,第三章由郑州大学的铁瑛编写,第四章由水利部机电研究所的陈桂珠、陈服军编写,第五章由水利部机电研究所的陈桂珠编写,第六章由郑州大学的铁瑛、徐平编写。

本书在编写过程中参考并引用了有关专业的书籍,得到了高密度电阻率法勘探专家和同行们的大力支持和帮助,在此表示由衷的感谢。由于编者水平有限,加之时间仓促,错漏之处在所难免,衷心地希望广大专家、学者和读者批评指正。

编 者
2012 年 5 月

目 录

前 言

第一章 概 述	(1)
第一节 引 言	(1)
第二节 国内外高密度电阻率法研究现状	(1)
第三节 高密度电阻率法的特点和基本结构	(4)
第四节 高密度电阻率法的应用	(6)
第二章 常见地质特征的电学特性	(8)
第一节 岩 石	(8)
第二节 水	(20)
第三节 断 层	(20)
第四节 溶 洞	(22)
第五节 煤	(23)
第六节 煤矿地下采空区	(24)
第三章 高密度电阻率法的理论基础	(28)
第一节 稳定电流场	(28)
第二节 均匀介质中的点电源二维电场	(30)
第三节 地下电流密度随深度变化的规律	(33)
第四节 地下不均匀电阻率对电场的影响	(36)
第五节 高密度电阻率法勘探的工作原理	(40)
第四章 高密度电阻率法的勘探技术	(47)
第一节 高密度电阻率法的勘探设备	(47)
第二节 野外勘探技术	(58)
第三节 勘探数据处理	(60)
第五章 高密度电阻率法的数值模拟方法	(74)
第一节 正演问题模拟方法	(74)
第二节 反演问题模拟方法	(87)
第六章 高密度电阻率法的工程应用	(96)
第一节 地下水勘探	(96)
第二节 溶洞和溶蚀裂隙勘探	(101)
第三节 注浆效果勘探	(112)
第四节 地热勘探	(119)
第五节 煤矿底板止水勘探	(139)
参考文献	(147)

第一章 概 述

第一节 引 言

为了解决环境地质调查、水利工程等实际工程问题,专家们特别研制出以岩石、矿石之间电阻率差异为基础的高密度电阻率法装置,通过观测和研究地下各介质间的电阻率差异,研究电场在空间上的分布特点和变化规律,从而达到查明地下地质构造和寻找地下电性不均匀体(塌陷区、岩溶区、地下水等)的目的。高密度电阻率法数据采集系统既包含有剖面观测系统,又包含有电测深观测系统,所以数据观测精度较高,包含了丰富的地电信息,从而在工程勘探中取得很好的效果。

高密度电阻率法是直流电阻率法中的一个分支,是在常规电阻率法勘探基础上发展起来的一种地球物理勘察方法,而与常规的直流电阻率法相比又具备其自身的优势。通常情况下,由于常规的电阻率法勘探仅仅是一维勘探技术,所提供的关于地下结构体的电性信息比较贫乏,因而不能对其成果进行很好的统计和解释,所以常规电阻率法常常达不到环境地质调查、工程等野外实际工作的要求。而高密度电阻率法勘探是一种二维勘探技术,在实际野外工作中所有电极一次性布置完成,数据采集和数据预处理都实现了计算机自动化,不仅野外采集数据速度快、数据信息量比较多,而且能保证采集数据的质量,可以对采集回来的野外数据进行计算机数据处理和视电阻率成像,这样就大大提高了工作效率。视电阻率反演拟断面图包含了丰富的地电信息,更直观地再现了地下断面的特征,解释起来相对也更为简单。

第二节 国内外高密度电阻率法研究现状

常规电阻率法勘探的研究始于 19 世纪初期,1815 年首先在英国康瓦尔铜矿上观察到了由铜矿产生的天然电流场,当时仅限于科学研究,还没有实际应用。为了适应工业发展的需要,矿产资源的开发和科学技术的进步促使电阻率法勘探方法产生并应用到生产实际中。约在 19 世纪末提出了电阻率法勘探,20 世纪初提出了视电阻率这一重要概念(温纳和施伦贝尔,1915 年),并确定了温纳四极和中间梯度装置。电阻率法勘探是地球物理勘探中的重要方法之一,它是以岩土体的电性差异为物理基础的。电阻率法勘探从产生至今得到了广泛的应用,并且经过 80 余年的实践和创新,已经形成了一个理论比较完善、方法多样的地球物理勘探方法。此后在全国各金属矿、石油、煤田等勘探工作中,我国常规电阻率法勘探发展也相当迅速,尤其是在金属矿产勘探中得到了有效的应用。

随着现代科学技术的发展,特别是计算机技术的飞速进步,大大促进了电阻率法勘探的新技术、新方法、新仪器的发展,尤其是野外信息的数字化和资料的计算机处理,使得电

阻率法应用范围进一步扩大,地质效果更为明显。在常规电阻率法勘探仪器方面,智能化、高效化是发展总趋势。中国吉林大学工程技术研究所、日本 OYO 公司和美国 GSSI 公司等相继开发出新一代多功能电测系统仪器及电阻率成像系统,使得野外数据采集、结果成图一次性完成。

虽然电阻率法勘探在国民经济中发挥着重要作用,但常规电阻率法由于其观测方式的限制,不仅测点密度稀疏,获得的信息量少,而且也很难从电极排列的某种组合上去研究地电断面的结构和分布,因此所提供的关于地电断面结构特征的地质信息较为贫乏,无法对其结果进行统计处理和对比解释。由此看来,在物探测试方法中,同地震勘探方法中大数据量、规律的解析思路相比,电阻率法勘探缺乏其应有的力度,常规的电阻率法已无法满足实际工作的需要。

数理方法的不断进步和计算机技术的发展,使对大量的数据进行处理并进行正演和反演成为可能。另外,电阻率法勘探的专家们不断探索新的方法,以解决更加复杂的电阻率法勘探的问题。1989 年在美国一次专题讨论会上,有人指出:“在过去 60 年里,反射地震法的数据密度增加了一万倍以上。要改善电阻率法结果的分辨率,应当把它的数据密度成千倍地增大。目前可能的是采用像地震工作那样的传感器阵列。”在这种思潮的引导下,高密度电阻率法的提出和付诸实施使电阻率法勘探也可以和地震勘探一样采用更快覆盖的方式,更准确地采集信息,更高精度地进行多维反演,使电阻率法解释资料更加直观、明了。高密度电阻率法勘探在实际工作中表现出巨大的潜力,可以说这一新技术的出现是电阻率法勘探的一大进步。

20 世纪 80 年代以来,随着我国科学技术的不断进步以及数据处理技术的发展,电阻率法在方法理论和探测技术等方面都得到了很大的提高,取得了许多理论成果和应用成果。在勘探方法上,高密度电阻率法、激发极化法、大地电磁法等多种方法不断得到研究和利用。80 年代后期,我国地矿部系统率先开展了高密度电阻率法及其应用技术研究,从理论与实际相结合的角度,进一步探讨并完善了方法理论及有关技术问题。近年来,该方法先后在重大场地的工程地质调查、坝基及桥墩选址、采空区及地裂缝探测等众多工程勘察领域中取得了明显的地质效果和显著的社会经济效益。

一、高密度电阻率法仪器发展

关于阵列电探的思想,在 20 世纪 70 年代末期就有人开始考虑实施,英国学者所设计的电测深偏置系统实际上就是高密度电阻率法的最初模式。80 年代中期,日本地质计测株式会社曾借助电极转换板实现了野外高密度电阻率法的数据采集,只是由于整体设计尚不完善,这套设备没有充分发挥高密度电阻率法的优越性。80 年代后期,我国原地质矿产部系统率先从高密度电阻率法理论与实际相结合的角度,研制成了相应类型的高密度电阻率法仪器。

我国吉林大学工程技术研究所最先研制开发出了多道分布式高密度电阻率法采集系统,并在实际工程中有了广泛的应用。基于此方法,其他仪器也相继研制成功,如长春地质学院的 GC-1 加 HD-1 型高密度电阻率采集系统,地矿部机电研究所推出了由 GC-2 型多路转换器和 MIR-1B 型多功能电测仪组成的系统,随后该所又推出了由 MIS-2 型

多路转换器和 MIR-1C 型多功能电测仪配套而成的系统,北京地质仪器厂和中国地质大学(北京)合作推出了 DUM-1 型电极转换器和 DDJ-1 型多功能电测仪系统。

目前,研究高密度电阻率法的方法技术和仪器的单位,主要有中国地质大学、上海地质仪器厂、重庆地质仪器厂等;生产仪器的还有吉林大学、重庆的有关仪器厂家等。

最近几年,国外高密度电阻率法仪器发展很快。测量道数从单通道发展到多通道,科研样机的通道数已达上百道。观测参数从单一的视电阻率发展到视电阻率、自然电位和视激化率等多参数。观测位置从陆地发展到江、河、湖、海。GPS 定位、24 位 A/D、高性能计算机等新技术成功地应用于高密度电阻率法仪器中,同时减轻了仪器的重量和体积。国外的高密度电阻率法仪器主要有瑞典 ABEM 公司研制的 Terramete SAS 4000 和 SAS 1000,美国 AGI 公司研制的 SuperSting R8-IP 和 SuperSting RI-IP,以及加拿大先达利公司推出的 SARIS(Scintrex Automated Resistivity Imaging System)。

二、电极排列发展

高密度电阻率法测量最初的排列方式主要有 3 种: α 、 β 和 γ 。现在排列方式已发展到十几种。不过仔细研究就可发现,所有排列都是从对称四极(施伦贝尔, Schlumberger)、偶极-偶极(dipole-dipole)、单极-偶极(pole-dipole)、单极-单极(pole-pole)演变而来的(其中, γ 排列方式无变种)。如图 1-1 所示, $AM=MN=NB$ 时,施伦贝尔排列就变成 α 排列; $AB=BM=MN$ 时,偶极-偶极排列就变成 β 排列;对于单极-偶极排列,就有 $AMN, MNB, AM=MN$ 和 $AM \neq MN$ 等 4 种。至于所谓的滚动排列装置,在电极排列方式上基本不变,只不过是其排列方式有利于断面滚动衔接而已。

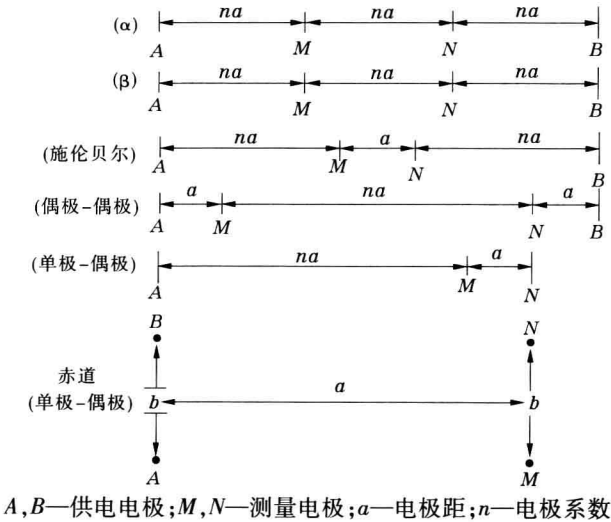


图 1-1 高密度电阻率法常用排列示意图

三、高密度电阻率法反演发展

国内研究反演方法的很多,获得的研究成果也很多,如王兴泰等发表了《电阻率图像重建的佐迪(Zohdy)反演及其应用效果》;王若等发表了《用改进的佐迪反演方法进行二

维电阻率图像重建》;张大海等发表了《二维视电阻率断面的快速最小二乘反演》;王丰等发表了《改进的模拟退火方法及其在电阻率图像重建中的应用》;王运生等发表了《用目标相关算法解释高密度电法资料》。目前,反演方法的研究正朝着不断改进,并推出商用软件的方向发展。

国外主要研究计算机自动二维、三维反演。二维反演程序是基于圆滑约束最小二乘法的计算机反演计算程序,使用了基于准牛顿最优化非线性最小二乘新算法,使得大数据量下的计算速度较常规最小二乘法快 10 倍以上。圆滑约束最小二乘法基于以下方程:

$$(j'j + uF)d = j'g$$

$$F = f_x f_x' + f_z f_z'$$

式中 F ——目标函数;

f_x ——水平平滑滤波系数矩阵;

f_z ——垂直平滑滤波系数矩阵;

f_x', f_z' —— f_x, f_z 的转置矩阵;

j ——偏导数矩阵;

j' —— j 的转置矩阵;

u ——阻尼系数;

d ——模型参数修改矢量;

g ——残差矢量。

这种算法的一个优点是可以调节阻尼系数和平滑滤波器以适应不同类型的资料。反演程序使用的二维模型把地下空间分为许多模型子块。然后确定这些子块的电阻率,使得正演计算出的视电阻率拟断面与实测拟断面相吻合。对于每一层子块的厚度与电极距之间给一定的比例系数。最优化方法主要靠调节模型子块的电阻率来减小正演值与实测视电阻率值的差异,这种差异用均方误差(RMS)来衡量。同时,M. H. Loke 的二维、三维电阻率法和激发极化法反演程序已商品化,被国内外大多数公司、单位所使用,并与仪器相配套。

四、图示方法

高密度电阻率断面一般采用拟断面等值线图、彩色图或灰度图表示,由于它表征了地电断面每一测点视电阻率的相对变化,因此该图在反映地电结构特征方面具有更为直观、形象的特点。

第三节 高密度电阻率法的特点和基本结构

高密度电阻率法是集测深和剖面法于一体的一种多装置、多极距的组合方法,它具有一次布极即可进行多装置数据采集,以及通过求取比值参数便能突出异常信息的特点。高密度电阻率法是 20 世纪 80 年代提出来的一种电阻率法勘探新技术,是以常规直流电阻率法为基础,在探测断面上同时布置多个电极(60 个或 120 个),由人工向地下发送电流,使地下形成稳定的电流场,通过自动控制转换装置对所布设的断面进行自动观测和记

录的一种物探方法。高密度电阻率法可进行二维地电断面测量,兼具断面法和测深法的功能,是进行地层划分,探测隐伏断层构造、岩溶空洞以及地质滑坡体等的一种有效手段。相对而言,高密度电阻率法具有测点密度大、信息量大、工作效率高等特点,在测量过程中,通过转换装置控制电极间的不同排列组合,能够实现直流电阻率法勘探中的各种装置形式的探测,可以提供更多的地电断面信息,有利于对比分析,因此充分发挥了物探技术在勘察中的优势。

高密度电阻率法数据采集方式是分布式的,进行野外测量时只需将全部电极设置在一定间隔的测点上,测点密度远较常规电阻率法大,一般为 $1 \sim 10 \text{ m}$,然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换开关上。电极转换开关是一种由单片机控制的电极自动转换装置,它可以根据需要自动进行电极装置形式、极距及测点的转换。测量信号经电极转换开关送入电法仪主机,并将测量结果依次存入存储器。将测量结果导入电脑后,即可对数据进行各种处理,给出地电断面分布的各种图示结果。

一、高密度电阻率法的特点

传统的电阻率法勘探时电极数量少,电极的位置需要随时更换,数据密度低、劳动强度大、工作效率低。高密度电阻率法相对于常规电阻率法而言,它具有以下特点:

(1) 电极布设是一次完成的,测量过程中无须更换电极,因而可以防止因电极设置而引起的故障和干扰。

(2) 可实现多种电极排列方式的组合,从而获得较丰富的关于地电结构的信息。

(3) 数据的采集和收录实现了自动化(或半自动化),不仅采集速度快,而且避免了由于人工操作所出现的误差和错误。

(4) 可以实现资料的现场实时处理或脱机处理。根据需要可自动绘制和打印各种成果图,大大提高了电阻率法的智能化程度。

(5) 采集信号信噪比高。高密度电阻率法仪采用专用电缆,它分为屏蔽供电线和信号线,彻底克服了线间干扰对测量数据的影响,提高了信噪比。

(6) 与传统的电阻率法相比,具有成本低、施工效率高、数据信息丰富、解释方便、勘探能力显著提高等特点。

虽然高密度电阻率法有许多优点,但在实际工程应用中也发现了一些问题:

(1) 在实际的工程探测中,根据不同的目的选择何种装置形式;如何根据探测要求确定探测范围的大小;选择何种方法对数据进行反演;反演过程中如何选择反演次数。

(2) 由于自然界中的地质体都是三维形式的,理论上使用三维模型才能更准确地解释其结构。现在三维高密度电阻率法是一个可进行积极研究的方向,但是由于仪器设备和处理软件都不能满足要求,三维高密度电阻率法还没有达到二维高密度电阻率法的应用水平。现在,这两个主要的技术问题得到了初步解决:一是仪器可以同时进行多个读数,这对于节省勘探时间是很更要的;二是计算机运算速度的提高,使得大数据量的反演可以在短时间内完成。这使得三维高密度电阻率法勘探实用化。不过在三维情况下,高密度电阻率法对目标体与背景的电率率差异的分辨率和对目标体空间尺寸的分辨率如何变化尚待确定。

二、高密度电阻率法勘探系统的基本结构

高密度电阻率法勘探系统的基本结构主要包括以下三个方面:

- (1)将全部电极布设在一定间距的测点上,然后用多芯电缆通过由单片机控制的电极自动换接装置连接到电法仪上。
- (2)测量时,由单片机控制变换电极的排列方式、极距大小,以及测点位置,自动完成各测点多极距、多装置形式的数据采集工作,并将测量结果存储在电法仪内。
- (3)将存储在电法仪内的测量结果传输到微机内,在微机中进行求取比值参数、计算各种统计误差等数据处理工作,最后将原始数据、中间结果以及最终结果打印出来,并根据需要绘制成不同形式的图件。

第四节 高密度电阻率法的应用

一、国内应用

国内应用高密度电阻率法比较多,领域也较广,据不完全统计,主要有:张献民等应用高密度电阻率法探测煤田陷落柱,表明该法可有效地探测煤田陷落柱;刘康和等采用高密度电阻率法等查明地表下一定深度的断层;侯烈忠等通过对某机场主跑道高密度电阻率法实测资料的处理和分析,简述了所探测的异常体在多种处理图件上的反映特征及高密度电阻率法在地基勘探中的效果;董浩斌和王传雷等将高密度电阻率法应用于长江堤坝坝体电性随长江水位变化的研究中,提出使用高密度电阻率法来监测堤坝隐患的发展;徐义贤、董浩斌等使用高密度电阻率法对树根分布情况进行探测,从而提出对名优树种进行科学施肥的方案;王士鹏在寻找地下水、查明采空区、探测岩溶发育带和划分地层等方面应用高密度电阻率法;郭铁柱使用高密度电阻率法在某水库坝基渗漏勘察中收到了良好的效果;吴长盛在某水库堤坝裂缝检测与评定研究中运用高密度电阻率法,准确地确定了堤坝的隐患,并提出了水库堤坝隐患治理的建议;王文州将高密度电阻率法用在高速公路高架桥岩溶地区地质勘探中;刘晓东等将高密度电阻率法用在岩溶灾害调查中,用高密度电阻率法划分可溶岩区、勘察基岩断裂构造、了解基岩岩溶发育情况等;王玉清等在高层建筑选址工作中应用高密度电阻率法,对区内浅层溶洞的平面分布情况和空间展布形态,从环境地球物理角度对工程选址及地基处理提出了合理的建议;杨湘生在湘西北岩溶石山区找水工作中应用高密度电阻率法,在确定最佳井位方面发挥了重要作用;余京洋等利用高密度电阻率法监测地下介质污染;宋洪柱等使用高密度电阻率法探测古墓,认为高密度电阻率在古墓探测中是一种简单、易行、高效的方法;周俊龙等用高密度电阻率法在红卫水库检测土石坝隐患,发现采用高密度电阻率法检测土石坝缺陷是一种成本低、效率高且确实可行的好方法;罗有春等使用高密度电阻率法探测防空洞,实例分析表明该方法对测定防空洞有较好的效果,且具有成本低、效率高、测试简便等优点;汤谨晖等将高密度电阻率法应用在某路基岩溶区勘察中,提供的数据丰富、效率高、可靠性好、速度快,是在灰岩地区寻找土洞、溶洞及构造破碎带最有效的物探方法之一;唐英杰等用井间高密度电阻

率成像法检测深孔帷幕注浆效果;汪新凯等用高密度电阻率法探测土堤(坝)渗漏,探测渗漏在土堤(坝)中的赋存形态,结合资料分析和现场情况调查及确定渗漏部位的方法,为土堤坝的安全鉴定和除险加固提供参考;陈则林等采用覆盖式高密度电阻率探测系统探测堤防隐患,结果表明该方法在千里堤文安堤段隐患探测中具有较好的应用效果,且具有探测速度快、精度高等优点;原文涛等用高密度电阻率法探测煤层采空区,以寿阳煤层采空区探测为例,说明高密度电阻率法是寻找煤层采空区的一种行之有效的手段;丘广新等使用高密度电阻率法探测排水管渠,应用实例充分阐述了采用高密度电阻率法探测排水管渠的可用性、可靠性,为地下管线探测技术提供了新的选择;钟韬等将高密度电阻率法应用在岩溶地区的勘探中,说明了该方法能很好地压制地形起伏、地下典型不均匀体影响及旁侧效应等带来的 ρ_s 值畸变等问题,从而改善了高密度电阻率法在岩溶地区勘探中的应用;玄月等应用高密度电阻率法中的温纳和偶极两种探测方法,对某地区隐伏断裂进行探测,从而说明电法探测技术在隐伏断裂探测中有很好的应用前景;孟贵祥等首次将高密度电阻率法技术引入到石材矿探测中,并进行二维反演和三维电阻率成像反演,实现了高密度电阻率法清晰刻画具有高电阻率特征的石材矿矿体三维空间形态,从而识别风化层和裂隙构造等不利因素;黄小军等利用高密度电阻率法来勘探水库区岩溶发育规律及地下暗河的走向,认为该方法能直观形象地反映断面溶岩的形态。

综上所述,高密度电阻率法探测主要应用领域和解决的问题有:

(1)水利水电工程:堤坝探测;水坝黏土芯墙渗漏检测;堤坝灌注质量检测;堤坝结构体探测;水库堤防渗漏检测;水库堤防裂缝检测;堤防隐患探测;堤防垂直防渗墙质量检测;测定潜水层深度和含水层分布。

(2)环境工程地质:滑坡调查;边坡软弱夹层调查;冻土调查;岩溶探测;探测地下采空区(洞穴);探测地下和水下隐藏物体。

(3)工程地质勘察:基岩面调查测定基岩埋深;隧道渗漏探测;滑坡面调查;隐伏断层、破碎带探测;松散沉积层序和基岩风化带划分。

(4)城市工程勘察:城市管线探测;人防工程探测;城市地下埋藏物探测;路面塌陷调查。

(5)工程质量检测:隧道灌浆质量检测;堤防灌浆质量检测;煤田采空区处理灌注质量检测。

(6)考古、其他工程等。

二、国外应用

从 AGI(Advanced Geosciences Inc)公司公布的资料情况来看,高密度电阻率法在国外被广泛应用,如:使用拖曳式电极对湖底、浅海海底电阻率分布进行研究,堤坝隐患探测,地下水探测,隧道开挖方案确定(尽可能寻找软土层位),污染物侵蚀分布情况探测,岩溶探测,等等。

高密度电阻率法的应用范围十分广泛,只要目标体与背景之间存在电阻率差异,同时目标体具有一定的空间尺寸和埋藏深度,都可以使用高密度电阻率法对目标体进行探测。高密度电阻率法由于其具有高效率、深探测和精确的地电剖面成像等优势,成为水文和工程地质勘察中最有效的方法之一。

第二章 常见地质特征的电学特性

研究岩石、水、煤、断层、溶洞和煤矿地下采空区等常见地质特征的电学性质是高密度电测法的前提。目前所研究的电性参数已经有很多种,例如电阻率 ρ (或电导率 σ)、介电常数 ϵ 、压电模量 d 、自然极化 E 、激发极化率 η 等。本章着重介绍岩石、水、煤、断层、溶洞和煤矿地下采空区等地质环境特征的导电性及其影响因素的有关试验研究成果。

第一节 岩石

一、岩石的电阻率

由均匀材料制成的具有一定横截面面积的导体,其电阻 R 与长度 L 成正比,与横截面面积 S 成反比,即

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2-1)$$

式中 ρ ——比例系数,称为物体的电阻率。

电阻率仅与导体材料的性质有关,它是衡量物质导电能力的物理量。显然,物质的电阻率值越低,其导电性就越好;物质的电阻率越高,其导电性就越差。在电法勘探中,电阻率的单位采用欧姆·米来表示(或记作 $\Omega \cdot \text{m}$)。电阻率的倒数 $1/\rho$ 即为电导率,以 σ 表示,它直接表征了岩石的导电性能。不同岩石的电阻率变化范围很大,常温下可从 $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 变化到 $10^8 \Omega \cdot \text{m}$,电阻率与岩石的导电方式不同有关。岩石的导电方式大致可分为以下四种:

(1) 石墨、无烟煤及大多数金属硫化物主要依靠所含的数量众多的自由电子来传导电流,这种传导电流的方式称为电子导电。由于石墨、无烟煤等含有大量的自由电子,故它们的导电性相当好,电阻率非常低,一般小于 $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}$,是良导体。

(2) 岩石孔隙中通常都充满水溶液,在外加电场的作用下,水溶液的正离子(如 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 等)和负离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)发生定向运动而传导电流,这种导电方式称为孔隙水溶液的离子导电。沉积岩的固体骨架一般由导电性极差的造岩矿物组成,所以沉积岩的电阻率主要取决于孔隙水溶液的离子导电,一切影响孔隙水溶液导电性的因素都会影响沉积岩的电阻率。岩石的孔隙度、孔隙的结构、孔隙水溶液的性质和浓度以及地层温度等,都对沉积岩的电阻率产生不同程度的影响。

(3) 绝大多数造岩矿物,如石英、长石、云母、方解石等,它们是通过矿物晶体的离子导电。这种导电性是极其微弱的,所以绝大多数造岩矿物的电阻率都相当高(大于 $10^6 \Omega \cdot \text{m}$)。致密坚硬的火成岩、白云岩、灰岩等几乎不含水,而其矿物晶体的离子导电又十

分微弱,故它们的电阻率很高,属于劣导电体。

(4) 泥质一般是指粒度小于 10 μm 的颗粒,它们是细粉砂、黏土与水的混合物。泥质颗粒对负离子具有选择吸附作用,从而在泥质颗粒表面形成不能自由移动的紧密吸附层,在此紧密吸附层以外是可以自由移动的正离子层。在外电场作用下,正离子依次交换它们的位置,形成电流。这种以泥质颗粒表面的正离子来传导电流的方式与水溶液的离子导电方式不同,称为泥质颗粒的离子导电,也称为泥质颗粒的附加导电。黏土或泥岩中泥质颗粒的离子导电占绝对优势,由于黏土颗粒或泥质颗粒表面的电荷量基本相同,所以黏土或泥岩的导电性能比较稳定,它们的电阻率低且变化范围小。在砂岩中,随着岩石颗粒的变细,附加导电所起的作用将越来越大。特别是细砂岩和粉砂岩,附加导电对岩石的电阻率影响很大。

地壳中的岩石是多种物质材料的混合体,其中有导电的金属矿物颗粒、不导电的造岩矿物颗粒,亦有含水孔隙和干孔隙,等等。因此,不同类型岩石的平均电阻率往往千差万别。总的来看,地壳中火成岩、变质岩和沉积岩三大岩类导电性的变动范围差异甚大,如表 2-1 所示。由表可见,火成岩电阻率比沉积岩大。然而,由于沉积岩特殊的生成条件,这一类型岩石的电阻率变动范围最高可以达到 8 个数量级,比火成岩和变质岩的变动范围要大得多。表 2-2 列出了部分沉积岩的电阻率。

土层结构较岩石松散,孔隙度大,且与地壳的水圈相联系,因此它们的电阻率一般较低。表 2-3 给出了部分浮土的电阻率。

表 2-1 三类部分岩石的电阻率

岩石		$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	岩石		$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	岩石		$\rho(\Omega \cdot \text{m})$
沉积岩	硬石膏	$10^4 \sim 10^6$	火成岩	花岗岩	$1 \times 10^6 \sim 8 \times 10^7$	变质岩	千枚岩	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$
	灰岩	$6 \times 10^2 \sim 6 \times 10^8$		辉长岩	$5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$		大理岩	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$
	砾岩	$2 \times 10 \sim 2 \times 10^8$		石英斑岩	$5 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$		石英岩	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^8$
	砂岩	$10^{-1} \sim 10^8$		橄榄岩	$1 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7$		片岩	$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$

表 2-2 部分沉积岩的电阻率

岩石	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	岩石	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$
页岩	$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$	泥灰岩	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5$
泥质板岩	$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$	白云岩	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$
黏土质页岩	$1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$	石膏	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$
粉砂岩	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$	裂隙灰岩	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$
多孔砂岩	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$	致密结晶灰岩	$1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$
致密砂岩	$1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$	砂质泥灰岩	10^8

表 2-3 部分浮土的电阻率

浮土名称	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$	浮土名称	$\rho(\Omega \cdot \text{m})$
黄土层	0 ~ 200	隔水黏土层	5 ~ 30
不含水砂卵石层	> 600	白垩纪黏土	5 ~ 10
含水砂卵石层	50 ~ 500	黏土	1 ~ 200

二、岩石的电阻率与其成分和结构的关系

从表 2-1 ~ 表 2-3 可以知道,岩石电阻率变化的范围是很大的。变化大的原因是多方面的。一般来说,岩石的电阻率与它的成分、结构(颗粒排列方式,颗粒之间孔隙、空穴和裂隙状况)、含水状况以及水的矿化度等有密切关系,除此之外,还受到它所处环境的热力学条件(温度和压力状况)的影响。现先讨论岩石电阻率与它的成分、结构的关系。

(一) 岩石电阻率与岩石成分的关系

岩石一般是由多种矿物组成的。这些矿物可看做是两类成分的集合:一类是导电成分,一类是不导电成分。岩石的导电性与导电成分在总体积中所占的比例有关系,这个比例愈大,它的导电性就愈好,电阻率就愈低。图 2-1 是岩石电阻率 ρ 与其中导电矿物体积比 V_1/V 关系的示意图, V_1 和 V 分别为导电成分的体积和岩石的总体积。

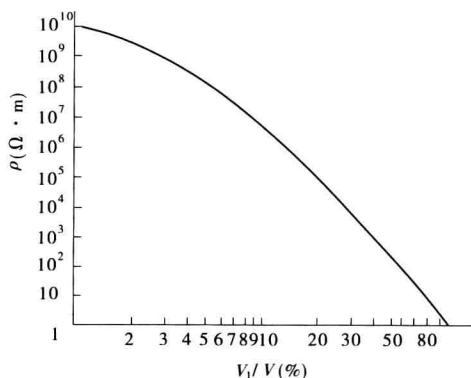


图 2-1 岩石电阻率与所含导电矿物体积比的关系

麦克斯韦公式应用到球状导电包体模型可以得出下列结果:

$$\rho_r = \rho_1 \frac{\varphi_v \rho_1 + (3 - \varphi_v) \rho_2}{(3 - 2\varphi_v) \rho_1 + 2\varphi_v \rho_2} \quad (2-2)$$

式中 ρ_r, ρ_1, ρ_2 ——岩石整体平均电阻率、球状导电包体的电阻率及不导电的外圈岩石电阻率;

φ_v ——球状导电矿物所占的体积比, $\varphi_v = V_1/V$ 。

按照式(2-2)所得到的 $\rho_r \sim \varphi_v$ 曲线与图 2-1 有所不同,但总的趋势是一致的。

(二) 岩石电阻率与岩石结构的关系

1. 矿物排列方式的影响

在岩石中矿物颗粒的排列方式对导电通道的影响很大,在不同的排列方式下,岩石的

导电性有很大的差异。研究表明,这种影响表现在以下三个方面:

(1)相同含量的导电矿物呈浸染状分布时岩石的电阻率大于呈脉状分布时的岩石电阻率。

(2)岩石可以视为由不同形状的矿物颗粒和均匀相连的胶结物所组成,岩石的电阻率主要取决于胶结物的导电性,与孤立矿物的导电性关系不大。

(3)矿物颗粒呈定向排列形成层理时,岩石的导电性具有方向性(亦称为各向异性),沿着层理方向的岩石电阻率小于垂直层理方向的电阻率。表 2-4 给出了部分岩石的各向异性系数 λ 值。

表 2-4 部分岩石的各向异性系数 λ 值

岩石	λ	岩石	λ
灰岩、砂岩	1.01 ~ 1.02	成层砂岩层	1.10 ~ 1.59
松散黏土层	1.02 ~ 1.05	粒状凝灰岩	1.16 ~ 1.17
页岩	1.03 ~ 1.08	泥质板岩层	1.10 ~ 1.59
具有砂岩夹层的黏土	1.05 ~ 1.15	黏土页岩层	1.41 ~ 2.25
白云岩	1.07	碳质页岩层	2.00 ~ 2.75

各向异性系数 λ 的定义为

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}} \tag{2-3}$$

式中 ρ_l, ρ_n ——沿着层理、垂直方向的岩石电阻率。

在一般情况下, $\lambda > 1$ 。

2. 孔隙裂隙结构和含水状况的影响

岩石中一般都有程度不同的孔隙、空穴和裂隙,它们对岩石导电性的影响与其含水状况有关系,因此必须将两者综合起来考虑。

由于岩石生成条件的不同和以后环境条件的变化,三大岩类岩石的孔隙度(裂隙率)有着明显的差异,如表 2-5 所示。在大多数情况下,火成岩的孔隙度较小,沉积岩的孔隙度较大。位于地壳表层的风化岩石和土层具有更大的孔隙度。随着深度的增加,岩石的裂隙逐渐闭合,如表 2-6 所示。但是,在地壳深处岩石的原生孔隙仍然存在。

表 2-5 部分岩石的孔隙度

岩石	$\varphi(\%)$	岩石	$\varphi(\%)$
变质岩石	0.02 ~ 0.60	砂岩	8.10 ~ 9.50
花岗岩	0.05 ~ 2.80	中生代灰岩	1.20 ~ 26.50
大理岩	0.10 ~ 6.00	板岩状页岩	1.10 ~ 20.00
硅质页岩	0.80 ~ 1.50	侏罗纪砂岩	4.20 ~ 24.60
黑色页岩	0.70 ~ 1.40	第三纪砂岩	2.20 ~ 42.00

续表 2-5

岩 石	$\varphi(\%)$	岩 石	$\varphi(\%)$
片麻岩	0.30 ~ 2.40	白垩纪砂岩	7.20 ~ 37.70
硬石膏	0.03 ~ 6.26	三叠纪砂岩	0.60 ~ 27.70
石英岩	0 ~ 8.70	砾岩	20.20 ~ 37.70
黏土质砂岩	0.40 ~ 10.00	黏土	10.10 ~ 62.90
砂质页岩	1.50 ~ 44.80	土壤	20.00 ~ 69.40

表 2-6 岩石裂隙率随深度的变化

深度(m)	$\varphi(\%)$	深度(m)	$\varphi(\%)$
10 ~ 20	0.33	40 ~ 50	0.23
20 ~ 30	0.35	50 ~ 60	0.15
30 ~ 40	0.31	>60	0.16

岩石孔隙中的含水状况可以用湿度来表征。目前,对湿度的定义有两种:一种是按水在岩石中的重量比来表示,记为 S_w ;另一种是按水在岩石中所占的体积比来计算,记为 S_v 。表 2-7 给出了不同湿度下部分岩石电阻率的实测结果。由表 2-7 可以看出,随着岩石湿度的减小,岩石电阻率急剧增大。

表 2-7 不同湿度下部分岩石电阻率的实测结果

岩石	$S_w(\%)$	$\rho(\Omega \cdot m)$	岩石	$S_w(\%)$	$\rho(\Omega \cdot m)$
粉砂岩	0.54	1.5×10^6	叶蜡岩	0.76	6.1×10^8
	0.50	7.3×10^7		0.72	4.9×10^9
	0.44	8.4×10^8		0.70	2.1×10^{10}
	0.38	5.5×10^{10}		0	$>10^{13}$
花岗岩	0.31	4.4×10^5	玄武岩	0.95	4.1×10^8
	0.19	1.8×10^8		0.49	9.0×10^7
	0.06	1.3×10^{10}		0.26	3.1×10^9
	0	$>10^{12}$		0	1.26×10^{10}
细粒砂岩	1	4.2×10^5	橄榄石辉岩	0.028	0.7×10^7
	0.67	3.18×10^8		0.014	0.39×10^8
	0.1	1.4×10^8		0	0.56×10^{10}

岩石的水饱和度对岩石电阻率的影响具有极为重要的意义。岩石的水饱和度是指水的体积与岩石中孔隙总体积的比,记为 S_k 。这样,自然界中岩石就有以下三种情况: