

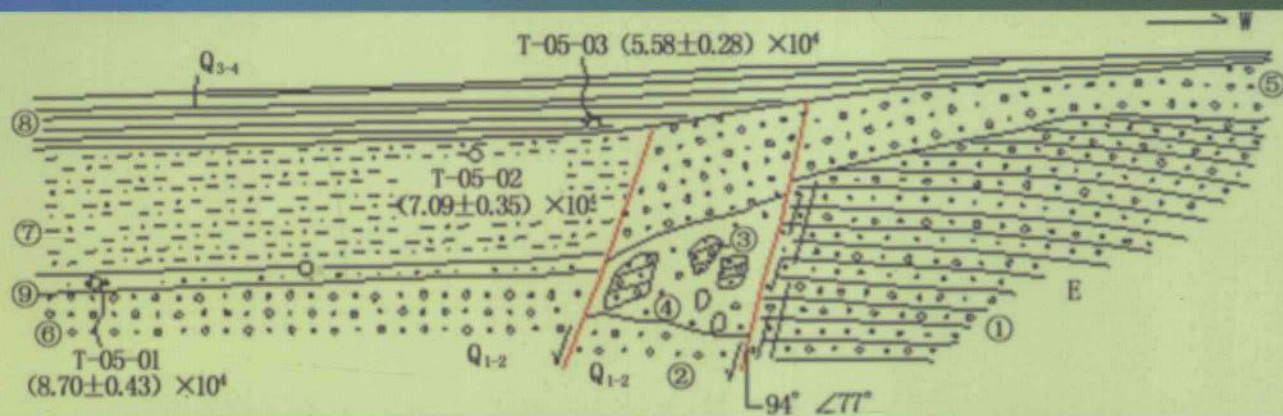
国家发展与改革委员会项目

《城市活断层试验探测》(2004-1138) 资助

地电成像

及其在地学领域中的应用研究

李清林 秦建增 谢汝一 徐顺强 潘纪顺 著



地震出版社

国家发展与改革委员会项目

《城市活断层试验探测》(2004-1138)资助

地电成像及其在地学领域中的应用研究

李清林 秦建增 谢汝一 徐顺强 潘纪顺 著

地震出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地电成像及其在地学领域中的应用研究/李清林等著. —北京: 地震出版社, 2010. 7
ISBN 978 - 7 - 5028 - 3764 - 8

I. ①地… II. ①李… III. ①电阻率法勘探 IV. ①P631. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 104513 号

地震版 XT200700148

地电成像及其在地学领域中的应用研究

李清林 秦建增 谢汝一 徐顺强 潘纪顺 著

责任编辑: 张友联

责任校对: 庞娅萍

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

编辑室: 68467982

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

版 (印) 次: 2010 年 7 月第一版 2010 年 7 月第一次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

字数: 370 千字

印张: 14.5

书号: ISBN 978 - 7 - 5028 - 3764 - 8/P (4404)

定价: 40.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

序

随着中国经济发展速度的加快,经济社会发展所需要解决的诸多问题,如能源、矿产资源、环境、灾害、水资源、地震等领域均与地球物理学的发展密切相关。

地球物理学的理论和技术已渗透到煤田、油、气藏勘探与开发(包括大陆、陆缘与海域及极地)的每个环节。20 世纪后半叶以来,离开地球物理学的理论、方法及与之有关的高新技术,煤炭和油气的勘查,储量的增加,采收率的提高均是难以想象的。金属及非金属矿产资源的勘探、开发,特别是大型、超大型矿床和矿集区等深层找矿和矿产资源后备基地的建立等,从对矿体的勘查、认定、资源评价及开发设计等方面均需要地球物理学为之提供矿体与围岩的空间展布依据。

在重大工程建设方面,如长江三峡水库及黄河小浪底电站的坝址选择,坝下基岩体评价,已建成的水利设施堤坝中隐患的勘察(如近年长江洪水中的“管涌”等)、治理,南水北调,西气东运,高速铁路铺设等等均离不开理论指导下的各种物理参量的地球物理勘察和其所提供的基底稳定性和构造背景。

地球物理勘探技术还为陆地和水下隧道的开挖,地下工程建设的实施等提供技术保障;近年来,地球物理学方法和技术又在环境污染的监测方面,特别是城市环境污染(地下水、辐射等),活断层勘查与监测等方面大有作为,并正在形成一个新的应用领域或分支。此外有关非金属矿产资源和材料储方面,地球物理也能为之提供勘查天然材料的源地,特别是建筑业、电气制造业与工程等方面都有用武之地。

21 世纪初能源、矿产、环境等资源如此紧迫的形势下,如何发展地球物理高新勘探技术已成为越来越受关注的焦点与迫切需求。地电成像技术的出现为地球物理勘探向高新技术发展提供了方向之一。

在电法勘探中,利用岩石与矿物介质的导电性、激电性、介电性和导磁性等方面的差异,这些差异能够在岩石与矿物介质中电磁场(人工的、天然的)空间和时间分布方面表现出来,一般说,岩石与矿物介质的电磁学参数值改变越明显,则电磁场的变化也越剧烈,因此,人们便可通过电磁场空间和时间分布状态的观测和研究,查明岩石与矿物介质在地壳中存在的状态(大小、形状、埋藏深度等)以及物理参数值的大小,以达到勘探的目的。

本书系统阐述了地电成像的理论和方法;介绍了该方法在地学领域诸如城市活断层探测,矿产资源勘探,地热、地下水勘探,地质灾害调查、地震监测预报中大量的应用实例,对从事该项工作的同行有着广泛地借鉴和实用价值。和国内外同类书籍相比,本书充分利用了最新的探测和研究成果,尤其是采用了最近几年作者在城市活断层探测、地震监测等方面的最新探测研究成果。由于该项工作正在快速发展阶段,多数从事该项工作的技术人员急需这方面的理论书籍和应用实践方面的专著。

最后,需要说明的是,在实际工作中,地球物理勘探方法(包括电法勘探),能否取得良好的效果,除了按照不同的地质条件、不同目的,合理地选择方法、技术外,还决定与其他地球物理勘探、地质、钻探等方法的密切配合,这是因为,地球物理场的异常一般来说是多解的,在许多情况下,单独采用一种方法,往往不易获得肯定的结果。在这方面,本书也给出了很多很好的例子。

滕吉文

2010年2月

前 言

地球物理勘查是地质勘查的一个重要组成部分。与传统地质方法相比，它可以“透视”地下岩矿石的分布；而与钻探、掘进方法相比，它又成本低廉。因而，是一种既好又省的地质勘查方法。不过，长期以来地球物理勘查资料的推断解释都仅限于定性或半定量解释，只能提供地下岩矿石的大致分布情况。20 世纪后期，开始研究地球物理成像，以期由地球物理资料定量地描绘地下的岩矿石分布。但是，受方法技术、待测地球物理参数的性质和观测空间等因素的约束，大多数地球物理方法的实测数据量不足，因而成像的效果不佳。

从伦琴发现 X 射线以来，首先被应用于医学诊断，但是，透射影像是用 X 射线将一个三维目标体投射到同一平面上的结果，目标体前后的影像被叠加在一起，使成像结果变得模糊且没有空间信息。为了区分这些叠加的影像信息，出现了医学 CT 成像技术，使用该技术对患者进行多层面多角度扫描，再利用计算机进行投影重建运算，然后在图像终端上显示重建后的图像，即可清晰地重现人体的内部结构，该技术引起了医学放射诊断学的一场革命。

借鉴医学 CT 的思想，电层析成像（简称地电成像）作为地学成像技术的一大分支，也得到飞跃发展。地球物理学中层析成像技术的研究约始于 20 世纪 70 年代后期，自 80 年代以来才发展较快。1987 年日本的 Shima 首先提出“电阻率层析成像”一词，并提出了反演解释的方法，标志着电层析成像的诞生。此后，许多地球物理学工作者，从理论、实验到应用的不同角度都开展了广泛地研究工作。日本 OYO 公司于 90 年代初首先研制出用于电阻率层析成像实际观测的 MCOHM-21 型仪器。近十几年来，电层析成像技术在重建理论和仪器研制方面有了较完备的发展。随着阵列布极方式和自动化数据采集系统的发展，已可实现跨孔、孔地、单孔及地面上密集的电位数据采集，因此可对地下进行精确的三维电层析成像，使电层析成像和地震层析成像、电磁波层析成像并称为地球物理学中的三大层析成像技术。

这种方法在选定的测线和测点上，布置几十乃至上百个电极；然后用多芯电

缆将它们连接到特制的电极转换装置；据操作指令，将这些电极组合成指定的电极装置和电极距；快速完成多种电极装置和多电极距在观测剖面的多个测点上的电阻率（视电阻率）或者极化率观测。可获得大量的实测数据，为进行电阻率（甚至包括激电参数）成像提供了可能性。

美国 AGI 公司，开发了用于高密度地电测量的专用观测仪器和由其观测数据做地电成像的商业软件。国内的一些地勘类大学、地质仪器生产厂家也相继开发了同类仪器和相应的软件系统。如重庆地质仪器厂、重庆奔腾数控技术研究所、武汉地质大学、吉林大学（原长春地质学院）等，各类仪器都有自身特点。

电法勘探的特点是方法变种多，电极装置类型多和应用范围广。针对不同的勘查任务，选用合适的电极装置类型，是电法的一大难点。地电成像法可以在很大程度上克服这一困难，但也同样存在合理选择电极装置类型的问题。

即使采用先进的观测仪器和合理的野外工作方法技术，野外观测数据中也难免包含不同程度的观测误差，必须进行数据预处理，消除或减小误差干扰，才能保证成像的质量。现行的数据预处理都是采用手工处理，人为因素影响很大。可以在分析大量野外实测数据的误差分布规律的基础上，将误差分为人为过失误差和随机的偶然误差，并建立压制这两种误差的算法，编制计算机程序，自动进行数据处理。从而使观测数据的预处理变得轻松、高效和客观、可靠，保证成像的高质量。

地电成像，也可称之为高密度电层析成像、多道直流电法探测、地电 CT、地电成像等。为简化起见，同时，考虑到目前该方法已经发展了极化率成像技术，为此，该方法本书定名为：地电成像。

中国地震局地球物理勘探中心 20 世纪 80 年代末开始进行用于地热、地下水和矿产资源等相关领域的地电测量，20 世纪末开始进行地电成像测量工作。30 多年来，利用电阻率层析成像技术在城市活断层探测研究、地震安全性评价、地震监测预报、地热和地下水资源勘查、固体矿产资源勘探、工程物探、地质灾害调查等领域广泛进行了探测研究实践，取得了大量宝贵的资料，产生了良好的经济效益。本书就是在对地电成像方法进行系统的阐述、归类和研究的基础上，充分利用这些年获取的大量实测资料和探测研究实践，进行较系统地归纳与总结，以期同行与读者能够在借鉴与学习的基础上，为该领域的发展做出贡献。

本书第一章至第六章、第八章由李清林执笔撰写，第七章由秦建增、潘继顺执笔撰写，谢汝一绘制了全部图件，并对全书进行了编排，徐顺强参与了第一章和第二章的编写和校对工作，全书由李清林统稿。

目 录

第一章 地电成像的基本原理和方法·····	(1)
第一节 二维地电成像·····	(1)
第二节 三维电阻率成像·····	(18)
第三节 其他电阻率成像算法简介·····	(27)
参考文献·····	(33)
第二章 地电成像测量仪器原理及简介·····	(35)
第一节 地电成像测量系统基本原理·····	(35)
第二节 集中式地电成像测量系统简介·····	(36)
第三节 分布式二维地电成像测量系统简介·····	(38)
第四节 国内外主要仪器分析·····	(41)
第五节 未来趋势及展望·····	(43)
参考文献·····	(44)
第三章 城市活断层探测·····	(45)
第一节 郟庐断裂带潍坊段的探测研究·····	(45)
第二节 北京奥林匹克公园地区地震活断层的探测研究·····	(92)
第三节 安阳、郑州等城市活断层探测中的应用研究·····	(100)
参考文献·····	(102)
第四章 矿产资源勘探·····	(104)
第一节 工作方法·····	(104)
第二节 电阻率成像和激电测深对栾川铅锌矿的联合勘探·····	(104)
第三节 驻马店市确山县留庄、新安店钼矿远景区勘探实例·····	(105)
第四节 河南省汝州市寄料镇张坡顺达煤矿综合勘探·····	(113)
第五节 登封市香山煤矿电法勘探和氧气测量的联合勘探·····	(121)
第六节 七里坪多金属矿勘探·····	(122)
参考文献·····	(128)
第五章 地热、地下水资源勘查·····	(129)

第一节	工作方法	(129)
第二节	郑州市地热和深层地下水资源勘查	(129)
第三节	河南省西峡县地热资源的综合勘查	(135)
第四节	河南省南阳市地热资源综合勘查	(149)
第五节	河南省商城县汤泉池温泉区地热资源综合勘查研究	(154)
第六节	河南镇平县拐沟茫泉矿泉水水源地勘查	(168)
	参考文献	(176)
第六章	地质灾害调查	(177)
第一节	煤矿采空区探测及其稳定性计算	(177)
第二节	溶洞探测的应用研究	(182)
第三节	建筑场地隐伏沙洞探测研究	(187)
第四节	洞穴和岩溶地基勘查	(190)
第五节	滑坡和水库堤坝渗漏调查	(195)
第六节	隐伏窑洞勘查	(197)
	参考文献	(201)
第七章	地震监测预报中的地电成像方法	(203)
第一节	地电成像方法在地震监测预报中的主要进展	(203)
第二节	受力条件下岩石(岩层)电阻率变化实验	(207)
第三节	地震监测中的电阻率成像方法	(210)
第四节	四维电阻率成像用于地震监测预报的预研究	(211)
第五节	存在问题的讨论	(215)
	参考文献	(217)
第八章	与其他物探方法的对比及存在的问题探讨	(219)
第一节	和人工地震的对比	(219)
第二节	和探地雷达的对比	(219)
第三节	和瞬变电磁法的对比	(220)
第四节	综合对比分析	(220)
第五节	电阻率成像法存在的问题	(220)
	参考文献	(221)

第一章 地电成像的基本原理和方法

第一节 二维地电成像

1. 二维地电成像的基本原理

常规电阻率法由于其观测方式的限制, 不仅测点密度较稀, 而且也很难从电极排列的某种组合上研究地电断面的结构与分布。因此, 在精细勘探中, 为了提高电阻率法的勘探能力, 使电阻率法在城市工程与环境地质调查中发挥更大的社会效益, 采用地电成像法。

地电成像法在现场测量时, 只须将全部电极设置在一定间隔的测点上, 然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换器, 使电极布设一次完成。测量时由程序控制, 从而实现电极排列方式、极距和测点的快速转换, 准确与快速地采集大量数据。利用与该系统配套的系列高级电法处理软件, 对采集的数据进行各种处理及结果图示, 使解释工作更加方便与直观。但该方法的基本原理仍是属于直流电法的范畴 (B.A.柯马罗夫, 1983)。

电阻率成像技术的核心是在观测上采用阵列电极系统、数据处理上实施二维或三维反演, 由实测的视电阻率值得到真电阻率的分布图像。由于利用了丰富的信息量和非线性反演, 所得结果的分辨率远高于常规电法勘探 (翁爱华等, 2001)。它十分便于地质工作的分析与解释, 降低了传统电法的不确定性。由于真电阻率值与地层的岩性、岩石孔隙中液体的性质有着密切关系, 所以在识别断层、破碎带、含水层、油气层及其污染源等方面非常有效。地表观测的电成像图像在水平方向可具有 (0.5~1.0) 电极距的分辨能力, 但在深度方向上的分辨能力较差, 一级间断面会在图像中表现为渐变的梯度层或过渡带, 解释推断中需予以注意 (傅良魁, 1983)。

地电成像法以前主要分为电阻率成像和极化率成像。目前应用较多的就是电阻率成像。以下主要介绍电阻率成像的相关问题。

2. 电阻率成像数据采集方法

电阻率法的特点是方法变种多, 电极装置类型多和应用范围广。针对不同的勘查任务, 选用合适的电极装置类型, 是电阻率法的一大难点。电阻率成像法可以在很大程度上克服这一困难, 但也同样存在合理选择电极装置类型的问题。

电阻率成像野外测量的方法分为: 地表、单孔、跨孔及孔地等, 均取得视电阻率的原始数据。每种方式下又可设计多种电极的组合排列。比如温纳 (α 装置)、偶极 (β 装置) 和微分 (γ 装置), 针对不同测量装置所采用的层析成像方法也各不相同。各类测量装置中最重要的两个设计参数是道间距 (即电极间距) 和隔离系数。

道间距决定着成像的分辨率, 数值模拟的结果是: 电阻率成像的分辨在隔离系数小于 10 时, 水平方向约为 0.5~1.0 倍道间距, 垂直向为 1~2 倍道间距; 隔离系数较大时, 约为 1~2 倍 (水平方向) 和 3~5 倍 (垂直方向) 道间距。所以, 电阻率成像图像的可靠分辨主要是

在地质构造的水平方向上,而对深度的控制能力一般都比较弱。

隔离系数(供电极距)决定着探测的深度和浅部的覆盖次数,相当于在一条固定的测量断面下方实施了多少条电剖面测量。隔离系数越大,数据采集量越大,反演时浅部约束条件越多,重建出的图像信息量也越丰富。成像剖面的深度和分辨率是由观测装置、隔离系数和道间距三个参数决定的(冯锐等,2001)。

视电阻率的重要概念是 Wenner 和 Schlumberge (傅良魁,1990)在1915年针对电位值的低分辨而提出的,在观测系统上利用两点电位的差值来抑制外围干扰,再通过沿剖面的移动和变极距测量来提高电法勘探的分辨率。遗憾的是,传统的电法监测只做了单极距的视电阻率测量,未实施剖面的移动和变极距测量,即丢掉了空间域的变化信息。这个弱点早在20世纪80年代就被关注,国内已做过变极距试验(侯康明等,1993;薛顺章等,1994)和理论研究(钱家栋等,1988),证实其效果都比单一极距的要好。90年代出现的电阻率层析成像技术,则是电法观测系统和数据处理上的又一次重大进步。

3. 二维电阻率成像的算法(罗延钟、万乐等,2006、2004、2003)

电阻率成像法在预先选定的地面观测剖面 and 测点上,同时布置几十乃至上百个电极,然后用多芯电缆将它们连接到特制的电极转换装置;可根据操作员的指令,将这些电极组合成指定的电极装置和电极距;用自动电测仪快速完成多种电极装置和多电极距在观测剖面的多个测点上的电阻率法(视电阻率)观测;配上数据处理、反演和成像软件,获得地下电阻率分布图像,从而完成地质勘查任务。电阻率成像,假设地面起伏和地电构造都是二维和具有相同走向的,且观测剖面垂直于构造走向。成像任务是由观测剖面上电阻率法的视电阻率观测数据,反演该剖面下地电断面,绘制地下岩石的真电阻率分布图像。

设在观测剖面上的总电极数为 N_d ,相邻电极间距为 a ,电极装置最小和最大间隔系数分别为 $N_{\min}$ 和 $N_{\max}$ 。反演基础的正演计算,采用有限单元算法。正演计算的网格中心区即电阻率成像区,沿横向划分为步长为 a 的 N_d 个节点,分别与观测剖面上的各个电极位置相重合;沿纵向按同样步长 a 划分为 $(N_{\max}/2+2)$ 个节点。成像区划分为 $N = (N_d-1) \times (N_{\max}/2+1)$ 个平行四边形单元组成网格。分别向两侧和下方延伸出15个步长依次按1.3倍增大的矩形单元,连同成像区共同组成有限单元法正演计算网格。将成像区内 N 个平行四边形单元视为电性均匀,电导率 σ_i 或电阻率 ρ_i ($i=1, 2, \dots, N$) 就是需要通过反演确定的成像参数。

3.1 反演线性方程组的建立

假设在实际工作中测到一组(共 M 个)实测视电阻率数据,称为实测数据矢量 ρ_s ,

$$\{\rho_s\} = \{\rho_{s1}, \rho_{s2}, \dots, \rho_{si}, \dots, \rho_{sM}\}^T \quad (1.1)$$

通过这组实测数据反演求出地下岩石的电导率 σ_i ($i=1, 2, \dots, N$),称为模型参数矢量 $\{\sigma\}$,

$$\sigma = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_j, \dots, \sigma_N\}^T \quad (1.2)$$

某一电极距在某一测点的实测视电阻率 ρ_{si} 是模型矢量 σ 的函数 $\rho_{si}\sigma$ 。为求得 σ ,令 $\sigma = \sigma^0 + \delta\sigma$ 。其中, σ^0 是初始模型矢量,给定: $\delta\sigma$ 为模型矢量的改正量,未知。算出改正量,模型矢量就求得。

将 $\rho_{si}(\{\sigma\})$ 作多变量泰勒级数展开:

$$\rho_{si}(\sigma^0 + \delta\sigma) = \rho_{li}(\sigma^0) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial \rho_{li}(\sigma^0)}{\partial \sigma_j^0} \cdot \delta\sigma_j + R \quad (1.3)$$

R 是高次项, 将其略去, 上式就是一个关于 $\{\delta\sigma\} = \{\delta\sigma_1, \delta\sigma_2, \dots, \delta\sigma_j, \dots, \delta\sigma_N\}^T$ 的线性方程。其中, ρ_{li} 是与实测视电阻率 ρ_{si} 相对应的、对初始模型矢量 $\{\sigma^0\}$, 用有限单元法计

算出的视电阻率理论值; $\frac{\partial \rho_{li}(\{\sigma^0\})}{\partial \sigma_j^0}$ 是第 i 个视电阻率对第 j 个模型参数的一阶偏导数理论

值。对于 M 个实测视电阻率数据, 我们有:

$$\begin{Bmatrix} \rho_{s1} \\ \rho_{s2} \\ \vdots \\ \rho_{sM} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \rho_{l1} \\ \rho_{l2} \\ \vdots \\ \rho_{lM} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho_{l1}}{\partial \rho_1^0} & \frac{\partial \rho_{l1}}{\partial \rho_2^0} & \dots & \frac{\partial \rho_{l1}}{\partial \rho_N^0} \\ \frac{\partial \rho_{l2}}{\partial \rho_1^0} & \frac{\partial \rho_{l2}}{\partial \rho_2^0} & \dots & \frac{\partial \rho_{l2}}{\partial \rho_N^0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial \rho_{lM}}{\partial \rho_1^0} & \frac{\partial \rho_{lM}}{\partial \rho_2^0} & \dots & \frac{\partial \rho_{lM}}{\partial \rho_N^0} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta\sigma_1 \\ \delta\sigma_2 \\ \vdots \\ \delta\sigma_N \end{Bmatrix} \quad (1.4)$$

简写成:

$$J \delta\sigma = \{\rho_s\} - \{\rho_l\} \quad (1.5)$$

式中, $M \times N$ 阶矩阵 J 称为雅可比矩阵。矩阵方程式 (1.4) 或式 (1.5) 组成一个线性方程组, 由实测视电阻率数据 (矢量 ρ_s) 及正演理论视电阻率数据 (矢量 ρ_l) 和一阶偏导数理论数据 (雅可比矩阵 J), 计算模型矢量的改正量 $\{\delta\sigma\}$, 算出地下岩石电导率分布-模型参数矢量:

$$\sigma = \sigma^0 + \delta\sigma \quad (1.6)$$

正演计算采用有限单元算法; 而偏导数 (雅可比矩阵元素), 则采用我们自己建立的简捷算法 (式 1.2、1.3), 只需做一次有限单元正演计算便可算出。

1.3.2 线性方程组的解法

线性方程组 (1.4) 或 (1.5) 中参数值和数据值之间, 可能有几个数量级差别, 采用对数拟合, 用理论视电阻率数据的对数 $\ln\{\rho_l\}$ 与实测视电阻率数据的对数 $\ln\{\rho_s\}$ 相似和。这时, 线性方程组仍具有式 (1.5) 的形式; 采用改进的广义逆矩阵法式 (1.6), 式 (1.7) 求解矩阵方程式 (1.5), 计算出模型矢量的改正量 $\{\delta\sigma\}$ 。进而计算模型参数-地下岩石电导率

$$\sigma_j = \sigma_j^0 + \delta\sigma_j \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (1.7)$$

由式 (1.3) 导出式 (1.4) 和式 (1.5) 时, 忽略高次项 R , 上述方程及其解是近似的。为获得足够近似结果, 需重复进行求解过程, 将计算结果作为模型的初始参数值进行迭代计算, 直至计算结果满足给定的精度要求为止。“精度”用拟和方差 ρ_{li} 与 ρ_{si} 的相对均方差 ASD 来衡量。

$$ASD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left(\frac{\rho_{li} - \rho_{si}}{\rho_{li}} \right)^2} \quad (1.8)$$

求解线性方程组 (1.5) 计算量主要用在雅可比矩阵的形成、奇异值分解和计算改进的广义逆矩阵上。为节省计算量，在迭代中一般不重复上述三个计算步骤，直接应用上次迭代的改进广义逆矩阵；只在连续几次迭代的拟和方差改善很小，甚至方差变大时，才重算一次。

4. 二维电阻率成像工作方法

4.1 工作方法概述

一般采用固定断面扫描测量，最常用的电极装置为 α 排列（温纳装置 AMNB）、 β 排列（偶极装置 ABMN）、 γ 排列（微分装置 AMBN），也可以采用二极、三极装置等。测量时，一次将既可做供电电极又可做测量电极的 60~120 根电极按固定点距布设在测线上，通过多芯电缆与多极电路转换器连接，在主机控制下可实现电极排列方式、极距及测点的扫描测量。该方法一次测量可完成一条固定断面下方的 16~39 条剖面、552~2340 个测点的数据采集工作。二维电阻率成像野外布线见图 1.1。

测量时，既可按固定断面扫描测量（电极排列有：AMNB、ABMN、AMBN、AMN、MNB、A-MN-B、自电 M、自电 MN、充电 M、充电 MN），又可按变断面连续滚动扫描测量（电极排列有 A-M、A-MN、AB-M、AB-MN、MN-B、A-MN 矩形、A-MN-B 跨孔偶极。其中，连续滚动扫描测量可在电极总数不变的情况下允许测量断面连接至任意长。

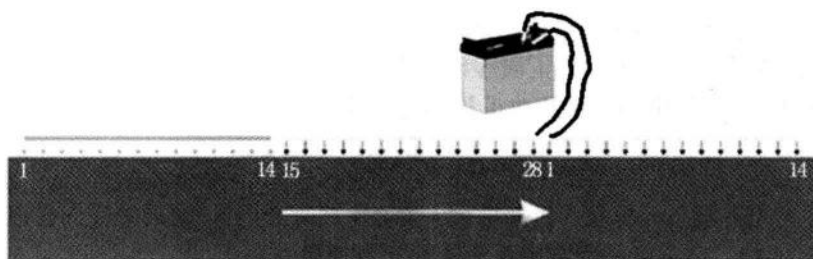


图 1.1 电阻率成像二维观测系统

4.2 装置系统

装置系统是影响分辨率的重要因素。研究表明，微分装置的异常幅值最小，振荡出现最早。温纳四极振荡稍好，但异常幅值不大。偶极-偶极装置的异常幅值相对较大，分辨能力较强，但振荡却很剧烈，甚至高阻体上方出现低阻异常，反之亦然。不同的装置对于不同的探测目标具有不同的分辨率和探测深度。对于电阻率成像法，偶极采集系统适应于浅部探测，而温纳采集系统适应于深部探测。对于接地条件差、供电干扰严重的环境，采用温纳采集系统具有一定的优势（谢忠球，2001）。

在市区和建筑物密集区进行电阻率层析成像测量，要解决一些关键的技术问题，如：尽可能增大供电电流；尽可能避开城市工业游散电流（尤其是地下电缆）的干扰；采用冲击钻打孔，以解决道路和各种硬化路面难以布极的困难；和交通管理部门协调，解决城市车辆过

多而给电测施工带来困难的问题等。

4.2.1 固定断面扫描测量

该测量方法在测量时以剖面线为单位进行测量，一次测量最少测一条剖面线，存储与显示时亦以剖面线为单位进行。一个断面由若干条剖面线组成，且每条剖面线有唯一编号，简称剖面号。以 α 排列为例，测量某一剖面 n 时，AMNB相邻电极保持极距 a ，每测量完一点向前移动一个基本点距 x ，直至B极为最后一个电极止，剖面上的测点数随剖面号增大而减少，其断面上测点呈倒梯形分布，当实接电极数为60，剖面数为16，断面测点分布如图1.2所示。

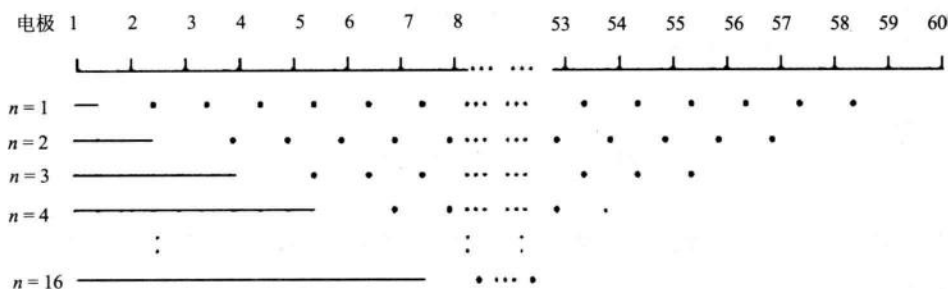


图 1.2 固定断面扫描测量断面测点示意图

当实接电极数给定时，任意剖面测点数由下式确定：

$$D_n = P_{\text{sum}} - (P_a - 1) \cdot n \quad (1.9)$$

式中， n 为剖面号； D_n 为剖面 n 上的测点数； P_{sum} 为实接电极数； P_a 为装置电极数（装置1~3等于4，装置4~5等于3）。例如对 α 排列，电极数 $P_a = 4$ ，设实接电极数 $P_{\text{sum}} = 60$ ，剖面数为16，则 $D_n = 60 - (4 - 1) \cdot n = 60 - 3 \times n$ 。 $D_1 = 60 - 3 \cdot 1 = 57$ ， $D_{16} = 60 - 3 \cdot 16 = 12$ ，断面总测点数 $= 16 \cdot (D_1 + D_{16}) / 2 = 552$ 。

4.2.2 变断面连续滚动扫描测量

该测量方法在测量时以滚动线为单位进行测量，启动一次测量最少测一条滚动线，存储与显示时则仍以剖面线为单位进行。滚动线是一条沿深度方向的直线或斜线（不可视线），各测点等距分布其上，所有滚动线上相同测点号的测点构成一条剖面，不同深度的测点位于不同剖面上，一条滚动线上的测点数等于断面的剖面数，一个断面由若干条滚动线组成，且每条滚动线有唯一编号，简称滚动号。

测量一条滚动线的过程称作单次滚动，即在保持供电电极与某个电极接通不动的情况下沿测线方向（电极号由小到大）移动测量电极，测量电极与供电电极间距起始为一个基本点距，测量并存储当前点电阻率后便移动一次测量电极，每次移动一个基本点距，重复上述测量移动过程直至测量点数等于剖面数为止。

图1.3为变断面连续滚动扫描测量断面测点分布示意图，图中，电极装置为A-M二极装置（其他装置测点分布相同，仅水平坐标不同而已，滚动总数=15），实接电极数=18，剖面数=8，断面上测点呈平行四边形分布，由于剖面数为8，所以在18根电极布好不动的情况下只能测量前10条滚动线，要测11~15号滚动线，则须将18根电极整体向前移动10

个点距，即原 11 号电极位置成为 1 号电极，其余类推。

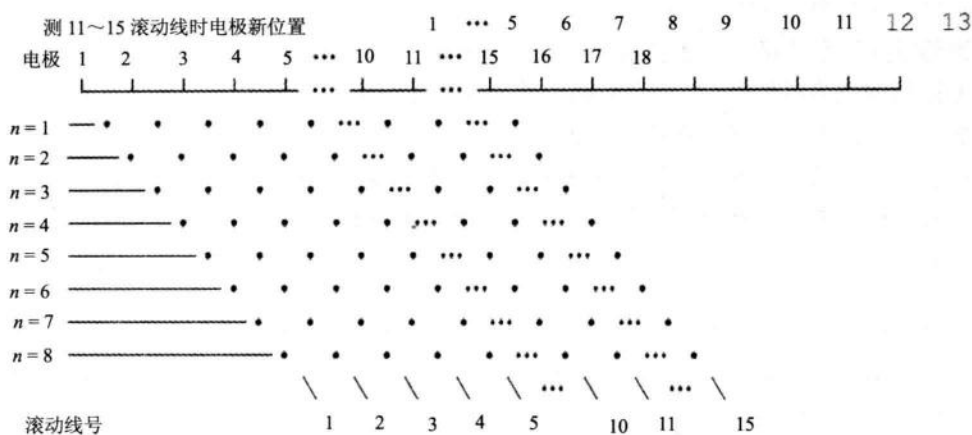


图 1.3 变断面连续滚动扫描测量断面测点示意图

当电极排列与实接电极数 P_{sum} 确定时，最大剖面数（也即一条滚动线上最多测点数）由下式决定：

$$N_{\text{max}} = P_{\text{sum}} - (P_a - 1) \quad (1.10)$$

式中， N_{max} 为最大剖面数； P_{sum} 为实接电极数； P_a 为装置电极数（装置 6 等于 2，装置 7~8 等于 3，装置 9 等于 4）。

若设定断面剖面数为 n ($n \leq n_{\text{max}}$)，则在不移动电极情况下可连续测量的滚动线条数 R_n 由下式确定：

$$R_n = n_{\text{max}} - (n - 1) \quad (1.11)$$

若设定断面滚动总数为 R_{sum} ，则测量完全部滚动线须移动布置电极次数由下式决定：

$M = R_{\text{sum}}/R_n$ 整除，或 $M = [R_{\text{sum}}/R_n] + 1$ 不整除，其中， $[\dots]$ 表示取整数部分，如图 1.3。

断面总测点数=滚动（线）总数×剖面数。

4.2.3 各种装置系统的形式

(1) α 排列（温纳装置 AMNB）。

该装置适用于固定断面扫描测量，电极排列如图 1.4。

特点：测量断面为倒梯形。

测量时， $AM = MN = NB$ 为一个电极间距，A、B、M、N 逐点同时向右移动，得到第一条剖面线；接着 AM、MN、NB 增大一个电极间距，A、B、M、N 逐点同时向右移动，得到另一条剖面线；这样不断扫描测量下去，得到倒梯形断面。

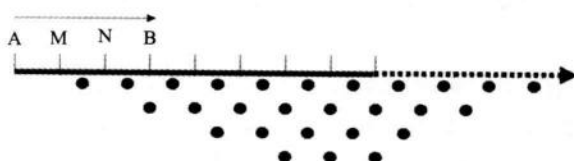


图 1.4 α 排列（温纳装置 AMNB）形式

(2) β 排列 (偶极装置 ABMN)。

该装置适用于固定断面扫描测量, 电极排列如图 1.5。

特点: 测量断面为倒梯形。

测量时, $AB = BM = MN$ 为一个电极间距, A、B、M、N 逐点同时向右移动, 得到第一条剖面线; 接着 AB 、 BM 、 MN 增大一个电极间距, A、B、M、N 逐点同时向右移动, 得到另一条剖面线; 这样不断扫描测量下去, 得到倒梯形断面。

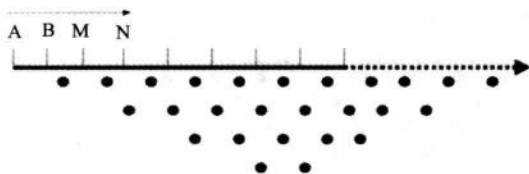


图 1.5 β 排列 (偶极装置 ABMN) 形式

(3) γ 排列 (微分装置 AMBN)。

该装置适用于固定断面扫描测量, 电极排列如图 1.6。

特点: 测量断面为倒梯形。

测量时, $AB = BM = MN$ 为一个电极间距, A、B、M、N 逐点同时向右移动, 得到第一条剖面线; 接着 AB 、 BM 、 MN 增大一个电极间距, A、B、M、N 逐点同时向右移动, 得到另一条剖面线; 这样不断扫描测量下去, 得到倒梯形断面。

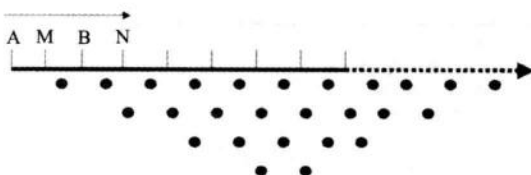


图 1.6 γ 排列 (微分装置 AMBN) 形式

(4) δA 排列 (联剖正装置 $AMN\infty$)。

该装置适用于固定断面扫描测量, 电极排列如图 1.7。

特点: 测量断面为倒梯形。

测量时, $AM = MN$ 为一个电极间距, A、M、N 逐点同时向右移动, 得到第一条剖面线; 接着 AM 、 MN 增大一个电极间距, A、M、N 逐点同时向右移动, 得到另一条剖面线; 这样不断扫描测量下去, 得到倒梯形断面。

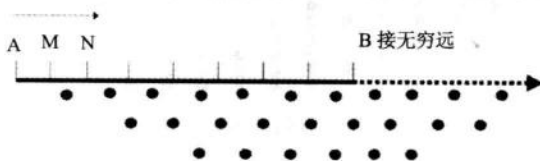


图 1.7 δA 排列 (联剖正装置 $AMN\infty$) 形式

(5) δB 排列 (联剖反装置 ∞MNB)。

该装置适用于固定断面扫描测量, 电极排列如图 1.8。

特点: 测量断面为倒梯形。

测量时, $MN = NB$ 为一个电极间距, M 、 N 、 B 逐点同时向右移动, 得到第一条剖面线; 接 MN 、 NB 增大一个电极间距, M 、 N 、 B 逐点同时向右移动, 得到另一条剖面线; 这样不断扫描测量下去, 得到倒梯形断面。

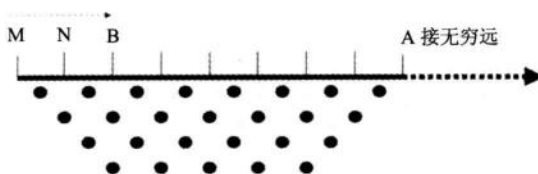


图 1.8 δB 排列 (联剖反装置 ∞MNB) 形式

(6) A-M 二极排列。

该装置适用于变断面连续滚动扫描测量, 电极排列如图 1.9。

特点: 测量断面为平行四边形。

测量时, A 不动, M 逐点同时向右移动, 得到一条滚动线; 接着 A 、 M 同时向右移动一个电极, A 不动, M 逐点向右移动, 得到另一条滚动线; 这样不断滚动测量下去, 得到平行四边形断面。



图 1.9 A-M 二极排列形式

(7) A-MN 三极排列。

该装置适用于变断面连续滚动扫描测量, 电极排列如图 1.10。

特点: 测量断面为平行四边形。

测量时, A 不动, M 、 N 逐点向右同时移动, 得到一条滚动线; 接着 A 、 M 、 N 同时向右移动一个电极, A 不动, M 、 N 逐点向右同时移动, 得到另一条滚动线; 这样不断滚动测量下去, 得到平行四边形断面。

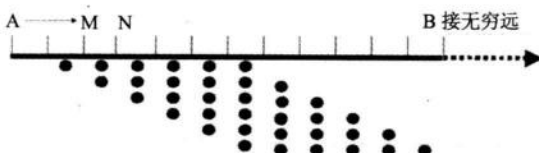


图 1.10 A-MN 三极排列形式

(8) AB-M 三极排列。

该装置适用于变断面连续滚动扫描测量, 电极排列如图 1.11。