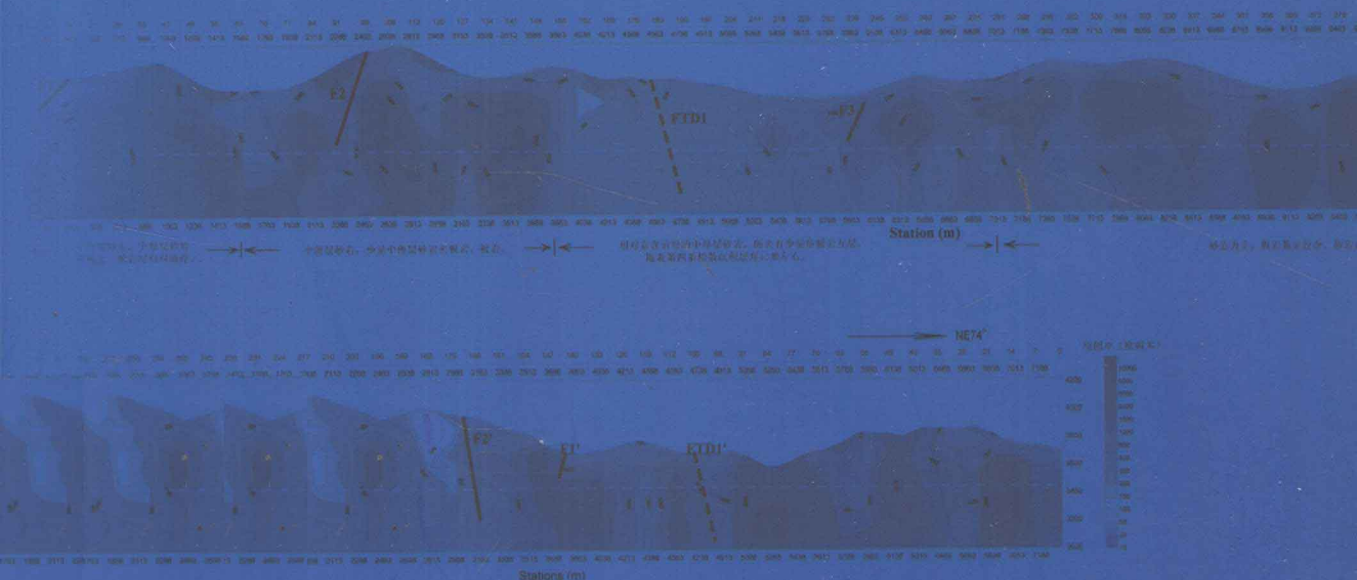


深埋长隧洞探测技术研究

薛云峰 张继锋 郭玉松 编著



黄河水利出版社

深埋长隧洞探测技术研究

薛云峰 张继锋 郭玉松 编著



黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书根据南水北调西线工程的特点,分析了可控源音频大地电磁法在南水北调西线工程探测中存在的一些技术难题,并对这些问题进行了理论分析、模型研究和方法技术研究,确定了以可控源音频大地电磁法为主,配合其他物探和地质调查进行南水北调西线工程深埋长隧洞探测方法,为类似工程的探测和成果解释提供了工作模式。

本书可供从事物探、地质工作的工程技术人员及大专院校相关专业的教师和研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

深埋长隧洞探测技术研究/薛云峰,张继锋,郭玉松
编著. —郑州:黄河水利出版社,2010. 12

ISBN 978 - 7 - 80734 - 923 - 5

I. ①深… II. ①薛… ②张… ③郭… III. ①深埋隧道
—探测—研究 IV. ①U459. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 203454 号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwp@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:hhslebs@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:10

字数:230 千字

印数:1—1 000

版次:2010 年 12 月第 1 版

印次:2010 年 12 月第 1 次印刷

定价:29.00 元

前 言

深埋长隧洞施工是南水北调西线工程第一期工作中的难点,也是跨流域调水工程必须面对的问题。如何在隧洞设计与施工之前,对拟建隧洞的工程地质条件进行详细勘察,在地表利用地面勘探、地质调查、综合地球物理探测技术,获取引水隧洞附近地层结构和物性特征,并根据物性特征进行岩性分类;查明主要断层构造的宽度和走向、埋深,并对构造的赋水性进行初步评价是十分有意义的。

工程地球物理以地表至地下几百米的介质或异常体的结构、构造为目标,用高科技手段采集主动源或被动源激励条件下的物理响应信号,通过数字信号转换、数据处理和分析,从而了解和把握目标体的物理性质与状态。国内近年来在利用地球物理勘探技术查明地下不良地质体方面做了大量的工作,深埋长隧洞岩性划分和不良地质体的探测成了工程地球物理的热点和难点问题,引起了地球物理学者的广泛关注,投入了各种各样的方法和技术,在各种物探方法中,由于可控源音频大地电磁法(CSAMT)具有工作效率高、勘探深度范围大、分辨率高、高阻屏蔽作用小、抗干扰能力大等突出的特点,因此成为南水北调西线工程深埋长隧洞探测的主要方法技术。

可控源音频大地电磁法虽然有着其他方法不可比拟的优点,但是对于南水北调西线工程这样沟谷深切、断崖纵横、地质构造复杂、地层陡倾角的高原地区,解决 1 000 m 以内的构造、岩溶、岩层划分等问题,可控源音频大地电磁法仍存在一些技术难题,如近场效应、静态效应、各向异性、分辨能力、探测深度等难题。这些难题有些是该方法本身固有的缺陷,有些是特殊的地形地质条件造成的,对这些技术难题进行深入的理论和模型研究及方法技术研究,以便采取最有效的观测系统,编制有效的软件,对各种效应进行识别和消除,提高数据的质量;利用已知的钻孔资料、探洞资料、综合测井资料及其他综合物探资料,进一步分析各类岩性的物性特征,采用有限元数值模拟方法,对不同的地质模型进行正演,分析数值模拟的结果,为异常的识别提供指导;最后形成一套系统有效的深埋长隧洞围岩岩性识别的探测技术,并利用综合探测技术和地质调查相结合的方法对南水北调工程深埋长隧洞附近地层结构和岩性特征进行分类,对主要构造线(尤其是断层)的宽度、走向及赋水性进行初步评价,取得了良好的探测效果。这为南水北调西线工程以及其他水利水电工程、交通、铁路、矿山的深埋长隧洞的围岩岩性识别评价、灾害预测提供了关键的理论方法和技术支持。

本书的研究成果是在国家“十一五”科技支撑计划项目“南水北调工程若干关键技术研究与应用”的资助下完成的,是对课题“西线超长隧洞 TBM 施工关键技术问题研究”的专题项目“隧洞围岩岩性识别的综合探测技术研究”成果的总结。本书分 8 章,主要研究内容包括:CSAMT 的基本理论研究,研究了各种波区视电阻率的定义及相互关系,提出计算视电阻率的公式;对三维可控源音频电磁法数值模拟理论和算法的研究,解决了三维可控源音频电磁法数值模拟的问题;对基于南水北调西线工程岩性特征不同三维地质模型

的有限元数值模拟研究,分析了数值模拟结果,为异常的识别提供了理论指导;对 CSAMT 野外工作设计和数据处理关键问题的研究,为数据采集和资料解释提供了方法和技术;最后在理论研究和有限元数值计算模拟的基础上,确定了以可控源音频大地电磁法为主,配合其他物探方法进行南水北调西线工程深埋长隧洞探测方法,并对探测结果进行了系统的分析和总结。

在此向为本书做出贡献的同仁表示感谢,向所有参加过南水北调西线工程深埋长隧洞地球物理探测的单位和个人表示感谢。

由于时间仓促,水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者指正。

作 者

2010 年 7 月

目 录

前 言

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 研究的目的和意义	(1)
1.2 工程地球物理的发展及探测方法的选择	(1)
1.3 CSAMT 的发展及特点	(3)
1.4 本书研究内容及结构	(6)
第 2 章 CSAMT 的理论基础及有限元基本原理	(8)
2.1 电磁法中的基本方程及电磁量参数	(8)
2.2 均匀大地表面上水平电偶极源的电磁场	(13)
2.3 可控源电磁法远区电场闭合表达式及一维解析解	(17)
2.4 地电磁场边值问题	(30)
2.5 电磁变分原理	(32)
2.6 伽辽金有限元法	(39)
2.7 小 结	(40)
第 3 章 三维电磁场有限元数值计算方法	(42)
3.1 引 言	(42)
3.2 稀疏矩阵的压缩存储	(43)
3.3 矩阵的预处理技术	(49)
3.4 Krylov 子空间方法	(53)
3.5 数值算例	(59)
3.6 小 结	(61)
第 4 章 基于南水北调西线工程岩性特征的 CSAMT 有限元数值模拟	(62)
4.1 二维线源的数值模拟	(62)
4.2 基于电场双旋度方程的三维可控源边值问题	(70)
4.3 三维有限元分析	(75)
4.4 基于南水北调西线工程岩性特征的三维数值模拟结果	(83)
4.5 模型数值模拟结果分析	(99)
4.6 小 结	(100)
第 5 章 野外工作设计	(101)
5.1 CSAMT 场源设计和观测	(101)
5.2 测量方式的选择	(102)
5.3 观测区域的选择和测线布置	(103)
5.4 仪器设备	(104)

5.5	CSAMT 噪声分析·····	(104)
5.6	CSAMT 最佳观测方案·····	(105)
5.7	CSAMT 工作质量评价·····	(107)
5.8	小 结 ·····	(108)
第 6 章	CSAMT 数据处理的关键问题 ·····	(109)
6.1	地形的改正 ·····	(109)
6.2	近场校正 ·····	(110)
6.3	静态校正 ·····	(111)
6.4	CSAMT 的反演及推断解释基础·····	(113)
6.5	小 结 ·····	(114)
第 7 章	CSAMT 在深埋长引水隧洞围岩岩性识别中的应用 ·····	(115)
7.1	探测方法的选择及思路 ·····	(115)
7.2	探测工作量及仪器设备 ·····	(115)
7.3	探测成果 ·····	(116)
7.4	典型引水线路(玛柯河—贾曲段)探测方法与成果 ·····	(119)
7.5	小 结 ·····	(139)
第 8 章	总 结 ·····	(140)
参考文献	·····	(141)
附图 1 ~ 11		

第1章 绪论

1.1 研究的目的和意义

南水北调西线工程,是从位于青藏高原的大渡河、雅砻江、通天河向黄河中上游地区调水的宏大工程,是解决我国西北六省(区)用水和黄河生态用水的重大举措。与国内外已经实施和正在规划研究的跨流域调水工程相比,南水北调西线工程可谓当今世界上规模最大的调水工程,具有调水量最大、水源点最多、调水线路最长、受水区最广、配套工程建设任务最重的特点。特殊的地理、气候条件及地质条件的复杂性也决定了南水北调西线工程是当今世界上难度最大的调水工程;调水区的低气压、缺氧和寒冷构成了调水区的气候特点,使得工程的勘察、规划、设计和施工工作困难重重;调水工作区的陡倾角岩层、褶皱、断层的异常发育,以及多年冻土和季节性冻土的普遍存在,将会给工程带来一系列棘手的问题;尤其是深埋隧洞的高温、高地应力、断层破碎带、涌水、有害气体等问题,仅第一期工程隧洞总长 244.10 km,分为 7 段,其中最长洞段为 73 km,最大埋深 1 100 m。由此可见,深埋长隧洞的施工是第一期工作中的难点,也是跨流域调水工程必须面对的问题。如何在隧洞设计与施工之前,对拟建隧洞的工程地质条件进行详细勘察,在地表利用地面勘探、地质调查、综合地球物理探测技术,获取引水线路附近地层结构和各种物性特征,并根据物性特征进行岩性分类;查明主要断层构造的宽度和走向,并对构造的赋水性进行初步评价是十分有意义的。

1.2 工程地球物理的发展及探测方法的选择

1.2.1 工程地球物理的主要方法

工程地球物理是应用地球物理的一个重要分支,由于其服务对象是国民经济的基本建设,其地位与作用随着我国经济建设的迅猛发展而显得越来越重要,由于工程地球物理具有成本低、周期短、精度高、效果好的优势,近年来工程地球物理方法和理论不断发展,应用领域不断扩展,已成为应用地球物理的又一个主力军。

工程地球物理以地表至地下几百米的介质或异常体的结构、构造为目标,用高科技手段采集主动源或被动源激励条件下的物理响应信号,通过数字信号转换、数据处理和分析,从而了解和把握目标体的物理性质和状态。工程地球物理是一门应用学科,以理论模拟和物理实验模拟为理论研究的核心,目前有限元、边界元、解析计算和差分计算等是正演方法的主流,许多实际理论问题逐步解决,如由一维问题发展到二维乃至多维定解,由完全弹性条件假设至非完全弹性条件假设等。由于工程地球物理的最终目的在于反演,

所以反演理论领域的发展尤为突出,反演问题由线性化理论转向非线性化理论、模糊理论和联合反演等方向。

国内近年来在利用地球物理勘探技术查明地下不良地质体方面做了大量的工作,深埋长隧洞岩性划分和不良地质体的探测成了工程地球物理的热点和难点问题,引起了地球物理学者的广泛关注,投入了各种各样的方法和技术,在各种物探方法中,根据其所研究地球物理场的不同,通常可分为以下几大类:

- (1)以地下介质密度差异为基础,研究重力场变化的方法称为重力勘探;
- (2)以介质磁性差异为基础,研究地磁场变化规律的方法称为磁法勘探;
- (3)以介质电性差异为基础,研究天然或人工电场(或电磁场)的变化规律的方法称为电法勘探(或电磁法勘探);
- (4)以介质弹性差异为基础,研究波场变化规律的方法称为地震勘探;
- (5)以介质放射性差异为基础,研究辐射场变化特征的方法称为放射性勘探;
- (6)以地下热能分布和介质导热性为基础,研究地温场变化的方法称为地热测量。

面对南水北调西线工程深埋长隧洞的特点和特殊的地质情况,电磁法是解决南水北调西线工程特殊地质问题的重要勘探方法。

1.2.2 电磁感应法的类别

电磁感应法(简称电磁法)是电法勘探的重要方法,主要利用了岩土介质的导电性、导磁性和介电性的差异,观测和研究人工或天然形成的电磁场的分布规律(时间和频率特性),进而解决有关的各类地质问题。电磁法种类多,观测参数多,依据所用场源性质、工作方式及其解决地质问题的能力,可将电磁法分为时间域电磁法和频率域电磁法。从场源的形式上可以分为天然场源和人工场源两种。人工场源又可分为连续波场、辐射场和瞬变脉冲场。连续波场是向大地发射连续的电磁场,在发射的同时,观测场的空间分布也可以改变发射频率,从而研究异常场随频率的变化,这种形式的电磁法称为频率域电磁法,其工作频率一般低于 10^5 Hz。

当电磁波的频率超过 10^5 Hz 时,电磁波以波动形式传播。这种情况下,主要利用岩石对电磁波的反射、透射及吸收特性来研究有关的地质问题,这种形式的电磁波称为辐射场法,主要包括地质雷达等;瞬变脉冲场是向大地发射不同形式的脉冲电磁场,在脉冲的间歇时间观测电磁场随时间的衰减,这种方法称为时间域电磁法,也称瞬变电磁法;天然场源包括大地电磁法(MT)和音频大地电磁法(AMT),前者是观测与太阳辐射有关的超低频(频率范围 $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^2$ Hz)天然大地电磁场,后者主要观测由于雷电作用产生的音频(频率范围 $n \times 10^{-1} \sim n \times 10^3$ Hz)大地电磁场。在AMT的观测方式基础上,通过观测人工供电产生的音频电磁场,发展形成了可控源音频大地电磁法(CSAMT),这些方法称为频率域电磁法。

时间域电磁法(Time Domain Electromagnetic Methods),简称为TEM。它是利用不接地回线或接地线源向地下发送一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场的间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次涡流场的方法,尽管TEM与频率域电磁法(FEM)都是同属于研究二次涡流场的方法,并且两者通过傅里叶变化关系相互关联着,在某些条件下,一种方法的数据可

以转换为另一种方法的数据。然而,就一次场对观测结果的影响而言,两种方法具有不相同的效能,TEM 是在没有一次场背景的情况下观测研究二次场(纯异场),大大简化了对地质对象所产生异常场的研究,对于提高方法的探测能力更具有前景。但是,由于时间域发射波形复杂,测量的信号弱,因此对仪器性能要求较高,理论也较复杂,且抗干扰能力低,探测深度有限。频率域中,理论相对简单,对仪器性能要求也较简单,又因测量总场,信噪比高,抗干扰能力强。由于这些特点,频率域电磁法在国内外中深度勘探中得到了广泛的应用。

频率域电磁法是通过改变电磁场的频率进行测深的一类电磁法勘探,它利用电磁感应的趋肤效应,即高频电磁场穿透浅,低频电磁场穿透深,在场源和接收点间距不变的情况下,改变电磁场的频率来达到测深的目的。当测深深度在 100 ~ 200 m 以内时,频率可采用几十到几万赫兹,当探测更大深度时,可将频率降低到 $n \times 10^{-1} \sim n \times 10^{-3}$ Hz。

频率域电磁测深可利用天然电磁场,也可利用人工电磁场。利用前者的方法称为大地电磁测深,后者称为人工频率电磁法。两种方法皆在地面上测量电场和磁场分量,计算出不同频率和深度的视电阻率值,再对资料进行推断解释。大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)和低频大地电磁法(HMT)本质上都属于采集天然场信号的被动源频率域电磁法,差别在于采集信号的频率不同,相应的探测深度和分辨率不同。高频大地电磁法(HMT)采集的信号频率较高,最高可达 100 kHz,研究的深度较浅,从地下的十几米至几百米。由于天然场源的随机性和信号微弱,MT 法需要花费巨大努力来记录和分析野外数据。为克服 MT 法的这个缺点,加拿大多伦多大学教授 D. W. Strangway 和他的学生 Myron Goldstein 提出了可控源音频大地电磁法(Controlled Source Electromagnetic Methods, 简称 CSAMT)。

1.3 CSAMT 的发展及特点

可控源音频大地电磁法(CSAMT)是利用两端接地的有限长导线作为发射源,使用人工源激发交变电磁场,在地表观测电磁响应并计算波阻抗及视电阻率进行勘探的一种方法。它是在大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)基础上发展起来的利用人工场源的大地电磁法。该方法的最大特点是采用人工场源,大大增加了电磁信号的强度,弥补了天然场源信号微弱、不易观测等缺点,同时又具有较大的勘探深度。

大地电磁测深法是研究地壳和上地幔构造的一种以天然交变电磁场为场源的地球物理勘探方法。当交变电磁场以波的形式在地下介质中传播时,由于电磁感应作用,地面电磁场所观测到的数据将包含有地下介质电性(电阻率)分布的信息。根据电磁场的趋肤效应,不同周期的电磁场信号具有不同的穿透深度,因此通过研究大地对天然电磁场的频率响应并经反演处理,就可获取地下介质不同深度的电阻率分布信息(介质电性特征),通过研究地下介质电性特征的差异就能实现局部构造的圈闭及地质层位的追踪。

实际生产中一般观测电磁场的五个分量,即 E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y 、 H_z 。通过计算得到不同频率的视电阻率及相位响应,根据反演资料表征的由浅到深的地下介质电阻率的大小变化情况、电阻率等值线所反映的断面纵横向的变化、测井、钻孔、岩石物性等资料的地质标

定,达到了解目的层纵横向展布、局部构造圈闭、基底构造起伏及断裂发育、采空等情况。

大地电磁测深法的最初模型是苏联学者 A. H. 吉洪诺夫 (A. N. Tikhonov) (1950), 以及法国学者卡尼尔 (L. Cagniard) (1953) 提出的。前提条件是假设模型的场源是均匀平面电磁波垂直入射于大地, 且大地电性介质是水平均匀层状分布的。在此基础上, 论证了场源为垂直入射的平面波, 大地介质是水平层状分布的条件下, 相应大地电磁场的解, 并把阻抗响应变换为习惯的视电阻率形式, 他们的理论奠定了大地电磁测深法的基础。苏联于 1957 年研制出了第一台用于大地电磁测深的仪器, 其记录系统采用一般的光点模拟照相记录。20 世纪 60 年代法国、美国、苏联、加拿大等国都进一步着手仪器的研制工作, 试制出感应式磁场接收器与饱和式磁场接收器。我国 20 世纪 60 年代初期, 原中国科学院地球物理研究所开始研究大地电磁测深法, 取得了初步成果, 并用它进行了方法的试验和研究, 随后又研制出了感应式光电模拟记录大地电磁测深仪和感应式数字磁带记录大地电磁测深仪。20 世纪 90 年代加拿大、美国等国家研制出了具有卫星同步功能、体积小、质量轻的 24 位大地电磁测深系统, 在设计上采用了更快捷的采集系统和更容易的数字记录系统。现在, 全球定位系统 (GPS) 已常规的用于信号的同步和计时, 由于系统不再需要联线实现同步与记录, 使得系统更加灵活方便。采集站点也不需要固定在靠近其他站点或中心站点的位置, 从而使远磁参考成为可能。目前, 国内应用的主要采集系统为加拿大凤凰公司生产的 V5-2000、美国 EMI 公司的 MT-24NS 网络型、德国 Metronix 公司的多功能 GMS-06 等电磁系统。80 年代末期美国学者 Bostick 提出了电磁阵列剖面法 (Electric Magnetic Array Profile), 它在原理上通过采用沿测线方向同步高密度信息采集的方法, 控制和减少了横向电性不均匀体分布所造成的影响, 为静态位移校正及提高构造勘探分辨率奠定了基础。

针对大地电磁法 (MT) 场源的随机性和信号微弱, 以致观测困难这一状况, 加拿大多伦多大学的 D. W. Strangway 等在 1971 年提出了一种改变方案——采用可以控制的人工场源, 论文于 1975 年发表, 从理论和实验两个方面奠定了可控源音频大地电磁法的基础。自 70 年代中期起, CSAMT 得到实际应用, 一些公司相继生产用于 CSAMT 测量的仪器和解释应用软件。特别是 80 年代以来, 方法理论和仪器都得到了很大发展, 应用领域也扩展到普查、勘探石油、天然气、地热、金属矿产、水文、环境等各个方面, 从而成为受重视的一种地球物理方法。近年来, 加拿大凤凰公司 (PHOENIX) 和美国宗基公司 (ZONGE) 制造了先进的 CSAMT 测试系统, 如 V6、V8、GDP-32 系统, 进一步促进了 CSAMT 的发展和应用。

根据使用的场源数目和观测的场分量多少, CSAMT 分为张量 CSAMT、矢量 CSAMT 和标量 CSAMT 三种。张量 CSAMT 使用两组正交场源, 对每个场源测量五个场分量 (E_x 、 H_y 、 E_y 、 H_x 、 H_z); 矢量 CSAMT 使用一个场源, 测量五个场分量; 标量 CSAMT 仅观测一个场源的两个正交的切向分量。在一般的地质情况下, 面积性标量 CSAMT 可以取得良好的效果, 且较为简便、快速、经济, 因此获得了广泛的应用。

CSAMT 的激发方式一般分为接地式 (电性激发) 和感应式 (磁性激发), 图 1-1 是 CSAMT 的激发方式, 图 1-1(a) 为接地式, 图 1-1(b) 为感应式。借助交流电的发射装置, 在地中及空气中建立感应电磁场。第一种方法与直流电法一样, 利用 A、B 供电电极将交

变电流直接供入地下。地中的分散电流及供电导线中的集中电流均在其周围产生交变一次磁场,后者在地中有感应产生二次电场,它是封闭的涡旋电场。如果地下介质不均匀,则在覆盖层、围岩及局部导体上均产生涡旋电场。如果观测点是在距 A 、 B 供电电极连线外的很远处,则 A 、 B 供电电极已成为电偶极子。电偶极子源产生的电磁波实际上是向四面八方辐射的,就波的传播途径而言,可分为天波、地面波和地层波(见图 1-2),电磁波在地下的波长远比空气中的波长要小,那么沿地表向接收端的地面波和直接在地层中传播的地层波在某一时刻由于波程的差别,就会在地面附近形成一个近于水平的波阵面(见图 1-3),造成一个几乎垂直向下传播的近似的水平极化平面波。这些波在传播过程中均与地下地质体发生作用,并把作用结果反映到地面观测点,那么我们才可从地面的测量中推断地下地质体的赋存情况。

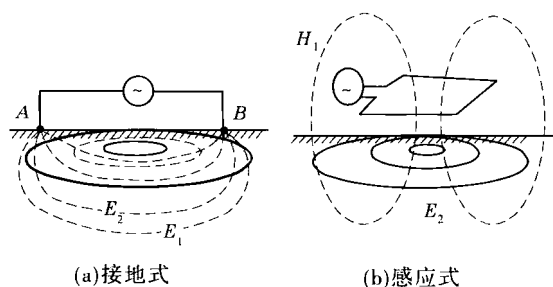


图 1-1 CSAMT 的激发方式

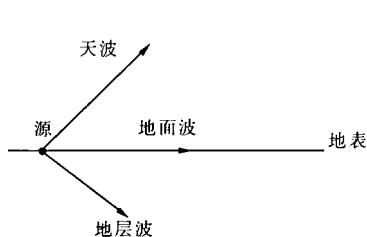


图 1-2 电磁波的传播途径

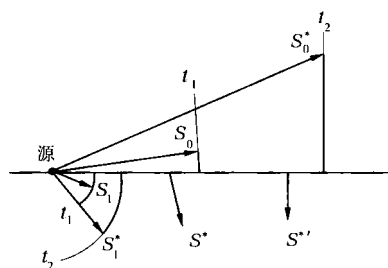


图 1-3 波程差和波阵面

可控源音频大地电磁法最大的特点是采用人工场源,大大增加了电磁信号的强度,弥补了天然场源信号微弱、不易观测等缺点。此外,它还具有工作效率高、勘探深度范围大、水平和垂直分辨率较高、高阻屏蔽作用小等优点。概括地讲,CSAMT 具有如下特点:

- (1) 工作效率高。利用一个偶极发射,可以在四个很大的扇形区域内测量。
- (2) 勘探深度范围大。考虑到主客观因素和目前的技术,CSAMT 的勘探深度为几十米至二三千米。
- (3) 垂向分辨率高。CSAMT 垂向分辨能力与多种因素有关,如果将要探测对象的厚度和埋深之比定义为垂向分辨率,那么,它为 10% ~ 20%。
- (4) 水平分辨率高。CSAMT 水平分辨率与收发距无关,约等于接收电偶极长度。
- (5) 地形影响小。由于观测值事实上作了归一化,因此地形影响大为减弱;由于是平

面波场,因而测区内地形影响也较小,且易于校正。

(6)高阻层的屏蔽作用小。CSAMT 使用的是交变电磁场,因而它可以穿过高阻层,特别是高阻薄层。有些无法用直流电法探测到的高阻层下的地质体,用 CSAMT 能很好地反映出来。

由于可控源音频电磁法具有工作效率高、勘探深度范围大、分辨率高、高阻屏蔽作用小、抗干扰能力大等突出的特点,所以成为南水北调西线工程深埋长隧洞探测的主要方法技术。

CSAMT 虽然有着大地电磁法不可比拟的优点,但是对于南水北调西线工程这样沟谷深切、断崖纵横、地质构造复杂、地层陡倾角的高原地区,解决 1 000 m 以内的构造、岩溶、岩层划分等问题,可控源音频大地电磁法仍存在一些技术难题,如近场效应、静态效应、各向异性、分辨能力、探测深度等难题。这些难题有些是该方法本身固有的缺陷,有些是特殊的地形地质条件造成的。对这些技术难题进行深入的理论和模型研究以及方法技术研究,以便采取最有效的观测系统,编制有效的软件,对各种效应进行识别和消除,提高数据的质量;利用已知的钻孔资料、探洞资料、综合测井资料及其他综合物探资料,进一步分析各类岩性的物理性质特征,采用有限元数值模拟方法,对不同的地质模型进行正演,分析数值模拟的结果,为异常的识别提供指导。最后形成一套系统有效的隧洞围岩岩性识别的探测技术。

1.4 本书研究内容及结构

第 1 章 介绍了南水北调西线工程的特点及地球物理探测的主要任务,分析了可控源音频大地电磁法的特点和在南水北调西线工程探测中存在的一些技术难题,明确了研究的目的是意义,给出了全文的主要内容结构。

第 2 章 概述了电磁场的基本理论,包括 Maxwell 方程组、电磁量之间的物质方程及边界方程,趋肤深度和探测深度的确定;讨论了均匀大地表面上水平电偶极源的电磁场的分布特点,研究了各种波区视电阻率的定义及相互关系,提出计算视电阻率的公式。推导了可控源电磁法远区电场闭合表达式及一维解析解;并对电磁场边值问题、电磁变分、伽辽金有限元法进行了研究。

第 3 章 对大型稀疏复系数矩阵的压缩存储以及方程组的求解进行了研究,解决了三维电磁场有限元数值模拟的瓶颈,并取得了较好效果。

第 4 章 本章对三维可控源数值模拟的理论和数值计算方法进行了系统研究,编制了计算程序,并对程序的正确性进行了检验,最后根据南水北调西线工程深埋长隧洞岩性的地球物理特征,设置了不同的三维地质模型,采用可控源音频电磁法进行了有限元数值模拟,分析了数值模拟结果,得出了重要结论,为实际工作提供了理论指导作用。

第 5 章 根据探测任务和现场工作条件对 CSAMT 野外工作进行设计。主要包括场源设计、测量方式与噪声分析、最佳工作参数、数据采集与质量评价等。

第 6 章 对 CSAMT 数据处理的关键问题进行了分析和研究,主要包括地形、近场效应、静态效应的分析和改正,反演的推断解释。

第7章 在理论研究和有限元数值计算模拟的基础上,确定了以可控源音频大地电磁法为主,配合其他物探方法进行南水北调西线工程深埋长隧洞的探测工作。本章主要介绍了工作的内容、工作的方法、综合探测结果及地质解释。

第8章 对全书进行总结,指出存在的不足之处,并对今后需要做的工作提出了建议。

第 2 章 CSAMT 的理论基础及有限元基本原理

众所周知,麦克斯韦方程组是完整统一的电磁场理论基础。CSAMT 一般采用水平电偶极子场源,它产生的电磁场理所当然地由麦克斯韦方程组完整地描述。因此,求解偶极子场的分布,就是求这种场源的一定边界条件下麦克斯韦方程组的解。

2.1 电磁法中的基本方程及电磁量参数

2.1.1 麦克斯韦方程组与基本电磁量

麦克斯韦方程组是描写电磁场的一组基本的经验公式,含有以下四个彼此独立的方程,分别反映了以下四条基本的物理定律:

$$\text{法拉第定律} \quad \text{rot}\mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$\text{安培定律} \quad \text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\text{库仑定律} \quad \text{div}\mathbf{D} = q \quad (2-3)$$

$$\text{磁通量连续性原理} \quad \text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (2-4)$$

并且

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \varepsilon \mathbf{E} \\ \mathbf{B} &= \mu \mathbf{H} \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \quad (2-5)$$

以上各式中, $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{D}$ 分别为电场强度矢量和电感应强度矢量; ε 为介质的介电常数; $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{B}$ 分别为磁场强度矢量和磁感应强度矢量; μ 为介质的磁导率; $\mathbf{J}$ 为电流密度矢量; σ 为介质的电导率;在地球物理勘探中,常常采用 σ 的倒数 ρ ,即 $\rho = \frac{1}{\sigma}$,称之为电阻率; q 为电荷密度。

以上这些便是磁场的基本物理量。

对式(2-2)两边取散度,由于旋度的散度恒为零,故有:

$$\text{div}\mathbf{J} + \text{div} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = 0 \quad (2-6)$$

式(2-6)第二项中,对坐标的微分和对时间的微分互不相关,可以交换它们的顺序,并注意到

$$\text{div}\mathbf{D} = q$$

即有

$$\operatorname{div} \mathbf{J} + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \quad (2-7)$$

式(2-7)称为连续性方程,它是电量守恒定律的数学表示。

2.1.2 波动方程

我们来研究均匀导电介质中的电磁场,在这样的介质中, ε 、 μ 、 σ 都是常数。

可以证明,在均匀介质中,除场源所在处以外,可变电荷密度 q 实际上等于零。因此,在场源以外,麦克斯韦方程组中式(2-3)可写为:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \mathbf{D} &= \varepsilon \operatorname{div} \mathbf{E} = 0 \\ \operatorname{div} \mathbf{E} &= 0 \end{aligned} \quad (2-8)$$

为了分别研究电场或磁场的性质,有必要从式(2-1)和式(2-2)中消去电场矢量 $\mathbf{E}$ 或者消去磁场矢量 $\mathbf{H}$,使之变为只含一个场矢量的方程式。为此,对式(2-1)取旋度:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{rot} \mathbf{H} \quad (2-9)$$

把式(2-2)代入式(2-9),有:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2-10)$$

利用矢量分析中的已知恒等式

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E}$$

并注意到在场源外, $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$, 我们得到:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2-11)$$

对式(2-2)进行同样的运算,得到关于磁场强度 $\mathbf{H}$ 的形式完全相同的方程式,即:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} + \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2-12)$$

式(2-11)和式(2-12)称为波动方程,它把场矢量随空间的变化和随时间的变化联系起来,说明电磁场是以波动方式在空间传播的。

2.1.3 亥姆霍兹方程

在 CSAMT 法中,人工供给场源的电源是谐变电流,可以写成指数函数的形式:

$$I = I_0 e^{-i\omega t} \quad (2-13)$$

式中: I_0 为电流的幅值; ω 为谐变电流的圆频率; t 为时间。

谐变电流产生的电磁场也是谐变的,同样可以写为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-i(\omega t - \varphi_E)} \quad (2-14)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-i(\omega t - \varphi_H)} \quad (2-15)$$

式中: $\mathbf{E}_0$ 、 $\mathbf{H}_0$ 分别为电场及磁场强度的幅值; φ_E 、 φ_H 分别为电场和磁场相对于电流的相位差。

不难验证,式(2-13)、式(2-14)对时间的微分具有下列算符规律:

$$\frac{\partial}{\partial t} = -i\omega \quad \frac{\partial^2}{\partial t^2} = -\omega^2$$

据此,式(2-11)和式(2-12)可以分别写为:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\varepsilon\mu\omega^2 \mathbf{E} - i\sigma\mu\omega \mathbf{E} = -(\varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega) \mathbf{E} \quad (2-16)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\varepsilon\mu\omega^2 \mathbf{H} - i\sigma\mu\omega \mathbf{H} = -(\varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega) \mathbf{H} \quad (2-17)$$

$$\text{令} \quad k^2 = \varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega \quad (2-18)$$

式(2-16)、式(2-17)变为以下形式:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (2-19)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (2-20)$$

式(2-19)和式(2-20)称为亥姆霍兹方程,也称它们为波动方程。实际上,它们是由波动方程式(2-11)和式(2-12)在谐变电流条件下导出的结果,式中 k 称为波数或传播常数。

2.1.4 衰减常数与相位常数

在式(2-18)中

$$k^2 = \varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega = \mu\omega(\varepsilon\omega + i\sigma)$$

公式右边第一项含有介质的介电常数 ε ,称为位移项;第二项含有介质的电导率 σ ,称为传导项。

在一般情况下,电介质(比如空气)中的电流主要是位移电流,传导电流常常可以忽略不计,而在导体(比如岩石)中,电流主要是传导电流,位移电流可以忽略不计。在音频段,导电介质中的位移电流和传导电流有同等的作用,由定义式(2-18)可知,波数 k 为一复量,可以表示为如下的两部分之和:

$$k = a + ib \quad (2-21)$$

式中: a 为相位常数; b 称为衰减常数。

将式(2-21)两边同时平方,并使它和式(2-18)相等,得:

$$k^2 = a^2 - b^2 + i2ab = \varepsilon\mu\omega^2 + i\sigma\mu\omega \quad (2-22)$$

使式(2-22)中实部和实部、虚部和虚部分别相等,得到以下关系:

$$a^2 - b^2 = \varepsilon\mu\omega^2 \quad (2-23)$$

$$2ab = \sigma\mu\omega \quad (2-24)$$

解此关于 a 、 b 的联立方程,经过一些代数运算,我们得到:

$$a = \omega\left(\frac{\mu\varepsilon}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[(1 + a^2)^{\frac{1}{2}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-25)$$

$$b = \omega\left(\frac{\mu\varepsilon}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[(1 + a^2)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-26)$$

式(2-25)和式(2-26)中

$$a = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon}$$

表示介质中传导电流与位移电流之比,称为损耗角正切。

2.1.5 趋肤深度或透入深度

如果假设电磁波为平面单色波,在无限均匀导电介质中传播,即满足式(2-14)、