

可控源音频大地电磁法及其应用

汤井田 何继善 著

 中南大学出版社

可控源音频大地 电磁法及其应用

汤井田 何继善 著

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

可控源音频大地电磁法及其应用/汤井田,何继善著. —长沙:
中南大学出版社,2005.12

ISBN 7-81105-251-2

I. 可... II. ①汤...②何... III. 大地电磁法 - 研究
IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 145253 号

可控源音频大地电磁法及其应用

汤井田 何继善 著

☐责任编辑 刘石年

☐责任印制 文桂武

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

☐印 装 长沙利君漾印刷厂

☐开 本 850 × 1168 1/32 ☐印张 11.5 ☐字数 283 千字

☐版 次 2005 年 12 月第 1 版 ☐2005 年 12 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7 - 81105 - 251 - 2/P · 003

☐定 价 25.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

作者简介

汤井田，男，1965年10月生，江苏省东海县人，中南大学教授、博士生导师。1992年获工学博士学位，1998~1999年在美国劳伦兹国家实验室做高级访问学者。1999年获湖南省青年科技奖，2001年被评为教育部优秀青年教师。先后主持国家、省级科技项目10多项，发表论文60篇，获省级科技进步奖8项次。

何继善，男，中南大学教授、博士生导师、中国工程院院士，湖南省科协主席。

内容提要

本书从电磁场基本方程出发,系统研究了人工源频率域电磁测深中快速数值计算方法、全区视电阻率理论、静态效应的互相关矩阵识别与波数域校正方法、异常的奇性指标及静态效应的识别、小波多分辨分析及静态效应的最佳压制,讨论了场源效应及物理实验结果,最后分析了CSAMT的部分应用实例。

本书虽定名为可控源音频大地电磁法及其应用,但内容并不局限于此。基于MT法、CSAMT法和频率测深的关系,考虑到非平面波效应和静态效应的广泛存在性,本书重点研究了非平面波效应和静态效应的消除和压制方法,并兼顾了频率域电磁测深正、反演解释方法。

本书可供地球物理工程人员、大专院校教师作主要参考书,也可用作相关专业研究生的教材。

目 录

绪 言	(1)
第 1 章 电磁场的基本理论	(9)
1.1 电磁场的基本方程	(9)
1.2 格林函数和局域分布源的电磁场	(18)
1.3 场等效原理和互易定理	(27)
第 2 章 频率域电磁测深的快速一维正演	(33)
2.1 均匀水平分层大地表面上谐变偶极子的电磁场	(33)
2.2 波区视电阻率的定义和相互关系	(43)
2.3 水平分层介质表面谐变偶极子场的数值计算方法	(51)
2.4 偏角效应	(62)
2.5 空间频率特性函数与等值原理	(64)
第 3 章 全区视电阻率	(72)
3.1 非平面波效应	(72)
3.2 全区视电阻率原理	(75)
3.3 水平电偶极子源的全区视电阻率	(77)
3.4 垂直磁偶极子源的全区视电阻率	(83)
3.5 数值计算结果和应用实例	(87)

3.6	全区视电阻率的反演	(111)
第4章	静态校正的波数域滤波方法	(119)
4.1	静态效应的物理原因和特征	(119)
4.2	静态效应的校正	(125)
4.3	静态效应校正的波数域滤波方法	(127)
4.4	电磁列阵剖面法(EMAP)及应用	(138)
第5章	小波理论及其应用基础	(145)
5.1	Fourier 变换和窗口 Fourier 变换	(145)
5.2	连续小波变换及其性质	(148)
5.3	多分辨分析与正交小波基	(155)
5.4	紧支集正交小波基	(162)
5.5	小波标架	(165)
5.6	小波基与取样定理	(169)
5.7	信号的奇性及其检测	(174)
5.8	小波包及其性质	(182)
5.9	多维正交小波基	(187)
第6章	小波变换与静态效应的识别、分离和最佳压制	(189)
6.1	高维地质体的特征刻画与静态效应的识别	(190)
6.2	多分辨分析与静态效应的最佳压制	(197)
6.3	复杂信号分离的高精度方法	(214)
6.4	小波变换与噪声的压制	(221)
第7章	频率域电磁测深的反演	(225)
7.1	概述	(225)

7.2	电阻率函数的奇性分析和深度反演	(228)
7.3	频率测深反演的广义逆方法	(233)
7.4	频率测深反演的随机搜索法	(244)
第 8 章	CSAMT 法场源效应和物理模拟	(250)
8.1	频率域电磁测深中的记录规则	(251)
8.2	地质体的分辨与场源效应	(263)
8.3	CSAMT 法物理模拟	(285)
第 9 章	野外工作设计与应用实例	(290)
9.1	CSAMT 法场源设计	(290)
9.2	CSAMT 法测量方式	(293)
9.3	CSAMT 法噪声分析	(298)
9.4	CSAMT 法最佳观测方案	(309)
9.5	CSAMT 法数据评价	(314)
9.6	CSAMT 法在新疆黄山铜镍矿的应用	(316)
9.7	湘西金矿 CSAMT 法应用分析	(321)
参考文献		(346)

绪 言

电磁法是根据电磁感应原理研究天然或人工(可控)场源在大地中激励的交变电磁场分布,并由观测到的电磁场分布研究地下电性及地质特征的一种地球物理方法。按场源,电磁法可分为天然场源的大地电磁法(Magnetotellurics; MT)和人工(可控)源电磁法;从空间上,电磁法又可分为航空电磁法、海底电磁法、井中电磁法和地面电磁法;根据研究的场的特性,电磁法可分为频率域电磁法(Frequency-domain Electromagnetics; FEM)和时间域或瞬变电磁法(Time-domain/Transient Electromagnetics; TEM;在前苏联又称建场法);按勘探方式,电磁法又可划分为电磁测深和一般的剖面电磁勘探。在电磁测深中,根据测深原理,又有几何电磁测深和参数电磁测深两种。本书阐述的主要是频率域参数电磁测深中的一些理论和应用成果。有关理论可以容易地推广到频率域电磁法的其他领域。

层状介质中电磁测深最早使用的是“Eltran”法。它基于L. W. Blau于1933年发明的美国专利。Eltran法是利用脉冲电流激发供电偶极在大地中形成电磁场,并用与供电偶极在同一直线上的另一电偶极检测经大地传导后的电磁场。原理上,从不同电导率地层界面反射的能量可以用接收机作为瞬变信号记录下来,这与反射地震波法很类似,但Eltran法比地震勘探简便、经济,因此使一些石油公司产生了浓厚兴趣,并发表了一系列介绍各种野外试验结果的文章。后来的理论分析指出,对于沉积盆地中通常存在的良导岩石,由于脉冲激发的瞬变响应频率较低,难以达到识别各个反射波所需要的分辨率。因为对Eltran法幻想的破灭,

20 世纪 50 ~ 60 年代, 电法在石油勘探中的应用相对冷落。在金属矿勘探中, 也以直流电法和激发极化法受到较多的重视和应用。

与大量的野外试验相比, 20 世纪 40 年代以前, 对电磁法的理论分析较少。Peters 和 Bardeen (1932) 最早将麦克斯韦方程组应用于电磁测深法中, 后来又出现了一些类似的文章。第二次大战后, 电磁法理论才得到了迅速的发展。J. R. Wait、S. H. Ward、Tikhonov、Vanyan 等大批学者发表了大量文章, 介绍均匀介质和层状介质中各类激励源的理论进展。随着电子计算机的广泛应用, 电磁测深的一维理论数值计算有了极大发展, 各类反演技术得到了广泛应用。对于较简单的二、三维模型, T. Lee 等人作了相应的理论分析, 但对于复杂的地电模型, 物理模拟和各类数值模拟仍是主要的研究手段。在理论进展的同时, 随着电子技术的高速发展, 各类电磁法仪器相继问世, 形成了各种电磁测量系统, 并得到了广泛的应用。

在有关电磁法的大量文献中, 时间域电磁法占有较大的比例。然而, 相比较而言, 时间域和频率域测量各有特点。时间域中, 激发信号是宽频脉冲, 单次发射便可得到完整的时间衰减曲线。又由于一次场和二次场在时间上是分开的, 可以直接测量二次场, 这使得时间域可以采用“短偏移距”(时间和距离可以互换)甚至“零偏移距”测深装置研究深部电性变化。频率域中, 除非能用某些方法去掉一次场, 否则收发距需要大于期望勘探深度的几倍。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。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, 频率域电磁测深在国内外也得到了广泛的应用。其中, 大地电磁法和可控源音频大地电磁法 (Controlled Source Audio - frequency MagnetoTellurics,

CSAMT)得到了较多的重视和应用。

大地电磁法(MT法)既可在时间域也可在频率域中进行,但以频率域应用最广。这种方法最初是由法国学者卡尼亚(Cagniard, 1953)和前苏联吉洪诺夫(Tikhonov, 1946, 1950)提出的。它假设天然电磁场以平面波形式垂直入射均匀各向同性层状大地表面,并在地表观测正交的电磁场切向分量。计算波阻抗(卡尼亚)电阻率。由于利用了交变电流的感应耦合作用,MT法可以穿透直流电测深难以透过的高阻带,又由于波垂直入射,故横向效应小。另外,天然电磁场具有很大的能量且分布在较宽的频带上,因此,只要选择合适的频率区间,MT法可以探测地下数百公里深度范围内的电性变化,这是任何人工源电磁测深所难以达到的。为研究较浅处的电性变化,可以采用音频大地电磁法(AMT)。在卡尼亚等人提出大地电磁法后的数十年间,很多学者对天然场源的结构及形成机制、地球曲率、复杂的二、三维地电构造、MT数据的观测、分析、反演和MT法测量仪器等进行了大量研究,所有这些可以集中反映在一些介绍MT法的专门论著中。

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提出了利用人工(可控)场源的音频大地电磁法(CSAMT)。这种方法使用接地导线或不接地回线为场源,在波区测量相互正交的电、磁场切向分量,并计算卡尼亚电阻率,以保留AMT法的一些数据解释方法。自20世纪70年代中期,CSAMT法得到实际应用,一些公司相继生产用于CSAMT法测量的仪器和应用解释软件。进入80年代后,该方法的理论和仪器得到很大发展,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、工程、环境保护等各个方面,从而成为受人重视的一种地球物理方法。

根据使用的场源数目和观测的场分量多少,CSAMT法分为

张量、矢量和标量 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。概括地讲, CSAMT 法具有如下特点:

1. 工作效率高。利用一个偶极发射, 可以在 4 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 法的勘探深度为几十米至二三千米。

3. 垂向分辨率高。CSAMT 法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, 它在 10% ~ 20% 之间。

4. 水平分辨率高。CSAMT 法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 法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 法能很好地反映出来。

7. 立体观测。面积性的 CSAMT 相当于一种三维的立体地电填图, 因此对于查明地下构造、追踪其平面变化特别有效。

与直流电测深法相比, 以上这些特点均属明显优点, 因而 CSAMT 法不但已取得良好效果, 而且其应用前景也是广阔的。然而, CSAMT 法也存在自身和技术上所造成的问题, 尚需进一步研究解决。

将上述方法叫做 CSAMT 法是历史形成的, 但并不很恰当。

首先,本法是采用人工场源而不是天然场源,而 Magnetotellurics 是指天然场源形成的大范围的电磁场。在本法的初期是想用人工场源取代天然场源,而测量和解释均保留 AMT 的方法。但是,一旦使用人工场源,场源的影响必然出现。虽然人们尽可能在远区测量,使场接近平面波,但在实际工作中由于种种条件的限制,使得有的频率不能满足远区的需要,这样一来,出现了许多 AMT 法中不会遇到的问题,如:过渡带效应、近区效应、场源附加效应、场源阴影效应等。而且为了加大勘探深度,低频已超出一般的音频范围。

实际上,它是一种人工场源的频率域测深方法,但又不是人们通常所称的频率测深法。我们认为,也许用“可控源卡尼亚电阻率测深法”这个术语更为贴切,因为它较好地表示了本方法的三大特点:使用人工场源;测量卡尼亚电阻率和改变频率进行测深。但由于历史的原因,我们仍保留 CSAMT 这个术语。

虽然,CSAMT 法属于一种人工源的频率电磁测深,但和通常的频率域电磁测深不同。这主要因为 CSAMT 法测量两个相互垂直的电磁场切向分量计算卡尼亚电阻率,因而具有较强的抗干扰能力,且更容易获得对地电变化较灵敏的相位差信息;又由于波区电磁场十分接近平面波,因而其资料处理、解释也较为简便,可以保留 AMT 法中的许多解释方法。另外,在 CSAMT 中,同样可以计算频率域电磁测深中使用的场分量视电阻率,它们和卡尼亚电阻率的综合解释,可以更详细地研究地电断面,且磁场视电阻率更易于透过高阻带,这使得 CSAMT 法相比于通常的频率域电磁测深有其独特的优点。同时,CSAMT 和 AMT 或 MT 亦有不同,根本原因是 CSAMT 法使用了可控场源,因而极化方向明显,信噪比高,易于观测。研究还表明,在含高阻屏蔽层的地电断面上,人工源电磁测深不仅可以探测到高阻层,且综合利用各种视电阻率和相位差信息,还可以确定高阻层的埋深、厚度及其下伏

的电性变化；而 MT 或 AMT 法对高阻层本身是不灵敏的。但是，由于使用了人工场源，CSAMT 法必然受场源效应影响，这主要包括非平面波效应、场源附加效应、阴影效应和测深通道的弯曲。

所谓非平面波效应，是因为观测点靠近场源或频率太低引起的。由于 CSAMT 法（以及其他的人工源频率域电磁测深）要求在波区观测，此时电磁场接近平面波。但由于客观及技术原因，测深有时不得不进入过渡带（中间区）甚至近区，此时电磁场分量随距离变化而具有不同的变化规律，从而引起视电阻率和相位差的畸变，不能客观地反映地电变化。目前，有许多文献讨论了近区及中间区数据的校正问题，但都不够完善、系统。

场源附加效应（source - overprint）是指场源下地质情况对 CSAMT 数据的影响；阴影效应则是场源和测深点之间的地质情况引起的。

场源附加效应基本上不影响 CSAMT 波区卡尼亚电阻率，但对于过渡带和近区数据会产生强烈的影响，它亦可能引起微弱的静态位移。二、三维数值模拟可以很好地研究这种效应。在野外，最好是选择有利的发射源位置。另外，根据几种不同场源观测结果作反褶积处理也可能消除这种效应。

测深通道的弯曲也是一种非平面波效应，它是由于中间区、近区电磁波不再垂直入射地表面造成的。研究这种效应，对于合理地选择记录点位置具有指导意义。

在 CSAMT 法及测量电场的频率域电磁测深中（包括 AMT 和 MT），静态位移是另一个极为麻烦的难题，它主要是测区内近地表电性横向不均匀性或地形起伏引起电场畸变造成的。这种效应与频率无关，通常引起测深曲线的上下位移，由于相位与视电阻率对频率的梯度呈线性变化，因此，合理地利用相位资料，可以消除这种效应。另外，广义的滤波技术为消除静态效应提供了更广阔的前景。从原理上，这种滤波既可在空间域进行，亦可在波

数域进行。

本书虽定名为可控源音频大地电磁法及应用,但内容并不局限于此。基于 MT 法、CSAMT 法和频率测深的关系,考虑到非平面波效应和静态效应的广泛存在性,本书重点研究了非平面波效应和静态效应的消除与压制方法,并兼顾了频率域电磁测深正、反演解释方法。其具体内容如下:

第 1 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,格林函数,惟一性定理。

第 2 章讨论了水平层状介质表面水平电偶极子源和垂直磁偶极子源的电磁场的分布特征,研究了各种波区视电阻率的定义及相互关系,提出了计算水平层状介质表面偶极子场的新的方法,从而可利用短汉克尔滤波系统统一计算各种场分量,并编制了灵活、实用的程序。

第 3 章从电磁场的统一性出发,提出了系统定义各种全区视电阻率的原理、方法及算法。理论分析表明,以各种方式定义的全区视电阻率,在波区收敛于各自的波区视电阻率;在近区则收敛于用近区公式计算的视电阻率或一水平渐近线,其值由地电参数和收发距决定;而在中间区,则随电距离的变化从波区特性均匀地、自适应地变化到近区特性,相位差也表现出同样的特性。因此,采用全区视电阻率定义,可以将频率域电磁测深中的波区、中间区和近区视电阻率有机地统一起来,并将波区的参数测深和近区的几何测深统一起来,因而可消除波区视电阻率在过渡带和近区的畸变。

第 4 章集中讨论了在波数域消除静态效应的方法理论。提出了计算各频点的互相关矩阵来判别静态效应的新方法,讨论了实际应用效果。

第 5 章是第 6 章的序和基础,简要介绍了小波理论及其应用基础。

第6章重点研究了小波变换在静态效应压制中的应用。小波变换是20世纪80年代发展起来的新的数学分支,被认为是近几十年来调和发展的里程碑,已在工程界、地球物理等领域获广泛应用。首先利用小波变换的时-频局部化功能,提出了刻画三维地质体特征的奇性指标及计算方法,利用它可以对静态效应作识别。在此基础上,利用S. Mallat多分辨分析思想和算法,可以在不同尺度下对静态效应进行分离和最佳压制。为保证复杂地球物理信号分离的精度,提出了信号分离的高精度方法,以作为小波包思想的初步应用。最后,讨论了电磁信号中噪声的压制方法。需要说明的是,本章提出的方法也适用于其他领域。

第7章讨论了电磁测深中的反演方法及其他一些问题。提出了利用奇性指标的快速反演方法,并讨论了约束的广义逆反演方法和随机搜索法。

第8章以二维及三维的数值和物理模拟结果为基础,讨论了频率测深中的记录规则,认为在波区测量中,将记录点放在测量电偶极的中点是合理的,并对场源效应进行了详细分析。

第9章讨论了野外工作设计中的问题,并简要介绍了CSAMT法在湘西金矿等地的应用成果。

本书的大部分内容形成于1990~1995年前后,曾得到原中国有色金属工业总公司地质总局、国家自然科学基金、湖南省自然科学基金的资助。相关方法已在中南大学地球物理勘察新技术研究所开展的CSAMT法资料处理和解释中应用,部分章节曾用作研究生的讲义。先后有10多位教师与研究生不同程度地参与了本项工作。在此对所有帮助和参与的单位、团体和个人表示衷心的感谢。

第1章 电磁场的基本理论

众所周知, Maxwell 方程组是完整统一的电磁场的理论基础。电磁测深法一般采用偶极子场源, 它产生的电磁场理所当然地由 Maxwell 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 Maxwell 方程的解。

1.1 电磁场的基本方程

1.1.1 Maxwell 方程组与基本电磁量

真空或介质中宏观电磁场的 Maxwell 方程组是描述电磁场的一组基本的实验公式, 含有以下四个方程, 分别反映了四条基本的物理定律:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{法拉第定律}) \quad (1.1.1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (\text{安培定律}) \quad (1.1.1b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{库仑定律}) \quad (1.1.1c)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (\text{磁通量连续性原理}) \quad (1.1.1d)$$

电荷和电流在 Maxwell 方程组中是作为源项出现的。电荷密度 ρ 和电流密度 $\mathbf{J}$ 通过电流连续性方程相互联系:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.1.2)$$

作为确定电磁场和电荷、电流系统运动的完整方程组, 除了