第 22 卷 第 4 期 地 球 物 理 学 进 展 Vol. 22 No. 4
2007 年 8 月(页码:1195～1200) PROGRESS IN GEOPHYSICS Aug. 2007

瞬变电磁法理论与应用研究进展

薛国强[1], 李 貅[2], 底青云[1]
(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029;2. 长安大学地质工程与测绘工程学院,西安 710054)

摘 要 对国内外瞬变电磁法的方法研究概况、理论研究、仪器状况以及在应用领域的研究进展情况做出了综述性评价. 瞬变电磁法的理论研究主要涉及正演方法、反演方法、资料处理方法. 瞬变电磁法的应用领域包括地面、海洋、航空以及地下等不同工作场地. 同时指出瞬变电磁法的发展趋势为研究三维正反演、多分量观测、成像技术、微信号分析等,以及注重发展海洋、井下、航空瞬变电磁法等.

关键词 瞬变电磁法,理论与应用,研究进展
中图分类号 P631 **文献标识码** A **文章编号** 1004-2903(2007)04-1195-06

The progress of TEM in theory and application

XUE Guo-Qiang[1], LI Xiu[2], DI Qing-Yun[1]
(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*;
2. *School of Geology and Survey Engineering, Chang'an University, Xi'an* 710054, *China*)

Abstract We give the total condition of TEM study include technology, theory, instrument and application, the theory study mainly include forward calculation method, inverse problem and data processing scheme. The application of it include earth surface, sea and aerial survey, subsurface exploration. We also give advance progress the of TEM, include studying 3D forward and inverse calculation, multi-component survey technology, imaging study, and weak signal analyses, as well as, sea, tunnel, aerial TEM developing.

Keywords transient electromagnetic method, theory and application, study progress

0 引 言

瞬变电磁法(TEM)是一种时间域的电磁探测方法. 介质在一次电流脉冲场激励下会产生涡流,在脉冲间断期间涡流不会立即消失,在其周围空间形成随时间衰减的二次磁场. 二次磁场随时间衰减的规律主要取决于异常体的导电性、体积规模和埋深,以及发射电流的形态和频率[1～6]. 因此,我们可以通过接收线圈测量的二次场空间分布形态,了解异常体的空间分布[1～6].

瞬变电磁法在上世纪 30 年代最早由前苏联科学家提出,当时采用的是远区工作模式. 但是,利用电流脉冲激发供电偶极形成时域电磁场的是 1933 年由美国科学家 L. W. Blau 最先提出,当时利用不同电导率地层界面电磁波的反射与地震反射波信号的相似性,进行了大量的实验和比较. 到了上世纪 50～60 年代,前苏联科学家成功地完成了瞬变电磁法的一维正、反演,建立了瞬变电磁法的解释理论和野外工作方法之后,瞬变电磁法才开始进入实用阶段. 上世纪 60 年代以后,当意识到时间域电磁测深法可以利用远远小于期望探测深度的收发距时,该方法有了一个快速发展. 随之,"短偏移"、"晚期"、"近区"、等技术研究迅速发展起来. 美国等西方国家在上世纪 70～80 年代之间,短偏移法一直处于研究和试验阶段,未被广泛运用,而长偏移法已得到了应用,特别是在地热调查和地壳结构的调查中. 随后一些专家对瞬变电磁法的一维正反演及方法技术进行了大量研究[7]. 我国于 70 年代初开始研究 TEM,长

收稿日期 2007-04-10; **修回日期** 2007-06-20.
基金项目 中国博士后基金(2005038388),中国科学院王宽诚博士后奖励基金,中国科学院知识创新项目((KZCZ-yw-113).)国家自然科学基金重点项目(50539080)联合资助.
作者简介 薛国强,男,1966 年生,1989 年于西安地质学院获学士学位,2002 年于长安大学获硕士学位,于 2005 年于西安交通大学获博士学位. 研究方向为电磁探测理论与应用. (E-mail:ppxueguoqiang@163.com)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

春地质学院 、中南工业大学、西安地质学院 、中国有色金属工业总公司矿产地质研究院和西安物化探研究院等单位先后研制了电磁系统,并进行了理论和方法技术研究,主要采用近区方式的中心回线法和重迭回线法进行工作,取得了一批有价值的研究成果及大量成功的实际应用实例[8]. 这一时期代表作有朴化荣著《电磁测深法原理》,牛之链著《脉冲瞬变电磁法原理》及方文藻著《瞬变电磁测深法原理》. 在最近几年的瞬变电磁法应用实践中,还出现了蒋邦远编著的《实用近区磁源瞬变电磁法勘探》,李貅编著的《瞬变电磁测深的理论与应用》. 近几年,瞬变电磁法的理论与应用研究越来越活跃. 特别是在工程勘察领域的应用.

1 理论研究进展

1.1 正演计算

对瞬变电磁法一维情况下的正演计算大多采用先在频率域进行讨论,得到层状介质下的电磁响应表达式,然后把讨论结果转换到时间域来. 从频率域到时间域响应的转换,可以采用的方法有:GAVER-STEHFEST 逆拉氏变换方法,延迟谱方法,线性数字滤波方法,折线化正余弦变换法[1,2].

二维数值计算多采用有限差分法进行. 用两个无限长直导线近似作为发送回线源,可用均匀半空间的解析解在 $t>0$ 时刻将源转化为初始条件加入. 对所研究的空间区域作差分离散,利用准静态近似处理空中边界,在地-空界面向上延拓一个网格,采用五点差分显式格式[9],在每一时间步计算网格空间各点的场量,然后进行时间的逐步递推,就能直接模拟电磁波的传播及其与地质体的相互作用过程.

有限元法对频率域计算比较有利. 因为它可以很方便地处理急剧变化的和倾斜的电导率分界面和地形等问题. 由于频域电磁勘探中的二维定解问题相对简单,且用有限元法求解十分方便,因此,先在频域中用有限元法求解,然后变换到时间域,是瞬变电磁二维正演的一种有效途径.

2.5 维人工源时间域电磁场数值模拟问题是目前国际上尚未妥善解决的计算地球物理疑难问题之一. 我国从上世纪 80 年代开始着手研究 2.5 维电磁场的数值模拟,采用有限元法对时间域和频率域电源瞬变电磁场的 2.5 维响应进行正演数值模拟. 在频率域已经实现三维源二维地质结构的数值计算[10,11],可以首先在频率域计算电磁场响应值,然后再把计算结果变到时间域[12,13,14].

三维瞬变电磁场正演计算只能用数值方法,主要方法有三类:有限差分法[15,16]、有限元法[14]和积分方程法[17]. 前两种方法要求对所计算的全部区域进行离散化,所占用的计算机容量较大. 第三者只要对异常区域进行离散化,存贮量大大减小.

因为积分方程法只需要计算小体积异常区的场,不必计算整个区域的场. 这一点使积分方程算法比微分方程法具有更大的优越性. 但是积分方程法求解要遇到某些更困难的数学问题,仅适合模拟简单模型.

在开放域的地球物理问题中,微分方程算法要解决边界条件和源的处理问题. 瞬变电磁三维直接时域有限差分法数模拟已经有报道[15,16]. 而且还进一步地通过设定等效位移电流,使原适合波动场的时域有限差分算法(FDTD)能够适用于扩散场问题. 直接时域算法的引入,展现了电磁场在地下随时间传播的全过程,使 TEM 场的时间特性被直接反映出来,从而给复杂的物理过程描绘出清晰的物理图象. 目前国内还没有应用较好的 3D 正演软件.

1.2 反演问题研究

浮动薄板解释法是一种根据视纵向电导曲线的特征值直观地划分地层的近似解释方法. 因此称为“视纵向电导解释法”,也有人把该法形象地称为“浮动薄板解释法”.

烟圈理论解释法在均匀大地上,当发送回线中电流突然断开时,在下半空间中就要被激励起感应涡流场以维持在断开电流以前存在的磁场,大地感应涡流在地表面产生的电磁场可近似地用圆形电流环表示. 这些电流环就像由发射回线吹出的“烟圈”,其半径随着时间增大而扩大,其深度随时间延长而加深. 这就提示我们:当计算均匀半空间的地面瞬变电磁响应时,可以用某一时刻的镜像电流环来代替.

人机对话自动反演法 先根据地质资料及定性分析结果,给出初始模型进行正演计算,将正演计算结果用改进的阻尼最小二乘法与实测数据对比拟合. 如果拟合结果不满足要求,就修改模型参数,再进行正演计算,然后再对计算结果对比,如此重复直到满意为至.

人工神经网络反演是模拟人脑机理和功能的一种新型计算机和人工智能技术,在数据处理中采用拟人化的方法进行处理,特别适合于不确定性和非结构化信息处理. 它不要求工作人员有丰富的工作经验,它避开了具体复杂的电磁场计算,只要经过适

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

当的学习训练就能够解决复杂的实际问题,而且还具有学习记忆功能,它一边工作一边学习,使得瞬变电磁法的反演工作具有延续性和继承性. 随着专家系统的不断完善,该方法将有广阔的发展前景.

联合时-频分析反演是借助于信号分析领域内的新成果发展而成的技术,它同时分析 TEM 信号的时间和频率域响应曲线特性,从而进行定性和定量分析解释[18]. TEM 接收到的电压衰减曲线形态比较相近,一般情况下计算出全程视电阻率以及其它电性参数,再进行分析解释,这种常规方法对 TEM 信号的利用率不高. 联合时间频率分析可以表示涡流场在不同时刻,不同频率分量在地下激发和衰减过程. 设观测的时间曲线和由此进行快速付氏变换所得的频率曲线为已知,给定初始反演参数,采用广义逆矩阵迭代超定方程,结果表明,用两种曲线进行联合反演所得的参数精度比常规解释精度高.

成像类反演主要有两种,一种是时频等效转换方法,即:通过一个经验公式,把 TEM 数据等效转换成平面波场数据,借用 MT 数据的拟地震思路,求取反射系数序列进行成像[19]. 另外一种就是波场转换方法,并进一步进行拟地震偏移成像. 如果将扩散的瞬变电磁场变换为波场处理,将该波场从地面向地下反向外推进行偏移成像,形成瞬变电磁偏移方法[20],将对提高瞬变电磁场的分辨率具有重要意义.

瞬变电磁法的三维反演问题将是研究的热门. 由于计算的复杂性,国内研究较少,国外学者研究相对较多. 但随时着计算技术的不断发展,三维反演问题得到解决,瞬变电磁法的勘探精度会得到很大的提高.

1.3　资料处理方法

瞬变电磁法的资料工作,主要是根据瞬变电磁响应的时间特性和剖面曲线特性,以及工区的地质地球物理特征,通过分析研究,划分出背景场及异常场. 在有条件的情况下,应该进行数据全区转换[21],小波去噪等处理,很有必要利用一维、二维、三维正演数值计算得到工作地区的先验知识,便于资料分析解释,尽可能地利用钻井资料,区域地质资料. 目前的瞬变电磁探测方法对地下目标体的评价精度低,对于所绘制的电性参数图件,一般采用二次电压衰减曲线和由此算得的视电阻率值及视纵向电导参数来进行解释. 有时候也利用多测道剖面图,时间常数,二次感应电压与背景场感应电压的比值等参数等进来定性分析解释,但多数情况下仍处于定性和"看图识字"的阶段. 对瞬变电磁法测深资料定量解释还局限于单点一维反演,且反演效果不佳,很多情况下是靠解释人员的工作经验及地质先验知识来对测深结果做出判断,人为性较大. 其分辨率远不能满足实际工程地质的需要,这一状况也限制了方法的推广应用.

2　应用状况

按照工作空间来分,TEM 可以分为:地面 TEM. 地下 TEM、航空 TEM、海洋 TEM. 在我国,前者应用较多,后三者的应用较少.

2.1　地面勘察

瞬变电磁测深法以其直接测二次场;可以进行近区观测;受静态位移的影响小;测地工作简单,工效高等特点广泛应用于金属矿勘探、油气田勘探和煤田地质勘探、工程地质勘察中. 瞬变电磁法的应用还有:海洋调查;水文地质、环境工程灾害地质调查;高速公路、铁路的路线选择;水库、水坝、机场、桥梁以及高层建筑的选址、地下洞体的工程勘察;地下水、地热资源的探查;对长江、黄河等大江大河堤坝的质量探查;对古代地下建筑群位置和规模的无损探测;隧道掌子面超前预报、煤矿超前探测. 国外的地球物理工作者把瞬变电磁测深法用于冰冻层、海水入浸等地质方面调查.

以前,瞬变电磁法只局限于金属矿勘探,1992 年以后随着仪器的智能化与数字化,瞬变电磁法开始步入工程、环境、灾害地质调查中,如探测地下采空区、陷落柱等煤田灾害,划分地下断层、寻找地下水,金属矿产勘探、石油、煤炭等非金属矿产调查、工程场地地质勘察、隧道超前地质预报等领域. 取得了良好的效果. 地面主要应用的装置形式有磁源重迭回线法、大回线源法、中心回线法、电偶源、LOTEM 应用较少.

解决了大量工程地质问题. 取得了很多实际应用和理论研究成果.

2.2　地下瞬变电磁法

2.2.1　矿井瞬变电磁法

由于井下施工环境的限制,不可能采用大线圈装置形式,只能采用边长小于 3 m 的多匝小线框,工作效率高. 井下瞬变电磁法在施工过程中,具有一定的方向特性. 在探测过程中,根据地质任务的不同,可调整发射线框与煤层底板之间的角度. 可以将线圈直立于巷道内,当线圈面平行巷道掘进前方,可

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进行超前探测,或探测煤层内的含水构造异常体;也可以将线圈置于巷道底板,并设置一定的夹角,通过探测了解煤层底板下一定深度范围内含水异常体垂向和横向的发育规律.发射线框和接收线框分别为匝数不等且完全分离的2个独立线框,以便与地下(前方)异常体产生最佳耦合响应.在工作面回采前,利用现有巷道对相邻工作面未掘巷道实施侧向探测,确定隐伏含水异常范围及位置,为掘进中防、探水工作提供技术依据.减少、取代和部分取代现行超前探测工作[22,23].

2.2.2 隧道掌子面瞬变电磁法

随着我国铁路、公路隧道及南水北调引水隧洞建设的加快,隧道(洞)的勘查设计时间比较短,在隧道(洞)工程建设开发之前,很难提供足够的时间来进行地面地球物理勘探和岩土工程地质勘察,况且由于受到复杂地质和水文地质条件的影响,不良地质情况预报无论在理论方法和技术手段上都没有得到有效解决,难以应对隧道施工中可能出现的水体灾害问题.长安大学,西安煤炭研究所率先用瞬变电磁法进行隧道掌子面前方不良地质体超前预报.取得了较好的效果.类半平面问题在掌子面高和宽大于5倍的回线尺寸的情况下,近似认为是半平面.引进了微分电导成像技术,解决掌子面前方含水构造探测问题.采用3米长的回线框作为发送,直立地贴近于掌子面,用特制的接收磁探头(固定于回线正中心)接收来自掌子面前方的二次感应电压信号,通过一系列各种隧道效应校正,得到较好的资料.通过近年来几十个隧道探测,取得了较多的经验和效果.

2.3 海洋瞬变电磁法

目前用于海洋油气勘探的可控源电磁方法主要有频率域和时间域电磁法两类.海洋电磁勘探时一般将接收装置布设于测量区域的海底,发射源为电偶极源,用船拖着在距观测区域一定的距离范围(2～10 km)内移动,实现多偏移距测量.频率域方法与时间域方法的差别仅在于发射波形和电磁响应函数不同,而在解释参数上时间域电磁法可以获得地层的充电率参数,为研究地层的含油气性提供比电阻率更为直接的信息.国内在这一方面的理论研究[24,25]多于实际应用.

3 仪器状况

过去勘探队伍和设备主要集中于地质队,科研院所等,仪器主要为国产仪器为主.当时的国产商品化的仪器主要产自西安、廊坊、长沙等地.现在一些非物探专业部门,独立法人的企业,还有个人购买了进口仪器和国产仪器.受市场化作用的影响,国产仪器受冲击力较大.市场上大的项目还是依靠进口仪器来完成.进口的国外的仪器主要有加拿大GEONICS公司生产的PROTEM系统(PROTEM-37,47,57,67);PHOENIX公司生产的V6,V8系统;美国ZONGE公司生产的GDP-32系统等.澳大利亚SIROTEM仪器和前苏联的MPPO仪器.前面三款仪器在国内应用较多,后两者仪器应用较少.国外仪器最大特点是接收机全智能化,形成多功能的工作站.目前,国际上商业用的固定翼时间域航空电磁系统主要有澳大利亚产TEMPEST、加拿大产GEOTEMR、GEOTEM DEEPTM、MEGATEM、澳大利亚产QUESTEMR 450、南非产SPECTREM等系统.国内应用很少.

在我国,70年代初期开始着手研究瞬变电磁仪器系统,最早研制并投入生产的是地矿部物化探研究所,其生产的的仪器型号为WDC-1、WDC-2,后又研制了IGGETEM-20瞬变电磁系统;1988年西安物化探研究所采用脉冲压缩技术研制成功大功率的LC-1系统并投入生产,后来又研制EMRS-1、EMRS-2瞬变电磁仪.1992年长沙高新技术产业区智通新技术研究所与中南工业大学合作生产出SD-1型、SD-2型仪器,白云仪器厂在此基础上研制了MSD-1,BYF5MSD1瞬变电磁系统.1996年石油天然总公司与西安石油仪器厂开始研制用于深部探测的大功率高精度瞬变电磁仪器.北京矿产地质研究所王庆乙教授研制了TEMS-3S瞬变电磁仪器;吉林大学林君教授研制了ATEM-2瞬变电磁仪器[26,27],重庆奔腾数控技术研究所研制了WTEM系统;限于我国电子技术工艺水平原因,虽然一些厂家在生产用于深部勘探的大功率仪器和用于浅部探测的小功率仪器,但在生产工艺上、原器件焊接技术上和性能稳定上都与国外仪器有很大的差距.目前国内没有生产航空电磁法仪器的厂家.接收磁探头方面:GDP32配有接收磁芯磁探头.V6,V8系列仪器配有专用的空心接收结圈,不太方便.国内已经有专门生产此探头的单位,可以生产浅、中、深三种不同型号的磁探头.

受市场和国外仪器的影响,国内仪器需要向高性能,高分辨方向发展,乃是当务之急.将地震勘探仪器及方法中已采用的先进技术有针对性性地引入,发展多通道电磁法、阵列式观测、实现多次空间迭加和多次覆盖.将电子工业中业中新型技术有针

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对性地引入到仪器设备中如:卫星定位、同步、大功率管控制技术、微波通讯技术等.设备器件耐高温高寒技术;仪器的系列化、多功能化;发展成熟的先进的数据处理技术、可视化软件、高温超导磁探头[28],提高磁场探测的灵敏度.

4　研究展望

(1)理论研究方面:研究高分辨率的数据采集系统;研究三维精细解释方法,发展对地下目标体的3D 反演;以可视化技术为主体的计算机技术的应用;研究三分量技术;研究多孔径瞬变电磁探测理论.发展成像技术及瞬变电磁测深资料与其它勘探资料的联合反演.瞬变电磁法的激电效应特征研究.

(2)研究弱信号技术:包括瞬变电磁早期信号的研究和晚期信号研究.瞬变电磁发射线圈和接收线圈之间存在互感,以及它们自身都有自感,其等效回路相当于 RLC 电路,自感信号与电磁响应信号迭加在一起,如何对这种信号进行分离,如何确定有效观测起始时间,从而确定瞬变电磁最小探测深度.当然瞬变电磁的探测深度与仪器的分辨能力、地下介质导电情况、围岩特性、目标体与围岩差异等因素有关.晚期信号能量较弱,最后被背景噪声淹没,研究有效的信噪分离方法,以增大瞬变电磁法的探测精度和深度.

(3)方法技术方面:接收装置阵列化.瞬变电磁法拟地震的时间域和空间域多次覆盖技术研究是十分重要的.另外,多分量的观测技术研究也不应忽视.研究多源发射聚焦探测方法.

(4)仪器方面:采集系统图像化.发展多通道大功率、多功能、智能化电测系统,高灵敏度高性能探头的研制,是现代仪器研制开发的难点.仪器向数字化、多功能化、智能化、自动化、轻便化方向发展.特别是研制多分量瞬变电磁法系列(航空、地面、井下).考虑到岩层各向异性对测量结果的影响,以及大地电磁干扰场是一种水平极化场,因此通常选择测量磁场的垂直分量.观测水平分量可以研究断面的各向异性,这一方面的理论研究有待发展.

(5)应用方面:除了通常应用于金属矿产及石油资源的勘查外,还应用在地下水、地热环境及工程勘查中.另外,井下瞬变电磁法的研究和应用还处于起步阶段,瞬变电磁法的隧道超前地质预报及深部构造精细探测方面应该加强研究.还要大力研究海洋瞬变电磁法和深部剩余油瞬变电磁法精细探测.井—地瞬变电磁勘探系统,已经取得初步成果,希望在油田,矿产资源领域得到较好应用.石油天然气勘查.深部油藏监测,剩余油勘察等仍然是瞬变电磁法的一个难题.所以,要实现三维反演的实用化,成果推广化,还需要走一段很长的道路.

5　结　论

我国对瞬变电磁法的理论研究与生产实践已有30 年的历史,但目前在理论研究、仪器研制方面尚处于初级阶段,而仪器大多是在国外仪器基础上的开发和改进,加之应用推广并不普遍,因此,在我国瞬变电磁法研究和普及还要有很长的路走.

总的来说,瞬变电磁法取得了很大进展,在勘察领域得到相对广泛的认可,但是,还要研究非共中心点情况下的瞬变电磁正反演;还需要加强水平分量资料的观测,及多分量数据的正反演问题研究;复杂介质情况下,比如连续介质、地形起伏介质;瞬变电磁正演计算还研究的不够深入.拟地震成像解释的研究工作,虚拟波场速度分析,拟地震定量反演解释的研究才刚刚开始.特别是二维地电断面情况下的拟地震解释还处于探索阶段.另外,对于拟地震解释的精度评价研究做的还不够深入.在三维正演计算中,大多研究场源为电偶极子或者接地长导线形式,对于应用较广的矩形回线源情况,由于其复杂性,正演计算研究相对较少.航空瞬变电磁法,国外有开展,我国开展较少.

感　谢　课题组王妙月、石昆法研究员,王光杰副研究员,王若博士对一些问题的探讨与帮助.中国地质大学王家映教授,江苏大学闫述研究员对一些疑难问题的研究和指导.

参　考　文　献(References):

[1]　朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990,
[2]　方文藻,李予国,李貅.瞬变电磁测深法原理[M].西安:西北工业大学出版社,1993
[3]　牛之琏.时间域电磁法原理[M].中南工业大学出版社,1993,
[4]　何继善.电法勘探的发展和展望[J].地球物理学报,1997,40(增刊):308～316.
[5]　蒋邦远.实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M].地质出版社,1998.
[6]　李貅.瞬变电磁测深的理论与应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2002 9 1-4,102～105.
[7]　薛国强.回线源瞬变电磁法对地成像方法研究[D].博士学位论文,西安:西安交通大学,2005.
[8]　李貅.瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像研究[D].博士学位论文,西安:西安交通大学生,2005

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[9] 闫述. 瞬变电磁场的直接时域数值分析[J]. 地球物理学报, 2002,45(2): 275～284.
[10] 底青云,王妙月,王若. 有限元法 2.5 维 CSAMT 数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2):317～324.
[11] 底青云,Martyn Unsworth,王妙月. 复杂介质有限元法 2.5 维 CSAMT 数值模拟[J]. 地球物理学报,2004,47(4):723～730.
[12] 熊彬,罗延钟. 电导率分块均匀的瞬变电磁 2.5 维有限元数值模拟[J]. 地球物理学报, 2006, 49(2): 590～597.
[13] 熊彬,罗延钟,强建科. 瞬变电磁 2.5 维反演中灵敏度矩阵计算方法(J). 地球物理学进展, 2004,19(3):616～620.
[14] 王华军,罗延钟. 中心回线瞬变电磁法 2.5 维有限单元算法[J]. 地球物理学报,2003 46(6): 855～862.
[15] Wang T, Hohmann G W. A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1993,58: 797～809.
[16] 宋维琪,仝兆歧. 3D 瞬变电磁场的有限差分法正演计算[J]. 石油地球物理勘探,2000,35(6):731～756.
[17] 张 辉,李桐林,董瑞霞. 体积分方程法模拟电偶源三维电磁响应[J]. 地球物理学进展,2006 21(2): 386～390.
[18] 闫述, 陈明生. 瞬变电磁场资料的联合时- 频分析解释[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1):203～208.
[19] 薛国强,李貅,宋建平. 从瞬变电磁测深数据向平面波场数据的等效转换[J]. 地球物理学报,2006,4(5):1539～1545.
[20] 李貅,薛国强,宋建平,郭文波. 从瞬变电磁场到波场的优化算法[J]. 地球物理学报. 2005,48(5):1185～1190.
[21] 白登海,Maxwell A Meju,卢健等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697～704.
[22] 杜木民,李玉宝. 井下瞬变电磁探水技术初探[J]. 河北煤炭, 2006,3:1～2.
[23] 丛茂祥,张爱印,张利芳. 矿井瞬变电磁法探测井下工作面顶底板的含水构造[J]. 江苏地质,2004,28(4):238～242.
[24] 周逢道,林 君,刘长胜,王 艳,周国华,李 慧. 浅海底瞬变电磁法接收天线频率特性研究 —带宽对浅层分辨的影响[J]. 地球物理学进展,2006 2 1(4):1342～1345.
[25] 刘长胜, 林君. 海底表面磁源瞬变响应建模及海水影响分析[J]. 地球物理学报,2006,49(6):1891～1898.
[26] 嵇艳鞠,林君,王忠. 瞬变电磁接收装置对浅层探测的畸变分析与数值剔除[J]. 地球物理学进展,2007,22(1):262～267.
[27] 嵇艳鞠,林君,于生宝等. ATTEM 系统中电流关断期间瞬变电磁场响应求解的研究[J]. 地球物理学报, 2006,49(6): 1884～1890.
[28] 王赤军,陈晓东,赵毅,王宝珍. 77KSQUID 磁强计在 TEM 测量上的应用研究[J]. 地球物理学报,1999,42(SUPPL):161～166.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net