



中国教师发展基金会教师出版专项基金资助

瞬变电磁法 拟地震偏移成像研究

李 貅 薛国强 著 ▶▶▶

Study on pseudo-seismic
migration imaging of transient
electromagnetic method



科学出版社

中国教师发展基金会教师出版专项基金资助

瞬变电磁法拟地震偏移成像研究

李 貅 薛国强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者近十多年来在瞬变电磁拟地震方法技术研究与应用实践的基础上写成的。书中介绍了作者在该领域理论方法和实际应用方面的系列重要成果。本书系统地论述了瞬变电磁波场转换原理及方法、瞬变电磁虚拟波场特性,研究了瞬变电磁拟地震方法的重要技术:虚拟子波宽度压缩技术、合成孔径技术、三维偏移成像技术等。本书可供大、中专院校地球物理、地球探测与信息技术等专业师生、科研单位研究人员以及相关单位工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

瞬变电磁法拟地震偏移成像研究 / 李貅, 薛国强著. —北京:
科学出版社, 2013.6

ISBN 978-7-03-037886-6

I. ①瞬… II. ①李… ②薛… III. ①瞬变电磁法-模拟-
地震偏移-地震层析成像-研究 IV. ①P631.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第131554号

责任编辑: 韩 鹏 张井飞 责任校对: 包志虹

责任印制: 钱玉芬/封面设计: 陈四雄

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年6月第一版 开本: B5 (720×1000)

2013年6月第一次印刷 印张: 9 插页: 12

字数: 202 000

定价: 68.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



瞬变电磁法以其独特的优点广泛应用于资源勘查、工程勘察、地质灾害调查等领域，并越来越受到广大地质科技工作者的青睐。随着把地震学中已有的和正在发展的方法技术应用到瞬变电磁法中的研究不断进步，瞬变电磁测深偏移成像方法技术的研究也成为当今勘探电磁领域研究的热点。人们越来越关注像拟地震解释法、电磁偏移成像以及偏移与反演相结合的研究方法。这些方法从波场的角度，拓展和丰富了瞬变电磁场的内涵，使得从实测资料中提取到常规瞬变电磁法提取不到的、对地下目标体成像更有利的信息。

面对资源勘查（深部矿、盲矿）和工程勘察（精细勘察）方面对地球物理工作要求的提高，研究开发瞬变电磁法拟地震的多次覆盖技术是十分必要而且具有重要实际意义的。另外，多分量、阵列式的观测技术可以获得丰富的地电信息，其方法技术研究也已经引起人们的重视。研制抗干扰能力强的多分量、多通道适合开展阵列式观测的瞬变电磁探测系统，大功率、多功能、智能化及适时数据处理功能等是现代仪器的发展方向，另外，研制高灵敏度、高性能、三分量观测探头也是高分辨瞬变电磁仪的重要环节。

在前人研究的基础上，笔者先后和二十多位研究生一起研究瞬变电磁拟地震资料解释方法技术。提出从瞬变电磁场到波场的优化算法，将正则化算法用于逆变换过程的计算中，成功地提取出虚拟地震子波。通过实验发现，采用多孔径辐射场源能得到比单孔径辐射场源更强的磁场分布这一现象的存在，从一次场观测结果看出多孔径场明显地改善了磁场的方向性，证明了多孔径瞬变电磁场存在相关叠加现象；完成了虚拟子波宽度压缩技术研究，用基尔霍夫积分法进行电磁波场偏移成像处理，实现了瞬变电磁场的三维曲面延拓计算；从瞬变电磁场本身的特性出发，基于等效导电平面的理论，提出瞬变电磁虚拟波场连续速度分析方法，初步取得了瞬变电磁拟地震资料解释的阶段性成果。

我们出版本研究专著，以便对该方法技术感兴趣的读者阅读和参考。全书共分7章，第1章介绍瞬变电磁法的发展概述和研究展望；第2章为波场转换基本原理；第3章研究瞬变电磁虚拟波的波场特性；第4章介绍合成孔径技术及虚拟子波宽度压缩技术；第5章介绍瞬变电磁虚拟波场三维曲面延拓成像技

术；第6章介绍虚拟波场的速度分析；第7章给出理论模型数值模拟结果以及我们近年来的工作实例。

全书主要由李貅负责撰写，薛国强负责第1章、第4章的撰写和全书的编排和校对工作。往届毕业的研究生戚志鹏、郭文波、马宇、全红娟、武军杰、范涛、刘银爱、吴琼、朱宏伟、张旭等，以及在读研究生孙怀凤、钱建兵、张莹莹等都对方法的研究以及本书的出版做出了贡献。博士生周楠楠对瞬变电磁物理量信息进行了整理，博士生陈卫营对公式进行了核对。硕士生李海对书中参考文献进行了校对。

本书是在作者近年来所承担的国家自然科学基金项目和企业委托项目的基础上完成的。但由于瞬变电磁法在我国开展研究和应用的时间相对较晚，特别是瞬变电磁拟震解释理论与应用研究还处于初步阶段，还需要继续深入研究。加上作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

李 貅

2012年11月8日于长安大学

序言

第 1 章 瞬变电磁法发展与展望	1
1.1 瞬变电磁法发展概述	1
1.2 瞬变电磁法的发展方向	3
1.3 瞬变电磁法拟地震解释研究的前沿课题	7
1.3.1 基于时-频等效转换的瞬变电磁成像技术.....	7
1.3.2 基于波场转换的瞬变电磁成像技术	8
1.3.3 逆时偏移成像方法.....	10
第 2 章 瞬变电磁场的全域波场变换原理	12
2.1 瞬变电磁场与虚拟波场关系式的建立.....	12
2.2 波场反变换式的不适定性.....	14
2.2.1 反问题与第一类算子方程的不适定性.....	14
2.2.2 波场变换方程的不适定性分析.....	15
2.3 波场变换的数值化方法.....	19
2.3.1 数值化方法.....	19
2.3.2 最优化方法.....	20
2.4 波场逆变换的预条件共轭梯度正则化算法.....	21
第 3 章 瞬变电磁虚拟波场的波场特性分析	25
3.1 两层模型分析.....	25
3.1.1 单正峰波场记录模型.....	25
3.1.2 单负峰模型分析.....	35
3.2 三层模型分析.....	45
3.2.1 双正峰虚拟波场记录.....	45
3.2.2 正负双峰虚拟波场记录.....	48
3.2.3 负正双峰波场记录.....	52
3.2.4 双负峰波场记录.....	56
3.3 时间域响应加噪后的波场特征.....	59

第 4 章 合成孔径算法与子波宽度压缩	74
4.1 合成孔径成像算法	74
4.2 子波宽度压缩	75
4.2.1 波形展宽的现象	76
4.2.2 波形展宽的原因	77
4.2.3 利用反褶积技术压缩波场宽度	79
4.2.4 模型计算	81
第 5 章 瞬变电磁场拟波动方程三维曲面延拓成像	85
5.1 基尔霍夫绕射积分的建立	85
5.2 基尔霍夫积分偏移 (曲面延拓)	90
5.3 波场延拓的边界单元法	92
5.3.1 基尔霍夫积分的离散化	92
5.3.2 单元分析	92
5.3.3 合成矩阵	94
5.3.4 单元积分的计算	94
第 6 章 TEM 虚拟波场速度分析	99
6.1 基于等效导电平面法的速度建模原理	99
6.1.1 等效导电平面法基本原理	99
6.1.2 水平层状介质表面的瞬变电磁场的近似计算	101
6.1.3 \bar{m} 参数的优化提取	103
6.2 单个测点的速度建模方法	105
6.3 连续速度分析	106
6.3.1 全局距离加权插值	106
6.3.2 近点线性插值	108
第 7 章 理论模型成像计算与应用实例	116
7.1 模型计算	116
7.1.1 层状模型	116
7.1.2 三维模型	118
7.2 应用实例	124
7.2.1 隧道超前预报实例	124
7.2.2 煤矿采空区探测实例	126
参考文献	132

彩图

第 1 章 瞬变电磁法发展与展望

1.1 瞬变电磁法发展概述

瞬变电磁法最早在 20 世纪 30 年代由原苏联科学家提出,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是由美国科学家 L. W. Blau 于 1933 年最先提出的,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,但由于脉冲激发的瞬变响应频率较低,难以得到识别各个反射波所需要的分辨率,瞬变电磁法一直受到冷落。到了 20 世纪五、六十年代,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。20 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。在苏联,组建了数十个瞬变电磁法探测队伍,在油气勘探领域开展工作,并取得了卓有成效的勘查效果。随之,“短偏移”、“晚期”、“近区”等技术研究迅速发展起来。20 世纪七、八十年代,在美国等西方国家短偏移法一直处于研究和实验阶段,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、反演方法技术进行了大量研究。20 世纪 80 年代后随着计算机技术的发展,欧美学者在二、三维正演模拟技术方面,发表了大量用有限差分法、有限元法、积分方程法等进行电磁法数值模拟研究的论文。理论和认识的提高推动了瞬变电磁法探测应用的发展。电磁法理论方面的主要代表著作有考夫曼和凯勒(1987)的专著《频域和时域电磁测深》,米萨克 N·纳比吉安(1992)主编的《勘查地球物理·电磁法》第一卷。与此同时,苏联学者别尔季切夫斯基和日丹诺夫(1985)提出电磁波拟地震波的偏移方法,他们吸取了“偏移成像”的广义概念,在电磁法中确定了正则偏移和解析法偏移两种方法。随后,一些成像技术研究的成果相继出现,Macnae(1987)、Eaton 和 Hohmann(1987, 1989)等完善了电导率成像方法,Ghristensen(2002)对瞬变电磁数据一维成像进行了研究。20 世纪 90 年代初, Lee 和 Xie(1993)推导了二维成像解释方法。de Hoop(1996)认为瞬变电磁法与反射地震勘探具有相似性原理。Gershenson(1993)提出用波的扩散传播特性解释时间域电磁测深资料。Kunetz(1972)研究了

大地电磁与地震弹性波场之间的内在联系, Lee 和 Memechan (1987) 根据电磁波与地震波的相似性利用差分法的二维偏移实现了电磁数据成像。20 世纪 80 年代末, 别尔季切夫斯基和日丹诺夫 (1985) 又从激发极化现象理论出发, 研究了时间域瞬变电磁法的激电效应特征及影响, 解释了瞬变电磁法晚期电磁响应的变号现象, 并对三维极化体的瞬变电磁响应特征进行了数值计算。

在我国, 对瞬变电磁法的研究始于 20 世纪 70 年代, 较早开展工作这项工作的有牛之珪 (1986, 1992)、朴化荣 (1990)、曾孝箴等, 他们将脉冲式航电仪用于地质填图和找矿中; 蒋邦远 (1998) 等将瞬变电磁法用于普查勘探良导金属矿实践中, 并研制出了电磁脉冲瞬变系统; 牛之珪 (1986, 1992) 将瞬变电磁法用于金属矿勘探上, 取得了显著的效果, 并与长沙智通新技术研究所合作研制并生产了智能化瞬变电磁仪; 朴化荣 (1990) 用 G-S 逆拉氏变换法实现了电性源瞬变电磁测深的正演计算; 方文藻等 (1993) 用线性数字滤波技术实现了大回线源瞬变电磁测深的正演计算, 并将大回线源瞬变电磁测深法广泛用于地热和地下水调查、工程调查和地质灾害调查, 又将瞬变电磁法用于大地电磁测深曲线的静校正, 取得了良好的效果。在一维、二维数值模拟方面, 王华军和罗延钟 (2003) 从事研究并发表了相关论文, 王华军 (2003)、陈伯舫等 (1998)、陈明生 (1999)、殷长春和刘斌 (1994) 等对二维、三维瞬变电磁正、反演进行了研究。王家映等 (1985)、王家映和方胜 (1986)、王家映 (1990) 通过分析平面电磁波与地震波的相似性, 对大地电磁的拟地震解释进行了系统的研究; 于鹏和王家林 (2001)、于鹏等 (2003) 在对电磁场偏移研究的基础上, 提出了改进的有限差分法大地电磁场偏移成像技术; 李貅等 (2005b) 对瞬变电磁测深开展了微分电导成像的研究工作, 并提出从瞬变电磁到波场的优化算法, 通过波场转换, 对瞬变电磁虚拟波场的三维曲面延拓成像进行了研究; 陈本池等 (1999) 对波场变换进行了研究, 用模拟数据成功地获得了单一界面的二维地质结构的图像, 王华军和罗延钟 (2003) 对瞬变电磁测深波场变换中的波形展宽原因探讨; 吕国印 (1998) 研究了二维瞬变电磁逆时偏移; 薛国强 (2005) 提出并开展了瞬变电磁对地成像理论和成像数值计算方法的研究; 闫述 (2002) 用时间域有限差分法对地下瞬变电磁响应进行了数值计算, 并在瞬变电磁测深的联合时-频解释方面进行了研究; 郭文波 (2001) 通过分析均匀介质和分层媒质中电磁波与地震波的传播特征, 认为回线源中心激发的瞬变电磁场在地下扩散可近似看成球面波形式传播, 在晚期球面波接近于平面波, 与地震波有相似的传播特征, 在时-频转换的基础上, 通过求取发射函数序列实现了瞬变电磁资料拟地震解释法。

国内主要的著作有《电磁测深法原理》(朴化荣, 1990)、《脉冲瞬变电磁

法及应用》(牛之琏, 1986)、《时间域电磁法原理》(牛之琏, 1992)、《瞬变电磁测深原理》(方文藻等, 1993)、《实用近区磁源瞬变电磁法勘探》(蒋邦远, 1998)、《瞬变电磁测深的理论与应用》(李貅, 2002)等。

在仪器的研制方面, 国内多家科研院所从 20 世纪 80 年代末开始相继研制成功了各具特色的瞬变电磁仪。例如, 中国地质科学院物化探研究所研制开发的 WDC-1、WDC-2 与 IGGEM-20 瞬变电磁仪; 西安强场源物化探研究所刘显跃等研制的 LC-1、EMRS-3 等小线圈、大电流瞬变电磁系统; 中南工业大学牛之琏与长沙智通新技术研究所联合研制生产的 SD-1、SD-2 瞬变电磁仪; 长沙白云仪器有限公司生产的 MSD-1 轻便型瞬变电磁仪器; 北京矿产地质研究所王庆乙(1999)研制的 TEMS-3S 瞬变电磁仪; 吉林大学林君等(2004)研制的 ATEM-2 瞬变电磁仪等。很多勘查单位购买了国际上先进的装备, 如美国 ZONG 研制生产的 GDP-12、GDP-16、GDP-32 多功能电法系统, 加拿大凤凰公司生产的 V5、V6、V8 系统, 加拿大 Geonics 公司生产的 PROTEM 瞬变电磁系统接收机(EM37、EM47、EM57、EM67 等), 澳大利亚生产的 SIROTEM-II、III, Terra TEM 仪器等, 从而推动了瞬变电磁法的工作, 并获得了大量有价值的研究成果及成功的应用实例。

1992 年以来, 随着仪器的智能化与数字化, 瞬变电磁法开始迅速步入工程、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、石油和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。目前, 瞬变电磁法已经几乎涉足了勘探地球物理的所有领域, 取得了良好的效果。

1.2 瞬变电磁法的发展方向

瞬变电磁法作为一种重要的电磁勘探方法, 以其独特的优点(经济、无损、快速、信息丰富、分辨力强等)广泛用于资源勘探和工程勘察中。但针对一些具体的精细探测问题, 如高速公路和铁路建设中的隧道超前地质预报精细探测、大型重要古墓的墓室结构精细探测、大型水坝隐患精细探测等, 常用的瞬变电磁法的分辨率受到限制, 探测效果受到影响, 这是因为常规方法要想提高信噪比, 就要加大发射回线的面积, 加大发射磁矩, 但随着发射回线面积的加大, 体积效应的影响随之加强, 也就影响了分辨率的提高。从目前看, 在理论研究、仪器研制方面处于初级阶段。理论研究虽已解决了一维正、反演问题, 但在二、三维的研究还未达到应用程度, 而仪器大多是在国外仪器基础上的开发和改进, 应用推广并不普遍。

随着探测分辨率和精度要求的提高,迫切需要从两个方面对极有发展前途的瞬变电磁法进行深入的研究,一方面是在探测的方法技术方面研究多孔阵列式观测方式,目的是在保证一定探测深度及不增加体积效应的前提下,提高对目标体的分辨率;另一方面是在原有解释方法理论上对正、反演问题做更深入的研究,探索新的反演理论并对其进行系统化,建立系统的瞬变电磁解释正、反演理论,同时使瞬变电磁法的解释向三维方向迈进,使这一方法能更好地解决一些高难度的精细探测问题。

自 20 世纪 70 年代以来,瞬变电磁法在我国研究、应用已有 30 余年的历史,在理论(包括解释理论)研究、方法技术方面取得了长足进步。虽然先后发表出版了大量有关瞬变电磁理论与应用方面的论文与专著,解释理论、方法技术、勘察效果等方面均有报道,但从目前看,在理论研究、仪器研制方面仍处于初级阶段。

有专家认为,正是由于电磁法理论本身的复杂性,对用户在仪器设备和基础理论方面的知识要求更高,因此方法的进展相对缓慢。国内仪器生产的规模性和持续性较差,加之应用推广并不普遍,受市场经济的影响,国内越来越多的生产单位和科研院所都购置了国外生产的多功能、多方法仪器,使国内自成体系的方法研究、装备研发以及技术发展受到制约。与发达国家相比,瞬变电磁法在我国的应用方面与西方国家大体相当,其他方面仅相当于国外 20 世纪 90 年代的水平,而复杂地电条件下的正、反演解释国内可以说尚处于入门阶段。何继善(1997)院士指出,电磁法二维、三维反演方法和成像技术将是理论研究中的重要方向。就目前瞬变电磁法的理论与应用,仍面临以下几方面的问题。

(1) 在信号采集方面:众所周知,瞬变电磁探测是观测一次场间歇期间地下介质感应产生的随时间变化的二次场。其特点是:①信号动态范围大,观测信号的幅值及其衰减减慢取决于探测的地下介质(地质体)的时间常数 τ 值,对于良导体,信号衰减较慢,时间范围一般从几十微秒到几百毫秒,信号的幅值一般从数十或上百毫伏变到零点几微伏;②感应信号的频带宽,瞬变电磁探测信号的频谱成分十分丰富,频带范围一般为 $n \sim n \times 10^4$ Hz;③探测的信号受干扰噪声影响大,瞬变电磁探测一般在晚期观测,晚期探测信号一般为微伏量级,这时观测频带内的各种天然及人文干扰噪声相对较强,实际观测到的是各种信号的叠加,要提高信噪比,就要提高仪器的灵敏度或增大发射功率。因此,如何采集到并分离出丰富的能反映地下介质地电特性的有用信号,是瞬变电磁勘查能否成功的关键。

目前的观测技术,多数瞬变电磁仪器是在连续的等对数时间间隔窗口内采集来获得感应二次场的衰减曲线的,一般为 20~40 道,信息量十分有限。

GDP-32 多功能电法系统实现了算术等时间间隔的采样功能,大大提高了采样密度,可观测几百至上千道的数据,比常规对数间隔采样获得更丰富的地电信息,但晚期道很多比有用信息强的干扰噪声同时进来了。如何获取并分离出含丰富地电信息的有用信号,仍是地球物理工作者需解决的问题。

对于瞬变电磁探测,不论长偏移距还是近区观测,目前的观测参数多为磁场的垂直分量。有学者提出应同时观测水平分量,但鲜有成功应用的文献报道。因此,研究开发多分量、阵列式的观测技术对促进瞬变电磁探测的应用发展具有重要的现实意义。

(2) 解释理论方面:国内外有关瞬变电磁法解释理论方面的文献报道很多,主要有浮动薄板解释法(视纵向电导解释法)、烟圈理论解释法、瞬变电磁时-频转换反演,一维、二维正、反演人机联合解释法等。

以往解释所用信号和参数单一,尚未见有多分量、矢量合成、多参数联合解释方面的报道;复杂条件下的二维、三维正反演解释还不成熟,尚处于研究探索阶段。因此,探索研究瞬变电磁多分量快速解释方法和合成矢量解释方法,研究开发阵列式观测资料的处理方法和快速适用的二维、三维正反演解释理论的研发,将极大地提高瞬变电磁探测的分辨能力及解释精度,丰富瞬变电磁探测的解释理论。

(3) 方法实用性方面:瞬变电磁法应用领域广泛,受人们重视、关注的程度越来越大。尽管该方法有独特的优点,但在某些特殊地质地貌开展工作仍会遇到各种困难,例如,地形切割严重的秦岭山区开展金属矿瞬变电磁探测,工作布置困难,采样难度大,由于地形恶劣、植被发育,工作甚至不能开展;海洋瞬变电磁工作,虽有学者在从事实验研究,但仍沿用传统的装置方式、观测技术,效率低、工作难度大。另外,随着找矿难度的增大,需要在干扰大的矿区及外围开展大深度的勘查工作;工程勘察方面往往需要解决精细构造、复杂断面等方面的问题,这就给地球物理工作者提出了更高的要求,迫切需要研发抗干扰能力强的、勘探深度大的、分辨能力强的、解释精度高的方法技术。因此,开发经济有效的瞬变电磁探测工作装置、快速观测技术、精度高的解释理论是瞬变电磁法探测应用研究的一个方向。

地震勘探共深度点多次覆盖技术为我们提供了研究思路,开发应用阵列式多分量观测方法与技术将快速获得更丰富的地电信息,模仿地震勘探共深度点叠加法,研究阵列式多分量观测资料的快速适用的解释方法将大大提高瞬变电磁探测的解释精度,丰富瞬变电磁探测的解释理论,从而对瞬变电磁(航空和海洋瞬变电磁)的应用发展带来更加广阔的前景。

因此,可以将瞬变电磁法的发展方向概括为以下几个方面。

(1) 理论研究方面:在注意发展研究复杂地电条件下二、三维问题正反演

的同时，更应注意实际应用效果，瞬变电磁拟地震的偏移成像技术、瞬变电磁法各种干扰信号的分离技术研究和解释方法也是一个值得注意的研究方向。当前国内、外学者正在寻找一个数学上的处理办法，将瞬变电磁场变换成波场，即将电磁响应中与传播有关的特征提取出来，而把电磁波传播过程中与频散、衰减有关的特征进行压制或去除。如果能够实现，就能将瞬变电磁场的求解问题转化为大家所熟悉的波动方程的求解问题，就能将地震偏移成像技术、Born 近似反演技术、脉冲谱反演技术、层析成像反演技术等用于瞬变电磁场的反演解释中。基于电磁波在导电介质中的传播和地震波在弹性介质中传播的运动的相似性建立起来的反演解释方法这些年来有了很大发展，取得了卓有成效的研究成果，在一定程度上缩小了解的非唯一问题，扩大了电磁法的应用范围，并可希望从观测资料中提取常规反演方法得不到的更多、更准确的地下信息。

另外，经典瞬变电磁理论将磁性源和电性源看做偶极子，利用稳恒电流场的磁偶极子或静电场的电偶极子公式，比拟到谐变场的频域表达式，再经频域到时域的变换得到解析公式。这种基于偶极子的理论公式在瞬变电磁法的发展中起到了重要作用，但还不能完全反映场的特性、不能适应精确勘探的需要。可以用时变点电荷载流微线元代替偶极子微元，可以不再经过 Fourier 变换或 Laplace 变换，直接在时间域中推导层状介质表面上大回线和长接地导线源的瞬变电磁场解析解。通过研究时域辅助函数的选取、时变点电荷载流微元的处理、含特殊函数积分算法，分析瞬变场在典型地层和不同场区情况下的响应特征等，建立新的电磁场理论体系。这一研究方向将突破长期沿用的偶极子理论，用真正的微元代替偶极子微元，减小非偶极子和时域频域转换误差，可以很好地反映全场区的电磁特性，为瞬变电磁法的进一步发展和实际勘探提供研究思路。

(2) 方法技术方面：瞬变电磁法拟地震的多次覆盖技术研究是十分重要的，另外，多分量、阵列式观测技术研究也不应忽视。

针对目前较广泛使用的瞬变电磁回线源装置，开展高分辨瞬变电磁法全域探测技术研究，或者开展对以往方法技术的改进研究，将会大大提高瞬变电磁探测的纵向和横向分辨能力，从而提高解决地质问题的精度，为精细工程地质勘察提供方法、技术上的支撑。

(3) 仪器方面：主要是发展多通道、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电磁仪研制开发的难点。受市场和国外仪器的冲击，国内仪器需要向高性能、高分辨方向发展，乃是当务之急。

1.3 瞬变电磁法拟地震解释研究的前沿课题

1.3.1 基于时-频等效转换的瞬变电磁成像技术

近年来,利用瞬变电磁场勘探石油、地热源和各种矿产资源的理论和应用研究工作在不断发展,对于探测埋在地下的低阻异常体,瞬变电磁法已被证明是一种有效的方法。但是,由于在分层、有耗媒质中电磁现象的复杂性,目前对实测数据的解释水平仍很低。近年来人们正深入研究二维、三维的复杂模型,力图更准确地描述大地中的电磁瞬变现象,并设法从电磁响应中获得地下结构的局部形状和尺寸等高分辨信息。

中心回线瞬变电磁法是一种近区观测的电磁探测方法。由于场源的特殊性,在介质中传播的电磁场是扩散场。在研究回线源瞬变电磁法对地成像时,这一问题是不容回避的问题,这样,由扩散场向平面波场数据转换就成了问题研究的关键。

郭文波等(2005)从大量模型计算入手,通过对两种场源测深正演数据的分析、对比,以及对两种场在地下介质中传播的特性分析,建立了一种从瞬变电磁测深数据向平面波场转换的时间-频率对应关系。

通过大量的理论模型正演计算、曲线对比、误差分析,结合场的特性分析,从两种场的穿透深度及反映地下电性结构一致性角度,经过详细推导,得出瞬变电磁测深视电阻率数据可以转换成平面波场视电阻率数据的结论,构造了由时间到频率的转换关系式

$$210/f = t \quad (1.1)$$

式中, f 为频率, t 为观测时间延迟,这一关系可以从两种场在地下介质中传播的时间、速度、深度等方面加以说明。电磁场在地下介质中的扩散速度与地下介质的电阻率及时间有关系。在阶跃波断开后的某一时间延迟内,扩散深度与速度的关系如下

$$D(t) = \int_0^t V_d(\rho, t') dt' \quad (1.2)$$

式中, $D(t)$ 是扩散深度, $V_d(\rho, t')$ 是扩散速度, ρ 是介质的电阻率, t' 是断电后的时间延迟。

为了推导瞬变电磁场在地下的传播速度及深度,我们分析瞬变电磁场在地下的建场机制及过程。在场源激励下,地下介质中产生涡流,在阶跃波断开后,涡流不会立即消失,而是有一个过渡过程,在这个过程中,由地下介质所产生的二次感应场经过了一个由无到有,由小到大、到极大、到衰减、再到无

的过程。对于地下某一深度，磁场微分量初始值为零，经过建场，到达极大值，最后衰减到零。某一频率或者某一时间的电磁场分布在地下的任何深度内。从地球物理勘探的角度看，电磁探测深度与仪器的检测灵敏度、地电情况、围岩情况、噪声电平等因素有关。在比较理想的情况下，也可能探测到埋深相当于几倍的趋肤深度（或者扩散深度）的地下地质体，在复杂地质情况下，也可能探测不到埋藏在趋肤深度（或者扩散深度）以内的地质体。但是，总的来说，对于同一介质的同一深度，扩散场的视电阻率与平面波场的视电阻率对此深度地电性结构应该有相同的反映。

在一维近似的条件下，把趋肤深度和扩散深度等效认为是电磁场的探测深度。这样，令两个深度相等，从而可以找到频率与时间的类似式 (1.1) 的关系式。

薛国强等 (2004) 提出了瞬变电磁法对地成像理论和成像数值计算方法，其原理是根据所构造的扩散场向平面波场转换时的时间-频率关系式，把时间转换成频率，这样就完成了扩散场数据向平面波场的转换。由转换后的视电阻率值求出平面波场的波阻抗，再由计算出来的波阻抗，建立关于电性层反射系数序列的方程组，再通过线性规划法，求出反射系数序列，最终以反射系数为参数绘制成像剖面。

该方法给出了瞬变电磁法对地成像数值计算步骤：①给出各种不同地电模型，分别进行正演计算，计算出视电阻率值，根据不同的地表电阻率，对早期道数据进行校正；②通过转换关系，把时间延迟变成频率，对理论模型正演数据或者实测视电阻率值进行域的变换，把时间域扩散场视电阻率值变成平面波场视电阻率值；③由平面波场视电阻率值在频率域求出波阻抗；④以波阻抗为参数，构建方程组；⑤用线性规划法求出反射系数序列；⑥最终以反射系数为参数进行成像。

1.3.2 基于波场转换的瞬变电磁成像技术

由于瞬变电磁场满足的微分方程事实上是一个扩散方程，因而不能采用目前大家熟悉的波动方程求解方法。所谓瞬变电磁场的波场变换是指通过数学积分变换，将满足扩散方程的时域瞬变电磁场转换为满足波动方程的波场，然后借助于地震中发展起来的一些比较成熟的成像方法技术，求解被探目标体的物性和几何参数。

Weidelt (1972)、Kunetz (1972)、Levy 等 (1988)、Lee 和 Memechan (1987) 等于 20 世纪 70 年代和 80 年代的一些研究成果，都分别揭示了在层状大地介质中，电磁扩散方程与地震波动方程间存在有趣的数学对应形式，但他们研究问题的着眼点都是将对应地电模型的波场模拟结果变换成时域电磁响

应。但是,更能激起学者们研究兴趣的是波场逆变换,将已知时域场转换为波场,这将有利于偏移以及更加复杂的成像技术的应用。

从波场到时域场的波场正变换式

$$\mathbf{H}_m(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi t}} \int_0^{\infty} \tau e^{-\tau^2/4t} \mathbf{U}(\tau) d\tau \quad (1.3)$$

式中, $\mathbf{H}_m(t)$ 表示瞬变电磁场量, $\mathbf{U}(\tau)$ 表示虚拟波动参量, τ 表示虚拟时间。

这一变换过程称为正问题 (direct problems)。如果反过来,已知时域场求波场,则称为反问题 (inverse problems)。

众所周知,反问题往往和不适定性 (ill-posed) 紧密相联,各种各样的反问题,不仅出现于地球物理问题中,而且出现于数学本身。波场正变换式是典型的第一类 Fredholm 型算子方程,而它有一个重要的特征,就是所谓的“不适定性”。关于“适定” (well-posed) 和“不适定” (ill-posed) 的概念是 Hadamard 为了描述数学物理问题与定解条件的合理搭配,于 20 世纪初引入的。

瞬变电磁场所满足的扩散方程主要刻画电磁涡流场的感应扩散特征,而基于扩散方程的偏移成像及反演方法,一般对电性界面的分辨能力较差,这就需要寻找到一个数学上的处理办法,将瞬变电磁场变换成“波场”,即提取出电磁响应中与传播有关的特征,压制或去除电磁波传播过程中与频散、衰减有关的特征。将瞬变电磁场的求解问题转化为波动方程的求解问题,就能将地震偏移成像技术、Born 近似反演技术、层析成像反演技术等用于瞬变电磁场的反演解释中。

李貅等 (2005b) 提出了从瞬变电磁场到波场的优化算法。在波场的正变换中,在保证瞬变电磁场的计算精度的同时,应用两步最优化算法,成功地控制和减少了积分系数的个数和离散数字积分的采样点个数,解决了在波场反变换式中,由于积分系数过多而产生的欠定方程组的问题,同时改善了第一类算子方程的不适定性。在波场反变换中,将正则化算法用于逆变换过程的计算中,通过采用偏差原理和 Newton 迭代格式选出最优的正则化参数,使得反变换所得到的波场稳定、可靠。通过对数值计算结果与已知波场函数对比,证明了该方法的有效性和实用性。大量的理论计算表明,这种变换得到的虚拟波场,不仅满足波动方程,而且还类似于地震子波一样,具有传播、反射、透射特征。

通过理论研究已经解决了瞬变电磁场的波场变换问题,这就为瞬变电磁场的偏移成像创造了条件。但瞬变电磁场偏移成像问题与地震勘探中的弹性波偏移成像问题有相似之处,但也不完全相同。需要指出,TEM 虚拟波场是经过

数学变换得到的，不是客观存在，因此，还有其特殊性。

1.3.3 逆时偏移成像方法

1. Stratton-chu 积分偏移成像方法

Zhdanov 等 (1988)、Zhdanov 和 Booker (1993)、Zhdanov 和 Li (1997)、Zhdanov 和 Portniaguine (1997) 借鉴了地震勘探中的逆时偏移概念，经过十余年的系统研究，对时间域的瞬变电磁场进行了逆时偏移成像的深入研究，提出了偏移电磁场的概念，并且在逆时偏移电磁场基础上对二、三维反演问题也展开了最新的研究。瞬变电磁场的偏移应用的是 Stratton-Chu 积分

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{4\pi} \int_0^{t'} \iint_{\Gamma} \left\{ (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \nabla \mathbf{G}^* + (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \nabla \mathbf{G}^* + (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) \mu_0 \frac{\partial \mathbf{G}^*}{\partial t} \right\} \cdot d\mathbf{S} dt \\ & = \mathbf{H}(\mathbf{r}', t) \end{aligned} \quad (1.4)$$

式中，

$$\mathbf{G}^* = \frac{(\mu_0 \sigma)^{1/2}}{2\pi^{1/2} (t' - t)^{3/2}} \exp \left[-\frac{\mu_0 \sigma |r' - r|}{4|t' - t|} \right] u(t' - t) \quad (1.5)$$

这里，

$$u(t' - t) = \begin{cases} 1 & t < t' \\ 0 & t > t' \end{cases} \quad (1.6)$$

式中， \mathbf{G}^* 是引入的格林函数， \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 是地表 Γ 上的电场和磁场， \mathbf{n} 是 Γ 的外法线方向的单位矢量。式 (1.4) 表明，可以通过将地表观测到的电磁场值向下延拓，得到地下电磁场的分布，延拓后的电磁场值在界面处发生突变，由此可以确定地下介质的地电构造。Zhdanov 等主要对孤立和多个电性异常体的模型做了实验研究，成像效果较好。

2. 基尔霍夫 (Kirchhoff) 积分偏移成像方法

利用优化算法，将瞬变电磁场进行波场变换，得到“波场”，将波场分析的原理即地震波场从地面向地下反向外推进行偏移成像的方法用于对瞬变电磁场的解释，形成瞬变电磁场的偏移方法，也就是对观测电磁数据向下延拓，构建产生响应的地下电阻率图像。

李貅 (2005) 给出了基尔霍夫积分法进行电磁波场偏移成像处理的数值计算方法。波场在地下传播可以用波动方程描述，其方程为

$$\nabla^2 u - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \mathbf{F}$$

上述方程的基尔霍夫积分分解为

$$\mathbf{U}(x, y, z, t) = -\frac{1}{4\pi} \oint \left\{ [u] \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) - \frac{1}{r} \left[\frac{\partial u}{\partial n} \right] - \frac{1}{vr} \frac{\partial r}{\partial n} \left[\frac{\partial u}{\partial t} \right] \right\} dQ + \frac{\mathbf{F}}{r_0} \quad (1.7)$$