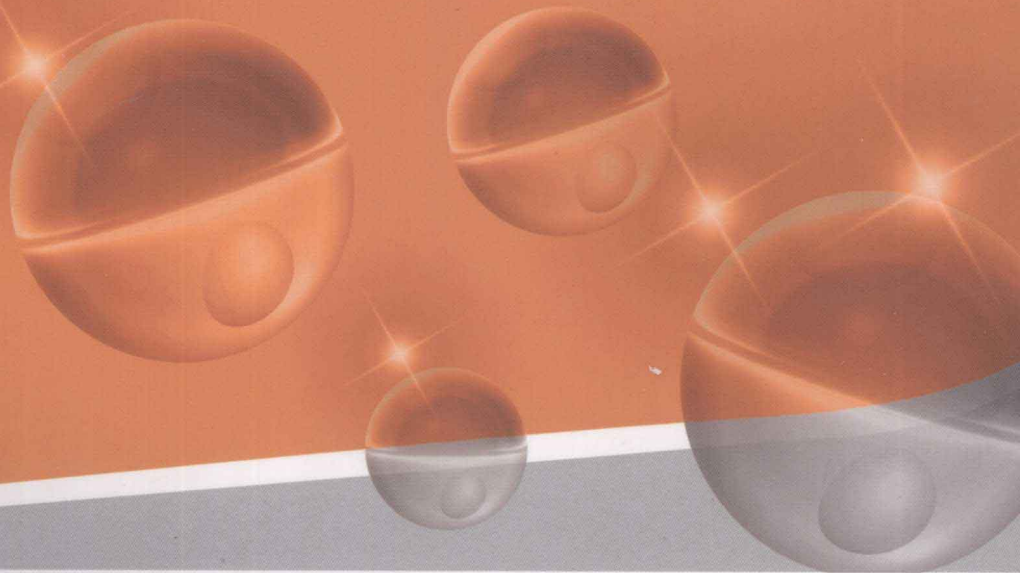


国家高技术研究发展计划（863计划）资助

瞬变电磁三维异常特征 反演与瞬变场可视化

邓晓红 吴广耀 等著

SHUNBIAN DIANJI SANWEI YICHANG TEZHENG
FANYAN YU SHUNBIANCHANG KESHIHUA



地质出版社

国家高技术研究发展计划（863 计划）资助

瞬变电磁三维异常特征反演 与瞬变场可视化

邓晓红 吴广耀 王兴春 吕国印 著
张 杰 武军杰 赵敬洗

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是一部介绍瞬变电磁三维正反演最新研究成果的专著, 主要内容包括瞬变电磁三维正演、定源回线三维异常场特征反演及地下瞬变场三维可视化。首先, 介绍瞬变电磁法发展概况及正反演研究现状; 其次, 从瞬变电磁场基本理论出发, 通过采用三维交错网格有限差分法, 实现复杂地电条件下瞬变电磁三维正演数值模拟, 说明研制的三维正演程序特点, 对验证结果及复杂模型算例进行分析; 再次, 介绍基于 MATLAB 平台, 实现瞬变电磁场三维体数据加载成像及动态可视化, 并对瞬变电磁场与三维地质体相互作用进行分析; 最后, 对定源回线三维异常特征反演实现的可行性进行分析, 介绍定源回线三维异常场分离方法, 对三维异常特征进行分析, 说明研制的三维反演程序特点, 并对复杂模型反演算例进行分析。

本书可作为从事瞬变电磁专业的科技人员和在校地球物理专业的大学生、研究生的参考书, 也适合科研课题组织管理人员、科研人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

瞬变电磁三维异常特征反演与瞬变场可视化/邓晓

红等著. —北京: 地质出版社, 2009. 12

ISBN 978 - 7 - 116 - 06404 - 1

I. 瞬… II. 邓… III. 电磁法勘探—研究 IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 226453 号

责任编辑: 蔡卫东

责任校对: 杜悦

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324571 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 787mm × 960mm¹/₁₆

印 张: 7.75

字 数: 200 千字

印 数: 1—1000 册

版 次: 2009 年 12 月北京第 1 版·第 1 次印刷

定 价: 40.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 06404 - 1

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)



邓晓红，男，1965年生，博士，教授级高级工程师，应用地球物理专业。自1985年大学毕业分配到中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所工作至今，具有20多年从事地球物理，特别是电磁法的科研和勘查工作经历，多次承担地质大调查项目，目前正在承担国家高技术研究发展计划（863计划）和危机矿山项目，为2009年科技部“全国野外科技工作先进个人”获得者。

前 言

本书是在“复杂地电条件下瞬变电磁三维异常特征反演”课题最新研究成果的基础上完成的。该课题为2006年国家高技术研究发展计划(863计划)“资源环境技术领域”课题之一,由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所承担,主要任务和目标:通过研究工作,实现复杂地电条件下瞬变电磁法三维正演数值模拟方法技术,减少三维正演中的边界效应影响,提高三维正演数值模拟速度;实现瞬变电磁场与三维地质体相互作用的动态可视化方法技术,动态可视化地下三维瞬变电磁场;实现定回线源瞬变电磁三维异常特征反演方法技术,反演获得复杂形状的地下三维异常体。以上目标的实现,使得瞬变电磁三维正反演技术向实用化迈进,提高瞬变电磁对矿体定位的精度,为高精度地球物理矿体定位提供技术支撑。为了实现上述任务和目标,研究过程中采用的主要思路如下:

1) 对于瞬变电磁三维正演数值模拟,采用三维交错网格有限差分法来求解地下半空间介质中感应电磁场问题。首先,对求解区域进行三维网格剖分,将连续问题离散化,用有限的网格节点代替连续的求解空间。其次,采用交错网格法定义电场和磁场,仿照交错网格法,以跳跃的方式完成时间步进。应用 Du Fort-Frankel 法得到显式的一阶微分方程,以差分近似代替微分,从而推导出离散的、时间步进的、显式的和稳定的差分方程。最后,应用 MATLAB 和 FORTRAN 混合编程技术编制三维交错网格、时间步进的有限差分法三维正演程序,使得三维正演程序界面友好,菜单设计合理,可视化程度高,从而实现复杂地电条件下磁性源瞬变电磁三维正演数值模拟。通过对不同模型进行 FDTD 正演数值计算,并将其计算结果与解析解和澳大利亚 Encom 公司的 EM Vision 商业软件的计算结果进行对比分析,来说明所采用的计算方法和编制的三维正演程序计算结果的正确性和可靠性。

2) 对于瞬变电磁场与三维地质体相互作用动态可视化,总的指导思想:基于 MATLAB 平台,根据瞬变电磁法的特点,开发研制三维体积数据加载成像程序模块和瞬变电磁场三维体积数据动态可视化图形展示模块。

首先,开发 MATLAB 三维数据域生成函数,主要包括采用三维网格化函数、三维数据插值函数和三维数据数值光滑函数来构造形成规则三维体积数据。其次,开发 MATLAB 三维数据可视化函数,主要包括切片函数、三维等值线函数、三维片块函数、三维旋转函数、灯光函数、图形图像处理函数以及一些底层的句柄控制函数,实现显示三维体积数据的体积表面图、XY 平面切片图、YZ 平面切片图和 XZ 平面切片图。最后,开发 MATLAB 平台上的照相机技术,包括应用相机目标函数、相机位置函数、相机视角函数、相机视线函数以及坐标轴属性函数等,实现瞬变电磁场与三维地质体相互作用动态可视化。

3) 对于三维反演,在充分考虑当前三维正演计算速度的前提下,选定定源回线装置开展三维反演研究工作。采用成熟的一维广义逆反演方法,对测量剖面上远离异常中心测点的总场数据进行反演,以获得一个具有广泛意义的背景模型。利用三维正演数值模拟,分别对背景模型和有地下三维体模型进行计算,认为两者之差是异常场。通过对定源回线装置不同模型进行正演计算,分析总结模型参数对异常场影响的特征,为开展定源回线三维异常场特征数据反演模型参数提供理论依据。在总结已有瞬变电磁反演方法的基础上,为了减少形成 Jacobian 矩阵所需正演计算工作量和反演过程中 Jacobian 矩阵的“病态”,提高反演速度和收敛稳定性,开展定源回线三维异常场特征数据反演模型参数。通过对不同理论模型合成数据进行反演试算,来说明反演方法的可行性和正确性。

通过两年多的研究工作,全面完成了国家高技术研究发展计划(863 计划)课题的任务和目标,取得的主要研究成果有以下几个方面:

1) 首次实现了定源回线瞬变电磁三维异常特征反演,为瞬变电磁实测数据的三维处理和解释最终走向实用化提供了一套新的方法技术。课题组在正演模拟方法研究、模型试算、异常场分离方法研

究的基础上,通过采用背景场归一的瞬变场值作为异常场特征值进行反演计算这一方法技术,不但使反演过程趋于稳定、求解参数更加灵敏,而且使反演计算量明显减少,从而较好地实现了定源回线瞬变电磁三维异常特征反演。

2) 实现了复杂地电条件下瞬变电磁三维有限差分法正演数值模拟,解决了正演三维模型可视化输入输出、计算速度慢、边界效应影响大等关键技术,为实现定源回线瞬变电磁三维异常特征反演提供了必要的正演前提条件。

3) 首次实现了瞬变电磁场与三维地质体相互作用动态可视化,研制了动态可视化地下三维瞬变电磁场程序模块,为形象地描述地下瞬变电磁场不同衰减时间空间分布形态,研究瞬变电磁法机理及扩散过程,理解瞬变电磁法基本原理提供了强有力的图示工具。

本书除前言外,共5章。前言介绍国家高技术研究发展计划(863计划)课题主要研究思路及取得的主要成果、全书章节内容构成,以及本书作者情况。第一章为瞬变电磁法正反演研究现状,介绍瞬变电磁法发展概况和瞬变电磁法正反演研究现状。第二章为复杂地电条件下瞬变电磁三维正演数值模拟,从瞬变电磁场基本理论出发,通过采用三维瞬变电磁场交错网格有限差分法,实现复杂地电条件下瞬变电磁三维正演数值模拟;介绍研制的三维正演程序特点、验证结果分析及复杂模型算例分析。第三章为瞬变电磁场与三维地质体相互作用动态可视化,介绍瞬变电磁场三维体积数据加载成像及动态可视化实现过程和研制的程序特点,并对瞬变电磁场与三维地质体相互作用进行分析。第四章为定源回线三维异常特征反演,对定源回线三维异常特征反演实现的可行性进行分析,介绍定源回线三维异常场分离方法并对异常特征进行分析;介绍研制的三维反演程序特点及复杂模型反演算例分析。第五章为结论与建议,对瞬变电磁法三维正反演研究工作进行总结,介绍存在的问题,并对今后研究工作提出建议。

本书的出版得到了国家高技术研究发展计划(863计划)资助,中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所给予了大力支持。在本书的编写过程中,得到了国土资源部咨询研究中心孙文珂研究员、中国地质调查局发展研究中心刘士毅教授、中国地质科学院地球物

理地球化学勘查研究所蒋邦远教授、周凤桐教授、胡平教授的指正。作者在此一并表示最诚挚的感谢。

邓晓红组织吴广耀、王兴春、吕国印、张杰、武军杰、赵敬洗讨论确定本专著的结构和内容，最后由邓晓红、吴广耀执笔撰写。

鉴于瞬变电磁理论的复杂性，本书中肯定会有不妥和谬误之处，敬请读者批评指正。

作者

2009年9月

目 次

前 言

| | |
|---------------------------------------|---------|
| 第一章 瞬变电磁法正反演研究现状 | (1) |
| 第一节 瞬变电磁法发展概况 | (1) |
| 第二节 瞬变电磁法正反演研究现状 | (4) |
| 第二章 复杂地电条件下瞬变电磁三维正演数值模拟 | (13) |
| 第一节 瞬变电磁场基本理论 | (13) |
| 第二节 瞬变电磁场三维交错网格有限差分法 | (17) |
| 第三节 三维正演程序的特点及验证 | (25) |
| 第四节 复杂地电模型算例及分析 | (32) |
| 第三章 瞬变电磁场与三维地质体相互作用动态可视化 | (39) |
| 第一节 瞬变电磁场三维体积数据加载成像及动态可视化 | (39) |
| 第二节 瞬变电磁场三维体积数据可视化程序简介 | (40) |
| 第三节 瞬变电磁场与三维地质体相互作用分析 | (42) |
| 第四章 定源回线三维异常特征反演 | (65) |
| 第一节 定源回线三维异常特征反演实现的可行性分析 | (65) |
| 第二节 定源回线三维异常场分离技术与异常场特征分析 | (66) |
| 第三节 定源回线三维异常特征反演的实现 | (77) |
| 第四节 定源回线三维异常特征反演程序简介 | (82) |
| 第五节 三维理论模型合成数据反演算例及分析 | (84) |
| 第五章 结论与建议 | (110) |
| 参考文献 | (113) |

第一章 瞬变电磁法正反演研究现状

第一节 瞬变电磁法发展概况

瞬变电磁法 (Transient Electromagnetic Method, TEM) 属于时间域电磁法, 是以地下岩、矿石导电性和导磁性差异为地球物理前提, 根据电磁感应原理的观测方式来研究电磁场时间和空间分布规律, 以寻找地下良性导电矿体或解决相关地质问题的一种地球物理勘查方法 (牛之琰, 1992; 李貅, 2002)。瞬变电磁法场源的激励方式有两种, 即不接地回线框磁性源和接地有限长导线电性源。本书讨论的研究场源为不接地回线框磁性源瞬变电磁法。

磁性源瞬变电磁法的基本工作原理是, 给不接地回线框供于双极性脉冲电流产生激发磁场, 在该磁场的激励下, 导电地质体受感应产生涡流。当脉冲电流从峰值跃变为零时, 一次磁场消失, 而产生的感应涡流并不立即消失, 其消失过程是一个瞬变过程, 这个过程의快慢与导体的电性参数有关。地质体导电性越好, 感应涡流热耗损越小, 瞬变过程就越长。由于感应涡流在导电介质中的传播服从扩散方程, 它逐步向地下深部扩散, 其扩散范围随时间推移也逐步扩大, 并在地下半空间产生二次电磁场, 该二次电磁场随时间滞后将逐渐消失。因此, 对于不同地下电性参数结构, 感应涡流产生的二次电磁场消失过程也将有所不同, 据此就有可能通过测量和分析感应涡流产生的瞬变响应来确定地下导体的电性分布结构和空间形态。瞬变电磁法的测量装置主要有以下几种形式 (李貅, 2002; 蒋邦远, 1998)。

1. 中心回线和重叠回线装置

中心回线和重叠回线是瞬变电磁法最常用的测量装置, 发射与接收的位置关系如图 1-1 所示。其中 T_x 为发射线框, R_x 为接收线圈或线框, 下文相同。该装置采用不接地线圈作为激励源, 接收为磁探头或不接地线圈, 发射和接收的中心点重合。重叠回线装置接收线圈面积较大, 测量到的信号幅度也较大。

2. 定源回线装置

定源回线装置的发射与接收位置关系如图 1-2 所示。在测量过程中, 激励线框始终固定不动, 测量点可以位于线框内也可以位于线框外。测量点位于



图 1-1 中心回线和重叠回线装置

线框内一般称为定源内回线装置；测量点位于线框外称为定源外回线装置。本书主要研究定源内回线装置的三维反演。

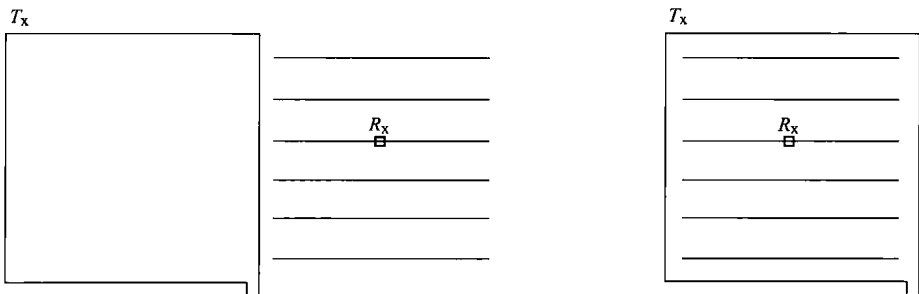


图 1-2 定源回线装置

3. 偶极-偶极装置

偶极-偶极装置的特点是激励线框的半径或者激励导线的长度较小，在理论上均被视为磁偶极子，发射与接收位置关系如图 1-3 所示。

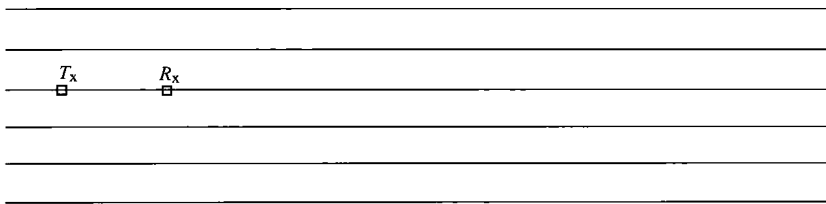


图 1-3 偶极-偶极装置

同其他一些电磁测量方法如频率域电磁法或直流电法相比较，瞬变电磁法具有如下一些特点（牛之琰，1992；李貅，2002）：

- 1) 断电后测量纯二次场，不存在一次场相关干扰。
- 2) 可在激励源近区测量，能够减小旁侧横向非均匀性影响，增强垂向电性分辨率。
- 3) 穿透高阻地层能力强。
- 4) 通过多次脉冲激发，可实现时间域多次叠加、空间域多次覆盖技术，以提高信噪比和观测精度。
- 5) 通过选择不同时间窗口进行观测，既可以有效地压制各种干扰噪声，也可以获得不同深度地质信息，集剖面和测深工作于一体。

由于瞬变电磁法具有以上特点，一经提出就受到地球物理工作者高度重视，其最早应用可追溯到1933年。当时美国的 Blau L. W. 提出了瞬变电磁测深的最初形式并获得了专利，其主要思想是，通过反射的电磁波序列了解大地电性结构，并应用于石油勘探（李貅，2002）。第二次世界大战后，相当多的国家进行了规模不同的野外试验和勘探应用。瞬变电磁法进入实用阶段始于20世纪50年代，苏联、美国、加拿大、澳大利亚等国的地球物理学家在基础理论、应用技术等方面进行了深入的研究，方法技术日趋成熟，并开展了大量应用实验工作。特别是苏联在20世纪70~80年代开展过大面积测量工作。与此同时，仪器设备方面也取得了很大成就，一些著名地球物理公司相继推出不同类型的多功能电法仪或用于不同领域的 TEM 专用设备。这些设备性能稳定、操作方便、自动化程度高，大都已实现商业化并在全球销售。

我国自20世纪70年代起就开展了瞬变电磁法仪器与方法技术研究。国家在“七五”、“八五”、“九五”和“十五”期间都进行了 TEM 法仪器设备和方法技术专题研究。以几家大专院校为代表的研究机构在基础理论、正反演解释技术等方面取得了较大进展；以几家专业研究所为代表的研究机构在仪器研制、方法技术、应用试验等方面开展了大量工作，推动了 TEM 法实用化进程。总之，瞬变电磁法在进入20世纪80年代后得到了迅猛的发展，又进一步拓宽了其应用领域，现已广泛应用于油气勘探、矿产勘查、工程勘察、环境调查、考古探测、军事探测等诸多方面。

虽然瞬变电磁法数据处理技术和解释技术获得了长足的进步，国内外的一些相关杂志相继也有二维、三维正反演方法技术的论文发表，但二维、三维正反演方法技术仍处于探索研究阶段，离真正实用阶段有相当大的距离。因此，围绕瞬变电磁法三维正反演问题进行深入细致的研究，将对瞬变电磁资料的精细解释以及方法本身的技术进步具有重要的意义。

第二节 瞬变电磁法正反演研究现状

当前,瞬变电磁法主要的研究参数是电阻率或电导率,一般认为磁导率参数为常数。有些地质体,如石墨、硫化物矿物,由于其电阻率比围岩电阻率低得多,能产生很强的瞬变电磁响应。而瞬变电磁反演的目的,就是确定测量数据所携带的地下地质信息为电阻率空间分布,并应用于地质解释中去。由于地下电阻率是一个复杂连续函数,而采集的数据却是有限的。因此,实际工作中反演结果并不一定能提供真实的地下电阻率值,但却能给地质解释提供重要的依据。

反演的先决条件是必须提供一种可靠的正演方法和算法。在瞬变电磁正演模拟中,无论是一维层状模型,还是二维、三维复杂模型,由于模型响应函数都比较复杂,一般采用数值模拟技术来解决。瞬变电磁数值模拟技术的发展是近30年的事情,发展至今已能模拟真实地质结构的全三维电磁感应问题。数值模拟技术结合反演方法,可以计算解释在野外测量获得的瞬变电磁数据,从而获取地下电性参数分布信息。在20世纪60年代计算机技术取得突破前,瞬变电磁的资料解释主要依据于理论公式推导(解析解)、规则形体物理模拟实验研究结果以及观测经验来进行(Markku P., 2003)。一维层状模型目前仍是瞬变电磁资料解释的常用模型。瞬变电磁层状模型的解析解早在20世纪50年代就推导出来了(Ward S. H., 1980)。导电均匀半空间和层状模型中不同装置的解析解也可在发表的文章中找到(Ward S. H. et al., 1988; Spies B. R. et al., 1991)。由于解析解不仅在一些多维数值模拟中要用到,而且还可以用于验证多维数值模拟算法的有效性,因此,它在多维数值模拟中起到了重要作用。当前,相对于二维、三维问题,瞬变电磁一维模型即均匀半空间和层状模型的正反演问题已得到比较好的解决。

当地下电性在横向上发生变化时,一维层状模型将不再适合真实地质结构,必须寻求更复杂的二维和三维模型。在20世纪60年代末至70年代初,二维模型的算法才首次出现(Parry J. R., 1969; Coggon J. H., 1971; Hohmann G. W., 1971),70年代中期又有解决全三维电磁响应问题的报道(Raiche A. P., 1974; Hohmann G. W., 1975; Weidelt P., 1975)。二维、三维数值模拟的解决,得益于当时数值计算方法和计算机技术的突飞猛进。进入80年代后,已经研发了许多先进的电磁场数值模拟方法和技术(Wannamaker P. E. et al., 1984; Newman G. A. et al., 1986; Newman G. A. et al., 1988; Lee K. H. et al., 1989; Xiong Z., 1992; Zhdanov M. S. et al., 1996; Liu E. H. et al., 1998; Mitsuhashi Y., 2000; Sasaki K., 2001)。

大部分电磁场二维、三维数值模拟方法可分为两种形式，即根据麦克斯韦方程的数学形式可分为求解积分方程和微分方程的近似解，简称为 IE 方法和 DE 方法。IE 方法又可分为表面积分法和体积积分法，而 DE 方法主要为有限元法和有限差分法。对于三维电磁场数值模拟而言，IE 方法是应用最早和最广泛的方法。由于 IE 方法只需解异常体的电磁场，使问题大为简化，计算时形成的矩阵较小，因此，所需计算机内存和耗时较少。但 IE 方法不具有一般性，每次计算必须针对具体模型的几何边界和介质特性进行再推导，特别是当地下三维体结构比较复杂时，数值模拟计算的困难程度将急剧增加。此外，IE 方法一般都在频率域内进行，不能对时间窗口的大小进行控制，在分析时间域响应特征时大多是将相应情况下的频率域结果转换到时间域。DE 方法是利用微分方程直接在时间域求解电磁响应，其优点是可以对时间窗口进行控制，比较适合模拟地下复杂形状三维地电结构以及地下电性剧烈变化的模型。缺点是需要设定必要的边界条件，相对于 IE 方法，时间和空间剖分密度要求较大，因此，对计算机资源需求较高。

自 20 世纪 90 年代初中期以来，电磁法二、三维资料解释反演方法技术有基于积分方程正演算法的各种非线性（Torres-Verdin C. et al. , 1993; Zhdanov M. S. et al. , 1996）和局部非线性（Habashy T. M. et al. , 1993）反演算法，以及基于波场转换理论的各种偏移成像技术（Lee K. H. et al. , 1993; Zhdanov M. S. et al. , 1993）。这两类反演算法的优点是计算量少、反演速度快。由于积分方程正演算法仅适用于个别形体的正演，相应的反演结果也只能是反映个别异常体的图像。近几年来，用各种近似方法进行反演也取得了令人瞩目的成果，如三维电磁准线性近似快速反演，在剖分 1800 个网格下计算一条剖面仅需几至几十分钟（Zhdanov M. S. et al. , 1996）。至于反演成像，更是近几年来国外学者研究的焦点，诸如波场射线追踪走时层析成像技术，基于 Born 近似的迭代 Born 反演频率域电磁导电率成像技术（Alumbaugh D. L. et al. , 1993），采用类似于声波（地震）衍射层析成像方面的二维声频电磁成像技术（Zhou Qiang et al. , 1993），跨孔电磁层析成像的一种非线性反演技术（Torres-Verdin C. et al. , 1993），时间域电磁数据的波场变换，以及类似于地震偏移层析成像的时间域逆时偏移层析成像技术等各类电磁成像及层析成像技术（Zhdanov M. S. et al. , 1993）。但各种偏移成像技术在反演过程中必须通过其他方法确定背景区电阻率，因而，反演结果也只能给出主要目标体图像。这些反演方法可以在一定程度上满足显示主要探测对象（例如良导电矿体）近似形态的需求，但很难满足地质填图和工程地质勘察需全面、完整反映地下地电构造分布的要求。值得一提的是，美国的 Xie et al.（2000）提出了一种新的算法，使得反演的速度大大提高，也使得三维反演成像成为可能。

我国的许多学者在瞬变电磁二维和三维正、反演成像方面进行了一些有益研究和探索。王华军等（2003）应用有限元法导出了中心回线装置瞬变电磁法 2.5 维二次场（纯异常）算法；李貅等（2001）中心回线装置的拟地震解释方法；杨长福等（2000）根据烟圈理论，导出了三维瞬变电磁近似反演方法。

在时间域，有限差分的方法更为简单方便。瞬变电磁时域有限差分算法的过程是：在时间域应用交错网格离散三维模型微分方程，在每个时间步计算网格空间各点电磁场各个分量。随着时间步的推进，就能直接模拟脉冲电磁波的扩散及其与地质体的相互作用过程，使瞬变电磁场时域特性能被直接反映出来。这一特点使时域有限差分算法能直接给出非常丰富的电磁场问题时间域信息，为复杂的物理过程描绘出清晰物理图像。因此，直接在时间域对瞬变电磁场信号进行分析，可对瞬变场在地下扩散的整个过程有更全面的了解，从而对瞬变电磁法探测各类地质问题的有效性给出更为精确的评估（阎述等，2002）。

在 20 世纪 80 年代，由于电磁场时域有限差分法的简便和灵活，它被应用于求解二维时域方程地下瞬变电磁场响应问题（Goldman M. M. et al. , 1983；Oristaglio M. L. et al. , 1984）。但在应用去解三维时域地下瞬变电磁场响应问题时在解二阶方程遇到了需精确计算物性参数空间导数和需模拟不连续场等困难（Adhidjaja J. I. et al. , 1989），因而发展比较缓慢。通过应用交错网格和解联合的一阶麦克斯韦方程组可克服上述困难（Wang Tsili et al. , 1993）。由于 Du Fort-Frankel 法（Du Fort E. C. et al. , 1953）应用于扩散方程时是显式的和无条件稳定的，因此，Oristaglio et al.（1984）将 Du Fort-Frankel 法应用于利用有限差分法求解二维瞬变电磁问题，并给出了显式的总是稳定的时间步进解。Wang et al.（1993）把应用交错网格解三维联合一阶麦克斯韦方程组与应用 Du Fort-Frankel 法结合起来，给出了在满足一定条件下总是稳定的、显式的时间步进差分方程解，首次成功地解决了三维时域瞬变电磁场数值模拟问题。

目前在国内，直接在时间域分析二维、三维瞬变电磁场的研究工作和相关的文献并不多见。中国地质大学（北京）吴广耀等（2000）“九五”期间在 Wang et al.（1993）的基础上成功地开发研制了三维时域瞬变电磁场数值模拟计算。陈明生等（2001）和阎述等（2002）直接在时间域对负阶跃脉冲激发的二维瞬态场进行了数值分析。

我们知道，地球物理反演的目的，就是寻找最佳的模型参数，使正演模拟响应与野外实际测量数据拟合差达到极小。反演方法通常分为局部优化和全局优化两种方法（杨文采，1997；姚姚，2002；王家映，1998），如最速下降法、共轭梯度法和线性最小二乘反演等为局部优化方法，而随机搜索、神经网络

络、模拟退火和遗传算法等属于全局优化方法。两种方法的最大差别在于全局优化方法所需正演次数比局部优化方法多得多，因此，局部优化方法比全局优化方法反演速度快。近年来出现的全三维反演（Sasaki K. , 2001; Newman G. A. et al. , 1997; Commer M. , 2004）属于局部优化反演方法。在局部优化反演方法中，需要计算 Jacobian 矩阵和求解线性方程组。Jacobian 矩阵的形成是用有限差商作为偏导数的近似值，其正演计算量大得惊人，一般采用并行机计算（Commer M. , 2004），故对计算机的资源需求较高。为此，出现了第三种反演方法即近似反演。近似反演就是为了避开或减小计算 Jacobian 矩阵和求解大型线性方程组的工作量，采用相对简单的模型迭代计算出模型的少量参数。但近似反演方法最大的问题是初始模型的确定和迭代的收敛稳定，许多学者在瞬变电磁近似反演方面做了大量的工作。

美国的 Garg et al. (1986) 利用空间和时间滤波延拓的方法圈定出了 TEM 测区内异常体的位置。在一个位置固定的大功率接地线源周围，布设了相当数量接收点进行区域 TEM 勘测，然后利用空间和时间滤波延拓的方法圈定出测区内异常体位置。所观测的各个点视电阻率资料为该分析方法基础资料。其具体做法由以下 4 个步骤组成。

第一步，确定整个测区内一个最好的层状模型。首先从视电阻率资料中滤去其中的非层状成分。考虑到层状模型瞬变响应是以源为对称的，则可以以源为中心对不同圆环上的视电阻率资料进行平均就可以滤去局部效应。其平均方法采用线性平均。为了不使局部异常对结果产生偏离，平均中可舍去约 20% 超限的过大或过小资料。然后对所获得的平均视电阻率资料进行一维广义逆反演，确定整个测区内一个最好的层状模型。

第二步，首先计算出最好的层状模型在各测点的理论视电阻率。然后假定各测点的场由层状模型的初始部分和异常电阻率结构的二次部分组成，则各测点实际观测的视电阻率减去该测点的层状模型理论视电阻率，可获得各测点的异常视电阻率值。

第三步，构制出不同延迟时间的异常视电阻率切片，如图 1-4 所示。图 1-4 中的激发源为 1.6km 接地线源，供以周期 80s 方波，在各观测点上测量 TEM 垂直磁场感应电动势。视电阻率按下列公式计算：

$$\rho_a = \frac{2\pi R^4}{3IL\cos\theta} - \frac{\partial B_z}{\partial t}$$

式中： R 为收发距； I 为线源的电流强度； L 为线源的长度； θ 为源至测点径向量与源赤道轴的夹角。

第四步，是把重磁方法中向下延拓技术应用用于所选择的不同延迟时间局部视电阻率异常中。对于一个给定的异常，可以给出延拓深度与异常峰谷振幅图

(图 1-5)。图 1-5 为图 1-4 中异常 A 的延拓深度与异常峰谷振幅图，曲线的极大曲率处所对应的深度近似等于异常体深度。

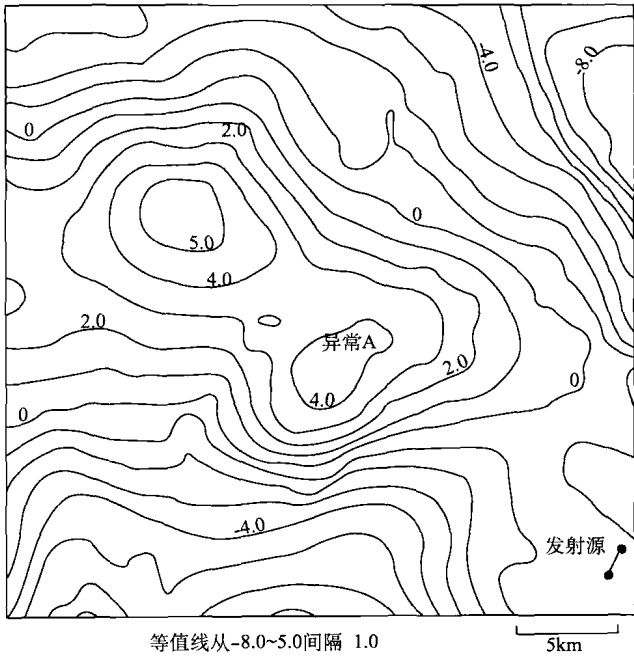


图 1-4 延迟时间为 1.5s 的异常视电阻率切片图

美国学者 Barnett (1984) 提出了一种简单的反演时间域瞬变电磁数据方法。认为如果围岩电阻率很高，目标体可以看成是隔离导体，则在地表观测到的不同延迟时间瞬变二次场是由薄板导体内不同感应等效电流烟圈产生的。为此，采用最小二乘法反演不同延迟时间感应等效电流烟圈位置、方位和大小，从而获得薄板导体位置、方位和尺寸。

初始激发电流断开后一定时间，在地表所测量到的二次场是由驻留在导体内的涡旋电流产生的。对于薄板导体，板内将形成与导电板体形状相似的电流环分布。最初是集中在板的边缘，然后向导体中心扩散。短时间间隔后，这一电流分布达到了半平衡位置，然后简单地做振幅衰减。由理论和数字模拟可以证明，不仅在晚期，即便在较早期，这一电流分布也可以用一个等效电流烟圈表示 (图 1-6)。这一烟圈所画出的轨迹距边缘约 30%，包含了板的总面积的 50%。这样一来，在地表观测的瞬变磁场响应可被简单认为是电流烟圈在观测点所产生的磁场。因此，只要知道板的形状和相对观测点的方位，就可以简单利用 Biot-Savart 定律计算出来：