



国家重点基础研究发展计划(2007CB209400)

# 矿井瞬变电磁法勘探

于景邨 著

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书从电磁场基本方程出发,系统研究了矿井下全空间瞬变电磁场分布特征、视电阻率计算方法、井下巷道内瞬变电磁法勘探工作装置形式、井下瞬变电磁法勘探中各种人文噪声及其处理技术、全空间瞬变电磁法勘探数据时深换算理论及方法,全面论述了典型地电模型矿井瞬变电磁时间域三维有限元法正演模拟技术,以理论成果为指导,重点阐述了矿井瞬变电磁法勘探应用技术,最后分析了矿井瞬变电磁法勘探的部分应用实例。

本书可供大中专地球物理专业师生、矿井地球物理勘探技术人员和矿井地质工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

矿井瞬变电磁法勘探/于景邨著. —徐州:中国矿业大学出版社,2007.11

ISBN 978 - 7 - 81107 - 762 - 9

I. 矿… II. 于… III. 矿井—电磁法勘探—研究 IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 161934 号

书 名 矿井瞬变电磁法勘探  
著 者 于景邨  
责任编辑 潘俊成  
出版发行 中国矿业大学出版社  
(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
排 版 中国矿业大学出版社排版中心  
印 刷 江苏淮阴新华印刷厂  
经 销 新华书店  
开 本 787×1092 1/16 印张 11 彩插 16 字数 300 千字  
版次印次 2007 年 11 月第 1 版 2007 年 11 月第 1 次印刷  
定 价 80.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

我国 95% 的煤矿是地下开采,特别是东部地区大部分矿区浅部可开采资源明显不足,随着煤矿开采技术的提高,开采深度越来越大。深部煤炭资源不仅储量丰富,质量也优于浅部。随着煤矿开采深度逐渐增大,煤矿开采过程中将会出现高温、高地压和高水压等一系列地质问题,特别是煤层距离赋水层近、水压大,煤矿深部开采过程中水害问题将是今后煤矿生产过程中主要灾害之一。长期以来,因为煤矿水害而给国家和人民带来的人身伤亡和经济损失极为惨重,近几年煤矿水害更加严重,2005 年 8 月 7 日,广东省梅州市兴宁市黄槐镇大兴煤矿发生透水事故,123 名矿工被困井下;2006 年 7 月 5 日,山西省吕梁市中阳县雷家沟煤矿宋家沟矿井发生一起重大透水事故,6 人死亡;2006 年 12 月份,全国煤矿接连发生 4 起重大透水事故,死亡 22 人,还发生 1 起突水淹井事故;2007 年 3 月 10 日,辽宁抚顺矿业集团公司老虎台煤矿发生特大透水事故,造成 22 人死亡、7 人下落不明的重大事故。因此,研究矿井水文物探新方法和新技术具有十分重要的现实意义。

矿井瞬变电磁法勘探与地面瞬变电磁法勘探的物理环境明显不同,在井下极其有限的施工空间内,如何将地面边长为十几米到几百米的测量回线或供电电极距应用到井下巷道内?如何克服巷道底板铁轨、金属支护、皮带金属支架、巷道内金属排水管道、供电电缆和巷道松动裂隙等电性不均匀体对观测结果的影响?如何完成全空间瞬变电磁数据时深换算理论和方法技术,从而高精度、高效率地完成地质勘探任务,是矿井瞬变电磁法勘探推广应用的关键。另外,矿井瞬变电磁法勘探是在井下巷道内采用不接地回线装置向周围空间发射电磁场,利用另一不接地回线观测巷道周围空间导电介质中感应的二次涡流场。因此,三维空间中不同方位地质异常体的电性响应在观测结果中相互叠加,增加了矿井瞬变电磁法勘探资料处理和解释的难度。与地面瞬变电磁法相比,矿井瞬变电磁法勘探研究程度较低,特别是基础理论研究和仪器开发明显落后于应用技术。加强矿井瞬变电磁法基础理论研究和仪器开发,逐步系统完善矿井瞬变电磁数据采集系统、资料处理和解释系统,为发展和开拓矿井瞬变电磁法的应用领域奠定基础。

自 1998 年以来,中国矿业大学先后完成了多项与矿井瞬变电磁法勘探有关的煤炭企业委托科研项目,其中“煤矿突水构造矿井瞬变电磁探测技术研究”项

目 2006 年获得国家安全生产监督管理局科技进步三等奖,同时被评为“安全生产优秀科技推广项目”(2007 年山东省科技进步三等奖)。鉴于煤矿水文地质问题的特殊性,到目前为止还没有一本全面阐述矿井瞬变电磁法勘探理论与技术方面的著作,本书即是该项目研究成果的总结,愿此书能起到抛砖引玉的作用。

本书共分 7 章。第 1 章简要介绍了瞬变电磁法勘探的发展现状和今后的研究方向。第 2 章介绍了全空间瞬变电磁场基本理论,导出矿井瞬变电磁场分布特征和视电阻率计算公式。第 3 章介绍了煤矿突水构造全空间瞬变电磁响应特征三维正演模拟。第 4 章介绍了矿井瞬变电磁法井下工作方法与技术。第 5 章介绍了矿井瞬变电磁法勘探井下人文噪声,通过物理模拟和井下实际测量,分析了矿井瞬变电磁法勘探过程中各种人文噪声规律及其处理技术。第 6 章介绍了矿井瞬变电磁法数据时深换算理论和技术,建立了矿井瞬变电磁法时深换算数学模型。第 7 章介绍了矿井瞬变电磁法在煤矿突水构造勘探中的应用。

本书的出版特别感谢中国矿业大学李志聃老师对我多年的培养和指导;在本书成果的研究过程中得到了中国矿业大学陈锁忠副教授、刘树才教授和刘志新讲师的指导和帮助;在现场试验和研究中,皖北煤电集团公司吴玉华总工程师、赵开全教授级高工和段中稳教授级高工,淮北矿业集团公司地测处程新明处长、韩东亚副处长、李成明高工和王大设高工,枣庄矿业集团公司高庄煤矿高化军高工给予了大力支持和帮助。研究生曹军、汤金云、王杨州等对本书的研究成果做了大量工作。作者在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

著 者

2007 年 9 月于徐州

## 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1
1.1 矿井水害类型及其勘探方法 .....	1
1.2 矿井瞬变电磁法勘探 .....	2
1.2.1 国内外研究概况 .....	2
1.2.2 矿井瞬变电磁法及其特点 .....	6
1.3 今后的研究方向 .....	9
<b>2 全空间电磁场的基本理论</b> .....	10
2.1 电磁场的基本方程 .....	10
2.1.1 电磁场的基本方程 .....	10
2.1.2 格林(Green)函数和局域分布源的电磁场 .....	15
2.1.3 场等效原理和互易定理 .....	21
2.2 均匀导电极化全空间内磁偶极子形成的频率域电磁场 .....	23
2.3 均匀导电全空间磁偶极子形成的瞬变场 .....	33
2.4 矿井瞬变电磁法勘探的理论基础 .....	40
2.4.1 两个导电半空间分界面上垂直磁偶极子源形成的电磁场 .....	40
2.4.2 巷道顶板—磁偶极子源产生的电磁场 .....	47
2.4.3 水平层状介质矢势 $A_z$ 表达式的推导 .....	59
2.4.4 两层介质巷道底板的电磁场特征 .....	61
<b>3 煤矿突水构造全空间瞬变电磁响应特征三维正演模拟</b> .....	69
3.1 有限元方法的基本原理 .....	69
3.1.1 泛函与变分的基本概念 .....	69
3.1.2 里兹方法 .....	70
3.1.3 伽辽金法 .....	71
3.1.4 有限元方法的基本步骤 .....	72
3.2 地质—地球物理模型的建立 .....	72
3.2.1 煤系地层的电性特征 .....	72
3.2.2 煤系地层的地质条件 .....	76
3.2.3 地质—地球物理模型的建立 .....	79

3.3	数学模型的建立	80
3.3.1	网格划分	80
3.3.2	线性插值分析	83
3.3.3	矿井瞬变电磁场数学模型的建立	86
3.4	有限元法三维正演模拟技术及程序设计	95
3.4.1	三维正演计算步骤和程序设计	95
3.4.2	有限元系数矩阵的等带宽存储	96
3.4.3	有限元线性方程组解法	97
3.5	煤矿突水构造全空间瞬变电磁响应特征三维正演模拟	99
<b>4</b>	<b>矿井瞬变电磁法井下工作方法与技术</b>	<b>103</b>
4.1	井下常用瞬变电磁仪器介绍	103
4.1.1	Terra TEM 瞬变电磁仪	103
4.1.2	TEM47HP 瞬变电磁仪	113
4.2	矿井瞬变电磁法工作装置及探查技术	115
4.2.1	矿井瞬变电磁法工作装置	115
4.2.2	矿井瞬变电磁法探查技术	116
<b>5</b>	<b>井下瞬变电磁噪声物理模拟及实验</b>	<b>121</b>
5.1	井下瞬变电磁噪声分析	121
5.2	井下瞬变电磁噪声物理模拟	122
5.2.1	物理模拟相似性准则	122
5.2.2	井下瞬变电磁噪声重叠回线组合物理模拟	125
5.2.3	井下瞬变电磁噪声双回线组合物理模拟	126
5.3	井下瞬变电磁噪声试验	127
5.3.1	巷道侧帮瞬变电磁噪声重叠回线瞬变电磁响应特征	127
5.3.2	巷道底板瞬变电磁噪声重叠回线瞬变电磁响应特征	128
5.3.3	巷道底板瞬变电磁噪声双回线瞬变电磁响应特征	129
5.3.4	相同环境重叠回线和双回线组合瞬变电磁噪声响应比较	129
5.3.5	井下电磁噪声数据处理技术	130
5.4	矿井瞬变电磁法选择测量参数关断时间分析	131
5.4.1	观测参数选择	131
5.4.2	关断时间分析	131
<b>6</b>	<b>矿井瞬变电磁法数据处理与解释</b>	<b>133</b>
6.1	矿井瞬变电磁法时深换算基本理论	133
6.1.1	时深换算数学模型的建立	133
6.1.2	矿井瞬变电磁法时深换算数学模型	137
6.2	瞬变电磁法时深换算技术	137

---

6.2.1	水平层状介质理论模型时深换算技术 .....	137
6.2.2	具有倾斜界面层状介质理论模型时深转换 .....	143
6.3	矿井瞬变电磁法数据处理与解释系统 .....	147
<b>7</b>	<b>矿井瞬变电磁法勘探在煤矿突水构造探查中的应用 .....</b>	<b>161</b>
7.1	矿井瞬变电磁法的特点 .....	161
7.2	矿井瞬变电磁法勘探在探查煤矿突水构造中的应用 .....	162
7.2.1	矿井瞬变电磁法探查含(导)水陷落柱及注浆效果检测应用实例 .....	162
7.2.2	矿井瞬变电磁法探查非含(导)水陷落柱应用实例 .....	163
7.2.3	矿井瞬变电磁法探查煤层底板含水构造应用实例 .....	165
7.2.4	综放工作面顶板赋水性矿井瞬变电磁法探查实例 .....	165
7.2.5	采掘工作面煤层顶板赋水矿井瞬变电磁法探查实例 .....	169
7.2.6	掘进巷道迎头赋水性矿井瞬变电磁法超前探查实例 .....	170
7.2.7	不良钻孔赋水性矿井瞬变电磁法超前探查实例 .....	172
	<b>参考文献 .....</b>	<b>176</b>



# 1 绪 论

## 1.1 矿井水害类型及其勘探方法

煤炭是我国重要的基础能源和重要原料,在国民经济中具有重要的战略地位。煤炭在我国一次能源消费构成中的比例一直占 70%以上,我国煤炭资源约占化石能源的 95%。煤炭是我国的主体能源,是能源安全的基石。近年来,我国煤炭需求迅速上升,供需缺口日趋扩大,拉动煤炭产量快速增长,2003 年我国煤炭产量为 16.67 亿 t,2004 年达到 19.56 亿 t,2005 年为 21.1 亿 t,2006 年为 23.25 亿 t,同比增长 8.1%。与此同时,我国煤炭行业安全生产形势严峻,据统计,2006 年全国煤矿事故死亡人数为 4 746 人,煤矿重大事故死亡人数上升 22.2%。

煤矿水害是与瓦斯、煤尘等并列的矿山建设与生产过程中的主要安全灾害之一。长期以来,因为煤矿水害而给国家和人民带来的人身伤亡和经济损失极为惨重。随着煤矿开采技术的提高,开采深度越来越大,接近含水层也越来越多。近几年煤矿水害更为严重,2005 年 8 月 7 日,广东省梅州市兴宁市黄槐镇大兴煤矿发生透水事故,123 名矿工被困井下;2006 年 7 月 5 日,山西省吕梁市中阳县雷家沟煤矿宋家沟井发生一起重大透水事故,6 人死亡;2006 年 12 月,全国煤矿接连发生 4 起重大透水事故,死亡 22 人,还发生 1 起突水淹井事故;2007 年 3 月 10 日,辽宁抚顺矿业集团公司老虎台煤矿发生特大透水事故,造成 22 人死亡、7 人下落不明的重大事故。因此,重视矿井防治水工作是十分必要的。

造成煤矿水害原因是多种多样的,根据目前多个矿井突水情况分析,主要突水类型有以下几种:① 地表水体溃入矿井引起的水害;② 因巷道或工作面回采揭露含(导)水陷落柱而引起突水;③ 因老窑采空区积水而引起矿井导水;④ 火成岩含水层导入矿井引起突水;⑤ 因导水断层与强含水层或含水岩溶相连,把水导入矿井而引起突水。因此,对各种引起矿井突水灾害的水源体超前预测预报,是防止矿井突水灾害事件发生的根本保证。目前,国内外常采用的预测方法主要是根据矿井已有的水文地质、构造地质和钻探资料,借助于各种物探方法进行综合分析,而物探方法在井下探测水源体比地面探测具有独特的优势(刘天放等,1992)。

目前,探查煤矿井下引起水害的水源体矿井地球物理勘探方法主要有矿井直流电法勘探、音频电透视技术和矿井瞬变电磁法勘探。由于井下测量环境的限制,测线和测点布置主要局限于巷道顶、底板或侧帮,矿井直流电法勘探能探查巷道顶、底板或侧帮附近岩层内的突水构造,对距离巷道较远的工作面内水源体预测预报效果明显减弱,特别是巷道长度较短时,由于无法按要求布置供电电极和测量电极,矿井直流电法勘探方法也就无法进行。音频电透视技术属于直流电偶极接地探测技术,工作方法与无线电波透视法类似,其电场分布

于地下层状全空间,电流沿最小路径流动,属体积勘探,主要用于解决煤层底板下或顶板上一定深度范围内的富(含)水异常构造。在井下进行音频电透视的施工方案设计时,采用一发多收形式,即在一个巷道内某点(A)发射,在本工作面的另一巷道对应点(MN)左右一定范围内接收,形成一个扇形扫描区,电透视井下测量方式如图 1-1 所示。考虑到资料处理的方便与直观,处理过程中把视电阻率值转化为视电导率值。由于视电导率与视电阻率呈反比例关系,电透视成果图上视电导率数值越大表示异常越强。在资料解释时,探测深度一般由两种发射频率来决定,不同的发射频率对应不同的探测深度。笔者对该方法的数值技术进行了大量的模拟工作,得出音频电透视的探测深度和工作面的宽度存在一定的关系,最佳探测范围为  $0.4L$  ( $L$  为工作面的宽度)左右的深度段。由于音频电透视技术供电电极和测量电极分别布置在工作面两个巷道内,和矿井直流勘探方法类似,井下干扰严重,体积效应大,在工作面没有形成时,施工起来较困难。矿井瞬变电磁法勘探是一种非接触式探测技术,属于时间域电磁法。它利用不接地回线向采掘空间周围的煤岩体发射一次电磁场,通过在发射间歇测量煤岩体中导电性不均匀体产生的二次感应场随时间的变化规律,来达到探查各种地质目标体的目的。根据采掘空间断面的大小选择发射和接收回线边长后,仍可通过加大发射功率和接收回线匝数的方法增强二次场信号的强度,从而增大瞬变电磁法勘探的顺层或垂直勘探深度。因此,该方法在克服井下施工空间的局限性方面具有明显的优势。根据电磁场趋肤效应理论,电磁场在高阻介质中衰减慢、传播距离远,采用非接触式、多匝数和小回线(边长 2 m 左右)测量装置的矿井瞬变电磁法勘探技术探查井下巷道周围空间一定范围内水害,通过多年的实际应用,取得了明显的地质效果。

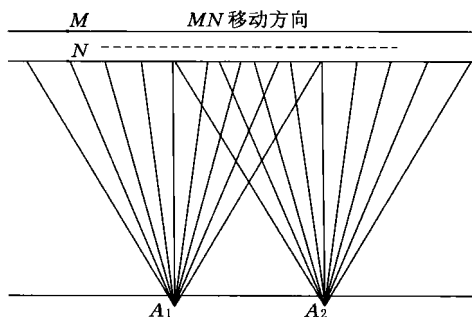


图 1-1 音频电透视测量方式

## 1.2 矿井瞬变电磁法勘探

### 1.2.1 国内外研究概况

最早提出利用电流脉冲激发供电偶极形成时域电磁场的是美国科学家 L. W. Blau (1933),命名为“Eltran”,并于当年获得了美国发明专利,此法提出后,美国石油公司做了很多野外试验,利用不同电导率地层界面电磁波的反射和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,难以得到识别各反射波所需要的分辨率,使得 Eltran 法的幻想破灭。从此以后,瞬变电磁法一直受到冷落。直到 20 世纪 50

年代苏联基本建立了瞬变电磁法解释理论和野外施工的方法技术,60年代苏联30多个瞬变电磁法队在全国各个盆地进行普查,并成功地发现了奥伦堡地轴上的大油田。关于瞬变电磁法的理论研究原苏联一直走在世界的前列,50~60年代由Л. Л. Ваньян和А. А. Куфманн等人成功地完成了瞬变电磁法的一维正、反演,70~80年代苏联地球物理工作者又在二、三维正演方面做了大量工作,80年代初苏联学者Жданов提出了电磁波拟地震波的偏移方法,他吸取了“偏移成像”的广义概念,在电磁法中确定了正则偏移和解析延拓偏移两种方法。80年代末,苏联的一些学者如Каменский又从激发激化现象理论出发,研究了时间域瞬变电磁法的激电效应特征及影响,成功地解释了瞬变电磁法晚期段电磁响应的变号现象。欧美各国虽然于20世纪50年代就提出了该方法,并做了一定的试验工作,但大规模发展该方法始于70年代,J. R. Wait、G. V. Keller、A. A. Kaufmann等人对该方法的一维正、反演方法技术进行了大量研究。80年代以来,随着计算机技术的发展,欧美各国在瞬变电磁法的二、三维正演模拟技术方面所做工作(有限元、有限差分、积分方程及混合方法直接解时间热传导方程或者解频率域亥姆霍兹方程,再进行域的转换)日臻完善,代表人物有G. W. Hohmann、P. Weidelt、G. F. West、A. P. Raiche、B. R. Spies、J. H. Knight、San Filippo、T. J. Lee等一大批学者。

国内瞬变电磁法研究自20世纪70年代开始,由长春地质学院、地矿部物化探研究所、中南大学和中国地质大学等单位分别在方法理论、仪器及野外试验方面做了大量工作,比较系统地建立了一维正、反演理论及方法技术,并自行研制出瞬变电磁仪器,而大功率和多功能瞬变电磁仪器主要依赖进口。在理论和方法技术研究方面,推动了瞬变电磁法(TEM)在我国的应用和发展。这一时期的代表作有朴化荣的《电磁测深法原理》、牛之链的《脉冲瞬变电磁法及应用》、方文藻等人的《瞬变电磁测深法原理》、蒋邦远等人的《实用近区磁源瞬变电磁法勘探》和李貅编的《瞬变电磁测深的理论与应用》等。虽然国内外地球物理工作者在瞬变电磁法基本理论和应用方面的研究取得长足进展,但这些研究都是以地面瞬变电磁勘探为基本点。

矿井瞬变电磁法勘探属于全空间效应的勘探方法,其理论依据、井下施工技术和资料处理与解释方法与地面有本质区别,目前国内中国矿业大学一直在这方面进行研究工作,并取得了良好的效果。国外矿井瞬变电磁法勘探研究成果尚未见报道。

在电磁法勘探时间—深度转换理论和应用方面,国外许多地球物理工作者在这方面做了不少研究工作,特别是欧美学者的研究一直走在前列。最早实现电磁数据时间—深度转换是在大地电磁测深数据处理中(Niblett and Sayn Wittgenstein, 1960; Schmucker, 1970; Bostick, 1977; Jones, 1983),随后在UTEM(Macnae and Lamontagne, 1987)和频率域航空电磁法勘探(Sengpiel, 1988)数据处理和解释中也实现了时间—深度转换。近几年来,在瞬变电磁法勘探数据处理和解释中,也提出了许多实现时间—深度转换算法(P. A. Eaton, 1989; P. K. Fullagar, 1989, 1992; M. A. Meju, 1992, 1995, 1998; A. G. Nekt, 1987; A. P. Raiche, 1985; R. S. Smith, 1994; T. Lee, 1977; James Macnae and Yves Lamontagne, 1987),这些算法在实际中得到一定应用,其中许多方法具有简单、快速的特点,但是根据这些算法转换深度—视电阻率拟断面图在不同深度上的电性分布特征与实际地下介质的电性分布特征差异较大。通过对各种转换算法推导过程和理论基础进行分析,产生误差大的原因之一是这些算法基本都是根据瞬变电磁场的“烟圈”效应理论推导出换算数学模型,即直

接由瞬变电磁场在地下感应的二次场达到最强时的时间来计算相应的深度,这与电磁场实际扩散情况不一致;第二个原因是在推导时间—深度算法数学模型时,均假设发射线圈为偶极源,即探测深度远远大于发射线圈或线源的尺寸,实际测量中的探测深度与发射线圈或线源并不满足这个关系。国内学者在瞬变电磁法勘探数据处理和解释中也做了大量的工作,提出了瞬变电磁场波场转换和拟地震波处理方法(李金铭,1996;牛之琰,1992,1995;昌彦君,张桂青,1994;宋先旺,1994;P. Ellio,孙鸿雁,1993),并取得显著成绩,但在时间—深度转换算法方面的报道很少,基本与国外研究相似。

在瞬变电磁仪器设备方面,国外具有代表性的有加拿大 Geonics 公司推出的 PROTEM—47、57 和 67 瞬变电磁系统;澳大利亚 Geo 仪器公司生产的 SIROTEM—III, Monash Geoscope 公司和 Alpha Geoscience 公司联合研制的 Terra TEM;美国 Zonge 公司生产的 GDP—32 II 以及加拿大 Phoenix 公司生产的 V8 多功能地球物理探测系统。在我国比较具有代表性的瞬变电磁仪器有中南大学和长沙高新技术开发区智通研究所的 SD—1、2;地矿部物化探研究所的 WDC—2、3、4、5;北京矿产地质研究所的 TEMS—3S。而目前能够应用于煤矿进行勘探工作的仪器只有加拿大 Geonics 公司的 PROTEM—47HP 瞬变电磁仪器系统、澳大利亚 Geo 仪器公司生产的 SIROTEM—III、Monash Geoscope 公司和 Alpha Geoscience 公司联合研制的 Terra TEM 瞬变电磁仪器系统。

矿井瞬变电磁法勘探技术虽然在井下勘探工作中取得了非常不错的效果,但是由于矿井瞬变电磁法勘探研究起步较晚,国内外的研究甚少,只有国内部分单位在研究和应用,缺乏理论基础,应用不是很广。研究一维正演模拟的人就不多,更别说矿井全空间三维正演模拟。研究三维地电体全空间瞬变电磁响应特征,对探测井下巷道周围不同方位地质异常体具有重要的指导意义。

瞬变电磁的正演数值模拟方法以有限差分法、积分方程法、有限元法以及综合法(前三种方法的综合)居多。积分方程法和有限差分法求解过程中往往面临许多复杂的数学问题,且计算十分繁杂,特别是当地电模型为非均匀异常体和不规则形体时,其正演计算的难度急剧增加。2006年中国矿业大学的周仕新硕士研究生使用有限插分进行了三维瞬变电磁场模拟,取得了较好的效果。

纯二维正演,即场源为均匀场或接地长导线,地下地质体具二维构造。这一类问题,可采用解析法计算一些均匀层状大地中无限长圆柱体及双层柱体或半无限薄板等的瞬变响应。数值方面最早的文献是 J. T. Kuo 等人在 1980 年用有限元法解一线源二维阻尼波动方程的问题。他们直接在时间域求解,采用空间的有限剖分和时间的中心差分,并给出了任意二维地电断面的 TEM 响应的显式解法。1983 年, M. M. Goldman 和 C. H. Stoyer 引入差分—积分的混合算法,计算了垂直磁偶极子激发下轴对称模型的 TEM 响应(柱坐标系中的纯二维问题)。为了减少计算量,空气—地表的边界条件采用微分方程给出,最终得到二组差分解和一个 Fredholm 积分解,用交替方向(隐式)法将二维问题化为一系列一维问题求解。M. M. Goldman 用有限差分法给出了二维水平层状介质中的瞬变电磁场的模拟算法。1984 年, M. L. Oristaglio 和 G. W. Hohmann 提出以 DuFort—Frankel 法为基础,用显式有限差分法求解线源二维扩散方程,其中利用了地表向上延拓的边界条件,从而避免了求空气中的场。1985 年 Adhidjaja 等人修改了 M. L. Oristaglio 和 G. H. Hohmann 的方法:利用原来的公式直接求二次场。1986 年, M. M. Goldman 等人用有限元法求解任意二维电阻率分

布的 TEM 响应,求解的是总场而非二次场,时间分步法采用前差显式格式。

二维大地三维源(即 2.5 维或准二维)的问题对解释实际复杂大地的电磁数据显得比纯二维问题更重要,应用也更广泛。1992 年,Leppin 解决了长久以来未曾解决的二维非均质体、三维源的时间域电磁模拟问题。他间接求解时间域散射磁场的扩散方程。通过傅氏变换到空间一波数域中,化为二维问题;用显示格式计算了微分方程后,用逐次超松弛迭代求解大型线性方程组;之后通过数字滤波再使傅氏变换返回到时间域。1996 年, L. A. Tabarovsky 等人利用有限差分法和积分法在二维的条件下对三维电磁场源进行了描述。

瞬变电磁法的三维正演模拟一直是人们共同关注的焦点,也是西方各国瞬变电磁法中的热门课题。由于三维模拟相对二维又增加了一维,因而计算工作量成数十倍、数百倍地增加,现在精度是一个问题。三维 TEM 正演问题又包含多种情况,早在 1984 年 Walter L. Anderson 通过快速汉克变换来求解格林张量从而模拟了三维瞬变电磁场的半空间响应。Philip E. Wannamaker 等开发了一种基于积分法的程序来模拟三维介质中的瞬变电磁场。San Filipo 和 G. W. Hohmann 用积分方程法求解了导电半空间三维体的 TEM 响应。积分方程法优于差分解法之处主要在于,只有异常导电区需进行离散,同时又涉及求时域张量格林函数和散射电流的褶积问题。除此之外,时间步长还可以取得较大。1986 年,Newman 和 G. W. Hohmann 研究了层状大地中任意三维体的 TEM 响应,源为线圈或接地导线,首先在频率域中求解,然后利用正、余弦数字滤波变换到时间域中。1993 年, Wang 和 G. W. Hohmann 解决了“真正意义上”的三维 TEM 正演问题,采用了三维空间网格的有限差分法直接在时间域中求解任意源的三维瞬变场响应,用交错网格法求解电磁方程的时间分步,避开求解二阶 Maxwell 方程而直接求一阶方程,无需求各参数的空间导数,故而解决了许多有关数值计算上的难点,计算的磁场晚期结果准确。1996 年,Michaels、Zhdanov 和 Sheng Fang 开发了一种类线性近似法模拟了三维电磁场。Tsili Wang 和 Alan C. Tripp 从时间域麦克斯维方程出发,用 Yee 氏网格划分法划分地电介质并利用有限差分法进行三维的电磁场模拟。

1991 年,西安地质学院方文藻在《大回线法瞬变电磁测深正演计算》一文中用线性数字滤波法计算了大回线法瞬变加深响应曲线,在实际计算中采用三次样条函数法,加快了计算速度,在微机上实现了瞬变测深正演计算。1991 年,中南大学生之珺在《一维层状大地的瞬变电磁测深正演计算》一文中推导了激励电流为阶跃波形的中心回线及重叠回线装置情况下层状大地的瞬变感应电压的余弦积分表达式,计算了一维层状大地模型上的瞬变电磁正演响应。1994 年,长春地质学院殷长春和刘斌在《瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究》一文中利用并矢格林函数理论和积分方程方法计算两层大地中三维异常体的频率域电磁响应,并利用反余弦变换方法将其转换为时间域电磁响应,解释了时间域电磁响应晚期段经常出现的场值变号现象,将描述电阻率频散特征的 Cole—Cole 模型引入到正演计算之中。1996 年,桂林工学院阮百尧在《Guptasarma 算法在瞬变电磁正演计算中的应用》一文中提出一种改进的 Guptasarma 算法,用于瞬变电磁的正演计算中。1998 年,甘肃煤田地质局刘继东在《地面大回线源在地下形成的瞬变电磁场的反演研究》一文中研究了地面大回线源在地下形成的瞬变电磁场的反演方法,采用改进的阻尼最小二乘可行方向法进行了反演计算。1999 年,阎述、陈明生在《线源频率电磁测深二维正演》一文中对一维有限元法应用于二、三维而引出的问题作了分析,并作为向三维的过渡,研究了三维地电体的有限元方

程正演。2000年,唐新功、胡文宝、严良俊在《层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应》一文中用基于张量格林函数的体积分方程对五层地电模型表面的水平电偶极子和接收器下方不同深度的水平导电薄板的三维异常体进行瞬变电磁响应的正演模拟。2000年,陈小斌、张翔、胡文宝在《有限元直接迭代算法在MT二维正演计算中的应用》中将有限元直接迭代算法用于MT二维正演计算,充分利用了有限元直接迭代算法同时具有有限元和有限差分基本特征的优点。2002年,陈小斌、胡文宝在《有限元直接迭代算法及其在线源频率域电磁响应计算中的应用》中采用有限元直接迭代算法实现了线源频率域测深电磁响应的二维正演计算,首先给出了线源正演问题的有限元直接迭代格式,然后由迭代法进行求解;在处理奇异源问题上,采用向内递推的组合网格技巧,在源点附近可进行局部加密,并实现粗细网格的对接,从而较好地解决了奇异源附近的计算问题;还提出一种迭代求取全区视电阻率的方法,避免了远近区的划分。通过对均匀半空间、层状介质和二维模型电磁响应的计算,获得了与大地电磁测深相似的视电阻率曲线。2003年,吴小平、汪彤彤在《利用共轭梯度算法的电阻率三维有限元正演》中引入了对称超松弛预条件共轭梯度(SSOI-PCG)迭代算法来求解电阻率三维有限元计算形成的大型线性方程组,并有机结合系数矩阵的稀疏存储模式。2003年,谢辉、钟燕辉、蔡迎春在《电磁场有限元法在GPR正演模拟中的应用》中采用十二点等参单元对电磁场的三维有限元进行了计算,并用FORTRAN编译了相应的三维有限元程序。2003年,宛新林、席道瑛、高尔根在《三维电阻率正演计算中的Lanczos迭代算法》中介绍了利用Lanczos迭代算法求解大型线性方程组 $Ax=b$ 的问题,通过Lanczos迭代构造出对称三对角阵方程组,并采用正交分解法进行求解,此算法占用内存少、收敛速度快且稳定,针对大型稀疏矩阵的特点,采用简单地记录矩阵的非零元素值及其所在行、列值的方法来存储大型稀疏矩阵,可大大节省机器内存,提高运算速度。

2004年,卢健在《瞬变电磁矩形线框一维正演及电磁信号去噪研究》中介绍了频率域瞬变电磁的汉克积分和贝塞尔积分的一维正演算法,以及余弦多项式近似法、Gaver—Stehfest逆拉普拉斯法、Guptasmarma算法等时间域一维瞬变电磁正演法。2004年,黄俊革、阮百尧在《三维电阻率测深有限元正演模拟中的边界影响》中对三维地电体进行了六面体的离散,并研究了边界和有限元在值相差两倍以上时对电阻率的影响,探讨了解决方法。针对煤矿井下瞬变电磁法勘探的特殊性,研究全空间三维地电体的瞬变电磁响应特征,对矿井瞬变电磁法勘探资料解释工作不仅具有理论意义,而且具有重要的指导价值。

### 1.2.2 矿井瞬变电磁法及其特点

矿井瞬变电磁法(MTEM)是利用不接地回线于井下巷道内设置通以一定电流的发射线圈,在其周围空间产生一次电磁场,并在巷道周围导电岩矿体中产生感应电流。在电流断开之前,发射电流在回线周围空间中建立起一个稳定的磁场。在时间 $t=0$ 时刻,将电流突然断开,由该电流产生的磁场也立即消失。一次磁场的这一剧烈变化通过巷道内空气和周围导电介质传至回线周围的岩层中,并在岩层中激发出感应电流以维持发射电流断开之前存在的磁场,使空间的磁场不会即刻消失。由于介质的热损耗,直到将磁场能量消耗完毕为止。

由于电磁场在空气中传播的速度比在导电介质中传播的速度大得多,当一次电流断开时,一次磁场的剧烈变化首先传播到发射回线周围巷道顶、底板和侧帮,因此,最初激发的感应电流局限于巷道附近岩层中。巷道附近各处感应电流的分布也是不均匀的,在紧靠发射

回线一次磁场最强的巷道顶、底板处感应电流最强。随着时间的推移,巷道周围的感应电流便逐渐向外扩散,其强度逐渐减弱,分布趋于均匀。研究表明,任一时刻巷道顶、底板导电岩层中涡旋电流在巷道内产生的磁场可以等效为一个水平环状线电流的磁场。在发射电流刚关断时,该环状线电流紧挨发射回线,与发射回线具有相同的形状。随着时间的推移,该电流环向外扩散,并逐渐变形为圆电流环。等效电流环像从发射回线中“吹”出来的一系列“烟圈”,因此,将巷道顶、底板导电岩层中涡旋电流向外扩散的过程形象地称为“烟圈”效应,如图 1-2 所示。

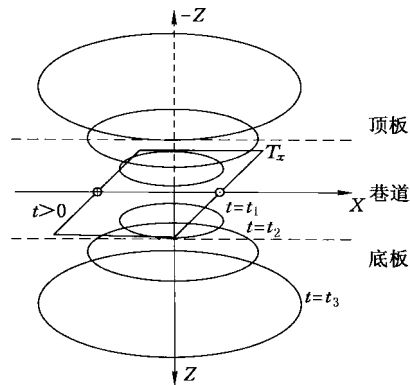


图 1-2 巷道顶、底板感应电流环带分布示意图

地面瞬变电磁法勘探与其他物探方法相比具有体积效应小、工作效率高、纵横向分辨率高和对低阻反应灵敏等优点。根据近 10 年来矿井直流电法理论和技术的研究思路 and 实际应用经验,将地面瞬变电磁方法勘探应用于矿井下,采用多匝数、小回线组合工作装置探查矿井不同位置含水构造,具有比地面瞬变电磁法勘探分辨率高(回线边长为 2 m 左右)、体积效应小、旁侧影响小、测量速度快和轻便等优点。根据多年矿井瞬变电磁法勘探试验研究,井下瞬变电磁法探测信噪比比地面瞬变电磁法和矿井直流电法勘探高得多。如图 1-3 所示,图(a)为巷道内瞬变电磁噪声电位衰减曲线,其最大值为  $\pm 200 \mu\text{V}/\text{A}$ ;图(b)为井下巷道内实际测量的电位衰减曲线,其  $t = 30 \text{ ms}$  的电位值远大于同时间窗口的瞬变电磁噪声,说明矿井瞬变电磁法勘探具有很高的信噪比,应用于井下探测巷道不同位置水源体,必将为矿井防治水工作带来光明前景。

矿井瞬变电磁法与地面瞬变电磁法一样,采用仪器和测量数据的各种工作装置形式和时间窗口相同。受矿井瞬变电磁法勘探环境的影响,测量线圈大小有限,其勘探深度不如地面深,勘探深度一般在 150 m 左右。地面瞬变电磁法为半空间瞬变响应,这种瞬变响应来自于地表以下半空间地层;而矿井瞬变电磁法为全空间瞬变响应,这种瞬变响应来自于回线平面上下(或两侧)地层,给确定异常体的位置带来困难。实际资料解释中,必须结合具体地质和水文地质情况综合分析。总的来说,矿井瞬变电磁法与地面瞬变电磁法相比具有以下几个方面的特点:

① 由于井下测量环境与地表不同,不可能采用地表测量时的大线圈(边长大于 50 m)工作装置,只能采用边长小于 3 m 的多匝小线框,因此与地面瞬变电磁法相比具有数据采

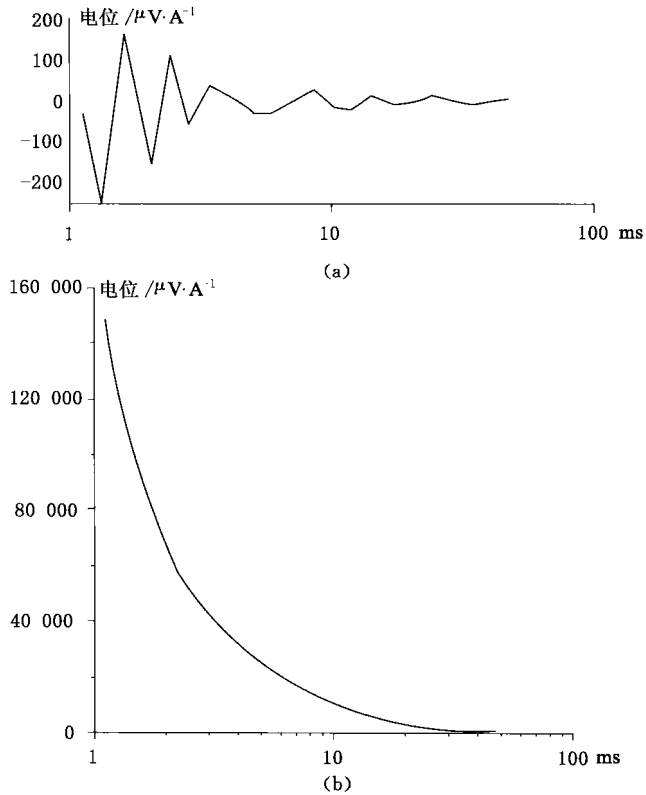


图 1-3 井下噪声和电位衰减曲线  
(a) 噪声曲线; (b) 电位衰减曲线

集工作量小、测量设备轻便、工作效率高、成本低等优点。

② 由于采用小线圈测量,点距更密(一般为 2~10 m),体积效应小,可以提高勘探分辨率,特别是横向分辨率。

③ 井下测量装置距离异常体更近,大大提高测量信号的信噪比,实际测量结果说明,井下测量信号的强度比地面同样有效面积的同工作装置测量的信号强 10~100 倍。井下的干扰信号相对有用信号可忽略不计(大于 30 ms 时间段),而地面测量信号在衰减到一定时间段(一般小于 15 ms)就被干扰信号覆盖,无法识别有用异常信号。

④ 地面瞬变电磁法勘探一般只能将线圈平置于地面测量,而井下瞬变电磁法勘探可以将线圈置于巷道底板测量,探测巷道底板下一定深度内含水异常体垂向和横向发育规律,也可以将线圈直立于巷道内,当线圈面平行巷道掘进前方,可进行超前探查;当线圈面平行于巷道侧面煤层,可探查工作面内顶、底板一定范围内含水低阻异常体的发育规律。

⑤ 由于瞬变电磁法关断时间的影响,与其他物探方法相比,无法探测到更浅部的异常体(浅部 20 m)。同时,对于其他矿井物探方法无法施工的巷道(巷道长度有限或巷道掘进迎头超前探测等),可采用测量装置小、轻便的矿井瞬变电磁法探查。

⑥ 矿井瞬变电磁法勘探从数据采集、资料处理、成图到定量解释工作均可在微机上实现,无需手工作业,因此,矿井瞬变电磁法勘探是一种自动化程度很高的勘探方法。



### 1.3 今后的研究方向

我国地面瞬变电磁法的研究、开发和实践虽已有 30 多年的历史,但从目前情况来看,在理论研究、仪器研制方面仍处于初级阶段,理论研究虽已基本解决了一维正、反演问题,但二、三维的研究尚未达到应用程度。仪器大多是在国外仪器基础上开发和改进的,加之应用推广不普遍,因此,我国地面瞬变电磁法研究和普及还有很长的路要走。矿井瞬变电磁法勘探是在地面瞬变电磁法勘探的基础上经过开发应用到煤矿井下的,在井下有限空间的巷道内探测巷道周围水源体,其理论研究、仪器开发及资料处理和解释工作需要几代人的研究来完成。总结地面瞬变电磁法勘探几十年来的经验和教训,矿井瞬变电磁法勘探的发展方向可概括为以下几个方面:

#### (1) 理论研究方面

对单一三维地电模型的全空间瞬变电磁响应特征进行系统研究;对多个三维地电模型的全空间瞬变电磁响应特征进行系统研究,从瞬变电磁异常响应特征上区分各地电模型的响应时间或位置;矿井瞬变电磁勘探中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;矿井瞬变电磁数据处理和解释系统的研制为该方法的推广应用具有重要的促进作用。

#### (2) 方法技术方面

矿井瞬变电磁法勘探受全空间效应的影响,对异常体空间定位影响很大。类似于探地雷达中的屏蔽天线,研制出矿井瞬变电磁法勘探中接受装置只接受来自探测方向的二次感应场是今后矿井瞬变电磁法勘探应用技术的发展方向。

#### (3) 仪器方面

研制具有防爆性、轻便、防潮、耐高温和智能化矿井瞬变电磁法勘探仪器以及高灵敏度、高性能探头是矿井瞬变电磁法勘探仪器研制的方向。