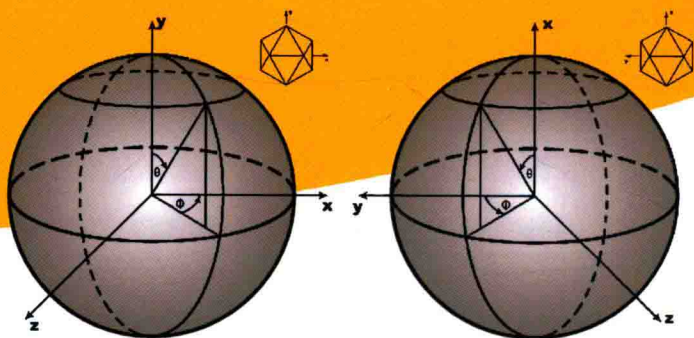


矿井瞬变电磁法 理论与技术研究

杨海燕 岳建华 著



科学出版社

矿井瞬变电磁法理论与技术研究

杨海燕 岳建华 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是矿井瞬变电磁法研究专著,对矿井瞬变电磁法勘探的理论基础、方法技术及资料处理与解释方法作了较为全面的论述。书中系统阐述了全空间介质中瞬变电磁一次场、二次场特征及关断效应影响问题。在对全空间三维时间域有限差分算法研究的基础上,详细讨论了巷道边界条件和截断边界条件,进而研究和分析了巷道影响特征、全空间效应的本质及其对瞬变电磁信号、勘探分辨率的影响因素,总结了典型地电异常体的矿井瞬变电磁响应特征。以理论成果为指导,重点阐述了矿井瞬变电磁资料的处理与解释技术,并辅以应用实例。

本书可作为地球物理学专业研究生教材,也可供从事应用地球物理及相关专业的工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿井瞬变电磁法理论与技术研究/杨海燕,岳建华著.—北京:科学出版社,2015.9

ISBN 978-7-03-045670-0

I. ①矿… II. ①杨… ②岳… III. ①电磁法勘探—研究 IV. ①P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 215767 号

责任编辑:张井飞 韩 鹏/责任校对:赵桂芬

责任印制:徐晓晨/封面设计:耕者设计工作室

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第一版 开本:720×1000 B5

2015年9月第一次印刷 印张:12 1/4 插页:7

字数:250 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

查明水源、导水通道及采掘活动对地下水赋存和运移状态的扰动影响是煤矿防治水的重要任务,识别和预测隧道掌子面前方及其周围断裂带、含水带等是隧道交通工程防止地质灾害发生的关键。瞬变电磁法因其施工方便灵活、工作效率高而成为近年来解决上述地质问题的常用方法之一。

在隧道和矿山井下巷道施工的瞬变电磁法属全空间类勘探方法,巷道影响和全空间效应是其固有的特殊理论问题。隧道或巷道周围瞬变电磁场的分布变化规律既不同于地表半空间,也不同于无隧道或巷道的“纯”全空间。因此,地下瞬变电磁法理论与地面瞬变电磁法理论既有共性又有区别,区别之处正是地下瞬变电磁法理论研究的重点。本书以应用量大、应用面广的煤矿井下瞬变电磁法即矿井瞬变电磁法为例,探讨地下瞬变电磁法特殊的理论基础、方法技术、资料处理与解释方法。

全书共7章。第1章简要介绍矿井瞬变电磁法的发展历史和研究现状。第2章阐述全空间介质中一次场、二次场的解析解及关断效应。第3章研究巷道全空间三维时域有限差分算法,详细讨论巷道边界条件和截断边界条件。第4章分析研究全空间效应的本质及其对瞬变电磁信号、勘探分辨率的影响。第5章论述巷道空间对瞬变电磁场的影响特征和影响因素。第6章总结典型地电异常的矿井瞬变电磁响应特征。第7章则为矿井瞬变电磁法晚期与全区视电阻率公式和算法,实测瞬变电磁资料滤波和后延改正策略,并辅以应用实例。

本书主要成果得到国家自然科学基金项目“巷(隧)道影响下全空间瞬变电磁法视电阻率与时间-深度转换理论研究”(编号:41004048)和“含导水构造的瞬变电磁响应特征与突水探测基础研究”(编号:50774085),国家“十二五”科技支撑计划项目“矿井突水重大灾害实时监测预警技术”(编号:2013BAK06B01),江西省自然科学基金项目“瞬变电磁法隧道效应及全空间全区数据解释理论研究”(编号:20114BAB212007)和“圆锥形场源地下瞬变电磁法精细解释技术理论研究”(编号:20151BAB203045),江西省教育厅科学技术研究项目“地-井瞬变电磁法深部铀矿勘查中的关键理论问题”(编号:GJJ14487),放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室开放基金项目“深部铀矿勘查地-井瞬变电磁法响应特征研究”(编号:RGET1308)以及华东理工大学博士启动项目的资助。

作者在研究过程中曾得到中国矿业大学刘志新副教授、姜志海副教授的帮助,东华理工大学刘俊、林云、谢石文、刘少光、董萌萌、徐正玉、李锋平等研究生参与了书中部分内容的研究工作,湖南省煤田地质局方大为高级工程师、贺检桥高级工程师等曾参加井下试验工作。在此,作者一并致以诚挚的谢意!

目 录

前言

| | |
|--------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景与意义 | 1 |
| 1.2 矿井瞬变电磁法勘探 | 2 |
| 1.3 矿井瞬变电磁法发展历史与研究现状 | 3 |
| 1.4 矿井瞬变电磁法发展趋势 | 8 |
| 第 2 章 均匀介质中的瞬变电磁场 | 9 |
| 2.1 均匀导电全空间介质中多匝小回线源一次场 | 9 |
| 2.2 均匀导电全空间介质中多匝小回线源二次场 | 18 |
| 2.3 多匝小回线装置的暂态过程 | 26 |
| 2.4 关断电流影响下的瞬变电磁解 | 40 |
| 第 3 章 矿井瞬变电磁场时域有限差分法正演模拟 | 48 |
| 3.1 瞬变电磁场三维时域有限差分方程 | 48 |
| 3.2 非均匀网格剖分技术 | 56 |
| 3.3 时域有限差分方程稳定性 | 59 |
| 3.4 时域有限差分算法精确性 | 64 |
| 3.5 截断边界条件 | 67 |
| 3.6 修正的廖氏吸收边界条件 | 70 |
| 3.7 巷道空腔与边界处理 | 75 |
| 3.8 边界条件在差分方程中的应用 | 77 |
| 第 4 章 矿井瞬变电磁法的全空间场效应 | 90 |
| 4.1 模型设置与计算方法 | 90 |
| 4.2 层状介质瞬变电磁场响应特征 | 91 |
| 第 5 章 巷道对全空间瞬变电磁场的影响 | 99 |
| 5.1 巷道影响下的感应电动势 | 99 |
| 5.2 巷道影响与关断时间 | 101 |
| 5.3 巷道影响与装置形式 | 103 |
| 5.4 巷道影响与围岩导电性 | 105 |
| 5.5 巷道影响与装置位置 | 107 |
| 5.6 巷道影响与巷道几何尺寸 | 108 |

| | | |
|-------------|------------------------------|------------|
| 5.7 | 巷道影响下的异常响应 | 109 |
| 第6章 | 矿井瞬变电磁法典型地电异常特征 | 116 |
| 6.1 | 时间-深度转换 | 116 |
| 6.2 | 三维地电体响应特征 | 117 |
| 6.3 | 三层地电断面瞬变电磁场响应特征 | 130 |
| 6.4 | 四层地电断面瞬变电磁场响应特征 | 137 |
| 6.5 | 断层瞬变电磁场响应特征 | 143 |
| 6.6 | 陷落柱瞬变电磁场响应特征 | 147 |
| 第7章 | 矿井瞬变电磁资料解释方法 | 155 |
| 7.1 | 全空间晚期视电阻率解释 | 155 |
| 7.2 | 全空间全区视电阻率解释 | 160 |
| 7.3 | 滤波技术适用性与后延影响改正策略 | 171 |
| 参考文献 | | 183 |
| 彩图 | | |

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

我国煤炭生产位列世界第一,过去的 10 年间我国煤炭产量快速增长,2004 年煤炭产量为 19.6 亿 t,2014 年突破 38.0 亿 t。随着开采强度和深度的加大,我国煤矿安全生产形势十分严峻。

受地质条件和煤矿开采历史等客观因素的影响,我国煤矿水文地质条件极为复杂,水害极为严重。我国 95%的煤矿为井工开采,煤层赋存条件复杂多变,地质灾害因素多样,开采深度不断增大等是煤矿灾害事故频发的主要原因之一。2005 年 9 月颁布实施的《国务院关于预防煤矿生产安全事故的特别规定》,整顿和关闭了不具备安全生产条件的煤矿和非法小煤矿,煤炭资源整合成效显著,但原小煤矿和老窑无序开采遗留下的采空积水情况不明,又对煤矿安全生产构成新的威胁。据统计,在我国煤矿重特大事故中,矿井突水事故在死亡人数和发生次数上,仅次于煤矿瓦斯事故,但造成的经济损失一直居各类煤矿灾害之首。随着矿井开采深度的增加,矿井突水事故居高不下,仅 2000 年到 2009 年的 7 年间就发生重、特大矿井突水事故 535 起,死亡 3169 人。在过去的 20 年内,有 250 多个矿井被水淹没,经济损失高达 350 多亿元人民币,同时,煤矿突水对矿区水资源与环境也造成巨大的破坏。

为此,国家安全生产监督监察部门 2008 年出台了《关于预防暴雨洪水引发煤矿事故灾难的指导意见》和《关于进一步加强煤矿水害防治工作的意见》,2009 年以国务院安全生产委员会办公室名义下发了《关于防范煤矿水害事故的紧急通知》。2009 年正式颁布实施了《煤矿防治水规定》(安监总局第 28 号局长令,以下简称《规定》)。《规定》中严格要求煤矿防治水工作应当坚持“预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采”的原则,采取“防、堵、疏、排、截”的综合治理措施。水文地质条件复杂和极复杂的矿井,在地面无法查明矿井水文地质条件和充水因素时,必须坚持有掘必探。探水是指用超前勘探方法,查明采掘工作面顶底板、侧帮和前方的含水构造(包括陷落柱)、含水层、积水老窑等水体的具体位置、产状等,从而为有效的防治矿井水害做好必要的准备。而《规定》中同时指出,钻探和物探是探水的主要技术手段。

1.2 矿井瞬变电磁法勘探

用于探查对煤矿具有潜在水害威胁的水源体的地球物理勘探方法主要有矿井直流电法勘探、矿井瞬变电磁法勘探、无线电波透视、探地雷达和地震勘探类方法。经过多年的努力,矿井直流电法勘探、无线电波透视法在理论、技术和勘探装备方面都有了显著进步,在煤矿防治水预测预报中已得到广泛的应用,并取得一定的经济和社会效益。但是,当施工巷道长度有限时矿井直流电法勘探的勘探深度受限制,如果工作面没有形成系统,无线电波透视法也无能为力,需要发展对施工空间要求低、井下操作方便的矿井物探新方法。

此外,近年来煤矿生产的一些新特点也对矿井物探工作提出了新要求。第一,随着采煤新技术、新工艺和新装备的采用,工作面回采速度显著提高,上覆岩层向采场的涌水量加大,需要提前探水放水,查明顶板岩层富水区是矿井物探工作的新任务;第二,煤岩巷掘进速度明显加快,传统的钻井超前探测方法工时长、效率低,需要寻求新的大距离超前探测方法;第三,开采历史较长的煤矿,开采下组煤时要考虑底板承压奥灰水的威胁,开采上组煤需要对采空区积水进行探测,矿井物探面临新问题。因此,发展矿井物探新技术、新方法不仅是提高其应用能力和应用效果的需要,也是煤矿安全生产提出的新任务、新要求、新课题。

为此,近年来国内多家单位坚持开展了井下物探方法的研究工作,其中施工空间要求低、操作方便的矿井物探新技术——矿井瞬变电磁法勘探技术逐渐成为研究重点。该技术具有诸多优点,表现为:①井下干扰因素少,可获取较强的有用信号;②巷道内施工,更接近目标体,可实现精细探测;③采用灵活性较强的小回线装置,避免巷道空间对探测工作的影响,工作效率高;④可进行跟踪探测,实现实时预测预报。

实践表明,矿井瞬变电磁法勘探与地面瞬变电磁法勘探的物理环境不同。地面瞬变电磁法的观测装置位于地表之上,探测的地质异常体方位在装置的下方,并可根据实际工作的需要采用大回线源装置以实现深部探测。而矿井瞬变电磁法的观测装置布置在巷道内部,受巷道空间的限制只能采用小回线装置。尽管小回线装置形式较为灵活,工作效率高,但其探测深度有限。矿井瞬变电磁法所研究的目标体既有可能位于巷道顶底板岩层内部,又有可能在巷道迎头前方,同时,巷道影响和全空间场效应的存在势必影响不同方位地质异常体的瞬变电磁响应,增加了资料处理和解释的难度。

1.3 矿井瞬变电磁法发展历史与研究现状

1.3.1 我国矿井电法发展历史

自1954年8月中国第一支煤炭电法测量队成立,到20世纪80年代初,煤炭电法勘探主要用于山区地质填图、隐伏地区普查找煤、勘探阶段探测断层和隐伏煤层露头。在此期间,在河南义马矿区、登封矿区、禹县含煤区、新郑含煤区,内蒙古陈旗、东胜、准噶尔矿区,贵州六枝矿区北段、盘县矿区,江西乐平矿区涌山和丰城矿区石滩,湖南嘉禾县袁家矿区北段,陕西合阳东王地区,新疆乌鲁木齐河东铁厂沟-碱沟等地,通过煤炭电法勘探寻找岩溶裂隙水,为生产矿区或规划开发矿区找到了一大批水源。

1984年,中国矿业大学与江苏煤炭地质物测队联合开发的直流电测深正反演微机软件代替理论量板法和人工经验方法进行电测深定量解释。安徽省煤田地质局物探测量队提交的任楼地区水源电法勘探报告,全部采用该微机软件反演解释,提高了分层能力和解释精度,地质效果明显。1984年起,受中国煤炭地质总局委托,中国矿业大学开始2D有限元电法正演算法研究。

1985年,国家计划委员会批准进口煤田露天综合勘探设备,中国煤炭地质总局引进10套法国SYSCAL R2数字电法仪,改善了装备条件。

1980年中后期,开滦范各庄矿、淮北杨庄煤矿等几次大的煤矿突(透)水事故引起人们的高度重视,以煤矿防治水为主要任务的矿井物探工作提上议事日程。1987年,中华人民共和国煤炭工业部总工程师陈明和到中国矿业大学调研,要求启动煤矿防治水矿井物探工作。

此时,应用矿井物探方法探测和评价煤层底板突水条件并无成功案例和参考资料,物探仪器设备多适用于地面勘探,无专用的矿井物探仪器,基础理论也都是地面类物探方法所使用的半空间理论。

1988年年底,结合淮北杨庄煤矿II617工作面突水后复采论证,中国矿业大学矿井物探研究室与淮北矿务局地测处联合开展“以矿井直流电法勘探为主,矿井地震勘探、放射性测量、微重力测量和红外测温为辅”的综合矿井物探试验工作。此次试验工作历时两年,100多人先后参与了该项工作。在杨庄煤矿开展的井下技术试验工作包括:巷道顶、底板电测深,巷道电剖面法,矿井高密度电阻率法,煤层测深法,直流电透视法,无线电波透视法,微重力测量,红外测温,矿井地震勘探等。其中,电法类方法的试验内容为:装置形式、极间距与测点点距选择、施工方法与技术、电极及其接地问题、供电电源、干扰特征与压制方法、资料整理与处理、图示方法;电磁波层析成像技术。地震类方法的试验内容为:观测系统、激发方式、检波器布置、巷道空气波压制、资料处理与解释。微重力测量的试验内容为普通重力

测量与重力梯度测量。

1989年之后,中国矿业大学岳建华课题组开展的矿井电法勘探基础研究获得了国家自然基金的持续资助,对巷道影响和全空间效应的物理模型实验进行了研究。1990~1994年,研究了层状介质全空间电场线性滤波法正演计算,顶、底板电测深曲线自动反演算法以及层测深曲线的线性滤波法。1996~1997年,实现了巷道影响下全空间电流场边界单元法数值模拟算法,提出巷道影响下的全空间电流场理论。1998年,实现了考虑巷道影响的全空间电测深、层测深边界单元法数值模拟。2000~2003年,实现了巷道影响下全空间电流场有限差分法和有限单元法数值模拟算法。

在此过程中,矿井电法勘探方法与技术得到不断丰富和完善,中国矿业大学实现了探测工作面内陷落柱和小构造的侧帮电测深、直流电透视、超前探孔中单极-偶极法和巷道掘进头超前探技术,煤炭科学研究总院西安分院研究了探测工作面底板含、导水构造音频电透视技术,山东科技大学特采所研究了水下采煤矿井物探技术,河北煤炭科学研究院与中国矿业大学合作研究了点源梯度法和巷道掘进头超前探技术。研究成果推广至山东、河北、河南、陕西等省底板承压水问题突出的矿区,底板突水事故频发的现象从此得到有效的遏止。

1996年,中国煤炭地质总局组织“九五”物探科技调研后,决定引进瞬变电磁法。1997年年初,中国矿业大学和中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院各引进一台 SIRO-TEM 3F 瞬变电磁仪。1998年,水文地质条件简单的充矿综采放顶煤工作面受顶板红层砂岩水的困扰,严重影响生产效率;权台矿3煤25工作面回采掉水,怀疑顶板砂岩水受灰岩水补给。由于矿井直流电法在顶板布设电极遇到困难,于是中国矿业大学开展了矿井瞬变电磁法井下技术试验。

在矿井瞬变电磁法井下技术试验研究的基础上,2001年中国矿业大学于景邨完成了矿井瞬变电磁法理论及应用技术研究博士论文,2003年皖北段中稳等分别发表文章介绍了任楼矿应用矿井 TEM 探测底板陷落柱和检测注浆效果,2003年中国矿业大学刘树才、岳建华在第六届中国国际地球电磁学学术研讨会上结合徐矿和充矿应用介绍了矿井瞬变电磁法探测巷道顶、底板含水构造的方法技术。

2003年,中国科学院地质与地球物理研究所白登海等在第六届中国国际地球电磁学学术研讨会上结合峰峰牛儿庄矿应用实例介绍了地下全空间瞬变电磁法及其在煤矿水害预测中的应用。

2003年,中国矿业大学岳建华等在中国地球物理学会年会上分析了多匝小回线装置视电阻率偏小的原因。2004年,煤炭科学研究总院西安分院闫述等发表了井下全空间瞬变电磁法薄层和细导线响应特征的数值模拟结果。

2005年后,在博士点基金和国家自然科学基金的资助下,中国矿业大学岳建华课题组实现了矿井瞬变电磁法的2D和3D有限元法、有限差分法、边界元法数

值模拟,使基础研究得以顺利开展。所开展的研究总结了多匝小回线装置收、发特征及其对观测结果的影响;认识和掌握了典型地电体的异常响应特征,为定性解释奠定了基础;认识和掌握了天线方向特征,确立了异常体空间定位的理论基础;初步掌握了时深转换的规律,为定量解释奠定了基础。

2006年,焦作煤业郭纯等发表《地下全空间瞬变电磁技术在煤矿巷道掘进头的连续跟踪超前探测》一文。2006年,中国矿业大学刘志新等应用矿井瞬变电磁法探测工作面内封闭不良钻孔。2007年,刘志新等提出巷道掘进头超前探测的扇形观测技术。2008年后,中国矿业大学、煤炭科学研究总院西安分院、安徽理工大学等多家高校科研机构和企业发表了许多关于矿井瞬变电磁法探测老空积水的文章。

1.3.2 矿井瞬变电磁法研究现状

1. 正反演理论研究

最早开始瞬变电磁场基础理论研究的学者为 Wait(1951a),此后 Ванъян、Keller、Kaufman、Hohmann、Weidelt、West、Raiche、Spies、Nabighian、Lee 等国外学者开展了瞬变电磁场理论的研究工作,从而奠定了瞬变电磁场理论体系的基础。

20世纪50~60年代,Wait对地表半空间均匀层状介质瞬变电磁场进行的理论研究,Ванъян与Куфманн等开展的瞬变电磁法一维正、反演研究,以及Morrison推导的半空间层状介质瞬变电磁场的积分表达式等,为之后瞬变电磁场的理论研究奠定了基础。而Nabighian(1979)提出的“烟圈”理论,则大大简化了瞬变电磁资料的反演与解释,成为瞬变电磁资料解释的基础方法之一。

此后,在有限单元法、有限差分法(网格法)、边界单元法(积分方程法)和混合法(如有限差分法-积分方程法)等方法的基础上,更复杂的二维、三维正反演逐渐成为瞬变电磁法理论研究的热点。采用数值方法在时间域中直接求解瞬变电磁场(Kuo and Cho,1980;Oristaglio and Hohmann,1984),以及先在频域中求解瞬变电磁场后应用积分变换方法转换到时间域(Newman and Hohmann,1986)均取得较好的效果;将原有计算方法进行扩展修正,并应用于二维、三维正反演问题求解的研究成果也不断涌现(Raiche and Spies,1981;Knight and Raiche,1982;Sanfilipo and Hohmann,1985;Goldman,1986;Wang and Hohmann,1993;Lee and Buris,1994;Rob and Peter,1997;White and Iskander,1997;Vay,2001;Xie et al.,2002;Srisukh et al.,2002;Van and Wood,2005);此外,混合解法的采用不仅拓展了瞬变电磁场的求解方法,而且使瞬变电磁法理论研究得到很大的提高(Goldman and Stoyer,1983;Feliziani and Maradei,1998;Teixeira and Chew,2000)。

20世纪70年代,国内学者朴化荣、曾孝箴、王延良等率先开展瞬变电磁法的研究工作,随后,蒋邦远、牛之珪等将瞬变电磁法用于金属矿勘探。方文藻和李予国(1991)、殷长春(1994)、李貅(2002)等先后开展了瞬变电磁法二维、三维正演模拟工作,并对大回线源瞬变电磁视电阻率定义方法进行了研究。2000年以后,国内瞬变电磁法理论研究成果颇丰,以各种数值方法为基础的二维、三维正反演研究成果不断涌现,具有代表性的有闫述、唐新功、宋维琪、严良俊、王华军、熊彬等。在我国瞬变电磁理论不断发展的同时,各种类型的瞬变电磁系统也相继研制成功,如DGVI-1型电磁脉冲瞬变系统,SD-1型智能化瞬变电磁仪等。

国内外学者做出的大量研究工作成就了地面瞬变电磁法在石油、金属矿、找水及工程等勘探中良好的应用效果。但是总体看来,目前虽已解决了一维正反演问题,但二维、三维的研究成果还未达到应用程度。国内地面瞬变电磁法理论研究、仪器研制发展迅速,但和国外相比仍有一段差距。

2. 全空间理论研究

地下瞬变电磁法属全空间类勘探方法,巷道影响和全空间场效应是地下电法或电磁法勘探固有的特殊理论问题。在全空间场效应和巷道不导电空气的共同作用下,地下瞬变电磁场的分布变化规律既不同于地表半空间,也不同于无巷道的“纯”全空间瞬变电磁场。国外有关全空间瞬变电磁法的研究成果尚不多见,密切相关的为2002年Stefi和Chouteau用数字滤波法计算了层状介质内部水平线圈上的瞬变响应,但所使用的计算模型仍为一维层状介质,且未考虑巷道影响。而在国内,由于瞬变电磁法在巷道内应用的需要,中国科学院地质与地球物理研究所、中国矿业大学、长安大学、煤炭科学研究总院西安分院、山东科技大学、吉林大学以及西安交通大学等多家单位持续开展了地下瞬变电磁法勘探的研究工作,研究内容涵盖地下瞬变电磁法正演研究、资料处理和成像研究、方法技术研究及观测系统研究。

正演研究从数值模拟算法出发,推导或引入内边界条件(巷道边界)和外边界条件(截断边界条件)(岳建华等,2007;杨海燕、岳建华,2008c;杨海燕,2009),进而实现模拟巷道影响、全空间层状介质响应和三维导体响应特征(谭代明、漆泰岳,2008c;杨海燕、岳建华,2008c;陈玉玲,2010;岳建华、杨海燕,2012)以及井中干扰物体响应特征的目的(闫述、石显新,2004;于景邨等,2008)。而在资料处理中则采用小波变换、波场变换原理等数学方法及物理模型实验方法对由金属支护和铁轨引起的井下噪声、低阻屏蔽层影响特征等问题开展研究(刘志新等,2007a;胡兵等,2010;张欢、彭刘亚,2010)。井下施工环境的特殊性迫使地下瞬变电磁法在方法技术和观测系统方面进行改进,因而对能有效获取顶、底板及顺层地质信息的井中探测技术的研究逐步深入,如用环形测深代替常规的超前探测方法的技术研究(刘志

新等,2007b;Jiang et al.,2007),李貅主持完成的“地下瞬变电磁法”和“隧道施工掌子面前方地质预报瞬变电磁法研究”项目的研究内容中,对地表发射地下接收装置的理论难点,以及对基于波场变换原理和瞬变电磁虚拟波场的特性对隧道探测的 TEM 快速成像方法和向后屏蔽高频(250Hz)磁探头技术难题的解决,均极大地促进了瞬变电磁法在井下探测应用的发展。此外,白登海等(2003)在全空间瞬变电磁法理论和突水构造探测技术研究和试验工作的基础上发展的高分辨率电阻率成像方法,以及与加拿大 Geonics 公司合作开发的地下全空间瞬变电磁系统 EM-47HP,均为地下瞬变电磁法成像技术与观测系统研究的重大突破。而近几年地下瞬变电磁法资料处理与可视化技术研究也在持续,如全空间瞬变电磁法视电阻率解释技术及三维地质异常可视化技术研究等均为在地下瞬变电磁法前期研究的基础上产生的新成果(廖俊杰等,2011;李明星等,2011;刘俊等,2012;杨海燕、岳建华,2013)。

地下瞬变电磁法应用发展的过程也是该方法理论与技术研究不断深入的反映,地下瞬变电磁法在地下工程探水,在煤矿顶、底板岩层含水性探测以及在煤矿迎头超前预报中的有效应用(白登海等,2003;郭纯等,2006;代刚等,2006;孔德山等,2010;刘振庆等,2011;于景邨等,2011;王东伟等,2011),均昭示该方法广阔的应用前景,同时也突显了实际应用中亟待解决的理论与技术新问题。

3. 视电阻率转换

视电阻率作为一种表达地下电性结构的参数,其定义方法一直是国内外学者研究的重点,许多学者一直在寻求较为精确的计算方法以使求得的视电阻率更接近于介质的“真”电阻率。因此,相对于目前常用的晚期视电阻率,全区视电阻率(或精确视电阻率)公式的定义和计算方法成为研究的焦点。

不同场源所对应的瞬变电磁响应解析解不同,因而与之对应的视电阻率定义和解释方法也会发生变化。在偶极源、线源和回线源瞬变场视电阻率定义与计算方面,对中心回线装置瞬变响应解析式执行泰勒展开以得到近似视电阻率公式(Spies and Raiche,1980),使用迭代算法以获取较高精度的晚期视电阻率(Raiche et al.,1985),采用迭代算法和数值方法实现回线源中心方式视电阻率计算(Yang,1986;Spies and Egger,1986;Ward and Hohmann,1987;Christensen,1995),以及偶极源瞬变电磁场精确视电阻率的计算(Das,1995a,1995b)等研究均为瞬变电磁法成功应用于实践提供了重要的理论与技术保证。

而针对不同装置和地-电结构开展的精确视电阻率计算和资料解释方法研究也给圆锥形装置下资料解释技术提供了借鉴和参考。如均匀半空间模型和层状模型视深度公式的理论推导及求解方法对比(宋先旺,1997),中心回线源和磁偶极子源磁场公式与扩散速度公式推导(严良俊等,2002)等均为其中代表。而以中心回

线和长偏移距等野外常用观测方式为对象的全区视电阻率计算方法研究(严良俊等,1999;蒋邦远,2000;苏朱刘、胡文宝,2002;翁爱华、陆冬华,2003;白登海等,2003),基于瞬变电磁场衰减规律求取时间域垂直磁场分量,进而获取全区视电阻率的研究(李建平等,2007;许建荣等,2008),以及利用瞬变电磁场源的各种特性而提出的计算全区视电阻率的数值逆样条插值法、平移算法、核函数算法和二分搜索算法等研究(熊彬,2005;王华军,2008;陈清礼,2009;刘俊等,2012;杨海燕、岳建华,2013)均着眼于探求瞬变电磁场早期和晚期视电阻率的精确解法,避免因感应电位核函数的非线性而产生早晚期响应混淆,以获取同一感应电位对应的早期响应或晚期响应的唯一解,并实现过渡区视电阻率的精确计算,与采用均匀半空间模型法、层状模型法、三次样条插值法以及由“薄板理论”出发的电场分量互换原理等对瞬变电磁法视深度开展的研究(宋先旺,1997;杨长福等,2000;严良俊等,2002,2003)共同奠定了瞬变电磁法资料解释技术的理论基础。

1.4 矿井瞬变电磁法发展趋势

经过若干年的深入研究,矿井瞬变电磁法在许多理论与技术问题方面已得到较大改善,如已开发的正演模拟算法、应用较为成熟的环形超前探测技术等。但许多关键理论问题尚未得到有效解决,从而制约了矿井瞬变电磁法的应用效果。

巷道内只能采用多匝小回线装置的强互感耦合产生较强的感应电位,从而使早延时中的有效信号难以分辨,“盲区”范围与探测深度的比例大于地面瞬变电磁法。矿井瞬变电磁法探测受到全空间场效应的制约,准确分辨来自不同方位的地质异常信息成为矿井瞬变电磁法研究的瓶颈。地面瞬变电磁法的研究参数已经较早地实现了由地下介质电性综合反映的视电阻率向介质“真”电阻率的转变,研究成果已转化成实用的反演软件,而适用于巷道全空间介质的反演问题尚未得到解决。

解决矿井瞬变电磁法理论与应用中存在的诸多问题是这种方法走向成熟的必经过程,是真正实现精细探测的基础,具有重要的研究价值。

第 2 章 均匀介质中的瞬变电磁场

矿井瞬变电磁法的观测装置位于巷道内部,有限的巷道空间限制了场源尺寸,而矿井防爆规程也限制了发射电流大小,因而可用的场源装置及其特性成为矿井瞬变电磁法勘探必须解决的首要问题。目前,可用于矿井探测的瞬变电磁系统主要为:加拿大 Geonics 公司生产的 Protom47 系统,可使用偶极装置和共轴装置;澳大利亚 Alpha 公司生产的 TerraTEM 系统,可使用同一回线和重叠回线。

无论何种瞬变电磁系统,回线源都是常规场源形式。巷道内只能采用小回线源装置,通常通过增加线圈匝数进而增强发射磁矩来实现增大探测深度的目的。这种装置灵活、高效,但也存在若干理论与应用难题。用于发射和接收瞬变电磁场的多匝回线,其自感和互感作用获得增强,也导致了关断时间的增加,进而影响了早延时更大范围内的数据质量,由此产生了更大的“盲区”。单匝回线可以有效减弱电感作用,但其发射磁矩较小,限制了探测深度。

本章内容以一次场、二次场、关断时间为关键因素来讨论多匝小回线的场源特性与计算理论。

2.1 均匀导电全空间介质中多匝小回线源一次场

2.1.1 一次场公式推导

在图 2.1 所示的球坐标系下,圆形回线中通入电流为 $I(t)$, t 在关断时间内变化,半径为 a 。 $P(r, \theta_0, \varphi_0)$ ($0 \leq \theta_0 < \pi, 0 \leq \varphi_0 < 2\pi$) 和 $M(a, \frac{\pi}{2}, \varphi)$ ($0 \leq \varphi < 2\pi$) 分别为场点和源点。

圆形回线的参数方程为

$$\begin{cases} x = a \cos \varphi \\ y = a \sin \varphi \\ z = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

在任意时刻 t , M 点处选取一电流元 $I(t) d\mathbf{l}$, 则由 Biot-Savart 定律,该圆形回线在 P 处产生的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{I(t) d\mathbf{l} \times \mathbf{MP}}{|\mathbf{MP}|^3} \quad (2.2)$$

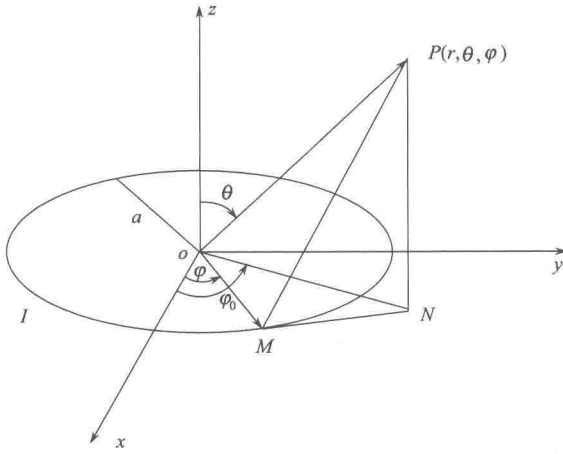


图 2.1 球坐标系下的一次场计算模型

式中, $d\mathbf{l}$ 为 M 点处的圆周切向量; \mathbf{MP} 为向量。 \mathbf{MP} 的计算方法如下:
 向量 \mathbf{OM} 和 \mathbf{OP} 分别为

$$\mathbf{OM} = a \cos\varphi \mathbf{i} + a \sin\varphi \mathbf{j} + 0\mathbf{k} \tag{2.3}$$

$$\mathbf{OP} = r \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \mathbf{i} + r \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \mathbf{j} + r \cos\theta_0 \mathbf{k} \tag{2.4}$$

从而得到

$$\begin{aligned} \mathbf{MP} &= \mathbf{OP} - \mathbf{OM} \\ &= (r \sin\theta_0 \cos\varphi_0 - a \cos\varphi) \mathbf{i} + (r \sin\theta_0 \sin\varphi_0 - a \sin\varphi) \mathbf{j} + r \cos\theta_0 \mathbf{k} \end{aligned} \tag{2.5}$$

并且

$$|\mathbf{MP}| = \sqrt{r^2 + a^2 - 2ra \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0)} \tag{2.6}$$

同时由圆的参数方程式(2.1)得到

$$d\mathbf{l} = -a \sin\varphi d(\varphi \mathbf{i}) + a \cos\varphi d(\varphi \mathbf{j}) + 0\mathbf{k} \tag{2.7}$$

故

$$\begin{aligned} d\mathbf{l} \times \mathbf{MP} &= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ -a \sin\varphi d\varphi & a \cos\varphi d\varphi & 0 \\ r \sin\theta_0 \cos\varphi_0 - a \cos\varphi & r \sin\theta_0 \sin\varphi_0 - a \sin\varphi & r \cos\theta_0 \end{vmatrix} \\ &= ra \cos\varphi \cos\theta_0 d(\varphi \mathbf{i}) + ra \sin\varphi \cos\theta_0 d(\varphi \mathbf{j}) \\ &\quad + [a^2 - ra \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0)] d\varphi \mathbf{k} \end{aligned} \tag{2.8}$$

对 $|\mathbf{MP}|^{-3}$ 作如下整理(任来平等, 2002)

$$\begin{aligned}
 |MP|^{-3} &= [r^2 + a^2 - 2ra \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0)]^{-\frac{3}{2}} \\
 &= \frac{1}{(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} \left[1 - \frac{2ra}{r^2 + a^2} \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \right]^{-\frac{3}{2}} \quad (2.9)
 \end{aligned}$$

将式(2.9)中的 $\left[1 - \frac{2ra}{r^2 + a^2} \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \right]^{-\frac{3}{2}}$ 项进行泰勒展开,得到

$$\begin{aligned}
 &\left[1 - \frac{2ra}{r^2 + a^2} \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) \right]^{-\frac{3}{2}} \\
 &= 1 + \frac{3ra}{r^2 + a^2} \sin\theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) - \frac{15}{4} \cdot \frac{r^2 a^2}{(r^2 + a^2)^2} \sin^2\theta_0 \cos^2(\varphi - \varphi_0) \\
 &\quad + O[\cos^2(\varphi - \varphi_0)] \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

式中, $O[\cos^2(\varphi - \varphi_0)]$ 为高阶无穷小。

取式(2.10)的前两项与式(2.6)和式(2.8)代入式(2.2)进行积分运算,得到圆形回线在空间任一点处产生的磁感应强度分量为

$$\begin{cases}
 B_x(t) = \frac{3\mu I(t)S}{8(r^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} r^2 \sin(2\theta_0) \cos\varphi_0 \\
 B_y(t) = \frac{3\mu I(t)S}{8(r^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} r^2 \sin(2\theta_0) \sin\varphi_0 \\
 B_z(t) = \frac{\mu I(t)S}{2(r^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} \left(r^2 + a^2 - \frac{3}{2} r^2 \sin^2\theta_0 \right)
 \end{cases} \quad (2.11)$$

式中, $S = \pi a^2$, 为回线的面积。

多匝小回线装置由 n 个单匝回线串联而成,其磁矩定义为 $M(t) = nI(t)S$, 同时为方便计算,根据如下关系式

$$\begin{cases}
 x = r \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \\
 y = r \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \\
 z = r \cos\theta_0
 \end{cases} \quad (2.12)$$

将式(2.11)转化到直角坐标系下,得到的直角坐标下多匝小回线源一次场磁感应强度分量为

$$\begin{cases}
 B_x(t) = \frac{3\mu M(t)}{4\pi} \cdot \frac{xz}{(r^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} \\
 B_y(t) = \frac{3\mu M(t)}{4\pi} \cdot \frac{yz}{(r^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} \\
 B_z(t) = \frac{\mu M(t)}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{(r^2 + a^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{3(r^2 - z^2)}{2(r^2 + a^2)^{\frac{5}{2}}} \right]
 \end{cases} \quad (2.13)$$