


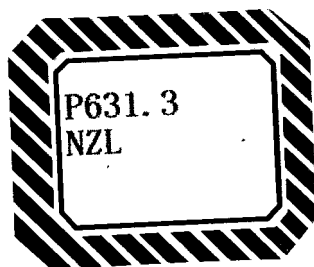
时间域电磁法原理

牛之琏 编著

 中南大学出版社

时间域电磁法原理

牛之琏 编著



中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

时间域电磁法原理/牛之珺编著. —长沙:中南大学出版社,
2007. 12

ISBN 978-7-81105-613-6

I. 时... II. 牛... III. 电磁法勘探 IV. P631.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 170642 号

时间域电磁法原理

牛之珺 编著

-
- 责任编辑 邓立荣
 责任印制 文桂武
 出版发行 中南大学出版社
社址:长沙市麓山南路 邮编:410083
发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482
 印 装 长沙市华中印刷厂
-

- 开 本 787 × 1092 1/16 印张 19.5 字数 489 千字
 版 次 2007 年 12 月第 1 版 2007 年 12 月第 1 次印刷
 书 号 ISBN 978-7-81105-613-6
 定 价 38.00 元
-

图书出现印装问题,请与经销商调换

内容提要

本书从应用的角度出发,阐述了有关时间域电磁法(即瞬变电磁法)的理论基础、方法技术和应用实例。全书分以下五篇:理论基础,瞬变电磁信号检测原理及仪器,剖面测量方法,测深方法,井中瞬变电磁方法。书中列举了笔者和合作者在勘查深部金属矿产及扩大应用领域方面取得效果的实例,也将近些年来与合作者合作的合作者提供的卓有成效的实例分成十个专题编入本书的附录。全书理论联系实际,从基本的电磁场理论(或物理概念)出发,深入浅出地论述了方法原理,充实和阐述了近代电子技术及计算机计算技术在仪器系统和数据处理、成图、解释软件等方面的应用及发展动向。本书反映了笔者及合作者20多年来的研究成果和业绩,同时精选了众多国内外文献和手册中的内容。本书可供地质、地球物理工作者,大专院校高年级学生,研究生等作为“电磁法勘探专题”的主要参考用书。

前 言

笔者分别于1985年和1993年主编出版了《脉冲瞬变电磁法及应用》和《时间域电磁法原理》两本书,也主编出版了两册译文集。实际上是我校与冶金部第一地勘局、新疆有色地勘局、湖南有色地勘局、华北有色地勘局、华东有色地勘局、湖南煤炭地质局、安徽煤炭地质局、长沙智通新技术研究所及长沙白云仪器开发有限公司等单位合作开发研究成果的总结。大量的理论研究、物理模拟、正反演计算程序、仪器研制、野外试验和实践应用实例等资料来自合作开发的成果。在近十几年中,笔者继续与冶金部第一地勘局、云南有色地勘局、湖南有色地勘局、山西煤炭地质局、核工业203所等单位合作继续开展方法技术野外试验研究和实践,在探测深部金属矿、地热勘查、勘查深层水、工程勘察、湖海水面作业勘查等方面取得成效,编制了用于实践的数据处理和半定量解释用的软件包。起草了《中华人民共和国地质矿产部行业标准——地面瞬变电磁法技术规程》。在仪器研制方面,协助白云仪器开发有限公司在原已经省部级鉴定并获湖南省科技创新金奖的SD-1瞬变电磁系统的基础上,改进成型为MSD-1瞬变电磁仪;并于1998年与杜其江高工、潘秋明研究员等合作,研制成功GPS信号同步中功率瞬变电磁仪。这些点滴成果都有待总结、充实、提高,在我国进一步推广应用时间域电磁法中发挥作用。

我国经济建设的快速发展,矿产、矿业、油气田、交通、电力、工程建设、环境保护、古建筑(古墓等)勘测等对应用地球物理提出了新需求,尤其需要适应勘查深部隐伏矿的需求。此外,在对煤矿生产至关重要的煤田水文地质勘查方面,瞬变电磁法已经成为了首选的物探手段。有鉴于此,近十年来,时间域电磁法在国内外备受青睐并得到很快发展,应用领域涉及方方面面,新技术、新观测系统不断涌现。不少合作者及同行朋友都提出需要重新编著一本适应于当前形势的需要的书。考虑了很久,笔者还是下定决心编写新版《时间域电磁法原理》一书,好在现在条件有所改善,可以上网查阅近几年所空缺的资料,此外还有众多合作者的支持。

本书从应用的角度出发,阐述讨论有关时间域电磁法的理论基础、方法技术和应用实例。全书分以下五篇:理论基础、瞬变电磁信号检测原理及仪器、剖面测量方法、测深方法和井中瞬变电磁方法。为了避免篇幅过大,一些电磁场理论的详细推导过程已删除,直接引用其结论,指明所引用的文献。建立在电磁感应原理基础上的时间域电磁法,二维、三维正反演方法(包括成像)所引用的仍然是经典理论推导结果的公式,人们引入了一些现代计算方法及技巧,把复杂的地质问题作了许多简化,成为诸多的方法。至今,这些方法应用于实践还存在许多问题,因此,书中仅作简要介绍,指明具有代表性的文献。另外,野外应用中,剖面测量和测深方法的资料整理和解释,通常并没有明显界线,有时剖面测量的结果可以整理出测深的图件,反之亦然;书中只是为了系统阐述方便而将其截开。在仪器方面,这些年国内外发展很快,书中重点叙述近代仪器检测原理;具体的仪器仅主要介绍Geonics公司的PROTEM系统等世界公认的一流仪器,使读者了解这类仪器的技术指标和突出优点,能够与其他各类仪器(可上网查询)有个对比。应用实例方面,精选了几位笔者和合作者在勘查深部

盲矿及扩大应用领域方面取得效果的例子,也将近些年合作者提供的不少实例分成十个专题编入本书的附录中。读者如在实践中遇到困难和问题,笔者非常乐意本着共同提高的目的,予以回答、协助和讨论。

书中引用了与笔者愉快合作长达 26 年的刘本浩教授级高工主持完成的三个实例,尤其是在资源严重危机的矿山——辽宁红透山矿区的应用实例引人注目,几年的工作使红透山矿的资源量增加了一倍;书中相当多篇幅内容也是共同合作研究的成果。张宪润教授、李凤初高工、刘本浩教授级高工、杨治元高工、黄秦高工、任光明老总、冯索夫高工、周国华工程师、王隆平博士(教授级高工)、叶英博士、潘秋明研究员、杜其江高工、卢军高工、李文尧教授、罗鉴凡高工、廖忠工程师、雷治远高工、沈长明高工、李爱华高工、宋先旺高工、孙紫英教授、刘国生高工等长期来与本人愉快合作,或协助笔者完成了多项课题。由长期从事电磁测深理论研究和二、三维正反演计算方法研究的资深学者陈明生研究员和闫述教授编写了《二、三维数值模拟原理及反演解释》及《局部导电体对地下瞬变场扩散的影响特征》两节。此书编写过程中,征求过李金铭、程方道、任怀宗、刘国栋等四位资深老教授的意见,与吕国印教授级高工、罗国平高工、朱献平高工、刘显跃教授讨论了若干技术难题,获益匪浅。

在此,深切怀念曹冰河教授级高工,他卓有成效地把时间域电磁法引入湖南,成功地开展了深部找矿的试验研究及投入勘查工作,论著颇多,贡献极大。

本书的出版得到北京欧华联科技有限责任公司、湖南有色地勘局、云南铜业勘查物化探公司及长沙白云仪器开发有限公司资助,得到中南大学信息物理工程学院席振珠等老师的支持,在此深表谢意。

本书涉及内容较多,着重于技术应用,适应于有一定实践经验和基础的读者,也希望对正准备开展该方法的读者有所帮助。为此,在文字上相当省略,期望能节省一些读者的宝贵时间。是否能达到预期效果,敬请读者评价、批评指正。

牛之琰

2007 年 5 月 1 日于中南大学

本书使用的部分符号及缩写词

1. 缩写词

| | | | |
|-------|-----------|------|---------|
| ЗС | 建场测深 | ЗСД | 远区建场测深 |
| ЗСБ | 近区建场测深 | ЧЗ | 频率测深 |
| МПП | 过渡过程法 | МППО | 共圈过渡过程法 |
| СМПП | 井中过渡过程法 | АМПП | 航空过渡过程法 |
| ВПИ | 感应激发极化 | КМА | 库尔斯克磁异常 |
| FEM | 频域电磁法 | TDEM | 时域电磁法 |
| TEM | 瞬变电磁法 | PEM | 脉冲电磁法 |
| INPUT | 感应脉冲瞬变电磁法 | TEMH | 钻井中电磁法 |
| Tx | 发送回线 | Rx | 接收回线 |
| Txp | 发送框的中心点 | POS | 板顶中心点 |

2. 符号

| | | | | | |
|-----------|----------------|----------|-------------|------------|-------------|
| Re | 实分量 | Im | 虚分量 | M | 感应偶极磁矩 |
| H | 磁场强度 | B | 磁感应强度 | E | 电场强度 |
| J | 电流密度 | I | 供电电流 | E | 电场或电偶极 |
| H | 磁场或探测深度、目的层的深度 | Φ | 磁通或概率积分 | B | 感应磁场 |
| $i(t)$ | 感应涡流 | $V(t)$ | 感应电压 | | |
| ρ | 电阻率 | σ | 电导率 | ϵ | 介电常数 |
| μ | 磁导率 | S | 纵向电导或回线面积 | δ | 趋肤深度或扩散深度 |
| η | 激发极化率 | t | 时间 | AB | 供电线 AB |
| MN | 测量电极 | L | 回线边长或电感 | Q | 发送回线面积 |
| q | 接收线圈有效面积 | τ | 时间常数或扩散参数 | r | 装置的偶极距或径向距离 |
| R | 发送回线半径或电阻 | M | 发送回线的磁矩或磁偶极 | j | 虚数 |
| t_{of} | 发送电流切断时间 | b | 板状体长边 | h | 深度或厚度 |
| a | 球体半径或板状体短边长度 | t_l | 进入晚期的时间 | T | 周期 |
| N | 线圈匝数 | n | 测道数 | β^2 | 球体的特征参数 |
| α | 矿体倾角或综合参数 | β | 相交角 | S/N | 信噪比 |
| φ | 走向角 | γ | 边缘角 | | |

上注标 Z 、 AB 表示垂直磁偶源、电偶源；

下脚标 x 、 y 、 z 、 φ 表示场的 x 、 y 、 z 、 φ 分量；

下脚标 τ 、 ω 、 s 表示时域，频域，直流电。

目 录

| | |
|--------------------------------------|-------------|
| 绪论 | (1) |
| 0.1 发展概况 | (1) |
| 0.2 工作装置 | (3) |
| 0.3 观测参数 | (5) |
| 0.4 时间域电磁法的特点和局限性 | (6) |
| 第 1 篇 时间域电磁法的理论基础 | |
| 第 1 章 激发场源 | (7) |
| 1.1 常用激发场波形及其频谱 | (7) |
| 1.2 观测信号波形的特征 | (8) |
| 1.3 发送波形参数对观测结果的影响 | (11) |
| 1.4 关断效应影响的计算 | (13) |
| 1.5 综合阐述 | (15) |
| 1.6 时间域与频率域电磁场之间的关系 | (16) |
| 第 2 章 层状大地的瞬变电磁场 | (18) |
| 2.1 瞬变电磁测深观测参数之间的关系 | (18) |
| 2.2 均匀半空间的瞬变电磁场 | (18) |
| 2.3 水平导电薄层上的瞬变电磁场 | (27) |
| 2.4 层状大地磁偶源的瞬变电磁场 | (30) |
| 2.5 层状大地电偶源的瞬变电磁场 | (33) |
| 第 3 章 局部导电体的瞬变电磁响应 | (37) |
| 3.1 高阻围岩中导电球体的瞬变电磁响应 | (37) |
| 3.2 局部导体晚期瞬变电磁场的等效计算 | (38) |
| 3.3 薄板状导体的瞬变电磁响应计算 | (41) |
| 3.4 其他局部导体瞬变电磁响应的近似计算 | (43) |
| 3.5 局部导体对地下瞬变场扩散的影响特征 | (45) |
| 第 4 章 物理模拟及数值模拟原理 | (49) |
| 4.1 物理模拟相似性准则 | (49) |

| | | |
|------------|-------------------------|-------------|
| 4.2 | 空气介质中物理模拟方法与技术 | (52) |
| 4.3 | 导电围岩条件下物理模拟的几个问题 | (56) |
| 4.4 | 二、三维数值模拟原理及反演解释 | (57) |
| 4.5 | 导电薄板瞬变电磁响应的数值解法 | (66) |
| 第5章 | 瞬变电磁场的附加效应 | (68) |
| 5.1 | 位移电流效应 | (68) |
| 5.2 | 接收线圈固有的过渡过程 | (69) |
| 5.3 | 集流效应 | (72) |
| 5.4 | 磁张弛效应 | (75) |
| 5.5 | 感应激发极化效应 | (84) |

第2篇 瞬变电磁信号检测原理及仪器

| | | |
|------------|-----------------------------|--------------|
| 第6章 | 瞬变电磁信号检测原理 | (88) |
| 6.1 | 瞬变电磁信号的特点 | (88) |
| 6.2 | 电磁噪声 | (89) |
| 6.3 | 硬件构成概述 | (93) |
| 6.4 | 检测方法原理 | (96) |
| 6.5 | 抑制电磁噪声的观测方法 | (103) |
| 第7章 | 时域电磁法仪器 | (106) |
| 7.1 | 航空 TEM 系统 | (106) |
| 7.2 | 加拿大 Geonics 公司的地面仪器系统 | (108) |
| 7.3 | 澳大利亚的地面仪器系统 | (111) |
| 7.4 | 加拿大 Crone 公司的地面仪器系统 | (112) |
| 7.5 | 使用连续波的仪器系统 | (113) |
| 7.6 | 可以观测瞬变电磁场的多功能电测站 | (114) |
| 7.7 | 应用于 LOTEM 方法的仪器系统 | (114) |
| 7.8 | 俄罗斯(包括前苏联)的时域电磁法仪器 | (115) |
| 7.9 | 国内 SD 系列仪器系统简介 | (116) |

第3篇 剖面测量方法

| | | |
|------------|----------------------|--------------|
| 第8章 | 同点装置方法 | (121) |
| 8.1 | 同点装置瞬变电磁场的时间特性 | (121) |
| 8.2 | 同点装置异常的剖面曲线特征 | (126) |

| | | |
|---------------------------------|-------------------------------|--------------|
| 8.3 | 地形影响 | (132) |
| 8.4 | 导电覆盖层的影响 | (134) |
| 8.5 | 导电围岩对异常的影响 | (138) |
| 8.6 | 影响瞬变电磁法探测深度的几种因素 | (140) |
| 8.7 | 工作技术 | (143) |
| 8.8 | 资料解释 | (150) |
| 8.9 | 实例分析 | (157) |
| 第9章 | 大定回线源及偶极装置方法 | (168) |
| 9.1 | 时域与频域异常剖面曲线特征的比较 | (168) |
| 9.2 | 大定回线源装置异常剖面曲线特征 | (170) |
| 9.3 | 偶极装置异常的剖面曲线特征 | (176) |
| 9.4 | 导电覆盖层和导电围岩的响应特征 | (179) |
| 9.5 | 几种常用装置的比较与选择 | (184) |
| 9.6 | 实例分析 | (186) |
| 第4篇 瞬变电磁测深方法 | | |
| 第10章 | 水平层状大地的测深 | (198) |
| 10.1 | 远区和近区瞬变电磁测深方法的比较 | (198) |
| 10.2 | 两层断面的 ρ_r 曲线特征 | (200) |
| 10.3 | 三层断面的 ρ_r 曲线特征 | (203) |
| 10.4 | 中心回线装置的 ρ_r 曲线特征 | (207) |
| 10.5 | 二、三层断面的 S_r 曲线特征 | (209) |
| 10.6 | 瞬变电磁测深方法的探测能力 | (212) |
| 10.7 | 瞬变电磁测深工作方法与技术 | (219) |
| 10.8 | 定性解释方法 | (223) |
| 10.9 | 半定量解释方法 | (226) |
| 10.10 | ρ_r 曲线的计算机一维反演方法概述 | (227) |
| 10.11 | 实例分析 | (229) |
| 第11章 | 非均匀层状大地上的测深 | (236) |
| 11.1 | 非水平层状大地上的测深 | (236) |
| 11.2 | 局部导体上的瞬变电磁测深曲线 | (239) |
| 11.3 | 实际断面的等效代替计算方法 | (242) |
| 11.4 | 实例分析 | (243) |

第5篇 井中瞬变电磁方法

| | |
|-----------------------------|-------|
| 第12章 井中瞬变电磁方法 | (249) |
| 12.1 井中瞬变电磁响应的模拟计算 | (251) |
| 12.2 井中瞬变电磁异常的一般特征 | (252) |
| 12.3 薄板状导体井中瞬变电磁响应的规律 | (258) |
| 12.4 井中瞬变电磁数据反演方法 | (265) |
| 12.5 实例分析 | (266) |
| 附录1 瞬变电磁法应用实例选编 | (268) |
| 附录2 TEM 应用软件的进展 | (285) |
| 参考文献 | (292) |
| 后 记 | (298) |

绪 论

时间域电磁法 (Time domain electromagnetic methods) 或称瞬变电磁法 (Transient electromagnetic methods), 都缩写为 TEM, 是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域人工源电磁探测方法。它利用不接地回线 (磁源) 或接地线源 (电偶源) 向地下发送一次脉冲磁场 (通常称为一次场), 在其激发下, 地下地质体中激励起的感应涡流将产生随时间变化的感应电磁场 (通常称为二次场)。由于二次场包含有地下地质体丰富的地电信息, 在一次脉冲磁场的间歇期间, 利用线圈或接地电极观测二次场 (或称响应场), 通过对这些响应信息的提取和分析, 从而达到探测地下地质体的目的。显然, 所研究的是响应场与时间的关系, 故称之为时间域电磁法。由于一次场和二次场均为瞬态场, 有时把该方法称之为瞬变电磁法, 俄国人称之为过渡过程法 (МПП, 为俄文过渡过程的缩写)。

频率域电磁法 (FEM) 也是建立在电磁感应原理基础上观测研究响应场的方法, 它研究的是响应场与频率的关系。TEM 与 FEM 的机理没有本质的不同, 两者都通过傅里叶变换关系相互关联, 在某些条件下, 一种方法的数据可以转换为另一种方法的数据。然而, 就一次场对观测结果的影响而言, 两者却截然不同, FEM 研究在一次场背景上的二次场, 地形、工作装置参数改变、地表层电阻率不均匀及一次场的背景值等都会对观测结果带来不可忽略的影响; TEM 则研究一次脉冲磁场的间歇期间的二次场 (纯异常响应), 大大地简化了对异常响应的研究, 具有更高的探测和分辨能力。

TEM 尽管有多类变种方法, 其数学物理基础都是基于导电介质在阶跃变化的激励磁场激发下引起的涡流场问题。剖面测量方法主要用于勘查良导电金属矿体、岩溶、工程基础等, 研究局部导体 (球体、板状体等) 的瞬变电磁响应问题。测深方法主要用于探测地层构造如勘查煤田、地下水、地热、油气田等, 研究水平层状大地的瞬变电磁响应问题。钻井中方法主要目的是探测深部导电地质体, 研究沿钻孔测量的异常响应规律。

下面, 就几个有关基础知识问题作概略叙述。

0.1 发展概况

时间域电磁法应用于探测地质构造问题起始于前苏联, 以 20 世纪 40 年代 А. Н. Тихонов 的理论研究为基础, 建立起试图探查油气田地地质构造的远区建场测深法 (ЗСБ), 它使用电偶源, 测点布置于离开电偶源距离为 r 的地点 (r 称之为装置的偶极距或径向距), 要求 $r \geq (4 \sim 6)H$ (H 为探测深度或目标层的深度), 用水平线框测量感应电压了解其过渡过程。20 世纪 50 年代以后, 由 В. А. Сидоров 和 В. В. Тикшаев 等人建立了近区建场测深法 (ЗСБ), $r \leq 0.7H$, 主要试图用于地震勘探方法勘查油气田时效果不好的地区。1969 年至 1972 年期间相继发表了六册理论计算曲线图册^[108] 及相关文献^{[12]、[13]}。20 世纪 80 年代出现供电电压达 850 ~ 1 000 V、供电电流可达 200 A、用 ЦЭС-3 数字接收站观测的系统, 引入了现代数据采集、处理和解释技术。在发展 ЗСБ 的同时期内, 由 Ю. В. Якубовский 和 В. Х. Коваленк 等人

创立了应用于矿产勘查的过渡过程方法 МПП, 制定出了适用于钻井、航空和海洋领域的方法技术。由 Ф. М. Каменецкий 主编的《金属物探过渡过程法应用指南》^[10] 及 В. А. Сидоров 专著《脉冲感应电法勘探》^[30] 反映了当时前苏联的应用水平。

在西方, 1951 年首先由 J. R. Wait 提出了利用瞬变电磁场法寻找导电矿体的概念, 他在示波器屏幕上观测到了如图 0-1 所示的波形。这种阶跃磁场 [图 0-1(b)] 使导体激发起涡流电磁场, 用接收线圈可以观测到瞬态感应电压, 图 0-1(c) 为纯一次场的感应电压衰变曲线, 图 0-1(d) 为纯导体涡流场所感生的感应电压衰变曲线, 图 0-1(e) 为两者总的感应电压衰变曲线。相继有多伦多大学(加)、美国地质调查所、犹它大学(美)、科罗拉多矿业学院(美)、澳大利亚联邦科学工业研究院(CSIRO)、澳大利亚矿物研究院(BMR)等单位投入研究, 知名学者及所发表的论文甚多, 本书参考文献中已列有其主要者, 例如 [6]、[33]、[34]、[36]、[37]、[42]、[54]、[55]、[64]。仪器系统方面, 1962 年加拿大 Barringer 公司的航空 INPUT 投入使用, 经不断改进至今仍是世界主要的航电系统之一。20 世纪 80 年代, 澳大利亚推出 GEOTEM 航电系统并且与 INPUT 系统作了对比^[98], 已经过了数十年的实践, 它是目前世界上使用最多的吊舱式电磁系统。加拿大 Aeroques 是直升机吊舱式电磁系统, 其独特的三分量探头具有很高的分辨能力, 也是较先进的系统。在 90 年代末, 澳大利亚七个单位(包括 WorldGeoscience 公司)联合, 经过多年的努力, 研制成多用途的 TEMPEST 系统和配套的软件, 它是轻型固定翼飞机吊舱式数字电磁系统, 它的特点是:

用先进的信号处理技术, 获得了很低的噪声水平。航空 TEM 系统在地下水的快速勘查方面已取得良好效果, 值得我国西部勘查地下水借鉴。地面仪器系统从 70 年代首次推出商品仪器以来, 跟踪当今电子器件、计算机、程控技术、计算方法和技巧等方面的飞速发展, 不断涌现出各类仪器, 经不断改进研制了不少高性能的仪器, 笔者将在第 7 章里介绍, 这里不再赘述。

在我国, 于 20 世纪 70 年代初开始开发研究 TEM, 先后投入研究的单位有: 长春地质学院(现吉林大学)、中国地质科学院物化探勘查研究所、桂林有色矿产地质研究院、中南工业大学(现中南大学)、西安地质学院(现长安大学)、西安交通大学、北京有色矿产地质研究院、中国地质大学等。国内学者主编的主要书籍有(按时间顺序): 朴化荣《电磁法测深原理》, 牛之珪《时间域电磁法原理》, 方文藻《瞬变电磁测深原理》, 蒋邦远《实用近区磁源瞬变电磁法勘探》, 李貅《瞬变电磁测深的理论与应用》。出版的译文专辑甚多, 主要有文献 [10]、

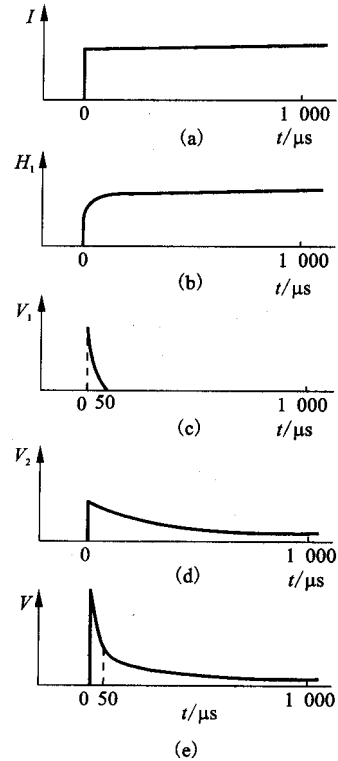


图 0-1 瞬变电磁场示波观测波形图

(a) 发送框供电电流; (b) 一次磁场; (c) 接收框中的一次感应电压; (d) 接收框中导体涡流场的感应电压; (e) 接收框中总场的感应电压

[11]、[12]、[13]、[64]、[67]、[108]。近期国内期刊发表的论文更多,笔者查阅过的有200多篇,读者可以上网查阅。仪器方面,继80年代末出现并已经省部级鉴定的WDC系列、SD系列之后,近十多年又涌现出大量的研制产品,据笔者不完全统计,有ATEM-Ⅱ等12类之多。但是这些众多仪器多数为与澳产SIROTEM-Ⅱ、Ⅲ相类似的“收发一体机”,尽管也有利用GPS同步的分体式仪器,笔者认为在当前,研制出较高水平的仪器仍然是当务之急。二、三维的正反演问题(包成像技术),国内投入研究者众多,发表的论文也多,但是在短期内投入实践应用的可能性不大,笔者希望能有一些人在投入到基础理论研究时我也去探讨方法技巧,并重视与其他物探方法的综合应用。

0.2 工作装置

按TEM应用领域可以把工作装置分为四类。

(1)剖面测量装置。常用的剖面测量工作装置如图0-2所示。它是常用来快速勘查有限导电体(金属矿产、岩溶、断层等)的装置,分同点、偶极和大定回线源三种。同点是指发送回线(Tx)与接收回线(Rx)的中心点相重合之意,当Tx与Rx相重叠时称为重叠回线装置,当Rx使用小线圈时称为中心回线装置;它与探测对象有最佳的耦合,所获得的异常简单而

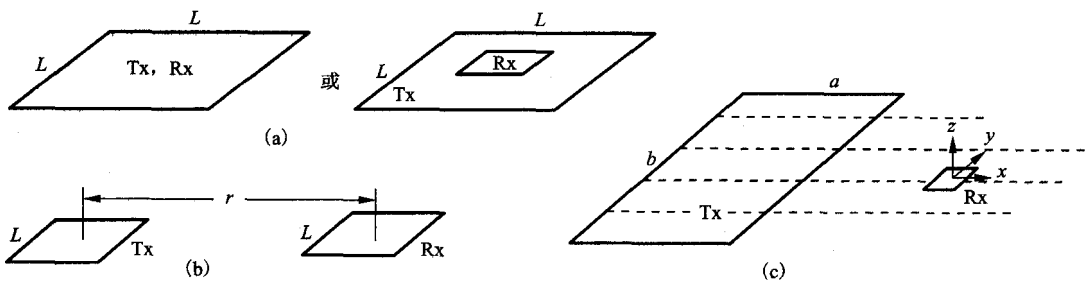


图0-2 TEM剖面测量装置

(a)同点装置;(b)偶极装置;(c)大定回线源装置

且幅度大,是“一体机”仪器使用的主要装置。如图0-2(b)所示,当Tx与Rx相分离,保持固定收、发距 r (或称偶极距),沿测线逐点移动的装置称为磁偶源偶极装置,Rx用多匝小线圈观测磁场三个分量的感应电压值,有时Rx移动数点后再移Tx,它是70年代仪器常用的装置,由于探测深度小加上野外施工不便,现在已很少使用。图0-2(c)所示为大定源回线装置,Tx采用边长达数百米的矩形回线,Rx采用小线圈沿垂直于Tx长边的测线逐点观测磁场三个分量的感应电压值,为了提高效率,通常在Tx框内外都观测。在工程勘查中,Tx用大定源回线,Rx在框内加密测点观测垂直分量也是常用的装置,在干扰电平较低的情况下,建议也观测水平分量,两个分量的资料综合解释有利于判断探测对象的几何形态。探测对象产状直立或较小的情况下,为了加强对探测对象的激励磁场,有时也采用双线框重叠回线装置^[64],相对于上述单框重叠回线装置的异常更为简单和幅度增大。

(2)测深装置。测深装置如图0-3所示。中心回线装置是当探测深度在1 km以内时最常用的装置,一般点距等于回线边长 L ,Rx用多匝小线圈水平放置(只测垂直分量);详查

时, T_x 可以用矩形框, 在中心线 $1/3$ 段内布置 $3 \sim 5$ 个观测点, 相邻 T_x 可相重叠 50% 以内使观测点相连续。磁偶源偶极装置有时用于探测深度在几十至几百米以内的湖海面作业, 工作方法与磁偶源剖面测量装置相同。电偶源或线源装置用于探测深度在 1 km 以上的情况, 偶极距 r 选择大约等于目标层的深度, 测线平行于 AB , R_x 用多匝线圈水平放置观测 V_z^{AB} 。电偶源或线源装置用于油气田勘查时, 用 $r \geq (4 \sim 6)H$ (H 为探测深度或目标层的深度) 的装置, 在俄国称为远区建立场测深法 (ЗСД); 在西方国家称为 LOTEM (Long Offset Transient EM); 观测 V_z^{AB} 及 E_ϕ^{AB} 两个参数。

(3) 钻井中观测的装置。钻井中观测的工作装置 (TEMH), 其目的在于探测分布于钻孔附近的深部目标。如图 0-4 所示, 当勘查区有彼此相靠近的多个钻孔的情况下, 一般只敷设一个较大的 T_x , 接收线圈 (探头) 分别沿各个钻孔逐点移动观测磁场沿井轴分量的感应电压值。仅有单个钻孔的情况下, 需要在不同方位敷设多次 T_x , 逐次沿该钻孔逐点移动观测磁场沿井轴分量的感应电压值。从观测结果的分析, 可以获得探测目标形态、产状和位置等信息。

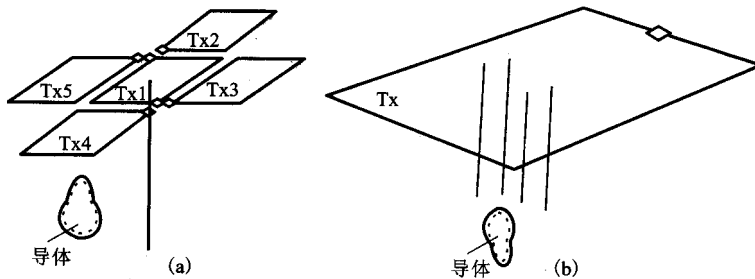


图 0-4 钻井中的工作装置

(a) T_x 单孔观测; (b) 单个 T_x 多孔观测

近些年来, 我国着手研究适用于矿坑的 TEM 方法, 目的在于探测分布于坑道附近的目标, 更主要的目的是试图解决矿坑涌水灾害的“超前探”问题。已取得了明显的地质效果, 相对于其他方法具有它突出的优点。由于在矿坑观测受施工空间和条件的限制面对更复杂的难题还有待解决。

(4) 航空装置。航空 TEM 系统的发送线圈安装于机身上, 三分量接收线圈及前置放大器安装在吊舱内, 吊舱用电缆拖拽在飞机的后下部。按照飞行高度可以分为高、低空飞行两类, 分别在 2400 m 以上及 150 m 以下的高度飞行。图 0-5 为低空系统的示意图。航空 TEM 方法主要应用于大面积范围内快速普查良导电矿产、勘查地下水资源及地质填图。在山区大面积普查, 适于选用高空飞行的系统; 在地形崎岖地区的详查, 适于选用低空飞行的直升飞

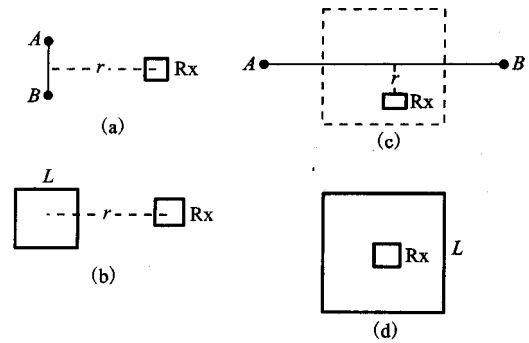


图 0-3 TEM 测深工作装置

(a) 电偶极源; (b) 磁偶极源; (c) 线源; (d) 中心回线

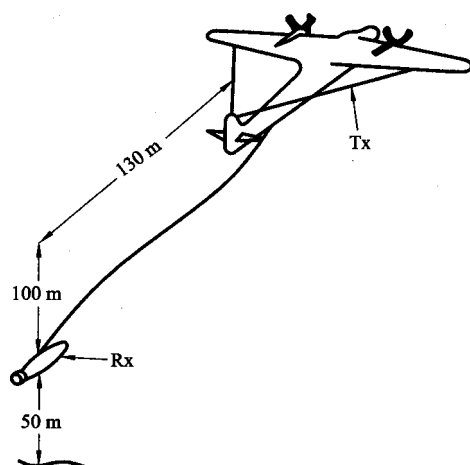


图 0-5 航空 TEM 系统示意图

机系统。在我国西部矿产资源及地下水资源的勘查中，它会大有用武之地，不少学者预言将来有可能会替代地面系统^[67]。

0.3 观测参数

TEM 仪器系统的一次场波形、时窗范围、测道数和相对应的时间、仪器的原始观测参数和计量单位等，各厂家的仪器之间有所差别。尽管传感器（接收线圈）输入仪器前置放大器的都是感应电压 $V(t)$ 值，就经过仪器处理后所输出的参数（观测参数）及计量单位而言，大概可以分为 4 类。

(1) 用发送脉冲电流幅值归一化的参数：仪器输出的读数为 $V(t)/I$ 值，以 $\mu\text{V}/\text{A}$ 作计量单位。多数“一体机”使用此参数。

(2) 用一次场的感应电压 V_1 归一的参数：这里的 V_1 是一次场刚刚将要切断时刻所采样的感应电压值，假设 $V_1 = 1000$ ，输出值 $R_c = V(t)/V_1$ ，无计量单位。加拿大 Crone 公司的 PEM 系统使用此参数。

(3) 未归一的 m 参数：仪器输出值 $m = V(t) \cdot G \cdot 2^n$ ，式中 G 为前置放大器加上固定了倍数的后置级的放大倍数之和， 2^n 为仪器公用通道程控放大器的放大倍数， $n = 1, 2, 3, \dots, 7$ ， m 值以 mV 计量。加拿大 Geonics 公司的 PROTEM 系统使用此参数，取 $G = 52.1$ 。

(4) 感应磁场 B 值：仪器输出 B 值，以 pW/m^2 或 nW/m^2 计量。澳大利亚 ARTEMISTM 系统使用此参数。

在后续的数据处理中，无论用上述的哪种参数，一般都要换算成瞬变值 $\dot{B}(t)/I$ ，以 $\text{nV}/(\text{m}^2 \cdot \text{A})$ 计量。

$\dot{B}(t)/I = [\text{dB}(t)/\text{dt}]/I = V(t)/qI$ 。这里 q 称为接收线圈的有效面积， $q = S_R \cdot N$ ； S_R 、 N 分别表示接收线圈的面积、匝数。

(1) 由 $V(t)/I$ 值换算成 $\dot{B}(t)/I$ 的公式为： $\dot{B}(t)/I = [10^3 \cdot V(t)/I]/q$ ；

(2) 由 V_m 值换算为 $\dot{B}(t)/I$ 的公式为： $\dot{B}(t)/I = [V_m \cdot 10^6]/qG2^n = 19\,200 \cdot V_m/q2^n$ ；

(3) 由 RC 换算为 $\dot{B}(t)/I$ 的公式为: $\dot{B}(t)/I = 6RC \times 10^6 / GAq2^n$, 式中 A 为前置放大倍数, G 为接收机固定了倍数的后置级的放大倍数, 2^n 表示各测道的放大倍数, 各测道的 n 值不一致(有对照表); 乘以 6×10^6 是因为取一次场归一值 $V_1 = 6 \times 10^6 \mu\text{V}$, 而取读数值是 1 000。

此外, 由瞬变值 $\dot{B}(t)/I$ 可以用一系列的公式导出许多参数, 例如视电阻率 ρ_r (以 $\Omega \cdot \text{m}$ 计量)、视纵向导 S_r (以西门子 S 计量)、视时间常数 λ_r (以 ms 计量)、磁感强度 $B(t)$ (由对 $\dot{B}(t)$ 值取积分而得, 以 pW/m^2 计量) 等。导出参数还不只这些, 有可能找到更适用的参数, 待读者去探索。

0.4 时间域电磁法的特点和局限性

由于 TEM 是在没有一次场背景情况下观测二次场, 相对于 FEM 等方法有以下几个方面的特点。

(1) 主要噪声来自外界的天电和人文电磁场干扰, 可以采用提高功率 - 灵敏度的方法增大信噪比, 以展宽时窗(延长有用测道)提高探测深度, 实现用较小的装置探测较大深度的探测目标。

(2) 可使用同点装置工作, 与探测目标有最佳的耦合, 可以得到形态简单和幅度较强的异常, 探测深度大, 分辨能力强, 更适合于对深部目标的勘查。

(3) 在高阻围岩条件, 没有地形起伏引起的假异常; 在低阻围区, 地形、覆盖层等地质噪声(假异常), 从多测道的观测结果中易于识别, 能与深部目标的响应相分离。

(4) 相对于 FEM、直流电法而言, 对测地布点的要求可以放宽。野外工作既快又简单, 工作效率高。

(5) 相对于 FEM 及直流电法, 穿透和分辨低阻覆盖能力强, 无高阻屏蔽现象。

(6) 可处理绘制的图件花样多, 反映地电体的信息丰富。

由于有以上所述的特点, 它备受人们青睐, 可以称得上是“探测矿产的尖兵”、“工程勘察的好帮手”、“水源勘查的锐利武器”。但是, TEM 总归是基于地电体之间电阻率差异的有源测量方法, 有它的局限性。首先, 要求足够强的供电电流, 尤其是在探测深部目标时所要求的设备较笨重、装置大, 野外劳动强度大, 工效低。噪声干扰往往使晚期测道利用受限制, 影响了对深部目标的探测能力。异常具有多解性, 量化解释水平低, 尚不能适应需要。因此, 有许多问题有待探索和研究。