



中国地质调查局地质调查技术标准

DD 2019-11

地-井瞬变电磁法技术规程

Technical specification for borehole transient electromagnetic method

自然资源部中国地质调查局

2019年11月

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义、符号和计量单位	1
3.1 术语和定义	1
3.2 符号和计量单位	1
4 总则	2
4.1 应用对象	2
4.2 应用条件	2
4.3 工作装置	2
5 技术设计	2
5.1 工作任务	2
5.2 资料收集	3
5.3 方法有效性分析	4
5.4 技术参数选择	4
5.5 工作精度设计	5
5.6 电阻率参数测定	6
5.7 设计书编写	6
6 仪器设备	7
6.1 发送系统	7
6.2 接收和下井系统	7
6.3 使用与维护	7
7 野外工作	8
7.1 施工准备	8
7.2 发送系统布设	8
7.3 井场布设	8
7.4 观测与记录	8
7.5 质量检查与评价	9
7.6 野外资料验收	10
7.7 安全与防护	10
8 资料整理与图件编制	11
8.1 资料整理	11
8.2 图件编制	11

9	资料解释	12
9.1	基本要求	12
9.2	异常识别	12
9.3	定性解释	12
9.4	定量解释	12
9.5	综合地质解释	13
10	报告编写与资料提交	13
10.1	编写要求	13
10.2	主要内容	13
10.3	主要图件	14
10.4	资料提交	14
附录 A	(资料性附录) 地—井瞬变电磁法坐标系与一次磁场	15
附录 B	(规范性附录) 地—井瞬变电磁法野外工作记录表	20
附录 C	(资料性附录) 地—井瞬变电磁法工作流程	21
附录 D	(资料性附录) 地—井瞬变电磁法典型异常特征	23
附录 E	(资料性附录) 地—井瞬变电磁法定量解释技术及应用实例	26
	参考文献	33

前 言

本标准遵循 GB/T 1.1-2009 《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本标准由自然资源部中国地质调查局提出。

本标准由自然资源部中国地质调查局归口管理。

本标准起草单位：中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。

本标准起草人：邓晓红、张杰、武军杰、王兴春、杨毅。

本标准由自然资源部中国地质调查局负责解释。

地一井瞬变电磁法技术规程

1 范围

本标准规定了地一井瞬变电磁法的技术设计、仪器设备、野外工作、资料整理与图件编制、资料解释、报告编写与资料提交等方面的技术要求和操作方法。

本标准适用于金属矿产勘查中的地一井瞬变电磁法工作。能源、非金属矿产、水文地质及工程地质等勘查中的地一井瞬变电磁法工作亦可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件，凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14499 地球物理勘查技术符号

DZ/T 0069 地球物理勘查图图式、图例及用色标准

DZ/T 0153 物化探工程测量规范

3 术语和定义、符号和计量单位

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

地一井瞬变电磁法 borehole transient electromagnetic method

地一井瞬变电磁法是基于电磁感应原理，通过分析井中瞬变电磁响应，研究异常体可能的赋存空间展布，从而探测地下目标体的一种电磁方法。

3.1.2

轴向分量 axis component

沿钻孔井轴方向的井中瞬变电磁响应分量，规定其响应值沿井轴指向上为正。

3.1.3

径向分量 radial components

垂直钻孔井轴方向的两个正交井中瞬变电磁响应分量，其中分量 U 指向钻孔倾向方向，分量 V 的方向由右手法则确定。

3.1.4

归一化感应电动势 normalized induced electromotive force

对所观测的井中瞬变电磁响应进行接收面积和发送电流归一获得的值。

3.2 符号和计量单位

地—井瞬变电磁法符号和计量单位见表 1。

表1 符号和计量单位

序号	符号	名称	计量单位	备注
1	T_X	发送系统	/	或发送回线
2	R_X	接收系统	/	或接收探头
3	L	发送回线边长	m (米)	
4	f	发送电流基频	Hz (赫兹)	
5	I	发送电流强度	A (安培)	
6	dB/dt	感应电动势	nT/s (纳特每秒)	接收面积归一, 计量单位等同于nV/m ² (纳伏每平方米)
7	t	采样道中心时间	ms (毫秒)	
8	$V(t)$	感应电压	nV/m ² (纳伏每平方米)	或观测值, 接收面积归一
9	dB/dt	归一化感应电动势	nV/(m ² A) (纳伏每平方米每安培)	接收面积和发送电流归一
10	M	均方相对误差	% (百分数)	
11	ε	均方绝对误差	nV/m ² (纳伏每平方米)	接收面积归一
12	A	轴向分量	nV/m ² (纳伏每平方米)	接收面积归一
13	U, V	径向分量	nV/m ² (纳伏每平方米)	接收面积归一

4 总则

4.1 应用对象

地—井瞬变电磁法主要用于发现钻孔旁一定范围内的电阻率异常目标体, 确定目标体埋藏深度、距钻孔的距离和方位; 预测钻孔底部目标体, 估算埋藏深度; 追踪钻孔已见目标体的延伸方向。

4.2 应用条件

4.2.1 目标体与围岩存在明显的电阻率差异。

4.2.2 钻孔周边一定范围内的目标体在孔中能够引起可分辨异常。

4.2.3 钻孔内通行畅通、安全且其附近地形地貌条件适合发送回线及台站的布设。

4.3 工作装置

地—井瞬变电磁法的工作方式是将发送回线布置在钻孔上方或其附近地面上, 向地下发送双极性一次脉冲电磁场, 接收探头在供电间隙沿钻孔逐点测量地下地质体感应产生的瞬变电磁响应 (见图 1)。野外常用工作装置一般分为两种, 即多方位发送回线装置 (见图 2) 和单发送回线装置 (见图 3)。

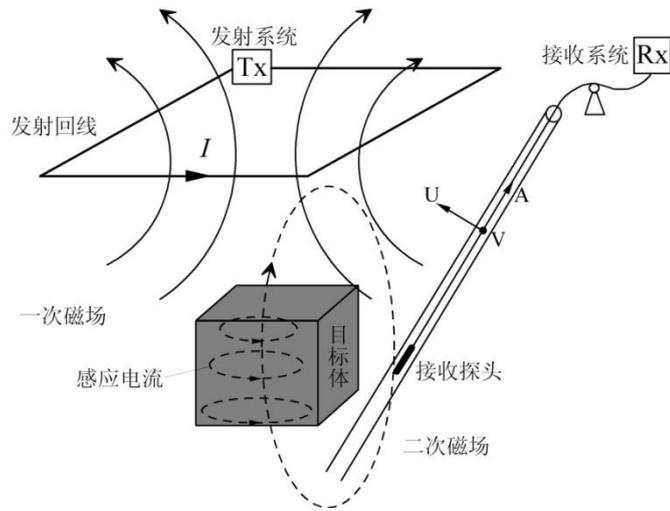


图1 地一井瞬变电磁法工作原理示意图

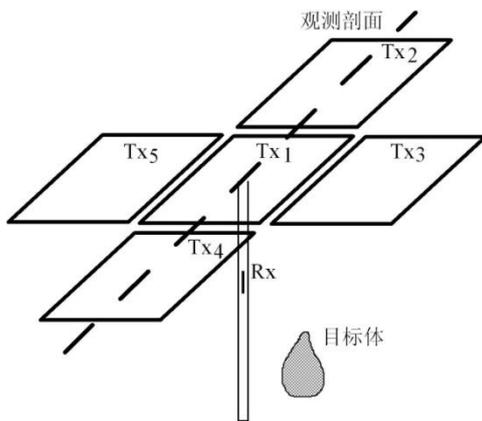


图2 五方位发送回线装置示意图

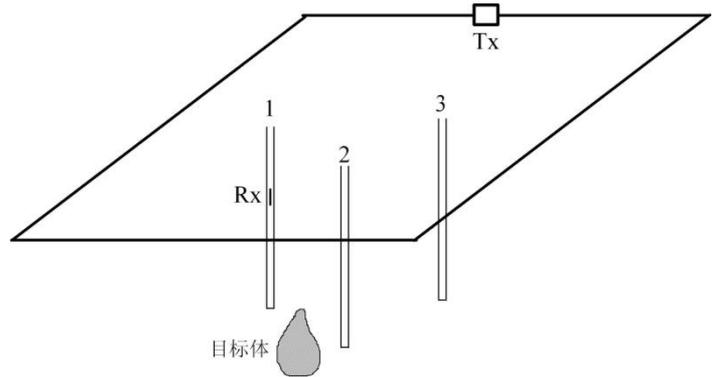


图3 单发送回线装置示意图

5 技术设计

5.1 工作任务

依据任务书或合同规定的目标任务，明确地一井瞬变电磁法工作探测的具体目标体并细化相关要求。

5.2 资料收集

5.2.1 根据工作任务要求，收集工区以下有关资料：

- a) 人文、气象、通视及交通运输条件等资料，尤其是工区地形、地貌、水系、土壤、植被等与发送框可敷设性有关的资料；
- b) 与工作任务有关的地质、物探、化探、勘查工程及测绘等资料，尤其是工区的电阻率物性参数和电阻率测井资料；

- c) 钻孔资料主要包括钻孔安全、孔深、孔径、倾角、倾向、方位、井液性质及岩芯资料等。
- 5.2.2 当收集到的资料不能满足技术设计要求时应进行野外踏勘，踏勘的目的：
- a) 了解工区地形、地貌、植被、通视及交通运输条件等；
 - b) 核对收集到的地质、物探、化探、测绘及钻孔情况等资料，并依据实际情况补充收集符合性不好的资料。
- 5.2.3 踏勘后应结合收集到的资料进行分析，然后做出如下判断：
- a) 在认定方法有效和可行性后方可转入设计书编写阶段；
 - b) 当方法有效性不能确定时则应开展专门的方法有效性试验。

5.3 方法有效性分析

5.3.1 依据下列资料进行方法有效性分析：

- a) 相邻工区或其它条件类似地区的实际工作成果；
- b) 必要时进行正演模拟或（和）方法有效性试验；
- c) 野外现场踏勘结果，尤其是目标体的规模、形态、电性特征以及人文干扰情况等；
- d) 以往的勘查经验。

5.3.2 正演模拟计算应包括下列内容：

- a) 正演模拟的模型应根据勘查目标体及周围介质的电阻率、勘查目标体可能的空间展布等参数按相似性原则来设计，或者选择该区典型地电断面来设计；
- b) 正演模拟应选择合适的工作装置及技术参数和正演计算方法，并提出正演模拟计算的各种技术要求和精度指标；
- c) 得出明确的有关有效性和参数选择的结论，并提供正演模拟结果资料。

5.3.3 方法有效性试验应符合如下要求：

- a) 试验钻孔应选在地形和目标体均具有代表性的地区；
- b) 试验时宜采用多方位发送回线装置。观测后应分析已知目标体的异常响应特征，主要包括异常强度、形态、时间特性等，得出明确的有关有效性和参数选择的结论。
- c) 方法有效性试验应在设计前完成；选择观测参数的试验应在正式测量前完成。

5.4 技术参数选择

5.4.1 发送回线位置的设计，应综合考虑地下目标体可能的赋存空间与发送回线一次磁场方向之间的关系（见图4），尽量使发送回线与地下目标体处于“最佳耦合”状态，参见附录A。

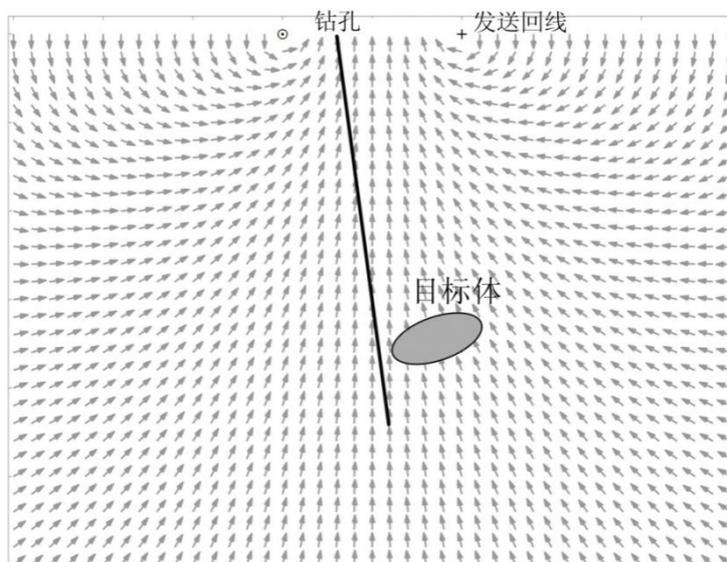


图 4 发送回线主剖面一次磁场方向分布断面图

5.4.2 发送回线边长大小的选择，应根据具体任务、钻孔深度、目标体与围岩电性参数以及发送系统性能等情况综合确定，必要时可采用数值模拟或（和）野外试验来确定。原则上应考虑足够大的发送磁矩，以确保接收信噪比足够大。一般情况下，孔深小于 500 m 的钻孔，发送回线边长 L 宜为 50 m ~ 200 m；孔深 500 m ~ 1000 m 的钻孔，回线边长 L 宜为 100 m ~ 400 m；孔深大于 1000 m 的钻孔，回线边长 L 最小为 200 m。

5.4.3 发送磁矩极性即发送电流方向的确定，应确保在每个发送回线中心附近观测到的垂直分量瞬变响应值为正值。

5.4.4 发送电流基频 f 的选择，取决于钻孔周围目标体规模及与围岩电性差异的变化范围，应通过现场试验或数值模拟来确定。发送电流基频 f 宜与工业电流的频率成偶数倍。

5.4.5 发送电流强度的选择，应综合考虑发射机性能、钻孔深度、回线电阻大小等因素，在条件允许的情况下尽量增大发送电流强度，实际发射功率应控制在发射机额定功率的 75% 以内。

5.4.6 发送电流关断时间应通过现场试验确定，并在接收机中正确设置。

5.4.7 采样叠加次数应依据野外现场实测的电磁噪声水平和干扰特征经试验后确定。

5.4.8 测量点距的选择，原则上应保证能够清晰完整地反映异常细节。一般选择 5 m ~ 10 m，可根据钻孔井段是否存在异常适当加密或放稀。在有异常的井段应加密至 1 m ~ 3 m，在背景的井段可放稀到 10 m ~ 20 m。

5.4.9 上述 5.4.1 ~ 5.4.8 为技术参数的初步设计，开工前应进行检验性试验，并依据试验结果进行相应的调整。

5.5 工作精度设计

5.5.1 在设计地一井瞬变电磁法的工作精度时应遵照下述要求：

- a) 能够观测与分辨勘查对象所产生的最弱异常，一般应使最大误差的绝对值小于任何有意义异常的 1/3；
- b) 根据仪器的技术性能合理设计，精度要求不应超过现有仪器设备所能达到的精度。

5.5.2 工作精度按照轴向分量 A 和径向分量 U、V 分别采用均方相对误差和均方绝对误差来衡量，分级列于表 2。

表2 工作精度分级表

级别	轴向分量 A		径向分量 U、V	
	均方相对误差 (观测值 ≥ 30 nT/s) %	均方绝对误差 (观测值 < 30 nT/s) nT/s	均方相对误差 (观测值 ≥ 30 nT/s) %	均方绝对误差 (观测值 < 30 nT/s) nT/s
	A	±5	±5	±10
B	±10	±10	±15	±15

5.5.3 工作精度以满足任务要求、取得较好探测效果为前提，兼顾经济效益来选择某一观测精度或在精度 A、精度 B 之间的中等精度。

5.5.4 测地工作精度要求

- a) 发送回线角点点位的测地误差应小于5 m，实际发送面积可由全球定位系统导航航迹获得。测地工作的技术细节参照GB/T 18314 和 DZ/T 0153 规定执行。
- b) 钻孔深度的定位总误差应小于井深的 0.2 %。

5.6 电阻率参数测定

5.6.1 凡属新区开展工作，应对区内目标体和各类围岩进行电阻率参数测定。

5.6.2 原则上应采用电阻率测井法测定目标体和各类围岩的电阻率，也可根据工区实际情况采用露头法、标本法等电阻率参数测定方法开展工作。

5.6.3 目标体及每类围岩样品的数量不少于 30 块。应满足测定条件，保证数据质量，标本测定相对误差应小于 20 %。

5.7 设计书编写

5.7.1 设计书内容

5.7.1.1 前言

主要包括：

- a) 项目来源；
- b) 工作目的任务（具体到探测目标体）；
- c) 工区地理位置、范围及自然地理与交通概况等。

5.7.1.2 工区地质及地球物理特征

主要包括：

- a) 工区以往地质、物探工作程度、主要成果及存在的问题；
- b) 地质特征包括地层、构造、岩浆岩、矿产等；
- c) 电阻率物性参数统计表、电阻率测井资料等；
- d) 列举工区地质简图、物探工作程度图、地质—地球物理模型图等；
- e) 分析地—井瞬变电磁法探测具体目标体的有利和不利条件，以及完成工作任务的可能性。

5.7.1.3 工作方法技术

工作方法技术应包括：

- a) 明确工作区具体范围及位置；
- b) 测地方法、仪器设备及技术要求；
- c) 选用的地—井瞬变电磁设备，工作装置的确定及依据，技术参数的选择及依据；
- d) 野外观测技术与质量要求及依据；
- e) 资料整理与图件编制要求；
- f) 数据处理与解释软件介绍及技术要求；
- g) 资料解释的原则、方法及保证成果质量的措施。

5.7.1.4 工作安排

工作安排主要包括：

- a) 列出野外工作及室内各项工作的进度安排；
- b) 明确地—井瞬变电磁法与测地、地质等工作的配合关系和程序，以及保证合理配合的措施。

5.7.1.5 实物工作量

列出为完成目标任务设计的实物工作量。

5.7.1.6 预期成果

列出提交的预期成果资料（数据、图件、报告等）内容及时间。

5.7.1.7 组织机构及人员安排

说明组织管理情况、项目组成员在项目中的分工及工作时间等。

5.7.1.8 经费预算

编制经费预算说明和经费预算表。

5.7.1.9 质量保障与安全措施

说明保证工作质量、工作安全（人员及仪器）的措施。

5.7.1.10 有关附图（交通位置图、工作布置图、地质简图等）及附表。

5.7.2 设计书审查与审批

设计书由编制单位初审，工作任务下达单位组织审查与审批，未经审批的设计书不得实施。

5.7.3 设计书变更

在设计执行过程中，如遇不可抗拒因素、设计时未曾预料到的新情况或发现原设计有不当之处，应及时向工作任务下达方提请变更。变更内容和依据应逐一列举，经批准后方可实施。

6 仪器设备

6.1 发送系统

6.1.1 应根据任务需要选择功率大小恰当的发射机。一般情况下，钻孔观测深度在 500m 以内时可选用发送电流强度大于 10 A 的发射机；当钻孔观测深度大于 500 m 时宜选用发送电流强度大于 20 A 的发射机。

6.1.2 选用发电机时，其输出频率和额定电压应符合发射机要求。发电机的输出电压变化应不超过 $\pm 5\%$ ，供电线路与外壳间的绝缘电阻应大于 $5\text{ M}\Omega / 500\text{ V}$ 。选用电池组时，发送电流应保持稳定。

6.1.3 地面发送回线应选用内阻小、绝缘性能好、轻便、强度高的导线。当供电电压为 500 V 时，供电导线的绝缘电阻应不小于 $2\text{ M}\Omega / \text{km}$ 。不能使用绝缘外层磨损、漏电的导线。

6.2 接收和下井系统

6.2.1 接收机要求性能稳定，输入阻抗应大于 $10\text{ M}\Omega$ 。

6.2.2 要求下井探头性能稳定，水平分量探头定位精度高，能耐相应探测深度井下的高温高压。

6.2.3 绞车系统的电缆应整齐有序地排列在绕线盘上，电缆长度应大于钻孔深度 100 m 以上。

6.2.4 下井电缆应能承受大于 300 kg 重物，电缆对地的绝缘电阻应不小于 $2\text{ M}\Omega / 500\text{ V}$ 。

6.2.5 应配备模拟假探头，其外形、大小和重量要与真探头相近，供测试钻孔内通行情况之用。

6.3 使用与维护

6.3.1 所有仪器设备应指定专人负责，建立档案，按照说明书的规定使用、维护和管理。

6.3.2 仪器设备必须存放在阴凉、通风、干燥、无腐蚀性气体、无强磁场的地方，使用和运输时要注意保持仪器清洁、干燥、防震、防静电、防曝晒。

6.3.3 应按照仪器说明书的要求定期对仪器充电。

- 6.3.4 非生产期间，所有仪器均应每个月进行一次通电检查，并将检查结果存入仪器档案。如发生故障，应及时详细地记录仪器故障情况和处理结果等。
- 6.3.5 每个工区开工前和收工后，应对仪器设备进行一次全面检查、维护和校准。
- 6.3.6 仪器在施工期间，除日常维护保养外，每日施工前后，应按照仪器说明书的要求对仪器性能进行检查。
- 6.3.7 仪器设备所配备的零部件、备件及工具要随仪器妥善保管，不得挪作它用。

7 野外工作

7.1 施工准备

- 7.1.1 去井场前应有专人对仪器设备进行校验，各项技术指标应符合说明书要求，应清点所需仪器设备、工具、材料、资料等。
- 7.1.2 发送台站和井场应配备雨伞、防雨帆布及通讯、照明等设备。
- 7.1.3 应与有关人员制定事故防范和应急措施。
- 7.1.4 雷雨天气不应开展工作，阴雨、湿度很大时不宜开展工作。

7.2 发送系统布设

- 7.2.1 发送台站应布设在地势平坦、视野开阔、交通方便、便于与接收站联系的地方，并离开高压线、变（配）电站 30m 以上。
- 7.2.2 发射机、发电机（或电瓶）等仪器设备应放置在通风位置，清理发送台站周围的易燃、易爆物品。
- 7.2.3 按照理论坐标及导航参数使用全球定位系统导航布置发送回线，记录其实际坐标，计算实际发送面积。
- 7.2.4 敷设发送回线时导线应尽可能避开现场的金属物体至少 5 m 以上，更不能直接相交。不得将剩余导线留在绕线架上，应将其呈“S”型铺于地面。布线时允许在方向线左右有所摆动，但摆动幅度不得大于发送回线边长的 5 %。导线联接处应接触良好，严禁漏电。
- 7.2.5 当导线通过水田、池塘、河沟时应予架空，防止漏电；当导线横过公路时应架空或埋于地下，以防绊断压坏。架空的导线应拉紧防止随风摆动。

7.3 井场布设

- 7.3.1 布设前应清理井场，使钻台前有 10 m 以上的开阔地，钻探器材堆置不应影响车辆的进出及就位。
- 7.3.2 在井场应妥善安放仪器设备，牢固绞车和井口滑轮，两者应保持一定的通视距离，并使井口滑轮与绞车滚筒轴线中央保持垂直，以防下井电缆跳出轮槽。
- 7.3.3 若使用电动工具操作绞车时，应检查各开关接口及电缆是否良好，发现问题应及时处理或更换。
- 7.3.4 若使用发电机供电应妥善将其固定，检查传动皮带的质量和接口是否良好，发现皮带质量或接口不良时应及时处理或更换。
- 7.3.5 接收机位置应离开绞车 3 m 以上距离。发电机位置应离开接收机和绞车 10 m 以上距离。

7.4 观测与记录

- 7.4.1 每天下井测量前必须用模拟探头测试钻孔内通行情况，待通行无阻后方可放入真探头进行观测。
- 7.4.2 在测试钻孔内通行情况时，电缆提升、下放的速度应保持稳定，最高限速 20 m/min，与实际观测基本保持一致。
- 7.4.3 开始测量前需对井口计数器（深度标记）进行深度校正，使记录点深度与探头实际深度相吻合。
- 7.4.4 正式观测时应匀速下放或提升电缆，最高限速 20 m/min。宜采用提升方式正式观测。
- 7.4.5 发射机与接收机的同步，一般采用电缆同步，也可采用石英钟或全球定位系统同步。如选择石英钟同步，则应每隔 4h~5h 进行一次时钟校对。
- 7.4.6 除直接记录在接收机内存的数据外，应及时、准确、齐全、清楚地填写野外记录表（见附录 B）。原始记录严禁涂改，如划改，则应使原来字迹仍可识别，并签字负责。
- 7.4.7 如已开展方法有效性试验，应正确设置获得的最佳观测技术参数，否则应开展生产前试验，以确定最佳观测技术参数。
- 7.4.8 在探头到达测点后，应先将绞车机械锁定后方可开始数据采集。如在垂直钻孔中测量，应在绞车锁定 2 S 后开始数据采集。
- 7.4.9 每个测点观测完毕后，操作员应及时对数据和曲线进行全面检查，合格后方可保存数据。
- 7.4.10 如观测的曲线出现畸变，应查明原因进行重复观测，并做详细记录。
- 7.4.11 如遇异常点、突变点等，应进行重复观测，必要时应加密测点。
- 7.4.12 当仪器出现故障时应及时查明原因，待仪器修好后应在出现故障前的测点上进行重复观测，在确认仪器性能正常后方可继续观测。
- 7.4.13 在探头沿钻孔完整测量一遍后应及时将数据传输至计算机，做好数据备份。
- 7.4.14 应在井场及时绘制井中瞬变电磁剖面曲线，并初步划分异常井段和背景井段，为制定下一步测量方案提供依据。

7.5 质量检查与评价

- 7.5.1 质量检查以单个钻孔、各采样道独立评价，按照 5.5.2 的规定进行工作精度分级。
- 7.5.2 质量检查工作允许不重新敷设发送回线，可采用两同两不同（同台仪器、同一井段、不同时间、不同操作员）方式进行。
- 7.5.3 检查点应均匀分布于钻孔全井段；重点检查异常井段、可疑点和突变点。
- 7.5.4 检查工作量应不低于总工作量的 5%。当工作量较少时，至少应有 30 个检查点或检查 50 m 井段。

7.5.1 数据采集质量按以下公式计算误差：

a) 当某个采样道的观测值大于等于 30 nT/s 时采用均方相对误差来衡量，其计算公式为：

$$M_j = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{V_i(t_j) - V'_i(t_j)}{\bar{V}_i(t_j)} \right]^2}$$

式中：

n —参加统计计算的测点总数；

$V_i(t_j)$ —第 i 个测点第 j 个采样道的原始观测数据；

$V'_i(t_j)$ —第 i 个测点第 j 个采样道的检查观测数据；

$\bar{V}_j(t_j) - V_i(t_j)$ 与 $V'_i(t_j)$ 的平均值;

M_j —第 j 个采样道所有测点统计的均方相对误差。

b) 当某个采样道的观测值小于 30nT/s 时采用均方绝对误差来衡量, 其计算公式为:

$$\epsilon_j = \pm \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [V_i(t_j) - V'_i(t_j)]^2}$$

式中:

n —参加统计计算的测点总数;

$V_i(t_j)$ —第 i 个测点第 j 个采样道的原始观测数据;

$V'_i(t_j)$ —第 i 个测点第 j 个采样道的检查观测数据;

ϵ_j —第 j 个采样道所有测点统计的均方绝对误差。

7.5.6 若精度达不到要求时应增加检查工作量。当检查工作量增至测点总工作量的 20 % 仍不要求时应返工重做。

7.6 野外资料验收

7.6.1 井场工作结束后, 项目组应对资料进行自检验收, 内容包括:

- a) 测量井段的地—井瞬变电磁测量任务是否完成;
- b) 仪器设备是否工作正常;
- c) 技术参数的选择是否恰当;
- d) 检查工作量和质量是否符合规范要求;
- e) 各种原始数据和表格、收集的资料是否齐全。

7.6.2 全部钻孔测量完成后, 应进行野外验收。提交验收的野外原始资料主要包括以下内容:

- a) 实际材料图;
- b) 野外原始记录(包括测地成果、技术参数试验、生产观测、质量检查记录等);
- c) 各分量野外实测原始数据、各测点衰减曲线(包括噪声)及剖面曲线;
- d) 质量检查误差统计表及对比曲线;
- e) 野外工作小结;
- f) 资料验收文据及清单。

7.6.3 野外资料验收合格后方可撤离井场结束野外工作。野外数据采集工作流程参见附录 C。

7.7 安全与防护

7.7.1 仪器设备在运输时要妥善包装和固定, 在搬运时应捆扎好, 注意防潮和防震, 运输中禁止与有碍安全的货物混装。

7.7.2 下井观测前须对仪器设备进行以下内容的复查:

- a) 电源电压、极性;
- b) 仪器接线及接地;
- c) 各开关、部件及计算机是否处于安全状态;
- d) 需固定装置的安装状况(包括探头各部份接头处);
- e) 绞车的刹车及变速装置。

7.7.3 绞车的机械设备不得在运转中检修。仪器设备通电检修或有可能接触 36 V 以上电压时, 应采取相应的安全措施。

7.7.4 布置、收拾井场与更换井下探头时，须将井口附件有可能掉入孔内的物件移开，电缆及探头提出后应及时盖好井口的井盖。

7.7.5 仪器设备和工作人员应避免电缆活动影响区。电缆在运动中禁止人员跨越，不得在绞车与井口滑轮间站立。

7.7.6 检查绞车刹车正常后方可下放电缆。绞车启动、电缆提升和下放时，严禁紧急刹车和骤然加速。当井况复杂或接近孔底时，应降低下放速度。当探头接近套管或井口时，须减慢提升速度。

7.7.7 严禁超井深下放电缆。电缆拉出绞车时，应防止打结。当井下探头提升至距井口 20 m 时，电缆上应有明显的减速警戒标记。

7.7.8 探头下到孔底后应尽快提升电缆进行测量，不允许探头在孔底停留时间过长。

7.7.9 工作结束后应将仪器设备各操纵部件恢复到安全位置。严禁在通电状态下拔、插接线和搬运仪器设备。

7.7.10 测量过程中操作人员应仔细观察仪器设备的工作状态，发现异常应及时关机。当地面仪器设备发生故障后应将井下仪器提升到安全位置后再进行检修。

7.7.11 测量时如有雷电须立即关闭仪器设备电源，暂停工作。

7.7.12 如下井遇阻，不得使用井下探头冲击障碍物。如提升电缆遇卡，应立即停车，上下活动电缆以求解脱。如解脱无效，应迅速指定有处理事故经验的专人会同钻探人员共同协商处理事故方案，以防止事故进一步复杂化。

7.7.13 在测井工程中发生孔内事故时，应立即与地质、钻探方面共同研究确定事故处理的具体措施，并由钻探方面指定专人负责共同处理。

7.7.14 凡发生较大测井事故应立即进行处理，同时上报主管部门。待事故处理结束后，应详细编写事故报告，主要内容如下：

- a) 事故地点、时间，事故经过及原因；
- b) 事故性质。如属责任事故，应提出处理意见；
- c) 经验教训。

8 资料整理与图件编制

8.1 资料整理

8.1.1 进行径向分量 U 、 V 的转角校正；剔除各分量畸变点；也可将原始数据整理成归一化感应电动势，为图件编制准备数据。

8.1.2 在使用晚期观测数据时，一般可采用不大于噪声电平 3 倍的均方绝对误差来衡量。在要求高精度和进行定量计算时，可采用不大于噪声电平 2 倍的均方绝对误差来衡量。

8.1.3 以每个钻孔为单位对全部原始资料和收集的资料进行整理和复查。各种数据的计算结果须经 100 % 的复查，确保正确无误。

8.1.4 整理和复查的原始资料内容主要包括：

- d) 野外原始记录；
- e) 各分量实测原始数据；
- c) 质量检查数据及误差统计表；
- d) 各种计算整理的表格和图件；
- e) 钻孔倾角和方位角资料；
- f) 钻孔地质柱状图或岩芯编录资料。

8.2 图件编制

8.2.1 编制的主要图件有：

- a) 实际材料图；
- b) 各测点衰减曲线图册（包括噪声曲线）；
- c) 各分量沿钻孔的多测道剖面曲线图；
- d) 综合解释图（包括钻孔柱状图、多测道剖面曲线图、解释推断图等）。

8.2.2 编制图件的基本要求

8.2.2.1 实际材料图应包括：

- a) 发送回线的实际敷设位置；
- b) 施工钻孔编号、井口实际位置、平面投影位置等；
- c) 其它能说明实际情况的有关资料。

8.2.2.2 多测道剖面曲线图可按照顺序每 5 个~8 个采样道绘制成一组曲线。剖面曲线的纵坐标为井深，采用线性坐标。横坐标为观测的瞬变响应值，可根据实际情况选择线性或对数坐标。

8.2.2.3 在综合解释图中所有图件的深度比例尺应一致，且应与地质柱状图统一。

8.2.2.4 图件的绘制应正确完整、清楚醒目、整洁美观、线条粗细均匀、字体工整。

8.2.2.5 图件中的技术符号按照 GB/T 14499 的规定执行，图式、图例及用色按照 DZ/T 0069 的规定执行。资料整理与解释工作流程参见附录 C。

9 资料解释

9.1 基本要求

9.1.1 应采用软件对获得的井中瞬变电磁资料进行数据处理与解释。

9.1.2 资料解释应在充分掌握和分析已有地质与物探资料，特别是所测钻孔最新资料的基础上，以地—井瞬变电磁实测资料为主进行解释推断。通过综合地质解释，逐个分析异常起因，做出地质解释，并在成果图上加以表述。

9.1.3 解释工作分为异常识别、定性解释、定量解释和综合地质解释等。在实际解释工作中，资料整理、定性解释、定量解释和综合地质解释需交叉或反复进行，使得资料解释工作逐步深化。

9.2 异常识别

9.2.1 应依据井中瞬变电磁剖面曲线，结合发送回线、目标体、探头之间的耦合关系，确定是否存在异常。

9.2.2 当在多测道剖面曲线上出现大于背景场 2 倍~3 倍以上噪声水平的连续 3 个~5 个测点、且所组成的曲线连续圆滑、轨迹清晰时，可认为是异常井段。

9.2.3 通常采用从已知到未知的类比法和模型对比法研究异常的幅度、形状变化、时间特性等特征规律，从而确定出现的异常是否为井旁、井底、井中异常。典型异常特征参见附录 D。

9.3 定性解释

9.3.1 定性解释主要是利用整理后的曲线与理论曲线比较，依据物性和测区已知地质资料和地质规律对异常的可能起因进行解释。

9.3.2 定性解释应注意可能的多解性。当存在多解性时，应设法依据地质、物性、正演模拟、综合资料等减少多解性；当不能给出唯一解释时，应说明最可能的解释及可能的其它解释。

9.4 定量解释

9.4.1 定量解释的主要任务是推断目标体的位置、产状、形态、大小、电阻率以及距钻孔的距离，常用的方法为三维正演拟合法（或称为人机交互反演）。

9.4.2 在进行三维正演拟合时要尽量利用已有地质和物探资料，特别是所测钻孔最新资料作为先验信息，在充分利用定性解释结论或认识的基础上建立初始模型。

9.4.3 运用三维正演软件反复拟合实测曲线，依据模型合理性第一、拟合度第二的原则推断目标体的位置、产状、形态、大小、电阻率以及距钻孔的距离等参数。

9.5 综合地质解释

9.5.1 综合地质解释是在单孔解释推断的基础上进行的，应结合地质和其它综合资料、综合单孔解释推断成果得出超越单孔解释推断成果的、全测区规律性认识成果。

9.5.2 在进行综合地质解释时应将定性、定量和综合地质解释结果编绘成综合解释图（包括钻孔柱状图、多测道剖面曲线图、解释推断图等），评估资料解释推断成果的可靠性，说明可能存在的问题与不足。

9.5.3 凡推断的井旁、井底目标体异常，均应提出验证建议书。建议书中应包括定性和定量解释结果与依据、建议的工程布置参数及注意事项等。应用实例参见附录 E。

10 报告编写与资料提交

10.1 编写要求

10.1.1 野外工作若是分阶段完成的，应编写阶段性报告。待野外工作全面完成后，编写最终报告。

10.1.2 报告的编写应由专人负责，并在合同或设计规定的时间内完成。

10.1.3 所采用的资料应是经过质量验收合格的正式资料。

10.1.4 报告应在全面掌握资料的基础上，经过研究及综合分析对比后，做出有依据、符合客观实际的结论；

10.1.5 报告应实事求是、内容全面、重点突出、立论有据、文字简练、结构严谨；

10.1.6 报告附图、附表、附件要规范、合理、美观，文字说明要简练、清楚。

10.2 主要内容

10.2.1 序言

序言主要包括：

- a) 简述项目来源、工作性质、目的任务；
- b) 任务完成情况；
- c) 所取得的主要成果。

10.2.2 工区地质及地球物理特征

主要包括：

- a) 工区概况和以往工作程度；
- b) 工区的地质特征和电性特征；
- c) 建立目标体、围岩的电性特征关系（或地电断面模型），分析与本次工作有关的多解性。

10.2.3 工作方法技术与质量评述

主要包括：

- a) 野外方法技术（包括仪器设备）；
- b) 实际工作布置；
- c) 质量检查工作（包括检查方法、检查工作量、检查点分布等）及质量检查结果。

10.2.4 资料整理与解释

资料整理与解释内容包括：

- a) 资料整理和解释方法（包括软件）；
- b) 资料整理结果；
- c) 说明异常识别和划分的原则及依据，简述异常特征；
- d) 定性解释结果及其依据；
- e) 定量解释结果及其依据；
- f) 综合地质解释结果及其依据；
- g) 分析评估解释推断结果的可靠性。

10.2.5 结论与建议

阐述本次工作得到的主要结论、存在的问题和对下一阶段工作提出建议。

10.3 主要图件

主要图件包括：

- a) 实际材料图（包括发送框的实际位置图、钻孔平面投影图）；
- b) 各分量沿钻孔的多测道剖面曲线图；
- c) 综合剖面图（包括钻孔柱状图、多测道剖面曲线图、解释推断图等）。

10.4 资料提交

成果报告完成评审后应尽快整理相关资料，及时提交。提交的主要资料包括：

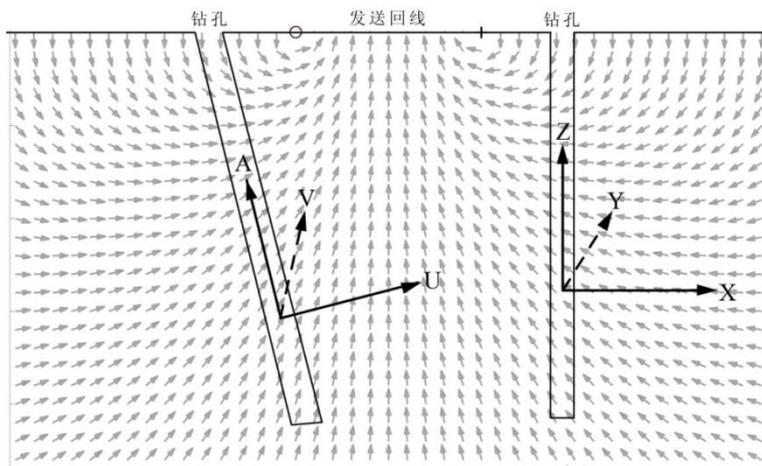
- a) 任务书、设计书等相关资料；
- b) 全部原始资料（野外记录、测地数据、观测数据、检查数据等）；
- c) 资料整理与解释结果及编制的图件；
- d) 成果报告。

附录 A
(资料性附录)

地—井瞬变电磁法坐标系与一次磁场

A.1 地—井瞬变电磁法坐标系

在地—井瞬变电磁法测量中，由于地下空间的一次磁场、感应二次磁场都是矢量场，因此在分析、研究地—井瞬变电磁响应特征时必须首先明确其坐标系。地—井瞬变电磁法坐标系的规定如下：轴向分量 A 沿井轴指向上为正，径向分量 U 、 V 按右手法则规定其正方向，且分量 U 指向钻孔倾向方向，如图 A.1 所示。当且仅当钻孔为直孔时钻孔坐标系即为笛卡尔右手坐标系。



图A.1 地—井瞬变电磁法一次磁场方向及坐标系规定断面示意图

A.2 一次磁场公式

地—井瞬变电磁法野外数据采集工作大都采用矩形回线作为激发场源。由于在钻孔中观测到的瞬变响应特征，不仅与目标体的导电性和几何形态有关，而且与发送回线、目标体、接收探头之间的位置关系密切相关。因此，了解和掌握一次磁场空间展布是研究井中瞬变响应特征的基础。

设边长分别为 $2a$ 、 $2b$ 的矩形发送回线 $ABCD$ 中心位于 $O(0, 0, 0)$ 处，在其中通以电流强度 I ，则在空间任意一点 $P(x, y, z)$ 处产生的一次磁场可由毕奥—萨法尔定律导出，如图 A.2 所示。可见，通电矩形回线在空间中任意点 P 产生的磁场可由四根有限长带电导线在 P 点所产生磁场的叠加得到，即：

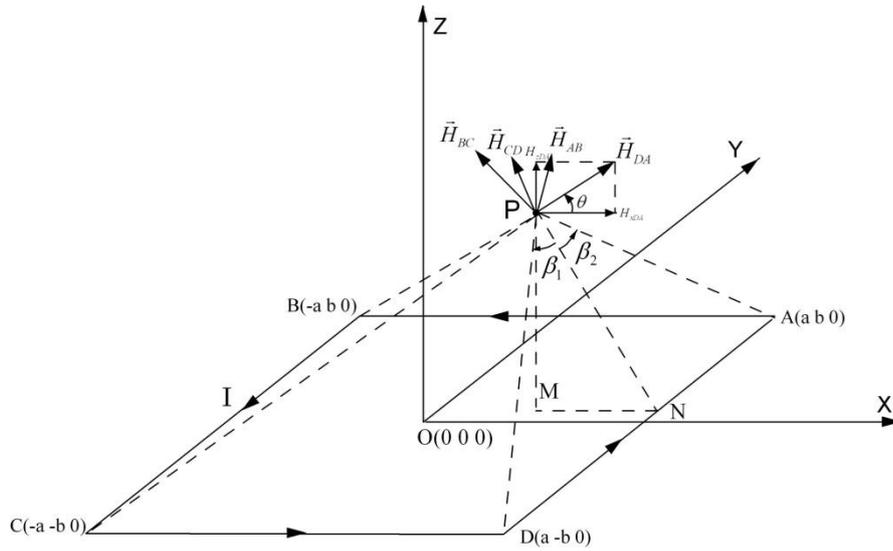
$$\vec{H} = \vec{H}_{AB} + \vec{H}_{BC} + \vec{H}_{CD} + \vec{H}_{DA}$$

那么，通电矩形回线在空间任意点 P 产生的磁场三分量表达式为：

$$\begin{aligned} H_x &= H_{xAB} + H_{xBC} + H_{xCD} + H_{xDA} \\ &= \frac{I}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{z}{(x-a)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{y+b}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{y-b}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{z}{(x+a)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{y-b}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{y+b}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right] \right\} \quad (A.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_y &= H_{yAB} + H_{yBC} + H_{yCD} + H_{yDA} \\
&= \frac{I}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{z}{(y+b)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right] \right. \\
&\quad \left. + \frac{z}{(y-b)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right] \right\} \quad (A.2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H_z &= H_{zAB} + H_{zBC} + H_{zCD} + H_{zDA} \\
&= \frac{I}{4\pi} \cdot \left\{ \frac{x-a}{(x-a)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{y-b}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{y+b}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right] \right. \\
&\quad + \frac{x+a}{(x+a)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{y+b}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{y-b}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right] \\
&\quad + \frac{y+b}{(y+b)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right] \\
&\quad \left. + \frac{y-b}{(y-b)^2 + z^2} \cdot \left[\frac{x-a}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{x+a}{\sqrt{(x+a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right] \right\} \quad (A.3)
\end{aligned}$$



图A.2 矩形发送回线在空间任意点P产生的一次磁场示意图

式中： H_x 、 H_y 、 H_z 为 P 点三个分量的磁场； H_{xAB} 为图 A.2 中 AB 边在 P 点产生的 X 分量磁场，其它类推；a、b 分别为矩形回线的半边长；x、y、z 分别为 P 点的空间坐标值；I 为发送电流强度。

A.3 “最佳耦合”概念

在地一井瞬变电磁法野外工作中涉及到发送回线的设计问题，出现了所谓“最佳耦合”概念。“最佳耦合”是指当发送回线位于恰当位置时，地下导电目标体能感应产生最强的二次磁场，即产生最强的异常。为了论证“最佳耦合”的重要性，下文以理论模型的数值模拟结果来加以分析。

计算的理论模型参数为：在自由空间中嵌入一个倾斜导电板体，板体大小 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ ，电导率 20 S/m ，倾角 45° 。板体中心距离钻孔 200 m 、中心埋深 200 m ，钻孔与板体的位置固定。发送回线边长 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ ，设计发送回线在 3 个位置，分别为中心框（C）、西框（W）和东框（E），如图 A.3 所示，数值模拟结果分别绘于发送回线下方。导电板体以 Y 轴对称，产生的感应二次磁场只有 X 和 Z 分量。

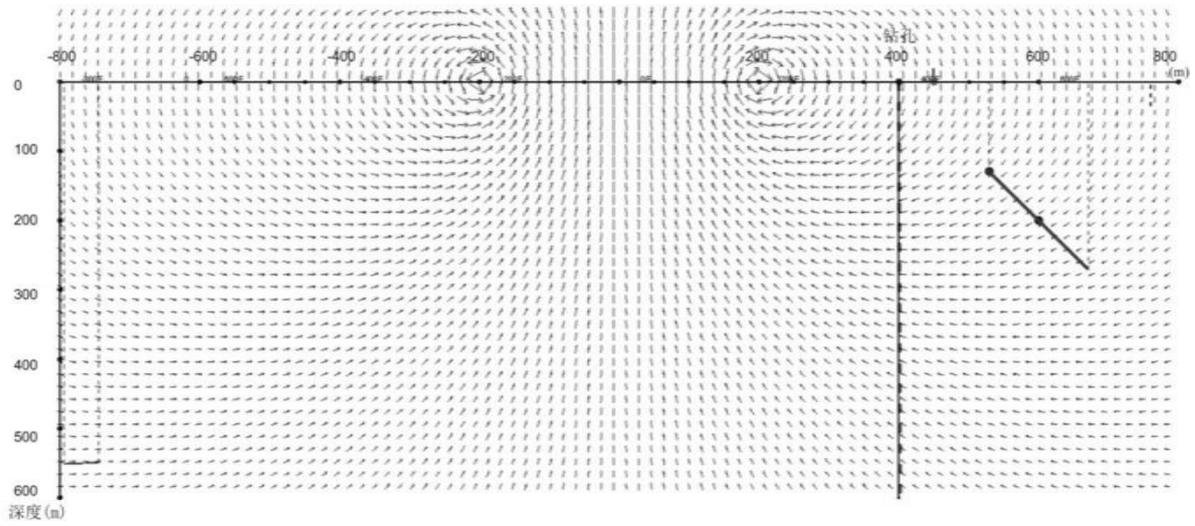
（上：钻孔、回线、板体平面位置关系 中：X分量 下：Z分量）

图A.3 发送回线不同位置时地一井 TEM 响应曲线

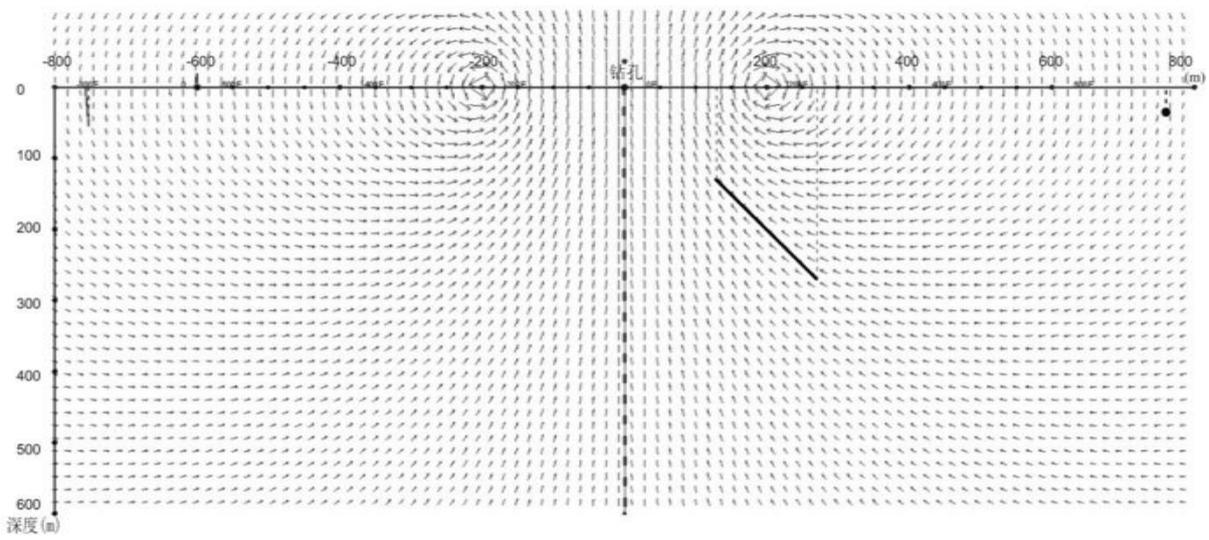
由图 A.3 可见，虽然回线 C 与钻孔及导电板体的距离最近，但其激发产生的异常响应却最弱，在相同比例尺下已无法分辨。而回线 E 激发产生的异常响应最强，回线 W 次之，且与回线 E 激发产生的异常反向。分析原因，这是由于发送回线与导电板体位置不同而导致了不同的耦合关系。

图 A.4 ~ 图 A.6 分别为回线 W、回线 C、回线 E 产生的一次磁场与导电板体耦合关系示意图，图中给出了不同发送回线在主剖面断面上的一次磁场方向分布及导电板体和钻孔位置，其中磁力线长度表示强度的大小。由图 A.4 可见，回线 W 产生的一次磁场穿过导电板体，但强度较弱，与导电板体具有一定的耦合关系。而在图 A.6 中，回线 E 产生的一次磁场不仅穿过导电板体，而且强度较大，与导电板体耦合最好。在图 A.5 中，虽然导电板体所处位置的一次磁场强度较大，但磁力线方向却沿着导电板体分布，因此耦合得最差，所激发的感应二次场最弱。此外，由于在导电板体所处位置回线 W 与回线 E 的磁力线方向相反，因此所产生的异常也反向，如图 A.3 所示。

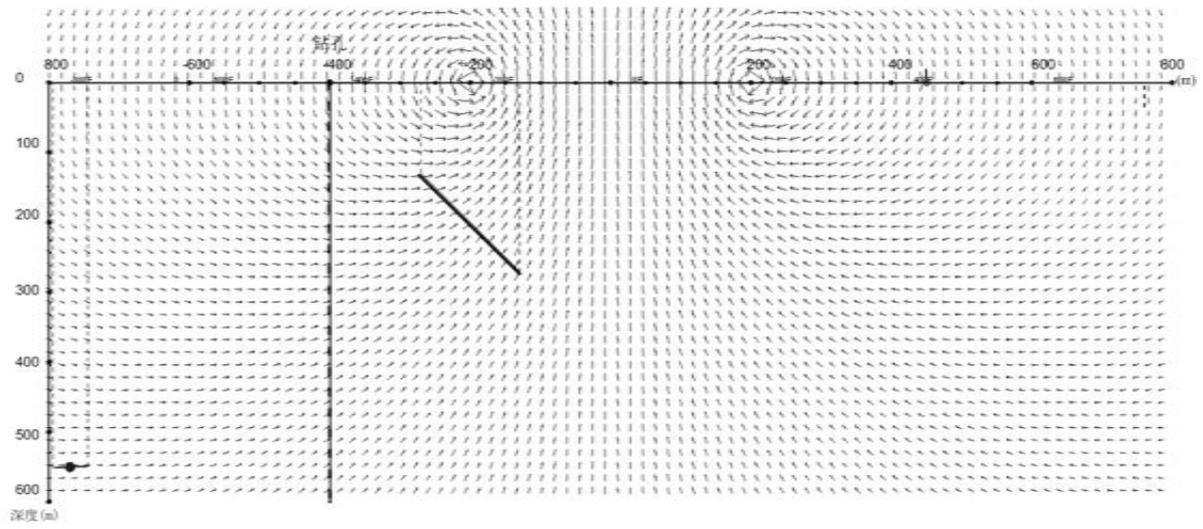
综上所述，我们在设计发送回线位置时，应综合考虑地下目标体可能的赋存空间与发送回线一次磁场方向之间的关系，尽量使发送回线与地下目标体处于“最佳耦合”状态。



图A.4 回线 W 产生的一次磁场与导电板体耦合关系示意图



图A.5 回线 C 产生的一次磁场与导电板体耦合关系示意图



图A.6 回线 E 产生的一次磁场与导电板体耦合关系示意图

附录 B
(规范性附录)

地一井瞬变电磁法野外工作记录表

地一井瞬变电磁法野外工作记录表见表B.1。

表B.1 地一井瞬变电磁法野外工作记录表

工区_____ 钻孔编号_____ 终孔深度_____ 套管深度_____ 测量日期_____ 天气_____

工作装置_____ 仪器型号_____ 探头编号_____ 自检情况_____

操作员_____ 记录人_____ 审核人_____

文件名	测量分量	同步方式	发送回线大小 m	发送电流基频 Hz	发送电流强度 A	关断时间 μs	叠加次数	采样道数	井深或测点区段 m	备注
现场描述:						野外工作布置示意图:				

填表说明：1. 文件名：输入接收机中的记录文件名称；2. 测量分量：所观测的井中瞬变响应某个分量；3. 同步方式：观测时发射机与接收机所采用的同步方式；4. 发送回线大小：观测时所采用的发送回线边长大小，包括矩形的长边和短边；5. 发送电流基频：观测时所采用的发送电流频率；6. 发送电流强度：观测时所采用的发送电流强度；7. 关断时间：观测时发送电流开始下降到完全关断所需时间；8. 叠加次数：观测时接收所采用的总叠加次数；9. 采样道数：接收机中选择的采样总道数；10. 井深或测点区段：接收机记录文件所对应的观测井深或测点范围；11. 备注：填写表中未列出的其它事项；12. 现场描述：记录发送回线周边的地形、地貌及可能的电磁干扰情况等，以及对井场环境进行描述；13. 野外工作布置示意图：画出发送回线与钻孔的简单位置关系示意图；14. 如发送回线与钻孔位置关系改变，则需另填写一张野外工作记录表。

附录 C
(资料性附录)
地—井瞬变电磁法工作流程

C.1 野外数据采集工作流程见图C.1。

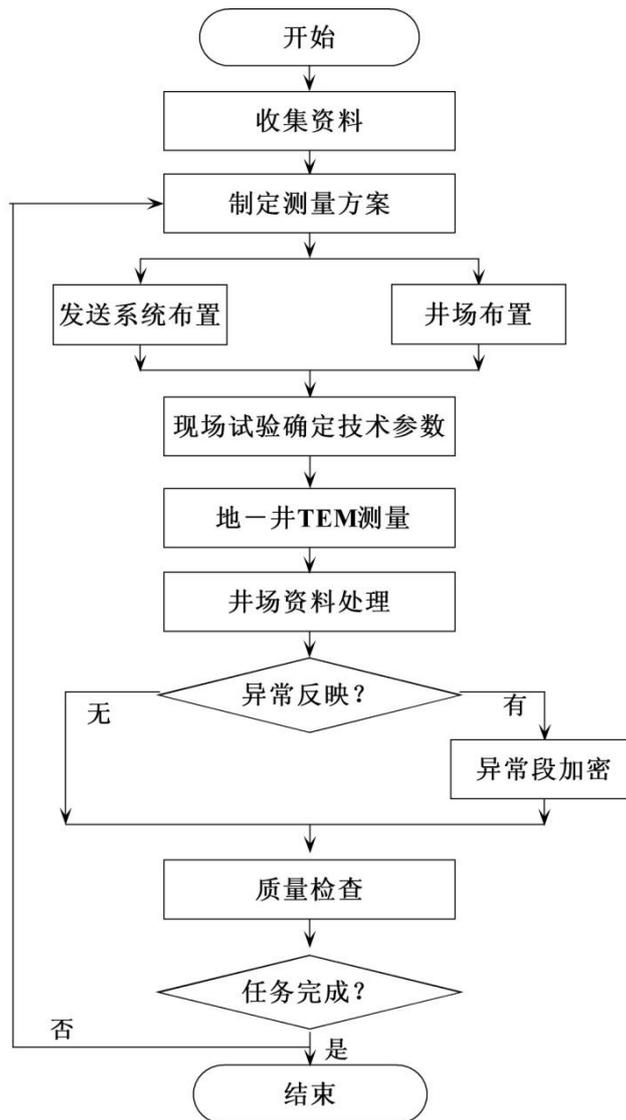


图 C.1 野外数据采集工作流程图

C.2 资料整理与解释工作流程见图C.2。

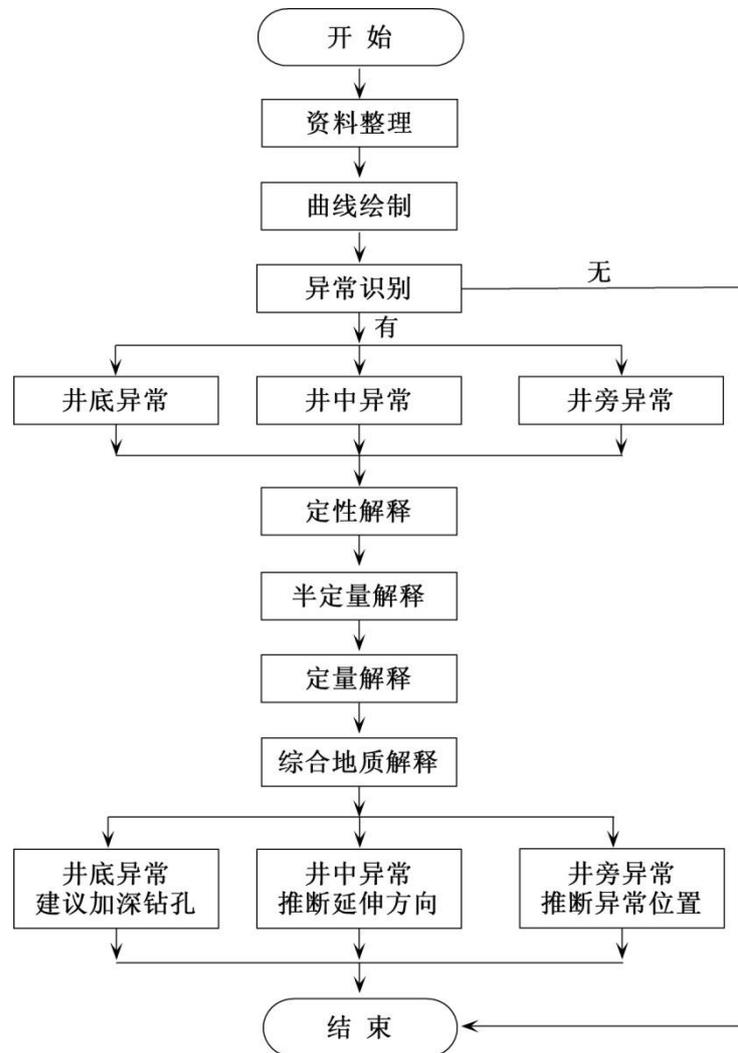
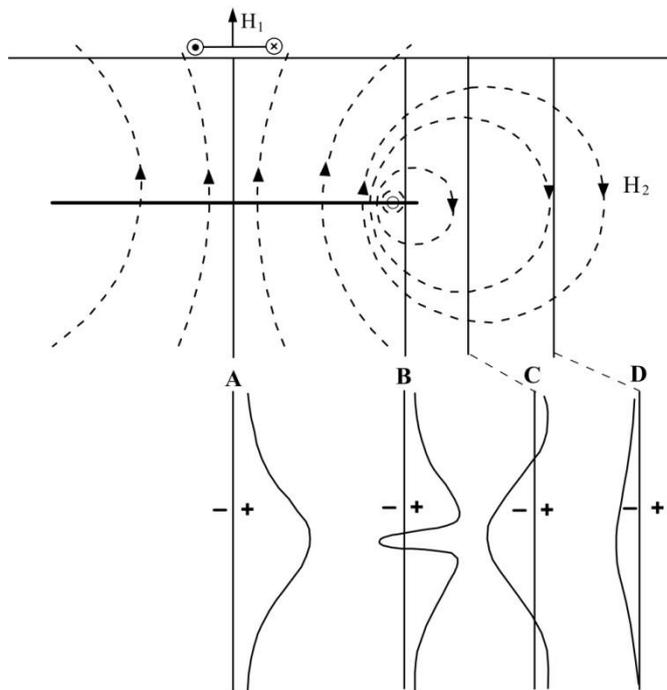


图 C.2 资料整理与解释工作流程图

附录 D
(资料性附录)
地—井瞬变电磁法典型异常特征

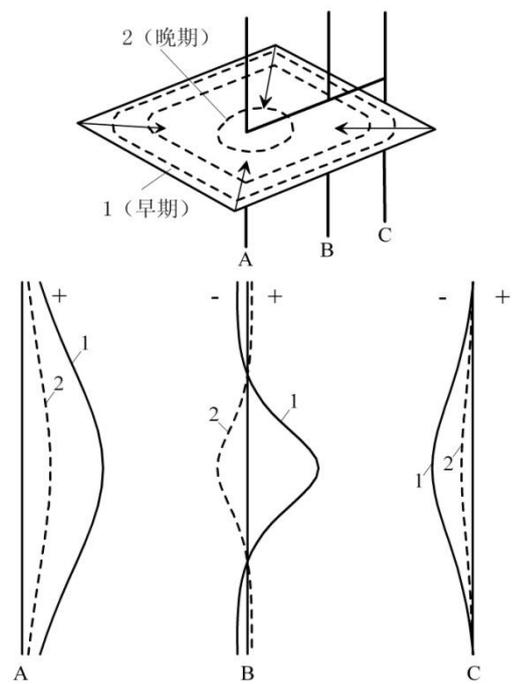
D.1 异常的静态特征

异常的静态特征是指异常响应随接收探头位置(钻孔深度)的变化特征。图 D.1 展示了发送回线位于导电矿体正上方时轴向分量出现的四种典型异常响应特征。钻孔 A 穿过矿体中部,异常特征为正异常;钻孔 B 穿过矿体边部内侧,异常特征为在正异常中出现反向异常;钻孔 C 穿过矿体边部外侧,为强而陡的负异常特征;钻孔 D 远离矿体,异常特征为弱而缓的负异常。需要指出的是,异常响应的符号、符号变化(过零)、幅值变化等是分析静态特征的要点。



H1 为一次磁场, H2 为感应二次磁场

图 D.1 轴向分量 A 异常曲线示意图



1 为早期道响应, 2 为晚期道响应

图 D.2 异常的动态特征曲线示意图

D.2 异常的动态特征

异常的动态特征(或称时间特征)是指异常响应曲线的形状及特征点(如极值、过零点等)随采样延时的变化特征,反映了导电矿体中感应涡流随时间的衰变及扩散规律,通常分为早、中、晚期。穿过矿体不同部位的钻孔中所观测到的异常动态特性存在明显的差异,如图 D.2 所示。在穿过矿体中部的 A 孔中,将观测到始终为正的异常;在穿过矿体边部的 B 孔中,由于孔位将从位于早期等效涡流环的内侧逐步被转化为位于晚期等效涡流环的外侧,因此将观测到中心异常由正变负、而两侧则由负变正的异常;在位于矿体外侧的 C 孔中,将观测到幅值较小且始终为负的异常。

D.3 井旁三分量异常特征

以下通过理论模型的数值模拟结果来分析井旁导体产生的三分量异常特征。设计的理论模型参数为：自由空间内嵌入一个 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的水平薄板，电导率 50 S/m ，深度 200 m 。在与板体中心重合的 $300\text{ m} \times 300\text{ m}$ 正方形边上(图 D.3 中虚线框)均匀地设置了A~P 等16 个垂直钻孔，孔深 400 m 。发送回线位于板体正上方，边长 $400\text{ m} \times 400\text{ m}$ ，发送电流 1 A ，接收线圈等效面积 1000 m^2 。模型示意图及数值模拟得到的各个钻孔三分量异常响应曲线如图 D.3 所示。

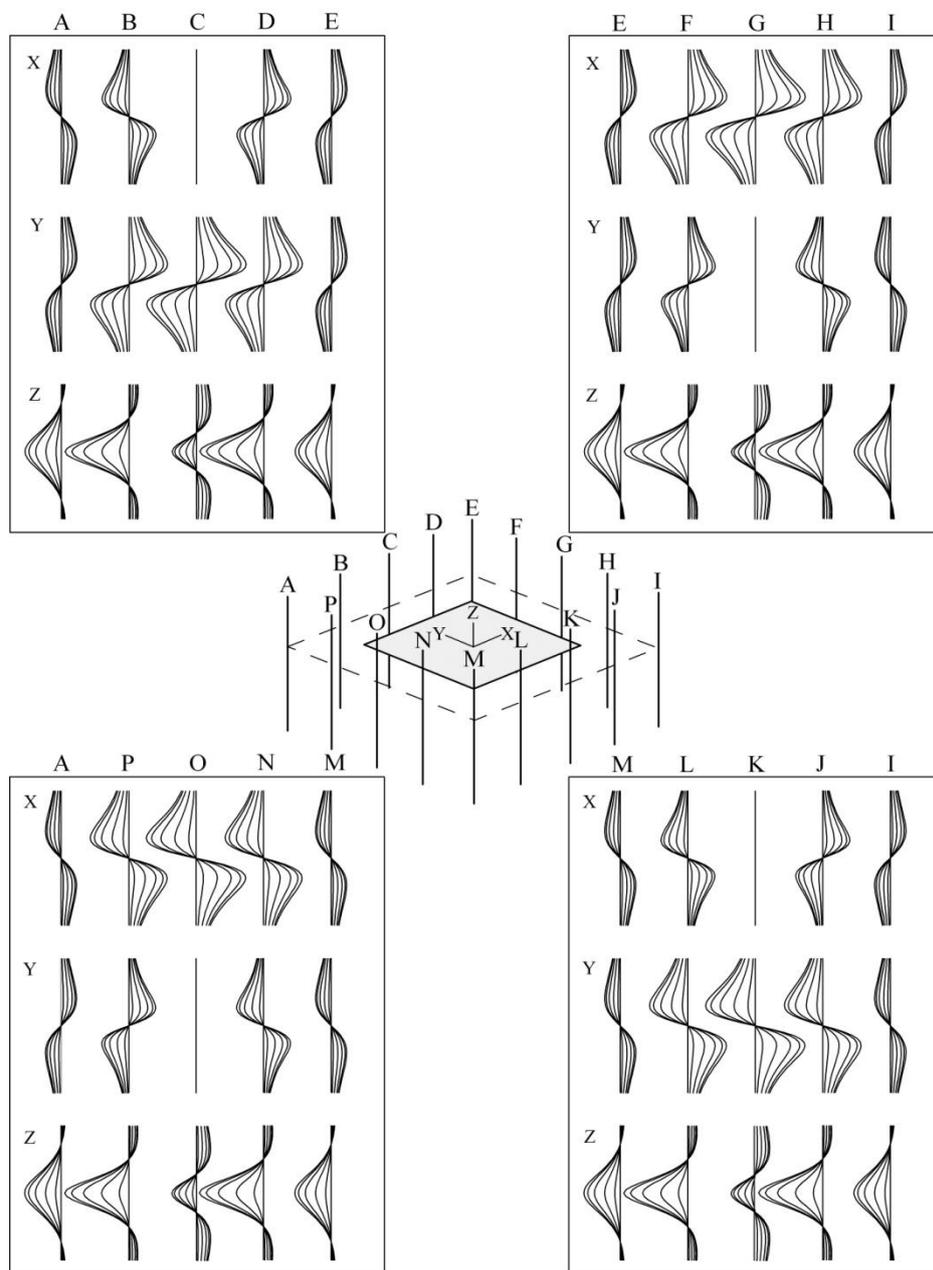


图 D.3 低阻薄板与钻孔不同位置关系及三分量异常响应剖面曲线图

由图D.3异常响应曲线可见，Z 分量异常响应曲线特征完全一致，均为单峰负异常，为典型井旁异常；在与板体中心相对称的钻孔中，响应幅值及异常中心深度均相同，如钻孔 A、E、I 和 M 均相同，钻孔 B、D、F、H、J、L、N 和 P 均相同。可见，Z 分量异常曲线只能确定板体的深度而不能确定其方位。

图D.3 中 16 个钻孔的三分量异常曲线没有完全相同的，如 A 孔 X 分量异常曲线为“S”型而 Y 分量为反“S”型；E 孔 X、Y 分量异常曲线均为反“S”型；I 孔 X 分量异常曲线为反“S”型而 Y 分量为“S”型；M 孔 X、Y 分量异常曲线均为“S”型。因此，水平分量（X 或 Y）具有如下特征规律：以钻孔为坐标原点，若板体中心位于某水平方向（X 或 Y）的正方向一侧，则观测到该水平分量的异常响应曲线为“S”型，反之则为反“S”型。

通过分析水平分量异常响应曲线可推断出异常中心的大致方位，方法总结如下：

- 以钻孔为原点，X、Y 轴可将水平面划分为四个象限。若 X、Y 分量异常曲线为“S”型，则异常中心位于第一象限（如钻孔 L、M、N）；
- 若 X 分量异常曲线为反“S”型，Y 分量为“S”型，则异常中心位于第二象限（如钻孔 H、I、J）；
- 若 X、Y 分量异常曲线均为反“S”型，则异常中心位于第三象限（如钻孔 D、E、F）；
- 若 X 分量异常曲线为“S”型，Y 分量为反“S”型，则异常中心位于第四象限（如钻孔 A、B、P）。

以上推断出异常中心的方位方法如图 D.4 所示。

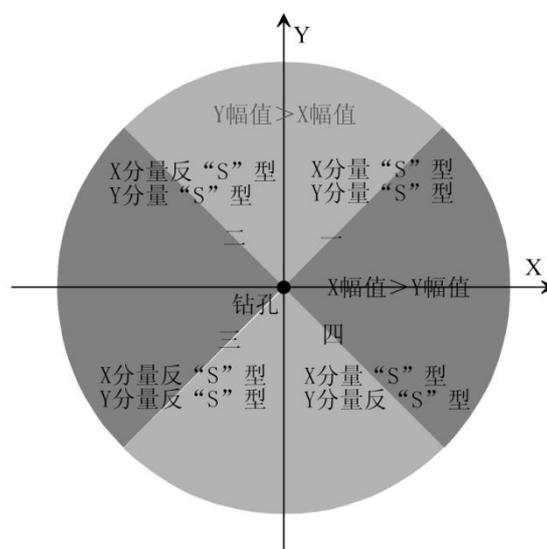


图 D.4 X、Y 分量异常曲线特征与异常中心位置分布关系示意图

进一步，通过对比 X 与 Y 分量异常响应幅值可以判断异常中心的偏向，方法总结如下：

- 若 Y 分量幅值较大，则异常中心离 Y 轴较近；当异常中心位于 Y 轴时，Y 分量响应幅值达到最大而 X 分量响应为零，如钻孔 C、K；
- 若 X 分量幅值较大，则异常中心离 X 轴较近；当导体中心位于 X 轴时，X 分量幅值达到最大而 Y 分量响应为零，如钻孔 O、G。

附录 E
(资料性附录)

地—井瞬变电磁法定量解释技术及应用实例

E.1 地—井瞬变电磁法定量解释技术简况

当前，地—井瞬变电磁法的定量解释技术发展比较缓慢，最主要的定量解释手段为人机交互反演，一般在对井旁异常进行解释推断时可采用半定量的矢量交会法加以配合。在进行人机交互反演时首先通过矢量交会法确定异常中心位置，然后在此基础上设置较为合理的初始模型，再通过多次人机交互反演获得与实测资料较好的拟合，最后确定井旁异常的地电模型参数。

E.2 地—井瞬变电磁矢量交会法

E.2.1 方法简介

我们知道，在一次磁场的激发下地下导体内将产生感应涡流，而在钻孔不同深度观测到的地—井瞬变电磁异常响应即为感应涡流在空间不同位置产生的感应电磁场。通过研究地下感应电磁场空间特征发现，感应二次磁场的矢量方向与一次磁场的强度、二次磁场的观测时间等参数无关，只与观测点的方位和距离有关，且异常区的特征矢量可以交会于一点，而交会点恰好位于感应涡流中心，从而可以确定异常体的中心位置，这种方法称之为地—井瞬变电磁矢量交会法。下面以 1 个理论模型和 1 个实测钻孔资料处理为例简要介绍其应用效果。

E.2.2 理论模型矢量交会解释

理论模型参数及测量装置为：钻孔孔深 300 m、位于发送回线中心，回线边长 210 m × 210 m、发送电流强度 1 A，均匀半空间（围岩）嵌入一个导电立方体，围岩电阻率 200 Ω·m、立方体导体大小 90 m × 90 m × 20m、电阻率 1 Ω·m、导体中心坐标 (0, 50, 150)（以钻孔为坐标原点），工作装置及模型的平面投影如图 E.1。

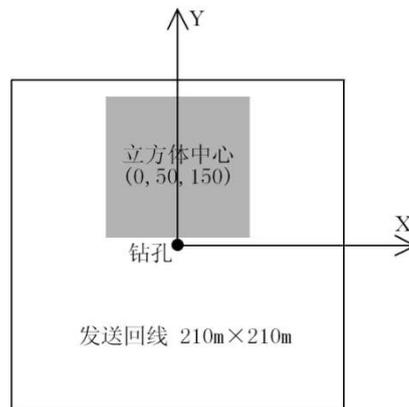


图 E.1 理论模型水平投影图

图 E.2 为对理论模型进行数值模拟获得的地—井瞬变电磁三分量归一化感应电动势剖面曲线。由于导电立方体以 X 轴对称，瞬变响应只有 Y 分量和 Z 分量，没有 X 分量。可见，在 Y 分

量和 Z 分量响应中既有导体又有围岩还有两者互感产生的二次磁场，而地—井瞬变电磁矢量交会法需要采用导体产生的纯异常场，因此首先要进行纯异常场提取。

忽略围岩与导体之间的互感，将实测响应近似为纯异常场与背景场的简单叠加。从浅到深可将钻孔响应曲线（图 E.2）划分为背景场—异常场—背景场三个区段。由于围岩产生的背景场是连续的、渐变的，因此可将上下两个背景区的响应值近似地作为背景场，采用曲线拟合的方法求取异常区的背景场，从实测响应中减去背景场就提取出了纯异常场（见图 E.3 所示），然后再用纯异常场进行矢量交会。

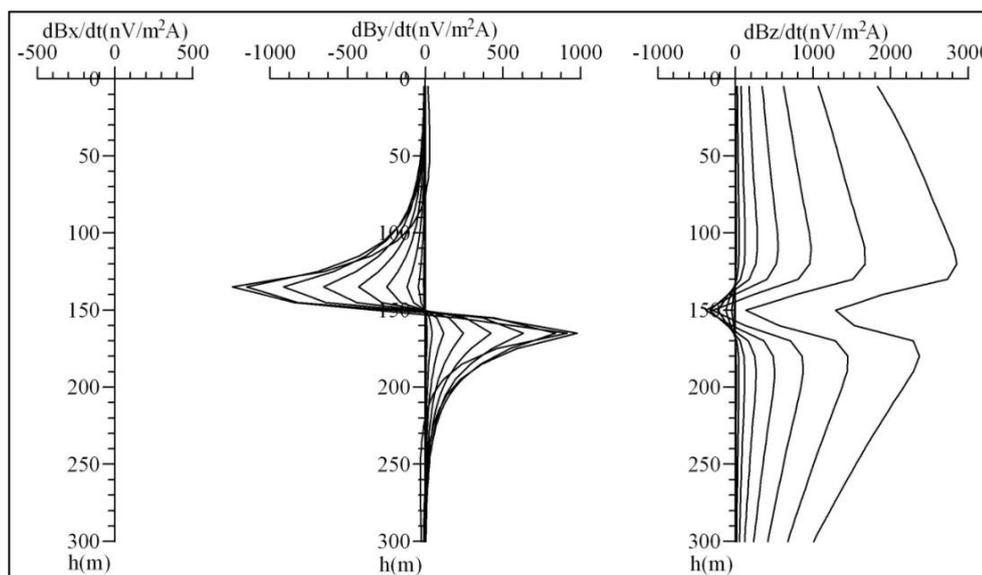


图 E.2 理论模型地—井瞬变电磁三分量归一化感应电动势曲线图

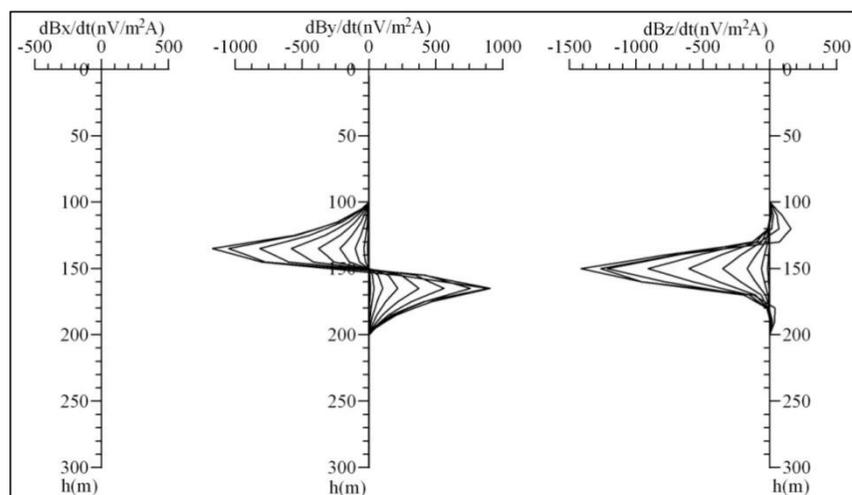


图 E.3 理论模型地—井瞬变电磁三分量纯异常曲线图

先根据两个水平分量的纯异常场（此模型只有 Y 分量）求出异常中心方位，再根据异常区合成的水平分量和 Z 分量纯异常的交会点来确定异常中心与钻孔的距离及埋深。这样，某个采样时间的感应涡流中心深度、其与钻孔之间的距离、相对 X 轴的方位角（逆时针）都已确定。为了直观

明了，以罗盘图的形式绘制出感应涡流中心的方位及平面投影位置，且以钻孔为纵轴、各采样点为起点可绘制各采样点的特征矢量，特征矢量的交会点就指示了异常中心的深度及其与钻孔的距离。图 E.4为采样延时 $t = 1.1812 \text{ ms}$ 时的地—井瞬变电磁矢量交会结果图。由图可见，矢量交会点距离钻孔约 47 m、深度约 150 m、方位约为 90° ，交会点与导体中心位置基本吻合。

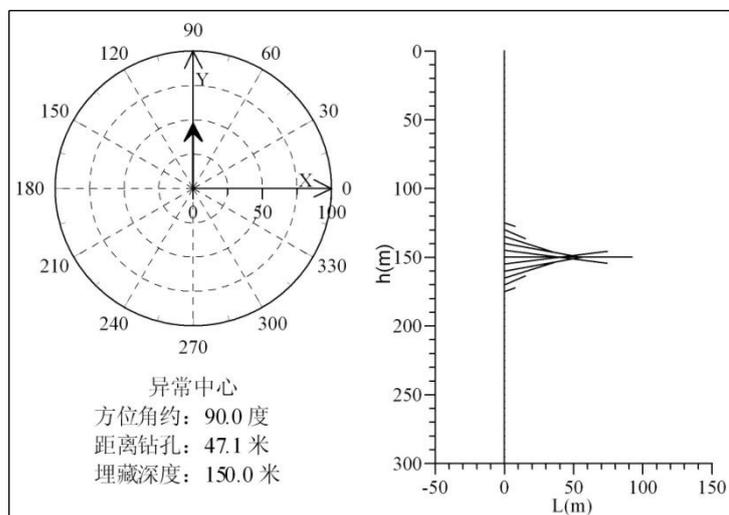


图 E.4 理论模型矢量交会结果图

E. 2. 3 ZK 1108 孔实测资料矢量交会解释

新疆小热泉子铜矿区 ZK 1108孔孔深140m，未见矿体。野外测量采用的技术参数为：发送回线边长 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 、发送电流基频 25 Hz 、关断时间 $500 \mu\text{s}$ 、电流强度 10 A 、最大采样延时 6.22 ms 、采样道 26。

将ZK 1108 孔实测数据导入后将三分量响应值做电流和接收面积归一化处理，中心框激发获得的三分量归一化感应电动势剖面曲线如图 E.5 所示。

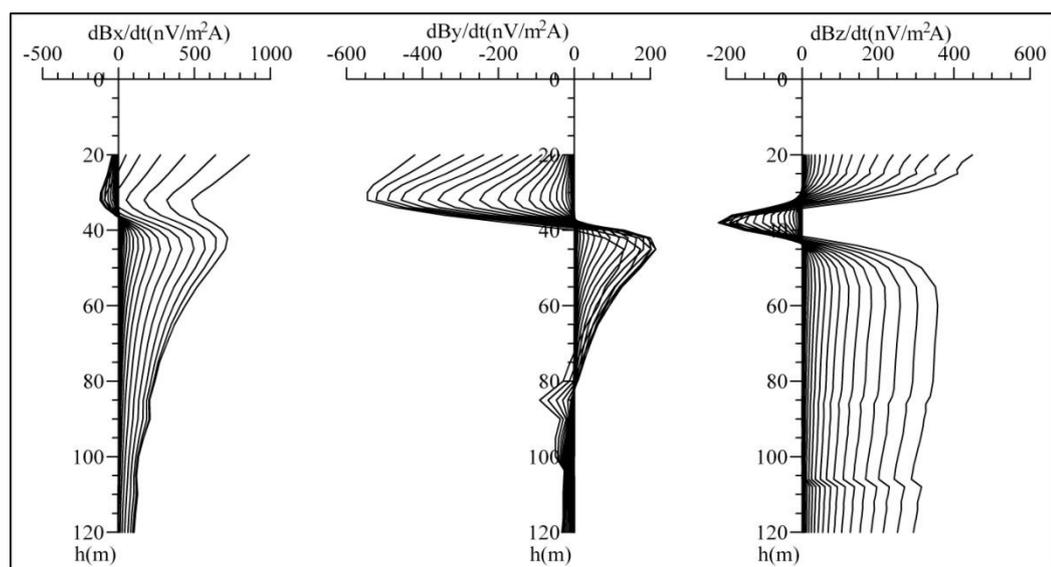


图 E.5 ZK1108 孔地—井瞬变电磁三分量归一化感应电动势剖面曲线图

由图 E.5 可以看出，孔深 $20 \text{ m} \sim 60 \text{ m}$ 有明显的异常显示，为此作出如下的定性推断解释：

- a) Z 分量响应曲线显示明显的负异常，根据其异常特征及地质资料可划分为井旁盲矿异常；
- b) 三个分量的响应曲线均有较好的对称性，且Z 分量以井深为对称，X、Y 分量以零点为对称，说明矿体内的感应涡流呈近似水平状态；
- c) X、Y分量的响应曲线均显示为“S”型特征，且响应幅值相差不大；Y 分量稍强、X 分量稍弱，说明异常中心在第一象限中轴的上方，即方位角大于 45° 。

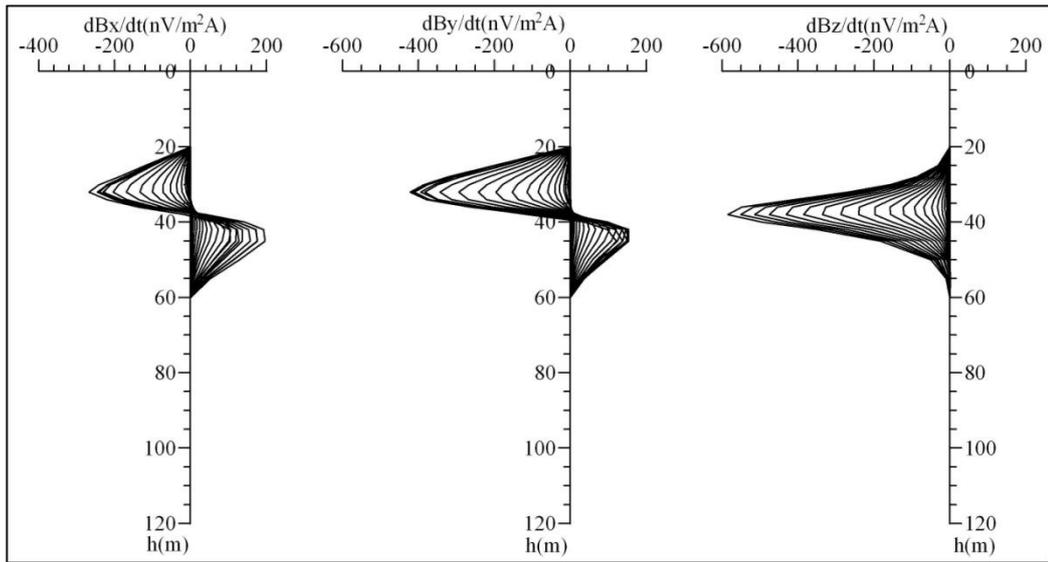


图 E.6 ZK1108 孔地—井瞬变电磁三分量纯异常曲线图

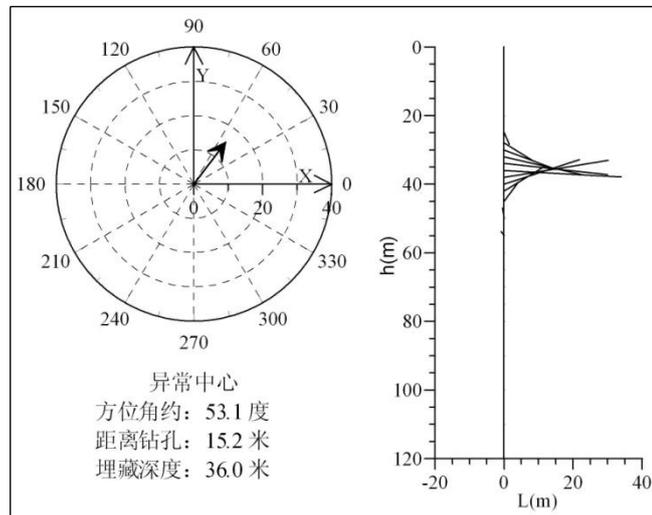


图 E.7 ZK1108 孔第 16 道 ($t_{16}=0.936\text{ms}$) 矢量交会图

在定性解释的基础上又进行了矢量交会处理。首先采用前文所述的提取纯异常的方法获得了各分量的纯异常，如图 E.6 所示。选择三个分量纯异常场的第16道 ($t_{16} = 0.936 \text{ ms}$) 数据进行矢量交会，交会结果如图 E.7 所示。由图可见，矢量交会得到的异常中心方位角约为 53° ，与钻孔之间的距离约 15 m、埋深约 36 m。

E. 2. 4 矢量交会法应用条件

矢量交会法是一种简单、快速的半定量解释方法，在应用条件合适的情况下能够快速确定井旁盲矿的中心位置，其主要的适用条件有：

- a) 矢量交会法主要用于井旁盲矿异常，对井底和井中见矿异常不适用；
- b) 矢量交会法仅适用于感应涡流处于水平或近似水平状态。当感应涡流平面倾斜较大时，应改变交会方法及修正系数；
- c) 矢量交会法适用于瞬变磁场和感应电动势资料，无需进行参数转换；
- d) 矢量交会法是针对纯异常场的解释方法，处理实测资料时需进行纯异常提取。

E.3 地—井瞬变电磁法人机交互反演

E.3.1 理论模型人机交互反演

通过前文对理论模型剖面响应曲线的定性分析及纯异常场矢量交会获得的结果，我们首先可以构建一个比较合理的初始模型：均匀半空间中嵌入局部导体，半空间电阻率设为 $100 \Omega \cdot m$ 、局部导体电阻率设为 $5 \Omega \cdot m$ 、导体大小为 $70 m \times 70 m \times 20 m$ 、中心位置坐标为 $(0, 45, 150)$ ，其它相关的发送、接收等技术参数均为已知。初始模型建立后，进行第一次三维正演数值模拟计算获得的拟合曲线如图E.8所示。

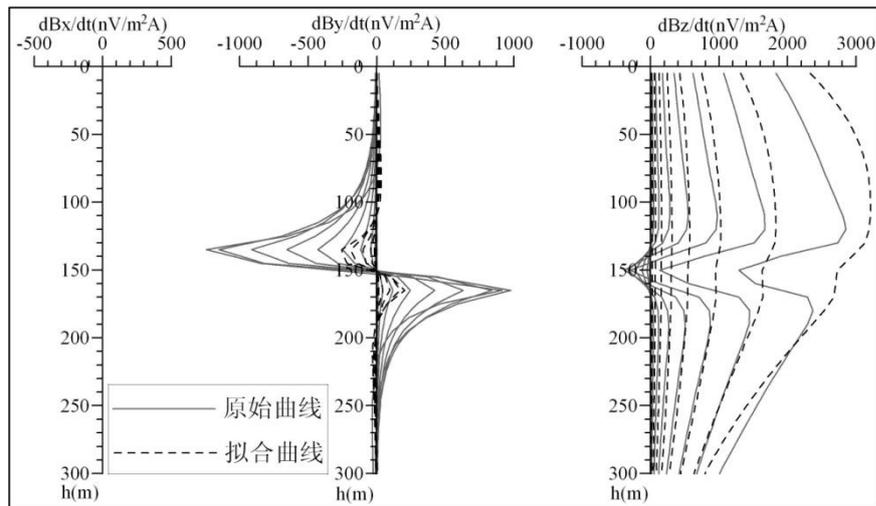


图 E.8 理论模型人机交互反演拟合曲线 1

由图E.8可见，拟合曲线（虚线）的背景场响应幅值明显比原始曲线（实线）强，而异常场幅值偏弱，说明初始模型的半空间电阻率偏低、局部导体电阻率偏高，但背景场和异常场曲线的特征点位置、范围、及衰变速度均接近。为此只修改模型的电阻率参数：将半空间电阻率修改为 $260 \Omega \cdot m$ 、局部导体电阻率修改为 $0.5 \Omega \cdot m$ 。重新进行三维正演计算得到如图E.9所示的拟合曲线。由图 E.9 可见，模型修改后得到的正演拟合曲线的背景场响应幅值比原始曲线偏弱，而异常场幅值偏强，说明本次模型参数的改正量过大。再适当地修改模型的电阻率参数，反复进行人机交互反演。由于模型的几何参数已由定性解释、矢量交会确定，只修改模型的电阻率参数，因此能使三维人机交互反演能够快速获得较好的拟合效果。当半空间电阻率调整为 $200 \Omega \cdot m$ 、局部导体电阻率修改为 $1 \Omega \cdot m$ 时得到了如图 E.10 所示的拟合曲线，可见拟合效果较好。由此人机交互反演获得的模型参数为：围岩电阻率 $200 \Omega \cdot m$ 、立方体导体 $70 m \times 70 m \times 20 m$ 、电阻率 $1 \Omega \cdot m$ 、导体中心坐标 $(0, 45, 150)$ ，反演结果与理论模型参数基本吻合。

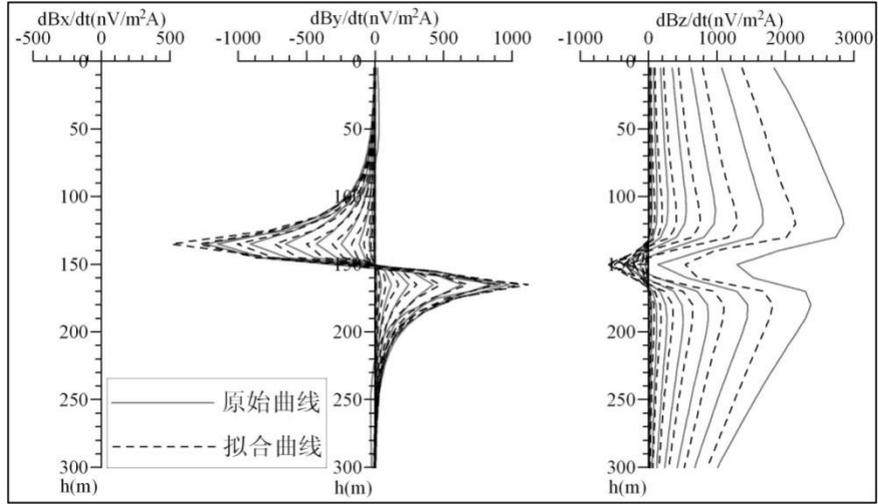


图 E.9 理论模型人机交互反演拟合曲线 2

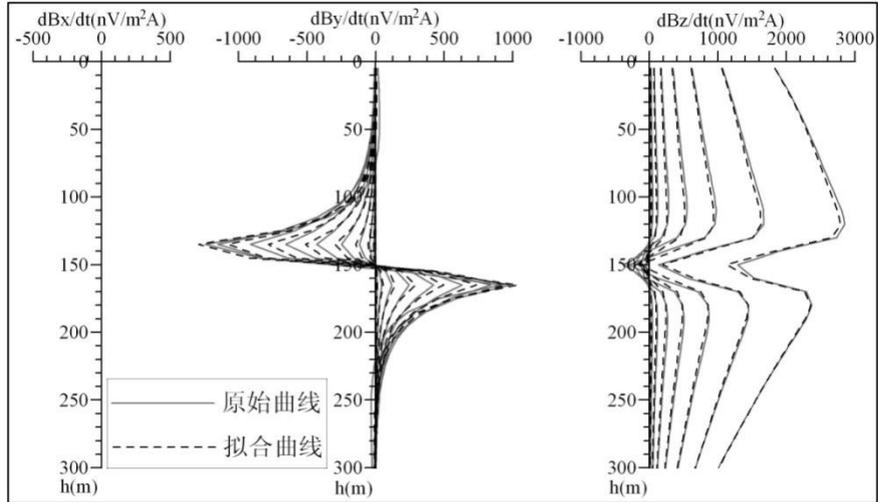


图 E.10 理论模型人机交互反演拟合曲线 3

E. 3. 2 ZK1108孔实测资料人机交互反演

根据前文对资料的定性解释、矢量交会结果分析建立的初始模型设定为：导体大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、中心位置坐标 $(10, 15, 37.5)$ 、围岩电阻率 $80\Omega\cdot\text{m}$ 、导体电阻率 $0.5\Omega\cdot\text{m}$ 。初始模型建立后，进行三维正演模拟计算得到如图E.11所示的拟合曲线。

由图E.11可见，正演模拟曲线（虚线）的背景场响应幅值明显比实测曲线幅值（实线）弱，且异常场幅值也偏弱，说明初始模型的围岩和局部导体电阻率偏高。

经过反复修改围岩和局部导体电阻率，再进行人机交互反演。当围岩电阻率 $75\Omega\cdot\text{m}$ 、异常体电阻率 $0.1\Omega\cdot\text{m}$ 时，获得的拟合曲线如图E.12所示。由图 E.12 可见，模拟曲线的背景场响应幅值及异常场曲线特征、幅值均能与原始实测曲线拟合的较好。经过三维人机交互反演获得的最终地电模型参数为：均匀半空间电阻率 $75\Omega\cdot\text{m}$ 、低阻体大小 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、电阻率 $0.1\Omega\cdot\text{m}$ 、埋深 37.5 m 、中心距离钻孔约 18 m 、在平面上的投影坐标为 $(10, 15)$ 。

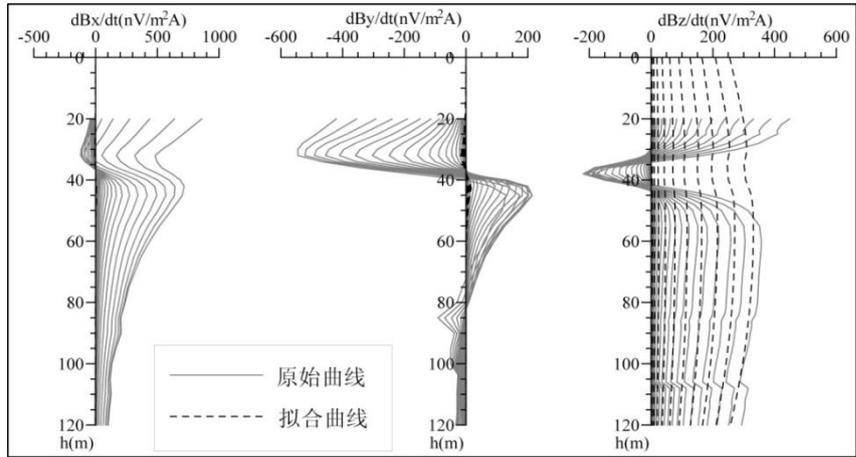


图 E.11 ZK1108 孔初始模型人机交互拟合曲线图

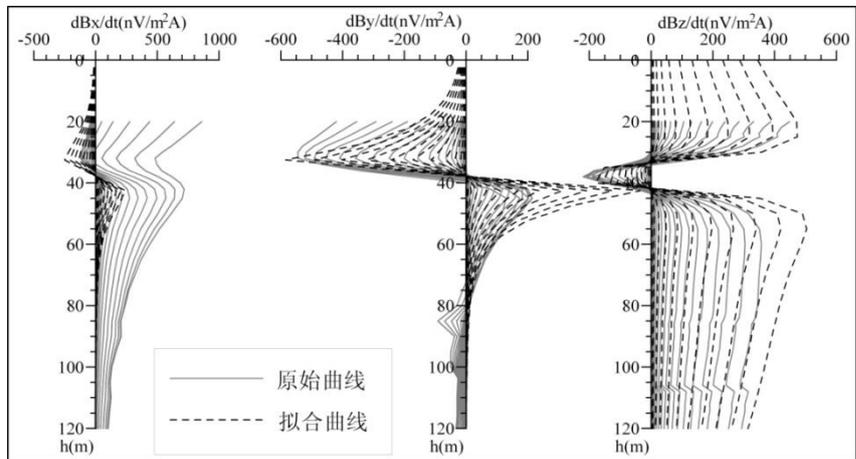


图 E.12 ZK1108 孔人机交互拟合曲线图

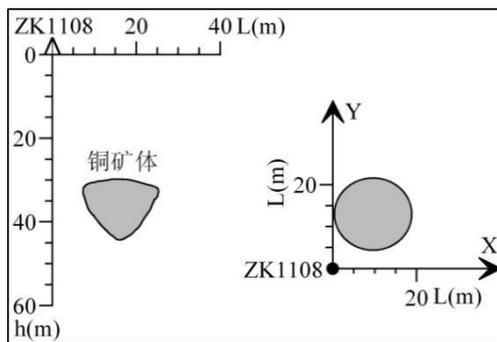


图 E.13 ZK1108 孔井旁矿体实际空间位置分布图

在完成 ZK 1108 孔地一井瞬变电磁测量后，矿山企业在技术人员的指导下进行了坑道验证，在解释推断的异常位置发现了富铜矿体。开采后显示，该矿体呈大漏斗形，矿体中心距地面约 38 m，距钻孔约 17 m，矿体最宽处约 18 m、最厚约 15 m，矿体在主断面及水平面上的投影如图 E.13 所示。由图 E.13 可见，对 ZK 1108 孔实测资料的推断解释结果与实际矿体中心主体位置完全吻合。

参 考 文 献

- [1] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M], 北京: 地质出版社, 1998.
- [2] 布塞利, 著. 蒋邦远, 译. 瞬变场法野外工作方法和数据处理手册[M], 北京: 地质出版社, 1992.
- [3] 牛之琏, 时间域电磁法原理[M], 长沙: 中南大学出版社, 2007.
- [4] 牛之琏, 脉冲瞬变电磁法及应用[M], 长沙: 中南工业大学出版社, 1986.
- [5] [美]戈鲁, [美]褐茨若格鲁, 著. 周克定, 等译. 电磁场与电磁波[M], 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 全国地质矿产标准化技术委员会物探化探分技术委员会. DZ/T 0187—1997 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [7] 张杰, 王兴春, 邓晓红, 等, 地一井瞬变电磁井旁板状导体异常响应特征分析[J], 物探化探计算技术, 2014, 36(6): 641-648.
- [8] 张杰, 邓晓红, 郭鑫, 等. 地一井 TEM 在危机矿山深部找矿中的应用实例[J], 物探与化探, 2013, 37(1): 30-34.