

doi: 10.11720/wtyht.2021.1158

张莹莹. 多辐射场源半航空瞬变电磁法多分量响应特征分析[J]. 物探与化探, 2021, 45(1): 102-113. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1158>
Zhang Y Y. An analysis of full-component response of multi-source semi-airborne TEM method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(1): 102-113. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1158>

多辐射场源半航空瞬变电磁法多分量响应特征分析

张 莹 莹

(新疆大学 地质与矿业工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 多辐射场源半航空瞬变电磁法是对电性源半航空瞬变电磁法的发展和补充, 具有探测深度大、地形适应性强和工作效率高的优点。基于一维正演理论, 本文对平行辐射场源、带角度多辐射场源和单个源模型在空中产生的三分量瞬变响应特征进行分析, 结果表明: 整体来说 z 分量瞬变响应曲线形态最为简单, 多辐射场源情况下响应增强的特点最明显, 最利于数据处理和解释; x 分量瞬变响应形态最为复杂, 在全场域经常表现出极性反转的变号现象, 但晚期信号幅值总是增大; y 分量瞬变响应受电流方向和接收点位置的影响最大, 曲线形态和响应幅值变化均较为复杂。结合偏移距变化下响应衰减幅度, 建议工作区域偏移距控制在辐射源长度的 5~6 倍内为宜。本文的研究结果可为实际勘查工作的野外施工布置及定性分析提供参考, 同时获得了对该方法的初步认识。

关键词: 多辐射场源; 电性源; 半航空瞬变电磁法; 三分量响应

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2021)01-0102-12

0 引言

半航空瞬变电磁法(semi-airborne transient electromagnetic method)起源于 Nabighian 提出的基于水平电偶极源, 地面发射、空中接收的半航空电磁法^[1], 该方法兼具地面发射功率强、勘探深度大和空中接收面积测量、工作效率高的双重优点, 目前已在地热调查、火山结构调查、地下巷道调查、地下水盐渍化及地下水监测、采空区探测、隧道勘察等领域得到成功应用^[2-10]。半航空瞬变电磁法的发射源可分为磁性源和电性源, 电性源装置观测信号的衰减速度比磁性源慢, 信号电平相对较大, 对保证晚期信号的观测质量有好处^[11]; 另一方面, 在地形条件复杂地区电性源布设可选范围大, 更灵活方便, 因此工作效率更高。此外, 电性源同时具有水平和垂直电场分量, 水平分量有利于低阻体探测, 垂直分量在地层电性界面感应的电荷有利于高阻体探测, 对良导和高阻目标体都有较好的分辨能力, 可以提供更丰富的地层电性信息^[12-13], 因此本文主要针对电性源半航空瞬变电磁法展开研究。

目前, 市场上有代表性的电性源半航空瞬变电磁系统, 如: Mogi 等设计的 Grounded Electrical Source Airborne Transient EM (GREATEM) 系统^[14]、吉林大学嵇艳鞠团队研制的无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统^[6-7]、中国科学院电子学研究所刘富波等研制的无人直升机搭载的半航空瞬变电磁勘探系统(S-ATEM)^[15]和成都理工大学王绪本团队研制的线圈传感器、同步采集装置以及实时数据处理软件三部分构成的接收系统(SATR)^[16-18]等, 搭载的飞行平台各异(可以是有人机或无人机, 如直升机、无人飞艇和旋翼机等), 可以采集多分量磁场响应, 也可以采集多分量磁场的时域导数响应, 在特定地区探测深度可达 800 m^[19]。在数据处理和解释方面, 主要集中在响应特征分析、视电阻率求解、快速成像和反演等方向^[20-35], 但研究大都基于单个辐射源。实际上电性源半航空瞬变电磁法的辐射源可以是单一的, 也可以是多个的, 回线源装置也可视作多个辐射源的叠加。通过调整发射源的位置及电流方向, 多辐射场源可以有针对性地加强垂直或水平分量采集信号强度, 削弱随机噪声, 提高半航空瞬变电磁法的分辨率。文中基于电偶极子剖分思想给出

收稿日期: 2020-04-01; 修回日期: 2020-10-13

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2017D01C064)

作者简介: 张莹莹(1989-), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要从事瞬变电磁场的理论和应用方面的研究工作。Email: zhangyy19890423@163.com

了多辐射场源半航空瞬变电磁法的正演计算方法,设计了平行辐射场源和带角度多辐射场源模型,对均匀半空间模型进行计算,对比分析了发射源的布置及电流方向变化对三分量瞬变电磁响应的影响,并讨论了发射源辐射范围。计算结果表明,通过调整发射源的方位和电流方向,多辐射场源半航空瞬变电磁法可以有针对性地加强采集信号强度,其中 z 分量曲线形态最简单, x 分量曲线形态最复杂,总是会出现变号现象, y 分量受发射源位置和电流的影响最大,最后根据响应衰减幅度建议工作区域控制在辐射源长度的 5~6 倍内为宜,具体可视实际工作地区的地质电阻率、地形等因素综合决定。

1 正演计算方法

建立如图 1a 所示的地表电偶极子层状地电模型,每层的参数由电阻率值 ρ_i 和层厚 h_i 确定, A 和 B 分别表示电偶极子的正极和负极,随时间变化的电流谐变因子为 $e^{-i\omega t}$, x 轴正方向与发射源电流方向一致, z 轴指向下,整个坐标系满足右手坐标系准则,坐标原点 O 位于电偶极子中心, M 是空中任意测点,离地高度 z ,在地表的投影为 P , P 与 O 之间为偏移距 r 。

图 1b 所示为多辐射场源剖分示意。利用偶极子叠加的方式求取有限长接地导线源产生的电磁响

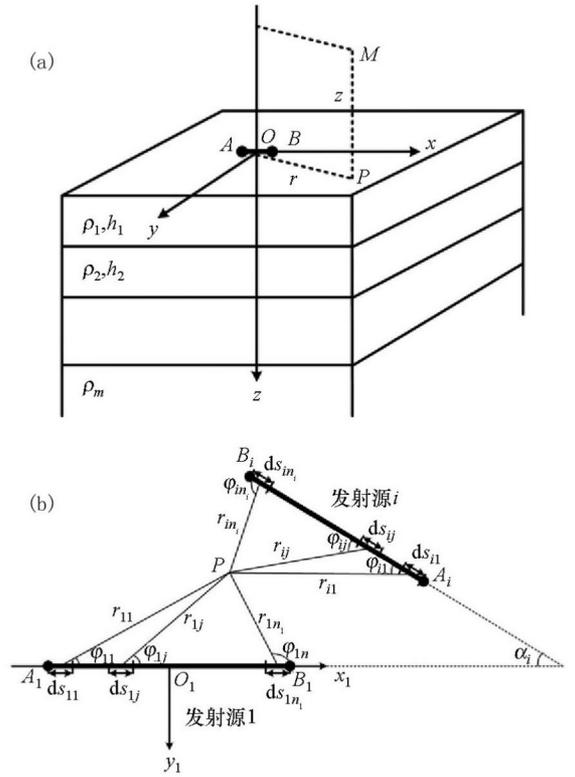


图 1 地表电偶极子层状模型 (a) 与多辐射场源剖分示意 (b)
 Fig. 1 Schematic diagram of an electric dipole on the surface of layered earth (a) and coordinate sketch of multi-source subdivision (b)

应,可得层状大地多辐射场源在地面以上产生的频率域磁感应强度表达式为^[26]:

$$B_x(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \cos \alpha_i \left[-\frac{P_{Eij} \mu_0 \sin \varphi_{ij} \cos \varphi_{ij}}{2\pi r_{ij}} \int_0^\infty \frac{2\lambda}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_{ij}) d\lambda + \frac{P_{Eij}}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_{ij} \cos \varphi_{ij} \cdot \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r_{ij}) d\lambda \right] - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sin \alpha_i \left[\frac{P_{Eij} \mu_0 (\cos^2 \varphi_{ij} - \sin^2 \varphi_{ij})}{2\pi r_{ij}} \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_{ij}) d\lambda + \frac{P_{Eij} \mu_0 \sin^2 \varphi_{ij}}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r_{ij}) d\lambda \right], \quad (1)$$

$$B_y(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sin \alpha_i \left[-\frac{P_{Eij} \mu_0 \sin \varphi_{ij} \cos \varphi_{ij}}{2\pi r_{ij}} \int_0^\infty \frac{2\lambda}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_{ij}) d\lambda + \frac{P_{Eij}}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_{ij} \cos \varphi_{ij} \cdot \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r_{ij}) d\lambda \right] + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \cos \alpha_i \left[\frac{P_{Eij} \mu_0 (\cos^2 \varphi_{ij} - \sin^2 \varphi_{ij})}{2\pi r_{ij}} \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_{ij}) d\lambda + \frac{P_{Eij} \mu_0 \sin^2 \varphi_{ij}}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_0(\lambda r_{ij}) d\lambda \right], \quad (2)$$

$$B_z(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \frac{P_{Eij}}{2\pi} \mu_0 \sin \varphi_{ij} \int_0^\infty \frac{\lambda^2}{\lambda + u_1/R_1} e^{\lambda z} J_1(\lambda r_{ij}) d\lambda. \quad (3)$$

式中:

$$R_1 = \text{cth} \left[u_1 h_1 + \text{arcth} \frac{u_1}{u_2} \text{cth} \left(u_2 h_2 + \dots + \text{arcth} \frac{u_{n-1}}{u_n} \right) \right],$$

$u_i = \sqrt{\lambda^2 + k_i^2}$, $k_i^2 = -i\omega\mu\sigma_i - \omega^2\mu\epsilon$; 当低频电磁波在导

电介质中传播时,可忽略位移电流,则 $k_i^2 = -i\omega\mu\sigma_i$; σ_i 是第 i 层地层的电导率; n 是电性源总个数; n_i 表示第 i 个电性源的剖分段数; $P_{Eij} = I_i ds_{ij}$, I_i 表示第 i 个电性源的供电电流大小, ds_{ij} 表示第 i 个电性源剖分的第 j 段的长度; α_i 表示第 i 个电性源与标准坐

标系 x 轴之间的夹角; φ_{ij} 表示第 i 个电性源剖分的第 j 段相对于观测点在地表投影 P 的夹角; r_{ij} 表示第 i 个电性源剖分的第 j 段相对于观测点在地表投影 P 的距离; J_0 、 J_1 分别表示零阶、1 阶贝塞尔函数。

当采用阶跃电流作为发射波形时,

$$I = \begin{cases} I_0, & t < 0; \\ 0, & t \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

根据频谱分析理论, 谐变场量与时间场量存在如下对应关系:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{F(\omega)}{-i\omega} e^{i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

根据积分变换理论, 时间域响应可以由频率域响应通过如下正弦变换得到^[12]:

$$\frac{\partial B_p(t)}{\partial t} = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \text{Im} B_p(\omega) \sin(\omega t) d\omega, \quad (6)$$

$p = x, y, z$ 。

上述频率域响应采用 D. Guptasarma 和 B. Singh 提

的 140 点滤波系数进行快速汉克尔数值滤波计算^[36], 时间域响应采用王华军导出的 250 点滤波系数进行频—时域响应转换^[37]。

2 一维正演模拟及特征分析

2.1 平行辐射场源

首先考虑一种 2 个发射源平行的特殊情况, 计算采用的均匀半空间模型电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 电性源长度均为 1 000 m, 发射波形为阶跃电流, 电流强度 1 A, 箭头所示即为发射电流方向, 分别讨论发射电流方向相同和相反两种情况与单个源的对比。由于飞行高度对半航空瞬变电磁响应的影响主要体现在早期, 且影响不大^[6, 38], 因此该参数不作为本文讨论的重点。为不失一般性, 文中所有测点的接收高度均设置为 -80 m 。图 2 为发射源坐标俯视图, 虚线所示为测线所在位置。

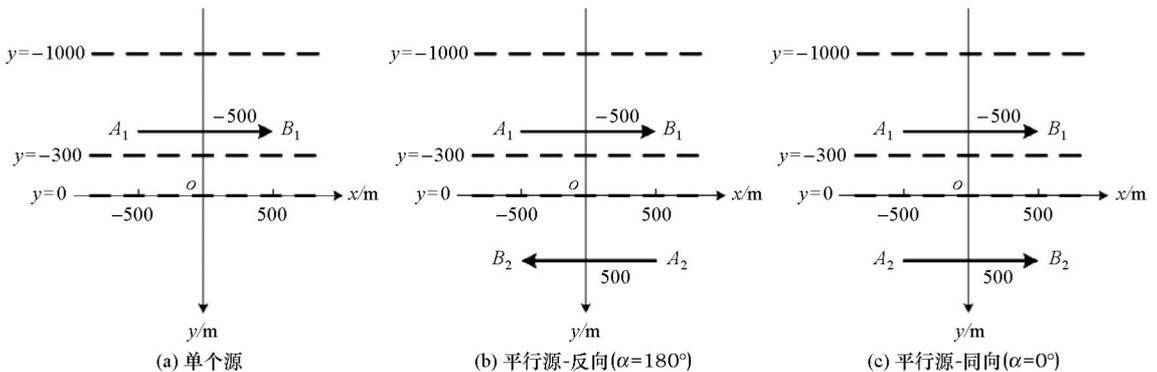


图 2 平行源及测线坐标俯视图

Fig. 2 Top view of parallel sources and survey lines

分别计算了 $y=0$ 、 -300 、 -1000 m 测线上不同点 ($x=500$ 、 1500 、 2500 m) 的三分量瞬变电磁响应。 $y=0 \text{ m}$ 测线刚好位于两源之间对称的位置处, 在该测线上当平行源电流方向相反时 x 和 z 分量响应相比单个源均会增大, 但 y 分量由于场的对称性却被抵消掉; 当平行源电流方向相同时情况却刚好相反, 由于场的对称性, x 和 z 分量响应为 0, 而 y 分量响应增大。对比小偏移距 (图 3a~c) 和大偏移距 (图 3g~i) 结果可见, x 和 z 分量曲线形态均较为光滑, 而 y 分量在小偏移距 (图 3b) 时曲线形态较为复杂, 会出现变号的极性反转现象, 随着偏移距的增加, 虽然早期瞬变响应的幅值减小, 但衰减的速度减慢, 在晚期仍能保持较大的幅值。

$y=-300 \text{ m}$ 测线位于两平行源之间, 在该测线上无论发射电流相同还是相反, 3 个分量的瞬变响应

均存在。当发射电流方向相反时 x 和 z 分量整体表现为响应幅值增大, 而 y 分量响应幅值减小, 特别是在晚期衰减更快, 幅值比单个源还要小 (图 4b、e、g); 在小偏移距时仅有 y 分量会出现极性反转 (图 4b), 其余分量形态均较为光滑。当发射电流方向相同时, x 、 y 、 z 三分量整体上均表现为响应幅值增大; 当偏移距较小时, 三分量曲线形态复杂, 均出现了变号的极性反转现象 (图 4a~c), 随着偏移距的增加, 该现象会逐渐消失。偏移距变化对三分量响应的表现主要影响在早期, 偏移距越大早期三分量瞬变响应相比单个源的曲线分异越明显, 多辐射场源的优势越突出 (图 4d~i)。对比电流方向相同和相反两种情况可见, 对于 x 和 z 分量, 电流方向相反时响应幅值大于电流方向相同的情况, 而 y 分量刚好相反。

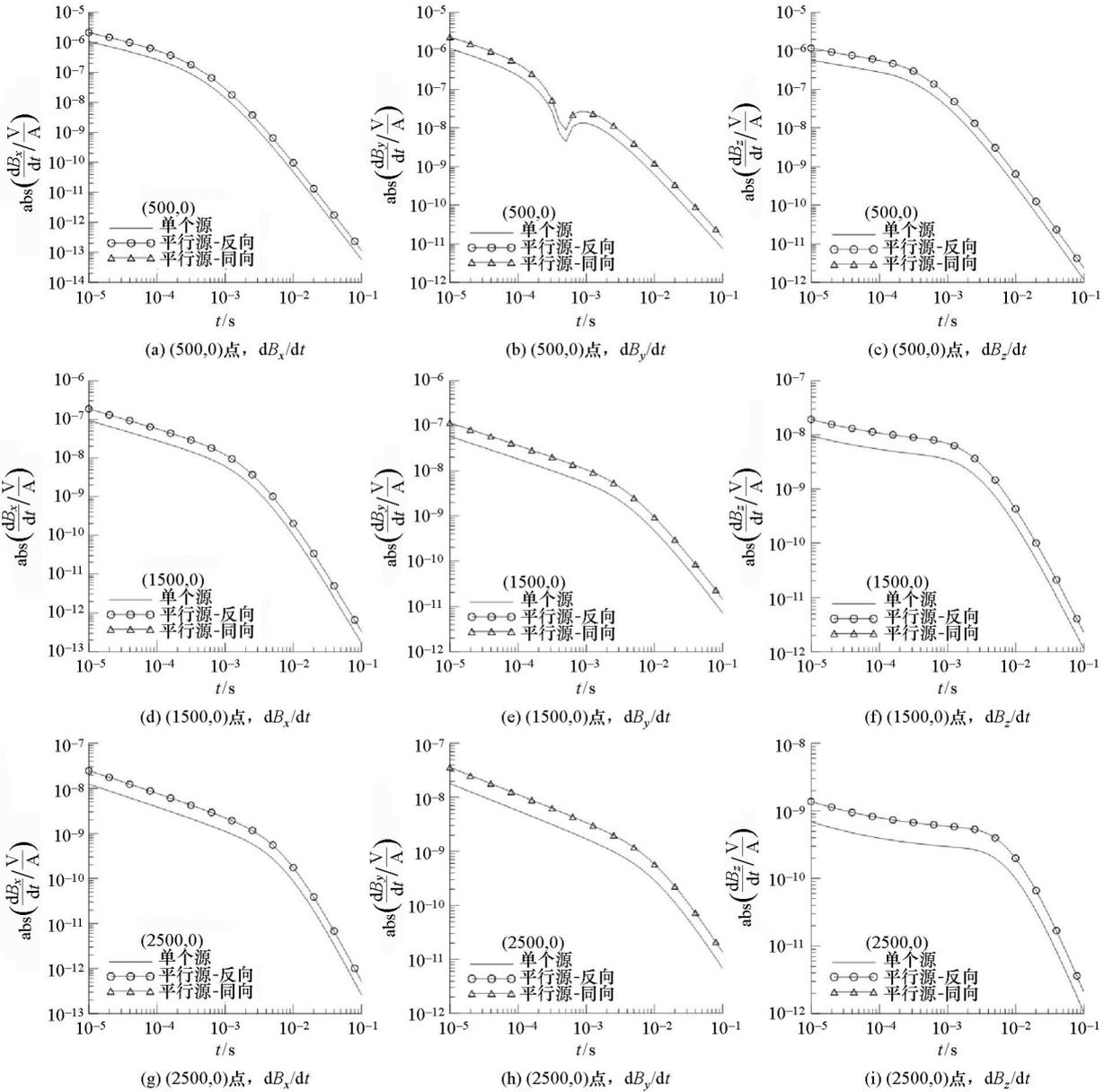


图 3 $y=0\text{ m}$ 测线平行源多分量响应对比

Fig. 3 Multi-component responses of parallel sources on survey line $y=0\text{ m}$

$y=-1000\text{ m}$ 测线位于两平行源外侧,该测线同样存在 3 个分量的瞬变响应,当平行源发射电流相反时, x 和 z 分量曲线形态表现类似,虽然早期响应比单个源幅值小,但衰减速度慢因此晚期响应幅值仍比单个源大,在小偏移距(图 5a、c)和较大偏移距(图 5d、f)时曲线均存在变号现象,随着偏移距变化, y 分量响应的幅值在晚期总是比单个源的更小(图 5b、e、h);当发射电流方向相同时,无论小偏移距还是大偏移距, x 和 z 分量不仅曲线形态简单,在全时段还比单个源有更大的幅值,偏移距变化对 y 分量的影响主要在早期,在晚期 y 分量总是表现出比单个源幅值大的特点(图 5b、e、h)。随着偏移距

的增加,平行源三分量响应的形态更为简单,电流方向相同时三分量总是比单个源幅值更大,电流方向相反时 x 和 z 分量在晚期也总是比单个源幅值更大,但受发射电流方向影响, y 分量幅值更小。

2.2 带角度多辐射场源

为了使讨论结果不失一般性,本文设计了带角度多辐射场源模型,均匀半空间模型电阻率为 $100\ \Omega \cdot \text{m}$,发射源 $A_1B_1=1000\text{ m}$, $A_2B_2=1414\text{ m}$,发射电流强度均为 1 A ,接收高度 -80 m 。发射源及测线坐标俯视图见图 6,虚线所示为测线所在位置,分别计算了 $y=0、-1000\text{ m}$ 测线上不同点的三分量瞬变电磁响应,分两种情况(两发射源夹角 $\alpha > 90^\circ$ 及 $\alpha <$

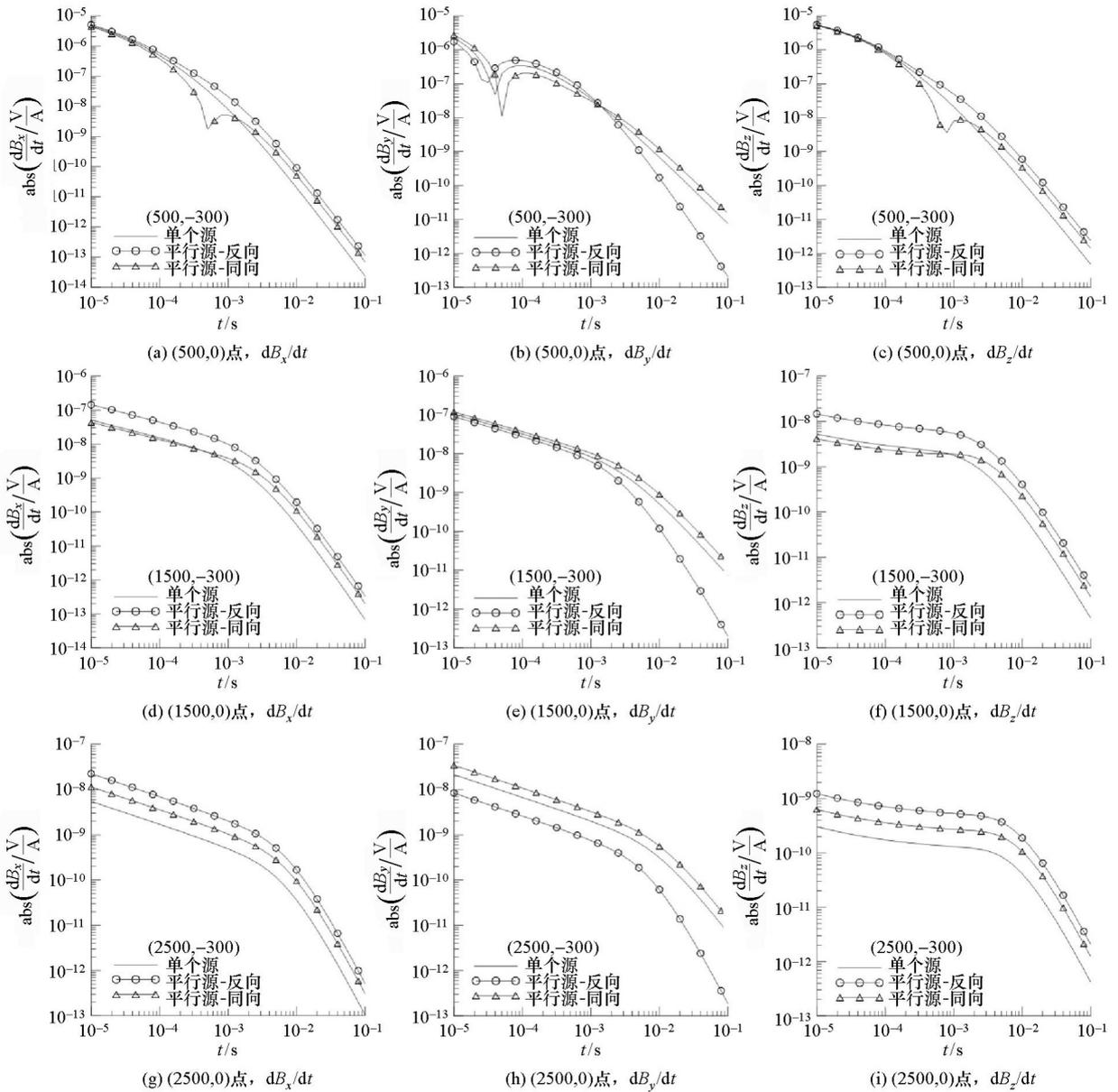


图 4 y=-300 m 测线平行源多分量响应对比

Fig. 4 Multi-component responses of parallel sources on survey line y=-300 m

90°) 讨论带角度多源与单个源多分量响应特征。

y=0 m 测线跨过两发射源之间的区域,该测线上无论 $\alpha > 90^\circ$ 还是 $\alpha < 90^\circ$, 相比较单个源, x 分量在大、小偏移距情况下形态均更为复杂, 出现变号现象, 随着偏移距增大, 变号出现的时刻会逐渐推迟, 但 x 分量的幅值在全时域均有明显增大(图 7a、d、g、j、m); $\alpha < 90^\circ$ 时, 相比较单个源 y 分量幅值在大、小偏移距情况下均有增大, 但在小偏移距时会出现变号现象, 而 $\alpha > 90^\circ$ 的 y 分量响应不仅形态更为复杂, 幅值也会远小于单个源情况(图 7b、e、h、k、n); 相比较单个源, z 分量响应在大偏移距时幅值在全时域均会增大, 偏移距越大, 幅值增大越明显, 但是

小偏移距时晚期可能出现幅值大幅减小的情况(图 7c、f、i、l、o)。

y=-1 000 m 测线位于两发射源之外的区域, 该测线上 x 分量响应特征与 0 m 测线类似; 带角度多源 y 分量在小偏移距时会出现极性反转, 随着偏移距增大, 变号现象会消失, 且 $\alpha < 90^\circ$ 的 y 分量晚期响应总是大于单个源, 而 $\alpha > 90^\circ$ 的情况刚好相反(图 8b、e、h); 相比较单个源, 无论 $\alpha > 90^\circ$ 还是 $\alpha < 90^\circ$, z 分量响应在大、小偏移距情况下整体均表现出幅值增大的现象, 随着偏移距增大, 多辐射场源加强信号强度的特征愈发明显, 但在小偏移距时可能会出现极性反转, 随着偏移距增大, 三分量响应的幅值均会

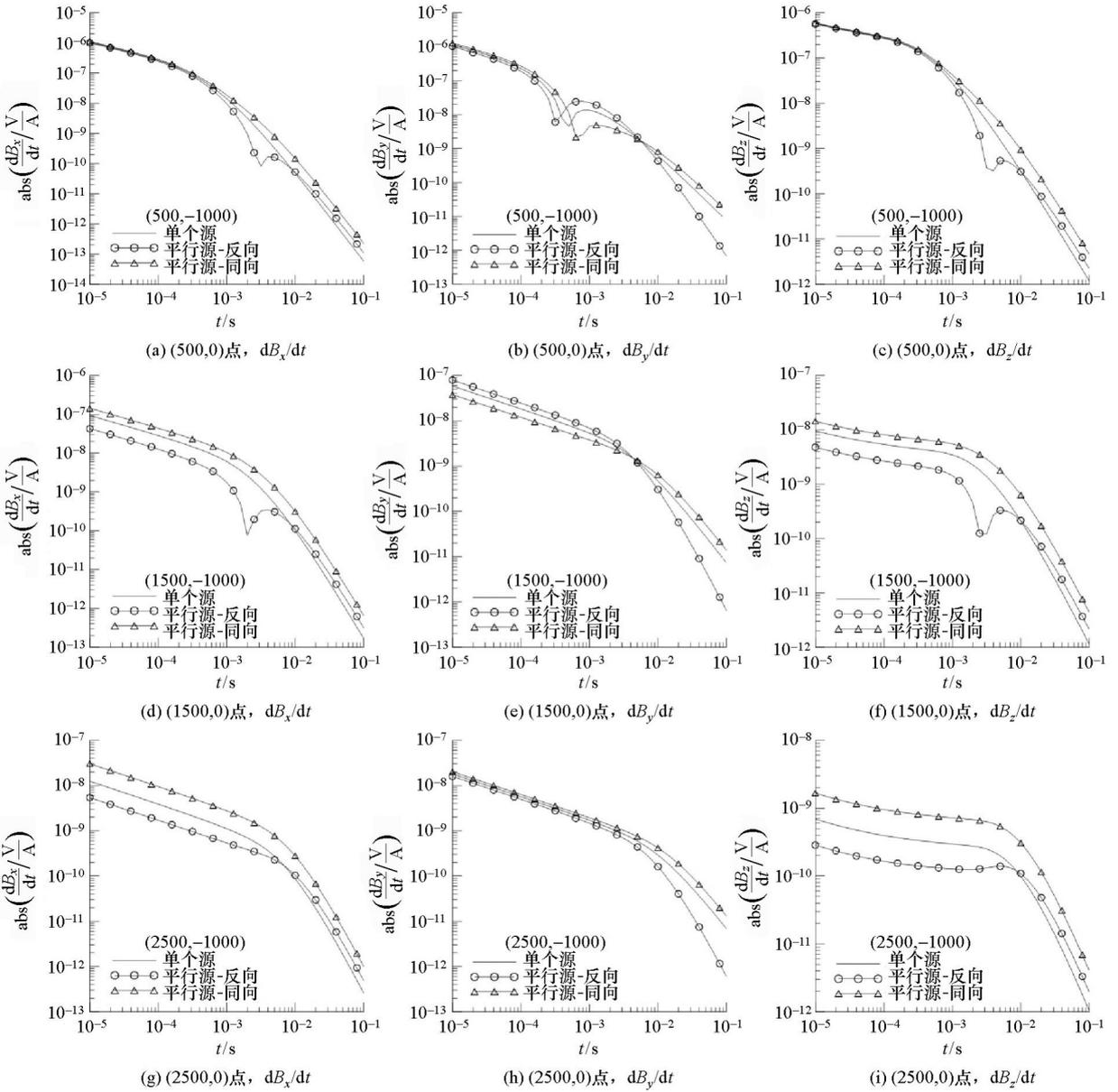


图 5 $y=-1000$ m 测线平行源多分量响应对比

Fig. 5 Multi-component responses of parallel sources on survey line $y=-1000$ m

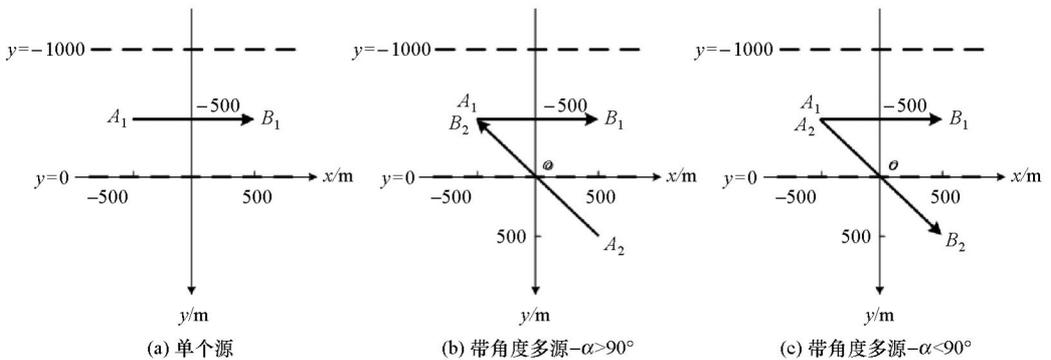


图 6 带角度多源及测线坐标俯视图

Fig. 6 Top view of angled sources and survey lines

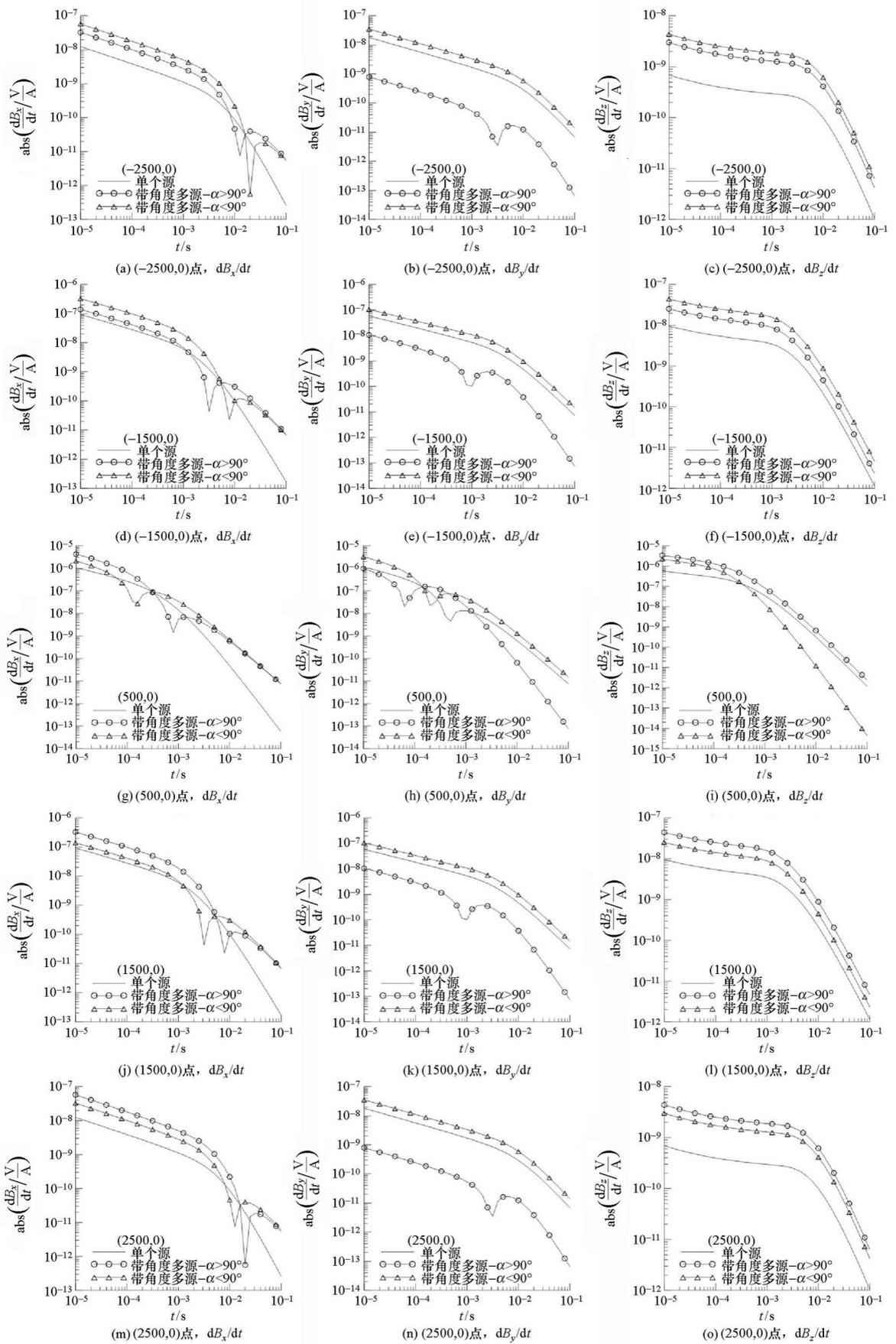


图7 y=0 m 测线带角度多源多分量响应对比

万方数据 Fig. 7 Multi-component responses of angled sources on survey line y=0 m

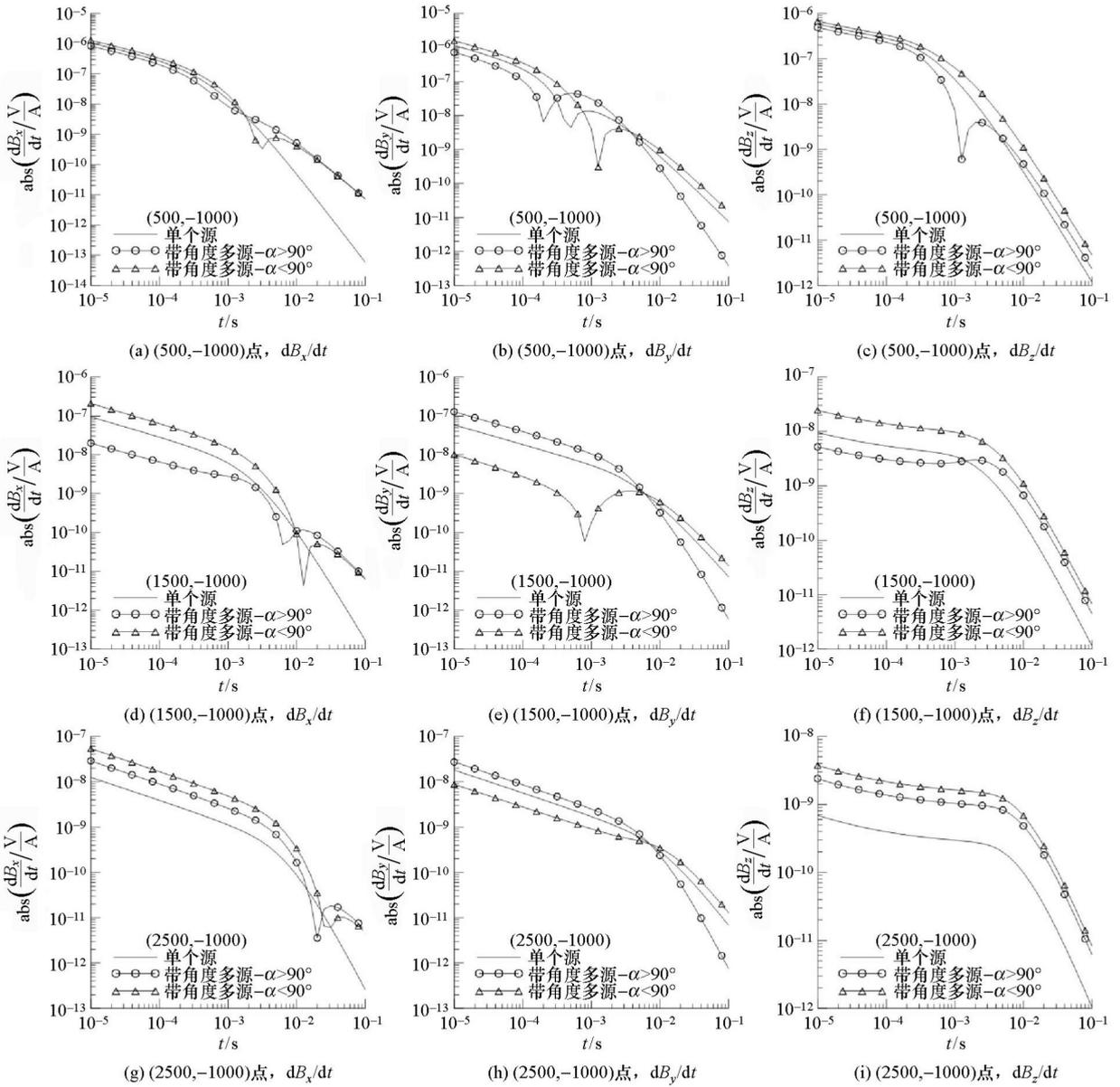


图 8 $y = -1000$ m 测线带角度多源多分量响应对比

Fig. 8 Multi-component responses of angled sources on survey line $y = -1000$ m

减小但多辐射场源信号衰减的幅度整体上较单个源慢,在大偏移距时仍能保持较大的幅值,这种现象在晚期尤为明显(图 8c、f、i)。

3 发射源辐射范围分析

以单个源为例分析半航空瞬变电磁法的发射源辐射范围。计算采用的均匀半空间模型电阻率 $100 \Omega \cdot m$,发射源 $A_1 B_1 = 1000$ m,发射电流强度均为 1 A,接收高度 -80 m,发射源及测点坐标俯视图见图 9a,分别计算了与发射源呈 45° 夹角测线上偏移距为 100、300、500、700、1000、3000、5000、7000 m 测

点的多分量响应。

由图 9 可见,随着偏移距的增加三分量瞬变响应曲线分异明显, x 分量在近区随着偏移距增大全时域响应幅值也增大,但在远区早期响应幅值会减小而晚期响应由于衰减变慢仍能保持较大幅值,反而比近区晚期响应幅值大数个数量级; y 分量随着偏移距增大曲线形态变得复杂,出现极性反转的变号现象,响应幅值在全时域会逐渐减小,早期响应整体上呈现出幅值变小的特征,晚期响应幅值不会大于近区的晚期响应,但曲线衰减变缓; z 分量曲线形态变化规律,随着偏移距增大,会出现类似于“平台”的特征,且平台跨越的时窗范围逐渐增大,早期

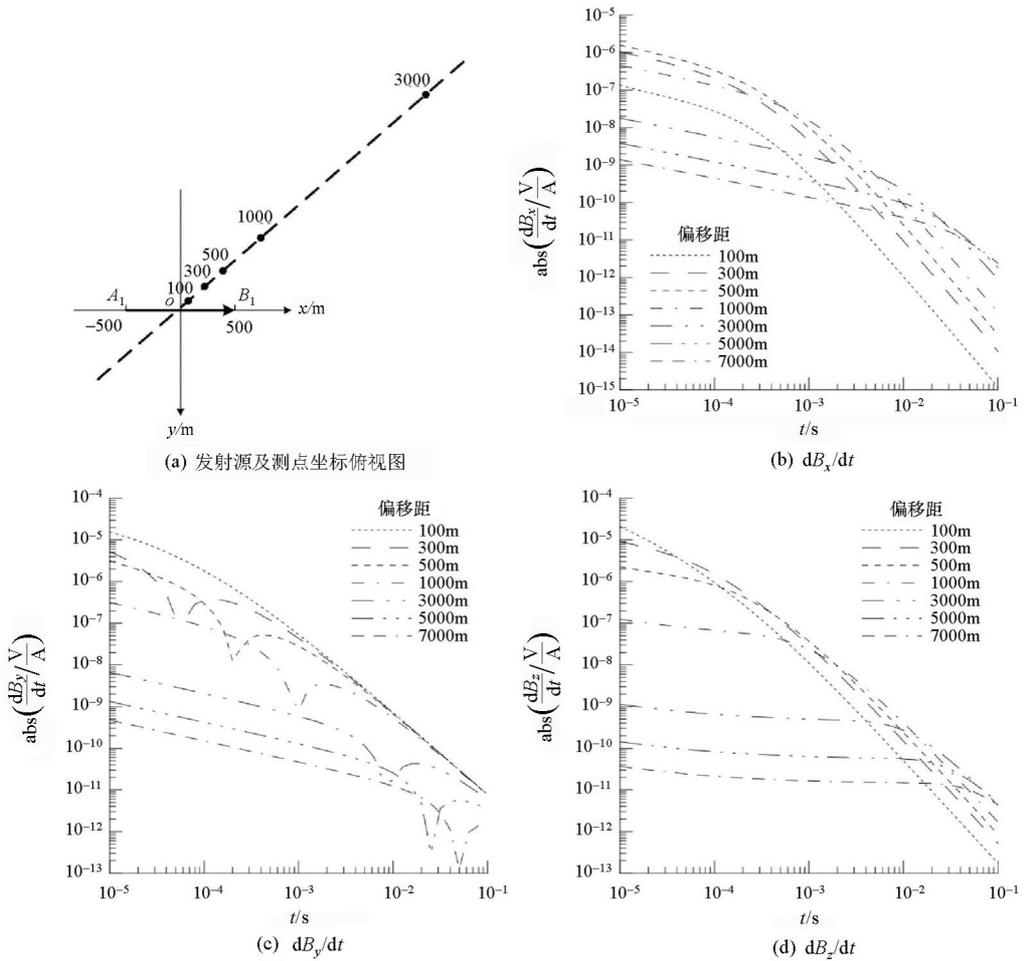


图9 不同偏移距多分量响应对比

Fig. 9 Multi-component responses at different offsets

响应幅值逐渐减小,由于瞬变响应衰减变缓晚期响应反而能保持较大幅值。综合图9b、c、d可知,当测点偏移距达到发射源长度7倍处时(偏移距7000m),在0.01~100ms时窗范围内,三分量幅值衰减的幅度不足3个数量级,特别是z分量,仅约1个数量级,曲线在全时域变化平缓,“平台”持续时间较长,且随着偏移距增加,“平台”持续的时窗会持续增大,这并不利于数据采集和信号处理解释,因此建议半航空瞬变电磁方法的工作区域偏移距控制在辐射源长度的5倍内为宜。

4 结论与讨论

多辐射场源半航空瞬变电磁法采用多个辐射源地面发射、空中接收的工作方式,兼具地面发射功率强、勘探深度大和空中接收面积测量、工作效率高的特点。为了发展该方法的施工技术、数据处理和解释技术,需要对多分量响应特征进行分析,取得对该法的初步认识。本文基于多辐射场源半航空瞬变场

一维正演理论,对发射源位置变化、电流方向变化时不同偏移距下的三分量瞬变响应进行研究,从响应特征出发对半航空瞬变电磁法的工作区域进行分析,取得了如下几点主要认识:

1) 对于平行布置的两个发射源,当电流方向相同时,相比较单个源,在全场域x和z分量瞬变响应均得到加强,特别是在晚期,信号增强的特点会更明显,但在小偏移距情况下这两个分量可能会由于极性反转出现变号现象,y分量则整体均表现出响应增大的特点。当电流方向相反时,虽然在全场域x和z分量瞬变响应在晚期仍会增大,但在早期受测点位置影响可能会出现幅值减小的情况,y分量在全场域整体表现出响应减小的特点。此外,在设计发射源时,需要注意在两源之间对称的测线上,可能会出现某一分量响应为零的情况。

2) 对于带角度布置的两个发射源,当两源之间的夹角 $\alpha < 90^\circ$ 时,相比较单个源,x分量在全场域普遍形态复杂,出现极性反转的变号现象,偏移距越大变号出现的时刻越晚,响应幅值整体均表现出增大

的特点;受测点位置影响, y 分量在早期可能增大或减小,但在晚期响应总是增大; z 分量在全场域整体表现为增强的特点,但在小偏移距的个别位置处可能被削弱。当两源之间的夹角 $\alpha > 90^\circ$ 时, x 和 z 分量特点类似 $\alpha < 90^\circ$ 的情况; y 分量虽然在早期可能增大或减小,但晚期响应总是减小。显然,从异常的复杂程度上看, z 分量形态最为简单,多辐射场源情况下响应增大的特点最明显,最利于数据处理和解释; x 分量形态最为复杂,总是表现出极性反转的变号现象; y 分量受发射电流方向和接收点位置的影响最大,曲线形态和响应幅值均较为复杂。

3)对于单个源情况,随偏移距变化三分量瞬变响应曲线分异明显, y 分量响应形态更为复杂,响应幅值总是减小, x 和 z 分量幅值在早期整体呈减小趋势,但随着偏移距变化由于衰减变慢会出现类似于“平台”的特征,因此在晚期仍能保持较大幅值,随着偏移距增加,“平台”持续的时窗会持续增大,曲线分异特征减弱,这并不利于数据采集和信号处理解释,结合 z 分量响应在全时域衰减幅度,建议半航空瞬变电磁方法的工作区域偏移距控制在辐射源长度的5~6倍内为宜,具体可视实际工作地区的电阻率、地形等因素综合决定。

参考文献 (References):

- [1] Nabighian N M. Electromagnetic methods in applied geophysics-theory (volume 1) [M]. Tulsa OK: Society of exploration, 1988.
- [2] Mogi T, Kusunoki K, Kaieda H, et al. Grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey of mount Bandai, north-eastern Japan [J]. Exploration Geophysics, 2009, 40: 1-7.
- [3] Allah S A, Ito H, Mogi T, et al. Three-dimensional resistivity characterization of a coastal area; Application of grounded electrical-source airborne transient electromagnetic (GREATEM) survey data from Kujukuri beach, Japan [J]. Journal of Applied Geophysics, 2013, 99(3): 1-11.
- [4] Ito H, Mogi T, Jomori A, et al. Further investigation of underground resistivity structures in coastal areas using grounded-source airborne electromagnetics [J]. Earth Planets & Space, 2011, 63(8): e9-e12.
- [5] Ito H, Kaieda H, Mogi T, et al. Grounded electrical-source airborne transient electromagnetics (GREATEM) survey of Aso Volcano, Japan [J]. Exploration Geophysics, 2013, 44: A-D.
- [6] 嵇艳鞠,王远,徐江,等.无人飞艇长导线源时域地空电磁勘探系统及其应用[J].地球物理学报,2013,56(11):3640-3650. Ji Y J, Wang Y, Xu J, et al. Development and application of the grounded long wire source airborne electromagnetic exploration system based on unmanned airship [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3640-3650.
- [7] 李肃义,林君,陆贵红,等.电性源时域地空电磁数据小波去噪方法研究[J].地球物理学报,2013,56(9):3145-3152. Li S Y, Lin J, Yang G H, et al. Ground-airborne electromagnetic signals de-noising using a combined wavelet transform algorithm [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3145-3152.
- [8] 方涛,张建军,付成群,等.无人机地空瞬变电磁系统在冶山地下巷道探测中的应用[J].地球物理学进展,2015,30(5):2366-2372. Fang T, Zhang J J, Fu C Q, et al. Using ground-airborne transient electromagnetic system on unmanned aerial vehicle detecting Yeshan underground tunnels [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(5): 2366-2372.
- [9] 刘金鹏.电性源地空瞬变电磁法在采空区探测中的应用[D].西安:长安大学,2018. Liu J P. The application of ground-airborne transient electromagnetic method with electric source in the gobs detection [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [10] 吴启龙.半航空瞬变电磁视电阻率成像及在复杂地形区域隧道勘察中的应用[D].济南:山东大学,2019. Wu Q L. Semi-Airborne transient electromagnetic apparent resistivity imaging and its application in tunnel survey in complex terrain areas [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [11] 刘天佑.地球物理勘探概论[M].北京:地质出版社,2007. Liu T Y. Introduction to geophysical exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [12] Kaufman A A, Keller G V. 频率域和时间域电磁测深[M].王建谋,译.北京:地质出版社,1987. Kaufman A A, Keller G V. Electromagnetic sounding in frequency and time domain [M]. Wang J M. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [13] Um E S. On the physics of galvanic source electromagnetic geophysical methods for terrestrial and marine exploration [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2005.
- [14] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of grounded electrical source airborne EM (GREATEM) [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 61-64.
- [15] 刘富波,李巨涛,刘丽华,等.无人机平台半航空瞬变电磁勘探系统及其应用[J].地球物理学进展,2017,32(5):2222-2229. Liu F B, Li J T, Liu L H, et al. Development and application of a new semi-airborne transient electromagnetic system with UAV platform [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2222-2229.
- [16] 吴寿勇.半航空电磁勘查系统数据采集关键技术研究[D].成都:成都理工大学,2014. Wu S Y. Research of data acquisition key technologies of half aviation electromagnetic exploration system [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [17] 李琳琳.半航空瞬变电磁发射机关键技术研究[D].成都:成都理工大学,2015. Li L L. Study on the key technology of the GREATEM transmitter [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [18] 王金梅.无人机半航空瞬变电磁信号接收技术研究[D].成都:成都理工大学,2018. Wang J M. The research on receiving technology of semi-airborne

- transient electromagnetic receiver [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [19] 张莹莹, 李貅. 地空瞬变电磁法研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(4): 1735 - 1741.
Zhang Y Y, Li X. Research progress on ground-airborne transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(4): 1735 - 1741.
- [20] 阳贵红. 时域电性源地-空电磁探测数据预处理研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Yang G H. Data preprocessing research on electrical-source of time domain ground-airborne electromagnetic [D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [21] 张莹莹. 水平电偶源地空系统瞬变电磁法多分量解释技术及全域视电阻率定义研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
Zhang Y Y. Study on multi-component interpretation and full field apparent resistivity definition of semi-airborne transient electromagnetic method with electrical dipole on the surface [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [22] 张莹莹, 李貅, 姚伟华, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法多分量全域视电阻率定义 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(8): 2745 - 2758.
Zhang Y Y, Li X, Yao W H, et al. Multi-component full field apparent resistivity definition of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method with galvanic sources [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(8): 2745 - 2758.
- [23] 宿传玺. 浅层岩溶半航空瞬变电磁响应规律与试验研究 [D]. 济南: 山东大学, 2018.
Su C X. Responses and experimental studies of semi-airborne transient electromagnetic for shallow karst [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [24] 曹凤凤. 地空瞬变电磁起伏地形效应的特征研究 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
Cao F F. Study on characteristics of rugged terrain effect of ground-airborne transient electromagnetic [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [25] 李貅, 张莹莹, 卢绪山, 等. 电性源瞬变电磁地空逆合成孔径成像 [J]. 地球物理学报, 2015, 58(1): 277 - 288.
Li X, Zhang Y Y, Lu X S, et al. Inverse synthetic aperture imaging of ground-airborne transient electromagnetic method with a galvanic source [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(1): 277 - 288.
- [26] 张莹莹. 地空瞬变电磁逆合成孔径成像方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
Zhang Y Y. Study on inverse synthetic aperture imaging of ground-airborne transient electromagnetic method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [27] 张莹莹, 李貅, 李佳, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁法快速成像方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(2): 869 - 876.
Zhang Y Y, Li X, Li J, et al. Fast imaging technique of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(2): 869 - 876.
- [28] 吕仁斌. 半航空瞬变电磁数据处理及快速成像方法研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
Lyu R B. Research on rapid simulation and data processing of semi-aerial transient electromagnetic [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017.
- [29] 稽艳鞠, 徐江, 吴琼, 等. 基于神经网络电性源半航空视电阻率反演研究 [J]. 电波科学学报, 2014, 29(5): 973 - 980.
Ji Y J, Xu J, Wu Q, et al. Apparent resistivity inversion of electrical source semi-airborne electromagnetic data based on neutral network [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(5): 973 - 980.
- [30] 徐江. 基于人工神经网络电性源半航空视电阻率反演方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
Xu J. Apparent resistivity inversion research of electrical-source of semi-airborne transient electromagnetic based on neutral network method [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [31] 许洋. 半航空一维正反演研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
Xu Y. Study about 1D forward and inversion of SATEM [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [32] 李佳. 多辐射场源地空瞬变电磁一维反演方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
Li J. Study on 1D inversion of multi-source grounded-airborne transient electromagnetic method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [33] 赵涵, 景旭, 李貅, 等. 多辐射场源地空瞬变电磁一维反演方法研究 [J]. 物探与化探, 2019, 43(1): 132 - 142.
Zhao H, Jing X, Li X, et al. A study of 1D inversion of multi-source ground-airborne transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1): 132 - 142.
- [34] 张澎, 余小东, 许洋, 等. 半航空时间域电磁数据一维自适应正则化反演物 [J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(1): 1 - 8.
Zhang P, Yu X D, Xu Y, et al. An adaptive regularized inversion of 1D semi-airborne time-domain electromagnetic data [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(1): 1 - 8.
- [35] Abdallah S, Mogi T, Kim H J. Three-dimensional inversion of GREATEM data: Application to GREATEM survey data from Kujukuri Beach, Japan [J]. Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 99: 1 - 7.
- [36] Guptasarma D, Singh B. New digital linear filters for Hankel J0 and J1 transforms [J]. Geophysical Prospecting, 1997, 45: 745 - 762.
- [37] 王华军. 正余弦变换的数值滤波算法 [J]. 工程地球物理学报, 2004, 1(4): 329 - 335.
Wang H J. Digital filter algorithm of the sine and cosine transform [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2004, 1(4): 329 - 335.
- [38] Mogi T, Tanaka Y, Kusunoki K, et al. Development of grounded electrical source airborne transient EM (GREATEM) [J]. Exploration Geophysics, 1998, 29: 61 - 64.

An analysis of full-component response of multi-source semi-airborne TEM method

ZHANG Ying-Ying

(College of Geological and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: Multi-source semi-airborne TEM is a supplement and development of electric source semi-airborne TEM. It has characteristics of great detective depth, strong adaptability in complex topography and high working efficiency. Based on the one-dimensional forward algorithm, the author analyzed the full-component response of parallel source and multi-source and single-source models. The results show that the curve of vertical component z is the simplest and it can be significantly strengthened with multi-source, which means this component is the most suitable one for data processing and interpretation. The most complex component is x . The curve always shows sign-changing in full field, but the magnitude can be strengthened in late stage. As the horizontal component y is most affected by current direction and receiver location, the curve shape and magnitude change are both complicated. Combined with the response characteristics of magnitude variation versus offset, it is suggested that the working area should be within the range of 5~6 times of source length. The research results in this paper can provide a reference for technical support to its application and obtain a preliminary understanding of the method.

Key words: multi-source; electric source; semi-airborne transient electromagnetic method; three-component response

(本文编辑:沈效群)