doi: 10.11720/wtyht.2021.1566

刘彦涛,彭莉红,孙栋华,等.基于三维有限元的航空大地电磁倾子响应特征[J].物探与化探,2021,45(5):1329-1337. http://doi.org/10. 11720/wtyht.2021.1566

Liu Y T, Peng L H, Sun D H, et al. Research on response characteristics of airborne magnetotelluric tipper based on three-dimensional finite element [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5):1329-1337. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1566

## 基于三维有限元的航空大地电磁倾子响应特征

刘彦涛<sup>1,2,3</sup>,彭莉红<sup>1,2,3</sup>,孙栋华<sup>1,2,3</sup>,张伟盟<sup>1,2,3</sup>,王海红<sup>1,2,3</sup> (1.核工业航测遥感中心,河北石家庄 050002; 2.中核集团铀资源地球物理勘查技术(重点实验 室),河北石家庄 050002; 3.河北省航空探测与遥感技术重点实验室,河北石家庄 050002)

摘要: 倾子是航空大地电磁数据解释的重要参数,研究倾子响应特征对数据解释具有重要意义。文中介绍了航空 大地电磁基本原理与 ZTEM 航空大地电磁数据采集系统,利用三维有限元方法对简单异常体倾子响应进行了模 拟,分析测线与岩性分界面斜交情况下倾子 *T<sub>x</sub>* 与倾子 *T<sub>y</sub>* 的响应特征。研究结果表明:当测线与岩性分界面斜交 时,倾子 *T<sub>x</sub>* 与倾子 *T<sub>y</sub>* 响应皆存在且对岩性分界面有所反映,随测线方向改变,倾子表现出相应规律。本文研究进 一步加深了倾子对岩性分界面响应特征的理解,可为倾子资料解释提供参考与依据。

关键词: 倾子; 航空大地电磁; 三维有限元; ZTEM

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2021)05-1329-09

#### 0 引言

大地电磁法利用天然电磁场作为探测场源,具 有探测深度大、设备轻便等优点<sup>[1]</sup>。为对高山、荒 漠、沼泽地等勘探人员无法到达区域进行地球物理 勘探,可选方法之一为运用航空器搭载测量仪器对 这些区域进行探测,也因此航空大地电磁近些年得 到了快速发展<sup>[2-5]</sup>。与传统大地电磁方法原理相 同,航空大地电磁利用天然电磁场作为场源,接收由 于地下地质体横向不均匀激励的垂直磁场分量,结 合地面接收到的磁场水平分量,换算倾子参数,反演 地下地质体电阻率分布,从而达到探测目的。远方 天然电磁场可看作平面电磁波垂直入射到地面,只 有当地质体存在横向电性变化时,才会激励起垂直 磁场<sup>[6]</sup>。不同于传统大地电磁法,由于航空大地电 磁空中探测无法接地,只能采集磁场分量,通过磁场 分量可换算得到倾子参数,再利用倾子参数对地下 地质体进行地球物理解释。

倾子是对地质体电性横向不均匀性的一种反 映<sup>[7]</sup>,由于磁场垂直分量强度小且受干扰大,早期 大地电场法勘探中没有得到成功应用,1989年 Labson 提出远参考技术对原始数据进行降噪处理,并 通过优化磁场接收装置,成功使用倾子参数进行了 地球物理解释<sup>[8]</sup>。近些年对大地电磁倾子响应的 研究较多<sup>[9-12]</sup>,尤其是利用数值模拟算法模拟倾子 对典型地电模型的响应特征,分析其响应规 律<sup>[13-17]</sup>,研究覆盖层、横向电阻率差异大小、地形、 测线高度等因素对倾子的影响<sup>[18-20]</sup>。前人数值研 究中所选测线大多垂直岩性分界面,使异常体倾子 响应理想化,而在实际探测中,不能保证设计测线与 所有横向地电断面垂直。本文首先简单介绍了航空 大地电磁勘探原理以及航空大地电磁 ZTEM 探测系 统,利用三维有限元方法对测区磁场分量分布特征 进行模拟分析,之后建立典型地电模型,研究了当测 线与横向地电断面斜交时的倾子响应特征。

#### 1 方法原理

天然电磁场以平面波的形式垂直入射到地下, 入射的平面电磁波中不存在磁场垂直分量,当地下 地质体存在横向电性变化时,将会激励垂直磁场,这

收稿日期: 2020-12-14; 修回日期: 2021-07-07

第一作者:刘彦涛(1994-),男,助理工程师,硕士,主要从事航空电磁、航磁勘查研究工作。Email: liuyantao703@163. com

个垂直磁场与两个水平磁场存在复线性关系:

 $H_{z}(\omega) = T_{x}(\omega) H_{x}(\omega) + T_{y}(\omega) H_{y}(\omega)$ ,(1) 式中: $H_{x}(\omega) \setminus H_{y}(\omega) \setminus H_{z}(\omega)$ 分别为不同频率  $x \setminus y \setminus z$ 磁场分量, $T_{x}(\omega) \setminus T_{y}(\omega)$ 为倾子系数。倾子是复数 值且随频率变化。倾子参数与地下地质体电性分布 相关而不与激发电磁波极化方向相关,所以倾子可 以作为解释地下电性分布的参数。

在式(1)两边分别乘以  $H_x(\omega) \setminus H_y(\omega)$ 的共轭复数值<sup>[6]</sup>,构建方程组:

$$\begin{cases} [H_{z}H_{x}^{*}] = T_{x}[H_{x}H_{x}^{*}] + T_{y}[H_{y}H_{x}^{*}] ,\\ [H_{z}H_{y}^{*}] = T_{x}[H_{x}H_{y}^{*}] + T_{y}[H_{y}H_{y}^{*}] , \end{cases}$$
(2)

式中: $[H,H_*^*]$ 表示  $H_*$  与  $H_*$  共轭复数乘积的累加

和,其他表示类似。

通过方程组(2)可求取倾子值  $T_x \ T_y$ :  $\left( T = \frac{ [H_z H_x^*] [H_y H_y^*] - [H_z H_y^*] [H_y H_x^*] }{ [H_y H_x^*] [H_y H_x^*] } \right)$ 

$$\begin{cases} T_{x} = [H_{x}H_{x}^{*}][H_{y}H_{y}^{*}] - [H_{y}H_{x}^{*}][H_{x}H_{y}^{*}] ,\\ T_{y} = \frac{[H_{z}H_{y}^{*}][H_{x}H_{x}^{*}] - [H_{z}H_{x}^{*}][H_{x}H_{y}^{*}]}{[H_{x}H_{x}^{*}][H_{y}H_{y}^{*}] - [H_{y}H_{x}^{*}][H_{x}H_{y}^{*}]} , \end{cases}$$
(3)

#### 2 ZTEM 系统

ZTEM 系统是目前全球应用较为广泛的商用航 空大地电磁系统,系统主要由两部分组成,如图1。



(a) 空中Hz接收模块

(b) 地面基站Hx、Hv接收模块

图 1 ZTEM 系统 Fig. 1 System of ZTEM

空中接收线圈用于接收磁场 H<sub>2</sub> 分量,线圈直径 7.4 m,考虑到直升机对接收信号的影响,同时保证 飞行员的可操控性,线圈吊挂于直升机下方 85 m 处。线圈上安置 3 个 GPS 天线,实时监测线圈姿 态,用于消除水平和垂直电磁场交叉耦合的效应。 数据采集过程中控制线圈离地高度约 100 m,飞机 飞行速度 80 km/h。

地面接收线圈主要是由 3 个正交的边长为 3.05 m 的方形接收线圈组成,安置在工作区 25 km 范围内且人文干扰相对较小的固定地点,用来观测 水平磁场分量 H<sub>x</sub>和 H<sub>y</sub>。基站 5 km 范围内最好无 高压线通过,并且没有无线电基站、信号发射站等发 射无线信号的装置。

ZTEM 系统接收分析 6 个频率的信号,分别为 600、300、150、75、37、25 Hz。电磁场的趋肤深度 δ 与频率相关,按照趋肤深度公式  $\delta \approx 503 \sqrt{\rho/f}$  (*f* 为 频率, $\rho$  为电阻率)分别计算 1 000 Ω · m 半空间和 100 Ω · m 半空间 ZTEM 系统 6 个频率的趋肤深度, 绘制频率—趋肤深度曲线(图 2)。





从图中可以看出,ZTEM 系统 6 个频率的趋肤 深度线性增加,即 ZTEM 所选用的 6 个探测频率使 得 6 个频率的趋肤深度大致呈均匀等间距分布,这 种分布形式利于后期数据成图与反演计算。 本文使用商用软件 COMSOL Multiphysics 进行 正演模拟。该软件是基于三维有限元算法的多物理 场模拟软件,使用 AC/DC 模块建立典型三维地质模 型,对大地电磁响应进行模拟,分析倾子响应特征。

自然界垂直入射的平面波可分解为2组正交的 电磁波,为便于分析,假设这两个极性波分别沿主轴 方向,源1沿y轴方向,源2沿x轴方向。在源1激 励下,求取磁场3个分量 $H_x^{(1)}$ 、 $H_y^{(1)}$ 、 $H_z^{(1)}$ ,在源2激 励下,求取磁场3个分量 $H_x^{(2)}$ 、 $H_y^{(2)}$ 、 $H_z^{(2)}$ ,利用公式 (3)求取倾子参数<sup>[5]</sup>。

$$\begin{cases} T_x = \frac{H_y^{(2)} H_z^{(1)} - H_y^{(1)} H_z^{(2)}}{H_x^{(1)} H_y^{(2)} - H_x^{(2)} H_y^{(1)}} & \circ \\ T_y = \frac{H_x^{(1)} H_z^{(2)} - H_x^{(2)} H_z^{(1)}}{H_x^{(1)} H_y^{(2)} - H_x^{(2)} H_y^{(1)}} & \circ \end{cases}$$
(4)

综合使用磁绝缘和理想磁导体边界条件,设置 垂直场源的边界为理想磁导体边界,平行场源的边 界为磁绝缘边界,从而达到模拟无限域的效果。使 用自由四面体对模型进行网格剖分,对异常体网格 加密,提高求解精度,模型剖分效果如图3所示。





依据 ZTEM 系统所用频率,数值模拟中使用频 率为 25、37、75、150、300、600 Hz,模型背景电阻率 100 Ω・m,充分考虑模拟边界效应以及最低频率最 大探测深度应小于模型高度,设置模型长 3 000 m, 宽 3 000 m,高 1 400 m。为突出倾子对异常响应特 点,异常体上方不设置覆盖层。 4 大地电磁三维正演模拟

#### 4.1 全区域磁场三分量分布特征

航空大地电磁 ZTEM 系统数据采集过程中,基 站固定于测区某个人文干扰低的地方采集磁场  $H_x$ 、  $H_y$ 分量,而不是沿测线进行数据采集。这种采集方 式基于磁场  $H_x$ 、 $H_y$ 分量全区变化可忽略的假设,为 验证上述假设,建立模型对大地电磁磁场三分量进 行正演模拟,分析其分布特征。

如图 4 所示建立三维模型,模型长 3 000 m,宽 3 000 m,高 1 400 m,背景电阻率为 100 Ω · m,设置 2 个相同尺寸不同电阻率的异常体,单个异常体长 1 500 m,宽 600 m,高 1 000 m,异常体电阻率值分别 为 10 Ω · m 与 1 000 Ω · m,选取沿红线方向的磁场 三分量数据,进行成图分析。





所选测线既有沿岩性分界面的情况,又有垂直 岩性分界面的情况,相对具有代表性。选取 37 Hz 与 300 Hz 两个频率磁场三分量数据进行成图(图 5),两幅图反映的规律类似:所选测线方向磁场水 平分量 H<sub>x</sub>、H<sub>y</sub>变化很小,基本可以忽略不计,磁场 垂直分量 H<sub>z</sub>变化非常明显,在测线垂直相交的岩性 分界面上出现极值点;由此验证了在实际数据采集 过程中,测区固定地点采集 H<sub>x</sub>、H<sub>y</sub>分量、沿测线采 集 H<sub>z</sub>分量的采集方式的可行性。同时,从图中还可 以看出 2 个频率出现极值点的位置相同,但极值绝 对值大小不同,高频磁场 H<sub>z</sub>分量极值绝对值大于低 频磁场 H<sub>z</sub>分量极值绝对值。

#### 4.2 低阻体倾子响应特征

利用数值模拟对倾子响应特征进行分析的文章 较多,所研究的响应特征皆为测线垂直岩性分界面





的情况,但实际应用中测线设计不能每次都做到完 全垂直岩性分界面。下面利用有限元法建立三维模 型,研究测线与岩性分界面斜交时的倾子响应特征。

如图 6 所示,三维模型长 3 000 m,宽 3 000 m,高 1 400 m,背景电阻率设为 100 Ω · m;异常体长 1 500 m,宽 800 m,高 1 000 m,异常体电阻率设为 10 Ω · m,坐标原点为模型上表面中心点。利用三维有限 元方法对大地电磁法进行数值模拟,研究倾子沿岩 性分界面斜交测线低阻异常体的响应特征。

选择3条具有代表性的测线,如图7所示(图中 为模型俯视图):测线 a 与 x 方向岩性分界面斜交; 测线 b 过 x 方向和 y 方向岩性分界面交点,沿异常 体对角线方向;测线 c 与 y 方向岩性分界面斜交。 沿3条测线分别绘制6个频率的倾子  $T_x$  与倾子  $T_y$ 曲线(图 8~图 10,图中虚线代表测线与岩性分界面 相交位置),分析倾子响应特征。数值模拟和实际 应用中倾子实部响应规律较倾子虚部响应规律好,



图 6 三维模型示意 Fig. 6 3D model sketch

文中所提倾子皆指倾子实部。

图 8 为沿测线 a 倾子  $T_x$  与倾子  $T_y$  曲线,可以 看出倾子  $T_y$  响应幅值高出倾子  $T_x$  响应幅值一个数



图 7 测线走向示意 Fig. 7 Sketch map of survey line



图 8 测线 a 倾子低阻响应特征





图 9 测线 b 倾子低阻响应特征





图 10 测线 c 倾子低阻响应特征

Fig. 10 Low-resistance response characteristics of tipper on survey line c

量级,且倾子  $T_y$ 响应极值点位置对岩性分界面位置 显示较为准确。倾子  $T_x$ 响应幅值较低,高频曲线对 岩性分界面无反映,低频曲线对岩性分界面的响应 特征与倾子  $T_y$ 的响应特征类似,但曲线极值点与岩 性分界面位置存在偏差,倾子响应极值点宽于岩性 分界点。测线 a 沿 y 轴方向存在岩性变化,理论上 表现为倾子  $T_y$ 响应,由于测线非完全垂直于岩性分 界面,存在微弱倾子  $T_x$ 响应,该响应对岩性分界面 的表现较差。

图 9 显示,沿测线 b 倾子  $T_x$  响应幅值略低于倾 子  $T_y$  响应幅值,各频率对于岩性分界面皆有响应, 倾子  $T_x$  曲线极值点对岩性分界面的位置反映较为 准确,但  $T_y$  曲线极值点对岩性分界面的位置反映存 在偏差,曲线极值点范围窄于实际岩性分界面位置。

图 10 显示, 沿测线 c 倾子  $T_x$  响应幅值高于倾 子  $T_y$  响应幅值, 且前者曲线平滑度优于后者, 倾子  $T_x$  对岩性分界面的位置反映较为准确。倾子  $T_y$  响 应幅值较低, 高频曲线对岩性分界面反映微弱, 低频 曲线极值点对岩性分界面位置反映存在偏差, 曲线 极值点反映的异常体宽度窄与实际异常体宽度。

纵向对比图 8、图 9、图 10, 倾子  $T_x$  响应曲线反 映 x 轴方向岩性变化, 随着测线偏离 x 轴方向越大, 倾子  $T_x$  响应幅值越低, 对于岩性分界面的反映能力 越差, 曲线极值点过渡越平滑; 而倾子  $T_y$  响应曲线 反映 y 轴方向岩性变化, 随着测线偏离 y 轴方向越大, 倾子  $T_y$  响应幅值越低, 对于岩性分界面的反映 能力越差, 曲线极值点过渡越平滑。

#### 4.3 高阻体倾子响应特征

将图6模型异常体电阻率设置为1000Ω·m,

模型背景围岩电阻率仍为100Ω·m,坐标原点为模型上表面中心点。利用三维有限元方法对大地电磁法进行数值模拟,绘制沿图7测线倾子响应曲线,研究倾子沿岩性分界面斜交测线高阻异常体响应特征。

图 11~图 13 分别对应 3 条测线倾子响应曲线。 从图 11 可以看出,沿测线 a 倾子  $T_x$  响应幅值低于 倾子  $T_y$  响应幅值,两者各个频率曲线极值对异常体 边界皆有反映,倾子  $T_x$  极值点曲线过渡相对平滑, 极值点位置与岩性分界点位置略微存在偏差,但偏 差不大。图 12 表明,沿测线 b 倾子  $T_x$  响应与倾子  $T_y$  响应曲线类似且幅值相近,倾子  $T_x$  与倾子  $T_y$  曲 线极值点对岩性分界面的位置反映皆较为准确。图 13 显示,沿测线 c 倾子  $T_x$  响应幅值高于倾子  $T_y$  响 应幅值,倾子  $T_x$  与倾子  $T_y$  各频率曲线极值点对岩 性分界面的位置反映皆较为准确。

对比图 11、图 12、图 13 可以看出,相同地质模 型下,随测线偏离 x 轴方向越大,测线方向越接近 y 轴,倾子 T<sub>x</sub> 响应幅值越低,倾子 T<sub>y</sub> 响应幅值越高。 对比低阻体响应曲线可以看出,高阻体倾子响应曲 线较低阻体响应曲线光滑,响应幅值较低的测线上, 倾子高频曲线不存在对异常体分界面无反映的状 态。同时,对于低阻异常体,倾子曲线在岩性分界面 形成极值,在异常体中段无岩性变化位置,倾子曲线 存在值为零的水平段,如图 10 中倾子 T<sub>x</sub> 响应,而高 阻体模型中,倾子响应曲线在两极值间不存在倾子 为零的水平段。实际上,在高阻异常体数值模拟中 发现,只有当两边岩性分界面最够远时,倾子响应曲 线才会在异常体中心位置出现倾子为零的水平段。



图 11 测线 a 倾子高阻响应特征



图 12 测线 b 倾子高阻响应特征







Fig. 13 High-resistance response characteristics of tipper on survey line c

### 5 结论与讨论

1)航空大地电磁只采集磁场分量,在测区范围 内磁场水平分量变化很小,只有地质体存在横向不 均匀性时才能激发磁场垂直分量,所以航空大地电 磁数据采集过程中,只需磁场垂直分量沿测线进行 采集,水平分量固定地点测量即可。

2) 倾子作为航空大地电磁数据解释中重要参数,在岩性横向分界面上表现为极值异常。当测线与岩性分界面斜交时, 倾子  $T_x$  与倾子  $T_y$  对异常分界面皆有反映。随测线偏离 x 轴方向越大, 测线方向越接近 y 轴, 倾子  $T_x$  响应幅值越低, 倾子  $T_y$  响应幅值越高, 反之亦然。

3) 倾子 *T<sub>x</sub>* 对 *x* 轴方向岩性变化反映最好, 当测 线与 *x* 轴方向岩性变化分界面斜交时, 倾子 *T<sub>y</sub>* 对岩 性分界面存在微弱反映, 且当异常体为低阻体时, 倾 子 *T<sub>y</sub>* 对岩性分界面位置反映存在偏差; 同样, 倾子 *T<sub>y</sub>* 对 *y* 轴方向岩性变化反映最好, 当测线与 *y* 轴方 向岩性变化分界面斜交时, 倾子 *T<sub>x</sub>* 对岩性分界面存 在微弱反映, 且当异常体为低阻体时, 倾子 *T<sub>x</sub>* 对岩 性分界面位置反映存在偏差。

4)相同地质模型,不同异常电阻率条件下,当 测线与 y 轴方向岩性变化分界面斜交时,高阻异常 体倾子 T<sub>x</sub> 曲线较低阻异常体倾子 T<sub>x</sub> 曲线平滑,且 低阻异常体倾子 T<sub>x</sub> 低频曲线对岩性分界面反映较 差。

值得注意的是数值模拟为无噪声影响理想条件

· 1336 ·

下的大地电磁响应特征,倾子曲线中高频响应幅值 高于低频响应幅值,实际野外数据采集过程中,频率 较高时,由于采样窗口窄,数据信噪较低。本文只讨 论了倾子实部响应特征,可进一步对倾子虚部与相 位响应特征进行研究,使用倾子多个参数对地质异 常进行解释,提高航空大地电磁探测准确度。

#### 参考文献(References):

- 朴化荣.电磁测深法原理[M].北京:地质出版社,1990.
   Pu H R. Principle of electromagnetic Sounding [M]. Beijing: Gology Press, 1990.
- [2] 张铭,刘长胜,康利利,等.基于航空大地电磁倾子特征的二维 大地结构探测方法[J].地球物理学进展,2018,33(3):1303-1312.

Zhang M, Liu C S, Kang L L, et al. Two-dimensional ground Structure detection method based on the tipper characteristics of airborne magnetotelluric [J]. Progress in Geophysics , 2018, 33 (3): 1303 – 1312.

[3] 许智博,谭捍东.ZTEM 二维非线性共轭梯度反演研究[J].物 探与化探,2019,43(2):393-400.

Xu Z B, Tan H D. Two-dimensional nonlinear conjugate gradient inversion of ZTEM [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(2): 393 – 400.

 [4] 姚志勇,孟祥连,杜世回,等.川藏铁路昌都至林芝段色季拉山 隧道航空物探试验研究[J].隧道建设,2021,41(2):248-257.

Yao Z Y, Meng X L, Du S H, et al. Experimental study on aerogeophysical prospecting of Shergyla mountain tunnel on Changdu-Nyingchi section of Sichuan-Tibet railway [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 248-257.

- [5] 石连成,骆燕,江民忠,等. 辽东半岛五龙金矿床航空电磁场特征及找矿意义[J]. 地质学报,2020,94(10):3106-3119.
  Shi L C, Luo Y, Jiang M Z, et al. Characteristics of aero-electromagnetic field and its prospecting significance in the Wulong gold deposit, Liaodong Peninsula [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(10): 3106-3119.
- [6] Keeva V. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins [J]. Geophysics, 1972, 37(1): 98-141.
- [7] Wang T, Tan H D, Li Z Q, et al. 3D finite-difference modeling algorithm and anomaly feature of ZTEM [J]. Applied Geophysics, 2016, 13(3): 553-560.
- [8] Labson V F, Becker A, Morrison H F, et al. Geophysical exploration with audiofrequency natural magnetic fields [J]. Geophysics, 1985, 50(4): 656-664.
- [9] 胡文宝,苏朱刘,陈清礼,等. 倾子资料的特征及应用[J]. 石油 地球物理勘探,1997,32(2):202-213.
  Hu W B, Su Z L, Chen Q L, et al. Character of tipper data and the application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 1997, 32(2): 202-213.
- [10] 陈小斌,赵国泽,詹艳,等. 磁倾子矢量的图示分析及其应用研究[J]. 地学前缘,2004,11(4):626-636.
   Chen X B, Zhao G Z, Zhan Y, et al. Analysis of tipper visual

vectors and its applocation [J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(4): 626-636.

- [11] 陈清礼,胡文宝,李金铭,等. 埋藏球体的倾子响应特征分析
  [J]. 石油天然气学报,2007,29(3):75-78.
  Chen Q L, Hu W B, Li J M, et al. Characteristics of tipper response of buried sphere [J]. Journal of Oil and Gas Technology (J. JPI), 2007, 29(3): 75-78.
- [12] 李赓,曹飞翔,李万开. 航空大地电磁响应特征分析及反演研究[J]. 物探化探计算技术,2021,43(2):224-231.
  Li G, Cao F X, Li W K. Analysis of response characteristics and research of inversion of airborne magnetotelluric [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(2): 224-231.
- [13] 童孝忠,柳建新,刘颖,等.利用有限单元法模拟二维 MT 倾子 响应[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(s1):349-354.

Tong X Z, Liu J X, Liu Y, et al. Calculating tipper response in two-dimensional magnetotelluric using finite element method [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(s1): 349 – 354.

- [14] 潘伟,肖晓,王永明. 倾子资料特征分析研究[J]. 地球物理学进展,2015,30(6):2741-2748.
   Pan W, Xiao X, Wang Y M. Research on the character of tipper data [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(6): 2741-2748.
- [15] 童孝忠,吴思洋,谢维. 基于有限差分法的大地电磁二维倾子 响应计算[J].工程地球物理学报,2018,15(4):485-491.
  Tong X Z, Wu S Y, Xie W. The tilting respinse calculation of magnetolluric two-dimension based on finite difference method
  [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(4): 485-491.
- [16] 池昌峰,袁丽伟,杨永龙,等. 大地电磁测深法(MT)二维倾子 正演研究[J].水利科技与经济,2019,25(1);43-51.
  Chi C F, Yuan L W, Yang Y L, et al. Research on the forward calculation of two-dimensional magnetotelluric tipper[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2019, 25 (1): 43-51.
- [17] 甘佳雄. MT 倾子响应的有限元模拟及影响因素分析[D]. 长沙:中南大学,2012.
  Gan J X. Finite element simulation and analysis of influence factors of MT tipper response [D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [18] 吴頔,严家斌,贺文根. 倾子对异常体的分辨能力及影响因素研究[J]. 地球物理学进展,2012,27(6):2656-2663.
  Wu D, Yan J B, He W G. Study on distinguishing to anomalous bodies by tipper and influencing factor of tipper [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2656-2663.
- [19] 徐凌华,甘佳雄,柳建新,等. MT 倾子响应的影响因素分析
  [J].物探化探计算技术,2013,35(4):430-434,371-372.
  Xu L H, Gan J X, Liu J X, et al. The analysis of influence factors of MT tipper response [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemiacl Exploration, 2013, 35(4): 430-434,371-372.
- [20] 李志强. ZTEM 三维正反演研究 [D]. 北京:中国地质大学(北

京),2016. Li Z C. Research on ZTEM Three-dimensional Forward Modeling and Inversion [D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2016.

# Research on response characteristics of airborne magnetotelluric tipper based on three-dimensional finite element

LIU Yan-Tao<sup>1,2,3</sup>, PENG Li-Hong<sup>1,2,3</sup>, SUN Dong-Hua<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Wei-Meng<sup>1,2,3</sup>, WANG Hai-Hong<sup>1,2,3</sup>

(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang 050002, China; 2. Key Laboratory of Uranium Resources Geophysical Exploration Technology, China Nuclear Industry Group Company, Shijiazhuang 050002, China; 3. Hebei Key Laboratory of Airborne Survey and Remote Sensing Technology, Shijiazhuang 050002, China)

Abstract: Tippers are important parameters for the interpretation of airborne magnetotelluric data, and the study on the response characteristics of tippers is of great significance for the data interpretation. This study firstly introduces the basic principle of airborne magnetotelluric and ZTEM airborne magnetotelluric data acquisition system, then simulates the tipper response of the simple abnormal bodies using the three-dimensional finite element method, and finally analyzes the response characteristics of tippers  $T_x$  and  $T_y$  when the survey lines obliquely intersect with a lithologic interface. As indicated by the results, both  $T_x$  and  $T_y$  responded to the lithological interface in the case that the survey lines obliquely intersected with a lithologic interface. Meanwhile, the tipper exhibited corresponding laws with the change in the direction of the survey lines in that case. This study further deepens the understanding of the response of tipper to lithologic interfaces and will provide references and guidance for the interpretation of tipper data.

Key words: tipper; airborne magnetotelluric; three-dimensional finite element; ZTEM

(本文编辑:沈效群)