

文章编号: 1001-1749(2023)04-0505-09

半航空瞬变电磁法正反演算法及 岩溶洼地实测数据验证

杜兴忠¹, 李永铭¹, 李万荣¹, 郭明², 高嵩², 李登柯²

(1. 中国电建集团 贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081;

2. 成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

摘要: 半航空瞬变电磁法(semi-airborne transient electromagnetic, SATEM)是一种新型电磁勘探技术,相比较于传统地面瞬变电磁法,勘探工作不受地形条件制约。特别是岩溶地貌地区,由于地形条件复杂,地面勘探工作很难开展。因此这里将SATEM应用于贵州某岩溶地貌地区的储能水电站工程探测。由于SATEM系统独特的工作方式,将会导致信号中噪声成分复杂,单点反演结果可靠性差,而过度的滤波会可能导致关键信息的丢失。据此首先根据岩溶地貌的两个经典构造模型设计了正演模拟,并在正演模拟的响应信号中加入噪声以模拟野外实测信号再反演计算,分析了使用单点正则化阻尼最小二乘反演和横向约束的阻尼最小二乘反演法刻画各模型的能力差异,理论上证明横向约束反演方法的优越性。最后将两种反演方法用于解释某储能水电站勘探的实测数据,反演结果与实际地质资料具有较好地对应,表明了SATEM用于岩溶地貌勘探的是可行的,且效果明显。

关键词: 半航空瞬变电磁法(SATEM); 岩溶地貌; 横向约束

中图分类号: P 631.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.04.11

0 引言

岩溶地貌广泛分布在我国西南地区,多为碳酸盐岩发育地区,在溶蚀风化作用、地下暗河岩溶塌陷作用下,形成四周多低山和峰林,底部多为含水量较高的软粘土层的地貌特征^[1-2]。其特殊的水文地质条件是水利水电工程建设中常遇的难题,往往由于对岩溶区域的勘测计算不够精确,会造成防护工程的巨大浪费,或是引起巨大的经济损失^[3-4],所以在岩溶地貌工程施工时,能准确快速地探测出浅层岩溶管道、深层岩溶管道及深大暗河等不良地质构造有重要的意义^[5-6]。半航空瞬变电磁法是一种地面

激发、空中采集的工作方式,具有方便、高效、勘探范围大、空间分辨率高等优势,适合在山地、起伏地形、沼泽地等地面物探难以开展的地区^[7-8]。

SATEM作为一种新兴的地球物理勘探方法,近几年在我国已经被有效地应用于矿产资源勘探、地下水资源勘探以及隧道工程勘探等领域^[9-11]。然而,SATEM探测系统一直在飞行运动中连续采集数据,这使得该系统不能像地面瞬变电磁法那样经过长时间的数据叠加来提高信噪比,而且还会在数据中引入其他类型的噪声(如低频运动噪声)^[12]。因此该系统的较弱的信号和复杂的噪声类型导致数据处理流程复杂,受信号处理人员的主观影响较大,且处理后的数据仍可能残存噪声干扰,常规单点反

收稿日期: 2022-04-02

基金项目: 中国电建集团贵阳勘测设计有限公司重大专项(YJZD2020-02)

第一作者: 杜兴忠(1973-),男,高级工程师,主要从事地球物理勘探及地震监测相关技术研究工作,E-mail: duxinzhong_gyy@powerchina.cn。

演无法保证结果的可靠性, 但将横向约束方法应用于瞬变电磁数据反演中却能有效改善反演效果^[13-14], 故选择带横向约束的阻尼最小二乘法分别反演 SATEM 的模拟数据和实测数据。

模拟数据选择两种经典的岩溶地质模型^[15], 通过正演模拟得到对应的半航空瞬变电磁响应特征, 并且为尽可能模拟野外实测数据, 考虑在模拟数据中加入常见的两种噪声(白噪声和仪器背景噪声)。通过反演添加噪声的模拟数据, 分析横向约束反演对岩溶地质模型的刻画能力, 证明了横向约束反演的有效性。实测数据选择贵州岩溶地貌地区的某水库半航空瞬变电磁法勘探试验数据, 反演结果与实际地质资料具有较好的对应, 表明了 SATEM 用于岩溶地貌勘探效果明显。

1 正演验证

笔者所用半航空瞬变电磁探测以接地长导线源作为激发源, 导线中心位于坐标原点上, 沿 x 轴向两侧延伸, z 轴以向下为正, 半航空瞬变电磁法工作示意图见图 1。

在层状模型中, 线圈接收回路中心的频域的垂直分量磁感应强度表示为^[16]:

$$H_z = \frac{I}{4\pi} \int_{-L}^L \frac{y}{R} \int_0^{\infty} (1 + r_{TE}) e^{u_0 z} \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda R) d\lambda dx' \quad (1)$$

式中: I 和 L 分别为电流大小和导线的半长; z 表示飞行高度的坐标值; $R = ((x-x')^2 + y^2)^{1/2}$; J_1 为一阶贝塞尔函数; r_{TE} 为反射系数。Guptasarma 提出的 Hankel 变换用于计算频域响应^[17], 王华军^[18]提出的正弦变换用于将响应虚部变换到时域, 垂直磁场的时域导数的时域表达式为式(2)。

$$\frac{dH_z(t)}{dt} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_M[H_z(\frac{e^{n\Delta}}{t})] \cdot W(n\Delta) \quad (2)$$

式中: $\Delta = \frac{\ln(10)}{20}$ 为采样间隔; W 为正弦变换滤波系数; $n = -149 \sim 100$, 即 250 点正弦滤波系数。

为验证本文正演算法的准确性, 选择将正演模拟结果和对应解析解对比(图 2)。正演参数如下: 线源长度为 1 000 m; 发射电流 1 A; 测点 x, y, z 坐标为(0, 250, -30); 均匀半空间电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$; 在 0.1 ms 至 100 ms 区间范围内等对数间隔选取 30 个时间点。

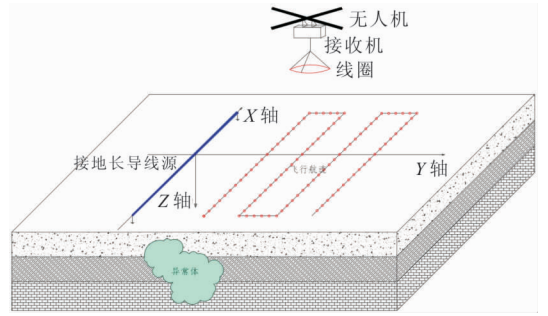


图 1 半航空瞬变电磁法工作示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semi-airborne transient electromagnetic method

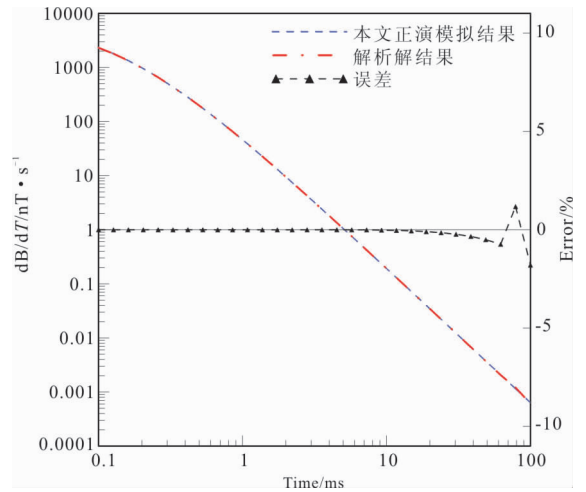


图 2 正演与解析解对比图

Fig. 2 Comparison of forward modeling and analytical solutions

由图 2 可以看出, 误差曲线显示, 在前 10 s 内正演模拟结果误差极小, 仅在 100 s 处出现了明显地震荡。

2 模拟噪声

为使模拟数据更接近真实数据, 还需要在模拟数据中加入噪声干扰, 笔者加入白噪声和仪器背景噪声两种。一般半航空瞬变电磁法中, 用于反演的数据都是感应电动势经过等对数间隔时窗抽道后的数据, 各时窗的宽度和此时窗中心点的延时成正比, 且各时窗的瞬态数据都是整个时窗内所有感应电动势的平均值。当环境噪声为白噪声时, 各个时窗的数据受不同时窗宽度的影响会使白噪声与 $t^{-1/2}$ 成正比衰减^[19]。仪器背景噪声用统一标准偏差表示, 通常设置为 2%, 加噪声后模拟响应公式如下^[20]:

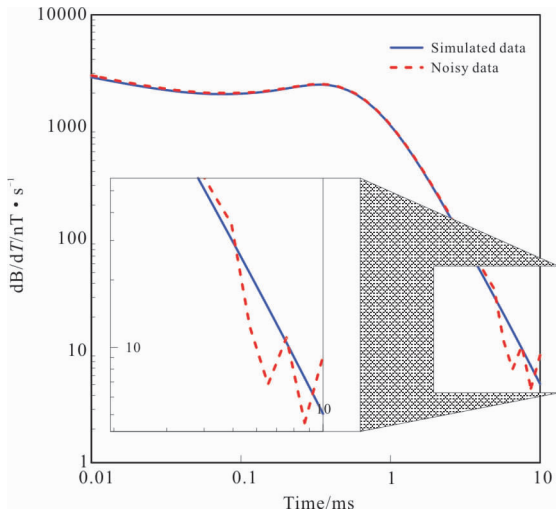


图3 单点模拟响应加噪效果图

Fig. 3 The effect of adding noise to the single-point simulation response

$$V = V + G(0,1) \cdot \left[\text{Noi}_Y^2 + \left(\frac{\text{Noi}_B}{V} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot V \quad (3)$$

$$\text{Noi}_B = b \cdot \left(\frac{t}{1 \cdot 10^{-3}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式(3)中: V 为加噪声后响应; V 为正演模拟响应; $G(0,1)$ 是均值为“0”且标准差为“1”的高斯分布; Noi_B 为白噪声; Noi_Y 为仪器背景噪声。

在单点模拟响应依照上述方式加 10 nT/s 白噪声和标准偏差为 2% 仪器背景噪声后的含噪声响应如图 3 所示,其中单点正演参数如下:线源长度为 1 000 m;发射电流 10 A;测点 x, y, z 坐标为 (0, 500, -30);双层模型阻率分别为 $30 \Omega \cdot \text{m}$ 和 $100 \Omega \cdot \text{m}$,其中第一层厚为 60 m;在 0.1 ms 至 10 ms 区间范围内等对数间隔选取 50 个时间点。

3 约束反演理论

半航空瞬变电磁法的数据处理和反演解释是一个线性流程,只有经过数据处理后才能反演解释,但是在噪声成分复杂的条件下,数据处理很难完全剔除噪声干扰。对含有噪声的数据进行单点反演将很难得到一个可靠的结果,所以引入了带横向约束的阻尼最小二乘反演方法约束最终的反演结果,减小噪声对反演结果的影响。阻尼最小二乘的目标函数为:

$$\Phi = \| \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_i - F_i(m)) \|^2 + \alpha \| \mathbf{W}_1 \Delta m \|^2 \quad (5)$$

式中: Φ 为总目标函数; \mathbf{d} 为观测数据向量,其数据个数 i 与抽道数量有关; \mathbf{m} 为模型参数向量; α 为阻尼因子; Δm 为模型修正量; \mathbf{W}_d 为观测数据加权矩阵,该矩阵为一个对角矩阵; \mathbf{W}_1 为模型修正量数据加权矩阵。

设 $F(m)$ 为模型 m 计算出的理论电磁响应,为使计算简便,选择在初始模型 M_0 处对 $F(m)$ 做一阶泰勒级数展开并忽略高阶项得式(6)。

$$\Delta d = d - F(m_0) = G \Delta m + e_{\text{obs}} \quad (6)$$

式中: Δd 为实测数据与在模型参数 m 条件下计算出理论响应的差值; $\Delta m = m - m_0$ 是模型修正量。

横向约束的中心思想是减小相邻测点反演结果中模型参数的差异,使得反演结果中电阻率和层厚度缓慢变化,根据^[21],可以设:

$$\mathbf{R}_p m - e_{rp} = 0 \quad (7)$$

式中: e_{rp} 是相邻点之间电阻率和层厚度的差异, \mathbf{R}_p 是由 1 和 -1 组成的横向约束矩阵,该矩阵为一个稀疏矩阵,具体可以表示为:

$$\mathbf{R}_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & -1 \end{pmatrix}_{M \times N} \quad (8)$$

其中: $M = (N_p - 1) * (2n - 1)$; $N = N_p * (2n - 1)$ 。

对式(7)左右两边减去 $\mathbf{R}_p m_0$ 可得:

$$\mathbf{R}_p \Delta m = -\mathbf{R}_p m_0 + e_{rp} \quad (9)$$

在实际反演过程中可以根据已知的地质信息,对不同的地层采用不同的横向约束强度,此时可通过引入加权因子来调整各个模型参数光滑度,将式(9)左右两边乘以加权系数矩阵得:

$$\mathbf{W}_p \mathbf{R}_p \Delta m = \mathbf{W}_p \mathbf{R}_p m_0 + \mathbf{W}_p e_{rp} \quad (10)$$

我们将带有阻尼因子约束的数据拟合方程和模型参数横向约束方程集合起来,可以得到带横向约束的阻尼最小二乘反演的总体方程:

$$\begin{bmatrix} G \\ \mathbf{W}_p \mathbf{R}_p \end{bmatrix} \Delta m = \begin{bmatrix} d - F(m_0) \\ -\mathbf{W}_p \mathbf{R}_p m_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{\text{obs}} \\ \mathbf{W}_p e_{rp} \end{bmatrix} \quad (11)$$

引入反演迭代结束的条件为^[22]:①达到最大迭代次数;②拟合误差小于设定拟合误差。拟合差为:

$$Rms = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [(d_j - F_j(m)) / d_j]^2}{N}} \quad (12)$$

式中: d_j 观测数据向量元素; $F_j(m)$ 为理论正演响应值; N 为采样时间个数。

4 岩溶地形模型建立

溶蚀地貌主要是由可溶岩的溶解、腐蚀,并伴随局部的基岩塌陷形成的。溶蚀洼地被看作是区域内地表水与地下岩溶网络的主要联通方式,其发育程度与该区域内大气降水与地表径流补给密切相关^[1]。为尽量模拟实测地质构造的电磁响应特征,笔者对测线上各测点经正演模拟,然后按照前面加噪声的方式,对各测点添加白噪声和仪器背景噪声,最后形成含噪声的多测道电磁剖面。其中,剖面由各测点时间为 0.01 ms~10 ms 内 50 个等对数间隔时窗构成。正演模拟参数见表 1。

4.1 石林型溶蚀构造模式

溶蚀洼地近地表岩石裂隙在地表水和粘土不断冲刷与腐蚀作用不断向下扩张,由于可溶岩矿物组成的不同以及不同位置的裂隙发育速度不同,在多

个位置形成地表水、裂隙水的小型排水中心。这些小型排水中心裂隙进一步向下发展,会将基岩腐蚀为石林型的构造模式。石林型溶蚀洼地构造可主要分为两层:不溶碎屑和细颗粒风化沉积物组成的覆盖层以及碳酸盐岩组成的基岩。对应电性特征:粘土覆盖层呈现相对低阻,基岩呈现相对高阻。本文正演模拟中覆盖层呈“V”型,在部分区域向下腐蚀,其中覆盖层电阻率取 $30 \Omega \cdot \text{m}$,基岩电阻率取 $100 \Omega \cdot \text{m}$,模型如图 4 所示。往正演模拟所得响应加入 10 nT/s 白噪声和 2% 的仪器背景噪声,最后生成含噪声的多测道电磁响应剖面见图 5。

表 1 正演模拟参数表

Tab. 1 Forward simulation parameter table

线源长度	飞行高度	偏移距	发射电流波形	电流大小
1 000 m	30 m	500 m	双极方波	10 A

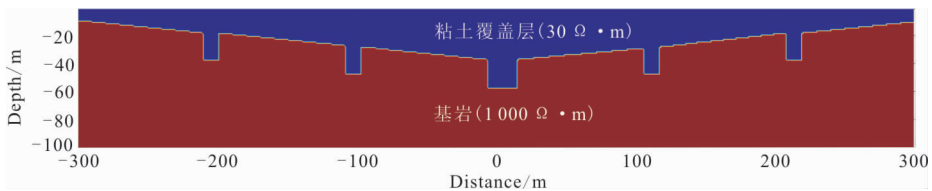


图 4 石林型溶蚀模型

Fig. 4 Stone forest type dissolution model

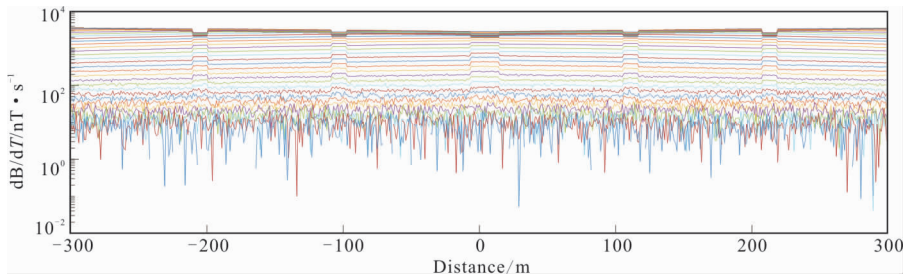


图 5 石林型溶蚀多测道电磁响应剖面

Fig. 5 Multi-measurement electromagnetic response profile of stone forest type dissolution

反演方法选择正则化反演和带横向约束的最小二乘反演方法,反演初始模型为均匀半空间模型,模型第一层厚度为 2 m,层厚按 1.04 指数增长,共 30 层,总深度为 105 m。反演迭代结束的条件为:①最大迭代次数 5 次;②迭代拟合差 1%。最终的反演结果如图 6 所示。

石林型溶蚀模型单点正则化反演结果中向基岩腐蚀的低阻柱体大小和深度反映准确,但覆盖层和

基岩的分界面不清晰,部分反演结果受噪声影响产生横向突变。横向约束反演结果中覆盖层和基岩的分界面清晰;向基岩腐蚀的低阻柱体大小和深度反映准确,但柱体下方的高阻基岩的典型特征反映一般。

4.2 含隔水层型溶蚀构造模式

当碳酸岩中存在溶解难或者不溶的岩质隔水层时,在隔水层未被侵蚀破坏前,上方通常存在包气带

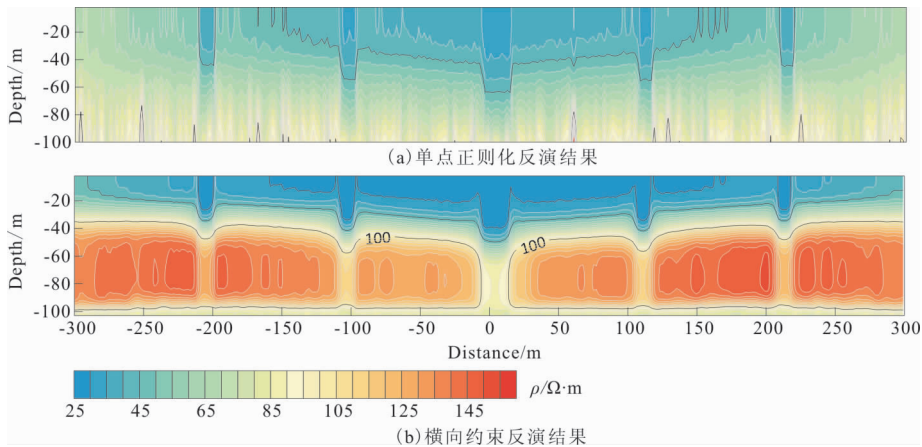


图 6 石林型溶蚀模型反演结果

Fig. 6 Inversion results of the stone forest type dissolution model

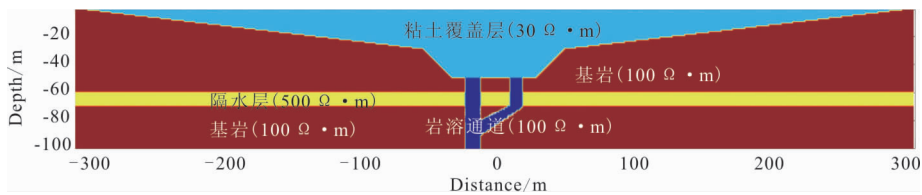


图 7 含隔水层型溶蚀模型

Fig. 7 Dissolution model with water barrier

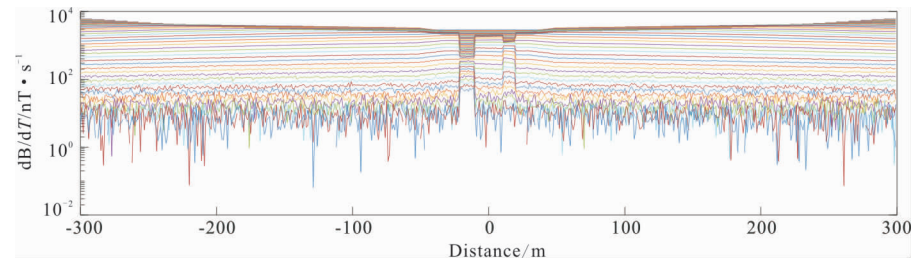


图 8 含隔水层型溶蚀多测道电磁响应剖面

Fig. 8 Multi-channel electromagnetic response profile of aquifer-bearing dissolution

水,将导致隔水层上方的碳酸岩剧烈溶解,且岩溶地区地形起伏不定,地表水会透过覆盖层向基岩低洼处堆积。当隔水层被侵蚀破坏后,地表水将与地下碳酸岩接触,极有可能形成岩溶排水通道。含隔水层岩溶洼地构造可主要分为四部分:①不溶碎屑和细颗粒风化沉积物组成的覆盖层;②碳酸盐岩组成的基岩;③隔水层;④岩溶排水通道。对应电性特征:覆盖层呈现相对低阻,基岩呈现相对高阻。其中覆盖层电阻率取 $30 \Omega \cdot \text{m}$,基岩电阻率取 $100 \Omega \cdot \text{m}$,隔水层电阻率为 $500 \Omega \cdot \text{m}$,岩溶排水通道电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,模型如图 7 所示。按设计参数正演模拟所得响应再加入 10 nT/s 白噪声和 2% 的仪器背景噪声,最后生成含噪多测道电磁

响应剖面见图 8。

反演初始模型为均匀半空间模型,模型第一层厚度为 2 m ,层厚按 1.04 指数增长,共 30 层,总深度为 105 m 。反演迭代结束的条件为^[22]:①最大迭代次数 5 次;②迭代拟合差 1% 。最终的反演结果如图 9 所示。

含隔水层溶蚀模型单点正则化反演结果中岩溶通道有一定地反映,但覆盖层和基岩的分界面不清晰,测线两端反演结果受噪声影响产生横向突变。横向约束反演结果中覆盖层和基岩的分界面较清晰;两条岩溶通道反映明显,但二者连通处岩溶通道反映不明显,只能看出部分倾斜趋势;高阻隔水层无明显反映。

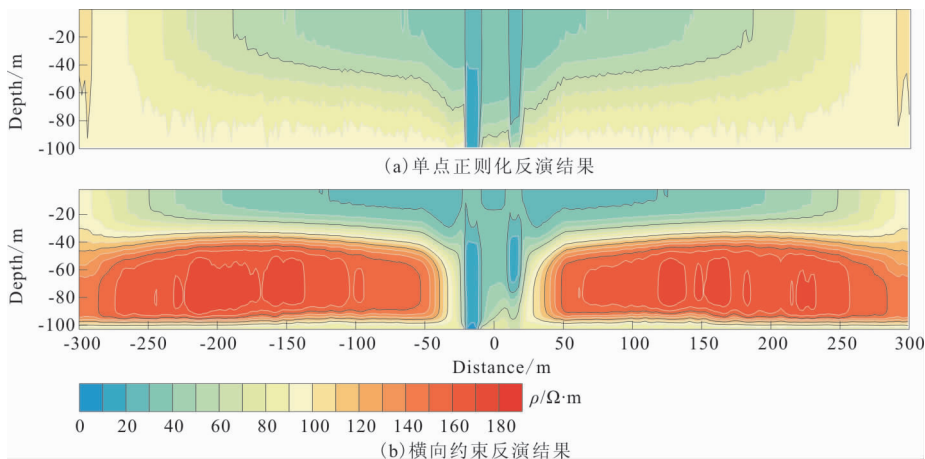


图9 含隔水层型溶蚀模型反演结果

Fig. 9 Inversion results of aquifer-bearing dissolution model

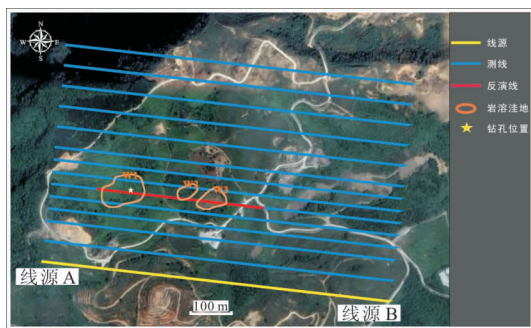


图10 贵州水库半航空瞬变电磁勘探航迹示意图

Fig. 10 Schematic diagram of semi-aerial transient electromagnetic exploration track of Guizhou Reservoir

5 实测数据反演

在贵州喀斯特高原地貌中的峰丛洼地地貌区,受山体地表起伏、植被覆盖等的影响,地面勘察方式效率低,实施半航空瞬变电磁法勘探能方便、高效完成工程勘探任务。为验证岩溶洼地地貌中半航空瞬变电磁法实际勘探效果,笔者将带横向约束的最小二乘反演用于处理贵州某水库半航空瞬变电磁试验数据。此次半航空瞬变电磁试验实际资料如图10所示,其中黄色线表示地面长导线源;蓝色线表示无人机13条测线轨迹,测线长度为850m,线间距为30m或50m不等;红色线表示用于约束反演的部分测线;褐色线表示初步地质调查后已发现的典型岩溶洼地区域;五角星表示地面钻孔点,钻孔深度为80m,且在钻孔底部溶蚀现象较普遍,以陡倾角裂隙及小溶洞为主。

本文用于反演解释的数据为测区内从南到北第5条测线的部分数据(图10中红线位置),测线走向自西向东,里程对应0m~400m。该段数据的测线轨迹途经多个岩溶洼地,是典型的喀斯特洼地地貌。选定测线数据经过基线漂移校正、单点二次场响应降噪、二次场响应叠加和等对数时窗抽道等步骤,多测道电磁响应剖面如图11所示。

实测数据反演初始模型为均匀半空间模型,模型第一层厚度为2m,层厚按1.09指数增长,共30层,总深度为248m。反演迭代结束的条件为:①最大迭代次数5次;②迭代拟合差1%。带地形最终的反演结果如图12所示。

从图12可以看出,钻孔数据反映的地层主要有覆土层、完整基岩层和溶蚀地层。两种反演结果中均在浅部存在2个相对低阻区域,一个覆盖W1洼地,另一个覆盖W2洼地和W3洼地,且W2洼地和W3洼地有融合趋势。正则化反演结果中层界面产生突变,可能受噪声影响。横向约束反演结果中层界面较平缓,比较符合实际地质条件。分析反演结果可知,在所有岩溶洼地中W1洼地向下侵蚀最深,同钻孔资料对应良好,证明了半航空瞬变电磁反演结果的有效性。

6 结论

将横向约束反演方法用于解释岩溶地貌的半航空瞬变电磁法数据能得到以下结论:

1) 横向约束反演方法能有效识别石林型溶蚀模型中覆盖层和基岩的分界面,且对向基岩腐蚀的低阻覆盖层的宽度和深度识别相对准确。

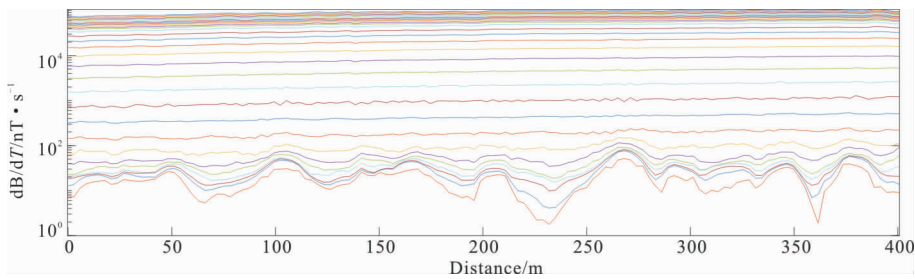


图 11 实测数据多测道电磁响应剖面

Fig. 11 Multi-channel electromagnetic response profile of measured data

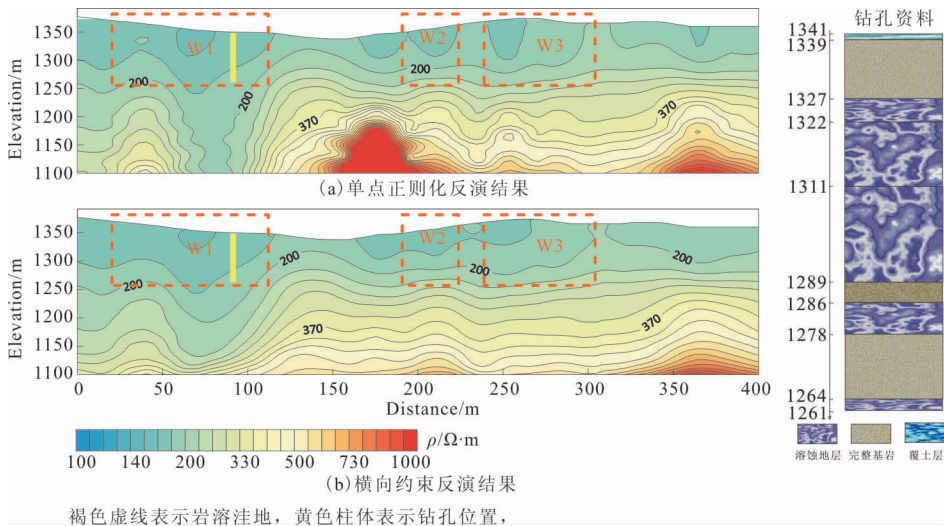


图 12 实测数据反演结果图

Fig. 12 Inversion result of field data

2) 横向约束反演方法能有效识别文中含隔水层型溶蚀模型中岩溶排水通道,但是难以识别模型中的高阻隔水层。

3) 横向约束反演方法对地层界面的刻画能力优于正则化反演方法。

4) 岩溶地貌 SATEM 实测数据的反演结果与实际地质资料对应良好,且能反映出岩溶洼地侵蚀基岩程度,证明 SATEM 能有效地应用于岩溶地貌勘探。

参考文献:

- [1] 袁道先. 中国西南部的岩溶及其与华北岩溶的对比[J]. 第四纪研究, 1992(04):352-361.
YUAN D X. Karst in southwest China and its comparison with karst in north China[J]. Quaternary Studies, 1992(04):352-361. (In Chinese)
- [2] LASKOW M, GENDLER M, GOLDBERG I, et al.

Deep confined karst detection, analysis and paleo-hydrology reconstruction at a basin-wide scale using new geophysical interpretation of borehole logs [J]. Journal of Hydrology, 2011, 406(3-4):158-169.

- [3] KRANJC, A. 6.10 classification of closed depressions in carbonate karst[J]. Treatise on Geomorphology, 2013(06):104-111.
- [4] YANG Y, JIANG Z, LIU S, et al. An eogenetic karst in lacustrine carbonates and its influence on reservoir development: A case study of the Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 125(2):104860.
- [5] AMANATIDOU E, VARGEMEZIS G, TSOURLOS P. Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia, Kozani, Greece [J]. Journal of Applied Geophysics, 2022(196):104499.

- [6] ZHU J, NOLTE A M, JACOBS N, et al. Using machine learning to identify karst sinkholes from LiDAR—Derived topographic depressions in the Bluegrass Region of Kentucky[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588:125049.
- [7] 张振雄, 易国财, 王仕兴, 等. 基于最小构造模型的地空瞬变电磁—维正反演技术研究[J]. *物探化探计算技术*, 2021, 43(3):352—359.
- ZHANG Z X, YI G C, WANG S X, et al. Research on 1D forward modeling and inversion of ground—airborne transient electromagnetic method based on minimum structural model[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 43(3):352—359. (In Chinese)
- [8] 林君, 薛国强, 李貅, 等. 半航空电磁探测方法技术创新思考[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(9):2995—3004.
- LIN J, XUE G Q, LI X. Technological innovation of semi—airborne electromagnetic detection method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(9):2995—3004. (In Chinese)
- [9] 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. (In Chinese)
- [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. (In Chinese)
- [11] 侯彦威, 高小伟, 李雄伟, 等. 地空瞬变电磁在积水采空区探测中的应用[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(10): 61—66.
- HOU Y W, GAO X W, LI X W, et al. Application of ground—airborne transient electromagnetic method in the detection of water—filled goaf[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(10):61—66. (In Chinese)
- [12] CHRISTIANSEN, A. V., CHRISTENSEN, N. B. A quantitative appraisal of airborne and ground—based transient electromagnetic (TEM) measurements in Denmark[J]. *Geophysics* 2003, 68 (2):523—534.
- [13] 殷长春, 邱长凯, 刘云鹤, 等. 时间域航空电磁数据加权横向约束反演[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(01):254—261.
- YIN C C, QIU C K, LIU Y H, et al. Weighted laterally—constrained inversion of Time—Domain airborne electromagnetic data[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46(1):254—61. (In Chinese)
- [14] 杨云见, 王绪本, 刘雪军, 等. 横向约束瞬变电磁拟三维反演[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(1): 201—208.
- YANG Y J, WANG X B, LIU X J, et al. A quasi—3D TEM inversion based on lateral constraints[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(1): 201—208. (In Chinese)
- [15] 王涛. 基于并行计算的地质雷达正演模拟及典型岩溶洼地地质特征智能识别[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WANG T. Ground penetrating radar forward modeling based on parallel computing and Intelligent identification of typical karst depression features [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (In Chinese)
- [16] NABIGHIAN M N, ORISTAGLIO M L. On the approximation of finite loop sources by two—dimensional line sources[J]. *Geophysics*, 1984, 49(7): 1027—1029.
- [17] GUPTASARMA D, SINGH B. New digital linear filters for Hankel J0 and J1 transforms[J]. *Geophysical Prospecting*, 1997, 45(5):745—762.
- [18] 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(04):329—335.
- WANG H J. Digital filter algorithm of the size and cosine transform[J]. *Chinses journal of Engineering Geophysics*, 2004 (04):329—335. (In Chinese)
- [19] MUNKHOLM, M. S., AUKEN, E. Electromagnetic noise contamination on transient electromagnetic soundings in culturally disturbed environments [J]. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 1996, 1 (2): 119—127.
- [20] AUKEN E, CHRISTIANSEN A V, JACOBSEN L H, et al. A resolution study of buried valleys using laterally constrained inversion of TEM data[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2008, 65(1): 10—20.
- [21] AUKEN E, CHRISTIANSEN A V. Layered and lat-

erally constrained 2D inversion of resistivity data[J].
Geophysics, 2004, 69(3): 752–761.

[22] 何可, 郭明, 胡章荣, 等. 半航空瞬变电磁 L1 范数自适应正则化反演[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1338–1346.

HE K, GUO M, HU Z R, et al. Semi-airborne transient electromagnetic inversion based on L1-norm adaptive regularization[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(5): 1338–1346. (In Chinese)

Semi-airborne transient electromagnetic method forward and inversion algorithm and field data verification in karst

DU Xingzhong¹, LI Yongming¹, LI Wanrong¹, GUO Ming², GAO Song², LI Dengke²

(1. POWERCHINA, Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China;

2. Chendu University of Technology, Key lab of Earth Exploration & Information
Techniques of Ministry of Education, Chengdu 610059, China)

Abstract: Semi-airborne transient electromagnetic method (SATEM) is a new type of electromagnetic exploration technology. Compared with a traditional ground transient electromagnetic method, the exploration work is not restricted by terrain conditions. Especially in karst landform areas, it is difficult to carry out ground exploration work due to complex topographic conditions. Therefore, this paper applies SATEM to energy storage hydropower station detection in a karst landform area in Guizhou. Due to the unique working mode of the SATEM system, the noise components in the signal will be complex. However, excessive filtering may lead to the loss of key information, and at the same time, the reliability of the single-point inversion results is poor. This paper first designs a forward model based on two classical structural models of karst landforms. It adds noise to the response signal of the forward modeling to simulate the field-measured signal and then inversion calculation. The square inversion and the damped least-squares inversion method of lateral constraint describe the difference in the ability of each model and theoretically prove the superiority of the lateral constraint inversion method. This method is feasible. Finally, the lateral constraint inversion method is used to interpret the measured data of an energy storage hydropower station, and the inversion results have a good correspondence with the actual geological data, indicating that SATEM is feasible for karst landform exploration, and the effect is noticeable.

Keywords: semi-airborne transient electromagnetic method (SATEM); karst landform; lateral constrain