

瞬变电磁探测堤坝软弱夹层的反演方法对比与应用研究

朱春光¹, 张盛行², 朱震东¹, 程宇¹, 汤雷²

(1. 南京市长江河道管理处, 江苏 南京 210011;

2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 针对瞬变电磁(TEM)探测中不同反演方法影响识别效果的问题, 构建了不同埋深、厚度、深厚覆盖层及双层夹层等典型工况模型进行正演模拟, 并对烟圈计算、奥卡姆线性反演及粒子群优化(PSO)非线性反演方法, 从分辨率、拟合误差及计算效率等方面进行对比。结果表明: 观测曲线畸变起始时刻与夹层埋深呈正相关, 畸变幅值与夹层厚度呈正相关且与埋深呈负相关; 深厚覆盖层显著影响观测信号, 并加大了反演的非唯一性。反演方法对比显示, 烟圈计算适用于快速定性分析, 奥卡姆反演在简单工况和夹层较厚时适用性较好, 而粒子群反演在薄层、多层及复杂结构条件下表现出更高分辨率与拟合精度。工程应用表明, 基于粒子群优化的反演结果与钻孔验证结果一致, 能够有效识别软弱夹层分布。

关键词: 软弱夹层; 瞬变电磁法; 正演分析; 反演方法; 工程应用

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)03-0121-08

Comparison and Application of Inversion Methods for Transient Electromagnetic Detection of Weak Interlayers in Dikes

ZHU Chunguang¹, ZHANG Shenghang², ZHU Zhendong¹, CHENG Yu¹, TANG Lei²

(1. Nanjing Yangtze River Management office, Nanjing, Jiangsu 210011, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210024, China)

Abstract: Weak interlayers in dikes are prone to inducing engineering hazards such as sliding and seepage, and their accurate identification is of great significance for ensuring structural safety. To investigate the influence of different inversion methods on the identification performance of transient electromagnetic detection, typical models with varying burial depths, layer thicknesses, thick overburden, and double interlayers were constructed for forward simulation. Three inversion approaches, namely smoke-ring calculation, Occam linear inversion, and particle swarm optimization (PSO) nonlinear inversion, were comparatively evaluated in terms of resolution, fitting error, and computational efficiency. The results indicate that the onset time of distortion in the observed curves is positively correlated with the burial depth of the interlayer, while the distortion amplitude is positively correlated with layer thickness and negatively correlated with burial depth. Thick overburden significantly affects the observed signals and increases the non-uniqueness of inversion. Comparative analysis of inversion methods shows that smoke-ring calculation is suitable for rapid qualitative analysis, Occam inversion performs well under simple conditions and for relatively thick interlayers, whereas PSO inversion exhibits higher resolution and fitting accuracy in thin-layer, multilayer, and complex structural conditions. Field application demonstrates that the PSO-based inversion results are consistent with borehole verification, effectively identifying the distribution of weak interlayers.

Keywords: weak interlayer; transient electromagnetic method; forward modeling; inversion methods; engineering application

堤坝是防洪减灾体系的重要组成部分,其安全运行关系重大^[1]。软弱夹层是指堤身或堤基中存在的低强度或高渗透性的薄弱层,如流塑状的粉土、淤泥质土或高含水率砂层,其厚度较小、分布不连续,土体表现为抗剪强度不足、渗透系数偏高、低阻及低速的特征,是诱发滑移、渗漏等险情的隐患^[2-4]。

地球物理方法为堤坝隐患探测提供了高效手段^[5]。瞬变电磁法因其对电阻率差异高度敏感、探测深度大、布设灵活等优势,在浅层地质隐患探测中显示出明显优势^[6]。瞬变电磁法采用不接地回线发射脉冲电流,在电流关断瞬间激发地下介质产生涡流,进而形成随时间扩散衰减的二次感应磁场;通过地表接收线圈记录瞬态磁场响应,其衰减特征反映了地下电阻率分布;经数值反演将时域信号转换为电阻率剖面,可根据电阻率异常分布识别地下隐患区域。因此,瞬变电磁的数据解释核心在于反演算法,其性能直接决定了成像分辨率与计算效率^[7]。目前常用反演方法主要包括三类:①烟圈计算:“烟圈”计算是一种追求高速而舍弃一定精度的反演方式^[8],通过近似解析公式快速估算视电阻率分布,可在野外实时评估地层变化趋势,理论和应用相对成熟,郭士明等^[9]采用烟圈快速成像实现了渠堤工程快速检测。②奥卡姆线性反演:基于线性正则化与平滑约束,通过动态调整正则化参数来修改模型实现较小误差的拟合,邢涛等^[10]采用奥卡姆线性迭代算法较为准确刻画出煤田玄武岩形态分布;Chaerul 等^[11]采用奥卡姆线性算法反演出了沿海地区的海水入侵情况;Yu 等^[12]采用奥卡姆算法反演出了煤矿富水采空区分布,并经过钻探验证。③非线性智能算法反演:通过构建更复杂的目标函数并引入正则化约束,能够有效处理强非线性、多极值的反演问题,显著提高对复杂地质结构的分辨能力^[13]。近年来的改进算法(如量子粒子群 QPSO、FLCPSO-IFAH 等)进一步在收敛速度和抗噪性上取

得提升,已在煤矿采空区、地质水文勘察等领域获得良好效果。Yuan 等^[14]采用粒子群优化算法反演了航空电磁数据,用于调查矿产资源分布。Jiao 等^[15]采用改进了量子粒子群优化算法,并将其用于煤矿积水采空区的瞬变电磁资料解释。

综合已有研究,不同反演方法在 TEM 数据处理中各有优势,但多集中于地层构造等体积相对较大的目标体识别,针对堤坝夹层这种浅埋、薄层、多层、覆盖层耦合结构的系统性对比研究尚缺乏。为此,本文设计了四类典型软弱夹层赋存工况(不同埋深、不同厚度、深厚覆盖层与双层夹层),对比分析烟圈计算、奥卡姆线性反演与粒子群优化非线性反演三种方法在软弱夹层识别中的分辨率、误差与计算效率差异,并通过实际工程验证评估其适用性,以揭示反演算法的应用边界与优势场景,为堤防软弱夹层的高效识别提供理论依据与方法参考。

1 理论与方法

1.1 正演工况

软弱夹层由于常处与含水状态,电阻相对正常土层较低^[16]。结合已有相关土体电阻率研究^[17-19],算例中夹层电阻率取值为 $10 \Omega/\text{m}$,正常土层电阻率取值为 $100 \Omega/\text{m}$,拟定不同埋深、不同厚度、下方存在深厚覆盖层和双层夹层四种工况进行计算,计算工况示意图见图 1,厚度取值见表 1。对上述工况和参数进行瞬变电磁正演计算,获取归一后的磁场 B_z 观测曲线。

1.2 反演方法

将获得的 B_z 随时间变化的观测曲线转换为深度-电阻率的过程称为反演。将上述算例获取的 B_z 观测曲线采用不同算法逐点进行反演,以对比烟圈计算、奥卡姆线性算法和粒子群优化非线性算法三种典型反演方法在识别软弱夹层方面的效果。

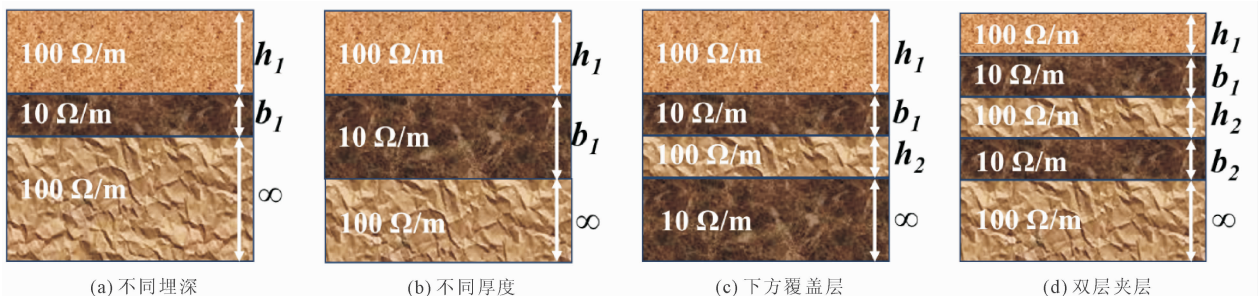


图 1 计算工况

表1 计算工况参数

类别	不同埋深			不同厚度			下方覆盖层			双层夹层		
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
h_1	10	20	30	20	20	20	10	20	20	10	10	20
b_1	10	10	10	5	10	20	5	5	10	5	10	5
h_2	—	—	—	—	—	—	20	10	10	20	10	10
b_2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10	10	5

注:工况参数单位为m;“—”表示工况下无该参数。

1.2.1 烟圈计算

TEM发射电流关断后,地下感应环流呈“烟圈”式向外、向下扩散;随扩散半径与深度增大,感应电流与次生磁场按典型幂律衰减,晚期在均匀半空间近似满足的斜率规律,该过程可由Maxwell方程组推导得到瞬态响应公式。根据烟圈扩散深度、半径和时间关系可得层状大地烟圈计算公式如式(1)、式(2)。由此将获得的随时间变化的响应数据换算为“视电阻率-等效深度”。

$$\rho = \frac{v^2 \pi t \mu_0}{4} \quad (1)$$

$$H_r = 0.441 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{t_1 \rho_1 + t_2 \rho_2}{\mu_0}} \quad (2)$$

式中: ρ 为均匀半空间电阻率, $\Omega \cdot m$; t 为采样时间,ms; μ_0 为空气磁导率; v 为烟圈的垂向传播速度; H_r 为地层深度,m; t_1 为烟圈或电磁扩散过程在第1层中的等效扩散时间; t_2 为烟圈进入第2层后的等效扩散时间; ρ_1 为第1层电阻率; ρ_2 为第2层电阻率。

1.2.2 奥卡姆线性算法

奥卡姆反演方法是一种基于线性正则化的反演策略,其核心思想源于奥卡姆剃刀原则,即在多种可能解释中,优先选择复杂度最低且能够充分拟合观测数据的模型。该方法旨在通过引入正则化约束,寻求一个既能拟合观测数据、同时又保持结构最简单且变化最平缓的地下电性模型^[20]。在数学表达上,目标函数定义如式(3),正则化参数 λ 在迭代过程中被动态调整,以在满足卡方误差接近预期拟合水平的要求。

$$\Phi(\mathbf{m}) = \|\mathbf{W}_d(\mathbf{d}_{\text{obs}} - \mathbf{F}(\mathbf{m}))\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{L}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}})\|_2^2 \quad (3)$$

式中: $\Phi(\mathbf{m})$ 为目标函数; \mathbf{m} 为待反演的模型参数向量; \mathbf{d}_{obs} 为观测数据; $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ 为给定模型 \mathbf{m} 下的正演响应; \mathbf{W}_d 为数据权重矩阵; \mathbf{m}_{ref} 为参考模型; \mathbf{L} 为正则化算子,通常可取一阶或二阶差分算子,用于约束模型变化的平滑性; λ 为正则化参数,用于权衡拟合误差与模型平滑性。

本研究模型电阻率限定在 $1 \sim 500 \Omega \cdot m$,初始为均匀地层 $100 \Omega \cdot m$,迭代次数为50次。

1.2.3 粒子群非线性算法

粒子群优化是一种启发式群体智能算法,以“群体协作、历史记忆”为搜索策略,每个粒子在搜索空间中以一定速度运动,并根据当前最优个体与群体经验更新自身位置^[21-22]。粒子通过跟踪两个极值来更新自身状态:其一是粒子自身迄今为止找到的个体最优解,其二是整个种群迄今为止找到的全局最优解。其数学更新公式如下:

$$v_i^{t+1} = v_i^t \omega + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t) \quad (4)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (5)$$

式中: x_i^{t+1} 与 v_i^{t+1} 分别为第 i 个粒子在 $t+1$ 次迭代时的位置和速度; x_i^t 与 v_i^t 分别为第 i 个粒子在第 t 次迭代时的位置和速度; p_i^t 为该粒子截止第 t 次迭代搜索到的个体历史最优位置; g^t 为群体截至第 t 次迭代搜索到的全局最优位置; ω 为惯性权重,用于控制粒子对上一迭代速度的继承程度; c_1 和 c_2 为学习因子,分别控制粒子向个体最优位置和全局最优位置靠近的程度; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 区间内服从均匀分布的随机数。

本研究参数向量包含 L 层电阻率与层厚比例(最后一层为半无限),电阻率搜索范围为 $[1, 500] \Omega \cdot m$ 。粒子种群数量为200,惯性权重由0.9线性衰减至0.5,学习因子为2,为速度钳制并采用无越界反射。停止判据为达到迭代次数或相对误差小于 10^{-6} 。

1.3 误差评估

奥卡姆线性算法和粒子群非线性算法均需要设置电阻率上下限,通过迭代缩小误差。结合工程经验,设置电阻率上下限为 $1 \sim 500 \Omega \cdot m$ 。采用相对误差指标进行计算,消除衰减造成的影响,计算方式为:

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(H_{\text{obs}} - H_{\text{fm}}/H_{\text{obs}})]^2} \quad (6)$$

式中: N 为时刻序号; H_{obs} 为第 n 个时间道垂直磁场观测数据; H_{fm} 为第 n 个时间道垂直磁场正演数据; f 为目标函数,目标函数越小即误差越小。

2 结果分析

2.1 正演数据特征

对 1.2 节中所述的含不同软弱夹层堤坝的工况

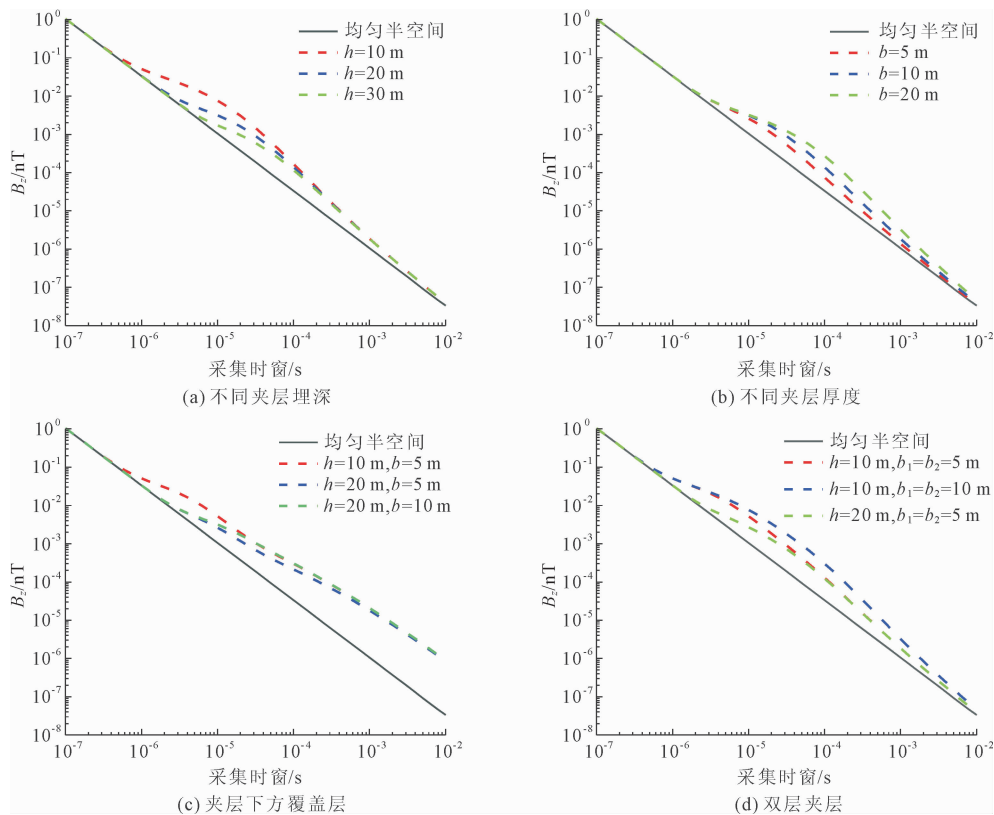


图 2 观测曲线对比

具体分析如下:

(1) 不同埋深: 当夹层埋深由浅至深时, 观测曲线畸变时刻延长, 畸变程度减弱。浅埋夹层引起的异常最为明显, 表现为早期幅值高、衰减迅速; 而深埋夹层的信号相对微弱, 但在后期观测曲线逐渐趋于一致。

(2) 不同厚度: 当夹层厚度逐渐变厚时, 观测曲线畸变起始时刻不变而影响时窗变宽, 响应幅值增大, 相对偏差随夹层厚度增加而显著提高。说明更大体积的导体能够维持更长时间的涡流, 厚层夹层产生的异常更易于识别。

(3) 下方覆盖层: 堤坝下方深厚覆盖层时, 观测曲线畸变时刻仍随夹层埋深而延长, 偏差幅度随夹层层厚增大而增长, 但观测曲线中后期明显受到影响, 早期信号部分也被掩盖, 相对偏差峰值位置也发生变化。这表明覆盖层对夹层信号具有屏蔽或削弱作用, 增加了识别难度。

(4) 双层夹层: 位于不同深度的软弱夹层, 使观

进行正演计算, 图 2 为不同工况的观测曲线及其与均匀半空间模型($100 \Omega \cdot \text{m}$) 基准模型的相对偏差。可见, 所观测的 B_z 磁场值随时间按幂律快速衰减, 不同软弱夹层类型使观测时窗内信号明显畸变。

测曲线表现出明显叠加特性, 不同夹层的贡献时窗叠加, 使相对偏差曲线出现峰值变缓或延迟衰减。与单层夹层相比, 双层结构使信号更为复杂, 加大了反演解释的非唯一性。

综上, 正演结果揭示了软弱夹层电性响应的基本规律: 观测曲线随时间呈现幂律衰减, 夹层观测曲线畸变起始时刻与埋深正相关, 观测曲线畸变幅值与夹层厚度呈正相关、与埋深呈负相关关联, 这些规律为模型反演提供了物理依据。但下覆深厚覆盖层显著影响观测信号, 双层夹层观测信号响应差异相对较弱, 加大了反演解释的难度和非唯一性。

2.2 反演结果对比

针对不同工况正演结果, 分别采用烟圈理论计算、奥卡姆线性反演和粒子群优化反演三种方法对表 1 中 12 种工况进行对比, 由于设计工况较多, 现在每类工况中选取较具代表性的反演结果和迭代误差呈现于图 3, 不同反演方法迭代精度和耗时见表 2。由图 3 可知:

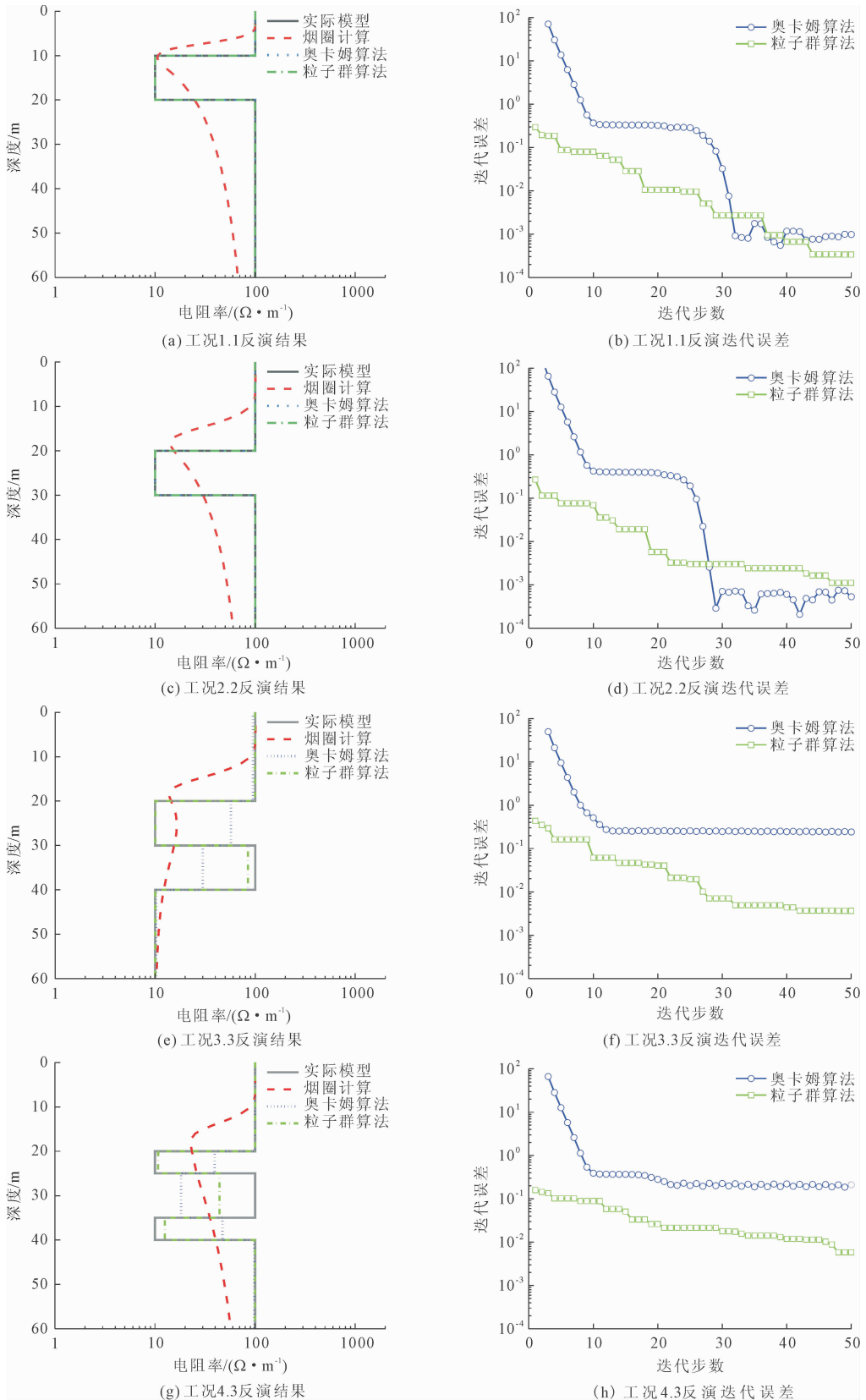


图 3 不同工况反演结果对比

(1) 不同埋深:烟圈计算电阻极小值对应夹层埋深位置,且计算速度极快。奥卡姆线性算法和粒

子群非线性算法均表现出较为准确的反演效果:奥卡姆算法反演误差随迭代步数降幅明显,在 30 步左

右达到最优;粒子群算法随迭代步数增长一直逐渐逼近最优解,但其计算耗时是奥卡姆算法的 20 多倍。

(2)不同厚度:烟圈计算通过低阻值能较快反映夹层分布深度,但对于薄层埋深定位误差较大。奥卡姆反演在夹层相对较厚反演较为准确,误差随迭代步数在较少步次内迅速下降,但正则化导致较小区域的低电阻率被“抹平”,无法反映较薄的夹层;相比之下,粒子群反演算法对薄层分辨能力更强,能够在保持较低拟合误差的同时较好地恢复夹层分布特征,但计算耗时明显增大。

(3)下方覆盖层:烟圈计算可反映地层电阻率分布的整体趋势(上高下低),以及第一层夹层大概埋深,但很难反映地层分布和覆盖层位置等信息。奥卡姆反演由于平滑约束无法分辨覆盖层和夹层对于观测曲线的贡献,导致拟合误差显著上升无法反映夹层特征。粒子群算法能够在较大程度上分离不同层位的电性特征,但需要更长的计算时间和先验信息的依赖。

(4)双层夹层:烟圈计算可反映第一层电阻的埋深及电阻率特征,但无法分辨第二层夹层且深部

电阻率特征与实际偏差较大。奥卡姆算法倾向于将两个窄层合并为一个较宽的相对低阻体,无法分辨两层夹层间的高阻体。粒子群算法反演结果尽管电阻率存在一定偏差,但能够较为明显分辨两层夹层的相对埋深与电性差异,其计算误差相对简单模型大幅增长,计算耗时较长。

综合来看,烟圈计算不涉及迭代拟合,计算速度很快,但对复杂地层识别能力有限,难以准确反映夹层厚度和电阻率分辨特征,可作为初步定型分析方法。奥卡姆线性反演计算效率高,在简单层状场景中效果较好,但对覆盖层和双层夹层等复杂工况,夹层厚度无法被准确识别,甚至出现与实际模型相反的反演结果,反演效果分辨率较低。粒子群非线性反演可捕捉到高对比度和多层结构的细节,对复杂工况拟合度更高,但需要足够的迭代次数和计算成本。

因此,烟圈计算仅能快速初步判断地层整体分布趋势,可用于初步筛查;奥卡姆反演高效、稳定,适用于夹层较厚、无覆盖层等简单工况下的反演;粒子群的非线性搜索耗时较长,但能够获得更高的分辨率和拟合精度,适合存在薄层或多层夹层、覆盖层较厚的复杂工况的精细解释。

表 2 计算耗时和计算误差对比

类别		不同埋深			不同厚度			下方覆盖层			双层夹层		
		1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
计算耗时 /s	奥卡姆算法	142	152	153	157	152	171	249	285	258	325	415	405
	粒子群算法	3520	3868	4207	4335	3868	4498	5240	5480	5432	5550	6715	6818
计算误差 /($\times 10^{-4}$)	奥卡姆算法	1.06	2.09	5.53	3010	2.09	0.82	1510	1030	2401	2140	797	1860
	粒子群算法	7.02	1.48	3.37	2.94	1.48	3.22	12.9	18.2	3.64	202	20.9	58.1

3 工程应用

3.1 工程概况

某地区堤防堤顶宽约 6 m,为三级堤防。前期地质勘察资料揭示,该段堤防堤身填土主要分为 2 层:①黏性土,局部夹少量砂、砾、碎石、植物根系等,普遍均匀性较差,压实度较差,厚度约为 4~8 m;②砂砾及少量黏性土,成分复杂,孔隙较大且连通厚度约为 3~5 m。堤基土相对成分复杂,自上而下为粉质黏土、淤泥、粉砂、砾砂等。高水位运行时,堤防偶有出现渗漏险情,推测为堤身内部存在软弱夹层,高水位运行下形成了渗漏通道。为探查软弱夹层分布情况,采用瞬变电磁法进行探测。

3.2 数据采集与反演

现场探测设备采用“南水·坤宁”巡堤查险车,

其车前搭载了小回线瞬变电磁设备。探测线圈直径为 0.7 m,发射频率为 32 Hz,发射电流为 60 A,采样频率为 1.25 MHz,发射波形为双极性梯形波,采集时窗为 1.3 ms,采集模式为 RTK 模式,可实时获取测点位置信息,现场采集时沿堤顶连续采样,采集数据为归一化单位电流的磁场 B_z 数据。

为精准分辨软弱夹层,采用粒子群算法进行反演,反演与算例采用相同的模型参数,电阻率搜索范围为 1~500 $\Omega \cdot m$,粒子群种群数量为 200。将各点数据按位置排列,并采用克里金空间插值方法进行插值计算,形成视电阻率等值分布云图。

某段堤防探测成果见图 4,图 4 中蓝色代表低阻率区、红色代表高阻率区、绿色为中等电阻率区域。堤防视电阻总体分布呈层状,浅层视电阻率相对较高,结合地勘资料,推测为堤身填筑的黏性土;

中深层视电阻率相对较低,推测可能存在为粉砂、粉质黏土等原状土,探测结果整体符合工程资料揭示的地质分布规律。

其中,里程0~212 m区间、深度8~15 m等区

域范围内存在多处低视电阻率夹于高视电阻率之间的情况,推测该区域存在夹杂砂土、杂填土等易透水土体的软弱夹层隐患。

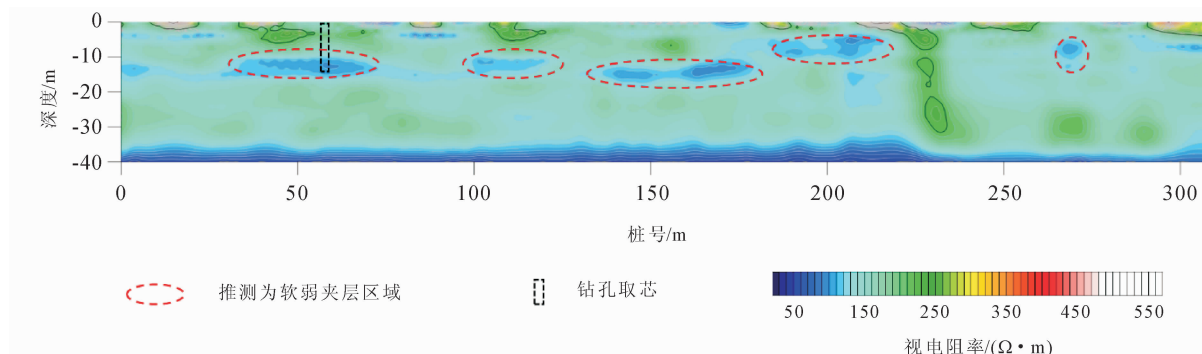


图4 探测反演成果图

3.3 钻孔验证

为验证探测准确性,选择桩号60 m位置处进行钻孔,钻孔深度12.50 m。钻孔揭露土层如图5。可见,0~8.4 m为粉质黏土,颜色为黄褐色,状态呈软可塑,土质相对均匀,仅局部夹杂砾石土;下部8.4~12.5 m为淤泥质土,颜色为灰黑色,状态呈流塑状,且含大量粉砂。瞬变电磁法推测该区域8~15 m视电阻率低,为软弱夹层。钻探揭露成果与物探反演的结果基本对应。由此验证反演结果较为可靠。

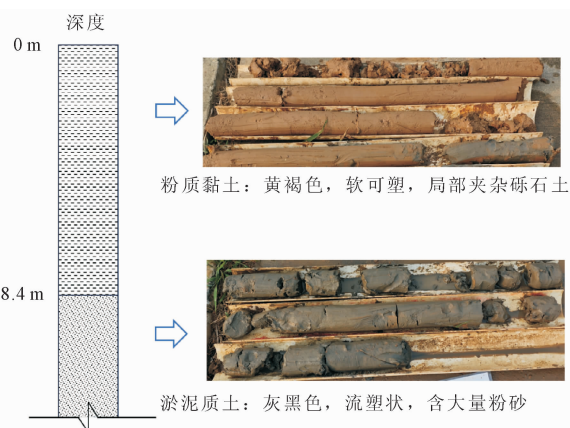


图5 钻芯取样揭露土层

4 结论

(1) 软弱夹层使响应曲线在时间窗出现可辨识畸变;畸变初现时刻与埋深正相关,畸变幅值与厚度正相关、与埋深负相关;但下覆深厚覆盖层显著影响观测信号,双层夹层观测信号差异相对较弱,增大了反演解释的难度和非唯一性。

(2) 烟圈计算快速直观但分辨率有限,可初步

分析地层电阻率分布趋势;奥卡姆反演对薄层夹层、双层夹层分辨能力不足,但适用于较厚夹层等简单工况;粒子群在薄层、多层夹层等复杂工况下分辨率和拟合精度相对较高,但计算成本较高。

(3) 在实际堤防探测应用中,采用粒子群算法反演识别出连续低阻夹层,与钻孔揭示的粉砂夹层在位置与埋深上吻合,证明了该算法用途的可靠性。

参考文献:

- [1] 高玉峰,王玉杰,张 飞,等. 边坡工程与堤坝工程研究进展[J]. 土木工程学报,2024,57(08):97-118.
- [2] 彭文明,张雪东,夏 勇. 软弱覆盖层上土石坝动力离心模型试验研究[J]. 岩土力学,2023,44(06):1771-1778.
- [3] 周 鹏,王 霜,王 恺. 不同结构堤基渗流的数值模拟和管涌临界条件[J]. 人民黄河,2021,43(03):57-62.
- [4] 朱勇辉,周建银. 堤坝漫溃机理、模型及溃决洪水模拟技术与应用[J]. 长江科学院院报,2023,40(05):1-8.
- [5] Zhang Guochen, Xu Liqun, Qiu Fei, et al. A review on the progress of integrated geophysical exploration techniques for leakage hazard detection in earth and rock dams[J]. Applied Sciences-Basel, 2025,15(04):1767.
- [6] 张盛行,汤 雷,朱春光,等. 基于瞬变电磁法的均质土坝渗漏通道探测与消险质量评价[J]. 水利与建筑工程学报,2025,23(02):98-105.
- [7] 王 鹤,晏茂珊,席振铎,等. 基于物理指导的等值反磁通瞬变电磁深度学习反演[J]. 中南大学学报(自然科学版),2025,56(05):1851-1860.
- [8] 袁永榜. 煤矿采空富水区瞬变电磁快速成像技术[J]. 煤矿安全,2020,51(05):98-101,106.
- [9] 郭士明,谢向文,廖 先. 基于拖曳式瞬变电磁法的渠

- 堤工程快速检测技术研究[J]. 人民黄河, 2022, 44(06):129-133.
- [10] 邢涛, 袁伟, 李建慧. 回线源瞬变电磁法的一维 Occam 反演[J]. 物探与化探, 2021, 45(05):1320-1328.
- [11] Chaerul V A, Djaja I G P F S, Pratomo P M, et al. Identifying seawater intrusion in coastal areas using the transient electromagnetic method at Santolo Beach, Garut, West Java, Indonesia[J]. Geosystems and Geoenvironment, 2026, 5(01):100440.
- [12] Yu Chuantao, Zhang Xi, Chen Weiying, et al. Detection of water-enriched goaf via the semi-airborne transient electromagnetic method[J]. Journal of Applied Geophysics, 2023, 212:105011.
- [13] 徐正玉, 付能翼, 周洁, 等. 瞬变电磁法非线性优化反演算法对比[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022, 52(03):744-753.
- [14] Yuan Zhanbo, Wu Muiyang, Fu Nengyi, et al. Research on 1-D forward modeling and inversion of TEM considering induced polarization effects[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 241:105844.
- [15] Jiao Junjun, Cheng Jiulong, Liu Yuben, et al. Inversion of TEM measurement data via a quantum particle swarm optimization algorithm with the elite opposition-based learning strategy[J]. Computers & Geosciences, 2023, 174:105334.
- [16] 陈熠坤, 储亚, 蔡国军, 等. 低频电阻率测试技术在特殊土地中的应用研究进展[J]. 工程地质学报, 2024, 32(05):1798-1813.
- [17] 覃玉龙, 江元, 闫江, 等. 岩土介电性参数与物性参数关联性研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(S2):345-350.
- [18] 罗东翔, 孙敬, 党如童, 等. 辽河干流防洪工程筑堤土料电阻率特性试验研究[J]. 东北水利水电, 2025, 43(06):32-37.
- [19] 彭光灿, 黄世传, 徐兴倩, 等. 红黏土固结压缩电阻率模型试验研究[J]. 环境工程学报, 2025, 19(11):3014-3021.
- [20] 郭嵩巍, 刘小畔, 郑凯, 等. 基于全区视电阻率的瞬变电磁一维 Occam 反演中雅克比矩阵的解析算法[J]. 物探与化探, 2020, 44(03):559-567.
- [21] 王书明, 底青云, 夏彤, 等. 瞬变电磁数据 L-PSO 反演方法[J]. 地球物理学报, 2022, 65(04):1482-1493.
- [22] Xu Zhengyu, Liu Longhuan, Liao Xian, et al. Research and application of small-loop transient electromagnetic inversion method using improved FLCPSO-IFAH optimization algorithm[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 239:105759.

(上接第 104 页)

- [21] 张玲, 欧强, 赵明华, 等. 移动荷载下土工加筋路堤动力响应特性数值分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(10):2865-2874.
- [22] JTGD30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [23] JTGC20—2011 公路工程地质勘察规范[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2011.
- [24] JTG3430—2020 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [25] 张景昱, 刘盼, 邓华锋, 等. 应力-干湿循环耦合作用下泥岩力学特性劣化效应研究[J/OL]. 岩土工程学报, 1-10 [2025-12-17]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20251127.1010.002>.
- [26] 侯小强, 范泓涓, 黄解放, 等. 冻融循环下固化高原软土长期强度劣化规律与微观机制研究[J/OL]. 岩石力学与工程学报, 1-13 [2025-12-17]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1397.O3.20251126.1007.001>.
- [27] 陈航航, 魏亚妮, 范文, 等. 干湿循环作用下黏黄土微观结构响应及强度劣化机制研究[J/OL]. 工程地质学报, 1-17 [2025-12-17]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2025-0034>.
- [28] 宋飞, 赵健. 土工格室挡墙破坏机理及评价方法[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2019.
- [29] 褚夫蛟, 刘敦文, 侯志勇, 等. 高速公路复工路基土工格栅的加固补强稳定性[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(05):741-74.