

基于 SIMM-UKF 和电阻率成像技术的 滑坡体形变预测算法研究

徐哈宁^{1,2}, 肖 慧^{1,2}, 邓居智²

(1. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西南昌 330013;
2. 东华理工大学地球物理与测控技术学院, 江西南昌 330013)

摘 要: 土体渗流场动态变化和其产生的深部位移是滑坡地质灾害的主要诱因. 针对现有的深部位移监测技术无法在空间上完整描述和解释滑坡体变形过程的问题, 提出一种基于简化交互多模型 (Simplified Interactive Multiple Model, SIMM) 和无迹卡尔曼滤波 (Unscented Kalman Filter, UKF) 的滑坡体内部结构成像预测技术. 利用电法勘探具有快速、准确采集地下介质电性信息, 并实现多维电阻率剖面成像的特点, 依据地质条件, 将不同勘探装置采集的电阻率模型作为输入. 通过门限检测, 判别滑移面周边电阻率值变化速度是否超过预警值, 对各模型数据进行无迹卡尔曼滤波并交互输出. 现场实验证明, 该算法解决了电阻率采集装置间灵敏度匹配问题, 实现了滑坡地质体内部结构快速、多维成像, 提高了滑坡内部形变过程解释的有效性.

关键词: 滑坡监测; 电阻率法勘探; 交互多模型; 无迹卡尔曼滤波

中图分类号: TP312 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)02-0354-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200391

Research on Prediction Algorithm of Landslide Deformation Based on SIMM-UKF and Resistivity Imaging Technology

XU Ha-ning^{1,2}, XIAO Hui^{1,2}, DENG Ju-zhi²

(1. Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China University of
Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

2. School of Geophysics and Measurement-Control Technology, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: The dynamic change of soil seepage field and its deep displacement are the main inducements of landslide geological disasters. To solve the problem that the existing deep displacement monitoring technology can not describe and explain the deformation process of landslide in space, an imaging prediction technology of landslide internal structure based on simplified interactive multiple model (SIMM) and unscented kalman filter (UKF) is proposed. Electrical prospecting has the characteristics of collecting underground media information quickly and accurately, Furthermore, it can realize multi-dimensional resistivity profile imaging. Based on the above and geological conditions, resistivity models collected by different exploration devices are taken as input. The threshold detection is used to judge whether the change speed of the resistivity value around the slip surface exceeds the warning value, and the data of each model are processed by unscented Kalman filter and output interactively. Field experiments show that the algorithm solves the problem of sensitivity matching between resistivity acquisition devices, realizes fast and multi-dimensional imaging of the internal structure of landslide geological body, and improves the effectiveness of interpretation of landslide internal deformation process.

Key words: landslide geological hazard monitoring; resistivity exploration; interactive multi-model; unscented Kalman filter

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-08-31; 责任编辑: 马兰英

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目 (No. GJJ150598); 江西省防震减灾与工程地质灾害探测工程研究中心基金 (No. SDGD202005); 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室基金 (No. RGET1908)

1 引言

滑坡地质灾害是我国仅次于地震的第二大地质灾害。经过多年研究,滑坡地质体的表面位移和内部应力监测技术已相对成熟,而引发了 85% 以上滑坡事件的大气降水导致的土体渗流场动态变化和其产生的深部位移的监测技术手段却相对单一^[1]。钻孔深部位移监测技术能够反映坡体内部的变形特征,确定滑动面位置,已在重大滑坡监测和防治中得到广泛应用^[2]。但受钻孔位置、数量和成本的限制,该技术无法实现滑坡体内部空间上完整、连续的位移数据采集。因此,如何快速、有效的采集滑坡地质体内部结构变化信息,并实现多维建模成像,是滑坡地质灾害监测、预测领域的重要研究方向^[3,4]。

地质模型构建方向,有限元软件如 ANSYS 在边坡稳定性分析中得到广泛应用^[5],但地质空间关系的复杂性、软件功能的局限性等问题导致 ANSYS 等建模多基于应力应变等空间上不连续的监测技术,该方式降低了数据之间的关联性,且不能完整、真实的反映滑坡体内部结构空间上连续的变化过程。电阻率成像技术根据滑坡薄弱体(面)与围岩在物质构成、结构、孔隙度和含水率的不同,导致滑坡体具有密度、电性、弹性等多种物理特性的差异的特点^[6,7]。通过大面积电极阵列的扫描测量,可快速实现地下介质电性信息的多维成像^[8-11]。但电阻率法勘探不同采集装置对各种结构的地质体灵敏度不同、反演过程中参数不同等原因,导致反演结果存在多解性特点。如何发挥各种装置特点,提高电阻率成像技术的准确性、有效性,成为该技术应用于滑坡动态监测的难点。

滑坡过程是一种复杂的动态演变,滑坡岩土体物质组成具有各向异性的特点,滑坡的位移变形情况与滑坡内部因素和外部因素间存在着非线性的关系^[12,13]。UKF 采用递推方法,能够依靠数据更新不断对动态系统进行修正,适合滑坡监测数据的动态处理和预测模型的建立^[14-16]。由于 UKF 没有对非线性函数进行线性化处理,即没有忽略高阶项,因而得到的后验分布均值和协方差估计比扩展卡尔曼滤波方法得到的结果更加精确^[17-20]。

为了实现滑坡地质体内部形变过程多维、连续成像,解决滑坡体地质模型的非线性问题,发挥各种装置的对不同地质体的探测优点,提高电阻率法反演成像速度。本文提出一种基于 SIMM 和 UKF 技术的电阻率滑坡体预测模型,将滑坡系统视作随机动态系统:电阻率数据变化过程看作观测值与估计值相互影响的随机动态过程,以电阻率采集数据和变化速率作为状态向量,将变化加速度作为系统噪声随机模型,建立滑坡体

电阻率运动方程,对滑坡系统的多因素动态变化状态进行描述。将不同装置作为模型输入,首先通过门限检测,判断电阻率数据变化速度是否超过预警设定。未超过预警值,表示地下水渗流场或滑移面未出现明显加速变化,滑坡发生的可能性较小,为了减少数据量,提高算法的实时性,按单一模型快速滤波处理。当超过预警值时,通过交互多模型(Interactive Multiple Model, IMM)算法把各模型当前数据的滤波值进行交互作为各模型下一时刻的输入,分别进行 UKF 滤波,得到的结果进行加权交互输出,更新状态方程。必要时,可通过钻孔深部位移数据进行校正,增加滤波算法的有效性。

2 电阻率成像原理

滑坡体的矿物组分、颗粒形状、结构、胶结物以及岩石的孔隙度、裂隙度及含水情况等均有不同。电阻率成像技术根据岩石矿石、不同地层或不同地质体导电性存在差异的特点,通过地面测定,研究人工或天然电场的分布特点和变化规律来推断地下电阻率分布从而准确的推断出不同地质体的分布状况。电阻率用 ρ_s 表示,单位为 $\Omega \cdot m$,电阻率计算公式^[10]:

$$\rho_s = K \frac{U_{MN}}{I_{AB}}, K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \quad (1)$$

U_{MN} 为测量正电极(M极)和测量电极负极(N极)间的一次场电位差, I_{AB} 为通过供电正电极(A极)和供电负电极(B极)向大地发射的电流, K 为装置系数, AM 、 AN 、 BM 、 BN 为各点之间距离。将电阻率成像技术应用于滑坡地质灾害监测过程中需要解决野外连续供电和远距离无线传输数据两个关键技术,本文通过 DEM-3 型分布式直流电法仪进行改装,增加太阳能供电模块和 4G 网络数据传输模块,在试验现场与其他监测设备共同布设在滑坡前缘的监测站中,电缆通过线管保护从监测断面的前缘向后缘方向布设,满足了长期野外自动化电阻率监测的需要,监测设备布设断面结构图如图 1 所示。

电阻率成像以不同颜色代表不同的电阻率,横坐标为剖面距离,纵坐标为深度,在一个滑坡观测断面或整个滑坡体内,形象的表示出电阻率的结构。电阻率法勘探可根据供电和采集电极不同的排列组合,形成的常用的 10 余种勘探装置,也可根据现场地质条件,自定义勘探装置。其中,电测深法是固定测量电极距,由小到大改变供电电极距,用以研究测点下和测区下不同导电性地质体从浅到深的垂向分布情况;电剖面法是使供电电极和测量电极的电极距都固定不变,整个装置沿测线朝一个方向移动,在不同测点上进行观测。它是在大体同一勘探深度情况下,了解沿测线的岩层、构造情况,岩层倾角较大

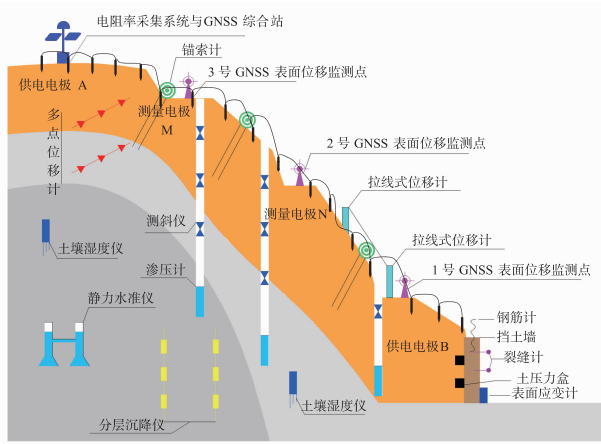


图1 监测设备布设断面结构图

的地区,岩层倾角越大,使用越有利.

本文根据不同装置对目标体水平或垂向分辨能力、探测深度和有效探测范围等如下因素,选择温纳装置、偶极-偶极装置和温纳-施伦贝尔装置进行测量建模. (1) 温纳装置在装置中心正下方,灵敏度函数几乎成水平分布. 温纳装置对电阻率的垂向变化比较敏感,一般用来探测水平目标体. (2) 偶极-偶极装置高灵敏度区域出现在发射偶极和接收偶极下方,灵敏度等值线几乎垂直的. 因此,偶极-偶极装置水平分辨率比较好,一般用来探测向下有一定延伸的目标体. (3) 温纳-施伦贝尔装置是温纳装置的一个变种装置,其高灵敏度值出现在测量电极之间的正下方,但探测深度小. 滑坡地质灾害的滑移面一般位于地表以下 30m 范围内,这种深度正好在极间距($a = 1\text{m}$, $a = 0.5\text{m}$)的温纳-施伦贝尔装置的灵敏度范围内(减小极间距可以有效的提高监测精度),同时因其兼顾水平和纵向的分辨率,是滑坡地质灾害较为理想的监测装置. 三种装置灵敏度分布图如图 2 所示.

以电极数量 80 为例,三种装置的跑极方式和测量点分布图如图 3 所示. 温纳装置: $AM = MN = NB$, A 、 M 、

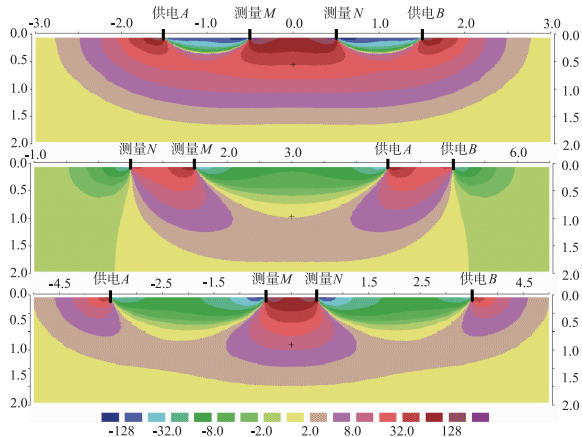


图2 三种装置灵敏度分布图

N 、 B 逐点同时向右移动,随着极间距的增大,剖面反演解释通过的深度也逐渐增大;偶极-偶极装置: $AB = BM = MN$, A 、 B 、 M 、 N 逐点同时向右移动;温纳-施伦贝尔装置跑极方式:此装置介于温纳与施伦贝尔之间,间隔层数为 $3a$ (a 为标准极间距),在 1~3 层施伦贝尔法跑极,4~6 层 MN 间隔变为 $3a$,7~9 层 MN 电极间距变为 $5a$,依此类推,得到一个倒梯形断面图.

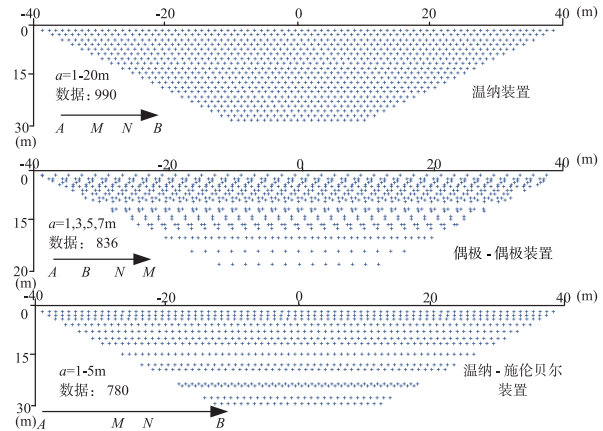


图3 三种装置跑极方式和测量数据点分布图

3 SIMM-UKF 算法的实现

不同地质条件下,各种电阻率法测量装置对地下目标体的探测有效性差异,通过地质资料总结和其他监测数据比对分析,确定出针对不同地质条件的 IMM 算法中装置模型间的 Markov 状态转移概率,并基于滑坡体电阻率预测模型,形成动态的监测、预测过程,提高该算法的监测预测有效性. 电阻率状态方程与观测方程,设非线性系统的广义状态方程和观测方程^[19]:

$$\mathbf{X}(k+1) = f[\mathbf{X}(k), \mathbf{W}(k), \mathbf{V}(k)] \quad (2)$$

$$\mathbf{Z}(k) = h[\mathbf{X}(k), \mathbf{V}(k)] \quad (3)$$

式中, $\mathbf{X}(k)$ 目标状态向量; $\mathbf{Z}(k)$ 目标量测向量; $\mathbf{W}(k)$ 系统噪声,其方差为 $\mathbf{Q}(k)$; $\mathbf{V}(k)$ 量测噪声(根据测斜仪深部位移、地下水位和现场钻孔等数据进行校正),其方差为 $\mathbf{R}(k)$. $f(\bullet)$ 为线性函数, $h(\bullet)$ 为非线性函数.

IMM 算法采用一个 Markov 链控制若干模型之间的切换,把各个模型上任一时刻的滤波值进行交互作为各模型下一时刻的输入,然后分别进行滤波,得到的结果进行加权交互输出作为最终结果. 该算法的难点在于 N 组 UKF 滤波模式参数 $M_j(k)$ 定义,模式间 Markov 转移矩阵的确定等. SIMM 算法根据新息 $\mathbf{V}(k)$ 的大小来判断电阻率数据变化速度是否超过预警值,并由此来调整滤波器的参数^[18].

$$\mathbf{V}(k) = \mathbf{Z}_{i,k|k-1} - \mathbf{H}(k)\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} \quad (4)$$

当电阻率数据变化速率未超过预警值时,它是零均值高斯白噪声,其协方差矩阵^[18]:

$$S(k) = H(k)P_{k|k-1}H'(k) + R(k) \quad (5)$$

式中, $P_{k|k-1}$ 为一步状态预测的协方差矩阵 $\hat{X}_{k|k-1}$. 定义目标机动检测的判别函数^[18]:

$$D(k) = V'(k)S^{-1}(k)V(k) \quad (6)$$

由 $V(k)$ 的统计特性可知, 此处定义的检测判别函数 $D(k)$ 是服从自由度为 m 的 χ^2 分布, m 为误差向量 $V(k)$ 的维数. 如果超过门限值, 新息将不再是零均值高斯白噪声, 判别函数将变大. 若 $D(k) > T$, 进行多模型交互、混合; 若 $D(k) \leq T$, 按原单一模型参数滤波预测.

为了合理确定检测门限, 要综合考虑虚警概率和漏检概率. 滑坡体的组成成分、岩石的孔隙度、裂隙度和原含水情况都会影响地下渗流场体运移和扩散的速度, 导致滑坡体电阻率数据发生明显的变化. 现场需要根据地勘资料, 构建低阻体、高阻体和均匀成分的目标体的静态地电模型、匀速和变速运移和扩散地电模型, 从而提高门限判定的准确率. 确定门限 T 时, 必须综合考虑虚警概率 P_f 和机动检测判别函数 $D(k)$ 的变化情况.

Step1 将 $k-1$ 时刻电阻率采集数据集的每个数据的滤波值和误差协方差作为 UKF 滤波器的输入. 根据式(6)确定判别函数 $D(k)$. 根据 P_f 和 $D(k)$ 判别数据的变化速率是否超过门限值.

Step2 如果未超过门限值, 则按原滤波参数按照单一装置数据进行滤波. 如果电阻率数据变化速度超过门限值, 以 $\hat{X}_{0,k|k}$, $P_{0,k|k}$ 和观测值 $Z_{0,k|k-1}$ 为输入, 按照 IMM 算法对各模型进行交互得到 k 时刻的滤波值 $\hat{X}_{k|k}$ 和 $P_{k|k}$.

根据现场地质条件和钻孔取样结果, 按不同装置灵敏度特点, 选择 r 个电阻率采集装置模型 M_j , 模式间的 Markov 状态转移概率为 $P_{ij} = P\{M_j(k) | M_i(k-1)\}$, 表示 $k-1$ 时刻处于模式 i , 而 k 时刻处于模式 j 的 Markov 转移概率; 各模型通过一个 Markov 链控制它们之间的转换, 转移概率矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1r} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{r1} & \cdots & P_{rr} \end{bmatrix} \quad (7)$$

IMM 算法首先将 $k-1$ 时刻各装置采集的电阻率数据的滤波值和误差协方差交互加权作为输入值^[20]:

$$\begin{aligned} & \hat{X}_{0j}(k-1|k-1) \\ & = \sum_{i=1}^r \hat{X}_j(k-1|k-1)\mu_{ij}(k-1|k-1) \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} P_{0j}(k-1|k-1) & = \sum_{i=1}^r \mu_{ij}(k-1|k-1) \{ P_i(k-1|k-1) \\ & + [\hat{X}_i(k-1|k-1) - \hat{X}_{0j}(k-1|k-1)] \\ & \cdot [\hat{X}_j(k-1|k-1) - \hat{X}_{0j}(k-1|k-1)]^T \}, \\ \mu_{ij}(k-1|k-1) & = \frac{P_{ij}\mu_i(k-1)}{c_j} \end{aligned} \quad (9)$$

$\hat{X}_j(k-1|k-1)$, $P_i(k-1|k-1)$ 表示 $k-1$ 时刻, 模

式 j 滤波器的状态估计及其协方差矩阵; $\hat{X}_{0j}(k-1|k-1)$, $P_{0j}(k-1|k-1)$ 表示 $k-1$ 时刻, 模式 j 滤波器的混合初始状态估计及其协方差矩阵.

$c_j = \sum_{i=1}^r P_{ij}\mu_i(k-1)$, $\mu_{ij}(k-1|k-1)$ 是预测模型 j 的概率.

Step3 各模型 UKF 滤波

根据输入交互及 $k-1$ 时刻的量测数据 Z_{k-1} , 对各个装置采集电阻率数据进行 UKF 滤波, $\Phi_j(k-1)$ 为 $k-1$ 时刻的一步转移矩阵. 模型 j 的一步状态预测^[19]:

$$\hat{X}_j(k|k-1) = \Phi_j(k-1)\hat{X}_{0j}(k-1|k-1) \quad (10)$$

模型 j 的一步预测状态协方差^[19]:

$$\begin{aligned} P_j(k|k-1) & = \Phi_j(k-1)P_{0j}(k-1|k-1)\Phi_j^T(k-1) \\ & + Q_j(k-1) \end{aligned} \quad (11)$$

模型 j 的滤波更新^[19]:

$$\hat{X}_j(k|k) = \hat{X}_j(k|k-1) + K_j(k|k)V_j(k) \quad (12)$$

其中, $V_j(k)$ 为模型 j 的新息; $K_j(k|k)$ 为模型 j 的增益.

Step4 最后交互的输出:

$$\hat{X}(k|k) = \sum_{j=1}^r \hat{X}_j(k|k)\mu_j(k) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} P(k|k) & = \sum_{j=1}^r \mu_j(k) \{ P_j(k|k) + [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)] \\ & \cdot [\hat{X}_j(k|k) - \hat{X}(k|k)]^T \} \end{aligned} \quad (14)$$

图 4 为本文设计的基于 SIMM 和 UKF 技术的电阻率滑坡体预测模型流程. 其中 $A_n(k)$ 为 $k-1$ 时刻电阻率量测值的似然函数.

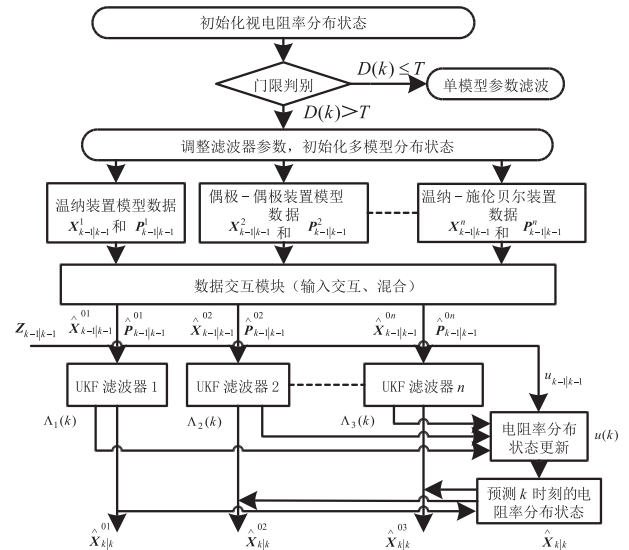


图4 基于SIMM-UKF技术的电阻率滑坡体预测模型流程图

该算法不但适用于监测滑坡体地下介质电性信息均匀分布的情况, 在土体成分不均匀时, 可通过钻孔方式取样, 根据地下目标体的分布和组成情况, 建立指定监测区域不均匀介质的地电模型, 对 SIMM 算法反演出

的电阻率成像数据进行校正。

4 现场实验

实验场地选定珠海市凤凰山隧道延伸段 K24 + 460 ~ K24 + 550 边坡的 05 剖面,进行连续多天、不同装置的采集数据,建立滑坡体预测模型,并通过与已安装在该边坡的固定式测斜仪和地下水水位计监测结果进行对比,验证该方法的有效性。

该工程地质断面图如图 5 所示。该边坡属砂/砾质粘土边坡,平面形态呈“凸型”,边坡地势总体南高北低,实测后缘高程 25m,前缘高程 5m,前后缘最大高差约 20m,坡面平均坡度约 22°,主滑方向为 143°,地下水位埋深不大,且地下水主要接受丘陵区裂隙水补给,腐蚀性较弱;地基土主要为残坡积土,软土层厚度较小,断裂构造不发育,上部有厚度为 3 ~ 5m 左右的坡积土,以下为全、强风化花岗岩。根据含水介质特征和地下水赋存条件,场区地下水类型主要为基岩裂隙水。坡积土层及全、强风化岩层中基本不含水,基岩裂隙水主要为构造裂隙水和风化裂隙水,赋存在基岩裂隙中。地下水位一般受地形影响,变化较大,在山坡上,水位稍高,在山脚地段,水位低。ZK2 和 ZK4 为固定式测斜仪钻孔,用以监测该边坡深部水平位移,该数据后期与采集数据对比,可对该方法的有效性进行验证。

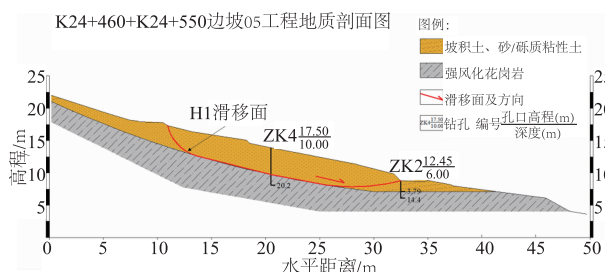


图5 工程地质断面图

在该边坡上由坡顶至坡低布置测线,电极间距 $a = 1\text{m}$,电极数量 60 根,供电电压 90V,最大 $AB = 59\text{m}$,有效测深 14.75m,使用 DEM-3 型分布式直流电法仪配合智能电极对该剖面进行测量。使用瑞典高密度处理软件 RES2Dinv 进行地形校正和数据反演处理。

第一次试验前连续多 15 日无降水,测量装置选择:温纳装置、偶极-偶极和温纳-施伦贝尔装置。测量频率:三种装置每天各一次。测量周期:连续 3 天,期间无降水。其中,第一天、第二天三种装置采集数据反演结果如图 6 所示。

如图 6 所示,图(a)为温纳装置采集,图(b)为偶极-偶极装置采集,图(c)为温纳-施伦贝尔装置采集。从图中可以看出:

(1) 三种不同装置在边坡前缘反演结果基本一致,

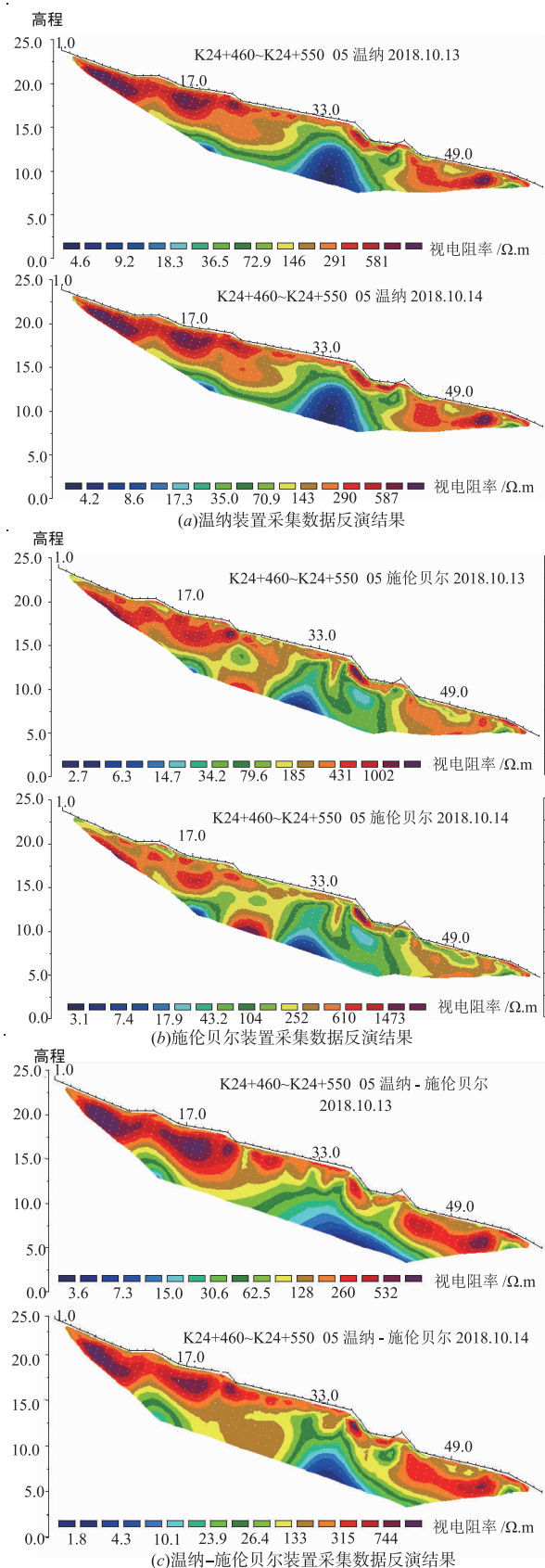


图6 三种装置采集数据反演结果

反映出了地质结构和滑移面所在位置。

(2)在边坡中部可以明显看出各种不同装置对地下不同地质结构的目标体分辨率不同,对底部低阻体的边缘和结构的判断存在差异。其中温纳装置和温纳-施伦贝尔装置因该边坡以水平层状结构分布为主,采集数据反演结果整体较为相似。在该测线 30~35m、深度 5~10m 处,偶极-偶极装置灵敏度明显不同于其他两种装置,温纳-施伦贝尔装置因对不同方向的地质构造都有较好的灵敏度,成像效果较为理想,且符合该边坡地质剖面结构。

(3)在该边坡的后缘部分,表层坡积土较浅,主要以风化花岗岩为主,三种装置反演结果基本一致。

以前 2 天数据为 UKF 滤波器状态输入,因该边坡地质情况为竖向电阻率分层结构较好,滑移面较为清晰,故以温纳-施伦贝尔装置为主要测量装置, SIMM 算法使用 3 种模型交互:温纳-施伦贝尔模型、温纳模型和偶极-偶极模型,设马尔科夫转移概率为: $P = [0.8 \ 0.1 \ 0.1]$, 对该边坡第 3 天电阻率数据进行预测,三种采集装置第 3 天采集该断面共 16 层剖面,其中第一层剖面 and 滑移面附近(深度约为 5~10m)第 7 剖面电阻率对比数据如图 7 和图 8 所示。

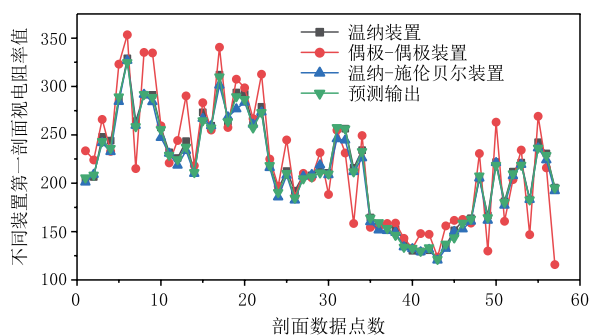


图7 三种装置和预测输出第一剖面数据对比

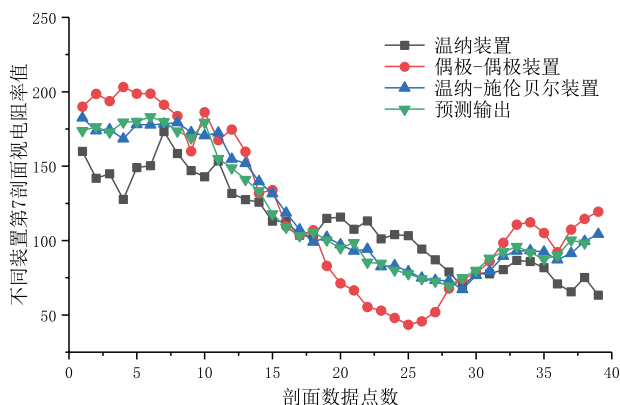


图8 三种装置和预测输出第7剖面数据对比

图 7 所示,为三种装置第一剖面原始数据和应用 SIMM-UKF 滤波算法输出的数据对比图,从图中可以看

出,该边坡浅层地表(0~5m)坡积土部分电阻率数据在 $175\Omega \cdot m \sim 290\Omega \cdot m$ 之间,三种装置采集数据和预测数据基本一致。滑移面附近数据反演结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,在电阻率采集数据第 7 层(深度 6.45m 附近),因地质结构变化较小,边坡前缘和后缘部分三种不同装置采集数据基本一致。边坡中部因地质结构以水平方向分层位置,三种装置采集数据存在不同,温纳-施伦贝尔装置采集数据能够结合其他两种装置的灵敏度特点, SIMM-UKF 算法预测数据与 ZK4 深部位移监测数据对比,能够反映出内部形变趋势。

以前 2 天三种不同装置数据为 UKF、扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)和去偏转换卡尔曼滤波(Converted Measurement Kalman Filter, CMKF)滤波器状态输入交互输出,与第三天温纳-施伦贝尔装置实测数据对比 SIMM-UKF 算法和其他两种算法的误差,如图 9 所示。

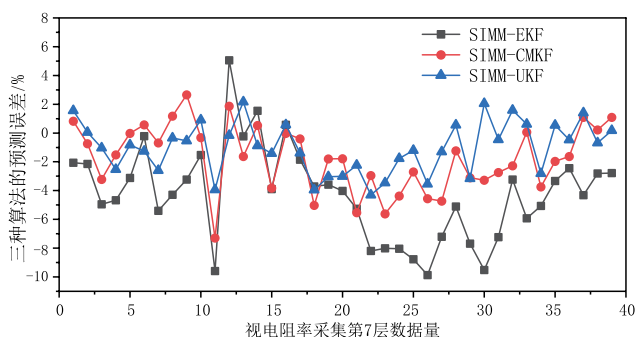


图9 三种不同算法的预测误差曲线

从图 9 中可以看出,在滑移较少的边坡前缘和后缘, SIMM-CMKF 与 SIMM-UKF 的准确性相似,误差范围在 $\pm 2\%$ 之内,但在地质结构相对复杂和出现滑移的边坡中部本文提出的 SIMM-UKF 算法预测的精度 -4% 至 $+2\%$ 范围内,要明显好于 SIMM-CMKF 和 SIMM-EKF 两种算法。

预测数据反演结果如图 10 所示,第 3 天实际温纳-施伦贝尔装置测量结果反演图如图 11 所示。

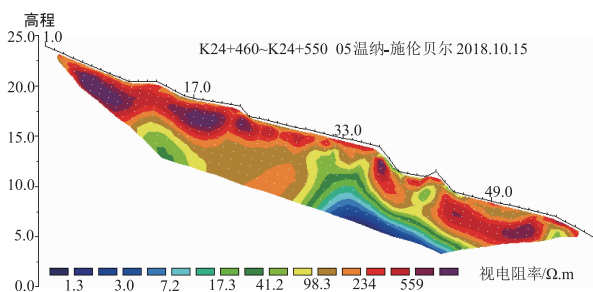


图10 预测数据反演结果

从图 10、图 11 中可以看出:在边坡前缘和后缘部分,预测数据与温纳-施伦贝尔装置实测数据基本一致。在边坡中部,因三种装置交互输出的结果,对水平和垂

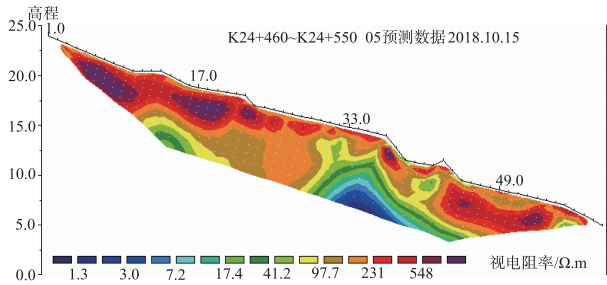


图11 温纳-施伦贝尔装置测量结果反演图

向地质结构灵敏度均有所提高,该测线 25 ~ 35m、深部 5 ~ 10m 处滑移面分辨清晰,地下土体渗流场变化方向和趋势明显,与 ZK2 和 ZK4 两处深部位移监测数据对比,SIMM-UKF 算法输出数据明显更能反映该边坡的地质结构分层和变化过程。

5 结论

滑坡体土体渗流场和深部水平位移具有典型的非线性特点,现有技术无法实现地质体内部结构快速二维、三维预测成像. 基于 SIMM-UKF 的滑坡体电阻率预测成像技术可根据现场地质条件和各种采集装置对地下不同结构和介质的灵敏度差异,灵活的修改模型集的马尔科夫转移概率,将数据进行无迹卡尔曼滤波交互输出,有效的抑制了非线性模型线性化所引入的误差. 同时,开展针对现场地质条件的低阻体、高阻体和不均匀成分的目标体的静态地电模型、匀速和变速运移和扩散地电模型构建,可提高预测数据的准确性. 现场实验验证,该方法能够有效的预测滑坡体地质结构的变化,为滑坡灾害的监测和预测提供技术支持。

参考文献

- [1] CHO S E. First-order reliability analysis of slope considering multiple failure modes[J]. *Engineering Geology*, 2013, 154(28): 98 – 105.
- [2] ZHANG J, HUANG H W, ZHANG L M, et al. Probabilistic prediction of rainfall induced slope failure using a mechanics based model[J]. *Engineering Geology*, 2013, 168(1): 129 – 140.
- [3] HUANG C C, JU Y J, LE J L, et al. Internal soil moisture and piezometric responses to rainfall-induced shallow slope failures[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 101(04): 134 – 145.
- [4] WANG G, SASSA K. Factors affecting rainfall-induced flow slides in laboratory flume tests[J]. *Geotechnique*, 2001, 51(07): 587 – 599.
- [5] Yelisetti S, Spence G D, Riedel M, et al. Role of gas hydrates in slope failure on frontal ridge of northern Cascadia margin[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(1): 441 – 458.
- [6] FABIO B, GUIDO P, ROBERTA P, et al. Landslide monitoring for risk mitigation by using corner reflector and satellite SAR interferometry: The large landslide of Carlantino (Italy)[J]. *Catena*, 2017, 151(3): 49 – 62.
- [7] KRZYSZTOF S, MARTA K, BOGDAN G. Talus slope evolution under the influence of glaciers with the example of slopes near the Hans Glacier, SW Spitsbergen, Norway[J]. *Geomorphology*, 2017, 285(9): 225 – 234.
- [8] DANIELA C, NEIL D, GARY J F, et al. Analysis of acoustic emission patterns for monitoring of rock slope deformation mechanisms[J]. *Engineering Geology*, 2016, 219(10): 21 – 31.
- [9] TOMMASO C, PAOLO F, EMANUELE I, et al. On the monitoring and early-warning of brittle slope failures in hard rock masses: Examples from an open-pit mine[J]. *Engineering Geology*, 2017, 228(2): 71 – 81.
- [10] LORENZO D C, MARIA T P, MARIA C C, et al. Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2013, 98(07): 1 – 10.
- [11] Anna Kelbert, Naser Meqbel, Gary D, et al. ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data[J]. *Computers and Geosciences*, 2014, 66(10): 40 – 53.
- [12] Ren Z Y, Tang J T. A goal-oriented adaptive finite-element approach for multi-electrode resistivity system[J]. *Geophysical Journal*, 2014, 199(01): 279 – 287.
- [13] WANG W, WU X P, Spitzer Klaus. Three-dimensional DC anisotropic resistivity modelling using finite elements on unstructured grids[J]. *Geophysical Journal*, 2013, 193(02): 734 – 746.
- [14] DENG Y, ZHENG Y, BIN L, et al. Complete tri-axis magnetometer calibration with a gyro auxiliary[J]. *Sensors Journal*, 2017, 17(06): 63 – 74.
- [15] KORMAN S, REICHMAN D, TSUR G, et al. Fastmatch: Fast affine template matching[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2017, 121(01): 111 – 125.
- [16] CAO L, YANG W W, LI H N, et al. Robust double gain unscented Kalman filter for small satellite attitude estimation[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60(03): 499 – 512.
- [17] CAI S K, WU M P, ZHANG K D, et al. The first airborne scalar gravimetry system based on SINS/DGPS in China[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 2013, 56(12): 2198 – 2208.
- [18] 侯宏录, 周德云. 基于 IMM 的光电经纬仪机动目标跟踪优化算法[J]. *西北工业大学学报*, 2007, (04): 561 – 565.

HOU H L, ZHOU D Y. An optimization algorithm for improving markedly the tracking of a maneuvering target [J]. Journal of Northwestern Poly technical University, 2007, (04): 561 - 565. (in Chinese)

[19] GAO W, DENG L, YU F, et al. A novel initial alignment algorithm based on the interacting multiple model and the Huber methods [A]. Position, Location and Navigation Symposium (PLANS) [C]. Savannah, GA, USA, 2016. 910 - 915.

[20] CHANG D C, FANG M W. Bearing-only maneuvering mobile tracking with nonlinear filtering algorithms in wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Systems Journal, 2014, 8(1): 160 - 170.

作者简介



徐哈宁 男, 1979 年 11 月出生, 黑龙江哈尔滨人. 东华理工大学副教授. 主要研究方向为地质灾害监测技术和地球物理勘探仪器研发.
E-mail: 33007063@qq.com



肖 慧(通讯作者) 女, 1978 年 7 月出生, 陕西渭南人. 东华理工大学副教授. 主要研究方向为地球物理仪器和核智能仪器研发.
E-mail: hxiao@ecit.cn



邓居智 男, 1972 年 12 月出生, 江西高安人. 东华理工大学教授、博士生导师. 主要研究方向为资源地球物理勘探和电磁法正反演.
E-mail: jzhdeng@ecit.cn