

暴雨型山体滑坡预警技术——电抗阈值法

唐冬梅^{1,2}, 陈一平^{1,2}, 柳建新^{1,2}, 杨 振³

- (1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 有色资源与地质灾害探查湖南省重点实验室, 长沙 410083;
3. 湖南继善高科技有限公司, 长沙 410208)

摘 要: 为了实现暴雨型山体滑坡的动态预警, 基于已有的滑坡成果, 在线性时不变理论的框架内探讨一种预警方法——电抗阈值法。基于地质体地电特性 TD 阻容模型, 在外电场作用下将“滑带层”动态含水量 ΔW_s 变换为反映大地系统传输函数的“滑带层”复阻抗特性 ΔZ_s , 实现对滑坡隐患体(以“滑带层”为主)动态含水量的间接监测; 基于“莫尔-库伦”破坏准则, 通过对“滑带层”平均倾斜角 α 和现场静摩擦因数 μ 阈值的求证获得 μ 的动态阈值边界; 基于模拟实验和理论分析, 在时域系统中通过频谱变换将 ΔW_s 、 ΔZ_s 和 μ 归一为因果系统函数, 获得反映暴雨型山体滑坡的理论阈值区。模拟实验结果表明: 在外电场激发下, “滑带层”动态含水量 ΔW_s 与“滑带层”复阻抗 ΔZ_s 以及现场静摩擦因数 μ 具有鲜明的拟合性, 且它们在时间域上均具有阈值特性。使用该方法能将不变系统内的多参数有效拟合, 可以为暴雨型山体滑坡阈值报警技术的研究提供一种可探讨的新途径。

关键词: 暴雨型滑坡; 复阻抗; 动态含水量; 静摩擦因数; 阈值报警

中图分类号: TU443

文献标志码: A

Reactance threshold value method for heavy rainfall landslide warning

TANG Dong-mei^{1,2}, CHEN Yi-ping^{1,2}, LIU Jian-xin^{1,2}, YANG Zhen³

- (1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Key Laboratory of Non-ferrous Resources and Geological Hazard Detection, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Hunan Geo-sun High Technology Limited Company, Changsha 410208, China)

Abstract: In order to realize the dynamic warning for the heavy rainfall landslide, based on the existing landslide theory and within linear time-invariant systems theory framework, a warning way named reactance threshold value method was discussed. The dynamic water content of sliding layer ΔW_s is transformed to complex impedance ΔZ_s which reflects the transmission function of geodetic system based on TD resistance-capacity model under the action of external electric field. Based on Mohr-Coulomb failure criterion, the dynamic threshold boundary of the static friction factor μ is obtained through analyzing the average slope angle and static friction factor μ threshold of the sliding layer. ΔW_s , ΔZ_s and μ are normalized to causal system function through spectrum transformation in timing-domain system, and theory threshold area of heavy rainfall landslides is obtained based on theory analysis. The simulation experimental results show the dynamic water content of sliding layer ΔW_s , complex impedance ΔZ_s and static friction factor μ have distinct fitting feature under the action of external electric field, and the three parameters all have threshold characteristics in time domain. This method can effectively fit multiple parameters in the time invariant system, and it can provide a new negotiated way to dynamic threshold warning technology research of heavy rainfall landslide warning.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41174103); 教育部博士点基金资助项目(20110162130008); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2011BAB04B08); 国家科技基础性工作专项(2013FY110800)

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 柳建新, 教授, 博士; 电话: 13807486248; E-mail: ljx6666@126.com

Key words: heavy rainfall landslide; complex impedance; dynamic water content; static friction factor; threshold warning

研究资料显示,暴雨诱发的滑坡灾害占灾害总数的90%左右^[1-3],因此,有效监测暴雨型滑坡灾害的信息具有非常重要的作用。但目前针对山体滑坡地质灾害的大量研究成果集中体现其地质的成因、静态勘查、防治、数学与统计模型的建立以及表面间接物理参量的静态监测方面;如具有滑坡灾害隐患的地质体必然存在“滑动体”、“滑带层”、“滑床”三层结构,且“滑动体”和“滑床”的地质密度大于“滑带层”的地质密度^[4];滑坡隐患体的斜坡坡度在20°~45°之间时,滑坡发生的概率最大等^[2]。但在地面上对由于暴雨引起的地下半空间地球物理动态信息的变化进行直接有效的监测存在着技术瓶颈,因此,暴雨型山体滑坡动态信息监测和宽动态阈值报警技术仍是滑坡预警预报领域的难题。针对上述问题,基于前人的滑坡理论研究成果,本文作者研究了在线性时不变框架内通过外加主动源信号激发地质体,获得与暴雨型滑坡相关的多因素的拟合,探讨一种新型、间接的监测方法——电抗阈值法。

1 电抗阈值法的原理

分析暴雨型滑坡地质灾害的形成过程可知,暴雨诱发山体滑坡的主要原因是地表水或地下水渗入到滑坡隐患体,引起其内部动态含水量变化,且“滑带层”的动态含水量 ΔW_s 变化率大于“滑床”或“滑动体”的动态含水量变化率。内部动态含水量变化引起“滑带层”的现场静摩擦因数 μ 逐渐改变,当现场静摩擦因数 μ 的变化到达一定的值时,在重力的作用下,滑体的受力失衡,滑体沿着“滑带层”平均倾斜角 α 滑动,从而造成山体滑坡现象^[5-9]。因此,平均倾斜角 α 处于边坡稳定阈值内时,实时有效监测“滑带层”的动态含水量 ΔW_s 变化特性,是实现暴雨型滑坡地质灾害预警的关键。由于滑坡隐患体“滑带层”具有三维非均尺度和非均密度特征,直接监测动态含水量变化特性几乎不能实现,所以必须寻求新的方法获得“滑带层”的动态含水量 ΔW_s 变化特性。

由水分子的电介质特性^[10-11]可知,在外电场的作用下具有滑坡隐患的地质体的地下半空间各结构层随其动态含水量变化,产生不同的极化特性。其中,极化强度(P)表示为

$$P = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\sum P_i}{\Delta V} \right) = NP_i \quad (1)$$

式中: ΔV 为电介质的任一微观小体积元; N 为电介质中每单位体积的水分子数; P_i 为微观体积元内的第 i 个分子的偶极矩。

从宏观的角度出发,将不同含水量的滑坡主体视为各向同性的电介质体,被极化的电介质体的偶极矩为 P_i ,则每处的电极化强度(P)与该处的总电场强度(E)成正比,且方向相同,即

$$P = E(\varepsilon_0 \varepsilon_r - \varepsilon_0) = E \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) = \chi E \varepsilon_0 \quad (2)$$

式中: ε_0 为真空介电常数, ε_r 为相对介电常数, $\varepsilon = (\varepsilon_0 \varepsilon_r)$ 为绝对介电常数, χ 为电场极化率。

可见,外电场的强度与不同主体的含水量大小直接决定地质体的极化强度,即外电场能够激发含水电性介质产生极化现象且极化现象可以很好地与含水量大小拟合。

对上述现象进一步分析得知,在外激发电场的作用下,地下半空间各结构层随其动态含水量的变化,产生不同的极化强度并表现出不同的极化响应。这种随动态含水量变化的极化响应在激发电流场的环路中表现为反映地下半空间特有的地球物理性质的复阻抗特性,该复阻抗特性既是时间 t 的函数,也是动态含水量的函数,它们的关系可表示为式(3)和(4):

$$\lim_{\Delta W_s \rightarrow 0} \frac{Z_s(W_{s0} + \Delta W_s) - Z_s(W_{s0})}{\Delta W_s} = (Z_s)'_{\Delta W_s \rightarrow 0} \quad (3)$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{W_s(t_0 + \Delta t) - W_s(t_0)}{\Delta t} = (W_s)'_{\Delta t \rightarrow 0} \quad (4)$$

式中: $Z_s(W_{s0} + \Delta W_s)$ 表示某结构层含水量为 $(W_{s0} + \Delta W_s)$ 时对应的复阻抗; $Z_s(W_{s0})$ 表示某结构层含水量为 W_{s0} 时的复阻抗; $W_s(t_0 + \Delta t)$ 表示某结构层在 $(t_0 + \Delta t)$ 时刻对应的含水量; $W_s(t_0)$ 表示某结构层在 t_0 时刻对应的含水量。

同时,该复阻抗在时间域系统中可以拟合为该阻抗体上的电位值 $\Delta V(t)$ 与电流值 $I(t)$ 的比值。作“归一”分析,可得因果系统等效复阻抗 $Z_s(t)$,即

$$Z_s(t) = \frac{\Delta V(t)}{I(t)} \quad (5)$$

因此,只要通过外电场激发监测到滑坡隐患体“滑带层”的复阻抗特性就能推算得出其相应的含水量,从而实现对其动态含水量的间接监测。

另一方面,岩土力学的“莫尔-库伦”破坏准则表明“莫尔应力圆”与“库伦强度”线相切的应力状态是岩土体的破坏准则^[12-13]。利用“莫尔-库伦”破坏准则的“弹性平衡状态”和“极限平衡状态”理论分析具有滑坡隐患的地质体中的“滑带层”得知,宏观上其可被视为具有一定强度的弹塑性体,其在结构形成时就产生了弹性变形和塑性变形;所以客观上可将“滑带层”拟合成两个接触表面(分别与“滑体”、“滑床”)之间剪切强度较低的隔膜。将含有动态含水量 ΔW_s 的“滑带层”拟合成在摩擦系统中具有复杂结构和流变性能的半固体润滑隔膜,“滑带层”现场静摩擦因数 μ 就是动态含水量 ΔW_s 的因果函数。它们的关系可表示为

$$\lim_{\Delta W_s \rightarrow 0} \frac{\mu(W_{s0} + \Delta W_s) - \mu(W_{s0})}{\Delta W_s} = (\mu)'_{\Delta W_s \rightarrow 0} \quad (6)$$

式中: $\mu(W_{s0} + \Delta W_s)$ 表示“滑带层”含水量为 $(W_{s0} + \Delta W_s)$ 时对应的现场静摩擦因数, $\mu(W_{s0})$ 表示“滑带层”含水量为 W_{s0} 时的对应的现场静摩擦因数。

通过归一化分析,现场静摩擦因数在激发电流场的环路中同样可以拟合为复阻抗特性。由山体滑坡理论^[14-16]可知,滑坡积聚过程中,动态含水量在时间域系统存在边界特性,所以具有滑坡隐患结构的地下半空间(以“滑带层”为主)在激发外电场的作用下,复阻抗特性和“滑带层”现场静摩擦因数在时间域系统中均具备边界特性。

基于以上原理,针对在地面很难直接对“滑带层”的动态含水量 ΔW_s 、现场静摩擦因数 μ 进行动态监测的技术难题,本研究进行电抗阈值法的探讨。该方法是一种通过对“滑动体”、“滑带层”和“滑

床”分别进行外电场激发获得相关动态信息并对所有信息进行的整合、分析滑坡预警预报的方法,如图1所示,其中 V_s 是主动激发源, ΔV_1 、 ΔV_2 和 ΔV_3 是每层电极分别拾取的电位信号。在外电场激发的作用下,通过对“滑带层”的动态含水量 ΔW_s 与复阻抗特性 ΔZ_s 在时间域的幅频特性的拟合,以及现场静摩擦因数 μ 阈值的求证,获得滑坡阈值的边界条件。通过对“滑动体”、“滑床”和“滑带层”的复阻抗值与动态含水量、现场静摩擦因数进行相干检测与归一化分析,实现“暴雨型”山体滑坡动态信息的实时监测与阈值报警。

2 等效复阻抗 $Z_s(t)$ 研究

在平均倾斜角 α 处于边坡稳定阈值内的条件下,滑坡隐患体的复阻抗特性直接反应动态含水量的变化。因此,从滑坡隐患体的等效复阻抗及其电性能研究入手研究动态含水量的变化。通常在研究地球物理信息的电性能时,常采用频率域(FD)和时间域(TD)两种方法。采用频率域(FD)研究时主要对象是充电率 m 和时间常数 t ;采用时间域(TD)研究时主要对象是响应函数 $Z(t)$ ^[11]。本文作者采用TD阻容模型^[17-18]对时间域的阶跃响应函数 $Z(t)$ 进行了模拟,获得对地质体归一化等效复阻抗 $Z_s(t)$ 和传递函数的分析,从而得到动态含水量和复阻抗的拟合。

2.1 TD阻容模型

在外电场激发条件下建立含水地质体等效的TD阻容模型,如图2所示。其中: R_s 是主动激发源 V_s

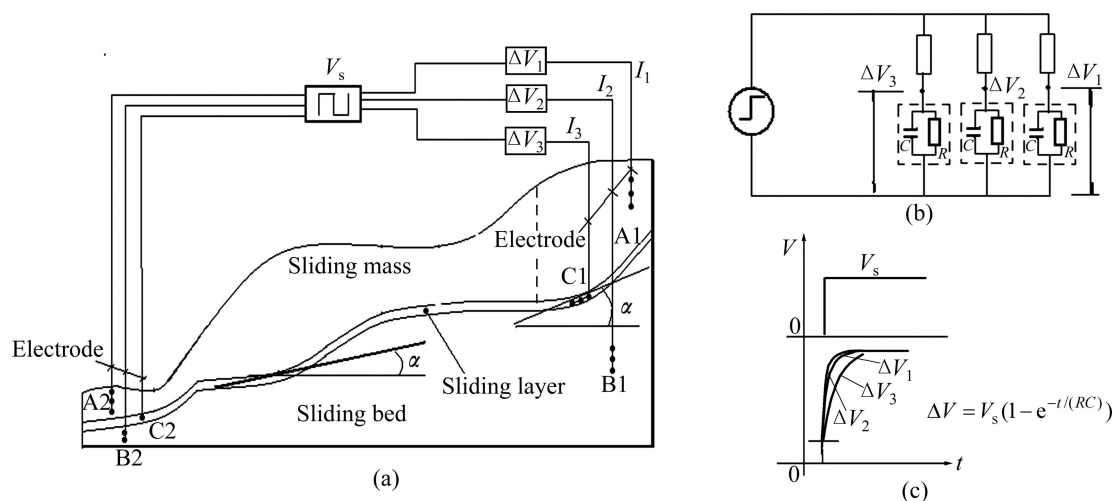


图1 电抗阈值法原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of reactance threshold value method

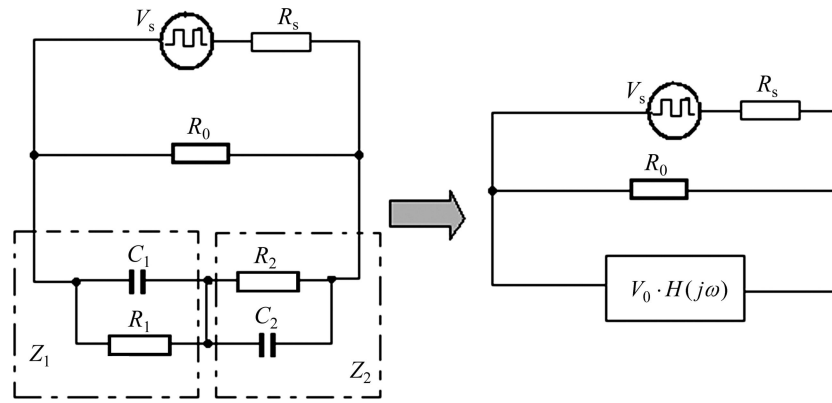


图2 TD阻容数学模型图

Fig. 2 TD resistance and capacity mathematical model

的内阻, R_0 、 R_1 、 R_2 是阻容模型各部分电阻, C_1 、 C_2 是阻容模型各部分电容。分析获得其等效复阻抗和传递函数的数学表达式。

根据基尔霍夫定律, 建立模型的端口电压 V_0 的数学表达式:

$$V_0 = I[(R + j\omega L_1) + j\omega L_0 + \frac{1}{j\omega C}] \quad (7)$$

式中: L_1 和 L_0 分别是模型中的内电感和外电感, C 为整个模型的等效容抗, R 为整个模型的等效直流阻抗, I 为回路电流。

在不考虑模型中的内电感和外电感的情况下式(7)可写为

$$V_0 = I \left(R + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (8)$$

同时, 根据图2计算阻容网络等效输入复阻抗:

$$Z(t) = R_0 // \left(\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2} \right) \quad (9)$$

当

$$\begin{cases} R_1 = R_2 = R \\ C_1 = C_2 = C \\ R_0 \gg R \end{cases} \quad (10)$$

则

$$Z(t) = \frac{2R}{1 + j\omega RC} \quad (11)$$

采用电路瞬态分析法对模型的端口电压 V_0 的瞬态响应进行模拟, 等效复阻抗模型的传递函数:

$$H(j\omega) = \frac{V_0}{V_s} \quad (12)$$

又由 RC 充放电曲线可知

$$V_0 = V_s(1 - e^{-t/(RC)}) \quad (13)$$

因此, 电路传递函数表示为

$$H(j\omega) = 1 - e^{-t/(RC)} \quad (14)$$

将含水滑坡隐患体各层结构视为阻容模型, 通过介电常数动态监测仪获得各个输出端 V_0 的特性, 通过计算分析可得到滑坡地质体各层结构因动态含水量变化而呈现出的等效复阻抗 $Z_s(t)$ 。

2.2 模型实验研究

基于以上数学模型, 通过图3所示的试验装置进行实验研究, 得到试验样品的幅频特性曲线图和试验样品动态参数变化图, 如图4和5所示。

分析图4和5可知: 1) 不同地质体样品的吸水率是地质体密度的函数。2) 通过外电场激发得到的复阻抗特性与其相应的含水量具有鲜明的拟合性, 不同的含水量表现出不同的幅频特性曲线; 不同地质体样品的复阻抗是动态含水量的函数, 即电路中的拟合电容动态值 C 是动态含水量的函数。3) 动态含水量在时间域具有边界(阈值)特性, 复阻抗在时间域也同样具有边界(阈值)特性。

3 “滑带层”平均倾斜角 α 数值解析

上述 TD 阻容模型实验的结果表明在“滑带层”平均倾斜角 α 处于边坡稳定阈值内时, 动态含水量和复阻抗在时间域均具有边界特性。由于“滑带层”现场静摩擦因数 μ 是“滑带层”动态含水量 ΔW_s 的因果函数, 所以现场静摩擦因数 μ 在时间域上也具有边界特性。由于对“滑带层”动态含水量 ΔW_s 和复阻抗 ΔZ_s

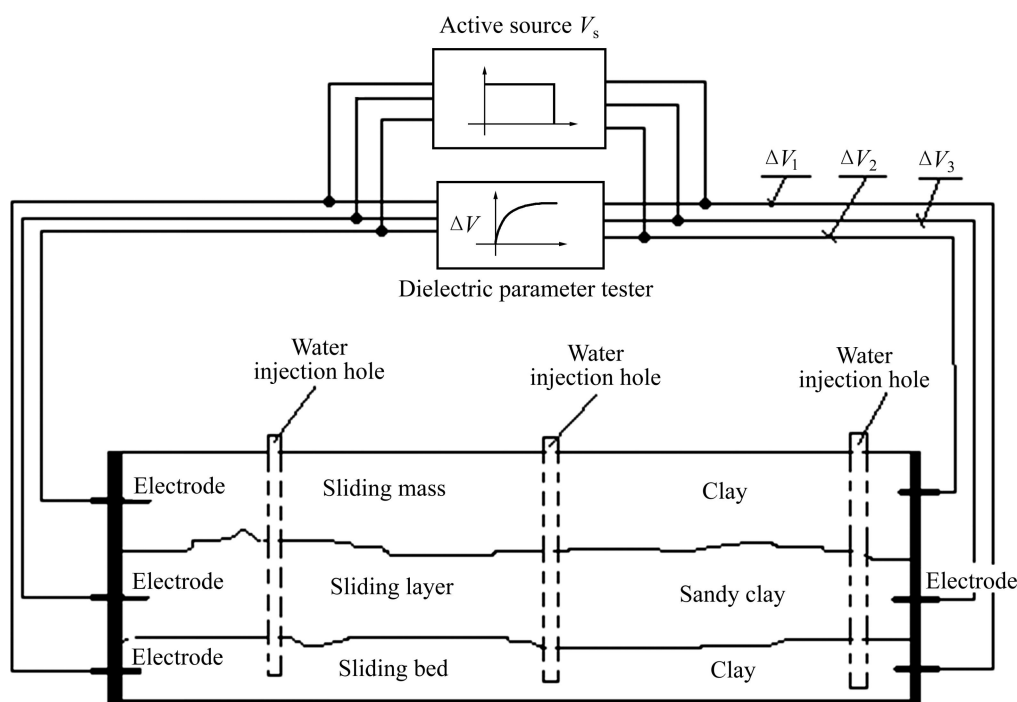


图3 电抗阈值试验装置示意图

Fig. 3 Diagram of reactance threshold test unit

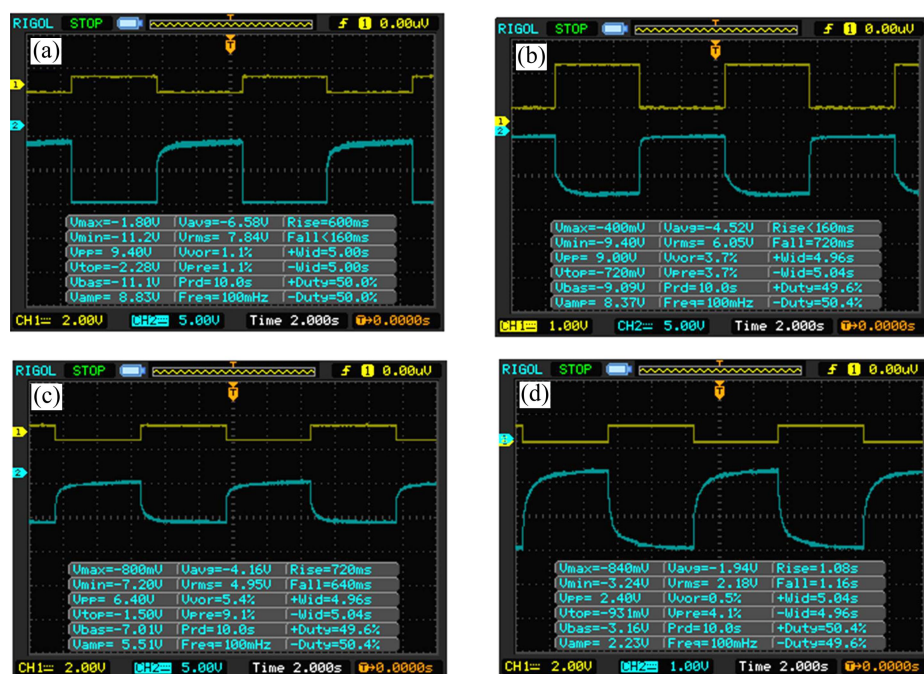


图4 试验样品幅频特性波形图

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic waveform diagram of test sample: (a) $W_{s0}=7.53\%$; (b) $W_{s0}=15.51\%$; (c) $W_{s0}=24.53\%$; (d) $W_{s0}=51.68\%$;

的边界特性进行定量的阈值确定存在着难度, 所以, 通过对现场静摩擦因数 μ 的边界阈值定量分析反演获

得对 ΔW_s 和 ΔZ_s 的阈值界定。而处于边坡稳定阈值内的“滑带层”平均倾斜角 α 的大小是影响现场静摩擦因

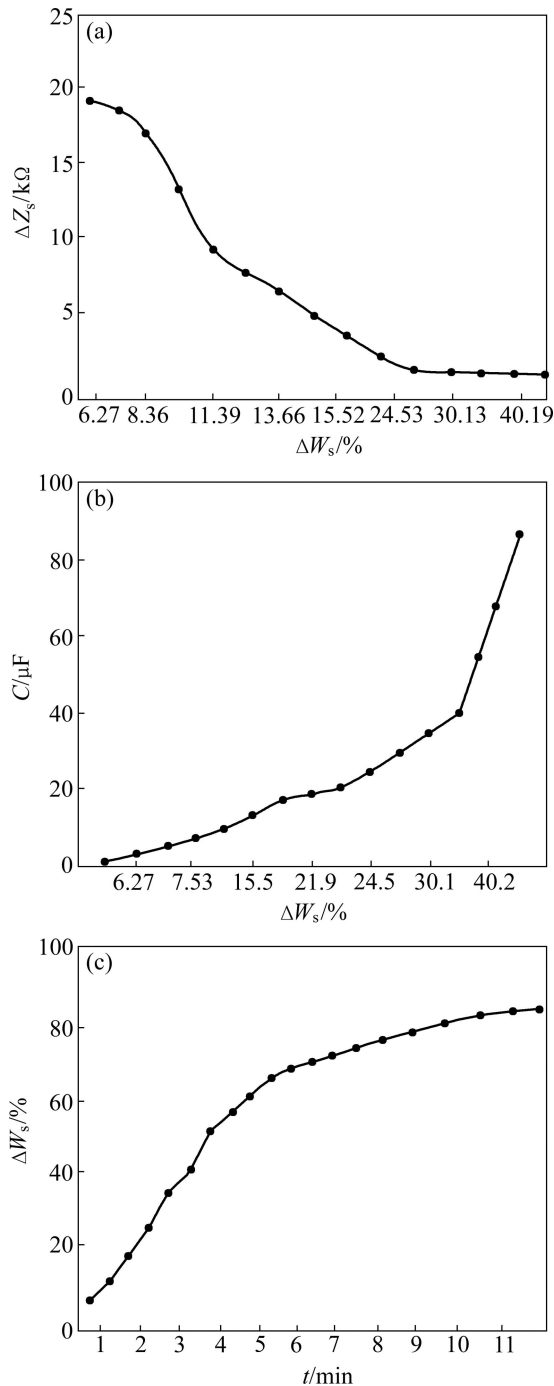


图5 试验样品的动态参数变化

Fig. 5 Dynamic parameter variation of test sample: (a) Dynamic variation of reactance ΔZ_s with variation of soil water content ΔW_s ; (b) Dynamic variation of capacitor C with variation of soil water content ΔW_s ; (c) Dynamic variation of soil water content with time

数 μ 边界阈值定量分析的重要因素。因此, 其数值解析和确定也非常重要。由于滑坡隐患体地质结构复杂, 目前, 对滑面内平均倾斜角 α 的确定主要是在地质勘

测基础上进行数据分析得到^[19-20]。基于地质勘测评估, 根据存在滑坡隐患山体地质结构的地球物理特征, 建立山体滑坡诱发滑坡的地球物理模型, 通过重心法^[21-22]获得“滑带层”平均倾斜角 α 的数值解析。此模型中边坡形状被分成两段或多段如图6所示, 利用重心法分别找出每段地质体对应的角度后, 经过算法整合获得整个滑坡隐患体“滑带层”的平均倾斜角度 α 。

假设 (x_i, y_i, z_i) 表示滑动体这个三维空间某一小段的某体积元上任意一点的坐标, $f(x_i, y_i, z_i)$ 表示该体积元的体密度, ΔV_i 为该体积元的体积, 则该体积元的质量为

$$\Delta \delta_i = f(x_i, y_i, z_i) \cdot \Delta V_i \quad (15)$$

则三维空间在该段的总质量所示为

$$\delta = \lim_{\lambda \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n f(x_i, y_i, z_i) \cdot \Delta V_i = \iiint_{\Omega} f(x, y, z) dV \quad (16)$$

其中: $\lambda = \max \{d(\Delta V_i)\}$ 。三维空间物体在该段的重心

坐标 (x, y, z) 则为

$$x = \frac{\iiint_{\Omega} x f(x, y, z) dV}{\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dV} = \frac{1}{\delta} \iiint_{\Omega} x f(x, y, z) dV \quad (17)$$

$$y = \frac{\iiint_{\Omega} y f(x, y, z) dV}{\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dV} = \frac{1}{\delta} \iiint_{\Omega} y f(x, y, z) dV \quad (18)$$

$$z = \frac{\iiint_{\Omega} z f(x, y, z) dV}{\iiint_{\Omega} f(x, y, z) dV} = \frac{1}{\delta} \iiint_{\Omega} z f(x, y, z) dV \quad (19)$$

通过该重心点 (x, y, z) 做垂直沿长线得到与“滑面”曲线的交点(见图6), “滑面”曲线(函数)在该交点处经滤波平滑处理后求导, 可得“滑面”曲线(函数)在该点的导数即“滑面”曲线(函数)在该点的切线。而该切线与水平面的夹角就是该小段“滑面”对应的角度, 即

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan \alpha \quad (20)$$

通过上述方法找出所有分段“滑面”对应的角度, 通过算法整合获得整个滑坡隐患体“滑带层”的

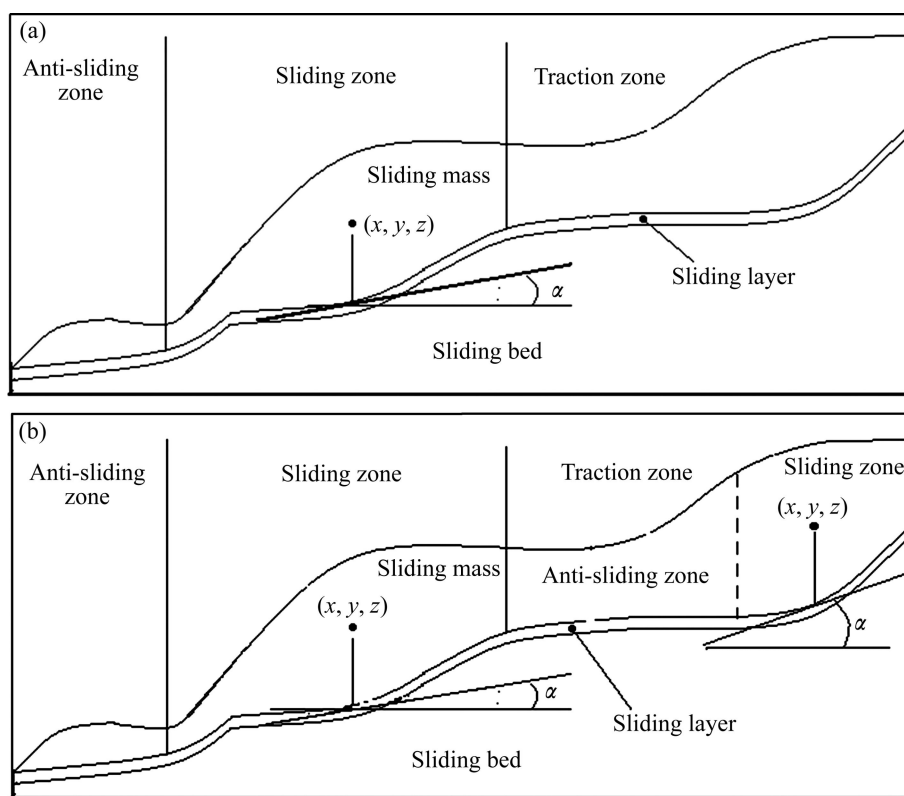


图6 山体滑坡物理模型

Fig. 6 Landslide physical model: (a) Two-stage; (b) Multi-stage

平均倾斜角度 α 。

4 动态阈值研究

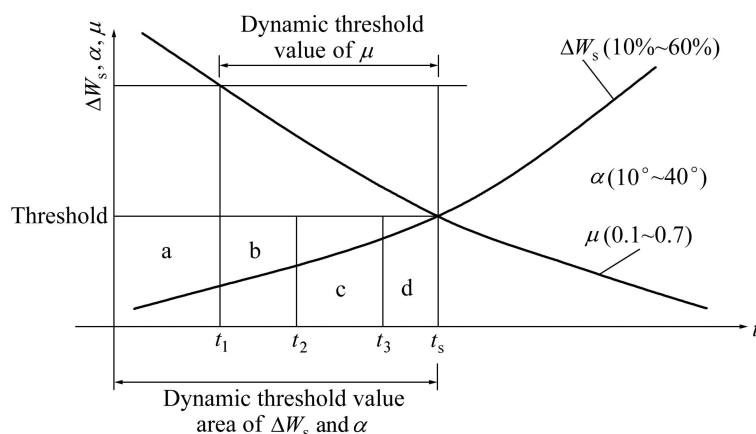
基于“滑带层”平均倾斜角 α 的解析, 依照牛顿第三定律, 对滑坡隐患体某段进行受力分析可得滑坡隐患体处在极限平衡状态的条件是现场岩土的最小静摩擦因数 $\mu_{\min}$ 与“滑带层”平均倾斜角 α 满足以下关系, 即 $\mu_{\min} = \tan \alpha$ 。只有当“滑带层”现场岩土的最小静摩擦因数满足 $\mu < \tan \alpha$ 时, 滑坡隐患体才会发生滑坡。因此, 可以认为滑坡隐患体不发生滑坡的前提是滑体存在一个保持稳定的现场静摩擦因数 μ , 它可以表示为 $\mu = \mu_{\min} + \Delta\mu$, 即现场岩土的最小静摩擦因数 $\mu_{\min}$ 与因外界因素变化而发生变化的静摩擦因数变量 $\Delta\mu$ 之和。 $\Delta\mu$ 的动态定义域就是影响滑坡隐患的地质体状态判决的条件。

当 $\Delta\mu = 0$ 时, $\mu = \mu_{\min}$ (即 $\mu = \tan \alpha$); 滑坡隐患体处在稳态临界点即极限平衡状态。当暴雨引起滑坡隐患地质体“滑带层”含水量增加从而导致 $\Delta\mu$ 逐渐减小, 保持稳定的现场摩擦因数 μ 逐渐减小, 当 $\Delta\mu$ 的减小使

得 μ 减小到小于 $\tan \alpha$ 时, 坡体的平衡遭到破坏, 滑坡开始。所以, 在具有滑坡隐患的环境中, 滑坡隐患体处在稳态时 $\Delta\mu$ 阈值区域: $0 < |\Delta\mu| < \mu - \tan \alpha$ 。

常见地质构造物质的现场静摩擦因数近似值为 0.25~0.5, 在不考虑含水量的影响情况, 通过计算 $\alpha = \arctan \mu$ 可获得整个滑坡隐患体“滑带层”平均倾斜角 α 的最大动态参考阈值范围是: $14^\circ \leq \alpha \leq 27^\circ$ 。当 $\alpha > 27^\circ$ 时, $\mu < \tan \alpha$, 坡体处在动态; 当 $\alpha < 14^\circ$ 时, $\mu > \tan \alpha$, 坡体处在稳态。理论上可以认为, 当整个滑坡隐患体“滑带层”平均倾斜角初始条件 $\alpha < 14^\circ$ 时, 不存在滑坡风险; 初始条件 $\alpha > 27^\circ$ 的状态在现实中不存在。综合考虑其它因素, 具有滑坡隐患的地质体构造中的“滑带层”平均倾斜角 α 的阈值区应拟合为 $10^\circ < \alpha < 40^\circ$ 。

由此, 通过对不同类型的滑坡地质结构主体(“滑动体”、“滑带层”、“滑床”)的含水动态值与现场静摩擦因数两者之间的进行物理模拟和微分方程的演算, 也可获得动态阈值边界和动态阈值边界的对应条件。由于 ΔW_s 、 ΔZ_s 和 μ 同属因果系统, 在时间域系统中通过变换谱拟合的“归一”变化, 基于实验与理论分析可获得 ΔW_s 、 α 和 μ 相对应的阈值区, 理论上阈值区域图如图 7 所示。



a: Warning blue area; b: Warning yellow area; c: Warning orange area; d: Warning red area

图7 滑坡阈值区图

Fig. 7 Landslide threshold area

5 结论

1) 在线性时不变系统理论框架内,通过TD阻容模型将“滑带层”的动态含水量 ΔW_s 变换为“滑带层”传输函数的复阻抗 ΔZ_s ;通过对“滑带层”复阻抗 ΔZ_s 的监测实现对“滑带层”动态含水量 ΔW_s 的间接监测,为“暴雨型”山体滑坡动态信息的实时监测与阈值报警技术的研究,提供了一种可探讨的电抗阈值法。

2) 构建山体滑坡地球物理模型,基于“莫尔-库伦”破坏准则,通过对“滑带层”平均倾斜角 α 和现场静摩擦因数 μ 阈值的求证获得 μ 的动态阈值边界,为现场静摩擦因数 μ 动态信息的模拟采集和分析提供一种方法。

3) 在时域系统中通过频谱变换将 ΔW_s 、 ΔZ_s 、 μ 与“滑带层”平均倾斜角 α 视同因果系统函数,通过模拟实验与理论分析获得暴雨型滑坡阈值区域图,为“暴雨型”山体滑坡动态阈值监测提供技术拟合途径。

REFERENCES

[1] 魏 丽,郑有飞,单九生.暴雨型滑坡地质灾害预报预警方法研究评述[J].气象,2005,31(10):3-6.
WEI Li, ZHENG You-fei, SHAN Jiu-sheng. Review on prediction and warning method of landslide hazard triggered by heavy rainfall [J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(10): 3-6.
[2] 李 媛,孟 晖,董 颖,胡树娥.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-31.

LI Yuan, MENG Hui, DONG Ying, HU Shu-e. Main types and characteristics of geo-hazard in China——Based on the results of geo-hazard survey in 290 counties [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(2): 29-31.
[3] 高华喜,殷坤龙.降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J].岩土力学,2007,28(5):1056-1060.
GAO Hua-xi, YIN Kun-long. Discuss on correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1056-1060.
[4] 张玉池.边坡失稳地球物理特征及其应用研究[D].长沙:中南大学,2007:33-39.
ZHANG Yu-chi. Slope failure in geophysical characteristics and application research [D]. Changsha: Central South University, 2007: 33-39.
[5] 乔建平,杨宗佶,田宏岭.降雨滑坡预警的概率分析方法[J].工程地质学报,2009,17(3):343-348.
QIAO Jian-ping, YANG Zong-Ji, TIAN Hong-ling. Probability analysis based on method for rainfall-induced landslide warning [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 343-348.
[6] 罗先启,葛修润.滑坡模型试验理论及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008:103.
LUO Xian-qi, GE Xiu-run. Landslide model test theory and its application [M]. Beijing: China Water Power Press, 2008: 103.
[7] AREZOO R, HARIANTO R, ENG-CHOON L. Effect of antecedent rainfall patterns on rainfall-induced slope failure [J]. Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2011, 137(5): 483-491.
[8] 何玉琼,徐则民,张 勇,王志奇.斜坡失稳的降雨阈值模型及其应用[J].岩石力学与工程学报,2012,31(7):1484-1490.
HE Yu-qiong, XU Ze-min, ZHANG Yong, WANG Zhi-qi. Rainfall threshold model of rainfall-induced slope instability and

- its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(7): 1484-1490.
- [9] 杨姗姗, 邓华锋, 黄 坚, 陈兴周, 邓成进. 滑坡灾害与降雨关系研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(8): 128-129, 131.
- YANG Shan-shan, DENG Hua-feng, HUANG Jian, CHEN Xing-zhou, DENG Cheng-jin. Relationship between landslide and rainfall [J]. Yellow River, 2010, 32(8): 128-129, 131.
- [10] 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 91-94.
- LIANG Can-bin, QING Guang-rong, LIANG Zhu-jian. Electromagnetism [M]. Beijing: High Education Press, 2005: 91-94.
- [11] 陈一平, 何 华, 唐冬梅, 杨 振. 山体滑坡动态信息实时采集技术的实验研究[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(1): 101-106.
- CHEN Yi-ping, HE Hua, TANG Dong-mei, YANG Zhen. Experiment study on dynamic information real-time acquisition technology about landslide [J]. Computing Techniques of Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 34(1): 101-106.
- [12] 梅志千, 周建方, 章海远. 莫尔-库伦理论的修正及应用[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(3): 441-444.
- MEI Zhi-qian, ZHOU Jian-fang, ZHANG Hai-yuan. The modification and application of Mohr-Coulomb's theory [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2002, 36(3): 441-444.
- [13] 梅启双. 地下工程岩体应力分布及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012: 15-18.
- MEI Qi-shuang. Study on stress distribution and its application to underground on engineering rock mass [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012: 15-18.
- [14] 陈洪凯, 魏 来, 谭 玲. 降雨型滑坡经验型降雨阈值研究综述[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(5): 990-995.
- CHEN Hong-kai, WEI Lai, TAN Ling. Review of research on empirical rainfall threshold of rainfall-induced landslide [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2012, 31(5): 990-995.
- [15] 王治华, 郭兆成, 杜明亮, 程尊兰. 基于数字滑坡技术的暴雨滑坡、泥石流预警、监测模型研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(5): 303-309.
- WANG Zhi-hua, GUO Zhao-ming, DU Ming-liang, CHENG Zun-lan. Model study of monitoring and early warning of rainstorm induced landslide and debris flow based on digital landslide technology [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(5): 303-309.
- [16] 王智磊, 孙红月, 尚岳全. 基于地下水位变化的滑坡预测时序分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2276-2284.
- WANG Zhi-lei, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan. Time series analysis of landslide prediction based on groundwater level variation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(11): 2276-2284.
- [17] 陈一平, 刘 华, 唐冬梅, 亓庆新. 滑坡体含水状态的电法勘探与预警方法研究[C]//中国地球物理学会. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011: 520.
- CHEN Yi-ping, LIU Hua, TANG Dong-mei, QI Qing-xin. Methodological research of moisture state in the mass of landslide and its early warning [C]// Chinese Geophysical Society. The 27th annual meeting proceedings of the Chinese Geophysical Society. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2011: 520.
- [18] LEE T. The Cole-Cole model in time domain induced polarization [J]. Geophysics, 1981, 46(3): 932-933.
- [19] 张静波, 练 伟. 谈谈岩体等效内摩擦角的计算公式[J]. 岩土工程界, 2009, 12(12): 16-17.
- ZHANG Jing-bo, LIAN Wei. Calculating formula of equivalent internal friction angle of rock mass [J]. Geotechnical Engineering World, 2009, 12(12): 16-17.
- [20] 庞茂康, 任光明, 李冬芹, 王 建. 某滑坡滑带土强度参数的敏感性分析[J]. 水能源科学, 2010, 28(10): 47-50.
- PANG Mao-kang, REN Guang-ming, LI Dong-qin, WANG Jian. A sensitivity analysis of strength parameters of landslide sliding zone soil [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 47-50.
- [21] 苑 远, 孙树立. 基于重心坐标插值的三维网格变形方法[C]//北京力学学会. 北京力学学会第十九届学术年会论文集. 北京: 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社, 2013: 481-482.
- YUAN Yuan, SUN Shu-li. 3 d mesh deformation method based on interpolation method in the center of gravity coordinate [C]// Beijing Modality. The 19th Academic Conference Proceedings of Beijing Modality. Beijing: China Academic Journals (CD-ROM Version) Electronic Magazine, 2013: 481-482.
- [22] 宋晓光, 刘沈如, 张景涛. 应用于弹性问题的重心坐标有限元法[J]. 固体力学学报, 2010, 31(3): 310-317.
- SONG Xiao-guang, LIU Shen-ru, ZHANG Jing-tao. Bary-centric coordinates finite element method and the application in elasticity [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(3): 310-317.

(编辑 李艳红)