

DOI: 10.12401/j.nwg.2022034

滑坡匀速变形阶段快速诊断方法研究

王朋伟, 安玉科*

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 改进切线角预警模型是一种有效的滑坡预警方法, 但改进切线角模型的机制是以准确识别匀速变形阶段及其速率为基础的, 滑坡的匀速变形速率是随着孕灾环境变化和滑坡演化阶段而波动的, 相同模型在不同匀速变形速率下得出的切线角存在较大差异, 对滑坡预警不利。因此, 笔者提出采用曲线凸凹特性与滤波技术的自适应获取滑坡匀速变形阶段和平均速率, 并建立速率可靠性评价规则, 从而实现对改进切线角预警模型进行实时修正, 确保滑坡预警的准确性。该研究为滑坡监测预警智能化、自动化实时处理监测预警数据提供技术支持。

关键词: 滑坡; 监测预警; 切线角模型; 匀速变形

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0197-07

Research on Rapid Diagnosis Method of Landslide's Uniform Deformation Stage

WANG Pengwei, AN Yuke*

(Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: The improved tangent angle early warning model is an effective landslide early warning method, but the mechanism of the improved tangent angle model is based on the accurate identification of the uniform deformation stage and its rate. The uniform deformation rate of the landslide fluctuates with the change of the disaster prone environment and the landslide evolution stage. Therefore, the tangent angles obtained by the same model under different uniform deformation rates are quite different, which is unfavorable for landslide early warning. Based on this, the paper proposes to use curve convex concave characteristics and filtering technology to adaptively obtain the landslide uniform deformation stage and average rate, and establish rate reliability evaluation rules, so as to achieve real-time correction of the improved tangent angle early warning model and ensure the accuracy of landslide early warning. The research of this paper provides technical support for intelligent and automatic real-time processing of monitoring and early warning data of landslide monitoring and early warning.

Keywords: landslides; monitoring and warning; tangent angle model; uniform deformation

滑坡作为世界上最重要的地质灾害之一, 给人民生命和财产造成极大的损失, 是制约中国山区经

济发展的重要因素(张林梵等, 2022; 黄煜等, 2023)。滑坡监测预警可有效预防滑坡灾害的发生, 确保重

收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-08-22; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 甘肃省科技重大专项项目“甘肃省湿陷性黄土地区公路修筑成套技术研究”(1302GKDA009), 甘肃省交通运输厅科研项目“基于钢管抗滑桩的应急抢险支撑结构体系研究”(2021-25)联合资助。

作者简介: 王朋伟(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事公路地质灾害识别与监测预警研究。E-mail: dzwang1604@163.com。

* 通讯作者: 安玉科(1983-), 男, 博士, 正高级工程师, 从事公路地质灾害防治与应急处置研究。E-mail: 295419830@qq.com。

要构筑物和人民财产安全。近年来,随着5G网络、北斗卫星和监测传感器的发展,中国每年都要布设成千上万个滑坡智能监测设备。2022年,自然资源部进一步扩大地质灾害“群专结合”监测预警实验面,将继续在全国17个省份开展实验工作,计划建设20040实验点。“十四五”期间自然资源部计划新建8.2万处地质灾害“群专结合”监测点,显著提高地质灾害监测预警科技水平与覆盖面,逐步构建人防与技防并重的监测预警体系。

当前,滑坡监测预警理论日渐成熟,基于自动化监测设备的滑坡实时监测技术及系统逐渐普及,目前可以方便快速获取大批量的滑坡变形监测数据(何朝阳,2020;马娟等,2021;孟晓捷等,2022)。通过滑坡监测数据可探测到滑坡物理参数变化规律,结合预警预测模型判断滑坡演化阶段以及未来时段的稳定状态,为生命避险和工程抢险提供决策依据(薛强等,2018;张林梵,2023)。近年来,许强等(2009)提出改进切线角预警模型得到了行业广泛认

可,并在贵州、甘肃等滑坡取得了成功的防灾预警效果(Fan et al., 2019;许强等,2020a)。

改进切线角模型核心思想是位移-时间曲线(S-t曲线)纵横坐标量纲不一致,导致拉伸或不同人计算得到曲线的切线角不一致,通过匀速变形阶段速率对纵坐标进行转化,形成无量纲的T-t曲线(许强等,2020b)。传统的匀速变形速率主要根据滑坡宏观演化阶段和S-t曲线位移特征来人为确定匀速变形阶段和其速率,但实际监测工作中匀速变形速率可能不是个定值,会随着时间推移而有所变化,比如库水型滑坡,滑坡匀速变形速率与库水涨落强相关,每年匀速变形速率呈波动状(图1)(王朋伟,2012),致使其位移-时间曲线呈现“震荡”和“阶跃”性。另外,受传感器测量误差与环境因素的影响不可避免存在噪声影响,随着时间的推移,获取的监测数据经常发生漂移(龙悦等,2012),位移呈锯齿状或波浪状,匀速变形阶段与加速变形阶段分隔界线不是很明显(图2)。

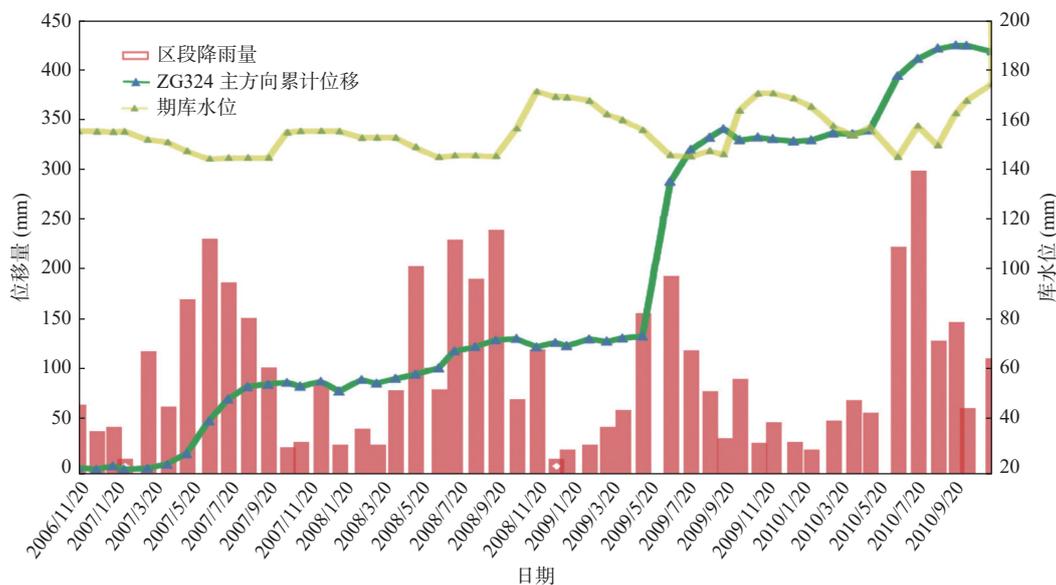


图1 库水型滑坡时间位移曲线图(王朋伟,2012)

Fig. 1 Time displacement curve of reservoir water type landslide

易庆林等(2013)提出采用Haar小波分解获取趋势位移和波动位移,通过趋势位移表现为稳定增长来判断匀速变形阶段,该方法适用于有周期规律的监测曲线特征,且需要人工干预才能识别匀速变形阶段;何朝阳等(2017)借助离散小波变换时频分析特性,通过将高频信号的变化与速度增量两者相互校验获取匀速变形阶段,该方法对于不同阶段匀速

变形速率存在变化的情况不能有效及时调整;马海涛等(2021)基于匀速变形阶段速率服从正态分布特征,提出一种应用正态置信区间识别SP位置的方法确定匀速变形阶段,但该方法不适用于不服从正态分布的曲线。

以上研究方法各有局限性,对于发展自动化监测预警存在一定的问题。笔者从监测曲线特点出发,提

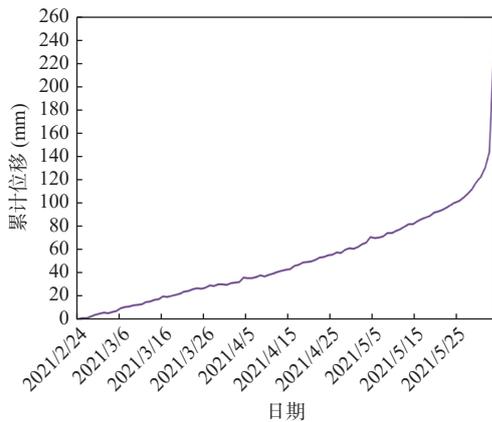


图 2 滑坡时间位移曲线图

Fig. 2 Time displacement curve of landslide

出采用曲线凹凸特性与滤波技术的自适应获取滑坡匀速变形阶段和平均速率, 并建立速率可靠性评价规则, 从而实现自动对滑坡变形切线角模型进行实时修正, 确保预警的准确性。

1 改进切线角预警模型原理

改进切线角预警模型核心思想是通过匀速变形阶段的速率对位移进行时间量化处理, 从而实现 S-t 曲线转化成无量纲 T-t 曲线。改进切线角模型计算公式如下:

$$T_i = \frac{S_i}{\bar{v}} \quad (1)$$

$$a_i = \arctan \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

式中: S_i 为 i 时刻滑坡的累计位移 (mm); T_i 、 T_{i-1} 为变换后与时间相同量纲的纵坐标值, 两者相差一个监测周期, 如 1 天、1 周等; \bar{v} 为滤波后滑坡匀速变形阶段的速率 (mm/d); a_i 为改进的切线角 ($^\circ$); t_i 、 t_{i+1} 为监测时刻, 两者相差一个监测周期。

依据切线角原理, 滑坡的变形演化阶段与切线角相关, 当切线角小于 45° 时, 可认为滑坡处于初始或减速变形演化阶段; 当切线角约等于 45° 时, 处于匀速变形演化阶段; 当切线角大于 45° 时, 则认为滑坡进入了加速变形演化阶段, 这一阶段可细分为初加速 ($45^\circ \sim 80^\circ$)、中加速 ($80^\circ \sim 85^\circ$)、加加速 ($> 85^\circ$) 变形演化阶段, 切线角越接近 90° , 滑坡发生的可能性越大(许强等, 2008)。从以上原理公式可见, 获取匀速变形阶段的速率是关键, 是预警中最重要的环节(元星等, 2020)。

2 基于曲线凹凸特性的动态识别匀速变形阶段

2.1 滑坡匀速变形阶段提取

根据时间位移曲线, 滑坡变形演化通常分为 3 个演化阶段(图 3)(罗文强等, 2016)。
 ①初始变形阶段: 开始变形表现相对较大的斜率, 之后随着时间推移变形趋于正常, 曲线斜率有所减缓, 表现为减速变形特征, 该阶段又称减速变形阶段, 曲线特征呈凸型。
 ②匀速变形阶段: 在初始变形基础上, 滑坡以基本相同的速率变形。因不时受外界因素的干扰和影响, 以及局部锁固效应影响, 抗滑力与下滑力处于相互拉扯, 彼此抗争, 其变形曲线可能会波动, 呈小型锯齿状或波浪状, 有时受周期性因素影响呈周期性跃迁。但整体上宏观上呈一条倾斜的直线, 速率在一定范围小幅度波动, 持续时间一般较长, 曲线特征呈直线型。
 ③加速变形阶段: 当坡体变形发展到一定阶段后变形速率呈不断增长趋势, 且速率有逐渐增大的趋势, 直至坡体失稳之前, 变形近似陡立, 曲线特征呈凹型。

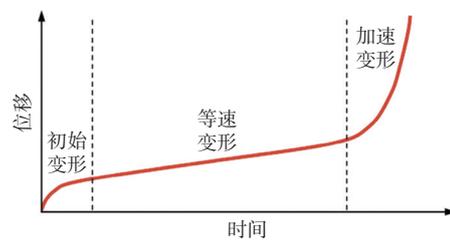


图 3 滑坡三阶段演化曲线图

Fig. 3 Three-stage evolution curve of landslide

从以上原理可知, 滑坡 S-t 曲线初始阶段为凸型、匀速阶段为直线型、加速阶段为凹型。笔者通过曲线凹凸测量计算方法识别出滑坡时间位移曲线凸凹型线拐点, 通过拐点判断匀速变形阶段的时间范围(图 4)。

定义: 设 $f(x)$ 在 (a, b) 内是连续, 如果对 (a, b) 内任意两点 x_1, x_2 ,

如果恒有 $f\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) < \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2}$, 那么呈 $f(x)$ 在 (a, b) 内的图形呈凹型;

如果恒有 $f\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) = \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2}$, 那么呈 $f(x)$ 在 (a, b) 内的图形呈直线型;

如果恒有 $f\left(\frac{x_1 + x_2}{2}\right) > \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2}$, 那么呈 $f(x)$ 在

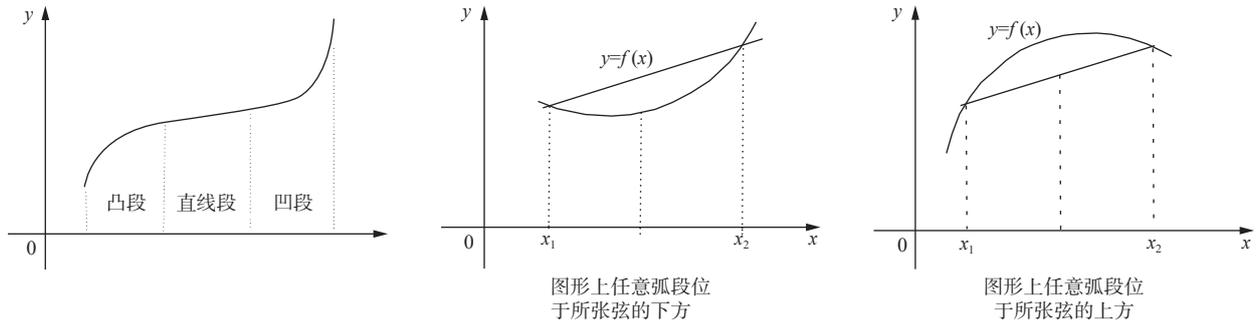


图 4 凹凸特性基本原理图

Fig. 4 Basic principle of concave-convex characteristic

(a, b)内的图形呈直凸型;

根据以上原理,定义 $K_1 = f\left(\frac{x_1+x_2}{2}\right)$, $K_2 = \frac{f(x_1)+f(x_2)}{2}$, 那么当 $K_1 > K_2$ 时是凸型, 对应初始变形阶段; 当 $K_1 = K_2$ 时是直线型, 对应匀速变形阶段; 当 $K_1 < K_2$ 时是凹型, 对应加速变形阶段; 由此定义无量纲的参数 $L = \frac{K_1}{K_2}$, 当 $L < 1$ 时对应加速变形阶段, $L = 1$ 对应匀速变形阶段, $L > 1$ 对应初始变形阶段。

因此, 选取任意时间段动态判别值 L 即可判断出滑坡变形处于哪个阶段。但在实际应用中由于受外界干扰和设备自身误差的影响, 往往 $S-t$ 曲线具有一定的漂移, 呈锯齿状或波浪状, 匀速变形阶段 L 会在 1 附近波动(图 5)。故而将匀速变形阶段的 L 的范围定义为 $0.99 \leq L \leq 1.01$ 。

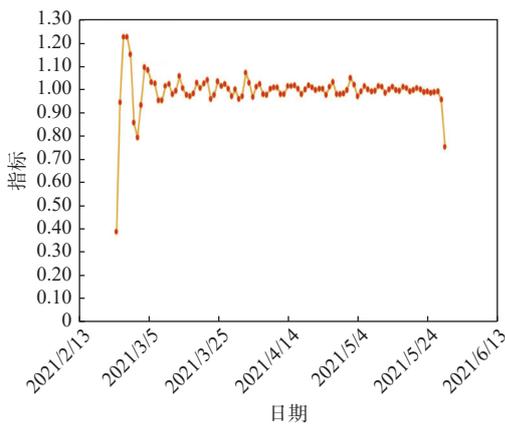


图 5 凹凸特性测量指标图

Fig. 5 Measurement index L of concave-convex characteristic

当 $L < 0.99$ 时, 滑坡处于加速度变形阶段; 当 $0.99 \leq L \leq 1.01$ 时, 滑坡近似处于匀速变形阶段; 当 $L > 1.01$ 时, 滑坡处在初始变形或减速变形阶段。同时选取滑坡变形时间窗口的长短对 L 值有影响, 鉴于一

般滑坡从加速到失稳变形持续时间不小于 5d, 因此以 5d 作为滑坡动态判断识别时间窗口。并且定义连续 5d 内 $L < 0.99$ 时滑坡处于加速变形阶段, 连续 5d 内 $L > 1.01$ 时为滑坡处于减速变形阶段(红点表示 L 指标)(图 5)。

根据以上定义建立距离预警时间点最近的匀速变形阶段提取规则, 即: ① 距离预警时间点最近的加速变形阶段与减速变形阶段之间的时间段为匀速变形阶段。② 如果无减速变形阶段, 那么加速阶段之前时间段全部为匀速变形阶段。③ 如果无加速度变形阶段, 那么减速变形阶段之后的时间段全部为匀速变形阶段。④ 如果无加速变形和减速变形阶段那么全部为匀速变形阶段。

依据以上定义可以动态识别出当前预警时间点的匀速变形阶段, 且匀速变形阶段随着滑坡时间位移特征动态调整。经过规则评估无减速变形阶段, 加速变形阶段之前的时间段为匀速变形阶段, 图中的红线为自动识别匀速变形阶段, 匀速变形与加速变形阶段分隔时间点为 2021/5/26 日(图 6)。

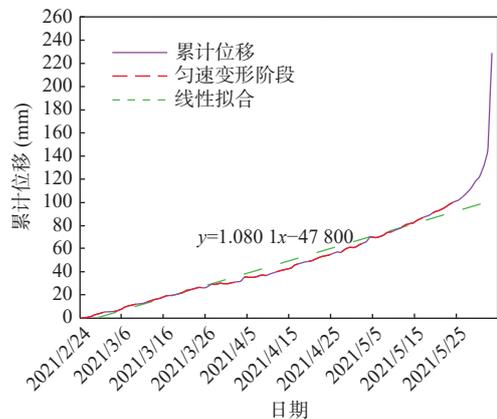


图 6 匀速变形阶段拟合曲线图

Fig. 6 Fitting and denoising in the uniform deformation stage

2.2 获取匀速变形阶段速率

受噪声和测量误差的影响, 匀速变形阶段通常呈小幅度锯齿状或波浪状, 采用线性最小二乘法对匀速变形监测数据进行滤波处理, 以降低数据噪声对速率的影响。

最小二乘法原理是一种数学优化技术。它通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配, 并使这些求得的数据与实际数据之间误差的平方和为最小, 可用于曲线拟合去噪(李泉等, 2012)。

研究两个变量(x, y)之间的相互关系时, 通常可以得到一系列成对的数据 $\{x(1), y(1), x(2), y(2) \cdots x(m), y(m)\}$; 将这些数据描绘在 $x-y$ 直角坐标系中, 若发现这些点在一条直线附近, 可以令这条直线方程归纳为公式(3):

$$y = a_0x + a_1 \quad (3)$$

式中: a_0, a_1 是任意实数。

匀速变形阶段采用线性函数进行拟合去噪, 各个时间段对应的方程解为滤波后的位移值, 最小二乘法系数 a_0 为匀速变形速率 v (图 6)。

2.3 匀速变形阶段速率可靠性分析

为了防止在加速度变形阶段因传感器自身原因造成匀速变形阶段的假象, 进而造成预警误判, 建立一种匀速阶段速率可靠性评判标准十分重要。

通常滑坡在初始变形和匀速变形阶段速率相对较低, 在低位徘徊(图 7), 加速度变形阶段速率是匀速阶段几倍甚至几十倍的关系(图 8)。当切线角 50° 时, 加速度阶段速率与匀速阶段速率的速率比为 1.2 倍; 当切线角 60° 时, 速率比为 1.7 倍; 当切线角 70° 时, 速率比为 2.7 倍; 当切线角 80° 时, 速率比为 5.7 倍; 当切

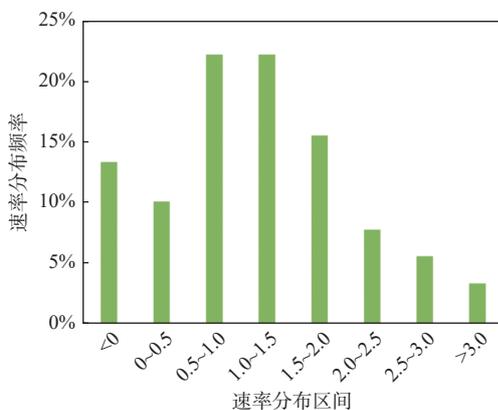


图 7 匀速变形阶段速率分布直方图

Fig. 7 Rate distribution histogram

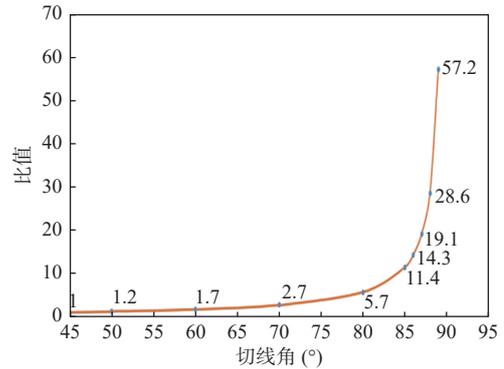


图 8 速率比图

Fig. 8 Rate ratio

线角 85° 时, 速率比为 11.4 倍; 当切线角 86° 时, 速率比为 14.3 倍。当切线角 87° 时, 速率比为 19.1 倍; 当切线角 88° 时, 速率比为 28.6 倍; 当切线角 89° 时, 速率比为 57.2 倍。

从上面关系可以看出, 随着切线角的增大, 滑坡滑动的危险性逐渐增大, 速率比逐渐呈指数型增长。根据速率比的关系建立以下匀速变形阶段速率可靠性评判规则:

$$\bar{V} = \frac{1}{N-1} [\bar{v}_1 + \bar{v}_2 + \cdots + \bar{v}_{N-1}] \quad (4)$$

式中: \bar{V} 为当前预警时间段之前的匀速变形阶段速率的平均值; \bar{v}_i 为第 i 个自适应计算出的匀速变形阶段速率; \bar{v}_N 为当前预警时间段自适应获取的匀速变形阶段的速率; $\bar{v}_N \leq 1.5 \times \bar{V}$ 时, 可靠性为绿色; $\bar{v}_N \leq 2.0 \times \bar{V}$ 时, 可靠性为黄色; $\bar{v}_N > 2.0 \times \bar{V}$ 时, 可靠性为红色。

当获取匀速变形阶段速率的可靠性为绿色时, 当前预警时间段获取的匀速变形阶段速率可靠性高, 可以直接使用; 当为黄色时, 可靠性较高, 但需要引起注意; 当为红色时, 可靠性偏低, 当前的获取匀速变形阶段速率偏高, 此时采用 \bar{v}_{N-1} 代替 \bar{v}_N 为当前预警时间段采用的匀速变形阶段速率。

2.4 公路滑坡智能监测预警流程

根据以上建立的匀速变形阶段识别规则, 建立公路滑坡智能监测预警流程。采用曲线凹凸测量技术获取当前预警时间段的匀速变形阶段; 利用最小二乘法对匀速变形阶段去噪拟合, 获得匀速变形阶段速率, 依据可靠性评价规则确定速率的可靠性; 采用改进切线角模型进行监测预警。

对原始数据进行切线角计算, 其结果如蓝色虚线

所示(图9),表现为匀速变形阶段切线角在 45° 上下波动,呈锯齿状;红色虚线代表经过直线段拟合去噪后切线角,其中匀速变形段切线角为 45° ,加速度变形段

与原始改进切线角保持一致。因此,文中提出的数据处理算法更加直观体现出滑坡变形不同阶段切线角的差异,为监测预警提供可靠的数据支持。

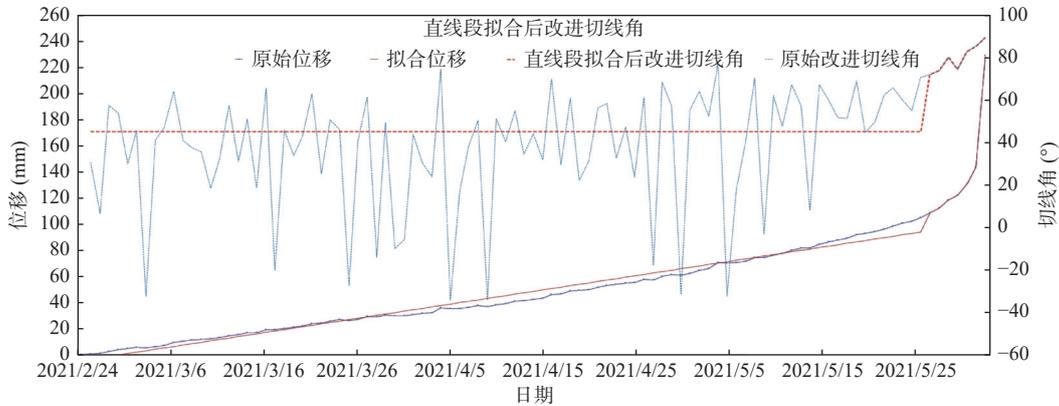


图9 时间位移曲线与切线角关系图

Fig. 9 Time displacement curve and tangent angle

3 结论

(1)受外界因素和滑坡固锁效应的影响,滑坡匀速变形阶段可能随着时间的变化处于动态调整中,其值不是固定不变的。

(2)针对改进切线角预警模型的特点,提出采用曲线凹凸特性测量和滤波的方法获取预警时间段的匀速变形阶段和其速率,为改进切线角的计算提供实时可靠的速率数据。

(3)建立速率评价规则确保其准确性,从而实现对改进切线角预警模型进行实时动态修正,防止预警误判。该方法可以自适应实时获取匀速变形阶段及其速率,具有一定的实用性和可操作性,为自动实时监测预报提供技术支持。

参考文献(References):

- 何朝阳. 滑坡实时监测预警系统关键技术及其应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- HE Chaoyang. Research on Key Technology and Application of Real-time Monitoring and Early Warning System of Landslide[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- 黄煜, 谢婉丽, 刘琦琦, 等. 基于GIS与MaxEnt模型的滑坡易发性评价——以铜川市中部城区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 266-275.
- HUANG Yu, XIE Wanli, LIU Qiqi, et al. Landslide Susceptibility

Assessment Based on GIS and MaxEnt Model: Example from Central Districts in Tongchuan City[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 266-275.

李泉, 贾如磊, 李金明, 等. 基于最小二乘法位移传感器数据的曲线拟合[J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2012, 12(1): 24-26.

LI Quan, JIA Rulei, LI Jinming, et al. Fitting Displacement Sensor Curve Based on Least Squares Method[J]. Lanzhou Petrochemical College of Vocational Technology Journal, 2012, 12(1): 24-26.

龙悦, 徐光黎, 高幼龙, 等. 数据预处理在滑坡位移相关分析中的应用[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 122-127.

LONG Yue, XU Guangli, GAO Youlong, et al. Application of the Data Preprocessing Methods to the Correlation Analysis of Landslide Displacement[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(2): 122-127.

罗文强, 李飞翱, 刘小珊, 等. 多元时间序列分析的滑坡演化阶段划分[J]. 地球科学, 2016, 41(4): 711-717.

LUO Wenqiang, LI Feiao, LIU Xiaoshan, et al. Evolution Stage Division of Landslide Based on Analysis of Multivariate Time Serie[J]. Earth Science, 2016, 41(4): 711-717.

马海涛, 张亦海, 于正兴. 滑坡速度倒数法预测模型加速开始点识别及临滑时间预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(2): 355-364.

MA Haitao, ZHANG Yihai, YU Zhengxing. Research on the identification of acceleration starting point in inverse velocity method and the prediction of sliding time[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(2): 355-364.

- 马娟, 赵文炜, 齐干, 等. 基于普适型监测的多参数预警研究-以三峡库区卡门子湾滑坡为例[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 259-269.
- MA Juan, ZHAO Wenyi, QI Gan, et al. Study on the Multi-parameter Early Warning Based on Universal Equipment: A Case of Kamenziwan Landslide in the Three Gorges Reservoir[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 259-269.
- 孟晓捷, 张新社, 曾庆铭, 等. 基于加权信息量法的黄土滑坡易发性评价——以1:5万天水市麦积幅为例[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 249-259.
- MENG Xiaojie, ZHANG Xinshe, ZENG Qingming, et al. The Susceptibility Evaluation of Loess Landslide Based on Weighted Information Value Method: Taking 1: 50 000 Map of Maiji District of Tianshui City As an Example[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 249-259.
- 亢星, 朱星, 许强, 等. 基于斋藤模型的滑坡临滑时间预报方法改进及应用[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 832-839.
- QI Xing, ZHU Xing, XU Qiang, et al. Improvement And Application of Landslide Proximity Time Prediction Method Based on Saito Model[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28(4): 832-839.
- 王朋伟. 库水作用下滑坡变形演化规律研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- WANG Pengwei. Study on Deformation Regularity of Landslide Under The Influence of Reservoir Water[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- 许强, 曾裕平, 钱江澎, 等. 一种改进的切线角及对应的滑坡预警判[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 501-505.
- XU Qiang, ZENG Yuping, QIAN Jiangpeng, et al. Study on a improved tangential angle and the corresponding landslide pre-warning criteria[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 501-505.
- 许强, 彭大雷, 何朝阳, 等. 突发型黄土滑坡监测预警理论方法研究: 以甘肃黑方台为例[J]. 工程地质学报, 2020a, 28(1): 111-121.
- XU Qiang, PENG Dalei, HE Chaoyang, et al. Theory and Method of Monitoring and Early Warning for Sudden Loess Landslide: a Case Study at Heifangtai Terrace[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020a, 28(1): 111-121.
- 许强, 汤明高, 黄润秋, 等. 大型滑坡监测预警与应急处置[M]. 北京: 科学出版社, 2020b.
- XU Qiang, TANG Minggao, HUANG Runqiu, et al. Large-scale Landslide Monitoring and Early Warning and Emergency Response [M]. Beijing: Science Press, 2020b.
- 许强, 汤明高, 徐开祥, 等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1104-1112.
- XU Qiang, TANG Minggao, XU Kaixiang, et al. Research on Space-time Evolution Laws and Early Warning-prediction of Landslides[J]. *Chinese Journal Of Rock Mechanics And Engineering*, 2008, 27(6): 1104-1112.
- 薛强, 张茂省. 延安淹土安滑坡监测预警及变形特征[J]. 西北地质, 2018, 51(2): 220-226.
- XUE Qiang, ZHANG Maosheng. Monitoring Early Warning and Deformation Characteristics of Yantu'an Landslide in Yan'an[J]. *Northwestern Geology*, 2018, 51(2): 220-226.
- 易庆林, 胡大儒, 代天凡, 等. 基于小波分析的滑坡变形规律研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 91-94+102.
- YI Qinglin, HU Daru, DAI Tianfan, et al. Deformation Law for a Landslide in the Three Gorges Reservoir Area Based on Wavelet Analysis[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2013, 11(5): 91-94+102.
- 张林梵, 王佳运, 张茂省, 等. 基于BP神经网络的区域滑坡易发性评价[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 260-270.
- ZHANG Linfan, WANG Jiayun, ZHANG Maosheng, et al. Evaluation of Regional Landslide Susceptibility Assessment Based on BP Neural Network[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2): 260-270.
- 张林梵. 基于时序 InSAR 的黄土滑坡隐患早期识别——以白鹿塬西南区为例[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 250-257.
- ZHANG Linfan. Early Identification of Hidden Dangers of Loess Landslide Based on Time Series InSAR: A Case Study of Southwest Bailuyuan[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 250-257.
- Fan Xuanmei, Xu Qiang, Andres Alonso-Rodriguez, et al. Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergencyresponse[J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 1003-1020.
- He Chaoyang, Ju Nengpan, Xu Qiang, et al. Automated Data Processing and Integration of Large Multiple Data Sources in Geohazards Monitoring[J]. *International Journal of Georesources and Environment*, 2017, 3(1): 9-21.