

岩土工程

边坡位移监测研究现状述评

陈晓雪¹, 罗旭², 尚文凯³, 岳德鹏¹, 邓向瑞²

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013;

3. 平朔煤炭公司安家岭露天煤矿, 朔州 036006)

摘要 滑坡是一种危害性严重的自然灾害, 威胁着人民的生命财产安全, 并有可能产生巨大的经济损失。边坡位移监测是保证边坡在施工和使用期内安全的重要手段和措施。文章主要介绍了目前国内外使用较多且较成功的边坡监测的技术手段, 分 3 个阶段对边坡位移时间预报模型的研究现状进行了综合叙述, 并分析了边坡监测的发展趋势同时做出了展望, 为边坡的稳定性评价、防治工程设计和滑坡治理提供了参考依据。

关键词 GPS GIS 滑坡 预报模型 测量机器人

中图分类号 TU454 **文献标识码** A **文章编号** 10495-5331(2008)02-0110-05

边坡形变是表征边坡变化的最显著的参量, 最能体现边坡的变化状况和发展趋势。因此如果能够准确地监测出边坡的位移、变形程度并对变形的发展趋势进行较准确的预报, 就可以尽早采取减灾防灾的措施和对策, 使这类灾害造成的损失减少到最低程度。所以, 开展崩塌、滑坡地质勘查、科学实验、监测预报及防治研究工作, 尽量避免和减轻灾害损失, 具有十分重要的现实意义和巨大的经济与社会效益; 同时, 对丰富和发展灾害预报理论, 推动工程地质、环境地质和岩土力学向更高层次发展也具有重要的理论意义。

1 国内外边坡监测技术应用现状

目前, 国内外边坡监测的技术已经从人工皮尺简易工具的监测手段过渡到仪器监测, 又正向着自动化、高精度及远程监测系统方向发展。

GPS(全球定位)系统与传统的测量技术相比具有全球范围、全天候、全时域、连续快速、高精度、能同时测定点的三维位移以及易于实现全系统的自动化等优点, 而且 GPS 测量法可以同时测定测点的三维坐标, 对于运动的观测点还能精确出其运动的速度。在测程上大于 10km 时, 其相对精度可以达到 $5 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-6}$, 甚至可以能达到 10^{-7} , 优于精密光电测距仪。国际上已普遍采用 GPS 测量技术监

测地壳变形和断裂运动, 法国阿尔卑斯山脉的 Sechilienne 滑坡为冰川堆积体, 1985 年曾发生 3000 万立方米的滑坡, 1998 年应用 GPS 和全自动机器人实现了实时在线安全监测^[1]。

GIS 强大的空间数据库功能为滑坡信息的管理和分析提供了技术保障。GIS 和 RS 相互结合可以显著增强遥感对滑坡地质灾害的识别能力和提高地理信息系统的空间分析预测的水平。在 GIS 环境下对滑坡遥感图像进行解译和信息提取, 通过影像的地形纠正和空间坐标配准后, 即可将解译的有关信息直接进入 GIS 数据库, 因而能快速获取研究区的历史滑坡和环境背景资料, 包括地形地貌、地质构造、地层岩性、土地利用、植被覆盖、水系、城镇居民点及主要的建筑物、研究区的滑坡灾害点以及其分布情况等。因此, 通过基于 GIS 的边坡位移遥感影像资料的解译和信息提取工作, 可以极大地提高资料收集的效率, 而且资料所包含的边坡信息量更丰富。

近景摄影测量法是把近景摄影仪安置在两个不同位置的固定测点上, 同时对边坡范围内观测点摄影构成立体像对, 利用立体坐标量测像片上各观测点三维坐标的一种方法。对边坡进行周期性重复摄影, 并且所获得的像片资料是边坡地表变化的实况纪录, 可随时进行比较, 该方法外业省时省力信息

[收稿日期] 2007-08-01; [修订日期] 2007-08-27。

[基金项目] 中央级科学事业单位修缮购置专项基金(编号: AXG06304)资助。

[第一作者简介] 陈晓雪(1982年—), 女, 2001年毕业于长春理工大学, 获学士学位, 在读硕士生, 现主要从事水土保持、空间测绘技术、灾害监测及虚拟现实三维表达工作。

量。目前该方法的精度可以满足崩滑体处于速变、剧变阶段的监测要求,即适合危岩临空陡壁裂缝或滑体地表位移量变化速率较大时的监测。

测量机器人 (Measurement robot), 或称测地机器人, (Georobot) 是一种能代替人进行自动搜索、跟踪、辨识和精确照准目标并获取角度、距离、三维坐标以及影像等信息的智能型电子全站仪。它是在全站仪基础上集成步进马达、CCD 影像传感器构成的视频成像系统, 并配置智能化的控制及应用软件发展而形成的。测量机器人通过 CCD 影像传感器和其它传感器对现实测量世界中的“目标”进行识别, 迅速做出分析、判断与推理, 实现自我控制, 并自动完成照准、读数等操作, 以完全代替人的手工操作。张正禄等 (2006) 使用测量机器人变形监测系统 CRT - DEMOS (Geo - robot Deformation Monitoring System) 对三峡工程库区巴东滑坡进行了监测试验, 该系统由基站、参考点、目标点和计算机组成, 是基于一台测量机器人的有合作目标 (照准棱镜) 的变形监测系统, 实现了全天候的无人值守监测^[2,6]。

合成孔径雷达干涉测量技术 (InSAR) 是近 10 年来迅速发展起来的一项新的空间对地观测技术, 它是利用合成孔径雷达的相位信息提取地表的三维信息和高程变化信息。InSAR 技术可以获取全球高精度的 (理论上可以达到毫米量级)、高可靠性的 (全天时、全天候)、空前丰富的地表变化信息。Frunan, Camec 等利用 ERS - 1 的 3d 重复周期的 SAR 数据集, 并利用形变前的 DEM 消除地形效应的方法, 对法国东南部的 LA Claire 滑坡进行了观测和测量。研究结果表明在 12d 的时间间隔内, 该滑坡体发生了整体位移, 滑坡体从顶到底的位移速率并不均一, 研究结果与传统测量方法所得结果符合很好^[5,7]。

2 边坡位移监测时间预报模型研究现状

由于边坡变形预报受到许多不确定因素的影响, 所以变形预报模型也较多, 而且各有利弊, 这里主要对边坡位移时间预报模型进行介绍。时间预报根据滑坡不稳定时间可分为趋势预报和临滑预报两大类; 趋势预报又可再分为长期预报、中期预报和短期预报。长期预报是指斜坡尚处于初始变形阶段而进行的未来整体破坏的时间预报, 预报的时间尺度一般为数十年甚至上百年; 中期预报是指斜坡处于稳定变形阶段 (线性阶段) 而进行的未来整体破坏的时间预报, 预报的时间尺度一般为数年至数十年;

短期预报是指斜坡处于加速变形初级阶段 (非线性阶段) 而进行的未来整体破坏的时间预报, 预报的时间尺度一般为数月; 临滑预报是指斜坡处于加速变形末期后 (非线性阶段) 而进行的整体破坏的时间预报, 预报的时间尺度为数天^[11]。

经过 30 多年的研究, 国内外许多滑坡专家潜心研究, 不断探索, 使滑坡理论有了较大发展, 纵观其发展过程, 大致可分为三个阶段:

2.1 现象预报和经验式预报阶段

这一阶段处于 20 世纪 60 ~ 70 年代, 滑坡预报主要以现象预报和经验预报为主。人们利用滑坡的一些破坏现象和失稳的宏观前兆现象, 对滑坡进行推断, 显然这种方法只适用于有明显前兆的滑坡, 预报精度也不高。1968 年日本学者斋藤迪孝通过大量的试验和对现场位移监测资料的分析, 提出了蠕变破坏的三阶段理论, 建立了滑坡时间与蠕变速率之间的经验公式, 利用该模型曾于 1970 年对日本的高汤山隧道滑坡进行了成功预测。

福围模型是日本学者在 1985 年经过多次大比例尺模型试验的基础上提出的滑坡速度 - 时间关系

$$\frac{1}{v} = A(a - 1)^{\frac{1}{a-1}} (t_f - t)^{\frac{1}{a-1}} \quad (1)$$

式中: A 、 a 为常数; v 为滑坡速度; t 为初始时间; t_f 为破坏时间。利用上式, 可结合作图法进行滑坡预报。

2.2 位移 - 时间统计分析预报阶段

进入 80 年代后, 在滑坡预报研究方面取得了显著进展。许多学者大量引入数学方法和理论模型, 用于拟合不同滑坡的位移 - 时间曲线, 根据所建的模型作外推预报。其模型有以下几种:

1) 位移加速度回归模型: 此模型认为大多数滑坡位移 - 时间动态监测数据列的散点图式极其类似于某二次曲线, 故可拟合回归方程

$$y = c + bx + ax^2 + \quad (2)$$

作外推预报, 其可靠程度取决于动态曲线的连续性。式中待定系数 a 、 b 、 c 按最小二乘法原理和求极值法则求解, 为随机因素对位移量 y 的影响值。

2) 均加速条件时间预报模型

当第三蠕变阶段为匀加速度时, 岳启伦 (1987) 提出剧滑时间预报公式

$$T_r = \frac{t_1}{1 - \lambda} \quad (3)$$

式中: T_r 为从计算点开始至剧滑开始所需的时间; t_1 为从计算点开始前的等值位移时间增量; λ 为从计算点开始后的等值位移时间增量与前等值位移

时间增量的比。

该模型对实际发生的滑坡在如下两方面作了简化：当滑坡开始移动时，滑坡的地质条件基本不变，即滑坡的下滑力及对滑床的压力是恒定的；滑坡位移产生加速度的原因，是由于滑坡下滑力大于滑带的摩阻力；如果是匀加速度运动，则认为滑带摩阻力变化可忽略不计。

3) 灰色 Verhulst模型：此模型认为滑坡发生、发展、成熟及至消亡的发展过程类似于生物生长机理的时间序列，故可选用灰色理论中的 Verhulst模型来进行预测，即

$$\frac{dx}{dt} = ax - bx^2 \quad (4)$$

其解为一“S型位移-时间曲线

$$x(t) = \frac{a/b}{1 + \left[\frac{a}{b} \frac{1}{x(0)} - 1 \right] e^{a(t-t_0)}} \quad (5)$$

且取滑坡运动加速度为 0 (对应滑速最大值 $a^2/4b$) 的时间 t 为临滑时间 t_c

$$t_c = \frac{a}{2b} \quad (6)$$

式中待定系数 a, b 由最小二乘法原理和求极值法则求得。

晏同珍 (1988) 根据滑坡过程存在着与生物孕育、发生、消亡相似的位移特征，引入了 Verhulst 生物生长模型的非线性预测方法及泊松回旋等其他几种模型，目前 Verhulst 已被广泛采用。

2.3 综合预报模型及预报判据研究阶段

随着滑坡研究的深入发展，20 世纪 90 年代以来，由于系统科学和非线性科学的发展及其在各个领域内的广泛应用，人们认识到滑坡位移-时间曲线的拟合外推常常只能对滑坡近期行为趋势作出有限的预测，在众多因素，尤其是非线性因素的作用下，要准确、可靠地预报滑坡的长期行为是困难的。因此，学者们逐步形成了跟踪预报的思想，这时出现的边坡变形监测时间预报模型有：

1) 滑体变形功率模型：此模型基于边坡平面应变刚塑性模型，以滑体的变形功率作为滑体变形阶段划分标准，当变形功率临近破坏功率达到某一程度，即认为滑坡变形进入临滑阶段，此时采用滑体变形功率作为时间预报参数，最终确定滑坡剧滑时间。破坏功率与各时刻的变形功率可由塑性力学理论导出。

破坏功率为

$$F_i v_i^p dv = \int_{S_D^*} k [v_i^*] dS_D^* \quad (7)$$

变形功率与时间的关系为

$$\int_0^t F_i v_i^p dv dt = \int_0^t F_i S_i dv \quad (8)$$

式中： F 为滑体体积力； v_i 为滑坡变形速度场； k 为滑面剪切屈服极限； $[v_i^*]$ 为滑坡面 S_D^* 上的速度间断。

利用计算出的破坏功率和各时刻变形功率与时间关系的频谱曲线，即可最终较为准确预报滑坡剧滑时间。

2) 分形时间预测模型：对于一个时间序列 $\{ (t) \}$ ， $t = 1, 2, \dots$ ，定义其均值序列为

$$\bar{X}(t) = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t X(i), \quad t = 1, 2, \dots \quad (9)$$

累积离差为

$$X(t) - \bar{X}(t) = \sum_{i=1}^t (X(i) - \bar{X}(t)), \quad 1 \leq t \quad (10)$$

极差

$$R(t) = \max_i X(t) - \min_i X(t), \quad i = 1, 2, \dots \quad (11)$$

标准差为

$$S(t) = \left[\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t (X(i) - \bar{X}(t))^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (12)$$

则 $R(t)/S(t) = R/S$ 存在统计规律

$$R/S \sim \left(\frac{H}{2} \right)^H \quad (13)$$

H 为赫斯特指数。而分形理论中为研究系统的自相似性，一般将分维 D 定义为

$$N = (1/r)^D \quad (14)$$

所以，前述时间序列中的 H 可以看成是极差和标准差的分维值。对于滑坡的变形监测数据，可以进行分时间段处理，将某一时间序列分为几段，分别计算各段的一个极差和标准差，建立 R/S 的数据对，在 $\lg(R/S) - \lg(t)$ 关系曲线上找出直线段，拟合直线段的斜率即得位移分维值 D_d 值。如果由滑坡的监测数据求得某一时段的位移分维值明显低于其他时段的分维值 (位移分维值急剧下降)，则表明滑坡将失稳或大规模复活。

3) Pearl 预报模型：此模型认为滑坡的变形发展过程曲线与描述生物生长规律的曲线类似，如果将边坡变形监测数据 (t, Y) 按时间顺序排列，应用 Pearl 曲线

$$Y = \frac{K}{1 + be^{-at}} \quad (15)$$

来拟合这些数据,只需求出 a 、 b 、 K 三个参数,即可对滑坡变形发展进行预报。

4) 小波分析与神经网络耦合预报模型:小波变换被誉为“数学显微镜”,它可从时频域的局部信号中有效的提取信息,利用离散小波变换对变形数据进行分解和重构,可有效的分离误差,能更好的反映局部变形特征和整体变形趋势。与傅立叶变换相似,小波变换能探测周期性的变形。赵东健(2005)结合某岩质高边坡测斜监测,将测斜所得到的数据重构为信号形式,再利用小波分析滤除高频噪声信号,处理结果实际上建立了一个监测时间和综合位移变化的关系,这个综合位移变化集中了整体位移变化的信息,反映了边坡位移变化趋势。

将各种边坡位移预测模型主要类型及对应的预测方法与判据归纳为表 1 所示^[9]:

表 1 目前边坡位移预测模型的主要类型

	位移加速度回归模型	监测曲线回归 方程外推法	位移加速度
时间预测	均加速条件时间预报模型	统计方法	位移
	灰色 Verhulst模型	灰色统计方法	
	边坡体变形功率模型	功能原理	位移峰值
	分形时间预测模型	分形理论	位移分维值
	非线性动力学模型	反演理论	动力学判据
	Pearl模型	统计方法	位移

近年来随着滑坡预报理论的不完善和计算机科学的迅速发展,出现了不少的滑坡预测预报应用系统。比如滑坡灾害预报系统 LTFS(秦四清等,1993),基于神经网络的滑坡稳定性系统 SES(夏元友,1996)。成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室研制的地质灾害变形预测预警系统(许强等,1999),滑坡实时跟踪预报软件系统 SIPS(李天斌等,1999),滑坡发生时间的非线性灰色预测软件(袁金荣,1999)等。

3 边坡位移监测研究的发展趋势及展望

回顾边坡位移分析方面取得的大量实践及研究成果,展望边坡变形分析研究的未来,其发展趋势将主要体现在如下几个方面:

1) 数据处理与分析将向着自动化、智能化、系统化、网络化的方向发展,同时更注重时空模型和时频分析(尤其是动态分析)的研究,数字信号处理技术将会得到更好的应用。

2) 加强对各种方法和模型的实用性研究,边坡变形监测系统软件的开发不会局限于某一固定模式,随着变形监测技术的发展,变形分析新方法的研究

将会不断涌现。

3) 边坡位移的应用预测应该是强调定性与定量因素综合集成作用的、智能化手段的方法。滑坡预报的智能化方法研究还处于起步阶段,发展空间潜力还很大。近年来以遗传算法、模糊逻辑和神经网络为代表的计算智能科学理论在工程学科的应用中独树一帜,目前正在逐步引入到滑坡预报的研究中,其在滑坡预报方面的应用也将会对该研究领域有所创新性贡献。

4) 边坡位移监测技术未来发展的另一个方向应该是实现综合性的监测方法,即同时采用多种监测手段同时对边坡进行多测点、多参数的监测。随之产生的一个问题便是监测信息的协同利用问题。因此综合性监测方法与现场综合处理平台的同时运用便能协调好这个问题。然而进一步的研究表明,专家的经验知识在科学研究中特别是在预测科学中起着举足轻重的作用。专家往往具有不可思议的预见能力,而这种经验直觉几乎不可能用一般的数学方法建立定量模型。因此,再附以专家系统就更加完善了。同时,随着计算机技术、通讯技术、网络技术的发展,远程网络监控技术也是未来边坡监测的一个发展方向。

[参考文献]

- [1] 王志旺,李端有. 3S技术在滑坡监测中的应用[J]. 长江科学院院报,2005,22(5):33-36.
- [2] 梅文胜,张正禄,黄全义. 测量机器人在变形监测中的应用研究[J]. 大坝与安全,2002,(5):33-35.
- [3] 李强,李端有. 滑坡位移监测动态预报时间序列分析技术研究[J]. 长江科学院院报,2005,22(6):16-19.
- [4] 孙玉科,杨志法,等. 中国露天矿边坡稳定性研究[M]. 中国科学技术出版社,1999.
- [5] 单建新,马瑾,王长林,等. 利用差分干涉雷达测量技术(D-InSAR)提取同震形变场[J]. 地震学报,2002,24(4):413-420.
- [6] 徐佳,麻凤海,宋伟东,等. TCA2003边坡自动监测系统的研究[J]. 矿山测量,2005,(1):49-52.
- [7] 姜晨光,逢晓周,董勤景,等. 露天矿边坡自动监测系统的开发与应用[J]. 中国地质灾害与防治学报,2006,17(4):123-128.
- [8] 黄声享,尹晖. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.
- [9] 陈永奇,吴子安. 变形监测分析与预报[M]. 北京:测绘出版社,1997.
- [10] 朱建军,贺跃光. 变形测量的理论与方法[M]. 长沙:中南大学出版社,2004.
- [11] 张永兴,文海家. 滑坡灾害智能预测理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [12] 殷坤龙. 滑坡灾害预测预报[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2005.

- 社, 2004.
- [13] 李海蒙, 李军财. 国内外矿山边坡监测技术应用的最新进展 [J]. 中国矿业, 2006, 15(4): 46 - 47.
- [14] 富崇彦, 张立昌. 孝义铝矿采场边坡位移监测及其工程控制 [J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(5): 92 - 93.
- [15] 潘平. 基于小波神经网络理论的边坡位移预测 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2006, 33(2): 176 - 180.
- [16] 张永兴, 胡居义, 文海家. 滑坡预测预报研究现状述评 [J]. 地下空间, 2003, 23(2): 200 - 202.
- [17] Li S J, Feng X T, Wu W P. Long - tem monitoring and dynamic remedial measures in a large scale landslide[A]. In: Proceedings of International Conference on Slope Engineering [C]. Hong Kong: Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, 2003, 262 - 267.
- [18] Seber, G A F, and C J Wild. Nonlinear Regression [M]. Wiley, 1989: 75 - 89.
- [19] Hancock E K R, Kitter J. Discrete Relaxation [J]. Pattern Recognition, 1999, 23: 711 - 733.
- [20] Pal S K, King R A, Hashin A A. Automatic graylevel thresholding through index of fuzziness entropy [J]. Pattern Recognition Letters, 1983, 1: 141 - 146.

REVIEW OF CURRENT SITUATION OF MONITORING SLOPE DISPLACEMENT

CHEN Xiao - xue¹, LUO Xu², SHANG Wen - kai³, YUE De - peng¹, DENG Xiang - ru²

(1. School of Resource and Environmental, Beijing Forest University, Beijing 100083;

2. China National Institute of Metrology, Beijing 100013;

3. Anjialing Opencast Coal Mine, Pingshuo Coal Company, Shuozhou 036006)

Abstract: Landslide is a kind of nature disaster which have serious harm, threaten safety of man's life and property, and is likely to bring huge economy loss. Slope displacement monitoring is an important mean and measurement to ensure the safety of slope during construction and usage period. This text mainly introduced many successful technique means of monitoring slope, and described the research actuality of predicting model of coast displacement in three moments currently in home and abroad, and analyzed the development trend of monitoring slope meanwhile making the expectation, which offering reference of appraising stability of slope, designing of prevention project and fathering coast.

Key words: GPS, GIS, landslide, prediction model, measurement robot