

# 滑坡地质灾害远程监测预报系统及其工程应用

何满潮

(中国矿业大学 深部岩石力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 露天矿边坡稳定性监控预报技术研究, 对滑坡地质灾害防控具有重要意义。以滑体、滑床和监控锚索相互作用力学原理为理论基础, 提出滑体和滑床相对运动状态的力学监测原理, 把多因素监测变为单一滑动力力学量监测, 给出滑动力与监控预紧力的关系。通过滑坡物理模型试验得出, 在滑坡发生前, 边坡岩体内应力会连续发生变化, 当滑动力大于抗滑力后, 边坡岩体会发生变形和滑动, 且捕捉边坡岩体内应力的变化优于对岩体位移的监测。基于上述原理和试验结果, 开发了滑坡地质灾害远程监测预报系统, 实现摄动力动态变化的远程实时监测。提出4种监测预警模型, 通过对露天矿山边坡等的现场实践应用, 该监控新技术成功地进行边坡稳态实时监控和预测预报。

**关键词:** 边坡工程; 边坡稳定性; 滑坡预报; 远程监测预报系统; 滑动力

**中图分类号:** P 642.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2009)06 - 1081 - 10

## REAL-TIME REMOTE MONITORING AND FORECASTING SYSTEM FOR GEOLOGICAL DISASTERS OF LANDSLIDES AND ITS ENGINEERING APPLICATION

HE Manchao

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** It is meaningful for researching on monitoring and forecasting technology of slope stability in open pit mine to prevent landslide geological disasters. Based on the mechanical principle of interaction among landslide body, landslide bed and monitoring anchor cable of slope, the mechanical principle of relative movement between landslide body and landslide bed is proposed; and the multi-factor monitoring is transformed into single landslide mechanical monitoring. The relationship between sliding force of slope and pretightening force is provided. According to the physical model experiment of landslide, the stress will change continually inside the landslide mass before the occurrence of landslide. When the sliding force is greater than the anti-sliding force, the deformation and landslide will take place, which means the change of stress will be ahead of displacement. Consequently, monitoring the alteration of stress in the sliding mass is better than that of the displacement. Based on above principle and experiment, the system of real-time remote monitoring and forecasting for geological disasters of landslide is developed, which can realize the real-time remote monitoring of perturbation. Four types of forecasting models corresponding to the system of remote monitoring are also presented. According to the field application to opencast mines slope, this new technology successfully implements monitoring and forecasting for stable condition of slopes.

**Key words:** slope engineering; slope stability; landslide forecasting; remote monitoring and forecasting system; sliding forces

**收稿日期:** 2009 - 01 - 18; **修回日期:** 2009 - 04 - 09

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202200); 国家自然科学基金重大项目(50490270); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0656)

**作者简介:** 何满潮(1956 - ), 男, 博士, 1981年毕业于长春地质学院工程地质专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事深部岩石力学理论及灾害控制方面的教学与研究。E-mail: hemanchao@263.net

# 1 引言

我国疆域辽阔，地质环境复杂，影响地质灾害发育的自然地质条件也复杂多样，加之地质灾害具有分布广、类型多、频度高、强度大等特点，地震、崩塌、滑坡及泥石流等已经成为对我国危害最大的地质灾害<sup>[1]</sup>。尤其是近年来，随着国民经济的高速发展，各行各业对能源需求日益增加，我国北方露天矿山目前已经陆续进入深部开采阶段，由于矿区工程地质条件复杂、断层、岩脉纵横交错，加之矿山频繁的生产爆破振动，崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害更为严重<sup>[2-4]</sup>，阻碍了矿山生产的正常进行，制约着矿山的可持续安全生产。

由于早期装备条件的限制，我国滑坡监测主要是根据人工观测地表变化特征、地下水以及周围动植物的异常来推断确定其发生的可能性<sup>[5, 6]</sup>。之后，随着时代的发展和科技进步，表面位移监测法的一些常规仪器，包括全站仪、经纬仪、水准仪、GPS监测以及新近发展的GPS手机监测和InSAR技术等<sup>[7-11]</sup>，也逐渐得到应用。这类方法由于表面位移和滑面位移的不一致性，预测预报准确度十分有限。而通过深部位移监测法，即钻孔倾斜仪进行监测<sup>[12]</sup>，虽然能够确定滑面位置，但产生较大错动后，倾斜位移监测失效，后期滑坡位移数据无法获得，故其数据带有“一孔之见”而有失准确。

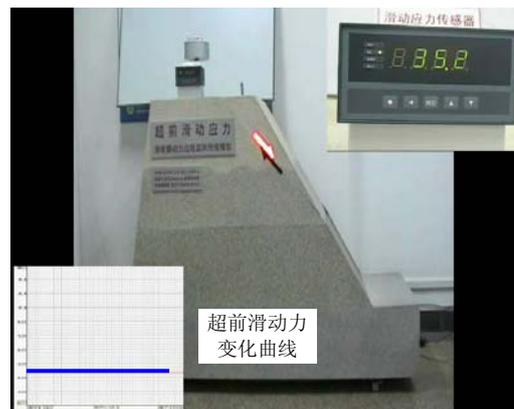
随着最新技术的不断应用<sup>[13-15]</sup>，滑坡灾害预测预报的技术水平有所提高，但仍难以实现准确预报。究其原因，是由于位移、裂缝等现象只是滑坡的必要条件，并不是充分条件。滑坡前一定会产生位移和裂缝，但有位移、裂缝的产生并不一定会发生滑坡。表面位移和裂缝的产生与很多因素有关，除滑坡外还与降雨、温度和湿度的变化有关。只从“现象监测”难以实现对滑坡的超前准确预报，因此，要超前预报滑坡灾害，必须找到滑坡发生的超前信息。

作为一个天然的力学系统，滑坡发生与否决定于“下滑力”和“抗滑力”之间的平衡状态变化。而滑坡过程是由渐变增加到最终破坏的过程，“超前剪切下滑力”（超前下滑力），即滑动前的剪切下滑力变化可以作为预测滑坡的充分必要条件。通过超前下滑力的实时监测就可以预报滑坡的发生。该系统的先进之处在于抓住了边坡失稳的本质特征，

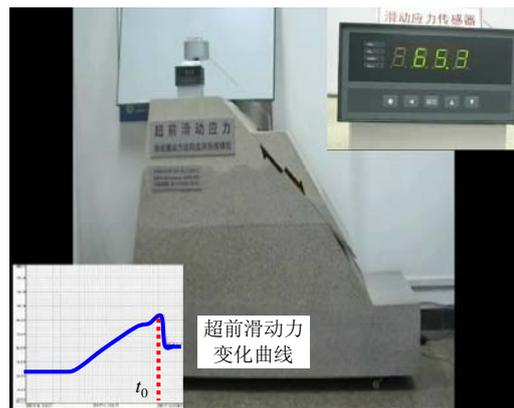
通过对摄动力的实时监测，继而计算出滑坡体下滑力的大小，实现了从“现象监测”到“本质监测”的飞跃。

# 2 超前下滑力的物理模型试验

基于上述下滑力监测原理，建立了滑坡过程模拟试验系统，来监测下滑力与表面位移的关系。结果表明(见图1)，滑坡地质灾害发生之前，边坡岩体内应力会连续发生变化，当下滑力大于岩土体的抗滑力后，会发生变形和滑动，其应力变化超前于表面位移的发生，捕捉边坡岩体内应力的变化优于对岩体位移的监测。由超前下滑力的变化曲线可以看出，超前下滑力是由最初的常量值逐渐增大到达一个峰值，超前下滑力超过峰值后滑体开始滑动破坏。



(a) 滑坡前



(b) 滑坡后( $t_0$ 为滑动时间，即峰值点)

图1 滑坡过程物理模拟试验

Fig.1 Physical modeling experiment of landslide process

# 3 超前下滑力的数学表达

滑坡其实是滑体沿着滑面在滑床上运动的一种

灾害运动形式。本质是下滑力和抗滑力这对矛盾力学量之间的运动。当下滑力为主要因素时，就发生滑动；当下滑力为次要因素时，滑坡就稳定。滑坡监测预报的关键就是掌握下滑力相对于抗滑力的变化动态。而滑坡力学系统作为一个“天然力学系统”，无法直接对其超前滑动力进行监测，必须采用一定的技术，将其转变成为“天然力学系统”与“人为力学系统”相结合的“可测力学系统”。

摄动监测的原理就是采用“穿刺摄动”技术，把锚索穿过滑面，施加一个小的预应力扰动，力学上称之为“摄动力”。这时摄动力已参与到滑坡力学系统中，这样就可以推导摄动力和滑动力之间的函数关系，从而反映超前滑动力的变化。

根据滑坡摄动力学模型(见图 2)可以得出：

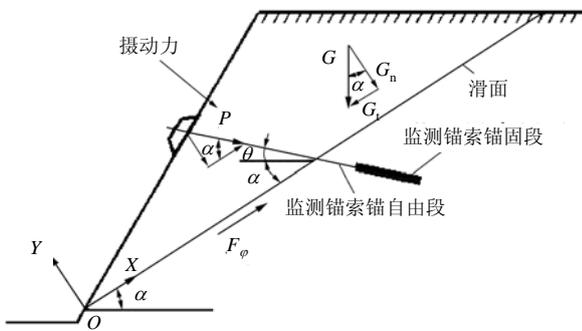


图 2 滑坡力学模型

Fig.2 Mechanical model of landslide

滑动摩阻力：

$$F_\phi = (P_n + G_n) \tan \bar{\varphi} + cl \tag{1}$$

在极限平衡状态下，有

$$\sum \bar{X} = 0 \tag{2}$$

$$P + F_\phi - G_t = 0 \tag{3}$$

$$G_t = P + F_\phi \tag{4}$$

超前滑动力  $G_t$  的数学表达为

$$G_t = P[\cos(\alpha + \theta) + \sin(\alpha + \theta) \tan \bar{\varphi}] + G \cos \alpha \tan \bar{\varphi} + \bar{c}l \tag{5}$$

式中： $G_t$  为超前滑动力(kN)， $P$  为摄动力(kN)， $G$  为重力(kN)， $\alpha$  为滑动面与水平面夹角(°)， $\theta$  为监测锚索加固角(°)， $\bar{\varphi}$  为边坡滑动体各土层内摩擦角加权平均值(°)， $\bar{c}$  为滑动面各土层黏聚力加权平均值(kPa)， $l$  为滑动面长度(m)， $G_n$  为法向力。

式(3)表明， $P$  是人为力学系统的可测力学量，不可测的滑动力学量  $G_t$  可以表示为  $P$  的函数，能够

通过计算得出。

## 4 滑动力远程监测装备

### 4.1 远程实时监控系统拓扑结构

远程监控系统数据采集无线传输方式，采用完全的点对点传输，即每套监测设备之间都是相互独立的，互不干涉，没有任何连接线缆，各监测点可分散布置。现场设备采用电池组供电，使用时只需定期更换电池即可；测量数据能够远距离传输，并可同时发给多个监控主机。摄动力监控系统组成如图 3 所示。

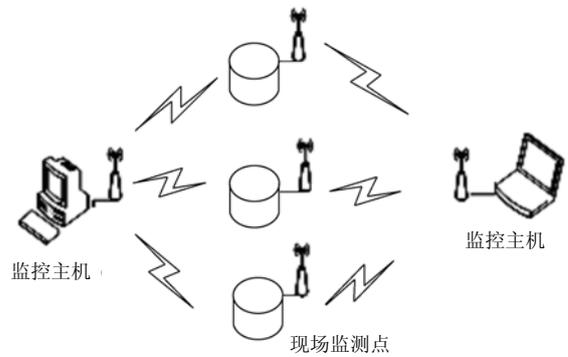


图 3 摄动力监控系统组成

Fig.3 Composition of perturbation force monitoring system

### 4.2 远程监测预报系统组成

监控系统主要由两大部分构成：一部分是智能传感、采集、发射系统，该部分用于安装到监测现场，可将现场锚索等应力数据自动采集、自动发射到接收分析系统；另一部分是智能接收分析系统，该部分可将现场发来的数据自动接收并处理形成动态监测曲线和监测预警曲线，根据监测预警曲线判断监控对象的稳定状态。

### 4.3 智能传感、采集、发射系统

智能传感、采集、发射系统构造如图 4 所示，主要由两部分构成，即传感装置和采集、发射装置。传感装置直接安装在监测锚索外端部，完成摄动力感应任务。监测锚索的埋设深度根据场地工程地质剖面图确定，使监测锚索穿过滑动面，锚固在滑床之上；在无工程地质剖面信息的地区，尽量使监测锚索端部埋入相对稳定的基岩内。采集、发射装置除主机外还包括电池组和天线，完成数据的采集和远程发射任务。电池组根据使用情况应定期更换。

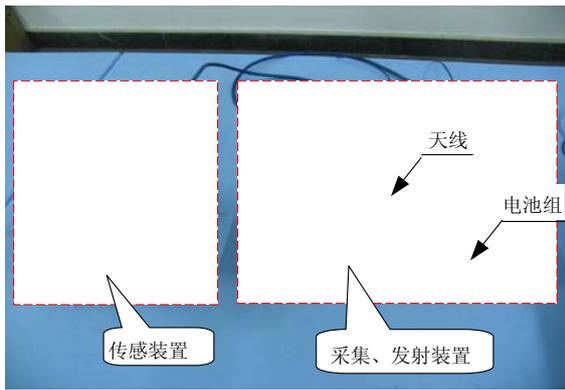


图4 智能传感、采集、发射系统

Fig.4 Intelligent sensor, collection, and transmit system

### 4.4 接收分析系统

智能接收分析系统构造如图5所示，该部分由信号接收器和分析计算机组成。信号接收器用来接收发射系统的数据信号并将接收的信号传递给计算机，计算机对接收的信号进行分析处理。为了连续接收现场信号，信号接收器的电源要保持接通状态，计算机最好配置不间断工作电源，在监测过程中主机箱要保持开机状态，在不对计算机进行操作的时间，可以将计算机显示器的电源关闭，只关闭计算机显示器的电源不影响信号的接收和处理。分析系统实现了网络化，用户经过授权后可以通过 Internet 查询实时监控信息。



图5 智能结构分析系统

Fig.5 Analytical system of intelligent structure

## 5 滑动力实时监控预警模型

通过大量现场试验和理论分析，确定出4种基本预警模式，为滑坡预警预报提供参考。

### 5.1 监控设计及预警准则

监控力学系统中锚索设计采取的初始预紧力，

按下式确定：

$$P_0 = (0.25 \sim 0.50)P_{\max} \tag{6}$$

监控预警过程采用预警准则：

$$\bar{P} = (1.4 \sim 2.0)P_0 \tag{7}$$

式(6)，(7)中： $P_0$ 为监控设计初始滑动力(kN)， $P_{\max}$ 为监控锚索最大设计荷载(kN)， $\bar{P}$ 为滑动力预警值(kN)。

### 5.2 监控预警模式

根据摄动监控力学原理分析，监控曲线存在4种类型，即预警模式共分为4种：

(1) 稳定模式。该模式监测曲线与警戒线没有交点，监测曲线总体没有与警戒线相交的趋势(见图6)。

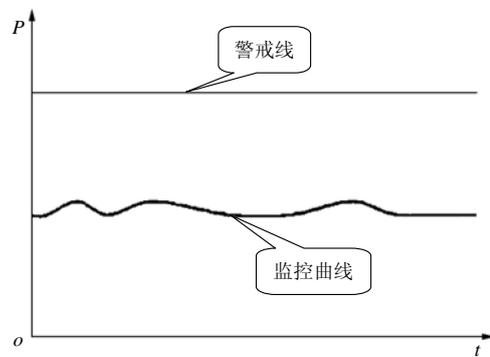


图6 稳定模式监控曲线特征

Fig.6 Characters of monitoring curves of stable mode

(2) 滑坡模式。该模式监测曲线总体存在与警戒线相交的趋势，监测曲线与警戒线最终产生交点，交点位置对应横坐标即是监测预警时间，当监测曲线超过警戒线达到某一值后，边坡发生滑坡破坏(见图7)。

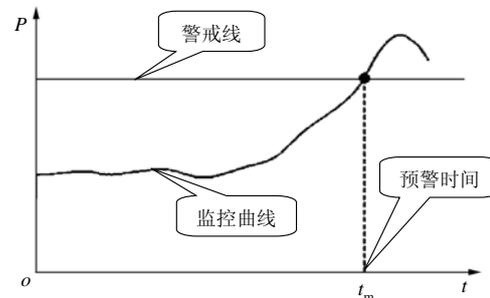


图7 滑坡模式监控曲线特征

Fig.7 Characters of monitoring curves of landslide mode

(3) 软化压入模式。该模式监测曲线在某一时间段内会发生加固力降低的情况，主要因为雨水等

地表水入渗, 使锚索端部锚墩下方土体发生软化, 锚墩在锚索拉力作用下压入土体, 锚索伸长量减小而降低预应力(见图 8)。

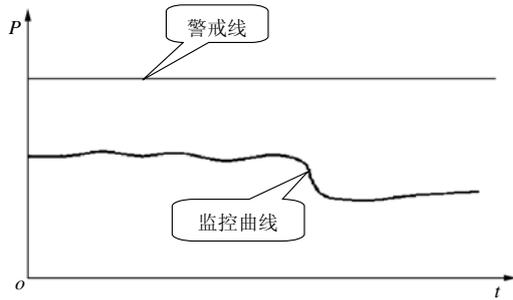


图 8 软化压入模式监控曲线特征

Fig.8 Characters of monitoring curves of softening pressing-in technology mode

(4) 振动扰动模式。该模式监测曲线在某时段加固力有明显的脉冲波动, 但波动后加固力瞬时恢复原值, 不影响监测曲线的整体变化特征(见图 9)。

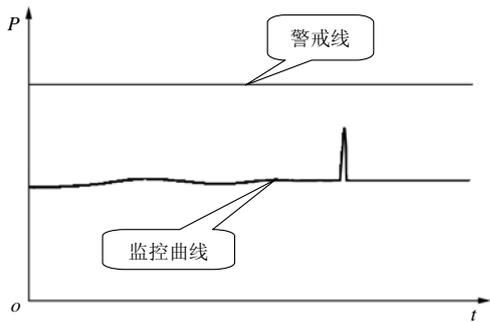


图 9 震动扰动模式监控曲线特征

Fig.9 Characters of monitoring curves of blasting disturbance mode

## 6 滑坡监测预报实例

滑坡地质灾害远程监测系统已经在全国 7 个地区 102 个点进行了智能远程监测。经过近 3 a 的监测, 已有 3 处发生失稳, 其中 2 处发生滑坡, 1 处产生裂缝, 进入滑坡预警状态。监测动态曲线上均提前 1 个月左右出现了明显的失稳前兆, 由于及时预报避免了人员伤亡和严重的经济损失。本节介绍监测系统在西露天煤矿准确预报滑坡的情况, 并介绍该系统在其他地区的推广应用。

### 6.1 露天矿边坡稳定性监控

#### 6.1.1 工程概述

平庄煤业(集团)有限责任公司西露天煤矿于 1958 年 8 月开工建设, 生产采用 4 m<sup>3</sup> 单斗电铲采

装, 非工作帮固定折返坑线, 准轨铁路运输工艺。1965 年末移交生产, 投产时能力定为 150×10<sup>4</sup> t/a, 1989 年达到设计能力。现在处于生成后期, 边坡稳定问题已经成为制约露天矿生产的决定性因素。

平庄露天矿位于平庄煤田中部, 属于哈尔滨山构成的 EN 向低山丘陵坡地, 露天矿开采前地势基本呈西高东低形态。采矿作业推进方向, 即矿坑扩展方向自东向西由低向高发展。矿坑东侧为非工作帮, 是山麓与平原的交界处, 主要有上部第四系表土层和下部杏园组砂岩、页岩层两层, 地形标高一般为+540 m。矿坑西侧是工作帮, 自上而下分布有第四系松散岩组、第三系破裂~半松散岩组、侏罗系上部砂岩-砂泥岩岩组、碎裂镶嵌结构辉绿岩组和复合结构煤层, 山丘最高标高为+713 m。采矿作业推进方向自山丘与平地交接处开始, 向山丘方向扩展, 工作帮平均标高大于非工作帮, 煤层埋藏标高越来越低和山丘高度加大, 使工作帮边坡随采矿作业的延续而不断加高。

#### 6.1.2 远程监控设计及实施

监测点的布置要求有利于准确及时反应滑动力的变化。沿边坡走向重点布置在裂隙发育的 4400 和 4600 剖面附近位置, 又兼顾其他区域; 垂直边坡走向监测点的布置尽量使 2~3 个点形成一个监控剖面。

西露天矿非工作帮 488 站所属边坡, 是西露天矿铁路运输通道的咽喉部位, 属于顺层边坡。对于非工作帮 488 站所属边坡的监控目标是实时掌握边坡的稳态变化, 及时、准确地确定加固时机及加固位置和工作量。根据边坡工程条件, 对重点边坡共布置远程监测点 15 个, 分为 2 个监测区域, 大体形成 5 个监测剖面 and 两个补充单点。非工作帮重点边坡的远程监控分区见图 10。



图 10 非工作帮重点边坡监控分区

Fig.10 Monitoring subarea of non-working wall of important slope

西露天矿工作帮边坡，属于反倾逆层边坡。随着开采边界的逐渐到达，延长矿山服务年限的唯一途径，是加大工作帮边坡角实行陡帮开采。对工作帮边坡进行远程监控的目的，在于实时掌握陡帮边坡的稳定状态，为陡帮开采的安全生产决策提供科学依据。陡帮边坡共设置远程监测点 7 个。图 11 为其中一个监测点的远程摄动监控设施现场安装图。



图 11 远程摄动监控设施现场安装图

Fig.11 Field installation picture of remote perturbation monitoring system

对于非工作帮和工作帮监控数据均实时远程无线传输到北京监控中心。图 12 为位于中国矿业大学(北京)的远程摄动监控系统主界面。



图 12 远程摄动监控系统主界面

Fig.12 Main interface of remote perturbation monitoring system

### 6.1.3 监控曲线的模式识别及预测预报

图 13 为非工作帮边坡各监测点开始监控以来第二监控区各监测点的监测曲线。分析其曲线特征可知，虽然个别点摄动力短时间波动较大，波动幅度达到了 58 kN，但总体上仍然很平稳没有持续增长的变化趋势。其他各点的监测数据曲线显示，没

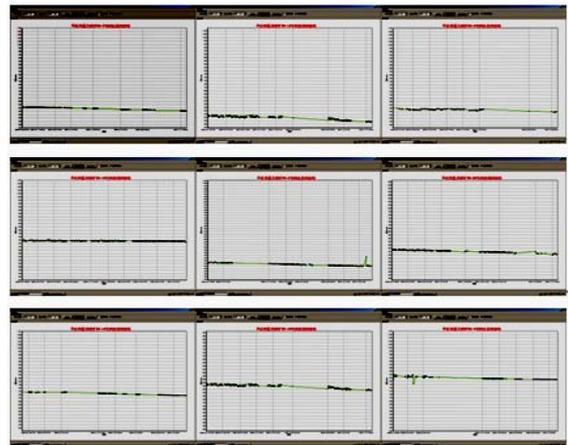
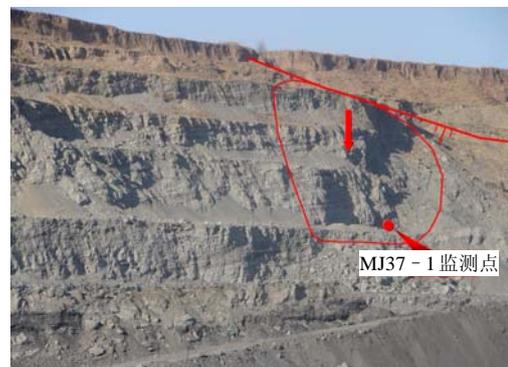


图 13 第二监控区监测曲线(稳定状态)

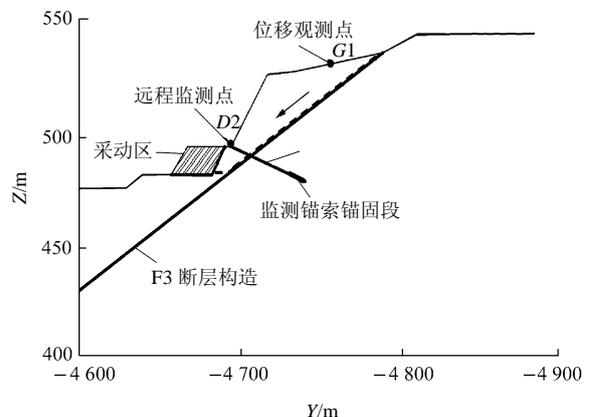
Fig.13 Monitoring curves of the second monitoring subarea (stable state)

有持续走高的趋势。各监测点监控曲线总体符合稳定预警模式，非工作帮边坡岩体处于安全稳定状态。

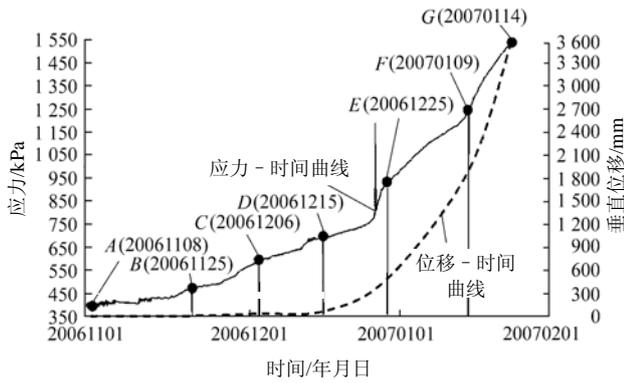
图 14 为工作帮西北边坡 MJ37-1 监测点远程摄动监控与位移监测对比曲线。分析滑动力应力曲线特征，监测点滑动力总体上有持续增长的变化特点，监控曲线形态特征符合滑坡模式，并且滑动力曲线明显优于位移曲线。根据监控预警准则，当摄动力监控值达到初始值的 1.4~2.0 倍即发出滑坡预



(a) 监测点分布图



(b) 监测点剖面图



(c) 监测点应力监控曲线与位移曲线对比图

图 14 工作帮边坡 MJ37 - 1 点监控曲线(非稳定状态)

Fig.14 Monitoring curves of working wall slope at point MJ37 - 1(instable state)

警, 曲线到达点 C 后进行了预警, 从位移曲线及图片上看, 当应力到达点 C 时, 表面基本上没有位移。应力曲线到达点 D 时, 表面出现不连续裂纹。当滑动力曲线到达点 E 时, 表面的不连续曲线开始贯通, 从位移曲线上可以看出要发生位移了, 此时离系统发生预警已有 20 d。当滑动力曲线到达点 F 时, 滑坡体发生滑动, 其裂缝平均宽度为 0.30 m, 落差为 0.33 m。当滑动力曲线到达点 G 时, 裂缝平均宽度为 0.50 m, 落差为 0.86 m, 滑落体掩埋监测设备, 监测结束。滑坡预警时间比实际滑坡时间提前一个月, 生产企业根据预警情况及时调整生产计划, 最大限度的避免了滑坡给生产造成的不良影响。对比该点的滑动力曲线与位移曲线, 该系统提前于刚体位移监测 3 周发出预警。图 15 为工作帮西北部边坡滑坡的全过程。



(e) 点 G 时裂缝一侧继续下沉

(f) 滑坡后景象

图 15 工作帮西北部边坡滑坡过程

Fig.15 Vision processes of landslide at northwest working wall

### 6.2 西气东输工程边坡稳定性监控实例

#### 6.2.1 工程概述

西气东输工程边坡稳定性监控段位于子长县余家坪乡王家凹村黑山寺, 西气东输管线桩号为 DD258~DD259。管线穿越原为黄土陡坡, 管线施工时经人工整平为一平台, 目前对管线工程来说形成了上、下边坡。地貌单元属黄土梁峁之斜坡地貌。

根据野外钻探和室内土工试验, 本场地地层由第四纪全新世人工填土, 第四纪晚更新世风积黄土、残积古土壤, 第四纪中更新世风积黄土组成, 监测点地质剖面图如图 16 所示。

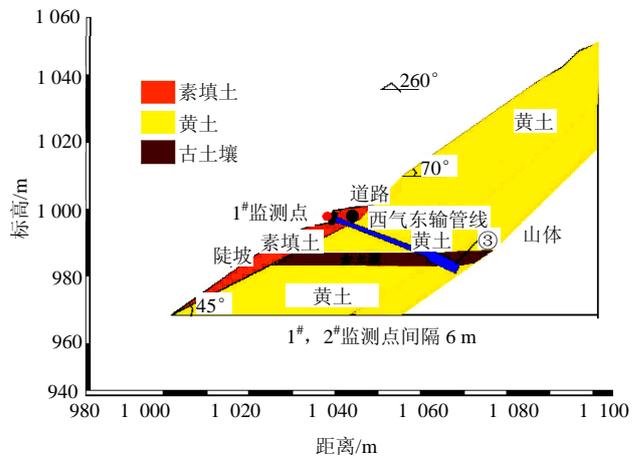


图 16 西气东输监测点剖面图

Fig.16 Section plan of monitoring points of West-to-East Gas Transmission Project



(a) 点 C 时表面无位移

(b) 点 D 时不连续裂缝



(c) 点 E 时裂缝贯通

(d) 点 F 时裂缝一侧下沉

#### 6.2.2 远程监控设计及结果分析

应用滑坡地质灾害远程监测预报系统在西气东输延安段重点边坡设置了 2 个监测点, 监测点位于坡面下 2.4 处, 监测点水平间距 6 m, 监测点分布如图 17 所示。

图 18 为西气东输边坡 1#监测点远程摄动监控曲线。分析曲线特征, 2008 年 2 月 21 日监测曲线出现陡然上升趋势, 准确预报了管线所在边坡裂缝的发生(见图 19(a)), 2008 年 3 月 13 日, 裂缝贯通(见



图 17 西气东输监测点分布图

Fig.17 Distribution map of monitoring points for West-to-East Gas Transmission Project

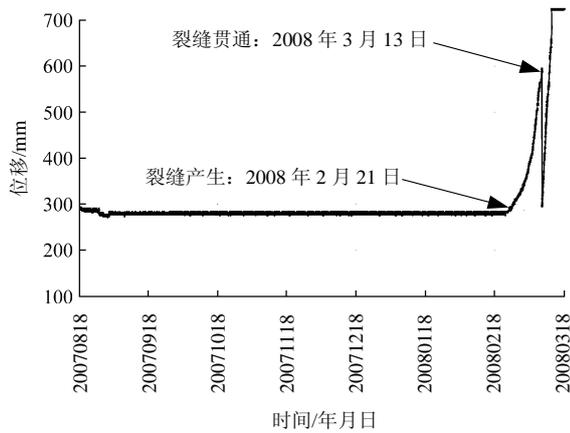


图 18 西气东输 1#监测点监控曲线

Fig.18 Monitoring curves of monitoring point No.1 of West-to-East Gas Transmission Project



(a) 裂缝产生(2008年2月21日)



(b) 裂缝贯通(2008年3月13日)

图 19 现场观察的裂缝

Fig.19 Observed cracks on spot

图 19(b))。根据预报结果, 及时对边坡进行了加固处理, 从而保证了管线的安全。

### 6.3 灵宝罗山矿区滑坡体稳定性监控实例

#### 6.3.1 工程概述

罗山矿区滑坡体位于河南省灵宝市阳平镇桑园村, 海拔 680~980 m。首次山体滑坡发生于 1987 年 11 月, 滑坡体斜长 192 m, 宽 80~120 m, 滑坡体体积 40 m<sup>3</sup>, 造成 3 人死亡, 经济损失人民币达 900 万元, 企业停产近 1 a。

随着矿产资源开采规模的不断扩大, 滑坡体的范围逐步扩大, 现形成了 I, II, III, IV 滑坡体, 总面积 17.96×10<sup>4</sup> m<sup>2</sup>, 如图 20 所示。2001 年后, 又连续发生了 3 次以上小型滑坡, 形成塌陷坑 14 个, 体积 14.393×10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>, 地裂缝 22 条, 长度 2 160 m。严重地威胁着矿山的可持续安全开采。

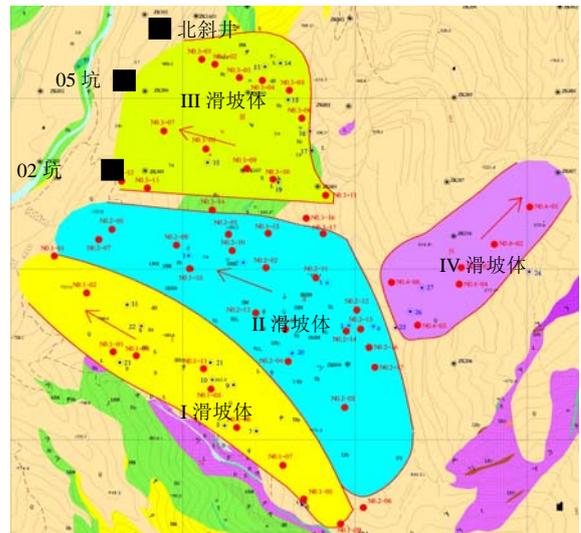


图 20 罗山滑坡体工程地质平面图

Fig.20 Geological sketch of Luoshan landslide

中国矿业大学(北京)岩土工程研究中心针对罗山矿区滑坡体实际情况, 提出“利用地下采矿治理地表滑坡”的理念, 并提出了相应的设计方法, 同时对采矿影响下滑坡体的稳定性进行动态远程监测。

#### 6.3.2 远程监控设计及结果分析

根据远程监测原理和实际断面工程地质概况, 在保证边坡稳定性的前提下, 采用经济的参数进行滑坡体远程监测设计, 共布设监测线 11 条, 监测点 53 个, 罗山矿区西山滑坡体监测点剖面图见图 21。

罗山矿区按照新的矿山开采设计方法进行采矿, 经过近 4 个月的现场监测, 53 个监测点总体上

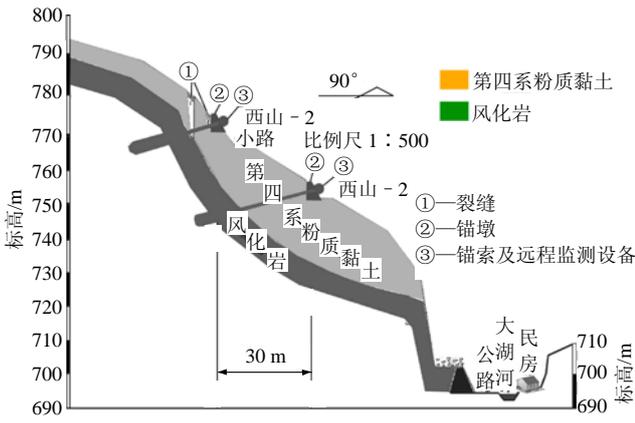


图 21 罗山矿区西山滑坡体监测点剖面图

Fig.21 Sketch plan of monitoring points of Xishan landslide in Luoshan mine area

处于稳定状态, 试验数据证实了“新的开采方案没有加剧滑坡而使滑坡体变得稳定”的科学预测是完全正确的。图 22 为罗山矿区西山滑坡体监测点监控曲线。分析曲线特征, 两个监测点摄动力总体上保持恒定, 边坡处于稳定状态, 监控曲线形态特征符合稳定模式。

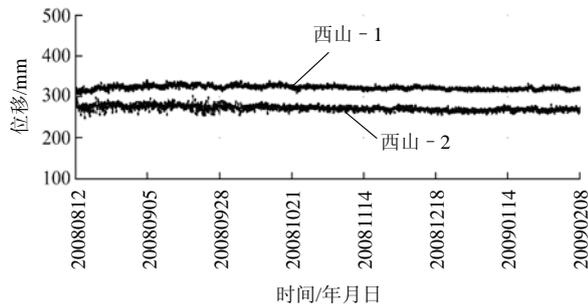


图 22 罗山矿区西山滑坡体监测点监控曲线

Fig.22 Monitoring curves of monitoring points of Xishan landslide in Luoshan mine area

### 6.4 广坪镇地震灾区滑坡远程监测实例

#### 6.4.1 工程概述

广坪镇地震灾区滑坡体位于陕西省汉中市宁强县广坪镇。2008 年 5 月 21 日, 受汶川 8.0 级大地震影响, 该镇凤凰街北山边坡失稳破坏, 坡顶裂缝宽度 10~400 mm, 长度约 30 m。坡脚处挡土墙变形严重, 直接威胁着坡脚处 37 户(150 人)居民的生命安全。

#### 6.4.2 远程监控设计及结果分析

2008 年 8 月, 根据远程监测原理和实际断面工程地质概况, 在保证广坪镇凤凰街北山边坡稳定性的前提下, 采用经济的参数进行广坪镇滑坡体远

程监测设计, 在凤凰街北山共布设监测点 3 个(见图 23, 24)。



图 23 广坪镇滑坡体监测点分布图

Fig.23 Distribution map of monitoring points of landslide in Guangping Town

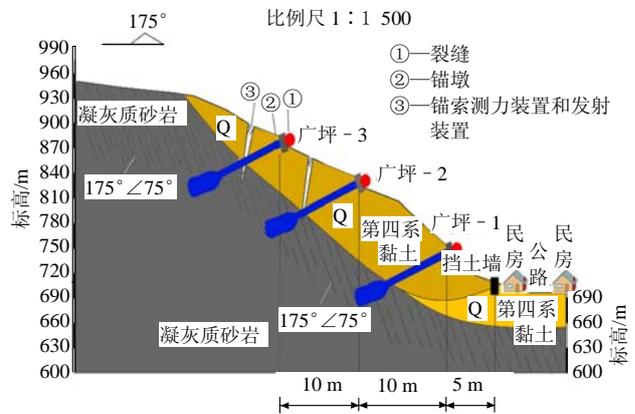


图 24 广坪镇滑坡体监测点剖面图

Fig.24 Cross-section of monitoring points of landslide in Guangping Town

经过近 4 个月的现场监测, 3 个监测点总体上处于稳定状态。图 25 为广坪镇滑坡体 3 个监测点远程摄动监控曲线。分析曲线特征, 监测点摄动力总体上保持恒定, 边坡处于稳定状态, 监控曲线形态特征符合稳定模式。

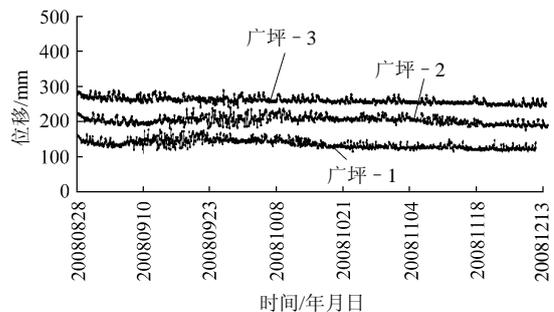


图 25 广坪镇滑坡体监测点监控曲线

Fig.25 Monitoring curves of monitoring points of landslide in Guangping Town

## 7 结 论

(1) 研究表明, 边坡岩体内应力会不断发生变化, 当滑动力大于岩土体的滑动抗力后, 会发生变形和滑动, 其滑动力变化超前于表面位移的发生, 捕捉边坡岩体滑动力的变化超前于对岩体位移的监测。

(2) 提出了“天然力学系统”与“人为力学系统”相结合的“可测力学系统”的设计思想, 建立了滑坡摄动力学模型, 推导了摄动力和滑动力之间的函数关系, 从而反映超前滑动力的变化, 实现对滑坡灾害的准确预报。

(3) 研制了滑坡地质灾害远程监测预报系统, 包括现场监测子系统和室内监测子系统, 开发了相关监测软件、控制监测核心电路模块和预测预报技术, 实现了对滑坡灾害和边坡稳态的实时远程智能监测。

(4) 提出了边坡稳定、滑坡、下雨软化、爆破扰动等预警模式和相应的预测预报方法。

(5) 该监测系统和预测预报方法在露天矿开采工程、西气东输工程、金矿开采及地震灾区的滑坡灾害及边坡应力状态监测中成功应用和推广, 经济和社会效益显著。其中滑坡监测的前兆现象十分明显, 比常规方法大为提前, 为滑坡灾害预测预报提供了有效的手段。

### 参考文献(References):

- [1] 《中国减灾》编辑部. 全国灾害实录(2004年8, 9月)[J]. 中国减灾, 2004, (10): 61 - 64.(Editorial Office of Disaster Reduction in China. Record of national disasters(August and September in 2004)[J]. Disaster Reduction in China, 2004, (10): 61 - 64.(in Chinese))
- [2] 吕建红, 袁宝远. 边坡监测与快速反馈分析[J]. 河海大学学报, 1999, 27(6): 98 - 102.(LU Jianhong, YUAN Baoyuan. Study on slope monitoring and quick feedback[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(6): 98 - 102.(in Chinese))
- [3] 罗志强. 边坡工程监测技术分析[J]. 公路, 2002, (5): 45 - 48.(LUO Zhiqiang. Study on monitoring technology of slope engineering[J]. Highway, 2002, (5): 45 - 48.(in Chinese))
- [4] 金爱兵, 孙金海, 吴顺川. 露天矿深部开采边坡稳定性分析与治理方案研究[J]. 金属矿山, 2005, (6): 5 - 8, 13.(JIN Aibing, SUN Jinhai, WU Shunchuan. Analysis of slope stability in deep mining of an open-pit mine and its control scheme[J]. Metal Mine, 2005, (6): 5 - 8, 13.(in Chinese))
- [5] 夏柏如, 张 燕, 虞立红. 我国滑坡地质灾害监测治理技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2001, (增): 87 - 90.(XIA Bairu, ZHANG Yan, YU Lihong. Monitoring and treatment technology of landslide geological disasters in China[J]. Exploration Engineering(Drilling and Tunneling), 2001, (Supp.): 87 - 90.(in Chinese))
- [6] 胡 伟, 李庶林. 岩质边坡稳定性分析中的 AE 技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(3): 9 - 11.(HU Wei, LI Shulin. A study on the acoustic emission technology in the analysis of rock slope stability[J]. Mining Research and Development, 2002, 22(3): 9 - 11.(in Chinese))
- [7] 郭晓岚, 涂亚庆. 滑坡监测的一种新方法——TDR 技术探析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 740 - 744.(WU Xiaolan, TU Yaqing. New approach of landslide activity monitoring—probing into TDR technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 740 - 744.(in Chinese))
- [8] 万华琳, 蔡德所, 何薪基, 等. 高陡边坡深部变形的光纤传感监测试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2001, 23(1): 20 - 23.(WAN Hualin, CAI Desuo, HE Xinji, et al. Experimental research on monitoring deep deformation of high-steep slopes by using optical fiber sensing[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2001, 23(1): 20 - 23.(in Chinese))
- [9] 郭晓岚, 涂亚庆. 滑坡监测方法及新进展[J]. 中国仪器仪表, 2001, (1): 10 - 12.(WU Xiaolan, TU Yaqing. Methods and new development of landslide activity monitoring[J]. China Instrumentation, 2001, (1): 10 - 12.(in Chinese))
- [10] 周 策, 陈文俊, 汤国起. 滑坡崩塌岩体推力监测系统的研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2004, (1): 43 - 46.(ZHOU Ce, CHEN Wenjun, TANG Guoqi. Study on rock body thrust monitoring system with OTDR distributing optical fiber[J]. Exploration Engineering (Drilling and Tunneling), 2004, (1): 43 - 46.(in Chinese))
- [11] PERSKI Z, RAMON H, WOJCIK A, et al. InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland[J]. Engineering Geology, 2009(to be published).
- [12] 代志勇, 袁 勇, 刘永智. 基于光纤应力传感的山体滑坡监测系统研究[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(3): 51 - 53.(DAI Zhiyong, YUAN Yong, LIU Yongzhi. Research on monitoring system for landslides based on fiber optic strain sensing[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2004, 2(3): 51 - 53.(in Chinese))
- [13] 何满潮, 崔政权, 蒋宇静, 等. 三峡库区边坡稳态 3S 实时工程分析系统研究[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 112 - 117.(HE Manchao, CUI Zhengquan, JIANG Yujing, et al. Study on 3S engineering analysis system of the slope stability in Three Gorges area[J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(2): 112 - 117.(in Chinese))
- [14] 叶 青, 赵全麟. 三峡工程库区滑坡监测几个问题的探讨[J]. 人民长江, 2000, 31(6): 7 - 9.(ZHANG Qing, ZHAO Quanlin. Problems about monitoring of landslides in TGP reservoir area[J]. Yangtze River, 2000, 31(6): 7 - 9.(in Chinese))
- [15] 何满潮. 露天矿高边坡工程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.(HE Manchao. High slope engineering in open-pit mine[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991.(in Chinese))