

# HSP超前地质预报技术在双护盾TBM 施工隧道中的应用

程德胜<sup>1</sup>, 汪旭<sup>2</sup>

(1. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 四川 成都 610093;

2. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 611731)

**摘要:**结合探测成果与实际开挖所揭露的围岩情况表明,HSP地质预报法对节理裂隙密集带、断层破碎带等地质异常情况响应较好,但在围岩较为破碎的洞段,震源能量衰减较大,因此为保证TBM掘进施工的安全,应增加相邻两次预报的搭接长度;基于掘进参数的模糊数学判别围岩结果与HSP探测结果基本吻合,该客观性评价表明了该方法具有较高的预报准确率,能够对TBM施工期间前方地质围岩情况做出可靠的判断。

**关键词:**双护盾TBM施工;超前地质预报;HSP;模糊数学

**中图分类号:**F407.1P315.75;U455.49

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-2184(2018)03-0177-05

## 0 引言

目前TBM已经广泛应用于各种类型的隧道施工,由于该设备对地质条件适应性较差<sup>[1]</sup>,因此要求对隧道地质条件有充分了解和准确把握,由于设计阶段的精度所限或其他原因,隧道设计与实际地质情况相差较大,致使针对TBM施工的隧道超前地质预报研究日显突出。由于TBM施工隧道环境的复杂性,在该类隧道中开展一般隧道超前地质预报方法存在较大的难度,且预报效果也会受到众多干扰源的影响,难以为TBM的安全掘进提供指导作用<sup>[2]</sup>。然而,受限于方法技术的发展及成本的控制,目前TBM施工段超前地质预报主要方法多是从传统钻爆法改良而来<sup>[3]</sup>,由于TBM施工隧道的特殊性,这些方法适应性较差,预报准确率有待提高。PETRONIO等<sup>[4,5]</sup>提出了应用于TBM施工的隧道随钻地震波预报法(Tunnel - Seismic - While - Drilling,简称TSWD),该方法利用TBM掘进机刀盘滚刀切割岩石所激发信号作为震源信号,通过对安装在刀盘的检波器所记录的震源信号(pilot signal)和在隧道外的接收信号进行互相关运算,能够有效提取到隧道前方不良地质体的反射波,并据此对前方地质条件作出判断。该方法实现了在TBM不停机的条件下对前方围岩变化情况进行预报,对TBM施工起到了积极的指导作用。国

内,李苍松等<sup>[6]</sup>针对TBM隧道施工的特殊性研究了HSP声波超前地质预报方法,对掌子面前方的不良地质体进行了有效预报。但该类被动源方法目前使用的都是较大的偏移距,且主要是利用透射波进行地质预报,在具体实施时,难度较大,且震源能量衰减较多,降低了分辨率及预报准确率。

本文利用TBM掘进破岩所产生的地震波作为HSP超前地质预报的震源,通过对所采集的反射地震波进行反演成像,在西藏某公路隧道双护盾TBM掘进期间,提供了有关掌子面前方围岩和地质条件变化的信息,对减少因突发地质灾害造成的损失提供了技术支持。并根据实际围岩开挖观察结果以及基于TBM掘进参数的模糊数学判别结果,对长距离连续跟踪探测的HSP预报结果进行了评价。结果表明,该方法现场操作便捷,能够实现不停机状态下对前方地质情况进行探测,且探测精度较高。

## 1 方法原理

适用于双护盾TBM施工的HSP地质预报技术主要利用TBM掘进时滚刀破岩所产生的地震波作为探测的震源信号,该被动信号特征依赖于掘进参数、岩性和滚刀的状态,是连续随机震源,通过长时间的积累可以获得足够的能量,可作为震源信号进行地质探测,震源信号在隧道中的岩体内传播,当遇到存在波阻抗差异的地质界面时,如节理裂隙带、断层破碎带、岩溶等不良地质体

收稿日期:2018-05-08

时,便会发生反射<sup>[7]</sup>,反射波经过地层的传播,被检波器所接收,通过对检波器的具体布设,可实现阵列式数据采集,并通过深度域绕射扫描偏移叠加成像技术,进行反演解释。该方法数据处理的关键技术主要基于多源地震<sup>[8]</sup>及地震干涉技术。多震源地震技术是近年来发展起来的地震快速采集技术。它不考虑相邻时间激发炮之间前一炮信号对后一炮的影响,可以同步或近同步激发两个或两个以上的震源。地震干涉法的研究最早由CLAERBOUT等<sup>[9]</sup>提出,该方法能够在不知道震源特性的情况下通过波场之间的互相关重构来自地质构造的反射信息,从而对介质的构造特征进行探测。

图1为在双护盾TBM施工中进行HSP地质预报测试时的布置示意图。信号接收检波器在边墙两侧进行阵列式布设,接收自刀盘切割岩石所产生并传播的信号,本文所用HSP法现场操作便捷,测试时间短,能够减少来自隧道内台架、金属、高压电等的影响。

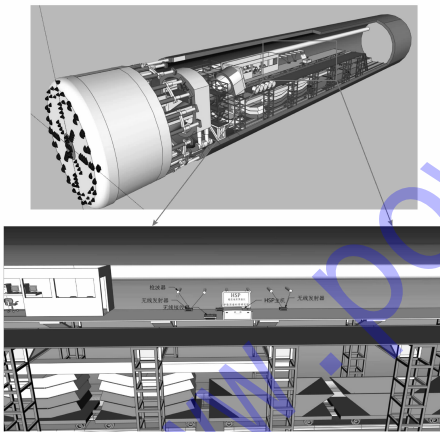


图1 HSP现场测试布置三维示意图

对于双护盾TBM施工隧道,信号采集和数据储存都通过无线发射器由主机内置计算机进行控制。每次测试时,采集一到两个掘进循环进尺的数据(1.8~3.6 m),数据量要求不少于800道,实际测试时接收传感器之间的间隔可根据现场条件具体确定。超前探测预报范围可达到80~100 m。

## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

西藏某公路隧道全长4 775 m,位于极高山亚区,是高原隆升、侵蚀最为强烈的地区,地形起伏

大,河谷深切,属典型的高山峡谷地貌,平均海拔达到4 000~5 500 m。隧道内径8.4 m,开挖洞径9.1 m,隧道最大埋深约为830 m。该隧道采用双护盾TBM施工,区内岩性以花岗片麻岩、条带状混合片麻岩、眼球状混合片麻岩、肠状混合片麻岩等组成,片麻理发育,岩石总体属中硬岩-坚硬岩,受片麻理影响,岩石强度各项异性较明显。

地质构造形迹主要表现为韧性剪切带、次级小型断层、长大裂隙和节理裂隙系统,对隧道稳定性起着控制作用。隧道横穿一个背斜,与背斜枢纽方向大角度相交,该区域新构造运动强烈,地震活动频繁,其50年超越概率10%地震动峰值加速度 $\geq 0.4 g$ ,对应地震烈度 $\geq IX$ 度,区域构造稳定性差,加之埋深较大,因此TBM卡机风险较大,掘进期间的超前地质预报将非常重要。本文采用HSP超前地质预报技术对该隧道进行了连续探测,主要对开挖工作面前方可能开挖揭露的断层、破碎带、软弱夹层等不良地质体(带)发生的可能性、规模及性质等进行预报。

### 2.2 预报成果及开挖验证

HSP超前地质预报具体实施为,在TBM保养期间,实施布极孔钻孔和掌子面地质情况观察分析;在TBM掘进施工过程中,实施HSP法数据采集。本文对典型里程段的预报成果进行了分析说明,并结合实际开挖围岩情况对预报成果进行验证。

在隧道施工至K10+072附近时,HSP探测结果显示前方至少超过50 m的范围内存在反射异常(见图2),具体分析结果如表1所列,围岩情况极差,当天发出预警,隧道在加强支护的条件下继续掘进,之后TBM遭遇大范围的断层破碎带,多次发生塌方现象,具体围岩开挖揭露情况如图3所示。

除上述里程范围发生较大面积的塌方外,掌子面在里程K10+545~K10+550、K10+577~K10+586范围内也发生了小范围塌方,该异常围岩情况同样在HSP超前地质预报成果图中有明显反射异常(见图4),具体分析结果如表2所列。

隧道掘进1 200 m期间,采用HSP法对前方实施了连续探测预报,预报结果均果对TBM掘进施工起到了积极的指导作用,预报结果与实际开挖均较为符合,图5为该掘进期间对HSP探测结果。

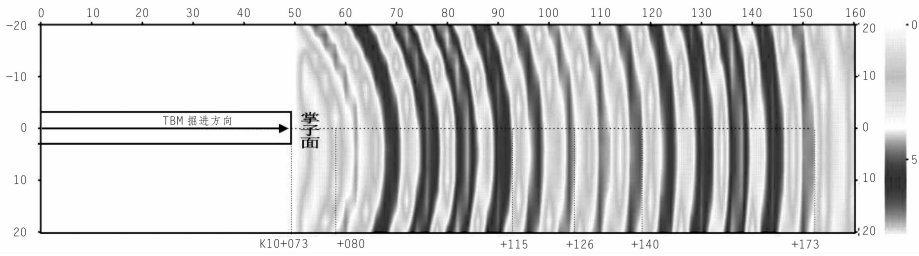


图 2 K10+072 掌子面 HSP 探测反演分析成果

表 1 K10+072 掌子面测试分析结果

预报范围	探测结果
K10+073 ~ K10+126	该段探测范围位于掌子面前方 53 m,有明显反射异常,初步判断围岩完整性和稳定性较差,可能存在间断式节理裂隙发育带,局部可能存在塌方现象,需注意里程 K10+073 ~ K10+084、K10+088 ~ K10+108、K10+117 ~ K10+126。
K10+126 ~ K10+173	该段探测宽度为 47 m,有明显反射异常,初步判断围岩完整性和稳定性较差,可能存在空腔、塌方现象。其中,K10+126 ~ K10+140 段,需注意局部区域可能出现的塌方现象;K10+140 ~ K10+173 段,可能存在节理裂隙密集发育带或断层破碎带。

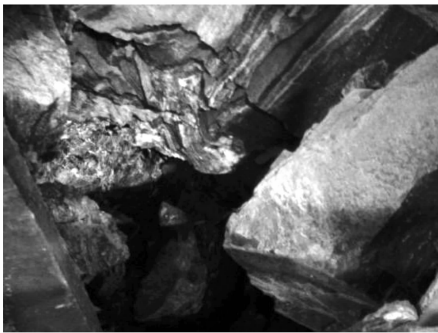


图 3 K10+096 位置 TBM 前方围岩照片

双护盾 TBM 在掘进期间,由于其施工特点,所露围岩有限,对围岩地质特征的观察受到很大制约,对围岩情况的判断仅能 - 依靠地质观察窗和出渣情况,判断往往会存在一定的主观性以及误差,因此必须充分利用各种手段获得的信息,适时对围岩状况进行判断,研究表明通过对掘进参数进行分析,能够对围岩地质情况进行有效判别,能够客观的反应所遇围岩变化情况<sup>[10]</sup>,因此本文选取掘进时的推力及贯入度,利用模糊数学方法,对 TBM 掘进过程中围岩状况进行了判别,并将判别结果与 HSP 预测结果进行对比分析。

### 3 分析与讨论

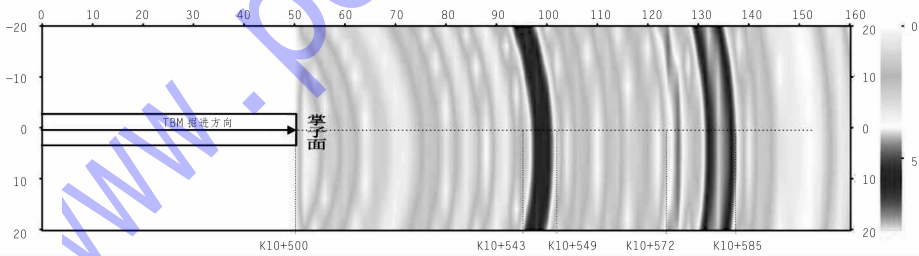


图 4 K10+500 掌子面 HSP 探测反演分析成果

表 2 K10+500 掌子面测试分析结果

测试范围	探测结果
K10+500—K10+543	该段探测结果位于掌子面前方 43 m,未见明显反射异常,围岩稳定性较好、完整性较好。
K10+543—K10+549	该段探测结果有明显反射异常,初步判断围岩完整性和稳定性较差。
K10+549—K10+572	该段探测结果未见明显反射异常,围岩整体稳定性较好、完整性较好。
K10+572—K10+585	该段探测结果局部有明显反射异常,初步判断围岩完整性和稳定性较差,局部可能存在节理裂隙和破碎带。
K10+585—K10+600	该段探测结果未见明显反射异常,围岩整体稳定性较好、完整性较好。

与实际开挖情况所进行的统计对比。从图中 可知围岩变化情况与掘进参数的变化规律存在较

高的相关性,因此,本文将对掘进参数进行详细的分析,对预报成果进行更为客观性的评价。

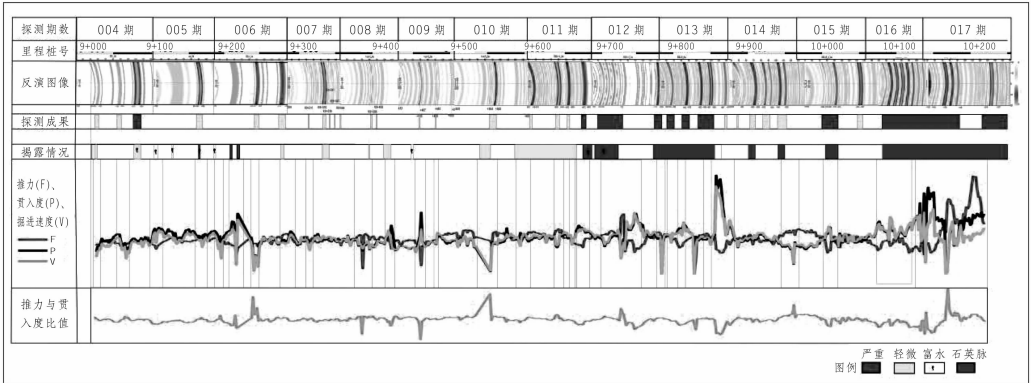


图5 HSP 地质预报成果与揭露情况统计

在 TBM 掘进过程中,若推力与贯入度均水平同步、均匀变化,说明围岩情况正常,若推力与贯入度的变化情况出现较大比例的突变,则表明 TBM 所经过的围岩地层情况发生变化或其掘进姿态存在问题等。因此本文对应每一环掘进时的推力及贯入度,对围岩进行了模糊判别。剔除人为原因导致的异常掘进参数,共选择了 633 环的掘进参数,所形成的掘进特性空间为  $\Omega_i$ , 每一环的掘进参数构成总空间  $\Omega_i$  的一个子空间  $\Omega_i$ 。将参数点  $(x_i, y_i)$  描绘在  $F-R$  (推力-贯入度) 平面中即可得到如图 3 所示的子空间  $\Omega_i$  分布。在该子空间中,将掘进参数点进行回归分析,取得回归曲线  $y = kx$ , 本文中实际掘进参数经回归分析后得到  $k = 1325.9$ , 即回归曲线为  $y = 1325.9x$ 。根据回归分析的预测与控制原理<sup>[11]</sup>,  $y$  的置信水平为  $1 - \alpha$  的预测区间近似为:

$$y_1 = kx - \sigma_e u_{1-\alpha/2} \quad (1)$$

$$y_2 = kx + \sigma_e u_{1-\alpha/2} \quad (2)$$

式中  $u_{1-\alpha/2}$  为标准正态分布的  $1 - \alpha$  的上分位点,本文中取置信水平为  $1 - 0.05$ , 因此可查表获得  $u_{1-0.05/2} = 1.96$ ;  $\sigma_e$  为回归分析的残差均方差,其值为 2557.04。

至此,在空间  $\Omega_i$  中建立了两个集合,即 A:  $y_1 = kx - b$ , B:  $y_2 = kx + b$ , 其中  $b = \sigma_e u_{1-\alpha/2} = 5011.79$ , 它们将空间  $\Omega_i$  划分为 I、II、III 三个区域,如图 6 所示。

当掘进参数点  $(x_i, y_i)$  落在 I 区内时,推力与贯入度基本成比例变化,表明 TBM 在正常围岩情况中掘进(包含了较软及较硬围岩情况);而当掘

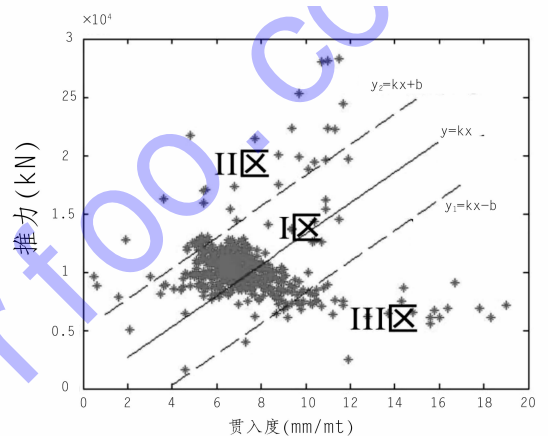


图6 掘进参数回归分析所确定模糊分类集合

进参数点  $(x_i, y_i)$  落在 III 区内时,推力增加幅度较大,但贯入度却仍保持在一个较低的水平,表明 TBM 刀盘被挤压性岩石所卡住或遭遇塌方导致刀盘荷载增加,或正在穿越的围岩地层硬度异常增加;当掘进参数点  $(x_i, y_i)$  位于 III 区内时,推力并未明显增加,但贯入度异常增高,表明围岩节理裂隙较为发育或破碎程度严重,容易发生塌方等灾害。采用欧式距离对围岩变化情况进行了更为详细的模糊判别,每一环掘进参数点  $(x_i, y_i)$  与模糊集合 A、B 的距离(按点到直线的距离计算)分别按下式计算

$$d_{1i} = \frac{|kx_i - y_i - \sigma_e u_{1-\alpha/2}|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad y_i < y_1(x_i) \quad (3)$$

$$d_{2i} = \frac{|kx_i - y_i + \sigma_e u_{1-\alpha/2}|}{\sqrt{k^2 + 1}} \quad y_i > y_2(x_i) \quad (4)$$

对所得的各距离进行归一化处理,分别得到  $d_{01i}$ 、 $d_{02i}$ ,根据归一化距离与隶属度的关系,可得掘进参数点  $(x_i, y_i)$  对模糊集合 A、B 的隶属度分别为

$$\mu_{\bar{A}} = \exp(-d_{01i}/(1-d_{01i})) \quad (5)$$

$$\mu_{\bar{B}} = \exp(-d_{02i}/(1-d_{02i})) \quad (6)$$

数据点  $(x_i, y_i)$  与模糊集合的距离越大,隶

属度越小。若隶属度  $\mu_{\bar{A}}$ 、 $\mu_{\bar{B}}$  接近 1.0,表明掘进异常程度轻微;而值越小,则表明围岩异常情况严重。本文中对于隶属度小于 0.6,则认为其围岩异常情况较为严重,记录 II 区及 III 区内的异常点的对应里程及其异常程度与 HSP 预报结果对比如图 7 所示。

对比根据由掘进参数模糊判别的结果与 HSP

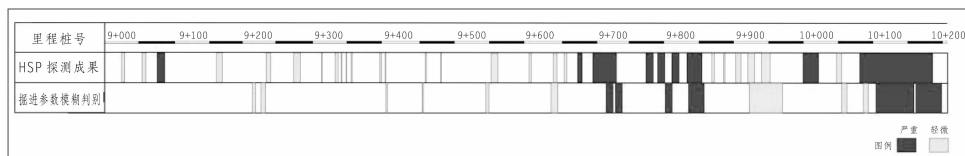


图 7 HSP 地质预报成果与掘进参数模糊判别对比

超前探测预报结果可以看出,HSP 预报结果与模糊分类结果存在较高的相关性,其中也存在 HSP 预报结果中部分较小异常在掘进中并未引起掘进参数的异常变化。总体对比结果表明 HSP 探测结果具有较高的准确性,能够在双护盾 TBM 施工期间对前方地质围岩情况做出可靠的判断,有效指导其施工。

#### 4 结 语

本文通过 HSP 超前地质预报技术在西藏某公路隧道双护盾 TBM 掘进期间的应用,得出以下结论:

(1)结合探测成果与实际开挖所揭露的围岩情况表明,HSP 地质预报法对节理裂隙密集带、断层破碎带等地质异常情况响应较好,但在围岩较为破碎的洞段,震源能量衰减较大,因此为保证 TBM 掘进施工的安全,应增加相邻两次预报的搭接长度;

(2)基于掘进参数的模糊数学判别围岩结果与 HSP 探测结果基本吻合,该客观性评价表明了该方法具有较高的预报准确率,能够对 TBM 施工期间前方地质围岩情况做出可靠的判断;

(3)HSP 超前地质预报技术不影响 TBM 施工,前期准备工作少,现场操作便捷,针对双护盾 TBM 隧道施工预报适应性较强,在对西藏某公路隧道双护盾 TBM 施工阶段连续探测期间,准确提供了有关掌子面前方围岩地质情况变化的信息,为提前采取相应措施、减少因灾害造成的损失提供了技术支持,具有较高的实用价值。

目前适用于双护盾 TBM 施工隧道的 HSP 超前地质预报方法主要是利用纵波信号,对于隧道

突涌水的预报,效果还不是很理想,而横波对含水水体等介质较为敏感,因此需进一步研究横波超前地质预报方法,提高对突涌水等灾害的预报准确度。此外,基于文中的研究内容,还需采取数值模拟手段对 TBM 刀盘滚刀破岩所激发的地震波场进行详细研究,综合考虑影响多震源地震波场的各种因素,以便采取相应的数据处理方法,提高采集数据的质量。

#### 参考文献:

- [1] 姚宗弟. 隧道掘进机施工技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [2] POLETTI F, PETRONIO L. Seismic interferometry with a TBM source of transmitted and reflected waves[J]. Geophysics, 2006, 71(4): 85-93.
- [3] 李玉波. 三维地震波法超前地质预报在引汉济渭工程 TBM 施工中的应用[J]. 水利水电技术, 2017, 48(8): 131-136.
- [4] PETRONIO L, POLETTI F. Seismic - while - drilling by using tunnel boring machine noise[J]. Geophysics, 2002, 67: 1798-1809.
- [5] PETRONIO L, POLETTI F, Schleifer A. Interface prediction ahead of the excavation front by the tunnel - seismic - while - drilling (TSWD) method[J]. Geophysics, 2007, 72(4): 39-44.
- [6] 李苍松, 谷婷, 丁建芳, 等. 适合于 TBM 施工的 HSP 声波反射法地质超前预报[J]. 工程地质学报, 2008, 16(S1): 111-115.
- [7] 何发亮, 李苍松. 隧道施工期地质超前预报技术的发展[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(3): 12-14.
- [8] 王汉闯, 陈生昌, 陈国新, 等. 多震源地震数据偏移成像方法[J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 918-931.

(下转第 190 页)

水电站发现机组尾水位较设计值偏高的情况,如果停机消缺,将严重影响发电效益。针对这一情况,搭载单波束测深仪与GPS系统的先进智能无人船出现在了现场,对机组尾水水面、水下地形进行了全面测量,得出尾水泥沙淤积造成水位异常的精准结论。

无人船仅是大渡河库坝安全管理中心运用先进监测技术的一个缩影。除了水上无人船外,该中心还引进了水下无人潜航器、水下机器人、多波束声纳探测、三维激光扫描等检测新技术,结合实际情况,解决深水、浑水以及动水等复杂环境下的水下检测难题。高画质的水下视频和清晰的三维测量成果,还让以往很难检测的水下缺陷无处遁形,大大降低了作业成本,增加了发电效益。

除了科学高效的水下检测手段,大渡河库坝安全管理中心还运用无人机,对水库大坝进行巡检,机载高清摄像头如同“火眼金睛”,担负起人工无法涉足区域测量的重任。目前,大渡河库坝安全管理中心正在探索无人机搭配三维激光扫描等技术,对水库大坝进行全景化监测,力争早日实现“水陆空”立体监测模式。

#### 预警 未卜先知

大量信息化技术的应用,提升了大渡河库坝安全管理中心安全管理水平;分布全流域的近2万个监测点和每天超4万个的监测数据,又让大渡河库坝安全管理中心的大数据管理日益成熟,安全效益日益突显。

(责任编辑:卓政昌)

(上接第181页)

[9] CLAERBOUT J. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response [J]. *Geophysics*, 1968, 33: 264 - 269.

[10] 宋克志,袁大军,王梦恕. 基于盾构掘进参数分析的隧道围岩模糊判别[J]. *土木工程学报*, 2009, 42(1): 107 - 113.

[11] 张启锐. 实用回归分析[M]. 北京:地质

出版社, 1988.

2016年4月30日早8点,监测系统检测到大岗山水电站附近郑家坪滑坡体位移超过42毫米/天。毫米级位移是肉眼无法观察的距离,但是依靠精准的数据采集,大渡河库坝安全管理中心及时发布预警,通过国家能源集团大渡河公司与地方取得联系,对滑坡体下方省道路段实施交通管制。4小时后,该处发生总量2000立方米的山体塌方。由于预警及时、处置得到,避免了自然灾害带来的人民群众生命财产损失。

在“智慧大渡河”体系建设中,大渡河库坝安全管理中心根据实际情况,提出了依托大数据、云计算平台和流域库坝安全信息化系统,建立大渡河流域电站大坝安全风险预警管理体系,对超标洪水、超限降雨、地震监控、梯级电站联动联防等9大风险点提供预警,形成库坝安全管控不断演进的闭环智慧管控模式。目前该系统已在龚嘴、铜街子2个电站成功投入试运行。

在不断升级的智慧管理中,大渡河库坝安全管理中心取得了9项实用新型专利和2项软件知识产权,获得全国设备创新成果和全国电力职工技术成果一等奖各1项、全国智慧电厂创新成果2项、集团公司科技进步二等奖1项、三等奖2项。这些成果,应用性高、可移植、易于推广,并具有较高商业价值,有望于未来逐步走出流域、走向全国,让“智慧库坝”的先进理念和建设成果,保障更多水电站安全,为人民生命财产安全服务。

(责任编辑:卓政昌)

出版社, 1988.

#### 作者简介:

程德胜(1982-),男,汉族,湖北孝感人,工程师,硕士,主要从事水电站建设管理及施工技术的研究工作;

汪旭(1990-),男,四川喜德人,硕士,主要从事隧道超前地质预报及数值模拟方面的研究工作。

(责任编辑:卓政昌)

## 今夏四川电网用电负荷预计将突破3700万千瓦

6月21日,从国网四川省电力公司召开新闻发布会上获悉,入夏以来,四川电网最高用电负荷和日最高用电量均超去年同期水平,达到2793万千瓦和5.3亿千瓦时。而考虑到可能出现的极端天气,预计今年夏天,四川电网最高负荷约为3700万千瓦,同比增长12%,最大日用电量为7亿千瓦时,同比增长13%。此外,1-5月,成都电网最高负荷1122万千瓦,同比增长21.9%,据预计,今夏成都电网最高负荷为1250-1350万千瓦(含天府新区),最高负荷将会出现7月中旬至8月下旬。