

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.03.042

# 基于 SSP 地震散射剖面方法的水电站 高边坡地质勘测

李建伟, 洪振国

(云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

**摘要:** 地震散射剖面法可展现垂直剖面内岩土界面形态和深度、岩土介质波速的分布规律, 具有可识别比波长小得多的异常体、具有更高的分辨优点, 通过对腊寨水电站高边坡进行地震散射剖面法计算, 结果表明: 最上层由全强风化岩和第四系崩坡积物构成的松散层, 厚度大约 10 m; 下面是弱风化层, 厚度为 20 m~30 m; 弱风化层下面是微风化层, 其分布特点为两端薄中间厚, 厚底从左到有由 50 m 逐渐增加到 70 m 再逐渐减少到 30 m; 最底下一层为原岩。

**关键词:** 高边坡; 大变形; 勘测

中图分类号: TV742

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2016)03-0221-05

## High Slope Geological Survey of Hydropower Station Based on SSP Seismic Scattering Profile Method

LI Jianwei, HONG Zhenguo

(Yunnan Water and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research Institute, Kunming, Yunnan 650021, China)

**Abstract:** Seismic scattering profile method can display the vertical profile of rock soil interface morphology and depth, rock soil medium velocity distribution, the advantages are recognition is much smaller than the wavelength anomalous body, high resolution. The geological survey of Lazhai hydropower station high slope was finished by using seismic scattering profile method. The results showed that the top on the grounds is the strong weathered rock and quaternary colluvial accumulation composed of loose layer, the thickness is about 10 m, below which is weakly weathered layer with thickness of 20 m~30 m, weakly weathered layer below the weathered layer and its distribution characteristics at both ends of the middle of thick and thin, thick bottom from left to 50 m by gradually increased to 70 m decreased gradually to 30 m, the bottom layer is protolith.

**Keywords:** high slope; large deformation; geological survey

目前水电站边坡向地震烈度大、坡度大、地形和地质起变化方向发展, 而常规的地质勘测技术采用高密度电法和传统地震反射、折射、面波等勘探方法, 高密度电法无水高阻边坡, 大多数水电站边坡为充水低阻边坡<sup>[1]</sup>, 追踪连续层面的传统地震反射、折射、面波等勘探方法, 对于山区, 地层具有不连续和地质横向变化大<sup>[1]</sup>, 很难取得良好地质勘测, 高密度电法和传统地震反射、折射、面波等勘探方法都不能满足现在要求。

横向变化、高分辨率的 SSP 地震散射剖面方法

是近年发展起来新的观测与资料处理方法<sup>[2]</sup>, 有效地解决水电站边坡地震烈度高、边坡高、地形变化大等地质勘测难题, 以腊寨水电站右岸边坡为工程实例进行地质勘测应用。

### 1 SSP 地震散射剖面法原理

地震散射剖面法在波动传播的逆散射成像基础上建立, 它的基本原理就是波阻抗变化的异常体被地震波入射时<sup>[3]</sup>, 新的被动震源异常体向四周介质散射能量。按观测到的散射波的动力学与运动学情

况确定异常体的形状、位置和力学性状<sup>[4]</sup>。

SSP 地震散射剖面技术在山区复杂地质条件的浅层地震剖面技术比较适合<sup>[1]</sup>, SSP 地震散射剖面观测系统示意图 1。图像直观、分辨率高。该方法在地表布置地震观测剖面, 激发点距一般取 6 m ~ 8 m, 接收点距 2 m ~ 4 m, 探测深度可达 100 m 以上。可展现垂直剖面内岩、土介质波速的分布、岩土界面深度与形态。该技术特别适合于复杂造山带和坍塌区的浅层地震勘查, 已经在多个边坡勘查中取得了很好的效果。

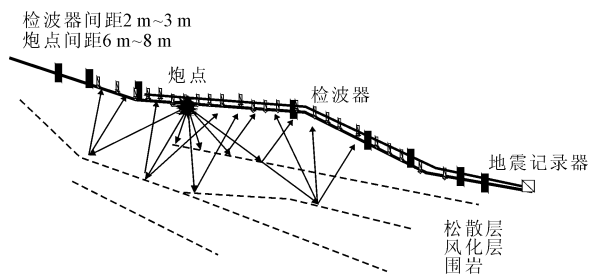


图 1 SSP 地震散射剖面观测系统示意

SSP 技术利用逆散射成像技术, 在岩土介质中地震波方程:

$$\nabla^2 U - \frac{\partial^2 U}{v^2 \partial t^2} = 0 \quad (1)$$

地质构造、岩性变化等波阻抗变化界面地震波散射返回到接收点时进行散射记录<sup>[1]</sup>。在介质波阻抗变化的部位发生地震波的散射时,  $\alpha(r)$  表示均匀介质中局部平方波速的百分比异常的假定<sup>[1]</sup>, 按百分比异常的分布表征地质结构的主要特征, 则介质中的波动方程:

$$\alpha(r) = \frac{v^2 - v_0^2}{v^2} \quad (2)$$

$$\nabla^2 U - \frac{\partial^2 U}{v_0^2 \partial t^2} = - \frac{\alpha(r)}{v_0^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}$$

其中:  $U$  为总的地震波场由散射波场  $U_s$  和入射波场  $U_i$  的和构成<sup>[5]</sup>:  $U = U_s + U_i$ 。把散射场和入射场代入公式(2), 入射场比散射波强, 按波恩 BORN 基本相似, 则入射波和散射波方程式分别为式(3)和式(4)<sup>[6]</sup>:

$$\nabla^2 U_i - \frac{\partial^2 U_i}{v_0^2 \partial t^2} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla^2 U_s - \frac{\partial^2 U_s}{v_0^2 \partial t^2} = - \frac{\alpha(r)}{v_0^2} \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} \quad (4)$$

入射波方程式(3)与方程式(1)的形式相同。散射波方程式(4)右端项代表入射波产生的惯性力,

在入射波惯性力的激励下产生散射波<sup>[5]</sup>。当边界散射波的影响较小时, 按达郎贝原理, 散射波方程式(4)频率域内的解为<sup>[6]</sup>:

$$U_s(r_s, r_0, \omega) = - \omega^2 \int_{\Omega} \frac{\alpha(r)}{v_0^2} U_i(r, r_0, \omega) g(r, r_s, \omega) dr \quad (5)$$

其中:  $U_i(r, r_0, \omega)$  是发射点位于  $r_0$  时散射点在  $r$  处的入射场,  $U_s(r_s, r_0, \omega)$  是发射点位于  $r_0$  时接收点在  $r_s$  接收到的  $\Omega$  体系内总共的散射场。公式(5)说明, 散射场  $U_s$  散射点强度与入射波强和速度  $U_i$  异常幅值  $\alpha(r)$  成正比。 $g(r, r_s, \omega)$  是散射点位于  $r$ , 接收点在  $r_s$  的格林函数<sup>[6]</sup>:  $g(r, r_s, \omega) = \frac{e^{-\beta|r-r_0|}}{|r-r_0|}$ 。

由于域内散射点散射能量的叠加为接收到的散射波, 则根据克希霍夫偏移方法得到异常散射体的强度与位置分布  $\alpha(r)$ <sup>[6]</sup>:

$$\alpha(r) = \sum_n \frac{u_s[r_0, r_s, t = (|r_0 - r| + |r_s - r|)/v]}{g} \quad (6)$$

其中:  $g$  为散射波的格林函数,  $v$  为偏移速度。

## 1.1 SSP 地震散射理论的优点

### 1.1.1 地震散射理论适应的条件更广分辨率高

在地震勘探中习惯使用反射理论, 观测和资料处理都按 CDP 或 CMP 方法进行, 反射面尺度  $D$  远大于波长  $\lambda$  的场合是反射理论的适用条件。当目标体的尺度较远时很难满足反射条件, 采用散射理论解决目标体远大于波长的难题。因此散射理论适用的范围更广泛, 目标体远小于波长时使用瑞利散射理论<sup>[5]</sup>。

$D = \lambda$  米散射

$D \ll \lambda$  瑞利散射

$D \gg \lambda$  反射

散射理论可识别远目标体比波长小的异常体, 反射波的能量一般比散射波能量大, 散射理论比反射理论具有更高的分辨率<sup>[5]</sup>。

### 1.1.2 地震散射强度与频率和方向有关

理论研究表明, 散射信号的强度与波阻抗差异、散射波方位角、入射波的频率、散射体的大小有关。散射响应是一个方向函数, 而不是像反射定律那样入射角等于反射角那样简单。

### 1.1.3 地震散射理论更符合惠更斯原理

散射面上发射点和接收点间具有相同时程散射信号的叠加为散射理论记录, 反射理论将地震记录理解为仅仅是反射界面上震源与接收点中间反射信

号为反射理论记录<sup>[7]</sup>,详见地震射线与散射信号记录图2。一条记录包含邻近区域内不同散射界面、不同射线路径散射信号的叠加,这种理解更符合惠更斯原理。当要确定每个散射点的性质时,会使用区内所有相关记录进行反演,因而具有更高的分辨率和可靠性。

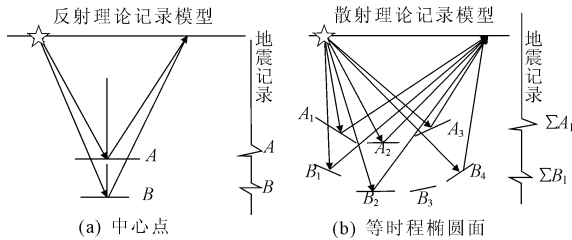


图2 地震射线与散射信号记录

## 1.2 SSP 技术的速度分析

偏移成像速度分析是 SSP 地震散射成像技术的组成重要部分,速度的合理性影响到图像结构的真实性。射线从发射点经过散射点到达接收点<sup>[6]</sup>,走时  $t_i$ ,平均速度  $V_a$ ,对应的地震信号为  $U_s$ ,信号的幅值和极性可表示为:

$$U_s(t_i), \text{ 其中 } t_i = \frac{R_0 + R_s}{V_a}$$

当射线速度为合理值时,空间的每个的散射 A 按走时计算得到的相应射线上散射信号的叠加极大值<sup>[6]</sup>:  $\frac{\partial}{\partial v} \left( \sum_{j=1}^n U_{sj} \right) = 0$ 。

因此最优偏移速度通过偏移叠加能量最大化来获取,偏移叠加能量最大时最优偏移速度<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial E}{\partial v} = 0, E = \frac{1}{M\alpha_0^2} \sum_{j=1}^M (\alpha_j - \alpha_0)^2, \alpha_0 = \frac{\sum_{j=1}^M \alpha_j}{M} \quad (7)$$

式中:  $M$  为偏移区总像点数,偏移图像可靠性必须满足偏移速度真实性,采集不同偏移距的散射道集数据,有足够的横向偏移,才能保证偏移速度真实性<sup>[6]</sup>。

## 1.3 SSP 技术的方向滤波

SSP 地震散射技术使用的是地下结构面的散射信号,但是在地表观测中不可避免地会记录到其他干扰信号,包括直达波、面波信号等。在进行速度扫描和偏移成像之前必须将这些干扰信号消除,在这里使用 F-K 变换,进行方向滤波,将视速度较低的直达波和面波滤除,仅保留反应地下结构特征的散射回波。

## 1.4 SSP 工程地质结构偏移成像

地震偏移成像依据的主要资料是地震波的走时

和振幅。散射波信号观测到的时间序列为<sup>[6]</sup>:

$$U_s(t, m_i, m_j) = \sum_{k=1}^n R(m_k) \delta(t - t_k) \quad (8)$$

其中:  $U(t, m_i, m_j)$  为在  $m_j$  爆炸点  $m_i$  位置观测点得到的反射信号时间序列;  $n$  为散射事件的总合<sup>[6]</sup>;  $R(m_k)$  为在位置  $m_k$  处界面的散射强度,满足  $-1 \leq R(m_k) \leq 1$ ;  $t_k$  为散射点到接收点和发射点到散射点的走时的走时组成<sup>[6]</sup>,满足:

$$t_k = \int_{m_i}^{m_k} \frac{ds}{v} + \int_{m_k}^{m_j} \frac{ds}{v} \quad (9)$$

$R(m_k)$  是散射强度,它为回折波的折射系数  $E_{2j}$ 、前行波的折射系数  $E_{1i}$  与射线最前端的散射系数  $R_k$  的联积:

$$R(m_k) = E_{11} E_{12} \cdots E_{1K-1} R_k E_{2k-1} E_{2k-2} \cdots E_{21} \quad (10)$$

由最前端的反射系数  $R_k$  的符号决定反射强度  $R(m_k)$  的符号。在介质波透射层数少、阻抗差异少的情况下<sup>[6]</sup>,由最前端的散射系数决定散射强度  $R(m_k)$  的极性和强弱主要,近似有<sup>[6]</sup>:

$$R(m_k) = R_k \quad (11)$$

它代表了地质构造和地质结构差异的主要特点。通过反演获得地下各散射面的强度  $R(m_k)$  和位置、速度分布  $V(m)$  得到地震偏移成像。波阻抗差异大<sup>[6]</sup>,散射系数大,波阻抗升高散射系数为正,波阻抗降低散射强度为负。

每次观测记录的合计反演得到地质结构的反射强度  $R(m_k)$  分布<sup>[6]</sup>:

$$R(m_k) = \frac{1}{LP} \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^P \frac{U_s(t_i, m_j, m_l)}{g} \quad (12)$$

其中:  $t_i$  满足走时方程(9),  $P$ 、 $L$  分别为接收点数和爆炸点数,  $V$  的分布根据方程(7)获取<sup>[6]</sup>。

## 2 资料处理过程

根据 TST 隧道超前预报系统进行观测,硬件包括地震仪、信号分离器、检波器、信号线缆等<sup>[1]</sup>。TST 有多种观测方式,以地震散射技术为基础,具有隧道超前预报的最新技术<sup>[8]</sup>。在隧道观测中是 TST,在地表勘探中为 SSP,两种观测方式的检波器与信号电缆不同,但资料处理软件技术是相同的。

本次资料处理采用北京同度工程物探技术有限公司 TST 系统中的 TSTWin 软件系统。TSTWin 系统的资料处理流程如下:

(1) 地震记录数据格式转换

- (2) 地震记录选取  
 (3) 观测系统几何位置编辑  
 (4) 地震数据预处理

① 切除直达波、面波、噪声、标记坏道、频率滤波、方向滤波;

② 由于地表观测时面波很强以致淹没了地下构造反射回来的信号,因此必须将面波加以滤除。在本次观测中,滤除面波的主要方法和过程如下:

④ 带通滤波,范围 50 Hz ~ 1 000 Hz,将噪音滤除;

⑤ 视速度滤波(FK 滤波),将视速度高于 4 km/s,和低于 1 km/s 的滤除。

⑥ 切除,将上述滤波后产生的噪音,以及地表的信号切除;

⑦ 面波的重要特点是速度低,频率低,能量强。经过上述滤波,基本可以将地表以及浅层的面波消除掉,而突出地下深层的散射波。

### (5) 波速分析

偏移叠加能量最大通过速度扫描寻找,最优偏移速度为偏移叠加能量最大的时速度<sup>[6]</sup>。

### (6) 偏移成像

当剖面的波速确定后,按克希霍夫方法进行逆散射偏移成像,得出反映地下构造变化的偏移图像,并以此作为地质解释的依据。

## 3 工程实例

### 3.1 工程概况

腊寨水电站是龙江水能资源开发的第九个梯级

电站,径流面积 3 672 km<sup>2</sup>,年平均径流量 47.6 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>,电站为引水式电站,规划区间龙江河流口水头落差约 90 m<sup>[9-11]</sup>。挡水大坝工程采用混凝土重力坝坝型,设计水库正常蓄水位 1 102.50 m,水库总库容 615.6 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>,坝顶高程 1 105.00 m,相应坝高 65 m,发电引水隧洞长约 2 020 m,水轮机安装高程 1 019.146 m,电站总装机 120 MW<sup>[12-15]</sup>。

腊寨水电站坝址右岸边坡位于大坝右岸坝轴线上,岸坡较陡,复杂地质条件,狭小施工场地,大于 250 m 的总高差。开挖卸荷的右岸边坡跨越了一个雨季和枯季后,右岸边坡有较大的变形出现,直接影响右岸边坡的继续施工及大坝的安全<sup>[10]</sup>。

开挖过程中出现了超出前期勘测、设计工作所预测的变形范围。边坡的变形情况已不允许做进一步的地质勘测工作,采用 SSP 地震散射剖面物探分析边坡的变形机理。

### 3.2 勘测结果分析

腊寨电站右岸边坡 SSP 法地震勘探共完成 8 个剖面(5 个横向剖面,3 个纵向剖面),其中具有典型的剖面为坝轴线主剖面散射偏移图 3,图中 I 色代表岩体界面相对变软,连续的 II 色代表岩体界面连续性较好的变硬、完整, I、II 色相间、断续变化的区域代表松散层变化较大<sup>[2,8]</sup>。

从坝轴线剖面散射偏移图 3 分析可知,地质结构可分为 4 层,最上层为由第四系崩坡积物和全强风化片麻岩构成的松散层,10 m 左右厚度,波速较低约为 1 km/s,横向分布与地表基本平行。下面是 20 m

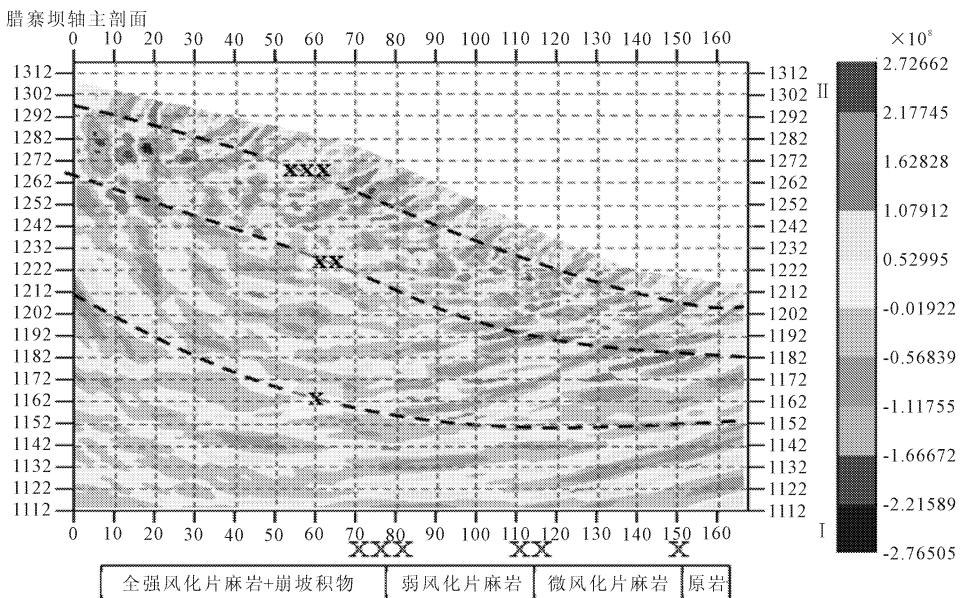


图 3 坝轴线剖面散射偏移图

~30 m 厚度弱风化层,横向分布与地表基本平行<sup>[2]</sup>,在剖面右侧处略有减薄,波速较低约为 1.5 km/s ~ 2 km/s。弱风化层下面微风化层,其分布特点为两端薄中间厚,厚底从左到有由 50 m 逐渐增加到 70 m 再逐渐减少到 30 m,最底下一层为原岩。

## 4 结 语

地震散射剖面法基本原理是波阻抗变化的异常体入射地震波时,异常体向周围介质散射能量被动震源,适合于复杂造山带和坍塌区的浅层地震勘查,可展现垂直剖面内岩、土介质波速的分布、岩土界面深度与形态,地震散射剖面法应用腊寨水电站右岸高边坡进行地质勘测,有效地分析边坡地质情况和变形机理,为下一步采取工程措施重要的依据,已经在边坡勘查中已取得了很好的效果。

### 参考文献:

[1] 李 斌,石大为.SSP 技术在采空区探查中的应用[J].煤矿安全,2012,44(9):155-158.

[2] 地质的超前预测、预报方案[EB/OL].[2012-12-11][2015-09-10].<http://wenku.baidu.com/view/2d14120902020740bele9b3b.html?from=search>.

[3] 曹胜洪.TST 超前预报技术在煤矿掘进巷道中的应用[J].煤炭与化工,2013,36(4):68-70.

[4] 罗宗帆.SSP 地震散射剖面技术在隧道病害诊断中的应用[J].工程勘察,2013,41(3):90-96.

[5] 赵永贵,蒋 辉.TST 隧道超前预报技术原理与应用[C]//中国地球物理学会第二十四年年会论文集,2008.

[6] TGP206、TSP20、TST 隧道地质超前预报系统的区别[EB/OL].(2012-11-28)[2015-09-10].<http://www.doc88.com/p-336769686253.html>

[7] 赵永贵,蒋 辉.隧道地震超前预报技术现状分析与新进展[J].公路隧道,2010(1):1-7.

[8] 胡 蓉,阳军生,张学民,等.邻近煤矿小窑采空区隧道围岩稳定性分析及应对措施研究[D].长沙:中南大学,2012.

[9] 洪振国,刘浩林.阻抗式调压井水力学计算研究[J].水力发电,2014,40(12):51-54.

[10] 范永波,伍法权,王根龙,等.某水电站坝址右岸边坡变形分析及治理对策[J].人民长江,2008,39(19):61-64.

[11] 洪振国,黄立群.调压井结构内力计算研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):177-182.

[12] 洪振国,刘浩林.水电站调压井特征线法水力学计算研究[J].中国农村水利水电,2015(4):163-166.

[13] 洪振国,王 鹏.露天上室式调压井在引水式电站中的设计研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(3):194-198.

[14] 洪振国,刘浩林.水电站阻抗式受力复杂调压井设计[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):148-153.

[15] 洪振国,刘浩林,黄立群.水电站混合式调压井设计研究[J].人民黄河,2015,37(12):111-114.

(上接第 171 页)

[7] 俞家欢,孙开天,杨 楠,等.钢筋和型钢混凝土异形柱的静力和动力有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(3):484-489.

[8] 陈兰响,关 萍,刘晴晴,等.基于 ABAQUS 分析型钢-圆钢管混凝土的力学性能[J].水利与建筑工程学报,2015,13(2):15-19.

[9] 刘林林,屠永清,叶英华,等.基于 ABAQUS 的钢管混凝土 L 形柱有限元分析[J].沈阳工业大学学报,2013,33(3):349-354.

[10] 张继承,吕 行,吴 胜,等.L 形钢管混凝土柱-钢梁框架受力性能有限元分析[J].建筑结构学报,2015,36(S1):27-33.

[11] 习晓征,徐亚丰.十字形钢管混凝土异形柱偏心受压试验研究[J].建筑钢结构进展,2011,13(2):44-50.

[12] 谭良斌,刘 忠,朱勇光,等.带约束拉杆 L 形钢管混凝土轴压柱受力性能分析[J].土木工程与管理学报,2012,29(4):70-74.

[13] 徐亚丰,侯晓曦.偏压作用下 L 形钢管混凝土异形柱的非线性分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2010,26(3):511-516.

[14] 孙林柱.钢筋混凝土异形柱轴心受压性能的试验研究[D].天津:天津大学,2007.

[15] 刘鸿文.材料力学[M].北京:高等教育出版社,2010.