# 可控震源地震勘探在大坝检测中的应用试验

钟飞1,张伟1,李继山2,梁昌明3,钟约先1

(1. 清华大学 机械系,教育部先进成形制造重点实验室,北京 100084;2. 中国铁道科学研究院 车辆研究 所,北京 100081;3. 广东粤电南水发电有限责任公司,广东 乳源 512700)

**摘要:**某电厂大坝为黏土斜墙堆石坝,其黏土防渗层的状态(密实性、一致性等)是极其重要的问题.瞬态瑞利 面波探测技术可用来检测堤坝松散层和土坝渗漏水异常区.可控震源激发波形精确可控,可激发高频地震波, 以提高地震勘探分辨率,进行浅层薄层地震勘探.本文应用研制的可控震源地震勘探系统对大坝进行了实地测 试,对测试数据进行了频散分析,衰减系数与能量分析,波速计算分析.分析结果表明,大坝局部区域存在低速 点;研制的可控震源系统可有效地进行浅层地震信号勘探.

**关 键 词:** 可控震源; 地震勘探; 大坝检测; 信号处理 中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)01-0056-06

我国堤坝隐患的传统探测方法是钻探和人工探视,近期把地球物理勘探作为辅助手段.工程地球物理勘 探是堤坝隐患快速、准确、无损伤探测的首选方法.现阶段我国使用的物探仪器主要是传导类电法与波动类 (如瑞利波法等)<sup>[1]</sup>.利用瑞利面波进行工程地震勘探是近些年国内外新兴的一种工程物探方法.赵纯青等 用锤击激发面波对克孜尔水库坝体出现的裂缝进行了面波勘探<sup>[2]</sup>.面波法勘探早期应用于土坝隐患的勘 查<sup>[3]</sup>,如今在土坝管涵、土洞、白蚁巢穴、土体疏松带、滑坡体的探测及坝体质量评价等方面也得到了应 用<sup>[4]</sup>.

可控震源地震勘探的方法最早出现在 1960 年 Crawford, Doty 和 Lee 的论文中,其后相继出现了离心机 械式可控震源、液压可控震源、电力可控震源<sup>[5]</sup>.可控震源因具有激发波形精确可控、自行运载通过性高、成 本低、效率高、可在人口和建筑物稠密等不允许使用炸药震源的地区使用等优点,受到地球物理界的普遍欢 迎,成为地震勘探的主要激发设备<sup>[6]</sup>.可控震源是在相对长的时间内分散地把能量传入到地下,再用相关技 术将分散的能量集中起来并压缩成宽度很窄的脉冲,用长时间输出的小能量信号去逼近短时间输出的大能 量信号.超磁致伸缩可控震源以地震波形式向地下发射变频扫描信号,地震波在不同构造的地层交界面或地 下目标体表面传播,表面波通过地面的检波器进入地震仪. 地震仪接收到的信号仍是调频信号,通过相关技 术使调频信号变成带有延时信息的脉冲信号,从而实现地下目标检测,对地下信息成像<sup>[7]</sup>.

某电厂大坝为黏土斜墙堆石坝,最大坝高81.3 m,坝顶高程为225.9 m,长215.0 m,宽6.0 m;坝底最大 宽度450.0 m;防浪墙高1.7 m、高程为227.6 m.该大坝建成40多年,为定向爆破堆石、黄土防渗、水泥面板 防冲刷的土坝,其安全性值得关注.如面板下沥沙层密实状态(是否掏空),黄土防渗层有无裂纹,其厚度及 其密实程度是否还符合要求,堆石层的一致性等.炸药震源会损伤大坝,因此南水大坝测试采用了超磁致伸 缩可控震源面波勘探.

收稿日期:2009-04-02

基金项目:铁道部-清华基金项目(T200409);广东省粤电集团有限公司科技项目(K06NS001)

**作者简介**: 钟 飞(1979-),男,湖南武冈人,博士研究生,主要从事浅层可控震源地震勘探和无损检测方面研究. E-mail: zhongfei@ emails. bjut. edu. cn

# 1 试验设备与方法

测试采用清华大学无损检测实验室自行研制的可控震源地震勘探系统,系统由信号换能器、SD1404 压 电陶瓷检波器、SD1432 电荷放大器、E1430A 数据采集板、主机、换能器驱动箱、接触调压器、牵引小车和检测

小车等组成(见图 1).系统可实现 30 Hz 到 10 kHz 频率范围 内地震波激发,地震波激发方式包括:脉冲激发、脉冲串激 发、扫频激发和连续激发.数据采集系统实现了 16 通道、每 通道最大 15 kHz 采样速率、可变增益以及不限时长的数据 采集管理系统. PCI 信号发射卡使用 PCI9054 作为 PCI 总线 接口芯片,IGBT 驱动信号发生芯片为 Altera 公司的 Cyclone 系列 FPGA.换能器驱动电路为电压型单相全桥式逆变电路, 作为功率开关器件的 IGBT 选用 MITSUBISHI 公司的 CM200DY-12H 型号,最大可加载 600 V 电压、200 A 电流. IGBT 驱动芯片选用 Fuji 公司的 EXB841 芯片,最大开关频 率达到 40 kHz.

测试分左岸、中间、右岸三段进行.如图 2 所示,黑点代 表检波器,标志"震源"的大黑点代表换能器,左岸左上角为 第一个测点,共 20 条测线 1 429 个测点.配重 7 块,每块 10 kg,合计 70 kg,检波器 8 道,道间距约 2.5 m,最小炮间距 (最小偏移距) 2.5 m,测线间距约 2.5 m,检波器沿测线方向 布置,小车沿测线方向(平行于水面)移动,每次移动 2 个测 点,即炮间距 5 m.采样率 10 KHz,采样时间 2 s,换能器驱动 电压 100 V.

堤坝隐患探测要求仪器的探测深度一般在 10~30 m,由于隐患尺寸较小时只有十几厘米到几十厘米, 有时甚至更小,这就要求仪器有较高的分辨能力.为了提高分辨率,必须使用频率较高的波,但是波的穿透能 力将会大大降低.对每个测点,脉冲串分 50 Hz20 串和 60 Hz20 串,开频扫描起止频率分别为 30~100 Hz,

 $40 \sim 100~{\rm Hz}, 50 \sim 100~{\rm Hz}, 40 \sim 150~{\rm Hz}, 40 \sim 200~{\rm Hz},$   $40 \sim 250~{\rm Hz}.$ 

大坝黏土层含水量从上到下依次增加.水泥盖板厚 200~250 mm,左岸左侧与右岸中间沥沙层较厚(约 700 mm),其它地方厚约 460 mm,黏土层厚度从 1 m 到几米.

大坝倾斜表面为混凝土防冲面板,中心有沥水 孔,检测测试时该沥水孔用作测点和声波介入点. 检测时先打开沥水孔,插入塑料管(直径110 mm), 换能器辐射头直径90 mm(见图3).





2 试验数据处理与分析

我们用频散曲线、衰减系数和波速三种方法来评价大坝的状况.采集信号用 Matlab 进行处理,计算频散曲线、能量衰减系数、波速之前都要先进行 50 Hz 和 40~250 Hz 带通两次滤波预处理(见图 4).







Fig. 4 Comparison between original signal and filtered signal of 40-250 Hz sweep

#### 2.1 频散曲线分析

单一波长(或单一频率)组分的面波传播速度称为该波长(或频率)的相速度,不同频率的相速度差异称 为频散.对于瞬态法面波勘探,

$$V_R = 2\pi f \Delta x / \Delta \Phi(f) \tag{1}$$

式中: $V_R$ 为相速度,f为频率, $\Delta x$ 为两检波点之间的距离, $\Delta \varphi(f)$ 为某一频率的相位差.在同一时刻两道波形之间的相位差  $\Delta \varphi(f)$ 由两部分组成,其一是两道波形相对于各自时窗起点  $t_{01}$ 和  $t_{02}$ 的初相位差

$$\Delta \Phi_0(f) = \Phi_{01}(f) - \Phi_{02}(f) \tag{2}$$

另一部分则是两道波形时窗起点之间的时差  $\tau = t_{01} - t_{02}$ 的所导致的相位差  $2\pi f \tau$ ,即

$$\Delta \Phi(f) = \Delta \Phi_0(f) + 2\pi f \tau \tag{3}$$

一般来说,低频情况下  $2\pi fr/\Delta \Phi_0(f)$ 数值很小,可以忽略不记. 但随着频率的增加, $2\pi fr$  值逐渐增大,在计算中的权重也越来越大. 由此可知, $2\pi fr$  的引入是解决高频失真的技术关键<sup>[8]</sup>.

初相位差的计算方法有两种:一种是直接利用谱分析的结果计算,另一种则是利用相关函数的傅里叶变换计算.对两个对比测点  $x_1, x_2$  上的两道波形分别做谱分析,可得到两个对应的初相位  $\Phi_{01}(f)$ 和  $\Phi_{02}(f)$ ,则 两道波形的初相位差按公式(2)计算.

r,1的傅里叶变换为:

$$R_{21}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} r_{21}(\tau) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau = W_1(f) \cdot W_2(f)$$
  
=  $|W_1(f)| \cdot |W_2(f)| \cdot \exp[j(\Phi_{01}(f) - \Phi_{02}(f))] = |R_{21}(f)| \cdot \exp[j\Phi_0(f)]$  (4)

式中: W<sub>1</sub>(*f*), W<sub>2</sub>(*f*)分别为第一道波形和第二道波形的傅里叶谱, W<sup>\*</sup><sub>2</sub>(*f*)是 W<sub>2</sub>(*f*)的共轭谱; R<sub>21</sub>(*f*)为互相关 函数 *r*<sub>21</sub>(*τ*)的傅里叶谱,称为互相关谱.可见,互相关谱的相位谱就是两道波形的初相位差.典型频散曲线如 图 5 所示.



Fig. 5 Frequency dispersion curves of point 16-49

按瑞利波的传播理论,在地质异常体比如断层中传播时,频散曲线会突然中止或发生畸变,以此来进行 地层划分或地质异常体的判别.通常认为频散曲线上出现的突变或"之"字型拐点是由土层的分界面、地下 空洞或其它掩埋物所引起.统计每个小块频散曲线转折点的数目,绘制成频散曲线灰度图.频散曲线转折点 次数大于等于5的测点有:16-8,19-49,19-50(见图6),位于大坝右下方,值得注意.



Fig. 6 Isogram of frequency dispersion curve transition points for the dam

### 2.2 衰减系数与能量分析

信号 x(n) 的能量定义为:  $E = \sum_{n}^{+\infty} = |x(n)|^2$ . P1 为距离换能器辐射头最近的点,这里近似认为 P1 点所 采集到的振动信号为换能器所输出的最大振动信号. 分别将其它检测点的能量与 P1 点能量作比值,转化成 分贝(dB)值后除以距离,就可以算出衰减系数. 计算公式为<sup>[9]</sup>:  $A = 20\log \frac{E_a}{E_a} / D$ .

衰减系数的大小亦能反应地下介质的状况. 衰减系数等值线图采用5点2次多项式平滑滤波法滤波(见图7),可见,大坝整体上具有一致性.



## 2.3 波速计算

采用相关系数法计算波速时取第一道中一段数据,与其余各道数据移动相关,根据相关系数最大值点计 算延时,道间距除以延时即为波速.相关函数法则求各道与第一道相关函数,根据相关函数最大值点计算延 时(见图 8).信号 y1 起始时间 0 ms,y2 起始时间 200 ms,相关后延时 200 ms,说明可用相关方法求延时.





根据相关函数法和相关系数法计算的各道延时见表1.由表1可以看出,滤波后的相关函数法和相关系数法计算结果差别不大.本次测试采用滤波后的相关函数法.计算得波的传播速度均值为227.48 m/s.左岸 波速比右岸低,该区域水泥盖板有裂缝,3~5孔之间有明显翘曲和凸起.波速大于0小于60 m/s的点有:1-40,1-42,2-6,2-42,4-2,4-35,4-69,5-2,5-36,7-3,9-31,12-27,12-29,12-46,17-47,20-24,20-26,19-57.波速等值线图采用7点3次多项式平滑滤波 Savitzky-Golay Fir 滤波(见图9).对照图7和图9,衰减系数 大的位置和波速小的位置基本上是对应的.

表1 1-31 测点 2-8 道相对于1 道的延时

		Tab. 1 Delay of channel 2-8 to channel 1 of point 1-31					
	计算方法	各 道 延 时					
		1	2	3	4	5	6
滤波前	相关函数法	0	15.8	42.9	39.4	100.6	81
	相关系数法	0	16.2	27	39.4	66.2	99.3
滤波后	相关函数法	0	16.3	27.2	39.5	66.3	107.4
	相关系数法	0	16.2	26.9	39.1	50	107.7



# 3 结 语

应用研制的可控震源地震勘探系统对某电厂大坝进行了实地测试,研究分析表明:(1)研制的可控震源 地震勘探系统可有效地进行浅层地震勘探;(2)运用 Matlab 对勘探信号进行了频散分析,衰减系数与能量分 析,波速分析等数据处理,有效地反应了地下介质的状态;(3)数据处理结果显示右岸平均波速大于左岸,说明右岸整体密实状态比左岸好,大坝有部分区域波速低、衰减系数大.

### 参考文献:

- [1] 彭皖生,程海英,孟繁瑾. 工程物探在水利检测中的应用[J]. 安徽建筑, 2004(4): 96. (PENG Wan-sheng, CHENG Hai-ying, MENG Fan-jin. Application of engineering geophysical prospecting in hydraulic detection[J]. Anhui Architecture, 2004(4): 96. (in Chinese))
- [2] 赵纯青, 尹力峰, 唐丽华, 等. 克孜尔水库大坝的面波检测[J]. 内陆地震, 2002, 16(1): 53. (ZHAO Chun-qing, YIN Li-feng, TANG Li-hua, et al. Surface wave detection to dam of Kizil reservoir[J]. Inland Earthquake, 2002, 16(1): 53. (in Chinese))
- [3] 底青云, MARTYN UNSWORTH, 王妙月. 复杂介质有限元法 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 723-730. (DI Qing-yun, UNSWORTH M, WANG Miao-yue. 2.5-D CSAMT modeling with the finite element method over 2-D complex earth media[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 723-730. (in Chinese))
- [4] 王书增,谭 春,陈 刚,等. 面波法在堤坝隐患勘查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 262. (WANG Shuzeng, TAN Chun, CHEN Gang, et al. The application of Rayleigh wave exploration on detecting hidden dam troubles [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 262. (in Chinese))
- [5] HOOVER G M, GALLAGHER J G, RIGDON H K. Vibrator signals [C] // Proceedings of the IEEE, 1984: 1290–1301.
- [6] 陶知非. 世纪之交论可控震源的发展与变化[J]. 物探装备, 2000, 10(1): 1-6. (TAO Zhi-fei. Discussion on development of vibroseis in the exchange of century[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2000, 10(1): 1-6. (in Chinese))
- [7] 陈祖斌,林 君.可控震源扫描控制技术研究[J].计算机工程与应用,2002,38(7):241-243.(CHEN Zu-bin, LIN Jun. Study on the control of vibroseis scanning signal[J]. Computer Engineering and Application. 2002, 38(7):241-243. (in Chinese))
- [8] 张 辉. 超声层析与瑞利波勘探方法探索及其在工程中的应用[D]. 北京:中国地质大学, 2002. (ZHANG Hui. Methodological research on ultrasonic CT and Rayleigh wave exploration as well as their application [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002. (in Chinese))
- [9] ZHANG W, LIU T X. The research of rare earth-iron giant magnetostrictive seismic source of shallow seismic exploration [C] // International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2006: 184–189.

## The applied test of vibroseis seismic prospecting system in dam

ZHONG Fei<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, LI Ji-shan<sup>2</sup>, LIANG Chang-ming<sup>3</sup>, ZHONG Yue-xian<sup>1</sup>

 Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China; 3. Guangdong Yuedian Nanshui Power Corporation Limited, Ruyuan 512700, China)

**Abstract**: There is a rockfill dam with clay facing in Guangdong, and its earth blanket's state such as compactness and uniformity is important. Transient Rayleigh wave can be used to inspect the loose layer and leakage anomaly region of the earth dam. The vibroseis source can arouse precise and controllable high frequency seismic wave so as to improve seismic solution for shallow seismic prospecting. Field test is carried out with vibroseis seismic prospecting system developed by our lab in Nanshui dam. Frequency dispersion, attenuation coefficient, energy and wave speed are analyzed as the testing data. It is indicated that the speed of some spots is low, and that the vibroseis system can do shallow seismic prospecting effectively.

Key words: vibroseis; seismic prospecting; dam detection; signal processing