

黄河冰凌地电测试曲线小波分析及预警技术

丛沛桐¹, 王瑞兰², 李艳¹, 屈寒飞¹, 吴卫熊¹, 王启¹

(1. 华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

摘要 采用地电测试技术对黄河冰水两相流进行视电阻率测试, 绘制了电测深曲线。曲线经小波分解后, 2 个水平分解的曲线类型差异都十分显著, 且平稳流凌时曲线无明显阈值, 端点(河床淤泥)视电阻率值为 $15.52\Omega\cdot\text{m}$, 而局部冰塞时曲线经过 2 个水平分解后的阈值为 $6.68\Omega\cdot\text{m}$ 。现场测试及小波分析表明, 黄河封河期间平稳流凌与出现冰塞时的电测深曲线有明显差异, 可以通过曲线特征和总体阈值进行判别。

关键词 黄河冰凌; 地电测试; 预警技术; 小波分析

中图分类号 :TV875 **文献标识码** :B **文章编号** :1006-7647(2008)01-0062-04

Wavelet analysis of geo-electric measurement curve for ice jam of Yellow River and early warning technique//CONG Pei-tong¹, WANG Rui-lan², LI Yan¹, QU Han-fei¹, WU Wei-xiong¹, WANG Qi¹(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China)

Abstract :The apparent resistivity of the ice-water two-phase flow was measured by use of the geo-electric measurement technique, and the resistivity sounding curve was plotted. Two types of curves obtained by wavelet decomposition of the resistivity sounding curve in horizontal direction were of obvious difference. For stable ice jam flow, the decomposed curve has no obvious threshold, and the resistivity at the end is $15.52\Omega\cdot\text{m}$, while for local ice jam, the decomposed curve has the threshold of $6.68\Omega\cdot\text{m}$. Field test and wavelet analysis show that, the decomposed curves for different conditions are easy to be distinguished by their characteristics and total threshold.

Key words :ice jam of Yellow River; geo-electric measurement; early warning technique; wavelet analysis

黄河下游河道流量常年保持在 $500\sim 1\,000\text{m}^3/\text{s}$, 丰水年则更大^[1]。这样大的流量一旦降温, 河道中就会出现较大的流冰量。由于黄河河道上游宽浅、下游弯曲, 河势不顺畅, 若上段开河而下段固封或下段封而上段未封, 势必造成冰凌堵塞, 水位壅高没堤, 形成冰凌灾害^[2]。黄河冰凌洪水突发性强, 涨势猛、持续时间长, 产生的灾害有时更甚于暴雨洪水, 给泛区造成巨大经济损失^[3]。

冰凌测试及预警涉及河道冰凌运行规律、热力条件、水动力条件及边界条件, 缺乏成熟的测试手段和测试条件^[4]。与非封冻或敞开式河道水流相比, 对河道冰凌进行实时测试是十分困难的。现阶段国内河道冰情监测主要以遥感技术为主(遥测), 但遥感数据空间分辨率和时间周期是重要的制约因素, 由于黄河部分窄河段区大小在卫星图像上还不到一个像素, 因此单纯依靠遥感技术还不能实时监测预

警河道冰情^[5]。

地球物理测量技术是应用于冰雪和冻土领域测量的技术方法, 可用来测定冰川厚度、冰渍厚度与埋藏冰, 判断冻土和融区分布以及多年冻土的构造, 确定多年冻土埋深^[6]。将其应用于黄河冰凌测试, 可以有效地弥补遥感监测手段的不足, 实时监测预警河道冰情^[7]。

1 预警原理

地电测试原理是通过地层视电阻率测试反演地层岩性, 由于冰与水的导电性有明显差异, 随着冰凌密度的不断增加, 冰水混合体的视电阻率也会不断增大, 具有一定的耦合关系^[8]。黄河冰凌处于冰盖与河床所限河道内, 冰水混合物与冰盖和河床沉积层之间的地电物性差异显著, 采用地电测深技术是可行的, 电测深曲线是冰盖下流凌密度、流凌堆积的

综合反映 ,对电测深曲线进行小波分解后 ,可判断冰凌的出险状况^[9] ,进行冰凌预警。

视电阻率公式^[10] :

$$\rho = k \frac{V}{I} \tag{1}$$

式中 : ρ 为视电阻率 , $\Omega \cdot m$; V 为供电电压 , V ; I 为供电电流 , A ; k 为装置系数 ,与 AB 和 MN 电极的极距 (d_1 和 d_2) 有关 ,由仪器自动给出。

采用 DDC-6 型电子自动补偿仪进行测试 ,电压测量精度 $\pm 1\% \pm 1mV$,电流测量精度 $\pm 1\% \pm 1mA$ 。由于电极深入冰水中 ,接地条件优于地面 ,可保证仪器正常读数。通过重复读数和检查点测试来保证测量精度。

极距布置 : $\frac{d_2}{2} : 1 \ 3 \ 3 \ 3 \ 8 \ 8 \ 8 \ 15 ; \frac{d_1}{2} : 5 \ 10 \ 15 \ 20 \ 25 \ 40 \ 60 \ 80$ 。

调整 AB 和 MN 电极的极距 ,通过仪器测量电压和电流 ,计算出相应各极距的冰水两相流视电阻率 ,绘制电测深曲线 ($\rho \sim \frac{d_1}{2}$) 。

对于离散输入信号 $f \in V_0$,多分辨分析算法如下^[11] :

$$f = \sum c_n^0 \varphi_{0,n} = \sum c_n^1 \varphi_{1,n} + \sum d_n^1 \psi_{1,n} \tag{2}$$

其中

$$\varphi_{1,n} = 2^{-k/2} \varphi(2^{-k}t - 2)$$
$$\psi_{1,n} = 2^{-k/2} \psi(2^{-k}t - n)$$

式中 : φ 为多分辨分析中的尺度函数 ; ψ 为与 φ 有关的小波函数 ; c_n^0 为初始小波分解系数 ; c_n^1 为低频小波分解系数 ; d_n^1 为高频小波分解系数。 $\varphi_{1,n}$ 与 $\psi_{1,n}$ 分别为空间 V_1 和 W_1 的正交子空间 ,并且有

$$V_0 = V_1 \oplus W_1 \tag{3}$$

经 2 尺度小波变换后的曲线特征和阈值都十分明显 ,可作为预警指标采用。

在综合黄河开河、封河期流冰规律的基础上 ,运用地球物理学方法 ,以冰面电测深曲线为数据源 ,模拟视电阻率与冰凌流冰量之间的关系。当冰凌密度大时冰水混合物的视电阻率数值大^[12] ,反之则小。由此分析冰盖下流冰量的状况 ,通过冰面电测深曲线反演流冰量的大小^[13]。

当冰盖下冰凌淤塞时 ,会有大量冰块堆积 ,水流壅高 ,视电阻率数值明显增加 ,通过冰凌视电阻率增加的阈值 ,可判别冰凌淤塞状况 ,开展冰凌预警研究 (图 1) 。

2 现场测试与小波分析

试验地点选择在黄河济南河段的冻口浮桥和新徐西外环浮桥 ,于 2004 年 12 月底至 2005 年 1 月上旬进行了野外地电测试。黄河济南河段从 2004 年

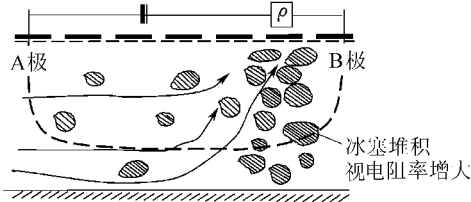


图 1 冰塞堆积、视电阻率增加情形

底持续流凌 ,沿新徐西外环浮桥两侧河段 ,冰凌的封冻和解冻现象交替出现 ,浮桥两侧可明显地区分为封冻区 (有冰盖) 和未封冻区 ,有利于进行对比研究。

经实地调查 ,封河期间大部分冰层厚度在 10 ~ 30 cm 之间 ,为此 ,野外测试断面均以浮桥为依托 ,沿浮桥布线 ,在确保安全的情况下进行测试。

野外现场布置了电测深剖面线 10 条 ,剖面线总长为 3 000 m ,所测量的河道宽度为 250 ~ 320 m ,河水位标高为 27 ~ 28 m (黄河基面) ,河水水深为 5 ~ 10 m ,流量为 350 ~ 400 m³/s ,气温为 - 9 ~ 2 ℃ ,河道开阔 ,笔直顺畅。试验方案包括了冰盖封冻区和未封冻区以及少量流凌、大量流凌等各类组合条件 ,比较全面地反映了黄河冰凌的特性。

采用 DDC-6 型电子自动补偿仪 ,选用对称四极方法测试了河道剖面视电阻率、电压、电流、气温、河水位、河水温度、流量等参数 ,仪器性能稳定 ,参数均进行了反复校核 ,测试满足工作精度要求。

测试结果表明 ,由于水是导电性能良好的介质、冰是导电性能较差的物质 ,河床以下沉积物和地层的导电性能又与水和冰有明显的差异 ,介质的地球物理特性为本方法的实施提供了理论支持 ,在实际测试中也得到了证实。极距较大时 ,视电阻率数值仍然较低 ,表明电流主要是在导电性能良好的水中穿过 ,而不是穿越河床以下的地层 ;极距较小时 ,电流尽量绕过表面封冻的冰盖 ,在下部的水流中通过 ,在此地球物理背景的支持下 ,表面和深部介质的影响可降低到最低限 ,为提高地电测试精度、分辨流凌量等级、开展定量研究和预警提供了有力的技术保障。几组典型的测试数据见图 2。

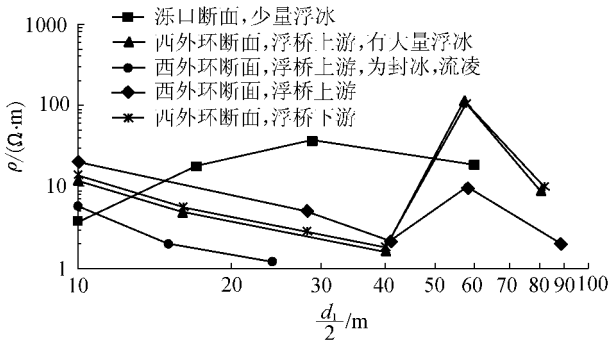


图 2 典型电测深曲线

由图 2 可知 ,黄河封河期间 ,冰凌的分布、冰盖厚度、流凌量的大小与电测深曲线有较明显的相关关系 , ρ 的数值和曲线变化特征可以间接地反映冰盖下流流量的变化 ,初步揭示了黄河封冻区冰凌的特点和规律。

为深入分析电测深曲线的特点 ,采用小波分解技术 ,对信号 b 和 c 测深曲线进行 2 个水平的分解 (图 3) ,并进行曲线全局阈值计算。

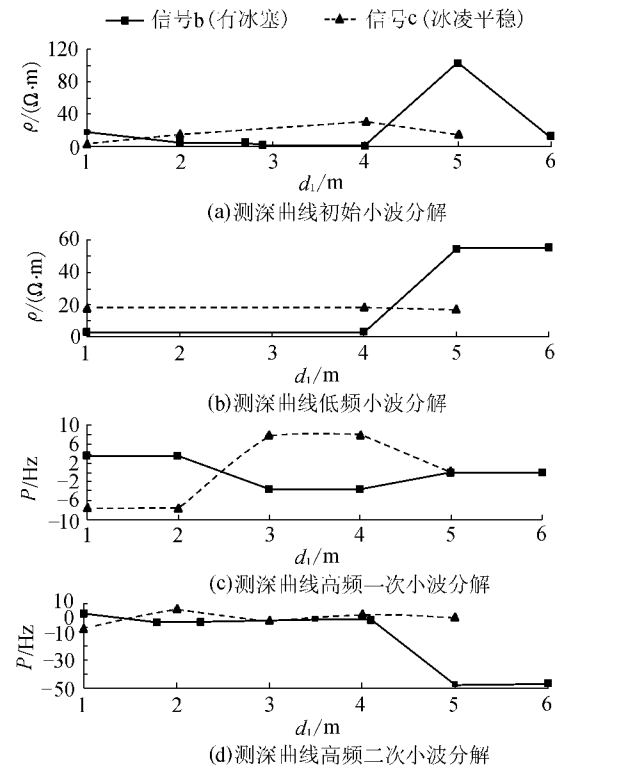


图 3 信号 b、c 测深曲线小波水平分解 (西外环断面)

经过 2 个水平的小波分解 ,平稳流凌和局部地段有冰塞的电测深曲线在 2 个水平分解上差异都非常显著 ,曲线特征有明显不同 ,可以判读为 2 种不同类型的曲线 ,并推断冰凌流动的平稳状况是有差异的。通过进一步的阈值判别 ,数量化评价冰凌的预警指标。

为确定曲线阈值 ,对电测深曲线进行了去噪声处理。自动识别出阈值点后 ,再进行剩余能量计算 (图 4)。

对信号 b 测深曲线进行 2 个水平的 Haar 小波分解后 ,识别出总体阈值为 $6.68 \Omega \cdot m$,该曲线阈值剩余能量为 99.57% ,零点数占 57.14% ,对全局具有明显的控制作用。该曲线总体阈值 $6.68 \Omega \cdot m$ 为局部冰塞情况下冰水两相流视电阻率阈限。

对信号 c 测深曲线经过 2 个水平 Haar 小波分解后 ,总体阈值为 $15.52 \Omega \cdot m$,该曲线阈值剩余能量为 87.97% ,零点数占 71.43% ,零点数增加说明曲线的单调性显著 ,冰水混合流流态均匀。由于阈值点位于

端点 ,应为河床淤泥质层的电性反映。同理也说明 ,冰水两相混合流没有明显阈限 ,流态是平稳的。

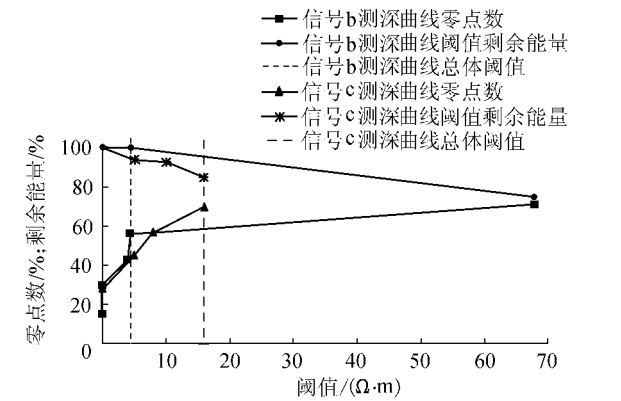


图 4 信号 b、c 测深曲线小波阈值曲线 (西外环断面、有冰盖)

3 成果分析

根据以上测试数据 ,可以得出如下规律性认识 :在西外环断面 (图 3 中信号 b 测深曲线) ,有一处视电阻率数值异常 (高) ,超过 $100 \Omega \cdot m$,根据该地段河床地质条件 ,参考相关河段视电阻率曲线特征 ,推断该处视电阻率异常可能是由于河床本身壅塞造成的 ,由于冰的导电性较差 ,故出现视电阻率较高的情况。此情况可视为冰凌预警条件。

所测试的电测深曲线比较有效地反演出黄河封河过程中冰盖下流凌量的变化特征。测试数据证实 ,冰水两相混合流平稳流凌时视电阻率数值在 $10 \Omega \cdot m$ 左右 ,没有明显阈值 ,当局部测点视电阻率数值偏高时 ,可能是冰下局部壅塞或卡冰引起的 ,如果剖面线上多点壅高 ,作为凌汛的预警条件应予以高度重视。

4 结 论

黄河封河期间平稳流凌与局部出现冰塞时的电测深曲线有明显差异 ,可以通过曲线特征及总体阈值进行判别。

在测试期间 ,黄河济南河段封河期冰凌总体上处于平稳流凌阶段 ,未有大范围的冰塞现象。因此 ,冰凌预警的阈值上限还应结合后续研究工作逐步确定。

参考文献 :

[1] 蔡琳.黄河防凌工作 50 年[J].人民黄河,1996(12):1-4.
[2] 牛运光.凌汛危害及其防护措施[J].人民黄河,1997(2):9-13.
[3] 孙绵惠.1996 年凌汛黄河小北干流冰塞壅水成因分析[J].人民黄河,1997(4):12-14.
[4] HAMMAR L, SHEN Hong-dao. Frazil evolution in channels[J]. Journal of Hydraulic Res, 1995, 33(3): 86-88.
[5] 毕占义, 朱庆俊.直流电测深法在大西湾地下水资源勘察中的应用[J].勘察科学技术, 2001(2): 62-64.

[6] SMITH T ,ETTEMA R. Flowresistance in ice covered alluvial channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1997 ,123(7) : 15-17.

[7] 姚昆中 ,程原生. 黄河小北干流河津段冰凌灾害及抢险措施[J]. 山西水利 ,2000(1) :24-25.

[8] 罗德传. 电测深法在工程设计中的应用[J]. 物探与化探 ,1985 ,19(4) :307-311.

[9] 蔡琳 ,卢杜田. 水库防凌调度数学模型的研制与开发[J]. 水利学报 ,2000(6) :67-71.

[10] 陈守煜 ,冀鸿兰. 冰凌预报模糊优选神经网络 BP 方法[J]. 水利学报 ,2004(6) :1-7.

[11] LI Jun-heng ,MICHEL A N ,POROD W. Analysis and synthesis of a class of neural networks : linear systems operating on a closed hypercube[J]. IEEE Trans ,1989(11) :1405-1422.

[12] 顾明林 ,王静. 黄河内蒙古河段冰凌研究与冰凌预报数据库系统的设计[J]. 甘肃农业大学学报 ,1999 ,34(3) : 287-290.

[13] 茅泽育 ,吴剑疆 ,余云童. 河冰生消演变及其运动规律的研究进展[J]. 水力发电学报 ,2000(1) :153-161.

(收稿日期 2007-01-12 编辑 方宇彤)

(上接第 49 页) 在以下方面加强应对能力的建设^[10] :

- ① 针对应急预案的预见性、针对性和可操作性 ,完善水库防汛应急预案。一旦发生险情 ,能够立即组织下游公众撤离至安全区。
- ② 完善大坝安全监测和分析系统 ,争取 2h 以上的溃坝预警能力。
- ③ 加强对下游公众的安全宣传教育和组织联络工作 ,防患于未然。
- ④ 进一步提高及时组织居民疏散撤离的能力。

5 结 语

沙河水库东副坝溃坝生命损失是在分析溃坝洪水的基础上 ,考虑了溃坝洪水严重性程度、风险人口、警报时间和风险人口对溃坝洪水严重性的理解程度 4 个方面 ,采用 Graham 法估算的 ,可为水库防洪决策提供支撑。虽然生命损失各个参数和计算结果有不确定性成分 ,但是这种计算分析方法已经在国外使用多年 ,有较多的使用经验。随着我国对突发事件生命损失的重视和深入研究 ,参数的不确定性问题将会逐步得到解决。

参考文献 :

[1] 黄玲 ,谈祥. 江苏省溧阳市沙河水库大坝安全评价报告[R]. 上海 :上海勘测设计研究院 ,2006.

[2] 齐宏宇 ,蔡纬良. 江苏省溧阳市沙河、大溪水库大坝安全鉴定地质专题报告[R]. 上海 :上海勘测设计研究院 ,2006.

[3] 李侠 ,霍玉仁. 江苏省溧阳市沙河水库大坝现场安全检查报告[R]. 上海 :上海勘测设计研究院 ,2006.

[4] 谢世勋 ,周锦文 ,郑浩杰. 沙河水库工程水文手册(1958 ~ 1988) [R]. 溧阳 :溧阳县沙河水库管理处 ,1989.

[5] 江苏省溧阳市沙河水库管理处. 溧阳市沙河水库 2006 年控制运用计划[R]. 溧阳 :江苏省溧阳市沙河水库管理处 ,2006.

[6] 李雷 ,盛金保 ,彭雪辉 ,等. 江苏省沙河水库东副坝风险分析研究报告[R]. 南京 :南京水利科学研究院 ,2007.

[7] FREAD D L. An erosion model for earthen dam failures[M]. Maryland : National Weather Service ,1991.

[8] FREAD D L ,LEWIS J M. NWS FLDWAV model[M]. Maryland : National Weather Service ,1998.

[9] 李雷 ,周克发. 大坝溃决导致生命损失估算方法研究现状[J]. 水利水电科技进展 ,2006 ,26(2) :76-80.

[10] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究[D]. 南京 :南京水利科学研究院 ,2006.

(收稿日期 2007-02-27 编辑 方宇彤)

(上接第 45 页) 胶凝面板堆石坝优化后的坝体和面板的应力、位移均不大 ,且有较好的分布规律。

综合应力、变形、稳定的计算结果看 ,优化方案是安全可靠的 ,且有一定的安全储备。

4 结 论

- a. 采用非线性数学规划法对胶凝面板堆石坝进行断面优化设计是可行有效的。
- b. 胶凝面板堆石坝优化方案经济合理、安全可靠。比较优化前后大坝的堆石方量与造价 ,相对于普通面板堆石坝 ,胶凝面板堆石坝优化后的坝坡可以更陡、节省的堆石方量多、造价低。从应力与变形、应力水平、稳定分析结果看 ,优化后的胶凝面板堆石坝均能满足要求 ,是安全可靠的。

参考文献 :

[1] 陆述远 ,唐新军. 一种新坝型——面板胶结堆石坝简介[J]. 长江科学院院报 ,1998 ,15(2) :54-56.

[2] LONDE P. Hardfill dam ,the faced symmetrical fardfill dam :a new concept for R. C. C.[J]. International Water Power & Dam Construction ,1990(2) :19-24.

[3] 李永新 ,何蕴龙 ,乐治济. 胶结砂砾石坝应力与稳定有限元分析[J]. 中国农村水利水电 ,2000(7) :35-38.

[4] 蔡新 ,郭兴文 ,张旭明. 工程结构优化设计[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,2003 :87-95.

[5] 李志强 ,侯永峰 ,吕鹏. 茅坪溪土石坝沥青混凝土心墙的材料力学特性[J]. 岩土工程界 ,2003 ,6(1) :73-74.

[6] 唐新军 ,陆述远. 胶结堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报 ,1997 ,30(6) :15-18.

[7] 陆希. 公伯峡水电站面板堆石坝应力应变计算[J]. 西北水电 ,2000(1) :34-38.

(收稿日期 2006-12-14 编辑 方宇彤)

