

DOI: 10. 16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2016. 05. 04

水下模型地形超声成像分析与实时测量

宋欢¹, 邹先坚², 石春娟³

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所/岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 山东英才学院建筑工程学院, 山东 济南 250104)

摘要: 针对水利工程试验中水下模型地形的测量问题, 分析比较了高频超声回波信号与阵列超声成像信号特征, 并提出了一种超声成像测量方法。该方法直接利用高频超声成像仪获取水下模型地形的实时图像, 通过分析提取图像中的地形成像亮带线, 从而实现水下模型地形的快速无接触实时测量。结果表明基于高频超声成像的测量方法能够有效地规避水中悬浮粒子对水下模型地形测量的干扰, 能够实现地形的实时测量, 测量误差在 3 个像素宽(1.8 mm) 以内。该方法自适应性强, 速度快, 分辨率高, 为水下模型地形的动态分析与实时测量提供了一种有效途径, 并已运用到实际工程中。

关键词: 高频超声; 水下模型地形; 河工模型试验; 信号分析; 实时测量

中图分类号: P641, P208

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2016) 05-0028-05

Ultrasonic imaging analysis and real-time survey for underwater physical model terrain

SONG Huan¹, ZOU Xianjian¹, SHI Chunjuan²

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei, 430072, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics (IRSM)/CAS, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. School of Architectural Engineering, Shandong Yingcai University, Jinan, Shandong 250104, China)

Abstract: As for the measurement problem of the underwater model terrain in physical model tests of hydraulic engineering, the authors analyze the characteristics of high frequency ultrasonic echoes and array ultrasound imaging signals and propose an ultrasonic imaging terrain survey approach. This approach is by using a high-frequency ultrasonic imaging device to obtain the real-time image of the underwater model terrain. A fast noncontact and real-time survey of the underwater model terrain is realized by analyzing the ultrasonic imaging signals and extracting the imaging terrain lines. The results show that the approach can effectively avoid the interference of suspended particles to model terrain survey under water flow and realize the real-time measurement for the underwater physical model terrain. The measuring error is within 3 pixels wide (about 1.8 mm) with the advantages of strong adaptability, fast speed and high resolution. This approach can provide an effective method for the dynamic analysis and real-time survey of underwater model terrain. It has been used in practical engineering.

Keywords: high-frequency ultrasonic; underwater model terrain; river physical model test; signal analysis; real-time survey

在水利工程模型试验中, 水下模型地形的测量, 尤其是浑浊水流作用下的地形测量, 对于水沙互相作用

收稿日期: 2015-10-04; 修订日期: 2015-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(41006058); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014212020205)

第一作者: 宋欢(1989-), 女, 博士研究生, 主要从事信号处理与图像分析研究。E-mail: songhuan@whu.edu.cn

通讯作者: 邹先坚(1987-), 男, 博士, 主要从事超声检测与水文地质工程测量研究。E-mail: zouxianjian@whu.edu.cn

机理与河床冲淤演变规律的试验研究具有很大的实际意义^[1]。

在模拟真实河流的河工模型试验中,水下模型地形长达数百米,一次完整的地形测量就需要数十万个测量点,任务繁琐而艰苦,效率很低。为此国内外学者开发出了很多种用于测量模型地形的仪器。比如,接触式的仪器有光电反射式地形仪、电阻式地形仪和跟踪地形仪;非接触式的仪器有超声地形仪和激光扫描仪以及最近发展起来的近景摄影测量技术^[2]。接触式地形仪容易破坏模型地形表面,对水下淤面或者水上洲滩、边滩都有一定的扰动和接触误差^[3]。非接触式地形仪能够很好解决这些问题,比如文献^[4]指出的超声波地形仪和光学 CCD 成像地形仪都能够实现模型地形的无接触快速测量,推动了模型地形测量技术的发展。

在流速较大浓度较高的浑水动床模型试验中,由于水沙的互相作用,且模型塑料沙比重很轻,模型地形及其附近沙粒的流动性很大,会有大量粒子在水中和地形表面附近运动,从而导致光学 CCD 图像无法看清真实的模型地形,这对光学成像测量造成了很大的影响。另外,水中大量的运动沙粒会使超声波地形仪发出的超声波信号提前返回接收,从而造成很大的测量误差。虽然多次测量取平均值等信号处理方法可以弥补或消减该问题,但还是无法从根本上消除悬浮沙粒对模型地形测量的影响。

本文在超声测量地形原理的基础上,利用现有的高频超声波成像阵列模块对含沙水流进行直接成像,获取水下模型地形的图像^[5~9]。然后,进行分析处理,提取水下模型地形线从而实现水下地形多点非接触式的快速测量。该方法有效改善了传统声学方法点到点的测量,从而实现模型地形线到线再到面式的测量,特别能够适合浑浊水流情况下水下模型地形的实时观测与在线测量分析。

1 高频超声信号分析

1.1 超声回波信号

超声波地形仪是基于超声回波定位测量原理的仪器。如图 1 所示,把超声波探头(换能器)置于水面,发射电路控制换能器垂直向下发射一束高频超声脉冲波,然后接收电路处理声波传播遇到模型地形返回的回波信号,从而判断模型地形的位置,最后进一步处理并显示结果。

若已知超声波在水中的传播速度和超声波来回传播的时间,则河床地形深度可以表示为:

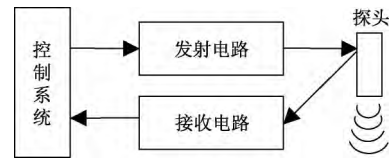


图 1 超声波发射、传播和接收示意图

Fig. 1 Ultrasonic waves emission, transmission and reception

$$h = h_0 + c(t - t_0) / 2 \quad (1)$$

式中: h ——河床地形深度;

h_0 ——水面到参考点的距离;

c ——超声波水中的传播速度;

t ——超声波探头接收到回波信号的时刻;

t_0 ——超声波的发射时刻。

其中 $t_0 = 0.0125 \text{ ms}$ $t = 0.0127 \text{ ms}$, 见图 2。

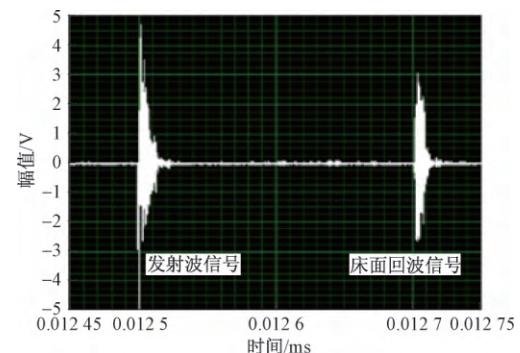


图 2 清水中超声波探头发出的声波和地形信号回波信号

Fig. 2 Ultrasonic waves from detector and echoes from terrain in clear water

试验中若 h_0 为 15.0 cm, 波速 c 测量为 1500 m/s, 根据式 (1) 可以很方便地算出模型地形的深度为 30.0 cm。当超声波探头以 10 cm/s 的速度在水平方向依次扫描时, 就可以得到水下的模型地形。

在浑水模型试验中,水中悬浮沙粒较多,对超声波探头发出的超声波信号影响较大,不能保证探头每次接收到的回波信号都是水下模型地形信号。如图 3 所示,在发射信号与真正地形回波信号之间存在一次较大的和一次较小的沙粒反射回波信号。沙粒回波信号已经大于模型地形的回波信号,这已经给模型地形的判断造成了很大干扰。超声波探头以较快的速度(10 cm/s)水平扫描水平地形时,进一步增加了剔除错误信号的难度,很难保证探测的模型地形是否正确可靠。

1.2 超声成像信号

为了解决水中悬浮粒子对测量水下模型地形的干

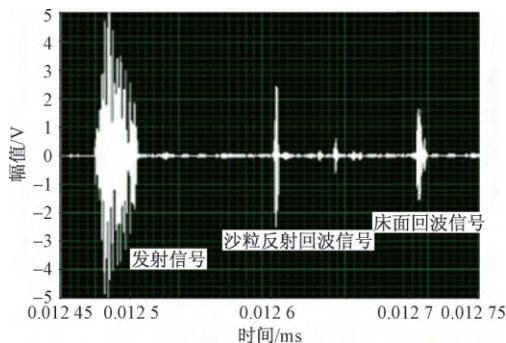


图3 混水中超声波探头发出的声波信号和地形回波信号以及水中悬浮的沙粒回波信号

Fig.3 Ultrasonic waves from detector , echoes from terrain and echoes from suspended sediments in muddy water

扰,本文利用医用B型超声成像仪直接获取水中模型地形的图像。采用高频凸阵式超声波探头对水下模型地形进行快速聚焦扫描;采用亮度调制方式显示回波信号的强弱,即回波幅度大,亮度强,幅度小,亮度弱,进而形成比较真实的水下地形剖面图像。其中一帧超声成像扫描图如图4所示。图4中底部一条水平方向的亮带线为水下模型地形的超声成像图,亮带线上方大大小小的亮斑点为水中悬浮运动的沙粒图像。由此可见,超声成像仪较好地再现了水体中地形与悬浮沙粒的信息。

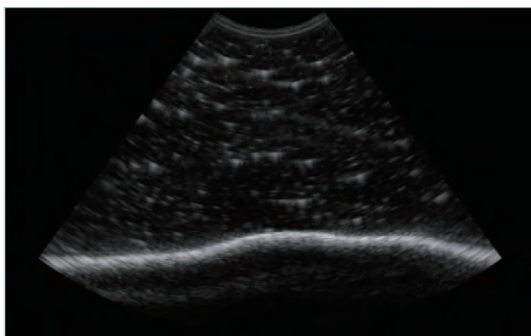


图4 水下模型地形的超声成像扫描图

Fig.4 Scanning map of the underwater terrain

由图4可知,水下模型地形的超声成像信号相对连续稳定。在水流中地形成像亮带基本保持不变,悬浮运动沙粒的成像光斑也相对独立^[10-11],地形成像亮带特征比较明显,如图5所示。图5为图4中垂直方向的一列像素点灰度分布情况,分析可知地形上方亮斑的灰度幅值一般在75左右,而地形亮带(最右边的峰值)一般在150以上。故据此特征可以区分和提取水下地形亮带线,实现水下模型地形的测量。

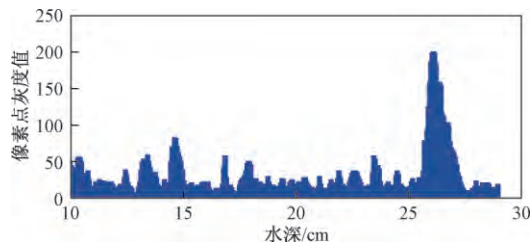


图5 其中一列像素点(垂直方向)灰度值分布图

Fig.5 Distribution of one line pixels' gray values

2 水下模型地形测量

由图4~5可知,水下模型地形的超声成像是一条水平方向连续分布的地形亮带,故采用垂线方向上的像素灰度与梯度权值之和的最大值作为地形线上的点,再根据地形的水平方向的连续性进行自动跟踪搜索,依次寻找出水下模型地形边界线的其他点,以实现单帧图像中水下模型地形的提取。

如图6(a)所示,设图像的左上角为像素坐标起点,坐标从上往下从左往右依次增加。记原图像中像素点的灰度随着*x*、*y*轴变化的函数为*f*(*i*,*j*),采用3×3领域,则点(*i*,*j*)处灰度和梯度权值之和*g*(*i*,*j*)的计算方法为式(2),对应的算子模板为图6(b)。

| | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| (<i>i</i> -1, <i>j</i> -1) | (<i>i</i> -1, <i>j</i>) | (<i>i</i> -1, <i>j</i> +1) |
| (<i>i</i> , <i>j</i> -1) | (<i>i</i> , <i>j</i>) | (<i>i</i> , <i>j</i> +1) |
| (<i>i</i> +1, <i>j</i> -1) | (<i>i</i> +1, <i>j</i>) | (<i>i</i> +1, <i>j</i> +1) |

(a)

| | | |
|----|----|----|
| -1 | -2 | -3 |
| 1 | 2 | 1 |
| 1 | 2 | 1 |

(b)

图6 超声图像中像素点的坐标分布(a)和算子模板(b)

Fig.6 Coordinate of pixels (a) and operator model (b)

$$g(i,j) = \frac{1}{4} \left\{ \sum_{k=-1}^{+1} [f(i+1,j+k) - f(i-1,j+k) + f(i,j+k)] + [f(i+1,j) - f(i-1,j) + f(i,j)] \right\}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n; k = -1, 0, 1 \quad (2)$$

式中:*m*——图像像素点的总行数;

n——图像像素点的总列数;

g(*i*,*j*)——第*i*行第*j*列像素点的灰度和梯度权值之和。

当*g*(*i*,*j*)在第*j*列*x_i*处取最大值时,记为*g*(*x_i*,*j*)_{max}。然后,取每一列像素点(从上往下扫描)的灰度值和梯度权值之和的最大值*g*(*x₀*,0)_{max}、*g*(*x₁*,1)_{max}、*g*(*x₂*,2)_{max}、⋯、*g*(*x_i*,*j*)_{max}、⋯、*g*(*x_m*,*n*)_{max}的行坐标*x₀*,*x₁*,*x₂*,⋯,*x_i*,⋯,*x_m*构成水下模型地形线。最后,在移动控制平台的帮助下,连续扫描水下模型地形,从而实现水下模型地形线的连续提取与实时测量^[7]。在模型水槽试验中,水下模型地形测量系统如图7所

示。图 7 为该测量系统在河工模型试验大厅里的实物装置图 图中显示的有超声成像仪、移动控制平台、水下模型地形和模型水槽。

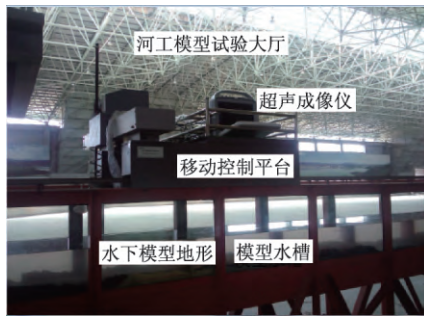


图 7 水下模型地形超声成像测量系统

Fig. 7 Ultrasound imaging measurement system for the underwater model terrain

3 测量结果与讨论

在河工模型试验水槽中,利用超声成像仪(图 7)可以一次性得到水下模型地形的超声成像图。在此基础上进行水下模型地形的连续提取,再标定像素距离与实际水深的对应关系,即可实现水下模型地形的实时测量。其中一帧图像的测量结果如图 8 所示。图中红色线为测量的地形线,左边为垂直水深坐标,底部为水平距离坐标。

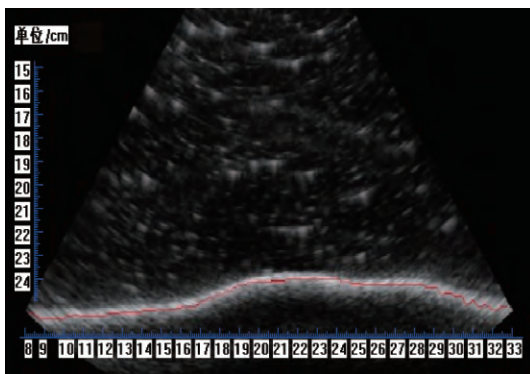


图 8 水下模型地形测量效果图

Fig. 8 Measured result of the underwater terrain

在动床模型试验当中,由于地形的上边界点容易受到泥沙粒子的扬动和沉降运动及水流冲刷作用的影响,地形的上边界存在一定的不确定性。但是地形亮带的中心区域相对比较稳定,故取地形的上边界点与相对稳定的中心点的平均值作为地形线上的点,以得出相对稳定的地形边界线。

由于超声成像测量方法的原理本质上和超声回波定位测量方法一样,故该方法具有相似的测量精度和

灵敏度。在静态或低流速的清水模型试验中,超声成像测量方法的测量精度是 2 像素宽(一个像素宽等于 0.6 mm)如图 9 所示。图 9(a)为超声回波连续测量方法和超声成像测量方法所得地形线与真实地形线的对比图,图 9(b)为超声回波连续测量方法与真实地形线的偏差图,图 9(c)为超声成像测量方法与真实地形线的对比偏差图。

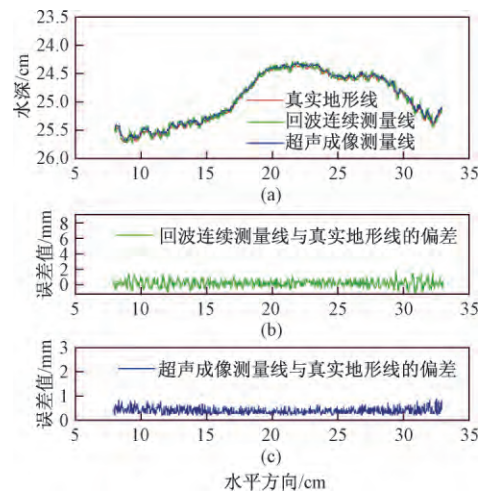


图 9 清水中水下地形测量精度对比图

Fig. 9 Comparison of terrain under clear water

由图 9 可知,在清水定床模型试验中,超声成像测量方法测量的结果基本上和超声回波测量方法一致,都与真实地形线吻合较好,测量偏差小于 1 mm。由此可知,超声成像测量方法在清水定床模型试验中是可行,结果可靠。

在浑水动床模型试验当中,超声回波方法非常容易受到水中悬浮运动粒子的干扰。特别是在模型地形表面附近有大量泥沙颗粒运动的情况下,超声回波信号处理难以剔除运动颗粒的回波干扰信号。然而,超声成像测量方法则可以通过图像处理的方式进行运行粒子图像信号的滤波处理,把地形附近运动粒子的成像干扰进行滤除,实现水下模型地形的无干扰测量与分析^[12]。图 10(a)、10(b)、10(c)分别为浑水动床模型试验情况下真实地形线、回波连续测量地形线和超声成像测量线的对比分析图。

由图 10 可知,在浑水动床模型试验中,超声成像测量方法所得地形线依然与真实地形线吻合较好,测量误差仍然在 2 个像素宽之内。然而,超声回波测量方法所得地形线由于受到地形附近大量无规则运动粒子的干扰而与真实地形线偏差较大。由此可知,超声成像测量方法在浑水动床模型试验中具有明显的优势,所得地形线精度较高。

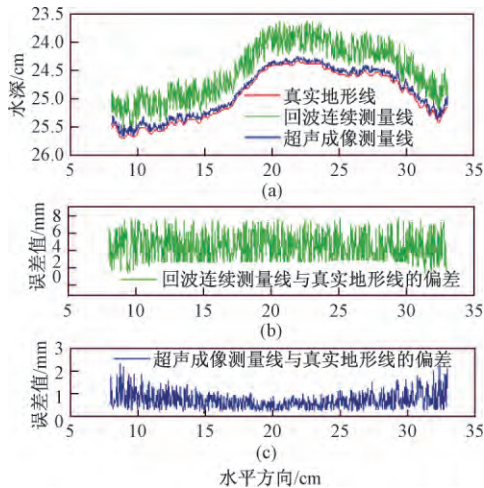


图 10 浑水中水下地形测量精度对比图

Fig. 10 Comparison of terrain under muddy water

4 结论

(1) 对高频超声回波信号和超声成像信号进行了对比分析。结果表明高频超声回波信号容易受到水下悬浮运动沙粒的影响,进而影响浑水模型试验情况下地形的测量分析,从而提出超声成像测量方法。

(2) 针对水下模型地形的测量,超声回波定位测量方法是点到点式测量,需要进行多次连续测量达到比较高的测量精度,而超声成像测量方法是线到线式的测量,一次性就可以实现水下地形线的高精度测量分析。

(3) 浑水模型试验中,超声回波定位测量方法容易受到床面附近无规则运动沙粒的干扰,从而大大地影响了测量精度,但超声成像测量方法可以通过图像处理实现水下模型地形线的无干扰测量与分析,测量精度小于 3 个像素宽(约 1.8 mm),有效地解决了浑水模型地形的实时测量问题。

参考文献:

[1] Chu X, Nelis J, Rediske R. Preliminary Study on the Effects of Surface Microtopography on Tracer Transport in a Coupled Overland and Unsaturated Flow System [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18 (10): 1241 - 1249.

[2] 褚宏亮,殷跃平,曹峰,等. 大型崩塌灾害变形三维激光扫描监测技术研究[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 128 - 134. [CHU H L, YIN Y P, CAO F, *et al.* Research on deformation monitoring of large collapses and landslides based on 3D laser scanning technology [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 128 - 134. (in Chinese)].

[3] 陈诚,唐洪武,陈红,等. 国内河工模型地形测量方法研究综述[J]. *水利水电科技进展*, 2009, 29 (2): 76 - 79, 94. [CHEN C, TANG H W, CHEN H, *et al.* Review of the research on topographic survey methods for physical river models in China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29 (2): 76 - 79, 94. (in Chinese)]

[4] 马志敏,范北林,许明,等. 河工模型三维地形测量系统的研制[J]. *长江科学院院报*, 2006, 23(1): 47 - 49, 60. [MA Z M, FAN B L, XU M, *et al.* Development of measuring instrument for 3D river bed model topography [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2006, 23(1): 47 - 49, 60. (in Chinese)]

[5] Zou X J, Ma Z M, Hu W B, *et al.* B-mode ultrasound imaging measurement and 3D reconstruction of submerged topography in sediment-laden flow [J]. *Measurement*, 2015, 72 (1): 20 - 31.

[6] 马志敏,邹先坚,赵小红,等. 基于 B 超成像的低含沙量测量[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(4): 796 - 803. [MA Z M, ZOU X J, ZHAO X H, *et al.* The measurement of low sediment concentration based on B-mode ultrasound images [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(4): 796 - 803. (in Chinese)]

[7] 宋欢,王川婴,邹先坚,等. 基于 B 超图像的水下模型地形提取方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(2): 225 - 232. [SONG H, WANG C Y, ZOU X J, *et al.* An extracting method of underwater model topography based on B-mode ultrasound images [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23 (2): 225 - 232. (in Chinese)]

[8] Crapper M, Bruce T, Gouble C. Flow field visualization of sediment-laden flow using ultrasonic imaging [J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2000, 31(1/4): 233 - 245.

[9] 马志敏,邹先坚,赵小红,等. 基于 B 超成像的泥沙起动流速测量方法[J]. *水科学进展*, 2015, 26 (1): 59 - 65. [MA Z M, ZOU X J, ZHAO X H, *et al.* A method of measuring sediment incipient velocity based on B-scan ultrasound imaging technique [J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 59 - 65. (in Chinese)]

(下转第 47 页)

- [7] Ford D C, Williams P W. Karst geomorphology and hydrology [M]. London: Chapman & Hall, 1989: 601.
- [8] Morse J W, Mac Kenzie FT. Geochemistry of sedimentary carbonates [M]. Amsterdam: Elsevier, 1990: 696.
- [9] Gabrovsek F, Menne B, Dreybrodt W. A model of early evolution of karst conduits affected by subterranean CO₂ sources [J]. Environmental Geology, 2000, 39: 531–543.
- [10] 张文佑. 中国及邻区海陆大地构造 [M]. 北京: 科学出版社, 1986. [ZHANG W Y. Marine and continental geo-tectonics in China and adjacent regions [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)]
- [11] 邱书敏. 岩溶找水 [M]. 南宁: 广西人民出版社, 1980. [QIU S M. Karst water exploration [M]. Nanning: Guangxi People's Publishing House, 1980. (in Chinese)]
- [12] 张亮, 陈植华, 周宏, 等. 典型岩溶泉水文地质条件的调查与分析——以香溪河流域白龙泉为例 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(2): 31–37 [ZHANG L, CHEN Z H, ZHOU H, et al. Investigation and analysis of the hydrogeological characteristics of the typical karst spring in the Xiangxi River Basin: exemplified by the Bailong Spring in Xingshan County of Hubei [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(2): 31–37. (in Chinese)]
- [13] 罗明明, 肖天昀, 陈植华, 等. 香溪河岩溶流域几种岩溶水系统的地质结构特征. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 13–19. [LUO M M, XIAO T Y, CHEN Z H, et al. Geological structure characteristics of several karst water systems in the Xiangxi River Karst Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 13–19. (in Chinese)]
- [14] 田娟, 董贵明, 束龙仓. 孔隙-管道型西南岩溶地下河系统参数与流量衰减系数关系的数值试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 13–18. [TIAN J, DONG G M, SHU L C. Research on relationship between parameters and attenuation coefficients of pore-pipe underground river systems, southwest China [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 13–18. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳

(上接第32页)

- [10] Yeom E, Nam K, Paeng D, et al. Improvement of ultrasound speckle image velocimetry using image enhancement techniques [J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 205–216.
- [11] Zou X J, Ma Z M, Zhao X H, et al. B-scan ultrasound imaging measurement of suspended sediment concentration and its vertical distribution [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(11): 115–303.
- [12] 苗得雨, 白晓红. 基于 Matlab 的土体 SEM 图像处理办法 [J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(6): 141–146. [MIAO D Y, BAI X H. Microstructure of soil using SEM images based on Matlab [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(6): 141–146. (in Chinese)]
- [13] 吴红斌, 徐金明, 刘大谋, 等. 使用图像分析方法研究整环加载试验中盾构管片的错台变化特征 [J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 113–118. [WU H B, XU J M, LIU D M, et al. Dislocation variations in tunnel segments in lining structure experiments using image processing techniques [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(3): 113–118. (in Chinese)]

责任编辑: 张若琳