

多波束测深方法对坝下泄洪消能建筑物冲刷破坏的检测

孙红亮¹, 胡清龙¹, 袁琼², 卫蔚²

(1. 四川中水成勘院工程物探检测有限公司, 四川 成都 610072;
2. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:为了无损检测坝下泄洪消能建筑物的冲刷破坏程度,将多波束测深方法从海洋测绘引进到水电站检测,结合水下机器人视频验证,对某水电站的坝下泄洪消能建筑物中的冲刷破坏情况进行检测,以查明水泥混凝土护坦的冲刷破坏程度以及边墙的淘刷深度。通过检测的过程及资料分析,确定了多波束测深系统无信号屏蔽的适用条件,对冲刷、磨损、淘空等精细检测特征进行了总结。结果表明,多波束测深系统对冲刷磨损情况检测效果良好,可以清晰判断冲刷磨损范围及程度,对混凝土错台现象反应明显;对冲刷淘空情况检测效果较好,对冲坑部位水下地形绘制精确,对淘空区域的范围及深度判断较好。

关键词:无损检测;多波束测深系统;泄洪消能建筑物;冲刷破坏

中图分类号:TV653 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0076-05

Erosion damage detection of a flood energy dissipating system using multi-beam bathymetry method//SUN Hongliang¹, HU Qinglong¹, YUAN Qiong², WEI Wei² (1. Sichuan Zhongshui Chengkanyuan Geophysical Exploration Co., Ltd., Chengdu 610072, China; 2. Power China Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China)

Abstract: A multi-beam bathymetry system was introduced from marine surveying and mapping to the hydropower station detection industry so that non-destructive testing for the erosion damage effect of the flood energy dissipating system can be carried out. The multi-beam bathymetry system combined with the video filmed by an underwater robot was applied to detect the erosion damage of the cement concrete mulch and side walls of a hydropower station. Through analysis of the testing process and data, the application conditions of no signal shielding was determined. Detailed detection characteristics such as scouring, wearing and caving were summarized and the result shows the multi-beam bathymetry system has good detection effects for erosive wear especially for the faulting of slab ends of which the scope and degree can be clearly estimated. The multi-beam bathymetry system also has good detection effects for erosive caving and the underwater topography around the scouring pit can be accurately plotted with a better estimation for the scouring scope and depth.

Key words: non-destructive examination; multi-beam bathymetry system; flood energy dissipation system; erosion damage

我国进入了水电开发与建设的高峰期,一批大型及特大型战略性工程正在或即将投入使用,其工程和社会条件十分复杂,技术难度高^[1]。从水力学角度看,我国高坝建设普遍存在高水头、大流量、窄河谷的技术特点,这对高坝坝下泄洪消能建筑物提出了很高的要求^[2]。

冲刷破坏是威胁坝下泄洪消能建筑物安全运行的主要问题,在电站运行期间对坝下泄洪消能建筑物进行检测,判断冲刷破坏程度,提前做出维护方案以防止冲刷破坏程度继续加大,成为重点研究方向。

坝下泄洪消能建筑物多为水垫塘或消力池,在下游水位较高时,长期处于水下十几到几十米,难以修筑围堰进行抽水检查。

目前水下无损检测方法主要为目视检测,包括潜水员水下目视、水下摄影、水下录像等,存在受水流和水质限制、可视范围小、定位繁杂等缺点。多波束测深系统也称声呐阵列测深系统,在海洋测绘、江河湖泊测绘中的应用日益广泛^[3-5]。

笔者将多波束测深方法应用于某水电站的大水深坝下泄洪消能建筑物冲刷破坏的无损检测中,通

过水下机器人系统验证,分析总结该技术应用优势及缺陷,以推动该方法的应用推广。

1 多波速测深系统

多波束测深系统源于单波束回声测深系统,利用安装于船的龙骨方向上的一条长发射阵,向海底发射一个与船龙骨方向垂直的超宽声波束,并利用安装于船底的与发射阵垂直的接收阵接受回波。当测深系统在完成一个完整的发射接收过程后,经过适当处理形成与发射波束垂直的许多个预成接收波束,从而形成一条由一系列窄波束测点组成的在船只正下方垂直航向排列的测深剖面^[6-7]。

多波束测深系统采用了惯导系统并配有 GNSS 辅助定位及 Octans 惯性姿态传感器,可实现精确的位置、艏向、垂荡和横摇测量。结合 RTK-GPS 系统,能实时提供厘米级定位精度的测量数据修正,对泄洪建筑物过流面进行全覆盖扫测,相邻测线覆盖范围重合至少 20%,对于重点部位进行多次覆盖扫测,保证探测数据精度。

采用 Qinsy 数据采集软件以及 CARIS HIPS and SIPS 实测数据后处理软件对采集来的各传感器数据进行处理,对水深数据设定各项合理的过滤参数以删除假信号,对两条相邻测线重覆盖地方的多余观测数据进行筛选、删除,以保留高精度的水深数据。最后,绘制等深线图以及典型测线地貌图^[8]。

2 检测效果总体分析

2.1 某水电工程坝下泄洪消能建筑物概况

某水电站位于雅砻江干流上,由河床式发电厂房、泄洪闸及挡水坝等建筑组成,电站泄洪闸由河床 4 孔泄洪闸和右岸导流明渠内 3 孔泄洪闸组成。

河床 4 孔泄洪闸坝布置于河床右侧,其左接厂房坝段,右接导流明渠。泄洪闸坝段沿坝轴线方向长 90.0 m,闸室顺水流方向长 60.0 m。下游消力池护坦顶高程 970.0 m,消力池长 65.0 m,消力池护坦厚 4.0 m,消力池尾坎下游抛填大块石护底。右岸导流明渠内布置 3 孔泄洪闸坝,沿坝轴线方向长 74.6 m,闸室顺水流方向长 60.0 m。下游消力池护坦接导流明渠底板高程 982.00 m,护坦长 65 m。

2.2 检测成果分析

为了查明该水电站首次开闸泄洪后消能系统的冲蚀磨损程度,对过流面展开水下检测工作。多波束测深检测范围为:河床段泄洪闸堰面和护坦表面,桩号坝 0+016.79(弧门门槽后)至坝 0+125.00;明渠段泄洪闸堰面和护坦表面,桩号坝 0+016.70(弧门门槽后)至左导 0+326.48;河床泄洪闸及明渠泄洪闸出口段。检测成果平面图见图 1。

图 1 中测试成果图与设计图纸吻合度较高,总体能反映大水深下泄洪过流面的地形情况。混凝土护坦部位整体较平整,河床部位整体较粗糙。河床泄洪闸段护坦下游有冲坑发育,明渠泄洪闸段海漫段有混凝土脱块现象。

2.2.1 (坝横)坝 0+0~0+60 检测区域

由图 1 可见,对于(坝横)坝 0+0~0+60 检测区域,由于两侧闸墩混凝土墙的屏蔽作用,致使 GPS-RTK 信号失锁,只能采用惯性导航,这会产生随时间累积的系统误差,致使定位不准确,成果图形出现局部拼接畸形,表现为空白或重叠、高程起伏不定等(图 2)。这种系统误差对一般海洋测绘的影响可以忽略不计,但是对厘米级的高精度冲刷磨损检测的影响较为严重。

总之,当周围存在对 GPS-RTK 信号形成干扰的

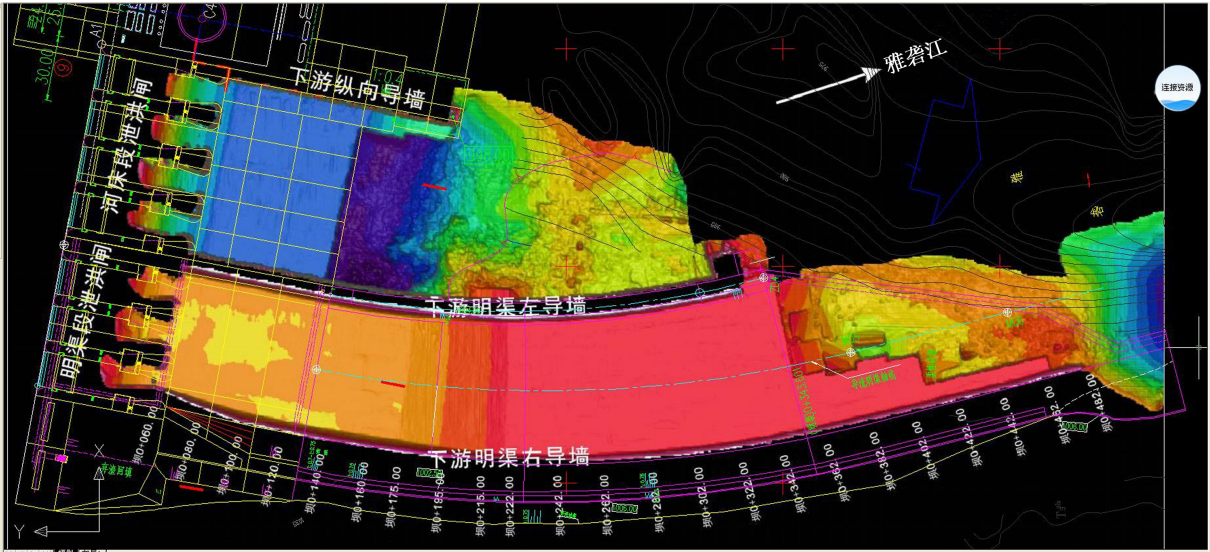


图 1 多波束测深检测成果平面图

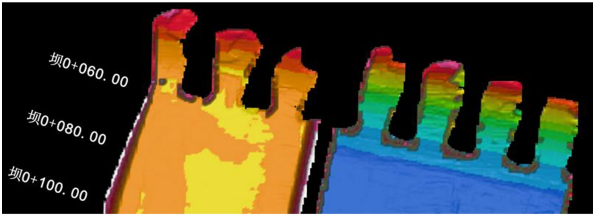


图2 (坝横)0+0~0+60区域检测成果平面图

建筑物或设施时,多波束测深系统将因系统误差产生局部假异常,在后期进行资料处理及解译时需注意。

2.2.2 河床泄洪闸段

2.2.2.1 混凝土护坦表面

由图1可见,多波束测深系统对河床泄洪闸段护坦测试效果较好,数据密集完整,成果图清晰光滑。护坦表面未见明显凹陷及凸起变形,表面起伏较小,最大高程差约2 cm,基本为一个平面,无冲蚀破坏,三维图形见图3。

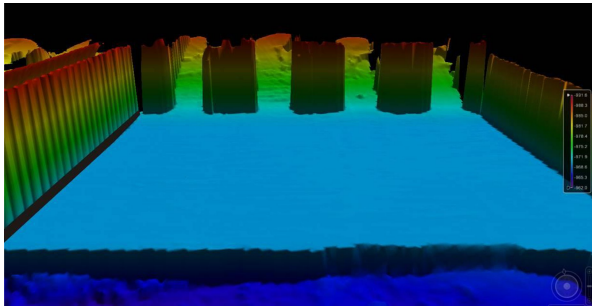


图3 河床泄洪闸段护坦表面检测成果三维图

2.2.2.2 河床泄洪闸段护坦与边墙接缝

针对图3中河床泄洪闸护坦与明渠左导墙接缝存在数据缺失的空白区域,对多波束测深原始云数据进行剖面数据提取,见图4。

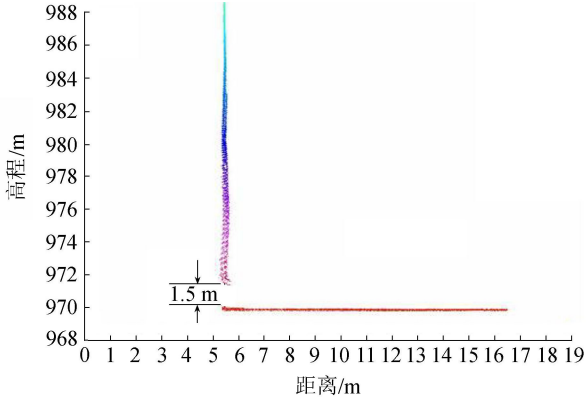


图4 河床泄洪闸段护坦表面检测点云剖面

由图4可见,边墙及护坦表面光滑,但边墙底部高程970.0~971.5 m之间存在约1.5 m高度的原始数据空白。

为查明该部分异常原因,进行水下机器人复核,复核成果见图5,可见明渠左导墙与护坦接触地带

的混凝土台阶,该混凝土台阶约宽30 cm、高5 cm。明渠左导墙与底部混凝土台阶接触紧密并呈90°夹角,河床泄洪闸段护坦与混凝土台阶接触紧密并呈90°夹角。该混凝土台阶发育引起发射波的多次反射,从而产生数据盲区。

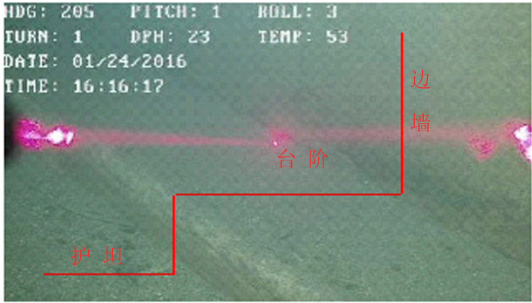
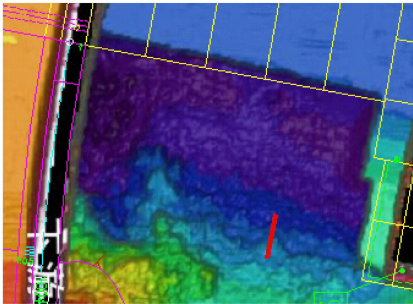


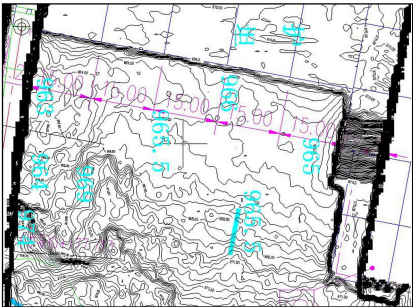
图5 河床泄洪闸段护坦与明渠左导墙接缝

2.2.2.3 护坦下游

由图1可见,从坝0+125.0~0+175.0约50 m的左侧尾水渠边墙至右侧明渠左导墙范围形成冲刷坑。根据测试原始云数据进行等高线图绘制,护坦部分等高线基本等高距1 cm,下游冲坑部分等高线基本等高距10 cm,如图6所示。由图6可见,最大冲深约7 m,冲刷坑坑底高程约963.0 m。



(a) 平面图



(b) 等高线

图6 护坦下游冲坑

由图6(b)可见,在坝0+147剖面河床高程起伏高差达到4 m,河床最低高程为963.1 m左右,最高高程为966.3 m左右。过流前该位置为下游危岩残体,拆除平整高程在970.0 m左右,竖向剖面图如图7所示。

由图7可见,明渠左导墙左岸侧(坝横)坝0+

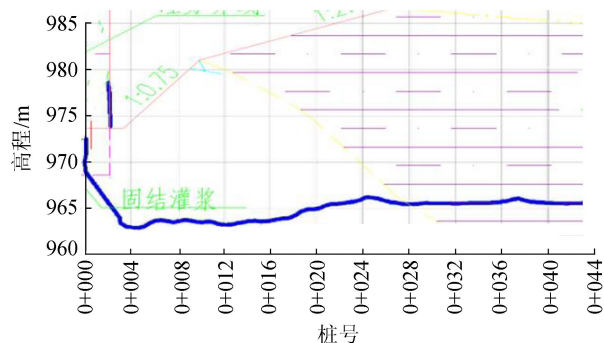
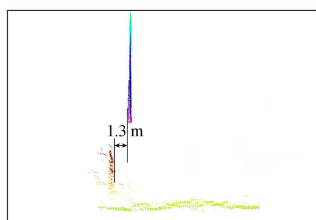
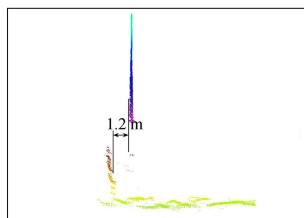


图7 坝0+147 竖向剖面

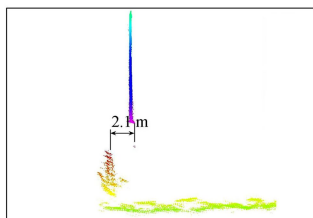
170 区域附近的 974 m 高程以下存在明显淘空。对多波束测深原始云数据进行提取(图 8),结果表明:974 m 高程以上墙体完整光滑,云数据密集,无明显冲蚀;在 974 m 高程以下区域至河床底部,存在约 1~2 m 的淘空区域;船只漂浮于水面,由于水深大,在 970~974 m 高程区域存在因检测波不能到达而引起的数据盲区。



(a) 坝0+145



(b) 坝0+150



(c) 坝0+160

图8 导墙左侧区域检测点云剖面

以上成果表明:

- 多波束测深系统对混凝土护坦冲刷磨损情况检测效果良好,可以清晰判断冲刷磨损程度。
- 多波束测深系统对混凝土护坦下游冲刷淘空情况检测效果较好,对冲坑部位水下地形绘制精确,对淘空区域的范围及深度判断较好。
- 多波束测深系统在混凝土锐角和直角交界处可能产生因多次反射而形成的数据盲区。
- 由于大水深作用,船只漂浮于水面,冲刷淘

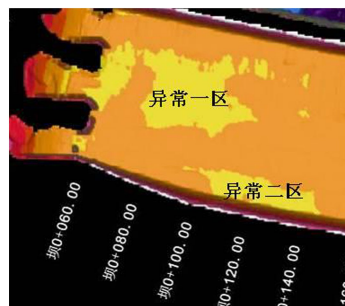
空区域顶部会出现因检测波不能到达而引起的数据盲区。

2.2.3 明渠泄洪闸段

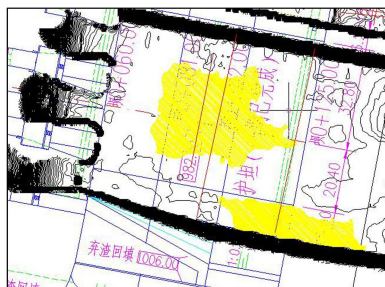
2.2.3.1 混凝土护坦表面

多波束探测成果显示明渠泄洪闸段混凝土护坦表面存在 3 个异常区域。

异常一区位于明渠泄洪闸段 982.0 m 高程护坦,异常范围为(坝横)坝 0+076~0+108 以及(坝纵)0+10~0+40,为平面展布较大的下凹,混凝土表面未见明显淘蚀现象,凹陷范围(长×宽×深)约为 45 m×20 m×0.06 m。异常区域平面位置图见图 9,根据原始云数据提取的剖面高程数据绘制剖视图见图 10。



(a) 平面图



(b) 等高线

图9 异常一区、异常二区检测成果

异常二区位于位于明渠泄洪闸段 982 m 高程护坦,接近下游明渠右导墙。异常范围为(坝横)坝 0+104~0+145 以及(坝纵)0+60~0+70,为平面展布较大的下凹,混凝土表面未见明显淘蚀现象,凹陷范围约为 45 m×7.5 m×0.1 m。异常区域平面位置图见图 9,根据原始云数据提取的剖面高程数据绘制剖视图见图 11。

异常三区位于位于明渠泄洪闸段 982 m 高程护坦,异常范围为(坝横)坝 0+168~0+172 以及(坝纵)0+48 附近,混凝土出现了错台现象,错台范围约为 3.5 m×1.2 m×0.1 m,水下混凝土模拟图见图 12。

2.2.3.2 护坦与边墙接缝

多波束测深成果显示导流明渠段底板与边墙接缝处较为契合,未见明显分裂及变形,局部三维图形见图 13。

对导流明渠底板测试云数据进行剖面分析,云

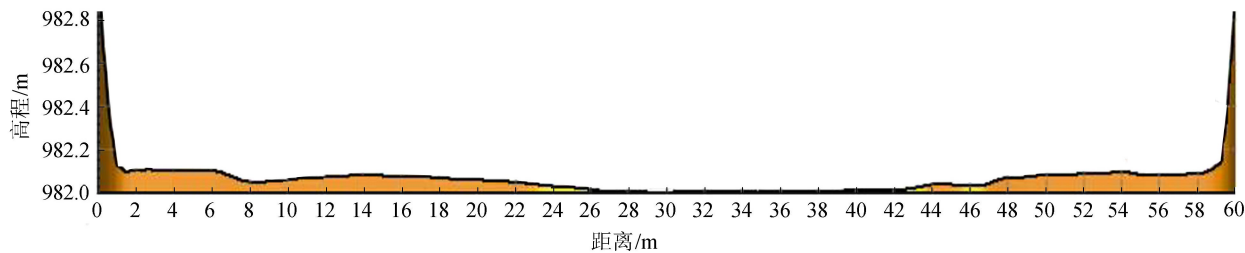


图 10 异常一区检测成果剖面

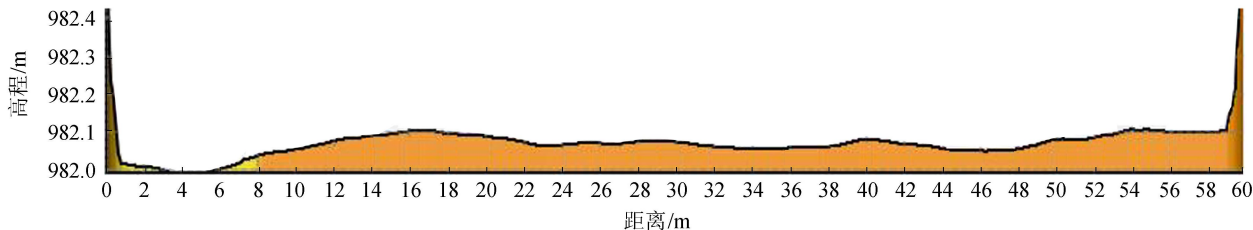


图 11 异常二区检测成果剖面

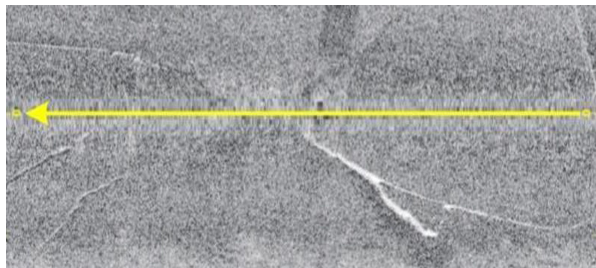


图 12 异常三区模拟图

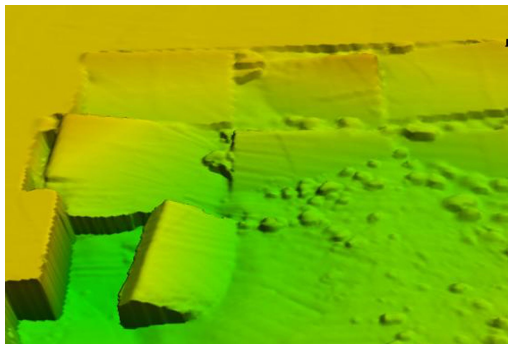


图 15 明渠下游海漫段检测成果三维图

以上成果表明:

- a. 多波束测深系统对混凝土护坦冲刷磨损情况检测效果良好,可以清晰判断冲刷磨损范围及程度,对混凝土错台现象反应明显。
- b. 多波束测深系统对混凝土钝角交界处测试效果良好,采集原始云数据密集。
- c. 多波束测深系统对混凝土护坦下游海漫段检测效果良好,对护坦混凝土脱块情况水下地形绘制精确,可清晰判断护坦混凝土脱块的大小及脱开程度。

3 结 论

- a. 多波束测深系统对冲刷磨损情况检测效果良好,可以清晰判断冲刷磨损范围及程度,对混凝土错台现象反应明显。
- b. 多波束测深系统对冲刷淘空情况检测效果较好,对冲坑部位水下地形绘制精确,对淘空区域的范围及深度判断较好。
- c. 多波束测深系统对混凝土钝角交界处测试效果良好,而在混凝土锐角和直角交界处,可能会因多次反射而形成的数据盲区。

(下转第 94 页)

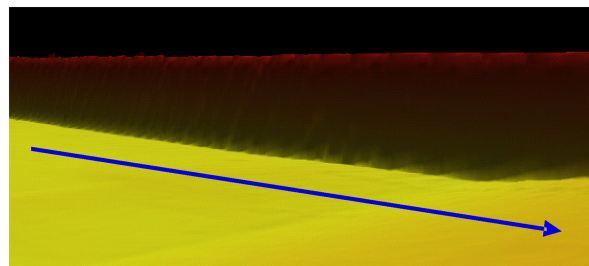


图 13 导流明渠段护坦与边墙接缝处检测成果三维图

数据剖面图见图 14。由原始云数据可见,底板与边墙接缝处数据密集,未见冲蚀缺陷;边墙表面较光滑,与底板呈现 45° 夹角。

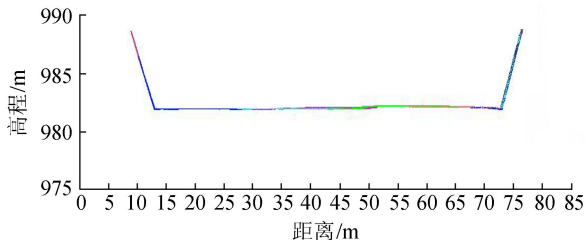


图 14 明渠泄洪段检测原始点云剖面

2.2.3.3 明渠下游海漫段

多波束探测成果显示(明渠)0+343 下游区域护坦混凝土分块脱开,脱开的混凝土分块多于 8 块(图 15),分块平面尺寸(长×宽)约为 $13\text{ m} \times 13\text{ m}$,介于(坝横)坝 0+168 至坝 0+172 之间。

[11] WANG Fujun, LI Yaojun, CONG Guohui, et al. CFD simulation of 3D flow in large-bore axial-flow pump with half-elbow suction sump [J]. Journal of Hydrodynamics; Ser B, 2006, 18(2): 243-247.

[12] 袁寿其, 刘厚林. 泵类流体机械研究进展与展望[J]. 排灌机械工程学报, 2007, 25(6): 46-51. (YUAN Shouqi, LIU Houlin. Research progress and prospecton fluid machinery-pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(6): 46-51. (in Chinese))

[13] 周龙才, 刘士和, 丘传忻. 泵站正向进水前池流态的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2004, 22(1): 23-27. (ZHOU Longcai, LIU Shihe, QIU Chuanxi. Numerical simulation of fluid flow in forward inflow forebay of pumping station [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2004, 22(1): 23-27. (in Chinese))

[14] 冯建刚. 城市排水泵站虹吸式出水管水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2010.

[15] 王晓升, 冯建刚. 泵站虹吸式出水管虹吸形成过程气液两相流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 78-83. (WANG Xiaosheng, FENG Jiangang. Numerical simulation of gas-liquid flow outlet pipe siphon siphon formed Pumping [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 78-83. (in Chinese))

[16] 冯建刚. 大型城市取水泵站虹吸式出水管水力特性研究[J]. 给水排水, 2007, 33(11): 203-206. (FENG Jiangang. Research on hydraulic characteristics of siphon-type water outflow pipe in big size municipal water intake pumping station [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(11): 203-206. (in Chinese))

[17] 李彦军, 颜红勤, 葛强. 泵站虹吸式出水渠道优化设计[J]. 排灌机械, 2008, 26(4): 43-47. (LI Yanjun, YAN Hongqin, GE Qiang. Optimum design of siphon outlet conduit in pumping station [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2008, 26(4): 43-47. (in Chinese))

[18] 谭淋露, 冯建刚, 陈毓陵, 等. 泵站虹吸式出水管数值模拟及水力优化[J]. 中国农村水利水电, 2014, 31(3): 126-133. (TAN Linlu, FENG Jiangang, CHEN Yuling, et al. Numerical simulation and hydraulic optimization of siphon outlet pipe in pumping station [J]. China Rural Water and Hydropower, 2014, 31(3): 126-133. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-12-11 编辑: 骆超)

(上接第 80 页)

- d. 当周围存在对 GPS-RTK 信号形成干扰的建筑物或设施时, 多波束测深系统将产生随时间累积的系统误差。
- e. 由于大水深作用, 船只漂浮于水面, 多波束测深系统会在冲刷淘空区域顶部出现检测波不能到达引起的数据盲区。

参考文献:

[1] 陈云华, 吴世勇, 马光文. 中国水电发展形势与展望[J]. 水力发电学报, 2013, 32(6): 1-4. (CHEN Yunhua, WU Shiyong, MA Guangwen. Trends and prospects of hydropower development in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(6): 1-4. (in Chinese))

[2] 王英奎, 廖仁强, 江春波. 高拱坝水垫塘消能机理及水力学参数研究进展[J]. 人民长江, 2015, 46(8): 40-43. (WANG Yingkui LIAO Renqiang, JIANG Chunbo. Research progress on energy dissipation mechanism and hydraulic characteristics of plunge pool in high arch dam [J]. Yangtze River, 2015, 46(8): 40-43. (in Chinese))

[3] LI Haisen, XU Chao, ZHOU Tian. High-resolution integrated detection of underwater topography and geomorphology based on multibeam interferometric echo sounder [J]. Advances in Hydrology and Hydraulic Engineering, 2012, 212/213: 345-350.

[4] 拜阳, 宋海斌, 关永贤, 等. 利用反射地震和多波束资料研究南海西北部麻坑的结构特征与成因[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2208-2222. (BAI Yang, SONG Haibin, GUAN Yongxian, et al. Structural characteristics and genesis of pockmarks in the northwest of the South China Sea derived from reflective seismic and multibeam data [J]. Chinese Journal Geophysics, 2014, 57(7): 2208-2222. (in Chinese))

[5] 关永贤, 杨胜雄, 宋海斌, 等. 南海西南部深水水道的多波束地形与多道反射地震研究[J]. 地球物理学报, 2016, 59(11): 4153-4161. (GUAN Yongxian, YANG Shengxiong, SONG Haibin, et al. Study of deep water channels in SW South China Sea based on multi-beam bathymetric and multi-channel reflection seismic data [J]. Chinese Journal Geophysics, 2016, 59(11): 4153-4161. (in Chinese))

[6] HAMMERSTAD E. Advances in multibeam echo sounder technology [C]//OCEANS, 93, Engineering in Harmony with Ocean, Proceedings. Victoria, BC, Canada: IEEE: 1482-1487.

[7] ROBERTS H H, SHEDD W, HUNT J. Dive site geology: DSV ALVIN (2006) and ROV JASON II (2007) dives to the middle-lower continental slope [J]. Deep-Sea Research Part II, 2010, 57(21/22/23): 1837-1858.

[8] ANDERSON J T. Acoustic seabed classification of marine physical and biological landscapes [J]. Infectious Diseases, 2007, 35(5): 351-352.

(收稿日期: 2017-05-24 编辑: 郑孝宇)