

# 黄金坪水电站泄洪建筑物水下检查技术探索与实践

刘 玥

(四川大唐国际甘孜水电开发有限公司, 四川 甘孜 626001)

**摘要:**在高速水流的长期冲刷下,泄洪建筑物混凝土易出现冲蚀,下游易出现冲坑,这些问题往往都隐藏在水下,平常不易被人发现,对水电站的安全稳定运行造成了威胁。传统的潜水员水下检查技术受下潜时间和下潜深度的限制,作业范围有限,难以对水工建筑物的水下部分进行大范围的检查,同时由于水下环境复杂,潜水员在水下作业时会有生命危险,采用多波束声呐系统和水下无人潜航器的方法对黄金坪水电站溢洪道消力池进行水下检查,测量得到了消力池水下冲坑的精确数据。该技术突破了水下检查作业范围的限制,在保证人员安全的情况下,提高了工作效率,也为消力池水下缺陷修复提供了可靠的数据支撑,为同类水下建筑物检查提供参考。

**关键词:**水工建筑物;消力池;水下检查;多波束声呐系统;水下无人潜航器

**中图分类号:**TV698.1;U666.75;[TM622]

**文献标志码:** B

**文章编号:**1001-2184(2023)增 2-0130-09

## Exploration and Practice of Underwater Inspection Technology of Flood Discharge Structures of Huangjinping Hydropower Station

LIU Yue

(Datang International Power Generation Ganzi Hydropower Development Co., Ltd., Ganzi Sichuan 626001)

**Abstract:** Under the long-term erosion of high-speed water flow, the concrete of flood discharge buildings is prone to erosion, and downstream erosion pits are prone to occur. These problems are often hidden underwater and are not easily discovered, posing a threat to the safe and stable operation of hydropower stations. The traditional underwater inspection technology for divers is limited by the diving time and depth, and the scope of operation is limited, making it difficult to conduct large-scale inspections of the underwater parts of hydraulic structures. At the same time, due to the complex underwater environment, divers may face life risks when working underwater. Therefore, a multi-beam sonar system and an underwater unmanned underwater vehicle were used to conduct underwater inspections of the spillway stilling pool of the Huangjinping Hydropower Station, and accurate data of the underwater flushing pit of the stilling pool was obtained through measurement. This technology breaks through the limitations of the scope of underwater inspection operations, improves work efficiency while ensuring personnel safety, and provides reliable data support for repairing underwater defects in the stilling basin, providing reference for similar underwater building inspections.

**Key words:** Hydraulic structures; Stilling basin; Underwater inspection; Multi-beam sonar system; Underwater unmanned underwater vehicle

## 0 引言

黄金坪水电站处于大渡河上游河段,系大渡河干流水电规划“三库 22 级”的第 11 级电站,电站采用水库大坝和“一站两厂”的混合式开发,电站总装机容量 850 MW。枢纽建筑物主要由沥青混凝土心墙堆石坝、1 条 3 孔岸边溢洪道、1 条泄洪(放空)洞、左岸大厂房和右岸小厂房引水发电建筑物等组成。电站于 2015 年 5 月开始下闸蓄

水,该年 8 月底首台机投产发电。

溢洪道由进口引渠段、控制闸室段、泄槽段、消力池段和出水渠段组成。消力池采用梯形断面,消力池长 86.00 m、底宽 46.00 m,底板高程 1 396.00 m,常年位于大坝下游水面线下。设计最大入池流速 36.45 m/s,出池流速 5.27 m/s。

由于泄洪系统消力池流速非常快,流态紊乱,且大渡河水流湍急,河水含沙量大,水流携带悬移质、推移质对泄洪系统消力池冲蚀破坏较严重。

收稿日期:2023-04-05

为确保黄金坪水电站的安全稳定运行,有必要在汛后对泄洪系统消力池进行检查及修复。

## 1 检查方法

### 1.1 多波束测深系统

#### 1.1.1 方法原理

多波束测深系统,又称为多波束测深仪、条带测深仪或多波束测深声呐等,最初的设计构想就是为了提高海底地形测量效率。与传统的单波束测深系统每次测量只能获得测量船垂直下方一个海底测量深度值相比,多波束探测能获得一个条带覆盖区域内多个测量点的海底深度值,实现了从“点—线”测量到“线—面”测量的跨越,其技术进步的意义十分重大。

测深系统的换能器基阵,由发射声信号的发射阵和接收海底反射回声信号的接收阵组成。发射器发出一个扇形波束,其面垂直于航迹,一般开角为  $60^{\circ}\sim 150^{\circ}$ ,航迹方向的开角约为  $0.5^{\circ}\sim 5.0^{\circ}$ 。接收阵接收海底回波信号,经延时或相移后相加求和,形成几十个或者数百个相邻的波束。航迹方向的波束开角一般为  $1^{\circ}\sim 3^{\circ}$ ,垂直于航迹的开角为  $0.5^{\circ}\sim 3.0^{\circ}$ 。组合发射和接收波束可得到几十个或几百个窄的测深波束。多波束系统测试示意图见图 1<sup>[1]</sup>。

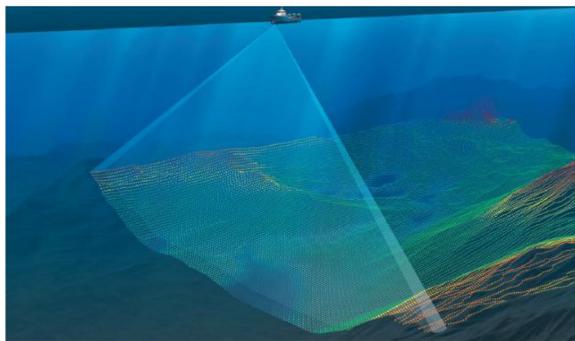


图 1 多波束系统测试示意图

#### 1.1.2 仪器设备及技术指标

此次采用 TELEDYNE RESON A/S 公司生产的 Teledyne RESON-IDH SeaBat T50-P 系统。采用调频技术大大增加测量性能,测距远,抗干扰性能高,理论上可覆盖 20 倍水深值,是目前世界上采用最多的多波束测量系统。T50-P 多波束系统相关技术指标见表 1。

#### 1.1.3 现场作业

(1)坐标系统转换。此次水下三维声呐检查

表 1 T50-P 多波束系统相关技术指标

工作频率	190~420 kHz 之间任意选择,用户在线实时选择
垂直航迹线 接收波束宽度(标称值)	$0.5^{\circ}$
沿航迹线发射波束宽度(标称值)	$1.0^{\circ}$
波束数	Max:512;min:10
最大扫宽角度	$150^{\circ}$ ED/ $165^{\circ}$ EA
最大水深范围	300 meters
深度分辨率	6 mm
深度等级	50 m

系统采用了 RTK·GPS 技术提供定位参数,坐标系为 WGS-84 坐标系,高斯  $3^{\circ}$  带投影,测区中央子午线为  $102^{\circ}$ ,高程采用 1985 国家高程基准。

(2)传感器的安装。以船只作为多波束检查系统的载体,安装多波束系统水下发射及接受换能器,表面声速探头、固定罗经、三维运动传感器和 RTK 流动站,各项安装须确保设备与船体的摇晃一致。

(3)消力池扫测。多波束检查系统对消力池进行全覆盖扫测时,遵循测线尽量保持直线,特殊情况下,测线可以缓慢弯曲,同时,相邻测线覆盖范围重合至少 20%,且对于重点部位(如导墙和底板接缝区域等)进行多次覆盖扫测。溢洪道消力池多波束测深航迹图见图 2。

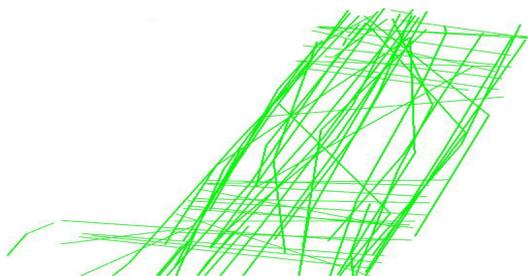


图 2 溢洪道消力池多波束测深航迹图

## 1.2 水下无人探测系统

### 1.2.1 方法原理

此次水下检查使用缆式水下无人探测系统。系统主要包括 ROV 主机、地面控制系统和绞盘管理系统三个部分。ROV 主机部分是整个水下探测系统的核心,包括高分辨率彩色摄像机、低照度黑白摄像机、激光测量单元、扫描声呐、推进器、照明灯、机械臂等部件。地面控制系统包括计算机控制系统、DV 录像机、无线遥控系统等部件。

绞盘管理系统包括绞盘、电缆、脐带控制系统等部件。水下无人探测系统是多种检测传感器集成的运动平台,工作人员在岸上或船上远程操控 ROV 进行水下作业,避免了工作人员入水的危险<sup>[2]</sup>。

### 1.2.2 仪器设备及技术参数

此次采用的水下机器人型号为河豚 IV-B,河豚 IV-B 是一款小型观察级 ROV,它轻便小巧、设计紧凑,以太网轻松接入个人终端 PC,通过在 PC 上安装 ROV 遥控软件。水下高清数码相机支持 4 倍光学变焦,配合特有的水下图像处理算法,能够获取高质量的水下影像资料。河豚 IV-B 水下无人潜航器 (ROV) 系统主要技术参数见表 2。

表 2 河豚 IV-B 水下无人潜航器 (ROV) 系统主要技术参数

技术参数	技术指标
耐压深度	300 m
推进器数量及安装方式	3 个水平矢量推进器矢量, 1 个垂直推进器
推进力	前进推力大于等于 500 N; 垂直推力大于等于 280 N; 侧向推力大于等于 280 N
内置传感器	航向 (罗经)、姿态、深度等传感器
前视摄像头分辨率	1 080 p
360°扫描避碰声呐技术指标	测程范围: 15~200 m; 扫描角度: 360°连续扫描; 耐压深度: 不低于 1 000 m; 分辨率: 1~4 m 范围内为 2 mm, 5 m 及以上时分分辨率不低于 10 mm

### 1.2.3 现场作业

(1) 作业前检查。在水下检查作业前,需要

对 ROV 主机的密封性、通电性能、摄像头、扫描声呐、灯光等方面进行检查。另外,需要仔细检查供电线缆是否存在缺口、破裂或其它缺陷等损坏情况。

(2) 溢洪道消力池水下检查。

对溢洪道消力池进行水下无人潜航器检查,采取纵、横剖面相结合的作业方式,共完成纵向测线 5 条、横向测线 10 条,溢洪道消力池底板水下无人潜航器作业测线布置图见图 3。测线包含: 底板与导墙接触部位测线、底板中间部位测线、导墙中部测线; 各泄槽之间接触部位测线、泄槽边缘测线、底板与下游尾坎接触部位测线、下游尾坎中部测线。

## 2 水下检查成果分析

### 2.1 多波束水下检查

此次采用水下多波束测深系统对溢洪道下游消力池、消能阶梯 (水下) 部分及下游混凝土护坦进行水下检查,作业期间水面高程为 1 409.30 m。

溢洪道消力池水下三维多波束声呐检查成果俯视图见图 4,水工建筑水下各部位三维现状与设计图整体一致性较好,未见明显冲刷破坏变形; 浅滩区域由于船只及仪器设备不能靠近,未检查到数据。

### 2.2 表观分析

(1) 泄槽段

溢洪道泄槽段水下三维多波束检查成果图见图 5,通过分析可知:

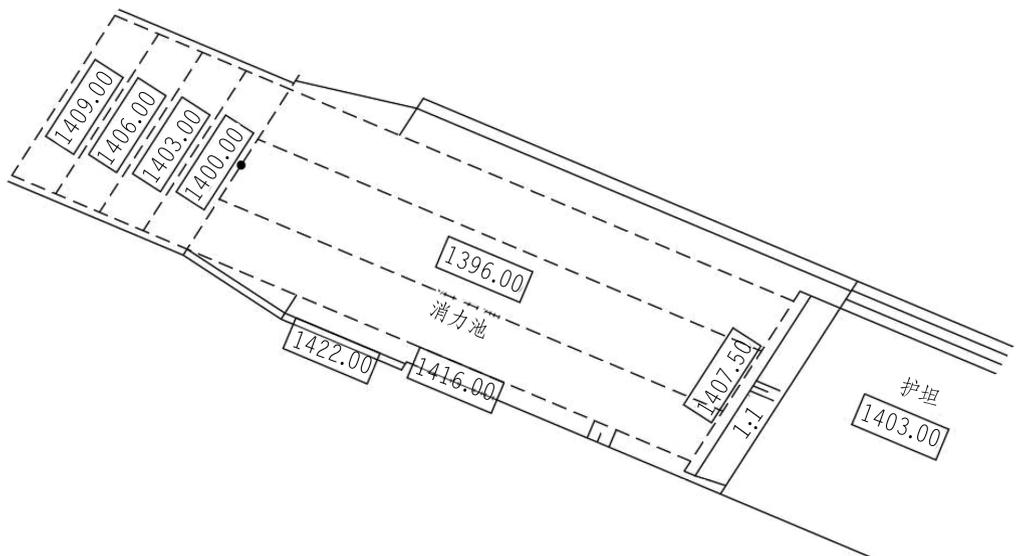


图 3 溢洪道消力池底板水下无人潜航器作业测线布置图 (虚线为测线)

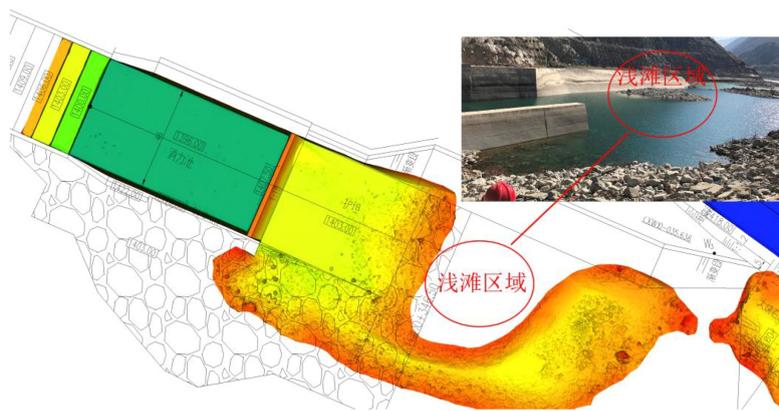
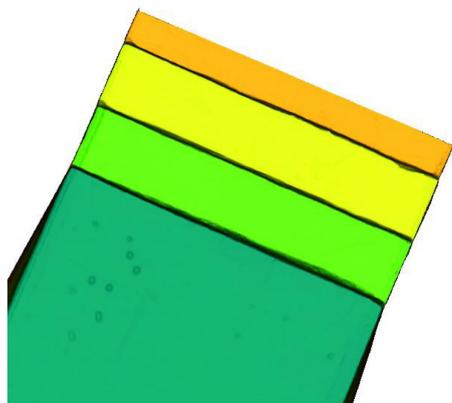
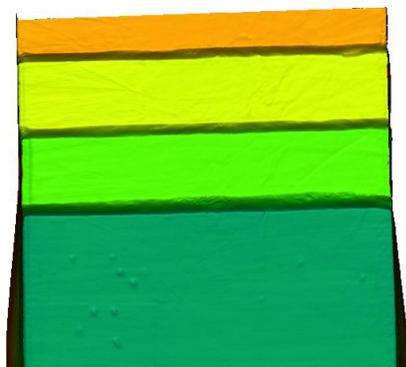


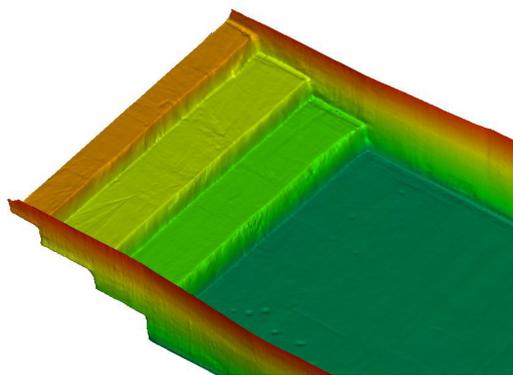
图4 溢洪道消力池水下三维多波束声呐检查成果俯视图



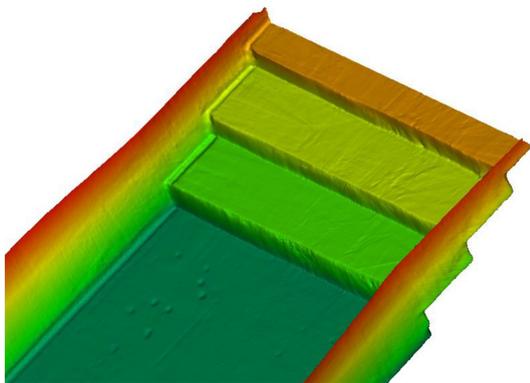
(a) 泄槽底板(俯视)



(b) 泄槽立面(下游向上游看)



(c) 左侧边墙(右岸向左岸看)



(d) 右侧边墙(左岸向右岸看)

图5 溢洪道泄槽段水下三维多波束检查成果图

①水下检查到4个阶梯,高程依次为1 406.00 m、1 403.00 m和1 400.00 m,其中高程1 406.00 m阶梯检查到部分区域。

②各阶梯平面及立面平整、规则,未见明显异常区域。

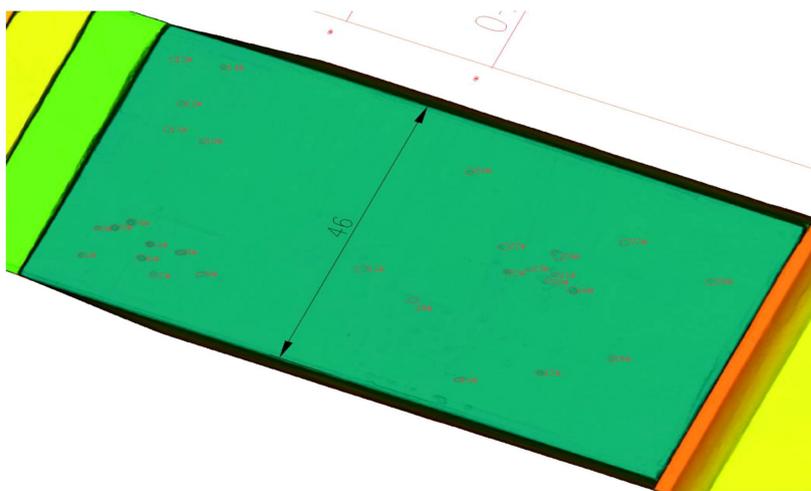
③各阶梯与边墙交界区域数据平滑和完整,未见明显异常区域。

## (2) 消力池段

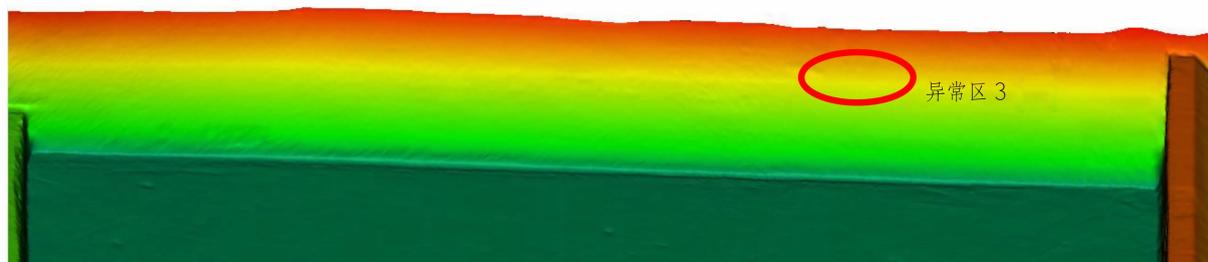
溢洪道消力池段水下三维多波束声呐检查成果图见图6,通过分析可知:

①消力池底板局部受到冲蚀,形成29个冲坑,冲坑直径为60~130 cm,深度为5~14 cm。其中最大冲坑位于泄槽下游靠右侧,冲坑直径约130 cm,深度约14 cm。

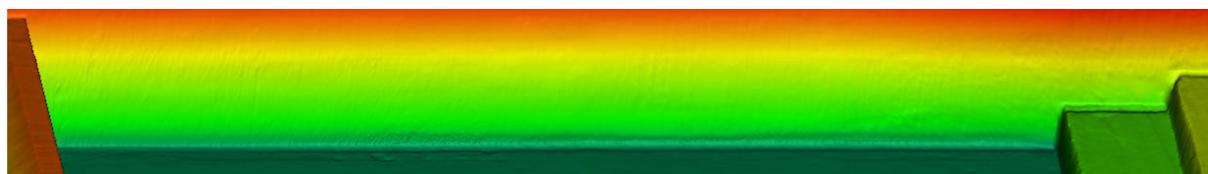
②消力池上游侧与泄槽相接,台阶立面平整,未见明显异常区域。



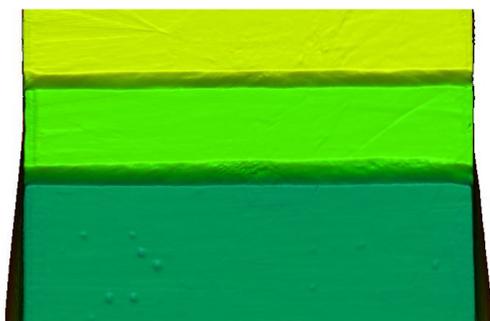
(a) 底板



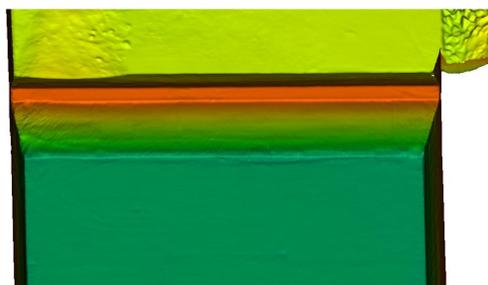
(b) 左侧边墙



(c) 右侧边墙



(d) 上游侧



(e) 下游侧

图 6 溢洪道消力池段水下三维多波束声呐检查成果图

③2021 年水下检查发现消力池左侧边墙局部受到冲刷, 形成 3 处异常区域。经过修补过后, 2022 年多波束检查在消力池左边墙只发现其中异常区 3 仍存在明显缺陷。异常区 3 位于左边墙桩号(溢)0+231.50~(溢)0+233.51 处, 高程为 1404.80 m, 三维尺寸约为 207 cm×37 cm×

16 cm[长(顺河)×高(垂直)×深(淘刷)]。

④消力池右侧边墙平整、规则, 未见明显异常区域。

⑤消力池下游尾坎立面边墙平整、规则, 未见明显异常区域。

### 2.3 剖面分析

根据设计图纸,对溢洪道消力池截取 5 条剖面,其中 1 条轴线纵剖面,4 条横剖面。溢洪道消

力池水下检查成果剖面分布位置图见图 7。

(1)溢洪道消力池轴线纵剖面 1。

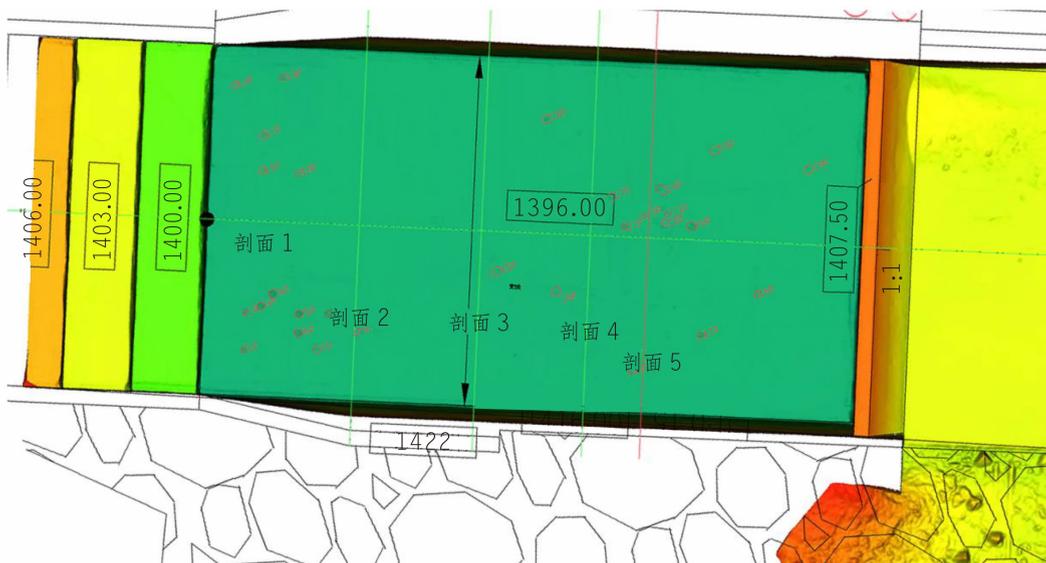


图 7 溢洪道消力池水下检查成果剖面分布位置图

溢洪道消力池轴线纵剖面 1 设计对比图见图 8,通过分析可知:

①泄槽段三维现状检查成果整体与设计图基本吻合,局部高于设计图 1~2 cm;相较于 2021 年无明显变化

②消力池底板与泄槽下游侧立面、尾坎上游侧立面接触部位紧密,呈直角,与设计图吻合;消力池底板检查成果与设计图整体吻合,局部差异在 2~3 cm;

③尾坎顶面整体平整,与设计图吻合,局部高于设计图 2~3 cm;尾坎下游侧面整体平整,与设

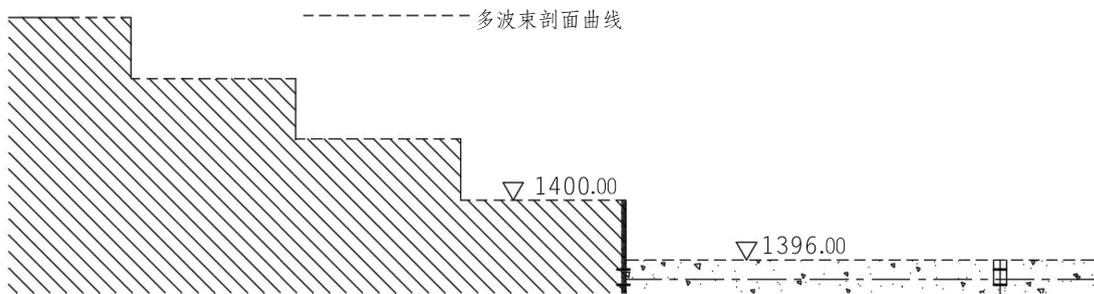
计图吻合,局部和设计图偏差 1~2 cm;

④护坦在(溢)0+266.5~(溢)0+294.5 段地形线与设计图吻合,高程为 1 403.0 m;在(溢)0+294.5~(溢)0+326.5 段地形线由于块石及河沙淤积,逐渐高于设计线至 255 cm。

(2)横剖面 2

横剖面 2 位于桩号(溢)0+194 处,横剖面 2 (溢)0+194 处多波束成果与设计对比图见图 9,通过分析可知:两侧边墙、底板及转角位置剖面线顺直,与设计图基本吻合,未见明显异常。

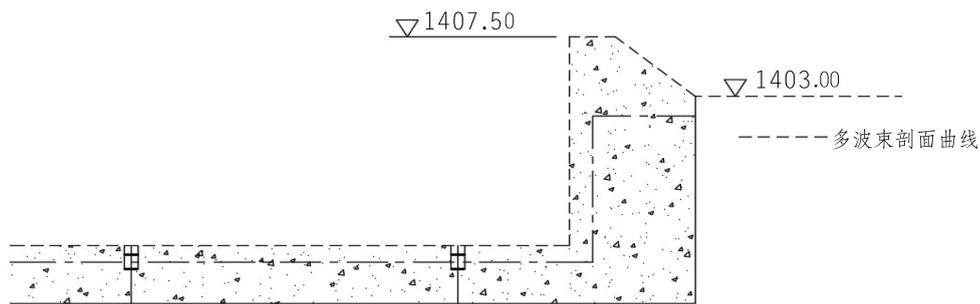
(3)横剖面 3



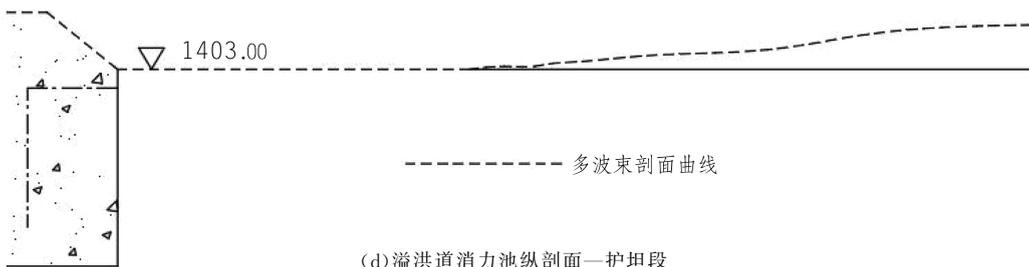
(a)溢洪道消力池纵剖面—泄槽段



(b)溢洪道消力池纵剖面—底板段



(c) 溢洪道消力池纵剖面—尾坎段



(d) 溢洪道消力池纵剖面—护坦段

图 8 溢洪道消力池轴线纵剖面 1 设计对比图



图 9 横剖面 2(溢)0+194 处多波束成果与设计对比图

横剖面 3 位于桩号(溢)0+210 处,剖面 3 (溢)0+210 处多波束成果与设计对比图见图 10,

通过分析可知:

① 右侧边墙、底板及转角位置剖面线顺直,与

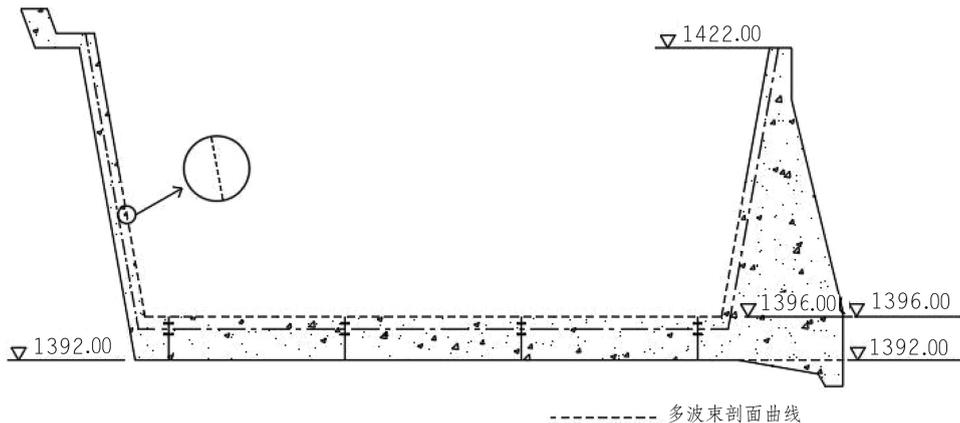


图 10 剖面 3(溢)0+210 处多波束成果与设计对比图

设计图基本吻合,未见明显异常。

②2021 年检查发现左侧边墙剖面线在高程 1 403.60 m 处存在冲刷凹陷,凹陷约 7 cm。2022 年检查发现该处冲刷凹陷已经修复。

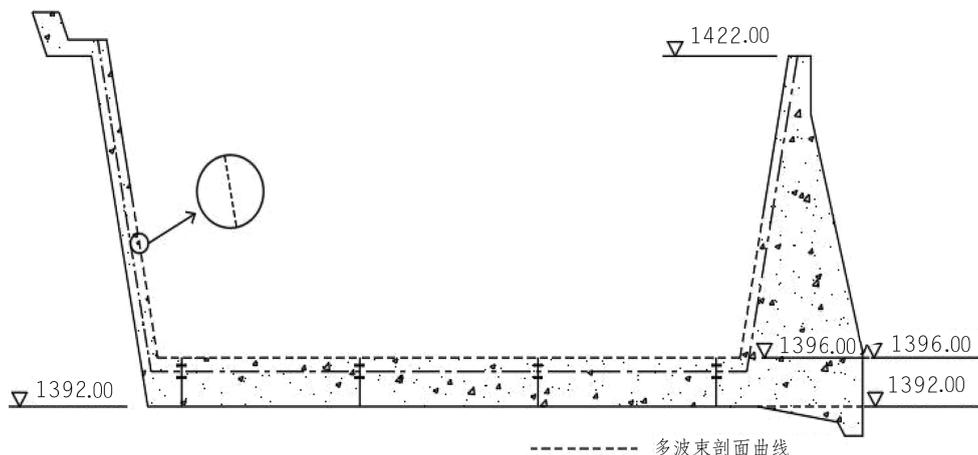


图 11 剖面 4(溢)0+224 处多波束成果与设计对比图

①右侧边墙、底板及转角位置剖面线顺直,与设计图基本吻合,未见明显异常。

②2021 年检查发现左侧边墙剖面线在高程 1 403.70 m 处存在冲刷凹陷,凹陷约 9 cm。2022 年多波束检查发现该处冲刷凹陷大部分区域已被修补。

#### (5)横剖面 5

横剖面 5 位于桩号(溢)0+232 处,剖面 5 (溢)0+232 处多波束成果与设计对比图见图 12,通过分析可知:

①右侧边墙、底板及转角位置剖面线顺直,与设计图基本吻合,未见明显异常。

②2021 年检查发现左侧边墙剖面线在高程 1 404.80 m 处存在冲刷凹陷。2022 年检查发现该处冲刷凹陷任然存在,凹陷约 16 cm。

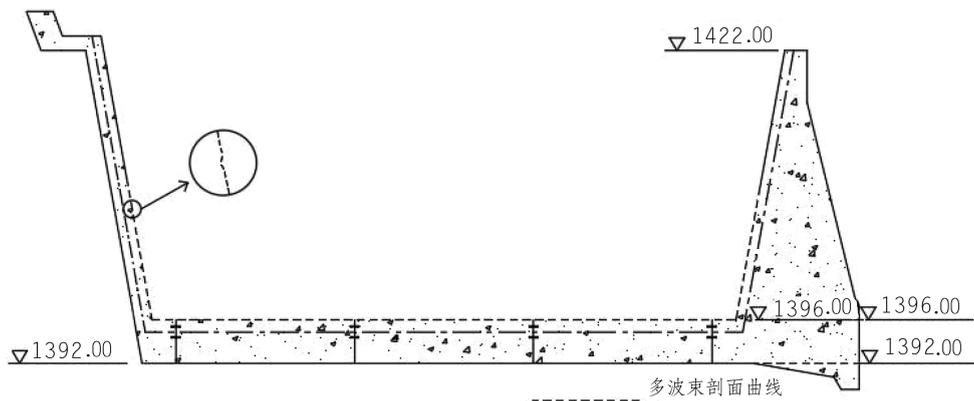


图 12 剖面 5(溢)0+232 处多波束成果与设计对比图

#### (4)横剖面 4

横剖面 4 位于桩号(溢)0+224 处,剖面 4 (溢)0+224 处多波束成果与设计对比图见图 11,通过分析可知:

### 2.4 水下无人潜航器检查

采用水下无人潜航器搭载摄像系统对黄金坪水电站溢洪道消力池进行水下检查,成果分析如下:

(1)各结构接触部位。上游泄槽段混凝土表面整体平整,无孔洞、漏筋、裂缝、明显疏松区域,局部表面存在麻面、粗骨料外露,粗骨料未脱落,属于轻微冲刷;上游泄槽段各阶梯接触部位紧密,无明显拉裂及错动变形。消力池底板下游尾坎接触部位紧密,无明显拉裂及错动变形。

(2)边墙。此次边墙检查结合多波束检查成果,通过对 2021 年检查出的左边墙三处异常区域进行了重点加密检查来获取更直观的视频对比资料。左边墙水下异常区域图见图 13,分析可知:

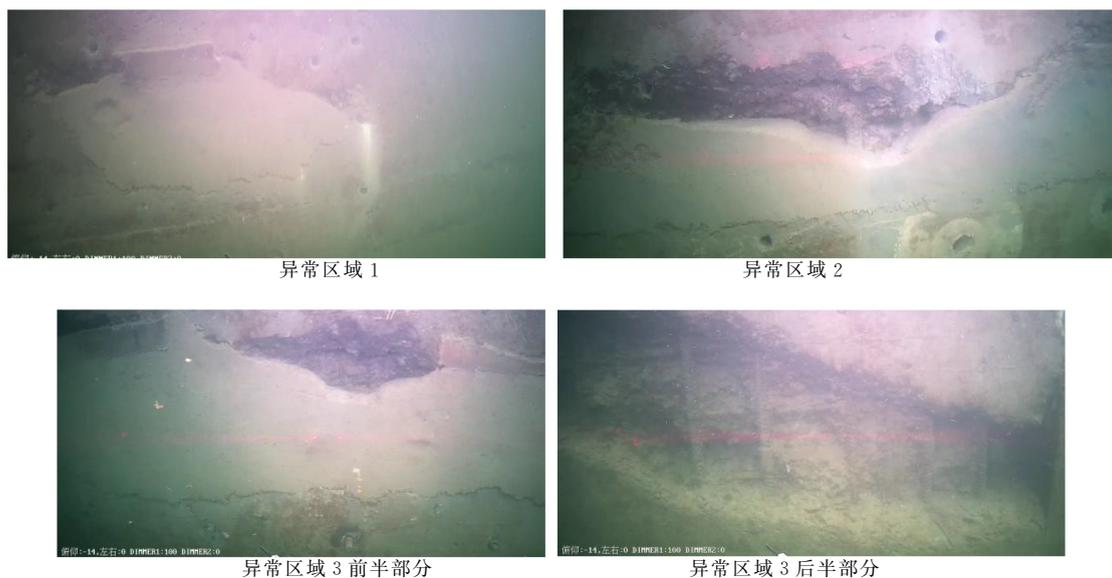


图 13 左边墙水下异常区域图



图 14 底板部位局部典型

①在 2021 年检查出的左边墙三处异常区域, 2022 年水下检查消力池发现异常区 1 墙面平整; 异常区 2 局部区域被冲刷剥蚀; 异常区 3 前半部分区域墙面平整, 后半部分修补区域被冲刷剥蚀。

②除异常区域外, 边墙表面整体光滑平整, 仅局部表面存在麻面和轻微磨损。

③边墙与底板接触部位磨损相对较为严重, 局部区域粗骨料外露, 但未脱落, 属于轻微冲刷。

(3) 底板。此次底板检查结合 2021 年多波束检查成果, 对底板发现的冲坑区域进行重点加密检查以获取更直观的资料。底板部位局部典型图见图 14。

①消力池底板整体平整, 无孔洞、漏筋、裂缝和明显疏松区域, 表面多被苔藓、薄砂沉积层附着。

②底板上冲坑呈近圆形, 部分冲坑局部钢筋外露。

### 3 结 语

综合利用水下无人潜航器和多波束测深系统, 建立了一套水工建筑物水下联合检测技术方法, 实现水下建筑物近距离检查, 替代人工进行水

下作业, 保障了人员安全。在不排水的条件下, 提高了经济效益和工作效率, 为消力池水下缺陷修复提供可靠的数据支撑。水下无人潜航器和多波束测深系统作为重要的水下检测作业平台, 与其他技术将会有更多结合, 未来在工程方面会有更广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 刘经南, 赵建虎. 多波束测深系统的现状和发展趋势[J]. 海洋测绘, 2002, 22(5): 3-6.
- [2] 顾红鹰, 刘力真, 陆经纬. 水下检测技术在水工隧洞中的应用初探[J]. 工程建设与管理, 2014(12): 19-20+25.
- [3] 邹双朝, 皮凌华, 甘孝清, 等. 基于水下多波束的长江堤防护岸工程监测技术研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(1): 93-98.
- [4] 徐玉如, 李彭超. 水下机器人发展趋势[J]. 自然杂志, 2011, 33(3): 125-132.
- [5] 黄世强. 混凝土坝结构缺陷检测技术进展和展望[J]. 大坝与安全, 2016(3): 1-9.
- [6] 郑发顺. 遥控水下机器人系统在水库大坝水下检查中的应用[J]. 水利信息化, 2014(2): 45-49.

#### 作者简介:

刘 玥(1994-), 男, 陕西安康人, 助理工程师, 学士, 从事水利水电工程施工技术与管理工。

(责任编辑: 廖益斌)