

锦屏二级水电站引水隧洞水下检测技术研究与应用

王继敏 来记桃

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 大直径长距离引水隧洞的运行检测一直是亟待解决的技术难题。针对锦屏二级水电站世界级引水隧洞工程例行运行检测需求,探索开展了水下机器人水下检测替代引水隧洞放空检查的技术研究和工程应用。通过长距离潜航器本体设计,采用 Blueview-T2250 三维扫描声呐和光学摄像等多传感器检测方法,惯性导航与多普勒计程仪组合定位技术,克服了复杂工程边界条件限制,实现了有缆遥控潜水器 2km 级隧洞表观全覆盖粗检细查,水下检测成果与隧洞放空检查基本吻合,达到了安全、准确、高效的预期目的。

关键词: 锦屏二级水电站; 引水隧洞; 水下检测; ROV

中图分类号: TV672

文献标识码: A

1 研究背景

近年来,我国建成水利水电长大引水隧洞工程众多。这些隧洞工程普遍具有围岩地质条件复杂、洞线长、洞径大等特点,长年运行可能会出现裂缝、坍塌、露筋等典型缺陷,如不及时检查并处理可能严重影响工程安全运行。常规放空检查存在成本高、风险大、效率低等突出问题,部分工程甚至不具备放空检修条件。受引水隧洞空间封闭、结构异型、高水压、弱光等复杂环境限制,潜水员水下检查面临人身安全风险,存在检查效率低、作业范围受限等问题。随着科学技术的发展,水下机器人检测技术在海洋工程近海勘探中得到了广泛应用^[1-2],近年来逐渐应用到水电水利工程领域,但一般限于水电站水垫塘、河床、短距离引水、尾水隧洞工程应用^[3],且检测手段相对单一。

雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞工程是世界最大规模水工隧洞群,由四条长约 17km、直径约 12m 的引水隧洞组成。工程建设期,最大实测地应力超过 100MPa,最大外水压力超过 10MPa,工程水文地质条件极其复杂。四条引水隧洞自运行以来每两年放空检查一次,共经历了两轮放空检修,单次放空仅排水、充水就需要约 14 天时间,检查耗时长、成本高。放空检查表明,引水隧洞总体运行情况良好,但隧洞末端富水带洞段局部衬砌结构及集渣坑淤积状况仍需要密切关注。为确保引水隧洞结构安全和发电机组运行稳定,减少频繁放空对隧洞结构的不利影响和发电效益的损失,迫切需要研究水下检查方案代替放空检查进行隧洞例行

检测，以便及时制定运维策略。

2 水下检测机器人系统

水下机器人也称无人遥控潜水器，是一种工作于水下的极限作业机器人，通过搭载不同的作业工具，完成特定需求的水下作业，具有效率高、风险低、易于操作等优点，可以弥补传统人工水下检测的不足^[4]。无人遥控潜水器分为有缆遥控潜水器（ROV）、自主式潜水器（AUV）以及复合型潜水器（ARV）。AUV 依靠自身携带电池提供动力，自主进行水下检测作业，但水下续航能力和负载能力有限，不能实时显示水下检测信息，难以实现精细化检测作业。ARV 虽然可以通过通讯光纤进行实时操控，但同样存在自带供电电池面临的续航和负载等问题，且光纤易盘绕、折断而致使 ARV 失去通讯和控制。基于锦屏二级水电站引水隧洞的结构及环境特点，综合考虑长时间、长距离水下检测所需克服的巡航能力和安全回收问题，以及高精度检测需求，重点研究有缆遥控潜水器在水检测关键技术与工程实践。

ROV 是通过胶带电缆将潜水器水下作业本体与水面遥控系统连接，由水面实时提供动力和通讯控制，操作人员在水面遥控潜水器工作，具有作业深度大，不受动力供给限制，工作时间长，设备支持功能强，数据实时传输显示，没有水下作业人身安全风险等优点。ROV 水下检测机器人系统主要包括潜水器主机、脐带缆管理系统、地面控制系统、辅助保障系统四部分。ROV 主机实施水下航行推进并提供检测设备搭载平台，搭载照明设备、声呐系统、高清摄像机等多种检测和作业设备执行水下作业。脐带缆管理系统包括绞盘、脐带缆、TMS 装置等，保障 ROV 主机的电力、通讯、数据传输。地面控制系统包括数据存储设备、遥操作系统、数据分析与处理计算机系统等，实现 ROV 主机的参数监控、指令收发、数据存储与分析等，是整个水下机器人系统的大脑^[5-6]。辅助保障系统包括动力电源、通讯基站、吊运设备、应急系统等。



图 1 水下检测机器人系统组成示意图

3 关键技术方案研究

3.1 潜水器载体设计

潜水器载体是水下检测传感器集成的水下移动终端，统筹兼顾 ROV 搭载设备、检测能力、动力与功耗、安全收放、工程边界等技术要求。针对锦屏二级水电站引水隧洞检测距离长、进出口通道狭小等特征，潜水器载体采用小体积框架设计，采用零浮力、抗拉、耐磨、传输能力强的光电复合脐带电缆进行供电、通讯控制和应急回收牵引^[7]，在载体上安装 4 个水平矢量推进器和 2 个垂直向推进器，以增强长距离工作的动力保障。ROV 主要技术指标见表 1。

为解决了长距离、小型化升、降压供电难题，电力传输采用 400Hz 中频升降压电能传输技术。脐带缆按照 5km 进行设计，传输最大有功功率达 5.4kW，满足水下检测机器人所需总功率要求，抗拉能力达 2t。通过研究和优化，确定水下检测机器人尺寸长 1.53m、宽 0.81m、高 0.75m，以满足从直径 2.1m 的调压室阻抗孔进出的限制要求。

表 1 ROV 主要技术指标统计表

技术参数	技术指标
耐压深度	300m
推进器结构组成	4 个水平矢量推进器，2 个垂直推进器，优化艏向推力
推进力	前进推力 90kgf；垂直推力 50kgf；侧向推力 28kgf
内置主要传感器	航向（罗经）、姿态、深度传感器、避碰传感器

脐带缆长度	5000m
光学摄像设备配置	前视、后视、侧视、顶视 4 组光学摄像设备
光学摄像设备分辨率	1080P 高清彩色摄像

3.2 水下检测方案与定位技术

(1) 全覆盖检测方案

引水隧洞洞径 10.8~11.8m，结构型式多变，水体能见度低，水下摄像视角宽度窄。为实现大直径隧洞内壁全覆盖检测，研究采用声呐扫描普查和光学摄像详查相结合的隧洞全覆盖检测方案，即先通过声学检测为主、光学检测为辅的快速普查并判断缺陷规模和部位，再通过 ROV 抵近缺陷部位作进一步摄像详查、勘验。

高精度声呐扫描普查是全覆盖检测的关键。通过调研和联合研制，引进了首台移动式隧洞专用的 Blueview-T2250 三维扫描声呐系统，能够实现隧洞结构的实时三维扫描并提供连续的高分辨率图像，分辨率达 6mm，探测距离 10m。T2250 系统使用高频率低功耗的声学多波束技术^[8]，能够随 ROV 行进方向以 2.25MHz 的频率进行移动式三维扫描，发出 2100 个重叠窄波束连续采集隧洞 360°范围声波反射点云数据，实时创建一个密集的三维点云图像，清晰展示隧洞的结构细节，以便损伤评估。通过多波束三维成像声呐全覆盖扫描，解译分析后对重点关注部位进行 ROV 抵近摄像、激光测距等精细量测，从而实现引水隧洞更高精度、表观全覆盖高效检测。

(2) 水下定位技术

对于海洋或水库等开阔水域检测中，通常采用超短基线定位技术（USBL）进行水下定位。引水隧洞为相对封闭空间结构、边界繁杂，而 USBL 存在受多次反射波干扰及密集铁磁性结构设施的综合影响，定位误差较大。惯性导航定位系统（Inertial Navigation System, INS）是一种不依赖外部信息、也不向外部辐射能量的自主式导航系统，其工作环境不仅包括空中、地面，还可以在水下。多普勒计程仪（Doppler Velocity Log, DVL）利用发射的声波和接收的水底反射波之间的多普勒频移测量潜水器相对于水底的航速和累计航程，能够在没有外部陆基或星基定位信息支持下实现封闭空间内准确定位与导航^[9-10]。研究确定引入高精度 INS 与 DVL，结合缆长计数器、导引声呐、深高度计等多项定位校正设备进行

水下定位，可以实现平面定位精度达 50cm，轴线精度为航行距离的 2‰。ROV 水下检测中还可利用隧洞内可识别的、具有位置信息的特征点，对水下定位进行校正，以减小惯性导航系统定位累积误差。

3.3 复杂工程边界条件 ROV 布放

电站上游调压室井筒及 2.1m 直径阻抗孔是 ROV 进入引水隧洞末端的唯一通道。上游调压室竖井总高为 139m，开挖直径 23m，调压室分流墩上部阻抗板厚 3m，阻抗板两侧共布置 4 个直径 2.1m 的圆形阻抗孔。ROV 需穿过上游调压室阻抗孔到达隧洞底板，经直角转弯往上游方向航行，脐带缆在阻抗孔边缘易产生剐蹭破损甚至断裂，影响 ROV 供电与通讯，存在一定的安全隐患。为消除直角结构对脐带缆的剐蹭损伤，降低弯段处与脐带缆的摩擦力^[1]，保障 ROV 的安全运行，设计了一种适应该阻抗孔的中继引导装置（TMS）。TMS 自上而下由托盘、圆柱框架、导向滑轮、导向定位锥组成，托盘将该装置卡在阻抗孔上端，圆柱框架落入 3m 厚阻抗孔中，导向滑轮控制脐带缆方向并增大转弯半径，导向定位锥是在吊放时便于导向并对准阻抗孔口，并在 TMS 装置上安装灯光、视频摄像，以观察 TMS 下放状态和潜水器行进状况。

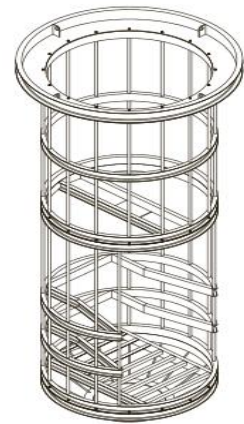
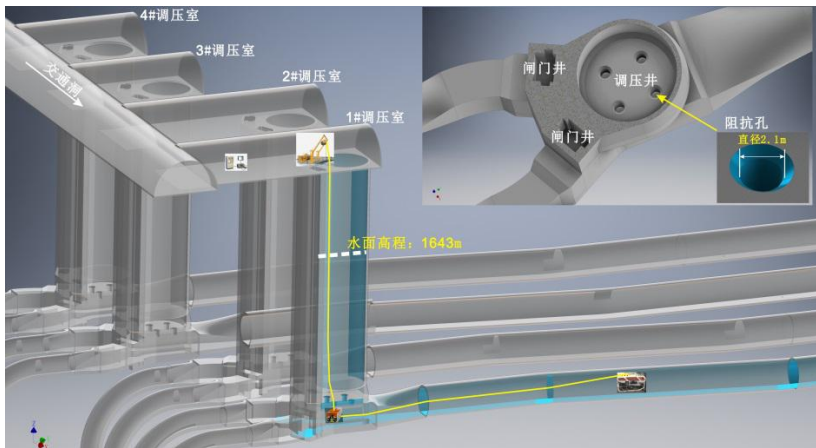


图 2 上游调压室及阻抗孔布置示意图 图 3 阻抗孔布放 TMS 装置示意图

3.4 水下检测实时监控技术

操控人员基于 ROV 姿态传感器监测数据和检测信息感知，判断 ROV 行进状态和隧洞检测环境，在隧洞结构多变、空间密闭、低能见度等复杂水下环境下检测作业依然存在较大安全风险，时常需要借助隧洞结构特征进行分析、校验，以保障检测的高效全面。基于此，根据隧洞 BIM 模型与前期已有的检测数据，构建典型作业区三维场景和作业目标模型数据库，引入 VR 实时可视化重构技术，

融合模型数据库数据和ROV实时回传水下地形点云数据,构建高逼真的ROV水下作业虚拟环境,实现全方位视角切换监控ROV实时作业状态,可以极大提高水下作业安全保障和检测效率。

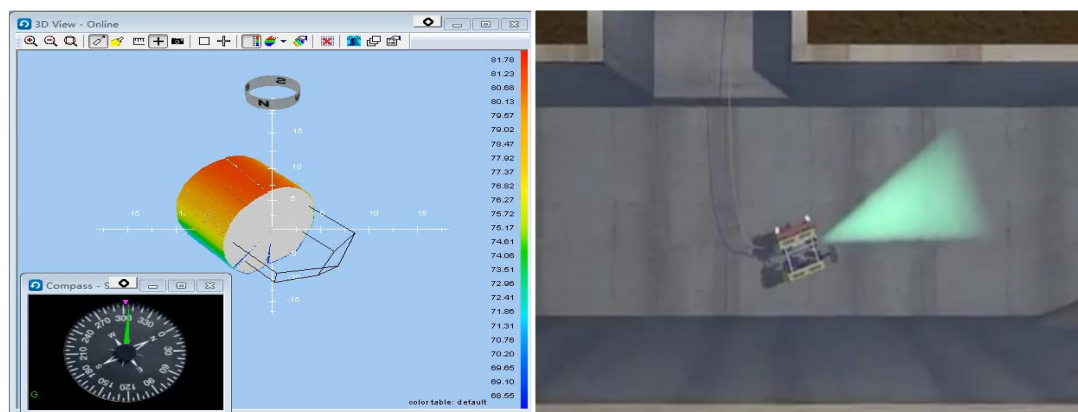


图 4 ROV 水下检测状态监控及仿真模拟

4 工程检测应用

4.1 工程概况

雅砻江锦屏二级水电站为一低闸、长隧洞、大容量引水式电站,利用 150km 长大河湾的天然落差,通过长约 16.7km 的引水隧洞截弯取直,获得水头约 310m。电站总装机容量 4800MW,多年平均发电量 242.3 亿 kWh。四条引水隧洞具有埋深大、洞线长、洞径大等特点,工程水文地质条件极其复杂,为世界埋深最大、规模最大的水工隧洞群工程。四条引水隧洞中心距 60m,隧洞底坡 3.65%,自进口底板高程 1618.00m 降至高程 1564.70m 与上游调压室相接,开挖直径 12.4~14.3m,衬后隧洞跨度 10.8~11.8m。引水隧洞末端 15km 桩号附近各布置一组集渣坑,各组集渣坑均由左右两个集渣坑组成,每个集渣坑设 3 室。

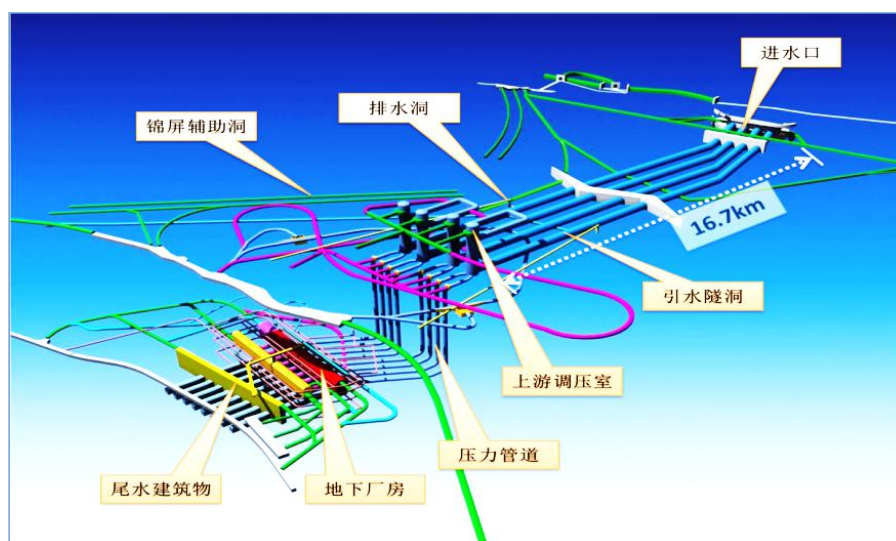


图 5 锦屏二级水电站地下引水发电系统隧洞群布置示意图

4.2 水下检测目的与内容

为及时、全面掌握引水隧洞结构运行状况，基于水下检测技术调研情况和工程现阶段运行实际，以引水隧洞末端水下检测为切入点，探索常态化例行检查手段。检查内容为引水隧洞末端衬砌混凝土表面有无新增破损、剥落、露筋、表面附着等缺陷，缺陷修复部位运行情况，以及集渣坑淤积状况。重点检查引水隧洞桩号 15+200m 附近隧洞段混凝土衬砌运行情况及下游集渣坑淤积状况。

4.3 现场检测实施

ROV 与 TMS 装置经引水隧洞末端上游调压室井筒吊放入水并下潜约 70m，TMS 固定在直径为 2.1m 的阻抗孔边壁，ROV 穿过阻抗孔进入引水隧洞，向上游方向分全覆盖普查和局部详查两个阶段进行检测。为确保现场检测顺利进行，现场配备了两台检测级 ROV 和一台备用级 ROV，这种多设备及多模式作业潜水器方案设计，为引水隧洞水下检测提供了足够的安全冗余保障。现场布置见图 6。

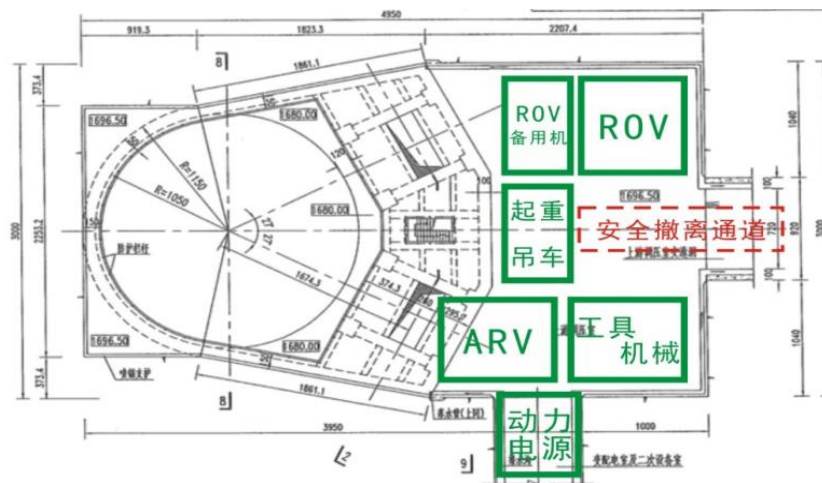


图 6 检测现场布置图

4.4 水下检测成果及评价

2018 年 11 月至 2020 年 1 月，结合发电机组停机检修，完成了锦屏二级水电站 4 条引水隧洞末端共计 6 次水下检测，其中 1 号、2 号引水隧洞完成了两次水下检测对比，3 号、4 号引水隧洞完成了水下检测与放空检查对比验证。单次水下检测时间约 3 天，引水隧洞最大检测距离达 2.3km。检测结果表明，引水隧洞末端总体运行情况良好（三维声呐扫描典型成果见图），未发现影响隧洞运行安全的隐患和缺陷，水下检测结果与放空检查基本吻合，较好地指导了引水隧洞的运行检修维护工作，实现了常态化水下无人检测。针对重点关注的 15+200m

附近洞段和末端集渣坑运行状况，总体情况如下：

(1) 引水隧洞混凝土结构表观缺陷检查

通过全覆盖普查、抵近详查对比分析，2018年12月，1号引水隧洞15+210m附近隧洞底部混凝土保护层局部剥落约6m²，局部环向钢筋出露；2019年12月再次水下检测发现，缺陷范围扩大至32m²，剥落深度未见明显变化（见图8）。

2号引水隧洞运行状况良好，两次对比检测未见明显变化。3号引水隧洞检测发现底板混凝土局部磨蚀露筋，主要分布在桩号16+100m、15+950m、14+900m处，与次月计划外放空检查结果一致，典型缺陷水下检测与放空检查对比见图9。4号引水隧洞仅发现隧洞底板混凝土局部磨蚀，未见混凝土保护层脱落、钢筋出露等情况，且当月进行了计划内放空检查，检查结果与水下检测一致。

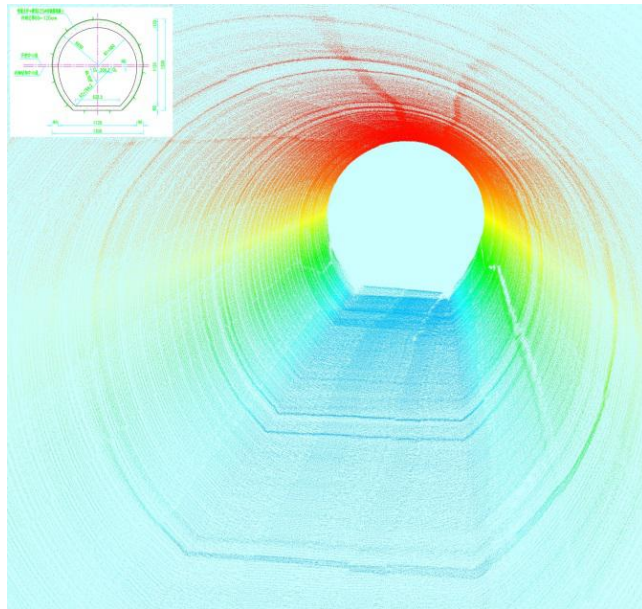


图7 引水隧洞水下三维声呐扫描成果典型图

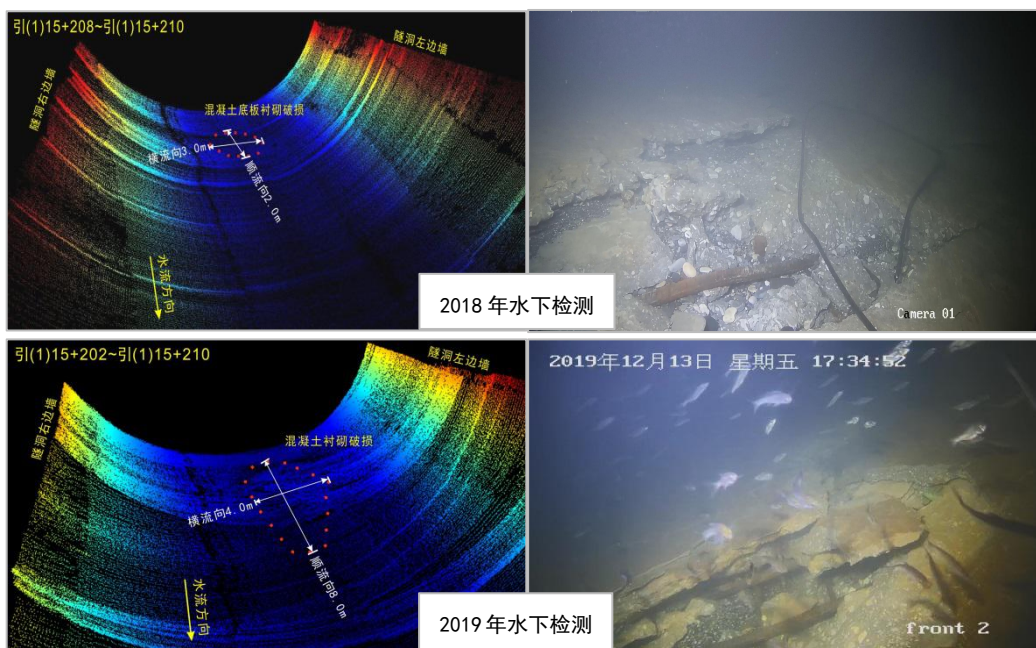


图 8 1 号引水隧洞 15+210m 段混凝土保护层脱落范围变化对比 ((2018~2019 年))

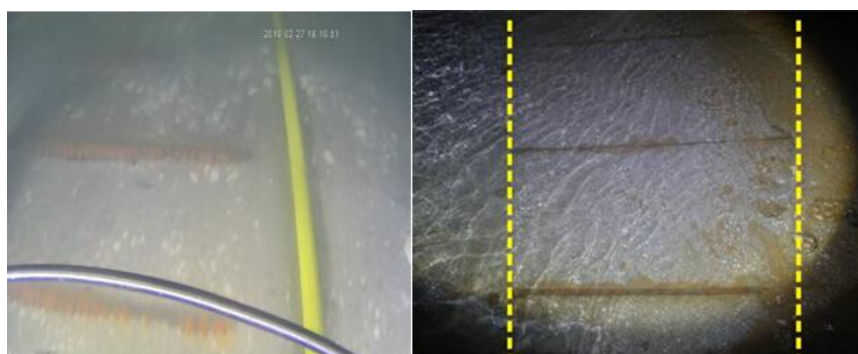


图 9 3 号引水隧洞底板混凝土磨损水下检测与放空检查对比图 (2019 年)

(2) 集渣坑淤积状况

1 号引水隧洞下游集渣坑经 2018 年 12 月和 2019 年 12 月两次水下检测表明，经过一年的运行，集渣坑淤积体积由 17.4% 增至 25.9%，沉渣空间仍较大。

2 号引水隧洞集渣坑除下游 3# 沉渣室外，其余 5 个沉渣室均已基本淤满，淤积总量占集渣坑总体积的 91.4%；2019 年 11 月再次检查发现，淤积略有增加，总量占集渣坑总体积的 97%（见图 10）。

3 号、4 号引水隧洞集渣坑的 6 个沉渣室均已淤满，并及时进行了放空检查及清理，放空检查淤积情况与水下检测结果基本吻合（见图 11）。

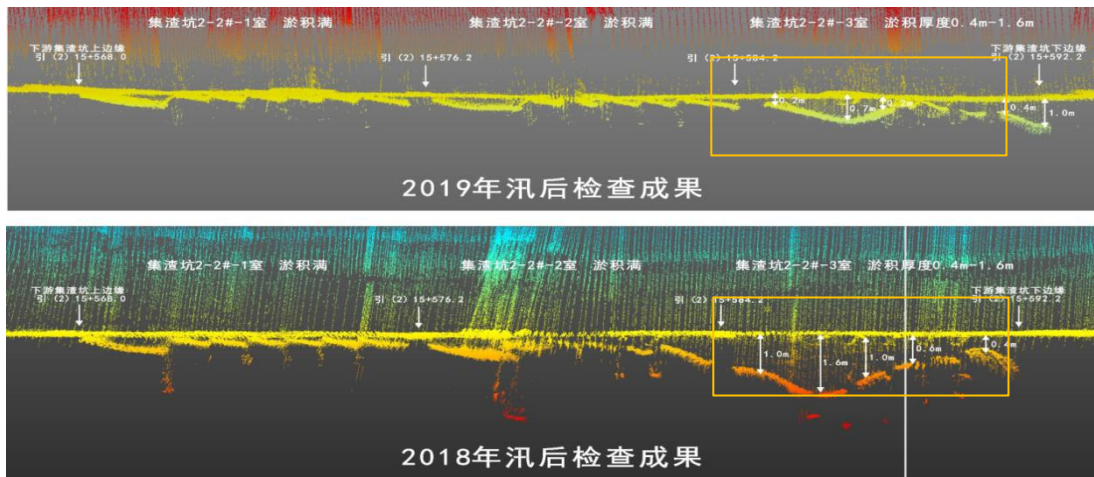


图 10 2号引水隧洞下游集渣坑沉渣室淤积水下三维声呐扫描纵断面图

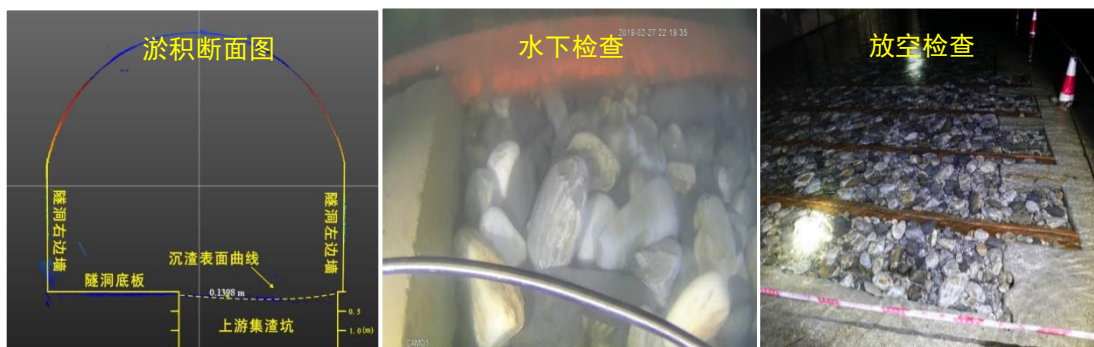


图 11 3号引水隧洞集渣坑沉渣室水下检测与放空检查对比图

5 结论与展望

(1) 针对大直径长隧洞在水检测需求和技术难题，创新性开展了潜水器载体长距离巡检设计与控制、大断面全覆盖高精度检测、水下精准定位、复杂工程边界条件布放与回收等关键技术方案研究，形成了大直径长隧洞水下全覆盖检测成套装备和解决方案。

(2) 采用 ROV 首次完成了锦屏二级引水隧洞末端 2km 级长度水下全覆盖常态化检测，查明了隧洞末端衬砌结构运行情况及集渣坑淤积状况，成果直观、可靠，有效指导了引水隧洞运维策略。

(3) 对于更长距离引水隧洞多传感器组合在水检测，以及检测精度的进一步提高，还需要依靠科技发展，进一步研究探索。

参考文献

- [1] 李硕,刘健,徐会希等. 我国深海自主水下机器人研究现状[J]. 中国科学:信息科学, 2018(9): 1152-1164.
- [2] 刘晓阳,杨润贤,高宁. 水下机器人发展现状与发展趋势探究[J]. 科技创新与生产力, 2018, 293(6): 27-28.
- [3] 冯永祥,来记桃. 高水头多弯段压力管道水下检查技术研究与应用[J]. 人民长江, 2017.
- [4] 王黎阳. 潜水机器人在深孔有压式隧洞环境检测中的应用[J]. 大坝与安全, 2015(3),55-58.
- [5] 黄泽孝,孙红亮. ROV 在深埋长隧洞水下检查中的应用[J]. 长江科学院院报, 2019(7):171-174.
- [6] 何亮,马琨,李端有. 多波束联合水下机器人在大坝水下检查中的应用[J]. 大坝与安全, 2019(5): 46-51.
- [7] 张洁. 浅谈光电复合缆应用技术[J]. 无线互联科技, 2015(23):135-136.
- [8] 唐力,肖长安,陈思宇等. 多波束与水下无人潜航器联合检测技术在水工建筑物中的应用[J]. 大坝与安全, 2016(4):52-55.
- [9] 丁妍. 光纤陀螺捷联惯导/多普勒计程仪一体化组合导航方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2014.
- [10] 刘慧,王丰乐. INS/DVL 组合导航系统在水下载体中运用研究[J]. 青岛大学学报, 2002.
- [11] 赵俊海,张美荣,王帅等. ROV 中继器的应用研究及发展趋势[J]. 中国造船, 2014(3): 222-232.

第一作者简介：

王继敏（1964—），男，湖南湘潭人，正高级工程师，主要从事水电工程建设管理和技术管理工作，现任雅砻江流域水电开发有限公司副总经理。

通讯地址：四川省成都市双林路 288 号

电话：028-82907866 手机：13981528001

电子邮箱：wangjimin@ylhdc.com.cn