

# 混凝土面板坝水下检查技术应用与研究

代鑫

国能大渡河流域水电开发有限公司

**摘要:**面板坝作为水电站大坝的一种常见坝型,其很大一部分常年处在水下,以往面板水下检查多为潜水员水下探摸检查,该方法成本高,检查成果依赖于潜水员的业务素质,所以急需找出一套检查成本低、检查效果可靠的技术进行面板水下检查,查明面板表面有无破损、剥落、露筋、裂缝、渗漏等缺陷。多波束、侧扫声呐、伪随机流场法物探检测技术、水下无人潜航器检查技术作为一系列高新技术,在水下检查领域逐渐崭露头角,而将多种技术进行综合应用于混凝土面板水下检查在行业内还未曾见过,多波束检查技术可实现水下结构的三维重现<sup>[1][2]</sup>,侧扫声呐检查技术可获取水下结构的表观影像信息,伪随机流场法通过测区电流密度信息来判断面板局部渗漏情况,水下无人潜航器检查技术可近距离获取混凝土表观的高清图像资料,将四种技术有效结合可实现面板的全覆盖普查和局部详查。本文首先介绍了面板水下综合检查技术思路,并以水电站水下检查实例说明该综合检查技术的可行性,以及在实际应用过程中遇到的问题和改进方法。

**关键词:**面板坝; 渗漏; 水下检查; 水下声呐; 水下无人潜航器

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.07.026

## 一、引言

混凝土面板坝表观缺陷水下检查主要存在以下2个问题:①面板长年处在水下,且水深较深;③坝前面板由于是缓坡结构,泥沙容易淤积附着在面板上。

针对以上2个问题,本文提出了一套深水水下检查方案,并经过自主改装设计,解决了面板泥沙附着难以获取到混凝土表观影像的问题,有效解决了混凝土面板坝水下检查技术的难题。

## 二、检查技术简介

### (一) 检查技术思路

采用多波束、侧扫声呐、伪随机流场拟合法、水下无人潜航器检查技术进行面板水下检查,总体思路为“面积性普查与局部详查”相结合,详述如下:

①采用多波束检查技术进行水下全覆盖精细扫描,取得面板水下结构三维成果,通过解译实测成果,划分出检查区域内存在的混凝土表观缺陷,定量分析混凝土表观缺陷的规模。

②采用侧扫声呐检查技术,对面板进行全覆盖地貌影像采集,为多波束数据的解译与分析提供参考。

③采用伪随机流场法对整个工作区域进行了面积性的普查,通过局部电流密度局部凸起异常判断面板渗漏情况。

④基于多波束、侧扫声呐、伪随机流场拟合法检查成果,对缺陷部位、渗漏异常部位以及其他重点关注的部位,采用水下机器人的方式进行局部详查。

⑤综合分析多种方法实测成果,得出混凝土表观缺陷的规模、类型、位置等参数。

### (二) 多波束检查技术

多波束检查技术是以一定的频率发射多个波束,波束具有沿航迹方向开角窄而垂直航迹方向开角宽的特点,多个波束形成扇形声波束探测区。单个发射波束与接收波束的交叉区域称为脚印,发射与接收循环称为声脉冲<sup>[1]</sup>。根据各个角度的声波到达时间或相位即可测量出每个波束对应点的水深值,若干个测量周期组合就形成了条带状水深图。

### (三) 侧扫声呐检查技术

侧扫声呐是一种主动式声呐,从安装在船体两侧(船载式)或安装在拖鱼内(拖曳式)的换能器中发出声波,利用声波反射原理获取回声信号图像,根据回声信号图像分析水底地形、地貌和障碍物,识别水底沉积物类型,检测水下物体的表面结构等,侧扫声呐工作原理示意图见图2<sup>[3]</sup>。

### (四) 伪随机流场拟合法

大坝在没有管涌渗漏情况下,正常流速场分布类似于均匀半空间中的均匀电流场。当存在管涌、渗漏时,将出现两方面的异常情况:

1. 在正常流速场基础上,出现了由于渗漏造成的异常流速场,异常流速场的重要特征是水流速度矢量指向管涌渗漏的入水口。理论分析表明,在一定条件下,异常流速场满足的数学物理方程及边界条件与稳定电流场满足的数学物理方程及边界条件相同,因此场的分布也服从类似的规律。

2. 由于渗漏的出现,必然存在从迎水面向背水面的渗漏通道。

根据上述物理现象,将一个电极置于背水面的出(渗)水点(区),另一个电极置于库区水体中,且距离出(渗)水点(区)相当远,以保证测量区域的电流场不受其影响。在水底附近测量三分量(矢量)的电流密度或垂直(标量)电流密度分布,并根据电流场异常情况判断渗漏的入口(区)。由于是用电流密度场拟合渗漏造成的异常流速场分布,因此该方法被称为伪随机流场拟合法。

### (五) 水下无人潜航器检查技术

水下无人潜航器(Remotely Operated Vehicle,简称ROV),也叫水下机器人,是能够在水下环境中长时间作业的高科技装备,尤其是在潜水员无法承担的高强度水下作业、潜水员不能到达的深度和危险条件下更显现出其明显的优势。

水下无人潜航器系统主要包括了ROV潜器单元、地面控制单元、供电单元及吊放系统四部分。其中,ROV主机包括了高分辨率彩色摄像机、避碰声呐、内置姿态传感器、机械臂、推进器、照明灯等部件;地面控制系

统包括了计算机控制系统、DV录像系统等部件。

### 三、应用实例与分析

#### (一) 项目简介

混凝土面板坝前一般为缓坡结构，再加上库水泥沙含量较大，导致水下面板上附着一层泥沙，而且坝前水位一般都较深，潜水员水下探摸安全风险较大、成本较高，且难以做到全覆盖检查。针对此种情况，采用多波束、侧扫声呐、伪随机流场拟合法、水下无人潜航器检查技术对该面板进行了水下全覆盖检查，多波束检查技术获取水下面板的三维体型信息，侧扫声呐检查技术获取水下面板的影像信息，伪随机流场法获取面板电流密度凸起异常信息，ROV水下检查获取缺陷部位、渗漏部位以及其他重点关注的部位的高清照片，遵循面积性普查与局部详查的技术思路。

#### (二) 全覆盖普查

1. 某水电站采用多波束检查技术对库水位线以下面板进行全覆盖扫描，多波束获取面板的实测体型，与面板的设计体型进行对比分析，对比成果图1，从图中可知：

①EL. 595马道以上面板未见大的混凝土凹陷和鼓包，没有大的混凝土表面缺陷。

②EL. 595马道以下面板存在不同程度的淤积，淤积厚度在1m~20m之间。

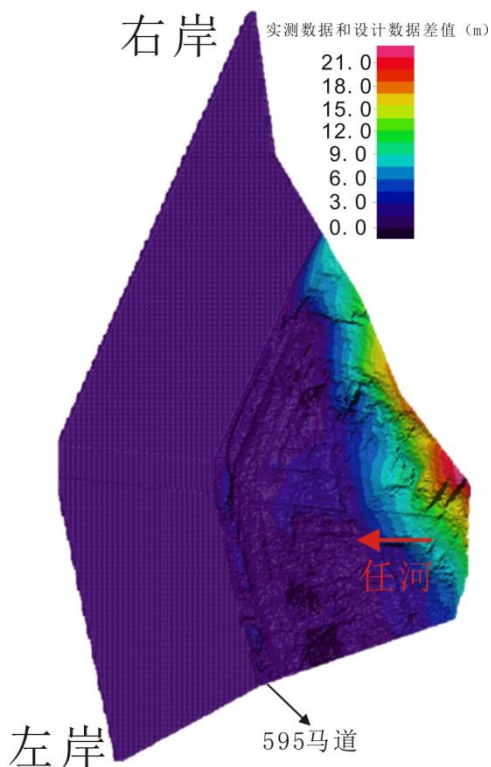


图1 面板库水位线以下部位实测体型与设计体型差异图

2. 其次采用侧扫声呐检查技术对库水位线以下面板进行全覆盖扫描，检查成果图见图2，从图中可知面板未见大的混凝土凹陷和鼓包，没有大的混凝土表面缺陷，与多波束水下检查结果一致。

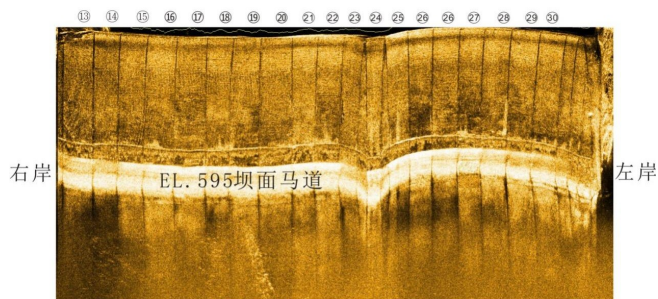


图2 面板库水位线以下部位侧扫声呐检查成果图

3. 接着采用伪随机流场拟合法进行库区渗漏入水口的具体位置的探测，探测成果图见图3，从图中可以看出，本测区电流密度正常范围为 $5\text{mA}/\text{m}^2 \sim 15\text{mA}/\text{m}^2$ 之间，异常部位电流密度表现为高值异常，为正常值的3倍甚至5倍，共发现5个高电流密度异常区，编号①~⑤均推测为渗漏入水口的反映，①号异常区位于库区左岸上部高程在620m~635m位置；②号异常区位于库区左岸下部高程在570m~600m位置；③号异常区位于库区右岸上部高程在603m~608m位置，④号和⑤号异常区均位于库区右岸下部，高程分别为568m~571m和559m~562m位置。其中①和②号异常区，其电流密度值较大且范围广，推测为主要的渗漏异常区；③、④和⑤号异常区，电流密度值较小、范围较小且分布零星，推测为次要异常区。各异常区平面位置均见图中红色圈定部位。

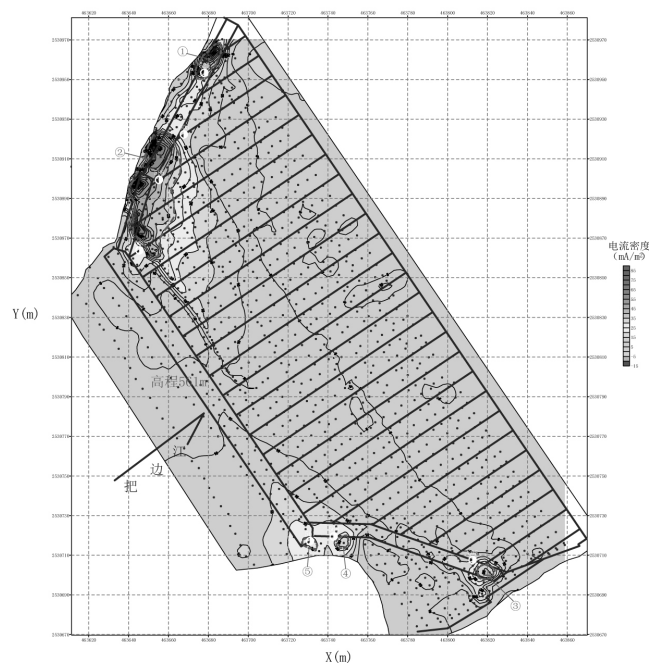


图3 某水电站库区电流密度等值线图

#### (三) 局部详查

采用水下机器人搭载高清摄像设备对多波束、侧扫声呐、伪随机流场拟合法检查出的缺陷、渗漏异常部位进行局部详查，多种方法相互验证，最终实现面板的全覆盖普查和局部详查的目的。

但是库水位以下面板由于常年处在水下，坝面普

遍存在泥沙附着，ROV水下摄像局部详查存在两个问题：①坝面泥沙附着，难以获取混凝土表面摄像数据；②ROV接近面板时由于推进器的扰动，容易把附着在坝面的泥沙扬起将水搅浑，严重影响ROV高清摄像头的视距范围。针对以上情况，研制出了一套水下清洗和摄像的方案，用于泥沙附着面板的水下摄像检查。

本方案是通过设计一款清洗爬行车和一个摄像车实现水下清洗和摄像的，爬行车主要由车体框架、清洗系统、牵引制动系统组成，摄像车主要由搭载小车、GoPro相机以及示踪墨盒组成，具体工作方式如下：

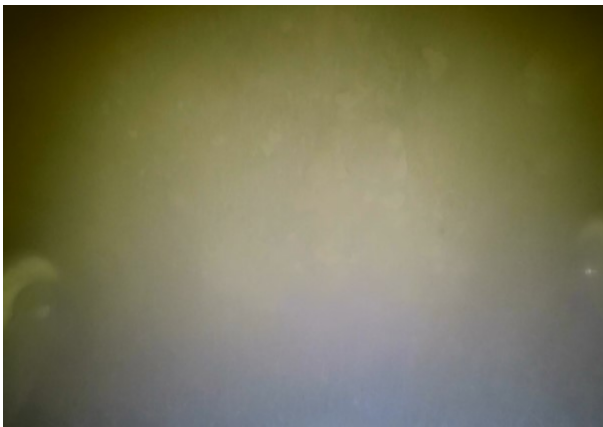
①将高压水泵固定在清洗爬行车上，在车的前端设计高压水枪。

②清洗系统在顶端卷扬机的牵引下在坝面斜坡上从上往下或从下往上行走，行走过程中尽量匀速缓慢。

③冲洗完毕后原路收回清洗系统。

④摄像系统在人力牵引下搭载GoPro相机及视踪墨盒对清洗完的坝面进行水下摄像和渗漏检查，每块面板布置沿面板斜坡方向三条平行检查测线，测线间距4m，其中一条为面板接缝测线。

采用该套设备，对普查阶段发现的缺陷、渗漏部位进行水下清洗摄像检查，发现面板局部部位出现混凝土掉块的现象和局部部位示踪剂随水入缝的现象，验证了普查成果，实现了对普查成果的详查。检查成果图见图4~图5。

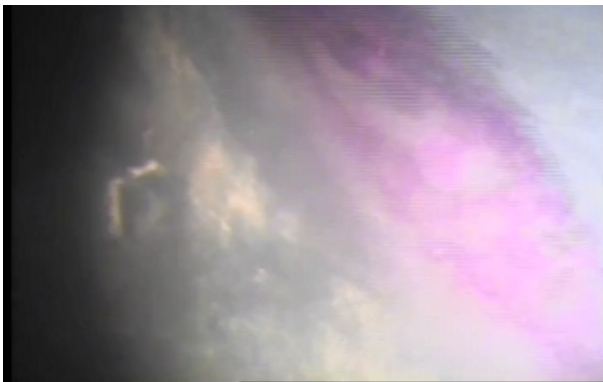


清洗前水下摄像典型成果图



清洗后水下摄像典型成果图

图4 水下清洗前、后摄像效果对比图



高锰酸钾示踪剂随水渗入现象



水中悬浮物质随水渗入现象

图5 面板库水位线以下水下清洗摄像典型成果图

#### 四、结语

采用多波束、侧扫声呐、伪随机流场拟合法、ROV水下检查技术等综合方法对面板进行全覆盖普查和局部详查，通过自主改装研制的水下清洗摄像设备，突破了已有方法的局限性，充分利用各种方法的优势和特点，解决了混凝土面板坝水下检查技术难题，建议将该综合检查技术作为混凝土面板坝水下检查的常规检查技术，为面板坝水电站的运行检修提供了可靠的技术保障。

#### 参考文献

[1] 杨宇. 水下多通道真彩色三维重建与颜色还原方法研究[D]. 中国海洋大学, 2014.  
[2] 束洪福. 水下探秘丰富了人的想象力[N]. 科技日报, 2006-06-29009.  
[3] 熊春宝, 田磊, 熊爱成, 陈小华. 侧扫声呐声波掠射角对海底管道检测的影响[J]. 测绘通报, 2016(04): 58-63.