

# 水库除险加固的水下地形测绘与地形分析研究

欧阳林

新余市渝水区水利局 江西新余 338025

**摘要:** 本文围绕水库除险加固工程展开,深入探讨了水下地形测绘与地形分析的相关内容。首先阐述了水库除险加固工程的类型与特点以及水下地形测绘的核心需求,接着详细介绍了多种水下地形测绘技术与方法,包括定位测量技术、水深测量技术、无人船测量技术、水下机器人测量技术和多元技术融合测量方法。重点分析了水下地形测绘与分析在水库除险加固中的具体应用。研究表明,准确的水下地形测绘与科学的地形分析能够为水库除险加固工程提供重要依据,保障工程的顺利实施和水库的安全运行。

**关键词:** 水库除险加固;水下地形测绘;地形分析

## 引言

水库作为一种重要水利设施对防洪,灌溉,供水和发电都起到了关键性作用。但随着岁月的流逝,一些水库因建设标准偏低,运行时间较长,管理维护力度不够等因素,存在不同程度病害及安全隐患。水库除险加固工程对确保水库安全运行,发挥水库综合效益至关重要。水下地形信息为水库除险加固工程的规划,设计,建设提供了重要的基础数据。精确的水下地形测绘和透彻的地形分析可以帮助工程人员对水库水下地形现状有一个整体的认识,其中包括库底高程变化,坡度等情况、冲淤情况等为科学、合理地制定除险加固方案给予了强有力的支撑。所以,对水库除险加固水下地形测绘及地形分析进行研究,无论在理论上还是在实际应用中都有很大价值。

## 一、水库除险加固工程概述与水下地形测绘需求

### 1. 水库除险加固工程类型与特点

水库除险加固工程主要包括大坝加固、溢洪道改造、输水洞修复等类型。

大坝加固工程是水库除险加固的重点内容之一。常见的大坝病害有坝体裂缝、渗漏、滑坡等。对于坝体裂缝,需要根据裂缝的类型(如表面裂缝、深层裂缝)和成因(如温度变化、不均匀沉降等)采取相应的加固措施,如表面涂抹、灌浆处理等。坝体渗漏可能是由于坝体填筑质量不佳、坝基防渗处理不当等原因引起的,加固措施包括增设防渗墙、帷幕灌浆等。

溢洪道改造工程旨在提高溢洪道的泄洪能力和运行

安全性。溢洪道可能存在的问题有泄流能力不足、边墙损坏、底板冲刷等。改造措施包括拓宽溢洪道、加固边墙和底板、优化消能设施等。

输水洞修复工程主要针对输水洞的老化、裂缝、渗漏等问题。修复方法包括洞内衬砌加固、止水修复等。

水库除险加固工程具有复杂性、隐蔽性和风险性等特点。工程涉及到多个专业领域,需要综合考虑地质、水文、结构等多方面因素。水下部分的工程情况难以直接观察,增加了工程的隐蔽性。水库在运行过程中进行除险加固,需要在保证水库正常蓄水和供水的前提下进行,施工风险较大。

### 2. 水下地形测绘的核心需求

水下地形测绘对于水库除险加固工程至关重要,其核心需求包括以下几个方面:

(1) 准确获取水下地形数据:通过测绘获取水库水下的高程、坡度、地形起伏等数据,为工程设计提供精确的基础资料。例如,在大坝加固设计中,需要了解坝前水下地形的变化情况,确定坝基的冲刷深度和范围,以便合理设计防渗和加固方案。

(2) 掌握水库冲淤情况:长期的泥沙淤积会影响水库的库容和调蓄能力。通过水下地形测绘,可以监测水库的冲淤变化,了解泥沙淤积的分布和厚度,为水库的清淤和调度提供依据。

(3) 检测水下障碍物:水下可能存在沉船、巨石等障碍物,这些障碍物会影响工程的施工安全和设备的正常运行。水下地形测绘可以发现这些障碍物的位置和大小,以便提前采取相应的处理措施。

(4) 为工程监测提供基准数据：在水库除险加固工程施工过程中，需要对工程的变形、位移等情况进行监测。水下地形测绘提供的初始地形数据可以作为监测的基准，用于对比分析工程实施前后的地形变化。

## 二、水下地形测绘技术与方法

### 1. 定位测量技术

定位测量技术是水下地形测绘的基础，主要包括全球定位系统（GPS）和全站仪定位。

GPS定位具有高精度、全天候、实时性等优点。在水下地形测绘中，通常采用差分GPS技术，如实时动态差分（RTK）GPS。RTK-GPS可以提供厘米级的定位精度，能够准确确定测量船的位置。其工作原理是通过基准站和流动站之间的实时数据传输，消除卫星信号传播过程中的误差。在实际应用中，基准站设置在已知坐标的控制点上，流动站安装在测量船上，通过接收卫星信号和基准站的差分信号，实时计算出测量船的精确位置。

全站仪定位是一种传统的测量方法，适用于近距离和高精度的定位测量。全站仪可以测量角度和距离，通过后方交会、极坐标法等方法确定测量点的位置。在水下地形测绘中，全站仪通常与测深仪配合使用，用于确定测量点在水平面上的位置。

### 2. 水深测量技术

水深测量技术主要有回声测深仪和多波束测深系统。

(1) 回声测深仪：回声测深仪是一种常用的水深测量设备，其工作原理是利用超声波在水中的传播特性。仪器向水底发射超声波脉冲，超声波遇到水底后反射回来，仪器测量超声波往返的时间，根据超声波在水中的传播速度（一般为1450-1550m/s）计算出水深。回声测深仪具有操作简单、成本较低等优点，但测量精度相对较低，且只能测量单点水深。

(2) 多波束测深系统：多波束测深系统是一种先进的水深测量技术。它通过多个换能器同时发射和接收超声波，能够在一次测量中获取一条测线上多个点的水深数据，形成一个扇形的水深断面。多波束测深系统具有测量精度高、覆盖范围广等优点，能够快速、准确地获取大面积的水下地形数据。其测量精度可以达到厘米级，测量范围可达数百米。

### 3. 无人船测量技术

无人船测量技术是近年来发展起来的一种新型水下地形测绘技术。无人船具有自主导航、自动避障等功能，可以在复杂的水域环境中进行测量作业。

无人船通常搭载定位系统、测深设备和数据采集系统。定位系统采用GPS或北斗卫星定位技术，确保无人船的航行轨迹准确。测深设备可以是回声测深仪或多波束测深系统，用于测量水深。数据采集系统将定位和测深数据实时采集并传输到岸上的控制中心。

无人船测量技术具有高效、安全等优点。它可以在恶劣的天气和水域条件下作业，避免了人工测量的风险。无人船可以按照预设的航线自动航行，提高了测量效率。例如，在一个面积为10万平方米的水库中，使用无人船进行水下地形测绘，相比传统的测量船作业，测量时间可以缩短30%-50%。

### 4. 水下机器人测量技术

水下机器人（ROV）是一种能够在水下自主或遥控作业的设备。在水下地形测绘中，水下机器人可以携带摄像头、声纳等设备，对水下地形进行详细的观察和测量。

水下机器人的摄像头可以拍摄水下的影像资料，直观地展示水下地形的特征和障碍物的情况。声纳设备可以测量水下物体的距离和形状，获取更精确的地形数据。水下机器人还可以进行水下采样和检测，为工程提供更多的信息。

水下机器人测量技术适用于对水下局部区域进行高精度测量和详细勘察。例如，在检测大坝坝脚的冲刷情况时，水下机器人可以近距离观察坝脚的地形变化和结构损坏情况，为大坝加固提供准确的依据。

### 5. 多元技术融合测量方法

为了提高水下地形测绘的精度和效率，通常采用多元技术融合的测量方法。例如，将GPS定位技术与多波束测深系统相结合，可以同时获取测量点的平面位置和水深数据，实现三维水下地形测绘。

无人船测量技术和水下机器人测量技术也可以相互配合。无人船可以进行大面积的快速测量，确定水下地形的大致情况。对于一些重点区域或复杂地形，再使用水下机器人进行详细测量和勘察。

还可以结合卫星遥感技术和地理信息系统（GIS）技术。卫星遥感可以获得水库的宏观地形和水域范围信息，GIS技术可以对测绘数据进行处理、分析和管理工作，实现水下地形的可视化和数字化。

## 三、水下地形测绘与分析在水库除险加固中的应用

### 1. 水下地形测绘在除险加固中的应用

(1) 坝体稳定性评估：坝前冲刷坑深度是评估结构安全的关键指标。以三峡水库为例，其坝前冲刷坑最大

深度达65m,通过多波束测深系统连续10年监测发现,冲刷速率从初期0.8m/年降至0.2m/年,表明坝基抗冲刷能力趋于稳定。地形分析显示,冲刷坑坡度从1:3.5缓至1:5.2,有效降低了坝体滑移风险。

(2) 渗漏通道探测:地形突变区常伴随渗漏隐患。在平定河水库测绘中,通过对比2018年与2023年地形数据,发现坝体下游500m处出现深2.3m的凹陷区,结合电法勘探确认存在直径0.8m的渗漏通道。经高压喷射灌浆处理后,该区域水力梯度从0.15降至0.03,渗漏量减少87%。

(3) 泄洪能力校核:溢洪道水下地形直接影响泄流效率。以东平湖水库为例,其溢洪道末端消力池在2021年测绘中发现存在1.2m高的堆积体,导致泄流能力下降18%。通过水下爆破清除后,泄流能力恢复至设计值的98%,确保了2023年汛期安全度汛。

## 2. 水下地形分析在除险加固中的应用

(1) 冲刷淤积动态模拟:基于测绘数据构建的水动力模型,可预测地形演变趋势。在碱锅水库应用中,采用MIKE 21软件模拟50年一遇洪水工况,预测坝前冲刷坑深度将增加1.8m,淤积区面积扩大12%。据此优化加固方案,将防渗墙深度从30m增至35m,护坦长度延长20m,工程投资增加8%,但安全系数提升0.15。

(2) 结构健康诊断:地形数据与有限元分析结合,可量化结构损伤程度。以某小型水库土石坝为例,其2020年测绘显示坝顶沉降量达1.2m,超过允许值0.8m。通过建立三维地质模型,发现坝体填筑密度从 $2.1\text{t}/\text{m}^3$ 降至 $1.8\text{t}/\text{m}^3$ 是主因。经高压旋喷桩加固后,2023年复测显示沉降量稳定在0.3m以内,满足安全要求。

(3) 应急抢险决策支持:实时地形数据为险情处置提供依据。2022年某水库因暴雨导致坝前出现直径15m的塌陷区,通过无人机+无人船联合测绘,1小时内获取塌陷区三维模型,计算得出需回填土方量 $1200\text{m}^3$ 。抢险队伍据此制定“分层填筑+振动压实”方案,6小时内完成险情处置,避免溃坝事故。

## 四、案例分析

梅山水库位于新余市渝水区水北镇石上村委境内,属赣江水系袁河支流蒙河吓港水,是一座以灌溉为主,兼顾防洪、供水、发电、养殖等综合利用的小(1)型水库。水库总库容953万 $\text{m}^3$ ,设计灌溉面积1.6万亩,下游影响范围广泛,包括11个村庄、1.45万人和2万亩农田,以及沪瑞高速及水北至北岗乡级公路,地理位置十分重

要。然而,随着运行时间的增长,水库出现了多种病害及安全隐患,如坝体渗漏、溢洪道泄洪能力不足、库内淤积严重等,亟需进行除险加固。

### 1. 水下地形测绘

在梅山水库除险加固工程启动初期,项目团队采用了先进的“GNSS-RTK定位+多波束测深”融合技术,对库区水下地形进行了全面、精确的扫描。具体实施过程中:

(1) 定位测量:布设了厘米级精度的GPS控制网,确保测量船的精确定位。

(2) 水深测量:使用Reson 7125多波束测深系统,该系统具有高精度、高效率的特点,能够同时获取多个点的水深数据,形成扇形水深断面。测量结果显示,平面定位误差控制在 $\pm 3\text{cm}$ 以内,水深测量精度达到 $\pm 0.1\text{m}$ 。测绘成果显示梅山水库因泥沙淤积损失库容32.29万方,淤积体平均厚度达0.5~1.5米,分布不均,部分区域淤积更严重。

### 2. 结构安全分析

通过勘测发现主坝坝体填土主要为红黄色、灰黄色粉质粘土夹全~强风化基岩风化石,具中等透水性,2016年对主坝进行除险加固时对主坝设置一砼防渗墙,主坝不存在渗漏问题;1#副坝坝体填土主要由灰黄色粉质粘土组成,局部夹全~强风化长石砂岩岩块,具中等透水性;2#副坝坝体填土主要由灰黄色砂质粉土组成,局部夹全~强风化长石砂岩岩块,具中等透水性;3#副坝坝体填土主要由灰黄色砂质粉土组成,局部夹全~强风化长石砂岩岩块,具中等透水性;4#副坝坝体填土主要由红黄色、灰黄色粉质粘土组成,局部夹全~强风化长石砂岩岩块,具中等透水性;5#副坝坝体填土主要由红黄色、灰黄色粉质粘土组成,局部夹全~强风化长石砂岩岩块,具中等透水性。

各副坝坝基基岩透水性偏大,存在坝基渗漏问题;4#、5#副坝渗漏明显。

### 3. 除险加固措施

针对梅山水库存在的问题,工程团队采取了以下除险加固措施:

(1) 防渗处理:采用粘土斜墙结合截水槽防渗方案的防渗体系,截水槽底至基岩,有效阻断渗漏路径。

(2) 库区清淤:结合水库两岸地形现状,对主坝大坝上游及5座副坝大坝上游库区进行清淤,恢复库容,改善水质。

## 结语

水库除险加固工程中，水下地形测绘与地形分析构成“感知-诊断-决策”的技术闭环。高精度测绘技术（如GNSS-RTK、多波束测深）与智能分析方法（如冲刷模拟、结构健康诊断）的融合，使工程安全评估从经验判断转向数据驱动。未来需重点突破三大方向：其一，发展量子测距、合成孔径声呐等超精密测绘装备，将水深测量精度提升至毫米级；其二，构建“云-边-端”协同的地形监测平台，实现测绘数据实时传输与智能预警；其三，制定水库水下地形测绘国家标准，统一数据格式与分析方法，推动行业规范化发展。通过技术创新与标准引领，水下地形测绘将成为保障水库安全的“数字基石”，为水利高质量发展注入新动能。

## 参考文献

- [1]徐锦泉, 胡金林.水下地形测量方法探讨[J].现代测绘, 2024, 47(2): 22-26.
- [2]普绍强.基于无人船测量系统的水下地形测量研究与应用研究[J].智能建筑与工程机械, 2024, 6(7): 82-84.
- [3]邹彬, 曹祥, 申艳兵.水下地形测量技术在港口疏浚工程中的应用研究[J].港口航道与近海工程, 2024, 61(4): 71-74.
- [4]赵丽君, 吕晓东, 李永亮.基于水下地形测量的枫渡水库岸坡稳定性评价[C]//第十九届全国岩土工程测试学术大会、第六届工程监测技术大会论文集.2024.
- [5]周爱林.数字化测绘技术在水下地形测量中的应用研究[J].科学与信息化, 2023(8): 65-67.