

# 水利工程水下施工关键技术突破及实践应用分析

冯宪勇 孙先进

邳州市水利建筑安装工程有限公司 江苏 邳州 223100

**【摘要】**：水利工程水下施工在保证水资源开发利用、防洪减灾以及水利基础设施建设等方面具有重要意义，施工质量的好坏直接影响到工程的安全性、耐久性以及运行效益等。伴随着大型水利工程的兴建规模越来越大，常规水下施工技术已经很难适应在复杂水域环境中高精度、高效率以及高安全性等施工需求。本文着重介绍了水利工程水下施工的关键技术，并对其环境特点和技术需求进行了分析，着重论述了水下测量定位、基础处理等问题、在混凝土浇筑，装备协同及数字化智能控制方面取得了关键技术的突破，结合典型工程实践对应用效果进行了分析，提出了施工质量控制的方法、风险防控与技术优化建议等方面进行了阐述，希望对提高水利工程水下施工技术水平与工程建设质量有一定借鉴意义。

**【关键词】**：水利工程；水下施工；关键技术；实践应用

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.068

伴随着国家重大水利工程、流域综合治理、水库除险加固以及河道整治工程建设的不断发展，水下施工已经成为水利工程建设的关键环节。由于施工环境中存在着水流复杂、能见度差、地质条件变化大以及隐蔽工程众多等问题，传统的施工方法对施工精度，质量控制以及安全管理都提出了更大的挑战。近年来多波束测量、智能监测、水下机器人、数字化施工管理等新技术在水利工程领域中的不断运用，对促进施工质量与管理水平的提高起到了强有力的支持作用<sup>[1]</sup>。对水下施工关键技术突破与实践应用进行深入研究，对提高工程建设效率、确保工程运行安全以及促进水利工程智能化发展等方面都有一定的理论价值与实践意义。

## 1 水利工程水下施工特点及关键技术需求分析

### 1.1 水下施工环境特征及主要技术难点

水利工程水下施工一般都是在高水压、低能见度、流速变化较大以及地质条件比较复杂的情况下进行的，其施工过程受到水流冲刷、泥沙淤积、基床不稳以及设备定位难度较大等方面的影响较为明显<sup>[2]</sup>。相对于陆上施工，水下作业隐蔽性好，可视化程度不高，质量检测困难，易发生开挖超欠挖、结构偏位、混凝土离析和基础承载不到位等现象。因此如何实现复杂水动力作用下的精准定位、稳定作业以及全过程质量控制是水下施工中的核心技术难点问题。

### 1.2 水下施工关键技术体系构成

水利工程水下施工的关键技术体系包括水下测量定位技术、地基处理技术、围堰及导流控制技术、水下混凝土施工技术、潜水作业及水下装备技术、施工监测和质量检测技术方面的内容<sup>[3]</sup>。其中测量定位技术对施工精度控制至关重要，地基处理及结构施工技术对工程质量形成至关重要，智能监测及

检测技术对施工安全及质量评价起到了辅助作用。各技术相互联系、协同工作，为复杂环境下水下施工有序进行提供了保证。

### 1.3 关键技术突破的现实需求与发展方向

伴随着水利工程施工规模的扩大，深水化、复杂化、智能化发展趋势越来越显着，依靠人工经验及单一设备进行施工的传统施工方式已经很难适应高精度、高效率、高安全性等施工需求。突破水下施工关键技术的实际需要主要表现为提高施工定位精度，强化复杂水域适应能力，减少安全风险和促进质量可控性<sup>—</sup>。今后，要促进水下施工技术朝着智能感知、数字建模、装备协同、自动化作业以及全过程数据化管理等方向发展。

## 2 水利工程水下施工关键技术突破分析

### 2.1 水下测量定位与智能监测技术突破

水下测量与定位技术取得突破性进展主要表现在多源探测、高精度定位以及三维可视化技术等方面。由于水下施工环境具有能见度低、水流扰动大、泥沙悬浮大的特点，常规的人工测量很难精确把握水下地形、结构位置及施工偏差。通过多波束测深、侧扫声呐、水下摄像、声学定位和三维建模等技术的运用，可以较精确的得到水下地貌、障碍物的分布、基槽轮廓及结构安装状态为优化施工方案，设备定位及质量复核等提供了技术支撑。

通过智能监测技术，水下施工的动态控制能力得到了进一步的加强。通过施工区域内的水位、流速、浊度、沉降、位移、应力以及设备运行状态等传感器的布设，实现了环境变化与施工响应数据的实时获取以及异常情况的报警。在水流突变、基底冲刷、结构偏移或者设备运行不正常等情况下，该监测系统可以帮助施工人员对施工参数及作业顺序进行及时的调整，减

少了盲目施工及事后补救措施,进而促进了水下施工安全性、精确性及连续作业能力的提高。

## 2.2 水下基础处理与成槽成孔施工技术突破

水下基础处理技术突破主要集中在增强复杂基础情况下承载能力、稳定性及抗冲刷性能等方面。水利工程水下基础往往面临着淤泥层较厚,软弱土广布,基床起伏较大以及局部冲刷强烈的情况,如果处理不当,极易诱发结构沉降、倾斜或者渗漏的危险。在不同地质条件下,可以综合运用水下清淤整平、抛石挤淤、砂石垫层、注浆加固、帷幕灌浆等多种工艺,同时配合声呐复测及沉降监测,验证了治理效果,为结构后续施工提供了稳定可靠的基本条件。

成槽成孔施工工艺上的突破主要表现在孔槽成型精度、护壁稳定及沉渣控制。水下连续墙、灌注桩及防渗墙的施工过程中常受水压、泥浆性能、地层变化及机械振动等因素的作用而发生塌孔、偏孔、槽壁失稳或过厚的孔底沉渣等现象。从优化泥浆护壁参数,完善钻机及抓斗导向系统,强化垂直度的实时监测及改进孔底清渣的检测手段等方面可以有效地提高成槽成孔的质量,加强水工结构防渗、承载性能及整体稳定性。

## 2.3 水下混凝土浇筑与结构施工技术突破

水下混凝土浇筑技术取得突破主要体现在材料性能优化和浇筑工艺精细化控制两个方面。在水下环境下混凝土易受水流冲刷,泥沙混入以及导管运行不当等因素的影响而出现离析、夹泥、冷缝、强度不够等质量缺陷。所以应该使用高流动性,抗离析及抗冲刷性能好的水下混凝土并对水胶比,外加剂掺量及骨料级配等参数进行合理的控制。同时严格控制导管法浇注时的首灌量、导管埋深、提升速度及连续供料等参数,以保证混凝土以平稳的状态形成。

在结构施工技术方面的重大突破主要集中在水下模板的精确定位、钢筋笼的安装过程、预制构件的沉放技术以及结构连接精度的严格控制上。对闸坝基础、泵站取水口、围堰封底及护岸结构而言,其结构的安装部位直接关系到后续运行的安全性。通过定位导向架、临时固定装置、吊装姿态控制及水下复核检测技术的应用,提高了构件就位的准确性,降低了结构偏位及接缝不严的现象。将水下影像、声呐检测与施工数据记录相结合,也可以实现结构施工过程的可追溯,改善工程实体的质量。

## 2.4 水下施工装备协同及数字化智能控制技术突破

水下施工装备协同技术取得突破性进展,促进水下作业从单一装备自主施工走向多装备联合作业。复杂水域的施工、清淤、测量、成槽、吊装、浇筑和检测的过程是紧密相联的,其

中任何一个环节的落后都会影响到施工的总体进展。通过对浮吊、抓斗、钻机、泵送设备、测量船、潜水机器人及监测装置等设备的统一调度,实现了设备间信息共享及工序协同,本实用新型减少了重复作业及等待时间的产生,提高了施工效率且降低了人工水下作业的风险。

数字化智能控制技术对水下施工的精细化管理具有重要的支持。通过数字化施工管理平台的搭建,对水文环境、设备轨迹、施工参数、质量检测、安全监测、进度信息等信息进行集中集成,可实现对整个施工过程的可视化,数据化以及可追溯管理。综合运用 BIM 模型、自动控制、远程操作及智能预警等技术,施工单位可及时辨识施工偏差、评判风险等级、实现资源的优化配置,促进水下施工由经验管理走向数据驱动、智能决策、精准控制。

## 3 水利工程水下施工关键技术实践应用及优化策略

### 3.1 关键技术 in 典型水利工程中的实践应用分析

水利工程中水下施工关键技术工程中的实际运用一般贯穿勘测、清障、基础处理、结构施工以及运行检测的整个过程。在闸坝加固、泵站取水口施工、河道整治、航道护岸以及水库除险加固过程中,由于水下施工的环境比较复杂,采用单一的工艺往往很难达到施工的要求,因此需系统集成水下测量定位、智能监测、基础加固、成槽成孔、水下混凝土浇筑。通过工前精准探测、工中动态控制、工后质量复核等措施,能有效提高水下隐蔽工程可视化水平及施工质量稳定性。

如某泵站取水口改建工程,施工区水流速度快、淤泥层较厚、基础承载力不够。在项目实施之前运用多波束测深与声呐扫描技术对水下地形与淤积状况进行了掌握,之后通过水下清淤、基床整平与抛石挤淤对基础条件进行了改善。结构施工阶段通过导管法水下混凝土的持续浇注,配合水位、流速及结构沉降监测等手段控制结构的施工过程。

### 3.2 施工质量控制与安全风险防控措施

水下施工的质量控制要遵循全过程、全要素、动态化的原则。施工前应对水文、地质、流速、泥沙及障碍物等进行全面勘察,并合理设置施工窗口期,设备配置及技术方案等;在施工中应着重注意测量定位精度、基底清理质量、成孔成槽的垂直度、钢筋笼的安装位置、混凝土配合比、导管的埋深及连续浇筑时间等;建成后还要经过声呐检测、水下影像、钻芯取样、潜水复核的全面验收。只有形成闭环的质量管理机制才能减少隐蔽工程质量缺陷的发生。

以水闸基础加固工程为例,如果孔底沉渣没有得到清理,或者导管埋深没有得到很好的控制,易导致夹泥、断桩、缩径

等一系列质量问题的出现,从而影响基础的承载性能。对于该风险可以通过沉渣检测仪及水下摄像设备对成孔完成后的孔底状态进行复核,并对浇筑时的混凝土方量,灌注速度以及导管提升高度等参数进行实时记录。同时在安全防控上,要对突涨水、强流、设备不稳定、潜水作业及临时用电风险分级控制,遇有异常及时处理停工,保证施工质量和人员安全的同步控制。

### 3.3 关键技术应用效果评价及存在问题分析

水下施工关键技术应用效果可以通过施工精度、质量稳定性、安全水平、工期控制及综合效益来评估。测量定位和智能监测技术可以增加水下作业的透明度和降低依靠经验进行施工所带来的偏差;基础处理及成槽成孔技术可以提高地基的承载能力,提高结构的抗冲刷、抗沉降性能;水下混凝土浇筑技术可以增强结构的整体性与耐久性;采用数字化装备的协同技术可以有效地提高施工管理的效率以及风险预警的能力。

但是在实践中水下施工的关键技术还受到了一定的限制。一方面复杂的水域条件对技术效果有影响,例如高含沙水流、强紊流、深水高压环境等都可能使声呐成像精度下降、设备作业稳定性下降;另一方面一些项目由于投资规模,技术人员及设备条件等因素的制约,很难综合运用智能监测、水下机器人及数字化平台等技术。以中小河道治理工程为例,施工单位通常还是依靠人工经验以及常规检测手段进行施工,造成施工数据累积不充分、质量难以追溯等问题。

### 3.4 水下施工关键技术优化路径与推广应用建议

在水下施工的关键技术优化过程中,应重点关注“精准感知、稳定施工、智能控制、规范管理”这几个方面。一是要加

强水下测量、地质探测、施工装备与监测系统数据的整合,建立统一信息管理平台并对施工状态进行实时反馈;二是要提高水下装备自动化与协同作业能力并减少人工潜水作业所占比重;三是要针对不同类型的水利工程制定分级技术的应用计划,切忌一味追求高端装备,忽略工程适用性。同时应不断完善施工技术标准及验收规范以增强技术推广可复制性。

例如在大型水库除险加固或深水闸坝工程中,可推广“BIM建模—多波束测深—水下机器人巡检—智能监控平台”的综合技术模式,实现设计、施工和检测数据的一体化管理;中小型泵站、涵闸及河道整治工程则可以优先采用水下清淤整平、导管法浇筑、声呐复测及基础沉降监测的实用技术。通过根据工程规模、风险等级以及投资条件等因素进行分类普及,不仅能够提升关键技术的运用效率,还能够促进水下施工技术常态化运用于水利工程中。

## 4 结论

水利工程水下施工作为一项工艺复杂、专业性强、风险大的系统工程,其关键技术水平的高低直接关系到工程建设质量与运行安全。通过强化水下测量与定位、基础处理与混凝土浇筑、装备协同与数字化智能控制关键技术创新运用,可有效增强施工精度、质量稳定性与安全保障能力。就实际情况而言对关键技术进行综合集成应用已经成为水下施工效率提升的重要手段。在今后的工作中,要进一步强化智能装备研发、数字化平台建设和施工标准体系完善等方面的工作,促进关键技术和信息化、智能化技术的深度融合,不断提高我国水利工程水下施工的现代化水平,从而为重大水利工程的高质量施工提供更稳固的技术支撑。

## 参考文献:

- [1] 黄祖朋.水利工程水下混凝土浇筑施工技术及其质量保障措施[J].陶瓷,2026,(6)165-167.
- [2] 张鑫伟,朱佳辉,黄一城.水利工程水下施工技术及其安全控制研究[J].水上安全,2026,(1)136-138.
- [3] 李震,丁华.水利工程中水下施工技术的难点与解决对策研究[J].产品可靠性报告,2025,(10)254-256.
- [4] 罗耀光.水利水电工程水下混凝土浇筑施工技术研究[J].水上安全,2025,(17)186-188.