

ICS 编号

CCS 编号

# 团体标准

T/CHES XXX—20XX

## 调水工程水下机器人检查技术导则

Technical guidelines for underwater robot inspection of  
water diversion projects

(报批稿)

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国水利学会 发布



# 前 言

本标准按照《工程建设标准编写规定》（建标（2008）182号）的规定起草。

本标准共分为8章和2个附录，主要技术内容包括总则、术语和定义、基本规定、检查内容、机器人选型、作业程序、技术要求、成果整理等。

请注意本标准的某些内容可能涉及专利。本标准的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条16号，邮编100053），以便今后修订时参考。

本标准主编单位：中国南水北调集团中线有限公司

水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院

本标准参编单位：水利部大坝安全管理中心

中国水利学会

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

广东粤海珠三角供水有限公司

南京水科院瑞迪科技集团有限公司

河海大学

深圳潜行创新科技有限公司

本标准主要起草人：向衍、吴小扁、沈光泽、刘六宴、杨元月、盛金保、孙卫军、刘伟宝、陈晓楠、陈哲、陈思宇、曹翔宇、张凯、刘成栋、柯敏勇、周彦章、张浩江、梁建奎、郝泽嘉、孔洋、孔明、孙红亮、悦琳琳、金秋、鲁文妍、贺喜、王亚坤、聂兵兵、高森、张佩伦、孙润达、潘长城、杨勇、王梦、朱延涛、许松、张炜博、戴波、彭望、刘灿平、孟颖、沈明威、沈洁、彭雪峰、彭家奕、胡继洲、张洵、周长根

本标准主要审查人：程德虎。



# 目 次

1 总 则	(1)
2 术语和定义	(2)
3 基本规定	(3)
4 检查内容	(4)
4.1 一般规定	(4)
4.2 水下检查内容	(4)
5 水下机器人选型	(6)
5.1 一般规定	(6)
5.2 有缆机器人	(6)
5.3 无缆机器人	(6)
5.4 设备安全防护	(7)
6 作业程序	(8)
6.1 一般规定	(8)
6.2 水下检查准备	(8)
6.3 水下检查	(8)
6.4 资料整理	(9)
7 技术要求	(10)
7.1 一般规定	(10)
7.2 表面缺陷检查	(10)
7.3 渗漏入口检查	(10)
7.4 淤积与冲刷检查	(11)
7.5 金属结构缺陷检查	(11)
7.6 水生生物检查	(11)
8 成果整理	(12)
附录 A 水下检测方案（大纲）	(13)
附录 B 水下检测成果报告（大纲）	(14)
本标准用词说明	(15)
引用标准名录	(15)
条文说明	(17)



## 1 总 则

- 1.0.1 为了规范调水工程水下机器人检查的技术要求，制定本标准。
- 1.0.2 本标准适用于调水工程主要建筑物的机器人水下检查。
- 1.0.3 机器人水下检查除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语和定义

### 2.0.1 调水工程 water diversion project

为满足供水、灌溉和生态需水要求，兴建的跨水系、跨区域的水资源配置工程。

### 2.0.2 水下机器人 underwater robot

通过其搭载的检查装置，对工程水下目标体的运行情况实施水下检查工作的机器人。

### 2.0.3 声呐检查 sonar inspection

通过水下机器人配置的声呐系统对水下检查区域进行扫测，获取检查区域声呐图像以确定目标位置，并对其形态进行判定的过程。

### 2.0.4 水下摄像检查(光学成像检查) underwater camera inspection (optical imaging inspection)

通过水下机器人配置的水下摄像头对检查目标进行录像、拍照，获取图像及视频资料，并对表观状态进行判定的过程。



### 3 基本规定

- 3.0.1 开展机器人水下检查，应结合建筑物布置、结构特点和运行特点，制定检查方案，明确检查部位、项目、内容、方法、要求，检查方案大纲应符合本标准附录 A 要求。
- 3.0.2 水下检查所使用的水下机器人及检测仪器技术指标应满足水下检查方案要求。
- 3.0.3 水下机器人检查的检测仪器应检定或校准。
- 3.0.4 机器人水下检查应配备相关技术人员。
- 3.0.5 水下检查作业前，应制定安全生产方案，进行安全培训。
- 3.0.6 水下检查应满足安全作业及环保的要求，并应符合现行行业标准《水电水利工程施工通用安全技术规程》DL/T 5370、《水电水利工程土建施工安全技术规程》DL/T 5371 和《水电水利工程施工环境保护技术规程》DL/T 5260 的有关规定。
- 3.0.7 水下检查后应形成成果报告。有以往检查成果的，应进行对比分析。
- 3.0.8 水下检查应及时检查数据、影像质量，保存各项原始记录，水下记录内容应全面、完整。
- 3.0.9 机器人水下检查应遵循“安全可靠、技术先进、节能环保”原则，并确保对调水工程生态环境影响最小化，避免污染水体，减少干扰生物。
- 3.0.10 水下检查采用的方法、工艺、装备、材料应满足环保的要求，饮用水源地水下检查时应无毒、无害，并应符合现行行业标准《水利水电工程施工通用安全技术规程》SL 398、《水利水电工程土建施工安全技术规程》SL 399 和《水利水电工程环境保护设计规范》SL 492 的有关规定。

## 4 检查内容

### 4.1 一般规定

- 4.1.1 水下机器人检查应按检查大纲开展，并应明确检查部位和项目。
- 4.1.2 水下机器人应根据具体建筑物类型进行针对性检查。

### 4.2 水下检查内容

- 4.2.1 按调水工程主要建筑物类型划分时，机器人水下检查应包括水库大坝、水闸、泵站、渠道、渡槽、管（涵）、隧洞与倒虹吸等水工建筑物的水下检查工作。
- 4.2.2 水库大坝进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：
  - 1 坝体表面裂缝、剥蚀、冲蚀、破损或其他形式的物理损坏。
  - 2 水库大坝混凝土表面磨损情况。
  - 3 止水结构破损、撕裂、脱离、变形或异物卡塞情况。
  - 4 接缝、伸缩缝及其他结构连接处的渗漏等。
  - 5 库底、坝前、取水口附近等泥沙淤积、异物阻塞情况。
  - 6 水生生物生长分布情况。
- 4.2.3 水闸进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：
  - 1 混凝土裂缝、表面剥落、蜂窝麻面、破损及钢筋外露情况。
  - 2 闸墩与底板结合部位沉降、错台等。
  - 3 闸孔内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布情况。
  - 4 闸门金属结构及门槽裂缝、变形、锈蚀等情况。
  - 5 门槽边缘是否平直，有无明显翘曲。
  - 6 闸门底水封装置老化撕裂、脱落或异物卡阻情况。
  - 7 闸门止水带偏移、变形或断裂情况。
- 4.2.4 泵站进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：
  - 1 混凝土裂缝、表面剥落、蜂窝麻面、破损及钢筋外露情况。
  - 2 进水口、拦污栅、流道与泵室等泥沙淤积、异物阻塞情况。
  - 3 水生生物生长分布情况。
  - 4 闸门、拦污栅、轨道等部位异物卡阻、腐蚀、变形或焊缝开裂情况。
  - 5 金属部件磨损、锈蚀或损坏情况。
  - 6 泵站关键止水部位老化撕裂、脱落或异物卡阻情况。
  - 7 门槽止水压板的偏移、变形或断裂状态。
- 4.2.5 渠道进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：
  - 1 衬砌板裂缝、错台、下滑、隆起、塌陷，渠道渗漏等。
  - 2 衬砌板与跨渠桥梁、建筑物墩柱结合部位开裂、塌陷等。
  - 3 逆止阀阻塞、损坏、缺失。
  - 4 水生生物生长分布情况。
  - 5 渠道内泥沙淤积及异物阻塞情况。
- 4.2.6 渡槽进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：
  - 1 槽身裂缝，混凝土表面剥落、破损，防渗材料开裂、脱落等。
  - 2 结构缝密封胶条开裂、脱落。
  - 3 槽内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布情况。
  - 4 渡槽桩基基础迎水面、桩-土交界处的局部冲刷坑深度、宽度及形态。
  - 5 渡槽桩基基础表面混凝土剥落、裂缝、钢筋裸露等缺陷。
- 4.2.7 管（涵）进行水下机器人检查时，应符合下列规定：
  - 1 PCCP 管道水下检查内容宜包括下列内容：
    - 1) 管身裂缝，混凝土表面剥落、破损、腐蚀、脱壳及生物附着，管身鼓包。
    - 2) 管道内衬剥落、侵蚀或沉积物堆积。
    - 3) 管道承插口碰损、外保护层脱落，橡胶密封圈气孔、裂缝。
    - 4) 管身内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布情况。

- 2 涵洞水下检查内容宜包括下列内容:
  - 1) 混凝土表面裂缝、剥落、破损。
  - 2) 结构缝错台, 聚脲、密封胶条等防渗材料开裂、脱落。
  - 3) 涵洞内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布情况。
- 4.2.8 隧洞进行水下机器人检查时, 应检查下列工作内容:
  - 1 洞顶塌落、底板坍塌物堆积。
  - 2 混凝土表面裂缝、破损。
  - 3 结构缝错台。
  - 4 洞内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布情况。
- 4.2.9 倒虹吸进行水下机器人检查时, 应检查下列工作内容:
  - 1 管身裂缝, 混凝土表面剥落、破损。
  - 2 管身结构缝错台, 密封胶条开裂、脱落。
  - 3 管身内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布情况。
  - 4 管体迎水面、管-土交界处的局部冲刷坑深度、宽度及涡流掏空现象。
  - 5 伸缩缝、施工缝等部位接缝渗漏痕迹。
  - 6 穿河段管道止水带偏移、老化或撕裂情况。

## 5 水下机器人选型

### 5.1 一般规定

- 5.1.1 水下检查机器人可分为有缆机器人及无缆机器人。
- 5.1.2 水下检查机器人选型及技术应符合下列规定：
  - 1 应根据具体水下检查作业任务和实际作业工况合理选定机器人型号、级别、搭载的检测设备及相应工具，并应保证机器人及设备满足作业要求；
  - 2 现场检查临时用电应满足相关要求，供电电源应匹配水下机器人作业负载，各控制模块应满足绝缘、通风、散热、防雨、防火的安全要求，并应可靠接地；
  - 3 水下机器人应满足水下静态平衡、水下动态平衡的运动控制要求，并应具备耐压、防水、绝缘等特性。
  - 4 水下机器人宜配备导航定位系统，水下导航系统的精度应满足水下检查的要求。
  - 5 水下机器人系统抗流能力不宜低于 2 节。
- 5.1.3 在准备阶段和作业阶段，应评估包括水深、流速、水温、水质、泥沙淤积和能见度等作业环境因素以及可能存在的风险。作业环境因素对水下机器人作业的影响应在可接受范围内。
- 5.1.4 水下机器人操作人员应熟悉作业限制条件。

### 5.2 有缆机器人

- 5.2.1 有缆机器人应适用于包括开阔水域环境的水下检查。在狭闭环境或水体能见度低环境下使用有缆机器人时，应采取保障作业安全的措施。
- 5.2.2 有缆机器人地面控制台应放置在稳定牢靠平台，临空临水作业应设置防护措施，并宜符合现行行业标准《水利水电工程施工安全防护设施技术规范》SL 714 的有关规定。
- 5.2.3 有缆机器人下水前应进行设备检查，检查内容应包括外观检查、脐带缆检查、通信及控制系统检查、作业工具检查、脐带缆收放设施检查，并应符合下列规定：
  - 1 外观检查时，启动有缆机器人电子或液压设备前，应检查有缆机器人是否有裂纹、凹陷、油污、老化、部件松动、电缆或液压管松动、摄像机镜面污渍、推进器桨叶内杂物；
  - 2 有缆机器人脐带缆外观应完好、顺直，无损伤、扭结、缺陷或污染；有缆机器人脐带缆宜选用零浮力电缆，作业前应对脐带缆抗拉强度进行评估，不应超负荷工作；
  - 3 通信及控制系统检查，应检查所有控制指令功能，并应确认有缆机器人响应正常。检查应确定缆机器人报警状态、数据显示、指示灯等工作状态正常；
  - 4 作业工具检查应检查搭载工具与水下作业项目匹配性，并应检查搭载工具功能完整性；
  - 5 脐带缆收放设施应检查结构、电气连接、液压部件完整性。
- 5.2.4 脐带缆宜选用零浮力缆。作业前应对脐带缆的抗拉强度进行评估，不应超负荷工作。应保持脐带缆和水下结构物的安全距离。

### 5.3 无缆机器人

- 5.3.1 无缆机器人应适用于通视条件好、开阔环境或狭窄空间下的水下检查作业任务。
- 5.3.2 无缆机器人配备的测速仪器和自主导航系统等应满足调水工程水下检测所需量程、精度和使用环境要求。
- 5.3.3 无缆机器人应具备紧急上浮机制，并应确保在失去动力或故障时能安全返回水面。
- 5.3.4 无缆机器人应具备避障系统，并应避免与调水建筑物发生碰撞造成损坏。
- 5.3.5 无缆机器人应检查独立供电是否稳定以及备用电源是否完好。独立供电提供的续航能力应确保机器人能在预定时间内完成任务。
- 5.3.6 无缆机器人下水前应进行检查，检查内容应包括外观检查、通信系统检查、自主导航系统检查、避障系统检查。
- 5.3.7 水下作业前，应对无缆机器人搭载的自主导航系统开展安全性、可靠性、可维修性和环境适应性测试，并应确保满足水下作业要求。

#### 5.4 设备安全防护

5.4.1 水下检查现场应对影响设备安全运行的危险源进行辨别，并指定相应控制措施。作业现场设备的用电、防火、接地和绝缘等安全措施应符合国家现行有关标准的规定。

5.4.2 机器人水下作业过程中，应符合下列规定：

1 水下作业过程中，应保持完整的水下检查过程，并存档；

2 作业过程中，应定时测试通信状态，维持人员和设备的有效沟通；

3 现场作业前应进行安全风险评估，并应制定安全应急预案。当涉及交叉作业、超浅水作业时，应依据风险评估采取相应预防措施。

5.4.3 当水下机器人出现故障时或天气预报的作业环境因素不满足作业要求时，应回收水下机器人，并应在回收前通报作业场所及相关方。

5.4.4 水下机器人选择应确保对调水工程生态环境影响最小化，不得污染水体、干扰生物。

5.4.5 水下机器人回收后，应进行下水后检查，并应使用淡水冲洗水下机器人。

## 6 作业程序

### 6.1 一般规定

- 6.1.1 水下检查作业程序宜包括下列内容：
  - 1 资料收集、现场调查。
  - 2 制定检查方案。
  - 3 检查前准备。
  - 4 现场检查作业。
  - 5 数据记录与分析。
  - 6 形成检查报告。
- 6.1.2 水下机器人及检测仪器在作业前应进行检验和调试，在作业后应进行设备状态检查及日常维护。
- 6.1.3 水下检查单位应提交检查方案、安全生产方案及应急预案，并应进行审批或报备。
- 6.1.4 水下检查单位应与调度运行管理单位建立联络机制。

### 6.2 水下检查准备

- 6.2.1 水下检查作业前，应编制检查方案，方案宜包括下列内容：
  - 1 工程概况。
  - 2 检查目的和要求。
  - 3 检查依据的标准及有关技术资料等。
  - 4 检查项目内容、检查方法。
  - 5 检查技术要求。
  - 6 预期成果。
  - 7 检查人员和仪器设备。
  - 8 工作进度计划。
  - 9 协调与配合工作。
  - 10 安全、环保和职业健康。
- 6.2.2 水下检查准备工作应包括但不限于下列内容：
  - 1 查勘现场作业环境，确定检查设备的安放和布设位置。
  - 2 按检查要求，布置水上工作平台，安放检查所用设备与器具。
  - 3 布设电源，安装和调试仪器设备。
  - 4 开展技术交底和安全作业教育。
- 6.2.3 水下检查作业前，应先开展现场踏勘，可根据需要携带水深仪、流速仪等仪器设备，获知作业区域水情及周边环境等基本信息，具体信息宜包括下列内容：
  - 1 测量控制基准点位置。
  - 2 作业下船点或吊放点。
  - 3 水流情况、水体能见度。
  - 4 水下暗礁或结构的存在情况。
  - 5 水深变化情况。
- 6.2.4 水下检查作业前，应识别可能存在的风险源及安全隐患，并应进行应急演练。针对存在严重问题的水工建筑物开展水下检查，作业前应开展技术方案、安全应急预案的论证。

### 6.3 水下检查

- 6.3.1 机器人水下检查宜采用先普查后详查的工作思路，普查阶段成果应能圈定缺陷或异常部位分布情况；详查阶段成果应能确定缺陷性质、具体位置和规模等信息。
- 6.3.2 水下检查过程中，当发现损坏等缺陷时，机器人应抵近、悬停，并应进行多角度录像观察。
- 6.3.3 水下缺陷定位应以机器人搭载定位传感器数据为主，定位异常时机器人可采用上浮至水面的方式进行复核。
- 6.3.4 水下检查过程中，当发现下列问题，应补测或重测：

- 1 机器人搭载传感器数据异常、采集数据不全、采集数据明显错误。
  - 2 录制的影像及视频信息不足以反映现状缺陷或异常信息。
- 6.3.5 水下检查可针对同一检查内容采用多种方法进行综合检查,发现重大或疑似重大缺陷时宜创造无水环境条件进一步验证及处置。

#### 6.4 资料整理

- 6.4.1 水下检查应遵循外业实施与内业分析同步进行、内业成果指导外业实施原则,作业过程中,应对实测数据进行初步整理和解释,并应检查数据质量。
- 6.4.2 水下检查应保存含电子数据文件的各项原始记录,并应及时检查数据、影像质量。水下记录内容应全面、完整,并应附有略图、素描图或照片、影像等资料。

## 7 技术要求

### 7.1 一般规定

- 7.1.1 水下检查应根据建筑物特点和运行情况选择检查方法和设备，确保检查全面性和准确性。
- 7.1.2 检查过程中应记录数据和影像资料，确保检查结果完整性和可追溯性。
- 7.1.3 所有检查应符合相关安全标准和环境保护要求，确保工作人员和设备安全。
- 7.1.4 表面缺陷主要关注裂缝、破损、坑洞、冲刷、淘蚀、塌陷、隆起、错台等。
- 7.1.5 表面缺陷检查前应结合监测结果、前期检查结果等初步分析缺陷大致位置，表面缺陷普查应确定疑似缺陷或重点检查部位，表面缺陷详查应确定表面缺陷的位置、范围、规模及类型。
- 7.1.6 渗漏入口检查应关注坝前水域、大坝表面、库盆等部位。
- 7.1.7 渗漏入口检查前应结合监测结果、前期检查结果等初步分析渗漏形式及渗漏入口的大致位置，渗漏入口普查应确定疑似渗漏入口部位或重点检查区域，渗漏入口详查应确定渗漏入口的位置、范围、形态及渗漏程度（渗漏量）。
- 7.1.8 淤积检查主要检查输水渠道、倒虹吸进口、闸门前、泵站前池及调蓄水库等部位；冲刷检查主要检查输水建筑物（含渡槽、隧洞）进出口衔接段、消能设施、陡坡段及石坝上游护面等部位。
- 7.1.9 淤积与冲刷检查前应结合设计资料、竣工资料、水库运行情况和前期检查资料分析检查部位的淤积或冲刷情况。对于受淤积、冲刷影响较大的调水工程，宜建立水上、水下工作基点和典型检查断面。
- 7.1.10 淤积与冲刷检查应查明淤积或冲刷位置、范围及淤积厚度或冲刷深度，估算淤积或冲刷量。当有历史淤积或冲刷数据时，应分析淤积或冲刷变化趋势并计算淤积、冲刷增量。
- 7.1.11 金属结构缺陷检查主要检查闸门、拦污栅及其埋件、压力钢管等部位。
- 7.1.12 金属结构缺陷检查前应收集材质、焊接工艺、运行报告、历次检测报告等相关资料并编制检查方案。
- 7.1.13 金属结构缺陷检查应以外观检查为主，当发现影响结构安全或功能的严重缺陷时，应进行无损检测以确定其性质和程度。金属结构缺陷检查应查明变形、腐蚀、磨损、损伤、裂纹、焊缝缺陷和水生物附着及其构件缺损等缺陷。
- 7.1.14 水生生物检查主要检查建筑物表面及金属结构上的水生物附着情况，包括水生物种类、覆盖范围、附着厚度及其对结构的影响。
- 7.1.15 水生生物检查前应结合建筑物运行历史、水质条件和前期检查结果，初步分析水生物附着的高风险区域，并制定针对性检查方案。

### 7.2 表面缺陷检查

- 7.2.1 在较宽阔水域或狭长水域普查水工建筑物表面缺陷，宜采用走航式多波束声呐法或侧扫声呐法；在狭小水域普查水工建筑物表面缺陷，宜采用定点式多波束声呐法。
- 7.2.2 在隧洞、涵管内普查洞壁、管壁表面缺陷，宜采用潜水器或履带式爬行器搭载摄像、图像声呐沿轴向或环向进行检查，潜水器或履带式爬行器行进速度不宜大于 0.1m/s。当检查发现缺陷时，应调整至能清晰观测缺陷特征的位置，至少停止 10s 或一个图像声呐扫描周期，对准缺陷拍摄清晰、完整的图像。
- 7.2.3 应对普查发现的疑似缺陷部位或确定的重点部位进行详查。详查宜采用潜水器或履带式爬行器抵近目标区域进行摄像检查或图像声呐检查，在保证安全的前提下可由潜水员进行目视检查、摄像检查。能见度较差时宜进行图像声呐检查或人工探摸检查。
- 7.2.4 水下检查水工建筑物表面的破损、坑洞、冲刷（淘蚀）、塌陷（隆起）等缺陷，应确定缺陷的位置、范围、深度（高度）并判断缺陷的性质；检查水工建筑物表面的裂缝，确定裂缝的位置、走向、长度和宽度。

### 7.3 渗漏入口检查

- 7.3.1 在较宽阔水域，渗漏入口普查宜采用伪随机流场法；在狭长或狭小水域，渗漏入口



普查宜采用声波流速检测法；隧洞、涵管宜采用潜水器或履带式爬行器进行摄像检查或辅以图像声呐检查。

7.3.2 应对普查发现的疑似渗漏部位或确定的重点检查区域进行详查。渗漏入口详查宜采用潜水器或履带式爬行器抵近目标区域进行摄像检查或辅以图像声呐检查，在保证安全的前提下可由潜水员进行目视、摄像检查。当能见度较差时，应进行人工探摸检查，并辅以图像声呐检查。对于渗漏形态复杂、入口难以定位或需验证渗漏路径的情况，应进行连通性示踪验证。

7.3.3 对于渗漏出口明确、逆向连通性较好的混凝土结构或基岩中的渗漏，可采用逆向压流连通试验示踪法检查渗漏入口。

#### 7.4 淤积与冲刷检查

7.4.1 在较宽阔水域或狭长水域检查大范围的淤积与冲刷，宜采用走航式多波束声呐法，检查测线宜沿平行淤积或冲刷长轴方向布置，检查范围应超出淤积或冲刷范围；采用多波束声呐法检查时，宜采用与以往检查相同的平面坐标系和高程系。

7.4.2 在狭小水域内检查淤积与冲刷，或检查小范围的淤积与冲刷，宜采用定点式多波束声呐法。

7.4.3 检查淤积物类型及性质时，宜采用目视检查或摄像检查。当能见度较差时，宜进行人工探摸检查，并辅以图像声呐检查。

7.4.4 当缺乏历史数据或需要查明淤积厚度、淤积物内部结构时，宜采用水域地层剖面法。水域地层剖面法测线宜沿平行淤积长轴方向布置，并布置少量连接测线，测线长度应超出淤积范围。

7.4.5 目视检查、摄像检查或图像声呐检查发现淤积时，应测量淤积位置、范围和顶面高程；发现冲刷时，应测量冲刷坑的范围和最深位置及其深度。

#### 7.5 金属结构缺陷检查

7.5.1 金属结构缺陷检查宜采用目视检查、摄像检查或图像声呐法。对于内部缺陷，可采用无损探伤检测。

7.5.2 检查发现金属结构存在变形、表面平整度变化等缺陷时，应配合使用高精度专门器具进行测量。

7.5.3 金属结构的腐蚀检测可采用水下测厚仪，并符合下列规定：

1 待测区全部有机物、水生物应清理干净，结构表面油漆涂层厚度不应大于探头允许值。

2 声程设置宜大于或等于 2 倍金属厚度，当测点处的厚度测值与设计或原有资料差别较大时，可在该测点周围半径 0.5m 范围内适当移动探头进行厚度测量。

3 钢闸门、拦污栅、埋件的腐蚀检测内容及评定标准应符合 NB/T 11418 的有关规定，压力钢管腐蚀检测内容及评定标准应符合 NB/T 10349 的有关规定。

#### 7.6 水生生物检查

7.6.1 水生生物普查宜采用目视检查及摄像检查法。对于能见度较低的水域，可辅以人工探摸检查。

7.6.2 检查重点区域应包括闸门、拦污栅、流道、水位变动区等易附着水生物的部位，以及长期处于静水或缓流状态的区域。

7.6.3 检查时应记录水生物的种类、颜色、形态、覆盖面积及附着厚度，对于可能影响结构安全、阻碍检查或影响水质的特定种类水生物，应采集样本进行进一步分析。

7.6.4 对于水生物附着严重的区域，应评估其对结构功能的影响。若附着物导致过流能力下降或加速金属腐蚀，应制定清理或维护方案。

7.6.5 清理水生物时，宜采用机械清理或环保型生物抑制剂，避免使用对水质或生态环境有害的化学药剂。清理后应复查清理效果，并记录清理前后的对比数据。

## 8 成果整理

### 8.1 一般规定

- 8.1.1 水下检查资料整理工作内容应包括声呐、水下摄像头所采集的图像和视频数据、机器人检查路线和部位，水下检查工作日志及水下检查报告。
- 8.1.2 每日（次）水下检查工作结束后，应填写水下检查作业记录表和水下机器人检查工作日志，并应及时对图像、视频数据进行整理，剔除无效数据和图像后，摘取关键截图备份保存至专用移动硬盘。
- 8.1.3 水下检查日志、检查报告应及时归档存储。
- 8.1.4 水下检查过程中，发现严重影响安全的问题应及时报告。

### 8.2 检查工作日志记录

- 8.2.1 水下检查日志应包含下列主要内容：
  - 1 水下检查范围、检查工程概况及检查路线，如建筑物特征、环境特性等；
  - 2 水下检查工作开展情况。包括人员、设备投入情况，检查方式等；
  - 3 水下检查情况。以图像和视频方式对水下检查过程中发现的问题进行直观描述，将衬砌板损坏部位以网格示意图形式画出。
- 8.2.2 水下检查视频及图像数据清晰度宜高于 1080p 分辨率，文件宜以“位置-缺陷类别-时间-编号”形式命名。

### 8.3 水下检查报告编制

- 8.3.1 专项检查任务完成后，应及时编制检查报告，报告大纲应按本标准附录 B 填写。

## 附录 A 水下检测方案（大纲）

- A.0.1 项目（工程）概况，应包括工程（项目）的基本情况，如地理位置、水文地质、建筑物布置、运行管理情况等。
- A.0.2 工作目的及重难点分析，应说明任务来源、工作目的及范围、工作内容及技术路线、工作重难点分析及解决思路等。
- A.0.3 检查实施方案，应包括作业范围与内容、作业流程、作业准备、施测作业等。
- A.0.4 报告编制方案，应包括报告编制思路、拟定的报告目录及附件材料等。
- A.0.5 项目进度计划与保障措施，应包括项目进度计划、拟投入的设备、项目人员组织机构、人员设备进出场流程、安全文明施工保障措施、应急管理措施等。
- A.0.6 项目概预算，应根据具体工作内容按相关要求及规范编制项目概预算。

## 附录 B 水下检测成果报告（大纲）

### B.1 项目（工程）概况

包括工程（项目）的基本情况，如地理位置、水文地质、建筑物布置、运行管理情况等。

### B.2 检查目的、依据及要求

说明任务来源、检查目的、检查依据、可能存在的缺陷和主要问题、拟获得的检查结果等。

### B.3 检查内容

描述检查的部位、范围、检查项目、实施时间及过程等。

### B.4 检查方法

应针对不同的检查部位、范围和项目等叙述检查方法、设备选型、检查过程及控制。

### B.5 检查结果

应描述各种方法的检查结果及对比分析结果，提出检查结论。对检查中发现的缺陷等与以往检查结果进行对比分析，说明变化情况，分析变化原因。

### B.6 结论

对检查发现的缺陷或问题，分析对建筑物或结构运行安全的影响，并提出处理意见及建议。

## 本标准用词说明

- 1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
  - 1) 表示很严格，非这样做不可的：  
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
  - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：  
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
  - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应该这样做的：  
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
  - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 《泵站设计标准》GB 50265
- 《堤防工程设计规范》GB 50286
- 《砌体工程现场检测技术标准》GB/T 50315
- 《建筑结构检测技术标准》GB/T 50344
- 《焊缝无损检测》GB/T 3323
- 《焊缝无损检测超声波检测技术、检测等级和评定》GB/T 11345
- 《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》GB/T 14173
- 《预应力钢筒混凝土管防腐蚀技术》GB/T 35490
- 《轻型有缆遥控水下机器人》GB/T 36896.1
- 《水工金属结构焊接通用技术条件》SL 36
- 《土石坝养护修理规程》SL 210
- 《混凝土坝养护修理规程》SL 230
- 《调水工程设计导则》SL/T 430
- 《泵站现场测试与安全检测规程》SL 548
- 《衬砌与防渗渠道工程技术管理规程》SL 599
- 《水利工程质量检测技术规程》SL 734
- 《水工隧洞安全鉴定规程》SL/T 790
- 《水工混凝土建筑物缺陷检测和评估技术规程》DL/T 5251
- 《多波束测深系统测量技术要求》JT/T 790
- 《渡槽安全评价导则》T/CHES 22
- 《水工建筑物水下检测技术导则》T/CWEA 26
- 《倒虹吸管安全评价导则》T/GDWA 0014
- 《水下工程有缆机器人检测规程》DB 37/T 4386

中国水利学会团体标准

调水工程机器人水下检查技术标准

T/CHES XXX—20XX

条 文 说 明

## 制 定 说 明

T/CHES XXX—20XX《调水工程水下机器人检查技术导则》，经中国水利学会××××年××月××日以第××号公告批准发布。

本标准在制定过程中，编制组根据立项与大纲审查意见的要求，进行了广泛调查和深入研究，总结了南水北调中线工程、南水北调东线工程、珠江三角洲水资源配置工程、山西省万家寨引黄入晋工程等实践经验，参考了相关规范内容，对本标准进行了制定。

为便于广大设计、施工、科研、管理等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《调水工程水下机器人检查技术导则》编制组按照章、节、条顺序编制了本标准的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需要注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。



## 目 次

1	总 则.....	(20)
2	术语和定义.....	(21)
3	基本规定.....	(22)
4	检查内容.....	(23)
4.1	一般规定.....	(23)
4.2	水下检查内容.....	(23)
5	水下机器人选型.....	(30)
5.1	一般规定.....	(30)
5.2	有缆机器人.....	(30)
5.3	无缆机器人.....	(31)
6	作业程序.....	(33)
6.1	一般规定.....	(33)
6.2	水下检查准备.....	(33)
6.3	水下检查.....	(33)
7	技术要求.....	(34)
7.2	表面缺陷检查.....	(34)
7.3	渗漏入口检查.....	(34)
7.4	淤积与冲刷检查.....	(34)
7.5	金属结构缺陷检查.....	(35)
7.6	水生生物检查.....	(35)
8	成果整理.....	(36)
8.1	一般规定.....	(36)

# 1 总 则

## 1.0.2 规定本标准的适用范围。

本标准适用的调水工程建筑类别，包括调水工程中的水库大坝、水闸、泵站、渠道（堤防）、渡槽、管（涵）、隧洞、倒虹吸等建筑物，本标准适用于水工建筑物水下表观状态或外观缺陷的检测，主要指水工建筑物的运行状态（如冲刷、沉积现状，闸门的启闭、淤堵、抛石岸坡的坍塌等表观状态），以及外观缺陷（如：混凝土蜂窝、麻面、孔洞、疏松脱落、掉块、裂缝、露筋、破损、冲蚀，及金属结构变形、焊缝脱开、锈蚀、防腐层剥落等表面可见的缺陷或病害）的检测。对于水下地形现状探测、水工建筑物渗漏检测、金属结构内部缺陷检测等，需参考相关的技术规范，在本标准中不再规定。

1.0.3 水下检测需要遵守各行业安全相关作业规定，主要按照《水利水电工程施工通用安全技术规程》SL 398 与运营管理单位的安全规定，包括临边作业、高处作业、水上作业、特种作业等相关的安全作业管理规定。

## 2 术语和定义

### 2.0.2 水下机器人

水下机器人是一种能够在水下环境中长时间作业的高科技装备，替代潜水员无法承担的、或不能到达的深度和危险条件下的水下作业机器人。水下机器人分为遥控水下机器人（Remote Operated Vehicle, ROV）和自主式水下机器人（Autonomous Underwater Vehicle, AUV）。ROV 通过缆线与岸基进行数据传输和控制指令传达，又称有缆式水下机器人。AUV 无需通过线缆与岸基通信，而是通过预设的智能控制算法力进行航行控制、信息获取。

### 2.0.3 声纳检查

声纳的分类可按其工作方式，按装备对象，用途、携带方式和技术特点等分类方法分成为各种不同的声纳。水下检测工作中常用的有单波束回声测深仪、侧扫声纳、多波束测深、浅地层剖面仪等。

### 3 基本规定

3.0.1 调水工程水下检测工作，要与调水工程安全定检周期、水流冲刷影响、突发自然灾害等情况相关联，一般由运营单位提出检测任务的需求，根据工程实际情况定期或不定期开展。对于长期运行部位，每年要进行 1 次水下检测；对于应急突发情况，要在短时间内采用多种检测技术高效地完成水下检测，查明各类水工建筑物水下表观状态或外观缺陷的分布范围。

3.0.2 随着水下检测方法、技术的快速发展以及新型检测仪器和装备的不断涌现，为调水工程水下检测工作的开展创造了良好条件，有利于检测效率和质量提高。为适应调水工程建设及运行管理的需要，水下检测工作宜采用国内外先进的水下检测技术，尤其被工程实践证明准确可靠的检测技术，必要时采用传统检测手段进行结果验证。由于各类水下检测技术适用范围及检测效果各有优劣，为查明水下空间分布及表观状态影像，一般采用两种或以上检测方法进行综合检测，不同的水下检测技术与方法，所检测的隐患、缺陷特征需一致、对应或互补，以获取准确、可信的检测成果，提高检测精度。

3.0.3 水下检测仪器设备要满足技术指标的要求，由岸上供电、水域作业中的设备需绝缘良好、须设有漏电保护装置。针对不同工程部位开展检测作业时，采用的仪器设备需满足检测作业精度的相关要求，仪器设备的精度指标需有相关的证书或证明材料。水下作业使用的设备要及时维护保养，每次作业结束后，声呐元件、探头需用淡水冲洗、清拭干净，减小水体对仪器设备的损耗。

3.0.4 水下检测作业属于专业性较强的工作，工作过程中存在安全风险，需要由经过系统、专业培训的检测人员开展相关的检测工作。水下检测工作的全过程需符合相关规定中各项程序、措施、方案的要求。

3.0.5 检测工作的开展需以保证水下作业设备和人员的安全为基础，水下作业需始终处于有效的监督、管控之下，确保供电、通信正常后再开展。若存在通信、供电中断的情况，要确保断电后，能收回仪器设备进行全面检查。

## 4 检查内容

### 4.1 一般规定

4.1.1 检查大纲作为作业实施的纲领性文件，其核心作用在于预先精准界定受检的工程结构关键部位和具体的检查项目。通过强制要求按大纲执行，旨在避免检查的盲目性，确保资源高效利用、数据采集完整可靠，并最终为调水工程水下结构的安全运行状态评估提供系统化、可追溯的技术依据。

4.1.2 水下机器人检查需依据不同水工建筑物的结构特征、运行风险及典型病害模式，制定差异化的检查方案。针对水库大坝、水闸、泵站、渠道、渡槽、管（涵）、隧洞及倒虹吸等八类典型水工建筑物，应明确其核心检查内容，并适配机器人传感器配置与作业路径，确保隐蔽缺陷精准识别，避免“一刀切”式检查造成的疏漏或资源浪费。

### 4.2 水下检查内容

4.2.1 依据调水工程核心设施的水下结构特性，系统划分了水下机器人检查的覆盖范围。明确涵盖水库大坝、水闸、泵站、渠道、渡槽、管（涵）、隧洞及倒虹吸等八类典型水工建筑物。此分类旨在确保检查工作无遗漏、目标精准化，为各类建筑物水下隐蔽部位的病害检查与安全状态评估提供全面技术依据。

4.2.2 水库大坝进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 坝体表面裂缝、剥蚀、冲蚀、破损或其他形式的物理损坏是影响水库大坝结构安全与运行稳定性的关键隐患，需通过水下机器人搭载高清摄像、声呐成像、三维激光扫描等设备进行系统性检查。检查应重点关注裂缝的几何特征、剥蚀与冲蚀的范围及深度、破损区域的形态与稳定性，实时记录和分析异常数据，综合评估损伤程度及潜在风险，为大坝维护、加固及应急处置提供科学依据，确保工程安全与长期运行可靠性。

2 水库大坝混凝土表面磨损情况的检查是调水工程中确保大坝结构安全与运行稳定的重要环节。水下机器人应具备高清摄像、精准定位和图像增强等功能，能够对大坝迎水面、泄洪段及基础部位等关键区域进行细致拍摄与扫描，识别因水流冲刷、泥沙磨蚀或化学侵蚀导致的表面剥落、糙化、露筋等问题。通过定期检查与历史数据对比分析，可评估磨损发展趋势，为后续维护与加固提供科学依据。

3 止水结构的破损、撕裂、脱离、变形或异物卡塞是影响水库大坝防渗性能与结构稳定性的关键隐患，需通过水下机器人搭载高清摄像系统、三维激光扫描仪及声呐成像设备进行系统性检查。检查应重点关注止水带的接缝完整性、锚固点稳定性、表面裂纹或锈蚀范围、几何形变程度，以及异物卡塞位置与体积，量化分析损伤特征。检查过程中需同步记录水下流速、水压等环境参数，评估异物卡塞对止水功能的即时影响，判断损伤发展趋势及修复优先级，为制定止水结构加固、更换或清障方案提供科学依据，保障大坝长期防渗安全与运行可靠性。

4 接缝、伸缩缝及其他结构连接处是水库大坝防渗体系中的薄弱环节，易因施工质量缺陷、材料老化、温度变化或地基不均匀沉降等因素导致开裂、错动或密封性能下降，从而引发渗漏问题。渗漏不仅会降低大坝的稳定性，还可能诱发内部侵蚀、扬压力增大等次生风险，威胁工程安全，需通过水下机器人搭载高清摄像系统、三维激光扫描仪、多波束声呐及声学定位设备进行系统性检查。检查应重点关注接缝宽度、错位量、表面破损范围及渗漏流速等参数。检查过程中需同步记录水流速度、水压等环境参数，评估渗漏对结构稳定性的即时影响，并通过历史数据比对分析渗漏发展趋势，综合判断渗漏风险等级，为制定止水修复、接缝灌浆或结构加固方案提供科学依据，保障大坝长期防渗安全与运行可靠性。

5 水库大坝库底、坝前及取水口附近的泥沙淤积与异物阻塞是影响调水工程输水效率、结构稳定性和水质安全的核心隐患，需通过水下机器人搭载多波束声呐、三维激光扫描仪、高清摄像系统及声学定位设备进行系统性检查。检查应重点量化淤积区域的分布范围、厚度变化及异物类型，精准识别淤积趋势及异物卡塞位置。检查过程中需同步记录流速、含沙量等水文参数，评估淤积对取水口过流能力及坝体冲刷防护的即时影响，并通过历史数据比对分析淤积速率与异物累积规律。检查结果应为制定清淤方案、异物清除策略及调水运行优化

措施提供科学依据，保障调水工程长期安全运行与水质达标。

6 水库大坝区域的水生生物生长分布情况是评估调水工程生态影响与水体健康的关键指标，需通过水下机器人搭载多光谱相机、高清摄像系统、声呐传感器及环境监测模块进行系统性检查。检查应重点记录水生生物的种类、密度、分布范围及生长状态，检查过程中需同步采集水温、流速、溶解氧等环境参数，评估其对生物栖息条件的影响，同时关注外来物种入侵风险。检查结果应为制定生态修复措施、调水运行调控方案及生物多样性保护策略提供科学依据，确保调水工程与生态环境的协同可持续发展。

4.2.3 水闸进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 水闸混凝土结构的裂缝、表面剥落、蜂窝麻面、破损及钢筋外露是影响其耐久性与安全运行的关键缺陷。裂缝成因包括荷载应力、材料收缩徐变、温度变化及施工质量；表面剥落与蜂窝麻面多由混凝土配合比不当、模板漏浆或振捣不均导致；破损及钢筋外露则常见于化学腐蚀、机械磨损或保护层厚度不足。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载高分辨率光学相机、多波束声呐及激光扫描设备，结合图像处理算法对裂缝宽度、剥落面积、蜂窝孔洞分布及钢筋外露长度进行量化检查，并通过超声波测厚评估混凝土保护层厚度退化情况。

2 闸墩与底板结合部位的沉降、错台是水闸结构稳定性与防渗性能的关键隐患，其成因包括地基不均匀沉降、施工接缝质量缺陷、材料老化收缩及水流冲刷导致的局部掏蚀。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载高精度激光扫描仪、多波束声呐及三维成像声呐，结合图像处理算法，对沉降量、错台高度及分布规律进行量化检查，并通过超声波测厚评估结合面混凝土密实度。

3 闸孔内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布是影响水闸过流能力、结构安全与生态健康的核心问题。泥沙淤积多因来水含沙量高、流速降低或闸门启闭不均导致局部沉积，异物阻塞则源于施工残留、漂浮物或人为丢弃物，而水生生物附着可能加速混凝土腐蚀并缩小过水断面。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载多波束声呐、侧扫声呐及高清摄像系统，结合激光扫描与红外热成像技术，对淤积厚度、异物体积及生物附着密度进行量化检查，并通过三维建模分析淤积趋势与阻塞风险。

4 闸门、拦污栅、轨道等部位的异物卡阻、腐蚀、变形及焊缝开裂是影响水闸启闭功能与结构安全的核心风险。异物卡阻多因漂浮物或施工残留物堆积导致闸门运动受阻；腐蚀与变形主要由水流冲刷、氯离子侵蚀或材料疲劳引起；焊缝开裂则因焊接质量缺陷、应力集中或环境腐蚀共同作用。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载高分辨率光学相机、多波束声呐、磁通门传感器及激光扫描设备，结合图像识别算法对异物体积、腐蚀速率、变形量及焊缝裂纹长度进行量化检查。

5 门槽边缘的平直性及翘曲情况是保障闸门密封性与启闭安全的关键指标。边缘不平直或翘曲可能由混凝土收缩变形、施工模板偏差、长期水流冲刷或材料疲劳引起，导致闸门卡阻、渗漏甚至结构失稳。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载高精度激光扫描仪、多波束声呐及三维建模系统，结合图像处理算法，对门槽边缘的直线度及翘曲高度进行量化检查，并通过点云数据生成三维模型分析形变趋势。

6 该条款要求通过水下机器人重点检查闸门底水封装置是否存在老化撕裂、脱落或异物卡阻三类典型病害。底水封作为闸门核心止水构件，长期受水力摩擦、环境侵蚀易导致橡胶材料硬化开裂、压板螺栓松动引发整体脱落，或水流挟带树枝碎石等异物卡入底槛间隙阻碍密封。水下机器人凭借高精度摄像与机械臂操作能力，可高效识别上述病害细节，克服传统潜水作业风险，并为水封选型优化与快速维护提供依据，显著提升闸门止水系统安全运行的智能化保障水平。

7 通过水下机器人对闸门止水带偏移、变形或断裂三类典型缺陷进行精准检查，其核心在于识别因安装偏差、外力挤压或材料老化导致的止水失效风险。止水带作为闸门核心密封构件，其位置精度及正交性直接影响封水效果；若混凝土浇筑中固定不牢或受钢筋石子挤压，易引发偏移或变形，而橡胶材料抗撕裂强度仅为拉伸强度的1/3-1/5，在尖锐物刺戳或长期水力荷载下易发生断裂。水下机器人凭借高清摄像与三维定位能力，可量化测量止水带偏移距离、变形曲率及裂纹形态，并通过机械臂辅助清理检查面障碍物，克服传统潜水检查在深水、低能见度环境下的盲区，为及时修复或更换决策提供高精度依据，从而保障调水工程闸门止水系统的长期密闭性。

8 通过水下机器人对闸门周边异常漩涡、紊流或局部集中水流三类典型水力现象进行

精准监测，其核心在于识别因结构变形、止水失效或门槽气蚀引发的渗漏与能量损失风险。异常水流通常由闸门安装偏差、底水封撕裂或门槽不平整导致流态突变而形成：例如止水带偏移可能引发门后低压区漩涡，加剧结构空蚀；门槽变形或异物卡阻则易诱发紊流，降低过流效率；而局部集中水流多因底槛沉降或支承结构变形导致水压分布失衡，长期作用可能引发闸室冲刷或振动失稳。水下机器人凭借高清摄像与三维流速传感器，可量化捕捉漩涡尺度、紊流强度及水流集中区域，结合机械臂辅助清理检查面附着物，克服传统潜水检查在复杂流场中的观测盲区，为闸门流道优化与止水系统修复提供动态数据支撑，从而保障调水工程水闸运行的水力稳定性与结构安全。

#### 4.2.4 泵站进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 泵站作为调水工程中的关键输水设施，其混凝土结构长期承受水流冲击、周期性荷载及环境侵蚀作用，易出现裂缝、表面剥落、蜂窝麻面、破损及钢筋外露等病害，影响结构安全、耐久性 & 抗渗性能。因此，在检查过程中应利用水下机器人对上述缺陷进行重点识别与评估，分析其成因和发展趋势，判断对泵站整体结构和运行功能的影响，并为后续维修加固提供技术支撑，确保泵站安全稳定运行。

2 进水口、拦污栅、流道与泵室是泵站输水系统中的关键部位，易因水流携带泥沙、杂物等原因造成泥沙淤积或异物阻塞，影响过流能力，增加水流阻力，严重时可能导致水泵效率下降、设备损坏或运行故障。因此，在调水工程中应利用水下机器人对上述区域进行定期检查，准确掌握淤积厚度与阻塞情况，评估其对泵站运行安全和输水效率的影响，并为清淤、清理及维护工作提供科学依据，确保泵站高效、稳定运行。

3 泵站水下结构表面及流道区域易受水质环境和水流条件影响，成为水生生物附着、聚集的易发区，可能造成局部堵塞、增加水流阻力或加剧结构腐蚀，影响泵站运行效率与结构安全。因此，在调水工程中应利用水下机器人对进水口、流道、泵室等区域的水生生物种类、密度及分布情况进行定期观察与记录，评估其对泵站功能和结构的潜在影响，并为后续清理和生态防控措施提供技术支撑，确保泵站安全高效运行。

4 闸门、拦污栅、轨道等金属结构是泵站运行中的关键部件，长期处于水下或潮湿环境中，易因水流冲击、腐蚀作用或外力影响出现异物卡阻、腐蚀剥落、结构变形或焊缝开裂等问题，影响设备正常启闭与安全运行，严重时可能引发重大运行故障。因此，在调水工程中应利用水下机器人对上述部位进行重点检查，识别异物卡阻情况、腐蚀程度、结构变形及焊缝开裂等缺陷，评估其对泵站运行安全的影响，并为后续维修、防腐或更换提供科学依据，保障泵站稳定、高效运行。

5 泵站中的金属部件，如阀门、管道、叶轮及支撑结构等，长期在水下或潮湿环境中运行，易因水流冲刷、化学腐蚀或机械磨损等因素出现锈蚀、磨损或损坏现象，影响其强度、密封性能及使用寿命，严重时可能导致设备失效或运行故障。因此，在调水工程中应利用水下机器人对各类金属部件的表面状态与结构完整性进行细致检查，识别磨损、锈蚀程度及损坏情况，评估其对泵站安全稳定运行的影响，并为后续维护、修复或更换提供技术依据，确保泵站高效、可靠运行。

6 关键止水部位缺陷是导致泵站渗漏、影响工程安全与运行效率的主要隐患，人工巡检难以近距离全面探查，而水下机器人凭借其机动性与高清摄像能力，可深入水下狭小空间或浑水环境，对这些隐蔽且至关重要的密封部件进行近距离、高精度的可视检查，为及时发现隐患、评估安全状态和制定维修策略提供直接依据。

7 应对泵站门槽止水压板进行专项检查，重点识别其是否存在因外力冲击、长期水压作用或安装缺陷导致的结构偏移、塑性变形或断裂失效状态。偏移或变形会削弱对止水橡皮的均匀压紧力，导致局部漏水；断裂则造成止水系统彻底失效。水下机器人凭借高清水下摄像、近距离观测及搭载的测量传感器，可定量评估压板偏移量、变形曲率及裂纹形态，为判断止水系统可靠性及制定维修方案提供关键依据。

8 泵站水下区域涡流及集中涌水等异常流态多由结构突变、边界不平顺、设备运行干扰或局部破损引起，会导致水泵机组效率下降、振动加剧、空蚀破坏风险陡增，严重时甚至引发机组失稳或结构空蚀破坏。水下机器人凭借其水下机动性、稳定悬停能力及搭载的高清摄像系统，可近距离、多角度直观记录流态细节，为诊断流态异常成因、评估水力性能及优化流道设计或运行调度提供直接的视频影像证据，是预防运行风险和保障泵站安全高效运行的关键技术手段。

#### 4.2.5 渠道进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 渠道衬砌板在长期运行过程中，受地基沉降、水流冲刷、冻融作用及外荷载影响，易出现裂缝、错台、下滑、隆起或塌陷等结构病害，进而引发渠道渗漏问题，不仅造成输水损失，还可能削弱堤防稳定性，威胁工程安全。因此，在调水工程中应利用水下机器人对衬砌板结构状态和渠道渗漏情况进行定期检查，识别病害类型与分布，评估其对渠道输水功能和堤防安全的影响，并为后续修复加固和防渗处理提供科学依据，确保渠道安全、稳定、高效运行。

2 衬砌板与跨渠桥梁、建筑物墩柱结合部位是渠道结构体系中的关键连接区域，受结构差异变形、水流冲刷及地基沉降等因素影响，易出现开裂、塌陷等病害，进而引发渗漏、结构失稳甚至影响桥梁和建筑物的安全运行。因此，在调水工程中应利用水下机器人对该类结合部位进行重点检查，准确识别结构裂缝、塌陷形态及其发展情况，评估其对渠道与周边建筑物安全的影响程度，并为后续加固处理提供技术支撑，确保渠道与跨渠设施的整体稳定与协同安全运行。

3 逆止阀作为渠道排水系统中的关键控制部件，其功能是防止水流倒灌、保障排水安全。长期运行中，逆止阀可能因泥沙淤积、杂物堆积或结构老化等原因出现阻塞、损坏或部件缺失，影响其正常启闭与密封性能，严重时可能导致排水失效或引发倒灌风险。因此，在调水工程中应利用水下机器人对逆止阀的工作状态进行细致检查，识别阻塞程度、结构损坏及部件完整性情况，评估其对排水系统功能的影响，并为后续清淤、修复或更换提供技术依据，确保渠道排水系统的安全与稳定运行。

4 渠道水下区域易成为水生生物附着或聚集的区域，其过度生长可能造成局部堵塞、加剧结构腐蚀、影响排水功能，甚至对衬砌结构的完整性构成威胁。因此，在调水工程中应利用水下机器人对水生生物的种类、分布密度及生长情况进行定期监测，评估其对渠道输水能力、结构安全及运行维护的影响，并为生态防控与清理措施提供科学依据，确保渠道的安全稳定与高效运行。

5 渠道内泥沙淤积及异物阻塞是影响输水效率和排水安全的常见问题，长期积累可能导致过流断面减小、水流不畅，甚至引发局部冲刷、渗漏或结构破坏。因此，在调水工程中应利用水下机器人对渠道底部、排水口及易淤积区域进行定期检查，准确掌握泥沙淤积厚度、异物种类与分布范围，评估其对渠道输水能力和堤防安全的影响，并为清淤、清理和维护工作提供科学依据，确保渠道功能稳定、运行安全。

#### 4.2.6 渡槽进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 渡槽槽身作为输水系统中的重要结构，长期承受水压、温度变化及环境侵蚀等作用，易出现裂缝、混凝土表面剥落、破损以及防渗材料开裂、脱落等病害，影响其结构安全性和防渗性能，严重时可能引发渗漏甚至威胁整体稳定。因此，在调水工程中应利用水下机器人对渡槽槽身进行重点检查，识别各类结构缺陷和防渗层损坏情况，评估其对渡槽运行安全的影响，并为后续维修加固与防渗处理提供技术支撑，确保渡槽安全、稳定、高效运行。

2 渡槽结构缝密封胶条是保障其防渗性能和结构稳定性的关键部件，长期运行中易因环境温差、水流压力、材料老化及外力作用出现开裂、脱落等病害，导致渗漏风险增加，影响渡槽安全运行。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像系统、声呐等设备，对密封胶条完整性进行精细化检查，识别开裂、脱落部位及其成因，结合拉伸强度、耐老化性等检查指标，评估其对防渗体系和结构安全的影响，并为修复维护提供科学依据，确保渡槽长期稳定、高效运行。

3 渡槽槽内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物附着是影响输水效率和结构安全的典型问题，长期积累可能造成过流断面缩小、水流不畅，甚至引发局部冲刷、渗漏或结构破坏，同时水生生物的过度生长可能加剧腐蚀或堵塞排水孔。因此，在调水工程中应利用水下机器人对槽内淤积厚度、异物分布及水生生物种类与覆盖范围进行系统检查，结合声呐扫描、高清摄像等技术手段，评估其对输水能力、结构稳定性及防渗性能的影响，并为清淤、清理及生态防控措施提供科学依据，确保渡槽安全高效运行。

4 渡槽桩基基础迎水面及桩-土交界处是水流冲刷作用的关键区域，局部冲刷坑的形成直接影响桩基稳定性和结构安全。水流在桩体迎水面产生绕流涡旋，导致桩周土体持续剥蚀，形成深度与宽度不等的冲刷坑；桩-土交界处因材料刚度差异更易引发涡流空蚀和渗流破坏，加剧冲刷坑扩展。若冲刷坑深度过大或形态异常，可能削弱桩基水平承载力，诱发倾斜甚至



断裂。因此，通过水下机器人精确测量冲刷坑深度、宽度及形态，可定量评估冲刷风险，为及时采取抛石、灌浆等防护措施提供依据，确保渡槽长期运行安全。

5 渡槽桩基基础表面混凝土剥落、裂缝及钢筋裸露等缺陷主要由水力冲刷、环境侵蚀、材料老化及施工质量隐患等因素引发。混凝土剥落会削弱桩基截面完整性，加速内部钢筋锈蚀；裂缝扩展可能诱发渗漏并加剧碳化深度，导致钢筋有效截面损失和握裹力下降；钢筋裸露则直接引发锈蚀膨胀，造成混凝土保护层崩裂，形成恶性循环。此类缺陷若不及时检查，可能引发桩基承载力衰减、结构变形甚至失稳，威胁渡槽整体安全。

#### 4.2.7 管（涵）进行水下机器人检查时，应符合下列规定：

##### 1 PCCP 管道水下检查内容宜包括以下内容：

1) PCCP 管道作为调水工程中大流量输水的关键设施，其管身裂缝、混凝土表面剥落、破损、腐蚀、脱壳及生物附着等问题，可能由材料老化、施工缺陷、环境侵蚀或长期运行中的应力集中引发，直接影响管道结构强度、防渗性能及使用寿命；管身鼓包则可能源于内部水压异常、局部应力失衡或混凝土保护层失效导致的膨胀变形。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像、声呐扫描、电磁检查等设备，对上述缺陷进行系统检查，及时识别裂缝扩展趋势、脱壳范围、生物附着程度及鼓包形态，为管道维修加固、防腐处理或更换决策提供科学依据，确保 PCCP 管道长期安全、高效运行。

2) PCCP 管道内衬剥落、侵蚀或沉积物堆积是影响其结构完整性与输水效能的主要隐患，内衬剥落可能由化学腐蚀、水流冲刷或材料老化引起，侵蚀会削弱管道抗压能力，沉积物堆积则可能导致过流断面缩小、局部堵塞甚至引发二次腐蚀。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像、声呐扫描及激光测距等设备，对内衬表面完整性、侵蚀深度及沉积物厚度进行系统检查，识别剥落范围、侵蚀程度及沉积分布规律，为后续修复加固或清淤维护提供科学依据，确保 PCCP 管道长期安全运行。

3) PCCP 管道承插口碰损、外保护层脱落及橡胶密封圈气孔、裂缝等问题，直接影响管道接口的密封性能与结构耐久性。承插口碰损可能因运输、安装或外力作用导致局部混凝土破损，削弱接缝强度；外保护层脱落会加速预应力钢丝的腐蚀，降低管道抗压能力；橡胶密封圈的气孔、裂缝则易引发渗漏，长期运行中可能扩大为结构性缺陷。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像、声呐扫描及电磁检查设备，对承插口完整性、保护层附着状态及密封圈表面缺陷进行精细化检查，识别缺陷类型与分布，为后续修复加固提供科学依据，确保 PCCP 管道接口的密封性与长期运行安全。

4) PCCP 管道管身内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物附着是影响其输水效率与结构安全的关键问题。泥沙淤积会缩小过流断面、降低输水能力，异物阻塞可能引发局部冲刷或堵塞排水孔，水生生物的附着则加剧腐蚀并阻碍水流。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像、声呐扫描及激光测距等设备，对淤积厚度、异物分布及水生生物种类与覆盖范围进行系统检查，通过实时数据传输技术实现远程监控。检查结果可为清淤、清理及生态防控措施提供科学依据，确保 PCCP 管道长期稳定运行。

##### 2 涵洞水下检查内容宜包括以下内容：

1) 涵洞混凝土表面裂缝、剥落、破损是影响结构耐久性与安全运行的关键问题。裂缝可能由结构性荷载、温度应力、材料收缩或施工缺陷引发，剥落与破损则多因腐蚀、冻融循环、水流冲刷或外力撞击导致，直接削弱混凝土强度与抗渗性能，可能引发渗漏、钢筋锈蚀或局部坍塌。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像、声呐扫描、电磁检查及激光测距等设备，对裂缝形态、剥落区域范围及破损程度进行系统检查，分析裂缝扩展趋势及损伤机理。检查结果可为修复方案提供科学依据，确保涵洞长期稳定运行。

2) 涵洞结构缝错台及聚脲、密封胶条等防渗材料开裂、脱落是影响其密封性能与结构稳定性的关键缺陷。错台可能由设计不当、施工误差或材料变形引发，直接削弱接缝的抗剪与抗渗能力；聚脲和密封胶条的开裂、脱落则与材料老化、施工缺陷或环境应力密切相关，易导致渗漏并加速结构劣化。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清摄像、激光测距及红外热成像等设备，对错台尺寸、防渗材料完整性及接缝密封状态进行系统检查，分析缺陷分布规律。检查结果可为修复方案提供科学依据，确保涵洞长期防渗与结构安全运行。

3) 涵洞内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物附着会显著降低输水能力并威胁结构安全。泥沙淤积可能缩小过流断面、加剧局部冲刷，异物阻塞易引发排水不畅或机械故障，水生生物附着则加速混凝土腐蚀并增加水流阻力。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载高清

摄像、声呐扫描及激光测距等设备，对淤积厚度、异物分布及生物附着类型与覆盖范围进行系统检查，分析淤积趋势与生物危害性。检查结果可为清淤、异物清除及生态防控措施提供科学依据，确保涵洞长期稳定运行与输水效率。

#### 4.2.8 隧洞进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 隧洞洞顶塌落及底板坍塌物堆积是影响输水安全和结构稳定性的关键隐患。洞顶塌落可能由地质构造薄弱、地下水侵蚀、施工支护不足等引发，底板坍塌物堆积则多因塌落物未及时清理或水流冲刷不充分，加剧底板磨损并阻碍水流畅通。因此，在调水工程中应利用水下机器人搭载多波束声呐、高清摄像、激光扫描及红外热成像等设备，对塌落范围、堆积物类型及分布规律进行系统检查，分析塌落趋势。检查结果可为清淤、加固及灾害预警提供科学依据，保障隧洞长期安全运行。

2 隧洞混凝土表面裂缝及破损是影响结构耐久性与输水安全的核心缺陷。裂缝成因包括材料收缩徐变、温度变化、外部荷载及施工质量，破损则多由冲刷磨损、化学腐蚀或机械损伤引发，易导致钢筋锈蚀、渗漏加剧及结构承载力下降。因此，在调水工程中应采用水下机器人搭载高分辨率光学相机、多波束声呐及激光扫描设备，对裂缝宽度、长度、分布密度及破损形态进行量化检查，同步评估裂缝深度与渗漏风险。

3 结构缝错台。结构缝错台是隧洞结构接缝处因施工误差、材料变形或地质沉降导致的台阶状错位，可能引发渗漏、应力集中及结构失稳。错台成因包括盾构顶力不均、模板拼缝刚度不足、后期地层沉降差异及混凝土收缩徐变。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载高精度激光扫描仪、多波束声呐及三维成像声呐，结合图像处理算法，对错台高度、宽度及分布规律进行量化检查；同步通过超声波测厚评估接缝密封材料性能退化情况。

4 隧洞内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布是影响输水效率与结构安全的关键问题。泥沙淤积多因来水含沙量高、流速降低或局部地形变化导致沉积，异物阻塞则源于施工残留、漂浮物或人为丢弃物，而水生生物附着可能加速结构腐蚀并缩小过流断面。因此，调水工程中应采用水下机器人搭载多波束声呐、侧扫声呐及高清摄像系统，结合激光扫描与红外热成像技术，对淤积物厚度、异物体积及生物附着密度进行量化检查，并通过三维建模分析淤积趋势与阻塞风险。检查数据需同步评估水生生物对混凝土的腐蚀速率，制定针对性治理方案。此类检查可显著降低人工下井风险，提升隧洞运行可靠性与生态友好性。

#### 4.2.9 倒虹吸进行水下机器人检查时，应检查下列工作内容：

1 倒虹吸结构作为调水工程中的关键输水通道，其管身裂缝及混凝土表面剥落、破损问题直接影响结构耐久性与运行安全。裂缝可能由温度应力、地基沉降或荷载作用引发，易导致渗漏、钢筋锈蚀及结构强度退化；混凝土表面剥落、破损则多因冻融循环、水流冲刷或化学侵蚀造成，削弱结构防护能力并加速劣化进程。通过水下机器人搭载高清摄像、声呐扫描及激光测距等技术，对管身进行系统性检查，重点识别裂缝宽度、长度及分布规律，评估表面缺陷的面积、深度与扩展趋势，并结合历史监测数据综合判断结构健康状态。检查应优先覆盖高流速区、接缝部位及既有缺陷区域，确保隐患早发现、早预警。

2 倒虹吸管身结构缝错台及密封胶条开裂、脱落是影响其结构完整性和密封性能的关键缺陷。结构缝错台多由施工误差、地基不均匀沉降或外力作用引发，易导致接缝渗漏、应力集中及管身稳定性下降；密封胶条开裂、脱落则因长期水压、温度变化、材料老化或安装不当所致，可能加剧渗漏并加速混凝土劣化。通过水下机器人搭载高清摄像、三维激光扫描及成像声呐等技术，系统检查结构缝错台的位移量、分布规律及胶条破损程度，并结合历史数据评估缺陷扩展趋势。检查应优先覆盖高应力区、接缝转角处及既有缺陷区域，确保隐患早识别、早处置。

3 倒虹吸管身内泥沙淤积、异物阻塞及水生生物生长分布是影响输水效能与结构安全的重要因素。泥沙淤积易导致过流能力下降、局部冲刷加剧；异物阻塞可能引发流态紊乱或机械损伤；水生生物附着则会降低过流断面、加速腐蚀并干扰传感器信号。通过水下机器人搭载多波束声呐、高清摄像及激光扫描系统，对管身内部进行三维建模与沉积物厚度量化分析，统计异物种类与分布密度，评估水生生物附着面积与生长趋势。检查应优先覆盖弯头、变径段及低流速区等易淤积区域，并同步记录异物阻塞位置与生物附着形态，为清淤、除障及生态防控提供依据。

4 倒虹吸管体迎水面及管-土交界处因高速水流冲击形成马蹄形漩涡与剪切渗流，诱发局部冲刷坑及涡流掏空现象，导致管底地基土体持续流失并形成悬空洞穴；若坑深过大或掏

空范围扩展，将引发管体应力集中、基础失稳甚至结构断裂。水下机器人通过多波束声呐三维建模与高清影像，精准量化冲刷坑深度、宽度及掏空腔体的形态边界，依据相关规范评估风险等级，为抛石固基、模袋混凝土回填等防护措施提供数据支撑，保障倒虹吸抗冲稳定性与输水安全。

5 倒虹吸伸缩缝、施工缝等接缝部位的渗漏痕迹主要由止水材料老化、结构沉降差异、施工质量缺陷或水力荷载反复作用引发。渗漏不仅加速止水带腐蚀失效，导致填充料流失，还会诱发缝周混凝土溶蚀剥落、钢筋锈蚀膨胀，进而削弱管体整体性；长期渗流更易软化地基土体，加剧管节间错位风险。水下机器人通过多光谱高清摄像识别渗漏渍痕、红外热成像探测隐蔽渗流路径、三维声呐扫描缝宽变化及背后空洞，结合机械臂触诊判断止水带完整性，精准定位渗漏源及危害程度。检查数据为接缝修复提供依据，从根源消除渗透隐患，保障倒虹吸结构密封性与长期服役性能。

6 倒虹吸穿河段管道止水带的偏移、老化或撕裂主要由水流冲击、地基沉降及材料劣化引发，导致接缝密封失效并诱发渗漏，进而加速缝周混凝土溶蚀与钢筋锈蚀，甚至引发管节错位。水下机器人通过高清摄像识别表观缺陷、机械臂触诊检查物理性能、红外热成像定位渗漏热区，精准量化损伤程度，为复位加固、注浆填充或止水带更换等修复措施提供依据，从源头消除渗透隐患，保障穿河段管道的结构密封性与输水安全。

## 5 水下机器人选型

### 5.1 一般规定

5.1.1 有缆机器人是指遥控水下机器人 (Remotely Operated Vehicle, ROV)，机器人通过脐带缆与水面控制平台相连，实现电力供应、数据传输和控制指令发送。具有安全性高、作业时间长和数据采集效率高等特点。无缆机器人是指自主式水下航行器 (Autonomous Underwater Vehicle, AUV)，通过内置的自主导航系统、控制系统、避障系统、供电系统等完成自主定向航行和既定检测任务。

5.1.2 本条对水下机器人的选型及技术要求进行了规定：

1 针对水下机器人，根据其在水中的运动形态可分为浮游、拖曳、爬行和结构依赖等类型；根据其功能可分为观察型和作业型两大类；根据大小可分为微型、中型、大型和超大型。观察级 ROV 通过配备高清摄像头、声呐等检测设备，用于对水工建筑物水下表面进行大面积扫测。作业级 ROV 则在观察的基础上，配备机械臂、清洁刷、高压喷头等操作工具，可满足简单的修复作业需求。表 1 中给出了水下检查用有缆机器人基本配置表。

表 1 水下检查用有缆机器人基本配置表

分类		尺寸/mm	基本照明	摄像头	驱动方式	选配工具
观察级	小型	≤400	2×25WLED	水下高清	2~4 螺旋桨	1~2 种
	中型	400~1500	4×25WLED	水下高清	4~6 螺旋桨	多种
	大型	≥1500	4×25WLED	水下高清	6~8 螺旋桨或履带式	多种

水下机器人可搭载包括声学探测传感器、光学探测传感器、水下定位传感器、机器人工作状态监测传感器和水下作业工器具等检测设备。其中，声学探测传感器包括前视图像声呐、侧扫声呐、断面扫描声呐和多波束声呐等；光学探测传感器包括水下高清摄像、激光点云扫描仪和水下光谱仪等；水下定位传感器包括惯性导航系统 (INS)、多普勒测速计 (DVL)、水下激光测距仪、声学基线定位设备 (长基线、短基线和超短基线) 等；水下作业工器具包括清洁刷、CP 探头、水下激光测距仪、机械臂、示踪剂、液压剪、无损检测传感器等。

水下摄像具有显像直观、快速的优势，但由于工作效率低，不适合大面积的检查；此外，水下摄像的成像质量受水下能见度的直接影响，当水下环境浑浊、水下光线昏暗时，水下摄像将无法得到可靠清晰的图像。根据现场作业实际需求和水下作业环境选择适宜的水下检查方法。当检查范围较小时，选用水下摄像或二维图像声呐、三维成像声呐；水质较清时一般采用水下摄像，水质浑浊时一般采用二维图像声呐、三维成像声呐；当检查范围较大时，一般先选用测量船搭载多波束声呐、侧扫声呐进行大面积普查，再对普查异常部位或工程重点关注部位采用水下摄像或二维图像声呐、三维成像声呐进行详查。

5.1.3~5.1.4 本条规定了一般情况下水下机器人工作条件要求。

水下能见度是根据水下机器人在水中视力受限和水下检查所需而制定，如实际情况水下能见度小于 1 m，采取清水置换或其他措施提升水体能见度。

水温是根据人体耐受温度和国内水体正常温度情况制定，如水温低于 5℃，潜水员穿干式潜水服或热水潜水服，以确保潜水员得到合适的保护。

水下机器人自身具有抗流能力，但超过了机器人的允许流速可能对现场检查造成一定的困难。实际调水工程中，诸多工况难以直接满足要求。对于水流速度超出此限制条件，因特殊情况需要水下检查时，需要对现场具体条件进行评估，并采取措施保障安全。

总之，本条提出的限制条件是相对普适性要求，对于现场特殊作业条件，采取有效措施并经论证后，在确保安全的前提下，也可在更加恶劣的作业环境下实施水下检查作业。

### 5.2 有缆机器人

5.2.1 本条规定对有缆机器人的适用场景进行了规定。有缆机器人在复杂的水下结构环境中，其灵活性仍显不足，脐带缆在一定程度上限制了其的活动范围，这可能导致在某些狭闭空间或大量障碍物的区域，无法优先到达或准确操作。

5.2.2 根据《水利水电工程施工安全防护设施技术规范》SL 714，以下是临空临水作业安全的一些具体要求：

1 施工区域宜按规划设计和实际需要采用封闭措施，主要进出口处应设置明显施工警示

标志。对施工中关键区域和危险区域，应实行封闭管理，设置安全警示标志并安排专人值守。

2 进入施工现场的工作人员，必须按规定佩戴安全帽和使用其他相应的个人防护用品，防护用品应符合 GB/T11651 的有关规定。从事特种作业的人员，必须持有政府主管部门核发的操作证，并配备相应的安全防护用具。

3 高处作业面(如坝顶、屋顶、原料平台、工作平台等)的临空边沿，必须设置安全防护栏杆及挡脚板。

4 在悬崖、陡坡、杆塔、坝块、脚手架以及其他高处危险边沿进行悬空高处作业时，临边必须设置防护栏杆，并应根据施工具体情况，提供安全带、安全绳等个体防护用品，挂设水平安全网或设置相应的吊篮、吊笼、平台等设施。

5 电梯井、闸门井、门槽、电缆竖井等的井口应设有临时防护盖板或设置围栏，在门槽、闸门井、电梯井等井道口(内)安装作业，应根据作业面情况，在其下方井道内设置可靠的水平安全网作隔离防护层。

6 不宜在同一垂直方向上同时进行多层交叉作业。上下两层交叉作业时，底层作业面上方必须设置防止上层落物伤人的隔离防护棚，防护棚宽度应超过作业面边缘 1m 以上。防护棚材料宜使用 5cm 厚的木板等抗冲击材料，且满铺无缝隙，经验收符合设计要求后使用，并定期检查维护。

#### 5.2.3 有缆机器人控制系统的技术要求如下：

1 水上控制系统应具有在监视器上同步显示日期、时间、水深、行进距离等基本信息的功能，并应可以进行数据处理；

2 操控台可采用按键和摇杆发送指令控制机器人本体在水下实现检测作业；应能够采集摄像头清晰的图像，并实现抓拍录制视频的功能；

3 机器人本体应能在水中实现上浮下潜、进退、转艏、横滚等多自由度灵活运动，能够实现定深、定航及定横滚动作；

4 摄像系统应密封、耐压，镜头应具有平扫与旋转、俯仰与旋转、变焦功能，摄像头高度应可以自由调整；

5 控制器应能够实时采集舱内各个传感器的信息，时刻监测舱内温湿度及漏水情况；

6 照明灯光强度应能自主调节。

5.2.4 在水下作业中，脐带缆的科学选用与规范操作是保障作业安全的核心环节。传统浮力缆或沉水缆在水中会因浮力作用产生张力波动，零浮力缆通过材料配方（如高密度聚乙烯包裹中空结构）和结构设计（多层编织增强），使缆体在水中处于中性悬浮状态，既能减少设备牵引能耗，又能避免与水下结构物的摩擦磨损（如岩石、管道棱角等）

不同的水下作业场景和设备类型，对脐带缆与水下结构物的安全距离要求有所不同。在一些常规的水下检查作业中，要求脐带缆与水下结构物保持数米的距离，以避免水下机器人在作业过程中脐带缆与结构物发生缠绕或碰撞。水工建筑物水下结构物表面复杂、有突出部分或尖锐边缘，容易勾住或磨损脐带缆，此时需要保持更大的安全距离。当脐带缆放置较长时，其摆动范围更大，安全距离要求也应相应增加。

### 5.3 无缆机器人

5.3.1 本条规定对无缆机器人的适用场景进行了规定。无缆机器人由于不受脐带缆的限制，可以进入一些复杂地形区域，获取更准确的水工建筑物结构信息，显著提升复杂地形的异构环境适应性。如：德国 ATLAS 的 SeaCat 团队使用 SeaCat AUV 实现半满水输水隧洞（长 24km，直径 8m）的检测任务；美国旧金山公共事业委员会使用 Falcon AUV 检查了五英里长的 Hetch Hetchy 输水管道；中国南方电网调峰调频发电有限公司研发的 ARV 通过全向和单波束声呐实时感知局部环境，实现机器人自动脱缆并自主返航，完成对海蓄电站直径 8.40m、长度 1.20km 引水隧洞和天生桥二级电站直径 10.00m、长度 1.80km 引水隧洞的检测任务，此外该公司还将 ARV 通过调压井放入锦屏二级电站引水隧洞下端（直径 12.00 m），并进行了 2.50km 的检测。

5.3.2~5.3.5 自主水下航行器在水下作业，不仅要感知环境的信息，并且通过感知环境确定自身的状态。航行器搭载的传感器主要包括感知速度、感知姿态、感知障碍物等几类组成。表 2 给出了无缆机器人所需的传感器种类。

具体的传感器包括：

- (1) 可提供用于测量航行器的加速度、角速度的传感器组合，如惯性传感器；
- (2) 可提供用于测量航行器与水面或海底距离的传感器组合，如深度传感器；
- (3) 可提供航速信息的传感器或传感器组合，如多普勒；
- (4) 可提供姿态信息的传感器或传感器组合，如陀螺仪；
- (5) 可提供用于感知周围的物体和地形的传感器组合，如摄像头、声呐；
- (6) 根据需要选配可提供航向信息的传感器或传感器组合，如磁力计、重力计。

表 2 无缆机器人使用的传感器总览

传感器种类	应用数量	传感器使用功能
加速度传感器	1~3 个	测量航行器加速度、角速度
距离传感器	1~4 个	测量航行器与水面或水底的距离
航速传感器	1~2 个	测量航行器航行速度
姿态传感器	1~3 个	测量航行器姿态
环境传感器	1~6 个	感知周围物体和地形
航向传感器	1~4 个	感知航向信息

## 6 作业程序

### 6.1 一般规定

6.1.3 水下检查单位需提交关键文件，并完成审批或报备流程，以确保检查作业的规范性与安全性。

6.1.4 确保水下检查作业与调度运行管理的协同配合，避免因信息不畅导致安全事故或作业冲突。若现场工况无法满足检查设备工作条件，在不影响正常供水的情况下，可协调相关部门通过采取调度措施来创造适合水下机器人探测设备运行的工况，以保证检查设备运行安全。

### 6.2 水下检查准备

6.2.1 水下检查不仅是关于水工建筑物表面缺陷的调查，而是包括相关资料收集、外部环境调查在内的系统调查与分析评估。不同的建筑物部位，不同的运行管理要求，对水下表面检查的要求不同，检测的步骤、内容和安全保障措施也会相应改动，所以需要分部位进行。

资料调查包括检查对象的工程设计、施工、运行、监测及安全鉴定等档案资料。

水工建筑物表面缺陷描述对象包括缺陷类型、位置、尺寸，并附有略图、素描或照片及影像资料等；

外部环境主要指水工建筑物周边的水域情况，例如水深、流速、水温、水质、泥沙淤积、能见度等。

### 6.3 水下检查

6.3.1 水下检查尽量沿测线路径实施，以便实现水下待查区域的全覆盖。测线间距的选择结合检查目的、内容、范围等多方面因素综合确定，测线方向在开阔水域环境中，如近坝库区、泄洪坝段过水通道及尾水渠等，一般采用沿待检查区的短轴方向布置；在封闭水域环境中，如引水隧洞、尾水隧洞等，一般采用沿待检查区域的长轴方向布置。

水下检查采用区域性普查与局部详查的方案。在区域性普查阶段，主要针对待查区域的缺陷和异常，主要采用声学检查技术、辅助定位技术进行快速普查，圈定其空间分布和规模；在此基础上，采用分辨能力更好的光学摄像技术抵近圈定的区域进行详查，进一步查明缺陷的类型、现状、尺寸规模及空间分布情况。

6.3.3 定位检查异常部位标识有两种方法，一种是依靠水下机器人探测设备自主定位，另一种是将水下机器人探测设备上浮至水面，人工辅助进行标记。第二种情况一般应用于较复杂的场景。

6.3.5 采取多种检查方法可以对结果进行相互印证，提高检查结果的准确性。经实践检验或论证，并通过技术成果认定的水下检查新方法、新技术和新装备等，应用于水工建筑物的水下检查。考虑工程现场实际情况复杂，有的新方法、新技术和新装备可能试验、检验仍不充分，并不适用于现场一些复杂的情况，导致得出的成果可能偏离实际。比如磁场类的大坝渗流检测新技术，由于水电站大坝本体材料及结构会影响磁场分布，因此磁场类的大坝渗流检测新技术不能直接适用于水电站大坝等复杂的水工建筑物。故采用新方法、新技术和新装备得到的水下检查成果，原则上要与常规检测手段的成果进行相互印证和综合分析，以确保新方法、新技术和新装备应用的合理性和可信度。

## 7 技术要求

### 7.2 表面缺陷检查

7.2.1 多波束声呐检查结果应根据点云图像识别表面缺陷，确定缺陷的范围和深度，绘制缺陷分布图和典型断面图，描述缺陷的特征。侧扫声呐检查结果应根据侧扫声呐镶嵌图识别表面缺陷，估算缺陷的范围和深度，绘制缺陷分布图，描述缺陷的特征。

7.2.2 摄像检查应根据视频影像识别表面缺陷，并结合现场检查记录表、测量定位资料绘制表面缺陷分布图，描述缺陷的特征。图像声呐检查的图像宜进行拼接，拼接后的声呐图像完整，可整体识别目标体。图像声呐检查应根据声呐图像判读表面缺陷，并结合现场检查记录表、测量定位资料绘制表面缺陷分布图，描述缺陷的特征。

7.2.3 当有多次检查或多种方法检查结果时，应进行综合比对分析。检查结果应包括缺陷部位、位置、范围、规模（深度、高度、长度）及特征描述，绘制缺陷平面分布图、剖面图或示意图，标明与周边建筑物的相对位置，分析对建筑物运行安全的影响，并附缺陷统计表、照片或摄像资料。

### 7.3 渗漏入口检查

7.3.1 目视检查应根据现场检查记录表、测量定位资料绘制渗漏入口分布图，并描述渗漏入口特征。摄像检查应根据视频影像识别渗漏入口位置，结合现场检查记录表、测量定位资料绘制渗漏入口分布图，并描述渗漏入口特征，截取典型渗漏入口照片。伪随机流场检测结果整理应符合 NB/T10224 的相关规定，并根据各测点电流密度值绘制测区电流密度等值线图，对测区电流密度进行统计分析确定测区电流密度背景值和异常值范围，判定渗漏入口并绘制渗漏入口分布图。声波流速检测应根据各测点流速测值绘制测区流速等值线图，对测区流速测值进行统计分析，确定测区流速异常区域，判定渗漏入口并绘制渗漏入口分布图及流速大小。

7.3.2 当有多次检查或多种方法检查结果时，应比对分析各种方法检查结果，综合判定渗漏入口。检查结果应明确渗漏位置、范围，以及与建筑物的相对关系，分析对建筑物运行安全的影响，并附相关照片、图件或摄像资料。

### 7.4 淤积与冲刷检查

7.4.1 多波束声呐检查结果整理应符合 JT/T790 的相关规定，并根据点云图像识别淤积或冲刷区域，绘制淤积或冲刷分布图、典型断面图、水下地形图或水下地貌图，计算淤积或冲刷量，描述淤积物特征。

7.4.3 目视检查应根据现场检查记录表、测量定位资料绘制淤积或冲刷分布图，估算淤积或冲刷量，并描述淤积或冲刷特征，选取典型淤积或冲刷照片。摄像检查应根据视频影像识别淤积或冲刷区域，结合现场检查记录表、测量定位资料绘制淤积或冲刷分布图，计算淤积或冲刷量，并描述淤积或冲刷特征，截取典型淤积或冲刷照片。声呐图像宜进行拼接，拼接后的声呐图像完整，边界清晰，可整体识别淤积或冲刷范围，根据声呐图像识别淤积或冲刷区域，绘制淤积或冲刷分布图，计算淤积或冲刷量，描述淤积物特征。

7.4.4 水域地层剖面探测结果整理应符合 NB/T35065 的相关规定，并根据声呐剖面图解译淤积物的内部结构及厚度，绘制淤积分布图，计算淤积量，描述淤积物的特征。水域多道地震探测结果整理应符合 NB/T35065 的相关规定，并根据地震剖面图解译淤积物的厚度，绘制淤积分布图，计算淤积量。

7.4.5 当有多次检查或多种方法检测结果时，应比对分析各种方法检查结果，综合判定淤积或冲刷发展变化情况并计算淤积、冲刷增量。检查结果应明确淤积或冲刷位置、范围、高度或深度，与建筑物的相对关系，分析对建筑物运行安全的影响，并附相关照片、图件或摄像资料等。



## 7.5 金属结构缺陷检查

7.5.1 目视检查应根据现场检查记录表、测量定位资料绘制缺陷分布图，并描述缺陷特征。摄像检查应根据视频影像识别金属结构缺陷，并结合现场检查记录表、测量定位资料绘制金属结构缺陷分布图，描述缺陷特征，截取典型缺陷照片。声呐图像宜进行拼接，拼接后的声呐图像完整，边界清晰，可整体识别目标体，图像声呐应根据声呐图像识别金属结构变形、破损及预埋件缺失等，获取缺陷声呐图像特征。

7.5.3 腐蚀检测应根据测量点数据和原数据对比，识别金属结构磨损、腐蚀等缺陷，描述缺陷特征。检查结果应包括金属结构破损、变形、腐蚀、裂纹等特征信息，说明缺陷与金属结构整体的相对位置，分析缺陷对结构的影响，并附缺陷统计表、照片或影像资料等。

## 7.6 水生生物检查

7.6.1 目视检查应根据现场检查记录表、测量定位资料绘制水生物附着分布图，描述水生物种类、颜色、形态及覆盖特征，并选取典型附着区域照片。摄像检查应通过视频影像识别水生物附着区域，结合测量定位资料绘制分布图，截取典型照片并记录附着厚度。人工探摸检查结果应补充能见度不足区域的附着情况，与目视或摄像检查结果整合。

7.6.4 对影响结构安全的水生物附着，应量化分析其导致的过流断面缩减率、闸门摩擦阻力增加值等参数，提出清理优先级建议。清理方案需注明所采用机械或生物抑制剂的环保性依据。

7.6.5 清理效果复查应对比清理前后的分布图、厚度测量数据及功能测试结果（如闸门启闭力变化）。长期监测建议纳入定期检查计划，并附典型区域时序对比照片及数据表。

## 8 成果整理

### 8.1 一般规定

- 8.1.1 水下检查工作日志可按运行管理单位或检查实施单位的格式进行填写。
- 8.1.2 图像及视频数据的整理应有针对性，准确直观的反应水下检查部位的现状。