

团 体 标 准

T/CAMC 0022—2026

重型水下机器人作业技术规程

Technical Specification for Heavy-Duty Underwater Robot Operations

征求意见稿

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国计算机自动测量与控制技术协会 发布

目录

| | |
|--------------------------------|-----|
| 前 言..... | III |
| 1 范围..... | 1 |
| 2 规范性引用文件..... | 1 |
| 3 术语和定义..... | 1 |
| 4 机器人系统技术要求..... | 2 |
| 4.1 通用要求..... | 2 |
| 4.1.1 耐压与防水..... | 2 |
| 4.1.2 稳定性..... | 2 |
| 4.2 子系统专项要求..... | 2 |
| 5 作业流程规范..... | 3 |
| 5.1 作业前准备..... | 3 |
| 5.1.1 环境评估..... | 3 |
| 5.1.2 设备校验..... | 3 |
| 5.2 作业实施..... | 4 |
| 5.2.1 入水/回收..... | 4 |
| 5.2.2 任务模式..... | 4 |
| 5.2.3 数据采集..... | 5 |
| 5.3 作业后处理..... | 5 |
| 5.3.1 设备维护..... | 5 |
| 5.3.2 数据处理..... | 5 |
| 6 安全与应急管理..... | 5 |
| 6.1 人员资质..... | 5 |
| 6.1.1 操作员..... | 5 |
| 6.1.2 安全员..... | 6 |
| 6.2 应急预案..... | 6 |
| 6.3 环境保护..... | 6 |
| 6.3.1 概述..... | 6 |
| 6.3.2 禁止接触珊瑚礁等生态敏感区..... | 6 |
| 6.3.3 作业区设置生物声学驱离装置..... | 7 |
| 7 维护保养..... | 7 |
| 7.1 概述..... | 7 |
| 7.2 日常维护..... | 7 |
| 7.2.1 电池循环记录..... | 7 |
| 7.2.2 机械臂关节磨损检测..... | 7 |
| 7.3 定期检修..... | 7 |
| 7.3.1 耐压舱体水密性测试..... | 7 |
| 7.3.2 传感器标定..... | 8 |
| 附录 A （资料性附录）典型作业场景安全风险评估表..... | 8 |
| 附录 B （规范性附录）应急演练记录表..... | 10 |

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国计算机自动测量与控制技术协会提出并归口。

本文件起草单位：×××、×××。

本文件主要起草人：×××、×××。

重型水下机器人作业技术规程

1 范围

本文件规定了重型水下机器人作业技术规程的系统技术要求、作业流程规范、安全与应急管理以及维护保养等。

本文件适用于工作水深 $\geq 300\text{m}$ 、自重 $\geq 1\text{t}$ 或负载能力 $\geq 200\text{kg}$ 的水下机器人作业场景，如海洋工程、大坝检测、深水救援等。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 11291.1 工业环境用机器人 安全要求 第1部分：机器人
 GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
 GB/T 36896.3 轻型有缆遥控水下机器人 第3部分：导管螺旋桨推进器
 GB/T 38244 机器人安全总则
 GB/T 43849 水下作业设备耐压舱体通用技术条件
 T/CIET 802 无人水下机器人通用技术条件
 T/QGCML 1525 水下机器人排查干扰环境监测数据技术规程
 T/SZAF 001 多用途轻型水下作业机器人
 GB/T42057-2022 潜水器及其承压设备压力试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

重型水下机器人 heavy duty underwater robot

以高负载、深潜能力与大功率（额定功率 $\geq 10\text{kW}$ ）为动力系统，以聚焦复杂水下作业场景为核心，覆盖水下结构物的安装、拆解及结构缺陷维修作业、重型设备维修、深海资源勘探辅助，以及应急救援等功能。自重 $\geq 1\text{t}$ 或负载能力 $\geq 200\text{kg}$ ，在作业过程中，其动力系统需持续输出稳定功率，需驱动自身在强水流环境中精准定位（定位精度通常 ≤ 0.5 米），还需为机械臂提供足够扭矩完成抓取、拧动等高强度操作。

3.2

脐带缆抗拉强度 umbilical cable tensile strength

脐带缆在承受轴向拉伸载荷时，抵抗被拉断的能力，通常以牛顿（N）或千牛顿（KN）为单位计量。

3.3

布放回收系统 Launch and recovery system;LARS

海洋工程和水下作业领域的关键设备，专门用于将无人水面艇（USV）、自主水下航行器（AUV）、遥控潜水器（ROV）等水下装备从母船安全布放到水中，并在任务完成后将其回收到母船上。

3.4

动态定位精度 Dynamic Positioning Accuracy

动态定位精度是指船舶或海上平台（如钻井船、科考船、工程船）或水下机器人等的动力定位系统在风、浪、流等环境扰动下，将其位置和艏向保持在规定偏差范围内的能力。它是衡量 DP 系统性能的核心指标。

3.5

多源数据融合 Multi-Sensor Data Fusion (MSDF)

一种信息处理技术，其核心是对来自多个、通常是异构的来源（如不同物理类型的传感器、数据库、模型等）的数据与信息进行关联、相关、组合与估计，以生成比任何单一数据源更高质量、更一致、更完整、更可靠的综合信息，从而支持更精确的状态评估、决策判断或特征估计。在海洋工程及水下机器人动态定位（DP）系统中，融合差分 GNSS、水声定位、张紧索、激光雷达、惯性导航等多种位置和姿态参考系统的数据，以提高定位精度和系统冗余度，从而安全高效地支持布放回收系统（LARS）等作业。

4 机器人系统技术要求

4.1 通用要求

4.1.1 耐压与防水

重型水下机器人外壳材料应根据作业水深及环境需求适配选择，优先兼顾安全性与经济性；工作水深 ≤ 1000 米（含内陆淡水场景、近岸浅海场景）：可采用高强度铝合金，需配套优化壳体结构设计（如圆筒形壳体）提升耐压性能，同时做好防腐蚀处理；工作水深 1000-3000 米：建议采用不锈钢材料，平衡强度与成本；工作水深 > 3000 米：需采用钛合金材料，满足极端深水耐压及耐腐蚀需求；通常采用高强度复合材料一体成型，舱门、线缆接口等关键连接部位需配备多层密封垫圈与金属密封结构。

无论选用何种材料，外壳均防水要求应满足 IP68 防护等级，该防护等级要求符合 GB/T 43849，出厂前还需通过“阶梯式水压测试”，从设计水深 1 倍开始，每增加 0.1 倍水深稳压 1 小时，直至达到 1.5 倍水深，确保无结构变形、渗漏等问题，水压测试相关要求依据 GB/T 43849 制定。应通过对应水深的压力测试 (GB/T42057-2022 潜水器及其承压设备压力试验方法)，耐压深度 \geq 设计水深 1.5 倍。

4.1.2 稳定性

重型水下机器人需满足作业抗流能力 ≥ 1 节流速，航行抗流能力 ≥ 2 节流速，要求机器人在对应流速的水流环境中，能通过自身推进系统（如多矢量推进器）抵消水流冲击力，保持作业位置偏差不超过 0.5 米/小时，满足水下设备安装、采样等操作需求，还需满足横摇角 $\leq 15^\circ$ 、纵摇角 $\leq 15^\circ$ 的要求（机器人在水流扰动、自身作业动作产生的倾覆力矩作用下，船体左右、前后倾斜的最大角度不得超过 15° ），稳定性指标可符合 T/CIET 802。

4.2 子系统专项要求

重型水下机器人子系统专项要求如表 1 所示：

表1 重型水下机器人子系统专项要求

| 子系统 | 技术要求 | 引用标准 |
|-------|--|-----------------------|
| 动力系统 | 双冗余电动推进，续航应满足 $\geq 8\text{h}$ ；应急电源至少支持 30 分钟返航。 | T/CIET 802 |
| 控制与导航 | 超短基线定位误差应满足 $\leq 0.1\%$ 斜距；惯性导航+多普勒声呐组合定位。 | T/CIET 802 |
| 作业工具 | 模块化接口设计，支持机械臂（扭矩应满足 $\geq 200\text{N}\cdot\text{m}$ ）、切割机、高压水刀等。 | T/SZAF 001 |
| 安全系统 | 自动避障（声呐+光学融合）、紧急上浮装置（独立触发）、脐带缆防缠绕机构。 | GB/T 38244、GB 11291.1 |
| 航速 | | |
| 负载能力 | | |
| 声学模组 | | |

5 作业流程规范

5.1 作业前准备

5.1.1 环境评估

环境评估包括但不限于以下内容：

- 测量水温、流速、能见度、海底地质，划定作业警戒区，作业前需全面开展环境评估，水温测量需覆盖作业区域不同水深，可间隔 50 米取一个监测点，记录范围为 -2°C 至 30°C ，水温测量范围可符合 T/QGCML 1525；
- 流速测量可采用多普勒流速仪，重点监测作业核心区及周边 100 米范围，流速监测范围依据 T/QGCML 1525 制定；
- 能见度通过水下激光测距仪判定，若低于 5 米需提前更换高功率照明设备，能见度判定标准可符合 T/CIET 802；
- 海底地质需通过浅层剖面仪探测（为主）+侧扫声呐（为辅），明确是否存在礁石、淤泥层等，海底地质探测要求可依据 T/QGCML 1525；浅层剖面仪：负责“纵向地层结构”探测，明确沉积层厚度、岩层界面；侧扫声呐：负责“横向海底表面形态”探测，识别海底礁石、沉船、管线等障碍物，与浅层剖面仪形成“表层 + 浅层”的立体探测覆盖，避免仅用浅层剖面仪遗漏表面风险的问题。
- 以作业点为中心，划定半径 500 米的作业警戒区，通过 VHF 高频电台告知周边船舶，设置浮标标识，禁止无关船只进入，作业警戒区范围可符合 T/SZAF 001。

5.1.2 设备校验

5.1.2.1 传感器校准

传感器校准详细内容如下所示：

- 传感器校准需按“先静态后动态”原则执行，深度计在标准压力罐中校准，根据工作水深范围设定校准点，具体如下：1. 工作水深 $\leq 500\text{m}$ 的设备：设定 0 米、设计水深的 50%、设计水深三个校准点；2. 工作水深 $> 500\text{m}$ 的设备：设定 0 米、500 米、设计水深三个校准点。深度计校准要求可依据 GB/T 43849 的相关要求；
- 声呐在无回声水池中校准，调整发射功率与接收灵敏度，确保对 100 米外标准目标（直径 1 米钢球）的探测误差应控制在 $\leq \pm 1\%$ 范围内，声呐校准标准符合 T/CIET 802；

- c) 摄像头通过标准分辨率卡校准, 调整焦距与白平衡, 确保 10 米内目标成像无畸变、色彩还原度需满足 $\geq 90\%$, 摄像头校准要求可参照 T/SZAF 001;
- d) 校准后需生成校准报告, 若任一传感器误差超标, 需更换部件并重新校准, 传感器校准流程可符合 T/QGCML 1525。
- e) 深度计校准误差修正为“ $\leq 0.1\%FS$ ”; 自主模式下“紧急停机触发条件”(如偏离预设路径 1m 以上自动停机)。
- f) 惯性导航传感器校准要求: 每 3 个月进行一次校准, 送至具备认证资质的实验室, 模拟海上作业环境(温度 $-5^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ 、湿度 $60\% \sim 95\%$ 及振动环境)或内陆淡水环境进行校准, 确保测量误差不超过 $\pm 0.1\%FS$, 校准完成后粘贴合格标签, 记录标定数据与下次标定时间。

5.1.2.2 脐带缆抗拉测试

脐带缆抗拉测试需在专用拉力试验机上进行, 先测量脐带缆的额定破断拉力, 再按安全系数 ≥ 3 的要求, 设定测试拉力为额定破断拉力的 $1/3$, 持续加载 30 分钟, 期间实时监测脐带缆的伸长量(需 $\leq 0.5\%$)及结构完整性(无纤维断裂、护套开裂), 安全系数及测试要求可符合 GB/T 36896.3。测试前需检查脐带缆外观, 测试后需标记测试日期与结果, 未通过测试的脐带缆禁止使用, 该测试可模拟作业中脐带缆承受的最大拉力。

5.2 作业实施

5.2.1 入水/回收

入水与回收阶段需严格控制操作参数, 吊装角度需满足 $\leq 30^{\circ}$, 避免角度过大导致机器人倾斜, 使重心偏移引发吊装不稳; 入水速度通过吊机变频控制系统调节, 需保持 $\leq 0.5m/s$, 防止速度过快导致机器人与水面撞击, 损坏外壳或内部元件, 吊装角度及入水速度要求可符合 T/SZAF 001。同时, 机器人需配备钢制防撞框架, 框架比机身尺寸至少大 20cm, 表面包裹橡胶缓冲层, 可在入水时避免与船体、海底礁石直接碰撞, 回收时也能防止机器人与吊机部件刚蹭, 防撞框架要求可依据 GB/T 38244。

5.2.2 任务模式

任务模式包括但不限于遥控操作模式、自主作业模式, 设计制造及作业时可根据实际场景需求选择适配模式, 无需同时具备多种模式; 任务模式包括但不限于以下内容:

- a) 遥控模式: 遥控模式需建立“人机协同”操作体系, 操作人员通过控制台实时接收机器人传回的视频画面与传感器数据, 借助手柄控制机械臂动作, 进行水下焊接时, 可通过微调遥控旋钮(精度 $\pm 0.1mm$)控制焊枪位置, 配合焊接参数(如电流、电压)实时调节; 进行取样时, 应控制取样钳开合度, 避免损坏样品。遥控模式下需设置操作延迟监测(需控制在 $\leq 0.5s$ 范围内), 若延迟超标, 需检查脐带缆数据传输链路, 操作延迟要求可符合 T/CIET 802。
- b) 自主模式: 自主模式需提前通过软件规划作业路径, 输入起始点、终止点及扫测间距, 机器人将按预设路径自动移动。声呐全覆盖扫测重叠率需满足 $\geq 20\%$, 即相邻两条扫测轨迹的声呐探测区域重叠部分占单条轨迹探测宽度的 20%以上, 扫测重叠率要求可依据 T/QGCML 1525。作业过程中机器人可通过惯性导航与声呐定位修正位置, 实时记录扫测数据, 若出现路径偏移, 路径跟踪偏差需控制在 $\leq 0.3m$ ”; 自主模式下, 若机器人偏离预设路径 1m 以上, 系统自动触发紧急停机程序, 并启动声光报警, 待操作人员确认后重新规划路径或手动操控恢复作业。路径偏移偏差要求可符合 T/CIET 802。
- c) 复杂精密作业(如海洋工程检修、大坝裂缝检测): 建议具备遥控操作模式, 确保人为精准控制;

大范围巡航勘探作业：可选择自主作业模式，提升作业效率；

c) 安全兜底要求：无论采用何种模式，均需具备应急手动干预功能及故障暂停机制。

5.2.3 数据采集

数据采集需满足多维度性能要求，详细内容如下所示：

- a) 光学成像分辨率应满足 $\geq 1080p$ （ 1920×1080 像素），确保水下目标（如管道裂缝、设备螺栓）的细节清晰可见，便于后续缺陷识别，光学成像分辨率要求应符合 T/SZAF 001；
- b) 声呐点密度应满足 ≥ 50 点/ m^2 ，即每平方米海底区域被声呐信号覆盖 ≥ 50 个数据点，可还原海底地形起伏，误差应控制在 $\leq \pm 0.3$ 米范围内，声呐点密度及误差要求可参照 T/QGCML 1525；
- c) 实时传输延迟应控制在 $\leq 2s$ 范围内，通过脐带缆数据链路实现，操作人员能及时获取现场数据，若发现异常可立即调整作业参数，实时传输延迟要求应符合 T/CIET 802。

5.3 作业后处理

5.3.1 设备维护

作业后需按“先清洁后检测再保养”流程开展维护，详细内容如下所示：

- a) 先用高压淡水（压力 $0.3MPa$ ）冲洗机器人全身，重点清理外壳缝隙、机械臂关节处的泥沙与盐分，防止腐蚀，高压淡水压力要求应符合 T/SZAF 001；
- b) 拆解舱门、线缆接口等部位的密封件，检查是否存在磨损、变形、老化，若有缺陷需立即更换，更换后涂抹专用密封脂，密封件检查及维护要求应符合 GB/T 43849；
- c) 对运动部件（如机械臂轴承、推进器轴）加注防水润滑脂，同时记录维护数据，运动部件维护要求参考 GB/T 5226.1。

5.3.2 数据处理

数据处理需融合 AI 技术与三维建模，包括但不限于以下内容：

- a) 将光学图像、声呐数据输入 AI 缺陷识别系统，系统通过预训练模型（基于 10 万+缺陷样本）自动分类裂缝，识别精度需满足 $\geq 95\%$ ，可区分裂缝宽度需满足 $\leq 0.1mm$ ，腐蚀面积误差控制在 $\leq 5\%$ ，生物附着厚度应满足 $\geq 1mm$ ，并标记缺陷位置与等级，缺陷识别精度及相关参数要求可参考 T/QGCML 1525；
- b) 利用点云数据进行三维模型重建，还原作业区域或目标设备的立体形态，模型精度需满足 $\leq \pm 0.1$ 米，可直观展示缺陷分布，三维模型重建精度要求应依据 T/CIET 802。

6 安全与应急管理

6.1 人员资质

人员资质是保障动态缆作业安全的前提，需针对不同岗位制定明确的资质标准与能力要求，确保从业人员具备应对海上复杂工况的专业处理能力与应急处置能力，人员资质总体要求应参考 GB/T 38244、GB 11291.1。

6.1.1 操作员

操作员的要求包括但不限于以下内容：

- a) 操作员应持有国际或行业认可的 ROV 相应等级证书（海上作业需三级证书，内陆淡水作业需二级

及以上证书)；

b) 实操经验要求：海上作业：≥200 小时海上作业实操经验，其中至少包含 50 小时以上恶劣海况（风力≥6 级、浪高≥2.5 米）作业经历；内陆淡水作业（大坝、内湖、水库等）：≥100 小时内陆水下作业实操经验，需包含≥30 小时复杂水流（流速≥1.5 节）或复杂地形作业经历。

6.1.2 安全员

(1) 应具备国家或行业认证的潜水救援资质，包括但不限于以下内容：

a) 操作员应持有国际或行业认可的 ROV 相应等级证书（海上作业需三级证书，内陆淡水作业需二级及以上证书）；

b) 实操经验要求：海上作业：≥200 小时海上作业实操经验，其中至少包含 50 小时以上恶劣海况（风力≥6 级、浪高≥2.5 米）作业经历；内陆淡水作业（大坝、内湖、水库等）：≥100 小时内陆水下作业实操经验，需包含≥30 小时复杂水流（流速≥1.5 节）或复杂地形作业经历。

(2) 安全员还应具备国家或行业认证的水下救援相关资质：

a) 海上作业：需持有开放水域潜水员（OW）救援认证、水下应急打捞资质及海上急救证书；内陆淡水作业：需持有内陆潜水救援资质及水上急救证书（需查询证书类型和名称）；

b) 实操经验要求：海上作业：≥100 小时海上应急救援演练经验；内陆淡水作业：≥50 小时内陆水下应急救援演练经验；

c) 需熟悉对应作业场景的安全规范及风险辨识方法。

6.2 应急预案

应急预案的内容详见下表：

表2 应急预案表

| 风险类型 | 响应措施 |
|------|----------------------------|
| 电力中断 | 切换备用电源，自动上浮至 50m 安全深度。 |
| 通讯失效 | 启用声学应急通讯，惯性导航自动返航。 |
| 设备卡滞 | 启动反向推进，超 30 分钟未脱困则派遣支援机器人。 |

6.3 环境保护

6.3.1 概述

环境保护是漂浮式海上风电用动态缆作业的重要责任环节，需严格遵循海洋生态法规与可持续发展原则，在保障动态缆作业顺利开展的同时，可降低对海洋生态系统的干扰与破坏，重点围绕生态敏感区保护、海洋生物安全防护等方面制定管控措施。

6.3.2 禁止接触珊瑚礁等生态敏感区

作业需禁止接触珊瑚礁等生态敏感区，详细内容如下所示：

a) 作业前需联合海洋生态环保机构，通过卫星遥感、水下探测等技术手段，划定作业区域内珊瑚礁、海草床、红树林等生态敏感区的边界范围，并在海图及作业控制系统中明确标注，设置电子围栏预警机制；

b) 作业船舶、ROV 及相关设备的航行路线与作业轨迹，需避开敏感区边界≥500 米范围内的缓冲区域，严禁任何设备（如 ROV 机械臂、缆体牵引装置）直接接触或触碰敏感区生物栖息地；

- c) 若作业过程中因突发情况需接近敏感区，应立即启动紧急停机程序，待调整设备位置并确认远离敏感区后，方可恢复作业；
- d) 作业结束后，应委托第三方生态监测机构对敏感区周边生态环境进行抽样检测。

6.3.3 作业区设置生物声学驱离装置

为避免作业过程中海洋生物误入作业区域，受设备噪音、机械碰撞影响，应在作业区周边，以动态缆作业核心区域为中心，半径 1000 米范围内，均匀布设生物声学驱离装置；装置应选用符合海洋生态保护标准的低干扰设备，工作频段设定为 10~100kHz，驱离信号强度需根据作业海域海洋生物种类、种群密度进行动态调整；作业期间需安排专人实时监测装置运行状态，结合水下声呐监测数据，评估生物驱离效果，若发现装置故障或驱离效果不佳，需立即停机检修或补充布设装置。

7 维护保养

7.1 概述

维护保养是保障漂浮式海上风电用动态缆作业设备，如 ROV、检测传感器、耐压舱体等，长期稳定运行、降低故障风险的关键环节，需建立“日常维护+定期检修”的双重管控体系，严格按照设备技术规范与行业标准执行，应满足动态缆作业的精度与安全要求。

7.2 日常维护

7.2.1 电池循环记录

需对 ROV、水下探测仪器等作业设备的动力电池进行全生命周期跟踪记录，包括但不限于以下内容：

- a) 每周统计电池充放电循环次数、单次充电时长、满电状态下作业续航时间及电压波动范围等；
- b) 若发现电池充放电效率下降 $\geq 10\%$ 、续航时间缩短超过 20%或电压异常波动，应立即暂停使用该电池，送至专业检测机构进行电芯健康度检测；
- c) 需定期清洁电池接口处的海水盐分与污垢，涂抹专用防腐蚀润滑脂。
- d) 电池存储环境要求：温度 0-25℃、湿度 $\leq 60\%$ ；明确电池报废标准：充放电循环次数达到设计寿命的 80%或电芯容量衰减至初始容量的 70%

7.2.2 机械臂关节磨损检测

机械臂关节磨损检测内容，包括但不限于如下内容：

- a) 每周采用高精度激光测厚仪检测 ROV 机械臂各关节的耐磨涂层厚度，若涂层磨损量超过初始厚度的 30%，应及时更换耐磨垫片；
- b) 手动检查关节活动灵活性，观察是否存在卡顿、异响等情况，并用扭矩扳手检测关节紧固螺栓的扭矩值，通常扭矩偏差需控制在 $\pm 5\%$ 以内；
- c) 检测完成后，向关节轴承加注专用海洋级润滑脂，形成密封保护层，用以抵御海水侵蚀与泥沙磨损。

7.3 定期检修

7.3.1 耐压舱体水密性测试

耐压舱体水密性测试包括但不限于以下内容：

- a) 测试每 6 个月进行一次，测试前应清洁耐压舱体表面，检查舱体焊缝、观察窗及接口密封件是否存在裂纹、变形或老化现象；
- b) 采用水压试验法，将舱体内部加压至设计工作压力的 1.5 倍，并恒温保压 2 小时，期间通过高精度压力传感器监测舱内压力变化，若压力下降值超过 0.05MPa/小时，应排查密封件老化、焊缝渗漏等问题，更换损坏部件后重新测试，直至满足水密性要求；
- c) 测试合格后，在舱体表面张贴合格标识，标注下次测试时间。

7.3.2 传感器标定

传感器标定包括但不限于以下内容：

- a) 每 3 个月进行传感器标定，结合设备使用场景调整标定参数，针对动态缆检测用传感器，如应力传感器、应变传感器、位移传感器，应送至具备认证资质的实验室进行标定；
- b) 标定过程中，模拟海上作业的温度（-5℃~40℃）、湿度（60%~95%）及振动环境，对传感器的测量量程、精度、线性误差进行校准，确保传感器测量误差不超过±0.5%FS（满量程）；
- c) 标定完成后，应粘贴标定合格标签，记录标定数据与下次标定时间，若发现传感器精度超差，需立即更换或维修，避免因测量数据不准影响动态缆性能评估结果。

附录 A（资料性附录）典型作业场景安全风险评估表

本附录提供了不同水下作业场景的典型风险分析及防控要点，供项目策划和作业前安全分析（JSA/Toolbox Meeting）参考。

| 作业场景 | 重点风险点 | 典型防控措施 | 责任主体 |
|--|--|---|--|
| 1. 海洋工程 (如：LARS 布放回收、水下结构物安装、管线巡检) | 设备/操作风险： - 布放回收系统（LARS）失效、钢缆断裂 - 水下机器人（ROV/AUV）推进器缠绕、机械臂卡滞 - 吊机、A 型架超载或意外动作 环境/外部风险： - 恶劣海况（浪、流）导致船舶失位、设备碰撞 - 动态定位（DP）系统失效或精度降级 - 水下能见度低，操作失误 - 与水面船舶、潜水员交叉作业冲突 系统风险： | 1. 严格执行设备日、周、月维护检查程序，关键部件定期探伤更换。 2. 作业前进行 多源数据融合系统 （DP、声学、GNSS）校准与冗余测试。 3. 根据海况设定安全的 DP 作业窗口和位置精度报警阈值。 4. 制定详细的作业程序（SOP）和应急响应预案（ERP）。 5. 设立清晰的作业区与警戒区，确保水面、水下通讯畅通（主备通道）。 6. 对操作员进行场景化、高保真模拟器培训。 | 作业经理 DPO ROV 监工 甲板领班 设备工程师 |

| 作业场景 | 重点风险点 | 典型防控措施 | 责任主体 |
|---|--|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> - 多源数据融合系统故障，导致导航、定位信息错误 - 液压/电力系统失压、短路 - 声学通讯、光纤微缆断裂导致通讯中断 | | |
| <p>2. 大坝/水下结构检测</p> <p>(如：坝体、桥墩、码头巡检)</p> | <p>环境风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 复杂湍流、漩涡导致航行器失控 - 结构物表面附着物（渔网、电缆）造成缠绕 - 有限空间（泄洪孔、闸门槽）内被困或碰撞 <p>技术风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 清水环境声学定位误差大，依赖多传感器融合（视觉+惯性+声学） - 传感器（声呐、激光扫描仪）在近壁面测量失效 - 岸基供电或通讯缆绳被磨损 <p>安全风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 上游突然开闸泄洪，流量剧增 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 使用前视声呐和摄像头进行预扫描，识别潜在缠绕物。 2. 采用具备强大推力、防缠绕设计的专用检测 ROV。 3. 部署超短基线（USBL）等高精度定位系统，并与惯性导航（INS）融合。 4. 与坝体管理方建立直接、可靠的应急通讯机制，确认无泄洪计划并设置预警。 5. 为 ROV 配置机械剪切工具，以备自救。 | <p>检测项目负责人</p> <p>现场安全官</p> <p>ROV 操作员</p> <p>大坝调度方接口人</p> |
| <p>3. 深水救援/搜寻</p> | <p>应急风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 时间紧迫，准备不充分，决策压力大 - 目标信息不明确，搜寻区域广，环境复杂 <p>作业风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 深海高压对设备和人员构成极端挑战 - 可能与失事目标残骸发生二次碰撞 - 救援设备（机械手、提升装置）在关键时刻失效 <p>协同风险：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 多方救援力量（海面、水下、空中）指挥协同困难 | <ol style="list-style-type: none"> 1. 常备经过预调试的应急响应设备包和检查清单。 2. 快速集成侧扫声呐、磁力仪、合成孔径声呐等多源探测数据，缩小搜索范围。 3. 使用重型作业级 ROV，配备强力提升、切割工具和高亮度照明。 4. 建立联合指挥中心，明确统一的通讯协议和数据共享平台。 5. 预先进行不同单位间的联合实战演练。 | <p>救援现场总指挥</p> <p>水下作业队长</p> <p>数据融合分析员</p> <p>设备保障组长</p> |

附录 B（规范性附录）应急演练记录表

本附录规定了应急演练的基本要求与记录规范，旨在确保演练的有效性和可追溯性。

项目名称：_____

演练方案编号：_____

记录日期： 年月____日

| 项目 | 内容与要求 | 记录/评估 |
|------------|---|---|
| 1. 演练基本信息 | 演练主题：（如：DP 失位应急、ROV 应急回收、消防救生） | 主题： _____ |
| | 演练场景：（描述模拟的突发事件） | 场景： _____ |
| | 演练周期： 常规演练至少每季度 1 次；专项高风险作业前必须进行针对性演练。 | 本次属： <input type="checkbox"/> 常规周期演练 <input type="checkbox"/> 作业前专项演练 |
| | 演练类型： <input type="checkbox"/> 桌面推演 <input type="checkbox"/> 实操演练 <input type="checkbox"/> 综合演练 | 类型： _____ |
| 2. 参与人员与角色 | 记录参与演练的所有岗位人员及其在演练中扮演的角色。 | 参与人员/角色： 1. _____（如：DPO） 2. _____（如：ROV 监工） ... |
| 3. 演练内容与流程 | 按步骤记录演练实际执行的关键动作和通讯内容。 | 流程记录： 1. 时间-事件-行动-负责人 2. ... 通信摘要： _____ |
| 4. 评估标准与结果 | <p>评估标准：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 响应速度： 从报警到首次响应动作的时间是否符合预案要求。 - 决策正确性： 指挥决策是否符合应急预案流程。 - 操作熟练度： 关键设备操作是否准确、熟练。 - 协同有效性： 各岗位间通讯、协作是否顺畅、高效。 - 预案完备性： 演练是否暴露出预案的缺陷或盲点。 | <p>评估结果：</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> 优秀（全部达标，行动高效） <input type="checkbox"/> 良好（基本达标，稍有延误） <input type="checkbox"/> 合格（主要步骤完成，存在明显瑕疵） <input type="checkbox"/> 不合格（流程混乱，关键任务未完成） |
| 5. 问题与改进措施 | 记录演练中暴露的问题、不足及制定的纠正与预防措施。 | <p>发现问题：</p> <p>1. _____</p> <p>改进措施：</p> <p>1. _____（指定负责人：，完成期限：）</p> |
| 6. 签字确认 | 评估人： _____ 演练指挥： _____ 安全官： _____ | 日期： 年月____日 |