

# 团 体 标 准

T/CAMC 0021—2026

## 水下机器人环境感知系统探测技术指南

Technical guidelines for environmental perception and detection systems  
of underwater robotic vehicles

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 次

前言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 系统组成.....	2
4.1 传感器系统.....	2
4.1.1 声学传感器.....	2
4.1.2 光学传感器.....	2
4.1.3 化学传感器.....	2
4.1.4 其他传感器.....	2
4.2 数据处理与融合系统.....	3
4.3 导航与定位系统.....	3
5 技术要求.....	3
5.1 传感器性能要求.....	4
5.2 导航与定位精度要求.....	4
5.3 通讯系统要求.....	4
5.4 环境适应性要求.....	4
6 探测方法.....	4
6.1 声学探测方法.....	4
6.1.1 声纳探测技术.....	4
6.1.2 侧扫声呐探测技术.....	错误!未定义书签。
6.1.3 多波束测深技术.....	5
6.2 光学探测方法.....	5
6.2.1 水下成像技术.....	5
6.2.2 蓝绿光探测技术.....	5
6.3 化学探测方法.....	5
6.3.1 化学传感器.....	5
6.3.2 电化学传感器.....	5
7 性能评价.....	5
7.1 探测精度评价.....	6
7.2 导航与定位精度评价.....	6
7.3 抗干扰能力评价.....	6
7.4 稳定性评价.....	6
8 试验方法.....	6
8.1 实验室试验.....	6
8.2 现场试验.....	6

9 检验规则..... 7

    9.1 检验项目..... 7

    9.2 检验方式..... 7

    9.3 抽样方法..... 7

## 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：×××、×××。



# 水下机器人环境感知系统探测技术指南

## 1 范围

本文件规定了水下机器人环境感知系统的系统组成、技术要求、探测方法、性能评价、试验方法和检验规则等。

本文件适用于水下机器人环境感知系统的设计、制造、检验和应用等。

## 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 26178 光通量的测量方法
- GB/T 32065.2 海洋仪器环境试验方法 第2部分：低温试验
- GB/T 32065.4 海洋仪器环境试验方法 第4部分：高温试验
- GB/T 32065.10 海洋仪器环境试验方法 第10部分：盐雾试验
- GB/T 32065.14 海洋仪器环境试验方法 第14部分：振动试验
- GB/T 32065.15 海洋仪器环境试验方法 第15部分：水压试验
- GB/T 43849 水下机器人整机及零部件基本环境试验方法 水静压力试验方法
- GB/T 44534 水下助推机器人通用技术要求
- 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

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**水下机器人** *underwater robot*

在水下环境中执行水下探测与作业任务的海洋、湖泊、江河等仪器。

### 3.2

**环境感知系统** *context-awareness*

水下机器人用于实时获取、处理和理解周围环境信息的系统，包括传感器、数据处理单元等。

### 3.3

**探测技术** *detection technology*

利用潜水器、声呐等传感器，对水下环境、资源等信息进行观测、测量和数据分析的科学方法。

## 4 系统组成

### 4.1 传感器系统

#### 4.1.1 声学传感器

声学传感器的详细内容如下所示：

- a) 声纳是利用声波在水中的传播和反射特性，通过电声转换和信息处理进行导航和测距的技术，可对水下目标进行探测和通讯的电子设备，按工作方式可分为主动声纳和被动声纳。受海水密度、盐度，水的浑浊度、环境噪声影响比较大，影响声纳的探测距离和精度，除了探测距离外，分辨率和分辨力也是很重要指标；
- b) 侧扫声纳通常安装在船体两侧，向水下发射水平方向的声波束，声波束在遇到水下物体（如沉船、岩石、管道等）时会反射回来，形成水下物体的二维图像；通过连续扫描并记录反射信号，绘制出水下物体的轮廓和位置信息；侧扫声纳主要用于水下考古、水下障碍物探测、水下管道检测以及海底电缆路由调查等领域，适用于寻找和定位水下未知物体或结构物。
- c) 多波束测深仪是通过发射扇形排列的声波束，声波束在遇到海底或水下物体时会反射回来，由接收阵列接收并处理成海底地形的三维图像；设备适用于海底地形测绘，如海洋地质调查、航道测量、水下管道铺设前的地形勘察等。

#### 4.1.2 光学传感器

光学传感器的详细内容如下所示：

- d) 摄像头具有防水性能，可在深水环境中工作，可清晰的获取水下环境图像信息，用于识别物体和特征，为作业区域提供照明，其光通量测量应符合 GB/T 26178 的规定；激光雷达是以发射激光束探测目标位置、速度等特征量的雷达系统，可获得与目标有关的信息，如目标距离、方位、高度、速度、姿态、形状等参数；
- e) 红外传感器是利用红外成像技术，捕捉水下环境中的红外辐射，并将其转换为可见的图像，适用于夜间或光线不足的水域，可在水下考古、水下救援、水下监测等多个领域应用。

#### 4.1.3 化学传感器

化学传感器的详细内容如下所示：

- a) 电化学传感器能够连续、实时地监测水质参数，如溶解氧、硫化氢等，具有多参数集成和远程监控的功能，方便用户查看和管理水质数据；
- b) 光化学传感器主要利用光的吸收、发射和散射等现象进行检测，可连续、实时地监测水质参数，如 PH 值、溶解氧、营养盐等，设备具有实时监测、环保等优点。

#### 4.1.4 其他传感器

其他传感器包括但不限于以下内容：

- a) 温度传感器能够实时监测海洋温度的变化，可为科学研究、环境保护和资源管理提供数据，可应用于监测海洋温度变化、渔业资源管理、海洋能源开发等；
- b) 压力传感器主要用于测量水下的压力变化，获取水下环境信息，压力传感器在水下的应用主要有两种，一种是随着深潜设备一起下潜的压力传感器，用来检测当前深度的环境压力值；另一种是深海中常见的压力传感器，可监测水下的地震活动，工作运行期间会被长期放置在海底，其水静压力试验应符合 GB/T 43849 的规定；

- c) 磁力计用来测量磁场强度和方向的仪器，可定位设备的方位（如航向角测量）、导航系统辅助以及地磁场研究，关键参数与性能指标可包括磁力计的精度、分辨率、灵敏度及测量范围等，其水静压力试验应符合 GB/T 43849 的规定；
- d) 惯性测量单元（IMU）通过测量水下机器人的角速度和加速度，可帮助机器人感知其在空间中的姿态变化，可实现平衡控制和运动跟踪。

#### 4.2 数据处理与融合系统

系统数据处理与融合系统主要由数据预处理、数据融合算法和环境建模组成，详细内容如下所示：

- a) 数据预处理主要对传感器采集的数据进行滤波、去噪、放大等操作，用来提高数据质量；
- b) 数据融合算法通过融合多种传感器的监测数据，可提高水下机器人的定位精度、鲁棒性和环境感知分析能力，常用的数据融合算法包括贝叶斯滤波、卡尔曼滤波等；
- c) 环境建模以传感器监测数据为环境建模的核心数据，用来构建水下环境的数学模型，如三维地图、目标识别模型等。

#### 4.3 导航与定位系统

导航与定位系统由惯性导航系统、声学定位系统、视觉定位系统、SLAM、深度计、高度计和超短基线组成，详细内容如下所示：

- a) 惯性导航系统（INS）以陀螺和加速度计为敏感器件的导航参数解算系统，根据陀螺的输出建立导航坐标系，算出水下机器人运载体在导航坐标系中的速度和位置，可全天候、全时间地工作于空中、地球表面乃至水下；
- b) 声学定位系统（ASL）可在水下进行定位和导航，使用声纳信号与已知位置的信标或潜艇进行通信，可确定机器人的绝对位置；
- c) 视觉定位系统（VSL）是利用计算机视觉和机器学习技术，使得水下机器人能在水下环境中实时感知和定位，借助摄像头可将机器人的视觉观察与环境地图进行匹配，确定相对位置；
- d) SLAM（同步定位与建图）结合 INS、VSL 和其他传感器数据来构建环境地图，并同时估计机器人位置的算法。其核心问题包括数据关联、状态估计和地图表示，系统一般可分为五个模块，传感器数据、视觉里程计、后端、建图及回环检测，SLAM 可辅助水下机器人执行路径规划、自主探索、导航等任务。
- e) 深度计：以垂直基准为参照，定量输出深度值的仪器，单位常用米（水下）、毫米（工业）。水下常用自由液面 / 海平面；工业常用零件表面 / 工装零点。用于测量某点至特定基准面（如液面、海底、零件基准面）垂直距离的计量仪器，核心按“接触式”与“非接触式”分类，原理覆盖压力、声学、光学与机械传动，广泛应用于海洋工程、工业制造、潜水等场景。
- f) 高度计：搭载于卫星、船舶、海洋观测平台或水下航行器，用于测量观测平台至海面、海底或指定参考面垂直距离的遥感或现场测量仪器。主要包括卫星雷达高度计、船载 / 机载激光高度计、水下声学高度计等类型，可获取海面高程、有效波高、海底地形、距底高度等关键海洋环境参数，广泛应用于海平面变化监测、海洋动力环境观测、海底地形测绘、水下航行器安全保障等领域。
- g) 超短基线：由基线长度  $< 1\text{m}$  的小型水声基阵与水下应答器组成，通过测量声波到达各阵元的相位差 / 时延差解算方位、结合声传播时间测距，实现水下目标相对定位的水声定位技术。

### 5 技术要求

## 5.1 传感器性能要求

传感器的性能，详细内容包括但不限于如下所示：

- a) 精度：应规定各类传感器在探测目标位置、距离、形状等方面的精度指标；
- b) 分辨率：应明确传感器对水下环境的分辨能力；
- c) 可靠性：传感器应稳定可靠地工作，减少故障发生的概率，其机械电气安全应符合 GB/T 5226.1 的规定；
- d) 抗干扰能力：传感器应能够抵抗水下复杂环境中的电磁干扰、声波干扰等因素的影响，相关抗干扰性能应符合 T/QGCML 1525 的规定。

## 5.2 导航与定位精度要求

导航与定位精度的要求，包括但不限于如下所示：

- a) 位置精度：应规定水下机器人在不同环境条件下的定位精度，符合 T/CIET 802 的相关要求；
- b) 姿态精度：宜明确机器人姿态测量的精度指标；
- c) 路径规划精度：应对水下机器人环境信息规划路径的准确性提出精度要求，符合 GB/T 44534 的相关规定。

## 5.3 通讯系统要求

通讯系统的要求，包括但不限于如下所示：

- a) 通信方式：应规定水下机器人与地面控制站或其他设备之间的通信方式，如声学通信、光纤通信、无线电波通信等；
- b) 传输速率：需确定数据传输的速率要求，以保证实时数据传输的需求；
- c) 误码率：应限制通信过程中的误码率，以确保数据传输的准确性；
- d) 抗干扰能力：通信系统应具备良好的抗干扰能力，保证通信的稳定性，符合 T/QGCML 1525 的相关要求。

## 5.4 环境适应性要求

环境适应性的要求，包括但不限于如下所示：

- a) 温度范围：应规定水下机器人环境感知系统能够正常工作的温度范围，低温环境适应性应符合 GB/T 32065.2 的规定，高温环境适应性应符合 GB/T 32065.4 的规定；
- b) 压力范围：应明确系统能够承受的水下压力范围，水压试验应符合 GB/T 32065.15 的规定；
- c) 盐度范围：应说明系统在不同盐度环境下的盐度范围；
- d) 海流和潮汐影响：应考虑海流和潮汐对传感器探测和导航定位的影响，并提出适应性要求，振动环境适应性应符合 GB/T 32065.14 的规定。

## 6 探测方法

### 6.1 声学探测方法

#### 6.1.1 声纳探测技术

声纳探测技术的详细内容如下所示：

- a) 声纳技术的基本原理是通过声波在水中的传播特性来实现探测，声波在水中的传播速度约为 1500 米每秒；

- b) 利用声呐技术，反射回来的声波被转换为电信号，经过放大处理后，可以在显示器上显示或在耳机中播放声音，通过测量信号的往返时间，可确定目标的距离；通过分析声调的高低，可判断目标的性质。
- c) 目标识别算法是通过分析反射回来的声波信号，提取目标的相关特征信息，如形状、大小、材质等，常用识别算法包括特征提取、模式识别和机器学习等。
- d) 侧扫声呐通过处理回波信号来构建海底地形地貌的图像信息，信号的强度反映了海底的起伏和硬度，通过计算机对声呐带图像进行处理，可获得分辨率较高的二维海底地貌图；还可通过多波束技术和动态频率调节技术，提升不同水深的适应性，深度学习算法可优化散射信号处理。

### 6.1.2 多波束测深技术

多波束测深是通过发射扇形声波束实现海底地形测量的关键技术，集成计算机、导航定位、姿态传感器等设备，采用正交发射接收阵列形成宽覆盖测深条带，单次测量可达水深数倍宽度，测量流程包含测前校准、航向规划、声速补偿及数据处理等环节，在港口航道测量中能检测最小 1 立方米障碍物，其测深精度遵循 IHO S-44 国际规范，水深 12 米时误差应满足  $\leq \pm 0.27$  米。

## 6.2 光学探测方法

### 6.2.1 水下成像技术

水下成像技术的详细内容如下所示：

- a) 水下相机的成像原理主要包括光学成像和图像处理技术，光学成像是利用可见光进行成像，越小的波长使得光学系统获取图像的分辨率较高，图像处理技术可用来改善水下环境图像的质量；
- b) 激光雷达的测距和成像方法是基于时间飞行脉冲（ToF）原理，通过发射激光脉冲并测量其往返时间来计算距离。典型波长为 532 纳米，最高分辨率可达 3 毫米，适用于 3000 米水深的环境，主要包括激光发射器、接收光学天线和信号处理单元，通过脉冲重复频率和算法（如 RIATT 压缩算法），可在高浊度水体中保持毫米级三维点云精度。

### 6.2.2 蓝绿光探测技术

绿光探测技术是利用蓝绿光波段在大气及水体中穿透力较强的特性，通过发射端向目标区域发射蓝绿光信号，信号接触目标后产生反射或散射，接收端捕获反射/散射信号并转化为电信号，经信号处理与数据分析获取目标的位置、形态、浓度等信息，可应用于低空目标探测、水下探测等场景。

## 6.3 化学探测方法

### 6.3.1 化学传感器

化学传感器是将特定的物质转化为电子信号输出，通过内置的敏感元件与被测物质发生化学反应，生成可检测的信号。例如，pH 传感器通过测量溶液中氢离子浓度的变化反映水质的酸碱度。

### 6.3.2 电化学传感器

电化学传感器是通过与被测气体发生反应，并产生与气体浓度成正比的电信号来工作。典型的电化学传感器由传感电极（工作电极）和反电极组成，并通过一个薄电解层隔开，气体通过微小的毛管型开孔与传感器发生反应，然后通过疏水屏障层到达电极表面。在电极表面，气体分子被氧化或还原，产生电流，可通过测量电流确定气体浓度。

## 7 性能评价

## 7.1 探测精度评价

探测精度评价包括但不限于以下内容：

- a) 目标定位精度评价，通过实验或模拟测试，可评估水下机器人对目标位置的探测精度；
- b) 环境参数测量精度评价，需对温度、压力、盐度等环境参数的测量精度进行评价。

## 7.2 导航与定位精度评价

导航与定位精度评价包括但不限于以下内容：

- a) 定位误差分析，主要针对水下机器人在不同环境条件下的定位误差来源和大小进行分析，定位精度应符合 T/CIET 802 的相关要求；
- b) 路径规划准确性评价，系统应评估机器人路径规划的合理性和准确性，符合 GB/T 44534 的相关规定。

## 7.3 抗干扰能力评价

抗干扰能力评价包括但不限于以下内容：

- a) 电磁干扰测试，系统需模拟不同的电磁干扰环境，测试传感器和通信系统的抗干扰能力，符合 T/QGCML 1525 的相关要求；
- b) 声波干扰测试，系统需模拟水下声波干扰，评估声学传感器的抗干扰性能，符合 T/QGCML 1525 的相关要求。

## 7.4 稳定性评价

稳定性评价包括但不限于以下内容：

- a) 长时间运行稳定性测试，系统需对水下机器人环境感知系统进行长时间连续运行测试，评估其稳定性，其机械电气安全应符合 GB/T 5226.1 的规定；
- b) 动态环境适应性测试，在不同水流、波浪等动态水下环境中，系统需要测试系统的稳定性和可靠性，振动环境适应性应符合 GB/T 32065.14 的规定。

## 8 试验方法

### 8.1 实验室试验

实验室试验包括但不限于如下内容：

- a) 传感器性能测试，在实验室环境下，对各类传感器进行性能测试，需验证其精度、分辨率等指标是否符合要求；
- b) 数据处理与融合算法验证，利用模拟数据对数据处理与融合算法进行验证和优化；
- c) 导航与定位算法测试，在模拟水下环境中，可测试导航与定位算法的性能，符合 T/CIET 802 和 GB/T 44534 的相关规定。

### 8.2 现场试验

现场试验包括但不限于如下内容：

- a) 实际水下环境测试，将水下机器人投放到实际水下环境中，进行探测任务的试验，评估系统的整体性能，其安全要求应符合 GB 11291.1 的规定；

- b) 环境适应性试验, 在不同的水下环境条件下 (如不同温度、压力、盐度等) 进行试验, 验证系统的环境适应性, 低温环境试验应符合 GB/T 32065. 2 的规定, 高温环境试验应符合 GB/T 32065. 4 的规定, 盐雾环境试验应符合 GB/T 32065. 10 的规定, 水压试验应符合 GB/T 32065. 15 的规定;
- c) 对比试验, 可与其他同类水下机器人环境感知系统进行对比试验, 评估系统的优势和不足。

## 9 检验规则

### 9.1 检验项目

系统需明确要进行检验的项目, 如外观和结构检查、功能检查、性能试验等, 可列出检验项目清单。其中性能试验应包含传感器精度检验 (符合 IHO S-44 国际规范、相关技术设计要求等)、导航定位精度检验 (符合 T/CIET 802、GB/T 44534 等)、抗干扰能力检验 (符合 T/QGCML 1525 等)、环境适应性检验 (符合 GB/T 32065 系列标准等)。

### 9.2 检验方式

应规定检验的方式, 如型式试验、出厂试验、验收试验等。根据检验方式, 可进一步确定检验项目。抽样后, 进一步进行合格判断。所有检验项目均符合规定要求的, 则判定检验合格。若发现某个检验项目不合格, 应停止检验, 并在采取纠正措施后, 根据缺陷的严重程度, 经协商可重新进行全检或仅对不合格项目进行检验。若再次检验仍不合格, 则判定检验不合格。

### 9.3 抽样方法

确定抽样方法和抽样数量, 不足一台按照 1 台计, 数量大于 5 台时, 抽取 20%, 抽样应确保检验结果的代表性和可靠性。