

团 体 标 准

T/CAOE 83—2025

水下声光探测三维成像系统性能 测试方法

Performance testing method for underwater acousto-optic
detection three-dimensional imaging system

2025-03-24 发布

2025-03-24 实施

中国海洋工程咨询协会 发 布
中国标准出版社 出 版

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 概述	2
5 测试要求	2
5.1 测试设备和设施	2
5.2 测试项目	2
6 测试方法	3
6.1 成像分辨力	3
6.2 成像分辨率	5
6.3 成像频率	8
6.4 成像距离	8
6.5 成像时间	9
6.6 信噪比	9
6.7 图像尺寸	9
6.8 工作水深	9
6.9 电磁兼容性	9
6.10 环境适应性	10
6.11 系统可靠性	10
6.12 现场测试	10
7 测试过程中异常情况处理	11
8 测试报告	11
附录A(资料性) 水下声光探测三维成像系统示例	12
附录B(资料性) 测试结果记录表	13
参考文献	14

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。

本文件由中国海洋工程咨询协会提出并归口。

本文件起草单位：青岛海洋工程水下设备检测有限公司、青岛海洋地质研究所、青岛森科特智能仪器有限公司、中国海洋大学、中国船舶集团有限公司第七六〇研究所、山东科技大学、青岛海检集团有限公司、中海油深圳海洋工程技术服务有限公司、中海辉固地学服务(深圳)有限公司、深之蓝海洋科技股份有限公司、中国石油大学(华东)、山东大学、哈尔滨工程大学、中国船级社海洋工程技术中心、中国海洋工程装备技术发展有限公司、宁波泛叶海洋科技有限公司、宁波锐科海洋科技有限公司、天津大学青岛海洋技术研究院。

本文件主要起草人：刘晓、孙治雷、张喜林、于敬东、杜敬林、郭金家、罗宇、徐猛、张宁、赵静、徐昊、彭东东、魏自浩、刘庆省、张红岩、王新宝、张旭、李森、韩超、李超、郭岳山、李倩倩、石鹏、卢泽宇、江文亮、孙宝江、胡作琛、刘延俊、高永海、杨志勋、周晓明、康永田、王宇、钟科星、张聪、管勇鑫、郭磊、张卫红、赵佳、管健、于川迪、仇凯岷。

水下声光探测三维成像系统性能 测试方法

1 范围

本文件规定了水下声光探测三维成像系统性能测试的测试要求、测试方法、测试过程中异常情况处理和测试报告。

本文件适用于利用声呐成像和激光线扫描成像的水下三维成像系统的性能测试,其他类似的水下成像系统也可参照使用。

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/T 7965—2002 声学 水声换能器测量
- GB/T 10250—2007 船舶电气与电子设备的电磁兼容性
- GB/T 32065.2 海洋仪器环境试验方法 第2部分:低温试验
- GB/T 32065.3 海洋仪器环境试验方法 第3部分:低温贮存试验
- GB/T 32065.4 海洋仪器环境试验方法 第4部分:高温试验
- GB/T 32065.5 海洋仪器环境试验方法 第5部分:高温贮存试验
- GB/T 32065.6 海洋仪器环境试验方法 第6部分:恒定湿热试验
- GB/T 32065.10 海洋仪器环境试验方法 第10部分:盐雾试验
- GB/T 32065.11 海洋仪器环境试验方法 第11部分:冲击与碰撞试验
- 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
- JJG 880 浊度计
- GA/T 1128—2013 安全防范视频监控高清晰度摄像机测量方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水下声光探测三维成像系统 **underwater acousto-optic detection three-dimensional imaging system**
在水下利用声学成像单元和光学成像单元共同获取被测目标表面三维坐标、反射强度等信息并生成被测目标图像的非接触式主动探测系统。

3.2

移动式扫描模式 **mobile scanning mode**

水下声光探测三维成像系统搭载于无人遥控潜水器或自主水下航行器等水下移动式平台时,在探测

过程中通过调节声学成像单元和光学成像单元的角度,对被测目标进行扫描的成像模式。

3.3

旋转式扫描模式 rotary scanning mode

水下声光探测三维成像系统搭载于水下座底式平台时,在探测过程中通过控制声学成像单元和光学成像单元转动,对被测目标进行扫描的成像模式。

3.4

成像分辨力 imaging resolution ability

水下声光探测三维成像系统对被测目标进行探测时,能够区分相邻目标间的最小距离。

3.5

成像分辨率 imaging resolution

水下声光探测三维成像系统对被测目标进行探测时,生成三维图像的精密程度。

3.6

成像距离 imaging distance

水下声光探测三维成像系统对被测目标进行探测时,能够获取被测目标图像的距离。

4 概述

水下声光探测三维成像系统主要由声学成像单元、光学成像单元、主控舱、主支架、云台等组成,并按照不同形式组装,在水下进行工作时可根据实际需求选择不同的扫描模式,包括搭载水下移动式平台的移动式扫描模式和搭载水下座底式平台的旋转式扫描模式。通过对被测目标进行探测,获得被测目标的声学点云和光学点云,通过获取对应的变换矩阵完成点云配对,实现声学探测图像和光学探测图像融合并成像。附录 A 给出了水下声光探测三维成像系统的示例。

5 测试要求

5.1 测试设备和设施

要求如下:

- a) 水听器:频率范围 0.1 MHz~2.5 MHz,并在标定有效期内;
- b) 浊度计:试验前利用浊度计检测水体浊度,浊度计满足 JJG 880 中计量性能要求;
- c) 标定板:选用铝制高精度漫反射标定板,不透光,反射率满足 80% 以上,黑白棋盘格样式和靶线板样式,标定板尺寸根据待测系统性能参数合理选择;
- d) 试验水池:长度不小于 30 m,宽度不小于 10 m,深度不小于 5 m,宜优先选用消声水池;
- e) 测试行车:配有回转/升降装置,用于安装待测系统和水听器,角度控制最大允许误差 $\pm 0.1^\circ$,位移控制最大允许误差 ± 0.5 cm;
- f) 搭载平台:包括水下移动式平台和水下座底式平台,其中水下移动式平台宜为中大型的无人遥控潜水器或自主水下航行器,且移动速度应满足待测系统的成像要求,保证成像质量;水下座底式平台应满足待测系统的安装、升降、回转等测试要求;搭载平台应配备待测系统正常工作所需的供电、电气及通信接口。

5.2 测试项目

水下声光探测三维成像系统的测试项目和测试方法应符合表 1 的规定。

表 1 测试项目和测试方法

测试项目		测试方法	
成像分辨力	声学成像分辨力	6.1.1	
	光学成像分辨力	6.1.2	
成像分辨率	声学成像分辨率	波束数	6.2.1.1
		波束宽度	6.2.1.2
		覆盖角宽	6.2.1.3
	光学成像分辨率	单线点云数	6.2.2.1
		激光线扫描角度	6.2.2.2
成像频率		6.3	
成像距离		6.4	
成像时间		6.5	
信噪比		6.6	
图像尺寸		6.7	
工作水深		6.8	
电磁兼容性	静电放电抗干扰度		6.9.1
	射频电磁场辐射抗扰度		6.9.2
	电快速瞬变脉冲群抗扰度		6.9.3
	浪涌(冲击)抗扰度		6.9.4
	电源波动		6.9.5
环境适应性	工作温度		6.10.1
	贮存温度		6.10.2
	湿热		6.10.3
	盐雾		6.10.4
	振动		6.10.5
	冲击和碰撞		6.10.6
系统可靠性		6.11	
现场测试		6.12	

6 测试方法

6.1 成像分辨力

6.1.1 声学成像分辨力

步骤如下：

- a) 将待测系统安装至测试行车的回转装置上,调整待测系统入水深度,使入水深度为水池深度 D_1 的一半,缓慢调整待测系统使发射换能器声轴方向与水面平行,并保持静止;

- b) 将两个目标陶瓷小球A球和B球(直径接近声学成像标称的成像分辨力指标大小,且均为 d_r)分别布放在待测系统前面,并且从俯视角度上来看使发射换能器声中心与两个小球的几何中心三点共线,在水平方向上,发射换能器声中心与两个小球的相交点距离1 m,A球的几何中心与发射换能器声中心距离为 $1-d_r/2$,B球的几何中心与发射换能器声中心距离为 $1+d_r/2$;从侧视图方向来看,A球几何中心的入水深度为 $D_s/2-d_r/2$,B球几何中心的入水深度为 $D_s/2+d_r/2$;
- c) 启动,调整显示量程,使得从俯视角度上来看,两球相交点的成像位置是当前量程 D_s 的二分之一,且发射换能器声中心与两个小球的几何中心仍保持三点共线;
- d) 固定A球,沿水平方向缓慢向远处移动B球,此时记录A球和B球在水平方向的距离为 D_{ab} ,并实时观察成像图像,如果在该图像中清晰看到斜距 $90\% \times (D_s/2-d_r)$ 至 $110\% \times (D_s/2+D_{ab})$ 范围内出现两个峰值量点,则此时的 D_{ab} 记录为成像分辨的极限距离,声学成像分辨力测试原理图见图1;
- e) 重复步骤d)2次,成像分辨力为3次测试数据的平均值。

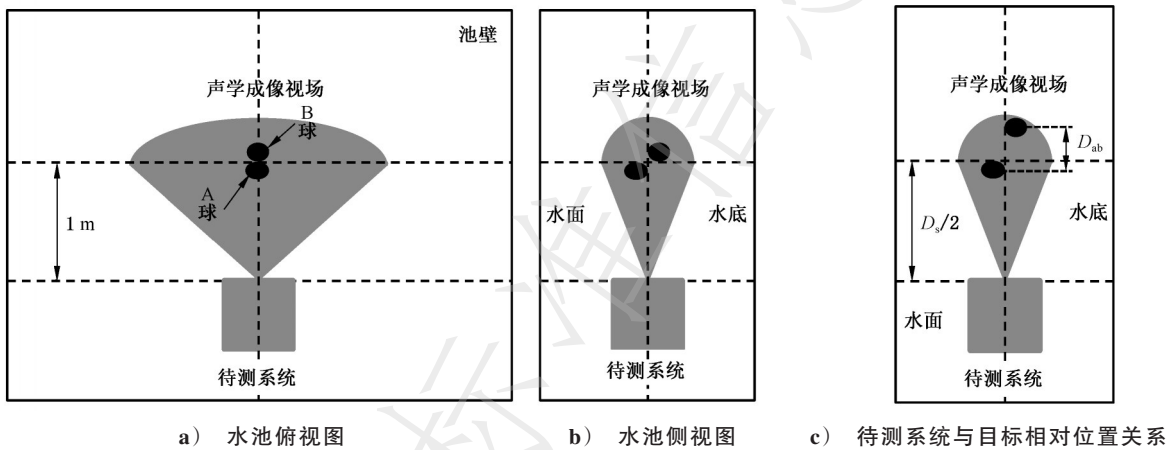


图1 声学成像分辨力测试原理图

6.1.2 光学成像分辨力

步骤如下。

- a) 扫描陶瓷球棒,扫描数据至少覆盖球面50%的区域,陶瓷球棒表面对光漫反射,扫描时可使用各种形式的标志点或标志物辅助测量。
- b) 光学成像分辨力测试原理图见图2,其两陶瓷球中心之间的距离 l_k 即为光学成像分辨力。其中, l_k 应不小于测量体积的体对角线长度的30%,陶瓷球直径应为测量体积体对角线长度的10%~20%,陶瓷球棒的形状误差应小于最大允许测量精度值的五分之一,且尺寸需经计量。当试验需测的 l_k 大于100 mm时,建议使用步距球规作为标准样件,材质和长度的要求同标准陶瓷球棒的要求。

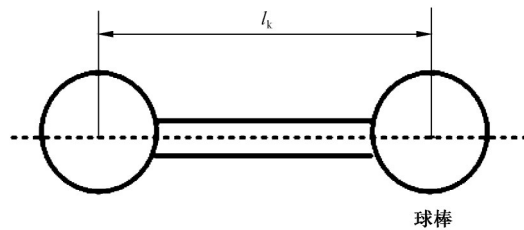


图2 光学成像分辨力测试原理图

注:待测系统的测量体积范围参数由生产企业在产品机身或说明书中规定。

6.2 成像分辨率

6.2.1 声学成像分辨率

6.2.1.1 波束数

由待测系统显控界面与存储文件判定。

6.2.1.2 波束宽度

步骤如下。

- a) 调整待测系统发射换能器扇面至水平,使水听器与待测系统处于同一深度,水平距离符合远场条件,并保持静止。
- b) 以 0.5 cm 的步进间隔升降调节水听器,采集水平波束角内对应角度位置处的开路电压,按公式(1)计算各个角度位置处的声压级:

$$SL = 20\lg e_s + 20\lg d - M_s - 120 \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中:

SL——声压级,单位为分贝(dB);

e_s ——水听器开路电压,单位为伏(V);

d ——待测系统与水听器之间的距离,单位为米(m);

M_s ——水听器自由场电压灵敏度级,单位为分贝(dB)。

- c) 按 GB/T 7965—2002 的 14.2 绘制水平波束角的极坐标指向性图,见图 3,记录从主轴两侧的最大响应下降 3 dB 时对应的两个方向间的角度,作为水平波束宽度数值。
- d) 以 0.1°的步进间隔水平调节待测系统扇面旋转,采集垂直波束角内对应角度位置处的开路电压,计算成声压级,按 GB/T 7965—2002 的 14.2 绘制垂直波束角的直角坐标指向性图,见图 4,记录从主轴两侧的最大响应下降 3 dB 时对应的两个方向间的角度,作为垂直波束角的波束宽度。

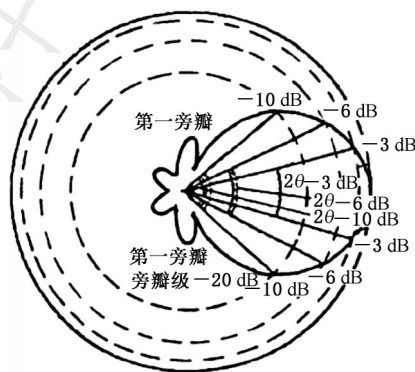


图3 极坐标指向性图

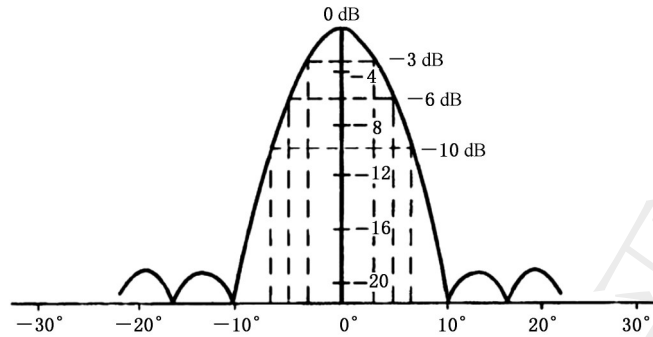


图4 直角坐标指向性图

6.2.1.3 覆盖角宽

6.2.1.3.1 水平覆盖角宽测试步骤如下。

- a) 将1根目标棒竖立放置在水中,距离试验水池池壁距离不少于1 m,目标棒应选用不锈钢、碳纤维等不易变形、耐腐蚀材质制成的圆柱体。
- b) 将待测系统安装至测试行车的回转装置上,入水深度为水池深度的一半,调整待测系统发射换能器声轴方向垂直于池壁,待测系统前端面距离目标棒1 m。
- c) 启动,调整显示量程,使得目标棒的成像位置是当前量程 D_s 的二分之一。
- d) 向右平移待测系统,显控界面中目标棒的成像应向画面左侧移动,直至消失,记录目标棒即将消失时待测系统的坐标 X_R ;随后向左平移待测系统,显控界面中目标棒的成像应向画面右侧移动,直至消失,记录目标棒即将消失时待测系统的坐标 X_L ,水平覆盖角宽测试原理图见图5;测试行车移动时应遵循先快后慢的原则,以便准确记录坐标 X_R 和 X_L ,且规定待测系统当前位置为测试坐标零点,向右平移为正;测试行车左右移动的最大距离限制一般为4 m。
- e) 重复步骤d)两次, X_R 和 X_L 取3次测试数据的平均值。
- f) 水平覆盖角宽 θ 通过公式(2)求得。

$$\theta = 2\arctan \frac{X_R - X_L}{2} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- θ ——水平覆盖角宽,单位为度($^\circ$);
- X_R ——目标棒向左移动即将消失时待测系统坐标,单位为米(m);
- X_L ——目标棒向右移动即将消失时待测系统坐标,单位为米(m)。

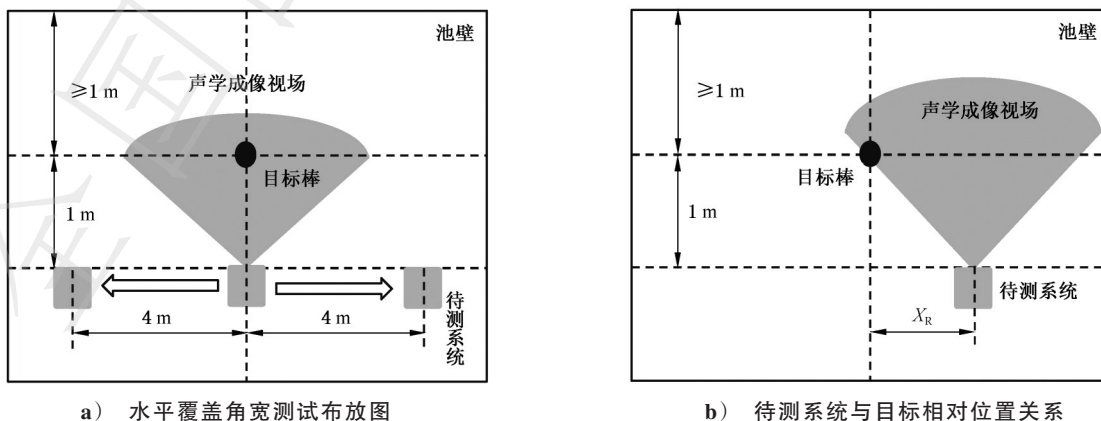


图5 水平覆盖角宽测试原理图

6.2.1.3.2 垂直覆盖角宽测试步骤如下。

- a) 将1根目标棒水平放置在水中,距离试验水池池壁距离不少于1 m。
- b) 将待测系统安装至测试行车的回转装置上,入水深度为水池深度的一半,调整待测系统发射换能器声轴方向垂直于池壁,待测系统前端面距离目标棒1 m。
- c) 启动,调整显示量程,使得目标棒的成像位置是当前量程 D_s 的二分之一。
- d) 向下平移待测系统,显控界面中目标棒的成像应向画面上方移动,直至消失,记录目标棒即将消失时待测系统的坐标 H_U ,随后向上移动待测系统,显控界面中目标棒的成像应向画面下方移动,直至消失,记录目标棒即将消失时待测系统的坐标 H_D ,垂直覆盖角宽测试原理图见图6;测试行车移动时应遵循先快后慢的原则,以便准确记录坐标 H_U 和 H_D ,且规定待测系统当前位置为测试坐标零点,向上平移为正;测试行车上下移动的最大距离限制一般为1 m。
- e) 重复步骤d)2次, H_U 和 H_D 取3次测试数据的平均值。
- f) 垂直覆盖角宽 φ 通过公式(3)求得。

$$\varphi = 2\arctan \frac{H_U - H_D}{2} \dots\dots\dots (3)$$

式中:

φ ——垂直覆盖角宽,单位为度($^\circ$);

H_U ——目标棒向下移动即将消失时待测系统坐标,单位为米(m);

H_D ——目标棒向上移动即将消失时待测系统坐标,单位为米(m)。

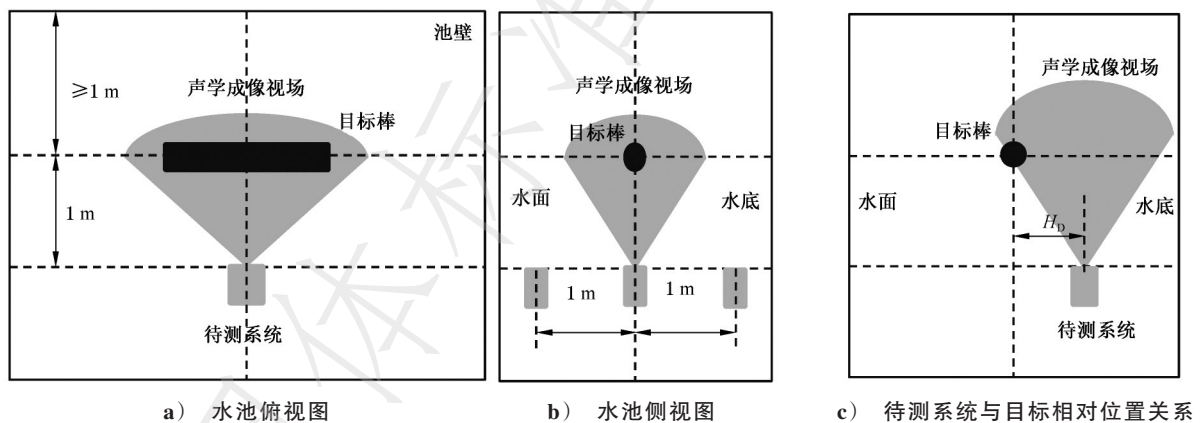


图6 垂直覆盖角宽测试原理图

6.2.2 光学成像分辨率

6.2.2.1 单线点云数

由相机像素与存储文件判定。

6.2.2.2 激光线扫描角度

步骤如下:

- a) 将待测系统固定于标定板对面,入水深度为测试水池的一半,在水池一侧布置标定板,使标定板中心与待测系统的激光发射中心位于同一水平线上,并保持静止;
- b) 启动,记录激光线束在标定板上覆盖宽度 b 的数值和待测系统最前端距离测试板距离 a 的数值,激光线扫描角度测试原理图见图7,根据公式(4)计算激光扫描角度 α 。

$$\alpha = 2\arctan \frac{b}{a} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

α ——激光扫描角度,单位为度($^{\circ}$);

a ——待测系统距离标定板距离,单位为米(m);

b ——激光线束在标定板上覆盖宽度,单位为米(m)。

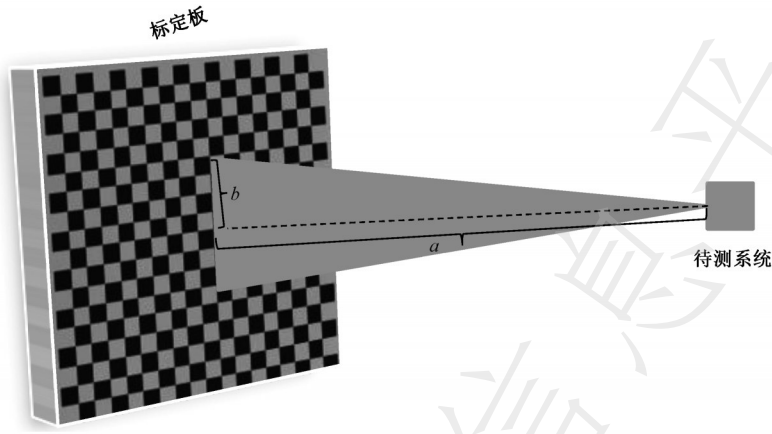


图7 激光线扫描角度测试原理图

6.3 成像频率

成像频率采用数据回放的方式来确定,统计一定时间内待测系统上传的图像帧数,按照公式(5)计算成像频率 v 。

$$v = n/t \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中：

v ——成像频率,单位为帧每秒(fps);

n ——图像帧数,单位为帧(f);

t ——时间,单位为秒(s)。

6.4 成像距离

步骤如下：

- a) 将待测系统固定于测试水池一侧,入水深度为水池深度的一半,目标物安装至测试行车升降装置底端且紧靠待测系统,调整目标物在待测系统中心线上,并保持静止;
- b) 启动,缓慢移动测试行车,使目标物沿波束或激光发射方向移动;
- c) 当目标物首次被探测到并成像时,记录此时软件里的三维点云数据,得到待测系统的最小成像距离;继续移动测试行车,直至待测系统图像无法显示目标物,记录此时软件里的三维点云数据,作为待测系统的最大成像距离,成像距离测试原理图见图8。

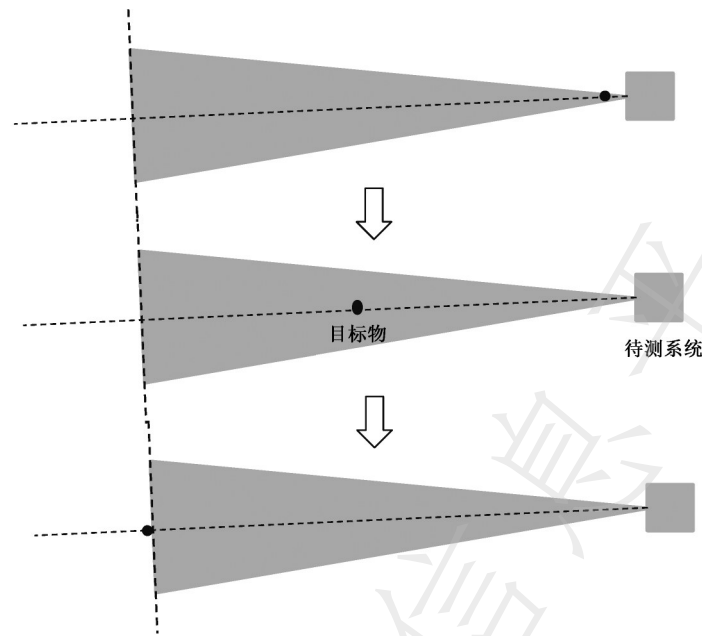


图8 成像距离测试原理图

6.5 成像时间

由待测系统显控界面与存储文件判定,包括信号接收时间、信号反馈时间等。

6.6 信噪比

按 GA/T 1128—2013 的 6.6 进行测试。

6.7 图像尺寸

按 GA/T 1128—2013 的 6.2 进行测试。

6.8 工作水深

按 GB/T 32065.15 的对待测系统进行水压测试,测试后检查外观是否变形破损,内部是否漏水,以及成像功能是否正常。

6.9 电磁兼容性

6.9.1 静电放电抗干扰度

按 GB/T 10250—2007 的第 7 章进行测试。

6.9.2 射频电磁场辐射抗扰度

按 GB/T 10250—2007 的第 7 章进行测试。

6.9.3 电快速瞬变脉冲群抗扰度

按 GB/T 10250—2007 的第 7 章进行测试。

6.9.4 浪涌(冲击)抗扰度

按 GB/T 10250—2007 的第 7 章进行测试。

6.9.5 电源波动

按 GB/T 10250—2007 的第 7 章进行测试。

6.10 环境适应性

6.10.1 工作温度

按 GB/T 32065.2 进行低温测试。按 GB/T 32065.4 进行高温测试。

6.10.2 贮存温度

按 GB/T 32065.3 进行低温贮存测试。按 GB/T 32065.5 进行高温贮存测试。

6.10.3 湿热

按 GB/T 32065.6 进行测试。

6.10.4 盐雾

按 GB/T 32065.10 进行测试。

6.10.5 振动

按 GB/T 32065.14 进行测试。

6.10.6 冲击和碰撞

按 GB/T 32065.11 进行测试。

6.11 系统可靠性

水下声光探测三维成像系统的系统可靠性测试应至少包括：

- a) 插头、通信接口等接插器是否脱落或接触不良；
- b) 使用配套软件测试通信质量,包括通信速率、延迟时间、带宽稳定性等；
- c) 通过主控软件发送控制指令,检查待测系统功能和操作是否正常；
- d) 测试过程中,数据采集和数据分析软件是否正常运行,是否出现信息丢失现象；
- e) 在动力供应正常的条件下,测试待测系统的续航时间是否满足规定要求,并同时按照 a)~d) 的要求检查待测系统长期工作过程中的稳定性,若出现故障,检查待测系统故障恢复的能力和时间内是否满足规定要求。

6.12 现场测试

要求如下：

- a) 测试前应根据所搭载平台的设备和设施情况,编制现场测试大纲,并严格遵照其内容实施；
- b) 待测系统应在搭载平台上完成固定安装和水下连接调试,如待测系统配备有补偿设备,需要组装好后再进行测试;调试完成后,使用控制系统及控制软件检查待测系统的传输性能等,若无异常,则继续测试；

- c) 测试待测系统对水下特定目标物的成像能力,检查图像的清晰度、完整性等,且宜在不同作业场景下开展对比测试;
- d) 搭载于水下移动式平台时,应测试不同移动速度下待测系统的图像采集能力,且移动速度稳定后再进行测试;如无特殊要求,移动速度可在 0.5 m/s、1.0 m/s、1.5 m/s、2.0 m/s、2.5 m/s、3.0 m/s 中选取,最大允许误差 ± 0.1 m/s。

7 测试过程中异常情况处理

在测试过程中,如出现下列情况之一,应立即暂停测试,排查故障,修复后选择继续测试、重新测试或终止测试:

- a) 停电;
- b) 测试设备与仪器仪表发生故障;
- c) 某种外界干扰使测试数据出现明显异常;
- d) 测试结果超出试验委托方规定的允许值;
- e) 待测系统发生异常响声或损坏等。

8 测试报告

测试报告应至少包括以下内容:

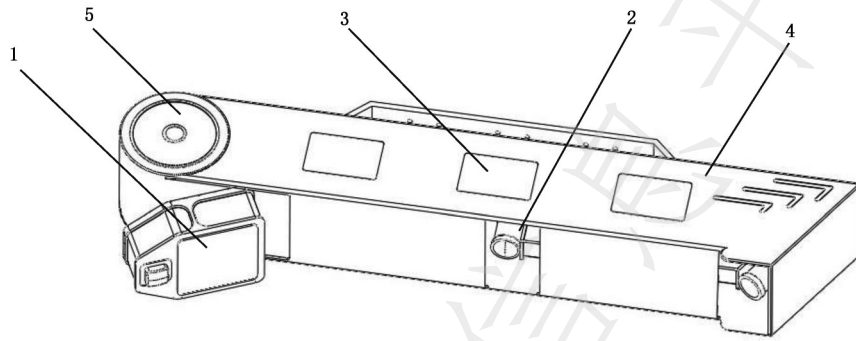
- a) 待测系统信息;
- b) 测试项目和测试依据;
- c) 测试地点和测试日期;
- d) 测试设备和设施;
- e) 测试环境;
- f) 测试结果,可参照附录 B 表 B.1 进行记录。

附录 A

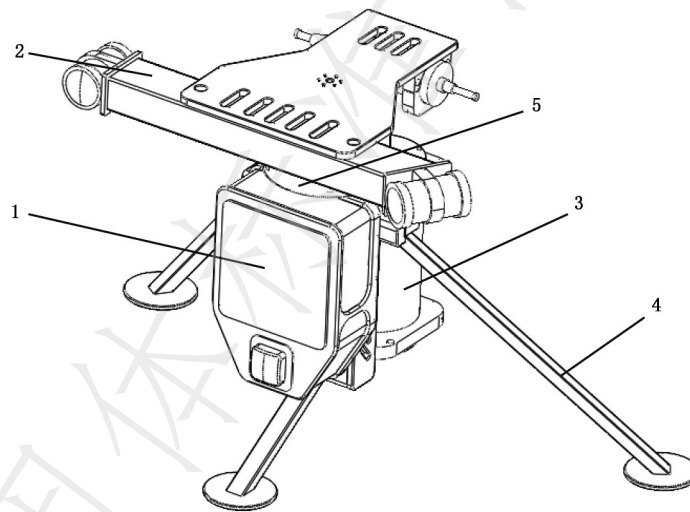
(资料性)

水下声光探测三维成像系统示例

水下声光探测三维成像系统示例见图 A.1。



a) 搭载水下移动式平台的移动式水下声光探测三维成像系统



b) 搭载水下座底式平台的旋转式水下声光探测三维成像系统

标引序号说明：

- 1——声学成像单元；
- 2——光学成像单元；
- 3——主控舱；
- 4——主支架；
- 5——云台。

图 A.1 水下声光探测三维成像系统示例图

附录 B
(资料性)
测试结果记录表

水下声光探测三维成像系统性能测试结果记录表见表B.1。

表 B.1 水下声光探测三维成像系统性能测试结果记录表

待测系统信息	待测系统名称			
	待测系统编号			
	型号/规格			
	扫描模式			
测试依据				
测试日期				
测试地点				
测试环境				
测试设备和设施				
测试项目			测试结果	
成像分辨率	声学成像分辨率(m)			
	光学成像分辨率(m)			
成像分辨率	波束数			
	波束宽度(°)			
	覆盖角宽	水平覆盖角宽(°)		
		垂直覆盖角宽(°)		
	单线点云数			
激光线扫描角度(°)				
成像频率(fps)				
成像距离(m)				
成像时间(s)				
信噪比(dB)				
图像尺寸(pixel)				
工作水深(m)				

检测员：_____

核验员：_____

参 考 文 献

- [1] GB/T 2423.1 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验A:低温
 - [2] GB/T 2423.2 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验B:高温
 - [3] GB/T 2423.3 环境试验 第2部分:试验方法 试验Cab:恒定湿热试验
 - [4] GB/T 2423.5 环境试验 第2部分:试验方法 试验Ea和导则:冲击
 - [5] GB/T 2423.10 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验Fc和导则:振动(正弦)
 - [6] GB/T 2423.17 电工电子产品环境试验 第2部分:试验方法 试验Ka:盐雾
 - [7] JJF 1951 基于结构光扫描的光学三维测量系统校准规范
 - [8] JJG(交通)183 二维扫描成像声呐
 - [9] SJ/T 11886 结构光手持式三维扫描仪
 - [10] T/CDSA 600.4 便携式多波束成像声呐制造和检验验收通用规范
-

中国海洋工程咨询协会
团体标准
水下声光探测三维成像系统性能
测试方法

T/CAOE 83—2025

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

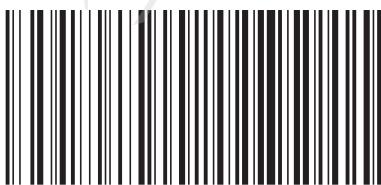
*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 29 千字
2025年6月第1版 2025年6月第1次印刷

*

书号:155066·5-14200 定价 43.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权所有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



T/CAOE 83—2025