**《水下声速仪校准规范（激光干涉法）》**

**实验报告**

规范编制组

二〇二五年五月二十日

## 1 实验目的

为验证《水下声速仪校准规范（激光干涉法）》中规定的技术指标是否满足计量特性要求，验证校准条件和校准方法是否科学合理，是否能够完全覆盖计量性能要求中设计参数的测量范围。

## 2 实验条件

### 2.1 时间地点

实验时间：2025年5月，实验地点：中国计量科学研究院昌平院区17#。

### 2.2 环境条件

环境温度：（21.0）℃，空气相对湿度：（56) %。

### 2.3 实验样品与校准装置

实验样品：海卓同创生产的SVS1500型水下声速仪。

校准装置的主要仪器包括：

* 恒温水槽，湖州唯立仪表厂，定制
* 发射与接收换能器，OLYMPUS，V303-SU
* 信号发生器，是德科技，33511B
* 数字示波器，泰克，DPO 4334B
* 双光束激光干涉仪，哈尔滨工业大学，定制
* 时间间隔测量模块，中国计量科学研究院，自研（推荐采用TDC-GP22计时芯片实现）

## 3 计量特性

### 3.1 声速示值误差

水下声速仪的声速示值误差通常在±10 m/s内。

### 3.2 声速示值重复性

水下声速仪的声速示值重复性一般应小于0.1 m/s。

## 4 实验项目及方法

### 4.1 实验项目

本次实验用于校准水下声速仪（海卓同创的SVS1500）的示值误差。

### 4.2 实验方法

根据《水下声速仪校准规范（激光干涉法）》中规定的方法开展校准实验。

4.2.1 实验前的准备

（1）确认水下声速仪工作正常，声速值能正常反馈，对于自容式水下声速仪能保证连续工作1小时以上，且设备时间应与校准系统时间同步。图1为待校准的水下声速仪实物图。



图1 待校准的水下声速仪

（2）将发射与接收换能器按规范要求安装在恒温水槽中心区域，其中与接收换能器连接的夹具上端连接平面反射镜；

（3）调节双光束激光干涉仪光路，使激光光束与换能器声束共线，且光束垂直入射到反射镜面并原路返回至双光束激光干涉仪。

（4）连接信号发生器、时间间隔测量模块、数字示波器等仪器设备，使其处于待工作状态。

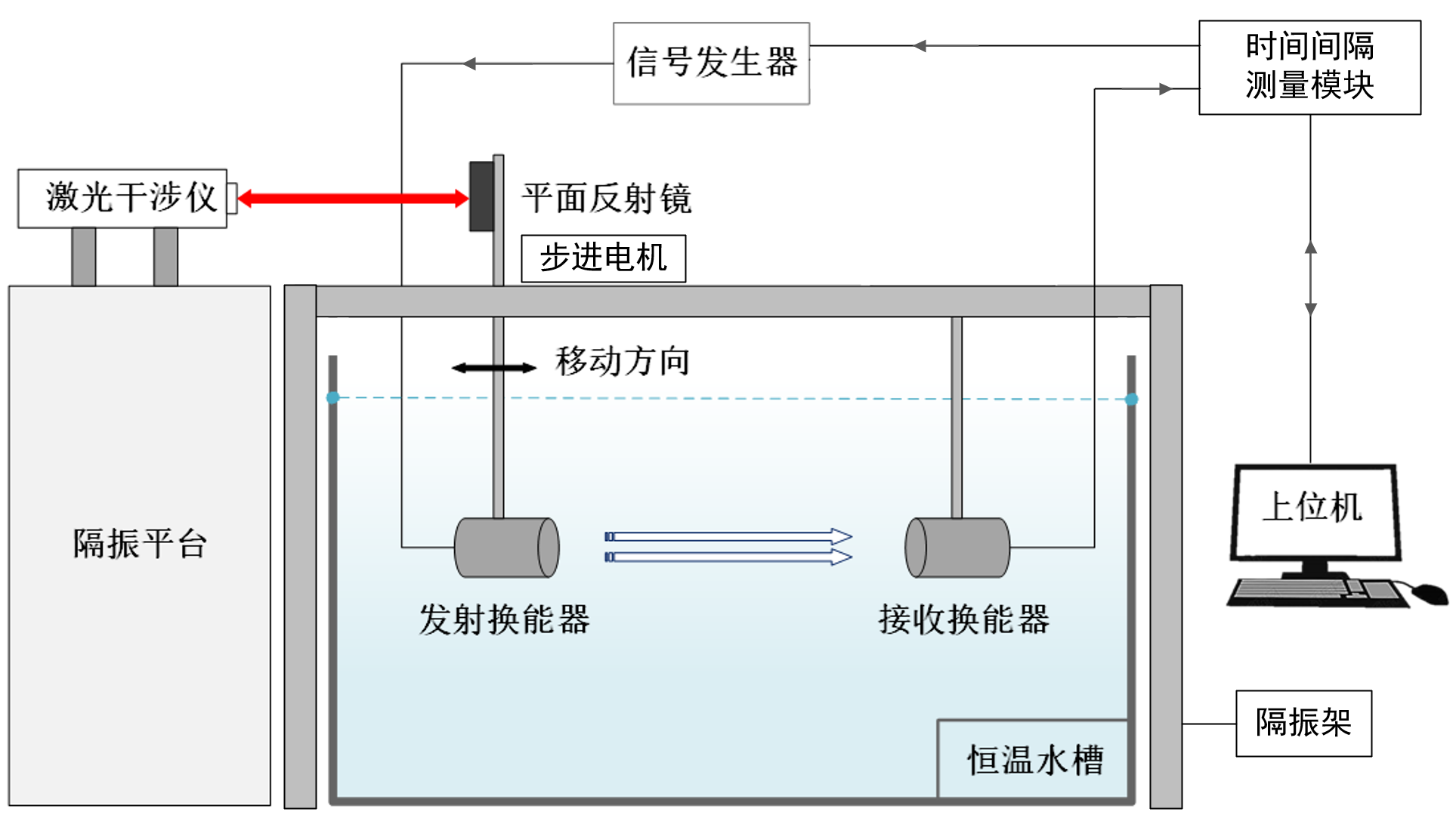


图2 激光干涉法水下声速仪校准装置结构图

4.2.2 实验步骤

（1）按照图2连接各仪器设备，开启所有仪器设备及被校水下声速仪，预热15 min，并设置各仪器设备参数；

（2）设定恒温水槽的温度值，并开始控温，对两个换能器间有效工作区域的水温进行实时测量，等待水温度平衡，直至有效工作区域内水温变化在±0.005 ℃内；

（3）利用时间间隔测量模块控制触发信号发生器，激励发射换能器在水下发射固定频率（如1 MHz）的脉冲调制正弦信号，脉冲个数以直达波与反射波不发生叠加为宜，通常周期数可设置为15~20；

（4）接收换能器采集声波信号至时间间隔测量模块，测得声波在水中传播的时间间隔为；

（5）利用双光束激光干涉仪测量干涉仪到平面反射镜之间的距离，记为；

（6）保持发射换能器位置不变，沿声束方向移动接收换能器的距离，并等待水温平衡；

（7）与步骤（4-5）相同，分别测量当前状态下声波在水中传播的时间间隔为及双光束激光干涉仪与平面反射镜之间的距离；

（8）利用式计算当前温度下，两个换能器之间的标准声速值；

（9）将待校水下声速仪置于水中，声速测量部分位于发射换能器和接收换能器声轴线的中间，等待温度平衡；

（10）读取声速仪的输出声速示值，利用式得到声速示值平均值，并利用式计算声速示值重复性，其中为测量次数，建议其值应不小于6；

（11）利用式计算水下声速仪的声速示值误差；

（12）在(2~40) °C范围内，改变恒温水槽温度，重复上述步骤（2~11），得到水下声速仪在不同声速点的声速示值误差与重复性；

（13）存储数据，关闭仪器设备，校准结束。

## 5 实验结果与分析

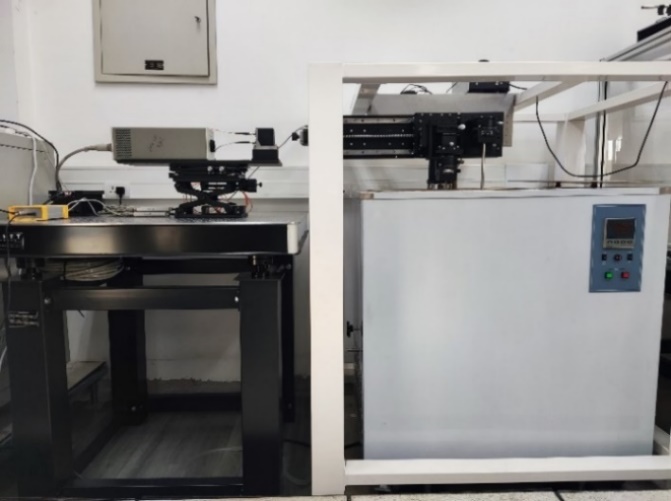
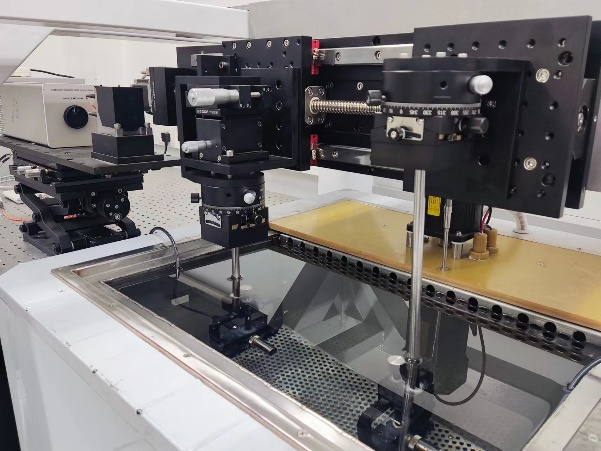
 

图3 水下声速仪校准装置（激光干涉法）

实验装置实物见图3，表1~表6分别给出不同温度下、恒温水槽中分别填充纯水和海水时对水下声速仪的校准结果。

表1 纯水中声速测量及声速仪校准结果（温度设置3℃）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 水中温度  (℃) | 声程差  (mm) | 时间差  (μs) | 标称声速  (m/s) | 声速仪声速示值  平均值(m/s) | 声速示值误差  (m/s) |
| 1 | 3.032 | 49.9876 | 35.2888 | 1416.529 | 1416.603 | 0.074 |
| 2 | 3.036 | 49.9872 | 35.2893 | 1416.496 | 1416.532 | 0.036 |
| 3 | 3.030 | 49.9872 | 35.2891 | 1416.504 | 1416.574 | 0.070 |
| 4 | 3.033 | 49.9873 | 35.2888 | 1416.519 | 1416.482 | -0.037 |
| 5 | 3.032 | 49.9872 | 35.2880 | 1416.551 | 1416.578 | 0.027 |
| 6 | 3.035 | 49.9867 | 35.2886 | 1416.510 | 1416.562 | 0.052 |
| 平均值 | 3.033 | 49.9872 | 35.2888 | 1416.518 | 1416.555 | 0.037 |
| 标准差 | 0.0022 | 0.0003 | 0.0005 | 0.0195 | 0.0427 | 0.0405 |

表2 纯水中声速测量及声速仪校准结果（温度设置20℃）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 水中温度  (℃) | 声程差  (mm) | 时间差  (μs) | 标称声速  (m/s) | 声速仪声速示值  平均值(m/s) | 声速示值误差  (m/s) |
| 1 | 19.964 | 49.9886 | 33.7502 | 1481.133 | 1481.188 | 0.055 |
| 2 | 19.966 | 49.9880 | 33.7508 | 1481.091 | 1481.198 | 0.107 |
| 3 | 19.962 | 49.9880 | 33.7511 | 1481.077 | 1481.125 | 0.048 |
| 4 | 19.968 | 49.9879 | 33.7502 | 1481.114 | 1481.073 | -0.041 |
| 5 | 19.962 | 49.9886 | 33.7502 | 1481.135 | 1481.088 | -0.047 |
| 6 | 19.961 | 49.9883 | 33.7506 | 1481.106 | 1481.129 | 0.023 |
| 平均值 | 19.964 | 49.9882 | 33.7505 | 1481.109 | 1481.134 | 0.024 |
| 标准差 | 0.0027 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0229 | 0.0509 | 0.0596 |

表3 纯水中声速测量及声速仪校准结果（温度设置40℃）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 水中温度  (℃) | 声程差  (mm) | 时间差  (μs) | 标称声速  (m/s) | 声速仪声速示值  平均值(m/s) | 声速示值误差  (m/s) |
| 1 | 39.917 | 49.9882 | 32.7212 | 1527.704 | 1527.628 | -0.076 |
| 2 | 39.919 | 49.9883 | 32.7216 | 1527.685 | 1527.597 | -0.088 |
| 3 | 39.914 | 49.9877 | 32.7209 | 1527.701 | 1527.673 | -0.028 |
| 4 | 39.913 | 49.9885 | 32.7208 | 1527.727 | 1527.683 | -0.044 |
| 5 | 39.916 | 49.9880 | 32.7207 | 1527.716 | 1527.679 | -0.037 |
| 6 | 39.917 | 49.9883 | 32.7215 | 1527.690 | 1527.742 | 0.052 |
| 平均值 | 39.916 | 49.9882 | 32.7211 | 1527.704 | 1527.667 | -0.037 |
| 标准差 | 0.0022 | 0.0003 | 0.0004 | 0.0157 | 0.0500 | 0.0493 |

表4 海水中声速测量及声速仪校准结果（温度设置3℃）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 水中温度  (℃) | 声程差  (mm) | 时间差  (μs) | 标称声速  (m/s) | 声速仪声速示值  平均值(m/s) | 声速示值误差  (m/s) |
| 1 | 3.027 | 49.9891 | 34.1855 | 1462.289 | 1462.399 | 0.110 |
| 2 | 3.029 | 49.9894 | 34.1852 | 1462.314 | 1462.422 | 0.108 |
| 3 | 3.205 | 49.9889 | 34.1848 | 1462.311 | 1462.384 | 0.073 |
| 4 | 3.026 | 49.9891 | 34.1852 | 1462.304 | 1462.352 | 0.048 |
| 5 | 3.028 | 49.9888 | 34.1854 | 1462.286 | 1462.278 | -0.008 |
| 6 | 3.024 | 49.9892 | 34.1843 | 1462.341 | 1462.362 | 0.021 |
| 平均值 | 3.057 | 49.9891 | 34.1851 | 1462.307 | 1462.366 | 0.059 |
| 标准差 | 0.0728 | 0.0002 | 0.0004 | 0.0200 | 0.0500 | 0.0473 |

表5 海水中声速测量及声速仪校准结果（温度设置20℃）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 水中温度  (℃) | 声程差  (mm) | 时间差  (μs) | 标称声速  (m/s) | 声速仪声速示值  平均值(m/s) | 声速示值误差  (m/s) |
| 1 | 19.963 | 49.9840 | 32.8733 | 1520.504 | 1520.611 | 0.107 |
| 2 | 19.965 | 49.9838 | 32.8723 | 1520.544 | 1520.477 | -0.067 |
| 3 | 19.964 | 49.9837 | 32.8727 | 1520.524 | 1520.493 | -0.031 |
| 4 | 19.967 | 49.9841 | 32.8731 | 1520.516 | 1520.583 | 0.067 |
| 5 | 19.965 | 49.9834 | 32.8718 | 1520.555 | 1520.579 | 0.024 |
| 6 | 19.961 | 49.9840 | 32.8727 | 1520.534 | 1520.509 | -0.025 |
| 平均值 | 19.964 | 49.9839 | 32.8727 | 1520.529 | 1520.542 | 0.013 |
| 标准差 | 0.0020 | 0.0003 | 0.0005 | 0.0188 | 0.0557 | 0.0658 |

表6 海水中声速测量及声速仪校准结果（温度设置40℃）

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次数 | 水中温度  (℃) | 声程差  (mm) | 时间差  (μs) | 标称声速  (m/s) | 声速仪声速示值  平均值(m/s) | 声速示值误差  (m/s) |
| 1 | 39.921 | 49.9889 | 31.9584 | 1564.184 | 1564.228 | 0.044 |
| 2 | 39.924 | 49.9888 | 31.9578 | 1564.214 | 1564.187 | -0.027 |
| 3 | 39.918 | 49.9883 | 31.9572 | 1564.229 | 1564.173 | -0.056 |
| 4 | 39.923 | 49.9884 | 31.9577 | 1564.206 | 1564.283 | 0.077 |
| 5 | 39.920 | 49.9889 | 31.9574 | 1564.233 | 1564.179 | -0.054 |
| 6 | 39.922 | 49.9889 | 31.9572 | 1564.247 | 1564.289 | 0.042 |
| 平均值 | 39.921 | 49.9887 | 31.9576 | 1564.219 | 1564.223 | 0.004 |
| 标准差 | 0.0022 | 0.0003 | 0.0005 | 0.0222 | 0.0524 | 0.0570 |

从上述实验结果可以得出，水下声速仪校准的声速示值误差的标准偏差最大为0.0658（对应20℃的海水介质），小于声速仪示值误差的扩展不确定度0.12 m/s (*k*=2)，测量结果在不确定度的偏差范围内，满足对应校准规范的计量性能要求。

## 6 结论

根据上述实验结果及分析可得，《水下声速仪校准规范（激光干涉法）》的计量特性要求和校准方法科学合理，相关单位可根据本实验报告内容进一步验证计量性能的可靠性。