**《水下声速仪校准规范（激光干涉法）》**

**测量不确定度评定**

**水下声速仪校准规范（激光干涉法）编制组**

**2025年5月**

**《水下声速仪校准规范（激光干涉法）》**

**测量不确定度评定报告**

## 1 概述

激光干涉法水下声速仪声速示值误差校准的测量不确定度评定依据JJF 1059.1—2012中的规定实施，以20 ℃对应的海水声速1520.542 m/s为例，说明声速示值误差校准的测量不确定度评定过程。

## 2 测量不确定度评定

**2.1 测量模型**

考虑校准过程中水温变化对声速示值误差的影响，将声速示值误差计算式重写为

 (1)

式中：

——被校水下声速仪在恒温水槽中输出声速示值的平均值，m/s；

——换能器移动前后发射接收换能器间的距离之差，m；

——换能器移动前后声波在水下传播时间间隔之差，s；

——温度变化引起的声速变化系数，m/(s∙℃)；

——校准过程中恒温水槽工作区内水温变化量，℃。

由上式计算偏导可得，水下声速仪声速示误差值测量不确定度各分量的灵敏系数为

 (2)

 (3)

 (4)

 (5)

依据上述可得，影响声速测量的不确定度来源主要包括测量重复性、距离测量和声波传播时间间隔测量、水槽内温度变化等。其中，距离测量的不确定度来源包括双光束干涉仪的波长稳定度、空气折射率测量误差、测量光束与声束对准误差（即余弦误差）；声波传播时间间隔测量的测量不确定度来源包括时间间隔测量误差、换能器衍射效应、两换能器对准误差等。

**2.2 相对标准不确定度评定**

2.2.1 测量重复性引入的不确定度分量

在相同测量条件下对水下声速值和声速仪示值进行重复测量，采用贝塞尔公式计算声速示值误差测量的标准偏差

 (6)

式中：

——声速示值误差的标准偏差，m/s；

——第次测量的声速示值误差，m/s；

——声速示值误差的平均值，m/s；

——测量次数。

2.2.2 双光束干涉仪波长稳定度引入的不确定度分量

所用激光器的波长稳定度优于10-8，服从均匀分布，由波长稳定度引入的不确定度分量，基本可忽略不计，且与水温无关。

2.2.3 空气折射率测量误差引入的不确定度分量

空气折射率是双光束激光干涉仪测量的输入参数，空气折射率通过Rueger经验公式计算，与空气温度、压力、水气压、二氧化碳含量等有关，参考文献中的测量误差和数据，空气折射率测量误差小于0.66 ppm，服从正态分布，且与槽内水温无关，因此空气折射率测量误差引入的不确定度分量。

2.2.4 测量光束与声束对准误差（余弦误差）引入的不确定度分量

为减小测量光束与声束的对准误差，采用了激光器与声场扫描设备辅助对准的方式，经测量分析，光束与声束的夹角不大于±0.2°，引入的位移测量相对偏差为6.09 ppm，服从正态分布，且与槽内水温无关，因此由测量光束与声束对准误差引入的不确定度分量。

2.2.5 时间间隔测量误差引入的不确定度分量

利用标准信号发生器对间间隔测量模块进行重复性测量，得到最大相对标准偏差为9.85 ppm，服从正态分布，且与槽内水温无关，因此由时间间隔测量误差引入的不确定度分量。

2.2.6 换能器衍射效应引入的不确定度分量

根据对换能器衍射效应研究及误差分析，修正后对声波飞行时间测量的影响不超过10 ppm，与水槽内温度相关，取其最大值10 ppm计算，服从均匀分布，因此由换能器衍射效应引入的不确定度分量。

2.2.7 两换能器对准误差引入的不确定度分量

发射和接收换能器的对准通过定位机构和寻找信号最大值实现，假设对准时换能器分别在yz方向偏离中心±0.3 mm，当测量距离为100 mm时，由对准偏离引入的相对误差为4.50 ppm，服从正态分布，且与槽内水温无关，因此由两换能器对准误差引入的不确定度分量ppm。

2.2.8 水槽中水介质温度波动引入的不确定度分量

经测试，恒温水槽中工作区域的温度变化量和分布均匀度都在±5 mK内，依据经验公式，每摄氏度引起的海水声速变化量最大为4.6 m/s，利用20 ℃对应声速测量的平均值，计算水槽内温度变化引入的声速相对变化量为，服从均匀分布，ppm。

2.2.9 数值修约引入的不确定度分量

水下声速仪声速示值误差校准的修约间隔为0.001 m/s，服从均匀分布，半区间宽度为0.0005 m/s，故数据修约引入的相对标准不确定度分量ppm。

**2.3 合成相对标准不确定度**

声速示值误差校准的测量不确定度来源及数值汇总见表1。

表1 声速示值误差校准的相对标准不确定度一览表

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 不确定度的来源 | 符号 | 数值/ppm |
| 1 | 测量重复性 |  | 36.65 |
| 2 | 双光束干涉仪波长稳定度 |  | 0.01 |
| 3 | 空气折射率测量误差 |  | 0.33 |
| 4 | 测量光束与声束对准误差 |  | 3.05 |
| 5 | 时间间隔测量误差 |  | 4.93 |
| 6 | 换能器衍射效应 |  | 5.77 |
| 7 | 两换能器对准误差 |  | 2.25 |
| 8 | 水槽中水介质温度波动 |  | 8.74 |
| 9 | 数据修约 |  | 0.33 |

因上述各相对标准不确定度分量互不相关，故声速示值误差的合成相对标准不确定度为：

ppm (7)

将声速平均值1520.542 m/s代入上式可得声速示值误差的合成标准不确定度为0.059 m/s。

**2.4 扩展不确定度**

取包含因子*k*=2，则声速示值误差的扩展不确定度：

 (8)

取为0.12 m/s (*k*=2)。