

# 一种可以自动校正的水下声学测深仪

权冉冉

(中交天津港湾工程研究院有限公司)

**摘要:** 声波在不同的介质中传播速度不一样,而成品声学测距仪是把声波的传播速度作为一个固定值刻画到仪器中。为解决此因素引起的声学测距仪测量误差较大的问题,设计了一种可以自动校正的水下声学测深仪,包括多台校正测深仪和实测测深仪。自动校正的水下声学测深仪,校正测深仪的测距观测值与校正测深仪与挡板间的距离之间通过线性拟合的方式建立联系,求得修正系数,进而实时校正实测测深仪的观测值,提高测深仪测距的精度。该声学测深仪可用于不同水体的水下声学测深,且可以实时自动校正测深结果,提高测量精度。

**关键词:** 自动校正;水下;声学;测深仪

## 1 研究背景

超声波测深仪是一种适用于江河湖泊、水库航道、港口码头、沿海、深海的水下断面和水下地形测量以及导航、水下物探等诸多水域的水深测量仪器<sup>[1]</sup>。超声波测深仪(ultrasonic wave detector)是一种非接触的测量仪器,是根据超声波能在均匀介质中匀速直线传播,遇不同介质面产生反射的原理设计而成。具有其他测量仪器没有的优点,其结构框架简单,体积较小,仪器价格较低,通讯简单,易处理,更易于集成加工。因此超声波测深仪的应用范围越来越广,也越来越受到重视。采用超声波测深仪测深时,将超声波换能器放置于水下一定位置,其到水底的深度可以根据超声波在水中的传播速度和超声波信号发射出去到接收回来的时间间隔计算出来。

声波在水中的传播速度随着介质的不同而发生变化,并非是一个固定常量,一般需要通过大量的试验数据测定分析计算得到声波在某介质的传播速度。成品声学测距仪是把声波的传播速度作为一个固定值刻画到仪器中,导致声学测距仪测量误差会加大。为了提高声学测距仪的观测精度,本文提出了一种可以自动校正的水下声学测深仪,适合各种水体,能够实时校正测深仪的观测值,提高测深仪的观测精度,利用辅助校正测深仪来校正实际工作测深仪,从而提高实际测深仪测量精度,已在夸平船上安装并试验,其精度得到了很好地提高。

## 2 测深仪工作原理

超声波测深的基本过程是探头发射超声波,

超声波在介质中传播,当其碰到被测目标后,超声波被反射回来,探头接收到反射回来的超声波后,通过硬件与软件处理计算出探头发射超声波到探头接收到反射回来的超声波的时长。那么被测目标到探头的距离就等于超声波的速度乘以该时长的 $1/2$ <sup>[2]</sup>。其公式如下:

$$L = \frac{1}{2}ct \quad (1)$$

式中: $L$ 为被测目标到探头的距离, m;  $c$ 为超声波在介质中传播的声速, m/s;  $t$ 为超声波从探头到被测目标再到探头的传播时长, s。

式(1)中超声波在介质中传播的声速 $c$ 与介质的体积弹性模量及密度均有关,而体积弹性模量和密度随温度、盐度及静水压力变化而变化。时间 $t$ 是仪器测量得到的,一旦超声波在介质中传播的声速 $c$ 、时间 $t$ 确定后,通过计算即可得到探头到被测目标水底的距离<sup>[3]</sup>。

由于声波在传播过程中受海水的温度、盐份等影响,在不同的时间、地点声波的传播速度均不同,不能得到准确数值。在实际生产中,通常用平均传播速度 $c_m$ 替代,则:

$$L = \frac{1}{2}c_m(t_r - t_t) \quad (2)$$

式中: $t_t$ 和 $t_r$ 分别表示探头发射声波和探头接收到反射回来的声波的瞬间时刻, s;  $c_m$ 为超声波在介质中传播的平均声速, m/s。

测深仪是一种应用测深原理测量水深的仪器。安装在船上的换能器向水底辐射声脉冲,水底界面将其反射,测定水底反射波到达换能器的时间 $t$

就可以确定水深。测深仪根据其工作原理、基本结构，通常可以划分为4部分：发射系统，发射、接收换能器，接收系统，监控终端等。

测深仪监控终端的脉冲触发器以脉冲重复频率产生触发脉冲，控制计时器计时和发射系统工作。发射系统产生具有一定功率和宽度的电脉冲送到发射换能器。发射换能器将电脉冲转换为超声波脉冲并发射出去，到达待测目标海底后，被待测目标海底反射回来然后被接收换能器接收，接收换能器将超声波脉冲转换为电信号送到接收系统。在超声波脉冲传播的过程中，声能经过往返的传播衰减和介质吸收，实际回到换能器的声能很微弱而且混杂着噪声。接收系统要将所有的回波信号从噪声背景中检测出来，并将其进行放大、变换等处理，再将其传送到监控终端。监控终端能自动地将发射信号之间的时间差值计算成水深值，并进行记录保存或者显示。测深仪的工作原理见图1。

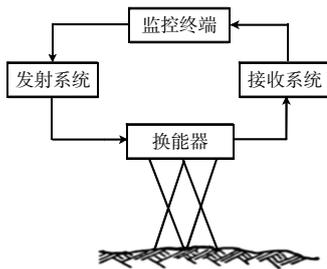


图1 测深仪工作原理图

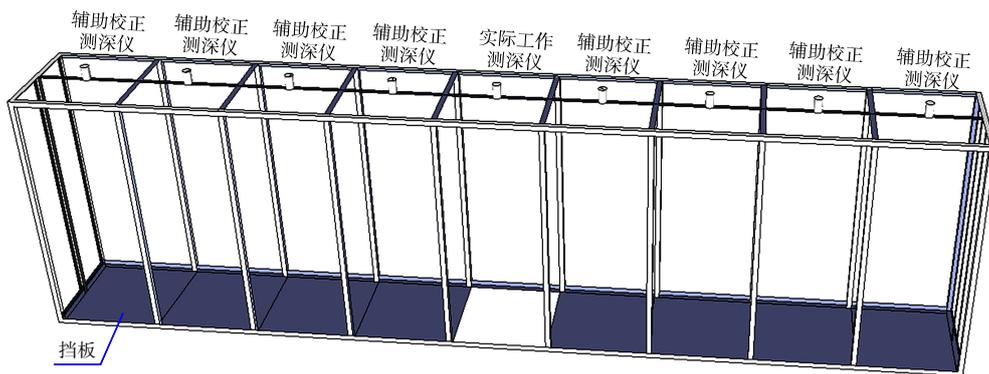


图2 系统框架设计图

各测深仪之间的安装间距满足式(3)：

$$S=H\tan\theta \quad (3)$$

式中： $S$ 为测深仪间的最小间距， $m$ ； $H$ 为测深仪探头与其对应的挡板之间的距离， $m$ ； $\theta$ 为测深仪的波束角，弧度。

挡板大小的最小值为 $2S$ ，挡板优选为正方

### 3 框架设计

本文介绍了一种可以自动校正的水下声学测深仪系统，该系统包括用于测量水深的实际工作测深仪、用于提供校正数据的多个辅助校正测深仪、用于安装这些辅助校正测深仪和实际工作测深仪的框架基础、以及用于接收和处理所有实际工作测深仪和辅助校正测深仪数据的数据处理单元。

在本系统中，实际工作测深仪的数量为1个，辅助校正测深仪的数量为8个(根据振锤的大小确定其数量)。框架基础为矩形框架结构，包括9个并排设置的子框架单元。实际工作测深仪安装在框架基础中心位置的子框架单元顶部，该中心位置的子框架单元两侧的其余8个子框架单元顶部分别安装1个辅助校正测深仪，并且在这8个子框架单元的底部分别安装挡板，每个辅助校正测深仪与其底部对应挡板之间的距离为固定的设定值，本示例中优选为5m。

实际工作测深仪和8个辅助校正测深仪均与数据处理单元连接，由数据处理单元根据8个辅助校正测深仪提供的检测数据对实际工作测深仪的检测数据进行校正。

系统框架设计图见图2，实际工作测深仪安装在中间第5个安装位上，两侧分别安装4个辅助校正测深仪，辅助校正测深仪下方5m处安装正方形挡板。

形，其正中心与其上方辅助校正测深仪的探头在同一条铅垂线上。

### 4 校正原理

这种自动校正水下声学测深仪系统的校正原理是将搭载实际工作测深仪和8个辅助校正测深仪的框架基础置于水中，通过数据处理单元实时

采集实际工作测深仪和 8 个辅助校正测深仪的检测数据。数据处理单元根据各辅助校正测深仪的检测数据(即辅助校正测深仪检测的到挡板的距离值)和辅助校正测深仪到其对应的挡板之间的真实距离(需提前设定,本示例中为 5 m),计算出各辅助校正测深仪的校正系数,计算公式为:

$$\Delta D' = k \Delta D \quad (4)$$

式中:  $k$  为校正系数;  $\Delta D'$  为辅助校正测深仪的检测值(优选为多次检测的平均值  $\Delta D'$ ), m;  $\Delta D$  为辅助校正测深仪到挡板的真实距离, m。

计算获取各辅助校正测深仪的校正系数后,用这些校正系数去校正实际工作测深仪的检测值,校正流程图见图 3,其校正公式为:

$$D' = \left( \frac{1}{20} k_1 + \frac{2}{20} k_2 + \frac{3}{20} k_3 + \frac{4}{20} k_4 + \frac{4}{20} k_6 + \frac{3}{20} k_7 + \frac{2}{20} k_8 + \frac{1}{20} k_9 \right) \times D \quad (5)$$

式中:  $D'$  为修正后的实际工作测深仪的检测值, m;  $D$  为实际工作测深仪的检测值, m;  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 、 $k_6$ 、 $k_7$ 、 $k_8$ 、 $k_9$  分别为 8 台辅助校正测深仪的校正系数。

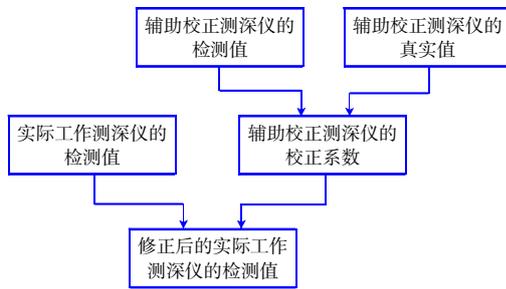


图 3 校正流程图

### 5 现场试验

为了验证这种可自动校正的水下声学测深仪系统的精度,将仪器安装在夯平船上进行测试试验。该测试试验选择水深分别是 6 m 左右、11 m 左右、15 m 左右的 3 处水域作为试验场地。

夯平船到达试验场地固定后,先用水坨测量得到甲板面到海底的高度,水深等于甲板面到海底的高度减去杆舷值(甲板面到水面的高度),这个水深作为真值与其他测量结果进行对比。

水坨测量完成后,开启水下声学测深仪系统,记录校正后的实际工作测深仪的测深结果和未校正的实际工作测深仪的测深结果。可知:

$$H_{\text{校正水深}} = H_{\text{校正测深仪}} + \Delta H - H_{\text{杆舷}} \quad (6)$$

式中:  $H_{\text{校正水深}}$  为校正后的实际工作测深仪测量的

水深, m;  $H_{\text{校正测深仪}}$  为校正后的实际工作测深仪测量结果, m;  $\Delta H$  为实际工作测深仪探头到甲板面的高差,可在安装自动校正水下声学测深仪系统时测量获取, m;  $H_{\text{杆舷}}$  为甲板面到水面的高度, m。

$$H_{\text{未校正水深}} = H_{\text{未校正测深仪}} + \Delta H - H_{\text{杆舷}} \quad (7)$$

式中:  $H_{\text{未校正水深}}$  为未校正的实际工作测深仪测量的水深, m;  $H_{\text{未校正测深仪}}$  为未校正的实际工作测深仪测量结果, m。

每组试验中自动校正水下声学测深仪系统的测量结果和未校正的实际工作测深仪的测量结果各取了 5 组,由于水坨测量 3 次,取平均值作为水坨测量结果。在 6 m 左右的水深处,自动校正水下声学测深仪系统测量的水深与水坨测量的水深对比结果如表 1 所示。

表 1 自动校正水下声学测深仪系统测量结果与水坨测量结果对比表

序号	自动校正水下声学测深仪系统测量结果/m	水坨测量结果/m	偏差绝对值/m
1	6.201 0	6.135	0.066 0
2	6.198 0	6.135	0.063 0
3	6.196 0	6.135	0.061 0
4	6.199 0	6.135	0.064 0
5	6.197 0	6.135	0.062 0
平均值	6.198 2	6.135	0.063 2

由表 1 可知,自动校正的水下声学测深仪系统测量的水深的精度都控制在 7 cm 以内。

在 6 m 左右的水深处,未校正的实际工作测深仪测量水深与水坨测量水深结果对比见表 2。

表 2 未校正的实际工作测深仪测量结果与水坨测量结果对比表

序号	测深仪系统测量结果/m	水坨测量结果/m	偏差绝对值/m
1	6.240	6.135	0.105
2	6.241	6.135	0.106
3	6.239	6.135	0.104
4	6.238	6.135	0.103
5	6.237	6.135	0.102
平均值	6.239	6.135	0.104

由表 2 可知,未校正的实际工作测深仪测量水深的精度都控制在 11 cm 以内。

由表 1、表 2 可知自动校正水下声学测深仪系统测量的水深精度比未校正的实际工作测深仪测量的水深精度高,在 6 m 左右的水深处,其精度提高了 4 cm 左右。

在 11 m 左右的水深处,自动校正水下声学测

深仪系统测量水深与水坨测量水深的对比结果如表3所示。

表3 自动校正水下声学测深仪系统测量结果与水坨测量结果对比表

序号	自动校正水下声学测深仪系统测量结果/m	水坨测量结果/m	偏差绝对值/m
1	11.272 0	11.357	0.085 0
2	11.273 0	11.357	0.084 0
3	11.271 0	11.357	0.086 0
4	11.269 0	11.357	0.088 0
5	11.273 0	11.357	0.084 0
平均值	11.271 6	11.357	0.085 4

由表3可知，自动校正水下声学测深仪系统测量水深的精度都控制在9 cm以内。

在11 m左右的水深处，未校正的实际工作测深仪测量水深与水坨测量水深结果对比见表4。

表4 未校正的实际工作测深仪测量结果与水坨测量结果对比表

序号	测深仪系统测量结果/m	水坨测量结果/m	偏差绝对值/m
1	11.244 0	11.357	0.113 0
2	11.246 0	11.357	0.111 0
3	11.249 0	11.357	0.108 0
4	11.248 0	11.357	0.109 0
5	11.247 0	11.357	0.110 0
平均值	11.246 8	11.357	0.110 2

由表4可知，未校正的实际工作测深仪测量水深的精度都控制在12 cm以内。

由表3、表4可知自动校正水下声学测深仪系统测量的水深精度比未校正的实际工作测深仪测量的水深精度高，在11 m左右的水深处，其精度提高了3 cm左右。

在15 m左右的水深处，自动校正水下声学测深仪系统测量水深与水坨测量水深的对比结果如表5所示。

表5 自动校正水下声学测深仪系统测量结果与水坨测量结果对比表

序号	自动校正水下声学测深仪系统测量结果/m	水坨测量结果/m	偏差绝对值/m
1	15.709 0	15.613	0.096 0
2	15.714 0	15.613	0.101 0
3	15.716 0	15.613	0.103 0
4	15.712 0	15.613	0.099 0
5	15.713 0	15.613	0.100 0
平均值	15.712 8	15.613	0.099 8

由表5可知，自动校正水下声学测深仪系统测量水深的精度都控制在11 cm以内。

在15 m左右的水深处，未校正的实际工作测深仪测量水深与水坨测量水深结果对比见表6。

表6 未校正的实际工作测深仪测量结果与水坨测量结果对比表

序号	测深仪系统测量结果/m	水坨测量结果/m	偏差绝对值/m
1	15.719 0	15.613	0.106 0
2	15.724 0	15.613	0.111 0
3	15.726 0	15.613	0.113 0
4	15.722 0	15.613	0.109 0
5	15.723 0	15.613	0.110 0
平均值	15.722 8	15.613	0.109 8

由表6可知，未校正的实际工作测深仪测量水深的精度都控制在12 cm以内。

由表5、表6可知自动校正水下声学测深仪系统测量的水深精度与未校正的实际工作测深仪测量的水深精度差不多，在15 m左右的水深处，其精度没有较明显的提高。

由表1、表3、表5可知自动校正水下声学测深仪系统测量的水深精度随着水深的增加，其优势在慢慢地减弱。声波传播的速度在不同深度的海水中是不同的，本试验是以深度5 m的海水为样本计算修正系数，测量深度增加，这个修正系数的偏差就会越来越大，修正的精度也会越来越低。在每个工程中，应结合工况对辅助校正测深仪与其底部对应挡板之间的距离做出最优设定。

## 6 结语

本文介绍了一种可自动校正的水下声学测深仪系统，通过辅助校正测深仪的数据拟合校正系数，从而用校正系数去修正实际工作测深仪，得到更精确的测量结果，克服了现有技术的不足，通过辅助校正测深仪校正实际工作测深仪的数据，弥补了测深仪里固化声速的缺陷，从而提高了测深仪的精度。本系统可以为海底勘测、海底施工等提供更精确的海底测深参数，从而提高施工精度。本系统只考虑了介质对声速的影响，没有考虑水的温度、流速等对声速的影响。后续研究中将把水的温度、流速对声速的影响考虑在内，进一步提高测深仪的测量精度。

## 参考文献：

- [1] 祝慧敏. 多波束测深系统水下地形测量关键技术与精度评估[J]. 经纬天地, 2022(2): 4-6.
- [2] 谢华军. 挖泥船用超声波测深仪研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [3] 汪志明. 差分GPS和测深仪组合系统在水下地形测量中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006.