

测深仪校准装置

王智孝 申宪忠 邵良兰

(国家海洋局第一海洋研究所, 青岛)

摘 要

测深仪是由声学元件、电子元件、机电元件等组成, 用于测量水深, 其精度是由上述元件的性能及使用方法决定, 因此每次使用之前进行校准是十分重要的。

测深仪校准装置是使用螺杆装置, 准确测定水深 (D_w), 用游标卡尺装置测定记录水深 (D_c), 选用高精度温(t)、盐(S)、深(D)—声速经验公式计算水中声速(c), 然后用上述直接测量值, 间接校准测深仪的稳定性及“校准声速”值。

此装置使用准确可靠, 简单易行。

一、前 言

测深仪是由机、电、声元件组成。随着时间的增加, 其性能总会发生变化, 直接影响到测深精度。一个能自身校准且能综合测定机、电、声元件性能的测深仪校准装置是

非常需要的。该装置是根据螺杆、游标卡尺能测量微小长度的原理, 利用声波多次反射的方法, 突破测深仪机械记录灵敏度低的限制, 用测量各“间接测量分量”的方法, 校准测深仪的各种技术参数。

二、测深仪校准装置

测深仪校准装置, 下面简称校准装置(如图1所示), 由水槽、螺杆、齿轮组、指示器、标准反射面、垫棒、万用表、水平仪、水平调节装置等组成; 游标卡尺装置, 下面简称卡尺(如图2所示), 它是由游标卡尺、卡板、微调螺丝、支架等组成。

螺杆、齿轮、标准反射板, 经过精密加工。螺杆全长80cm, 全长误差 $< \pm 0.055\text{mm}$, 反射板的平面度误差 $< \pm 0.12\text{mm}$, 齿轮每转一周, 螺杆升降一个螺距, 每一个螺距等于5mm, 指示器有100个分刻度, 可以指示齿轮转过百分之几圈; 水平仪和水平调节装

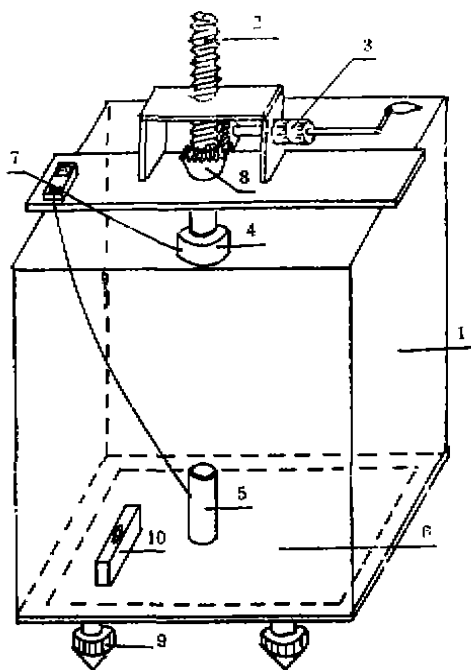


图1 测深仪校准装置图

1. 水槽; 2. 螺杆; 3. 指示器; 4. 换能器;
5. 垫棒; 6. 标准反射面; 7. 万用表; 8. 齿轮组;
9. 水平调节螺丝; 10. 水平仪

本文于1989年3月9日收到, 修改稿于1990年3月16日收到。

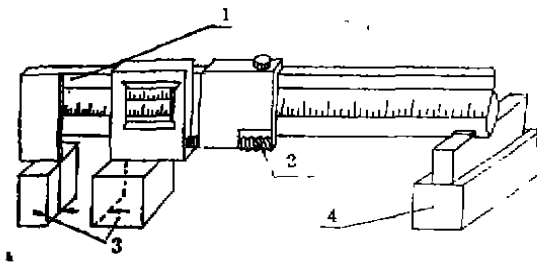


图 2 游标卡尺装置

1. 卡尺; 2. 微调螺丝; 3. 卡板; 4. 支架

置, 能调节标准反射板和发射换能器的发射面成水平状态; 垫棒和万用表在测量前调整时使用, 利用换能器的发射面与垫棒上端面接触电阻, 减小测量力误差。测量力误差 $\Delta_f = \pm 0.15 \text{ mm}$ 。

游标卡尺的精度为 $\pm 0.02 \text{ mm}$, 卡板底端内侧边线 A, B 为两条平行线, 使用时 A, B 分别对准所要测量的水深记录线及零位线的上沿, 使用微调螺丝和卡尺上的读数, 量读零位线和记录水

深线上边沿之间的距离, 此距离可换算成水深值 d_e 。

由于使用了螺杆装置减小了测量力的误差, 以及采用水平调节装置, 使发射换能器发射面至水槽底面之间的距离 (d_w) 测量误差 $< \pm 1 \text{ mm}$; 卡尺是采用对上千个记录信号进行多次平滑处理, 以及采用降低阿贝误差的办法, 从而可以在记录值 d_e 上分辨出水深值 $d_w < 5 \text{ mm}$ 的水深变化。

由于以上措施, 从而突破了测深仪机械记录灵敏度低的限制。

三、基 本 原 理

测深仪测量水深是利用声波在水中的传播速度 (c) 与传播时间 (t_d) 的乘积来实现的。声波在水中传播的基本方程为:

$$d = \frac{1}{2} t_d c \quad (1)$$

式中 d 为水深真值; t_d 为声波从发射至海底反射回来的时间; c 为声波在水中的传播速度。

测深仪测深的基本方程为:

$$d_e = \frac{1}{2} t_d c \quad (2)$$

式中 d_e 为 d 在测深仪记录纸上的记录值; c_e 为测深仪的校准声速。

当测深仪在水槽中校准时, 则方程 (1) 改写成:

$$d_w = \frac{1}{2} t_d c_w \quad (3)$$

式中 d_w 为声波从发射器至水槽底之间实测水深; c_w 为水槽中水的声速。

将式 (3) + (2) 得: $\frac{d_w}{d_e} = \frac{c_w}{c_e}$

$$c_e = c_w \cdot d_e / d_w \quad (4)$$

式 (4) 为水槽校准基本方程, 只要准确测定 d_w , d_e , c_w , 便可以间接计算出 c_e 值。

校准装置使用 $\phi 80 \text{ cm}$, 高 100 cm 的水槽, 没有吸声材料, 此种水槽是否能满足校准

的要求,必须在校准之前先验证。验证的目的是观察在底反射声信号到达接收器之前,

是否有干扰信号出现。验证的方法是:先将换能器放到槽底,然后慢慢上升35cm,让测深仪处于工作状态,这时底反射信号记录在图3上, A~A'为底反射信号的前沿;因为水深小于水槽的半径,因此不会有水槽边的反射信号出现;由于吃水线是任意选定的,因此 d_e 值可以由吃水线的上边沿EE'与反射信号线上沿AA'之间的距离来量读。

从记录曲线图上,没有发现有干扰信号出现在吃水线上沿和底反射信号A~A'上沿之间,继续上升换能器,这时反射信号与吃水线之间的距离逐渐加大,如A'~B线段,最后上升到76cm处为止,这时测得 d_e 的记录曲线为B~B',从记录曲线图上仍可以看出,在底反射信号到达接收器之前无干扰信号出现,按照距离计算,在A'~B线段上沿到吃水线之间,如果有干扰信号,就必然能够在此区间看到,而在我们的多次实验中,没有发现有干扰信号出现,从而验证了底反射信号是真实的信号,这也说明发射频率和

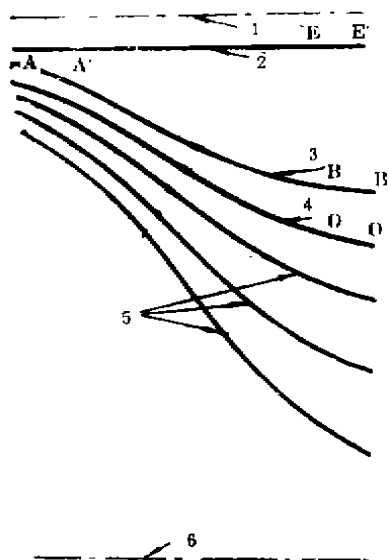


图3 SDH-13型测深仪验证实验记录曲线

1. 零位线; 2. 吃水线; 3. 底反射;
4. 二次反射; 5. 干扰信号; 6. 校准
声速迹线

方向角可以满足水槽校准的要求。(SDH-13型测深仪的频率为208kHz、方向角为7°)。在有示波器的情况下,也可以用示波器观察接收波形,波形图如图4所示,发射脉冲的开始时间为O点,底反射最早回来的时刻为A点,在O~A之间没有干扰信号出现。

由于测深仪记录钢针掠过记录纸的时间 $t_1 = 21\text{ms}$, 0.8m声波来回的时间 $t_2 = 1\text{ms}$,在适当调整接收灵敏度情况下,于测深仪记录纸上,可辨认的每一次声发射混响时间 $< 5\text{ms}$,从而能够实现水槽校准工作。

为了提高测量精度,必须选用高精度的声速经验公式,LeRoy的公式可以满足要求,其精度为 $\pm 0.1\text{m/s}$,他的公式如下:

$$c_s = 1492.9 + 3(t - 10) - 6 \times 10^{-3}(t - 10)^2 - 4 \times 10^2(t - 18)^2 \\ + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(t - 18)(S - 35) + d/61$$

式中 t 为水温,精度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$; S 为盐度,精度为 ± 0.01 。

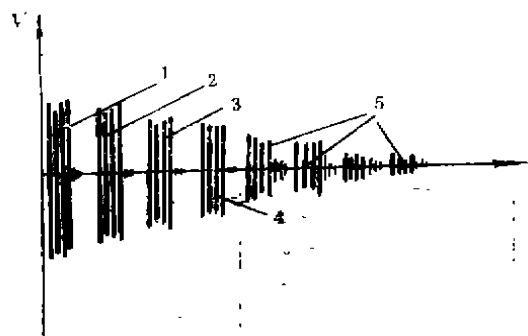


图4 用示波器观察测深仪水槽反射声波图

1. 零位信号; 2. 吃水线信号; 3. 底反射信号;
4. 二次反射信号; 5. 干扰信号

在测量之前,先用卡尺测量垫棒的高度,并放在槽底,调正发射换能器与标准反射板成水平状态,然后将螺杆下降,使换能器与垫棒接触。用电表测接触电阻。当电阻为零时,说明它们已经接触,去掉垫棒,将螺上升,这时总水深 d_w 为:

$$d_w = \text{螺距} \times \text{螺距个数} + \text{垫棒高度}$$

d_w 测定之后,使测深仪工作。任选一个吃水深度线, A 为零位线, B 为吃水深度线, C 为一次反射信号, D 为二次反射信号,如图 5 所示。用卡尺量读 $1, 1', 2, 2', \dots, 30, 30'$ 共 30 个测量点的 d_c 值。用列表法计算标准误差的步骤是将 d_c 值的平均值首先用任意常数法算出平均值,并求出标准误差,如表 1 所示。 c_s 值由式(4)给出。

表 1 d_c 值 计 算 表

B = 840 (mm)				置信度 $P_s = 0.683$	
n	$d_{ci} \times 10^3$	δ_i	δ_i^2	$S = 0 \quad t = 16.08^\circ\text{C}$ $d_w = 725.71 + 0.51 + 5 \times 127 = 761.22\text{mm}$ $c_w = 1468.099\text{m/s}$ $\delta_i = d_{ci} - B$ $\bar{d}_c = B + \sum \delta_i / n = 840 - 0.9 = 839.1\text{mm}$ $\sigma_{d_c} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum \delta_i^2 - \frac{(\sum \delta_i)^2}{n} \right]}$ $= \pm 3.20\text{mm}$ $\sigma_{\bar{d}_c} = T \cdot \sigma_{d_c} / \sqrt{n} = 1.05 \times 3.20 / \sqrt{30} = \pm 0.61\text{mm}$ $d_c = 839.1 \pm 0.61\text{mm}$ $c_s = \frac{d_c \cdot c_w}{d_w} = \frac{839.1 \times 1468.099}{761.22}$ $= 1618.299(\text{m/s})$	
1	8.38	-2	4		
2	8.42	+4	16		
3	8.40	0	0		
4	8.38	-2	4		
5	8.34	-6	36		
6	8.38	-2	4		
7	8.44	+4	16		
8	8.39	-1	1		
9	8.42	+2	4		
10	8.40	0	0		
11	8.38	-2	4		
12	8.34	-6	36		
13	8.44	+4	16		
14	8.40	0	0		
15	8.40	0	0		
16	8.41	+1	1		
17	8.42	+2	4		
18	8.38	-2	4		
19	8.34	-6	36		
20	8.34	-6	36		
21	8.38	-2	4		
22	8.34	-6	36		
23	8.44	+4	16		
24	8.38	-2	4		
25	8.39	-1	1		
26	8.42	+2	4		
27	8.40	0	0		
28	8.44	+4	16		
29	8.38	-2	4		
30	8.36	-4	16		
$\sum \delta_i = -28$			$\sum \delta_i^2 = 323$		

c_s 对应迹线 $J_1 = 16613.1\text{mm}$ SDH-13型测深仪, 机号8649。

四、数据和误差处理方法

众所周知,在间接测量中,各直接测量误差分量可以采用等精度测量,用增加测量次数及剔除粗大误差的方法可以提高测量精度。因此 σ_x 值及 σ_x 平均值误差的计算,采用标准误差计算方法,单次测量误差要统一换算成标准误差。

(一) 平均值和标准误差处理方法

根据任意常数列列表法,先任意取一个常数B。B可以是测量数据 X_i 中的某一个,再令 $\delta_i = X_i - B$,并将 δ_i 及 δ_i^2 列于表中, X_i 的平均值为 $\bar{X} = B + \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}$,则测量列的误差

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \delta_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n \delta_i \right)^2}{n} \right]}$$

在测量过程中,根据统计学理论,在有限次测量时,误差一般遵守T分布,此时的误差概率密度分布函数式为:

$$\sigma(T, k) = \frac{\Gamma\left(\frac{k+1}{2}\right)}{\sqrt{k\pi} \Gamma\left(\frac{k}{2}\right)} \cdot \left(1 + \frac{T^2}{2}\right)^{-\left(\frac{k+1}{2}\right)}$$

式中的伽玛函数为

$$\Gamma(m) = \int_0^{\infty} t^{m-1} e^{-t} dt$$

$$T = \frac{\bar{X} - A}{\sigma(\bar{X})} \quad k = n - 1, n \text{ 为测量次数}$$

$$\text{则 } \bar{X} - A = T \cdot \sigma(\bar{X})$$

令平均值 $\bar{X}$ 的标准误差为 $\sigma_{\bar{X}}$

$$\sigma_{\bar{X}} = \bar{X} - A = T \cdot \sigma(\bar{X})$$

由上式可以得到, $\bar{X}$ 平均值的标准误差因测量次数 n 不同,还要乘以T系数。

在直接测量过程中,因疏忽或其它原因,在测得的数组中,引入了一些不正常的数,只有剔除这些不正常的数,才能使测量的结果接近真值。为此我们设这些不正常的数具有粗大误差,按照极限误差法则,凡大于 $\sigma_{max} = 3\sigma$ 的残差,就属于粗大误差。因此可以用 $|X_i - \bar{X}| > \sigma_{max} = 3\sigma$ 的办法,逐项剔除不正常的数,最后得到的平均值为 $\bar{X} = B$

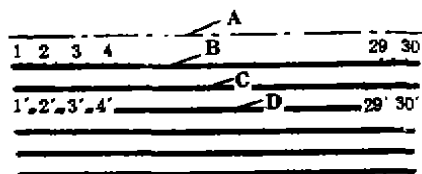


图 5 校准装置记录曲线图

A 为零位线; B 为吃水线; C 为底反射;
D 为二次反射; E 为声速迹线

$+ \sum_{i=1}^{n'} \delta_i / n', \sigma = \sqrt{\frac{1}{n'-1} \left[\sum_{i=1}^{n'} \delta_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n'} \delta_i \right)^2 / n' \right]}$, $\bar{X}$ 平均值的标准误差 $\sigma_{\bar{X}} = T \cdot \sigma / \sqrt{n'}$, 其中 $n' = n - J$, n 为测量次数, J 为剔除粗大误差的个数, T 可以从 T 分布数据表(表 2) 上查得。

表 2 T 分 布 数 据 表

测量次数 n	5	6	7	8	9	10	15	20	30	∞
T	1.14	1.11	1.09	1.08	1.07	1.06	1.04	1.03	1.02	1.00
备 注										置信度 $P_r = 0.683$

(二) 单次测量误差处理方法

校准过程中, t 和 S 是单次测量。单次测量误差是一种估读误差, 即是一种极限误差。根据统计规律, 标准误差的置信度 $P_r = 0.683$, 从拉普拉斯积分表上, 可以查出, 当 $P = 0.997$ 时的置信区间为极限误差, 因此极限误差 Δ 与标准误差 σ 的关系为 $\Delta = 3\sigma$ 。

当单次测量的自变量个数是多个时, 则间接测量误差的计算可采用绝对和法进行综合, 即

$$\Delta y = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 \right| + \cdots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \right| \quad (5)$$

(三) 间接测量随机误差处理方法

校准 c_c 值, 是用直接测量 d_w , c_w , d_c 值代入公式计算求得, 根据函数误差传递公式, c_c 的平均值标准误差为:

$$\sigma_{c_c} = c_c \sqrt{\left(\frac{\sigma_{d_w}}{d_w} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{c_w}}{c_w} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{d_c}}{d_c} \right)^2} \quad (6)$$

式中 σ_{d_w} 为 d_w 测量标准误差; σ_{c_w} 为 c_w 测量标准误差; σ_{d_c} 为 d_c 测量标准误差。

五、误 差 计 算

以 SDH-13 型测深仪为例讨论校准装置测量 c_c 的误差, 从表 1 得到当 $S = 0$, $t = 16.08^\circ\text{C}$ 时, $d_w = 756.22\text{mm}$, $c_w = 1468.099\text{m/s}$, $d_c = 839.1\text{mm}$, $c_c = 1618.3\text{m/s}$, $\sigma_{d_w} = \pm 0.181\text{mm}$, $\sigma_{d_c} = \pm 0.0006\text{m}$ 。已知

$$c_w = 1492.9 + 3(t - 10) - 6 \times 10^{-3}(t - 10)^2 - 4 \times 10^{-2}(t - 18)^2 \\ + 1.2(S - 35) - 10^{-2}(t - 18)(S - 35)$$

上式展开合并同类项:

$$c_w = 1401.04 + 4.9t + 1.38S + 0.046t^2 - 10^{-2}tS + d/61$$

由上式我们可以认为 c_w 为 t , S , t^2 , tS , d 的函数。

根据式(5), c_w 的极限误差为 Δc_w

$$\Delta c_v = \left| \frac{\partial c}{\partial t} \Delta t \right| + \left| \frac{\partial c}{\partial S} \Delta S \right| + \left| \frac{\partial c}{\partial t^2} \Delta t^2 \right| + \left| \frac{\partial c}{\partial t S} \Delta t S \right| + \left| \frac{\partial c}{\partial d} \Delta d \right|$$

$$\Delta t^2 = 2t \Delta t = 0.32$$

$$\Delta t S = t \Delta S + S \Delta t = 0.16$$

$$\text{则 } \Delta c_v = \pm 0.08 \text{ m/s}$$

$$\sigma_{c_v} = \frac{1}{3} \Delta c_v = \pm 0.03 \text{ m/s}$$

将 c_c , d_c , d_v , c_v , σ_d , σ_{d_v} , σ_{c_v} 代入式(6), 可以求得测深仪校准装置测得校准声速 c_c 的标准误差为:

$$\sigma_{c_c} = \pm 1.215 \text{ m/s}$$

六、校准结果讨论

我们使用校准装置, 对 SDH-13 型测深仪进行了校准, 并将校准后的 c_c 值使用在海上测绘实际测量中。图 6 为 1988 年黄河口海港地形测量记录示意图, 箭头 5 所指为校准装置测得的 c_c 迹线, A 点为现场水深比对点, 水砣实测水深为 7.10m, 测深仪测得水深为 7.13m, 两者相差 $\pm 0.03\text{m}$ 。1989 年 3 月在胜利油田呈北油田海上测绘过程中使用校准装置, 实测值与测深仪测得值在 20m 水深以内误差没有超过 $\pm 0.07\text{m}$ 。由此进一步证明了校准装置能较好地保证测深仪在海上的测量精度。

根据测深仪稳定性定义, 此装置还可以测量其稳定性, 方法与校准基本相同。

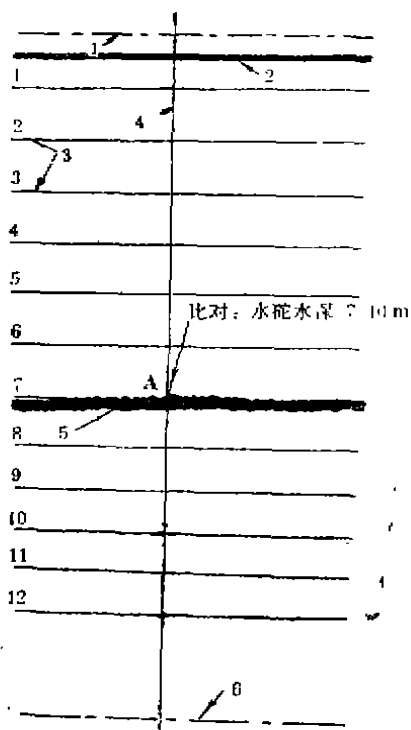


图 6 SDH-13 海上比测图

1. 零位线; 2. 吃水线; 3. 标尺刻度;
4. 定标线; 5. 海底信号; 6. 校准声速迹线

参 考 文 献

- [1] 孟尔嘉编: 实验误差与数据处理, 上海科学技术出版社, 1988, 1。
- [2] 黄振云编: 形状误差测量, 中国计量出版社, 1986, 5。
- [3] 张文裕编: 实验的数据处理, 科学出版社, 1986, 5。
- [4] 汪德昭编: 水声学, 科学出版社, 1981。
- [5] 罗雨星编: 测量误差及数据处理, 中国计量出版社, 1984, 5。
- [6] Urick Robert J.: Principles of underwater sound. 1975。

THE ADJUSTING DEVICE OF AN ECHO SOUNDER

Wang Zhixiao Shen Xianzhong Shao Lianglan

(First Institute of Oceanography, SOA)

Abstract

An echo sounder is comprised of acoustical, electronic and electromechanical elements. It is used to measure the depth of water. Its accuracy relies on the performance of the elements and the way in which they are used. So it is a necessary process to adjust it before they are used each time.

The adjusting device of an echo sounder measures precisely the depth of water (D_w) with a screw and the distance between the two recorded lines (D_c) with a ruler which has a sliding mark. A high-precision empirical formula of sound speed in water is chosen, into which the directly measured values of temperature (t), salinity (S) and depth of water (D) are substituted to calculate the speed of sound in water (C). Then the stability and the "adjusted speed of sound" of the echo sounder are adjusted indirectly according to the measurements of C , D_c , D_w , t , S , D as mentioned above.

This device is reliable, precise and easy to operate.