

探讨提高海上测深精度的方法

广东海事局海测大队 梁浓盛

【摘要】本文对目前海上测深误差来源进行系统的分析，并探讨提高海上测深精度的方法和使用声速仪取代检查板校对测深仪改正数的设想。

【关键词】换能器 安装误差 起伏 横摇 纵摇 声速改正

一、前言

目前港口、航道大面积水深测量还是依靠船载测深仪方式进行，在目前及以后一段长时间都不可替代，多波束测深也仅局限于特等水域进行全覆盖测量；随着数字式智能化测深仪及相关设备的广泛应用和水深测量自动化软件的普及应用，使港口、航道测绘技术含量上了一个新台阶，也使测深过程中的各种误差在传统测量中不能有效解决的问题，现在在自动化软件上可以完善地加以解决或减小其误差的影响。

二、测深误差来源分析及消除方法

船艇作为海上测量的载体，测深精度自然以船体的运动姿态和运动速度相关，也与测深仪的架设及测深仪测深精度和使用自动化软件相关。

(1) 测深仪换能器的安装误差

测深仪换能器表平面和海水面不平行（换能器中央波束和海水面不垂直）形成夹角而产生的倾斜改正；

安装换能器的测深杆与海水面不垂直形成夹角所产生的倾斜改正；

测深仪换能器表平面到海面距离（静态吃水）的量取误差。

设定：L—测深仪换能器表平面到海面距离（静态吃水），从测深杆标尺上读取；

1—测深杆与海水面不垂直形成的夹角。

2—换能器中央波束和海水面不垂直形成的夹角。

D—换能器中央波束方向测到海底的倾斜距离（已进行声速改正的水深数值）

Z—经安装误差改正后的真实水深：

$$Z=L*\cos 1+D*\cos 2$$

对于船的舷外式和舷内式（船底）安装根据以上公式进行取舍，固定测量船1和2相对是固定的，可以使用常规测量方法进行测出，但对于租船测量时测深仪的安装要特别注意，因安装误差是一项比较大的系统误差，其误差值随深度的增加而增大，应在软件上进行事后改正。

(2) 船体运动所引起的测深误差

动态吃水改正误差

船体在运动中会有下沉量，这是测量船在海上运动的结果：它只与船体自身的重量和运动速度相关，与测量船舶相对于静止参照物的绝对运动速度无关，即与船舶主机转速相关，相当于无动力船舶在海上漂流，船体随水流运动，但无动态吃水改正的原理一样；当然，对于吨位小的测量工作艇因影响小，是可以不作这项改正的，而对于吨位大的测量船艇则必须进行此项改正；

但测量船自身的重量由于船员数量和水仓装水量的变化而形成一定的变量，船体运动的自身速度也是变量，就使得此项改正变得复杂化。

动态吃水改正数的测定有很多方法，但只能记录船速的概数，并进行船

舶动态吃水概数的改正，现在还无法对船舶动态吃水进行精确的实时改正，这也是以后水深测量的一个研究课题，并对精确改正此项误差有着现实的意义。

船体在运动中起伏（**heave**）、横摇（**roll**）、纵摇（**pitch**）产生的测深误差

船体在测量中受风浪的影响使得测深精度和船体的运动姿态相关。涌浪滤波器能对船体在运动中起伏（**heave**）及横摇（**roll**）、纵摇（**pitch**）在海水平面垂直分量上的起伏进行改正，但对横摇、纵摇引起的测深仪换能器中央波束方向到海底形成测深倾斜距离则无法进行改正，在风浪大和测量水域水深比较深的时候，则横摇和纵摇对测深精度影响是巨大的，以前是采用人工量取的方法对测深仪的回波记录 $Td/2$ （ Td 为波峰波谷之差）进行消除处理，但存在人工量取误差，而且测量自动化得不到充分的体现；如果使用三维运动传感器（**Motion Sensor**），这项测量误差通过软件可以得到准确的实时改正。

设定：测深仪换能器无安装误差

L-- 测深仪换能到海面距离（静态吃水）从测深杆标尺上读取；

Heave (t) -- t 时刻的起伏值；

pitch (t) -- t 时刻的纵摇角；

Roll (t) -- t 时刻的横摇角；

D (t) -- t 时刻的换能器中央波束方向到海底的倾斜距离（已进行声速改正的水深值）；

Z (t) -- t 时刻的经起伏及横摇、纵摇改正的真实水深；

则得出如下公式：

$$Z(t) = (L + D[t]) * \sqrt{\cos^2(\text{pitch}(t)) - \sin^2(\text{roll}(t))} + \text{heave}(t)$$

这样就可以对此项误差进行实的改正，尽管是这样，在测量中也应注意如下事项：

a. 尽量避免在风浪大的海况进行测深；

b. 船体运动中应缓慢地变速，避免船体的急转弯、变速过大的运动，因这时造成运动传感器或涌浪滤波器采集的数据失真，在测量航道时，两条测深线在换线的地方采集的水深数据经潮水改正后，勾绘的等深线成波浪形就是船体这种运动造成的影响。

（3）船体因自身或风流影响使船体产生的倾斜改正

对于吨位较大和船体较高使得受侧风面积比较大的测量船，在测量过程中由于船上多个水仓装水量的不平衡使得船体发生倾斜，及在开阔海域中测量时由于风流的影响也使得船体发生倾斜，这就形成了倾斜改正。

设定：测深仪换能器无安装误差

L--测深仪换能到海面距离（静态吃水）从测深杆标尺上读取；

--船体的倾斜角；船体水平面与海水面不平行形成的夹角；

D---撕目器中央波束测到海底的倾斜距离（已进行声速改正的水深值）

Z--经倾斜改正后的真实水深：

$$Z = (L + D) * \cos$$

在测量中，要随时注意船体是否平衡，如发生倾斜则必须进行倾斜改正；在开阔和平坦的海区测量中，经常发现两测深断面上的水深成波浪形起伏，就

是这种倾斜造成与海水作用形成的海底地貌不相符，当然在船体和吨位比较小及只有一个水仓的测量船则没有此项倾斜改正。

(4) 测深仪的声速改正

海洋中的声传播的特点

海洋中实际的声传播因许多因素而变得复杂化，海水的物理化学性质引起的声衰减及折射；不平静的海面使反射复杂化；以及在检测中存在着海洋环境噪声和混响的问题。

水中声速与空间电磁波的传播速度相比少得多，故使得扫描速率大大地降低；声波高频分量衰减很大，使数据传输率低；水中声速梯度比空气中声速梯度大得多，使声波发生强烈的折射，定向信息的可靠性差；波长比较长，空间分辨率低；海洋中的背景噪声利混响都比较大，且占较宽频带，加上换能器只能在低Q情况下使用，因此信号检测受到限制：海水无法承受高于确定的尺小压力值，故进入海水中的总能量受发射器尺寸大小的限制，并且同发射器装置的深度有关。

测深仪的工作原理

测深仪换能器按一定速率输出击脉冲的同时也接收回声信号，即有能量的转换过程（电能→声能、声能→电能）有一个具有控制功能的主控装置，调节和提供准确的记时，即发射的声脉冲从换能器到海底，然后再返回的时间（双程时间），测深的精度大部分取决于精确测量这时间的能力，一般测深仪认为水中声速是已知量，对已校正的记录时间进行计算，可得到换能器到海底的距离。

式中：d--换能器中央波束方向到海底的距离；

c--测深仪的固定声速，可调节，一般为1500m/s；

t--声脉冲从换能器到海底，然后再返回换能器的时间；

$$d=1/2 c* t$$

其中c为调节的固定值，这就形成误差的来源。

海水中声速的分布

水中声速接近1500m/s，但其精确值在很大程度上依赖于温度、压力，以及较小的程度上依赖于盐度，水里声速随上述诸因素的增大而增大。

Wilson提出的精确经验公式：

$$C=1449.14+ V_T+V_P+V_S+V_{STP}$$

《海道测量规范》中的经验公式：

$$C=1449.2+4.6 t-0.055 t^2+0.00029 t^3+ (1.34-0.01 t) (S-35) +0.0017Z$$

式中：V_T——温度的四阶多项式（t为温度，℃）

V_P——压力的四阶多项式（与深度相关，Z为深度，m）

V_S——盐度的二阶多项式（S为盐度，‰）

V_{STP}——包含着S、T、P的交叉乘积的多项式

利用方程式及精确测得的S、T、P，可计算出精确的水中声速。从影响方面，温度和压力在确定声速的垂直分布图方面是重要的变量，而盐度在一般海区变化量很小，压力随深度的增加的变化关系近似于线性关系，故声速梯度与在不同海区是不相同的；由于声速梯度引起的折射，使得声线朝低声速区弯曲（折射），这是测深仪标称精度误差的来源之一。

声速仪的工作原理

不同的声速仪采用的工作原理主要有如下两种

方法1：测出声脉冲通过空间两点的时间，定时方法采用“环鸣”方式，即

每当声脉冲被接受器接受，电子电路即触发另一声脉冲，测定此脉冲的重复频率或周期，相当于测定声波在两点之间的渡越时间，即可确定各水层的声速。

方法2：浅海声速仪测定温度和压力按生产厂方经验公式可获得声速值。声速仪能获得和提供精度可靠的随深度连续变化的声速结果。

声速改正的方法

$$Z_V = (C_1/C_0 - 1) Z_I$$

式中： Z_V ——声速改正数

C_1 ——各水层声速（声速仪测得）

C_0 ——测深仪设计深度

声速改正计算时应注意：

- 1、 C_1 的取值，近似相同的声速水层可合并，取其平均值；
- 2、声速仪数据是从水面到海底，但在计算时应从测深仪换能器所在的深度开始。

声速改正示例

在2000年9月为香港海事处进行担杆水道分航道水深测量时，使用声速仪对测深仪测量数据进行声速改正，在相同的测量水域内测深仪测量数据经声速改正后和多波束测量水深数据相比较，结果相当符合，多波束也使用相同的声速文件进行改正，证明利用声速仪的声速数据进行测深仪改正数计算是有效和成功的，如下是担杆水道测出的声速文件：**20000828.svp**

Section	2000—0828	01:00
0.0	1534.5	
0.6	1535.2	
1.1	1535.7	
1.9	1537.3	
2.4	1537.5	
2.9	1537.6	
3.4	1537.7	
4.3	1537.7	
4.9	1537.8	
5.4	1537.9	
6.1	1538.8	
6.8	1539.0	
7.9	1539.1	
8.5	1539.2	
9.8	1539.1	
10.4	1538.9	
11.3	1537.0	
11.4	1537.0	
13.1	1536.6	
13.6	1535.7	
14.3	1534.6	
15.1	1351.4	
15.7	1530.6	
16.2	1530.4	
17.0	1530.0	
18.0	1530.1	

19.0	1530.1
20.0	1530.0
21.0	1529.5
22.0	1529.3
23.0	1529.0
24.0	1528.6
25.0	1528.2
30.0	1527.0
40.0	1526.0

深度段 (m)	水层厚度 (m)	平均声速 (m/s)	测深仪设计声速为1500 m/s时的声速改正数	测深仪设计声速为1535 m/s时的声速改正数
1.2~1.9	0.7	1536.5	0.017	0.001
1.9~5.4	3.5	1537.6	0.087	0.006
5.4~10.4	5	1538.9	0.130	0.013
10.4~11.3	0.9	1538	0.023	0.002
11.3~13.1	1.8	1536.9	0.044	0.002
13.1~14.3	1.2	1535.6	0.028	0
14.3~15.1	0.8	1533	0.018	-0.001
15.1~15.7	0.6	1531	0.012	-0.002
15.7~20	4.3	1530.2	0.087	-0.003
20~25	5	1529.1	0.097	-0.019
25~30	5	1527.6	0.092	-0.024

说明:1535 m/s 是在 12 m 水深处用检查板校对测深仪改正数时调整后的声速,从计算结果看:20 m 声速改正数为 0.008 m,25 m 声速改正数为-0.011 m,30 m 声速改正数为-0.035m;但不调整声速时:20 m 声速改正数为 0.046 m,25 m 声速改正数为 0.543 m,30 m 声速改正数为 0.635 m;静态吃水 1.2 m。

从声速改正数计算结果可以看出如下的规律

1、声速由小变大,是个变量,且声线朝低声速区弯曲并和测区所在的纬度相关,变曲度和温度、压力相关;

2、不同声速水层厚度不一样;

3、声速文件由 0 m 到海底获得随深度变化的连续声速,故计算声速改正时,由于测深仪换能器和水面有一定的距离(静态吃水),应从换能器所在的深度开始计算;

4、不同水深值计算声速改正数时,应是不同声速水层一直到水深值深度的各水层声速改正数的总和;

5、使用检查板校对测深仪改正数时，在 12 m 水深处校对并调整测深仪的声速，和声速仪在此深度声速比较，调校值误差在 3m/s 以内时，即使不进行声速改正，水深测量精度也得到有效的保证；

6、不调整测深仪的设计声速，一般为 1500m/s，则声速误差是巨大的，在浅水的海域，随深度的增大而增大，故必须进行测深仪的声速改正。

使用声速仪取代检查板校对测深仪改正数方法的意义

换能器的安装有舷外式（船舷）和内舷式（船底）两种，《海道测量规范》中规定在 0 m~20 m 水深区可以使用检查板进行校对测深仪改正数，在舷外式安装时，使用检查板在较浅海域和潮水的高、低平潮时间内可以很费力地实现校对，但在有潮流、风浪的其它时间难以实现，即使可以，也难以达到检查、校对所要求的精度和目的；如果是内舷式（船底）安装，换能器和船舷有一定的距离，这种检查板的校对方法不但使校对精度难以保证，其结果更令人担忧。

科技的进步，使得高精度的测量仪器层出不穷，且更有实用性，规范的编写也由于新仪器应用的成熟和广泛而增加新的内容，但对于新仪器的更新换代来说，规范是滞后的，现在的声速仪完全可以满足高精度的水深测量要求。

声速仪更能体现测绘自动化的要求，在测量软件上可以实现对每个水深值进行准确的声速改正，检查板校对测深仪改正数是间断、不连续的和精度较低的改正数，故声速仪是自动化程度体现的方向，避免了人力和时间等资源的浪费，提高了测深精度和工作的效率。

三、结束语

通过对海上测深误差来源的综合分析以及对测量载体的运动方式和测深设备、改正的相关设备论述，基本上可以消除或减小影响测深精度的误差，提高了测深精度，使综合的测深误差得到改善。

但影响海上测深精度的因素众多，其中一些误差影响在数值上难以准确获得，此文中未进行论述的潮汐改正也是非常复杂和对测深精度有巨大影响的因素，故海上测深精度的评价在未来一段时期还是值得研究和探讨的课题