

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.02.004

## XCTD 与 CTD 的对比测试研究

徐泽, 于宗泽, 傅晓洲, 俞欣沁  
(广州海洋地质调查局, 广东广州 510700)

**摘要:** 海水声速剖面的准确获取对于利用多波束声呐系统进行水深测量至关重要, 而传统的声速剖面获取方式都需要停船进行测量, 导致海上调查作业效率较低。为了解决该问题, 本文首先介绍了温盐深剖面测量仪 (CTD) 和抛弃式温盐深剖面测量仪 (XCTD) 间接测量声速剖面的原理, 然后对“海洋地质六号”调查船在同一站位及时间利用 CTD、XCTD 和 AML PLUS SV 声速剖面仪测量得到的声速剖面进行了一个对比分析。研究表明, 三者测量得到的声速剖面在相同水深处声速互差引起的水深差值最大为 0.130 9 m。在多波束水深测量过程中, 可考虑使用 CTD 和 XCTD 间接测量获得的声速剖面代替声速剖面仪直接测得的声速剖面, 通过合理布设 CTD 站位以及使用 XCTD 来提高海上多波束水深调查的作业效率。

**关键词:** 抛弃式温盐深仪; 温盐深仪; 声速剖面; 多波束水深测量

**中图分类号:** P714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2021) 02-0022-07

20 世纪 70 年代出现的多波束测深系统深刻改变了海洋水深调查的方式, 极大地提高了水深测量的作业效率<sup>[1]</sup>。由于多波束测深系统在工作过程中呈扇面状发射和接收声波信号, 然后根据声传播旅行时和海水声速确定水深。因此, 在多波束水深测量过程中, 海水声速剖面的准确获取以及声速的改正对于最终的水深成果质量至关重要, 不合理的声速将导致观测到的海底地形呈凹凸状<sup>[2-3]</sup>。

目前, 海水声速测量方式有两种: 一种是间接声速测量, 另一种是直接声速测量<sup>[4]</sup>。间接声速测量是根据温度、盐度和压力数据, 用特定的计算公式确定海水声速, 直接声速测量则是通过测量声速在某一固定距离上传播的时间或相位, 从而直接计算海水声速。间接声速剖面测量代表性仪器有美国海鸟公司 (SeaBird) 生产的 CTD, 直接声速剖面测量代表性仪器有 AML 公司生产的

不同系列的声速剖面仪。目前, 进行声速剖面测量时多采用声速剖面仪直接测量声速剖面, 在测量船停船时, 通过钢缆绞车投放声速剖面仪。当水深较深时, 导致投放回收时间较长, 同时, 受声速剖面的时空限制, 当声速剖面不满足要求时, 需要停船并重新做声速剖面的测量, 导致海上调查作业效率较为低下。

为了提高海上多波束水深调查作业的效率, 在非停船作业模式下快速获取海水声速剖面, 利用 XCTD 以及抛弃式温度剖面测量仪 (XBT) 间接测量声速剖面已得到广泛应用<sup>[4-5]</sup>。然而, XCTD 与 XBT 作业效率虽高, 但是其探测深度有限。并且, XBT 无法观测海水的盐度信息, 其对深水海域的海水声速测量影响较重, 并进一步影响到水深测量精度。为了解决 XBT 无盐度信息的问题, 有学者提出了联合 XBT 与 WOA13 模型盐

收稿日期: 2020-05-26

基金项目: 深海关键技术与装备专项资助项目 (2016YFC0300606-03)

作者简介: 徐泽 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海底地形地貌探测研究。E-mail: xzxuze@163.com

度信息确定声速剖面的解决办法<sup>[6]</sup>, 但是 WOA13 模型盐度数据是对多年每月的盐度数据取平均值, 分辨率较低<sup>[7]</sup>。

为了解决海上调查作业效率较低的问题, 同时保证多波束测深的精度, 本文介绍了 CTD 与 XCTD 作业原理, 对比了同一时间、同一站位的 CTD、XCTD 及声速剖面仪观测得到的声速剖面数据, 探讨了利用 CTD 与 XCTD 提高多波束水深调查的作业效率。

## 1 CTD 与 XCTD 原理

### 1.1 CTD 原理

CTD 广泛应用于海洋调查中, 是目前应用最多的海水温度、盐度与深度参数测量设备。利用 CTD 观测得到的温度、盐度和深度数据, 结合声速经验模型, 可以间接确定海水声速。其中, 最具代表性的是海鸟公司的 SBE 917Plus CTD 剖面仪。SBE 917Plus CTD 剖面仪搭载的传感器采用模块化设计, 能够快速准确地获取海水的温度、电导率和深度参数。系统主要包括 SBE 9Plus CTD 单元、SBE 17Plus SEARAM 存储单元和 SBE32 采水器。

SBE 9Plus CTD 单元是温盐深要素测量的主要执行者, 其内部安装有电导率、温度和带温度补偿的高精度石英压力传感器, 为减小船体升降引起的盐度尖峰效应, 采用 TC 导管将温度和电导率传感器连接在一起, 通过水泵迫使海水以恒定速率通过感温原件和电导池, 从而可以获取同一水团的温度和电导率数据<sup>[8]</sup>。

SBE 17Plus SEARAM 是整个系统的控制单元, 同时为 SBE 9PLUS CTD 单元和 SBE32 采水器提供电源。通过系统程序, 可以将数据采样间隔预先输入到 SEARAM 中, 因此可实现数据采集、存储的自动化。

图 1 为 SBE 917Plus CTD 剖面仪在海上调查中的布放过程示意图, 其布放过程可概括为以下 7 个步骤: 安装调试、参数设置、设备布放、下降过程中测量、上升过程中采水、设备回收、数据下载及处理<sup>[9]</sup>。

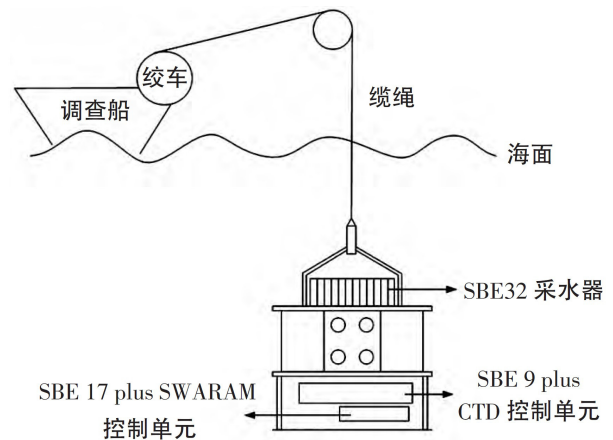


图 1 SBE 917Plus CTD 剖面仪布放方式

### 1.2 XCTD 原理

XCTD 是一种海水温盐剖面快速测量设备, 可在下沉过程中测量海水的电导率和温度, 并根据下沉时间和速度计算出深度, 其最大测量深度可达 2 000 m。

XCTD 测量系统一般由发射装置、抛弃式探头、数据接收装置和数据处理系统组成。其中, 发射装置和抛弃式探头结构如图 2 所示。

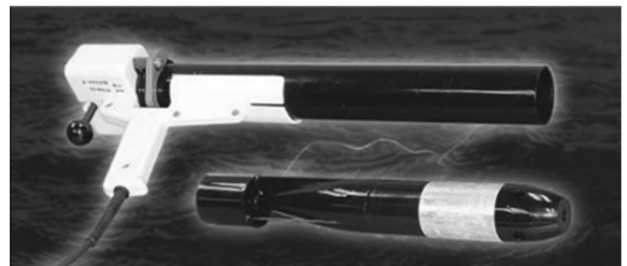


图 2 XCTD 发射装置与抛弃式探头

抛弃式探头是测量系统的核心, 其中搭载的温度和电导率传感器可在探头的下沉过程中测量海水的温度、盐度数据。因为 XCTD 没有搭载压

力传感器，故深度参数需要通过探头的下沉速度计算获得。

发射装置不仅用于发射探头，还要作为水下探头和水上数据接收装置之间完成数据通信的辅助结构。在探头脱离发射装置时，探头和发射装置中的传输导线线轴同时释放高强度细导线，用于实现传感器测量结果的数据传输。

数据接收装置和数据处理系统的主要功能是接收水下探头传回的温度和电导率数据，并计算盐度、声速等相应参数；检测探头入水信号，并根据入水时间和下沉速度计算剖面深度；实时记录并显示温度、电导率和声速剖面数据随深度变化的特性曲线。

XCTD 测量系统工作方式如图 3 所示：抛弃式探头由发射装置发射入水，入水后即开始测量海水的温度和电导率。在下沉过程中，测量数据经探头内的高强度细导线传输至水上数据接收装置，进行数据预处理。数据处理软件检测探头入水时间，计算其入水深度，并对温度和电导率数据进行平滑和修正处理。获得最终的温盐深剖面数据<sup>[9-11]</sup>。其中，日本 TSK 公司生产的 XCTD 在世界处于领先水平，其不同型号的 XCTD 性能指标见表 1。

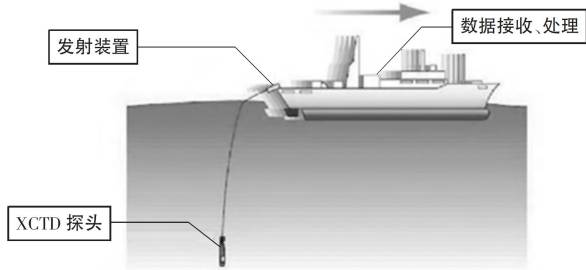


图 3 XCTD 工作示意图

表 1 日本 TSK 公司不同型号 XCTD 指标

| 型号     | 深度 /m | 船速 /kn | 时间 /s |
|--------|-------|--------|-------|
| XCTD-1 | 1 000 | 12     | 300   |
| XCTD-2 | 1 850 | 3.5    | 575   |
| XCTD-3 | 1 000 | 20     | 205   |
| XCTD-4 | 1 850 | 6      | 540   |

## 2 数据来源与处理

### 2.1 数据来源

本文采用“海洋地质六号”调查船 2019 年 3 月在西太平洋某海域实测的数据。直接声速剖面测量采用的仪器为 AML 公司的 PLUS SV 声速剖面仪，最大工作深度 6 000 m。间接声速剖面测量采用的仪器为海鸟公司生产的 SBE 917 plus CTD 和日本 TSK 公司生产的 XCTD-4。在到达站位时，首先停船，使用钢缆绞车同时搭载了一套 AML 声速剖面仪和 Seabird SBE 917 Plus CTD，同时投放回收，共耗时约 5 h，分别获得两个声速剖面数据文件 SVP-AML 和 SVP-CTD。然后，调查船以 5 kn 船速匀速向前航行，在航行的过程中投放 XCTD，探头下降深度达 1 850 m 时，连接抛弃式探头与发射装置之间的数据传输导线断裂，测量结束，得到一个声速剖面数据文件 SVP-XCTD，此过程共耗时约 10 min。图 4 为 MK-150 采集软件查看原始采集数据。如图 4 所示。

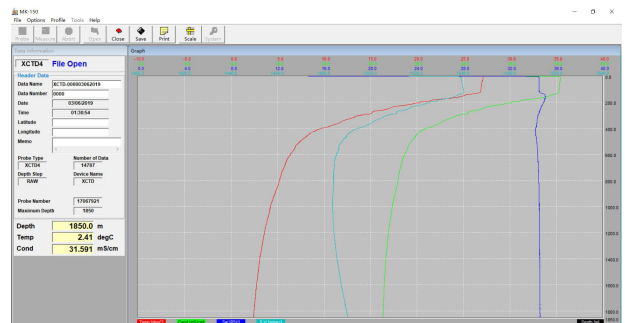


图 4 MK-150 采集软件查看 XCTD 原始数据

### 2.2 数据处理

根据观测得到的原始声速剖面数据，绘制 AML PLUS SV 声速剖面仪、温盐深剖面仪和抛弃式温盐深剖面仪的声速剖面图，如图 5 所示。

为了进一步对比 SVP-XCTD、SVP-CTD 与 SVP-AML 之间的差异性大小，分别对 3 个声速剖面按深度间隔 1 m 取一个样。然后在对应同一深度处，分别计算 SVP-XCTD 与 SVP-CTD、SVP-

XCTD与SVP-AML、SVP-CTD与SVP-AML之间的互差大小。由于误差的影响,采集的声速剖面数据可能存在尖峰效应,即某一时刻的测量值偏离实际值较大,为了剔除误差导致的测量异常

值,采用中值平均滤波法对声速剖面互差数据进行滤波处理,可有效的剔除异常值及平滑声速剖面互差曲线,结果见图6。最后,分别统计每组互差值的最大值、最小值、均值以及标准差(表2)。

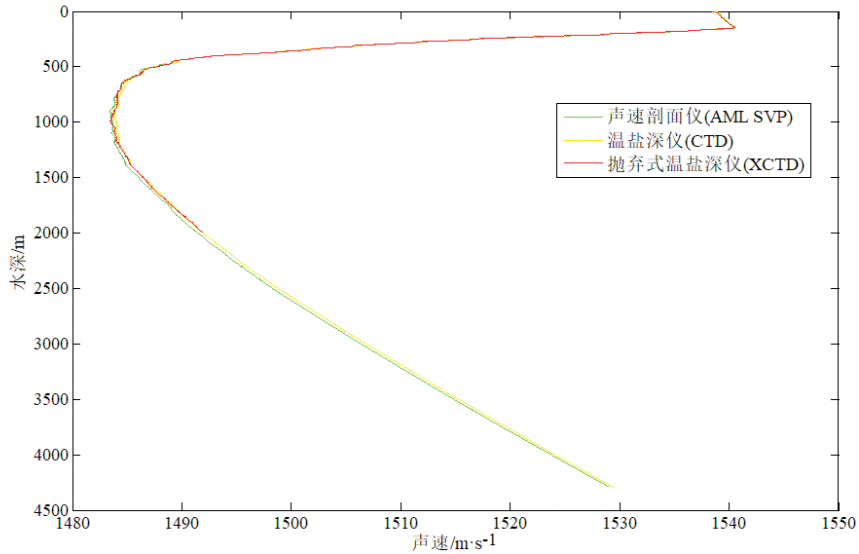


图5 AML声速剖面仪、温盐深仪与抛弃式温盐深仪获得的声速剖面

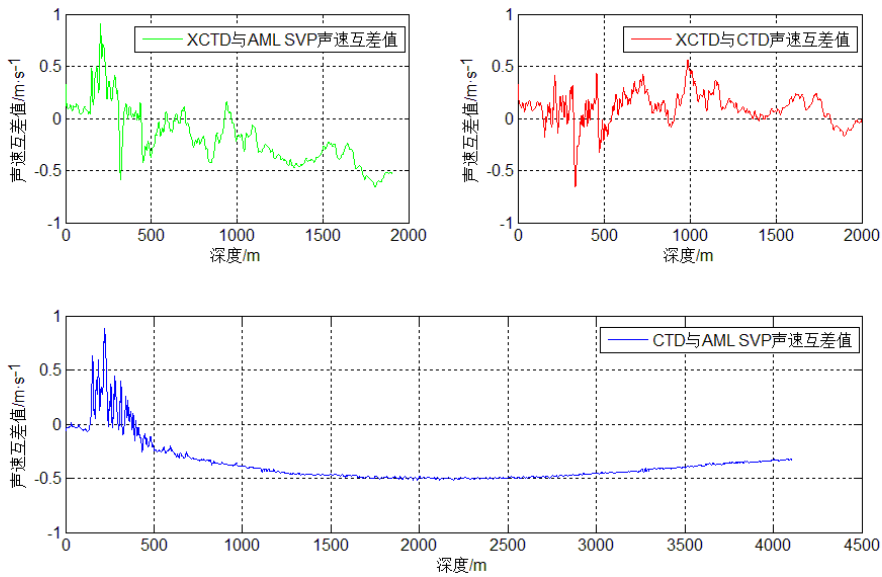


图6 SVP-XCTD与SVP-AML、SVP-XCTD与SVP-CTD、SVP-CTD与SVP-AML互差

表2 XCTD与AML、XCTD与CTD、CTD与AML之间的声速互差统计

|          | 最大值 /m·s <sup>-1</sup> | 最小值 /m·s <sup>-1</sup> | 平均值 /m·s <sup>-1</sup> | 标准差  |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------|
| XCTD与AML | 0.91                   | -0.66                  | -0.18                  | 0.27 |
| XCTD与CTD | 0.56                   | -0.66                  | -0.10                  | 0.15 |
| CTD与AML  | 0.88                   | -0.52                  | -0.36                  | 0.19 |

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同声速剖面间互差对水深测量的影响

从图 6 中可以看出, SVP-XCTD 与 SVP-CTD 的互差值总体较小, 在 200 m 深度附近处, 互差波动较大, 200 m 深度以下, 互差趋于稳定。统计分析结果表明: 最大值 0.56, 最小值 -0.66, 平均值 -0.10, 标准差 0.15 (表 2)。SVP-XCTD 与 SVP-AML 的互差最大值 0.91, 最小值 -0.66, 均值 -0.18, 标准差 0.27 (表 2)。SVP-CTD 与 SVP-AML 的互差最大值 0.88, 最小值 -0.52, 均值 -0.36, 标准差 0.19 (表 2)。虽然对声速互差值进行了中值平均滤波, 但是从图 6 中仍可以看出, 在深度 180~300 m 之间, XCTD、CTD 与 AML 的声速互差值仍存在一些的异常值, 导致声速互差曲线跳动较为明显。结合图 5 中三者的声速剖面, 深度约 200 m 附近正好位于声速跃层界面。单独提取 XCTD 与 CTD 的温度与盐度数据, 绘制温度、盐度随深度变化的响应曲线 (图 7), 在深度约 200 m 附近, 同样也是温度与盐度变化较大的跃层界面。因此, 推测这些互差值异常可能是在温度、盐度的跃层内, 不同设备传感器的响应时间不同、深度计算公式的误差或传感器本身的测量误差引起的。在深度约 300 m 以下, 三者的互差值趋于稳定。其中, SVP-CTD 与 SVP-AML 的互差值无明显波动。而 SVP-XCTD 与 SVP-AML、

SVP-XCTD 与 SVP-CTD 在深度约 200 m 以下, 互差值在 -0.7~1 m/s 之间呈不规则的曲线波动。

为了确定 CTD 和 XCTD 观测得到的声速剖面与声速剖面仪获得的声速剖面之间的差值对水深测量的影响, 首先对水深进行分层, 浅水区由于声速变化较大, 分层间隔 50 m、100 m, 深水区声速呈线性变化, 分层间隔 200 m、400 m, 然后利用每层的水深值除以声速剖面仪在该层底界面获得的声速, 得到声波在该水深层传播时间, 利用该传播时间乘以声速互差值, 最终得到该水深层声速互差值引起水深误差 (表 3)。从表中可以看出, 在 2 400 m 水深层, 差值引起的水深变化最大为 0.130 9 m。在多波束水深测量过程中, 声速剖面的分层远小于 400 m, 该差值对水深测量结果的影响可忽略不计, 使用 XCTD 与 CTD 获得的声速剖面数据完全满足水深调查的要求。

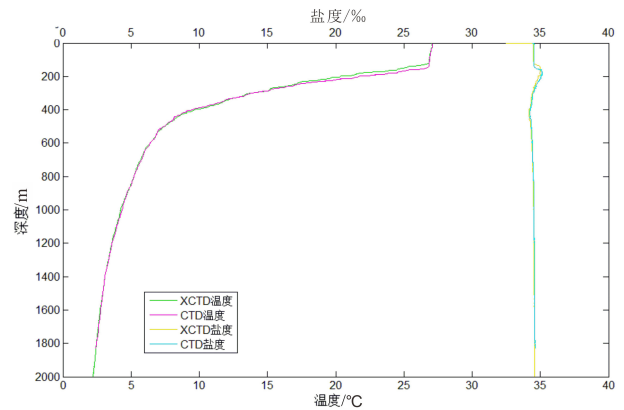


图 7 XCTD 与 CTD 温度、盐度随深度变化的响应的曲线

表 3 不同声速剖面间互差对水深测量的影响

| 水深 /m | SVP-CTD 与 SVP-AML      |           | SVP-XCTD 与 SVP-CTD     |           | SVP-XCTD 与 SVP-AML     |           |
|-------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|       | 互差值 /m·s <sup>-1</sup> | 差值引起水深 /m | 互差值 /m·s <sup>-1</sup> | 差值引起水深 /m | 互差值 /m·s <sup>-1</sup> | 差值引起水深 /m |
| 50    | 0.01                   | 0.000 3   | 0.13                   | 0.0042    | 0.16                   | 0.005 2   |
| 100   | 0.05                   | 0.001 6   | 0.05                   | 0.0016    | 0.09                   | 0.002 9   |
| 200   | 0.23                   | 0.015 0   | 0.32                   | 0.0209    | 0.19                   | 0.012 4   |
| 300   | 0.06                   | 0.003 9   | 0.15                   | 0.0099    | 0.10                   | 0.006 6   |
| 400   | 0.12                   | 0.008 0   | 0.09                   | 0.0060    | 0.12                   | 0.008 0   |
| 500   | 0.27                   | 0.018 1   | 0.44                   | 0.0296    | 0.22                   | 0.014 8   |
| 600   | 0.20                   | 0.013 5   | 0.03                   | 0.0020    | 0.11                   | 0.007 4   |

续表 3

| 水深/m  | SVP-CTD 与 SVP-AML      |           | SVP-XCTD 与 SVP-CTD     |           | SVP-XCTD 与 SVP-AML     |           |
|-------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|       | 互差值 /m·s <sup>-1</sup> | 差值引起水深 /m | 互差值 /m·s <sup>-1</sup> | 差值引起水深 /m | 互差值 /m·s <sup>-1</sup> | 差值引起水深 /m |
| 700   | 0.32                   | 0.021 5   | 0.03                   | 0.0020    | 0.26                   | 0.017 5   |
| 800   | 0.31                   | 0.020 9   | 0.20                   | 0.0135    | 0.14                   | 0.009 4   |
| 900   | 0.38                   | 0.025 6   | 0.26                   | 0.0175    | 0.03                   | 0.002 0   |
| 1 000 | 0.38                   | 0.025 6   | 0.23                   | 0.0155    | 0.46                   | 0.031 0   |
| 1 200 | 0.45                   | 0.060 6   | 0.34                   | 0.0458    | 0.12                   | 0.016 2   |
| 1 400 | 0.47                   | 0.063 3   | 0.38                   | 0.0511    | 0.03                   | 0.004 0   |
| 1 600 | 0.47                   | 0.063 2   | 0.37                   | 0.0498    | 0.17                   | 0.022 8   |
| 1 800 | 0.49                   | 0.065 8   | 0.63                   | 0.0846    | 0.03                   | 0.004 0   |
| 2 000 | 0.48                   | 0.064 4   | -                      | -         | -                      | -         |
| 2 400 | 0.49                   | 0.130 9   | -                      | -         | -                      | -         |
| 2 800 | 0.46                   | 0.122 4   | -                      | -         | -                      | -         |
| 3 200 | 0.43                   | 0.113 9   | -                      | -         | -                      | -         |
| 3 600 | 0.40                   | 0.105 5   | -                      | -         | -                      | -         |
| 4 000 | 0.33                   | 0.086 6   | -                      | -         | -                      | -         |

### 3.2 CTD 与 XCTD 在多波束水深测量中的应用

目前, 在多波束水深测量过程中, 多使用声速剖面仪直接观测声速剖面。测量时需要停船, 然后通过绞车投放声速剖面仪。在远海, 水深多达 6 000 m 左右, 投放回收一次约 5 h, 耗费船时较多。同时, 海洋调查规范要求, 在  $1^\circ \times 1^\circ$  范围内至少应有 3 个全海深的声速剖面, 而当声速剖面变化较大时, 还需要进行补测, 这往往需要耗费大量宝贵的船时。同时, 海上调查作业大多是一个综合性的作业过程, 不仅仅包括多波束水深调查, 往往还包括海洋地球物理调查(海洋重力、磁力调查)以及海洋水文调查(CTD、ADCP 调查)等。

根据 CTD 与 XCTD 的特点, CTD 的测量深度最大可达 10 000 m, 满足全海深测量要求, 进行全海深的声速剖面测量时, 可考虑使用 CTD 进行测量。但是 CTD 的缺点是需要停船进行测量, 耗费时间较长, 水深 2 000 m 时测量一次声速剖面数据大约需要 100 min。XCTD 的测量深度最大只有 2 000 m, 比 CTD 的测量深度要小许多。但是 XCTD 的优点是不需要停船即可进行声速剖面的

测量, 水深 2 000 m 时只需 10 min 的时间即可完成一次声速剖面的测量。

在海上调查作业过程中, 为了节约船时, 可以考虑在含有 CTD 调查的航次中, 在满足设计要求的基础上, 通过合理布设 CTD 站位, 使用 CTD 代替声速剖面仪间接测量声速剖面, 以减少声速剖面仪投放次数。由于 XCTD 具有不用停船、作业时间短、效率高的优点, 但是其测量深度最大为 2 000 m, 所以, 在多波束水深调查过程中, 当声速剖面变化较大, 需要补充声速剖面测量时, 可在非停船作业状态下通过投放 XCTD 间接测量获得声速剖面数据。

## 4 结 论

通过对 XCTD、CTD 和声速计获取的声速数据进行对比分析, 得出以下结论:

(1) 不同声速剖面间互差引起的水深变化最大为 0.130 9 m。该差值对水深测量结果的影响可忽略不计, 使用 XCTD 与 CTD 获得的声速剖面数据完全满足水深调查的要求; (2) 在海上多波束

水深调查作业过程中, 当有 CTD 调查作业时, 可通过合理布设 CTD 站位, 使用 CTD 间接测量得到的声速剖面代替声速剖面仪直接测量得到的声速剖面; 当需要补充声速剖面测量时, 在非停船作业状态下投放 XCTD 间接测量声速剖面, 可提高海上多波束水深调查作业的效率。

#### 参考文献:

- [1] 吴自银, 阳凡林, 罗孝文, 等. 高分辨率海底地形地貌: 探测处理理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [2] 李家彪, 郑玉龙, 王小波, 等. 多波束测深及影响精度的主要因素 [J]. 海洋测绘, 2001(1): 26-32.
- [3] 赵建虎, 刘经南. 多波束测深及图像数据处理 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [4] 张宝华, 赵梅. 海水声速测量方法及其应用 [J]. 声学技术, 2013, 32(1): 24-28.
- [5] 董庆亮, 陈东, 李明叁, 等. 投弃式温盐深测量仪在海底地形测量中的应用 [J]. 海洋测绘, 2013, 33(3): 36-39.
- [6] 黄辰虎, 陆秀平, 王克平, 等. 联合 XBT 和 WOA13 模型盐度信息的深水走航声速准确确定 [J]. 海洋通报, 2016, 35(5): 554-561.
- [7] Boyer T P, Garcia H E, Locarnini R A, et al. 2013 World Ocean Atlas Aids High-Resolution Climate Studies[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2014, 95(41): 369-370.
- [8] 郭斌斌, 李琦, 肖波, 等. SBE 917plus CTD 剖面仪及其自容式作业 [J]. 海洋信息, 2015(1): 42-45.
- [9] 张龙, 叶松, 周树道, 等. 海水温盐深剖面测量技术综述 [J]. 海洋通报, 2017, 36(5):481-489.
- [10] 石新刚, 苏强. 投弃式海洋仪器设备发展现状 [J]. 声学及电子工程, 2015(4): 46-48.
- [11] 贾志成, 于晓山, 尼建军, 等. XCTD 剖面仪数据传输电路的设计与实现 [J]. 海洋技术, 2010,29(2): 1-4.

## Study on the Comparative Test of XCTD and CTD

XU Ze, YU Zong-ze, FU Xiao-zhou, YU Xin-qin

Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510700, China

**Abstract:** The accurate acquisition of sea water sound velocity profile is very important for water depth measurement using multi-beam sonar system. However, the traditional acquisition methods of sound velocity profile need to stop the ship for measurement, which leads to the low efficiency of marine survey. In order to solve this problem, this paper introduces the principle of indirect measurement of sound velocity profile by CTD and XCTD, and conducts contrastive analysis on the sound velocity profile at the same station and time of “Hai Yang Liu Hao” exploration vessel which was measured with CTD, XCTD and AML PLUS SV sound velocity profiler. The results show that the maximum difference of water depth caused by the difference of sound velocities between the three profiles is 0.1309 m. During Multi-beam Echo Sounding, researchers conduct reasonable arrangement of CTD station and use XCTD to improve operation efficiency of the Multi-beam Echo Sounding survey at sea.

**Key words:** XCTD; CTD; sound velocity profile; Multi-beam Echo Sounding