

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2019.01.006

国产 XBT 海上比测方法研究及结果分析

雷发美^{1,2,3}, 商少平^{1,2,3}, 贺志刚^{1,2,3*}, 汪鹏⁴, 戴昊^{1,2,3}

(1. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学海洋观测技术研发中心, 福建 厦门 361005; 3. 厦门大学海洋与地球学院, 福建 厦门 361005; 4. 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094)

摘要:随着国产投弃式温深仪(XBT)性能的提高,其使用范围和规模也逐步扩大,受某专项办的委托,厦门大学在南海东北部开展了“海洋监测设备适用性检验规范及海上试验研究(国家 863 计划)”项目,针对海洋技术领域研发的技术较为成熟、具备产品化条件的 XBT 开展检验与验证,对国产 XBT 的性能和实际使用情况进行分析和总结。试验中,在不同站点进行温盐深仪(CTD)现场测量,以此数据为真值对国产和进口 XBT 精度做评估。在较高速度走航测量时,则以进口 XBT 数据为参照,对国产 XBT 进行评估。试验结果表明,国产 XBT 整体上表现良好,成功率大概为 80%,有些型号的国产 XBT 精度与进口 XBT 精度接近,但国产 XBT 无效剖面较多。同时也发现,进口 XBT 的精度无法满足预期比测的要求,不能准确计算出国产 XBT 精度,但结果仍然具有参考价值。本次试验可以为国产 XBT 的规模化应用和推广提供数据支持,也可为其他型号 XBT/XCTD/CTD 等仪器的比测提供借鉴。

关键词:投弃式温深仪;XBT;比测;精度;误差传播定律中图分类号:P716^{+.12} 文献标志码:A 文章编号:1003-2029(2019)01-0032-08

为了解决在机动状态下的海洋环境参数测量问题,20 世纪 60 年代,国外开发了应用于移动平台的投弃式海洋环境测量探头,例如 XBT(Expendable Bathythermograph),XCTD(Expendable Conductivity Temperature Depth)等。在各类投弃式海洋环境测量探头中,使用最为广泛的是 XBT,无需绞车即可从各种舰船上投放。同时其测量探头成本低廉,可以大量使用,能够获得大范围海域的准同步温度剖面数据。从上世纪 70 年代开始,XBT 已经成为海洋观测中非常重要的一部分。

关于 XBT 的误差,国内外都进行了大量的分析工作,误差的来源包括纯温度误差、深度误差、探头类型误差^[1]、参数误差、随机误差^[2]、水温误差及记录系统误差^[3]等。到目前为止,大家比较认可的误差处理方法有两种,一种是基于微分的温度梯度法^[4-7],

另一种是基于积分的最小均方根误差法^[8-9]。国内外的学者通过这两种方法,对 XBT 的历史数据进行了有效的校正。

在我国的海洋调查中,主要使用日本 TSK(Tsurumi-Seiki,简称 TSK)公司 T-7 和 T-10 两种型号 XBT。海洋工作者对其性能、特点、使用等方面都比较了解,对数据的处理也有比较完善的方法。最近几年,随着国产 XBT 性能的提高,其测量结果正在被越来越多的用户所认可,使用范围和规模也逐步扩大^[10]。

为了对国产 XBT 的性能和实际使用情况进行分析和总结,受某专项办的委托,厦门大学在南海东北部开展了“海洋监测设备适用性检验规范及海上试验研究(国家“863”计划)”项目,针对海洋技术领域研发的技术较为成熟、具备产品化条件的 XBT

收稿日期:2018-09-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFF0200900),国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2012AA091906);促进海峡两岸科技合作联合基金资助项目(U1405233)

作者简介:雷发美(1984-)男,理学硕士,工程师,主要研究方向为物理海洋学、海洋观测技术。E-mail:lfm101659@163.com

通讯作者:贺志刚,副教授, zghe@xmu.edu.cn

开展检验与验证,以促进技术成果的完善与固化,提高设备的可靠性、稳定性和批量一致性。海试过程中,采用科学的海上试验程序和方法获得试验数据,并通过规范化的数据分析方法取得评价结果^[1],为国产海洋环境监测设备的规模化应用和推广提供技术支撑。

文中第一部分介绍参试仪器,第二部分为海上试验情况,第三部分为比测方法,第四部分为误差来源分析,最后部分为试验总结。

1 参试的国产 XBT 和进口 XBT/CTD

本次试验参试的 XBT 厂商有甲、乙、丙、丁 4 家单位,比测使用的进口 XBT 为日本 TSK 公司生产的 T-7 型 XBT,标准 CTD(Conductivity, Temperature, Depth)为美国海鸟公司生产的 SBE19 Plus 型 CTD,该 CTD 试验前后分别经国家海洋计量站青岛分站检定合格(合格证书略),参试 XBT 和标准 CTD 具体参数见表 1。

表 1 参试 XBT 和标准 CTD 厂家及参数

Tab.1 The manufacturers of XBT and standard CTD and their specifications

厂家	型号	最大航速/kn	测量参数	测量范围	测量精度
甲	/	15	$T/^{\circ}\text{C}$	-2~35	± 0.1
			D/m	760	$\pm 2\%$
乙	/	15	$T/^{\circ}\text{C}$	-2~35	± 0.1
			D/m	760	$\pm 2\%$
丙	/	15	$T/^{\circ}\text{C}$	-2~35	± 0.1
			D/m	760	$\pm 2\%$ 或 5
丁	/	12	$T/^{\circ}\text{C}$	-2~35	± 0.15
			D/m	760	$\pm 2\%$ 或 5
日本 TSK 公司	T-7	15	$T/^{\circ}\text{C}$	-2~35	± 0.1
			D/m	760	$\pm 2\%$ 或 5
美国海鸟公司	SBE19 Plus(标准 CTD)	定点	$C/\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$	0~65	± 0.005
			P/MPa	0~70	$\pm 0.1\% \text{F.S}$

2 海上比测试验实施情况简述

该试验分 3 次进行,第 1 次和第 2 次试验使用“延平 2 号”船,第 3 次试验使用“实验 3 号”船,3 次试验均在南海东北部海域进行,参与比测的有国内

甲、乙、丙、丁 4 家 XBT 生产单位。

进行海试时,应该确保试验海区地势比较平坦,最小水深大于 800 m,整个试验过程中实时注意船上测深仪的变化,防止 XBT 未达到预定深度就触底。海况应该在 3 级以下,避开大风和雨天,尽可能减小不确定的外界因素对试验造成的干扰。根据试验大纲的要求,把航速大致控制在定点、6 kn,9 kn,12 kn,15 kn。定点投 24 枚,其余各航速均投 12 枚。正常情况下,XBT 的投放时间大约为 2min,包括准备时间,每枚 XBT 大概需要 5min,以此计算,6 kn,9 kn,12 kn,15 kn 走航投放时,每两枚 XBT 的距离大约分别为 0.9 km,1.4 km,1.8 km,2.3 km。

第 1 次试验从 2013 年 8 月 3-10 日,参与 XBT 比测的为甲单位,进行定点、6 kn,9 kn 投放试验,同时进行 CTD 测量;第 2 次试验从 2014 年 4 月 1-10 日,参与 XBT 比测的为乙单位和丙单位,进行定点、6 kn,9 kn 投放试验;第 3 次试验从 2014 年 7 月 28 日至 8 月 3 日,参与 XBT 比测的为甲、乙、丙、丁 4 家单位,进行 12 kn 和 15 kn(实际航速为 16 kn)走航投放试验,其中丁单位的 15 kn 为自己实验。3 个航次在投放国产 XBT 的过程中,均有交替投放进口 XBT,试验的站位和航线见图 1。

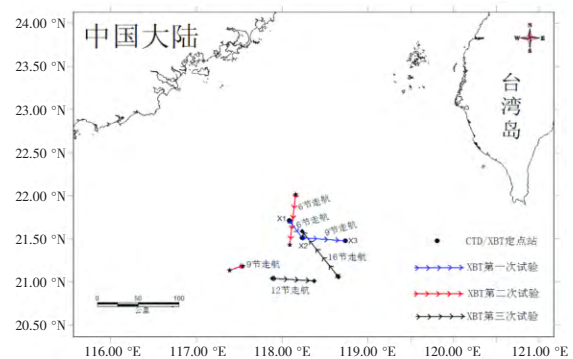


图 1 定点投放站位和走航投放路线图

Fig.1 The fixed-position and underway course

3 海上比测试验数据分析方法

从表 1 中可以看出,比测用的 T-7 型 XBT 产品标称精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,这与国内厂家生产的 XBT 精度相同或非常接近。根据已有海上试验的情况来看,进口 XBT 的实际精度与标称精度有一定的差距,例如日本 TSK 公司的 T-10 型 XBT^[10],但由于 XBT 为抛弃式设备,无法逐一进行检定校准,因此在比测时,采取以下步骤进行:

(1) 进行多点的 CTD 测量, 由于 CTD 的精度一般都会比 XBT 精度高一个量级以上, 因此, 约定 CTD 的测量值作为真值。

(2) 在 CTD 测量期间, 不影响作业的情况下, 把国产和进口 XBT 交替投放, 获取 XBT 的测量值, 两者的时间间隔不超过 24 h 且距离不超过 10 km^[2], 最好在 45 min 和 3 km 之内^[3]。

(3) 走航试验时, 不进行 CTD 测量, 把国产和进口 XBT 交替投放, 以进口 XBT 测量数据为参考(认为进口 XBT 定点和走航的精度一致), 计算国产 XBT 精度。

(4) 质控: 首先把所有 XBT 剖面数据用各单位自带的软件进行质控, 再对各剖面的深度数据进行检查, 深度数据异常的剖面为失败投放; 最后把不同厂家不同航次的温度剖面各自分组, 对每组数据同一深度的温度用 3 倍标准差进行检验, 超出 3 倍标准差的点视为无效点。若一个剖面的无效点数超过 0.3%(超出 3 倍标准差概率), 该剖面为无效剖面, 不超过 0.3%的, 对该点剔除后进行插值处理。计算时, 优先剔除无效点比例最大的剖面, 对剩余的剖面继续检验, 直至所有的剖面都符合要求。

(5) 插值: 由于 CTD、进口 XBT、不同厂家的国产 XBT 深度数据都不匹配, 因此, 在处理数据时, CTD 直接从软件中导出 1 m 间隔的数据, 而 XBT 则用 Matlab 进行插值, 处理成 1 m 间隔, 使得两者的深度数据相匹配。

(6) 精度计算: 按照时间和空间的就近原则, 把进口 XBT 和标准 CTD 进行对比, 把国产 XBT 与进口 XBT 进行对比, 分别得到进口和国产 XBT 精度。在精度表达方式上, 根据不同研究目的有不同的计算方法, 例如均方根误差 (root mean square error, RMSE)^[10]、平均绝对离差^[12]、均值差^[13-14]等, 这里用均方根误差来表示 XBT 的精度^[15], 计算公式如下^[16-17]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (1)$$

式中 x_i 、 y_i 为两种观测方式在同一深度的测量值, x_i 表示参试仪器测量结果, y_i 为标准仪器测量结果, n 为样本个数。

(7) 测量仪器之间的误差传播^[15]: 由于进口 XBT 精度与国产 XBT 精度相当, 因此, 计算国产 XBT 精度时, 应当使用误差传播定律, 扣除进口 XBT 的误差, 从而获得国产 XBT 的真实精度。

3.1 进口 XBT 与 CTD 的比测结果

在第一航次的 X1、X2、X3 站分别进行 CTD 测

量, 同时也在该站点及走航过程中投放进口 XBT, 获取的数据采用 3 倍标准差进行检验, 所有剖面均正常, 获取的数据结果见图 2。

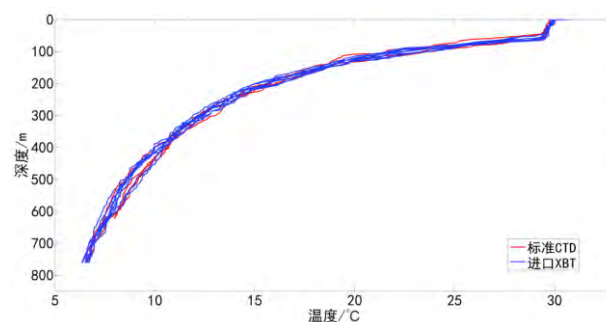


图 2 第一航次进口 XBT 与标准 CTD 温度垂向分布剖面图

Fig.2 The temperature profiles of the imported XBT and standard CTD at the first vessel

原本计划在每个站点开始和结束时各做一次 CTD 测量, 但由于操作和天气原因, X2 和 X3 站均只在开始的时候有 CTD 测量数据。在数据比对时, 依据就近原则把进口 XBT 和标准 CTD 剖面数据分组匹配。考虑到 9 kn 走航时, X2 站少一次 CTD 数据, 航速较快, 时间和空间变化较大, 依据前面的 XBT 间隔的推算, 距离已经超过 10 km 的范围^[2], 因此 9 kn 走航投放的 3 枚进口 XBT 不参与计算, 其余的 8 枚进口 XBT 均方根误差计算结果见表 2。

表 2 进口 XBT 与 CTD 均方根误差分析结果(单位: °C)

站位	XBT 编号	标准 CTD 型号	均方根误差	平均值
X1	T-7-01		0.33	
X1	T-7-02		0.14	
X1→X2	T-7-03		0.26	
X1→X2	T-7-04	SBE19 Plus	0.28	0.28
X1→X2	T-7-05		0.35	
X2	T-7-06		0.38	
X3	T-7-10		0.24	
X3	T-7-11		0.27	

从表 2 来看, 进口 XBT 与标准 CTD 温度测量结果的均方根误差最大为 0.38 °C, 最小为 0.14 °C, 平均值为 0.28 °C, 与 T-7 型 XBT 给定的产品精度 ±0.1 °C 有差距, 造成差距的原因有待进一步分析。前人对国外各种型号的 XBT 精度做了大量的修正工作^[18-19], 但对于局部海区或者说是某些产品批次不一定适合, 应该以实际测量为准。根据测量结果, 该批次的 T-7 型 XBT 在该海域内的精度为 ±0.28 °C。

3.2 国产 XBT 与进口 XBT 的比测

试验中,进口 XBT 共投放 78 枚,获取剖面数 78 个,其中定点 5 个,走航 73 个,有效剖面数为 77 个;甲单位共投放 75 枚 XBT,获取剖面数 73 个,其中定点 24 个,走航 49 个,有效剖面为 60 个;乙单位共投放 74 枚 XBT,获得剖面数据 71 个,其中定点 25 个,走航 46 个,有效剖面为 57 个;丙单位共

投放了 78 枚 XBT,获取剖面数 72 个,其中定点 24 个,走航 48 个,有效剖面为 60 个;丁单位共投放 23 枚 XBT,获取剖面数 23 个,全部为走航投放,有效剖面为 20 个。有效剖面数占投放总数的比例定义为成功率。各参试单位 XBT 投放具体情况见表 3,质控前后获取的数据剖面见图 3~图 7。

表 3 参试 XBT 投放情况表

Tab.3 The illustrate of throwing away the compared XBT

参试单位	投放总数	定点投放	6 kn 走航 投放	9 kn 走航 投放	12 kn 走航 投放	16 kn 走航 投放	获取剖面 数量	有效剖面 数量	成功率/%
TSK	78	31	11	10	13	13	78	77	99
甲	75	24	12	15	12	12	73	60	80
乙	74	27	12	11	12	12	71	57	77
丙	78	24	18	12	12	12	72	60	77
丁	23	无	无	无	13	10	23	20	87

从表 3 中可以看出,进口 XBT 的成功率比国产的高,达到 99%,只有一枚 XBT 温度剖面毛刺过多,废弃不用,国产 XBT 成功率大约为 80%,与进口的相比还有一定的差距。国产 XBT 在投放过程中会出现连续几枚都是无效的情况,这有可能是受海洋中尺度现象的影响^[20],例如内波的持续时间一般为 5~40 min^[21],因此在 XBT 投放过程中,尽量避免内波的干扰。

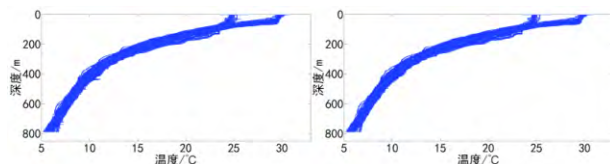


图 3 进口 XBT 质控前(左)、后(右)温度剖面分布图
Fig.3 The temperature profiles of the imported XBT before (left) and after(right) quality control

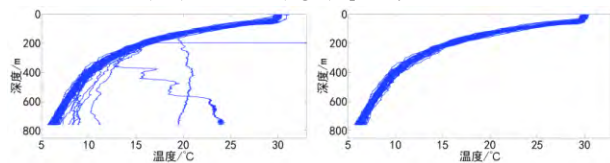


图 4 甲单位 XBT 质控前(左)、后(右)温度剖面分布图
Fig.4 The temperature profiles of meth-manufacture XBT before(left) and after(right) quality control

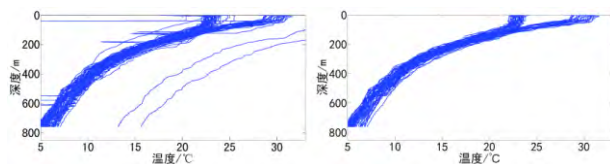


图 5 乙单位 XBT 质控前(左)、后(右)温度剖面分布图
Fig.5 The temperature profiles of eth-manufacture XBT before(left) and after(right) quality control

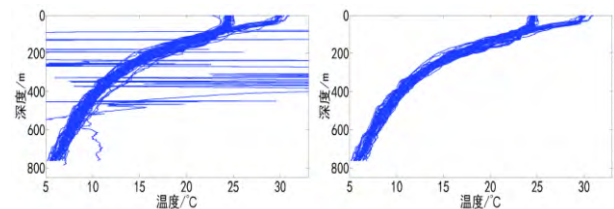


图 6 丙单位 XBT 质控前(左)、后(右)温度剖面分布图
Fig.6 The temperature profiles of prop-manufacture XBT before(left) and after(right) quality control

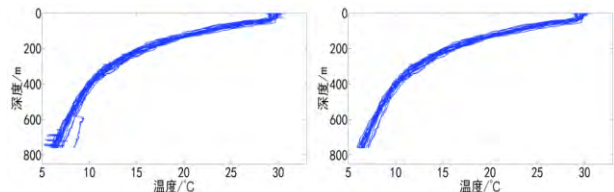


图 7 丁单位 XBT 质控前(左)、后(右)温度剖面分布图
Fig.7 The temperature profiles of but-manufacture XBT before (left) and after(right) quality control

从质控的结果来看,4 家国产 XBT 均有无效剖面,甲单位剔除 13 个,乙单位剔除 14 个,丙单位剔除 12 个,丁单位剔除 3 个,无效剖面率平均为 16%。从图 4~图 7 中可以看出,质控后异常剖面基本上被剔除。

在数据匹配时,以进口 XBT 测量值为标准,所有的国产有效 XBT 剖面均与时间上最近的进口 XBT 剖面做比对,并且根据航速不同分组计算,得出每个国产 XBT 的均方根误差,再计算各单位 XBT 的平均值,计算结果见表 4。

表 4 国产 XBT 与进口 XBT 均方根误差分析结果(单位: °C)
Tab.4 Result of RMSE between the indigenous and imported XBT(Unit: °C)

参试单位	定点投放	6 kn 走航投放	9 kn 走航投放	12 kn 走航投放	16 kn 走航投放*	平均值
甲	0.28	0.27	0.31	0.33	0.38	0.31
乙	0.48	0.57	0.44	0.64	0.50	0.53
丙	0.40	0.44	0.39	0.68	0.56	0.49
丁	/	/	/	0.43	0.46	0.45

* 说明:由于 15 kn 为“实验 3 号”船的共振频率,经过商量,原本 15 kn 的试验在 16 kn 航速下完成。

从表 4 均方根误差的平均值可以看出,甲单位 XBT 的均方根误差最小,其次为丁单位。从不同航速的误差来看,甲单位定点和 6 kn 走航投放的误差较小,与进口 XBT 均方根误差基本一致,随着航速的增加,均方根误差略微变大。乙单位 XBT 的均方根误差总体偏大,在各航速下没有明显的区别。丙单位在 9 kn 航速内误差较一致,但在 12 kn 以上时,误差变大。丁单位只有 12 kn 和 16 kn 数据,均方根误差仅次于甲单位,但由于丁单位参试的 XBT 数量较少且缺少 9 kn 及其以下的数据,该结果仅供参考。

3.3 比测试验中误差的传播和积累

由于测量仪器自身存在的固有误差,无法获得海洋数据的真值。在比测过程中,通过选择合适的标准仪器,可以忽略标准器的误差。但是当无法选择高精度的值作为标准值时,必须考虑测量误差之间的积累和传播。

根据误差传播定律^[15],设进口 XBT 精度为 m_1 ,国产 XBT 精度为 m_2 ,两者之间的误差为线性传播,合成误差 m_z 计算公式如下:

$$m_z = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} \quad (2)$$

从公式(2)来看,如果两个仪器的精度相差一个量级,则小的误差可以忽略不计。实际使用过程中,如果以低精度的标准器检定高精度的仪器,则计算结果仅能作为参考。根据该公式计算的国产 XBT 精度结果如表 5 所示。

表 5 参试 XBT 精度计算结果(单位: °C)

参试单位	标准仪器及型号	实测精度(均方根误差)
TSK	CTD(SBE19 Plus)	0.28
甲		0.13
乙	进口 XBT(TSK T-7 型)	0.45
丙		0.40
丁		0.35

从表 5 可以看出,甲单位的计算结果比进口 XBT 的精度更高,这个结果是不可信的,这相当于用低精度的仪器作标准来检定高精度的仪器,没有实际意义。恰好甲单位投放时有进行 CTD 测量,与进口 XBT 比对一样,定点和 6 kn 投放的所有有效剖面根据就近原则与 CTD 温度测量结果作比对,计算结果见表 6。

表 6 进口 XBT 和甲单位 XBT 精度计算结果(单位: °C)

Tab.6 Precision of the imported and meth-manufacture XBT (Unit: °C)

参试单位	标准仪器及型号	实测精度 (均方根误差)
TSK	CTD	0.28
甲	(SBE19 Plus)	0.31

从表 6 比测试验结果来看,甲单位与进口的 T-7 型 XBT 精度比较接近,差值为 0.03 °C,由于标准仪器的不同,乙、丙、丁 3 家单位的 XBT 精度与进口 XBT 不能直接比较。

从甲单位的计算结果来看,不同的标准器计算出来的结果不同,这有可能是不同观测方式导致的观测结果误差不同,同一种观测方式(进口 XBT 和甲单位 XBT)的数据比较一致,而不同的观测方式(CTD 和 XBT)误差比较大,导致误差从标准 CTD 到进口 XBT 再到国产 XBT 的传播过程中不能正常进行。因此,以进口 XBT 的测量结果为标准,不能准确计算出国产 XBT 的误差,但可以为国产 XBT 提供参考。

从整个海试试验来看,试验的设计存在一定的欠缺,主要是过于相信进口产品,由于进口 XBT 的实测精度与标称精度有一定差距,致使最后不能准确计算出各家参试的国产 XBT 精度。若要进行精确的误差测量,标准器应该使用 CTD,确保获取的真值有较高的精度,使分析计算的结果更加合理可靠。若是参试的 XBT 尚在实验阶段,其精度与进口 XBT 的标称精度相差较大,为了节约成本,可以用进口 XBT 的测量结果作为参照,以此为依据对产品进行改进。

4 误差来源分析

由于本试验为第三方独立开展的适用性检验试验,对 XBT 误差造成的原因不做具体分析,仅对数据的获取情况及海上试验过程中可能导致误差

来源的因素进行罗列,XBT 厂家可根据海试结果,有针对性地改进 XBT 产品。

从比测试验的结果看,无论是进口 XBT 还是国产 XBT,通过海上试验分析计算得到的误差与产品的标称精度都还有一定差距,其原因可能是多方面的,可以从以下几个方面考虑:

(1) 产品本身的问题,试验结果质控时剔除了部分无效剖面,这些无效剖面中有一部分测量出了完整的剖面,只不过偏差太大,无法使用,若这些完整剖面参与计算,虽然可以提高成功率,但会相应增加误差。

(2) 可能与投放环境有关,通过实验记录可以发现,雨天投放效果较差,有些型号的国产 XBT 失败率增加,而进口 XBT 很多毛刺的温度剖面也是在这个时候出现,可能是雨天对仪器有一定的干扰。

(3) 标准 CTD 的测量误差无法避免,一般情况下,CTD 的精度足够高,但是在高海况的情况下,海面的波动会影响 CTD 压力的测量,这个可以从 CTD 下降和上升的数据重叠程度看出,重叠越好,数据越可靠,因此尽可能在低海况下进行试验。

(4) 进口 XBT 的产品标称精度与实际测量精度有一定的差距,从结果看出,最小的误差也比产品的标称精度大,影响国产 XBT 精度的计算。

(5) 与国产 XBT 温度探头的精度有关,与 CTD 进行比测时,进口 XBT 均方根误差为 0.28°C ,而国产 XBT 中,最小为 0.31°C ,两者尚有一定的差距,关于

纯温度探头的精度将在以后的试验中再进行分析。

(6) 可能与现场投放的操作是否规范有关,不规范的投放将导致线轴的释放不够顺畅,探头不能按预定的速度下降,导致误差偏大,甚至投放失败。

(7) 海洋中一些快速变化的中尺度现象也可能会影响 XBT 的比测。有的参试单位连续投放的几枚 XBT 都有获取数据,但均属于无效剖面,这很可能在海洋内部有中尺度海洋现象,因此,在试验过程中,最好能对海流进行同步观测。

5 总结

从本次比测试验结果来看,国产 XBT 整体上表现良好,甲单位 XBT 精度最高,与进口的 XBT 精度接近,其次为丁单位,乙和丙单位的 XBT 精度略低。但也存在一些问题,国产 XBT 的成功率平均值约为 80%,比进口 XBT 低,精度与进口的还有一定差距,最低相差 0.03°C ,并且均有不可用的无效剖面,大约占 16%,这将影响国产 XBT 在应用上的推广。

通过本次试验,我们注意到采用进口 XBT 做标准已经不能满足比测的要求,无法准确计算出国产 XBT 精度,但该结果仍然具有参考意义。试验时尽可能在低海况下进行,同时,应该实时观测海洋状况,防止中尺度现象对试验造成干扰。

本次试验的比测和分析方法可以为其他国产 XBT/XCTD/CTD 等仪器的比测试验提供借鉴。

参考文献:

- [1] Cheng L, Abraham J, Goni G, et al. XBT Science: Assessment of instrumental biases and errors [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2016, 97(6): 923-933.
- [2] Marlos G, Gustavo G, Klaus K. Reducing biases in XBT measurements by including discrete information from pressure switches[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30: 810-824.
- [3] Cowley R, Wijffels S, Cheng L, et al. Biases in expendable bathythermograph data: A new view based on historical side-by-side comparisons[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2013, 30: 1195-1225.
- [4] Kimio H, Hiroyuki Y. Detection of systematic errors in XBT data and their correction [J]. Journal of the Oceanographical Society of Japan, 1987, 43: 68-76.
- [5] Kimio H, Tamaki Y. New detection method for XBT depth error and relationship between the depth error and coefficients in the depth-time equation[J]. Journal of Oceanography, 1992, 48: 221-230.
- [6] Hanawa K, Rual P, Bailey R, et al. A new depth-time equation for Sippican or TSK T-7, T-6 and T-4 expendable bathythermographs (XBT)[J]. Deep-Sea Research I, 1995, 42: 1423-1451.
- [7] Hanawa K, Rual P, Bailey R, et al. Calculation of the depth equation of expendable bathythermographs by a new temperature-error-free method[S]. (Application to Sippican/TSK T-7, T-6 and T-4 XBTs), UNESCO Technical Papers in Marine Science, 1994. <http://unesdoc.unesco.org>.

- [8] Viktor G, Franco R. On depth and temperature biases in bathythermograph data: Development of a new correction scheme based on analysis of a global ocean database[J]. *Deep Sea Research*, 2010, 57: 812-833.
- [9] Cheng L, Zhu J, Franco R, et al. A new Method to estimate the systematical biases of expendable bathythermograph [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2011, 28: 244-265.
- [10] 张平, 唐锁夫, 屈科, 等. 国产 XBT 海上测试及实际使用效果分析[J]. *声学技术*, 2012, 31(6): 570-573.
Zhang P, Tang S, Qu K, et al. Test and analysis on domestic-made XBT probe[J]. *Technical Acoustics*, 2012, 31(6): 570-573.
- [11] 钱洪宝, 徐文, 张杰, 等. 对海洋仪器设备规范化海上试验的认识与思考[J]. *海洋通报*, 2016, 35(4): 386-389.
Qian H, Xu W, Zhang J, et al. Overview and further thoughts on the standardized sea trials for marine instruments [J]. *Marine Science Bulletin*, 2016, 35(4): 386-389.
- [12] Uchida H, Ohyama K, Ozawa S, et al. In situ calibration of the seabird 9 Plus CTD thermometer [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2007, 24: 1961-1967.
- [13] Alberola C, Millot C, Send U, et al. Comparison of XCTD/CTD data[J]. *Deep-sea Research I*, 1996, 6: 859-876.
- [14] Mizuno K, Watanabe T. Preliminary results of in situ XCTD/CTD comparison test[J]. *Journal of Oceanography*, 1998, 54: 373-380.
- [15] 叶德培, 赵峰, 施昌彦, 等. JJF 1059.1-2012. 测量不确定度评定与表示[S].北京:中国计量出版社 2012.
Ye P, Zhao F, Shi Y, et al. JJF 1059.1-2012. Evaluation and expression of uncertainty in measurement [S]. Beijing: China Metrology Publishing House: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2012.
- [16] 费业泰. 误差理论与数据处理[M].北京:机械工业出版社, 1996.
Fei Y. Error Theory and Surveying Adjustment[M]. Beijing: China Machine Press, 1996.
- [17] 吕国涛, 胡长青, 张平. 利用二次拟合对 XBT 探头相关参数的改进[J]. *声学技术*, 2009, 28: 28-30.
Lv G, Hu C, Zhang P. Research on improving related parameters of XBT based on quadratic fitting [J]. *Technical Acoustics*, 2009, 28: 28-30.
- [18] Anderson E R. Expendable bathythermograph (XBT) accuracy studies [R]. Naval Ocean Systems Center Tech, San Diego, California, 1980.
- [19] Cheng L, Zhu J, Cowley R, et al. Time, probe type, and temperature variable bias corrections to historical expendable bathythermographs[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31: 1793-1825.
- [20] Glenn R, Allan R. XBT measurements of thermal gradients in the MODE eddy [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1976, 7: 300-302.
- [21] 邓冰, 陈凤贵, 肖义国, 等. 基于实测资料海洋内孤立波诊断模型设计[J]. *装备环境工程*, 2014, 11(3): 10-13.
Deng B, Chen F, Xiao Y, et al. Diagnosis model design of internal solitary waves based on in-situ data [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2014, 11(3): 10-13.

Research on the Method of Comparing the In-Situ Performance of the Domestically-Made XBT and Analysis of the Results

LEI Fa-me^{1,2,3}, SHANG Shao-ping^{1,2,3}, HE Zhi-gang^{1,2,3}, WANG Peng⁴, DAI Hao^{1,2,3}

1. *Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Marine Information Technology Ministry of Education, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China;*

2. *Institute of Ocean Exploration Technology, Xiamen University, Xiamen 361005 Fujian Province, China;*

3. *College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005 Fujian Province, China;*

4. *Troop 61741 of the People's Liberation Army, Beijing 100094, China*

Abstract: With the development of the domestically-made XBTs, their applications are boosting in ocean observation. Therefore, Xiamen University carried out the Program "In situ comparison-testing and standard inspection procedure for applicability of oceanographic monitoring equipment (the National 863 Program) " in the northeast of South China sea. It is aimed at the inspection and verification of domestically-made XBTs which have mature technology for commercialized production. In the sea trials, the reseavrthers firstly evaluated the precision of the imported XBT by comparing the profiles with CTD in different fixed-positions, and then compared the domestic XBT with the imported XBT at the underway observation. The result indicated that the domestic XBT shows good performance, with the success rate of approximate 80%. The precision of some domestically-made XBTs was close to that of the imported XBTs, but with more invalid temperature profiles. Meanwhile, it is found that the precision of the imported XBT was too low to satisfy the requirement in the test, so the researchers couldn't get the actual precision for domestic XBT, but the result still had importance reference value. This test will provide supports for the large-scale applications and promotion of the domestic XBT and can be used for reference for other XBT/XCTD/CTDs.

Key words: expendable bathythermograph profiler; XBT; comparison; precision; error spread law