

# 海洋投弃式温深剖面仪应用发展概述

陈文景<sup>1</sup>, 张林<sup>1,2</sup>, 孙雪海<sup>1,2</sup>, 段嘉希<sup>1,2</sup>

(1. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237; 2. 海军潜艇学院, 山东 青岛 266199)

**摘要:** 海洋温度的变化会显著影响水下声传播、生物活动、气象和洋流等现象, 温深是反映海洋变化运动规律的基本参数。投弃式温深剖面仪(Expendable Bathythermograph, XBT)、温盐深测量仪(Conductivity Temperature Depth, CTD)、全球海洋实时观测网(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)等是目前进行海水温深测量的主要仪器。其中 XBT 因其现场测量简便、效率高、硬件成本低等特点, 正在被大规模使用。本文主要介绍有关海洋温度测量的背景及演化历史, 分析对比了国内外相关仪器设备的发展现状, 总结了国产化产品还存在的差距和不足, 另外对传感器、结构设计、数据通讯传输、数据后处理、可靠性研究等关键技术和研究热点进行了详细介绍, 最后对未来无人平台的技术发展路线给出了思路和见解, 开展投弃式温深剖面仪的相关技术研究和产品研制对实现国产化有积极的推动意义。

**关键词:** 投弃式; 温深剖面仪; 投弃式温深剖面仪(Expendable Bathythermograph, XBT); 温度测量; 深度测量

中图分类号: P715.9 文献标识码: A  
DOI: 10.11759/hyxx20191011003

文章编号: 1000-3096(2020)11-0114-09

海洋声速剖面作为重要的海洋水文参数在海洋环境监测、开发利用和科学研究中有着特别重要的意义, 在军事上<sup>[1]</sup>, 对于潜艇的航行安全、隐蔽、通讯、攻击及舰艇和飞机的探潜和反潜行动有非常重要的意义, 为此人们已开发设计了各种形式的水温剖面测量仪器。其中投弃式温深剖面仪(Expendable Bathythermograph, XBT)是一种通过投弃一个温度感应探头, 在温度探头的快速下降过程中感应海水温度剖面的一次性测量设备。和温盐深测量设备(Conductivity Temperature Depth, CTD)相比, XBT 在使用过程中无需绞车, 成本低廉, 即使测量舰船在航行状态下也可快速测得海水的温度剖面, 具有良好的实时性和便捷性, 因此在海洋水文调查中得到了广泛的应用。

XBT 因其具有快速、实时、价格低廉等优势<sup>[2]</sup>, 而迅速得到海洋科学家、相关科研院所和企业的重视, 20 世纪 70 年代开始, 国外已经进行了大规模的实际应用, 国内从 80 年代开始关注和研究投弃式设备, 至今与国外先进设备仍存在一定差距。下文将就海洋温度测量历史、投弃式设备发展现状与差距、关键技术方向进行详细介绍。

## 1 海洋温度测量历史

1935 年 Carl-Gustaf Rossby 在美国研制出第一台海洋温度测量样机, 并在二次世界大战期间提供

给美国海军, 在潜艇发射鱼雷、规避目标上起到了很大的作用。对于海水温度的观测, 从最早的颠倒温度计(Nansen Bottle)、机械式温深仪(Mechanical Bathy Thermograph, MBT)、XBT、CTD, 到今天的自持式剖面观测浮标、水下滑翔机(Glider)等。

随着直升飞机以及固定翼飞机在海洋调查中的应用日益广泛, 人们在 XBT 的基础上开发设计了机载投弃式海水温度剖面测量系统(Aerial XBT, AXBT)。和 XBT 相比, AXBT 在 XBT 的基础上增加了无线电发射装置, 通过无线电将 XBT 测得的海水温度剖面数据发送到安装在飞机上的接收装置, 从而可利飞机高速运动的特性在短时间内完成大范围的海水温度剖面调查, 效率大为提高。如果采用无人机/艇运载方式, 灵活性、隐蔽性、经济成本会更有优势。另外还有一些水下机器人(AUV)之类的会携带温度、压力传感器, 其在作业过程中会实时显示并保存测量结果。

## 2 投弃式海洋设备发展现状

### 2.1 国外发展现状

针对海洋领域的迫切需求, 国外从 20 世纪 30 年

收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2020-07-20

作者简介: 陈文景(1989—), 男, 湖北孝感人, 硕士, 工程师, 研究方向为水声环境效应与探测技术, 电话: 15671113721, E-mail: chenwenjingmail@qq.com

代开始,着手对船载投弃式海洋仪器设备进行研制,加装单一温度传感器的 XBT 最先被研发成功,并在此基础上,增加传感器数量,相继研发成功投弃式温盐深仪(XCTD)、声速剖面仪(XSV)和流速剖面仪(XCP)。企业化运作模式下,发展形成了谱系化的船载、机载和潜艇载系列设备,既服务于军方,也供海洋科学工作者用作科学研究。目前占主流、且技术实力过硬的投弃式海洋仪器设备研制生产公司主要有两家,分别是美国斯皮坎公司(Sippican, Inc.)和日本鹤见精机有限公司(Tsurumi Seiki, Co. Ltd, 简称 TSK)。两家公司在投弃式海洋仪器设备的研制领域一直处于世界先进水平,相关产品垄断了全球市场,成为比照产品,其传感器设计、制作工艺等核心技术依然对外保密<sup>[3]</sup>。

关于船载投弃式海洋仪器,如船用投弃式温深仪(SXBT)等,在国内已有应用,劳雷工业公司在华独家代理了日本鹤见精机公司的投弃式测量设备(XBT、XCTD、XCP、XSV)。

对于机载投弃式海洋仪器(如 AXBT)的相关资料公开较少,仅有简略的产品介绍,并且这些机载投掷系统均为手动方式。芬兰维萨拉公司在机载下投式探空系统中用到了自动投放装置,可以支持载人飞机、无人机投掷(图 1)。

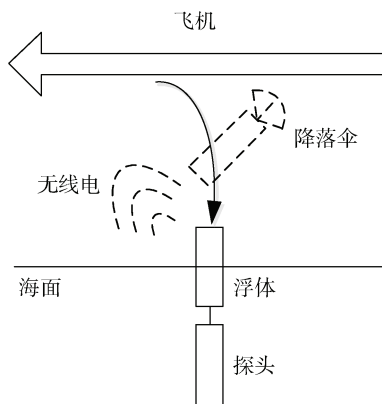


图 1 机载投弃式温深测量仪工作原理  
Fig. 1 Workflow diagram of AXBT

## 2.2 国内发展现状

国内投弃式海洋仪器设备研究始于 20 世纪 80 年代,国家海洋技术中心(刘宁等<sup>[4-5]</sup>)、国防科技大学(原解放军理工大学气象海洋学院,叶松<sup>[6]</sup>、焦冰<sup>[7]</sup>等)、中国科学院声学研究所东海研究站(徐海东<sup>[8]</sup>、张平<sup>[9]</sup>等)、山东省科学院海洋仪器仪表研究所(杜立

彬、陈维山<sup>[10]</sup>等)等单位,开展了投弃式海洋参数剖面测量设备中有关探头运动仿真、数据通讯传输、系统集成测试等方面的研究工作,经过多年的努力,取得了一批实用性专利、试验样机等成果。其中国家海洋技术中心、中科院声学所东海站,以及西安天和防务公司和北京星天海洋公司等单位已经基本掌握了 XBT 的设计技术和制造工艺,并实现 XBT 产业化生产。

国防科技大学叶松等<sup>[6]</sup>提出了新型远海机动水文环境监测系统(New Mobile Offshore Hydrologic Environment Monitoring System, NMOHEMS),这是一种以无人机技术、流星余迹通信技术和海洋水文现场探测技术相结合为核心技术特征,实现远距离、安全、机动、保密和顽强性强的海洋水文环境多要素同步监测的系统。目前处于概念设计及相关理论论证阶段,产品化样机缺失。

售价上,根据网络公开招标文件显示,TSK 的“XBT 抛弃式温盐深采集系统”为 19.9 万元,国产系统一般在 8 万~10 万元间,适用不同海深和不同航速,探头价格不同,TSK 一般约为 6 000 元/枚,国产约为 2 000 元/枚。

## 2.3 国内外差距

国产的 XBT 产品已经可以实现规模化生产,但与国外的产品仍存在一定差距,主要表现在:不成体系,型号不全,针对不同的海域海况,考虑的还不周全;设备稳定性较差,投放成功率低,制作工艺不成熟,易受到外界或内部的影响而导致失效;比测试验不足,主要是将 XBT 与高精度的 CTD 进行比较校正,国外在太平洋、大西洋、印度洋等不同海域都开展了比测试验,据统计,20 世纪 70 年代,美国实施的比测数量就达到 2 000 枚,而国内截止到 2011 年还不足 500 枚,比测试验的开展有助于提高设备的测量精度,意义重大,国内在这方面投入不够。张平等<sup>[9]</sup>在海上将 TSK 与东海站的几个型号进行了对比(见表 1),部分参数与同等规格的 TSK 产品相当,但仍发现了存在的很多问题,需优化结构与电路设计,实际操作过程中提前把探头放置在与海温差异不大的地方。

## 3 关键技术与研究热点

### 3.1 温度传感器

探头在下降过程中,温度传感器响应水温变化

表 1 TSK 与国产产品参数指标对比<sup>[9]</sup>

Tab. 1 Comparison of parameters between TSK and domestic products<sup>[9]</sup>

厂家	型号	温度测量范围/°C	温度测量误差/°C	深度测量范围/m	深度测量误差/m
日本 TSK	T-10	-2~35	±0.2	0~200	±2%或 5
	T-6	-2~35	±0.2	0~460	±2%或 5
	T-7	-2~35	±0.2	0~760	±2%或 5
中国科学院声学研究所东海研究站	D3	-2~35	±0.2	0~300	±2%或 5
	D5	-2~35	±0.2	0~500	±2%或 5
	D7	-2~35	±0.2	0~760	±2%或 5

的速度直接影响到测量的效果。国际上,一般采用时间常数来表征传感器响应动态环境变化快慢的能力。温度传感器的类型主要有<sup>[11]</sup>热电偶、金属热电阻(RTD, Resistance Temperature Detector)、热敏电阻、光纤光栅等几种。热电偶测温范围广,灵敏度低;RTD 稳定性强,信号线性度良好,但尺寸大、成本高、灵敏度低;热敏电阻响应快,但存在严重的热电非线性;光纤光栅体积小、精度高,应用广泛。

目前,美国、加拿大、日本等少数先进国家可以制造时间常数达到 60~70 ms 的海洋剖面测温传感器,如美国的海鸟(SBE, Sea-Bird Electronics)系列传感器的响应时间位 65 ms<sup>[12]</sup>。国内采用热敏电阻研制的传感器普遍的响应时间在 100 ms 左右,而传统的铂电阻为十几秒。余有龙<sup>[13]</sup>在对金属封装光纤光栅温度传感器特性的实验研究中得出,采用紫铜管、黄铜管、不锈钢管封装的布拉格光纤光栅(FBG, Fiber Bragg Grating)温度传感器的响应时间为 3.8 s、4.0 s、4.5 s。张登攀等<sup>[12]</sup>提出了一种新的封装工艺制作 FBG, 经过模拟仿真和实验得出其响应时间可以达到 50 ms 左右,比普通光纤温度传感器的响应时间提高了一个数量级。

另外,针对国内对传感器时间常数测试和检验方法和平台的缺失,国家海洋技术中心<sup>[14]</sup>研发设计了时间常数测量装置,对 SBE3 的测量结果显示,在运动速度为 1m/s 时,测定的时间常数为 64.8 ms,与厂家标称的 65 ms,绝对误差 0.2 ms,相对误差 0.3%,对比结果较为准确。

### 3.2 结构设计

不同的 XBT 探头结构设计,会对应不同的水下运动姿态和极限速度,选择合适的结构设计对保证数据获取的准确性和温深数据计算对应关系都至关重要。国内很多学者开展了探头结构设计相关的数值模拟和试验,刘孟德等<sup>[15]</sup>利用 Fluent 软件建立探头外形的流体力学模型,经分析得出:探头主体采用流

线型设计有助于保持姿态的稳定,头部采用弧线型设计,有利于获得稳定的下降速度。徐金随等<sup>[16]</sup>采用 N-S 方程和  $k-\epsilon$  湍流模型,对圆柱形、有尾翼形、无尾翼形等三种不同结构的探头进行压力场、速度场的数值模拟,得到了 2.1 m/s、4.6 m/s、4.9 m/s 的极限速度,表明外壳为流线型的可以获得更大的极限速度,有尾翼的在下落过程中表现的更稳定,同时与实际试验比较后也基本符合相关规律,验证了数值模型的有效性。陈振涛等<sup>[17-18]</sup>同样认为研究探头的下落过程和姿态必须考虑外形的影响,使用的探头是无人机载的小型探头,采用了混合网格技术结合湍流模型<sup>[19]</sup>来开展数值验证工作,分别对导流腔、收缩段、尾翼等 6 种不同组合方案进行对比,分析不同雷诺数下的阻力系数和相同质量下的极限速度,得出结论:导流腔、收缩段减阻,尾翼增阻;雷诺数增加,  $\log R_e$  在 2.3 至 3.8 时,阻力系数迅速减小,在 3.8 至 5.1 时,减小趋势放缓。孙涛等<sup>[20]</sup>也通过数值计算和少量物理实验验证探头运动规律,考虑了探头在 0~20 m 高度自由落体,及水下的全运动过程,在得到探头在海水中的阻力和浮力后,运用四阶龙格-库塔方法求解运动控制方程,并考虑了海水密度和探头重量变化情况下的运动规律。众所周知,在不同的海域、不同的深度,海水具有不同的密度,导致探头的浮力会发生变化,探头在下降过程中,随着缠绕导线减少,自身重量也会减轻。通过模型计算得到结果表明:不同的高度将赋予探头不同的入水初速度,对应着不同的阻力,速度越大,阻力越大;入水时间短时,海水密度对入水距离的影响不大,入水时间越长,密度差异导致的入水距离越大;探头质量变化相较于质量不变,也会对极限速度有影响;海水密度的变化和探头重量变化相比,后者对极限速度的改变更大。同样,黄银水等<sup>[21]</sup>在探头线圈不释放的条件下拟合出了阻力系数与雷诺数的关系式。根据在实际测量过程中,探头附近的流动处于湍流状

态,上述的数值模拟较为理想,肖鸿等<sup>[22]</sup>采用时变雷诺方程结合湍流模型来计算探头的下沉运动状态,模拟了水流与探头的相互作用,根据得到的速度和压力分布,来分析阻力系数与雷诺系数之间的相互关系。

### 3.3 数据通讯传输

传感器采集的数据需要传回到船基信号处理单元,这两者之间的数据通讯传输按是否有数据线连接,主要可以分为两大类:有线、无线。

(1) 首先介绍目前应用较为广泛的有线传输,数据流程一般如下图 2 所示。

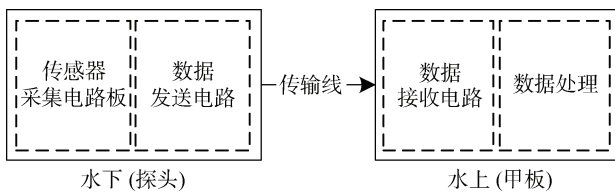


图 2 有线传输数据采集传输链路

Fig. 2 Diagram of wired data acquisition and transmission

探头包括了传感器、数据采集电路、数据传输发送电路,采集完毕的数据通过与水面上的甲板单元连接的传输导线(漆包线),直径约为 0.1 mm,将数据传递到甲板上的采集板,再经过处理软件显示数据结果。传输导线电阻很大,线间电容和等效电感都随着线轴展开,其数值变化大。传输距离越长,信号的衰减和畸变也越严重,所以要采取相关措施保证接收到数据的正确性和可靠性<sup>[23]</sup>。

(2) 另外一种就是无线传输,目前这种传输模式多用于浮标、航行器与船基的通讯,在 XBT 上正在逐步推广。无线传输解除了探头必须与船连接的限制,有助于提高采集效率。通常的数据传输链路如下图 3 所示。

操作人员在船上将投弃式单元整体投入水中,或者挂载到无人机上,到达指定测量区域,启动投放操作后,温深浮标滑出弹仓并打开降落伞,缓慢落入水中,当触及海面时自动脱落保护罩,剥离降落伞并延展通讯天线,探头和浮体在水中稳定一定时间后自动分离或者在收到测量指令后分开,探头开始下沉,下沉过程中释放传输线,由传感器采集不同深度的温度信息,通过传输线传给温深浮标在海面的浮体单元,浮体内部经过简单的数据处理后经由天线将数据信息传递给船基平台上的数据接收

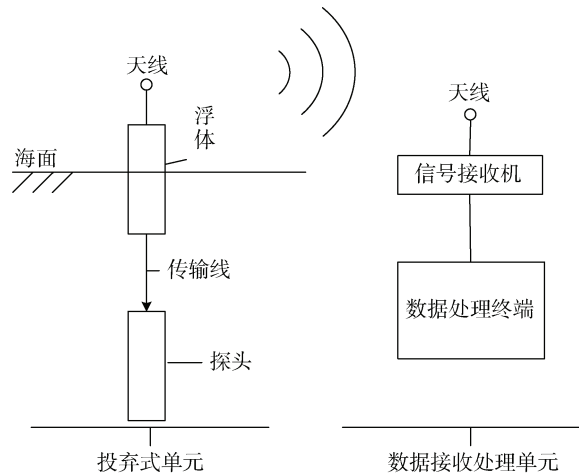


图 3 无线传输数据采集传输链路

Fig. 3 Diagram of wireless data acquisition and transmission

单元,信号接收机将信号传送到数据处理终端(软件),完成数据的最终处理与显示。在完成温深测量任务后启动自毁程序,沉入海底。

关于投弃式单元与数据接收单元之间的无线通讯,有通过卫星、流星余迹等方式进行数据传输。翟小羽等<sup>[24]</sup>、张少永<sup>[25]</sup>在海上数据测量中运用了卫星通讯手段进行了数据的传输,在浮标等稍大型设备上,功率、天线等影响数据传输质量的因素都可以得到较好的满足,对于 XBT 这种小型化的设备,相关的技术工作还需进一步深入开展。焦冰<sup>[26]</sup>设计了通过流星余迹将数据传回地面主站的传输方式,流星进入大气层后会在高度 100 km 的位置产生电离余迹,流星产生的余迹具有随机突发性,一般在几毫秒至几秒之间,在短暂的时间里将其作为通讯媒介,利用其反射或散射电波,以此来达到通讯的目的<sup>[27]</sup>。徐海东等<sup>[8]</sup>设计了基于时分多址原理的数据传输系统,最多允许 8 个 AXBT 同时工作,大幅提高了测量效率,并对数据采用了冗余编码,总计 104 Byte,其中 100 Byte 为 10 s 的温度数据,2 Byte 采样序号,2 Byte 为校验和。2011 年在千岛湖进行了实际测试,试验结果表明系统工作稳定可靠,符合预期。

### 3.4 数据后处理

因为 XBT 探头本身没有携带压力传感器,要想获取探头测量温度所对应的深度,通常是根据探头在水中的下沉速度,从入水时刻开始计算“时间-深度”的关系式,即下降速率公式(Fall-Rate equation),一般形式为:

$$z(t) = at - bt^2,$$

其中,  $z(t)$ 为  $t$ (单位秒)时刻对应的探头深度,  $a$ 、 $b$ 为待求参数。典型的如 TSK 公司 T-5 型 XBT 产品的下降速率公式为<sup>[28]</sup>:

$$z(t) = 6.540\ 71t - 0.001\ 869\ 1t^2,$$

温度传感器的测量是按照一定的频率进行采样的, 这样就能与深度一一对应起来, 因此深度数据只要传送采样序号即可。在实际使用中, 不同厂商、不同型号的探头有不同下降速率, 探头的外形、重量、投放的高度、入水速度等都会对其产生影响。系统会默认设置好深度计算公式, 如果想进一步优化测量数据对应关系, 对于参数  $a$ 、 $b$  的选取可以在比照 CTD 数据的基础上再进行一定的修正。2008 年美国大西洋海洋大气研究所 AOML 专门就 XBT 的下降速率问题举办过国际研讨会, 力求建立一个新的公式以用于过去和未来 XBT 采集的数据, 同 CTD、Argo 浮标数据一起, 为研究全球气候温度变化提供有效的参考。国内纪风颖<sup>[29]</sup>也对不同数据集处理方法、精度误差、注意事项进行了研究。曾海燕<sup>[30]</sup>提出了一种基于最优差值法的温度剖面补全算法, 并结合实测数据进行了验证。

求解参数  $a$ 、 $b$  的方法大都基于实际数据的拟合计算, 但不同研究人员采用的试验装置和方法存在差异。井彦明<sup>[31]</sup>利用高速摄像机将探头的下降过程全部拍摄下来, 通过对摄像资料的处理, 得到探头下降的深度、速度、时间数据, 分析下降速度得知探头在静水中的极限下降速度为 5.27 m/s, 即探头在水下经过一段时间加速后趋于稳定的速度, 加速时间大约 2 s, 距离约为 7.5 m。陈维山<sup>[10]</sup>通过在 20 m 的透明水槽中试验, 将多组下落距离  $z(t)$ , 和对应时间  $t$ , 拟合求解取期望, 并与 CTD 测量数据进行对比, 求得深度误差曲线在 2% 以内。赵江涛<sup>[32]</sup>通过基于积分投影和 Radon 变换的方法测量下降速度, 依旧是通过高速摄像机进行拍摄探头下降的一系列图像, 首先求取  $N$  帧图像的水平积分投影, 以合成基于此的时间堆栈图像, 经过 Canny 边缘检测和 Radon 变换检测直线, 最终得到 XBT 的下落速度, 该方法在图像质量不是很清晰的试验环境下依旧能得到较为准确的探头下降速度。翁兴国<sup>[33]</sup>以单片机为基础, 探头连接着释放线, 下降过程中带动反光片产生高光平外部中断, 单片机响应并控制计时器计时, 预留的释放线长度就是探头下降的距离, 此种装置结构简单, 系统误差在 0.000 36 s, 能够满

足系统的精度要求。

在现场作业中, 甲板处理软件也是很关键的一环, 有助于实时查看温深剖面, 并对测量数据的有效性进行直观的评估。P. Thadathil<sup>[34]</sup>、翟小羽<sup>[35]</sup>、贾志成<sup>[36]</sup>等都进行过这方面的软件开发工作。通常的数据处理软件主要包括了数据管理、文件管理、信息管理模块等功能(见图 4)。在软件中可以查看下降速率公式, 打印温深剖面, 进行区域温度等值线的绘制等。

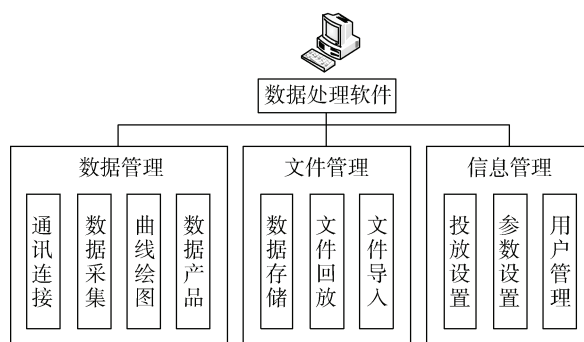


图 4 XBT 数据处理软件功能模块图

Fig. 4 Functional module diagram of XBT data processing software

### 3.5 可靠性研究

20 世纪 90 年代, 澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)在有关 XBT 质量控制手册汇总了系统测量失效的常见故障模式<sup>[37]</sup>, V Philbrick<sup>[38]</sup>通过实际海测, 也开展了类似的工作。国内近些年也陆续开展了相关的工作。方芳等<sup>[39]</sup>利用统计过程控制(Statistical Process Control, SPC)对海上试验数据进行了故障原因分析, SPC 是一种运用统计技术对过程中的各个阶段进行监控, 从而达到改进和保证质量的目的, 目前已广泛应用于设计、生产、服务和管理等一般过程。试验数据来源于 2009 至 2010 年间的 4 次海试, 共投放 126 枚, 失效 50 枚(见表 2)。经初步分析, 除了一些偶然因素(如人员操作不当)是造成故障率较高的原因外, XBT 失效最大的故障原因在于机械部件失效, 切实提高系统本身的稳定性是降低故障率的最有效办法。

翁兴国等<sup>[40]</sup>运用 Petri 网模型对 NMOHEMS 系统的布放系统进行了可靠性分析。由于故障树模型较难表现故障发生的时间序列关系, 因此采用 Petri 网模型对其进行简化, 经过分析和实验验证, 该方法可以有效提高运算效率, 减少计算量, 并简化了

表 2 故障现象统计表<sup>[39]</sup>

Tab. 2 Statistical table of fault phenomena<sup>[39]</sup>

序号	合计	故障概率	故障比例/%	总占比/%
地线松脱	1	0.008	2	
发射枪短路	3	0.024	6	
探头无连接	7	0.056	14	28
数据异常	2	0.016	4	
软件错误	1	0.008	2	
漆包线断裂	22	0.175	44	
船体刮擦漆包线	6	0.048	12	72
漆包线绝缘下降	8	0.063	16	
合计	50	0.398		

软件程序的实现,在系统可靠性分析做出了有益的尝试。任强等<sup>[41]</sup>将 TSK 公司生产的 XCTD 与国家海洋技术中心生产的 XBT 进行对比分析,在每个站点同时释放 XCTD 和 XBT,总计得到 13 组数据,分析后得出 XBT 的数据整体表现良好,能够满足复杂海域的快速走航观测,准确性和可靠性良好(表 3)。

表 3 XBT 与 XCTD 技术指标<sup>[41]</sup>

Tab. 3 Comparison of technical indices between XBT and XCTD<sup>[41]</sup>

技术指标	XBT	XCTD-1
最大深度范围/m	0~760	1000
温度测量范围/°C	-2~±35	-2~+35
深度测量精度/F·S	±2%	±2%
温度测量精度/°C	±0.1	±0.02
适应最大航速/ kn	15	12
温度分辨率/°C	0.02	0.01
最小深度间隔/ m	0.65	0.13

## 4 总结与展望

针对投弃式温深剖面仪国产化进程,本文主要从 XBT 的国内外发展现状、差距,以及结构外观设计、数据通讯传输等研究热点和关键技术进行了介绍,总结了国产化产品存在的突出问题:产品不成体系、测量稳定性差、质量和可靠性低。面对以上问题及现今发展趋势,未来应着力从以下几个方面进行突破:

(1) 开发适应不同海域、不同航速、不同搭载平台的产品,形成谱系化的产品序列。国外的先进产品在采集频率、深度、航速等参数细分领域都有对应的产品,目前国产化产品还存在巨大差距,相关研

究院所应加强沟通协作和合理分工,优势互补,减少重复和低质量劳动;

(2) 提高产品加工工艺。加工工艺的提高有赖于产业链上游企业切实提高设备加工精度和操作人员技术等,在实际使用中,漆包线的断裂、绝缘性降低是导致故障产生的重要原因,有必要从全产业链上提高协同配合,精益求精;

(3) 增加比测试验。比测试验的开展是为了提高产品可靠性,产品的实际测量效果和精度需要经过大量的对比试验完成,不同的精度会直接影响到数据测量的质量,以及后续以此为基础的研究报告产出质量,所以务必加强对比测试验的重视;

(4) 继续深入研究投弃式设备的相关基础技术。XBT 是投弃式设备的一种,与其他投弃式设备(如 XCP)有部分相同的技术属性,对探头下沉的流场分析、数据采集和传输等继续深入开展,是形成独有和更先进技术的基础。另外,传感器技术也是限制产品质量的关键技术,理论基础、加工技术都有待加强;

(5) 积极开展无人平台的投弃式设备研发。无人平台具有高隐蔽性、高机动性、高实时性等诸多优点,目前国内开展的并不多,针对众多民用和军事需求,积极开展原型机试验、测试、生产有着广阔的应用基础。

### 参考文献:

- [1] 史伟,野学范,孙晓磊.多功能抛弃式浮标及在潜艇作战中的运用[J].四川兵工学报,2011,32(7):121-123. Shi Wei, Ye Xuefan, Sun Xiaolei. Multifunctional abandoned buoy and its application in submarine operations[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2011, 32(7): 121-123.
- [2] 方芳.投弃式温度剖面测量仪(XBT)可靠性研究[D].天津:国家海洋技术中心,2011. Fang Fang. Study on Reliability of the Expendable Bathythermograph(XBT)[D]. Tianjin: National Ocean Technology Center, 2011.
- [3] 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. Shi Xingang, Su Qiang. Development status of abandoned marine instruments and equipment[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2015(4): 46-48.
- [4] 刘宁.XCP等投弃式剖面测量技术研究[J].中国科技成果,2010,11(23):16. Liu Ning. XCP and other discarded profiling techniques[J]. China Science and Technology Achievements, 2010, 11(23): 16.
- [5] 刘宁,李永军,朱光文.一种投弃式快速海流剖面观

- 测仪器[J]. 海洋技术, 2007(3): 13-15.
- Liu Ning, Li Yongjun, Zhu Guangwen. A Kind of fast expendable current profiler measure production[J]. Ocean Technology, 2007(3): 13-15.
- [6] 叶松, 王晓蕾, 焦冰, 等. NMOHEMS 的概念与设计[J]. 海洋技术, 2010, 29(1): 28-31.
- Ye Song, Wang Xiaolei, Jiao Bing, et al. The concept and design of NMOHEMS[J]. Ocean Technology, 2010, 29(1): 28-31.
- [7] 焦冰, 叶松, 陈振涛, 等. 抛弃式海水温度测量系统的设计[J]. 海洋技术, 2012, 31(3): 6-8, 16.
- Jiao Bing, Ye Song, Chen Zhentao, et al. Design of expendable sea temperature measurement system[J]. Ocean Technology, 2012, 31(3): 6-8, 16.
- [8] 徐海东, 胡长青, 张平. 机载抛弃式温度剖面仪系统设计[J]. 声学技术, 2012, 31(6): 555-558.
- Xu Haidong, Hu Changqing, Zhangping. System design of airborne expendable bathy thermograph[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(6): 555-558.
- [9] 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 Ping, Tang Suofu, Qu Ke, et al. Test and analysis on domestic-made XBT probe[J]. Technical Acoustics, 2012, 31(6): 570-573.
- [10] 陈维山, 刘孟德, 雷卓. 投弃式温深计探头海水中下落深度计算方法研究[J]. 山东科学, 2012, 25(5): 25-29.
- Chen Weishan, Liu Mengde, Lei Zhuo. Research on the computational approach of falling depth of an expendable bathythermograph probe in seawater[J]. Shandong Science, 2012, 25(5): 25-29.
- [11] 徐霄阳. 海洋自容式温深测量仪研究与开发[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- Xu Xiaoyang. Research and development of marine self-contained temperature-depth data logger[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [12] 张登攀, 王璠, 王永杰. 光纤光栅海洋温度传感器的快速响应特性[J]. 光电工程, 2015, 42(3): 7-12.
- Zhang Dengpan, Wang Yao, Wang Yongjie. Fast response properties of ocean temperature sensors based on fiber bragg grating[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(3): 7-12.
- [13] 余有龙, 李德明, 张林. 金属管封装光纤光栅温度传感器特性的实验研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(5): 737-740.
- Yu Youlong, Li Deming, Zhang Lin. Experimental study on the characteristics of fiber bragg grating temperature sensor packaged with a metal tube[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2011, 28(5): 737-740.
- [14] 廖和琴, 田雨, 高坤. SBE3 温度传感器时间常数测量和测试方法的研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(6): 54-58.
- Liao Heqin, Tian Yu, Gao Kun. Research on the measuring and testing method of SBE3 temperature sensor time constant[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(6): 54-58.
- [15] 刘孟德, 陈维山, 刘杰. 基于 CFD 的投弃式温深计探头流场分析[J]. 山东科学, 2012, 25(5): 22-24, 29.
- Liu Mengde, Chen Weishan, Liu Jie. CFD based flow-field analysis of an expendable bathythermographs probe[J]. Shandong Science, 2012, 25(5): 22-24, 29.
- [16] 徐金随, 程浩, 相冰, 等. XBT 探头外形数值模拟及实验研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(2): 60-64.
- Xu Jinsui, Cheng Hao, Xiang Bing, et al. Numerical simulation and experimental study of the shape of XBT probe[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(2): 60-64.
- [17] 陈振涛, 叶松, 王晓蕾, 等. NMOHEMS 探头外形对其下沉运动的影响分析[J]. 海洋通报, 2012, 31(4): 449-453.
- Chen Zhentao, Ye Song, Wang Xiaolei, et al. Analysis of the influence of its shape on the dropping of NMOHEMS probe[J]. Marine Ocean Bulletin, 2012, 31(4): 449-453.
- [18] 陈振涛, 刘凤, 王晓蕾, 等. 抛弃式探头下沉运动数值计算的网格划分方法研究[J]. 海洋技术学报, 2017, 36(5): 32-37.
- Chen Zhentao, Liu Feng, Wang Xiaolei, et al. Research on the mesh dividing method for expendable probe sinking simulation[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(5): 32-37.
- [19] Zhou L J, Wang Z W. Numerical simulation of cavitation around a hydrofoil and evaluation of a RNG k- $\epsilon$  model[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130: 1-7.
- [20] 孙涛, 黄银水, 陶建华. 抛弃式温盐探头运动状态的数值模拟及其实验验证[J]. 海洋通报, 2002(2): 69-76.
- Sun Tao, Huang Yinshui, Tao Jianhua. Numerical modeling for the kinetic property of a dropping seawater temperature-salinity probe and experimental verification[J]. Marine Ocean Bulletin, 2002(2): 69-76.
- [21] 黄银水, 陶建华. 线圈释放式温、盐、深探头运动特性的数值计算方法研究[J]. 海洋技术, 2003(1): 45-48.
- Huang Yinshui, Tao Jianhua. Computation method of the kinetic property of salinity, temperature and depth probe with releasing winding[J]. Ocean Technology, 2003(1): 45-48.
- [22] 肖鸿, 刘长根, 陶建华. 抛弃式温盐探头阻力系数的数值模拟及其实验验证[J]. 海洋技术, 2006(1): 35-37.
- Xiao Hong, Liu Changgen, Tao Jianhua. Numerical simulation of drag coefficient for CTD probes and its experimental verification[J]. Ocean Technology, 2006(1): 35-37.

- [23] 陈雷, 贾志成, 李永军, 等. 投弃式温盐深测量仪数据传输系统的研制[J]. 海洋技术, 2009, 28(3): 26-29.  
Chen Lei, Jia Zhicheng, Li Yongjun, et al. Development of data transmission system of expendable CTD profiling system[J]. Ocean Technology, 2009, 28(3): 26-29.
- [24] 翟小羽, 王海涛, 齐占辉, 等. 基于北斗卫星的 XBT 数据传输系统设计与实现[J]. 海洋测绘, 2013, 33(2): 61-62, 66.  
Zhai Xiaoyu, Wang Haitao, Qi Zhanhui, et al. Design and implementation of XBT data transfer system based on the Beidou satellite navigation system[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 33(2): 61-62, 66.
- [25] 张少永, 李文彬, 商红梅, 等. 北斗一号卫星导航定位系统在抛弃式海洋移动观测平台的应用[J]. 海洋技术学报, 2014, 33(2): 93-98.  
Zhang Shaoyong, Li Wenbin, Shang Hongmei, et al. The application of the BEIDOU-1 navigation and positioning satellite system in expendable and mobile platforms for marine observation[J]. Journal of Ocean Technology, 2014, 33(2): 93-98.
- [26] 焦冰. 一种抛弃式海温探测仪通信系统的设计[A]//S8 大气探测与仪器新技术、新方法[C]. 中国气象学会, 2012.  
Jiao Bing. Design of a communication system for abandoned SST detector[A]//S8 New technologies and methods for 8 atmospheric sounding and instruments[C]. Chinese Meteorological Society: Chinese Meteorological Society, 2012.
- [27] 齐涛. 支持流星余迹通信的远程无线网络技术在气象无人机上的应用[J]. 气象水文海洋仪器, 2016(4): 59-63.  
Qi Tao. Application of remote wireless network technology for supporting meteor burst communication in the meteorological unmanned aerial vehicle[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2016(4): 59-63.
- [28] Shoichi Kizu, Hiroyuki Yoritaka, Kimio Hanawa. A new Fall-Rate Equation for T-5 Expendable Bathythermograph (XBT) by TSK[J]. Journal of Oceanography, 2005, 61: 115-121.
- [29] 纪凤颖, 林绍花, 万芳芳, 等. ARGO、GTSP 与 WOD 数据集及其应用中需注意的若干问题[J]. 海洋通报, 2016, 35(2): 140-148.  
Ji Fengying, Lin Shaohua, Wan Fangfang, et al. An introduction to Argo, GTSP, WOD and their application[J]. Marine Science Bulletin, 2016, 35(2): 140-148.
- [30] 曾海燕, 胡满佳. 机载投弃式温深浮标的垂直温度剖面补全算法[J]. 计算机光盘软件与应用, 2011(22): 117.  
Zeng Haiyan, Hu Manjia. Airborne abstain from deep-temperature vertical temperature profile buoy completion algorithm[J]. Computer CD Software and Application, 2011(22): 117.
- [31] 井彦明, 谭世祥. 机载投弃式温盐深浮标中的三项关键技术研究[J]. 海洋技术, 2001, 4: 48-53.  
Jing Yanming, Tan Shixiang. Key Points Study of Airborne Expendable CTD Probe[J]. Ocean Technology, 2001, 4: 48-53.
- [32] 赵江涛, 张东亮, 张锁平, 等. 基于视频的投弃式温深仪速度测量技术研究[J]. 电视技术, 2017, 41(4/5): 257-261.  
Zhao Jiangtao, Zhang Dongliang, Zhang Suoping, et al. Research on XBT velocity measurement method based on video[J]. Videoengineering, 2017, 41(4/5): 257-261.
- [33] 翁兴国, 叶松, 陈振涛, 等. NMOHEMS 剖面探头下沉实验装置研制[J]. 中国测试, 2013, 39(6): 68-72.  
Weng Xingguo, Ye Song, Chen Zhentao, et al. Design of submergence experiment equipment for NMOHEMS profile probe[J]. China Measurement & Test, 2013, 39(6): 68-72.
- [34] Thadathil P, Ghosh A K, Sarupria J S, et al. An interactive graphical system for XBT data quality control and visualization[J]. Computers & Geosciences, 2001, 27(7): 867-876.
- [35] 翟小羽, 刘宁, 门雅彬, 等. 基于 C# 的 XBT 终端显示控制系统设计与实现[J]. 海洋技术, 2013, 32(1): 31-35.  
Zhai Xiaoyu, Liu Ning, Men Yabin, et al. Design and implementation of XBT terminal display and control system based on C#[J]. Ocean Technology, 2013, 32(1): 31-35.
- [36] 贾志成, 岳西凤, 李永军, 等. 海水温盐深剖面测量设备的串口实时数据采集实现[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(05): 1196-1198, 1208.  
Jia Zhicheng, Yue Xifeng, Li Yongjun, et al. Realization of serial seal-time data acquisition for deep-sea conductivity/temperature/depth profile measuring equipment[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(5): 1196-1198, 1208.
- [37] Bailey R, Gronell A, Phillips H. CSIRO cook book for quality control of expendable bathythermograph(XBT) data[R]. CSIRO Marine Laboratories Report, 1994.
- [38] Philbrick V. Examination of XBT data from '97probes[R]. In La Jolla SOOP Status Reports. SOOP Scientific and Technical Developments. 2009: 155-165.
- [39] 方芳, 张鹏, 陈晨. 基于统计过程控制技术的 XBT 故障概率控制研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(2): 120-124, 143.  
Fang Fang, Zhang Peng, Chen Chen. Research on XBT Failure Probability Control Based on Statistical Process Control[J]. Ocean Technology, 2013, 32(2): 120-124, 143.
- [40] 翁兴国, 王晓蕾, 叶松, 等. NMOHEMS 布放系统可靠性的 Petri 网分析方法[J]. 自动化仪表, 2014, 35(1): 22-25.  
Weng Xingguo, Wang Xiaolei, Ye Song, et al. Reliability Analysis Method Based on Petri Network for NMOHEMS Deployment System[J]. Process Automation Instrumenta-



tion, 2014, 35(1): 22-25.

[41] 任强, 魏传杰. 国产抛弃式温度剖面仪(XBT)资料质量分析[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(1): 102-105.

Ren Qiang, Wei Chuanjie. Quality analysis on the domestic expendable bathy thermograph (XBT) data[J]. Journal of Ocean Technology, 2016, 35(1): 102-105.

## Review on the application and development of Expendable Bathythermograph

CHEN Wen-jing<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1, 2</sup>, SUN Xue-hai<sup>1, 2</sup>, DUAN Jia-xi<sup>1, 2</sup>

(1. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

**Received:** Oct. 11, 2019

**Key words:** expendable; temperature and depth profiler; XBT; temperature measurement; depth measurement

**Abstract:** The changes in ocean temperature will significantly affect underwater acoustic propagation, biological activities, meteorology, and ocean currents. Temperature and depth are the basic parameters reflecting the changes in ocean movement. Expendable bathythermographs (XBT), conductivity-temperature-depth profilers, and Argo floats are the main instruments for seawater temperature and depth measurements. Among them, XBT is used for large-scale measurements because of its simplicity, high efficiency, and low hardware cost. This paper mainly introduces the background and evolution history of ocean temperature measurement, analyzes and compares the development status of related instruments and equipment at home and abroad, identifies the gaps and shortcomings of domestic products, and introduces in detail the key technologies and research hotspots of sensors, structure design, data communication transmission, data post-processing, and reliability. Finally, the ideas and opinions on the future technology development route of unmanned platforms are presented. Technical research and product development of XBT need to be conducted to achieve localization.

(本文编辑: 康亦兼)