

海水声速测量方法及其应用

张宝华¹, 赵梅²

(1. 海军装备部电子部, 北京 100841; 2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 200032)

摘要: 在水声研究和海洋工程中, 广泛地需要测量海水声速。纵观水声技术的发展历史, 声速及其测量方法和手段一直是水声研究的基本问题。从水下声传播速度的物理特性出发, 介绍了典型海洋声速剖面的特征, 以声速剖面对声传播的影响为关注对象, 示例说明了其对声纳最佳探测深度及声纳探测距离的影响, 以及声速测量在大洋测温中的应用。在声速剖面测量方法方面, 介绍总结了国内外的声速测量设备的原理、技术发展趋势以及主要产品。最后给出了海洋声速剖面测量的发展展望。

关键词: 海水声速; 测量方法; 声速应用

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-01-0024-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.01.006

Sound speed measurement in seawater and its application

ZHANG Bao-hua¹, ZHAO Mei²

(1. PLA, Beijing 100841; 2. Shanghai Acoustics Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: With the development of acoustic technology, the importance of sound speed measurement is explained. The distribution and physical characteristics of seawater sound speed are introduced. Focused on sound propagation problems, the effect of sound speed profile on the best probing depth of sonar and its detection range is discussed. Seawater temperature observation is also taken into account. The sound speed measurement theory is stated, and the development of the equipment is introduced as well. Finally, the prospect of sound speed measurement technology is described.

Key words: seawater sound speed; sound velocity measurement; sound speed application

0 引言

水中声传播的速度作为最基本的声学特性与水声事业发展紧密地联系在一起。1827 年, 瑞士物理学家 Colladon 和法国数学家 Sturm 在日内瓦湖进行了第一次水中声速测量试验, 得到了极为正确的淡水声速。大约在 20 世纪初, 水中声速值的精确测量推动了水声第一个实际应用的出现: 人们在灯塔上安装潜水钟和雾号, 通过在航船上测量钟声在水中传播和雾号声在空气中传播的时间差测量船舶与灯塔间的距离。从量纲上考虑, 把海水中声传播时间转换为距离时都需要精确的声速值。在同一海域不同时间, 回声测深仪性能会由于“午后效应”的影响而发生变化, 所谓“午后效应”, 即回声测距设备, 每到下午性能就下降的现象。由于太阳辐射, 深表层水温于下午升高, 形成负梯度型声速分布, 使声线向下折射, 因此上午能够探测到的目标,

下午却因折线折射而处于声影区之中, 信号显著减弱, 甚至完全消失。回声测深仪因此成为精确测量海水声速的重要推动原因, 而这种需要对于声纳应用中获得精确的目标距离数据显得尤为突出。

本文根据海水声速的物理特性, 分析了声速剖面对声纳等设备的影响和基于声速剖面的一些应用, 揭示了海水声速对于水声研究的重要性, 最后对目前主要的声速测量技术进行了总结, 并对其发展进行了展望。

1 海水声速的特性

1.1 海水声速的经验公式

通常所说的声速是指平面波的相速度, 它是一种纵波, 与密度、可压缩性有关。在海洋中, 密度、可压缩性则与静压力、盐度以及温度有关。因此, 海水中的声速 C 是海水温度 T 、含盐度 S 以及深度 Z (静压力)的递增函数, 它们之间具有复杂的关系, 常用的经验公式为^[1]

$$C=1449.2+4.6T-0.055T^2+0.000029T^3+(1.34-0.017)(S-35)+0.016Z \quad (1)$$

收稿日期: 2012-09-20; 修回日期: 2012-12-17

作者简介: 张宝华(1964—), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 研究方向为水声工程。

通讯作者: 赵梅, E-mail: zhaomei@mail.ioa.ac.cn

在大多数情况下, 这种简化的 Del Grosso 声速方程已足够精确, 可以满足大多数实际需要。但是要计算更精确的声速值, 声速作为温度、盐度和深度的函数来说是远远不够的。比如完整 Del Grosso 的表达式^[2]就有 19 项, 每项的系数保留 12 位有效数字。除此以外, 还有更多精确的经验公式可供选择^[3,4]。

1.2 海水的声速分布

海洋中的声速分布是多变的, 既有地区性变化, 也有季节性变化和周、日变化。决定海水声速的温度、盐度和压力三个主要因素主要随深度变化, 因而海水声速可近似认为主要是在深度方向上变化, 也就是在深度方向上存在声速剖面。

典型的深海声速剖面具有声道结构。在海洋表面, 因受阳光照射, 水温较高, 同时又受到风浪的搅拌作用, 形成海洋表面等温层, 也称混合层。在深海内部, 水温比较低而且稳定, 形成深海等温层, 声速主要随海水深度(压力)的增加而增加, 呈现正梯度分布。在表面等温层和深海等温层之间, 存在一个声速变化的过渡区域, 在这一过渡区域, 温度随深度逐渐下降, 声速呈现负梯度分布, 这一区域称为跃变层^[5]。

浅海声速剖面受到更多因素的影响, 变化较大, 呈现明显的季节特征。在温带海域的冬季, 浅海大多为等温层, 形成等声速剖面或弱正梯度声速剖面; 在夏季, 多为温度负梯度, 因而形成负梯度声速剖面, 甚至跃变层。

2 声速剖面在水声装备中的应用

水声装备是进行水下探测、跟踪和识别的主要手段。然而, 各类水声装备的技术性能都严重地受到海洋环境条件的影响。同一部声纳, 在不同海洋环境条件下的作用距离可以相差数倍, 甚至更大, 其根本原因是海洋声场特性随海洋环境(海水声速剖面、海深、底质以及海况)而发生变化。对于不同海域、不同季节、不同频率以及不同的发射深度、接收深度, 海洋声场特性有很大的差别, 并直接影响水声设备的使用性能。

海洋中的声传播环境是十分复杂和多变的, 海水介质及其边界条件存在着多种非均匀性, 使得声波在海水中的传播情况也是相当复杂的。影响声波在海洋中传播的主要因素有海水声速分布、海底底质与地貌、海浪、海流、海洋内波等等。海洋介质的非均匀性可分为有规律的和随机的两大类, 两者

都会强烈地影响海洋中的声场。例如声速随深度的有规变化会形成水下声道从而导致远程声传播, 而随机的非均匀性则会引起声的散射并造成声场的起伏。

本部分将从三个实际应用例子出发, 重点揭示声速剖面在声纳应用中的重要地位。

2.1 声速剖面对声纳最佳探测深度的选择参考

图 1 和图 2 是在相同负跃层条件下、不同声源深度的等强度曲线, 温跃层大约在 15~20m 之间。

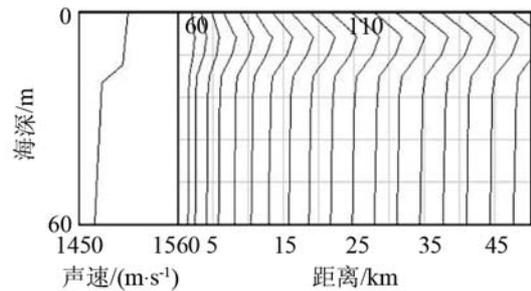


图 1 负跃层条件下的等强度曲线, 声源深度为 7m
Fig.1 Contoured propagation loss versus range in the thermocline condition, source depth is 7 m

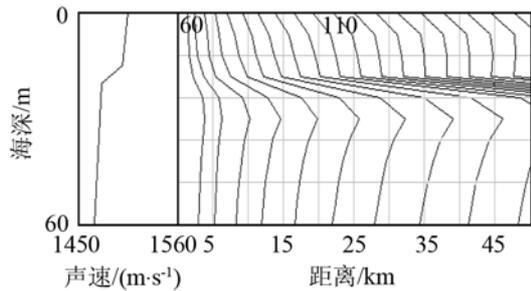


图 2 负跃层条件下的等强度曲线, 声源深度为 30m
Fig.2 Contoured propagation loss versus range in the thermocline condition, source depth is 30 m

在图 1 中, 等强度曲线在 7 m 深度附近向距离远的方向突出, 说明环境条件在如图 1 所示的情况下, 在该深度处能接收到最强的目标噪声信号。而在图 2 情况下, 等强度曲线在 30 m 深度附近处向距离远的方向明显突出, 说明在该深度处容易发现目标, 即声纳使用性能最好。

从图中可以看出, 从同一声源发出的信号, 其不同深度上随距离传播的衰减是不一样的。比较两图可看出, 在相同水文条件下, 声源深度不同时, 声强的分布情况也有很大差别。

对于图 1 所示的浅海负跃层条件, 声源深度为 7 m, 位于跃层(15~20 m)之上, 等强度曲线的分布在深度上变化不大, 即一定源级的声源发出的信号, 在跃层上下的不同深度、相同距离处接收到的信号强度相差不多, 说明水下平台位于跃层之上或跃层之下时, 声纳发现水面舰船的能力差不多。而

如图 2，声源深度为 30m，位于跃层(15~20m)以下时，在跃层上下的不同深度、相同距离处接收到的信号强度相差很多，信号在跃层下比在跃层上传播得更远。例如，在图 1 中，对一个噪声目标信号，在跃层之上传播 10 km 左右衰减了 80 dB，而在跃层下 30m 深处传播 20km 也才衰减了 80dB。因此，当水下平台位于跃层以下时，水面声纳较难发现水下目标，但当吊放声纳或拖曳线列阵的深度下降到跃层之下时，就容易发现水下目标。

2.2 声速剖面对声纳探测距离的影响

声传播衰减曲线可反映出声信号随距离衰减的快慢程度和大小。图 3 是负梯度条件下的传播衰减曲线图，图 4 是温跃层条件下的传播衰减曲线图。

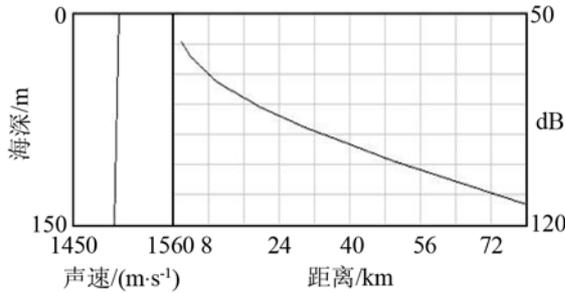


图 3 负梯度条件下的传播衰减曲线，声源深度为 30m，接收深度为 7m
Fig.3 Propagation loss versus range in the negative gradient condition, source depth is 30 m, receiver depth is 7 m

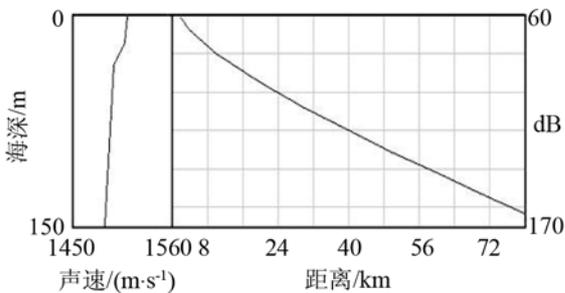


图 4 温跃层条件下的传播衰减曲线，声源深度为 30m，接收深度为 7m
Fig.4 Propagation loss versus range in the thermocline condition, source depth is 30 m, receiver depth is 7 m

比较图 3、4 可明显看出，对于目标深度为 30m、被动声纳深度为 7m 的情形，图 3 所示的负梯度传播条件比图 4 所示的温跃层传播条件好得多。如图 3 中，8km 处的传播衰减值是 70dB，40km 处的传播衰减值约为 93 dB，因此，声信号从 8km 处传播到 40km 处，衰减了 23dB。而图 4 中，信号从 8km 处传播到 40 km 处，衰减了约 40 dB。说明在图 4 所示的条件下，信号强度随距离衰减得更快，声纳的作用距离也就越近。

图 5 是将图 3 和图 4 中的两条传播衰减曲线显示在同一图中作比较，可以更清楚地分析不同条件下声纳的作用情况。图 5 中，从声传播角度看，其

它条件相同，只有声速梯度不同，同一部声纳跟踪相同的声源目标，当传播衰减为 80 dB 时，声纳的作用距离会相差 10km 左右。

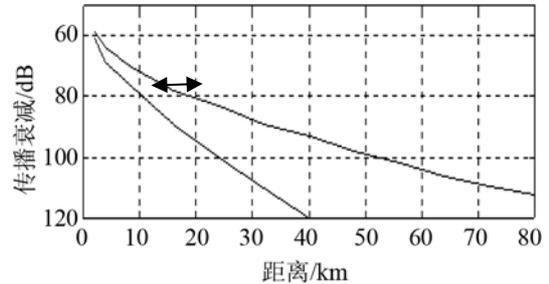


图 5 不同声速梯度条件下的传播曲线对比，声源深度为 7m，接收深度为 30m
Fig.5 Comparison of propagation losses in the different sound speed gradient conditions, source depth is 30 m, receiver depth is 7 m

2.3 大洋测温

近年来频频施威的“厄尔尼诺”气候反常现象与海洋温度变化密切相关，因此监测海洋温度变化就十分重要。然而，由于水温随昼夜、季节而起伏变化，监测海水温度变化趋势是十分艰难的。若利用声波可以在海洋远距离传播的特点，加上海水声速随温度变化很灵敏，就可以准确计算出大范围海洋的平均水温变化。1991 年，美国水声学家进行了一次实验，在南太平洋的一个小岛——赫德岛附近水下放了一个功率为 6kW 的低频声源，在印度洋、太平洋与大西洋的 18 个站进行接收，最远接收距离达 16000 m。实验证明用这种方法来监测海水的温度变化是可行的^[6]。

3 声速测量技术

在海上，测量声速一般采取两种方式：直接测量法与间接测量法。

3.1 直接测量方法

直接测量法使用的设备一般称为“声速仪”，通常利用收发换能器在固定的距离内测量声速，同时以压力传感器及温度补偿装置测量水深。根据获取声速的方法的不同，通常又分为环鸣法^[7]、脉冲叠加法^[8]、驻波干涉法^[9]以及相位法^[10]等。这里简单介绍最常用的环鸣法以及相位法。

目前常见的海水声速仪大多都是采用环鸣法的原理制成。发射换能器产生的脉冲在海水中传播一定距离后被接收换能器接收，经过放大整形鉴别后产生一个触发信号立即触发发射电路。这样的循环不断进行，就可以得到一个触发脉冲序列。忽略循环过程中的电声延迟，得到的重复周期时间可

认为是通过固定距离的时间, 由此计算得到海水声速。相位法可以避免环鸣法每一次循环中电声和声电转换带来的误差, 也是一种常用的方法。通过测量收发信号的相位差, 计算固定频率的波长, 最后获得声速。随着信号处理技术的发展, 对相位测量的精度正不断提高, 该方法的测量精度也不断提高。

3.2 间接测量方法

间接测量是通过水文仪器(温盐深仪等)测量海水的温度、盐度和深度, 利用这些环境测量与声速的经验公式, 进而计算得到声速剖面。目前该方法精度超过了直接测量法, 尤其是在开阔不冻的海洋中, 盐度的变化量通常是可以忽略的, 一旦对深度的影响作修正后, 温度相对于深度的关系曲线同声速分布剖面完全是一模一样的。

在科学调查船上广泛使用的是温盐深仪(Conductivity-Temperature-Depth system, CTD)和热敏探头(Bathy Thermograph, BT)。这一类吊放式设备在同一艘船上投放并回收, 可以在特设的显示设备上读取温度(盐度、压力)和深度的关系, 进而获得声速剖面。它们的主要缺点是回收仪器费时费力并且无法在走航中应用。

以投弃式温度探头(Expendable Bathy Thermograph, XBT)和投弃式温盐深探头(Expendable Conductivity-Temperature-Depth system, XCTD)为代表的投弃式设备, 是在走航中获得声速剖面而不必回收的传感器件。原理上它由装有水文参数(温度等)测量探头的投弃容器构成, 入水后以已知的速率下沉。探头上缠绕在卷轴上的细线与甲板上接收设备相连。不断下沉中, 探头通过细线将水文参数传回, 形成水文参数随深度的变化曲线图(计算得到声速剖面)。图 6 为投弃式温度探头(XBT)与温盐深仪(CTD)测量结果对比图。随着投弃式探头测量精度的不断提高, 已经在日常海上作业中逐渐取代吊放式设备并应用于科学领域。

此外, 一些改进的投弃性设备因供飞机使用的需要正在发展起来。在原有的投弃式探头基础上, 它配备无线电通讯装置以代替连线, 具体的例子有空投式温度探头(Airborne Expendable Bathy Thermograph, AXBT)。

4 总结与展望

海洋是我国经济社会发展的重要空间和战略性后备资源宝库, 是全面建设小康社会的重要

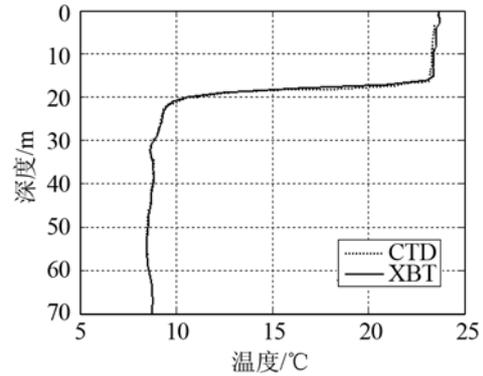


图 6 投弃式温度探头与温盐深仪测量结果对比图

Fig.6 Comparison of measurement results with different equipments: XBT and CTD

保障。海洋开发的历史表明, 对海洋进行开发利用的成功与否, 在很大程度上依赖于对海洋环境要素的变化规律的掌握, 如何获取海洋温度、盐度、密度、海流等重要海洋环境参数, 这是我们必须首先解决的问题。

海洋水文参数可以通过布放大量的测量探头来测量, 这种测量探头的布放可依托舰船平台、飞机平台或浮标等, 获取的数据不同于遥感测量数据, 由于是直接测量, 因而精度高, 并且可获得水体内的垂直分布规律。

目前, 国内海洋水文参数的测量, 主要基于舰船平台, 若要进行大范围的快速测量, 这种基于舰船平台的机动测量仍然不能满足实际需求。而以飞行器为平台的投弃式海洋水文测量仪器, 由于测量方式的机动性更强, 通过短时间内大面积投放大量的测量探头, 可以进行远距离大范围的海洋水文参数测量。

国外已经开发和使用了这类测量探头, 因此, 有必要研制以飞行器为平台的投弃式海洋水文测量仪器, 实现大范围海洋水文参数剖面的采集手段, 可以提高我国海洋环境信息获取能力, 从而服务于科学考察、资源勘探等各领域。

参 考 文 献

- [1] Clay C S, Medwin H. Fundamentals of Acoustical Oceanography [M]. San Diego: Academic press, 1997.
- [2] Del Grosso V A. New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1974, 56(4): 1084-1091.
- [3] Spiesberger J L, Metzger K. A new algorithm for sound speed in seawater[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1991, 89(6): 2677-2688.
- [4] Dushaw B D, Worcester P F, Cornuelle B D, et al. On equations for the speed of sound in seawater[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1993, 93(1): 255-275.
- [5] 刘孟安, 连立民. 水声工程[M]. 浙江科学技术出版社, 2002, 10. LIU Meng'an, LIAN Limin. Underwater acoustic engineering[M]. Zhejiang Science and Technology Press, 2002.

- [6] 关定华. 用声学方法监测海洋——海洋声层析技术和大洋气候声学测温[J]. 物理学进展, 1996, 16(3): 504-514.
GUAN Dinghua. Acoustical monitoring of the ocean—Acoustical tomography and acoustical thermometry of ocean climate[J]. Progress in Physics, 1996, 16(3): 504-514.
- [7] Hunklinger S, Arnold W. Ultrasonic properties of glasses at low temperatures[J]. Physical Acoustics, 1976, 12(1): 155-215.
- [8] McSkimin H J. Pulse superposition method for measuring ultrasonic wave velocities in solids[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1961, 33(1): 12-16.
- [9] 梁济仁, 黄开连. 驻波法测量声速[J]. 广西民族大学学报: 自然科学版, 2009, 15(3): 68-72.
LIANG Jiren, HUANG Kailian. Discuss accuracy question about measuring wavelength for ultrasonic velocity definite using phase method or extreme value method[J]. Journal of Guang Xi University for Nationalities, 2009, 15(3): 68-72.
- [10] 邹红玉, 江影. 采用相位法与极大值法测量超声波声速的准确度的研究[J]. 大学物理, 2007, 26(5): 32-34.
ZHOU Hongyu, JIANG Ying. Discuss accuracy question about measuring wavelength for ultrasonic velocity definite using phase method or extreme value method[J]. College Physics, 2007, 26(5): 32-34.

上海市声学学会理事会和《声学技术》编委会会议纪要

上海市声学学会理事会和《声学技术》编委会 2012 年终总结会于 2013 年 1 月 11 日下午在同济大学声学研究所联合召开。上海市声学学会理事长孟昭文(中国船舶重工集团公司第 726 研究所所长)、副理事长胡长青(中国科学院声学研究所东海研究站站长)、副理事长兼秘书长龚农斌(同济大学声学研究所教授)、《声学技术》主编张叔英研究员和《声学技术》执行主编姚蓝研究员等理事编委约 50 余人出席了会议。

理事会会议阶段由副理事长兼秘书长龚农斌教授主持, 上海市声学学会理事长孟昭文所长简要汇报了 2012 年度学会工作, 包括日常工作、学术活动、技术咨询等。通报表扬了荣获了上海市“十佳医技工作者”的我会会员上海市第六人民医院超声科主任胡兵(上海市声学学会副理事长)和上海市瑞金医院超声科主任詹维伟, 该活动由市委宣传部等单位主办, 20 万市民参与投票评选。上海市声学学会魏墨盒声学基金委主任钱梦騷教授通报了魏墨盒声学奖的提名和评选情况。各专业委员会主任汇报了 2012 年各自开展的学术活动及 2013 年的工作安排。学会领导要求大家积极参与 2013 年“海峡两岸声学学术交流会”、“上海-西安声学学术交流会”和“西部声学学术交流会”等相关的学术活动。

《声学技术》编委会会议阶段由执行主编姚蓝研究员主持, 常务副主编丁玉薇编审汇报了 2012 年的工作进展。她从期刊的基本工作、工作更新、网络建设等方面进行了详细的总结; 同时, 从期刊的影响因子对比、各单位来稿比例、编委的审稿情况、文献评价统计数据等方面介绍了本刊取得的成绩, 并就本刊现存问题提出了 2013 年的工作重点。执行主编姚蓝研究员认为, 为了进一步提高质量, 需扩大审稿队伍, 并提出了具体的措施。为进一步发挥编委专家的作用, 为缓解稿源, 在对编委专家的辛勤劳动给予充分肯定的同时, 又对编委们提出了更具体的要求。主编张叔英研究员认为, 为了提高作者的写作水平, 可以举办“如何撰写科技论文”等相关学术活动, 促进期刊的发展。主办单位领导胡长青站长和上海市声学学会理事长孟昭文等领导, 对期刊的工作给予了充分的肯定, 表示将会一如既往地支持期刊工作。



上海市声学学会理事长 孟昭文
中国船舶重工集团公司第 726 研究所所长



副理事长胡长青
中国科学院声学研究所东海研究站站长



副理事长兼秘书长龚农斌
同济大学声学研究所教授



上海市声学学会魏墨盒声学基金委主任
钱梦騷



《声学技术》主编 张叔英研究员



《声学技术》执行主编姚蓝研究员