

海洋声场预报研究和工程应用

孟昭文¹, 李维嘉¹, 胡长青²

(1. 华中科技大学, 交通科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 中科院东海研究站, 上海 200032)

摘要: 随着科学技术的飞速发展, 对海洋声场作出合乎要求的快速精确预报, 显得尤为重要。浅海平滑平均声场理论和深海广义相积分理论克服了经典的 WKB 近似在反转点发散的缺点, 而且实现了声场数值预报的实时性要求, 基于上述理论, 进行海洋声场分析设备的研究和工程应用, 对声呐的设计、使用及舰艇作战有重要意义。

关键词: 海洋声场; 预报; 分析

中图分类号: O427 **文献标识码:** A

Research and application on sound field in water

MENG Zhao-wen¹, LI Wei-jia¹, HU Chang-qing²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Shanghai Acoustics Laboratory, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: Today, it is important to predict the sound field fast and correctly. The smooth-averaged sound field technique and the generalized phase integral theory are effective methods for computing sound field in water. The two methods not only resolve the divergence problem at turning point of classic WKB method, but also realize real time calculation. On the basis of these two theories, equipment for prediction and analysis can be developed.

Key words: sound field in water; prediction; analysis

1 引言

声波是目前唯一能够在海水介质中进行远距离传播的有效手段, 因此, 研究海洋中的声波特性也就具有极其重要的意义。海洋声传播规律是海洋声学研究的基本课题, 海洋声场的数值计算和预报是进行海洋声传播和混响、反演、匹配场定位、声层析等研究的基础, 是现代声呐设计和使用以及水面、水下作战部署中所提出的重要课题。

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。

第二次世界大战后, 水声传播的研究得到了突

飞猛进的发展, 人们从理论和实验两方面积累了大量的经验。应该说, 声场计算模型的研究是从 20 世纪 60 年代开始的, 它的发展与计算机的发展密不可分。目前所发展的声场数值预报方法主要有: 射线算法、简正波算法(NM)、抛物方程近似算法(PE)、FFP 算法、水平射线—垂直简正算法^[1]等。每一种算法自然各有其特点, 在使用时要针对具体问题的性质选择合适的算法, 以便使得到的声场能够最大限度地符合实际情况。

射线算法是波动方程的高频近似解, 计算速度快, 物理意义明确, 而且能适应介质及边界的水平变化, 但对低频及焦散区处理困难。随着国际上水声研究的重点转向低频问题, 现在射线法的应用越来越少。

简正波理论是近年来发展比较快, 研究者比较多的一种传播模型, 目前已有很多优良的计算程序如 MOATL、KRAKEN 等。虽然不同的计算程序有不同的技巧, 但主要是利用差分(或有限元)方法来求解波动方程及其边界条件所对应的本征值及本征函数的问题, 故其对一般声速分布的海洋都能计算, 但计算速度比较慢。传统的简正波算法适用于低频、浅海和水平不变问题, 对水平变化相对缓慢的

收稿日期: 2001-03-06; 修回日期: 2001-09-29

作者简介: 孟昭文(1957-), 男, 河北宽城县人, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事水声工程研究。

海区, 可以用绝热简正波的方法来解决。耦合简正波理论的计算精度最高, 可计算倾斜海底或海水介质水平变化较大的海区, 缺点是当需要计算的简正波号数很大时, 计算量大。当海底倾斜程度加大时, 计算步长必须大幅度减小, 从而使计算速度大为降低, 计算误差也将增加。

抛物方程法(PE)最初是由 Hardin 和 Tappert 于 70 年代引入水声的^[2], 由于 PE 算法较易解决水平梯度问题, 从那时起, 人们利用 PE 方法来研究水声传播的兴趣不断增长。PE 算法是波动方程的窄角近似解, 近年来发展较快, 已出现了处理宽角、反向散射等问题的算法。PE 算法可以计算全场解, 对于低频问题的计算速度很快, 但当频率增高、海深增加时, 计算时间增加也很快。

随着科学技术的飞速发展, 对声场作出合乎要求的快速精确预报, 显得尤为重要。

实践表明, 由于海洋环境与实验条件的不确定性, 使复杂的干涉结构很难与实验结果相吻合, 不能验证计算曲线的精细结构。这种情况下人们就用比较简便的方法计算声场的空间平滑结构, 以避免繁琐的数值计算。我国学者提出的浅海平滑平均声场理论^[3], 对简正波振幅函数采用包络平滑, 获得了浅海中平滑平均声强的积分表达式。这个表式不但形式简单, 克服了经典的 WKB 近似在反转点发散的缺点, 而且计算速度快, 实现了浅海声场数值预报实时性的要求。近来这一理论又发展为波束位移射线简正波理论^[4], 对浅海声场进行了更精确的预报。

同样, 深海声场也是由大量的简正波迭加而成的, 在水平面上与垂直深度上形成十分复杂的空间干涉结构。在简正波理论的基础上, 采用广义相积分方法(WKBZ 近似)^[5], 并综合考虑海面反射相位修正、海底反射损失所建立起来的广义相积分简正波理论, 成功地解决了深海会聚区影区的声场计算问题。广义相积分简正波算法得到的声场与 NM、PE 计算结果以及实验结果十分一致, 而计算时间比 NM、PE 方法至少降低了两个数量级, 实现了深海声场的快速、精确预报^[6]。

近几十年来, 国外对各大海域进行了广泛的水声调查, 对海洋声场特性进行了深入研究, 以便研制与海洋环境相匹配的水声装备。在一定的技术条件下, 谁能更有效地利用海洋水声环境, 谁的水声装备就具有更大的优势。前苏联与法国的海军曾采用专门的计算尺来估算声呐的作用距离, 后来又按海区、季节编制了声呐作用距离图册。这些方法虽然精度

不高, 预报的速度不快, 却已付诸使用, 这更说明其重要性。为了实现快速、准确的声呐性能预报, 美国、前苏联等多年来一直以巨大的投资从事海洋声场研究, 并已为海军配备了相关的装备。所以, 新型的声呐系统应当具有性能预报的功能, 快速声场预报应当成为声呐系统的重要组成部分。

我国具有很长的海岸线和广阔的海域, 近海防御和远海作战能力是国防建设的一个重要内容。由于海区环境的复杂多变, 为了使水声装备获得最佳的使用效果以提高战斗力, 舰艇迫切需要知道所处海域的水下声场分布状况和声呐的使用性能。浅海平滑平均声场传播理论和深海广义相积分理论的建立, 实现了声场预报的实时性, 也为研制适合于我国海洋环境的相关声场分析装备奠定了基础。

2 理论

2.1 波动方程

为便于分析和解决问题, 水声学中经常把实际海洋介质描述成一种无水平变化的柱对称分层介质模型, 这是对实际海洋介质的一种接近理想的描述, 其中点源的波动方程为^[7]:

$$\begin{cases} \Delta^2 \Psi(a, r, t) - \frac{1}{c^2(z)} \frac{d^2}{dt^2} \Psi(z, r, t) = 0 \\ P(z, r, t) = \sqrt{\rho} \Psi(z, r, t) \end{cases} \quad (1)$$

上式中 $\Psi(z, r, t)$ 是声场的速度势, $P(z, r, t)$ 是声场的声压。

对于简谐点源, 柱坐标下的 Helmholtz 方程为:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\omega^2}{c^2(z)} \right] \Psi(z, r) = 0 \quad (2)$$

设方程(2)的简正波解为:

$$\Psi(z, r) = \sum_m U_m(r) \Phi_m(z) \quad (3)$$

利用分离变量法便可得到:

$$\frac{d^2 U_m(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_m(r)}{dr} + \mu_m^2 U_m(r) \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \Phi_m(z)}{dz^2} + (k^2(z) - \mu_m^2) \Phi_m(z) = 0 \quad (5)$$

其中 $k^2 = \frac{\omega^2}{c^2(z)}$ 。这样, 凭借初始条件和边界条件分别对式(4)和式(5)求解 $U_m(r)$ 及 $\Phi_m(z)$ 。

方程(4)是零阶 Bessel 方程, 方程(5)的解是简正波的本征函数, μ_m 是本征方程的根。然而, 要想精确地求得 μ_m 和本征函数 $\Phi_m(z)$ 是很困难的。

2.2 平滑平均声强

对水平分层海洋模型, 设海水密度与深度分别

为常数 ρ 与 H , 海水声速仅是深度 z 的函数 $c(z)$ 。

对于简谐点源, 声场的声压可表示为^[8]:

$$P(z_s, z_r, r, t) = \sqrt{\frac{8\pi}{r}} e^{-i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \sum_m \Phi_m(z_s, \mu_m) \Phi_m(z_r, \mu_m) \sqrt{\mu_m} e^{i\mu_m r - \beta_m r} \quad (6)$$

式中 z_s 和 z_r 分别为发射和接收深度, r 是水平传播距离, t 是时间因子, ω 是声源的角频率, μ_m 和 Φ_m 是简正波的本征值和本征函数, β_m 是简正波的指数衰减系数。

每一简正波与具有确定形状的本征声线相对应, 当有效简正波的数目足够大时, 对简正波采取非相干迭加, 并用本征函数的包络代替函数本身, 就相当于对声场进行空间平滑。引入参数 E , 于是, 浅海中的平滑平均声强就可表为:

$$I = \frac{4}{r} \int_0^{k \min} \frac{\mu \exp(-2\beta r) d\mu}{S(\mu) [Ed^{2/3}(\eta) + k^2(z_s) - \mu^2]^{1/2} [Ed^{2/3}(\eta) + k^2(z_r) - \mu^2]^{1/2}} \quad (7)$$

2.3 广义相积分简正波理论

本征函数由广义相积分方法来计算, 并且当本征射线在海面附近反转时进行海面相移修正, 以克服低频情况下不作海面相移修正引起的会聚区位置和宽度的较大计算误差。

根据公式 (6), 可获得声强的表式:

$$I(r) = \frac{8\pi}{r} \left\{ \left| \sum_m \phi_m(z_s) \phi_m(z_r) \sqrt{U_m} \cos(U_m r) \right|^2 + \left| \sum_m \phi_m(z_s) \phi_m(z_r) \sqrt{U_m} \sin(U_m r) \right|^2 \right\} \quad (8)$$

广义相积分简正波理论不仅成功地解决了深海会聚区影区声场的计算问题, 而且实现了声场的快速、精确预报。

3 工程应用

3.1 浅海传播衰减曲线

根据指定浅海海域的水文条件和环境参数, 可以预报该海域的声场特性, 实时计算声传播损失, 显示声传播损失的等强度图和指定深度上的声传播衰减曲线。由声传播衰减曲线可以反映出声信号随距离衰减的快慢程度和大小。

如果目标深度为 7m, 接收深度为 30m, 把在负梯度条件下和温跃层条件下计算的传播曲线画在一起, 如图 1, 可以清楚地分析声呐的作用情况。可以看出, 负梯度传播条件比温跃层传播条件好得多。比如说, 其它条件相同, 同一部声呐跟踪相同的声源目标, 在 10km~20km 间(衰减量为 80dB), 声呐的跟踪距离在这两种声速剖面条件下会相差 10km 左

右。而在 30km~40km 间(衰减量为 100dB), 声呐的跟踪距离可能相差 27km 左右。

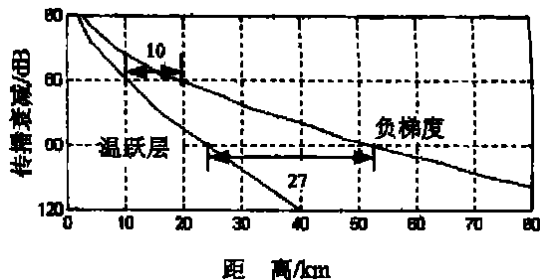


图 1 负梯度和温跃层条件下的传播衰减曲线比较

3.2 深海会聚区和影区

对于存在声道效应的深海, 在声源的一定开角范围内出射的声线被声道所束缚。这些声线所形成的声束仅照射到部分空间区域, 并在某些距离段上聚集起较大能量而形成会聚, 在另一些区域, 只有经过海底大掠射角反射的声线才能进入, 由于经过海底反射的声线携带的能量较少, 因此这些区域就形成了声影区。会聚区和影区的交替是水声学中的重要现象, 如果保持接收深度不变而逐渐离开声源, 在会聚区就能接收到较强信号, 而在影区接收到的信号较弱, 甚至接收不到信号。如果声源在声道轴附近时, 以小角度出射的声线向外传播时, 在声道内反转而不经边界面反射, 损失的能量较少, 因此信号能传输到很远的地方。

深海水域的声场可以用广义相积分简正波方法来计算。

用广义相积分方法计算声场, 在计算速度上比传统的声场计算方法至少提高了两个数量级, 可以实现预报的实时性。图 2 是深海声传播衰减曲线, 从图中可以看到明显的会聚区和影区现象。

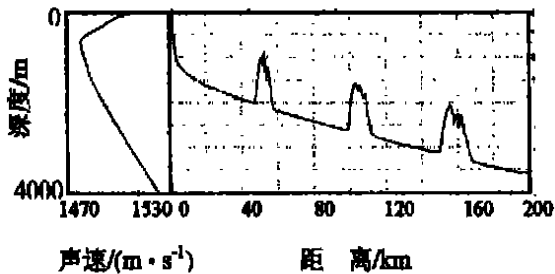


图 2 深海声道条件下的会聚区和影区分布示意

由于会聚区现象的存在, 当目标在会聚区附近时, 我们容易捕捉到信号, 当目标在影区时, 我们就很难发现它。对柱对称海域, 就意味着以我为中心,

(下转第 117 页)

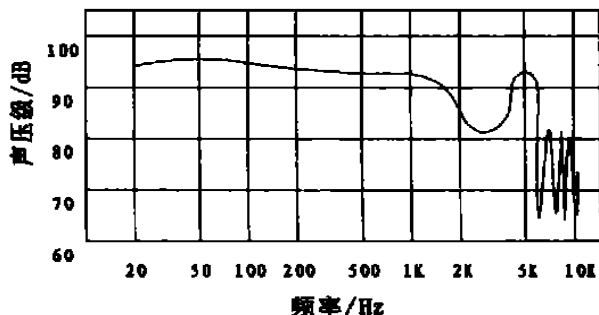


图3 防噪声耳塞隔声量随频率变化试验结果(声级压缩在100dB)

由表1可知,防噪声耳塞的隔声量具有非线性效应,声压级在125dB以上时,耳塞的隔声量显著增加。若采用主观阈值法来测试(见表3),其隔声量(500Hz)为4.90dB,标准偏差为4.59dB,此值不能反映防噪声耳塞在高声强环境下存在非线性效应的隔声量,它只能大致反映线性段的隔声量,且各频段的标准偏差较大,重复率较低。

由表2可知,采用“人工耳道”法对防噪声耳塞隔声量进行重复性试验,其标准偏差小于1dB,说明此方法的重复率高。

由图3可知,防噪声耳塞的隔声量与频率有关,当频率低于1000Hz时,隔声量大致不变;在2000Hz~4000Hz之间,隔声量有明显提高;在4000Hz以上,隔声量起伏变化很显著。

由上述试验结果可以看出,“人工耳道”法测耳塞隔声量的标准偏差为1dB~3dB,其离散度较小,重复率高,且能很方便地测出耳塞隔声量的频谱特性。而主观阈值法测耳塞隔声量的标准偏差达4.5dB~7dB,其离散度较大,重复率低。因此用主观阈值法很难真正表征耳塞(尤其是非线性耳塞)的隔声性能,各种耳塞之间也不能确切地进行比较。

4 讨论

耳塞的隔声量是评价耳塞性能的重要指标,但佩戴耳塞后的隔声量,既受耳塞本身性能的影响,也受各人耳道、听觉机制及主观方面的影响,因此对测量耳塞的隔声性能,用“人工耳道”法则更能客观地反映耳塞单一的隔声性能,便于不同耳塞间的相互比较。

对于在高声强环境下,出现非线性效应的隔声耳塞,用主观阈值法测量耳塞隔声量存在较大的测试误差,主观阈值法所测得的隔声量只能反映低声级、线性情况下的耳塞隔声性能,而用“人工耳道”法则能比较准确地观察非线性耳塞在不同声级下的隔声性能,并能方便地测出耳塞的隔声频谱,也可在脉冲声的情况下对耳塞进行隔声性能的测试。

用“人工耳道”法测量耳塞的隔声性能,其重复率较高,便于长期观察耳塞的隔声性能,在设计阶段对耳塞进行多方面的性能测试尤为方便、重要,且便于数据之间的相互比较,避免了主观阈值法中存在的离散度大、重复率差的缺点。因此可以认为,用“人工耳道”法测量耳塞的隔声性能比主观阈值法具有更好的通用性,它能对线性或非线性耳塞进行测试,且测试方法方便、准确、重复性能好,比较准确地反映实际情况下耳塞的隔声性能,便于耳塞间的相互对比,是一种较先进的耳塞隔声性能测试方法。

参考文献

- [1] ISO 4869-1981(E) Acoustics measurement of sound attenuation of hearing protectors subjective method.
- [2] 王季卿等. 阈值法测量护听器声衰减若干问题探讨[J]. 应用声学, 1986, 5(1): 7-14.
- [3] 高文元, 王吉荣等. 三种防噪声耳塞的汉语清晰度测试[J]. 噪声与振动控制, 1989, 1: 41-43.

(上接第111页)

在相应的距离上存在着若干个环带,当目标进入这些环带时就被我声呐所发现。

参考文献

- [1] 汪德昭, 尚尔昌. 水声学[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] R. H. Hardin, F. D. Tappert. Applications of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations, SIAM Rev. 15[C], 1973. 423.
- [3] 张仁和. 浅海中的平滑平均声场[J]. 海洋学报, 1981,

3(4): 535-544.

- [4] 张仁和, 李风华. 浅海声传播的波束位移射线简正波理论[J]. 中国科学(A辑), 1999, 29(3): 241-251.
- [5] 张仁和. 水下声道中的平滑平均声场[J]. 声学学报, 1979, 2: 102-108.
- [6] 何怡, 张仁和, 刘红. 海洋声场的广义相积分简正波方法, 声场声信息国家重点实验室年报[Z]. 北京: 中科院声学所, 1992, 2: 35-39.
- [7] [苏]列·布列霍夫斯基赫. 海洋声学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [8] [苏]列·布列霍夫斯基赫. 分层介质中的波[M]. 北京: 科学出版社, 1985.