

哈尔滨工程大学

硕士学位论文

海洋环境噪声建模研究

姓名：吴静

申请学位级别：硕士

专业：声学

指导教师：刘伯胜

20070301

摘 要

海洋环境噪声是水声信道的干扰背景场,任何声纳系统的设计和使用都要受海洋环境噪声的限制;同时,海洋环境噪声又是有用的信号,可以用其空间结构来对海洋环境参数进行反演。海洋环境噪声场是一个随地域、时间变化的复杂的场。浅海海洋环境下,环境噪声源发出的声波在传播过程中在海面与海底之间经历多次反射。海洋环境噪声场即是由大量噪声源及其各自的声场与环境边界的相互作用共同决定的一种随机过程。海洋环境噪声的谱级及垂直指向性是其中两个影响水声系统的主要因素。

海洋环境噪声模型包含噪声源模型和传播模型两部分。本文采用静态的偶极子连续源层模型,即假设统计相关特性已知的点噪声源随机均匀地分布在海面以下任意小深度的无穷大平面上,并假设海面为自由边界面,单极子噪声源将成为偶极子声源。本文考虑了三种噪声源,设风和降雨噪声源分布在无限大平面上,船舶噪声源视为环形分布,噪声源级由经验公式求得;传播模型采用了远场简正波和近场射线方法的混合模型,计算简正波与海底反射系数时都使用了 KRAKEN 计算程序。

本论文以噪声传播满足的基本波动方程为基础,建立了一个适用于浅海分层介质的噪声理论模型,讨论了海水中声速、海底性质、频率及源分布等对海面声源(包括风、雨以及船舶)的噪声谱级和垂直指向性的影响。论文主要做了以下工作:依据噪声传播满足的基本波动方程,得到了格林函数表达式;然后推导出海洋环境噪声的谱级和垂直指向性的简正波和射线表达式;然后选取一定的环境参数,对模型进行数值模拟,论文还计算了实测噪声数据的噪声谱级。计算结果和 T.C.Yang 的工作以及 RANDI 模型的结果进行了比较,基本相符。

关键词: 环境噪声模型; 简正波; 射线; KRAKEN

ABSTRACT

Ocean ambient noise is the interference to underwater sound channel, and it has great effects on the design and use of all kinds of sonar systems; And furthermore, ambient noise field is useful structure. Some environmental parameters can be inversed by its spatial information. The ocean noise field is a complicated field changing with space and time. In shallow water, sound emanating from a noise source undergoes multiple reflections between the sea surface and the sea floor. The ocean ambient noise field is a stochastic process of many such noise sources and the respective interactions of their wave fields with the environmental boundaries. Spectrum level and vertical directionality of the noise are two of major factors affecting the performance of underwater sound systems.

Ambient noise model consists of a sound source model and a sound propagation model. The static continuous dipole source model is adopted in this paper, the assumption that uncorrelated noise sources are randomly distributed on the infinitely large plane just below the ocean surface is used. In the presence of the pressure-release surface, monopole sources will couple into the water as dipoles. Three kinds of noise sources are concluded in this paper: the noise sources of wind and rain are distributed on an infinitely large plane, and the noise sources of ships are distributed on an annulus. The source levels can be divided by empirical formulas. A hybrid model of normal mode method (for far field) and ray method (for near field) is used in the propagation model, and the KRAKEN program is used in the computation of normal modes and bottom reflection coefficients.

This paper is based on the basic wave equation, then a noise model applicable for range-independent shallow water is divided, and the effect of sound speed profile, frequency, bottom and the distribution of sources on the noise spectrum level and vertical directionality of the surface sources (such as wind,

rain and ships) is discussed. The work in this paper is as following: Firstly, green function are obtained from the wave equation; Then according to the static source model, the normal mode and ray expressions of spectral level and vertical directionality expressions are derived; Last proper coefficients are chosen and the simulation work for the model is done, and the noise spectrum level of measured noise data are computed. The results of our model are basically in agreement with the results of T.C. Yang's and the results in RANDI model.

Key words: ambient noise model; normal mode; ray; KRAKEN

哈尔滨工程大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献等的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）： 吴静

日 期： 2007 年 3 月 19 日

第 1 章 绪论

1.1 论文背景及意义

21 世纪是海洋的世纪,国际政治、经济、军事和科技活动都离不开海洋,人类的可持续发展也将必然越来越多地依赖于海洋。我国是一个海洋大国,拥有 18 万多公里长的大陆海岸线、37 万多平方公里的领海、近 300 万平方公里的管辖海域和丰富的海洋资源,这些都是我国实施可持续发展战略的重要物质基础。

在海洋环境中,声波是信息传递的主要方式。海洋的一个重要声学特征是其水下环境噪声。海洋噪声的研究与应用有着广泛的领域。在军事上,海洋噪声的研究主要用于潜艇战和反潜战的海战中;在民用领域,海洋噪声的研究是海洋科学研究和海洋开发的重要手段。现在世界上已对海洋噪声进行了大量测量,遍及有关海区,甚至涉足南北极地,深达 4000~5000 米^[1]。随着现代军事需要和海洋事业的发展,海洋噪声的研究和应用已越来越引起人类的关注和重视,其发展必将更加迅速。

海洋环境噪声研究具有重要的意义。首先,海洋环境噪声是水声信道中的干扰背景场,任何声纳系统的性能都要受海洋环境噪声的限制。因此,建立海洋环境噪声的现场快速预报方法和模型对于声纳性能的评估、水声对抗战术以及潜艇水下隐蔽机动方式的制定都有重要的指导意义。其次,不能只把海洋环境噪声看作是水声接收信号的一种干扰,在许多情况下,还必须把水听器接收到的噪声看作是有用的信号,它包含了关于海面状况、海面上的大气、海底地慢的构造过程、海洋动物的行为等等多方面的大量信息^[2]。由噪声数据可以反演出海水、海底的各种信息,对探测和开发海洋资源有重要意义。

1.2 国内外研究水平

海洋噪声数学模型把噪声级和指向性(垂直或水平)作为频率、深度、地理位置和年中时间的函数,对其进行预报,分为环境噪声和波束噪声统计模型两种模型。前者用于预报被声接收器感知的平均噪声级,后者则专门预报

大孔径、窄波束被动声纳系统的低频航运噪声特性^[1]，本文的研究范围属于前者。

对于海洋表面噪声，自第二次世界大战以来已经陆续发展了一系列理论模型，包括：海面噪声的经典模型(CS模型)^[4]、Kuperman和Ingenito^[5]提出的分层海洋的波动模型(K/I模型)、Harrison^[6]提出的射线声学模型(CANARY模型)等。最近20年来又以理论模型为基础发展了多个数值预报模型，如比较实用的RANDI^[7]模型。下面就海面噪声源噪声场的建模问题的国内外研究历史与现状予以介绍。

1.2.1 海面噪声源模型

海洋环境噪声理论模型包括噪声源模型及声传播模型两部分。常采用的海面噪声源模型有两种，即噪声源具有一定时空分布的动态模型和噪声源不随时间变化的静态模型。本文采取静态模型方式，它又分为两种：一种假定统计相关的无指向性点源分布于海面之下某一深度的无限平面上，另一种是假定统计独立的指向性点源直接分布在海面上，Liggett与Jacobson^{[8][9]}已证明上述两种静态模型的等价性，并指出无指向性点源空间分布的相关函数与指向性点源的指向性函数相互联系。噪声源级的大小是由实验数据推导拟合或者由经验模型推导而来的。

对风成噪声源，Wilson^[10]给出了基于白帽指数的风成噪声源级经验公式：

$$R(U) = \frac{U^3}{1749.6} - \frac{U^2}{81} + \frac{1.5U}{4.32}, \quad 9 < U < 30 \text{kn} \quad (1-1)$$

其中， U 为风速，适用范围：10~30knots，适用频率范围：50~1000Hz；Kuperman 和 Ferla^[11]则给出了从RANDI实验数据中去掉传播效应后的风成噪声源级公式：

$$SLW \approx 55 - 6 \lg[(f/400)^2 + 1] + (18 + v/4) \lg(v/10) \quad (1-2)$$

其中， v 为风速，单位：knots； f ：频率，单位：Hz。

对雨成噪声源，Urick^[12]给出的源级公式与降雨率 R (mm/hour) 有关，基本与频率无关：

$$SLR = 51.03 + 10 \lg R \quad (1-3)$$

对船舶噪声源, Ross^[13]提出了典型商船辐射噪声的回归公式:

$$L = 175 + 60 \lg(U/25) + 10 \lg(B/4) \quad (1-4)$$

其中, B 为螺旋桨叶片数, U 为螺旋桨末端转速, 单位: m/s; Hamson^[14]的经验公式为:

$$SLS = 186 - 20 \lg f + 6 \lg(v_s/12) + 20 \lg(L/300) + 10 \lg N \quad (1-5)$$

其中, f : 频率, 单位: Hz; v_s : 船速, 单位: knots; L : 船长, 单位: feet; N : 每平方米船只数目。

1.2.2 噪声传播模型

1. C/S模型

Cron与Sherman于20世纪60年代最早提出了海面噪声场模型。他们设无限大海面上均匀分布着噪声源, 海水与海底均视作均匀半空间。声源的辐射指向性图案为 $\cos^m \theta$, θ 是掠射角, m 为多极子阶数。C/S模型只考虑声线的直线传播, 并导出了垂直分离与水平分离两水听器相关函数表达式, 垂直表达式为:

$$c_y = 2 \sin(kd) / kd + 2(\cos(kd) - 1) / (kd)^2 - 2i[\cos(kd) / kd] - \sin(kd) / (kd)^2, \quad m=1 \text{ 时} \quad (1-6)$$

$$c_y = 4 \sin(kd) / kd + 12 \cos(kd) / (kd)^2 - 24 \sin(kd) / (kd)^3 - 24(\cos(kd) - 1) / (kd)^4 - 4i[\cos(kd) / kd - 3 \sin(kd) / (kd)^2] - 6 \cos(kd)^3 + 6 \sin(kd) / (kd)^4, \quad m=2 \text{ 时} \quad (1-7)$$

由上式可以看出, 噪声场垂直相关函数只与水听器间隔有关, 而与其绝对位置无关。由于不考虑海底的影响, 而且不考虑声线的折射效应, 因此C/S模型只适用于深海环境, 是比较粗糙的。

2. Chapman模型

Chapman^[15]在C/S模型的基础上, 加入了海底反射的影响, 并导出了以仰角 θ 为变量的声场噪声强度的方程:

$$I(\theta) = \begin{cases} I_0(\theta)(1/(1-V(\theta))) & \text{当 } \theta > 0 \text{ 时} \\ I_0(\theta)V(\theta)/(1-V(\theta)) & \text{当 } \theta < 0 \text{ 时} \end{cases} \quad (1-8)$$

其中, $I_0(\theta) = PS(\theta)/2\pi \sin \theta$, $V(\theta)$ 为海底平面波强度的反射系数, $S(\theta)$ 为源强度指向性方程, P 为单位面积噪声源强度。图 1.1 给出了 Chapman 模型对不同海底类型 A-F(由软及硬)的噪声场指向性强度的计算结果。可见, 海底类型对噪声强度指向性有明显影响: 低声速海底(尤其是类型 A)对应的噪声强度在来自水平上方部分明显大于水平下方部分, 而高声速海底(D、E 与 F)情况下, 噪声场强度在临界角对应的区域呈现明显的峰值。

Chapman模型还进一步导出了噪声场的垂直相关函数:

$$C(x) = \int_{-1}^1 I(\theta) \exp(ik \sin \theta) d(\sin \theta) / \int_{-1}^1 I(\theta) d(\sin \theta) \quad (1-9)$$

其中, x 为水听器垂直间隔。

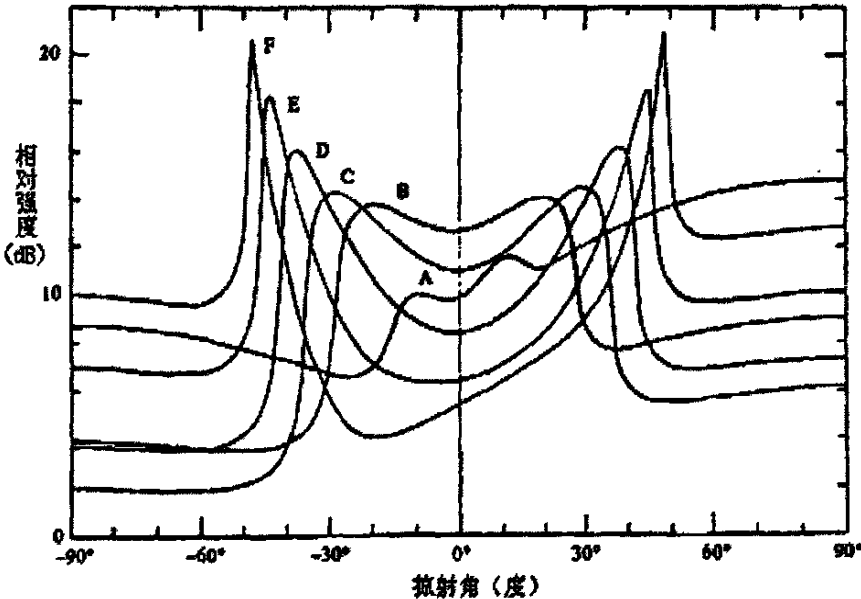


图1.1 Chapman模型对不同海底类型的噪声场指向性强度的计算结果

3. Buckingham模型

Buckingham^[16]在均匀声速剖面、弱损失海底类型的浅海环境下, 用简正波方法求得了噪声场的垂直相关函数以及阵增益。通过海底弱损失的假设, 满足了简正波的低损耗传播, 使得噪声场主要来自于远场离散谱的贡献, 可以忽略了近场连续谱的成分。在 Buckingham 模型当中, 水体的中间部分存在一个“近似均匀”的区域, 在此区域中垂直放置的水听器之间的相关系数仅

与其间隔有关，与其绝对位置无关。

$$c_{ij} = \pi V A^2 z_0^2 \left\{ \sin \left[\left(M + \frac{1}{2} \right) (z_i - z_j) \right] \sin(z_i - z_j) / 2 - 1 \right\} / \Delta \quad (1-10)$$

其中 M 为简正波模数， z_i 、 z_j 为归一化的水听器的深度， z_0 为归一化的声源层深度， V 为单位面积声源个数， A 为声源强度， Δ 为涉及模式衰减的项。由相关函数方程(1-10)，可以推导出噪声到达结构与垂直阵增益公式。但是由于忽略了近场连续谱部分的贡献，因此此模型仅能代表小于某临界角区域对应的声场部分。

4. Plaisant模型

Plaisant^[17]用射线理论描述海面噪声源层到接收器的声传播，并考虑了水体吸收、海底损失以及变化的声速剖面的影响，导出了噪声场强度的指向性以及水听器之间的空间相关函数，其结果与500Hz以上用垂直阵测量的结果十分相近。此模型不考虑水听器阵元间的不均匀性，即相关函数只与水听器间距有关，与其绝对位置无关。

5. K/I模型

Kuperman与Ingenito利用全波理论处理噪声传播问题，不仅考虑远场离散谱的贡献，也将近场连续谱的贡献包括近来。该模型假设具有特定源级和相关性的单极子声源均匀分布于接近于海面处的一无限大平面上，声场与距离无关。源深度 z 应比波长小，一般建议小于波长的1/4。噪声场中两点的格林函数的乘积相当于一个传播算子，它联系着噪声源相关特性与噪声场的相关特性。模型假设噪声源是不相关的。根据波导中声速剖面、边界条件计算出与深度有关的格林函数。噪声场的相关函数的求解最终归结为对波数的积分，这实际上包括了对噪声场有贡献的各个谱域。将格林函数化为特征函数的展开表达式，从而可以利用简正波计算声场。如图1.2所示，离散谱来自于掠射角小于临界角且与海底多次作用的那部分声场，而连续谱则由直达声场以及掠射角大于临界角且与海底相互作用的那部分声场组成。

K/I模型可以用来计算水平分层介质中随深度变化的相对噪声级，以及任意两点的噪声场相干情况。计算时，远场离散波用SUPERSNAP程序、近场连续波用快速声场程序(FFP)来计算。K/I模型还在研究不同源指向性参数时环境因素对垂直或水平指向性的影响中得到广泛应用。图1.3为480Hz时用

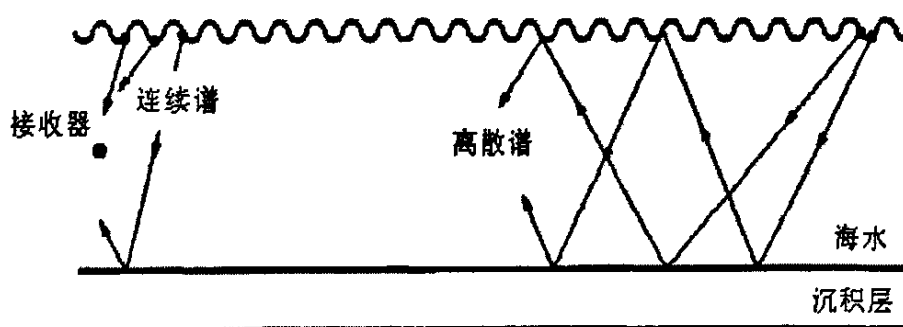


图1.2 浅海中连续和离散谱到达接收器示意图

K/I 模型计算的垂直阵响应，阵长为 5λ 。由图可见，增加指向性参数 m ，接近水平方向的远场离散简正波衰减迅速，而对接近垂直到达的近场连续波成分影响不大。

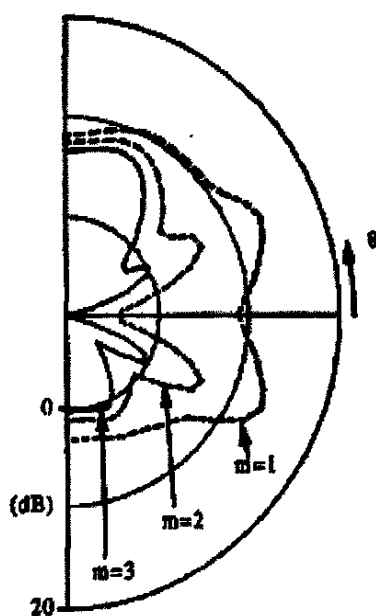


图1.3 480Hz时用K/I模型计算的垂直阵响应，

分别对应指向性参数 $m=1, 2, 3$

K/I模型的缺点在于计算时间太长，尤其对高频时。尽管如此，K/I模型还是得以改进，被对离散和连续波计算速度都加快的SUPERSNAP所更新，也可以用Schmidt的SAFARI程序来计算，在Perkins的距离变化声场的计算中，应用KRAKEN来计算简正波。

6. Carey模型

Carey^[18]等人将抛物方程传播模型与海面噪声源耦合起来, 计算与距离有关的海洋环境中噪声场的垂直分布。该模型把海面分成内部与距离无关的圆形面积和与距离有关的圆外面积。为简单起见, 假定外部区域的海洋环境与距离有关但在方位上是圆点对称的。模型计算的重点在于外部区域噪声源对内部区域接收点的互谱密度。

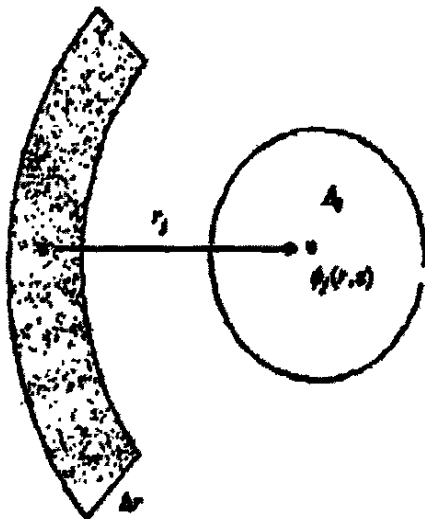


图1.4 用抛物方程计算噪声场的几何表示

图1.4给出了外部区域中的一个环形带, 外部区域的海面声源以在 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机相位 x 辐射, 声源分布密度为每单位面积 η 个声源。厚度为 Δr 的第 j 个环形带中有 N_j 个声源, 每个声源都对声场点 (r, z) 有贡献。总贡献为:

$$\phi_j(r, z) = \sum_{n=1}^{N_j} \exp(ix_n) p(r_j, z) \quad (1-11)$$

抛物方程的包迹函数 ψ 与声压的关系式为:

$$p(r, z) = \frac{\psi(r, z)}{\sqrt{r}} \exp(i(k_0 r - \frac{\pi}{4})) \quad (1-12)$$

最后推导得到用抛物方程的包迹函数 ψ 表示的总声场。计算时, 应用抛物方程算法的包迹函数推进式来计算。抛物方程算法可以按照噪声场的垂直

薄片向前推进,因而可以直接使用该方法计算垂直指向性。Carey等利用该模型模拟了大陆架噪声和深海噪声各自对深海工作站的贡献。

尽管噪声场的抛物方程模型只适合远场条件,而且作了柱面对称的简化假设,但因为抛物方程算法在计算具有很大变化的海洋路径上的声场方面是最精确和最实际的方法,因此该模型仍然显示出了良好的前景。

7. CANARY模型

Harrison对声传播作射线处理,于90年代中期提出了CANARY模型。该模型假设噪声源均匀分布在海面上,考虑了海洋信道的各种影响,如声速分布,海面、海底反射和介质吸收等,计算时只需要考虑连接海面噪声源和接收器的声线,如图1.5所示。

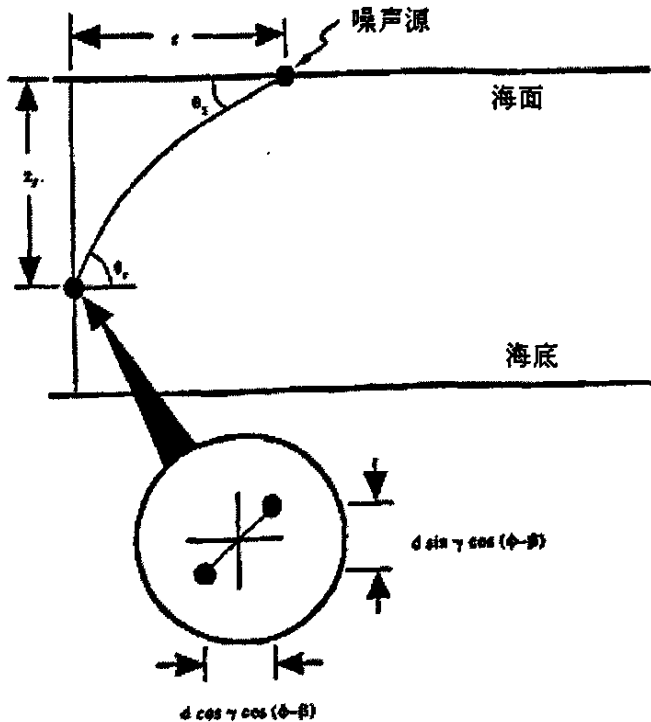


图1.5 CANARY模型示意图

射线声学模型的基本公式已由Harrison导出,其假设为:(a)声线处理;(b)两个水听器距离很近;(c)忽略多途干涉;(d)与方位角和距离无关的声学环境。如图1.5所示,深度为 z 的接收器接收到的来自于水平距离 r 、深度 $z=0$ 的单位源的声压振幅可以表示成所有声线的和:

$$\psi(z_r, r) = \sum_p A_p(z_r, r, \theta_r) \exp(iB_p(z_r, r, \theta_r)) \quad (1-13)$$

其中, θ_r 是声线入射角(掠射角); p 是声线指数, 表示各种入射角度为 θ_r 的声线。这些声线包含经过海面、海底反射的多途传播。对于中心位于 z 、连线长度为 d 、俯仰角为 γ 、方位角为 β 的水听器对, 其相关函数可以表示为:

$$\rho(d, \gamma) = q \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \psi(z_1, r_1) \psi^*(z_2, r_2) g^2(\theta_r) r dr d\phi \quad (1-14)$$

其中 $g = \sin^m \theta_r$ 是噪声源的指向性函数, q 是海面上单位面积的噪声源数目, 归一化为1, θ_s 、 θ_b 分别为海面和海底掠射角。最后推导得噪声场的指向性:

$$N(\theta) = Q \sin^{2m-1} \theta_s [1 - R_s(\theta_s) R_b(\theta_b) e^{-\alpha s_c}]^{-1} \quad (1-15)$$

其中, R_s 和 R_b 是海面和海底反射的能量损失, s_c 是单次循环的声学长度, α 是介质吸收系数。 Q 是剩余的(不足一次循环的)那一段传播途径的能量损失:

$$Q = \begin{cases} e^{-\alpha s_r} & \theta_r > 0 \\ R_b e^{-\alpha(s_c - s_r)} & \theta_r < 0 \end{cases} \quad (1-16)$$

相关函数为:

$$\begin{aligned} \rho(d, \gamma) = & 2\pi \int_0^{\pi/2} \sin^{2m-1} \theta_s [1 - R_s(\theta_s) R_b(\theta_b) e^{-\alpha s_c}]^{-1} \\ & \times (e^{ikd \sin \theta_s \sin \gamma} e^{-\alpha s_r} + R_b e^{ikd \sin \theta_s \sin \gamma} e^{-\alpha(s_c - s_r)}) \\ & \times J_0(kd \cos \theta_r \cos \gamma) \cos \theta_r d\theta_r \end{aligned} \quad (1-17)$$

令相关函数中的 $d=0$, 得到总的噪声强度:

$$I = 2\pi \int_{-\pi/2}^{\pi/2} N(\theta_r) \cos \theta_r d\theta_r \quad (1-18)$$

该模型关键在于给定传播条件下, 追踪连接海面和接收器的声线, 限定到达接收器的声线的角度范围。此射线模型最适合于解决高频情况, 在一定程度上弥补了波动方法的局限。它不仅可以应用于分层海洋, 而且可以推广应用于三维海洋。

8. WKBZ模型

噪声场的建模工作在国内也有展开, 张仁和院士将简正波本征函数的广

义相积分近似即 WKBZ 近似应用在噪声场的传播计算上^{[19][21]}。

在浅海水平分层介质中, 由简谐点源产生的声压表示为:

$$p(z_1, z_2, r) = \sqrt{\frac{8\pi}{r}} \sum_i \psi_i(z_1) \psi_i(z_2) \sqrt{\mu_i} \exp(i\mu_i r - \beta_i r + i\pi/4) \quad (1-19)$$

其中, z_1 和 z_2 分别是源和接收器深度, μ_i 、 β_i 是模式本征值的实部和虚部部分, 而 $\psi_i(z)$ 是简正波深度函数。 $\psi_i(z)$ 由 WKB 近似理论给出:

$$\psi_i(z) = \sqrt{\frac{2}{s_i}} \begin{cases} \frac{\exp[-\int_z^{\eta_i} \sqrt{\mu_i^2 - k^2(y)} dy]}{\sqrt{2} [Eb^{2/3}(z) + 4\mu_i^2 - 4k^2(z)]^{1/4}}, & z < \eta_i \\ \frac{\sin[\int_z^{\eta_i} \sqrt{k^2(y) - \mu_i^2} dy + \pi/4]}{[Eb^{2/3}(z) + k^2(z) - \mu_i^2]^{1/4}}, & z < \eta_i < \zeta_i \\ \frac{(-1)^i \exp[-\int_{\zeta_i}^z \sqrt{\mu_i^2 - k^2(y)} dy]}{\sqrt{2} [Eb^{2/3}(z) + 4\mu_i^2 - 4k^2(z)]^{1/4}}, & z > \zeta_i \end{cases} \quad (1-20)$$

其中, $E=0.875$, $b(z) = |dk^2(z)/dz|$, s_i 是本征声线单次循环的距离, η_i 、 ζ_i 分别是上下反转点的深度。

空间相关函数是噪声场的二阶矩, 它描述声场中两点之间声压的相似性。它由下式定义:

$$\begin{aligned} \psi(z_1, z_2, d_L, d_V, r) = & \frac{8\pi}{r} \sum_i \overline{\psi_i^2(z_1)} \overline{\psi_i(z_2) \psi_i(z_2 + d_V)} \\ & \times \mu_i \exp(-2\beta_i r - i\mu_i d_L) \end{aligned} \quad (1-21)$$

其中 d_L 、 d_V 分别是水听器对的水平、垂直间隔。上式相关函数的归一化形式定义为:

$$\gamma(z_1, z_2, d_L, d_V, r) = \frac{\overline{p(z_1, z_2, r) p^*(z_1, z_2 + d_V, r + d_L)}}{[\overline{p(z_1, z_2, r)^2} \overline{p(z_1, z_2 + d_V, r + d_L)^2}]^{1/2}} \quad (1-22)$$

将声压表达式(1-19)代入式(1-22)，化简得相关函数：

$$\begin{aligned} \psi(z_1, z_2, d_L, d_V, r) = & \frac{8\pi}{r} \sum_i \overline{\psi_i^2(z_1)} \overline{\psi_i(z_2) \psi_i(z_2 + d_V)} \\ & \times \mu_i \exp(-2\beta_i r - i\mu_i d_L) \end{aligned} \quad (1-23)$$

最后，归一化的空间相关函数写为如下的形式：

$$\begin{aligned} \gamma(z_1, z_2, d_L, d_V, r) = & \sum_i \frac{\mu_i}{S_i} \left[Eb^{2/3}(z_1) + k_i^2 - \mu_i^2 \right]^{-1/2} \\ & \times \left[Eb^{2/3}(z_2) + k_i^2 - \mu_i^2 \right]^{-1/2} \\ & \times e^{-2\beta_i r} \cos(k_i d_V \sqrt{k_i^2 - \mu_i^2}) e^{-i\mu_i d_L} \end{aligned} \quad (1-24)$$

其中， μ_i 为水平波数。

广义项积分(WKBZ)近似克服了经典的 WKB 近似在反转深度发散的困难，形式简单，易于计算而且有足够的精度。

9. 简正波射线混合模型

中科院声学所林建恒博士在T.C.Yang将噪声场分为远近场理论的基础上，建立了海洋环境噪声简正波射线混合模型^[22]。模型推导了用射线方法计算近场的表达式，在保证计算精度的同时，提高了计算速度。本文将采用此模型进行计算，其相关理论将在第三、四章作详细介绍。

1.2.3 数值预报模型

伴随着理论模型的日益成熟和军事国防的需要，人们在上述理论模型的基础上，建立了很多数值预报模型^[9]。自八十年代以来，国外已开发了多个海洋环境噪声预报模型，如美国的RANDI(Research Ambient Noise Directionality Mode)、DUNES(Directional Underwater Noise Estimates)、ANDES(Ambient Noise Directional Estimation System)和英国的

CANARY(Coherence and Ambient Noise for Arrays)等模型。这些模型的频率范围是几十Hz~10kHz,特别是2kHz以下,基本上覆盖了声纳的主要工作频段。下面对这些模型作简单介绍:

ANDES(4.2版本)用于浅海环境噪声建模,包括航运密度和声速数据库。另外,此模型能反应由于风速和传播损失场中离散声源运动引起的噪声指向性的起伏变化。

CANARY模型是基于声线的环境噪声和噪声相干模型,用于评估距离和相位有关的环境下的声纳性能,它将噪声源看成面分布而不是点源。

CNOISE模型用于预报航运产生的环境噪声,这里与距离有关的传播损失必须由外部产生。

DANES模型产生噪声级和航运噪声和风成噪声的水平指向性估计。

DINAMO模型模拟三维噪声指向性和实际声纳阵性能。DINAMO模型与CANARY模型的联系比较紧密,CANARY模型主要用于科学研究。DINAMO模型对所有噪声指向性立体角乘以声纳阵波束图进行直接积分,而CANARY模型首先计算声纳阵的相关矩阵,然后将这些项相加得到声纳阵响应。

DUNES模型估计频率上的全向、垂直、水平和三维指向性噪声。这个模型包括高纬度和坡度增强的风成噪声效应,模型的重点在于自然环境噪声的计算。其航运噪声的贡献被外在的加入,并不依靠庞大的航运数据库。

以下具体介绍一下RANDI模型。RANDI模型是环境噪声模型的一个有益实例。RANDI模型计算选定海洋环境的低频(10Hz~500Hz)环境噪声的垂直指向性和水平指向性,其方框图见1.6。模型主要包括以下几方面:

(1)传播损失

RANDI模型所用的传播损失输入量有以下三个来源:内含的线性声线轨迹例行程序;随距离和阵输入角而变化的传播损失所组成的输入数据;深海声道传播算法。

(2)噪声源及谱

RANDI模型考虑了6种各向同性和各向异性的海面噪声源和体积噪声源:航船,风浪,生物,零级海况,降雨,远方声源,还有第7种,即目标噪声源,作为任选项。海面噪声由分布在6m深的水平面上的无数个点源产生。利用经验算法计算7种噪声源的平方声压谱级,在用户指定的频带内,对全部

噪声的平方声压谱级按输入频率响应函数进行积分。

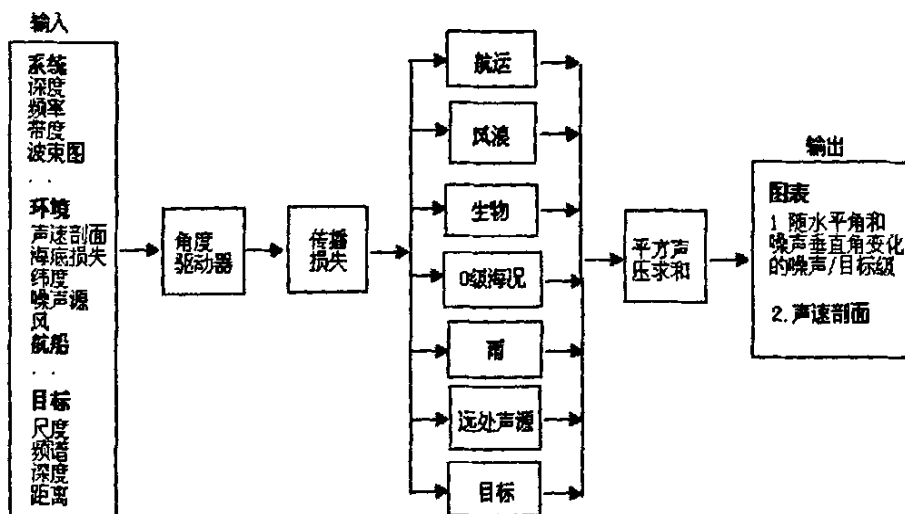


图1.6 RANDI模型方框图

(3)指向性

为了确定噪声场的水平指向性，以接收器为中心，海洋被划分为 n 个楔形区域(称为扇区)，扇区的垂直厚度等于接收器所处的海深。对用户规定的每个扇区，独立地进行噪声计算，再将 n 个扇区的平方噪声声压加起来，得到总的平方噪声声压。

噪声场的垂直指向性是按垂直差分角确定的。首先计算差分角对应的声线束与各向异性噪声场平面相交的面积。然后，将这些面积值与局部噪声有效平方声压级相乘，其结果被减去相应的传播损失，然后作累加。各向同性噪声源的贡献在这时被计算。最后将得到的噪声级与接收阵的垂直响应进行卷积。全部计算过程对每一个差分角进行重复。

(4)进展

RANDI模型的最早版本是RANDI-1，它计算和显示频率范围为10Hz~10kHz环境噪声场的垂直和水平指向性。RANDI-2模型在SACLANTCEN模型的基础上构建，用于解释浅海环境噪声的特殊机理。RANDI-3用于频率范围从低频到中频(10Hz~300Hz)，浅海和深海的环境噪声级和指向性预报。接收器可以是水平或垂直线阵，主要噪声源被假定为航运噪声、远距离风暴噪声和当地风噪声。可用有限元方法或分段抛物型方程模型计算变化环境中的

航运噪声。局部风成噪声可以用距离无关的理论来计算。

1.2.4 噪声模型总结

总的看来海洋环境噪声场的理论建模有两种基本方法：波动声学模型和射线声学模型。近年来的主要工作集中在更为复杂的浅海方面，目前真正实用的是K/I模型，以及CANARY模型。从传播角度来看，波动模型(K/I模型)是一个很完善的模型，但是对近场噪声源必须进行非常耗费机时的连续谱计算，因此准确但慢。特别是在三维情况下，用波动方法计算传播的工作量巨大，用这种方法作现场预报是不现实的。射线模型(CANARY模型)考虑了海洋信道的各种影响，如声速分布、海面海底反射和介质吸收等。它不仅应用于分层海洋，而且可以推广应用于三维海洋，是快速模型，但对远场噪声源必须作过多的近似，致使不很准确。本论文将采用林建恒^[22]的远场简正波近场射线方法的混合模型来进行计算。

1.3 本文的目的及主要内容

本文海洋环境噪声建模的目的即以水平分层浅海海洋环境噪声场为研究对象，采用远场简正波和近场射线的混合方法，建立海洋环境噪声谱级和垂直指向性随风速、航船分布、降雨、水深等的模型，获得噪声谱级及垂直指向性与环境因素的关系。

论文首先回顾了海面噪声源噪声场建模工作的历史与现状，其中包括了噪声源模型、噪声传播模型和噪声预报模型，在总结以往模型的基础上，确定了本文的建模方法；然后介绍了海洋环境噪声的基本理论，包括互谱密度、谱级、指向性等，并具体介绍了环境噪声各种源及其谱特性以及海洋环境噪声的测量方法，为以后各章的展开打下基础；在谱级方面，论文首先将噪声场的势函数可以用格林函数来表示，根据波动方程和边界条件，求得格林函数的简正波和射线表达式，然后推导出海洋环境噪声谱级的远近场表达式，并选取以往模型参数进行验证，讨论了海水声速、海底、频率以及海面噪声源分布面积等对噪声谱级的影响，最后计算了实测噪声数据的谱级；在指向性方面，论文推导了噪声场的垂直指向性表达式，讨论了海水声速、海底、频率以及海面噪声源分布面积等对指向性的影响；最后给出本文的结论。

第 2 章 海洋环境噪声基本理论

2.1 海洋环境噪声及其描述

海洋环境噪声是海洋中任一特定位置、以及每年中任一时刻均普遍存在的不期望的声背景。不包括由附近舰船、海洋生物或阵雨引起的瞬态声音，也不包括一切形式的自噪声。它是信号检测中所面对的噪声背景，具有时间、位置和深度特性。因此，环境噪声是去除所有可分辨的瞬态声源后所残留的那部分声级^[1]。

2.1.1 功率谱及噪声级

海洋环境噪声模型中，噪声声压是一个随机量，与时间量之间不存在确定关系，因此分析噪声声压幅值的频谱没有意义；而其功率谱函数是一个确定的统计量，反映了该过程各频率分量的平均强度。功率谱密度可由互谱密度推导得出，互谱密度定义为声场中两点处的声压谱的共扼乘积：

$$C_w(r_1, r_2, z_1, z_2) = \langle \phi(r_1, z_1) \phi^*(r_2, z_2) \rangle \quad (2-1)$$

其中， $\langle \rangle$ 为集平均。当 $r_1 = r_2$ 、 $z_1 = z_2$ 时，上式退化为功率谱 $S(f)$ ，噪声谱级即为以分贝计的噪声功率谱。

在声纳方程 $SL - TL = NL - DI + DT$ 中，海洋环境噪声作为信道的加性干扰，用噪声级 NL 加以描述。海洋环境噪声级定义为^[2]：

$$NL = 10 \lg \frac{I_N}{I_0} \quad (2-2)$$

式中， I_N 为水听器工作带宽内的噪声总声强，即：

$$I_N = \int_{f_1}^{f_2} S(f) df \quad (2-3)$$

其中， $S(f)$ 为频谱密度函数，定义为：

$$S(f) = \frac{dI_N}{df} \quad (2-4)$$

假设水听器工作带宽 Δf 内噪声功率谱 $S(f)$ 是均匀的，则有：

$$I_N = S \cdot \Delta f \quad (2-5)$$

则得噪声级与均匀噪声谱的关系为：

$$NL = 10 \lg \Delta f + 10 \lg \frac{S}{I_0} \quad (2-6)$$

通常，噪声谱级被规定为 1Hz 带宽内的均方根声压级。采用不同的单位会得到不同的噪声谱级，技术文献中经常遇到的单位包括：以 $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ 为参考的 dB，以 $1\mu\text{Pa}/\text{Hz}^{1/2}$ 为参考的 dB 等。

2.1.2 与深度的关系

对于低频环境噪声与深度的关系，Morris^[24]在东太平洋的测量结果如图 2.1，可以看出，低频时噪声谱级随深度增加而减小，但在 500Hz 时随深度减

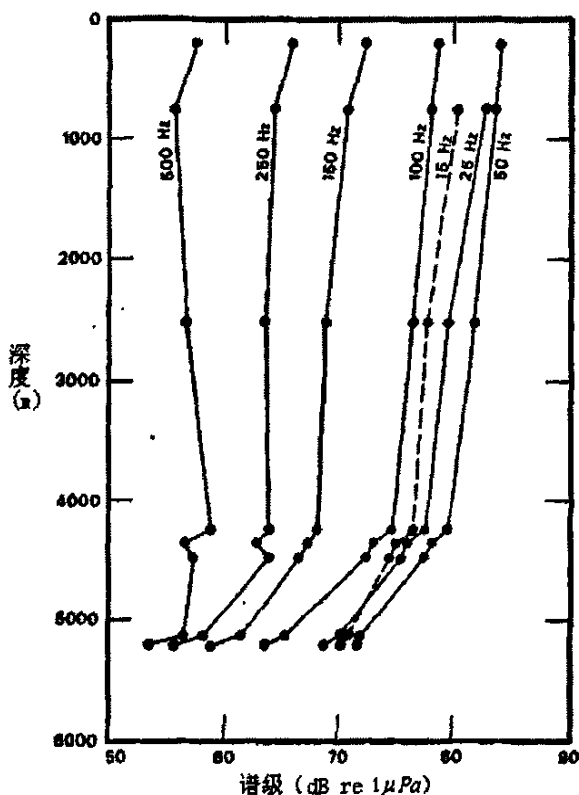


图 2.1 东北太平洋环境噪声测量：
以 1/3 倍频程带宽测量的噪声剖面

小较少,因为此时风成噪声超过了航运噪声。在临界深度以下,因为接近海底,噪声随深度增加而急剧减小,这是声波与海底交互作用致使折射声能的损失所造成的。

图2.2所示为林建恒^[25]在我国某海域测得的宽带噪声级随水深的垂直分布,图中每根线代表不同的风速。由图可见,在海面风速1.8~10.6m/s内,上述频段宽带声级随接收深度的增加而下降。海面附近接收点(18m)与最深接收点(61m)之间的环境噪声级之差在较低风速时比较高风速时小。原因分析如下:海面海况和远处的航船是海洋环境噪声的两个主要噪声源,小风速时海表面声源强度小,中远距离的航船影响大,负声速梯度时一部分远方噪声不能达到较深接收点,较深接收点处环境噪声较低,而水深18m处的水听器处于等温层之中,致使海面附近和深部接收点之间的声级差较大;当风速较大时,接收点顶部附近海面的噪声源增强,这一部分噪声能够以直达方式和海底反射方式抵达较深接收点,从而使较深处接收点的声级增加,这样海面附近接收点和深部接收点之间的声级差变小。

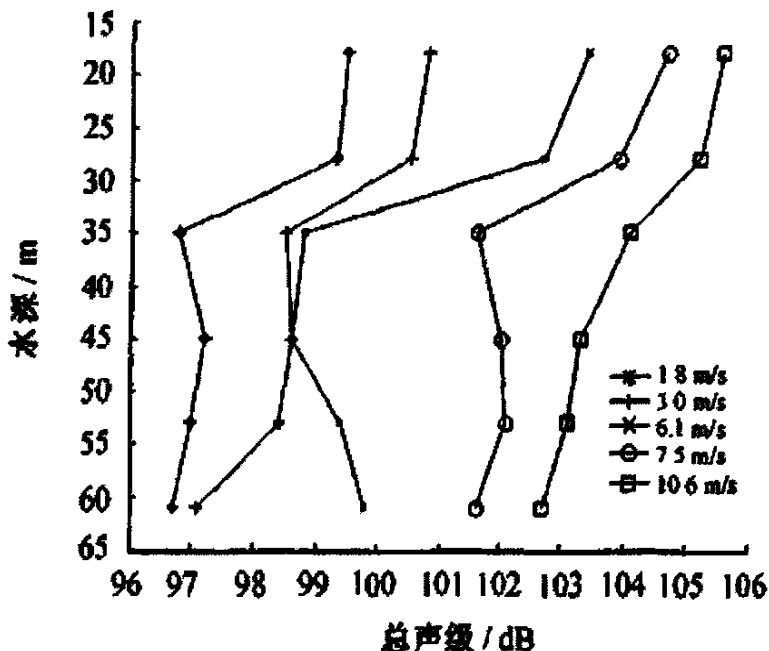


图2.2 某海域0.1~20.0kHz频段的宽带噪声级随水深的垂直分布

2.1.3 指向性

在设计声纳信号处理方案时,从抗干扰的角度来说,除了关心代表平均能量的噪声级外,还需要充分利用信号场和干扰场的时空统计特性的差异,例如环境噪声的指向性、相关函数等,以最大限度地获得增益,提高设备的抗干扰能力^[26]。

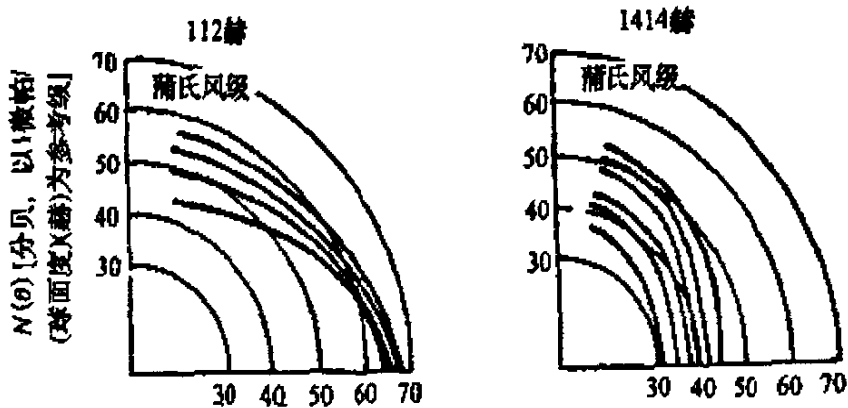


图 2.3 海底水听器在两个频率点上测得的环境噪声垂直指向性

工程上将噪声视为各向同性的,但测量结果表明并非如此。由于噪声源的指向性、空间分布和海洋传播条件等原因,使得水下噪声具有指向性。图 2.3 所示为 Axelrod^[27]等人在 112Hz 和 1414Hz 频率上的环境噪声垂直指向性的测量结果,是将到达海底水听器的单位立体角内的声强 $N(\theta)$ 作为角度 θ 的函数画出的。显然,在 112Hz 频率上,由水平方向到达水听器的噪声强于垂直方向,其差随风力的增加而变小。在 1414Hz 频率上,来自上面的噪声强于水平方向,其差随风力的增大而增大。结果说明,深海自然噪声具有指向性。图示指向性说明了以下事实:低频噪声来自很远处,主要通过水平途径到达水听器,高频噪声源大多在顶上的海面上。进一步的研究表明:海面辐射噪声有近乎 $\cos^2 \theta$ 的指向性,这同实有的噪声源和海面以上的虚源共同组成偶极子源的假设是一致的。

环境噪声的水平指向性是变化无常的,特别是在低频区。航船是主要的低频噪声源,观测到的方位变化大都可以用航线和航船密度的时空变化来解释。

2.1.4 振幅分布和空间相关

1. 振幅分布

根据中心极限定理, 海洋环境噪声的振幅分布是高斯的, 但在近海面其分布比高斯型尖, 原因是噪声源数目不够大。

2. 空间相关性

噪声的空间相关指海中相隔开的水听器接收到的噪声的乘积对时间的平均。两个相距为 d 的各向同性单频噪声的相关系数为:

$$\rho(d) = \sin kd / kd \quad (2-7)$$

Cron 和 Sherman 对指向性为 $\cos^m \theta$ 的噪声场相关系数进行研究, 如图 2.4, 其中包括单频各向同性噪声的空间相关曲线以及辐射特性为 $\cos^2 \theta$ 的面声源的相关曲线, 接收水听器间距为 d , 相关系数 ρ 为间距与波长之比 d/λ 的函数。由图可见水平方向和垂直方向上的相关系数理论曲线与各向同性的单频噪声场具有相同形状。海面粗糙度形成的噪声场具有 $\cos^2 \theta$ 的指向特性^[4]。

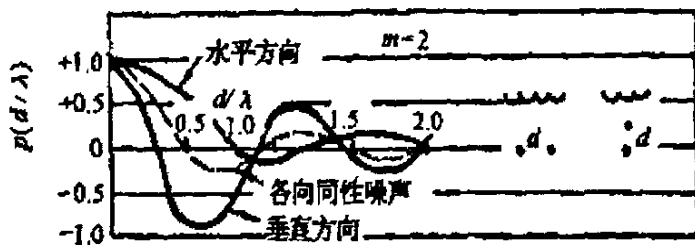


图 2.4 噪声空间相关曲线

2.2 海洋环境噪声源与噪声谱

2.2.1 深海环境噪声源及其谱

图 2.5 所示为 Wenz 谱级图^[28], 在一般情况下, 它能够比较细致地描写出环境噪声的普遍规律性, 被认为最具代表性的深海噪声谱曲线。

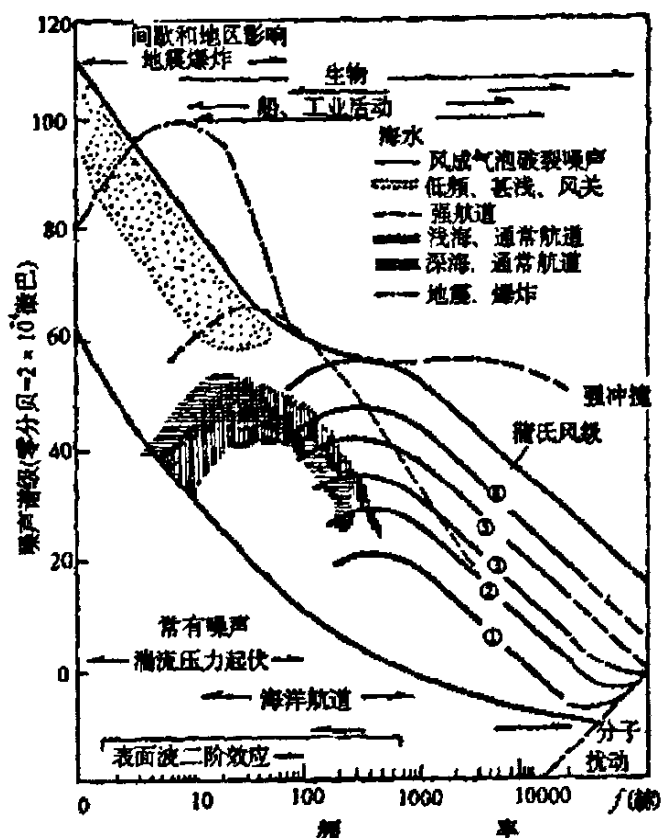


图 2.5 Wenz 谱级图

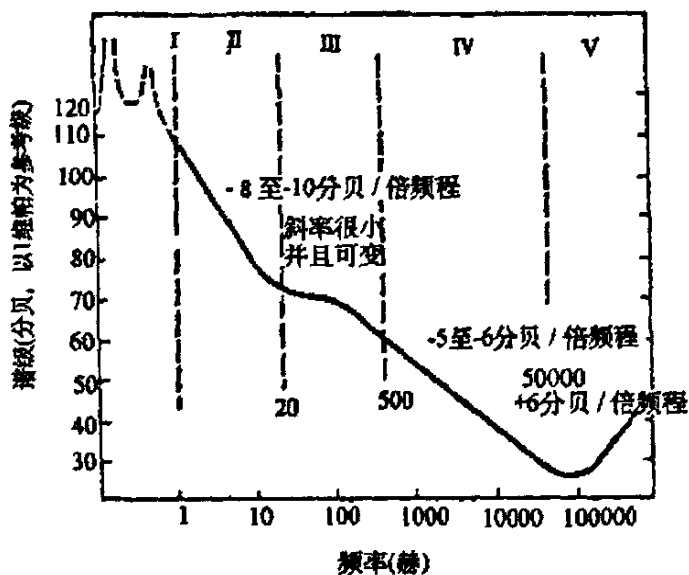


图 2.6 深海环境噪声谱举例

深海环境噪声谱例子如图 2.6, 谱由斜率不同的几部分组成, 解释如下^[23]:

(1) 1Hz 以下, 这段谱至今还不为人所知。估计该噪声来源于海水静压力效应或是地球内部的地震扰动。

(2) 斜率为-8~-10dB/倍频程, 与风速仅有微弱的关系, 最可能的噪声源是海洋湍流。

(3) 自然噪声谱变平, 远处行船是主要噪声源。

(4) 具有-5~-6dB/倍频程, 噪声源是离测量点不远的粗糙海面。

(5) 海水介质分子热运动噪声, 谱线斜率为 6dB/倍频程。

工程上, 为预报海洋环境噪声级, 需要不同条件下的平均典型自然噪声谱。图 2.7 画出了不同航运和风速条件下的预报用曲线。从该图可近似求得任何地点和时间的环境噪声谱, 其方法是选择适当的航运曲线和风速曲线, 并将它们在相重合频率的中点联合起来。当噪声源不只一个时, 有效噪声背景的求取是对有贡献的噪声源按强度进行相加。

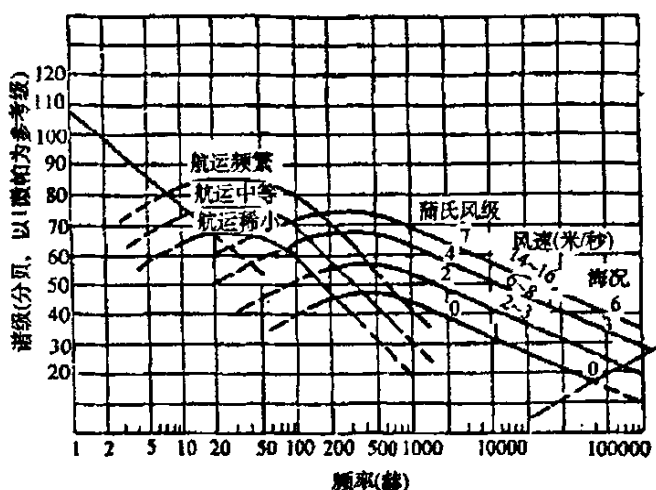


图 2.7 深海平均环境噪声谱

2.2.2 浅海环境噪声源及其谱

早期的海面噪声理论主要讨论深海中的噪声场, 假定统计独立的噪声源分布于海面上, 海洋被视为均匀半空间, 未考虑海水折射与海底反射的影响。浅海环境噪声的大量测量表明, 浅海环境噪声级常常高于代表深海噪声的 Wenz 曲线, 并具有较大的海域与季节变化。在同样的风速与海况条件下, 这

种差别可能是由于海洋环境条件(如海底特性、水深与声速剖面等)不同所引起。

与比较确定的深海环境噪声情形相反,在近海、海湾和港口,环境噪声的变化很大。在这些地方,浅海噪声的声源在不同的时间和不同的地点都显著不同。在浅海中,某一频率下的背景噪声由三类不同形式的噪声混合而成:(1)行船及工业噪声,(2)风成噪声,(3)生物噪声。在一个特定的时间和地点,噪声级取决于这些源的“混合”情况。因这种混合的情况随时间、地点而变,所以噪声级也就表现出时时处处有显著的变化性。因此在海湾、港口以及近海地区,仅能给出噪声级的粗略指示。在近海,如大陆架上,在很宽的频段内,还是由风速决定噪声级。图2.8表示Piggott^[29]得到的几种风速下的频谱。同时还给出在距佛罗里达州劳德代尔堡5海里的开阔海域深700英尺处所测得的两条平均谱。与深海平均环境噪声谱(图2.6)比较看出,在频率高于500Hz左右时,近海中噪声级比远离海岸的深海噪声级高5到10分贝。

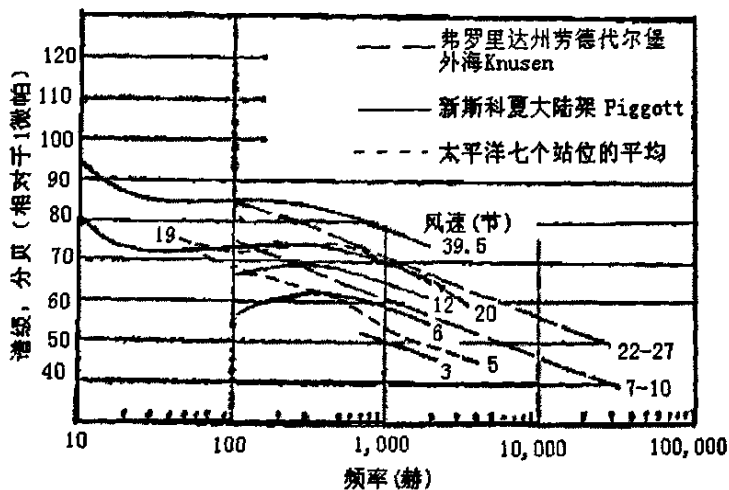


图 2.8 以风速作为参量的近海噪声级

2.2.3 自然噪声的间歇源及自然噪声的变化特性

所谓间歇源指的不是持续数小时或数天,而仅是暂时存在的噪声源,如能发声的海洋生物、降雨、爆炸、地震和火山活动等。本文主要关注降雨引起的噪声。显然降雨会增加环境噪声,其增加与降雨率有关,或许也与整个降雨的面积有关。图 2.9 表示了在不同降雨量下的三个环境噪声谱。图上还

根据图 2.6 画出在 20~40 节风速下无雨时的谱, 可以看到, 在 1 至 10 千赫之间暴雨的噪声谱近于“白噪声”。在 10 千赫处, 暴雨下的噪声级超过无雨时 18 分贝^[26]。

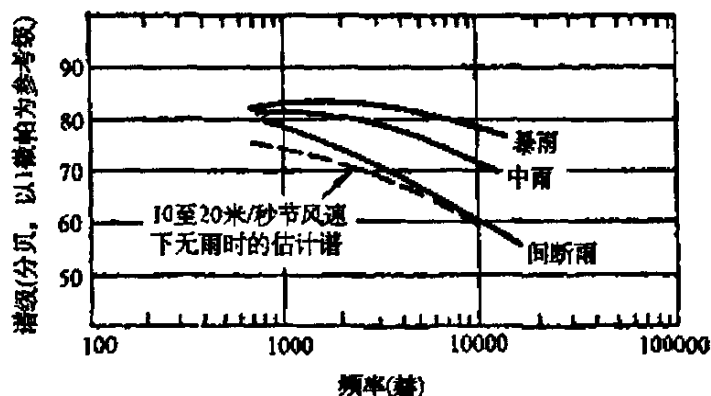


图 2.9 长岛海峡观察到的降雨噪声谱,
虚线是和测量数据相应的无雨时的噪声谱

2.3 海洋环境噪声测量

海洋噪声测量是对指定的海洋环境在规定的频率范围内进行噪声测量。基本的方法是使用抗流感噪声测试系统来测量噪声。在测量系统准备完毕和待测海域划定好的基础上, 用可靠的测试系统记录海洋环境噪声。测量时, 水下声测量系统与测量船之间的距离应大于 50m, 布放深度应满足测量要求。在测量期间, 应尽量避免干扰。在测量海区内, 应避免机动船的干扰, 并对测量环境的状况作详细的描述和记录。对每一个观测点, 通常应作连续 24 小时测量, 每隔 1 小时记录一次。每次录音时间至少 3 分钟, 以满足记录的噪声为高斯平稳随机过程。系统方框图如图 2.10 所示^[30]。

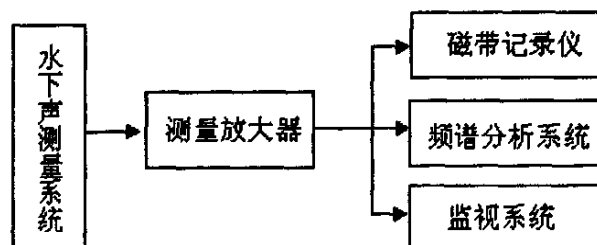


图 2.10 测量系统方框图

其中水下声测量系统又分为利用单水听器、利用直线阵和利用矢量水听器测量,下面分别具体介绍这三种方法。

2.3.1 利用单水听器的测量

单个水听器的性能应满足如下要求:

(1) 频率范围: 频宽一般应宽于 $5\text{Hz}\sim 20000\text{Hz}$ (特殊要求上限频率扩展至 $100,000\text{Hz}$);

(2) 频率响应: 不均匀性在 $\pm 2.0\text{dB}$ 以内;

(3) 指向性: 通常要求无指向性, 其水平和垂直指向性偏差在使用频率的上限小于 $\pm 2.0\text{dB}$, 当水听器具有指向性时, 应当测量出它的指向性指数 DI, 以便进行修正;

(4) 灵敏度: 对于不带前置放大器的水听器的声压灵敏度应大于 -208dB , 对于带有前置放大器的水听器声压灵敏度应大于 -190dB ;

(5) 具有良好的水密性, 能承受海流的冲击和海水的腐蚀;

(6) 要有很低的自噪声。

图 2.11 所示为某次试验水听器布放示意图^[11]。由于海浪和海流的作用以及船的摇摆电缆的抖动等原因, 会使水听器输出的干扰信号很高, 因此应以测量水听器为核心构成一个水下声学系统, 在系统设计和制造时, 应采取有效的抗流减震措施。

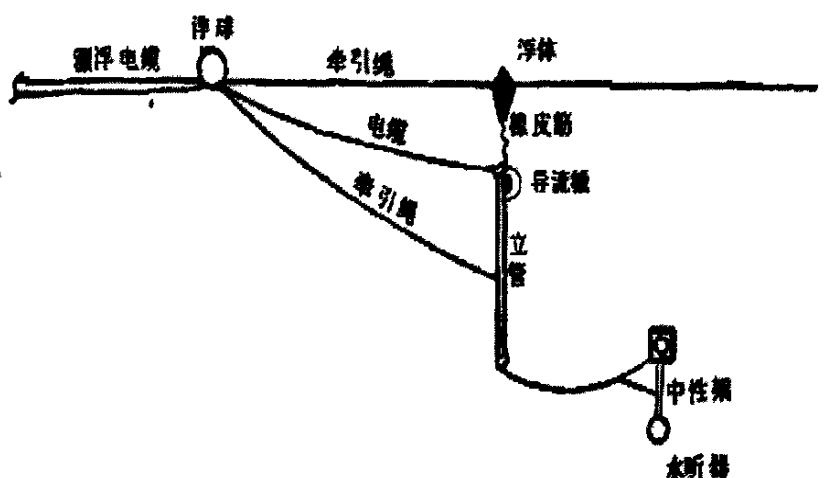


图 2.11 立杆式水下声系统结构示意图

2.3.2 利用直线基阵的测量

用直线基阵测量海洋环境噪声和水下目标的辐射噪声已被广泛应用。这是由于它比单个水听器具有更高的信噪比增益，从而可以检测到更微弱的噪声信号，同时还可以测得海洋环境中不同深度及同一深度处不同位置的噪声分布规律。

图 2.12 所示为文献[25]中所用的直线阵船舷法布放方案。船舷法是将多阵元水听器阵吊放于测试船的舷侧，通过电缆将多通道信号传输至实验室进行处理。各个水听器组阵前均经过校准，为了消除或减小电缆在海流中的振动以及湍流流速脉动干扰噪声，在安装水听器时采用了软护套式特制导流罩，水听器“软”置于其中央。采用了 32 通道数字磁带机，总采样频率达 1280kHz，磁带机自带监视器，便于监视每一通道的输出。

船舷法收、放水听器阵的操作简便、安全，接收阵阵形和接收水听器深度较易保持，测试较可靠，但测量过程中需要排除本船各种噪声的干扰，对于在综合性水声试验中穿插执行海洋环境噪声监测来讲，难以实现长时间连续数据的有效观测。

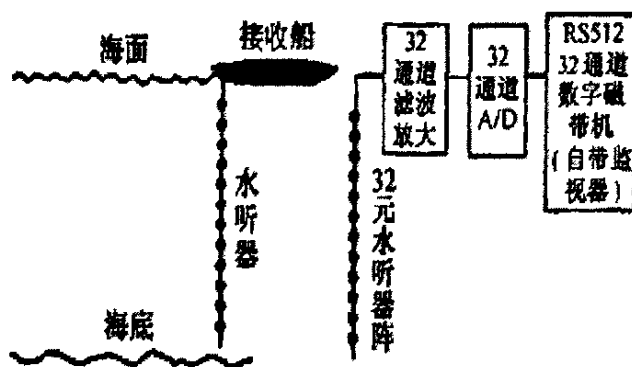


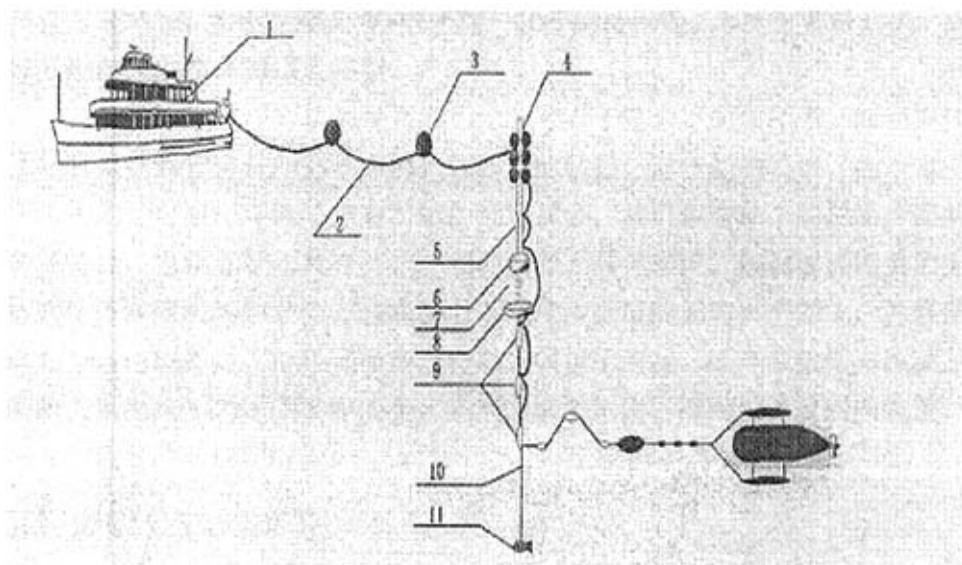
图 2.12 船舷法—32 元阵测量系统

2.3.3 利用矢量水听器的测量

利用水听器进行噪声场的测量，历经了从单水听器测量到水平阵和垂直阵测量的发展过程，然而这些测量系统，都是针对声压这个参量研制的，在此约束条件下，为了获得较高的空间增益，必须采用直线阵测量和相应的波

束形成技术,使得阵测量技术难度大,系统复杂、造价高。描述声场的除声压外,还有质点振速。如果把声压水听器和振速水听器组合在一起,则可同时测量声场的声压和质点振速,这种组合在一起的传感器称之为声压—振速组合传感器,它是矢量传感器。当测量了声场中的声压和质点振速后,可以计算出声强。

图 2.13 所示为声压—振速组合传感器构成的海洋环境噪声场声能流特性测试系统^[31]。系统主要由声压—振速组合传感器构成,组合传感器安装在抗流减振拖体内,此外,还包括姿态监测系统、水下电子舱,电子舱内带有前放供电电源、放大器、滤波电路等。



2.13 海洋环境噪声场声能流特性测试系统示意图

1 测量船 2 拖缆 3 浮球 4 浮球 5 立杆
6 重物 7 橡皮筋 8 阻尼器 9 浮子 10 钢绳 11 重物

2.4 本章小结

本章以海洋环境噪声的基本理论和基本测量方法为主题,首先介绍了描述海洋环境噪声一些基本概念,如互谱密度、噪声谱级、指向性等,然后介绍了环境噪声源及其谱特性,最后介绍了海洋环境噪声的测量方法,为以下各章的展开讨论打下了基础。

第3章 海洋环境噪声谱级

3.1 噪声源描述

海洋环境噪声的源多种多样,在不同的频段上有不同特性。一般说来,10kHz以下频段内,主要噪声源为海面扰动和航船,另外还包括间歇性的降雨声源。对于200~300Hz以上的频率或较高的海况,风与海浪的相互作用是产生海洋环境噪声的主要因素之一;而在几百赫兹以下低频段,环境噪声的主要成分来自船舶和其他的人为噪声源;降雨会增加噪声级,大雨时海中噪声级显著增加,频率主要集中在1千赫~10千赫范围内。本文主要针对风、雨以及船舶三种噪声源建立模型。

对风及雨噪声,可认为噪声源为均匀分布于海表下的单极子,海洋中任意接收点处的噪声是所有噪声源共同作用的结果。对于船舶噪声,由于本文所考虑的是对海洋环境噪声有贡献的远场部分,故可忽略单个船舶噪声源的传播特性,也将其看作具有一定分布的面源。具体来说,假设统计相关的无指向性点源随机均匀地分布在海面以下任意小深度的无穷大平面上,并假设海面为自由边界面,单极子噪声源将成为偶极子声源。噪声源数据与源级之间的关系见式(1-2)、(1-3)和(1-5),噪声谱级随风速、降雨量以及船舶航速、长度和数目的增加而增加。

3.2 谱级公式的推导

3.2.1 互谱密度的格林函数表达式

设噪声源位于深度为 z' 的无穷大平面内,如图3.1示。设源平面中某一点 \mathbf{r}' 的声源强度以单极子声源 $s(\mathbf{r}',t)$ 表示,为一随机变量。则声场方程为:

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2(z)} \frac{\partial^2}{\partial t^2})\phi = -4\pi s(\mathbf{r}',t)\delta(z-z') \quad (3-1)$$

其中, ϕ 为声压。 ϕ 和 s 经傅立叶变换后得:

$$\phi(\mathbf{r},z,t) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \phi_w(\mathbf{r},z) \exp(-i\omega t) \quad (3-2)$$

$$s(\mathbf{r}', t) = (2\pi)^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega S_w(\mathbf{r}') \exp(-i\omega t) \quad (3-3)$$

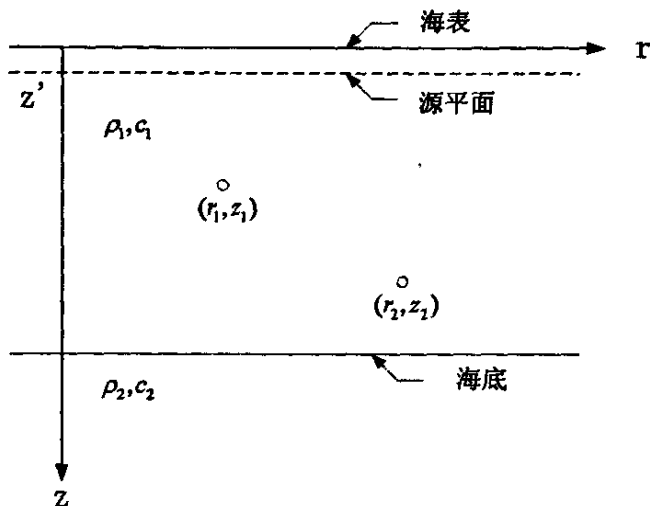


图 3.1 噪声传播模型

将(3-2)、(3-3)代入(3-1)中, 变换后得

$$(\nabla^2 + k^2)\varphi_w = -4\pi S_w(\mathbf{r}')\delta(z - z') \quad (3-4)$$

其中, $k = \omega/c$ 为波数。方程(3-4)的解为:

$$\varphi_w(\mathbf{r}, z) = \int d^2\mathbf{r}' S_w(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; z, z') \quad (3-5)$$

为简便, 以下推导中略去下标 w 。 $G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; z, z')$ 为此问题的格林函数, 满足以下方程:

$$(\nabla^2 + k^2)G(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; z, z') = -4\pi \left(\frac{1}{\mathbf{r} - \mathbf{r}'} \right) \delta^2(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \delta(z - z') \quad (3-6)$$

系数 4π 是为了使得在无限均匀介质中声场势函数具有 e^{ikR}/R 的简单形式, 也就是说声源具有基准强度^[32]。此外, 格林函数还必须满足海面压力释放边界条件、海底边界条件以及海底无穷远处的声场熄灭条件。

噪声场的互谱密度用 (\mathbf{r}_1, z_1) 与 (\mathbf{r}_2, z_2) 点声场的复共轭之积的集平均表示。当两个声场点在同一位置时, 它简化为局部声谱级。互谱密度表示为:

$$\begin{aligned} C(\mathbf{r}_1, z_1; \mathbf{r}_2, z_2) &= \langle \varphi(\mathbf{r}_1, z_1) \varphi^*(\mathbf{r}_2, z_2) \rangle \\ &= \iint \langle S(\mathbf{r}') S^*(\mathbf{r}'') \rangle \times G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}'; z_1, z') G^*(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}''; z_2, z'') d^2\mathbf{r}' d^2\mathbf{r}'' \end{aligned} \quad (3-7)$$

设噪声源的相关函数是均匀的, 在空间上它只与声源间隔 $\mathbf{s} = \mathbf{r}' - \mathbf{r}''$ 有关, 即:

$$\langle S(\mathbf{r}') S^*(\mathbf{r}'') \rangle = q^2 N(\mathbf{s}) \quad (3-8)$$

这里 q 是海面噪声源强度。则式(3-7)转化为:

$$C(\mathbf{r}_1, z_1; \mathbf{r}_2, z_2) = q^2 \iint N(\mathbf{s}) \times G(\mathbf{r}_1, \mathbf{s}; z_1, z') G^*(\mathbf{r}_2, \mathbf{s}; z_2, z') d^2 \mathbf{s} \quad (3-9)$$

由于假设噪声源为无指向性的, 则其相关函数 $N(\mathbf{s})$ 是空间各向同性的, 即 $N(\mathbf{s}) = N(|\mathbf{s}|)$ 。另外, 由于假定这些噪声源分布在图 3.1 的源平面上, 在存在压力释放表面的情况下, 这些噪声源是作为高阶极子辐射器与海水耦合的。如果噪声源是不相关的, 它们的相关函数就有 δ 函数的形式。Liggett 和 Jacobson 已经证明, 海面噪声源产生的相对垂直方向的远场辐射图案为 $\cos^p \theta$ (p 为多极子的阶数)。总之, 海面噪声源的相关函数可表示为:

$$N(s) = \begin{cases} \frac{2\delta(k(z')s)}{[k^2(z')s]} & \text{不相关噪声源} \\ 2^p p! \frac{J_p[k(z')s]}{[k(z')s]^p} & \cos^p \theta \text{ 辐射图案} \end{cases} \quad (3-10)$$

本文考虑各向同性的不相关噪声源, 则可得:

$$C(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, z_1, z_2) = \frac{4\pi q^2}{k^2(z')} \int G(\mathbf{r}_1, \mathbf{s}; z_1, z') G^*(\mathbf{r}_2, \mathbf{s}; z_2, z') d^2 \mathbf{s} \quad (3-11)$$

取 \mathbf{r}'' 在源平面上的点为坐标原点, 即得 $\mathbf{s} = \mathbf{r}'$, 用位移量之差 $R = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ 表示噪声场点, 得到互谱密度的格林函数表达式:

$$C(R, z_1, z_2) = \frac{4\pi q^2}{k^2(z')} \int G(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}'; z_1, z') G^*(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}'; z_2, z') d^2 \mathbf{r}' \quad (3-12)$$

为消除式(3-12)对声源深度 z' 的依赖, 海面附近单极子声源强度 q 表示为:

$$q^2(z') = \frac{Q^2}{4k^2 z'^2} \quad (3-13)$$

其中 Q 是海洋表面声源强度。

以下推导中, 将噪声源分为两部分, 一部分是位于 (\mathbf{r}_1, z_1) 和 (\mathbf{r}_2, z_2) 点上方的“头顶”噪声源, 另一部分为“头顶”之外的远场噪声源。远场和近场

的格林函数分别用简正波和射线表达式。则互谱密度表示为：

$$C(R, z_1, z_2) = C_f(R, z_1, z_2) + C_h(R, z_1, z_2) \quad (3-14)$$

其中， C_f 、 C_h 分别代表远场和近场噪声源的贡献。

远场简正波部分先求格林函数的波数积分形式，再将其用简正波展开，然后代入求得互谱密度 $C_f(R, z_1, z_2)$ ；近场射线解部分则先代入格林函数的球面波解，再将其转化为波数积分形式，后采用稳相法积分求得格林函数的射线表达式，再代入求得互谱密度 $C_h(R, z_1, z_2)$ 。

噪声场相关函数 C_r ，可以由下式求得：

$$C_r(R, z_1, z_2) = \int_{-\infty}^{\infty} C(R, z_1, z_2) \exp(-i\omega\tau) d\omega \quad (3-15)$$

当 $R=0$ 和 $z_1 = z_2$ 时，互谱密度退化为噪声功率谱，即 $C(0, z, z)$ ，再取分贝数即得噪声谱级。

3.2.2 噪声谱级的简正波表达式

格林函数积分表达式的直角坐标形式为：

$$G(r, r'; z, z') = \frac{1}{2\pi} \int d^2k g(k, z, z') \exp(ik \cdot (r - r')) \quad (3-16)$$

其中 $g(k, z, z')$ 满足方程：

$$\frac{d^2 g}{dz^2} + [k^2(z) - k^2]g = -2\delta(z - z') \quad (3-17)$$

将式(3-16)代入(3-12)，得噪声场互谱密度公式：

$$\begin{aligned} C_f(R, z_1, z_2) = & \frac{4\pi q^2}{k^2(z')} \int d^2r' \frac{1}{(2\pi)^2} \iint d^2k d^2k' g(k, z_1, z') g^*(k, z_2, z') \\ & \times \exp[ik \cdot (r_1 - r')] \exp[-ik' \cdot (r_2 - r')] \end{aligned} \quad (3-18)$$

并对 r' 和 k' 积分，这样式(3-12)给出的互谱密度就可以表示为：

$$C_f(R, z_1, z_2) = \frac{4\pi q^2}{k^2(z')} \int d^2k g(k, z_1, z') g^*(k, z_2, z') \exp(ikR) \quad (3-19)$$

又 g 和 g^* 只与 k 的幅度有关, 对 k 相应的方位角进行积分, 得到互谱密度为:

$$C_w(R, z_1, z_2) = \frac{8\pi q^2}{k^2(z')} \int_0^\infty g(k_r, z_1, z') g^*(k_r, z_2, z') J_0(k_r R) k_r dk_r \quad (3-20)$$

其中, k_r 为水平波数。

在透声海底情况下, 声场的模式展开式只有在代表连续谱的分支割线的贡献不重要时才是精确的。通常这要求声源与接收器的水平间隔达到几个海深^[33]。本文采用远场简正波近场射线的计算模式, 远场情况下, 在声源与接收器的水平间隔达到几个海深时, 可以用格林函数的简正波展开式计算波数积分。以下用特征函数展开式, 即简正波模式展开式来表示与深度有关的格林函数:

$$g(k_r, z_1, z') = 2 \sum_m \frac{\psi_m(z') \psi_m(z)}{k_r^2 - k_{rm}^2} \quad (3-21)$$

式中 $\psi_m(z)$ 为归一化幅度函数, k_{rm} 为已变换问题的第 m 号模式的传播波数。假定 k_{rm} 是复数, 其虚部为模式衰减系数, 即 $k_{rm} = \kappa_m + i\alpha_m$, 且 $\kappa_m, \alpha_m > 0$ 。将 g 和 g' 的模式展开式代入(3-20), 经推导得:

$$C_w(R, z_1, z_2) = \frac{8\pi^3 q^2}{k^2(z')} \sum_m \frac{|\psi_m(z')|^2 \psi_m(z_1) \psi_m^*(z_2) J_0(\kappa_m R)}{\alpha_m \kappa_m} \quad (3-22)$$

按 $R=0$ 和 $z_1 = z_2$ 进行计算时, 即得环境噪声谱, 即

$$C_w(0, z, z) = \frac{8\pi^3 q^2}{k^2(z')} \sum_m \frac{|\psi_m(z')|^2 |\psi_m(z)|^2}{\alpha_m \kappa_m} \quad (3-23)$$

波数与波函数皆由 KRAKEN^[24] 程序获得, 将上式取分贝数即得噪声谱级。

3.2.3 噪声谱级的射线表达式

张仁和院士在文献[35]中讨论了射线方法在掠射角稍大(一般取 $>15^\circ$)时的适用性, 本文计算中近场取为 500m 内, 射线方法可以应用。考虑到近处噪声源所产生的声场对海水声速剖面的变化很不敏感, 本章对不同声速剖面统一地采用均匀声速剖面下的格林函数表达式。设点源声场为 $\frac{\exp(ikR)}{R}$,

由于本文海面取自由界面, $V_s = -1$, 设海底反射系数为 V_b 。据文献[36], 图(3-1)示的声场格林函数的球面波表达式为:

$$G(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-V_b)^n \left[\frac{\exp(ikR_{n1})}{R_{n1}} - \frac{\exp(ikR_{n2})}{R_{n2}} + V_b \frac{\exp(ikR_{n3})}{R_{n3}} - V_b \frac{\exp(ikR_{n4})}{R_{n4}} \right] \quad (3-24)$$

其中,

$$\begin{aligned} z_{n1} &= 2nH + z - z', \\ z_{n2} &= 2nH + z + z', \\ z_{n3} &= 2(n+1)H - z - z', \\ z_{n4} &= 2(n+1)H - z + z', \\ R_{nj} &= \sqrt{r^2 + z_{nj}^2} \end{aligned} \quad (3-25)$$

r 为接收器离声源距离, z 为深度。

球面波分解为柱面波的公式为:

$$\frac{\exp(ikR)}{R} = \frac{ik}{2} \int_{-1}^1 \exp(ikz \cos \theta) H_0^{(1)}(kr \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (3-26)$$

引入积分变量 $k_r = k \sin \theta$ 代替 θ , 对 k_r 的积分应从 $-\infty$ 到 $+\infty$, 则上式转化为:

$$\frac{\exp(ikR)}{R} = \frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(ik_z z) H_0^{(1)}(k_r r) \frac{k_r}{k_z} dk_r \quad (3-27)$$

其中, $k_z = k \cos \theta$ 。当 $z > z'$ 时, 将式(3-27)代入式(3-24), 经简化, 得格林函数射线方法下的波数积分表达式:

$$\begin{aligned} G(r, z) &= -2i \sum_{n=0}^{\infty} \int [(-V_{bn} e^{2ik_z H})^n [e^{-ik_z z'} - e^{ik_z z'}] \\ &\quad \times [e^{ik_z z} + V_b e^{ik_z (2H-z)}] H_0^{(1)}(k_r r) \frac{k_r}{k_z} dk_r \end{aligned} \quad (3-28)$$

用同样的方法可以证明, 在 $z < z'$ 时, 场的值可由在(3-28)中交换 z 和 z' 而得到。

采用稳相法积分, 以下略去推导过程, 直接给出格林函数的射线表达式:

$$G(r, z) = -2i \sum_{n=0}^{\infty} [(-V_{bn})^n \frac{1}{R_{n1}} \sin(k_{zn}^0 z') e^{ik_{zn} R_{n1}} + (-1)^n V_{bn} \frac{1}{R_{n2}} \sin(k_{zn}^0 z) e^{ik_{zn} R_{n2}}] \quad (3-29)$$

其中,

$$\begin{aligned} z_{n1} &= 2nH + z, & z_{n2} &= 2(n+1)H - z, \\ R_{n1} &= \sqrt{r^2 + z_{n1}^2}, & R_{n2} &= \sqrt{r^2 + z_{n2}^2} \end{aligned} \quad (3-30)$$

$$k_{zn1}^0 = \frac{kz_{n1}}{R_{n1}}, \quad k_{zn2}^0 = \frac{kz_{n2}}{R_{n2}}, \quad (3-31)$$

其中, V_{bn1} 、 V_{bn2} 分别为第 $n1$ 对和 $n2$ 对偶极子射线抵达海底时的反射系数。

将式(3-30)代入(3-12), 并忽略干涉项, 化简后得:

$$\begin{aligned} C_h(R, z_1, z_2) &= \frac{32\pi^2 q^2}{k^2(z')} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^a [V_{bn1}^{2n} \frac{\sin^2(k_{zn1}^0 z')}{R_{n1}^2} J_0(kR \frac{r}{R_{n1}}) e^{-ikz_{n1}(z_1-z_2)/R_{n1}} \\ &\quad + V_{bn2}^{2n+2} \frac{\sin^2(k_{zn2}^0 z')}{R_{n2}^2} J_0(kR \frac{r}{R_{n2}}) e^{-ikz_{n2}(z_1-z_2)/R_{n2}}] r dr \end{aligned} \quad (3-32)$$

由于所求为互谱密度, 故将上式取实部即可。则上式转化为

$$\begin{aligned} C_h(R, z_1, z_2) &= \frac{32\pi^2 q^2}{k^2(z')} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^a [|V_{bn1}|^{2n} \frac{\sin^2(k_{zn1}^0 z')}{R_{n1}^2} J_0(kR \frac{r}{R_{n1}}) \cos(k(z_1-z_2) \frac{z_{n1}}{R_{n1}} - 2n\theta_{bn1}) \\ &\quad + |V_{bn2}|^{2n+2} \frac{\sin^2(k_{zn2}^0 z')}{R_{n2}^2} J_0(kR \frac{r}{R_{n2}}) \cos(k(z_1-z_2) \frac{z_{n2}}{R_{n2}} - (2n+2)\theta_{bn2})] r dr \end{aligned} \quad (3-33)$$

最后得近场功率谱公式为:

$$C_h(0, z, z) = \frac{32\pi^2 q^2}{k^2(z')} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^a [|V_{bn1}|^{2n} \frac{\sin^2(k_{zn1}^0 z')}{R_{n1}^2} + |V_{bn2}|^{2n+2} \frac{\sin^2(k_{zn2}^0 z')}{R_{n2}^2}] r dr \quad (3-34)$$

将上式取分贝数即得近场噪声谱级, 对总场谱级, 只需将远近场谱级按能量相加即可。

3.3 数值计算

本节利用噪声功率谱公式(3-23)和(3-34), 计算分层海洋介质中的噪声功率谱, 进而得到其谱级, 来研究海底、声速剖面、频率以及源分布的变化对噪声谱级的影响, 并与其它模型的结果进行比较, 验证本模型的可行性。近场射线方法中的海底反射系数以及远场简正波方法中的波数及波函数均由 KRAKEN 程序获得, 远近源的分界距离取 500 米。计算相对噪声谱级时, 为消除源深度对结果的影响, 设海面噪声源强度为 1, 即式(3-3)中的 $Q=1$ 。

3.3.1 不同海底时谱级随深度的变化

本节讨论软硬两种海底时噪声谱级随深度的变化。噪声谱级随与所考虑变化量的关系与声源强度无关，故取相对噪声谱级，单位为以 $1\mu Pa/Hz^{1/2}$ 为参考的 dB。为便于比较，采用 T.C.Yang 参数^[37]：水深为 100m，频率 500Hz，海水衰减系数为 0.0505dB/km,具体参数见表 3.1，海底声速剖面见图 3.2。考虑三种海水声速剖面：等梯度、负梯度和正声速，如图 3.3 所示。

表 3.1 用于数值计算的底面参数

底类型	相对密度		压缩波声速 (m/s)		压缩波衰减 (m/s)		剪切波声 速(m/s)	剪切波 衰减 (dB/ λ)
	沉积 层	海底	沉积层	海底	沉积层	海底		
硬底	...	2.0	...	1800	...	0.8	400	2.0
软底	1.5	1.8	1450- 1500	1600	0.06	0.15

沉积层厚度：6m

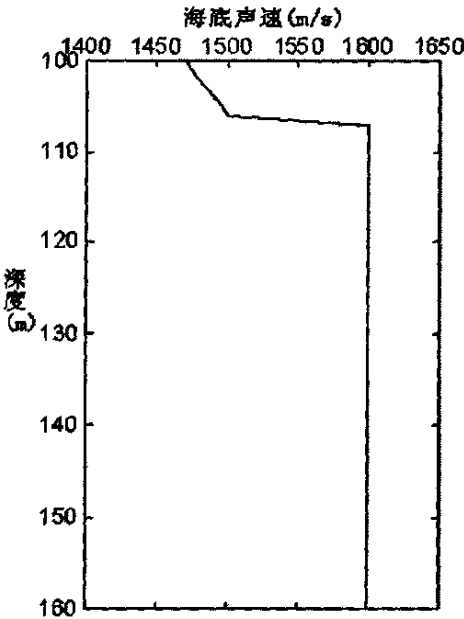


图 3.2 T.C. Yang 参数：
软底时海底的声速曲线

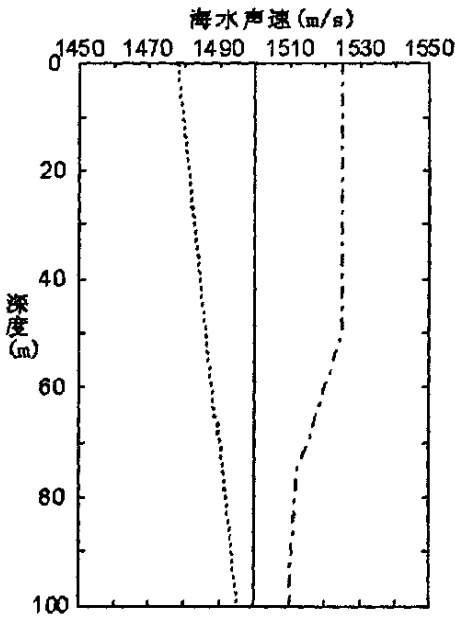


图 3.3 等声速(实线)、负声速
(点划线)和正声速(点线)声速曲线

图 3.4 所示为等声速时软硬两种海底的噪声谱级随深度的变化情况。由图可见，两图中的谱级都不随深度发生变化，这是由于等声速情况下，声线不会发生弯曲，噪声谱级基本不随深度而变化；但由于软底的吸收作用，软底时的噪声谱级普遍比硬底低约 3dB。图 3.5 为负梯度下的环境噪声谱级曲线。和等声速的曲线基本相似，硬底和软底的谱级差别仍约 3dB，噪声谱级随深度增加而稍有减小。这是由于负声速剖面下，声线向下弯曲，由海表而来的声线随深度增加逐渐扩散，声强减小，导致谱级减小。

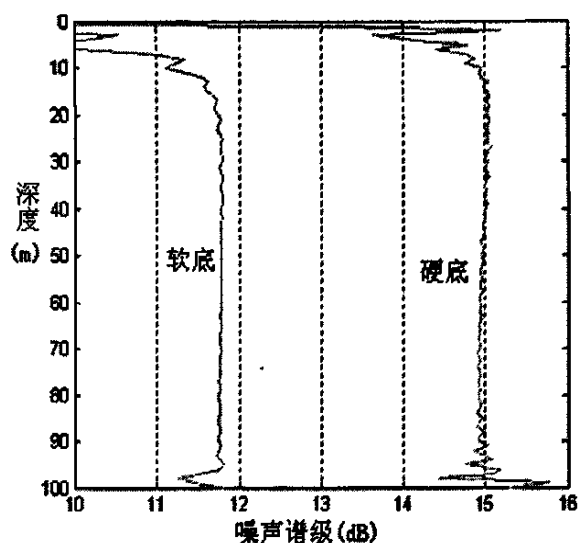


图 3.4 等声速时软硬两种海底的噪声谱级随深度的变化

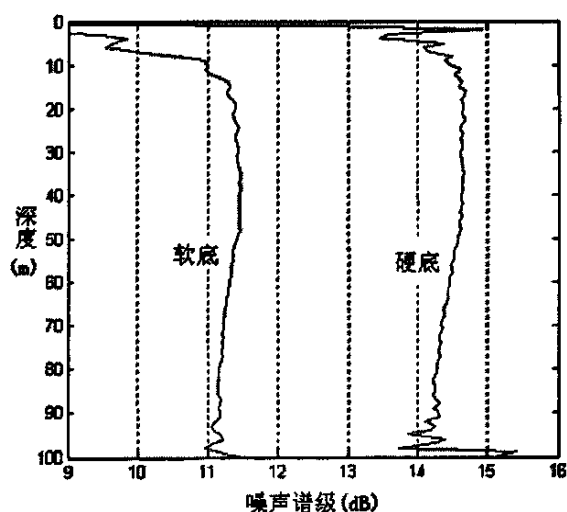


图 3.5 负声速时软硬两种海底的噪声强度随深度的变化

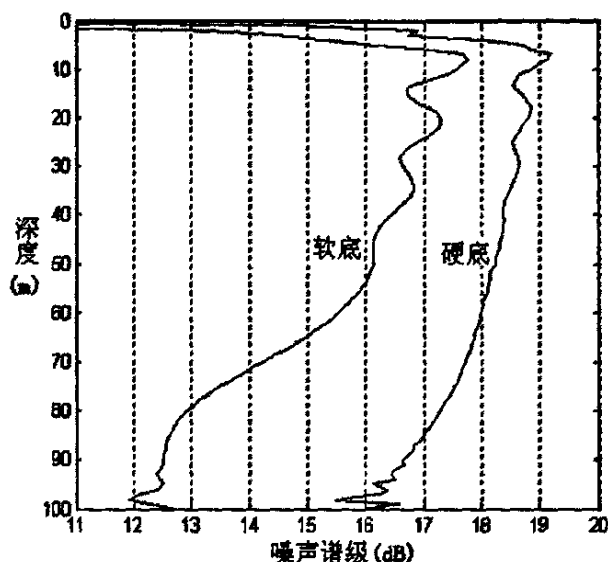


图 3.6 正声速时软硬两种海底的噪声强度随深度的变化

图 3.6 所示为软硬两种海底时正声速梯度下的噪声谱级随深度的变化曲线。由图可见，软底与硬底的噪声谱级差别在水层上部少于 2dB，而在水层的下部约 4dB，说明正声速剖面对软底的影响比硬底要大。图中呈现的噪声谱级的峰是由正梯度时占主要地位的低阶简正波造成的：此时，声线向上弯曲，形成海面波导，低阶简正波集中在水层的上部，与海底的作用机会很少，从而形成了图中的峰。另外，比较以上三图可见，负声速时各深度的谱级比等声速稍小，两者明显比正声速时的谱级低，是由于声线与海底的作用不同所致。

3.3.2 不同频率时谱级随深度的变化

本节讨论不同频率时谱级的频率特性，仍采用上节中的参数。由源级公式可以看出，频率对风成以及船舶噪声级都有影响，故在本节计算时取绝对噪声级。这里选取风速为 10 节的风成噪声进行计算，其它参数与上节相同。图 3.7、3.8 和 3.9 分别是在等声速、负声速和正声速梯度下，频率为 200Hz、400Hz 和 800Hz 时软底情况下的噪声谱级随深度的变化曲线。

可以看出，等声速和负声速梯度情形的曲线形状是很相似的，只是负声速梯度时噪声级随深度的增加稍有下降，正声速的曲线与上两者不同，是由

于声线与海底的作用不同所致；随着频率的增加，谱级减小，原因解释如下：源级公式 $SLW = 55 - 61\lg[(f/400)^2 + 1] + (18 + v/4)\lg(v/10)$ 中声源级随频率增加而减小，另外计算中对源级的定义中，引入了频率的影响，使谱级随频率减小。实际也存在使谱级随频率增加的因素，即频率越高，传播波导所能通过的简正波数目越多，声线在海底行进地越近。但总起来还是出现图示随频率增加而减小的结果，这与以往观测以及理论计算的结果都是一致的。

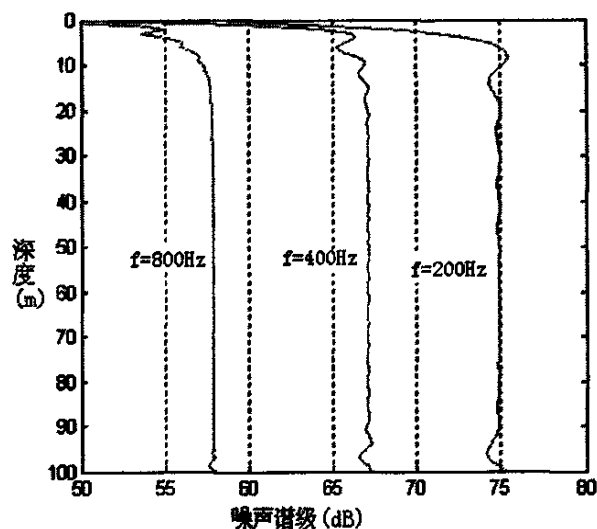


图 3.7 等声速梯度不同频率时的噪声强度随深度的变化

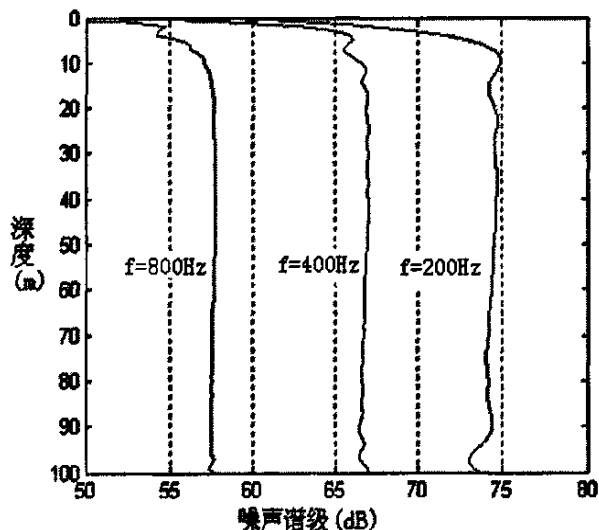


图 3.8 负声速梯度不同频率时的噪声强度随深度的变化

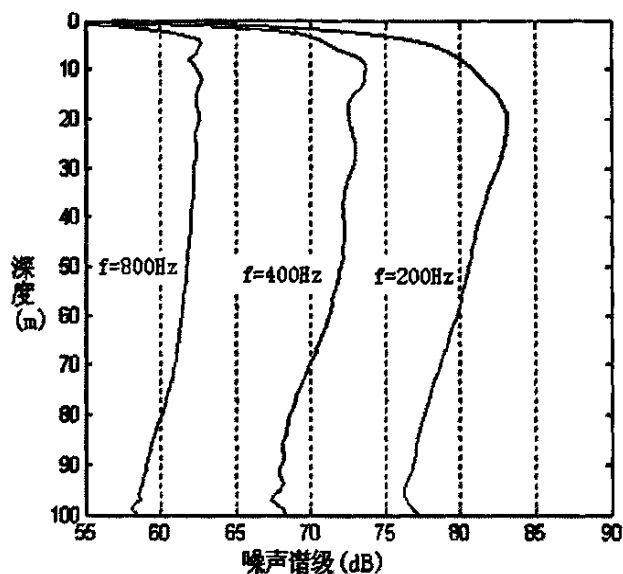


图 3.9 正声速梯度不同频率时的噪声强度随深度的变化

3.3.3 任意声速梯度时谱级随深度的变化

本小节采用 RANDI 模型中的 Baltic 环境参数^[39]，图 3.10 和 3.11 所示。

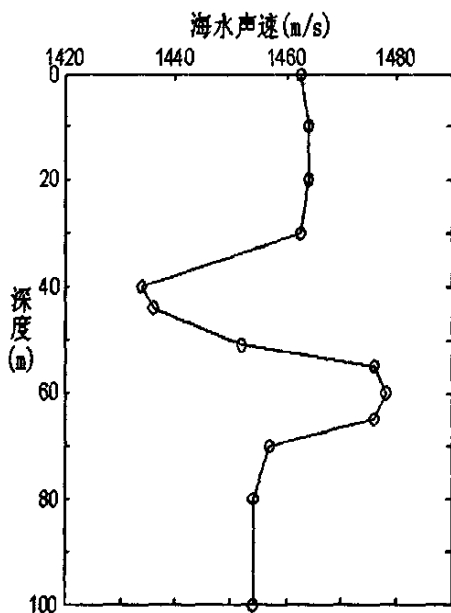


图 3.10 Baltic 海水声速

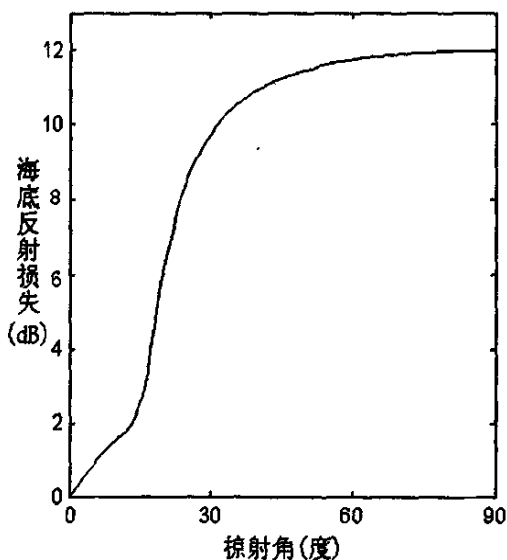


图 3.11 Baltic 海底反射损失

图 3.12 是本模型针对该剖面预报的环境噪声谱级随深度的变化曲线，图

3.13 是 RANDI 模型的预报结果。两者都为相对噪声级，两条图线无论在变化趋势和量级的变化上都是一致的。由图可见，噪声谱级大概有 6dB 的变化，在水体中间深度处变化最明显。观察声速剖面可知，约 60m 向上深度存在海面波导，超过 60m 时，声线向下弯曲，在海底发生反射，声能衰减。

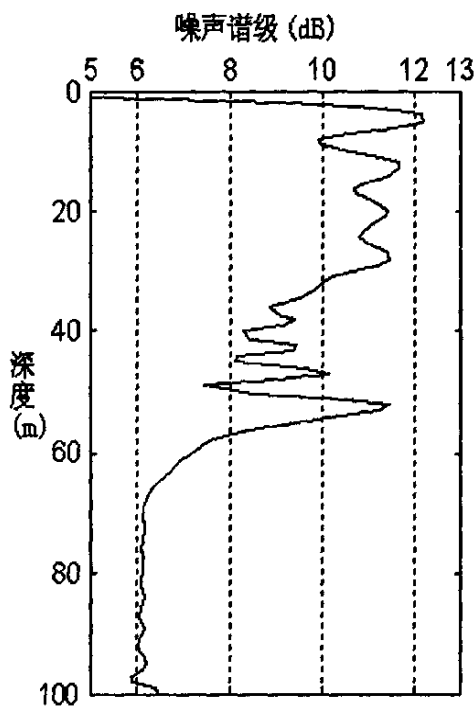


图 3.12 本模型对 Baltic 声速的预报结果

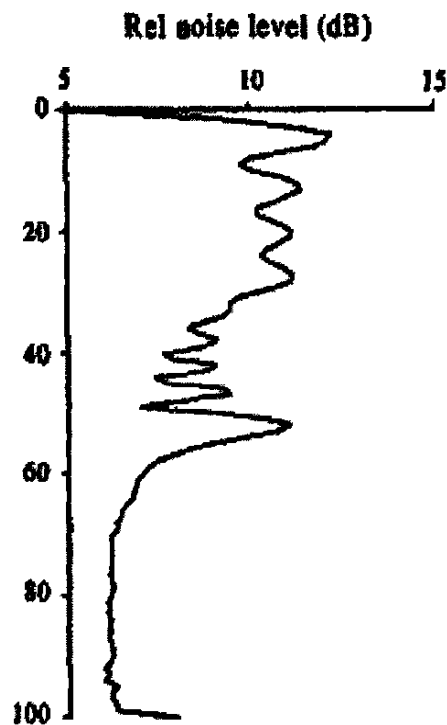


图 3.13 RANDI 模型对 Baltic 声速的预报结果

3.3.4 谱级随噪声源面积的变化

以上讨论中，将声源设为在距离和方位上的均匀分布，这种假设对风雨噪声成立，对船舶噪声不够确切。计算远方航船产生的低频噪声需要 3 个输入量：(1)每种类型船的辐射噪声源级；(2)随相对接收器的方位和距离变化的航船密度；(3)随临近海面声源(船)与深处接收器之间的距离而变化的传播损失。把以接收器为圆心、随距离依次变化的圆环所做的贡献叠加起来，就可以得到随接收器方位而变化的航运噪声级^[3]。

对本文所涉及的噪声谱级及垂直指向性而言，方位分布对其没有影响，

故在计算中将船舶噪声源看作分布在距离 r_1 、 r_2 之间的圆环内，设其分布与方位无关，采用 3.3.3 节中的参数。图 3.14(a)图所示为本文计算的接收器位于 20m、40m 和 80m 深时增大圆半径时对谱级的影响，(b)图为文献[39]的结果。

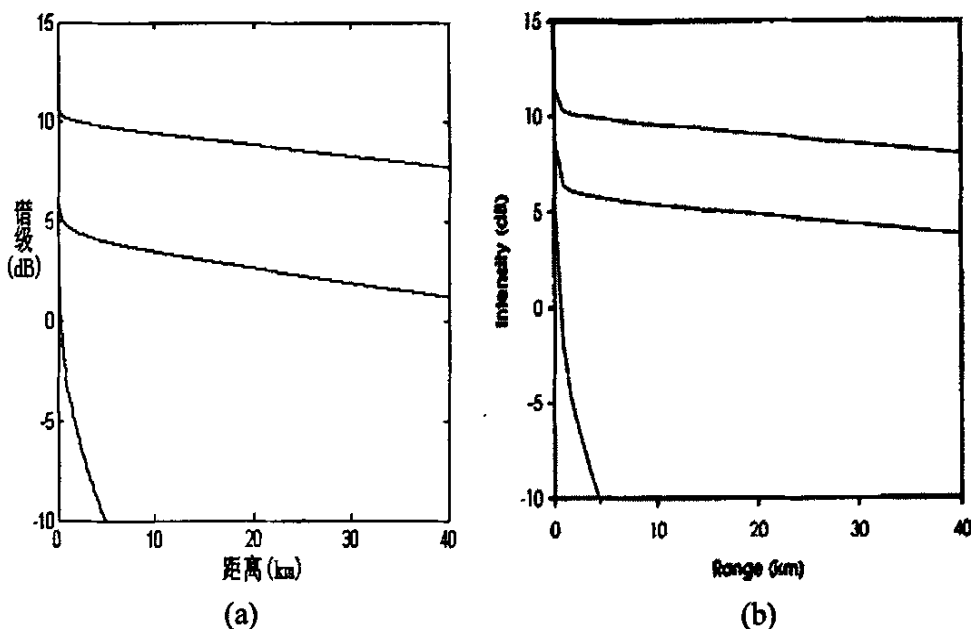


图 3.14 去除距离内的声源对噪声谱级的影响

上、中、下三条曲线分别代表接收器深度 20m、40m、80m

(a) 本文计算结果, (b) Harrison 的结果,

由图可见，本模型结果与文献[39]基本吻合。80m 深处的噪声谱级随距离衰减最快，20m 和 40m 深度处的噪声谱级衰减较慢，且呈指数衰减。参照图 3.10 海水声速剖面曲线，以上两个深度位于海面波导内，海底反射损失影响不大，只存在由海水吸收引起的衰减。

3.4 实测数据分析

3.4.1 分析步骤

进行数据分析时，首先需对记录的信号进行数据浏览、有效性分析和截取，获得用于数据分析的样本；然后采用相关、FFT 分析和功率谱估计等技术进行处理，获得相关函数、谱图等的处理结果。数据处理步骤一般为：

(1) 对连续信号 $x(t)$ 进行采样量化, 得到无限离散序列 $x(n)$ 。

(2) 对 $x(n)$ 截取一定时间内的有限离散序列信号 $x_N(n)$: $x_N(0)$, $x_N(1)$, $x_N(2)$, ..., $x_N(N-1)$, 共计 N 个值进行计算。

(3) 对 $x(n)$ 进行基于付立叶变换的窄带谱分析, 其计算过程如下:

$$X(k+1, j) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n+1, j) W(n) W_N^{kn}, \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3-36)$$

式中 $X(k+1, j)$ 为第 j 号样本的瞬时谱, $W_N = e^{-j(2\pi/N)}$, $W(n)$ 为分析时选用的窗函数, N 为样本的信号长度。瞬时功率谱为瞬时谱的模平方为:

$$P(k+1, j) = |X(k+1, j)|^2 \quad (3-37)$$

(4) 对 M 个样本信号瞬时功率谱算术平均, 即为该信号的平均功率谱:

$$P_e(k+1) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M P(k+1, j) \quad (3-38)$$

M 为平均的次数, 一般选取 30~60 次。

3.4.2 分析结果

本节对某湖所测得的环境噪声数据进行分析。图 3.15 画出了 50~2000Hz 频带内由测量数据计算的噪声谱级频率特性。图 3.16 为利用本模型计算的噪声谱级频率特性。

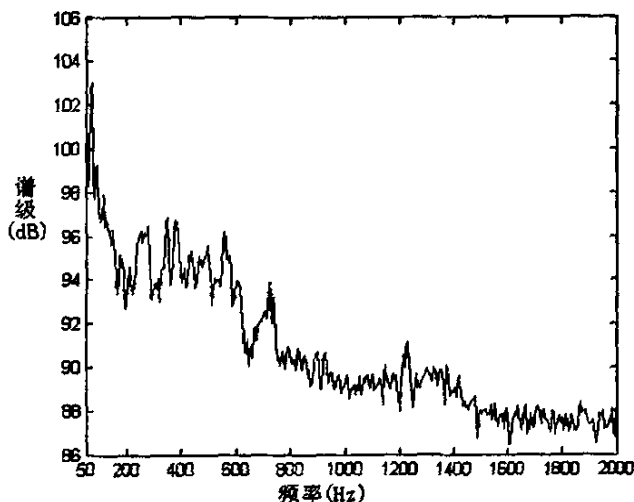


图 3.15 实测噪声谱级频率特性

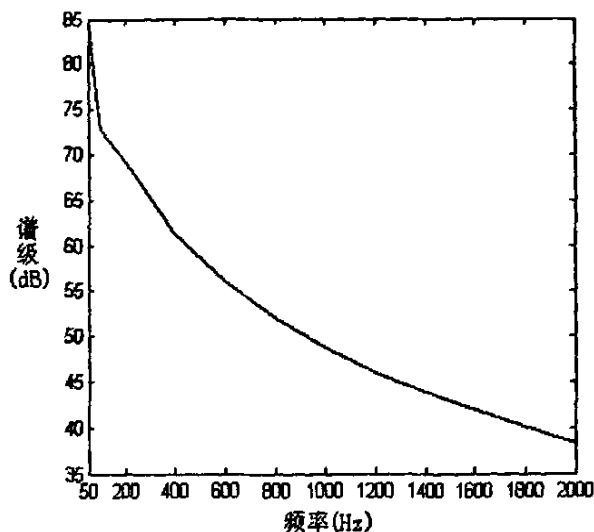


图 3.16 本模型计算的噪声谱级频率特性

由于环境噪声源复杂多变，其特性也是随时空而变的，无法确切的描述其源参数和传播条件，故而本文理论计算中，只取了风成噪声，风速取为 5knots。由以上两图可见，实测噪声谱级曲线变化趋势基本与理论计算曲线一致，都随频率的增加而减小，但数值偏大。由于所测为内陆湖试数据，噪声可能还包括工业、船舶等人为噪声，使噪声数据偏大。

3.5 本章小结

本章从海面噪声满足的波动方程出发，导出了远场简正波近场射线的噪声谱级表达式；数值计算时对射线模型进行了简化，忽略了声速剖面在垂直方向上不均匀性的影响，在保证一定精度的条件下，提高了计算速度。然后选取不同参数计算了噪声谱级的变化情况，和其它模型的结果基本吻合。运行相同环境参数，以往模型采用波数积分法需要几小时，而本模型仅需要几分钟。最后对实测数据进行了处理，并将其所得的噪声谱级频率曲线与本模型计算的曲线进行比较。可以得出，噪声谱级随深度的变化情况与海水中声速随深度的变化有关；谱级的大小与海底吸收有关，软底时的噪声强度小于硬底时的；谱级随频率的增加而减小；各个深度上噪声谱级随声源面积的变化不同，还要由接收器所处的声速剖面来决定；实测数据谱级频率特性与理论计算得到的趋势一致，由于环境条件的差异，数值上有差别。

第4章 海洋环境噪声指向性

在声呐作用距离预报或信号处理方案设计中,需对海洋环境噪声场的时空统计特性进行预报。海洋环境噪声场特性中,垂直指向性与垂直相干特性能够反映噪声场空间结构。事实上,两者可以由傅里叶变换联系起来。通过对海洋环境噪声指向性的预报,可以合理设计水声基阵的布阵位置和方式,有利于采取有效的抑制环境噪声的措施。海洋环境噪声的方向性由噪声源的空间分布、噪声源的辐射指向性及声传播条件共同决定。本章将在上一章的基础上,讨论环境噪声的垂直指向性。

4.1 远场简正波表达式

环境噪声场的垂直指向性可用一垂直阵测量,阵元分别位于深度 z_j 处。

垂直指向性定义为^[36]:

$$B(\theta) = \left| \sum_j \int \varphi(z_j) \exp(-ikz_j \sin \theta) d^2 r' \right|^2 \quad (4-1)$$

其中, θ 为掠射角, $\varphi(z_j)$ 为式(3-5)中定义的声压。将式(3-5)代入上式,且

噪声源是不相关的,满足 $\langle S(r') S^*(r'') \rangle = \frac{4\pi}{k^2(z')} \delta(r' - r'')$, 则可得:

$$B(\theta) = \frac{4\pi q^2}{k^2(z')} \int_{r'} \left| \sum_j G(r'; z_j, z') \exp(-ikz_j \sin \theta) \right|^2 d^2 r' \quad (4-2)$$

采用柱坐标系,并取阵所在位置为原点,上式被写成

$$B(\theta) = \frac{8\pi^2 q^2}{k^2(z')} \int \left| \sum_j G(r'; z_j, z') \exp(-ikz_j \sin \theta) \right|^2 r' dr' \quad (4-3)$$

(3-5)式中格林函数的远场简正波表达式为:

$$G(r'; z, z') = \sum_m \sqrt{\frac{2\pi}{k_{rm} r'}} \psi_m(z_j) \psi_m(z_0) e^{-ik_{rm} r'} \quad (4-4)$$

将代入(4-4)代入(4-3)，最后推导得远场噪声指向性表达式为[22]：

$$B_f(\theta) = \sum_{m=1}^M n_m B_m(\theta) \quad (4-5)$$

其中，

$$n_m = \frac{8\pi^3 q^2}{k^2(z')} \times \frac{1}{\alpha_m \kappa_m} e^{-2\alpha_m \rho} \psi_m^2(z') \quad (4-6)$$

$$B_m(\theta) = \left| \sum_j e^{-ikz_j \sin \theta} \psi_m(z_j) \right|^2 \quad (4-7)$$

上两式中的 $\psi_m()$ 为 m 阶简正波函数， κ_m, α_m 分别为 m 阶简正波的传播波数 k_m 的实部和虚部，可由 KRAKEN 程序获得。

4.2 近场射线表达式

在讨论射线解时，考虑到达垂直阵的射线中包含着来自海面 and 海底方向的两类射线，故将近场噪声源的贡献分为两部分求解，分别设为 $B_{h1}(\theta)$ 和 $B_{h2}(\theta)$ 。

由海面抵达接收器的噪声的格林函数为：

$$G(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-V_b)^n \left[\frac{\exp(ikR_{n1})}{R_{n1}} - \frac{\exp(ikR_{n2})}{R_{n2}} \right] \quad (4-8)$$

代入(4-3)式，化简得指向性^[22]：

$$B_{h1}(\theta) = \frac{2q^2}{k^2(z')} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^r \left| \sum_j (-v_{bnj1})^n \sin k_{znj1} z' \frac{1}{R_{nj1}} e^{ikR_{nj1}} e^{-ik_z z_j} \right|^2 r dr \quad (4-9)$$

由海底抵达接收器的噪声的格林函数为：

$$G(r, z) = \sum_{n=0}^{\infty} (-V_b)^n \left[V_b \frac{\exp(ikR_{n3})}{R_{n3}} - V_b \frac{\exp(ikR_{n4})}{R_{n4}} \right] \quad (4-10)$$

指向性为：

$$B_{h2}(\theta) = \frac{2q^2}{k^2(z')} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^r \left| \sum_j (-1)^n v_{bnj2}^{n+1} \sin k_{znj2} z' \frac{1}{R_{nj2}} e^{ikR_{nj2}} e^{-ik_z z_j} \right|^2 r dr \quad (4-11)$$

4.3 数值计算

下面利用式(4-5)、(4-9)和(4-11), 计算噪声垂直指向性随声速剖面、底面参数、频率及声源分布的变化情况, 并验证模型的可行性。计算中参数均采用第三章中的 T.C.Yang 的参数, 频率为 500Hz, 设接收阵阵元数 61, 阵元间距取半个波长, 即 1.5m, 噪声源级选取也与文献[36]相同。

4.3.1 指向性与海底反射损失的关系

图 4.1 所示为等声速剖面硬底时噪声场的垂直指向性, 图 4.2 所示为硬底的海底反射损失, 海底临界角约为 34 度。由图可见, 掠射角大于临界角时, 指向性幅值明显减小; 总声场与远场离散谱对应的指向性曲线在小于一定掠射角范围完全重合, 且在此区域内存在两个对称的“峰”。由于这一掠射角范围内, 阵的输出主要是来自远场离散谱的贡献, “峰”域是来自远处简正波号数较为集中的区域。在接近零度的小掠射角处, 垂直指向性曲线存在“噪声凹陷”, 这是因为掠射角小, 对应的简正波号数少, 且传播距离较远, 对指向性的贡献相对要低。

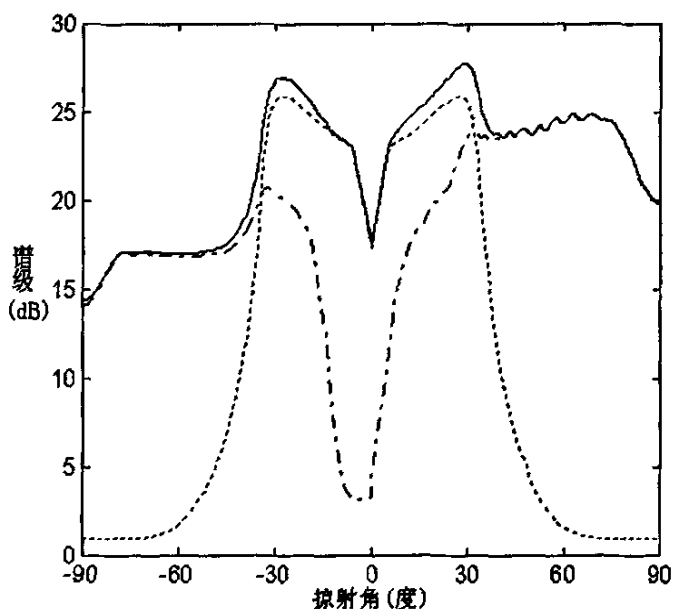


图 4.1 等声速剖面硬底时的噪声垂直指向性, 图中实线、点线、点划线分别对应于总声场、远场、近场噪声源对垂直指向性的贡献

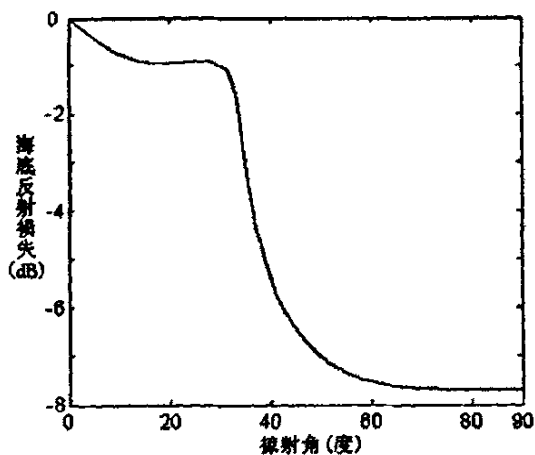


图 4.2 硬底时的海底反射损失

图 4.3 所示为等声速剖面软底时噪声场的垂直指向性, 图 4.4 为软底的海底反射损失。软底的临界角虽然无法准确给出, 但其对应的指向性曲线也在大于一定的掠射角后呈现相同的效果, 将此角度视为“等效”临界角。由图可见, 在大于临界角的范围内, 连续谱与总声场对应的指向性曲线重合, 在此角度范围内垂直指向性主要是来自连续谱的贡献。由于海底的吸收, 来自海面方向的连续谱的贡献明显要高于海底方向的连续谱的贡献。

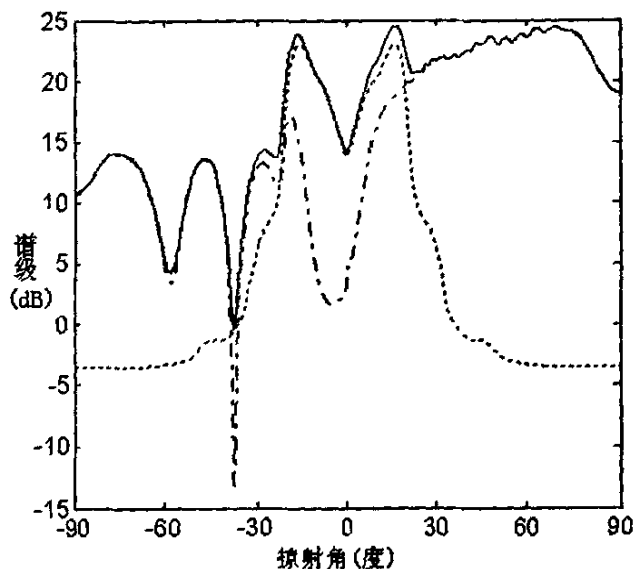


图 4.3 等声速剖面软底时的噪声垂直指向性。图中实线、点线、点划线分别对应于总声场、远场、近场噪声源对垂直指向性的贡献

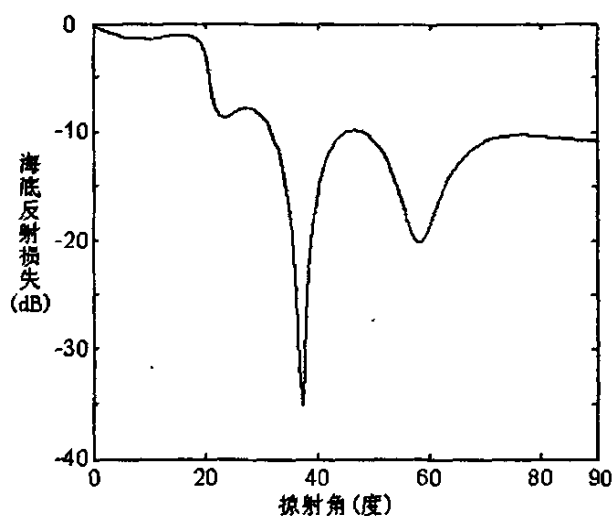


图 4.4 软底时的海底反射损失

4.3.2 不同声速剖面下指向性随海底的变化

图 4.5 给出了等声速剖面下软底和硬底情况下的环境噪声垂直指向性。当掠射角小于 34 度(硬底的临界角)时,海底损失大,软底的简正波的强度低于硬底的,导致其噪声强度也低于硬底的噪声强度;当掠射角大于 40 度时,由于负的高角度不存在直达声和海面反射声,主要是底面反射声线的贡献,软底的底面损失大于硬底,故导致软底的噪声强度也低于硬底的。负梯度情况下,声线和底面的作用更强,导致软底和硬底的强度相差更大一些,如图 4.6。正梯度情况下,海底的影响减少,软、硬底时的噪声强度差也减少,且由于海面波导的形成,出现了小角度时的峰值,如图 4.7 所示。

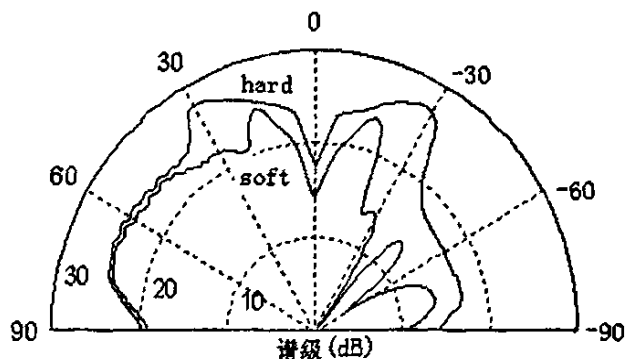


图 4.5 等声速剖面时软底和硬底时的噪声垂直指向性

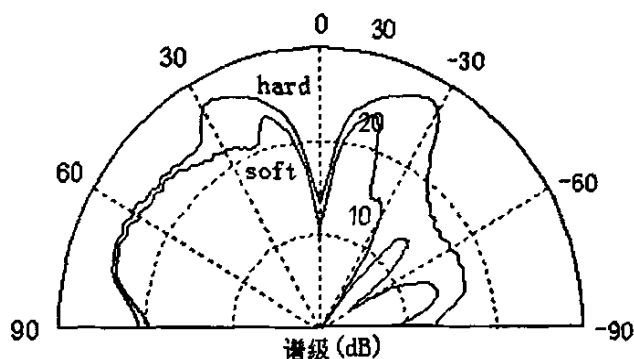


图 4.6 负声速梯度时软底和硬底时的噪声垂直指向性

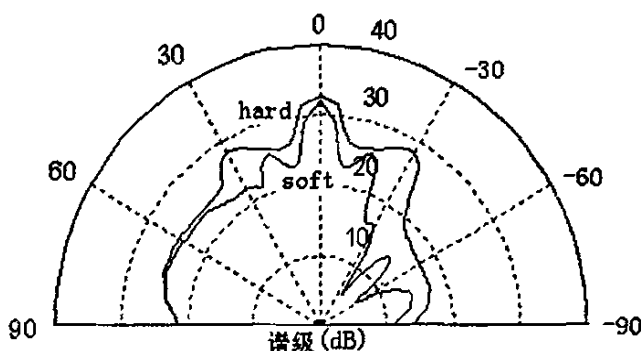


图 4.7 正声速梯度时软底和硬底时的噪声垂直指向性

以下将本文的结果与 T.C.Yang 的结果进行比较。图 4.8 是软底情况下等声速和负声速梯度时的环境噪声垂直指向性的数值预报结果。图 4.9 是 T.C.Yang 模型的计算结果。可以看出两种模型的结果在趋势上基本吻合，在数值上的差异可能是由于所取接收阵的分布或阵元间距不同所致。

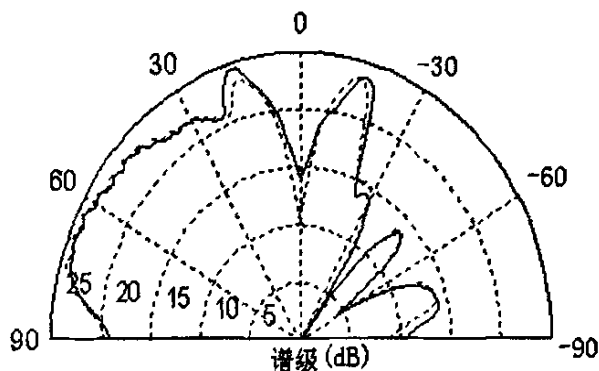


图 4.8 软底时等声速和负声速的噪声垂直指向性

实线—等声速，点线—负声速

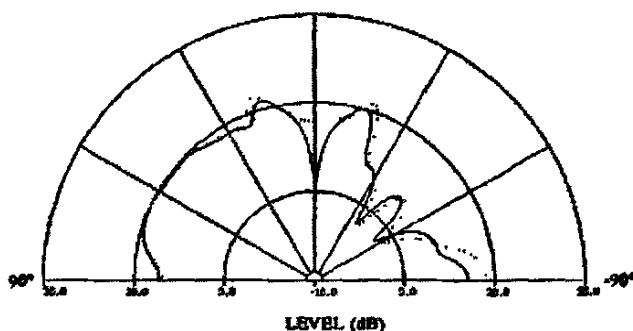


图 4.9 T.C.Yang 的计算结果

4.3.3 指向性随频率的变化

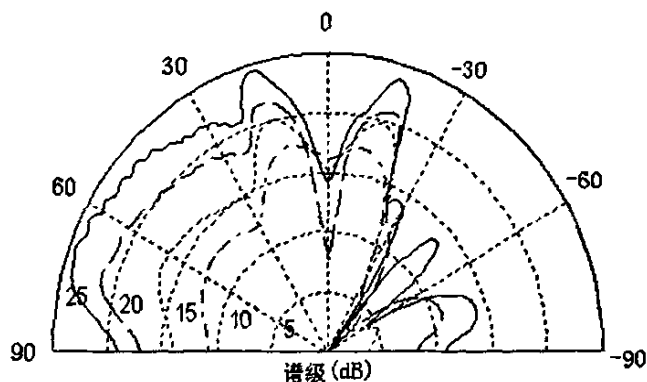


图 4.10 等声速剖面，软底时的噪声垂直指向性随频率的变化

实线—500Hz，虚线—250Hz，点线—100Hz，点划线—50Hz

图 4.10 所示为等声速剖面软底时，噪声垂直指向性在频率范围 50~500Hz 内的变化，这里设噪声源级为 1，与频率无关。由图可见，噪声指向性随频率减小而减小。对远场声源而言，在掠射角小于 34 度时，频率越低，传播波导所能通过的简正波数目越少；对近场声源而言，频率越低，声线在海底行进地越远，海底吸收越大，故而导致图示情况的发生。

4.3.4 指向性随声源面积的变化

与 3.3.4 节相似，这里单独考虑船舶噪声源，设其分布在环带内。图 4.11 为负声速梯度时均匀分布噪声源与去除 2000m 内噪声源时的指向性比较，可见远处噪声源指向性较窄且对称，均匀分布声源指向性较宽且不对称。这是

由于负声速梯度时，远处声源的能量主要水层上部传播，不受海底的影响，而近处声源与海底的作用较强。

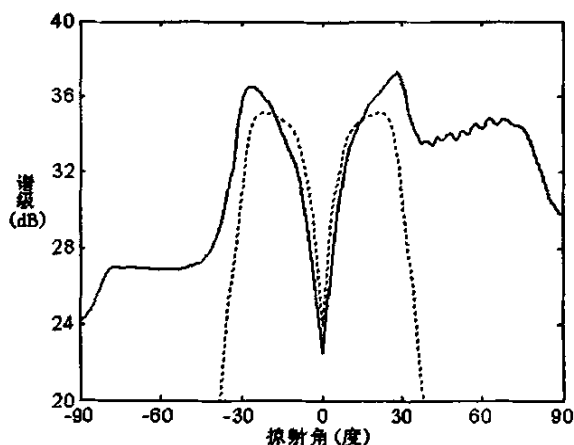


图 4.11 负声速梯度时均匀分布噪声源与去除 2000m 内噪声源时的指向性比较：实线—均匀分布，点线—移除 2000m 内噪声源

4.4 本章小结

本文在前一章的基础上，建立了分层介质的噪声垂直指向性模型，讨论了环境噪声垂直指向性随海底参数、声速剖面、频率以及噪声源分布面积的变化。由讨论可知，噪声场的垂直指向性能够充分反映噪声场中波导的基本传播特性。各环境参数如海水声速剖面、海底类型、海面源面积等对声传播的影响，以及对噪声场有贡献的连续谱域与离散谱域，都可以在噪声场的指向性中得到直观的体现；指向性随频率增加而减小。另外通过比较可以看出，本文预报结果和文献[38]基本吻合。

结 论

本论文依据林建恒的海洋环境噪声简正波射线混合模型理论, 建立了一个适用于浅海分层介质的噪声理论模型, 讨论了海面声源(包括风、雨以及船舶)的噪声谱级和垂直指向性随海水声速、海底性质、频率以及声源分布的变化。首先, 从波动方程出发, 得到了互谱密度的格林函数统一表达式; 然后进一步推导出适用于远场的简正波表达式和适用于近场的射线表达式, 在此基础上, 得到海洋环境噪声的谱级和垂直指向性的远近场表达式, 在近场计算时, 忽略了声速剖面在垂直方向的不均匀性, 用等声速的情况进行了简化; 然后进行数值计算, 讨论了海水声速、海底以及频率对噪声谱级的影响, 并将船舶噪声源作为特殊情况, 讨论了谱级及垂直指向性随声源面积分布的变化, 最后根据实测数据计算了噪声谱级。计算结果和 T.C.Yang 的工作以及 RANDI 模型的结果进行了比较, 基本相符, 但须时较少。通过这几部分的工作, 可以得出以下结论:

1. 噪声谱级与噪声源之间的关系由源级公式确定, 噪声谱级随风速、降雨量以及船舶航速、长度和数目的增加而增加。
2. 噪声场的谱级随深度的变化情况与海水中声速随深度的变化有关; 谱级的大小与海底吸收有关, 软底时的噪声谱级小于硬底时的; 噪声谱级随频率的增加而减小; 各个深度上噪声谱级随声源面积的变化不同, 还要由声速剖面来决定。
3. 噪声场的垂直指向性能够充分反映噪声场中波导的基本传播特性。各环境参数如海水声速剖面、海底类型、频率和海面源面积等对声传播的影响, 以及对噪声场有贡献的连续谱域与离散谱域, 都可以在噪声场的指向性中得到直观的体现。

本文在讨论噪声场的垂直指向性时, 作了海洋环境水平分层的假设, 而与距离有关的海洋环境条件能够极大影响噪声场的空间结构。此外, 本文将船舶噪声源环境噪声源看作环形分布、在环内是均匀分布的单极子源, 这是不确切的。因此, 建立更为符合实际的三维海洋环境噪声模型和进一步探讨各类噪声源的特性及源分布对噪声场的影响, 是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] 王宝升,郭田霖.海洋噪声.百科知识.1994(9):54-57 页
- [2] 布列霍夫斯基,雷桑诺夫.海洋声学基础.北京:海洋出版社,1985:38 页
- [3] Paul C Etter.蔡志明译.水声建模与仿真.电子工业出版社,2005:225-251 页
- [4] Cron B F, Sherman C H.Spatial correlation function for various noise models.J.Acoust.Soc.Am.1962, 34(11):1732-1736P
- [5] Kuperman W A, Ingenito F. Spatial correlation of surface-generated noise in a shallow ocean channel. J. Acoust. Soc. Am. 1980,67:1988-1996P
- [6] Harrison C H. CANARY: A Simple Model of Ambient Noise and Coherence. Applied Acoustics.1997, 51(3):289-315P
- [7] Wagstaff R A. RANDI: research ambient noise directionality model. Nav. Undersea Ctr, Tech.Pub. 1973:349P
- [8] Liggett W S, Jacobson M J. Covariance of surface-generated noise in a deep ocean. J. Acoust. Soc. Am. 1965, 38(2):303-312P
- [9] Liggett W S, Jacobson M J. Noise covariance and Vertical Directivity in a deep ocean. J. Acoust. Soc. Am. 1966, 39(2):280-288P
- [10] Wilson J H. Low-frequency wind-generated noise produced by the impact of spray with the ocean's surface. J.Acoust.Soc.Am.1980, 68(3):952-956P
- [11] Kuperman W A, Ferla M C, A shallow water experiment to determine the source spectrum level of wind-generated noise. J. Acoust. Soc. Am. 1985, 77:2067-2073P
- [12] Urick R. Principles of Underwater Sound for Engineers. McGraw Hill, 1975:188-204P
- [13] Ross D. Mechanics of underwater noise. Pergamon Press, 1976:375P
- [14] Hamson R M. Sonar array performance prediction using the RANDI-2 ambient noise model and other approaches. BAeSEMA Report B 277/TR-1, 1994

- [15] Chapman D. Surface-generated noise in shallow water:A model. Proc. Inst. Acoust. 1987(9):1-17P
- [16] Buckingham M J. A theoretical model of ambient noise in a low-loss shallow water channel. J. Acoust. Soc. Am. 1980, 67:1186-1192P
- [17] Plaisant A. Spatial coherence of surface generated noise. Proceedings of UDT. 1992:515P
- [18] Carey W M, ed. Deep-ocean vertical noise directionality. IEEE J. Ocean Eng. 1990, OE-15:324-334P
- [19] Qin Wang, Renhe Zhang. Range and Depth-Averaged fields in Ocean Sound Channels. J. Acoust. Soc. Am. 1990, 87:633-638P
- [20] 张仁和.浅海声场的平滑平均理论、数值预报与海底参数反演.物理学进展.1996,16(3):489-496 页
- [21] Qin Wang, Renhe Zhang, Sound Spatial Correlation in Shallow Water. J. Acoust. Soc. Am. 1992, 92(2):932-938P
- [22] 林建恒.风关海洋环境噪声理论模型.中国科学院研究生院博士学位论文.2002
- [23] 刘伯胜,雷家煜.水声学原理.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 1993:213-224页
- [24] Morris G B. Depth dependence of ambient noise in the northeastern Pacific Ocean. J. Acoust. Soc. Am. 1978, 64(2):581-590P
- [25] 林建恒,蒋国健,高伟,李德军.海洋环境噪声垂直分布测试和分析.海洋学报.2005,27(3):32-38页
- [26] R J 尤立克,洪申译.水声原理.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1990
- [27] Axelrod E H, ed. Vertical directionality of ambient noise in deep ocean at a site near Bermuda. J. Acoust. Soc. Am. 1965,37:77-83P
- [28] G M Wenz. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. J. Acoust. Soc. Am. 1962,34:1936-1956P
- [29] Piggott C L. Ambient sea noise at low frequencies in shallow water of the scotian shelf. J. Acoust. Soc. Am. 1965,36:2152P
- [30] 阎福旺,凌青,汲长利,朱明洪.海洋噪声实验技术.北京:海洋出版社,

1997:47页

- [31] 刘庆文.海洋环境物理场特测试与分析技术研究.哈尔滨工程大学硕士学位论文.2005:16-18页
- [32] 杨士莪.水声传播原理.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1994:4 页
- [33] 李丙辉.浅海风成海洋环境噪声场空间结构及海底参数反演研究.中国海洋大学硕士学位论文.2004:27页
- [34] Porter M.The KRAKEN normal mode program.NRL/MR/5120-92-6920, Wash ington DC: Naval Research Laboratory, 1992
- [35] 张仁和,朱柏贤,吴国清,候温良.海面噪声的空间相关与垂直方向性理论.声学学报.1992,17(4):270-277页
- [36] 布列霍夫斯基赫.分层介质中的波.第二版.北京:科学出版社,1985年
- [37] Yang T C, Kwang Yoo. Modeling the environmental influence on the vertical directionality of ambient noise in shallow water. J. Acoust. Soc. Am. 1997, 101(5), Pt.1:2541-2554P
- [38] Hamson R M.The modeling of ambient noise due to shipping and wind sources in complex environments.Applied Acoustics.1997, 51(3):251 -287P
- [39] Harrison C H. Formulas for ambient noise levels and coherence. J. Acoust. Soc. Am. 1996, 99(4), Pt.1:2055-2066P

致 谢

本论文工作是在导师刘伯胜研究员的悉心指导下完成的，在此表示深深的谢意。刘老师渊博的学识、对问题的深入见解令我钦佩至极；他严谨的治学态度、孜孜不倦的敬业精神将使我终身受益；他毫无保留的奉献精神和循循善诱的良师益友风范给我留下了深刻的印象，在做人和做学问方面他都是我尊敬的师长。

在论文的工作中，得到了王晶老师和李思纯老师的大力帮助，在此表示衷心的感谢。

在两年半的生活与学习中，我的同学陈斌斌、杨青青、李姝、崔晓巍、王邵婷等给予了我许多帮助和支持，在此表示衷心的感谢。

最后，感谢我的父母及弟弟对我工作的支持。