

第2章 舰船结构水下声辐射研究

2.1 引言

舰船及水下航行器结构运行过程中将不可避免地发生结构振动,并产生水下辐射噪声,威胁舰船的生命力与安全性,因此控制舰船与水下航行器结构的水下辐射噪声水平将作为减振降噪设计首要目标^[45-47]。舰船结构水下辐射噪声成因复杂,影响因素众多,结构形式、尺寸参数,激励源设备的安装布置方式、运行状态的变化都将导致结构水下辐射噪声的时间、空间分布差异。因此,为探究舰船及水下航行器的声辐射特性规律,有必要开展理论与数值仿真研究。

舰船与水下航行器的水下声辐射机理较为复杂,一般以机械噪声、流噪声与螺旋桨噪声进行划分。其中,机械噪声是舰船与水下航行器中、低航速水下辐射噪声的主要成分,其低频线谱严重威胁舰船与水下航行器的安全性^[48-49],因此,本章遵循理论与工程应用相结合的研究方法,基于声固耦合理论与边界元法,结合无限域流场截断技术,建立舰船与水下航行器辐射噪声数值仿真模型,开展典型激励下结构的振动声辐射数值仿真,并总结舰船与水下航行器结构中、低频段辐射噪声特性规律。

2.2 水下辐射噪声理论基础

2.2.1 声固耦合分析方法

声固耦合有限元分析法是舰船结构声辐射分析的常用方法^[50-54],在进行结构声辐射计算时,其结构本身相对复杂,结构与流场介质耦合位置的边界元网格数量较多,存在计算强度大、求解效率低等弊端。声固耦合有限元分析法的计算强度相对较小,且预报精度能够满足需求。声固耦合有限元分析法其基本思想是:首先将舰船或水下航行器结构进行离散,利用节点位移连续条件建立力平衡方程,通过结构的刚度矩阵与质量矩阵,求解结构响应;将流场离散,基于理想流体波动方程,结合结构、流场的耦合关系、流场外表面的自由边界条件,求解流场域的声压响应。声固耦合有限元分析法假定流体为理想介质,须满足如下近似条件^[55]:

- a. 流体不存在粘滞性,声波传播过程没有能量耗散;
- b. 流体宏观静止,即流体初速度为零。流体是均匀的,静态压强、密度为常数;
- c. 声波传播时,流体运动过程都是绝热的;
- d. 声波为小振幅波。

将流体离散化得到有限数量声学单元，流场域内声学有限元方程如下：

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{K}_f \mathbf{P} + \rho_f \mathbf{R} \ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{0} \quad (2-1)$$

式中： \mathbf{M}_f 是等效质量矩阵， \mathbf{K}_f 是等效刚度矩阵， \mathbf{R} 是流体和结构的耦合矩阵。

无阻尼条件下，声场有限元方程如(2-1)式所示。如考虑流体与结构的交界面的阻尼吸声项，矩阵方程式如下：

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{P}} + \mathbf{C}_f \dot{\mathbf{P}} + \mathbf{K}_f \mathbf{P} + \rho_f \mathbf{R} \ddot{\mathbf{U}} = [\mathbf{0}] \quad (2-2)$$

式中： \mathbf{C}_f 是声阻尼矩阵。

类似地，真空环境中含阻尼项的结构振动有限元方程为：

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F}_s \quad (2-3)$$

式中： \mathbf{M}_s 是结构质量矩阵， \mathbf{K}_s 是结构刚度矩阵， \mathbf{C}_s 结构阻尼矩阵， \mathbf{F}_s 是结构的力向量载荷。

为描述流体与结构的相互作用，依据虚功原理得处流场与结构的耦合方程：

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}_s \mathbf{U} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_f \quad (2-4)$$

式中： $\mathbf{F}_f = \mathbf{R}^T \mathbf{P}$ 。

将式(2-2)与(2-4)联立，得到如下方程，可以得到结构表面节点处的位移和流场中的声压情况。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{M}_s & [\mathbf{0}] \\ \rho_f \mathbf{R} & \mathbf{M}_f \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{U}} \\ \ddot{\mathbf{P}} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{C}_s & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & \mathbf{C}_f \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{P}} \end{Bmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{K}_s & -\mathbf{R}^T \\ [\mathbf{0}] & \mathbf{K}_f \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{P} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}_s \\ [\mathbf{0}] \end{Bmatrix} \quad (2-5)$$

2.2.2 流场域耦合条件

依据有限元法基本理论，结构一个波长范围至少应包含 4-5 个网格节点，以保证仿真计算结果的准确性。为满足此前提条件，依据下式确定计算频率上限对应的最大有限元网格尺寸。

$$x \leq 0.4\pi (D / \rho h)^{1/4} \omega^{-1/2} \quad (2-6)$$

目前，声固耦合有限元分析技术是水下大型复杂结构振动声辐射问题求解的相对成熟的数值仿真方法，已有学者通过试验测试，进行了方法的有效性验证^[77]。若应用声固耦合有限元法进行水下航行器结构的振动与声辐射分析，通过进行流场的截断处理，降低仿真计算规模十分必要，截断流场域须满足以下条件：①需要保证流体与水下航行器结构的耦合效应；②截断流场位置的无反射边界条件。

有限元流场域的最小流场域半径 R_f ：

$$R_f \geq \max(D/2 + 0.2\lambda, 2D) \quad (2-7)$$

式中： D 为水下航行器结构的最大直径； λ 为分析频率的声波波长，针对宽频连续谱， λ 选取最小的计算频率对应的声波长。

式(2-7)中第一项是为保障有限域流场内声传播的准确性，式中第二项是为保障结构与流体声介质耦合耦合关系。通常而言，由于水下大型结构声辐射的分析频率包含结构的低阶振动频率，因此需要第二项进行结构、流场介质的边界条件限制。

2.3 舰船结构水下辐射噪声特性分析

2.3.1 舰船结构水下声辐射数值仿真模型

(一) 舰船结构水下辐射噪声数值仿真模型的构建

(1) 舰船设备截断简化。采用运动边界相似法，以振动加速度形式在基座施加机械设备振动激励载荷。以质量点进行压载、重物的模型简化。

(2) 舰船结构几何模型建立。舰船水下辐射噪声采用整体船体模型进行仿真计算；对于舰船壳体、甲板、舱壁以及大型加强结构等均采用壳单元进行简化，对于小型骨材、加强筋等采用梁单元离散。几何模型如下图所示，考虑舱壁、基座、各层甲板等局部结构。模型总长 $L=75\text{m}$ ，半宽 $D=5.5\text{m}$ 。模型壳体与局部结构材料均为船用钢，结构材料参数包括：密度 $\rho=7850\text{kg/m}^3$ ，弹性模量 $E=2.11\text{e}^{11}\text{N/m}^2$ ，泊松比 $\mu=0.3$ 。流体介质为海水，密度 $\rho_0=1025\text{kg/m}^3$ ，声速 $c_0=1500\text{m/s}$ 。

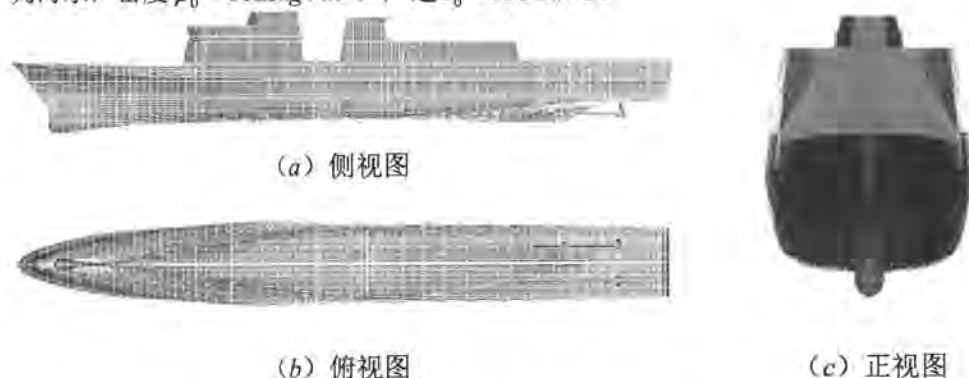


图 2.1 舰船几何模型

(3) 流场截断。在进行舰船结构声振特性分析之前，需构建舰船结构及与其耦合流场的几何模型，并定义结构的属性参数。舰船水下声辐射仿真计算采用船舶整体模型，为提高计算效率，通过建立有限流场域，并在外围施加无反射边界条件，流场域半径依据声固耦合理论确定。根据舰船结构特点与计算的频率要求，确定舰船结构与流场有限元的模型单元尺寸，并划分有限元网格。最后，关联结构与耦合流场，定义结构与流场间的耦合关系。

(4) 舰船声辐射数值仿真的声固耦合模型、边界元模型建立。舰船结构几何模型经网格离散,得到舰船辐射噪声有限元模型。结构的网格尺寸 $\lambda=0.05m$,流场 $L'=110m$,直径 $D'=24m$ 。结构网格单元达到158850个;流体单元数292860个;有限元分析模型单元总数为451710个,如图2.2所示。在此基础上,结合边界元理论,建立舰船水下辐射噪声预报模型。首先,基于声固耦合理论,获取结构表面响应(位移、声压等),导入水面以下的船体结构外表面网格作为边界元网格,建立边界元网格与结构表面的映射关系,作为声辐射计算输入。随后,设置声场边界条件、设置流体介质声传播速度、密度等参数,依据计算需求,设置边界元场点网格,完成边界元模型建模。



图2.2 舰船声固耦合模型示意图

(二) 载荷与边界条件以及声压考核点

(1) 确定舰船辐射噪声数值分析激励载荷。应用运动边界相似法,以振动加速度形式进行激励载荷加载,设备基座的激励载荷作用位置施加附加质量。螺旋桨脉动压力载荷主要考虑叶频脉动分量,量值随着简谐数的增加而单调快速下降,因此,在推进器对应位置施加低阶脉动压力载荷。仿真过程中取2倍叶片脉动压力为叶频脉动压力的一半,3倍叶频脉动压力为2倍叶频的一半。

(2) 确定流体介质边界条件。通过有限组合流场域模拟无限域流场,流场域的外表面施加无反射边界条件。

(3) 声压考核点设置。在水平面沿距模型中心1km的圆周范围内,间隔 18° 方向角设置声压考核点,如图2.3(a)所示。在法平面内,沿距模型中心1km的圆周范围内,间隔 18° 俯仰角设置声压考核点,如图2.3(b)所示。

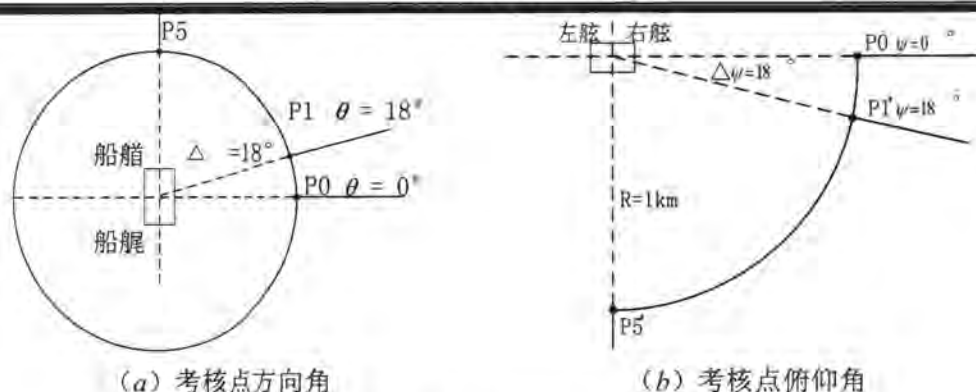


图 2.3 水下航行器结构水下声辐射考核点布置图

(三) 典型激励源特性

舰船激励载荷的获取方法应按照激励载荷测试方案、方法以及激励载荷的表征方式确定, 考虑以上因素, 给出设计阶段舰船水下辐射噪声的激励载荷获取一般流程如下:

(1) 进行舰船设备的台架振动测试, 获取设备的时域激励载荷; 经傅里叶快变换, 获取设备的线谱激励载荷以及台架振动响应;

(2) 开展台架测试激励载荷的实船转换, 获取舰船设备基座振动加速度水平激励力载荷线谱;

(3) 针对设备的激励载荷表征参数、舰船水下辐射噪声仿真预报方法, 确定舰船水下辐射噪声预报的激励载荷施加方法。

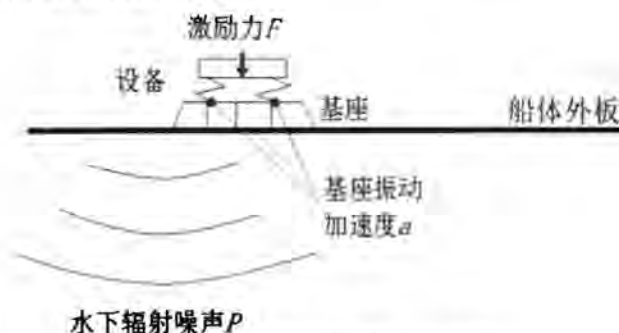


图 2.4 水下声辐射激励源示意图

舰船结构按照功能需求进行舱室划分, 大型机械设备通常集中布置于艏部的机舱、艉舱, 在中、低航速下, 机械设备是水下航行器水下辐射噪声的主要声源, 应重点考虑。在舰船结构水下声辐射仿真评估工作中, 往往需要基于系列振动测试, 获取准确、完整的设备激励载荷, 从而准确量化结构水下辐射噪声水平。本节旨在探究舰船水下辐射噪声的一般规律, 因此, 设备激励载荷基于舰船尺度参数、母型设备振动数据进行估算。

对于水面舰船，柴油机基座振动水平较高，是水下辐射噪声的主要激励源。选取某船柴油机作为母型设备，功率、转速等基本参数如表 2.1 所示，机脚振动加速度测试数据如图 2.5 (a)。

表 2.1 某船柴油机基本信息

品牌	瓦锡兰	型号	W9L32 E
数量	6 台	功率	4950kW
转速	720 r/min	重量	84000kg
尺寸	10.475×2.890×3.925 m		

基于中国船级社《船舶及产品噪声控制与检测指南》，估算舰船柴油机设备振动载荷。基于舰船主尺度，匹配柴油机参数：功率 3000kW，重量 42000kg，转速 720 r/min。

并按照下式估算船用低速柴油机机脚振动加速度频带级 L_a ：

$$L_a = 10 \lg \frac{n_e P_e^{0.55} (1 + P_e / m)}{1 + (f / m)^3 m / P_e} + 30 \lg \frac{n}{n_e} + 20 \lg f + 34 \quad (2-8)$$

其中， P_e 为柴油机额定功率，单位 kW。 n_e 为柴油机额定转速，单位 r/min。 n 为柴油机工作转速，单位 r/min。 m 为柴油机质量，单位 kg。 f 为倍频程中心频率，单位 Hz。

按照下式，确定舰船机脚振动加速度线谱级：

$$L'(f) = L(f) - (L_a - L_o) \quad (2-9)$$

其中， $L'(f)$ 为柴油机机脚振动加速度线谱级， $L(f)$ 为柴油机母型设备机脚振动加速度线谱级。 L'_o 为 8Hz-1kHz 的柴油机机脚振动加速度频带总级， L_o 为 8Hz-1kHz 的柴油机母型设备机脚振动加速度频带总级。柴油机机脚振动加速度线谱级换算结果如图 2.5 (b)。设备弹性安装将导致机脚与基座间存在 20-40dB 隔振量，经 30dB 隔振处理，柴油机设备基座振动加速度如图 2.5 (c) 所示。

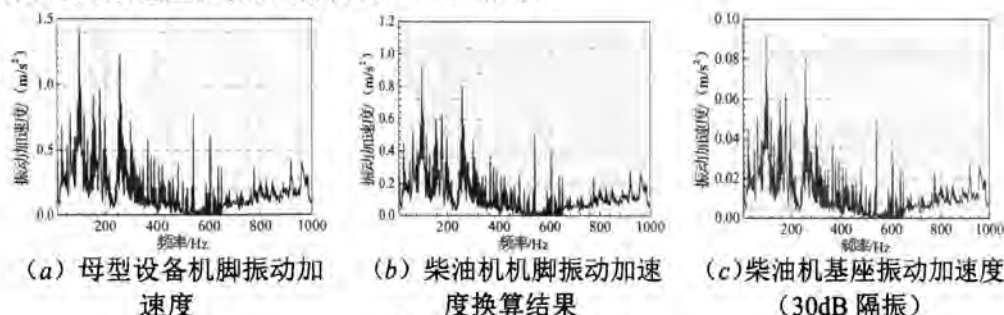


图 2.5 柴油机振动载荷

舰船推进器工作造成的脉动压力将引起船底板振动，对舰船水下噪声产生影响。基于中国船级社《船上振动指南》(2012)，估算推进器脉动压力载荷。螺旋桨脉动压力主要是叶频分量，无空泡螺旋桨脉动压力 P_0 (pa) 为：

$$P_0 = \frac{n_e^2 D^2}{70} \frac{1}{Z^{1.5}} \left(\frac{1}{d_s / R} \right)^{k_0} \tag{2-10}$$

其中， r 为螺旋桨转速，单位 r/min 。 D 为螺旋桨直径，单位 m 。 R 为螺旋桨半径，单位 m 。 Z 为螺旋桨叶数。 d_s 为 $r/R=0.9$ 处到船底计算表面的距离，单位 m 。

$$k_0 = 1.8 + 0.4(d_s / R) \tag{2-11}$$

由螺旋桨空泡引起的叶频脉动压力 P_c (pa) 为：

$$P_c = \frac{n_e^2 D^2}{160} \frac{V_s(W_{amax} - W_e)}{\sqrt{h_a + 10.4}} \left(\frac{1}{d_s / R} \right)^k \tag{2-12}$$

其中， V_s 为船速，单位 m/s 。 h_a 为螺旋桨浸深，单位 m 。 d_s 为 $r/R=0.9$ 处到船底计算表面的距离，单位 m 。 W_{amax} 与 W_e 分别为最大伴流与有效伴流，通过图谱获取。

$$k_c = 1.7 + 0.7(d_s / R) \tag{2-13}$$

总脉动压力 P ：

$$P = \sqrt{P_0^2 + P_c^2} \tag{2-14}$$

螺旋桨主要参数、主推进螺旋桨脉动压力载荷估算结果如下表所示。

表 2.2 螺旋桨参数

螺旋桨名称	螺旋桨叶数 N	螺旋桨转速 n_e	螺旋桨直径 D
主推螺旋桨	4	153.9rpm	3800mm

表 2.3 主推螺旋桨脉动压力

工况	无空泡螺旋桨 诱导的叶频脉 动压力幅值	空泡螺旋桨诱 导的叶频分量 脉动压力幅值	螺旋桨诱导的 叶频分量脉动 总压力幅值	作用于船体表 面的脉动压力 合力
	$P_0/(\text{Pa})$	$P_e/(\text{Pa})$	$P/(\text{Pa})$	$F/(\text{kN})$
满载出港	1568.57	888.19	1802.58	26.03
压载到港	1568.57	918.66	1817.79	26.25

舰船水下辐射噪声数值仿真计算中，螺旋桨脉动压力载荷直接施加于船底外板。当螺旋桨上方船底为平底时，在螺旋桨无空泡或空泡不严重的情况下，脉动压力的最大值位于螺旋桨轴线方向螺旋桨盘面之前 $0.1D$ (D 为螺旋桨直径) 处，分布范围为 $D \times D$ 。无空泡螺旋桨的脉动压力主要是叶频脉动分量，而叶频脉动压力总是随着简谐数的增加而单调快速下降。一般原则，2 倍叶片次分量是 1 次的一半，而 3 倍叶片次分量比例更小。仿真计算过程中取 2 倍叶片脉动压力为叶频脉动压力的一半，3 倍叶频脉动压力为

2 倍叶频的一半。

2.3.2 舰船结构水下声辐射计算与特性分析

基于以上水下航行器辐射噪声数值预报模型,采用频域分析方法,进行水下辐射噪声仿真计算。首先应用运动边界相似法,以振动加速度级形式进行激励载荷加载。模型以有限组合流场域模拟无限域流场,流场域的外表面施加无反射边界条件。将声源级作为水下辐射噪声的表征参量,并沿 1km 的圆周范围设置声压考核点,考核点布置如图 2.3 所示。计算频段: 20-600Hz, 计算步长 $\Delta f=2\text{Hz}$ 。

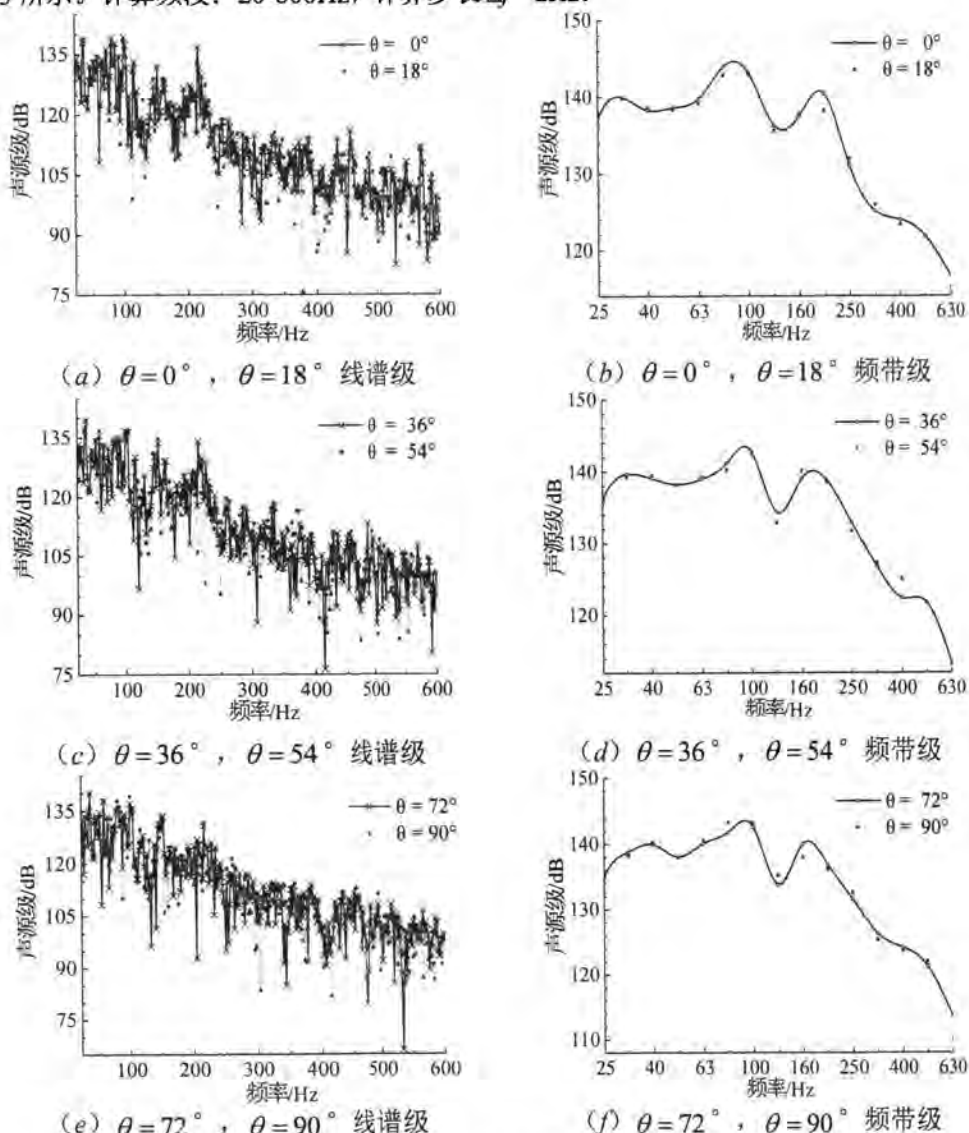
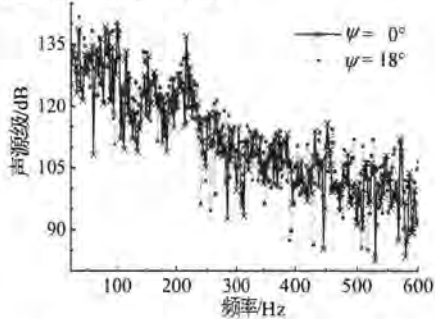


图 2.6 典型方向角的舰船结构水下声辐射数值仿真结果

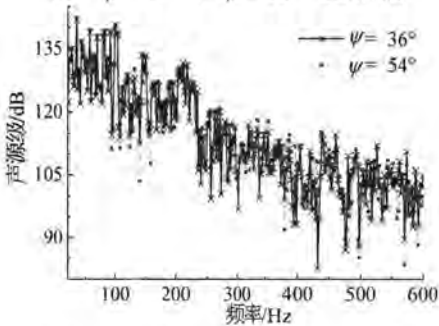
表 2.4 典型方向角的舰船结构水下辐射噪声声源级/dB

方向角/ $^{\circ}$	20-100Hz	100-315Hz	315-600Hz	20-600Hz
0	149.3	143.6	126.5	150.3
18	148.8	142.7	126.1	149.8
36	148.3	143.2	125.4	149.5
54	148.1	143.3	126.9	149.4
72	148.5	142.8	126.2	149.5
90	149.1	142.0	126.1	149.9

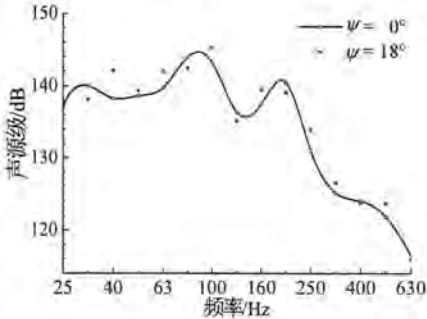
由以上分析可知，舰船结构水平面内各个考核点声压级存在一定差异。由舷侧到艏部的水下声辐射强度逐渐变小，舷侧考核点 P0 辐射噪声水平总体偏大。通过分析考核点 P0 ($\theta = 0^{\circ}$) 声压响应可知，20-600Hz 频段，考核点声源级波动较大，以下频段出现峰值线谱：100Hz (138.0dB)、86Hz (137.8dB)、216Hz (136.0dB)、224Hz (129.4dB) 等。通过分析声辐射频带总级数据可知，舰船结构辐射声源级呈现低频大、高频小的变化趋势。20-600Hz 声源级在 149-151dB 之间，20-100Hz 声源级在 148-159dB 之间，两者十分接近，辐射声能主要集中在以 20-100Hz 代表的中低频段，100Hz 以上频段对于声辐射总级影响有限。



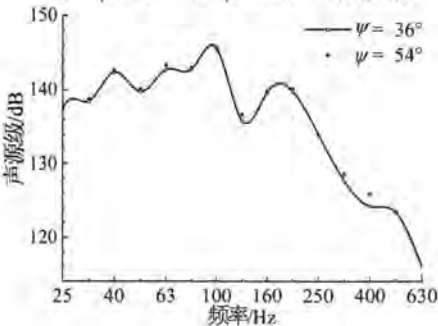
(a) $\psi = 0^{\circ}$, $\psi = 18^{\circ}$ 线谱级



(c) $\psi = 36^{\circ}$, $\psi = 54^{\circ}$ 线谱级



(b) $\psi = 0^{\circ}$, $\psi = 18^{\circ}$ 频带级



(d) $\psi = 36^{\circ}$, $\psi = 54^{\circ}$ 频带级

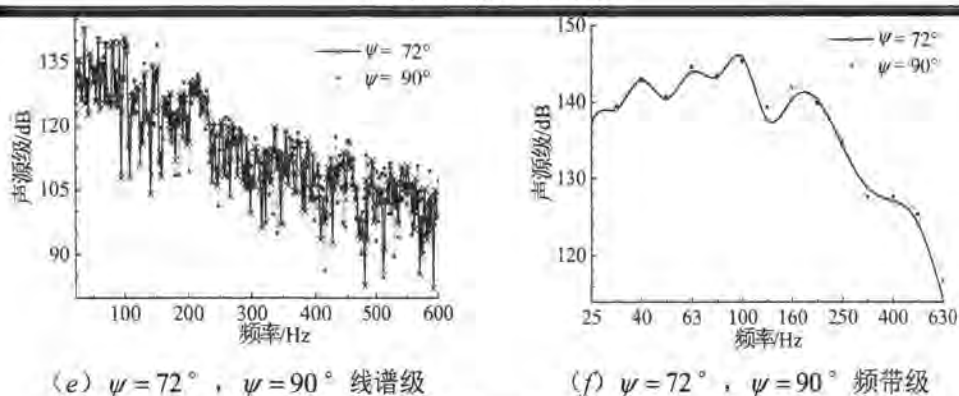


图 2.7 典型俯仰角的舰船结构水下声辐射数值仿真结果

表 2.5 典型俯仰角的舰船结构水下辐射噪声声源级/dB

俯仰角/ $^\circ$	20-100Hz	100-315Hz	315-600Hz	20-600Hz
0	149.3	143.6	126.5	150.3
18	150.2	143.7	127.1	151.1
36	150.6	144.1	127.2	151.5
54	150.9	144.5	128.1	151.8
72	151.1	144.9	129.0	152.0
90	151.2	145.7	129.9	152.3

由以上分析可知, 舰船结构垂直剖面内对应不同俯仰角的声压级存在一定差异。随着俯仰角的增大的水下声辐射强度逐渐增大。通过分析声辐射频带总级数据可知, 舰船结构辐射声源级呈现低频大、高频小的变化趋势, 20-600Hz 声源级在 150-153dB 之间, 20-100Hz 声源级在 149-152dB 之间, 两者十分接近, 辐射声能主要集中在以 20-100Hz 代表的中低频段。100Hz 以上频段对于声辐射总级影响有限。

2.4 水下航行器结构声辐射特性分析

2.4.1 水下航行器结构声辐射数值仿真模型

(一) 水下航行器结构声辐射数值仿真模型的构建

(1) 水下航行器设备截断简化。采用运动边界相似法, 以振动加速度形式在基座施加机械设备振动激励载荷, 即泵类、推进电机等设备激励载荷经舱筏隔振系统隔振处理后的振动加速度级。以质量点进行压载、重物的模型简化。

(2) 水下航行器结构几何模型建立。水下航行器结构辐射噪声采用整体船体模型进行仿真计算; 对于水下航行器壳体、甲板、舱壁以及大型加强结构(如: 环肋等)均采用壳单元进行简化, 对于小型骨材、加强筋等采用梁单元离散。模型为单层旋转柱壳结构, 型线参考 SUBOFF 模型, 并考虑舱壁、基座、围壳、舵翼等局部结构。经比例缩

放, 模型总长 $L=90\text{m}$, 柱壳最大直径 $D=13\text{m}$ 。模型壳体与局部结构材料均为船用钢, 结构材料参数包括: 密度 $\rho=7850\text{kg/m}^3$, 弹性模量 $E=2.11\text{e}^{11}\text{N/m}^2$, 泊松比 $\mu=0.3$ 。流体介质为海水, 密度 $\rho_0=1025\text{kg/m}^3$, 声速 $c_0=1500\text{m/s}$ 。几何模型如下图所示。

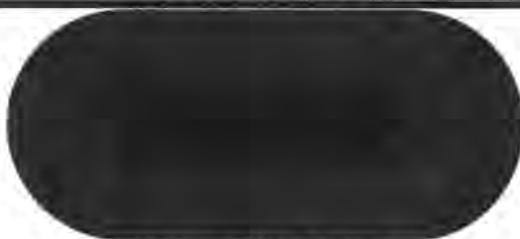


图 2.8 水下航行器几何模型

(3) 流场截断。在进行水下航行器结构声振特性分析之前, 需构建水下航行器结构及与其耦合流场的几何模型, 并定义结构的属性参数。水下航行器声辐射仿真计算采用整体模型, 为提高计算效率, 通过建立有限流场域, 并在外围施加无反射边界条件, 并根据声固耦合理论确定流场域半径。根据水下航行器结构特点与计算的频率要求, 确定水下航行器结构与流场有限元的模型单元尺寸, 并划分有限元网格。最后, 关联结构与耦合流场, 定义结构与流场间的耦合关系。

(4) 水下航行器声辐射数值仿真的声固耦合模型、边界元模型建立。舰船结构几何模型经网格离散, 得到水下航行器辐射噪声有限元模型。结构的网格尺寸 $\lambda=0.05\text{m}$, 流场 $L'=150\text{m}$, 直径 $D'=28\text{m}$ 。结构网格单元达到 178870 个; 流体单元数 322541 个; 有限元分析模型单元总数为 501411 个, 如图 3.8 所示。在此基础上, 结合边界元理论, 建立水下航行器水下辐射噪声预报模型。首先, 基于声固耦合理论, 获取结构表面响应 (位移、声压等), 导入船体结构外表面网格作为边界元网格, 建立边界元网格与结构表面的映射关系, 作为声辐射计算输入。随后, 设置声场边界条件、设置流体介质声传播速度、密度等参数, 依据计算需求, 设置边界元场点网格, 完成边界元模型建模。





(c) 声固耦合模型

图 2.9 水下航行器声固耦合模型示意图

(二) 载荷与边界条件以及声压考核点

(1) 确定水下航行器辐射噪声数值分析激励载荷。应用运动边界相似法，以振动加速度形式进行激励载荷加载，并在设备基座的激励载荷作用位置施加附加质量。

(2) 确定流体介质边界条件。通过有限组合流场域模拟无限域流场，流场域的外表面施加无反射边界条件。

(3) 声压考核点设置。考核点设置方法与舰船水下辐射噪声预报模型相似，沿距模型中心 1km 的圆周范围内，间隔 18° 方向角设置声压考核点，在法平面内，沿距模型中心 1km 的圆周范围内，间隔 18° 俯仰角设置声压考核点，具体如图 2.3 所示。

(三) 典型激励源特性

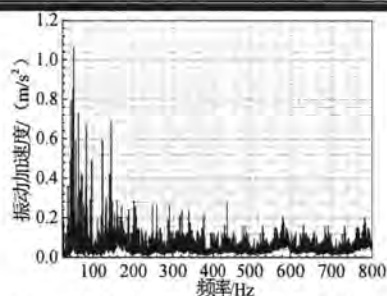
水下航行器激励载荷的获取方法应按照激励载荷测试方案、方法以及激励载荷的表征方式确定，一般流程如下：

(1) 进行水下航行器激励源设备的台架振动测试，获取设备的时域激励载荷；经傅里叶快变换，获取设备的激励载荷以及台架振动响应；

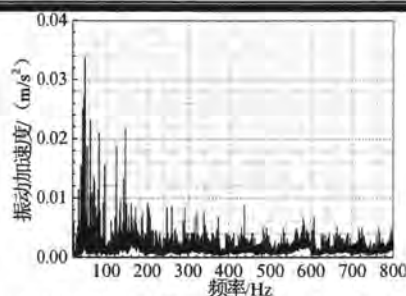
(2) 开展台架测试激励载荷的实船转换，获取舰船设备基座振动加速度水平激励力载荷线谱；

(3) 针对设备的激励载荷表征参数、舰船水下辐射噪声仿真预报方法，确定舰船水下辐射噪声预报的激励载荷施加方法。

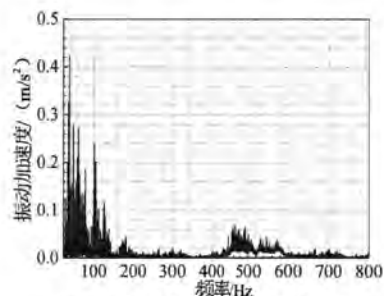
水下航行器机械噪声的主要激励源包括艏舱动力装置，如汽轮发电机组、推进电机、推力轴承，以及机舱的滑油泵、冷却水泵、空压机、空调风机等各型设备。受实际条件制约，水下航行器激励源设备的实船测试数据难以获取，并且本节旨在探究水下航行器声辐射的一般规律，因此，套用尺度相近水面舰船的同型或近型设备振动数据作为仿真输入，如下图所示。其中，汽轮发电机组振动载荷选用某型科考船柴油发电机组振动测试数据，空压机振动载荷选用科考船空压机振动测试数据。



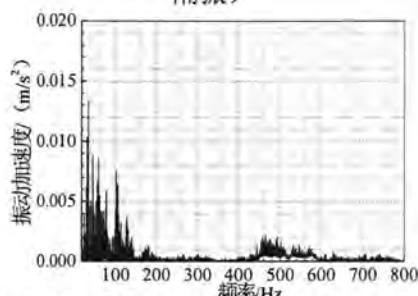
(a) 汽轮发电机组机脚振动载荷



(b) 汽轮发电机组基座振动加速度 (30dB 隔振)



(c) 空压机机脚振动载荷

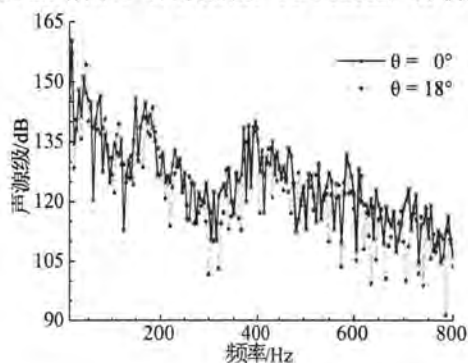
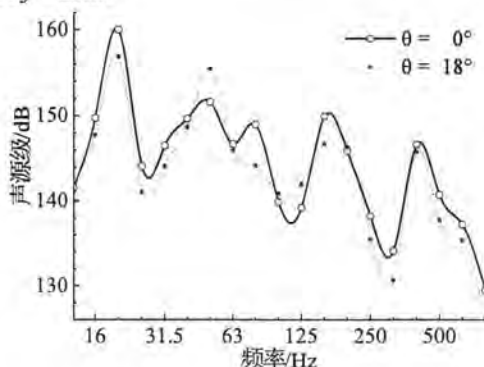


(d) 空压机基座振动加速度 (30dB 隔振)

图 2.10 主要设备振动载荷

2.4.2 水下航行器结构声辐射计算与特性分析

基于以上水下航行器辐射噪声数值预报模型,采用频域分析方法,进行水下辐射噪声仿真计算。首先应用运动边界相似法,以振动加速度级指标形式进行激励载荷加载。模型以有限组合流场域模拟无限域流场,流场域的外表面施加无反射边界条件。将声源级作为水下辐射噪声的表征参量,并沿 1km 的圆周范围设置声压考核点,考核点设置图如 2.3 所示。计算频段: 10-800Hz, 分析步长 $\Delta f=2\text{Hz}$ 。

(a) $\theta=0^\circ$, $\theta=18^\circ$ 线谱级(b) $\theta=0^\circ$, $\theta=18^\circ$ 频带级

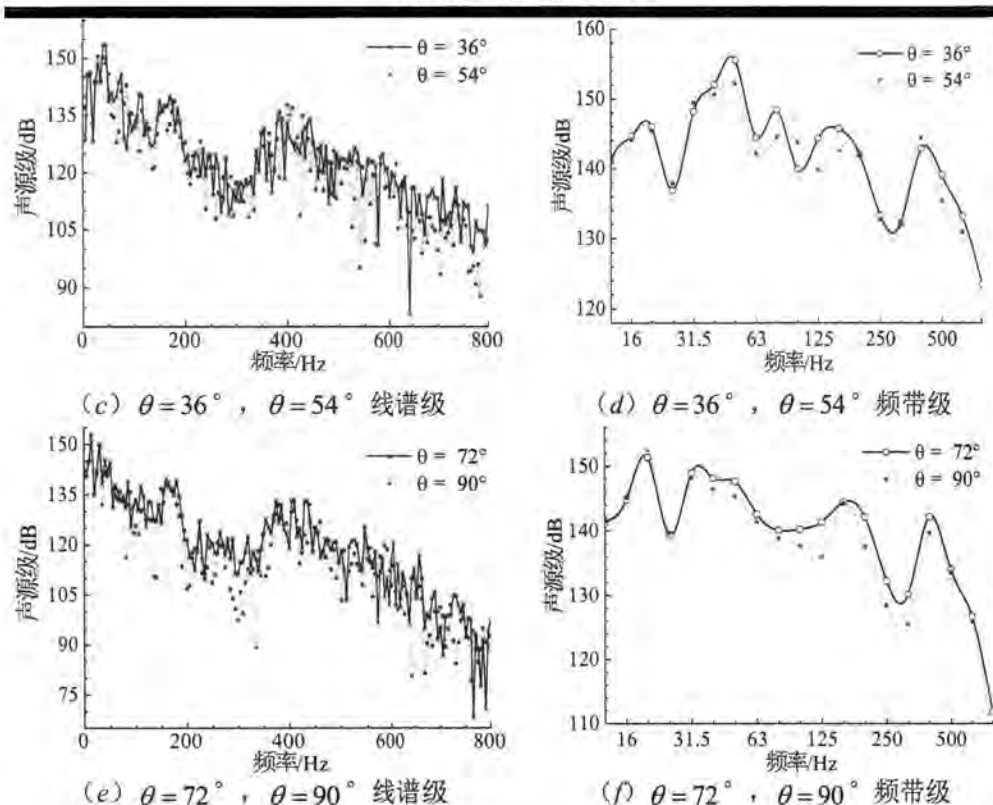


图 2.11 典型方向角的水下航行器结构声辐射数值仿真结果

表 2.6 典型方向角的水下航行器结构辐射噪声声源级/dB

方向角/ $^\circ$	10-100Hz	100-315Hz	315-800Hz	10-800Hz
0	161.9	151.9	148.1	162.5
18	160.5	150.5	146.8	161.0
36	158.9	149.2	144.7	159.5
54	157.2	146.8	145.2	157.8
72	156.4	147.9	142.9	157.2
90	156.2	145.8	140.9	156.7

由上图可知,水平面内各个考核点声压级存在一定差异。考核点 P0 辐射噪声水平总体偏大。通过分析考核点 P0 ($\theta = 0^\circ$) 声压响应可知,10-800Hz 频段,考核点声源级波动较大,以下频点出现峰值线谱:15Hz(160.3dB)、40Hz(150.8dB)、380Hz(139.8dB)等。水下航行器结构辐射声源级呈现低频大、高频小的变化趋势。10-800Hz 声源级在 156-162dB 之间,10-100Hz 声源级在 156-163dB 之间,两者十分接近,辐射声能主要集中在以 10-100Hz 代表的中低频段,100Hz 以上频段对于声辐射总级影响有限。

典型频点声压分布如下图:

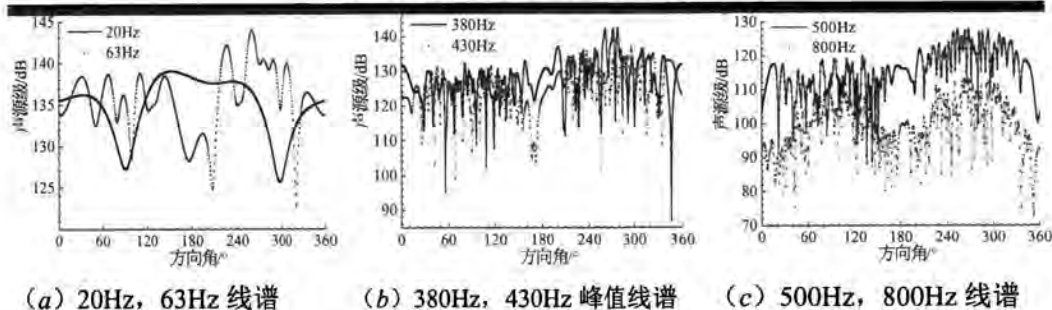
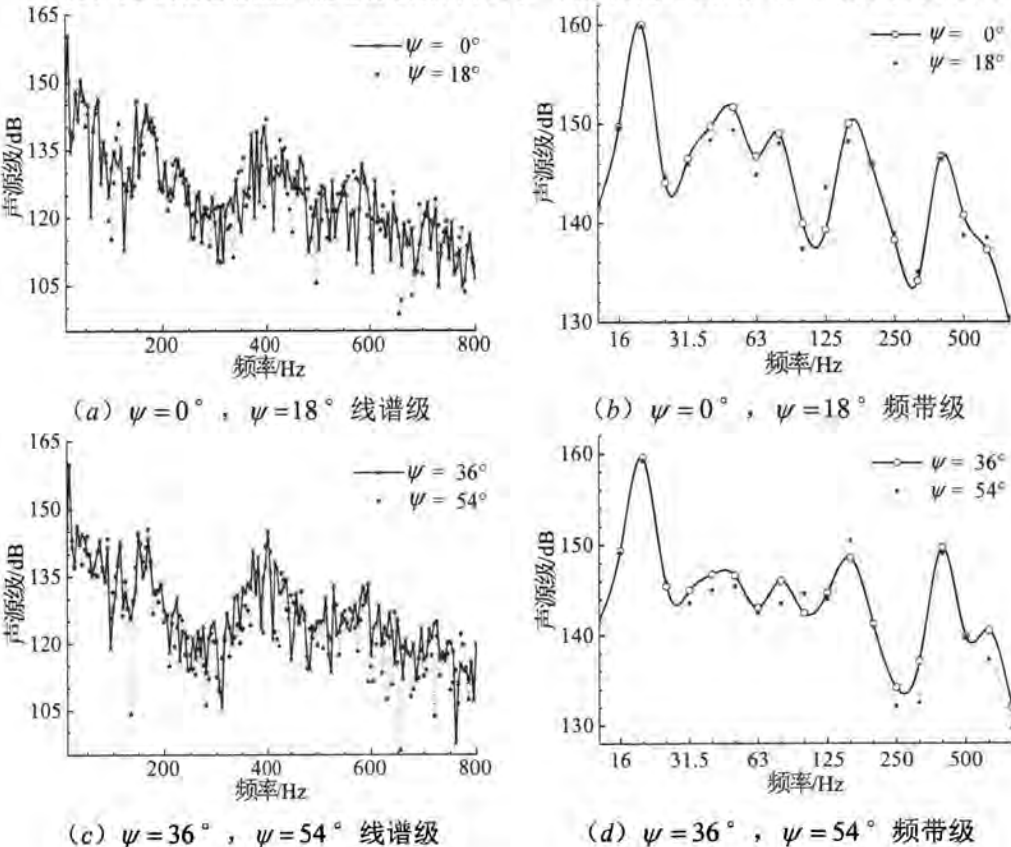


图 2.12 典型频点声源级周向分布

通过以上辐射噪声分析结果，得出以下结论：

- (1) 水下航行器声辐射存在周向指向性。
- (2) 对于不同分析频率，水下辐射噪声周向分布差异较大。对于 20Hz 频点，艏部、舷侧外壳的振动声辐射，对应方向的辐射声压相对偏高；当分析频率增加时，声辐射指向性减弱。
- (3) 10-800Hz 频段，随着分析频率升高，由方向角造成的声源级波动幅度增大。



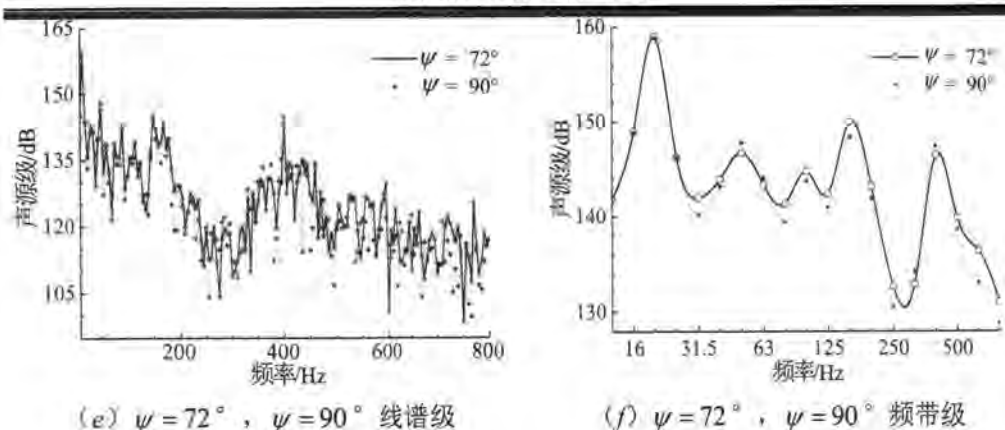


图 2.13 典型俯仰角的水下航行器结构声辐射数值仿真结果

表 2.7 典型俯仰角的水下航行器结构辐射噪声声源级/dB

俯仰角/ $^\circ$	10-100Hz	100-315Hz	315-800Hz	10-800Hz
0	161.9	151.9	148.1	162.5
18	161.5	151.5	147.8	162.1
36	161.0	150.9	150.6	161.7
54	160.6	151.9	149.9	161.5
72	160.3	151.5	147.7	161.1
90	160.2	150.0	148.2	160.8

由以上分析可知，水下航行器结构垂直剖面内对应不同俯仰角的声压级存在一定差异。随着俯仰角的增大的水下声辐射强度逐渐增大。通过分析声辐射频带总级数据可知，舰船结构辐射声源级呈现低频大、高频小的变化趋势。10-100Hz 频段总级与 10-800Hz 频段总级十分接近，100Hz 以上频段对于声辐射总级影响有限。

2.5 本章小结

考虑到舰船与水下航行器等结构通常具有结构形式复杂、结构参数众多的特点，如何梳理并建立简明的航行器结构与声学流场环境间的耦合声振传递关系表达式，是舰船与水下航行器结构声辐射研究亟待突破的关键技术。为此开展声固耦合有限与元分析技术应用研究，声固耦合有限与元分析技术能够在确保计算精度的前提下，有效控制声辐射计算周期，能够满足声呐性能建模的技术需求。

针对舰船与水下航行器结构的水下振动声辐射特性开展研究。基于声固耦合理论与边界元法，结合无限域流场截断技术，建立舰船与水下航行器声辐射数值仿真模型，并开展结构声辐射数值仿真计算，探索复杂激励下舰船与水下航行器结构的振动声辐射的特性规律，作为舰船水下噪声特性研究与声探测效能分析的基础。研究表明：舰船与水下航行器结构水下辐射噪声存在周向指向性，声源级与声压考核点的方位角存在关联

性。舰船与水下航行器水下辐射噪声水平受结构尺寸参数、结构形式、激励源特性等多种因素影响，在分析频率范围内波动较大。舰船与水下航行器结构辐射声源级呈现低频大、高频小的变化趋势。辐射声能主要集中在以20-100Hz代表的中低频段，100Hz以上频段对于声辐射总级影响有限。典型激励条件下，20-100Hz频段，水下航行器结构声辐射存在高于140dB的峰值线谱，是威胁舰船与水下航行器安全性的重要成分。

舰船与水下航行器声辐射表现出相似的频谱特性，两者水声传播模型差异主要体现在声源深度方面。水下航行器具有水面、水下多种航行状态，并考虑到水下航行器在隐身安全性方面往往具有更高需求，因此，后文声传播与声探测研究对象将不完全局限于水面船舶，通过开展多种声源深度的水中目标噪声分析，总结舰船与水下航行器等结构的水下噪声规律。

第3章 海洋环境声传播损失计算与规律研究

3.1 引言

水声传播计算对于舰船水下噪声特性研究极为重要,海水理化性质、海洋声场边界、海洋声场特征参数等海洋环境参量都会在一定程度上造成水声传播差异,从而影响舰船水下噪声分布。因此舰船水下噪声分析离不开海洋声场建模,在试验测试结果分析、声呐设计与系统优化、复杂海洋声反演试验等方面发挥重要作用^[56]。声衰减与声吸收是传播损失的主导因素,具体地可以从边界相互作用、传播途径、体积效应三个方面出发,开展水声传播建模。由于各类声传播数学模型在计算频段、应用几何关系中存在着一定的固有局限,因此本章首先针对射线理论、简正波模型以及抛物型方程模型作简要介绍,并讨论建模技术适用范围,以文献模型校验计算结果,总结水声传播损失计算方法。在此基础上,探究包括海况、水声传播速度在内的各类复杂海洋环境参量对于声传播特性的影响规律,并给出典型海域水声传播损失计算结果;分析舰船水下噪声分布规律,作为舰船线谱声探测效能研究、安全态势分析的数据积累。

3.2 水声传播理论基础

3.2.1 窄带传播损失理论背景

将远场与参考位置的声响应比值定义为微分传播因子 F_{NB} , 参考距离通常是距离目标 1m 处。无指向性声源的传播损失同窄带声信号传播因子 F_{NB} 有如下关系^[57-58]:

$$PL = -10\lg(F_{NB}) \quad (3-1)$$

F_{NB} 通过微分传播因子 G_{NB} 表示:

$$F_{NB} = \int G_{NB}(\theta) d\theta \quad (3-2)$$

对于指向性声源,将窄带传播损失定义推广为如下形式:

$$PL = -10\lg[\int b(\theta) G_{NB}(\theta) d\theta] \quad (3-3)$$

式中

$$b(\theta) = \frac{J(\theta, \varphi_{arr})}{J_0} \quad (3-4)$$

另一方面,窄带传播因子在时间维度上近似为:

$$F_{NB}(f_0) \approx \frac{1}{B} \int_{f_0-B/2}^{f_0+B/2} F_{coh}(f) df \quad (3-5)$$

式中: B 为有效处理带宽,定义为窄带线谱宽度 δf_{total} 与实际带宽 δf_{FFT} 中的较小

者:

$$B \equiv \min(\delta f_{\text{total}}, \delta f_{\text{FFT}})$$

如果需要更高的近似精度, 可以用额外的高斯权重函数作距离平均:

$$F_{NB}(f_0) \approx \frac{f_0}{Br_0} \int_{r_0(1-B/2f_0)}^{r_0(1+B/2f_0)} F_{coh}(r, f_0) dr \quad (3-6)$$

3.2.2 水声传播损失建模技术分类

流场中声波动方程从运动方程、状态方程、连续方程导出, 是所有水声传播数学模型的理论基础, 波动方程的双曲型二阶线型偏微分方程形式如式 (3-7) 所示:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (3-7)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算符, Φ 为声压势函数。

引入势函数 Φ 谐和解, 将式 (3-7) 简化为与时间无关的亥穆霍兹波动方程:

$$\nabla^2 \varphi + k^2 \varphi = 0 \quad (3-8)$$

为求解亥穆霍兹波动方程, 针对势函数 φ 进行假设与近似, 形成多种声传播理论模型, 如射线理论、简正波模型、抛物方程模型等^[59-64]。

(一) 射线理论

射线理论适用于与距离有关的海洋声传播求解, 可拓展求解范围至三维空间。射线理论依托于亥穆霍兹方程, 假设:

$$\varphi = Ae^{iP} \quad (3-9)$$

A 和 P 分别代表声压幅值函数 $A = A(x, y, z)$ 与相位函数 $P = P(x, y, z)$

将 (3-9) 代入亥穆霍兹方程, 实部与虚部分离:

$$\frac{1}{A} \nabla^2 A - [\nabla P]^2 + k^2 = 0 \quad (3-10)$$

$$2[\nabla A \cdot \nabla P] + A \nabla^2 P = 0 \quad (3-11)$$

式 (3-10) 表征声线几何形状。式 (3-11) 为传输方程, 确定声波振幅。基于几何声学近似, 简化式 (3-10) 得:

$$[\nabla P]^2 = k^2 \quad (3-12)$$

几何声学近似条件要求声波波长内声速梯度小于 c/λ (如式), 限制了射线理论的低频段适用性。另一方面, 海洋声速梯度导致部分相邻声线汇聚, 形成焦散线。焦散线附近区域声压幅值趋于无穷大, 因此, 射线理论难以处理焦散线附近区域声传播问题。

$$\frac{1}{A} \nabla^2 A \ll k^2 \quad (3-13)$$

高斯型声束模型将声线轨迹联系到高斯强度剖面,通过关联声束宽度、曲率微分方程与标准射线方程,进行中心声线声束场求解,方法能够有效处理焦散线问题。

(二) 简正波模型

简正波模型由波动方程积分表达式导出,建立在距离无关的假设基础之上,要求海洋环境特征参数仅随深度变化。简正波解中势函数 φ 为深度函数同距离函数乘积,求解过程中引入分离常数,得到描述深度方向驻波的简正波方程与水平方向的行波方程,进一步以无限积分表示势函数 φ 通解。简正波模型对海底沉积物参数输入较为繁琐,输入参数包括沉积物密度、沉积层衰减效应参数、压缩波速及切变波速。由于介质层间声速剖面差异,导致物理模型分层增多,计算强度相应增大。

(三) 抛物型方程模型

抛物型方程模型适用于求解水平变化问题,因而可推广至三维空间声场计算,在低频段声传播计算方面具有一定的优越性。抛物型方程模型引入折射率参数 $n=c_0/c$ 到亥姆霍兹波动方程:

$$\nabla^2 \varphi + k_0^2 n^2 \varphi = 0 \quad (3-14)$$

柱坐标系中:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + k_0^2 n^2 \varphi = 0 \quad (3-15)$$

将方程解写成以下形式:

$$\varphi = \Psi(r, z) \cdot S(r) \quad (3-16)$$

代入式(3-14)得:

$$\Psi \left[\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right] + S \left[\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S} \frac{\partial S}{\partial r} \right) \frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^2 n^2 \Psi \right] = 0 \quad (3-17)$$

以 k_0^2 作为分离常数得:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} + S k_0^2 = 0 \quad (3-18)$$

和

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} + \frac{2}{S} \frac{\partial S}{\partial r} \right) \frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^2 n^2 \Psi - \Psi k_0^2 = 0 \quad (3-19)$$

式(3-18)为零阶贝塞尔方程,解为第一类零阶汉克尔函数。式(3-19)可进一步简化:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + 2ik_0 \frac{\partial \Psi}{\partial r} + k_0^2 (n^2 - 1) \Psi = 0 \quad (3-20)$$

式(3-20)被称为抛物型波动方程。初始场已知前提下,通过步进解法求得数值解。

抛物型方程模型计算强度与距离间隔分步成正比，从而导致高频段计算时间过长。对于 500Hz 以上频段的海洋环境声传播计算，抛物型方程模型存在一定的局限性。

3.2.3 水声传播损失计算模型适用性讨论

由于简正波模型仅适用于距离无关的水平分层海洋声场建模，本节主要针对高斯型声束与抛物型方程模型进行算例验证。以深水环境为例，进行窄带信号传播损失计算。分析频点包括 20Hz、200Hz 与 500Hz。海洋声场环境参数包括：声源深度 30m，水平范围 10km，海况 1 级。对于高斯型声束与抛物型方程模型，无限水深条件以 1km 水深近似代替。水深 30m 与 100m 处的传播损失随距离变化关系如下计算结果如下图：

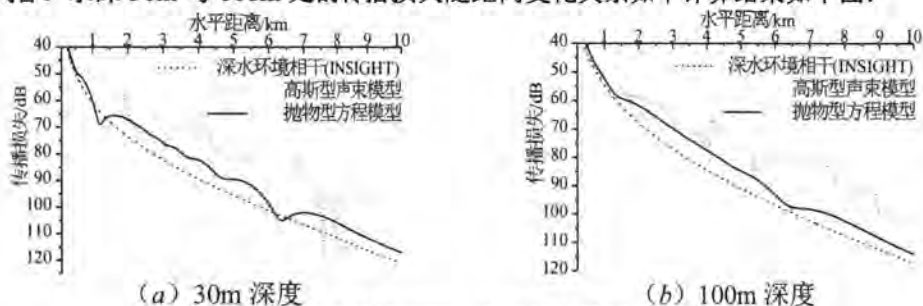


图 3.1 深水环境 20Hz 声信号传播损失曲线

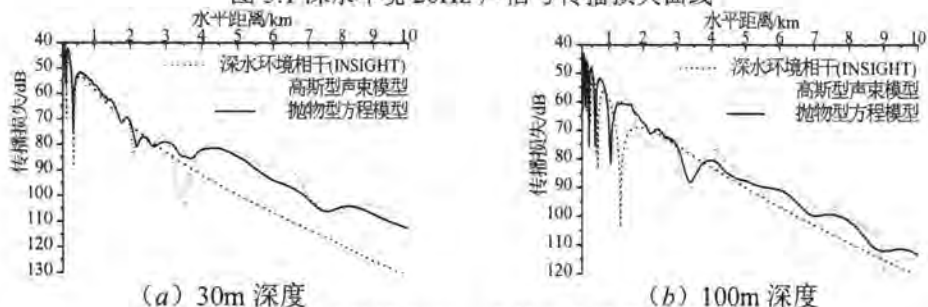


图 3.2 深水环境 200Hz 声信号传播损失曲线

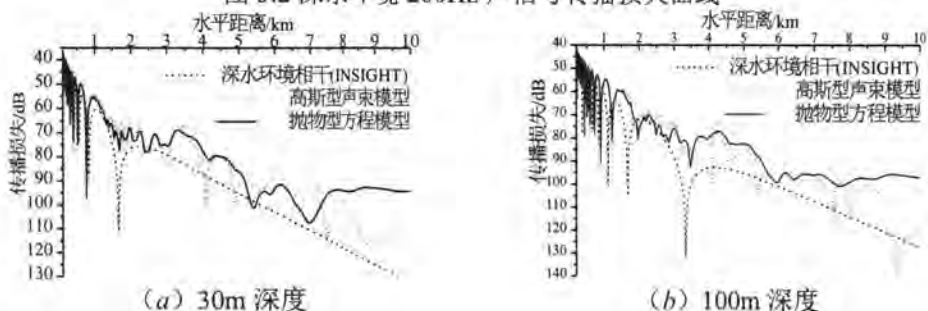


图 3.3 深水环境 500Hz 声信号传播损失曲线

以文献中的 INSIGHT 模型作为参照，验证传播损失计算模型。对于算例涉及的深水环境相干传播损失计算，抛物型方程模型适用性较好，由于边界条件近似，造成传播

计算结果会在一定程度上受到海底反射的影响，因此与文献中的数据存在较小的差异。但总体上看，抛物型方程模型计算结果具有较高的可信度。

高斯型声束模型受几何近似条件限制，对于以 20Hz 代表的低频段，计算结果准确度不能满足要求。对于中、高频段，计算结果总体上与抛物型方程模型及文献结果相近。另一方面，高斯型声束模型 500Hz 以上的频段范围，相较抛物型方程模型在计算效率上优势明显。因此，在后续工作中，若分析频率低于 500Hz，水声传播损失计算选用抛物型方程模型，若分析频率等于或高于 500Hz，选用高斯型声束模型。

3.3 浅海环境舰船声传播规律研究

海洋声传播损失成因包括声吸收与声散射等，与海水理化性质、海洋声场边界、海洋声场特征参数密切相关，本节主要针对水声传播速度、海况、声源深度以及海底沉积物四种因素，探究海洋声传播特性规律。

3.3.1 海洋声场环境参数

(一) 海况

海面对于声传播的影响主要体现在近表面的声反射与声散射现象。首先，平静海面可以看作是理想声反射体，反射损失近似为零，直达声与反射声之间将产生明显的镜像干涉，声波交替相长与干涉相消并形成干涉条纹。由气流、降水引起的海面扰动将导致空气-海水界面的声散射，同时，波浪破碎产生的气泡将造成近表面的声辐射、散射与声吸收现象^[67-68]。由于在密度与可压缩性等方面，空气、海水介质存在着明显差异，同时气泡自身具有共振特性，因此，悬浮气泡对于水声传播具有重要影响。除此之外，起伏海面将导致单频信号的频率模糊与频移效应，信号幅度与强度发生剧烈起伏。

海洋声场建模主要考虑参数为本地风速，并估计海面粗糙度与近表面气泡量。海浪在时间维度上具有随机性，可把海面自然起伏看作随机过程，分析海浪的统计特性。海面风浪对照如表 3.1。

表 3.1 海面风浪对照表

海况等级	描述	蒲福风级	浪高(m)	海面粗糙度参数
0	无风：海面如镜。	0	0	0
	软风：海面出现鱼鳞状涟漪。	1	0.1	0.1
1	轻风：海面存在明显波纹，顶峰呈玻璃状。	2	0.2	0.2
2	微风：小波波峰发生破碎，存在偶发白浪。	3	0.6	0.6
3	和风，波浪幅度较大，白浪频繁出现。	4	1	1

4	清劲风：出现长峰中浪，并存在偶然出现的激溅浪花。	5	2	2
5	强风：大浪形成，浪峰呈现白色可见飞沫。	6	3	3
6	疾风：风浪显著涌起，白色飞沫受风力影响，形成可见浪花。	7	4	4
7	大风：海面形成长峰大浪。波峰上缘破碎形成明显浪花。	8	5.5	5.5
8	烈风：海面形成长峰大浪，飞沫沿风向形成条纹，风浪倒卷，形成能够影响能见度的激溅浪花。	9	7	7
9	狂风：形成长卷峰伴随大浪，海面出现大面积飞沫，飞沫沿风向形成浓白条纹。能见度受激溅浪花严重影响。	10	9	9
	暴风：海面形成能够隐没中小等度船舶的巨浪。海面由浓白飞沫完全覆盖。能见度受激溅浪花严重影响。	11	11.5	11.5
	飓风：海面形成巨浪。空中充满激溅飞沫。能见度受激溅浪花严重影响。	12	14(及以上)	14(及以上)

(二) 海水声传播速度

海水的声传播速度海洋声场建模的关键输入参数，受温度、盐度与海水静压等因素影响，其中，海水温度作为主导因素。海水声介质的温度、盐度的不均匀分布，将导致声传播波介质在水平、深度方向上的分层现象，从而形成海洋中的声速梯度，对于浅海波导、深海声道、北极半声道等路径的声传播有显著影响。

声传播速度可定义为海水定压比热、定容比热、等温压缩系数以及海水密度的函数，如下式。

$$c = \left(\frac{\gamma}{K\rho} \right)^{1/2} \quad (3-21)$$

式通常不会作为水声传播速度计算的工程应用算法，目前，仍需依赖经验公式估算。在这方面，Kuwahara、Frye 与 Pugh 等研究人员曾作出突出贡献，提出了最早的声速经验公式，并进行多次改良与修正。公式包括依赖于盐度、温度、和静压各项的分量。如下。T (°C)、S (‰)、P(kg/cm²)、z(m)分别代表温度、盐度、静压、深度。

和在威尔逊公式的基础上，给出更简单的，按照及计算声速的公式。

$$c = 1449.30 + \Delta c_P + \Delta c_T + \Delta c_S + \Delta c_{TPS} \quad (3-22)$$

其中

$$\Delta c_P = 1.5848 \times 10^{-1} P + 1.572 \times 10^{-5} P^2 - 3.46 \times 10^{-12} P^4 \quad (3-23)$$

$$\Delta c_T = 4.587T - 5.356 \times 10^{-2} T^2 + 2.604 \times 10^{-4} T^3 \quad (3-24)$$

$$\Delta c_s = 1.19(S-35) + 9.6 \times 10^{-2}(S-35)^3 \tag{3-25}$$

$$\Delta c_{TPS} = 1.35 \times 10^{-5} T^2 P - 7.19 \times 10^{-7} TP^2 - 1.2 \times 10^{-2}(S-35)T \tag{3-26}$$

$$P = 1.033 + 1.028126 \times 10^{-1} z + 2.38 \times 10^{-7} z^2 - 6.8 \times 10^{-17} z^4 \tag{3-27}$$

温度升高将引起海水的体积弹性模量增加，同时密度减小，声速将随之增加。海水温度随季节的变化范围较大，从而水温能够对声速产生较大影响。相较而言，盐度的影响较小。海水盐类浓度关系到海水介质压缩率，对声速产生间接影响。海水盐度在海域之间变化较小。在深度方面，声速与水深线型关联，一般地深海声速以 0.17/m 正梯度线型变化。海洋声传播同声速深度剖面有重要联系，相对于同一海区，气候、季节等因素能够通过海水温度间接影响到声速结构，从而不同季节声传播特性出现一定差异。东海的亚热带海域四季声速剖面图如下。

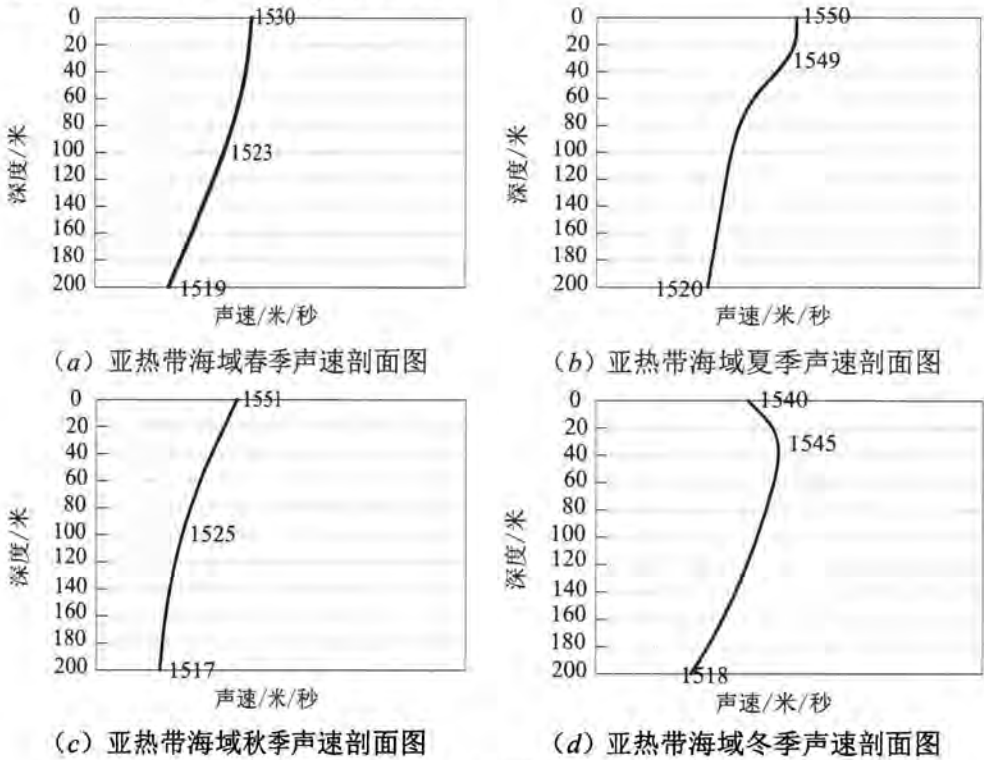


图 3.4 亚热带海域四季声速剖面图

(三) 海底沉积层与海底地形

海底的地形起伏与沉积层的声学性质与底部声学界面的声反射、散射特性密切相关。海底的声学性质在空间维度上变化明显。一方面，海底沉积层声速、密度在深度方向是存在渐变与突变。海底沉积物垂向分层将导致透射声波在沉积层内部的反射与折

射，因此，从计算精度方面考虑，有必要将海底沉积层作为一种同时具有压缩波速与切变波速特征的复杂传播介质。另一方面，海底沉积层的成分包括岩石、砂图、淤泥等类型，造成声反射系数的显著差异。

对于近海岸、江河入海口等区域，海底沉积物以陆源沉积物为主，包括淤泥、砂土和泥浆等。远洋沉积物主要包括钙质、硅质软泥与黏土类。分别来源于死亡有机体分解和大气悬浮物质。东海近海沉积物呈块状与斑状分布。对于潮流沙脊区、小型河口区、海峡峡道出口、浅滩区、等区域，陆源沉积物补给较为充足，沉积物主要以颗粒砂、淤泥为主，典型海区包括苏北辐射沙脊、琼州海峡出口、六股河河口、扬子浅滩等。对于北部湾、浙闽近岸、莱州湾等海域等旋转流区或是水动力较弱的海湾，海底沉积物以细颗粒物为主，包括粉砂、黏土等。

表 3.2 中国东海海区沉积物信息

沉积区类型		典型沉积区	地貌
泥区	河口泥质沉积	长江入海口泥质沉积区; 浊水溪泥质沉积区	水下三角洲
	沿岸流、泥质沉积	辽南沿岸流、泥质沉积区; 浙闽沿岸流、泥沉积区	水下岸坡
	小环流泥质沉积	苏南小环流泥质沉积区	堆积平原
	陆架外泥质沉积	澎湖水道泥质沉积区	水下谷地
砂区	陆、岛近岸砂质沉积	环台湾近岸浪控砂沉积区	海滩
	潮控砂沉积	台湾浅滩潮流砂沉积区	活动沙丘
	残留砂沉积	台湾海峡残留砂沉积区	砂质平原、洼地
混合区	混合沉积	东海北部混合沉积区	陆架平原

沉积层厚度范围变化较大，变化范围可以达到数千米。海底沉积层的物理参数是海洋声场仿真的输入参数之一，沉积层的声速与密度是水声传播计算的关键参数，部分太平洋底部沉积物参数测量的平均值如下表。

表 3.3 太平洋底部沉积物参数测量平均值

沉积层类型	空隙率 η (%)	密度 ρ (kg/m ³)	声速 c (m/s)	声速梯度 (m/s)/m
粗粒沙 1	38.6	2030	1836	1.0
细粒沙 2	43.9	1980	1742	1.0
非常细沙	47.4	1910	1711	1.0
泥沙	52.8	1830	1677	1.0
砂质淤泥	68.3	1560	1552	1.0
砂-泥-黏土	67.5	1580	1578	1.6
黏土质淤泥	75.0	1430	1535	1.6

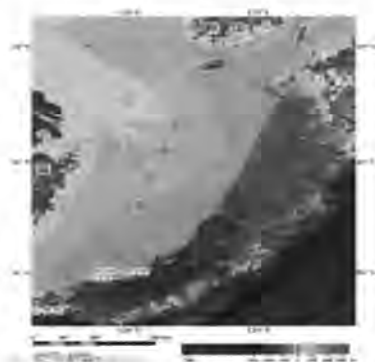
淤泥黏土	76.0	1420	1519	1.6
黏土质淤泥	78.6	1380	1535	1.6
淤泥黏土	85.8	1240	1521	1.6
黏土	85.8	1260	1505	1.6
黏土质淤泥	76.4	1410	1531	1.6
淤泥黏土	79.4	1370	1507	1.6
黏土	77.5	1420	1491	1.6

东海近海域是我国通往东北亚、东南亚地区的主要通道，同时是东部诸港通往太平洋的必经之路，地理环境十分特殊。另一方面，东海海洋渔业、滨海砂矿资源丰富，是石油与天然气等油气资源的聚集区。因此，东海地形、地貌特征研究对于地质板块理论研究、海区自然资源利用开发、海洋交通业发展都具有重要意义。

东海作为第二大边缘近海，北启长江入海口，东至韩济州岛西南一线，东北与朝鲜海峡相接，经由日长崎本岛东端至种子岛一线，南以广东南澳岛与台湾南鹅銮鼻线与南海为界。海区西临闽、沪、浙三省，东至琉球群岛、九州与台湾岛。东海海区沿北东走向逐渐开阔，汇入西太平洋，平均水深为 370m，最大水深达到 2322m，面积为 75.69 万 km²。海底地形沿西北向东南向倾斜。大陆架由陆向海缓慢倾斜，海区等深线与中国东海岸线近似平行。海区水下地形复杂，大陆架范围内岛屿众多，分布有三角洲地形、古河道与潮流沙脊等地貌。近岸区北部分布密集的入海口及水下三角洲平原，等深线呈扇状延伸，长江入海口外的潮流沙脊区地形走向由南北向逐渐转变为西北向。南部海域为东北向带状岸坡地形，等深线与海岸线近似平行于，并呈南密北疏状排列，平均坡降为 1‰。



(a) 东海、南海海域



(b) 东海海域

图 3.5 东南近海海底地形图

海底地貌总体上呈现以西北向东南的倾斜阶梯状地形。从近岸浅水区到大陆架边缘，呈现舒缓坡；大陆架边缘至冲绳海槽西坡，海底陡变，水深在 160-200m 区间。大

陆架至冲绳海槽的深水地貌区，轴部存在系列陡峭的珠状分布海山，海底以浮岩、玄武岩、玄武质安山岩为主。槽底轴部出现断陷洼地与地堑槽，下陷深度超过 100m，宽度超过 7km。

3.3.2 典型海区水声传播损失规律分析

基于射线理论与抛物型方程模型，分别进行 20Hz-1kHz 频段的窄带水声信号传播损失计算，探究水声传播速度、海况、海底地形等因素对于传播损失的影响规律。

(一) 水声传播速度

海水的声传播速度与海水温度、盐度、静压等理化性质参数关联程度较大。海水温度、静压等因素在深度方向上的不均匀分布，导致海水介质的分层现象，形成海洋声速梯度^[69-70]。相对于同一海域，气候、季节等因素能够通过海水温度间接影响到声速结构，从而不同季节声传播特性出现一定差异。以上节季节垂向声速剖面为输入变量，进行 20Hz-1kHz 频段的窄带水声信号传播损失计算，分析水下声传播特性规律。其他海洋声场环境参数包括：声源深度 50m，水平范围 10km，水深 200m，海况 2 级；海底沉积物黏土，厚度 200m，忽略海底地形起伏。部分频点的传播损失-水平距离曲线如下图。

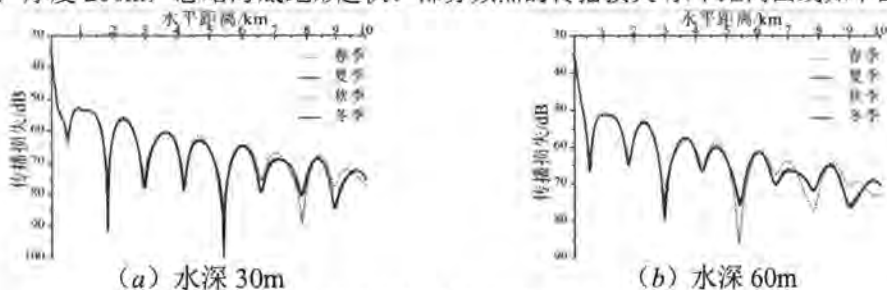


图3.6 季节声速剖面的传播损失-距离曲线 (20Hz) /dB

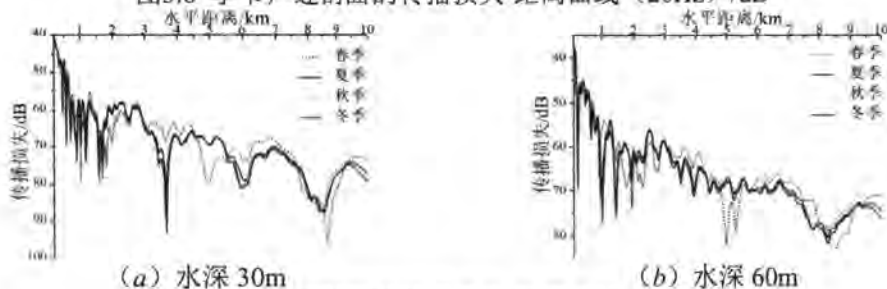


图3.7 季节声速剖面的传播损失-距离曲线 (63Hz) /dB

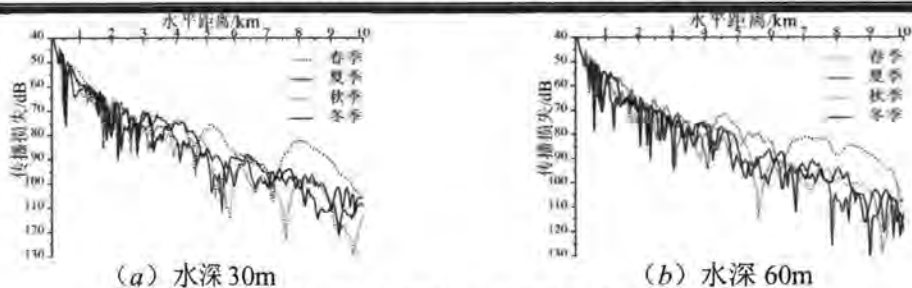


图3.8 季节声速剖面的传播损失-距离曲线 (500Hz) /dB

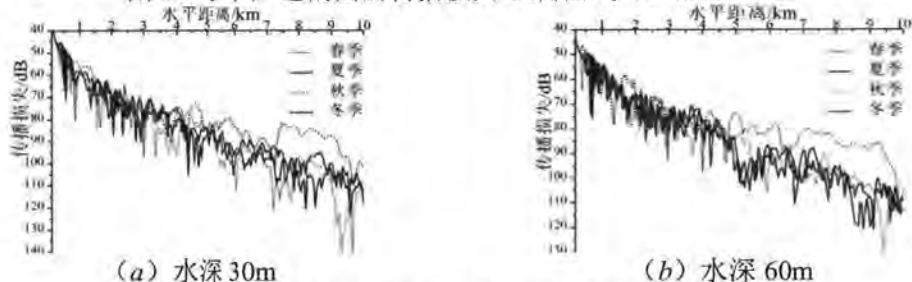


图3.9 季节声速剖面的传播损失-距离曲线 (1kHz) /dB

由于声传播过程中的声扩展与声吸收效应, 声传播损失在水平方向上总体呈现逐渐增加的趋势。季节声速剖面对于传播损失影响较小, 图示曲线不存在明显差异。当分析频率为 20Hz 时, 季节声速剖面引起的传播损失差异几乎可以忽略。随着分析频率增大, 以春季声速剖面为输入的计算工况, 在水平距离大于 5km 时, 传播损失曲线呈现不同于其他工况的变化趋势, 总体上看, 20Hz-1kHz 频段由声传播速度剖面引起的传播损失差异小于 10dB。初步分析原因如下:

(1) 计算海域深度、水平范围有限, 声传播主要路径为直达声与海底反射。其中, 直达声传播距离短, 海底反射以大角度通过折射层, 因此, 声介质分层而产生的折射效应不能造成明显差异。

(2) 声源深度为 50m, 大于声层深度, 浅海波导难以造成声传播的明显影响。

部分频点传播损失在深度、水平方向分布图如下:

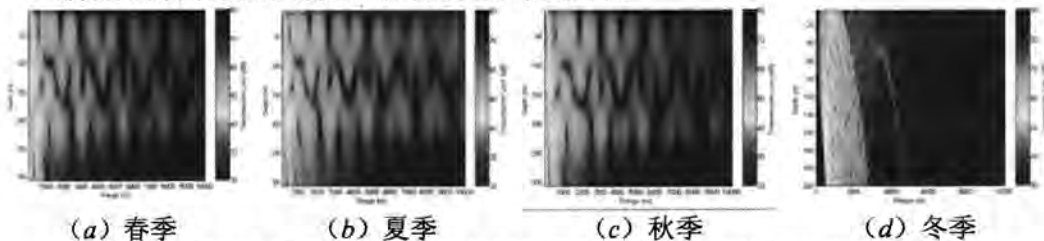


图3.10 季节声速剖面的传播损失空间分布 (20Hz) /dB

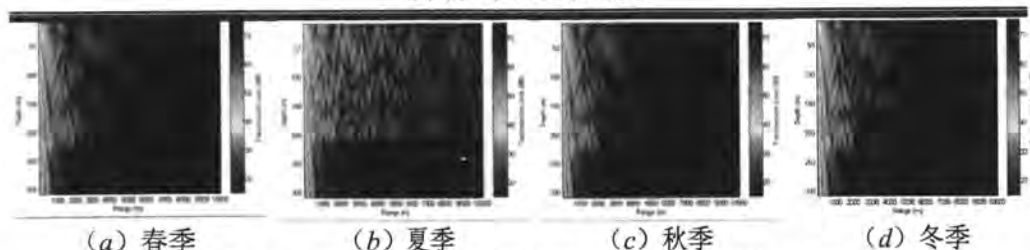


图3.11 季节声速剖面的传播损失空间分布 (63Hz) /dB

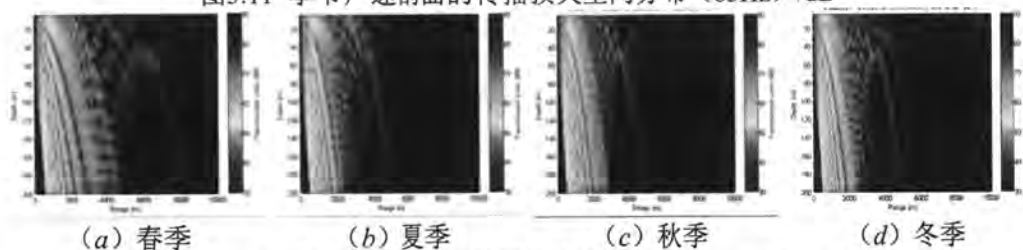


图3.12 季节声速剖面的传播损失空间分布 (500Hz) /dB

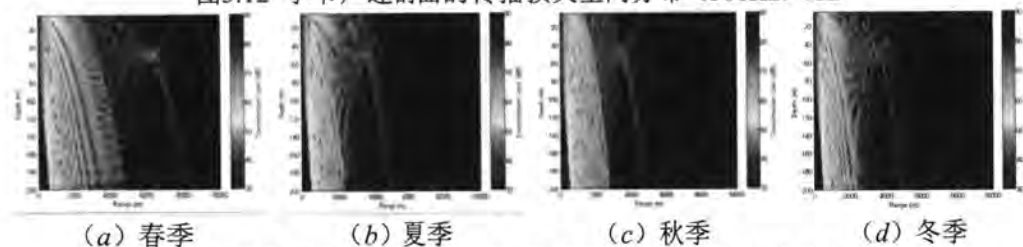


图3.13 季节声速剖面的传播损失空间分布 (1kHz) /dB

(二) 海况

海面对于声传播的影响主要体现在近表面的声反射与声散射现象。由气流、降水引起的海面扰动将导致空气-海水界面的声散射，同时，波浪破碎产生的气泡将造成近表面的声辐射、散射与声吸收现象。选取海况等级作为表征参数，依据表 3.1 对应本地风速、海面粗糙度与近表面气泡量。进行 20Hz-1kHz 频段的窄带水声信号传播损失计算，分析水下声传播特性规律。其他海洋声场环境参数包括：声源深度 50m，水平范围 10km，水深 200m；冬季水声速度剖面；海底沉积物黏土，厚度 200m，忽略海底地形起伏。海况 0、2、5 级部分频点的传播损失-水平距离曲线如下图。

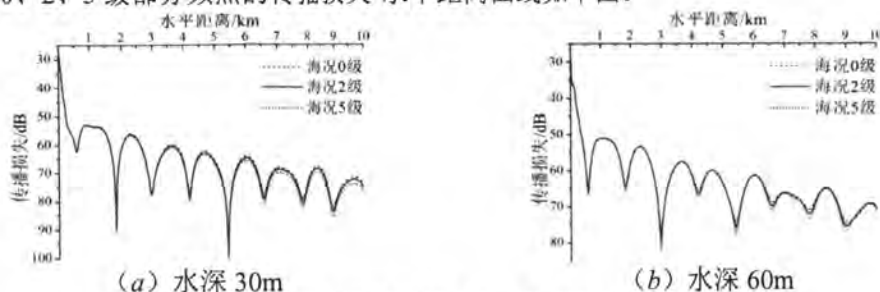


图3.14 海况0-5级的传播损失-距离曲线 (20Hz) /dB

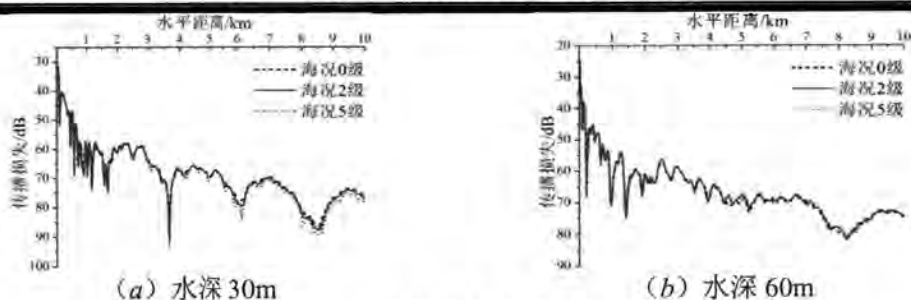


图3.15 海况0-5级的传播损失-距离曲线 (63Hz) /dB

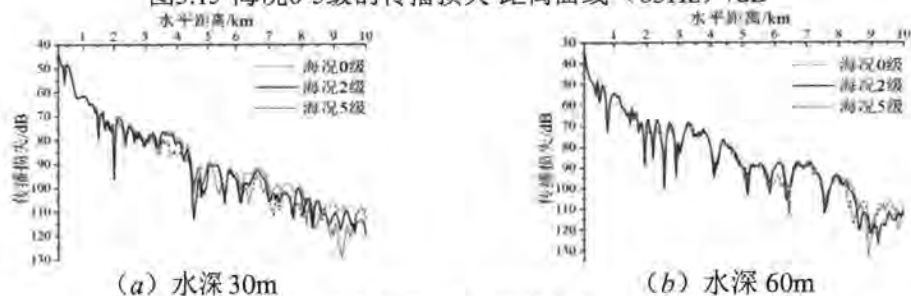


图3.16 海况0-5级的传播损失-距离曲线 (500Hz) /dB

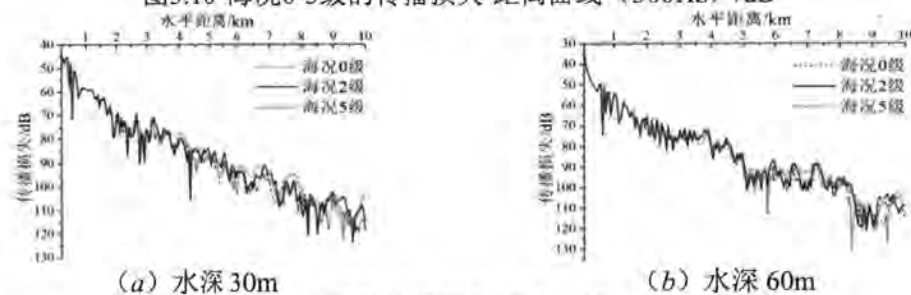


图3.17 海况0-5级的传播损失-距离曲线 (1kHz) /dB

上图声传播损失在水平方向上总体呈现逐渐增加的趋势。计算海况等级范围的传播损失变化较小，图示曲线不存在明显差异。当海况 0-5 级区间变化时，传播损失差异几乎可以忽略。

(三) 声源深度

以声源深度作为输入变量，进行 20Hz-1kHz 频段的窄带水声信号传播损失计算，分析水下声传播特性规律。其他海洋声场环境参数包括：水平范围 10km，水深 200m；冬季水声速度剖面；海况 2 级；海底沉积物黏土，厚度 200m，忽略海底地形起伏。声源深度 25m、50m 与 100m 部分频点的传播损失-水平距离曲线如下图。

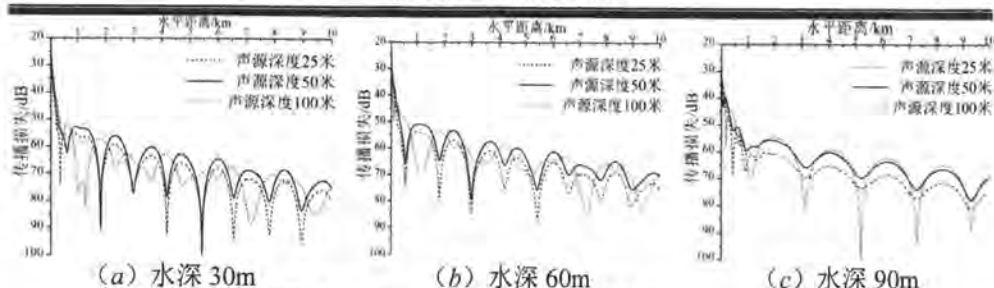


图3.18 声源深度25-100m的传播损失-距离曲线 (20Hz) /dB

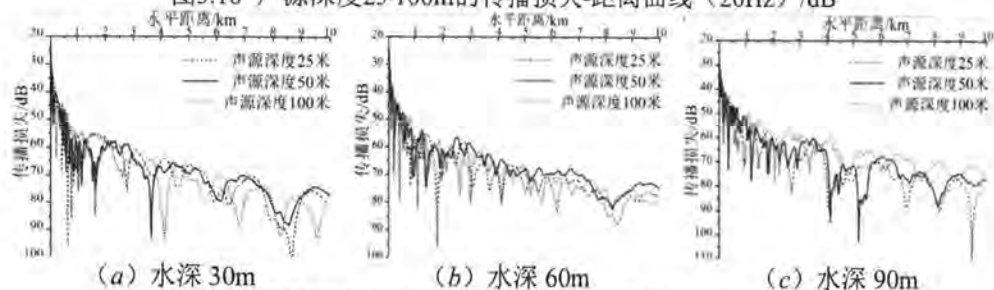


图3.19 声源深度25-100m的传播损失-距离曲线 (63Hz) /dB

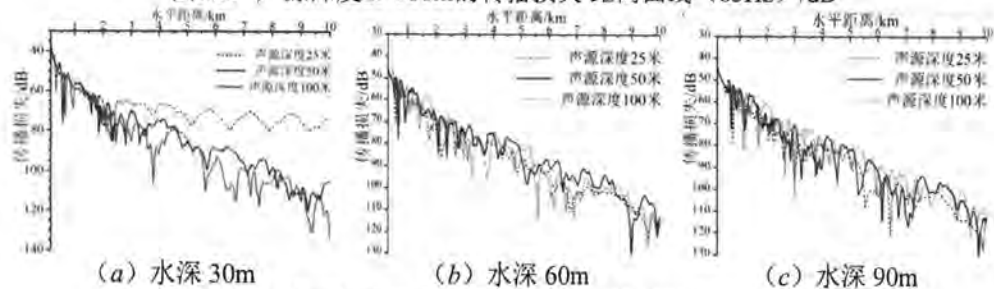


图3.20 声源深度25-100m的传播损失-距离曲线 (500Hz) /dB

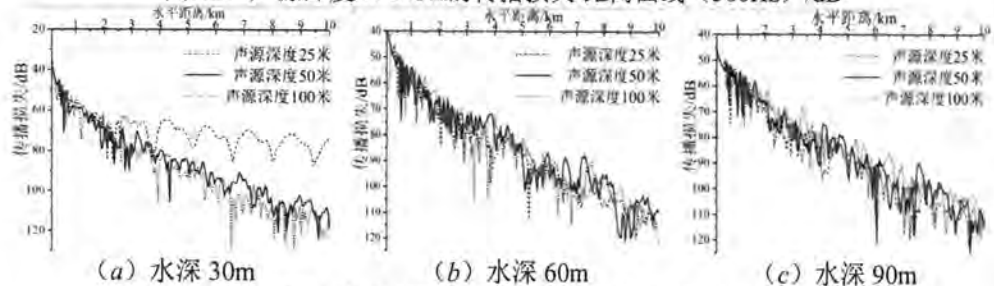


图3.21 声源深度25-100m的传播损失-距离曲线 (1kHz) /dB

对于图示浅海声场环境, 传播损失受声源深度影响明显。冬季声速剖面水深 0-30m 存在正声速梯度, 海面与声层底部构成浅海波导, 波导内部形成声低损耗传播路径。500、1000Hz 声信号浅海波导内的传播损失相对较低 (如图 3.12 (a) 与图 3.13 (a)), 波导内部几乎不受扩展损失影响。水平距离大于 2km 时, 浅海波导造成的传播损失差异逐渐趋于明显, 2-10km 范围内浅海波导可造成高于 20dB 的传播损失差异。对于以 20Hz、

63Hz 为代表的中、低频段, 传播损失曲线存在一定差异, 但不存在明显规律。

(四) 海底沉积物

海底沉积层的声学性质在空间维度上变化明显, 与底部声学界面的声反射、散射特性密切相关。海底沉积层的成分包括岩石、砂图、淤泥等类型, 其造声速、密度等特性参数存在渐变与突变, 造成声反射系数的差异显著。海底沉积物的声学性质是海洋声场建模要考虑的主要因素。黏土、细粒砂、砂质淤泥是海底大陆架常见的沉积物类型, 依据 3.3.1 节沉积物声学性质参数, 进行 20Hz-1kHz 频段的窄带水声信号传播损失计算, 分析水下声传播特性规律。其他海洋声场环境参数包括: 声源深度 50m, 水平范围 10km, 水深 200m, 海况 2 级; 冬季水声速度剖面; 海底沉积物厚度 200m, 忽略海底地形起伏。部分频点的传播损失-水平距离曲线如下图。

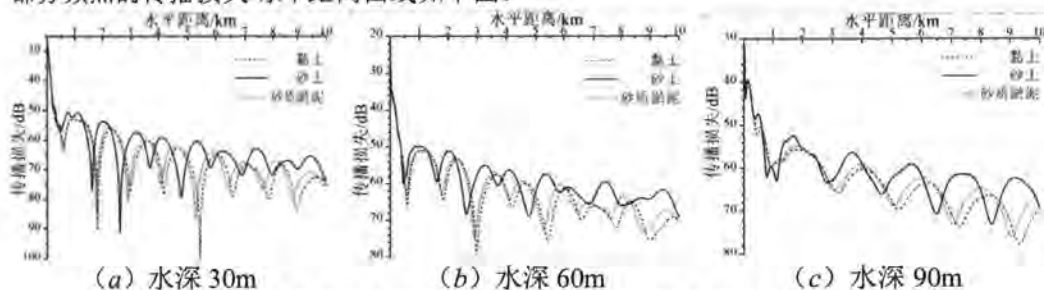


图3.22 海底沉积物的传播损失-距离曲线 (20Hz) /dB

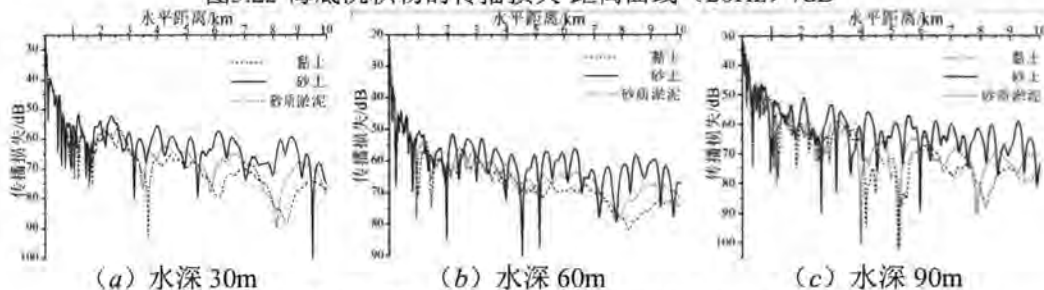


图3.23 海底沉积物的传播损失-距离曲线 (63Hz) /dB

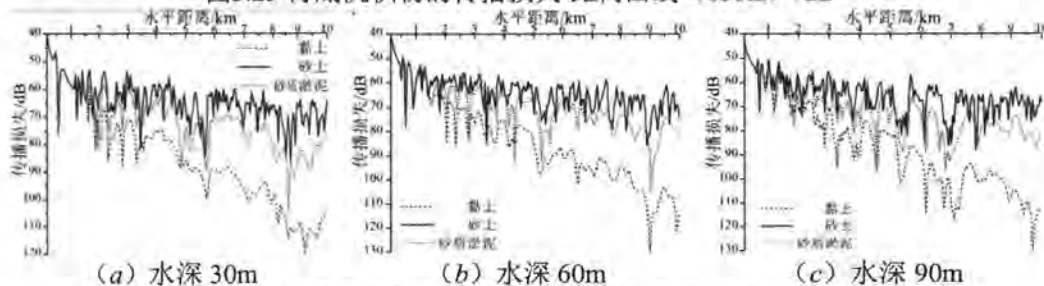


图3.24 海底沉积物的传播损失-距离曲线 (500Hz) /dB

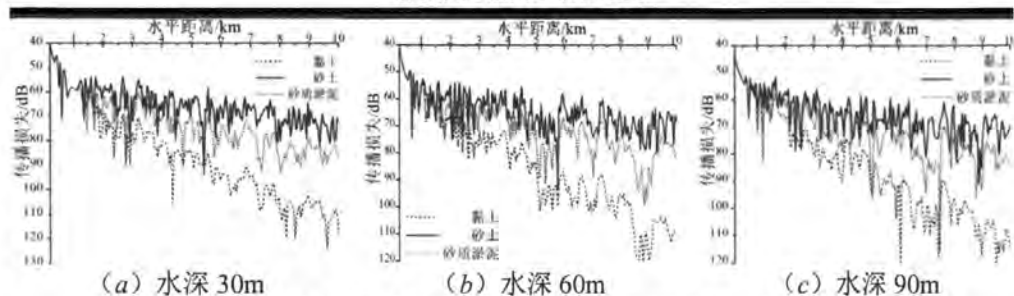


图3.25 海底沉积物的传播损失-距离曲线 (1kHz) /dB

对于浅海声场环境的有限水深范围内，声波与海底沉积层相互作用引起声传播的高衰减。细粒砂、岩石等硬质沉积物可以在一定程度上控制反射损失，如图 3.24 与 3.25 所示，若沉积物为细粒砂、砂质淤泥，500、1000Hz 声信号传播损失明显偏小。由沉积物造成的传播损失差异随着水平距离的增加逐渐明显，在 10-40dB 之间。对于以 20Hz、63Hz 为代表的中、低频段，海底沉积物所引起的传播损失差异有限。

部分频点传播损失在深度、水平方向分布图如下：

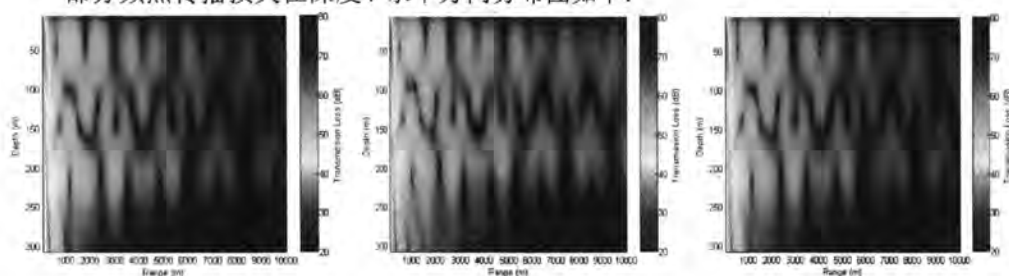


图3.26 海底沉积物的传播损失空间分布 (20Hz) /dB

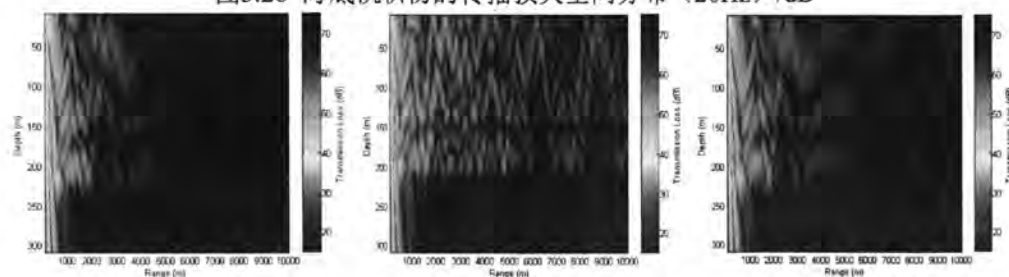
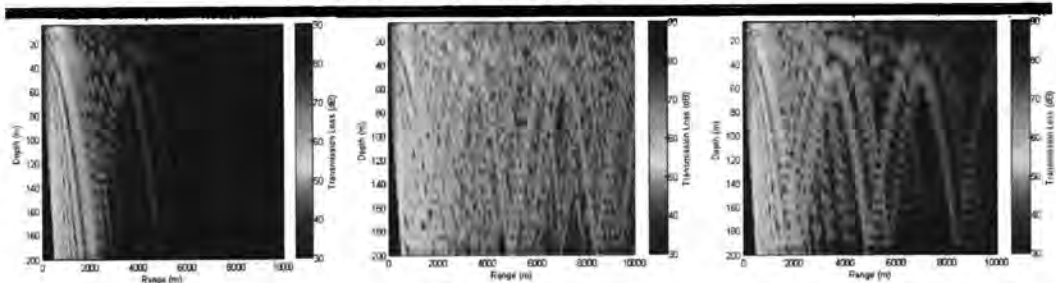


图3.27 海底沉积物的传播损失空间分布 (63Hz) /dB

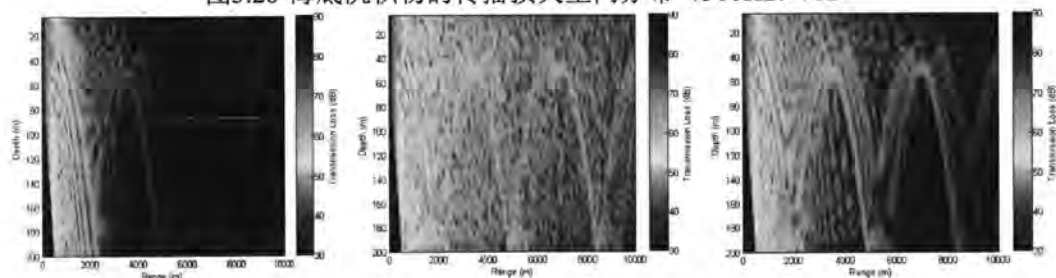


(a) 海底沉积物：黏土

(b) 海底沉积物：细粒砂

(c) 砂质淤泥

图3.28 海底沉积物的传播损失空间分布 (500Hz) /dB



(a) 海底沉积物：黏土

(b) 海底沉积物：细粒砂

(c) 砂质淤泥

图3.29 海底沉积物的传播损失空间分布 (1kHz) /dB

3.4 舰船与水下航行器远场噪声特性研究

基于舰船与水下航行器结构声辐射数值仿真模型，获取结构辐射声源级，通过水声传播模型，确定结构水下噪声传播一定距离后的衰减量，从而获得结构远场水下噪声水平。舰船与水下航行器结构的水下噪声是被动声呐探测的主要目标。分析并掌握舰船水下噪声特性，对于优化舰船声学设计、提高舰船安全性与隐蔽性具有重要意义。

3.4.1 水下航行器远场噪声特性研究

本节结合舰船与水下航行器声辐射、声传播分析方法，首先以2.4.2节水下航行器结构为例，进行水下航行器远场噪声特性研究。选取声压级作为水下噪声表征参量，分析频段256-500Hz。将水下航行器近似为点声源，声辐射特性参照2.4.2节计算结果。

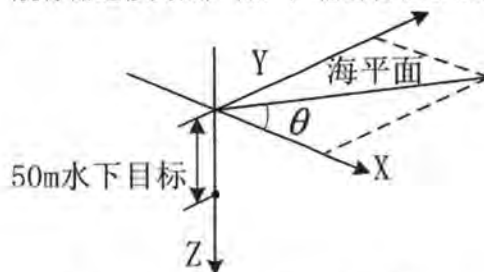
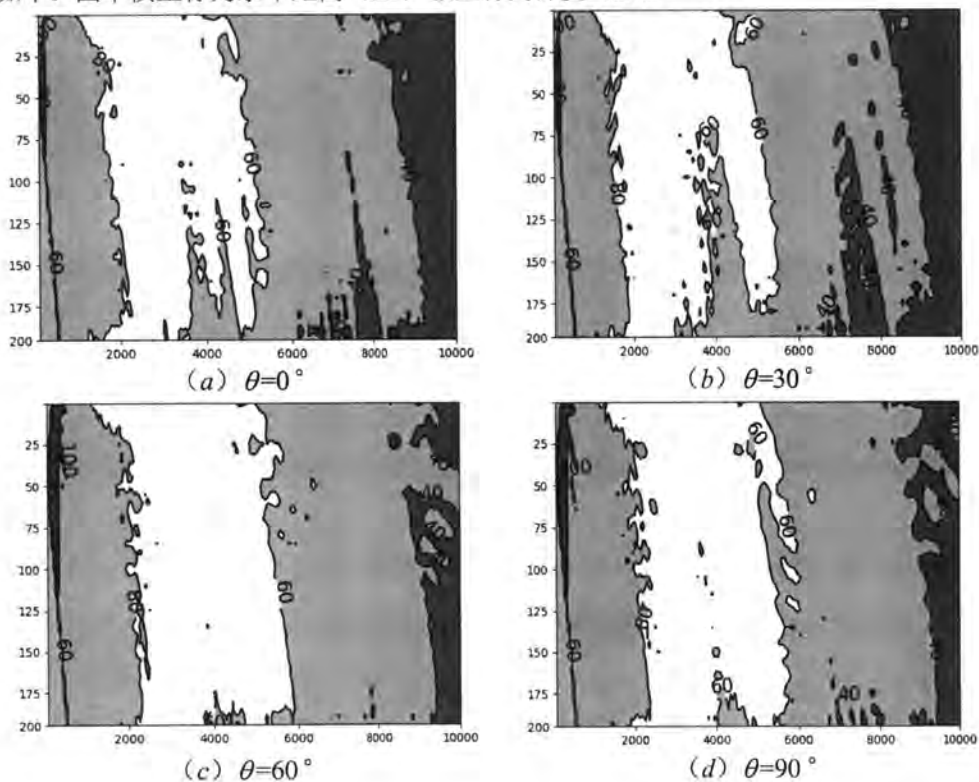


图 3.30 浅海声场模型坐标系

表 3.4 水下航行器结构 256-500Hz 频段声辐射谱密度级 (右舷 1km 考核点)

频率/Hz	270	280	290	300	310	320	330	340
声源级/dB	124.6	122.5	120.0	118.8	122.6	121.6	124.5	128.6
频率/Hz	350	360	370	380	390	400	410	420
声源级/dB	116.9	125.0	138.6	139.8	135.1	133.5	130.2	129.3
频率/Hz	430	440	450	460	470	480	490	500
声源级/dB	131.3	126.8	128.8	129.0	133.7	124.1	115.5	124.0

基于水声传播理论进行浅海声场传播损失计算。构建浅海声场模型, 环境参数包括: 声源深度 50m, 水平范围 10km, 最大水深 200m, 海况 2 级; 冬季水声速度剖面; 海底沉积物黏土, 厚度 200m。不考虑海底地形起伏。以目标位置沿垂向在海面的投影为坐标原点, 坐标系如图, Y 轴正方向为航向。通过把指定位置 256-500Hz 频段的声压级进行非相干叠加, 确定该位置水下噪声的声压级。对应典型方向角 θ 的水下噪声等高线图如下。图中横坐标为水平距离 (m), 纵坐标为深度 (m)。



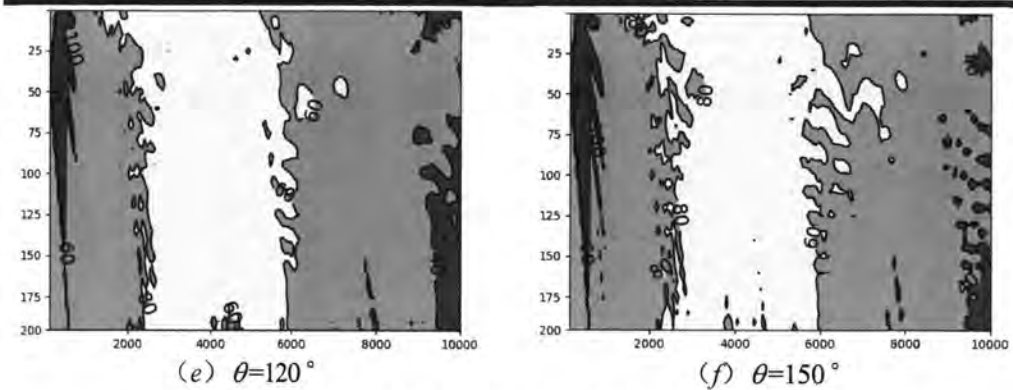


图3.31 典型方向角 θ 的水下航行器噪声分布图/dB

方向角 $0 < \theta < \pi$ 范围内的等声压级空间曲面如下图所示。

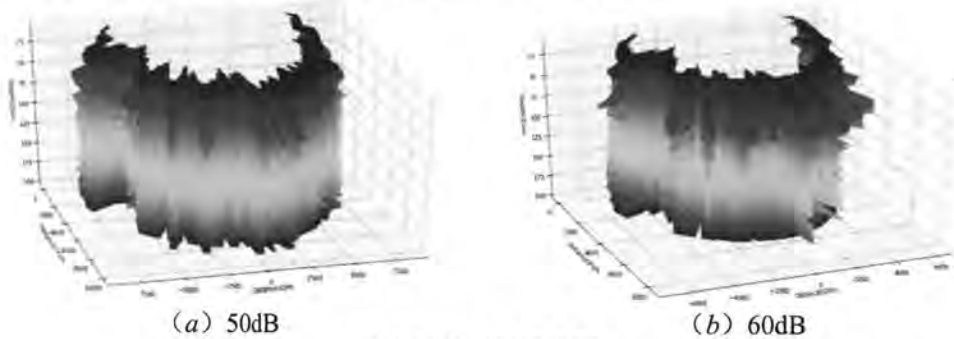


图3.32等声压级曲面

为给出特定位置的水下噪声量化结果，绘制声压级-水平距离曲线如下图，相应的水下噪声的声压级如下表。

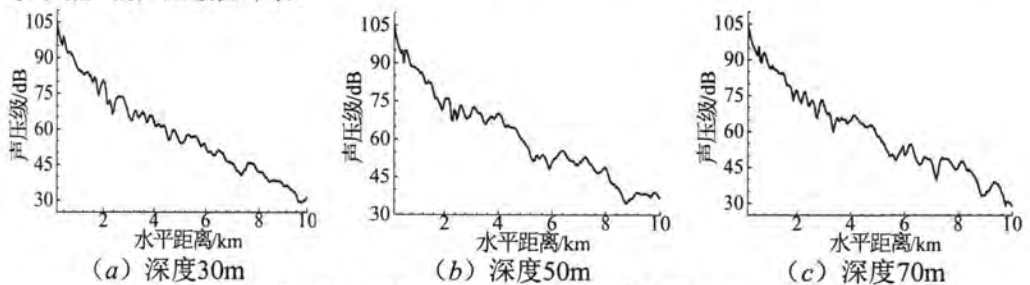


图3.33 $\theta=0^\circ$ 平面内声压级-水平距离曲线

表3.5 $\theta=0^\circ$ 平面内水下噪声分布/dB

水平距离	2km	3km	4km	5km	6km	7km	8km	9km	10km
深度 30m	84.7	79.7	64.7	61.4	54.2	51.1	45.2	42.0	36.4
深度 50m	87.1	76.1	72.4	69.9	57.3	52.0	51.4	47.8	37.5
深度 70m	87.5	74.5	69.0	65.9	58.2	50.7	46.3	46.8	34.9

基于以上分析可知，对于浅海环境，水下航行器噪声总体上呈现随水平距离增加而衰减的趋势。等声压级曲面可近似以柱面表征，水下噪声随水深变化较小。由于水下航

行器结构辐射噪声具有指向性，方向角会造成一定程度的水下噪声空间分布差异。

现考虑水平距离增加一倍导致的水下噪声衰减的量化结果，如下表：

表 3.6 水平方向的水下噪声衰减/dB

水平距离	2m	3m	4m	5m
30m	20.0	25.5	19.6	25.0
50m	14.7	18.8	21.0	32.4
70m	18.5	16.3	22.6	31.0

通过上表数据可知，对于方向角 $\theta=0^\circ$ ，深度为 50m 的声场空间，水平距离为 5km 与 10km 处声压级差值为 32.4dB，即水平距离 5km 与 10km 之间声衰减为 32.4dB。水平距离 4km 与 8km 之间的声衰减为 21.0dB，声衰减逐渐减小。实际上，对于任意位置，水平距离增加一倍导致的柱面扩展损失相等，因此，可以认为水平距离是声吸收效应的主要制约因素之一，水平距离增加，声吸收效应逐渐明显。

3.4.2 舰船远场水下噪声特性研究

由于舰船与水下航行器工作深度不同，水下噪声特性将存在一定差异。本节以 2.3.2 节舰船结构为例，进行舰船远场水下噪声特性研究。选取声压级作为水下噪声表征参量，分析频段 256-500Hz。将舰船近似为点声源，声辐射特性参照 2.3.2 节计算结果。基于水声传播理论进行浅海声场传播损失计算。声源深度近似为 5m，其他环境参数与 3.4.1 相同。256Hz 与 500Hz 频点的传播损失计算结果如下图。

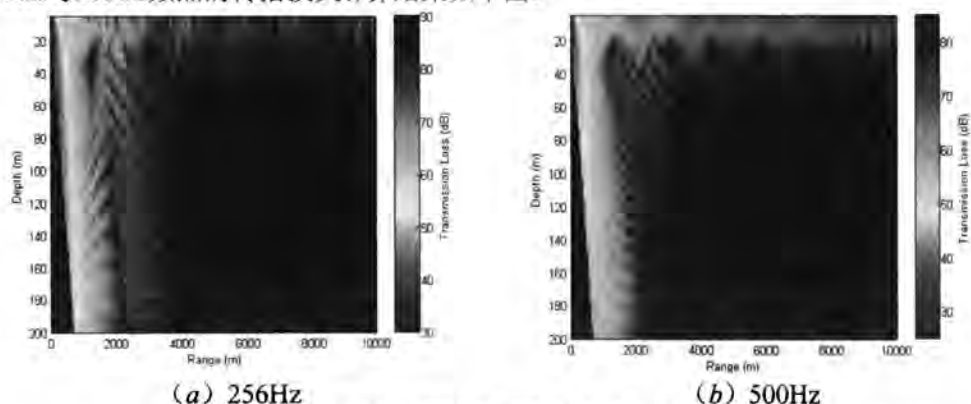
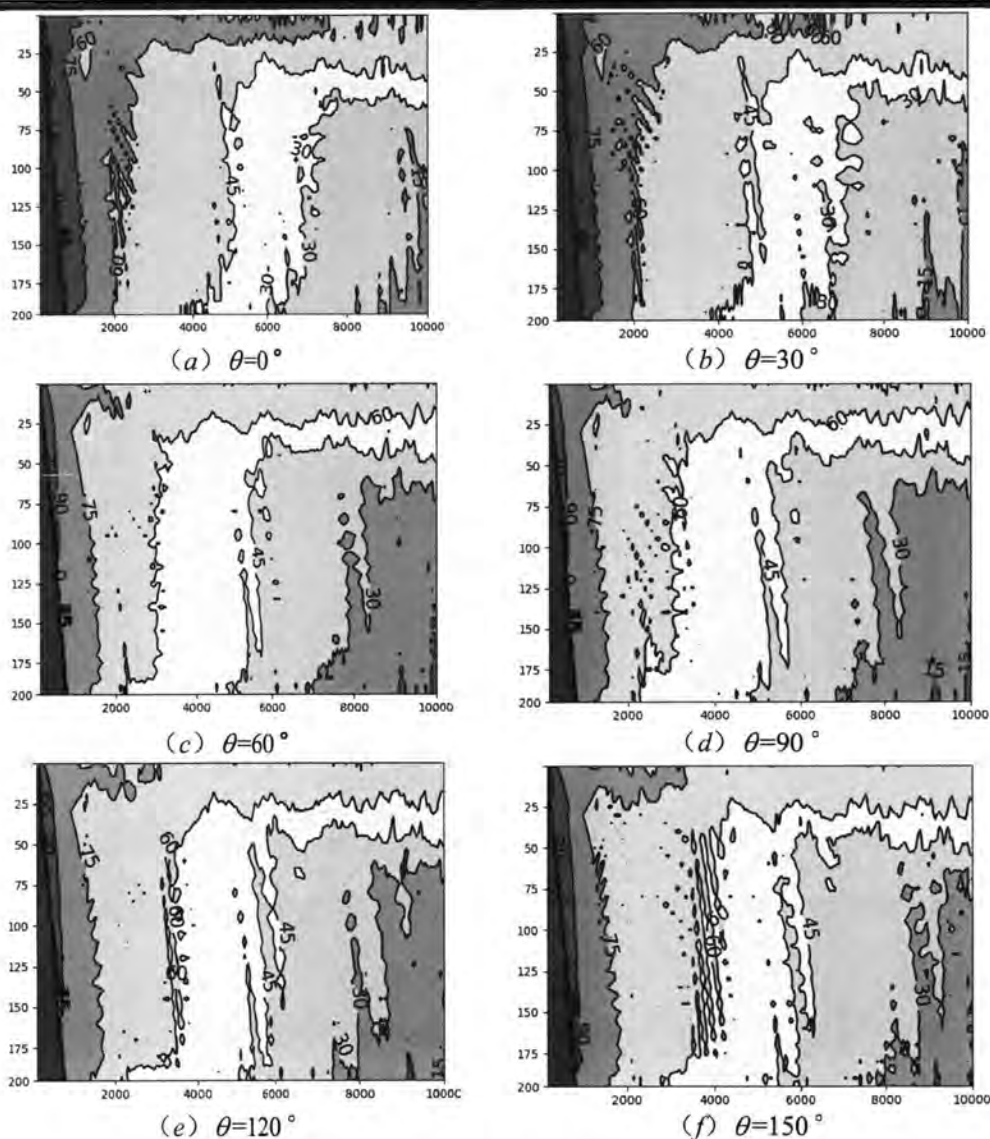


图3.34 舰船水下噪声部分频点传播损失图

算例中声速剖面在水深 0-30m 存在正声速梯度，海面与声层底部构成浅海波导，由于声源位于波导内部，声波通过浅海波导远距离传播，波导内部传播损失较小。通过把任意位置 256-500Hz 频段的声压级进行非相干叠加，确定该位置声压级。对应典型方向角 θ 的水下噪声等高线图如下。图中横坐标为水平距离（m），纵坐标为深度（m）。

图3.35 典型方向角 θ 的舰船水下噪声分布图/dB

通过分析上图可知,浅海波导对于舰船水下噪声造成了一定影响,声波主要沿波导内部传播,波导内部噪声水平偏高,10km 范围内不存在明显衰减。波导外部水下噪声分布与水下航行器相似,总体上呈现随水平距离增加而衰减的趋势,等声压级曲面可近似以柱面表征。

3.5 本章小结

围绕水声传播损失计算开展研究。首先,分析射线理论、简正波模型、抛物型方程模型等各类海洋声场建模方法的在应用几何关系、分析频段等方面的特点与适用性,以

文献模型校验计算结果，讨论建立水声传播损失计算方法。其次，以水声传播的边界相互作用、传播途径、体积效应等方面作为基本出发点，总结海洋声场环境关键参数，探究水声传播速度、海况、海底地形等因素对于传播损失的影响规律，最后结合舰船与水下航行器声辐射计算结果，进行舰船与水下航行器远场水下噪声特性分析，研究表明：

1、抛物型方程模型适用于中、低频段的海洋声场传播损失计算，高频部分以高斯型声束模型计算结果作为补充。经文献模型校验，方法计算结果具有较高的可信度。

2、浅海声场环境，声源深度、海底沉积物类型对于水声传播特性影响显著，海况等级、声速剖面结构引起的传播损失差异有限：

(1) 浅海环境深度、水平范围有限，声传播主要路径为直达声与海底反射。声介质分层而产生的折射效应不能造成明显的传播损失差异。总体上看，20-1000Hz 频段由声传播速度剖面引起的传播损失差异小于 10dB。

(2) 浅海波导构成了声波近海面的低损耗传播路径。对于文中涉及的声场模型，浅海波导可以引起高于 20dB 传播损失差异。

(3) 浅海声场环境声波与海底沉积层相互作用引起声传播的高衰减，因而海底沉积物类型对于声传播损失影响较大。对于文中涉及的声场模型，由海底沉积物造成的传播损失差异在 10-40dB 之间，并随着声波频率增大逐渐明显。砂土、岩石等硬质沉积物可以在一定程度上控制反射损失。

3、对于浅海环境，舰船与水下航行器水下噪声分布呈现相似规律，总体上呈现随水平距离增加而衰减的趋势。等声压级曲面可近似以柱面表征。

第4章 复杂海洋环境舰船声学安全态势研究

4.1 引言

安全态势包含两个评估指标：舰船水下噪声的探测概率与相应探测距离。建立适用于工程应用的舰船水下噪声探测效能分析模型是舰船结构声学研究的一个重要课题。舰船水下噪声探测效能与声辐射、声传播特性、声呐设备性能等多种因素相关。为量化接收设备性能，预测舰船声探测的策略效能。以被动声呐方程作为理论基础，进行针对线谱声信号的被动声呐性能建模，通过水下目标辐射声源级数值仿真、海洋声场传播损失仿真、背景噪声级估算，经信号处理得接收设备阵列响应，基于统计检测理论确定目标探测距离。在此基础上，认为指定接收设备检测概率是关于目标位置的连续函数，求解概率函数梯度，提出低噪声使用策略。最后，总结声呐探测性能影响因素，探索复杂海洋环境声呐设备探测概率的分布规律。

4.2 舰船水下线谱声探测理论模型

声呐性能建模目的在于量化声呐性能，给出探测某个水下航行体的可能性，并进行策略效能分析。策略效能由声呐成功实现探测的概率决定。声呐方程是用于量化声呐性能代数表达式，窄带相干处理的被动声呐方程^[70]如式(4-1)。

$$SE_{NB} = (SL - PL) - (NL_f + BW - AG) - DT \quad (4-1)$$

式中各项参数物理意义如下表所示。其中声源级 SL 与传播损失 PL 分别参照第2章与第3章计算方法。本节将围绕阵增益（或指向性系数）、检测阈、噪声等参数，总结相对成熟的经验算法或数值模型，完成舰船水下线谱声探测建模，结合具体算例，进行舰船水下线谱噪声探测模型可行性验证，作为后续研究的理论基础。

表 4.1 声呐方程参量

参数	符号	定义	参考位置
声源级	SL	$SL = 10\lg S_0$	声轴上距离声源 1m 处
传播损失	PL	$PL = -10\lg(F_{NB})$	声轴上距离声源 1m 处/接收点
噪声级	NL_f	/	水听器位置处
阵增益	AG	$AG = 10\lg(R_{arr}/R_{FFT})$	/
带宽	BW	$BW = 10\lg(\frac{R_{hp}}{R_{FFT}} \delta f)$	/
检测阈	DT	/	/

4.2.1 统计检测理论

由于噪声与信号具有自然起伏的统计特性，导致目标信号的检测信噪比难以明确得出。因此，基于统计检测理论，进行接收机特定信噪比条件下的信号检测概率分析十分必要。对于瑞利衰落信号，其单个信号的幅度服从瑞利分布，那么信号幅度的概率密度函数如下：

$$f_s(A) = \frac{A}{a^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2a^2}\right) \quad (A \geq 0) \quad (4-2)$$

对于瑞利噪声，信号与噪声概率密度函数：

$$f_{s+N}(A) = \frac{A/\sigma^2}{1+R} \exp\left(-\frac{A^2/2\sigma^2}{1+R}\right) \quad (4-3)$$

式中： σ 为样本标准差。瑞利分布下概率密度函数曲线如图 4.1。 a 为众数幅度，即概率密度函数 $f_s(A)$ 最大值对应的 A 的取值。

$$R \equiv \frac{E(A^2)}{2\sigma^2} \quad (4-4)$$

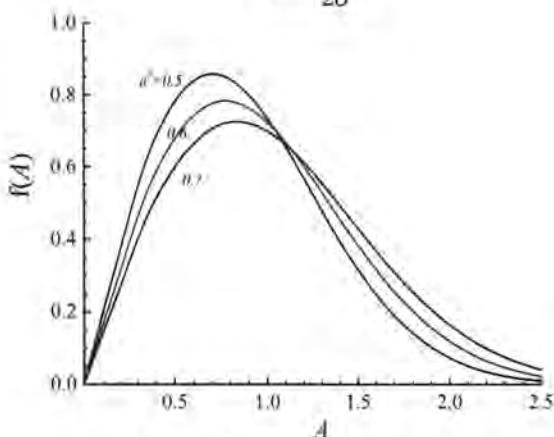


图 4.1 瑞利分布概率密度曲线

由此可得检测概率：

$$p_d = \exp\left(-\frac{A_T^2/2\sigma^2}{1+R}\right) \quad (4-5)$$

从而得到瑞利衰落信号 ROC 曲线如图 4.2 所示，图纵坐标为声呐检测阈 DT ，横坐标为虚警概率 P_{fa} 。其中，虚警指的是由单纯的噪声起伏引起的声呐系统的错误目标报告。概率密度函数的某个物理观测量在给定范围内的积分与积分变量无关，对于高斯噪声，相干处理后的概率密度函数如式 (4-2)。由噪声引起的阈值超越概率如式 (4-6)：

$$p_{fa} = \exp(-A_T^2/2\sigma^2) \quad (4-6)$$

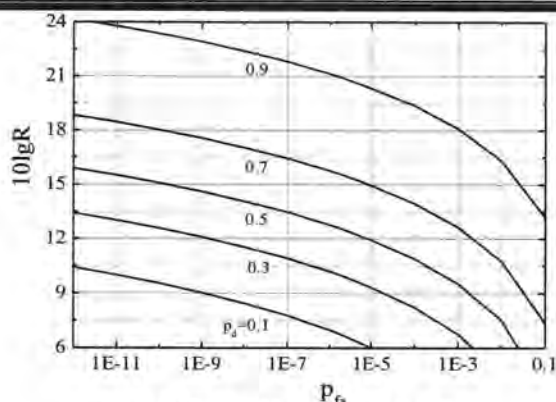


图 4.2 接收机特性曲线 (ROC)

4.2.2 声呐信号处理

被动声呐设备拾取压力扰动经信号处理方法来提高信噪比, 信号处理方法包括时域和空域滤波。时域滤波通过降低噪声级获得信噪比增益, 因此重点讨论空域滤波, 通过波束形成技术, 滤除部分角度范围内的噪声。

波束形成是声呐阵列信号处理的主要内容, 包括多元基阵各阵元输出信号的加权、延时以及求和处理, 将阵元拾取信号累加, 从而形成空间指向性。声呐阵列响应指接收机输出端信噪比, 由水听器处的声信号经时间与空间滤波获取。通过滤波处理得到信噪比增益。对于均匀片状偶极子噪声源, 水平线列阵噪声增益:

$$G_N = \frac{\int Q_N^N B(\Omega) d\Omega}{Q^N} \quad (4-7)$$

其中:

$$B(\Omega) = \frac{\sin^2 u}{u^2}$$

$$u(\theta, \varphi) = \frac{\pi L}{\lambda} (\cos \theta \sin \varphi - \sin \psi)$$

假定 Q_N^N 与 $\sin \theta$ 成比例, 那么:

$$G_N = \frac{\int d\theta \int d\varphi \left(\frac{\sin^2 u}{u^2} \right) \sin \theta \cos \theta}{\int d\theta \int d\varphi \sin \theta \cos \theta} = \frac{N}{\pi} = \frac{\int \Delta \varphi(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\pi} \quad (4-8)$$

取 $\Delta \varphi/2$ 的近似解:

$$\frac{\Delta \varphi}{2} \approx \arcsin \frac{\frac{\pi}{kL} + \sin \psi}{\cos \theta} + \arcsin \frac{\frac{\pi}{kL} - \sin \psi}{\cos \theta} \approx \frac{2\pi}{kL} (\cos^2 \theta - \sin^2 \psi)^{-1/2} \quad (4-9)$$

由此可得:

$$N \approx \frac{2\pi}{kL} \int_0^{\arccos(\sin\psi)} (\cos^2\theta - \sin^2\psi)^{-1/2} \sin\theta \cos\theta d\theta \quad (4-10)$$

对于端射情况:

$$\frac{\Delta\varphi}{2} \approx \sqrt{\max(0, \frac{2\pi/kL - \sin^2\theta}{\cos^2\theta})} \quad (4-11)$$

从而得到:

$$G_N = \frac{2}{\pi} \int_0^{\arcsin\sqrt{2\pi/kL}} \sqrt{2\pi/kL - \sin^2\theta} \sin\theta d\theta \quad (4-12)$$

4.2.3 水下噪声组成与参数化模型

声呐设备采集的压力起伏可以看作以下两种声场的线型叠加:

- a. 由目标声源引起的压力起伏;
- b. 其他因素引起的压力起伏。

在声呐性能分析中, 水下噪声源将作为一项重要参量。以上对于信号与噪声的划分方法说明对于声呐性能建模需要考虑多种潜在噪声源, 包括海面风噪声、行船噪声、雨雪噪声、以及声呐平台自噪声、非声噪声等。其中, 风噪声与行船噪声分别是中、低频段水下噪声的主要成分。

(一) 风噪声参数化模型

声呐性能建模将重点考虑风噪声与行船噪声。通常认为破碎波或类似海面活动所引起的气泡脉动是风噪声形成的物理机理。由于气泡多分布与仅海面, 因此, 风噪声激励源等效于无限薄层内的均布偶极子源。定义参数 K :

$$K = \frac{3\rho c}{2\pi} W_A \quad (4-13)$$

那么, 风噪声谱密度:

$$10\lg Q_f = 10\lg(\pi K) \quad (4-14)$$

在数千赫兹频段上, 风噪声随频率的增加单调下降, APL-UW^[71]提出适合 10-100kHz 频段范围的参数化模型, 并得到广泛认可。对于低频段, 由于测量过程中, 1kHz 以下频段风噪声易被航船噪声掩蔽, 并且声辐射特性不可避免受到声传播损失影响, 常常导致频段风噪声建模复杂化。通过近似关系式把声源级和声压级联系起来, 可用于 1-50kHz 风噪声建模。

$$K_{Ma} = \frac{(53.91\hat{v} - 104.5)^2}{\pi} \left(\frac{8}{F}\right)^{1.57} \quad (4-15)$$

以下偶极子声源因子综合公式可以实现低频、高频风噪声声源谱模型之间的平滑过渡。

$$K = \frac{10^{4.12} \hat{v}^{2.24}}{(1.5 + F^{1.59}) 10^{0.16}} \quad (4-16)$$

式中

$$\delta(\Delta T) = \begin{cases} 0 & (\Delta T < 1) \\ 0.26(\Delta T)^2 & (\Delta T \geq 1) \end{cases}$$

ΔT 为界面声介质温差。

(二) 行船噪声参数化模型

通常把行船噪声看作片状或线状连续声源。单艘船只可以用近海面的单极子声源表征。航运噪声谱密度:

$$SL_A = 10 \lg N_A + SL_f^{mp} \quad (4-17)$$

N_A 为船只密度, SL_f^{mp} 为单极子声源谱级:

$$SL_f^{mp} = 10 \lg \left(\frac{\rho c}{4\pi} W_f \right) \quad (4-18)$$

可以通过以下参数化模型估算:

$$SL_f^{mp} = 230 - 35.94 \lg \hat{f} + 9.17 \lg [1 + (\hat{f}/340)^2] \quad (4-19)$$

对于低频单极子声源, 辐射声场将与海面反射波干涉, 叠加场与偶极子辐射源声场等价。声源因子以下式表示:

$$K = 4k^2 d^2 N_A 10^{SL_f^{mp}/10} \quad (4-20)$$

主要航线舰船密度估计值由文献[71]与文献[72]给出。

4.2.4 舰船水下线谱声探测算例

考虑深水域水下目标, 位于海面下 50m 深度, 均匀地辐射功率 0.2mW 的 500Hz 窄带信号。水平导向线阵列布置于水下 50m 的正横波束方向。海面风速 3m/s。声呐滤波器分辨率为 0.25Hz, 假设 256Hz 接收频段内共形成 1024×32 个波束。虚警率为 1 次/时。分析结果如表 4.2。

表 4.2 计算参数表

名称	符号	参考单位	数值解 参考值	/dB
声源级	SL	$2.44 \times 10^{13} \text{ pa}$	$\mu \text{ pa}$	134.0
噪声谱级	NL	$9.26 \times 10^5 \text{ pa}$	$\mu \text{ pa}$	59.7
带宽	BW	0.25Hz	/	-6
阵增益	AG	35.4	/	15.5
检测阈	DT ₅₀	23.8	/	13.8
优质因子 FOM				82.0

考虑直达声、海面反射等传播途径，传播损失计算结果如下：

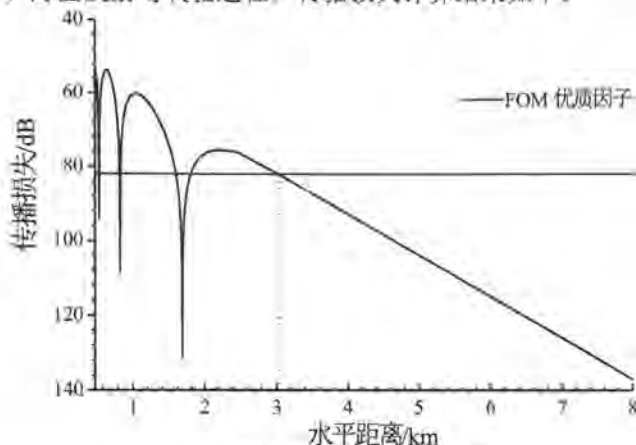


图 4.3 传播损失曲线

声呐优质因子 FOM 是表征声呐探测性能的参数，物理意义是指定检测概率下的最高单程传播损失。图中传播损失曲线与优质因子 FOM 交点对应 50%探测概率，探测距离约为 3km。

4.3 舰船水下噪声探测效能分析与应用

4.3.1 舰船线谱噪声探测效能计算

舰船与水下航行器辐射噪声的峰值线谱是结构声振特性的研究重点，将极大影响接收设备的探测性能，是安全态势分析需要考虑的主要因素。如何针对舰船与水下航行器声辐射峰值线谱，制定科学合理的声学优化方案，是保障与提高舰船与水下航行器安全性与生命力的关键，作为舰船减振降噪设计的重要研究内容。本节以水下航行器作为研究对象，基于浅水域目标声探测模型，结合水下航行器辐射噪声仿真分析结果，进行实船线谱噪声探测效能分析，给出线谱噪声的探测距离分布规律。

对于浅海声场环境，声波和强变异性海底边界之间的交互作用，导致原本高强度的声反射、声散射计算进一步复杂化。为模拟海底地形起伏引起的声传播差异，构建海底地形模型如图，模型包括岛弧、海脊、海底平原等典型海底特征结构。基于水声传播理论进行海洋声场传播损失计算，环境参数包括：声源深度 50m，水平范围 10km，最大水深 200m，海况 2 级；冬季水声速度剖面；海底沉积物黏土，厚度 200m。



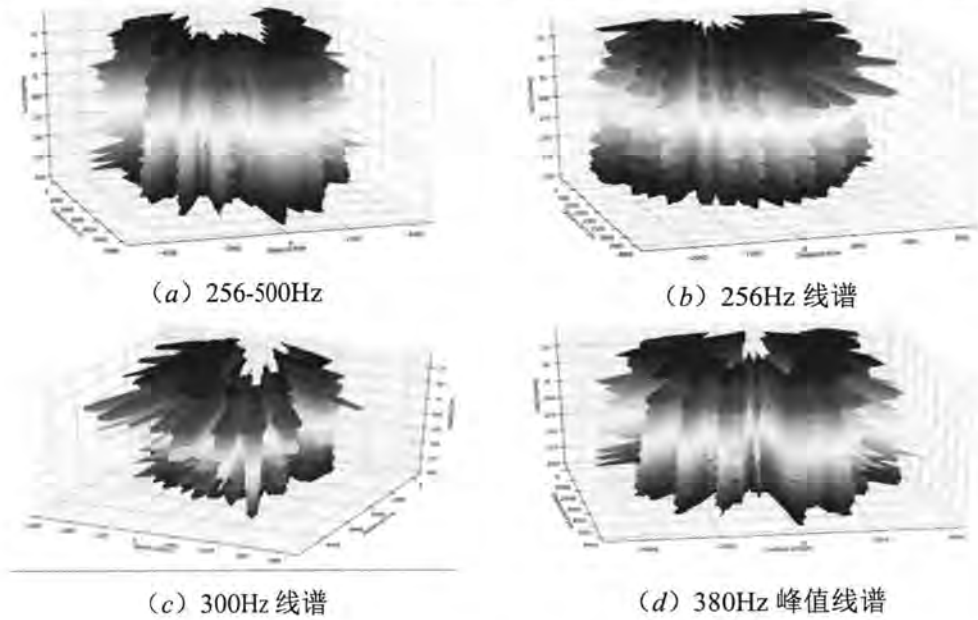
图 4.4 浅海地貌模型

考虑位于海面下 50m 的浅水域水下目标，声探测分析频段为 256Hz-500Hz，将水下航行器近似为点声源，声源级如 2.4.2 节。接收机为长 45m 的水平线列阵，假设位于正横波束方向。声呐滤波器分辨率为 0.25Hz，虚警率为 1 次/时。接收频段内共形成 1024×32 个波束。背景噪声包含风噪声与行船噪声。依据窄带相干处理的被动声呐方程，以目标初始位置沿垂向在海面的投影为坐标原点，坐标系如图 4.4 (a)，Y 轴正方向为航向。对应检测阈 $DT_{50}=13.8\text{dB}$ ， $0<\theta<\pi$ 范围内的目标探测距离分布图如下。

256Hz-500Hz 曲面参照各频点曲面的外层包络面绘制。

表 4.3 水下航行器结构 256-500Hz 频段声辐射源级（右舷 1km 考核点）

频率/Hz	270	280	290	300	310	320	330	340
声源级/dB	124.6	122.5	120.0	118.8	122.6	121.6	124.5	128.6
频率/Hz	350	360	370	380	390	400	410	420
声源级/dB	116.9	125.0	138.6	139.8	135.1	133.5	130.2	129.3
频率/Hz	430	440	450	460	470	480	490	500
声源级/dB	131.3	126.8	128.8	129.0	133.7	124.1	115.5	124.0



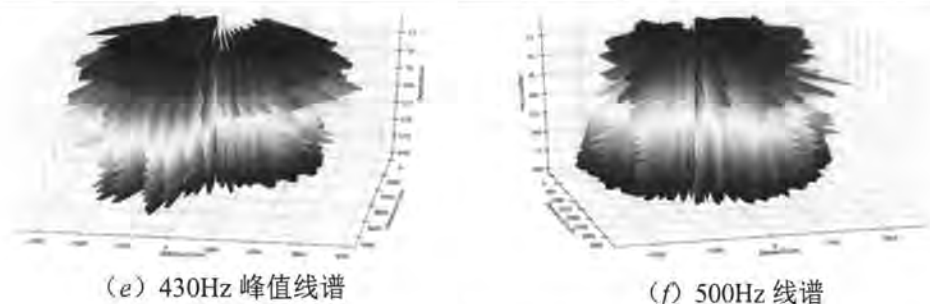


图 4.5 对应 DT_{50} 检测阈的等探测概率曲面

因周向的目标声源级差异，探测距离随着方向角 θ 波动较大。以上算例探测距离的主要影响因素包括：

(1) 海水声吸收效应。海水的黏性以及硼酸、硫酸盐的化学弛豫效应导致声传播过程中，一部分声能转化成热能，引起声衰减。算例分析频率对应多种声吸收系数，从而导致传播损失差异。算例分析频段的声衰减主要由化学弛豫效应引起，盐度与静压是主要影响因素。

(2) 目标声辐射源级。380Hz 与 430Hz 为水下辐射噪声峰值线谱，探测距离提升明显，并对 256-500Hz 的频段探测性能造成影响。

对应 DT_{50} 检测阈，水深 30m 与 50m 的 XOY 平面探测距离-方向角曲线如下：

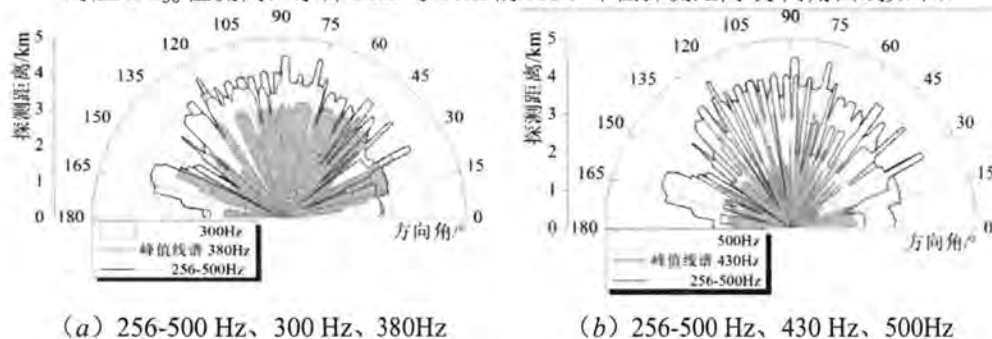


图 4.6 DT_{50} 检测阈的探测距离曲线（深度 30m）

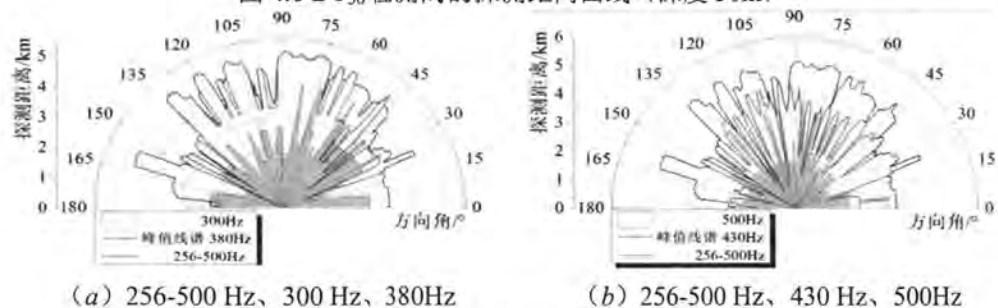


图 4.7 DT_{50} 检测阈的 XOY 平面探测距离曲线（深度 50m）

如上图所示,对应多数的方向角,256-500Hz频段与380Hz峰值线谱的探测距离曲线重合,少数方向角的频段探测距离参照430Hz峰值线谱取值。其他多数频点难以引起频段探测效能差异。

对应 DT_{50} 检测阈, YOZ 平面探测距离-深度曲线如下:

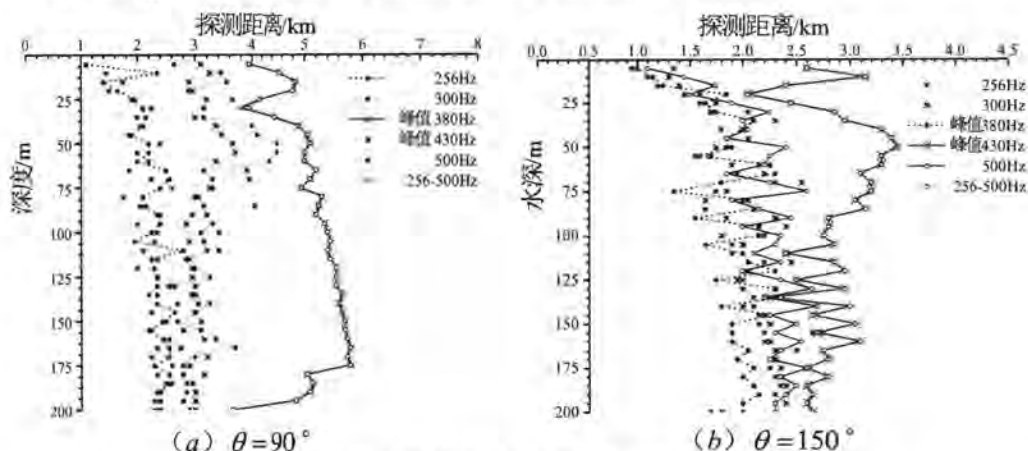


图 4.8 DT_{50} 检测阈的 YOZ 平面探测距离曲线

如上图所示,当方向角 $\theta=90^\circ$ 时,频段探测距离-深度曲线与 380Hz 峰值线谱对应曲线重合。当方向角 $\theta=150^\circ$ 时,频段探测距离-深度曲线与 430Hz 峰值线谱对应曲线重合。对于指定方向角,实船线谱噪声探测距离由特定峰值频点界定。由此可知,舰船峰值线谱对于接收机探测性能影响显著,针对峰值线谱的减振降噪设计,是优化舰船声学性能的关键。本节以水下航行器作为研究对象,进行探测效能分析,探究水下线谱声探测特性规律。后文另开展多种深度的水下目标探测性能分析,借以反映舰船与水下航行器的声探测规律。

4.3.2 低噪声使用策略

基于前文探测效能分析方法,规划舰船航行路线,控制舰船探测概率。低噪声使用策略以控制舰船探测概率为目标,为舰船航行路线规划提供参考。对于任意指定远场接收机,其探测概率是目标位置的连续函数 $p_d = f(x, y, z)$, 定义目标位置点 p , 自 p 点沿任意方向引射线 l , 那么概率函数 $p_d = f(x, y, z)$ 沿 l 的方向导数:

$$\frac{\partial f}{\partial l} \Big|_p = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_p \cdot \cos \alpha + \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_p \cdot \cos \beta + \frac{\partial f}{\partial z} \Big|_p \cdot \cos \gamma \quad (4-21)$$

其物理意义为 $p_d = f(x, y, z)$ 沿 l 的变化率。 l 与梯度方向一致时,方向导数达到最大,梯度方向以向量表示:

$$\mathbf{grad} f(x, y, z) = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{k} \quad (4-22)$$

计算过程中, p 与相邻节点之间的概率变化率相对容易获取, 近似代替 p 的偏导数。

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x, y, z) - f'(x', y, z)}{x - x'} \quad (4-23a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{f(x, y, z) - f'(x, y', z)}{y - y'} \quad (4-23b)$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{f(x, y, z) - f'(x, y, z')}{z - z'} \quad (4-23c)$$

对于柱坐标系:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial r} \cdot \cos \alpha + \frac{\partial f}{\partial r} \cdot \frac{\cos \beta}{r} \quad (4-24a)$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial f}{\partial r} \cdot \cos \beta + \frac{\partial f}{\partial r} \cdot \frac{\cos \alpha}{r} \quad (4-24b)$$

(一) 梯度求解

对于 4.2 节所述浅水域目标声探测模型, 假定 $\theta = 90^\circ$ 方向 (正前方) 或 $\theta = 150^\circ$ 方向 (左舷 60°) 布置有接收机设备, 深度 50m, 与目标距离为 5km。初始位置 P 概率函数 $p_d = f(x, y, z)$ 的方向导数如下图。

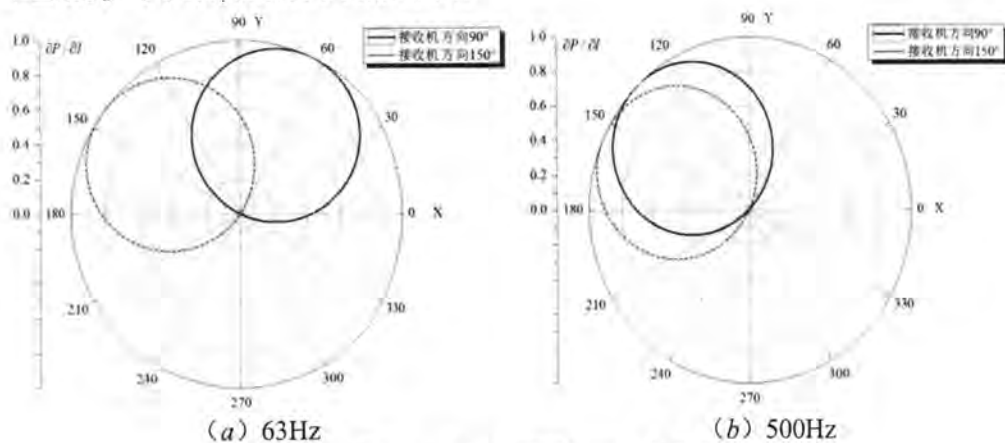


图 4.9 XOY 平面归一方向导数

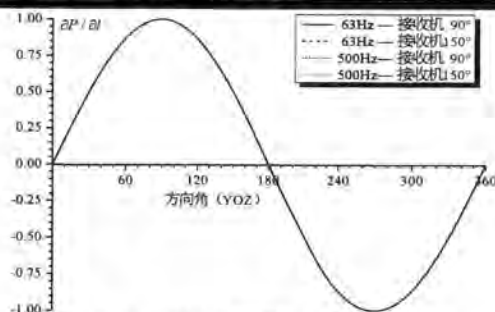


图 4.10 YOZ 平面归一方向导数

图中方向导数达到最大值的方向即为相对目标位置的梯度方向，沿梯度方向移动探测概率增加速度最快，同理沿负梯度方向移动，探测概率减小的速度最快。例如对于 63Hz 线谱（图中紫色实线），当接收机位于 $\theta = 90^\circ$ 方向（正前方）时，若 $\theta = 60^\circ$ ，则对于特定的目标初始位置 P ，探测概率函数 XOY 平面的方向导数取到最大值， $\theta = 60^\circ$ 为梯度方向。如果目标沿 $\theta = 60^\circ$ 移动单位距离，探测概率函数增量最大，为实现控制探测概率，目标应沿负梯度方向，即 $\theta = 240^\circ$ 方向移动。

由于 $\frac{\partial f}{\partial x} \ll \frac{\partial f}{\partial z}$ ， $\frac{\partial f}{\partial y} \ll \frac{\partial f}{\partial z}$ ，即目标声源在深度方向上移动单位距离引起的探测概率变化量明显大于水平方向。因此，在图 5.7 中，梯度方向均十分接近 z 轴正向，目标应降低潜深，以减小探测概率。

对于浅水域目标声探测模型，假定接收设备位于 $\theta = 90^\circ$ 方向（正前方），深度 50m，与目标距离 5km，初始位置 P 概率函数 $p_d = f(x, y, z)$ 的方向导数如下图。

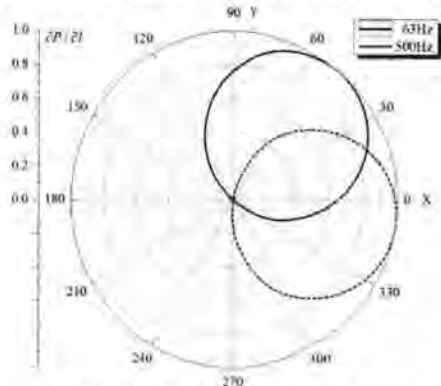


图 4.11 XOY 平面归一方向导数

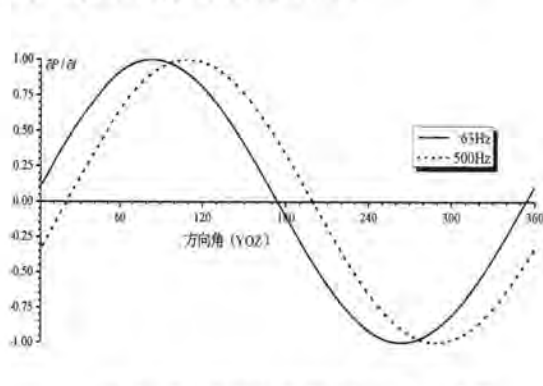


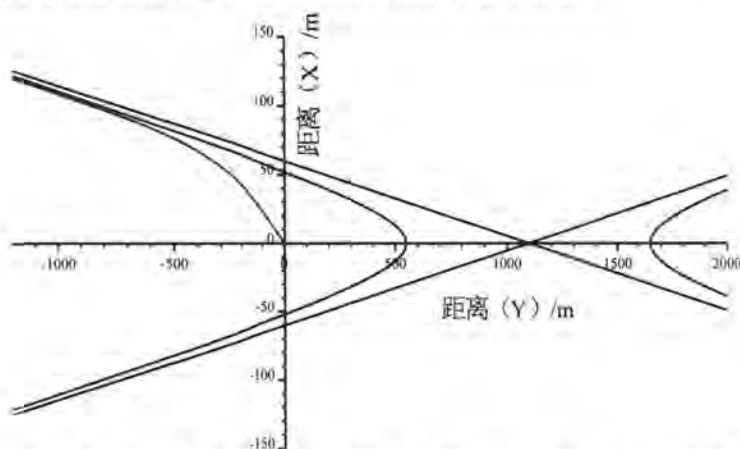
图 4.12 YOZ 平面归一方向导数

如上图所示，当接收设备位于 $\theta = 90^\circ$ 方向（正前方）时，63Hz 线谱对应 XOY 平面的负梯度方向为 225° ，500Hz 线谱对应的负梯度方向为 180° 。目标声源在深度方向上移动单位距离引起的探测概率变化量相较水平方向仍明显偏大，负梯度近似指向 z

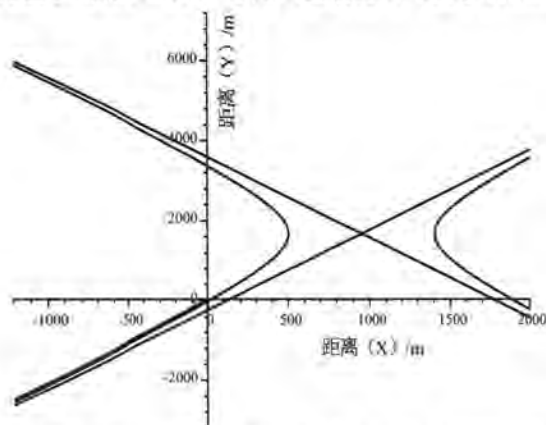
轴负向。

(二) 航线轨迹规划

以上为指定接收设备概率函数梯度方向的确认方法。如果海域内存在位置信息确定的接收设备，那么可以认为负梯度方向的位移微元构成的航线轨迹是最优航行路径。计算过程中，首先定义求解函数，依据梯度原理获得概率函数负梯度，从而确定位移微元以及目标位置 p' ，递归求解函数，并绘制目标轨迹。过程仅考虑目标的刚体运动。对于 4.3.1 节浅水域目标声探测模型，目标轨迹在 XOY 平面投影如下：



(a) 接收机位于目标 $\theta = 90^\circ$ 方向（正前方），距离 1.1km，深度 50m



(b) 接收机位于目标 $\theta = 120^\circ$ 方向，距离 1.9km，深度 50m

图 4.13 目标轨迹在 XOY 平面投影

目标轨迹在 XOY 平面投影可近似以单枝双曲线表示。渐进线以接收机位置为交点，斜率与目标初始位置，接收机相对目标方向角、距离，目标声辐射特性等因素相关。当接收机位于目标 $\theta = 90^\circ$ 方向（正前方）、距离 1.1km，初始位置目标位移微元 X 方向分量偏大，经多次递归运算，轨迹与双曲线接近。在 YOZ 平面，由于目标声源在深度

方向上移动单位距离引起的探测概率变化量相较水平方向仍明显偏大，目标将以大角度上浮至浅水区域。

4.4 典型海域舰船声探测特性规律研究

4.4.1 浅海环境舰船声探测效能研究

舰船与水下航行器声探测影响因素众多，目标声辐射特性、海洋环境声传播特性、接收机性能参数等都将造成探测概率差异。海洋环境声信道传播损失是其中不稳定因素，与水声传播途径、边界相互作用、海水理化性质密切相关，是声探测所需考虑的主要参数。浅海近岸区繁忙的水面交通以及恶劣的传播条件扩大了声探测模型的复杂程度。因此，本节将从海洋环境方面探究浅海声场环境的声探测特性规律。

(一) 海况

海况等级对于声探测的影响主要体现在以下方面：首先，海况等级决定了海面粗糙程度以及气泡量，造成近表面的声反射与声散射差异；另一方面，风噪声是中、高频段背景噪声的主要成分，是关系到声呐探测性能的重要参数。以海况等级为输入变量，探究水下目标声探测特性规律。选取浅水域水下目标声探测模型，考虑浅水域各向同性水下目标，接收设备为水平线列阵，布置于目标正横波束方向，背景噪声包含风噪声与行船噪声。忽略海底地形起伏。对应 1-3 级海况进行水下目标声探测计算。探测概率 0.8、0.6、0.4、0.2 等概率线图如下。图中横坐标为水平距离（m），纵坐标为深度（m）。

表 4.4 海况等级的线谱声探测模型输入参数表

项目	参数	项目	参数
声源深度	50m	接收设备	水平线列阵 45m
水平范围	10km	虚警率	1 /时
深度	200m	波束	1024×32
声源级	141dB（各向同性）	滤波器分辨率	0.25Hz
海况等级	1/2/3	噪声	风噪声、行船噪声
海底沉积物	黏土/200m	声速	冬季声速剖面

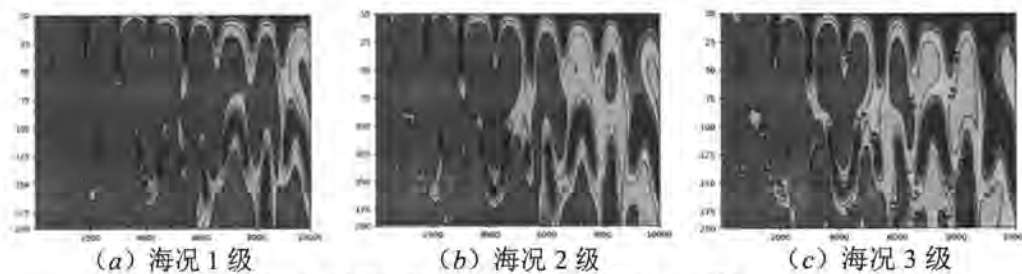


图4.14 海况1-3级的探测概率分布图（20Hz）

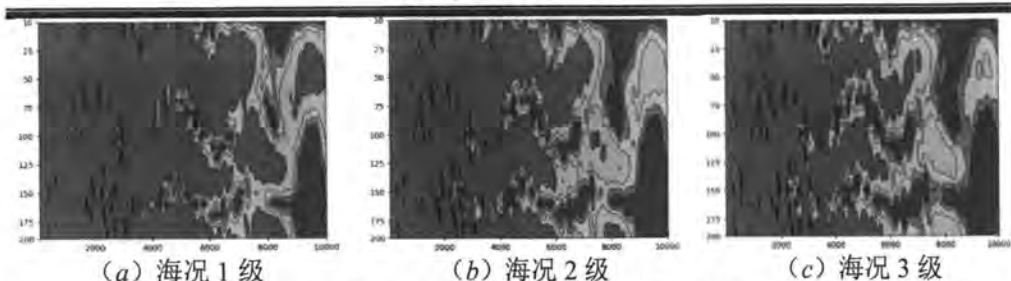


图4.15 海况1-3级的探测概率分布图 (63Hz)

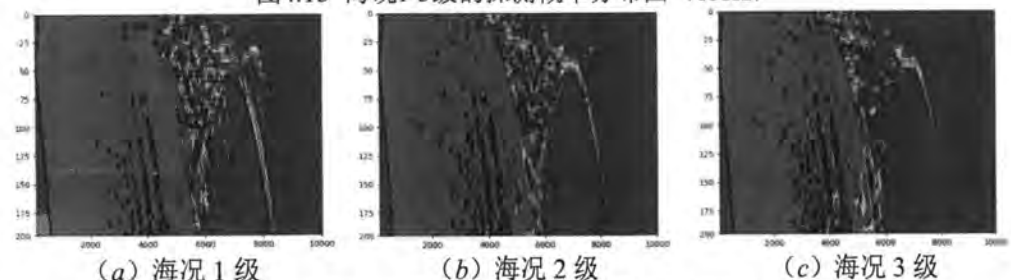


图4.16 海况1-3级的探测概率分布图 (500Hz) /dB

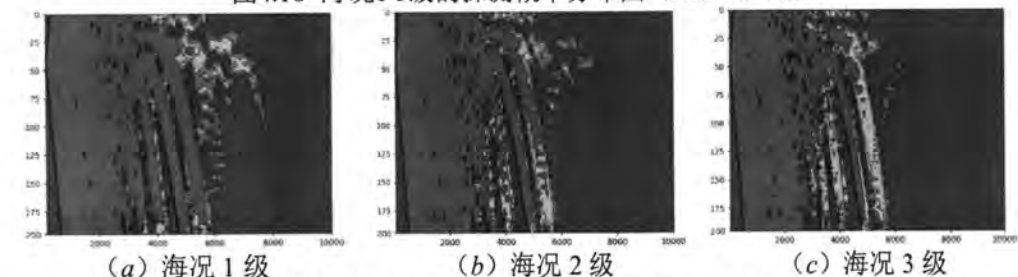


图4.17 海况1-3级的探测概率分布图 (1kHz)

海况等级的变化与背景噪声级相关，一般认为当高海况等级导致高强度的海面声辐射，声呐接收机探测性能相应降低。通过上图可知，海况等级 1-3 的变化过程中，指定线谱的同一深度、水平距离的探测概率逐渐减小。

水深 50m 时，检测阈 DT_{50} 的检测信号余量-水平距离曲线如下：

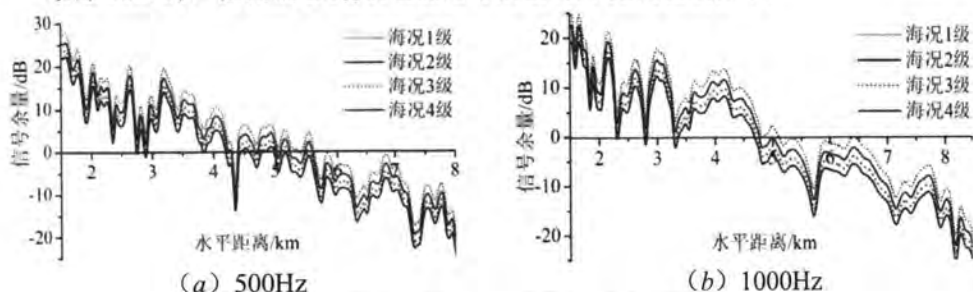


图 4.18 检测阈 DT_{50} 的信号余量曲线

图中曲线与水平坐标轴交点的信号余量为零，探测概率为 50%，探测距离为零点横坐标的最大值。由上图可知，海况 1-4 级的信号余量曲线变化趋势一致，探测距离存在

微小差异。同一水平距离，1 级海况的信号余量最高，探测距离最大，其他海况的信号余量与探测距离依次递减。500Hz 线谱探测距离约为 5.8km，1kHz 线谱探测距离约为 5.0km。

(二) 水声传播速度

以季节垂向声速剖面为输入变量，探究水下目标声探测特性规律。选取浅水域水下目标声探测模型，考虑浅水域各向同性水下目标，接收设备为水平线列阵，布置于目标正横波束方向，背景噪声包含风噪声与行船噪声。忽略海底地形起伏。对应冬季、春季、夏季的声速剖面进行水下目标声探测计算。探测概率 0.8、0.6、0.4、0.2 等概率线图如下。图中横坐标为水平距离（m），纵坐标为深度（m）。

表 4.5 季节声速剖面的线谱声探测模型输入参数表

项目	参数	项目	参数
声源深度	50m	接收设备	水平线列阵 45m
水平范围	10km	滤波器分辨率	0.25Hz
深度	200m	波束	1024×32
声源级	141dB（各向同性）	虚警率	1 / 时
海况等级	2	噪声	风噪声、行船噪声
海底沉积物	黏土/200m	声速	冬/春/夏季声速剖面

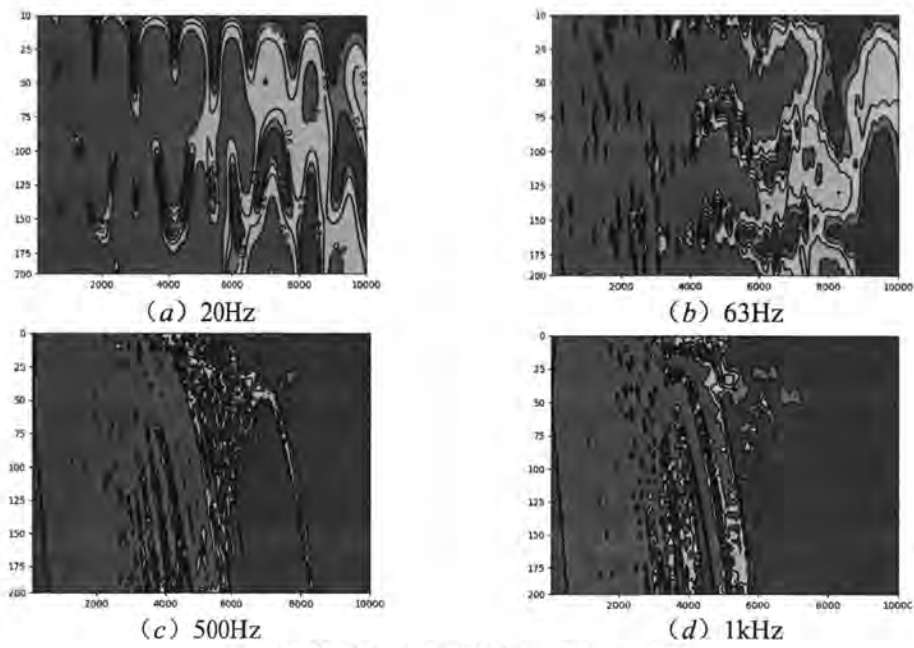


图4.19 冬季声速剖面的探测概率分布图

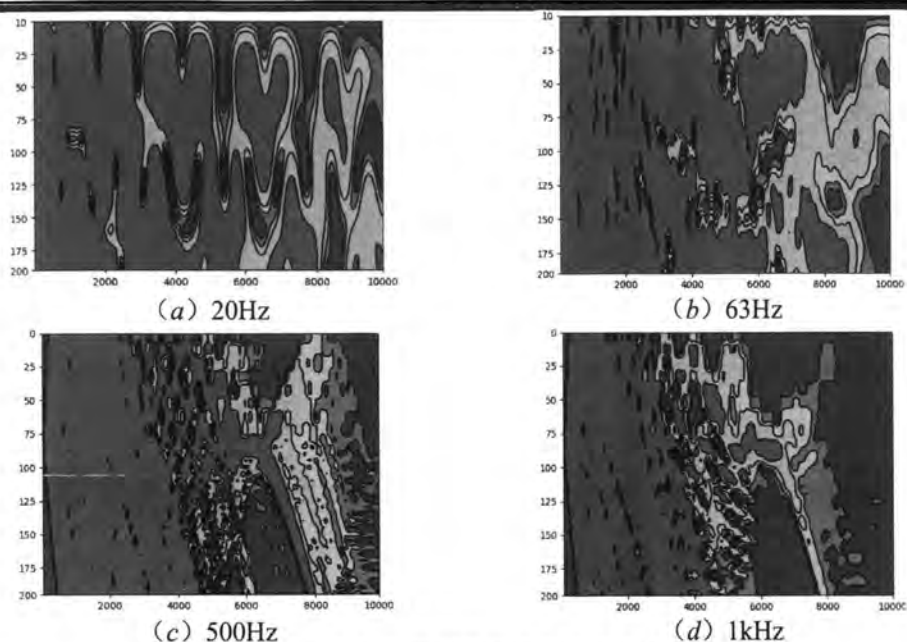


图4.20 春季声速剖面的探测概率分布图

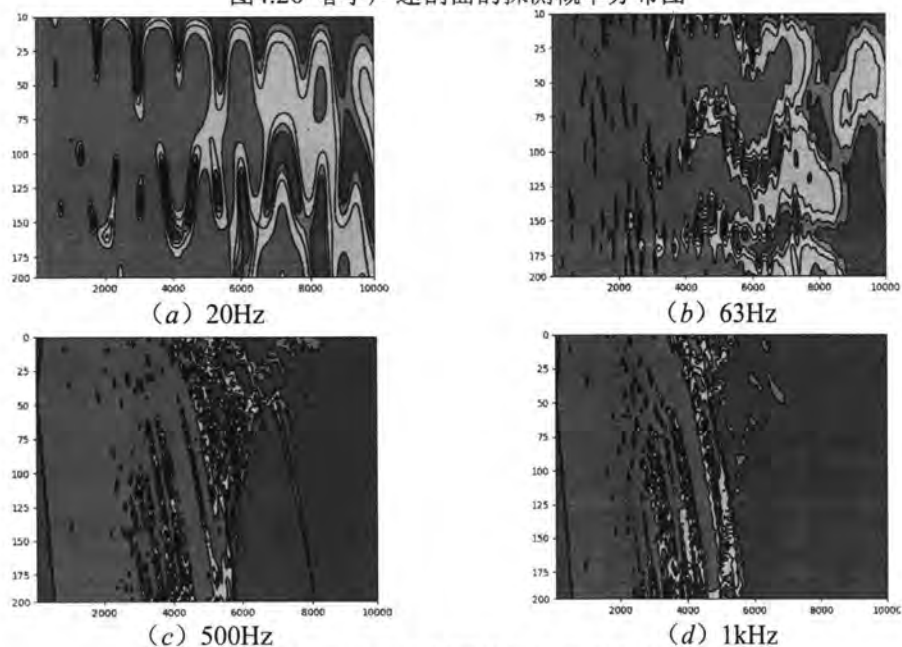


图4.21 夏季声速剖面的探测概率分布图

声探测效能受目标信号频率影响较大,对于 20Hz 线谱,在距离目标 8-10km 范围内,仍然存在部分区域保持 0.8 以上的探测概率。随着声信号频率的升高,声吸收效应引起高传播损失,指定区域探测概率呈现衰减趋势。季节通过影响声传播损失造成探测效能差异,由 4.3.2 节声传播分析可知,季节声速剖面对于浅海声传播影响有限,因而季节

引起的探测分布差异相对较小。春季 500Hz 与 1000Hz 线谱的在分析范围内呈现高探测概率，与声场低传播损失相关。

(三) 海底沉积物

以海底沉积物类型为输入变量，探究水下目标声探测特性规律。选取浅水域水下目标声探测模型，考虑浅水域各向同性水下目标，接收设备为水平线列阵，布置于目标正横波束方向，背景噪声包含风噪声与行船噪声。忽略海底地形起伏。对应包括黏土、细粒砂、砂质淤泥海底沉积物类型进行水下目标声探测计算。探测概率 0.8、0.6、0.4、0.2 等概率线图如下。图中横坐标为水平距离（m），纵坐标为深度（m）。

表 4.6 海底沉积物的线谱声探测模型输入参数表

项目	参数	项目	参数
声源深度	50m	接收设备	水平线列阵 45m
水平范围	10km	虚警率	1 /时
深度	200m	波束	1024×32
声源级	141dB（各向同性）	滤波器分辨率	0.25Hz
海况等级	2	噪声	风噪声、行船噪声
海底沉积物	黏土/细粒砂/ 砂质淤泥（200m）	声速	冬季声速剖面

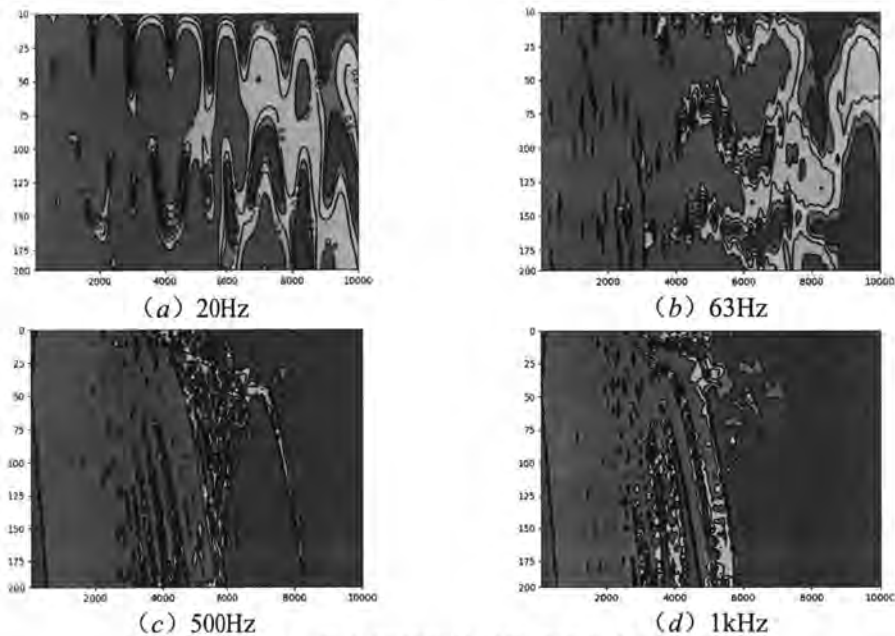


图4.22 黏土沉积物的探测概率分布图

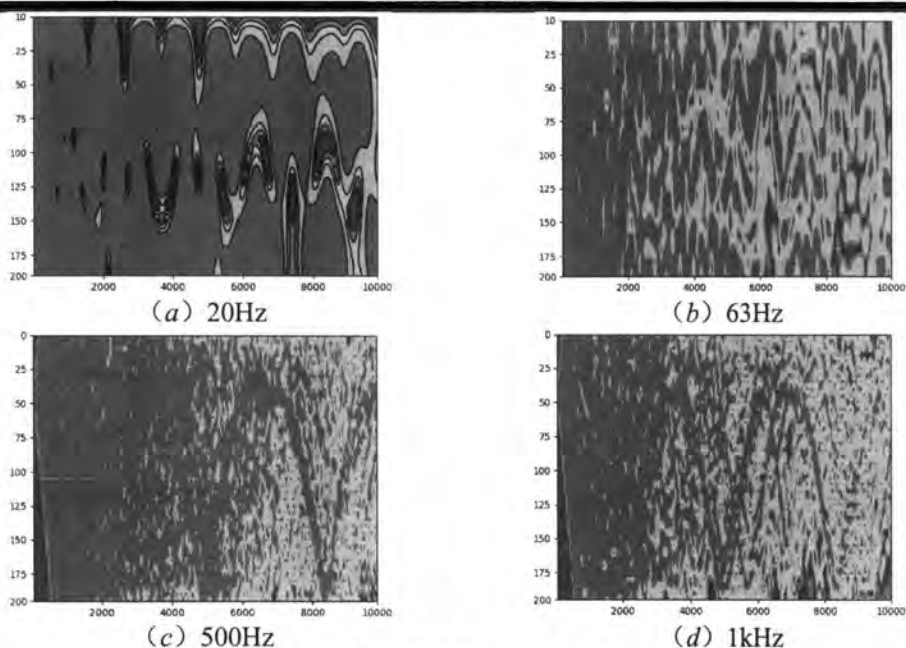


图4.23 细粒砂沉积物的探测概率分布图

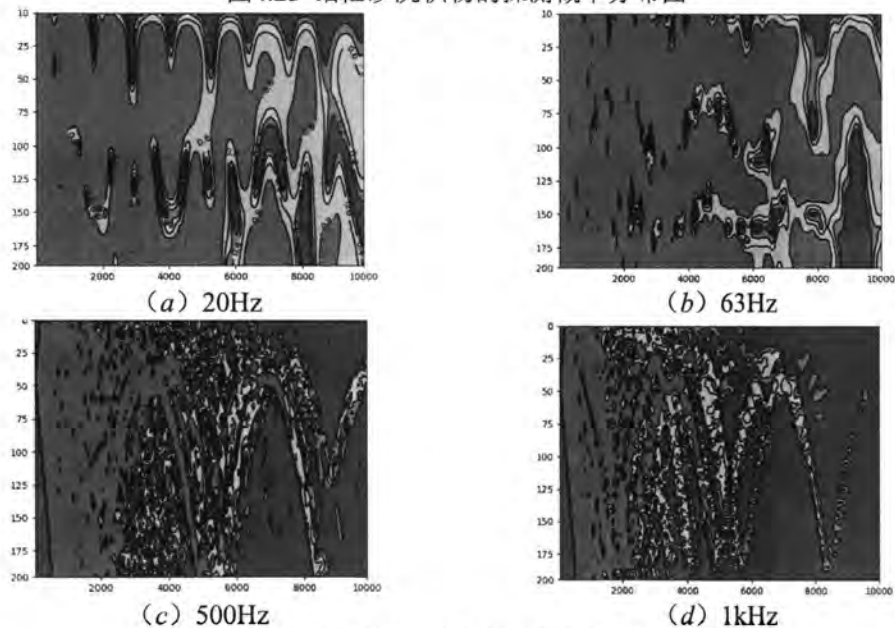


图4.24 砂质淤泥沉积物的探测概率分布图

对于浅海声场环境的有限水深范围内，声波与海底沉积层相互作用引起声传播的高衰减。因而海底沉积物的声学性质将极大地影响声呐探测性能。砂土、岩石等硬质沉积物可以在一定程度上控制反射损失，海底沉积微为细粒砂、砂质淤泥时，同一位置的探测距离相对偏高。如图 4.23 (c)、(d) 所示，当海底沉积物类型为细粒砂时，海域传播

损失整体偏小，探测概率偏高。

(四) 声源、接收机深度

以声源深度为输入变量，探究水下目标声探测特性规律。选取浅水域水下目标声探测模型，考虑浅水域各向同性水下目标，接收设备为水平线列阵，布置于目标正横波束方向，背景噪声包含风噪声与行船噪声。忽略海底地形起伏。对应 25、50、100m 声源深度，进行水下目标声探测计算。探测概率 0.8、0.6、0.4、0.2 等概率线图如下。图中横坐标为水平距离（m），纵坐标为深度（m）。

表 4.7 声源深度的线谱声探测模型输入参数表

项目	参数	项目	参数
声源深度	25/50/100m	接收设备	水平线列阵 45m
水平范围	10km	虚警率	1 /时
深度	200m	波束	1024×32
声源级	141dB（各向同性）	滤波器分辨率	0.25Hz
海况等级	2	噪声	风噪声、行船噪声
海底沉积物	黏土/200m	声速	冬季声速剖面

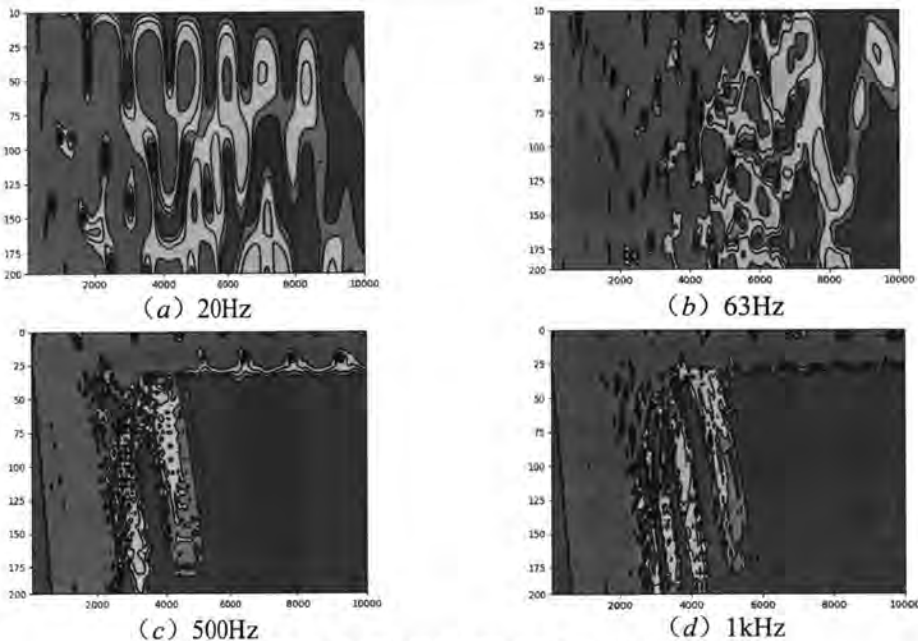


图4.25 声源深度25m的探测概率分布图

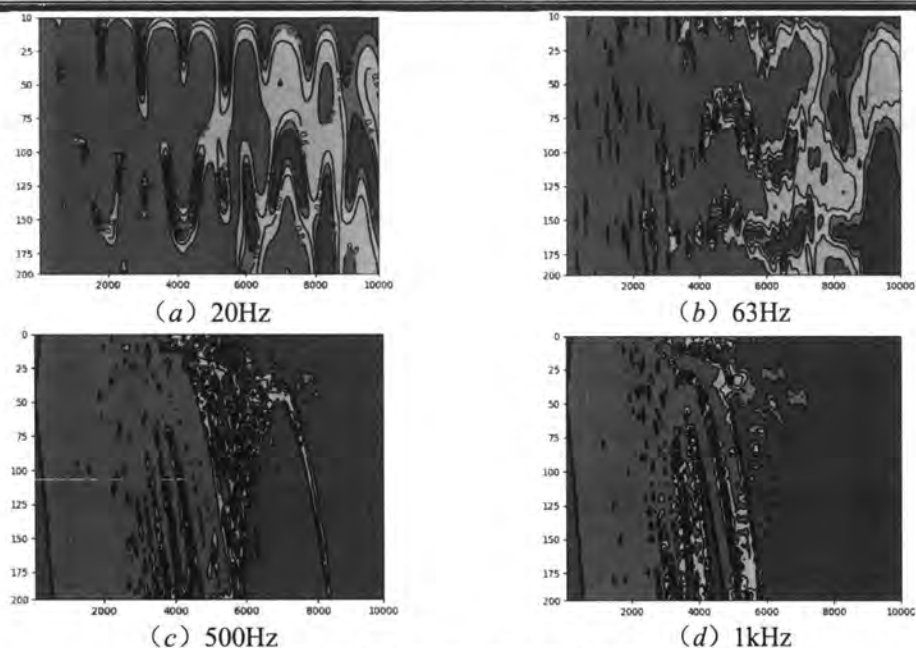


图4.26 声源深度50m的探测概率分布图

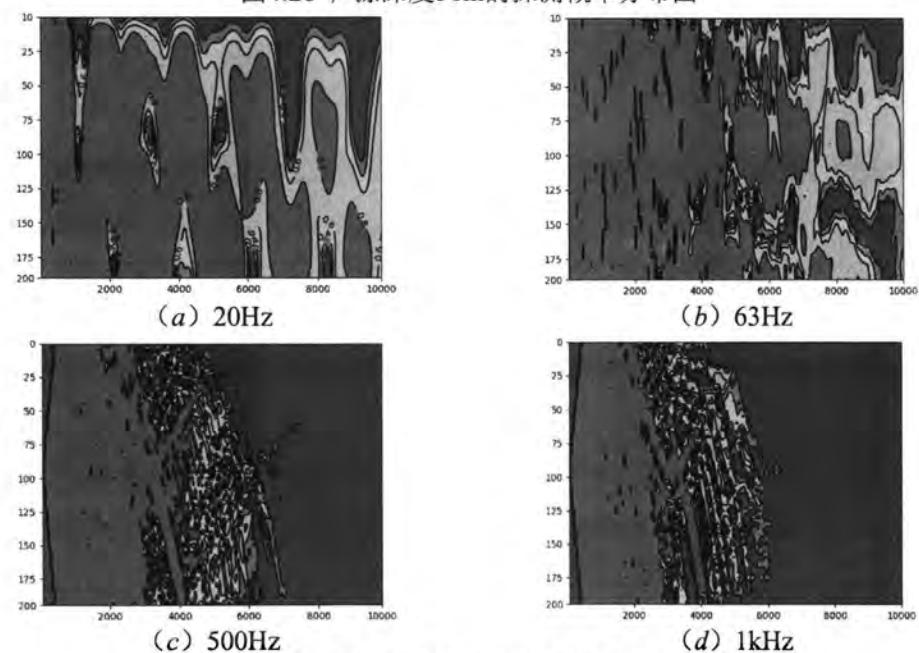


图5.27 声源深度100m的探测概率分布图

对于图示浅海声场环境,冬季声速剖面水深0-30m存在正声速梯度,海面与声层底部构成浅海波导,波导内部形成声低损耗传播路径。声源深度为25m时,500Hz与1000Hz线谱可以在波导内部实现远距离传输,波导内探测概率高于80%。声源位置会导致明显的探测概率分布差异。

当声源深度为 50m、接收机深度 30-80m 时, 检测阈 DT_{50} 的检测信号余量-水平距离曲线如下:

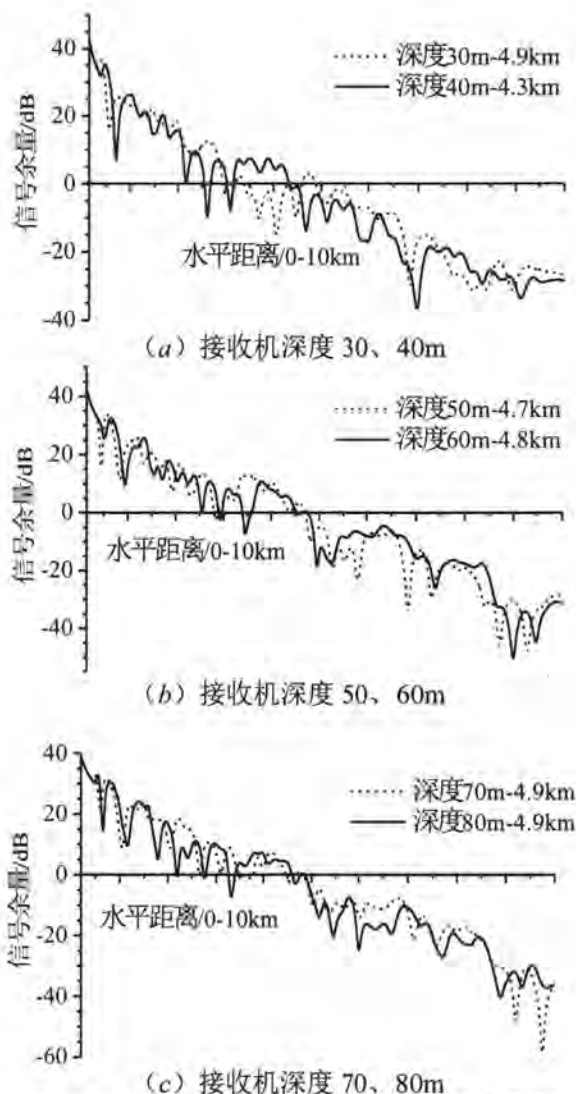


图 4.28 深度 30-80m 检测阈 DT_{50} 的信号余量曲线

对于浅海声场环境, 任何位置的声响应是直达声、海底与海面反射等传播路径的相干处理结果。从上图可知, 信号余量随着接收机深度的变化趋势一致, 量值具有一定差异。探测距离在 4.3-4.9km 范围内变化。

4.4.2 深海汇聚区舰船声探测效能研究

深海温跃层以下的声传播速度主要受海水静压影响, 呈现正声速梯度, 如果海域水

深超过临界深度，那么在声介质层折射作用下，部分声线传播过程可以避免海底与海面反射，保证焦散结构的完整性，形成声汇聚区。汇聚区内部传播损失将显著低于球面扩展损失。以深海水下目标声探测模型为例，分析声汇聚效应对声探测性能的影响规律。主要考虑海域深度、声道轴深度两方面因素造成的探测性能差异，如下图所示：

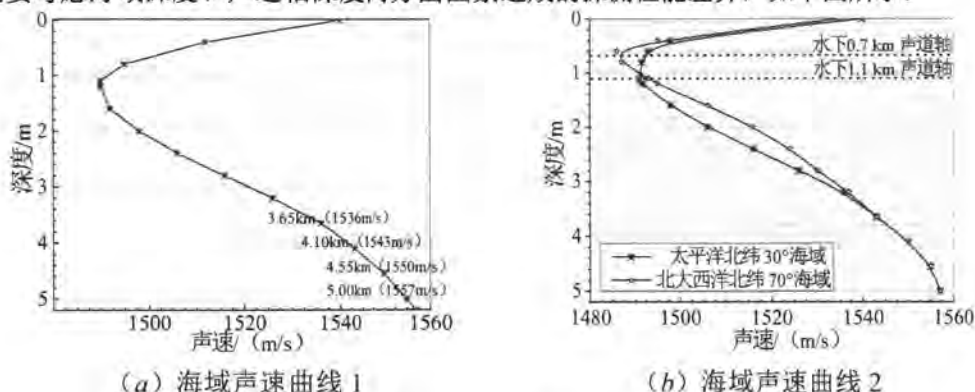


图 4.29 深海区声速-深度曲线

(一) 海域深度

深海的汇聚效应依赖于深水静压导致的声介质分层，需要特定的海域深度形成完整的焦散结构，因此，深海汇聚效应与海域深度之间存在较强关联性。通过分析海域深度 3.6、4.1、4.5、5.0km 情况下的声探测性能，探究海域深度对于深海舰船声探测效能的影响规律。模型输入参数如下表所示。

表 4.8 海域深度的汇聚区声探测模型输入参数表

项目	参数	项目	参数
声源深度	50m	接收设备	水平线列阵 45m, 水下 50m
水平范围	400km	虚警率	1 / 时
深度	3.6、4.1、4.5、5.0km	波束	1024×32
声源级	134dB (500Hz)	滤波器分辨率	0.25Hz
海况等级	2	噪声	风噪声、行船噪声

以上表数据作为水下航行器深海汇聚区声探测模型输入参数，其中，海域声速曲线如图 4.29 (a) 所示，海域深度 3.6、4.1、4.5、5.0km 情况下，声传播损失计算结果如图 4.30 所示。基于 4.2.4 节算例可知，500Hz、134dB 线谱、检测阈 DT_{50} 对应的优质因子 $FOM=82dB$ 。

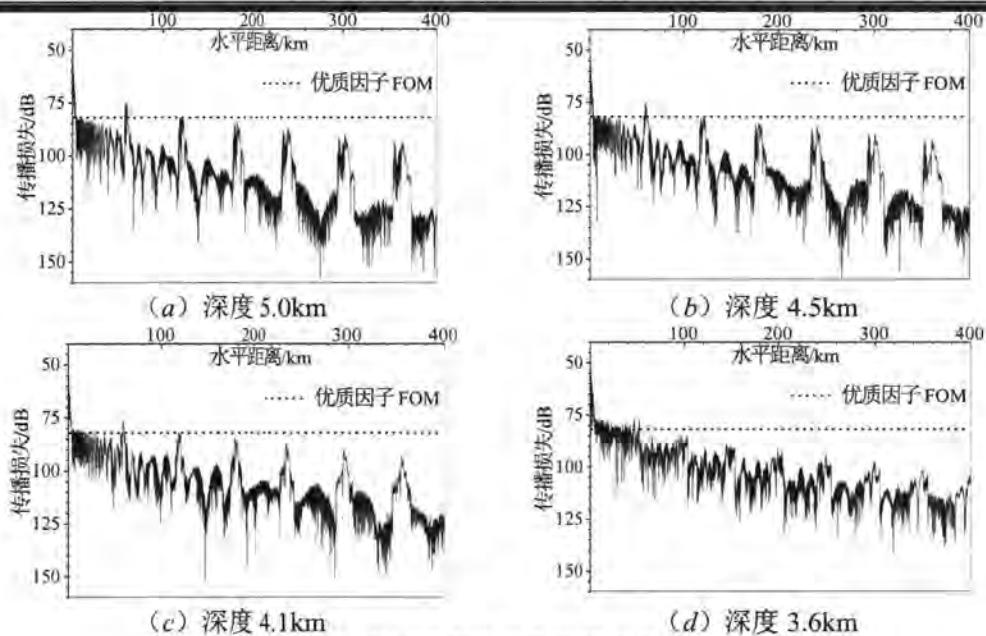


图 4.30 海域深度的深海环境传播损失曲线

海域深度 4.1-5.0km 声场模型汇聚区以 60km 水平距离间隔出现, 汇聚区内声传播损失显著偏低, 部分区域汇聚效应造成的传播损失差异高于 20dB。导致 100km 水平范围内仍然存在部分区域探测概率达到 50%。随着传播距离增加, 汇聚区逐渐变宽, 内部传播损失增大。可以认为当水平距离达到一定界限, 传播损失将随距离平滑过渡, 并由声衰减与柱面扩展损失表征。海域深度 3.6km 声场模型不存在明显的声汇聚区, 传播损失曲线平滑过渡。分析图 4.29 (a) 可知, 模型海面声速约为 1540m/s, 对应共轭深度为 4.0m, 海域深度 3.6km 小于共轭深度, 声波经海底反射并导致高衰减, 因而传播损失曲线较为平滑, 声汇聚效应不明显。

(二) 声道轴深度

高纬度海域受气候影响, 声道轴分布位置向近海面偏移, 造成声传播、声探测差异。通过以深水海域典型海区声速曲线为输入变量, 探究声道轴深度对于舰船声探测效能的影响规律。模型输入参数如下表所示。

表 4.9 声道轴深度的汇聚区声探测模型输入参数表

项目	参数	项目	参数
声源深度	50m	接收设备	水平线列阵 45m, 水下 50m
水平范围	400km	虚警率	1 / 时
深度	5.0km	波束	1024×32
声源级	134dB (500Hz)	滤波器分辨率	0.25Hz
海况等级	2	噪声	风噪声、行船噪声

以上表数据作为水下航行器深海汇聚区声探测模型输入参数,其中,海域声速曲线如图 4.29 (b) 所示,声传播损失计算结果如下图所示。基于 4.2.4 节算例可知,500Hz、134dB 线谱、检测阈 DT_{50} 对应的优质因子 $FOM=82\text{dB}$ 。

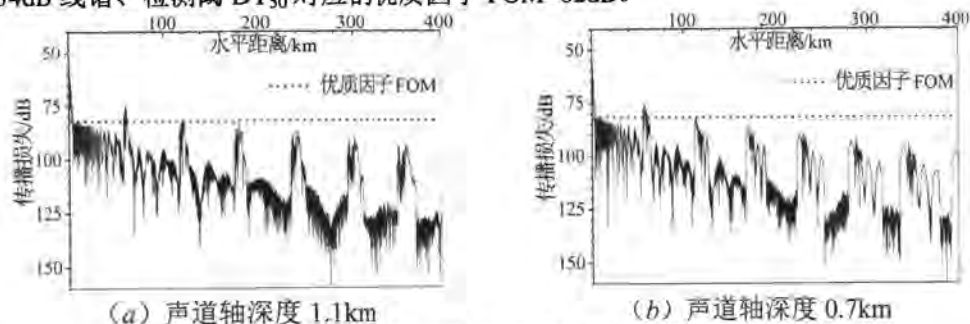


图 4.31 声道轴深度的深海环境传播损失曲线

声道轴深度为 1.1km 与 0.7km 的声场模型均存在明显的汇聚效应,汇聚区以 60km 水平距离间隔出现,汇聚区域内部声传播损失显著偏低,部分区域汇聚效应造成的传播损失差异高于 20dB。声道轴 0.7km 对应的声场模型汇聚区宽度较大,内部传播损失增大。

4.5 本章小结

针对舰船线谱声探测开展研究,以被动声呐方程作为理论基础,围绕声源级、水声传播损失、阵增益等各项量化声呐性能的主要参数,总结数值或理论算法,完成舰船线谱声探测建模。在此基础上,开展复杂海洋环境舰船安全态势分析,并进一步探究声呐探测性能影响因素。主要结论如下:

1、峰值线谱对于接收机探测性能影响显著,256-500Hz 频段内的峰值线谱探测距离在 4-6km 之间,针对中、低频线谱噪声的减振降噪设计应作为舰船声学优化的重点。

2、舰船线谱噪声探测效能与声辐射、声传播特性、接收节性能等因素相关,主要影响因素是海洋声场的传播损失差异:

(1) 如果声源深度小于声层深度,那么声信号将沿浅海波导远距离传播,波导内部声呐探测概率高于 80%。

(2) 对于浅海声场环境的有限水深范围内,声波与海底沉积层相互作用引起声传播的高衰减。因而海底沉积物的声学性质将极大地影响声呐探测性能。砂土、岩石等硬质沉积物可以在一定程度上控制反射损失。

(3) 声传播速度、海况等级对于浅海环境舰船声探测效能影响有限。海况等级反映了海面的声辐射、声散射性能。关系到背景噪声水平与声传播特性。一般认为高海况

等级将导致高强度的海面声辐射，声呐接收机探测性能相应降低。

(4) 深海声汇聚效应导致水声远距离传播，将声呐设备探测距离延伸到百公里以外范围。深海汇聚区间隔若干海里出现，随着传播距离增加，汇聚区逐渐变宽，内部传播损失增大。最终传播损失随距离平滑过渡，并由声衰减与柱面扩展损失表征。汇聚效应与海域深度、声速剖面、声道轴深度相关。文中汇聚区以 50-60km 水平距离间隔出现，50%的探测概率对应的优质因子小于第二汇聚区内部的传播损失，探测距离约为 120km。

基于以上研究，总结舰船隐蔽航行建议如下：

(1) 近海河口三角洲、浪控沉积区海底以高密度、低孔隙率的砂质沉积物为主，其物理性质导致声波可以沿海底反射路径低衰减传播，探测概率增大明显。舰船应避免于此类海区航行。

(2) 浅海波导是声远距离传播的有效路径，水下航行器应将工作深度控制在声层深度以下。

(3) 深海区声汇聚效应将声探测距离扩大到数百公里量级，因此，工作海区深度不宜超过临界深度。