

Y 935932

分类号: \_\_\_\_\_

密 级: \_\_\_\_\_

UDC: \_\_\_\_\_

编 号: \_\_\_\_\_

## 工学硕士学位论文

# 潜艇辐射噪声测量研究

硕士研究生 : 高守勇

指导教师 : 杨德森 教授

学位级别 : 工学硕士

学科、专业 : 水声工程

所在单位 : 水声工程学院

论文提交日期: 2006 年 5 月

论文答辩日期: 2006 年 6 月

学位授予单位: 哈尔滨工程大学

## 摘 要

低噪声潜艇的辐射噪声源级已接近于海洋环境噪声，在要求的测量距离，由于传播衰减，传至测量点的信号级将低于该处的环境噪声级。为解决低噪声潜艇辐射噪声测量的难题，海军试验基地建设了垂直线阵和矢量水听器两套低噪声测量系统，在这样的背景下，声场环境造成的传播损失异常和潜艇体积源效应已不能忽略。

浅海是声传播明显的受到海面 and 海底边界影响的海域。本文研究了浅海环境下的近程声传播损失异常，表明浅海近程声传播损失规律在一般情况下不符合球面波衰减规律，对低噪声潜艇的辐射噪声测量必须进行声场校正。

潜艇是复杂的体积源，本文阐述了振动声辐射问题的声学基础、潜艇三大辐射噪声源的产生机理、计算方法及潜艇辐射声源的空间分布特性。介绍了基于声压测量的垂直线阵系统和基于声压振速联合测量的矢量水听器系统及相关辅助方法。

为通过近场测量获得潜艇辐射噪声远场特性，进而归算潜艇辐射噪声的声源级，本文提出了潜艇近程分布式声源模型，计算了近场和远场的声场分布，并根据亥姆霍兹积分方程进行了近-远场变换。

**关键词：** 传播损失异常；体积源；近-远场变换

## Abstract

The sound level of low-noise submarines is close to the environmental noise of the ocean. In the desired distance of measurement, the sound level of the arrived signal will be lower than the level of the environmental noise at the measurement point because of the transmission loss. In order to solve the problem of measuring the radiated noise of low-noise submarines, the experimental base of the naval has constructed two measurement systems aiming at low noise, one is the vertical line array, the other is the sound vector sensor. According to the background here, the abnormality of the transmission loss due to the sound field environment and the solid source effect of submarines can not be ignored.

The sound transmission is obviously influenced by the surface and the bottom of the sea in the shallow water. The thesis studies the abnormality of transmission loss of the near-field in the shallow water, which does not obey the transmission loss law of spherical waves. So a sound field adjustment when measuring the radiated noise of the low-noise submarines is necessary.

The submarine is a complex solid source. The thesis discusses the basis of the sound radiation due to vibration and the mechanics of the three main sources of the submarine. Then calculation methods are given and the spatial distribution characteristics of the radiated sources of submarines are acquired. The two systems of vertical line array based on sound pressure measurement and sound vector sensor based on united measurement of sound pressure and particle velocity are introduced and so do the relevant assistant methods.

In order to get the far-field characteristics of radiated noise of submarines by near-field measurement and then calculate the source level, a distributed sound source model in the near-field of submarines is put forward and the distribution of the near-field and the far-field are calculated. A transformation from near-field to far-field is carried through according to the Helmholtz integration equation. The two systems of low-noise measurement should have comparable equivalence. The

radiated pressure field and the particle velocity field of distributed sound source in shallow water environment is discussed in this paper.

**Key words:** the abnormality of transmission loss; solid source; transformation from near-field to far-field

# 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）：高宇勇

日 期：2006 年 6 月 10 日

## 第 1 章 绪论

### 1.1 引言

舰船辐射噪声的测量、研究和应用最初是伴随着水中兵器的发展而提出的。1940 年 10 月,德国布设了利用舰船辐射噪声而诱发的音响水雷,而后又出现了利用舰船辐射噪声作为信号的被动音响自导鱼雷。二次大战期间英美等国对各种类型数百艘舰船的辐射噪声进行了上千次测量,获得了许多重要的资料,对当时的海战起到了重要的作用。

近年来,随着科学技术的不断发展,降低噪声、提高声隐身性能已演变成潜艇设计中的一场革命,各大军事强国也不断推出“安静型潜艇”、“无噪声航速”、“隐身潜艇”等新概念。美国继成功地研制出隐形飞机后,大力进行隐形舰艇研究。70年代研制了G.P.Lipscomp 安静型潜艇,90年代建造的SSN-21(海狼级)核潜艇噪声已低于海洋环境噪声。俄罗斯也设计出一批低噪声潜艇,如被西方称为安静型潜艇的Kilo“基洛”级潜艇(可淹没于一级海洋环境噪声)。另据法国、瑞典等国资料透露,他们的常规动力潜艇噪声在低速时,其辐射噪声已低于1~2 级海洋环境噪声<sup>[1][2][3]</sup>。我国新型安静型潜艇的减振降噪技术也获得了快速的发展,辐射噪声强度不断下降,如何评估它们的辐射噪声水平已经成为一个非常现实的问题。

世界各海军强国在大力发展低噪声潜艇的同时,也很重视潜艇辐射噪声测量技术的发展,不惜花费巨资开展测量系统集成技术研究和建造海上潜艇噪声试验场及可移动式测试平台。如美国建立大西洋水下试验与鉴定中心,法国与意大利海军设立了基于近场全息法的大型垂直线阵测试系统,俄罗斯在远东和北海建有固定的大型综合试验场,研制了组合式矢量水听器测试系统。

对于低噪声潜艇来说,在国军标规定的目标辐射噪声测量距离处,目标信号已经淹没在海洋环境噪声中,常规的单点式声压测量方法已无法测到有效数据。为解决低噪声潜艇的辐射噪声测量问题,海军试验基地 XXX 专项中建设了两套低噪声测量系统,分别是中科院声学所承研的“低噪声测量系统(垂直线阵)”和哈尔滨工程大学承研的“低噪声测量系统(矢量水听器)”。

垂直线阵系统采用宽带恒定束宽波束形成的方法实现潜艇辐射噪声的宽

频带测量。系统用形成的窄指向性波束照射目标艇,需要在 50m~100m 的近场测量。

矢量水听器系统采用共点同步独立测量质点声压和质点振速,通过计算得到有功声强,利用各向同性噪声相互抵消来提高信噪比,可在 800m~1000m 的远场测量潜艇辐射噪声。

在潜艇辐射噪声测量中,用声源级表示辐射声能量的大小。声源级定义为水听器声轴方向上距源的等效声学中心 1m 处的声强与参考声强之比的分贝数。

对声源级的测量,通常是在距等效声中心一定距离上进行测量,然后根据测量结果进行距离修正得到 1m 处的声源级。常规的距离修正多采用球面扩展衰减 (20lgR)。对于低噪声潜艇的辐射噪声测量,由于信噪比很低,必须考虑可能带来归算误差的声传播衰减异常因素。为了解决目标辐射噪声测量中的声场校准问题,试验基地已经完成了“测量校准声源系统”的研制工作。

所谓等效声学中心是声源发出声波的位置。对点源,等效中心和点源位置重合,如小尺度的鱼雷,在辐射噪声测量的距离上可认为是理想的点源。潜艇是体积很大的复杂声源,在与源的尺度相近的距离上测量时(如单点声压测量和垂直阵测量在 50m~100m),其等效声中心如何确定?近似的方法是:“舰船在匀速直线航行过程中,水听器测得的噪声输出最大时,从水听器向舰船首尾线作垂线,其垂足被认为是等效声中心”<sup>[4]</sup>。考虑近场垂直线阵系统测量和远场矢量水听器系统测量的对比,较为精确的办法是把潜艇简化为多点源模型,考虑各点源的贡献比,计算远场意义下的等效声中心。

## 1.2 海洋声场环境及声传播损失

海洋是一种极其复杂的声学介质。海洋介质最具特征性的现象是其非均匀性,这种非均匀性可分为有规的和随机的两大类,两者都会强烈地影响海洋中的声场<sup>[5]</sup>。

声速随深度的有规变化会形成水下声道从而导致远程声传播,例如深海声道及会聚区和声影区现象。

随机的非均匀性会引起声的散射并造成远距离声传播起伏,随机海面的

声散射造成近距离声传播起伏, 海洋内波对低频、远程传播的声信号起伏有重要的影响<sup>[6][7]</sup>。

### 1.2.1 海洋声场环境

#### 1. 声速剖面

海水中的声传播速度是一个基本的海洋学变量, 它对声传播有重要影响, 决定了海洋中的声传播规律。声速随着温度、盐度和压力的增加而增加, 其中以温度的影响最显著。经验公式是多次海上测量的实验总结, 下面给出比较简单的乌德公式:

$$c = 1450 + 4.21T - 0.037T^2 + 1.14(S - 35) + 0.175P \quad (1-1)$$

上式中,  $c(m/s)$  为声速,  $T(^{\circ}C)$  是温度,  $S(\text{‰})$  是盐度,  $P(atm)$  是静压力。

影响声速变化的三个要素温度、盐度和静压力 (或深度) 都接近于水平分层变化, 声速也近似为水平分层变化。因此, 在海洋中, 声速随位置的变化可写成  $c(x, y, z) = c(z)$ ,  $z$  为垂直坐标,  $x$ 、 $y$  为水平坐标。

就宏观而言, 可以粗略地把海中声速的垂直分布  $c(z)$  分成四类<sup>[7]</sup>: 深海声道声速分布、表面声道声速分布、反声道声速分布和浅海声速分布。图 1.1 为我国南海某浅海海域不同月份的声速剖面图。

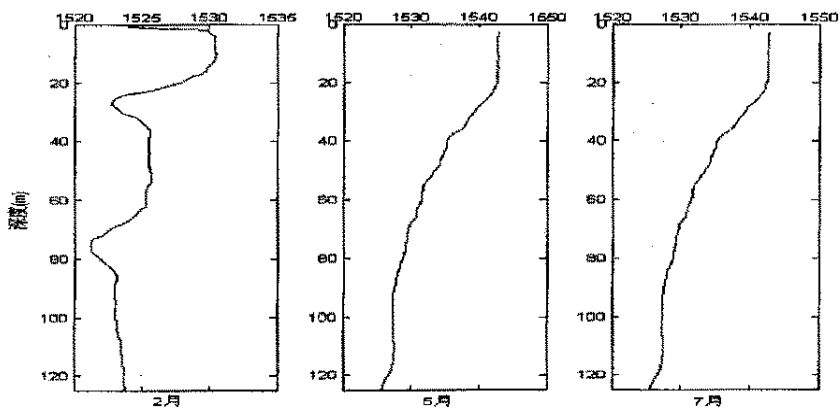


图 1.1 南海某海域不同月份的声速剖面



## 2. 海水吸收

吸收指的是在海洋中传播的一部分声能由于介质粘滞、热传导以及其它弛豫过程而被损耗的效应。它们可以很方便地按频率分成四个不同的区间，各区间的控制机理可以很容易地区别开来。这些频率区间依照频率的升序排列是：(1) 大尺度的散射和泄露；(2) 硼酸弛豫；(3) 硫酸镁弛豫；(4) 粘滞性。在实际应用中，海水的吸收可通过吸收系数 $\alpha$ 和距离 $r$ 来求出。吸收系数的单位通常为 $dB/km$ ，Thorp 给出了适用于 50kHz 以下频率的吸收系数经验公式：

$$\alpha = \frac{0.102 f^2}{1 + f^2} + \frac{40.7 f^2}{4100 + f^2} \quad (1-2)$$

式中， $f$  为频率，单位是 kHz。

## 3. 海面

海面主要通过以下途径对水声传播产生影响：

### (1) 前向散射与反射损失

海面既是声波的反射体，又是声波的散射体。当海洋中的平面声波入射到十分平滑的海面时，海面通常可以用一个压力释放面来模拟。在这种边界条件下，空气和海水交界处的声压接近为零，海水中反射波的振幅几乎等于入射波的振幅，但是有 $180^\circ$ 的相移，这种条件也叫狄利克雷边界条件。

当海面因为风的原因而变得起伏时，声波入射到粗糙海面上，就会产生散射波。散射声场中含有相干分量和非相干分量。相干分量是沿镜反射方向传播的波，其振幅与入射波振幅之比定义为相干（平均）反射系数。海面的粗糙度可以用瑞利参数来表示<sup>[7]</sup>：

$$R = 2k \cdot a \cdot \sin \theta \quad (1-3)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$ 是波数， $a$ 是海面波浪的均方根振幅（ $2a$ 是波峰到波谷的波高）， $\theta$ 是相对水平面的掠射角。相干参数是声强的相干分量与总声强之比，通过实验发现相干参数与瑞利参数之间大致符合函数 $\exp(-R^2)$ 的关系。

### (2) 镜像干涉与频率效应

当海面平滑时，在直达声波和海面反射声波之间会产生干涉。通过海面

反射的声波可以被看作是与声源关于海面对称的一个虚源发射出来的，虚源信号与入射信号的振幅几乎相等，但是相位不同。这时的声场可以被分为三部分：近场，靠近声源，但是离虚源很远，因此反射信号很弱，不能产生明显的干涉；干涉场，此处接收信号时，随距离的增大存在很强的峰值和零值；远场，这里声源和虚源的相位差别更大，声强随距离四次方的倒数下降。这种现象也叫洛埃镜效应，它随着海面粗糙度的增大而减弱。

当海面粗糙时，海面的垂直移动将对入射波的振幅进行调制，并将自己的谱作为上边带和下边带迭加到入射声波的频谱上。此外，当存在表面流时，散射声将发生水平移动，这会产生多普勒频移和多普勒模糊谱。

### (3) 混浊与气泡

海面附近存在气泡层，由于它能使声速发生变化，同时能产生共振和散射，因此使得声的反射和散射问题更加复杂。悬浮的固体微粒和微小气泡一起改变了复声波数，影响了介质的声学属性。通过热、粘性吸收和散射效应，微小气泡增加了声的衰减。此外，微气泡也使介质的可压缩性变得很复杂，从而导致了扩散。

### 4. 海底

海底是十分复杂的边界，对于在海洋信道中的声信号传播有着重要的影响。在本质上海底有许多类似于海面的特性，也是一个声波的反射和散射边界。但是由于结构的多样性和多层性，其影响要比海面更复杂。具体说来，海底通常是分层的，其密度和声速可能随深度渐变，也可能随深度突变，甚至在很短的范围内就发生突变。此外，由于海底成分从岩石一直到很软的淤泥，因此海底就其声学性质来说变化更大。声波能够通过沉积层传播，既能被其底层反射回水中，也能被沉积层中大的声速梯度折射回水中。海底还有一个与海面明显不同的属性，就是它的特性可以认为不随时间变化。

## 1.2.2 潜艇辐射噪声测量的工作特点

潜艇辐射噪声测量的工作有以下特点：

- 浅海：50m~300m；
- 近距离：50m~1000m；
- 短时间：十几个小时以内。

由于距离较近, 可以不考虑海洋环境大尺度的空间变异性, 把测量环境视为水平均匀介质。由于测量时间较短, 可以不考虑涡旋、内波等造成的海洋环境时间变异性。

对于潜艇辐射噪声测量的实际工作来说, 总是可以找到环境条件比较均匀, 远离航道、渔场和海岸的海区。如俄罗斯有专门的辐射噪声测量场, 我国南海某些海域也有合适的测量区, 具有大范围内平缓的泥沙质海底, 可以避免海底地形、海底底介质声学特性的变化的影响。

因此, 本文仅研究有规的、非时间变的浅海声场环境对潜艇辐射噪声测量的影响。

### 1.2.3 浅海声信号的多途传播

在海洋中, 在一定条件下, 海水介质具有垂直分层的特性, 也就是说声速(折射率)并不是随着水平方向的距离变化, 而仅仅是海水深度的函数。因此, 由于声线起始掠射角度的不同, 在不同深度的海水中, 声线轨迹应该是具有不同的曲率的圆弧的组合。因此, 对于我们所研究的浅海目标来说, 我们接收到的是声源从不同的角度发射的声波经过海洋传播后的接收信号, 由于信号经过不同的路径传播, 并且经由海底和海面的反射, 就形成了声传播的多途效应, 如图 1.2 所示。

从声源处发射的波形  $s(t)$ , 经过多途传播后, 到达接收端的接收波形  $y(t)$  可表示为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot s(t - \tau_i) \quad (1-4)$$

式中:  $N$  —— 声波传播途径的总数

$A_i$  —— 声波沿第  $i$  条传播途径到达接收点的信号幅度值

$\tau_i$  —— 声波沿第  $i$  条传播途径到达接收点的信号传播时延

声传播的多途效应的相干干涉导致声传播损失异常。

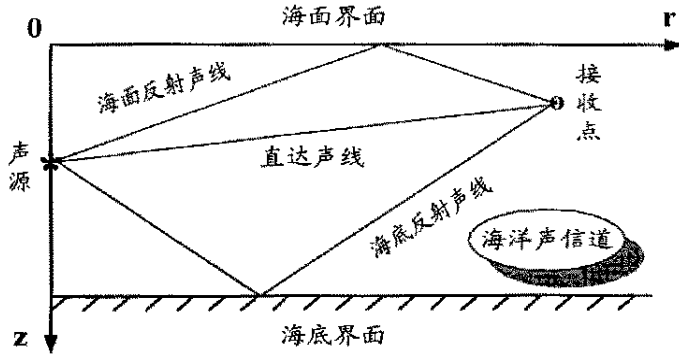


图 1.2 浅海信号多途传播的示意图

#### 1.2.4 声传播损失

声波在介质中的传播损失，主要包括扩展损失、衰减损失和界面引起的损失。扩展损失是指波阵面在传播过程中不断扩大，使得单位时间内单位面积上能量的减小，即平均功率密度减小，也就是声强减小。对于无限均匀介质空间，扩展损失是球面扩展损失；对于非均匀有限空间，则是非球面扩展损失，损失大小与介质中的声速分布和界面条件有关。

传播损失 TL 定量地描述了声波传播一定距离后声强的衰减变化，它通常定义为：

$$TL = 10 \lg \frac{I_1}{I_r} \quad (1-5)$$

式中， $I_1$  是离声源中心 1m 处的声强度； $I_r$  是距声源 r 处的声强度。因为声强  $I_1$  和  $I_r$  在定义中含有时间平均的意义，对于信号持续时间足够长，则其平均时间的取值中包括了传播中的其他影响在内。能流密度表示垂直于声速传播方向上，通过单位面积所流过的能量，单位是  $J/cm^2$ ，所以瞬时信号时的损失为：

$$TL = 10 \lg \frac{E_1}{E_2} \quad (1-6)$$

式中： $E_1$ —声源出单位距离参考点上的能流密度

$E_2$ —观察点离声源参考点位  $r$  处的能流密度

为了粗略地估计传播损失, Marsh 和 Schlkin 提供了一组便于使用的半经验公式。这些半经验公式是根据大约十万个(在 0.1 到 10 千赫频率范围内)测量值总结得到的。定义  $H = [(D+L)/8]^{1/2}$ , 则在与参数  $H$  有关的不同距离上, 应用三个不同的方程式。上面  $D$  是海水深度(英尺),  $L$  是层的厚度(英尺),  $H$  用千码计算。在近距离范围内, 即距离  $r$  小于  $H$ , 传播损失为(分贝)

$$TL = 20 \log r + ar + 60 - k_L \quad (1-7)$$

式中  $r$  以千码计,  $a$  是海水吸收系数, 以分贝/千码计。  $K_L$  是“近场异常衰减”, 它依赖于海况和海底类型。在中等距离范围内, 即  $H \leq r \leq 8H$ , 传播损失为:

$$TL = 15 \log r + ar + a_r \left( \frac{r}{H} - 1 \right) + 5 \log H + 60 - k_L \quad (1-8)$$

式中  $r$  和  $H$  以千码计,  $a_r$  是浅海衰减系数。对于远距离区域, 即  $r > 8H$

$$TL = 10 \log r + ar + a_r \left( \frac{r}{H} - 1 \right) + 10 \log H + 64.5 - k_L \quad (1-9)$$

这些方程式显示了近场是球面扩展, 中间场区是二分之三次方衰减, 而远场区是柱面扩展。

### 1.3 潜艇辐射噪声近场修正

#### 1.3.1 近场修正方法

潜艇是体积很大的复杂声源, 在与源的尺度相近的近场测量时, 其等效声学中心是难以确定的。文献[6]指出: “声学中心是船内或船外的一个点, 当在远处进行测量时, 噪声好像是从这一个点辐射出来的一样。”说明声学中心甚至会移到船外, 直接用目标几何中心作为声学中心误差是非常大的。

随着潜艇工况的变化, 潜艇各辐射噪声源在总辐射声级中所占的比重也不一样。可以直观地认为, 低速航行结构噪声占主要成分时, 声学中心在艇的中后部; 高速航行螺旋桨噪声占主要成分时, 声学中心应靠近艇的艉部。

对辐射声源的测量，一般要求获得目标远场辐射特性，再进行距离归算。为保证把低噪声潜艇辐射噪声测量的误差控制在一定范围内，保证多次测量的可重复性，近、远场同时测量的可比性，有必要对近场测量结果进行修正。

近场修正的方法是通过近场测量的结果，计算目标的远场特性及远场意义下的等效声学中心，然后以远场的结果进行距离归算。

近场修正的途径有两条：

1、通过分析潜艇辐射噪声源特性，将目标简化为分布式等效声源→根据近场测量结果，通过源识别的方法，确定各源的权重→根据等效声源计算远场特性。

2、根据近场全息测量结果，通过声场空间变换（全息变换）直接获得远场特性。

图 1.3 表示近场修正的途径。

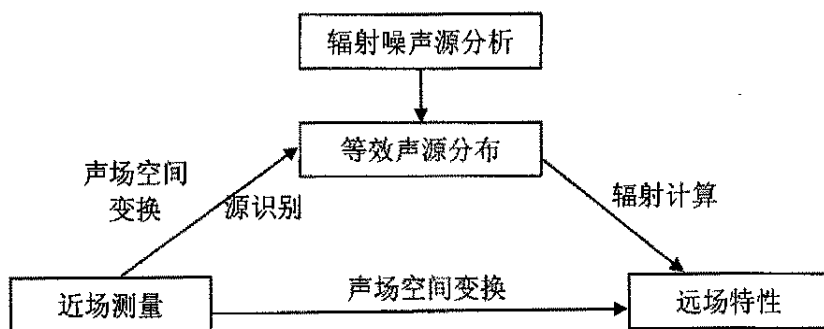


图 1.3 近场修正的途径

### 1.3.2 潜艇噪声源识别方法

结构动力学中有三类基本问题，即：在已知激励、响应、系统动态特性三者之二的情况下求取第三个量。在求得系统特性的基础上，一种情况是根据实测输出信号来反推噪声源，即通过对输出信号作分解求逆以识别主要噪声源，这涉及到结构动力学中的第二类逆问题；另一种情况是采用正问题研究思路，即由测得的输入信号结合已得到的系统特性(如传递函数)来求系统的输出，从而定量得到各源贡献比<sup>[8]</sup>。

潜艇源识别的传统方法，在时域处理范畴主要有分部运转、时历分析、

辐射效率测定和相关分析等方法；频域主要是谱分析方法、相干分析方法和偏相干分析方法<sup>[11][9]</sup>。较新的方法主要包括基于多入/输出模型的噪声源分析方法、自适应噪声抵消法、声全息成像技术以及功率流分析方法等<sup>[10]</sup>。

## 2. 基于实艇辐射噪声测量的源识别方法<sup>[11]</sup>

### (1) 通过特性方法

在进行潜艇辐射噪声测量时，潜艇由远及近接近测量水听器并由近及远通过测量水听器，当潜艇到测量水听器的距离大于潜艇的尺度时，辐射声场表现为点源辐射的声场。当潜艇到测量水听器的距离小于潜艇的尺度时，辐射声场则表现为潜艇各部位辐射噪声共同形成的复合声场。如果测量水听器与艇体上某一参考点的位置关系一定，那么在空间(或时间)上，测量数据与艇体部位就形成了一一对应关系，当测量条件(深度、艇速、频率)一定时，被测量舰船辐射噪声的声压级或功率谱与相对测量水听器位置的对应关系称之为舰船辐射噪声的通过特性，它反映了潜艇通过测量水听器侧方时，声压级沿艇体方向的分布。通过对纵向通过特性的分析，可得到不同频带噪声级与艇体部位的对应关系。为确定潜艇辐射噪声源提供了一种方法。

潜艇辐射噪声通过特性包括总声级通过特性、三分之一倍频程频带级通过特性和线谱通过特性。总声级通过特性曲线的最大值对应于舰船总声级最大的位置，而三分之一倍频程频带声压级和线谱通过特性则反映不同频率的噪声级和被测潜艇不同位置的关系。

当被测潜艇以较低的速度和较近的距离通过测量水听器时获得的通过特性数据，对查找噪声源更有价值，其位置对应关系更清晰。

### (2) 应用合成孔径技术进行实艇噪声源定位

合成孔径技术的原理是利用小孔径基阵的移动来获得移动方向方位上大的合成孔径，从而得到方位方向的高分辨力<sup>[12]</sup>。合成孔径技术在雷达目标跟踪、探测、识别上的应用已经很成熟，由于声传播的海洋介质复杂性以及声传播速度相比电磁波要低得多等因素影响，其在声纳中的应用正处于研制过程中<sup>[13]</sup>。关于合成孔径技术在噪声源识别中的应用，文献[14]中指出，合成孔径技术还用于高分辨力的波束成形，这在安静型潜艇辐射噪声的测量中可以获得应用，利用这种技术可以把潜艇作为一个体积元，确定辐射噪声中最有贡献分量的部位。

针对单水听器测量的合成孔径技术原理是：一个拖动的或者在水中运动的水听器代替了通常的多元水听器线阵<sup>[15]</sup>。为了应用此原理，可以将实艇辐射噪声测量的模型—单水听器静止，潜艇以一定速度、距水听器一定距离、沿直线匀速通过测量水听器转化为潜艇静止，单水听器以一定速度、距潜艇一定距离、沿直线匀速通过潜艇的模型。这样，运用合成孔径原理，运动的单水听器就等效成了一个水听器基阵。通过这个水听器基阵来定位噪声源。

经过实测数据验证，此种方法比利用线谱的通过特性查找噪声源的方法更加有效、精确。

### （3）近场聚焦波束形成技术。

在海洋环境下测量潜艇的辐射噪声通常采用单元水听器漂浮或浮标水听器进行。随着潜艇噪声越来越接近或掩盖在海洋背景噪声中，这种常规的测量方法已经很难检测到被测潜艇的噪声信号了。为了适应潜艇的安静化进程提出了采用直线阵测量潜艇噪声。采用直线阵测量潜艇噪声的关键技术就是近场聚焦波束形成。

近场聚焦波束形成的基本原理：近场波束形成与远场波束形成的主要区别在于：在远场，声波是以平面波的形式传播到接收基阵。而在近场，声波是以球面波的形式传播到基阵。所以，远、近场中波的传播形式的不同，导致了远、近场波束形成处理方法上的差异。由于平面波到达基阵各阵元的幅度相同，只有相位存在差异，所以远场波束形成只需做相移的补偿。而球面波在传播过程中，幅度是随着距离成反比变化的，所以在近场波束形成中既要相移的补偿，又要做幅度的补偿。这也就是近场聚焦波束形成的基本原理。

通过计算机仿真验证，此种方法不仅能精确定位单个噪声源，而且能将两个距离很近的噪声源分辨出来，所以此种方法能够应用到实艇噪声源分析中。

### 1.3.3 基于声全息技术的源识别和远场预报

声全息技术也是噪声源近场识别的一种主要方法之一，同时它的声场空间变换可以直接由辐射声场的近场数据计算远场特性。

声全息技术包括常规声全息、近场声全息和远场声全息<sup>[16]</sup>。



在常规声全息中, 全息数据是在被测物体的辐射或散射声场的 Fresnel 区域或 Fraunhofer 区域(即全息接收面与物体的距离  $d$  远大于波长  $\lambda$  的条件下)采用光学照相或数字记录设备记录的。当声源辐射场具有方向性时, 常规声全息可能丢失声源的重要信息, 并且通过声压记录的全息图, 只能用于重建声压场, 而不能得到振速、声强等物理量。

针对这一问题, 80 年代初, 由 E. G. Williams 等首先提出的近场声全息技术 NAH (near-field acoustic holography) 是一种新的成像技术, 是全息成像理论的推广和突破。NAH 是在紧靠被测声源物体表面的测量面上记录全息数据, 然后通过变换技术重建三维空间声压场、振速场、声强矢量场, 并能预报远场指向性<sup>[17][18]</sup>。

由于近场声全息技术的高分辨率性能, 国内学者对该技术进行了深入的研究。九十年代初, 中国科学院武汉物理研究所和哈尔滨工程大学水声所率先开始在空气和水中进行近场声全息的理论研究工作。中国科学院武汉物理研究所张德俊等<sup>[19]</sup>采用传声器线阵扫描实验装置对圆钢板和编磬振动进行了全息重构。哈尔滨工程大学何祚镛、何元安等在水下目标散射场全息重构方法研究<sup>[20]</sup>、非共形面全息重构<sup>[21]</sup>、声场空间变换识别水下噪声源以及声全息测量基阵的设计<sup>[22]</sup>等方面进行了很有成效的研究工作, 并采用水下双通道声强测量系统及自制的自动控制扫描装置, 以球型压电换能器作为声源, 对声场进行全息重建, 验证了 BAHIM 方法的可行性<sup>[23]</sup>。

实现近场声全息技术的一个关键问题是在近场(测量距离远小于分析声波的波长)准确获得全息测量面上的复声压。为解决这个问题, 国外发展起来的代表性方法可归纳为基于声压测量和基于声强测量的两种。其中基于声压测量的全息复声压测量方法有快照法(Snapshot Method)、逐点“扫描”法(Single-Scanning Microphone Method)、线阵“混合声压测量”法。八十年代末, Loyan 和 Pascal 提出了基于声强测量的平面宽带声全息技术, 即 BAHIM 技术(Broadband Acoustic Holography based on Intensity Measurement)。BAHIM 方法实际上仍是获取全息复声压信号的一种手段。它通过在全息面上的声强测量, 经过一定的算法来估算全息平面上的复声压。哈尔滨工程大学研制出我国第一套水下双通道声强测量系统及自动控制扫描装置, 并改进成双水听器线列阵水声声强测量系统<sup>[26]</sup>。

为了获取全息信息,近场声全息需要用复杂的接收阵在非常接近声源表面的距离进行测量,如文献[26]的试验,发射基阵源面元尺寸为  $90\text{cm} \times 109\text{cm}$ ,信号频率  $5\text{kHz}$ ,发射面到接收阵间距仅为  $10\text{cm} \sim 15\text{cm}$ 。文献[27]1995年在旅顺实艇系泊试验中,艇壳舷边在采用了复杂的步进扫描线阵系统,如图 1.4 所示:

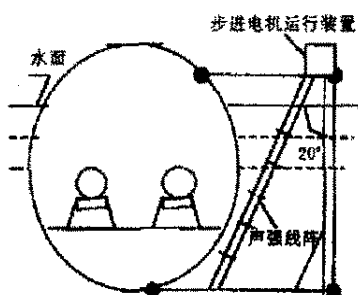


图 1.4 实船近场声全息测量设备示意图<sup>[26]</sup>

何元安<sup>[28]</sup>对基于 Helmholtz 积分的 DRL 方法进行了改进,给出了基于 NAH 的远场指向性快速预报方法、基于 GENAH 变换和 Helmholtz 积分的远场指向性计算公式。

远场声全息<sup>[29][30]</sup>方法通过测量离声源较远的声压场来重建表面声压及振速场,由此预报辐射源外任意一点的声压场、振速场、声强矢量场,由于观察点离声源很远,声源表面场和观察点声压的关系可以大大简化,因此和 NAH 相比,远场声全息具有计算简单的特点。另外这种方法计算的声强直接反映了辐射到远场的贡献,因此便于识别到远场有贡献的声源。但远场记录不到倏逝波成份。因此和常规声全息一样,分辨率受声波波长的限制,不适宜高分辨率的场合。但适合于对运动火车、汽车、舰船、潜艇等尺寸较大的物体进行噪声识别和远场预报。

就目前海上实艇、实际工况的潜艇辐射噪声测量来说,要想进行近场声全息信息采集是非常困难的。但对于潜艇辐射噪声测量的近场修正,考虑较低的可接受的空间分辨率,利用现有的垂直阵测量系统在距离  $50\text{m}$  的近场获取“全息”信息,通过远场声全息技术进行噪声源识别或远场指向性计算还是有意义的。当潜艇航行距垂直阵测量系统  $50\text{m}$  通过时,可等效为垂直阵在距潜艇  $50\text{m}$  的平面上获得了全息扫描信息。

美国人在 70 年代中期就提出了近场相对运动扫描测量的思想<sup>[28]</sup>。目前,美、俄等国都普遍采用近场线阵测量,为声全息的应用提供了可能。美国与法国海军都报道了它们各自的潜艇噪声近场声全息测量系统<sup>[31]</sup>和处理软件方案,由于保密原因,尚未见详细资料报道,但实现了声全息技术从实验室研究道外场复杂环境下应用的飞跃。美国 PSI 公司近年研制的活动式“垂直线阵测量系统”(PVLAMS)已成功应用于美国和澳大利亚海军测量安静型潜艇辐射噪声。

虽然水下潜艇辐射噪声的声全息技术由于保密原因,很难见到详细资料报道,但类似的应用—远场声全息技术用于汽车等运动声源的噪声源识别已经发表了多篇论文,对潜艇辐射噪声测量的垂直线阵系统声全息应用有重要的参考价值。国外 Park 和 Kim<sup>[32][33]</sup>采用 16 个阵元、间距 10cm 的垂直固定式传声器阵列对装有两个扬声器的运动汽车进行了全息测量和噪声源定位。测量中在车上安装了用于计算全息相位的参考传声器。国内清华大学杨殿阁、毛晓群<sup>[34][35]</sup>等进行了类似的研究。

文献[34]采用固定传声器阵列和运动声源模型,构造了全息测量面,研究了运动声源的多普勒效应消除方法,导出了远场预报和声场重建的公式。该文献没有使用传统声全息测量中的参考传声器,而是通过将测量得到的实数信号进行一次傅立叶变换和反变换来构造声全息复信号。

文献[36][37]建立了应用分布源边界点法进行多源声场全息重建和预测理论,提出了3种多源声场全息重建和预测的求解方法:单面测量组合法多面测量组合法和多面测量消元法,解决了在多个相干声源同时存在时的声源表面信息重建和声场中各声学量的预测问题。考虑到实际重建结果对测量误差的高度敏感性,文献提出采用Tikhonov 正则化方法稳定重建过程,抑制测量误差的影响,从而优化了重建结果,提高了全息重建和预测的可信度。

#### 1.3.4 DRL 法近远场变换

在水声计量测试技术中,对于大声学尺寸的水声基阵,由于满足远场条件的测试距离很大,实施远场测量比较困难,常常需要在近场条件下测量其远场特性<sup>[38]</sup>,为此已发展了较成熟的近场测量技术。

目前已经成功研究并应用的由近场条件下的测量确定辐射器远场特性的

方法主要有 3 种：球面波修正法、DRL 法、Trott 平面近场校准基阵 (NFCA) 法。其中应用较为广泛的是基于亥姆霍兹积分的 DRL 法。

DRL 近场校准方法于 60 年代初由美国得克萨斯大学防卫研究实验室 (DRL) 提出，其的基本理论基础是亥姆霍兹积分公式：

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial n} \frac{e^{jkr}}{r} - \Phi \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \right] dS \quad (1-10)$$

根据测量面  $S$  上测量的复声压和复声压梯度结果，可以得到远场任意点的声压值。DRL 中，需要两个假设条件<sup>[40][41]</sup>：声波传播到测量面上为近似平面波，可以用复声压替代复声压梯度；远场距离  $r$  很大，近远场归算时自然满足。

文献[40]提出用格林函数法从近场测量数据推断远场特性的近场测量方法，可以避免平面波假定和压力梯度形式，其远场计算是基于从封闭表面的声压值计算得到的，从而推得的远场特性较为精确。

## 1.4 本文研究内容

本文结合现阶段和未来的低噪声潜艇辐射噪声测量的工程实践，对工程中必须面临的浅海近程声传播衰减异常修正、大体积复合声源近场测量修正问题进行了理论研究。

本文分为以下几个部分：

第 1 章 对本文的研究背景作了简要介绍，并介绍了影响潜艇辐射噪声测量的海洋声场环境、潜艇辐射噪声测量近场修正的方法及相关研究进展。

第 2 章 对传播的理论基础—波动方程及定解条件进行了阐述，介绍了水声传播的射线模型和简正波模型，并讨论了多途信道物理模型。

第 3 章 阐述了潜艇振动声辐射问题的声学基础、潜艇辐射噪声的产生机理及测量方法。

第 4 章 根据简单的物理模型讨论了浅海近程声传播损失异常的原因，给出了浅海声场修正方法。

第 5 章 提出了潜艇辐射近场分布式声源模型，并进行了近远场变换。

## 第2章 浅海声传播理论基础

辐射噪声测量的项目之一是测量目标的辐射声源级，即在离声源 1 米处的辐射声压级。测量实际上是在某个距离上进行的，例如在 100 米~200 米处测得的声压级，如何推算到 1 米处的声源级？这就是所谓校正问题。我国历来按球面波衰减规律进行推算，但专家们历来都有异议。按球面波衰减规律进行推算的方法所引起的差异在某些条件下是满足不了测量精度的。这种差异主要来源于声传播的海洋声信道。

波动方程揭示了声波传播的普遍规律，它是描述波动的数学形式，同时也是计算声学问题的基本关系式，本章从三个基本方程出发导出了亥姆霍兹方程，并给出了定解条件。

水声传播领域中求解亥姆霍兹方程有两种基本方法：声线轨迹方法和波动理论方法，本章介绍了射线声学模型和简正波模型。

### 2.1 波动方程及定解条件

#### 2.1.1 波动方程

波动方程在研究声学问题中具有重要意义，它是描述波动的数学形式，同时也是计算声学问题的基本关系式。

在假设流体介质性质为理想、连续、静态均匀的条件下，根据质量守恒定律、热力学定律、牛顿运动定律可以导出小振幅声波传播的三个基本方程<sup>[42]</sup>：

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \vec{u}) \quad (2-1)$$

状态方程：

$$dp = c^2 d\rho \quad (2-2)$$

运动方程：

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = -\nabla p \quad (2-3)$$

其中， $p$  为声压， $\vec{u}$  为质点振速， $\rho$  为介质密度， $c$  为声速。在小振幅

波动情况下,忽略  $du/dt$  和  $d\rho/dt$  中的二阶小量,从以上三个方程中消去  $\bar{u}$  即得:

$$\rho \nabla \cdot \left( \frac{\nabla p}{\rho} \right) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-4)$$

如果密度是均匀的,可以得到理想、均匀、静止流体中小振幅波的波动方程:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2-5)$$

如果引入速度势函数  $\Phi$ , 有:

$$p = \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (2-6)$$

可以得到速度势函数必满足的波动方程:

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

由(2-5)式,考虑简谐波,取时间因子为  $e^{-j\omega t}$  (本文中所有的时间因子都假定为  $e^{-j\omega t}$ ),可以得到与时间无关的亥姆霍兹方程:

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

$$\text{其中 } k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}$$

### 2.1.2 定解条件

由上面导出的波动方程揭示了声波传播的普遍规律。此时,波动方程的解仍然是不确定的,没有任何实际意义。对于唯一确定的物理过程而言,还必须给出满足该物理过程的具体的条件。在数理方程中,该类方程称为泛定方程,与某一确定物理过程相关的具体条件称为定解条件。定解条件包括初始条件和边界条件,对于简谐过程(稳态情况)不需要初始条件,而且边界条件也与时间无关。

在水声传播问题中,海面和海底的边界条件是十分重要的定解条件。它们描述了海面和海底边界对声波的响应,规定了声场在边界上应满足的关系。以下是常用的几种典型的边界条件:

#### (1)自由软边界条件

该边界不承受压力,边界上的压力等于零。假设边界是  $z=0$  的平面,则在边界上各点应满足的边界条件为(2-10)式:

$$P|_{z=0}=0 \quad (2-9)$$

平静的海面一般使用这种边界模型。

#### (2)绝对硬边界条件

该类边界上的质点法线方向振速为零。如果边界是  $z=D$  的平面,  $z$  轴即为边界的法线方向,则在边界上各点满足条件下式:

$$\frac{\partial p}{\partial z}|_{z=D}=0 \quad (2-10)$$

理想的海底界面可以选择该边界模型。

#### (3)连续性条件(声学半空间)

在水声传播研究中,一般可以把海底界面看作与海水不同的另一种液态介质,这时在海底界面上就会出现密度  $\rho$  和声速  $c$  的有限间断。在该界面两边都存在声场的情况下,边界上应满足压力连续和质点法线方向振速连续的条件。假设海底深度为  $Z=D$ ,则边界条件可写为:

$$P|_{z=D^-}=P|_{z=D^+} \quad (2-11)$$

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}\right)|_{z=D^-}=\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z}\right)|_{z=D^+} \quad (2-12)$$

事实上,这种边界模型并不仅仅局限于海底液态半空间,只要在介质分布有跃变的界面都可以用该边界条件来描述。

#### (4)阻抗边界条件

这时边界上的压力和振速满足线性齐次关系,即:

$$aP|_{z=D}+b\frac{\partial P}{\partial z}|_{z=D}=0 \quad (2-13)$$

### (5) 辐射条件

如果问题包括无穷远点在内, 为了使波动方程的解唯一, 还应考虑辐射条件:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left( \frac{\partial \varphi}{\partial R} \right) - ik\varphi = 0 \quad (2-14)$$

除了上述这些最常用的边界条件类型, 在水声领域中还用到许多其它的边界模型来确定求解波动方程的边界条件, 如“三参数”海底模型、“薄层”海底模型以及使用反射系数模型等等。

利用这些边界模型来限制波动方程的解在边界上的取值就可以完全确定波动方程(2-5)或(2-8)的解。

## 2.2 水声传播模型

### 2.2.1 概述

在水声传播研究领域中, 存在着多种求解亥姆霍兹方程的理论方法。但它们都源于两种基本方法: 波动理论方法和声线轨迹方法。这两种方法各有所长, 可以使用其中一种方法来求解亥姆霍兹方程, 也可以使用两种方法同时求解亥姆霍兹方程。根据求解波动方程所用方法的不同可以建立不同水声传播模型。

按照对波函数解的形式选取和求解波动方程时所使用方法的不同可以将传播模型大致分成声线模型、简正波模型、抛物型模型、快速声场模型和多路径展开模型等五类模型<sup>[43]</sup>, 其模型分类情况及所采用的理论方法如图 2.1 所示。

在这五类传播模型中, 除了声线模型完全采用了声线轨迹技术, 其余的传播模型都不同程度地采用波动技术。抛物型模型选择了不同于其它三种模型的波动方程解的形式。简正波模型、快速声场模型和多路径展开模型使用了相同的解的形式, 但求解波动方程积分表达式的方法却各不相同。

按照与水平距离的关系又可进一步将这些传播模型细分为与距离无关的模型和与距离有关的模型。与距离无关就意味着假定了模型对环境是圆柱对称的(即海洋环境是水平分层的, 它的特性随深度变化)。与距离有关是指海



洋介质的某些特性除与深度有关以外，还与相对接收器的距离和方位有关。对距离的依赖性还可以进一步分为在距离和深度上有变化的二维情况和在距离、深度和方位上都有变化的三维情况。

声线模型、抛物型模型适用于与距离有关的声场问题，简正波模型、快速声场模型和多路径展开模型适用于与距离无关的声场求解问题。其中，简正波模型可以通过绝热方式和耦合方式扩展到二维和三维情况。

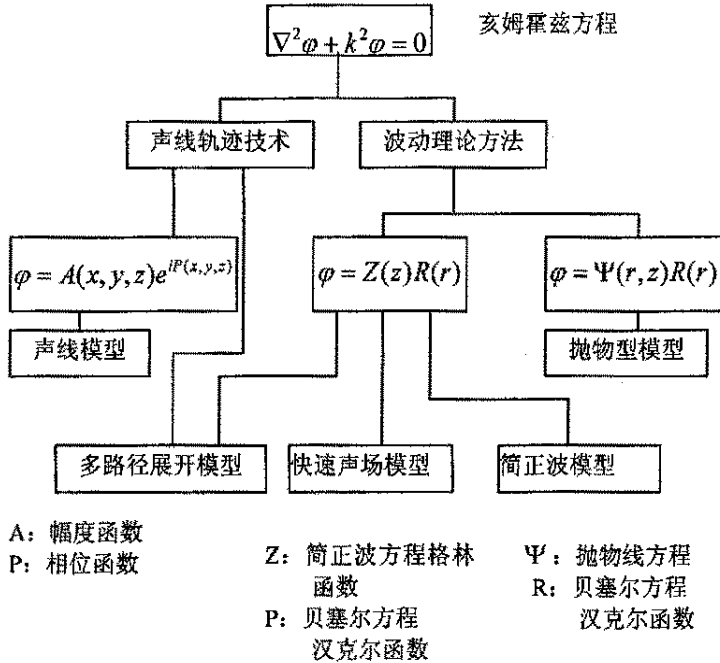


图 2.1 传播模型分类表及各种理论方法之间的关系

快速声场模型不考虑环境特性与距离的关系，只能用来解决与距离无关的声场问题。与简正波模型相比，快速声场模型能够很好地预报近场情况下的声场，而简正波模型在计算简正波模式时，忽略了近场的影响。

### 2.2.2 射线声学模型

射线声学是发展最早，物理上最直观的声场分析方法，在一定条件下，射线声学的数学运算也比较简捷。射线理论把声波的传播看作是一束垂直于等相位面的射线的传播，每一条射线与等相位面垂直，称为声线。声线途经

的距离代表声波传播的路程，声线经历的时间为声波传播的时间，声线束所携带的能量为声波传播的能量。

### 1. 射线声学基本方程

射线声学假定声波能量根据介质性质的空间变化沿一定路径传播，在各点的声场声压可以写成如下形式：

$$p = A(\vec{r})e^{ik_0 L(\vec{r})} \quad (2-15)$$

其中  $A(\vec{r})$ 、 $L(\vec{r})$  均为实函数， $A$  为声压幅度， $L$  为声程，反映传播过程中的相位变化， $k_0$  为参考波数。由运动方程可导出声程方程：

$$(\nabla L)^2 = \left( \frac{c_0}{c} \right)^2 = n^2 \quad (2-16)$$

$n$  即为折射率，由声速决定。式 (2-16) 是射线声学的基本方程式，它给出了声程的梯度  $\nabla L$  与折射率  $n$  之间的关系。

强度方程为：

$$\nabla \cdot (A^2 \nabla L) = 0 \quad (2-17)$$

由于声强度矢量：

$$\vec{I} \propto A^2 \nabla L \quad (2-18)$$

即声强与振幅  $A$  的平方和声程梯度  $\nabla L$  的乘积成正比， $I$  的方向指向声线传播的方向  $\nabla L$ ，所以得到：

$$\nabla \cdot \vec{I} = 0 \quad (2-19)$$

上式表示声强度矢量  $\vec{I}$  的散度为零，说明射线声学中声强度矢量为—管矢量，声能量沿声线束管传播。

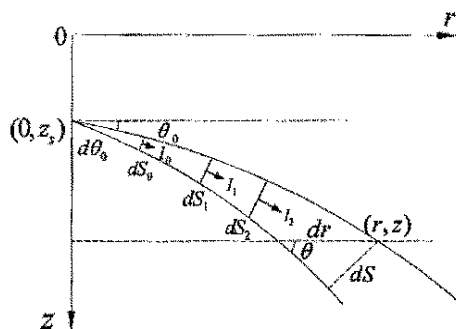


图 2.2 声能沿声线束管的传播

如图 2.2 所示，声能量传播方向与声线束管的截面垂直，声线束管之间没有能量交换。图中  $I_0$ 、 $I_1$ 、 $I_2$  分别是声线束管的截面  $dS_0$ 、 $dS_1$ 、 $dS_2$  处的声强，如果声强在截面上均匀分布，则有：

$$I_0 dS_0 = I_1 dS_1 = I_2 dS_2 = \dots = \text{常数} \quad (2-20)$$

式 (2-20) 说明，声能量沿声线束管传播，截面大，声能量分散，声强值减小；截面小，声能量集中，声强值增加。

## 2. 声强和声压

由前面分析已经知道，声强  $I$  随着声线束管横截面积  $S$  的增加而减小。如图 2.2 所示在声源  $(0, z_s)$  处以掠射角  $\theta_0$  和  $\theta_0 + d\theta_0$  出射的两条声线，在海水介质中沿声线轨迹传播，到达接收点  $(r, z)$  时，两条声线水平方向距离为  $dr$ 。当声源为无指向性时，声场对称于  $z$  轴。在声线束管内，沿声线单位距离处的声强为  $I_0$ （参考声强）。两条声线所包含的与声线垂直的面积（为绕  $z$  轴旋转一周所形成的圆环带）为：

$$dS_0 = 2\pi \cdot \cos\theta_0 \cdot d\theta_0 \quad (2-21)$$

在接收点  $(r, z)$  处，两条声线所包含的与声线垂直的面积为：

$$dS = 2\pi r \cdot \sin\theta \cdot dr \quad (2-22)$$

根据公式 (2-20) 可以得到接收点处的声强  $I$  和声压  $A$  为：

$$I = \frac{I_0 \cdot dS_0}{dS} = \frac{I_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot d\theta_0}{r \cdot \sin \theta \cdot dr} \quad (2-23)$$

$$A = \sqrt{I} \quad (2-24)$$

在一般情况下, 声线要经过多次海面 and 海底反射, 此时要计入由海面和海底反射带来的损失, 另外还应计入海水介质的吸收。接收点处的声强和声压分别为<sup>[44]</sup>:

$$I = \frac{I_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot d\theta_0}{r \cdot \sin \theta \cdot dr} \cdot \left| \prod_{i=1}^{N_s} V_{si}(\theta_{si}) \right|^2 \cdot \left| \prod_{i=1}^{N_b} V_{bi}(\theta_{bi}) \right|^2 \cdot e^{-2\beta L} \quad (2-25)$$

$$A = \sqrt{\frac{I_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot d\theta_0}{r \cdot \sin \theta \cdot dr} \cdot \prod_{i=1}^{N_s} V_{si}(\theta_{si}) \cdot \prod_{i=1}^{N_b} V_{bi}(\theta_{bi}) \cdot e^{-\beta L}} \quad (2-26)$$

式中:  $N_s$ ——海面反射次数

$N_b$ ——海底反射次数

$\theta_{si}$ ——第  $i$  次海面反射时在反射点处的入射角

$\theta_{bi}$ ——第  $i$  次海底反射时在反射点处的入射角

$V_{si}$ ——第  $i$  次海面反射系数

$V_{bi}$ ——第  $i$  次海底反射系数

$\beta$ ——海水介质的吸收系数

$L$ ——声线到达接收点时经过的路程

### 2.2.3 简正波模型

简正波模型通常把海洋信道假设为柱面对称分层介质如图 2.3 所示。根据假设介质的声速  $c$  和密度  $\rho$  都是深度  $z$  的函数,  $Z_s$  表示声源深度<sup>[45][46]</sup>。

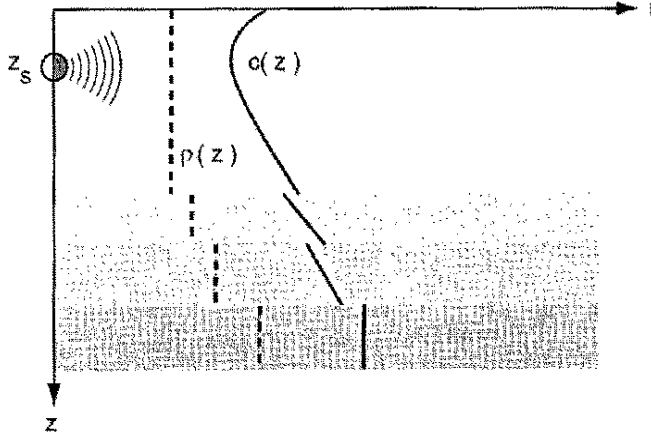


图 2.3 与距离无关的分层声传播介质示意图

考虑点源情况下, 分层介质中波动方程:

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho} \nabla P \right) - \frac{1}{\rho c^2(z)} P_{tt} = -s(t) \frac{\delta(z - z_s) \delta(r)}{2\pi r} \quad (2-27)$$

这里的  $P(r, z, t)$  声压是深度、距离和时间的函数。另外,  $s(t)$  是等方向性的点源,  $\rho(z)$  是密度,  $c(z)$  是声速。

对于海面为自由软边界, 海底为绝对硬海底的理想情况, 方程的边界条件为:

$$\begin{aligned} P(r, 0, t) &= 0 & (\text{自由海面}) \\ P_z(r, D, t) &= 0 & (\text{绝对硬海底}) \end{aligned} \quad (2-28)$$

其中  $D$  表示海深。声源信号取指数函数形式的单频信号:

$$s(t) = e^{-i\omega t} \quad (2-29)$$

同时声压可以表示为时间独立谐和波形式:

$$P(r, z, t) = p(r, z) e^{-i\omega t} \quad (2-30)$$

把方程式(2-30)代入波动方程(2-27)式, 方程可表示为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} p = \frac{-\delta(z-z_s) \delta(r)}{2\pi r} \quad (2-31)$$

当波动方程为无源波动方程时，应用分离变量方法求解方程， $p(r, z) = Z(z)R(r)$ ，式(2-31)可表示为：

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial R}{\partial r} \right) \right] + \left[ \rho(z) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho(z)} \frac{\partial Z}{\partial z} \right) + \frac{\omega^2}{c^2(z)} \right] Z = 0 \quad (2-32)$$

方括号中的两部分分别为  $r$  和  $z$  函数，如果两部分都等于常数  $k^2$ ，那么可得  $Z(z)$  形式方程和  $R(r)$  的形式方程：

$$\rho(z) \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho(z)} \frac{dZ(z)}{dz} \right) + \left( \frac{\omega^2}{c^2(z)} - k^2 \right) Z(z) = 0 \quad (2-33)$$

$$Z(0) = 0 \quad (\text{自由海面})$$

$$\frac{dZ(D)}{dz} = 0 \quad (\text{绝对硬海底})$$

方程(2-33)形式是典型的斯特姆-刘维本征值问题。其具有如下属性：(1) 方程有无限个解，分别用模式函数  $Z_m(z)$  和水平波速  $k_m$  的离散值来表示， $Z_m(z)$  表示该方程的第  $m$  阶本征函数， $k_m$  表示该方程的第  $m$  阶本征值；(2) 第  $m$  阶模式在  $[0, D]$  区间存在  $m$  个零点，并且本征值按照从大到小的顺序排列，即  $k_1 > k_2 > k_3 \dots$ ；(3) 所有的本征值都小于  $\omega/c_{\min}$ ，其中  $c_{\min}$  表示最小声速。方程 (2-33) 的解满足正交归一化条件：

$$\int_0^D \frac{Z_m(z) Z_n(z)}{\rho(z)} dz = \begin{cases} 1 & m = n \\ 0 & m \neq n \end{cases} \quad (2-34)$$

经过正交归一化处理后，简正波方程的模式解构成了一个正交归一的完备集，声压可以表示成如下无限和的形式：

$$p(r, z) = \sum_{m=1}^{\infty} R_m(r) Z_m(z) \quad (2-35)$$

把方程(2-35)代入方程(2-31)，可得到如下方程：

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \frac{\rho(z)}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{r}{\rho(z)} \frac{\partial R_m(r)}{\partial r} \right) Z_m(z) + R_m(r) \left[ \rho(z) \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho(z)} \frac{dZ_m(z)}{dz} + \frac{\omega^2}{c^2(z)} Z_m(z) \right) \right] \right\} = \frac{-\delta(r) \delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (2-36)$$

把方程（2-33）式代入方程（2-36）式可以得到：

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left[ -\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial R_m(r)}{\partial r} \right) Z_m(z) + k_m^2 R_m(r) Z_m(z) \right] = \frac{-\delta(r) \delta(z - z_s)}{2\pi r} \quad (2-37)$$

方程（2-37）应用正交变化性化简为：

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial R_l(r)}{\partial r} \right) + k_l^2 R_l(r) = \frac{-\delta(r) Z_l(z_s)}{2\pi r \rho(z_s)} \quad (2-38)$$

在该问题中方程(2-38)的解为：

$$R_l(r) = \frac{i}{4\rho(z_s)} z_l(z_s) H_0^{(1,2)}(k_l r) \quad (2-39)$$

由辐射条件决定了等式(2-38)中取第一类汉克尔函数，这样声压场  $p(r, z)$  可表示为：

$$p(r, z) = \frac{i}{\rho(z_s)} \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z_s) Z_m(z) H_0^{(1)}(k_m r) \quad (2-40)$$

将汉克尔函数展开，取其一级近似，声场表达式可表示为：

$$p(r, z) \approx \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-i\pi/4} \sum_{m=1}^{\infty} Z_m(z_s) Z_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}} \quad (2-41)$$

## 2.3 多途信道声场模型

声波在海洋中的传播实际上是一个非常复杂的问题。海洋这个水下声信道，它不但对目标信号进行能量变换（声传播损失），而且它对声源的发射波

形也进行变换,因而水下声信道是时变、空变的随机信道。要想建立一个数学模型来完全仿真或模拟实际的物理模型是不可能的,也是不现实的。因此,数学模型只能是物理模型的一个合理简化,简化的程度取决于数学模型带来的误差对于所解决实际工程问题是否在允许接受的范围内。多途信道仿真模型就是遵循这个原则来建立的(图 2.1),整个数学模型的简化条件为:

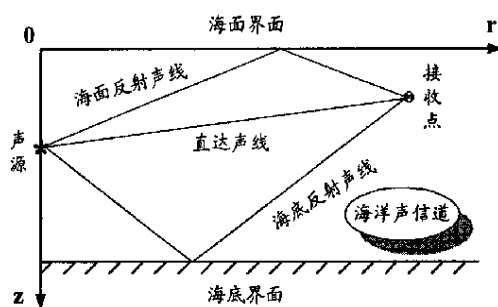


图 2.4 多途信道模型的示意图

1. 声速度(折射率)不随水平方向变化,仅是海水深度的函数。

若令  $x$ 、 $y$  代表水平坐标,  $z$  代表垂直坐标,则在上述分层介质的假设中存在以下关系式:

$$c(x, y, z) = c(z) \quad (2-42)$$

$$n(x, y, z) = n(z) \quad (2-43)$$

2. 海面、海底界面假设为平整的界面。

实际海面很少有风平浪静的时候,经常呈现有海风引起的波浪;而海底则是地形大多是不规则的。假设海面、海底界面为平整的界面,其不平整性和声波频率的吸收,可以通过调整或反演海面、海底的声学参数得到合理的简化。

3. 声源和接收点的位置是静止不变的。

声信号自声源发出,在海洋中沿各自不同途径的声线到达接收点,在所观察和处理的时间不是过分长的条件下,可以认为声源、接收点的位置是不随时间变化的。

4. 整个海洋信道看作是一个网络系统。

从声纳发射换能器或声源发出携带信息的声波,通过海洋到达声纳接收



水听器基阵这个物理过程，从网络模型的意义出发，可以将海洋声信道看作是对发射波形进行变换的一个滤波器。这个滤波器是一个时变、空变的随机滤波器。因此，海洋声信道可以用一个网络的系统函数来描述，网络的输入为声源的发射信号，输出为接收点处的接收信号，如图 2.5 所示。

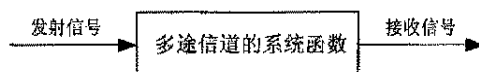


图 2.5 多途信道的网络模型

5. 声场由本征声线决定。

本征声线是指从声源发出、通过接收点的、各种对声场有重要贡献的声线的集合。多途信道中的声场强度及接收波形由本征声线的特征声线参数决定。本征声线的特征声线参数决定了多途信道的系统函数。

## 2.4 本章小结

本章介绍了浅海声传播的理论基础—波动方程及定解条件，常用的水声传播模型—射线声学模型和简正波模型，并介绍了多途信道声场模型。

### 第 3 章 潜艇辐射噪声测量基础

声辐射的计算问题一般可描述为波动方程在一定边界条件下的定解问题。按照分析方法不同,它可归纳为两类:一类是以波动方程为基础的时域分析法,另一类是以 Helmholtz 方程为基础的频域分析法。前者是在时域内分析声振关系,既可以用来计算稳态声场特性,又可以用来计算瞬态声辐射规律,但是,由于时域分析法相当于在每个时间步上求解一次静态问题,因而计算量很大,累积误差也较大。频域分析法是以简谐声波为研究对象,由于对任意时间函数的声波问题,原则上总可以通过 Fourier 分析,将其分解为一系列简谐声波的叠加,因此,频域分析法特别适合于稳态声场的研究。从目前的研究现状来看,频域分析法居多<sup>[58]</sup>。

#### 3.1 振动声辐射的声学理论基础

振动在均匀理想流体介质的无限域中引起小振幅声波的声辐射问题,在声场参数精确到一阶量的近似意义下,可用如下波动方程(3-1)、Neumann 边值条件(3-2)以及在无穷远处的 Sommerfeld 辐射条件(3-3)形成的定解方程来描述<sup>[42][59][60]</sup>:

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi(x, t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi(x, t)}{\partial t^2} & x \in D_+ \\ \frac{\partial \varphi(\xi, t)}{\partial n} = v(\xi, t) & \xi \in S \end{cases} \quad (3-1) \quad (3-2)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \left( \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial r} + jk \varphi(x, t) \right) = 0 \quad x \in D_+ \quad (3-3)$$

式中  $x$  表示三维声场空间中的任一点;  $t$  为时间变量;  $c$  为声速;  $\varphi(x, t)$  是声场的速度势函数;  $\nabla^2$  是 Laplace 算子,  $S$  是振动体的边界表面,其外部区域记作  $D_+$ , 而其内部区域记作  $D_-$ , 并且用  $n$  表示振动体边界上的外法线( $n$  指向  $D_-$  时为正);  $v(\xi, t)$  是已知的振动体表面法向振速( $v(\xi, t)$  指向  $D_+$  时为正),其可以通过数值计算方法(如有限元方法等)或实测的方法获得;  $j$  是虚数单

位,  $r$  是场点  $x$  与振动体边界上或其内域中一定点之间的距离, Sommerfeld 辐射条件是对外部振动声辐射问题在自由空间无穷远处不存在反射波现象的描述。

速度势函数是描述声场特性的一个重要的声场参数, 它在物理上反映了由于声波的存在, 使得媒质单位质量所具有的冲量, 其与声压  $p(x, t)$ 、媒质质点速度  $\bar{u}(x, t)$  的关系为:

$$p(x, t) = \rho \frac{\partial \varphi(x, t)}{\partial t} \quad (3-4)$$

$$\bar{u}(x, t) = -\nabla \varphi(x, t) \quad (3-5)$$

式中  $\rho$  是声场的密度,  $\nabla$  是梯度算子。

若将 (3-1~3-5) 式作 Fourier 变换, 则上述各式可转化为频域表达式:

$$\begin{cases} \nabla^2 \Phi(x, f) + k^2 \Phi(x, f) = 0 & x \in D_+ \\ \frac{\partial \Phi(\xi, f)}{\partial n} = V(\xi, f) & \xi \in S \end{cases} \quad (3-6)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \left( \frac{\partial \Phi(x, f)}{\partial r} + jk \Phi(x, f) \right) = 0 \quad x \in D_+ \quad (3-7)$$

$$P(x, f) = j2\pi \Phi(x, f) \quad (3-8)$$

$$\bar{U}(x, f) = -\nabla \Phi(x, f) \quad (3-9)$$

### 3.1.1 克希荷夫公式

积分法一般在频率域就单频成分进行, 可以直接计算声场外任意观察点处的声场。克希荷夫 (基尔霍夫, Kirchhoff) 公式是积分法的基础。

单一频率源发出的声振动代入声波动方程后得 Helmholtz 波动方程:

$$\nabla^2 \Phi + k^2 \Phi = 0 \quad (3-10)$$

特定边界条件和初始条件下, 式 (3-11) 的点源称为格林 (Green) 函数, 即

$$\nabla^2 G(r, r') + k^2 G(r, r') = -4\pi \sigma(r - r') \quad (3-12)$$

其中,  $\sigma(r-r')$  是 Dirac 脉冲函数。

对于如图 3.1 所示的振动体在外部无限域中的声辐射问题, 可以将其分析域  $D$  内任一点  $x$  处的速度势表达为边界量的积分形式。为此, 首先以点  $x$  为球心、 $R(\sim\infty)$  为半径作一包含振动体的球面  $S_\infty$ 。

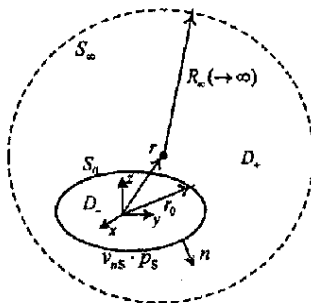


图 3.1 无限域中振动声辐射示意图

由 Green 公式可以导出无限域中的边界积分公式:

$$\Phi(r) = \iint_S \left[ G(r, r') \frac{\partial \Phi}{\partial n} - \Phi \frac{\partial G(r, r')}{\partial n} \right] dS \quad (3-13)$$

对于三维问题, 格林函数式(3-12)的解为

$$G(r, r') = \frac{e^{jkr}}{4\pi r} \quad (3-14)$$

由式(3-14)表示的单位点源声场称为 Helmholtz 方程在自由空间的基本解, 代入式(3-13)得基本解表示的克希荷夫公式:

$$\Phi(\vec{R}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[ \frac{\partial \Phi}{\partial n} \frac{e^{jkr}}{r} - \Phi \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \right] dS \quad (3-15)$$

克希荷夫公式(3-15)右边的第一项确定一个球面波声源的势函数, 第二项确定一个偶极子声源的势函数。式(3-15)给出了惠更斯原理的数学形式, 根据这个原理, 任何一个波场可以看作是波的叠加形式。

在“绝对硬”平面壁前点声源的辐射声场在引进镜像点声源(振动的振幅相等, 方向相反)后, 可得到惠更斯第一积分公式:

$$\Phi(\vec{R}) = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\partial \Phi}{\partial n} \frac{e^{jkr}}{r} dS \quad (3-16)$$

$$p(\vec{R}) = \frac{-j\omega\rho}{2\pi} \iint_S \ddot{u} \frac{e^{jkr}}{r} dS \quad (3-17)$$

在“绝对软”平面壁前的点声源，其镜像点声源相位与真实源的相位相反，与真实点源构成偶极子声源，可得到惠更斯第二积分公式：

$$\Phi(\vec{R}) = -\frac{1}{2\pi} \iint_S \Phi \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) dS \quad (3-18)$$

$$p(\vec{R}) = \frac{-jk \cos \alpha}{2\pi R} \iint_S p(S) e^{jkr} dS \quad (3-19)$$

由惠更斯第一积分公式可根据平面上已知的振速值求半空间的声场，由第二积分公式可根据平面上已知的声压值求半空间的声场。

### 3.1.2 瑞利积分

惠更斯第一积分公式又称瑞利公式，适用于求解“绝对硬”平面壁前点声源的辐射声场和无限大刚性障板上辐射器的辐射声场。

实际问题中，一般只能给出有限平面上的振动速度或弯曲平面上的振动速度，则可以用克希荷夫近似方法求解。克希荷夫近似的实质是，如果发射面的尺寸比声波的波长大很多，并且这个面的曲率半径也比波长大很多的话，则可以认为在表面上声压和振动速度的比值近似地象平面波情况一样。这样，可以认为表面的每个面元  $dS$  作声辐射，恰如是放在与它所在点的切面相重合的无限大刚性障板上声辐射一样。克希荷夫近似方法即为瑞利积分。

二维空间的克希荷夫公式为：

$$p(\vec{R}) = \frac{j}{4} \int_L \left[ \frac{\partial p}{\partial n} H_0^{(2)}(kd) - P \frac{\partial}{\partial n} H_0^{(2)}(kd) \right] dl \quad (3-20)$$

二维空间得瑞利积分为：

$$p(x, z, w) \approx -\frac{\omega\rho_0}{\sqrt{2\pi k}} e^{j\pi/4} \int_L V(x') \frac{e^{-jk\sqrt{(x-x')^2+z^2}}}{\sqrt{(x-x')^2+z^2}} dx' \quad (3-21)$$

讨论声源在焦面得指向性时，常使用瑞利积分，即将源表面微元的贡献相加。设二维空间中，声源置于  $x$  轴上向  $z$  方向发射声波，以瑞利积分计算

源中心对称轴上的声压幅度，源坐标为  $(x, 0)$ ，在源中心对称轴上的观察点坐标为  $(0, z)$ 。在  $x$  和  $z$  方向上取相同离散间隔

$$x = ih, \quad z = mh \quad (3-22)$$

则源和观察点的距离为

$$r = \sqrt{i^2 + m^2} h \quad (3-23)$$

于是，瑞利积分可以写为离散形式：

$$|p(m)| \propto \left| \sum_{i=-M}^M V(i) \frac{\cos(k\sqrt{i^2 + m^2}h) - j\sin(k\sqrt{i^2 + m^2}h)}{\sqrt{i^2 + m^2}\sqrt{h}} \right| \quad (3-24)$$

其中， $V(i)$  中可以包括聚焦的相位条件和幅度加权系数。

### 3.1.3 活塞辐射器的近场辐射

在距离远大于半径时，辐射器的声场为远场区，即弗朗霍夫(Fraunhofer)区。在远场区，可以用平行声线法，即把许多元波按平行声线传播途径达到某点来计算。在距离比半径不大的近场区，声场形成复杂的干涉现象。近场区由称为菲涅尔(Fresnel)区，以下对沿活塞面中心法线上的声场分布作计算。

如图 3.2，具有无限幕的圆面活塞式辐射器中心法线上，离  $O$  点距离为  $z$  处的速度势可根据式(3-16)计算。

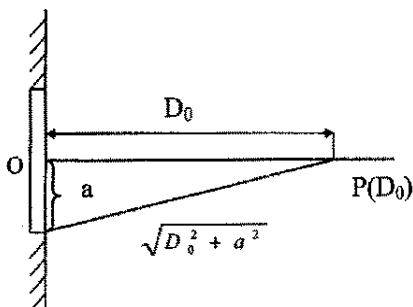


图 3.2 活塞近场辐射示意图

由于活塞面上  $\rho$  为半径， $d\rho$  为带宽的环环形辐射波到  $p$  点的路程相同，故取  $ds = 2\pi\rho d\rho$ ， $r^2 = \rho^2 + z^2$  代入式(3-16)中得：

$$\phi(z, t) = \frac{u_0 e^{j\omega t}}{2\pi} \int_0^a \frac{2\pi \rho e^{-jk\sqrt{\rho^2+z^2}}}{\sqrt{\rho^2+z^2}} d\rho = \frac{u_0 e^{j\omega t}}{-jk} \left[ e^{-jk\sqrt{a^2+z^2}} - e^{-jkz} \right] \quad (3-25)$$

利用指数函数和三角函数关系得声压:

$$p(z, t) = j2\rho_0 c u_0 e^{j[\omega t - k(\sqrt{a^2+z^2} + z)/2]} \cdot \sin\left(\frac{k}{2}(\sqrt{a^2+z^2} - z)\right) \quad (3-26)$$

近场中声压振幅的分布函数为:

$$p_m(z) = 2\rho_0 c u_0 \sin\left(\frac{k}{2}(\sqrt{a^2+z^2} - z)\right) \quad (3-27)$$

由式(3-27)可见, 近场法线上质点振速和声压是不同相位的。

菲涅尔近场衍射的计算结果如图 3.3 所示。

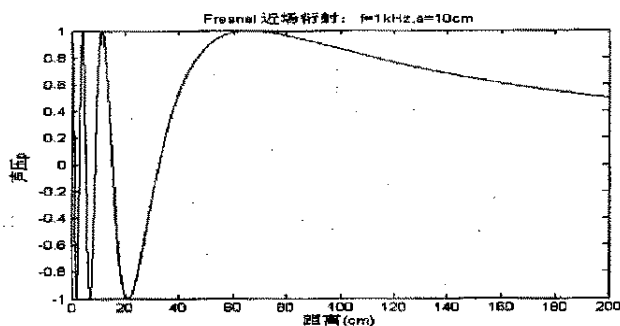


图 3.3 菲涅尔近场衍射

菲涅尔近场衍射区, 法线上会出现极大值和极小值的交替分布, 对应距发射面最远处的最大值处  $D_0$  满足:

$$D_0 = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \quad (3-28)$$

这表明最后一个最大值的位置恰好是边缘声线和轴向声线路差为  $\lambda/2$ , 超过此点后, 活塞面上任何两个元波到达法线上的点的程差都小于  $\lambda/2$ , 即不再出现干涉现象, 声压幅值变为单调地减小, 这里,  $D_0 \approx 9a$ 。于是声场逐渐进入弗朗霍夫区。在此点附近, 声压幅值变化缓慢, 类似于平面波。

接近远场区, 有:

$$\phi(z, t) \approx \frac{2u_0}{k} e^{j(\omega t - kz)} \cdot \sin \frac{ka^2}{4z} \quad (3-29)$$

当  $z > D_0$ , 式(3-29)表明声压幅值按  $\sin \frac{ka^2}{4z}$  衰减, 当  $z \gg a$ , 可近似表示为:

$$\phi(z, t) \approx \frac{u_0 S_0}{2\pi z} e^{j(\omega t - kz)} \left[ 1 - \frac{1}{6} \left( \frac{ka^2}{4z} \right)^2 \right] \quad (3-30)$$

辐射声场测量时, 假设已给定允许测量误差为  $\Delta$ , 则接收器到辐射器的最近距离为:

$$r_{\min} = \frac{ka^2}{4\sqrt{6}\Delta} = \frac{\pi}{2\sqrt{6}} \cdot \frac{a^2}{\lambda}, \quad r_{\min} \gg a \quad (3-32)$$

频率愈高, 半径愈大的辐射体, 近区衍射场愈长, 按  $1/r$  规律计算声场误差愈大。式(3-32)虽然是从活塞式辐射器导出的, 但它仍具有普遍意义, 对于其它形式的辐射器, 从菲涅尔区向弗朗霍夫区过渡的距离都可写成:

$$r_{\min} = K \cdot \frac{L^2}{\lambda} \quad r_{\min} \gg L \quad (3-33)$$

式(3-33)可作为远场条件的近似判据, 在水声测量中对声场的误差分析具有重要意义。

## 3.2 潜艇辐射噪声特性

### 3.2.1 潜艇辐射噪声产生机理

从声学的角度来看, 潜艇是一个复杂的噪声源分布体, 产生水下辐射噪声的原因主要有三个方面<sup>[6][61][62]</sup>, 潜艇主要噪声及其传递如图 3.4 所示<sup>[6]</sup>:

#### 1. 潜艇结构噪声

机械设备产生的结构噪声是潜艇低速巡航时最主要的噪声源。

航行潜艇本身众多不同部件的机械振动产生机械噪声, 这种振动由各种途径通过艇壳传到海水中去, 如机座与艇壳相联结的振动部件等。机械振动产生的方式如下:

- (1) 不平衡的旋转部件, 如不圆的轴或电机电枢;
- (2) 重复的不连续性, 如齿轮、电枢槽、涡轮机叶片;
- (3) 往复部件, 如往复内燃机汽缸中的爆炸;



- (4) 泵、管道、阀门中流体的空化和湍流，凝汽器排气；  
(5) 在轴承和轴颈上的机械摩擦。

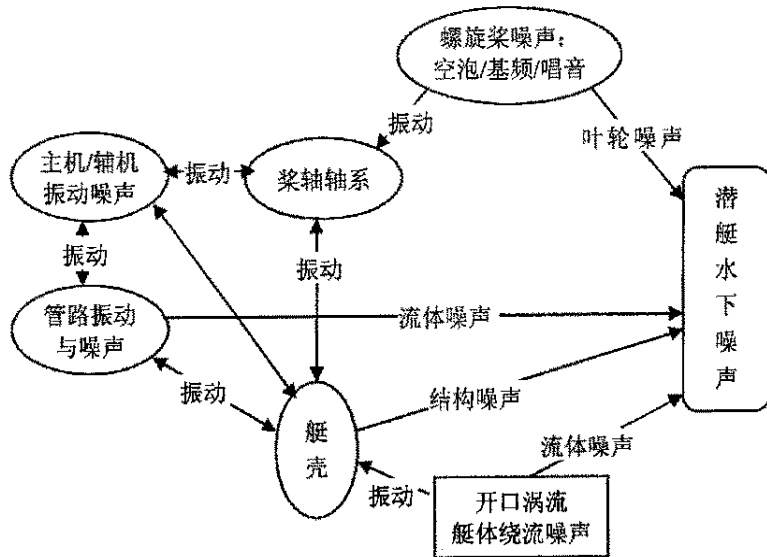


图 3.4 潜艇主要噪声源及传递示意图

其中前三种声源产生线谱，噪声中主要成分是在振动的基频及谐波上的单频分量；后两种产生连续谱噪声，当激起结构部件共振时，还迭加有线谱。所以，潜艇的机械噪声可以看作是强线谱和弱连续谱的迭加，而这些强线谱就是上列的一种或多种重复性振动产生的过程。

动力机械振动辐射声的基频等于运转机械的转速和叶片或活塞冲程数的乘积。辐射声的强度决定于力源强度，还决定于振动从源点传到艇体的振动传递分布函数以及结构的声辐射效率。艇壳结构共振辐射声最强。对于低频情况，被激作弯曲振动时辐射效率很低、辐射噪声不强。

## 2. 潜艇螺旋桨噪声

虽然螺旋桨也是潜艇的推进机械，但它产生的噪声同机械噪声有不同的源和不同的频谱。如上所述，机械噪声产生在艇的内部，由各种传导和传播过程通过艇壳到达海水；而螺旋桨噪声产生在艇体外部，是螺旋桨转动及潜艇在水中航行引起的。当潜艇在水听器附近通过时，可以看到潜艇的机械噪声比螺旋桨产生的噪声早到达峰值，并同艇上产生的噪声部位相一致。

螺旋桨作为噪声源的辐射噪声中,由于舰船航速和螺旋桨转速不同,螺旋桨声级大小和种类也不相同,按噪声物理特性的不同,可将螺旋桨噪声分为以下几类:

- (1)螺旋桨空泡噪声;
- (2)螺旋桨无空泡低频离散谱噪声;
- (3)螺旋桨无空泡低频连续谱噪声;

螺旋桨空泡噪声是由于空泡的生成与溃灭引起压力变化而产生的。当螺旋桨在水中转动时,在叶片的尖上和表面上产生低压或负压区。如果这个负压足够高,水就要自然破裂,小气泡形成的空穴开始出现。稍后,这些空化产生的气泡就破碎了(在湍流中或螺旋桨上的破碎),并发出尖锐的声脉冲,由大量的这种气泡破碎产生的噪声是一种很响的噍噍声,存在这种噪声时,它往往构成潜艇噪声谱高端的主要部分。

螺旋桨无空泡低频离散谱噪声主要是由于螺旋桨工作在船尾的非均匀流场中,当螺旋桨叶片周期性旋转时,这种非均匀流场会使叶片产生非定常升力脉动,从而辐射出周期性的离散谱噪声。

螺旋桨的低频连续谱噪声主要是由于螺旋桨工作在船尾的湍流场中,由于湍流和叶片的相互作用产生随机升力脉动,从而辐射出低频连续谱噪声。

### 3. 潜艇水动力噪声

不规则的和起伏的水流流过的运动潜艇时产生水动力噪声。不规则流引起的压力起伏,直接辐射出去,在远处形成声波,更重要的,可以激励艇体某些部分发生振动。

在正常情况下,水动力噪声主要对潜艇声纳造成影响,其辐射噪声不重要,容易被机械噪声和螺旋桨噪声所掩盖。但是在特殊情况下,如在结构部件或被激励成线谱噪声的共振源时,水动力噪声在出现线谱的范围内成为主要的噪声源。

## 3.2.2 潜艇辐射噪声特性

### 1. 潜艇辐射噪声频谱结构

描述声压谱源级和频率关系的曲线成为频谱图,它以频率为横坐标,以声源级为纵坐标。对不同类型的潜艇辐射噪声频谱图研究表明,它们具有基

本相似的形状, 如图 3.5 是某艘潜艇某工况辐射噪声频谱图。

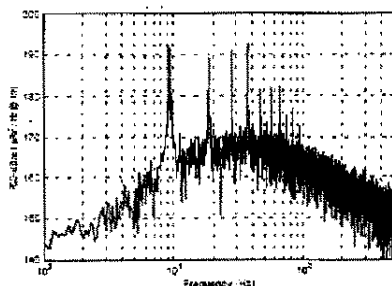


图 3.5 某艇某工况辐射噪声频谱图

由图中可以看出潜艇辐射噪声声源级的频谱是由连续谱和线谱叠加而成的混合谱。连续谱反映噪声信号中随机噪声部分的能量分布, 大量的测量和分析表明, 潜艇噪声的连续谱有一峰值, 其谱峰频率的上限因舰船类型而异, 但都在 200Hz-400Hz 之间, 当频率低于谱峰频率的上限时, 频谱随频率的增高较平直(或略有提高), 它占有辐射噪声的绝大部分能量; 当超过这一频率上限时, 呈衰减趋势, 每倍频程衰减大约 6dB。

潜艇噪声谱的宽带连续谱分量的主要来源是螺旋桨噪声和机械噪声, 而线谱分量则集中在 1000Hz 以下的低频端, 主要有往复运动的机械噪声、螺旋桨叶片共振线谱和叶片速度线谱以及水动力引起的共振而产生。

功率谱中的线谱反应噪声信号中的周期性噪声部分(单个简谐信号和多个简谐信号组合)的能量分布, 它们多分布在低频(800Hz 以下)。线谱部分与推进系统、螺旋桨及辅机有关。辅机产生的线谱分量一般相当稳定, 与潜艇航速无关。对于推进系统和螺旋桨产生的线谱, 其幅度与频率随潜艇的速度而变化。螺旋桨未发生空泡时, 舰船噪声的线谱是相当强的, 当舰船航速增加而产生空泡时, 宽带噪声的强度会掩盖某些频率分量。

## 2、潜艇辐射噪声空间特性

潜艇辐射噪声的平面特性是反映潜艇声压级与距水听器的水平距离(沿潜艇首尾线方向)关系的一个重要特征, 通常称为纵向特性。当运动潜艇通过测量水听器侧方时, 被测潜艇声压级与水听器水平距离的关系称为潜艇辐射噪声的纵向特性。纵向特性与测量水深、测量频域范围有关。如果把纵向特性的水平距离用潜艇的航速与时间的乘积代替, 得到的声压级与时间的关系

就称为潜艇噪声通过特性。

作为声源的潜艇向外辐射噪声具有方向特性，即辐射噪声的能量在空间分布是不均匀的，声源级与观测点的方向有关。另一方面，在近距离上潜艇不能再像远距离上那样视为点声源，而应该视为由多个点声源即舰船中部的各类辅机、中后部的主机和尾部的螺旋桨噪声组成的体积声源。

图3.5给出了舰艇在激励频率为400Hz、880Hz时的水下声辐射指向特性曲线，图中水平方向为舰艇的艇头、艇尾方向。由图可见，机械噪声的辐射强度随着方位的不同而发生变化，艇艏和艇艉方向的辐射强度比其它方向小的多，而且辐射强度与噪声频率有很大关系。由计算得到声辐射指向性曲线，发现低频噪声的指向性曲线比较光滑，而高频噪声的指向性中的“瓣”比较密集。

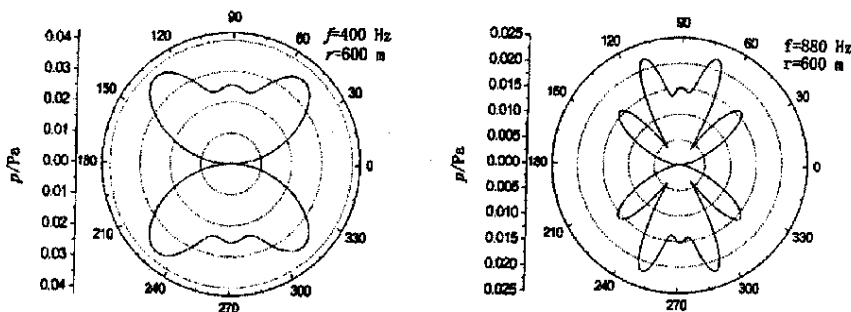


图3.5 舰艇水下噪声辐射的指向性曲线<sup>[66]</sup>

在距离被测艇某一参考点等距离处测得的辐射噪声级与舷角的关系称为水平平面特性，在垂直于艏艉线平面内距离某一参考点等距离测得的噪声级与铅垂线夹角的关系称为垂直平面特性。

图 3.6 为示意性地表示了潜艇辐射噪声的有方向性，通常实际的水平指向性的最大值并不在舷侧正横方向潜艇几何中心对应处取得，而是在舷侧靠艉部的方向。

从图中可以看出，潜艇辐射噪声水平指向性在正横方向最强，在首尾方向声辐射较弱。在艇艏方向声源级较小是由于艇壳对潜艇的主要噪声源有掩蔽效应，而艇艉方向声源级下降是由于尾流对声波的掩蔽效应。声源级的方

向性与潜艇的工况和噪声频率有密切关系,为了比较潜艇噪声声源级的大小,通常将水平舷侧方向的最大声源级作为潜艇噪声的声源级。

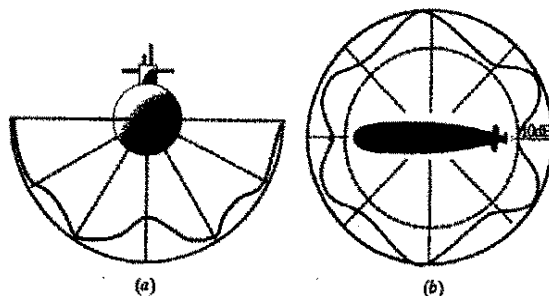


图 3.6 潜艇辐射噪声指向性示意图<sup>[4]</sup>

(a)垂直指向性; (b)水平指向性

### 3.3 低噪声潜艇辐射噪声测量方法

低噪声潜艇的主要特征是其水下辐射噪声小,其辐射噪声源级接近于海洋环境噪声,在要求的测量距离,由于传播衰减,传至测量点的信号级将低于该处的环境噪声级,因而用一般的测量设备就无能为力了。常规的单水听器、单点噪声测量方法,无论是采用 760 所的浮标吊放方式还是试验基地的潜标方式,都难以实现对新型艇的辐射噪声测量。

为测量和评估低噪声潜艇水下辐射噪声,西方国家和苏俄采取的方法是挑选环境噪声极低的海域开辟为专用的实验场,在海底铺设专门的测量基阵,测量信号通过海底电缆传输到岸上实验室进行处理,这样可有效的降低环境和测量装置本身干扰噪声的影响并可对目标进行精确的跟踪定位。但这种系统庞大复杂,费用昂贵,又缺乏机动性,对目前我国既难实现也不实用。

针对低噪声潜艇辐射噪声测量的要求,国内新的测量方法是采用垂直线阵和矢量水听器测量系统。本节介绍低噪声潜艇辐射噪声测量的方法

#### 3.3.1 测量方程

潜艇辐射噪声的大小使用声源级来表示,它定义为水听器声轴方向上距源的声学中心 1m 处的声强与参考声强之比的分贝数。由下式可以得到辐射噪声源的声源级:

$$SL = 10 \log \frac{I_N}{I_0 D_f} \quad (3-34)$$

式中,  $D_f$  是处理带宽;  $I_0$  是参考声强, 它是声压为  $1 \mu\text{Pa}$  的平面波的强度;  $I_N$  是距噪声声源声中心  $1\text{m}$  处的噪声声强。

舰船噪声测量尽管规定在标准距离上进行, 但是往往不一定都在这样的距离上进行测量, 为了便于比较, 需要换算到标准距离如  $1\text{m}$  处的总声源级。具体计算方法是将不同距离上测得的声级, 加上声波在海洋中的传播损失和吸收损失。当不计具体的传播条件, 近距离通常采用球面扩展规律加上吸收损失的简便规则, 即传播损失为

$$TL = 20 \log r + ar \times 10^{-2} \quad (3-35)$$

式中  $r$  是测量点到被测舰船的距离(米),  $a$  是吸收系数(分贝/千米)

在海洋中测量潜艇水下辐射噪声时, 潜艇辐射噪声、海洋环境参数和测量系统参数之间的关系遵循声纳方程:

$$SL - TL = NL - DI + DT \quad (3-36)$$

$SL$  为被测潜艇辐射噪声的声源级,  $NL$  为由测量环境和测量系统等产生的背景噪声级,  $DI$  为测量系统的接收指向性指数,  $TL$  为传播损失,  $DT$  为检测域, 设为测量的信噪比  $S/N$ , 则潜艇辐射噪声测量的基本方程为:

$$S/N = SL - TL - NL + DI \quad (3-37)$$

由于低噪声潜艇辐射声源级  $SL$  已大大降低, 为了保证在规定的信噪比下测量到低噪声艇的辐射噪声, 有 3 种途径:

#### (1) 减少传播损失 $TL$

减少传播损失就要缩短距离, 而距离过近, 一方面对潜艇水下导航定位和机动提出更高的要求, 另一方面, 潜艇体声源的近场效应更加突出, 距离归算更加困难。

#### (2) 降低测量背景噪声 $NL$

测量背景噪声包括测量系统的自噪声和海洋环境噪声。随着新的低噪测量放大器、测量水听器的应用, 测量设备的本身电噪声已成为次要因素, 测量系统的水下声系统抗流、减震、降噪设计就成为关键因素。测量时尽可能的选择海洋环境噪声级低的海域和季节, 但最低海洋环境噪声级的限制是客

观存在的。

### (3) 增加测量系统的指向性 DI

由于前两种途径的限制, 实现低噪声艇辐射噪声测量方法的基本原理就是增加测量系统的指向性。

大尺寸多元基阵测量系统和矢量水听器测量系统能获得较高的空间增益, 以下介绍这两种系统的测量理论和方法。

## 3.3.2 测量设备

### 1. 垂直线阵噪声测量系统

垂直线阵测量系统采用美国 PSI 公司前些年研制的活动式“垂直线阵测量系统”(PVLAMS)的方法, 用宽带恒定束宽的垂直线阵代替单点无方向性水听器, 以提高测量的信噪比。PVLAMS 系统已成功应用于美国和澳大利亚海军测量安静型潜艇辐射噪声。

垂直线阵测量系统的原理是利用垂直指向性提高信噪比。在环境噪声为各向同性的条件下, 垂直线阵的阵增益决定于波束主瓣的宽度  $\alpha$ 。当旁瓣响应可以忽略时, 阵增益为:

$$A = 10 \log \frac{180^\circ}{\alpha} \quad (\text{dB}) \quad (3-38)$$

可见减小主瓣宽度可以任意提高阵增益。但是, 主瓣的宽度必须保持一定的宽度以使它能照射到整个被测目标。

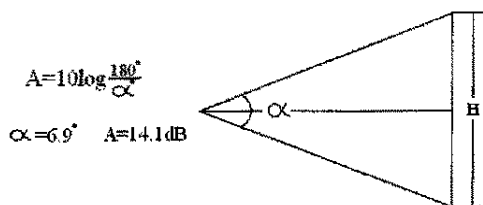


图 3.7 垂直阵的增益和主瓣宽度

如图 3.7 所示, 设目标高度为  $H$ , 距离为  $R$ , 则要求

$$\alpha \geq 2 \tan^{-1} \left( \frac{H}{R} \right) \quad (3-39)$$

取  $H=6$  米,  $R=50$  米, 则要求  $\alpha \geq 6.9^\circ$ , 此时阵增益为

$$A = 10 \log \frac{180^\circ}{6.9^\circ} = 14.1(\text{dB}) \quad (3-40)$$

垂直线阵测量系统的关键技术是恒宽束波束形成。一般的波束形成得到的指向性图是频率的函数，所以只适用于窄带信号，非恒宽束会破坏宽带信号的谱形状。许多研究者已提出多种或多或少成功的水声用恒宽束阵，有的是用能互相作用的阵元素组成阵，有的是将阵元排列成复杂的几何形状，这些方法能得到某个频带内的束宽恒定，但存在主波束形状上变化显著，旁瓣特性不好等缺点。该系统采用 Lardies 和 Guilhot 提出的利用滤波处理得到宽带恒宽束线阵的方法，将整个频带分割为多个倍频程带宽，对每个倍频程由若干个阵元组成两个互相嵌套的等间隔直线阵，用常规的延时—加权—求和方法得到两阵的方向性图，然后通过适当的补偿滤波将两个阵的输出迭加，使得在一个倍频程之间保持其方向特性不变。

该系统在距离潜艇 50m~100m 的近场测量，其海上布放示意图如图 3.8 所示。

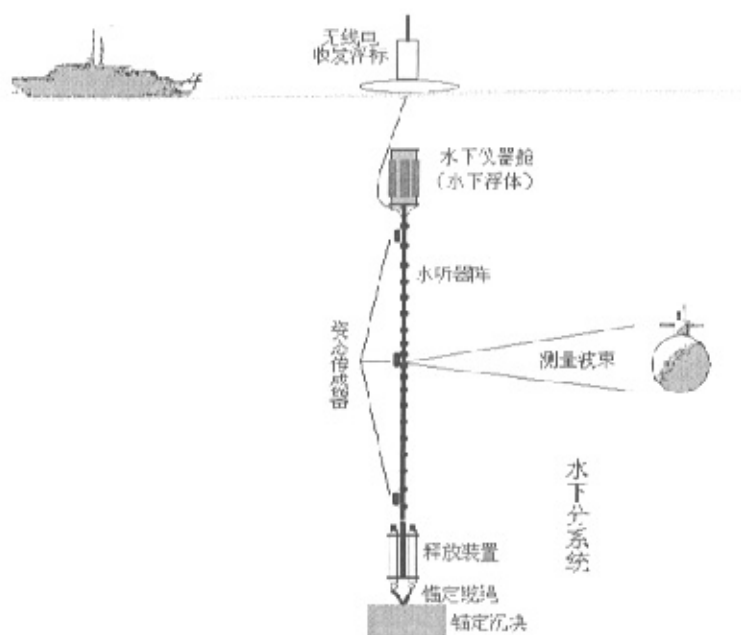


图 3.8 垂直线阵系统布放示意图



## 2. 矢量水听器噪声测量系统

矢量水听器由声压水听器和振速水听器复合而成,可以共点、同步、独立地测量声场中空间一点处的声压和质点振速的各正交分量<sup>[67][68][69][70]</sup>。

系统采用的低频和高频矢量水听器均由哈尔滨工程大学低噪声测量课题组自行研制,具有天然的空间指向性,图3.9给出了某型低频和高频矢量水听器的实测指向性图:

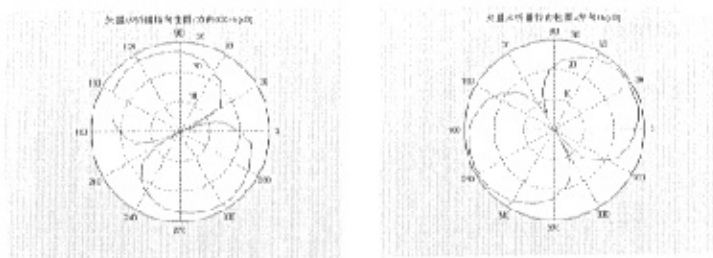


图 3.9 低频矢量水听器指向性图

矢量水听器测量系统的关键技术是声压、振速联合处理方法。

矢量水听器同步测量声场中一点处的声压  $p(\mathbf{r}, t)$  和质点振速  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$  的三个正交分量  $v_x(\mathbf{r}, t)$ 、 $v_y(\mathbf{r}, t)$  和  $v_z(\mathbf{r}, t)$ 。质点振速的三个正交分量可以用式(4-11)式表示:

$$\begin{cases} v_x(\mathbf{r}, t) = v(\mathbf{r}, t) \cos \phi \sin \theta \\ v_y(\mathbf{r}, t) = v(\mathbf{r}, t) \sin \phi \sin \theta \\ v_z(\mathbf{r}, t) = v(\mathbf{r}, t) \cos \theta \end{cases} \quad (3-41)$$

其中,  $\phi \in (0, 2\pi)$  为入射声波的水平方位角,  $\theta \in (0, \pi)$  为入射声波与 Z 轴的夹角。

以往平均声强的定义为:

$$\bar{I}(\mathbf{r}, t) = \overline{p(\mathbf{r}, t) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{r}, t)} \quad (3-42)$$

这时声压与质点振速的乘积为声强(声能流),而与以往定义不同的是,复声强的定义为:

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{r}, \omega) = p(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{v}^*(\mathbf{r}, \omega) \quad (3-43)$$

式中, 符号  $\omega$  表示频率, 上标\*表示复共轭。 $p(\mathbf{r}, \omega)$  和  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, \omega)$  分别是  $p(\mathbf{r}, t)$  和  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$  的 Fourier 变换。由公式 (4-13) 可见, 复声强定义在频域上。复声强还可以表示为有功声强和无功声强的形式:

$$\mathbf{I}_c(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{I}_o(\mathbf{r}, \omega) + i\mathbf{I}_r(\mathbf{r}, \omega) \quad (3-44)$$

式中,  $\mathbf{I}_o(\mathbf{r}, \omega)$  称为有功声强, 表示向远处传播的声能;  $\mathbf{I}_r(\mathbf{r}, \omega)$  称为无功声强, 表示不传播的声能。因此, 对于单频球面波, 有功声强与距离的平方成反比, 无功声强与距离的三次方成反比, 是有功声强的高阶小量, 远场条件下, 无功声强可以忽略不计, 声压和质点振速基本同相。

根据矢量水听器测量的声压  $p(\mathbf{r}, t)$  和质点振速  $\mathbf{v}(\mathbf{r}, t)$  的三个正交分量  $v_x(\mathbf{r}, t)$ 、 $v_y(\mathbf{r}, t)$  和  $v_z(\mathbf{r}, t)$ , 通过简单的信号处理很容易得到声强量, 见图 3.10。

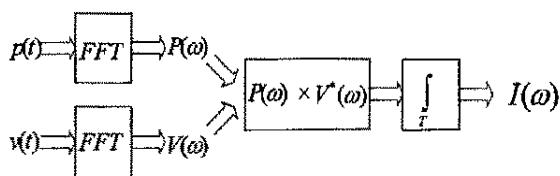


图 3.10 信号处理流程

以矢量水听器为核心的低噪声测量系统, 由无线数据传输控制分系统、水下湿端分系统、数据采集和记录分系统、实时监测分系统、数据分析处理分系统以及其它辅助测量分系统组成。由于系统能获得较高的空间增益, 可以在 800m~1000m 的远场进行测量, 系统海上布放示意图如图 3.11 所示:

对于整个测量系统来说, 有多方面的因素制约其取得目标高精度的辐射噪声, 这其中较为重要的因素有传播损失、导流罩吸声、矢量水听器的校准、测量电路的精度以及后置处理的影响。

矢量水听器低噪声测量系统已于 2006 年 4 月在大连海域进行了科研性海上试验。系统主要进行了矢量水听器与标准水听器的对比性试验、通过特性试验、同步测距试验、无线电拉距试验, 取得了良好的效果。

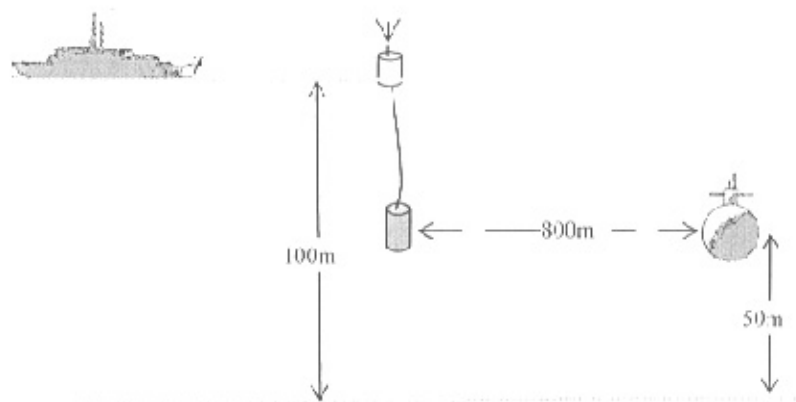


图 3.11 矢量水听器系统布放示意图

### 3. 潜艇辐射噪声测量的辅助方法

潜艇水下航行辐射噪声的测量是一项复杂的系统工程，除了测量系统本身外，还需要其它配套的设施和辅助方法，主要是：潜艇导航定位、同步测距和声场标校。

为保证潜艇各项试验的水下导航和精确定位，海军靶场配备了多套导航定位系统，包括长期使用的 Oceano 系统和其它长基线系统，目前哈尔滨工程大学正在为靶场研制更新的长基线系统。

#### (1) 水声同步测距<sup>[71]</sup>

在潜艇水下航行辐射噪声的测量中，潜艇的运动要素(航速、航向、距离等)是十分重要的测量内容，这些参数是噪声数据分析的重要参考依据，它们的准确性会直接影响到辐射噪声测量误差的大小。

同步钟式测距需要在被测艇上安装同步声信标，测量前信标与测量体进行同步。同步后在每次零时刻，信标发射一高频声脉冲，测量体开始计时，根据水听器接收脉冲到达的时间可以计算出距离。同步钟测距有利于实现连续测距而且不对舰船辐射噪声测量产生干扰，工作的可靠性容易得到保证。

靶场现有的单点式声压水听器噪声测量系统和目前在建的垂直阵测量系统、矢量水听器测量系统都配置了水声同步测距接收单元。

图 3.12 给出了信标装艇位置示意、本人攻读学位期间研制完成的自容式信标和带缆式信标控制器外观。

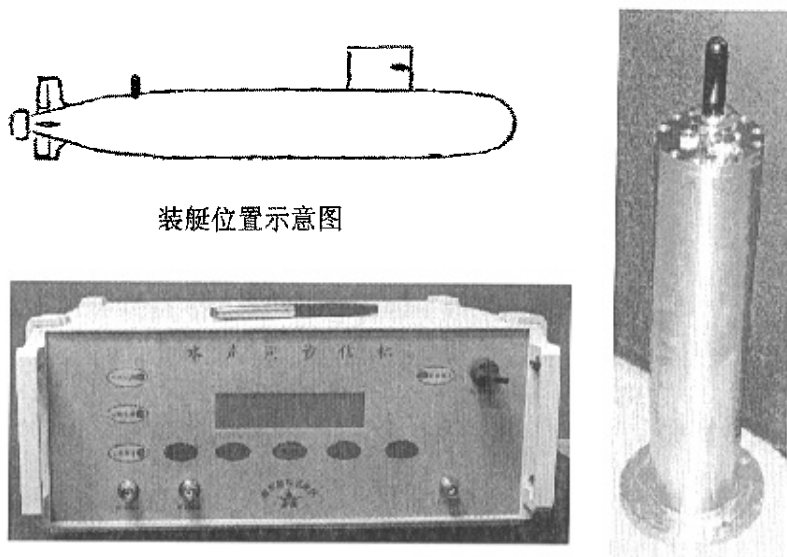


图 3.12 信标控制器及自容式信标

信标在艇上的安装位置为艇壳上表面 3 号仓段位置靠近预留孔处，在潜艇的尾部。该位置一方面距螺旋桨较近，靠近潜艇主要噪声辐射源，有利于距离归算，另一方面距舰桥较远，可以避免舰桥对高频信号的阻挡。

#### (2) 声场标校系统<sup>[72]</sup>

潜艇辐射噪声的测量结果是否可信，测量误差是否在规定的范围以内，是我们至为关心的问题之一。对于低噪声潜艇来讲，降低几分贝噪声已属很不容易，不能由于测量误差太大，而得出不正确的结果评估。因此，必须尽可能地提高各个环节的测量的精度。

海上测量误差与很多因素有关，除测量系统本身外，海区的声传播条件也是一个重要方面。在以往的潜艇辐射噪声测量工作中，一般都是按理想单点源、球面波传播衰减规律进行数据处理，显然，这是不够的，会带来较大误差，尤其是在不同海区不同季节的测量情况。如果能对测量频段内的声传播衰减规律进行现场精细的测量和标校，就会进一步提高测量精度。这不仅对低噪声潜艇噪声测量很重要，对靶场建设的两套不同原理的低噪声潜艇的辐射噪声测量系统的性能对比和标定也极为有意义。

系统安装在潜艇上，主要用于潜艇辐射噪声测量海区的声场校准，提供标准声源和同步测距声源。

### 3.4 本章小结

积分法一般在频率域就单频成分进行，可以直接计算声场外任意观察点处的声场。克希荷夫（基尔霍夫，Kirchhoff）公式是积分法的基础。本章介绍了 Kirchhoff 积分公式及其简化的瑞利积分公式。根据瑞利公式讨论了活塞辐射器的近场菲涅尔(Fresnel)区干涉特性和远场弗朗霍夫区的近似判据。

潜艇的辐射噪声场是多个源辐射构成的复杂声场，从频谱上来说具有由连续谱和线谱叠加而成的混合谱结构，从空间上来说具有复杂的空间分布特性。特别是其空间分布特性，使得传统的辐射噪声测量方法和距离归算方法难以获得高精度的结果。

由于传播损失和测量背景噪声的限制，实现低噪声艇辐射噪声测量方法的基本原理就是增加测量系统的指向性。垂直线阵测量系统的原理是利用垂直指向性提高信噪比，其关键技术是水听器阵宽带恒定束宽波形成方法。矢量水听器可以共点、同步、独立地测量声场空间一点处的声压和质点振速的各正交分量，测量系统采用声压振速联合处理来获得空间增益。垂直线阵系统在近场测量，矢量水听器系统可以在远场测量，其配套的设备主要是水声同步测距系统和声场标校系统。

## 第 4 章 浅海近程声传播损失异常修正

声波在海洋介质中的传播损失，主要包括扩展损失、衰减损失和界面引起的损失。扩展损失是指波阵面在传播过程中不断扩大，使得单位时间内单位面积上能量的减小，即平均功率密度减小，也就是声强减小。对于无限均匀介质空间，扩展损失是球面扩展损失；对于非均匀有限空间，则是非球面扩展损失，损失大小与介质中的声速分布和界面条件有关。界面损失包括海面边界引起的损失和海底边界引起的损失。

传播损失异常是指实际传播损失  $TL$  与球面波扩展衰减规律之差  $TL-20\lg R$ 。

为了粗略地估计传播损失，Marsh 和 Schlkin 提供了一组便于使用的半经验公式。这些半经验公式是根据大约十万个(在 0.1 到 10 千赫频率范围内)测量值总结得到的。定义  $R=[(H+L)/3]^{1/2}$ ， $H$  是海水深度  $m$ ， $L$  为浅海表面混合层的厚度  $m$ ， $R$  为距离参数  $km$ 。在近距离范围内，即距离  $r < R$ ，传播损失为(分贝)

$$TL = 20\log r + ar + 60 - k_L \quad (4-1)$$

式中  $r$  为水平距离  $km$ ， $a$  为海水吸收系数  $dB/km$ ， $K_L$  是近场传播异常  $dB$ ，它与海况和海底类型有关，如图 4.1 所示：

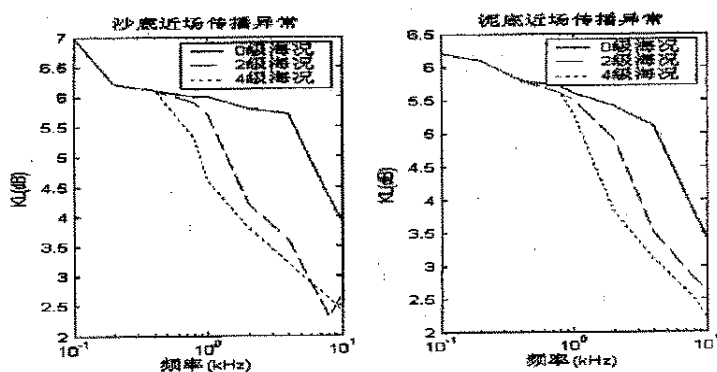


图 4.1 半经验公式的近场传播异常

由图 4.1 可见，低频近场传播异常比高频大，100Hz 频率的传播异常比

1kHz 频率大 4dB；沙底海域的近场传播异常比泥底大，反映了海底反射对传播损失的影响；低海况的近场传播异常比高海况大，反映了海面镜面反射对传播损失的影响。

本章以简单的声场模型为基础，从理论上研究由界面引起的浅海近程声传播损失异常。

#### 4.1 海面虚源干涉效应

当海表面不太粗糙时，它使水下声场产生干涉图案。这种图案是由直达声和表面反射声之间的相长干涉和相消干涉所形成的，这种干涉称为洛埃镜效应或虚源干涉效应<sup>[6][7]</sup>。

若有一点源  $S$  位于靠近水平面下  $z_1$  深度处，接收点  $P$  位于坐标  $(x, y, z)$  处，位置如图 4.2 所示。

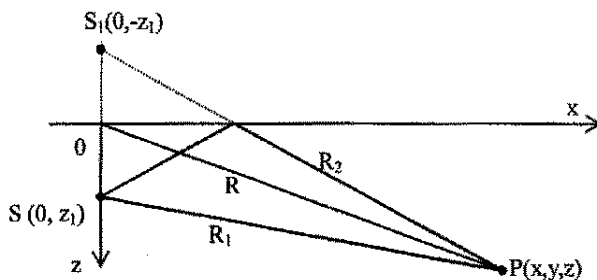


图 4.2 水下点源  $S$  和虚源  $S_1$  形成的声场

对于不存在海表面的无界空间，点源  $S$  发射的各向均匀球面波表为

$$p = \frac{1}{R_1} e^{-jkR_1} \quad (4-2)$$

式(4-2)满足波动方程  $\nabla^2 p + k^2 p$  和辐射定解奇性条件式：

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -4\pi\delta(r)Ae^{j\omega t} \quad (4-3)$$

但是，式(4-3)不满足自由边界条件。为此根据镜反射原理引入一位于  $(0, -z_1)$  点上的虚源  $S_1$ ，总声场应由点源  $S$  和虚源  $S_1$  共同组成，则声压为

$$p = \frac{1}{R_1} e^{-jkR_1} - \frac{1}{R_2} e^{-jkR_2} \quad (4-4)$$

$$\text{式中 } R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - z_1)^2}, \quad R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + z_1)^2}。$$

当  $z=0$  时,  $R_1=R_2$ 。为了使式(4-4)满足  $z=0$  处的边界条件  $p=0$ , 在式(4-4)的第二项前面必须有一负号。

声场表式(4-4)可看成直达声线 SP 和海面反射系数  $V=-1$  的反射声线  $S_1P$  的声场迭加。在这里使用了球面波反射声压等于平面波反射系数(-1)乘上球面波入射声压的关系, 这对于反射系数等于常数的平整海面来说是正确的。

### 1. 声压振幅随距离的变化

考虑距离  $R$  远大于声源深度  $z_1$  和接收深度  $z$  情况下的声振幅随距离的变化。根据图 4.2, 取近似  $R \approx r^2 + z^2 + z_1^2$ , 则

$$p \approx 2 \left[ \frac{zz_1}{R^3} \cos \left( k \frac{zz_1}{R} \right) + j \frac{1}{R} \sin \left( k \frac{zz_1}{R} \right) \right] e^{jkR} \quad (4-5)$$

一般情况下, 满足  $zz_1/R \ll 1$ 。因而声压幅值可近似表示为

$$|p| = \frac{2}{R} \sin \left( k \frac{zz_1}{R} \right) \quad (4-6)$$

当距离  $R=R_N$  满足

$$R_N = \frac{kzz_1}{\pi \left( N + \frac{1}{2} \right)} \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (4-7)$$

时, 声压极大值为

$$|p| = \frac{2}{R_N} \quad (4-8)$$

这是接收点位于近场菲涅尔区内, 直达声和海面反射声同相迭加的结果。声压幅值与距离  $R_N$  成反比, 且是单个点源声压幅值  $1/R_N$  的两倍。在菲涅尔干涉区内, 声压最后一个极大的距离  $R_{N=0} = 2kzz_1/\pi$ , 当  $R$  大于此值时可



以认为接收点已离开菲涅尔干涉区，进入弗朗霍夫区。在弗朗霍夫区内，声压随  $r^{-2}$  单调减小，声强随  $r^4$  减少。

在菲涅尔干涉区内，声压极小值与  $R$  的三次方成反比，与  $z$  和  $z_1$  乘积成正比。这是点源  $S$  和虚源  $S_1$  反相迭加的结果，两点源离开接收点的距离不完全相等，振幅值也不相等，因而，反相合成声压不等于零。在  $R^{-3}$  项上出现差值，故声压极小值与  $R^3$  成反比。

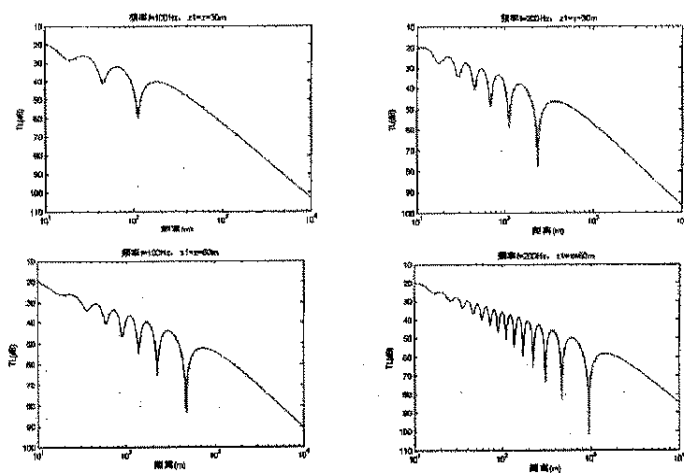


图 4.3 海面干涉形成的声传播损失异常

图 4.3 中画出传播损失的规律。近场干涉区声压振幅极大值与  $R$  成反比，极小值与  $R$  三次方成反比，远场弗朗霍夫区内声压振幅与  $R$  平方成反比。

由图中可以看出，相同的深度，频率高的菲涅尔干涉区距离远；相同的频率下，深度大的菲涅尔干涉区距离远。

对于平整海平面下的点源声场，当  $R > z_1$  和  $z$ ，接收点位于菲涅尔干涉区内，声压极值由 (4-8) 给出，则传播损失为：

$$TL = 20 \lg R - 20 \lg \left[ \sin \left( \frac{kzz_1}{R} \right) \right] \quad (4-9)$$

弗朗霍夫区内传播损失为  $TL=40 \lg R$ ，在该区域内，距离增加一倍， $TL$  达 12dB，是球面扩展  $TL$  分贝值的二倍。

上面为平整自由海面下点源声场的传播损失，在海面波浪明显增长时，其反射系数由平均反射系数 ( $V=\mu$ ) 给出。 $\mu$  为大于零小于 1 的正数。 $\mu$  与

海面波浪的垂直位移、声波频率和声波的海面掠射角有关,  $\mu$  随波浪位移增长、声波频率提高和掠射角加大而减小。当  $\mu$  值接近于零时, 表示散射场中相干散射的成分很小, 可以忽略不计, 海面散射完全是漫散射。一般说来,  $0 < \mu < 1$ , 这时直达声和海面反射声组成的合成声场表为

$$p = \frac{1}{R} e^{-jk \left( R - \frac{zz_1}{R} \right)} - \frac{\mu}{R} e^{-jk \left( R - \frac{zz_1}{R} \right)} \quad (4-10)$$

传播损失为

$$TL = 20 \lg R - 10 \lg \left[ 1 + \mu^2 - 2\mu \cos \left( \frac{2kzz_1}{R} \right) \right] \quad (4-11)$$

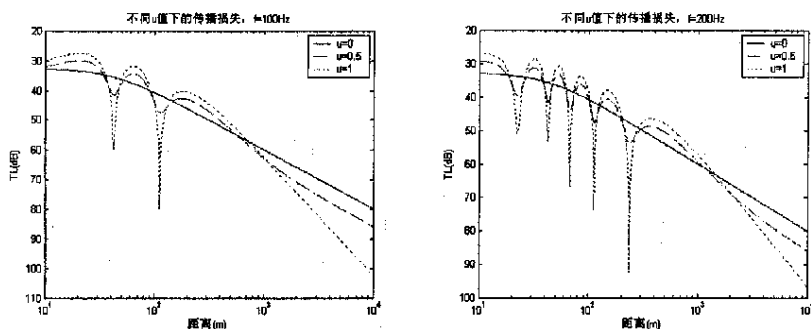


图 4.4 不同  $\mu$  值下的传播损失

传播损失  $TL$  与球面波的传播损失之差  $TL - 20 \lg R$  称为传播损失异常。图 4.4 给出  $TL$  随  $\mu$  的变化。其中  $\mu=0$  即为正常球面波衰减的  $20 \lg R$ , 另外两条线与  $\mu=0$  曲线的差即为传播损失异常。由式(4-11)及图 4.4 可见, 高频的传播损失异常较低频复杂。

## 4.2 浅海多途干涉

浅海是指声传播明显地受海面和海底边界影响的海域。在分析浅海声场时, 除考虑直达声以外, 还必须考虑经过一次和多次海面海底的反射声, 总声场等于直达声和这些反射声的迭加。实质上, 浅海多途干涉是更加复杂的虚源干涉效应。

虚源表示式的导出过程, 可以清楚地给出浅海声场的直观物理景象, 浅

海声场要比探海复杂。这里把经海面 and 海底的反射声线看成是由各自的虚源发出的声线，虚源数目随着计入声线的反射次数的增加而增加。虚源数目达到无穷的声线迭加，组成了浅海的总声场。

假定有一深度  $z=H$  的浅海声速均匀层，上界面  $z=0$  为平整自由界面，下界面  $z=H$  为平整硬界面，如图 4.5 所示：

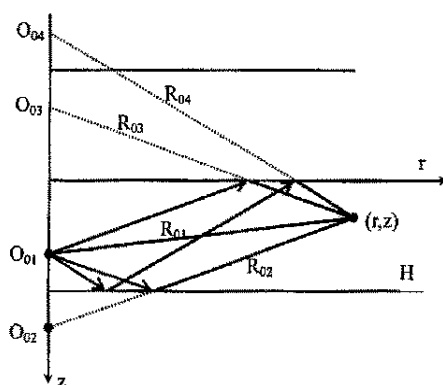


图 4.5 浅海多途干涉的虚源示意图

点声源  $O_1$  位于坐标  $(0, z_0)$  处，观察点位于坐标  $(r, z)$  处。它们相距  $R_{01} = \sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}$ ，因而，归一化的直达波声压等于  $P = R_{01}^{-1} \exp(jkR_{01})$ 。首先计入经海底一次反射的声线，它由虚源  $O_{02}$  发射的声线，与直达声叠加后，声压

$$p = \frac{\exp(jkR_{01})}{R_{01}} + \frac{\exp(jkR_{02})}{R_{02}} \quad (4-12)$$

式中， $R_{02} = \sqrt{r^2 + (2H - z - z_0)^2}$

将式 (4-12) 中的  $p$  对  $z$  求导  $\partial p / \partial z$ ，由于点源  $O_{01}$  和虚源  $O_{02}$  对于界面  $z=H$  来说是对称的，满足硬边界条件  $(\partial p / \partial z)_{z=H} = 0$ 。但是，点源  $O_{01}$  和虚源  $O_{02}$  并不对称于界面  $z=0$  的自由界面，因此，式 (4-12) 的  $p$  不满足自由界面条件  $p_{z=0} = 0$ 。为此，考虑再加上对称于界面  $z=0$  的两个虚源  $O_{03}$  和  $O_{04}$ 。

$O_{03}$  与  $O_{01}$  对称,  $O_{04}$  与  $O_{02}$  对称。由于满足自由界面的偶极对称, 反射声线的相位需改变  $180^\circ$ , 可求得 4 点源  $O_{01}$ 、 $O_{02}$ 、 $O_{03}$ 、 $O_{04}$  的合成声压。

$$p = \frac{\exp(jkR_{01})}{R_{01}} + \frac{\exp(jkR_{02})}{R_{02}} - \frac{\exp(jkR_{03})}{R_{03}} - \frac{\exp(jkR_{04})}{R_{04}} \quad (4-13)$$

$$\text{式中, } R_{03} = \sqrt{r^2 + (z + z_0)^2} \quad R_{04} = \sqrt{r^2 + (2H + z - z_0)^2}$$

如果观察点移到海面  $z = 0$  处, 有  $R_{01} = R_{03}$ ,  $R_{02} = R_{04}$ , 可见上式的  $p$  满足上界面自由边界条件, 但不满足下界面硬边界条件, 为了恢复下界面的对称性, 可再叠加两个虚源  $O_{11}$  和  $O_{12}$ , 它们分别由  $O_{03}$  和  $O_{04}$  对下界面作镜反射而引入则得到六点源的合成声压。但是, 六点源的合成又破坏了上界面的对称性。为此, 继续增加迭加的虚源对数。每增加一对源, 相应于多计入一次海面或海底的反射声线。虚源阶数  $M$  越高, 声线经过海面和海底的反射次数越多, 虚源离观察点距离越远, 对合成声压贡献也越小。当虚源个数趋于无限时, 合成声压表式在上、下界面上都满足它们各自的边条件, 总声场写成

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \left[ \frac{\exp(jkR_{n1})}{R_{n1}} + \frac{\exp(jkR_{n2})}{R_{n2}} - \frac{\exp(jkR_{n3})}{R_{n3}} - \frac{\exp(jkR_{n4})}{R_{n4}} \right] \quad (4-14)$$

$$\text{式中 } R_{ni} = \sqrt{r^2 + z_{ni}^2} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

$$z_{n1} = 2Hn + z - z_0$$

$$z_{n2} = 2H(n+1) - z - z_0$$

$$z_{n3} = 2Hn + z + z_0$$

$$z_{n4} = 2H(n+1) + z - z_0$$

式(4-14)为均匀层硬质海底的声场虚源表示式。

可以把式(4-14)推广到满足一般平整界面的情况。若令  $V_1$  代表下界面的声压反射系数,  $V_2$  为上界面的声压反射系数, 不同虚源声线有不同的入射角  $\theta_{in}$ , 如果假定  $V_1$  和  $V_2$  与声线入射角  $\theta_{in}$  无关, 则式(4-14)改写成

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} (V_1 V_2)^n \left[ \frac{\exp(jkR_{n1})}{R_{n1}} + V_1 \frac{\exp(jkR_{n2})}{R_{n2}} + V_2 \frac{\exp(jkR_{n3})}{R_{n3}} + V_1 V_2 \frac{\exp(jkR_{n4})}{R_{n4}} \right] \quad (4-15)$$

即使反射系数  $V$  与入射角  $\theta_{in}$  有关, 式 (4-15) 也近似成立。图 4.6 给出了 1 阶和 2 阶的虚源干涉传播损失异常。

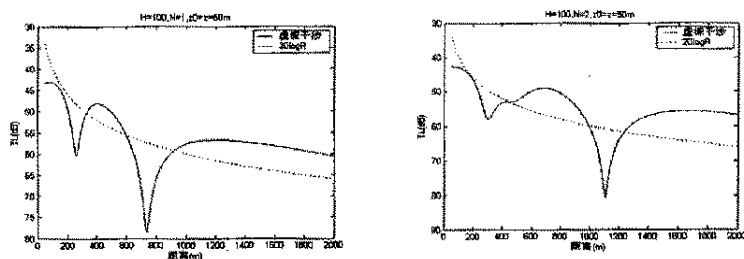


图 4.6 虚源干涉的传播损失异常

### 4.3 Pekeris 环境模型的传播损失异常

本节根据第 2 章的简正波模型, 计算两层均匀介质的 Pekeris 环境模型传播损失。

模型海洋环境为海深  $h=200m$ , 假设海底深度  $H=3000m$ , 海水密度  $\rho_1=1g/cm^3$ , 海水声速  $c_1=1500m/s$ , 海底密度  $\rho_2=1.5g/cm^3$ , 海底声速  $c_2=2000m/s$ , 海底吸收系数为  $\alpha=0.5dB/\lambda$ , 信号频率  $F=10Hz$ , 而且海面假设海底为自由边界条件, 如图 4.7 所示。传播损失计算结果如图 4.8 所示。

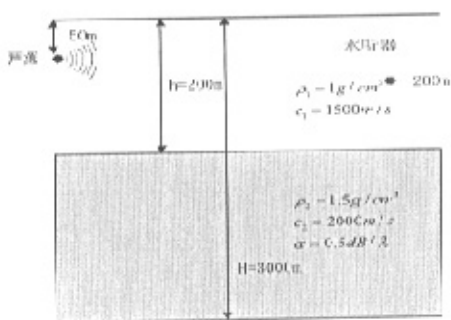


图 4.7 两层均匀介质的 Pekeris 环境模型

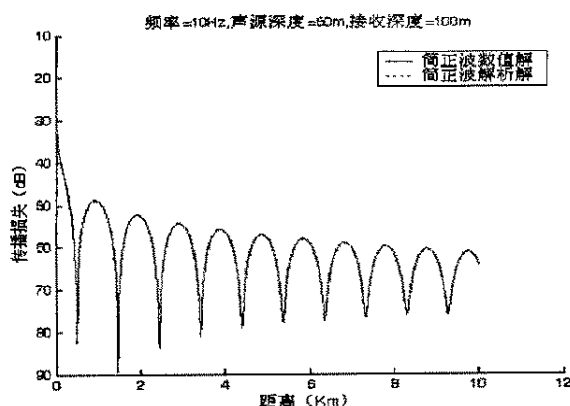


图 4.8 两层均匀介质 Pekeris 模型的传播损失

由图 4.8 可见, 10Hz 的声信号在上述海洋环境中 2km 距离内有两次较大的传播异常起伏, 异常值达到近 8dB。

#### 4.4 侧面波

侧面波在实质上, 是球面波在平面分界面上反射时, 沿全内反射临界角  $\theta_c$  入射的折射波束在沿界面传播过程中, 不断向上方介质辐射而形成的<sup>[5][42]</sup>。

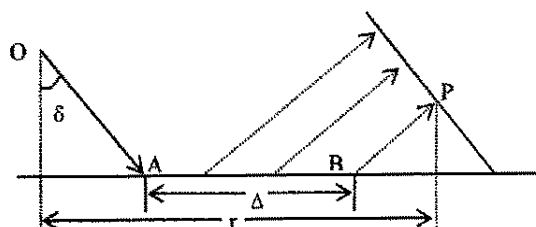


图 4.9 侧面波的成因

利用简单的物理推论, 可以了解侧面波的成因。一球面波从源 O 以全内反射角  $\delta$  ( $\sin \delta = n$ ) 入射到位于边界面上的点 A, 在下面介质中它激发一个沿着边界而传播的波(图 4.9)。在传播过程中此波不断地辐射一部分能量返回到上面介质, 这就是侧面波的起因。根据折射定律, 相应于侧面波的射线族与界面法向成角度  $\delta$  离开边界面。侧面波的波前 P 在空间中是相对于通过 O 的垂直轴对称的锥面。

关于 Pekeris 波导中声的传播, Pekeris, Brekhovskikh, Eisler 和国内学者

都做过较为深入的研究<sup>[45][51][52]</sup>, 得到声压场的分解形式: 简正波(normal mode)和侧面波(lateral wave)。然而从前的工作更注重在远距离起主要作用的简正波, 对在中近距离起重要作用的侧面波只得到近似解析式。

文献[45]将球面波展开成平面波的积分形式, 并导出了 Pekeris 波导中声压场的积分解:

$$\Psi = jk \int_{-(\pi/2)+j\infty}^{(\pi/2)+j\infty} \frac{\sin b(z-h)(e^{-bz_0} + Ve^{bz_0})}{(1+Ve^{2bh})e^{-bh}} H_0^{(1)}(kr \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (4-16)$$

式中:  $V = \frac{m \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}$ ,  $m = \frac{\rho_1}{\rho}$ ,  $n = \frac{c}{c_1}$ ,  $b = jk \cos \theta$ ,  $k = \frac{\omega}{c}$ 。

积分路径如图 4.10 中的  $\Gamma_0$ 。

在求解声压场的积分式的过程中, 根据不同的积分路径, 声压场分解为留数和形式的简正波解:

$$\Psi_N = \sum \text{Res} = \frac{2\pi j}{h} \sum_i \frac{\sin \left[ x_i \left( 1 - \frac{z_0}{h} \right) \right] \cdot \sin \left[ x_i \left( 1 - \frac{z}{h} \right) \right] \cdot H_0^{(1)}(kr \sin \theta_i)}{1 - \left( \frac{kh r}{mx_i} \right)^2 \cdot \frac{1}{x_i} \cdot \tan x_i \sin^2 x_i} \quad (4-17)$$

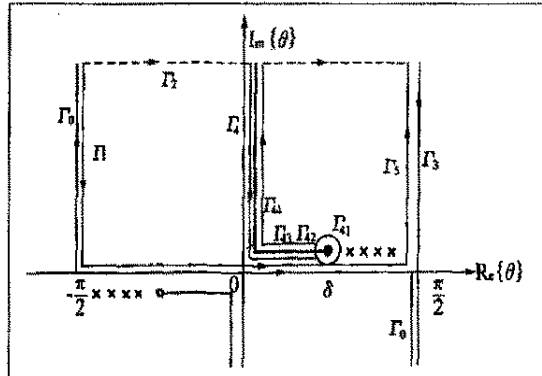


图 4.10 简正波积分路径

其中  $x_i = kh \cos \theta_i$ ,  $\theta_i$  为围道内极点, 由频散方程定义:

$$mx \cdot \text{ctgx} = -\sqrt{(kh\gamma)^2 - x^2} \quad \text{其中 } x = kh \cos \theta, \quad n = c/c_1, \quad \gamma^2 = 1 - n^2, \quad k = \omega/c,$$

$$m = \rho_1 / \rho_0$$

在路径  $\Gamma_4$  上积分则可得到侧面波的积分式:

$$\Psi_{t,1} = 2jk \int_0^{\pi/2} \frac{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \sinh b(h - z_0) \sinh b(h - z)}{\sigma m \cos \theta \left[ \cosh^2 bh - \frac{(n^2 - \sin^2 \theta) \sinh^2 hb}{m^2 \cos^2 \theta} \right]} H_0^{(1)}(kr \sin \theta) \sin \theta d\theta \quad (4-18)$$

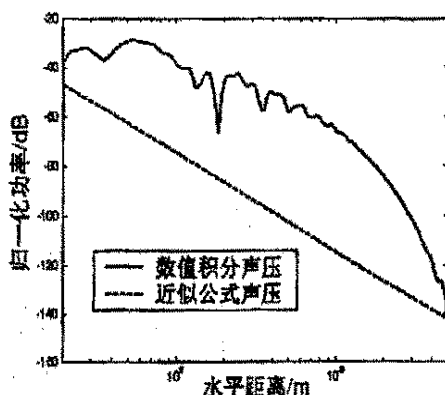


图 4.10 侧面波的近似解与精确解<sup>[52]</sup>

侧面波的近似解在中近距离,正是侧面波发挥作用的距离误差很大,如图 4.10 所示,声波频率 200Hz,  $h=47\text{m}$ ,  $z_0=43.4\text{m}$ ,  $z=1.5\text{m}$ 。图中显示,侧面波的近似解和解析解相差达到 30dB-50dB。

#### 4.5 多途信道模型的传播损失异常<sup>[73]</sup>

仿真参数的选取主要取决于仿真研究目的和各参数分别对传播衰减损失的影响。例如,由于考虑为近程声场,因而声波传播的距离较近;同时,由于主要研究环境参数对传播损失的影响,所以仿真计算是在选取基本参数的前提下,通过某个环境参数在一定范围的变化来进行,即对一定频率带宽的白噪声,考虑不同的水文条件、海区深度、点声源深度、水听器深度以及海底声学参数来研究其对声传播损失的影响。

基本参数选取为:单点噪声源、白噪声频率的带宽  $\Delta f$  为 100~1000Hz、接收点离声源的水平距离  $r$  的范围为 30~50m、海区深度  $H$  范围为



50~150m、声源深度 $z_s$ 范围为5~40m、水听器深度 $z_h$ 范围为10~45m、海面反射系数为 $V_s(\theta_s)=0.95$ 。水文条件分布见表4.1,海底介质的参数取值见表4.2

表 4.1 水文条件分布

| 声速度分布         | 均匀层  | 正梯度层               | 负梯度层                | 跃变层 |                     |
|---------------|------|--------------------|---------------------|-----|---------------------|
| 相对梯度<br>(1/s) | 0    | $2 \times 10^{-5}$ | $-1 \times 10^{-4}$ | 上层  | $-1 \times 10^{-4}$ |
|               |      |                    | $-5 \times 10^{-4}$ | 跃变层 | $-1 \times 10^{-3}$ |
|               |      |                    |                     | 下层  | $-1 \times 10^{-4}$ |
| 各层厚度<br>(m)   | 海区深度 | 海区深度               | 海区深度                | 跃变层 | 4                   |

其中,海面声速度 $c=1450$ 米/秒。

表 4.2 海底介质的参数取值

| 高声速海底       | 低声速海底       |
|-------------|-------------|
| $m = 2.034$ | $m = 1.590$ |
| $n = 0.909$ | $n = 1.111$ |

其中, $m$ 为海底密度与海水密度的比值、 $n$ 为海水声速度与海底声速度的比值。

根据上述参数进行仿真计算,其结果分析如下:

#### 1. 水文条件的影响

(1)各水文条件下的传播衰减曲线与球面波的衰减规律相比较有较大的差异,这个差异的大小与海底介质、海深、声源和水听器的位置有关。在海底介质为高声速海底下,最大可达8dB。

(2)从各水文条件下的传播衰减曲线间的比较可以看出:①负声速梯度的传播衰减最大。这可能是因为负声速梯度的折射效应的缘故,致使声线折向海底,造成海底处的入射掠角过大。②等声速层的传播衰减曲线与正声速梯

度的曲线大体相同。③跃变层对声波的影响不明显，其传播衰减曲线与等大小的负声速梯度的曲线大体相同，原因声波的频率不太高或跃变层厚度太薄，因而影响不明显；此外，跃变层对较远处声场影响大，而对近距离处声场影响较小。④在海底介质为高声速海底情况下，当声源和水听器的位置在某些位置下，各水文条件下的传播衰减曲线趋于同一变化规律。

部分结果见图 4.11 所示，图示中的  $1/r^2$  代表球面波的衰减曲线。

## 2. 海底介质的影响

(1) 高声速海底与低声速海底比较，在海深较小的情况小，低声速海底的传播损失要大于高声速海底，但随着海深的增加，它们之间的差异减小。见图 4.12。

(2) 海深对高声速海底下的传播损失影响较大，而对低声速海底的影响很小。

## 3. 声源、水听器位置的影响

对高声速海底，随着声源或水听器深度的增加，传播衰减曲线的斜率减小，曲线变得平坦。声源、水听器位置的影响参见图 4.13。

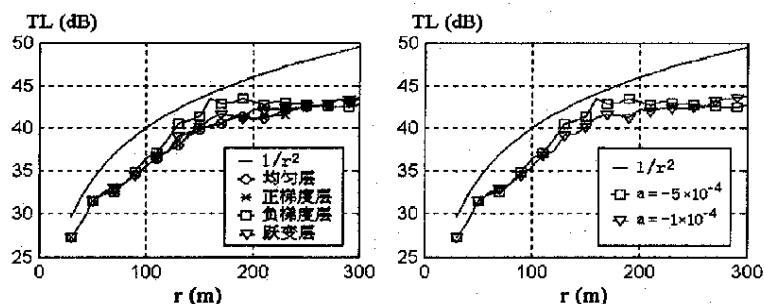


图 4.11 传播损失曲线与声速分布关系

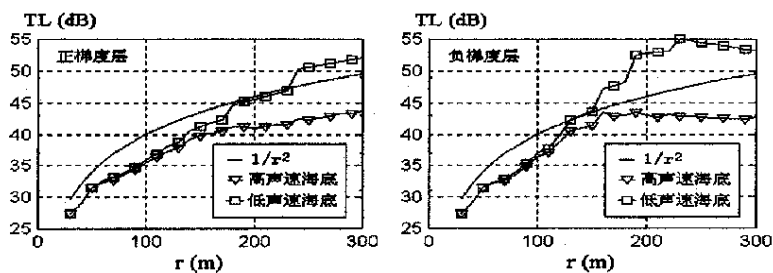


图 4.12 传播损失曲线与海底介质关系

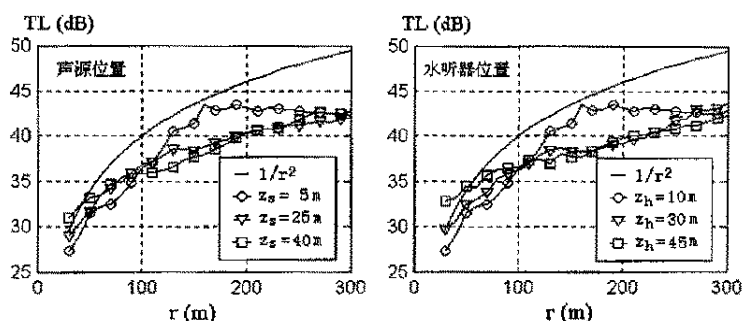


图 4.13 传播损失曲线与声源、水听器深度关系

#### 4. 海深的影响

- (1) 海深对高声速海底的影响较大，而在低声速海底下，其影响则很小。
- (2) 对高声速海底，随着海深的增加，导致大于球面波传播损失的点前移。

如图 4.14 所示。

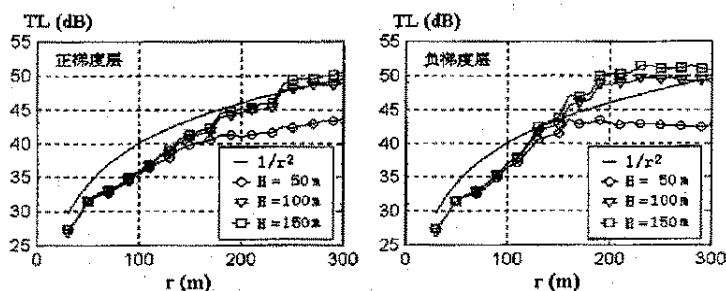


图 4.14 传播损失曲线与海区深度关系

## 4.6 本章小结

浅海是声传播明显的受到海面和海底边界影响的海域。在分析浅海声场时，除考虑直达声以外，还必须考虑经过一次和多次海面 and 海底的反射声，总声场等于这些直达声和这些反射声的迭加。

点噪声源在近距离声场的传播损失曲线，不仅与声速分布、海区深度、海底反射特性等环境条件有关，而且还取决于声源及接收水听器的位置。

近程声传播损失规律在一般情况下不符合球面波衰减规律，其差异最大时可达到 8dB。这表明测量舰船目标的辐射噪声声源级时，必须对所处的声

场进行校正测量，否则，按球面波衰减规律进行推算的结果是有时无法满足所要求的测量精度。

传播损失异常的修正量可以根据本章的计算方法获得。

## 第 5 章 潜艇辐射噪声的近场测量

### 5.1 潜艇辐射噪声的近似计算

潜艇水下辐射噪声的计算主要用于潜艇声学设计和噪声预报。俄罗斯拥有全套声学设计指南和 underwater 噪声计算方法。利用这套计算方法可计算：机械和系统引起的噪声；桨运转及船体相互作用而引起的噪声；船体绕流引起的噪声；给定工况下的总噪声级；还可进行初期设计阶段水下噪声数理模型的确定、水下噪声估算，并可得出桨-船体系统声辐射理论与试验方法以及根据桨模试验预报实桨噪声级的方法等<sup>[3]</sup>。

文献[65]给出了一种基于传递函数不变意义下的均方加速度法。该方法以实验数据为基础，对同类结构，在确定了结构噪声辐射效率因子的基础上，再通过直接法或间接法获得的结构表面均方加速度分布，即可估算水下结构的辐射噪声。

文献[3]介绍了国外计算、预报潜艇近场和远场辐射噪声的数理模型。如法国梅塔威博(Metravib R.D.S)公司的 GAP 软件，对于直径 5m 的典型潜艇适用频率可达 1700Hz，覆盖了声纳的低、中频段；英国付瑞塔-纳希(FrazerNast)公司的 FNV-Noise，能够预报敷盖消声瓦潜艇的近场、远场噪声；德国土伦海军 CerdanDCN 预报方法为传递函数法，着重预报装艇设备产生的水噪声。以英国噪声和振动协会为首，联合造船厂和有关单位研制了一种船舶噪声设计软件，称做 NDES(Noise Design for ship)。

张升明<sup>[74]</sup>从完整的结构振动理论公式与水中声辐射的波动方程、赫姆霍兹积分公式出发，根据工程实际情况逐步简化推导了船舶结构振动与声辐射的近似计算公式：

#### 1. 由结构振动计算远场声辐射

$$L_p = L_a + 10 \lg A + 102.5 - 20 \lg f - 20 \lg r_0 \quad (5-1)$$

式中，A—结构振动面积  $m^2$ ；

f—频率 Hz；

$r_0$ —声场位置与结构物面的平均距离 m；

$L_p$ —水中声压级 dB, 参考值  $P_0=10^{-6}\text{Pa}$ ;

$L_a$ —结构振动加速度级, 参考值  $a_0=10^{-6}\text{m/s}^2$ 。

式(5-1)即为由结构振动加速度级  $L_a$  (dB) 计算远场 P 点 ( $r_0$  距离) 处的声压级  $L_p$  (dB) 的近似公式。使用式(5-1)时应注意以下几个条件:

(1) 结构振动的加速度是整个振动表面的平均振动级, 点的数目要求相邻振动点的距离不大于水中声波波长的  $0.8\lambda$ 。

(2) 结构表面的曲率半径大于声波波长, 并且声场点 P 距离结构很远 ( $kr_0 \gg 1$ ), 即  $r_0$  为几倍的声波波长  $\lambda$ 。如果结构表面的曲率半径很大, 那么式(5-1)使用的频率范围就宽。对于水面舰船而言, 船底板或船舷外板的曲率半径都很大, 式(5-1)可以在  $300\text{Hz} \sim 400\text{Hz}$  以上使用。

在确定结构振动面积  $A$  时, 取从 P 点所能看到的那部分结构的振动面积或者是其截面。

## 2. 由结构振动级估算声辐射的声源级

结构振动所产生的远场声辐射确定后, 一般都要推算到距离声源中心  $1\text{m}$  处的声级, 称为声源级, 用  $L_s$  表示。

$$L_s = L_p + 20\lg r_0 = L_p + 10\lg A + 102.5 - 20\lg f \quad (5-2)$$

## 3. 由近场噪声计算远场噪声

$$L_p = L_{p_0} + 10\lg A - 20\lg r_0 - 5 \quad (5-3)$$

式中,  $L_p$ —远场 P 处 (距离结构  $r_0$  米) 的声压级;

$L_{p_0}$ —近场的平均声压级;

$A$ —结构振动面积  $\text{m}^2$ , 水声参考值  $P_0=10^{-6}\text{Pa}$ ;

## 4. 由近场噪声估算声辐射的声源级

$$L_s = L_{p_0} + 10\lg A - 5 \quad (5-4)$$

式中,  $L_s$ —声源级 (dB)

文献[74]对上述近似计算公式进行了试验验证。某试验, 潜艇辐射噪声主要主要由螺旋桨唱音引起, 根据实测螺旋桨部位的自噪声级, 利用(5-4)式估算的声源级与远场测量结果相差仅  $0.4\text{dB}$ 。文献给出了 3 项试验验证, 估算误差在  $0.4\text{dB} \sim 1.5\text{dB}$ , 表明这些近似公式具有一定的准确度。

## 5.2 近程分布式声源模型

从潜艇辐射噪声特性测试和噪声源定位与识别的角度来分析, 实艇噪声测量时, 测量距离和艇长通常是相当的, 潜艇噪声源一般都位于测量基阵的 Fresnel 区, 将潜艇视为点声源来进行声源级换算的方法实际会带来一定的误差。对潜艇水中辐射噪声产生贡献的噪声源及噪声源间的关系是非常复杂的, 通常可以将潜艇的噪声源看作是由复杂分布的点源(可视作单极子或多极子)或面源组成的, 各噪声源的激励强度和噪声源间的相关性将直接影响各噪声源对潜艇水中噪声的贡献, 且是频率、空间和时间的函数, 与潜艇的工况(含机械设备关启状态、航速和下潜深度)有关。

对于体积辐射声源, 由于寻求其解析解非常困难, 一般都采用简化的多点源模型来对辐射体进行简化。

水面舰船的近场分布式声源一般采用三亮点模型<sup>[75][76][77]</sup>。根据主要的辐射声源, 把正常航速的船舶声辐射的纵向分布设想为三个亮点区域, 或进一步等效为三个辐射声亮点模型:

(1) 尾部: 推进器是主要噪声源, 主要特征是连续谱能量很强, 主要能量覆盖 1000~5000 Hz 频域, 并且具有典型的空化噪声频谱。此外, 尾部也会出现螺旋桨叶片和轴引起的旋转频率及其谐波的线谱, 也可能出现唱音。

(2) 中后部, 即从尾部起 1/4 船长处: 主机是主要的噪声源, 主要能量覆盖 10~100 Hz 频域, 具有弱连续谱加强线谱的功率谱特征。

(3) 中部, 即 1/2 船长处: 各类辅机是主要噪声源, 主要能量覆盖 100~1000 Hz 频域, 功率谱中既包含连续谱成分, 也包括线谱成分。

从理论上研究这个模型仍有较大的困难, 刘勋利用船舶通过测量点上方时测量水听器获得的噪声通过特性分析来验证其正确的程度<sup>[78]</sup>。

邓大新、林春生<sup>[78]</sup>采用三轴声强测量法建立了舰船声场的近程分布式声源模型, 沿船的纵向将船划分为 N 个等长的区域, 每个区域的长度相等, 并假设辐射噪声源为声单极子源, 其等效声中心为每个区域的几何中心。

本节参考水面舰船的三亮点模型, 根据潜艇近程分布式声源的特点, 建立潜艇的近程分布式声源模型。

### 5.2.1 以潜艇为中心的坐标系

为了研究基于潜艇近程分布式声源模型的近场测量修正,建立随潜艇移动的直角坐标系。

图 5.1 是以潜艇为中心建立的坐标系。

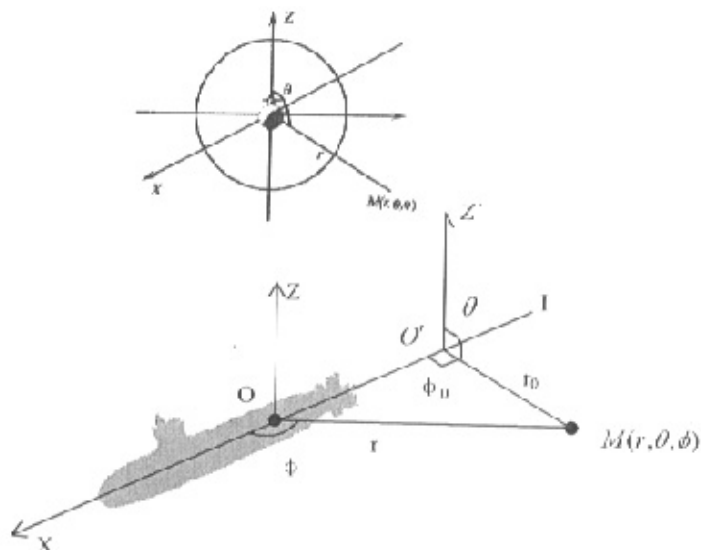


图 5.1 以潜艇为中心建立的坐标系

潜艇辐射噪声测量工程实施中,水声同步测距的信标的安装位置,一般根据经验选择在潜艇等效声中心附近上方的艇壳上。把坐标原点设为潜艇等效声中心,坐标系随艇运动,  $x$  轴通过坐标原点沿潜艇艏艉,正方向指向艇艏( $\theta = 90^\circ, \phi = 0^\circ$ ),当没有风和流的影响时,  $x$  轴和潜艇的航行方向一致,  $y$  轴通过坐标原点与  $x$  轴在同一水平面上,  $y$  轴的正方向为  $\theta = 90^\circ, \phi = 90^\circ$  的方向,  $z$  轴通过坐标原点与  $xoy$  面垂直指向海面( $\theta = 0^\circ$ )。

在这个坐标系中,测量水听器的空间位置  $M$  点可用  $x, y, z$  的直角坐标系表示,也可以用距坐标原点的距离  $r$  和角度  $\theta$  和  $\phi$  的极坐标表示,水听器输出



反映舰船辐射噪声场中该点的声压值。

### 5.2.2 潜艇辐射声场近程分布式多源模型

复杂声源模型通常可视为同一类简单源（单极子或偶极子元）的相干组合，或者是不同类简单源的相干组合，或者是同一类相干源的连续分布。而对于辐射噪声的连续谱还可能是同一类无关源的组合，或者是不同类无关源的组合，或者是同一类无关源的连续分布。

如图 5.2 所示，设艇长为  $L$ ，沿艇的纵向将艇划分为  $N$  个等长的区域，每个区域的长度为  $n=L/N$ 。假设辐射噪声元为单极子或偶极子元，其等效声中心为每个区域的几何中心。

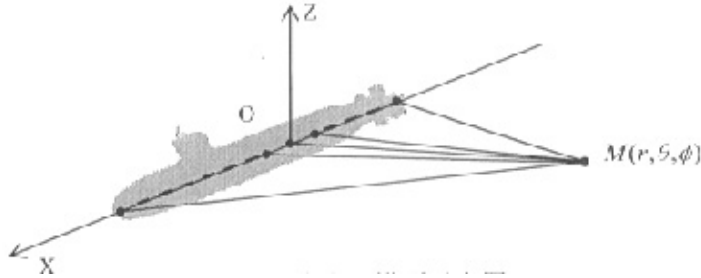


图 5.2 分布式多源模型示意图

为简单起见，假定复合声源由若干个简单的单极子和偶极子相干组合而成，所有单极子和偶极子简单声源都辐射同一频率  $\omega$  的信号成分，以  $P_i^{(m)}(r_i, z_i, \omega)$  和  $P_i^{(d)}(r_i, z_i, \omega)$  分别表示第  $i=1, 2, \dots, N^{(m)}$  个单极子和第  $i=1, 2, \dots, N^{(d)}$  个偶极子声源辐射的声压场， $V_{x_i, y_i, z_i}^{(m)}(r_i, z_i, \omega)$  和  $V_{x_i, y_i, z_i}^{(d)}(r_i, z_i, \omega)$  分别表示第  $i=1, 2, \dots, N^{(m)}$  个单极子和第  $i=1, 2, \dots, N^{(d)}$  个偶极子声源辐射的振速场， $S_{0i}^{(m)}(\omega)e^{j\phi_{0i}^{(m)}}$  和  $M_{0i}^{(d)}(\omega)\cos\theta_i e^{j\phi_{0i}^{(d)}}$  分别表示单极子和偶极子元声源的激发谱， $\phi_{0i}^{(m)}$  和  $\phi_{0i}^{(d)}$  分别表示单极子和偶极子元声源的初始相位， $\theta_i$  表示第  $i$  个偶极子声源的轴与信号传播方向的夹角，则由  $N^{(m)}$  个单极子和  $N^{(d)}$  个偶极子声源组成的复合声源辐射的总场为：

$$\begin{aligned}
 P(\omega) &= \sum_{i=1}^{N^{(m)}} P_i^{(m)}(r_i, z_i, \omega) + \sum_{i=1}^{N^{(d)}} P_i^{(d)}(r_i, z_i, \omega) \\
 &= \sum_{i=1}^{N^{(m)}} S_{0i}^{(m)} e^{j\phi_{0i}^{(m)}} H_{pi}^{(m)}(r_i, z_i, \omega) + \sum_{i=1}^{N^{(d)}} M_{0i}^{(d)} e^{j\phi_{0i}^{(d)}} \cos\theta_i H_{pi}^{(d)}(r_i, z_i, \omega) \quad (5-5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_{x,y,z}(\omega) &= \sum_{i=1}^{N^{(m)}} V_{x,y,z,i}^{(m)}(r_i, z_i, \omega) + \sum_{i=1}^{N^{(d)}} V_{x,y,z,i}^{(d)}(r_i, z_i, \omega) \\
 &= \sum_{i=1}^{N^{(m)}} S_{0i}^{(m)} e^{j\phi_{0i}^{(m)}} H_{x,y,z,i}^{(m)}(r_i, z_i, \omega) + \sum_{i=1}^{N^{(d)}} M_{0i}^{(d)} e^{j\phi_{0i}^{(d)}} \cos\theta_i H_{x,y,z,i}^{(d)}(r_i, z_i, \omega) \quad (5-6)
 \end{aligned}$$

式中  $H_{p,x,y,z,i}^{(m,d)}(r_i, z_i, \omega)$  表示单极子和偶极子辐射场的声压和振速波导传递函数。

一般情况下，这些点源之间是存在一定的相关性或无关，声源发出的信号或是窄带调制信号或是宽带噪声信号。

在简单源组合形成的复杂辐射系统情况下，有效接收的声压和振速信号是各单频信号成分的和的形式：

$$p_s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{i=1}^{N^{(m)}} S_{0i}^{(m)} e^{j\phi_{0i}^{(m)}} H_{pi}^{(m)}(r_i, z_i, \omega) + \sum_{i=1}^{N^{(d)}} M_{0i}^{(d)} e^{j\phi_{0i}^{(d)}} \cos\theta_i H_{pi}^{(d)}(r_i, z_i, \omega) \right] e^{j2\pi f t} df \quad (5-7)$$

$$v_{S,x,y,z}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{i=1}^{N^{(m)}} S_{0i}^{(m)} e^{j\phi_{0i}^{(m)}} H_{x,y,z,i}^{(m)}(r_i, z_i, \omega) + \sum_{i=1}^{N^{(d)}} M_{0i}^{(d)} e^{j\phi_{0i}^{(d)}} \cos\theta_i H_{x,y,z,i}^{(d)}(r_i, z_i, \omega) \right] e^{j2\pi f t} df \quad (5-8)$$

上式中下标“S”表示接收输出中的信号成分。

声源相对于接收器运动时最显著的影响是多普勒频移，接收的频率  $f_a$  与发射频率  $f_s$  的关系可表示为：

$$f_a = \frac{f_s}{1 - M_s \cos\theta} \quad (5-9)$$

其中  $M_s$  为声源的平移马赫数， $\theta$  为运动矢量与指向接收器方向的夹角。

对于小马赫数，有如下关系：

$$f_o = f_s(1 + M_s \cos \theta) \quad (5-10)$$

声源的平稳运动也改变静态情况下计算的接收信号强度，但只有在马赫数超过 0.1 时，这一效应才变得重要，在水声计算中通常不用考虑。

### 5.2.3 潜艇辐射声场分布式四亮点模型

5.2.1 小节给出的分布式多源模型可以对潜艇辐射声场进行较精确的分析，但还比较复杂。

航行中的潜艇的辐射噪声上是众多噪声源辐射的综合结果，文献[79]研究了各噪声源的作用，在潜艇上测量主要噪声源产生的噪声辐射强度，然后通过声场叠加方法推算出了潜艇的辐射噪声值。周庆余<sup>[79]</sup>作了实验研究，对潜艇辐射主要噪声源进行了较准确的定位，获得了较理想的结果。本节参考周庆余的结果，将潜艇辐射噪声的纵向分布简化为四亮点模型：

#### 1. 指挥台围壳

潜艇指挥台围壳基本上是个空腔，当海水流过时，在开口处就会出现旋涡，一个空腔口可能出现多个旋涡，它们促使空腔振动，而空腔振动又会使旋涡模式增强，涡系使潜艇指挥台围壳产生振动，并向海水中辐射噪声。

指挥台围壳噪声为流激空腔共振声，其振动是由有限体积的流体产生，而不是固体产生的，具有偶极子源特性。

#### 2. 艇体

潜艇艇体结构相当复杂，艇体内装有数十台机械，运转的机械通过多种渠道激励艇体。艇体与海水接触，是各种机械噪声的主要辐射体。艇体受机械运转激励，产生弯曲振动，将能量传递到海水中，海水是振动体的负载。这种能量的传递受到表面匹配的影响，因而将艇体做为噪声源考虑时，应以噪声最大的部位为噪声源的位置，试验表明<sup>[79]</sup>，艇体的柴油机部位为噪声最大的位置。艇体结构振动可等效为单极子源。

#### 3. 主电机

艇体内的个别激励源，如主电机，通过机座激励壳体，使该部位的艇体振动不亚于柴油机部位，因此将该部位作为一个亮点，可等效为单极子源单极子源。

#### 4. 螺旋桨

螺旋桨噪声产生在艇体之外，包括螺旋桨空化噪声和螺旋桨叶片振动噪声。空化噪声是连续谱，它是辐射噪声高频段的主要部分；螺旋桨叶片振动噪声频率较低。

螺旋桨的辐射噪声特性比较复杂，其声源特性与工况具有密切的关系。螺旋桨空化时，其辐射源主要为体积脉动的空泡，辐射噪声几乎是无指向性而向全空间等值辐射的，为单极子声源<sup>[61]</sup>；而潜艇低速航行时的螺旋桨非空化噪声具有偶极子源特性。

图 5.3 为潜艇分布式四亮点模型的示意图。

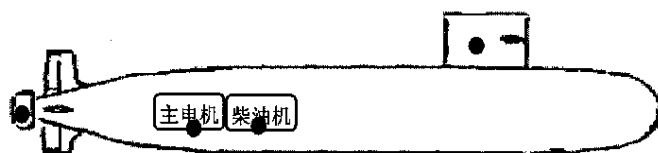


图 5.3 潜艇分布式四亮点模型

潜艇辐射噪声源中的湍流等流噪声由于具有偶极子、四极子的特性，主要影响潜艇声纳，对远场辐射的贡献比较小，因此模型中不考虑水动力噪声。

同水面舰船的三亮点模型一样，从理论上研究这个模型仍有较大的困难，可以通过辐射噪声通过特性的时频分析或其它潜艇源识别方法来验证其正确的程度。

### 5.3 分布式声源辐射的近场测量和远场特性

#### 5.3.1 单点近场测量的指向性

如图 5.4 所示，根据前小节的潜艇分布式四亮点模型，将潜艇等效为 4 个点声源，单水听器测量点的声场为 4 个点源辐射声场的线性叠加。测量点到各等效源的距离满足远场条件。

坐标系随潜艇作匀速直线运动，测量点 M 所测量的声压值，以时间  $t$  为横坐标，就得到了通过特性曲线。可以将潜艇视为静止，声压测量水听器沿直线  $L$  扫描，则得到沿舷侧方向距潜艇距离为  $r_0$  的近场声压分布曲线。在声压分布曲线的最大值处，向  $x$  轴作垂线，其垂心可作为潜艇辐射声学中心。

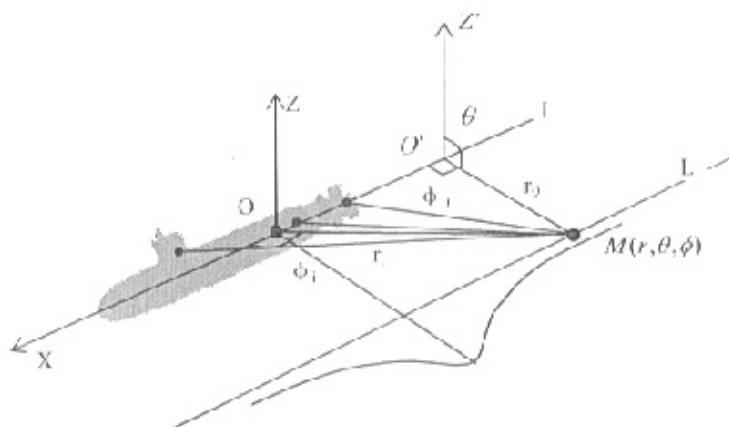


图 5.4 多点源模型的声辐射

为简单起见，本节仅考虑无限均匀介质中的辐射声压场，假定声源由 3 个简单的单极子和 1 个偶极子相干组合而成，所有单极子和偶极子简单声源都辐射同一频率  $\omega$  的信号成分，单极子辐射为：

$$p(r) = jk\rho c \frac{Q}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (5-11)$$

其中  $Q = 4\pi a^2 u_{a0}$ ，为振源强度

偶极子辐射为：

$$p(r, \theta) = \frac{k\rho c A}{4\pi r^2} e^{-j(kr - \varphi - \pi/2)} \sqrt{1 + (kr)^2} \cdot \cos\theta \quad (5-12)$$

其中， $A = Qd$ ， $\tan\varphi = kr$

本小节通过潜艇分布式四亮点模型正问题的计算，获得近场声压分布曲线。算例1：假定复合声源由3个单极子和1个偶极子组成，其相对位置坐标和在总声源中的贡献比如表5.1所示。

表 5.1 3 个单极子和 1 个偶极子的相对位置坐标和贡献比

| 点源序号<br>n | $x_n$ (m) | $y_n$ (m) | $z_n$ (m) | 贡献比 (%) |      |      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|------|------|
|           |           |           |           | 工况 1    | 工况 2 | 工况 3 |
| 单极子 1     | -30       | 0         | 0         | 40      | 60   | 20   |
| 单极子 2     | -10       | 0         | 0         | 10      | 10   | 20   |
| 单极子 3     | 10        | 0         | 0         | 30      | 20   | 40   |
| 偶极子 4     | 30        | 0         | 4         | 20      | 10   | 20   |

图 5.5、图 5.6、图 5.7 给出了不同距离、不同工况的通过特性和指向性曲线。

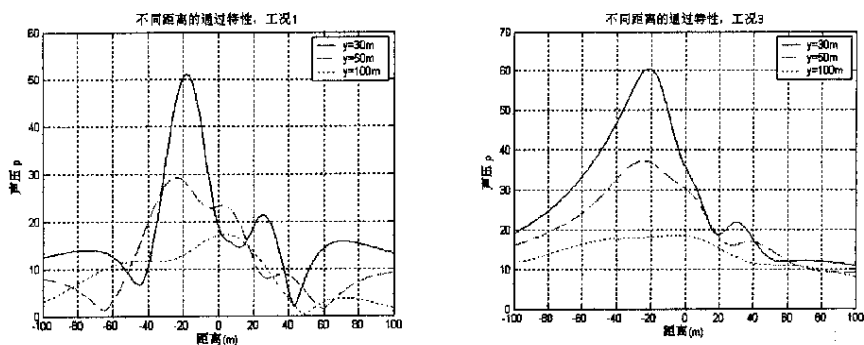


图 5.5 不同距离的通过特性

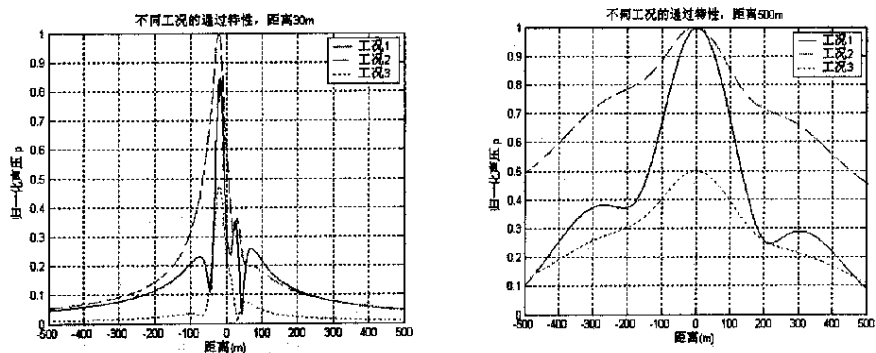


图 5.6 不同工况的通过特性

图 5.5 说明, 近场离通过特性曲线比远场复杂, 且在不同距离下利用通过特性最大值确定的声学中心位置也不一样。

图 5.6 说明, 不同的工况, 通过特性幅度差别比较大, 声学中心位置也有一定变化。

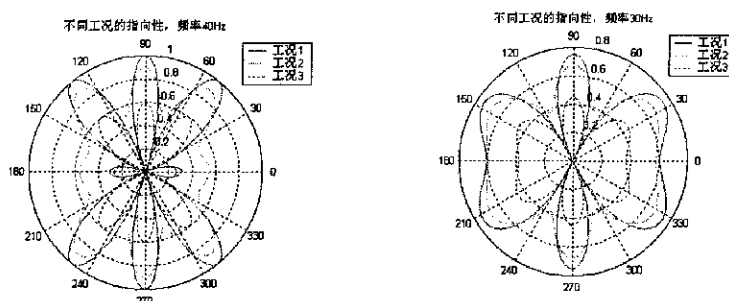


图 5.7 不同工况的指向性

图 5.7 说明，不同工况下指向性形状基本一致，不同的频率差别比较大，低频较平滑，高频旁瓣较多。

### 5.3.2 基于亥姆霍兹积分的近远场变换

考虑垂直阵和矢量水听器两套低噪声测量系统同时分别在近场和远场测量，它们的测量结果应该是一致的。

简单的方法是两者都归算到距离声学中心 1 米处后比较，但出现较大误差时，还是难以下定论。因为垂直线阵系统在近场测量，其归算时声学中心选取困难，可能会带来误差。

另一种方法是将垂直线阵系统测量的结果变换到远场矢量水听器系统处进行比较，并以远场的结果进行声源级计算的归算。近远场变换的方位

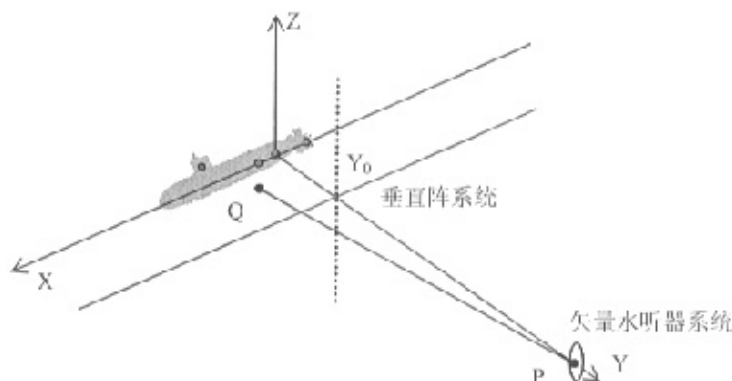


图 5.8 垂直阵近场测量及远场变换示意图

关系如图 5.8 所示:

潜艇航行通过垂直阵系统时,可等效为垂直阵在系统所在的与 XOZ 平面平行的  $Y_0$  平面上进行了扫描测量,获得了高度为垂直阵有效阵元长度、宽度为所可选的超过艇长数倍的平面信息。利用平面信息,采用赫姆霍兹积分方程可以计算潜艇分布式点源模型的远场声场分布。

为方便计,重写赫姆霍兹积分方程如下:

$$p(P) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[ p(Q) \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) - \frac{e^{jkr}}{r} \frac{\partial p(Q)}{\partial n} \right] dS \quad (5-13)$$

式中  $p(Q)$  是  $Y_0$  平面上任意点  $Q$  处的复声压,  $n$  是  $Y_0$  平面的外法线,  $r$  是  $P$ 、 $Q$  两点的距离,  $k$  是波数。

在将  $Y_0$  平面  $Q$  点处声压近似为平面波声压的情况下,  $Q$  点处的声压梯度可近似为声压,即

$$\frac{\partial p(Q)}{\partial n} \approx jkp(B) \quad (5-14)$$

另外,由于最终是确定远场声压,所以有  $kr \gg 1$ , 即

$$\frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \approx jk \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) \frac{\partial r}{\partial n} \quad (5-15)$$

其中  $\partial r / \partial n = -\cos \beta$ 。由此可以得到由近场测量的复声压计算远场复声压的公式:

$$p(P) = \frac{-jk}{4\pi} \iint_S (1 + \cos \beta) \left( \frac{e^{jkr}}{r} \right) p(Q) dS \quad (5-16)$$

积分面为垂直阵所在的矩形平面,应用高斯数值积分法,可得:

$$p(\psi, \varphi) = \frac{-jk}{4\pi} \left( \frac{\exp(jkR)}{R} \right) (1 + \cos \varphi \sin \psi) \cdot a \cdot b \cdot \sum_{m=1}^M A_m \sum_{n=1}^N B_n p(X_m Z_n) \exp[-jk(X_m \cos \psi \cos \varphi + Z_n \sin \varphi)] \quad (5-17)$$

式中,  $p(\psi, \varphi)$  为  $R$  距离处得远场声压,  $\psi, \varphi$  分别为水平方位角和垂直方位角;  $a$  和  $b$  为近场测量面尺寸(m);  $R$  为远场距离;  $M$  和  $N$  分别为水平与



垂直方向上的高斯分割系数； $A_m$ 和 $B_n$ 分别为相应的高斯系数； $X_m$ 和 $Z_n$ 分别为相应的高斯坐标。

图 5.9 给出了垂直阵等效扫描面的近场声压分布和变换到远场的声压分布情况。声源模型采用表 5.1 的参数。假设垂直阵长为 100m，阵元间距 1m，图中垂直距离正负 50m 为阵长方向，即潜艇坐标系的 Z 方向，水平方向为潜艇航行方向，及 X 方向，取正负 500m。

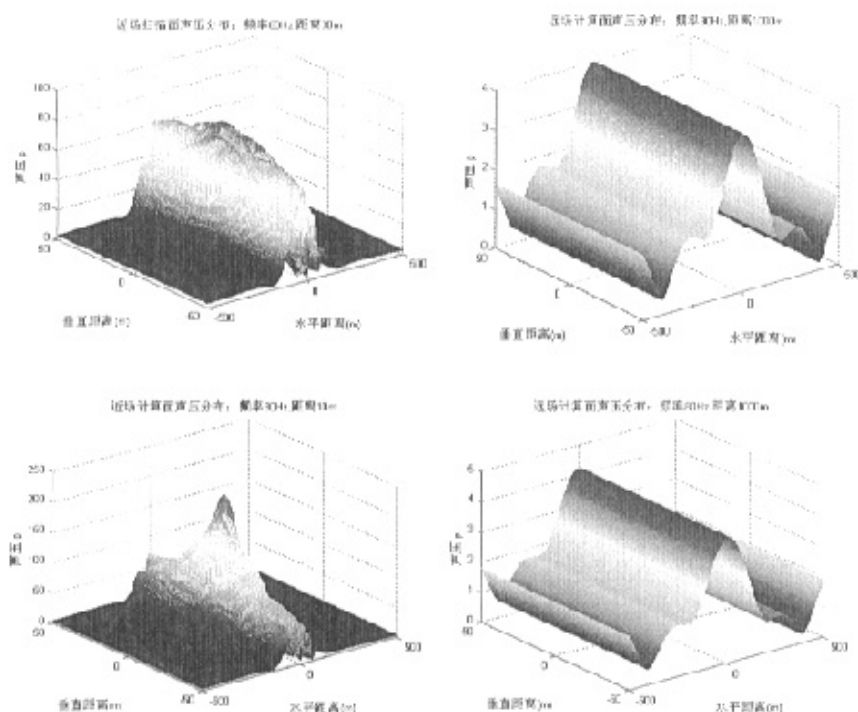


图 5.9 垂直线阵的近远场变换

根据赫姆霍兹积分方程，近远场变换的积分面应包含所计算的全部辐射声源，如圆柱形换能器的近场计量就要在整个圆柱面上测量。近场计量<sup>[49]</sup>理论认为，对于强指向性的声源如活塞式换能器，可以只在一定尺度的平面上进行，只要测量面边缘的声压幅值与中心位置相比低 20dB，其信息损失带来的误差就可以忽略。

从本节计算结果来看,扫描方向的尺度可以任意加长,达到艇长的 10 倍已经足够了。但垂直阵的长度有限,在距离 30m 处扫描的信息损失已比较严重,要保证一定精度的变换,扫描距离可能要近至 10m,但这样的距离在海上是难以实施的。

另外,由于近场测量对相邻测量点间的最大间距要求<sup>[40]</sup>小于  $0.8\lambda$ ,采用实际的垂直线阵系统近场数据进行声场空间变换还受到频率的限制。

进一步的实用的研究可以参考文献[30]远场声全息的方法,选取合适的远场全息函数,再结合基尔霍夫衍射积分公式可以进行更有效的变换。

#### 5.4 本章小结

对于复杂的体积辐射声源,由于寻求其解析解非常困难,一般都采用简化的多点源模型来对辐射体进行简化。

本章给出了潜艇辐射声场的近程分布式多源模型,并根据潜艇辐射噪声测量的实际经验,将其简化为沿纵向分布的四亮点模型,建立随潜艇移动的直角坐标系。通过四个点源模型的声场辐射计算和近远场变换,讨论了潜艇辐射噪声的空间分布特性。

本章对潜艇辐射噪声测量的近场修正理论方法进行了初步的研究。要获得在外场试验中可使用的近场测量修正量还需要进一步深入的研究。

## 结 论

浅海是声传播明显受到海面和海底边界影响的海域。在分析浅海声场时,除考虑直达声以外,还必须考虑经过一次和多次海面和海底反射的声能,总声场等于这些直达声和反射声的迭加。点噪声源在近距离声场的传播损失曲线不仅与声速分布、海区深度、海底反射特性等环境条件有关,而且还取决于声源及接收水听器的位置。近程声传播损失规律在一般情况下不符合球面波衰减规律,其差异最大时可达到 8dB。这表明在进行潜艇辐射噪声测量时,必须对所处的声场进行校准,否则,按球面波衰减规律进行推算的结果无法满足所要求的测量精度。

从声学的角度来看,潜艇是一个复杂的噪声源分布体,本文介绍了潜艇辐射噪声的三类噪声源产生机理及水下辐射噪声的近似计算方法。潜艇的辐射噪声场是多个源辐射构成的复杂声场,具有复杂的空间分布特性,使得传统的辐射噪声测量方法和距离归算方法难以获得高精度的结果。

由于传播损失和海洋背景噪声的限制,实现低噪声潜艇辐射噪声测量方法的基本原理就是增加测量系统的指向性。垂直线阵测量系统利用垂直指向性提高信噪比,矢量水听器测量系统采用声压振速联合处理来获得空间增益。

对于复杂的体积辐射声源,由于寻求其解析解非常困难。本文给出了潜艇辐射声场的近程分布式多源模型,并根据潜艇辐射噪声测量的实际经验,将其简化为沿纵向分布的四亮点模型,建立随潜艇移动的直角坐标系。通过四个点源模型的声场辐射计算和近远场变换,讨论了潜艇辐射噪声的空间分布特性。

对于传播损失异常,更进一步的工作可以编写实用的声场校正软件,读取 SVP、SBE 等靶场水文设备现场测量的声速参数,根据目标和测量系统的相对位置,计算各频率点的传播损失异常修正值。可以结合靶场新研制的声场标校系统进行现场精细的测量和标校。

对于潜艇体积源近场测量的修正,进一步的工作可以采用声全息的方法,在近场获得潜艇辐射声场的全息信息,通过声场空间变换获得远场特性和源的分布特性,进一步优化潜艇分布式声源模型。

## 参考文献

- [1] 杨德森. 水下航行器噪声分析及主要源识别. 哈尔滨工程大学博士论文. 1996
- [2] 时胜国. 水下航行器辐射噪声预报方法研究. 哈尔滨工程大学硕士论文. 2001
- [3] 胡家雄. 21 世纪常规潜艇声隐身技术发展动态. 舰船科学技术. 2001. 4
- [4] 王之程, 陈宗歧, 于泓, 刘文帅. 舰船噪声测量与分析. 国防工业出版社, 2004
- [5] [苏]JI . M. 布列霍夫斯基. 海洋声学. 科学出版社, 1983
- [6] R. J. 尤立克著, 洪申译. 水声原理. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990
- [7] 刘伯胜, 雷家煌主编. 水声学原理. 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1993
- [8] 章林柯, 何琳, 朱石坚. 潜艇主要噪声源识别及贡献比计算方法综述, 第十届船舶水下噪声学术讨论会论文集, 2005 年
- [9] 杨德森. 利用偏相干方法识别主要激励源. 哈尔滨船舶工程学院学报, 1994, 15(3):35-45 页
- [10] 张宝成, 徐雪仙. 舰艇水下噪声源贡献的分析. 舰船力学情报, 1994, (10):40-46 页
- [11] 程广福, 夏春艳, 刘文帅, 蒋行海, 刘雨东. 潜艇噪声源识别和分离方法研究综述, 第十届船舶水下噪声学术讨论会论文集, 2005 年
- [12] 孙大军. 合成孔径声纳技术研究(综述). 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(1):51-56 页
- [13] 李启虎. 水声学研究进展. 声学学报, 2001, 26(4):295-301 页
- [14] 李启虎. 进入 21 世纪的声纳技术. 应用声学, 2002. 21(1):13-18 页
- [15] 夏春艳, 刘文帅. 应用合成孔径技术进行实船噪声源分析, 舰船科学技术 2005. 27(4):13-18 页
- [16] 周广林, 陈心昭, 陈剑, 毕传兴. 声全息技术的研究现状与展望. 声学技术 2003, 22(2):120-127 页
- [17] Williarms E G. Sound source reconstructions using a mi- crophone array J. Acoust. Soc. Am, 1980, 68(1):340-344P

- [18] Maynard J D, Williams E G, Lee Y. Nearfield acousticholography: I. theory of generalized Holography and the development of NAH[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1985, 78(4):1395-1413P
- [19] 张德俊等, 近场声全息对振动体及其辐射场的成像. 物理学进展, 1996, 16(3-4):613-623 页
- [20] 暴雪梅, 何祚镛. 近场声全息方法研究目标散射场. 哈尔滨工程大学学报, 1999, 18(10), :15-19 页
- [21] 何元安, 何祚镛. 轴对称结构表面声场的非共形重建精度分析, 声学学报, 2001, 9, 26(5), 455-463 页
- [22] 何祚镛, 王文芝. 声全息测量基阵的设计与研制, 哈尔滨工程大学学报, 2003, 4, 23(2), 59-61 页
- [23] 何元安, 何祚镛, 姜军. 基于声强测量的近场声全息及其在水下声源声辐射分析中的应用, 声学学报, 1996, 7, 21(4), 297-305 页
- [24] 何元安, 何祚镛. 用声场空间变换识别水下噪声源. 应用声学, 2000, 19(2): 9-13 页
- [25] 何元安, 何祚镛. 基于平面声全息的全空间场变换:I. 原理与算法. 声学学报, 2002, 27(6):507-512 页
- [26] 何元安, 何祚镛. 基于平面声全息的全空间场变换: II. 水下大面积平面发射声基阵的近场声全息实验. 声学学报, 2003, 28(1):45-51 页
- [27] 何祚镛. 实船设备结构振动和水声声强测试分析及噪声源的判别. 中国造船, 2003, 44(2): 50-58 页
- [28] 何元安. 大型水下结构近场声全息的理论与实验研究. 哈尔滨工程大学博士论文. 1996
- [29] Williams E G. Imaging the sources on a cylindrical shell from far-field pressure measured on a semicircle [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1996, 94(4):2022-2032P
- [30] 杨殿阁等. 用于噪声识别的声全息重建方法的研究. 声学学报, 2001, 26(2):156-160 页
- [31] J A Clark, P M Honke and J M Ellis. Acoustic imaging of large vibrating structures. [J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, Vol88:S173

- [32] S. -H. Park and Y. -H. Kim. Visualization of pass-by noise by means of moving frame acoustic holography. [J]. J. Acoust. Soc. Am, 2001, 110(5):2326-2339P
- [33] S. -H. Park and Y. -H. Kim. An improved moving frame acoustic holography for coherent bandlimited noise. [J]. J. Acoust. Soc. Am, 2001, 110(5):2326-2339P
- [34] 杨殿阁, 郑四发, 郑凯, 连小氓, 蒋孝煌. 运动声源的声全息识别方法, 声学学报, 2002, 27(4):357-362 页
- [35] 毛晓群, 罗禹贡, 杨殿阁等. 使用阵列技术识别高速行驶轿车的辐射声源. 汽车技术, 2003, 9:6-10 页
- [36] 毕传兴, 陈剑, 陈心昭. 基于分布源边界点法的多源声场全息重建和预测技术理论研究. 中国科学, E 辑, 2004, 34(1): 111-120 页
- [37] 张胜勇, 陈心昭, 王有成, 分布源边界点法及其在振动体声辐射计算中的应用, 声学学报, 1999, Am, 1985, 78(4): 13951413
- [38] 郑士杰, 袁文俊等. 水声计量测试技术. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1996
- [39] 楚龙宝, 袁文俊. 水声换能器近场校准方法的实验研究, 数据采集与处理, 1993, 8(4):249-256 页
- [40] 赵涵, 平自红, 楚龙宝等. 近场测量方法研究, 声学与电子工程, 1996, 42(2):39-44 页
- [41] 平自红, 楚龙宝. 声呐阵远场空间指向性的近场测量法, 声学与电子工程, 1998, 49(1):37-42 页
- [42] 何祚镛. 声学理论基础. 哈尔滨船舶工程学院出版社
- [43] Paul C. Etter 著. 蔡志明等译. 水声建模与仿真. 电子工业出版社, 2005
- [44] E. Л. 沈杰罗夫著, 何祚镛、赵晋英译. 水声学波动问题. 国防工业出版社. 1983
- [45] [苏]JI . M. 布列霍夫斯基. 分层介质中的波. 科学出版社, 1983
- [46] Jensen F. B, W. a. Kuperman, M. B. Porter, H. Schmidt, 张润中, 唐宗瑜译, 海洋计算声学, 715 所

- [47] 田坦, 刘国枝, 孙大军编著. 声呐技术. 哈尔滨工程大学出版社. 1999
- [48] 杨士羲著. 水声传播原理. 哈尔滨工程大学出版社, 1994
- [49] 惠俊英编著. 水下声信道. 国防工业出版社, 1992
- [50] 李风华, 肖灵. 关于浅海中简正波衰减与群速的讨论. 中国科学. 199712, 12, 27(12)
- [51] Pekeris CL. Theory of propagation of explosive sound in shallow water. Geological Society of America Memoir, 1948, 27:1~117
- [52] 吴开明. 水下声信道的仿真与应用研究. 哈尔滨工程大学硕士论文. 2005
- [53] 张歆, 张小蓓. 基于 Kraken 简正波模型的浅海声场分析. 西北工业大学学报. 2000, 18(30)
- [54] 唐俊峰. 基于射线声学理论的三维声场计算研究. 哈尔滨工程大学硕士论文. 2003
- [55] Micheal B. Porter. The KRAKEN Normal Mode Program. SACLANT Undersea Research Centre. May 17, 2001
- [56] 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) (4)
- [57] 张仁和, 李风华. 浅海声传播的波束位移射线简正波理论. 中国科学. 1993, 29(3)
- [58] 王秀峰. 机器辐射声场分析的新型计算方法研究. 合肥工业大学博士学位论文. 2001
- [59] 王三德. 水下复杂弹性壳体的相似性研究. 哈尔滨工程大学博士学位论文. 2004
- [60] 李太宝. 计算声学-声场的方程和计算方法. 科学出版社, 2005. 1
- [61] D. 罗斯. 水下噪声原理. 北京: 海洋出版社, 1983
- [62] 叶平贤, 龚沈光. 舰船物理场. 兵器工业出版社. 1992
- [63] 何祚镛. 水下噪声及其控制技术进展和展望. 应用声学. 2002, 21(1)
- [64] 魏以迈. 我国船舶水下噪声研究进展综述. 上海造船. 2000, 1
- [65] 何元安, 杨德森. 水下结构辐射噪声估算方法实验研究. 船舶力学. 1999. 3(2)

- [66] 童宗鹏, 王国治. 舰艇结构水下振动和声辐射特性研究. 华东船舶工业学院学报(自然科学版) 2003. 17(2)
- [67] 孙贵青. 矢量水听器检测技术研究. 哈尔滨工程大学博士论文. 2001
- [68] 时胜国, 杨德森. 矢量水听器的源定向理论及其定向误差分析. 哈尔滨工程大学学报. 2003, 24(2): 132-135 页
- [69] 孙贵青, 杨德森, 张揽月. 基于矢量水听器的水下目标低频辐射噪声研究. 声学学报. 2002, 27(5): 429-434 页
- [70] 孙贵青, 李启虎. 声矢量传感器信号处理. 声学学报. 2004, 29(6): 491-498 页
- [71] 高守勇. 自容式同步信标技术报告. 中国海军科技报告. 2005. 11
- [72] 周建清, 高守勇. 测量校准声源技术报告. 中国海军科技报告. 2005. 11
- [73] 范敏毅. 水下声信道的仿真与应用研究. 哈尔滨工程大学博士论文. 2000
- [74] 张升明, 沈顺根, 赵本立. 舰船水下声辐射的近似计算方法. 舰船科学技术. 1997. 1
- [75] 刘勋, 相敬林, 罗建. 舰船辐射噪声源纵向分布的研究. 数据采集与处理. 1999. 14(4)
- [76] 相敬林, 刘勋. 舰船做为体积声源的源强度谱纵向分布特性. 探测与控制学报. 2002. 24(2)
- [77] 刘勋, 相敬林, 周越, 罗建. 作为体积目标的船舶声辐射纵向分布特性的研究. 西北工业大学学报. 2002. 18(3)
- [78] 邓大新, 林春生. 舰船声场的近程分布式声源模型
- [79] 周庆余. 由实测的本艇噪声推算辐射噪声. 声学与电子工程. 1995. 38(2)



## 攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

### 一、攻读学位期间撰写得科技报告

- [1] 高守勇. 鱼雷音响模拟器实施方案. 中国海军科技报告. 2003 年 10 月.
- [2] 高守勇, 朱海京. 鱼雷音响模拟器技术报告. 中国海军科技报告. 2004 年 8 月.
- [3] 高守勇, 朱海京. 鱼雷音响模拟器研制报告. 中国海军科技报告. 2004 年 8 月.
- [4] 高守勇. 自容式信标研制方案. 中国海军科技报告. 2004 年 6 月.
- [5] 高守勇, 张中山. 自容式信标研制报告. 中国海军科技报告. 2005 年 8 月.
- [6] 高守勇, 张中山. 自容式信标技术报告. 中国海军科技报告. 2005 年 8 月.
- [7] 周建清, 高守勇. 测量校准声源系统研制报告. 中国海军科技报告. 2005 年 8 月.
- [8] 周建清, 高守勇. 测量校准声源系统技术报告. 中国海军科技报告. 2005 年 8 月.

### 一、攻读学位期间完成的科研项目

- [1] 高守勇, 朱海京, 张中山, 陈志刚. 鱼雷音响模拟器研制. 2004 年 12 月  
通过海军装备部技术鉴定
- [2] 高守勇, 张中山, 陈志刚等. 自容式信标研制, 2005 年 12 月验收
- [3] 周建清, 高守勇, 张中山, 陈志刚等. 测量校准声源系统研制. 已完成,  
待验收

## 致 谢

本论文是在导师杨德森教授的悉心指导下完成的。在两年多的学习中，杨教授在研究工作中的缜密细致、一丝不苟的工作作风使我获益匪浅，我将永远铭记和学习。导师那种严谨的治学态度，忘我的工作精神始终激励着我，并将伴随我的一生。感谢导师对我生活上的莫大关怀！

在论文完成期间，我得到了许多老师和同事、同学的热情帮助。在此，仅致以我个人的最诚挚的谢意。感谢我单位周建清所长对我研究方向和论文选题的严格要求！感谢时胜国、刘国枝、方尔正、莫士奇、洪连进、陈洪娟、张揽月等各位老师对我的热心指点！感谢王三德博士、徐峰硕士、江向东硕士对我在学习和生活上的无私帮助！感谢我的同学们和所有帮助过我的人们……。

感谢我的妻子三年来一个人在家中含辛茹苦抚养刚出生的孩子！感谢妻子的理解和支持！

谨以此文纪念我的父亲高克正。一生刚正不阿的父亲总是要求我以部队工作为重，以学业为重，以至在病重时仍催促我返回部队……

## 个人简历

高守勇，1973年11月出生；

1996年7月毕业于中国地质大学应用地球物理系，获工学学士学位；

1996年7月海军招干入伍，现为海军91388部队第450所工程师；

2003年9月至今，哈尔滨工程大学水声工程学院硕士研究生。

自1996年参加工作到1998年间从事水中兵器目标磁场特性测量工作，从1998年至今一直从事目标水下辐射噪声测量工作。1999年获三等功一次。

工作期间发表论文2篇，撰写科技报告10余份，参加8项科研项目，获军队科技进步奖二等奖1项、三等奖2项、四等奖2项，获试验基地科技进步奖1项。其中“MUNMS活动式水下噪声测量系统”获军队科技进步二等奖，“LGY-1型浪高测量仪”和“轻便式海洋磁探测系统”获三等奖。

作者: [高守勇](#)  
学位授予单位: [哈尔滨工程大学](#)

## 参考文献(80条)

1. [参考文献](#)
2. [杨德森](#) [水下航行器噪声分析及主要噪声源识别](#)[学位论文]博士 1996
3. [时胜国](#) [水下航行器辐射噪声预报方法研究](#) 2001
4. [胡家雄](#), [伏同先](#) [21世纪常规潜艇声隐身技术发展动态](#)[期刊论文]-[舰船科学技术](#) 2001(4)
5. [王之路](#), [陈宗歧](#), [于飒](#), [刘文帅](#) [舰船噪声测量与分析](#) 2004
6. [JI M](#) [布列霍夫斯基](#) [海洋声学](#) 1983
7. [R J](#) [尤立克](#), [洪申](#) [水声原理](#) 1990
8. [刘伯胜](#), [雷家煌](#) [水声学原理](#) 1993
9. [章林柯](#), [何琳](#), [朱石坚](#) [潜艇主要噪声源识别及贡献比计算方法综述](#) 2005
10. [杨德森](#) [利用偏相干方法识别主要激励源](#) 1994(03)
11. [张宝成](#), [徐雪仙](#) [舰艇水下噪声源贡献的分析](#) 1994(10)
12. [程广福](#), [夏春艳](#), [刘文帅](#), [蒋行海](#), [刘雨东](#) [潜艇噪声源识别和分离方法研究综述](#) 2005
13. [孙大军](#), [田坦](#) [合成孔径声呐技术研究\(综述\)](#)[期刊论文]-[哈尔滨工程大学学报](#) 2000(1)
14. [李启虎](#) [水声学研究进展](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2001(4)
15. [李启虎](#) [进入21世纪的声纳技术](#)[期刊论文]-[应用声学](#) 2002(1)
16. [夏春艳](#), [刘文帅](#) [应用合成孔径技术进行实船噪声源分析](#)[期刊论文]-[舰船科学技术](#) 2005(4)
17. [周广林](#), [陈心昭](#), [陈剑](#), [毕传兴](#) [声全息技术的研究现状与展望](#)[期刊论文]-[声学技术](#) 2003(2)
18. [Williarns E G](#) [Sound source reconstructions using a microphone array](#) 1980(01)
19. [Maynard J D](#), [Williams E G](#), [Lee Y](#) [Nearfield acousticholography:1.theory of generalized Holography and thedevelopment of NAH](#) 1985(04)
20. [张德俊](#) [近场声全息对振动体及其辐射场的成像](#)[期刊论文]-[物理学进展](#) 1996(4)
21. [暴雪梅](#) [近场声全息方法研究目标散射场](#)[期刊论文]-[哈尔滨工程大学学报](#) 1997(5)
22. [何元安](#), [何祚镛](#) [轴对称结构表面声场的非共形重建精度分析](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2001(5)
23. [何祚镛](#), [王文芝](#) [声全息测量基阵的设计与研制](#)[期刊论文]-[哈尔滨工程大学学报](#) 2002(2)
24. [何元安](#), [何祚镛](#), [姜军](#) [基于声强测量的近场声全息及其在水下声源声辐射分析中的应用](#) 1996(04)
25. [何元安](#), [何祚镛](#) [用声场空间变换识别水下噪声源](#)[期刊论文]-[应用声学](#) 2000(2)
26. [何元安](#), [何祚镛](#) [基于平面声全息的全空间场变换: I. 原理与算法](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2002(6)
27. [何元安](#), [何祚镛](#), [商德江](#), [徐春萍](#), [姜俊奇](#), [楼红伟](#) [基于平面声全息的全空间场变换: II. 水下大面积平面发射声基阵的近场声全息实验](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2003(1)
28. [何祚镛](#) [实船设备结构振动和水声声强测试分析及噪声源的判别](#)[期刊论文]-[中国造船](#) 2003(4)
29. [何元安](#) [大型水下结构近场声全息的理论与实验研究](#) 1996
30. [Williams E G](#) [Imaging the sources on a cylindrical shell from far-field pressure measured on a semicircle](#) 1996(04)

31. [杨殿阁](#) [用于噪声识别的声全息重建方法的研究](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2001(02)
32. [J A Clark](#), [P M Honke](#), [J M Ellis](#) [Acoustic imaging of large vibrating structures](#) 1990
33. [S -H Park](#), [Y -H Kim](#) [Visualization of pass-by noise by means of moving frame acoustic holography](#) 2001(05)
34. [S -H Park](#), [Y -H Kim](#) [An improved moving frame acoustic holography for coherent bandlimited noise](#) 2001(05)
35. [杨殿阁](#), [郑四发](#), [罗禹贡](#), [连小珉](#), [蒋孝煜](#) [运动声源的声全息识别方法](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2002(4)
36. [毛晓群](#), [罗禹贡](#), [杨殿阁](#), [郑四发](#), [李富强](#), [连小珉](#) [使用阵列技术识别高速行驶轿车的辐射声源](#)[期刊论文]-[汽车技术](#) 2003(9)
37. [毕传兴](#), [陈剑](#), [陈心昭](#) [基于分布源边界点法的多源声场全息重建和预测理论研究](#)[期刊论文]-[中国科学E辑](#) 2004(1)
38. [张胜勇](#), [陈心昭](#), [王有成](#) [分布源边界点法及其在振动体声辐射计算中的应用](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 1999(2)
39. [郑士杰](#), [袁文俊](#), [薛耀泉](#) [水声计量测试技术](#) 1996
40. [楚龙宝](#), [袁文俊](#) [水声换能器近场校准方法的实验研究](#) 1993(04)
41. [赵涵](#), [平自红](#), [楚龙宝](#), [黄勇军](#) [近场测量方法研究](#)[期刊论文]-[声学与电子工程](#) 1996(2)
42. [平自红](#), [楚龙宝](#) [声呐阵远场空间指向性的近场测量法](#)[期刊论文]-[声学与电子工程](#) 1998(1)
43. [何祚镛](#), [赵玉芳](#) [声学理论基础](#)
44. [Paul C Etter](#), [蔡志明](#) [水声建模与仿真](#) 2005
45. [E JI](#) [沈杰罗夫](#), [何祚镛](#), [赵晋英](#) [水声学波动问题](#) 1983
46. [JI M](#) [布列霍夫斯基](#) [分层介质中的波](#) 1983
47. [Jensen F B](#), [W a Kuperman](#), [M B Porter](#), [H. Schmidt](#), [张润中](#), [唐宗瑜](#) [海洋计算声学](#)
48. [田坦](#), [刘国枝](#), [孙大军](#) [声呐技术](#) 1999
49. [杨士羲](#) [水声传播原理](#) 1994
50. [惠俊英](#) [水下声信道](#) 1992
51. [李风华](#), [肖灵](#) [关于浅海中简正波衰减与群速的讨论](#) 1997(12)
52. [Pekeris CL](#) [Theory of propagation of explosive sound in shallow water](#) 1948
53. [吴开明](#) [水下声信道的仿真与应用研究](#)[学位论文]硕士 2005
54. [张歆](#), [张小蓓](#), [李斌](#) [基于Kraken简正波模型的浅海声场分析](#)[期刊论文]-[西北工业大学学报](#) 2000(3)
55. [唐俊峰](#) [基于射线声学理论的三维声场计算研究](#)[学位论文] 2003
56. [Micheal B Porter](#) [The KRAKEN Normal Mode Program](#) 2001
57. [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](#)[期刊论文]-[物理学进展](#) 1996(3)
58. [张仁和](#), [李风华](#) [浅海声传播的波束位移射线简正波理论](#) 1993(03)
59. [王秀峰](#) [机器辐射声场分析的新型计算方法研究](#)[学位论文]博士 2001
60. [王三德](#) [水下复杂弹性壳体的相似性研究](#)[学位论文]博士 2004
61. [李太宝](#) [计算声学-声场的方程和计算方法](#) 2005
62. [D 罗斯](#) [水下噪声原理](#) 1983
63. [叶平贤](#), [龚沈光](#) [舰船物理场](#) 1992
64. [何祚镛](#) [水下噪声及其控制技术进展和展望](#)[期刊论文]-[应用声学](#) 2002(1)

65. [魏以迈](#). [我国船舶水下噪声研究进展综述](#) 2000 (01)
66. [何元安](#). [杨德森](#). [水下结构辐射噪声估算方法实验研究](#)[期刊论文]-[船舶力学](#) 1999 (2)
67. [童宗鹏](#). [王国治](#). [舰艇结构水下振动和声辐射特性研究](#)[期刊论文]-[华东船舶工业学院学报 \(自然科学版\)](#) 2003 (2)
68. [孙贵青](#). [矢量水听器检测技术研究](#) 2001
69. [时胜国](#). [杨德森](#). [矢量水听器的源定向理论及其定向误差分析](#)[期刊论文]-[哈尔滨工程大学学报](#) 2003 (2)
70. [孙贵青](#). [杨德森](#). [张揽月](#). [基于矢量水听器的水下目标低频辐射噪声测量方法研究](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2002 (5)
71. [孙贵青](#). [李启虎](#). [声矢量传感器信号处理](#)[期刊论文]-[声学学报](#) 2004 (6)
72. [高守勇](#). [自容式同步信标技术报告](#) 2005
73. [周建清](#). [高守勇](#). [测量校准声源技术报告](#) 2005
74. [范敏毅](#). [水下声信道的仿真与应用研究](#)[学位论文]博士 2000
75. [张升明](#). [舰船水下声辐射的近似计算方法](#)[期刊论文]-[舰船科学技术](#) 1997 (1)
76. [刘勋](#). [相敬林](#). [罗建](#). [舰船辐射噪声源纵向分布的研究](#)[期刊论文]-[数据采集与处理](#) 1999 (4)
77. [相敬林](#). [刘勋](#). [舰船做为体积声源的源强度谱纵向分布特性](#)[期刊论文]-[探测与控制学报](#) 2002 (2)
78. [刘勋](#). [相敬林](#). [周越](#). [罗建](#). [作为体积目标的船舶声辐射纵向分布特性的研究](#)[期刊论文]-[西北工业大学学报](#) 2000 (3)
79. [邓大新](#). [林春生](#). [舰船声场的近程分布式声源模型](#)
80. [周庆余](#). [由实测的本艇噪声推算辐射噪声](#)[期刊论文]-[声学与电子工程](#) 1995 (2)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis\\_Y935932.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y935932.aspx)

授权使用: 哈尔滨工程大学 (hebgcdx), 授权号: d9ee51f4-eb29-42e8-82d9-9e1f00f5b864

下载时间: 2010年10月30日