中国海洋声学研究进展

张 仁 和

（中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室，北京 100080）

海洋声学研究声波与海洋的相互作用．它包括两方面的问题：一方面研究海洋环境对海中声场的影响；另一方面利用声波来探测海洋结构．海洋声学是一门应用范围很广、发展十分迅速的学科．本文简要介绍了海洋声学研究的某些进展，其中包括浅海与深海声场，浅海混响与低频声吸收．

关键词 海洋声学，声传播，混响，声吸收

Abstract

Ocean acoustics studies the interaction between acoustic waves and ocean, which involves problems in two aspects: one is the effect of ocean environment on the acoustic fields in the sea,and the other is how to probe the ocean structures by use of acoustic waves. It is a widely applicable and rapidly developing science. In this paper, some advances in research on ocean acoustics are introduced, which includes acoustic fields in shallow water and in the deep sea, shallow-water reverberation and sound absorption of low frequency.

Key words ocean acoustics, sound propagation, reverberation, sound absorption

海洋声学的基本任务是研究声波与海洋的相互作用．它一方面探索海洋环境（海面波浪、海水非均匀性以及海底结构）的时空变化对声场影响的规律（正演问题）；另一方面研究如何利用声波来探测海洋结构以及海中物体的位置与特性（反演问题）．海洋声学研究是具有重大应用前景的基础研究．由于电磁波与激光在海水与海底中具有强烈的吸收衰减，其穿透深度不超过 1km；而声波在浅海中可传播数 10km，在大洋中可传播上万 km，可穿入海底几 km．因此声波是目前唯一能够在海洋中进行远距离探测与传输信息的能量形式．海洋声学在水下战争，海洋研究与海洋开发中起着特殊重要的作用．

海洋声学研究在国际上受到高度重视．它的发展现状如下：

（1）近 10 年来海洋声场的计算方法取得了重大进展．各国投入了相当大的力量从事计算声学的研究，努力发展适用范围广、运算速度快、计算精度高的计算模型与算法．各国实验室已发展了 30 多种传播声场的计算方法，每种方法各有其优缺点，但尚未达到“广、快、高”的要求．抛物方程（PE）方法具有对环境适用能力强的优点，但目前的算法计算速度慢、频率低，应用于混响场、环境噪声场与脉冲声场尚处于起步阶段．

（2）匹配场与匹配简正波定位研究从理论走向应用．由于传统的水声定位方法几乎未利用海洋声传播特性，使探测距离与精度受到极大限制，远不能满足实用要求．80年代以来，美国与亚欧国家开展了匹配场与匹配简正波定位方法的研究，并在北冰洋、太平洋以及浅海区域进行了原理性实验．

（3）浅海声学是当前研究的热点．由于原

苏联解体，美、苏对抗结束，许多国家把研究重点转移到经常发生地区冲突的浅海区域。浅海声学由于海底的影响，多途与频散效应严重，比深海复杂得多。

(4) 海洋声学层析法扩展应用于大洋声学测温。Munk 与 Wunsch 于 70 年代末提出的海洋声学层析法，是利用大洋中远程脉冲声传播反演大范围海水运动变化规律，80 年代美国在东北太平洋进行过 4000km 范围的海洋声学层析实验。1990 年提出利用远程声传播监测由于温室效应引起的海洋变暖趋势，1991 年 2 月进行了赫德岛可行性实验，57Hz 的低频声波在 16000km 的距离处被接收到，并具有足够的时间分辨。现已成立国际组织，开展国际合作研究，称为 ATOC 计划。计划首先在太平洋建立观测网，进行为期 10 年的观测。

从上述可以看出，海洋声学是一门应用范围广、发展十分迅速的科学，下面仅就我国海洋声学研究的一些进展作一简述。

一、浅海声场研究

1. 简正波衰减、群速与简正波实验

简正波理论是描述海中声场最常用的方法之一。Pekeris[1] 首先用它来分析爆炸声在均匀浅海中的传播。在简正波理论中，简正波的衰减系数 β_l 与群速 v_l 是两个最重要而又难以计算的物理量。Kornhauser 与 Raney[2] 最先用微扰法得到均匀浅海中的简正波衰减。我国学者[3]在 60 年代发表了用边界反射系数与本征射线循环距离表示的简正波衰减与群速的一般公式：

$$\beta_l = \frac{-\ln|V_s| - \ln|V_b|}{S_l + \delta_l}, \qquad (1)$$

$$v_l = \frac{S_l + \delta_l}{T_l + \tau_l} \qquad (2)$$

(1)式与(2)式首次考虑了波束位移与时延对简正波衰减与群速的影响，不但形式简明，精度也比微扰法高，至今仍被国内外学者广泛引用。特别是对临界简正波，许多学者根据微扰法理论得到临界简正波的衰减与群速分别等于海底声速的结论，即 $\beta_c = \alpha_b$，$v_c = c_b$。根据(1)式与(2)式的分析[4]，纠正了上述关于临界简正波衰减与群速的不正确的结论，在国际上受到重视。

提取单个简正波是检验简正波理论的一个重要方法，并可获得海底的声学参数。利用高频与低频的群速差，我们提出了获取单个简正波的简化方法[5]：使用单个水听器依次在不同的深度接收记录爆炸信号，在实验室回放时用高频滤波信号作为触发采样脉冲，得到的一系列低频信号等效于一个垂直接收阵，然后对所有信号进行加权相加，就得到单个简正波。图 1 是用简化方法获得的简正波波形，它相当一个 18 阵元、长度 36m 的垂直线阵的结果。

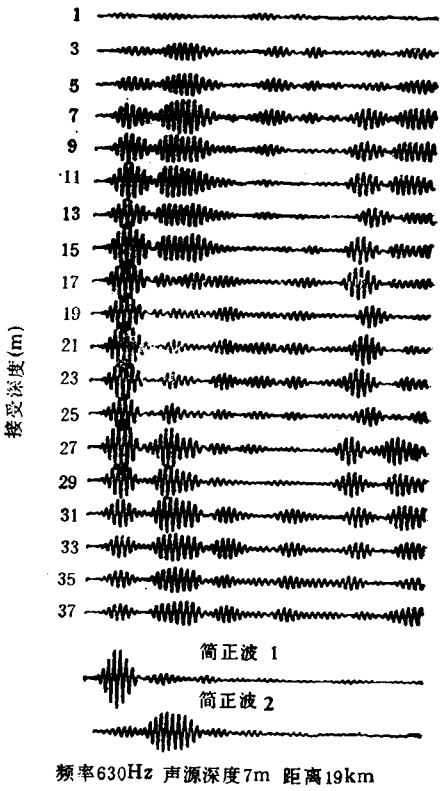

图 1 用简化方法获得的浅海中的单个简正波

2. 信号波形的多途结构与声场的空间相干性

由于声波在海水中的折射与边界反射，使

浅海中的信号波形变得十分复杂。多途传输是浅海信道的基本特征。掌握信号波形的传输规律是实现信道匹配的物理基础。在70年代中期，我们已观测到负跃层浅海中脉冲信号具有规律的梳状结构（见图2），波形结构与声源和接收器的深度有关。我们用射线理论较好地解释了波形的"宏观"结构[6]。最近我们根据简正波衰减与群速的一般表达式[(1)式与(2)式]，计算了理想跃变层浅海中的脉冲波形，得到了与实验相同的结构，说明浅海中信号波形的数值预报是可能的。

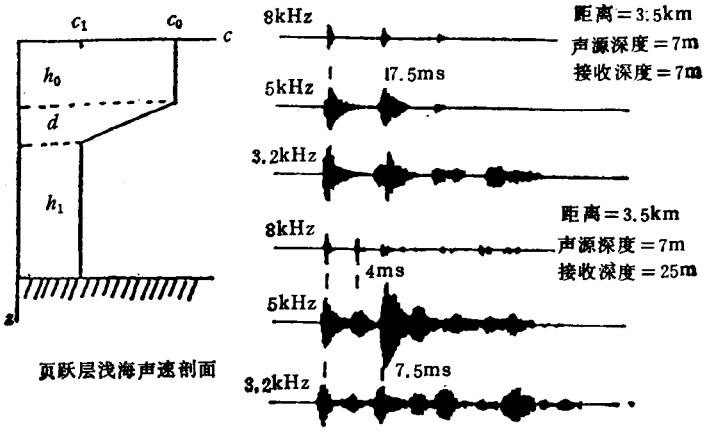

图 2 海上实验所观测到的脉冲波形

随着声呐信号处理技术的发展，浅海中声场相干性的研究一直受到注意。Scholz[7] 用74 m长的水平线阵测量了2—50km的空间相关。与此同时，我们测量了水听器间距160—240m，距离50—130km的空间相关[8]。实验证明，浅海中低频远程声场有很强的空间相干性，为利用大尺寸声呐接收阵获得高空间增益提供了物理依据。

3. 浅海声场平均强度结构及其反演

浅海中的声场常常由大量的射线或简正波构成，形成复杂的空间干涉结构。平均强度结构是对浅海声场最基本的描述，在声呐设计与使用中有重要实际意义。Brekhovskikh[9], Smith[10] 和 Weston[11] 用不同的方法导出过平均声强的表达式，但他们的表达式皆存在发散性，即当声源与接收深度相等时，平均声强变为无穷大。我们利用本征函数的广义相积分（WKBZ）近似，获得了浅海平均声强的普遍表示公式[12]：

$$I_{SF}=\frac{4}{r}\int \cdot \sin\alpha_1\sin\alpha_2\exp(-2\beta r)d\alpha_1/S(\alpha_1)[D(z_1)+\sin^2\alpha_1]^{1/2}[D(z_2)+\sin^2\alpha_2]^{1/2}, \quad (3)$$

式中 $\beta=-\ln|V|/S(\alpha_1)$。(3) 式反映了声速剖面、边界反射损失、频率以及收发深度对平均声强的影响，而且不存在发散性。当频率无限高时，(3)式退化为 Brekhovskiskh, Smith 与 Weston 的结果。基于平均强度表达式(3)，我们已研制成声场数值预报仪，根据已知的声速剖面与海底反射系数，就能在数秒钟内计算出平均强度场。图3给出了传播损失的计算结果

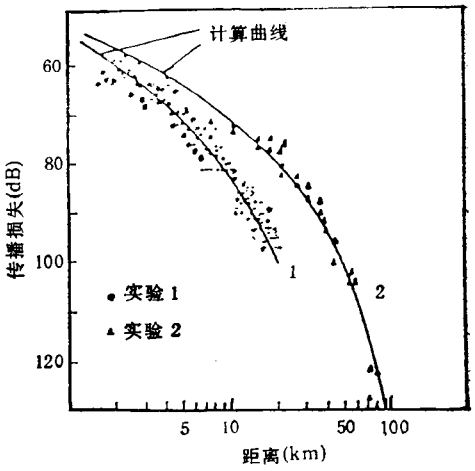

图 3 计算与测量的传播损失比较

与测量结果的比较，图中“●”与“▲”是测量结果，曲线是由(3)式计算得到的。实验结果取自 Cohen 与 Cole[13] 的论文，曲线 1 与 2 分别是在同一海区两种水文条件下的计算结果，计算与实验符合得很好。

通常，声速剖面是容易直接测量的，而海底反射系数，特别是小掠角的海底反射损失很难直接测量。基于平均声强的表达式(3)，我们提出了一种反演海底反射损失的方法，也就是根据测量得到的声速剖面以及传播损失，用最优化方法反演实验海区的海底反射系数。我们的方法已应用于我国东海与黄海区域，获得了满意的结果[14]。

二、深海声场研究

1. 反转点会聚区理论与实验

水下声道中的高声强会聚区一直受到人们的注意。按照经典射线理论，在焦散线与反转点上声强为无穷大。如图 4 所示，水下声道中一般存在三类反转点：位于声源同一深度上的 $A_1, A_2, \cdots$ 为第一类反转点，位于共轭深度(声速与声源深度相同)上的 $B_1, B_2, \cdots$ 为第二类反转点，在其他深度上的 $C_1, C_2, \cdots$ 为第三类反转点。我们提出了三类反转点会聚区强度的完整理论[15]，指出在三类反转点附近存在高强度的反转点会聚区，并给出了三类反转点会聚区强度的计算公式。不考虑海水声吸收时，第一类反转点会聚区的声强与频率的 2/3 次方成正比，与距离的平方成反比；第二类反转点会聚区的声强与频率的 1/3 次方成正比，与距离的一次方成反比；第三类反转点会聚区的声强与频率的 1/3 次方成正比，与距离的平方成反比。为了检验理论，1983 年进行了南海深海实验，在 150km 距离上观测到三个高强度的反转点会聚区，会聚区的强度与位置同理论计算基本一致。应特别指出，我们还在理论与实验上证明，经过海底反射的声波亦可形成反转点会聚区[16]，这一新概念的提出，为中等深度海域利用海底反射途径提供了十分重要的理论根据。

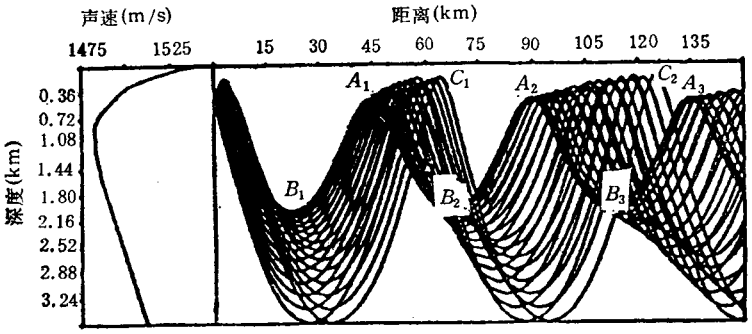

图 4 水下声道中的三类反转点

2. WKBZ 简正波理论及其应用

近年来，为了研究大洋远程声传播，我们发展了 WKBZ 简正波理论[17]，即采用本征函数的广义相积分(WKBZ)近似，并考虑了海面附近反转时的相位修正，适合水平缓变的大洋声道，是一种快速而精确的计算大洋远程声传播的方法。图 5 是理论计算与实验结果的比较，左图是用 WKBZ 简正波理论计算的，右图是 1990 年中俄合作太平洋水声实验的结果，理论与实验符合得相当好。

由于 WKBZ 简正波方法具有快速、精确的优点，我们已将它用来研究大洋中远程脉冲声传播问题。图 6 是频率 100—150Hz 的带通信号在北太平洋中传播 4000km 的脉冲波形与时间结构，左图是用 WKBZ 理论计算的，在 VAX11/780 上的 CPU 时间约 5min；右图是用传统的简正波(CNM)方法计算的，使用计算机的时间为 WKBZ 方法的 100 倍以上。

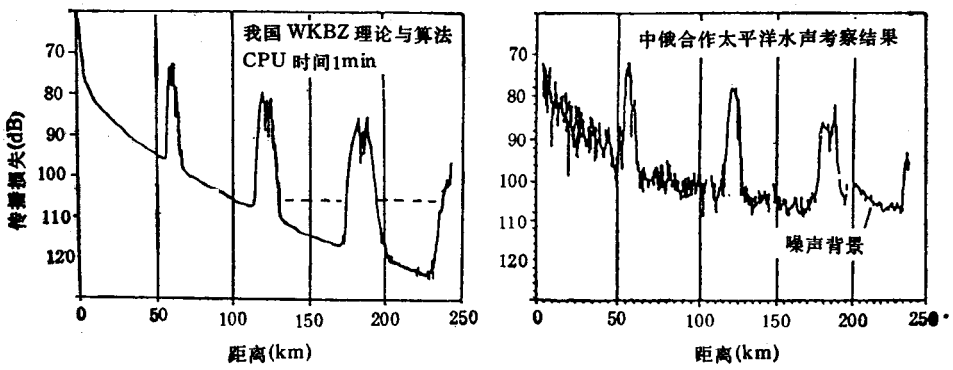

图 5 太平洋中远程声传播理论与实验比较

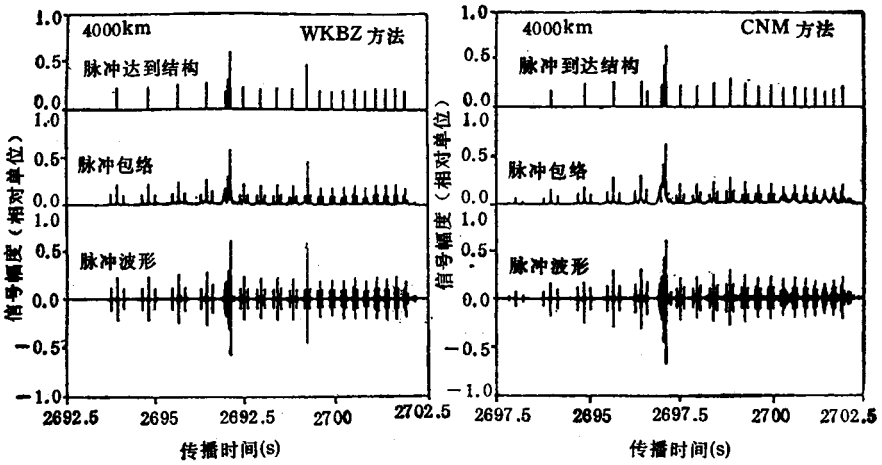

图 6 太平洋中远程脉声传播

三、浅海混响

混响是对回声探测的严重干扰，它是传播与散射的综合效应，而浅海混响则更为复杂.射线方法适合于计算近程混响，但不适合于远程. Bucker 与 Morris[18] 最先将简正波方法应用于均匀浅海混响，但未考虑复本征值的影响. 我国学者[19]发展了比较完善的混响简正波理论，适用于一般的分层非均匀浅海，提出了用混响衰减作为归一化物理量基本概念. 理论与实验证明：(1) 复本征值对散射波的影响一般不能忽略；(2) 混响衰减与发射信号的幅度和带宽无关；(3) 混响具有互易性，即 $I_R(t,z_1,z_2)=I_R(t,z_2,z_1)$；(4) 不同深度的混响强度遵从"几何平均规律"，即

$$I_R(t,z_1,z_2)=\sqrt{I_R(t,z_1,z_1)I_R(t,z_2,z_2)}$$

四、低频声吸收

海水声吸收的研究是海洋声学中的一个重要课题. 准确测定海水声吸收系数的首要目的是为声呐作用距离预报提供必需的参数. 但作为对海水声吸收物理现象的研究，必须阐明这一现象的原因、规律和机理.

1965 年发现的海水低频 (10kHz 以下) 异

常声衰减现象曾使水声学家困惑了将近10年之久。美国曾花费大量的人力和物力进行海上(包括大的淡水湖)实地测量，科学家们提出了九种可能的衰减机理。由于海水低频声吸收的实验室测量存在极大的困难，直到1975年才由Fisher和Simmons首先用球共振器法证明是海水中存在的硼所引起的化学弛豫吸收。但因所用共振器尺寸的限制，无法由声共振器法获得弛豫频率数据。

我国学者发表了一系列论著，对海水低频声吸收作了系统、深入的研究[20]，其中包括：

(1) 对测量海水低频声吸收的共振器法作出了重大的改进，解决了低千赫频段低吸收溶液和海水声吸收的高精度测量难题。最低测量频率可低至3kHz，最小可测量的吸收值达到0.02dB/km，得到国际上最好的室内测量结果。

(2) 首次从理论上估计了压力对硼酸吸收的影响。在理论和实验上都证明硼酸的最大波长吸收随温度升高而显著增大，从而否定了以往认为温度和压力对硼酸最大波长吸收的影响可以忽略的结论。

(3) 首次用共振器法获得了人工海水和天然海水的声吸收与pH值的关系，揭示了某些预报公式与实测值之间的偏离，并解释了偏离的原因。

(4) 利用由混响瓶法测得的海水高频声吸收数据，并在低千赫频段内验证了$MgSO_4$弛豫吸收数据。

[1] C. L. Pekeris, *Geol. Soc. Am. Mem.*, **27** (1948), 1.
[2] D. E. Kornhauser and W. P., Raney, *J. Acoust. Soc. Am.*, **27**-3 (1955), 689.
[3] 张仁和，声学学报，2-1(1965)，24.
[4] R. Zhang and Z., Lu, *J. Sound & Vib.*, **127**-1 (1989), 121.
[5] 侯温良等，声学学报，**13-1**(1988)，38.
[6] 张仁和等，海洋学报，**3**-1(1981)，57.
[7] R. Scholz, NATO AST Proceedings, Enschede, (1976), 210—300.
[8] 张仁和等，声学学报，**6**-1(1981)，9.
[9] L. M., Brekhovskihk, *Sov. Phys. Acoust.*, **11**-1 (1965), 126.
[10] P. W. Jr., Smith, *J. Acoust. Soc. Am.*, **55**-5 (1974), 1197.
[11] D. E., Weston, *J. Acoust. Soc. Am.*, **68**-2(1980), 269.
[12] 张仁和，海洋学报，**3**-4(1981)，535.
[13] J. S. Cohen, and B. F., Cole, *J. Acoust. Soc. Am.*, **61**-1(1977), 213.
[14] 王勤，张仁和，声学学报，**15**-1(1990)，1.
[15] 张仁和，声学学报，**5-1**(1980)，28.
[16] 张仁和等，声学学报，**6**-3(1981)，198.
[17] 张仁和等，声学学报，**19**-1(1990)，10.
[18] H. P. Bucker, and H. E., Morris, *J. Acoust. Soc. Am.*, **44**-4(1968), 827.
[19] 张仁和、金国亮，声学学报，**9**-1(1984)，12.
[20] Qiu Xinfang et al., *Chin. J. Acoust.*, **7**-2 (1988), 295.

尘埃等离子体物理

李　芳

(中国科学院电子学研究所，北京　100080)

尘埃等离子体物理是近年来发展起来的新的研究领域. 本文介绍了尘埃等离子体物理的研究内容，特点及研究近况.

近年来，一个新的专业名词“尘埃等离子体”经常被人们提到。它不仅出现在等离子体物理领域，而且也常出现在空间物理、电波传播、半导体科学、材料科学等领域。顾名思义，尘埃等离子体不是“纯”的等离子体，而是被尘埃“污染”了的等离子体。

一、尘埃粒子和尘埃等离子体

尘埃粒子相当普遍地存在于自然界。在天