

# 近海面水层中声传播损失估计和分析

范威<sup>1,2</sup>, 李颂文<sup>1,2</sup>

(1. 水声对抗技术重点实验室, 上海 201108; 2. 上海船舶电子设备研究所, 上海 201108)

**摘要:** 近海面水层通常存在声速梯度变化, 并随着季节的更替而改变。根据南海典型中等深度海在春季、夏季、秋季和冬季的声速剖面, 分析近海面水层中 12 km 水平距离内声传播损失的空间分布和频率变化规律。结果表明: 春、夏两季由于负梯度声影区现象, 声传播损失约在 1 km 的距离超过 80 dB; 秋、冬两季的典型特征是存在表面声道现象, 当声源在近海面混合层内部时, 混合层中声传播损失在截止频率以上小于球面扩展损失, 而当声源深度大于混合层深度时, 表面声道现象不明显。

**关键词:** 近海面; 声速剖面; 季节变化; 传播损失

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2015)-03-0223-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2015.03.007

## Estimation and analysis of acoustic propagation loss in the water layer near sea surface

FAN Wei<sup>1,2</sup>, LI Song-wen<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing Laboratory, Shanghai 201108, China;

2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

**Abstract:** The sound speed gradient usually varies with seasonal change in the water layer near sea surface. The acoustic propagation losses in the near surface layer are estimated for the different sound velocity profiles in typical mid-depth sea areas of the South China Sea in spring, summer, autumn and winter respectively. The characteristics of acoustic propagation losses for different types of sound speed profiles in the spatial and frequency domains are analyzed when the horizontal distance between the source and receiver is within 12km. The results show that, due to the negative gradient phenomenon which results in acoustic shadow zone, the acoustic propagation losses in the spring and the summer reach 80dB at the horizontal distance about 1km. While in the autumn and the winter, it is typical that the surface channel phenomenon exists, so the acoustic propagation loss is less than the spherical expansion loss at the frequency above the cutoff frequency when the source is located in the mixed layer near the sea surface. However, the surface channel phenomenon is not obvious when the source depth is greater than that of the mixed layer.

**Key words:** near sea surface; sound velocity profile; seasonal change; propagation loss

## 0 引言

发展与环境特性相融合的水下目标探测技术是声呐发展的趋势之一。水下目标探测是在特定水体环境中进行的, 环境因素制约着声传播损失、目标散射、混响、噪声、换能器等诸多声呐要素, 对工作在近海面环境中的声呐表现得尤为突出。本文提到的近海面环境是指靠近海面、水体深度在海面以下几米到数十米之间的水层。

传播损失是声呐方程中重要的物理量, 近海面水层中声传播损失与声速剖面、水体吸收和散射、

表层气泡分布等诸多因素有关, 其中声速剖面是声传播损失的重要影响因素, 其它因素可以通过声速剖面等效表示, 如近海面水层气泡密度一般是随深度递减的, 使得近海面气泡层中声速呈正梯度分布。由于风浪、日照等环境因素的影响, 实际海洋中近海面水层声速剖面通常存在梯度变化, 并随着季节的更替而改变。在不同季节, 声传播损失随着声源频率、声源和接收器深度、距离的变化规律也不同。在近海面水层中, 声呐工作频率和布放的空间位置选择不当时, 声呐作用距离将大幅度降低。

本文考虑声速剖面随季节变化对中等距离条件下近海面水层声传播损失的影响, 以我国南海典型中等深度海在春季、夏季、秋季和冬季的声速剖面为例, 分析 12 km 距离内近海面水层中声传播损失的空间分布和频率分布随季节的变化规律。

收稿日期: 2014-07-10; 修回日期: 2014-10-08

作者简介: 范威(1984—), 男, 山东济南人, 博士, 工程师, 研究方向为水下小目标探测技术。

通讯作者: 范威, E-mail: fanwei1029@126.com

### 1 典型中等深度海声速的季节变化

中等深度海是指深度在深海和浅海之间，具有不完整声道的海洋，我国南海是典型的中等深度海。中等深度海的声速剖面随季节的变化通常比较明显，主要体现在混合层的季节性变化。所谓混合层<sup>[1]</sup>，指的是风浪搅拌和海气之间的相互作用下近海面水层中产生一定深度的、水温均匀的水层，在混合层中声速受压力的影响呈正梯度结构，从混合层中发出的声波向海面方向偏折，经海面多次反射形成波导式的传播，这种类型的声信道被称为表面声道或混合层声道。混合层声速剖面随季节的更替而呈现周期性的变化，季风性气候是混合层产生周期性变化的重要原因，混合层往往在秋季季风转换的过程中开始加深，在冬季发展到最强，在春季随着季节性温跃层的形成而逐渐消衰，在夏季最弱或消失。

图 1(a)~1(d)分别是深度约 2500 m 的典型中等深度海在春季、夏季、秋季和冬季的声速剖面，春季和夏季的声速剖面由温度跃变层和深水层组成，而秋季和冬季的声速剖面最大特征是除温度跃变层和深水层外还有混合层存在。

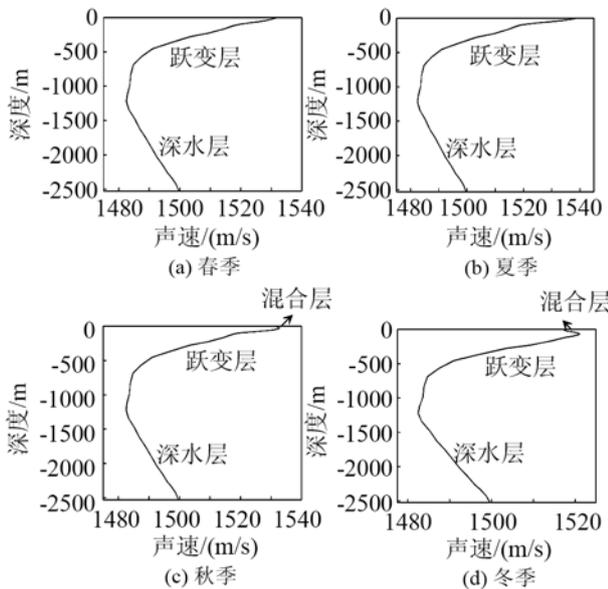


图 1 典型中等深度海在春、夏、秋、冬的声速剖面  
Fig.1 The sound velocity profiles in the typical mid-depth sea in spring, summer, autumn and winter

图 2(a)~2(d) 分别是典型中等深度海近海面水层(<100 m)在春季、夏季、秋季、冬季的声速剖面<sup>[2]</sup>，春季和夏季表层海水升温，海表的声速最大，声速自海表面随深度的增加而减小，表层 100 m 水

体春季声速变化量约为 12 m/s，而夏季声速变化量约为 20 m/s；秋季和冬季表层附近水层降温，声速稍偏低，普遍出现正梯度现象，最大声速出现在海面以下的水层，最大声速所在的深度即为混合层深度，它随季节的改变而改变，随海区的不同而不同，在图 2(c)中秋季最大声速对应的深度约为 30 m，而图 2(d)中冬季最大声速对应的深度约为 66 m，即秋季和冬季混合层的深度分别为 30 m 和 66 m。

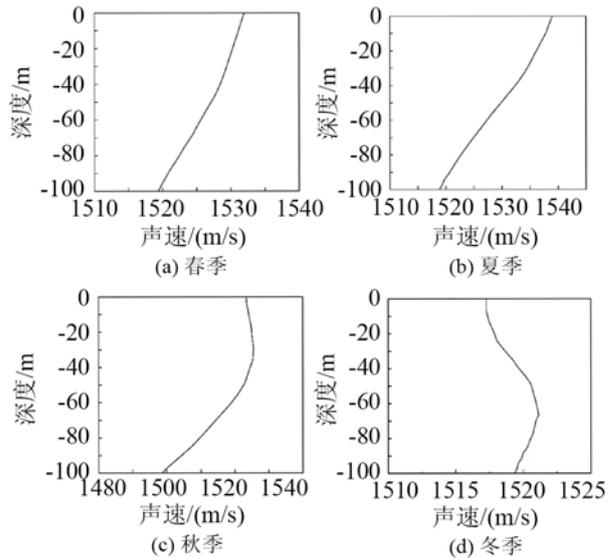


图 2 典型中等深度海近海面水层在春、夏、秋、冬的声速剖面  
Fig.2 The sound velocity profiles in the surface layer of the typical mid-depth sea in spring, summer, autumn and winter.

### 2 不同季节近海面水层中传播损失

本节以图 1 典型中等深度海在春季、夏季、秋季和冬季的声速剖面为例，分析 12 km 水平距离内近海面水层中声传播损失空间分布和频率分布随季节的变化规律，声传播损失采用 KRAKEN 简正波传播声场模型计算<sup>[3]</sup>，海底设为泥沙底质。

#### 2.1 近海面水层中声传播损失的空间分布

根据主动或被动声呐方程<sup>[4]</sup>，声传播损失越小，近海面水层中声呐的作用距离越大，声呐在水下布放的空间位置应选择在声传播损失小的水深。近海面水层中声传播损失不仅与接收的位置有关，还与季节性声速剖面、声源频率及声源深度等因素有关。图 3(a)~3(d)分别是春季、夏季、秋季和冬季 12 km 水平距离内、近海面水层(<100 m)中声传播损失随接收距离和深度的空间分布，其中声源的位置固定，位于水下  $z_0=10$  m，声源的频率为  $f=3$  kHz。

分析图 3 可见：(1) 在春季和夏季，近海面水层(<100 m)中声传播损失约在 1 km 的距离上就超

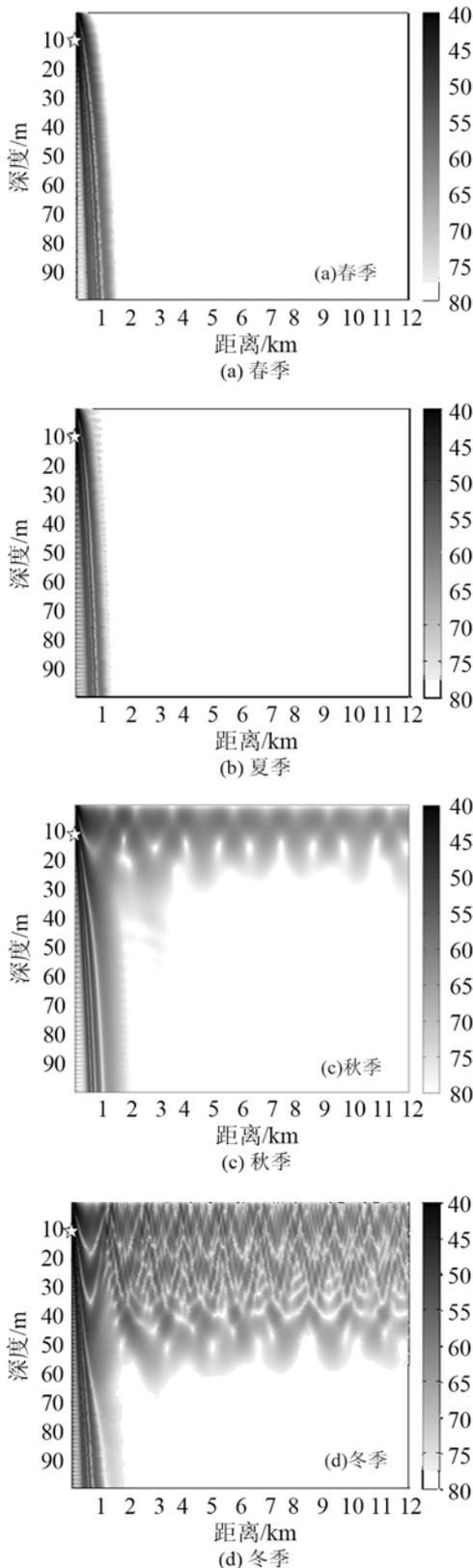


图 3 春、夏、秋、冬近海面水层中声传播损失空间分布。  
 Fig.3 The acoustic propagation losses in the surface layer in spring, summer, autumn and winter ( $f=3$  kHz and source depth  $z_0=10$ m)

过 80 dB, 声波随距离的衰减大, 接收点越靠近水面, 声传播损失越大。若声呐工作在春、夏季近海

面水层, 则作用距离将大幅度降低。(2) 秋季和冬季有表面声道现象, 秋季表面声道中声波在 12 km 距离内的平均传播损失约为 64 dB, 而冬季表面声道内的平均传播损失约为 66 dB。混合层深度越大, 则表面声道的深度越大, 冬季表面声道深度比秋季大。若声呐工作在秋、冬季近海面混合层, 则有利于提高其作用距离。

在秋冬两季, 当声源深度大于近海面混合层深度时, 表面声道现象不明显。以秋季为例, 图 4(a)、4(b)分别是声源深度  $z_0=25$  m 和  $z_0=45$  m 两种情况下, 12 km 水平距离内近海面水层(<100 m)中声传播损失随接收距离和深度的空间分布, 声源的频率为  $f=3$  kHz。分析图 3(c)、图 4(a)和图 4(b)结果可知, 当声源靠近混合层边缘时( $z_0=25$  m), 表面声道弱化, 即混合层中声传播损失增大, 而当声源的深度( $z_0=45$  m)大于混合层的深度时, 表面声道现象消失。

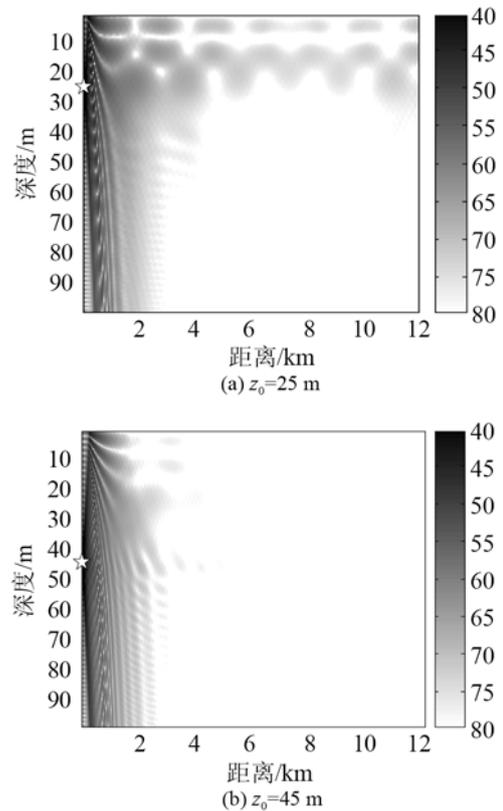


图 4 声源在混合层以外时秋季近海面水层中声传播损失空间分布  
 Fig.4 The acoustic propagation losses in the surface layer in autumn ( $z_0=25$  m and 45 m)

### 2.2 近海面水层中声传播损失的频率变化

在近海面环境中, 声呐工作频率的选择依赖于近海面水层中声传播损失的频率特性。图 5 是典型中等深度海在春季、夏季、秋季和冬季典型声速剖面下(图 1)近海面水层中声传播损失随频率(<3 kHz)

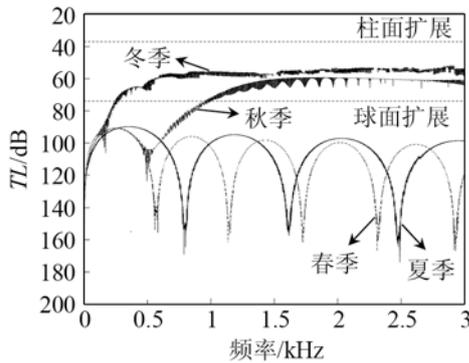


图5 声源和接收深度同为 10 m 时声传播损失随频率的变化曲线  
Fig.5 The variation of acoustic propagation loss with frequency in four seasons when the depths of source and receiver are 10 m

的变化曲线, 声源和接收点的水下深度都是 10 m, 两者之间的水平距离为 5 km。

从图 5 可以看出, 春季和夏季的声传播损失在 90 dB 以上并远大于 5 km 的球面扩展损失(74 dB), 并且随频率有极大、极小交替变化。根据 2.1 的分析, 冬、秋两季有混合层表面声道现象, 声传播损失随频率变化的最大特征是有低频截止频率  $f_{\text{cutoff}}$ , 其对应的最大波长可以估算为<sup>[5]</sup>

$$\lambda_{\text{max}} = c / f_{\text{cutoff}} = 4.7 \times 10^{-3} H^{3/2} \quad (1)$$

其中:  $c$  是水中声速;  $H$  是近海面混合层的深度。从式(1)可以分析, 表面声道截止频率与混合层深度有关, 混合层的深度越大, 则截止频率越小。文献[6]也讨论了表面声道截止频率, 通过以海面 Lloyd 镜干涉图案第一主声束角出射的声线估算表面声道截止频率  $f_{\text{cutoff}}$ , 把声线限制在表面声道内传播的最小频率作为表面声道的截止频率。表面声道存在截止频率并不表明表面声道是严格截止的<sup>[5]</sup>, 当声波频率远小于  $f_{\text{cutoff}}$  时, 声强就急剧地衰减, 而频率远大于  $f_{\text{cutoff}}$  时, 声强的衰减较小, 主要是由吸收和泄漏所产生的衰减。根据冬、秋两季混合层的深度, 由式(1)得到秋季和冬季的低频截止频率分别约为 602 Hz 和 1983 Hz。

比较图 5 秋、冬两季声传播损失曲线可以分析: 冬季声传播损失在 602 Hz 以下随频率减小而增大, 而声传播损失在 602 Hz~3 kHz 变化小、平均值为 56 dB; 秋季声传播损失则在 1983 Hz 以下随频率减小而增大, 在 1983 Hz~3 kHz 的传播损失平均值为 61 dB, 比冬季 602 Hz~3 kHz 的平均传播损失大约高出 5 dB。由图 5 还可以看出秋、冬两季混合层声传播损失在截止频率以上变化规律介于柱面扩展和球面扩展之间; 近海面水层中在冬季时声呐的工作频率可选择范围宽。

图 6(a)是当声源和接收器在秋季近海面混合层

内部( $z_0=10\text{ m}$ )的情况下, 两种不同频率信号在混合层中声传播损失随距离的变化曲线。图 6(b)是声源深度大于混合层深度( $z_0=40\text{ m}$ )的情况。从图 6(a)中可以看出, 当声源频率(2 kHz)大于秋季表面声道低频截止频率 1983 Hz 时, 混合层中声传播随距离变化小; 而当声源频率(500 Hz)小于低频截止频率时, 混合层中声传播损失随距离的增大而增大。从图 6(b)中可以看出, 当声源的深度大于混合层的深度时, 声传播损失较大而其受到频率的影响小。

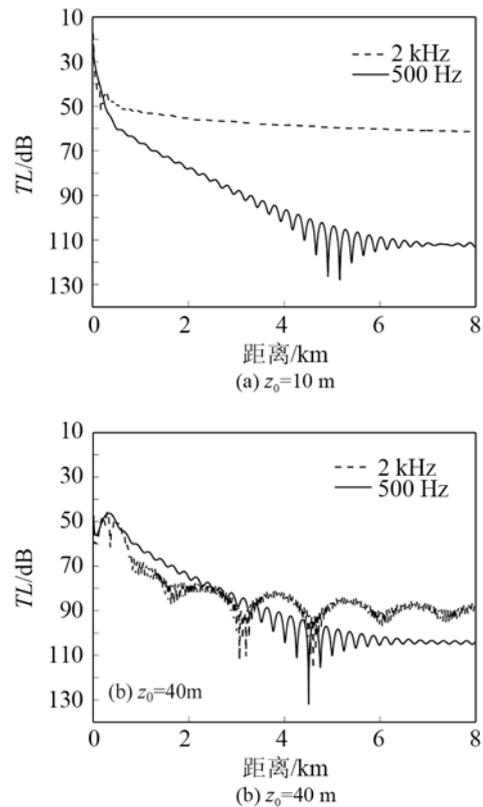


图6 秋季不同频率下声传播损失随距离的变化曲线  
Fig.6 The variation of acoustic propagation loss with range at the frequency above and below the cutoff frequency in autumn

### 3 结 论

本文以典型中等深度海在春季、夏季、秋季和冬季的声速剖面为例, 分析了近海面水层中声传播损失在四季不同声速剖面类型下的空间分布和频率变化规律。近海面水层中春季和夏季声传播损失的最大特征为负梯度声影区现象, 声传播损失约在 1 km 的距离超过 80 dB; 秋、冬两季的典型特征是存在表面声道现象, 当声源在近海面混合层内部时, 混合层中声传播损失在截止频率以上小于球面扩展损失, 而当声源深度大于混合层深度时, 表面声道现象不明显。

在我国南海典型中等深度海近海面水层环境

中, 不同季节的声传播损失空间和频率变化规律影响着声呐的作用距离、布放深度和频率等工作参数和性能指标。当近海面存在混合层表面声道时, 接收器布放在混合层内部有利于提高声呐的作用距离, 而声呐的工作频率须选择在混合层低频截止频率以上, 由于冬季的低频截止频率小于秋季的情况, 声呐利用表面声道现象的频率区间比秋季宽; 当不存在混合层或接收器布放深度大于混合层深度时, 负梯度声影区起主要作用, 接收器深度大于声源(目标或其辐射噪声)深度时则有利于对目标的探测。

### 参 考 文 献

- [1] 张旭, 张永刚, 张健雪, 等. 海洋混合层结构对表面中声传播特性的影响分析[J]. 海洋学报, 2012, **34**(1): 79-89.  
ZHANG Xu, ZHANG Yonggang, ZHANG Jianxue, et al. The effect of ocean mixed-layer structure on acoustic propagation in a surface duct environment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, **34**(1): 79-89.
- [2] 邱章, 朱良生, 许健林, 等. 南海北部海区上层水体平均声速场的变化[J]. 海洋学报, 2001, **23**(5): 42-48.  
QIU Zhang, ZHU Liangsheng, XU Jianlin, et al. Variation of sound velocity of upper water in the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001: **23**(5): 42-48.
- [3] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational ocean acoustics[M]. New York; AIP, 1994.
- [4] 李启虎. 声呐信号处理引论[M]. 2版, 海洋出版社. 2000.  
LI Qihu. Introduction of sonar signal processing[M]. Second edition, Ocean Press, 2000.
- [5] 尤立克. 水声原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1990.  
Urick R J. Principles of underwater sound[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 1990.
- [6] DUAN Rui, YANG Kunde, MA Yuanliang. Investigation of long-range sound propagation in surface ducts[J]. Chin. Phys. B, 2013, **22**(12): 1-11.

### • 简 讯 •

## EV 新一代线阵列扬声器技术交流会在福州召开

为了促进电声技术的学术交流, 推介专业音响的新技术和新产品, 上海市声学学会电声专业委员会与博世安防通讯系统公司, 于 2015 年 6 月 3~5 日在福州海峡会展中心的闽江世纪金源会展大酒店, 联合举办“新一代线阵列扬声器技术交流会”。会上博世 EV 固定安装全球产品经理 Guillermo Wabi 先生首先说明 EV 的技术发展趋势, 阐述新品 X-Line 线阵列扬声器的特性。它采用 MBH 中频 Hydra 复合技术, 确保了 12 单元的强大低频能量输出, 同时表现出多个点声源阵列的中频特性, 实现了频段间银色的无缝衔接; 其 WCH 环形高频设计, 辅以高效的驱动单元, 保证了低失真和高频延展的完美融合。此外, X-Line 线阵列扬声器还采用一体化吊装系统, 装配十分方便, 无需额外附件即可轻松完成安装, 效率大为提高。

会上还进行了现场试听品鉴, 让与会代表感受到了王者归来般的卓越音质和音效。在下午作了 EV 最新案例介绍: 包括福建长乐体育中心、武汉光谷国际网球中心、大庆国际会议中心等, 生动地讲述 EV 音响的最新成功应用。

博世安防通讯公司中国区付云平总经理、董涛业务总监等亲自出席并致辞, 上海市声学学会秘书长也亲临会场。参加会议的还有常务理事严雷总经理、电声专业委员会主任梁华教授和上海市声学学会部分会员、专家, 以及全国各地从事专业音响和影视演出行业的设计人员和工程技术人员等, 共计 170 多人。这次会议内容新颖, 反映热烈, 效果良好, 受到了与会者的普遍好评。

同济大学声学研究所 梁华