舰船螺旋桨空化低频辐射噪声时频域仿真

谢 骏，笪良龙，胡均川
(海军潜艇学院水声数据中心，山东青岛 266071)

摘要：依据空泡动力学经典理论的分析结果，仿真出单个空泡体积变化时间波形及相应的声脉冲。将旋转桨叶充分空化情况下，一周期内引起的空泡群破灭过程的平均行为用单空泡仿真，并将不均匀尾流场空泡群噪声辐射近似描述为以叶片频倒数为周期间隔出现、幅度随机变化的单脉冲所构成的脉冲序列组成，并在声压脉冲波形上叠加适当的高斯白噪声。推导了宽带洛埃镜模型信道响应函数，分析其相应的谱特性，对深海近表面目标螺旋桨空化近场低频辐射噪声场进行了仿真，仿真结果与实测数据吻合较好。

关键词：波形仿真；低频线谱；螺旋桨空化噪声；宽带信号；传播模型
中图分类号：O427.5;N032;TP391.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2011)-04-0364-05
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2011.04.014

Waveform simulation of low frequency line spectrum on nearfield radiated propeller cavitation noise

XIE Jun, DA Liang-long, HU Jun-chuan
(*Naval Submarine Academy*, *Qingdao* 266071, *Shandong*, *China*)

Abstract: The waveform of a single cavity volume change based on classical single cavitation dynamics model has been simulated. The instantaneous free-field acoustic pressure radiated from a pulsating monopole source can be derived by solving the acoustic wave equation in the case of a fluctuating mass source. If its density change is assumed to be negligible, the monopole pressure waveform is directly proportional to the second derivative of the cavity volume change. Based on the physical mechanism of low frequency line spectrum on propeller cavitation noise, the acoustic radiations of a great of cavitation bubbles can be represented by a single cavitation bubble during the time of propeller cavitation. A pulsating radiated acoustic pressure, which is caused by propeller rotation, is treated as a pulsatory random process with the radiated acoustic pressure waveform from a single cavity, equal iterative, random amplitude and structure of group by group. Through overlapping white Gaussian noise, the randomicity of pressure waveform of low frequency line spectrum is simulated. The transfer function expressions of radiated acoustic pressure field based broadband Lloyd-Mirror pattern are deduced, and the characteristic of transfer function is analyzed. Based on the above, the near-field radiated acoustic pressure in deep water from a shallow pulsating monopole source is simulated. Although the model of low frequency line spectrum on propeller cavitation noise is simplified, the results are in good agreement with experiment results.

Key words: waveform simulation; low frequency line spectrum; propeller cavitation noise; broadband signal; propagation model

0 引 言

舰船螺旋桨空化噪声是主要的舰船辐射噪声源，因此人们对空化噪声做了大量的理论和实验研究[1-3]。国内外大量的测量证明螺旋桨空泡噪声辐射直接产生显著的低频线谱[4-6]。这些低频线谱是叶片频的倍频，其幅度在某一频率处出现最大值，低于此频率，幅度随频率的增加而增加，高于此频率，幅度随频率的增加而迅速减小。本文从单空泡体积脉冲声场模型出发，建立舰船螺旋桨空化噪声低频线谱波形仿真方法，应用洛埃镜模型，进一步仿真分析了深海近表面体积脉动源的近场辐射声场的结构。

1 单空泡体积脉动源声场模型[7]

舰船螺旋桨空化噪声是单极子辐射源，其声压场满足方程

收稿日期: 2009-12-15; **修回日期**: 2010-03-27
基金项目: 国防预研基金; 新世纪优秀人才支持计划 NCET。
作者简介: 谢骏(1976-), 男, 安徽颍上人, 博士生, 讲师, 研究方向为声纳环境效应仿真、水下目标特性分析。
通讯作者: 谢骏, E-mail: xiejun688@tom.com

$$\nabla^2 p-\frac{1}{c_0^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}=-\frac{\partial q}{\partial t} \tag{1}$$

其中 p 为声压，q 为脉动质量。

考虑点源，即声源尺寸比波长小得多时，该方程的解为

$$p(r,t)=\frac{1}{4\pi r}\frac{\partial Q(t-r/c_0)}{\partial t} \tag{2}$$

其中：$Q=\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\rho_0 V)$；$\rho_0$ 为密度；V 为空泡体积变化。因此，声源 1 m 处的声压为

$$p(t)=\frac{\rho_0}{4\pi}\frac{\partial^2 V(t)}{\partial t^2} \tag{3}$$

式(3)表明，声源的强度正比于流体密度和体积加速度的乘积。

2　单空泡体积脉动辐射声场模型

深海近表面单空泡体积脉动源的近场辐射声场，可采用洛埃镜模型建模[8]，几何关系如图 1 所示，其中 d 为声源深度，θ 为接收点相对水平方向的偏离角，S 为声源位置，P 为接收点位置。

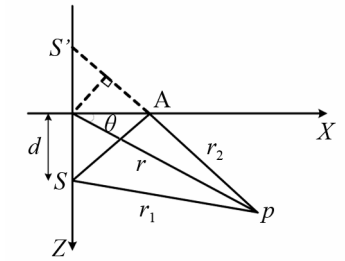


图 1　洛埃镜模型几何关系图

Fig.1　Geometry for surface image solution

因为单空泡体积脉动声压是宽带信号，因此需要将洛埃镜模型推广到宽带。

设声压 $p(t)$ 的傅里叶变换为 $P(\omega)$，则有

$$p(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}P(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\mathrm{d}\omega$$

接收声场为：

$$p(r,\theta,d,t)=\frac{1}{2\pi}\left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty}P(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(t-r_1/c_0)}\mathrm{d}\omega}{r_1}-\frac{\int_{-\infty}^{\infty}P(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(t-r_2/c_0)}\mathrm{d}\omega}{r_2}\right)$$

$$p(r,\theta,d,t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}P(\omega)\left(\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(t-r_1/c_0)}}{r_1}-\frac{\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(t-r_2/c_0)}}{r_2}\right)\mathrm{d}\omega \tag{4}$$

式中，$r_1\approx r-d\sin\theta$，$r_2\approx r+d\sin\theta$，代入式(4)，得

$$p(r,\theta,d,t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}P(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\left(\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega(r-d\sin\theta)/c_0}}{r_1}-\frac{\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\omega(r+d\sin\theta)/c_0}}{r_2}\right)\mathrm{d}\omega \tag{5}$$

考虑 $r>>d\sin\theta$，因此有 $r_1\approx r_2$，则式(5)变为

$$p(r,\theta,d,t)=-\frac{1}{2\pi r}\int_{-\infty}^{\infty}P(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega(t-r/c_0)}2\mathrm{i}\sin(kd\sin\theta)\mathrm{d}\omega \tag{6}$$

式(6)表明，深海近表面单空泡体积脉动源的近场辐射声压相对声源声压相位滞后 kr，式中 $2i\sin(kd\sin\theta)$ 是宽带洛埃镜模型信道响应函数。

3　信道响应函数特性分析

宽带洛埃镜模型信道响应函数特性与声源深度、偏离角和接收信号频率有关。

当声源深度和接收信号频率一定时，信道响应函数特性随偏离角的改变如图 2 所示。

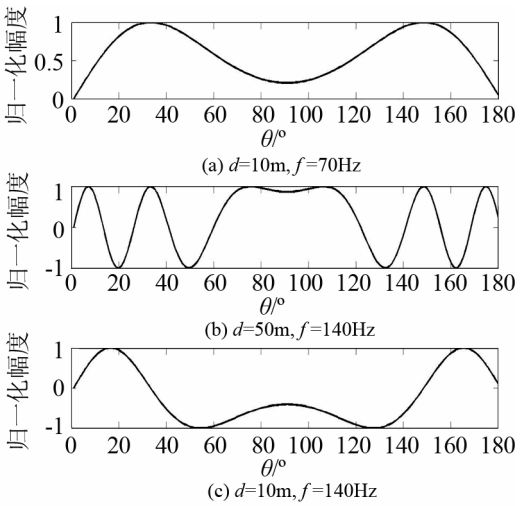


图 2　信道响应函数特性随偏离角的变化图

Fig.2　Transfer function of channel variability versusdeclination angle

图 2 表明信道响应函数具有垂直方向性。这种方向特性的振荡剧烈程度随频率、深度的增大而变大，而且以 π/2 方向角为中心对称，因此以下分析仅考虑 0 至 π/2 角度范围内。

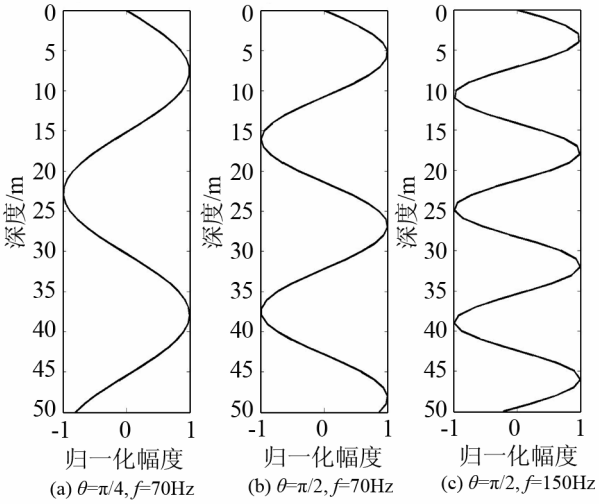


图 3　信道响应函数特性随声源深度的变化图

Fig.3　Transfer function of channel variability versus source depth

当偏离角和接收信号频率一定时，信道响应函数特性随声源深度的改变情况如图 3 所示。

图 3 表明信道响应函数在深度方向上具有一定的分布模式。这种分布模式随角度、频率的增加，其幅度分布的最大值、最小值的个数也增多。

当偏离角和声源深度一定时，信道响应函数特性随接收信号频率的改变情况如图 4 所示。

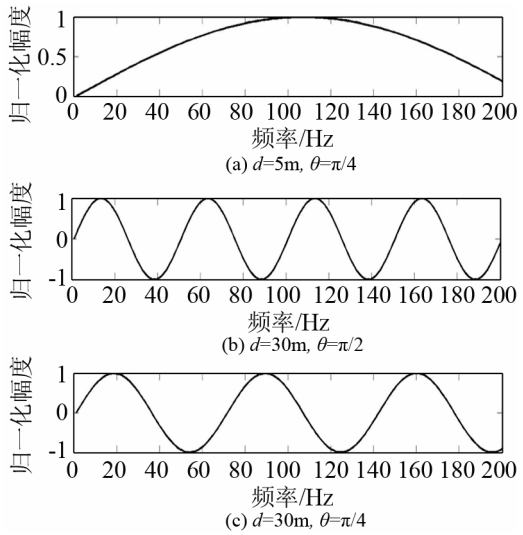


图 4 信道响应函数特性随接收信号频率的变化图

Fig.4 Transfer function of channel variability versus frequency

图 4 表明信道响应函数具有梳状滤波器特征，其通带、止带与声源深度和偏离角有关，带宽随角度、深度的增加而变小。

4 声源及接收声场低频线谱波形仿真

螺旋桨空化噪声的低频线谱是由于螺旋桨在水中转动而产生的脉动压力场迫使螺旋桨空泡群不断周期性产生和破灭，或随着这种脉动压力的节拍而作周期性的体积脉动，向外辐射噪声[4, 9-10]。为简化仿真模型，假设螺旋桨在充分空化条件下，一周期内空泡群脉动的平均行为可用具有随机初相的单个气泡脉动来表示。因此，由桨叶旋转而引起的空泡群噪声辐射可近似描述为一个周期性的随机函数：由一系列形状相同、以叶片频倒数 T 为间隔准周期出现、幅度为随机变量 A 的脉冲所组成。设单位幅度的单个声压脉冲为 $p(t)$，其频谱为 $P(\omega)$，该随机脉冲序列对应功率谱密度为[9]

$$G(\omega)=[\delta_A^2+(\overline{A})^2\frac{2\pi}{T}\delta(\omega-\frac{2n\pi}{T})]\frac{|P(\omega)|^2}{T} \qquad (7)$$

式中：δ_A^2 为脉冲幅度 A 的方差；$\overline{A}$ 为 A 的平均值；T 为叶片频倒数；$n=0,1,2,\cdots$。

上式表明该脉冲序列的频谱为线谱谐波簇，其中线谱谐波簇幅度受到声压脉冲频谱的调制。

由气泡动力学经典理论知，单个气泡的崩溃时间接近其生长时间的 3/4，实际气泡由于含有永久性气体会使气泡生长崩溃过程出现反跳，反跳、崩溃现象将产生高频辐射，由于本文主要探讨螺旋桨空化噪声的低频线谱，因此，对高频辐射部分进行了滤波处理，假设单个气泡体积变化如图 5 所示。

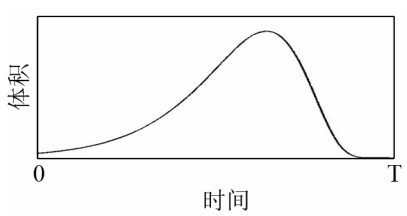


图 5 单个气泡的生长和崩溃

Fig.5 The growth and collapse of a gaseous bubble

根据式(3)、(6)，忽略常数因子，可得到该气泡辐射声源声压和近场接收声压的脉冲及频谱如图 6 所示。

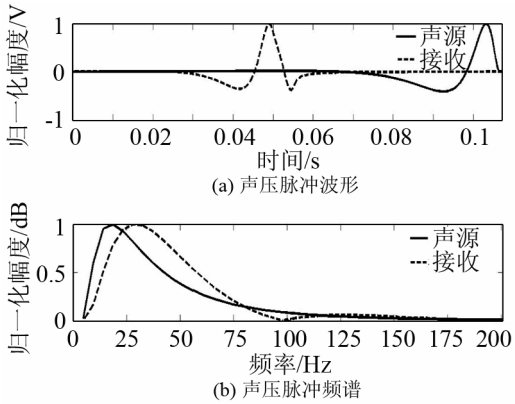


图 6 单个气泡声源声压及其辐射声压的脉冲波形及频谱

Fig.6 The pulse waveform and frequency spectrum of source and radiated field from a gaseous bubble

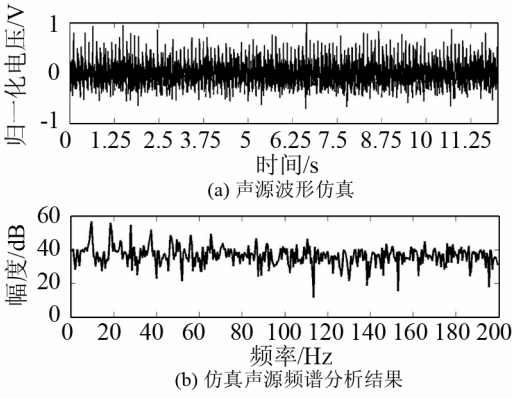
图 6 表明，接收声压脉冲相对于声源声压脉冲频谱峰值位置移向高频端，接收声压线谱幅度与声源声压线谱幅度总体分布形状基本相似。

考虑到实际海洋环境中螺旋桨空泡群声辐射行为的复杂性，在仿真螺旋桨空化噪声低频线谱波形时，可将图 6 中的声压脉冲波形叠加上适当的高斯白噪声。

根据图 6 中声压脉冲的频谱形状，结合式(7)分析可知，通过该方法仿真得到的舰船螺旋桨空化噪声低频线谱幅度在某一频率 f_0 处具有最大值，低于此频率，线谱幅度随频率的增加而增加，高于此频率，线谱幅度随频率的增加而减小。图 7 是对转速为 140 转/min、4 叶螺旋桨低频线谱波形仿真及其频谱分析结果，仿真结果与理论分析相一致。

根据式(6)对深海近表面目标螺旋桨空化近场

辐射噪声场进行仿真。图 8 是对转速 140 转/min、4 叶螺旋桨位于深度 d=4m 、偏离角 $\theta=\frac{\pi}{2}$ (目标正下方接收)条件下的仿真分析结果，图中谱分析的频率分辨率为 0.5Hz。与图 7 对比，显然，接收声压场的频谱峰值移向高频端。

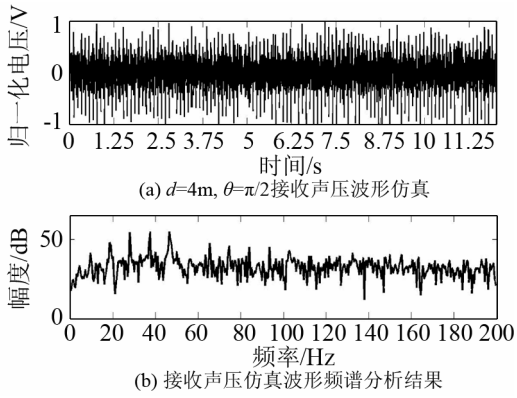


(a) 声源波形仿真

(b) 仿真声源频谱分析结果

图 7　声源声压波形仿真及其频谱图(转速 140 转/min, 4 叶)

Fig.7　The waveform simulation and frequency spectrum of source field (140 rpm,4 blades)



(a) d=4m, θ=π/2接收声压波形仿真

(b) 接收声压仿真波形频谱分析结果

图 8　接收声压波形仿真及其频谱图(转速 140 转/min, 4 叶, d=4m, θ=π/2)

Fig.8　The waveform simulation and frequency spectrum of radiated field (140 rpm, 4 blades, d=4m, θ=π/2)

图 9[5]中曲线 a 是 M/V OVERSEAS HARRIETTE 商船在最大转速(140 转/min)时，对其辐射噪声实测结果以 0.5 Hz 带宽分析得到的窄带谱，线谱标号 B 为螺旋桨空化辐射的低频线谱成份。该测量结果由 Arveson 等人用 5 个布设在 60~460m 深度的垂直水听器获得的，试验海区选择在巴哈马群岛一块被浅滩包围的海域，可有效避免外海海洋环境噪声的干扰。图 9 中曲线 b 是图 8 中接收声压波形仿真的功率谱。通过比对分析，两曲线低频线谱谐波簇位置分布规律，滤除曲线 a 的连续谱后，低频线谱谐波簇幅度分布规律以及幅度最大线谱位置、显著线谱个数均具有一定的相似性。对于图中曲线 a、曲线 b 存在的幅值差异，是由于两信号的声源级不同而引起的，可通过调整仿真波形的信号幅度来消除曲线 a、曲线 b 的幅值差异。

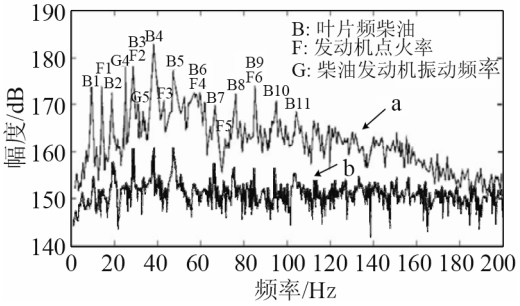


图 9　M/V OVERSEAS HARRIETTE 商船最大转速(140 转/min)的 0.5Hz 带宽的窄带谱

Fig.9　Narrow-band spectra of M/V OVERSEAS　HARRIETTE in 0.5 Hz bands at maximum speed(140 rpm)

5　结 论

本文根据空泡动力学经典理论的分析结果，给出空泡脉动过程的体积变化，结合单极子辐射声场模型得到单个声压脉冲波形，用它来近似描述螺旋桨空泡群声辐射一周期内的平均行为。螺旋桨空化噪声低频线谱波形可通过叶片频倒数 T 为周期间隔，幅度为随机变量 A 的上述脉冲串来仿真。该方法尽管对空泡云的低频辐射模型作了简化，但仿真结果与理论分析相一致，与国内外有关螺旋桨低频空化噪声的测量结果吻合也较好[4,5]。

本文仅考虑螺旋桨空化噪声低频线谱的仿真问题。舰船辐射噪声低频线谱成分的辐射声源与舰船的动力系统有关，图 9 中 M/V OVERSEAS HARRIETTE 商船的低频线谱成份的产生除螺旋桨空化外，还包括柴油发动机点火(频率)和柴油发电机振动(频率)等其它因素。最近，熊紫英[11,12]等讨论了螺旋桨非空泡状态下低频线谱产生机理，归结为螺旋桨非定常力作用下的偶极子辐射。有关舰船不同工况下其它低频辐射噪声声源仿真问题需要进一步研究。在信道响应函数建模方面，本文仅考虑了简单的洛埃镜模型，有关复杂水声条件下宽带声场建模问题还需要深入研究。

参　考　文　献

[1]　朱安珏. 水中目标辐射噪声特性仿真[J]. 声学技术, 2004, **23**(2): 128-131.
ZHU Anjue. Simulation of radiation noise from underwater targets[J]. Technical Acoustics, 2004, **23**(2): 128-131.

[2]　张宾, 孙长瑜. 拖船辐射噪声的海试数据分析及特性仿真[J]. 声学技术, 2007, **26**(5): 798-801.
ZHANG Bin, SUN Changyu. Sea trial data processing and tow ship noise simulation[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(5): 798-801.

[3]　李凯, 黄建国. 水下航行体辐射噪声的线谱分析及建模[J]. 声学技术, 2007, **26**(6): 1112-1115.
LI Kai, HUANG Jianguo. Analysis and modeling of line spectrum of

underwater vehicle's radiating noise[J]. Technical Acoustics, **26**(6): 1112-1115.

[4] 蒋国健, 林建恒, 马杰等. 舰船螺旋桨空泡噪声的数理模型[J]. 声学学报, 1998, **23**(5): 401-408.
JIANG Guojian, LIN Jianheng, MA Jie, et al. Theoretical model of noise caused by shio propeller cavitation[J]. Acta Acustica, 1998, **23**(5): 401-408.

[5] Arveson P T, Vendittis D J. Radiated noise characteristics of a modern cargo ship[J]. J. Acoust. Soc. Am(S0001-4966), 2000, **107**(1): 118-129.

[6] Gray L M, Greeley D S. Source level model for propeller blade rate radiation for the world's merchant fleet[J]. J. Acoust. Soc. Am(S0001-4966), 2000, **107**(1): 118-129.

[7] D 罗斯. 水下噪声原理[M]. 北京: 海洋出版社, 1983: 70-71.
Ross D. Mechanics of underwater Noise[M]. Beijing: Ocean Press, 1983: 70-71.

[8] Jensen F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational Ocean Acoustics[M]. New York: American Institute of Physics, 1994: 16-17.

[9] 陶笃纯. 螺旋桨空化噪声谱[J]. 声学学报, 1982, **7**(6): 344 -350.
TAO Duchun. Spectrum of propeller Cavitation Noise[J]. Acta Acustica, 1982, **7**(6): 344 -350.

[10] 陶笃纯. 舰船噪声节奏的研究(II)——自相关函数及其节奏信息的提取[J]. 声学学报, 1983, **8**(2): 65-76.
TAO Duchun. A study on ship-radiated noise rhythms(II)- atuocorrelation function and extraction of rhythm information[J]. Acta Acustica, 1983, **8**(2): 65-76.

[11] 朱锡清, 李亚. 船舶螺旋桨叶片与艉部湍流场互作用噪声的预报研究[J]. 声学技术, 2006, **25**(4): 361-364.
ZHU Xiqing, LI Ya. Prediction of noise induced by interaction between turbulent flow and propeller blades[J]. Technical Acoustics, 2006, **25**(4): 361-364.

[12] 熊紫英, 朱锡清, 刘小虎, 等. 船尾伴流场-导管-螺旋桨互作用噪声预报研究[J]. 声学学报, 2009, **34**(2): 117-123.
XIONG Ziying, ZHU Xiqing, LIU Xiaolong, et al. Stern wake-duct-propeller interaction noise prediction and research[J]. Acta Acustica, 2009, **34**(2): 117-123.

2011'中国西部声学学术交流会在银川举行

由四川省声学学会，上海市声学学会，中国声学学会物理声学分会、超声电子学分会，重庆市声学学会，中国力学学会电子电磁器件工作组和陕西省声学学会联合发起的"2011'中国西部声学学术交流会"，于 2011 年 8 月 17 日~22 日在宁夏回族自治区银川市举行。宁夏回族自治区科协王冰副主席，中国声学学会主持日常工作的副理事长宗健研究员、中国声学学会副秘书长及四川省声学学会副理事长张知易研究员，中国声学学会物理声学分会主任王新龙教授，超声电子学副主任委员吴浩东教授，上海市声学学会副秘书长丁玉薇副研究员，重庆声学学会副理事长邓明晰教授，中国力学学会电子电磁器件工作组王骥教授，陕西省声学学会秘书长李钢虎教授，宁夏声学学会田东旭秘书长出席了开幕式。来自北京、上海、四川、陕西、江苏、浙江、湖北、黑龙江、内蒙、重庆、宁夏等地高等院校、中国科学院声学研究所等科研院所，及有关企业单位的声学科技专家、教授等 100 余名代表参加了会议。

本次会议得到了中国科学院声学研究所、中铁西南科学研究院、中国测试技术研究院等 10 余家科研院所，西北工业大学、同济大学、四川大学、南京大学、海军工程大学等近 30 所军内外高等院校，以及驻军部队、四川正声科技有限公司等企业单位的广大声学科技工作者、专家、教授的热烈响应和积极支持。共收到学术论文 132 篇，录用并发表的 128 篇。论文涉及的专业领域大致划分为水声学、物理声学、超声电子学与功率超声、医学超声及超声影像学、语音、通信及信号处理、环境与检测声学六个专题：

录用论文由中文科技核心期刊《声学技术》杂志 2011 年第 4 期(Pt.2)出版发行。在本次会议上交流的论文近 70 余篇。学术交流会分大会报告(9 位专家作了专题报告)和小组交流报告两种形式进行。

会上由张知易、王新龙、吴浩东、邓明晰、李钢虎、王骥、林书玉、张明敏 8 位专家组成的专家组，面向于中青年科技工作者评出了优秀论文 10 篇。

本次交流充分体现出了到会专家教授严谨、求实的治学态度，积极、认真、向上、活跃的学术气氛。在这次会上提交的论文和所作的报告，反映出了我国声学科技在上述几个专业当前的基本发展水平和方向，论文所阐述的理论和揭示的成果具有创新性和较高的学术价值，有的成果展示出了开发应用的实用前景。整体看来，这是我国声学界水平、质量都很高的一次学术交流会。

这次由中国声学学会物理声学及超声电子学分会和几个地方兄弟声学会联合举办的声学学术交流会议，是一次规模较大，实力较强的成功合作。这一举措有力地促进和加强了我国西部地区和发达地区，兄弟学会声学科技工作者和全国声学科技工作者之间的交流与沟通，对促进西部地区乃至全国声学科技的发展，有着重要的作用和不可轻视的影响。到会专家一致认为，会议达到了预期目的，取得了圆满的成功。

上海市声学学会 丁玉薇