

单侧声带振动的远场声压研究

赵 晓, 曹 辉, 徐 晨

(陕西师范大学应用声学研究所超声重点实验室, 西安 710100)

摘要: 根据单侧声带的生理结构和振动特性, 提出单侧声带振动模型。运用声学基本理论, 采用瑞利积分, 计算了此单侧声带模型振动的远场声压分布, 仿真数值计算了声压分布规律, 并与正常声带模型辐射声场的声压进行比较。结果表明, 在音频范围内, 在声带空隙宽度相同的条件下, 声压比值几乎不随方向角的变化而改变。而在方向角相同情况下, 声压比值随着孔隙的增加呈线性下降。

关键词: 单侧声带; 远场声场; 声压分布

中图分类号: R767.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-06-0490-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.06.010

Research on the far-field sound pressure model of unilateral vocal cord vibration

ZHAO Xiao, CAO Hui, XU Chen

(Shanxi Key Laboratory of Ultrasonics, Applied Acoustic Institute, Shanxi Normal University, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the physical structure and the vibration characteristics of the unilateral vocal cords, this paper proposed a unilateral vocal cord vibration model. The far-field sound pressure distribution of the unilateral vocal cord vibration model was calculated on the usage of acoustic theory and Rayleigh Integral. The sound pressure distribution pattern was calculated by numerical simulation, which was compared with the sound pressure distribution of the normal vocal cord model in the radiated sound field. The results showed that the sound pressure ratio almost does not change with the change of the direction angle when the vocal cord gap width is identical in the audio frequency range. When the direction angle remains unchanged, the sound pressure ratio decreases linearly with the increase of pores.

Key words: unilateral model of vocal cord; far-field; pressure distribution

0 引言

声带是发声系统的核心器官和生理基础, 其解剖位置在喉腔中部, 由声带肌、声韧带和粘膜三部分组成, 呈左右对称状态^[1]。发声时, 两侧声带拉紧, 声门裂缩小甚至关闭, 声带与肺部高压驱动下的高速气流在声门处发生物理作用, 使声带振动并激发声门波, 在喉内肌肉调节作用的支配下, 声门波进而被声道调制, 产生通常所说的嗓音^[2]。声带振动与张力、弹性、形状及声门下压力和气流速度等因素密切相关^[3]。声带的长短、松紧和声门裂的大小均能影响声调的高低。声带振动无疑在很大程度上决定了人类嗓音的基本特征^[4]。但声带也是语音器官中最容易受伤和病变的部位。其嗓音疾病

的主要病变表现为声带的病变。声门波反应声带的运动状态。声带振动的改变是由声带质量增加、声带本身弹性和形变能力的受损引起的^[5], 其病变主要表现为声带麻痹、声带息肉和小结节、囊肿、白斑、喉结核或肿瘤等^[6,7]。其中单侧声带麻痹在临床上比较常见。在此病例中, 一侧声带固定或运动减弱, 即不能内收和外展, 始终处于某一固定位置。本文以中部位置病例作为研究对象, 其它位置因类似略写, 患者发病表现以声嘶现象为主^[8-11]。

本文采用声换能器来描述疾病声带, 提出一侧声带固定, 使另一侧声带正常振动而建立的单侧声带振动模型。进一步研究单侧声带振动产生声压的特性, 并与正常声带的声压特性进行了比较。

1 模型的建立与理论分析

根据声带特点简化计算, 本文将单侧声带等效为图 1 所示模型, 图 1 中左侧声带固定, 右侧声带

收稿日期: 2012-09-05; 修回日期: 2012-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(11074159)、陕西师范大学研究生培养创新基金(2012CXSS034)资助项目。

作者简介: 赵晓(1987-), 女, 陕西西安人, 硕士, 研究方向为应用声学。

通讯作者: 赵晓, E-mail: 709770356zz@163.com

在电激励的情况下正常振动。图中 $2b$ 为声带长度， a 为声带单侧宽度， a' 是声带张开宽度。给此模型一定频率的电激励，使其以速度 $u=u_a e^{j\omega t}$ (其中 ω 为声源简谐振动的圆频率， u_a 为振幅值) 振动时，可向障板前面的半空间辐射声波，对此进行分析。

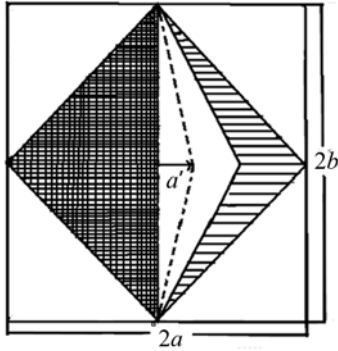


图1 单侧声带模型图
Fig.1 Unilateral vocal fold model

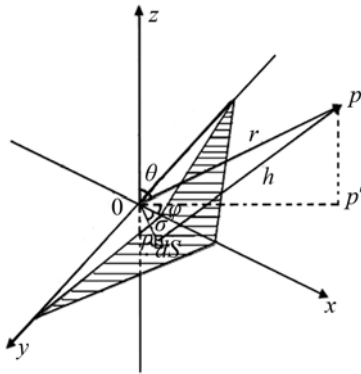


图 2 声带模型空间声压坐标
Fig-2 Sound-pressure spatial coordinate of vocal fold model

在图 1 的模型中，建立坐标系，如图 2 所示。选取模型中心为坐标原点，模型所在平面为 xoy 平面， x 轴、 y 轴分别为模型的两条对角线，垂直于模型平面中的为 z 轴。在柱坐标系中，声场中一点 p 位于距坐标为 r 、与 z 轴夹角为 θ 、旋转角为 φ 的位置， p' 为点 p 在 xoy 平面内的射影。

将此模型表面分成无限多个小面元，每个小面元都可看作一点源，位于极径为 ρ 、极角为 σ 处的面元 dS 在观察点，产生的声压为

$$dP = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi h} e^{j(\omega t - kh)} dS \quad (1)$$

其中： k 、 ρ_0 、 c_0 分别为声音在空气中传播的波数、媒质密度、声速； h 为 p 点到 dS 微元的距离； u_a 为振元速度的振幅； dS 为积分微元； ω 为角频率。

将所有这些点源辐射的声波叠加，即可得到空间某一点的声压为

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint_S e^{jk\rho \cos(r, \rho)} dS \quad (2)$$

其中 $dS = dx dy$ ，由几何关系：

在 $r \gg 2a$ 区域，当 $r \gg \rho$ 时

$$h \approx r - \rho \cos(r, \rho) \quad (3)$$

可得

$$h^2 = r^2 + \rho^2 - 2r\rho \cos(r, \rho) \quad (4)$$

即对于远场从模型各面发出的声波到观察点时振幅差异很小，故声压表达式中振幅部分的 h 可近似用 r 代替，但相位部分的 h 应由式(4)代替，则声压为

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint_S e^{jk\rho \cos(r, \rho)} dS \quad (5)$$

又因为

$$\mathbf{r} = r(\sin \theta \cos \varphi \mathbf{i} + \sin \theta \sin \varphi \mathbf{j} + \cos \theta \mathbf{k}) \quad (6)$$

$$\rho = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} \quad (7)$$

$$\cos(r, \rho) = \frac{\rho \cdot \mathbf{r}}{|\rho| |\mathbf{r}|} = \frac{x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi}{\rho} \quad (8)$$

所以声压为

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \iint_S e^{jk(x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi)} dS = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \left(\int_0^a \int_{\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} e^{jkx \sin \theta \cos \varphi} dx \int_0^a \int_{\frac{b}{a}x-b}^{\frac{b}{a}x+b} e^{jky \sin \theta \sin \varphi} dy \right) \quad (9)$$

为了简化计算，只研究声压在 xoz 的右侧平面内的分布，即取 $\varphi = 0$ 时，声压为

$$P = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \left[ab \left(\frac{\sin \frac{ak \sin \theta}{2}}{\frac{ak \sin \theta}{2}} \right)^2 - a'b \left(\frac{\sin \frac{a'k \sin \theta}{2}}{\frac{a'k \sin \theta}{2}} \right)^2 \right] \quad (10)$$

辐射远场的指向性为

$$D(\theta, 0) = \frac{P_\theta}{P_{\theta=0}} = \frac{a}{a-a'} \left[\frac{\sin \left(\frac{ak \sin \theta}{2} \right)}{\frac{ak \sin \theta}{2}} \right]^2 - \frac{a'}{a-a'} \left[\frac{\sin \left(\frac{a'k \sin \theta}{2} \right)}{\frac{a'k \sin \theta}{2}} \right]^2 \quad (11)$$

2 理论结果的模拟与分析

为了揭示单侧声带模型中声压的变化规律，将正常声带的声压与此单侧声带振动产生的声压进行比较。

正常菱形声带的声压函数为

$$P_0 = j \frac{k \rho_0 c_0 u_a}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} * \left[2ab \left(\frac{\sin \frac{ak \sin \theta}{2}}{ak \sin \theta} \right)^2 + 2a'b \left(\frac{\sin \frac{a'k \sin \theta}{2}}{a'k \sin \theta} \right)^2 \right] \quad (12)$$

辐射远场的指向性:

$$D(\theta, 0) = \frac{P_\theta}{P_{\theta=0}} = \frac{a}{a+a'} * \left[\frac{\sin \left(\frac{ak \sin \theta}{2} \right)^2}{ak \sin \theta} \right] + \frac{a'}{a+a'} * \left[\frac{\sin \left(\frac{a'k \sin \theta}{2} \right)^2}{a'k \sin \theta} \right] \quad (13)$$

假定声带振动频率为 $f=500\text{Hz}$ (其他频率也有类似变化), 正常声带与声带模型单侧宽度定值为 20mm 即 ($a=20\text{mm}$), 空隙单侧宽为 10mm (即 $a'=10\text{mm}$) 时的声压归一化分布曲线如图 3 所示。

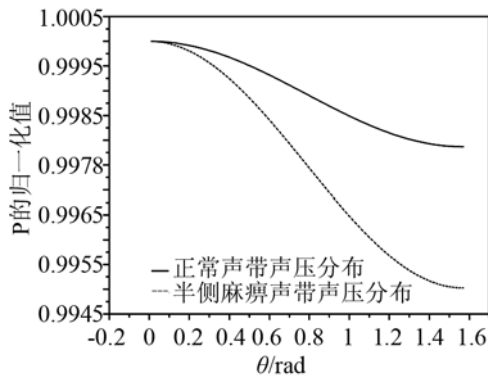


图 3 单侧与正常声带声压对比图
Fig.3 Unilateral and normal vocal sound pressure comparison

在图 3 中可看出, 声压的分布与方向角 θ 有关, 正常与半侧声带的声压都是随着 θ 角度的增加而减小, 但是半侧声带相对于正常声带其声压减小幅度更快。

为了进一步研究单侧声带振动与孔隙张开大小的关系, 再次假定半侧声带模型振动频率 $f=500\text{Hz}$, 单侧宽度定值为 20mm , 使声带孔隙从 0 逐渐增大到 20mm 过程中, 在 $\theta=\pi/6, \pi/3, \pi/2$ 处得到声压的变化规律如图 4 所示。

在图 4 中可明显看出空隙的大小也直接影响着半侧声带的声压分布, 在 $\theta=\pi/6, \pi/3, \pi/2$ 方位上声压的幅值统一随着孔隙的增大而减小, 且随着角度的增大减小程度更加明显。

图 5 和图 6 分别是正常声带和单侧声带产生声压的分布区面图, 通过图 5、图 6 比较可看出, 半侧声带虽然与正常声带振动产生的声压总体变化

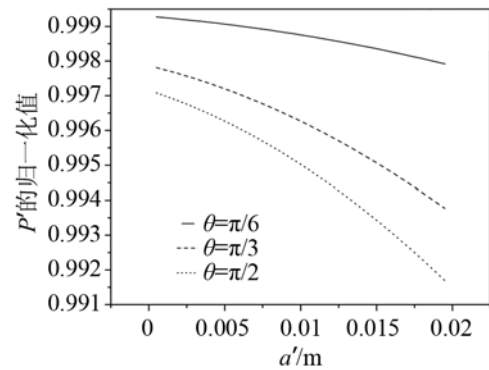


图 4 声压随孔隙改变的变化规律
Fig.4 Sound pressure variation with the size change of pore

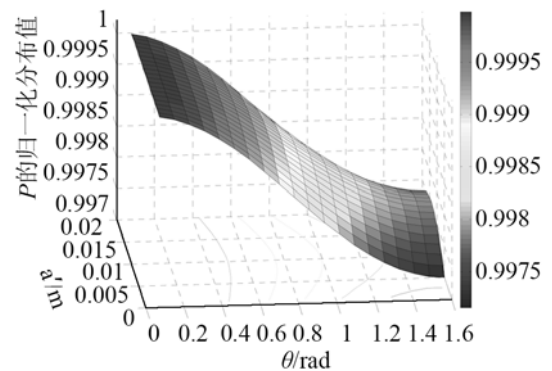


图 5 正常声带声压分布曲面图
Fig.5 Normal vocal sound pressure distribution surface

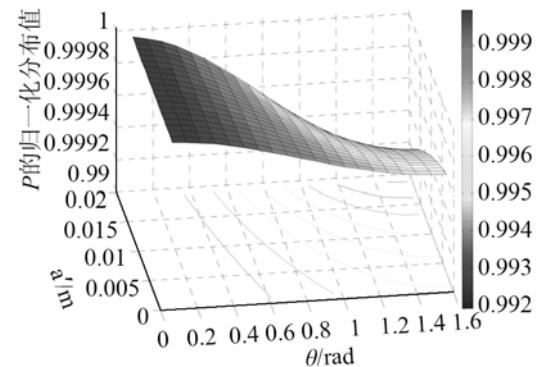


图 6 单侧声带声压分布曲面图
Fig.6 Unilateral vocal sound pressure distribution surface

趋势相似, 都是随着 θ 角的增加而逐渐减小, 但它们的声压分布还是有明显差异的: 正常声带的等压线是以 $a'=0.01\text{m}$ 为对称轴的抛物线分布, 而半侧声带的等压线却没有明显的规律可循。

这种没有明显的规律性却在它与正常声带的声压比值上表现出了一定的规律性, 将(10)与(12)相比可得到

$$\frac{P'}{P_0} = \frac{1}{2} * \frac{a' \sin^2 \frac{ak \sin \theta}{2} - a \sin^2 \frac{a'k \sin \theta}{2}}{a' \sin^2 \frac{ak \sin \theta}{2} + a \sin^2 \frac{a'k \sin \theta}{2}} \quad (14)$$

再次假定声带振动频率为 $f=500\text{Hz}$ 的正常声带与声带模型单侧宽度定值为 20mm 即($a=20\text{mm}$), 空隙单侧宽为 10mm (即 $a'=10\text{mm}$)时, 声压比分布曲线如图 7 所示。

图 8 为在取 $a=0.02\text{m}$ 、 $\theta=[0, \pi/2]$ 、 $a'=0.01\text{m}$ 时, 半侧声带与正常声带声压二维比。

图 9 为在取 $\theta=\pi/3$ 、 $a=0.02\text{m}$ 、 $a'=[0, 0.02]\text{m}$ 时的半侧声带与正常声带声压二维比。

通过图 7、8 和 9 可看出在 a' 相同的情况下, a'

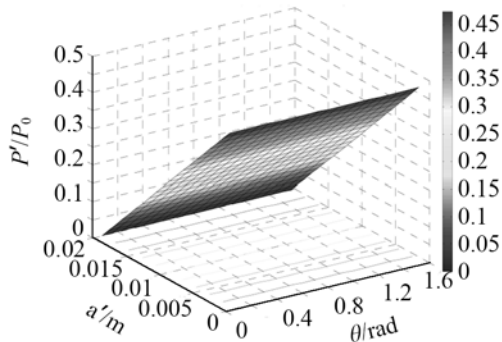


图 7 单侧与正常声带空间声压对比图
Fig.7 Unilateral and normal vocal fold space pressure comparison

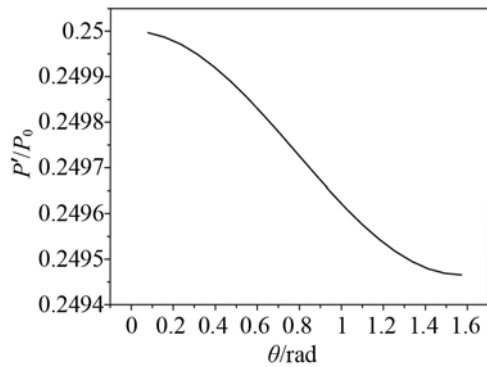


图 8 半侧与正常声带在不同角度上声压二维比
Fig8 Two-dimensional pressure ratios of unilateral and normal vocals at different angles

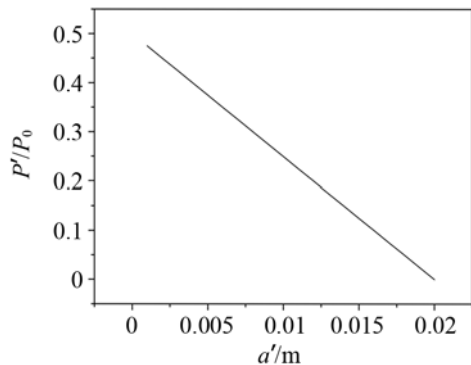


图 9 半侧与正常声带的二维声压比与空隙的关系
Fig.9 Relationship of two-dimensional pressure ratios and pores for unilateral and normal vocal cords

的 P'/P_0 比值随 θ 角度的改变很小, 几乎可认为不随 θ 的改变而改变。而在 θ 角度不变的情况下, 随着 a' 的增加, P'/P_0 的比值线性下降。

通过以上分析可知: 虽然半侧声带产生的声压分布没有明显的规律, 但与文献给出的基本一致^[9], 原因可能是单侧健康声带在发声时受患侧声带影响, 产生不规则振动。但通过它与正常声带产生的声压相比即可发现一定的规律性。

3 结论

单侧声带麻痹在临床上比较常见, 本文依据声带的实际生理结构, 考虑到声带几何尺寸的长度比其厚度大得多故忽略其厚度。采用建立单侧声带振动模型来描述疾病声带组织在空间产生辐射声压的分布情况, 并与正常声带声压进行比较。通过对此模型的理论分析, 得到声带的开合程度对声压分布的影响, 以期建立单侧声带的发声规律。所得结果能对病理声带振动的理论分析提供一定的研究依据。

参 考 文 献

- [1] 于萍, 王荣光. 嗓音疾病与嗓音外科学[M]. 北京: 人民军医出版社, 2009: 10-16.
YU Ping, WANG Rongguang. Voice disorders and phonosurgery[M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2009, 10-16.
- [2] Cook D D, Mongeau L. Sensitivity of a continuum vocal fold model to geometric parameters, constraints, and boundary conditions[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2007, **121**: 2247-2253.
- [3] JIANG Sichang, Recent advances of otorhinolaryngology in China[J]. Chinese Medical Journal, 1995, **108**(3): 173-177.
- [4] 赵守国, 孙义和, 王素品. 基于复倒谱的声门下噪音源研究[J]. 生物物理学报, 2002, **18**(4): 434-439.
ZHAO Shouguo, SUN Yihe, WANG Supin. A study on sub-glottal voice source based on complex cepstrum[J]. ACTA Biophysica Sinica, 2002, **18**(4): 434-439.
- [5] Berry D A, Herzel H, Titze I R, et al. Interpretation of biomechanical simulations of normal and chaotic vocal fold oscillations with empirical eigenfunctions[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1994, **95**: 3595-3604.
- [6] 明澄, 洪卫, 李敏, 等. 电视喉动态镜下 163 例声嘶患者声带振动和粘膜波的观察分析[J]. 大理医学学报, 2000, **9**(4): 50-51.
MING Chen, HONG Wei, LI Min, et al. Clinical analysis on 163 cases with hoarseness under move-laryngoscope[J]. Journal of Dali Medical College, 2000, **9**(4): 50-51.
- [7] 徐洁洁, 黄昭鸣, 等. 声带良恶性增生疾病嗓音的声学参数分析[J]. 江苏医药杂志, 2001, **27**(3): 169-171.
XU Jiejie, HUANG Shaoming, et al. Acoustic analysis in patients with benign and malignant diseases of vocal cords by computer technique[J]. Jiang Med J, 2001, **27**(3): 169-171.
- [8] 温武, 周水淼, 李兆基, 等. 单侧声带麻痹的病因及预后[J]. 听力学及言语疾病杂志, 2000, **8**(1): 1-3.
WEN Wu, ZHOU Shuimiao, LI Zhaoji, et al. Prognosis and cause of unilateral vocal cord paralysis[J]. Journal of Audiology and

- Speech Pathology, 2000, 8(1): 1-3.
- [9] 陈秋恒, 葛平江, 苏小妹, 等. 最长最响发声时间评价单侧声带麻痹患者声门闭合情况的研究[J]. 临床耳鼻咽喉头颈外科杂志, 2011, 25(15): 681-683.
CHEN Qiuhuan, GE Pingjiang, SU Xiaomei, et al. Use maximum loudest phonation time to evaluate unilateral vocal cord paralysis voice[J]. Clinical Otolaryngology-head and Neck Surgery, 2011, 25(15): 681-683.
- [10] 王玘, 王伟, 陈世彩, 等. 动态喉镜记波扫描评估单侧声带麻痹患者的声带振动功能[J]. 听力学及语言疾病杂志, 2011, 19(2): 126-129.
LI Ding, WANG Wei, CHEN Shicai, et al. The clinical applications of dynamic laryngoscope in patients with unilateral vocal cord paralysis[J]. Journal of Audiology and Speech Pathology, 2011, 19(2): 126-129.
- [11] 张明星, 温武, 周水淼, 等. 单侧声带麻痹患者嗓音主、客观评估及相关性分析[J]. 听力学及语言疾病杂志, 2010, 18(4): 339-343.
ZHANG Mingxing, WEN Wu, ZHOU shuimiao, et al. Subjective and objective evaluation of unilateral vocal cord paralysis[J]. Journal of Audiology and Speech Pathology, 2010, 18(4): 339-343.

第三届上海-西安声学学会学术会议在沪召开

第三届上海-西安声学学会学术会议于 2013 年 11 月 23~25 日在上海同济大学召开。来自同济大学、中国科学院声学研究所东海研究站、中国船舶重工集团公司第 726 研究所、哈尔滨工业大学、中国科学院上海硅酸盐研究所、复旦大学、陕西师范大学、西北工业大学、西安科技大学、渭南师范学院、西京医院、河海大学、国防科技大学、黑龙江大学、中国特种设备检测研究院、西北核技术研究所、中航商发、上海大学、上海理工大学、上海飞机设计研究等 20 多个高校和科研单位的声学科技工作者和研究生共计 70 多人出席了会议, 开展学术交流。会上上海市声学学会孟昭文理事长为首届“魏墨盒声学奖”获得者中国科学院上海硅酸盐研究所李国荣研究员(工业超声)、复旦大学他得安教授(土族)(医学超声)颁发了“魏墨盒声学奖”奖状。

宾夕法尼亚州立大学终身教授、国家第二批“千人计划”创新人才、哈尔滨工业大学凝聚态科学与技术研究所所长曹文武教授, 在会上作了“声动力抑制癌症新生血管”的大会报告。“魏墨盒声学奖”获奖者中国科学院上海硅酸盐所李国荣研究员和复旦大学他得安教授, 分别作了“压电陶瓷及其在声功能器件的应用”和“骨质状况的超声评价进展”的学术报告, 介绍了他们在声学研究中取得的成果和今后的工作计划。同济大学声学研究所程茜副教授作了“细胞的物理特性与生命医学”的大会报告。

经组委会评审, 本次会议录用学术论文共 50 篇, 分为“超声物理和物理声学”、“检测声学和水声学”、“声学器件与算法”和“语音噪声与控制”四个专题进行分组学术交流。与会代表发言积极, 气氛热烈。

上海-西安声学学会学术会议每两年举行一次, 以促进东西部两大城市和区域的声学技术交流合作。本次会议由上海市声学学会、同济大学物理科学与工程技术学院声学研究所主办, 西安声学学会、中国声学学会检测声学分会和陕西省超声学重点实验室协办。经协商, 2015 年第四届上海-西安声学学术会议拟将在常州河海大学举行。

