

纪念应崇福院士诞辰100周年

## 听觉障碍患者的空间听觉\*

谢菠菘<sup>1,2†</sup> 孟庆林<sup>1</sup>

(1 华南理工大学物理与光电学院 声学研究所 广州 510641)

(2 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510641)

**摘要** 空间听觉是对声音空间属性或特性的主观感觉,包括对声源的定位、对环境反射声的主观感觉等。复杂声学环境下的语言获取也和空间听觉密切相关。听觉障碍通常会包括空间听觉能力的下降甚至缺失,影响语言的获取能力。人工听觉是治疗听觉障碍的手段,理想情况下应能恢复或改善患者的空间听觉能力。该文综述了听觉障碍患者的空间听觉及其人工恢复方面的研究、进展及存在的问题。

**关键词** 听觉障碍,空间听觉,人工听觉

中图法分类号: O428, O429 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)05-0607-07

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.004

## Spatial hearing of hearing impaired peoples

XIE Bosun<sup>1,2</sup> MENG Qinglin<sup>1</sup>

(1 Acoustic Laboratory, School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

(2 State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract** Spatial hearing is the subjective perception to the spatial attributes of sound, including the localization of sound sources and spatial perceptions of environmental reflections. Speech perception in complex acoustic environments is also closely related to spatial hearing. Hearing impairment often accompanies with deterioration or lack of spatial hearing, which decreases speech perception ability. Artificial hearing is a means to treat hearing impairment. Ideally, we hope it could improve or restore spatial hearing of patients. The present article reviews the research progress and problems in spatial hearing and its restoration for hearing impaired peoples.

**Key words** Hearing impairment, Spatial hearing, Artificial hearing

2018-06-06 收稿; 2018-07-13 定稿

\*国家自然科学基金项目(11704129), 亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题项目(2018ZB23)

作者简介: 谢菠菘(1960-), 男, 广东广州人, 教授, 研究方向: 空间声的信号处理和心理声学。

†通讯作者 E-mail: phbsxie@scut.edu.cn

## 1 引言

人类正常的听觉中,除了对声音的响度、音调和音色等单耳主观属性的感觉外,还包括声音的(双耳)空间听觉,也就是对声音空间属性或特性的主观感觉。空间听觉是听觉系统获取声音信息、产生听觉事件的一部分<sup>[1]</sup>。空间听觉包括对声源的定位、对环境反射声的主观感觉等。在日常生活中,听觉对声源的定位能力可以帮助寻找目标、发现和避免周围的潜在危险(特别是在视觉范围外)。而存在干扰声(包括噪声、竞争声、反射声等)的复杂声学环境下语言获取也和空间听觉密切相关。

全球有3.6亿残疾性听觉障碍(损失)患者,约占人口总数的5%<sup>[2]</sup>。其中我国听力残疾人数达2054万人,约占残疾人总数的24%<sup>[3]</sup>。残疾性听觉障碍是指成人任意一侧耳的最小听阈大于40 dB HL,儿童任意一侧耳的最小听阈大于30 dB HL。听觉障碍除了体现为单侧或双侧可听阈的提高(甚至听力完全缺失)外,还可能包括空间听觉能力的下降甚至缺失。这除了影响寻找目标、发现和避免周围潜在危险的能力外,空间听觉能力下降所带来的一个大问题是干扰环境下语言获取能力的降低。

人工听觉技术(包括助听器与人工耳蜗等)是对听觉障碍的治疗手段,正得到日益广泛的应用,它们可部分恢复或改善患者的听觉功能。理想情况下,人工听觉应恢复听觉障碍患者的空间听觉功能,从而恢复或改善在干扰环境下语言的获取能力,虽然目前的技术还不能完全做到这一点。

对听觉正常人群的空间听觉已有很多的研究,而对听觉障碍患者空间听觉的研究也引起了国际上的广泛兴趣。这是涉及声学、医学、生物医学工程、信号处理等多个学科的交叉领域。这方面的研究不但在人类听觉及其障碍的生理研究方面有重要的作用,而且在听觉障碍检测与诊断有重要的应用价值,同时对人工听觉技术的设计与改进方面也有重要的指导作用。

本文综述了有关听觉障碍患者的空间听觉问题与研究进展。内容包括人类空间听觉的基本原理,听觉系统与空间信息处理,听觉障碍与空间听觉的

损失,人工听觉与空间听觉的恢复,空间听觉能力的测试在医学诊断的应用等。

## 2 空间听觉的物理与生理机理

对声源定位是空间听觉的重要组成部分。声源定位包括方向定位和距离定位。从物理上看,声源方向定位是多个因素综合作用的结果<sup>[1,4]</sup>。自由场情况下,声源辐射的声波经头部、耳廓等散射和衍射后到达双耳,双耳声压包含有声源的空间信息。当声源偏离中垂面时,声波到双耳的传输存在与声源方向有关的双耳时间差(Interaural time difference, ITD);同时由于头部的阴影与散射的作用,也存在与声源方向、频率有关的双耳声级差(Interaural level difference, ILD)。大量的研究表明,在1.5 kHz以下的低频,双耳声压精细结构导致的相延时差是声源侧向定位的主导因素。对于幅度调制信号,当频率大于1.5 kHz时,双耳声压的包络延时差是声源侧向定位的一个弱因素。而随着频率增加(大约4 kHz~5 kHz以上),ILD对侧向定位逐渐起主要作用。但ITD和ILD不能解析前后和垂直定位,因为在前后镜像位置ITD和ILD是近似相同的,而在不同的垂直平面(也就是矢状平面或混乱锥)上,ITD与ILD也是近似不变的。事实上头部转动引起的双耳声压(可能主要是ITD)的动态变化,以及头部、耳廓等对声波的散射引起的耳道高频声压谱的变化是前后和垂直定位的因素。

听觉距离定位也是多个因素综合作用的结果。声音的主观响度随声源距离的变化、空气对声波的吸收所引起的高频衰减随距离的增加、头部等对近场声波的散射和阴影作用使得近场ILD随距离的变化、反射环境下的直达/反射声能比等都是潜在的距离定位因素。

各种不同定位因素的协同作用可以得到稳定的定位结果。但是这些定位因素所带来的信息也有一定的冗余性,在部分信息不可用的情况下听觉系统仍然可以对声源方向进行定位。甚至当部分定位信息存在冲突的情况下,听觉系统有可能选择一致性好的信息进行定位。也就是说高层神经系统在利用定位信息的时候有一定的纠错能力。但如果缺失或冲突的定位信息过多,定位的准确性就下降甚至完全不能定位。

在听觉定位中, 高层神经系统是根据各种定位信息(如ITD、ILD等)并和过去的听觉经验(模板)比较, 从而确定声源的位置。但定位因素与听觉模板之间的映射关系是随时间变化的。例如, 从儿童到成人的成长过程中, 头部尺寸是在增长的。因而特定侧向声源位置对应的ITD也在增加。但高层神经系统具有一定的可塑性, 可以适应这种变化过程。

当同时存在两个或更多个不相关声源时, 双耳接收到的声压是各声源产生声压的线性叠加, 包含有各声源以及环境反射产生的多声音信息的混合。听觉系统有可能从双耳信号所包含的混合声音信息流中实现信息分离, 从而辨别出一系列听觉目标, 并有可能对不同的目标形成不同的空间听觉事件。声音信号的时、频域信息以及空间信息对信息流的分离有重要的作用。

鸡尾酒会效应是与空间听觉和信息流分离密切相关的心理声学现象<sup>[5]</sup>。对同时存在目标语言声源和干扰声源, 当目标声源与干扰声源在空间上分离时, 听觉系统可以在干扰背景中有效地提取目标声源的声音信息。鸡尾酒会效应至少和两个因素有关。其一是较优耳的作用。目标声源与干扰声源在空间上分离时, 头部的阴影作用使得其中一个耳的目标/干扰信号比例提高, 从而更容易从干扰背景中获取目标信息<sup>[6]</sup>。其二是由于听觉信息流分离和选择性注意力集中, 而空间听觉因素(特别是低频双耳相延时差)在信息分离中起到了重要作用<sup>[7]</sup>。鸡尾酒会效应对噪声或干扰环境的语言感知非常重要。而在室内环境中, 反射声可以看成是一种干扰

声, 听觉系统也可以抑制反射声的干扰。

从生理声学方面考虑<sup>[8-9]</sup>, 空间听觉是听觉系统对双耳声信息综合处理的结果。图1是人类听觉器官的剖面图, 它包括外耳、中耳和内耳三部分。外耳主要是接受与传输声波。中耳的鼓膜与听骨链(锤骨、砧骨和镫骨)主要起着声阻抗匹配的作用, 而使声音能有效地传输到内耳。内耳由一卷成2.75圈的类似蜗牛壳的骨质管状结构组成, 并称为耳蜗。耳蜗的展开长度大约为35 mm, 靠近听骨链的一端称为耳蜗底端, 另一端称为耳蜗的顶端。沿着耳蜗管, 基底膜和前庭膜将其分为三个纵行的管道, 即前庭阶、中阶和鼓阶。前庭阶和鼓阶内充以外淋巴液。

声波通过听小骨对前庭阶的液体产生作用, 从而在基底膜上产生从底端到顶端的行波。基底膜的力学性质是沿其长度方向连续变化的, 不同位置对不同频率声波的响应是不同的。因而基底膜的振动位移包络最大的位置和声波的频率密切相关。对高频声波, 位移包络最大出现在底端附近, 而对低频声波, 位移包络最大出现在顶端附近。基底膜与盖膜之间有毛细胞, 当基底膜产生振动的时候, 会在基底膜与盖膜之间产生切变运动, 使毛细胞顶部的纤毛发生弯曲。纤毛的弯曲使得钾离子流向毛细胞, 从而改变毛细胞的内外电位差。这将依次导致神经递质的释放和听觉神经元的运动电位启动。这样, 毛细胞将基底膜的振动转换为神经脉冲并通过听觉神经传输到高层神经系统进行处理。因而内耳起着频率分析和将机械振动转换为神经脉冲的作用。

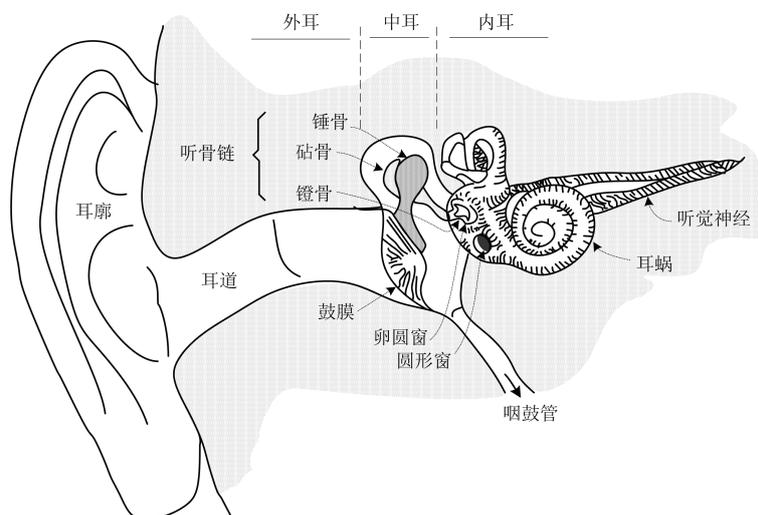


图1 人类的听觉器官的剖面图(根据文献[10]重画)

Fig. 1 Cross section of the peripheral auditory system of humans (Redrawn from Ref. [10])

图2是人类高层神经系统对听觉信息处理的示意图。来自左右耳蜗(Cochlear, CL)的神经脉冲信息经听觉神经(Auditory nerve, AN)传输到上橄榄复合体(Superior olivary complex, SO)中首次会合。橄榄复合体包括内侧上橄榄核(Medial superior olive, MSO)和外侧上橄榄核(Lateral superior olive, LSO),分别处理ITD和ILD信息。再上传到下丘(Inferior colliculus, IC;可能处理多感知信息)。最后经过初级听觉皮层(Primary auditory cortex, A1)和其他脑区的综合处理,形成听觉事件,包括空间听觉事件。当然,这里给出的是传统的一种从下到上的声音信息处理结构。但实际的声音感知是一种包括先验知识、从上到下的信息处理过程<sup>[11]</sup>。例如,对“语句可懂度”通常是高于“单音节清晰度”。而听觉感知的可塑性主要是和听觉皮层的处理密切相关的<sup>[12-13]</sup>。而目前对高层神经声音信息处理的认识只是初步的,有许多问题值得需要深入研究。

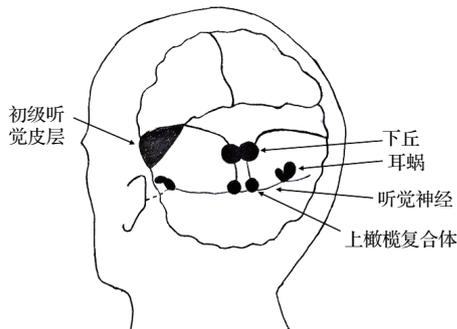


图2 人类高层神经系统对双耳听觉信息处理的示意图(根据文献[14]重画)

Fig. 2 Schematic of high level processing of bin-aural information (Redrawn from Ref. [14])

### 3 听觉障碍与空间听觉的损失

听觉通路中每个部分(包括外耳、中耳、内耳和高层神经系统)的功能障碍都有可能引起听觉障碍。听力学临床上一般将听觉障碍分为传导性、感音神经性、混合性三类。传导性主要是外耳和中耳传导性功能障碍引起,感音神经性主要是内耳的问题。听觉障碍除了可能会引起单侧或双侧听阈的提高甚至听力完全缺失外,还可能会包括空间听觉的障碍。例如,两侧不对称的听力损失、高层神经系统的障碍都有可能导致空间听觉的障碍。更

高层的神经缺陷也会引起听力功能的障碍。这属于脑神经科学的问题,与空间听觉信息处理的障碍有关。

空间听觉障碍对日常生活有较大的影响。除了影响患者寻找目标、发现和避免周围潜在危险的能力外,空间听觉障碍的最大问题是影响患者在吵杂、干扰(包括环境反射声干扰)环境下获取语言信息的能力<sup>[15]</sup>,可能会出现“听得见而听不清”的现象。这是因为鸡尾酒会效应是和空间听觉密切相关的。

国际上对听觉障碍患者的空间听觉方面做了不少的研究工作。早年的研究就指出,感音神经性听觉障碍者的ITD探测能力下降<sup>[16]</sup>。而听力损失导致ITD的探测能力下降,从而降低了听觉信息流分离的能力<sup>[17]</sup>。听觉信息流分离的能力的下降也会影响利用直达/反射声能比因素进行距离定位<sup>[18]</sup>。

### 4 人工听觉恢复与空间听觉

人工听觉恢复是治疗听觉障碍的手段,它可以改善部分患者的听觉。目前常用的人工听觉恢复手段包括助听器和人工耳蜗。前者主要适用于传导性听觉障碍以及非重度的感音神经性听觉障碍;后者主要适用于内耳声电转换功能的缺失。至于高层神经系统引起的听觉障碍,目前还没有有效的治疗手段。

理想情况下,我们希望人工听觉应能够恢复或改善双耳的空间听觉功能。否则将不能在干扰环境下很好地很获取语言信息,仍然出现“听得见但听不清”的现象。但目前的人工听觉技术并不一定能很好地做到这一点<sup>[19]</sup>。

对双侧听觉障碍患者,双耳助听器有可能部分改善空间听觉能力。即使是单侧听觉障碍患者,患侧单耳助听器与另一侧耳的自然听觉结合也有可能改善空间听觉的能力。在助听器的应用中,听觉训练以适应重建的空间听觉因素是重要的。双耳助听器通过一对放置在双耳或附近的传声器检拾得到双耳声信号,并进行均衡和其他处理(适应不同的听力损失)后用耳机重放。由于传声器通常是固定在头部表面且随头部一起运动,双耳助听器检拾到的是动态双耳信号,保留有动态定位信息。但是,助听器根据传声器放置位置的不同分为耳背式(Behind-the-ear, BTE)、入耳式(In-the-ear, ITE)

和入耳道式(In-the-canal, ITC)。由于BTE助听器的传声器与耳机之间有一定的距离,因而可获得较大的声音放大增益。同时BTE助听器也可以装置容量较大的电池。但BTE助听器的传声器是放置在耳廓背后而不是耳道入口。这种情况下,声源到传声器的传输函数是和到耳道入口的情况不同的。换句话说,BTE助听器检拾到的双耳声压是有误差的,不能代表正确的谱因素<sup>[20]</sup>。ITE助听器覆盖了耳甲,也会有类似问题。为研究双耳助听器,Majdak等<sup>[21]</sup>也对传声器放置在耳廓后面的头相关传输函数进行了测量。至于在双耳助听器中如何校正双耳声压的谱因素,或者佩戴者能否逐渐适应新的(有误差的)谱因素,或者在保留有动态定位信息的情况下谱因素误差对空间听觉能力的影响等都是值得研究的问题。

另一方面,很多现代的助听器含有自动增益控制、动态范围压缩、多传声器自适应指向性目标语音增强等算法。如果左右通路的信号处理是独立,则可能会导致左右通路的压缩电平、信号处理的相移不同,从而引入ITD与ILD的失真。而一些语音增强信号处理也会引起空间听觉因素的失真。因而设计不当的助听器信号处理会破坏空间听觉信息,甚至在声源定位方面起到适得其反的作用。因而应该使用保留声音空间信息的左右通路联合的信号处理方法<sup>[22-23]</sup>。

人工耳蜗通过传声器检拾得到声音信号,并利用信号处理装置将其转换为一定编码形式的电信号,通过植入体内的多电极系统直接刺激听觉神经来恢复或重建听觉功能。目前对双侧患重度以上听觉障碍者,有较大一部分是采用单侧人工耳蜗植入。这当然不能恢复空间听觉能力。理想情况下,我们希望双侧人工耳蜗(对严重双侧听觉障碍患者)或单侧人工耳蜗与另一侧耳的残存自然的听觉结合能恢复或改善双耳空间听觉的能力。虽然一些心理声学实验研究表明<sup>[24]</sup>,双侧人工耳蜗植入确实可以部分改善干扰环境下的语言感知,这主要是因为较优耳的作用,而不是双耳信息的处理。目前的双侧人工耳蜗不能完全恢复干扰环境下的语言感知能力,其主要原因包括<sup>[25]</sup>:

(1) 目前的外科手术很难做到双侧完全匹配或对称的植入。

(2) 对目前的人工耳蜗产品,其左右耳的信号处理是独立的,不能很好地提供双侧同步的空间

信息。

(3) 由于技术条件的限制,目前人工耳蜗对声音信息进行了简化,仅能提供声音时域包络信息而丢弃了时域精细结构信息,在空间听觉因素方面,最多能提供ILD信息,而不能提供低频ITD(双耳相延时差)的信息。但低频ITD在多信息分离中却有重要的作用。

对上面第(3)点,有不少作者研究了双侧人工耳蜗植入者对双耳间差的感知灵敏度<sup>[26]</sup>。这是通过人工合成的电刺激信号直接输入到人工耳蜗的电极(单电极或多电极),而让受试者感知听觉事件在头中的偏侧。结果表明双侧人工耳蜗植入者可以较好地感知ILD信息,从而可以一定程度地实现左右偏侧判断。但另一方面,双侧人工耳蜗并不能很好地改善ITD的感知,其低频ITD辨别阈值要比听力正常人群高得多。

也有研究对双侧人工耳蜗植入者进行声刺激信号的定位和语言可懂度实验。例如,Senn等<sup>[24]</sup>的实验结果表明,双侧人工耳蜗植入者在水平面前方和侧向的最小可听角分别为 $3^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 和 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。而对于正常听觉的对照组,相应的最小可听角分别为 $1^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 和 $7^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。双侧人工耳蜗植入者的最小可听角较正常听觉对照组有明显的增加,特别是侧向。这应该是双侧人工耳蜗不能很好地改善低频ITD感知所致。因为相对于ILD,低频ITD对侧向定位的贡献更大。另外,Kerber等<sup>[27]</sup>的实验表明,噪声也会严重影响双侧人工耳蜗植入者的定位。

因而改善人工耳蜗重建空间听觉信息功能方面还有许多工作要做。其一,有关植入精度的控制对空间听觉恢复的影响值得深入研究。而在双侧非完全对称植入的情况下,通过训练适应,或通过外部信号处理给予校正的方法也是值得研究的。其二,无论如何,人工耳蜗提供的神经脉冲信息与自然听觉的情况是有差异的。利用听觉的可塑性,高层神经系统可能会(部分)适应这些差异。但对于先天性和后天性(如成年后)的听觉障碍患者,其听觉先验知识是不同的。因而人工耳蜗植入后的听觉适应与可塑性也应不同,这也是值得研究的问题。其三,需要对人工耳蜗的信号处理策略进行改进。除了需要研究双侧同步的硬件结构与信号处理策略外(这在人工耳蜗实验平台上是很容易且已经实现了),更需要研究保留低频ITD信息的信号处理策

略。其中,低频ITD感知主要依赖低频时域精细结构的表达,那么增强低频ITD的一个前提是每侧耳的低频时域精细结构表达得到改进,这方面我们也已经提出了一些新的思路,并正在开展实验验证工作<sup>[28]</sup>。

## 5 空间听觉能力的测试

空间听觉是反映人的听觉能力的重要指标,但传统的听力测试(例如纯音测听)并不能评估患者的空间听觉能力。并且不同原因引起的空间听觉障碍是不同的,适当设计心理声学测量方法可寻找其原因,也可用于人工听觉恢复的评价。因而空间听觉能力的心理声学测试有可能作为对听觉系统进行临床诊断的手段之一,并且像通常的视力测试一样,简单有用而无害。

心理声学测试方法之一是在适当的声学处理(隔声、吸声)环境下布置多个扬声器,建立人工声学环境,从而测试不同频率信号的声源定位,干扰环境下的语言识别等。这种方法的特点是适应性广,但硬件相对复杂,需要一定的声学测试环境。

可能的测试方法之二是用虚拟听觉重放的方法,即用信号处理的方法产生期望的双耳声信号,并通过耳机重放。动态虚拟听觉环境实时绘制系统可实现这方面的功能<sup>[29]</sup>。这种方法的优点是硬件与声学测试环境简单,很容易模拟出各种不同的声学环境。但对于助听器使用者和人工耳蜗植入者,使用上有一定的困难,硬件之间需要适当的配合。

而各种对高层神经系统的无创伤检测方法,包括听觉相关的脑电、磁检测技术,核磁共振成像等,都有可能用于这方面的检测<sup>[30]</sup>。

## 6 结论

空间听觉是听觉系统(包括高层神经系统)综合分析和处理包含空间信息的双耳声压的结果。正常的空间听觉能力对获取声音信息非常重要,特别是在干扰声环境下获取言语信息。而不对称的听力损失、高层神经系统的障碍可能导致空间听觉的障碍。人工听觉应尽可能恢复双耳空间听觉,但目前并不能很好做到这一点。而空间听觉的心理声学测试有可能用于听觉障碍的检测、人工听觉恢复的评价等。听觉障碍患者的空间听觉及其人工改

善方面的研究已引起了广泛的兴趣,但还有许多工作要做。

**致谢** 感谢曹韦悦女士帮忙绘制了图2。

## 参 考 文 献

- [1] Blauert J. Spatial hearing: the psychophysics of human sound localization[M]. Cambridge: MIT Press, 1997
- [2] 世界卫生组织. 耳聋和听力损失-实况报道(第300号)[EB/OL]. [2017-02-01]. <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs300/zh/>.
- [3] 中国残疾人联合会. 2010年末全国残疾人总数及各类、不同残疾等级人数[EB/OL]. [2012-06-26]. [http://www.cdpf.org.cn/sjzx/cjrgk/201206/t20120626\\_387581.shtml](http://www.cdpf.org.cn/sjzx/cjrgk/201206/t20120626_387581.shtml).
- [4] Xie B S. Head-related transfer function and virtual auditory display[M]. Florida: J. Ross Publishing, 2013.
- [5] Bronkhorst A W. The cocktail party phenomenon: a review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions[J]. Acta Acustica united with Acustica, 2000, 86(1): 117-128.
- [6] Jelfs S, Culling J F, Lavandier M. Revision and validation of a binaural model for speech intelligibility in noise[J]. Hearing Research, 2011, 275(1/2): 96-104.
- [7] Kidd G Jr, Mason C R, Richards V M, et al. Informational masking[M]. Berlin: Springer, 2008: 143-189.
- [8] Gelfand S A. Hearing: an introduction to psychological and physiological acoustics[M]. Florida: CRC Press, 2017.
- [9] Moore B C J. An introduction to the psychology of hearing[M]. Leiden: Brill, 2012.
- [10] Geisler C D. From sound to synapse: physiology of the mammalian ear[M]. USA: Oxford University Press, 1998.
- [11] Blauert J. Modeling binaural processing: what next?[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2012, 132(3): 1911.
- [12] Nodal F R, Bajo V M, King A J. Plasticity of spatial hearing: behavioural effects of cortical inactivation[J]. Journal of Physiology, 2012, 590(16): 3965-3986.
- [13] King A J, Bajo V M, Bizley J K, et al. Physiological and behavioral studies of spatial coding in the auditory cortex[J]. Hearing Research, 2007, 229(1/2): 106-115.
- [14] Kohlrausch A, Braasch J, Kolossa D, et al. An introduction to binaural processing[M]. Berlin: Springer, 2013: 1-32.
- [15] Rothpletz A M, Wightman F L, Kistler D J. Informational masking and spatial hearing in listeners with and without unilateral hearing loss[J]. Journal of Speech Language & Hearing Research, 2012, 55(2): 511-531.
- [16] Hawkins D B, Wightman F L. Interaural time discrimination ability of listeners with sensorineural hearing loss[J]. Audiology, 1980, 19(6): 495-507.
- [17] Fuellgrabe C, Moore B C J. Effects of age and hearing loss on stream segregation based on interaural time dif-

- ferences[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2014, 136(2): 185–191.
- [18] Akeroyd M A, Gatehouse S, Blaschke J. The detection of differences in the cues to distance by elderly hearing-impaired listeners[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2007, 121(2): 1077–1089.
- [19] Avan P, Giraudet F, Büki B. Importance of binaural hearing[J]. *Audiology and Neurotology*, 2015, 20(S1): 3–6.
- [20] Akeroyd M A, Whitmer W M. Spatial hearing and hearing aids[J]. *ENT & Audiology News*, 2011, 20(5): 76–79.
- [21] Majdak P, Balazs P, Laback B. Multiple exponential sweep method for fast measurement of head-related transfer functions[J]. *Journal of the Audio Engineering Society*, 2007, 55(7/8): 623–637.
- [22] van den Bogaert T, Doclo S, Wouters J, et al. The effect of multimicrophone noise reduction systems on sound source localization by users of binaural hearing aids[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 124(1): 484–497.
- [23] van den Bogaert T, Klaseen T J, Moonen M, et al. Horizontal localization with bilateral hearing aids: without is better than with[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2006, 119(1): 515–526.
- [24] Senn P, Kompis M, Vischer M, et al. Minimum audible angle, just noticeable interaural differences and speech intelligibility with bilateral cochlear implants using clinical speech processors[J]. *Audiology and Neurotology*, 2005, 10(6): 342–352.
- [25] Kan A, Litovsky R Y. Binaural hearing with electrical stimulation[J]. *Hearing Research*, 2015, 322: 127–137.
- [26] Laback B, Egger K, Majdak P. Perception and coding of interaural time differences with bilateral cochlear implants[J]. *Hearing Research*, 2015, 322: 138–150.
- [27] Kerber S, Seeber B U. Sound localization in noise by normal-hearing listeners and cochlear implant users[J]. *Ear & Hearing*, 2012, 33(4): 445–457.
- [28] Meng Q, Zheng N, Li X. Mandarin speech-in-noise and tone recognition using vocoder simulations of the temporal limits encoder for cochlear implants[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, 139(1): 301–310.
- [29] Zhang C Y, Xie B S. Platform for dynamic virtual auditory environment real-time rendering system[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(3): 316–327.
- [30] Ahveninen J, Kopco N, Jaaskelainen I P. Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans[J]. *Hearing Research*, 2014, 307(68): 86–97.