



声学学报

Acta Acustica

ISSN 0371-0025, CN 11-2065/O4

## 《声学学报》网络首发论文

题目: 骨传导虚拟声源的近场距离分辨阈值研究  
作者: 敖静, 郭振宇, 王杰, 桑晋秋, 王小亚  
收稿日期: 2025-03-05  
网络首发日期: 2025-06-25  
引用格式: 敖静, 郭振宇, 王杰, 桑晋秋, 王小亚. 骨传导虚拟声源的近场距离分辨阈值研究[J/OL]. 声学学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/11.2065.o4.20250624.1947.001>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 骨传导虚拟声源的近场距离分辨阈值研究

敖静<sup>1</sup> 郭振宇<sup>2</sup> 王杰<sup>1†</sup> 桑晋秋<sup>3</sup> 王小亚<sup>4</sup>

(1 广州大学 电子与通信工程学院 广州 510006)

(2 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510641)

(3 华东师范大学 计算机科学与技术学院 上海 200062)

(4 广州市妇女儿童医疗中心耳鼻喉科 广州 510168)

2025 年 3 月 5 日 收到

2025 年 4 月 9 日 定稿

**摘要** 研究了乳突处骨导静态虚拟声重放下的近场声源距离分辨感知，并与气导条件进行比较。利用远场非个性化头相关传递函数（HRTF）与距离变化函数合成近场 HRTF，生成包含强度随距离自然变化及振幅归一化的两类刺激声。实验在不同方向（侧向、后方）、不同刺激顺序（接近顺序、远离顺序）和不同参考距离（0.5 m, 1.0 m）条件下测量距离分辨阈值。结果显示，强度是气导与骨导下距离感知的主要线索，强度存在时两种重放方式间差异不显著；归一化刺激下，后方声源的距离分辨在两种重放方式下无显著差异，而侧向声源中骨导的分辨阈值显著高于气导，可能因骨导串声干扰了双耳线索。此外，与气导类似，骨导重放下接近顺序的距离分辨优于远离顺序，表明其同样保留了对接近声源的行为准备机制。

**关键词** 骨导，最小可感知差异，自适应测试，距离分辨阈值

**PACS 数：**43.66, 43.60

**DOI** 10.12395/0371-0025.2025061

## Research on near-field distance discrimination threshold of bone-conducted virtual sound sources

AO Jing<sup>1</sup> GUO Zhenyu<sup>2</sup> WANG Jie<sup>1†</sup> SANG Jinqiu<sup>3</sup>

WANG Xiaoya<sup>4</sup>

(1 School of Electronics and Communication Engineering, Guangzhou University Guangzhou 510006)

(2 State Key Laboratory of Subtropical Building and Urban Science, South China University of Technology

Guangzhou 510641)

(3 School of Computer Science and Technology, East China Normal University, Shanghai 200062)

(4 E.N.T. Department, Guangzhou Women and Children's Medical Center, Guangzhou 510168)

**Abstract** This study investigates near-field distance discrimination of virtual sound sources under bone conduction (BC) reproduction at the mastoid and compares it with air conduction (AC). Near-field virtual sounds are synthesized using far-field non-individualized head-related transfer functions (HRTFs) combined with distance variation functions. Two types of stimuli are used: one preserving natural intensity variation with distance, and the other with normalized amplitude. Distance discrimination thresholds are measured under different directions (lateral, rear), stimulus orders (approaching, receding), and reference distances (0.5 m, 1.0 m). Results show that intensity serves as the primary cue for distance perception in both AC and BC conditions, and no significant differences are found between reproduction modes when intensity cues are present. With amplitude normalization, no significant difference is observed between AC and BC in rear-direction stimuli, whereas BC leads to significantly higher thresholds than AC in lateral-direction stimuli, possibly due to crosstalk interfering with binaural cues. Additionally, thresholds under BC are lower in the approaching order than in the receding order, suggesting that BC reproduction also preserves preparatory responses to approaching sound sources.

**Keywords** Bone conduction, Just noticeable difference, Adaptive testing, Distance discrimination threshold

\*国家自然科学基金项目(11974086, 12074403, 12411530075)资助

† 通讯作者: 王杰, wangjie@gzhu.edu.cn

## 引言

声源定位包括方向定位和距离定位,听觉是估计声源距离的重要手段<sup>[1]</sup>。已有研究表明,声源距离定位受到多种因素影响,包括响度、直达混响能量比、频谱线索、双耳线索以及由头部运动带来的动态信息等<sup>[2-5]</sup>,其中响度和频谱特征通常提供相对距离线索,而在室内环境下,直达混响能量比则能够提供绝对距离线索,在众多因素中,响度被认为是获取距离信息的主要线索。近场中,当声源偏离中垂面,随着声源逐渐靠近头部,双耳声级差(ILD)随着声源距离变化发生明显改变,而双耳时间差(ITD)与距离基本无关<sup>[6-8]</sup>,ILD为近场声源距离定位提供了有用的双耳线索,即使在缺少响度因素的情况下,听觉系统仍能通过

ILD 进行距离定位<sup>[9]</sup>。此外，在近场，每一只耳声压的谱特性也随声源距离而变化，因而也提供了潜在的距离定位因素<sup>[10]</sup>。

头相关传输函数（HRTF）描述了声源在空间中的位置与该声源在倾听者鼓膜处所产生的声压之间的关系<sup>[4]</sup>，这些距离变化因素可以用近场 HRTF 的距离变化来描述，通过使用不同距离的 HRTF，可以实现对听觉感知距离的控制。Yu 等用测量的个性化近场 HRTF 和非个性化近场 HRTF，研究了个性化 HRTF 对近场声源虚拟重放中距离感知的影响。结果显示在静态虚拟重放系统中，个性化 HRTF 对近场声源的听觉距离感知的影响不显著<sup>[5]</sup>。这也表明了使用非个性化近场 HRTF 进行近场范围内距离感知实验的可行性。

距离感知分为绝对距离定位和相对距离定位。绝对距离定位通常是指感知到的具体距离值，而相对距离定位则是指感知到的两个位置之间的相对距离差异。进一步来说，相对距离定位是听觉系统能够辨别两个声源相对距离的能力。而在进行距离分辨时，相对距离分辨阈值成为了重要的度量标准。听觉在不同条件（如虚拟声重放）下的距离感知灵敏度可以通过最小可感知差异（JND）进行描述。距离分辨 JND 阈值为听觉系统能够感知的最小距离变化，取决于参考距离<sup>[11,12]</sup>。已有研究表明，远场时最小可感知差异基本固定<sup>[13]</sup>，这意味着听觉感知对距离变化的敏感性在固定的距离比下大致恒定，压力分辨假说认为，在远场中距离分辨阈值可以达到 5%（对应声压级的分辨阈值）<sup>[14,15]</sup>，但在近场时，JND 阈值的变化会大一些<sup>[16-18]</sup>。Guo 等<sup>[18]</sup>在真实声场中进行实验，结果表明双耳线索对距离分辨阈值是有利的，另外其在侧向 100 cm 处的距离分辨阈值和压力分辨假说的 5% 接近，而在距离更近处的距离分辨阈值有所增大。此外，还有研究表明，刺激顺序也会影响距离分辨阈值。这里的刺激顺序分为接近顺序（先播放远处的声音，后播放近处的声音）和远离顺序（先播放近处的声音，后播放远处的声音）。Spagnol 等<sup>[17]</sup>在无回声环境下使用 400 ms 的白噪声信号作为刺激信号，研究受试者对近场虚拟声音源的相对距离分辨能力。研究结果表明，在近距离（小于 25 cm）时，接近顺序的距离分辨阈值显著低于远离顺序的阈值，而在较远距离（约 100 cm）时，远离顺序的阈值反而低于接近顺序。

上述研究都是在气导（Air Conduction, AC）条件下进行的。随着骨导（Bone Conduction, BC）耳机和骨导助听器的日益普及，骨导声重放下的空间感知性能也日益受到关注，现有研究主要集中在骨导重放时的声源方向定位<sup>[19]</sup>和空间去掩蔽<sup>[20]</sup>等方面，普遍认为由于骨导经颅传输形成交叉串声，可能会影响空间感知性能<sup>[21-23]</sup>。能否通过骨导设备进行有效的虚拟距离重放，这一问题对实现骨导设备的空间声重放具有重要意义，但目前尚未有研究探讨骨导设备虚拟声重放条件下的声源距离感知性能。在采用双耳骨导器件时，由于骨导路径下存在交叉串声，双耳线索会被破坏，侧向声源对应的 ILD 相比气导路径更小<sup>[24]</sup>。因此，在使用

骨导设备进行虚拟距离重现时，能否获得与气传导器件同样的相对距离感知性能，这一问题仍有待探索。

本研究探讨了气导和骨导声源重放方式对近场声源相对距离感知的影响。具体实验包括：分别进行气导和骨导两种重放方式下的两个不同方向的声源相对距离 JND 阈值测量实验。为了进一步讨论两种不同的声音传输路径下受试者利用双耳线索中的 ILD 进行声源相对距离估计的性能差异，所有实验分为保留强度线索（固定刺激）和对刺激声强度进行归一化处理两种情况。在保留强度线索的刺激声情况下，刺激声中包含随距离增大而自然衰减的声音响度线索。在归一化刺激声情况，不同距离的刺激以相同的强度进行播放，使受试者尽可能利用双耳线索进行声源相对距离定位<sup>[18]</sup>。受试者使用入耳式耳机和骨导换能器，分别在上述两种刺激声情况下进行 3 个不同刺激条件下的声源距离分辨实验。本研究包含两个实验。实验 1 使用固定刺激，考察了两个声源方向、两个参考距离、两种刺激顺序和两种传导方式的影响。实验 2 使用归一化刺激，在相同的声源方向、参考距离、刺激顺序和传导方式下进行。

## 1 材料和方法

### 1.1 受试者

13 名耳科健康的受试者（11 名男性，2 名女性，平均年龄 25 岁，标准差为 1 岁）参加了实验。所有受试者的健康状况良好，在所有测试频率（125~8000 Hz 倍频程）下，受试者气传导双耳纯音听力阈值均低于 20 dB HL，且气传导和骨传导的听力阈值差异小于 10 dB。所有的受试者均来自于广州大学，其中 10 名受试者曾参加过骨传导相关的心理声学实验。实验 1 有 10 名受试者参与，实验 2 有 8 名受试者参与，其中 5 名受试者同时参与了两组实验。每组实验分别需要大约三至四个小时完成。本研究已通过广州大学科学伦理专门委员会审查。

### 1.2 设备和刺激

实验在一个半消声室内进行。本底噪声为 22 dBA。进行骨传导实验时骨导振子（Radioear B81）用弹性绑带固定在左、右两侧乳突处，调节弹性绑带以达到  $3 \pm 0.5$  N 的静态压力<sup>[25]</sup>；进行气传导实验时受试者佩戴 Sennheiser IE800 入耳式耳机。实验期间，受试者坐在椅子上，手持应答器，其上配有两个按钮，用于选择第 1 个信号或第 2 个信号更接近自己。实验系统由一台运行实验程序的计算机控制，计算机通过 Fireface UFX II 声卡连接至气导耳机或骨导振子。试者感知信号后，使用应答器作出判断，反馈结果实时传输至计算机，计算机根据受试者的反馈控制下一步实验的进行。在实验期间电脑屏幕被关闭，以避免受试者被视



觉干扰。在休息期间可以选择打开屏幕，以显示下一个实验块的倒计时，其中实验块如图 1 所示。

实验使用的原始刺激信号为持续 500 ms 的宽带白噪声，具有 30 ms 的启动和关闭时间。本研究中定义正前方为  $0^\circ$ ，正右方为  $90^\circ$ ，正后方为  $180^\circ$ 。使用 DVF (Distance variation function) 方法<sup>[26]</sup>将 1 m 处  $90^\circ$  和  $180^\circ$  方向的 HRTFs<sup>[4]</sup>合成为  $90^\circ$  和  $180^\circ$  方向下不同距离的近场 HRTFs。然后对原始刺激信号进行卷积，从而创建不同距离和方向的虚拟声源进行双耳重放。在 DVF 计算中，头部半径参数固定为 8.75 cm。

在使用 HRTF 合成刺激声之后，根据是否消除刺激声中包含的随声源距离变化的声压级线索，将刺激信号分为两种：一种为有强度线索的固定刺激，信号强度随距离  $r$  ( $r$  为声源到头中心的距离) 按  $1/r$  比例变化。另一种为归一化刺激<sup>[18]</sup>。在归一化的情况下，使用  $r$  补偿  $1/r$  距离衰减系数。而在有强度情况下（固定刺激），保留刺激信号中随着距离而变化的声压级线索。

### 1.3 实验流程

在通过位于乳突处的双侧骨导振子进行双耳声重放之前，使用人工乳突 (Brüel & Kjær 4930) 测量 B81 骨导振子的频响，并根据所测得的频响数据设计相应的补偿滤波器进行均衡处理，以尽量减少骨导振子的频响特性对实验的影响。

#### 1.3.1 等响度校准

正式实验开始之前，首先对气导和骨导两种刺激信号进行主观等响度均衡，使气导和骨导条件下的刺激具有相同响度。响度均衡时使用的刺激信号的方位角为  $180^\circ$ ，距离为 50 cm。

气导刺激通过 Sennheiser IE800 耳机以 60 dB SPL 的水平播放，该刺激水平通过头部和躯干模拟器 (Brüel & Kjær 4128) 进行测量。然后，气导与骨导刺激由 Sennheiser IE800 耳机和 Radioear B81 交替播放。受试者调整施加在骨导换能器上的信号增益，使其与 60 dB SPL 的气导刺激的感知响度相匹配<sup>[27]</sup>。每名受试者调整的骨导刺激的水平被分别记录，并用于后续实验。

#### 1.3.2 预备实验

在将气导和骨导两种刺激信号进行响度匹配后，开始预备实验。首先让受试者收听水平面的环绕声，以熟悉虚拟声场。随后给受试者依次收听两个不同方位角 ( $90^\circ$  和  $180^\circ$ ) 上由近及远 (50 cm 到 100 cm) 的刺激信号，以便受试者熟悉不同距离处的虚拟声源。最后每位受试者进行了一个简短的训练程序，训练过程由若干个带有反馈的试验组成，以便他们熟悉任务和刺激。而在正式测试中，不会向受试者提供反馈。在进行实验 1 和实验 2 之前，都进行以上的步骤。

### 1.3.3 正式实验

实验 1 和实验 2 在不同的时间段内进行, 间隔超过 3 个月。在两个正式实验中, 每个受试者都在总共 16 个条件下进行阈值测量 (2 个参考距离 $\times$ 2 个声源方位 $\times$ 2 个刺激声重放方式 $\times$ 2 个刺激顺序)。这 16 个条件的顺序通过随机化方法进行安排。两个参考距离分别是 50 cm 和 100 cm; 2 个声源方位角分别是  $90^\circ$  和  $180^\circ$ ; 2 个刺激声重放方式分别是气导重放方式和骨导重放方式; 2 个刺激顺序是接近顺序和远离顺序。

图 1 描述了接近顺序下的一个实验块, 一个实验块包含若干个实验试次, 在一个实验试次中, 两个不同距离 (即参考距离和自适应距离) 的刺激依次播放, 刺激间保留有 0.5 s 的时间间隔。参考距离在一个实验块中是保持不变的 (即 50 cm 和 100 cm)。在实验中, 自适应位置的距离由受试者在上一个实验试次中的反应决定。在每个实验试次中, 受试者依次听到两个刺激信号 (一个对应参考距离, 一个对应当前的自适应距离), 本研究中设置自适应距离不超过参考距离, 所以当实验条件为接近顺序时, 先播放参考距离处的声源再播放自适应距离处的声源, 当刺激顺序为远离时则相反。随后, 受试者需要判断哪一个刺激更接近自身, 并通过手持应答器选择第 1 个或第 2 个刺激, 该选择即为受试者的“反应”。实验块的顺序通过随机化方法进行安排。在正式实验中, 每进行 30 分钟, 休息 15 分钟。

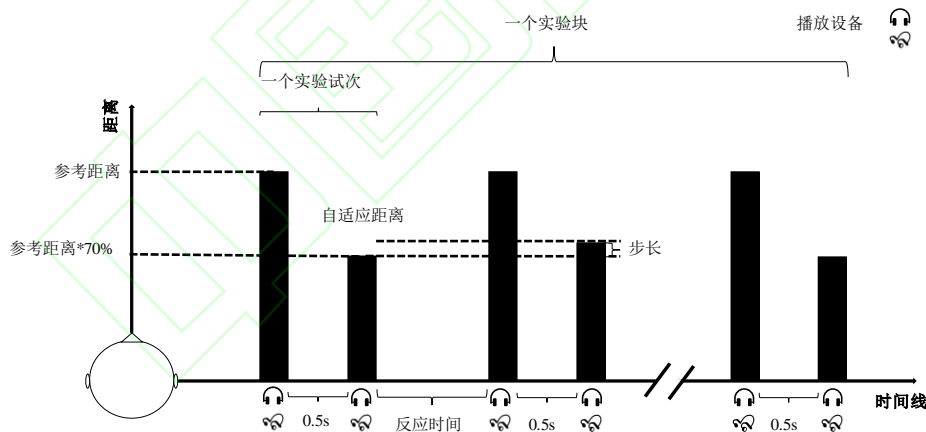


图 1 阈值测量流程示意图

侧向 ( $90^\circ$ ) 的初始自适应距离是参考距离的 70% (如参考距离为 100 cm 时, 初始自适应距离为 70 cm), 因为 Yu 等的实验表明当声源位于后方时, 距离感知分辨阈值更大<sup>[5]</sup>, 所以对后方的声源 ( $180^\circ$ ) 设置了相对参考位置更远的初始自适应位置 (参考距离的 60%)。采用二项强迫选择范式, 要求受试者根据听到的两个刺激, 判断哪个刺激更接近自身位置。受试者有足够的时间进行判断。在实验过程中, 程序根据受试者的反应, 采用“2 下 1 上”的自适应规则<sup>[28]</sup>更新下一个试次的自适应距离: 如果受试者在当前试次中连续两次判断正确, 程序会

以 1% 的步长（即参考距离的 1%）缩小自适应距离与参考距离之间的差距；若判断错误一次，则以 1% 的步长增大自适应距离与参考距离之间的差距。在第一次错误判断之前，每一步的大小被设定为 3%，目的是为了减少实验的持续时间。自适应的过程在 12 次翻转（由“下”变为“上”，或由“上”变为“下”，称为一次翻转）或者自适应距离与参考距离一致时停止。

由于听觉距离感知对距离变化的敏感性在固定的距离比下大致恒定<sup>[29]</sup>，JND 阈值计算如下：

$$JND_r = \frac{d_r - d'_t}{d_r}, \quad (1)$$

其中， $d_r$  是参考距离， $d'_t$  是最后五次翻转距离的平均值。

## 2 实验结果

### 2.1 固定刺激情况下的距离分辨阈值

实验 1 总共测量了 160 次（16 个测试条件×10 名受试者）距离分辨阈值，图 2 所示为固定刺激（实验 1）情况下，所有 16 个条件下测量的受试者的平均 JND 阈值。图 2 展示了不同声源方向、刺激方式、参考距离和刺激顺序条件下 JND 阈值的柱状图，误差条表示标准误差。子图（a）（b）（c）（d）分别表示气导和骨导路径下侧向与后方的相对分辨阈值。在每个子图中，50 cm 和 100 cm 处有两个组，分别显示接近和远离刺激顺序的距离分辨阈值，蓝色代表接近顺序，绿色代表远离顺序。在 50 cm 处，接近顺序下的阈值小于远离顺序，在 100 cm 处，接近顺序下的阈值较大。特别是子图（d）中，接近与远离刺激顺序的差异较小。

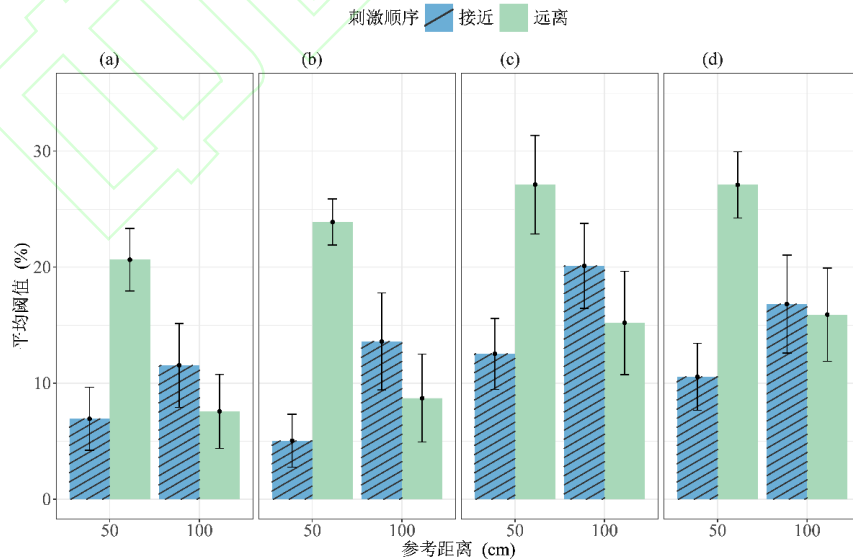


图 2 固定刺激下不同声源方向、传导方式、参考距离和刺激顺序条件下 JND 阈值柱状图（柱状图表示不同受试者的平均 JND，误差条表示标准差） (a) 气导，侧向；(b) 骨导，侧向；(c) 气导，后方；(d) 骨导，后方



经过 Anderson-Darling 检验正态性检验,各条件下的 JND 均满足正态分布。此外,采用 Mauchly 球形度检验评估数据是否满足球形假设。检验结果显示所有主体内因素均满足球形假设,因此无需进行 Greenhouse-Geisser 修正。实验采用四因素重复测量方差分析,以声源方向( $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ )、参考距离(50 cm, 100 cm)、刺激顺序(接近顺序, 远离顺序)以及刺激方式作为被试内因素,分析其对 JND 的影响。结果表明,声源方向 $[F(1,9)=16.89, p<0.01]$ 、参考距离 $[F(1,9)=11.02, p<0.01]$ 和刺激顺序 $[F(1,9)=6.82, p<0.05]$ 对平均 JND 阈值有显著影响,刺激方式的主效应未达到显著水平( $F(1,9)=0.019, p=0.893$ )此外,参考距离与刺激顺序之间存在显著的交互作用 $[F(1,9)=22.06, p<0.001]$ ,其他交互作用未达到显著水平( $p>0.05$ )。

为进一步分析显著的主效应和交互作用,采用 Bonferroni 校正的两两比较进行事后检验。分析结果表明, $90^{\circ}$  方向的 JND 均值为 12.7%,显著低于  $180^{\circ}$  方向的 18.8% ( $p=0.003$ ),表明受试者在  $90^{\circ}$  方向上的距离分辨能力更强;接近顺序的 JND 均值为 12.4%,显著低于远离顺序的 19.1% ( $p=0.028$ ),表明受试者对接近顺序下的距离变化更敏感,可能与听觉系统对靠近的声音信号更敏感的生理机制有关;50 cm 条件下的 JND 均值为 14.1%,显著低于 100 cm 条件下的 17.4% ( $p=0.009$ ),表明受试者在较近参考距离(50 cm)时的距离分辨能力更高,而在较远参考距离(100 cm)时的分辨能力下降。气导的 JND 均值为 15.6%,而骨导的 JND 均值为 15.9%,二者之间差异不显著( $p=0.893$ ),说明在当前实验条件下,气导刺激方式和骨导刺激方式的距离分辨能力相近,此外比较不同方向的气导和骨导差异,结果表明在两个方向气导和骨导之间的 JND 差异均为达到显著水平( $p<0.05$ )。

## 2.2 归一化刺激情况下的距离分辨阈值

实验 2 总共测量了 128 (16 测试条件 $\times$ 8 受试者)次距离分辨阈值,图 3 所示为归一化刺激情况下,所有 16 个条件下测量的平均 JND 阈值。图中的柱状图展示了归一化条件下,不同声源方向、刺激方式、参考距离和刺激顺序的 JND 阈值,误差条表示标准差。子图 (a) (b) (c) (d) 分别对应气导-侧向、骨导-侧向、气导-后方和骨导-后方的 JND 结果。每个图中,50 cm 和 100 cm 条件分别为两组,每组包含接近(蓝色)和远离(绿色)刺激顺序的柱状图。结果显示,接近顺序下的 JND 普遍低于远离顺序。此外,在远离顺序下,50 cm 和 100 cm 之间的 JND 差异较小,而在接近顺序下,50 cm 条件下的 JND 略低于 100 cm。在侧向和后方条件下,骨导刺激的 JND 均高于气导刺激。

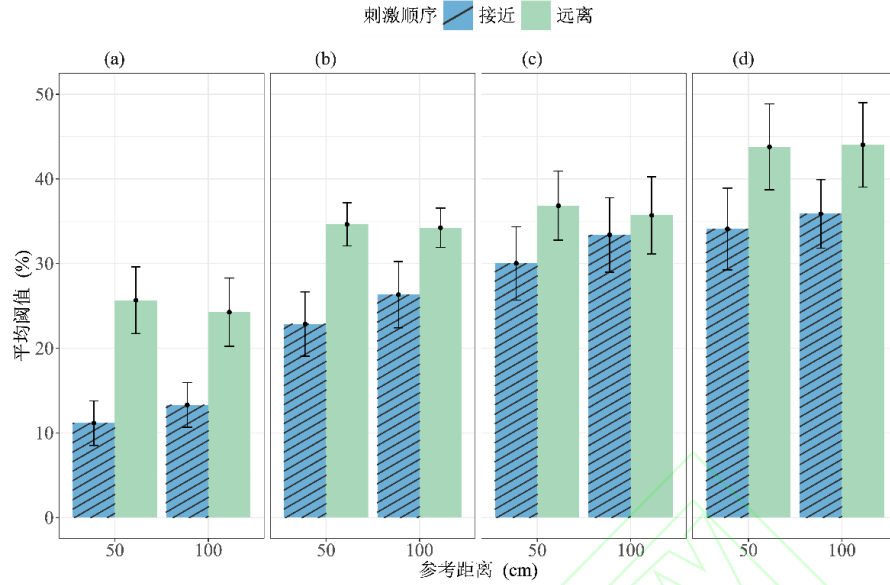


图3 归一化刺激下不同声源方向、传导方式、参考距离和刺激顺序条件下 JND 阈值柱状图(柱状图表示不同受试者的平均 JND, 误差条表示标准差) (a) 气导, 侧向; (b) 骨导, 侧向; (c) 气导, 后方; (d) 骨导, 后方

经过 Anderson-Darling 检验正态性检验, 各条件下的 JND 均满足正态分布。此外, 采用 Mauchly 球形度检验来评估数据是否满足球形假设。检验结果显示所有主体内因素均满足球形假设, 因此无需进行 Greenhouse-Geisser 修正。实验采用四因素重复测量方差分析, 将受试者作为被试间因素, 将声源方向、参考距离、刺激顺序、刺激方式作为被试内因素分析其对 JND 的影响。分析结果表明声源方向 $[F(1,9)=32.98, p<0.001]$ 、刺激顺序 $[F(1,9)=25.28, p<0.01]$ 、刺激方式 $[F(1,9)=5.820, p<0.05]$ 表现出显著性影响, 参考距离和刺激顺序的交互作用 $[F(1,9)=22.06, p<0.001]$ 表现出显著影响, 其他交互作用未达到显著水平, 表明这些因素之间的交互作用对 JND 的影响较小。值得注意的是, 参考距离在固定刺激下对阈值具有显著的影响, 而在归一化条件下不具有显著影响; 而刺激方式在固定刺激下不具有显著影响, 但在归一化条件下对阈值具有显著的影响。这说明了固定刺激下随距离变化的强度的影响, 它导致距离因素成为显著性因素, 而且在固定刺激下很可能盖住了刺激方式的影响。对比图 3 和图 2 可见, 相较于固定刺激中的 JND 阈值, 归一化刺激的 JND 阈值普遍变大, 这也可能是因为失去强度线索导致, 相对距离辨别的能力下降。

为进一步分析显著的主效应和交互作用, 采用 Bonferroni 检验进行事后多重比较。简单效应分析结果表明,  $90^\circ$  方向的 JND 均值为 24.1%, 显著低于  $180^\circ$  方向的 36.7% ( $p<0.001$ ), 表明受试者在  $90^\circ$  方向上的距离分辨能力更强。接近顺序的 JND 均值为 25.9%, 显著低于远离顺序的 34.9% ( $p<0.001$ ), 表明受

试者对接近顺序下的距离变化更敏感,可能与听觉系统对靠近的声音信号更敏感的生理机制有关。气导的 JND 均值为 26.3%,显著低于骨导的 34.5% ( $p < 0.05$ ),说明气导刺激方式相比骨导刺激方式在分辨能力上具有一定优势。在 50 cm 条件下,接近顺序的 JND 均值为 27.2%,而远离顺序的 JND 均值为 34.6%,差异显著 ( $p < 0.001$ )。而在 100 cm 条件下,接近顺序的 JND 均值为 24.5%,远离顺序的 JND 均值为 35.2%,二者之间差异不显著 ( $p > 0.05$ )。这表明在较近距离时,受试者对接近顺序更敏感,而远距离下此趋势减弱。

### 3 讨论

#### 3.1 与以往研究的距离分辨阈值差异分析

以往使用类似实验范式的研究均为气导研究,将本研究的 JND 测量结果与这些结果进行比较,如表 1 所示,其中 Spagnol 等(2015)<sup>[16]</sup>和 Spagnol 等(2017)<sup>[17]</sup>获得的最小可觉差(JNDs)是从其论文图表中提取的。“接近”和“远离”分别表示测试刺激出现在参考刺激之前或之后。“平均值”表示“接近”和“远离”JND 的平均值。本研究使用固定刺激时的气导 JND 阈值均值与 Guo 等<sup>[18]</sup>的研究相比偏大一些,50 cm 后方和侧向的距离分辨阈值百分比差值分别为 8.7 和 6.2,100 cm 下百分比差值分别为 9.9 和 3.9;本研究测量得到的阈值与 Spagnol 等(2015)<sup>[16]</sup>的更为接近,与 Spagnol 等(2015)测量的阈值相比,这些阈值百分比差值依次为 0.8, 1.2, 2.6, -4.5, 与 Spagnol 等(2017)<sup>[17]</sup>相比对应的百分比差值分别为 7.8, 1.7, 4.6, -4.0。这可能是因为 Guo 采用了真实声场进行测试,而本研究与文献[16,17]都采用了 DVF 合成的虚拟声场重放。

在归一化刺激情况下,本研究与 Guo 等相比,50 cm 后方和侧向的阈值均值的差值百分比分别是 1.91 和 2.01;100 cm 下的差值百分比为 6.13 和-5.33;与 Spagnol 等(2017)<sup>[17]</sup>的结果对比,这些差值分别为 16.41, 2.41, 17.53, 2.27。本研究测量的 JND 值普遍大于 Spagnol 等<sup>[16,17]</sup>的结果,而更接近 Guo 等的研究,这可能是因为虽然三者对声压级都进行了基于头部中心的  $1/r$  距离衰减归一化处理,但 Spagnol 的实验中,还额外设置了声压级在一个小范围内随机波动,而本研究 and Guo 等的实验中在单一声压级下。

表 1 与以往研究进行比较得到的阈值结果

					JND (%)			
					固定刺激		归一化刺激	
					0.5m	1.0m	0.5m	1.0m
	重放	实验	受试					

	方式	材料	数量	刺激	后方	侧向	后方	侧向	后方	侧向	后方	侧向
文献 [16]	气导	白噪声	30;30	接近	6	2.5	20	17	16	12	18	15
				远离	18	22	6	10	18	20	16	20
				平均	12	12	13	13.5	17	16	17	16.5
文献 [17]	气导	白噪声	20;20	接近	8	5	23	20	—	—	—	—
				远离	18	20	7	8	—	—	—	—
				平均	14.5	12.5	15	14	—	—	—	—
文献 [18]	气导	粉红噪声	8;8		11.1	7.5	7.7	5.6	31.5	16.4	28.4	24.1
本文	气导	白噪声	10;8	接近	12.5	6.9	20.1	11.5	30	11.2	33.4	13.3
				远离	27.1	20.6	15.2	7.5	36.8	25.6	35.7	24.3
				平均	19.8	13.7	17.6	9.5	33.4	18.4	34.5	18.7
本文	骨导	白噪声	10;8	接近	10.5	5	16.8	13.6	34.1	22.8	35.9	26.3
				远离	27.1	23.9	15.9	8.7	43.7	34.6	44	34.2
				平均	18.8	14.4	16.3	11.1	38.9	28.7	39.9	30.2

注意：其中受试数量(10;8)表示的是固定刺激实验为 10 人，归一化刺激为 8 人。

### 3.2 声源方向、距离和刺激顺序对距离分辨阈值的影响

以往气导距离感知研究表明，对于近距离声源，当声源位于听者侧向时，听觉距离分辨往往更加准确<sup>[18]</sup>。在本研究的两个实验中，声源方向显著影响了距离辨别阈值。相较于其他方向，侧向声源的 ILD 更大。本研究气导和骨导重放中，与后方相比，侧向均保持着明显的 JND 阈值判别优势（固定刺激侧向与后方平均 JND 差值为 6.1%，归一化刺激则为 12.6%），而 Guo 等<sup>[18]</sup>及 Spagnol 等<sup>[16,17]</sup>的气导研究中有同样的结论。这种侧向声源增强的距离感知在一些先前的其他研究中已有报道<sup>[9,30]</sup>。

之前的许多气导研究都指出随声源距离变化而引起的强度水平变化是影响声源距离判断的最重要的相对线索之一<sup>[6-8]</sup>，这一结论在本研究的气导和骨导重放中均得到验证。在实验 1 中，参考距离显著影响了距离辨别阈值，在相同的显著性水平（ $p=0.05$ ）下，这一结果与 Guo 等<sup>[18]</sup>及 Spagnol 等（2017）<sup>[17]</sup>的研究结果相符。在归一化刺激的情况下，本研究与这些研究中都表明参考距离对距离辨别阈值不具有显著性影响，这是因为归一化处理使得声源距离变化已基本不会引起强度水平变化。

Spagnol 等(2015) 的研究中采用固定刺激,发现近场(50 cm)条件下,接近顺序的平均 JND 阈值小于远离顺序;在远场(100 cm)条件下,接近顺序的 JND 反而大于远离顺序。即 JND 在接近和远离条件下随距离变化的趋势相反。本研究将实验扩展到采用固定刺激和归一化刺激两种情况,并分别采用气导和骨导重放,均得到了这样的结果(图 2 和图 3)。近期相关研究<sup>[16,17]</sup>的结论对这一现象给予了解释,近距离接近刺激的阈值明显更小可以解释为进化适应性,比起远离声音,对于接近声音的感知更明显,这可能是一种对于接近声源的安全边界的准备行为。本研究的实验结论表明,通过骨导传输路径,受试者在接近顺序和远离顺序下的近场声源距离辨别能力也保留了这种不对称性。

### 3.3 重放方式对距离分辨阈值的影响

由于骨导激励时,双耳之间的交叉串声会破坏双耳线索,相较于气导激励,骨导的耳间隔离会更小一些,有可能导致空间声信息畸变。例如,已有的水平面方向定位研究表明,骨导激励的定位误差往往大于气导的定位误差<sup>[19]</sup>。双耳因素同样对侧向距离定位具有重要贡献,但在本研究中,在采用固定刺激的实验一中气导和骨导在所有条件下距离辨别 JND 阈值差异不大,且未表现出显著性差异,究其原因,很可能是因为此时随距离变化的声压级水平是主要的因素,所以虽然骨导的串声和经颅衰减会破坏双耳线索,但这种破坏并未引起决定性的变化。在采用归一化刺激的实验二中,骨导路径下的 JND 阈值比气导的 JND 阈值有变大的趋势,后方 50 cm 下骨导的阈值均值(接近和远离顺序的均值)相较于气导提高了 5.5%,100 cm 下增大了 5.4%,但经过成对比较,差异不具有统计学意义( $p=0.346$ );而侧向 50 cm 和 100 cm 下骨导相较于气导 JND 阈值均值分别提高了 10.3%和 11.2%,统计分析表明存在显著差异( $p=0.016$ )。这是因为对于中垂面上的 180°,由于骨导声源到达双耳的影响一样,所以相较于气导,骨导重放并不会改变原有的很小的 ILD。而对于侧向声源,气导重放时 ILD 达到最大,而骨导的串声会导致 ILD 变小,从而使得骨导 JND 阈值明显大于气导的。此外,实验 2 中,气导的侧向的 JND 阈值明显小于后方的 JND 阈值( $p=0.012$ ),这是期望中的结果,因为侧向对应更大的 ILD。对于骨导而言,也得到了同样的结果( $p=0.007$ ),这说明虽然骨导串声的存在会导致侧向的 ILD 会变小,但相较于后方的 ILD,却依然较大,即骨导串声的影响并未足以破坏侧向声源的这种优势。

### 3.4 研究的局限性

本研究使用远场 HRTF 基于 DVF 方法合成不同距离的近场 HRTF,高于 5000 Hz 时合成的近场 HRTF 会有较大的误差<sup>[26]</sup>,可能会给结果带来一定的偏差。

目前已有的研究中,还很难进行信号处理来抑制骨导的串扰。要消除串声,需要获取骨导激励信号到内耳之间的传输特性,然后进行传输通路补偿,但受限



于现有技术,还无法在不进行手术开口的情况下进行骨导振子到内耳之间的测量。近期的一些研究也探索了使用非侵入式的方法进行测量<sup>[22,23]</sup>,取得了阶段性的进展,但远未达到如同 HRTF 技术这样较为成熟的应用阶段。

本研究中,骨传导刺激的位置仅在乳突处,而不同的骨导激励位置所引起的感知是不同的<sup>[19,31]</sup>,而且可能对应不同的的经颅衰减<sup>[19]</sup>,从而导致对双耳线索的破坏程度不同,最终对受试者的距离分辨能力的影响也不同。受实验时长所限,为避免受试者感到疲劳,本研究没有研究刺激位置对距离分辨阈值的影响。未来的研究可以扩展到其他可能佩戴骨传导装置的位置。

## 4 结论

本研究测量了在气导激励和乳突处骨导激励下,近场虚拟声源在侧向和正后方两个方向上的相对距离分辨阈值。实验结果表明:(1) 骨导激励下强度线索依然是主导因素。骨导激励与气导条件下,强度是距离定位的主要线索。存在自然强度变化时,两者的距离分辨能力无显著差异,表明骨导激励具备有效的距离感知能力。(2) 骨导侧向距离分辨受串声干扰。消除强度线索后,正后方声源的气导和骨导激励距离阈值无显著差异,但骨导侧向分辨明显弱于气导,可能因骨导串声影响了 ILD 线索。尽管如此,骨导侧向分辨仍优于正后方,说明串声未破坏侧向感知优势。(3) 骨导亦保留接近顺序的感知优势。骨导激励下,距离分辨在接近顺序优于远离顺序,受试者对接近声源更敏感,表明骨导激励保留了对接近声源的行为准备机制。

## 参考文献

- 1 谢波菽. 空间声原理. 北京: 科学出版社, 2019
- 2 朱俊, 谢波菽, 赵童, 等. 自由场听觉距离感知因素的动态虚拟实验研究. 声学学报, 2024; **49**(6): 1172-1185
- 3 谢波菽. 动态听觉定位因素及其在空间声重放的作用. 声学学报, 2024; **49**(6): 1131-1151
- 4 Xie B. Head-related transfer function and virtual auditory display. 2nd edition. USA: J Ross Publishing, 2013
- 5 Yu G, Wang L. Effect of individualized head-related transfer functions on distance perception in virtual reproduction for a nearby sound source. *Arch. Acoust.*, 2019; **44**(2): 251-258
- 6 Kolarik A J, Moore B C J, Zahorik P, et al. Auditory distance perception in humans: A review of cues, development, neuronal bases, and effects of sensory loss. *Atten. Percept. Psychophys.*, 2016; **78**(2): 373-395
- 7 Zahorik P, Brungart D, Bronkhorst A W. Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research. *Acta Acust. united Acust.*, 2005; **91**(3): 409-420

- 8 Xie B, Yu G. Psychoacoustic principle, methods, and problems with perceived distance control in spatial audio. *Appl. Sci.*, 2021; **11**(23): 11242
- 9 Brungart D S, Durlach N I, Rabinowitz W M. Auditory localization of nearby sources. II. Localization of a broadband source. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999; **106**(4): 1956-1968
- 10 Brungart D S, Rabinowitz W M. Auditory localization of nearby sources. Head-related transfer functions. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1999; **106**(3): 1465-1479
- 11 Ashmead D H, Davis D L, Northington A. Contribution of listeners' approaching motion to auditory distance perception. *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, 1995; **21**(2): 239-256
- 12 Strybel T Z, Perrott D R. Discrimination of relative distance in the auditory modality: The success and failure of the loudness discrimination hypothesis. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1984; **76**(1): 318-320
- 13 Ashmead D H, Leroy D, Odom R D. Perception of the relative distances of nearby sound sources. *Percept. Psychophys.*, 1990; **47**(4): 326-331
- 14 Green D M. An introduction to hearing. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1976: 254
- 15 Scharf B. Loudness. New York: Academic Press, 1978: 187-242
- 16 Spagnol S, Tavazzi E, Avanzini F. Relative auditory distance discrimination with virtual nearby sound sources. DAFX-15: Proceedings of the 18th International Conference on Digital Audio Effects, Norwegian Univ. Sci. Technol., Trondheim, 2015: 237-242
- 17 Spagnol S, Hoffmann R, Kristjánsson Á, et al. Effects of stimulus order on auditory distance discrimination of virtual nearby sound sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2017; **141**(4): 375-380
- 18 Guo Z, Zhao Y, Wang L, et al. Distance discrimination thresholds of proximal sound sources in a real anechoic environment. *Appl. Acoust.*, 2023; **203**: 109223
- 19 Wang J, Lu X, Sang J, et al. Effects of stimulation position and frequency band on auditory spatial perception with bilateral bone conduction. *Trends Hear.*, 2022, 26: 23312165221097196
- 20 Wang J, Xie S, Stenfelt S, et al. Spatial release from masking with bilateral bone conduction stimulation at mastoid for normal hearing subjects. *Trends Hear.*, 2024; **28**: 23312165241234202
- 21 Mattingly J K, Banakis Hartl R M, Jenkins H A, et al. A comparison of intracochlear pressures during ipsilateral and contralateral stimulation with a bone conduction implant. *Ear Hear.*, 2020; **41**(2): 312-322
- 22 Wang J, Chen Y, Stenfelt S, et al. Analysis of cross-talk cancellation of bilateral bone conduction stimulation. *Hear. Res.*, 2023; **434**: 108781
- 23 王杰, 陈运达, 陆锡坤, 等. 真人头部骨导效应实验和分析. *声学学报*, 2022; **46**(5): 687-698
- 24 Zeitooni M, Mäki-Torkko E, Stenfelt S. Binaural hearing ability with bilateral bone conduction stimulation in subjects with normal hearing: implications for bone conduction hearing aids. *Ear Hear.*, 2016; **37**(6): 690-702
- 25 ISO 80000-4:2019 Quantities and units — Part 4: Mechanics. International Organization for Standardization, 2019

- 26 Kan A, Jin C T, Van Schaik A. A psychophysical evaluation of near-field head-related transfer functions synthesized using a distance variation function. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2009; **125**(4): 2233-2242
- 27 Qin X, Usagawa T. Frequency characteristics of bone conduction actuators – Measurements of loudness and acceleration. *Appl. Acoust.*, 2017; **126**: 19-25
- 28 Levitt H. Transformed up-down methods in psychoacoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1971; **49**(2B): 467-477
- 29 Kopčo N, Huang S, Belliveau J W, et al. Neuronal representations of distance in human auditory cortex. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 2012; **109**(27): 11019-11024
- 30 Kopčo N, Shinn-Cunningham B G. Effect of stimulus spectrum on distance perception for nearby sources. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2011; **130**(3): 1530-1541
- 31 Wang J, Stenfelt S, Wu S, et al. The effect of stimulation position and ear canal occlusion on perception of bone conducted sound. *Trends Hear.*, 2022; **26**: 233121652211301