

引用格式：陈竹书，毛东兴. 近场条件下视觉距离感知对响度的影响[J]. 声学技术, 2020, 39(4): 456-460. [CHEN Zhushu, MAO Dongxing. The effect of visual distance perception on loudness in near field[J]. Technical Acoustics, 39(4): 456-460.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.04.013

近场条件下视觉距离感知对响度的影响

陈竹书，毛东兴

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要：文章研究了近场条件下，当声源距离改变时，视觉距离感知对响度的影响。在消声室中，使用球形声源在试听者的正前方发声。8位试听者分别在睁眼和闭眼的条件下，对3种中心频率(500 Hz、1 kHz 和 2 kHz)、8个距离(0.3~1.0 m, 1.0 m 为参考距离)的声信号进行了响度匹配。结果显示，随着声源距离的减小，睁眼时响度增加得要比闭眼时少一些。而闭眼时的响度匹配结果与封闭耳道口声压级的变化情况相一致。这说明闭眼时试听者根据耳道口的声压级来判断响度，而睁眼时视觉距离信息会对响度产生影响。结果还显示，对于频率越低的声信号，视觉距离感知造成的影响越大。

关键词：近场；视觉信息；距离；响度

中图分类号：B845.2

文献标识码：A

文章编号：1000-3630(2020)-04-0456-05

The effect of visual distance perception on loudness in near field

CHEN Zhushu, MAO Dongxing

(1. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The effect of visual cues of sound source distance on loudness is investigated when the sound source distance changes in near field. A real spherical sound source is positioned in front of listener in an anechoic chamber, and eight listeners perform loudness matching for the stimuli at a reference distance of 1.0 m and seven test distances of 0.3~0.9 m under two conditions of eyes opening and closing at three center frequencies of 500 Hz, 1 kHz and 2 kHz. The results show that as the sound source distance decreases, loudness in eyes opening increases less than that in eyes closing. The results of loudness matching in eyes closing are in accordance with the changes of sound pressure levels measured at the blocked ear canal entrance. It demonstrates that listeners judges the loudness based on the sound pressure levels at their ears when their eyes close. However, when eyes open, the visual cues of sound source distance affects loudness perception. The results also show that the effect of visual distance perception on loudness is more obvious at lower frequencies.

Key words: near field; visual cues; distance; loudness

0 引言

响度是心理声学中一个非常重要的参量，主要反映人耳对声音强度的感受。响度主要由声信号本身的声音大小和频谱决定。但是，其他一些非声学因素也会对响度带来影响。

已有研究证明，视觉刺激会对听觉系统产生影响。Fastl^[1]发现，对于同样的声信号，红色火车的响度比绿色火车要大 15%。静止的图片平均可以使响度降低 2.5%，动态的图片则可以降低约 5%。并且模拟的场景越逼真，视觉信息带来的响度下降就

越大。Aizawa 等^[2]专门研究了不同颜色的视觉刺激对响度的影响，并在此基础上建立了考虑视觉刺激的新的响度模型。Kitagawa 等^[3]研究了视觉对听觉的滞后影响，发现试听者在观看一个方块远近移动一段时间后，听稳态的声音会觉得响度在变化。Syouya 等^[4]使用大小或亮度变化的图片作为视觉刺激，响度或音调变化的纯音信号作为听觉刺激。结果发现，视觉刺激中大小和亮度的变化会影响听觉上对响度和音高的感知。Epstein 等^[5]研究了不同回放条件以及有无视觉信息时的双耳/单耳响度比。他们发现，耳机回放与扬声器回放得到的双耳/单耳响度比不同，视觉信息也会影响双耳的响度叠加。

本文通过进行对比实验，在响度匹配值和实测耳道口声压级的基础上，分析研究了近场条件下视觉距离感知对于响度的影响。

收稿日期：2019-07-03；修回日期：2019-08-09

作者简介：陈竹书(1991—)，男，江苏苏州人，博士研究生，研究方向为心理声学。

通讯作者：陈竹书，E-mail: 1410579@tongji.edu.cn

1 实验方法

1.1 主体

试听者共 8 人, 编号 A~H, 4 男、4 女, 年龄在 24~28 岁之间, 均为在校学生且听力正常。

1.2 设备

实验在消声室中进行, 以模拟自由场条件。

近场条件下, 如果声源不够小, 头和声源之间的多重散射会影响人耳处的声压。Yu 等^[6]计算发现, 在频率 20 kHz 以内, 要使人耳处声压的误差小于 1 dB, 当声源距离不小于 0.15 m 或 0.20 m 时, 声源半径分别不能超过 0.03 m 或 0.05 m。本实验采用自制的正十二面体声源, 半径约为 0.02 m, 完全满足实验要求。此外, 我们还对声源的指向性进行了测试。结果表明, 当受声点距离为 1 m 时, 在 4 kHz 以下, 声源基本满足无指向性的要求, 不同方向的差异在 0.2 dB 以内。

如果将多个声源安装在不同距离处进行回放, 近处的声源会遮挡远处的声源。因此, 实验中只用一个声源。将声源安装在一个滑轨上, 通过前后滑动来改变声源距离。

实验场景如图 1 所示。试听者坐在椅子上, 面对声源和支架。椅子上有一个头靠来固定头部, 使头部无法自由移动。



图 1 实验场景
Fig.1 The experimental scene

1.3 信号

实验中使用中心频率为 500 Hz、1 kHz 和 2 kHz 的三分之一倍频程的窄带噪声(均由白噪声通过巴特沃兹(Butterworth)滤波器滤波得到)。每个信号时长 2 s, 首尾 20 ms 分别乘以升余弦函数的上升和下降部分, 以消除声压突变。声源中心距头部中心 1 m 处为参考距离, 其他 7 个距离(0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4 和 0.3 m)为测试距离。声源位于参考距离处时, 分别播放 3 种频率的声信号, 并调节其大小使人头中

心处(人不在时)的声压级为 60 dB, 作为 3 种频率的参考信号。参考信号的强度在整个实验过程中保持不变。声源位于测试距离时播放的信号叫做测试信号, 测试信号的强度在实验过程中是不断调整的。

1.4 过程

听觉系统不但能感知响度, 还可以根据接收到的声信号对声源进行距离定位。听觉系统的距离定位主要依靠以下因素^[7]: (1) 声信号强度; (2) 直达/混响声能比; (3) 频谱; (4) 双耳信息; (5) 动态因素。除此之外, 其他非声学因素(例如视觉信息)也可以辅助听觉距离定位。在本实验中, 为了研究视觉距离信息对响度的影响, 就要让试听者无法通过听觉信息来判断距离。

试听者入座后, 测试人员将声源调节至与试听者双耳平齐的高度, 并调节支架位置, 使滑轨位于试听者正前方。

试听者闭上双眼并戴上眼罩后, 无法判断声源距离。这是因为: (1) 实验过程中声源功率是会变化的, 且试听者对声源不熟悉, 无法通过声信号强度来判断距离; (2) 在消声室中没有反射声, 无法通过直达/混响声能比来判断距离; (3) 使用的信号均为窄带噪声, 无法通过频谱变化来判断距离; (4) 由于人头的对称性, 当声源在正前方时, 双耳声级差(Interaural Level Difference, ILD)和双耳时间差(Interaural Time Difference, ITD)都近似为 0, 无法通过双耳信息来判断距离; (5) 头部固定不动, 无法通过动态因素来判断距离。

然后测试人员向试听者简述实验的流程, 试听者用 15 min 熟悉实验流程。

响度匹配开始, 测试人员先播放 1 m 处的参考信号, 时长 2 s, 间隔 1 s 后, 将声源移动至某个测试距离处播放测试信号, 时长 2 s。测试信号的初始强度是在一个范围内随机选取的。试听者需要比较感知到的两个信号的响度。如果试听者认为测试信号更响, 则下次测试将调小测试信号; 如果试听者认为参考信号更响, 则下次将调大测试信号。声压级调节的步距初始为 1 dB, 两次反转之后步距变为 0.2 dB。

最初测试信号的响度明显大于或小于参考信号, 调节测试信号的强度直至试听者认为测试信号与参考信号响度相等(简称等响)。重复此过程至少 3 次, 让试听者确认两个信号等响。最后, 等响时测试信号的增益值的相反数就作为响度匹配的结果。例如, 如果 0.5 m 处匹配响度的结果为 6 dB, 则表示 0.5 m 处的信号增加 -6 dB 后与 1 m 处的参考信号等响; 也可以表示声功率不变的情况下, 声源在 0.5 m 处时比在 1 m 处时响 6 dB。重复上述过程,

分别对3种频率(500 Hz、1 kHz和2 kHz)时,7个距离(0.9、0.8、0.7、0.6、0.5、0.4和0.3 m)处的测试信号都与1 m处的参考信号进行响度匹配。每个试听者完成每个频率1个测试距离的响度匹配约耗时8 min。试听者每天完成1个频率的7个测试距离的实验,约耗时 $8 \times 7 = 56$ min,中间有一次短暂休息。每个试听者3天可完成全部实验。

3天后,所有试听者再进行一轮实验。与之前实验的唯一区别是试听者不再戴眼罩并且睁开双眼,这样他们就可以看见声源知道声源距离。将睁眼和闭眼的两次实验结果进行对比。

2 实验结果

2.1 睁眼、睁眼对比

图2~4分别是8名试听者在睁眼和闭眼条件下对频率为500 Hz、1 kHz和2 kHz声信号进行响度匹配的结果。

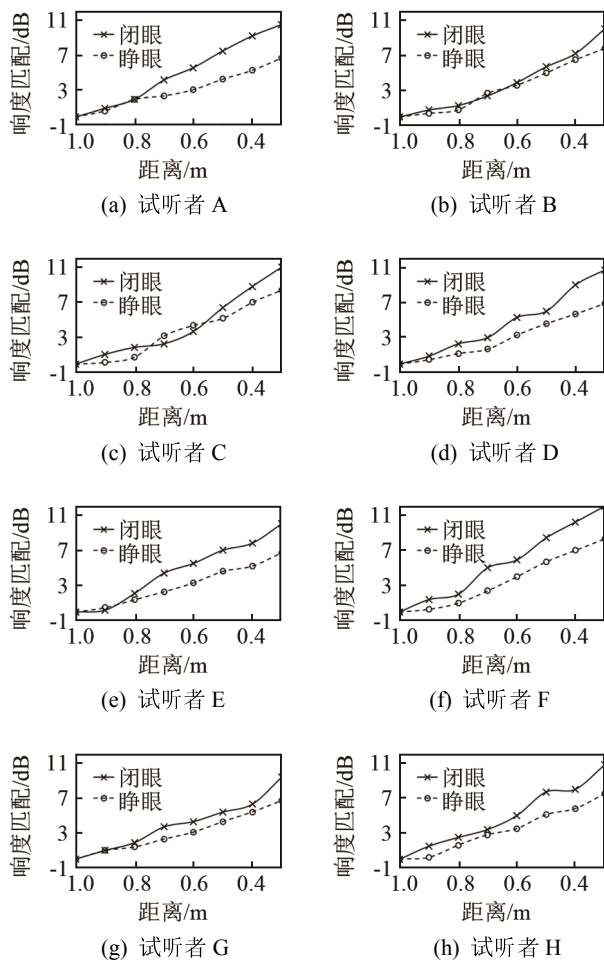


图2 8个试听者睁眼和闭眼条件下500 Hz声信号响度匹配测试结果

Fig.2 The loudness matching results of 8 listeners for 500 Hz sound signal in eyes closing and opening

从图2~4中我们可以看出,响度匹配值总体上随着距离的减小而逐渐增大,这与响度随着距离减小会增大的规律一致。其次,8个试听者的实验结果存在一定的个体差异,这是由于每个人的头部形状不同,从而导致耳道口的声压级也不相同。最后,除了试听者G的对频率1 kHz的声信号的响度匹配的测试结果以外,从图中其他试听者的测试结果可以看出,随着声源的靠近,睁眼时的响度匹配结果要明显小于闭眼时的响度匹配结果。这说明了视觉距离感知对响度的评价是有影响的。

为了进一步分析各个参量对响度匹配结果的影响,分别以眼睛的状态、距离和频率作为因子对全部实验结果做方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)。结果显示,眼睛的状态对响度匹配结果有显著的影响($F(1,7)=17.085, p<0.001$)。距离的影响也极为显著($F(6,42)=295.601, p<0.001$)。而频率则没有显著影响($F(2,14)=2.342, p=0.098$)。

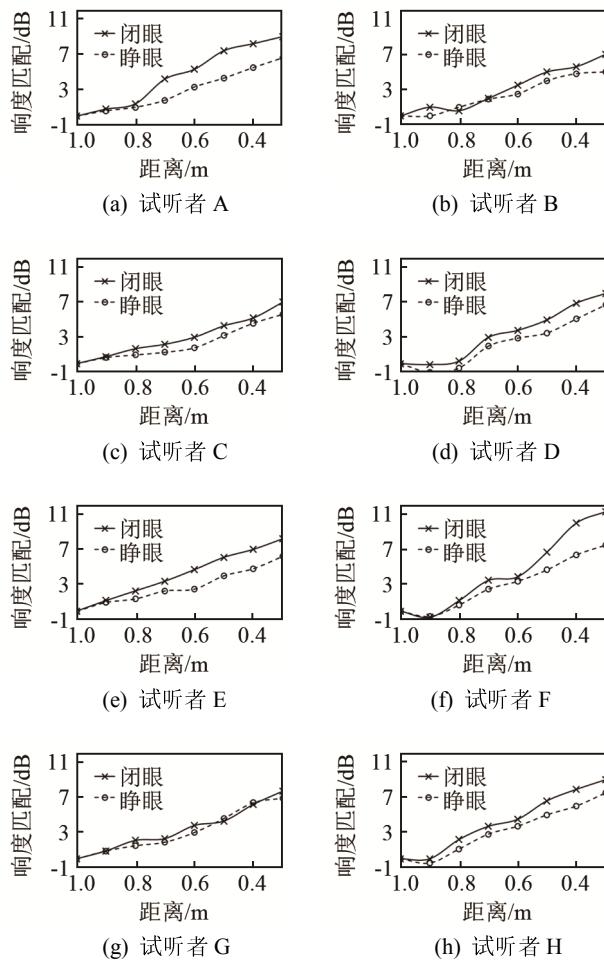


图3 8个试听者睁眼和闭眼条件下1 kHz声信号响度匹配测试结果

Fig.3 The loudness matching results of 8 listeners for 1 kHz sound signal in eyes closing and opening

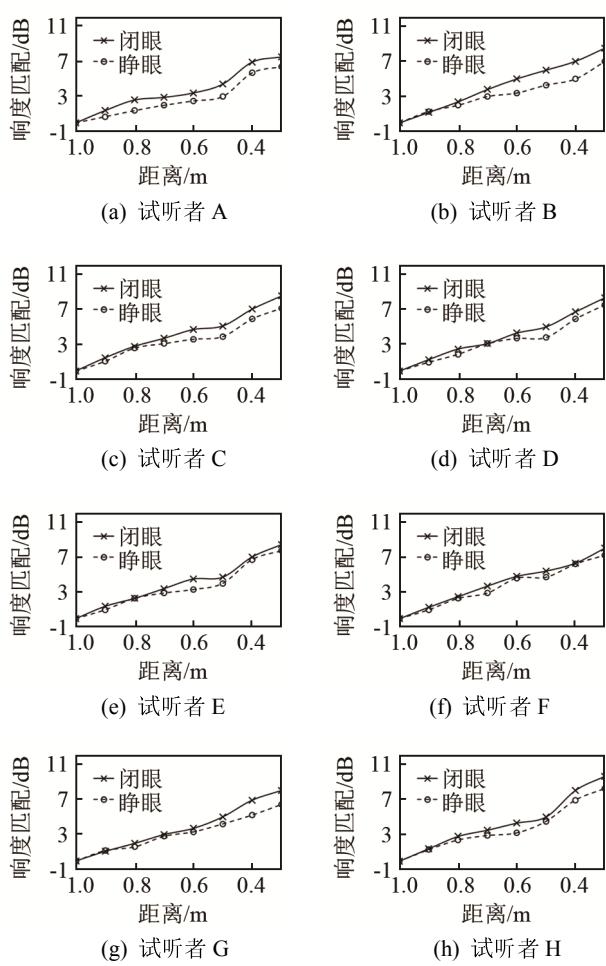


图4 8个试听者睁眼和闭眼条件下2 kHz声信号响度匹配测试结果

Fig.4 The loudness matching results of 8 listeners for 2 kHz sound signal in eyes closing and opening

2.2 响度匹配结果与耳道口声压级实测值比较

本文还研究了响度匹配结果与试听者耳朵处接收到的声压级之间的关系。由于声波在耳道内的传播与声波入射方向无关^[8], 因此一般测量封闭耳道口的声压级进行研究。

首先使声源的声功率恒定, 移动声源到不同距离处, 测量试听者封闭耳道口的声压级。由于人头部的对称性, 声源在正前方时, 左右耳的声压级几乎相同, 可以认为是双耳同音的情况, 因此我们直接对双耳的声压级取平均值来作为测量结果。最后, 用每个声源距离下的测量结果减去参考距离1 m 处的结果, 把两者的差值叫做实测值, 用于与响度匹配结果进行对比。

图5为8个试听者的实测值结果。由图5可以看出, 耳道口的声压级总体上是随着声源距离的减小而增大的。其次, 由于每个人的头部轮廓不同, 实测值的个人差异较大, 这也给出了图2~4中响度匹配结果出现个人差异的原因。

接着, 对8个试听者的耳道口声压级实测值、闭眼响度匹配结果和睁眼响度匹配结果分别进行平均, 结果如图6所示。可以看出, 除了2 kHz的个别几个距离处以外, 实测值与闭眼的响度匹配结果比较一致。这说明了试听者在闭眼情况下, 获取不到声源的距离信息, 主要通过耳道口接收到的声压级来判断响度。而图6中的睁眼响度匹配结果明显小于实测值和闭眼结果, 最大差值超过了3 dB(500 Hz、0.3 m 处), 见图2~4中。

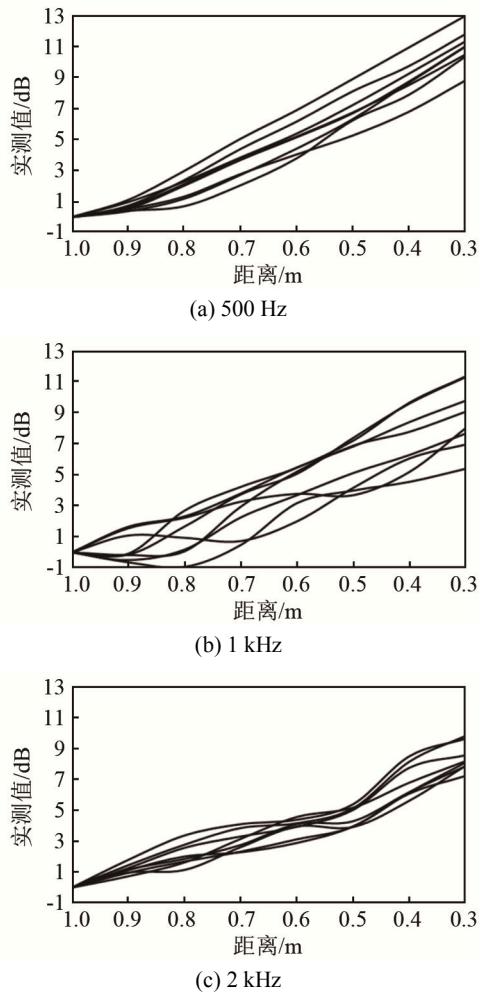


图5 8个试听者耳道口频率为500 Hz、1 kHz和2 kHz声信号相对声压级的实测值

Fig.5 Measured values of relative sound pressure level at the blocked ear canal entrance of eight listeners for 500 Hz, 1 kHz and 2 kHz sound signals

2.3 闭眼/睁眼时响度匹配差值与频率的关系

已知视觉距离感知会对响度匹配结果产生影响, 睁眼时响度匹配结果要小于闭眼时。

图7为闭眼响度匹配结果减去睁眼结果的差值, 可以更直观地反映视觉距离感知对响度产生的影响。首先, 差值是随着距离的减小而增大的, 这说明距离越近, 视觉信息的影响越大。其次, 频率越低, 差值越大: 频率为500 Hz时最大, 频率为1 kHz

时次之，频率为2 kHz时最小。这说明频率越低，视觉距离信息对响度的影响越大。

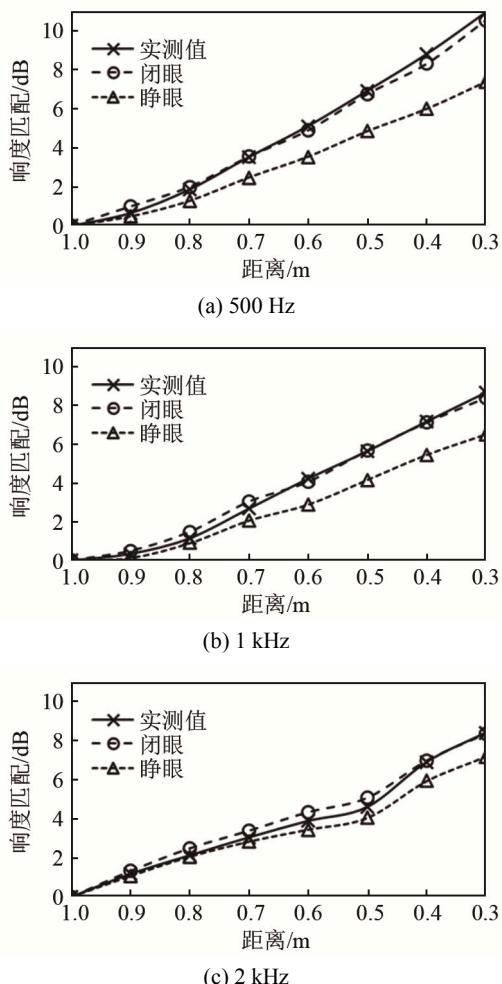


图6 8个试听者耳道口频率为500 Hz、1 kHz和2 kHz声信号相对声压级的实测值的平均值及在闭眼和睁眼情况下的响度匹配测试结果的平均值

Fig.6 Average measured values of relative sound pressure level at the blocked ear canal entrance and the loudness matching results of the eight listeners in eyes closing and opening for 500 Hz, 1 kHz and 2 kHz sound signals

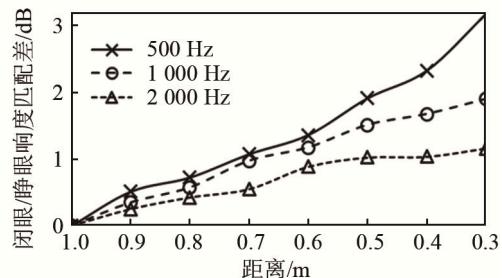


图7 闭眼和睁眼情况下响度匹配结果平均值的差值
Fig.7 Difference between the averaged values of loudness matching results in eyes closing and opening

3 讨论

通过上述实验发现，睁眼时响度匹配的结果小

于闭眼时的结果。这说明视觉的距离信息对响度的评价产生了影响，造成这种影响的原因为：(1)距离感知可能直接影响了响度感知，在大脑中这两个系统直接存在相互影响；(2)当距离减小时，声源看起来变大了，这种视觉刺激会影响响度^[4]；(3)看到声源靠近时，试听者会预感到响度要变大，心理上产生某种保护机制，降低了听到的响度；(4)当距离声源较近时，人可能会产生紧张感、不适感和危险感，这些心理变化可能也会影响响度。除以上几点外，视觉距离感知对响度产生影响可能还有其他的原因，也可能是多种因素共同作用的结果。

4 总结

本文通过对比实验，研究了视觉距离感知对响度的影响。结果表明，近场条件下，当声源靠近时，人耳感受到的响度会变大。闭眼时，试听者无法判断声源距离，只能根据耳朵接收到的声压级来评价响度。随着声源距离的减小，睁眼时的响度增加得要比闭眼时的少一些。这证明了视觉距离感知会对响度评价产生影响，而这种影响最大可以超过3 dB。此外，声信号的频率越低，这种视觉信息带来的影响越大。

参考文献

- [1] FASTL H. Audio-visual interactions in loudness evaluation[C]// Proceedings of the 18th International Congress on Acoustics. Kyoto Japan, 2004, 2: 1161-1166.
- [2] AIZAWA K, KAMOGAWA T, ARIMITSU A, et al. Development of a new loudness model in consideration of audio-visual interaction[C]//INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 2014: 3286-3295.
- [3] KITAGAWA N, ICHIHARA S. Hearing visual motion in depth[J]. Nature, 2002, 416(6877): 172-174.
- [4] SYOURA T, MAMORU I. Effect of size change and brightness change of visual stimuli on loudness perception and pitch perception of auditory stimuli[J]. I-Perception, 2011, 2(8): 64-764.
- [5] EPSTEIN M, FLORENTINE M. Binaural loudness summation for speech presented via earphones and loudspeaker with and without visual cues[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131(5): 3981-3988.
- [6] YU G Z, XIE B S, RAO D. Effect of sound source scattering on measurement of near-field head-related transfer functions[J]. Chinese Physics Letters, 2008, 25(8): 2926.
- [7] ZAHORIK P, BRUNGART D S, BRONKHORST A W. Auditory distance perception in humans: a summary of past and present research[J]. Acta Acustica United with Acustica, 2005, 91(3): 409-420.
- [8] HAMMERSHØI D, MØLLER H. Sound transmission to and within the human ear canal[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1996, 100(1): 408-427.