

扬声器的特性不匹配对虚拟声像的影响*

池水莲 谢菠荪[†] 饶丹

(华南理工大学 理学院物理系 声学研究所 广州 510641)

摘要 本文从理论和实验上探讨了扬声器的特性不匹配对重放虚拟声像的影响。结果表明,用两扬声器进行虚拟听觉重放时,在某些频率段和虚拟声像角度,两扬声器间很小的幅频特性差异或相频特性差异都足以对虚拟声像方向产生明显的影响。扬声器特性的差异对前方范围的声像影响较小,但对侧向范围的声像影响较大,因而两扬声器的特性不匹配也是导致虚拟听觉重放时侧向声像位置畸变的重要原因之一。而在实际应用中要特别注意两扬声器的特性匹配,或者要用信号处理的方法对两扬声器的特性进行校正。

关键词 虚拟听觉, 扬声器, 不匹配

Effect of mismatched loudspeaker pair on virtual sound image

CHI Shui-Lian XIE Bo-Sun RAO Dan

(South China University of Technology, School of Physics, Acoustic Lab., Guangzhou 510641)

Abstract The effects of mismatched loudspeaker pair on virtual sound image are investigated by theoretical analysis and experiment. It is proved that, for virtual auditory display with two loudspeakers, at some frequency and direction, a slight magnitude or phase mismatch between the two loudspeakers will result in an obvious directional distortion of sound image. The effect of mismatched loudspeaker pair on the front sound image is trivial, but that on lateral sound image is notable. Therefore, a mismatch in the loudspeaker pair is one of the reasons for lateral image directional distortion in virtual auditory. In practical use of virtual auditory display, the loudspeaker pair should be matched carefully, or alternatively, equalized by signal processing.

Key words Virtual auditory, Loudspeakers, Mismatch

1 引言

虚拟听觉利用头相关传输函数(HRTF)进行信号处理,模拟出空间声源到达双耳处的声音信号,再用耳机或经过串声消除后用

扬声器重放,从而在听觉上虚拟出相应的空间声像。对于常用的虚拟听觉信号的两扬声器重放,虽然存在一定的缺陷,如听音区域窄、只能产生前半水平面的声像而不能产生后半水平面的声像等,但由于系统具有结构

2008-01-31 收稿; 2008-05-30 定稿

*国家自然科学基金资助项目(编号: 10774049)和广州市科技计划项目(2005-Z3-D0071)

作者简介:池水莲(1979-),女,广东人,硕士,工程师,研究方向:虚拟声学。

谢菠荪(1960-),男,教授,博士生导师。

饶丹(1973-),男,讲师。

[†]通讯作者:谢菠荪, E-mail: phbsxie@scut.edu.cn

简单、声像清晰、自然等一系列的优点,所以在多媒体与虚拟现实、家用声重放等领域有重要的应用前景,并且也是目前国际上的热门研究课题^[1]。

对于虚拟声的两扬声器重放,许多研究都是假定两个扬声器的特性(包括幅频特性和相频特性)是完全一致的,这当然是一种理想的情况。在许多实际中,特别是大规模的生产应用中,要求两个扬声器的特性完全一致是困难的,两扬声器的特性可能会存在一定的偏差。这些偏差可能会对重放的虚拟声像定位有影响,但目前的文献中,未见有关于扬声器的特性不匹配对虚拟声像定位影响的定量研究结果。

在以下的讨论中,首先通过理论计算,分析了两重放扬声器的幅频或相频特性差异对虚拟声像定位的影响,再通过声像定位的心理声学实验对理论结果进行验证。

2 理论分析

2.1 虚拟听觉信号的两扬声器重放

水平面内坐标取为 $-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$,其中 $\theta = 0^\circ$ 为正前方, $\theta = 90^\circ$ 为正右方。如图1所示,设方位角为 θ 的点声源到左、右耳的头相关传输函数(HRTF)分别为 $H_L(\theta, f)$ 和 $H_R(\theta, f)$,按HRTF的定义^[1],在自由场情况下,简谐点声源在双耳产生的声压为:

$$P_L = H_L(\theta, f)P_0 \quad P_R = H_R(\theta, f)P_0 \quad (1)$$

其中 P_0 是头移开后点声源在原头中心位置处的频域复数声压。

由(1)式可得到点声源所产生的双耳声压的时间差ITD(按相延时定义)和双耳声压的声级差ILD^[1]:

$$ITD(\theta, f) = -\frac{\arg H_L(\theta, f) - \arg H_R(\theta, f)}{2\pi f} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} ILD(\theta, f) &= 20 \log_{10} \left| \frac{P_R(\theta, f)}{P_L(\theta, f)} \right| \\ &= 20 \log_{10} \left| \frac{H_R(\theta, f)}{H_L(\theta, f)} \right| \quad (\text{dB}) \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $\arg$ 表示计算展开(unwrapped)相位。ITD>0 表示右耳声压的相位超前于左耳声压的相位,而ILD>0表示右耳声压的幅度大于左耳声压的幅度,ITD<0和ILD<0的情况则正好相反。

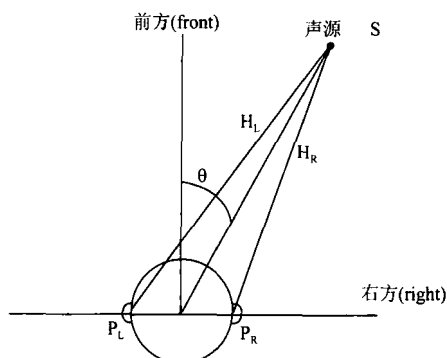


图1 单声源的情况

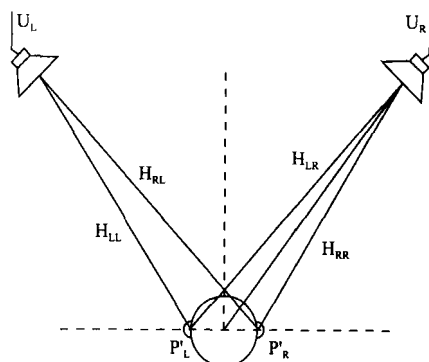


图2 两扬声器重放

对于两扬声器虚拟听觉重放,如图2所示,假设左、右扬声器到双耳的四个频域传输函数(HRTF)分别为 H_{LL} 、 H_{RL} 、 H_{LR} 和 H_{RR} ,并假设左、右对称性,即有 $H_{LL} = H_{RR} = \alpha$, $H_{LR} = H_{RL} = \beta$ 。如果馈给两扬声器的信号分别为 U_L 和 U_R ,并假设两扬声器由电信号到自由声场输出声压的传输函数分别为 $Y_L(f)$ 和

$Y_R(f)$, 则重放产生的双耳叠加声压为:

$$\begin{aligned} P_L' &= H_{LL}Y_L(f)U_L + H_{LR}Y_R(f)U_R \\ &= \alpha Y_L(f)U_L + \beta Y_R(f)U_R \\ P_R' &= H_{RL}Y_L(f)U_L + H_{RR}Y_R(f)U_R \\ &= \beta Y_L(f)U_L + \alpha Y_R(f)U_R \end{aligned} \quad (4)$$

对包含功率均衡的虚拟声像信号处理^[2,3], 将单通路频域信号 E_0 按下式处理后得到两扬声器的输入电信号 U_L 和 U_R :

$$\begin{aligned} U_L &= G_L(\theta, f)E_0 \quad U_R = G_R(\theta, f)E_0 \\ G_L(\theta, f) &= \frac{\alpha H_L - \beta H_R}{\sqrt{|\alpha H_L - \beta H_R|^2 + |-\beta H_L + \alpha H_R|^2}} \frac{|\alpha^2 - \beta^2|}{\alpha^2 - \beta^2} \\ G_R(\theta, f) &= \frac{-\beta H_L + \alpha H_R}{\sqrt{|\alpha H_L - \beta H_R|^2 + |-\beta H_L + \alpha H_R|^2}} \frac{|\alpha^2 - \beta^2|}{\alpha^2 - \beta^2} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 H_L 、 H_R 同 (1) 式, G_L 和 G_R 分别可看成两扬声器虚拟声重放系统中由单通路信号输入到左、右扬声器电信号输入的传输函数。假设两扬声器具有理想的传输特性, 且其传输特性完全一致, 即 $Y_L(f) = Y_R(f) = \text{常量}$, 由于在扬声器重放中, ITD 和 ILD 是两个主要的定位因素, 可以证明, 对 (5) 式的重放信号, 由 (4) 式的双耳声压计算得到的双耳时间差 ITD 和双耳声级差 ILD 和 (2)、(3) 式给出的单一点声源的情况完全相同, 因而两扬声器重放可在听觉上产生 θ 方向上的虚拟声像。这就是两扬声器虚拟声像的基本原理。

2.2 两扬声器特性不匹配时虚拟声像的分析

上面的讨论是假定两重放扬声器具有理想的传输特性, 并且是完全一致的, 信号处理的 (4) 和 (5) 式也是在此假设上得到的。即使重放扬声器不具备理想的传输特性 (传输函数不等于常量), 只要其传输特性完全一致, 即 $Y_L(f) = Y_R(f)$, 则重放产生的 ITD 和 ILD 也和上面讨论的理想情况相同, 不会影响重放的声像方向而只会影响重放的音色。但是当左、右扬声器的特性不匹配时, 即 $Y_L(f) \neq Y_R(f)$, 则会对重放的声像方向产生影响。假设

两扬声器的传输函数之比为:

$$D(f) = \frac{Y_R(f)}{Y_L(f)} \quad (6)$$

则:

$$d(f) = 20 \log_{10} |D(f)| = 20 \log_{10} \left| \frac{Y_R(f)}{Y_L(f)} \right| \quad (7)$$

表示两扬声器的幅频特性差异, 即电声转换灵敏度幅度差异。 $d(f) > 0$ 表示右扬声器的灵敏度幅度大于左扬声器的灵敏度幅度, $d(f) < 0$ 的情况则正好相反。而

$$\begin{aligned} \Delta\psi(f) &= \arg D(f) \\ &= \arg Y_R(f) - \arg Y_L(f) \end{aligned} \quad (8)$$

表示两扬声器的相频特性差异。 $\Delta\psi(f) > 0$ 表示右扬声器的相位超前于左扬声器的相位, $\Delta\psi(f) < 0$ 的情况则正好相反。在完全匹配的情况下, 应该有 $d(f) = 0 \text{ dB}$, $\Delta\psi(f) = 0$ 。

为了分析两扬声器特性不匹配时的虚拟声像方向, 需要计算声重放产生的双耳时间差 ITD 和双耳声级差 ILD, 并和单声源的情况比较。这里采用相关分析法^[4]计算 ITD, 这是因为相关分析法更接近听觉系统对声信号的分析过程^[5], 且对于窄带信号 (如 1/3 倍频程噪声), 相关分析法得到的 ITD 与 (2) 式给出的按双耳声压相延时定义的 ITD 非常接近。

通过计算双耳时域声压 $p_L(t)$ 、 $p_R(t)$ 的归一化互相关函数:

$$\Phi_{LR}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p_L(t+\tau) p_R(t) dt}{\left\{ \left[\int_{-\infty}^{+\infty} p_L^2(t) dt \right] \left[\int_{-\infty}^{+\infty} p_R^2(t) dt \right] \right\}^{1/2}} \quad (9)$$

或利用傅里叶分析, 将上式转换到频域计算:

$$\Phi_{LR}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} P_L(f) P_R^*(f) \exp(j2\pi f\tau) df}{\left\{ \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |P_L(f)|^2 df \right] \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |P_R(f)|^2 df \right] \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

其中 $P_L(f)$ 和 $P_R(f)$ 分别为左、右耳的频域声

压, 对单声源和两扬声器重放的情况, 分别由(1)和(4)式给出。而上标符号“*”表示复数共轭。按定义, $0 \leq |\Phi_{LR}(\tau)| \leq 1$ 。由上式可计算出函数 $\Phi_{LR}(\tau)$ 在 $|\tau| \leq 1$ ms 范围内的最大值, 与此相应的 $\tau = \tau_{\max}$ 即为相关法得到的双耳时间差 ITD, 即:

$$ITD = \tau_{\max} \quad (11)$$

上式之所以取 $\Phi_{LR}(\tau)$ 在 $|\tau| \leq 1$ ms 范围内的最大值所对应的 τ 来得到 ITD 值, 是因为由头部尺寸决定的最大 $|ITD|$ (当 $\theta = \pm 90^\circ$ 时) 一般不可能超过 1 ms^[1]。

同样, 由 $P_L(f)$ 和 $P_R(f)$ 也可以计算出单声源和两扬声器重放的双耳声级差:

$$ILD = 10 \log_{10} \left[\frac{\int |P_R(f)|^2 df}{\int |P_L(f)|^2 df} \right] \quad (12)$$

根据心理声学的研究结果^[5,6], 在 $f \leq 1.5$ kHz 的中低频的情况下, 双耳时间差 ITD 是声源(像)定位的主要因素, 双耳声级差 ILD 主要是影响重放声像的自然度。在此频率范围内, 可以根据 ITD 分析声像方向。但必须注意, 在虚拟听觉重放中, 当 ITD 一定时, ILD 与单声源的情况差别越大, 声像自然度越低; 当这种差别太大时, 会出现非常不自然(在头内或头部附近)的声像, 甚至不能形成确定位置的声像。这时可采用以下的方法对 ($f \leq 1.5$ kHz) 重放声像进行分析:

(1) 给定声源信号特性, 由(1)式和(10)式, 可计算出不同方向 θ 的单声源的双耳声压归一化互相关函数, 记为 $\Phi_{LR}(\theta, \tau)$, 并由此得到它在 $|\tau| \leq 1$ ms 范围内的最大值, 且得到(11)式的 $ITD_1(\theta)$, 它表示单声源产生的双耳时间差。另外, 根据由(1)及(12)式, 计算出不同 θ 的单声源所产生的双耳声级差 ILD_1 。

(2) 对两扬声器的虚拟听觉重放系统, 按(5)式给定重放信号, 并且给定两重放扬声器的传输函数 $Y_L(f)$ 和 $Y_R(f)$, 或给出两扬声器

的幅频特性和相频特性的差异, 也就是(7)式 $d(f)$ 和(8)式的 $\Delta\psi(f)$, 代入(4)式得到重放产生的双耳叠加声压 P_L' 和 P_R' , 再分别由(10)式和(12)式, 计算得到重放产生的双耳时间差 ITD_2 和双耳声级差 ILD_2 。

(3) 将两扬声器重放的 ITD_2 与单声源的 $ITD_1(\theta)$ 对比, 可得到重放声像方向的初步估算值 θ_1 。

(4) 在双耳时间差相同(也就是令 $ITD_1 = ITD_2$) 的条件下, 将两扬声器重放的 ILD_2 与单声源情况的 ILD_1 相比较, 然后利用 Nakabayashi 等人所提出的方法, 可进一步(半定量地)验证重放的声像的自然度和方向^[7]。Nakabayashi 等人提出立体声像的自然度可分为 A, B, C, D, E 五个等级, 并通过心理声学实验研究, 证明了声像的自然度(主观评价量)与 $\Delta ILD = |ILD_1 - ILD_2|$ (客观物理量) 有如下近似的关系:

A. 声像自然——当 $\Delta ILD \approx 0$ dB 时(当 $\Delta ILD \leq 1$ dB 时, 可近似作为这种情况), 立体声重放的双耳声级差与单声源的情况(近似)相同, 声像在听觉上与单声源几乎完全一样。

B. 声像稍有不自然—— $1 \text{ dB} < \Delta ILD < 6-7 \text{ dB}$

C. 声像不自然—— $6-7 \text{ dB} < \Delta ILD < 16-18 \text{ dB}$

D. 声像十分不自然—— $\Delta ILD > 16-18 \text{ dB}$

E. 声像极端不自然——这时听觉系统不能定位。

3 计算结果与讨论

本文的分析及实验中, 所用到的 HRTF 数据是 MIT 媒体实验室在 KEMAR 人工头上测量所得到的^[8]。MIT 媒体实验室给出的是 HRTF 的时域形式, 即头相关脉冲响应 HRIR,

其采样频率为 44.1 kHz, 长度为 512 点, 量化精度为 16bit。受测量用小型扬声器低频特性的限制, MIT 媒体实验室给出的 HRTF 的有效下限频率大约为 120 Hz。在此频率以下, HRTF 幅度开始衰减, 且相位特性也有较大的误差。因此我们采用刚球模型的计算结果对 HRTF 的低频特性进行了补偿, 具体的原理和方法见文献^[9]。

一般情况下, 一对不匹配的扬声器可能同时存在幅频与相频特性的差异, 但为简单起见, 这里讨论只存在幅频特性差异或只存在相频特性差异的情况。在下面的讨论中, 假设两扬声器分别布置在前方 $\pm 15^\circ$ 的方向, 其张角较传统的 $\pm 30^\circ$ 标准立体声扬声器布置为窄。采用 $\pm 15^\circ$ 的扬声器布置是因为其重放声像较传统

的布置稳定^[2], 更便于心理学实验验证。而从实际应用的角度考虑, 我们课题组所提出的 5.1 通路环绕声的虚拟重放系统也是采用 $\pm 15^\circ$ 的扬声器布置, 这更适合电视和多媒体计算机的应用。而分析所用的声音信号包括中心频率 f_0 分别为 125 Hz、250 Hz、500 Hz 和 1000 Hz 的 1/3 倍频程窄带噪声。

3.1 两扬声器存在电声转换灵敏度幅度差异的情况

图 3 给出了根据双耳时间差 ITD 初步估算得到的, 两扬声器存在电声转换灵敏度幅度差异时, 对不同中心频率 f_0 的 1/3 倍频程噪声信号、不同的信号处理设定声像方向 θ_s , 实际的声像方向 θ_l 随(7)式给出的两扬声器电声转换灵敏度幅度差 d 的变化关系曲线。

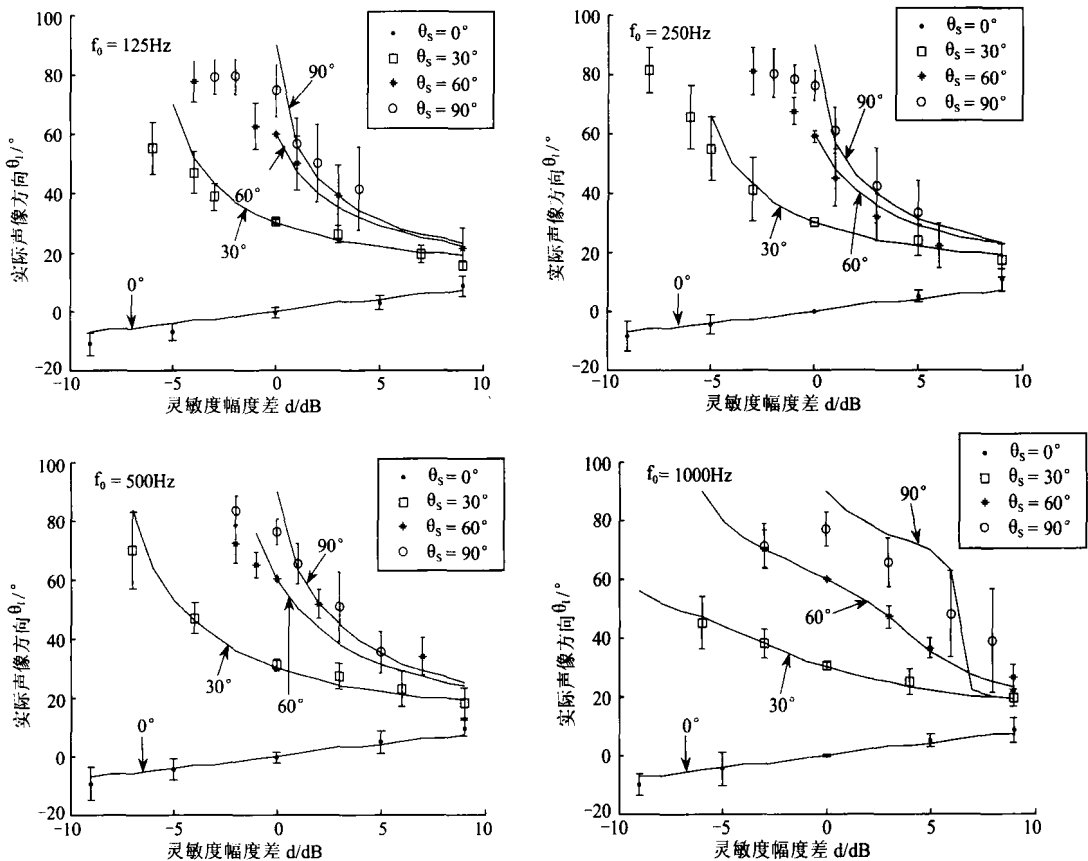


图 3 实际声像方向 θ_l 与两扬声器电声转换灵敏度幅度差 d (dB)的关系曲线
(曲线为理论值, 点或其它符号为实验值, 见后)

可以看出, 各个频段的 θ_l 随 d 的变化规律是类似的:

(1) 当两扬声器的幅频特性完全一致使得 $d = 0$ dB 时, $\theta_l = \theta_s$ 而没有声像方向畸变。

(2) 当 $d > 0$ dB, 也就是右扬声器的电声转换灵敏度大于左扬声器的电声转换灵敏度时, 设定方向为 $0^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ$ 的右前四分之一象限的声像都向着右扬声器的方向 ($\theta = 15^\circ$) 移动, d 越大, 移动越明显; 例如, 对 $f_0 = 500$ Hz, $d = 3$ dB, $\theta_s = 0^\circ$ 和 90° 的声像分别移动到 $\theta_l = 3^\circ$ 和 45° 。

(3) 当 $d < 0$ dB, 也就是左扬声器的电声转换灵敏度大于右扬声器的电声转换灵敏度时, $0^\circ \leq \theta_s < 15^\circ$ 的扬声器界内声像向着左扬声器的方向移动; $|d|$ 越大, 声像 θ_l 移动的角度越大; 当 $|d|$ 超过一定的值时, 声像会出现在左方 $\theta_l < 0^\circ$ 的方向。例如, 对 $f_0 = 500$ Hz,

$d = -3$ dB, $\theta_s = 0^\circ$ 的声像移动到 $\theta_l = -3^\circ$ 。而 $15^\circ < \theta_s < 90^\circ$ 的扬声器界外声像向着 $\theta = 90^\circ$ 的方向移动, $|d|$ 越大, 声像 θ_l 移动的角度越大; 当 $|d|$ 超过一定的值时, 可能会出现两扬声器重放产生的 ITD 大于水平面内 ($\theta = 90^\circ$) 单声源所能产生的最大 ITD, 这时不能用 ITD 计算出 θ_l (因而图中曲线也没有画出)。在实际倾听中, 这可能会有两种情况: 其一, 听觉上无确定声像位置; 其二, 听觉系统错觉成空间某一位置的声像, 但由于双耳处的声波与单声源的情况有较大的差别, 因而这种听觉错觉产生的声像的自然度是不佳的。

(4) 由左右对称性, 不难对设定方向为 $-90^\circ \leq \theta_s \leq 0^\circ$ 的左前四分之一象限的声像进行分析。

3.2 两扬声器存在相位差的情况

图 4 给出了根据双耳时间差 ITD 初步估

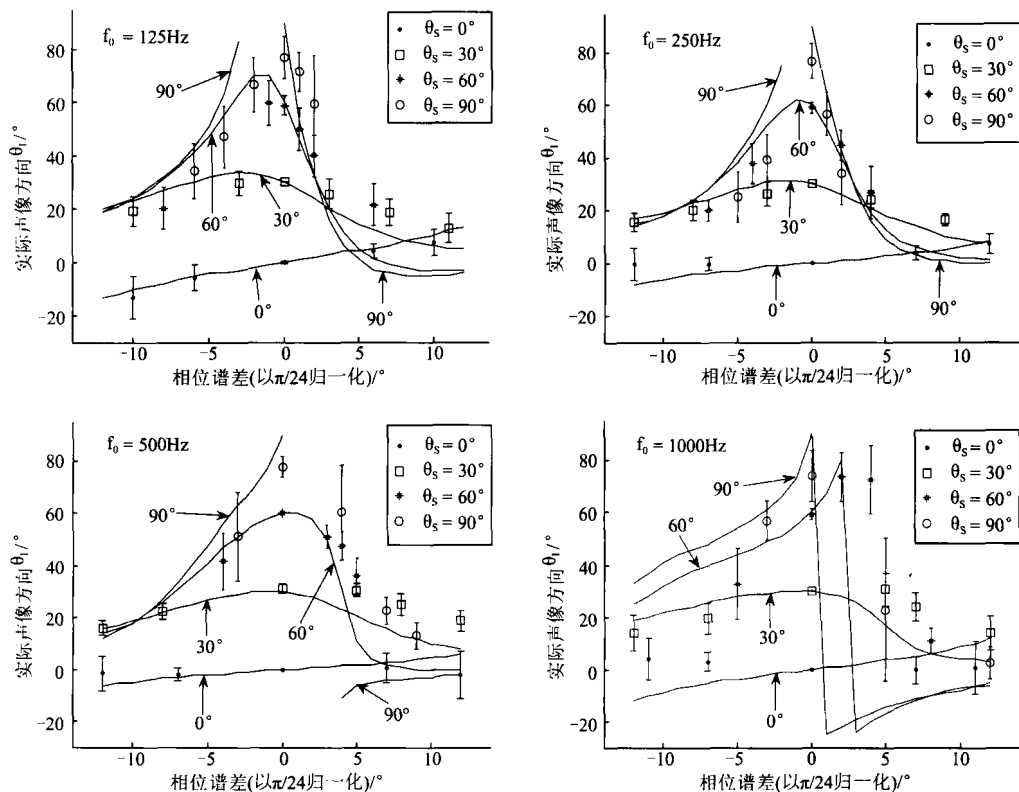


图 4 实际声像方向 θ_l 与两扬声器相位谱差 $\Delta\psi$ 的关系曲线
(曲线为理论值, 点或其它符号为实验值, 见后)

算得到的, 两扬声器存在相频特性差异时, 对不同中心频率 f_0 的 $1/3$ 倍频程噪声信号、不同的信号处理设定声像方向 θ_s , 实际的声像方向 θ_l 随(8)式给出的两扬声器相位谱差 $\Delta\psi$ (以 $\pi/24$ 进行归一化) 的变化关系曲线。

由图可以看出:

(1) 当两扬声器的相频特性完全一致使得 $\Delta\psi = 0$ 时, $\theta_l = \theta_s$ 而没有声像方向畸变。

(2) 当 $\Delta\psi \neq 0$ 时, 对设定方向 $0^\circ \leq \theta_s < 15^\circ$ 的扬声器界内声像, 它向着相位超前的扬声器方向移动; 也就是当右扬声器的相位超前使得 $\Delta\psi > 0$ 时, 声像向着右扬声器的方向 ($\theta = 15^\circ$) 移动; 反之, 当 $\Delta\psi < 0$ 时, 声像向着左扬声器的方向 ($\theta = -15^\circ$) 移动; $|\Delta\psi|$ 越大, 声像的移动越明显。例如, 对 $f_0 = 500$ Hz, $\theta_s = 0^\circ$ 的声像, $\Delta\psi = 7\pi/24$ 时移动到 $\theta_l = 3^\circ$; $\Delta\psi = -7\pi/24$ 时移动到 $\theta_l = -3^\circ$ 。

(3) 当 $\Delta\psi \neq 0$ 时, 对设定方向 $15^\circ < \theta_s \leq 90^\circ$ 右前四分之一象限的扬声器界外声像, 情况稍为复杂。其中对 $f_0 = 125$ Hz、 250 Hz 的不同角度虚拟声像, $f_0 = 500$ Hz 的 $\theta_s = 30^\circ$ 和 60° 虚拟声像, 以及 $f_0 = 1000$ Hz 的 $\theta_s = 30^\circ$ 虚拟声像, 其变化规律大体是一致的。无论右方扬声器的相位超前 ($\Delta\psi > 0$) 或落后 ($\Delta\psi < 0$), 声像都向着右扬声器 ($\theta = 15^\circ$) 的方向移动, $|\Delta\psi|$ 越大, 声像的移动越明显。而对 $f_0 = 500$ Hz 的 $\theta_s = 90^\circ$ 和 $f_0 = 1000$ Hz 的 $\theta_s = 60^\circ$ 或 90° 虚拟声像, 在 $\Delta\psi = 0$ 的两边, 声像方向 θ_l 出现跳变, 甚至有可能出现两扬声器重放产生的 ITD 大于水平面内 ($\theta = 90^\circ$) 单声源所能产生的最大 ITD 的情况, 这时不能用 ITD 计算出 θ_l 。

(4) 由左右对称性, 不难对设定方向为 $-90^\circ \leq \theta_s \leq 0^\circ$ 的左前四分之一象限的声像进行分析。

3.3 计算结果的进一步分析

由以上的分析可看出, 两扬声器特性不

匹配对不同频段声像的影响有所不同, 而对于不同设定方向 θ_s 的声像影响的程度区别更大。总的来说, 扬声器的特性差异对前方范围的声像方向影响较小, 对侧向范围的声像方向影响较大。例如对中心频率 $f_0 = 500$ Hz 的信号, 当两扬声器存在幅频特性差异, 且 $d = 1$ dB (右扬声器的电声转换灵敏度大于左扬声器的电声转换灵敏度) 时, $\theta_s = 30^\circ$ 的虚拟声像移动到 $\theta_l = 28^\circ$, 声像移动了 $\Delta\theta = \theta_s - \theta_l = 2^\circ$; $\theta_s = 60^\circ$ 的虚拟声像移动到 $\theta_l = 50^\circ$, $\Delta\theta = 10^\circ$; 而 $\theta_s = 90^\circ$ 虚拟声像移动到 $\theta_l = 63^\circ$, $\Delta\theta = 27^\circ$ 。

同样对中心频率 $f_0 = 500$ Hz 的信号, 当两扬声器存在相频特性差异, 且 $\Delta\psi = -\pi/24$ (左扬声器的相位超前于右扬声器的相位) 时, $\theta_s = 30^\circ$ 的虚拟声像保持 $\theta_l \approx 30^\circ$ 不变, 声像移动 $\Delta\theta = \theta_s - \theta_l \approx 0^\circ$; $\theta_s = 60^\circ$ 的虚拟声像移动到 $\theta_l = 58^\circ$, $\Delta\theta = 2^\circ$; 而 $\theta_s = 90^\circ$ 虚拟声像移动到 $\theta_l = 77^\circ$, $\Delta\theta = 13^\circ$ 。

特别是对于某些频率 f_0 及设定虚拟声角度 θ_s , 即使两扬声器的幅频或相频特性有很小的差异, 都有可能对重放声像方向产生的大的影响。例如对于 $f_0 = 500$ Hz, $\theta_s = 90^\circ$ 的情况, 当 $d = -1$ dB 或 $\Delta\psi = \pi/24$ 时, 都导致两扬声器重放的 ITD 大于水平面内 ($\theta = 90^\circ$) 单声源所能产生的最大 ITD 的不确定情况。

过去的一些实验研究已经发现, 采用前方两扬声器重放虚拟声像时经常有较大的侧向声像方向畸变^[10]。而理论和实验分析已表明, 侧向声像方向畸变的一个重要原因是信号处理的 HRTF 与倾听者的实际 HRTF 不匹配(头部尺寸的不同)^[11]。其后的分析也表明, 如果倾听中头部绕垂直轴转动(实际情况经常是如此), 则会加重侧向声像方向的畸变, 这是两扬声器重放中侧向声像方向畸变的第二个原因^[12]。而上面的分析表明, 两重放扬声器特性的微小差异是侧向声像方向畸

变的第三个原因。

上面只是利用 ITD 对重放声像的方向进行分析。实际上,当两重放扬声器特性不匹配时,还有可能导致虚拟声重放时的双耳声级差 ILD 与单声源的 ILD 差值较大,使声像的自然度降低。例如对于中心频率 $f_0 = 1000\text{Hz}$ 的信号,设定方向 $\theta_s = 90^\circ$,当两扬声器的相位差 $\Delta\psi = 5\pi/24$ 时,计算得到重放产生的双耳声级差 $ILD_2 = 6.0\text{ dB}$,由 ITD 得到的实际声像方向 $\theta_1 = -14^\circ$;而该方向的单声源产生的双耳声级差 $ILD_1 = -4.0\text{ dB}$ 。因而虚拟声像的 ILD 与单声源所产生的 ILD 是相反的,且它们之间的差别 $\Delta ILD = |\Delta ILD_1 - \Delta ILD_2| = 10\text{ dB}$ 。按照前面 2.2 小节最后的讨论,这是属于重放声像不自然(C 级)的情况。

所以在虚拟听觉重放时要尽量避免两扬声器特性的不匹配。在实际应用中,如果两扬声器仅存在电声转换灵敏度幅度差且是与频率无关,即 (7) 式的 $d(f) = \text{常数} \neq 0\text{ dB}$,则可通过调节放大器的通路平衡电位器给予校正。否则对 $d(f) \neq \text{常数}$ 或存在相位差的情况,则需要采用信号处理的方法给予校正。

4 实验验证

为了验证上面的理论分析,进行了声像定位实验,由于理论分析的数据量很大,所以只是选取了某些数据点进行验证性的实验。首先在多媒体计算机中用软件产生中心频率 f_0 分别为 125Hz、250 Hz、500 Hz 和 1000 Hz 的单通路 1/3 倍频程窄带噪声信号(44.1 kHz 采样,16 bit 量化),然后用 matlab 编制的软件将单路声频信号按(5)式处理得到设定方向 $\theta_s = 0^\circ$ 、 30° 、 60° 和 90° 的理想左、右扬声器重放信号 U_L 和 U_R 。为了模拟两扬声

器幅频或相频特性不匹配的情况,用信号处理的方法人工改变信号 U_L 和 U_R 之一的幅度或相位,得到信号 U_L' 或 U_R' ,它们经声卡进行 D/A 转换后,再经前置放大器后,用有源监听扬声器进行重放。

实验是在一间混响时间为 0.15 s 的听音室内进行,扬声器布置在半径为 2.0 m 的圆周上 $\pm 15^\circ$ 的位置,而圆周上每隔 5° 作一标记,帮助倾听者判定声像方向。实验所用的扬声器是 Genelec 1032A。在消声室内的测量表明,在中心频率 f_0 分别为 125Hz、250 Hz、500 Hz 和 1000 Hz 的 1/3 倍频程范围内,左、右扬声器的电声转换灵敏度幅度差分别是 0.1dB、0.3 dB、0.1 dB 和 0.2 dB,相位差均不大于 0.01π 。因此对于本文的研究,除了 250 Hz 的幅频特性差异稍大外,基本上可以认为左、右扬声器的本身特性是匹配的,所以可通过信号处理的方法较准确地模拟两扬声器幅频或相频特性不匹配的情况。

实验让倾听者判断感知的声像方向。共 8 个倾听者(4 男 4 女),将他们的倾听结果(声像方向的角度)剔除异常数据以后计算平均值作为最后的实验结果,并算出相应的标准差 σ 。

实验结果如图 3 和图 4 中一些符号所示,可以看出,实验结果与利用 ITD 估计得到的分析结果大体相符。但也存在有一定偏差的情况。例如,对于中心频率 $f_0 = 1000\text{Hz}$ 的信号,设定方向 $\theta_s = 90^\circ$,当两扬声器的对数幅度差 $d = 6\text{ dB}$ 时,理论计算得到的声像方向 $\theta_1 = 63^\circ$,而实验得到的声像方向 $\theta_1 = 48^\circ$ 。事实上,由图 3 可以看出,在 $d = 6\text{ dB}$ 附近,理论计算得到的 θ_1 随 d 变化很快,近似于跃变的情况。微小的干扰都有可能引起大的 θ_1 变化,因而导致理论与实验存在较大的偏差。对图 4 给出的两扬声器存在相频特性差异的情况,也存在类似的问题。

5 结论

上面的理论和实验分析表明, 用两扬声器进行虚拟听觉重放时, 只有左、右扬声器的特性完全匹配时, 重放的声像效果最为理想。而两扬声器的幅频和相频特性差异都会对重放声像产生影响, 其中对前方范围的声像方向影响较小, 而对侧向范围的声像方向影响较大。因此两扬声器的特性不匹配也是导致虚拟听觉重放时侧向声像位置畸变的重要原因之一。在某些频率段和虚拟声像方向, 两扬声器微小的幅频特性差异(1 dB 的量级)或微小的相频特性差异($\pi/24$ 的量级)都足以对侧向虚拟声像产生明显的影响。因此, 实际应用中要特别注意两扬声器的特性匹配, 或者要用信号处理的方法对两扬声器的特性进行校正。

本文只研究了两扬声器的幅频特性差异或相频特性差异对虚拟重放的影响, 而同时存在幅频特性差异或相频特性差异的情况将更复杂, 有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 谢波荪. 头相关传输函数与虚拟听觉. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [2] 谢波荪, 师勇, 谢志文, 等. 5.1 通路环绕声的虚拟重放系统. 声学学报, 2005, 30 (3): 235-241.
- [3] 何璞, 谢波荪, 饶丹. 虚拟声音色均衡信号处理方法的主客观分析. 应用声学, 2006, 25 (1): 4-12.
- [4] 谢波荪. 立体声和环绕声像的相关分析. 同济大学学报. 1999, 27(3): 361-365.
- [5] Blauert J. Spatial hearing. MIT Press, Cambridge, MA, 1983.
- [6] Wightman F.L., Kistler D.J. The dominant role of low-frequency interaural time difference in sound localization. J. Acoust. Soc. Am., 1992, 91(3): 1648-1661.
- [7] Nakabayashi K. A. method of analyzing the quadrasonic sound field. J.Audio Eng.Soc., 1975, 23(3): 187-193.
- [8] Gardner W. G. Martin K. D. HRTF measurements of a KEMAR. J Acoust.Soc.Am., 1995,97(6): 3907-3908.
- [9] 谢波荪. 头相关传输函数的低频特性. 声学学报, 2008, 33(6): 504-511.
- [10] Nelson P.A., Bustamante O.F., Engler, E., et.al. Experiments on a system for synthesis of virtual acoustic sources. J.Audio Eng.Soc., 1996, 44 (11): 990-1007.
- [11] 谢波荪. 头部尺寸对虚拟声像定位的影响, 应用声学, 2002, 21(5): 1-7.
- [12] 谢波荪. 头部转动与虚拟声像的稳定性, 电声技术, 2005(6): 56-59.