

◇ 研究报告 ◇

相位均衡对耳机重放的影响*

李光炬^{1,2} 桑晋秋^{1,2†} 郑成诗^{1,2} 石伟志^{1,2} 李晓东^{1,2}

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 均衡耳机到鼓膜的传递函数可有效提高耳机声重放效果。通过主客观实验对比研究幅度均衡方法、相位均衡方法和幅度相位同时均衡方法,结果表明相比于幅度均衡,相位均衡对耳机瞬态响应的影响更大;当系统相位为线性时,瞬态响应衰减越快,线性相位对耳机重放提升音色有显著作用;而以平直幅频响应为目标的幅度均衡对提升耳机重放效果有限。

关键词 耳机到鼓膜的传递函数,均衡,线性相位,耳机重放

中图分类号: TN64 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2017)06-0471-10

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2017.06.001

Effects of phase equalization on headphone reproduction

LI Guangju^{1,2} SANG Jinqiu^{1,2} ZHENG Chengshi^{1,2} SHI Weizhi^{1,2} LI Xiaodong^{1,2}

(1 *Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract Headphone-to-eardrum transfer function (HETF) equalization is critical to improve headphone reproduction quality. This work studies the magnitude equalization, the phase equalization and the magnitude-phase equalization methods through objective and subjective experiments. The results show that phase equalization is a more important factor for transient response than magnitude equalization. The main reason is that the effect of linear phase on headphone reproduction is significant and positively related to the decay time of transient response. The results also reveal that magnitude equalization for producing a nearly flat frequency response over the bandwidth of interest has limited effect on the improvement of the headphone reproduction quality.

Key words Headphone-to-eardrum transfer function (HETF), Equalization, Linear phase, Headphone reproduction

2017-03-22 收稿; 2017-05-01 定稿

*国家高技术研究发展 863 计划 (2015AA016306), 国家自然科学基金青年科学基金 (11504404), 国家自然科学基金青年科学基金 (11604362)

作者简介: 李光炬 (1989-), 男, 海南人, 硕士研究生, 研究方向: 语音和音频信号处理。

† 通讯作者 E-mail: sangjinqiu@mail.ioa.ac.cn

1 引言

耳机作为最常用的声重放设备,在现代通信、家用音频播放器、虚拟现实、智能硬件、听力康复等领域应用广泛。采用耳机进行声重放时,双耳信号依次经耳机重放、耳廓耦合与耳道传输到达鼓膜,引入了耳机到鼓膜的传递函数(Headphone-to-eardrum transfer function, HETF)^[1]。由于耳机本身往往并非理想电声系统以及耳机与耳廓的耦合作用, HETF 具有明显的峰谷结构,这会影响到耳机还原双耳声信号音色。耳机均衡通过调整 HETF 时频特性(如频谱的峰谷结构、相频特性等),可改善耳机的声重放效果。

本文主要研究耳机的客观指标(如幅频响应、相频响应、瞬态特性)对耳机主观感知效果的影响。耳机幅频响应是表征耳机性能的一个重要指标,这是因为耳机的幅频响应影响耳机重放声音频域的音量配比,是声重放保真度的一个重要因素。不少研究对耳机的频响曲线进行评估^[2-5],实验结果表明不同人群对耳机频响曲线的偏好不同,受试者对平直的耳机频响曲线偏好度较低,耳机的频响曲线如何设计仍存在争议。相频响应对耳机主观评价的影响目前还没有相关的研究,而针对扬声器的主观测听实验研究表明^[6-8],相位均衡对扬声器声重放的感知质量有重要影响,相位均衡不可忽视。耳机的瞬态特性反映耳机对突发信号的跟随能力与还原能力^[9],耳机瞬态响应的衰减特性最佳时,经耳机重放的声信号失真小,音色准确。文献^[10]研究表明,瞬态响应的衰减特性影响听音感知。

本文分别研究幅频特性和相频特性对耳机重放效果的影响。对同一款耳机采用了不同的均衡方式,包括均衡前、幅度相位同时均衡、只均衡幅度、只均衡相位,并加以横向比较。通过主、客观对比实验,考察了线性相位和平直幅频响应对耳机重放效果的影响,分析了相位特性与耳机瞬态响应的关系。实验结果表明,相位均衡可有效提高耳机均衡的重放效果。

2 耳机均衡原理与方法

2.1 耳机均衡原理

耳机重放时会引入 HETF,实际到达聆听者鼓膜处的声信号与馈给耳机的声信号存在以下频域

关系:

$$E(k) = E_p(k)M(k), \quad (1)$$

其中, $E(k)$ 是鼓膜处实际声信号的第 k 个频谱分量, $E_p(k)$ 表示馈给耳机声信号的第 k 个频谱分量, $M(k)$ 表示 HETF 的第 k 个频谱分量。

为了消除耳机传递特性的影响,可将实际的双耳信号声信号 $E_d(k)$ 经均衡滤波器滤波后,再馈给耳机重放,表示如下:

$$E_p(k) = H(k)E_d(k), \quad (2)$$

其中, $H(k)$ 表示耳机均衡滤波器的频域特性。

为了在鼓膜处准确地重放双耳声信号,要求 $E(k) = E_d(k)$,根据式(1)和式(2)有

$$H(k) = \frac{1}{M(k)}. \quad (3)$$

可见,理想的耳机均衡滤波器是 HETF 的逆滤波器。为了保证均衡滤波器满足因果性和稳定性^[11],均衡目标函数还要加上一定的时延。实际应用中,由于聆听者的个性化差异,采用在人工头上测量的耳机到鼓膜的传递函数 $M(k)$ 来设计 $H(k)$ 。耳机均衡后不能完全消除不同聆听者的 HETF,使得均衡后耳机到鼓膜的传递函数的频响不平直,从而使鼓膜处实际接收的声信号频谱产生误差。因此,需要较合理的均衡方法对 HETF 进行均衡,最大化地减小误差。

2.2 耳机均衡方法

2.2.1 只均衡幅度

一些经典的均衡方法注重幅度均衡,对相位均衡的考虑较少,如 Ramos-Lopez 均衡方法^[12]、Bank 均衡方法^[13]与 Kautz 均衡方法^[14]。其中 Kautz 均衡方法利用不同的极点控制频率映射,通过增减极点数量或修改极点位置来改变均衡滤波器逼近目标响应的精度,结构更加灵活。

本文采用 Kautz 均衡方法^[14]实现以平直幅频响应为目标的幅度均衡,相位不做处理。Kautz 均衡滤波器的 z 域表达式为

$$H(z) = \sum_{i=0}^N \omega_i G_i(z) = \sum_{i=0}^N \omega_i \left(\frac{\sqrt{1 - z_i z^*}}{1 - z_i z^{-1}} \right) \prod_{j=0}^{i-1} \left(\frac{z^{-1} - z_j^*}{1 - z_j z^{-1}} \right), \quad (4)$$

其中, $H(z)$ 是均衡滤波器的传递函数 z 域表示, ω_i 表示滤波器的权系数, $G_i(z)$ 表示正交 Kautz 函数, $G_i(z)$ 是由一组极点 $\{z_j\}_{j=0}^N$ 决定, * 表示复数共轭。

2.2.2 只均衡相位

通常情况下相位均衡可考虑采用全通滤波器。全通滤波器的设计可沿用 Hawksford 等提出的时间反转法^[15], 即将全通系统的时域冲激响应反转, 并对反转后的时域冲激响应加入一段合适的纯延迟。由于全通系统的时域冲激响应进行时间反转时, 系统引入了非因果特性, 这种非因果特性导致时域振铃现象。因此, 需要控制纯延迟的长度来避免时域振铃现象所引起的人耳听觉感知^[16]。许多研究者也提出全通滤波器的设计方法^[17-18], 但这些设计方法相对复杂。

为了实现在频率响应特性上保留原始幅频信息且相位均衡成线性相位, 本研究对耳机均衡前的时域冲激信号采用傅里叶变换, 得到每个频点的均衡前的相位。线性目标相位减去对应频点均衡前的相位得到均衡滤波器在频域的相位。均衡滤波器在频域的幅度设为 1。这样就得到均衡器在频域的幅度和相位。对均衡器在频域表达做逆傅里叶变换, 即得到均衡滤波器的时域响应。

2.2.3 幅度相位同时均衡

本研究用 FIR 均衡方法^[19] 同时实现以平直幅频响应为目标的幅度均衡和以线性相位为目标的相位均衡。

该均衡方法的设计基于最小二乘准则与正则化滤波器使均衡误差最小化。已有研究表明^[20], 正则化滤波器有助于减少系统响应的时域混叠。该均衡方法的频域表达式^[19] 为

$$H(k) = \frac{D^*(k)M(k)}{M(k)M^*(k) + \beta \cdot B(k)B^*(k)}, \quad (5)$$

其中, β 表示正则化滤波器加权标量, $B(k)$ 表示正则化滤波器响应的傅里叶变换, $D(k)$ 表示理想带通滤波器响应的傅里叶变换。

3 耳机的选择

3.1 HETF 测量实验

按照耳机的佩戴方式不同, 将耳机分为罩耳式耳机、贴耳式耳机、耳塞式耳机与入耳式耳机。由于耳机的佩戴方式不同影响耳机到鼓膜的传递函数

的特性, 因此, 需要选择测量可重复性较好的耳机以提高耳机均衡的有效性^[21]。实验中采用耳塞式耳机 (AKG k313) 与罩耳式耳机 (Sennheiser HD202), 编号分别为 HP1、HP2。

HETF 的可重复性测量可取耳道入口到鼓膜之间任一参考点, 已有研究证明^[1,21], 由于耳道内的一维声学传递特性, 可以采用耳机到耳道内任意一点的传递函数的逆进行耳机均衡, 不影响耳机均衡的效果。对于真人受试者, 采用探针传声器测量 HETF 具有一定的困难性与危险性。也可以测试一个通用的 HETF, 如在人工头双耳处采用封闭耳道法, 测量参考点为耳道入口处或为耳道入口到鼓膜之间任一参考点, 用传声器拾声信号测量 HETF^[1]。国际上通常采用通用的人工头 (KEMAR 人工头、B&K 人工头与 Acoustics HUS III 人工头) 测量耳机。本文采用 B&K 人工头测量 HETF, 传声器内置于人工头鼓膜的位置作为测量参考点。

图 1 是 HETF 测量原理的方框图。采用最大长度序列 (Maximum length sequences, MLS) 信号作为激励信号, 将由计算机产生的 MLS (长度为 $2^{13} - 1$, 8 次平均, 44.1 kHz 采样) 信号经 B&K PULSE 的 D/A (Digital/Analog 数字/模拟) 馈给戴在 B&K 人工头上的耳机进行重放。声信号由 B&K 人工头鼓膜处的 B&K 4192 传声器拾取, 再经 B&K PULSE 的 A/D 变换器输入到计算机进行记录, 将记录到的信号进行解卷积以及傅里叶变换, 即得到 HETF。每款耳机进行四次重复测量, 每次测量后, 将耳机取下并重新戴上, 然后进行新一次测量。

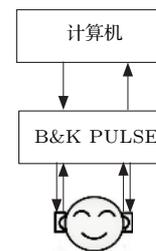


图 1 HETF 测量原理的方框图

Fig. 1 Block diagram of HETF measurement principle

3.2 HETF 测量结果及分析

图 2 为两款耳机的 HETF 在 B&K 人工头左耳处的四次测量结果, 分别以幅频响应与相频响应的形式给出, 频率范围为 20 Hz ~ 20 kHz。为了便于观察相频响应的线性特性, 这里耳机的相频响应图采用线性坐标的形式表示。

图2(a)表明HP1耳机的HETF测量可重复性很好。在40 Hz~15 kHz范围幅频响应的标准偏差都小于2 dB。这是由于耳塞式耳机直接与耳道耦合,避免了耳廓因素的影响。图2(b)表明HP2耳机的HETF测量可重复性虽不及HP1耳机但也较好。

幅频响应的标准偏差在20 Hz~8 kHz范围内基本都在3 dB以下。罩耳式耳机的HETF测量可重复性,不仅受到耳廓的耦合作用与耳道共振的影响,重复佩戴时耳罩位置的变化也会对传输函数造成一定的影响。

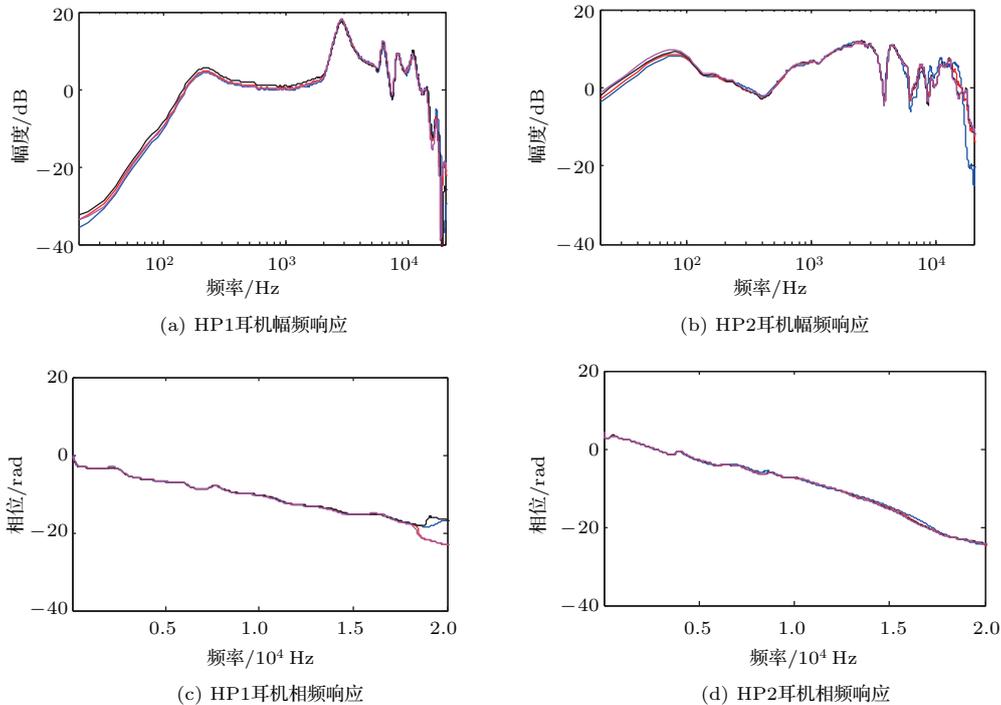


图2 两款耳机HETF的四次测量结果

Fig. 2 Four repeated measured HETFs for two headphones

不同研究得到的HETF测量可重复性的结论不同。饶丹等^[22]的研究表明耳塞式耳机具有很好的测量可重复性,Pralong等^[23]的研究表明罩耳式耳机具有较好的测量可重复性。

上述实验验证了HP1、HP2耳机的HETF测量可重复性均较高,可用于耳机均衡。

4 客观均衡结果

耳机均衡时,若无约束的抬升系统响应的低频与高频响应,可能引起系统响应的畸变、失真甚至损坏耳机。因此,在保证耳机低频性能的提升同时,需要根据耳机自身的响应频段(见图2)来设计均衡滤波器的均衡目标函数^[24]。利用2.2节的耳机均衡方法对HP1、HP2耳机进行均衡,本文只给出HP2耳机左耳的均衡结果。根据HP2耳机的响应频段,耳机的均衡范围设为40 Hz~16 kHz。

4.1 幅频响应

4.1.1 幅频响应的衡量标准

幅频响应反映耳机输出信号的幅度随频率变化而变化的规律。耳机的幅频响应是耳机重放保真度的一个重要因素,影响耳机的声信号的染色度。耳机的幅频响应可用耳机幅频响应的均方误差来衡量。均方误差函数的表达式^[25]为

$$e_{\omega} = \left[\frac{1}{N_f - N_i + 1} \sum_{k=N_i}^{N_f} (20 \lg |H_{EQ}(k)| - \bar{H}_{EQ})^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

$$\bar{H}_{EQ} = \left[\frac{1}{N_f - N_i + 1} \sum_{k=N_i}^{N_f} (20 \lg |H_{EQ}(k)|) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

其中, N_i 和 N_f 分别表示均衡起始频率和均衡终止频率的下标,均方误差函数 e_{ω} 只在均衡的频段之间考量, $H_{EQ}(k)$ 表示均衡后系统响应的傅里叶变换,

\bar{H}_{EQ} 表示均衡后系统响应傅里叶变换的模的均值。

4.1.2 幅频响应均衡结果

不同均衡方法均衡前后的幅频响应如图3所示。只均衡相位方法保留了原始幅频信息(见图3(d)),与均衡前的幅频响应一致(见图3(a)),其余均衡方法的幅频响应均逼近平直的幅频响应(见图3(b)与图3(c))。为了使耳机得到高质量的低音,耳机均衡时在低频段保留一个鼓起约3 dB 包络,在

70 Hz 处包络值最大,从右到左立刻呈现下降趋势(见图3(b)与图3(c))。

利用式(6)与式(7)计算均衡前后耳机幅频响应的均方误差。经计算,40 Hz~16 kHz的幅频响应均方误差如表1所示。均衡前的幅频响应均方误差为4.2 dB,幅度相位同时均衡方法与只均衡幅度方法的幅频响应均方误差均小于4.2 dB;只均衡相位方法因保留原始幅频信息,其与均衡前的幅频响应均方误差类似。

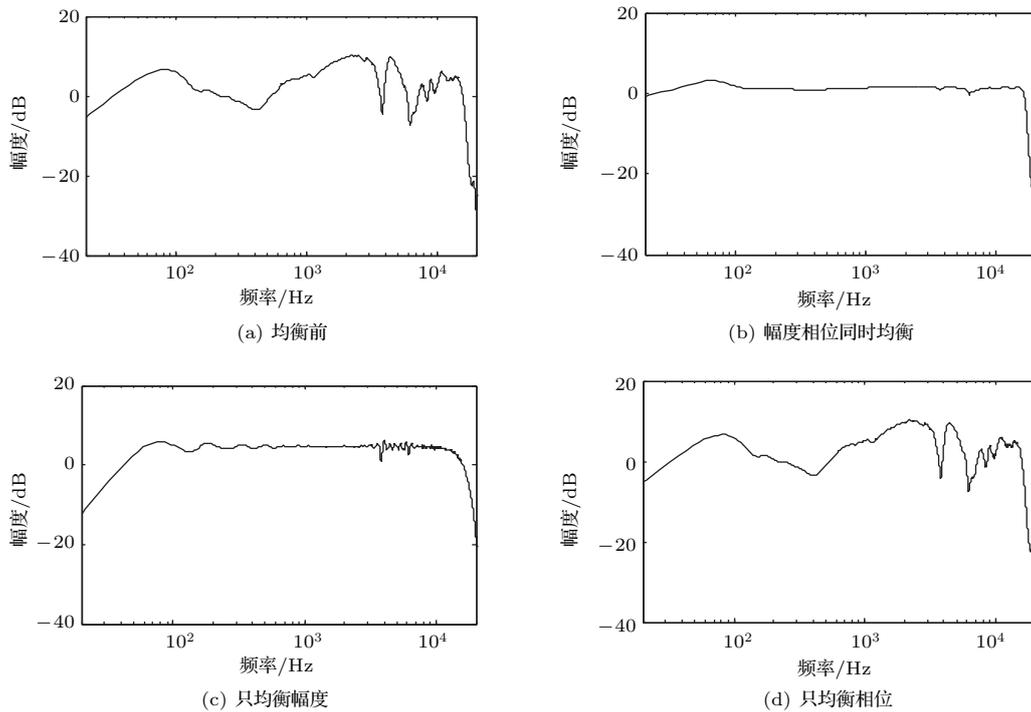


图3 不同均衡方法的幅频响应(HP2)

Fig. 3 Amplitude frequency response of different equalization methods (HP2)

表1 HP2耳机的幅频响应均方误差

Table 1 The mean square error of the amplitude frequency response for headphone HP2

(单位: dB)

均衡前	幅度相位同时均衡	只均衡幅度	只均衡相位
4.2	0.3	0.5	4.2

4.2 相频响应

4.2.1 相频响应的衡量标准

相频响应反映耳机输出信号与输入信号之间相位差随信号频率变化而变化的规律。耳机相频响应的线性化用群延迟响应曲线的平坦度来衡量,相频响应越线性,群延迟响应越平坦,各频率输出信

号到达时间越为接近。在相位没有产生失真的条件下,耳机的群延迟响应时间为常数。

4.2.2 相频响应均衡结果

不同均衡方法均衡前后的相频响应如图4所示,幅度相位同时均衡方法与只均衡相位方法的相位均为线性,只均衡幅度方法未对相位均衡。为了进一步了解相频响应的线性化程度,可通过群延迟响应曲线的平坦度(见图5)与耳机均衡范围内的群延迟均方差(见表2)衡量。对比均衡前,只均衡相位方法的群延迟响应最平坦,群延迟均方差最小,只均衡幅度方法的群延迟响应平坦度以及群延迟均方差与均衡前相当。

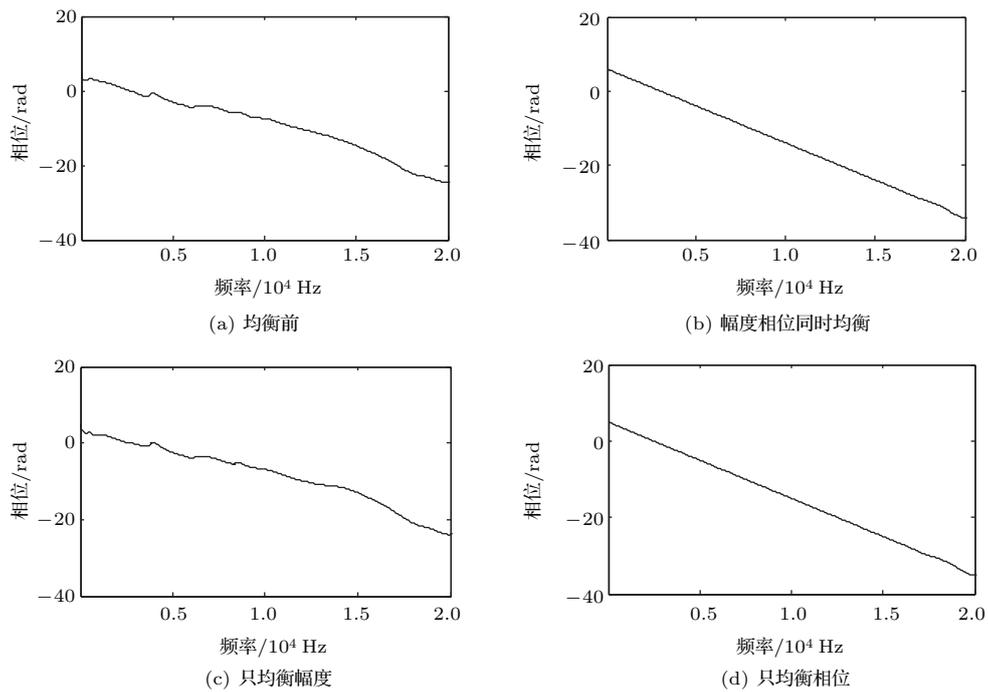


图4 不同均衡方法的相频响应(HP2)

Fig. 4 Phase frequency response of different equalization methods (HP2)

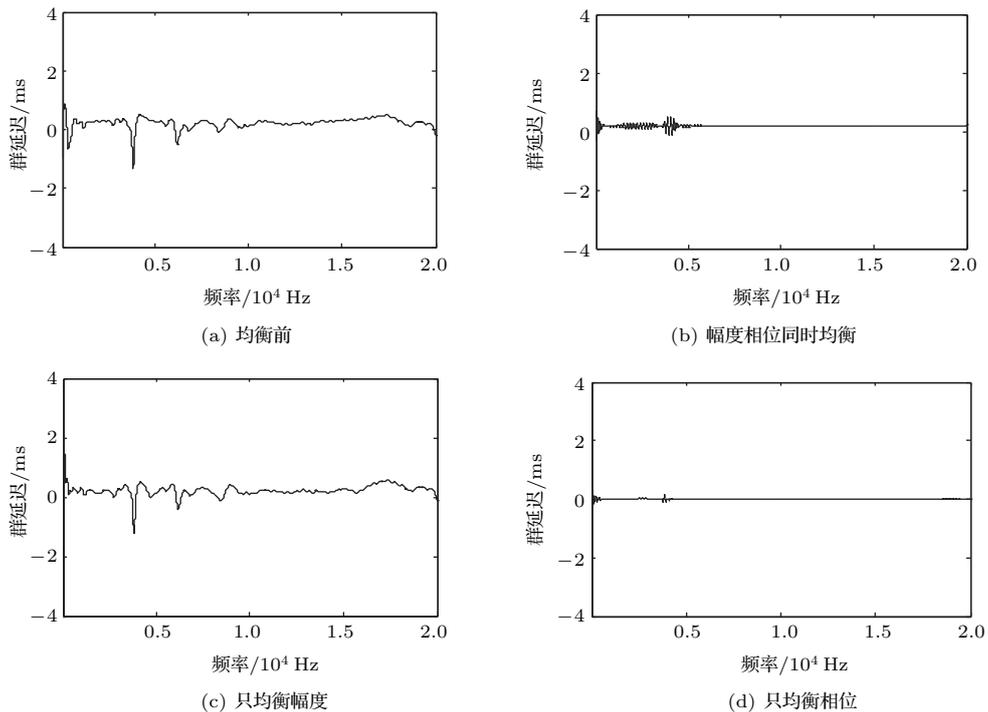


图5 不同均衡方法的群延迟响应(HP2)

Fig. 5 Group delay response of different equalization methods (HP2)

表2 HP2耳机的群延迟均方差

Table 2 Mean square error of group delay for headphone HP2

(单位: ms)

均衡前	幅度相位同时均衡	只均衡幅度	只均衡相位
0.28	0.09	0.27	0.05

4.3 瞬态响应

4.3.1 瞬态响应的衡量标准

瞬态响应是指激励信号接入以后,完全响应中瞬时出现的有关成分,随着时间推移,它将消失 [26]。耳机瞬态响应反应了耳机对突发信号的跟随能力和还原能力。瞬态响应好的耳机应当是信号一来就立即响应,信号一停就戛然而止。在假定耳机为线性系统的前提下,耳机的冲激响应可以反应耳机的瞬态响应。当耳机的瞬态特性不佳时,瞬态响应衰减变慢,耳机声信号的清晰度变差。瞬态特性可用瞬态信号的衰减时间 T_{60} 来衡量,与混响时间的计算相同 [27]。Schroeder 在 1965 年提出计算混响时间的方法 [27],它采用能量衰减曲线 (Energy decay curve, EDC) 表达直达声的衰减特性,如式 (8) 所示:

$$EDC_h(t) = \int_t^{+\infty} h(\tau) d\tau, \quad (8)$$

其中, $EDC_h(t)$ 是经过时间 t 后,瞬态响应的剩余能量。因此,用式 (9) 表征瞬态响应衰减与时间 t 的关系:

$$E(t) = 20 \cdot \lg \left(\frac{EDC_h(t)}{EDC_h(0)} \right). \quad (9)$$

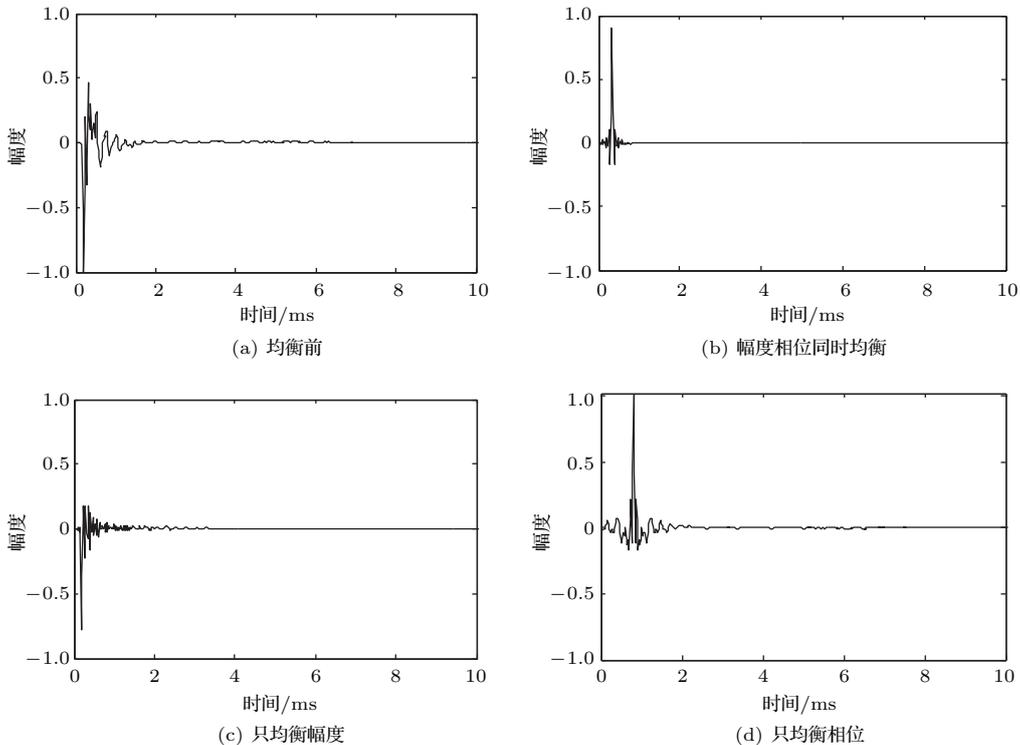


图6 不同均衡方法的瞬态响应 (HP2)

Fig. 6 Transient response of different equalization methods (HP2)

4.3.2 瞬态响应均衡结果

不同均衡方法均衡前后的瞬态响应如图6所示,幅度相位同时均衡方法的瞬态响应时域振铃很快地衰减;只均衡相位方法的瞬态响应出现时域振铃,但振铃的幅度小且时程较短 (小于 0.5 ms),人耳的时域后掩蔽效应使得时域振铃无法察觉,对耳机重放无影响,无需对时域振铃做处理。

图7为HP2耳机瞬态响应的能量衰减曲线,利用式 (9) 计算HP2耳机的瞬态响应衰减时间 T_{60} 。由计算结果 (见表3) 可知,包含相位均衡的两种方法 (幅度相位同时均衡、只均衡相位) 瞬态响应衰减时间 T_{60} 均很小,不包含相位均衡的两种方法 (均衡前、只均衡幅度) 瞬态响应衰减时间 T_{60} 均较大。由此,说明了相位均衡影响耳机瞬态响应的衰减特性,当系统相位为线性时,瞬态响应衰减越快。

表3 HP2耳机瞬态响应衰减时间 T_{60}

Table 3 Decay time T_{60} of transient response in headphone HP2

(单位: ms)

均衡前	幅度相位同时均衡	只均衡幅度	只均衡相位
5.8	0.5	4.5	1.4

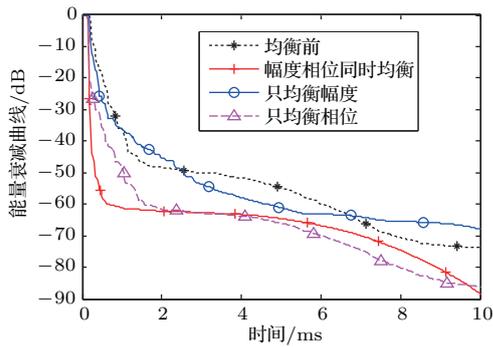


图7 不同均衡方法的瞬态响应的能量衰减曲线(HP2)

Fig. 7 Energy decay curve of transient response for different equalization methods (HP2)

5 主观评价实验

5.1 原理和方法

安排了主观测听评价实验来验证不同的耳机均衡方法对耳机重放造成的影响。

实验音频由录制的两类声音素材(弦乐、打击乐)与HP1、HP2耳机的HETF的逆函数卷积得到。弦乐与打击乐涵盖不同的频率范围,有利于进行较为全面的主观比较。实验音频经HP1与HP2耳机播放给受试者聆听。共有30名受试者参与主观评价实验,年龄介于25~30岁之间,听力正常,其中15人有较丰富的听音经验,其余15人有参与听音实验的经历,对声音信号方面都比较熟悉。

主观评价实验方法采用MUSHRA方法^[28](本文主观评价实验不设置参考实验音频,所有实验音频均进行盲听),要求受试者对实验音频的音色进行评价,尤其关注清晰度。评分标准参ITU-RBS.1534-1的主观测试标准^[29],打分区间为0~100,音色越好,打分越高。受试者通过MUSHRA音色测试界面进行操作,点击‘Play’按钮聆听实验音频,可以反复听多次,最后拖动滑动按钮给出评分。在主观评价实验之前先对实验音频进行编号,具体做法为每名受试者随机听取两类实验音频,每类实验音频包含4种不同均衡方法,分别为均衡前(I)、幅度相位同时均衡(II)、只均衡幅度(III)、只均衡相位(IV)。在正式听音实验前,每名受试者完成至少一次完整试听比较练习,以便熟悉实验打分规则。

5.2 结果与分析

主观评价实验结果采用单因素方差^[30]分析4种不同均衡方法对耳机重放影响的差异性。 P 表示

统计学差异,取 $P < 0.01$ 具有极显著统计学差异。

30名受试者的主观评价实验平均得分与标准偏差,如图8所示。

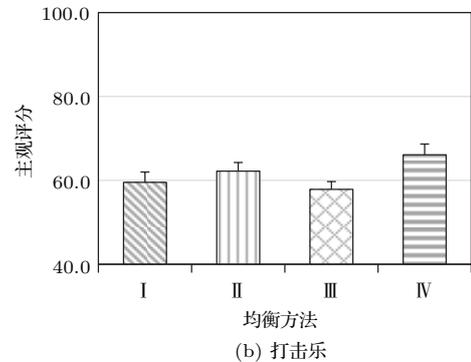
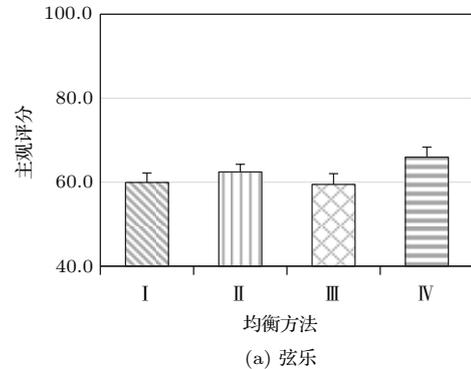


图8 30名受试者主观评价实验的平均得分与标准偏差

Fig. 8 The mean score and standard deviation of subjective evaluation test for thirty subjects

图8(a)表示弦乐的主观评价实验平均得分与标准偏差,IV平均得分65.9为最高,II平均得分62.4为次高分。弦乐的组间比较统计结果(表4)显示,IV显著比I和III高($P < 0.01$),II显著比I和III高($P < 0.01$)。II和IV方法均对相位进行均衡,I和III方法均没有对相位做均衡,这说明了相位均衡可以显著提高主观音色。表4还显示,IV显著比II高($P < 0.01$),IV保留原始的幅频响应,II实现以平直的幅频响应为目标的幅度均衡,这也说明以平直幅频响应为目标的幅度均衡对耳机重放时的音色提升有限。高端耳机的频响设计中往往经验性的保留一些峰谷,也是基于类似考虑。图8(b)表示打击乐的主观评价实验平均得分与标准偏差,IV平均得分66.1为最高,II平均得分62.2为次高分。打击乐的组间比较统计结果(表5),表明打击乐具有与弦乐类似的特征,这也说明了线性相位对耳机重放音色的提升显著,而以平直幅频响应为目标的幅度均衡不利于耳机重放时的音色提升。

由于幅度相位同时均衡方法使耳机的瞬态响应衰减更快,耳机重放清晰度有所改善,但以平直幅频响应为目标的幅度均衡,整体音色提升不明显,这也表明耳机均衡时的目标应保留适当的频域峰谷,避免引起幅频响应过度均衡;只均衡幅度方法,虽然以平直幅频响应为目标进行幅度均衡,但缺乏对相位均衡的考虑,耳机重放清晰度差,整体音色差;只均衡相位方法,避免了耳机的幅频响应过度均衡,同时使耳机的瞬态响应衰减较快,耳机重放音色的提升最显著,清晰度较好。

表4 弦乐的组间比较统计结果

Table 4 Statistical between-group comparisons of string

处理方法	<i>P</i>		
	I	II	III
I(59.9±2.2)			
II(62.4±1.8)	0.000*		
III(59.4±2.5)	1.000	0.000*	
IV(65.9±2.3)	0.000*	0.000*	0.000*

注: * $P < 0.01$, 括号内表示 (均值 ± 标准偏差)。

表5 打击乐的组间比较统计结果

Table 5 Statistical between-group comparisons of percussion

处理方法	<i>P</i>		
	I	II	III
I(59.5±2.4)			
II(62.2±2.0)	0.000*		
III(57.8±1.8)	0.030	0.000*	
IV(66.1±2.5)	0.000*	0.000*	0.000*

注: * $P < 0.01$, 括号内表示 (均值 ± 标准偏差)。

6 结论

本文根据衡量耳机均衡的客观指标与主观评价实验,分析相频响应与瞬态响应的关系以及相位均衡对耳机重放的影响。客观指标表明,相比于幅度均衡,相位均衡对耳机瞬态响应的影响更大,当系统相位为线性时,瞬态响应衰减越快;主观评价实验结果表明,线性相位对耳机重放音色的提升显

著,而以平直幅频响应为目标的幅度均衡对耳机重放时的音色提升有限。耳机均衡时不仅要设计合适的幅频响应目标,还要考虑相位均衡对耳机重放的影响。

参 考 文 献

- [1] MOLLER H. Fundamentals of binaural technology[J]. Applied Acoustics, 1992, 36(3/4): 171–218.
- [2] FLEISCHMANN F, SILZLE A, PLOGSTIES J. Identification and evaluation of target curves for headphones[C]//Audio Engineering Society Convention 133. Audio Engineering Society, 2012.
- [3] OLIVE S, WELTI T, MCMULLIN E. Listener preferences for different headphone target response curves[C]//Audio Engineering Society Convention 134. Audio Engineering Society, 2013.
- [4] OLIVE S, WELTI T, MCMULLIN E. The influence of listeners' experience, age, and culture on headphone sound quality preferences[C]//Audio Engineering Society Convention 137. Audio Engineering Society, 2014.
- [5] MOLLER H, JENSEN C D, HAMMERSHOI D, et al. Design criteria for headphones[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1995, 43(4): 218–232.
- [6] JOHANSEN L G, RUBAK P. The excess phase in loudspeaker/room transfer functions: Can it be ignored in equalization tasks?[C]//Audio Engineering Society Convention 100. Audio Engineering Society, 1996.
- [7] PLOMP R, STEENEKEN H J M. Effect of phase on the timbre of complex tones[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1969, 46(2B): 409–421.
- [8] GREENFIELD R, HAWKSFORD M J. The audibility of loudspeaker phase distortion[C]//Audio Engineering Society Convention 88. Audio Engineering Society, 1990.
- [9] POLDY C, BORWICK J. Loudspeaker and headphone handbook[M]. Oxford: Focal Press, 2001.
- [10] ANDO Y, RAICHEL D R. Architectural acoustics: Blending sound sources, sound fields, and listeners[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(6): 3151–3151.
- [11] RYAN C, FURLONG D. Effects of headphone placement on headphone equalization for binaural reproduction[C]//Audio Engineering Society Convention 98. Audio Engineering Society, 1995.
- [12] RAMOS G, LOPEZ J J. Filter design method for loudspeaker equalization based on IIR parametric filters[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2006, 54(12): 1162–1178.
- [13] BANK B. Audio equalization with fixed-pole parallel filters: An efficient alternative to complex smoothing[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 2013, 61(1/2): 3949.
- [14] KARJALAINEN M, PAATERO T. Equalization of loudspeaker and room responses using Kautz filters: Direct

- least squares design[J]. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2007, 2007(1): 1–13.
- [15] GREENFIELD R, HAWKSFORD M J. Efficient filter design for loudspeaker equalization[J]. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1991, 39(10): 739751.
- [16] RADLOVIC B D, KENNEDY R A. Nonminimum-phase equalization and its subjective importance in room acoustics[J]. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 2000, 8(6): 728–737.
- [17] BERNHARDT P. Simplified design of high-order recursive group-delay filters[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1980, 28(5): 498–503.
- [18] DECZKY A. Synthesis of recursive digital filters using the minimum p-error criterion[J]. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 1972, 20(4): 257–263.
- [19] SCHARER Z, LINDAU A. Evaluation of equalization methods for binaural signals[C]//Audio Engineering Society Convention 126. Audio Engineering Society, 2009.
- [20] LAVOIE M C, NORCROSS S G, SOULODRE G A. Distortion audibility in inverse filtering[C]//Audio Engineering Society Convention 117. Audio Engineering Society, 2004.
- [21] MOLLER H, HAMMERSHOI D, JENSEN C B, et al. Transfer characteristics of headphones measured on human ears[J]. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1995, 43(4): 203–217.
- [22] 饶丹, 谢波菽. 耳机传输特性的重复性分析[C]. 中国声学学会全国声学学术会议, 厦门, 2006.
- [23] PRALONG D, CARLILE S. The role of individualized headphone calibration for the generation of high fidelity virtual auditory space[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 100(6): 3785–3793.
- [24] LEACH JR W M. Active equalization of closed-box loudspeaker systems[J]. *Journal of the Audio Engineering Society*, 1981, 29(6): 405–407.
- [25] MOURJOPOULOS J. Digital equalization methods for audio systems[C]//Audio Engineering Society Convention 84. Audio Engineering Society, 1988.
- [26] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [27] SCHROEDER M. New method of measuring reverberation time[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1965, 37(3): 409–412.
- [28] VINCENT E. MUSHRAM-A Matlab interface for MUSHRA listening tests (version 1.0)[EB/OL]. [2015-12-08]. <http://c4dm.eecs.qmul.ac.uk/downloads/#mushram>.
- [29] ITU Recommendation BS.1534-1. Method of the subjective assessment of intermediate quality level of coding systems[EB/OL]. [2015-12-08]. http://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bs/R-REC-BS.1534-2-201406-S!!PDF-E.pdf.
- [30] 朱星宇, 陈勇强. SPSS多元统计分析方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.