

个性化头相关传输函数的近似获取 ——现状和问题*

钟小丽[†] 谢菠菰

(华南理工大学理学院物理系声学研究所 广州 510641)

摘要 虚拟听觉重放采用头相关传输函数 (HRTF) 合成双耳声信号, 并用耳机重放, 以产生所需的空间听觉事件。理想的虚拟听觉重放需要个性化 HRTF。个性化 HRTF 可通过实验测量或数值计算相对地准确获得。然而, 测量每个潜在使用者的高空间分辨率 HRTF 是困难的, 而数值计算 HRTF 的频段往往受限于计算机性能。近年发展了多种 HRTF 的近似获取方法, 并成为热门研究课题, 但效果有待验证和提高。本文评述了个性化 HRTF 近似的研究进展, 指出了存在的问题和今后的方向。

关键词 虚拟听觉重放, 头相关传输函数, 个性化, 近似

中图分类号: O428

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2012)06-0410-06

Approximation of individualized head-related transfer function —— current progresses and problems

ZHONG Xiaoli XIE Bosun

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

Abstract Virtual auditory display recreates desired spatial auditory events by synthesizing binaural signals by head-related transfer function (HRTF) and subsequently rendering them through headphone. Previous studies have proved that faithful performance of a virtual auditory display needs incorporating individual HRTFs obtained through empirical measurement or numerical computation with a certain accuracy. However, measuring individual HRTFs for each of potential users with high spatial resolution is tiresome and difficult, and available frequency range of numerical computation is severely limited by computer capability. Thus, a variety of approaches to approximating individual HRTFs have been developed, and become hot issues in the research of virtual auditory display. Although a moderate success has been achieved, further validation and improvement of those approximation approaches are required. This paper reviews the latest development in relevant field with emphasis on existing problems and future direction.

Key words Virtual auditory display, Head-related transfer function, Individuality, Approximation

2012-04-09 收稿; 2012-09-03 定稿

*国家自然科学基金(11004064)资助项目和亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题

作者简介: 钟小丽 (1975-), 女, 湖北襄阳人, 副教授, 博士, 研究方向: 双耳听觉, 心理声学。

谢菠菰 (1960-), 男, 教授, 博士生导师。

[†]通讯作者: 钟小丽, E-mail: xlzhong@scut.edu.cn

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 引言

头相关传输函数(head-related transfer function, HRTF)描述了自由场情况下声波从声源到双耳的传输过程。HRTF 是声波频率和声源方位的函数,包含主要的声源定位信息。此外,由于不同个体独特的生理外形,HRTF 是因人而异的。虚拟听觉重放(virtual auditory display, VAD)是 HRTF 的一个重要应用。在虚拟听觉重放中,采用双耳 HRTF 函数对单通路声信号进行频域滤波并采用耳机重放,就可以在听觉上产生相应空间方位的虚拟声像。研究表明,理想的虚拟听觉重放需要个性化的 HRTF 处理,而采用非个性化 HRTF 将导致较大的定位误差,特别是前后和上下镜像方位混乱以及仰角方位错误^[1]。

测量是获取个性化 HRTF 的最直接和相对准确的途径。至今,已有多个课题组进行了 HRTF 测量^[2-6],部分数据已经公开。然而,测量需要特定的设备且比较费时。因此,通过测量获得每个虚拟听觉重放使用者的高密度个性化 HRTF 是不可行的。基于个体生理外形的数值计算(例如边界元法)是获得个性化 HRTF 的另一种有效途径^[7-8]。然而,用于获取个体生理外形的三维扫描设备比较昂贵,而且计算全频段、多个方位的 HRTF 需要耗费大量的计算机资源。

为了避免复杂、耗时的测量和计算,有研究提出个性化 HRTF 的近似获取方法。近似获取(或者定制)是指在保留个性化听觉特征的前提下,尽可能地简化个性化 HRTF 的获取过程。虽然近似获取只能得到个性化 HRTF 的近似值,但它保留了个性化听觉信息。随着虚拟听觉重放的广泛应用,个性化 HRTF 的近似获取方法引起了广泛的关注。目前,已经取得了一定的进展,但是还有许多问题有待解决。本文全面回顾了个性化 HRTF 近似获取的研究进展,并进一步指出了目前存在的问题和将来的发展方向。

2 个性化 HRTF 的近似方法

虚拟听觉重放中经常采用 HRTF 的最小相位近似^[9]。在最小相位近似下,双耳 HRTF 函数简化为两个最小相位函数和一个双耳间的纯延迟(即双耳

时间差 interaural time difference, ITD),而最小相位函数由 HRTF 幅度谱唯一决定。相应地,个性化 HRTF 近似可以对 HRTF 最小相位函数(或幅度谱)和 ITD 分别进行。另一方面,通常采用各种特征提取或降维的算法(例如主成分分析法 principal component analysis, PCA)对个性化 HRTF 数据进行压缩,相应的近似将对展开分量进行。

个性化 HRTF 近似方法大致分为三类:基于生理参数的近似方法;基于主观实验的近似方法;基于少量测量的近似方法。

2.1 基于生理参数的个性化方法

HRTF 表征了声波和生理结构(例如头部、耳廓等)的相互作用。因此,可以假设个性化 HRTF 和个性化生理结构密切相关,由不同个体生理结构的相似度可以推知其个性化 HRTF 的相似度。Zotkin 等人利用耳廓参数匹配法,从已知的 HRTF 基线数据库中,挑选出最接近新受试者生理特征的 HRTF 数据,作为其个性化 HRTF 的近似^[10]。这种方法简单易行,在一定程度上可提高虚拟声源定位的准确性以及主观感知效果,但该方法未考虑 HRTF 相关的头部生理参数。Middlebrooks 提出了频率标度法,即新受试者的 HRTF 可通过对已知 HRTF 的频率标度变换近似得到,其中频率标度因子可由生理参数或者听音实验推知^[11-12]。频率标度法只考虑了不同个体生理尺寸差异所引起的 HRTF 沿频率轴的整体平移,而忽略了不同个体生理结构差异所导致的 HRTF 谱形状的不同,因而具有一定的局限性。Guillon 进一步将耳廓旋转角度的个体差异和频率标度法相结合,以提高个性化 HRTF 的近似效果^[13]。也有研究将 HRTF 分解为若干个独立部分的组合,每个独立部分对应一定的生理结构(即 HRTF 的结构模型);可以根据新受试者的生理参数,调整各个独立部分的参数(即调整不同生理结构对 HRTF 的贡献),实现个性化 HRTF 的近似^[14]。虽然 HRTF 的结构模型可以简化虚拟听觉重放中的信号处理运算,但它忽略了不同部分(即不同生理结构)之间的相互作用,其有效性有待进一步验证。目前,有许多研究采用统计方法(如多元线性回归)寻求生理参数和 HRTF 幅度谱(或 HRTF PCA 分解后的权重)之间的对应关系,进而通过生理参数预测个性化 HRTF^[15-19]。目前,这方面的工作有一定的进展,但是缺乏明确可靠的结论。

依笔者所见，基于生理参数的个性化 HRTF 近似中的最大问题是如何确定一组完备、相互独立、数量最少的生理参数组。Fels 等人发现三个头部生理参数 (the distance between the ear and the shoulder, the breadth of the head, the back vertex) 和三个耳部生理参数 (breadth and depth of the cavum concha, rotation of the ear) 对 8 kHz 以下 HRTF 有明显的影响^[20]。也有研究利用相关分析和多元线性回归分析寻求和 HRTF 密切相关的生理参数组^[19,21-22]。值得注意的是，即使采用同样的数据 (例如 CIPIC HRTF 数据库)，不同研究得到的结果也不完全一致。

此外，不同的研究对于同一个生理参数 (例如头宽) 测量点的定义也不完全一致，这导致研究结果的不可比性。对于某一个生理参数，如果不同测量点定义所导致的测量差异大于该生理参数在不同个体之间的实际差异，则生理参数预测的个性化 HRTF 是毫无意义的。因此，有必要对生理参数进行明确清晰的统一定义。另一方面，由于一些 HRTF 的个性化特征 (例如 5 kHz~12 kHz 频段的耳廓谷) 和耳廓生理结构的细节密切相关。耳廓相关生理参数微小的测量误差将导致较大的 HRTF 近似误差。最后，HRTF 和生理参数之间的关系非常复杂，目前常用的线性关系未必能够完整描述这种复杂关系。

2.2 基于主观实验的个性化方法

考虑到虚拟听觉重放中采用个性化 HRTF 的最终目的是获得自然、真实的听觉感知效果，有研究通过主观听音实验直接从已知的 HRTF 基线数据库中挑选出听觉匹配的 HRTF，近似作为新受试者的个性化 HRTF^[23-26]。例如，Katz 等人采用强制性三级选择 (bad/ok/excellent) 的心理声学实验方法，从 46 人的 HRTF 数据库中寻找能够满足大多数人听觉感知的最小 HRTF 子集 (称为感知伪正交 HRTF 集合)，将其作为新受试者个性化 HRTF 的近似^[26]。然而，这种方法的工作量较大，特别是当 HRTF 基线数据库包含较多样本时。也有研究根据主观听觉效果，挑选或者调整通用 (非个性化) HRTF 特征以逼近个性化 HRTF 的特征。So 等人采用聚类的方法将 196 个受试者分为 6 个正交类，将位于类中心受试者的 HRTF 作为该类受试者个性化 HRTF 的近似^[27]。Tan 和 Gan 提出一种受试者根据主观听觉效果自动调整 HRTF 特征 (如频域子带的增强/衰减模

式) 的近似方法^[28]。基于主成份分析法，Hwang 等人提出一种 HRTF 近似方法^[29]。将 CIPIC 数据库的中垂面 HRIR 表征为 12 个主成份的权重组合，并由受试者根据仰角定位效果调整 3 个主成份的权重。也有研究利用听觉适应性，通过适当的听觉训练，提高非个性化 HRTF 虚拟重放时的定位准确性以及前后声像的区分能力^[30-31]。严格来讲，因为这种听觉适应性发生在高层听觉系统而不是 HRTF，所以这种基于听觉适应性的方法不属于个性化 HRTF 近似。

由于无需进行物理的和生理参数的测量，基于主观听觉的个性化 HRTF 近似方法相对简单。然而，这种方法的结果有一定的随机性^[25]，如何设计主观实验方案以尽可能减小结果的随机性有待进一步研究。此外，HRTF 是空间方位的连续函数，理想情况下听觉匹配、听觉预测以及听觉适应都应当在虚拟声源可能出现的所有空间方位上进行。然而，由于时间的限制，主观实验通常只能在有限的空间方位上进行，例如中垂面。如何确定个性化 HRTF 近似中所需的典型实验方位，并制定出一套统一、高效的主观实验流程，值得进一步的研究。

2.3 基于少量测量的个性化方法

Fontana 等人采用少量测量匹配的方法近似获取个性化 HRTF。这种方法测量新受试者在少量空间方位的 HRTF，然后依据测量 HRTF 和他人 HRTF 数据之间的谱差异，从基线数据库中挑选出差异最小的受试者 HRTF 数据作为新受试者 HRTF 的近似^[32]。也可利用新受试者少量空间方位的 HRTF 测量数据直接恢复 (重构) 其它空间方位的 HRTF 以及空间方向连续的 HRTF 函数。受 Shannon-Nyquist 采样理论的限制，采用传统的插值方法准确重构原空间函数需要密集的空间采样 (测量)^[33]。当把 HRTF 分解为一组少量空间基函数表示后，可以从远小于 Shannon-Nyquist 采样理论所需的采样数目恢复 HRTF。谢波荪采用空间主成分分析法从一组高空间分辨率 HRTF 基线数据库推导出 HRTF 的高效基函数表示，并采用新受试者少量方向 HRTF 测量值推知个性化的权重系数，基函数和个性化权重系数的组合就构成了新受试者的高空间分辨率的 HRTF^[34]。也有研究采用神经网络的方法寻求 HRTF 的高效基函数^[35]，进而从少量个性化测量中重构全空间 HRTF。虽然少量测量的方法可以比较准确地

获取个性化 HRTF，但仍然需要一定的测量设备。

2.4 个性化双耳时间差的近似

如前所述，HRTF 的近似可对 HRTF 幅度和双耳时间差 ITD 分别进行。ITD 的空间变化比 HRTF 平缓，因而个性化 ITD 的近似相对简单。目前基于几何声学原理的 Woodworth ITD 公式被广泛采用^[36]。它将头部简化为一个刚球，双耳简化为球面上相对的两点。通过调整刚球半径（头半径），Woodworth 公式可以部分地预测个性化 ITD。Algazi 等人充分考虑了实际人头的外形，采用头宽、头高和头深的权重组合替代 Woodworth 公式中的头半径^[37]。然而这些 ITD 公式都是基于前后对称的球形头部模型，不能反映真人头部的前后不对称性以及由此而产生的 ITD 的空间前后不对称性；另外，公式中所包含的生理参数（主要是头部相关的生理参数）未必完备。作为改进，钟小丽等人利用空间谐波展开和 52 人的 HRTF 数据库，推导出一个具有统计意义的 ITD 模型公式^[38-39]。该公式反映了实际 ITD 的空间左右对称性和空间前后不对称性；利用头部和耳部的生理参数可预测个性化 ITD。比较研究表明，新公式的结构和预测效果均优于现有的同类模型公式。

3 讨论

目前，国内外在个性化 HRTF 近似方面的研究存在一些方法上的误区且具有普遍性，现讨论如下：

(1) 个性化 HRTF 近似的研究往往需要一个包括大量受试者的高空间分辨率 HRTF 以及生理参数的基线数据库。目前国际上公开的数据库中，只有 CIPIC 数据库（对某些人种）还比较符合要求。它包含了 43 名真人每人 1250 个方向的 HRTF 数据，以及 27 个生理参数数据^[2]。国内外许多相关研究都是在 CIPIC 数据基础上进行的。应该指出，CIPIC 数据库中大部分是西方人群受试者，而中国人和西方人的一些生理参数（如头面部及耳廓等）存在统计学上的显著差异。因此，利用 CIPIC 数据库进行中国人个性化 HRTF 的近似研究在逻辑上是不合理的。我们建立了中国人受试者的 HRTF 和生理参数数据库，近期正在开展中国人个性化 HRTF 的近似工作，所得结果理应更适合中国人的听觉生理特性。

(2) 虽然测量可相对准确地获取 HRTF，但按

目前的测量技术水平，HRTF 测量的平均幅度误差（对方位和频率平均）在 6 kHz 以下的频段约为 1 dB ~ 2 dB 的量级；在 6 kHz ~ 10 kHz 的频段约 3 dB ~ 5 dB 的量级；而在更高的频率，测量误差将明显增加，可达到 10 dB 以上^[40-43]。这主要是由于测量条件的微小改变将引起 HRTF 幅度谱上耳廓引起的高频窄带峰谷的改变，从而导致 HRTF（高频）幅度谱的明显改变。可见，HRTF 测量数据本身就存在较大的高频误差。然而，目前有不少研究低估甚至忽略原始测量数据本身的误差，认为 HRTF 平均近似误差下降 1 dB ~ 2 dB（甚至不足 1 dB）就意味着近似效果的明显改善。其实，即使 HRTF 近似误差有 1 dB 以内的降低，这种改善在听觉上也是无意义的。另外，有些研究在计算平均近似误差时，频率范围从 0 Hz 到 Nyquist 频率（即采样频率的一半）。实际上，受 HRTF 测量系统（如扬声器）本身频率响应特性的限制，测量 HRTF 数据在 0.1 kHz ~ 0.2 kHz 以下的低频和 20 kHz 以上的高频是不准确的，因而计算平均近似误差不应该包括这些频率范围。总体来说，现有的部分研究在评价 HRTF 近似的物理误差上是不合理的，更不用说对应的听觉误差。这有可能导致整个近似方案的不合理。为了避免上述问题，考虑到人类听觉的分辨率，我们建议在进行 HRTF 近似之前，对幅度谱进行听觉滤波器带宽的平滑处理，以减少高频窄带峰谷处的测量误差。同时，计算平均误差也应选择 HRTF 测量误差相对较少且对听觉定位重要的频段，如从数百 Hz 到 12 kHz ~ 16 kHz。

(3) 需要采用心理声学实验验证个性化 HRTF 近似结果的有效性。在虚拟听觉的耳机重放中，为了消除重放环节的影响，需要进行耳机均衡，即用耳机到耳道传输函数（headphone-to-ear-canal transfer function, HpTF）的逆进行均衡处理。不同个体 HpTF 的差异和不同个体 HRTF 的差异近乎等数量级^[44-45]。然而，许多基于耳机重放的心理声学实验没有采用个性化耳机均衡，甚至没有进行耳机均衡。这将影响实验结果的可靠性。另一方面，有些研究的心理声学实验过于粗糙或实验样本偏少，不符合心理声学实验的规范，或者连一些必要的数理统计分析都没有，其实验结论的可靠性值得怀疑。

(4) 应当正确评价个性化 HRTF 的重要性。上面的讨论主要是针对稳态虚拟听觉重放的应用。它

忽略了头部运动带来的动态定位因素，因而对个性化 HRTF 高频谱信息的准确性要求较高。而对于动态虚拟听觉重放，头部跟踪引入的动态定位因素可减少虚拟听觉重放系统对个性化 HRTF 高频谱信息的依赖，因而会容忍相对较大的 HRTF 近似误差^[46]。

4 结论

上述三类个性化 HRTF 的近似方法各有优劣。总体而言，基于生理参数的近似方法只需测量生理参数，且将随着三维人体扫描技术的发展而变得更加简单和便捷，因此具有广阔的商业前景。然而，目前这类近似方法无法准确获取 HRTF 高频特征（特别是与耳廓相关的特征）。因此，还需要进一步提高生理参数的测量精度，并深入研究生理参数与 HRTF 特征之间的复杂关系。基于主观实验的近似方法比较简单，但是精度欠佳；其结果具有一定的随机性且因人而异。从物理上看，基于少量测量的近似方法比较准确，可应用于科学研究以及高端商业产品。然而，少量 HRTF 测量仍需一定的设备，这可能会制约这种方法的广泛应用。

目前，国际上对个性化 HRTF 近似研究已取得了一定的进展，但在许多方面（特别是 HRTF 高频幅度近似的准确性）有待提高，且与商业化应用尚有一定距离。因而 HRTF 近似获取是值得继续深入研究的课题。近几年，国内外有不少研究热衷于 HRTF 近似方面的工作，但部分工作在研究方法上逻辑上存在问题，必须引起注意。

参 考 文 献

[1] WENZEL E M, ARRUDA M, KISTLER D J, et al. Localization using nonindividualized head-related transfer functions[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94(1):111-123.

[2] ALGAZI V R, DUDA R O, THOMPSON D M, et al. The CIPIC HRTF database[C]. IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001: 99-102.

[3] XIE B S, ZHONG X L, RAO D, et al. Head-related transfer function database and its analyses[J]. Sci. China, Ser. G, 2007, 50: 267-280.

[4] BLAUERT J, BRUEGGEN M, BRONKHORST A W, et al. The AUDIS catalog of human HRTFs[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1998, 103: 3082.

[5] MØLLER H, SØRENSEN M F, HAMMERSHØI D, et al. Head-related transfer functions of human subjects[J]. J. Audio Eng. Soc., 1995, 43: 300-321.

[6] <http://recherche.ircam.fr/equipes/salles/listen/>, IRCAM Lab, Listen

HRTF database, 2003.

[7] GUMEROV N A, O'DONOVAN A E, DURAIWAMID R, et al. Computation of the head-related transfer function via the fast multipole accelerated boundary element method and its spherical harmonic representation[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2010, 127: 370-386.

[8] KATZ B F G. Boundary element method calculation of individual head-related transfer function. II. Impedance effects and comparisons to real measurements[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2001, 110(5): 2449-2455.

[9] KULKARNI A, ISABELLE S K, COLBURN H S. Sensitivity of human subjects to head-related transfer-function phase spectra[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1999, 105(5): 2821-2840.

[10] ZOTKIN D N, DURAIWAMI R, DAVIS L S. Rendering localized spatial audio in a virtual auditory space[J]. IEEE Trans. on Multimedia, 2004, 6 (4): 553-564.

[11] MIDDLEBROOKS J C. Individual differences in external-ear transfer functions reduced by scaling in frequency[J]. J. Acous. Soc. Am., 1999, 106(3):1480-1492.

[12] MIDDLEBROOKS J C, MACPHERSON E A, ONSAN Z A. Psychophysical customization of directional transfer functions for virtual sound localization[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 108(6): 3088-3091.

[13] GUILLON P, GUIGNARD T, NICOL R. Head-related transfer function customization by frequency scaling and rotation shift based on a new morphological matching method[C]. AES 125th Convention, 2008, Preprint 7550.

[14] BROWN C P, DUDA R O. A structural model for binaural sound synthesis[J]. IEEE Trans. on Speech and Audio Processing, 1998, 6 (5): 476-488.

[15] JIN C, LEONG P, LEUNG J, et al. Enabling individualized virtual auditory space using morphological measurements[C]. Proceedings of the First IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia, 2000: 235-238.

[16] RODRÍGUEZ S G, RAMÍREZ M A. HRTF individualization by solving the least squares problem[C]. AES 118th Convention, 2005, Preprint 6438.

[17] NISHINO T, INOUE N, TAKEDA K, et al. Estimation of HRTFs on the horizontal plane using physical features[J]. Applied Acoustics, 2007, 68(8): 897-908.

[18] HU H M, CHEN L, WU Z Y. The estimation of personalized HRTFs in individual VAS[C]. IEEE Fourth International Conference on Natural Computation, 2008.

[19] XU S, LI Z Z, SALVENDY G. Identification of anthropometric measurements for individualization of head-related transfer functions[J]. Acta Acustica united with Acustica, 2009, 95:168-177.

[20] FELS J, VORLÄNDER M. Anthropometric parameters influencing head-related transfer functions [J]. Acta Acustica United with Acustica, 2009, 95(2): 331-342.

[21] HU H M, ZHOU L, MA H, et al. HRTF personalization based on artificial neural network in individual virtual auditory space[J]. Applied Acoustics, 2008, 69: 163-172.

[22] ZHANG M, KENNEDY R A, ABHAYAPALA T D, et al. Statistical method to identify key anthropometric parameters in HRTF individualization[C]. Joint Workshop on Hands-free Speech Communication and Microphone Arrays, 2011: 213-218.

[23] SEEGER B, FASTL H. Subjective selection of non-individual

head-related transfer functions[C]. Proc. ICAD 2003: 259-262.

[24] IWAYA Y. Individualization of head-related transfer functions with tournament-style listening test: listening with other's ears [J]. Acoust. Sci. & Tech., 2006, 27(6): 340-343.

[25] YAIRI S, IWAYA Y, SUZUKI Y. Individualization feature of head-related transfer functions based on subjective evaluation[C]. Proceedings of the 14 International Conference on Auditory Display, 2008.

[26] KATZ B F G, PARSEIHIAN G. Perceptually based head-related transfer function database optimization [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 131 (2): EL99- EL 105.

[27] SO R H Y, NGAN B, HORNER A, et al. Toward orthogonal non-individualised head-related transfer functions for forward and backward directional sound: cluster analysis and an experimental study [J]. Ergonomics, 2010, 53(6):767-781.

[28] TAN C J, GAN W S. User-defined spectral manipulation of HRTF for improved localization in 3D sound systems [J]. Electronics letters, 1998, 34 (25): 2387-2389.

[29] HWANG S, PARK Y, PARK Y S. Modeling and customization of head-related impulse responses based on general basis functions in time domain [J]. Acta Acoustica united with Acoustica, 2008, 94: 965-980.

[30] ZAHORIK P, BANGAYAN P, SUNDARESWARAN V, et al. Perceptual recalibration in human sound localization: Learning to remediate front-back reversals [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2006, 120 (1):343-359.

[31] SUŠNIK R, SODNIK J, TOMAŽIČ S. An elevation coding method for auditory displays [J]. Applied Acoustics, 2008, 69: 233-241.

[32] FONTANA S, FARINA A, GRENIER Y. A system for rapid measurement and direct customization of head related impulse responses. AES 120th Convention, 2006, Preprint 6851.

[33] ZHONG X L, XIE B S. Maximal azimuthal resolution needed in measurements of head-related transfer functions [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125(4): 2209-2220.

[34] XIE B S. Recovery of individual head-related transfer functions from a small set of measurements [J]. J. Acoust. Soc. Am., 2012, 132(1): 282-294.

[35] LEMAIRE V, CLEROT F, BUSSON S, et al. Individualized HRTFs from few measurements: a statistical learning approach[C]. Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, 2005: 2041-2046.

[36] WOODWORTH R S, SCHLOSBERG H. Experimental Psychology [M], Holt H.(Ed.), 1954.

[37] ALGAZI V R, AVENDANO C, DUDA R O. Estimation of a spherical-head model from anthropometry[J]. J. Audio Eng. Soc., 2001, 49(6): 472-479.

[38] ZHONG X L, XIE B S. A novel model of interaural time difference based on spatial Fourier analysis[J]. Chinese Physics Letters, 2007, 24(5): 1313-1316.

[39] ZHONG X L, XIE B S. A continuous model of interaural time difference based on surface spherical harmonic[C]. 10th Western Pacific Acoustics Conference, 2009.

[40] ALGAZI V R, AVENDANO C, THOMPSON D. Dependence of subject and measurement position in binaural signal acquisition[J]. J. Audio Eng. Soc., 1999, 47(11): 937-947.

[41] RIEDERER K A J. Repeatability analysis of head-related transfer function measurements[C]. AES 105th Convention, 1998, Preprint: 4846.

[42] ZHONG X L, XIE B S. Errors in the measurements of individual head-related transfer function[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009,126(4), Pt. 2:2241.

[43] 钟小丽, 谢波荪. 不同测量的 KEMAR 人工头 HRTF 数据初步比较[C]. 声频工程学术交流年会论文集, 2011: 318-323.

[44] KULKARNI A, COLBURN H S. Variability in the characterization of the headphone transfer-function[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2000, 107(2): 1071-1074.

[45] ZHONG X L, LIU Y, XIANG N, et al. Errors in the measurements of individual headphone-to-ear-canal transfer function[C]. DAGA, 2010: 607-608.

[46] ZHANG C Y, XIE B S. Platform for virtual auditory environment real time rendering system[C], ACOUSTICS 2012 HONG KONG Conference and Exhibition.