

文章编号:1004-9037(2014)02-0180-06

近场结构化头相关传输函数的测量与分析

吴玺宏^{1,2} 吕振洋^{1,2} 高 源^{1,2} 曲天书^{1,2}

(1. 北京大学机器感知与智能教育部重点实验室, 北京, 100871; 2. 北京大学言语听觉研究中心, 北京, 100871)

摘要:采用脉冲发生器作为点声源,通过控制水平角、仰角和距离等三维空间参数,测量了一种高空间分辨率的结构化头相关传递函数,其中包括头传递函数、头和耳廓传递函数以及头和躯干传递函数。基于测得的结构化头相关传递函数,分析了各结构对头相关传递函数的影响,并结合本研究测得的结构化头相关传递函数和 2009 年测得的完整头相关传递函数,基于两种加性法则计算分析了耳廓传递函数,分析结果表明两种方法得到的耳廓相关传递函数具有高相关度,验证了头相关传递函数是由头、躯干和耳廓的传递函数叠加而成的合理性。

关键词:头相关传递函数;点声源;空间分辨率;近场;远场

中图分类号:TP18 **文献标志码:**A

Measurement and Analysis for Proximal and Structural Head-Related Transfer Function

Wu Xihong^{1,2}, Lü Zhenyang^{1,2}, Gao Yuan^{1,2}, Qu Tianshu^{1,2}

(1. Key Lab of Machine Perception (Ministry of Education), Peking University, Beijing, 100871, China;
2. Speech and Hearing Researcher Center, Peking University, Beijing, 100871, China)

Abstract: The structural head-related transfer functions with high spatial resolution are measured using spark gap generator, which include head transfer function, head and pinna transfer function and head and torso transfer function. Based on the measured structural transfer functions, the effects of head, pinnae and torso on the total head-related transfer function are analyzed. Using the measured structural head-related transfer functions and the total head-related transfer functions, the pinna transfer functions are calculated using two different methods. The results show that the two pinna transfer functions are highly correlated in frequency domain. That means, under some conditions, the head-related transfer function can be seen as the summation of head transfer function, torso transfer function and pinna transfer function.

Key words: head-related transfer function; point sound source; spatial resolution; proximal region; distance region

引 言

头相关传输函数(Head-related transfer function, HRTF)描述了在自由场中声音从声源到达人耳鼓膜的传递特性。它被广泛应用于室内声学模拟,三维声像和虚拟现实等领域。获得头相关传递的主要方法包括物理建模、数值计算及实验测量,其中,最直接和精确方法是实验测量。威斯康

辛大学 Wightman 早在 1989 年就测量了娄氏电子公司声学人的耳膜处的 HRTF 并且开发了一套虚拟声系统^[1-2]。麻省理工的 Gardner 和 Martin 于 1995 年测量了人工头(Knowles electronic manikin for acoustic research, KEMAR)的头相关传递函数^[3],得到了广泛应用。加州大学戴维斯分校 Algazi 于 2001 年测量了 43 个真人和一个 KEMAR(两种不同型号的耳廓)的头相关传递函数,构造了 CIPIC HRTF 数据库^[4]。上述测量工作主

要针对远场条件,考虑了水平角和仰角的变化,忽略了声源距离对传递函数的影响。

在近场条件下(距离听者 1 m 范围内),由于 HRTF 受距离影响显著,因此测量时需要考虑声源的距离对头相关传递函数的影响。远场条件下测量头相关传递函数时,一般采用音箱作为声源,但近场条件下,此类声源从体积上不能被看成点声源,因此,如何选择合适的点声源,成为近场头相关传递函数测量的一个难题。针对此问题,Martens 和 Duda 于 1998 年采用直径 6.4 cm 的扬声器,基于 Golay 码方法测量了一个球的头相关传递函数,得到了近场的 HRTF 数据^[5]。同年,Galamia 使用 Tannoy 600 近场扬声器,基于最大长度序列(Maxim length sequence,MLS)方法测量了 KEMAR 人工头的近场 HRTF 数据^[6]。然而,这两种方法中声源从体积上仍然不能被看作是点声源,所测量的数据很难避免来自声源大小的影响。Brun-gart 和 Rabinowitz 1999 年利用电动喇叭驱动器和聚乙烯长管制造了一个近似点声源对 KEMAR 头进行了近场测量^[7-9]。Hosoe 于 2004 年和 2006 年分别采用自制的十二面体微扬声器,测量了 B&K 4128 人工头的近场 HRTF 并公布了该数据库^[10-11]。这两个工作解决了声源的体积问题,但声源频谱均有缺失,测量结果存在局部信噪比过低的问题,且两组测量结果的空间分辨率也不是很高。2009 年,北京大学与中科院声学所用脉冲发生器作为声源,建立了一个距离、仰角和水平角可任意调整的测量系统,并基于此系统测量得到高空间分辨率结构化头相关函数库^[12]。

近几年,随着头传递函数的研究不断深入,为建模和个性化需要,研究者需要进一步了解头、耳廓、躯干对头相关传递函数中的影响。面向此需求本文采用文献[12]的声源进行了头传递函数、头和耳廓传递函数及头和躯干传递函数等结构化头相关传递函数的测量,并进一步深入分析了头、躯干和耳廓等不同结构对头相关传递函数的作用,验证了它们在头相关传递函数中作用的叠加性。

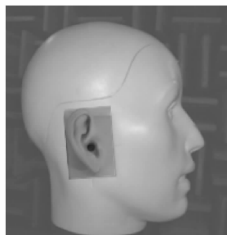
1 测量设备与环境

本研究的测量对象为 KEMAR 人工头(型号为 DB-4004,包括躯干和两个颈圈)。由于 KEMAR 人工头左右对称,在测量时使用了两种不同的耳廓模型。左耳耳廓模型为 DB-066(较大),右

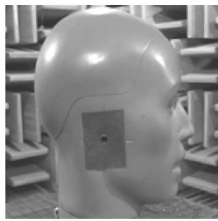
耳耳廓模型为 DB-060(较小),这样一次测量可以得到两组传递函数数据。人工头中配有 GRAS 40AG 型传声器、GRAS 26AC 型前置放大器和 Zwislocki 耳道模拟器两套,左、右耳各一套。测量在中国科学院声学研究所的全消声室中进行。该消声室截止频率为 70 Hz,可用空间为 6.5 m×4.8 m×3.2 m。为了达到点声源的效果,声源选择了文献[12]中的 BDMS1-040528 型脉冲发生器。人工头被竖直固定在全消声室中心平台上的一个带刻度的可水平转动的转盘上,转盘最小刻度为 5 度。脉冲声源被固定在如图 1 所示的支架上。由于脉冲声源每次发射的脉冲声音信号的波形不可能完全一致,所以在测量时需要记录每次的声源信号。为此,在脉冲声源附近 10 cm 处安放了一个配有 GRAS 26AC 型前置放大器的 GRAS 40AG 型传声器,用于记录声源信号,该传声器称为参考传声器。实验采用的数据采集装置是 B&K 公司生产的 pulse3560c 型多通道分析仪,采



(a) 头和躯干相关传递函数的测量环境
(a) Environment for head and torso transfer function measurement



(b) 带耳廓的头
(b) Head with pinnae



(c) 去掉耳廓的头
(c) Head without pinnae

图 1 含躯干结构化传递函数测量环境
Fig. 1 Environment for structure HRTF measurement with torso

样率为 65 536 Hz,量化位数为 16 bit。多通道分析仪与计算机相连,用以实时保存记录到的信号。测量过程中,转盘和支架表面均盖有海绵,从而可减少其对声音的反射。在测量某一位置的传递函数时,信号采集装置同时记录左耳传声器、右耳传声器和参考传声器的信号,通过适当的计算即可同时得到不同情况下左右耳的结构化头相关传递函数。

本研究共测量 3 组结构化的头相关传递函数,包括头传递函数,头和耳廓传递函数以及头和躯干传递函数。头和躯干传递函数的测量环境如图 1 所示,头传递函数,头和耳廓传递函数的测量环境如图 2 所示。在头和躯干传递函数的测量中,将人工头右耳耳廓模型摘下,并用橡皮泥填平右耳处为安装耳廓模型而设计的凹槽。在头和耳廓传递函

数的测量中,将人工头颈部以上部分从模型躯干上取下,并安装在图 2 所示的头部支架上。在头传递函数的测量中,则把耳廓模型摘下,用橡皮泥填平,并将躯干取下,安装在图 2 所示的头部支架上。

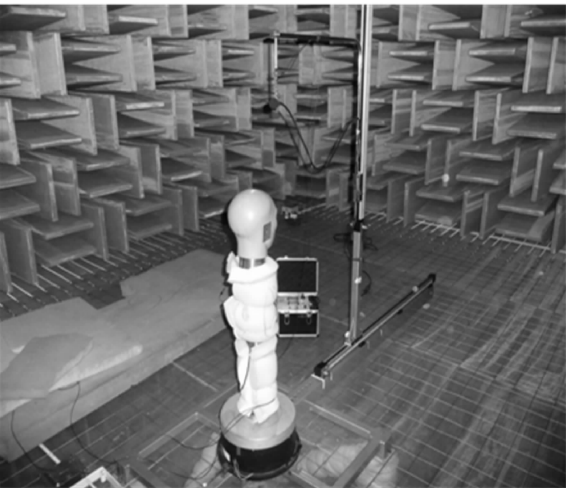
2 测量步骤

人工头被固定在全消声室中心平台上的一个带刻度的可转动转盘上,脉冲发生器则被固定在定制的测量支架上。通过遥控器控制脉冲发生器放电发声,采用 PULSE 自带的录音软件,以采样率 65 536 Hz,精度 16 bit 的条件进行音频采集,并保存为 WAV 格式。转盘、平台、支架等可能产生反射的物体均用海绵遮盖。测量按照距离、仰角、水平角的顺序进行。首先固定一个距离、一个仰角,测量不同水平角的结构化头相关传递函数,然后测量同一距离,另一仰角条件下不同水平角的结构化头相关传递函数,重复此步骤,至该距离所有仰角全部测完,开始测量下一距离球面上各位置的结构化头相关传递函数。

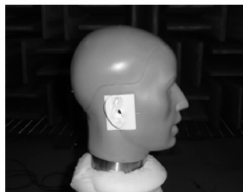
在开始测量某一平面上的 HRTF 之前,要首先通过比较双耳信号到达的时间差来标定水平角 0°的位置。即,当声源在人工头前方且左、右耳同时接收到声源发出的信号时,声源的水平角被标定为 0°。在标定好 0°之后,就开始逆时针转动转盘,逐个测量各个水平角的结构化头相关传递函数。在每一位置进行测量时,脉冲声源连续发声 5 次,参考传声器、左耳传声器和右耳传声器同时记录声源、左耳和右耳信号,便完成了一次测量。

3 测量数据空间分布

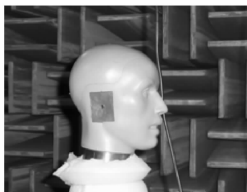
本研究工作共测量 3 组结构化 HRTF 数据,每组数据分别测量了声源距离人工头中心 20,30,40,50,75,100 cm 的 6 个距离上的 HRTF 数据。在近场范围内选择了相对较多的数据点,是因为随着距离的减小,HRTF 随距离的变化会越来越显著。在每个距离下测量的角度如表 1 所示。每个距离共需要测量以该距离为半径的球面上 793 点的数据,6 个距离共 4 758 点。



(a) 头传递函数、头和耳廓传递函数的测量环境
(a) Environment for head, head and pinnae transfer function measurement



(b) 带耳廓的头
(b) Head with pinnae



(c) 去掉耳廓的头
(c) Head without pinnae

图 2 无躯干结构化传递函数测量环境
Fig. 2 Environment for structural HRTF measurement without torso

表 1 测量角的分布

Table 1 Distribution of measured positions

仰角/(°)	—40	—30	—20	—10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	总计
水平角间/(°)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	10	15	30		
测量点数	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72	36	24	12	1	793

4 数据分析及结果

3 种结构化头相关传递函数和文献[12]中的完整头相关传递函数幅度谱随距离变化如图 3 所示,图 3(a)是头传递函数,图 3(b)是头和躯干传递函数,图 3(c)是头和耳廓传递函数,图 3(d)是文献[12]中测量的整体头相关传递函数。从图中可以看出头传递函数中有 3 个明显峰值,变化比较平坦。且峰值出现的位置几乎不随着距离变化,在近场条件即 50 cm 之内,头传递函数的峰谷变化较

小,表明其对距离的定位能力微弱;在头和躯干传递函数中,其幅度谱在 50 cm 或更远的位置产生了明显的梳状滤波效果,并且随着距离变化显著,在近场条件下,头和躯干传递函数的变化趋势与头传递函数相似,可见躯干对距离定位有一定作用;在头和耳廓传递函数中,峰谷位置几乎没有随距离改变而变化,走势也几乎相同,可以说耳廓对距离定位没有显著效果。在完整的头相关传递函数中,在躯干、头和耳廓的综合作用下,可以看出峰谷值随距离变化明显,包含了丰富的距离定位信息。

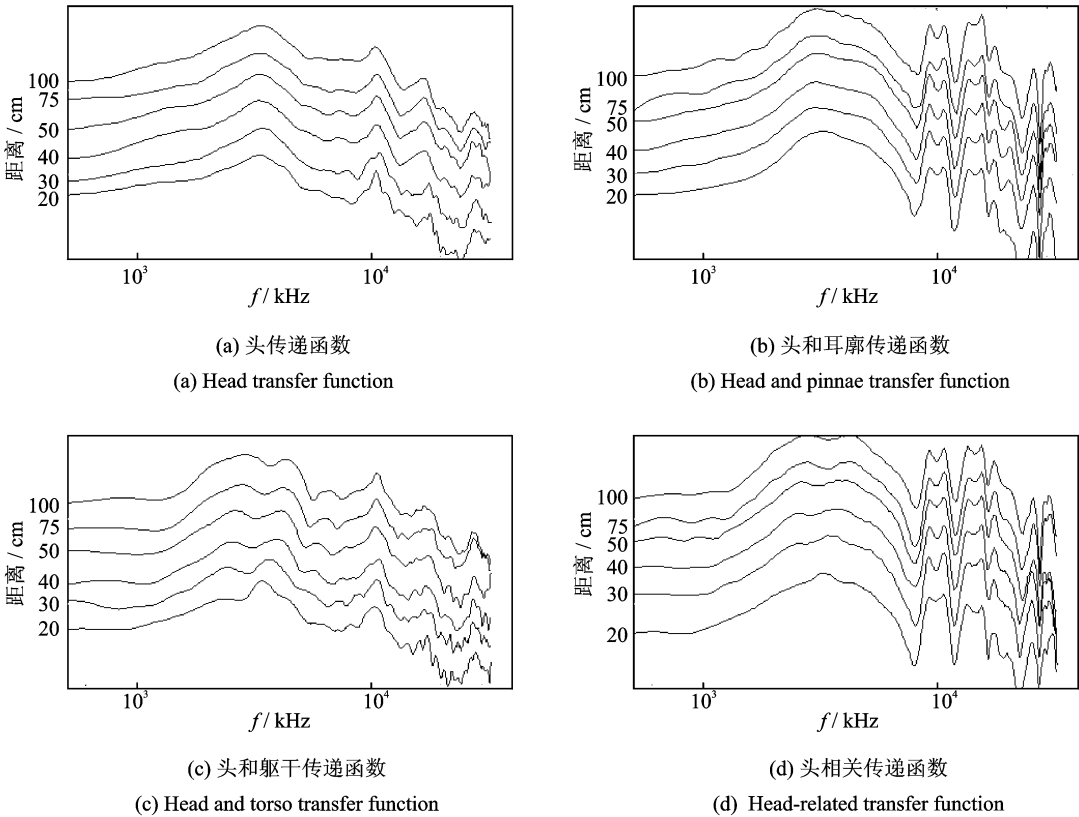


图 3 不同结构 HRTF 幅度谱随距离变化图

Fig. 3 Amplitude spectrum varies with distances of different structural HRTFs

从图 3 可以看出,当传递函数包括耳廓时,头相关传递函数发生明显变化,因此,可以说人体结构中对头相关传递函数影响最大的就是耳廓。耳廓的形状和大小决定了它对声音作用的频率范围在 3~4kHz 以上,耳廓的传递函数很难单独测得。本研究首先假设头相关传递函数是由头、躯干和耳廓分别对头相关传递函数进行作用叠加得到,然后通过进一步的实验分析来验证这一假设的合理性。在图 3 所示的 4 组数据基础上,采用两种线性组合方式得到耳廓的传递函数,一种是头和耳廓传递函数减去头传递函数(图 3(a,b)),另一种是头相关

传递函数减去头和躯干传递函数(图 3(c,d))。以仰角和水平角均为 0°为例,按两种方法得到的不同距离的耳廓传递函数如图 4 所示。

从图中可以看出,头相关传递函数减去头和躯干传递函数所得到耳廓的传递函数(图 4(a))与头和耳廓传递函数减去头传递函数得到的耳廓的传递函数(图 4(b))在 1 kHz 以上频率波形上具有明显的相似性。为进一步验证两种方法得到的耳廓传递函数是一致的,采用相关性作为准则计算了不同距离下,两种传递函数在仰角为零时不同水平角的相关系数,结果如图 5 所示。

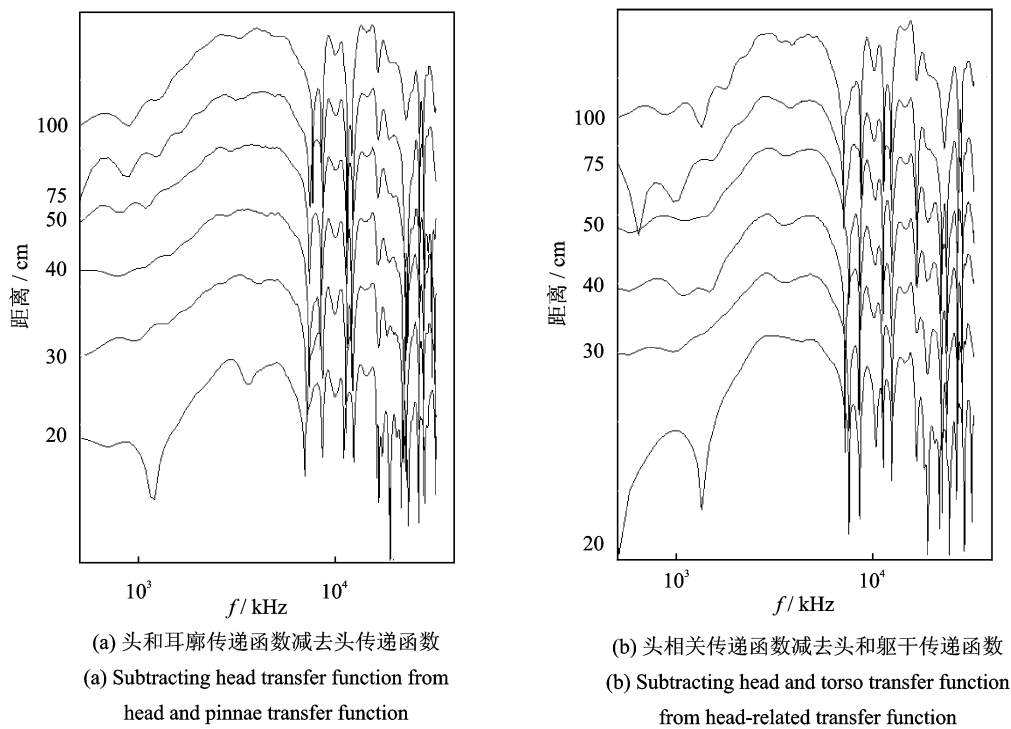


图 4 两种方法得到的耳廓的传递函数
Fig. 4 Pinnae transfer function based on two linear methods

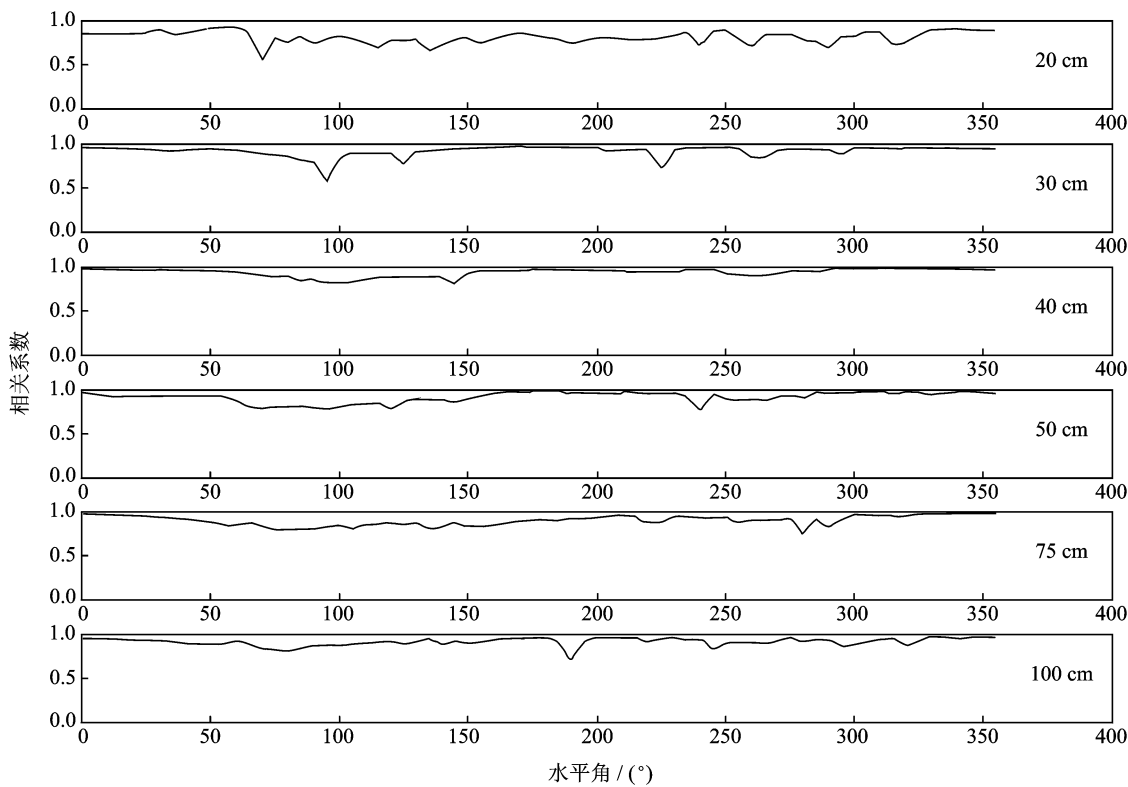


图 5 两种耳廓的传递函数之间的相关系数
Fig. 5 Correlation coefficients between the two pinnae transfer functions

图 5 的结果表明,在不同距离上,两种组合方式得到的耳廓传递函数在各个水平角都具有比较高的相关系数。这表明在一定的误差允许范围内,头相关传递函数可以看成是头、躯干及耳廓分别作

用的结果叠加而成。

5 结束语

本文详细讨论了结构化头相关传递函数的测量问题,并构建了距离从 20~100 cm,仰角从 -40° ~ 90° ,水平角从 0° ~ 360° 高空间分辨率的三组结构化头相关传递函数,包括头传递函数,头和躯干传递函数,头和耳廓传递函数。结合文献[12]中测量的完整头相关传递函数,进一步分析了头、躯干及耳廓对头相关传递函数的作用。并基于三组测量的高空间分辨率结构化传递函数以及文献[12]中的一组完整头相关传递函数,采用两种算法得到耳廓传递函数,通过计算相似度加以对比,发现两种不同算法得到的耳廓传递函数具有高度相关性,这表明在一定误差允许范围内,头相关传递函数可以看作是头、躯干、和耳廓的传递函数叠加作用产生的结果。

参考文献:

- [1] Wightman F L, Kistler D J. Headphone simulation of free-field listening. I: stimulus synthesis[J]. J Acoust Soc Amer, 1989, 85(2):858-867.
- [2] Wightman F L, Kistler D J. Headphone simulation of free-field listening. II: psychophysical validation [J]. J Acoust Soc Amer, 1989,85(2):868-878.
- [3] Gardner W G, Martin K D. HRTF measurements of a KEMAR[J]. J Acoust Soc Amer, 1995,97(6): 3907-3908.
- [4] Algazi A R, Duda R O. The CIPIC HRTF database [C]//Proc 2001 IEEE Workshop on Applicat Signal Process Audio Acoust. New Paltz, NY: IEEE 2001: 99-102.
- [5] Martens W L, Duda R O. Range dependence of the response of a spherical head model[J]. J Acoust Soc Amer, 1998, 104(5): 3048-3058.

- [6] Calamia P T. Three-dimensional localization of a close-range acoustic source using binaural cues[D]. Austin, TX: Univ of Texas,1998.
- [7] Brungart D S, Rabinowitz W M. Auditory localization of nearby sources. head-related transfer functions[J]. J Acoust Soc Amer, 1999, 106(3):1465-1479.
- [8] Brungart D S, Durlach N I, Rabinowitz W M. Auditory localization of nearby sources II: localization of a broadband source[J]. J Acoust Soc Amer, 1999, 106(4): 1956-1968.
- [9] Brungart D S. Auditory localization of nearby sources III: stimulus effects[J]. J Acoust Soc Amer, 1999, 106(6):3589-3602.
- [10] Nishino T, Hosoe S, Takeda K, et al. Measurement of the head related transfer function using the spark noise[C]//Proc 18th Int Congr Acoust. Kyoto, Japan: [s. n.], 2004: 1437-1438.
- [11] Hosoe S, Nishino T, Itou K, et. al. Development of micrododecahedral loudspeaker for measuring head related transfer functions in the proximal region[C]//Proc 2006 IEEE Int Conf Acoust, Speech, Signal Process. Toulouse, France. IEEE, 2006(5): 329-332.
- [12] Qu T S, Xiao Z, Gong M, et. al. Distance-dependent head-related transfer functions measured with high spatial resolution using a spark gap[J]. IEEE Trans on Audio, Speech, and Language Processing, 2009, 17(6):1124-1132.

作者简介:吴玺宏(1967-),男,教授,研究方向:语音信号处理、语音识别及合成、听感知计算模型,E-mail:wxh@cis.pku.edu.cn;吕振洋(1989-),男,学士,研究方向:虚拟听觉、头相关传递函数建模;高源(1992-),女,学士,研究方向:虚拟听觉,头相关传递函数测量;曲天书(1971-),男,博士,副教授,研究方向:音频信号处理、虚拟声音、空间音频编码。