

用于厅堂音质评价研究的人工 头传输系统的特性研究*

徐 勇 王炳麟

(清华大学建筑学院, 北京 100084)

1991年7月9日收到

摘要 本文对一个模拟中国男性的人工头传输系统的频响、前后频响差和指向性等主要物理特性, 以及方位感、声源远近感和房间大小感等重要听感特性进行了实验研究。结果表明, 这种人工头传输系统可以作为国内厅堂音质评价研究的一个有效工具。

On the transfer behavior of an artificial head system applied acoustical assessment researches for halls

XU Yong and WANG Binglin

(Architectural School, Tsinghua University)

Received July 9, 1991

Abstract The authors have made tests on the transfer system with an artificial head modeling a Chinese male on main physical behaviors such as the frequency response, difference in frequency responses between the front and the rear incidences, to ascertain important hearing behaviors such as the localization, distance perception and room dimensions perception. The results verify that this kind of transfer system with an artificial head could be one of effective tools in acoustical evaluation researches for halls.

一、引 言

听者对厅堂的音质印象是由作用其两耳上的声信号共同形成的, 但国内的厅堂音质评价研究目前仍停留于单点声场的阶段, 主要原因之一是缺少一种合适的研究工具。近年来的国外研究^[1]表明, 人工头方法是研究双耳听闻效应的有效手段, 有鉴于此, 参考国外经验^[2], 我们试制了一套适合中国情况的厅堂音质评价研究用人工头传输系统。图1是这套系统的构成简图。与国外较为典型的同类型人工头传输系统相比, 主要有以下特点: (1) 传声器位于人工头外耳道口, 振动膜于开口平齐的位置, 无外耳道(图2); (2) 采用高保真立体声耳机作为信号

* 国家自然科学基金资助课题。

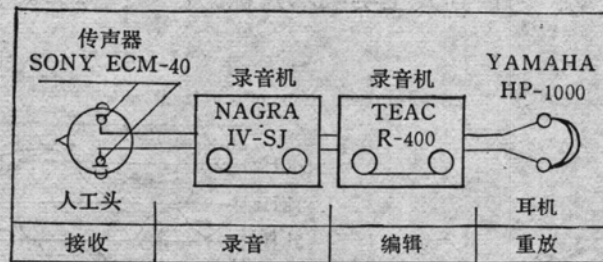


图1 人工头传输系统的构成简图

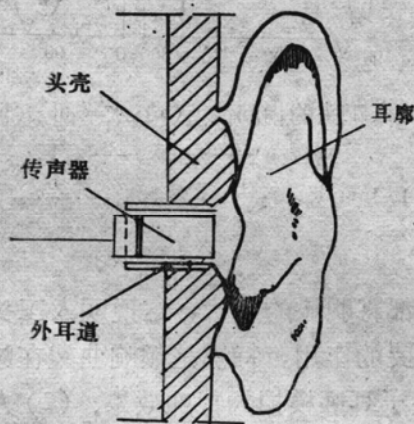


图2 人工头的外耳构造

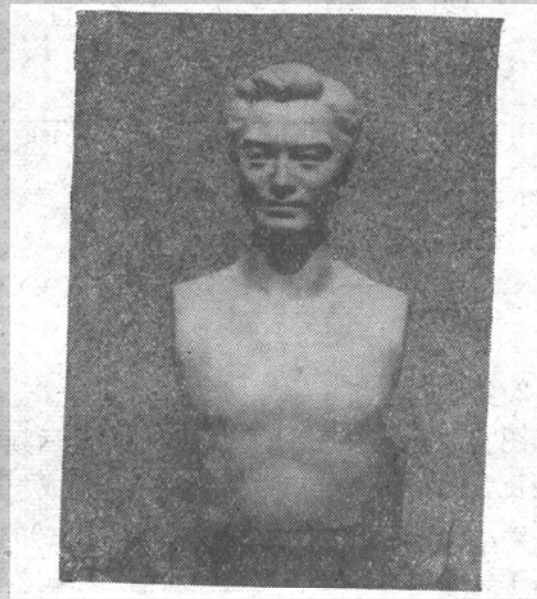


图3 人工头的外形

重放工具；(3)人工头的造型为典型的中国男性(图3)。人工头为树脂粘合纸质材料形成的壳体,表面具有一定的刚度。本文的主要工作是从声学-物理特性及听感特性探讨这套系统在国内外厅堂音质评价中应用的可行性。由于其中电声器件的声学特性易于明确,因此,本文主要是对上述特定人工头的声学特性的研究。

二、人工头的物理特性

1. 测定方法与结果

测定在消声室中进行,扬声器离开人工头中心2米,以保证近似平面波入射,主要考察人工头的频响,前后频响差*与指向性。前两项测定时,激发信号为1/3oct. 噪声,频响的参考点位于人工头两耳连线中点;后一项测定时,激发信号以正弦纯音为主,兼用1/3oct. 噪声。指向性测定涉及水平面和中性面这两个与头有关的重要平面**,以人工头按一定方式绕特定轴线

* 前后频响差为相同平面波从正前方与正后方入射时声压级响应差值的频率特性。

** 与头有关的几个平面定义如下: 经两耳连线的水平面和铅垂面分别称水平面和横断面,两耳连线的中垂面称中性面;在水平面和中性面上,正前方为0°,前者顺时针角度为正,后者逆时针向上角度为正,在横断面上,右侧水平方向为0°,逆时针向上角度为正。

旋转来实现声源方向的变动。考虑到人工头的不对称“发型”，左右两耳都进行了测定。图 4 及 5 是测定结果。

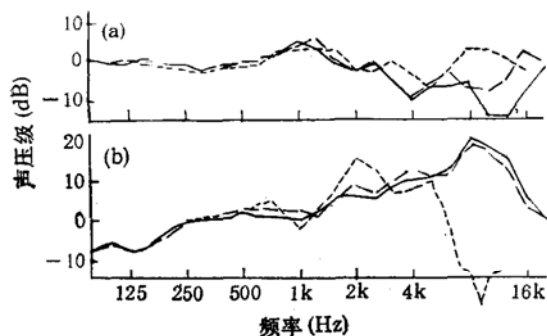


图 4 (a) 频响 (b) 前后频响差
——人工头左耳, ---人工头右耳,真人(头)

2. 结果与分析

图 4 中 (1) 人工头的频响曲线及前后频响差曲线都有明显的起伏, 这说明人工头的头部造型及表面材料对其声学物理特性的形成起着至关重要的作用, 特别是频响曲线在波长大致与耳廓尺寸相当的频率附近 (8kHz 左右) 的峰值反映了耳廓模拟的特殊效果。(2) 左右两耳的人工头频响曲线几乎重合, 而前后频响差曲线仅在 8kHz 以上高频段出现较明显差异, 考虑到人工头外型“发型”的不对称, 显然人工头头部的细部造型仅在高频范围对某些声学物理特性产生一定的影响。(3) 在图中我们对应地画出了 Wilkens 利用探针传声器在真人外耳

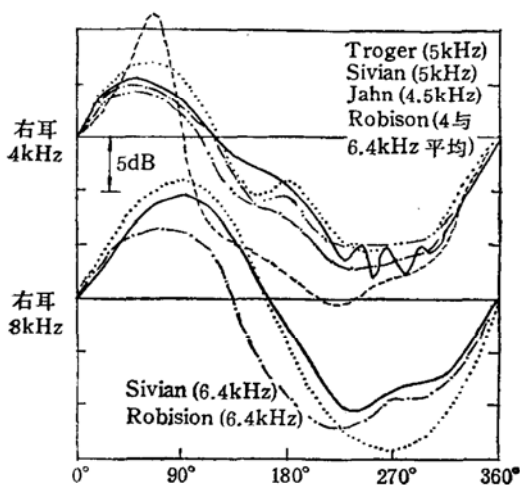


图 6 人工头指向性与真人的比较
——人工头的水平指向性曲线, 其他曲线分别是由不同学者测出的真人的水平指向性曲线

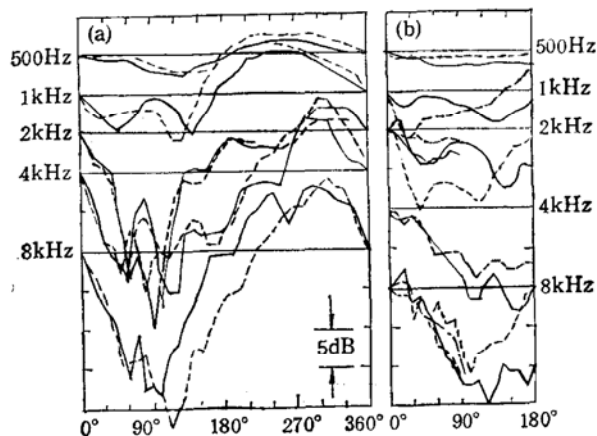


图 5 人工头的指向性 (a) 水平面 (b) 中性面
纯音: ——左耳, ---右耳;
1/3oct 噪声:左耳 ---右耳

道底部测出的真人头频响曲线^[3]及 Blauert 将传声器置于真人外耳道开口处测出的真人头前后频响差曲线^[4]。相比之下, 我们的人工头相对真人头, 前后频响差较为一致, 而且频率越低符合得越好; 而频响在 6.3kHz 以下较为一致, 6.3kHz 以上由于缺少一个响应“低谷”而出现较大差异。根据 Kleiner 关于外耳道模拟及传声器位置对人工头频响特性的影响的研究^[2], 上述的频响差异主要是由于堵塞外耳道的人工头缺少外耳道的共振吸收及传输作用所产生的。由于本工作的人工头是用于音质评价的, 重放信号在耳机之后要经过真人的外耳道, 所以存在这一差异是自然的, 并不能看做是声学特性的缺陷。

图 5 中 (1) 人工头的响应明显地具有指向性, 并且随着频率的增高而加强。(2) 用不同信

号得出的指向性曲线具有基本一致的特征。(3) 人工头左右两耳各自的指向性曲线在较低频率上基本相似,但随着频率的增高表现出较大的数值差异,而且,这种差异在中性面上较水平面更为明显,这反映出头部形状的细节对人工头的指向性具有一定的影响。图 6 是人工头的水平指向性与几个真人(头)的同类特性的比较^[9],尽管我们测出的曲线在所测耳异侧有一定的波动及较大的负“极性”,但这种差异在数值上并不比另外几条曲线之间的差异大多少,因此可以认为,我们的人工头的指向性与真人是基本一致的。

人工头的特性与真人也还存在某些差异。但从图 6 可以看出,差异并不大,指向性的趋势是相同的。如果必要,这些差异通过附加适当的电声补偿措施即可减小乃至消除。

三、人工头的听感特性

本文主要研究人工头的方位感、对声源的距离感与房间大小感。首先对所涉及的听感实验做如下统一说明:(1)不同声源的试听信号不是通过扬声器重放同一段录音,而是由演奏者直接演奏同一段节目。(2)参加试听实验的,都是在校大学生或研究生,年龄为 23 ± 5 周岁,具有正常听觉;(3)在试听过程中,拒绝“无法判断”的回答,如出现这种情况,则令听者重听信号,直到给出明确的判断为止。

1. 人工头的方位感

1) 实验方法与结果

以自由场及 1kHz 混响时间为 1.3s 的混响场作为实验的原始声场。先用人工头在原始声场中记录下来自相同距离,不同方向的节目信号作为试听信号,将这些试听信号随机排列,以相当短的间隔重录在磁带上;然后在试听室内将这些经过编辑的信号通过立体声耳机呈现给试听者,要求试听者头部保持不动,每听到一个试听信号后立即指出其“感觉到的”(perceived)声源方向;最后通过对试听者判断结果的统计处理,画出表征人工头方位感的特征图。为了考察测定结果,我们还测定了真人的方位感。此项测定在 1kHz 混响时间为 1.0s 的声场环境中进行。测定时,声源距离不变,方向随机改变,要求试听者头部固定,蒙住双眼,每听到一个信号后立即指出声源方向。与人工头同样,我们可以获得表征真人方位感的特征图。在通过人工头的三个平面上,都进行了方位感实验。表 1 是所用节目源的有关情况表 2 是方位感测定中节目源及声源方向和试听者的选择情况。图 7 及图 8 是通过实验得到的人工头与真人的方位感特征图。

表 1 方位感测定中节目源的有关情况

编 号	演奏方式	类 型	节 目 源 内 容	最大声压级频谱 -30dB 以上区间 (kHz)	信号长 (s)
1	男声独唱	声 乐	歌剧《江姐》主题歌“红梅赞”节选	0.125—6.3	16
2	二胡独奏	弦 乐	“二泉映月”节选	0.315—3.15	11
3	琵琶独奏	弹拨乐	“春江花月夜”节选	0.25—6.3	14
4	击拍手掌	脉 冲	三次等间距击拍手掌声	0.02—16	6
5	鸣 笛	脉 冲	单次鸣笛声		1

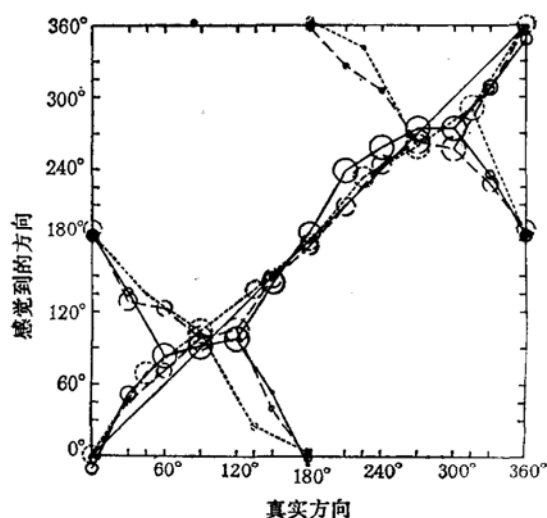


图7 水平方位感特征图

图中圆圈正比于听者的判断样本数

人工头: —○自由场 ----○混响场 真人头:○

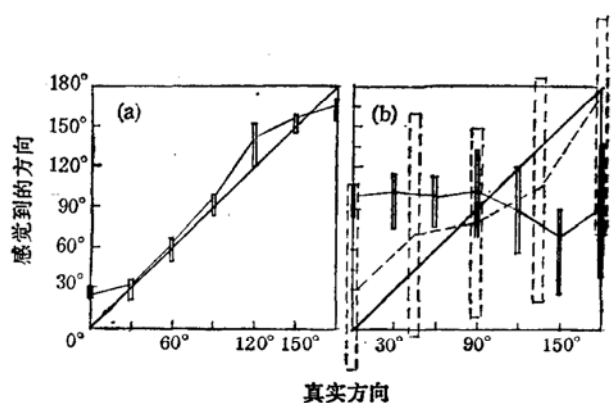


图8 (a) 人工头的横断面方位感特征图

(b) 中性面方位感特征图

—□: 人工头 ----□真人

表2 方位感测定中节目源、声源方向及试听者的选择情况

		水平面			横断面	中性面	
		人工头		真人	人工头	真人	
		自由场	混响场		自由场	自由场	
节目源	编号数量	1,2,3 3	4 1	5 1	2,3 2	1 1	5 1
声源方向	个数	12	12	8	7	7	5
	间隔	30°	30°	45°	30°	30°	45°
	呈现次数	4	4	10	5	5	10
试听者	总人数	5	20	8	10	10	8
	男性人数	3	12	5	7	7	5
	女性人数	2	8	3	3	3	3

2) 结果与分析

由方位感特征图可得出如下结论:(1)当声源在横断面时(图8(a)),通过人工头作出的方位判断相当准确。(2)当声源在水平面时(图7),通过人工头与真人直接作出的方位判断在总体趋势上没有明显差异,而且都出现倒置声源前后方向的“镜面效应”^[6],略有不同的是,真人的表现为前后方具有对称性,而人工头的则偏重前方。这种现象在混响场时更为明显。从整体上看,通过人工头的判断与真人的直接判断,结果十分接近。而且,人工头在混响场中对水平方位的判断比在自由场中更为准确。

Damaske 曾采用扬声器重放方式测定过人工头的水平面方位感,在此方式下,也有“镜面效应”出现。只是偏重于后方声源^[6]。这说明作者采用的耳机重放人工头系统在水平方位感上并不劣于用扬声器的系统。(3)当声源在中性面时(图8(b)),通过人工头的判断与真人直

接判断,都不能很好地符合声源的真实方向。判断都有集中于头顶的趋势。真人判断的平均值大体上反映出前、后方向,但数据相当离散有明显的个人差。(4)在水平面与横断面上,人工头方位感的特征图左右基本对称。说明不对称的“发型”没有产生明显影响。(5)前面提到,本文作者的人工头的指向性,在高频段上与真人的指向性有某些不同。主要原因是人工头没有外耳道,接收的是外耳道口处的信号。但用耳机听闻时,重放信号要经过试听者的外耳道,恰好与信号向真人的传播过程相同。上述方位感实验的结果表明,人工头与真人相当一致,证明了作者的这种设定。

图9是不同听者对声源方向判断的标准偏差曲线。可以看出,所有声源方向上的标准偏差值都不超过 45° ,考虑到实验中,听者所指示的方向与其感觉的方向之间可能产生的误差,以及我们记录的角度(精度 10°)与听者所指示方向间的误差,这些标准偏差的数值是不大的。因此,人工头的方位感在不同听者之间并没有有意义的差异。

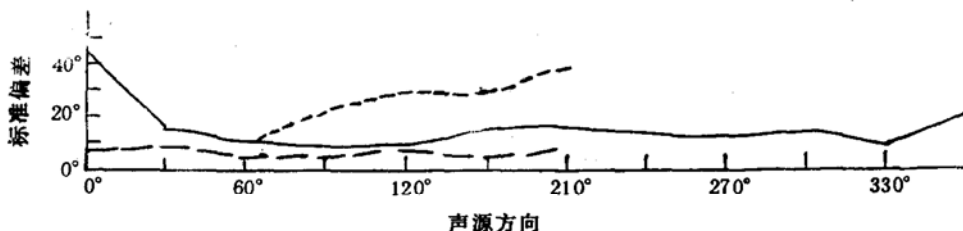


图9 不同听者之间声源方向判断的标准偏差
——水平面 ----横断面中性面

2. 人工头对声源的距离感与房间大小感

所谓人工头对声源的距离感与房间大小感是指听者通过人工头对声源的远近与所在房间的大小的识别能力。

1) 实验方法

声源距离感实验。将人工头安置在一间1kHz混响时间为1.3s的房间中,在其水平面 60° 方向上选择5个距离不同的声源位置,用人工头分别录下来自各声源的同一节目源(表1中的节目源2)信号,作为试听信号。在试听室内通过耳机将这些试听信号按成对比较法原则^[7]成对呈现给试听者,并提示,“信号对”中的两段信号是由方向相同、距离不同的声源发出,要求试听者每听完一对信号后立即指出二者之中哪段信号是由“近”声源发出的。据此,我们统计出各试听信号被选择为“近”声源的概率。用这种关于“近”的选择概率的大小排序与其对应声源远近的实际排序之间的关系,表现人工头的声源距离感特性。

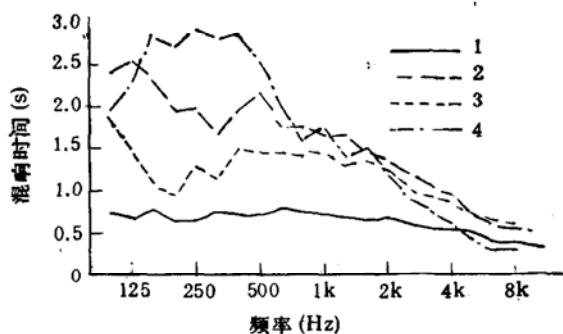


图10 用于人工头房间大小感实验的四个房间的混响时间频率特性曲线
位于演奏者处的扬声器激发,在人工头所在位置的传声器接收而测得

房间大小感实验。选择四个体积大小不同的房间。图10是它们的混响时间频率特性曲

线。人工头与声源的相对位置不变,在各房间中录下同一节目源信号。所用节目源为二胡独奏“江南春色”节选,信号长 12s。以同样的方法,得到各房间被试听者选择为“大”的概率。用这种关于“大”的选择概率的大小排序与相应房间体积大小的排序之间的关系,表现人工头的房间大小感特性。

上述实验的试听者共 20 名,是参加方位感测定的同一批人。人工头在不同房间录音时,录音机的输入设于相同的位置,重放试听时的输出位置也相同。

2) 测定结果

表 3 是实验结果。数据表明,听者能够通过我们的人工头区分声源的远近与听音所在房间的大小。

表 3 距离感及房间大小感实验结果

距离感	声源离开人工头的距离(m)	1.0	3.0	5.0	7.0	9.0
	关于“近”的选择概率	1.00	0.49	0.46	0.30	0.25
房间大小感	录音房间的体积 (m ³)	132	320	1410	11080	
	关于“大”的选择概率	0.38	0.47	0.58	0.59	

四、结 论

作者借鉴国外经验,试制了一套符合我国情况的厅堂音质评价研究用的人工头传输系统。通过对这套系统的频响、前后频响差与指向性等主要物理特性,以及方位感、距离感与房间大小感等重要听感特性的测定实验及与真人的比较分析,证明这套人工头传输系统除高频段的某些频率特性及方位感的“镜面效应”有不同的表现外,与真人有着基本一致的物理特性及听感特性。考虑到这套系统声学性能与目前国内厅堂音质评价研究的要求,这套系统造价低廉、使用方便,设备组成简单。我们的结论是,这套人工头传输系统可以在目前国内厅堂音质评价研究中推广运用。它具有足够的可靠性、可行性和现实性。可以成为我们从单耳指标研究走向双耳效应及其指标研究的有效工具。事实上,已经用这套人工头传输系统完成了关于混响场中直达声和混响声与响度关系^[8]以及两耳信号互相关特性^[9]的研究,并取得了较为满意的结果。

本文的实验工作在刘志超先生的帮助下完成,实验设备得到程明昆与叶恒健先生的鼎力支持,包紫薇先生曾给予作者多方指教。吴晓光、周旗刚与曾晓菁同学作为信号录音的演奏者,以及清华大学 21 名同学与北京大学 8 名同学作为试听者参加了实验工作。在此谨向上述各位致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Cremer L. and Müller H. A., "Principles and Applications of Room Acoustics", translated by Schultz T. J., (Applied science Publishers LTD, 1982), Part III.
- [2] Kleiner M., "Problems in the Design and Use of Dummy-Heads", *Acustica*, 41(1978), 183—193.
- [3] Wilkens H., "Kopfbezügliche Stereophonie-ein Hilfsmittel für Vergleich und Beurteilung Verschiedener Raumindrücke", *Acustica*, 26(1972), S. 213—221.
- [4] Blauert J., "Sound localization in the median plane", *Acustica*, 22(1969/1970), 205.
- [5] Schirmer W., U. *Elektroakust.*, 72(1963), 39.
- [6] Damaske P., "Head-Related Two-Channel Stereophony with Loudspeaker Reproduction", *J. Acoust. Soc. Am.*, 50 (1971), 1109—1115.
- [7] 赫葆源等, "实验心理学"(北京大学出版社, 1983).
- [8] 傅立新, "噪声空间结构的主观评价研究", 清华大学硕士学位论文 (1990).
- [9] 韩晓晖, "厅堂音质评价中双耳信号互相关特性的研究", 清华大学硕士学位论文 (1991).