

1:10 缩尺人工头研制及其在建筑声学 缩尺模型测量中的应用^{*}

孙海涛 赵越喆[†] 吴硕贤

(华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室 广州 510640)

2015 年 3 月 15 日收到

2016 年 9 月 20 日定稿

摘要 采用三维激光扫描技术对 01dB MK2B 人工头进行扫描,建立了包含耳道的人工头数字模型,再利用 3D 打印技术按照 1:10 的缩尺比打印出缩尺人工头,并将 1/8 in 传声器嵌入缩尺人工头内。在消声室内分别测量了足尺和缩尺人工头的双耳脉冲响应,并计算了双耳时间差 ITD、双耳声压级差 ILD 以及双耳互相关系数 IACC,对比分析结果显示两者吻合很好。将研制的人工头应用于天津文化中心音乐厅 1:10 声学缩尺模型 IACC 参数测量,模型测量结果与现场测量结果一致。该方法制作的缩尺人工头可用于声学缩尺模型实验中厅堂空间感参数的测量并有望应用于可听化技术。

PACS 数: 43.55

1:10 scale dummy head and its application in architectural acoustics scale model measurement

SUN Haitao ZHAO Yuezhe WU Shuoxian

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology Guangzhou 510640)

Received Mar. 15, 2015

Revised Sept. 20, 2016

Abstract 3D scan and 3D print technology are applied to design a 1:10 scaled dummy head. Ear canals model are constructed in computer according to the size of 1/8 inch microphone. Two 1/8 inch microphones are placed inside the scale dummy head after 3D printing. The binaural impulse responses were measured in anechoic chamber, and the values of Inter-aural Cross Correlation Coefficient (IACC), Inter-aural Time Difference (ITD) and Inter-aural Level Difference (ILD) are analyzed and compared between scaled dummy head and real dummy head. The scaled dummy head was then applied in the 1:10 acoustic scale model of the concert hall in Tianjin Cultural Center. The measured IACC values in acoustics scale model are consistent with the field measured results. It can be expected that the scale dummy head could be used to predict spaciousness parameters and is hopeful to realize auralization in architectural acoustics scale model test.

引言

缩尺模型实验是建筑声学主要预测手段之一。国际上对于超过 1500 座的以自然声演出为主的厅堂通常要在建筑设计阶段通过声学缩尺模型实验检验音质缺陷并预测其建成后的音质效果。缩尺模型实验是将实际厅堂按一定比例缩小,根据相似定律确

定界面的对应材料,然后利用高频声源发声,通过记录模型中的脉冲响应来进行声缺陷的判断和声学参数的预测。受声源和传声器的限制,缩尺模型实验通常只能用于单通道脉冲响应的测量,因此只能用于混响时间 RT、早期衰变时间 EDT、明晰度 C、清晰度 D、强度指数 G 等基于单通道脉冲响应的声学参数的预测。如何通过模型实验精确获得厅堂空间感音质参数 IACC 及实现可听化是声学缩尺模型实

^{*} 亚热带建筑科学国家重点实验室自主研究课题项目 (2015ZA01)

[†] 通讯作者: 赵越喆, arzhyzh@scut.edu.cn

验研究中的难点^[1]。

上世纪 90 年代初, Ning Xiang 等学者将 M 序列信号用于缩尺模型测量, 并试制 1:10 简易缩尺人工头进行双耳脉冲响应的测量^[2-3]。2000 年 Takayuki Hidaka 和 L L Beranek 在日本 Tokyo Opera City (TOC) 音乐厅声学设计中采用 20 mm 直径的钢球模拟 1:10 缩尺人工头测量了缩尺双耳脉冲响应, 并比较了模型测量、实测和计算机仿真的结果^[4]。2001 年 Lorenz 采用自制的简易人工头和按 1:12 缩小的缩尺人工头对英国皇家阿尔伯特音乐厅 (Royal Albert Hall) 进行了可听化研究^[5]。2008 年 Jin Yong Jeon 等韩国学者用 21 mm 直径的钢球模拟 1:10 缩尺人工头, 将两个 1/8 in 传声器放置在钢球两侧左右对称位置接收双耳信号, 探讨声场条件的改变对双耳互相关参数 IACC 的影响^[6-7]。采用钢球模型模拟人工头由于用于模拟双耳声信号接收的传声器未放置在耳道内, 缩尺人头与真实人工头仍有较大差别。人头宽度按 1:10 缩小后仅为 15~16 mm, 而目前国际上最小传声器尺寸为 1/8 in (直径 3.175 mm), 因此将传声器内置在缩尺人工头内并构建左右对称的缩尺密闭耳道有相当大的难度, 必须借助三维数字模型进行处理。

为实现缩尺人工头的精确测量, 本研究采用三维激光扫描技术对 01dB MK2B 人工头进行三维扫描, 并重建耳道模型, 利用 3D 打印技术制作 1:10 缩尺人工头, 并将 1/8 in 传声器内置在缩尺人工头内拾取声信号, 在消声室中分别测量了缩尺和足尺人工头的双耳脉冲响应, 双耳时间差 ITD、双耳声压级差 ILD 以及双耳互相关系数 IACC 并进行对比分析。同时将研制的 3D 打印缩尺人工头与简易缩尺人工头在天津文化中心音乐厅 1:10 缩尺模型中进行了对比测量验证。

1 1:10 缩尺人工头研制

1.1 人工头原型

研制的 1:10 缩尺人工头的原型是基于 01dB-MK2B 人工头, 见图 1。该人工头包括详细的面部、耳廓及躯干信息, 尺寸为 520 mm×430 mm×240 mm (高×宽×厚), 左右耳分别内置一只 1/2 in 传声器, 测量频率范围为 20 Hz~16 kHz, 满足 IEC959 标准^[8]。

1.2 三维扫描建立足尺人工头数字模型

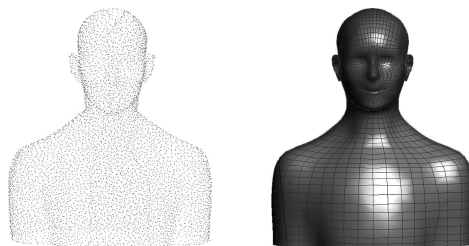
为确保人工头缩尺后的尺寸精度, 采用瑞士徕卡 Leica ScanStation 2 三维激光扫描仪对 MK2B 人工

头原型进行扫描。扫描仪标靶获取精度为 ± 1.5 mm, 扫描时最小采样密度 < 1 mm, 分 3 部分对人工头进行扫描, 将扫描的数据文件以 DXF 格式储存。

扫描输出的 DXF 图形文件以点云的方式包含了模型的三维信息 (图 2(a)), 将该文件导入 3DMAX 进行三维面片编辑处理, 得到人工头的精确三维曲面模型 (图 2(b))。为了将传声器内置在缩尺人工头内, 建模时在人头内预留耳道, 耳道开口朝下, 直径为 1/8 in, 以使得该尺寸的传声器垂直接入耳道。



图 1 01dB-MK2B 人工头



(a) 点云模型

(b) 曲面模型

图 2 01dB-MK2B 人工头的数字模型

1.3 3D 打印 1:10 缩尺人工头并嵌入传声器

本研究采用 ZPrinter450 三维快速成型机, 将设计完成后的三维数字模型通过 3D 打印机按 1:10 比例制作缩尺人工头, 原材料为石膏粉。缩尺人工头的高度为 52 mm, 设定每 0.1 mm 铺一层胶水, 则整个打印过程共需铺设 520 层胶水。3D 打印完成后的 1:10 缩尺人工头照片见图 3, 缩尺人工头模型的详细尺寸见图 4。



图 3 3D 打印的缩尺人工头模型

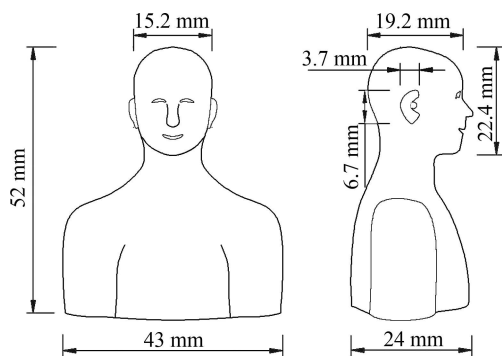


图 4 1:10 缩尺人工头的详细尺寸

缩尺人工头内用于接收双耳声信号的传声器为 B&K4138 (1/8 in)(见图 5)。该传声器的灵敏度为 $0.8 \sim 1 \text{ mV/Pa}$, 可测量频率范围为 $6.5 \text{ Hz} \sim 140 \text{ kHz}$, 动态范围为 $52.2 \sim 168 \text{ dB}$ 。将 B&K4138 传声器垂直置入缩尺人工头预留的耳道内。

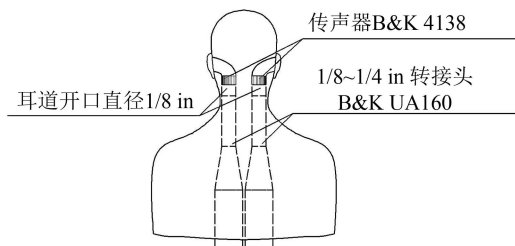


图 5 缩尺人工头耳道剖面图

2 1:10 缩尺人工头与足尺人工头的对比实验

2.1 脉冲声源的线性度及指向性检验

本研究用的测量声源为高频电火花脉冲声源, 平均脉宽 0.189 ms 。在消声室内利用 B&K4138 传声器测量了该声源线性衰减范围和指向性。

声源的线性度检验采用双通道测量, 通道 1 为参考通道, 用于检验脉冲声源的重复性, 通道 2 为测试通道, 从距离脉冲声源 10 cm 开始, 分别测量了 10 cm , 20 cm , 40 cm , 80 cm 处的声级及其频谱, 见图 6。在上述距离处的总声级分别为 139.9 dBA , 133.9 dBA , 128.0 dBA , 122.1 dBA 。按照距离加倍声级衰减 6 dB 进行计算, 表明测量声源的总声级可很好地符合点声源的线性衰减规律。参考通道的测量结果表明在中心频率为 $630 \text{ Hz} \sim 125 \text{ kHz}$ 的各 $1/3$ 倍频带上声源的重复性很好, 各频带声压级的波动均在 $\pm 0.5 \text{ dB}$ 之内。上述测量结果表明, 与声源的距离大于 10 cm , 声源辐射的声级即能很好地符合线性衰减规律。

声源的指向性测量在距声源 50 cm 的位置处进

行, 测量声源在水平面和垂直平面内每隔 30° 各点的声压级, 测量结果见图 7 和图 8。统计结果显示声源在 $630 \text{ Hz} \sim 125 \text{ kHz}$ 每个 $1/3$ 倍频程各测点声压级的标准偏差均小于 1 dB , 声源具有较好的无指向特性。

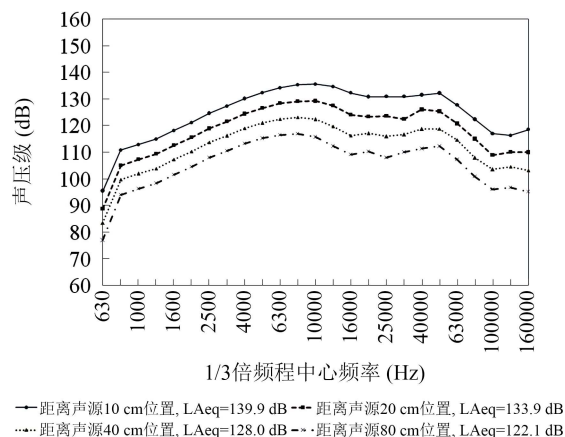


图 6 声源线性衰减特性图

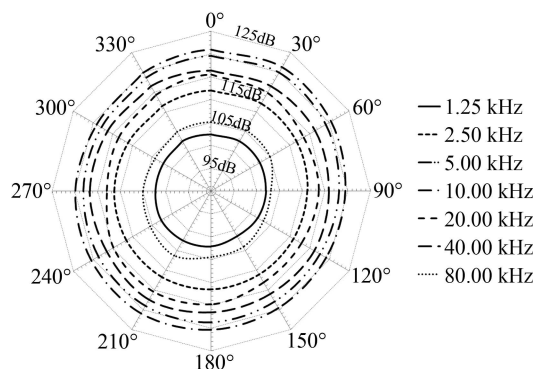


图 7 电火花声源水平指向性图

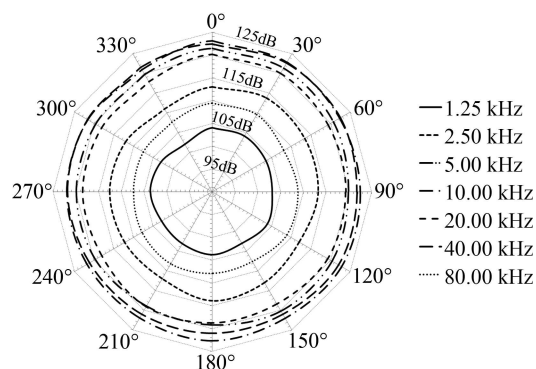


图 8 电火花声源垂直指向性图

2.2 缩尺与足尺人工头的双耳脉冲响应测量

消声室内缩尺人工头双耳脉冲响应的测量选取在对空间定位最敏感的 0° 水平面进行。将高频脉冲声源放置在距离缩尺人工头中心 15 cm 处, 按照 $1:10$ 的缩尺比, 该距离对应足尺测量距离为 1.5 m , 大于 1.2 m , 在此位置人头传递函数近似与距离无关^[9]。缩尺人工头的耳道口与声源的高度相同, 人工头中心

固定轴安装在 B&K9640 转台上, 采用激光定位, 将人工头双耳连线的中垂线对准声源时定义为 0° , 见图 9, 以双耳连线的中点为轴心水平转动人工头, 每隔 30° 记录一次双耳脉冲响应, 从 $0^\circ \sim 330^\circ$ 共记录了 12 次。

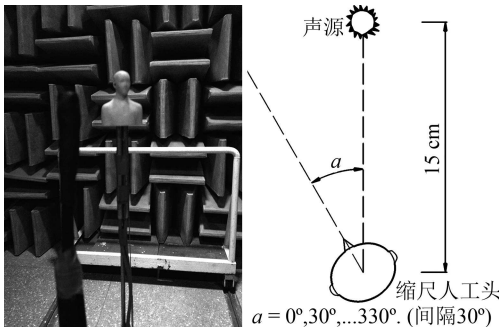


图 9 消声室内测量缩尺人工头双耳脉冲响应

为与缩尺人工头的测量结果相对比, 在消声室内测量了原型足尺人工头的双耳脉冲响应。声源距离人工头双耳的中心距离为 1.5 m。测点位置与缩尺人工头的测点位置对应。

2.3 缩尺与足尺人工头测量结果对比

2.3.1 IACC 测量结果对比

IACC 是左右耳接收到的脉冲响应的归一化短时互相关函数, 如式 (1) 和式 (2) 所示:

$$\phi_{rl}(\tau) = \frac{\int_0^{t_e} p_r(t)p_l(t+\tau)dt}{\sqrt{\left(\int_0^{t_e} p_r^2(t)dt\right)\left(\int_0^{t_e} p_l^2(t)dt\right)}}, \quad (1)$$

$$\text{IACC} = \max |\phi_{rl}(\tau)|, \quad |\tau| \leq 1 \text{ ms}, \quad (2)$$

式中 $p_l(t), p_r(t)$ 分别为左耳和右耳的脉冲响应, t_e 为积分上限, 一般取 50 ms, 80 ms 或 $+\infty$ 。本文的计算范围取 $0 \sim +\infty$ 。在国际标准 ISO3382 中, 厅堂音质测量参量 IACC 的测量频率范围为倍频程 125 Hz $\sim$ 4 kHz^[10]。利用 DIRAC 软件按照缩尺比 1:10 将测得的缩尺人工头双耳脉冲响应转换成对应的足尺人工头脉冲响应并计算得到 IACC 值 (见表 1), 并与实测的足尺人工头测量结果 (见表 2) 相对比。从表 1 和表 2 中可以看出, 水平面内的 IACC 值均接近 1, 部分频带结果低于 0.9。理论上在 0° 和 180° 位置 (相应于人头的水平正前方和水平正后方) 因左右耳的脉冲响应相同, 故 IACC 有最大值, 实验结果与此相符, 在 0° 和 180° 位置, 各个频带的 IACC 值都在 0.99 以上。在 125 Hz $\sim$ 4 kHz 的 6 个倍频带上, IACC 的数值都在 0.99 以上。在波长与人头尺寸接近的 2 kHz, IACC 的波动较大, 低值出现在 $60^\circ, 120^\circ$ 和 $240^\circ, 300^\circ$ 的对称位置上。足尺人工头与缩尺人工头的测试结果相当一致。实验数据也表明制作的缩尺人工头具有很好的对称性。

将表 1 和表 2 中的数据按对应频带分成两组进行 Pearson 相关分析, 统计结果显示, 各频带 IACC 的相关系数 r 和显著性检验 p 值、均值差 D 分别为: 125 Hz, $r=0.71, p<0.05, D=0.06$; 250 Hz, $r=0.61, p<0.05, D=0.03$; 500 Hz, $r=0.84, p<0.01, D=0.01$; 1 kHz, $r=0.75, p<0.01, D=0.01$; 2 kHz, $r=0.94, p<0.01, D=0.01$; 4 kHz, $r=0.68, p<0.05, D=0.07$ 。

采用缩尺人工头与足尺人工头两种方法测量得到的 IACC 值相差较小, 0° 水平面 IACC 各频带的均值差都在 1 个 JND (0.075) 之内^[11]。

表 1 缩尺人工头水平面内 IACC 测量值

水平角	IACC ($0 \sim \infty$)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
30°	0.96	0.99	0.98	0.99	0.96	0.94
60°	0.91	0.97	0.99	0.99	0.86	0.94
90°	0.92	0.96	0.99	0.99	0.99	0.95
120°	0.90	0.96	0.98	0.96	0.87	0.95
150°	0.93	0.97	0.97	0.99	0.98	0.98
180°	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99
210°	0.90	0.95	0.95	0.97	0.97	0.99
240°	0.90	0.94	0.97	0.97	0.89	0.96
270°	0.91	0.93	0.98	0.99	0.98	0.97
300°	0.91	0.95	0.98	0.98	0.91	0.95
330°	0.95	0.97	0.97	0.97	0.95	0.93
均值	0.93	0.97	0.98	0.98	0.95	0.96

表 2 足尺人工头水平面内 IACC 测量值

α	IACC ($0 \sim \infty$)					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
0°	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
30°	0.99	1.00	0.99	0.96	0.95	0.90
60°	0.98	1.00	0.99	0.98	0.85	0.86
90°	0.99	0.99	1.00	0.99	0.97	0.81
120°	0.98	0.99	0.98	0.92	0.85	0.84
150°	1.00	1.00	0.99	0.97	0.97	0.93
180°	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99
210°	0.99	1.00	0.97	0.97	0.99	0.96
240°	0.99	0.99	0.99	0.97	0.83	0.80
270°	0.99	0.99	0.99	0.99	0.97	0.84
300°	0.98	1.00	0.99	0.97	0.93	0.87
330°	1.00	1.00	0.98	0.98	0.93	0.89
均值	0.99	1.00	0.99	0.98	0.94	0.89

2.3.2 双耳时间差测量结果对比

双耳时间差 (Interaural Time Difference, ITD) 的定义是声波从声源传输到双耳的时间差异, 它是一个重要的方向定位因素, 与人工头的细节尺寸有关。本研究采用相关法计算得到全频带范围的“平均”ITD。按相关法的定义, 由式 (1) 计算函数 $\phi_{rl}(\tau)$ 在 $|\tau| \leq 1$ ms 范围内的最大值, 与此相对应的 τ 即为双耳时间差 ITD_{corre} , 为避开耳道共振影响, 在计算前对 $p_l(t)$, $p_r(t)$ 进行 2 kHz 的低通滤波 [12–13]。计算结果如图 10 所示。从图中可以看出, 缩尺人工头和足尺人工头的 ITD_{corre} 的最大值均出现在 90° 和 270° 位置, 两者的曲线吻合较好。

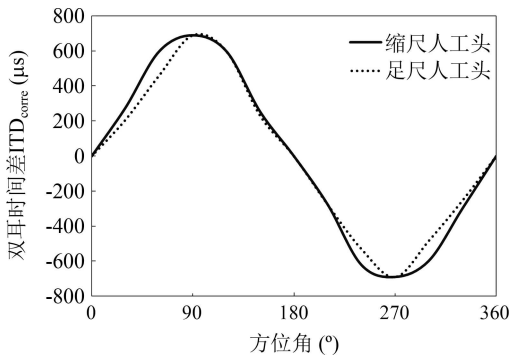


图 10 缩尺与足尺人工头的双耳时间差

2.3.3 双耳声压级差测量结果对比

双耳声压级差 (Interaural Level Difference, ILD) 为左耳与右耳的声压级差值, 也是影响声源定位的重要因素之一。本研究中以人工头双耳连线的中垂线对准声源时定义为 0° , 顺时针旋转为 $0^\circ \sim -180^\circ$, 逆时针旋转为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。缩尺人工头和足尺人工头的 ILD 的计算结果见图 11 和图 12, 最大值均出现在

4 kHz 以上, $60^\circ \sim 120^\circ$ 和 $-60^\circ \sim -120^\circ$ 之间的位置。两者的 ILD 分布图吻合良好。

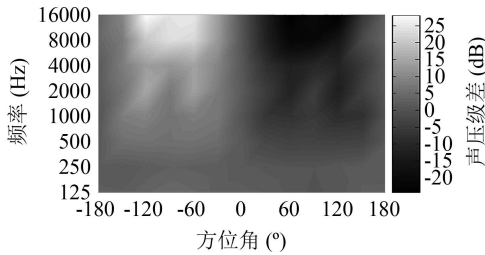


图 11 缩尺人工头双耳声压级差

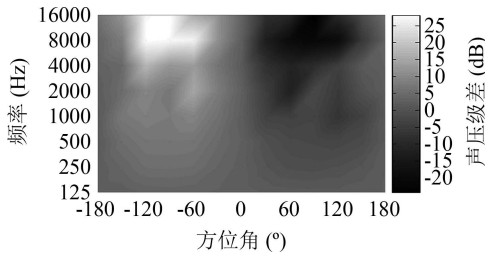


图 12 足尺人工头双耳声压级差

3 音乐厅缩尺模型内 IACC 测量

为了研究 1:10 缩尺人工头在缩尺厅堂测量中的准确度, 将简易缩尺人工头与 3D 打印缩尺人工头在天津文化中心音乐厅 1:10 缩尺模型中进行了对比测量验证。

天津文化中心音乐厅是专业音乐演出空间, 以自然声演出交响乐为主。音乐厅声学缩尺模型采用 15 mm 厚高密度板作为基材, 首先在 AutoCAD 中将音乐厅各部分分解, 通过数控雕刻机将每一部分精确切割出来再拼装, 保证音乐厅的制作精度。完成后的 1:10 音乐厅缩尺模型见图 13。

该音乐厅于 2012 年建成投入使用。音乐厅建成后对其进行了声学测量。缩尺模型内音乐厅的测点布置图见图 14, 现场测量的测点与此相同, 双耳脉冲响应测量时采用 01dB-MK2B 人工头。



图 13 天津文化中心 1:10 缩尺模型

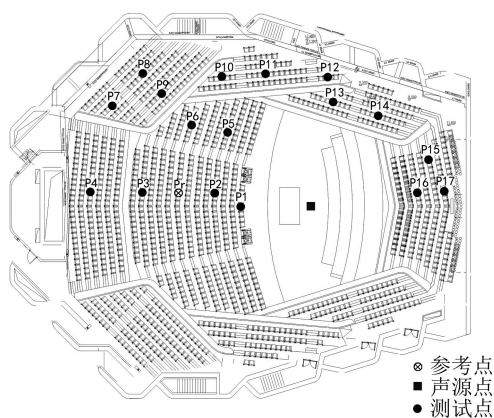


图 14 音乐厅测点布置图

按照 ISO3382 的要求, IACC 的测量时人工头的耳道口距地面的高度为 1.2 m。由于人工头安装时方向角的偏差会给 IACC 带来一定的误差^[14]。为保证缩尺和现场测量的一致性, 将座椅的正前方作为人工头正视方向, 模型与现场测量时均参照以上规定。

为防止传声器对人头周边声场的影响, 简易缩尺人工头测量时采用双通道, 其中一通道作为双耳脉冲测量的一个通道, 另一通道作为参考通道, 整个测量过程中参考通道的位置不变, 1:10 缩尺人工头参照 01dB-MK2B 人工头尺寸用石膏雕制。以缩尺人工头两耳洞的连线为中心线, 1/8 in (3.175 mm) 为直径开一个贯穿左右耳的孔, 测量左耳脉冲响应时传声器从右耳插入, 测量右耳脉冲响应时传声器从左耳插入 (见图 15), 测量时用胶水将人工头固定在测点位置, 以确保更换传声器时人工头的位置保持不变, 在测点位置分别记录左右耳的脉冲响应, 再去除参考通道合并成双耳脉冲响应。由于声源的稳定性对测量的结果会造成一定影响, 因此在测量的同时计算每个测点上参考通道两次脉冲响应测量结果在时域和频域上幅度的相关系数及脉冲序列在时域上对齐直达声时的互相关系数 ($IACC_{\tau=0}$), 计算结果显示参考通道两次测量结果相关系数均在 0.95 以上, 脉冲声源重复发声的稳定性非常好。图 16 为 3D 打印缩尺人工头在天津文化中心音乐厅缩尺模型中测

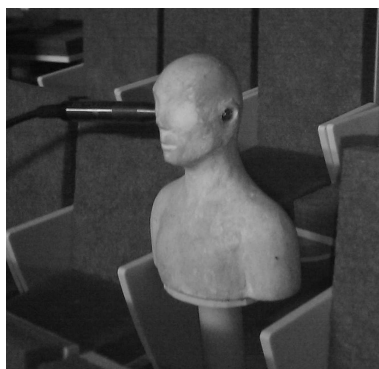
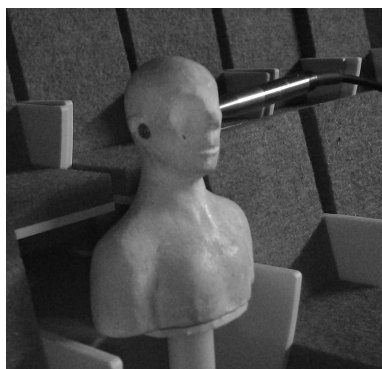


图 15 简易缩尺人工头测试左右耳脉冲响应

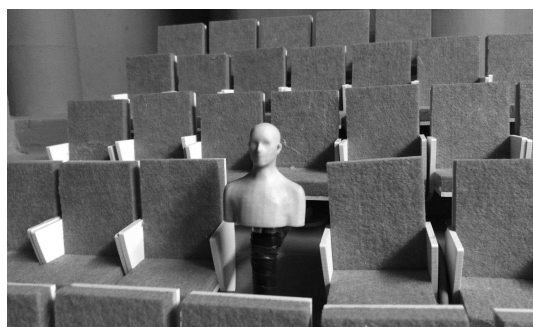


图 16 缩尺人工头测点安装图

点位置的安装图。

模型与现场测量的 $IACC_{(0\sim\infty)}$ 结果详见图 17, 图中数据为 18 个测点的平均值, 从结果可以看出由于简易缩尺人工头和真实人工头的外廓仍存在细微差别、缩尺人工头的对称性较差、双耳脉冲信号为高频脉冲声源两次发声合并生成, 导致模型测量结果偏低。3D 打印缩尺人工头较简易缩尺人工头大幅度提高了测量精度, 各频带 $IACC_{(0\sim\infty)}$ 测量结果与现场测量的结果偏差很小, 最大差值出现在 500 Hz, 偏差值为 0.07 小于 1 个 JND (0.075)。

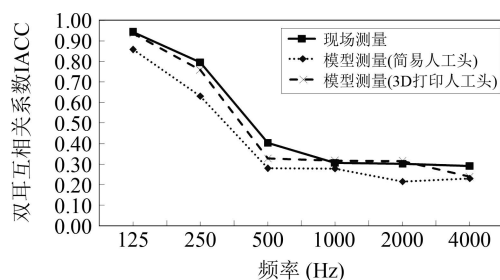


图 17 模型与现场 IACC 测量结果

4 结论

本文提出了一种综合利用现代三维扫描技术、3D 建模技术和 3D 打印技术制作 1:10 缩尺人工头的方法。利用该技术, 不仅可保证缩尺人工头面部、耳廓及躯干的精确尺寸, 而且通过三维建模软件建立了耳道的简化 3D 模型, 通过 3D 打印后制成包括耳道的缩尺人工头, 实现了将 1/8 in 传声器内置在缩尺人工头内的新方法。按照该方法制作的 1:10 缩尺人工头的 ITD 和 ILD 及 IACC 测量结果能较准确地与足尺人工头的测量结果相对应。经该人工头应用于天津文化中心音乐厅 1:10 缩尺模型测量, 结果表明模型与现场测量的 IACC 结果基本一致。该方法可用于建筑声学缩尺模型实验中厅堂空间感参

数 IACC 的测量, 并有望用于实现缩尺模型可听化技术。

参 考 文 献

- 1 吴硕贤, 赵越喆. 建筑环境声学的前沿领域. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2012; **40**(10): 28—31
- 2 Xiang N, Blauert J. A miniature dummy head for binaural evaluation of tenth-scale acoustic models. *Appl. Acoust.*, 1991; **33**(2): 123—140
- 3 Xiang N, Blauert J. Binaural scale modelling for auralisation and prediction of acoustics in auditoria. *Appl. Acoust.*, 1993; **38**(2): 267—290
- 4 Beranek L L, Hidaka T, Masuda S. Acoustical design of the opera house of the New National Theatre, Tokyo, Japan. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2000; **107**(1): 340—354
- 5 Lorenz K-H. Auralisation of a scale model of the Royal Albert Hall. *NAG Journal*, 2001; **195**: 1—12
- 6 Ryu J K, Jeon J Y. Subjective and objective evaluations of a scattered sound field in a scale model opera house. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008; **124**(3): 1538—1549
- 7 Jeon J Y, Ryu J K, Kim Y H *et al.* Influence of absorption properties of materials on the accuracy of simulated acoustical measures in 1:10 scale model test. *Appl. Acoust.*, 2009; **70**(4): 615—625
- 8 IEC/TR 60959-1990. Provisional head and torso simulator for acoustic measurements on air conduction hearing aids. International Electrotechnical Commission, 1990
- 9 余光正, 谢波菴, 饶丹. 人工头近场头相关传输函数及其特性. 声学学报, 2012; **37**(4): 378—385
- 10 ISO 3382-1:2009(E). Acoustics-measurement of room acoustic parameters—Part 1: Performance spaces. International Organization for Standardization, 2009
- 11 Cox T J, Davies W J, Lam Y W. The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria. *Acta Acust. united Ac.*, 1993; **79**(1): 27—41
- 12 谢波菴. 头相关传输函数的低频特性. 声学学报, 2008; **33**(6): 504—511
- 13 谢波菴. 头相关传输函数相位特性及双耳时间差的意义. 电声技术, 2006; **2006**(11): 40—45
- 14 Witew I, Lindau A, Schuitman J *et al.* Uncertainties of IACC related to dummy head orientation. Proc. DAGA 2010, Berlin, 2010