

# 基于仿真脉冲响应的厅堂音质评价

王红卫<sup>1</sup>, 吴硕贤<sup>1</sup>, 赵越喆<sup>1</sup>, 郭志超<sup>2</sup>

(1.华南理工大学 建筑学院, 广州 510640; 2.中原油田分公司 油田建设工程部, 濮阳 457000)

**摘要:**为进行可听化技术及厅堂音质评价研究,对黄埔青少年宫剧院进行了脉冲响应及其声学参数测试,同时应用 ODEON 软件对该剧院进行声场仿真,并将计算机仿真和实测结果相比较,通过主观听音试验,探讨应用仿真脉冲响应进行厅堂音质评价的可行性,为进一步实现厅堂音质可听化评价奠定基础。

**关键词:**脉冲响应;可听化;音质评价

**中图分类号:**TU112.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-7329(2005)01-0023-03

## Acoustic Evaluation of the Concert Hall Based on Simulated Impulse Responses

WANG Hong-wei<sup>1</sup>, WU Shuo-xian<sup>1</sup>, ZHAO Yue-zhe<sup>1</sup>, GUO Zhi-chao<sup>2</sup>

(1. College of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China; 2. Department of Oilfield Construction, Zhongyuan Oilfield Co. Puyang 457000, P. R. China)

**Abstract:** The impulse responses and other acoustical parameters of Huangpu Teenager Palace were measured. Meanwhile, the acoustical simulation based on software ODEON was carried out as well. The parameters based on computer simulation are compared with the measured ones. This case study shows that the auralization technique based on computer simulation can be used for predicting the acoustical quality of a hall at its design stage.

**Keywords:** impulse response; auralization; acoustical quality evaluation

室内声场的计算机仿真技术是利用计算机模拟声波在室内的传播过程,在室内音质设计与评价中发挥了越来越重要的作用。其中,如何评价仿真声场的音质效果是一个重要的问题。关于此问题目前还没有统一的方法。最直接的方法是通过试听者主观评价,即在真实房间里听某声源发出的声音或将听音位置所接收到的声信号录制下来,再与虚拟声场的音质进行比较,但这种方法存在个体化差异和主观因素的影响。厅堂是一个线性声学系统,其脉冲响应反映了该系统的声学特性,模拟声场的脉冲响应是厅堂声学仿真的核心工作,在此基础上不仅可以求得重要的声场客观参数,还可进一步实现音质的双耳可听化模拟。

本文首先通过计算机仿真得到能量脉冲响应,对此进一步赋予相位信息,从而合成单通道脉冲响应,再与实测脉冲响应相比较(包括据此获得的两组声学参数的比较),并将计算机仿真得到的脉冲响应与实测脉冲响应分别和消声室录制的音乐干信号卷积,通过耳机试听,以评价实际厅堂音质与仿真厅堂音质之间的差异。

### 1 脉冲响应的计算机仿真技术

厅堂音质仿真首先要建立厅堂的计算机模型。所建立的三维模型包含厅堂体型数据,如各个界面

\* 收稿日期:2004-11-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50178030,50008007),广东省科学基金资助项目(011668)

作者简介:王红卫(1975-),男,安徽人,博士生,主要从事建筑技术与科学研究。

的面积、空间位置等。此外,还必须输入准确的与声学有关的数据,如界面材料的吸声系数和扩散系数等,才能得到正确合理的结果。

厅堂音质仿真若要真实地模拟人在厅堂空间中的听闻效果,就必须计算厅堂中各反射声到达受声点位置的 $\text{能量}$ 、 $\text{时间}$ 及 $\text{方向}$ 等参数,即必须得出该厅堂的脉冲响应。再把脉冲响应与经过消声室录制的信号进行卷积,其输出的信号经扬声器或耳机发出,就能听到如置身于实际厅堂中的音质效果。此种技术即所谓的可听化(Auralization)技术。

本文利用丹麦技术大学研究开发的商品化仿真软件 ODEON 计算厅堂中某受声点位置的 $\text{能量}$ 脉冲响应。该软件将声线跟踪法和虚声源法相结合,通过设置转换阶次,将界面反射人为地划分为镜像反射和扩散反射部分。应该说明的是,通过上述方法得到的脉冲响应只反映了到达受声点的反射声的时间、方位和 $\text{能量}$ 数据,不包含相位信息,为了实现厅堂音质的可听化模拟,以及计算出部分重要声学参数,必须将计算机仿真得到的 $\text{能量}$ 脉冲响应经过转换,合成受声点处的脉冲响应。

### 2 黄埔青少年宫剧院计算机仿真

黄埔青少年宫剧院位于广州市黄埔区,是一座以演出地方戏曲为主的多功能剧院。该剧院设计容座为 800 座,设有一层楼座。

首先在 AUTOCAD 中按实际尺寸建立剧院的计算机模型,经数据转换后导入 ODEON 软件,并对各界面赋予相应材质(吸声系数)和相应的扩散系数。黄埔青少年宫剧院的三维计算机仿真模型及声源和受声点位置如图 1 所示,声线跟踪历程如图 2 所示。计算初始设置如下,声线数为 30 000 条,转换阶次为一次,脉冲响应采样间隔为 0.1 ms。经过计算可得到该剧院不同听音位置的 $\text{能量}$ 脉冲响应,同时得出这些听音位置的客观声学参数,包括混响时间、早期衰变时间和明晰度等。

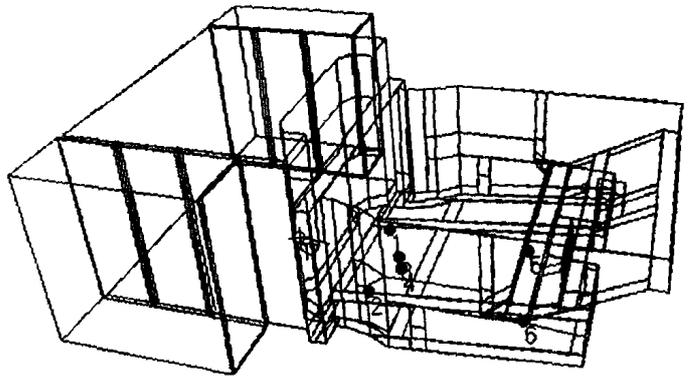


图 1 黄埔青少年宫剧院计算机仿真模型

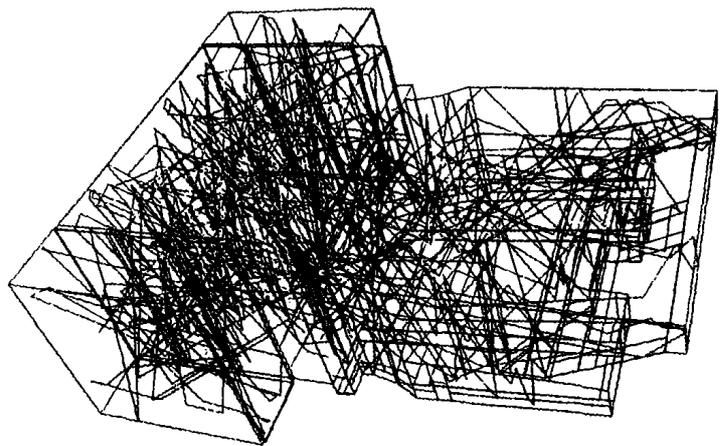


图 2 声线跟踪历程示意

### 3 黄埔青少年宫剧院脉冲响应测试

为了和仿真结果比较,我们对黄埔青少年宫剧院进行建筑声学测量。测量所用的仪器设备如图 3 所示。由计算机产生 MLS 信号,经 D/A 转换、放大后馈给 B&K4196 无指向性扬声器,由 B&K4189 传声器拾取单通道信号,再经前置放大器送入计算机 A/D 转换接口,进行实时分析得到测点的脉冲响应。该脉冲响应以 WAVE 文件格式存储,其它各项声场参数可由脉冲响应计算得到。

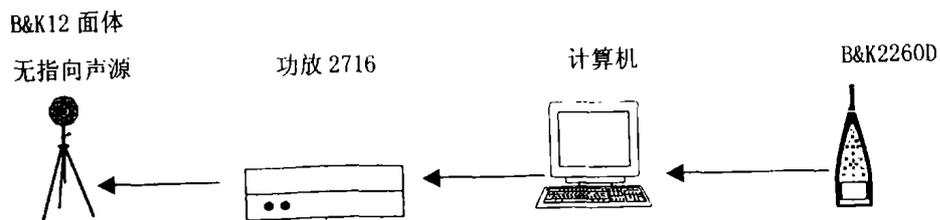


图 3 脉冲响应测量设备配置图

#### 4 仿真脉冲响应和实测脉冲响应的比较

由 ODEON 仿真软件计算可得到单通道能量脉冲响应,为了将计算机仿真结果与实测脉冲响应相比较,必须赋予能量脉冲响应以相位信息。一般采用的方法是先将各倍频程能量脉冲响应转换至频域,求出其频域的幅值,用 Hilbert 转换关系构造出最小相位,然后经过频域和时域转换得到厅堂的脉冲响应<sup>[1]</sup>。本文采用由倍频程能量合成脉冲响应的方法。该方法经主观实验验证其合成的结果与实际厅堂评价的结果差异很小<sup>[2]</sup>。该方法首先产生和厅堂能量脉冲响应长度相等,采样间隔相同的白噪声,并将上述白噪声按照频带的数目复制,用各倍频带的能量脉冲响应均方根调制对应频带的白噪声信号,然后用无限冲激滤波器滤去各倍频带多余的频率成分,再将各倍频带的脉冲响应相加,即可得到厅堂的脉冲响应。最后将脉冲响应归一化,以 wav 文件格式存储。

各点的实测脉冲响应和仿真脉冲响应差异较小,现仅列出厅堂中 4 排 12 座处的实测和仿真脉冲响应的比较结果,其结果如图 4 所示。从图中可以看出,4 排 12 座处仿真脉冲响应和实测脉冲响应的主要反射声时间序列基本一致。但实测脉冲响应拥有更丰富的前次反射声。造成仿真脉冲响应与实测脉冲响应差异的主要原因是:(1)仿真模型对各扩散体细节描述不够,其扩散特性在计算机仿真中未能充分体现;(2)ODEON 仿真程序限定的最小采样间隔为 0.1 ms,这在一定范围内限制了合成脉冲响应的逼真程度;(3)是由仿真算法本身造成的,由于 ODEON 所采用的扩散模型是以转换阶次来界定的,转换阶次本身尚缺乏物理上的意义。

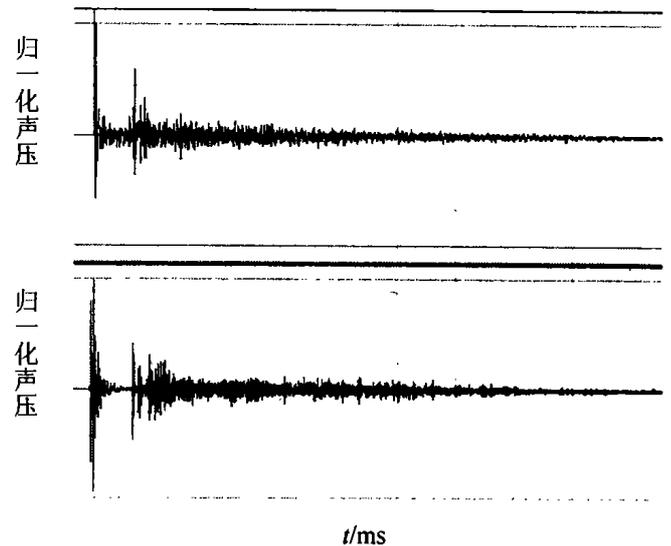


图 4 黄埔青少年宫 4 排 12 座处实测和仿真脉冲响应比较图

分别由实测脉冲响应和仿真计算得到的厅堂声学参数比较见表 1。从表 1 可知,通过仿真计算和实测厅堂脉冲响应计算得到的各处声场客观参数差异较小。这说明采用合成脉冲响应的方法来评价厅堂音质是可行的。

表 1 仿真与测量参数比较

参 数/1K Hz	2 排 18 座		3 排 5 座		5 排 9 座		4 排 12 座		12 排 15 座	
	测量	仿真	测量	仿真	测量	仿真	测量	仿真	测量	仿真
早期衰变时间 EDT/s	1.31	1.26	1.23	1.25	1.34	1.3	1.24	1.24	1.08	1.1
混响时间 T30/s	1.37	1.36	1.38	1.30	1.41	1.27	1.36	1.31	1.38	1.5
明晰度 C80/dB	1.56	1.6	3.36	3.4	2.94	2.9	4.96	4.1	5.63	1.9

#### 5 主观听音效果比较

通过软件仿真、实测获得的五个听音位置的厅堂脉冲响应,分别与消声室内录制的音乐干信号卷积,用耳机重放,由听音人进行音质主观评价。

本文的主观评价实验在华南理工大学的消声室控制室内进行,共分两次进行。第一次为三位教师,进行初次评价。第二次为 12 名在校的研究生。所有评价者均无听力缺陷。采用的干信号为 AURORA 公司提供的音乐 DENON09 片段<sup>[3]</sup>,采样频率为 44.1 kHz,片段长度为 20.431 s。将软件仿真和实测得来的脉冲响应分别和干信号卷积,然后进行同一响度的控制,以供评价,本文采用在 COOLEEDIT 中直接等化的方法,用耳机放音进行听音评价。主要评价内容为以下三个方面:混响感觉有无明显差异、音质丰

的数字城乡规划平台软件将向着网络化方向发展,实现 WEB - GIS。通过此类平台软件的应用可以将城乡规划所涉及的各个部门联系在一起,进行数据共享,互访,综合决策和规划设计<sup>[1]</sup>。随着数据库技术的快速发展,多源空间数据的无缝集成,构建异构数据库,拓扑关系与面向对象相结合也将能够得到实现,为该平台的进一步发展带来新思维。

由于该平台的可扩充性,以后可进一步编写扩充模块。如加入多图谱转化模块,编辑多种栅格图像的矢量化程序,将其统一成该平台的标准矢量图库文件集,同时录入空间信息数据库。可以通过编写矢量转成多种栅格文件的程序实现多种格式输出图件等。

### 参考文献:

- [1] G. 阿尔伯斯. 城市规划理论与实践概论[M]. 北京:科学出版,2000.
- [2] 吴信才. 地理信息系统原理与方法[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [3] 钱乐祥. GIS 分析与设计[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [4] 继成编. 数字地球导论[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [5] 陈建春. Visual C++ 6.0 开发 GIS 系统[M]. 北京:电子工业出版社,2000.
- [6] Visual C++ 实践与提高(数据库篇)[M]. 北京:中国铁道出版社,2001.
- [7] 毛锋. 地理信息系统建库技术及其应用[M]. 北京:科学出版社,1999.

(上接第 25 页)

满意度有无差异、空间感有无显著差异。评价结果发现由实测脉冲响应卷积的音乐其听音效果较好,音质较为丰满。其主要原因除上文提到的外,还由于仿真软件 ODEON 的有效倍频程频率范围为 63 - 8 kHz。如果将利用实测的脉冲响应进行卷积的结果用 IIR 数字滤波器滤除 8 kHz 以上的倍频程能量,则利用仿真合成脉冲响应与音乐干信号卷积和利用实测脉冲响应与音乐干信号卷积的听音结果差异并不明显。因此在一定范围内,可以用仿真的脉冲响应来取代实测脉冲响应进行主观听音试验。

## 6 结论

本文通过实测和仿真脉冲响应比较,以及两者与干信号卷积后听音效果的比较,说明应用仿真脉冲响应与干信号卷积来预测和评价厅堂音质的方法是可行的。若进一步考虑人头及躯干的影响,将计算机仿真脉冲响应与人头相关脉冲响应及干信号卷积,则可在厅堂的设计阶段,通过计算机仿真的方法真实地预演厅堂建成后的音质效果。该技术被称为厅堂音质虚拟可听化技术,在厅堂音质设计的实践中具有重要的应用前景,并将为厅堂音质评价和预测提供一种先进的有效的手段。这将是本文作者在自然科学基金资助下拟进一步开展的研究工作内容。

### 参考文献:

- [1] H. Kuttruff. Auralization of impulse responses modeled on the basis of ray - tracing results[J]. J. Audio. Eng. Soc., 1993, 41(11): 876 - 880.
- [2] A. Farina. Auralization software for the evaluation of the result obtained by a pyramid tracing code: results of subjective listening tests[J]. ICA95. Trondheim(Norway): 26 - 30, June 1995.
- [3] Aurora[EB/OL]. Http://www.ramseto.com