

# 厅堂音质辅助设计方法的应用研究

籍仙荣<sup>1,2</sup>, 陆风华<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学建筑与土木工程学院, 山西省 太原市 030024;  
2. 山西大学土木工程系, 山西省 太原市 030013)

**摘要:** 对厅堂音质辅助设计方法的发展历程、研究现状、基础理论和发展趋势进行了概述和讨论, 介绍了厅堂的音质要求和设计参量, 指出为确保厅堂音质达到设计预定的客观参量, 在厅堂声学方案设计完成后, 还需采用计算机模拟技术和(或)声学缩尺模型等辅助手段, 对声场进行预测, 以此为依据对方案不足之处进行修正, 并举例说明; 同时指出, 由于声场复杂性和实验设备及过程的局限性, 具体应用时, 还需结合理论分析和工程实践进行判断。

**关键词:** 厅堂音质; 辅助设计; 计算机模拟; 声学缩尺模型

中图分类号: TU112

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2017)-02-0157-08

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2017.02.011

## Application study of auditorium acoustics assisted design

JI Xian-rong<sup>1,2</sup>, LU Feng-hua<sup>1</sup>

(1. college of Architecture & Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;  
2. Department of Civil Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi, China)

**Abstract:** This paper outlines and discusses the development history, research status, basic theory and development trend of auditorium acoustics assisted design methods, introduces the acoustics requirements and design parameters of the auditorium, and points out what computer simulation technology and (or) acoustic scale model should be adopted to detect sound field characteristics after the acoustics design scheme being completed; then according to the testing results, the scheme would be optimized and modified, moreover some cases are cited as evidences. It also points out that because of the sound field complexity and the limitations of the experimental equipment and processes, the conclusions drawn by acoustics assisted design methods should be further judged by combining with theoretical analysis and engineering practice in the specific applications.

**Key words:** auditorium acoustics; assisted design; computer simulation; acoustic scale model

## 0 引言

1900 年, Sabine 在大量实验基础上提出了著名的混响时间公式, 开启了建筑声学的新时代<sup>[1]</sup>。此后半个世纪, Eyring、MacNair、Knudsen 等人发表了大量声学论著<sup>[2-4]</sup>, 为室内声学的发展奠定了坚实基础。上世纪 50 年代起, 许多专家学者尝试寻找或发现混响时间以外的第二参数<sup>[5-8]</sup>, 清晰度、明晰度、初始延迟间隙、早期衰减时间、双耳互相关系数等概念被提出; 同时, 人们也意识到, 在厅堂音质设计中, 声学设计及计算是重要手段, 但还不能完全反映声场, 需借助一些工具实现对声场的模拟和预测, 声学测量方法、辅助设计方法都是在此时

迅速发展起来的。声学缩尺模型和计算机模拟技术是两种常用的辅助设计方法。

声学缩尺模型技术的早期研究可追溯到赛宾时期, 利用光学模型和水波模型来研究一些简单的声学现象<sup>[9]</sup>。真正意义的缩尺模型技术被认为是 1943 年 F. Spöndock 提出的<sup>[10]</sup>, 他的研究表明声学缩尺模型的可行性; 此后几十年, 许多专家学者都对声学缩尺模型的理论和应用进行了探索和研究, 缩尺模型从在厅堂建筑中初步应用达到了兴盛时期。目前对声学缩尺模型技术的研究主要集中在如何更加快速便捷地制作模型, 进一步改善测试仪器及设备, 提高测试精度和测量频带宽度, 更好地应用于可听化及主观评价等方面<sup>[11-13]</sup>, 随着 50 年代计算机模拟在室内声场的应用, 声学缩尺模型也用来解决一些计算机模拟不能解决的问题。

1958 年, Allred 和 Newhouse 发表了题为“蒙特卡罗法在建筑声学中应用”的文章, 这是计算机模拟在室内声场中的首次尝试<sup>[14-15]</sup>。此后几十年, Allen、Jones、Gibbs 等人<sup>[16-17]</sup>都对室内声场的计算

收稿日期: 2017-02-06; 修回日期: 2017-03-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51508311)

作者简介: 籍仙荣(1974—), 女, 山西太谷人, 硕士, 讲师, 研究方向为建筑声环境。

通讯作者: 籍仙荣, E-mail: xrjee369@163.com

机模拟做了许多研究和论述,从不同角度解释了封闭空间中声波传播的过程,基于几何声学和波动声学的各种声场模拟软件也应用而生,并被用来辅助声学设计。目前对室内声场计算机模拟技术的研究主要集中在建立更为符合实际声场的计算模型,可听化、可视化的实现,模拟软件的开发利用,声学指标的相关性研究等方面<sup>[18-21]</sup>;应用则主要集中在如何精确地模拟和预测声场,指导和评价声环境设计,以及一些交叉学科的应用,比如心理声学、虚拟现实环境中声环境的模拟等方面<sup>[22-23]</sup>。

## 1 厅堂音质辅助设计的基础理论

为确保厅堂音质达到设计要求,音质辅助设计应参与厅堂建筑设计的各个过程<sup>[24]</sup>,在方案初步设计和深化设计阶段,可通过计算机模拟早期反射声的分布情况来检查体型是否存在声学缺陷,并以此模拟结果作为依据,进行相应的设计修正;进入扩大初步设计和施工图设计阶段,各个界面的声学材料和构造已经确定后,可通过计算机模拟测定混响时间以供参考;同时还可采用声学缩尺模型试验,测定声场分布、早期反射声分布和混响时间等参量,进一步修正音质设计中存在的问题;为了确保厅堂音质满足设计要求,还需在施工过程中以及竣工后的声学调试时进行多次现场测试,例如在装修即将竣工但还没全部竣工期间,进行现场测试,推算建成后可能的声学参数与设计指标之间存在的偏差,以便及时修正。例如在剧场观众厅除座椅外的其他表面(墙面、地面、顶棚及门窗)均装修完工后进行测试,然后依据测试结果进行座椅吸声性能的调整;竣工调试时,需邀请专业演员现场演出并邀请听众参与,听取他们的评价意见,然后找出对应的客观参量,做最后的调整和测试。

### 1.1 厅堂音质设计的声学参量

良好的厅堂音质,主观上要求混响感与清晰度(明晰度)之间有适当的平衡<sup>[25]</sup>,有合适响度且在整个听众区相差不大,有的厅堂还要求有一定空间感和环绕感,有良好音色,不发生畸变、失真等。厅堂音质的优劣最后都取决于观众的主观感受<sup>[26]</sup>,而主观感受会受诸多因素的影响,Beranek、Ando、Barron 等专家都对厅堂的音质评价做了研究<sup>[6,8,27]</sup>,但对于能代表厅堂音质的独立参量却持有不同见解,混响感、响度和亲切感是认同度最高的三个参量。

(1) 混响感:混响感是受混响时间、声音频谱、

声压级等多种因素影响的综合主观感受<sup>[28-29]</sup>,而混响时间的频率特性也会引起主观感知的差异。通常认为音乐厅理想的混响时间的频率曲线要平直,低频段可略有提高,但查雪琴等人提出异议<sup>[30-32]</sup>,指出无论大空间还是小空间,无论语言用途还是音乐用途的厅堂,都应抑制低频混响,频率特性曲线应在低频段下跌或至少平直。

(2) 响度:响度也是厅堂音质评价中最基本的评价参量,受很多因素制约,特别是与声源本身有关。响度评价指标有单值 A 声级和相对强度即强度因子  $G$ 。强度因子  $G$  表示厅堂内某测点直达声与反射声声强与距声源 10 m 处相应直达声强之比(该值一般在消声室测得)。单值 A 声级简单、直观,便于测量和检查,但没有考虑声源本身和房间特性的影响;而强度因子  $G$  考虑的是声强相对值,只考虑房间界面的影响,而与声源特性无关,为了简化测量,又提出了房间放大系数  $\Delta R$ ,即将测量结果中直达声直接按距离修正为 10 m 处的参考值,而不再测声源 10 m 处的直达声声强。也有学者认为,在响度评价中还应考虑听者的主观因素和时间特性,指出采用响度模型计算响度随时间的衰变率来评价响度会更合适<sup>[33-34]</sup>。

(3) 亲切感:直达声后 50 ms(语言)和 80 ms(音乐)内到达的早期反射声可以加强直达声强度和提提高亲切感,而直达声后第一次反射声到达的时间间隔即时延间隙  $t_1$ ,关系到早期反射声的品质。功能不同的厅堂,时延间隙要求不同,一般音乐厅最佳值在 20 ms 以内,歌剧院要求不超过 30 ms。

### 1.2 室内声场计算机模拟的基础理论

室内声场的计算机模拟技术主要有两大类<sup>[35]</sup>,即基于几何声学的模拟技术和基于波动声学的模拟技术,前者基于声线以直线传播的假设,忽略声音的波动性,代之以能量叠加;后者是把空间或时间分为元,然后用这些元的组合体解析地模拟或逼近求解区域,随着元数量的增加,解的近似程度不断改进,最后收敛于精确解。

#### 1.2.1 基于几何声学的模型

(1) 声线追踪法:在封闭空间中,将室内声源发出的球面波的每一小部分均看作一根声线<sup>[35]</sup>,每条声线携带对应球面波的能量在空间中多次来回反射,检测声线是否击中接收器(如小球或小立方体),击中则能量衰减,同时发生反射,如此直到满足一定条件则结束对该声线的追踪;计算机在对所有声线的传播过程进行跟踪的基础之上,合成该接收点处的声场;声质点追踪法与声线追踪法算法类

似, 但检测方法不同, 对于声质点模型, 质点停在接收器中的时间越长, 它对能量密度的贡献越大; 声线束是有不可忽视的横断面的声线集, 横断面有圆锥形或多边形, 可采用点接收器代替球形接收器或立方体接收器, 声束围绕空间来回反射, 检测接收器受照射的强度。

以上方法适用于具有几何反射边界面的空间; 如遇扩散反射边界面的精确模拟, 在几次反射后, 则需要追踪大量的声线/声质点/声束, 常用的近似法需产生一个随机数以决定反射的方向, 而不去追踪反射声线的各个方向。

(2) 虚声源法: 将界面视为几何反射面, 反射线被认为是从虚声源直接到达接收点的声线, 如考虑虚声源又产生的虚声源, 就得到多重反射, 当波长比空间/边界尺寸小很多时, 就可采用能量虚声源法, 此时不考虑声波的物理特性, 而将声波作为声线处理。该法对于几何反射界面时早期反射声的时间和方位能有较精确的模拟。

(3) 第二声源法: 前两种模型的综合应用, 人为设定两种模型的转换阶数, 低于转换阶数则利用虚声源法精确计算早期反射声的时间和空间分布, 反之则利用声线追踪法计算混响声, 该法转换阶数的确定非常重要, 不是阶数越高越好; 另外除需考虑房间界面吸声系数外, 还需考虑界面的散射系数。

### 1.2.2 基于波动声学的模型

计算机的发展, 使得数值解波动方程模型成为可能, 并应用到声学领域。有限元法和边界元法模型的基础是波动方程的近似解, 这种方法可为频域中的共振频率和时域中的波反射建立模型, 已成功地应用到小房间的声场模拟(如波长大于房间尺寸, 或至少属同数量级)。

有限差分时域法模型的基础是时域线性化欧拉方程的数值积分, 模型在解运动媒质传播方程时, 考虑了多重反射、多重衍射、非均匀吸收和部分扩散反射面的组合效应; 还可应用到运动、非均匀和湍流大气, 即可考虑折射效应。

波动理论的声学模型对于小尺度空间和小尺度声学器件, 应用计算机可在一定精度范围内求得数值解。

### 1.3 声学缩尺模型的基础理论

声学缩尺模型是将厅堂尺度按比例缩小, 声波波长也按统一比例缩小, 而频率则提高。如模型尺寸与原型尺寸之比为  $L_m:L=1:n$ , 则声波波长比  $\lambda_m:\lambda=1:n$ , 时间比  $t_m:t=1:n$ , 由于模型中的声速与原

型中的声速相同, 即  $c_m=c$ , 则有  $f_m:f=n:1$ 。缩尺模型比例  $n$  常取  $10\sim 50$ , 所以频率也会放大相应倍数, 这就要求声源和接收设备可在较高频率范围内工作, 声源有三个方面的基本要求: 指向性、频响特性和信噪比; 声接收设备通常采用不超过  $1/4$  inch 的传声器, 并配置相应鼻锥, 使其接近无指向性。模型中界面及物体在高频  $nf$  时的吸声特性应与原型中相应位置对  $f$  的吸声特性一致, 需通过实验寻求对应的模型材料; 空气对高频声的过度吸收也不容忽视, 需进行气体置换(如充干燥空气、充氮等)或理论修正。

## 2 厅堂音质辅助设计案例分析

在音质设计过程中, 音质计算是基础和重要环节, 但为了保证厅堂音质, 还需采用辅助手段对声场进行预测和检验, 及时发现问题并进行修正。

### 2.1 计算机辅助声学设计案例

在厅堂的音质设计初期, 应采用声学软件模拟厅堂声场<sup>[24]</sup>, 通过对声场分布和早期反射声分布的测定来检查体型是否存在明显的声学缺陷, 并及时修正; 当界面材料确定后, 还可以进一步模拟混响时间及其频率特性等声学参数。用于建筑声学模拟的软件较多, 本案例介绍 RAYNOISE 软件在洛阳歌剧院声学设计中的预测模拟作用。RAYNOISE 是比利时 LMS 公司开发的一款声学模拟软件, 能对封闭空间、敞开空间以及半封闭空间的各种声学行为进行模拟; 它的理论基础是几何声学, 利用虚声源法和声线跟踪法相结合的方法来计算声场的脉冲响应, 广泛用于工业噪声预测和控制、环境声学、建筑声学以及模拟现实系统的设计等领域<sup>[36]</sup>。

#### 2.1.1 洛阳歌剧院项目介绍<sup>[37]</sup>

洛阳歌剧院建成于 2007 年, 是一座大型多功能厅堂, 可满足大型舞台剧、交响乐演出以及会议召开等多项功能的需要, 歌剧院内景、平面图及剖面图见图 1、2。观众厅平面近似于矩形, 设有二层楼座, 有效容积  $12\ 760\ \text{m}^3$ ,  $1\ 420$  座, 每座容积  $8.9\ \text{m}^3$ 。音乐演出时, 可使用音乐反射罩和升降乐池。

#### 2.1.2 洛阳歌剧院的声学参数

在前期声学设计时, 通过声线分析<sup>[37]</sup>, 对台口两侧的八字形反射墙和耳光墙的弧度进行调整, 使得反射墙可以更好地给观众厅中部提供近次反射声, 以及避免弧形耳光墙在观众区形成声聚焦; 两侧墙面均粘贴双层  $15\ \text{mm}$  厚经过防火处理的密度



图1 观众厅内景(洛阳歌剧院)<sup>[37]</sup>  
Fig.1 The auditorium interior (Luoyang Opera House)<sup>[37]</sup>

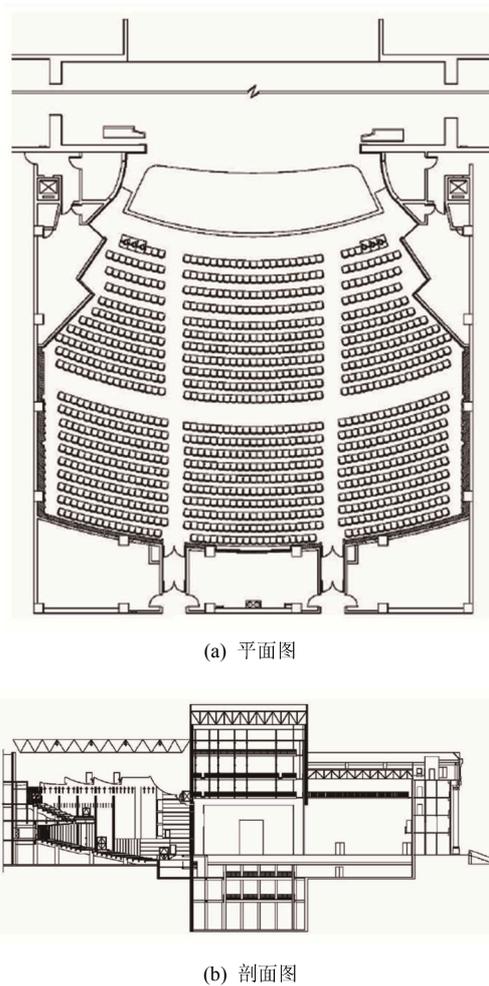


图2 平面图及剖面图(洛阳歌剧院)<sup>[37]</sup>  
Fig.2 Floor plan and section drawing (Luoyang Opera House)<sup>[37]</sup>

板,表面粘贴饰面层;吊顶材料选用双层 12 mm 厚的纸面石膏板;观众厅后墙采用弧形扩散吸声结构。主舞台、侧台和后台均进行吸声处理,使舞台混响时间和观众厅混响时间接近;观众厅的座椅则经过测试和调整,使其吸声系数达到设计要求。考虑到其原有的轻型彩钢板屋顶隔声性能较差,则在屋架上弦杆以上增加轻质隔声吊顶提高隔声性能。

为了检验设计变更是否合理,采用声学软件 RAYNOISE 对室内声环境模拟,声压模拟图见图 3。方案修改后,室内声场不均匀度明显改善,避免了对观众厅产生声聚焦。空场时,观众厅 500 Hz 的混响时间在 1.4 s 左右,舞台设置反射罩后,混响时间在 1.6 s 左右。竣工验收时,对歌剧院观众厅空场时进行了声学测试。图 4 显示了观众厅混响时间的测试值,由于在实测过程中,声场条件、吸声材

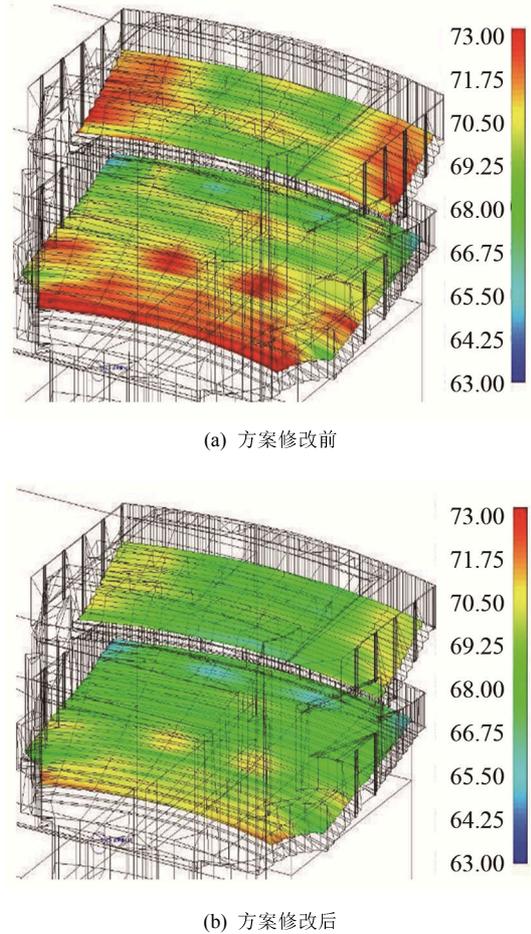


图3 声压级模拟图(1 kHz)<sup>[37]</sup>  
Fig.3 Simulated diagram of sound pressure level (1 kHz)<sup>[37]</sup>

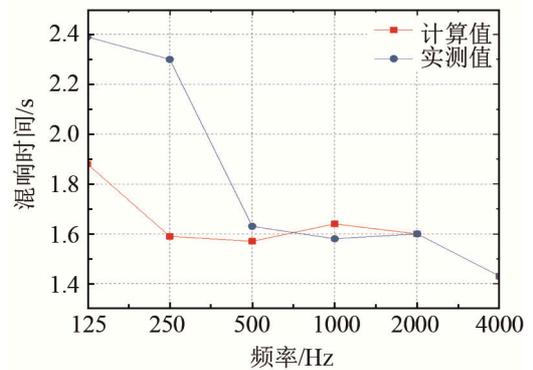


图4 混响时间的频率特性  
Fig.4 Frequency characteristics of reverberation time

料的布置位置等因素均与实验室的情况以及计算时的假设条件不同，因而会有一定误差；中、高频声波的简正波密度较大，容易形成扩散声场，则混响时间计算值和实测值有较好吻合；而低频段由于频率特点及实际声场的情况，不易形成扩散声场，空间中容易存在低频振动，且作用的频率范围较宽，使得混响时间计算值和实测值会有偏差。

计算机模拟在检查和发现厅堂建筑中的声学缺陷，进行体型或声学材料和结构的优选，预测声学参数等方面具有直观、便捷、快速等优点，但由于声场本身的复杂性，以及软件编制和各种声学参量定义过程中假设的局限性，会使得实测值与模拟计算值之间有误差，因此在具体应用时，需同时考虑计算机模拟的参考价值及局限性，并结合工程实践进行声环境设计。

### 2.2 声学缩尺模型辅助设计案例

声学缩尺模型的准确性主要与模型内材料选取、声源、声接收设备等因素有关，国内外许多音乐厅、歌剧院在建筑声学设计时，均通过缩尺模型试验对厅堂的音质进行了预测、设计和检验<sup>[38]</sup>。本文以上海东方艺术中心音乐厅为例，说明缩尺模型在声学辅助设计中的作用。

#### 2.2.1 上海东方艺术中心音乐厅工程概况<sup>[39]</sup>

上海东方艺术中心建成于 2004 年，由三个观演厅组成，其中音乐厅规模最大，可容纳观众 1976 座，有效容积 24 000 m<sup>3</sup>，每座容积 10.6 m<sup>3</sup>。音乐厅内外均为椭圆形，外层为玻璃幕墙，内层采用 8 条“鱼”状扩散结构。听众席围绕中心式演奏台布置，演奏台可以根据乐队规模升降，听众席之间以凸弧形矮墙分隔。吊顶设可升降吸声体，设计 0.5 s (1.6~2.1 s)可调幅度，用以调节厅内混响，上海东方艺术中心的平面图及剖面图见图 5。

#### 2.2.2 上海东方艺术中心音乐厅声学参数

为满足声学设计要求，该设计程序包括声学计算，计算机模拟和 1:10 的缩尺模型试验<sup>[39]</sup>，其中缩尺模型试验测试内容包括混响时间、声场分布和早期反射声序列三项，缩尺模型如图 6 所示，测试结果如图 7、8 所示。

由图 7 可以看出，混响时间及频率特性基本满足要求，即 125 Hz 和 500 Hz 分别要求混响时间为 2.41 s 和 2.1 s，测定值为 2.29 s 和 2.14 s，但可调混响幅度没达到 0.5 s 的要求，测定值为 0.25 s，说明可升降的吸声吊顶面积不足，需另外补充可调吸声结构。声场不均匀度  $\Delta L_p$  也达到设计要求，要求 500

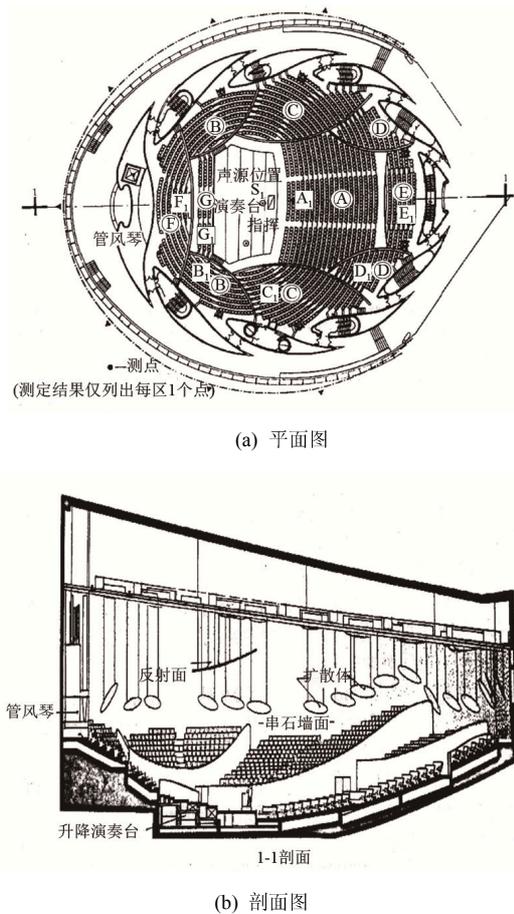


图 5 平面图及剖面图(上海东方艺术中心音乐厅)<sup>[39]</sup>  
Fig 5 Floor plan and section drawing (Concert Hall of Shanghai Oriental Art Center)<sup>[39]</sup>

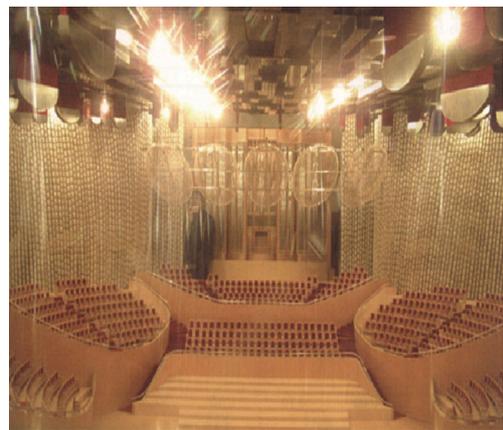


图 6 1:10 缩尺模型(上海东方艺术中心音乐厅)<sup>[39]</sup>  
Fig.6 Acoustic scale model of 1:10 (Concert Hall of Shanghai Oriental Art Center)<sup>[39]</sup>

Hz 的声场不均匀度设计值为不超过 6 dB，测定值为 5.6 dB。

图 8 为 100 ms(缩尺模型中为 10 ms)内早期反射声序列的测定，测定结果为 7 个测区内各 1 个点的反射声序列(测点布置见图 5)。由图 8 可看出，在池座前、中区缺乏早期反射声，其它部分良好。因

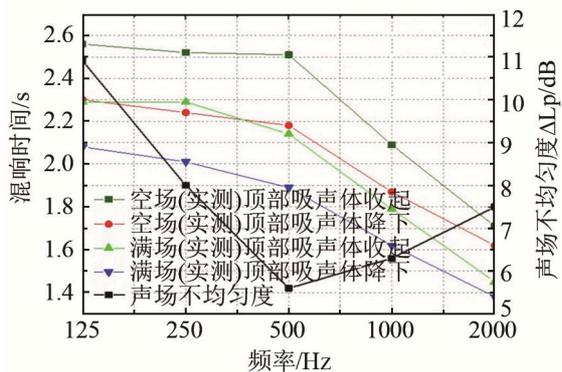
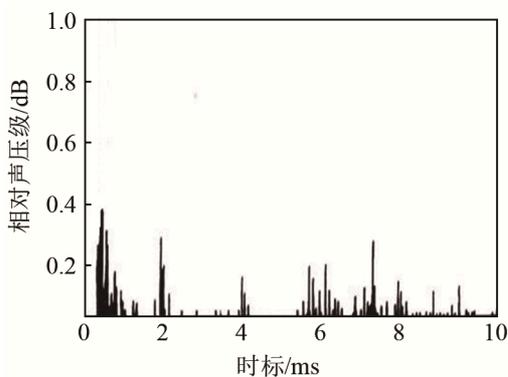
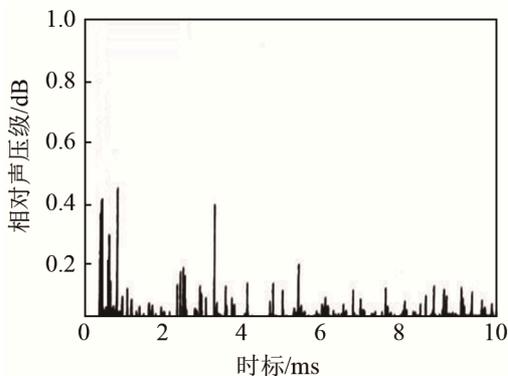


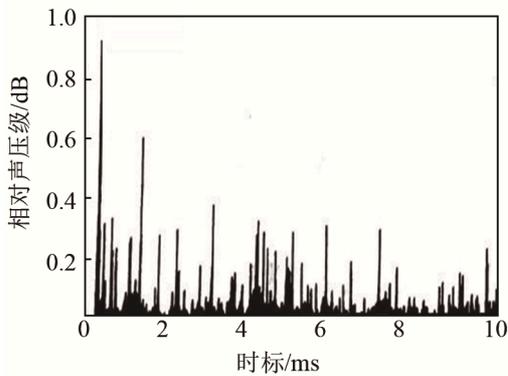
图 7 声学参数测试值  
Fig.7 Test values of acoustic parameters



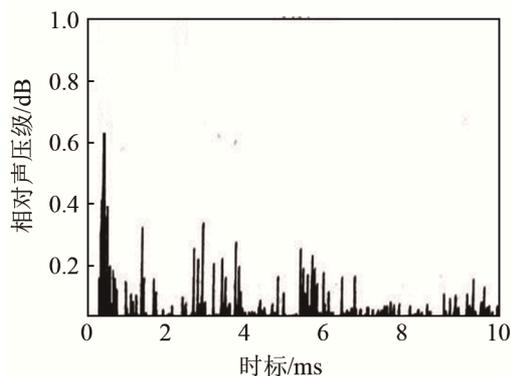
(a) 测点 A<sub>1</sub>



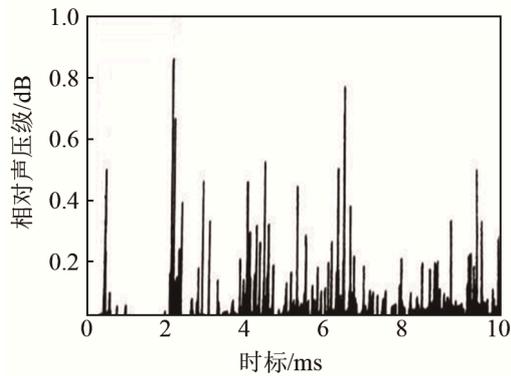
(b) 测点 B<sub>1</sub>



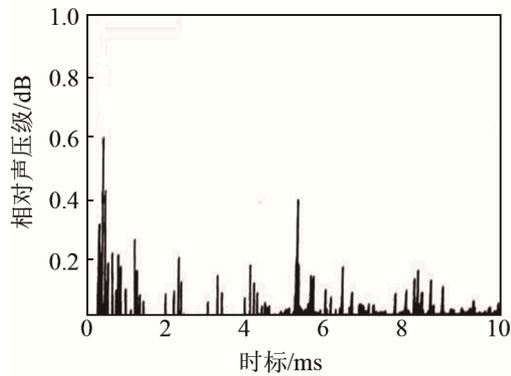
(c) 测点 C<sub>1</sub>



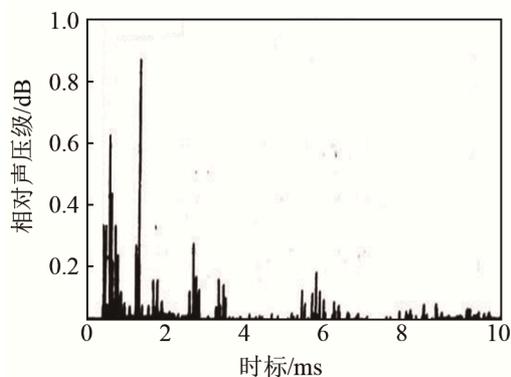
(d) 测点 D<sub>1</sub>



(e) 测点 E<sub>1</sub>



(f) 测点 F<sub>1</sub>



(g) 测点 G<sub>1</sub>

图 8 反射声序列测试值<sup>[39]</sup>  
Fig.8 Test values of reflection sequences<sup>[39]</sup>

此需调整演奏台上反射体的形式和角度，使其可向池座的前、中区提供较多反射声。另外，音乐厅后墙为凹弧形，可能会使池座前区形成回声，需在后墙上设置扩散体。

缩尺模型除可模拟分析厅堂的混响特性、脉冲响应外，还可检查厅堂是否存在声学缺陷，如声聚焦、回声、颤动回声等，其它相关参数如明晰度、强度因子、早期反射声时延间隙等在缩尺模型中的测试值均有较高的可信度，可作为修正设计的依据。

### 3 结论

在厅堂音质设计过程中，需检查该方案是否存在音质缺陷，声学指标是否满足功能要求，这就需要借助声学缩尺模型技术或(和)计算机模拟技术来检查方案。

(1) 为确保厅堂音质达到设计预定的客观参量，并保证主观感受与客观参量的统一，在音质设计过程中，除了需采用计算机模拟技术和声学缩尺模型进行辅助设计外，还需在施工进程中对现场进行声学实验，进而推算可能的测量值与实际值的差距，并进行修正；竣工后的声学调试中，还需通过试演听取演员和听众的主观评价，找出相应的客观参量，作最后的调整和测试。

(2) 计算机模拟可以预测声场声学参数，甚至可以聆听音质效果；不需额外实验设备，就可以进行多种设计方案的优选；可以查看和分析声音传播过程；整个模拟过程周期较短，输出结果快捷方便。但由于声场本身的复杂性及计算机的局限性，目前还不能完全代替理论分析和实践经验，具体应用时需结合工程实践经验进行判断。

(3) 声学缩尺模型不仅可以测量厅堂声学参数，还可以进行主观评价；可以用来研究主观评价指标；可以更为准确地模拟声场的波动现象，尤其是扩散问题；可用于处理一些计算机模拟不能解决的问题等。目前，声学缩尺模型还有一些问题需要解决，比如模型制作周期较长，造价偏高，实验所需的设备、仪器和材料如何能更符合实际情况，如何提高测试精度和测量频带宽度等。

### 参 考 文 献

- [1] Sabine W C. Reverberation[C]//Collected Papers on Acoustics. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1922: 3-68.
- [2] Eyring C F. Reverberation time in "dead" rooms[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1930, 20(4): 168-168.
- [3] Macnair W A. Optimum reverberation time for auditoriums[J]. Bell System Technical Journal, 1930, 9(2): 390-397.
- [4] Knudsen V O. The hearing of speech in auditoriums[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1929, 1(1): 56-82.
- [5] Thiele R. Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen[J]. Acta Acustica United with Acustica, 1953, 3(4): 291-302.
- [6] Beranek L L. Music, acoustics & architecture[M]. New York: Wiley & Sons, 1962.
- [7] Reichardt W, Alim O A, Schmidt W. Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances[J]. Acta Acustica United with Acustica, 1975, 32(3): 126-137.
- [8] Ando Y. Concert hall acoustics[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1985.
- [9] Sabine W C. Reverberation[C]//Collected Papers on Acoustics. Cambridge, Mass: Harvard University Press etc, 1922: 163-198. (The American Architect, 1913)
- [10] F. Spandöck. Akustische Modellversuche[J]. Annalen Der Physik, 2010, 412(4): 345-360.
- [11] 孙海涛. 建筑声学缩尺模型测量关键技术研究[D]. 广东: 华南理工大学, 2014.  
SUN Haitao. Research on key technology of architectural acoustic scale model measurement[D]. Guangdong: South China University of technology, 2014
- [12] Ryu J K, Jeon J Y. Subjective and objective evaluations of a scattered sound field in a scale model opera house[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2008, 124(3): 1538-1549.
- [13] Hidaka T, Suzuki K, Yamada Y. A new miniature loudspeaker for room acoustical scale model experiment[C]//Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, Ica, 2010.
- [14] Allred J C, Newhouse A. Applications of the Monte Carlo method to architectural acoustics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30(1): 1-3.
- [15] Allred J C, Newhouse A. Applications of the Monte Carlo method to architectural acoustics. II[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1958, 30(10): 903-904.
- [16] Allen J B, Berkley D A. Image method for efficiently simulating small - room acoustics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1979, 65(4): 943-950.
- [17] Gibbs B M, Jones D K. A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure[J]. Acta Acustica united with Acustica, 1972, 26(1): 24-32.
- [18] Raghuvanshi N, Galoppo N, Lin M C. Accelerated wave-based acoustics simulation[C]//Proc. Acm Symp. on Solid and Physical Modeling, 2008.
- [19] 黄坤朋. 基于改善时域有限差分边界的房间低频可听化实现[D]. 广东: 华南理工大学, 2011.  
HUANG Kunpeng. Realization of auralization by finite-difference time-domain method with improved boundary for room in low frequency[D]. Guangdong: South China University of technology, 2011
- [20] Webb C, Gray A. Large-scale virtual acoustics simulation at audio rates using three dimensional finite difference time domain and multiple graphics processing units[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013, 133(5): 3613-3621.
- [21] Mazzone F, Coyle J, Massone A M, et al. Fist: a fast visualizer for fixed-frequency acoustic and electromagnetic inverse scattering problems[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2006, 14(2): 177-187.
- [22] 宋拥民. 1446 座交响音乐厅音质设计与评价[J]. 声学技术, 2016, 35(5): 54-59.  
SONG Yongmin. Acoustic design and evaluation of 1446-seats

- symphony hall in Changsha Concert Hall[J]. *Technical Acoustics*, 2016, **35**(5): 54-59.
- [23] 蒋国荣. 室内声场模拟中的界面声散射[J]. *声学技术*, 2009, **28**(6): 697-700.
- JIANG Guorong. Sound scattering in room acoustic modeling[J]. *Technical Acoustics*, 2009, **28**(6): 697-700.
- [24] 项端祈. 演艺建筑: 音质设计集成[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- XIANG Duanqi. Collection of acoustical design: Performing arts buildings[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [25] 王季卿. 音乐厅音质设计进展及问题探讨[J]. *声学技术*, 2016, **35**(5): 391-397.
- WANG Jiqing. The advancements in the acoustical design of concert halls[J]. *Technical Acoustics*, 2016, **35**(5): 391-397.
- [26] 秦佑国. 室内声学的进展[J]. *电声技术*, 2009, **33**(8): 6-10.
- QIN Youguo. Progress in room acoustics[J]. *Audio Engineering*, 2009, **33**(8): 6-10.
- [27] Barron M. Auditorium acoustics and architectural design[M]. 2nd edition. London/ New York: Taylor & Francis, 2009.
- [28] 戴璐, 孟子厚. 混响感的因素分析[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2013, **20**(3): 21-30.
- DAI lu, MENG Zihou. Factor analysis of reverberation perception[J]. *Journal of Communication University of China (Science and Technology)*, 2013, **20**(3): 21-30.
- [29] 梁恒, 莫方朔. 混响感频率特性的主观评价[C]//中国声学学会青年学术会议, 2013: 199-200.
- LIANG heng, MO Fangshuo. Subjective evaluation of frequency characteristic of reverberance[C]//Chinese Younger Conference of Acoustics, 2013: 199-200.
- [30] Fuchs H V, Zha X. Requirement for low-frequency reverberation in spaces for music: Part 1: smaller rooms for different uses[J]. *Psychomusicology*, 2015, **25**(3): 272-281.
- [31] 查雪琴. 室内低频混响时间特性探讨[J]. *声学技术*, 2016, **35**(5): 435-441.
- CHA Xueqin. Requirements for low frequency reverberation characteristics in rooms[J]. *Technical Acoustics*, 2016, **35**(5): 435-441
- [32] Fuchs H V, Steinke G. Requirements for low frequency Reverberation in Spaces for Music: Part 2: Auditoria for performances and recordings.[J]. *Psy-chomusicology*, 2015, **25**(3): 282-293.
- [33] Lee D, Cabrera D, Martens W L. The effect of loudness on the reverberance of music: reverberance prediction using loudness models[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2012, **131**(2): 1194.
- [34] Lee D, Gong E, Cabrera D, et al. Intelligibility of reverberant speech with amplification: limitation of speech intelligibility metrics, and a preliminary examination of an alternative approach[J]. *Journal of Applied Mathematics & Physics*, 2015, **3**: 240-246.
- [35] 康健. 城市声环境论[M]. 戴根华, 译. 北京: 科学出版社, 2011.
- KANG Jian. Urban sound environment[M]. DAI Genhua, Translate. Beijing: Science Press, 2011.
- [36] 张新华, 范宝元. RAYNOISE 软件在建声和电声设计中的应用[J]. *电声技术*, 2001, **25**(9): 20-23.
- ZHANG Xinhua, FAN Baoyuan. Application of raynoise software in building acoustics and electroacoustics[J]. *Audio Engineering*, 2001, **25**(9): 20-23.
- [37] 朱相栋. 观演建筑声学设计进展研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- ZHU Xiangdong. Research on acoustic design development of performance building[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [38] 张钰, 张三明, 郭晓娟. 厅堂声学缩尺模型试验综述[J]. *建筑与文化*, 2013(1): 104-105.
- ZHANG Yu, ZHANG Sanming, GUO Xiaojuan. Summary of room acoustic scale model[J]. *Architecture & Culture*, 2013(1): 104-105.
- [39] 项端祈, 王峥, 陈金京, 等. 演艺建筑声学装修设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- XIANG Duanqi, WANG Zheng, CHEN Jinjing, et al. Architectural acoustics decoration design[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.