

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.04.016

厅堂侧向能量因子的仿真与实测

王红卫^{a,b}, 张 龙^a

(华南理工大学 a.建筑学院; b.亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要:侧向能量因子是衡量厅堂空间感的重要客观指标之一。厅堂侧向能量因子通常采用计算机仿真的方法得到。首先采用 MKH800 电容型传声器在实际厅堂中开展侧向能量因子测试工作。然后,通过 ODEON6.5 建立厅堂三维仿真模型,计算相同位置处侧向能量因子的模拟值,并将实测值与模拟值进行对比分析。研究表明,各点位的仿真值均大于实测值,座席区前部偏差较小,正对舞台上后部区域偏差较大。造成偏差的主要原因是由于 ODEON 软件中扩散系数的设置与所在面特性无关,同时,软件无法分别定义各频段的扩散系数。因此,在实际工程项目中,为了准确地预测室内音质效果,建议普遍采用缩尺模型实验测量侧向能量因子。

关键词:侧向能量因子;脉冲响应;计算机仿真;缩尺模型

中图分类号:TU212

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2016)04-127-06

Simulation and field measurement of the lateral energy fraction in hall

WANG Hongwei^{a,b}, ZHANG Long^a

(a. School of Architecture; b. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P.R.China)

Abstract: The lateral energy fraction in hall is an important objective factor of spatial impression, and it is usually simulated by computer simulation. We first used MKH800 to measure the lateral energy fractions at the corresponding positions of a real hall. Then, we established a 3D model of the hall with ODEON 6.5 to simulate the lateral energy fractions at the receiving points. Finally, the simulated lateral energy fractions were compared with the measured ones. The comparison results show that the simulation values are larger than the measured ones. The deviation of the simulated values is small in the front part of the seating area, and it is large in the middle and back part of the seating area in front of the stage. The reason for the deviation is that the diffusion coefficient of ODEON is not related to the areas' character, and the diffusion coefficient of each frequency band can not be separately defined in this software. Therefore, in order to accurately predict the indoor acoustics, it is recommended to use architectural acoustic scale model to measure lateral energy fractions.

Keywords: lateral energy fraction; impulse response; simulation; scale model

收稿日期:2016-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51278198);华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014zz0021);国家留学基金资助项目(201308440043).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51278198), Fundamental Research Funds for the Central Universities of South China University of Technology(2014zz0021) and the National Study Fund of China (201308440043).

作者简介:王红卫(1975-),男,华南理工大学副教授,博士,主要从事建筑和环境声学研究,(E-mail) wanghw@scut.edu.cn.

随着中国物质文化生活水平的不断提高,各类观演建筑不断涌现。侧向能量因子(LF)作为厅堂音质的重要客观评价指标之一,其测量技术受到国内外学者的广泛关注。通过测量房间内侧向反射的脉冲响应可以得到特定点位侧向能量因子的实测值,并可在此基础上开展关于空间感等的主观音质评价。当前国内的研究主要针对厅堂的仿真和现场测试独立展开。文献[1-2]针对具体工程项目进行测量,并分析了侧向能量因子的优选范围;文献[3]利用声强法测量某房间早期反射声,并讨论了时间窗宽度对于测量精度产生的影响;文献[4]则结合多个音乐厅的测量数据分析了后期侧向声能对空间感的影响;文献[5]虽然对观众厅各项参数做了仿真计算,但并未对仿真结果的精确度进行讨论;文献[6]虽对竣工后的厅堂进行了实测,但实测对象主要是混响时间、声压级、清晰度等参量,并未对厅堂的侧向反射声和空间感做出评价。笔者则在此基础上采用 MKH800 传声器测量厅堂中各点位的侧向能量因子;根据实际情况建立厅堂三维模型,设定声源及界面材料的声学参数,计算相应各点的侧向能量因子模拟值,通过比较实测和模拟的结果,分析了仿真的误差情况。

1 侧向能量因子计算

侧向能量因子通常采用测试位置处的脉冲响应计算得到。室内空间可以简化为线性时不变系统,测得的脉冲响应包含该空间的声学特性。利用无指向性点声源生成伪随机信号,在接收点处即可测得房间的脉冲响应。

侧向能量因子定义为早期侧向声能与早期总声能之比,因此,需要在同一点位测量两次脉冲响应,根据声能衰变曲线可得侧向能量因子的计算公式。

$$LF = \frac{\int_{0.005}^{0.080} p_L^2(t) dt}{\int_0^{0.080} p^2(t) dt}, \quad (1)$$

式中:LF 为各频段侧向能量因子测量值;分母部分通过无指向性传声器得到,其值表示 80 ms 内的早期总声能;分子部分则通过 8 字形传声器得到,其值表示 80 ms 内早期侧向声能。

2 侧向能量因子现场实测

2.1 测试仪器与系统

为了和仿真结果进行对比分析,在现场对侧向能量因子进行实测。测试仪器选用森海塞尔 MKH800 电容型传声器(如图 1 所示),具有较宽的频率响应和动态范围,并且可通过旋钮在“无指向”和“8 字形”两种模式之间进行切换。

测试系统如图 2 所示。十二面体扬声器置于舞台大幕线后 3 m,距地面 1.5 m。利用 Adobe Audition 生成 MLS 信号,经高频外置声卡和功率放大器,由扬声器输出。通过 Dirac 对采集的时域声信号进行分析计算,最终得到各频段的侧向能量因子实测值。



图 1 森海塞尔 MKH800 电容传声器

Fig.1 Sennheiser MKH800 capacitor microphone

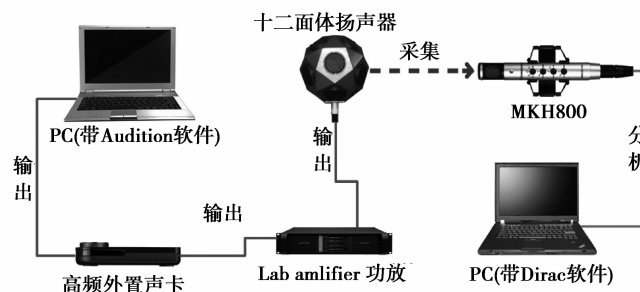


图 2 现场测试系统示意图

Fig.2 The experimental setup in an anechoic chamber

2.2 设备校准

测试设备的校准主要包括回路校准和系统校准,两者均通过 Dirac 软件实现。回路校准是通过测量回路的频率响应,从而标定系统相关频段的传输特性。将声卡输入和输出端利用数据线短接,Dirac 即可生成相应的回路校准文件,并在计算过程中自动加载。系统校准则是在自由场或扩散场中测量系统的脉冲响应,生成系统校准文件并对实际测量数据进行修正,降低 8 字形传声器两通道之间的相位失配误差。

2.3 现场实测结果

采用校准后的设备在现场进行实测,图 3 为待测厅堂的室内照片,实测结果如表 1、表 2 所示。



图 3 现场测试系统示意图

Fig.3 The experimental setup in an anechoic chamber

表 1 500 Hz 各点位侧向能量因子实测值

Table 1 Measured value of the early lateral energy fraction in 500 Hz

点位	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
实测值	0.178	0.151	0.157	0.173	0.139
点位	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
实测值	0.144	0.173	0.146	0.130	0.163

表 2 1 kHz 各点位侧向能量因子实测值

Table 2 Measured value of the early lateral energy fraction in 1 kHz

点位	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
实测值	0.165	0.146	0.137	0.149	0.131
点位	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
实测值	0.140	0.159	0.122	0.120	0.158

3 侧向能量因子计算机仿真

3.1 仿真软件与三维模型

为了预测分析厅堂内座席区侧向能量因子的分布情况,采用 ODEON 6.5 对其进行仿真计算,本软件是基于几何声学原理。利用声线跟踪和虚声源法模拟声波在厅堂内的传播规律,并计算特定位置的声学参数。

图 4 为报告厅的三维模型。本次仿真的厅堂容积约 $5\,000\text{ m}^3$,有效吸声面积约 $3\,000\text{ m}^2$ 。以舞台后墙线中点为原点建立空间直角坐标系。声源位置设在舞台中轴大幕线后 3 m 距地面 1.5 m 高,为无指向性点声源。观众区共布置了 10 个接收点,接收点均离地面 1.2 m 高。由于观众厅平面关于中轴线对称,因此,接收点分布在一侧。点位及坐标轴设置如图 5 所示。

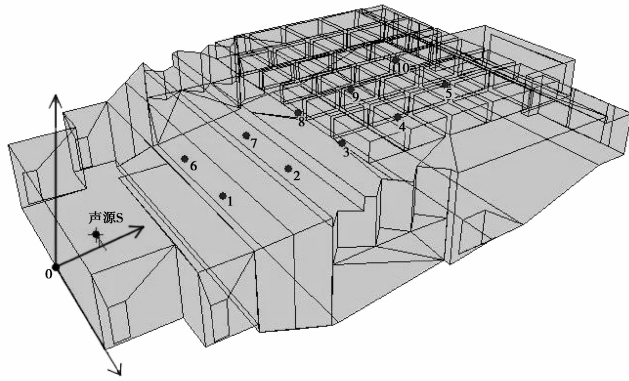


图 4 仿真三维模型

Fig.4 The three-dimensional model in simulation

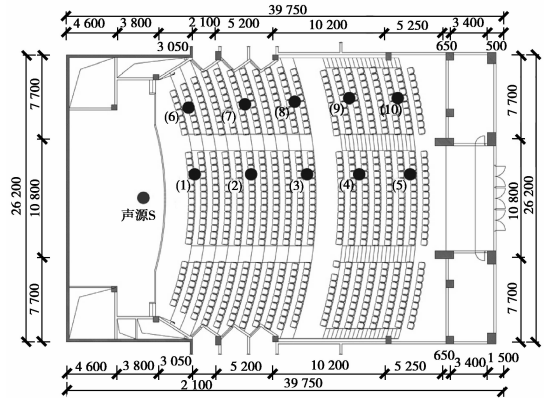


图 5 测试点平面分布

Fig.5 Receivers in horizontal distribution

3.2 室内各界面材料设置

室内各界面材料中频 500 Hz、1 kHz 的吸声系数如表 3 所示。

表 3 室内各界面吸声材料

Table 3 The absorption material in each interface

位置	材料	500 Hz	1 kHz
吊顶	粉灰	0.02	0.02
侧墙	MLS 扩散体	0.04	0.06
后墙	幕布	0.72	0.78
地面	水泥	0.01	0.02
门	木板门	0.10	0.10
听众席		0.75	0.85

如表 3 所示,吊顶选用吸声系数较小的材料,反射性能较好,为观众厅提供早期反射声,有利于室内声场分布均匀。前后墙做必要的吸声处理,防止出现回声等声学缺陷。此报告厅中频 1 kHz 的混响时间约 1 s。

为了保证仿真模型与实际厅堂各界面具有相同的吸声特性,测量厅堂的早期衰变时间、清晰度等参数,并与仿真结果进行比较。由表 4、表 5 可知,由于仿真基于几何声学原理,低频段与实测值相差较大,而中高频段各参量数值上较为接近。

表 4 室内声学特性指标模拟值

Table 4 The simulation values of acoustic indexes

频率/Hz	EDT/s	T30/s	C80/dB	D50
250	0.95	0.97	4.03	0.54
500	0.82	0.83	5.57	0.66
1 000	0.69	0.80	8.31	0.79
2 000	0.71	0.83	8.07	0.77
4 000	0.63	0.82	8.87	0.79

表5 室内声学特性指标实测值

Table 5 The measured values of acoustic indexes

频率/Hz	EDT/s	T30/s	C80/dB	D50
250	0.67	1.03	7.28	0.71
500	0.76	0.98	7.47	0.75
1 000	0.69	0.88	7.67	0.73
2 000	0.72	0.93	7.41	0.71
4 000	0.66	0.81	7.93	0.74

3.3 侧向能量因子仿真结果及误差分析

中频 500 Hz、1 kHz 各接收点的侧向能量因子模拟值如表 6、表 7 所示。

表6 500 Hz 各点位仿真值与实测值偏差

Table 6 The deviation between measured values and simulation values in 500 Hz

点位	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
模拟值	0.188	0.177	0.194	0.204	0.180
仿真误差	0.010	0.026	0.037	0.031	0.041
点位	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
模拟值	0.161	0.217	0.203	0.180	0.224
仿真误差	0.017	0.044	0.057	0.050	0.061

表7 1 kHz 各点位仿真值与实测值偏差

Table 7 The deviation between measured values and simulation values in 1 kHz

点位	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
模拟值	0.173	0.168	0.178	0.187	0.165
仿真误差	0.008	0.022	0.041	0.038	0.034
点位	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
模拟值	0.152	0.202	0.181	0.165	0.213
仿真误差	0.012	0.043	0.059	0.045	0.055

当某测试点侧向能量因子的值介于 0.2 和 0.3 之间时,即可认为此点主观音质满足空间感的要求。从仿真的结果上看,500 Hz 时,接收点(4)、(7)、(8)、(10)的模拟值在优选范围之内;1 000 Hz 时,仅接收点(7)、(10)满足优选范围。结合测试点的平面分布可知,靠近两侧墙的座席区模拟值普遍较大,这部分区域能接收到较为丰富的早期侧向反射声,空间感较好。结果表明,座席区前部(1)、(6)号点模拟值低于中后部,尤其是正对舞台的(1)号接收点,在 1 kHz 时仅为 0.152,明显低于其余各接收点,空间感较差。

对比实测值和模拟值可知:座席区前部(1)、(6)号点偏差较小,仿真和实测较为吻合;正对舞台座席区域的中后部偏差较大,1 kHz 时最大偏差约 0.059。实测结果亦表明各接收点侧向能量因子仿真值均大于实测值。这一方面是由于 ODEON 6.5 仿真时无法定义各界面全频段的扩散系数;另一方面,由于扩散系数的计算基于几何声线跟踪法,因此,扩散系数的大小与所在面的特性无关。根据 ODEON 使用说明中关于扩散系数的设置,通常面积较大的座席区扩散系数取 0.7,而较小的面则取 0.1。

4 结 语

采用双通道 MKH800 传声器测量多功能厅内特定点位的侧向能量因子,并与仿真结果进行比较。研究表明:各点位仿真值均大于实测值,座席区前部偏差较小,正对舞台座席区域的中后部偏差较大。在工程实践中,由于 ODEON 软件本身存在局限性,仿真结果往往误差较大。采用现场实测的方法能够较为精确地得到侧向能量因子,这对于室内音质的预测和主观评价具有重要的意义。若在实际工程项目中考虑实测的可行性,笔者则建议采用缩尺模型试验测量厅堂的侧向能量因子。

参考文献:

- [1] 王红卫,吴硕贤,赵越喆.基于仿真脉冲响应的厅堂音质评价[J].土木建筑与环境工程,2005,27(1):23-25.
WANG Hongwei, WU Shuoxian, ZHAO Yuezhe, et al. Acoustic evaluation of the concert hall based on simulated impulse responses [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2005, 27(1): 23-25. (in Chinese)
- [2] 张三明.河南艺术中心建声设计[J].演艺科技,2014(2):27-33.
ZHANG Sanming. Acoustical design of henan art center [J]. Entertainment Technology, 2014(2): 27-33. (in Chinese)
- [3] 蒋国荣,朱承宏.房间内早期反射声方向分布的声强法测量[J].声学技术,2007,26(3):450-454.
JIANG Guorong, ZHU Chenghong. Measurement with sound intensity for directional distribution of early reflections in rooms [J]. Technical Acoustics, 2007, 26(3): 450-454. (in Chinese)
- [4] 莫方朔.音乐厅中后期反射声对空间感的影响[J].声学技术,2002,21(Z1):84-87.
MO Fangshuo. The effect of late reflections on spatial impression in concert halls [J]. Technical Acoustics, 2002, 21 (Z1): 84-87. (in Chinese)
- [5] 乐意,赵其昌,沈勇,等.大型厅堂的建筑声学设计方法研究[J].南京大学学报(自然科学版),2011,47(2):208-217.
LE Yi, ZHAO Qichang, SHEN Yong, et al. Study on the acoustic design of large auditoriums [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2011, 47(2): 208-217. (in Chinese)
- [6] 冯文华,贺加添,魏平华.中南剧场建筑声学设计[J].华中建筑,2008,26(5):69-73.
FENG Wenhua, HE Jiatian, WEI Pinghua. Acoustical Design of Central South Theater [J]. Huazhong Architecture, 2008, 26(5): 69-73. (in Chinese)
- [7] Daniel Protheroe, Bernard Guillemin. 3D impulse response measurements of spaces using an inexpensive microphone array [J]. Building Acoustics, 2013, 20(2): 141-156.
- [8] Sakari Tervo, Teemu Korhonen, Tapio Lokki. Estimation of reflections from impulse responses [J]. Building Acoustics, 2011, 18(1): 159-174.
- [9] A. Bassuet. New acoustical parameters and visualization techniques to analyze the spatial distribution of sound in music spaces [J]. Building Acoustics, 2011, 18(3/4): 329-347.
- [10] Marshall AH. A note on the importance of room cross-section in concert halls [J]. Journal of Sound and Vibration, 1967, 5(1): 100-112.
- [11] Barron M. The subjective effects of the first reflection in concert halls—the need for lateral reflections [J]. Journal of Sound and Vibration, 1971(15): 475-494.
- [12] A. Abdou, R. W. Guy. Spatial information of sound fields for room-acoustics evaluation and diagnosis [J]. Journal of the acoustical society of America, 1996, 100(5): 3215-3226.
- [13] M. Kuster, D. de Vries, E. M. Hulsebos, et al. Acoustic imaging in enclosed spaces: Analysis of room geometry modifications on the impulse response [J]. Journal of the acoustical society of America, 2004(116): 2126-2137.