

# 厅堂音质空间感主观评价方法的实验研究

熊 艳, 盛胜我, 赵跃英

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

**摘要:** 厅堂的空间感(Spatial Impression)作为音乐厅音质的重要评价参量现已得到广泛认同。通过近期的研究实践, 介绍了厅堂音质空间感的主观评价方法, 其中包括在消声室内构建多通路的声场模拟系统, 主观音质评价实验中成对判断的具体步骤, 相应的心理尺度计算, 以及数据统计方法。最后给出了典型的实际测量结果。

**关键词:** 空间感; 空间声场; 主观评价

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-02-153-04

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.02.013

## Experiment study for subjective evaluation methodology of spatial impression on room acoustics

XIONG Yan, SHENG Sheng-wo, ZHAO Yue-ying

(Acoustic Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** It is well known that spatial impression is one of the important characteristics in concert hall. The author carried on some research practice on it. This paper introduce subjective evaluation methodology of spatial impression on room acoustics: simulate three-dimensional sound field in anechoic room, details of using the paired comparisons, date-processing and calculation on psychological scale. At last, the author described result of an experiment carried out on spatial impression according to such method.

**Key words:** spatial impression; spatial sound field; subjective evaluation

## 1 引言

空间感已被作为音乐厅音质评价的重要内容。Beranek 将其列为厅堂音质综合评价的八个主观参量之一<sup>[1]</sup>, 可见“空间感”在厅堂音质中的重要性。反映声场空间特征的客观参量有侧向反射因子(LF)<sup>[2]</sup>, 双耳互相关系数(IACC)<sup>[3,4]</sup>等。目前认为表观声源宽度(ASW)与听者包围感(LEV)是空间感的两个重要主观评价参量<sup>[3]</sup>。ASW 指人耳所感知的声源的宽度范围, LEV 指听音者被声音所包围的感觉。厅堂音质空间感的研究主要是探讨反映声场方向性特征的客观参量与主观评价参量之间的关系; 寻找音乐厅的最佳听闻效果以及满足最佳听觉环境的条件; 从而为音乐厅、大剧院等厅堂音质的优化设计提供依据。

厅堂音质空间感主观评价方法通常有演出问卷调查, 录音信号回放评价和实验室主观听音评价三种主要方法。问卷调查操作简单, 但调查结果往

往只能对一场演出的总体主观感受进行问卷, 听音者在厅堂中所处位置不同, 得到的调查限于本场演出和某个座位上的效果。借助乐团巡回演出的机会, 在不同厅堂中规定座位上用人双耳内传声器作立体声录音, 耳机回放信号进行试听评价, 克服了问卷调查方法的缺点, 但由于乐团巡演的机会不多, 所以这种方法没有被大量采用。实验室主观听音评价是在实验室(一般在消声室)内, 利用多通路的电声设备模拟实际声场环境来进行主观听音评价。这种方法不受演出的限制, 可以控制与调节模拟声场的条件。主观听音实验的方法是国外研究者在进行厅堂音质空间感研究中普遍使用的方法。

鉴于国内厅堂音质空间感主观评价试验的报道较少, 本文结合近期在消声室内所作的相关实验, 着重介绍了空间感主观评价所采用的研究方法, 其中包括在消声室内构建多通路扬声器的声场模拟系统; 主观音质评价实验中的对偶比较法; 相应的音质空间感心理尺度计算以及数据统计方法。同时, 也给出了典型的实际测量结果。

## 2 多通路声场模拟系统的构建

厅堂音质空间感的主观评价试验在消声室内

收稿日期: 2008-04-09; 修回日期: 2008-06-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(10574100)

作者简介: 熊艳(1978-), 女, 湖南长沙人, 博士研究生, 研究方向为建筑声学。

通讯作者: 熊艳, E-mail: cabuchino999@163.com

进行。采用空间分布的多通路电声系统模拟实际厅堂中的声场环境。主控计算机连接多通路外置声卡,独立发出的电信号,分别控制终端不同位置放置的多只扬声器,模拟直达声及空间各个方向的早期反射声和混响声。通过各通路信号强度和延迟时间的调节,能够较细致地模拟反射声的入射方向、到达时间、强度和频谱特性,从而使试验中的受试者对音质空间感作出主观评价。下面简单介绍扬声器模拟系统的构成。

## 2.1 扬声器的分布与支撑系统

扬声器的支撑系统分为平面支撑和空间支撑两大部分,平面支撑部分用于承托位于水平面内的扬声器,空间支撑部分用于承托位于上半空间中的扬声器。设计每只扬声器距离听音者距离相等(以保证各扬声器初始延时相等),即所有扬声器分布于半径为  $R$  的球表面,而听音位置则位于球心  $O$  (如图 1 所示)。平面支撑体系的扬声器距听音者 1.8m,以扬声器高音单元中心正对圆心,确定扬声器摆放高度 1.2m,与受试者坐位时双耳高度保持相当。共配置 12 只支架,各支架之间可依  $30^\circ$  均匀分布,也可根据研究需要,改变其角度分布。空间支撑体系由四个 1/4 圆弧型钢支架组合而成,四个支架在顶部最高处通过螺栓与一只环形钢板铰合,形成空间球面,支架底部亦通过螺栓与平面支架的水平承台铰合。每只弧形支架均由跨  $15^\circ$  的分段直钢管焊接而成,环形钢板每  $15^\circ$  定位一个螺栓孔,上半球面空间内的扬声器可以定位于  $15^\circ$  的任意整数倍水平

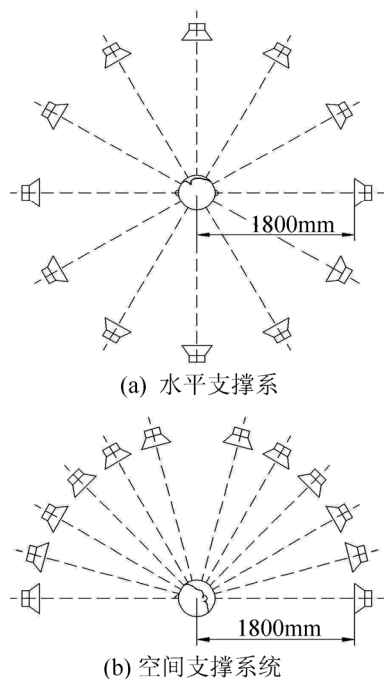


图 1 扬声器分布

Fig.1 Arrangement of loudspeakers

方位角或垂直方位角的位置上,共 72 个均匀分布的空间点,可满足声场模拟的需要。

## 2.2 信号系统的校准与调试

在消声室进行声场模拟的基本原理是用扬声器模拟直达声和来自不同方向不同时刻的反射声序列,改变反射声能量的空间和时间分布而构成不同的模拟声场。在声场模拟中,反射声空间分布在系统中依赖扬声器支撑体系的定位,时间分布对应每一个反射声序列的到达时刻。由于人耳能分辨来自同一方向间隔约 30ms 左右的两个反射声,且 1ms 的时延就可导致声像偏移,人耳在水平面的前方角度分辨率大于  $4^\circ$ ,后方分辨率也达到  $8^\circ$  [5],因此,需要严格校准实验系统。系统的校准包括扬声器频响的校准、声卡各通路延时的校准、扬声器位置误差的校准等。扬声器频响校准以校准各扬声器频响一致为目的,选定一只扬声器作为参照,在相同实验条件下,接收其它各只扬声器的激发信号,与参照扬声器激发信号做相关,得到的脉冲响应作为校准函数。声卡各通路延时测量是将声卡的输入与输出通道短接,每两路短接为一组,每路接收信号与激发信号作相关运算,得到声卡各通路的系统脉冲响应,比较每组两个响应的首个波峰到达时刻,得声卡各通路延时。扬声器位置误差校准方法,是将无指向性传声器置于消声室内听音位置处,以实际接收到的各只扬声器的激发信号为准,计算位置误差。最终通过信号时延增减处理,达到当各路扬声器同步发声时,其相对时延小于 0.1ms。

## 2.3 模拟声场

图 2 为一个模拟声场的结构示意图,其中由 1 个直达声、4 个早期反射声和 3 个后期混响声构成。直达声由听音者正前方扬声器发出,4 个早期反射信号分别由左右对称的两对扬声器,在直达声之后 30ms、40ms、60ms 和 70ms 分别发出;后期混响声用三路扬声器模拟,三路信号依次间隔 5ms。

早期反射声和后期混响声的分界常取为 80ms,

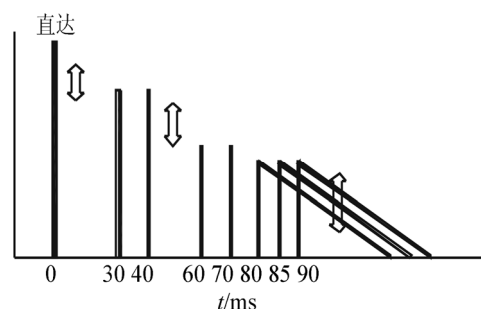


图 2 声场模拟结构示意图

Fig.2 Simulated sound field structure

直达声和早期反射声采用消声室录制的干音乐信号,后期混响声多用硬件效果器制造,也可截取厅堂的脉冲响应与干音乐信号做卷积,作为模拟声场的混响声信号。

### 3 主观评价实验

主观评价试验在消声室中进行,选取一段约8s~20s之间的合适乐曲作为干音乐信号,根据需要设计若干个模拟声场(设声场数量为 $N$ )。实验中,每两个声场组成一对,共组成 $N \times (N-1)/2$ 对声场,主观听音实验用对偶比较法<sup>[6]</sup>。对偶比较法是实验心理学中制作顺序量表的一种间接方法,最初由心理学家 J.Chon 在他的颜色爱好研究中应用。把所有有待比较的刺激一一配对,然后一对一对地呈献给被试者,要求被试者对各个配对刺激就给定的某种属性作比较,并判断其中哪一个属性更强。每个刺激都分别同其它刺激比较,得到它的各自强于其它刺激的百分比,再依据它们百分比的大小形成一个顺序量表。

空间感的主观实验分训练实验和正式实验两步进行:第一步,试听训练首先让受试人明确判断内容,随后按照正式实验形式,请受试人听2~4组音乐片段,目的是让受试人适应音乐的旋律、风格和实验的放音方式,同时要求他们在听音时进行判断,以熟练实验过程。第二步,正式实验中,每次由一位试听者进行听音,要求被试者就位后,头部面向正前方不转动,依次比较每一组声场中的前后两个信号,对前后两个声场的某个主观参量(如ASW)的大小、强弱、主观偏好等作出评价,给出前个声场大于(或小于)后个声场的评价结果。在实验中,受试者若不能对某组声场给出确定评价,需再次对该组声场进行试听,直至给出判断结果然后进行下一组。对所有声场对比比较完毕后,进行第二遍实验。第二遍实验是将上述两个声场的前后顺序颠倒,然后重复第一遍实验。

每个音乐片段取10s~20s,每对声场信号间隔时间相同,一般取1s~3s,每组之间间隔3s~5s,由受试者作出评价。正式实验过程中,要让受试人的情绪尽量保持平稳,并且保证不疲劳。一般将12至20对音乐信号为一单元,每单元之后安排受试者休息大约5min~10min,直至所有评价完成。

### 4 数据处理及统计分析

主观评价的实验数据并不能直接获得所需分

析参量的结果。首先,必须对实验数据进行数值化处理,然后进行信度检验,剔除不可靠数据。信度检验是为了确保实验结果的可靠性或一致性,一般进行三个方面的检验:相同事物检验( $i-i$ 比较),不同回放顺序检验( $ij-j_i$ 比较)和三角循环误差检验。通过信度检验剔除不可靠数据后采用Thurstone's Case V方法估值评价参量的心理尺度<sup>[7]</sup>,具体操作方法见图3:



图3 数据处理过程

Fig.3 Data-processing procedure

图3中,对评价数据赋值,赋值原则为:当 $j$ 声场主观评价大于(或强于) $i$ 声场时,赋值1,反之赋值0,对角线位置赋值0.5,得到一个被试对评价参量的二维评价结果数值矩阵,该矩阵为右半矩阵,再对剩余的左半矩阵赋值,赋值原则为 $(T_{ji}+T_{ij})=1$ ,得到完整的二维矩阵。重复以上步骤,得到所有被试的评价矩阵,叠加所有评价矩阵得到整体评价矩阵,再将矩阵中每一元素除以对应的有效评价次数得到评价百分比值矩阵( $P_{ij}$ ),随后进行 $P-Z$ 转换,得到 $Z$ 分数矩阵。最后对 $Z$ 分数矩阵各列依次求和,取平均,归一化,得到评价参量的心理尺度,心理尺度值越大表明该信号的被评价属性越强。

这里通过Thurstone's Case V方法得到ASW的心理尺度,Thurstone's Case V方法是用来处理对偶比较法的数据估值方法。“心理差别尺度”是指当信号的响应的概率满足正态分布规律时,两个信号之间的主观差别。当判断信号1大于信号2的几率大于75%时,心理差别为0.68,刚好等于主观感知差别阈值。也就是说,只有当心理尺度差大于0.68时,两个信号的差别才能被区分出来,若相差小于0.68,则认为两信号不可被区分,不具备可比性。

## 5 实际测量结果

图4是在消声室内进行空间感主观评价试验的实际照片。依照以上方法,进行了一组空间感主观研究实验,目的是研究早期侧向声能因子 $LF_E$ 对表观声源宽度ASW的影响。不同的音乐片段由于频率特性的不同会对实验结果产生影响,所以在讨论实验结果时,应考虑到频率特性的影响或者指出结论的前提是针对某一音乐片段而言。此处实验选择消声室录制的莫扎特的《F大调弦乐嬉游曲》K138第3乐章的一段约8s的乐曲作为干音乐信号,通过改变早期声能的方向分布,模拟 $LF_E$ 分别为0.05、0.12、0.2、0.28的四个声场。四个声场两两一对,共组成6组声场对,由10名具有一定声学知识及听音实践经历的学生接受听音实验。告知ASW的定义,并给予适当解释后要求受试者对一对声场前后两个信号的感知声源宽度(ASW)进行比对判断并给出结果,在完成所有6组判断后,颠倒声场前后顺序重复一次。受试者依次完成听音,得到10组评价结果,分别进行不同回放顺序检验及三角循环误差检验,剔除不可靠结果后赋值得评价赋值矩阵,叠加10个矩阵后转化为 $Z$ 分数矩阵。最后对 $Z$



图4 一位受试在消声室内进行空间感主观实验  
Fig.4 A subject being tested in anechoic chamber for spatial impression experiment

分数矩阵各列求和,取平均,归一化,得到如图5所示四个模拟声场的ASW心理尺度。

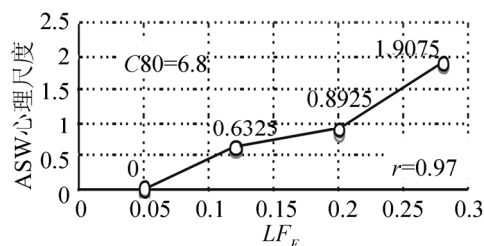


图5 ASW心理尺度测量结果

Fig.5 Measurement of psychological scale of ASW

实验结果表明在此音乐片段条件下,ASW的心理尺度随早期侧向声能因子 $LF_E$ 的增大而提高,即表观声源宽度随侧向声能量的增加而变宽。

## 6 结 语

本文介绍了厅堂空间感的主观评价实验方法,并通过一个典型实验说明了这种测试的实施和结果。

### 参 考 文 献

- [1] Beranek L. L. 音乐厅和歌剧院. 王季卿, 戴根华等译[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
- [2] Barron M. Late lateral fractions and the envelopment question in concert halls[J]. Applied Acoustics, 2001, 62(2): 185-202.
- [3] Morimoto, Mackawa. Auditory spaciousness and envelopment[A]. 13th ICA[C]. 1989.
- [4] Morimoto, Iida. A new physical measure for psychological evaluation of a sound field; Front/back energy ratio as a measure of envelopment[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 93(4):2282-2282.
- [5] 陈小平. 人头传输函数在双耳信号合成中的作用[J]. 电声技术, 2001, (5): 46-49.  
CHENG Xiaoping. Application of HRTFs in Binaural synthesis[J]. Audio Engineering, 2001, (5): 46-49.
- [6] 朱滢. 实验心理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000.  
ZHU Ying. Experimental psychology[M]. Beijing University Publication, 2000.
- [7] Thurstone L. A law of comparative judgment[J]. Psychological Review, 1927, 34: 273-286.