

上海文化广场音乐剧院的建声设计

Acoustic design for Shanghai Culture Square

杨志刚、章奎生

YANG Zhi Gang, ZHANG Kui Sheng

(上海现代建筑设计(集团)有限公司章奎生声学设计研究所, 上海 200041)

(Zhangkuisheng Acoustic design and research studio, Shanghai 200041)

Abstract: Project summarization of Shanghai Culture Square was introduced with theater's performance features, construction properties and acoustic design objectives, meanwhile acoustic requirement for decoration finishes of auditorium, computer simulation analysis and the results of acoustic testing.

Key words: reverberation time RT; clarity factor C_{80} ; lateral energy fraction LF; strength factor G_m

摘要: 介绍上海文化广场的工程概述, 剧场的功能及建筑概况、主要建声设计技术指标、观众厅表面装修用材的声学设计要求、计算机模拟分析、建声测试结果。

关键词: 混响时间RT; 明晰度 C_{80} ; 侧向反射系数LF; 声场力度 G_m

一. 工程概述:

上海文化广场东接茂名南路、西靠陕西南路、北邻复兴中路、南以永嘉路为界, 工程占地约 4.7 万平方米, 绿化面积 2.6 万平方米, 最深处达 22 米, 是目前世界上最大、最深、座位最多的地下剧场, 也是国内第一家以演出音乐剧为主的专业剧场。场外还有一个巨大的户外舞台, 草地上能同时容纳近千名观众, 是上海首个固定的公益性露天剧场。2006 年 9 月开始改建 2011 年 9 月完成, 历时三年。建成后的演出将以音乐剧表演为主、时尚经典类舞台艺术为辅, 将努力成为上海音乐剧产业的孵化和培育基地。

上海文化广场既是上海近代政治文化的缩影, 更是一部上海社会百年发展史。解放前这里是上海法租界著名的逸园跑狗场。1928 年, 黄金荣、杜月笙和万国储蓄会成立“法商赛跑会股份有限公司”一场比赛可得 30 万至 60 万元。1952 年陈毅市长命名它为文化广场。为迎接亚太区域和平会议的召开, 这里建成了拥有 15000 个座位的大看台。文化广场是上海人民政治集会和重要文艺演出的场所。刘少奇、周恩来、朱德、陈云、邓小平等党和国家领导人都先后来过这里。苏联西伯利亚芭蕾舞团的《天鹅湖》、日本松山芭蕾舞团的《白毛女》和朝鲜歌舞团的《血海》、《卖花姑娘》等剧目都曾在这里演出过, 当时引发了一票难求的局面。1969 年 12 月文化广场失火, 演出大厅长条木凳钢架全部烧毁。1970 年复建, 设计采用三向管式网架屋盖, 5700 平方米扇形平面, 布置 12137 个观众席位, 演出大厅内无一根柱子。“文革”时期, 文化广场的名字改成了“文化革命广场”, 革命样板戏、东方歌舞团出国汇报演出、现代芭蕾舞《红色娘子军》都在这里上演, 有时还放映其他社会主义国家的电影。上世纪 80 年代起市民的文化娱乐生活丰富起来, 文化广场独具的优势迅速消失, 于 1988 年关闭, 长期空置。1992 年初, 有着争议的股市一下子沸腾起来了, 上海证券交易所设在文化广场设立了临时交易柜台, 同年 12 月关闭。1997 年精文花市开业, 店铺近 300 家。2005 年夏天, 精文花市关闭。次年, 文化广场开始改建。由现代集团旗下华建建筑设计院与美国 BBB 建筑事务所合作承担建筑设计, 大堂和观众厅的室内设计方案由美国著名设计公司 STUDIOS Architecture 和 Team 7 International 联手打造。



图 1. 解放前文化广场为遛狗场



图 2. 1950 年代西伯利亚芭蕾舞团《天鹅湖》



图 3. 1970 年文化广场

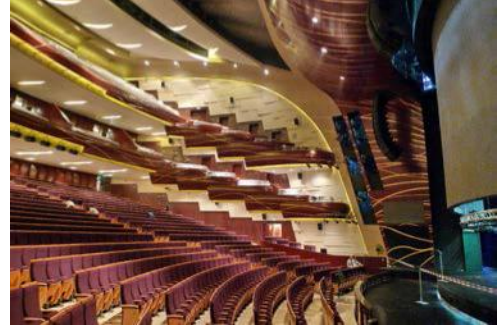


图 4. 2011 年新建成的文化广场剧场观众厅

新建成的文化广场宛若一只舒展巨翅的白色凤凰栖息在 4.7 万平米的绿茵上。新文化广场的奇特之处在于它不是“平地而起”，而是“向下造房”，基础最深达 24.3 米。工程总建筑面积为 6.5 万平方米，其中 7823 平方米为地上三层；6.5 万平方米中的 5.7 万平方米则位于地下，为地下五层。设计中采用了大量动感曲线，用流线型的造型和凤凰羽毛装饰图案来烘托建筑造型。剧场进门大厅的中央，造型新颖的透明“艺术之树”顶天立地，为地下各层空间洒下一抹阳光。大厅正面巨幅玻璃画出自著名旅美画家丁绍光之手，是目前世界上最大的彩色玻璃画作。屋顶则设计得错落有致。



图 5. 总体效果图



图 6. 总体效果图



图 7. 入口处的照片



图 8. 大剧院竣工后的照片

二. 剧场的功能及建筑概况

1. 使用功能

主要用于大型百老汇音乐剧、大型戏剧及大型歌剧演出，且以扩声系统为主，建声为辅。

2. 容座

观众厅容座为 1887 座（对外号称 2011 座），属大型剧场；其中池座 1247 座（其中乐池升起做为观众厅的一部分可布置 55 座）；一层楼座 188 座（其中侧包厢 36 座）；二层楼座 452 座（其中侧包厢 28 座）。

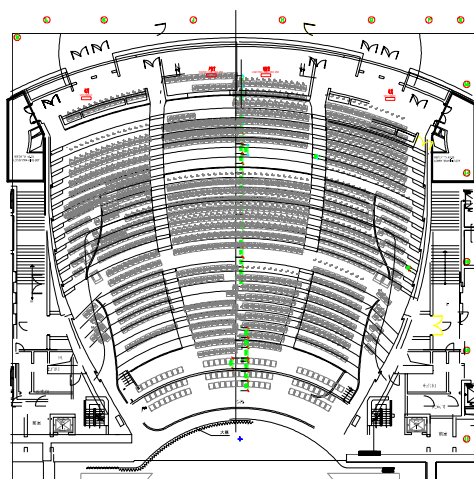


图 9. 池座平面图

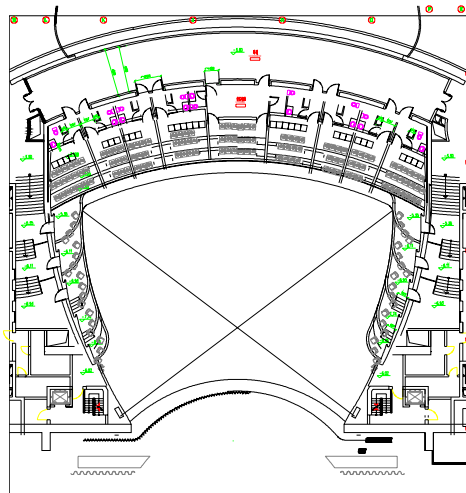


图 10. 一层楼座平面图

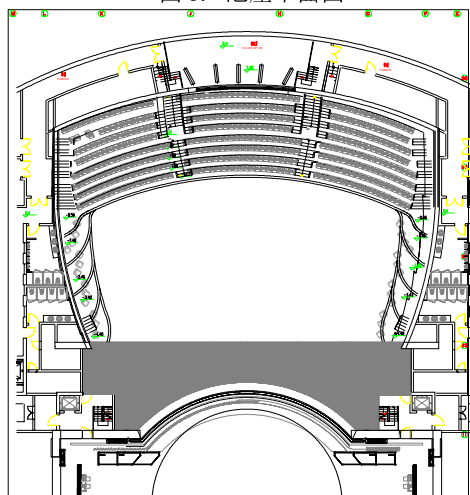


图 11. 二层楼座平面图

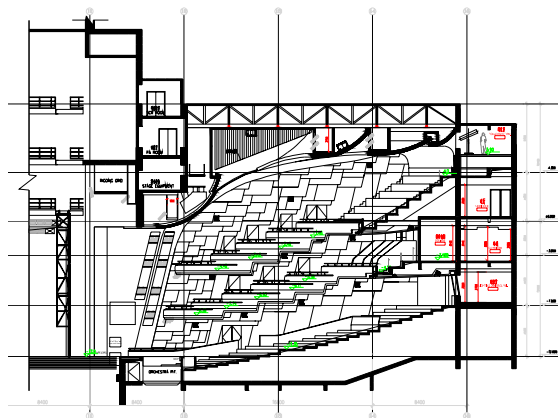


图 12. 剖面图

3. 建筑概况

建筑平面近似呈马蹄形；舞台开口：20m×11.5m，舞台面比池座第一排高 0.95m；厅内建筑尺寸：舞台台口至池座后墙最大水平距离为 32m；最大宽：35m；平均高：约 15.3m。

台口侧墙设二道耳光；天花设二道面光天桥，一道追光；观众席后部设两层挑台，侧墙设两层侧包厢；二层挑台开口高深比：4.1:6.3=1:1.54，基本符合规范要求的 $\geq 1:1.5$ ；三层挑台开口高深比：2.8:3.7=1:1.32，符合规范要求的 $\geq 1:1.5$ ；池座观众席为全台阶形式，共 23 排，第一排标高为-12.95m，最后一排标高为-7.50m，前后高差（总起坡）为 5.45m，平均起坡为 0.25m；一层楼座（贵宾包厢）共 3 排，第一排标高为-4.55m，最后一排标高为-3.499m，前后高差（总起坡）为 1.05m，平均起坡为 0.5m；二层楼座共 4 排，第一排标高为-0.560m，最后一排标高为 3.992m，前后高差（总起坡）为 4.552m，平均起坡为 0.65m，各层观众席末排的视点俯角分别为池座 12°，一层挑台 22°，二层挑台 32°；观众席前部设升降乐池，开口面积为 68 m²；

舞台包括主舞台、2 个侧舞台和后舞台；主舞台尺寸：长：35m，深：21.6m，高 28.8m；左右侧舞

台尺寸：长：19m，深：21.6m，高13.5m；后舞台尺寸：长：24.4m，深：18.6m，高13m；主舞台栅顶标高为16.800m；三层灯光渡桥标高分别为：1.000、5.500及10.000；舞台上设升降舞台及旋转车台等机械化舞台。音控室、灯控室设于池座后墙的中部。

三. 剧场主要建声设计技术指标

1. 中频满场混响时间 RT: 1.3±0.1 秒

混响时间频率特性如下:

中心频率 (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
混响时间 T_f (s)	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2	1.1
混响比 T_f / T_{500}	1.23	1.08	1.00	1.00	0.92	0.85

2. 透明度 C_{80} : 在 1~3dB 之间
3. 侧向反射系数 LF: 在 15%~35% 之间
4. 声场力度 G_M : -1~2dB
5. 本底噪声: NR≤20 曲线

四. 观众厅表面装修用材的声学设计要求

在本观众厅的声学装修设计中，中高频吸声材料主要配置在走道上。而低频吸声则主要借助于大天花吊顶、挑台天花吊顶及侧墙面等处不同材质及厚度的板共振所起的吸声作用。这里从建声设计角度对观众厅各部位用料、配置即构造设计提出以下建议，供室内装修设计考虑。

1. 观众厅内地坪及走道

观众厅内地坪用料可由建筑师及室内设计师根据装修标准、清洁要求及经济等因素确定，声学设计仅要求地板面料为贴实材料，如用木地板，则必须注意将龙骨间隙填实，以避免地板共振吸收低频。最后和装修设计单位确定地面采用石材，便于清洁；观众厅内走道部位铺设地毯，以防滑并避免脚步走动噪声。

2. 后墙面

经过音质计算，观众厅内后墙除门及观察窗外，均可不做吸声处理，但为了防止回声，需做声扩散处理。最后和装修设计单位确定采用四棱锥的声扩散体，具体做法为双层 12 后石膏板衬里加木饰面层，面密度约为 30kg/m²。

3. 侧墙面

中后部侧墙面均做硬的反射面，装修面层的面密度≥30kg/m²，以避免对低频声能的吸收。最后做法为：木饰面板、玻璃和GRG，面密度均为 30kg/m²。

4. 天花

天花在建声上会起到重要的前次反射声作用，因此建声设计要求在屋架荷载允许的条件下，尽可能采用较为厚重的反射型天花，以避免过多的低频声能被吸收。最后采用GRG（面密度为 40kg/m²）吊顶。

5. 挑台栏板

挑台栏板是厅内容易在前区造成回声的部位，建筑及室内设计中都应予以注意。建议本剧场的挑台做下倾式弧形或栏板结合表面装饰做一些局部扩散处理，以有利于扩散声波，不至于产生回声。

6. 舞台墙面

由于舞台包括 1 个主舞台、2 个侧舞台和 1 个后舞台，空间体积比较大，大大超过了剧场观众厅体积。为了避免舞台空间与观众厅空间之间因耦合空间而产生的不利影响，声学设计要求在舞台（包括主舞台、侧舞台及后舞台）一层天桥以下墙面做吸声处理。具体做法为：3 米以下采用 25 厚防撞木丝吸声板（刷黑色水性涂料）+75 系列轻刚龙骨（空腔）+原有粉刷墙体；3 米以上为 5 厚、穿孔 KT 板（穿孔率 20%）+75 系列轻刚龙骨（内填 50 厚 48kg/m³ 离心玻璃棉板，外包玻璃丝布）+原有粉刷墙体。

五. 计算机模拟分析

计算机声学模拟分析所采用的软件为丹麦技术大学编制的 ODEON9.2 建声模拟软件, 是世界上公认模拟结果最可靠的建声模拟软件之一。

(1). 观众厅的三维模型

根据剧场的平剖面图建立观众厅的三维声学模型, 共有 1005 个包络面围成, 见图 10、11。



图 10 计算机模型内视图 (歌剧条件)

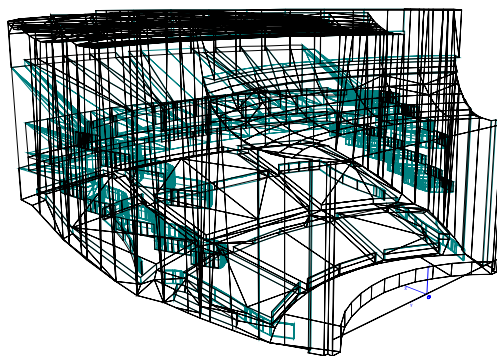


图 11 计算机三维声学模型图 (歌剧条件)

(2). 观众席主要声学参量的示意图

图 12 中的 A、B、C、D 分别为 T_{30} 、 C_{80} 、G 及 L_F 四个声学参量的模拟分析结果图。

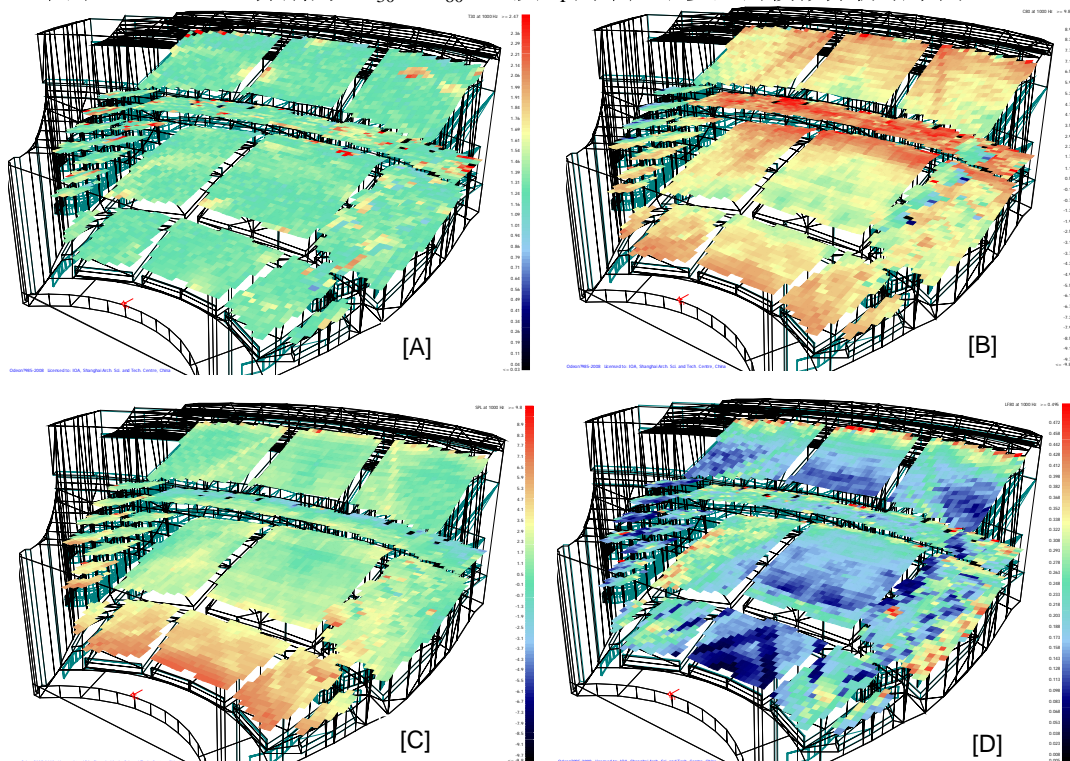


图 12 计算机模拟结果彩色网格图 (歌剧条件)

(3). 声学参量模拟结果汇总表 (满场状态)

表 1 声学参量模拟结果汇总表

声学参量	倍频程中心频率 (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
混响时间 T_{30}	1.58	1.42	1.35	1.33	1.26	1.10
早期衰减时间 EDT	1.66	1.76	1.42	1.82	1.73	1.61
明晰度 C_{80}	0.4	0.8	1.4	1.4	1.6	2.5
清晰度 D_{50}	0.44	0.47	0.50	0.50	0.51	0.56
声场力度 G	3.4	3.0	2.3	2.0	1.5	0.6
侧向反射系数 LF	0.153	0.154	0.127	0.103	0.097	0.092

六. 建声测试结果

1. 建声测试仪器系统图、测点布置图:



图8 建声测试仪器系统图

2. 主要建声测试结果:

空场主要建声测试结果见表1和表2。

表2 主要建声测试结果

声学测试参量	倍频程中心频率 (Hz)					
	125	250	500	1k	2k	4k
混响时间 T_{30}	1.65	1.55	1.55	1.52	1.45	1.18
早期衰减时间 EDT	1.42	1.30	1.47	1.47	1.48	1.11
明晰度 C_{80}	1.66	3.32	2.79	2.92	2.79	5.36
清晰度 D_{50}	0.42	0.52	0.52	0.53	0.54	0.65
声场力度 G	-2.23	-1.81	-0.52	-1.11	-0.86	-0.47
侧向反射系数 LF	0.16	0.15	0.20	0.21	0.27	0.21

表3 本底噪声测试结果

频率	倍频程中心频率 (Hz)							计权声级 (dB)	
	63	125	250	500	1K	2K	4K	A 声级	C 声级
池座中测点 1	54	47	37	39	37	30	23	41	61
舞台上测点 2	51	46	46	47	45	36	27	48	58
NR-25	55	43	35	29	25	21	17	37	

注：剧场观众厅内空调开时实测本底噪声为41~48dBA，未能达到噪声评价NR-25设计曲线要求。从现场听觉表明，本底噪声偏离的原因估计是因台上灯光设备的电磁噪声如整流器或其舞台设备散热风扇噪声所致，请剧院舞台技术部门予以检查消除。

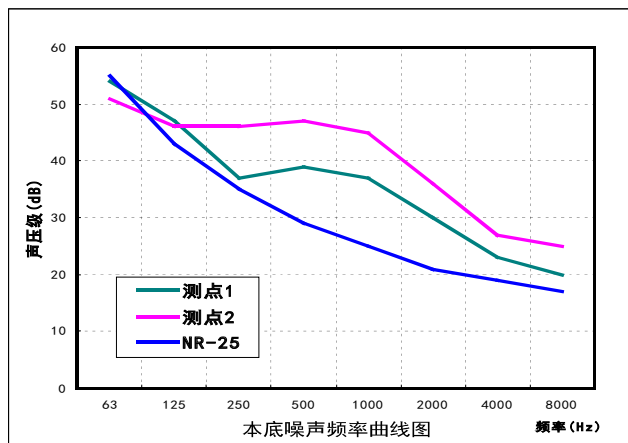


图11 本底噪声频率曲线图

3. 主要建声测试结果分析:

- 1) 混响时间是剧院建声设计中最重要音质评价指标,从混响时间(空场)测量数据可以得出,剧场空场 18 点平均中频(500 Hz~1000 Hz)混响时间为 1.54 秒。由于座席有足够吸声量预计满场中频(500 Hz~1000 Hz)混响时间将为 1.3 秒左右。混响特性曲线的低频有一定提升,低音比 BR 值达 1.06,中高频除 4KHz 有明显下跌外,基本平直特性、较好符合剧场声学设计规范和音乐剧院的声学设计预期要求。
- 2) 实测清晰度 D50 参数主要用于评价观众厅内的语言清晰度,测得本剧场观众厅内中高频(500~4KHz)平均 D50 值达到 0.56,表明观众厅内有一定的清晰度。
- 3) 从剧场明晰度指标 C80 值实测结果分析可见,大剧场观众厅的 C80(3)平均值为 2.83dB,符合歌剧推荐的 1.0~3.0 的要求。
- 4) 中频声场力度的平均值 Gmid 为-0.82,符合歌剧推荐的-1.0~2.0 的要求。
- 5) 本次现场测量利用先进的可调指向性测试话筒对音乐厅进行了侧向反射声系数 LF 值的测量,结果表明全频 LF 值达 0.15~0.27,中频平均达 0.20。表明本剧场观众厅的建筑声学平剖面体形设计和室内装修设计对观众厅的声反射和声扩散都取得了明显的效果。
- 6) 剧场观众厅内空调开时实测本底噪声为 41~48dBA。未能达到噪声评价 NR-25 设计曲线要求。从现场听觉表明,本底噪声偏离的原因估计是因台上灯光设备的电磁噪声如整流器或其舞台设备散热风扇噪声所致,请剧院舞台技术部门予以检查消除。

通过对大剧场的建声测量和分析,总体表明本剧场观众厅内混响时间适当,混响特性良好,声场分布均匀,观众厅有足够的听音清晰度和一定的丰满度,表明建声设计达到了预期的音质要求。总体音质效果可达到国内外同类剧场的先进水平。