

中南剧场建筑声学设计

Acoustical Design of Central South Theater

冯文华 Feng Wenhua
贺加添 He Jiatian
魏平华 Wei Pinghua

中图分类号 TU4*32
文献标识码 A
文章编号 1003-739X(2008)05-0069-05

摘要 中南剧场是服务于“中国第八届艺术节”的重点建设项目，是国内少有的专业话剧院。该文主要介绍该剧场的建筑声学设计包括：声学设计特点、声学技术要求、观众厅每座容积确定、体型设计、混响时间控制、噪声及振动控制、声学测试和音质效果等内容。

关键词 中南剧场 建筑声学设计

Abstract Central South Theater is a key construction project for “The 8th China Arts Festival”. It is also an unwonted professional drama theater in China. This article mainly introduces its acoustics design including design characteristics, technique requirements, seats dimension in auditorium, figure design, reverberation control, noise and vibration control, acoustic testing, timbre effect, etc.
Key Words Central South Theater, Acoustical design

第一作者 湖南大学建筑学院硕士研究生
第二作者 湖南大学建筑学院副教授
第三作者 化工部长沙设计研究院助理工程师

邮 编 410008
电子信箱 fengwenhua82@yahoo.com.cn
收稿日期 2008 01 07

中南剧场是为“中国第八届艺术节”服务的重点建设项目，是国内少有的专业话剧院，该剧院地处于武汉市京汉大道和规划的新马路的交叉口，距京汉大道15 m，距轨道一号线约30 m，临近规划的新马路。总用地面积约5 505 m²，总建筑面积14 419 m²，总投资近1.5亿元。

中南剧场的功能以演出话剧为主，兼顾歌舞类节目的多功能使用。该剧场观众厅采用钟形平面，其容量为810座（其中池座580座、楼座186座及包厢44座）。观众厅的有效容积为4 750 m³，约5.9 m³/座。观众厅宽为22 m，池座后墙距大幕线为21.5 m；楼座后墙距大幕线为24 m。观众厅两侧设置有跌落包厢。楼座下开口的高深比为1 1.2。该剧场舞台由主台和侧台组成，其台口宽14 m，高8 m，进深为18 m，并设有转台、车台等演出设备（图1~3）。

1 建筑声学设计特点及技术要求

演艺建筑的声学设计策略有下面三种：自然声为主；电声为主；自然声电声兼顾。每种策略适用于功能不同的演艺建筑。中南剧场的主要功能是演出话剧，话剧演出以自然声方式最佳，电声演出往往达不到理想效果。原因是：演员在舞台上的活动范围较大，靠固定于台口的传声器不能满足要求；而在舞台进深处悬吊传声器不仅给换景造成困难，同时靠近传声器时声级明显提高，反之降低，导致声音过大的起伏，缺乏真实感与层次感；使用无线话筒时，频响特性较差，会改变演员的音色。于是我们确定了“自然声为主，电声为辅”的音质设计原则。一个以自然声方式演出话剧的专业剧场，其观众厅的音质设计有如下特点和要求：要保证演出时语言清晰，就需要控制混响时间；观众厅内要有足够的响度，即要有足够的直达声和近次反射声，这主要通过控制观众厅进深、座席的升起（C值）、吊顶及侧墙的声反射来实现；厅内声场要均匀，有良好的扩散，因而厅内需设置扩散体，如沿侧墙布置包厢，设计凸弧形扩散反射面等；观众席区域内的频率相应要趋近平直，允许低频有适当的提升，低、中、高频要适度平衡；厅内背景噪声要足够的低，防止噪声对演出声产生掩蔽作用，需严格控制内部和外部的环境噪声传入厅内。

用一句话概括就是：“观众厅形体合理、响度足

够、语言清晰，声场均匀，有足够的近次反射声及低的背景噪声”。根据上述要求，我们确定了观众厅的几项主要的声学技术指标（表1）。

下面拟分为观众厅每座容积确定、形体设计、混响时间控制、噪声及振动控制和声学测量五部分分别论述该剧场的声学设计。

2 观众厅每座容积确定

所谓每座容积就是观众厅装修完成后的容积与观众人数之比，话剧演出时话剧演员的声功率是有限的，观众厅的容积小一点，声能密度就会大一些，观众听到的声音响度就会高一些。从此角度看，每座容积宜小不宜大。另一方面，每座容积太小，混响时间缩短，音质会变差，大厅的空间感会狭窄，给人压抑感。所以每座容积又不能太小。《剧场、电影院和多功能厅堂建筑声学设计规范》规定，话剧院的每座容积为4 m³/座~6 m³/座。

中南剧场的声学设计贯穿了该工程的全过程，在建筑方案设计时我们通过调整台口尺寸、楼座及包厢标高，在装修设计时通过调整吊顶标高，最终将总容积控制在4 750 m³，即对应的每座容积为5.9 m³，达到了话剧演出的要求。

3 观众厅的形体设计

观众厅形体设计要从声学 and 视觉两方面考虑。单就声学方面，它与厅堂声音的响度、声场的均匀度、声音的音质有关，还与是否存在声学缺陷有关。形体设计包括观众厅的平面设计。对以自然声演出话剧的剧院，形体设计尤为重要。

3.1 观众厅的平面设计

中剧场是一座810座的中型剧场，经过分析，观众厅确定采用钟形平面，原因有二：它结构简单，绝大多数观众席有良好的视角，均在人声的指向性范围内；该剧院容量不大，观众厅跨度控制在22 m以内，侧墙能够提供较强和覆盖面较大的侧向早期反射声。

3.2 观众厅的剖面设计

观众厅的剖面设计主要包括C值的控制、观众厅进深控制、侧墙和后墙的声学处理、台口及吊顶设计

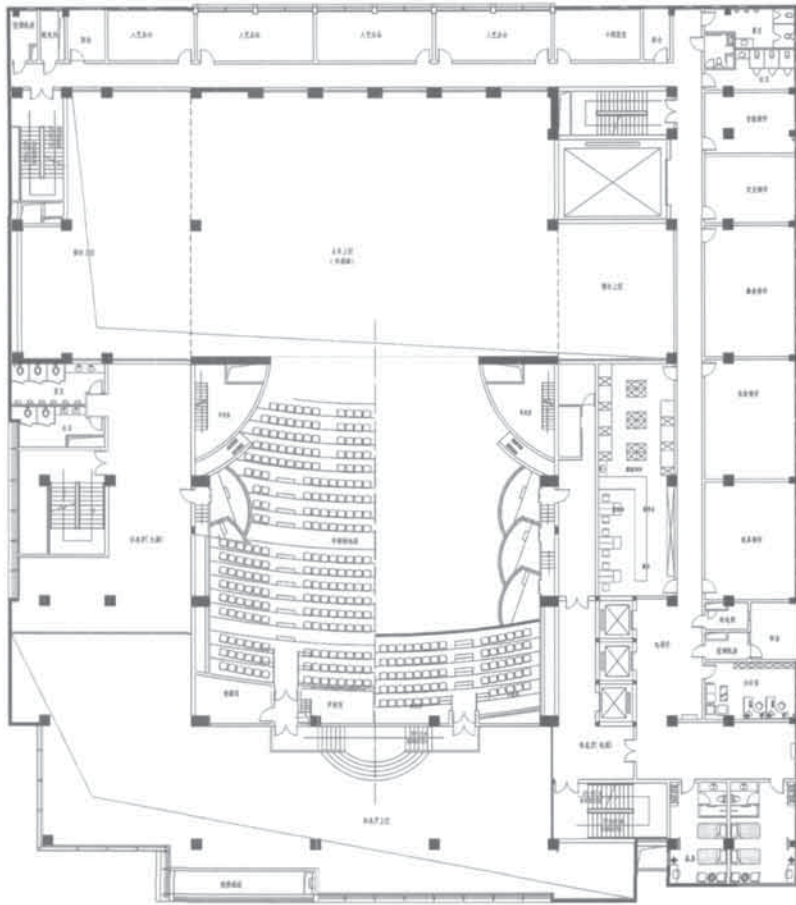


图1 中南剧场平面

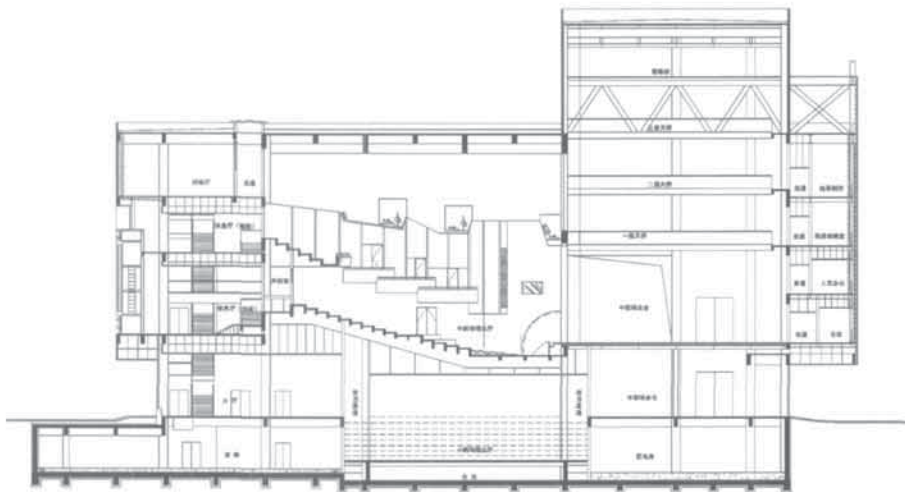


图2 中南剧场剖面

等方面的问题。

(1) C值的控制

在以自然声方式演出话剧的观众厅，每排座位升高应使任一听众的双耳充分暴露在直达声范围之内，并不受任何障碍物的遮挡。应尽可能大于等于视线所需的C值120 mm。C值太小，前面的观众就会对后面的观众产生掠射吸声，影响后排观众听到的声音的声级。该剧场观众席的C值均大于120 mm，后面观众席的C值接近200 mm（图4）。

(2) 观众厅吊顶设计

该观众厅的吊顶造型设计兼顾剧院的其他功能（如音箱桥、面光桥等）和声学要求。几经修改最后确定为折线型吊顶。通过调整吊顶的倾角，达到前部吊顶为池座中前部观众席提供有益的早期反射声；中后部吊顶增强后部观众席声级（图5）。控制吊顶标高，防止出现长延时反射声；将近次反射声相对于直达声的初始时间间隔控制在35 ms以内。为了避免低频被吊顶吸收，观众厅的吊顶采用了35 mm厚GRG增强型反声板。

(3) 观众厅后墙处理

该剧院的后墙呈微凹弧形，容易引起回声等音质缺陷。厅堂后墙声学处理方法主要有以下三种：

吸声处理；扩散处理；通过后部倾斜加强后座声级。三种方法适应不同的情况，就该剧场，我们选用第一种方法，在后墙上布置了复合吸声结构（图6）。

(4) 台口侧墙设计

台口侧墙采用喇叭形，可以将演员声反射并导向观众席，让池座中前区观众席得到较多的早期反射声；另外利于耳光、扬声器的布置。

(5) 楼座和包厢

为了压缩后排观众距舞台的距离，增强直达声的强度，我们设置了楼座。楼座栏板设计成下倾凸弧面，能给观众席提供扩散反射声。为了防止在楼座下的观众席范围内形成声影区，我们将楼座下开口的高深比控制为1:1.2，完全满足规范规定的自然声演出的剧院楼座下开口的高深比不大于1:1.5的要求。

观众厅有大片平行的侧墙，我们在其上设置了跌落的包厢和倾斜的声反射板。前者不仅有利于消除平行墙面之间的颤动回声，而且可增强观众厅的声扩散，提高声场的均匀度；后者针对中后部定向反射声能（图7）。

4 混响时间控制

4.1 观众厅混响时间的控制

观众厅的混响时间长短取决于观众厅的每座容积、座椅吸声、观众厅内配置的吸声材料与结构等因素。中南剧场是专业话剧院，观众厅容积较小，观众席本身就能提供可观的吸声量，但是话剧演出要求混响时间较短，经过计算，仍需配置吸声材料。我们采用了吸声量和观众相近的座椅，其各频率吸声系数见表2。结合消除音质缺陷，在容易产

生回声的后墙布置了宽频吸声结构。其余的部位采用声反射或声扩散材料与结构（如吊顶与侧墙面均采用GRG反声板）。根据中剧场的演出功能设计确定中频混响时间为 $1.2(1 \pm 10\%)$ s，各频率的混响时间相对于中频的比值如表3。

为了确保设计的准确性，我们对中剧场观众厅的混响时间进行了估算，从表4可以看出设计值与估算值接近，在误差允许范围内。

4.2 舞台混响时间的控制

因为该剧场采用镜框式舞台，舞台和观众厅是两个不同的空间，通过台口耦合为一体，而演员位于舞台上，因此舞台音质对演员的演出有直接影响。该剧院舞台容积大于观众厅，在没做声学处理的情况下，舞台的混响时间将远长于观众厅的满场混响时间，会引起一系列问题，如：由于舞台与观众厅通过台口耦合，声能衰减的速度比观众厅慢，从而使声能倒流，观众厅尾声增长，影响语言的清晰度；演员处于巨大的舞台上，混响时间又长，使演员难以掌握力度和平衡。

对此，我们对舞台空间进行适当吸声处理，大幕下落及舞台设备设置条件下，舞台空间的中频（500 Hz ~ 1 000 Hz）混响时间不宜超过观众厅空场混响时间。

为了确保达到设计要求，我们对舞台空间的混响时间进行估算，从表5中结果来看是满足设计要求的。

5 噪声及振动控制

噪声及振动控制是剧场声学设计的一个非常重要的方面，对使用自然声的剧场尤为重要。噪声及振动控制又包括室外噪声及振动控制和室内噪声及振动控制两部分。规范要求，专业话剧院观众厅的噪声限值为NR25。经过分析，该剧场观众厅可能的噪声源主要包括以下几个：一是空调的噪声；二是



图3 观众厅效果图

灯具及舞台设备的噪声；三是内部走廊、前厅等处通过出入口传入的噪声；四是室外传入的噪声。要使总噪声达到规范要求的NR25就必须将各噪声源传入观众厅内的噪声控制在NR20左右。首先我们来讨论室外噪声及振动控制。

5.1 室外噪声及振动控制

中南剧场选址于闹市区，紧邻京汉大道与轨道交通一号线。根据武汉新江城环境事务咨询有限公司所作的评估报告，中南剧场室外环境噪声约为70 dB，轨道交通一号线的振动对中南剧场有一定影响。评估报告建

议设置100 m长双排连续粉喷桩隔振墙。此部分的设计已由专业公司负责，不属于本设计考虑范围。

关于室外噪声控制，我们主要从平面传声和屋顶传声两方面考虑，对应地采取了如下防护措施：

将观众厅布置在整个建筑的中央，周围环布辅助房间及休息厅；屋顶采用密实的钢筋混凝土现浇屋面。经过验算，采取上述措施后完全能保证室外噪声传入观众厅后声压级小于NR20。

5.2 室内噪声及振动控制

室内噪声主要包括空调设备噪声，各类灯具

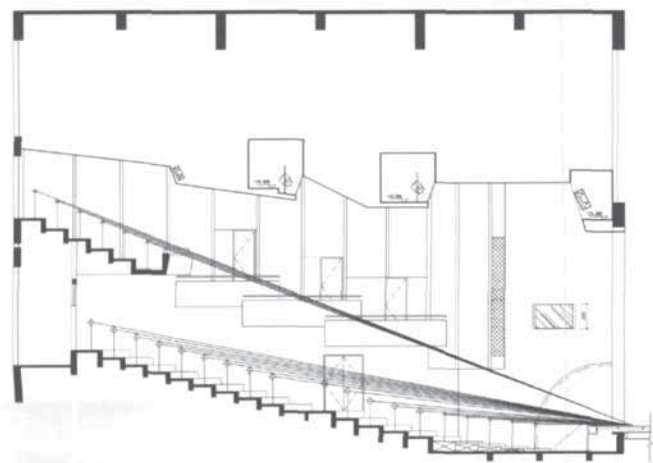


图4 观众厅C值控制图

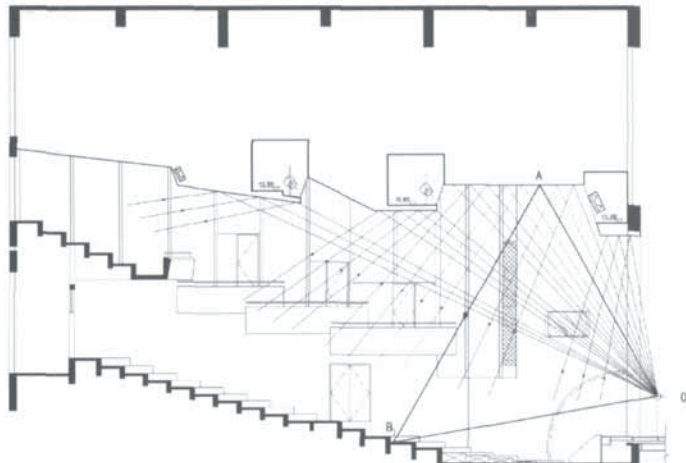


图5 观众厅吊顶声线分析图

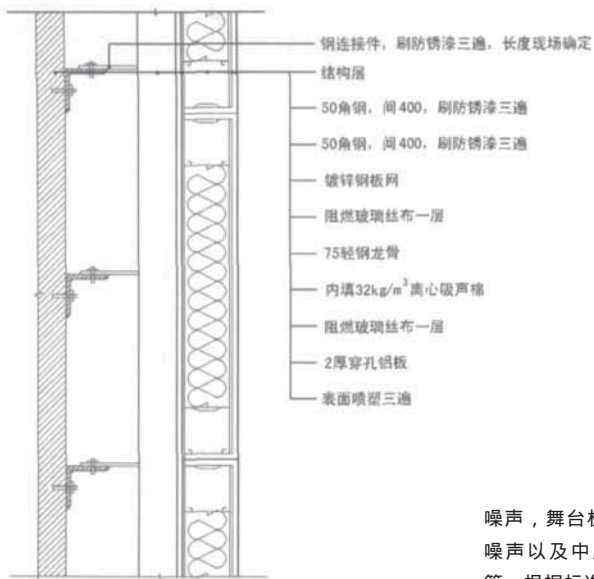


图6 观众厅后墙构造

表1 观众厅的声学技术指标

观众厅总容积	4 750 m ³
观众厅每座容积	5.9 m ³
中频混响时间	1.2 (1 ± 10%) s
背景噪声声级	NR25
后排观众席声级	60 dB
声场不均匀度	± 3 dB
清晰度 辅音损失	15%

表2 各频率的吸声系数

中心频率 (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
吸声系数	0.60	0.74	0.88	0.96	0.93	0.85

表3 各频率的混响时间

中心频率 (Hz)	125	250	500	1 000	2 000	4 000
混响时间 (s)	1.2	1.1	1.0	1.0	0.9~1.0	0.8~1.0

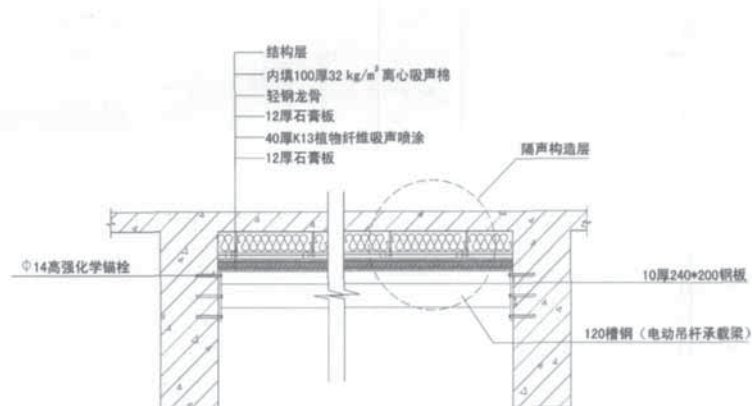


图8 复合隔声层构造

噪声，舞台机械设备噪声，休息厅及走廊的人流噪声以及中剧场与小剧场之间的相互干扰噪声等。根据标准即观众厅的背景噪声要低于NR25，因此以上每种噪声传到观众席的限值为NR20。对此我们采取了如下措施：对空调噪声的限值提出为NR20，并配合空调专业人员对空调噪声进行处理；使用低噪声灯具和舞台设备；观众厅周围采用双层墙结构，并在出入口设计了带有双层隔音门的声闸；在小剧场上方与中剧场相邻的顶棚上设置了复合隔声层（图8）。

为了确保设计的可行性，我们还利用德国声学软件ease进行了计算机模拟。模拟的结果显示观众厅音质效果良好，响度合适，声场分布均匀。在施工的过程中，我们对中南剧场适时地进行检测和调试，并对施工工艺和装修材料的声学性能严格把关，确保建成之后的中南剧场有令人满意的音质。

6 声学测量

在中南剧场装修及调试工作基本完成后，我们

对中南剧场的音质进行了测量。主要测量内容包括观众厅混响时间、声场不均匀度等音质评价指标。由于观众厅沿轴线对称，我们只需对轴及轴的一侧进行分析。其中混响时间测量选了8个具有代表性的位置（其中池座6个，楼座2个）（表6），声场不均匀度测量选取了42个具有代表性的位置（其中池座30个，楼座12个）（表7）。

从测量的结果可以得出下面几点：观众厅空场的平均中频混响时间为1.18 s，若经折算，满场的平均中频混响时间为1.09 s，设计值为1.2 (1 ± 10%) s，结果在误差的允许范围内，能很好地满足主要功能话剧演出的要求，对于歌舞演出稍嫌短。频率特性也达到较好地效果，中高频基本平直，观众厅音质有很好的明晰度。观众厅内自然声场分布均匀，特别是在中高频范围内完全满足设计的声场不均匀度 ± 3dB要求，仅有在低于150 Hz的频率范围内不均匀度稍高。表明观众厅声场有良好的扩散。

实测的结果表明中南剧场的建筑声学设计是比较成功的，但也有一些不足有待改进。

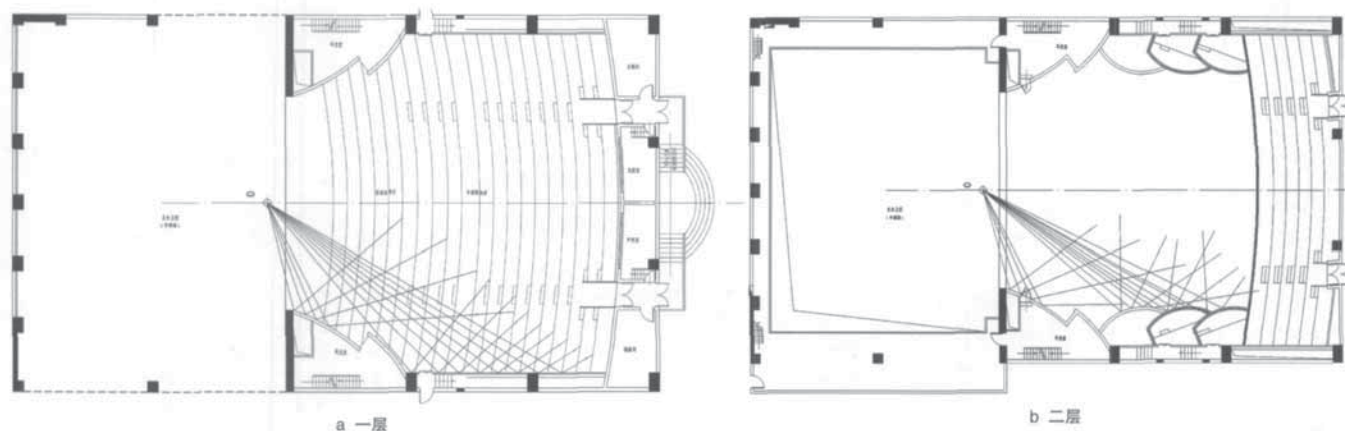


图7 侧墙扩散反射分析图

表4 中剧场混响时间计算表

项目	序号	位置与材料	表面积 (m ²)	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
				a	s*a	a	s*a	a	s*a	a	s*a	a	s*a	a	s*a
室内基本吸声量	1	顶棚反射板GRC	409.3	0.07	28.65	0.05	20.47	0.02	8.19	0.02	8.19	0.02	8.19	0.02	8.19
	2	台口处顶棚GRC	63.6	0.07	4.45	0.05	3.18	0.02	1.27	0.02	1.27	0.02	1.27	0.02	1.27
	3	内墙面上部GRC	68.1	0.07	0.68	0.05	0.68	0.02	0.68	0.02	1.36	0.02	1.36	0.02	1.36
	4	内墙面中下部GRC	120.6	0.07	1.21	0.05	1.21	0.02	1.21	0.02	1.21	0.02	2.41	0.02	2.41
	5	包厢表面GRC	31.6	0.07	2.12	0.05	1.58	0.02	0.63	0.02	0.63	0.02	0.63	0.02	0.63
	6	后墙金属吸声板	40.6	0.72	29.23	0.76	30.86	0.6	24.36	0.5	20.3	0.4	16.24	0.4	16.24
	7	后墙下部GRC	127.1	0.07	1.27	0.02	1.27	0.02	1.27	0.02	2.54	0.02	2.54	0.02	2.54
	8	舞台台口侧墙GRC	70.2	0.07	0.70	0.02	0.70	0.02	0.70	0.02	1.40	0.02	1.40	0.02	1.40
	9	舞台台口上部GRC	25.3	0.07	0.25	0.02	0.25	0.02	0.50	0.02	0.50	0.02	0.50	0.02	0.50
	10	门	36.2	0.16	5.79	0.15	5.43	0.1	3.62	0.1	3.62	0.1	3.62	0.1	3.62
	11	观察窗	2.6	0.35	0.91	0.25	0.65	0.18	0.47	0.12	0.31	0.07	0.18	0.04	0.10
	12	观众坐在软座椅上	630	0.6	378	0.74	466.2	0.88	554.4	0.96	604.8	0.93	585.9	0.85	535.5
	13	舞台开口	112	0.3	33.6	0.35	39.2	0.4	44.8	0.45	50.4	0.5	56	0.5	56
	14	楼座及包厢下石膏板吊顶	187.7	0.29	54.43	0.1	18.77	0.05	9.39	0.04	7.51	0.07	13.14	0.09	16.89
	15	音箱及灯光孔洞开口	31.6	0.3	9.48	0.35	11.06	0.4	12.64	0.45	14.22	0.5	15.8	0.5	15.8
总计					550.88		601.50		664.13		718.27		709.20		662.47
混响时间T=0.161V/ S* (V=4 800)					1.35		1.29		1.16		1.08		1.09		1.14

表5 中剧场舞台混响时间计算表

项目	序号	位置	表面积	125 Hz		250 Hz		500 Hz		1 000 Hz		2 000 Hz		4 000 Hz	
				a	s*a	a	s*a	a	s*a	a	s*a	a	s*a	a	s*a
项目	1	舞台地面	762.5	0.1	76.25	0.09	68.625	0.07	53.375	0.07	53.375	0.07	53.375	0.07	53.375
	2	舞台开口	119	0.3	35.7	0.35	41.65	0.4	47.6	0.45	53.55	0.5	59.5	0.5	59.5
	3	舞台后墙木丝板	778.1	0.67	521.327	0.72	560.232	0.78	606.918	0.82	638.042	0.76	591.356	0.74	575.794
	4	舞台内侧墙	877.2	0.23	201.756	0.2	175.44	0.17	149.124	0.1	87.72	0.1	87.72	0.1	87.72
	5	舞台口上方墙面	666.1	0.23	153.203	0.2	133.22	0.17	113.237	0.1	66.61	0.1	66.61	0.1	66.61
	6	舞台顶部	762.5	0.28	213.5	0.32	244	0.3	228.75	0.23	175.375	0.21	160.125	0.2	152.5
	7	舞台幕布	589	0.38	223.82	0.56	329.84	0.88	518.32	0.95	559.55	0.99	583.11	1.11	653.79
总计					1 425.556		1 553.007		1 717.324		1 634.222		1 601.796		1 649.289
混响时间T=0.161V/ (S*a) (V=13 000)					1.46s		1.34s		1.21s		1.28s		1.29s		1.26s

表6 观众厅空场混响时间测量表

中心频率 (Hz)	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
混响时间 (s)	1.67	1.39	1.28	1.18	1.11	1.13	1.07	0.93

表7 观众厅声场不均匀度测量表

中心频率 (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
全场 (dB)	±3.5	±2.8	±1.9	±2.1	±2.4	±3.2
池座 (dB)	±2.8	±2.3	±1.5	±1.4	±1.9	±2.7
楼座 (dB)	±1.9	±1.6	±1.0	±1.1	±1.4	±1.7

结 语

中南剧场于10月底竣工，紧接着接受了于11月5日开幕的中国第八届艺术节的检验。上演了《张之洞》、《柠檬黄的味道》、《春琴传》等剧目。中剧场的音质得到了演出人员、观众和剧场管理人员的普遍好评。有一位坐在池座后排的观众说：该厅在演出话剧《张之洞》时，没有使用扩声设备，自己坐在了后排，音量也足够，声音清晰且柔和。检验的结果可以说是令人满意的。最后要提的是该剧场能取得良好的音质离不开各专业的紧密配合及投资方的鼎力支持。

参考文献

- 1 中华人民共和国国家标准，剧场建筑设计规范 JGJ57-2000.
- 2 中华人民共和国国家标准，剧场、电影院和多用途厅堂建筑声学设计规范 GBJ2005-10.
- 3 中华人民共和国国家标准，民用建筑隔声设计规范GBJ 118-88.
- 4 中华人民共和国国家标准，建筑隔声评估标准 GBJ 121-88.
- 5 中华人民共和国国家标准，工业企业噪声控制设计规范GBJ 87-85.

- 6 中国建筑科学院建筑物理研究所. 建筑声学设计手册. 北京，中国建筑工业出版社，1987.
- 7 项端祈. 实用建筑声学. 北京：中国建筑工业出版社，1992（12）：210-236.
- 8 王季卿. 建筑厅堂音质设计. 天津：天津科学技术出版社，2001.
- 9 章奎生. 上海大剧院观众厅的音质设计研究. 声学学报，2000，25（1）：33-41.
- 10 章奎生，王静波. 上海东方艺术中心交响音乐厅的建声设计与音质评价. 演艺设备与科技，2006（2）：30.