

分布式耦合空间对多功能厅堂音质影响的模拟研究

张九红¹,王敏琦¹,马鸣霄²,朱国风³

(1. 东北大学江河建筑学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191; 3. 天津大学建筑学院, 天津 300072)

摘要 目的 探究分布式耦合空间对多功能厅堂音质的影响规律,以改善多功能厅室内声环境。方法 以东北大学多功能厅为例,先对该厅堂的基础数据进行调研分析;然后利用 Odeon 软件建立分布式耦合空间模型,并与实测数据对比,验证可行性;分析耦合空间的材料、构造和耦合面面积对声能衰减度和混响时间的影响;最后,设置两种模拟工况来优化改造方案。结果 主空间声环境得到优化,主空间混响时间降低约 30%,语言传输指数提升至良好水平。结论 在保证原建筑设计风格的基础上,利用分布式耦合空间可以调节主空间声环境,主空间音质效果提升良好,为多功能厅声环境设计提供技术支撑。

关键词 分布式耦合空间;多功能厅堂;厅堂音质设计;混响时间;语言传输指数

中图分类号 TU112.4

文献标志码 A

引用格式:张九红,王敏琦,马鸣霄,等. 分布式耦合空间对多功能厅堂音质影响的模拟研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 486-494. (ZHANG Jiuhong, WANG Minqi, MA Mingxiao, et al. Simulation research on the effect of distributed coupling space on the sound quality of multipurpose halls[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(3): 486-494.)

Simulation Research on the Effect of Distributed Coupling Space on the Sound Quality of Multipurpose Halls

ZHANG Jiuhong¹, WANG Minqi¹, MA Mingxiao², ZHU Guofeng³

(1. School of Jangho Architecture, Northeastern University, Shenyang, China, 110169; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing, China, 100191; 3. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin, China, 300072)

Abstract: The influence law of coupling space on the sound quality of multifunctional halls by utilizing distributed coupling space design is explored in order to improve the indoor acoustic

收稿日期: 2023-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978454); 辽宁省自然科学基金项目(20180550967); 辽宁省高校创新团队支持计划项目(LT2017002)

作者简介: 张九红(1968—), 女, 教授, 博士, 主要从事绿色建筑和建筑物理声、光、热学等方面研究。

environment of multifunctional halls. The multifunctional hall of Northeastern University taken as an example, the basic data of the hall are first researched and analyzed. Then the distributed coupling space model is established by Odeon software, and the feasibility is verified by comparing simulation values with the measured data, and the influence of the material, construction and coupling surface area of the coupling space on the acoustic energy attenuation degree and reverberation time is analyzed. Finally, two simulated working conditions are set to optimize the transformation scheme. The main space sound environment optimized, the main space reverberation time is reduced by about 30% , and the speech intelligibility index is improved to a good level. And it is concluded that on the basis of guaranteeing the architectural design style, the distributed coupling space can regulate sound environment of the main space, and the sound quality of the main space can be improved with good effect, which provides a theoretical method and technological support for the design of the multipurpose hall sound environment.

Key words: distributed coupling space; multipurpose hall; hall sound design; reverberation time; speech transmission index

耦合空间是由多个独立声学系统组成,通过开口或隔墙形式相连,构成一个整体空间^[1]。目前,许多学者对耦合空间进行了研究,指出耦合空间对调节主空间混响时间具有一定的作用^[2-10]。合理调整参数配置,可以实现在混响时间和语言清晰度之间的平衡,满足主空间混响时间的可调节需求^[11]。耦合空间分集中在舞台区域(源区耦合空间)和分布在空间侧面墙壁或顶棚上(分布式耦合空间)两种类型^[12],二者相比,分布式耦合空间实现混响时间和音质之间的可变调节能力更为突出。关于耦合空间的理论研究,人们提出了许多方法,有基于射线的几何声学^[13]、统计理论^[14]、统计能量分析^[15]、波动声学^[16]等,通过这些方法可识别和描述不同耦合条件下的声能衰减,其中波动声学建模最准确,但也是效率最低的建模方法,基于几何声学的计算仿真效率高,而统计能量分析法是分析复杂结构中高频声振耦合问题的一种非常有效的手段。

综上所述,笔者以东北大学多功能厅为例,采用统计能量分析和基于射线的几何声学方法,利用软件模拟分析耦合空间材料的吸声能力、耦合面开口大小对主空间声环境的影响,得出这些因素的影响规律;在不改变主空间设计风格的情况下,利用耦合空间技

术进行优化设计,找到提升该多功能厅室内音质的最佳方案,达到多功能厅室内空间感受与音质效果之间的整体平衡。

1 研究概况

1.1 研究对象

东北大学浑南校区多功能厅平面呈矩形,四周环绕封闭走廊(见图1)。为突出建筑风格,多功能厅顶棚采用清水混凝土外露方式,四面墙体为清水砖墙;观众席铺设地毯,降低了混响时间,增加室内整体吸声效果,提高使用者的听觉舒适度。

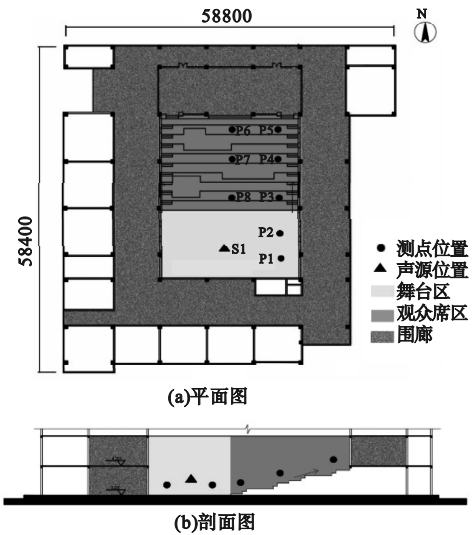


图1 多功能厅的平面和剖面图

Fig. 1 Plans and sections of the multipurpose halls

该多功能厅空间采用半开放式设计,如图2所示。不同于传统封闭形式,观众席两侧墙体上设有圆形和三角形的孔洞,出入口为开放式。多功能厅和周围走廊在空间上既是独立的个体,又互相联系,因此,多功能厅与其周围空间形成了典型分布式耦合空间^[12]。该类形式具有良好的空间效果,但存在混响时间过长等声学问题,影响主空间声环境质量。为响应多功能厅的半开放式设计理念,对分布式耦合空间进行深入分析,解决空间的连通性与声环境封闭性之间的矛盾,从而满足多功能厅使用者的听觉需求。



图2 多功能厅的内部透视图

Fig. 2 Interior perspective view of the multipurpose hall

耦合系数可作为声学耦合强度的指标量化声耦合的程度,其计算公式为^[10]

$$K_R = \frac{S_C}{S_C + A_R} \tag{1}$$

式中: S_C 为耦合面积; A_R 为接收室的等效吸声面积。

$K_R \approx 1$ 时为强耦合,把两个房间视为一个融合的大空间; $K_R \approx 0$ 时为弱耦合,是指从声源室到接收室为能量弱传输。经计算,该半开放式多功能厅耦合系数 K_R 为0.22。

1.2 声学标准

《剧场、电影院和多用途厅堂建筑声学设计规范》(GB/T 50356—2005)^[17]中规定:半开放式多功能厅在不同使用功能下中频最佳混响时间为0.9~1.3 s。当观众厅和舞台内无人占用时,主空间以扩声系统为声源,噪声级的最高限制不宜超出噪声评价指数NR-35。依据《声系统设备第16部分:通过语音

传输指数客观评价言语可懂度》(GB/T 12060.16—2017)^[18],语言传输指数STI值在0~1内,STI越大,语言清晰度越高。

该多功能厅主要功能是会议和演出,为了达到良好的音质效果,根据这两种功能设定相关声学参数,如表1所示。

表1 多功能厅声学参数的建议范围

Table 1 Recommended range of acoustic parameters for multipurpose halls

指标	混响时间 T30/s	语言传输 指数 STI	清晰度 D50	明晰度 C80
范围	0.9 ~ 1.3	>0.50	>0.50	0 ~ 9
最小可视差	5%	0.05	0.05	1

1.3 参数测量

依据《室内混响时间测量规范》(GB/T 50076—2013)^[19]规定,在舞台中央、距离地面1.5 m高处放置声源,在多功能厅纵轴上和单侧的半场观众区内均匀布设8个测点,在每个测点距地面1.2 m高度处放置接收器,测点位置如图1所示。使用BK2270声级计测量多功能厅室内在空场的情况下不同测点的背景噪声、混响时间和声压级。

1.3.1 背景噪声

多功能厅的背景噪声是指被测量声源以外的环境噪声,多功能厅周边走廊的噪声以及二层教室活动产生的噪声都会对声学参数产生影响,其计权总和不可超过标准规定的背景噪声的限值。表2为多功能厅各测点的背景噪声测量结果。

表2 各测点背景噪声计权总和测试值

Table 2 Weighted sum test value of background noise at each measurement point dB

测点	背景噪声值	测点	背景噪声值
P1	33.6	P5	33.4
P2	32.9	P6	34.1
P3	33.1	P7	33.3
P4	32.6	P8	34.2

从表2中看出,在空场情况下,各个测点的背景噪声计权总和均处于32.9~34.2 dB,

相对平均值为 33.4 dB,未超出规范的限值^[17]。

1.3.2 混响时间

在空场状态下,采用 BK 无指向性声源以及全指向性传声器,声源采用粉红噪声信号,采用“中断声源法”^[19]对多功能厅室内混响时间进行现场测量。根据图 1 多功能厅室内测点布置进行现场实测,图 3 为混响时间实测结果。通过数据分析看出,该半开放式多功能厅的混响时间较长,超过了标准值 0.9~1.3 s^[17],需要对主空间声环境进行优化改造。

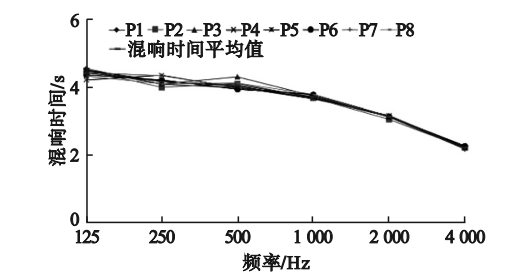


图3 混响时间实测结果

Fig. 3 Measurement results of reverberation time

1.3.3 声场不均匀度

根据 8 个实测测点在不同频率下的稳态声压级,得到多功能厅各频率下的声场不均匀度,结果如表 3 所示,多功能厅室内声场不均匀度不超过 ±3 dB,满足规范要求^[20]。

表3 倍频程中心频率的声场不均匀度
Table 3 Sound field inhomogeneity at octave center frequency

center frequency		dB	
频率/Hz	声场不均匀度	频率/Hz	声场不均匀度
125	2.4	1 000	2.8
250	2.8	2 000	2.7
500	2.5	4 000	2.6

2 数值模型建立

2.1 模型建立

通过调研分析得知,高校多功能厅常见平面形式均为矩形,长宽比约为 1.2~2.8,主空间高度约 6~10 m^[21],由此设定基础模

型主空间长宽高为 30 m×25 m×8 m。有研究表明,如需利用耦合空间达到调节主空间混响时间的效果,毗连房间的体量一般至少为主厅的 30%^[22],据此,在主厅周围设置两个长宽高为 30×4 m×8 m 和一个长宽高为 25×4 m×8 m 的混响室,形成分布式耦合空间。依此建成等比例的 Sketch Up 模型(见图 4),然后将模型导入 Odeon 软件中,并利用 3D Geometry debugger 软件检测模型是否出现声线泄露。

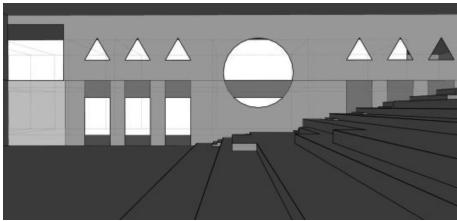


图4 虚拟模型内部

Fig. 4 Inside of the virtual model

2.2 参数设置

选择 Omni. SO8 型无指向性点声源作为模拟声源,声源和接收点(测点)的位置、高度与实测相同,以保证模拟和实测的一致性。为使模拟具有足够的声线数来计算整个空间,最大反射次数设为 10 000,多功能厅堂的射线追踪模型如图 5 所示。Odeon 模型中多功能厅各材料初始表面吸声系数如表 4 所示。

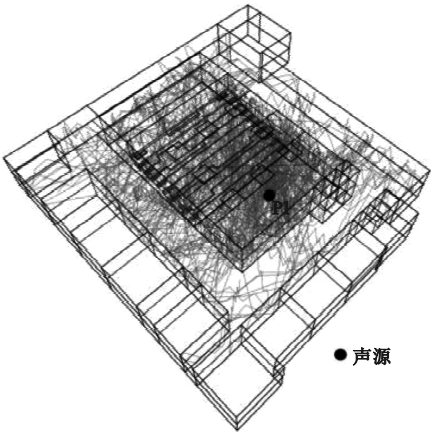


图5 多功能厅使用的射线追踪模型

Fig. 5 Ray tracing model used in multipurpose halls

表 4 各构造材料的初始表面吸声系数

Table 4 Initial absorption coefficient for each structure

构造类型	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
清水砖墙(勾缝)	0.02	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
混凝土(水泥抹面)	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03
玻璃窗(厚 3mm)	0.35	0.25	0.18	0.12	0.07	0.04

注:倍频程中心频率分别为 125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz、4 000 Hz。

2.3 模型验证

图 6 为多功能厅各测点的初始混响时间模拟值和实测值对比。经计算可知,模拟值与实测值的最大相对误差为 13.76%,平均误差在 8% 以内,模拟值/实测值的平均值为 0.933 3,标准差为 0.045。结果表明声场模拟值与实测值吻合度较高,使用 Odeon 软件建立的模型进行声环境模拟研究具有可行性。

和材料吸声系数对耦合声场的影响规律。模型 1 ~ 模型 6 的耦合开口面积比例分别为 10%、20%、30%、40%、50%、60%,每个模型的耦合空间吸声系数设为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9。

3.1 声能衰减

模拟分析发现,耦合开口面积相同情况下,不同吸声系数的衰减曲线出现双斜率的现象不同,其中吸声系数为 0.9 时曲线特征明显,由此选取吸声系数为 0.9 的工况来分析耦合开口面积的变化规律,结果如图 7 所示。分析可知,耦合开口面积为 10% ~ 50% 时,声能衰减曲线为双斜率曲线,开口大小在此范围内空间声能相互传递,两个空间出现耦合。当耦合开口面积比例大于 50% 时,衰减曲线斜率趋近于单斜率曲线,说明耦合空间几乎不再影响声音向主空间传递。由此,如需利用耦合空间对主空间声环境进行调节,耦合开口面积比例应控制在 50% 以内。

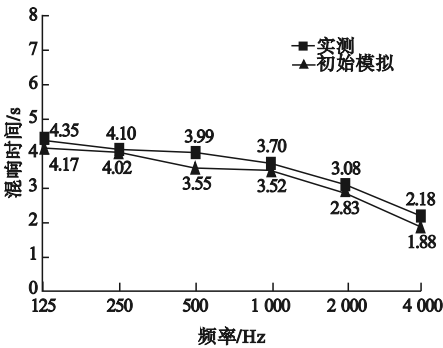
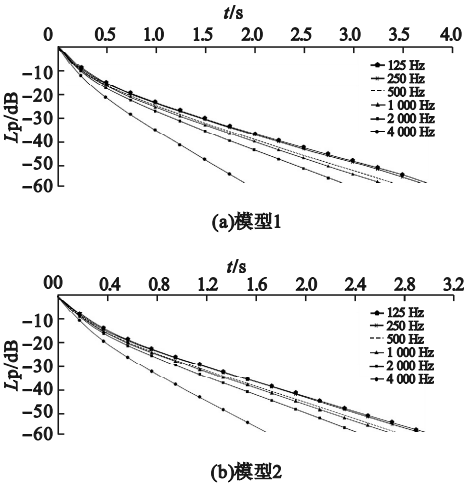


图 6 初始混响时间模拟和实测结果对比

Fig. 6 Comparison of measured values and simulated results on initial reverberation times

3 模拟结果与分析

声能衰减和混响时间是影响分布式耦合空间声环境的两个主要声学参数。在耦合空间系统中,声能从过剩的房间转移到不足的房间,每个空间中声音衰减所需的时间不同^[12]。基于声能交换,耦合空间的衰减曲线呈双斜率曲线,而单一空间表现为单斜率。双斜率声能衰减曲线是判断两个空间是否发生声耦合的依据^[23]。因此,笔者设置六种工况,分别建立模型,分析不同的耦合开口面积



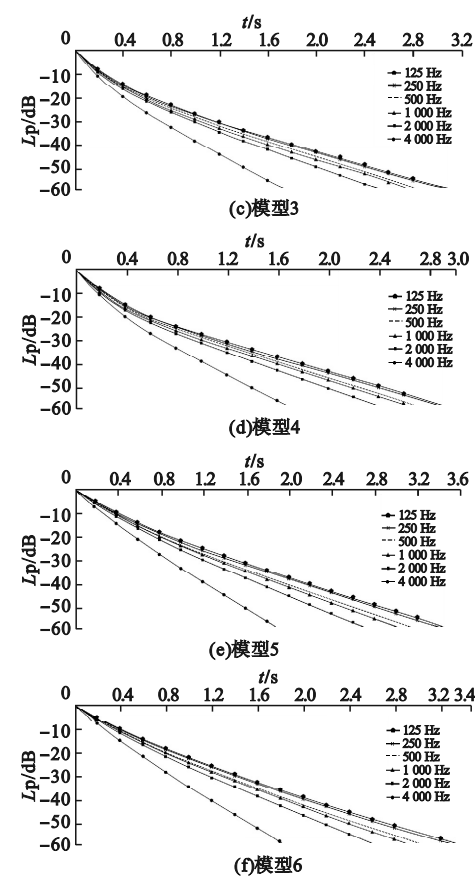


图7 吸声系数为0.9的各模型衰减曲线

Fig. 7 Decay curves for each model with an absorption coefficient of 0.9

3.2 混响时间

耦合声场主要通过调节主空间混响时间起到改善声环境的作用,通过上述工况模拟分析得到耦合空间对主空间声场的调节规律,图8、图9为不同耦合开口面积比例和不同吸声系数下的混响时间和STI对比结果。

当吸声系数大于0.5时,随耦合开口面积比例增大,主厅混响时间先下降后上升;当开口面积比例为10%~20%时,主空间声学参数变化较小,耦合空间作用较弱;当开口面积比例为30%~50%时,随混响时间下降,STI相对提升,耦合空间对主空间影响较为显著。因此,在设计分布式耦合空间时,可参考上述比例调整耦合空间连接口面积。

当耦合界面开口面积比例为30%~50%,吸声系数在0.1~0.9间变化时,混响

时间整体呈现下降趋势,STI指数提高,有利于满足多功能厅对语言清晰度的需求。因此,在主空间整体材质不变的情况下,通过改变耦合空间材料的吸声性能,可改善主空间音质效果。

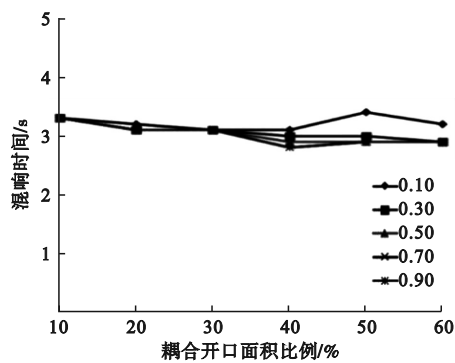


图8 不同耦合开口比例和不同吸声系数的混响时间

Fig. 8 Reverberation time for different coupling opening ratios and different absorption coefficients

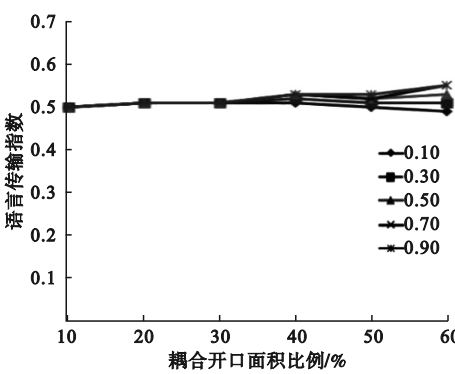


图9 不同耦合开口比例和不同吸声系数的STI

Fig. 9 STI with different coupling opening ratios and different sound absorption coefficients

4 改造方案优化

4.1 优化设计

针对该半开放式多功能厅的特点,在不破坏原有建筑风格前提下,不改变多功能厅室内墙体形式,通过改变多功能厅耦合面开孔大小和周边走廊耦合空间墙体的材质和构造,优化主空间声环境,利用耦合空间实现建筑设计和室内声环境之间的平衡。

通过实测和模拟分析得知,多功能厅存在混响时间过长等声学问题,可通过对多功能厅周围耦合空间墙面构造以及耦合面开孔尺寸进行优化。走廊墙面铺设与原有材料色彩及质感相似的吸声板,顶部覆盖 K13 喷覆

式装饰材料(材料吸声系数如表 5 所示),调节耦合空间参数,提出两种声学解决方案进行声学模拟。各工况设置如表 6 所示。三种模拟工况均设为人员满场,声源和测点布置与实测保持一致。

表 5 多功能厅各表面材料吸声系数

Table 5 Acoustic absorption coefficient of each surface material in the multipurpose hall						
材料类型	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
吸声板	0.41	0.96	1.03	0.90	0.82	0.58
K13 涂料(厚度 16mm)	0.05	0.16	0.44	0.79	0.90	0.91

注:倍频程中心频率分别为 125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz、4 000 Hz。

表 6 模拟方案设置

Table 6 Optimized design solutions		
组别	耦合空间开口状态	优化改造措施
原始工况	墙面门洞和窗洞全部开启	原始状态
工况一	墙面门洞和窗洞全部开启	改变耦合空间走廊材质
工况二	墙面门洞开启窗洞关闭	改变耦合空间走廊材质

4.2 优化结果

表 7 为各工况的混响时间模拟结果,表 8 为语言传输指数的模拟结果。其他声学参数如图 10、11 所示,模拟结果表明,优化后的主空间声学参数满足标准规定。

原始工况:由数据分析可知,保持初始状态,主空间低频混响时间为 3.98 ~ 4.12 s,中频混响时间为 3.05 ~ 3.12 s,高频混响时间为 1.54 s ~ 2.59 s,语言传输指数为 0.42。

表 7 各工况下平均混响时间模拟结果

Table 7 Simulation results of average reverberation time for each condition							s
组别	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz	
原始工况	4.12	3.98	3.12	3.05	2.59	1.54	
工况一	1.80	1.29	1.20	1.21	1.11	0.97	
工况二	1.82	1.54	1.49	1.5	1.41	1.14	

注:倍频程中心频率分别为 125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz、4 000 Hz。

该工况下混响时间较高,语言清晰度未达到良好水平,难以保证多功能厅声环境要求。

工况一:保留半开放式多功能厅墙面孔洞均开启的初始状态,仅改变耦合空间顶部和墙面材料,主空间低频混响时间为 1.29 ~ 1.8 s,中频混响时间为 1.2 ~ 1.21 s,高频混响时间为 0.97 s ~ 1.11 s,语言传输指数为 0.6。声能衰减曲线呈现双斜率曲线,耦合空间对主空间音质具有调节作用,低频混响时间不满足要求,中高频满足要求。

闭,同时改变耦合空间顶部和墙面材料,主空间低频混响时间为 1.54 ~ 1.82 s,中频混响时间为 1.49 ~ 1.5 s,高频混响时间为 1.14 ~ 1.41 s,语言传输指数为 0.58,混响时间基本达到标准要求,语言清晰度也有较大提升。

表 8 各工况下语言传输指数模拟结果

Table 8 Simulation results of language transmission index for each condition	
组别	传输指数均值
原始工况	0.42
工况一	0.60
工况二	0.58

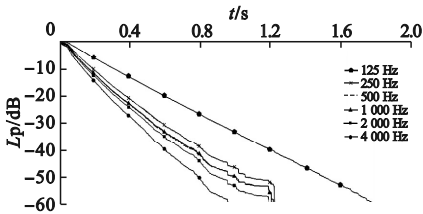


图 10 工况一声音能衰减曲线

Fig. 10 Working condition 1 sound energy decay curve

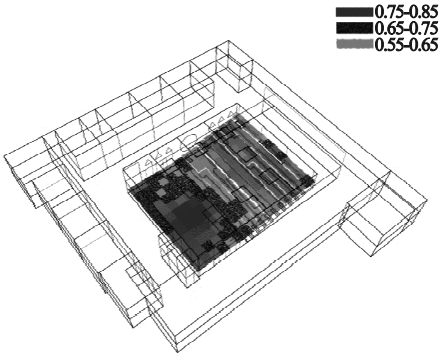


图 11 工况一清晰度 D50 分布图(1 kHz)

Fig. 11 Working condition 1; definition D50 distribution(1 kHz)

4.3 结果分析

对三种工况进行比较分析发现,通过改变多功能厅周围耦合空间走廊墙壁材料的吸声系数与构造,可以降低混响时间,优化主空间整体音质效果,反映了耦合空间吸声量对主空间混响时间影响的重要性。

为满足多功能厅不同功能需求,墙面窗户采用开闭可调状态,使观演者能获得最佳听闻感受。由依琳公式^[24]可知,混响时间和体积、吸声量有关。对工况一、二的混响时间分析发现,耦合空间在相同界面材料的情况下,主空间部分半开放式(门洞开启、窗洞封闭)向全部开放式(门洞、窗洞开启)转变时,耦合空间吸声作用较强,多功能厅混响时间降低。

多功能厅的使用功能主要以会议功能为主,观演为辅,STI 指数目标值要求不小于 0.50。多功能厅的原语言传输指数在 0.3 ~ 0.45,经过整体声环境的优化后,语言传输指

数在 0.45 ~ 0.6,语言清晰度有一定的提高,达到良好的标准。

5 结 论

(1)利用耦合空间可以营造良好的主空间声环境,在主空间吸声量不变的情况下,耦合空间体积占主空间的 30% 以上、耦合开口面积小于 50% 时,耦合空间可以提高主空间的音质效果。

(2)通过改变耦合空间吸声系数以及改变耦合开口面积大小,可以调整主空间的混响时间和语言传输指数,改善主空间声环境。

(3)通过对频率特性曲线分析发现,低频混响时间不易满足要求,考虑到人耳对低频响应敏感度较差^[25],如有特殊需要可在设计方案中适当增加部分低频吸声量,使得多功能厅室内声场达到所期望的音质效果。

参考文献

[1] 张亦驰. 耦合空间与可调式混响厅堂的设计与研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
(ZHANG Yichi. The design and research of coupled rooms acoustic quality and hall buildings with adjustable reverberation time [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.)

[2] YOUSSEF F, JULIEN B, HOSSEP A, et al. Acoustic reverberation time determination in solid medium [J]. Applied acoustics, 2022, 197:108958.

[3] SHUANGXIA S, GUOYONG J, BIN X, et al. Acoustic modeling and eigen analysis of coupled rooms with a transparent coupling aperture of variable size science direct [J]. The journal of sound and vibration, 2018, 419: 352 - 366.

[4] NIJS L, JANSSENS G, VERMEIR G. Reply to comments on "absorbing surfaces in ray-tracing programs for coupled spaces" [J]. Applied acoustics, 2003, 64(8):833 - 844.

[5] SU G Z. Exploration of room acoustics coupling in Hagia Sophia of Istanbul for its different states [J]. Journal of the acoustical society of America, 2021, 149(1):320 - 339.

[6] MEISSNER M, WIŚNIEWSKI K. Investigation of damping effects on low-frequency steady-state acoustical behaviour of coupled spaces [J]. Royal society open science, 2020, 7(8): 200514.

[7] SUMMERS J E. Technical note; remark on the

- formal identity of two statistical-acoustics models of coupled rooms [J]. Building acoustics, 2005, 12(1): 41–50.
- [8] MARTELLOTTA F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome [J]. Journal of the acoustical society of america, 2009, 126(3): 1175–1186.
- [9] MEISSNER M. Acoustic energy density distribution and sound intensity vector field inside coupled spaces [J]. Journal of the acoustical society of America, 2012, 132(1): 228–238.
- [10] BILLON A, VALEAU V, SAKOUT A, et al. On the use of a diffusion model for acoustically coupled rooms [J]. Journal of the acoustical society of America, 2006, 120(4): 2043–2054.
- [11] BRADLEY D T, WANG L M. The effects of simple coupled volume geometry on the objective and subjective results from nonexponential decay [J]. Journal of the acoustical society of America, 2005, 118(3): 1480–1490.
- [12] GÜL Z S, EŞMEBAŞI M, ÖZYURT Z B. The effects of stage house coupling on multipurpose auditorium acoustics [J]. Applied acoustics, 2022, 198: 108996.
- [13] SUMMERS J E, TORRES R R, SHIMIZU Y, et al. Adapting a randomized beam-axis-tracing algorithm to modeling of coupled rooms via late-part ray tracing [J]. The journal of the acoustical society of america, 2005, 118(3): 1491–1502.
- [14] FRANZONI L P. A power conservation approach to predict the spatial variation of the cross-sectionally averaged mean-square pressure in reverberant enclosures [J]. Journal of the acoustical society of America, 2001, 110(6): 3055–3063.
- [15] MARTELLOTTA F. Identifying acoustical coupling by measurements and prediction-models for St. Peter's Basilica in Rome [J]. Journal of the acoustical society of America, 2009, 126(3): 1175–1186.
- [16] SHI S, LIU K, XIAO B, et al. Forced acoustic analysis and energy distribution for a theoretical model of coupled rooms with a transparent opening [J]. Journal of sound and vibration, 2019, 462: 114948.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 剧场、电影院和多用途厅堂建筑声学设计规范: GB/T 50356—2005 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
(Ministry Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for architectural acoustical design of theater, cinema and multi-use auditorium: GB/T 50356—2005 [S]. Beijing: China Planning Press, 2005.)
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 声系统设备第16部分: 通过语音传输指数客观评价言语可懂度: GB/T 12060. 16—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
(General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Sound system equipment-Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index: GB/T 12060. 16—2017 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 室内混响时间测量规范: GB/T 50076—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(Ministry Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for measurement of the reverberation time in rooms: GB/T 50076—2013 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013.)
- [20] 项端祈. 实用建筑声学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
(XIANG Duanqi. Practical architectural acoustics [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1992.)
- [21] 王亚平, 江朝梅, 崔艳秋. 音质导向的可变空间多功能厅空间形体与界面装修关联性分析 [J]. 建筑科学, 2021, 37(10): 138–144.
(WANG Yaping, JIANG Chaomei, CUI Yanqiu. Correlation analysis of the shape and interface decoration of variable space multifunctional hall based on sound quality [J]. Building science, 2021, 37(10): 138–144.)
- [22] 葛强. 多功能厅堂建筑的声学设计与耦合空间的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
(GE Qiang. The acoustic design of multi-purpose hall and research of coupled space [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [23] 刘艺婷. 大空间耦合声场研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
(LIU Yiting. Research on acoustic characteristics of large coupling spaces. [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [24] 刘加平. 建筑物理 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
(LIU Jiaping. Architectural physics [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.)
- [25] 吴硕贤, 张三明, 葛坚. 建筑声学设计原理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
(WU Shuoxian, ZHANG Sanming, GE Jian. Principles of architectural acoustic design [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000.)
(责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)