

船载游乐园建筑室内声环境设计

张九红^{1,2}, 吕翔宇², 张晓倩², 马欣怡³

(1. 东北大学江河建筑学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 谢菲尔德大学建筑学院, 英国 谢菲尔德, S10 27N)

摘要 目的 为降低船载游乐园建筑室内混响时间, 满足噪声限值的要求, 制定声环境设计方案; 选择符合游览空间适宜性的吸声材料, 为游客提供良好的游览体验。方法 以船载游乐园中“与金尼交战”的场景空间为例, 分析船载游乐园室内空间的原设计方案; 采用依林-努特生公式计算空间内混响时间与吸声量, 通过分析吸声材料的声学特性与施工工艺, 选用3种吸声材料配合的声环境设计方案; 最终使用ODEON软件模拟验证设计方案的有效性。结果 无机纤维喷涂材料, 金属微穿孔板和薄板式共振吸声体的声环境设计方案, 使空间内各频率吸声量达到设计目标, 软件模拟空间内整体混响时间、游览路线声场均匀度与混响时间均达到了设计目标; 经过声环境设计后该空间声环境明显改善, 与原设计相比降噪量达到3 dB, 各频率混响时间达到标准控制范围。结论 采用合理的声环境的设计方案可以提升音质、控制噪声, 使游览空间声环境满足正常使用需求。

关键词 游乐场; 声环境设计; 混响时间; ODEON 软件模拟

中图分类号 TU112

文献标志码 A

Interior Acoustic Environment Design of Ship-borne Amusement Park Building

ZHANG Jiuhong^{1,2}, Lü Xiangyu², ZHANG Xiaoqian², MA Xinyi³

(1. School of Jianghe Architecture, Northeastern University, Shenyang, China, 110819; 2. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Architecture, The University of Sheffield, Sheffield, England, S10 27N)

Abstract: In order to reduce the reverberation time of the ship-borne amusement park building and meet the requirements of noise limit, the sound environment design scheme is formulated. Sound-absorbing materials that are suitable for sightseeing space are chosen to provide tourists with a good sightseeing experience. Taking the scene space of "Battle with Ginny" in the boat amusement park as an example, the original design scheme of its interior space was analyzed. The reverberation time and sound absorption in space were calculated by Eyring-Knudsen formula.

收稿日期: 2020-07-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078107); 辽宁省自然科学基金项目(20180550967)

作者简介: 张九红(1968—), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事绿色建筑和建筑物理等方面研究。

After analyzing the acoustic characteristics and construction technology of materials, a sound environment design scheme with three sound absorption materials is put forward, the effectiveness of this scheme is verified by ODEON software simulation. The sound absorption of each frequency in the space in the sound environment design scheme with inorganic fiber spraying material, metal microperforated plate and thin plate resonant sound absorber can reach the design goal. The entire reverberation time in the simulated space, sound field uniformity and reverberation time in the simulated tour route all reach the design goal. After the sound environment design, the sound environment of this space is obviously improved. Compared with the original design, the noise reduction reaches 3 dB, and the reverberation time of each frequency reaches the standard control range. Adopting a reasonable sound environment design scheme can improve the sound quality and control the noise, so that the sound environment of tourist space can meet the normal use requirements.

Key words: amusement park; acoustics environment design; reverberation time; ODEON software simulation

室内主题游乐园是一种新兴的休闲娱乐产业^[1]。游乐园内一般根据主题内容划分为不同场景区域,各场景体量巨大并形成封闭的空间。目前很多大空间建筑只注重新奇的概念与造型,对建筑的功能性考虑相对欠缺^[2]。部分主题游乐园的场景室内声环境不尽人意,不能保障游玩质量^[3]。当前国内没有针对主题游乐园声学设计的权威评价,行业亟待制定全面的设计标准和规范^[4]。笔者以国内某主题游乐园内船载主题场景的室内空间为研究对象,根据施工方原设计方案进行计算预测,提出包含声学设计目标与吸声材料选择的声环境设计方案,并使用软件模拟的方式进行验证,达到提升音质、控制噪声的目的,使游览空间满足正常的游览需求。

1 原设计方案分析

1.1 空间声环境概况

设计对象为游乐园中“与金尼交战”的场景空间,称游览空间(见图 1)。空间内效果如图 1(a)所示,当游客乘船到达该空间时,投影设备与音响同时运行,营造真实的战场效果。空间内声源主要由游客人声、设备运转声以及影片音乐声构成。电声源位置如图 1(b)标注所示,音响位于标注点地面及天棚位置共 14 个。该空间内表面积约 2 580 m²,体积约 5 200 m³,界面材料分布如图 1(c)所示。场景中天棚、墙壁及地面以水泥塑石材料为主,墙面上镶嵌有约 325 m²的金属投影幕,地面上约有 200 m²铺满玻璃钢板装饰,轨道中有深 600 ~ 800 mm 的水,水表面积约为 200 m²,耦合洞口^[5]面积约为 60 m²,各界面材料吸声系数如表 1 所示。

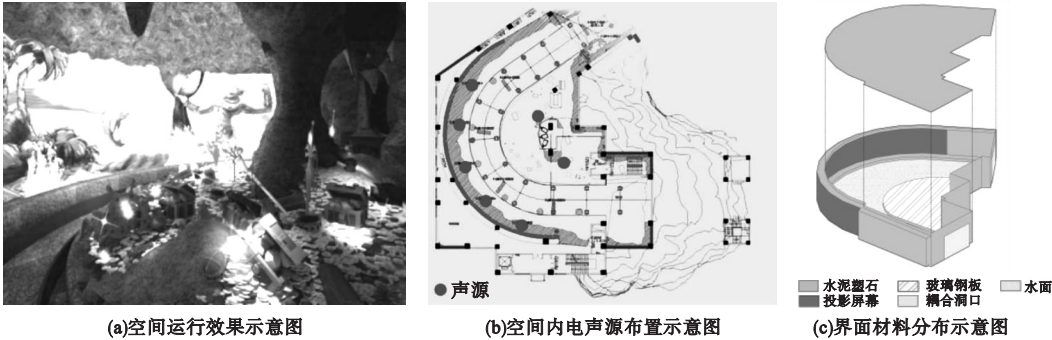


图 1 设计对象整体概况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overall overview of design object

表 1 原设计方案界面材料吸声系数

Table 1 Sound absorption coefficient of interface material in original design scheme

材料名称	面积/m ²	吸声系数					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
水泥塑石	1 800	0.020	0.030	0.030	0.030	0.040	0.070
投影屏幕	325	0.140	0.24	0.480	0.480	0.340	0.430
玻璃钢板	200	0.110	0.110	0.070	0.060	0.100	0.050
水面	200	0.008	0.008	0.013	0.015	0.020	0.025
耦合洞口	60	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300

1.2 原设计声环境参数计算

根据该建筑的功能需求,将音质提升与噪声控制作为室内声环境的设计目标。

(1)混响时间

由于该空间容积较大,并存在大量水,应考虑空气对声音传播的吸收。故选用依林-努特生公式^[6]进行混响时间计算,假定相对湿度为60%,空气吸收系数参考2 000 Hz为0.009,4 000 Hz为0.022,混响时间计算式为

$$T=\frac{0.161\ V}{-S\ln(1-\bar{\alpha})+4\ mV}.$$

(1)

式中: T 为混响时间,s; V 为房间容积,m³; S 为室内总表面积,m²; $\bar{\alpha}$ 为室内平均吸声系数; $4\ m$ 为空气吸声系数。

(2)吸声量

吸声量又称等效吸声面积,是用以表征某个具体吸声材料的实际吸声效果的量。

125~1 000 Hz吸声量计算式为

$$A=s\bar{a}=s(e^{\frac{0.161\ V}{T\ S}}-1).$$

(2)

2 000 Hz、4 000 Hz吸声量计算式为

$$A=s\bar{a}=s(e^{\frac{0.161\ V-4\ mV}{T\ S}}-1).$$

(3)

式中: A 为吸声量,m²。

根据式(1)、式(2)、式(3)计算原设计室内空间混响时间与吸声量(见表2)。从表可知,该空间内各频段混响时间均较高,尤其在125 Hz达到7.07 s。各频带的吸声量也普遍较低,无法达到保障电声音质和室内吸

声降噪的基本室内声学要求。

表 2 原设计方案混响时间与吸声量计算值

Table 2 Reverberation time and sound absorption quantity in the original scheme

频率/Hz	混响时间/s	吸声量/m ²
125	7.07	125.61
250	5.11	173.63
500	3.75	236.44
1 000	3.79	234.26
2 000	3.23	274.53
4 000	1.96	452.92

原设计方案场景内界面大多为吸声系数较低的硬质材料,房间吸声性能薄弱,并且该场景体积较大,导致室内混响时间过长^[7]。此外,场景中采用的影片电声已完成所有的混响音效处理,因此需要短混响、强吸声的建声基础,高质量还原场景音效^[8]。

2 声学设计目标

2.1 音质设计

目前没有针对此类公共建筑的声学标准,需要依照其功能特性类比相关的公共建筑规范进行设计。该空间是一个录制音频放声系统,可将其类比为全新类型的多功能影院。笔者参考《剧场、电影院和多用途厅堂建筑声学设计规范》(GB/T50356—2005)中对容积为5 000 m³的电影院观众厅混响时间的要求,得到设计方案(见表3)。

表 3 电影院观众厅各频率混响时间设计值

Table 3 Design value of reverberation time of each frequency in cinema auditorium

频率/Hz	混响时间/s
125	1.3
250	1.2
500	1.1
1 000	1.1
2 000	1.0
4 000	0.9

原方案中 125 Hz 混响时间为 7.07 s,与表 3 中数值相差较大。对于低频吸声来说,吸声体体积较大、不易安装。过分降低低频混响,会对其他频率混响时间、室内装修风格,以及经济指标等造成严重影响。针对空间声源分析,制作内容中低频声所占的比重较低。适当的低频混响时间能够弥补人耳对低频的不敏感,有助于增加音乐的丰满程度^[9]。因此将 125 Hz 混响时间设计目标放宽至 2.0 s。最终确定该游览空间各频率混响时间设计目标值如表 4 所示。

表 4 游览空间混响时间与吸声量设计目标值

Table 4 Design target value of reverberation time and sound absorption

频率/Hz	混响时间/s	吸声量/m ²
125	2.0	483.52
250	1.2	854.60
500	1.1	944.94
1 000	1.1	944.94
2 000	1.0	788.32
4 000	0.9	552.15

2.2 噪声控制

空间中的背景噪声是指游客产生的人群噪声、室内空调以及观影设备等产生的噪声,噪声的计权总和不能超过声限值。由于该空间处于设计阶段,无法验证其背景噪声是否满足要求。则在声环境设计中以音质设计为主,在保障音质的同时最大限度提升空间内吸声降噪能力,将以提升空间内降噪量为噪声控制目标。降噪量计算式为

$$\Delta L_p = 10 \cdot \lg \frac{T_1}{T_2}.$$

(4)

式中: ΔL_p 为降噪量; T_1 为吸声降噪前房间内混响时间,s; T_2 为吸声降噪后房间内混响时间,s。

3 吸声材料选择方案

吸声材料的选择,除满足声学需求外,还应保证与该船载游览空间的适宜性。因为场景内设置水系景观,选用的吸声材料应具有防潮、防水、防火特性^[10]。该场景形态复杂多变,不宜在顶棚或墙面采用大面积规整吸声体,应利用空间中形状特点采取不同的设计方案,保证装修效果实现最佳性价比。

3.1 无机纤维喷涂材料

场景内顶棚、地面、墙壁等处均应用水泥塑石,面积较大且表面不规整,水泥塑石吸声性能较差,在方案中选用无机纤维喷涂材料进行喷涂。无机纤维喷涂材料在混凝土、加气混凝土、砖砌体上均有很好的附着力,具有优异的防火、耐水、耐潮、防结露、防腐蚀以及良好的吸声性能^[11],在声学工程中应用广泛,其各频率吸声系数如表 5 所示^[11]。

表 5 无机纤维喷涂材料吸声系数

Table 5 Sound absorption coefficient of inorganic fiber sprayed materials

频率/Hz	吸声系数
125	0.17
250	0.60
500	0.95
1 000	0.95
2 000	0.97
4 000	0.81

根据表 5 可知,无机纤维喷涂材料在 500 ~ 4 000 Hz 频率的吸声系数较高均达到 0.9 以上。在 125 Hz 与 250Hz 频段吸声系数较小。则方案将采用喷涂该类材料以增加空间内中高频 500 ~ 4 000 Hz 吸声量。经计算喷涂该材料 800 m² 后,场景中高频 500 ~ 1 000 Hz 吸声量可满足目标要求,喷涂后空间吸声量如图 2 所示。

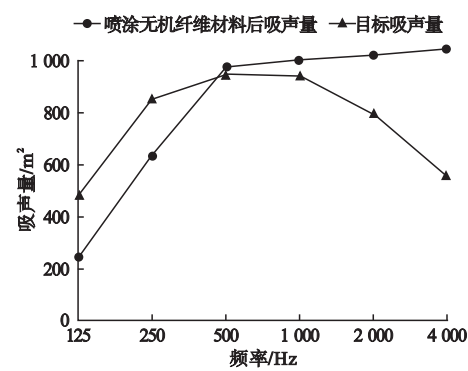


图2 喷涂无机纤维材料后吸声量对比

Fig. 2 Comparison of sound absorption before and after using spraying inorganic fiber materials

经过喷涂该材料面积 800 m² 后,空间高频 500、1 000、2 000、4 000 Hz 吸声量满足目标要求。125 Hz 及 250 Hz 的吸声量达到 245.61、629.93 距目标吸声量还存在一定的差距。

3.2 微穿孔铝板

原方案墙面上镶嵌有约 325 m² 的金属投影幕,面积较大且形状规整可进行整体替换。笔者设计方案选取 0.8 mm 厚的铝制微穿孔板替换原投影幕,板后留 150 mm 空腔。穿孔率为 1%,孔径为 0.8 mm。可以保证投影的视觉效果,微穿孔铝板吸声系数如表 6 所示^[12]。

表6 微穿孔铝板吸声系数

Table 6 Sound absorption coefficient of aluminum microperforated panel

频率/Hz	吸声系数
125	0.37
250	0.85
500	0.87
1 000	0.20
2 000	0.15
4 000	0.15

从表 6 可知,微穿孔铝板在 250 Hz 与 500 Hz 的吸声系数较高达到 0.85,其余频段吸声系数较低。因此可作为增加空间内 250 Hz 吸声量的吸声材料。将微穿孔铝板替

换原投影幕后空间吸声量如图 3 所示。替换 325 m² 微穿孔铝板后,空间内 250 Hz 吸声量达到 867.88,满足目标吸声量。

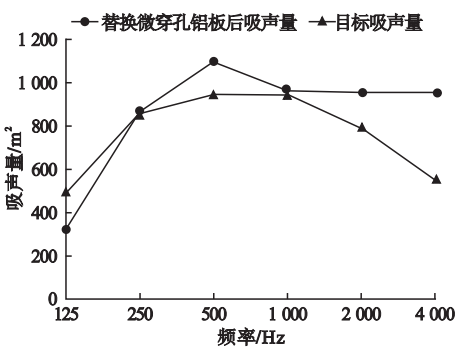


图3 替换微穿孔铝板后吸声量对比

Fig. 3 Pairs of sound absorption at each frequency before and after using replacing micro-perforated aluminum plate

3.3 硅钙板式共振吸声体

考虑到场景中高频吸声量已经足够,如若再增加中高频吸声量会导致中高频混响时间过短,使游客接收到的声音不够饱满。则采用板式共振吸声体^[13],针对低频做进一步的改造。选用的板式共振吸声体参数为 6 mm 厚硅钙板,板后空腔为 150 mm,龙骨间距 500×500 mm,板式共振吸声系数如表 7 所示。

表7 板式共振吸声体吸声系数

Table 7 Sound absorption coefficient of plate resonance absorber

频率/Hz	吸声系数
125	0.60
250	0.22
500	0.09
1 000	0.03
2 000	0.04
4 000	0.08

从表 7 可知,板式共振吸声体的 125 Hz 吸声系数为 0.6,其他各频率吸声系数均较低。可在低频范围起到优异的吸声作用,中高频吸声作用较低。在场景中增设约 300 m² 硅钙板共振吸声体可使空间内 125 Hz 混响时间达到设计目标。增设硅钙板共振吸声体后空

间吸声量如图 4 所示。选择空间内规则的垂直墙面增设 300 m^2 硅钙板共振吸声体后, 空间内 125 Hz 的吸声量达到 500.36 满足设计目标。

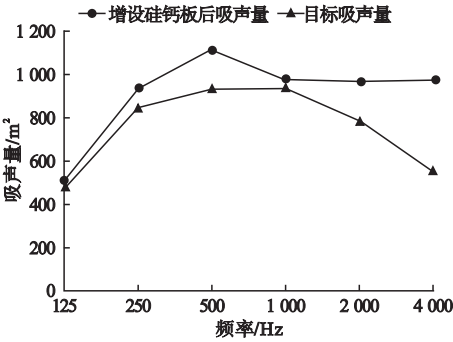


图 4 增设硅钙板式共振吸声体吸声量对比图
Fig. 4 Comparison of sound absorption before and after using adding silicon-calcium plate resonance absorber

3.4 声环境方案

将选择的 3 种吸声材料布置于场景空间后, 空间内各频率吸声量均达到设计目标。通过式(1)计算得到设计后混响时间计算值(见图 5)。原设计与笔者设计后的混响时间计算值代入算式(4)得到空间内降噪量为 3 dB 。

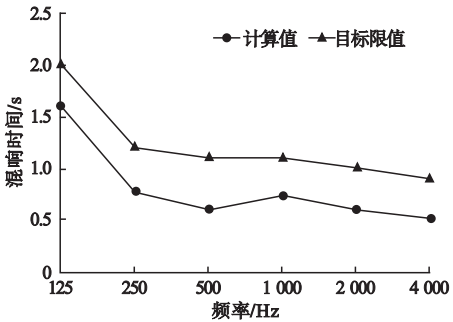


图 5 声学设计后混响时间曲线图
Fig. 5 Reverberation time graph in the design scheme

经过吸声材料方案设计后游览空间的全频率混响时间达到目标限值以下, 与原设计相比空间内降噪量达到 3 dB 。游乐园中“与金尼交战”的场景空间吸声材料布置如图 6 所示。

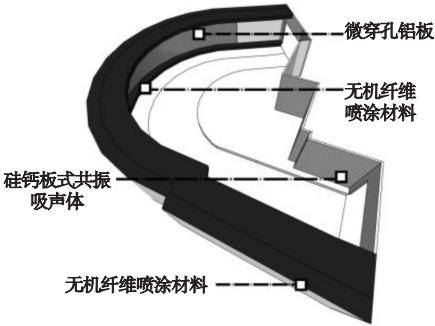


图 6 设计方案位置示意图
Fig. 6 Schematic diagram of design scheme location

4 方案验证

4.1 ODEON 可行性验证

ODEON 是基于几何声学原理的虚声源法与声线跟踪相结合的声学设计软件^[14]。笔者选用 ODEON 声学分析软件, 对原设计进行模拟, 与原设计混响时间计算值进行对照分析。

以保障模拟准确性前提, 对该场景进行适当简化建模^[15]。根据地面及天棚音响位置, 在模型中设置点声源 14 个。根据游客实际游览路线在模型内设置 4 个接收点, 高度设 1.2 m 。场景 ODEON 建模如图 7 所示。

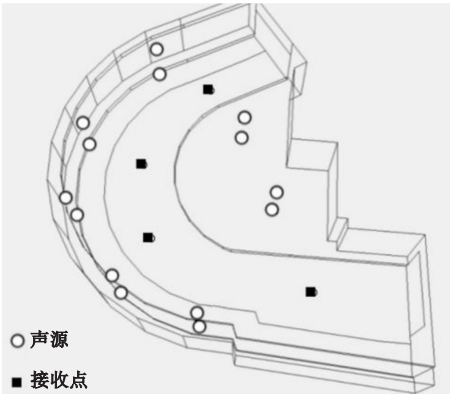


图 7 场景 ODEON 建模图
Fig. 7 ODEON model of scene

按照原设计方案的材料参数对模型内各个界面进行设置。得到的该空间原设计方案各倍频带中心频率的混响时间模拟值(见表 8)。计算值与模拟值的最大误差为 0.33 , 最

小误差为0.08,误差值较小,验证了ODEON软件模拟该场景声环境的可行性。

表8 原设计混响时间模拟值

Table 8 Simulation value of reverberation time in the original design

频率/Hz	计算值/s	模拟值/s	误差值/s
125	7.07	6.84	0.23
250	5.11	4.78	0.33
500	3.75	3.38	0.37
1 000	3.79	3.29	0.50
2 000	3.23	3.12	0.11
4 000	1.96	1.88	0.08

4.2 整体声环境验证

按照吸声材料设计方案对该模型内材料参数进行修改。得到的游览空间声学设计后混响时间如表9所示。经过声学设计后的各频带混响时间模拟值均达到了设计目标要求(见表4)。该空间声环境整体上可满足正常的游乐活动。

表9 设计后混响时间模拟值

Table 9 Simulation value of reverberation time after design

频率/Hz	混响时间/s
125	1.62
250	0.74
500	0.51
1 000	0.65
2 000	0.65
4 000	0.69

4.3 游览路线声环境验证

由于游乐园游览观赏的功能特性,该空间声学设计还应保证游客在该空间内游览进程中的游玩质量。因此,笔者在声学模拟中针对游览路线上的声压级分布以及混响时间进行模拟,并对其中4个接收点进行分析。图8为游览路线声压级分布,在游览经过区域内,入口处声压级在70 dB以下,进入到观演区域后,声压级基本控制在72~75 dB,从整体来看,声场均匀度较好,避免了出现听觉效果不佳的情况。

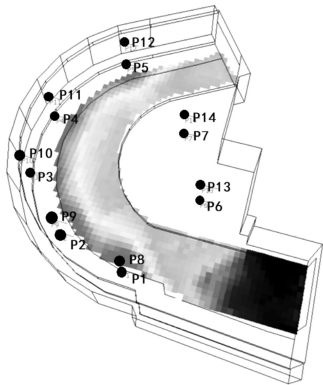


图8 游览路线声压级分布

Fig. 8 Sound pressure level distribution of tour route

模拟游览路线中接收点的混响时间如图9所示。从图中可以看出,各收点各频段混响时间均在目标范围内,符合要求。因此,设计方案对船载类游乐园建筑的声环境质量提升具有有效性,能够提供良好的建筑声学条件,保障实际观演中播放的电声效果,提升游客游玩质量。

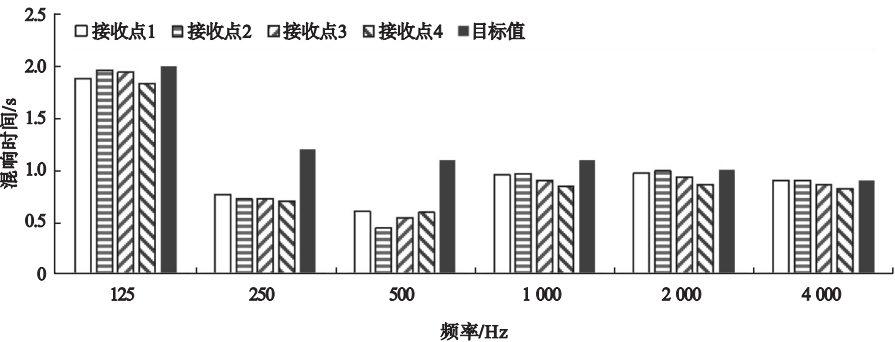


图9 各测点不同频率模拟混响时间

Fig. 9 The simulated reverberation time of different frequency band in each measurement location

5 结 论

(1) 对船载游乐园建筑室内空间的声学设计要点进行分析, 参考《剧场、电影院和多用途厅堂建筑声学设计规范》(GB/T50356—2005) 提出了混响时间设计目标值。

(2) 通过计算各频段原设计吸声量与目标吸声量, 设计了以无机纤维喷涂材料、微穿孔铝板和板式共振吸声体的声环境方案, 达到了目标吸声量和混响时间的要求, 设计后降噪量达到 3 dB。

(3) 通过 ODEON 软件模拟验证了该方案的有效性, 3 类声学措施结合的方案, 可以按各频段吸声量需求调整使用面积, 具有施工方便、调整灵活的优点, 该模式可以广泛应用于新建游乐园类建筑声环境设计中。

参考文献

- [1] 吕帅, 燕翔. 迪斯尼音乐厅的建筑与声学[J]. 电声技术, 2014, 38(2): 1-6.
(Lü Shuai, YAN Xiang. Research on the architecture and acoustics of the Walt Disney concert hall [J]. Audio engineering, 2014, 38(2): 1-6.)
- [2] 张龙巍, 张伶伶, 黄勇. 数字技术下的大空间建筑围护体系优化[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(3): 474-484.
(ZHANG Longwei, ZHANG Lingling, HUANG Yong. Optimization research on enclosing system of large-space building based on digital technology [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2015, 31(3): 474-484.)
- [3] 胡永, 钱城. 大型室内主题乐园声学环境降噪设计研究[J]. 电声技术, 2018, 42(9): 40-44.
(HU Yong, QIAN Cheng. Acoustics environment simulation and noise reduction design of large indoor theme park [J]. Audio engineering, 2018, 42(9): 40-44.)
- [4] 胡永. 青岛万达茂室内主题乐园声学模拟与设计研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
(HU Yong. Study on acoustic simulation and design of Qingdao Wanda Mao indoor theme park [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.)
- [5] 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.)
- [6] 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 Building Industry Press, 2009.)
- [7] 孙海涛, 刘培杰. 音乐厅兼做电影院: 以江西宜春梵贝音乐厅建筑声学设计为例[J]. 华中建筑, 2014, 32(6): 36-40.
(SUN Haitao, LIU Peijie. Concert hall as cinema architecture: acoustic design for Fanbei concert hall of Yichun city in Jiangxi province [J]. Huazhong architecture, 2014, 32(6): 36-40.)
- [8] 杨云翔. 浅析装饰技术对广播、录音建筑声学环境的质量影响[J]. 建设科技, 2015(17): 92-94.
(YANG Yunxiang. Analysis on the influence of decoration technology on the quality of architectural acoustic environment for broadcasting and recording [J]. Construction science and technology, 2015(17): 92-94.)
- [9] 朱相栋. 观演建筑声学设计进展研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
(ZHU Xiangdong. Research on acoustic design development of performance building [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.)
- [10] 孙佳奇, 欧达毅. 户外公共观演空间的声学问题浅析[J]. 中外建筑, 2016(5): 48-50.
(SUN Jiaqi, OU Dayi. Brief analysis of acoustic problems of outdoor public performance space [J]. Chinese & overseas architecture, 2016(5): 48-50.)
- [11] 王国建. 我国饰面型防火涂料的现状和发展[J]. 上海涂料, 2004, 42(6): 20-23.
(WANG Guojian. Current situation and development of decorative fire-resistant paint [J]. Shanghai coatings, 2004, 42(6): 20-23.)
- [12] 钟祥璋. 建筑吸声材料与隔声材料[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
(ZHONG Xiangzhang. Sound-absorbing and sound-insulating materials for buildings [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.)
- [13] 贾尚宏. 立体声电影院的吸声装置[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2003, 26(6): 1227-1229.
(JIA Shanghong. Sound-absorbing device of the stereophonic cinema [J]. Journal of Hefei university of technology (natural science), 2003, 26(6): 1227-1229.)
- [14] 胡永, 钱城, 张旭东, 等. 基于 ODEON 的室内水乐园声学模拟优化设计研究[J]. 电声技术, 2018, 42(12): 44-49.
(HU Yong, QIAN Cheng, ZHANG Xudong, et al. Research on sound field simulation optimization design of indoor water park based on ODEON [J]. Audio engineering, 2018, 42(12): 44-49.)
- [15] 祝培生, 冯伟, 路晓东, 等. 厅堂音质模拟软件 ODEON 建模方法研究[J]. 电声技术, 2012, 36(8): 7-11.
(ZHU Peisheng, FENG Wei, LU Xiaodong, et al. Study on modeling methods of auditorium acoustics simulation software ODEON [J]. Audio engineering, 2012, 36(8): 7-11.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)