

文章编号:1006-1355(2021)01-0184-04

剧院舞台台口等效吸声系数研究

李圣明^{1,2}, 谢晓东^{1,2}

(1. 上海建科检验有限公司, 上海 201108;
2. 国家建筑工程材料质量监督检验中心, 上海 201108)

摘要:混响时间是剧院建筑声学设计的核心指标。在进行混响时间仿真计算时,由于耦合空间的缘故,通常会将观众厅独立出来,并在舞台台口处设置一个等效吸声面,以反映舞台空间和观众厅的相互作用。然而,对于不同体型、不同吸声条件的观众厅与舞台空间,舞台台口应有不同的等效吸声参数。通过对观众厅与舞台空间混响时间的分别计算,推导出一组舞台台口等效吸声系数。根据观众厅有无舞台空间的实测结果,在无舞台时混响时间的基础上,利用Odeon软件拟合舞台台口吸声系数,来匹配有舞台时的观众厅混响时间。通过Odeon模拟结果与公式计算结果的比较,研究舞台台口等效吸声系数。舞台台口的等效吸声系数与观众厅、舞台空间各自的混响时间及体型都有关,不宜通过设置一个经验化的简单参数,来指导剧院的声学设计。

关键词:声学;舞台台口;等效吸声系数;Odeon;耦合空间;混响时间

中图分类号:TU112.2;TU112.4

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.033

Study on Equivalent Absorption Coefficient of the Proscenium Arch of a Theatre

LI Shengming^{1,2}, XIE Xiaodong^{1,2}

(1. Shanghai Jianke Technical Assessment of Construction Co., Ltd., Shanghai 201108, China;
2. National Center for Quality Supervision and Test of Building Engineering Materials, Shanghai 201108, China)

Abstract: Reverberation time is the core index of the acoustic design of theaters. When the reverberation time is simulated, the auditorium is usually separated from the space coupling. An equivalent sound absorption surface is set at the proscenium arch to reflect the interaction between the stage and the auditorium. However, for auditorium and stage with different shapes and sound absorption conditions, the proscenium arch should have different equivalent sound absorption parameters. Based on the calculation of reverberation time of the auditorium and stage, the equivalent sound absorption coefficient of a group of the proscenium arch is deduced. The reverberation time of the auditorium hall for the cases with the stage and without the stage is measured respectively. Based on the results of reverberation time of the auditorium without the stage, Odeon software is used to fit the sound absorption coefficient of the proscenium arch to match the reverberation time of the auditorium linked to stage. Based on the comparison of simulation results and calculation results by the fitting formula, the equivalent sound absorption coefficient of the proscenium arch is found. It is concluded that the equivalent sound absorption coefficient of the proscenium arch is related to the reverberation time and the shape of the both auditorium and the stage, and it is not suitable to set a simple empirical parameter to guide the acoustic design of the theater.

Key words: acoustics; proscenium arch; equivalent absorption coefficient; Odeon; coupling space; reverberation time

混响时间是剧院设计中的重要参数。对于镜框式舞台的剧院,舞台空间与观众厅的耦合是声学处理的难点。常规的公式计算与仿真方法,是将观众厅独立建模,并对舞台台口设置一个合理的等效吸声系数,很多经典文献中,都给出了根据经验计算出

的舞台等效吸声系数^[1],而并未考虑到舞台空间和观众厅本身的差异。

燕翔等^[2]通过剧院整体和观众厅的混响时间,推算出了相应的舞台台口等效吸声系数。同时对舞台台口的负等效吸声系数进行了阐述。杨小军等^[3]对舞台台口吸声进行了研究,仅在舞台吸声满足恰当的要求时,经验吸声系数才比较准确,当舞台的吸声系数产生变化时,利用台口吸声的经验公式,会产生较大的偏离。

收稿日期:2020-04-15

作者简介:李圣明(1990-),男,南京市人,硕士,主要研究方向为建筑声学、噪声与振动控制、声学超材料。

E-mail: lishengming1990@qq.com

舞台空间与观众厅形成了耦合空间,舞台空间为观众厅提供后期衰变时间的延长,会形成双折型衰变曲线^[4]。根据国标 GB/T 50076 中的检测方法,当衰变曲线呈双折线时,应建立适当的拐点,进而推算两段各自的混响时间[5]。然而这与设计、验收要求并不匹配。且绝大部分剧院都采用了单一混响时间指标来描述其混响感^[6],因此本文延续这样的传统,探讨 T20 或 T30 方法获得的单一混响时间与舞台台口吸声等效吸声系数的关系,也在工程上使得设计、施工及验收环节保持一致的指标也便于设计、施工及验收环节采用统一的声学指标。

本文从舞台空间和观众厅的混响时间计算出发,对舞台台口的等效吸声系数进行推导,并给出一组新的预测公式。通过分别计算舞台空间和观众厅这两个造型相对“周正”的独立空间,得到各自准确的混响时间参数,再通过等效公式,得到舞台台口的吸声系数。为镜框式剧院的舞台空间吸声设计、台口等效吸声参数的设计,提供一种新的思路。

1 舞台空间与观众厅混响时间的关系

剧院的声环境由舞台空间和观众厅的声学环境综合决定。二者对声品质都有着重要的贡献。二者由舞台台口进行连接,构成了一组相互耦合的声学空间,整体建立模型计算的结果与实际结果会产生一定的偏离^[7]。而分别计算两个空间的混响时间,能够得到比较准确的结果。

首先在舞台台口设置一个等效的不吸声面,即舞台台口的吸声量为0,将整个剧院分隔成观众厅和舞台空间两个部分,并对两个部分分别进行混响时间计算。

根据赛宾公式,可设观众厅混响时间:

$$T_1 = \frac{0.161V_1}{S_1\alpha_1} \tag{1}$$

式中: T_1 ——观众厅空间混响时间,s;
 V_1 ——观众厅空间容积, m^3 ;
 S_1 ——观众厅空间内表面积, m^2 ;
 α_1 ——观众厅空间平均吸声系数。
 舞台空间混响时间:

$$T_2 = \frac{0.161V_2}{S_2\alpha_2} \tag{2}$$

式中: T_2 ——舞台空间混响时间,s;
 V_2 ——舞台空间容积, m^3 ;
 S_2 ——舞台空间内表面积, m^2 ;
 α_2 ——舞台空间平均吸声系数。

在不考虑空间耦合的情况下,观众厅与舞台整体混响时间:

$$T = \frac{0.161(V_1 + V_2)}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2} \tag{3}$$

T ——观众厅与舞台空间整体混响时间,s。

若:

$$T_1 > T_2 \tag{4}$$

则有:

$$T = \frac{0.161(V_1 + V_2)}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2} < 0.161 \frac{V_1 + \frac{V_1S_2\alpha_2}{S_1\alpha_1}}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2} = \frac{0.161V_1}{S_1\alpha_1} = T_1 \tag{5}$$

同理可得:

$$T > T_2 \tag{6}$$

有上述推导可知,在耦合空间开口面积远小于两个空间的内表面积时。整体空间的混响时间应介于各自的混响时间之间。

图1、图2分别为苏州某剧院,座椅帘幕安装前后的混响时间实测结果。该剧院的舞台大幕处有一道防火幕,降下后可将观众厅与舞台完全隔离。防火幕的吸声量相对较低,可以视作不吸声面。然后分别对防火幕升起和落下后的观众厅与舞台进行混响时间检测。剧院内整体混响时间基本符合式(5)与式(6)的关系,即整体混响时间处在观众厅与舞台各自混响时间之间。

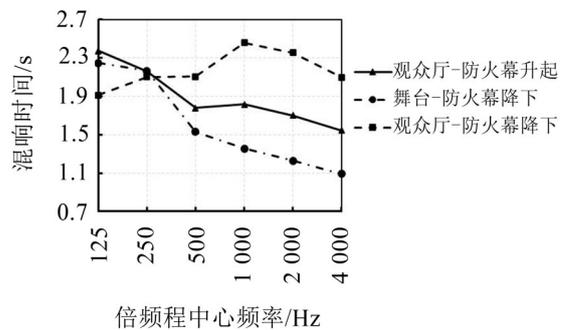


图1 剧院座椅帘幕安装前混响时间实测结果

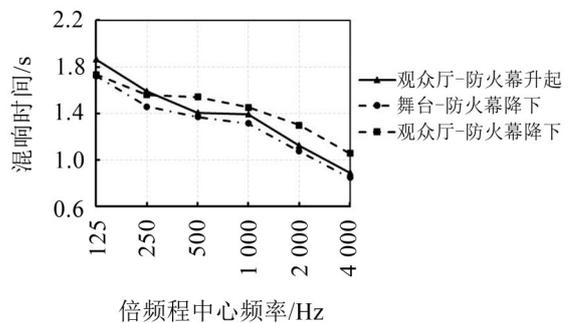


图2 剧院座椅帘幕安装后混响时间实测结果

图1与图2表明,整体混响时间值大体上处于每个分隔空间的混响时间之间,在低频125 Hz~250 Hz处会出现一定的偏离,在中高频处与式(5)与式(6)十分吻合。

2 舞台台口等效吸声系数计算

根据式(3),设整个空间总体混响时间:

$$T = \frac{0.161(V_1 + V_2)}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2} \quad (7)$$

假设舞台台口为不吸声的硬质表面,此时观众厅与舞台的混响时间分别为

$$T_1 = \frac{0.161V_1}{S_1\alpha_1} \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{0.161V_2}{S_2\alpha_2}$$

将舞台台口分隔面打开,对舞台台口设置等效吸声系数。利用剧院整体和等效吸声法计算得到的观众厅混响时间相等,可近似得到观众厅→舞台空间方向的台口处等效吸声系数:

$$T = \frac{0.161V_1}{S_1\alpha_1 + S\alpha} = \frac{0.161(V_1 + V_2)}{S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2} \quad (9)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{0.161}{S} \cdot \left(\frac{1/T_2 - 1/T_1}{1/V_1 + 1/V_2} \right) = T_1 \quad (10)$$

式中: α ——台口等效吸声系数;

S ——台口面积, m^2 。

因此,当 $T_1 > T_2$ 时,等效吸声系数为正值,表现为舞台空间吸收声能;当 $T_1 < T_2$ 时,等效吸声系数为负值,表现为舞台空间提供声能。当舞台空间混响时间长于观众厅时,未耗散的声能会趋于向观众厅辐射,引起观众厅混响时间增加,此时采用负吸声的方式,可以更加合理地预测观众厅的混响时间。

在体型不变的情况下,等效吸声系数与混响时间的倒数差成正比,即:

$$\alpha \propto \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (11)$$

舞台空间与观众厅的混响时间的差值越大,则等效吸声系数越高。

值得注意的是,上述推导过程针对舞台台口表面积远小于两个空间总表面积的情况,不适用于使用小型耦合空间,设计可变混响的案例。

考虑到赛宾公式仅适用于吸声系数 ≤ 0.2 的情况。故对其吸声系数进行伊林公式转换。

即:

$$S \cdot \alpha = -S \cdot \ln(1 - \alpha') \quad (12)$$

$$\alpha' = 1 - e^{-\alpha} \quad (13)$$

式中: α' 为依林公式转换后的台口等效吸声系数。

3 实测结果与 Odeon 仿真

利用剧院的防火幕升降,获得了图1与图2中,座椅、帘幕安装前后,舞台空间、观众厅各自独立的

混响时间,以及防火幕升起后,剧院的观众厅与舞台空间形成了一个整体时,观众厅的混响时间。

表1和图3是剧院的体型参数与Odeon模型图。在Odeon软件中将剧院分隔为两个独立的空间,在舞台台口处设置与硬质防火幕相匹配的吸声参数后,对仅有观众厅的混响时间进行模拟仿真,通过调整部分材料的吸声系数,得到与实测数据相符合的结果。然后,在舞台台口设置等效吸声面,根据防火幕升起后,整体剧院观众区的混响时间检测结果,通过反复调整舞台台口的吸声系数,得到与整体结果相匹配的情况,这时所设置的舞台台口等效吸声系数,可认为具有很高的准确性。

表1 剧院体型参数

位置名称	容积/ m^3	内表面积/ m^2
观众厅	1 900	1 480
舞台空间	8 287	2 849
舞台台口	/	102

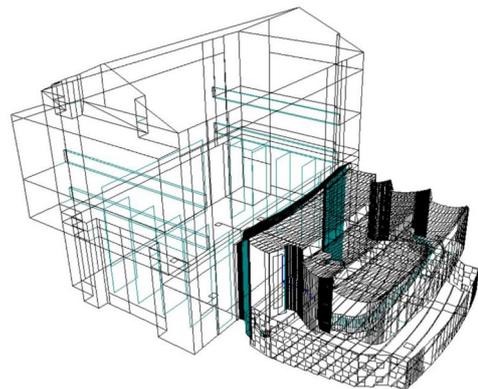


图3 剧院模型图

表2和表3分别为座椅、帘幕安装前后,舞台台口等效吸声系数Odeon仿真、赛宾公式计算结果和依林公式等效计算结果。计算结果表明,当舞台空间的混响时间大于观众厅时,等效吸声系数应为负值,即由于舞台空间的影响,观众厅的混响时间被加长。但Odeon软件无法设置低于0的吸声系数。因此表2与表3中Odeon结果为0时,表明其混响时间无法通过设置等效吸声面达到实测结果。

由表2、表3与图4、图5中舞台台口等效吸声系数的Odeon仿真结果和计算结果可以看出。舞台台口的等效吸声系数随着舞台空间与观众厅混响时间的变化而相应改变,等效吸声系数可以为负,即舞台空间向观众厅提供声能。比较式(10)的赛宾公式计算结果、式(13)的依林公式等效结果与Odeon仿真结果,可以看出,赛宾公式计算的等效吸声系数偏高,依林公式等效系数居中,Odeon仿真结果最低。而依林公式等效的结果偏离Odeon仿真结果最小,

表2 台口等效吸声系数模拟值与计算值

频率/Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Odeon 模拟值	0.00	0.00	0.40	0.50	0.52	0.63
赛宾公式结果	-0.19	-0.03	0.44	0.81	0.95	1.07
依林公式等效结果	-0.21	-0.04	0.35	0.55	0.61	0.66

表3 台口等效吸声系数模拟值与计算值

频率/Hz	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Odeon 模拟值	0.00	0.00	0.11	0.11	0.29	0.44
赛宾公式结果	0.01	0.11	0.20	0.18	0.39	0.56
依林公式等效结果	0.01	0.10	0.18	0.16	0.32	0.43

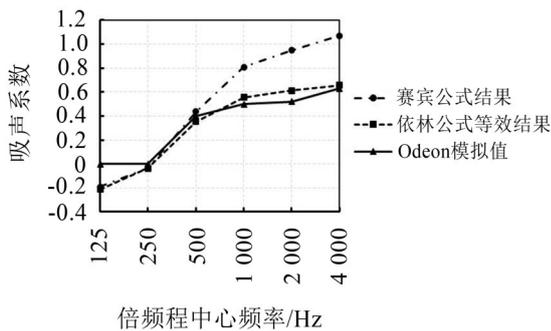


图4 座椅、帘幕安装前等效吸声系数与仿真结果

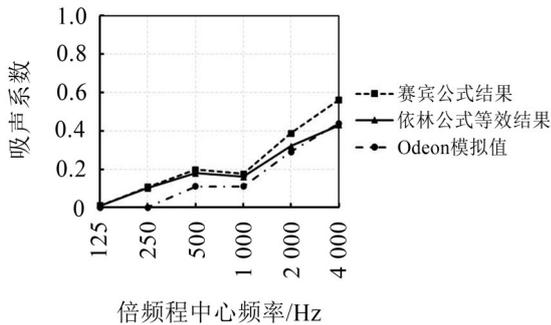


图5 座椅、帘幕安装后等效吸声系数与仿真结果

在两侧空间混响时间相差较大的情况下(如图1、图4所示),依林公式等效结果和仿真结果的重合度相当高。由于Odeon软件的仿真结果已经获得了社会上的广泛认可^[8],因此认为利用式(13)依林公式计算的等效吸声系数更具有可靠性。

4 总结与展望

利用本文给出的舞台台口等效吸声系数计算方法,可以得到一组随观众厅与舞台空间混响特性变化而变化的等效吸声系数。相比于传统的经验公式等效方法,可以针对不同吸声程度的舞台空间。在

利用Odeon软件建模的过程中,可首先将舞台空间与观众厅分别独立计算,得到各自的混响时间,再利用式(13)得出一组等效吸声系数,并将舞台台口设置对应的吸声系数,对观众厅进行独立仿真,得到观众厅的混响时间参数。使用公式计算混响时间时,也可使用类似的方法,分别计算混响时间后再设置相应的等效吸声系数。

可以看到,利用Odeon仿真得到的参数和推导公式计算的参数,尚有一定的偏离,希望在以后的工作中,能够找到更加准确的方法,来指导舞台台口等效吸声系数的设计。同时,由于Odeon自身的特性,无法对舞台空间混响时间过高时的状况进行有效的仿真,也希望软件开发人员能够针对这一情况做适当的调整。

参考文献:

- [1] 康玉成. 实用建筑吸声设计技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 燕翔, 徐学军, 薛小艳. 剧院设计中舞台台口吸声研究[C]. 全国建筑物理学术会, 2004.
- [3] 杨小军, 宋拥民, 章奎生. 剧院舞台台口的吸声特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2013, 33(S1): 32-35.
- [4] 王季卿. 耦合空间与厅堂音质[J]. 电声技术, 2005(11): 7-9+14.
- [5] 清华大学建筑学院. GB/T 50076-2013 室内混响时间测量规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [6] 白瑞纳克. 音乐厅和歌剧院[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [7] 高建亮. 剧院舞台吸声对观众厅主要声学参数的影响初探[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [8] 杨君, 曹伟. 建筑声学仿真软件ODEON在混响室设计中的应用[J]. 环境技术, 2019, 37(4): 127-132.