

DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.23101801 CSTR: 32055.14.sxjs.1000-3630.23101801

引用格式: 余佳亮, 韦可军, 米琼, 等. 离散梁吸声教室混响时间适宜计算方法[J]. 声学技术, 2025, 44(2): 270-275. [YU Jialiang, WEI Kejun, MI Qiong, et al. Evaluation of reverberation time calculation models for classroom under ceiling beam discrete absorption[J]. Technical Acoustics, 2025, 44(2): 270-275.]

离散梁吸声教室混响时间适宜计算方法

余佳亮¹, 韦可军², 米琼¹, 常明媛¹, 王超²

(1. 中建科工集团有限公司 广东深圳 518000; 2. 江苏标榜装饰新材料有限公司 江苏无锡 214400)

摘要: 钢结构装配式建筑成为学校建筑的发展趋势, 教室声环境也受到越来越多的重视, 其中混响时间是教室声环境设计中的重要指标之一。文章对顶梁采取离散和非均匀吸声条件下教室的混响时间计算进行研究, 旨在得出更准确和适用的计算方法。研究选取 2 种典型尺寸标准化钢结构教室, 在顶部钢结构梁上采取 3 种不同吸声布置方式, 对 125 Hz~4 kHz 倍频程混响时间采用 5 种不同的计算方法进行了计算, 并和实地测量结果进行对比, 分析比较了不同计算方法的结果与实测数据的差异特征。研究表明, 5 种不同计算方法得到的混响时间频谱变化趋势相似, 但在数值上有明显的差异。赛宾公式和 Arau 方法可以获得与实测更加一致的结果, 而 Arau 方法在各种吸声条件下均可得到更准确的混响时间估算。

关键词: 学校教室; 混响时间; 钢梁结构; 计算方法

中图分类号: TU112.2; TU112.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2025)-02-0270-06

Evaluation of reverberation time calculation models for classroom under ceiling beam discrete absorption

YU Jialiang¹, WEI Kejun², MI Qiong¹, CHANG Mingyuan¹, WANG Chao²

(1. China Construction Science and Industry Corporation Ltd, Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. Jiangsu Pivot New Decorative Materials Co., Ltd, Wuxi 214400, Jiangsu, China)

Abstract: Prefabricated steel-beam structures are becoming a trend in school buildings, and the sound environment of classrooms has also received more and more attention. Reverberation time is one of the important indicators in the design of classroom sound environment. In this paper, with the aim of obtaining more accurate and applicable calculation methods, the calculation of reverberation time in classrooms under discrete and non-uniform sound absorption conditions is studied. Two typical steel-beam structure classroom geometries are selected, and three different types of absorption arrangements are adopted on the ceiling beam. The reverberation times from 125 Hz to 4 kHz octave bands are calculated using five different models and then compared with the corresponding measured results. The results show that the reverberation time spectrum obtained by five different calculation methods have similar trends, but there are significant differences in numerical values. The Sabine formula and Arau method can obtain more consistent results with actual measurements, while the Arau method can provide more accurate estimates of reverberation time under various sound absorption conditions.

Key words: school classroom; reverberation time; steel structure; calculation model

0 引言

教室声环境对教学活动中学生的学习效果、教师授课以及师生的互动交流等教学质量有非常显著的影响, 教室的声学环境研究也持续受到关注^[1], 许多国家都已经制定了专门的学校建筑声学设计规范^[2-3]。

教室内的混响时间和本底噪声是教室声环境研究和设计的两个主要参数, 其中混响时间与房间的体积、几何尺寸以及内部吸声等多种参数有关, 是影响人对声音感知的重要因素, 如语言的清晰度和音乐的明晰度。Bistafa 等^[4]的研究表明, 教室的混响时间在 0.4~0.5 s 时语言清晰度可达到 100%, 美国国家标准中对体积为 283 m³ 以下的教室, 规定的中频混响时间限值为 0.6s, 体积为 283~566 m³ 的教室, 中频混响时间限值为 0.7 s^[2], 我国民用建筑设计规范: GB50118—2010^[5]中规定了普通教室空场 500~1000 Hz 混响时间的限值, 对体积小于等

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-04-15

作者简介: 余佳亮 (1984—), 男, 浙江杭州人, 博士, 高级工程师, 研究方向为钢结构工程。

通信作者: 米琼, E-mail: miqiong89@foxmail.com。

于 200 m³ 的教室混响时间限值为 0.8 s, 体积大于 200 m³ 的教室混响时间限值为 1 s。对中小学教室混响时间的一些测量结果表明, 我国中小学普通教室的混响时间达标率比较低, 如最近对亚热带地区中小学教室的测量发现^[6], 只有 21% 的学校的混响时间满足民用建筑隔声设计规范: GB50118—2010 中规定的要求。

准确预测计算混响时间对于建筑声学空间的设计非常重要。关于混响时间计算方法的准确性国内外开展了大量的研究, 提出了一些适用于不同条件下的计算方法, 包括对矩形教室空间和非均匀吸声条件下的混响时间计算^[7-9]。但是, 众多研究结果都表明, 这些计算公式在不同的应用条件下都存在一定的偏差, 不完全能在建筑声学设计中提供可信赖的混响时间估计。

装配式钢结构成为中小学教室建造的发展趋势, 结合顶部钢梁进行教室的吸声处理也成为一种新型的典型声学设计方式。结合钢结构教室的矩形空间特征, 考虑到教室空间内吸声材料分布的不均匀性, 以及教室顶部梁上吸声结构布置的特点, 本文采用 5 种针对不同条件下混响时间的计算方法, 对比了在不同吸声条件下混响时间计算结果与实测结果, 分析得出不同计算方法在教室顶部钢梁离散吸声布置, 及其不同吸声条件下混响时间预测计算的特点, 为离散式钢梁吸声布置教室的混响时间设计提供有效可信赖的方法。

1 混响时间计算方法

1.1 赛宾 (Sabine) 公式

赛宾公式是建筑声学中混响时间计算的经典公式, 来源于对实验结果的总结归纳, 混响时间 T 的计算公式为

$$T = \frac{0.161 \cdot V}{S\bar{\alpha} + 4mV} \quad (1)$$

式中: V 为房间的容积, 单位为 m³; S 为房间表面积, 单位为 m²; $\bar{\alpha}$ 为房间的平均吸声系数, 为无量纲量; m 为空气吸收衰减系数, 单位为 m⁻¹。房间的总吸声量 (或等效吸声面积, 单位为 m²) $A = S\bar{\alpha}$ 包含了墙面的吸声以及桌椅、人的吸声等房间内所有吸声。当平均吸声系数 $\bar{\alpha} < 0.2$ 时, 满足赛宾公式中假设的扩散场条件, 可以获得相对准确的计算结果。

1.2 艾林-米林顿 (Eyring-Millington) 公式

根据统计声学的原理, 计算出声在房间内的来回反射的平均距离, 推导得到连续声反射之间的平

均自由程, 艾林 (Eyring) 假设从声源发出的声在平均吸声系数为 $\bar{\alpha}$ 的表面连续反射, 计算得到声压级衰变 60 dB 所需的时间^[10]:

$$T = 0.161 \frac{V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \quad (2)$$

与 Eyring 采用房间所有表面平均吸声系数的计算方法不同, 米林顿 (Millington)^[11]提出计算房间内不同墙面吸声量的总和来计算混响时间的方法, 以适用于各表面吸声布置不均匀的情形:

$$T = 0.161 \frac{V}{-\sum S_i \ln(1 - \alpha_i) + 4mV} \quad (3)$$

式中: S_i 和 α_i 分别表示不同表面的面积和对应的吸声系数。式 (3) 也通常称为艾林-米林顿 (Eyring-Millington) 公式 (简称: Eyring-M)。

1.3 菲茨罗伊 (Fitzroy) 公式

对于房间内不同墙面吸声分布不均匀的情况, Fitzroy^[12]提出不仅要考虑物理因素, 还应该考虑房间的几何特征。房间内的声场可以看成在矩形房间沿三个主要轴向 (垂直、横向和长度方向) 上的同时振荡。混响时间根据三个方向上的衰变速度来计算, 每个方向上的衰变速度与对应方向上的吸声有关:

$$T = 0.161 \cdot \frac{V}{S^2} \left[\frac{-S_x}{\ln(1 - \alpha_x)} + \frac{-S_y}{\ln(1 - \alpha_y)} + \frac{-S_z}{\ln(1 - \alpha_z)} \right] \quad (4)$$

式中: S_x , S_y , S_z 分别为横向、长度和垂直三个方向的墙面总面积, 对应的吸声系数分别为 α_x 、 α_y 、 α_z ; S 为房间总面积。

1.4 Arau 公式

对于吸声非对称布置条件下的混响时间计算, Arau-Puchades^[13]假设声能密度衰变是一个非线性的过程, 可以分为 3 个部分的贡献叠加: 初始衰变、第一和第二线性衰变段、第三线性衰变段。房间总的混响时间是在不同的矩形方向上的衰变时间的面积加权:

$$T = \left[\frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_x) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_y) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0.161 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \alpha_z) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}} \quad (5)$$

式 (5) 中各参数的定义与式 (4) 中的一致。

1.5 EN12345 方法

欧盟标准 EN12345-6 附录 D 中^[14]给出了在矩

形空间内具有非规则吸声分布, 以及非规则表面形状(如房间内存在较多的物体)条件下混响时间的计算方法。该方法将房间内声场入射到各表面的能量分成掠入射和非掠入射成分, 通过计算掠入射条件下房间各个轴向的吸声量以及扩散声场的等效吸声量, 并引入散射系数来计算散射吸声量, 分别获得在 3 个轴向的混响时间以及散射吸声的混响时间, 最终得到房间的混响时间估计值。

该方法涉及比较复杂的计算流程和众多的计算公式, 是目前混响时间计算中最复杂的流程。在此不列出计算过程的细节, 具体过程可查阅 EN12345-6 中附录 D 部分的描述。

2 教室实验条件和参数

2.1 教室结构尺寸

研究的教室为中建科工集团有限公司装配式钢结构学校设计手册中的标准化普通教室, 其钢结构框架如图 1(a) 所示, 包括四周的工字钢梁以及中间的 2 根钢梁。房间的外围护结构完成后, 钢梁完全位于教室空间内部。教室内的中间钢梁分纵向(沿教室前后方向布置, 如图 1(b))和横向(沿教室左右方向布置, 如图 1(c))两种布局条件。

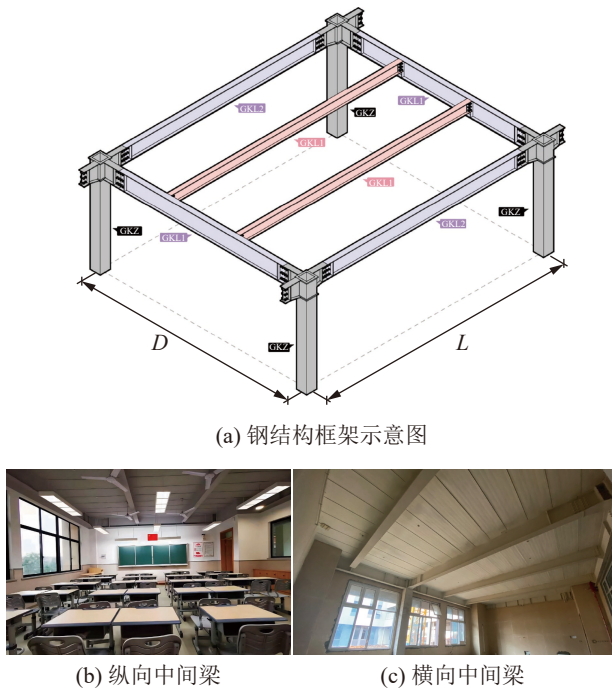


图 1 钢结构框架示意图及教室的钢梁布局
Fig.1 Schematic diagram of steel strudure frame and layout of steel-beam in classroom

教室的尺寸选取了标准化设计中的典型尺寸以及纵向中间梁和横向中间梁两种布局条件, 所研究教室的尺寸参数如表 1 所示。

表 1 教室的几何尺寸
Table 1 Geometrical Dimension of Classrooms

教室编号	长度/m	宽度/m	高/m	中间梁方向
A	9.3	8.4	3.6	竖向
B	9	7.6	3.6	横向

2.2 吸声构造

对于钢结构教室, 在钢梁表面采用装饰性吸声构造, 既保持了教室原有的空间设计, 又能改善钢梁的外观, 因此研究中将教室的吸声状态分为 3 种: 未采取吸声措施 (0)、部分梁吸声 (1) 和全部梁吸声 (2)。分别用教室名称后的数字表示吸声状态 (如 A0 表示教室 A 中的梁未进行吸声处理, B2 表示 B 教室的全部梁都进行了吸声处理)。在未进行吸声处理时, 教室 A 和教室 B 只是在前后墙的材料上稍有差异, 其他面的处理完全相同。根据教室各墙面的结构, 参考声学设计手册上给出的吸声系数取值, 并通过现场测量校核修正后, 确定了在未采取吸声措施前房间各表面 125~4000 Hz 倍频程的吸声系数, 如表 2 所示。

表 2 教室内部表面倍频程吸声系数
Table 2 Octave sound absorption coefficients of classroom inner surface

教室	吸声位置	频率/Hz					
		125	250	500	1000	2000	4000
A/B	左侧墙(含门)	0.13	0.16	0.15	0.15	0.11	0.09
A/B	右侧墙(含窗)	0.13	0.16	0.16	0.15	0.11	0.09
A/B	顶面	0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04
A/B	地面	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
A	前后墙	0.04	0.06	0.04	0.04	0.04	0.04
B	前后墙	0.04	0.06	0.04	0.06	0.09	0.12

在对教室进行吸声处理时, 采用的吸声构造的无规入射吸声系数如表 3 所示, 该吸声系数为吸声结构在混响室中实测的数据, 其中低频吸声根据文献[15]的研究结果进行了附加吸声修正。

表 3 采用吸声构造后教室的倍频程吸声系数
Table 3 Octave sound absorption coefficients of the classroom after adopting sound absorption structure

频率/Hz	吸声系数	频率/Hz	吸声系数
125	0.62	1000	0.82
250	0.76	2000	0.82
500	0.86	4000	0.74

由于吸声处理是结合钢梁装饰进行的, 在计算吸声构造在各墙面上的面积时, 结合声传播吸收的特征, 按照吸声构造在 x 、 y 、 z 方向 (分别对应房间的长度、宽度和高度) 的等效面积来计算, 以和前面几种混响时间计算模型里所确定的依据一致。

两种教室在不同吸声状态下各方向上吸声材料的面积如表 4 所示。

表 4 教室各表面吸声材料面积
Table 4 Areas of sound absorption structure on room surface

教室吸声 状态	吸声材料面积/m ²		
	左右侧墙(x方向)	前后侧墙(y方向)	顶面(z方向)
A2	12.6	4.65	10.35
B1	0	9	5.40
B2	3.80	13.50	10.38

2.3 混响时间实测

现场教室混响时间的实测按照室内混响时间测量规范：GB/T 50076—2013^[16]进行，采用瑞士 NTI-XL2 音频与声学分析仪的混响时间组件，声源为 DS3 全指向性十二面体扬声器。采用粉红噪声激励，1/3 倍频程滤波器进行频谱分析。声源位置和测点要求等均按照规范中的要求执行，测点高度为 1.2 m，每间教室的测点数为 9 个。实测时测量的混响时间为 T_{30} 的值。 T_{30} 表示在室内声场达到稳态后，声源停止发声，声压级衰减 30 dB 所需要的时间。对每个倍频程内 3 个 1/3 倍频程 T_{30} 混响时间取平均后，得到相应倍频程的混响时间值。教室实测和计算条件一样，为无桌椅的空教室。

混响时间测量分别在未进行内部吸声和不同吸声条件下进行。为减少现场的实验偏差，根据现场条件，对每种实验条件分别进行了该实验条件下 2~4 间教室的混响时间测量。最终分析的混响时间为多间教室混响时间测量结果的数学平均值。

3 结果与分析

3.1 计算和实测结果对比

按照第 2 节给出的教室房间参数和吸声条件，混响时间的计算按照第 1 节中给出的 5 种方法计算，得到各种吸声条件下的 125~4000 Hz 倍频程的结果。房间为无桌椅的空室，计算时空气吸声衰减导数按照 GB/T17247.1—2000^[17]中给出的结果取值(温度为 20 ℃，相对湿度取 60%)。实测的混响时间为教室实际安装条件下的测量结果，教室内除安装了吸声结构，无课桌椅等其他物体，测量方法和数据处理如第 2.3 节所述。

图 2 给出了教室 A 和教室 B 在未作吸声处理时的混响时间对比，表 5 给出了从 125~4000 Hz 全频带吸声系数平均值的对比。从计算结果来看，Fitzroy 方法的计算结果最大，而 Eyring-Millington 公式的计算结果最小，经典的 Sabine 公式的计算

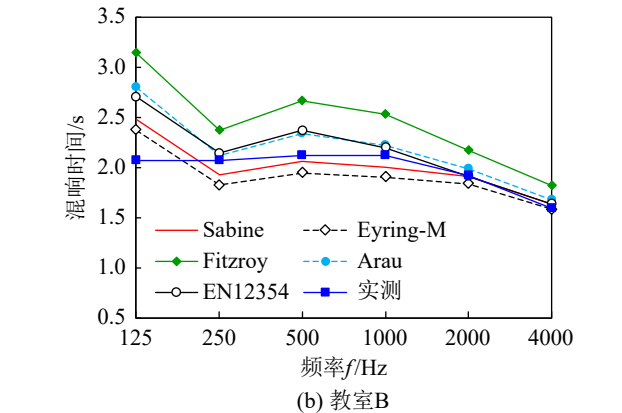
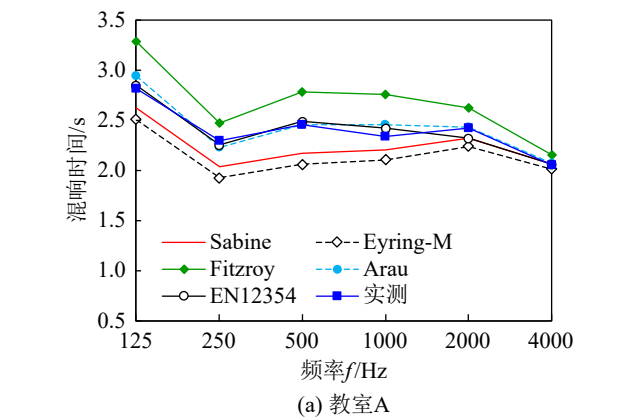


图 2 教室 A 和教室 B 在未作吸声条件下不同方法计算的混响时间对比
Fig.2 Comparison of reverberation times with different methods in classroom A and classroom B without sound absorption

表 5 不同方法平均吸声系数对比
Table 5 Comparison of average sound absorption coefficients with different method

教室	平均吸声系数					
	Sabine	Eyring-M	Fitzroy	Arau	EN12345	实测
教室A	2.00	1.91	2.45	2.19	2.16	1.98
教室B	2.24	2.14	2.68	2.43	2.40	2.40

结果与 Eyring-Millington 公式的计算结果的趋势基本一致，只是在各频带的数值稍大。Arau 方法的计算结果与 EN12354 方法的计算结果非常接近，处于 5 种计算结果的中间。5 种计算方法的计算结果在 2 kHz 和 4 kHz 高频的差异较小，而在中低频段的差异较为明显。

从实测结果与计算结果对比来看，教室 A 的实测结果与 Arau 方法以及 EN12354 方法的计算结果在全频带都能较好地吻合(系数分别为 0.98 以及 0.97)。教室 B 的实测结果在 250 Hz~1 kHz 的中频段处于 Sabine 公式与 Arau 方法之间。

图 3 给出了在所有梁采取吸声措施的条件下，混响时间不同方法的计算结果以及实测结果。从计算结果来看，5 种方法计算得到的混响时间的大小

排列顺序与未进行吸声处理时的结果基本一致。在频谱特征上,在 1 kHz 以下频段,EN12354 方法的计算结果与 Fitzroy 方法的计算结果更加一致。Sabine 公式、Eyring-Millington 公式以及 Arau 方法计算得到的混响时间频谱特征的趋势基本保持一致,三种方法之间结果的互相关系数达到 1.0(教室 A)和 0.99(教室 B)。

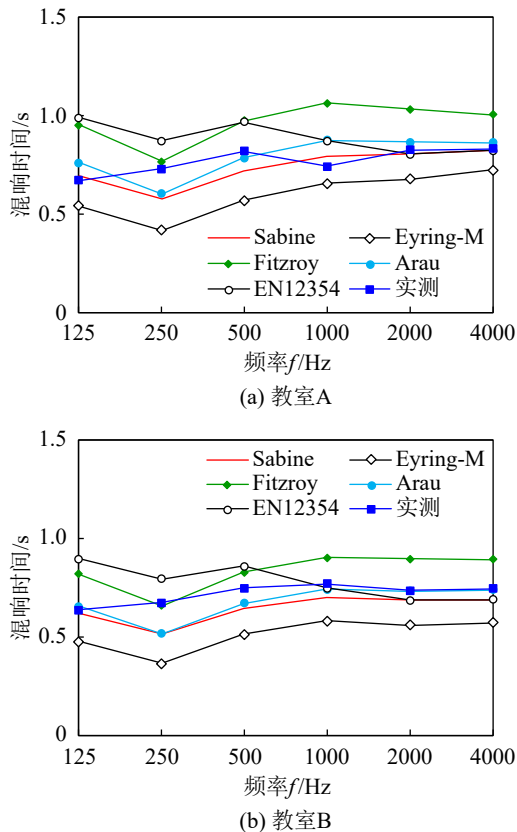


图3 教室 A 和教室 B 在全部梁吸声条件下不同方法的混响时间对比
Fig.3 Comparison of reverberation times with different methods in classroom A and classroom B with full sound absorption

全部梁安装吸声构造时,不同方法的全频带混响时间的平均值与实测结果的平均值如表 6 所示。从表 6 和图 3 可知,在 500 Hz 以上的频段,教室 A 的实测结果与 Sabine 公式的计算结果保持了较好的相符性,教室 B 的实测结果与 Arau 方法计算

表 6 全频带内不同方法计算的混响时间平均值与实测结果平均值对比

教室	混响时间平均值/s					
	Sabine	Eyring-M	Fitzroy	Arau	EN12345	实测
教室A	0.73	0.60	0.96	0.79	0.89	0.77
教室B	0.67	0.51	0.83	0.69	0.78	0.72

结果更加接近,稍大于 Sabine 公式的计算结果。总体上来看,与其他 3 种计算方法相比,两种教室采用 Sabine 公式或者 Arau 方法得到的计算结果都能获得相对较好的准确性。

在部分梁采取吸声措施时,教室 B 的混响时间计算结果与实测结果如图 4 所示。5 种计算方法所得到的混响时间结果的变化趋势与相互关系和采取全部吸声措施时的结果基本一致。与实测的混响时间相比,在 500 Hz 以上的频段,实测结果与 Arau 方法的计算结果吻合较好,而 Sabine 公式的计算结果则比实测结果稍小。

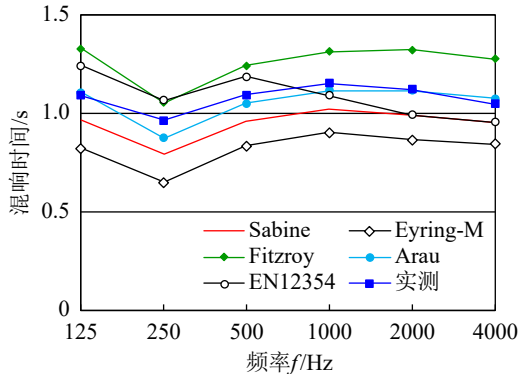


图4 教室 B 部分梁吸声条件下不同方法的混响时间对比
Fig.4 Comparison of reverberation times with different methods in classroom B with partial sound absorption

3.2 分析与讨论

钢梁结构教室在未采取吸声措施前,以及采取吸声措施达到教室混响时间标准要求后,其室内表面的平均吸声系数还不会显著大于 0.2,尚能满足 Sabine 公式的扩散场假设的适用条件。在不同的吸声条件下,5 种计算方法得出的混响时间频谱曲线趋势比较接近,但混响时间的数值上有明显的差异。

根据房间内统计能量衰变推导出来的 Eyring-Millington 公式从理论上可以看成是 Sabine 公式的精确公式。在不同的室内吸声条件下 Eyring-Millington 公式计算出的混响时间总是小于 Sabine 公式计算出来的混响时间,室内吸声系数越大时,两者的差异也越大。

Fitzroy 方法在 5 种方法中得到的混响时间总是最长的。当室内吸声系数增大时,EN12345 方法的计算结果在低频段与 Fitzroy 方法趋于一致。从教室 B 在部分吸声和全吸声条件下的混响时间对比中可以看出,随着吸声系数增大,二者在低频时的更好。在中高频段,EN12345 的方法与 Sabine 公式及 Arau 方法的计算结果更加接近。

在不同的教室吸声条件下,Arau 方法的计算结果总是稍高于 Sabine 公式的计算结果,但随着

吸声的增加, 两者的结果更加趋于一致。

从实际测量结果与计算结果的对比中可以发现, 对于建筑声学设计中通常最关心的中高频段, Sabine 公式和 Arau 方法提供了较准确的混响时间估计。在吸声系数较小时, 实测结果与 Arau 方法的计算结果更加接近; 而随着吸声系数的增大, 实测混响时间与 Sabine 公式的计算结果更加接近。以上结果说明对于教室的吸声设计, Sabine 公式仍是最简单有效的方法, 这与 Astolfi 等^[18]得出的结论相吻合。Arau 方法考虑了声场在 3 个不同方向的衰变, 在不同吸声条件下均能与实测的混响时间较好地吻合。因此, 对钢结构教室以及非均匀布置的吸声结构, Arau 方法是一个更加准确的混响时间计算方法。

4 结论

基于在教室顶部梁上布置离散和非均匀吸声结构条件下, 对 125 Hz~4000 Hz 频率范围内的混响时间进行计算和实验研究, 可以获得如下结论:

(1) 教室采取吸声处理达到满足混响时间要求时, 其室内表面的平均吸声系数基本不会显著大于 0.2, 即使在离散和非均匀吸声条件下, Sabine 公式仍可提供相对可靠的混响时间估计。

(2) 在针对非均匀吸声条件下的 5 种混响时间计算方法中, Arau 方法更加适用于结合顶部梁进行的离散吸声条件下 125~4000 Hz 全频带混响时间预测, 可以获得比 Sabine 公式更准确的计算结果。

本研究均是在教室内无课桌椅的空教室条件下开展的。布置课桌椅对混响时间结果及其变化特征的影响尚需进一步研究。

参考文献

- [1] 徐欢, 欧达毅. 教室声环境研究进展综述[J]. 建筑科学, 2015, 31(8): 35-40.
XU Huan, OU Dayi. A review of classroom acoustics research and development[J]. Building Science, 2015, 31(8): 35-40.
- [2] American National Standard. ANSI/ASA S12.60-2010/Part1 [S/OL]. [2024-11-07]. <https://webstore.ansi.org/standards/asa/ansiasas12602010part>.
- [3] UK Department of Education. Acoustic design of schools: performance standards. Building bulletin 93. 2015 [R/OL]. [2024-11-07] <https://www.gov.uk/government/publications/bb93-acoustic-design-of-schools-performance-standards>.
- [4] BISTAFA S R, BRADLEY J S. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 107(2): 861-875.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑隔声设计规范: GB 50118—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [6] 李楠, 赵越喆, 吴硕贤. 我国亚热带地区中小学校教室声环境分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 9-14, 40.
LI Nan, ZHAO Yuezhe, WU Shuoxian. Study on acoustic condition of primary and secondary school classrooms in subtropical region of China[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 9-14, 40.
- [7] BISTAFA S R, BRADLEY J S. Predicting reverberation times in a simulated classroom[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2000, 108(4): 1721-1731.
- [8] NOWOŚWIAT A, OLECHOWSKA M. Investigation studies on the application of reverberation time[J]. Archives of Acoustics, 2016, 41(1): 15-26.
- [9] NOWOŚWIAT A, OLECHOWSKA M. Estimation of reverberation time in classrooms using the residual minimization method[J]. Archives of Acoustics, 2017, 42(4): 609-617.
- [10] EYRING C F. Reverberation time in "dead" rooms[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1930, 1(2A): 168.
- [11] MILLINGTON G. A modified formula for reverberation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1932, 4(1A): 69-82.
- [12] FITZROY D. Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1959, 31(7): 893-897.
- [13] ARAU-PUCHADES H. An improved reverberation formula [J]. Acustica, 1988, 65: 163-80.
- [14] European Standard. EN 12354-6: 2003 [S/OL]. [2024-11-07]. https://www.intertekinform.com/en-us/standards/en-12354-6-2003-325937_saig_cen_cen_751186/.
- [15] 余佳亮, 米琼, 毛东兴. 教室梁侧的低频附加吸声效应[J]. 应用声学, 2024, 43(4): 874-879.
YU Jialiang, MI Qiong, MAO Dongxing. Excess low frequency sound absorption of structural beam side arranged absorber in classrooms[J]. Journal of Applied Acoustics, 2024, 43(4): 874-879.
- [16] 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, 2014.
- [17] 国家市场监督管理总局. 声学 户外声传播衰减 第1部分: 大气声吸收的计算: GB/T 17247.1—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [18] ASTOLFI A, CORRADO V, GRIGINIS A. Comparison between measured and calculated parameters for the acoustical characterization of small classrooms[J]. Applied Acoustics, 2008, 69(11): 966-976.