

教室室内最佳混响时间的研究

宋拥民¹, 祝培生², 盛胜我³

(1. 上海现代建筑设计(集团)有限公司章奎生声学设计研究所, 上海 200041;
2. 大连理工大学建筑与艺术学院, 大连 116024; 3. 同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 信噪比和混响时间是影响教室室内语言清晰度的主要因素, 教室室内信噪比的最佳下限值已有研究结果, 但教室室内最佳混响时间仍未形成一致的看法。对教室虚拟声环境下的语言清晰度试验结果进行方差分析, 并运用实验心理学的组间数据两两配对比较法, 对不同混响条件下的平均语言清晰度得分进行了差异显著性检验, 结果表明在高信噪比条件下, 体积不超过 200³ 的教室中频混响时间控制在 0.6s 左右室内听闻效果最佳。

关键词: 语言清晰度; 信噪比; 混响时间; 教室; 虚拟声环境; 显著性差异

中图分类号: TU112

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-01-0048-05

Research on optimal reverberation time in classrooms

SONG Yong-min¹, ZHU Pei-sheng², SHENG Sheng-wo³

(1. ZHANG Kui-sheng Acoustic Design and Research Studio, Shanghai XianDai Architectural Design(Group) Co. Ltd., Shanghai 200041, China;
2. School of Architecture and Fine Art, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Signal-to-noise ratio and reverberation time are the important factors that influence the speech articulation in classrooms. There is no the consensus of opinion about the optimal reverberation time in classrooms while the consensus about the optimal lower limit of signal-to noise ratio is reached. Speech articulation tests have been done in various virtual classrooms where the reverberation times are different from each other. Variance of articulation index scores in each test are analyzed. And then the significant differences of means between group data are tested with the pair matching comparison method which is idiomatic in the field of experimental psychology. The analytical results show that the optimal reverberation time of mid frequencies in the classroom with a volume of less than 200 m³ and a signal noise ratio of higher than 20dBA is about 0.6 seconds.

Key words: speech articulation; signal-to-noise ratio; reverberation time; classroom; virtual listening environment; difference significance

1 引言

教室声学问题是当前建筑声学领域的一个研究热点, 国内外对教室声学也进行了大量研究^[1]。目前教室声学研究的重点已经从室内外噪声源种类及其影响的分析转向教室室内听闻环境的研究。影响教室室内听闻环境的因素主要有室内背景噪声、信噪比、室内混响、授课语言本身的声学特性、师生交流方式等, 但最主要的因素还是混响时间和信噪比。研究^[2]表明, 教室室内信噪比的最佳下限值是 15dB(A), 继续提高信噪比, 教室室内语言清晰度并无明显改善, 此时影响语言清晰度最重要的因素就是混响时间了。而对于教室室内最佳混响时间, 不同国家或组织的建议值并不相同, 表 1 所示

为不同国家给出的体积在 200m³ 以下的教室室内混响时间的建议值^[3]。而我国在相关标准中对教室室内混响时间的建议值为 0.9s^[4], 这与国外的建议值相差不小, 为此对国内教室室内最佳混响时间进行研究显得尤为重要。

教室作为语言交流场所, 其听闻环境最直接的评价参量是语言清晰度, 测量方法通常是作语言清晰度试验。因此, 本文拟通过在体积不超过 200m³, 但混响时间不同的虚拟教室声环境里进行语言清晰度试验, 并对试验结果进行方差分析, 运用实验心理学中组间数据两两配对比较法, 对不同混响条件下的平均语言清晰度得分进行差异显著性检验, 从而得到教室室内的最佳混响时间。

2 研究方法

要得到教室室内混响时间的最佳值, 最理想的方法是在不同混响时间的教室里进行语言清晰度试验^[5], 当然要降低其他无关参量(尤其是信噪比)

收稿日期: 2008-03-04; 修回日期: 2008-05-17

作者简介: 宋拥民(1976-), 男, 博士, 湖北蕲春人, 研究方向为厅堂音质、噪声与振动控制的设计与研究。

通讯作者: 盛胜我, E-mail: sheng_sw@163.com

表 1 不同国家或组织对体积在 200m³ 以下的教室室内混响时间的建议值 (使用中)

国家或组织	WHO	美国	英国	法国	德国	意大利	葡萄牙	新西兰	比利时	日本
混响时间建议值/s	< 0.6	0.6	0.4~0.8	0.4~0.8	0.8~1.0	< 1.2	0.6~0.8	< 0.6	0.9~1.3	0.5~0.7

表 2 调制不同混响时间的虚拟脉冲所采用的衰减指数

RT _v /s	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	1.10	1.20
δ(*10 ⁻⁵)	58.33	37.50	23.96	18.13	13.54	9.58	6.67	4.58	3.23	1.98	0.83

的影响, 并通过对语言清晰度试验结果的分析来确定混响时间的最佳值。但在实际操作中, 要找到混响时间不同且符合研究目的(譬如各教室中频混响按照 0.1s 递增)的多间教室比较困难。为此, 本文采用指数衰减法对教室实测脉冲进行调制, 得到中频混响时间从 0.4s 到 1.3s、间隔 0.1s 变化的教室虚拟声环境, 在这些虚拟声环境里进行语言清晰度试验来得到混响时间的最佳值。

图 1 所示为教室空室的实测脉冲响应。对该脉冲响应函数, 按照 Schroeder 提出的反向积分法^[6]就可以得到混响时间的积分曲线(如图 2 所示), 进一步得到 RT 或 T₃₀ 等。

设实测脉冲的 Schroeder 积分曲线可以表示为:

$$\langle p^2(t) \rangle = \int_t^\infty h^2(\tau) d\tau \tag{1}$$

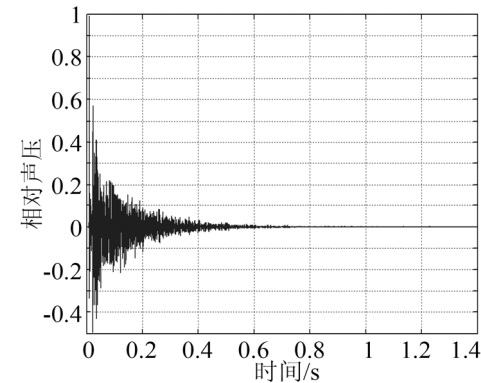


图 1 教室实测脉冲
Fig.1 Impulse measured in classroom

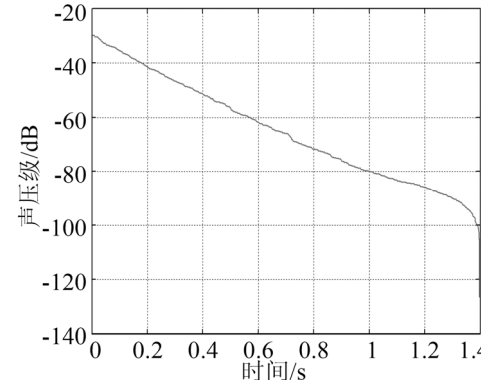


图 2 实测脉冲的施罗德积分曲线
Fig.2 Schroeder internal curve from measured impulse

式中, $\langle p^2(t) \rangle$ 为衰变曲线的集合平均, $h(\tau)$ 为室内脉冲响应。

对实测脉冲以指数衰减方式进行调制, 并设衰减指数为 $e^{-\delta t}$, 则新生成的虚拟脉冲也可以由 Schroeder 反向积分法得到混响时间的积分曲线, 如式(2)所示:

$$\langle p_v^2(t) \rangle = \int_t^\infty h^2(\tau) e^{-2\delta\tau} d\tau \tag{2}$$

式中, $\langle p_v^2(t) \rangle$ 为调制脉冲的衰变曲线的集合平均, $h(\tau)$ 为室内脉冲响应。

可以将虚拟脉冲的 Schroeder 积分曲线用最小二乘法拟合为:

$$y = k_2 t + b_2 \tag{3}$$

显然, 虚拟脉冲的混响时间 RT_v 可以表示为:

$$RT_v = \frac{-60}{k_2} \tag{4}$$

原则上由式(2)~(4)可以确定虚拟脉冲的混响时间 RT_v 与衰减指数 δ 之间的函数关系。在实用中, 借助计算机技术, 无需求解 RT_v 与 δ 之间复杂的函数表达式, 也可以生成所需要的虚拟脉冲。表 2 列出了由图 1 所示脉冲调制出混响时间(对应中心频率为 500Hz)在 0.2s~1.2s 之间变化的虚拟脉冲所采用的衰减指数 δ。虚拟脉冲是依据混响时间来调制的, 由此得到的声学参量值与实测脉冲得到的会有一定差别, 但并不会影响其规律性的研究。

在虚拟声环境下的语言清晰度试验中, 实验主体来自 84 名学生, 这些学生来自多个不同专业, 都具有一定的声学知识与实践。实验中对实验主体按照独立组设计的原则^[7]进行选择, 即规定 84 名被试者参加试验, 但不对被试者进行分组, 而由被试者随机组合, 每 12 人一组, 符合 GB/T15508-1995 “听音人一般不少于 10 人”的规定。其中两组实验主体各完成了两组实验, 对应采用 KXY4 和 KXY7 表, 其它五组各完成一组实验, 对应采用 KXY4 表。由于 84 名实验主体完全随机组合, 符合心理学实验随机独立组的设计原则^[6], 因此各组主体之间的个体差异可以忽略不计。表 3 为 84 名实验主体样本的基本情况。

表 3 实验主体样本的性别及年龄分布情况
Table 3 Age and sex of experimental samples

年龄	18	19	20	21	22	23
人数	6	44	16	12	4	2
百分比/%	7.1	52.4	19.0	14.3	4.8	2.4
性别	男			女		
人数	45			39		
百分比/%	53.6			46.4		

3 数据分析方法

语言清晰度试验实际上是一种主观实验，而主观实验通常不只是一要检验某种实验条件所引起的主观效应，更重要的是检验一种实验条件在几种不同的实验状态下所引起的主观效应是否有差异，最终检测出主观感受最佳的实验状态。对于教室室内听闻环境的主观实验，就是要通过不同实验条件检测出能够使室内语言清晰度达到最佳的实验条件或状态，从而找到教室室内最佳的混响时间或最佳的取值范围，这也能为今后教室声学设计提供理论依据和设计参考。

检验语言清晰度试验数据有效性的方法通常有标准差检验(即由平均值与 3 倍标准差来确定有效数据的范围)、半极差型检验和邻差型检验这三种方法^[7]。但标准差检验比较粗糙，半极差型检验和邻差型检验两种检验方法是单因子多水平实验常采用的分析方法，尤其适用于 25 种以下实验水平的主观实验。因此本文采用邻差型检验来校验测试数据的有效性。

在对主观实验观测值进行有效性检验后，还需要对所有观测值进行两方面的分析处理：先采用单因子方差分析方法^[8]进行组内数据差异显著性检验(即 F 检验)，再按照心理学实验的数据处理方法^[6]对各种实验状态下的数据进行组间数据的两两数配对比较，以检验各组数据平均数是否存在显著性差异。

由于单因子方差分析是统计中一种常用的分析方法，故此处不再赘述。组内数据两两配对比较的方法较多，像成对比较、标准比较(或称参考比较)等，其中最简单的一种是用 q 表作检验的 T 法^[7]。 T 值是衡量任何两个配对平均数之差的尺度，如果两个平均数之差小于 T ，则两者差别不显著，否则，两者存在显著差异。 T 值可由下式计算^[6]：

$$T = q_{\alpha}^k(\alpha) \sqrt{\frac{MSe}{n}} \quad (5)$$

式中 k 为比较的个数； Φ 为自由度； α 为显著

性水平，一般取 $\alpha=0.05$ ； MSe 为组内均方差； n 为重复实验次数，也即每个水平的观测次数。

利用组间数据平均值两两配对比较的结果可以确定最佳的实验水平，借此也可以确定观测因子(在本文即为混响时间)的临界取值。其原理为：当第 n 种实验水平下的平均值较第 $(n-1)$ 种实验水平下的平均值不存在显著性差异，而与第 $(n+1)$ 种实验水平下的平均值存在显著性差异，即第 n 种实验水平下的平均值刚好相当于全部实验水平中的“拐点”，则该种实验水平下被测因子所对应的数值即为该实验因子的临界值。当然此临界值既可能是最佳值，也可能是最不利值，至于是最佳值还是最不利值还得依据实际情况确定。

4 实验结果

对调制的中频混响时间从 0.4s 到 1.0s、间隔 0.1s 变化的虚拟教室声信号，混响时间为 1.3s 的教室实测声信号采用耳机回放方式进行了语言清晰度试验，试验严格按照 GB/T15508-1995《声学 语言清晰度测试方法》的要求进行。耳机回放系统采用 HEAD Acoustics 公司的回放系统 HPS，此套系统包括 Head SQLab II 试验台、IBM 笔记本电脑及 Artemis 回放软件、HPS 信号分配器、四套 HD600 高保真耳机以及电源等附件。采用此套回放系统可以得到最优的高保真空间声像，同时可以计算并调节听音信号的长时均方根 A 声级。为降低信噪比对测试结果的影响，将信噪比维持在比较高的水平对实验有利，但有研究表明，当信噪比超过 15 dB(A)时，再提高信噪比对语言清晰度并无明显改善^[8]，因此在语言清晰度试验中，各种实验条件下的信噪比均控制为 20dB(A)、放音音量统一调整为长时均方根 A 声级 65dB。表 4 为语言清晰度得分及邻差型检验结果，表中 $X_1 \sim X_{12}$ 代表 12 个样本。

在对所有测试数据进行有效性检验后，就可以按照 GB/T15508-1995《声学 语言清晰度测试方法》的规定计算各组实验的平均语言清晰度得分，其结果如表 5 所示。

由表 5 可以看出， $RT=0.6s$ 时，平均语言清晰度得分最高。如果缩短混响时间，语言清晰度得分会下降，而当混响时间增大时，语言清晰度得分又会下降。而 $RT=1.0s$ 时的平均语言清晰度得分与 $RT=0.6s$ 条件下的平均语言清晰度得分具有相同的特性，即混响时间加长与混响时间缩短，语言清晰度得分均会降低，即 $RT=1.0s$ 与 $RT=0.6s$ 都为比较

表 4 八组实验的语言清晰度得分及邻差型检验结果
Table 4 Speech articulation Scores from eight experiments and results of difference test from adjacent data

RT/s	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.3
X ₁	80.0	81.3	84.0	78.7	77.3	82.7	80.0	73.3
X ₂	81.3	82.7	86.7	81.3	78.7	82.7	84.0	77.3
X ₃	85.3	84.0	86.7	81.3	80.0	84.0	84.0	80.0
X ₄	86.7	84.0	88.0	84.0	82.7	84.0	84.0	82.7
X ₅	86.7	84.0	88.0	84.0	82.7	85.3	86.7	82.7
X ₆	86.7	85.3	89.3	84.0	84.0	85.3	86.7	84.0
X ₇	89.3	86.7	89.3	84.0	84.0	85.3	86.7	86.7
X ₈	89.3	86.7	89.3	84.0	85.3	86.7	89.3	88.0
X ₉	90.7	86.7	89.3	85.3	85.3	88.0	89.3	89.3
X ₁₀	90.7	88.0	89.3	85.3	86.7	88.0	89.3	89.3
X ₁₁	90.7	88.0	90.7	86.7	86.7	89.3	89.3	89.3
X ₁₂	94.7	90.7	92.0	90.7	86.7	90.7	89.3	89.3
X ₁₂ 检验	0.300	0.333	0.500	0.571	0.000	0.333	0.000	0.000
X ₁ 检验	0.500	0.400	0.400	0.333	0.286	0.200	0.429	0.417
临界值 c	0.642	0.642	0.642	0.642	0.642	0.642	0.642	0.642
异常值	无	无	无	无	无	无	无	无

表 5 八种教室声环境下的语言清晰度得分
Table 5 Means and standard deviations of eight experiments

RT (500Hz)/s	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.3
平均语言清晰度得分	87.7	85.7	88.6	84.1	83.3	86.0	86.6	84.3
标准偏差	4.2	2.6	2.1	3.0	3.2	2.6	3.0	5.3

表 6 八组实验平均语言清晰度得分差异显著性检验
Table 6 Different significance test of speech articulation scores from eight experiments

	平方和	自由度	均方	F	显著性检验结果
组间	273.3	7	39.0	3.40>3.28	高度显著 (P<0.05)
误差	1010.0	88	11.5		
总计	1283.3	95			

表 7 八组实验平均语言清晰度得分差异显著性两两配对比较
Table 7 Pairing comparison results of speech articulation scores between eight experiments

实验水平	$ x_i - x_1 $ (i > 1)	$ x_i - x_2 $ (i > 2)	$ x_i - x_3 $ (i > 3)	$ x_i - x_4 $ (i > 4)	$ x_i - x_5 $ (i > 5)	$ x_i - x_6 $ (i > 6)	$ x_8 - x_7 $	备注
X ₁ (RT=0.4s)								
X ₂ (RT=0.5s)	2.00							
X ₃ (RT=0.6s)	0.87	2.87						
X ₄ (RT=0.7s)	3.57	1.57	4.44					
X ₅ (RT=0.8s)	4.34	2.34	5.21	0.77				临界值 T=4.28
X ₆ (RT=0.9s)	1.68	0.32	2.55	1.89	2.66			
X ₇ (RT=1.0s)	1.13	0.87	2.00	2.44	3.21	0.55		
X ₈ (RT=1.3s)	3.35	1.35	4.22	0.22	0.99	1.67	2.22	

理想的混响时间的取值。为判定最佳混响时间，还需要对这几种实验水平下的平均语言清晰度得分进行组内平均值差异显著性检验和组内两两配对比较，F 检验和 T 检验的结果如表 6 和表 7 所示。

表 6 表明八种不同实验条件的平均语言清晰度得分之间确实存在显著性差异。而从表 7 可知，RT=0.6s 时的语言清晰度与 RT=0.7s 和 RT=0.8s 两种条件下的语言清晰度差异显著，而与其他混响条件下的语言清晰度得分无显著性差异，也即 RT=0.6s

可以算作平均语言清晰度得分变化的一个拐点，因此可以认为 RT=0.6s 为最佳混响时间。而 RT=1.0s 与 RT=1.3s 及 RT=0.9s 均无显著性差异，RT=1.0s 并不是有效的“拐点”，因此，可以确定 RT=0.6s 才是最佳混响时间。

5 结 论

混响时间作为教室室内听闻环境的主要影响

因素,其最佳值的确定对于教室声学设计有一定的指导意义。本文利用指数衰减法对教室实测脉冲响应函数进行调制建立起虚拟教室声环境,通过对教室虚拟声环境下的语言清晰度试验结果进行组间差异显著性检验可以得到教室室内混响时间的最佳值,检验结果表明,在高信噪比条件下体积不超过 200m^3 的教室室内最佳混响时间为 0.6s 。

参 考 文 献

- [1] 宋拥民,盛胜我. 教室室内声学研究进展[J]. 声学技术, 2006, **25**(1): 56-61.
SONG Yongmin, SHENG Shengwo. Progress in classroom acoustics research[J]. Technical Acoustics, 2006, **25**(1): 56-61.
- [2] 宋拥民,盛胜我. 信噪比对教室语言清晰度的影响[J]. 声学技术, 2006, **25**(增刊): 297-298.
SONG Yongmin, SHENG Shengwo. Influence of signal-to-noise ratio on speech articulation in classroom[J]. Technical Acoustics, 2006, **25**(supplement): 297-298.
- [3] Maria Lucia G. da R. Oiticica. Mariana Bezerra Moura and Luiz Bueno da Silva. Assessment of acoustical quality in a public school building-case report[A]. The 2005 congress and exposition on noise control engineering[C]. Rio de Janeiro. Brazil. 2005: 1729-1738.
- [4] GBJ 118-88. 民用建筑隔声设计规范[S].
GBJ 118-88. Code for design of sound insulation of civil buildings[S].
- [5] GB/T 15508-1995. 声学——语言清晰度测试方法[S].
GB/T 15508-1995. Acoustics-Speech articulation testing method[S].
- [6] Schroeder M R. New method of measuring reverberation time[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1965, **37**(3): 409-412.
- [7] 杨治良主编. 基础实验心理学[M]. 甘肃人民出版社. 1988: 1-54.
YANG Zhiliang(ed.). Basic experimental psychology[M]. Gansu Peoples Press, 1988: 1-54.
- [8] 同济大学概率统计教研室编著. 概率统计(第二版)[M]. 同济大学出版社. 2000.
Teaching and research group of probability and statistics, Tongji University. Probability and statistics(2nd edition)[M]. Tongji University Press. 2000.