

庭院空间的音质*

王季卿

(同济大学声学研究所 上海 200092)

2006 年 12 月 28 日收到

2007 年 1 月 26 日定稿

摘要 中国传统戏场有不少是庭院式的。在这种顶面敞开的空间中, 混响很少, 声场基本上是非扩散的, 故其声学性能与全封闭房间有很大不同。经典的室内声学例如赛宾混响公式在此不再适用。且由于缺失了大量来自顶面的反射声, 使反射声序列的精细结构有很大变化, 在仅仅表征声音衰变速率的混响时间参量中却反应不出来。致使虽具有与封闭房间相同 3D 混响时间的庭院空间中, 其混响感可能明显不同。本文分析了庭院空间内声场的若干特征, 对庭院式戏场音质作了初步探讨。

PACS 数: 43.55

Acoustics of courtyard spaces

WANG Jiqing

(Institute of Acoustics, Tongji University Shanghai 200092)

Received Dec. 28, 2006

Revised Jan. 26, 2007

Abstract The traditional Chinese theatre was often built with a courtyard. In such kind of space, the absence of a roof would mean little reverberation and non-diffused sound field. Acoustically the situation is quite different from that of any enclosed space. Therefore, the classic room acoustics, such as Sabine reverberation formula, would no longer be applicable here due to the lack of sound reflections from the ceiling. As the parameter of reverberation time T_{30} shows the decay rate only, it would not properly characterize the prominent change in the fine structure of the echogram, particularly for the case with a large reduction of reflections during the decay process. The sense of reverberance in a courtyard space would differ noticeably from that of the equivalent 3D- T_{30} in an enclosed space. In this article, the author, based upon the characteristic analysis of the sound field in a courtyard space, presents a preliminary study on the acoustics of the courtyard theatres.

引言

赛宾最初提出封闭空间内的混响时间 T 与房间容积 V 和室内吸声量 A 相关, 并有简单关系式——即熟知的赛宾公式来估算。它适用于低吸收的活跃房间和一个接近扩散的声场。随着室内平均吸声系数的增大, 声场的非扩散性渐趋明显, 估算结果便出现较大偏差, 于是有艾润修正公式的提出。这些估算公式所考虑的只是室内吸声总量, 并不反映它们在室内因分布不同而带来的后果。

赛宾公式中的吸声量是取开窗面积为单位的, 即设定 1 m^2 的开窗面积等于一个吸声单位, 它相当

于 1 m^2 吸声率达到 100% 的吸声材料。这样, 所有射向该面积上的声音完全散逸到室外, 或称全吸收, 不再参与室内声场的建立。对于开窗面积占室内表面积比例不大的房间来说, 混响时间公式的估算值与实际还是比较接近的。但是当这个开窗面积扩大到一定程度, 例如有一个墙面或顶面那么大, 那末室内声场将与具有相同吸声总量, 但均布在各表面的封闭空间会有所不同。如果仅从混响公式估算, 两者的混响时间虽然接近, 但实际音质效果可能有较大差异。以常见的无顶庭院戏场为例 (见图 1), 它是一个扁平的无顶空间。这样大面积的敞开顶部, 将会对室内声场和音质引起哪些和封闭空间不同的特征, 将是本文所要探讨的问题。

* 国家自然科学基金资助项目 (50078038)

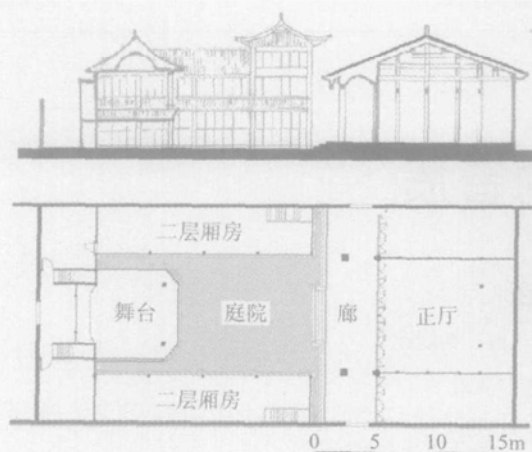


图1 一座庭院式戏场(上海三山会馆)的平面和剖面及实景图

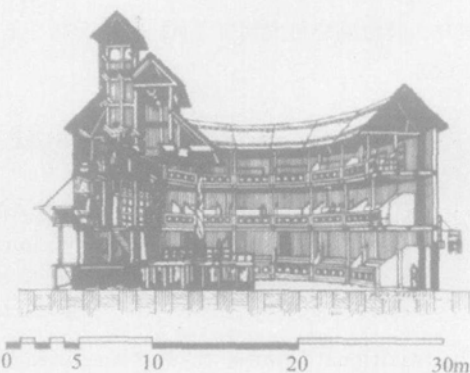
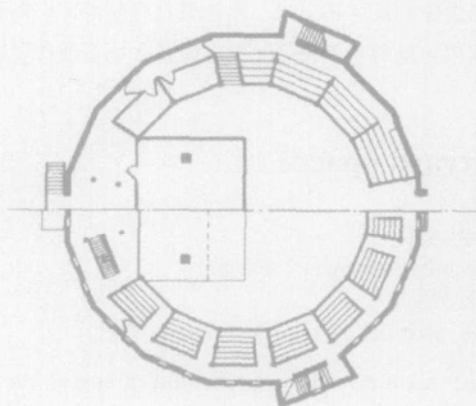


图2 英国伦敦莎士比亚式环球剧院平面和剖面

回顾历史,人们对三面敞开和两面敞开空间内的声学都进行过研究。例如1940年前后,马大猷^[1]从理论和实验上研究分析了三面敞开的小胡同内,由于声波在相距仅数米的两平行墙之间的多次反射,会出现一种很奇特的现象—颤动回声。这是由于在一维空间(其它二维一是无穷的,一是半无穷的)内形成很多共振的驻波引起的。他用了简正波的方法解释颤动回声的本质。另有人^[2,3](1978)对两侧为鳞次栉比高楼的街道(街宽比小胡同大许多倍,达到一、二十米以上),一个三面敞开极大空间内的声衰变过程(用的仍然是经典的混响时间参量)及接收点声级随距离的变化进行了研究。另有一种特殊情况是,在高和宽不大,但长度很大的走廊空间内的声传播,有人作了理论和实验研究^[4]。他们的重点都在探索噪声的传播规律。

至于两端敞开的空间又是常见的另一种类型。典型的例子如长度有限的城门洞和体型非常狭长的地铁车站。后者是一个长度远大于高度和宽度的非常狭长空间,声场很不扩散。康健(1996)^[5]曾指出在这类涵洞空间内,经典的室内声学原理不再适用。他对《狭长空间声学问题》所作的研究中^[6],较少考虑两

端敞开与否的影响。可能认为那已属次要的因素。对于城门洞那样不太长的两端敞开空间,端部开敞的影响就不能忽略。也许因为尚无太多实用性问题提出,故有关讨论在文献中还不多见。

中国传统戏场有不少是庭院式的,这类单面(顶面)敞开空间的声学特征过去讨论不多。作为一种特殊形式的观演建筑,有必要研究其音质。例如,仍按仅适用于封闭空间的经典混响时间作为音质指标,是否合适,值得推敲。又如17世纪在伦敦出现过几座所谓莎士比亚式(又称伊丽莎白时代型)园形无顶剧院,其格局也属于这种类型。目前仅存的一座名为环球剧院(1614年建,不久毁于火灾,1923年复建)(见图2),建筑直径约25 m,周围有二层回廊式包厢环绕着直径约17 m的中央庭院。Barron^[7]对其音质曾有简短评述:顶面敞开意味着很少混响,场内听众主要依靠直达声。

1 混响、混响时间和早期衰变时间

原则上讲,室内只要有多重反射声存在,便会使声音强度有所增加,并引起交混回响的效果。在庭

院式戏场中，亦然如此。但是按封闭空间建立的一些经典声场计算公式—混响时间和声压级分布估算式，都不适用于顶面敞开的空间。因为缺失了所有来自顶面反射声后，将与这些计算公式所假设的扩散场前题相去甚远。此外，对比一下封闭的和顶面敞开的两种空间（两者其它条件相同，空间尺寸均取 16 m×25 m，高 4.5 m）内的反射声序列（见图 3），还可看出混响过程中的精细结构发生了很大变化，但是两者的混响时间 T30（取 -5 dB 至 -35 dB 的衰变斜率得出）（s）可能差别不大。因为按经典的混响时间定义，它是“平均声能密度自原始值衰变到其百万分之一（60 dB）所需要的时间”，所考虑的只是它的衰变率而已。因此，对顶面敞开空间用常规方法获得的 3D 混响时间，会给人以误导。因为即使数值上相近，其混响过程和主观混响感显然不同。这种处于准三维空间所形成的 2.5D 混响时间，如果不加区别地引为音质指标，将失去其实用价值。

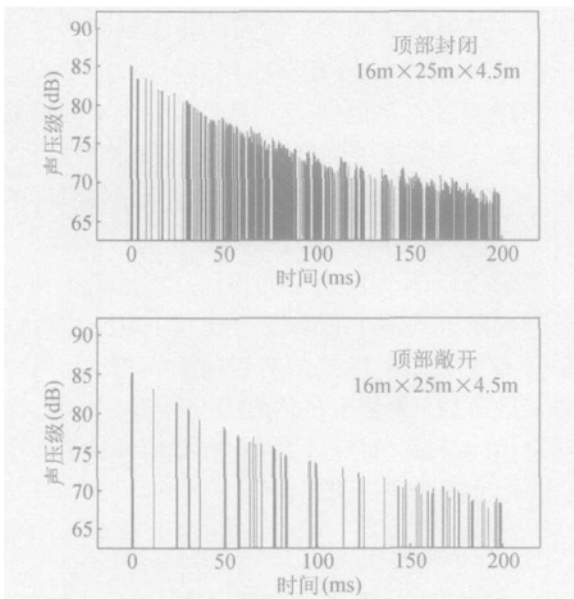


图 3 顶部封闭和敞开两种条件下模拟计算的脉冲响应对比

如果从空间内简正振动模式数量来看，顶面敞开后会必然减少很多。表 1 示明对一个 16 m×25 m，高 4.5 m 的房间，有顶和无顶两种条件下各频段（带宽均取 10 Hz）内的简正波数目变化（未计其简并）。说明顶面敞开后简正波数目缺失很多，在中频缺失率几近一半。对庭院音质来说这一因素亦不可忽略。

表 1 16 m×25 m，高 4.5 m 的房间内，各中心频率（带宽 10 Hz）的简正波数目（未计简并情况）

频率	63Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
A 完全闭合	29	103	385	1490	5856	23223
B 顶部敞开	20	63	213	786	3011	11778
(A-B)/A 缺失率	31%	40%	45%	47%	48%	49%

早在 1960 年代，主观评判实验^[8]告诉我们混响感与早期阶段衰变时间的关系比之传统混响时间要密切得多。后来，大家认同由 Jordan(1970)^[9]提出的以初始 10 dB 衰变曲线的斜率（即从 0 dB 到 10 dB 的早期阶段衰变过程）最为重要。因此在这个衰变阶段中，如缺失了对听众席颇起作用的顶面反射声后，对早期衰变时间 EDT(s) 也会有所影响。由于该早期阶段内反射声数目本来不多，缺失了顶面反射声后，在 EDT 中会得到一些反映的。至于早期衰变过程中因精细结构的不同，而对早期衰变时间和主观混响感受将产生何种影响，目前尚不清楚。但是在庭院空间内，混响参量取 EDT 仍然比 T30 更恰当。

取以上矩形空间为例，进行了有顶（封闭空间）和无顶（敞开空间）两种条件下的 EDT 和 T30 的模拟计算。各界面的吸声系数 α 取 0.1。声源和接收位置见图 4 所示。声源在偏离 1 m 纵向中心线上，后面离墙 4 m，高 1.5 m。在空间后部 14 m×14 m 范围内每隔 1 m 设一接收点（总共 225 点），高度均为 1.2 m。图 5 给出了 1000 Hz 的 T30(s) 和 EDT(s) 计算结果的比较，各取 225 点的中值结果为代表。顶面敞开前后的 T30 分别为 2.45 s 和 1.66 s。对有顶空间，

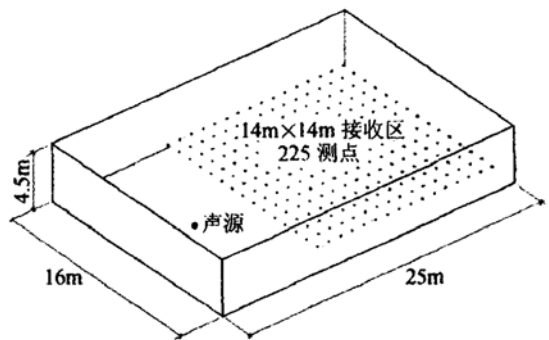


图 4 计算实例的空间为 16 m×25 m，高 4.5 m。接收区在 14 m×14 m 范围内，每 1.0 m 设一点，共 225 点，高度 1.2 m。

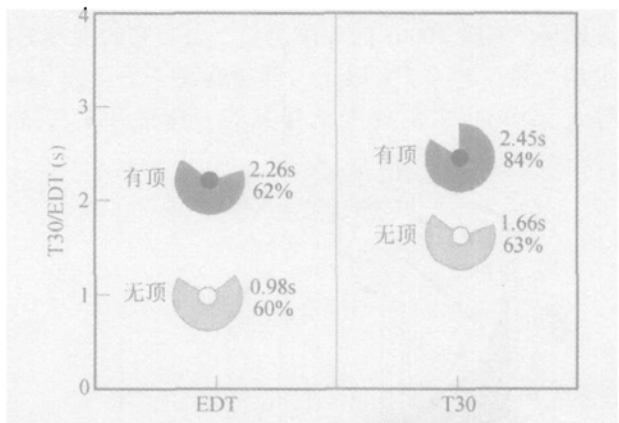


图 5 有顶和无顶两种空间内，T30 和 EDT 计算中值的比较（1000 Hz）。圆弧面积代表 ± 0.1 s 范围所占百分率。

有 84% T30 落在该中值的 ± 0.1 s 范围内, 无顶空间则为 63%(各以图中圆弧面积表示)。前者说明封闭空间内各接收点上的 T30 大致相同, 后者的一致性差些。至于两种条件下的早期衰变时间 EDT 则有更大差别, 它们的中值分别为 2.26 s 和 0.98 s。有顶空间有 62% 在 ± 0.1 s 范围内, 无顶空间为 60%。它说明庭院空间内各处的混响感明显地低于封闭空间的。

我们曾对几座庭院式戏场作过声学测量^[10,11], 中频 EDT(取 500 Hz 和 1000 Hz 的平均)大致在 0.7~0.8 s, 因庭院尺寸、形状、舞台设置、周边建筑情况而异。有个别庭院可达 1.0 s。

另一次所作多接收点的声学测量^[12](测点数约取 16~20 个, 视庭院大小而定), 示明各庭院 T30 的标准偏差很小(约 0.02~0.04 s), 而 EDT 的标准偏差则大得多(约 0.05~0.13 s)。后者说明无顶空间内声场均匀度会差些, 这应是意料中事, 亦与图 5 所示规律相吻合。只是这些庭院建筑与模拟计算的条件相比要复杂得多。那里都有亭式舞台, 台面约 2 m 高, 因此声源高度约在 3 m 左右; 声源上空是有小顶的。庭院两侧常有两层高的厢房或单层廊房, 面对舞台有正厅或檐廊等。所调查的庭院面积大致在 250 m² 左右, 最大的约 290 m², 最小的约 160 m²。庭院宽度最小的 11.7 m, 最大的 19.7 m; 长度最小的 12.2 m, 最大的 25.9 m。

西方古代露天剧场的形式比中国传统庭院戏场更为开敞, 场址尺寸也大得多, 故混响感更要低一些。Vassilantonopoulos 等人(2003)^[13]曾对三座古希腊和罗马露天剧场(各容纳 14 000, 17 000 和 2 300 听众)进行声学调查和测量, 混响时间均在 0.2 s 以下(分别为 0.2 s, 0.18 s, 0.13 s), 并认为场内毫无混响感。从它们的回声图谱中也可看出反射波极少(如图 6 所示)。Daniele 等人(2004)^[14]对一座建于意大利西西里岛上有类似规模的古代希腊式 Segesta 露天剧场(容座 4000)的声学测量, 表明它的混响时间也相当短, 约 0.4 s 以下, 低频略高一些。而 Gade 等人(2004)^[15]对地处土耳其的一座很开旷的古代

Aspendos 露天剧场(是迄今保存得最完好的罗马式剧场, 半径 59 m, 可容 7000 人)进行现场测量和计算机模拟。他们认为在这类顶面‘全吸收’的敞开空间内, 听众席接收到的反射声能是很小的。实测和模拟计算的声压级随至声源距离的变化, 均说明它们基本接近自由场条件。可是报告中却对中、高频(500 Hz~2 kHz)的现场实测和模拟计算(Odeon 软件 7.0 版)混响时间居然都高达 1.8 s 左右! 颇为令人费解。

2 声场分布的变化

稳态声在封闭空间内的声压级分布, 在混响半径之外基本是均匀一致的, 对于扩散良好的空间更可由简单公式估算。对脉冲声来说, 声场达不到稳态效果, 分布均匀度要差些, 且与空间形状关系更为密切。可是在庭院空间内, 所有来自顶面的反射声都消失了, 于是对离声源较远的后区接收到的声压级会降低很多, 空间内的声场分布便很不均匀, 使有些区域会出现响度不足的缺点。因此对庭院空间的音质而言, 在众多参量中强度指数 G (dB) 的重要性尤为突出。在混响不大的空间内, 它也直接影响到明晰度 C_{80} (dB)。

我们仍以图 4 所示空间为例, 通过模拟计算得到了顶面敞开前后中频强度指数 G_m (dB)(1 kHz) 的差值分布图(见图 7)。故与封闭空间相比, 可以预料顶面敞开后, 大量来自顶面的反射声缺损了, 全场声级会由此下降, 对后区尤甚。在此所举计算例中, G_m 值大致降低了 4 dB 以上。

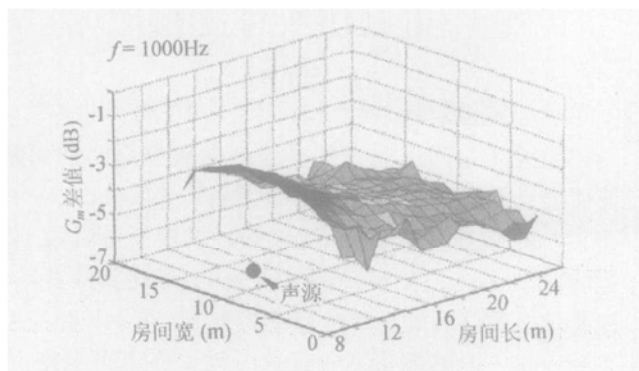


图 7 顶部封闭和敞开两种条件下, G_m 的差值 (dB) 分布图 (1 kHz)

在一些不同大小和形状的庭院式戏场所作现场实测结果表明^[12], G_m 值随至声源距离 r 的衰减如图 8 所示。衰减量大致在 0.25 dB/m 至 0.5 dB/m 范围。这也说明庭院的建筑条件不同对 G_m 值分布的影响不小。例如在上海三山会馆内, 利用庭院两侧双

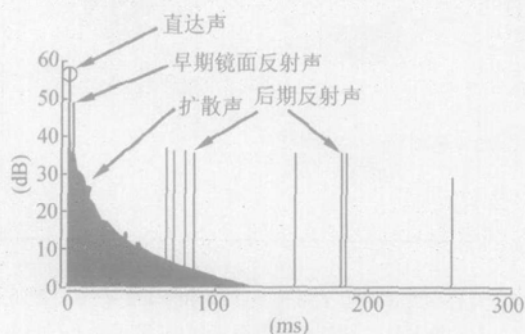


图 6 Epidauros 露天剧场内的回声图^[13]

层厢房的落地长窗, 关闭时庭院宽度为 11.7 m, 全部开启时庭院的有效宽度增为 17.7 m。这就影响到 G_m/r 的衰减量, 它们分别见图 9(a) 和 9(b) 所示。

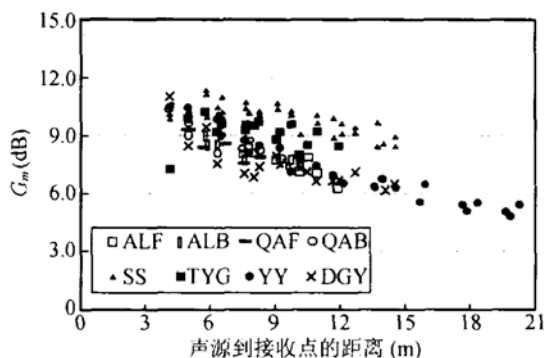


图 8 对八座庭院戏场的现场实测 G_m 值与至声源距离 r 的衰减量 (1 kHz)

ALF 宁波市安澜会馆前戏场, ALB 宁波市安澜会馆后戏场, QAF 宁波市安澜会馆前戏场, QAB 宁波市安澜会馆后戏场, SS 上海市三山会馆, TYG 宁波市天一阁, YY 上海市豫园, DGY 上海市青浦大观园

通过模拟计算, 还可了解到改变庭院周围墙高对高频 G 值分布的影响。从图 10(a) 可知, 在顶面全敞开情况下, 不同墙高 (选用 4.5 m, 8 m 和 12 m 三种高度) 对 G 值 (500 Hz, 1 kHz) 的影响很小。可是对混响时间的模拟计算结果表明, 墙高是有较明显影响的, 见图 10(b)。

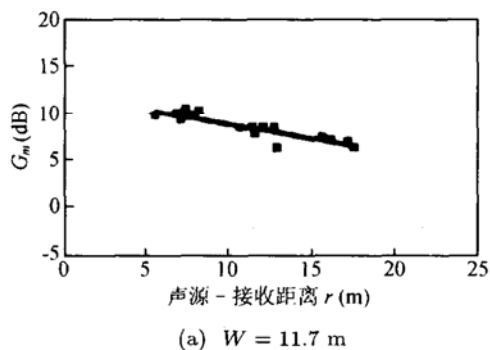
作为庭院式戏场, 明晰度 $C_{80}(\text{dB})$ 也是一个重要音质参量。考虑到庭院内混响声较弱 (经典混响时间是不能确切反映的), 只要早期声能足够强, 明晰度

就好。所以评价 C_{80} 必须与 G 结合, 也就是说当 G 值满足要求的情况下, 争取高 C_{80} 值才有实际意义。

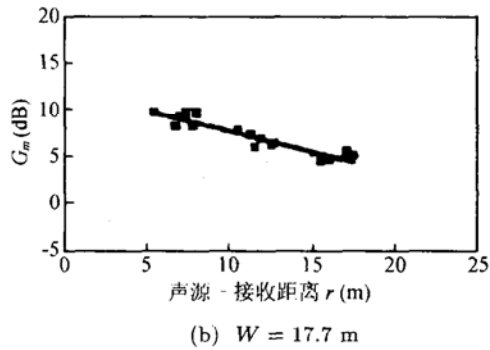
3 顶部敞开面积对声场的影响

以图 4 所示尺寸的空间而言, 它的顶面占到全部表面积的 34%。它比之两面侧墙 (占 19%) 和后墙 (占 6%) 的总和还大许多。因此如果仅仅把侧墙或后墙敞开, 对声场影响就小一些。使我们想起美国 Tanglewood 音乐棚^[16] 正是这样三面敞开的 (不是直到顶棚高度的全部敞开) 大厅, 它们只占全厅总表面积较小比例 (估计不足 7%) (大厅容积 42,500 m³, 容座 5200), 因此并未对全厅音质引起明显影响, 满场中频 1000 Hz 混响时间仍达到 1.7 s。此外, 同样开敞面积, 亦因在空间中所处部位不同而对音质有不同影响。

又如在敞开顶面的庭院中, 在声源上空设置一个小面积的顶棚, 其作用又将如何。仍以图 4 所示空间为例, 当顶面敞开情况下, 在声源上空与 4.5 m 墙同高处设置一个 8 m×8 m 的舞台小顶。通过模拟计算可知, 这个虽只占顶面积的 16%, 但对前区 G 值有明显提高 (见图 11)。如将该小顶移到后区上空, 对全区强度提高作用就不及布置在声源上空那样大, 祇是对后区有些帮助 (见图 12)。由此可见, 传统戏场舞台上设置亭式小顶, 对加强庭院全场声音起一定作用。



(a) $W = 11.7 \text{ m}$



(b) $W = 17.7 \text{ m}$

图 9 上海三山会馆庭院内, 以二层厢房的落地长窗开和关来改变庭院宽度 W 时, 实测的 G_m/r 衰减图。

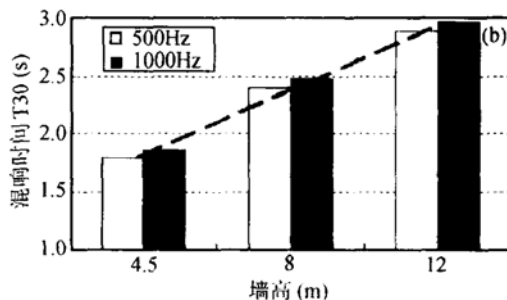
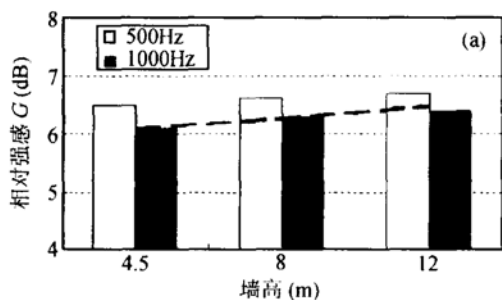


图 10 顶部敞开空间内, 不同墙高对 (a) G 值 (dB) 和 (b) $T_{30}(\text{s})$ 的影响 (500 Hz, 1 kHz)

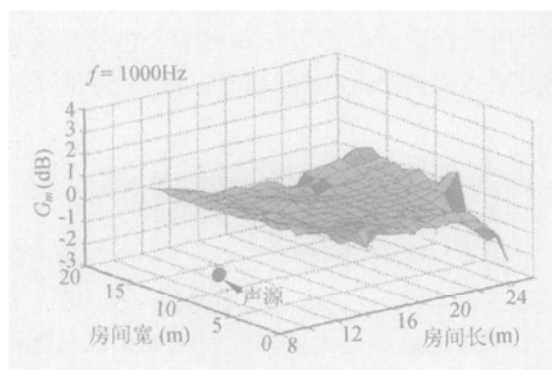


图 11 在庭院内舞台上空, 设置 8 m×8 m 小顶后的 G_m 值分布 (1 kHz)

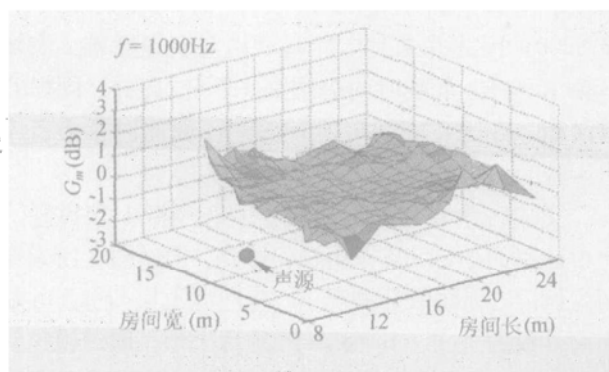


图 12 8 m×8 m 小顶移至庭院后区上空时的 G_m 值分布 (1 kHz)

4 结论和讨论

顶面敞开的庭院空间内的声场不同于经典室内声学所考虑的规律。一般来说, 大量射向顶面的声波全部散逸后, 在混响过程中缺失了许许多多来自顶面的反射声, 既使声场极不扩散, 也改变了反射声序列的精细结构, 致使虽具有与封闭房间相同混响时间的庭院空间中, 其混响感会明显不同。故一个仅仅反映声能衰减率的经典混响时间参量, 将不宜作为庭院空间的主要音质指标。这里更应强调使用 EDT 作为表征混响的参量为宜。

强度指数 (或称相对强感) G 表征接收到的声能强弱, 对于一个很少混响的无顶空间来说, 将成为更重要音质参量。故考察改变庭院界面条件后的声场变化, 以及敞开面积和所在部位对音质有不同程度的影响等, 也应从 G 值来考量。在此情况下, 由早、后期声能比所决定的清晰度指数 C_{80} , 在很大程度上取决于 G 值。也就是说, 庭院中相对强感高了, 清晰度也就基本上有满意的效果, 但在封闭空间内两者关系没有那么简单。

致谢

本文中的大量模拟计算工作是由张晓岚和杜铭秋两位完成的, 莫方朔博士也提供了一些帮助, 作者对他 (她) 们的辛勤工作深表谢意。

参 考 文 献

- 1 MAA D Y. The flutter echoes. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1941; 13(2): 170—178
- 2 Ko N W N, Yang C P. Reverberation time in a high-rise city. *J. Sound & Vib.*, 1978; 56(3): 459—461
- 3 Steennackers P, Myncke H, Cops A. Reverberation in town-streets. *Acustica*, 1978; 40: 115—119
- 4 Redmore T L. A theoretical analysis and experimental study of the behavior of sound in corridors. *Appl. Acoust.*, 1982; 15: 161—170
- 5 Kang J. The unsuitability of the classic room acoustical theory in long enclosures. *Arch. Sc. Review*, 1996; 39: 89—94
- 6 Kang J. Acoustics of long spaces, theory and design practice. Thomas Telford Ltd., 2002
- 7 Barron M. Auditorium Acoustics and architectural design. 1993, E & FN Spon., 247
- 8 Atal B S, Schroeder M R, Sessler G M. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. 5th International Congress on Acoustics, Lieger, 1965: G32
- 9 Jordon V L. Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1970; 47: 408
- 10 Hsu Y K, Chiang W H, Wang J Q. Acoustical measurements of courtyard-type traditional Chinese theater in East China. Audio Eng. Soc. Conference Paper, Presented at the 21st Conference, 2002, St. Petersburg, Russia.
- 11 Wang J Q. A primary study of the acoustics of Chinese traditional theatrical buildings. 声学技术 (英文版), 2003; 22: 2—5
- 12 薛林平, 王季卿. 江南八座传统庭院式戏场的音质测量和分析. 第九届全国建筑物理学术会议论文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 383—386
- 13 Vassilantonopoulos S L, Mourjopoulos J N. A study of ancient Greek and Roman theater Acoustics. *Acta Acustica / Acustica*, 2003; 89: 123—136
- 14 Daniele A, Gullo M et al. A study of the acoustic qualities of the ancient theatre in Segesta. In: Proc. ICA 2004, Japan, 2004; 3: 2349—2352
- 15 Gade A C, Lisa M et al. Roman Theatre acoustics: Comparison of acoustic measurement and simulation results from the Aspendos Theatre, Turkey. In: Proc. ICA 2004, 2004; 4: 2953—2956
- 16 Beranek L L. 音乐厅和歌剧院 (中译本). 上海: 同济大学出版社, 2002: 105—109