

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.01.004

编者按:

近些年, 古建声学在国内外发展迅速, 其研究方法已然不囿于经典声学方法, 而是从建筑学、计算机、统计学等其他学科汲取养分, 形成相对繁杂而又独特的方法体系。本文康健院士系统梳理了这些方法, 并针对声学实测、仿真分析和声景观三种经典方法进行详述, 为大家呈现出完整而清晰的方法图谱。对此, 康健院士指出: 未来学科的挑战在于, 各种方法虽视角丰富, 但其研究结论的内在逻辑如何实现辩证统一? 这仍需在学科未来的持续发展和互鉴中得到解决。

古建声学研究方法

康健^{1,2}

1. 伦敦大学学院 巴特莱特建筑学院, 伦敦 WC1H 0NN

2. 天津大学 建筑学院, 天津 300072

摘要: 古建声学作为建筑声学与文化遗产研究的交叉领域, 是近些年建筑声学领域兴起的重要一支, 正逐步从单一物理参量分析向主客观融合的多维研究范式演进。本文系统梳理了古建筑声学研究方法的技术谱系, 从现场实测、实验室重构、数字仿真及跨学科方法四个角度进行梳理, 并通过沈阳故宫、古希腊剧场、中国古戏台及汉传佛寺等典型案例, 对现场实测、声学仿真与声景观等经典研究方法进行论述。

关键词: 建筑声学; 古建声学; 声景观

中图分类号: TU112

文献标志码: A

文章编号: 2097-1486(2025)01-0036-06

A systematic review of the research methods in ancient architectural acoustics

KANG Jian^{1,2}

1. Bartlett School of Architecture, University College London, London WC1H 0NN, UK

2. School of Architecture, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: As an interdisciplinary research field of architectural acoustics and cultural heritage, ancient architectural acoustics has emerged as a significant branch of architectural acoustics in recent years. This field is progressively evolving from singular physical parameter analysis toward a multidimensional research paradigm integrating subjective and objective perspectives. This paper systematically reviews the technical genealogy of research methodologies in ancient architectural acoustics from four dimensions, i. e. in situ measurement, laboratory reconstruction, digital simulation, and interdisciplinary approaches. Through case studies of Shenyang Imperial Palace, Ancient Greek Theatres, traditional Chinese opera stages, and Han Buddhist temples, the paper elaborates on such classical research methods as in situ measurement, acoustic simulation, and soundscape analysis, etc.

Key words: architectural acoustics; ancient architectural acoustics; soundscape

0 引言

在建筑声学学科演进脉络中, 自赛宾 (Wallace

Clement Sabine) 提出混响时间理论以来, 声环境量化研究范式逐步确立。历经一个多世纪的理论积淀与技术迭代, 现代声学仿真算法与测量工具得到

长足发展,丰富与改善了古建声学研究的方法和流程。当代学界在方法论层面呈现出客观与主观并举的局面:客观上依托高精度声学测量系统与声学仿真平台实现对声场特征参量的多层次解析,主观上则融合心理声学评价与统计学模型,构建声景感知与空间形态的关联体系。此类研究不仅为解构古代建筑的声学智慧提供了技术路径,更通过跨文化的比较研究,重新诠释了传统营建技艺中声学环境与人文精神的耦合机制。

本文结合笔者过去参与的研究案例,系统梳理国内外古建声学研究方法,结合声学实测、仿真建模与统计分析,旨在构建兼具历史深度与技术精度的声学遗产研究范式,为文化遗产保护与历史空间声景复现提供理论框架与实践参照。

1 研究方法梳理

国内外古建筑的声学研究跨领域众多,方法自成体系。整体而言可分为四个技术维度,即现场实测、实验室重构、数字仿真及其他跨学科方法。

现场实测包括声学参数与物理尺寸两个方面,前者测量符合国际标准 ISO3382-1 的诸多声学指标,而后者则注重测量古建筑的三维数据,即建筑本体和各细部的长、宽和高,常常使用无人机与相机进行拍照,辅以激光扫描仪进行三维建模。实验室重构包括缩尺模型与材料声学特性分析两方面,前者使用 1:n 的比例制作模型并进行声学实验,根据实验结果和 n:1 的频率缩放因子推知原建筑的声场特性,对于更复杂的声学构件可进行 3D 打印,而后者则使用阻抗管法和混响室法测量材料的声阻抗和吸声系数,其结果可用于声学仿真。数字仿真技术则包含波动声学、几何声学和其他新型算法三方面。波动声学算法主要包括有限元法、时域有限差分法和边界元法等,可解决封闭小空间中的干涉现象与低频模态密度高的问题。几何声学算法主要包括声线追踪法和虚声源法,而新型算法则以基于神经网络和传统声学方法的深度学习声场预测法为代表。其他跨学科方法包括人文声学和保护工程两方面。人文声学研究可根据声景进行统计研究,还可根据历史声景观的文献语料进行分析。保护工程与实际往往结合紧密,在古建保护中实现非破坏性加固的声学评估。

综之,当前古建声学的研究方法呈现三个特征:测量与仿真精度提升、多物理场耦合以及虚实结合。研究方法不仅限于声学,而且与各领域研究方法相互交织,共同解决新的问题。

2 典型方法与案例

上文所述方法中,声学实测、仿真与声景观应用较为普遍,以下将从研究方法和典型案例两个方面对其进行具体分析。

2.1 声学实测

在声学实测方面,国际标准 ISO3382-1 提出了一些目前学界公认的声学指标,如声压级 SPL(Sound Pressure Level)、混响时间 RT(Reverberation Time)、早期衰变时间 EDT(Early Decay Time)、重心时间 Ts(Center Time)、语言清晰度 D50(Definition)、音乐明晰度 C80(Clarity)、语言传输指数 STI(Speech Transmission Index)、强度指数 G(Sound Strength)、侧向声能因子 LF(Lateral Energy Fraction)、演讲回声系数 Es(Speech Echo)与音乐回声系数 Em(Music Echo)、语言清晰度 STI(Speech Transmission Index)、舞台支持度 STI(Stage Support Index)等。众多企业基于此研发了各种测声设备,有的甚至允许自定义声学指标。

譬如,笔者在参与对沈阳故宫博物院的三栋大殿进行声学测量时,使用了 12 面体声源、声音功率放大器、四通道噪声振动分析仪、实时信号分析仪等仪器测得大殿的混响时间^[1]。何杰在对中国古戏台进行实地调研时,使用十二面体无指向声源和即时音频分析仪测定声压级,使用发令枪、麦克风及安装有声学分析软件和声学测量软件的便携式笔记本电脑测定早期衰变时间 EDT、混响时间 T30 和强度指数 G^[2]。

2.2 声学仿真

声学仿真方面,由于建筑一般尺寸较大,其波动性可忽略,因此几何声学方法在计算速度和精度两方面都比波动声学方法更能实现较好的均衡(对于家庭听音室等小房间的声学模拟,其效果不及波动声学方法)^①,基于此亦有一些企业研发出几何声学仿真,不仅可计算声学指标,输出声像图,有的还具有可听化音效的功能。仿真流程分为建立三维模型、导入几何声学仿真软件、设置各表面的吸声系数或扩散

① 需要指出,近些年为研究小尺寸建筑构件的声学问题,亦有使用基于有限元法的仿真软件进行研究的案例。有限元法的优点是基于波动声学,能兼顾声音的衍射、干涉现象,结果更为准确。如 Spyros 在 *The Use of Resonators in Ancient Greek Theatres* 中使用多物理场仿真软件 Comsol 对古希腊剧场的共鸣缸进行研究,无疑是拓展古建声学研究方法的典型案例。

系数、仿真声场四个部分。值得一提的是,对于过于复杂的建筑细部,为尽可能精确仿真且节省计算时间,往往会对模型进行简化。我们以古希腊和古罗马剧院、中国古戏台和汉传佛寺大雄宝殿的声景观为例分析。

2.2.1 古希腊与古罗马剧院

米诺斯文明时期(约公元前 2000—公元前 1500 年)与前埃斯库罗斯时期(约公元前 1500—公元前 600 年)的剧场分别是矩形和梯形,其形制尚未成熟(图1)。至公元前 5 世纪希腊古典时期,剧场建筑逐步确立以圆形表演区(orchestra)为核心、依托

自然地形构筑阶梯式观演区的范式——通过在山坡上开凿同心圆阶梯(后演化为木质长椅),结合石材与大理石构筑的永久性建筑,实现了声效与观演的双重优化(图2)。实际研究时,我们基于考古的尺寸数据,通过软件构建不同历史时期剧场的三维建模,运用声学仿真软件分析石头、木材、夯土等界面材料的吸声系数变化对声学指标(SPL、RT30 和 STI)的影响机制,并通过调整表面散射和吸声系数,揭示了剧院的材质构成对声能的衰减作用^[3]。结果表明:古希腊和罗马剧院在发展过程中,声能加强和混响增长方面改进明显。

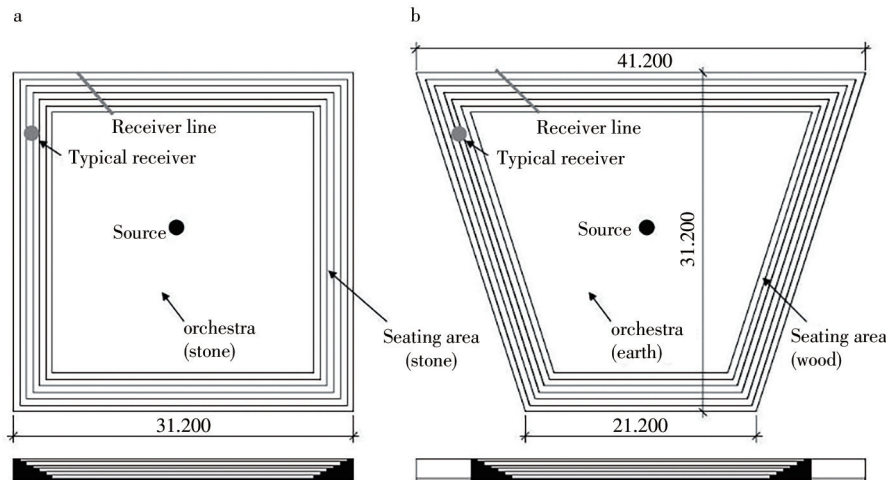


图1 米诺斯剧院与前埃斯库罗斯剧^[3]

Figure 1 Minoan theatre and pre-Aeschylean theatre^[3]

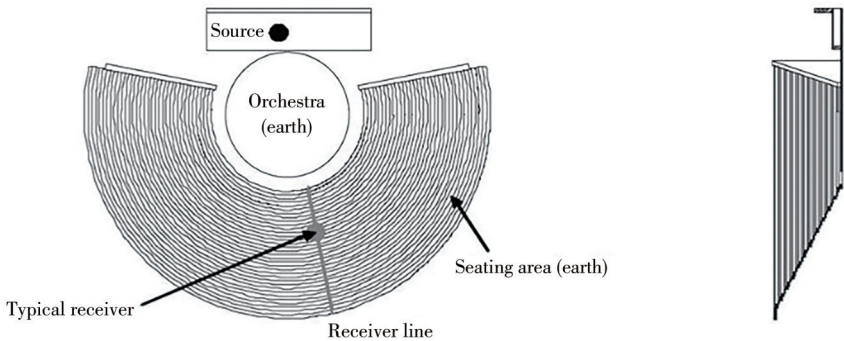


图2 古典希腊剧院^[3]

Figure 2 Classic Greek theatre^[3]

2.2.2 中国古戏台

中国古戏台形制结构具有显著的历时性演变特征,经历了由早期露台、乐台至四面观形制,再到大三面观、小三面观和一面观戏台的过程^[4],呈现出空间围合度和结构复杂度递增的趋势,晚期更发展出八字墙与设腔等声学技术。我们使用声学仿真软件,系统探讨了古戏台形状与剧场声场的关系。首

先,建立参数化模型,以面阔、进深为自变量,构建一面观、两面观和三面观的戏台模型;其次,为简化模型,将复杂坡顶统一简化为平顶结构,鉴于古戏台普遍存在的斗拱、藻井等复杂的扩散体构造,将屋顶内表面扩散系数设为70;再次,构建包含戏台的50 m×50 m×10 m的虚拟开放空间,设置空气界面吸声系数为99.99%以模拟露天声场条件;复次,为保证尺

寸为唯一变量,设定所有界面散射系数为0(即绝对光滑);最后,基于戏曲声学特征(演员的丹田发声导致高频能量集中),选取1 000 Hz作为中心测试频率,并排除非观演区的衍射区域进行声学参数分析^[5](图3)。

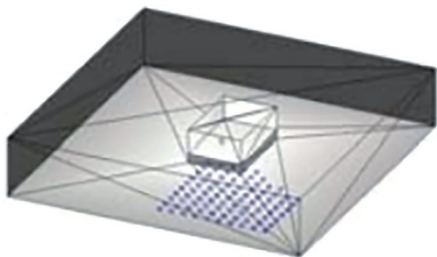


图3 古戏台声场仿真^[5]

Figure 3 Acoustic simulation of ancient theaters^[5]

研究表明,对于一面观戏台,戏台面阔主要影响LF、G和SPL,进深主要影响EDT、T15和T30,C80和D50,STI,G和SPL。对于前后式两面观戏台,面阔主要影响LF、G和SPL,进深主要影响EDT、T15,T30、C80、D50和STI,对于三面观戏台,面阔主要影响LF、C80、D50和STI,进深主要影响LF、C80、D50、STI、G和SPL。

2.2.3 汉传佛寺大雄宝殿

汉传佛寺大雄宝殿作为核心的宗教仪式空间,其声学环境对宗教仪轨的沉浸式体验具有重要影响。我们使用声学仿真软件对五台山显通寺大雄宝殿开展的声场特性研究,重点探究其织物材料和佛像对声场的影响。首先建立三维数字模型,对较为复杂的斗拱和屋顶等扩散体进行简化;其次通过材料数据库匹配传统织物(帷幔、幡旗)的吸声特性;最后设置多声源阵列模拟诵经声场分布,考虑到100~500 Hz的僧侣诵经声和中高频的佛教乐器,声源确保中频的平均值尽可能接近测量结果^[6](图4)。

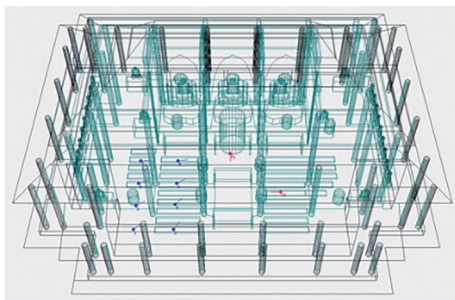


图4 显通寺大殿声学模型^[6]

Figure 4 Acoustic model for the main hall of Xiantong Temple^[6]

研究表明,当移除各种织物后,中频混响时间T30与中频早期衰减时间EDT分别增加32.3%和46.8%。屋顶形式对室内声场没有显著影响,声源指向性对T30没有影响,但对EDT和语言可懂度STI有影响,当僧侣面对面诵经时,STI达到最大值,改变声源位置对EDT和STI有适度影响。

2.3 声景观

在声景观领域,研究方法已从基础声学参量测量拓展至心理声学指标(如响度、尖锐度等)的量化分析。另外,我们也常使用声漫步(soundwalk)与声景制图法(soundscape mapping)得到声景全面的声音时空特征。研究通常借助统计软件进行因果推断与相关性分析。我们以拉萨汉传佛寺和重庆老君洞寺庙的声景观为例分析。

2.3.1 拉萨

在独特的宗教信仰体系、遗产保护政策和受限的全球化等因素共同作用下,拉萨这座城市成为极具文化特质的文化遗产。除物质文化遗产外,其声环境也是一种亟须保护的非物质文化遗产,亟待建立系统性保护机制。我们在拉萨选取了五条路线,涵盖巴科尔街、本地商业街、北京东路和大昭寺广场。使用声级计以10 s为间隔连续记录声音(麦克风覆盖有防风罩),同时使用全景录像机进行记录,于每日早上、中午和晚上三个时段按顺时针方向漫步。结果显示,诵经声、音乐声、交通噪声、鸟鸣声、脚步声、哨声等声源在不同时段呈现出高度独特的空间和时间分布,部分声音极具历史文化与地方特色,如朝圣者的叩拜声、鼓声、转经轮的声音和诵经声^[7](图5)。

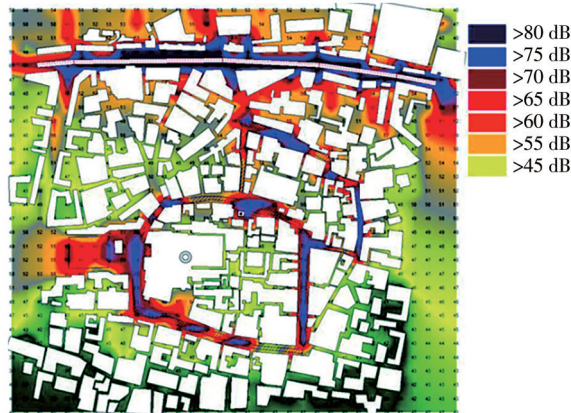


图5 中午时段的声图^[7]

Figure 5 Midday acoustic map^[7]

值得一提的是,为检验不同时段结果间的显著差异情况,研究采用Duncan的多重范围检验的最小显著差异法,结果显示部分区域在一天的固定时段

声音相似。另外,研究基于环境噪声模拟软件绘制拉萨历史城市中心不同时期的声图,模拟声环境和声标的空间与时间变化,辅助识别声环境较差的区域,为制定保护策略提供支持。

2.3.2 汉传佛寺

汉传佛寺中的声音在营造佛教信徒的宗教环境中发挥了关键作用。我们曾对五台山的显通寺、千山的龙泉寺、沈阳的慈恩寺和开封的相国寺进行声音和偏好研究,在寺庙开放前后的早上和晚上,我们使用高保真录音机和专用麦克风录制典型汉传佛寺的各种声音,每种声音录制10~60 s,随后使用声学软件和统计软件进行分析,前者可以分析声音的物理和心理声学参数,物理参数包括平均和最大声级,心理声学参数包括响度、尖锐度、粗糙度和波动强度^[8]。

研究发现,与佛教相关的人造声音在声环境中占主导地位,人们更偏爱自然声,此外,年龄和宗教信仰也对钟声偏好有显著影响。在主观评价方面,我们在4座寺庙分发了720份最终问卷,回收685份,使用统计软件的可靠性分析功能测试问卷的信度和效度。经计算Cronbach's α 系数为0.708,高于0.7,可以接受;KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)值为0.741,高于0.7,可进行因子分析;提取的四个公共因子的贡献积累率为51.6%,超过50%,结果可接受;Bartlett的球形检验值 p 小于0.001,结构效度的要求得到满足。通过统计学方法,保证了结果的客观准确。

2.3.3 重庆老君洞

我们在老君洞及周边道路选四个点,连续测量了24 h声压级,并在重庆大学招募了26名受试者(12男14女)进行声漫步,在每个测点停留5 min记录声压级 LA_{eq} ,并进行录音;选11名道士(5男6女)深度访谈,获取其关于声音的感知、期望及整体满意度的看法,并用扎根理论对结果进行定性分析。用统计软件进行Kolmogorov-Smirnov检验和Spearman检验,分别分析每个参数的正态分布及声景/视觉要素、声景/视觉景观舒适度与 LA_{eq} ,5 min之间的相关性,并运用回归分析深入探究对声景舒适度的影响机制^[9]。

研究表明,普通人对声景的评价更受声景环境的多样性、自然性及视听和谐的影响,而道士则更受道教信仰影响,随着道观视觉景观中自然元素比例逐渐提高,道士和普通人的声学舒适度随鸟鸣声增加而显著提高,然而,随着道教元素比例增加,道教音乐仅显著提高了普通人的声学舒适度和心率,而未对道士产生影响。

3 结语

古建声学作为多学科交叉融合的研究领域,其学科架构呈现出双重属性:在学科归属层面,它既是建筑声学的重要分支,又通过整合建筑学、历史学、考古学、人类学及材料科学等多元方法论体系,形成了独特的跨学科研究范式。这种交叉既引发了知识革新,同时也产生了方法论整合的新挑战,具体体现为声学量化分析、历史文献阐释与空间文化认同等多重解释逻辑的辩证统一。面对古建声学这个物质性与非物质性要素相互交织的复杂系统,现有方法在历史声场重建、声景感知机制解析、古建声场与演员间的声反馈与声补偿机制等方面仍存在理论盲区,这些问题仍需未来在各学科的互鉴中得到解决。

参考文献:

- [1] 张东旭,刘大平,康健,等. 沈阳故宫三栋殿堂室内混响时间测试与分析[J]. 建筑科学, 2014, 30(2): 66-71+82. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2014.02.013.
- [2] 何杰. 中国戏曲剧场建筑及音质研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 22.
- [3] CHOURMOUZIADOU K, KANG J. Acoustic evolution of ancient Greek and Roman theatres[J]. *Applied Acoustics*, 2008, 69(6): 514-529. DOI:10.1016/j.apacoust.2006.12.009.
- [4] 杨阳, 巩媛. 古戏台形制结构演变的动因[J]. 东华大学学报(社会科学版), 2022, 22(3): 92-107. DOI:10.19883/j.1009-9034.2022.0177.
- [5] HE J, KANG J. The Acoustic Research on Architectural Shape of the Stage of Traditional Chinese Theatres [C]//Auditorium Acoustics 2011, Institute of Acoustics, 2023.
- [6] ZHANG D, LAI R, ZHANG M, *et al.* Effects of spatial elements and sound sources on sound field in Main Hall of Chinese Buddhist temple[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2020, 147(3): 1516-1530. DOI:10.1121/10.0000758.
- [7] HUANG L, KANG J. The sound environment and soundscape preservation in historic city centres—the case study of Lhasa[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2015, 42(4): 652-674. DOI:10.1068/b130073p.
- [8] ZHANG D, ZHANG M, LIU D, *et al.* Sounds and sound preferences in Han Buddhist temples[J]. *Building and Environment*, 2018, 142: 58-69. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.06.012.
- [9] XIE H, PENG Z, KANG J, *et al.* Soundscape evalua-

tion outside a Taoist temple: a case study of Laojundong temple in Chongqing, China [J]. *International journal*

of environmental research and public health, 2022, 19(8): 4571. DOI:10.3390/ijerph19084571.



康健,清华大学学士及硕士,剑桥大学博士,德国建筑物理所洪堡学者。中国工程院外籍院士,英国皇家工程院院士,欧洲科学院院士,伦敦大学学院(UCL)巴特莱特建筑学部教授,天津大学建筑学院名誉院长,国际声学及振动学会主席,欧洲声学学会噪声委员会主席,欧洲声景联盟主席。获欧洲杰出资深科学家基金奖、瑞利奖等荣誉。主持80余项基金课题,参与90余项全球工程设计,发表学术论文800余篇/部。

(责任编辑:彭 鹏)