



燕翔

清华大学建筑声学博士，现任清华大学建筑学院建筑物理实验室主任，副教授。长期从事厅堂音质、噪声控制、声学实验检测、计算机模拟等科研工作。近年主要参与的声学工程设计和实验研究项目有：国家大剧院、2008北京奥运场馆（国家游泳中心、老山自行车馆、国家体育馆等）、洛阳体育中心、大庆文化中心、福建剧院、洛阳剧院、江西大剧院、北京南火车站、广州新火车站、西气东输金坛储气库噪声控制等。主持翻译了《建筑声学设计指南》（美），编制修订了《厅堂混响时间测量规范》、《厅堂音质比例模型测量规范》等国家标准，并发表了《脉冲反响积分法测量混响时间》等多篇学术论文。

剧场建筑声学的发展

The Developments of Architectural Acoustics in Theaters

撰文 燕翔 清华大学建筑学院

摘要 从古代剧场的露天表演，到现代大剧院的舞台演出，建筑声学对于听音效果至关重要。

以剧场历史为脉络，介绍中外建筑声学的发展状况。

关键词 剧场 音乐厅 建筑声学

1 古代剧场

声学环境是古代表演形式演变发展的重要影响因素之一。非洲土著音乐多在广阔的野外演奏，空旷的声场条件需要他们采用节奏感强的乐器和技法来感染观众。欧洲古典音乐悠扬而舒缓，这与在剧场房间内演出有着密切的关系。中国古代表演多在高出地面的戏台上进行，多有顶和后墙，环境介于开敞室外与封闭室内之间，由此造就了中国戏曲的节奏感也介于非洲和欧洲之间。古代演出者的音量、语调、节奏必须迎合演出场所的声学特性，才能有效地向观众传递声音信息，进而无形地征服观众的情绪。在长期的实践中，古人顺势而为，创造各种与表演场地般配的讲法、唱法和演奏方法。

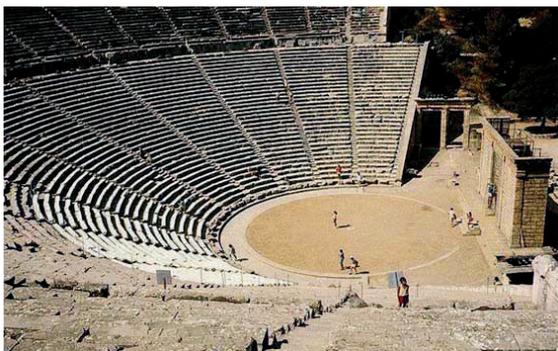
1.1 古罗马露天剧场

埃皮达鲁斯露天剧场（Theater at Epidaurus）建于公元前

300年前的古希腊时期，后经古罗马人改造，观众可达17 000人。西班牙梅里达露天剧场（Amphitheatre of Merida）建于公元前25年，可容纳观众3 000人。古代没有扩声器，建造者利用升起很大的半圆形使观众尽量靠近舞台，提高听闻效果，并利用舞台上和两侧的建筑墙面向观众席反射声音，同时，演员还使用夸张的面具，像喇叭一样将声音聚拢辐射出去。坐在埃皮达鲁斯剧场最后一排，可以毫不费力地听清舞台上的声音，对于如此之大的剧场来说，不要说2 000多年前，即使现今，设计实现同等优良的建筑声学效果也是不易的。

1.2 欧洲古剧场

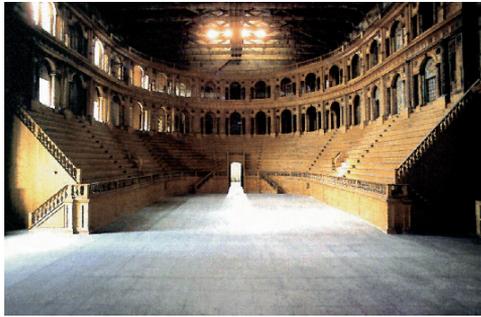
古代欧洲兴建了众多剧场，主要用于演出、集会或宗教活动。由于建筑石材在室内反射声音强烈，这些演出场所往往混响较长，



希腊埃皮达鲁斯露天剧场（www.kpcn.org）



西班牙梅里达露天剧场（摄影：燕翔）



意大利帕尔马市的法内斯剧院 (turismo.parma.it)



英国伦敦莎士比亚圆形剧场模型 (摄影: 燕翔)

讲话声音听不清楚,但演奏时音质浑厚、圆润。当时作曲家们都要尽力适应长混响效果。巴赫的管风琴音乐(18世纪上半叶)是专门为德国莱比锡(Leipzig)的托马斯教堂(Thomas)所写的。以海德尔、莫扎特、贝多芬为代表的巴洛克音乐和古典音乐(1600~1820年),是专门为如法国里昂城市大厅等贵族的舞厅而写的。

文艺复兴时期,诗歌与戏剧异常繁荣。像莎士比亚话剧,有很多对白和自白,为了能够让观众听清,需要降低剧场的混响以保证语言的清晰度。伦敦的莎士比亚圆形剧场(Globe Theatre)和意大利帕尔马市(Parma)的法内斯剧院(Teatro Farnese)都是莎士比亚戏剧演出场的知名场所,前者建于1599年,有1300个环形座位另加500个场地中央站位,后者建于1618年,2500座。法内斯剧院的侧墙上有很多开洞,莎士比亚圆形剧场没有顶棚,这些开口起到了吸声的作用,降低了声音反射的强度,提高了演出的音效。现在尚没有证据表明这些剧院曾有过声学方面的专门考量,也许只是“无心插柳”,可能那些听不清或效果不佳的剧院早就被历史淘汰了。

1.3 中国古戏台

中国古代的室内表演多为王公贵族服务,观众少,距离近,建筑声学的问题不突出,唐五代名画“韩熙载夜宴图”所绘即如此。中国古代也有很多戏台,其观场大都是一块平地,观众站立观看,来去自由,还可边看边聊天,甚至允许商贩穿插期间做生意。这种戏台视听条件很粗糙。山西翼城乔泽庙元代戏台是现存最早的古戏台,再到了清代,颐和园德和园大戏楼为慈禧太后一人独享,除了

摆阔摆派的豪华程度另人咋舌外,音效几无改观。据传,有的戏台下空间曾置入开口大缸,以求提高演出的共鸣效果,但是,研究表明,置缸对建筑声学的帮助微乎其微,其目的可能是存水消防,至于帮助提高声学效果不过是以讹传讹罢了。

2 西方近现代剧场

西方较早进行了建筑声学从无到有、从小到大的研究。声音本身虽是物理问题,而建筑声学研究的目的是解决怎样使人听到的声音更美,“以人为本”的思想理念造就了剧场建筑声学的发展。近100年来,西方大量兴建剧场,建筑声学理论一方面起到保驾护航的作用,另一方面也对剧场建筑形式的演变产生了极大的影响。

2.1 19世纪——音质靠运气

19世纪人们对建筑声学知之甚少,很多剧院的声音效果都不大理想。然而,正是这一时期却出现了一批以音质效果著称的剧场,如奥地利维也纳歌剧院(Wiener Staatsoper, 1700座, 1861年)、维也纳金色大厅(Wiener Musikverein, 2000座, 1870年)、法国巴黎歌剧院(Palais Garnier, 2200座, 1875年)、荷兰阿姆斯特丹皇家音乐厅(Concertgebouw, 2100座, 1888年)等,这些厅堂的声音或圆润悠扬,或沁人心脾,或撼人心灵,已经成为世界最优秀的表演者和最发烧的听众们心目中的表演圣地。

巴黎歌剧院的设计者查尔斯·加尼叶(Charles Garnier, 1825~1898年)的评论反映了古代建筑师对声学的认识,他说:“我必须声明我没有采用任何原则,没有任何声学理论,其成功或失败,我听天由命。”



唐五代名画“韩熙载夜宴图”(baike.baidu.com)



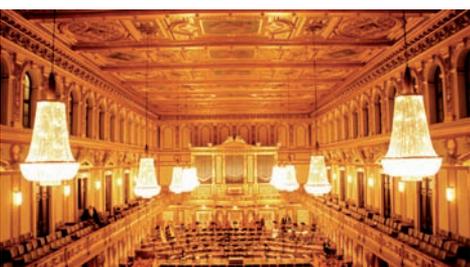
山西翼城乔泽庙元代戏台(摄影:罗德胤)



北京颐和园德和园大戏楼(摄影:罗德胤)



奥地利维也纳歌剧院(摄影:燕翔)



奥地利维也纳金色大厅(摄影:燕翔)



法国巴黎歌剧院(摄影:燕翔)



荷兰阿姆斯特丹皇家音乐厅(摄影:燕翔)



建筑声学创始人：赛宾
(美国ACENTECH公司提供)



美国哈佛大学的弗格艺术博物馆
(美国ACENTECH公司提供)



美国波士顿交响音乐厅 (摄影：燕翔)

2.2 20世纪初期——建筑声学诞生

建筑声学真正诞生于19世纪末、20世纪初。1895年，美国波士顿哈佛大学的弗格艺术博物馆(Fogg Art Museum)讲演厅落成，因墙面为硬质石材，回音很大而不能使用。哈佛大学校长埃利奥特(Charles W. Eliot, 1834~1926年)委托物理学系27岁的助教W.C. 赛宾解决这一问题。赛宾在将近40个不同容积的房子里进行了实验研究，提出了混响时间和吸声的概念，发现长混响是影响语言清晰度的原因，总结出混响时间与房间容积成正比、与吸声量成反比的重要结论。赛宾利用座椅软垫的吸声作用，较好地改善了该演讲厅的音质，并因此而声名鹊起。当时，波士顿正在新建音乐厅，业主出于保证声学效果的考虑，邀请了赛宾进行建筑声学设计。波士顿交响音乐厅(Symphony Hall, Boston, 2600座)于1900年建成，音效取得了巨大成功，与维也纳金色大厅、阿姆斯特丹皇家音乐厅并列被认为是具有世界顶级音质的三大厅堂，至今尚无后来者能超越。

建筑声学解释了这些厅堂音质玄妙之所在，主要有5点：一是厚重的隔声墙体保证了室内的安静度，二是狭长的鞋盒形体型有利于侧向声音反射，三是合理的每座容积率满足了人均声能量，四是合理的容积和吸声量保证了最佳混响时间，五是巴洛克式凸凹有致的内部装饰使声音均匀散射于整个大厅内。当然，除此主要因素外，还有很多声学细节也是非常重要的，例如装修表面的细节处理、舞台地板用材、墙面装饰用材等，综合造就了优美的音质。

20世纪初期，按赛宾理论建造的鞋盒形剧场或近似的马蹄平面剧场都可取得较好的声学效果，鞋盒形也成了剧场建筑设计的主流。

2.3 20世纪中期——探究与实践

20世纪中期，剧场建筑设计的个性化推动了建筑声学研究，并在实践运用中成果显著。

德国柏林交响音乐厅(Berliner Philharmonie, 2400座, 1963年)，建筑外观像金色的皇冠，平面为类圆多边形。建筑师期望打破古典鞋盒形的呆板，创造出更活泼、新颖的形式，并且容纳更多观众。在声学家配合下，该厅观众席布置采用了高底错落的葡萄园式，将观众分成小区块，每个小块的侧墙能够为临近区块提供声音反射，从而达到与鞋盒形殊途同归的音效。这种像梯田一样的设计在剧场史上还是第一次，不但声学效果是良好的，而且室内建筑形式也是划时代的，建筑与声学相得益彰，艺术与科学完美融合。

悉尼歌剧院(Sydney Opera House)1959年始建，1973年完工，内有一座2700座的音乐厅和一座1500座的歌剧院。其建筑造型横空出世之时，即震惊了整个世界。但是，贝壳状外形给当时的建筑声学专家们提出了严峻的考验，侧墙高大且倾斜并略带圆弧，这种室内的音效能行吗？“祸患积于忽微，智用藏于所逆。”巨大的挑战也孕育了巨大的机遇。建筑声学中的侧向声能比理论即诞生于该时该刻的澳大利亚，通过建筑墙体角度设计，合理控制来自两侧墙面反射声与来自头顶反射声能量分布和声音时间延迟的比例，利用双耳效应，获得令人满意的音效。悉尼歌剧院不但是表现主义的划时代作品，也是建筑声学侧向声能比理论的划时代经典案例。悉尼歌剧院堪称建筑史的一段神话，它是世界上唯一一个建筑师尚在时即被评为世界文化遗产的建筑，也是唯一一个城市因建筑而扬名世界的范例。

实践也不总都是一帆风顺。1960年代，美国四十多岁的白瑞纳克(Beranek, 1914~)在世界上已是鼎鼎有名的声学专家了，他撰写了巨著《音乐、声学和建筑》，将赛宾开创的建筑声学发展到“广泛实用”的阶段。那时，他接受委托，为纽约林肯表演艺术中心(Lincoln Center, 相当于美国国家大剧院)中的爱乐



德国柏林交响音乐厅 (摄影：燕翔)



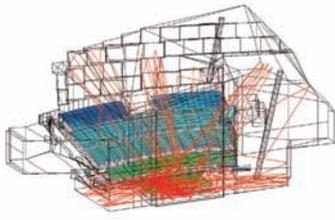
澳大利亚悉尼歌剧院 (摄影：燕翔)



美国纽约林肯中心(右侧为爱乐厅音乐厅, 现名费雪尔厅) (摄影：燕翔)



缩尺模型模拟技术（徐亚英提供）



计算机模拟技术（王鹏提供）

(Philharmonic) 音乐厅进行声学设计。为此，他曾奔赴世界各地 69 个著名厅堂进行大量声学研究。然而，恰恰在这一“登峰造极”之时，“严格遵照声学理论设计的”林肯爱乐音乐厅竟然出现了“低频缺乏问题”，以至于在 1962 年 12 月 23 日特意为迎接圣诞新年的首演以演出中断而失败告终。后经数十年的研究，人们才发现，这是因浮云反射板低频反射不足凸显了座椅低谷效应造成的。此事被誉为“建筑声学史上伟大的失败”。道无止境，建筑声学亦无止境。

2.4 20世纪90年代——计算机辅助如虎添翼

20 世纪末期计算机的飞跃发展对建筑声学的影响巨大。虽然，采用声线束法和镜像虚声源法可以较好地模拟和预估剧场的声学效果，但是，在没有高速计算机的时代，数以万计的声线和虚声源根本是无法实现追踪计算的。

有了高速计算机，不但计算问题迎刃而解，而且，以计算机为手段的声学测量技术也大大发展起来，使人们能够更加深入细致地预测剧场中的声音问题。

3 中国近现代剧场

3.1 清末民初——大众和民主的作用

19 世纪有两个建于室内的本土戏台，一个是北京的湖广会馆，一个天津的广东会馆。这两个会馆碰巧室内音质都很好，演讲、京剧、话剧等效果很不错，至今仍在演出使用。究其原因，一是房间容积适中，二是室内各界面多为木夹板装修，后空腔大，低频共振吸声好。另外戏台上方的台顶板具有一定舞台声反射作用。1912 年，孙中山在湖广会馆主持召开过国民党成立大会。“五四”时期，广

东会馆也经常举行群众集会，梅兰芳、杨小楼等人都曾在此演出。可以想到，如果剧场音效不佳，“革命党”就不会选择这里进行大集会和，也许就不能保存至今了。

20 世纪初叶上海大新舞台（3 436 座，后改名天蟾剧院，现名逸夫舞台）和南通更俗剧场（1 456 座，解放后曾改名人民剧场），是民国时期剧场的代表，分别由杨小楼和张謇等人邀请外国设计师仿效西欧剧场，结合本土戏剧演出而建。这些剧场多处于上海周边，属当时经济发达地区，主要建造目的是获取票房，手段是娱乐民众。想比之下，传统古戏台场地小，容纳不下几千名观众，从经济效益角度而言，西洋剧场的优势更有利。不过，这一时期剧场的声学效果因无声学专家配合，实际上都不尽如人意，解放后大都因音效问题改造过。

3.2 延安时期——因陋就简

延安时期的剧场（说“礼堂”更确切），产生于特殊历史时期，其政治文化观念至今影响巨大。杨家岭中央大礼堂、陕甘宁边区参议会礼堂等都是就地取材、军民自建的。建成后，室内回声很大，开会无法使用，后来采用了当地常用的炕毡（铺在炕上的棉毡或毛毡）作为吸声材料贴上去，虽然丑陋，但问题得以解决。

政治需要和艰苦条件促成了礼堂多功能使用的要求。会议和演出是两大重要功能，还常用作讲学、舞会、餐会、展览等，这种多功能礼堂模式至今仍有沿用。就声学而言，多功能的结果造成每个功能的效果都不是最佳的；另外，就严肃性而言，在政治场所内进行娱乐演出，在中国古代和西方社会都是很忌讳的。特殊的历史时代造就了这种特殊的“多功能”礼堂，并成为当代“多功能”剧场的根源。今天，我们在政府的大会堂里观看表演或在某市的大剧院里召开政协会议，已经习以为常，并不是多用使用就是合理的，而是因为一直这样做，也就顺理成章了。

3.3 解放初期——对建筑声学的重视

解放后，社会主义新中国彻底改变了上世纪二三十年代商业化剧场的萌芽发展方向，剧场成为党和人民政府向群众进行宣传教育的阵地。



北京湖广会馆（摄影：罗德胤）



天津广东会馆（摄影：罗德胤）



中央大礼堂室内



陕甘宁边区参议会礼堂

（来自《中国现代剧场发展研究》）（来自《中国现代剧场发展研究》）



重庆人民大礼堂外景
(www.baicle.com)



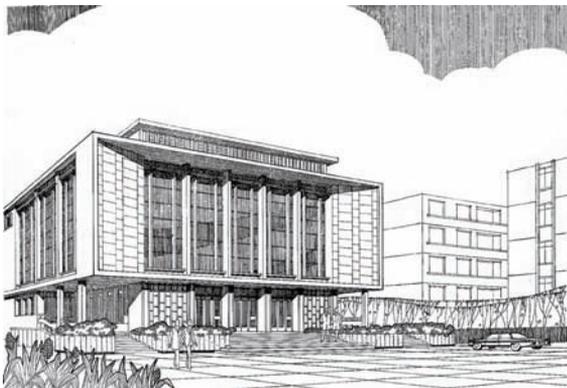
重庆人民大礼堂内景
(www.baicle.com)



气势宏伟的人民大会堂
(www.people.com.cn)



众星捧月般的人民大会堂室内
(来自《中国现代剧场发展研究》)



贵阳川剧院（来自《中国现代剧场发展研究》）



南宁剧院（来自《中国现代剧场发展研究》）



保利剧院（来自《中国现代剧场发展研究》）



保利剧院改建后的观众厅（来自《中国现代剧场发展研究》）

1950年，西南军政委员会决定在重庆建造一座会议和演出用的大礼堂，平面为圆形，穹顶，5层，4300座，因当时设计中没有考虑建筑声学，音质效果极差。后来很长一段时间仅作为标志性建筑供游人参观。2004年改造后，声学效果得到改善。

真正掀开中国建筑声学历史新篇章的是1959年建成的人民大会堂——万人大会堂。延安时期礼堂和50年代剧场的不良音质效果使周恩来等工程负责人深刻地认识到“上万人听”是必须用科学态度来解决的——如果不能保证所有人听清毛主席的讲话，技术问题也许就上升为政治问题了。周恩来亲自点名声学专家马大猷负责，带领全国可动员的全部声学力量进行攻关。马大猷先生开创性地采用穿孔吸声板降低大会堂内的混响时间，首先保证了语音清晰度，并采用局部区域补声扬声器和座椅局部扬声器与主扬声器结合的方式，保证了每个座位具有足够的声能。人民大会堂观众席9770座，舞台300座，合计10070座，是当时世界上人数最多的室内会堂，也是迄今为止世界上人数最多的室内会堂。

3.4 文化革命至改革开放初期——照抄照搬到引进吸收

大跃进、三年自然灾害、文化革命使国力空虚，剧院建设量严重下滑。文化革命对孔子的儒家思想进行了大批判，同时严重地破坏了一些优良的传统，反映在剧场设计上，谦逊为学的探究精神少了，模仿抄袭的实用主义多了。期间修建的贵阳川剧院（1981年）几乎照抄南宁剧院（1972年），其他这一时期的剧院也都大同小异。南宁剧院曾采用船形体吊顶，起到顶棚声扩散反射的作用，而一些模仿它的剧院根本不知道其声学作用的初衷，任意改变船形体的尺寸大小和材料。南宁剧院的材料做法是预制钢筋混凝土，容重大，

刚性大，对于声音反射有效果，但是很多模仿者为了减轻吊顶的荷载，将材料替换为轻质胶合板，完全丧失了声音扩散的作用，成为形式上的摆设。

1980年代中期开始，外国设计公司开始介入我国的剧场设计。落成于1989年的深圳大剧院引入了英国的舞台设计公司。北京中日青年交流中心即世纪剧场落成于1989年，引入了日本设计团队。保利剧院落成于1991年，设计者同深圳大剧院。外国人的设计为这些剧场带入了新空气，无论从建筑形式、室内装修还是舞台灯光，有令人眼前一亮的感觉。就声学而言，这一时期不乏有优秀作品，但是由于仍以政治集会和配合会后的歌舞演出为主，观众大多并非购票入场，对音效的认知极为有限，除保利剧院等为数不多的商业运作比较成功的剧场以外，几乎没有人们普遍知晓以音效著称的剧院。

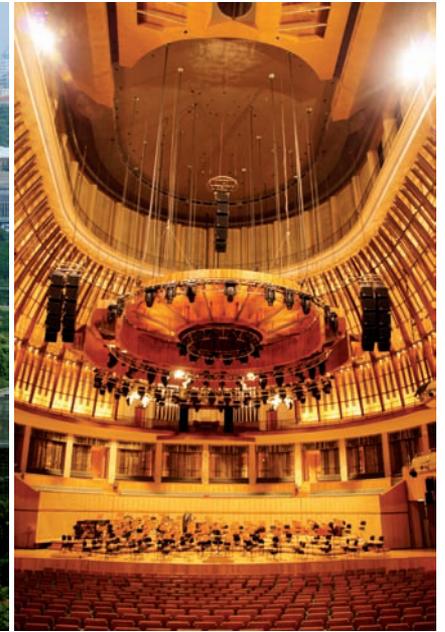
4 二十一世纪新篇

新世纪十多年来，大型演艺中心不断涌现。这些剧场往往造型新颖，争奇斗艳，一瞥之下就给人留下深刻的记忆。从最佳声学效果考虑，演艺中心常被分成多个专用的厅堂，分别具有与演出类型相适应的最佳混响时间参数。交响音乐厅一般约为2.0s，歌剧院一般约为1.5s，话剧或戏剧演出一般约为1.2s。

2002年建成的新加坡滨海艺术中心又称榴莲剧院（The Esplanade），是岛国水岸边的一朵奇葩。艺术中心规模宏大，酷似两颗榴莲，一为专用歌剧院（2000座），另一为专用音乐厅（1600座）。音乐厅为了适合交响乐、室内乐等不同演奏的混响需要，不惜巨资设计了调节容积的可变混响装置，目的只为追求最完美的音效。



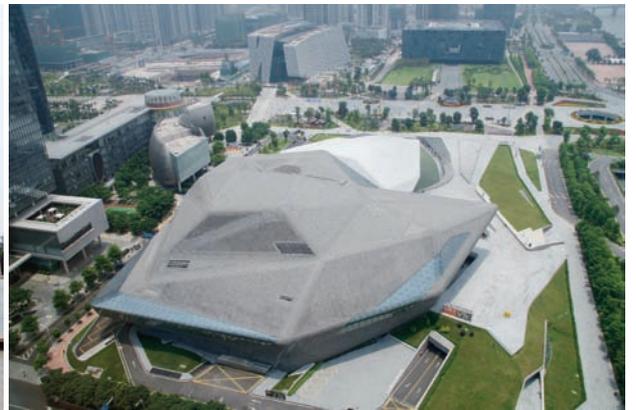
新加坡榴莲剧院外景 (摄影: 燕翔)



榴莲剧院音乐厅 (顶部侧门可开合, 用以改变容积) (摄影: 燕翔)



中国国家大剧院 (摄影: 燕翔)

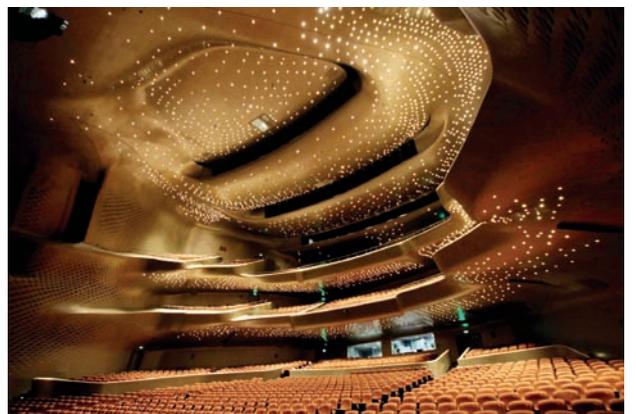


广州歌剧院 (摄影: 燕翔)

2007年建成的中国国家大剧院 (China National Grand Theater) 造型如蛋, 气势恢宏。在椭球型钛金属屋盖下, 内有三大独立专用厅堂, 音乐厅 (2 000 座), 歌剧院 (2 400 座), 戏剧院 (1 100 座)。虽然在设计方案、用材造价、维护管理等方面饱受非议, 但从建成后的使用效果来看, 尤其是就音质效果评价而言, 国家大剧院是名副其实的。

2010年建成的广州歌剧院 (Guangzhou Opera House), 其非线性设计的科技感将该建筑的后现代主义表现得淋漓尽致。然而, 建筑师为表达深藏于人们内心中对梦境幻影的终极渴望, 在剧院室内使用了极不规则曲面, 这对声音的均匀扩散非常不利, 对建筑声学提出了更高的要求。缩尺模型模拟在广州歌剧院建筑声学设计中起到了决定性作用, 按照模拟结果进行的墙面曲线优化和局部鳞片状声散射处理, 令广州歌剧院建筑声学获得了成功。

当下, 后现代非线性设计全球风行, 与广州歌剧院异曲同工的建筑作品比比皆是。新建的演艺中心或大剧院不可胜数, 座座卓尔不群, 引人注目。因投资巨大, 影响巨大, 业主们也越来越重视建筑声学效果, 聘请专业的声学顾问全程参与设计, 这无疑都是好的发展趋势。AT



广州歌剧院内景 (www.fubiz.net)

参考文献

- [1] 罗德胤. 中国古戏台建筑研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [2] 卢向东. 中国现代剧场发展研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [3] 燕翔. 建筑声学发展史简论[J]. 建筑技艺增刊. 2009 (S1).