

630

2011.2.4-4
2084

全国高校建筑学学科专业指导委员会推荐教材

高等学校 ^{建筑学} 专业系列教材
 ^{城市规划}

建筑声学设计原理

华南理工大学	吴硕贤	编著
浙江大学	张三明、葛 坚	
	吴硕贤	

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑声学设计原理/吴硕贤主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2000
高等学校建筑学、城市规划专业系列教材
ISBN 7-112-04227-5

I. 建... II. 吴... III. 建筑声学-声学设计-高等学校-教材 IV. TU112.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 20823 号

本书系统、深入地介绍 20 世纪建筑声学尤其是观演建筑声学的研究成果和声学设计的原理、经验与技术措施, 着重介绍近年来这一领域的新成果、新趋势。本书内容包括观演建筑史、建筑声学基本知识、室内声学原理、音质评价、吸声和隔声、室内噪声控制等, 重点介绍各类观演建筑的音质设计和建筑设计。本书内容翔实, 插图丰富, 并提供大量国内外重要观演建筑的实例, 具有新颖性、先进性、趣味性和权威性。本书作为建筑系本科生和研究生推荐教材, 并作为广大建筑师和室内设计装修以及环保、广播、音响和音像制作等工程技术人员的参考读物。

全国高校建筑学学科专业指导委员会推荐教材

高等学校 **建筑学** 专业系列教材
城市规划

建筑声学设计原理

华南理工大学 吴硕贤 编著
浙江大学 张三明、葛坚
吴硕贤 主编

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京二二〇七工厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 15 $\frac{1}{4}$ 字数: 382 千字

2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月第一次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 25.00 元

ISBN 7-112-04227-5

TU·3329 (9702)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

众所瞩目的 21 世纪已经到来了。21 世纪将是科学技术飞速发展的时代，是人类与自然更好地协调共处的时代，是人类追求并实现更加舒适宜人的人居环境的时代。新世纪将对建筑师提出更高的要求，即要为人类创造更加健康、美好的空间与环境。随着我国加入 WTO 的脚步的临近，随着人们生活水平的提高，人们对改造声环境质量的要求也越来越高。在此世纪之交，回顾并总结有史以来，尤其是一个世纪以来的建筑声学，特别是观演建筑声学领域的理论研究和工程实践成果，是十分有意义的事情。

原始人类早期的生活实践，就已经包括艺术的活动，其中重要的内容之一就是观演艺术的创造。最早可考的观演建筑包括古希腊的露天剧场和中国古代的“宛丘”。后来，观演活动渐次转入以室内为主，出现了室内剧场、音乐厅等观演建筑。为了追求良好的声环境，历史上人类一直进行着建筑声学方面的探求，并取得了许多成就。然而，现代建筑声学的科学基础却是在 20 世纪初奠定的。百年来，建筑声学理论和技术水平取得了长足的进步。在此世纪之交，总结这份宝贵的科学遗产，将其写入教科书，是十分有价值的事情。

尽管国内此前已出版或翻译出版了若干建筑声学方面的著作和教科书，但是鉴于近年这一领域的许多重要的新成果尚未被较详尽地加以介绍，因此，亟需一本内容较新、系统性较强的建筑声学教科书。笔者多年来潜心于这一领域的研究和教学工作，同时参加了许多观演建筑声学设计工程实践，始终不懈地追踪国内外这一领域的新发现、新成果及新技术，感到有责任将之较系统、深入地介绍给广大读者。这是我打算写作此书的初衷。

在全国高校建筑学学科专业指导委员会 1995 年广州、深圳会议及 1996 年西安会议上，与会委员认真讨论并审议了组织出版一套内容更新的建筑学专业本科生和研究生教材事宜，在建议组织编写的重点书目中，就有“建筑声学设计原理”。我作为指导委员会委员，更感到责无旁贷，理应负起一些编著教材的任务。这是促使我决定主编此书的契机。

于是我和浙江大学建筑系环境物理研究室张三明、葛坚副教授分工合作，以近年来我们用于教学实践的讲义为基础，又补充更新了若干章节，写出了此书。其中我本人承担了前言、第一、三、五、十、十一、十二、十六、十八、二十一章及附录中的附四、附五、附六等的写作；张三明承担第六、八、九、十三、十四、十五、十七、十九、二十二章及附录中的附一、附二、附三等的写作；葛坚承担了第二、四、七、二十章的写作。全书最后由我修改、统稿。何光华、李青梅绘制了部分插图。谨此一并致谢！

鉴于建筑声学的内容较为庞杂，尚包括环境声学、噪声控制学等内容，要在一本教科书中全面介绍，虽面面俱到，却容易不深不透。为此，我们决定本书的内容侧重阐述观演建筑声学设计原理。噪声控制学部分主要介绍室内噪声控制方面的内容。

鉴于目前国内尚缺少建筑声学方面的研究生教材，而目前出版这方面的研究生教材尚有困难，因此，本书决定编入部分专题性较强的章节，以 * 号加以标记。这部分内容对本

科生可不讲授，可作为研究生的教学内容，或作为有兴趣的本科生课外阅读教材，同时也为广大建筑师、从事室内设计与装修以及环保、广播、音响及音像制作等工程技术人员提供一本内容新颖、先进，阐述系统、深入的参考读物。

本书稿于1997年写出后，经全国高校建筑学学科专业指导委员会送三位专家评审，又经指导委员会全体委员一致投票通过作为向全国推荐的本科生及研究生教学用书，由建设部人事教育司下文交中国建筑工业出版社出版。在出版社朱象清总编、欧剑常务副总编以及王玉容责任编辑的关心和大力支持下，终于得以付梓，令人感到欣慰！在此谨向上述有关专家、领导致以诚挚的谢意！

由于我们的水平所限，本书不当之处在所难免，还望广大读者批评指正。

吴硕贤

2000年1月9日

第一章 绪 论

第一节 观演建筑声学发展简史

1995年6月5日至7日，美国声学学会在麻省理工学院（MIT）隆重举行关于赛宾（W.C.Sabine, 1868~1919）研究建筑声学一百周年的纪念活动。著名的波士顿交响乐团在波士顿音乐厅举行音乐会；东京弦乐四重奏乐队也在MIT的克雷斯格大厅举行演奏会，以缅怀这位杰出的声学家在建筑声学方面奠基性的功绩。

在赛宾之前，建筑声学可说是仅仅停留在感性认识和实践经验阶段。尽管19世纪世界各地也曾建造过以维也纳音乐友协音乐厅为代表的厅堂建筑，音质也非常出色，但是这些音乐厅的设计与建造主要依靠的是建筑师的经验和直觉判断，并未经过科学计算。这种情况直到赛宾定义了混响时间这一评价厅堂音质的物理指标之后，方才发生根本的改变。

赛宾发现混响公式的经过是颇富有戏剧性的。1895年，他年仅28岁，是哈佛大学物理系最年轻的助理教授。他受命对校园内新落成的Fogg艺术博物馆礼堂音质模糊不清的问题进行处理。这成为他开创性研究工作的开始。研究工作于1896年春夏之交进入高潮。当时他利用风琴管作为声源，依靠耳朵作为声接收器，并用一只停表作为计时器，大量的座垫作为吸声材料，夜以继日地进行实验研究。探索吸声量 A 与混响时间 RT 的关系，获得有关 RT 与 A 的关系的实验曲线。1898年，赛宾被邀请担任波士顿音乐厅的声学顾问。起初他踌躇不决，因为他当时尚未从 RT 与 A 的曲线中得出明确的数学公式。是年秋天的一个晚上，他苦思冥想，忽然疑团顿释，发现了规律。他兴奋地对母亲喊道：“妈妈，这是一个双曲线。”他意识到房间的吸声量 A 乘以 RT 是一个常数，并正比于房间的体积 V 。这就是著名的赛宾混响公式。1900年，他发表了题为《混响》的著名论文，奠定了厅堂声学乃至整个建筑声学的科学基础。混响时间至今仍是厅堂音质评价的首选物理指标，为指导厅堂声学设计提供科学依据。

发现混响时间公式后，赛宾欣然答应出任波士顿音乐厅声学顾问。波士顿音乐厅于1900年10月15日开幕，至今仍被评为世界上最好的三个音乐厅之一。波士顿音乐厅是世界上第一个经过科学计算设计而建成的音乐厅。此后，赛宾继续为许多建筑工程担任声学顾问，直至第一次世界大战爆发，他在军事部门担任战时的职务，占据他的余生。

自赛宾之后至二次大战之前，声学家的注意力都集中于改进 RT 的计算，改进测试技术，研究材料的吸声性能及探讨 RT 的优选值上。1929~1930年间，有几位声学家各自用统计声学方法导出混响时间的理论公式。其中最有代表性的是依林（C.Eyring）公式。1930年，麦克纳尔（W.A.MacNair）发表了有关厅堂最佳 RT 值的论文。这时期还有莫尔斯（P.M.Morse）等人（包括我国的马大猷）在室内波动声学 and 简正理论上获得了开创性的研究成果。1932年努特生（V.O.Knudsen）出版的《建筑声学》和1936年莫尔斯出版的《振动与声》标志着建筑声学已初步形成一门系统的学科。30年代声学缩尺模型开始出

现。声学家们采用 1:5 的模型和变速录音的方法研究混响过程。从 40 年代开始, 声学家们探求将缩尺模型应用于指导厅堂声学设计。

在探讨最佳混响时间的过程中, 人们发现, 在同一大厅中, RT 值大致相同, 但位置不同, 可以具有不同的音质; RT 值相同的不同大厅也可以具有不同的音质, RT 值不同的大厅也可以被评定为具有同等良好的音质。可见, RT 并非决定厅堂音质的唯一指标。此外, 无论赛宾公式或依林公式, 都认为 RT 与房间的形状无关, 与吸声材料的空间分布无关。这与实际情况有所差别。这些疑问启示着进一步研究的方向。

二次大战后, 对房间的声脉冲响应进行了较系统的研究。所谓声脉冲响应, 指的是在房间某处用短促的脉冲声激发, 而在接收处测得的直达声和各界面的反射声依到达时间和强度排列的响应图。脉冲响应充分反映了房间的声学特性。当时声学家们对反射声的时延和相对强度与主观听觉的关系进行了深入的研究。首先是 1951 年, 哈斯(H. Haas)发现时延大于 35ms 且具有一定强度的延迟声可以从听觉上被分辨出来, 但其方向仍在未经延时的声源方向。只有延时 50ms 时, 第二声源才被听到。这就是著名的哈斯效应。哈斯效应的发现促使声学家们自 50 年代以来掀起寻找新的厅堂音质指标的热潮, RT 不再成为唯一的指标。

在所提出的音质指标中, 有一类是从时域上求出声能比的, 即把直达声以及在 50ms (对于音乐声可放宽至 80ms) 内到达的反射声称为早期声, 而把余下的反射声称为混响声, 定义出早期声与混响声的声能比。属于这类指标的有 1950 年由白瑞纳克(L. L. Beranek)和舒尔茨(T. J. Schultz)提出的混响声能对早期声能的比值(1965 年, 他们把此比值的对数的 10 倍定义为行进活跃度 R), 席勒(R. Thiele)于 1953 年提出的清晰度 D 以及克来默(L. Cremer)和库勒(Kürer)于 1969 年建议的涉及能量重心到达时间的指标, 称为重心时间 t_c 。另一类是与 RT 相类似的用于描述稳态声能衰变快慢的指标。其中最重要的是乔丹(V. L. Jordan)于 1975 年提出的早期衰变时间 EDT 。它定义为据稳态声能衰减 10dB 的衰变率推出的混响时间。这类指标后来都被证明与 RT 高度相关, 并非独立的指标。60 年代末, 厅堂声学的一个重大进展是认识到侧向反射声能对于听觉空间感的重要性。这意味着对反射声的研究从时间域发展到空间域。最早是德国声学家施罗德(Schroeder)等人于 1966 年在测量纽约菲哈莫尼音乐厅时, 发现早期侧向声能与非侧向声能比例关系的意义。接着, 新西兰声学家马歇尔(H. Marshall)发现第一个反射声若来自侧向对音质有好处。这方面系统的研究工作是由英国声学家巴隆(M. Barron)及德国声学家达马斯克(P. Damaske)于 60 年代末、70 年代初进行的。他们的研究证实早期侧向反射声与良好的音乐空间感有关。据此, 声学家们又提出若干与空间感有关的物理指标。较重要的是侧向能量因子 LEF (由乔丹和巴隆分别于 1980 年和 1981 年提出) 以及双耳互相关系数 $IACC$ 。后者由德国声学家戈特洛伯(Gottlob)于 1973 年提出。LEF 的定义是早期侧向声能(5~80ms)与早期总声能之比; $IACC$ 是衡量双耳声信号差异性的指标。它是用两个传声器在听者耳道入口处测量声场, 再用专门编制的计算程序计算测量声音不一致的程度。 $IACC$ 值越低, 空间感越佳。

50~60 年代, 一批重要的建筑声学著作相继出版, 如 1950 年努特生和哈里斯(C. M. Harris)合著的《建筑中的声学设计》; 1954 年白瑞纳克的《声学》和 1949~1961 年克来默的《室内声学的科学基础》等。

从 50 年代开始, 厅堂缩尺模型研究有了长足的进展。首先是关于模型相似性原理的

研究取得成果，其次是测试技术有所改进，使这一技术在厅堂声学研究与设计中获得初步应用。由于厅堂模型的尺度按比例缩小，因此在其中传播的声波波长也相应缩小，因此声音频率必须按相同的比例增加。这意味着吸声材料也必须对应改变。相似性理论即是要解决这类问题。从60年代起，日本、英国、荷兰等国都加入研究和应用缩尺模型的行列，推动这方面的研究达到极盛期。如日本的伊藤毅（1965）等人开展了界面吸声系数模拟的研究；石井圣光（1967）等人提出用氮气置换法来解决空气吸声模拟的问题等，使缩尺模型开始大量应用于指导厅堂设计实践。例如乔丹在纽约歌剧院及悉尼歌剧院等大厅设计中，都应用了缩尺模型技术。60年代，厅堂音质测试技术及方法本身也取得突破。特别值得一提的是施罗德提出用脉冲响应积分法来测量 RT ，并提出室内声场增长和衰变的互补理论。

这一时期，厅堂声学的数字仿真技术也发展起来。最早可查到的文献为阿尔雷德（C.J.Allred）和纽豪斯（A.Newhouse）于1958年发表的用蒙特卡罗法计算声线在界面上碰撞几率的论文。1968年，挪威国立物理技术研究所的克罗克斯塔德（A.Krokstad）等人首次发表了关于用声线跟踪法模拟室内声场的文章。自1967年起，他们在这方面的的工作持续了15年之久。

二次大战后，世界各地尤其是欧洲和北美兴建了许多多功能厅、音乐厅和歌剧院。例如建于1951年的伦敦皇家节日厅（声学顾问 P.H.Parkin）。为了弥补 RT 的不足，该厅采用后来称为“受援共振”的电声系统来延长 RT ，成为世界上第一个成功地采用此项技术的音乐厅。50年代末，白瑞纳克为拟建的纽约林肯中心菲哈莫尼音乐厅的设计作准备，着手调查了20个国家的54个厅堂，于1962年出版了《音乐、声学 and 建筑》一书，总结了当时厅堂设计的经验。60年代，厅堂建筑尝试不规则形环绕式布局等新的空间形式。这方面成功的例子当首推柏林爱乐乐厅（由克莱默任声学顾问，于1963年建成）。据说该厅的设计灵感来自山地葡萄园。它开创了葡萄园式错落包厢坐席的新形式，并同样达到完美的音质效果，是音乐厅建造史上又一座里程碑。60年代，“浮云式”反射板开始引入音乐厅和多功能厅，以提供早期反射声（例如纽约菲哈莫尼厅）。其中不乏成功的例子，例如美国麻省的 Tanglewood 音乐棚。

70年代以来，继续提出若干新的音质指标（包括前述的 LEF 、 $IACC$ 等）。但这时研究的重点已不在于提出新的指标，而在于研究这些指标的独立性，它们与主观听觉的关联以及音质的综合评价。由于60年代建成的纽约菲哈莫尼厅在落成初期存在若干音质缺陷，使声学界意识到人们对于音质物理指标与主观感受的相互关系实际上不甚明了。为此，施罗德向联邦德国科学基金会（DFG）申请资助这项基础研究。以此为契机，开始了厅堂声学研究不断深化并取得多方面成就的新时期。

70年代中期以来，由施罗德领导的哥廷根大学研究小组与由克莱默领导的柏林技术大学研究小组进行了一系列有关音质主观优选试验的研究工作，其中有两项工作最为重要。一是柏林小组的威尔肯斯（H.Wilkens）及列曼（P.Lehmann）于1975~1976年跟随一个交响乐队对六个厅堂作了研究。它们将在厅堂记录下的音乐在实验室内重放，由试听者根据一种六个等级的语义学标度进行音质判断，再将此结果进行因子分析。与此同时，测量有关厅堂的物理参量，然后分析物理参量与主观听音结果的关系。另一项研究是哥廷根小组的戈特洛伯和席伯拉斯（Siebrasse）于1972~1973年采用高保真录音重放技术在25个

音乐厅中重放先在消声室中录制的“干”的音乐片断，用人工头记录接收信号，然后再到消声室中重放，由试听者判断哪个厅堂的音质较佳，最后进行因子分析，试图找到听者独立的判断指标，并与厅堂物理参数相关。后来，哥廷根小组又进行利用计算机数字仿真声场作主观优选的研究。他们将音乐信号经过计算机进行调制脉冲响应处理，再进行试听者的主观优选试验和相关分析。用这种方法允许对声场参量加以系统的改变。日本神户大学的安藤四一（Y. Ando）参加并总结了哥廷根小组近十年的工作，于1985年出版了《音乐厅声学》一书。该书提出4个独立的音质指标：①混响时间 RT ；②听者处声压级 L_p ；③初始延时间隙 $ITDG$ （指直达声与第一个强反射声之间的时间间隔）；④双耳互相关系数 $IACC$ 。他还提出用这四个参数的主观优选值的指数进行加权相加的方法来综合评价厅堂音质。另一种方法是用模糊集理论来综合评价厅堂音质。这是由笔者于1991年发表于《美国声学学会志》上的一篇文章提出的（我国学者包紫薇、王季卿也独立地提出或建议用模糊数学的方法评价音质）。此外，笔者与奥地利声学家奇廷格（E. Kittinger）还建议用乐队齐奏强音标志乐段的平均声压级 L_{pr} 来作为表征厅堂响度的物理指标。

70~80年代，豪特古斯特（T. Houtgust）和斯邓肯（H. J. M. Steenken）提出了基于调制传输函数（ MTF ）的对厅堂语言清晰度作快速定量测量与评价的新方法。1973年，他们首先提出将 MTF 作为厅堂语言清晰度的评价指标。为了加速测量过程，豪特古斯特又于1988年提出快速测量语言传输指数（ $RASTI$ ）的简便方法。该方法已得到国际电工委员会（ IEC ）的认可。测试仪器已商品化，如语言传输测试仪 BK3361，使室内语言清晰度可用电子仪器作快速客观评价。

声场计算机数字仿真技术自70年代以来进入蓬勃发展期。1972年，琼斯（D. K. Jones）和吉勃斯（B. M. Gibbs）发表了利用虚声源法模拟室内声场的工作。此后，计算机模拟沿两个方向进行。一是利用计算机试验来研究室内声学，对经典理论进行验证；二是致力于仿真技术实用化，用于指导厅堂声学设计。此外，利用有限元和边界元法计算室内声学参量的数值计算技术也发展起来。80年代计算机仿真技术不断发展，如声象法用于复杂形体仿真的新算法，以及声线跟踪法用于衍射效应仿真的算法等都在80年代先后提出。近年，计算机仿真着重考虑扩散问题。浙江大学建筑环境物理研究室也进行了三维声线随机跟踪算法的研究，并取得了成果。另一个新的进展是关于声场的听觉模拟研究。其基本原理是将一个“干”的音乐或语言信号（指在消声室自由声场内录制的未经厅堂影响的原始信号），输送至一数字滤波器（该滤波器具有与所研究的房间相同的脉冲响应）进行调制。从数学上讲即将原始声信号与脉冲响应进行卷积计算。调制后的声信号再经由耳机或扬声器组重放，听者便可预听到该厅堂的声学效果。为达到逼真的听觉效果，数字滤波器不仅要模拟房间本身的声学特性，还要模拟人的头部和外耳对声信号的影响，也即要包括人的头部和外耳的传递函数。该函数可通过人工头的测量得到，并加入到数字滤波器中。这意味着计算机声场仿真已发展到可听化技术（ $Auralisation$ ）的新阶段。

70年代以来，在厅堂设计实践中，陆续有许多环绕式大厅建成。这些大厅的平面是圆形、椭圆形或多边形，座位区三面或四面将乐台包围。1986年建成的美国加州桔县演艺中心剧场，别出心裁地将3000座的观众厅分割成4个局部小厅，共享一个共同的舞台。大厅中间插入一块墙面，使各厅的局部宽度减少至20~25m。这种新颖的创意，为厅堂设计提供新鲜而又成功的经验。

70年代以来,厅堂声学方面的重要著作除了前述的《音乐厅声学》外,尚有1973年库特鲁夫著的《室内声学》、1978年克莱默和缪勒(H.Müller)合著的《室内声学的原理和应用》以及白瑞纳克1996年的新作《音乐厅和歌剧院的音质》等。

尽管70年代以来建筑声学在理论上和实践上均取得了巨大的成就,人们对于影响厅堂音质的若干独立参量有了更为清楚的认识,然而由于音质感受与评价涉及人的主观心理、生理过程,而人类目前对于自身的认识尚处于初级阶段,因此这方面的探索可谓未有尽期。目前,以安藤四一为首的研究小组正在日本神户大学开展关于听觉的心理、生理机制的研究,试图揭示音质感受的内在奥秘。尽管这已涉及心理与生理声学的范畴,但这是厅堂声学欲取得重大突破的必由之路。另一方面,对音质的主观参量与客观物理指标相互关系的许多环节至今仍不十分清楚。这二者之间并非简单的一一对应的关系,而是一种复杂的多元映射关系。此外,若干独立的物理指标虽已提出,但其优选值和容许范围仍不十分明确。这些都有待于进一步研究解决。在厅堂设计方面,何种新颖的厅堂空间新形式能产生良好的音质效果,也值得深入探讨。

随着计算机软硬件技术的飞速发展和电声器件与设备质量的不断提高,可以预期,今后声场计算机仿真与高保真立体与环绕声技术相结合,将有可能在设计阶段忠实地预演厅堂的音质效果,使声场仿真达到可视化和可听化的阶段,并逼真地模拟任何音景(Soundscape)。在未来厅堂设计方面,也将花样翻新,不断推出能产生优良音质的观演建筑空间新形式。

最后想指出的是,建筑声学从广义而言,尚包括环境声学和噪声控制。100年来,在材料与构件吸声与隔声研究,城市环境声学研究以及在噪声控制包括消声、隔声等相关技术的研究方面,均取得长足的进展。由于本书内容主要侧重于观演建筑声学设计,所以本节内容也主要涉及观演建筑声学(即厅堂声学)的发展。

第二节 观演建筑的形成与演变

历史上最古老的剧院可以上溯至公元前7世纪古希腊为祭祀酒神戴欧尼色斯而建的剧场。这种露天剧场是用石块在山坡上修筑起层层看台,围绕着一小片平坦的表演区,由此发展出古希腊露天圆形剧场。其中古典晚期最著名的露天剧场之一是建于公元前350年的埃比道拉斯剧场。演员位于称为歌坛的直径约20m的中心圆形表演区上。歌坛后面有舞台。舞台面高3.5m,进深3m,长26.5m。舞台背后有12个壁柱作为背景。观众位于建于自然山坡上的扇形看台上。看台半径为59m,以220°的弧线环绕着表演区。看台分为上下两区,中间设横过道。过道下有32排座位,过道上还有20排座位。看台升起坡度接近1:2(图1-1),这种布置可以使同一水平的观众容量最大,同时又尽可能地接近舞台。古希腊露天剧场没有多少反射声,唯有从歌坛的石头铺砌及从位于演出区后面的建筑物上(景屋)能产生若干反射声。

随着喜剧的出现,戏剧表演区开始移到歌坛与景屋之间的舞台上。景屋扩大,并用壁柱、檐口及门廊装饰起来,成为戏剧的建筑背景。歌坛则变成了乐池。这个过程大约经历了一个世纪。除了埃比道拉斯以外,现在还可以从雅典、普里恩尼和德洛斯等地看到古希腊露天剧场的遗址。古希腊雅典还出现过室内观演场所。那是覆盖有木屋顶的中等尺寸的

四方结构，设有圆形台阶状的多排座位区。容纳观众 200~2000 人。演奏音乐时，靠悬挂在顶棚上的织物来控制混响。

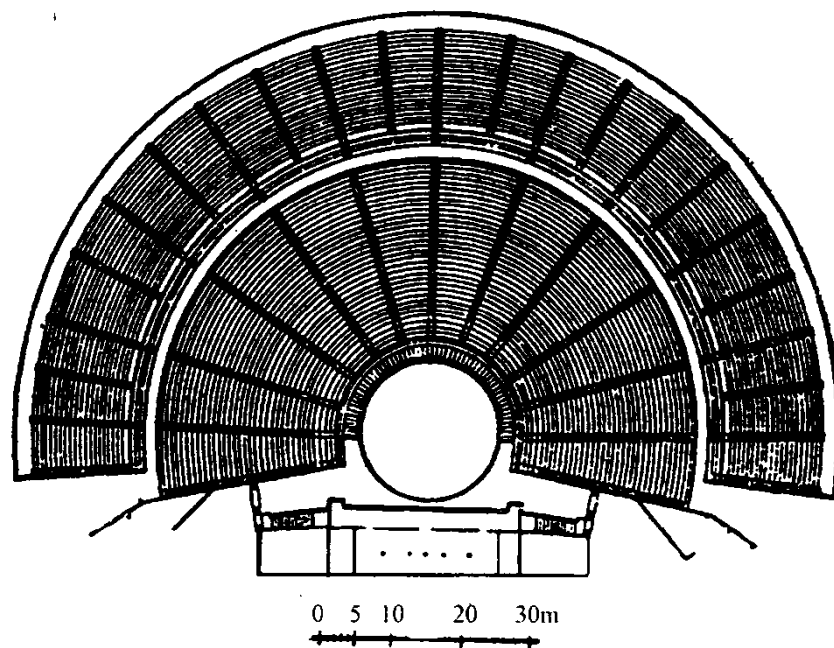


图 1-1 古希腊埃比道拉斯剧场平面

古罗马的圆形剧场是从古希腊露天剧场发展而来的。其座位坡度更陡，用一层层放射状的石料或混凝土拱券支承。演出区后面已建有较大的楼房，其两端的化妆室向前突出，从三面抱住舞台。这样可以形成短延时侧向反射声，增强直达声强度。罗马人还把圆形歌坛改为半圆形乐队席，使听众更接近声源。有的圆形剧场在舞台上还修建斜屋顶，将更多的反射声投向观众。公元 50 年，罗马人在法国南部奥朗日修建的剧场是典型的古罗马露天剧场。该剧场观众区直径达 64m，可容纳 6000 观众。舞台面宽 62m、深 14m。舞台顶部建有大型声反射顶棚（图 1-2）。由于古希腊与古罗马露天剧场均修建在噪声很低的处所，座位区接近演出区，座位升起较高，可保证视听不受遮挡，后期的剧场还能提供早期反射声，因此视听效果都比较好。

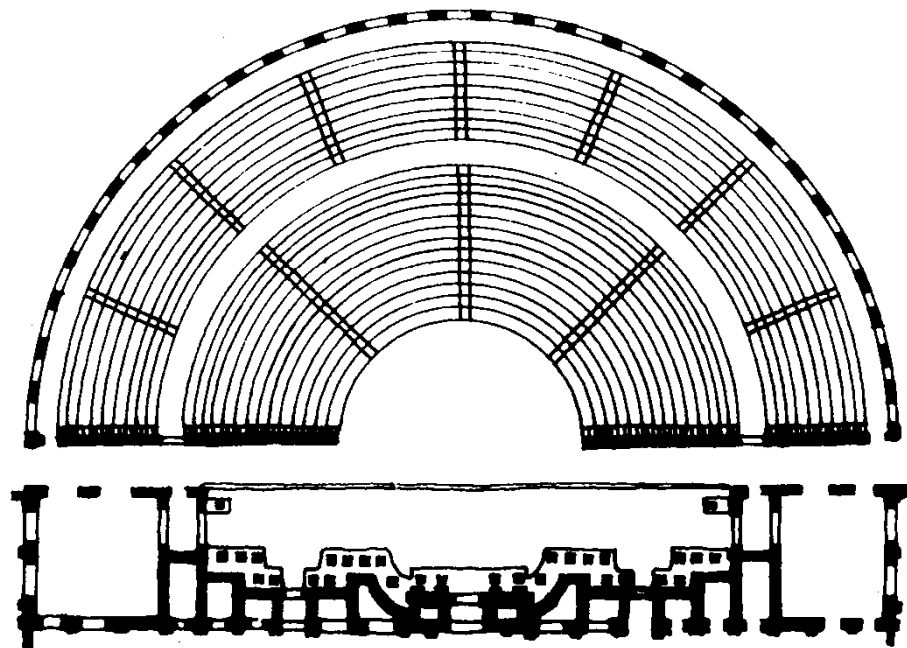


图 1-2 古罗马奥朗日剧场平面

罗马帝国被推翻以后，中世纪建造的唯一厅堂形式就是教堂，后期还有会议室。中世纪教堂的声环境特点是混响时间相当长，音质特别丰满，适合演奏管风琴，但语言清晰度较差。

直至意大利文艺复兴时期对戏剧有进一步发展之前，经过整整一千年。14~16世纪文艺复兴时期，欧洲一些城市已建有固定的剧场。在西班牙、英国和意大利发展着两类剧场形式。西班牙沿海城市出现了旅馆庭院式剧场。在三层楼内院中，底层为柱廊，上两层是围廊或有阳台的居室。这些就是剧场的边座或包厢。内院一端搭有戏台，其余是观众区。

后来，在英国出现了独具特色的有伊丽莎白式舞台的剧场。其中著名的环球剧场建于1600年。在这里首次上演了莎士比亚的许多剧作。该剧场可容纳1500人，其三层环廊成为包厢。中间平地一侧搭起1.2~1.8m高的舞台。舞台上方的木构建筑，其下部支柱以外的区域为前部表演区，其余内院平地为观众区（图1-3）。

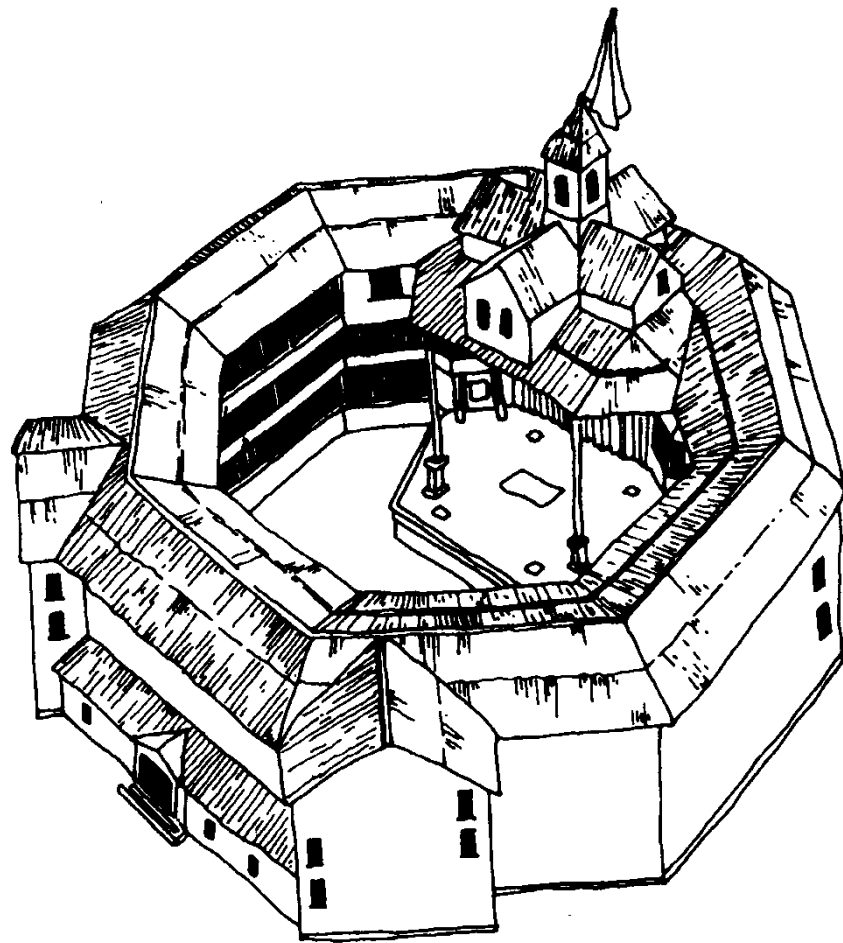


图 1-3 英国伊丽莎白式舞台剧场

在意大利则建造了仿古的室内剧场。早期例子是帕拉迪奥设计的建于1579~1584年间意大利维琴察的奥林匹克剧院。该剧院有3000个座席。它完成了从露天剧场向室内剧场的过渡，但其舞台和观众席的布置仍然近似于罗马露天剧场。它有一个较宽的呈半椭圆形的座位区。舞台则扩大，并发展了古罗马舞台上的大壁龛，并在拱券中装进当时刚刚发明的透视绘景。由于剧场中间有大量石砌表面，所以空场时混响严重。但由于这些石砌表面提供了丰富的反射声，故满场时还不至于过多地影响语言的清晰度（图1-4）。

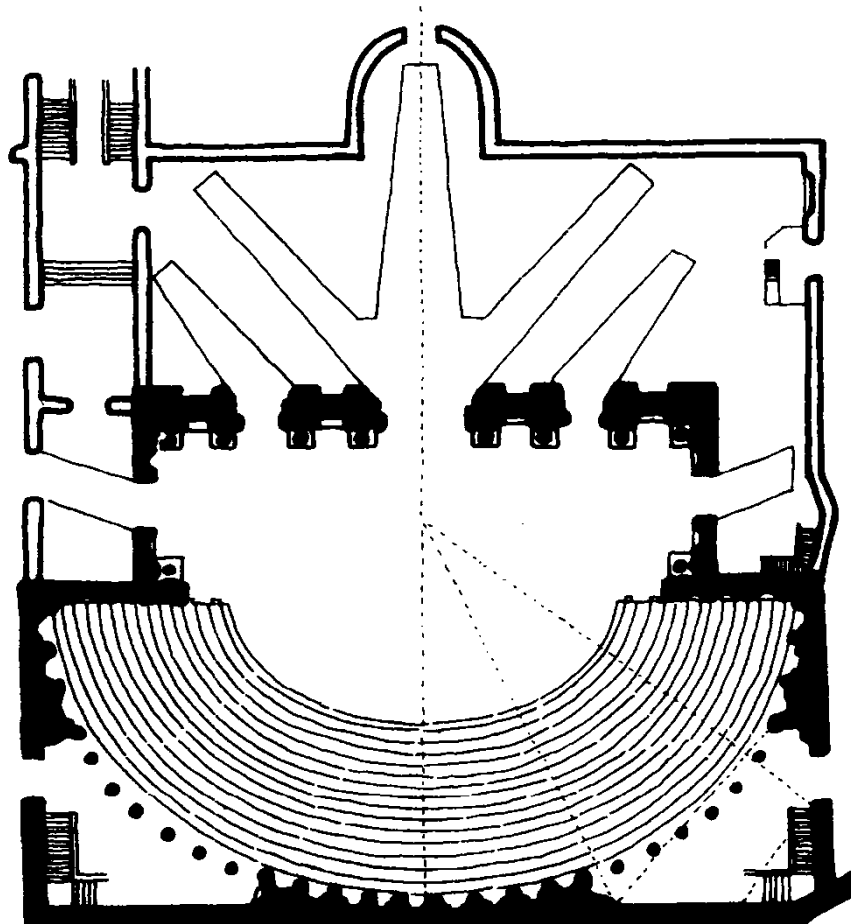


图 1-4 意大利奥林匹克剧场平面

剧院发展过程中的另一个重要建筑是 1618 年由亚历奥迪设计的，建于意大利帕尔马市的法内斯剧院。该剧院平面呈长方形，其观众席是由后部的半圆形区和边座的直线形区构成，中间留出很大的空间和舞台相连，可容纳约 2500 人。该剧场首次将原先舞台上的拱形画龛改为宽 12.5m 的镜框式舞台，将主要表演区从画龛外的横宽台面转移到镜框以内。原先的舞台就变成了台唇。这标志着剧院形式完成了向箱形舞台的演进过程（图 1-5）。

17 世纪上半叶，起源于西班牙旅馆庭院式剧场的多层围廊式看台与意大利镜框舞台相结合，形成以箱形舞台及马蹄形多层包厢观众厅为特征的剧场形式，并成为欧洲剧场的主要形式。这种剧场的最早例子是建于 1632 年的布恩·略梯罗剧场。

早先的剧场，演员表演区和乐队伴奏区之间并无明显的区分。16 世纪末，在意大利佛罗伦萨产生了最早的歌剧。由于歌剧艺术要求较大规模的乐队伴奏，因此，演员与乐队的分离就有了必要。这种分离最终体现在建于 1737 年意大利那不勒斯的圣卡洛剧场。该剧场中，乐队已经位于舞台前专有的区域，其标高比舞台低，从而形成乐池。演员则位于舞台上。舞台较大，观众厅平面为马蹄形，具有台阶式座位和环形包厢，排列至接近顶棚。其声学特点是利用观众席面积大量吸收声音，同时舞台区悬挂有布景等织物吸声体，使混响时间较短，适合于歌剧的演出（图 1-6）。

建于 1778 年意大利米兰的歌剧院是当时最大、设备最好的歌剧院，具有 2289 个座位，但最远包厢离舞台中心仅 31.25m。该剧院观众厅是意大利式观众厅最成熟的一个，

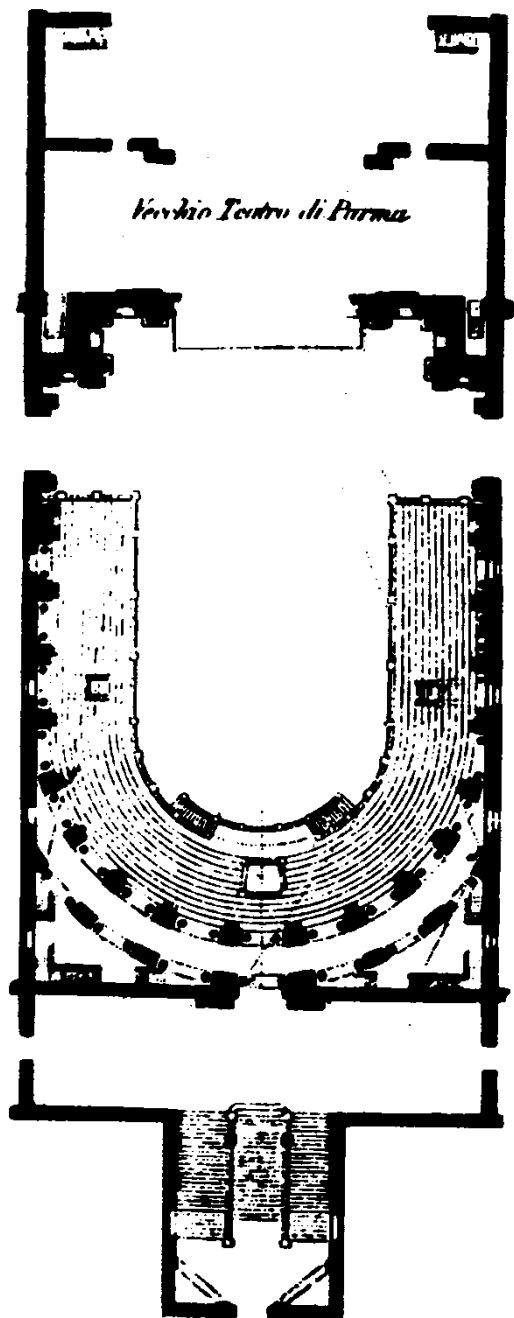


图 1-5 意大利法内斯剧场平面

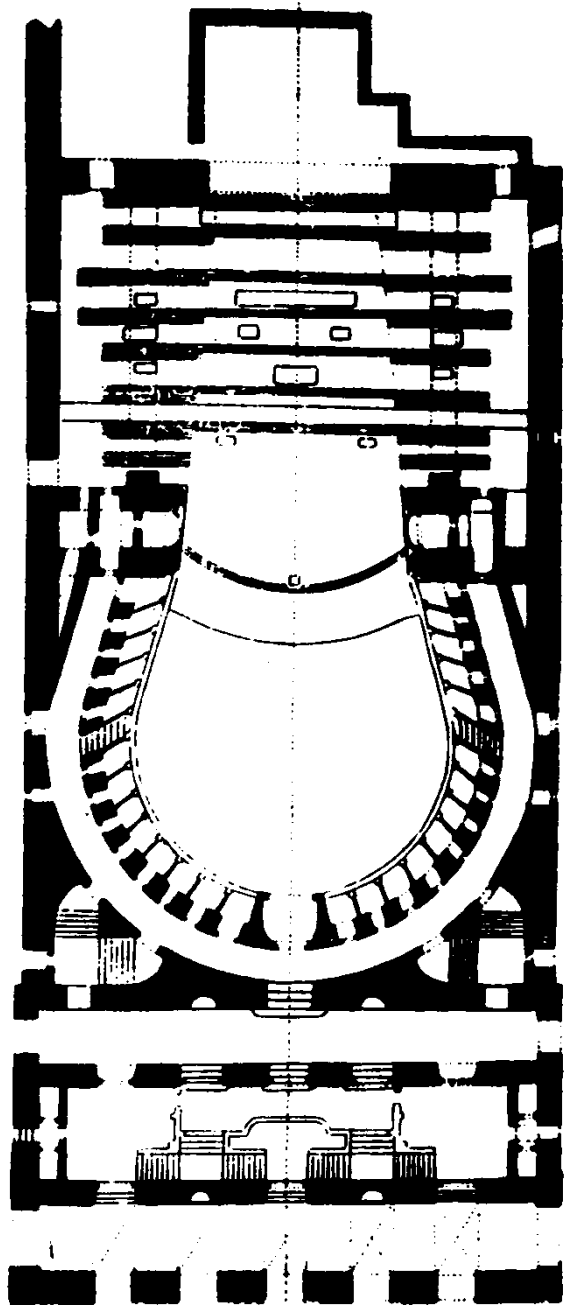


图 1-6 圣卡洛剧场平面

音质效果很好（图 1-7）。除了米兰歌剧院外，建于 1861 ~ 1875 年的巴黎大歌剧院和建于 1869 年的维也纳皇家歌剧院均为较成熟、音质较好的古典歌剧院。古典歌剧院观众厅的构造使用了大量的木板，以吸收低频声音，使得混响时间的频率特性曲线较为平直。这也是其音质较好的原因之一。

19 世纪开始了对新型观众厅形式的探讨。1872 ~ 1876 年在德国拜罗伊特市由音乐家瓦格纳策划建造了费斯特施皮尔歌剧院。该歌剧院的一个显著特点是观众厅为扇形平面。它不设包厢，仅在后部有浅浅的两层楼座。另一个特点是将乐池封闭，仅以有限的空隙朝向观众。费斯特施皮尔大厅是歌剧院演变史上的一个里程碑。20 世纪世界各地建造的剧院中，许多都采用源于该厅的扇形平面（图 1-8）。

古典音乐厅的出现要比歌剧院晚的多。直至 18 世纪，交响乐队才从小型的室内乐队发展出来。与此相适应，音乐厅也从小型的室内乐厅发展而来。

较大的古典音乐厅原型是 1780 年建成的莱比锡格万德豪斯音乐厅。它最初也仅有 400 个座位，后来才增加至 600 座位，体积为 2000 ~ 2500m³，适合于 40 ~ 50 个乐师的规模。

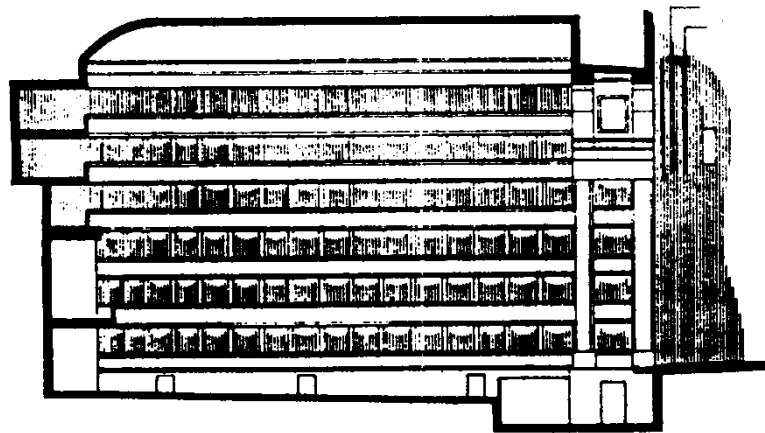
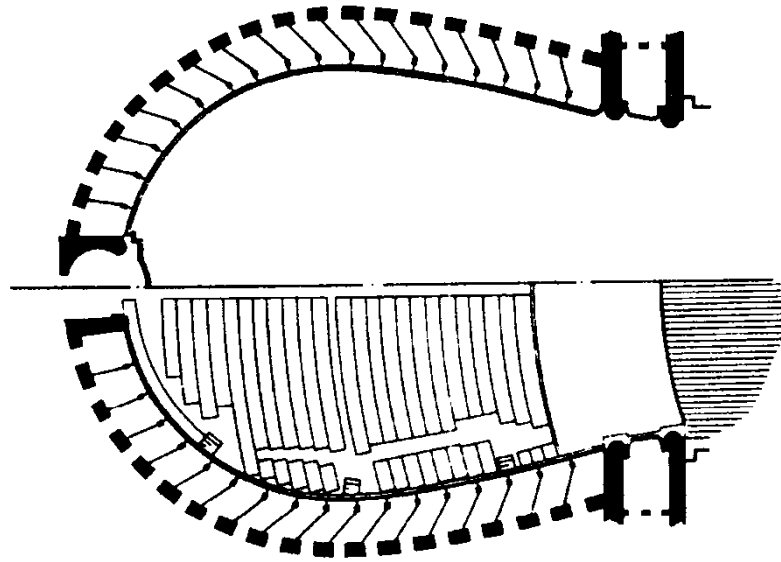


图 1-7 米兰歌剧院平剖面

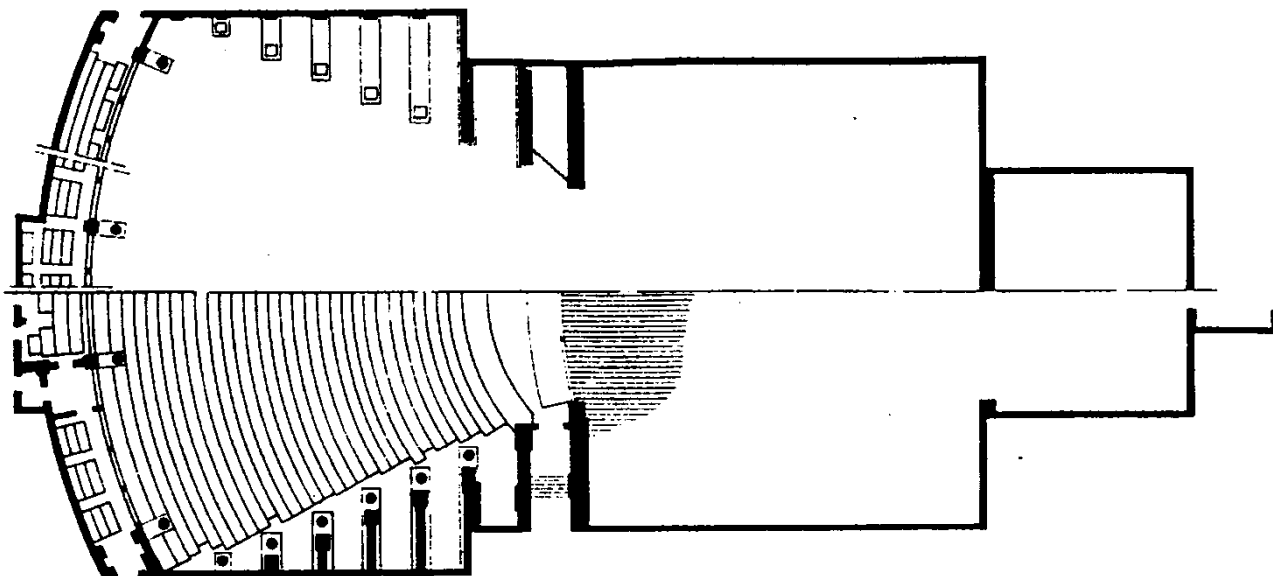


图 1-8 德国科罗伊特费斯特施皮尔厅平面

这个音乐厅存在一个多世纪，后来被 1886 年建成的新格万德豪斯音乐厅所代替。新音乐厅座位达 1560 座，其中 2/3 为乐池，其余分布在楼座与包厢上（图 1-9）。

这一时期在欧洲其它地方也陆续兴建了一批音乐厅。著名的音质良好的音乐厅有 1870 年建于维也纳的音乐友协音乐厅，1876 年建于瑞士巴塞爾的斯塔德卡西诺音乐厅，

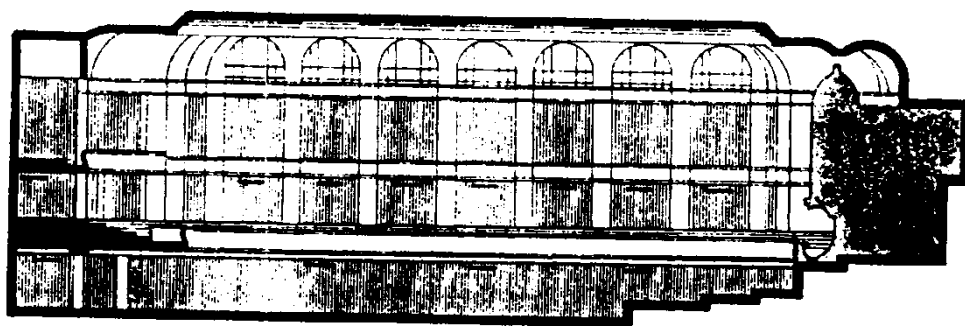
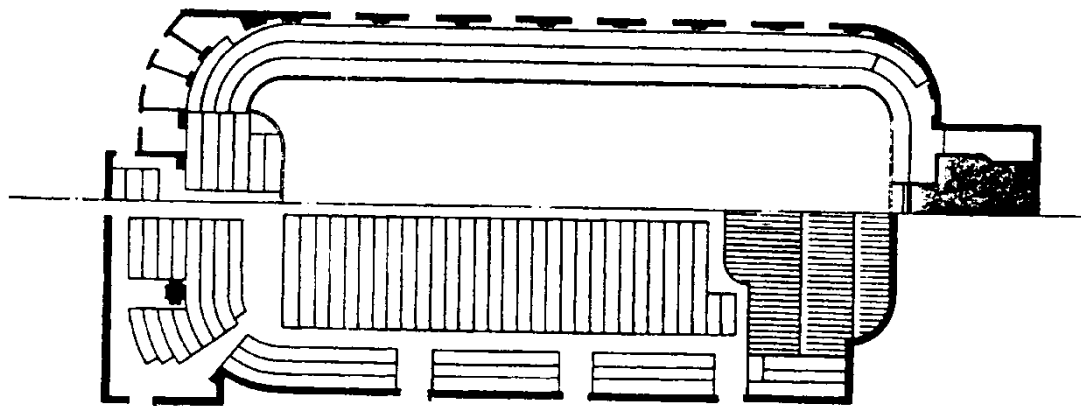


图 1-9 新格万德豪斯音乐厅平剖面

1877 年建于英国格拉斯哥 的圣·安德鲁斯音乐厅，1888 年建于阿姆斯特丹的音乐厅。这些古典音乐厅具有一些共同特点，都是矩形平面，有高的顶棚，1~2 个浅的楼座和丰富的装饰物，被称为鞋盒式音乐厅。

现代建筑声学的科学理论是哈佛大学物理系的青年助理教授 W.C. 赛宾（1868 ~ 1919 年）于 19 世纪末、20 世纪初创立的。1895 年，他受命对哈佛大学新落成的音质模糊不清的 Fogg 艺术博物馆大厅进行研究。这导致他发现了计算混响时间的著名公式。1898 年赛宾被邀请担任波士顿音乐厅的声学顾问。波士顿音乐厅于 1900 年 10 月 15 日开幕。它是世界上第一个经过科学计算设计的音乐厅。它的容积虽比前述欧洲古典音乐厅都大，为 2600 座，但其音质仍然达到优良水平。赛宾在设计波士顿音乐厅时，将乐队席设置在厅堂的尽端，使顶棚和围墙都很靠近乐队。这有利于声能的发送和提供丰富的早期反射声。但他这样做显然是出于直觉，因为当时他并不了解早期反射声的重要性（图 1-10）。

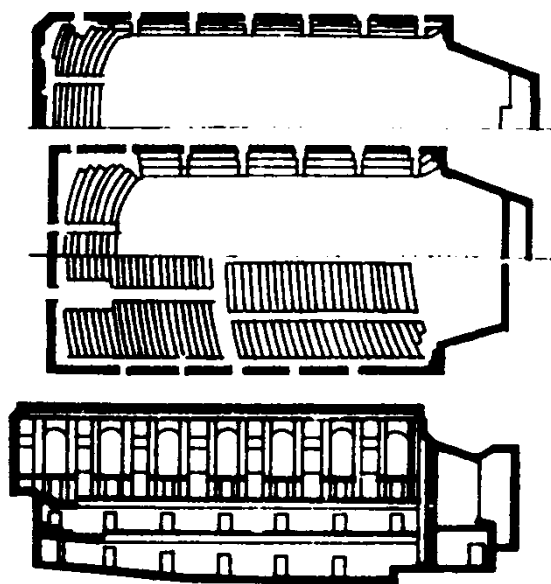


图 1-10 波士顿音乐厅平剖面

总之，到 19 世纪末，剧院和音乐厅都发展到成熟阶段，并奠定了厅堂声学的科学理论基础。

20 世纪的剧院比以往更重视兼顾听和看。为了适应写实表演艺术的需要以及为了改善视觉质量，20 世纪初建成的某些剧院开始取消侧面的包厢，座席也开始排成平行于舞台的浅弧线状。这时期观众厅式样很多，除了马蹄形多层包厢及古典半圆形看台等形式外，还出现了扇形、矩形、钟形等平面新形式，并开始了伸出式舞台等剧院新形式的尝试。例如 1919 年法国导演雷因哈特与德国建筑师波尔兹格合作，用一个旧马戏场改建成的柏林大话剧院，把宽 13m 的舞台向观众席伸出达 21m。

剧院建筑较系统的科学知识大致在 20 世纪 30 年代已形成。20~30 年代较著名的剧院建筑有英国的莎士比亚纪念剧院（1932 年）、巴黎的夏乐·普列耶尔厅（1927 年）等。其中莎士比亚纪念剧院呈标准的扇形平面，内设 1008 座位，楼座挑出很深。观众厅的顶棚是根据声学要求设计的，它把舞台上的声音反射到观众厅后部。舞台口的顶棚把声音反射到观众厅的中部。舞台的台唇很大，向前伸出，演员可从左右两个候演室的门直接走上台唇。

20 世纪 30 年代，美国的音乐厅设计深受瓦特森出版于 1937 年的《建筑声学》一书中某些不正确理论的影响，在舞台上为演员提供反射面，而在观众厅中则尽量多地布置吸声材料。按这一思路建成的有克利夫兰的席瓦伦斯音乐厅、麻省列诺斯的唐列坞音乐棚及普度大学音乐厅等。这些音乐厅后来都经过了改造。这一时期建造的音质较好的观演建筑有哥德堡音乐厅（1935）等。

二次大战后，世界各地主要是欧洲和北美陆续兴建一批剧院和音乐厅。对伸出式舞台、中心式舞台等新形式的探讨更加活跃。例如建于 1944 年瑞典玛尔摩的市立剧院，其观众厅平面为蚌形，在镜框式舞台前面有一个舌形的可升降的伸出式舞台。其楼座挑台也很别致，采用跌落式，使观众厅楼座与池座浑然一体。正式的伸出式舞台在 20 世纪 50~60 年代才在英、美等国出现，如建于 50 年代的英国奎斯特剧场，建于 1962 年的契切斯特剧场和建于 1963 年的美国古塞勒剧场等。

1947 年美国女戏剧家琼尼斯在达拉斯城建造了第一个中心式舞台剧场。正式的设计最完善的中心式舞台剧场则是华盛顿中心舞台剧场。

战后兴建的多功能厅和音乐厅中有许多是非鞋盒式厅，较重要的是建于 1951 年的伦敦皇家节日厅、建于 1956 年斯图加特的里德厅、建于 1959 年的波恩贝多芬音乐厅及建于 1960 年的萨尔茨堡节庆厅等。其中伦敦皇家节日厅为了弥补混响时间的不足，后来采用称为“受援共振”的电声系统来延长混响时间，成为世界上第一个成功地采用此技术的音乐厅。所谓受援共振，就是在大厅中安设若干共鸣器，在共鸣器中放置传声器来接收音乐频谱中的某一部分，接收后经放大反馈到扬声器，使混响时间得以延长。在皇家节日厅中共用了 172 个通道，提高了 100~700Hz 低频段的混响时间，效果很好。

1958 年北京建成世界上最大的厅堂——人民大会堂。它有 10000 个座位，有效容积达 91400m³。该厅音质良好，经多次主观听音评价认为清晰度高。音乐演出时声音清晰，无回声干扰等缺陷。

20 世纪 60 年代以来出现了环绕式不规则形音乐厅等新形式。这方面成功的例子当首推 1963 年建成的柏林菲哈莫尼音乐厅。为了声扩散，该观众厅的平、剖面形状及座席布

置都是不规则的，所有平顶都为凸弧形。观众席被分为若干块，高低错落地分布在大厅四周，将乐池紧紧环抱。据说该厅设计灵感来自于葡萄园。尽管与传统鞋盒式音乐厅在形式上大异其趣，但同样达到完美的音质效果，是音乐厅建造史上的又一座里程碑（图 1-11）。

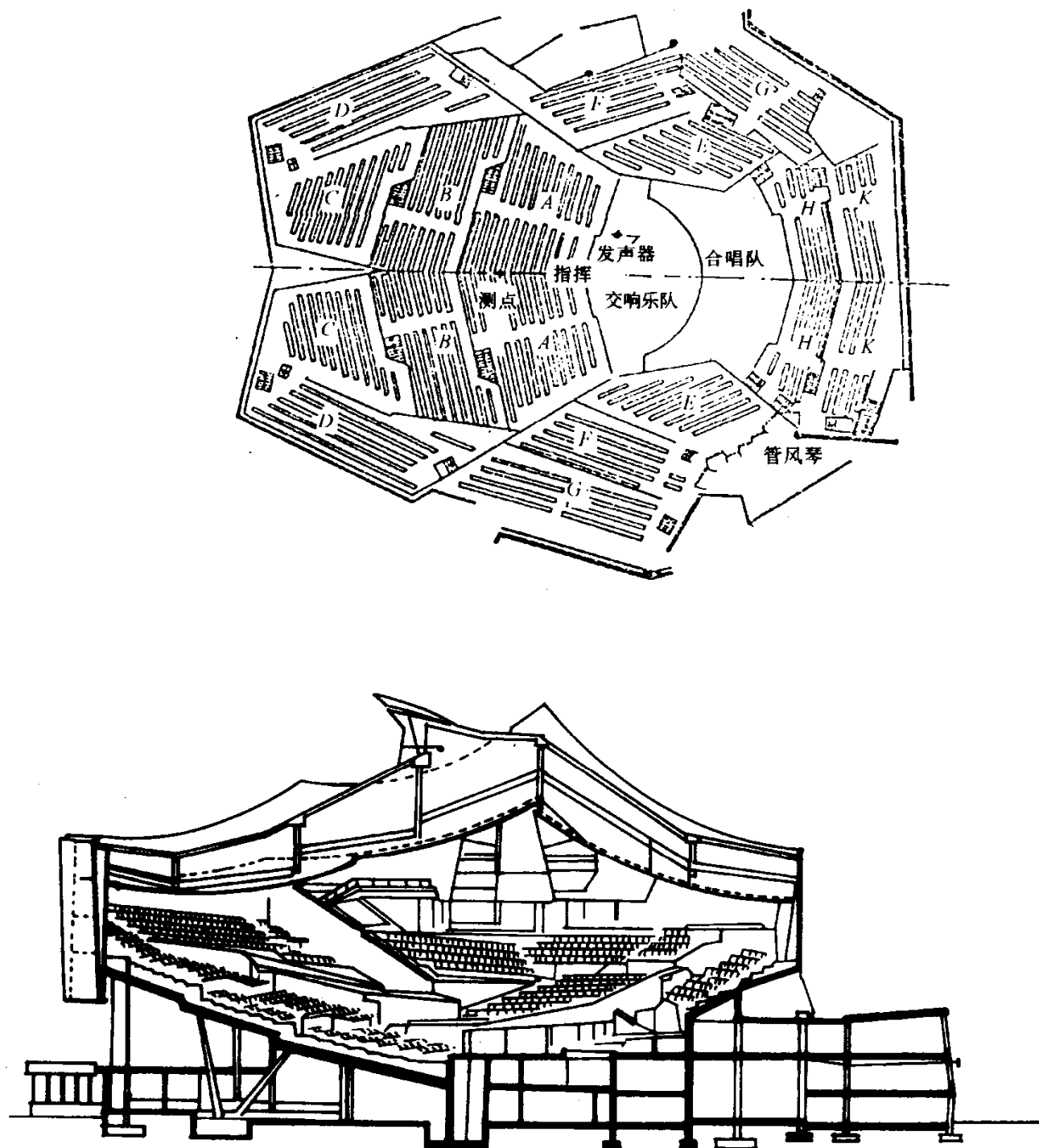


图 1-11 柏林菲哈莫尼厅平剖面

20 世纪 60 年代初，“浮云式”反射板开始引入音乐厅以提供早期反射声。1962 年建成的纽约林肯表演艺术中心的菲哈莫尼音乐厅，就是采用浮云式反射板。但该厅的音质没有预期的好。为了改造该音乐厅，请了许多资深的声学顾问，进行了许多的努力。以此为契机，引起国际声学界对音质物理指标与主观音质感受的相互关系进行深入研究。

尽管在剧院建筑中出现多种新形式，但世界各地新建的较大型歌剧院建筑，多数仍采用传统的箱形舞台和柱廊式多层包厢。据不完全统计，1969~1979 年间各国建成的剧院中有 62% 是箱形舞台，30% 是伸出式舞台，6% 是中心舞台，2% 为边舞台。这是由于传统的