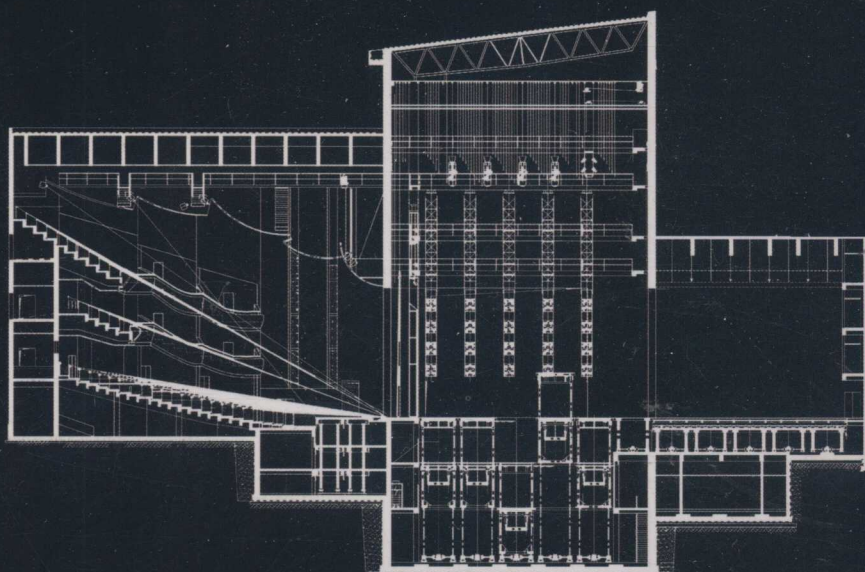
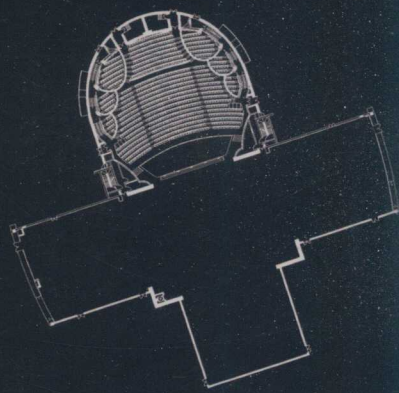


建筑声学设计

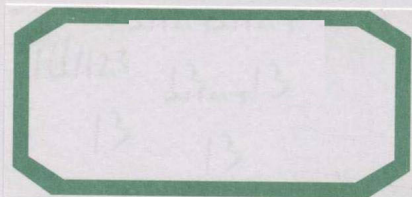
ARCHITECTURAL ACOUSTICS DESIGN



罗钦平 王金滔 毛志新◎编著

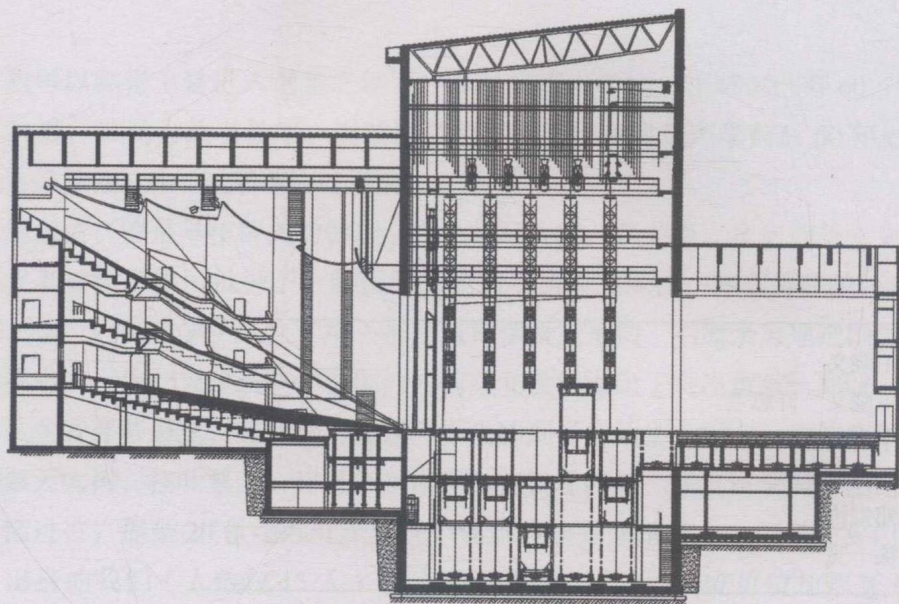


中国科学技术出版社
CHINA SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS



建筑声学设计

ARCHITECTURAL ACOUSTICS DESIGN

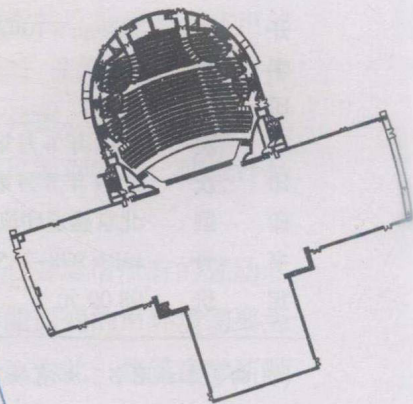


RFID

罗钦平 王金滔 毛志新 编 著

中国科学技术出版社

· 北 京 ·



图书在版编目(CIP)数据

建筑声学设计 / 罗钦平, 王金滔, 毛志新编著. —北京: 中国科学技术出版社,
2019.6

ISBN 978-7-5046-8276-5

I. ①建… II. ①罗… ②王… ③毛… III. ①建筑声学—声学设计

IV. ①TU112.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第068717号

策划编辑	王晓义
责任编辑	王晓义 许思兰
封面设计	中文天地
正文设计	中文天地
责任校对	邓雪梅
责任印制	徐 飞

出 版	中国科学技术出版社
发 行	中国科学技术出版社有限公司发行部
地 址	北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编	100081
发行电话	010-62173865
传 真	010-62179148
网 址	http://www.cspbooks.com.cn

开 本	787mm × 1092mm 1/16
字 数	460千字
印 张	20.5
版 次	2019年6月第1版
印 次	2019年6月第1次印刷
印 刷	北京盛通印刷股份有限公司
书 号	ISBN 978-7-5046-8276-5 / TU · 119
定 价	98.00元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

序

我可以称得上是进入耄耋之年了，涉足建筑声学这一领域也已有 60 个年头，承蒙编者抬爱，被邀为此书做序。岂敢！岂敢！倒不如把建筑声学前后 60 年做些对比吧！毕竟自己涉其之中，也算是一个见证。

忆过去，曾是早年留美的物理学者（如马大猷、魏荣爵、章启馥等）为我国建筑声学的发展播撒了第一批种子。归国后的他们不遗余力地在一些高等院校（中国科学院、南京大学、同济大学）建立了第一批建筑声学研究机构，不遗余力地把国外建筑声学专著译成中文。他们为建筑声学在国内的萌芽和发展做出了突出贡献。那时，国内相关领域的从业者寥若晨星，建筑界对建筑声学也感到异常陌生。而今，建筑声学在我国成了一棵参天大树，枝叶繁茂；建筑声学设计工程繁星闪烁，建筑声学人才比比皆是。

忆过去，那是 20 世纪八九十年代，建筑声学是建筑学中冷门里的冷门。所谓“科班”出身的我们（人数仅 15 人）被分配到教学、设计、研究单位却都毫无用武之地，成了闲人中的闲人。而今，随着建筑事业的蓬勃发展，建筑声学成了当前建筑设计中一项炙手可热、不可或缺的设计。在现代建筑中，以视听为主要功能的观演建筑要求能提供优良的听闻条件，以生活、工作、学习为主要功能的居住、办公、学校建筑则要求能提供安静、舒适的室内环境……从事建筑声学的业界人士，无不感到振奋，大有撸起袖子加油干的激情。

忆过去，我们从事的建筑声学设计手法是以直线传播为依据的声线作图，混响时间是厅堂音质设计中唯一的评价标准。而今，声音在厅内衰减过程中的反射声与直达声的时间延迟及其组成状况成为评价标准体系中的重要一项。与此同时，还把声音在室内传播完全视为波动过程，许多几何声学未曾考虑的声衍射、声影、共振、驻波等物理现象也尽在设计考虑范围之内。此外，采用计算机模拟技术，通过缩尺模型实验，使设计呈现出的效果更符合主观和客观的音质评价标准。

今昔对比，建筑声学确有翻天覆地的变化，抱着一份感恩的心会珍惜所有的感动。

展望未来，更多功能各异的现代建筑将会不断地涌现，随功能而变的声环境需要为艺术提供展现空间，同时，艺术也在呼唤建筑声学的介入和衬托。为此，建筑声学所赋

予的使命将会越来越多地降临在广大建筑设计师和室内装饰设计师头上。让我们永远记住这句话：好书不只是知识的传递，更能实现更多技能的转移。

李松金

2018年8月

李松金，福建长汀人，高级工程师。1961年上海同济大学建筑物理专业本科毕业。大学毕业后在武汉城市建设学院（今武汉理工大学）任助教，1964年调入中南建筑设计院任建筑师，1985年调入武汉市建筑设计院（今中信建筑设计研究总院有限公司）任高级工程师、主任工程师。30多年来，从事过建筑、建筑声学、建筑热工的教学、科研及设计工作。早年参与过第二汽车制造厂的建筑设计、唐山市的重建，也曾参与我国《民用建筑热工设计规程》（JGJ 24—1986，现已废止）、《民用建筑热工设计规范》（GB 50176—2016）、《民用建筑隔声设计规范》（GB 50118—2010）的制定。在武汉、深圳等地从事建筑声学工程设计数十项，较具代表性的工程有：武汉市洪山体育馆、河南省体育馆、十堰市二汽体育馆、武汉杂技厅、武汉音乐学院音乐厅、深圳艺术学校音乐厅、深圳艺术中心报告厅、武汉宽银幕立体声电影院、湖北教育学院演播室、湖北省农行干部管理学院演播室、中南国家计量测试中心消声实验室、二汽发动机消声实验室等项目的建筑声学设计。为把科研成果转化成生产力，曾组建武汉声学技术工程联营公司，任经理兼总工程师。治理的噪声工程一时遍布武汉三镇。在众多工程中有数项获省市级优秀设计奖、科技进步奖；有数十篇论文参加省级以上学术报告会交流，数篇论文在专业期刊中刊载。曾任中国建筑学会建筑物理分会委员、湖北省建筑学会建筑物理专业委员会副主任委员、湖北省声学学会副理事长、湖北省声学学会环境声学专业委员会主任委员等职。

编者的话

我通过自学走上了建筑声学设计这条路。

由于各种原因，迄今为止，有关建筑声学设计方面的书籍比较少，尚没有一本系统、全面、细致、具体地介绍建筑声学设计实操的书籍。这给业界后来者的学习造成了不便。

在近 20 年的时间里，我阅读了较多国内外有关建筑声学设计的书籍，研究了大量的国内外业界人士的建筑声学设计方案。同时，我和我的助手们也做了上千个建筑声学设计方案，成功地完成了数百个各类建筑声学设计项目。在多年积累的经验中，我发现，目前国内的建筑声学设计存在以下三大问题。

一是不够全面。体型设计基本被忽略，噪声与振动控制设计经常被忽略。

二是只有方案设计，没有施工图设计。不提供施工图的做法，使建筑声学设计师对施工具体程序、工艺要求等不了解，造成了大量方案理论上成立、实际上不能实施或实施不到位的结果；也造成了设计师和施工单位对设计目标与实际效果之间出现的差异互相推责的现象。

三是不少似是而非的方案被采用，造成了大量的资源浪费，令人痛心。

为了给业界后来者提供一个比较完整和系统学习建筑声学设计的条件，推进建筑声学设计的系统化、规范化，我决定抛砖引玉，根据多年的工作实践，编写《建筑声学设计》这本书，供读者参考。由于我们的水平有限，书中不当之处在所难免，还望广大读者批评、指正。

在我学习建筑声学设计的过程中，严谨、睿智的李松金老师给予了我大量的指导，花费了很多心血。在此，对李松金老师表示崇高的敬意和衷心的感谢！

张学勇、左晓娟、陈嘉华、刘晓林、吴茜茜、李奇蔚、方海新、雷诚参与了本书的编写工作，隔而固（青岛）振动控制有限公司的尹学军、王建、罗勇负责本书第 3 章“3.10 建筑隔振”的编写工作。在此，对他们的付出表示衷心的感谢！

罗钦平

2018 年 8 月

目 录

第1章 厅堂音质设计	1
1 体型设计	1
2 混响时间设计	45
3 主要厅堂内各界面材料的选用	62
4 吸声材料与吸声结构	65
5 主要声学厅堂噪声控制设计	86
6 扩声设计 / 声学缩尺模型试验	88
第2章 隔声设计	89
1 隔声设计的原则	89
2 各种隔声设计	91
3 隔声设计注意事项	143
第3章 噪声与振动控制设计	147
1 房间平面布置	147
2 噪声控制	152
3 隔振设计	161

4 消声器	204
-------	-----

第4章 主要声学空间音质设计 227

1 体育馆音质设计	227
2 剧场音质设计	244
3 音乐厅音质设计	262
4 电影院音质设计	268
5 会议室、报告厅音质设计	276
6 宴会厅音质设计	277
7 候机厅、候车厅音质设计	278
8 演播厅、录音室音质设计	279
9 声学方案问题案例	290

第5章 室内声场模拟软件介绍 295

1 室内声场模拟软件的由来	295
2 室内声场模拟的计算原理	297
3 室内声场模拟的基本功能	299
4 软件可靠性分析	301
5 珠岛宾馆礼堂建筑声学设计应用实例	301

附录 建筑声学名词解释 313

1 音质参量说明	313
2 隔声、噪声控制、吸声有关名词解释	314

结束语 317

厅堂音质设计

随着国民生活水平的提高及对良好建筑声环境的追求，厅堂音质设计（室内音质设计）已经成为建筑设计中不可或缺的一部分。尤其是对部分具有特殊听音要求的空间，如剧院、音乐厅、电影院、会堂、录音室、电视演播厅等空间，室内音质设计属必不可少的一项设计内容。除上述较为特殊的空间外，由于家庭影院、听音室以及大量听音用多媒体设备的普及，在学校、住宅建筑的常规设计中，室内音质设计也成了不可忽视的一部分。室内音质设计需以合理的背景噪声控制设计以及空间体型设计作为基础。也就是说，为保证室内音质效果，声学专业与建筑、结构、暖通、机电、装饰等专业需要互相配合。如马大猷所说：“一座厅堂要达到良好的音质要求，需要水平最高的建筑师与声学师密切合作，创造性地发挥最高水平。”建筑师要懂一些声学原理并尊重声学师，声学师要懂一些建筑常识并尊重建筑师。

在常规的空间中，室内音质设计应在建筑隔声和噪声控制（安静度）做好的基础上，以保证“足够的响度”“满意的清晰度”“合适的丰满度”“声场均匀度”“无声缺陷”“无噪声干扰”等基本要求来制订设计目标。

各类空间的室内音质设计中的吸声、反射、扩散设计因空间功能存在差异。其具体的设计思路，包括使用材料的类型，材料的布置、安装方法等，应根据项目实际情况分析，不可一概而论。

1 体型设计

1.1 体型设计的目的

体型设计是音质设计的一部分。把它放在厅堂音质设计的开篇，主要有以下几个

原因。

(1) 体型设计不仅是建筑设计的基础，更是厅堂音质设计的基础。

(2) 体型设计被不少声学设计师忽略。

(3) 声学设计师需要参与建筑体型设计，却通常被项目业主和建筑设计师忽略，以致国内不少声学空间在建筑设计时，体型就有较大声学缺陷。在建筑设计完成甚至建筑主体施工完成后，再让声学设计师参与，这时面对的就是一个难度极高的建筑声学设计挑战。

体型设计主要是为了充分利用房间内的有效声能，使早期反射声在时间和空间上能够合理分布，并防止房间内出现声聚焦、颤动回声、驻波、声影等声学缺陷。

1.2 体型设计的原则

对于观演类厅堂的体型，应由建筑声学设计师根据声学原理和项目功能定位要求进行设计。对于功能、体积已经确定的观演空间，体型设计的结果直接决定早期反射声的时间和空间分布，甚至影响直达声的传播，将对厅堂内的听音效果、装修造价产生重大影响。因此，体型设计是厅堂音质设计的重要基础。

体型设计应满足以下几个要求。

(1) 合适的容积控制。

(2) 充分利用声源的直达声，依据声学原理使直达声能够传播到厅堂的每一处。

(3) 通过合理的体型设计，去争取和控制厅堂内的早期反射声，使其满足合理的时间和空间分布要求。

(4) 适当的声扩散处理，使厅堂内的声场达到好的扩散程度，以满足厅堂内声场均匀度的要求。

(5) 防止厅堂内出现声聚焦、多重回声、声影区、驻波等声学缺陷。

(6) 明确墙体的装修厚度、顶棚的装修高度及荷载，给建筑设计师、装饰设计师提供方便。

1.2.1 厅堂的容积控制

不同声学厅堂，对容积（每座容积）控制有不同的要求。比如：

歌舞剧场观众厅的每座容积建议为 $4.5 \sim 7.5\text{m}^3$ ；

话剧、戏曲剧场观众厅的每座容积建议为 $4.0 \sim 6.0\text{m}^3$ ；

电影院观众厅的每座容积建议为 $6.0 \sim 8.0\text{m}^3$ ；

会堂、报告厅、多功能厅观众厅的每座容积建议为 $3.5 \sim 5.0\text{m}^3$ ；

体育馆比赛大厅的每座容积建议为 $15.0 \sim 25.0\text{m}^3$ 。

1.2.2 声源直达声的利用

直达声强度的大小将影响观众席上声音的清晰度。由于观众席的吸声作用，直达声每经过一个观众席，强度都会有衰减，故而观众席的听音清晰度与声源距离成反比，距离越远清晰度越差。

演出时，演员和部分乐器发出的声音均有一定的指向性。高频声音的指向性强，低频声音的指向性弱。观众席不在声音辐射（指向性）的区域内时，听音清晰度较差。

以自然声演出为主的厅堂，体型设计应注意以下几点。

(1) 厅堂的纵向长度一般不宜超过 35m。

(2) 使观众席尽量靠近舞台。当观众席超过 1200 座时，宜增加一层悬挑式楼座；当观众席超过 1800 座时，宜采用两层或者多层悬挑式楼座。

(3) 观众席的平面布置，建议将绝大部分观众席置于以声源为顶点的 140° 角的区域内。

(4) 观众厅尽可能采用高低错落的梯田式布置。观众席的高差设计既可以满足视线的设计要求、高低错落的区域变化，也有利于加强观众厅的声扩散。

(5) 观众厅顶棚设计，既应满足声反射和声扩散的要求，还应满足混响设计、隔声设计的要求。

1.2.3 早期反射声的控制

比直达声滞后 50ms 以内到达的声音称为早期反射声。音乐演出，可以延长至 80ms。

观众厅的体型设计应该使厅内每个观众席都能够接收到丰富的早期反射声，尤其是侧向早期反射声。

依据声学原理，在对观众厅作平面、剖面图进行声线分析时，即可得到每种体型的观众厅的早期反射声的状况。声线分析时，建议声源的位置选择舞台大幕线中心后 3m、高于舞台地面 1.5m 处，分别对顶棚及侧墙的形状进行声线分析，以确定顶棚和侧墙的最佳造型。设有乐池时，应在乐池开口中心增设一个声源点再做声线分析。

案例 1-1 浙江省横店海晏堂 3030 座大剧场声线分析

图 1-1~图 1-3 为横店海晏堂大剧场声线分析图。声源位于大幕线中心后 3m，离舞台地面高 1.5m 处。从声源发出的声音，经观众厅吊顶及侧墙反射后，可到达池座和楼座观众席的各个区域，声场分布均匀，并给观众席提供了大量的早期反射声，为提高观众区域的听音清晰度、亲切感及空间环绕感发挥了重要作用。

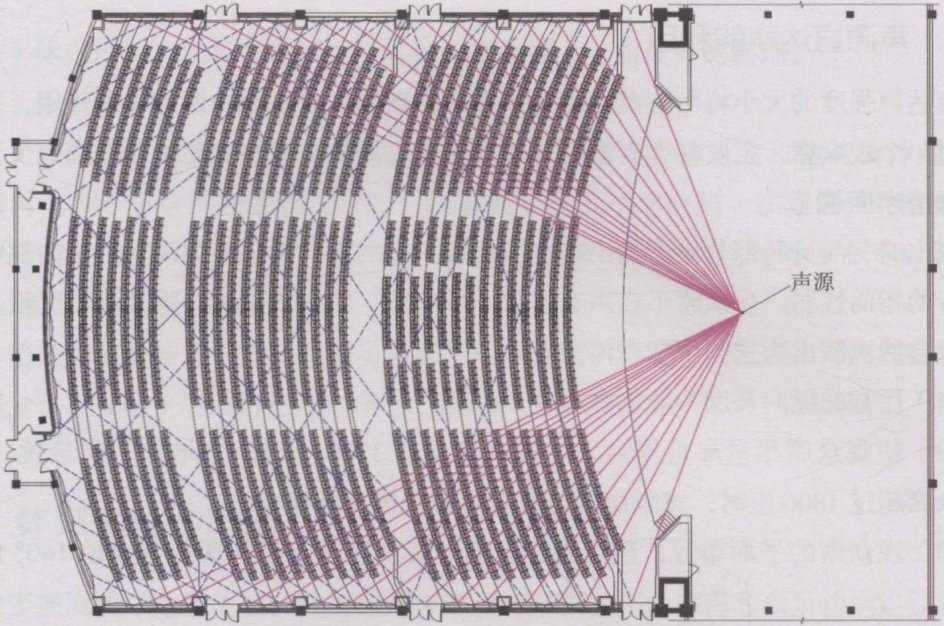


图 1-1 横店海晏堂大剧场池座声线分析平面图

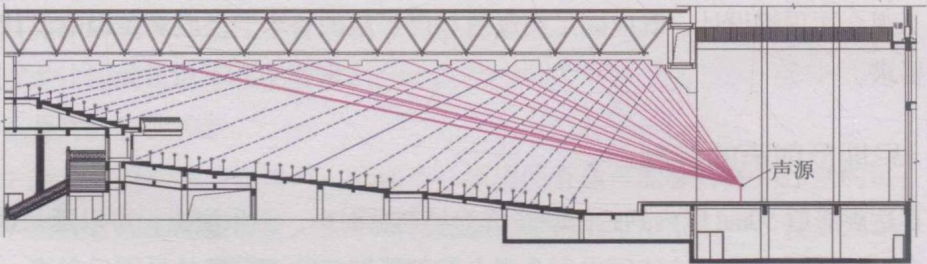


图 1-2 横店海晏堂大剧场声线分析剖视图

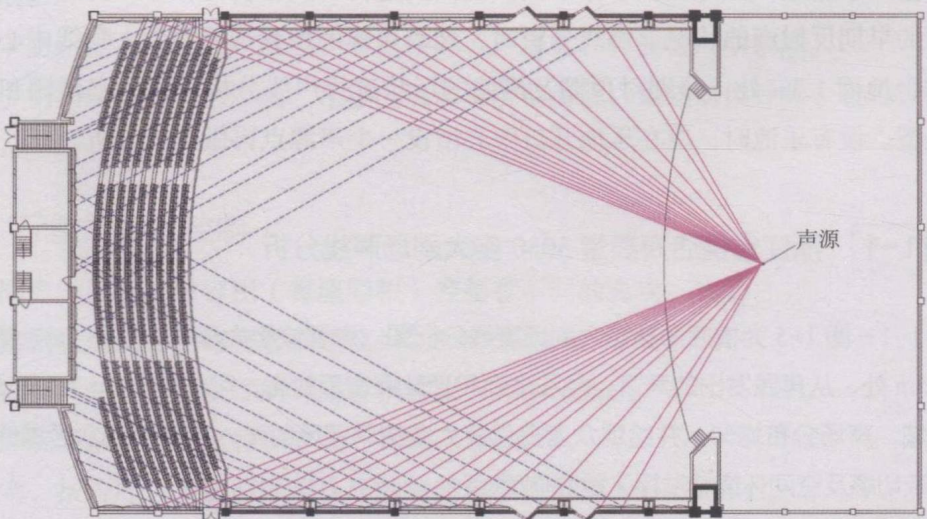


图 1-3 横店海晏堂大剧场楼座声线分析平面图

案例 1-2 江西省上高县艺术中心剧场声线分析

图1-4~图1-6为上高县艺术中心剧场声源1的声线分析图。舞台内设有音乐罩，声源1位于大幕线中心后3m，离舞台地面高1.5m处（音乐罩中心位置）。从声源发出的声音，经音乐罩、观众厅吊顶及侧墙反射后，可到达池座和楼座观众席的各个区域，声场分布均匀，并给观众席提供了大量的早期反射声。

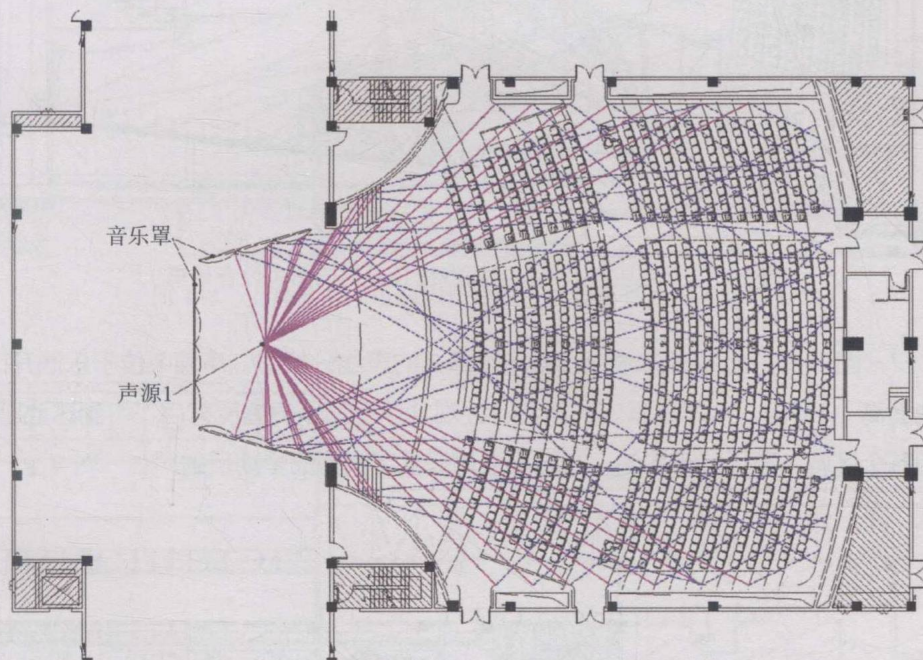


图1-4 上高县艺术中心剧场池座声线分析平面图（设音乐罩）

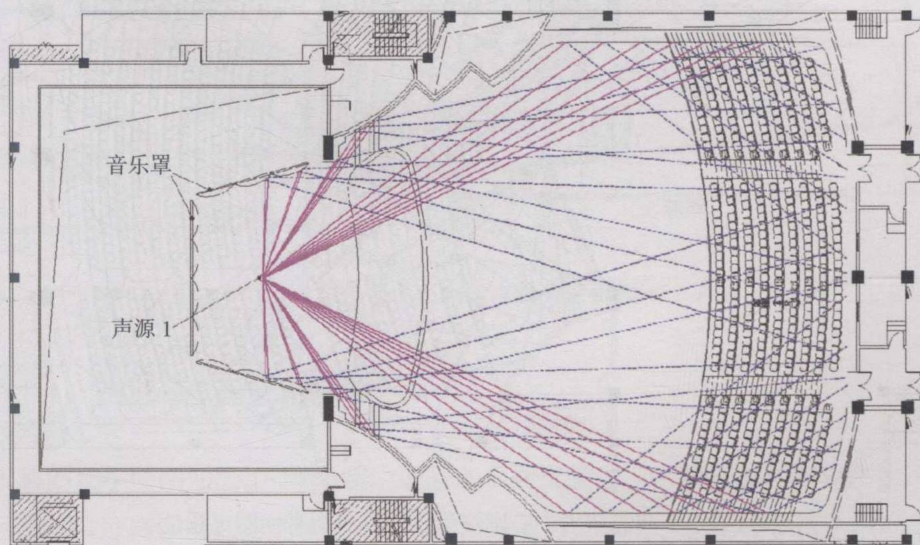


图1-5 上高县艺术中心剧场楼座声线分析平面图（设音乐罩）

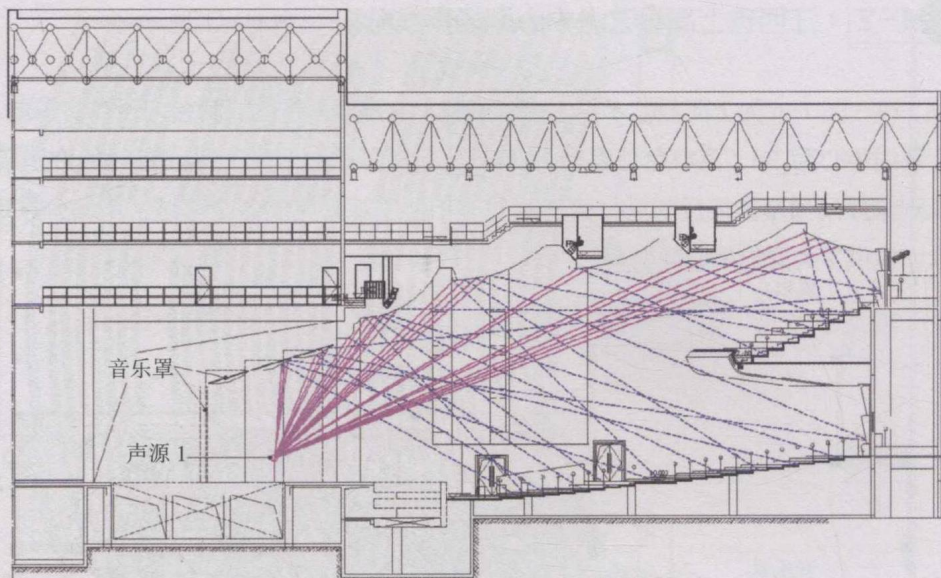


图 1-6 上高县艺术中心剧场声线分析剖视图(设音乐罩)

图 1-7~图 1-9 为上高县艺术中心剧场声源 2 的声线分析图。声源 2 位于乐池开口中心，离乐池地面高 1.5m 处。从声源发出的声音，经观众厅吊顶及侧墙反射后，可到达池座和楼座观众席的各个区域，声场分布均匀，并给观众席提供了大量的早期反射声。

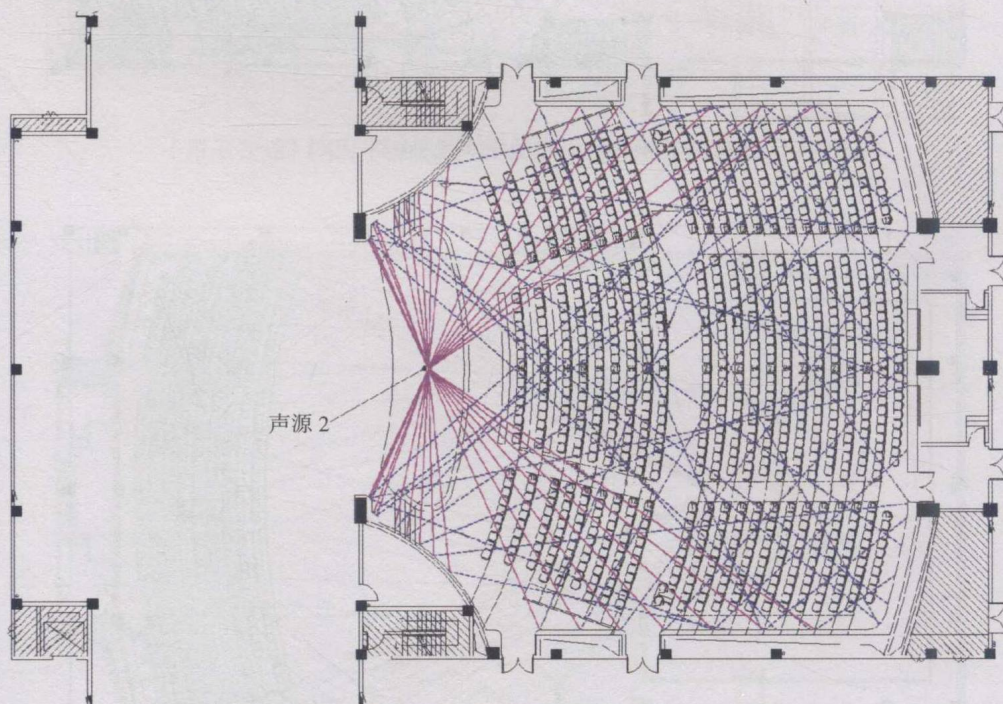


图 1-7 上高县艺术中心剧场池座声线分析平面图(乐池)

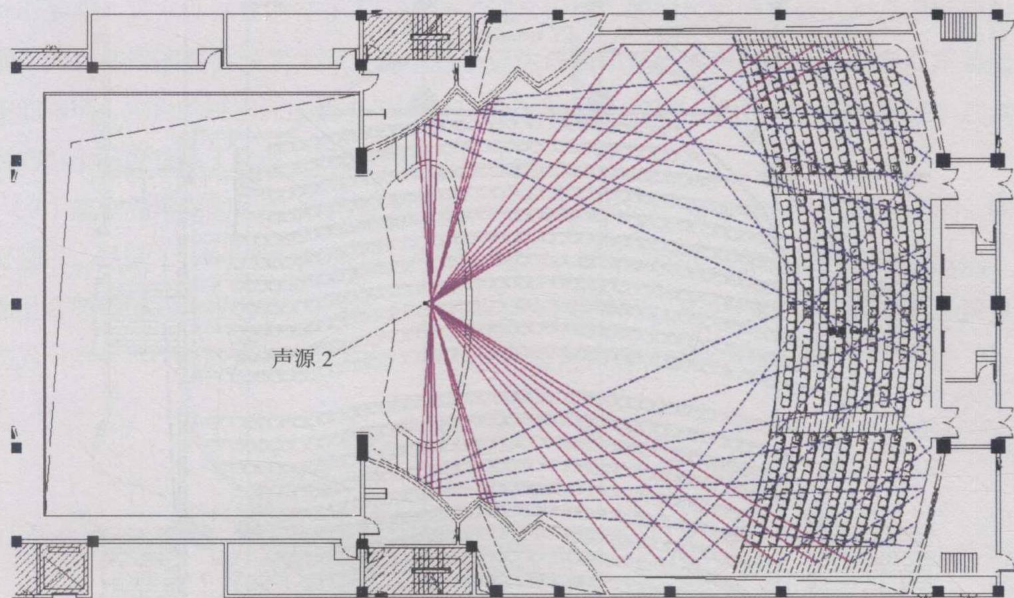


图 1-8 上高县艺术中心剧场楼座声线分析平面图(乐池)

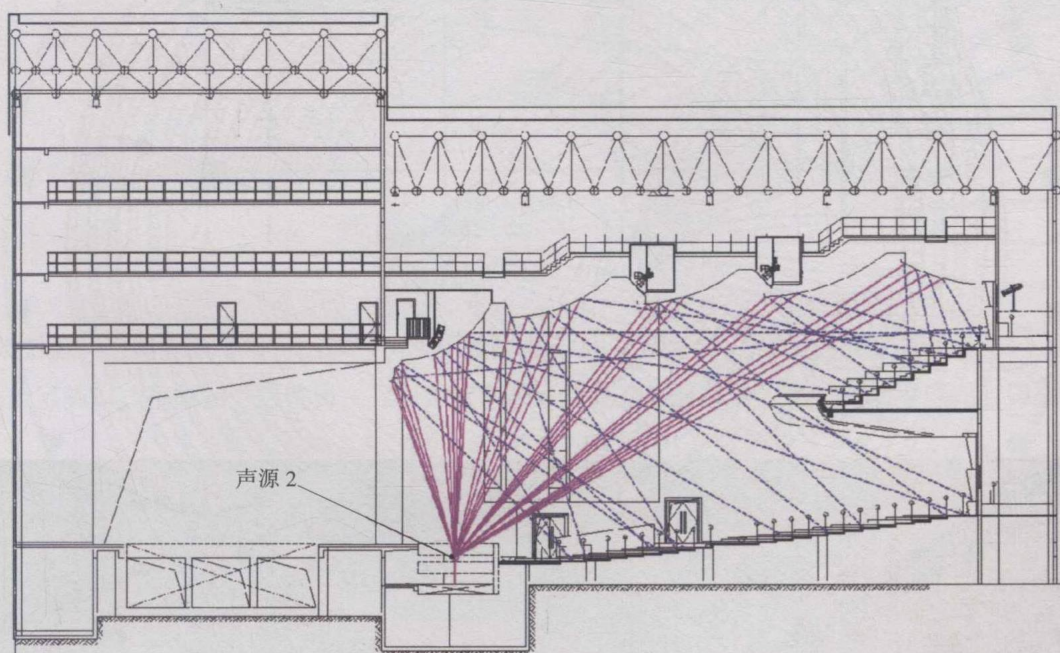


图 1-9 上高县艺术中心剧场声线分析剖视图(乐池)

案例 1-3 其他存在缺陷的案例

(1) 某剧场平面图如图 1-10 所示。该剧场平面呈圆形，凹弧形墙面容易产生声聚焦缺陷，而且在观众厅内设有独立的柱子，在遮挡观众视线的同时，也阻碍了直达声及早期反射声的传播。

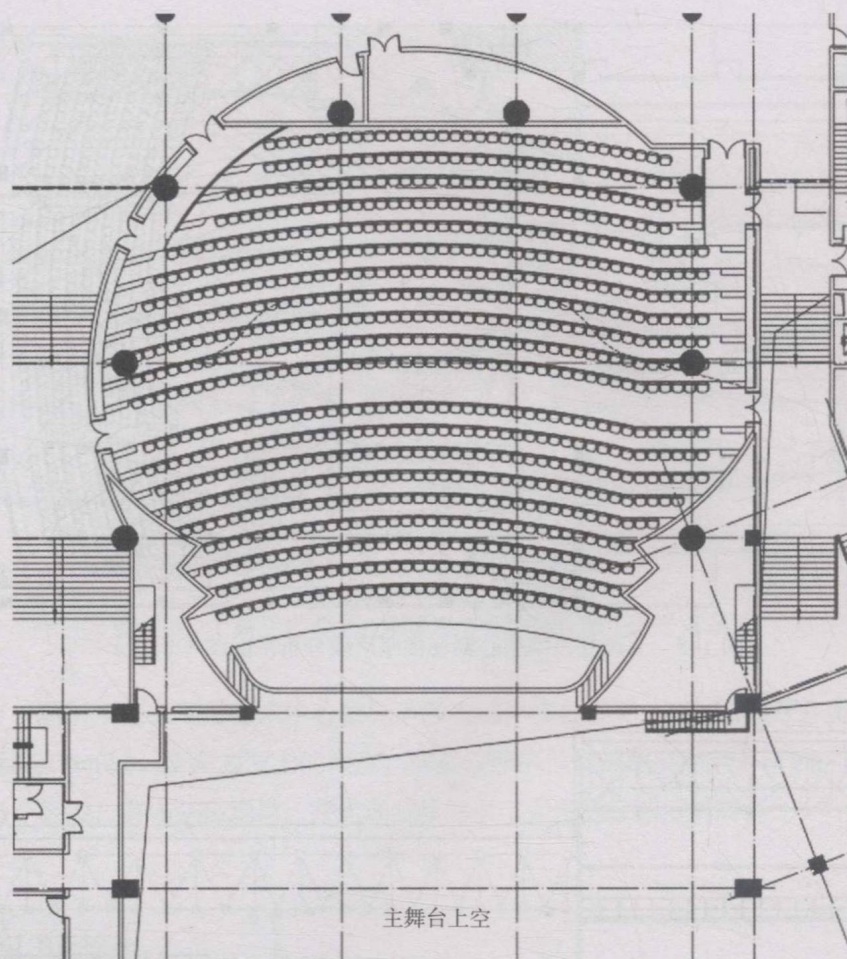


图 1-10 某剧场平面图

(2) 某剧场效果图如图 1-11 所示。从该剧场效果图可以看出, 为了增加楼座的座位数, 楼座设计的悬挑深度很深, 建筑结构在观众厅池座及楼座后方设有独立的柱子, 以满足结构

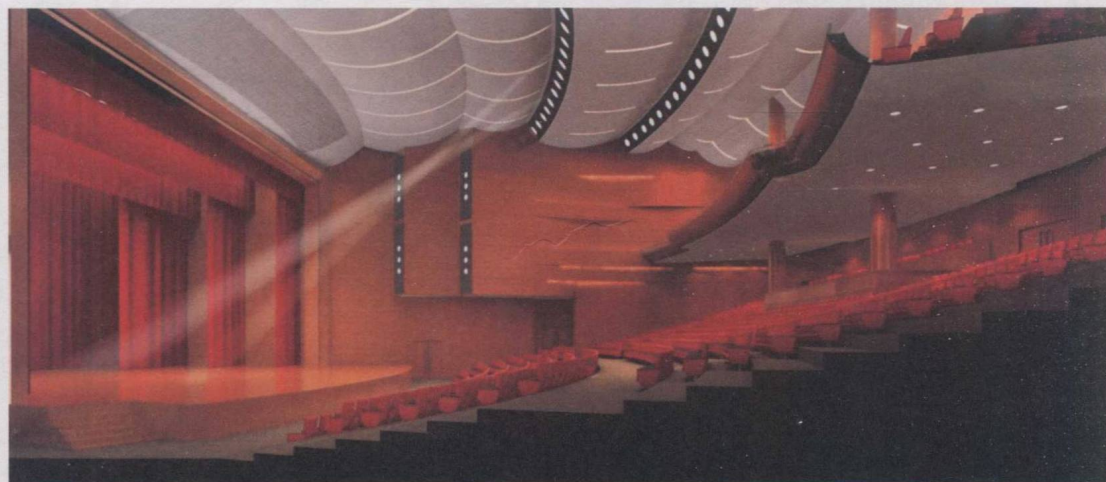


图 1-11 某剧场效果图

设计的要求。观众厅独立的柱子不仅遮挡了观众视线，同时也阻碍了直达声及早期反射声的传播。而且楼座的悬挑深度太深，也不利于直达声及早期反射声的传播。以自然声演出功能为主的剧场，挑台的挑出深度宜小于楼座下开口净高的1.2倍；以扩声为主的剧场，观众厅内挑台的挑出深度宜小于楼座下开口净高的1.5倍。

(3) 某剧场平面图如图1-12所示。舞台位于剧场中心，观众席设置在舞台四周，剧场平面呈圆形。从图1-12中剧场的声线分析可以看出，凹弧形墙面极易产生声聚焦缺陷。如果墙面没有严格进行全频吸声/扩散处理，从声源发出的声音，经凹弧形后墙反射后，聚集于舞台的另一侧，不仅造成声场的不均匀，而且会形成虚声源，对声源的定位极为不利。

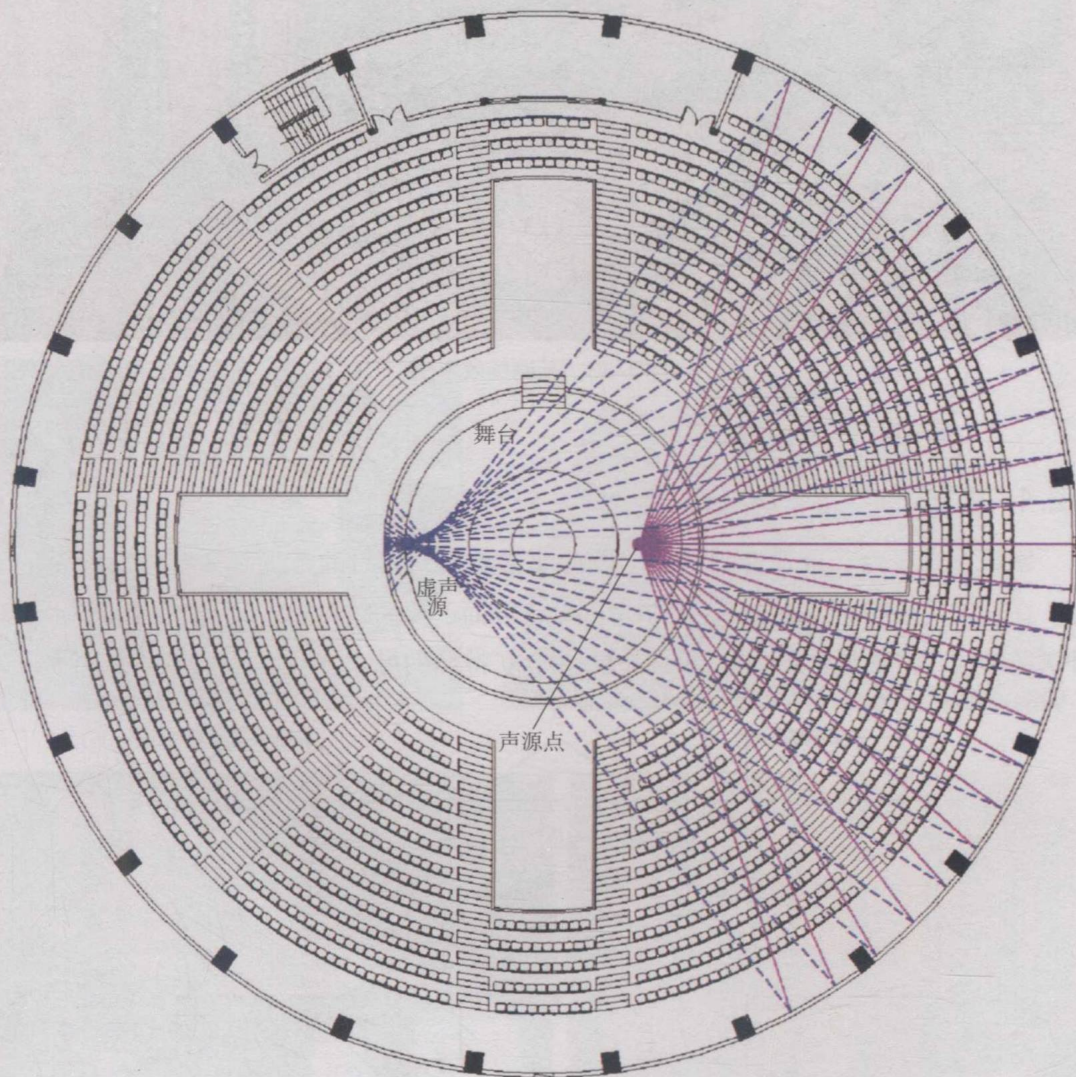


图1-12 某剧场平面图

(4) 某剧场效果图如图1-13所示。在其设计方案中，顶棚吊顶第二级的形状设计不合理(向内凹)，不利于早期反射声的获得。