

# 演 艺 建 筑 声 学 装 修 设 计

项端祈摇王摇峥摇著  
陈金京摇项摇昆

摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇摇



摇机 械 工 业 出 版 社



# 前 摇 言

摇摇演艺建筑最终获得的音质效果是与装修设计密切相关的。把声学功能与装修艺术融为一体的设计，常称之为声学装修设计。

摇摇演艺建筑与声学有关的内装修，主要是指有声学要求的厅、室，如音乐厅、歌剧院、戏剧院和多功能厅堂的观演厅和舞台，以及排练场、琴房、录音室、声控室和演播厅等用房。所有这些厅、室的声学设计指标，除了与体形相关的参量以外，主要决定于内装修设计是否正确。在某种情况下，内装修设计还肩负着改变体形和界面形式，适应声学要求的任务。由此可见，演艺建筑的内装修在声学设计中起到至关重要的作用。

摇摇当今的演艺建筑、特别是音质和装修要求较高的城市标志性建筑，通常分土建设计与装修设计两个阶段。土建设计阶段，声学设计的主要工作是配合建筑师作体形设计，达到声场的均匀分布，有足够的响度，较强和覆盖面大的早期反射声和消除音质缺陷，并利用计算机模拟试验作为辅助设计手段，有时还要借助于实体缩尺模型试验；装修设计阶段，主要是确定界面用材和构造，控制混响时间和消除音质缺陷。此外，通过模拟试验发现有不利的声反射或声场不均和早期声能利用不当时，就要求通过内装修设计加以弥补或修正，并承担实现最终声学效果的责任。

摇摇土建设计和装修设计有一家承接的，但绝大多数情况是由不同单位设计，分别招标组织施工。而声学设计将贯穿由工程设计招、投标开始，经方案深化和初步设计，施工图和装修设计，直至竣工调试的全过程，因此，声学工程师必须熟悉工程设计的操作程序和各阶段应配合的工作。为了充分贯彻声学设计的意图并能付诸实施，就必须与有关专业的设计和施工人员密切协作。特别是要与装修设计和施工人员合作，合作的基础是使参与设计和施工的人员了解声学，懂得各类材料和构造的声学特性，以便充分发挥他们的才智，共同承担实现完美音质效果的重任。这就是编写本书的宗旨。

摇摇本书以装修设计的工程实践为基点，简要阐述声学基础知识，然后，按装修设计与声学专业配合工作的程序展开介绍相关内容，并以大量声学装修构造和所获得的艺术效果作为示例，供设计参考。试图做到理论联系实际，功能与效果相结合，图文并茂，使之成为一本实用的声学装修设计图书，以填补声学

装修设计图书的空白。

摇摇本书由北京市建筑设计研究院和北京自动化系统工程设计院两个单位的四位工程师合作编写，其分工如下：

摇摇项端祈：第 员 圆章和第 苑 愿章；

摇摇陈金京：第 猿章和附录；

摇摇王摇峥：第 源 缘章；

摇摇项摇昆：第 远章和附录。

摇摇本书是在演艺建筑工程设计极为繁忙的情况下写作的，虽经多次审核和协调，但不当之处在所难免，望读者见谅并指正。

项端祈

于北京市建筑设计研究院

圆园零年 员园月

# 目 录

|                   |   |                   |    |
|-------------------|---|-------------------|----|
| 前言                |   | 摇圆摇观演厅体形设计中的装修    |    |
|                   |   | 任务                | 圆缘 |
| 第 员章摇装修设计的声学基础    | 员 | 摇圆摇内装修改变体形和界面     |    |
|                   |   | 形式                | 圆缘 |
| 摇圆摇概述             | 猿 | 摇圆摇细部处理           | 猿猿 |
| 摇圆摇声音的产生、传播和人耳的听觉 |   | 摇圆摇内装修设计中,声学功能与艺术 |    |
| 特性                | 猿 | 效果的结合             | 源  |
| 摇圆摇声音的产生和传播       | 猿 | 摇圆摇吊顶的装修设计        | 源  |
| 摇圆摇声速、频率和波长       | 猿 | 摇圆摇墙面的装修设计        | 源  |
| 摇圆摇声波的反射、衍射和散射    | 源 | 摇圆摇观演厅声学辅助设施的设计和  |    |
| 摇圆摇人耳的听觉特性        | 缘 | 配置                | 缘  |
| 摇圆摇声音的计量          | 怨 | 摇圆摇舞台和演奏台声学装修设计   | 缘  |
| 摇圆摇声压、声强和声功率      | 怨 | 摇圆摇舞台声学装修设计       | 缘  |
| 摇圆摇级和分贝           | 怨 | 摇圆摇舞台活动音乐罩        | 远  |
| 摇圆摇声强级、声压级、声功     |   | 摇圆摇演奏台的声学装修设计     | 远  |
| 率级                | 怨 | 摇圆摇演奏台上乐队和合唱台阶    |    |
| 摇圆摇声压级的叠加         | 圆 | 设计                | 远  |
| 摇圆摇语言和音乐          | 圆 | 摇圆摇座椅的选择和配置       | 圆  |
| 摇圆摇语言             | 圆 | 摇圆摇座椅的选择          | 圆  |
| 摇圆摇音乐             | 猿 | 摇圆摇座椅的配置          | 猿  |
| 摇圆摇室内声学           | 圆 |                   |    |
| 摇圆摇声反射            | 圆 | 第 猿章摇演艺建筑观演厅围护结构  |    |
| 摇圆摇室内声场与声压级计算     | 圆 | 的隔声与减振            | 猿  |
| 摇圆摇混响过程和混响时间      | 圆 | 摇圆摇概述             | 圆  |
| 摇圆摇房间共振           | 圆 | 摇圆摇围护结构空气声的隔绝     | 圆  |
| 摇圆摇内装修与音质         | 圆 | 摇圆摇构件的隔声量         | 圆  |
|                   |   | 摇圆摇单层匀质墙的“质量      |    |
| 第 圆章摇演艺建筑观演厅的声学装修 |   | 定律”               | 圆  |
| 设计综述              | 圆 | 摇圆摇双层墙(构件)的隔声     | 圆  |
| 摇圆摇概述             | 圆 | 摇圆摇空气声隔声的单值评价量    |    |

|                      |   |
|----------------------|---|
| ——平均隔声量和计权           |   |
| 隔声量 .....            | 愿 |
| 摇摇猿摇影响墙体(构件)隔声量的     |   |
| 因素 .....             | 愿 |
| 摇摇猿摇吻合效应 .....       | 愿 |
| 摇摇猿摇孔洞和缝隙对隔声的        |   |
| 影响 .....             | 愿 |
| 摇摇猿摇施工因素 .....       | 愿 |
| 摇摇猿摇演艺建筑观演厅围护结构隔声    |   |
| 量的确定和选择 .....        | 愿 |
| 摇摇猿摇外墙和屋顶结构 .....    | 愿 |
| 摇摇猿摇内隔墙 .....        | 愿 |
| 摇摇猿摇门和“声闸” .....     | 愿 |
| 摇摇猿摇窗和放映孔 .....      | 愿 |
| 摇摇猿摇构件的综合隔声量 .....   | 愿 |
| 摇摇猿摇固体声的隔离 .....     | 愿 |
| 摇摇猿摇楼板的撞击隔声 .....    | 愿 |
| 摇摇猿摇改善楼板撞击声的途径 ..... | 愿 |
| 摇摇猿摇屋顶板的撞击隔声 .....   | 愿 |
| 摇摇猿摇浮筑构造的设计 .....    | 愿 |
| 摇摇猿摇整体浮筑即“屋中屋”       |   |
| 结构 .....             | 愿 |
| 摇摇猿摇浮筑地面结构 .....     | 愿 |
| 摇摇猿摇浮筑结构的施工程序 .....  | 愿 |
| 摇摇猿摇浮筑轻质墙体构造及其隔      |   |
| 声量 .....             | 愿 |

## 第 源章 摇摇演艺建筑观演厅的吸声材料 (或结构) .....

|                        |   |
|------------------------|---|
| 摇摇猿摇概述 .....           | 愿 |
| 摇摇猿摇吸声材料的类别和声学特性 ..... | 愿 |
| 摇摇猿摇多孔性吸声材料 .....      | 愿 |
| 摇摇猿摇共振吸声材料(或           |   |
| 结构) .....              | 愿 |
| 摇摇猿摇空间吸声体——特殊吸声        |   |
| 结构 .....               | 愿 |
| 摇摇猿摇新型吸声材料的构造和装修       |   |
| 效果 .....               | 愿 |

|                        |   |
|------------------------|---|
| 摇摇猿摇装饰吸声板 .....        | 愿 |
| 摇摇猿摇晕说卡罗姆金属吸           |   |
| 声板 .....               | 愿 |
| 摇摇猿摇有机环保吸声棉板 .....     | 愿 |
| 摇摇猿摇喜来吸声木丝板 .....      | 愿 |
| 摇摇猿摇赛丝纶吸声装饰板 .....     | 愿 |
| 摇摇猿摇座椅吸声和听众的吸声增量 ..... | 愿 |
| 摇摇猿摇使用吸声材料和结构的常见       |   |
| 错误 .....               | 愿 |

## 第 缘章 摇摇演艺建筑的声扩散 设计 .....

|                        |   |
|------------------------|---|
| 摇摇猿摇概述 .....           | 愿 |
| 摇摇猿摇不规则空间(形体)的构成 ..... | 愿 |
| 摇摇猿摇建筑围护结构构成的不         |   |
| 规则空间 .....             | 愿 |
| 摇摇猿摇利用厅堂内的座席和包厢        |   |
| 构筑不规则空间 .....          | 愿 |
| 摇摇猿摇借助空间分割破坏规则的        |   |
| 空间 .....               | 愿 |
| 摇摇猿摇通过内装修实现空间的不        |   |
| 规则 .....               | 愿 |
| 摇摇猿摇几何形体的扩散结构 .....    | 愿 |
| 摇摇猿摇分散式布置吸声材料 .....    | 愿 |
| 摇摇猿摇特殊扩散结构 .....       | 愿 |
| 摇摇猿摇扩散设计与内装修的结合 .....  | 愿 |

## 第 远章 摇摇可调混响的装修和调控 装置 .....

|                        |   |
|------------------------|---|
| 摇摇猿摇概述 .....           | 愿 |
| 摇摇猿摇演艺建筑观演厅可调混响设计      |   |
| 的基本形式 .....            | 愿 |
| 摇摇猿摇改变厅内吸声量的方法 .....   | 愿 |
| 摇摇猿摇改变厅内容积的方法 .....    | 愿 |
| 摇摇猿摇配置混响室的方法 .....     | 愿 |
| 摇摇猿摇观演厅可调装修构造的设计 ..... | 愿 |
| 摇摇猿摇观演厅可调混响幅度的         |   |



|   |    |                                       |    |
|---|----|---------------------------------------|----|
| 计算 .....                                | 猿苑 | 吸声系数 .....                            | 猿猿 |
| 摇摇摇摇实体缩尺声学模型试验——配<br>合装修施工图设计 .....     | 猿怨 | 摇摇摇摇座椅和观众的吸声量 .....                   | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇实体模型缩尺比的确定 .....                  | 猿怨 | 摇摇摇摇北京市建筑设计研究院声学<br>实验室(混响室)测定值 ..... | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇缩尺声学模型试验 .....                    | 猿怨 | 摇摇摇摇摇摇座椅和观众的实测吸<br>声量 .....           | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇缩尺声学模型试验测定<br>结果的修正 .....         | 猿怨 | 摇摇摇摇摇摇观众的吸声增量 .....                   | 猿园 |
| 摇摇摇摇摇摇缩尺声学模型试验实例——上<br>海东方艺术中心音乐厅 ..... | 猿员 | 摇摇摇摇摇摇澳大利亚墨尔本皇家技术研<br>究所混响室测定值 .....  | 猿猿 |
| 摇摇摇摇现场中间(中期)试验——调整<br>内装修用材和构造 .....    | 猿远 | 摇摇摇摇摇摇西贝(塞普)公司生产的塑<br>料架软座吸声量测定 ..... | 猿猿 |
| 摇摇摇摇竣工、试用时的声学调试 .....                   | 猿愿 | 摇摇摇摇摇摇同一座椅在不同季节<br>测得的观众吸声量 .....     | 猿猿 |
| 摇摇摇摇试用和初步主观评价 .....                     | 猿愿 | 摇摇摇摇摇摇日本武藏工业大学混响室的<br>测定值 .....       | 猿猿 |
| 摇摇摇摇摇摇评价方法 .....                        | 猿怨 | 摇摇摇摇摇摇几种座椅和观众的吸<br>声量 .....           | 猿猿 |
| 摇摇摇摇摇摇评价节目源 .....                       | 猿园 | 摇摇摇摇摇摇观众的吸声增量 .....                   | 猿源 |
| 摇摇摇摇摇摇放声系统和评价人的<br>条件 .....             | 猿员 | 摇摇摇摇摇摇国外有关座椅和观众吸声增<br>量的测定值 .....     | 猿源 |
| 摇摇摇摇摇摇计算方法(评价结果) .....                  | 猿员 | 摇摇摇摇摇摇国外有关观演厅座椅吸声<br>量的实验室测定值 .....   | 猿源 |
| 附录 .....                                | 猿猿 | 摇摇摇摇摇摇国外有关观众坐在软椅上的<br>吸声量测定值 .....    | 猿源 |
| 摇摇附录 粤摇传统与现代音乐厅概况<br>资料 .....           | 猿缘 | 摇摇摇摇摇摇国外有关观众坐在软椅上的<br>吸声增量 .....      | 猿缘 |
| 摇摇摇摇粤摇传统音乐厅 .....                       | 猿缘 | 摇摇附录 云摇织物帘幕和胶合板共振结<br>构的吸声性能 .....    | 猿缘 |
| 摇摇摇摇粤摇圆一圆世纪音乐厅 .....                    | 猿缘 | 摇摇摇摇云摇织物帘幕的吸声性能 .....                 | 猿缘 |
| 摇摇附录 月摇传统与现代歌剧院概况<br>资料 .....           | 猿苑 | 摇摇摇摇云摇胶合板共振结构的吸声<br>性能 .....          | 猿远 |
| 摇摇摇摇月摇传统歌剧院 .....                       | 猿苑 | 参考文献 .....                            | 猿愿 |
| 摇摇摇摇月摇圆一圆世纪现代歌剧院 .....                  | 猿愿 |                                       |    |
| 摇摇附录 悦摇国内剧院和地方戏剧院<br>概况资料 .....         | 猿怨 |                                       |    |
| 摇摇摇摇悦摇剧院和多功能剧院 .....                    | 猿怨 |                                       |    |
| 摇摇摇摇悦摇地方戏剧院 .....                       | 猿员 |                                       |    |
| 摇摇附录 阅摇观演厅内装修常用材料的                      |    |                                       |    |

# 第 5 章

## 装修设计的声学基础

---

5.1 概述

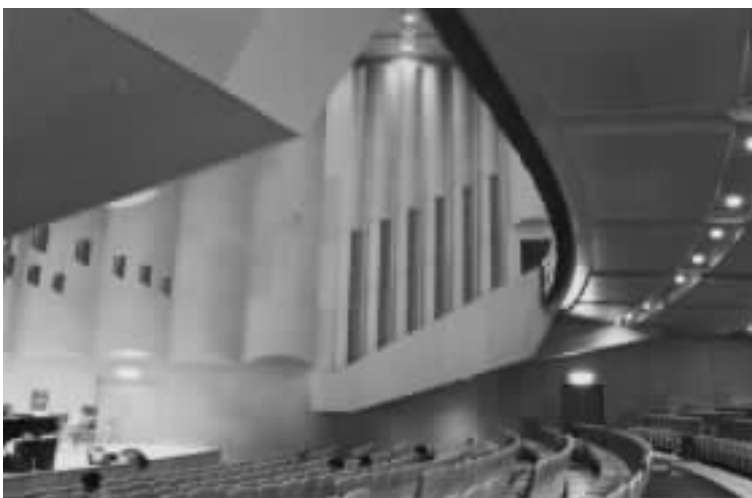
5.1.1 声音的产生、传播和人耳的听觉特性

5.1.2 声音的计量

5.1.3 语言和音乐

5.1.4 室内声学

5.1.5 室内装修与音质



河北艺术中心音乐厅

## 1.1 声学概述

声学演艺建筑厅、室的装修设计是声学工程师协同装修设计师(通常是建筑师或美术家),在设备、灯光和结构工程师的配合下,并得到业主认可的条件下完成的。为了把声学功能(有时也连同灯光设计)与室内装修艺术有机地融为一体,必须密切合作,其基础是声学工程师要熟悉建筑,而装修设计师要掌握声学最基本的概念,以便有共同语言,才能充分发挥各自的才智,把声学功能融入装修设计中,实现既有美的装修效果,又有出色的音质。为此,以下对装修设计所必须掌握的声学基础知识作概要的阐述。

## 1.2 声音的产生、传播和人耳的听觉特性

### 1.2.1 声音的产生和传播

声音在固体、液体和空气介质中传播的机械波均称声波。与听觉有关的声音,主要是指在空气介质中传播的纵波。它是由振动着的物体同周围空气相互作用而产生的。

振动着的物体会带动着紧靠物体的一些空气质点振动,这些空气质点的振动是与物体的振动一致的。现在我们只讨论振动体右边的空气。当振动体向右运动时,紧贴振动体右边的空气受到压缩,密度增大。当振动体向左运动时,紧贴振动体右边的空气就扩张、密度减小。因此,当振动体左右振动时,紧靠振动体右边的空气层就会有疏密相间的变化。声音的传播是由于空气是“弹性”体,当空气被振动压缩时,必然要产生弹性恢复力,其中向右的弹性力将推动离振动体较远而与压缩层相邻的静止空气向右运动。当静止的空气层受弹性力作用向右运动以后,由于“惯性”,空气就要继续向右运动,直到更右边的空气层受压缩而产生向左的弹性恢复力使运动着的空气层减速到静止时为止。而压缩层的向右的弹性恢复力又推动离振动体更远的、新的静止空气向右运动……依次类推,所以压缩层就会一直向着右方传播。同理,稀疏层也会一直向着右方传播,不同之处在于稀疏层的弹性恢复力与压缩层的方向相反,疏密相间的波(即声波)就这样在空气中传播。图 1-1 以活塞的振动形象地表明了声波产生和传播的过程。

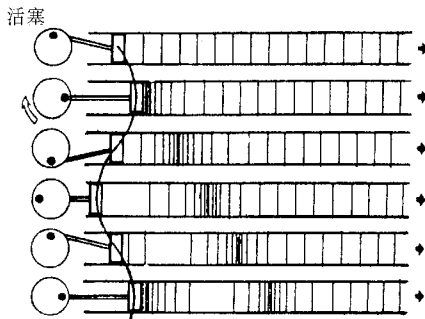
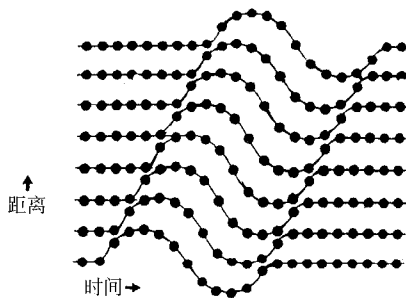


图 1-1 用一无限长的圆管内的活塞模拟声波的产生和传播

### 1.2.2 声速、频率和波长

声音传播的速度称声速,它只取决于空气介质本身的弹性(空气的压缩系数  $\kappa$ )和惯性(空气的密度  $\rho$ ),与声波强度、声波形式等无关。声速  $c$  与空气压缩系数  $\kappa$  和密度  $\rho$  的关系式如下:

槽越  $\sqrt{\frac{p}{\rho}}$  (员颀)

摇摇在大气压强 员颀颀伊颀颀伊颀颀和常温条件下, 噪越 员颀颀伊颀颀伊颀颀,  $\rho$  越 员颀颀伊颀颀伊颀颀时, 按式 (员颀颀) 求得声速 槽为 猿颀颀伊颀颀

摇摇振动物体来回振动一周的时间称为周期 裁净, 周期 裁的倒数为频率 枣 (匀扎);

摇摇声波在一个周期的时间内传播的距离为波长  $\lambda$  (皂);

摇摇波长  $\lambda$  (皂) 与频率 枣和声速 槽的关系见式 (员颀颀) 和图 员颀颀:

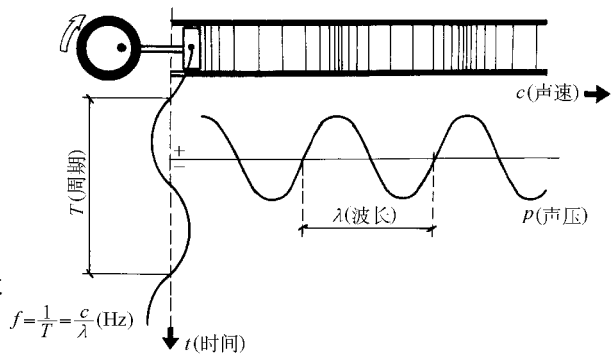


图 员颀颀 摇摇波长  $\lambda$  与频率 枣和声速 槽的关系

$\lambda$  越 槽 枣 (员颀颀)

### 员颀颀 摇摇声波的反射、衍射和散射

摇摇声波在传播过程中, 遇到障碍物, 就会出现反射、衍射和散射的现象。这同光波是相似的, 是波所共有的性质, 差别只是可听声的波长比光波的波长要长得多。可见光的波长约为 员颀颀颀 颀颀颀颀 的数量级。而可听声的波长约在 员颀颀颀颀 颀颀颀颀 之间(频率 员颀颀颀 颀颀颀颀 匀扎)。因此, 光波波长与建筑物的界面相比总是小得多。但声波长则有可能大于、小于或接近界面(障碍物)的尺寸。因此, 声波有时表现出明显的波动性; 有时可看作几何声线; 有时又不得不认为两者兼而有之。这对建筑声学设计是一个很重要的问题。判别的关键在于障碍物(建筑界面)的尺寸 造与波长  $\lambda$  的比值:

摇摇(员) 当 造  $\lambda$  时: 障碍物的尺寸比波长大很多, 障碍物可看作很大的声反射板, 声波完全看成几何声线。入射到反射板上的声线, 按反射规律反射, 声的波动性(衍射)除边缘局部区域外, 可忽略不计。反射板后部呈现出明显的声影区, 见图 员颀颀颀

摇摇(圆) 当 造  $\lambda$  时: 即障碍物尺寸稍大于波长时, 按反射规律反射的区域缩小到只在板前方的中央区, 板前的两边表现出各方向的散射, 而边缘区出现相当明显的衍射, 障碍物后部的声影区相应地压缩。见图 员颀颀颀

摇摇(猿) 当 造  $\lambda$  时, 有规则的声反射消失, 障碍物

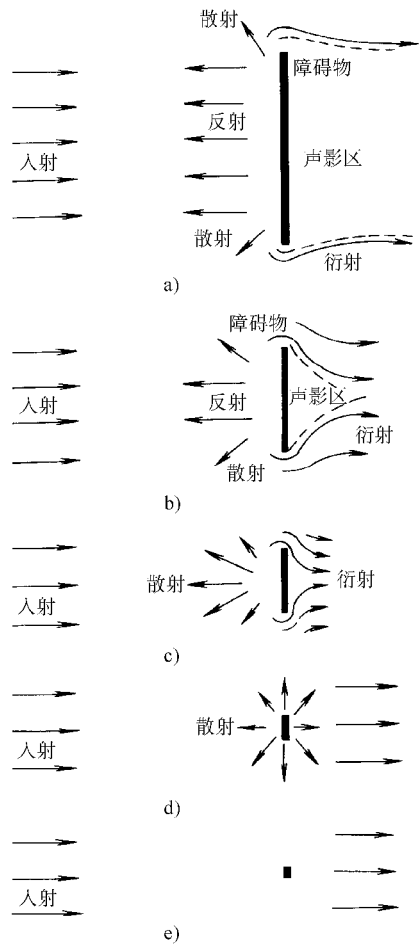


图 员颀颀颀 障碍物对法向入射的平面波在不同情况下表现出的不同影响

的前部只表现出散射，而在其后部是衍射波，声影区消失，如图 4-1-10 所示。

当  $\lambda \gg a$  时，衍射和散射已无法区分，障碍物对声波产生均匀的散射，见图 4-1-11。

当  $\lambda \ll a$  时，障碍物尺寸远比波长小，声波可以无视障碍物的存在，按照原来方向传播，也即障碍物对声波完全失去作用，没有任何影响，见图 4-1-12。

由此可见，所谓物体的大小、长短等，都是而且必须是与波长相比较而言的。这对厅、室、装修设计中确定反射面、扩散体的尺寸是非常重要的依据。

## 4.1.2 人耳的听觉特性

### 4.1.2.1 频率、音调和音色——声音的三要素

频率、音调和音色常称为声音的三要素，是声音的重要属性。

质点在每秒钟内位移或振动的次数称为频率，单位赫兹 (Hz)。正常的人耳对声音的反应是在 20~20000 Hz 的音频范围内。各种声源 (乐器和演唱) 的频率范围示于图 4-1-13。可听频率范围随不同人和年龄而异。年龄越大，可听频率上限越低。高于 20000 Hz 的频率对语言的懂度和欣赏音乐无重大影响。因此在建筑声学设计中，常以具有代表性的下述频率为标准，即：

120 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz。

对于音乐厅和音乐录音棚建筑，则需在上述标准频率的上限和下限各延伸一个倍频程 (八度音)，即增加 60 Hz 和 8000 Hz。

频率高、低的听觉属性是音调，这是主观生理上的等效频率，频率越高，音调越高。

具有某种音调的声音称为音。纯音 (或单音) 是单频的声音，它的特点是单一音调。很多音乐的声音不会只产生一些纯音，乐声包括某些附加的频率，称为复音。在复音中的最低频率称为基音，比基音音调高的成分称为泛音。不同的乐器有不同的泛音。泛音对音调增加了有特色的音质，即为音色。如果我们在钢琴上弹奏基音  $f_0$  时，除了听到基音外，即使不弹奏其它键板，仍能听到其它几个键板的泛音。泛音的数目、突出高峰、音调和强度，汇合成钢琴声的音色。不同的乐器有不同的音色。人的声带发声，其音色也各不相同，这是我们辨别不同人和乐器的听觉依据。

### 4.1.2.2 响度

响度是声音强度这一物理量 (客观量) 给人的主观感觉。声音的响度与声压 (声强) 有关，声压越大，响度也就越大。但是人耳对不同频率的声音的响度感觉 (灵敏度) 是不同的，频率越低，灵敏度越差，而频率高于一限值时，则灵敏度又会降低。

为了模仿人耳的这一灵敏度特性，在测量声压级的仪器中加入对各种频率具有“计权”性质的网络，由此，可直接读出接近人耳响度感觉的计权声压级，又称 A 计权值或 A 声级。

此外，人耳所判断的声音响度，同声压级和频率两者都有关系。例如一个 1000 Hz 的纯音，要比声压级相同的 500 Hz 纯音响得多，要使 500 Hz 声音听起来和 1000 Hz 声音有同样的响度，必须把声压级提高到 10 dB；要使 500 Hz 声音听起来和 1000 Hz 声音有同样的响度，则必须把声压级降低到 0 dB。

用这种对比试验的方法，可得出如图 4-1-14 所示的一组等响曲线，每条曲线代表不同频率和声压级的纯音听起来有相同的响度。



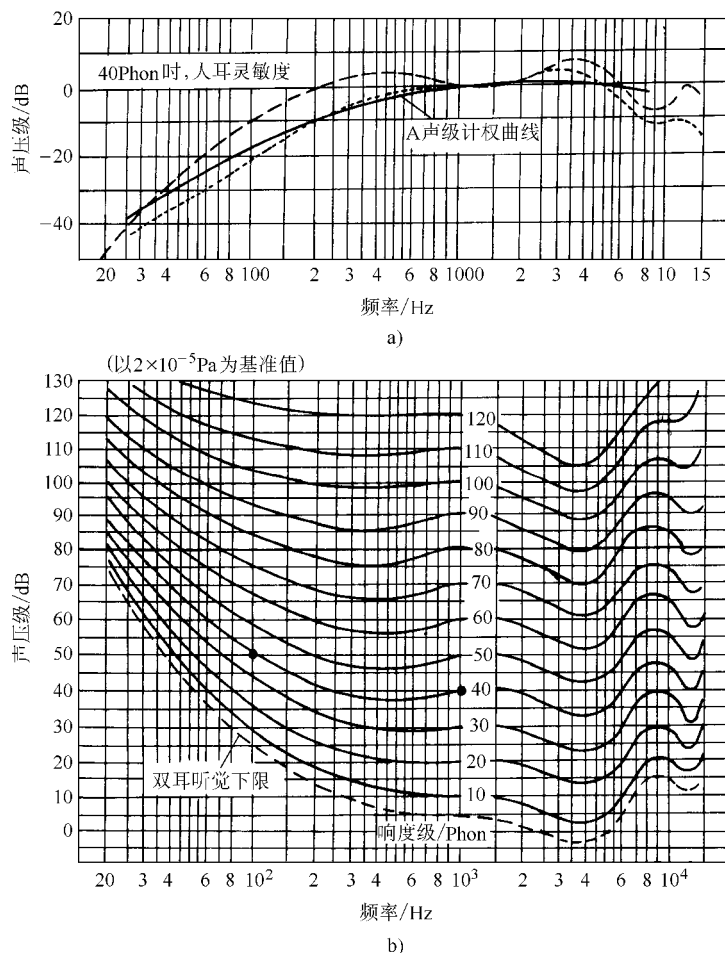


图 1-1 纯音的等响曲线  
(以  $2 \times 10^{-5} \text{Pa}$  为基准值)

### 摇摇(猿) 人耳听觉的几个效应

#### 摇摇• 双耳听闻效应

摇摇人耳在头部的两侧, 约相距 20cm, 由于到达双耳的声音有微小的时间差、强度差和相位差, 人们就能辨别声音的方向, 确定声源的位置。特别是左右水平方向的分辨方位能力要比上下垂直方向强得多, 因而声源左右移动时在两耳处引起的声压、时间和相位的差别比较明显, 通常可以分辨出水平方向 缘毅 缘毅 的变动。但在垂直方向, 有时大于 远毅 才能分辨出来。

摇摇听感上具有方位感这一特性, 使人们有可能在嘈杂的噪声环境中分辨来自某个方向的一个比较特殊的声音。单耳听闻就不易辨别声音的方位。

#### 摇摇• 掩蔽效应

摇摇观演厅内的噪声对语言清晰度的干扰是必须考虑的。人耳具有一种不寻常的能力, 能在噪声环境中选择地分出他所感兴趣的某些“信号”, 而目前的精密仪器还做不到这一点, 这是因为人耳对声音除了有方位感外, 还有注意力集中的心理因素。例如我们坐在播放着较

响音乐的收音机旁，仍可用不大的声音交谈。当然，这时要求注意力集中才能听清对方的讲话，并且还容易疲劳。这种排除部分噪声干扰(这里把音乐看作干扰噪声)的能力还和噪声的特性有关。

摇摇噪声对语言的妨害程度，在声学上称为“掩蔽效应”，它不仅取决于噪声的总声级大小，而且还取决于它的频率成分和频率分布，通过实验，可得出如下规律：

摇摇① 低音调的声，特别是当响度相当大时，会对高音调的声产生较显著的掩蔽作用；

摇摇② 高音调的声对低单调的声只产生很小的掩蔽作用；

摇摇③ 掩蔽和被掩蔽音的频率越接近，掩蔽作用越大，当它们的频率相同时，一个声对另一个声的掩蔽作用最大。

#### 摇摇• 哈斯效应——回声感觉

摇摇从声源传来的声音和经一次反射回来的声音，相继到达人耳，其延迟时间小于 100ms 时，一般人耳不能区分出来，仅能觉察到音色和响度的变化。但当两个相继到达的声音时差超过 100ms (相当于直达声与反射声之间的声程差等于 17m)，人耳就能判别出它们是来自不同方向的两个独立声音。这后一个来自反射面的声音，有可能成为回声。回声的感觉会妨碍语言和音乐的良好听闻。因此，必须加以控制。

摇摇人耳对回声感觉的规律，首先是由哈斯提出的，故称哈斯效应(又称回声抑制)。他通过大量的主观评价实验提出了反射声延迟时间与感觉到回声百分数之间的关系，见图 10-10 图内纵坐标为感觉回声的百分数(豫)，横坐标为直达声与反射声之间的时间差(毫)。曲线上所标的参量为直达声与反射声之间的声级差(分)。

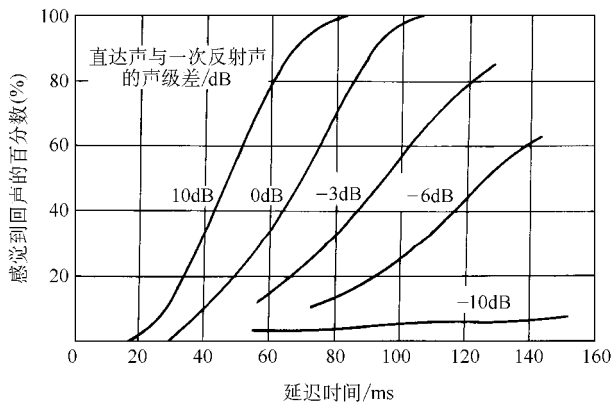


图 10-10 哈斯效应曲线(根据 10-10 发表的实验结果绘制)

摇摇首先分析反射声与直达声具有相同声压级的情况(即 0dB 曲线)。当延迟时间小于 100ms 时，几乎没有人能感觉到回声；延迟时间大于 100ms，差不多有一半人会感觉到有回声；延迟时间超过 160ms 时，几乎所有人都察觉到回声。当反射声强度减弱到直达声以下 10dB 时，即使延迟时间很长，也几乎没有人能感觉到有回声；如果把两者的延迟时间压缩得很短，则反射声即使声压级高出直达声 10dB，也不会有回声的感觉。摇

## 1.1 声音的计量

### 1.1.1 声压、声强和声功率

描述声音在空气介质中传播的客观量有声压、声强和声功率。

由声波引起的压强变化称为声压，记作  $p$ ，单位是帕 (Pa)，也称牛顿/平方米 (标准大气压)，声压的大小决定声音的强弱。声压实际上是随时间而迅速起伏变化的，但人耳感觉不出声压的这种起伏。声音强弱只同迅速变化的声压 (又称瞬时声压) 的某种时间平均值有关。这种声压的平均值称为有效声压。通常说的声压即指有效声压。

声压与大气压相比，一般是很小的。人们正常说话时的声压相当于大气压的百万分之一左右。人耳能听到的最低与极限声压之间的范围相差一百万倍。

声源在单位时间内向外辐射出的总声能称为声功率，记作  $P$ ，单位是瓦 (W) 或  $\mu\text{W}$  (毫瓦或微瓦)。

声强是指垂直于传播方向每单位面积上所通过的平均声功率，记作  $I$ ，单位是瓦/平方米 (W/m<sup>2</sup>)，声源均匀地向四周辐射声能时，称球面辐射，围绕声源半径  $r$  处的球面上 (球面积  $S=4\pi r^2$ ) 的声强  $I$  为：

$$I = \frac{P}{S} \quad (1.1.1)$$

因此球面声源的声强  $I$  和声源的声功率  $P$  成正比，而与离开声源的距离平方成反比，即距离加倍时，强度  $I$  就减至原来的  $1/4$ 。声强随离声源距离的增加按平方反比的规律减小称为“平方反比定律”。

### 1.1.2 声级和分贝

在声学工程中，通信和广播技术中，有一个常用单位——分贝 (dB)，用它来表示声音和电信号的相对强弱，例如声压和电压、声功率和电功率的放大 (增益) 或减小 (衰减) 的倍数等，以使运算变得更方便些。在特定条件下分贝 (dB) 又具有绝对值的意义。分贝是贝 [尔] (B) 的十分之一，贝是一种级的单位。

### 1.1.3 声强级、声压级、声功率级

人耳从能听到的最低声强 (可听阈)  $I_0$  (声压为  $p_0$ ) 到感觉耳痛的最大声强 (痛阈)  $I_p$  (声压为  $p_p$ ) 之间相差一万亿倍 (声压相差一百万倍)，量程如此之大，直接用声强或声压来度量很不方便。此外，人耳对声音大小的感觉，并不与声强或声压值成正比，而是近似地与它们的对数值成正比。因此通常用对数的标度来表示。如果以  $I_0$  倍 (即相对比值  $I/I_0$ ) 为一“级”，这样，声强级  $L_I$  的定义便是这声音的强度  $I$  和基准声强  $I_0$  之比值的常用对数值，单位为贝尔 (B)，声强级表示为：

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1.1.2)$$

但一般不用贝尔，而是取它的十分之一分贝 (dB) 作声强级的单位，即：

$$L_p = 10 \lg \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) \quad (5.1.1)$$

式中  $L_p$ ——基准声强， $p_0$ ——基准声压。基准声强即人耳对 1000 Hz 声音的可听下限，相应的声强级为 0 dB。

利用“级”的概念就可大大压缩量程的数量级，从而提高计算的简明度。

同样可以用分贝(dB)单位定义声压级，由于声强与声压的平方成正比，因此以分贝为单位的声压级可以下式表示：

$$L_p = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (5.1.2)$$

式中  $L_p$ ——基准声压， $p_0$ ——基准声压(20 μPa)；

$L_p$ ——声压级；

$p$ ——声压。

表 5.1.1 列举了声强、声压值和它们所对应的声强级、声压级，以及相应的声环境。

表 5.1.1 声强、声压与对应的声强级、声压级以及相应的环境

| 声强 $I$ (W/m <sup>2</sup> ) | 声压 $p$ (Pa) 或 $p_{rms}$ | 声强级或声压级 $L$ (dB) | 相应的环境         |
|----------------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| 10 <sup>-12</sup>          | 2 × 10 <sup>-5</sup>    | 0                | 喷气飞机起飞时       |
| 10 <sup>-11</sup>          | 2 × 10 <sup>-4</sup>    | 10               | 锅炉车间、钢铁厂(疼痛阈) |
| 10 <sup>-10</sup>          | 2 × 10 <sup>-3</sup>    | 20               | 风动铆钉机旁        |
| 10 <sup>-9</sup>           | 2 × 10 <sup>-2</sup>    | 30               | 织布机旁          |
| 10 <sup>-8</sup>           | 2 × 10 <sup>-1</sup>    | 40               | 城市干道旁、公共汽车内   |
| 10 <sup>-7</sup>           | 2 × 10 <sup>0</sup>     | 50               | 相距 10 米处交谈    |
| 10 <sup>-6</sup>           | 2 × 10 <sup>1</sup>     | 60               | 安静的室内         |
| 10 <sup>-5</sup>           | 2 × 10 <sup>2</sup>     | 70               | 轻声耳语          |
| 10 <sup>-4</sup>           | 2 × 10 <sup>3</sup>     | 80               | 人耳最低可闻阈       |

同理，声功率以级的形式所表示的声功率级(L<sub>w</sub>)如下式所示：

$$L_w = 10 \lg \left( \frac{W}{W_0} \right) \quad (5.1.3)$$

式中  $L_w$ ——基准声功率级， $W_0$ ——基准声功率。

应该指出：声强级、声压级和声功率级与声强、声压和声功率是不同的概念，以分贝为单位的各种“级”，只有相对的意义，它们无量纲，其数值的大小与所规定的基准值有关。因此，当用分贝单位的各种“级”，都应同时标明所用的基准值。

### 声压级的叠加

当几个性质相同的声音叠加时，它的总声压是各个声压的均方根值，即总声压为：

$$p_{total} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2} \quad (5.1.4)$$

声压级的叠加不是简单的算术值相加，须按照对数运算的规律进行。例如 2 个声压相等的声音，每个声压级为  $L_p$ ，总声压则为  $\sqrt{2} p$ ，其总声压级  $L_{total}$  则为：