

康玉成 © 编著

实用建筑吸声 设计技术

SHIYONG JIANZHU
XISHENG SHEJI JISHU

中国建筑工业出版社

TU112.5/3

2007

实用建筑吸声设计技术

康玉成 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

实用建筑吸声设计技术/康玉成编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2007
ISBN 978-7-112-09435-6

I. 实… II. 康… III. 建筑结构-吸声构造-建筑设计 IV. TU112.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 089787 号

实用建筑吸声设计技术

康玉成 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京二二〇七工厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 30 $\frac{3}{4}$ 字数: 744 千字

2007 年 9 月第一版 2007 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 52.00 元

ISBN 978-7-112-09435-6

(16099)

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)

本书是建筑师及相关专业人员从事建筑吸声设计的参考书。内容丰富、资料详实、实用性强、具有设计手册和工具书的功能。

本书宗旨是立足在建筑师的实用角度，从当前建筑设计领域的实际需求出发而编撰。书中“启发式”叙述和“灌输式”的详实讲解并举，具有启迪建筑师设计想象力和创造力的作用。同时，对于建筑师与声学工程师协同完成某些高要求的建筑吸声设计工程，本书亦具有较大的指导意义。

本书共有十三章，从第一、二章简要地阐述建筑声学基本知识特别是吸声基本知识开始，继而较全面、系统地阐述了吸声材料、成品吸声板砖、吸声结构、共振吸声结构、吸声体、吸声器等的吸声机理、性能、应用吸声设计技术等。第九章还详尽地给出了大量的材料、结构吸声系数数据，可供设计参考。第十至十三章中详实地介绍了室内声场声传播规律以及工业、民用建筑吸声降噪的设计方法、步骤，并列举了各类工业、民用建筑的吸声降噪、音质设计的实例。

本书的特点之一是在全书叙述中，凡能举例说明的吸声设计等技术问题，都尽量以实例佐证阐述，可具体帮助建筑师、读者从事建筑吸声设计工作。

本书的特点之二是较全面、系统地归纳、提供了声压级、A 声级等如何计量计算及其传播估算公式。对某些实用吸声设计技术以及 A 声级在建筑吸声降噪设计中的具体运用及其与声压级的关系，也都从工程设计实践所需的角度给予了较为详实的阐述。

本书的主要读者对象是建筑师，但对其他专业工程技术人员，建筑以及相关专业的大学、专院校师生也有参考价值。

* * *

责任编辑：张 建

责任设计：赵明霞

责任校对：孟 楠 关 健

前 言

建筑中的声学设计,是工业与民用建筑工程设计中重要的、技术性很强的一项设计工作。

就广泛的声学设计技术而言,有吸声、隔声、反射扩散、可调混响、消声器、振动的隔离、阻尼减振、有源噪声控制技术等等。而在建筑声学设计实践中,主要运用的是两类声学设计技术,这就是隔声和吸声。本书阐述的是建筑声学设计中的吸声技术。

吸声作为建筑声学设计中重要的技术措施,早已被人们发现和利用。这可以追溯到公元前的古希腊、古罗马的露天剧场所显示的观众席地面升起,来自舞台的直达声掠过一排排升起的观众坐席的间隔时,人们已经意识到由于掠射吸收对听闻有影响。而在 19 世纪中叶,一些“音乐建筑”等也都相应地应用了某些吸声技术。但是,当时人们应用声学技术常是出于本能和主观臆测,因为这时人们还不能从理论上对吸声加以解释。直到 1900 年,美国物理学家、现代建筑声学奠基人赛宾(W. C. Sabine)发表了《混响》的著名论文,赛宾对混响的研究并给出混响时间的实验公式,从而开辟了建筑声学,也就是近代建筑声学设计、研究的新时代。从此以后人们认识了混响,也认识了吸声和吸声系数及其与混响时间之间的函数关系。

从 20 世纪初至今的一百年间,各国声学家们经过不懈的工作,使吸声技术的理论研究和实践都取得了巨大的发展和令人信服的成就。吸声技术和其他声学设计技术一样逐渐地被自觉地、理性地、越来越广泛地得到理解和应用。尽管也出现过某些曲折,即便是国际上一些著名的声学家,在声学工程设计实践中也有过失误的教训,例如悉尼歌剧院、林肯艺术中心曾出现过的糟糕的音质问题,悉尼歌剧院曾经历了长达 14 年之久的试用、调试、修改。但是,总的来看还是建筑声学事业蓬勃发展的一百年。特别是 20 世纪中叶以来,即约 1966 年国际上对评价噪声采用“A 声级”这一指标,这是在国际上对防噪声技术的研究形成高潮以来才得出的认识和研究成果,尽管如今声学界对应用“A 声级”的实践产生了某些质疑,但 A 声级还是对推动声学事业的发展起到了重要的作用。

我国声学家、声学工作者经过半个世纪的研究和创新实践,特别是近 30 年来的研究和设计实践,创造性地开拓和发展了声学理论、吸声理论和实践技术。例如,噪声控制中新型吸声材料、吸声结构的理论研究和实践的开发利用;多功能厅堂可调混响以及运用计算机程序控制获得的突破性进展;20 世纪 70 年代开始由马大猷院士开创的对微穿孔板吸声理论的研究、实践所取得的重大成就;有源噪声控制的基础理论、系统实现和工程应用等方面所取得的成果;空调系统消声;减振装置的商品化、系列化;界面散射的理论研究和实践取得了重要的进展;厅堂音质设计中广泛采用计算机辅助设计(CAD);虚拟仪器更替传统的声学仪器;隔声构件的标准化、系列化以及声学设计和测量标准、规范的出台等等,这些都是颇具说服力的例证。理论研究上所取得的成就和进展,丰富的实践经验的积累,声学产品的开发以及工程应用,都显示了我国较高的声学学术和应用水平,并跻身国际声学界的先进行列。我国声学家、声学工作者们所取得的这些成就,也是笔者能够撰

写本书的基础。

建筑师在从事工业、民用建筑设计中，常会遇到声学技术的运用问题，如隔声、吸声、消声等。以吸声设计技术为例，有些建筑设计中应用吸声技术，建筑师是可以独立完成设计工作的；但也有些则是必须请专业声学工作者参与和建筑师密切合作才能完成。这两方面，都要求建筑师必须全面、系统、确切、详实地了解和掌握实用声学知识和实用吸声设计技术；要求建筑师必须与声学工作者有共同的声学设计技术语言。建筑师明了这一点是十分必要的，这也是笔者多年来从事建筑设计和建筑声学设计实践中所领悟到的。

建筑师了解和掌握建筑吸声知识和设计技术的必要性，还有一个很重要的原因，这就是例如隔声、消声设计主要强调的是功能，隔声、消声后的噪声级只要能满足规范限值，即是达标。而吸声设计除了吸声效果本身很重要外，吸声设计还常是与创造建筑室内空间艺术效果，与室内装饰设计息息相关，它体现着功能与艺术的统一。建筑设计、室内装修设计与室内声学设计、噪声控制设计、吸声设计应是同步进行的。所以这就更加表明建筑师了解和掌握建筑吸声知识和吸声设计技术的必要性。

本书宗旨是立足在建筑设计师的实用角度，从当前建筑设计领域的实际情况出发而编撰。阐述的方式既含有“启发式”的叙述，也着意于“灌输式”的较详实讲解，以提供给建筑师同行以及相关读者们于建筑吸声设计、实践中运用和参考。

笔者不是专业声学工作者，所以本书在很大程度上是笔者的读书和实践的笔记、心得。书中一些可用于设计实践的探讨、设想、一己之见是笔者在长期的读书和建筑设计、声学设计实践中所遇到、所悟到的。但是否确切，尚待实践的进一步检验，尚待声学家和建筑师在理论和实践上的检验、订正。笔者提出这些“一己之见”也是为了起到抛砖引玉的作用，期望我国的“应用声学”技术领域，在实用工程设计这一方面，进一步地给设计一线的建筑师提供更为实用的指导声学设计、吸声设计实践的文章、书籍。

还要特别指出的是，从实用出发，本书对所有吸声设计技术的叙述，特别是对有关声学计算技术的叙述，都尽可能地举例加以说明，以便使建筑师、读者加深理解，有益于设计实践。但是，声学设计技术中的计算公式，一般地说都仅可称之为估算式，只是近似的估值计算。这是因为实际声学工程设计中的声场条件，不一定完全符合公式导出的设定条件，因而理论计算与实际情况会有偏差。然而，在声学设计、吸声设计实践中，声学计算又常是必要的设计手段、步骤，特别是对于不是专业声学工作者的建筑师而言，设计工作由计算入手再进一步作出判断，这似是正常的设计思路。可见，建筑师不断积淀、掌握、熟悉吸声设计知识、技术，从而提高主观判定的知识、经验是很重要的。

本书在编撰中参考、引用了有关单位和声学家等编著的声学书籍和资料中的一些内容；又承蒙中国建筑工业出版社李根华先生的精心校审。在此一并表示衷心地感谢。限于笔者的声学知识水平，本书不当之处在所难免，敬请声学家、建筑师、读者指正。

康玉成

2007年1月

目 录

第一章 声音的传播与计量	1
第一节 振动与声	1
第二节 声音的传播原理	4
第三节 声波传播的特性	5
第四节 声音的物理计量	8
第五节 声音的主观量度	10
第六节 声压级、A 声级的计量运算	13
第七节 对关系式 $NR=L_A-5$ 的确认	29
第二章 吸声的基本概念	31
第一节 吸声和吸声系数	31
第二节 关于声阻抗	35
第三节 吸声材料和吸声结构	36
第四节 吸声技术在建筑声学设计中的应用	37
第五节 建筑吸声设计中的注意事项	40
第三章 多孔吸声材料	42
第一节 概述	42
第二节 无机纤维状多孔吸声材料	42
第三节 有机纤维状多孔吸声材料	50
第四节 颗粒状多孔吸声材料	51
第五节 泡沫类多孔吸声材料	55
第六节 绒状多孔吸声材料	59
第七节 多孔材料的吸声机理及影响因素	59
第四章 定型成品吸声砖、板	73
第一节 概述	73
第二节 玻璃棉吸声毡、板	73
第三节 矿棉装饰吸声板	76
第四节 岩棉装饰吸声板	88
第五节 软质纤维装饰吸声板	89
第六节 硬质纤维装饰吸声板	91
第七节 有机合成纤维——聚酯纤维装饰吸声板	92
第八节 木质吸声板	93
第九节 石膏装饰吸声板	93
第十节 钙塑、铝塑泡沫装饰吸声板	95
第十一节 颗粒材料类吸声板	96

第十二节 其他类材料吸声板·····	108
第五章 多孔材料吸声结构 ·····	111
第一节 概述·····	111
第二节 吸声墙面、吸声顶棚·····	111
第三节 可调吸声(反射)结构·····	112
第四节 空间吸声体·····	116
第五节 吸声尖劈·····	127
第六节 帘幕吸声结构·····	132
第六章 共振吸声结构 ·····	136
第一节 概述·····	136
第二节 单个共振器吸声结构·····	137
第三节 穿孔板共振吸声结构·····	139
第四节 狭缝穿孔板共振吸声结构·····	149
第五节 微穿孔板、微缝板共振吸声结构·····	153
第六节 薄板共振吸声结构·····	163
第七节 膜状共振吸声结构·····	168
第七章 消声器 ·····	169
第一节 概述·····	169
第二节 消声器的用途·····	169
第三节 消声器的类型·····	170
第四节 阻性消声器·····	170
第五节 抗性消声器·····	176
第六节 阻抗复合式消声器·····	180
第七节 微穿孔板消声器·····	181
第八节 土建结构消声器·····	182
第九节 电子消声器——有源噪声控制技术·····	183
第八章 特殊吸声物体 ·····	187
第一节 洞口的吸声·····	187
第二节 人的吸声·····	187
第三节 座椅的吸声·····	188
第四节 家具的吸声·····	189
第五节 空气的吸声·····	190
第九章 吸声系数表 ·····	194
第一节 概述·····	194
第二节 常用建筑材料吸声系数表·····	195
第三节 无机纤维状多孔材料及制品吸声系数表·····	196
第四节 有机纤维状多孔材料及制品吸声系数表·····	198
第五节 颗粒状多孔材料及制品吸声系数表·····	199
第六节 泡沫状多孔材料吸声系数表·····	201
第七节 绒状帘幕多孔材料吸声系数表·····	202

第八节 穿孔板吸声结构吸声系数表·····	204
第九节 薄板共振吸声结构吸声系数表·····	210
第十节 空间吸声体吸声系数表·····	212
第十一节 其他物体——人、座椅等吸声系数表·····	213
第十章 室内声场 ·····	214
第一节 声在室外空间的传播·····	214
第二节 室内声场声传播特点·····	216
第三节 直达声、早期反射声和混响声·····	216
第四节 扩散声场和稳态声场·····	217
第五节 几何声学原理·····	218
第六节 平均自由路程·····	220
第七节 共振与驻波·····	221
第八节 声源的指向性因数·····	225
第九节 声环境的房间常数·····	226
第十节 声压级计算式·····	227
第十一节 室内声场声压级计算式的实际运用·····	232
第十二节 平均吸声系数·····	234
第十三节 吸声量·····	239
第十四节 混响半径·····	240
第十五节 混响过程与混响时间·····	244
第十六节 室内壁面声源·····	250
第十七节 关于室内声场声压级计算式·····	251
第十八节 关于室内声场 A 声级计算式·····	259
第十一章 建筑中的吸声降噪 ·····	265
第一节 概述·····	265
第二节 噪声控制设计法规·····	266
第三节 吸声降噪的设计原则·····	277
第四节 四类降噪·····	280
第五节 吸声降噪——新设计建筑混响时间控制·····	281
第六节 吸声降噪——新设计建筑混响时间控制举例·····	284
第七节 吸声降噪——现有建筑混响时间控制·····	288
第八节 吸声降噪——现有建筑混响时间控制举例·····	291
第九节 吸声降噪——新设计建筑噪声级控制·····	294
第十节 吸声降噪——新设计建筑噪声级控制举例·····	297
第十一节 吸声降噪——现有建筑噪声级控制·····	306
第十二节 降噪量计算公式·····	310
第十三节 吸声降噪——现有建筑噪声级控制举例·····	315
第十二章 工业建筑吸声技术应用实例 ·····	337
第一节 工业建筑噪声控制设计原则·····	337
第二节 工业建筑吸声降噪设计实例·····	340

第三节	常见机械设备声源的噪声控制·····	354
第十三章	民用建筑吸声技术应用实例·····	367
第一节	吸声技术在民用建筑设计中的应用·····	367
第二节	厅堂音质评价参量的综合归纳·····	367
第三节	混响时间在厅堂音质设计中的主导作用·····	372
第四节	多功能厅堂·····	378
第五节	以演出戏剧为主的多功能剧场·····	379
第六节	会堂、报告厅、会议厅·····	400
第七节	专业电影院·····	405
第八节	音乐厅·····	414
第九节	语言播音室·····	423
第十节	录音棚(室)·····	429
第十一节	演播室·····	435
第十二节	综合及单项运动体育馆·····	445
第十三节	声学实验室——消声室·····	465
主要参考文献 ·····		479

第一章 声音的传播与计量

第一节 振动与声

一、振动与声音

声的源头是物体的振动，振源就是声源。物体的振动向外传播，只有在具有质量、具有弹性的媒质中才能进行。固体的、液体的、气体的媒质，凡是具有弹性的都可以成为传播振动的媒质。

振动的质点当无外力干扰时，振动将永远持续下去，这就是固有振动，或称自由振动、无阻尼振动。但自由振动只是一种理想情况，这是由于阻力无法避免，阻力使振动减幅，并一直到零，即质点停止往复振动，回到质点振动前固有的平衡位置，见图 1-1A、图 1-1B、图 1-1C。

在媒质中，振动是以波的形式传播的。振源迫使其附近具有弹性的媒质质点往复振

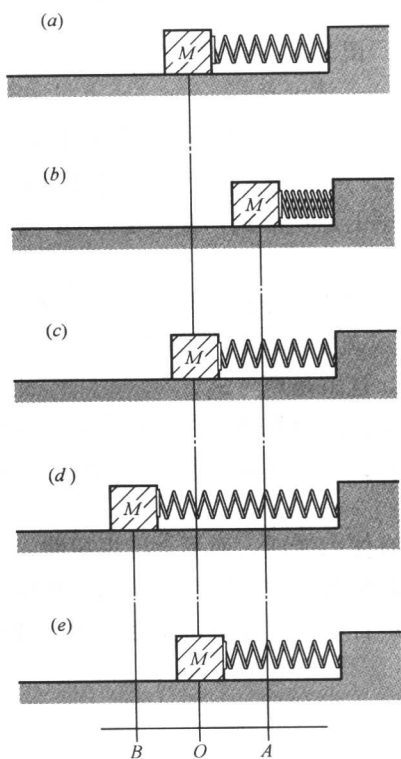


图 1-1A 简谐振动系统模型

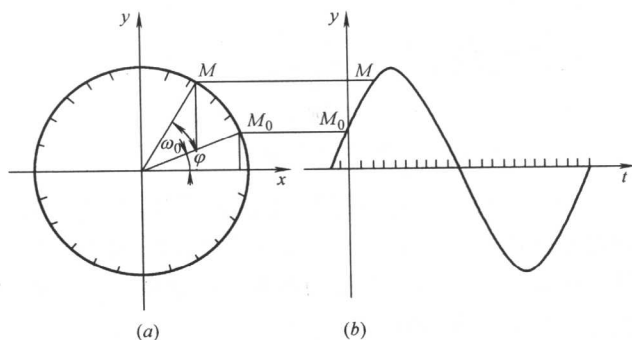


图 1-1B 简谐振动的图解

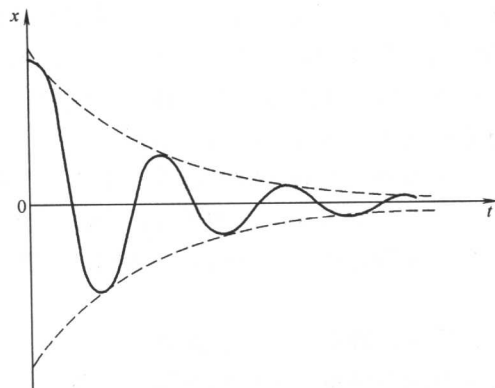


图 1-1C 阻尼振动的典型振动曲线

动，并由于弹性力、惯性力的作用，使各个相邻再相邻的媒质质点都会产生在各质点的固有平衡位置上往复振动起来，并且由近及远地传播，这就是波动。波动只是物体振动状态的传播，是能量的转移、扩散、再分布。图 1-2A、图 1-2B 是以活塞的振动，形象地表明了波动的产生和传播过程。

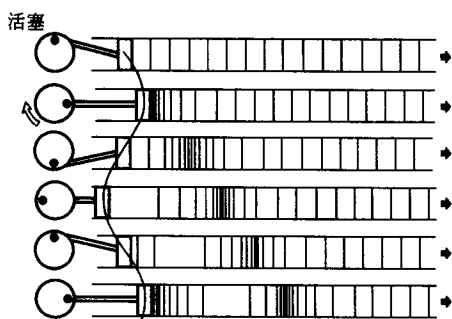
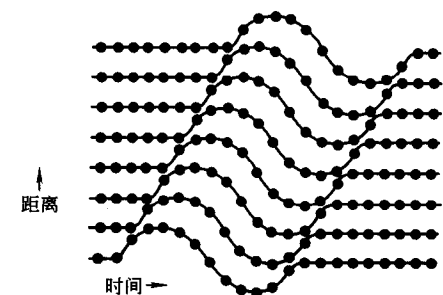


图 1-2A 用一无限长的圆管内的活塞模拟声波的产生和传播

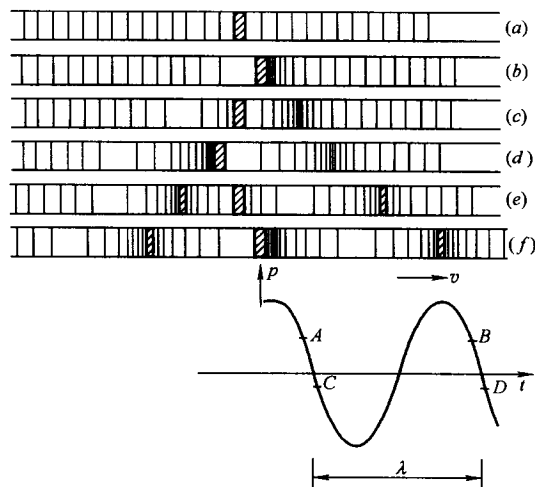


图 1-2B 声波的产生

声音的传播是物体的振动传播，即传播出去的是媒质的运动能量而不是媒质的本身。声音是物质的一种运动形式，这种运动的形式称为波动。声音在本质上是一种波动，因此，波动产生的声音也称为声波。振动和波动是互相关联的运动形式，振动是波动产生的根源，波动是振动的传播过程。

建筑声学 and 吸声设计技术中所涉及的声波，是指空气媒质中传播的声波。在空气媒质中，物体的振动带动周围空气质点振动，并在空气中形成疏密相间的“空气层”，于是形成了传播的声波，声波传播至人耳，并使人耳产生听觉，这就是声音。

声波是一种压力波，具有声压，是声源振动时迫使周围的空气质点往复振动，使空气中产生在大气压力上的附加交变压力，这种压力波就是声压。声波又是能量的载体，声音所具有能量的大小表现为声级的强弱。

声波传播的方式有横波和纵波。由于空气媒质只具有体积弹性，而不会出现扭曲、弯曲等切向弹性，所以在空气中传播的声波（空气声）都是纵波，即是说空气质点往复振动的方向与声波传播行进的方向是一致的。与听觉有关的声音，也主要是指在空气中传播的纵波声。

二、周期、频率、波长、声速

表征声或声波特性的物理参量有周期、频率、波长、声速。

- 周期：声波在传播的路程上，往复振动的两个相邻、同相位的质点之间传播所用的

时间，也就是质点振动完成一个往复所用的时间，叫做周期，用 T 表示，单位是秒 (s)。

• 频率：质点在一秒钟内振动的次数称频率，用 f 表示，单位是周/秒，国际单位是赫兹 (Hz)。

振动的频率是无限的，但正常人耳能产生听觉的是 $20 \sim 20000\text{Hz}$ 。在对建筑声学、吸声技术的研究、设计实践中，常用对人最有影响、最敏感的频率范围或称语言频率是 $100 \sim 4000\text{Hz}$ 。设计实践中常用这个频率范围内的六个倍频程中心频率，即 125 、 250 、 500 、 1000 、 2000 、 4000Hz 来表征声的频率特性。

关于倍频程：

由于可听声的频率范围太宽广，所以把其分为若干较小的段落，叫做频程。频程的上下限频率之差，称为频程宽度，简称带宽。其中心频率不是算术平均值而是上、下限频率的几何平均值。

$$f_{\text{中}} = \sqrt{f_{\text{上}} \times f_{\text{下}}} \quad (1-1)$$

例如中心频率 250Hz 的上、下限频率分别为 177Hz 和 354Hz ，用式 (1-1) 验证为

$$f_{\text{中}} = \sqrt{f_{\text{上}} \times f_{\text{下}}} = \sqrt{177 \times 354} = 250\text{Hz}$$

实践表明，两个不同频率的声音作相对比较时，起绝对作用的不是它们的差值，而是两个频率的比值。对频率作相对比较的单位叫倍频程，例如 250Hz 与 500Hz 之间频率相差一倍，则称这两个频率之间相差 1 个倍频程； 250Hz 与 1000Hz 之间频率相差两倍，即为相差 2 个倍频程。两个频率 f_1 、 f_2 相差 1 个倍频程就表明其频率之比为 2^1 ；相差 2 个倍频程就表明其频率之比为 2^2 ；若相差的倍数以 n 表示，则有一般关系式为

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^n \quad (1-2)$$

实践中常用的是 $n = \frac{1}{1}$ 倍频程和 $n = \frac{1}{3}$ 倍频程，则式 (1-2) 分别为

$$\frac{f_2}{f_1} = 2^1 \quad \text{和} \quad \frac{f_2}{f_1} = 2^{\frac{1}{3}}$$

• 波长：质点在一个往复振动的周期内所传播的距离称为波长，用 λ 表示，单位是 (m)，见图 1-3。可听声频 $20 \sim 20000\text{Hz}$ 的波长约为 $17\text{m} \sim 1.70\text{cm}$ ，吸声降噪设计中常用频率为 $125 \sim 4000\text{Hz}$ ，其波长约为 $2.72\text{m} \sim 8.5\text{cm}$ ，音质设计中常用频率为 $63.5 \sim 8000\text{Hz}$ ，其波长约为 $5.35\text{m} \sim 4.25\text{cm}$ 。

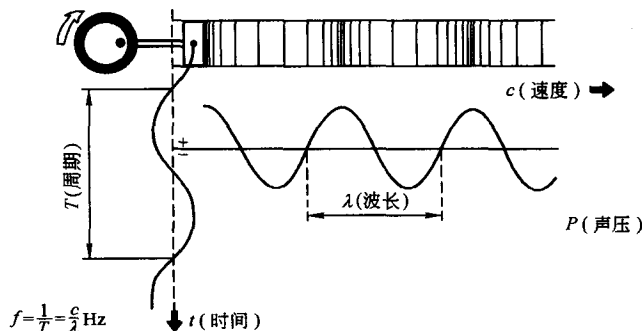


图 1-3 波长 λ 与频率 f 和声速 c 的关系

• 声速：声波行进的速度即每秒钟传播的距离，称为声速，用 c 表示，单位是米/秒 (m/s)。

声速不是质点振动的速度，而是行波行进的速度，是振动状态向外传播的速度，是声波传播从 t 时的波阵面到 $t + \Delta t$ 的波阵面的距离所用的时间。声速大小与振源的特性无关，而是与空气媒质的弹性表观密度、大气压力、温度等有关。通常在标准大气压力下，温度 20°C 时，空气声传播速度是 340m/s ，在建筑声学设计中常用此值作为声速。

• 波长 λ 、周期 T 、频率 f 、声速 c 之间有如下的关系： $c = \lambda \times f$ ， $f = 1/T$ ，这些关系式对任何声波都是适用的。我们由式 $c = \lambda \times f$ 可看出声频越高波长越短、声频越低波长越长的规律。

第二节 声音的传播原理

一、声传播的几何声学原理

声波在空气媒质中传播时，假定空气媒质是均匀的、各向同性的，则具有直线传播的特性。它是以声源为中心，在声传播方向上引出直线，此线称为射线或声线。显然，由声源引发出的声线是无限多的。当我们用声线来表示声波传播的路径，显示的是声传播中所遵循的几何声学（几何声线）原理。

二、声传播的波动原理

声波传播中还具有另外一种特性，即声传播的波动性，是物理声学的特性。

在声波传播的路程中，某一时刻波动所到达的各点的包迹面（球面、平面、柱面），即某时刻无限多的声线所同时到达的各点的包迹面，称为波阵面。声波传播中任一时刻在连续媒质中波阵面上的各点，都可以看作是一个发射新的子波的新波源，在下一时刻，这些子波的包迹面，就是声源在此刻新的波阵面，这就是著名的惠更斯原理，这个原理最明确地表明了声传播中的波动性。利用惠更斯原理所表征的声传播中波动性，可以很明确地解释声传播中的绕射（衍射）、散射现象，也可以解释声传播中的反射现象。

三、波动原理下的波阵面

我们以点声源为例简述如下：

设想点声源是一个脉动着的球体，是在均匀各向同性的空气这个无限媒质中向三维空间传播的声波，波阵面是一个球面，其半径等于离开声源的距离，即以声源为中心某一时刻径向的声线长度，这样的波称为球面波，声线垂直于包迹面。若已知点声源在 O 点，声速为 c ，则点声源声波传播中，某时刻 t 的波阵面为以声源 O 为圆心，以 $(c \times t)$ 为半径的球面 S_1 ，图 1-4。当声波传播中又经过了时间 Δt 后，此时的波阵面为以 S_1 球面上无限多的点为新的子波源点声源圆心，以 $(c \times \Delta t)$ 为半径作出的无限多的球面子波，这些子波的包迹，形成了新的球面波波阵面 S_2 ， S_2 也就是声源 O 在 $(t + \Delta t)$ 时刻传播到的新波阵面球面，也即是以声源在 O 为圆心，以 $c \times (t + \Delta t)$ 为半径的新的球面波阵面。以此类推，声波继续传播、发散，每时每刻都会产生以声源 O 为圆心，以 $(c \times t_n)$ 为半径的新的球面波波阵面。波阵面表示声波在某一时刻 t_n 所传播到的面。

同理也就有面声源的平面波波阵面。例如当点声源传播形成的球面波半径很大很大时，这时的诸声线可近似地看成为平行线，则局部波形为平面波。这就和宇宙中作为“点声源”的太阳光线射向地球表面时由于距离太远、半径非常之大，而形成的平行光线是一

样的。面声源的平面波波阵面示意图见图 1-5。

同理也就有线声源的柱面波波阵面，它是由线声源发出的，例如飞行着的子弹、炮弹、以及飞机、汽车、所发射的声音，就是线声源，它所产生的声波波阵面为柱面，示意图见图 1-6。

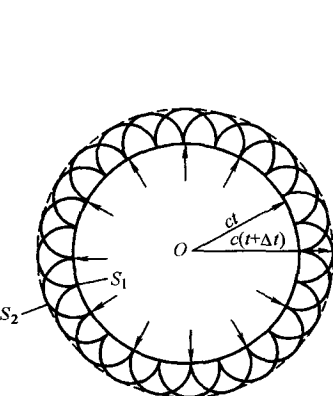


图 1-4 根据惠更斯原理求波阵面（点声源发球面波）

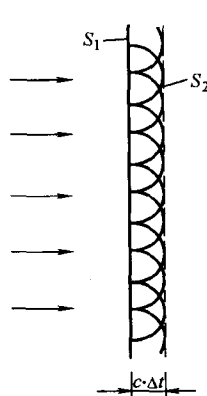


图 1-5 根据惠更斯原理求波阵面（面声源发平面波）

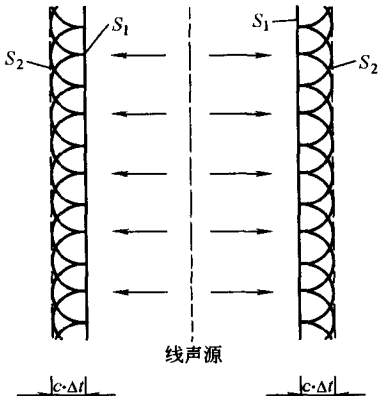


图 1-6 根据惠更斯原理求波阵面（线声源发柱面波）

声传播中的几何声学原理以及波动性原理这两种特性，有时同时呈现在声传播中，似有区别又不易绝对区分。

第三节 声波传播的特性

声波自声源发射出后，在无限均匀的媒质中是直线传播的。声波在传播的路程中遇到不同的媒质，如建筑构件等障碍物，其中包括带有孔洞的障碍物，当声波波长比这些障碍物大很多、比孔洞小得多时，声波仍然会是直线传播的。但是，当声波波长接近或小于这些障碍物、当孔洞比声波波长小得多时，声波的走向便会因障碍物大小、障碍物上孔隙的大小与入射声波波长两者之间的尺度关系，在一定条件下改变声波声线的直线传播方向，从而产生反射、绕射（衍射）和散射，这是从声波（声线）的走向而言。了解这类声线走向的规律，可以帮助我们掌握声传播的规律，以便于在建筑吸声设计中加以控制和运用。

一、反射定律

解释声传播中遇到障碍物，特别是遇到比入射声波波长大得多的障碍物时所呈现的声反射现象，可以用几何声学原理（声线）来解释，也可以用波动声学理论来解释。

当声波在空气中传播遇到构件的尺度比入射声波波长 λ 大得多时，设构件的尺寸为 L ，则 $L \gg \lambda$ ，此时声波将被构件反射。这里，我们以点声源发出球面波为例，用图 1-7 来说明。图中 O 为声源， O' 为相对于构件平面的“虚声源”， O 和 O' 两点是以构件平面为

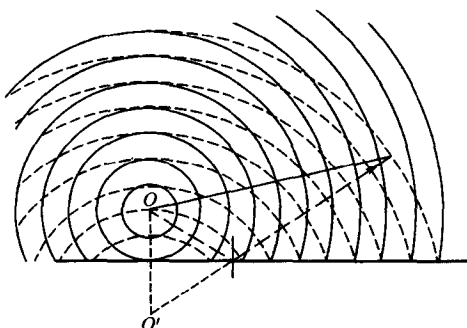


图 1-7 声波的反射

基准的对称点。 O 为实声源，发射的是实线声线，表示声波前进的入射方向，而反射波可以看作是从虚声源 O' 放射出的虚线声线，同一时刻入射声波和反射声波的波阵面半径相等。

图 1-7 中虚线所表示的波阵面是以虚声源 O' 为声源发出的与入射声波波形完全相同的反射波波形。图中某虚线球形反射波波阵面上的每一个点，都可以看成是发射次级反射声波的子波源，这无限多的子波面的包迹面，就是新的、次一时刻虚声源 O' 所传播（实为反射）的新的波阵面，也就是新的反射波阵面。这就是用惠更斯关于声波波动性原理来解释声波的反射。

同时我们还可以看到，利用声源与虚声源的对称关系，用几何声学的作图法便可以很容易地确定反射波的方向，即又可以用几何声学（声线）的原理来解释声波的反射现象。

这里我们将要讲述的反射定律，所遵循的就是几何声学原理。

现在让我们研究一条声线入射于构件的情况。这条入射声线是以一定的角度入射于大的构件平面， θ_i 为入射角，它是与构件法线方向的夹角；反射声线与构件法线方向的夹角为 θ_r ，见图 1-8A、图 1-8B。反射定律的基本法则是：

- (1) 构件板反射面比入射声波波长大多；
- (2) 入射声线、反射声线和构件板反射面的法线在同一平面内；
- (3) 入射声线和反射声线分别在法线的两侧；
- (4) 设入射声线与法线的夹角即入射角为 θ_i ；设反射声线与法线的夹角即反射角为 θ_r ；则入射角等于反射角，即 $\theta_i = \theta_r$ 。

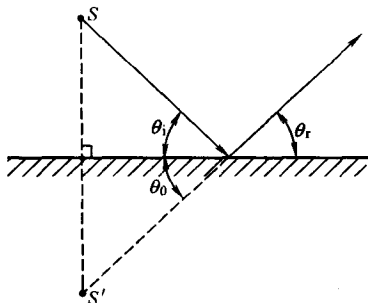


图 1-8A 声波被平面反射的虚声源原理
S—声源；S'—虚声源

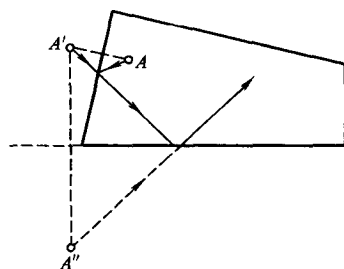


图 1-8B 一阶和二阶虚声源

二、声波的绕射（衍射）、反射和散射

现在让我们分析不同尺度的构件板，与入射声波波长二者之间，由于尺度变化而呈现的声波反射、绕射和散射现象。

1. 当入射声波传向的构件板上有很小的孔（小孔尺寸 $d \ll \lambda$ ）时

根据惠更斯原理，小孔处的空气质点可以看作是一个集中的新波源，声波通过小孔之后将产生以小孔为圆心的层层球面的波阵面，声波改变了原来的直线传播方向，并与原入射声波波形无关，见图 1-9。孔后两侧有声波和声线的现象表明了声波的绕射，声波的绕射只有用惠更斯的波动原理来解释。声波的频率越低，波长越大，绕射的现象越明显。

2. 当入射声波传向的构件板上有很大的孔（孔尺寸 $d \gg \lambda$ ）时

见图 1-10A、图 1-10B。这时可将孔处各点都看作是新的子波源，波长与孔同宽或孔大于波长的部位呈现着声波继续按原入射方向向前传播的现象。在板孔两端的边缘处，波阵面变为以孔端为新的波源，波阵面为半球面形的包迹，声波改变了原来传播的方向，绕到了板的背后，并在板后继续传播。这时在板后两端部的听者，尽管看不见声源但确能听到声音。

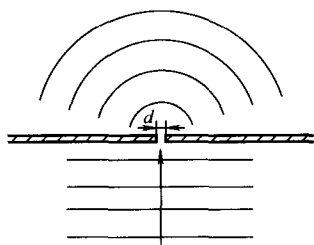


图 1-9 小孔对波的影响

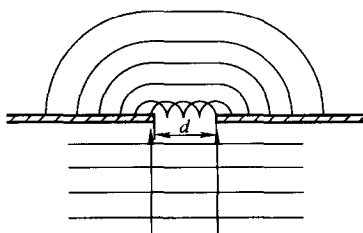


图 1-10A 大孔对前进波的影响

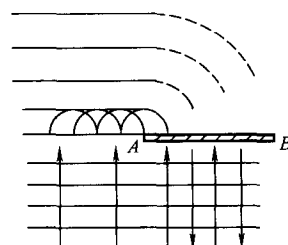


图 1-10B 声波的绕射

3. 当构件板的尺寸远远大于波长时

当构件板的尺寸 L 比波长 λ 大得多即 $L \gg \lambda$ 时，此时的板实际上是一块很大的反射面，声波完全可以看成是几何声线，入射到板上的声线按反射定律反射，声的波动性仅在板的两端产生局部的、可以忽略不计的绕射，而在板后将出现明显的无声的声影区，而且构件板尺寸 L 越比 λ 大，则声影区越大，见图 1-11 (a)。

4. 当构件板的尺寸稍大于波长时

由于构件板的尺寸 L 只稍大于波长 λ ，此时按反射定律反射的区域缩小到只在板前方的中央区，板的前方两端形成向板前方的“散射”，这种散射无法用几何声学的原理解释，而更接近波动性，见图 1-11 (b)。

“散射”的含意是声波朝许多方向无规则地反射，也包括折射和绕射。散射对于室内声场的空间分布和衰减都有很大的影响，它能有效地改善室内音质。

这里所说的折射，是声波传播中因媒质中声速的空间变化而引起的声传播方向改变的过程，如同光的折射现象，放在水中的筷子，使我们看到了有角度的弯折，这是由于光在空气和水中的传播速度的不同而呈现的奇异现象。

在构件板后的两端表现出相当明显的绕射，板后的声影区相应地比 $L \gg \lambda$ 时变小了。

5. 当构件板的尺寸与波长相近时

此时为 $L \approx \lambda$ ，这时有规则的反射消失，反射不再遵循反射定律，板前部分只表现出散射现象，反映了声传播的波动性（散射现象只能用波动原理来解释），而在板后表现出明显的绕射波，板后无声影区，见图 1-11 (c)。

6. 当构件板的尺寸稍小于波长时

此时为 $L < \lambda$ ，这时的散射和绕射已无法区分，板对声波产生均匀各向的散射，而板后声线仍和入射声线一样，继续以入射声波的方向在板后传播，见图 1-11 (d)。

7. 当声波射向很小尺寸的构件板时

此时为 $L \ll \lambda$ ，此时声波可以无视构件板的存在，而继续按声波原入射方向传播，也即是说板对声波的传播几近无影响，构件板后的声波传播不受影响的现象也是声波绕射很弱的结果，此时也不产生散射，见图 1-11 (e)、图 1-12。