

# 头部官能结构对 HRTF 的影响及主观验证实验

冯雪飞, 齐 娜

(中国传媒大学传播声学研究所, 北京 100024)

**摘要:** 为了研究声学头模上不同的头部官能结构对头相关传输函数(Head-Related Transfer Function, HRTF)及录音听感上的影响, 对具有不同官能结构的头模进行 HRTF 测量和对比分析, 得出头部不同官能结构对 HRTF 的影响。进一步的主观评价实验也验证了不同的头部官能结构对于声源定位的影响程度不同这一结论。其中, 耳廓对声源定位的影响较大, 是不可缺少的一个结构, 而有无鼻子、头发等其他细节官能结构对声源定位产生的影响则要弱得多, 同时这些头部官能结构对听感上的影响与声源类型和入射方向的关系十分密切。

**关键词:** 人工头模; 头相关传输函数; 主观实验; 声源定位

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-01-0041-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.01.010

## The influence of different head function structures on HRTF and subjective evaluation

FENG Xue-fei, QI Na

(Communication Acoustics Library, Communication University of China, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Head-related transfer functions (HRTF) of artificial heads with different head function structures are measured and analyzed to reveal the influence of different head function structures on HRTF. The further subjective listening tests also confirm that different head function structures may affect auditory localization in different degrees. Pinna is a very important and indispensable factor on sound localization. But the effects of nose, hair and other detail structures of head on sound localization are weaker. Moreover, the impact on auditory localization of these function structures is closely related to sound source types as well as incident angles.

**Key words:** artificial head; HRTF; subjective evaluation test; sound localization

## 0 引言

近年来, 随着移动多媒体技术的发展, 人们对使用耳机重放时声场自然逼真效果的要求也越来越高, 录音真实程度高、声场逼真效果好的人工头录音技术也越发引起关注。现有的人工头除了有对头部各细节进行精确复制的仿真头模, 还有头部结构有一定程度简化的人工头模<sup>[1]</sup>。仿真头模的细节(如头的大小和形状、眼窝、嘴、颧骨、耳廓的精细结构等)接近真人, 双耳录音重放声场逼真度高。然而, 过分追求细节的逼真度会增加仿真头的造价成本。考虑到人的听觉感知具有一定的模糊性, 可以在保留人工头基本声学特性不变的前提下对头部

细节进行一定程度的简化。简化头模因结构简单, 价钱相对便宜, 但声场还原效果较仿真头模有一定差别。国际上现有的简化头模产品种类很多, 但由于商业机密等原因, 对依据何种原则对头部结构进行简化设计尚未有公开报道。本文选择中国传媒大学自主设计的中国成年男性仿真头模(简称仿真头模)和椭球简化头模进行测量, 比较分析不同的头部细节结构带来的 HRTF 频谱上的差异。HRTF 即 Head-Related Transfer Function, 也叫头相关传输函数, 反映了声波从声源发出到被人耳接收过程中头部和耳廓等结构对声波产生的滤波作用。由于人的个性化因素, HRTF 也是一个非常具有个性化的指标, 分析不同结构声学头模的 HRTF 变化, 是最为直观地得出不同结构对 HRTF 影响的方法。同时结合主观实验验证了头部不同细节结构对录音效果听感上的影响。通过测量分析结合主观实验验证的方法, 最终可明确在设计制作简化头模时, 头部哪些细节结构可去掉, 而哪些是与声学特性密切相关的, 为简化头模的设计提供一定的理论依据。

收稿日期: 2012-01-03; 修回日期: 2012-04-10

基金项目: 自然科学基金课题资助项目(60803062); 国家科技支撑计划课题资助(2012BAH01F04)

作者简介: 冯雪飞(1985-), 女, 河南新乡人, 硕士, 研究方向为虚拟声技术。

通讯作者: 冯雪飞, E-mail: hjxf2005@126.com

# 1 不同头模制作、HRTF 测量及录音

## 1.1 不同官能结构头模制作

研究表明,相比于简单的刚性圆球模型,人头结构更接近于椭球体,椭球的声学频率特性与真人也较为贴近,所以本文选定椭球作为简化头部结构,通过对其添加不同的官能结构(耳廓、鼻子、头发等),结合 HRTF 测量,讨论不同头部官能结构对 HRTF 的影响,同时为了研究头部其他细节(眼窝、头颧骨等)的影响,还特别将带有不同结构的简化头模与仿真头模进行对比分析。实验使用的仿真头模如图 1(a)所示,是按照中国成年男性头型三维尺寸国家标准和中国成年人头面部尺寸国家标准<sup>[2,3]</sup>自主设计;简化椭球头模如图 1(b)所示,尺寸选取亦是参照相应国标<sup>[3]</sup>。仿真头模和简化椭球头模上安装的耳廓模型均相同,是在对中国成年男女耳廓形态进行了群体研究的基础上,根据耳廓形态细节统计结果得到的具有代表性细节特征设计而成的,即所谓的“标准耳”<sup>[4]</sup>,如图 1(c)所示。表 1 给出了不同官能结构头模的结构说明。



(a) 仿真头模 (b) 椭球模型 (c) 平均耳模型

图 1 实验中所用头模及平均耳模型

Fig.1 Models of artificial heads and the average ear

表 1 不同官能结构头模说明

Table 1 The artificial heads with different functional structures

头模编号	结构说明
1	椭球不加耳廓
2	椭球加耳廓
3	椭球加耳廓加鼻子
4	椭球加耳廓加鼻子加头发
5	仿真头模加耳廓

## 1.2 不同结构头模的 HRTF 测量和录音

不同头模进行 HRTF 测量以及录音时采用的空间坐标系为顺时针球坐标系 $(\theta, \phi)$ 。其中仰角 $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ 为声源方向矢量与水平面的夹角,方位角 $-180^\circ < \theta \leq 180^\circ$ 为声源方向矢量在水平面的投影与中垂面的夹角,右耳方向对应的水平方位角为 $90^\circ$ 。考虑到 HRTF 的对称性,本文中选取右耳的 HRTF 进行分析,无特殊说明,文中所有分析均以右耳为例。

HRTF 测量是在短混响录音间内进行的。测量时采用 DPA 4060BM 微缩传声器置于人工头左右耳道入口处,测量过程中人工头耳道中心距地面保持为 1.2 m,三只 Panasonic 同型号 3inch 全频带小扬声器分别固定于支架上,以头模正中水平面为基准,仰角分别为 $-45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ ,距头中心 1.2m,且每只扬声器轴心均指向头模中心。

HRTF 测量信号为计算机产生,经 8 个周期重复平均后的 MLS 序列。采样频率为 44.1 kHz,精度为 16 bit,阶数为 13B。测量时以方位角 $\Delta\theta=5^\circ$ 为间隔由 $\theta=0^\circ$ 开始旋转头模,在每个方位角上分别拾取仰角 $\phi=\pm 45^\circ$ 、 $0^\circ$ 三个扬声器的左右耳信号,顺时针旋转一周后,再记录 $\phi=90^\circ$ 的扬声器信号,得到全空间(除仰角 $-90^\circ$ )以 $5^\circ$ 为分辨率的 217 个方位的信号。

在对不同头模进行 HRTF 测量之后,又选取不同的声源信号进行双耳录音,作为后续主观评价实验使用的素材。声源信号共选择了三种,分别是时长为 2s 的白噪,时长 5s 的语音信号和持续 5s 的冲击声(竹板声)。录制时没有对全空间进行录制,仅是挑选了六个方位角进行录音,分别为: $(-110^\circ, 0^\circ)$ 、 $(120^\circ, 0^\circ)$ 、 $(-135^\circ, -45^\circ)$ 、 $(35^\circ, 45^\circ)$ 、 $(-5^\circ, 0^\circ)$ 、 $(-85^\circ, 0^\circ)$ 。这样对于每一个头模分别录制了来自六个方位角的三种声源总计 90 个信号。

## 2 不同官能结构头模 HRTF 特性分析

结合测量数据,分别对声源位于 $45^\circ$ 、 $-45^\circ$ 及 $0^\circ$ 仰角时,不同方位角下不同官能结构头模的 HRTF 幅度谱进行对比分析。图 2 给出了五种具有不同官能结构的声学头模水平面不同方位的 HRTF 幅度谱图。图 3 则给出了声源位于 4 个特定方位时五个头模的 HRTF 幅度谱图,其中图 3(a)和图 3(c)中五个头模的 HRTF 差别较小,大多在 3dB 以内,而图 3(b)和图 3(d)中不同官能结构 HRTF 差别比较明显,某些频段的差异甚至会超过 10 dB。综合对比分析图 2 和图 3 的情况发现:

(1) 头部不同官能结构对 HRTF 幅度谱的影响,主要表现为幅度值与谷点尖锐度会有一些的差异,而谷点位置基本不变。个别方位处,不同结构头模的幅度曲线的走势也会发生改变,如图 2 中各个头模的整体 HRTF 曲线所示;

(2) 方位不同,不同官能结构对 HRTF 幅度谱的影响大小不同。相比于耳朵同侧,声源位于耳朵异侧时不同官能结构头模的差异性更加明显,在图

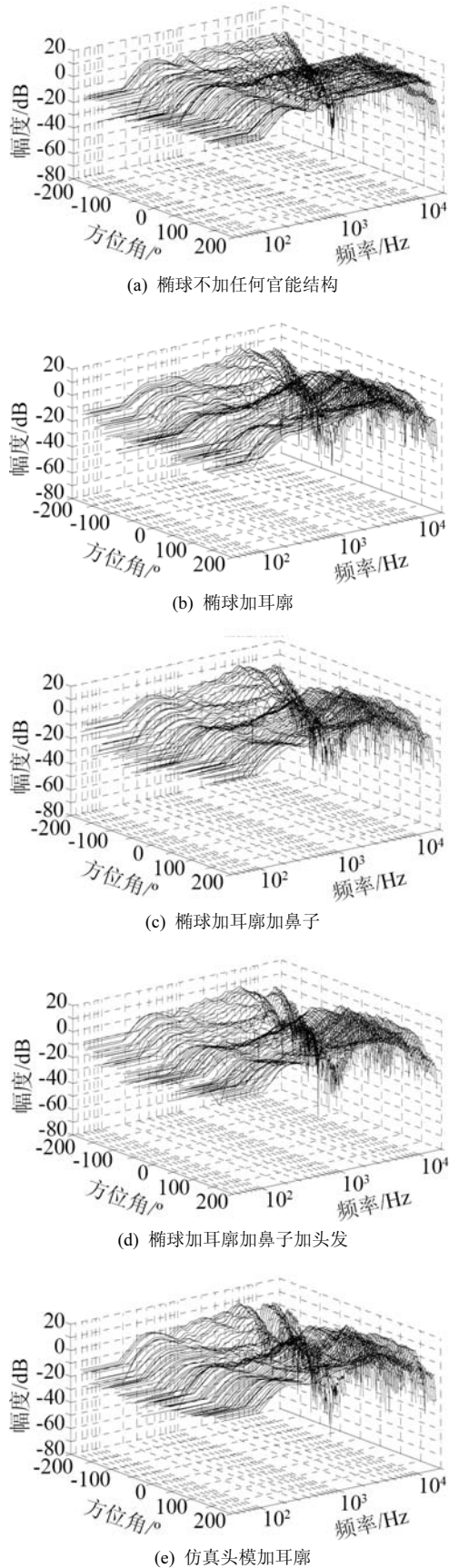


图 2 声源位于水平面上所有方位角时 5 个头模对应的 HRTF 幅度谱  
 Fig.2 The HRTF amplitude spectra of 5 artificial heads when sound sources come from all over the horizontal plane

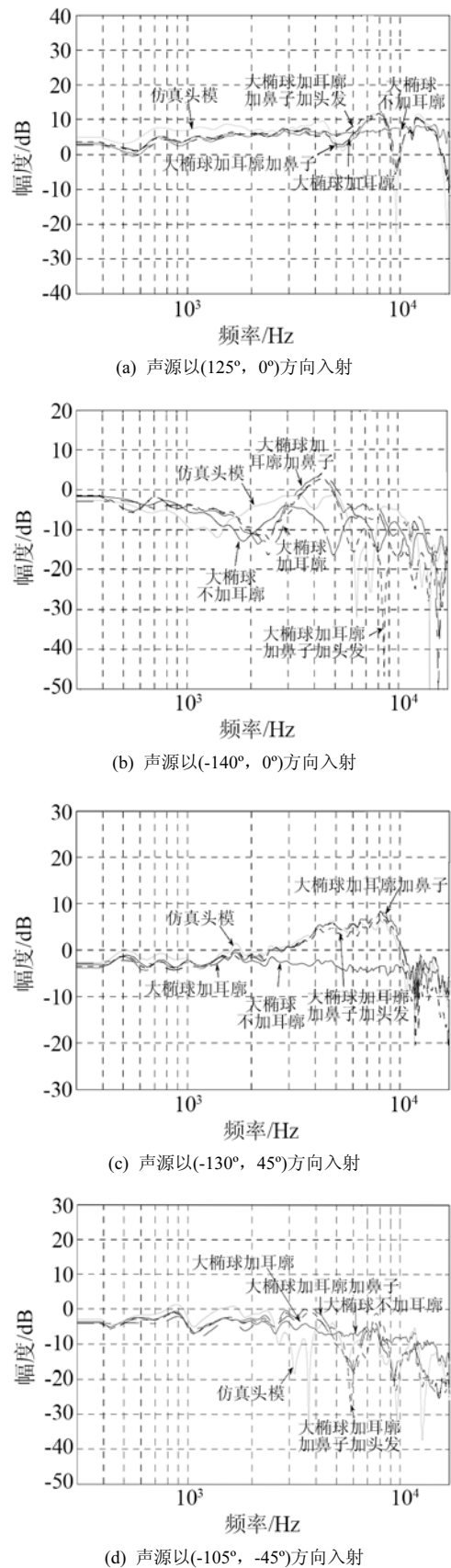


图 3 声源位于相同方位时 5 个头模对比幅度谱  
 Fig.3 Comparison of the HRTF amplitude spectra of 5 artificial heads when sound sources in the same direction

3(a)和图 3(b)中可以清晰地看到这一差别,当声源方向为 $(-140^\circ, 0^\circ)$ 右耳异侧时,各个头模的 HRTF 差别很大,最大处超过 20 dB,远大于声源方位为 $(125^\circ, 0^\circ)$ 右耳同侧时,各个头模 HRTF 差异均在 3 dB 以内的情况:

(3) 水平面时,不同官能结构的影响在耳朵同侧与异侧差别很大,而 $45^\circ$ 与 $-45^\circ$ 仰角时则没那么明显。可见,耳廓对于垂直方向声源定位的作用更加突出:

(4) 从图 3 的各个对比情况中可以看出,头部加/不加耳廓时,幅度谱差异明显:不加耳廓时幅度曲线比较平滑,没有明显的峰和谷。可见,相比于其他结构,耳廓对 HRTF 幅度谱的影响十分突出,这与前人的研究结果也是一致的:

(5) 从图 3(b)和图 3(d)中可以看出,当声源位于头后方时,头发的作用不能忽略,最大差异处可达 30dB 以上,而鼻子则影响很小:

(6) 与仿真头模频谱相比较,添加不同官能结构的椭球头模具有良好的一致性。这一点从图 3 的各种情况中都有体现,尤其是在图 3(a)中最为明显,这是因为在尺寸和基本构造上,添加了不同官能结构的椭球头模更接近一些。

(7) 综合分析所有的测量数据后,得出了以下结论:水平面上方位角在 $90^\circ\sim 130^\circ$ 、 $0^\circ\sim 40^\circ$ 范围附近, $45^\circ$ 仰角方位角为 $30^\circ\sim 75^\circ$ 、 $-90^\circ\sim -135^\circ$ 范围附近, $-45^\circ$ 仰角方位角为 $115^\circ\sim 130^\circ$ 、 $0^\circ\sim 40^\circ$ 范围附近,不同官能结构对 HRTF 幅度谱影响较小;而水平面上方位角在 $-60^\circ\sim -140^\circ$ 附近, $45^\circ$ 仰角方位角在 $130^\circ\sim 180^\circ$ 、 $0^\circ\sim 75^\circ$ 附近, $-45^\circ$ 仰角方位角在 $-60^\circ\sim -155^\circ$ 附近时,不同官能结构的影响十分突出,并且尤以水平面时差异更加明显。

### 3 主观评价实验及分析

#### 3.1 听感判断实验设计

将录制的实验素材按照声源类型分为三大组,

每一组里按两两头模对比又分为 7 小组,分别是:有无耳廓(头模 1 和 2)对比,有无鼻子(头模 2 和 3)对比,有无头发(头模 3 和 4)对比,仿真头模加耳廓与椭球加耳廓(头模 5 和 2)对比。在每一小组里包括以不同方位角重复排列的 12 对对比信号。

实验采用系列范畴法<sup>[5]</sup>,将每一组对比信号中声源方位变化情况分为五个范畴,分别是非常不明显、不明显、一般、比较明显和非常明显;实验选取 9 名被试进行重复实验,用 ATH-CK7 入耳式耳塞重放信号,要求被试判断出前后两种信号在声源方位的变化情况,在五个范畴里进行选择;实验过程中要求被试坐直,保持头部端正的姿势。从实验结果我们可以得到头部某一官能结构在不同方位对不同类型声源的影响情况。

#### 3.2 实验结果分析

表 2 中给出了所有分组的范畴分布结果,其中 1, 2, 3, 4, 5 这五个数字分别代表从最不明显到最明显这五个范畴。

由表 2 结果可以看出,增减鼻子和头发这两种结构,当声源为白噪和语音时在听感上的影响作用非常小,数据结果基本都在最小范畴里;当声源为竹板时,由于声源类型的改变,在某些方位角会产生一定的影响,但作用仍然很小且不具备规律性。

耳廓的作用显而易见且非常重要,有、无耳廓对比结果无论是哪种声源下都存在明显差异。相比之下,面部细节结构对声源定位的影响就小很多。

### 4 结 论

从测量分析的结果看,头部不同官能结构对 HRTF 幅度谱的影响,主要表现为幅度值与谷点尖锐度会有一些的差异,而谷点位置基本不变。在个别方位处,不同结构头模的幅度曲线的走势也会发生改变。并且头部有、无耳廓时 HRTF 幅度谱差异明显,最大处差异超过 30dB,可见耳廓的作用十分突出。当声源位于头后方时,头发的作用不能忽

表 2 不同官能结构实验数据处理结果

Table 2 The results of the subject tests of different functional structures

方位角	范畴分布											
	有无耳廓			有无鼻子			有无头发			仿真头模与椭球头模		
	白噪	语音	冲击	白噪	语音	冲击	白噪	语音	冲击	白噪	语音	冲击
$(-110^\circ, 0^\circ)$	5	4	5	1	1	1	1	1	1	1	3	2
$(120^\circ, 0^\circ)$	4	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2
$(-135^\circ, -45^\circ)$	3	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	2
$(35^\circ, 45^\circ)$	5	5	4	1	1	2	2	1	3	3	2	1
$(-5^\circ, 0^\circ)$	4	3	3	1	1	2	1	1	2	1	2	2
$(-85^\circ, 0^\circ)$	3	2	4	1	1	2	1	1	1	1	2	2

略, 而有无鼻子则差别不大。

从听感方面讲, 耳廓是必不可少的一个结构, 这也被相应的主观评价实验所验证。而有无鼻子、头发以及眼窝、颧骨、锁骨等细节官能结构对声源位置的判断所产生的影响则要弱得多。同时由主观评价实验也可看出这些头部官能结构对听感上的影响与声源类型关系十分密切。

### 参 考 文 献

- [1] 谢菠菘. 头相关传输函数与虚拟听觉[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 1.  
XIE Bosun. Head related transfer function and virtual auditory[M].

- Beijing: National Defence Industry Press, 2008. 1.  
[2] 中国成年人头面部尺寸国家标准, GB/T 2428-1998[P].  
Head-face dimensions of Chinese adults, GB/T2428-1998[P].  
[3] 中国成年男性头型三维尺寸国家标准, GB/T 23461-2009[P].  
3D dimensions of male adult head forms, GB/T2341-2009[P].  
[4] 齐娜, 李莉, 赵伟. 中国成年人耳廓形态测量及分类[J]. 声学技术, 2010, 29(5): 518-522.  
QI na, LI li, ZHAO wei. Morphometry and classification of Chinese adult's auricles[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(5): 518-522.  
[5] 孟子厚. 音质主观评价的实验心理学方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 84-91.  
MENG Zihou. Psychology experiment methods of Timbre Subjective Evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 84-91.

## • 会讯·书讯 •

### 《噪声控制与声舒适》书评

富克斯 著 江涛 查雪琴 译

德国弗劳恩霍夫建筑物理研究所(FhG, IBP)是专注于建筑声学 and 建筑热力学的著名研究单位。富克斯(H.V.Fuchs)教授长期在该研究所主持建筑声学研究和开发工作, 将其积 40 余年研究成果编写成《噪声控制与声舒适》一书, 其中也涵盖了该研究所工作团队的众多经验和成果。自 2004 年德文版问世以后, 2009 年又修订出版, 2012 年先后出版了英文和中文译本, 后者由中国科学技术出版社获授权出版。印刷质量上乘, 使大量清晰的图片得以展示给读者。本书的副标题是: “理念、吸声体和消声器”, 后两项是声学工程中大家熟悉的主要工具。这里强调“理念”的重要性, 正是本书的特色之一, 或许也是国内工程界和生产厂商所欠缺的内容。以无纤维化吸声材料而言, IBP 研究所很早注意及此, 薄膜型吸声体即为该研究所早期成果之一。90 年代自从引入马大猷教授创始的微穿孔吸声板后, 即不遗余力地开发出许多种新的微穿孔产品, 以适应不同的用途, 又带动了新产品的工业化。他们把声学机理研究、应用和开发研究、产品产业化等全过程结合起来, 推动了声学事业的全面发展。再则, 有时受特殊条件限制的疑难问题, 现有材料不能满足声学或其它方面要求时, 例如受使用场所限制的体积小而又宽频带吸收的, 或是不要妨害建筑视觉透明的, 或是在古建筑保护中要同时具有吸声、防火, 不破坏原建筑景观的, 或是要能清洗的要求等等。面临工作中新的挑战, 毫不畏缩, 始终坚持解决现实声学技术难题, 并非深藏在尚未发现的理论中, 而是首先要解决的总是实际应用问题的原则。唯有在这种“理念”驱动下, 不仅仅满足于给声学问题做出科学的解释, 还要通过分析和一系列试验, 必要的测量方法以及找到解决的办法。例如第 13 章中: 通道弯头的角度与消声量及其与频率相关特性; 直径约 2m 的大型管道消声器的构造和消声测量结果; 带沉淀物的废气排放消声器的构造和测量结果等等, 这些很有实用和参考价值的数据, 有极大的工程适用性, 大部分在以往的书籍中未曾有过。消声器的研发方面, 在与工业界合作方紧密协作下, 特别在低频消声和应对污浊液体对消声器的腐蚀方面有明显的改进。还扩展了板式共振器部分, 增加干涉消声器和有源消声器, 增加了关于室内通风设备和通风系统中节能和降低运营费用的“管道内衬吸声层”等等。书中科学原理及公式的推导只是为了使读者更好地应用这些技术、措施和材料。作者为适应工程技术的需要, 有些简化了的计算公式, 甚至可直接用计算器估算。

值得一提的是, 占全书 40%篇幅的第 11 章“室内声学中的吸声器”。作者从一个特殊的视角来讨论多种类型空间的室内声学设计的吸声处理问题。从一般会议室和厅堂到教堂, 从剧院中乐池到录音室的声学处理, 以至半开放空间如古希腊、罗马露天剧场的声学问题讨论。因此, 读者还可从本章中获得不少室内音质设计方面的知识和经验。

占本书篇幅达 20%的第 12 章“声学测试室的吸声构件和消声器”, 也是目前各行各业进行设备声学测试所要关心的, 但又缺乏全面介绍和讨论的课题。作者及其团队总结了他们近 20 年所积累的经验, 其中不乏创新之设计。

鉴于国内声学方面资料较多来自英文文献, 因此本书的中译本出版, 对我国广大声学工作者来说, 扩大了视野, 尤其对德国所制订的各种规范和标准内容有所了解。书中引用了作者及其工作团队长期积累的大量实例分析, 对于从事声学设计者来说, 既可借鉴, 又可从中获得启发。就读者对象来说, 除一般声学工作者外, 对建筑设计和规划部门以至施工单位, 亦不失为一册实用性技术参考资料。

本书所用声学参量符号有些许与我国的国标不同, 如果在书末提供一个对照表, 将对读者带来方便。