

Media



Focal Press  
Taylor & Francis Group

TECHNOLOGY

音频技术与录音艺术译丛

传媒典藏

[美] Floyd E. Toole 著

薛彦欢 周立 译

# 声音的重现

## 理想听音环境构建指南

国际声学与心理声学行业专家力作  
关于房间与扬声器的物理声学和心理声学话题

SOUND  
REPRODUCTION

THE ACOUSTICS AND PSYCHOACOUSTICS  
OF LOUDSPEAKERS AND ROOMS



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

Media

TECHNOLOGY

传媒典藏



Focal Press  
Taylor & Francis Group

音频技术与录音艺术译丛

# 声音的重现

## 理想听音环境构建指南

[美] Floyd E. Toole 著

薛彦欢 周立 译



# SOUND REPRODUCTION

THE ACOUSTICS AND PSYCHOACOUSTICS  
OF LOUDSPEAKERS AND ROOMS

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

声音的重现 : 理想听音环境构建指南 / (美) 图尔 (Toole, F. E.) 著 ; 薛彦欢, 周立译. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2016. 1

(音频技术与录音艺术译丛)

ISBN 978-7-115-40215-8

I. ①声… II. ①图… ②薛… ③周… III. ①录音—技术 IV. ①TN912.12

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第211866号

## 版权声明

Sound Reproduction, 1st Edition by Floyd E. Toole.

ISBN 978-0-240-52009-4

Copyright©2008 by Focal Press.

Authorized translation from English language edition published by Focal Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved; 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, Focal 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

POSTS & TELECOM PRESS is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书简体中文版授权由人民邮电出版社独家出版, 仅限于中国大陆境内销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书中的任何部分。

本书封底贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

- 
- ◆ 著 [美] Floyd E. Toole  
译 薛彦欢 周立  
责任编辑 宁茜  
责任印制 周昇亮
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
三河市海波印务有限公司印刷
  - ◆ 开本: 800×1000 1/16  
印张: 31 2016年1月第1版  
字数: 667千字 2016年1月河北第1次印刷
- 著作权合同登记号 图字: 01-2010-6516号
- 

定价: 129.00元

读者服务热线: (010)81055339 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

# 内容提要

本书包括下列内容：

- 引起听音者反应的感知的量度
- 理解起主导作用的心理声学法则
- 发展录音 / 重放方法与设备，从而将听众反应最好的感受最大化，同时将负面影响最小化
- 鼓励产业中的音乐和电影制作及消费级的声音重放共享同样的性能标准和系统结构，从而让听众领略到艺术作品的原始意图

拥有不同文化背景的读者都会觉得本书的内容易于理解。高保真音响发烧友、音乐爱好者、影迷、评论家以及记者会发现，通过本书他们可以用心理声学理论理解听到的声音。录音师、混音师以及母带制作工程师通过本书也许能挖掘出一些关于如何更好地融入声音重放大环境下的发人深省的看法。扬声器设计者通过本书可能在磁体、音圈、箱体的设计方面得不到什么帮助，但是他们会找到灵感，如何将换能器与系统更好地整合，以使房间边界和听音者的互动更加良好。最后，声学顾问会发现对于一些常规做法的解释和对新做法的建议。

# 致谢与献辞

感谢加拿大国家研究委员会与 Harman International Industries, Inc.，它们分别为我和我的同事提供了 27 年和 15 年的资金支持与设施，用于与声音重放相关的物理与心理声学因素的研究。Harman 公司的工程师慷慨地提供了读者在本书中看到的大量扬声器测量数据。我在此对为本书付出巨大努力并做出杰出贡献的遍布全球的研究人员表示由衷的尊敬与感谢。

感谢 Sean Olive、Todd Welti 和 Marshall Buck，他们为本书手稿部分提供了重要的意见与建议，还要感谢我的妻子 Noreen，她非常支持我，每天都与我分享这项创造过程。

特别感谢 John Eargle，他不断参与这一项目，为本项目的执行提供了鼓励与支持，直到 2007 年 5 月去世。John 的去世让我失去了一位好朋友和非常专业的同事，音频行业则失去了一位少有的集艺术、工程与科学技术于一身的慷慨奉献者。我谨以此书纪念这位美好的人士。

# 引言

声音的重现无处不在。在遛狗的时候，带上一台小小的便携式录音机就可以听到美妙的音乐。在公路上，乘客通过高品质的车载音频系统享受到了卓越的环绕声作品。在室内或花园中，人们可以聆听到精心挑选的音乐。另外，大屏幕上的电视节目或电影加之七声道娱乐系统让观众身临其境，为之震撼。这一切都是高科技的杰作，为人们带来了便利与愉悦。

往事如烟。20世纪50年代，我还是个少年，很想制作前置放大器和功率放大器，于是就在战争剩余物资中四处搜寻零件。我的第一台扬声器是从一台第二次世界大战空军食堂中的破旧的点唱机中抢救出来的。那个年代，玩音频是很多人的爱好。即使你不制作什么东西的话，也总会有电子管设备或者留声机之类的东西需要维修。至于声音品质，按照今天的标准当然很差，但是相对于那个时代，这是革命性的产物。家庭聚会时播放唱片在当时是新奇的潮流，也是身份的象征。这就是高保真——Hi-Fi的开端。由于被滥用，这个词现在已经很少被提及了。

这项事业于我来说开始是兴趣使然，后来成为了我学习的动力，并且命中注定成为了我的终生事业。如今，我在产品研发和应用方面工作了43年之后主动离职了，而这本书是我退休后第一个项目。其中的一些部分不可避免地带有自传性质，因为我自认为是这项产业科学基础的诸多贡献者之一。

从音频到声音的重现包含了诸多的情感与智慧，要理解这一过程是极具挑战性的，因为它涵盖的领域充满了矛盾：人类多方面的感知与设备系统和技术性能之间的碰撞。其主观方面具有复杂性、灵活性、适应性，偶尔还兼具多变性。技术方面的特点包括设备强大的重现能力、性能的稳定性以及测量数据的可靠性等。多年来，两种文化的结合取得了多方面的成功。两方面都在追求最终卓越的主观体验，但是在哲学、量度、术语等方面都存在根本性的差异。

录音与广播产业生产的就是我们声音重放系统所需的节目，其中包括音乐节目、谈话节目，以及电影、电视、游戏的配音等。这些节目无论从内容方面

还是从声音的音色与空间感方面都堪称艺术作品。我们作为这些节目的听众，并不知道其声音是怎样制作出来的，也不知道其制作初衷是什么。我们可能亲临过音乐家的不同表演现场，但没有人试过在传声器位置聆听演出，大家肯定是坐在离舞台一定距离的观众席中。将传声器信号进行简单重放根本不能重现现场体验，而这正是专业录音产生所要涉足的领域。

信号处理的第一个步骤：选择适当的传声器，将它们小心地放置在相关表演者的位置。第二个步骤：将录制的信号以多轨方式存储，然后按照适当比例进行混音。在专业控制室或家庭工作室里，音乐家和录音师通过扬声器监听混录好的声音，直到满意为止。第三个步骤：在混录过程中，为了提高声音品质，采用多个物理或虚拟旋钮，从而增加或减少特定频率的能量，并且在声轨中增添多种延时和混响等效果。最后，母带工程师完成母带的制作，并转录到 CD、DVD 等传播介质上，这一步会对节目进行进一步的处理，这也是信号处理的第四个步骤。在 LP 密纹唱片母盘制作中，有些处理的幅度是相当大的，例如，单声道低频、动态压缩、唱片中心圈附近的高频衰减以及种种用以应对介质局限性的手段。数字媒体无需这么显著的处理，但是母带工程师会通过监听扬声器来调整动态范围和带宽以适应听众的要求。上述为信号处理中清晰界定的四个步骤，在整个过程中，每个人都在筑造着结果，不能缺少任何环节，这就是艺术创造。唯一的问题是，在未来当我们在别的地方重放这些节目时，由于种种原因，听到的声音却和先前制作的不尽相同。很遗憾这是经常发生的事。

上述问题的关键在于声音重现。在控制室、家庭音乐工作室或母带制作室中，声音重现是节目创作过程中不可分割的一部分。这个过程显然不是线性的、稳定的、可预知的，就像一道谜题。因此对于大部分录音作品来说，传递到我们耳中的声音是一种全新的体验。它不是我们先前听到的任何东西，我们无从建立可供参考的记忆，甚至是有缺陷的记忆。鉴于重放设备不同，我们不能确定哪些因素决定了所听到的内容。假设我们听到了失真的声音，这是否是由于节目本身存在问题，抑或是因为重放系统的问题，在这个节目中暴露出来了？是否这两个因素在特定的条件下产生了特有的消极的相互作用呢？在一般的聆听条件下，上述问题我们无从得知。

听众情感的源头是艺术本身，是音乐，是电影，而不是音频硬件。很难想象，听众会对扬声器的驱动单元产生情感，但是如果好的音频硬件，听觉体验会大打折扣。因为听众无法了解原始声音的真实本质，没有人可以说“这听起来就是它应该有的样子”。但是听众通常会在喜欢与不喜欢的尺度上表达自己的态度，而这些观点往往带有感情色彩。



因此，诸如愉悦度和偏好度等描述词在评级方面与准确度和保真度一样重要。但这么做可能会破坏原始现场演出的纯粹性。幸运的是，听众可以觉察出非自然声与失真，也可以辨别出作品的好与坏，能够做出毫无偏见的评价。如果对于正确的声音只有模糊概念的话，听众只能辨别什么是错误的。于是“没有问题”变成了“优秀”的衡量标准。在本书结尾，我们可以看到卓越的技术如何同感知上的精确与情感上的满足产生高度联系。当我们进行聆听时，会认识到这一点。

下列概念构成了本书的基础：

- 引起听音者反应的感知的量度
- 理解起主导作用的心理声学法则
- 发展录音 / 重放方法与设备，从而将听众反应最好的感受最大化，同时将负面影响最小化
- 鼓励产业中的音乐和电影制作及消费级的声音重放共享同样的性能标准和系统结构，从而让听众领略到艺术作品的原始意图

我希望拥有不同文化背景的读者都会觉得本书的内容易于理解。高保真音响发烧友、音乐爱好者、影迷、评论家及记者会发现，通过本书他们可以用心理声学理论理解听到的声音。录音师、混音师及母带制作工程师通过本书也许能挖掘出一些关于如何更好地融入声音重放大环境下的发人深省的看法。扬声器设计者通过本书可能在磁体、音圈、箱体的设计方面得不到什么帮助，但是他们会找到灵感，如何将换能器与系统更好地整合，以使房间边界和听音者的互动更加良好。最后，声学顾问会发现对于一些常规做法的解释和对新做法的建议。

第一部分首先讲述了声音重放的历史，随后探讨了科学背景并且对相关的声学与心理声学理论知识进行了审视。本书有意避开数学分析方式。用图表解释人们听到的内容与测量得到的数据之间的关系。这样做的目的是使读者对某些感知的产生和结果有一个直观的理解。

科学家往往会为测量数据与感知内容之间的关系寻求数学描述。数学公式并不会增加信息，它只是试图用另一种方式来描述信息。事实上，公式是对心理声学测试得出的原始数据的简化。这种尝试在更复杂的感知现象模型化方面相当重要。几种简化关系的组合可以解释为某种复杂机制的结果。我们希望这一过程进行得足够完善，从而让输入的技术数据能够有效地预测人的感知。在声音重放这一大背景下，我们的长期目标是找到能够有效评估在室内运转的电子与换能器设备物理性能的技术性衡量体系。



笔者尽量使讨论切合主题、言简意赅，但是这是一个综合性的课题，因此一定篇幅的解释也是必要的。书中还包括一些啰嗦的部分，因为我预计读者对本书的阅读不一定遵循线性顺序。比方说，很多读者可能会从第二部分开始看，甚至可能会从最后一章看起，他们希望直接找到答案，而无需分析解释的过程。这样很好，但也请回过头来学习一下剩余的部分，因为只有理解了原理才能处理现实世界中无穷无尽的变化。在某些情况下，我们可能会发现不需要刻意去做弥补，因为其实并不存在问题。人们的适应能力往往成为被忽视的因素。我们有相当卓越的能力“透过”整个房间听辨声源本质，归根结底，对现场演出也是一样。

近些年来，由于“家庭影院”的推动，音频产业在定制安装方面取得了长足进步，其中包括家庭自动化、便利安装、娱乐等方方面面。这一业务给已经发展了50多年、面临着惨淡前景的双声道立体声重新注入了活力。立体声并没有销声匿迹，而且永远也不会消亡，目前有大量珍贵的音乐遗产需要这种演绎方式。有趣的是，是电影为立体声带来了灵感，也是电影为多声道进入家庭铺平了道路。为这一点，我们心怀感激。

“家庭影院”这个术语说明了一切：家庭中的电影。毫无疑问，电影是家庭娱乐的重要组成部分，但是家庭影院的使命不应仅此而已，这是令人遗憾的妥协。有些音频顾问宣传一种观念，家庭影院的声场应当能够同电影配音室甚至电影院媲美。在重要的频谱、动态、指向性以及空间感等方面，优秀的家庭影院系统毫不逊色。这些也都是声音重现的要素，除了电影以外，对于音乐和视视频游戏也是一样。家庭安装较小的物理尺寸让我们能够更加灵活自由地使用这些设备，从而为多种娱乐方式提供更加细致的声音。因此，我们可以尽情将这个系统称为家庭影院，但是它的设计目标是多用途的，如果一个家庭影院足够好，就有可能比大部分大型演出的音响效果更佳。

这是音频历史上第一次在设备制造商和最终客户之间运作的具有强大能力的服务产业。设计者和安装者在客户购买音视频设备时提供大量建议，并且完成了设备的安装和调试。鉴于当前音视频设备的复杂程度和对于集中控制的需求，服务产业体现了巨大的优势。

第二部分针对的是需要进行这种定制安装的人与其他想要创造艺术级家庭影院或声音重放系统的人。希望他们能够喜欢本书的语言和表达方式。这本书并不是菜谱一样的工具书。曾经尝试过简化工作，结果往往是过于简化。为了不吓跑读者，“保持简单”这一原则常常应用在不是那么简单的话题上。只有非常宽容的消费群体才会接受许多以折中原则建造出来的家庭影院。在家庭影院

的设计中，坚定的 DIY 爱好者是一个能力超强的群体。

日常起居室经过良好设计完全可以实现卓越的声音重现。然而，如果经常需要欣赏大动态声音的摇滚乐或电影大片，就需要一个专用的家庭影院了，同时也非常需要称职的声学顾问来设计有效的隔声措施。专用房间要进行内部声学处理，内部陈设也有别于一般房间，这是“聆听体验”的设计，并让这种体验在客户偏爱的节目与重放模式中达到优化。本书回顾了音频产业发展中积累的智慧，并且还增添了相对不熟知的科学研究结果，两者结合形成了关于娱乐系统与房间设计的指导思想。

“在知晓与坚信之间只有一步之遥。”马克·吐温如是说。

音频产业日趋成熟，无数次的重复产生了可与科学事实相比的某些信条，其中很多是无私与用意良好的，另外一些则受到了商业利益的驱使，是错误的，而受伤害的往往是艺术本身。

毋庸置疑，读者会发现本书中的某些建议同其他地方发布或推广的想法之间存在冲突。请试着翻阅本书内容或查找参考资料来理解我们提出这些建议的原因。书中某些部分并不完整，这是不可避免的。如果现在或将来有更好或更正确的建议，我们会应用科学文献自由交换信息：这些信息包括新的证据和对于新证据的解释。这就是科学方法。

科学为艺术服务。在本书中，我们将跟随科学来看看它将我们带向何方。我们会发现在某些方面，科学指向的是我们已经达到的位置，但在另外一些方面，我们有必要调整方向。

# 目录

## 第1部分 认识基本原理

第1章 声音的重现 .....	3
1.1 哲学的观点 .....	5
1.2 录音与录制的音乐 .....	7
第2章 艺术性的保持 .....	11
2.1 回到开始：捕捉声音品质 .....	12
2.2 回到开始：方向和空间 .....	15
2.3 一个怪圈 .....	18
2.4 打破怪圈：钥匙掌握在专业人员手中 .....	19
2.5 对艺术还原能力的测量 .....	23
第3章 房间里的声音——问题透视 .....	25
3.1 现场音乐演出 .....	25
3.2 声音的重放 .....	30
3.3 录音：房间里的乐器 .....	32
3.4 听音：房间里的听音者 .....	35
3.5 反射声：传播声音、整合声音与区分声音优劣 .....	36
3.6 声学与心理学声观尺度 .....	37
第4章 房间里的声场 .....	39
4.1 大型演出场所：音乐厅 .....	39
4.1.1 混响时间与音乐和语言的感知 .....	44
4.1.2 座席低谷效应 .....	45
4.1.3 早期和后期反射声的效果 .....	46
4.2 办公室以及工业生产场所 .....	47

4.3 家庭听音室和控制室 .....	49
4.3.1 一个房间，两个声场——过渡频率 .....	50
4.3.2 在过渡频率以上 .....	55
4.3.3 对小房间内扩散的缺失进行测量 .....	56
4.3.4 什么是“小”房间 .....	57
4.3.5 小听音室的传统声学测量 .....	58
第5章 反射声产生的效应 .....	61
第6章 反射声、声像与优先效应 .....	65
6.1 单个反射声的可闻声学效应 .....	65
6.1.1 单一反射声产生的效应 .....	69
6.1.2 另一个角度看优先效应 .....	71
6.1.3 不同方向的反射声 .....	72
6.2 多个反射声中的单个反射声 .....	73
6.2.1 真实的房间与仿真的房间 .....	75
6.2.2 阈“家族” .....	77
6.3 真实声像与幻象声像的对比 .....	77
6.4 音乐及其他声音的实验结果 .....	78
不同声音的阈值曲线形状 .....	80
6.5 单个与多个反射声 .....	82
6.6 反射声的测量 .....	83
第7章 空间印象 .....	87
7.1 有关空间感知的术语 .....	90
7.2 听音者和他们对反射声的“偏好” .....	91
7.3 更好的反射声 .....	93
7.4 总结并展望 .....	100
第8章 声音重放中的声像和空间效果 .....	103
8.1 一阶反射声 .....	103
8.1.1 一些关于扬声器摆放的想法 .....	108
8.1.2 延迟的反射声以及它们所产生的反射声 .....	113
8.2 ASW/ 声像展宽与扬声器的指向性 .....	114
8.2.1 测试扬声器指向性对声像和空间感的影响 .....	116

8.2.2 扬声器指向特性导致的可闻效果——其他观点	125
<b>第9章 反射声对音质音色的影响</b>	<b>127</b>
9.1 声波干涉的可闻性——梳状滤波效应	128
9.1.1 曲线类似而听感迥异的梳状滤波器	132
9.1.2 双耳听音，适应和梳状滤波效应	134
9.1.3 一种重要的单齿梳状滤波效应——立体声的顽疾	136
9.2 反射声对音色的影响——谐振的可闻度	139
9.2.1 我们听到了什么——频率响应的隆起还是瞬态啸叫？	140
9.2.2 去哪里寻找音色特征？	142
<b>第10章 反射声与语言可懂度</b>	<b>145</b>
10.1 单一反射声对语言的干扰	145
10.2 单一反射声对可懂度的影响	145
10.3 多重反射声、噪声和语言可懂度	146
10.4 “其他”声音的效应——信噪比	147
10.5 聆听难度——新的关联测量标准	150
10.6 真实的中置扬声器与中央虚声像	151
10.7 便携式语言重放测试	152
<b>第11章 听觉适应</b>	<b>155</b>
11.1 角度定位——优先效应	156
11.2 距离的感知	158
11.3 声音质量——音色	159
11.3.1 一个大范围的测试与其发人深省的测试结果	160
11.3.2 多声道实验——我们从中学到了些什么	162
11.4 小结	163
<b>第12章 邻近边界效应与扬声器安装方式</b>	<b>165</b>
12.1 立体角与声音辐射	165
临近边界效应的校正	169
12.2 扬声器安装方式的选择	170
12.3 为边界而设计的扬声器	175
<b>第13章 制造低频声波——在过渡频率以下</b>	<b>179</b>
13.1 共振的基础知识	180

13.2 房间模式和驻波	182
13.2.1 对房间的形状和尺寸进行优化	186
13.2.2 真实房间内的驻波	190
13.2.3 扬声器与听音位置，不同的房间，以及对共振模式的操控	193
13.3 在小房间内发送优质的低频	196
13.3.1 削弱房间共振模式的能量	198
13.3.2 对扬声器发送到房间共振模式的能量进行控制	199
13.3.3 第一步：对于矩形房间的一般性建议	201
13.3.4 第二步：进一步阐述	202
13.3.5 第三步：针对不同的超低音配置进行房间尺寸优化	207
13.3.6 第四步：用电子手段管理声场	209
13.3.7 在小房间内得到优秀的低频效果	214
13.3.8 立体声低音：没有必要	216
13.4 时域与频域	216
13.4.1 “自然的”声学均衡与电子均衡	217
13.4.2 另一个房间，另一个问题——一个迥异的解决方案	220
13.5 时域和频域的测量精度	222
实际的精度问题——均衡的名声是如何败坏的	224
第 14 章 第 1 部分总结：寻找前进之路	227

## 第 2 部分 设计聆听体验

第 15 章 音乐和电影的多声道选择	245
15.1 一些定义	245
15.2 多声道的诞生	247
15.3 立体声，一个重要的开始	249
15.4 四方声：立体声乘以二	251
15.5 多声道音频：影院的救星	252
15.6 家中的多声道音频	253
THX 对声音的修饰处理	254
15.7 多声道音频的另一个选择：AMBISONICS	257

15.8	上混合器：创新的本性	258
15.8.1	Fosgate 6 轴算法	259
15.8.2	Harman/Lexicon Logic 7 算法	259
15.8.3	“环绕声”上混合	260
15.9	多声道音响数字化和离散化	261
	对编解码器的说明	262
15.10	寻找最优的扬声器排列方式	263
15.10.1	对各种方案的科学研究	264
15.10.2	优化包围感	265
15.10.3	总结	270
15.11	建议	271
15.11.1	ITU 的观点	272
15.11.2	其他观点	272
15.12	分配声道和后方中央声道的选择	274
<b>第 16 章</b>	<b>理论应用于实践：听觉体验设计</b>	<b>277</b>
16.1	房间	278
16.2	纯视频考虑	281
16.2.1	以影院为参考	281
16.2.2	将观影体验搬到家中	283
16.3	音视频相结合	285
16.4	对扬声器的指向性要求	289
16.4.1	直达声的输送：定位	289
16.4.2	L、C、R 的初次侧向反射声	290
16.4.3	环绕声扬声器的水平指向性要求	293
16.4.4	最佳听音点以外：传输损失的结果	295
16.5	扬声器与室内声学处理的总结	299
16.5.1	LF、CF 和 RF 扬声器	299
16.5.2	环绕扬声器	302
16.5.3	传输损失	302
<b>第 17 章</b>	<b>扬声器之一：主观评价</b>	<b>303</b>
17.1	一生的工作之起点	304



17.2	扬声器的主观测量——将主观变为客观	309
17.3	控制实验中的可变因素	310
17.3.1	控制物理可变因素	311
17.3.2	控制心理可变因素	313
17.3.3	控制实验可变因素	316
17.4	测试中听力的影响	317
17.5	非听觉因素造成的偏见	320
17.6	方向感与空间感的主观评价, 以及其他	325
17.7	为扬声器评测建立试听环境	325
<b>第 18 章</b>	<b>扬声器之二: 客观评价</b>	<b>327</b>
18.1	两种声源	327
18.1.1	点声源: 球面扩散, 近场与远场的界定	328
18.1.2	线声源: 柱面扩散	330
18.2	对扬声器基本特性的测量	333
18.2.1	我们需要知道什么	334
18.2.2	改善数据的采集与处理	337
18.2.3	解读数据, 检查问题	340
18.2.4	消声室数据与房间曲线的关系	343
18.2.5	吸声材料和声扩散装置	345
18.2.6	“X”曲线——电影工业的标准	345
18.2.7	专业用数据说话	348
18.3	主观领域和客观领域的对比	349
18.3.1	测量	349
18.3.2	同时期的一个测试	351
18.4	现实世界中的消费级扬声器	353
18.4.1	独立式的 L、C、R 扬声器范例	354
18.4.2	横卧式中央扬声器	357
18.4.3	多重指向性环绕扬声器	357
18.4.4	完美的环绕扬声器	363
18.4.5	环绕声道的均衡	365
18.5	专业监听扬声器的实例	366

专业扬声器的设计目标 .....	370
18.6 另外一些有意义的和玄虚的测量项目 .....	372
18.6.1 高于过渡区频率范围的相位响应 .....	372
18.6.2 超低频的相位响应 .....	374
18.6.3 扬声器与功放的接驳：阻抗、线缆和阻尼因数 .....	375
18.6.4 灵敏度标定和功率放大器 .....	379
18.6.5 继续前行 .....	380
<b>第 19 章 心理声学——解释我们所测量到的和听到的 .....</b>	<b>381</b>
19.1 响度和听音基础 .....	382
19.1.1 等响度曲线与响度补偿 .....	384
19.1.2 等响度曲线与下降的听力 .....	386
19.1.3 不同角度的响度 .....	388
19.1.4 基本的掩蔽以及听觉反射 .....	389
19.1.5 背景噪声的评价准则 .....	390
19.1.6 我们听音的极限 .....	392
19.1.7 高分辨率音频的好处 .....	393
19.2 频谱倾斜、峰、谷、隆起和摆动 .....	395
19.2.1 共振的可闻度 .....	395
19.2.2 临界带宽、 $ERB_N$ 和音色 .....	399
19.3 非线性失真 .....	400
19.4 功率压缩 .....	402
倒相管湍流 .....	403
<b>第 20 章 从测量中预测听音者的偏好 .....</b>	<b>405</b>
20.1 Klippel 实验 .....	405
20.2 Olive 实验 .....	408
20.3 阶段性总结 .....	413
<b>第 21 章 声学材料与装置 .....</b>	<b>415</b>
21.1 关键的可变因素以及测量 .....	416
21.2 吸声的机理 .....	418
21.3 一些常见材料的声学性能 .....	420
21.3.1 常用的室内材质 .....	420