

Power of Sound

声音的力量

(电声技术国际研究进展)

Advances in the International
Research of
Electroacoustic Technologies

★ 沈 勇 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

声音的力量

(电声技术国际研究进展)

沈 勇 编



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书汇集包括国际上最著名的权威学术组织 Audio Engineering Society 前任理事长在内的国内外电声领域的领军人物、知名专家和工程技术人员的众多研究成果,内容涉及耳机、扬声器、材料科学、客观测量、主观评价、信号处理、专业音响、仿真等。本书既有深度,涵盖面又广,对提高科技创新能力、拓展视野具有很好的实际指导意义。

本书可作为电声技术及相关领域的科研人员和工程技术人员的参考书,也可供普通高等院校教师、研究生阅读和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

声音的力量:电声技术国际研究进展/沈勇编. —北京:电子工业出版社,2017.10
ISBN 978-7-121-32644-8

I. ①声… II. ①沈… III. ①电声技术-研究进展 IV. ①TN912.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第218413号

责任编辑:富 军

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:20.75 字数:535千字

版 次:2017年10月第1版

印 次:2017年10月第1次印刷

印 数:2000册 定价:98.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88254456。

前 言

音乐和语言在人类文明史上发挥着极为重要的作用，而声音是音乐和语言最重要的载体之一，声音的力量深刻地影响和改变着世界。伟大的声音科技在面世以后有些很快被接受、被应用，而有些却经历了漫长的岁月才被普遍认可。1876 年，贝尔发明了电话机，1877 年，爱迪生发明了留声机；前者实现了声音跨越空间，后者实现了声音跨越时间。在某种意义上说，古代的声学就是音乐学，而乐律学是音乐学的核心。中国五音乐律的计算方法最早记载于《管子·地员篇》的三分损益法，但始终存在“黄钟不能还原”的问题。1581 年，明代朱载堉发表十二等程律，并做了各种律管进行实验验证。他的珠算开方结果与用现代科学方法计算的结果完全相同，目前世界通用。十二等程律第一次解决了十二律自由旋宫转调的千古难题，无疑是世界乐律学史上的伟大发明创造，然而它在问世之初却遭到了旧派音乐家们的普遍强烈反对。在此后的 300 年间，只有清代著名音韵学家江永在 77 岁时参透了朱载堉的理论并加以完善。1926 年，美国华纳公司推出第一部有声电影《唐璜》，起初有声电影也曾遭到各个领域的强烈反对，其反对者包括著名演员、精英观众、评论家、电影投资商等。但 4 年之后，有声电影迅速普及到全世界，堪称工业革命历史中一次无与伦比的革命。

近年来，智能手机如日中天，智能音箱异军突起，人工智能大放光彩……智能化可谓是大势所趋，而与声音有关的智能化正深刻地改变着人们的生活。特别值得关注的是，2017 年遍地开花的“智能电声”，在声学与电声学的软件与硬件方面都存在明显不足，仍留有大量独特问题亟待声学与电声学的科技人员做出独特贡献。传统的电声行业因此面临着一个大有可为的极好时机。在这样的背景下，第六届电声技术国际研讨会（6th International Symposium on ElectroAcoustic Technologies, ISEAT2017）在深圳虚拟大学园隆重举行。

ISEAT2017 由南京大学声学研究所、南京大学深圳研究院、近代声学教育部重点实验室主办，中国电子元件行业协会电声器件分会、中国声学学会/中国电子学会声频工程分会、中国电子音响行业协会、深圳虚拟大学园管理服务中心、《电声技术》杂志、瑞声科技控股有限公司协办，南京大学深圳研究院、南京大学声学深圳研发中心承办。会议得到中国演艺设备技术协会和许多高校科研院所、相关企业的大力支持。

作为大会主席，我荣幸地邀请到 AES 当选理事长美国 David W. Scheirman 先生、AES 前理事长美国 Sean E. Olive 博士、AES 银质奖章获得者美国 David Griesinger 博士、德国 Wolfgang Klippel 教授、美国声学学会常务理事 Christopher J. Struck、美国 Bose 的 Akira Mochimaru 博士、美国 Sonos 首席换能器工程师 Richard Little 先生等几十位国内外享有盛誉的著名科学家、教授、资深技术专家，以特邀报告、知识讲座等多种方式展示科研成果、分享技术经验、激发创新灵感，并就相关问题进行深入而广泛

的交流研讨。这是一场代表了国际先进水平的行业盛会。

本书精选了第六届电声技术国际研讨会的部分文章。书名取自大会主题词“声音的力量（Power of Sound）”。电话、录音机、CD 唱机、DVD、MP3……借助声音技术，声音以其独有的力量深刻地改变着人们的生活。许多强大的公司从声音技术起步，如贝尔始于电话、惠普始于声频振荡器；许多强大的公司因声音产品而迅速成长并深刻地影响世界，如索尼的半导体收音机、苹果的 iPod、亚马逊的 Echo；许多技术从声音技术演变而来，如计算机光盘起源于与声音有关的磁带、CD。声音的力量是巨大的，电声科技可以为之插上翅膀。

在提升电声科技的征途上，科学家们致力于科学发现，工程师们致力于技术实现。我们在 2015 年提出的“电声+”，既是“深度+”，也是“广度+”。“深度+”即深挖技术，自我升级，从模仿、集成升级到原创，其中原创多依赖于“发现”；“广度+”即横向发展，勇于跨界，综合应用，创造新的发展生态，其关键在于技术能可靠地“实现”。

本书既涵括科学家们的“发现”，又涵括工程师们的“实现”。其内容主要涉及微电声、消费电声、专业电声三大领域。现将部分精彩内容摘录如下：

临近感是决定音乐厅内听众偏好的最重要因素，我们需要更准确的测量手段和预测方法来研究临近感。David Griesinger 博士在《实验室精确重放音乐厅双耳录音——基于鼓膜处耳机均衡方法》一文中提出了一种非侵入性的耳机均衡方法，考虑耳道共振的个体差异性，对每个测试人员将耳机的等响曲线调整至和前向扬声器的等响曲线相同。使用该均衡后的耳机能够准确重放前置声源在鼓膜处的音色，空间感和临近感也能很好地重现。这在厅堂研究中有很大应用，如检测早期反射声或者其他一些空间特性的影响。

Sean E. Olive 博士在《预测听音员对入耳式耳机音质偏好的统计模型》一文中，介绍了预测听音员对入耳式耳机偏好评分的统计模型。该文进行了一系列受控的听音试验，利用 71 名受训程度不一的听音员对 32 款不同入耳式耳机响应的偏好评分结果构建并验证了该模型。文中使用的实验方法为虚拟听音实验，对实验的软硬件设备、节目源选取与听音员的概况均进行详细介绍。经过两种方法验证可知该模型具有较强的鲁棒性且不存在过拟合现象。

Wolfgang Klippel 教授在《评估目标应用场合中的扬声器性能》一文中建立了音频系统的失真模型，提出了两种分析方法：一种是基于自功率谱和互功率谱分析的相关性分析；另一种则是基于自适应线性建模的残余失真分析，实现了对线性失真和非线性失真的分离。在残差分析中，可听化技术的应用可评估重放声失真可闻度，时频分析可进一步区分常规和非常规非线性失真，探究缺陷的根源。Klippel 教授在正常汽车和有缺陷的汽车中进行了实用环境的测试实验，验证了上述分析方法的合理性。

资深专家 Christopher J. Struck 在《耳机音质为何如此差？该如何解决这个问题？》一文中，引入了耳机的插入增益概念，并给出了基于此概念合适的设计目标，同时也选择性地介绍了一些有用的电声测量方法。文中指出，如果插入增益曲线平坦，则表明成

功实现了目标响应。一般而言,任何实际的目标响应与自由场响应或扩散场响应之间的差异非常小。因此,即使不存在设计目标时,自由场响应和扩散场响应也可作为目标响应来判断耳机的响应是否合理。在耳机的整个设计过程中,利用一些标准实验和计算方法可有效识别错误,减小耳机安装和声泄漏的影响,评估耳机左、右声道的平衡问题。利用全频带上的互调失真和差频失真的测量能够提供耳机的非线性失真信息。

Akira Mochimaru 博士《扩声系统中的渐变指向性阵列:技术回顾和性能优势》一文结合 ISEAT2015 论文的研究结果,进一步介绍了理想线阵列的技术难题、解决方案、实现方法和应用实例。渐变指向性阵列通过指向性控制技术、无缝阵列化技术和宽频压缩策动单元技术提供对目标场所的准确声覆盖,避免了模块间的音缝、壁面反射声、声能量浪费和分频对语言清晰度的破坏,从而实现整个听众区内均匀的声压级和一致的音色平衡。通过具有特定指向特性模块的组合,可根据使用场合定制方案,而无须为每个项目单独定制扬声器阵列。

资深专家 Steve Temme 在《用于扬声器品质控制的在线音频测试方法及测量结果的评价》一文中分析了可测量得到的扬声器特性,并讨论了扬声器产线上常见的测量隐患及如何避免这些陷阱。文章评价了几种用于扬声器品质控制的在线音频测试方法及测量结果,并确认了最有价值的测量方法及结果。此外,文章还讨论了测量速度、数据统计及完整的可追溯性。

资深工程师 Richard Little 在《材料科学在超薄低音扬声器设计中的应用》一文中对 Sonos 最近设计的一款扬声器上的振膜做预期的工作应力,仔细选择材料及通过 Instron 拉力测试机测量材料的屈服强度,并运用有限元分析法评估在受力条件下的性能表现。在分析的基础上,对振膜的设计进行变更,大大降低工作应力,最终完成应用于量产的设计。对有限元分析技术和材料性能测量技术的彻底理解,允许设计工程师去探索不寻常的设计。

限于篇幅,还有很多精彩篇章不再一一介绍。在这里,由衷地感谢作者们将自己的研究成果与心得公开分享,感谢全体翻译人员、审稿人员认真仔细地翻译、校订与编审工作,感谢夏洁和卢国潮为本书出版所做的技术支持和组织管理工作!

从研究到开发长路漫漫,在微电声、消费电声、专业电声三大领域仍有很多技术有待创新、有待提高。“他山之石,可以攻玉”,我衷心希望本书能为电声及相关领域科技人才的科技探索之路带来些许启发与帮助。如今的电声行业一波才动万波相随,希望各位能度势乘时、把握先机,在电声领域开拓出一片新天地!

南京大学声学研究所

南京大学深圳研究院

沈 勇

2017 年 9 月

目 录

国际电声技术研究动态	1
Accurate laboratory reproduction of binaural concert hall measurements	
with headphone equalization at the eardrum	15
实验室精确重放音乐厅双耳录音——基于鼓膜处耳机均衡方法	28
Why is headphone audio so poor, and what can be done about it?	40
耳机音质为何如此差? 该如何解决这个问题?	58
A statistical model that predicts listeners' sound quality preferences for in - ear	
headphones	74
预测听音员对入耳式耳机音质偏好的统计模型	90
入耳式耳机的仿真模型和目标频响	105
反馈有源降噪耳机 H_{∞} 鲁棒控制器的设计	115
Assessing Loudspeaker Performance in the Target Application	126
评估目标应用场合中的扬声器性能	139
扬声器稳态温度场数值分析研究	151
Progressive Directivity Array: technology overview and performance advantages for	
sound reinforcement systems	162
扩声系统中的渐变指向性阵列: 技术回顾和性能优势	181
Material Science in the Design of a Shallow Woofer	198
材料科学在超薄低音扬声器设计中的应用	209
Holographic Nearfield Measurement	219
近场全息测量技术	236
Evaluation of audio test methods and measurements for end - of - line	
loudspeaker quality control	251
用于扬声器品质控制的在线音频测试方法及测量结果的评价	270
Objective testing of high - end audio systems	288
高端音频系统的客观测试	300
鲁棒性个人音频技术的研究进展	311



国际电声技术研究动态

蒋佳为¹, 沈 勇^{1,†}, 毛燕蓉¹, 张兆奇¹, 顾 珺¹

(1. 南京大学声学研究所, 近代声学教育部重点实验室, 江苏 南京, 210093)

摘 要: 本文通过对 139 ~ 142 届 AES 大会收录论文的统计分析, 介绍了国际上关于电声新技术的研究动态, 特别是扬声器、耳机、空间声场三个方面研究的最新进展。

关键词: AES; 扬声器; 耳机; 空间声场

Latest Progress of International Electroacoustic Technologies

JIANG Jia - wei¹, SHEN Yong¹, MAO Yan - rong¹,
ZHANG Zhao - qi¹, Gu Jun¹

(1. Institute of Acoustics, Key Laboratory of Modern Acoustics,
Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: By summing up and analyzing 139th to 142nd AES conventions, the lat-

† E - mail address: yshen@nju.edu.cn

est progress of international electroacoustic technologies concerning loudspeakers, headphone and spatial acoustic field is introduced.

Keywords: loudspeaker technologies; AES; headphone; spatial acoustic field

0 引言

本文通过对最近两年 AES (Audio Engineering Society) 大会收录论文的统计分析,介绍在新形势下国际上电声新技术的研究动态。近几年,随着虚拟现实技术、可穿戴设备和智能家居的迅速发展,音频声学的重要性日益凸显。作为声系统的终端,人们希望扬声器的功率更大、效率更高、失真更小、尺寸更小,因此关于扬声器的新研究成果不断涌现。由于可穿戴和便携设备的发展,人们使用耳机听音也越来越频繁,因此对耳机的研究成为电声领域的新热点。VR (Virtual Reality)、AR (Augmented Reality)、智能家居等新领域也对空间声场技术提出了新的要求。

AES 大会是音频声学领域最权威的国际学术会议,每年在美国和欧洲各举办一次。世界各国音频声学领域杰出的科学家、工程师及其他权威人士常常在大会上发表最新的研究成果。每届 AES 大会都会讨论当下音频声学领域的热点内容。下面对最近举办的四届(第 139 届~第 142 届) AES 大会做简要介绍。

1 从第 139 届~第 142 届 AES 大会看国际电声技术的发展动态

四届 AES 大会的内容丰富多彩,除了传统的开幕式、颁奖、技术论文报告、专题讨论会、讲习课、技术参观、学生活动及职业发展、技术委员会会议、标准化委员会会议、展览会外,还设立了一些特色活动,如大师讲课、广播/流媒体研讨会、产品设计研讨会、游戏音频研讨会、现场扩声研讨会及历史回顾。

在第 139 届 AES 大会上, Oculus VR 的首席科学家 Michael Abrash 做了关于 VR 的报告,提出 VR 音频应重点关注合成 (Synthesis)、传播 (Propagation) 和空间定位 (Spatialization),讲述了如何获得高质量的头相关传递函数,使音频的空间定位快速且准确。本届大会邀请了耳机领域的专家做专题学术报告: Christopher Struck 讲述了耳机的目标频响和均衡方法及均衡的限制条件;日本专家 Naotaka Tsunoda 介绍了新研发的人工耳机测试设备; Sean Olive 分析了听音者对耳机低频和高频偏好的影响因素。

在第 140 届 AES 大会上,沉浸式音频 (Immersive Audio) 被广泛讨论,主要涉及扬声器的多通道选择和耳机的双耳录音。双耳音频领域专家 Rozenn Nicolzuole 做了“沉浸式音频发展变革:从实验室到大众市场”的主题讲座,应用波前合成 (Wave

Field Synthesis)、高保真环绕声技术(Higher Order Ambisonics、Vector - Based Amplitude Panning)等新技术,使沉浸式音频具有更逼真的3D声场,推动VR的发展。第140届AES大会的会场遍布各种耳机样品,为参会者提供了丰富的耳机3D音频体验。

第141届AES大会与AVAR(Audio for Virtual and Augmented Reality)会议共同举办。AVAR会议做了许多音频与VR、AR之间联系的讲座,还举办了为期一天的主题活动,产品研发的专家们与听众一起开发了一个代号为Speak2Me的产品。该产品的竞争对手是支持Alexa语音助手的Sonos音箱。专家们和听众一起讨论了Speak2Me的产品管理、用户体验、工业设计、声学设计、自然语音处理、产品测试和验证等具体内容。

在第142届AES大会上,论文和工程简报会议展示了120多个研究人员的工作,内容涉及3D录音、双耳听音、蓝牙和数字滤波器设计等。专题讨论会召集了一批专家,探讨一系列有挑战性和实用的课题,如传声器中的风噪声、电影音频制作和双耳录音。在专家讲座中,德国的Klippel教授提出一种扬声器二维有限元模型振膜振动的主动控制方法,该方法可以降低扬声器振膜分割振动模态的幅度,使力学和声学性能大为改善。丹麦科技大学的研究人员提出了轻重量扬声器箱体的构建方法,利用COMSOL证明可以在减小低频扬声器箱体重量的同时保证音质。

2 第139届~第142届AES大会电声相关论文统计与分析

作为声系统的终端,人们希望扬声器的功率更大、效率更高、失真更小、尺寸更小等,因此关于扬声器的新研究成果不断涌现。由于便携式和可穿戴设备的发展,人们使用耳机听音越来越频繁,因此对耳机的研究讨论成了近几届AES大会的新热点。近年来,VR、AR、智能音箱等新领域发展迅速,电声领域为了适应新潮流,声场控制、声源定位、3D音效等空间声场技术在近几届AES大会上也被广泛研究讨论。下面针对扬声器、耳机和空间声场三个热点专题,从四届AES会议论文中选取论文具体分析,并列出发代表性论文。

2.1 扬声器

(1) 扬声器的建模与设计

振膜的摇摆模态在头戴式耳机、传声器及其他种类的扬声器中是严重的问题,常常导致音圈擦圈,限制扬声器的低频最大声功率输出。此问题的根源在于振膜的刚度与质量分布的不均匀性和磁间隙中磁场分布的不均匀性。Klippel公司的研究人员^[1,2]提出了描述摇摆模态的动态模型,研发出了区分和量化摇摆模式三种激发因素的装置,并进行了相关的验证实验。

美国三星研究院的研究人员^[3]提出了一种新的时变仿真模型计算扬声器单元的频响。该模型可仿真复杂信号,并且仅需了解扬声器单元的几何结构和材料参数就可预测系统包含扬声器单元非线性在内的大信号特性,无需实物样品测量。将移动网格算法应用于音圈位移可仿真大信号的瞬态特性。研究表明,该模型仿真结果与集总参数模型仿真结果及实验数据相一致。此方法适合在构建实物前比较不同单元结构的效果,是扬声器设计工程师们的有力工具。

哈曼国际的研究人员^[4]运用计算机仿真探讨了失真在可接受范围内扬声器能够达到的最大声压级,按照最大声压级的要求,通过仿真结果设计出扬声器的结构。

在移动音响系统的设计中,为了选择合适尺寸和成本的电池,必须进行功耗估计。然而,糟糕的电力评估方法往往会导致电池体积大且昂贵。丹麦科技大学的 Filip Sommer Madsen 等人^[5]提出了一种更精确的方法估计倒相箱系统的功率损耗,使用机械和声学参数创建一个状态空间模型,而不是简单的将扬声器系统简化为恒值电阻。尽管在高频段存在误差,但在估计扬声器的功率损耗时,状态空间模型的准确度远优于恒值电阻模型。

本专题的代表性论文如下:

- Loudspeaker Rocking Modes (Part 1: Modeling) (第 139 届)
- Rocking Modes (Part 2: Diagnostics) (第 140 届)
- Fully Coupled Time Domain Simulation of Loudspeaker Transducer Motors (第 141 届)
- Power Considerations for Distortion Reduction of Loudspeakers (第 141 届)
- Model for Evaluation of Power Consumption of Vented Box Loudspeakers (第 142 届)

(2) 扬声器的结构与部件

即使扬声器箱体内部是均匀的压力场,体积速度很小,吸声材料的摆放也仍会影响倒相式扬声器的性能。来自芬兰的研究人员^[6]研究了吸声材料的摆放对箱体内部声场的影响。研究表明,即使系统的容积速度很小,无里衬的箱体内部仍会形成很强的涡流,而多孔材料的存在和分布会对涡流产生很大的影响。

移动设备中的动圈扬声器易于发生振膜位移超出最大线性位移的问题。来自乐喜金星电子公司的研究人员^[7]探讨了该问题。低频时,扬声器要产生高声压级要求大振膜振幅,此时会引起扬声器的非线性失真,音质也将产生失衡。研究人员致力于寻找音质与可闻失真之间的最佳对应关系,以获得最好的主观音质评价。

丹麦科技大学的研究人员^[8]探讨了如何降低低频扬声器的重量。市场分析表明,用户希望拥有箱体质量较轻且声音质量好的扬声器。研究人员通过在 COMSOL 中进行实验模拟提出了解决问题的方法,可以减少壁厚,充分使用支撑和里衬,在减小低频扬声器箱体重量的同时保证音质。

本专题的代表性论文如下:

- Absorption Materials in Reflex Loudspeakers (第 140 届)

- Improving the Sound Balance with Dynamic Control of Membrane Excursion (第141届)
- Construction of Lightweight Loudspeaker Enclosures (第142届)

(3) 扬声器的测量

在通常情况下,如客厅内,扬声器发出的总声功率在听觉体验中起着重要的作用。除了直达声和第一次反射声,声功率也决定房间里扬声器声重放的性能。扬声器系统的声共振是非常重要的,且由于空间的平均分布,声共振在声功率响应中更容易被获取。三星美国研究所的研究人员^[9]利用时频分析研究空间平均脉冲响应,揭示共振结构。他们还发现,扬声器均衡处理不仅减弱共振强度,也缩短了共振的持续时间。

扬声器系统的声学性能通常是在远场消声室环境下测量的,在这种情况下,测量需要大的测量距离和经特殊处理的房间(吸声边界、空气条件)。同时,测量高角分辨率的指向性时也非常耗时。声源的近场测量好处显著(直达声、更高的 SNR、更少的气候影响),但是需要一个扫描过程和测量数据的全息处理。德国的 Klippel 教授^[10]介绍了一种扬声器指向性的全息近场测量法,并介绍了该新测量技术的理论依据和对扬声器诊断的实际影响。

法国的 Maryna Sanalati 等人^[11]采用“辐射模式”(Radiation Modes)方法对两种扬声器系统的频率响应和指向性模式进行了测量。这种方法基于求解源边界上的离散 Helmholtz 方程获得一种适当的展开方式,从而得到源辐射的声场。研究人员用该方法测试阵列系统,并与消声室测量和基于振膜速度扫描的边界元计算两种方法做比较。结果表明,不同的方法有很好的一致性。研究人员对不同方法的优、缺点进行了比较,并讨论了在非消声室环境中使用“辐射模式”测量方法的可行性。

为尽可能降低保修成本,汽车制造商对零件供应商提出较严的规格要求和质量可靠性要求。同时,汽车制造商又期望较低的零件价格。因此,对于汽车制造商来说,与零件供应商制订合理的规格和误差要求是很重要的。同时,为达到质量控制的目的,汽车制造商还要清楚供应商和自身对产品进行检测的相关措施。由于扬声器固有非线性及时变特性及工作条件和环境的影响,因此汽车扬声器规格制订和测试是十分微妙的。哈曼和 Listen 公司的研究人员^[12]考察了扬声器的可测量特性,并讨论了产线上的常见问题和相关避免措施,评估了几种不同的针对终端汽车扬声器质量控制的音频测试方法和测量手段。

本专题的代表性论文如下:

- Time - Frequency Analysis of Loudspeaker Sound Power Impulse Response (第139届)
- Holographic Nearfield Measurement of Loudspeaker Directivity (第141届)
- Measurement of the Frequency and Angular Responses of Loudspeaker Systems Using

Radiation Modes (第 141 届)

- Evaluation of Audio Test Methods and Measurements for End - of - the - Line Automotive Loudspeaker Quality Control (第 142 届)

(4) 扬声器的音质评价

等响曲线代表了听觉系统声压级相关的频率响应,意味着当声压改变时,声音的频谱平衡会有一个相应的变化。英国伯明翰城市大学的研究人员^[13]给出了响度与声压级之间近似成比例的关系,允许在没有参考声压级的情况下,保持一个音频信号相对响度的同时保持恒定的频谱。为了演示该方法的好处,研究人员进行了听音试验。

现在人们使用很多可录制声音的技术产品,但录制的音质往往很差:失真、嘈杂、带有含糊的语音或模糊的音乐。英国索尔福德大学、英国曼彻斯特大学^[14]做了一项研究报告,发布三年的录音质量评估,意在探究录音质量差的原因。他们研究的典型问题有失真、风噪声、传声器处理噪声及频率响应。通过对误差和信号特征进行主观测试,建立感知模型自动预测未知音频流的音质。该工作可在机器学习领域中有应用。

为了对一大批音频产品进行主观评价,三星美国研究院^[15]设计了两种新的试听室:用于比较平板电视的旋转墙,全数字音频切换系统,定制基于平板的测试软件,运行各种听音试验及用于定制房间声学的模块化声学面板。通过模拟和声学测量,分析了房间的声学属性,并针对不同的听音环境设计最优的听音环境。

本专题的代表性论文如下:

- A Method of Equal Loudness Compensation for Uncalibrated Listening Systems (第 139 届)
- Perception and Automated Assessment of Audio Quality in User Generated Content (第 139 届)
- Environments for Evaluation: The Development of Two New Rooms for Subjective Evaluation (第 139 届)

2.2 耳机

(1) 耳机的均衡

耳机频响和均衡方法是影响耳机听感和评价耳机的重要因素。美国 CJS 实验室和 Listen 公司的研究人员^[16]建立了一种能准确评价和均衡耳机频响的处理方法,使频响能达到心理声学上的合理目标,并且发现了耳机均衡的限制条件。研究人员比较了自由场、扩散场和混合真实声场的目标频响,并对多款商用耳机的频响数据进行研究,对测量中的异常响应进行检查,确定异常响应的来源,以此来评价均衡的效果和发现耳机均衡的限制条件。

(2) 耳机的测量

日本索尼公司的研究人员^[17,18]提出了耳机新的测量系统和基于头相关传递函数的新的频响评价方法。新的耳机测量系统由一个 1/8 英寸的传声器、新的头与躯干模拟器及一个耦合器组成,具有切合实际的耳道形状,使耳机频响的测量范围覆盖整个可听频段,高频测量甚至可以达到 140kHz。基于新的测试系统对人工头中自由场扬声器频响的准确测量,研究人员同时提出了新的耳机频响评价方法。

美国 McIntosh 应用工程的 Eden Prairie^[19]研究了耳机中声负载阻抗的测量方法。研究人员准确测量了两款耳罩式耳机中结构的声阻抗,建立了对应的等效电路模型,并预测其频响。实验表明,理论模型和测量结果之间有很好的相关性,通过对结构进行声阻抗分析,可以得到整个系统的精确声学模型,从而了解每个组件对器件整体性能的影响。

美国 ImmersAV 技术的研究人员^[20]提出了入耳式耳机主客观声学密封性的测试方法。研究人员介绍了主观和客观两种确定换能器与耳廓和耳道声学密封性的方法。主观方法基于实验观察,让听音者感知 50Hz 和 500Hz 的响度。如果响度几乎一致,那么可以认为入耳式耳机声学密封性好。客观方法是将微型传声器置于耳机的出水管中,通过测量耳机频响来确定声学密封性。

(3) 耳机的音质评价

美国 REVx 公司的研究人员^[21]研究了头戴耳机和耳塞中的非传统噪声和失真及其对系统性能和耳朵疲劳的影响。对一些市售的耳机,研究人员分析了非传统噪声和失真相对音频的声压级与系统性能和耳朵疲劳的关系,量化噪声和失真对听音体验的影响。结果表明,非传统噪声和失真要求系统有 30 ~ 40dB 的信噪比,非传统噪声和失真比谐波失真更易增加听音者的疲劳感。

本专题的代表性论文如下:

- Headphone Response: Target Equalization Trade - offs and Limitations (第 139 届)
- A Headphone Measurement System Covers both Audible Frequency and beyond 20kHz (Part 1) (第 139 届)
- A Headphone Measurement System Covers both Audible Frequency and beyond 20kHz (Part 2) (第 140 届)
- Measurements of Acoustical Speaker Loading Impedance in Headphones and Loudspeakers (第 139 届)
- In Situ Subjective and Objective Acoustic Seal Performance Tests for Insert Earphones (第 141 届)
- Non - Traditional Noise and Distortion Sources in Headphones and Earbuds and Their Impact on System Performance and Ear Fatigue (第 141 届)

2.3 空间声场

(1) 声场控制

对于两个远点之间的声场拟合,波前合成(WFS)和回声消除是很有必要的。尽管这两种技术已经被研究了十多年,但尚不清楚是否有可能建立一个用WFS进行完整双音通信的实时系统。NTT媒体智能实验室^[22]阐述了建立包含波场合成和回声消除技术的实时完整双音通信系统的可行性。

南京大学^[23]提出了一种Multi-CBT扬声器阵列,将多个CBT应用于圆弧形或直线形的多声源阵列中。理论和实验证明,多CBT阵列可以实现可控的指向性。在多个应用实例的基础上,研究人员分析了各种循环型多CBT阵列和直线、衰减曲线多CBT阵列的性能。研究表明,Multi-CBT扬声器阵列的优势在于,只调整几个参数的值就可以调控指向性,易于在实际应用场合获得理想的效果。

日本的NTT服务进化实验室^[24]提出了一种利用高阶扬声器阵列在混响室中再现多区声场的方法。该方法使扬声器能够在不需要耳机的情况下,对多个听音区进行独立的广播和独立的声场复制,对于多区域复制,利用平移算子获得整个声场的参数,通过测量或者虚源法仿真求出房间的传递函数,然后利用柱谐波域中的最小范数方法计算出扬声器阵列的各个参数。

美国DBK协会^[25]设计了一种具有广泛覆盖特性的地面圆弧形CBT线阵列。该阵列提供了一种高可行性、高性能、简单节约的方法替代传统高频扬声器被抬高或挂在头顶上的声音强化设置。该地面CBT线阵列为听众提供了强劲的声音,且具有操作优势。优势包括覆盖范围广、声压的前后差最小、能量响应较平坦、指向天花板的能量更少、提高可懂度、更少的反馈及表演者在舞台上走动时有更大的自由。

美国DBK实验室的研究人员^[26]提出了一种针对CBT扬声器阵列的设计方案,能够使设计者较容易选择阵列的各种参数,如阵列高度、阵列所成圆弧角、阵列位置及阵列向下俯仰角等,可根据不同的需求优化阵列直达声的覆盖范围。

德国的研究人员^[27]提出了一种针对线声源阵列的优化方法:PLAC(Polygonal Audience Line Curving)方法。该方法可以根据听音域的形状和范围找出扬声器箱体的最优倾斜角度。他们还将该方法与传统的倾斜方案进行对比,发现该方法不管是在声场均匀性上还是在靶向声辐射方面都优于传统方法。

本专题的代表性论文如下:

- Echo Canceled for Real-Time Audio Communication with Wave Field Reconstruction (第139届)
- Directivity - Customizable Loudspeaker Arrays Using Constant - Beamwidth Transducer (CBT) Overlapped Shading (第139届)
- Spatial Multi - Zone Sound Field Reproduction Using Higher - Order Loudspeakers in

Reverberant Rooms (第140届)

- Use of Ground – Plane Constant Beamwidth Transducer (CBT) Loudspeaker Line Arrays for Sound Reinforcement (第141届)
- Design of Free – Standing Constant Beamwidth Transducer (CBT) Loudspeaker Line Arrays for Sound Reinforcement (第141届)
- An Analytical Approach for Optimizing the Curving of Line Source Arrays (第142届)

(2) 声源定位

日本会津大学的研究人员^[28]比较了三种方法对主观声源方位判断的影响,分别是VBAP (Vector – Based Amplitude Panning)、VBAP + HRTF及一种基于谱能量均衡化的新方法。研究表明,使用VBAP和VBAP + HRTF都能有效减少错误率,当声源方向呈球形分布时,使用VBAP效果更佳。他们提出了对使用VBAP进行水平定位的改进方案。

中东技术大学的研究人员^[29]提出了基于声强的声源定位方法代替传统的基于延迟的声源定位方法,不过,使用这种方法需要特殊的声强探测器或传声器阵列。另外,他们还利用二十面体球形传声器阵列做实验,评估了该方法对声源的定位效果。

本专题的代表性论文如下:

- Influence of Spectral Energy Distribution on Subjective Azimuth Judgments (第139届)
- On the Performance of Acoustic Intensity – Based Source Localization with an Open Spherical Microphone Array (第139届)

(3) 房间声学

意大利的研究人员^[30]开发并且完善了分析程序,可以更详细地研究小房间的声学特性,分析一些典型的例子,展示了不同小房间的声现象。

瑞士的研究人员^[31]提出了一种利用电声手段进行吸声的装置改善听音室内的低频模态分布。该装置由封闭式扬声器系统和与其相连的混合传感器组成。他们在听音室中进行了实验。结果表明,该吸声装置能实现预期的效果。

德国柏林工业大学的研究人员^[32]提出了一种利用声场分析的参数模型描述声学环境,将该方法与球形头相关冲激响应相结合,可以合成早期双耳室内冲激响应,将其与主观评价的结果对比,发现一致性很好。

英国纽卡斯尔大学的研究人员^[33]讨论了一种可实现的音频感知评估方法:OPQ (Open Profiling of Quality)。该方法是视觉和视听评估领域首先引入的一种方法,涉及心理感知评估、感官分析和外部偏好映射,适合用于未经训练的听音者。

声源投影的主要目的是将声源的感知方向从实际来源的方向改变为期望的方向。由于投影声源的聚焦能力是有限的,因此听音者不仅受投影声音的影响,也受真实声

源的影响。德国的研究人员^[34]对这一感知过程进行了研究。

英国萨里大学的研究人员^[35]认为在听音试验中,让听音者对声音的某一特征进行打分对未经训练的听音者来说是一件很困难的事情。他们提出了让听音者进行简单的选择代替打分,并进行一个判断视听空间相干性的方位感知实验,验证该方法的可行性。

本专题的代表性论文如下:

- Small – Rooms Dedicated to Music: From Room Response Analysis to Acoustic Design (第 140 届)
- Experimental Assessment of Low – Frequency Electroacoustic Absorbers for Modal Equalization in Actual Listening Rooms (第 140 届)
- Perceptual Evaluation of Synthetic Early Binaural Room Impulse Responses Based on a Parametric Model (第 142 届)
- Combining Preference Ratings with Sensory Profiling for the Comparison of Audio Reproduction Systems (第 142 届)
- Evaluation of Auditory Events with Projected Sound Sources Using Perceptual Attributes (第 142 届)
- Modeling Horizontal Audio – Visual Coherence with the Psychometric Function (第 142 届)

(4) 声学应用

研究人员^[36]通过收集房间脉冲响应获得房间的相关声学特征,希望通过耳机重建一个虚拟声场。有两种收集脉冲响应的方法:第一种是利用人工头采集双耳位置的脉冲响应;第二种是利用八通道的传声器阵列采集脉冲响应,接着利用算法,将八通道脉冲响应转化成双通道,再通过耳机播放。为了比较两种方法,研究人员分别测量了两种方法得到的房间脉冲响应;再通过主观听音实验发现,使用八通道测量,再下混到双通道,比直接使用双通道人工头测量得到的脉冲响应所重建的虚拟声场声源更宽、更自然、更逼真。

电气通信大学的研究人员^[37]提出一种个人声重放系统,使用两种可穿戴的末端发声式扬声器阵列代替耳机呈现声像。样机阵列位于听音者的胸腔上,使每个阵列的正对方向都指向听音者的耳朵。为了避免听音者周围的声泄漏,每个阵列的指向性都设计得很窄,还使用一个串扰消除器将声图像与头部相关的传递函数局部化。通过仿真验证了样机的性能,正对方向和其他方向之间的声压差大约为 15dB,串扰被抑制 10~20dB。另外,研究人员还对声图像的定位进行了主观听力测试,左右回答正确的概率大约为 90%,准确匹配的概率大约为 40%。

本专题的代表性论文如下:

- Investigation of Impulse Response Recording Techniques in Binaural Rendering of