

纪念应崇福院士诞辰 100 周年

基于声场复现的有源噪声控制支撑技术*

陈克安[†] 胥 健 王 岩

(西北工业大学航海学院 西安 710072)

摘要 有源噪声控制是一种有广泛用途的低频噪声控制技术, 目前已在部分场合取得商业化应用, 然而该技术的大规模应用仍然面临诸多困难, 声场复现技术为解决其中的关键问题提供了有效手段。该文论述了声场复现的两种实现方式(声场重构和声场再现)的基本原理、国内外现状及其在有源控制技术开发中的应用, 尤其是基于声压匹配法的初级声场重构、基于球阵的声场再现以及电声器件布放优化设计。

关键词 有源噪声控制, 声场重构, 声场再现

中图法分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2018)05-0743-08

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.05.020

Supporting techniques for active noise control based on sound field recurrence

CHEN Kean XU Jian WANG Yan

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract Active noise control is one of the most important techniques for reducing low frequency noise, which has been applied commercially into some specific issues. However, large-scale engineering applications are still confronted with a lot of difficulties. The sound field recurrence technique provides effective approaches to solve some key problems. In this paper, two implementation ways of sound field recurrence, i.e. sound field reconstruction and sound field reproduction, are reviewed, including fundamental principles, the state-of-art and applications into active control technique development, particularly the primary sound field reconstruction based on pressure matching method, the sound field reproduction using spherical arrays and the optimization of electroacoustic devices arrangement.

Key words Active noise control, Sound field reconstruction, Sound field reproduction

2018-06-14 收稿; 2018-08-15 定稿

*中央财政专项基金项目 (MJ-2015-F-044)

作者简介: 陈克安 (1965-), 男, 四川人, 教授, 研究方向: 噪声控制。

[†] 通讯作者 E-mail: kachen@nwpu.edu.cn

1 引言

有源噪声控制 (Active noise control, ANC) 作为一种最主要的控制低频噪声的降噪技术, 经过国内外学者和技术人员几十年持续不断的努力, 已经建立起成熟的理论体系, 突破了降噪机理认识、控制算法及性能分析、系统设计与实现等关键问题, 在有源降噪耳机、螺旋桨飞机舱内有源降噪、轿车车厢有源降噪等场合实现了有源降噪技术的工程应用以及产品化和商业化, 上述进展奠定了有源控制技术作为噪声控制技术重要分支的地位。然而, 已有成就与有源控制技术的发展潜力是不相称的。总的说来, 有源控制技术已在特定情况下获得应用, 甚至已展现出产业化推广的前景, 但该技术的应用范围和案例均十分有限, 大范围的推广应用遇到障碍, 突出问题表现在有源控制系统设计及工程应用中关键技术的研究尚待深入^[1]。

从有源控制技术开发的角度来讲, 目前的问题主要体现在: (1) 缺乏普适性的量化设计方法, 这主要指电声器件布放 (包括次级声源、误差传感器的个数和位置) 设计方法; (2) 缺乏便利、低成本的系统调试和测试声环境 (对飞机、空间站、潜艇等军用航行器舱内有源降噪系统开发尤其如此); (3) 缺乏通用灵活的设计工具和软硬件调试平台。要解决上述问题, 声场复现技术的应用十分关键, 已有研究表明, 声场复现技术用于有源噪声控制系统设计, 是推动其走向实用化的关键步骤。

声场复现是指通过一定手段还原真实声场 (或目标声场) 空间分布与时间特性的一种声场还原技术, 通常有两种不同的实现方式。需要注意的是, 不同文献对这两种声场复现方式的定义和名词术语并无明确区分, 往往混用, 本文按大多数学者的习惯用法给予区分和定义。声场复现的两种方式分别为声场重构 (Sound field reconstruction) 和声场再现 (Sound field reproduction), 前者是指利用扬声器阵列在特定物理环境中发声, 以重构真实的声场分布; 后者是指通过建立数学模型, 利用特定的算法以数值方式计算或预测目标声场参数, 以数据、图像或音频等方式呈现目标声场 (即声场的可视化或可听化)。声场重构技术通过扬声器阵列呈现真实的声场环境, 使人们仿佛身临其境, 感受真实的声效与声

音品质, 在有源噪声控制研究中可应用于构建初级噪声场, 建立系统调试和测试平台; 声场再现技术虽然只能以数值方式建立虚拟声场, 但在有源噪声控制系统设计、性能仿真、验证及声效展示方面将发挥重要作用。需要说明的是, 截至目前, 绝大部分实际应用的有源降噪系统, 其实现方式均是利用自适应算法调整次级声源强度 (幅度和相位) 实现在误差点处与初级声场的声压匹配, 这是声场重构技术的一种应用。本文论述的声场复现技术比自适应有源降噪技术涵盖的范围更宽, 它服务于有源降噪系统的试验平台搭建、次级声源和误差传感器 (即电声器件) 位置和个数设计、降噪效果的展示等等, 也就是作为构建有源降噪系统的支撑技术。

2 声场复现技术

2.1 声场重构

声场重构技术利用扬声器阵列重构三维空间声场的时间和空间特性, 典型方法是波场合成^[2-3] (Wave field synthesis, WFS)、高阶 Ambisonics^[4-6] (Higher order Ambisonics, HOA) 以及声压匹配^[7-8] 等。

WFS 技术是荷兰代尔夫特大学 Berkhout 教授于 1988 年提出, 其基本原理是基于惠更斯理论及 Kirchhoff-Helmholtz 积分方程, 即如果已知封闭曲面上声压和法向质点振速分布, 那么就可以在其表面布置一系列单极子和偶极子声源重构内部声场。对于简单声场, 可以利用点声源或平面波模型推导重构声源 (或称为次级声源) 的驱动函数; 针对复杂声场, 可利用传声器阵列采集声场信息, 外推次级声源位置的声场, 计算其驱动函数, 进而重构原始声场。为了构造出实际的 WFS 声场重构系统, 需要利用 Rayleigh 积分对其基本原理做适当修改^[3], 一方面将闭合的次级声源曲面缩减为平面, 将声源区域和重构区域分开, 另一方面, Rayleigh 积分移除了偶极子声源, 仅利用无指向性点声源, 更易实现。实际中, 更常见的是利用扬声器线阵列重构声场, 虽然在阵列平面内能够取得较好的重构效果, 但高度方向的声场信息无法有效重构。由于 WFS 仅利用有限数目的扬声器阵列, 因此会产生次级声源的离散和截断误差。另外, WFS 理论假设声波在自由场传播, 对于实际房间的声场重构, 则需要考虑房间补偿。

HOA方法认为球坐标系下的声场可由一系列球谐函数(基函数)及其展开系数组成,于是可以利用初级声场与合成声场之间的球谐函数模态匹配原理求解次级声源的驱动函数,进而重构三维声场。HOA声场重构主要包含两个步骤:空间编码和解码,即首先利用传声器阵列采集空间声场信息,在球谐函数域用声场展开系数来表示空间声场,然后求解次级声源驱动函数进而重构三维声场。相比于WFS,HOA并没有自由场的假设,但同样面临次级声源的空间离散误差问题。由于声场展开系数是有限阶次的,因此HOA产生的空间混叠误差要小于WFS^[4]。此外,同样将传声器阵列采集的声场信息进行傅里叶变换,WFS变换到波数域,存在离散和有限截断误差,而HOA变换到球谐函数域,本身即是离散的,且球面角度积分是封闭的,因此不存在离散及有限孔径误差^[5]。

声压匹配法是针对给定的次级声源分布及重构点位置,建立线性方程组,然后在最小二乘意义下求解次级声源驱动函数,使得重构声压与传声器阵列测量的声压能够很好地吻合(匹配)。该方法不限制次级声源位置及传声器阵列形式,其实现步骤是首先获得扬声器与传声器之间声通路的传递函数,然后通过声通路传递函数求逆获得次级声源(扬声器阵列)驱动函数,从而利用扬声器阵列发声重构声场。在实际应用中,声通路传递函数的获取可以通过自适应建模方式方便地给予实现。总的说来,相较WFS和HOA方法,基于声压匹配的声场重构系统,其实现较为简便,是人们常用的声场重构方法。当然,此方法中的线性方程组有可能是病态的,对测量噪声等非常敏感,因此需要特定的正则化技术以确保求解的稳定性^[8]。此外,最小二乘意义下的解向量虽然能够保证在测量点声场重构的精度,但其他区域的重构精度会明显降低。

2.2 声场再现

较为成熟的声场再现技术包括有限元、边界元、统计能量分析等方法,虽然这些方法发展较为成熟,且有商业软件提供强大的计算能力,但由于难以模拟真实的载荷和边界条件,计算结果与实际声场分布仍有差距。因此,基于实际声场测量的再现方法仍然是最可靠且高效的方法。

在低频范围内,声场再现的典型方法是近场声全息技术^[9](Nearfield acoustic holography, NAH),

代表性的算法有二维空间傅里叶变换法^[10]、边界元法^[11]及等效源法^[12](Equivalent source method, ESM)等,其中ESM方法由于计算简便且适合于任意形状的声场而备受学者关注,时域ESM方法还可以应用于空间声场合成等领域。NAH技术虽然理论上日益完善,实际中也取得了较好效果,但缺陷是需要预知声场的传递特性,即空间格林函数。对于封闭空间,只有规则形状声腔具有明确的解析表达式,而对于不规则的封闭空间,上述方法将难以实现。

如果能够找到一组合适的基函数,将声场在该组基函数下进行分解并求解其展开系数,利用基函数及其展开系数乘积的线性叠加就可以再现空间声场分布。该方法的关键在于寻找最能体现空间声场变化特征的基函数,并确定合适的展开系数。由于该方法不需要预知空间格林函数,并且分解形式灵活多样,因此更适合于实际工程应用。

空间声场的平面波分解是最常见的一种分解形式,并且可以利用多种阵列形式进行分解。2004年,Rafaely等^[13]利用球形传声器阵列(简称球阵)进行三维混响声场的平面波分解,指出平面波的空间分辨率取决于球阵能够获取到的声场展开系数的最高阶数 N ,而这与球阵形式有关。此外还可以通过最小二乘(Least squares, LS)方法求解平面波的复幅值^[14]。除了球阵外,圆形和圆柱形阵列也适用于平面波分解。

另一类常见的分解形式是球谐函数分解。例如,基于Helmholtz方程最小二乘法(Helmholtz equation least squares, HELS)的NAH^[15]以球谐函数为基函数再现结构振动与辐射声场,算法简单,计算效率高。球谐函数分解同样是HOA声场重构的理论基础,相比于HELs,HOA更多地研究了球谐函数域声场展开系数与空间声场分布之间的关系^[5]。

3 基于声压匹配法的初级声场重构

在有源控制系统开发过程中,面向控制对象模型进行初级声场重构是一项重要的前期工作,为后续电声器件布局设计、系统调试与测试等工作提供试验平台。由于初级声场特性决定了电声器件布局^[1],因此重构的初级声场与真实初级声场(目标声场)之间的相似程度对系统设计的有效性至关重要。目前,模型内部声场的重构多采用声压匹配

法^[16],利用模型外部的扬声器阵列发声,重构模型内部传声器阵列处的初级声压。图1给出了面向飞机舱室模型的声场重构系统框图。

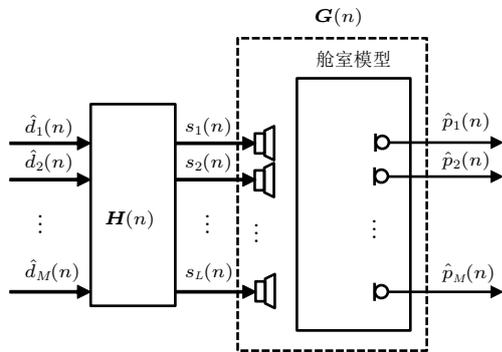


图1 舱室模型声场重构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sound field reconstruction for a cabin mock-up

下面研究利用 L 个扬声器重构舱内 M 个传声器处声压 ($M \geq L$) 的问题。在频域,扬声器阵列权值 $\mathbf{s}(\omega) \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 与目标声场声压及声通路传递函数的关系是

$$\mathbf{s}(\omega) = \hat{\mathbf{G}}^\dagger(\omega) \hat{\mathbf{d}}(\omega), \quad (1)$$

其中, $\hat{\mathbf{d}}(\omega) \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 是目标声场在传声器阵列处的采样值, $\hat{\mathbf{G}}(\omega) \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 是扬声器阵列到传声器阵列声通路的传递函数矩阵, $(\cdot)^\dagger$ 表示伪逆。在时域,第 l 个扬声器的驱动信号由目标声压信号和 $\hat{\mathbf{G}}^\dagger(\omega)$ 傅里叶逆变换得到的滤波器卷积得到

$$s_l(n) = \sum_{m=1}^M \left[\hat{d}_m(n) * \hat{h}_{lm}(n) \right]. \quad (2)$$

图2给出了作者所在课题组建立的普通房间中的直升机舱室模型,两侧各放置8个扬声器,上方布置14个扬声器,利用30个扬声器发声重构舱内监测点处的初级声压。图3给出了舱内某监测点处重构声压与目标声压的频谱对比。



图2 直升机舱室模型及其扬声器阵列

Fig. 2 The helicopter cabin mock-up and loudspeaker arrays

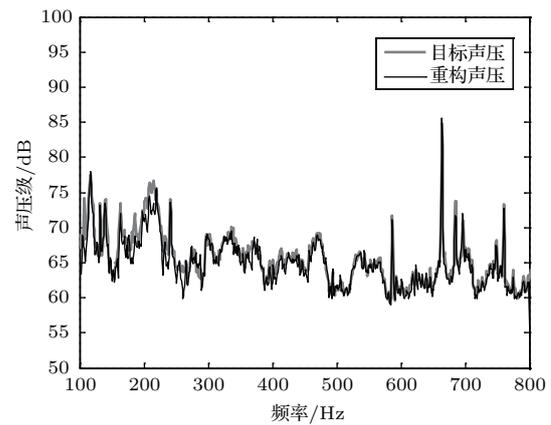


图3 舱内某监测点处的重构声压频谱

Fig. 3 The frequency spectrum of reconstructed sound pressure at a monitor position in the cabin mock-up

在有源控制系统开发中,重构初级声场除了用于电声器件布放设计、控制系统调试等工作外,还可以为各种无源降噪措施的性能验证提供可靠、稳定及低成本的试验环境。此外,通过在舱内重构不同工况下的初级声场,还可以进行舱室噪声声品质等心理声学方面的研究。另外,要说明的是,自适应有源噪声控制系统也是基于声压匹配法原理,但由于声环境的改变,次级声源强度需要自适应调节,而前面在重构初级声场时,重构扬声器的权系数一般按上述方法取固定值。

4 基于球阵的声场再现

任意形状空间声场中任一点 $\mathbf{r} = (r, \theta, \phi)$ 的声压可用一系列不同阶次的球谐函数加权求和表示,即

$$p(r, \theta, \phi, k) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n A_n^m(k) j_n(kr) Y_n^m(\theta, \phi), \quad (3)$$

其中, $j_n(kr)$ 为球贝塞尔函数表示的径向函数,表征了声场在半径方向上的变化; $Y_n^m(\theta, \phi)$ 为球谐函数,与场点的方位有关; $A_n^m(k)$ 为声场展开系数,不依赖于位置。对式(3)两边同时乘以 $Y_n^\mu(\theta, \phi)^*$ 并在整个球面上求积分,可以得到声场展开系数为

$$A_n^m(k) = \frac{1}{j_n(kr)} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi p(r, \theta, \phi, k) \times Y_n^m(\theta, \phi)^* \sin \theta d\theta d\phi, \quad (4)$$

其中, $*$ 表示复共轭。式(4)说明,只要获得测点位置处的声压即可解算出声场展开系数,将其代入式(3)可再现空间任一点的声压及其他声学参量。

采集声场信息的阵列形式有多种。与传统的线阵列和平面阵列相比人们更愿意采用球阵,原因在于:(1)球阵的形式更加多样,能够有效采集来自于 360° 方向的三维空间声场信息,更适合于封闭空间;(2)球阵的信号处理更加简单和高效,不同类型的球阵可以有统一的表达式描述;(3)由于球面是闭合的,因此球面声压的傅里叶变换不存在传统阵列

的有限孔径误差和窗效应,并且球谐函数域本身就是离散的,因此不存在传统傅里叶变换的卷绕误差;(4)从实际工程应用的角度,由于球阵的尺寸较小,因此测量更加方便,并且有多种成熟的球阵设备可供选择。

由于空间声场的展开系数仅与频率有关,而与空间位置无关,因此由它表示空间声场更加简洁且计算方便。对于圆柱声腔低频声场,其声模态在球谐函数域呈现出明显的稀疏特性^[17],因此在实际应用中,为了减少空间采样点数以降低实验成本,提高

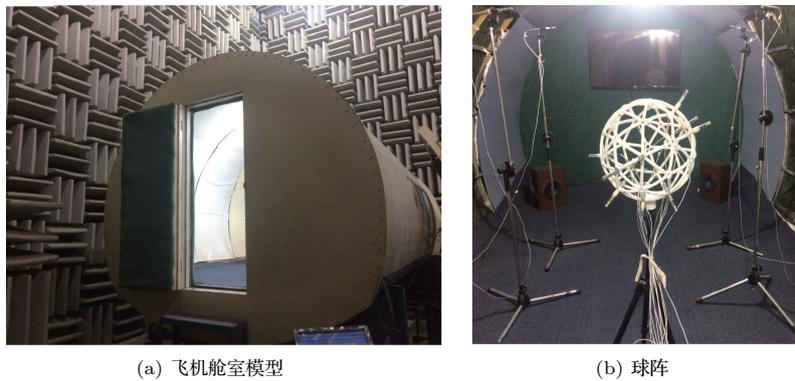


图4 飞机舱室模型及球阵

Fig. 4 The aircraft cabin mock-up and spherical microphone array

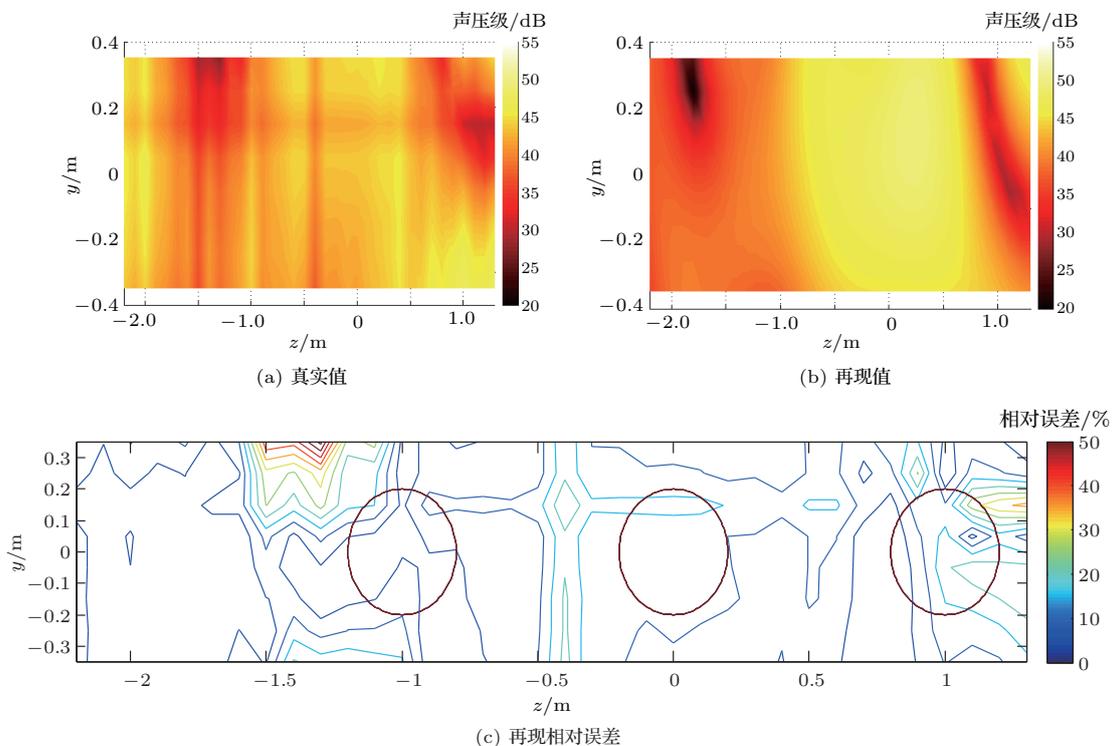


图5 声腔 216 Hz 舱内水平面的声压级再现及再现相对误差

Fig. 5 Reproduced sound pressure level and relative reproduction error of a horizontal plane in the cabin mock-up at 216 Hz

实验效率,同时获得高精度的声场再现,可以引入压缩感知(Compressive sensing, CS)技术,在 l_1 范数最小化约束条件下实现声场的有效分解^[18]。

在一个长、宽、高分别为10 m、10 m和8 m,本底噪声小于15 dB,截止频率为70 Hz的半消声室内,放置一飞机舱室模型,长度为6.4 m,直径为2.67 m,底板距离顶部最高点2 m。位于舱室角落的十二面体球形声源在0~1600 Hz白噪声激励下产生声场,利用表面随机分布的10个传声器,半径为0.2 m的空心球阵沿声腔中轴线3个位置进行测量,即 $(x, y, z) = (0, 0, -1), (0, 0, 0)$ 和 $(0, 0, 1)$ m,数据记录长度为10 s,采样率为65536 Hz,实验模型如图4所示,每个测量点相位信息由靠近声源的参考传声器与球阵传声器做互功率谱计算得到。利用CS方法求解声场展开系数,再现声腔216 Hz的声压级分布^[19],如图5所示。

上述声场再现方法,与有源噪声控制系统控制器采用的实现方法,其原理和目的是不一样的。针对有源控制系统开发,应用声场再现技术,可以以数值的方式预测噪声分布和传播途径,从而指导电声器件的布放、控制器设计及控制效果的评价,这样既节省了试验成本,又提高了工作效率。此外,声场再现技术还可以对自适应有源控制过程中的声场变化给予实时再现,并以视频和音频形式展现出来,给受众以身临其境的感觉,以便研发人员、管理者及用户直接体验有源控制效果。

5 电声器件布放优化设计

决定有源控制系统降噪量的因素有多种^[1],其中可设计和可调节的因素中,次级声源和误差传感器(统称为电声器件)布放是最重要的,其中次级声源布放情况决定有源控制系统所能达到的理论降噪量上限,误差传感器布放决定了特定次级声源布放情况下自适应有源控制系统所能达到的实际降噪量上限。也就是说,有源控制系统中电声器件布放是决定系统性能的关键性的物理因素。在有源控制系统开发及工程应用中,工程人员一般凭借经验,通过大量的现场调试选择最优布放组合^[20],这大大延缓了有源控制系统的开发进度,增加了开发成本,阻碍了有源控制技术的推广应用。目前,解决电声器件最优布放问题的方法可以大致分为以下几种。

(1) 基于解析的方法

在简单声源和简单声场条件下(如自由空间中

的集中声源辐射声场、规则空间中的驻波声场),根据声场分析容易获得目标函数的解析表达式,从而求解次级声源的最优位置和个数^[21]。该方法的优点是物理概念清晰,求解过程简单,缺点是要求目标函数具有解析表达式,这对实际工程应用无法实现。

(2) 基于优化算法的方法

对于实际应用中的复杂声场,可以将电声器件布放的优化看作组合优化问题,也就是从所有可能的布放中选择使降噪量最大的布放方案。由于可能的布放方案数量庞大,无法穷举搜索,故常采用子集选择法、遗传算法等优化算法^[22-23]进行搜索。目前,大多数研究采用遗传算法及其改进形式进行。实际应用中,确定目标函数后就能寻找到近似最优解。该方法思路简单,但存在参数选取复杂、搜索效率低、容易陷入局部最优解等问题。此外,这种优化搜索过于关注误差传感器位置的降噪量,可能导致其他区域声级增大,系统鲁棒性差。

(3) 基于传递函数矩阵的方法

次级声源和误差传感器之间声通路传递函数矩阵包含了布放信息,因此可以通过构造传递函数矩阵来优化布放,典型的方法是采用施密特正交原理^[24]、基于声传递矩阵奇异值分解^[25]等。该方法的优点是物理意义明确,但当次级声源个数较多时,算法不稳定,矩阵构造困难。

(4) 基于压缩感知的方法

事实上,封闭空间声场在不同方面存在稀疏性,具体表现在:①从频域上看,仅在有限个频点上的声功率是突出的;②从声模态的角度看,仅在特定空间位置的声压较大(模态反节面位置);③从空间区域上看,初级声场的直达声具有指向性。因此,物理上可以利用稀疏分布的次级声源获得较好的降噪效果。具体过程是,先确定备选次级声源位置,再构造欠定的稀疏线性回归问题,利用凸优化算法求解次级声源强度,同时可以选择布放位置(非零解对应的备选位置)。

(5) 基于声场再现的方法

上述优化方法在构造代价函数时,均需预先知道误差传感器的布放信息,这使得次级声源布放的优化依赖于误差传感器的布放信息,导致二者相互耦合,使得最优结果的取得极其困难,应用声场再现技术为解决该问题提供了新思路。利用球阵在空间多个位置进行测量,由球谐函数叠加原理,可以建立如下线性方程组^[26]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{s}^{(1)} \\ \mathbf{s}^{(2)} \\ \vdots \\ \mathbf{s}^{(\eta)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{T} & & & \\ & \mathbf{T} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{S}}_0^0(\mathbf{r}''_{(1)}) & \hat{\mathbf{S}}_1^{-1}(\mathbf{r}''_{(1)}) & \cdots & \hat{\mathbf{S}}_N^N(\mathbf{r}''_{(1)}) \\ \hat{\mathbf{S}}_0^0(\mathbf{r}''_{(2)}) & \hat{\mathbf{S}}_1^{-1}(\mathbf{r}''_{(2)}) & \cdots & \hat{\mathbf{S}}_N^N(\mathbf{r}''_{(2)}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\mathbf{S}}_0^0(\mathbf{r}''_{(\eta)}) & \hat{\mathbf{S}}_1^{-1}(\mathbf{r}''_{(\eta)}) & \cdots & \hat{\mathbf{S}}_N^N(\mathbf{r}''_{(\eta)}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0^0(k) \\ A_1^{-1}(k) \\ \vdots \\ A_N^N(k) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(5)中, $\mathbf{s}^{(j)}$ ($j = 1, 2, \dots, \eta$) 为不同测量位置球阵采集的声场信息, $A_n^m(k)$ 为整体坐标系声场展开系数, N 为截断阶数, \mathbf{T} 和 $\hat{\mathbf{S}}_n^m(\mathbf{r}'')$ 的表达式见文献[26]。利用LS或CS方法, 可以计算出整个封闭空间的声场展开系数 $A_n^m(k)$ 。再用该系数构造代价函数, 利用优化搜索等方法求解次级声源的最优布放。这可能带来两点优势: 一是选择的次级声源布放可保证全空间具有降噪效果; 二是不涉及具体的误差传感器布放信息, 可将误差传感器和次级声源的布放优化独立进行, 得到次级声源的最优布放后, 再优化误差传感器的布放使得待控制区域的降噪量最大。

6 结论

有源噪声控制技术的着眼点和生命力在于其工程应用和产业化, 虽然目前该技术在部分场合已获商业化应用, 但由于系统开发缺少规范化的方法和高效的设计工具, 导致研制周期长、通用性差、成本高等问题, 严重地阻碍了该技术的推广应用。本文论述的声场复现技术有助于有源控制系统设计与研制, 具体说来表现在:

(1) 在舱室模型中重构初级噪声场的时频和空间分布特性, 为系统设计、调试等工作提供可靠的试验平台;

(2) 实时再现目标声场, 利用视听一体化技术实时展示有源控制效果, 增强用户体验;

(3) 实现电声器件优化布放的虚拟设计, 降低系统研制成本, 提高系统开发效率。

声场复现技术作为一种研制有源噪声控制系统的辅助和支撑技术, 将为有源控制系统的设计与开发提供规范、高效的手段, 推动有源控制技术的规模化工程应用。

参 考 文 献

[1] 陈克安. 有源噪声控制[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2014.

- [2] Berkhout A J, Vries D D, Vogel P. Acoustic control by wave field synthesis[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 93(5): 2764-2778.
- [3] Spors S, Rabenstein R, Ahrens J. The theory of wave field synthesis revisited[C]. 124th AES Convention, 2008.
- [4] Spors S, Ahrens J. A comparison of wave field synthesis and higher-order Ambisonics with respect to physical properties and spatial sampling[C]. 125th AES Convention, 2008.
- [5] Ahrens J. Analytic methods of sound field synthesis[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [6] Zhang W, Abhayapala T D. 2.5D sound field reproduction in higher order Ambisonics[C]. International Workshop on Acoustic Signal Enhancement, 2014: 342-346.
- [7] Kirkeby O, Nelson P A. Reproduction of plane wave sound fields[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1993, 94(5): 2992-3000.
- [8] Fazi F M. Sound field reproduction[D]. Southampton: University of Southampton, 2010.
- [9] 陈心昭. 近场声全息技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [10] Williams E G, Maynard J D, Skudrzyk E. Sound source reconstructions using a microphone array[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68(1): 340-344.
- [11] Veronesi W A, Maynard J D. Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 85(2): 588-598.
- [12] Koopmann G H, Song L, Fahline J B. A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1989, 86(6): 2433-2438.
- [13] Rafaely B. Plane-wave decomposition of the sound field on a sphere by spherical convolution[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2004, 116(4): 2149-2157.
- [14] Zotkin D N, Duraiswami R, Gumerov N A. Sound field decomposition using spherical microphone arrays[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Process., 2008: 277-280.
- [15] Wang Z, Wu S F. Helmholtz equation-least-squares method for reconstructing the acoustic pressure field[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1997, 102(4): 2020-2032.
- [16] Gauthier P A, Camier C, Lebel F A, et al. Experiments of sound field reproduction inside aircraft cabin mock-up[C]. 133rd AES Convention, 2012.
- [17] Wang Y, Chen K. Low frequency sound spatial encoding within an enclosure using spherical microphone arrays[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2016, 140(1): 384-392.
- [18] Wang Y, Chen K. Compressive sensing based spherical harmonics decomposition of a low frequency sound field within a cylindrical cavity[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2017,

- 141(3): 1812–1823.
- [19] Wang Y, Chen K. Sound field reconstruction within an entire cavity by plane waves expansions using a spherical microphone array[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2017, 142(4): 1858–1870.
- [20] Elliott S J, Nelson P A, Stothers I, et al. In-flight experiments on the active control of propeller-induced cabin noise[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 140(2): 219–238.
- [21] 陈克安, 李海英, 孙进才. 自由声场自适应有源噪声控制中误差传感器的布放[J]. 振动工程学报, 1996, 9(4): 348–352.
Chen Kean, Li Haiying, Sun Jincai. Arrangement of error sensors for adaptive active noise control in free sound field[J]. Journal of Vibration Engineering, 1996, 9(4): 348–352.
- [22] Ruckman C, Fuller C. Optimizing actuator locations in active noise control systems using subset selection[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 186(3): 395–406.
- [23] Baek K, Elliott S J. Natural algorithms for choosing source locations in active control systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 186(2): 245–267.
- [24] Asano F, Suzuki Y, Swanson D C. Optimization of control source configuration in active control systems using Gram-Schmidt orthogonalization[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1999, 7(2): 213–220.
- [25] Khalilian H, Bajić I, Vaughan R. Towards optimal loudspeaker placement for sound field reproduction[C]. Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 2013, 32(3): 321–325.
- [26] 王岩, 陈克安, 玉昊昕, 等. 圆柱腔低频声场的球谐函数分解及声场再现[J]. 声学学报, 2018, 43(4): 719–727.
Wang Yan, Chen Kean, Yu Haoxin, et al. Spherical harmonics decomposition and reproduction of a low frequency sound field within a cylindrical cavity[J]. Acta Acustica, 2018, 43(4): 719–727.

◇ 声学新闻和动态 ◇

《应用声学》再次入编《中文核心期刊要目总览》

经《中文核心期刊要目总览》2017年版编委会公布, 依据文献计量学的原理和方法, 经研究人员对相关文献的检索、统计和分析, 以及学科专家评审, 《应用声学》入编《中文核心期刊要目总览》2017年版(即第8版)的核心期刊。

本次对于核心期刊的评价仍采用定量评价和定性评审相结合的方法。定量评价指标体系采用了被摘量(全文、摘要)、被摘率(全文、摘要)、被引量、他引量(期刊、博士论文、会议)、影响因子、他引影响因子、5年影响因子、5年他引影响因子、特征因子、论文影响分值、论文被引指数、互引指数、

获奖或被重要检索工具收录、基金论文比(国家级、省部级)、Web下载量、Web下载率16个评价指标, 选作评价指标统计源的数据库及文摘刊物达49种, 统计到的文献数量共计93亿余篇次, 涉及期刊13953种。参加核心期刊评审的学科专家近8千位。经过定量筛选和专家定性评审, 从我国正在出版的中文期刊中评选出1981种核心期刊。

(《应用声学》编辑部 摘编自2018年9月《中文核心期刊要目总览》入编通知)