

# 波束形成声源识别技术研究进展

褚志刚<sup>1</sup>, 杨洋<sup>2,3</sup>, 倪计民<sup>3</sup>, 江洪<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆工业职业技术学院汽车系, 重庆 401120; 3. 同济大学汽车学院, 上海 210804)

**摘要:** 波束形成作为一种空间声场可视化技术在声源识别领域得到广泛的研究和应用。概述了传声器阵列测量和波束形成后处理算法的发展历程, 分析了其特点, 总结了其发展方向, 主要包括: 声源识别性能更优的传声器阵列开发和算法改进、声源识别的适应性提高、波束形成结果不确定度的研究、基于声品质的声源成像及可视化研究等。对波束形成声源识别技术的认识及进一步的研究提供参考。

**关键词:** 波束形成; 声源识别; 发展历程; 发展方向

中图分类号: TB52 TB559

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2013)-05-0430-06

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2013.05.015

## Review of beamforming based sound source identification techniques

CHU Zhi-gang<sup>1</sup>, YANG Yang<sup>2,3</sup>, NI Ji-min<sup>3</sup>, JIANG Hong<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Faculty of Vehicle Engineering, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China;

3. Automotive College of Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** As a visualization technique of spatial sound field, beamforming has been widely studied and applied in the field of sound source identification. Not only the development courses of the microphone arrays and the beamforming post-processing algorithms are reviewed, but also their characteristics are summed up. Furthermore, the development trends are summarized, which mainly include the development and modification of microphone arrays and algorithms with better sound source identification performance, the improvement of the adaptability, the research on the uncertainty of beamforming results, the study of the sound source mapping and visualization based on sound quality metrics, and so on. It provides a good reference for understanding beamforming techniques.

**Key words:** beamforming; sound source identification; development course; development trend

## 0 引言

波束形成又名麦克风天线、相控麦克风阵列、声学望远镜、声学照相机、声学聚焦, 是一种先进的空间滤波技术, 早期主要应用于雷达、通信、电子对抗、声纳等领域的信号分析。随着计算机技术的发展, 波束形成作为空间声场可视化技术应用于声源识别领域, 其离散化被测物体表面形成网格聚焦点, 利用由若干麦克风组成的传声器阵列接收声信号, 基于一定的算法后处理各麦克风接收的声信号, 使对应真实声源的聚焦点位置的输出量被加强, 形成“主瓣”, 而其他聚焦点位置的输出量被衰减, 形成“旁瓣”, 从而有效识别声源<sup>[1,2]</sup>。传声

器阵列和后处理算法是波束形成声源识别技术的关键。

相比于声压法、声强法等传统的声源识别技术, 波束形成由于测量速度快, 计算效率高, 中高频分辨率好, 适宜中长距离测量, 对稳态、瞬态及运动声源的中高频成份定位精度高等优点<sup>[2-5]</sup>, 自 20 世纪 70 年代以来, 已成为航空、高速列车、旋转机械、车辆、发动机等领域不可缺少的声源识别技术<sup>[6]</sup>。国内外学者经过数十年的努力, 对该技术的研究取得了丰富的成果。本文从传声器阵列和后处理算法两方面概述了波束形成声源识别技术的发展历程, 分析了其特点, 总结了其发展方向, 对波束形成技术的认识及进一步研究具有参考价值。

## 1 传声器阵列发展历程

传声器阵列是由若干麦克风按一定顺序排列组成的声学测试设备, 其最早雏形是 Johnson 和

收稿日期: 2012-10-08; 修回日期: 2012-12-07

基金项目: 牵引动力国家重点实验室开发课题(TPL0903), 国家自然科学基金(50975296)资助项目。

作者简介: 褚志刚(1978—), 男, 江苏江都人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为噪声源识别技术及其应用。

通讯作者: 褚志刚, E-mail: zgchu@cqu.edu.cn

Dudgeon<sup>[7]</sup>在《阵列信号处理》中描述的一战期间法国军队用于探测敌军飞机的听力设备,该设备由两个分别包含六个麦克风的子阵列组成,两子阵列相距 2m 且通过等长度的管道分别与人耳相连,人耳接收的声信号是六个麦克风接收声信号的均值,通过改变两子阵列的轴线夹角来确定声波的传播方向。二战期间,军事的需要使传声器阵列测量技术在雷达、电磁天线、声纳领域被广泛发展应用。20 世纪 70 年代,传声器阵列应用于科学领域,其主要目的在于识别飞机及喷气发动机的主要噪声源。1974 年,美国 NASA 的 Soderman 和 Nobel<sup>[8]</sup>运用等间距直线形传声器阵列进行风洞气动声学测试。1976 年,剑桥大学的 Billingsley 和 Kinns<sup>[9]</sup>提出了“声学望远镜”的概念,给出了用于喷气发动机噪声源实时定位的硬件系统,其在理论分析等间距直线形传声器阵列性能的基础上,对超音速客机发动机的辐射噪声进行测试分析。高速列车噪声源的识别也是传声器阵列测试技术的应用领域之一,德国 DLR 于 1977 年开始使用等间距直线形传声器阵列记录声场数据,1979 年,King 和 Becher<sup>[10]</sup>使用 15 通道等间距均匀布置的直线形传声器阵列测量高速列车的噪声分布,首次对运动声源进行研究。除直线形外,圆弧形也是早期传声器阵列的一种形态,1977 年,Fischer 等<sup>[11]</sup>运用圆弧形传声器阵列进行发动机噪声源识别试验。一维线性传声器阵列简单方便,但声场数据采集不完全,数据处理中多假设声源为线性分布,声源识别性能具有局限性。

为克服一维线性传声器阵列的局限性,二维平面传声器阵列得到研究应用。1987 年,美国 NASA 的 Brooks, Marcoloni 和 Pope 等<sup>[12]</sup>首次使用平面传声器阵列研究流动噪声源的分布,其利用 12 通道平面传声器阵列测量直升机模型的气动噪声。同年,Blacodon, Caplot 和 Elias<sup>[13]</sup>在法国 ONERA 风洞试验室利用平面传声器阵列定位直升机旋翼的噪声源。他们的研究成果使学者们认识到二维平面传声器阵列的优势,自此,对其的研究工作被广泛展开:20 世纪 90 年代初期,美国 NASA<sup>[14,15]</sup>开发了用于风洞试验的 40 通道平面传声器阵列测试设备;美国 Boeing 公司应用平面传声器阵列进行气动噪声源识别试验,并开发了配套的软硬件工作环境;1997 年,法国 ONERA 的 Piet 和 Elias 等<sup>[16]</sup>设计了 39 通道十字形平面传声器阵列,在法国 CEPR-19 消声风洞中对空客飞机模型进行测试;1997 年,德国 DLR 的 Ulf Michel<sup>[17]</sup>用 29 通道嵌套传声器阵列对 Tomado 战斗机在高速飞行中的机体噪声和发动

机噪声进行测量,该传声器阵列由多组不等间距分布的直线形传声器阵列嵌套组成;1998 年,Ulf Michel<sup>[18]</sup>利用 111 通道平面传声器阵列在法兰克福机场对民用飞机的着陆噪声进行测量,该阵列传声器的坐标位置是基于旁瓣衰减的目的,由蒙特卡罗模拟法确定的,1999 年至 2001 年,西北工业大学的乔渭阳<sup>[19-20]</sup>也利用该传声器阵列进行飞机机翼噪声及着陆噪声的研究;1999 年,荷兰 NLR<sup>[21]</sup>的研究员在 DNW 风洞试验室利用 100 通道平面传声器阵列准确识别了模型空客飞机的噪声源;1999 年,德国 GFai 公司将照相机安装在传声器阵列上,首次实现了声源的可视化,“声学照相机”的概念诞生<sup>[6]</sup>。

丹麦 Brüel&Kjær 公司的 J. J Christensen 和 J. Hald 等<sup>[22]</sup>基于正交优化等算法设计的优化随机几何、阿基米德螺旋、轮形、半轮形等平面传声器阵列由于其强旁瓣抑制能力被广泛应用于车辆、发动机等机械的噪声源识别。2005 年,J. Hald<sup>[23]</sup>在优化轮形阵列基础上设计的扇形轮阵列,为近场声全息和波束形成的联合运用提供了硬件条件,显著提高了声源识别的性能。此外,德国 GFai 公司的圆环阵列、螺旋阵列及比利时 LMS 公司的伪随机阵列等也比较流行。在国内,清华大学、上海交通大学、北京理工大学、同济大学、重庆大学等高校及中国科学院声学研究所、内燃机研究所、铁道科学研究院等都致力于该技术的研究。

二维平面传声器阵列能够有效抑制阵列前方的干扰信号,而对阵列后方干扰信号的抑制能力差,尤其当后方干扰源所在平面与声源平面相对于传声器阵列平面平行对称分布时,声源计算平面上干扰源的投影位置处将出现与干扰源等强度的旁瓣,混淆声源平面成像结果,因此,平面传声器阵列多用于消声室等自由场环境。为抑制干扰噪声影响,GFai 公司推出了具有一定倾角的三维三角形传声器阵列,Brüel&Kjær 公司推出了具有一定倾角的三维星形传声器阵列,该阵列多用于高速列车、风力发电机、工厂等无法置于消声室的大型设备的表面噪声源识别。MicrodB 公司也设计了可用于车室、房间等混响场内局部区域噪声源识别的 56 通道三维空心半圆柱形传声器阵列,Maxime Robin 和 Bernard Béguet<sup>[24]</sup>利用该阵列在车室内对车窗的声学密封性能进行测试分析。

前述的传声器阵列均用于阵列前方被测物体二维表面的噪声源识别,而对于车室、房间等混响场内整个三维结构的噪声源分布,这些阵列因三维

空间声场采样不完全而无法准确识别。为实现三维空间的噪声源识别,GFai 公司设计开发了 32 通道、48 通道、120 通道传声器均匀布置的空心球形阵列,并提出了物体表面的三维成像方法,2006 年,A. Meyer 和 D. Döbler<sup>[25]</sup>利用该空心球形阵列对车内声场进行了重构。MicrodB 公司设计开发了实心球形传声器阵列并给出了基于声波衍射的球谐函数波束形成声源识别算法,该实心球形传声器阵列也被 MicrodB 公司和 Airbus 公司联合申请专利。2008 年, MicrodB 公司的 Maxime Robin 和 Bernard Béguet<sup>[24]</sup>模拟对比了空心球和实心球传声器阵列的性能,得出了实心球传声器阵列可以更准确识别混响场内噪声源的结论。此外, Brüel&Kjær 公司开发的 36 通道、50 通道实心球传声器阵列也被广泛应用于三维声场的噪声源识别。

从一维线性到二维平面再到三维立体,波束形成传声器阵列测量技术已有数十年的发展历史,设计开发分辨率更好、有效动态范围更高、成本更低、更方便适用的传声器阵列仍是国内外学者不断追求的目标。

## 2 波束形成算法发展历程

波束形成算法是后处理传声器阵列各麦克风接收声信号的数学方法,最早用于声源识别的波束形成算法是延迟求和,其直接对传声器阵列各麦克风接收的声信号按各聚焦点进行“相位对齐”和“求和运算”,该算法简单方便,但声源识别性能较差。随着信号处理技术的发展,互谱延迟求和算法取代一般的延迟求和,其延迟求和的对象是传声器阵列各麦克风接收声信号的互谱,互谱的运用有效抑制了不相关噪声信号的干扰,衰减了旁瓣,提高了声源识别的准确度。基于该算法,国内外学者给出了较多的成功案例报道:美国 NASA 的 Thomas F. Brooks 等<sup>[15]</sup>基于该算法研究了传声器阵列尺寸对定量飞机机体噪声源的影响;荷兰 NLR 的 S. Oerlemans 等<sup>[26]</sup>基于该算法对 1:10.6 比例的空客 A360 模型机翼的噪声源进行识别;杨洋<sup>[3]</sup>基于除自谱的互谱延迟求和理论,进行了噪声源识别算法设计和软件开发,准确识别了某发动机全负荷额定转速工况的噪声源。

互谱延迟求和算法的输出量为声源在传声器阵列平面的声压贡献量,与声源到阵列平面的距离等因素有关,无法反应声源的真实强度,为克服该不足,2003 年,丹麦 Brüel&Kjær 公司的 J. Hald<sup>[27]</sup>

受 Georges Elias 等<sup>[28]</sup>在 1995 年提出的最小化模型声场与真实声场间的差函数的方法的启发,构建模型声场与真实声场间互谱的差函数,引入互谱成像函数算法,有效考虑了球面波传播过程中各麦克风接收声信号幅值的差异性,不仅能重构声源在传声器阵列平面的声压贡献量,也能准确重构声源的真实强度,已在 Brüel&Kjær 的稳态及准稳态波束形成计算软件中得到成功应用。此外,加权波束形成、自适应波束形成、正交波束形成等算法也得到研究:2000 年,H. Kook<sup>[29]</sup>利用极大似然估计法估算出近场波束形成权重反比于假设声源点与测点间的距离;2009 年,Yong Thung Cho 等<sup>[30]</sup>在反比波束形成权重的基础上考虑更一般的球面汉克尔函数,运用高阶反比权重显著提高了声源识别的分辨率;2005 年,Ennes Sarradj 等<sup>[31,32]</sup>基于不相干机构产生的声信号成正交关系的理论,给出了正交波束形成算法,其对阵列接收声信号的互谱矩阵进行特征值分解,对各自不相干声源产生的互谱分别进行延迟求和,从而有效分离提取不同机理的噪声源。

传统波束形成算法的输出结果理论上声源分布与阵列点传播函数的卷积,阵列传声器采样的有限性和离散性使其点传播函数无法等于理想的  $\delta$  函数,不仅在真实声源位置输出具有一定宽度的“主瓣”,还在非声源位置输出“旁瓣”。主瓣的宽度影响声源识别的分辨率,旁瓣的出现污染声源成像图。阵列点传播函数与阵列的几何形状、相对于声源位置的尺寸和频率有关,输出结果受旁瓣等因素干扰,不能真实地反映声源分布,具有不确定性。有效缩减主瓣宽度、衰减旁瓣干扰,清晰化声源识别结果,是提高声源识别准确度的关键,近年来备受国内外学者关注。目前,已有的波束形成声源识别结果清晰化方法主要可分为清除法和反卷积方法两大类。CLEAN 算法是一种清除法,通过在传声器阵列麦克风接收声信号的互谱矩阵中消除已识别声源所产生的互谱来剔除与该声源相关的旁瓣。1998 年,Dougherty 和 Stoker<sup>[33]</sup>应用 CLEAN 算法识别气动噪声源。2007 年,荷兰 NLR 的 P. Sijtsma<sup>[34]</sup>给出了基于空间声源相干的 CLEAN-SC 算法。另一种被广泛研究的算法是反卷积,其通过在传统波束形成的输出结果中消除阵列点传播函数来提高声源识别性能。2004 年,美国 NASA 的 Thomas F. Brooks 等<sup>[35]</sup>给出反卷积声源成像方法(Deconvolution Approach for the Mapping of Acoustic Sources, DAMAS),其在传统波束形成的输出结果和声源分布之间建立线性方程组并通过引入正

约束来定解该方程组,从而提取声源信息。2005年, Thomas F. Brooks<sup>[36]</sup>将 DAMAS 扩展到三维空间的噪声源识别,给出 3D-DAMAS,并研究分析了其侧向和径向的分辨率。2005年, Dougherty<sup>[37]</sup>给出了 DAMAS 的两个扩展: DAMAS2 和 DAMAS3, DAMAS2 显著提高了反复计算的速度并利用低滤波增加了解的规范性, DAMAS3 在 DAMAS2 的基础上减少了求解过程需要的反复次数, DAMAS2 和 DAMAS3 均要求点传播函数为平移不变形式,该要求可以通过空间转换实现。DAMAS 基于统计独立的声源分布假设,能够准确获取不相干声源的位置和强度信息,为识别相关声源,2006年, Thomas F. Brooks<sup>[38]</sup>基于声源计算平面上各网格点波束形成输出结果的互谱给出了 DAMAS-C。2007年,佛罗里达大学的 Tark Yardibi 等<sup>[39]</sup>将稀疏约束算法应用于波束形成反问题,给出了 SC-DAMAS(Sparsity Constrained- DAMAS)算法和协方差矩阵拟合算法(CMF, Covariance Matrix Fitting)。2009年, Tark Yardibi 等<sup>[40]</sup>给出了用于识别相关声源的协方差拟合算法,并通过模拟计算和试验验证了该算法的正确性。2010年, Tark Yardibi 等<sup>[41]</sup>基于单声源、等强度不相干双声源、不等强度不相干双声源、相干双声源的声源识别试验,对比分析了互谱延迟求和、DAMAS、SC-DAMAS、CMF、CLEAN-SC 算法的性能。与 DAMAS 不同,非负最小二乘(NNLS, Non-Negative Least Squares)反卷积的基本思想是在传统波束形成输出结果、阵列点传播函数、声源分布之间建立差函数,最小化该差函数来提取真实声源信息。2007年,德国 DLR 的 Klaus Ehrenfried 等<sup>[42]</sup>基于梯度投影算法求解 NNLS 反卷积波束形成问题,为提高求解速度,其进一步效仿 DAMAS2 方法,假设空间转移不变阵列点传播函数和镜像空间转移不变阵列点传播函数,从而将空间卷积转化为波数域乘积,给出 FFT-NNLS 方法。该方法由于收敛快,计算效率高,声源定位准确等优点被广泛应用,最近, Svend Gade、Jesper Gomes 等<sup>[43,44]</sup>给出基于 FFT-NNLS 方法识别汽车空气动力噪声源、风力涡轮机噪声源、飞机通过噪声源的成功案例报道,得出比传统波束形成更准确的声源识别结果。

### 3 发展方向

波束形成声源识别技术经过数十年的发展,在传声器阵列测量和声信号后处理算法方面都取得了丰富的成果,为进一步改善其声源识别性能,仍

存在一些内容需要进一步研究。本文主要列出六方面:

(1) 开发声源识别性能更优的传声器阵列仍是目前波束形成领域的一个研究热点。通过改变阵列尺寸、传声器数目、传声器间隔等参数,优化阵列传声器布置形式、寻求更合理的传声器信号计权函数,使传声器阵列声源识别的空间分辨率更高,最大旁瓣水平更低,有效动态范围更大。此外,将神经网络、遗传算法等各种先进的最优化算法应用到传声器阵列结构参数和计权函数的优化中亦是一个重要的研究方向。

(2) 降低波束形成方法对测量环境的要求,提高其声源识别的适应性。理论上讲,波束形成方法可以采用任意形式的阵列对任意的声源表面进行声学成像,因此,寻求能适应和满足汽车驾驶室等密闭空腔结构、阵列后方具有声学反射面的测量环境、具有地面反射效应的声学环境等声场条件下的传声器阵列形式和信号处理算法及算法稳定性的提高是波束形成领域的一个重要研究课题。

(3) 波束形成结果不确定度的研究,提高波束形成技术的计量精度。采用更加合理的模型假设实现波束形成声源识别技术中对声源强度和辐射声功率的计算,研究测量环境参数、阵列与声源的距离、传声器灵敏度及频响特性等输入参数的不确定度对声源强度和辐射声功率的幅值精度和空间位置精度的影响,寻求最小化上述输入参数不确定度对波束形成输出结果影响的方法,提高基于波束形成方法声源贡献量排序的定量精度。

(4) 探究提高波束形成声源识别性能的改进算法,拓展波束形成声源识别算法的频率范围和动态性能。比如,尝试联合 HELS、SONAH 等方法提高低频空间分辨率;寻求更合理的传声器信号计权函数提高高频动态范围等。

(5) 波束形成输出的旁瓣在声源计算平面上相互叠加形成鬼影,严重污染了声学成像结果,采用合理的清晰化方法衰减甚至消除旁瓣对提高其声源识别的准确度具有重要意义。探讨将 DAMAS2、FFT-NNLS、CLEAN 等各种清晰化应用于最新的互谱成像函数波束形成声源识别结果的清晰化,并将上述清晰化方法从稳态声源向瞬态及运动声源识别,由平面声源向真实三维复杂声源加以推广有待进一步深入研究。此外,寻求更加合理的阵列形式及方法提高阵列点传播函数的转移不变性,进一步提高各种清晰化的声源识别准确度。

(6) 基于声品质的声源成像及可视化研究。噪

声源识别的最终目的是为了改善被识别对象的声学品质,而传统的声压、声强等客观参数的可视化成像结果更多地表达噪声源的强度信息,未能直接给出噪声接收者对噪声的主观感受,基于响度、尖锐度、粗糙度等声品质参数的声源可视化成像是未来波束形成声源识别技术的又一研究方向。

### 参 考 文 献

- [1] 褚志刚, 杨洋, 王卫东, 等. 基于波束形成方法的货车车外加速噪声声源识别[J]. 振动与冲击, 2012, 31(7): 66-70.  
CHU Zhigang, YANG Yang, WANG Weidong, et al. Identification of truck noise sources under passby condition based on wave beamforming method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(7): 66-70.
- [2] Mehdi Batel, Marc Marroquin. Noise source location techniques—simple to advanced applications[J]. Sound and Vibration, 2003, 37(3): 24-38.
- [3] 杨洋, 褚志刚, 倪计民, 等. 除自谱的互谱矩阵波束形成的噪声源识别术[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4): 145-148.  
YANG Yang, CHU Zhigang, NI Jimin, et al. Research on algorithm of sound source identification based on cross-spectral beamforming with exclusion of autospectra[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(4): 145-148.
- [4] 褚志刚, 杨洋. 近场波束形成声源识别的改进算法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 178-183.  
CHU Zhigang, Yang Yang. Improved algorithm of near-field beamforming for sound source identification[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 178-183.
- [5] 杨洋, 倪计民, 褚志刚, 等. 基于互谱成像函数波束形成的发动机噪声源识别[J]. 内燃机工程, 2012, 33(3): 82-87.  
YANG Yang, NI Jimin, CHU Zhigang, et al. Noise Source Identification of an Engine Based on Cross-spectra Imaging Function Beamforming[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2012, 33(3): 82-87.
- [6] Ulf Michel, History of Acoustic Beamforming[C]// 1th BeBeC, Berlin, Germany, November 21-22, 2006.
- [7] Johnson D H, Dudgeon D E. Array signal processing: concepts and techniques[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [8] Soderman P T, Noble S C. Directional microphone array for acoustic studies of wind tunnel models[J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(3): 168-173.
- [9] Billingsley J, Kinns R. The acoustic telescope[J]. Journal of Sound and Vibration, 1976, 48: 485-510.
- [10] King W F, Bechert D. On the sources of wayside noise generated by high-speed trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66: 311-332.
- [11] Fischer M J, Harper-Bourne M, Glegg S A L. Jet engine noise source location: the polar correlation techniques[J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 51: 23-54.
- [12] Brooks T F, Marcolini, Pope D S. A directional array approach for the measurement of rotor noise source distributions with controlled spatial resolution[J]. Journal of Sound and Vibration, 1987, 112(1): 192-197.
- [13] Blacodon D, Caplot M, Elias G. A source localization technique for helicopter rotor noise[C]// 11th AIAA Aeroacoustics Conference, Sunnyvale, CA, October 19-21, 1987.
- [14] Humphreys W H, Brooks T F, Hunter W W, et al. Design and use of microphone directional arrays for aeroacoustic measurements [C]// AIAA Paper 1998-0471, 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, January 12-15, 1998.
- [15] Brooks T F, Humphreys W M. Effect of directional array size on the measurements of airframe noise components[C]// AIAA Paper 1999-1958, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Bellevue, WA, May 10-12, 1999.
- [16] Piet J F, Elias G. Airframe Noise Source Localization Using a Microphone Array[C]// AIAA Paper 1997-1643, 3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, GA, May 12-14, 1997.
- [17] Michel U, Barsikow B, Haverich B, et al. Investigation of airframe and jet noise in high-speed flight with a microphone array[C]// AIAA Paper 1997-1596.3rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Atlanta, GA, May 12-14, 1997.
- [18] Michel U, B Barsikow, Helbig J, et al. Flyover Noise Measurements on Landing Aircraft with a Microphone Array[C]// AIAA Paper 1998-2336, 4th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, June 2-4, 1998.
- [19] 乔渭阳. 基于麦克风阵列测量的飞机机翼噪声源研究[D]. 西北工业大学博士学位论文, 1999, 12.  
QIAO Weiyang. A study on the wing noise sources based on the fly-over measurements with a planar microphone array[D]. Ph.D. Thesis of Northwestern Polytechnical University, 1999, 12.
- [20] 乔渭阳, Michel U. 二维传声器阵列测量技术及其对飞机进场过程着陆噪声的实验研究[J]. 声学学报, 2001, 26(2): 162-168.  
QIAO Weiyang, Michel U. A study on landing aircraft noise based on the fly-over measurements with a planar microphone array[J]. Acta Acustica, 2001, 26(2): 162-168.
- [21] Sijtsma P, Holthusen H. Source location by phased array measurements in closed wind tunnel test sections[C]// AIAA Paper 1999-1814, 5th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Greater Seattle, WA, May 10-12, 1999.
- [22] Hald J, Christensen J J. A class of optimal broadband phased array geometries designed for easy construction[C]// Proceedings of Internoise, 2002.
- [23] Hald J. Combined NAH and beamforming using the same array[J]. B&K Technical Review, 2005, 1(1): 11-39.
- [24] Maxime Robin, Bernard Béguet. Acoustic source localisation inside cabins[C]// Automotive and Railway Comfort congress, Le Mans, November 19-20, 2008.
- [25] Meyer A, Döbler D. Noise source localization within a car interior using 3D-microphone arrays[C]// 1th BeBeC, Berlin, Germany, November 21-22, 2006.
- [26] Oerlemans S, Broersma L, Sijtsma P. Quantification of airframe noise using microphone arrays in open and closed wind tunnels[C]// NLR-TP-2007-799: 1-28.
- [27] Christensen J J, Hald J. Improvements of cross spectral beamforming[C]// Proceedings of Internoise 2003: 2652-2659.
- [28] Elias G. Source Location with a Two-dimensional Focused Array: Optimal Signal Processing for a Cross-shaped Array[C]// Proceedings of Internoise 1995: 1175-1178.
- [29] Kook H, Moebs G B, Davies P, et al. An efficient procedure for visualizing the sound field radiated by vehicle during standardized pass by tests[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 233: 137-156.
- [30] Yong Thung Cho, Michael J Roan. Adaptive near-field beamforming techniques for sound source imaging[J]. J. Acoust. Soc. Am., 2009, 125(2): 944-957.
- [31] Sarradj E, Schulze C, Zeibig A. Identification of noise source mechanisms using orthogonal beamforming[C]// Noise and Vibration: Emerging Methods, 2005.
- [32] Sarradj E. Quantitative source spectra from acoustic array measurements[C]// BeBeC, Berlin, Germany, February 19-20, 2008.
- [33] Dougherty R P, Robert W Stoker. Sidelobe suppression for phased array aeroacoustic measurements[C]// AIAA Paper 1998-2242, 4th

- AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Toulouse, France, June 2-4, 1998.
- [34] Sijtsma P. CLEAN based on spatial source coherence[C]// NLR-TP-2007-345: 1-23.
- [35] Brooks T F, Humphreys W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources(DAMAS) Determined from Phases Microphone Arrays[C]// AIAA Paper 2004-2954, 10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Manchester, UK, May 10-12, 2004.
- [36] Brooks T F, Humphreys W M. Three-dimensional application of DAMAS methodology for aeroacoustic noise source definition[C]// AIAA Paper 2005-2960, 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, CA, May 23-25, 2005.
- [37] Dougherty R P. Extensions of DAMAS and benefits and limitations of deconvolution in beamforming[C]// AIAA Paper 2005-2961, 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, CA, May 23-25, 2005.
- [38] Brooks T F, Humphreys W M. Extension of DAMAS phased array processing for spatial coherence determination(DAMAS-C)[C]// AIAA Paper 2006-2654, 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Cambridge, MA, May 8-10, 2006.
- [39] Tarik Yardibi, Jian Li, Petre Stoica, et al. Sparsity constrained deconvolution approaches for acoustic source mapping[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2008, **123**(5): 2631-2642.
- [40] Tarik Yardibi, Jian Li, Petre Stoica, et al. A covariance fitting approach for correlated acoustic source mapping[J]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 2010, **127**(5): 2910-2931.
- [41] Tarik Yardibi, Nikolas S Zawodny, Chris Bahr, etc. Comparison of microphone array processing techniques for aeroacoustic measurements[J]. *Aeroacoustics*, 2010, **9**(6): 733-762.
- [42] Klaus Ehrenfried, Lars Koop. Comparison of Iterative Deconvolution Algorithms for the Mapping of Acoustic Sources[J]. *AIAA Journal*, 2007, **45**(7): 1584-1595.
- [43] Gade S, Hald J, Ginn B. Noise source Identification with increased spatial resolution used in automotive industry[C]// *Proceedings of Acoustics 2012*, Hong Kong, 2012.
- [44] Jesper Gomes. Noise source identification with blade tracking on a wind turbine[C]// *Proceedings of Internoise 2012*, New York, 2012