

王季卿教授八秩寿庆学术报告会——

室内声学测量中传声器阵列的特点及其应用

赵跃英, 王 婷

(同济大学声学研究所, 上海 200092)

摘要: 对不同传声器阵列的特点及其在室内声学测量中的应用进行了综述。介绍了一维线性、二维面分布、三维立体、圆型传声器阵列以及球型传声器阵列的基本特点。并列举了一些传声器阵列在室内声学测量中的具体应用实例, 对各类传声器阵列在实际测量中的优势和不足之处进行了分析。

关键词: 传声器阵列; 声场空间测量; 室内声学测量

中图分类号: TB556

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2009)-06-0705-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2009.06.005

Microphone arrays and their applications in room acoustic measurement

ZHAO Yue-ying, WANG Ting

(Institute of Acoustics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper summarizes the characteristics of various microphone arrays and their applications in room acoustic measurement. This article introduces the characteristics of various microphone arrays including linear microphone arrays, planar arrays, three dimensional arrays, spherical arrays and circular arrays. Several examples of room acoustic measurement using microphone arrays are illustrated in this paper, and their advantages and disadvantages are discussed from the view of practice.

Key words: microphone arrays; spatial measurement of sound field; room acoustic measurement

1 引言

室内声学研究的主要目的之一, 是运用测得的反映房间本身声学特性的客观参量来精确而客观地描述声场, 为厅堂音质研究提供客观依据。但是, 单个传声器接收的脉冲响应测量只能得到室内声场随时间变化的特性, 无法满足声场空间特性测量的要求。相比之下, 使用传声器阵列, 就可以测量房间的方向性脉冲响应函数, 从而获取较全面的声场空间信息。

传声器阵列测量最早出现在水声和超声领域, 后来在噪声测量方面也渐渐得到重视, 近年来, 许多学者致力于将传声器阵列应用于室内声学测量的研究^[1-13], 使用传声器阵列对空间多点声压进行测量, 再通过计算得到相应平面行波的能量及方向等

信息。虽然传声器之间的匹配问题以及传声器个数过多对声场产生的影响会带来一定的局限, 但是不可否认, 传声器阵列在获取声场空间信息方面具有很大的优势。

本文首先介绍了各类典型的传声器阵列, 对各种传声器阵列在实际测量中的优势和不足进行了分析。同时, 根据一些室内声学测量中的具体实例, 进一步阐述了运用传声器阵列测量声场方向信息的特点。

2 传统的几种典型传声器阵列

2.1 一维线阵列

最简单的一维传声器阵列为均匀排列的线阵列。若 N 个阵元的阵列沿 x 轴等间距均匀排布, 且每个阵元传声器的灵敏度相同。当一平面波的入射方向与 x 轴的夹角为 θ_0 时, 阵列在 θ 方向的输出可表示为^[14]:

$$S = \sum_{i=0}^{N-1} I_i e^{j i k d (\cos \theta - \cos \theta_0)} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-09; 修回日期:

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10874155)

作者简介: 赵跃英(1963-), 女, 上海人, 博士, 副教授, 研究方向为室内声学。

通讯作者: 赵跃英, E-mail: zhaoyy_9@163.com

其中, θ 表示平面波的入射方位与 x 轴的夹角, f 表示声波频率, c 表示介质中的声速, d 表示阵元间距。如图 1^[14]所示。

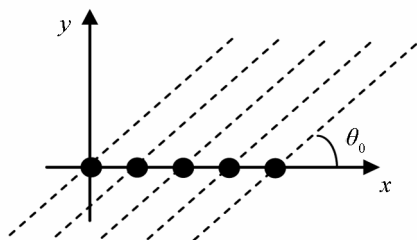


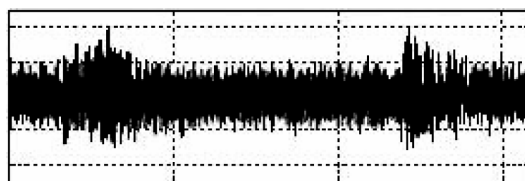
图 1 一维线阵列

Fig.1 Line microphone array

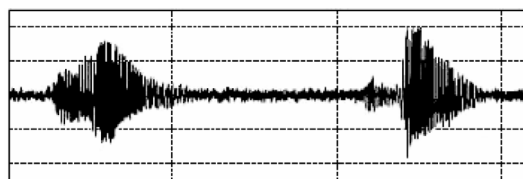
若各阵元的权数取值相同, 令 $u = kd(\cos\theta - \cos\theta_0)$, 则经化简可得:

$$S = e^{j(n-1)u/2} \frac{\sin(nu/2)}{\sin(u/2)} \quad (2)$$

各种不同的一维线阵在室内声学中的应用较为广泛。早期主要用于测量材料的反射及散射特性^[15], 后来常见于房间扩散特性的测量以及噪声环境下语音信号的拾取^[16], 如杨益新^[17]提出的一种语音增强阵列, 使用一个 5 元均匀线阵来接收端射方向带噪线性调频信号和语音信号, 然后进行时域宽带超增益处理。通过图 2 的前后对比可知, 语音增强效果非常明显。这种方法的优点是它不仅抑制空间均匀噪声, 而且可以抑制有向干扰, 其性能优于基于单个传声器的语音增强系统。除此以外线阵列还可以用于近场声全息信息的测量^[18]。当然, 使用声强传声器阵列也是一种较为实用的方法。例如吕钱浩等^[19]提出的使用矢量传感器阵列来进行声场测量。取 3 个相互垂直的速度传感器分别测量沿坐标轴声速分量, 将这 3 个速度传感器和一个声压传感器共点放置作为一个矢量传感器阵元, 对远场放



(a) 未经处理的原始信号



(b) 处理后的语音信号

图 2 使用线阵测量经处理得到的语音信号

Fig.2 Processed voice signal measured by line array

置的 3 个互不相关的声源进行定位。这种方法计算比较简便, 定位产生的旁瓣较低, 适合低信噪比情况下的声源目标估计。

但是由于一维线阵本身的制约, 对声场方向信息的拾取局限较大, 精度也很低。想要获得更完整的声场方向信息需将其拓展成二维或三维阵列来实现。

2.2 二维面分布阵列

平面四元方阵是基本的二维面分布阵列之一, 这种传声器阵列体积较小, 操作简单, 但是存在定位模糊, 且误差较大, 所获取的声场的方向信息不够准确, 在室内声学测量中使用较少。

平面十字传声器阵列^[20]是另一种二维面分布传声器阵列。此类阵列是将等距线阵在平面上进行十字排列, 然后利用时延法来获取声源方向信息。该方法首先估计时间延迟, 然后计算出声源位置, 运算量较小, 易于实时处理。实验表明, 这种测量系统得到的角度计算结果与实际位置数值相近, 表明该传声器阵列测量方位角时精度较高, 但在测量距离时数值上相差很大。因此, 虽然这种阵列测量精度相对平面四元阵列有了一定的提高, 可以用于声源定位的相关研究^[21]。但由于其平面结构以及阵元个数的限制, 其测量精度会受到入射方向的影响。在这种背景下, 出现了三维立体阵列。

2.3 三维立体传声器阵列

2006 年, 在二维面分布阵的基础上, 有人设计出三维传声器阵列, 主要有空间六元阵^[22]以及空间四元阵^[23], 其中空间四元阵在室内声学测量中应用相对较多。这类阵列是通过测量空间某点声源发出的声波传到各个传声器的时间来计算声源距离, 由此确定虚声源的位置。将该系统用于厅堂测量中, 可以根据测得的大厅脉冲响应来计算虚声源分布情况, 反射声指向特性等。图 3^[23]为空间四传声器阵的示意图。图 4(b)^[23]是根据虚声源分布计算得到的还原脉冲信号, 与原脉冲图 4(a)^[23]对比, 可以发

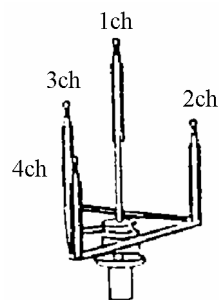


图 3 空间四传声器阵示意图

Fig.3 Spatial array with four microphones

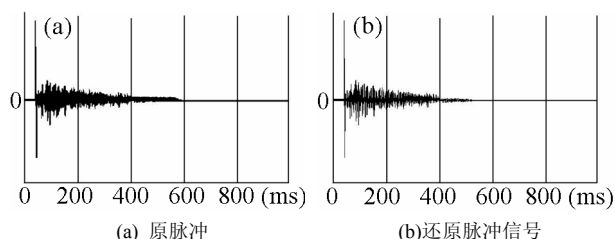


图4 根据虚声源分布计算得到的还原脉冲信号

Fig.4 Impulse response computed from image sound sources

现还原脉冲信号总体上与原信号相符,但精度仍然比原信号要差一些。也就是说,虽然相比于与一维线阵及二维面阵,三维立体阵的分辨率有了很大的提高,但由于其空间分辨率在不同的方向上具有不均匀性,因此这类阵列在室内声学领域早期使用的较多,随着声学测量技术的发展,逐渐被精度更高的传声器阵列所取代。

3 近期发展较快的几类传声器阵列

传统的传声器阵列虽然能够满足一定的室内声学测量要求,但是随着测量的要求越来越高,这些传声器阵列的不足越来越明显,一些新型的传声器阵列开始发展起来。最为突出的就是球型和圆型传声器阵列。

3.1 球型传声器阵列

2002年, Gover^[24]提出了一个32测点的球型传声器阵列(图5^[24]),针对低频和低频进行分开测量,并使用最佳波束形成处理方法处理信号。

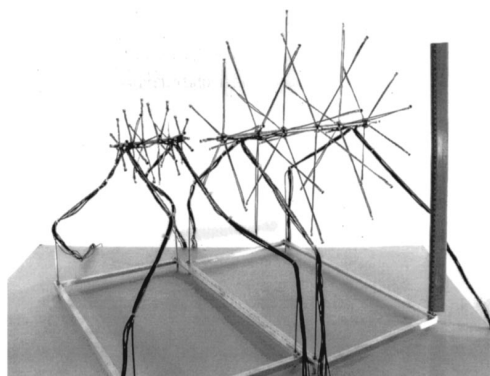


图5 32元球型传声器阵列

Fig.5 Sphere array with 32 microphones

Gover 将这一套系统运用到消声室测量,得到了对应测点的到达能量分布图和方向性信息。图6为消声室中仅有一个声源时传声器阵列接收到的测点能量的分布图, θ 和 φ 分别为竖直方向和水平方向的角。其中图6(a)是测量示意图,图6(b)表示到达能量的球面分布图,图中白色的小点表示声源预期的到达方向,图中能量分布表现为颜色的深

浅,颜色越深的地方能量越集中。图6(c)~6(e)分别为各个方向的平面图,小箭头所指的位置即声源预期到达方向。

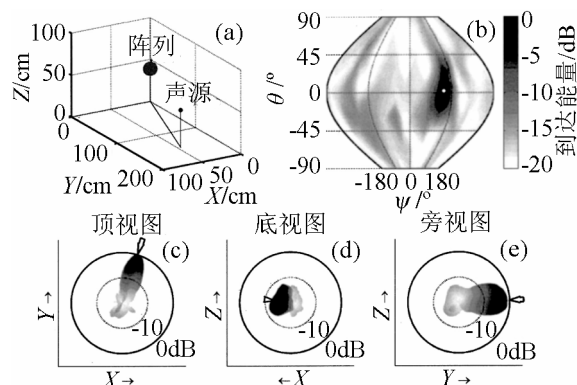


图6 消声室单个声源的能量分布图(1000~3300Hz)

Fig.6 Power distribution for single source in an anechoic chamber(1000~3300Hz)

此后 Rigelsford 和 Tennant^[25]设计了一个64个测点球型传声器阵列,进一步提高了测量精度,并将之用于声成像。但是由于这种开放性球型阵列的测点个数受到结构的限制,另一方面传声器匹配问题对精度的影响很大,同时采样中的频率混叠情况在高频时也较为明显,无法通过简便的方法进一步提高系统的性能。

为此, Rafaely^[26]提出了一种改进方法。将一个传声器与电动旋转系统连接沿球体表面定点采样,并使用线性扫频信号来进行重复测量,在数据处理中 Rafaely 使用了球谐函数来提高空间分辨率,并通过加上一个与频率有关的窗函数,使高频和低频空间分辨率的半角宽度保持不变,使其高频分辨率达

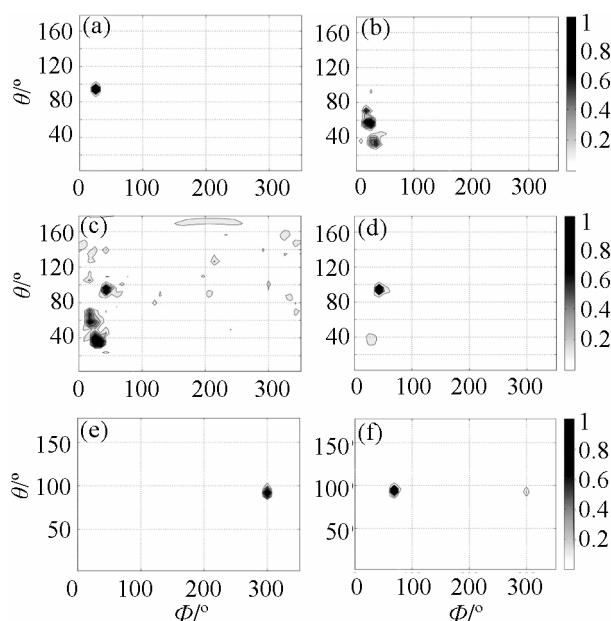


图7 某礼堂的平均能量分布图(2800Hz)

Fig.7 Averaged power distribution in an auditorium(2800Hz)

到 9° 。

将本测量系统用于实际测量某礼堂的声场方向性信息,得到了礼堂声场的方向性脉冲响应以及阵列输出的平均能量分布。图 7^[26]为该阵列测得的测点处平均能量分布图, θ 和 φ 分别为竖直方向和水平方向的角。图 7(a)为直达声能量分布,图 7(b)~7(c)为经天花板到达的第一次和第二次反射声,由图 7 可以发现第一次反射的能量分布较为集中,而第二次反射的能量分布则相对分散。图 7(d)~7(f)分别为经左舞台墙面、礼堂右墙面和礼堂左墙面反射后到达的平均能量的分布。

不过,该阵列重复测量耗时较长,影响了结果的稳定性,同时空间频率混叠的情况仍然存在,因此不适合现场实时测量。

总体而言,球型传声器阵列测量精度近似各向同性,计算相对简便;而且可以较为精确地测得房间内对应各个方向的方向脉冲响应。通过方向脉冲响应可以得到如扩散系数、早期衰减时间 EDT、混响时间、不同方向的声能比等厅堂音质客观参量^[27],从而分析关于各种不同房间的声学特性。

但由于球型阵列结构复杂,传声器不匹配问题较为严重,传声器位置摆放精确度很难控制,采样过程中频率混叠情况在高频很明显,传声器个数过多对声场产生了一定的影响,使测量精度受到严重的影响。

3.2 圆型传声器阵列及其等效系统

针对球型阵列结构太过复杂的问题,有人提出了圆型阵列的设计。圆型阵列是将传声器均匀分布在圆周上,其测量的复杂程度相对球型传声器阵列大为降低,且能够在半空间域内获得较为全面的声场信息,可以测量声场的方向信息,在声源定位研究方面也有较为突出的表现^[28]。比如 S.C.Chan^[29]等提出的同心圆环阵列,使用 28 个传声器按照一定规则组成 2 个半径不一样的同心圆环,来测量方向性脉冲响应。图 8^[29]是用该阵列测量两个位置相近并先后发出的信号的脉冲响应后所得到的声源方位估计图,图中 θ 和 φ 分别为竖直方向和水平方向的角。由图 8 可知,幅值出现两处峰值时所对应的角度即为声源的方位。但是这类测量方法仍然存在严重的传声器不匹配的问题。

针对此问题,提出了一种较易实现的旋转传声器的测量系统(如图 9 所示)^[30]。该系统由一个固定在转盘上的匀速旋转的无指向性传声器和一个可重复激发周期性信号的声源所组成,假设信号周期为 T ,若在 NT 时间内,转动平台刚好转过一周,分

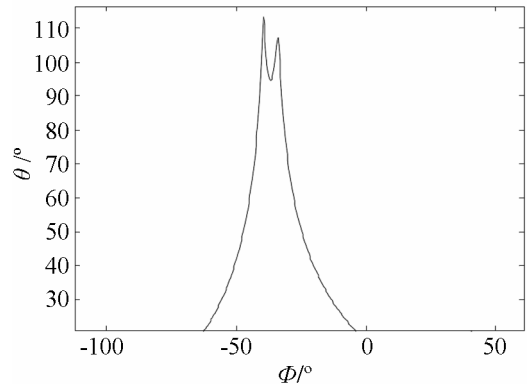


图 8 两个连续声源的方位估计

Fig.8 Direction pattern of two close sources

段后可得到 N 个持续时间为 T 的信号,其结果与 N 个传声器组成的圆型阵列测得的结果等效。但是该系统只能得到半空间域内的声场方向信息。为了解决这个问题,在旋转单传声器基础上又发展了旋转双传声器系统^[31],它类似一个双层的柱面传声器阵列,可以近似实现全空间域声场方向信息的测量。

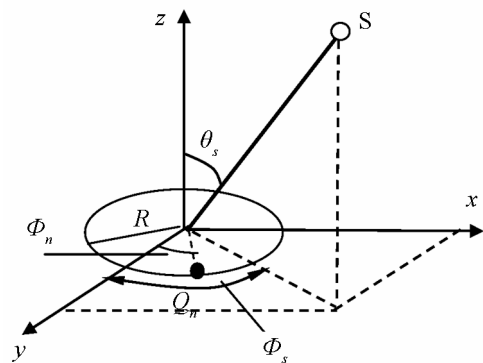


图 9 旋转单传声器系统

Fig.9 Rotation system with a single microphone

在一个礼堂中利用该系统进行实际测量,得到如图 10 所示^[31]的测点处的早期和后期反射能量分布。由图 10 可知,早期反射能量在中前方 30° 方向较为集中,而后期反射声能量在各个方向比较均匀。总体来说,旋转双传声器系统基本实现全空间

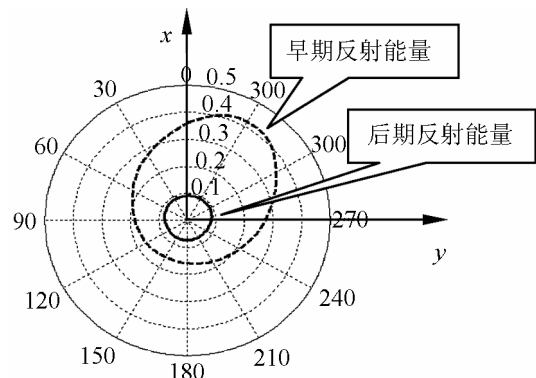


图 10 沿顶面反射及散射能量在 xy 平面内的投影

Fig.10 Directivity pattern at plane xy of early and later reflected impulses from ceiling

域声场信息的测量,可以用来进行厅堂音质客观参量的测量及研究,也可用于材料反射特性测量和声源定位等。其水平方向的分辨率较高且均匀对称,但由于其在竖直面并非各向同性,其垂直方向的分辨率与入射角度有关,且在高频时存在明显的旁瓣效应,其性能还有待另一步提高。

4 结 论

本文对室内声学测量中几种较为适用的传声器阵列的结构特点及其应用和优缺点进行了具体的分析比较。近年来,传声器阵列的发展较为迅速,在室内声学的测量领域的应用也逐渐普遍。其相关设计和信号处理方法以及将其与物理参量相对照应用于主观音质评价等问题上,仍然具有较大的发展空间,值得深入研究和探讨。

参 考 文 献

- [1] Park M, Rafaely B. Sound-field analysis by plane-wave decomposition using spherical microphone array[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2005, **118**, 3094-3103.
- [2] Driscoll J R, Healy D M. Computing fourier transforms and convolutions on the 2-sphere[J]. Adv. Appl. Math., 1994, **15**: 202-250.
- [3] Moreau S, Daniel J, Berlet S. 3D sound field recording with higher order ambisonics—Objective measurements and validation of a 4th order spherical microphone[A]. Proceedings of 120th AES Convention[C]. Paris, May 2006, 6857.
- [4] 齐娜, 孟子厚. 声频声学测量技术原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
QI Na, MENG Zihou. Technical theory of audio and acoustic measurement[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [5] Balmages I, Rafaely B. Open-sphere designs for spherical microphone arrays[J]. IEEE Trans. Audio, Speech and Lang. Proc, 2007, **15**: 727-732.
- [6] Okubo H, Otani H M, et al. A system for measuring the directional room acoustical parameters[J]. Appl. Acoust., 2000, **62**, 203-215.
- [7] Rafaely B. Plane-wave decomposition of the sound field on a sphere by spherical convolution[J]. J. Acoust. Soc. Amer., 2004, **116**(4): 2149-2157.
- [8] Pattern V R. Synthesis with null constraints for circular arrays of equally spaced isotropic elements[J]. IEE Proc-Microw Antennas Propag, 1996, **143**(2):103-106.
- [9] Meyer J, Elko G. A highly scalable spherical microphone array based on an orthonormal decomposition of the soundfield[J]. Proceedings ICASSP, 2002, **II**: 1781-1784.
- [10] Rafaely B. Analysis and design of dpherical microphone arrays[J]. IEEE Trans. Speech Audio Process, 2005, **13**: 135-143.
- [11] Abhayapala T D, Ward D B. Theory and design of high order sound field microphones using spherical microphone array[A]. Proc. ICASSP, vol. II[C]. 2002: 1949-1952.
- [12] Meyer J. Beamforming for a circular microphone array mounted on spherically shaped objects[J]. J. Acoust. Soc. Amer, 2001, **109**(1): 185-193.
- [13] Li Z, Duraiswami R. A Robust and self-reconfigurable design of spherical microphone array for multi-resolution beamforming[J]. Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing, 2005: 1137-1140.
- [14] 吕善伟. 天线阵综合[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1988.
- LÜ Shanwei. Synthesized antenn array[M]. Beijing: Beijing Aviation Institute Press, 1988.
- [15] Vorlander M, Mommertz E. Definition and measurement of random-incidence scattering coefficient[J]. Applied Acoustics, 2000, **60**(2): 1872199.
- [16] 董明. 基于传声器阵列语音增强方法研究[J]. 电声技术, 2008, **32**(3): 44-48.
DONG Ming. Research of speech enhancement based on microphone array[J]. Audio Engineering, 2008, **32**(3): 44-48.
- [17] 杨益新, 李博. 基于传声器阵列超增益波束形成的语音增强[J]. 电声技术, 2006, (1): 44-47.
YANG Yixin, LI Bo. Speech enhancement based on super gain beamforming of microphone array-frequency domain approach[J]. Audio Engineering, 2006, (1): 44-47.
- [18] 陈晓东. 近场平面声全息的测量和重构误差研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2004.
CHEN Xiaodong. A study on the errors existing in measurement and reconstruction of nearfield planar acoustic holography[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2004.
- [19] 吕钱浩. 矢量传感器阵列高分辨率方位估计技术研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, **25**(4): 440-445.
LÜ Qianhao. High resolution DOA estimation in beam space based on acoustic vector- sensor array[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, **25**(4): 440-445.
- [20] 林积微. 一种新型半球声源定位阵列[J]. 电子器件, 2008, **31**(4): 1377-1383.
LING Jiwei. New kind of planar microphone array in half 2 aerial acoustic source location[J]. Chinese Journal Of Electron Devices, 2008, **31**(4): 1377-1383.
- [21] 滕鹏晓. 基于多阵列数据融合的宽带多声源定位研究[J]. 应用声学, 2008, **27**(3): 167-172.
TENG Pengxiao. Localization of multiple wide-band acoustic sources based on data fusion of multiple arrays[J]. Applied Acoustics, 2008, **27**(3):167-172.
- [22] 王学青. 一种全空域无源定位的传声器阵列[J]. 电声基础, 2006, (2): 4-6.
WANG Xueqing. A novel microphone array for aerial acoustic passive location[J]. Audio Engineering, 2006, (2): 4-6.
- [23] 贺加添. 厅堂音质测量中的四传声器接受技术[J]. 声学技术, 1993, **12**(3): 26-29.
HE Jiatian. Four microphones receiving technical in auditorium acoustics measurement[J]. Technical Acoustics, 1993, **12**(3): 26-29.
- [24] Gover N, Ryan J G, Stinson M R. Measurement of directional properties of reverberant sound fields in rooms using a spherical microphone array[J]. J. Acoust. Soc. Am. 2004, **116**: 2138-2148.
- [25] Rigelsford J M, Tennant A. Acoustic imaging using a volumetric array[J]. Appl. Acoust. 2006, **67**: 680-688.
- [26] Rafaely B, Balmages I, Eger L. High-resolution plane-wave decomposition in an auditorium using a dual-radius scanning spherical microphone array[J]. J. Acoust. Soc. Am, 2007, 2661-2668.
- [27] Barron M. Objective measures of spatial impression in concert halls[A]. Proc. 11th International Congress on Acoustics[C]. Paris, 1983, 7: 105-108.
- [28] 邵怀宗. 基于麦克风阵列的声源定位研究[J]. 2004, **3**(4), 256-258.
SHAO Huaizong. Study on localization for speech based on microphone array [J]. Journal of YUNNAN Nationalities University(Natural Sciences Edition), 2004, **3**(4): 256-258.
- [29] Chan S C, Chen H H. Theory and design of uniform concentric circular arrays with frequency invariant characteristics[J]. IEEE, 2005, **4**: 805-808.
- [30] 赵跃英, 盛胜我, 赵松龄. 单传声器实现声场空间特性测量的研究[J]. 声学技术, 2007, **26**(6): 1205-1208.
ZHAO Yueying, SHENG Shengwo, ZHAO Songling. Research on measurement of special features of sound field using single microphone[J]. Technical Acoustics, 2007, **26**(6): 1205-1208.
Feng S Y, Zhao Y Y, Sheng SW, The performance of rotating dual-microphone system and its application[A]. 37th Inter-noise[C]. Oct. 26-29, 2008, Shanghai, China. R-A2.