

文章编号: 2095-2163(2021)03-0146-08

中图分类号: TP51

文献标志码: A

# 用于声学波束成形的传声器阵列设计与优化

殷光耀<sup>1</sup>, 金光灿<sup>1</sup>, 李 锦<sup>1</sup>, 刘 浩<sup>2</sup>

(1 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2 迅达(中国)电梯有限公司 亚太研发中心, 上海 201800)

**摘 要:** 针对目前传声器阵列对于中低频声源(尤其 200 Hz 以下低频)识别分辨率低的问题, 本文提出了一种基于波束成形算法的、对于中低频声源(150~2 500 Hz)识别性能较好的传声器阵列。该传声器阵列采用渐开线螺旋臂的形式, 多条螺旋臂围绕阵列中心均匀分布。采用田口法对阵列几何参数进行了选取和优化, 分析出最佳参数组合和几何参数对螺旋阵列性能影响的贡献度大小。在最佳参数组合下, 将本文提出的螺旋阵列与其他阵列结构进行对比分析。结果表明: 该螺旋阵列的最佳参数组合为传声器个数 30, 孔径 500 mm, 旋臂数 10, 基圆半径 110 mm; 对于阵列综合性能影响最大的是传声器个数, 贡献度为 28.93%; 其次是基圆半径和旋臂数, 贡献度分别为 22.76% 和 21.15%; 影响最小的是孔径, 贡献度为 16.75%。对比结果表明: 本文提出的阵列波束宽度系数  $C_{BW}$  值最小, 为 433.590 m/Hz, 分辨性能最佳; 动态范围均值为 7.03 dB, 标准差为 2.88 dB, 动态性能良好。

**关键词:** 传声器阵列设计; 声学波束成形; 中低频噪声; 田口法

## Design and optimization of microphone array for acoustic beamforming

YIN Guangyao<sup>1</sup>, JIN Guangcan<sup>1</sup>, LI Jin<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 Asia Pacific R&amp;d Center of Schindler (China) Elevator Co., LTD., Shanghai 201800, China)

**[Abstract]** Aiming at the problem that the current microphone array has low recognition resolution for medium and low frequency sound sources (especially low frequencies below 200 Hz), this paper proposes a microphone array design based on beamforming algorithm that has better recognition performance for medium and low frequency sound sources (150 ~ 2 500 Hz). The microphone array adopts involute as the form of spiral arm, and multiple spiral arms are evenly distributed around the center of the array. The Taguchi method is used to select and optimize the geometric parameters of the array, and the optimal combination of parameters and the contributions of geometric parameters to the performance of the spiral array are analyzed. Using the best combination of parameters, the spiral array proposed in this paper is compared with other array designs. The results show that the best parameter combination of the spiral array is 30 microphones, 500 mm aperture, 10 arms, and base circle radius 110 mm; the parameter that has the greatest impact on the overall performance of the array is the number of microphones, with a contribution of 28.93%; The base radius and the number of arms contribute 22.76% and 21.15%, respectively; the smallest impact is the aperture, which contributes 16.75%. The comparison results show that the array beamwidth coefficient value proposed in this paper is the smallest, 433.590 m/Hz, and the resolution performance is the best; the average dynamic range is 7.03 dB, the standard deviation is 2.88 dB, and the dynamic performance is good.

**[Key words]** microphone array design; acoustic beamforming; mid-low frequency noise; Taguchi method

## 0 引 言

基于波束成形算法的传声器阵列布局, 直接决定了其对噪声源定位与识别的性能, 目前被广泛应用于噪声研究领域。经典的传声器阵列空间布置是阵元间距相同的规则阵列, 例如 Li 等人<sup>[1]</sup>研究的直线阵, 夏阳等人<sup>[2]</sup>研究的矩形阵和 Elisabet 等人<sup>[3]</sup>研究的圆形阵等。但规则几何形状的阵列, 在空间域上会出现空间混叠现象, 从而形成干扰主瓣识别的栅瓣<sup>[4]</sup>。为了解决栅瓣问题, Dougherty<sup>[5]</sup>、Arcondoulis 等人<sup>[6]</sup>使用特定数学定义图形(例如螺

旋线)来构建不规则传声器阵列。螺旋形阵列确保了传声器之间间距的非冗余性, 改善了严重的空间混叠现象, 因此螺旋阵列设计在声学波束成形应用上十分流行。

单螺旋臂设计中, 阿基米德螺旋阵列<sup>[7]</sup>运用简单的螺旋公式, 对螺旋半径和圈数进行调整设计; Dougherty<sup>[5]</sup>提出了 Dougherty 对数螺旋线阵列; Arcondoulis 等人<sup>[6]</sup>提出一种基于指数螺旋公式且传声器更多集中在阵列中心的阵列。多螺旋臂阵列也是流行的螺旋阵列设计方法。在 Dougherty 多螺旋臂阵列设计<sup>[8]</sup>中, 提出了基于 Dougherty 指数螺旋线

作者简介: 殷光耀(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 噪声与振动。

通讯作者: 殷光耀 Email: emily929@126.com

收稿日期: 2020-10-28

的多螺旋臂设计;Christensen<sup>[9]</sup>和 Hald 等人<sup>[10]</sup>提出了 B&K 的多臂设计,多条螺旋臂呈辐条状分布;Underbrink<sup>[7-8]</sup>多螺旋阵列在 Dougherty 阵列的基础上进行相应的改进,其中传声器均分了阵列的孔径面积。以上阵列设计,主要关注于阵列结构的设计,较少涉及阵列几何参数的选取和优化方面的研究。

在生活、工业生产及工程应用中,中低频噪声是一种非常常见的噪声,例如交通噪声通常就是在 4 000 Hz 以下的中低频带范围内<sup>[11]</sup>。目前,对中低频噪声尤其是 200 Hz 以下的低频段识别已经成为噪声控制研究领域的一大难题。为了提高对中低频噪声源识别的分辨率,常用的方式是扩大传声器间距<sup>[11]</sup>,但会带来阵列孔径尺寸偏大的问题,会限制传声器阵列在测试空间有限场合下的使用,例如:封闭测试环境的风洞气动声学测试<sup>[12]</sup>。因此,针对中低频声源识别进行传声器阵列设计时,阵列几何参数的选取及优化至关重要。Amaral 等人<sup>[12]</sup>针对最低频率为 800 Hz 的低频带进行识别时,提出了一种螺旋阵列且对阵列的几何参数进行了选取,最后对比分析不同阵列的性能,结果表明:在 800~20 000 Hz 频带内,文献中提出的阵列设计分辨性能优于参考阵列。但该文献缺少参数选取的依据。Fonseca 等人<sup>[13]</sup>基于阿基米德通用方程提出一种最大化动态范围响应的阵列且进行了参数的选取及优化。但该文献只对部分参数进行研究且没有体现出不同参数对阵列性能的影响大小。

综上所述,本文针对 150~2 500 Hz 的中低频声源进行了传声器阵列的设计与优化,提出了一种多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列。本文采用田口(Taguchi)法对不同几何参数下的阵列进行了正交实验,分析出最佳的阵列参数组合;采用 Taguchi 中的 ANOVA 方法分析出阵列几何参数对于阵列性能贡献度的大小。在最佳参数组合下,对比分析了本文提出的传声器阵列与其他 6 种参考阵列的性能,分析结果表明:本文提出的阵列波束宽度系数最小、分辨性能最佳,同时动态性能良好。

## 1 阵列结构的设计

本文提出的传声器阵列采用多螺旋臂的形式,螺旋臂是环绕阵列中心均匀分布的。螺旋线的线型采用渐开线,将传声器分布在渐开螺旋线上。在阵列设计中,引入传声器环的概念,传声器分布在传声器环与渐开线螺旋臂的相交位置。

图 1 为本文设计的多螺旋臂渐开线式的传声器

阵列结构示意图。在进行阵列设计时需要确定以下参数:阵列最大孔径为  $D$ ,即最外圈传声器环的直径,将其半径表示为  $r_{\max}$ ;最小传声器环的半径  $r_b$ (最小传声器环即形成渐开线的基圆);传声器环的数目  $Q_n$ ;螺旋臂数目  $N_a$ ;每个传声器环上的传声器数目  $N_m$ 。

最内部的传声器环上传声器的向径和角度为:

$$r_{1,m} = r_b, \quad m = 1, \dots, N_m, \quad (1)$$

$$\theta_{1,m} = \frac{2\pi}{N_a}(m-1), \quad m = 1, \dots, N_m, \quad (2)$$

该环上的传声器为各渐开线的起点,各渐开线由初始渐开线(其起点在基圆圆心右侧的水平位置,并将其作为基准螺旋臂)环绕基圆圆心旋转而来。从第二个传声器环开始,各环传声器向径为:

$$r_{n,m} = r_b + \frac{r_{\max} - r_b}{Q_n - 1}(n-1), \quad n = 1, \dots, Q_n, m = 1, \dots, N_m, \quad (3)$$

根据渐开线的规律,以基准螺旋臂为初始位置(基准螺旋臂上的传声器为各环的第一个传声器),可以得出传声器角度为:

$$\theta_{n,m} = -\frac{\frac{2\pi}{N_a} \frac{r_b}{r_{n,m}}}{\frac{r_b}{r_{n,m}} \cos \frac{2\pi}{N_a} \frac{r_b}{r_{n,m}}} - \cos^{-1} \frac{\frac{2\pi}{N_a} \frac{r_b}{r_{n,m}}}{\frac{r_b}{r_{n,m}}} + \frac{2\pi}{N_a}(m-1), \quad n = 2, \dots, Q_n, m = 1, \dots, N_m. \quad (4)$$

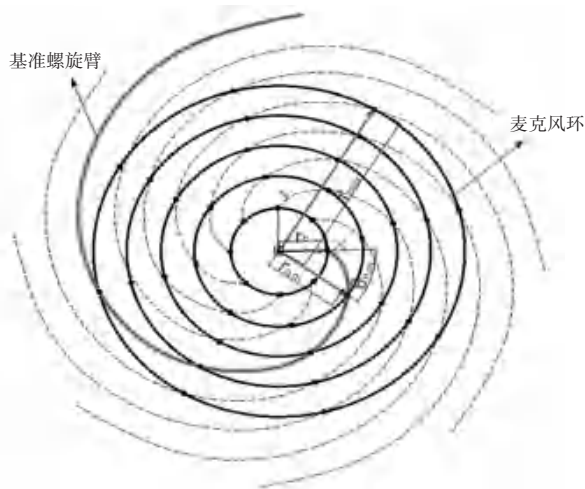


图 1 传声器阵列结构示意图(红色为基准螺旋臂)

Fig. 1 Schematic diagram of microphone array (the red spiral arm as the reference)

选定几何参数数值时,依次确定:阵列孔径和基圆的大小,传声器和螺旋臂的数目,可以依次得到:最大传声器环、最小传声器环的半径;每个螺旋臂上传声器的数目,传声器环环数;传声器的向径和角度。

## 2 阵列结构参数的选取及优化

### 2.1 阵列性能评价与仿真环境

图2为传声器阵列扫描原理,为了分析位于 $X_s$ 处的点声源,使用包含 $N$ 个传声器的阵列,第 $i$ 个传声器位置为 $X_i$ ,选取阵列中心位置 $X_0$ 作为参考点,则第 $i$ 个传声器处复数值声压 $P$ 为:

$$p(X_i) = a(X_i, X_0, X_s) q(X_s), \quad (5)$$

$$a(X_i, X_0, X_s) = \frac{r_{s,0}}{r_{s,i}} e^{-jk(r_{s,i} - r_{s,0})}, \quad (6)$$

其中, $a(X_i, X_0, X_s)$ 为传递函; $q(X_s)$ 为源信号激振函数; $r_{s,i} = |X_s - X_i|$ 表示声源和传声器的距离; $r_{s,0} = |X_s - X_0|$ 表示声源和阵列中心的距离; $K$ 为波数; $j = \sqrt{-1}$ 。

波束成形的基本原理是利用权系数向量对各传声器的声压值进行延迟累加。权系数向量 $h(X_i)$ 称为扫描向量,是假定的源位置 $X_i$ 产生的 $a(X_i, X_0, X_i)$ ,输出结果为:

$$p_F(X_i) = h(X_i)^H p(X_i), \quad (7)$$

其中,上标 $H$ 代表了厄米特转置, $p_F$ 是代表波束成形的输出值。

波束成形阵列对于近场声源识别时,波束对声源所在平面进行扫描并利用算法得到波束功率谱 $B$ ,功率谱 $B$ 用来构建声源映射图。使用传声器信号的互相关矩阵 $R$ ,功率谱 $B$ 可以写成:

$$B(X_i) = E[p_F(X_i) p_F(X_i)^*] = h(X_i)^H E(pp^H) h(X_i) = h(X_i)^H R h(X_i), \quad (8)$$

其中, $E$ 表示期望值,上标“\*”表示复共轭。

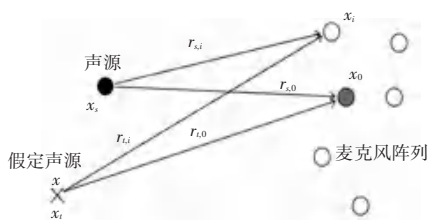


图2 传声器阵列扫描原理

Fig. 2 Principle of microphone array scanning

图3展示了点声源的映射图,其中主瓣波束宽度是指主瓣峰值以下3 dB处对应的主瓣直径,动态范围是指主瓣峰值和最大副瓣峰值的差值。Brooks等人<sup>[14]</sup>提出波束宽度的估计公式为:

$$BW(f) \cong C_{BW} \frac{h}{D} f^{-1}, \quad (9)$$

其中, $BW$ 是阵列波束宽度; $h$ 是阵列与声源所在平面的距离; $D$ 是阵列孔径; $f$ 是频率; $C_{BW}$ 是定义

所有频率下阵列波束宽度的系数。

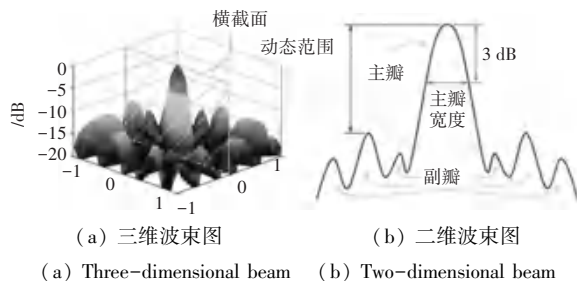


图3 波束宽度和动态范围定义

Fig. 3 Definitions of beamwidth and dynamic range

对于分辨性能的衡量,采用系数 $C_{BW}$ 可对不同阵列进行对比, $C_{BW}$ 值越低,主瓣波束宽度越低,阵列分辨性能越好。对于动态性能的衡量,本文采用计算所选频带内各子带所有动态范围大小的均值 $\overline{DR}$ 和标准差 $\sigma_{DR}$ 来估计阵列的整体动态范围性能。阵列好的整体动态性能包含了高水平值和低离散程度,对应于高均值和低标准差值。

本文利用单极点声源进行阵列性能研究,设置仿真环境。仿真时将点声源置于阵列中心点正相对的位置,距阵列0.5 m,信噪比为10 dB。将传声器平面和扫描平面建立为 $X-Y$ 平面,传声器阵列平面的 $Z$ 坐标为0 m,则扫描平面的 $Z$ 坐标为0.5 m。扫描平面上各点的坐标构成规则网格,即:

$$x \in [-1 \ 1] \quad \Delta x = 0.05 \text{ m}, \quad (10)$$

$$y \in [-1 \ 1] \quad \Delta y = 0.05 \text{ m}, \quad (11)$$

$$z \equiv 0.5 \text{ m}. \quad (12)$$

### 2.2 阵列参数正交实验

田口(Taguchi)法是Taguchi和Konishi为了解决质量、成本、工艺等工程问题的优化而提出的一种比穷举法更高效能、更系统的实验设计工具,以阶乘实验的方式执行实验和分析结果。

由第1节的内容可知,传声器数目、阵列孔径半径、旋臂数目和渐开螺旋线基圆半径这4个参数是设计多螺旋臂渐开线式的阵列的关键因素。因此,本文将上述4个参数作为控制因子设置水平值,详见表1;采用 $L(4^4)$ 正交实验组对不同参数组合下的阵列结构进行仿真,正交表见表2。仿真环境参照预先设置的环境不变。便于分析结果,计算信噪比( $S/N$ )并采用ANOVA方法分析这4个几何参数对于阵列性能影响的贡献度大小。

根据正交实验表,对16组不同参数组合下的阵列进行仿真实验。对实验结果进行性能的衡量,计算波束宽度系数、动态范围均值和动态范围标准差的数值,衡量指标数值见表3。

表1 参数水平表

Tab. 1 Table of parameter levels

水平编号	几何参数			
	传声器个数 $A$	孔径 $B(r_{\max}/\text{mm})$	旋臂数 $C$	基圆半径 $D(r_b/\text{mm})$
1	30	300	6	90
2	60	400	8	100
3	90	500	10	110
4	120	600	12	120

表2 正交实验表

Tab. 2 Table of orthogonal tests

实验编号	几何参数			
	传声器个数 $A$	孔径 $B(r_{\max}/\text{mm})$	旋臂数 $C$	基圆半径 $D(r_b/\text{mm})$
1	30	300	6	90
2	30	400	8	100
3	30	500	10	110
4	30	600	12	120
5	60	300	8	110
6	60	400	6	120
7	60	500	12	90
8	60	600	10	100
9	90	300	10	120
10	90	400	12	110
11	90	500	6	100
12	90	600	8	90
13	120	300	12	100
14	120	400	10	90
15	120	500	8	120
16	120	600	6	110

表3 正交实验结果

Tab. 3 Results of orthogonal tests

编号	$C_{BW}/(\text{m} \cdot \text{Hz}^{-1})$	动态范围均值	动态范围标准差	编号	$C_{BW}/(\text{m} \cdot \text{Hz}^{-1})$	动态范围均值	动态范围标准差
		$\overline{DR}/\text{dB}$	$\sigma_{DR}/\text{dB}$			$\overline{DR}/\text{dB}$	$\sigma_{DR}/\text{dB}$
1	361.293	7.170	4.486	9	376.996	8.00	4.92
2	438.702	6.897	3.810	10	449.806	9.01	5.05
3	433.590	7.030	2.880	11	518.211	9.66	4.61
4	543.969	6.209	2.790	12	622.631	9.75	4.49
5	383.531	7.720	4.910	13	383.536	8.47	5.53
6	429.244	8.504	4.380	14	464.519	9.65	5.57
7	522.253	8.810	4.230	15	503.895	10.02	4.61
8	554.498	8.980	3.730	16	583.932	10.21	4.25

波束宽度系数  $C_{BW}$  值越低,波束宽度越低,分辨率越高;阵列的动态范围的均值越大、标准差值越小,阵列的动态性能越好。为了综合考虑三者,本文构建一个能够包含所有性能衡量指标的单调函数,该单调函数如下所示:

$$M(C_{BW}, \overline{DR}, \sigma_{DR}) = \frac{C_{BW} \cdot \sigma_{DR}}{\overline{DR}}, \quad (13)$$

其中,  $C_{BW}$  是波束宽度系数,  $\sigma_{DR}$  是动态范围标准差,  $\overline{DR}$  是动态范围均值。式(13)的综合函数即

衡量指标运算的结果,最终  $M$  函数的结果越小,代表阵列综合性能越好。对表3中16组阵列下的性能衡量指标进行  $M$  函数求解,其结果见表4。

在表4中,16组阵列性能衡量指标的  $M$  函数值的基础上,采用 Taguchi 方法进行分析。图4为田口(Taguchi)法过程示意图,绘制参数影响统计图的步骤为:计算数据均方值,并转变为信噪比和平均信噪比值,再绘制参数影响统计图。信噪比( $S/N$ )起源于通信领域,Taguchi方法将其功能扩展到各个领域。

表 4 M 函数计算结果

Tab. 4 Results of function M calculation

实验编号	函数值	实验编号	函数值	实验编号	函数值
1	226.047	7	250.753	12	286.730
2	242.345	8	230.320	13	250.408
3	177.630	9	231.853	14	268.121
4	244.431	10	252.111	15	231.832
5	243.930	11	247.304	16	243.067
6	221.083				

在本文中,  $S/N$  用于评价控制因子对于阵列综合性能的影响, 信噪比值越大越好。由于  $M$  函数的结果越小, 阵列综合性能越好, 所以计算  $S/N$  时采用望小公式:

$$S/N = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \quad (14)$$

其中,  $y_i$  是第  $i$  个阵列性能指标数值,  $n$  为实验次数。

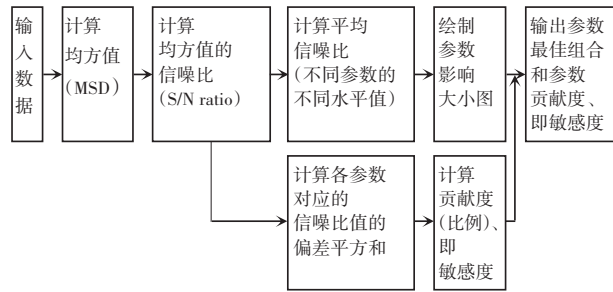


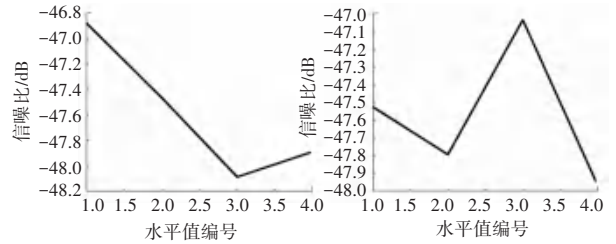
图 4 田口 (Taguchi) 法过程示意图

Fig. 4 Diagram of Taguchi method process

图 5 为从  $M$  函数值出发的参数影响统计图, 横坐标代表各参数的水平值编号, 纵坐标为信噪比大小。图 5(a)、(b)、(c)、(d) 反映了传声器的数目、阵列孔径半径、旋臂数目和渐开螺旋线的基圆半径四种控制因子在不同水平值下的信噪比大小, 每个控制因子的最高信噪比对应的参数取值即为最佳参数值。综上, 阵列性能最佳的最优参数组合是传声器个数 30, 孔径 500 mm, 旋臂数 10, 基圆半径 110 mm。

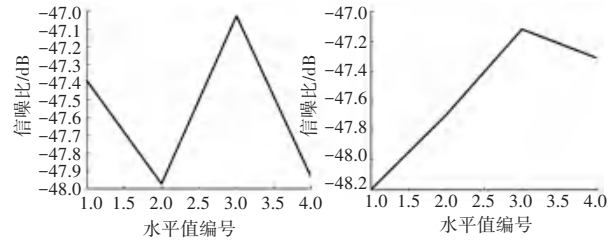
ANOVA 方差分析用于分析各控制因子 (几何参数) 对阵列综合性能的贡献度大小。图 4 中也包含 ANOVA 方差分析的步骤: 将各参数对应的信噪比进行偏差平方和的计算, 并计算各参数偏差平方和与所有参数的偏差平方和总和的比例, 即为参数贡献度。表 5 为几何参数对于  $M$  函数的贡献度, 在本文阵列的几何模型中, 对于综合性能影响最大的是传声器个数, 贡献度为 28.93%; 其次是基圆半径

和旋臂数, 贡献度分别为 22.76% 和 21.15%; 影响最小的是孔径, 贡献度为 16.75%。



(a) 传声器个数影响图 (b) 孔径影响图

(a) Impact of microphone number (b) Impact of array aperture



(c) 旋臂数影响图 (d) 基圆半径影响图

(c) Impact of spiral number (d) Impact of base circle radius

图 5 参数影响统计图

Fig. 5 Graph of parametric impact

表 5 M 函数值对应的参数贡献度

Tab. 5 The parameter contribution to the value of function M

参数	指标		
	自由度	偏差平方和	贡献度/%
传声器个数 A	3	3.42	28.93
孔径 $B(r_{max}/mm)$	3	1.98	16.75
旋臂数 C	3	2.50	21.15
基圆半径 $D(r_b/mm)$	3	2.69	22.76
误差	3	1.23	10.41
合计	15	11.82	100

### 3 仿真对比与分析

对于提出的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列设计方案, 本文选定阵列的最优参数水平值组合作为参数值所形成的阵列结构如图 6 所示, 阵列参数

为:传声器个数 30, 孔径( $r_{max}$ ) 500 mm, 旋臂数 10, 基圆半径 ( $r_b$ ) 110 mm。

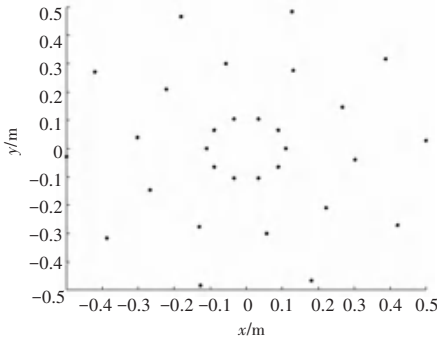


图 6 本文设计阵列的传声器位置

Fig. 6 Microphone locations of the designed array in this paper

图 7 是本文阵列在不同频率下的波束映射图, 可以反映出点声源空间分布的变化。从中可以看出波束主瓣宽度随着频率增加而减小, 而副瓣水平随着频率增加而变大, 而且可以看出副瓣水平呈现对称分布。

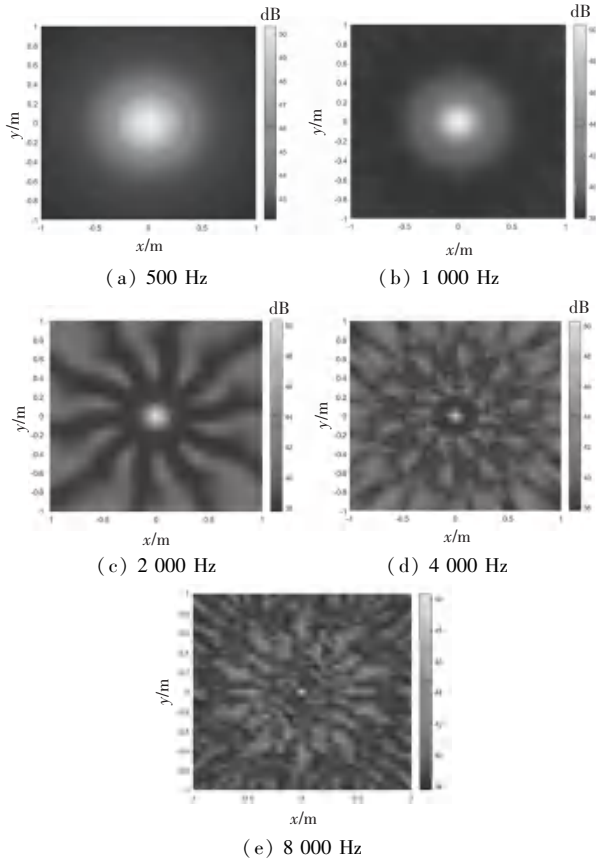


图 7 不同频率下的阵列波束映射图

Fig. 7 Beam mapping of the designed array at different frequencies

为了进一步研究本文提出的阵列性能, 统一采用上述最佳阵列几何参数组合, 即传声器个数 30, 孔径 ( $r_{max}$ ) 500 mm, 旋臂数 10, 基圆半径 ( $r_b$ ) 110 mm 这种参数组合, 对本文提出的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列和其他 6 种参考阵列进行对比

分析, 仿真环境按照预先设置的不变。图 8 展示了用以对比研究的 6 种参考阵列<sup>[15]</sup>, 分别为: Archimedes 螺旋阵列<sup>[7]</sup>, Arcondoulis 螺旋阵列<sup>[6]</sup>, B&K 多臂阵列<sup>[9-10]</sup>, Dougherty 螺旋阵列<sup>[5]</sup>, Dougherty 多螺旋臂阵列<sup>[7]</sup> 和 Underbrink 多螺旋臂阵列<sup>[7-8]</sup>。

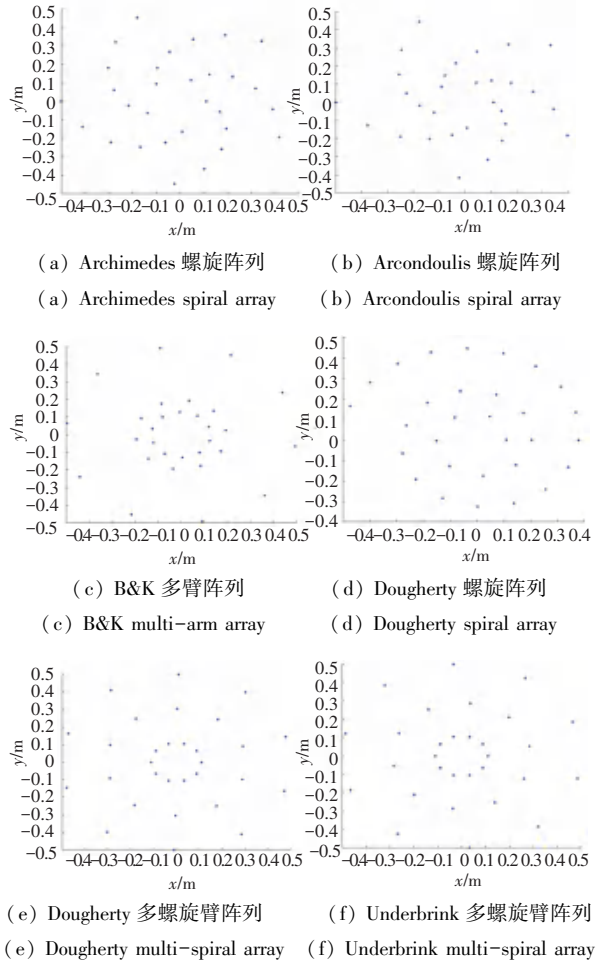


图 8 参考阵列

Fig. 8 The reference array

图 9 为本文所提阵列和 6 种参考阵列的仿真结果图, 从图 9(a)、图 9(c) 中可知: 本文的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列相对参考阵列而言, 在 150 Hz~2 500 Hz 的中低频带内 (尤其 200 Hz 以下), 波束宽度总体上明显下降, 因此分辨率性能得到提高。根据表 6 中的  $C_{BW}$  值来看, 多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列的  $C_{BW}$  值为 433.590 m/Hz, 在所有阵列  $C_{BW}$  指标中最小。因此, 根据 2.1 节中的定义, 本文提出的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列在中低频带内综合分辨率性能最佳。

图 9(b)、图 9(d) 中反映的动态范围可以看出: 所有阵列的动态范围在 500 Hz 以上频带中表现得相对平稳, 500 Hz 以下动态范围都迅速下降。根据

表6中的动态范围均值和标准差,本文设计阵列的动态范围的均值为7.03 dB,标准差为2.88 dB。因

此,根据2.1节中动态性能评价标准,本文提出的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列动态性能良好。

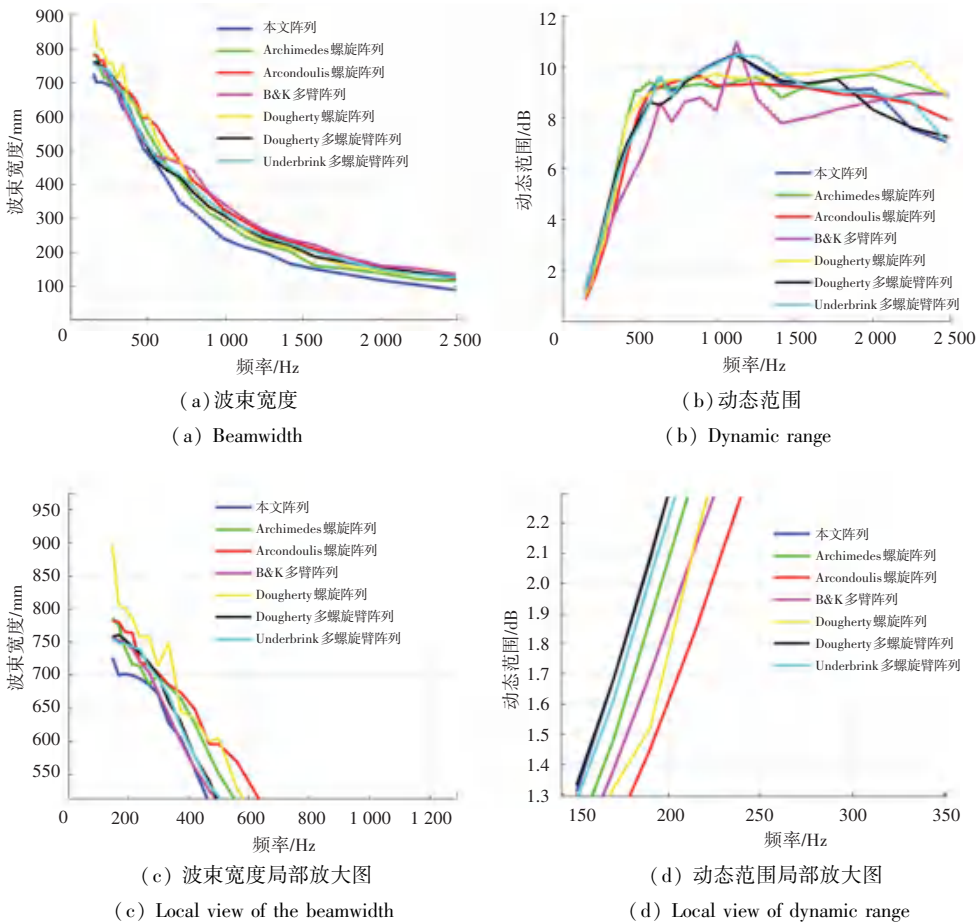


图9 阵列性能对比

Fig. 9 Comparison of array performance

表6 不同阵列的波束宽度和动态范围性能

Tab. 6 Beamwidth and dynamic range performance of different arrays

阵列	$C_{BW}/(m \cdot Hz^{-1})$	动态范围均值 $\overline{DR}/dB$	动态范围标准差 $\sigma_{DR}/dB$
多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列	433.590	7.03	2.88
Archimedes 螺旋阵列	485.993	7.17	2.97
Arcondoulis 螺旋阵列	538.387	6.68	3.11
B&K 多臂阵列	530.045	6.22	2.83
Dougherty 螺旋阵列	519.404	7.16	3.19
Dougherty 多螺旋臂阵列	502.010	6.96	2.83
Underbrink 多螺旋臂阵列	508.335	6.99	2.95

## 4 结束语

(1)本文提出了多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列的几何结构,几何结构中传声器数目、阵列孔径半径、旋臂数目和渐开螺旋线的基圆半径四个核心几何参数构成,选定核心参数值即可确定具体的传声器阵列形式。

(2)本文提出的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列性能最佳的最优参数组合是传声器个数30,孔径( $r_{max}$ )500 mm,旋臂数10,基圆半径( $r_b$ )110 mm。在本文阵列的几何模型中,对于综合性能影响最大的是传声器个数,贡献度为28.93%;其次是基圆半径和旋臂数,贡献度分别为22.76%和21.15%;影响最小的是孔径,贡献度为16.75%。

(3)与其他不同阵列设计的性能相比,本文提出的多螺旋臂渐开线形式的传声器阵列在150 Hz~2 500 Hz 内的分辨性能最佳,对应的波束宽度系数 $C_{BW}$  值为433.590 m/Hz;动态性能良好,动态范围均值为7.03 dB,标准差为2.88 dB。综上,阵列中低频性能得到了一定的提高。

## 参考文献

- [1] LI Changlei, BENESTY J, CHEN Jingdong. Beamforming based on null-steering with small spacing linear microphone arrays[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 143(5): 2651-2665.
- [2] 夏阳, 张元元. 基于矩形麦克风阵列的改进的GCC-PHAT语音定位算法[J]. 山东科学, 2011, 24(6):75-79.
- [3] ELISABET T B, JACOBSEN F, GRANDE E F. Beamforming with a circular microphone array for localization of environmental noise sources [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2010, 128(6): 3535-3542.
- [4] HALD J, CHRISTENSE N J J. A novel beamformer array design for noise source location from intermediate measurement distances [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, 112(5):2448.
- [5] Dougherty R P. Spiral-shaped array for broadband imaging; US, 5, 838, 284 [P]. 1998-11-17.
- [6] ARCONDOULIS E J G, DOOLAN C J, ZANDER A C, et al. Design and calibration of a small aeroacoustic beamformer [C]// Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Congress on Acoustics (ICA 2010). Sydney, Australia: the Australian Acoustical Society, 2010:1-8.

- [7] MUELLER T J, ALLEN C S, BLAKE W K, et al. Aeroacoustic measurements[M]. Berlin: Springer, 2002.
- [8] Underbrink JR. Circularly symmetric, zero redundancy, planar array having broad frequency range applications; US, 6, 205, 224 [P]. 2001-03-20.
- [9] Christensen J J, Hald J. Beamforming array of transducers: US, 7, 098, 865 [P]. 2006-08-29.
- [10] HALD J, CHRISTENSEN J J. Technical review beamforming [J]. Measurement, 2004, 12(1):15-28.
- [11] BJELIĆ M, STANOJEVIĆ M, PAVLOVIĆ DS, et al. Microphone array geometry optimization for traffic noise analysis [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 141(5):3101-3104.
- [12] AMARAL F R, RICO J C S, MEDEIROS M A F. Design of microphone phased arrays for acoustic beamforming [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences & Engineering, 2018, 40(7):354.
- [13] FONSECA W D, RISTOW J P, SANCHES D G, et al. A different approach to archimedean spiral equation in the development of a high frequency Array [C]//II SAE Brasil International Noise and Vibration Congress - SAE Technical Paper. Florianópolis, SC, Brazil; SAE International, 2010:1-10.
- [14] BROOKS T F, HUMPHREYS W M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (damas) determined from phased microphone arrays [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(4-5):856-879.
- [15] PRIME Z, DOOLAN C. A comparison of popular beamforming arrays [C]// Proceedings of Acoustics 2013 Victor Harbor: Science Technology and Amenity, Annual Conference of the Australian Acoustical Society. Australian; Australian Acoustical Society, 2013:1-7.

## (上接第145页)

- [8] 赵青, 余元辉. 基于分层特征化网络的三维人脸识别[J]. 计算机应用, 2020, 40(9):2514-2518.
- [9] 查明明, 刘志平. 《人工智能的数学基础》课程建设研究[J]. 教育现代化, 2020, 7(13):77-78, 81.
- [10] 陈向群, 郭晓. 人工智能的量子方法及其辨析[J]. 科学技术哲学研究, 2019, 36(2):8-13.
- [11] 闫坤如. 人工智能理解力悖论[J]. 云南社会科学, 2020(3):31-36, 186-187.
- [12] 杜严勇. 恐怖谷效应探析[J]. 云南社会科学, 2020(3):37-44, 187.
- [13] 王凯宁. 量子机器学习与人工智能的实现-基于可计算性与计算复杂性的哲学分析[J]. 科学技术哲学研究, 2019, 36(6):32-36.

- [14] 周美玲, 郭晓磊. 人工智能在计算机网络技术中的运用[J]. 开封大学学报, 2015, 29(2):92-93.
- [15] (德) THOMAS R. 机器崛起: 遗失的控制论历史 [M]. 王晓, 郑心湖, 王飞跃, 译. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [16] 尚凤森. 意识神经生物学的哲学研究 [D]. 太原: 山西大学, 2018.
- [17] 吴浩扬, 吴裕远. 神经芯片技术的研究进展 [J]. 生物化学与生物物理进展, 2004(1):89-93.
- [18] 崔庚寅, 张翠英, 崔凌浩. 人脑: 自然科学的最后堡垒 [M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2012.
- [19] 王志良, 李明, 谷学静. 脑与认知科学概论 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011.