一种强指向性基阵的设计及声场计算*

胡继文^{1,2}t 钱盛友¹

(1湖南师范大学物理与信息科学学院 长沙 410081)(2南华大学数理学院 衡阳 421001)

摘要 提出了一种新的基阵:将90个小圆环分布于半径不同的5个同心圆周上,对每个小圆 环采用了抛物型的振速加权。通过改变阵元尺寸、间距等参数研究了声场特征的变化。计算 结果表明,该基阵模型具有非常高的指向性和抑制旁瓣的能力。通过优化阵元组合方式和参 数,可获得最佳的声压分布效果。

关键词 基阵,数值计算,声压分布

Design and sound field computation of an array with intense directivity

HU Ji-Wen^{1,2} QIAN Sheng-You¹

(1 College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081) (2 College of Mathematics and Physics, Nanhua University, Hengyang 421001)

Abstract A new kind of array is proposed:90 small rings are distributed at five concentric circles of different radii, where each small ring vibrates with parabolic velocity weighting. Variation of sound field is studied with parameters of the array size, spacing and others. The results show that this array has a very intensive directivity and an ability of suppressing side-slobs. An optimum distribution of sound field can be obtained by optimizing the array combination and parameters.

Key words Array, Numerical computation, Sound pressure distribution

1 引言

高频、高分辨率、强指向性、低旁瓣是现代 声纳、探井等设备中重要的声参指标。关于基 阵指向性及声压计算的研究非常多。单就圆 环型而言,有同心圆环^[1,2]与小圆环自由组 合^[3]两种基阵类型。为获取高指向性、低旁瓣 基阵,通常采用改变阵元尺寸、组合方式及振 幅加权等手段,即所谓的"经验法";另一方法 是事先根据对指向性的目标要求,采用非线性 规划法求得阵元数量、尺寸、振速分布等参数, 即所谓的"综合法",它们各有其优点和不足。 文献[3]主要采用了"经验法",研究了小圆环 按矩形方式组合成基阵时阵元尺寸、间距及频 率等参数对指向性分布的影响,就其指向性分 布来看并不太理想。本文提出将小圆环分布于

²⁰⁰⁷⁻⁰⁶⁻¹² 收稿; 2007-10-17 定稿

^{*} 湖南省自然科学基金项目(02JJY2059)

作者简介:胡继文(1971 -),男,博士生,讲师,主要从事超声及应用研究。

钱盛友(1965 –),男,博士,教授,博士生导师。

[†] 通信联系人 E-mail hjw570@ hotmail.com

2

2.1 模型设计

圆环组合而成的基阵模型。

多层的同心圆周上组合成一种基阵模型。利用 非线性规划公式通过计算使阵元振速分布满足 强指向性、低旁瓣的要求,并通过改变阵元尺 寸、数量等参数以满足基阵优化的需要;计算了 各参数条件下的声压并进行了详细分析。



(a)单个圆环

(b)90个小圆环组成的基阵(图中只画了部分小圆环)

图1 阵元及基阵模型

(c)平面上任意位置外的小圆环

图 1 (a) 为单个小圆环,ρ₂ 为小圆环外半 径,ρ₁为其内半径。(b) 为小圆环基阵,其中相 邻两圆周间距相等且为 d,,小圆环圆心位于同 心圆周上。令最内圆周半径 R₁为 d,则由内向 外其余的圆周半径 R₂、R₃、R₄、R₅依次为 2d、3d、 4d、5d。在此条件下,于 R₁ 至 R₅的圆周上分别 放置 6 个、12 个、18 个、24 个和 30 个小圆环,这 恰好可使各圆周上的相邻小圆环的间距相同。

2.2 声场描述

2.2.1 任意小圆环在空间的声压分布

图 1(c)所示为 xOy 平面上任意位置处的 小圆环,小圆环圆心 O'离原点 O 的距离为 R_i , OO'相对 x 轴的夹角为 α_n ,在小圆环上任意点 Q (x_0,y_0) 取面元 ds,O'Q 的距离为 ρ ,其相对 x'轴的夹角为 α_n ,面元 ds 在空间任一点 p(x,y,z) 处产生的声压为 dp_i。由瑞利积分得

模型的设计及声场描述

图1所示为单个小圆环和90个同样的小

$$p_{\iota} = \iint_{S_2} \frac{j \kappa \rho_0 c_0 v}{\pi \mid \overline{QP} \mid} e^{j(\omega t - \kappa \mid \overline{QP} \mid)} ds \qquad (1)$$

这里 κ 为波数, ρ_0 为媒质密度, c_0 为媒质中声 传播速度,v 为小圆环表面振速, ω 为圆频率。 s 为小圆环表面积。为便于积分,只考虑远场, 即假设 $|\overrightarrow{QP}| = |\overrightarrow{r}|, |\overrightarrow{r}| = r, r \gg R, \ \Pi r \gg \rho, 则$ (1)式中的分母 $|\overrightarrow{QP}|$ 可近似为 r,相位上的| $\overrightarrow{QP}|$ 近似为 $r - R_i sin \theta cos(\phi - \alpha_n) - \rho sin \theta cos(\phi - \alpha_n)$ 。设小圆环表面振速分布满足: $v = v_0 [1 - (\rho/\rho_1)^2],$ 则由(1)式可求得: $p_i = \frac{j \kappa \rho_0 c_0 v_0}{2 \pi r} e^{i(\omega t - \kappa r + \kappa R, sin \theta cos(\phi - \alpha_n)} D_1(\theta)$ (2)

$$D_{1}(\theta) = \left[\rho_{2}J_{1}(\kappa\rho_{2}\sin\theta) - \rho_{1}J_{1}(\kappa\rho_{1}\sin\theta)\right] / (\kappa\sin\theta) - \left[\rho_{2}^{3}\kappa\sin\theta J_{1}(\kappa\rho_{2}\sin\theta) - \rho_{1}^{3}\kappa\sin\theta J_{1}(\kappa\rho_{1}\sin\theta) - 2\rho_{2}^{2}J_{2}(\kappa\rho_{2}\sin\theta) + 2\rho_{1}^{2}J_{2}(\kappa\rho_{1}\sin\theta)\right] / (\rho_{1}^{2}\kappa^{2}\sin^{2}\theta)$$

当 *R_i* = 0 时,式(2)表示中心在坐标原点处的 单个小圆环在远场产生的声压,*xOy* 平面上其 它位置处的小圆环与中心在原点处的小圆环 产生的声压仅差一与位置相关的相位差。

2.2.2 小圆环组合成的基阵在空间产生的声压 根据 Bridge 乘积定理^[4],利用前述坐标假 设模型参数可求得小圆环组合成的基阵在空

间 P(x,y,z) 处产生的声压为

3 数值计算结果及其分析

声压分布的计算结果如下。

假定基阵同心圆周中外圆周 R_s 的直径为 6.75cm,相邻两圆周间距 d 为 6.75mm,阵元 的外 半 径 ρ_2 为 2.25mm。媒 质 密 度 ρ_0 为 1000kg/m³,声速 c_0 为 1500m/s,小圆环表面振 速分布式 v 中的 v_0 为 1m/s,其它条件改变时 3.1 环面振速均匀分布与抛物形分布时基阵 的指向性对比

取振动频率 f = 1.5 MHz, 小圆环内半径 $\rho_1 = 1.25$ mm, 环面各点振速分别以 $v = v_0$ 均匀 分布和 $v = v_0 [1 - (\rho/\rho_1)^2]$ 抛物形分布时基阵 指向性的计算结果如图 2 所示。



图 2 环面振速分布不同时基阵指向性对比

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 2(a) 为归一化的指向性函数值, 图 2 (b) 为相对图 2(a) 中最大值的非归一化的 指向性函数值。从图中可看出, (a) 中旁瓣 多, 而(b) 图中只有极小的旁瓣, 且主瓣峰值 是前者的 3.75 倍。此结果表明后者声能高 度集中, 前者由于旁瓣多致使其主瓣声能聚 集度要低得多。由此可见采用抛物型加权振 速分布使基阵具有更强的指向性和抑旁瓣的 能力。

3.2 不同参数时基阵产生的声场分布

环面振速抛物型分布时,分别对小圆环孔 径、数量、间距等三种参数变化下的声场分布 进行了计算机仿真研究。

3.2.1 小圆环宽度和振动频率变化对空间 声压分布的影响

取声频分别为 0.5MHz 和 2.5MHz, 阵元 小圆环内半径改变时 z 轴上 1m 处的垂直截面 上声压分布如图 3 和图 4 所示。



图 3 外半径 $\rho_2 = 2.25 \text{ mm}$, 内半径 $\rho_1 = 0.8 \text{ mm}$ 时的声压分布



图 4 外半径 $\rho_2 = 2.25 \text{ mm}$, 内半径 $\rho_1 = 1.25 \text{ mm}$ 时的声压分布

图 3 是阵元小圆环内半径为 0.8mm 的 空间声压分布情况。频率相对较低时,主声 瓣四周有较多旁瓣,计算可得其最大旁瓣级 为 - 18.8dB、主瓣束宽半功率开角为 2.59°; 当声频增大时,主瓣声压值增大,由 0.5MHz 时声压峰值 8.1 × 10⁵ Pa 增大到 2.5MHz 时 的4.1×10⁶ Pa,同时主声瓣周围的最大旁瓣 级变为-27.6dB,主瓣束宽半功率开角变为 0.48°。事实上我们可由聚集系数^[5] $\gamma = \frac{4\pi}{\int_{0}^{2\pi} \int_{0}^{\pi} D^{2}(\theta,\phi) \sin\theta d\theta d\phi}$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0.86 和 0.97,说明频率越高,声能聚集能力越强,声压值也越大。图 4 是阵元小圆环内半径为1.25mm时空间声压分布情况。图 4(a)、(b)的最大旁瓣级分别为 - 21.3dB 和 - 29.5 dB,主瓣束宽半功率开角分别为 2.31°和 0.42°。对比图 3 与图 4 可知外半径不变内半

径越大时,指向性越好,但声压相应降低。 3.2.2 小圆环数及间距变化对声压的影响

声频为 0.5MHz、阵元外半径为 2.25mm、 内半径为 1.2mm 时,在 z = 1m 处的垂直截面 上观察小圆环数量及间距变化对声压分布的 影响,计算结果如图 5 所示。



(a)取基阵中的R1、R2、R3三个圆周上的小圆环组合



⁽b)取基阵中的R1、R3、R5三个圆周上的小圆环组合



对比图 3(a),分析可知以上两图中的旁 瓣都有所增加,其中图 5(a)中的最大旁瓣级 和主瓣束宽半功率开角分别为 - 15.7dB 和 3.75°,最大旁瓣级位于 24.07°开角处,主声瓣 峰值为 1.38×10⁵Pa;图 5(b)中的最大旁瓣级 和主瓣束宽半功率开角分别为 - 16.2dB 和 2.98°,最大旁瓣级与图 5(a)中的最大旁瓣级 位置接近,主声瓣峰值为 2.05×10⁵Pa。图 5 (a)、(b)均为 3 个同心圆周构成的基阵,而图 5(b)比图 5(a) 多 18 个小圆环阵元,且径向相 邻圆周间的距离拉大了一倍,在图 5(b)中主 声瓣附近出现了一道峰值较小的旁瓣。此结 果表明阵元数、阵元间距及阵元分布规则对声 场分布会产生较大的影响。

3.2.3 放大基阵模型对空间声压分布的影响

放大基阵模型是指对阵元小圆环内外半 径、圆周与圆周间的距离以及同一圆周上小圆 环间的间距都同时放大相同的倍数。





(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 6 (a) 是将图 3 (a) 中的基阵模型放大 2 倍后的声压分布情况,这时小圆环外半径为 4.5mm,内半径为 1.6mm,圆周半径 R₁至 R₅以 及同一圆周上相邻小圆环间距均相应地增大 到原来的 2 倍,其主瓣束宽半功率开角变为 1.16°,对比原图 3(a),旁瓣明显变小,指向性 增强,这时声压峰值约是原模型基阵声压峰值 的 4.0 倍。当放大到 4 倍时,即小圆环外半径 为9.0mm,内半径为 3.2mm 时,如图(b)所示, 旁瓣进一步减小,主瓣束宽半功率开角变为 0.61°,声压峰值约是原模型基阵声压峰值的 15.86 倍,说明对原模型放大倍数越高,指向 性越强,同时声压以近平方倍的增大。

4 结论

本文通过对基阵模型空间指向性及声压 的计算,可得如下结论:

(1)同样条件下,采用抛物型非线性振速 加权的小圆环基阵比均匀振速的基阵具有更 强的指向性和抑制旁瓣的能力。

(2)小圆环外半径不变,内半径增大时,指向性愈好,抑制旁瓣能力增强,但声压变小;反之,内半径变小时,指向性变差,抑制旁瓣能

力降低。当内半径为零时,小圆环基阵变为小 圆片基阵,这时基阵指向性最差。对同一基 阵,声频越高时,指向性越强。

(3)同一种组合基阵模型,小圆环数量越 多指向性越强,声压越大。在同心圆周最内层 半径和层数为了不变、每一圆周上小圆环间距 相同的条件下,外层圆周半径变小,会导致圆 周上小圆环数量相应减小;当小圆环总数量与 圆周间距的乘积最大时,基阵指向性最强。

(4)同一种基阵模型,等比例的放大其几 何尺寸,放大倍数越大,指向性越好,抑制旁瓣 的能力也更强,因而可根据实际需要合理选择 基阵尺寸。

参考文献

- [1] 姜永亮,汪承灏. 圆环型 Fresnnel 阵的声束聚焦特性的研究. 自然科学进展, 2001, 11 (11): 1157-1164.
- [2] 钱盛友. 热疗用环型平面换能器声场特性的研究. 应用 声学, 2003, 22 (3): 11-16.
- [3] 郭业才,赵俊渭,郭燚. 振速变化的环型活塞声源系统的设计 分析与仿真研究. 系统仿真学报,2002,14(8):1031-1033.
- [4] R. J鲍伯著,郑士杰译.水下电声测量.北京:国防工业出版社,1977;92-93.
- [5] 杜功焕,朱哲民. 声学基础,第二版. 南京:南京大学出版 社,2001: 344-362.