

引用格式: 童晖, 周博文, 张彬, 等. 一款宽带圆柱阵研究[J]. 声学技术, 2020, 39(6): 779-782. [TONG Hui, ZHOU Bowen, ZHANG Bin, et al. A study of broadband cylindrical array transducer [J]. Technical Acoustics, 39(6): 779-782.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2020.06.021

一款宽带圆柱阵研究

童 晖, 周博文, 张 彬, 杨长庚, 王佳麟, 赵 欣

(中科院声学研究所东海研究站, 上海 201815)

摘要: 圆柱阵换能器具有水平全向的优势, 已广泛应用在水声探测领域。文章研究了一款宽带圆柱阵, 利用匹配层技术拓宽圆柱阵阵元的带宽, 通过有限元仿真优化单个换能器阵元带宽、发送电压响应和阻抗等参数。同时通过仿真以阵元错位密集方式形成圆柱阵, 对阵元的个数及排列方式进行仿真优化, 制作了一款宽带圆柱阵并进行了测量, 圆柱阵直径为 400 mm, 高度为 435 mm, 圆柱阵的工作频段为 20~30 kHz, 频带内起伏 3 dB, 最大发送电压响应为 160.5 dB, 圆柱阵-3 dB 水平波束宽度为 360°。

关键词: 匹配层; 宽带; 圆柱阵

中图分类号: TB552

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2020)-06-0779-04

A study of broadband cylindrical array transducer

TONG Hui, ZHOU Bowen, ZHANG Bin, YANG Changgeng, WANG Jialin, ZHAO Xin

(Shanghai Acoustic Laboratory, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201815, China)

Abstract: The cylindrical transducer array has been widely used in underwater acoustic detection due to its horizontal non-directivity. A broadband cylindrical transducer array is studied in this paper. The bandwidth of each array element of the cylindrical transducer array is broadened by matching layer technology, and the parameters of the element, such as bandwidth, transmitting voltage response and impedance are optimized by finite element simulation. The cylindrical transducer array is formed by dislocated arrangement of array elements through simulation, at the same time the number and arrangement of array elements are optimized. A broadband cylindrical transducer array with a diameter of 400 mm and a height of 435 mm is developed and measured. The operating frequency band of the cylindrical array is 20–30 kHz with an internal fluctuation of 3 dB, a maximum transmitting voltage response reaches 160.5 dB, and the -3 dB horizontal beamwidth is 360°.

Key words: matching layer; broadband; cylinder array

0 引言

现今各国在军事与民用领域中, 对海洋的开发力度持续加大, 随着海洋开发的日益深入, 水下目标探测^[1]的相关技术越来越受到人们的重视, 水下目标包括如鱼群、蛙人、潜航器、水下障碍等。圆柱换能器阵^[2]具有水平全向、垂直开角可控等优点, 广泛应用于水声探测及通讯领域。错位密排阵列换能器是指在不缩小基阵孔径且保持波束开角等性能的条件下, 减少阵元数目, 有利于减少电子部件数量。本文介绍一款宽带圆柱阵换能器, 以复合棒阵元^[3-4]为基础, 通过匹配层技术^[5]优化设计圆柱阵阵元的带宽^[6]、发送电压响应, 同时以错位密排布

阵技术实现 192 元宽带圆柱阵。

1 圆柱阵指向性理论分析

图 1 中描绘了本文中所用的这一类型圆柱换能器阵, 坐标原点位于圆柱阵第一层的中心。该阵是以一种相邻母线错位排列的密集阵列方式布阵, 基阵半径为 R , 高度为 H , 圆柱阵共 M 层(图 1 中 $M=12$, 圆周均匀分布同一高度阵列定义为一层), 每层 N 个阵元, 相邻错位排列阵元高度间距为 d , $d=H/(M-1)$, 圆周相邻两个阵元圆心角为 $\alpha=2\pi/N$, 圆柱阵指向性函数推导如下^[1-2]。

圆柱点源位置矢量为

$$\mathbf{r}_{mm}=[R \cos(n\alpha) \quad R \sin(n\alpha) \quad (m-1)d] \quad (1)$$

入射声波单位矢量 \mathbf{u} 可表示为

$$\mathbf{u}(\theta, \varphi)=[\cos \theta \cos \varphi \quad \cos \theta \sin \varphi \quad \sin \theta] \quad (2)$$

第 m 层第 n 个阵元与参考点的相位差为

收稿日期: 2019-09-17; 修回日期: 2019-11-21

作者简介: 童晖(1986—), 男, 江西人, 硕士, 副研究员, 研究方向为水声换能器及基阵的研究。

通讯作者: 童晖, E-mail: tonghui27@163.com

$$\Delta\varphi_{mn} = k \times r_{mn} \times u(\theta, \varphi) \tag{3}$$

其中： $k = \omega/c$ ，为水中波数； ω 为角频率； c 为水中声速。

通过声程差计算出点源圆柱指向性函数为

$$D(\theta, \varphi) = \left| \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M e^{-j\Delta\varphi_{mn}} \right| = \left| \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N e^{-jkR\cos\theta\cos(\varphi-n\alpha)} \right| \left| \frac{1}{m} \sum_{m=1}^M e^{-jk(m-1)d_s \sin\theta} \right| \tag{4}$$

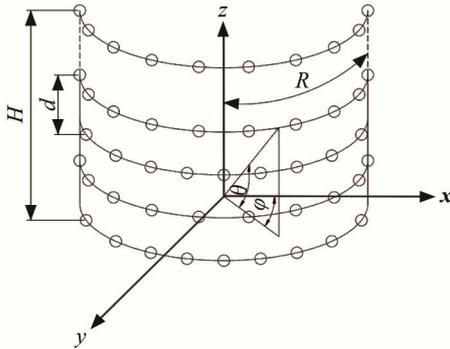


图1 圆柱阵的阵元排列模型
Fig.1 Element arrangement model of the cylindrical array

2 宽带圆柱阵有限元仿真

2.1 宽带圆柱阵基元仿真

利用 ANSYS 有限元仿真软件建立复合棒换能器模型，同时在复合棒换能器辐射面前增加匹配层材料。匹配层复合棒换能器在特定厚度条件下具有两个谐振峰，频率低的谐振峰 f_1 为复合棒一阶纵振峰，频率高的谐振峰 f_2 为匹配层所产生的复合棒二阶纵振峰。在特定声阻抗匹配层材料作用下，可使复合棒换能器的两个谐振峰耦合，从而拓宽换能器的带宽。

图2为水中单阵元电导 G 随匹配层厚度变化的仿真曲线。图2中 h 代表匹配层厚度。随着 h 的增加，第一个谐振峰 f_1 的电导和谐振频率将逐渐降

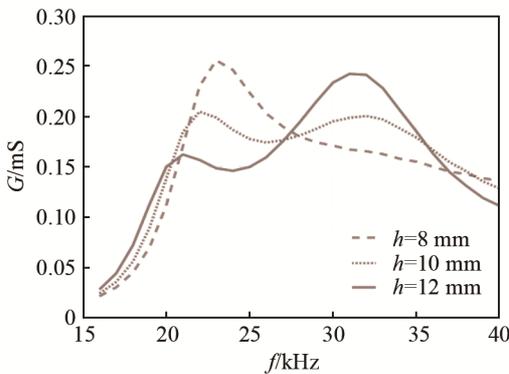


图2 单个阵元的水中电导随匹配层厚度变化曲线
Fig.2 Variation of the conductance of a single array element in water with the thickness of matching layer

低，第二谐振峰 f_2 的电导将逐渐升高，谐振频率将逐渐降低。从图2可知，通过改变匹配层厚度可得到较为理想的阻抗曲线。

随着匹配层厚度的变化，单阵元的发送电压响应曲线如图3所示。从图3中可以看出，随着匹配层厚度的增加，匹配层所产生的第二个谐振峰响应也逐渐增加，第一个谐振峰响应逐渐降低。同时与图2换能器水中单阵元电导曲线对比，可以看出单阵元的发送电压响应曲线与阵元的阻抗曲线变化趋势相同。因此通过仿真选取适当的匹配层厚度，可以得到较宽的带宽以及较高的发送电压响应。

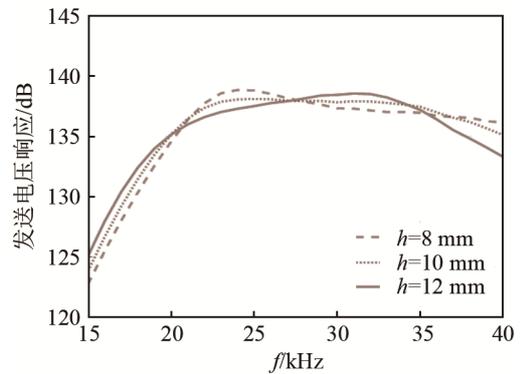


图3 单个阵元的发送电压响应随匹配层厚度变化曲线
Fig.3 Variation of the transmitting voltage response curve of a single array element with the thickness of matching layer

2.2 宽带圆柱阵指向性仿真

将阵元均匀布设在直径为 400 mm 的圆柱表面，阵元每层间距 $d = \lambda/2$ ，其中 λ 为频率 30 kHz 时的波长。随着圆柱阵单层阵元个数的增加，水平指向性均匀度越来越好，当数量增加到一定时，基本水平指向性为水平全向。从式(4)及仿真中可以得出，在一定带宽内，频率越高，若要达到全向指向性，则在圆周上的阵元个数需要的越多。图4中为频率 30 kHz 条件下，圆周分布不同个数阵元的基阵指向性图。从图4中可以看出，在单层个数 N 最小为 16 时，相邻两层错位排列即可实现基阵全向指向性。错位排列圆柱阵密排到一定程度可等效于密排均匀圆柱阵，在逐渐降低圆柱阵阵元个数的同时，最低能够实现圆柱阵水平全向的阵元数为圆柱阵临界阵元个数。从图4中可以看出该阵元的临界阵元个数为 16 个。

通过仿真优化选取该型匹配层材料厚度为 10 mm，采用水平单层 16 个阵元，垂直 12 个阵元的错位密排布阵的方式，如图5所示。运用 Matlab 软件可以计算出圆柱阵的指向性指数(D_1)，结合图3基元发送电压响应曲线可以得到圆柱阵的发送电压响应曲线，如图6所示。

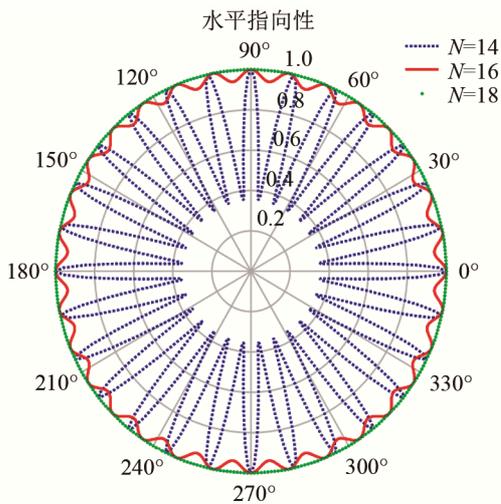


图 4 不同阵元个数的圆柱阵 30 kHz 的水平指向性图
Fig.4 Horizontal directivity patterns of the cylindrical array with different numbers of array elements at 30 kHz



图 5 圆柱阵三维实物结构图
Fig.5 The 3D physical structure of cylindrical array

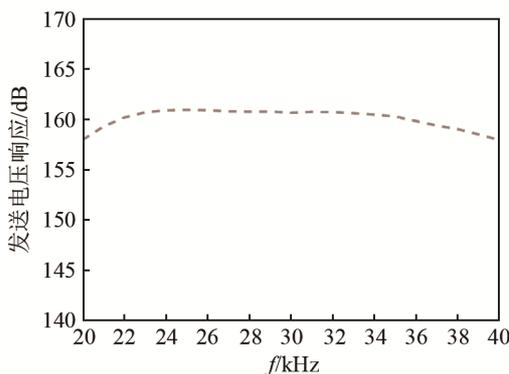


图 6 圆柱阵发送电压响应仿真曲线
Fig.6 Simulation curve of transmitting voltage response of cylindrical array

3 圆柱阵的电声性能测量

通过上述仿真确立了圆柱阵换能器的基本参数，以橡胶材料作为圆柱阵的防水透声层。最终制

做出一个由 192 个阵元组成的外形尺寸为 $\Phi 400 \text{ mm} \times 435 \text{ mm}$ 的宽带圆柱阵，如图 7 所示。



图 7 宽带圆柱的实样
Fig.7 Prototype of the broadband cylindrical transducer array

在 $10 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的消声水池中测量圆柱阵换能器的单阵元的电导曲线，与仿真结果对比如图 8 所示。从图 8 中可以看出，仿真曲线与实测曲线趋势及幅度值能较好地吻合，其中的差异主要是由于匹配层材料的声阻抗仿真值与真实值之间存在一定区别。同时由于匹配层材料为自制件，匹配层材料的均匀性和换能器阻抗有紧密的联系，而在仿真中默认匹配层材料为均匀性材料。

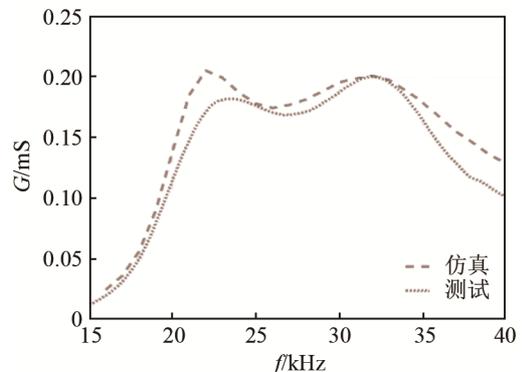


图 8 单个阵元电导曲线测试与仿真对比
Fig.8 Comparison of measured and simulated conductance curves of a single array element

圆柱阵设计工作频率为 $20 \sim 30 \text{ kHz}$ 。在大于 30 kHz 条件下圆柱阵的水平指向性将大于 3 dB ，因此， 0° 方向测量圆柱阵的发送电压响应有效数据为 $20 \sim 30 \text{ kHz}$ 频段。圆柱阵的 0° 方向发送电压响应曲线如图 9 所示，在 $20 \sim 30 \text{ kHz}$ 范围内，响应起伏小于 3 dB ，最大发送电压响应为 160.5 dB 。

图 10 为圆柱阵在 30 kHz 时的全阵发射指向性图，基阵具有水平 360° 开角，最大起伏为 1.9 dB ，与仿真设计值相符。指向性图中的起伏主要由阵元的一致性和阵元间距与波长的比值相关。在相同频率条件下，阵元个数较少，即阵元间距与波长的比

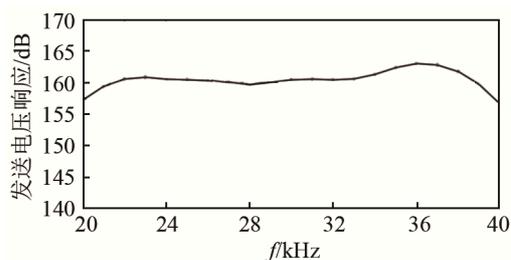


图9 圆柱阵发送电压响应曲线

Fig.9 The transmitting voltage response curve of the developed cylindrical array

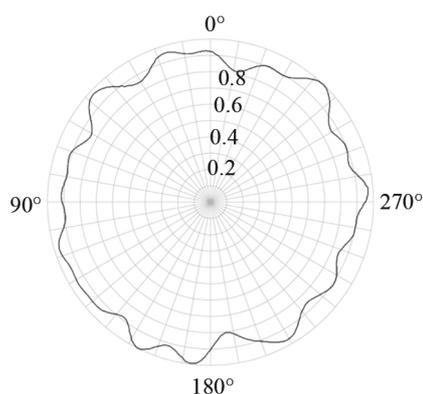


图10 圆柱阵 30 kHz 的水平指向性图

Fig.10 Horizontal directivity pattern of the developed cylindrical array at 30 kHz

值大,引起指向性具有规律的起伏,如图5中 $N=16$ 。从图10中可以看出,每一个波峰、波谷的极大值、极小值不一致,这是由于阵元不一致所引起的不规则的起伏。因此,要得到较为理想的指向性,必须要满足阵元一致性和阵元间距与波长的比值小两个条件。

4 结论

本文通过 Ansys 有限元软件及 Matlab 软件仿真圆柱阵,运用匹配层技术拓宽换能器阵元的带宽。圆柱阵水平分布阵元的个数越多,基阵工作频率上限越高,水平指向性越均匀。本文以交错排列的密集布阵方式,制作出一个工作频段 20~30 kHz、最大发送电压响应 160.5 dB、水平开角 360°的圆柱阵,测量结果与仿真结果基本吻合。

参考文献

- [1] SHERMAN C H, BUTLER J L. Transducers and arrays for underwater sound[M]. Springer, 2007.
- [2] 张怡琚,唐义政. 活塞阵元圆柱阵的指向性研究[C]//2018 中国西部声学交流会论文集, 2018.
- [3] 周利生,胡青. 水声发射换能器技术研究综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(7): 932-937.
ZHOU Lisheng, HU Qing. Summarization of underwater acoustic projector technologies[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(7): 932-937.
- [4] 刘慧生,莫喜平. 纵向换能器宽带研究设计进展[J]. 声学技术, 2014, 33(6): 564-571
LIU Huisheng, MO Xiping. Progress in research and design of broadband longitudinal transducers[J]. Technical Acoustics, 2014, 33(6): 564-571.
- [5] 田丰华,何文峰,张俊. 匹配层水声宽带换能器性能分析[J]. 鱼雷技术, 2012, 20(6): 428-431.
TIAN Fenghua, HE Wenfeng, ZHANG Jun. Performance analysis on broadband transducer with matching layer[J]. Torpedo Technology, 2012, 20(6): 428-431.
- [6] 张凯,唐义政,仲林建,等. 双匹配层高频宽带换能器研究[C]//2017 中国西部声学学术交流会论文集, 2017.