

# 声栅结构信号增强性能及其影响因素研究

阳磊<sup>1</sup>, 陈克安<sup>1</sup>, 吕宁<sup>1</sup>, 田丰华<sup>2</sup>, 张季阳<sup>1</sup>, 刘屹东<sup>1</sup>

(1.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072; 2.中国船舶集团有限公司第七〇五研究所, 陕西 西安 710069)

**摘要:**对于安装在水下航行器声信号接收段的水听器阵列,在其声障板上覆盖高声阻抗材料(称为信号调节板)是一种能有效提高表面声阻抗并减少信号衰减的措施。相比传统的完全覆盖方式,声栅结构(即周期性地敷设调节板阵列)可以极大地提高接收信号增益,减小接收段的质量。为了深入了解声栅结构信号增强机理,优化声栅结构设计,研究了调节板宽度、调节板厚度、入射角以及结构宽度比等因素对声栅结构信号增强性能的影响。仿真结果表明:斜入射会改变信号比(SR)的对称分布,但不会大幅改变结构的声学性能;调节板越宽、越厚,引起的非镜面散射会更强,声栅结构的信号增强性能就越好。在实际应用中,应合理设计声栅结构几何参数以满足现实环境的多重约束以达到总体性能最优,此外适中的宽度比能获得良好的总体声学性能。

**关键词:**信号增强;信号调节板;有限空间;声栅;轻量化;声聚焦

中图分类号:O427.2

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)02-0251-09

声呐是水中目标探测和通讯的主要设备,其中水听器阵列通常安装在水下航行器内部的声信号接收段,因此会收到来自后方结构中的弯曲波噪声。将水听器安装在距振动表面一定距离处能够有效降低这种由振动引起的噪声(即结构噪声),该距离被称为隔振距离<sup>[1]</sup>。对于某些必须直接安装在耐压船体上的水听器阵列来说<sup>[2]</sup>,结构噪声的控制尤为困难,一般需借助在航行器表面敷设声学覆盖层解决。

在声呐系统的换能器分系统中,反声障板具有隔离航行器本体辐射噪声、提高接收空间增益的功能<sup>[3]</sup>。由于障板与海水的特性声阻抗差异较大,声波在两界面间传播时阻抗失配,从而能够达到良好的声反射效果<sup>[4]</sup>,同时也会反射具有显著相位变化的声波,进而降低水听器处的总信号。为此,需要在障板上再加一层高声阻抗材料(亦称为信号调节板)以提高表面阻抗并减少信号衰减。传统上,信号调节板会完全覆盖航行器表面,但这会极大地增加结构的厚度与质量,在实际应用中限制较大。

Zhang等<sup>[5-6]</sup>提出了声栅结构,即由信号调节板组成的阵列结构能够产生局域信号反射从而增加障板上水听器的信号比,其效果优于完全覆盖的信号调节板,同时不影响覆盖层结构的整体声吸收。但其研究仅针对理想情况下的无限大结构且未对信号增强性能的影响参数进行深入分析。

一个多世纪以来,关于声波在声栅上的散射和吸收已有不少相关研究,学者们采用各种方法模拟声栅不同结构参数的影响,例如声栅的刚度、形状等<sup>[7-8]</sup>。大多数研究都是基于刚性、压力释放或周期表面的局域反应等假设,声栅的弹性特性往往被忽略。然而,在存在流体载荷且流体-结构相互作用强烈的情况下,弹性表面的振动对散射声场的影响可能会变得非常显著<sup>[9-10]</sup>。另一方面,在小型水下航行器信号接收段中,实际安装的声栅,其几何参数和质量等参数受到多种限制。

因此,针对水下航行器信号接收段形成的小空间,本文在静止流体-结构耦合作用基础上,对单周期和多周期声栅的信号增强结构进行建模,仿真分析了结构的声学性能及其影响因素。研究了调节板宽度、调节板厚度、入射角以及结构宽度对声栅结构信号增强性能的影响,为声栅结构与优化提供理论指导。

收稿日期:2023-02-14

作者简介:阳磊(1999—),硕士研究生

通信作者:陈克安(1965—),教授 e-mail:kachen@nwpu.edu.cn

## 1 声栅结构模型及其性能指标

信号调节板是一种尺寸有限的均质薄板,而声栅是周期性排列的信号调节板阵列。图 1 给出了声栅结构的横截面,主要包括基板、弹性覆盖层和信号调节板阵列。结构上方为静止流体(水),下方为空气;假设激励为远场入射的平面波,板、覆盖层和所有信号调节板在  $Y$  轴方向上无限远,因此只需要对  $X$ - $Z$  二维截面上的振动和辐射声进行理论建模。

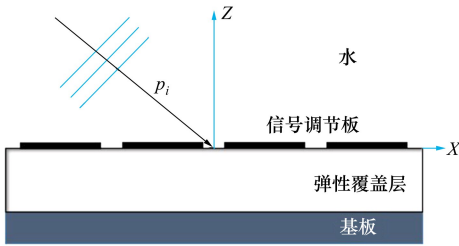


图 1 周期性声栅复合结构

为了更清晰地分析同一空间位置下总声场相对于入射声场的增强幅度,对声栅结构上方的总声压进行归一化处理。为此,引入判断信号增强的主要参量为信号比(signal ratio, SR),即将总声压与入射声压之比以对数的形式表示

$$R_s(x) = 20 \lg \left| \frac{p_T}{p_i} \right|_{z=0} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

式中:  $p_i(x, z) = P_i e^{-jk_0(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)}$  为入射声压;  $p_T$  为入射声产生的总声信号,它可以表示为

$$p_T(x, z) = p_b(x, z) + p_s(x, z) \quad (2)$$

式中,  $p_b(x, z)$  为阻塞声压(blocked pressure),由入射声压及其镜面反射叠加而成,有

$$p_b(x, z) = 2P_i \cos(k_0 z \cos \theta_i) e^{-jk_0 x \sin \theta_i} \quad (3)$$

式中:  $P_i$  为入射声压幅值;  $k_0$  为水介质中的波数;  $\theta_i$  为入射仰角。

另一方面,  $p_s(x, z)$  为散射声压,可以分为两部分:一部分是均匀覆盖层板的镜面反射声  $p_C(x, z)$

$$p_C(x, z) = \frac{2P_i \rho_0 \omega^2}{a_0} \left[ \frac{jk_0 \sin \theta_i F_{21} + \alpha F_{22}}{G} \right] e^{-jk_0(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \quad (4)$$

式中:  $\rho_0$  为水密度;  $\omega$  为入射声波角频率;  $a_0$ ,  $F_{21}$ ,  $\alpha$ ,  $F_{22}$  和  $G$  都是  $k_0 \sin \theta_i$  的函数。另一部分是周期性信号调节板产生的额外散射声  $p_{\text{SCPS}}(x, z)$

$$p_{\text{SCPS}}(x, z) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_{\text{scpsm}} e^{-jk_m x - \gamma_m z} \quad (5)$$

式中:  $\gamma_m = \sqrt{k_m^2 - k_0^2}$  是上半空间在  $z$  方向上的声波数;  $k_m = k_0 \sin \theta_i + \frac{2\pi m}{l}$ ,  $m$  是空间谐波序号;  $l$  是表面的空间周期。

当位置  $(x, z)$  和入射波频率  $f$  确定后,  $p_b(x, z)$  和  $p_C(x, z)$  仅仅是入射角  $\theta_i$  的函数,因此调节板产生的额外散射声  $p_{\text{SCPS}}(x, z)$  是调节板上信号增强的关键,也是 SR 的主要贡献量。然而,在  $p_{\text{SCPS}}(x, z)$  的表达式中,  $P_{\text{scpsm}}$  十分复杂,与很多参数有关,包括一些结构参数,如调节板的尺寸、构型等。虽然文献 [5] 中给出了  $P_{\text{scpsm}}$  的计算表达式,但计算过程十分复杂,难以通过理论公式量化分析这些结构参数的具体影响。本文建立声栅结构的有限元仿真模型,分析入射角  $\theta_i$  以及结构参数对声栅信号增强性能的影响。

## 2 单周期声栅结构声学性能及其影响因素

周期性声栅由若干个声栅单元构成,为了便于分析,首先对单周期声栅结构的声学性能进行计算机仿真,研究不同因素对单周期声栅结构声学性能的影响。

### 2.1 单周期声栅结构建模

通过声学仿真软件 COMSOL 建立声栅结构有限元模型,分析该声栅结构的声场分布。在小型水下航行器中,反声障板一般采用圆盘形,为此建立半径为 0.1 m 的圆盘基板,在其上方覆盖相同尺寸的弹性覆盖层得到覆盖层障板结构,基板和覆盖层厚度均为 0.01 m。结构上方添加圆柱形水域,下方介质为空气域,厚度均为 0.05 m。在结构上方沿  $Y$  轴敷设一个单周期声栅,信号调节板为条形薄板,厚度为 0.007 5 m,宽度为 0.1 m,调节板外侧与障板对齐。在介质外部添加完美匹配层,模拟无反射的吸收场;在水域中添加背景压力场,设置幅值  $P_i = 1$  Pa 平面波垂直入射作为激励;覆盖层障板结构四周自由。由于模型、声场呈对称分布,通过施加对称边界条件,计算 1/4 模型即可分析结构的声学性能,如图 2 所示。

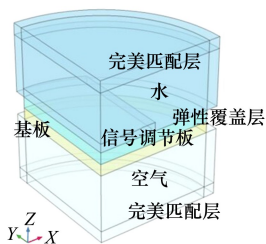


图 2 单周期声栅结构仿真模型

利用声-固耦合作为边界条件,选择频域分析以确定 SR 的空间分布特征。基板及信号调节板作为质量层,以钢作为材料。弹性覆盖层为橡胶材质,在仿真软件中基于弹性假设,给出覆盖层横波和纵波波速作为材料参数,分别为  $50\sqrt{1+0.3i}$  m/s 以及  $150\sqrt{1+0.1i}$  m/s,在仿真中将横波、纵波波速转为材料的杨氏模量与泊松比<sup>[2]</sup>。将薄板理论应用于声场-结构相互作用的分析,假设:①流体和结构都是均匀的,并且服从线性本构方程;②薄板中存在摩擦耗散引起的损耗因子;③薄板的法向位移在整个板厚度上是均匀的。但需要注意的是,使用薄板理论时获得的数值结果在其吻合频率(coincidence frequency)以下才有效。对于薄板来说,其吻合频率为<sup>[11]</sup>

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad (6)$$

式中:  $c$  为流体声速;  $h$  为薄板厚度;  $\rho, E, \nu$  分别为薄板的密度、杨氏模量以及泊松比。假定流体(水)中声速为  $c = 1460$  m/s,则 0.01 m 厚、材料为钢( $\rho = 7800$  kg/m<sup>3</sup>,  $E = 21.6 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>,  $\nu = 0.3$ )的基板,其吻合频率为 21.3 kHz。因此软件中对声栅结构的频域仿真在 21.3 kHz 以下,以 100 Hz 为步长进行。

文献[5]利用平均吸声系数验证了模型的正确性。根据(1)式在仿真中采用(7)式计算信号比

$$R_s = L_{pt} - L_{pb} \quad (7)$$

式中:  $L_{pt}$  为总声压级;  $L_{pb}$  为背景声压级。

### 2.2 声栅结构的声学性能

为了对声栅的声学性能进行分析,将  $X$  轴(结构宽度方向),以及沿  $Y$  轴(结构长度方向)选取的若干条截线作为数据集,并在后文中沿用该选取方式。 $Y$  轴方向截线均匀选择结构有代表性的位置,包括信号调节板的中心(截线 1)、1/4 处(截线 2, 3)、边缘(截线 4,5),未敷设调节板的覆盖层中心

(截线 6,7)以及边缘(截线 8,9),各截线的位置以及标号如图 3 所示。信号调节板上方的局域信号增强是判断声栅性能的重要依据,后文重点对结构宽度方向的信号比分布特征进行分析。

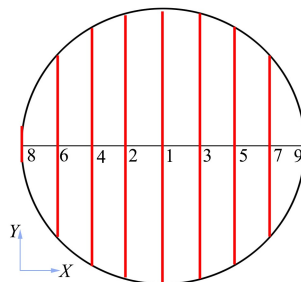


图 3 Y 轴截线及其标号示意图

为了分析 SR 随频率变化的规律,对  $Y$  轴截线上的 SR 进行平均。在法向入射平面波激励下,声场呈对称分布,只需选取截线 1,3,5,7,9 计算平均 SR。通过与无声栅障板进行对比,分析信号的增益效果。图 4 给出了不同  $Y$  轴截线的平均 SR 频率分布。

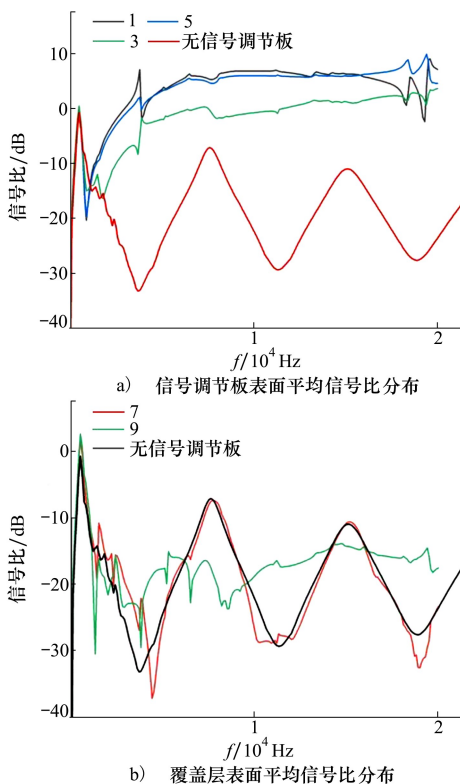


图 4 各  $Y$  轴截线平均信号比

与无声栅相比,声栅结构改变了 SR 无规则的

分布,使其具有明显的局域分布特征,调节板表面的平均 SR 在宽频带范围内有显著增强,仅在 1 kHz 附近的窄带小于无声栅情况,这是由于非镜面散射声压与其余声压成分的相位相反导致<sup>[5]</sup>。调节板中心与 1/4 处的平均 SR 在 3 kHz 以上时大于零,调节板表面的入射信号在宽频带内得到了增强。平均 SR 在 3.8, 18.4 以及 19.4 kHz,即捕获模态频率<sup>[12]</sup>时达到峰值,最高能够达到 13.1 dB 的信号增益;调节板边缘的平均 SR 稍低,信号增强性能较差。未敷设调节板的区域信号无明显增强,覆盖层中心的平均 SR 分布与无声栅结构基本吻合。由于水听器安装在调节板上,因此后文只关心调节板表面上的信号增强。在水声学中,不同应用领域声信号频率高低的划分不一样。本文研究针对的是水下航行器声探测任务,且声信号频率上限为 21.3 kHz,为了更好地分析声栅结构对不同频率范围内信号的增强性能,以及后续研究各因素对不同频率范围信号增强性能影响,本文将 2 kHz 以下作为低频,(2~10)kHz 作为中频,10 kHz 以上作为高频。

分析 SR 在结构宽度方向上的空间分布特征,计算隔振距离为 0.007 5 m 时 X 轴上的 SR 分布,结果如图 5 所示,其中横坐标范围(-0.05, 0.05)为信号调节板所在空间,纵坐标为频率,颜色越深 SR 越高。

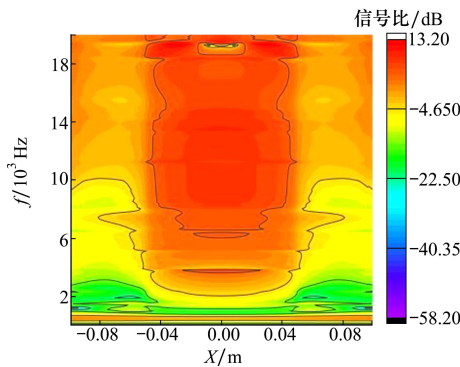


图 5 X 轴上的信号比空间分布

低频下 SR 在 X 轴上呈均匀分布;随着频率提高,SR 出现明显的局域分布,调节板表面的 SR 远高于调节板之间覆盖层上的 SR,信号有显著的局域增强。调节板上的 SR 同样存在着局域分布,更高的 SR 主要集中在调节板中央,随频率提高逐渐向调节板两侧延伸,与前文分析一致。

### 2.3 信号调节板宽度的影响

在小空间中,声栅的几何尺寸至关重要,它影响结构的信号增强性能、占用空间和质量。本文研究调节板的宽度  $L$  和厚度  $h$  对 SR 的影响,首先改变调节板的宽度  $L$ ,研究 SR 的分布规律。

沿用 2.1 节建立的模型,其余仿真设置不变,在  $[0.06, 0.1]$  m 的范围内改变  $L$ ,间隔 0.005 m,保持结构仍呈对称分布,计算调节板上 Y 轴截线的平均 SR。由于篇幅限制,只展示 0.1, 0.08, 0.06 m 下的结果以揭示调节板宽度的影响规律。

3 种宽度下平均 SR 的对比结果如图 6 所示,尽管  $L$  有所改变,调节板上仍存在显著的局域信号增强。减小  $L$ ,中频下的平均 SR 有所降低,信号增强的带宽减小,此外 SR 出现峰值的频率右移,捕获模态阶数减少。 $L$  为 0.08 和 0.06 m 时只出现了第一捕获模态峰值,但峰值 SR 有较大提高,并且高频的信号增强性能更稳定。

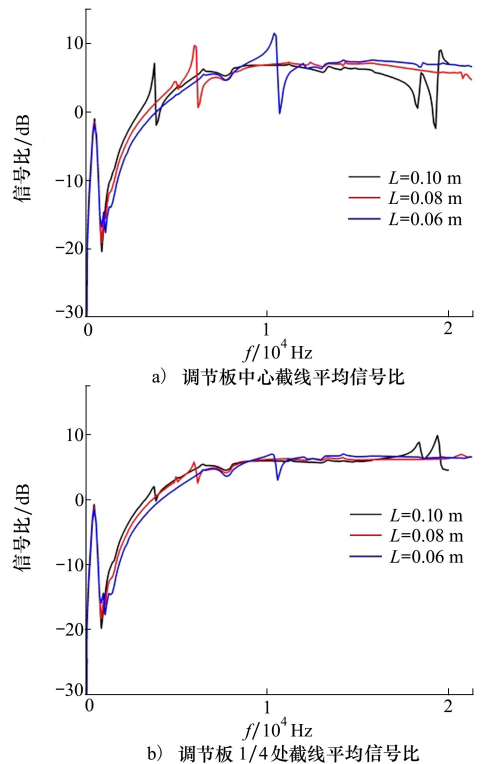


图 6 不同调节板宽度下的平均信号比分布

上述分析说明:调节板的宽度越小,增益峰值越高,高频信号的增强性能更稳定;宽度增大,引起的非镜面散射更强,局域信号增强的性能越强。增加宽度可以增强中频信号,提高宽带性能,增加捕获模

态的阶数,得到更多的 SR 峰值;但同时占用的空间和质量也越多,结构的吸声性能也会有所降低,影响系统的声隐身性能。因此,为同时保证多方面实际应用需求,需要合理地设计信号调节板的宽度。

### 2.4 信号调节板厚度的影响

水下航行器对内部结构的厚度有着严格的限制,因此研究调节板厚度  $h$  对声学性能的影响有重要的现实意义。

沿用 2.1 节建立的模型,其余仿真设置不变,在  $[0.005, 0.01]$  m 的范围内改变  $h$ ,间隔 0.000 5 m,保持结构仍呈对称分布,计算调节板上  $Y$  轴截线的平均 SR。由于篇幅限制,只展示 0.01, 0.007 5, 0.005 m 下的结果以揭示调节板厚度的影响规律。

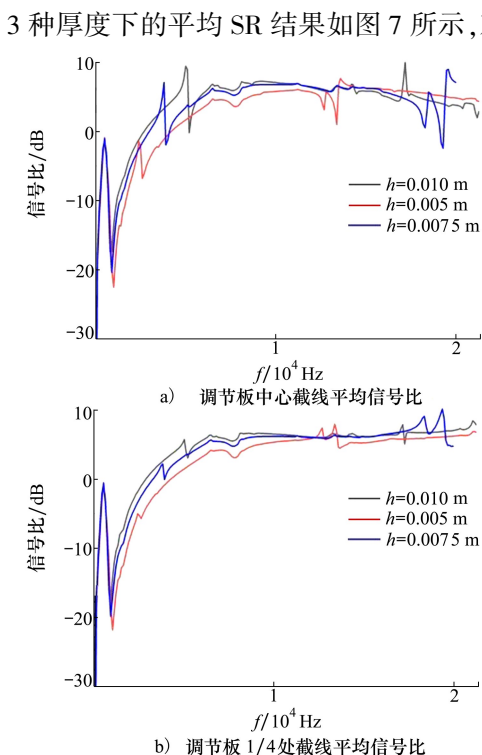


图 7 不同调节板厚度下的平均信号比分布

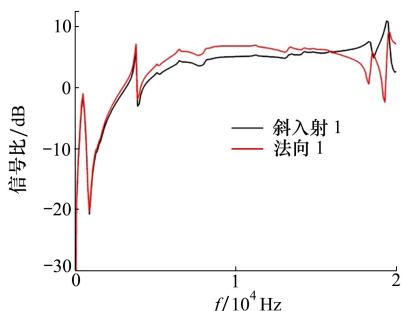


图 8 截线 1 的法向、斜入射平均 SR 对比

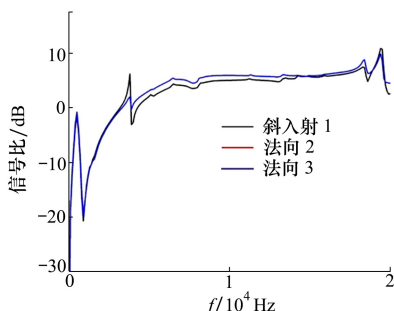


图 9 斜入射(截线 1)与法向入射(截线 2,3)平均 SR 对比

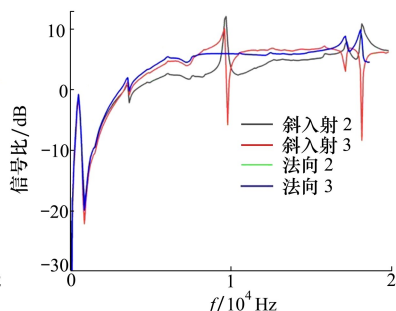


图 10 截线 2,3 的法向、斜入射平均 SR 对比

节板所在区域来说, $h$  越大,平均 SR 越大,峰值也越大,中频信号的增益更高。

上述分析说明:调节板越厚,同样会引起更强的非镜面散射,信号增强效果越好,增强带宽越宽。然而,受限于航行器内部的小空间,调节板并不是越厚越好,在不影响局域信号增强性能的前提下,选择厚度适宜的信号调节板来设计声栅结构。

### 2.5 声波入射角的影响

以上研究针对的是法向入射的平面波,对于斜入射平面波,SR 的频率及空间分布特性会发生变化。在此研究平面波斜入射对 SR 的影响,以确定声波入射角  $\theta$  是否会限制结构的信号增强性能。

定义入射角为图 1 中平面波方向与  $Z$  轴的夹角,沿用 2.1 节建立的模型,其余仿真设置不变,在  $[0^\circ, 85^\circ]$  的范围内以  $5^\circ$  的间隔改变  $\theta$ ,计算仿真结果。平面波斜入射情况下模型的声场分布不再对称,因此分析时对完整模型进行仿真,计算调节板上  $Y$  轴截线的平均 SR。同样,受限于篇幅,只展示  $\theta = 30^\circ$  下的结果以分析声波斜入射的影响。

调节板中心截线平均 SR 的频率分布与法向入射情况的比较如图 8 所示。“斜入射 1”代表斜入射下截线 1 的平均 SR,“法向 1”代表法向入射下截线 1 的平均 SR,后续表示与此类似。

低频下 2 种情况的平均 SR 分布一致;频率在 (3.9~15.9) kHz 之间时,斜入射的平均 SR 略低于法向入射;在 15 kHz 以上的高频,由于入射激励的非对称性,平均 SR 表现出与法向入射时调节板 1/4 处平均 SR 类似的特征,如图 9 所示。

当平面波斜入射时,调节板左侧(截线 2)的平均 SR 相较于法向入射时有一定的衰减,右侧(截线 3)反而有所增强,两截线的平均 SR 分布不对称,如图 10 所示。在 10.4 kHz 处,斜入射情况下的平均 SR 出现了新的峰值。

为分析原因,将调节板表面的法向振速与无声栅障板结构的法向振速相减,取计算结果的对数,命名为散射表面振速级 (scattered surface velocity level, SSL), 计算该频率下信号调节板上方的散射表面振速级分布。如图 11 所示,散射表面振速级分布不对称,且出现了偶数个波腹,可以证明 10.4 kHz 对应于第一反对称捕获模式频率<sup>[13]</sup>。

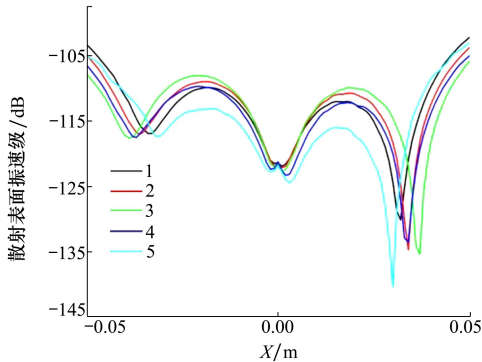


图 11 10.4 kHz 处散射表面振速级分布

在斜入射下,隔振距离处 SR 在 X 轴上的空间分布如图 12 所示,SR 分布不对称,调节板右侧的 SR 大于左侧,但仍然有着显著的局域信号增强。

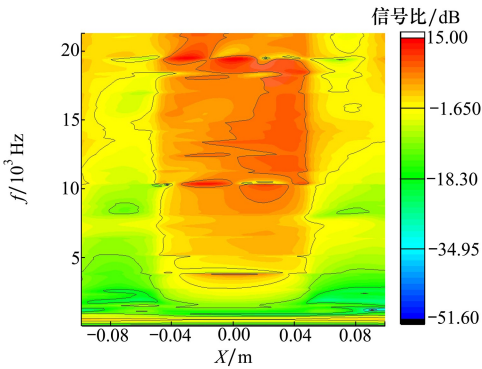


图 12 X 轴上的 SR 空间分布

### 3 多周期声栅结构声学性能及其影响因素

对于反声障板上方的水听器阵列来说,其周期性分布特性可以与声栅的周期性局域增强特性达成良好匹配。因此,在单周期声栅结构的研究基础上,在有限尺寸的圆形覆盖层障板上设计多周期声栅结构是一个合理的选择。本节通过仿真研究其声学性能及影响因素。

#### 3.1 多周期声栅结构声学性能仿真

假设某水下航行器在反声障板上安装了 4 列水听器(每列的个数根据实际情况决定,不影响本文研究),如图 13 所示。

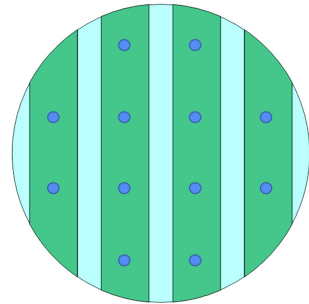


图 13 某航行器反声障板上方的 4 列水听器

因此在单周期声栅模型的基础上,在其上方敷设 4 块调节板得到多周期声栅模型(1/4 模型如图 14 所示)。具体计算时,设置圆盘半径为 0.5 m,调节板间隔 0.02 m,关于 Y 轴对称分布。

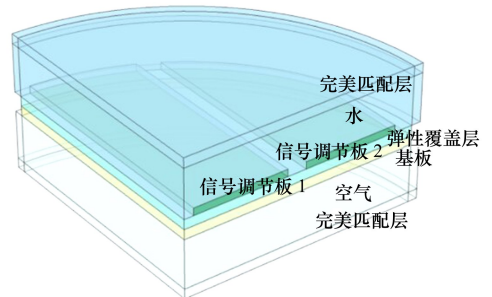


图 14 多周期声栅结构仿真模型

与单周期声栅结构的研究方法一致,分析 SR 在结构宽度方向上的空间分布特征,计算隔振距离为 0.007 5 m 时 X 轴上的 SR 分布,结果如图 15 所示。

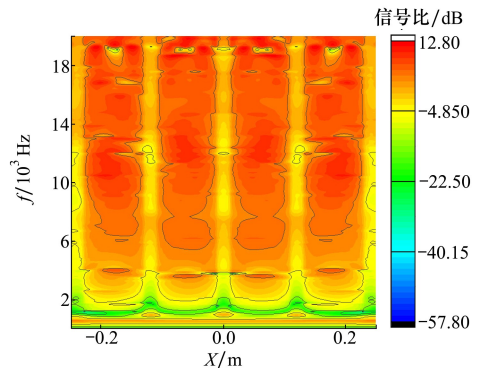


图 15 X 轴上的 SR 空间分布

图 15 显示,多周期声栅结构能够在局部空间周期性地增强入射信号,SR 具有明显的局域分布特征:4 个调节板上均存在显著的信号增强。与单周期声栅不同,四周期声栅 SR 关于中心呈偶对称分布,同一频率下单个调节板表面的 SR 分布并不对称,但不同位置的信号增强性能无明显差异,信号不存在显著衰减。

### 3.2 影响多周期声栅结构声学性能的各种因素

多周期声栅上敷设了多个信号调节板,因此一个周期的长度  $l$  为结构重要的几何参数,设为调节板宽度  $L$  与两调节板间隔  $d$  之和。

2.3 节的分析说明, $L$  越大,信号综合增强性能越好。但是在尺寸确定的有限空间内,无法简单拓宽  $l$ 。因此,在  $l$  不变的情况下,分析  $L$  与  $d$  的比值(宽度比)对结构声学性能的影响。固定  $l = 0.12 \text{ m}$ ,建立 3 种多周期声栅模型:① $L = 0.1 \text{ m}, d = 0.02 \text{ m} (L/d = 5)$ ;② $L = 0.08 \text{ m}, d = 0.04 \text{ m} (L/d = 2)$ ;③ $L = 0.06 \text{ m}, d = 0.06 \text{ m} (L/d = 1)$ 。

在调节板中心及 1/4 处设置 Y 轴截线,对比 3 种宽度比下 SR 的频率分布特性,由于不同声栅上的分布近似,只展示声栅 1 上的平均 SR 分布,如图 16 所示。

对于调节板表面而言, $L/d$  越大,中频信号的增强效果越好;平均 SR 的峰值频率左移,对应峰值降低。 $L/d$  减小时,第一捕获模态频率下的增益峰值显著提高。在高频下,不同  $L/d$  下的平均 SR 性能

基本相当。

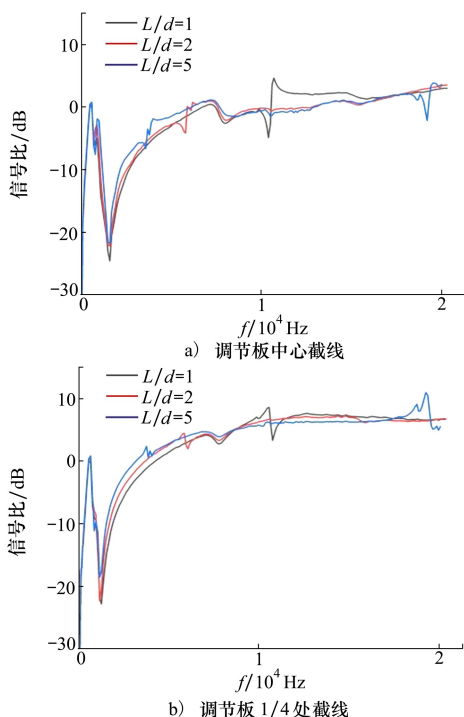


图 16 不同 Y 轴截线下的 SR 空间分布

3 种  $L/d$  下 X 轴上 SR 的空间分布如图 17 所示。尽管  $L/d$  不同,但声栅的周期性局域信号增强特征依旧显著。 $L/d$  越大,中频下调节板上的 SR 明显提高,信号增强带宽显著增加。而  $L/d$  越小,SR 的峰值更高。

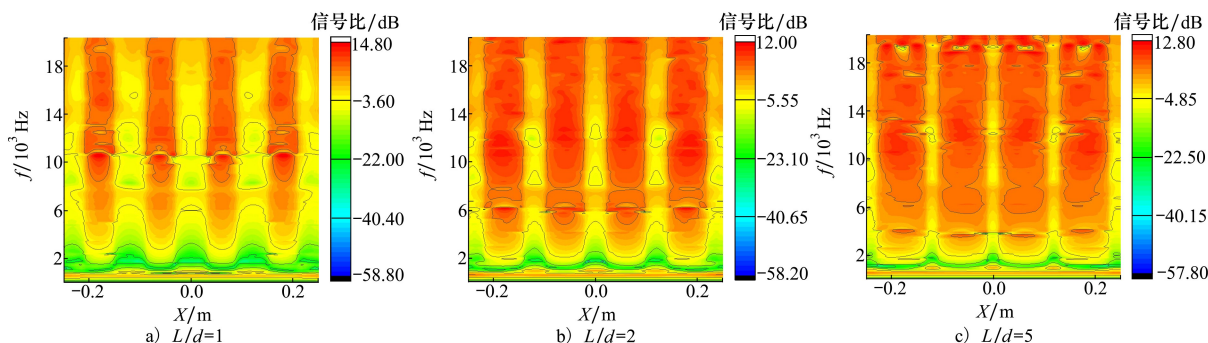


图 17 不同宽度比下 X 轴上的 SR 空间频率分布

高宽度比会提高信号的增强性能,而低宽度比会显著提高信号增益的峰值,为兼顾多个声学性能,同时考虑质量以及空间的应用要求,需要选择合适的宽度比。

## 4 结 论

本文对小空间中单周期和多周期的声栅结构进行了建模,对其声学性能和影响因素进行了仿真分

析。通过对结构宽度方向上频率、空间的性能分析,证明声栅能够精准地在声栅上方增强入射信号。分析了入射角度对性能的影响,结果表明,声波的斜入射改变了SR的对称分布,激发了结构的反对称捕获模态,但并未大幅改变结构的声学性能。对信号调节板宽度、厚度的分析说明:调节板越宽、越厚,其综合信号增强性能就越好,对(2~10)kHz的中频信号增强效果越高。但是,受到实际应用中小空间的限制,只能合理地设计几何参数以达到平衡。多周期声栅结构的性能分析反映了显著的周期性局域信

号增强性能,对结构宽度比的研究证明,选择适中的宽度比能使结构获得良好的综合声学性能。在研究各个参数对声栅结构信号增强性能的影响时,存在多个参数的交叉影响,因而声栅结构信号增强性能的变化可能是非线性的,甚至更加复杂。受限于篇幅,本文的研究主要从工程应用的角度,使用简单的控制变量法研究各个因素对声栅结构信号增强性能的影响,从而指导在工程中选择最合适的声栅结构参数。在后续关于信号增强机理与优化设计的研究中会进一步考虑。

## 参考文献:

- [1] KO S H, PYO S, SEONG W. Structure-borne and flow noise reductions(mathematical modeling)[M]. Korea: Seoul National University Press, 2001: 34-98
- [2] SHERMAN C, BUTLER J. Transducers and arrays for underwater sound[M]. New York: Springer, 2007: 289-291
- [3] 张怡璐. 圆柱阵布阵技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017: 46-47  
ZHANG Yijun. The study of cylindrical array layout technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017: 46-47 (in Chinese)
- [4] 边汉林, 夏铁坚. 一种圆柱通道型橡胶反声障板的研究[J]. 声学与电子工程, 2014(1): 31-33  
BIAN Hanlin, XIA Tiejian. The study of a cylindrical channel type rubber acoustic baffle[J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2014(1): 31-33 (in Chinese)
- [5] ZHANG Y, PAN J. Underwater sound scattering and absorption by a coated infinite plate with a distributed inhomogeneity[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013(133): 2082-2096
- [6] ZHANG Y, PAN J. Enhancing acoustic signal response and absorption of an underwater coated plate by embedding periodical inhomogeneities[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 142(6): 3722-3735
- [7] FEIT D, CUSCHIERI J M. Scattering of sound by a fluid-loaded plate with a distributed mass inhomogeneity[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1996, 99(5): 2686-2700
- [8] CUSCHIERI J M, FEIT D. Full numerical solution for the far-field and near-field scattering from a fluid-loaded elastic plate with distributed mass or stiffness inhomogeneity[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1998, 104(2): 915-925
- [9] SMITH S G, CRASTER R V. Numerical and asymptotic approaches to scattering problems involving finite elastic plates in structural acoustics[J]. Wave Motion, 1999(30): 17-41
- [10] GUO Y P. Effects of structural joints on sound scattering[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1993(93): 857-863
- [11] 王海军, 郭杏林. 板结构的吻合频率和临界频率特性研究[C]//第17届全国结构工程学术会议, 2008: 570-575  
WANG Haijun, GUO Xinglin. The study of coincidence frequency and critical frequency characteristics of plate structures[C]//Proceedings of the 17th National Conference on Structural Engineering, 2008: 570-575
- [12] POSTNOVA J, CRASTER R V. Trapped modes in topographically varying elastic waveguides[J]. Wave Motion, 2007, 44(3): 205-221
- [13] ZHANG Y, PAN J. Underwater sound radiation from an elastically coated plate with a discontinuity introduced by a signal conditioning plate[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2013(133): 173-185

# Performance and influencing factors of acoustic grating based on signal enhancement

YANG Lei<sup>1</sup>, CHEN Kean<sup>1</sup>, LYU Ning<sup>1</sup>, TIAN Fenghua<sup>2</sup>,  
ZHANG Jiyang<sup>1</sup>, LIU Yidong<sup>1</sup>

(1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2.No.705 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** In the acoustic signal receiving section of underwater vehicle, an effective measure to improve surface acoustic impedance and reduce signal attenuation is to cover acoustic barrier plate of hydrophone array with high impedance material (signal conditioning plate). Compared with traditional full coverage mode, an acoustic grating (periodic installation of regulator plate array) can greatly improve the received signal gain and reduce the weight of the receiving segment. In order to deeply understand the signal enhancement mechanism and optimize the design of acoustic grating, the factors that influence the signal enhancement performance of acoustic grating from the aspects of width, thickness, incident angle and structure width ratio is studied. Simulation results show that the oblique incidence will change the symmetrical distribution of signal ratio (SR), but will not significantly change the acoustic performance of the structure. Wider and thicker regulating plate lead to stronger non-mirror scattering and better signal enhancement performance of structure. In practical application, geometric parameters of acoustic grating should be reasonably designed to meet multiple constraints of real environment to achieve optimal overall performance. In addition, the moderate width ratio can obtain a good overall acoustic performance.

**Keywords:** signal enhancement; signal conditioning plate; limited space; acoustic grating; lightweight; acoustic focusing

**引用格式:** 阳磊, 陈克安, 吕宁, 等. 声栅结构信号增强性能及其影响因素研究[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(2): 251-259  
YANG Lei, CHEN Kean, LYU Ning, et al. Performance and influencing factors of acoustic grating based on signal enhancement[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(2): 251-259 (in Chinese)