

文章编号:1671-8879(2008)06-0100-06

加环筋轴对称壳体振动声辐射特性

石焕文^{1,2}, 杨富社¹, 盛美萍², 孙进才², 徐春龙¹

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘 要:为了研究加环筋轴对称壳的声振特性,建立了轴对称壳水中声辐射计算的 FEM/BEM(有限元法/边界元法)三维模型,探索了加筋的高度、宽度、数目对轴对称壳的表面平均振速、辐射功率、辐射效率、激励点法向声强以及声场指向性的影响规律。计算方法是在有限元软件 ANSYS 中建模和模态分析基础上,将有关数据(网格、模态)导入边界元软件 SYSNOISE 中计算流体-结构耦合状态下的辐射声场特性。结果表明:随着环筋高度、宽度和数目的增大,激励点法向声强、表面平均振速、辐射效率和辐射声功率随频率变化曲线的峰彼此错开;环筋高度、宽度和数目增大时,激励点法向声强以及辐射声功率都有增加,而表面平均振速减小,因而导致声辐射效率的增加;在频率 0~700 Hz 内,低频时环筋高度、宽度和数目的变化对声场指向性影响规律类似;高频(601 Hz)环筋增多时对称壳尾部声辐射相对增强,而加筋处的中部声辐射相对减弱。

关键词:水声学;环筋;轴对称壳;声振特性;FEM; BEM

中图分类号:O32.1; TV312; O426.1

文献标志码:A

Characteristics of vibration and sound field of axisymmetric shell with stiffening rings

SHI Huan-wen^{1,2}, YANG Fu-she¹, SHENG Mei-ping², SUN Jin-cai², XU Chun-long¹

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Marine, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: In order to investigate the characteristics of the vibration and sound field radiated by an axisymmetric shell with stiffening rings, a 3D model based on FEM/BEM for computing the sound field radiated by an axisymmetric shell with stiffening rings in water was established, and the effects of the height, the width and the number of the ring stiffeners on the roop mean square vibrational velocity, sound radiated power, radiation efficiency, normal sound intensity at driving point and pressure directivity of sound field radiated by it were investigated. The meshing data and modal data of the model in vacuo obtained from FEM code ANSYS were put into BEM code SYSNOISE and used for computing the parameters of the coupled sound field. The results show that, the curve peaks of the roop mean square vibratory velocity, radiated sound power, radiation efficiency, normal sound intensity at driving point will shift to different places when the width, or the height or the number of the stiffening rings increases; with the increase of the width, or the height or the number of the stiffening rings, the normal sound intensity at driving point and sound radiated power increases, the roop mean square vibratory velocity decreases, and the radiation efficiency increases; in the frequency region 0~700 Hz, the influence of the width, the

收稿日期:2007-12-08

基金项目:国家自然科学基金项目(50375121);国家“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAF02A00);陕西省科技攻关项目(2008K05-07)

作者简介:石焕文(1967-),男,陕西凤翔人,长安大学教授,西北工业大学博士后,E-mail:hwshi@chd.edu.cn.

height and the number of the rings on the sound field directivity pattern are nearly same, but at high frequency the number of rings makes the sound radiation from the tail higher than that from the middle section. 16 figs, 8 refs.

Key words: underwater acoustics; stiffening ring; axisymmetric shell; character of vibration and sound field; FEM; BEM

0 引言

加环筋的轴对称壳体在民用和军事方面都有广泛的应用。在民用方面,加环筋的轴对称壳体是飞机机身的主要结构形式,如果发动机引起结构振动声辐射而没有采取很好的减振降噪措施,轻者使乘客感到不舒适,重者对结构的稳定性产生影响。在军事方面,加环筋轴对称壳体是水中兵器(潜艇、鱼雷等)的主要结构形式,研究它们的振动声辐射规律,以及进一步采取必要的减振降噪方法,对于提高水中兵器的隐蔽性,从而对敌方目标进行有效打击具有重要的现实意义。Laulagnet 等^[1]通过将圆柱壳中面位移表示为壳在真空中模态解之和,应用能量方法求解了加环筋的两端简支在半无限长刚性圆柱壳障板上的圆柱壳水中和空气中的辐射功率、法向平均振速以及辐射效率,并探讨了结构损耗、激励力位置 and 方向的影响规律;Harari 等^[2]从 Sanders-Koiter 壳方程出发,提出了浸没在水中的两端带平板的有限长加筋圆柱壳的分析模型,计算得到了流体中声压以及激励点和接收点的加速度值并与试验结果作了对比,指出在径向力激励下圆柱壳辐射声功率比两端平板要大得多,除端板模态频率点之外端板的声辐射可忽略不计,但是在轴向力激励下端板的声辐射不能被忽略;汤渭霖等^[3]基于将环筋对壳体的作用简化为只有法向力,推导了有限长加环筋圆柱壳的振动和声辐射的近似解;陈美霞等^[4-6]通过将加筋结构等效为反力和反力矩加在圆柱壳表面上,从 Flugge 壳体方程出发求解了有限长加筋双层壳体的声辐射。以上文献为解析探知加筋的特征对圆柱壳的声辐射的影响,或多或少地引入了一些简化条件,但公式推导繁琐。商德江等^[7-8]建立了两端带半球帽双层加环筋圆柱壳水中声辐射计算的 FEM/BEM(有限元法/边界元法)模型,但模型是二维的,适用于轴对称情形,激励力只能沿对称轴方向。本文建立了加环筋的轴对称壳体水中声辐射计算的 FEM/BEM 三维模型,研究加环筋对平底圆柱壳的声振特性的影响,探索加筋的高度、宽度和数目对加环筋的轴对称壳体的辐射功率、辐射效率、法向

声强和声场指向性的影响,旨在对水中兵器的优化设计提供一定的参考。具体计算方法是,先在有限元软件 ANSYS 中做加环筋的轴对称壳体建模,进行模态分析,然后将有关数据(网格、模态)导入边界元软件 SYSNOISE 中计算流体-结构耦合状态下的辐射声场特性。

1 结构振动声辐射的计算公式

当一弹性结构置于流体中时,结构和流体之间有相互作用力,如果结构受到外力激励并用有限元建模,则结构的运动微分方程为

$$M_s \ddot{u} + C_s \dot{u} + K_s u = f_s + f_p \quad (1)$$

式中: M_s 、 C_s 、 K_s 分别为结构质量矩阵、比例阻尼矩阵和刚度矩阵; u 为结构位移向量; f_s 为外激励力向量; f_p 为流体压力对结构的作用力向量。

在线弹性流体介质域 V 内,简谐声压 p 应满足

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (2)$$

在弹性结构与流体界面上应满足

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -i\omega\rho v_n \quad (3)$$

式中: ρ 、 v_n 、 i 、 k 分别为流体介质密度、结构的法向速度、虚数单位和波数; ∇ 为算子。

在无穷远处还应满足 Sommerfeld 辐射条件,即

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [r(\frac{\partial p}{\partial r} - ikp)] = 0 \quad (4)$$

对式(2)利用加权残值法,并利用式(2)的特解

$$G(P, Q) = \frac{1}{r} e^{-ikr}, \text{ 可得 Helmholtz 方程}$$

$$C(P)p(P) = \int_S \left[p(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} - G(P, Q) \frac{\partial p(Q)}{\partial n} \right] dS(Q) \quad (5)$$

$$\text{式中: } C(P) = \begin{cases} 4\pi & P \in V \\ 4\pi + \int_S \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS(Q) & P \in S \\ 0 & P \in S, V \end{cases}$$

式中: P 、 Q 分别为场点和源点; r 为半径; n 为弹性结构表面 S 上指向流体域的单位法向矢量。

将式(3)代入式(5)并在 S 上离散后心得

$$Ap = Bv_n \quad (6)$$

结构表面法向速度向量 v_n 和结构表面速度向量 v 的转换关系为

$$v_n = G^T v \quad (7)$$

而结构表面节点等效流体压力向量 f_p 与流体节点压力向量 p 的关系为

$$f_p = -GSp \quad (8)$$

式中: G 为法矢量方向余弦转换矩阵; $S = \int_S N^T NdS$, N 为插值形函数矩阵; A 、 B 均为系数矩阵。

由式(6)、式(7)、式(8)可得

$$f_p = -GSA^{-1}BG^T v = (C_s + i\omega M_s)v \quad (9)$$

将式(9)代入式(1)求得 u , 基于式(6)、式(7)求得结构表面上的 p 、 v_n , 再代入式(5)求场点声压。将结构表面上的声压及法向振速代入式(10), 可得结构的辐射声功率为

$$W_s = \frac{1}{2} \int_S \text{Re}[p(v_n)^*] dS \quad (10)$$

结构受点力激励时, 激励力给结构的输入功率表示为

$$W_m = \frac{1}{2} \text{Re}[f_p \dot{u}] \quad (11)$$

式中: \dot{u} 为点力所在位置的振动速度向量。

结构的声辐射效率 η 为

$$\eta = \frac{W_s}{W_m} \quad (12)$$

2 计算结果及讨论

轴对称壳体的母线为图1中的 $ABCD$, 其中 AB 为圆弧, BC 和 CD 为直线段, y 轴为壳体的对称轴。壳体厚度 $h = 6$ mm。材料为铝, 密度 $\rho = 2700$ kg/m³, 泊松比 $\mu = 0.3$, 杨氏模量 $E = 6 \times 10^{10}$ Pa, 结构的模态阻尼系数为 0.01。计算中壳和筋都用 shell 63 建模。

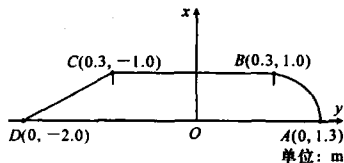


图1 计算模型

2.1 环筋高度对轴对称壳体振动声辐射的影响

对宽度 $b = 1$ cm 的 3 根在 BC 间等间距分布、环筋高度 t 分别为 0、3、5 cm 的环筋情形进行计算。在 592 号节点 $(0, 0.182 \text{ m}, 0.3 \text{ m})$ 加径向简谐激励力 $F_z = 10$ N。

图2~图5给出了环筋高度对轴对称壳受激励点的法向声强、表面平均振速、辐射声功率和辐射效率的影响规律。从图2~图5可见, 随着环筋高度的变化, 激励点法向声强、表面平均振速、辐射声功率和辐射效率随频率 f 变化曲线的峰彼此错开。这主要是因为随环筋高度的增加, 对称壳的刚度以及质量都发生了变化。从图2、图4可见, 在频率为 $0 \sim 700$ Hz 内, 随环筋高度增加, 激励点法向声强及辐射声功率增加(除个别模态峰值外)。从图3可见, 环筋增高时壳表面平均振速减小, 尤其是低频区。从图5(见下页)可见, 辐射效率随环筋高度增大而增大, 原因是环筋增高时, 壳表面平均振速减小, 而声辐射功率增大。

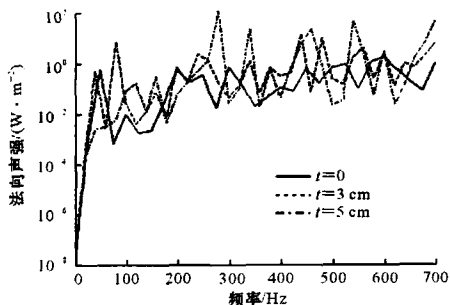


图2 环筋高度对轴对称壳受激励点法向声强的影响

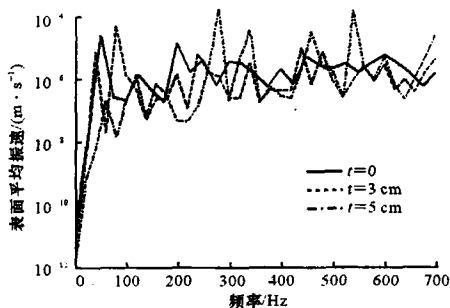


图3 环筋高度对轴对称壳表面平均振速的影响

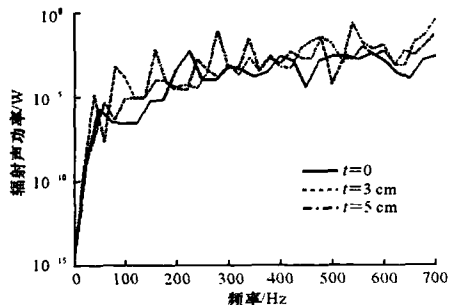


图4 环筋高度对轴对称壳辐射声功率的影响

图6(见下页)给出了在 $x = 0$ 平面、以坐标原点为中心、半径 $r = 5$ m 的圆周上, 不同高度环筋的轴

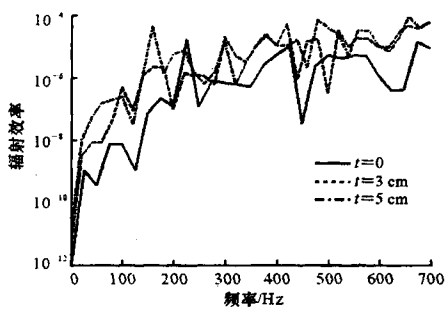
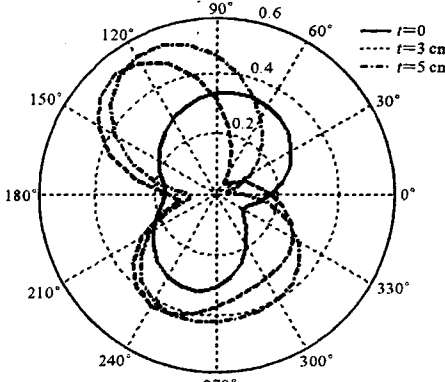
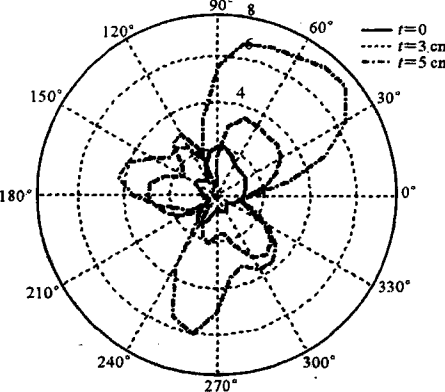


图 5 环筋高度对轴对称壳辐射效率的影响



(a) $f=201\text{ Hz}$



(b) $f=601\text{ Hz}$

图 6 环筋高度对轴对称壳辐射声场指向性的影响($r=5\text{ m}$)
对称壳水中辐射声场的分布。其中, y 轴(圆柱壳轴向)沿 $\theta=0^\circ$ 方向, z 轴(激励力方向)沿 $\theta=90^\circ$ 方向。从图 6 可见, 在 $f=201\text{ Hz}$ 时, 辐射声压形状近似“8”形, 且声压值在大部分区域内随环筋高度增加而增大, 环筋高度由 0 到 3 cm 再到 5 cm 过程中, 在激励侧声压极大方向由 $\theta=80^\circ$ 转到 130° 再转到 120° , 即环筋后壳体尾部(锥体部)辐射加强。在 $f=601\text{ Hz}$ 处指向性变得复杂, 环筋高度增加时声场指向性变化不大, 但声压幅值明显增加。

2.2 环筋宽度对轴对称壳振动声辐射的影响

对高度 $t=3\text{ cm}$ 的 3 根在 BC 间等间距分布、宽度 b 分别为 0、1、3 cm 的环筋柱壳进行计算。在 592 号节点(0, 0.182 m, 0.3 m)加 $F_z=10\text{ N}$ 。

从图 7~图 10 可见, 环筋宽度增加时激励点法向声强以及辐射声功率增加, 而表面平均振速减小, 因而导致声辐射效率的增加。比较图 5 和图 10(见下页)可见, 环筋高度增加比环筋宽度增大引起的声辐射效率增量。从图 11(见下页)可见, 环筋宽度增大时引起的指向性变化类似于环筋高度的情形。

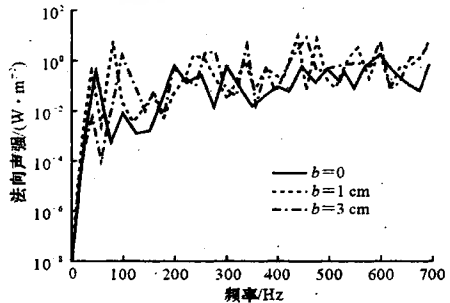


图 7 环筋宽度对轴对称壳受激励点法向声强的影响

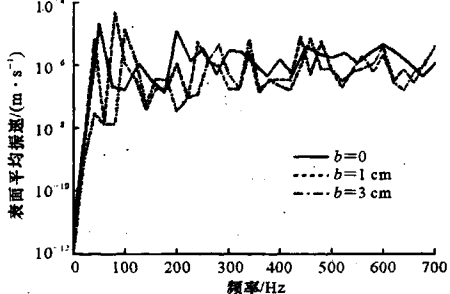


图 8 环筋宽度对轴对称壳表面平均振速的影响

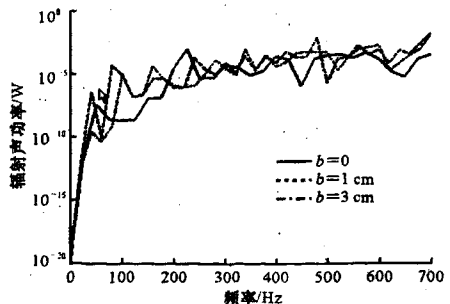


图 9 环筋宽度对轴对称壳辐射声功率的影响

2.3 环筋数目对轴对称壳振动声辐射的影响

在保持环筋宽度 $b=1\text{ cm}$ 、环筋高度 $t=3\text{ cm}$ 不变的情况下, 研究在 BC 间等间距分布的环筋数目 N 为 0、3、5 时对水下轴对称壳声振特性的影响。

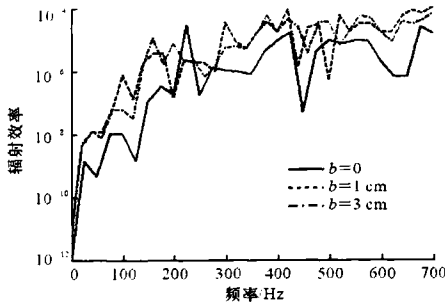


图 10 环筋宽度对轴对称壳辐射效率的影响

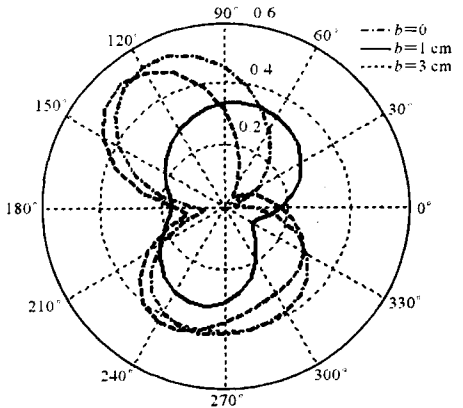
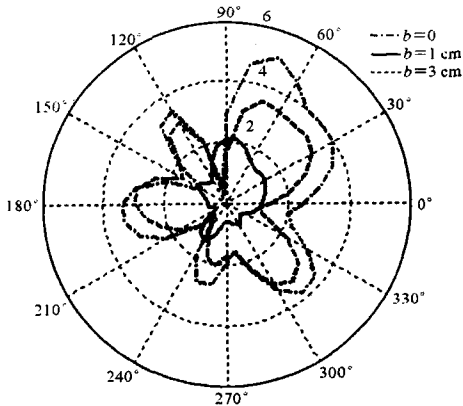
(a) $f=201$ Hz(b) $f=601$ Hz

图 11 环筋宽度对轴对称壳辐射声场指向性的影响($r=5$ m)
在 592 号节点(0, 0.182 m, 0.3 m)加 $F_z = 10$ N。

从图 12 ~ 图 15 可见,环筋数目 N 增加时激励点法向声强以及辐射声功率略有增加,而表面平均振速减小,因而导致声辐射效率的增加。从图 16(见下页)可见,在 $f=201$ Hz 处,环筋数目增大时引起的指向性变化类似于环筋高度的情形;在 $f=601$ Hz 处,环筋增多时对称壳尾部声辐射增强,原因是环筋增多时对称壳中部声辐射受到抑制。

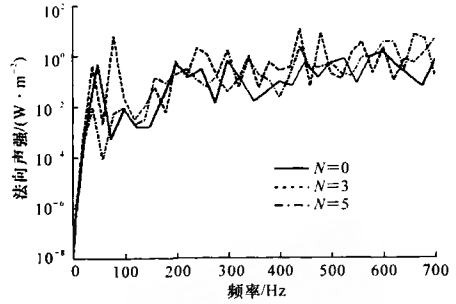


图 12 环筋数目对轴对称壳受激励点法向声强的影响

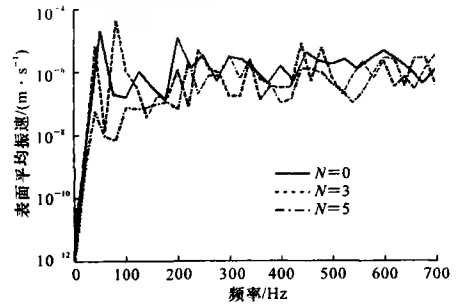


图 13 环筋数目对轴对称壳表面平均振速的影响

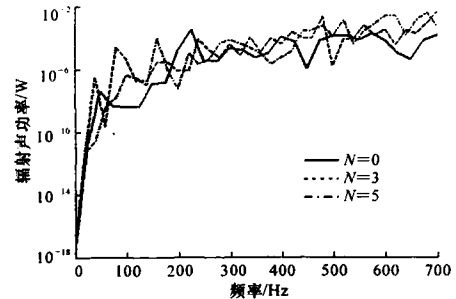


图 14 环筋数目对轴对称壳辐射声功率的影响

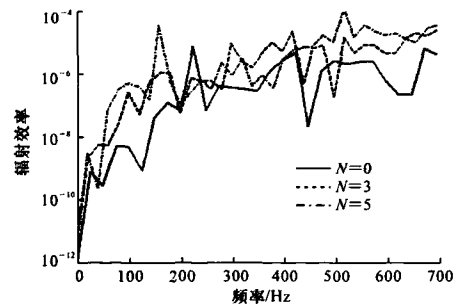


图 15 环筋数目对轴对称壳辐射效率的影响

3 结 语

(1) 建立了轴对称壳体水中声辐射计算的 FEM/BEM 三维模型,研究了加环筋对轴对称壳的

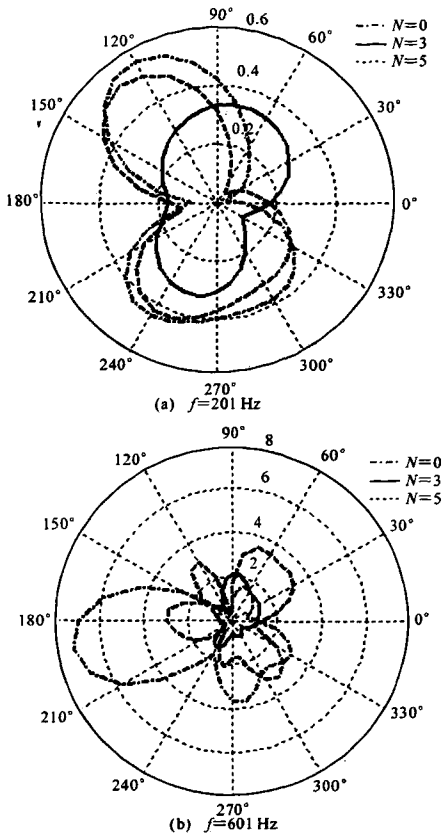


图 16 环筋数目对轴对称壳辐射声场指向性的影响($r=5\text{ m}$)

声振特性的影响,探索了环筋的高度、宽度和数目对轴对称壳的表面平均振速、辐射功率、辐射效率、激励点法向声强和声场指向性的影响。

(2)随着环筋高度、宽度和数目的增大,激励点法向声强、表面平均振速辐射效率和辐射声功率随频率变化曲线的峰彼此错开。环筋高度、宽度和数目增大时,激励点法向声强以及辐射声功率都有增加,而表面平均振速在减小,因而导致声辐射效率增大。

(3)在频率为 $0\sim 700\text{ Hz}$ 内,环筋高度和宽度变化对声场指向性影响规律类似;低频时环筋数目变化对声场指向性影响规律类似于环筋高度和宽度的影响规律,高频(601 Hz)环筋增多时对称壳尾部声辐射相对增强,而加筋处的中部声辐射相对减弱。

参考文献:

References:

[1] Laulagnet B, Guyader J L. Sound radiation by finite

cylindrical ring stiffened shells[J]. Journal of Sound and Vibration,1990,138(2):173-191.

[2] Harari A, Sandman E, Zaldonis J A. Analytical and experimental determination of the vibration and pressure radiation from a submerged, stiffened cylindrical shell with two end plates[J]. Journal of Acoustical Society of America,1994,95(6):3360-3368.

[3] 汤渭霖,何兵蓉. 水中有限长加筋圆柱壳体振动和声辐射近似解析解[J]. 声学学报,2001,26(1):1-5.
TANG Wei-lin, HE Bing-rong. Approximate analytical solution of vibration and sound radiation from stiffened finite cylindrical shells in water[J]. Acta Acustica,2001,26(1):1-5.

[4] 陈美霞,骆东平,陈小宇,等. 双层柱壳在流场中辐射声场压力的解析解[J]. 应用数学和力学,2002,23(4):415-421.
CHEN Mei-xia, LUO Dong-ping, CHEN Xiao-yu, et al. Analytical solution of radiation sound pressure of double cylindrical shells in fluid medium[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2002,23(4):415-421.

[5] 陈美霞,骆东平,陈小宇,等. 有限长双层壳体声辐射理论及数值分析[J]. 中国造船,2003,44(4):59-67.
CHEN Mei-xia, LUO Dong-ping, CHEN Xiao-yu, et al. Theoretical and numerical analysis on sound radiation of a finite double shell[J]. Chinese Ship Building, 2003,44(4):59-67.

[6] 陈美霞,骆东平,陈小宇,等. 复杂双层壳体声辐射性能分析[J]. 声学学报,2004,29(3):209-215.
CHEN Mei-xia, LUO Dong-ping, CHEN Xiao-yu, et al. Analysis of sound radiation characteristics of complex double shells[J]. Acta Acustica, 2004,29(3):209-215.

[7] 商德江,何祚镛. 加肋双层圆柱壳振动声辐射数值计算分析[J]. 声学学报,2001,26(3):193-201.
SHANG De-jiang, HE Zuo-yong. The numerical analysis of sound and vibration from a ring-stiffened cylindrical double-shell by FEM and BEM[J]. Acta Acustica,2001,26(3):193-201.

[8] 商德江. 复杂弹性壳体水下结构振动和声辐射特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2000.