文章编号：1007-7294(2025)07-1159-08

水下加筋板–声空腔耦合损耗因子计算方法研究

陆　斌[1]，盛美萍[1,2]，郭志巍[1,2]，程一鹏[2]，杨长江[1,2]
（1. 西北工业大学 宁波研究院，浙江 宁波 315048；2. 西北工业大学 航海学院，西安 710068）

摘要： 加筋板结构因其具有较高的结构刚度和强度，被广泛应用于船舶结构设计。本文在加筋板分频段分析模型基础上结合声空腔子系统统计能量分析（SEA）参数计算方法，建立了加筋板结构与声空腔间的辐射效率计算模型，并考虑流体负载的影响，从而获得了水下加筋板–声空腔耦合损耗因子计算方法，进一步使用 SEA 商用软件对计算方法进行了验证。研究分析了流体负载和结构加筋对耦合特性的影响，结果表明：流体负载和结构加筋主要影响耦合结构截止频率以下频段的辐射效率和耦合损耗因子，对截止频率以上的频段影响较小。研究成果可为船舶舱室噪声预报与声学设计提供理论支撑。

关键词： 加筋板；板–声腔耦合系统；统计能量分析；耦合损耗因子；辐射效率
中图分类号： TB535　　**文献标识码：** A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.07.014

Calculation method of coupling loss factor of underwater ribbed plate-acoustic cavity system

LU Bin[1], *SHENG Mei-ping*[1,2], *GUO Zhi-wei*[1,2], *CHENG Yi-peng*[2], *YANG Chang-jiang*[1,2]
(1. Ningbo Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315048, China; 2. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi’an 710068, China)

Abstract: Ribbed plate structures are widely used in ship structural design due to their high structural stiffness and strength. In this paper, based on the frequency band analysis model of ribbed plates and the statistical energy analysis (SEA) parameter calculation method of the acoustic cavity subsystem, a calculation model of the radiation efficiency between the ribbed plate structure and the acoustic cavity was established, and the influence of fluid load was taken into account, thus the method for calculating the coupling loss factor of an underwater ribbed plate with an acoustic cavity was obtained. Further, the calculation method was verified by using SEA commercial software. The effects of fluid load and structural reinforcement on the coupling characteristics were studied and analyzed. The results show that the fluid load and structural reinforcement mainly affect the radiation efficiency and coupling loss factor in the frequency band below the cut-off frequency of the coupling structure, and have little effect on that in the frequency band above the cut-off frequency. The research results of this paper can provide theoretical support for the prediction of ship cabin noise and acoustic design.

收稿日期：2025-01-19
基金项目：宁波市自然科学基金资助项目（2021J057）；国家自然科学基金资助项目（52301388）；船舶总体性能创新研究开放基金资助项目（33122232）
作者简介：陆　斌（1994–），男，硕士，工程师；
盛美萍（1970–），女，博士，教授，通讯作者，E-mail: acoustics@nwpu.edu.cn。

Key words: ribbed plate; plate-cavity coupling system; statistical energy analysis; coupling loss factor; radiation efficiency

0 引 言

加筋板类结构与内部声腔的耦合声振问题一直是振动声学相关领域的重要研究方向。加筋板结构被广泛应用于各工程领域,如舰船、潜艇、飞机、火箭、车辆等重要运载装备的各类舱室结构中[1−2]。长久以来,国内外学者对板结构–声耦合问题的研究一直在持续进行中。早期,Dowel 等[3] 研究分析了声腔与飞机壁板结构之间的作用关系,以此为契机开展了结构–声耦合问题研究。随后,Dowell 等[4] 在前期研究基础上建立了板–声腔系统的结构–声耦合数学理论模型,利用该模型分析了板–声腔耦合系统的声振固有特性,并开展了实验验证。Pan 等[5] 研究了板结构–声腔耦合系统声振特性,结果表明耦合系统的每阶模态都包含了板结构振动模态和声场模态两部分。David 等[6] 使用“Onera–MF 方法”计算弹性板与空腔耦合结构系统的频率响应,经验证该方法适用于中频域。

对于弹性板–声腔耦合结构的声振问题,国内学者也进行了大量的研究。黎胜等[7] 建立加筋板结构声传输模型,研究了板厚、肋间距、肋惯性矩和边界条件等因素对声传输特性的影响。靳国永等[8] 研究了弹性板结构封闭声腔的耦合机制和耦合特性,以及耦合特性对系统模态和固有频率的影响及影响程度,发现了规则结构–声腔模态簇耦合特性。俞孟萨等[9] 利用集成模态法和虚拟膜技术建立了非规则声腔自噪声计算声学模型,该模型可预报声腔内部噪声的低中频分量,为研究结构与复杂声腔耦合模型提供了新的思路。刘进等[10] 将加肋声呐透声窗结构简化为矩形板和矩形声腔组成的规则模型,研究了垂向肋骨间距对声呐自噪声的影响。王园[11] 和程传峰等[12] 利用声振耦合理论和模态叠加法研究了加筋板与封闭梯形声腔(矩形声腔)耦合结构的声振响应情况。孔德瑜等[13] 对比分析了声腔–弹性板声振耦合模型分别在点力激励和点声源激励下,声腔厚度、激励位置以及边界条件等对弹性板声辐射特性的影响和区别。

目前,国内外大部分工作主要针对弹性板–声腔耦合结构开展研究,耦合结构形式相对简单,而实际工程中的板–声腔耦合结构更为复杂。以舰船舱室结构为例,其板结构以加筋板为主体,加筋板的一面常处于含流体负载(海水)状态。因此,本文主要研究这类水下加筋板与声空腔的耦合结构的耦合损耗因子及辐射效率理论计算方法,具有重要的工程应用价值。

本文先从结构振动方程入手,在对结构频散特性进行分析的基础上,采用统计能量分析方法(SEA)针对含流体负载的加筋板结构和声空腔的辐射效率和耦合损耗因子这两个主要声振特性参数进行计算,基于此可对耦合系统进行声振特性预报,为复杂船舶结构声学设计提供理论指导。

1 理论计算模型

1.1 水下加筋板结构统计能量分析参数计算模型

加筋板结构示意图如图 1 所示,其基底板长为L_x,宽为L_y,厚为h,基底板的杨氏模量为E,密度为ρ,泊松比为μ;板面上正交布置有N_x条沿y方向的筋和N_y条沿x方向的筋,二者间距分别为S_x和S_y,截面积分别为A_x和A_y,密度分别为ρ_x和ρ_y,应用最小势能原理对其振动特性进行分析。

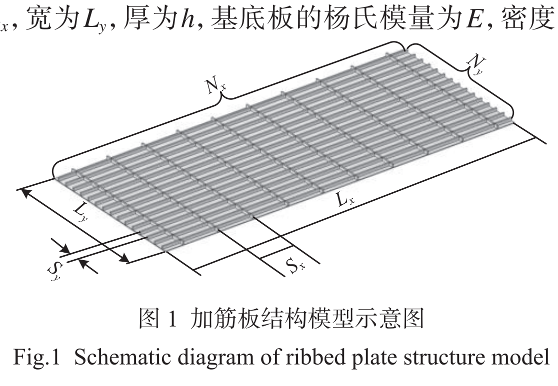


图 1 加筋板结构模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of ribbed plate structure model

在加筋板结构统计能量分析参数计算时,根据弯曲波波长λ_B与两方向上筋间距S_x和S_y的大小关系,可将筋对结构等效面密度M、x方向等效刚度D_x与y方向等效刚度D_y的影响分为以

下四种情况进行讨论。其中, D为均匀板弯曲刚度, G_xJ_x与G_yJ_y为筋的扭转系数。

（1）当弯曲波波长大于二个方向上筋间距最大值时, 即$\lambda_{\rm B} > \max(S_x, S_y)$, 有

$$\begin{cases} M = \rho h + \rho_x \dfrac{A_x}{S_x} + \rho_y \dfrac{A_y}{S_y} \\ D_x = D + \dfrac{E_x I_x}{S_x} + \dfrac{G_x J_x}{S_x} \\ D_y = D + \dfrac{E_y I_y}{S_y} + \dfrac{G_y J_y}{S_y} \end{cases} \tag{1}$$

（2）当弯曲波波长大于x方向的筋间距而小于y方向的筋间距时, 即$S_x < \lambda_{\rm B} < S_y$, 有

$$\begin{cases} M = \rho h + \rho_x \dfrac{A_x}{S_x} \\ D_x = D + \dfrac{E_x I_x}{S_x} + \dfrac{G_x J_x}{S_x} \\ D_y = D \end{cases} \tag{2}$$

（3）当弯曲波波长大于y方向的筋间距但小于x方向的筋间距时, 即$S_y < \lambda_{\rm B} < S_x$, 有

$$\begin{cases} M = \rho h + \rho_y \dfrac{A_y}{S_y} \\ D_x = D \\ D_y = D + \dfrac{E_y I_y}{S_y} + \dfrac{G_y J_y}{S_y} \end{cases} \tag{3}$$

（4）当弯曲波波长小于二个方向上的筋间距最小值时, 即$\lambda_{\rm B} < \min(S_x, S_y)$, 该种情况可忽略筋对均匀板结构的影响, 此时$M = \rho h$, $D_x = D$, $D_y = D$。

利用最小势能原理可计算得到含流体负载的加筋板结构的弯曲波波数:

$$K = \sqrt{\frac{\omega}{2}\left(\sqrt{\frac{M'}{D_x}} + \sqrt{\frac{M'}{D_y}}\right)} \tag{4}$$

式中, M'为考虑流体负载后的等效面密度, 具体计算公式为

$$M' = \rho h + \rho_x \frac{A_x}{S_x} + \rho_y \frac{A_y}{S_y} + \frac{\rho_0}{\sqrt{k_{\rm P}^2 - k_0^2}} \tag{5}$$

式中, $k_{\rm p} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$为均匀板弯曲波波数, ρ_0为流体密度, $k_0 = \omega/c_0$为流体中的声波数。

根据不含流体负载的均匀板纵波波速和剪切波波速传统计算理论[14], 推导出含流体负载加筋板的纵波波速$C_{\rm L}$和剪切波波速$C_{\rm S}$的计算公式, 具体分别为

$$C_{\rm L} = \sqrt{\frac{EhS}{\rho hS(1-\mu^2) + \rho_{\rm r} h_{\rm r} S_{\rm r}(1-\mu_{\rm r}{}^2)}} \tag{6}$$

$$C_S = \sqrt{\frac{EhS}{2\rho hS(1+\mu) + 2\rho_{\rm r} h_{\rm r} S_{\rm r}(1+\mu_{\rm r})}} \tag{7}$$

式中, $\rho_{\rm r}$、$h_{\rm r}$和$S_{\rm r}$分别为筋的密度、高度和筋与板之间的接触面积, S为基底板的表面积。

含流体负载的加筋板纵波波数$K_{\rm L}$与剪切波波数$K_{\rm S}$可通过公式[14] 计算得到, 即

$$K_{\rm L} = \frac{\omega}{C_{\rm L}} \tag{8}$$

$$K_{\rm S} = \frac{\omega}{C_{\rm S}} \tag{9}$$

加筋板纵波模态密度$n_{\rm L}(\omega)$和剪切波模态密度$n_{\rm S}(\omega)$可通过公式[14] 计算得到, 即

$$n_{\rm L}(\omega) = \frac{S\omega}{2\pi C_{\rm L}^2} \tag{10}$$

$$n_{\mathrm{S}}(\omega)=\frac{S\omega}{2\pi C_{\mathrm{S}}^2} \tag{11}$$

通过上述的理论计算模型即可得到水下加筋板结构的波数、波速和模态密度。

1.2 水下加筋板–声空腔耦合损耗因子和辐射效率计算模型

含流体负载的加筋板–声空腔耦合损耗因子计算模型的耦合结构示意图如图2所示，其中灰色长方体为声空腔，上面绿色面为加筋板结构，两者耦合类型为面耦合。

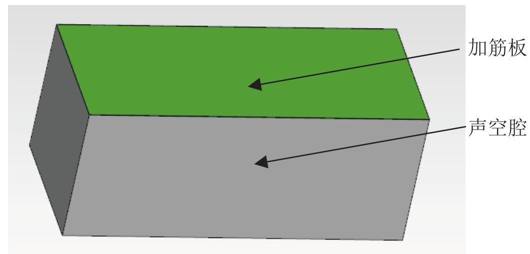


图2 加筋板–声空腔耦合关系示意图

Fig.2 Schematic diagram of the coupling relationship between a ribbed plate and an acoustic cavity

加筋板与声空腔之间的相互耦合作用可以用结构–声空腔间的辐射效率进行表征。在计算辐射效率时，需要考虑两个重要的频率。第一个是加筋板的x和y方向上的第一模态频率f_{11}，其表达式为

$$f_{11}=\frac{c_0^2}{4f_c}\left(\frac{1}{l_1^2+l_2^2}\right) \tag{12}$$

第二个是满足加筋板声辐射条件的临界频率，也称截止频率，只有当弯曲振动的频率大于截止频率时，加筋板才能辐射声波，其表达式为

$$f_{\mathrm{c}}=\frac{c_0^2}{1.8C_{\mathrm{L}}t} \tag{13}$$

式中，c_0为波在周围介质中的传播速度，l_1、l_2和t分别为板的长度、宽度和厚度，C_{L}为纵波在加筋板中传播的速度。

根据所获得的两个频率f_{11}和f_{c}，加筋板–声空腔耦合结构的损耗因子可通过标准EN 12354–1:2000[15]中的相关公式计算得到，即

$$\begin{cases}\tau=\left(\dfrac{2\rho_0c_0}{2\pi fM'}\right)^2\dfrac{\pi f_{\mathrm{c}}\sigma^2}{2f\eta_{\mathrm{tot}}} & f>f_{\mathrm{c}}\\ \tau=\left(\dfrac{2\rho_0c_0}{2\pi fM'}\right)^2\dfrac{\pi\sigma^2}{2\eta_{\mathrm{tot}}} & f\approx f_{\mathrm{c}}\\ \tau=\left(\dfrac{2\rho_0c_0}{2\pi fM'}\right)^2\left(2\sigma_f+\dfrac{(l_1+l_2)^2}{l_1^2+l_2^2}\sqrt{\dfrac{f_{\mathrm{c}}}{f}}\dfrac{\sigma^2}{\eta_{\mathrm{tot}}}\right) & f<f_{\mathrm{c}}\end{cases} \tag{14}$$

式中，σ_f和η_{tot}的具体计算公式为

$$\sigma_f=0.5\left[\ln\left(k_0\sqrt{l_1l_2}\right)-\Lambda\right];\ \sigma_f\leqslant 2 \tag{15}$$

$$\eta_{\mathrm{tot}}\approx\eta_{\mathrm{int}}+\frac{M'}{485\sqrt{f}} \tag{16}$$

式中，η_{int}为加筋板结构内损耗因子，辐射效率σ和Λ可参考标准EN 12354–1:2000[15]中的计算方法进行计算。

2 算例分析

本章主要通过算例验证本文理论计算模型的准确性和有效性，分析流体负载和加筋结构对辐射效率和耦合损耗因子的影响。本章算例中声空腔的长度为4.7124 m，宽度为2 m，高度为2 m，声空腔介质密度为1.21 kg/m^3，介质声速为343 m/s。加筋板流体负载密度为1026 kg/m^3，流体声速为1500 m/s。加筋板和均匀板的结构参数如表1所示。

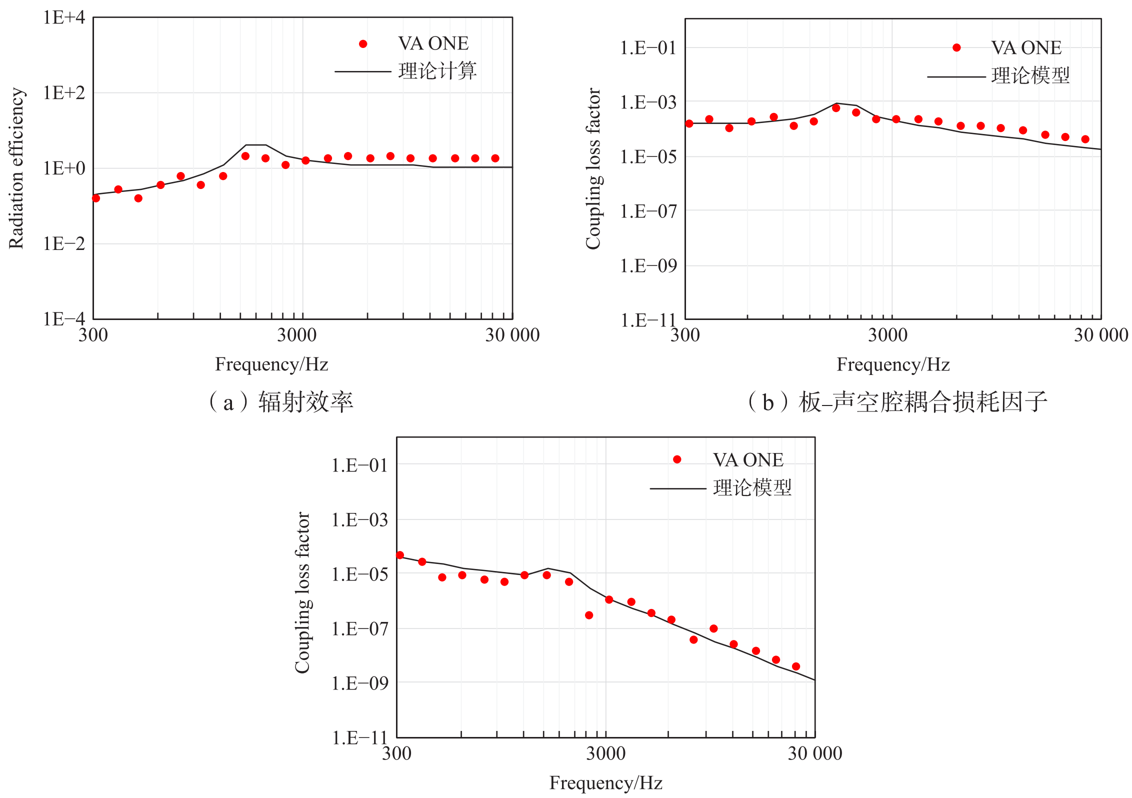
表 1　加筋板结构几何及材料参数表

Tab.1　Geometric and material parameters of reinforced plate structure

名称	数值	单位	名称	数值	单位
长度L_x	4.7124	m	筋高度h	0.04	m
宽度L_y	2	m	筋杨氏模量E_r	2.1×10^{11}	Pa
厚度h	0.008	m	筋密度ρ_r	7800	kg/m^3
杨氏模量E	2.1×10^{11}	Pa	筋泊松比μ_r	0.3125	/
密度ρ	7800	kg/m^3	沿x方向筋间距S_x	0.4712	m
泊松比μ	0.3125	/	沿y方向筋间距S_y	0.1333	m
筋宽度b	0.016	m			

2.1 理论计算模型正确性和有效性验证

通过采用理论模型得到的计算结果与现有商用软件 VA ONE 计算结果进行对比，如图 3 所示。



（a）辐射效率　　（b）板–声空腔耦合损耗因子

（c）声空腔–板耦合损耗因子

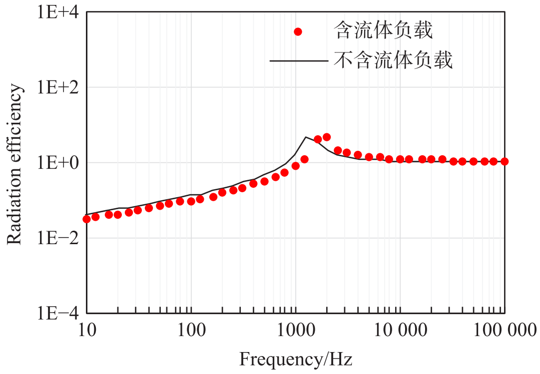
图 3　加筋板–声空腔辐射效率和耦合损耗因子计算结果对比

Fig.3　Comparison of radiation efficiency and coupling loss factor of stiffened plate-acoustic cavity system from different methods

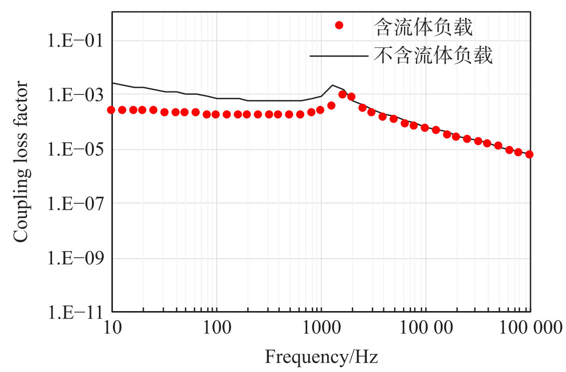
由图 3 可知，理论模型计算得到的含流体负载的加筋板–声空腔耦合损耗因子及辐射效率与 VA ONE 的计算结果在 300 Hz 之后的中高频段吻合较好，可以证明本文中的理论计算模型在中高频声振预报中具有较好的准确性和有效性。

2.2 流体负载对辐射效率和耦合损耗因子的影响

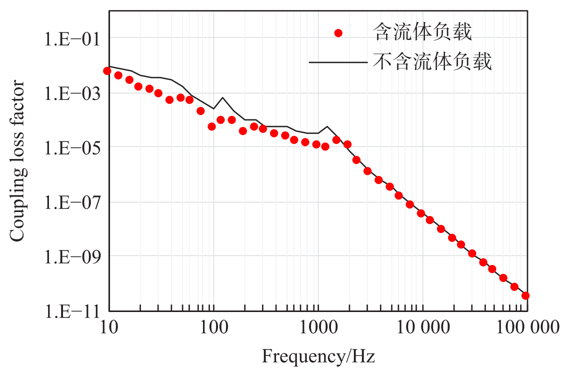
以加筋板–声空腔耦合系统为例，通过算例分析流体负载（海水）对耦合损耗因子和辐射效率的影响，对比了含流体负载和不含流体负载情况下的辐射效率和耦合损耗因子，结果如图 4 所示。



（a）辐射效率



（b）板–声空腔耦合损耗因子



（c）声空腔–板耦合损耗因子

图4 流体负载对辐射效率和耦合损耗因子的影响

Fig.4 Influence of fluid load on radiation efficiency and coupling loss factor

由图4可知,含流体负载的耦合系统中板的辐射效率在截止频率以下频段内要明显小于不含流体负载的辐射效率,从而导致含流体负载的耦合系统的耦合损耗因子在截止频率以下频段内要小于不含流体负载的耦合损耗因子,而截止频率以上频段的辐射效率和耦合损耗因子基本保持不变。因此流体负载主要影响耦合结构截止频率以下频段的辐射效率和耦合损耗因子,对截止频率以上频段的影响较小。

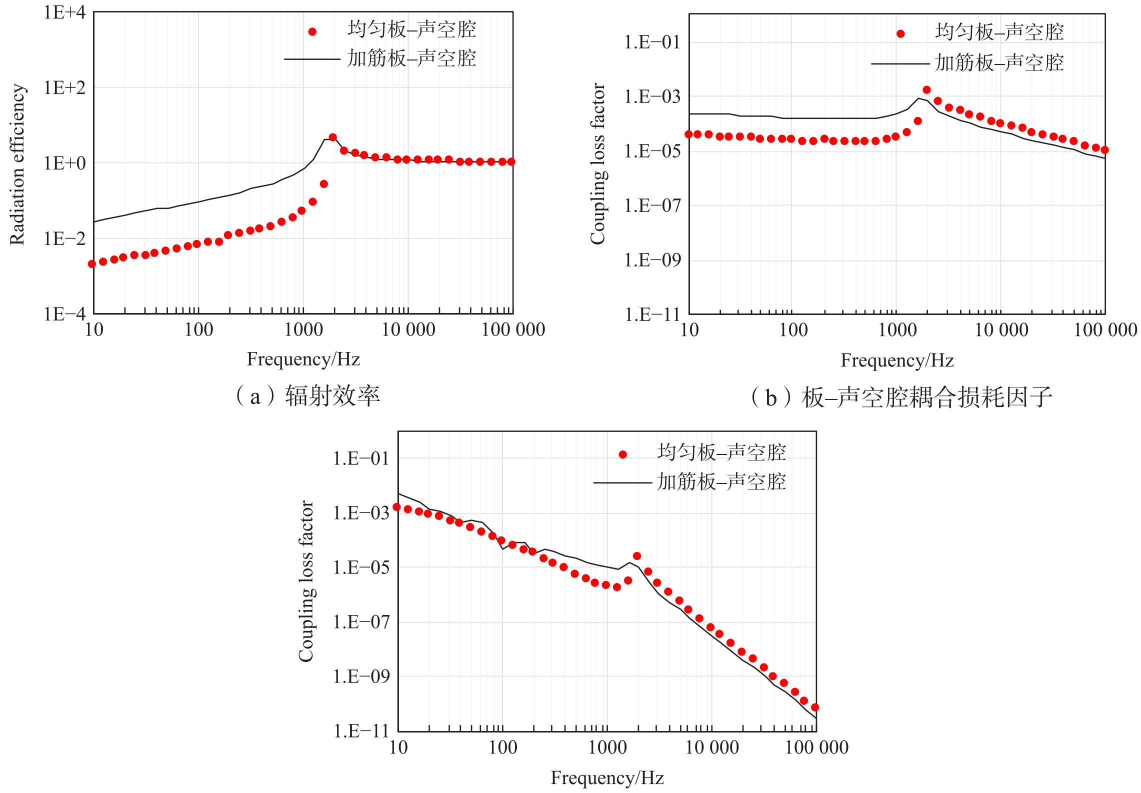
2.3 加筋结构对辐射效率和耦合损耗因子的影响

通过算例分析加筋结构对耦合损耗因子和辐射效率的影响,其中加筋板和均匀板(不加筋)的一面均在流体负载状态下,流体介质为海水,算例对比结果如图5所示。

由图5可知,加筋结构的辐射效率在截止频率以下频段内要明显大于不加筋结构的辐射效率,由其组成的耦合系统的耦合损耗因子,在截止频率以下频段内要大于不加筋结构的耦合损耗因子,而截止频率以上频段的辐射效率和耦合损耗因子基本保持不变。因此,加筋主要影响了耦合结构截止频率以下频段的辐射效率和耦合损耗因子,加筋会增大辐射效率和耦合损耗因子,而对截止频率以上频段的影响较小。

3 结 论

本文基于统计能量分析方法构建了含流体负载的加筋板–声空腔耦合结构的声振预报模型,辐射效率和耦合损耗因子的理论计算结果与商用软件VA ONE结果吻合较好,通过数值算例验证了文中分析模型的正确性和有效性。利用理论计算模型研究分析了流体负载和加筋结构对辐射效率和耦合损耗因子的影响,结果表明:



（a）辐射效率

（b）板–声空腔耦合损耗因子

（c）声空腔–板耦合损耗因子

图 5　加筋结构对辐射效率和耦合损耗因子的影响

Fig.5　Influence of stiffened structure on radiation efficiency and coupling loss factor

（1）流体负载主要影响耦合结构截止频率以下频段的辐射效率和耦合损耗因子，对截止频率以上频段的影响较小，附加流体负载后截止频率以下频段的辐射效率和耦合损耗因子均变小。

（2）加筋主要影响耦合结构截止频率以下频段的辐射效率和耦合损耗因子，会增大辐射效率和耦合损耗因子，而对截止频率以上频段的影响较小。

参　考　文　献：

[1] 卢天健，辛锋先. 轻质板壳结构设计的振动和声学基础[M]. 北京：科学出版社，2012.
Lu T J, Xin F X. Vibration and acoustic foundations for the design of lightweight plate shell structures[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

[2] 俞孟萨，刘延利，廖彬彬. 腔室内部声场与结构振动耦合特性及噪声控制研究综述[J]. 船舶力学，2012, 16(1–2): 191–201.
Yu M S, Liu Y L, Liao B B. Summarization on the research of coupling character between cavity acoustics and structure vibration together with noise control[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(1–2): 191–201. (in Chinese)

[3] Dowell E H, Voss H M. The effect of a cavity on panel vibration[J]. AIAA Journal, 1963, 1(2): 476–477.

[4] Dowell E H, Iii G F G, Smith D A. Acoustoelasticity: General theory, acoustic natural modes and forced response to sinusoidal excitation, including comparisons with experiment[J]. Journal of Sound and Vibration, 1977, 52(4): 519–542.

[5] Pan J, Bies D A. The effect of fluid–structural coupling on sound waves in an enclosure-theoretical part[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87(2): 691–707.

[6] David J M, M Menelle. Validation of a medium-frequency computational method for the coupling between a plate and a water-filled cavity[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 265(4): 841–861.

[7] 黎　胜, 赵德有. 加筋板结构声传输研究[J]. 船舶力学, 2001, 5(4): 61–66.
Li S, Zhao D Y. Research on sound transmission in reinforced plate structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 2001, 5(4): 61–66. (in Chinese)
[8] 靳国永, 杨铁军, 刘志刚, 等. 弹性板结构封闭声腔的结构–声耦合特性分析[J]. 声学学报, 2007, 32(2): 178–188.
Jin G Y, Yang T J, Liu Z G, et al. Analysis of structure-acoustic coupling characteristics of an elastic plate structure enclosed cavity[J]. Journal of Acoustics, 2007, 32(2): 178–188. (in Chinese)
[9] 俞孟萨, 白振国, 吕世金. 随机面激励的非规则声腔自噪声计算方法研究[J]. 船舶力学, 2015, 19(8): 1001–1010.
Yu M S, Bai Z G, Lü S J. Calculation of self noise in an irregular acoustic cavity under random surface excitation[J]. Journal of Ship Mechanics, 2015, 19(8): 1001–1010. (in Chinese)
[10] 刘　进, 王志伟, 沈　琪, 等. 加肋透声窗水动力自噪声的数值/解析混合计算方法研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(2): 282–290.
Liu J, Wang Z W, Shen Q, et al. Hybrid numerical analytical method for calculating hydrodynamic self-noise of ribbed acoustic window[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(2): 282–290. (in Chinese)
[11] 王　园, 李　磊, 盘朝奉, 等. 基于解析法的加筋板封闭梯形声腔的响应分析[J]. 振动工程学报, 2021, 34(5): 1045–1052.
Wang Y, Li L, Pan C F, et al. Response analysis of a closed trapezoidal sound cavity with stiffened plates based on analytical methods[J]. Journal of Vibration Engineering, 2021, 34(5): 1045–1052. (in Chinese)
[12] 程传峰, 金　明, 王项如, 等. 加筋板封闭矩形声腔的声振耦合特性研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(2): 24–29.
Cheng C F, Jin M, Wang X R, et al. Study on the acoustic vibration coupling characteristics of a closed rectangular cavity with reinforced plates[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2022, 60(2): 24–29. (in Chinese)
[13] 孔德瑜, 王　刚, 倪俊芳. 声腔–弹性板结构在不同激励下声辐射特性研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 126–137.
Kong D Y, Wang G, Ni J F. Acoustic radiation characteristics of cavity-elastic plate model under different excitation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 126–137. (in Chinese)
[14] 姚德源, 王其政. 统计能量分析原理及其应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
Yao D Y, Wang Q Z. Principle and application of statistical power analysis [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. (in Chinese)
[15] Swedish institute for standards. EN 12354-1: 2000. Building acoustics - Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of products - Part 1: Airborne sound insulation between rooms[S]. Stockholm, Sweden, 2000.