

文章编号: 1007-7294(2024)10-1611-11

# 轴-艇耦合系统声振仿真中的不规则频率问题

段嘉希<sup>1,2</sup>, 张林<sup>1,2</sup>, 孙雪海<sup>1,2</sup>, 殷丽君<sup>1,2</sup>, 笄良龙<sup>1,2</sup>

(1. 海军潜艇学院航海观通系, 山东青岛266199; 2. 青岛海洋科技中心, 山东青岛266237)

**摘要:**采用边界元方法求解频域流固耦合问题时,在内域虚拟流场的共振频率处会出现不规则频率问题,在这些不规则频率处辐射声场的求解常常出现较大波动。为研究实尺度潜艇的水下振动声辐射,本文建立基于Suboff艇型的轴系-艇体耦合系统。基于有限元/边界元法,分别采用/不采用消除不规则频率的封闭虚拟阻抗曲面(CVIS)法,计算轴系-艇体耦合系统的中低频段振动及辐射噪声。结果表明:(1)对于湿表面外形较复杂的细长艇体,同样会出现不规则频率,甚至连成“不规则频带”;(2)若不消除不规则频率,不规则频率处的辐射声压级有较大误差,在深海环境中可以“污染”到远场会聚区处;(3)对于主体结构为细长圆柱壳的艇形,首个不规则频率可参照与之尺度相当的细长圆柱壳不规则频率的表达式得出,首个无量纲不规则频率约为 $ka=2.4$ 。

**关键词:**边界元; 振动声辐射; 不规则频率; 会聚区

中图分类号: TB53 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.10.013

## Irregular frequency problem of vibroacoustic simulation of a shaft-hull system

DUAN Jia-xi<sup>1,2</sup>, ZHANG Lin<sup>1,2</sup>, SUN Xue-hai<sup>1,2</sup>, YIN Li-jun<sup>1,2</sup>, DA Liang-long<sup>1,2</sup>

(1. Department of Navigation Observation Communication, Naval Submarine Academy, Qingdao 266199, China;

2. Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** If the fluid-structure interaction problem in frequency domain is solved by boundary element method, irregular frequencies will appear at the resonant frequencies of virtual interior fluid domain and exhibit large fluctuation. In order to investigate the underwater acoustic radiation properties of a full-scale submarine, a shaft-hull coupled system was established based on Suboff model. The FE/BE method was adopted to calculate the vibroacoustic radiation of the system in low- and medium- frequency. The closed virtual impedance surface (CVIS) method was respectively used and not used to study the influence of irregular frequencies. It is shown that: (1) for slender submarine hull with complicated shape, irregular frequencies are not only negligible, but even exhibit in continuous irregular bands; (2) enormous errors will occur if irregular frequencies are not eliminated, and convergence zones in far field of deep ocean environment are also “contaminated”; (3) for submarine whose the main body is constructed as slender cylindrical shell, the 1<sup>st</sup> irregular frequency can be obtained according to the analytical expression of the irregular frequencies of slender cylindrical shell, and the non-dimensional 1<sup>st</sup> irregular frequency is about  $ka=2.4$ .

**Key words:** boundary element method; vibroacoustic radiation; irregular frequency; convergence zone

收稿日期: 2024-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52201392); 国家重点研发计划项目(2021YFC3100900)

作者简介: 段嘉希(1987-),男,博士,助理研究员; 笄良龙(1967-),男,教授,博士生导师,

E-mail: dalianglong@sohu.com。

## 0 引 言

在潜艇结构声学通道的研究中,通常将复杂的艇体结构简化为轴系-艇体耦合系统<sup>[1]</sup>或桨-轴系-艇体耦合系统<sup>[2]</sup>。目前,针对这类问题的实尺度模型分析主要面向艇体 100 Hz 以下频段的振动噪声控制<sup>[3]</sup>,而对于 100 Hz 以上频段关注较少。事实上,分析更高频段的艇体振动声辐射问题,一方面可以评估减振降噪措施在更高频段的效果,另一方面可以得到更多的艇体线谱与连续谱特征,为声探测与识别提供技术支持。针对流固耦合振动声辐射问题,有限元耦合边界元法是公认的计算精度较高的算法,主要在于其在边界积分方程中可根据声场环境的不同而选择与之匹配的 Green 函数<sup>[4-5]</sup>。在频域边界元计算中,一个重要的问题是“不规则频率”的消除。不规则频率的产生机理可以有多种表述,其中一种表述为:选用的声场 Green 函数,无论是针对自由场、半自由场或更加复杂的声场环境,均无法考虑流固耦合界面对声场的影响<sup>[6]</sup>。因此,边界元方程事实上成为了流场中一系列分布于流固耦合界面上的点源(单极子源或高阶源)强度与相位的求解,而流固耦合界面内外的流体性质是连续变化的。当激励频率接近内部流体的共振频率时,边界元方程的系数矩阵近似奇异,导致简单源积分方程无解,而 Helmholtz 方程出现无穷多解<sup>[7]</sup>。Marburg 等<sup>[6]</sup>指出,不规则频率不仅与结构的外形有关,也与结构的振动模式有关;同时,随着计算频率上升,不规则频率的分布也更加密集,导致难以将不规则频率与有效分析频率区分开来。

针对 Helmholtz 积分方程,使用最广泛的消除不规则频率的方法是 CHIEF 法<sup>[7]</sup>与 Burton-Miller 法<sup>[8]</sup>。CHIEF 法在结构内域插入若干个 CHIEF 点,抵消内域虚拟流场的共振,从而消除不规则频率。然而,当 CHIEF 点落在内域流体共振的节线上时,CHIEF 法将失效<sup>[9]</sup>;另外,随着频率增高,振型节线更加密集<sup>[10]</sup>,这都为 CHIEF 点的选取增加了难度。对此, Wu<sup>[10]</sup>提出了以 CHIEF 块代替 CHIEF 点,有效地改进了 CHIEF 法。Chen 等<sup>[11]</sup>将奇异值分解技术引入 CHIEF 法中,可以预报为消除不规则频率所需的有效 CHIEF 点数量,并根据 CHIEF 点的坐标判断是否为有效 CHIEF 点。Burton-Miller 法<sup>[8]</sup>基于 Helmholtz 积分方程与其法向导数的特征频率不一致的特性,将这两个方程通过一个虚数耦合系数  $\alpha = i$  (其中  $i = \sqrt{-1}$ ) 叠加,从而将不规则频率变为复数<sup>[12]</sup>,达到在实数域内消除不规则频率的目的。进一步设定  $\alpha = ik$ ,可以将系数矩阵的条件数降低至极小值,进而得到更为准确的结果<sup>[13]</sup>。在 Burton-Miller 法的实际计算中,主要难点在于,Green 函数的二阶混合偏导数引入了超奇异积分项,导致耗时增大<sup>[14]</sup>。为此,将超奇异积分项进行泰勒级数展开<sup>[14]</sup>,或引入静态 Green 函数<sup>[15-16]</sup>等技术,可将超奇异项转换为弱奇异项,进而降低计算量。

尽管采用 CHIEF 法、Burton-Miller 法或其改进型方法可以有效消除频域声辐射边界元计算问题中的不规则频率,但必须利用 Green 函数及其法向导数,采用 Helmholtz 积分开展辐射声场的后处理计算。若场点较远,则需要采用更加复杂的声场环境中的声场 Green 函数,这也导致其法向导数更加复杂,且根据不同理论,如简正波模型<sup>[17]</sup>、射线模型<sup>[18]</sup>、抛物方程模型<sup>[19]</sup>等得到的法向导数的表达式多种多样。因此,针对复杂水声环境远场辐射噪声的仿真问题,由于简单源积分只需要计算 Green 函数,所以具有先天优势<sup>[20]</sup>。然而,目前针对简单源积分法导致的声辐射边界元计算中的不规则频率问题研究较少。邹明松等将船舶耐波性频域边界元分析中的消除不规则频率的方法<sup>[21]</sup>引入复杂结构声学边界元频域分析,形成了针对简单源积分方程的封闭虚拟阻抗曲面法(CVIS)<sup>[22]</sup>,在湿表面内人为设置一个 CVIS 曲面,在 CVIS 曲面上利用 Helmholtz 积分,用于吸收内域流体的共振能量,可以有效消除不规则频率。针对海水声速垂直分层的海洋水声环境中复杂结构振动声辐射问题<sup>[23]</sup>,可将 CVIS 曲面上 Helmholtz 积分中的偶极子声源转换为一对相位相反的单极子源,形成等效源 CVIS 法<sup>[24]</sup>,可以避免 Green 函数法向导数的解析求解,从而将 CVIS 法拓展到更加复杂的水声环境中。

目前,在声辐射的边界元计算中,针对不规则频率的消除方法及验证已有较多论述,通常采用球壳这类有解析解的规则模型验证各类算法。而针对实际复杂结构(如潜艇)不规则频率的出现频段及

分布特性,则尚未有专门研究。本文采用以等效源 CVIS 法修正的有限元/边界元法,计算基于 Suboff 艇型的实尺度轴系-艇体耦合系统的中低频振动与声辐射,并与不采用 CVIS 法修正的边界元法对比,分析其不规则频率的产生频段与分布特征。这里特别指出,将圆柱壳结构一半长度对应的频率作为低频段与中频段的分界点,而以圆柱壳环频率为中频段与高频段的分界点<sup>[25]</sup>。

## 1 理论模型

### 1.1 流固耦合湿表面源强求解

对轴-艇耦合系统进行干模态分析,得到干模态位移分布  $\vec{u}_r = \{u_r \ v_r \ w_r \ \theta_{xr} \ \theta_{yr} \ \theta_{zr}\}^T$ , 建立流固耦合边界条件<sup>[20]</sup>如下:

$$\frac{\partial \varphi_r}{\partial n} = i\omega (u_r \vec{n}_x + v_r \vec{n}_y + w_r \vec{n}_z) \quad (1)$$

式中,  $r$  为模态阶数,  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别表示沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的平动,  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$  分别表示绕  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的转动。采用基于封闭虚拟阻抗曲面 (CVIS) 修正的简单源积分方程<sup>[22]</sup>:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi(\vec{r})}{\partial n(\vec{r})} = & -\frac{1}{2} \sigma(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma(\vec{r}_0) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n(\vec{r})} ds + \\ & \frac{1}{4\pi} \iint_{S_i} \frac{Z_{S_i} u_{ni}(\vec{r}_0)}{\rho_0} \frac{\partial^2 G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n_i(\vec{r}_0) \partial n(\vec{r})} - i\omega u_{ni}(\vec{r}_0) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n(\vec{r})} ds \end{aligned} \quad \vec{r} \in S \quad (2)$$

求解各阶干模态振型的辐射源强  $\sigma(\vec{r})$ 。上式中,  $\varphi$  表示辐射速度势,  $\omega = 2\pi f$  表示圆频率, 湿表面接收点  $\vec{r} = (x, y, z)$ , 湿表面源点  $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ,  $\partial/\partial n$  表示取法向导数,  $S$  与  $S_i$  分别为湿表面与虚拟阻抗封闭曲面,  $u_{ni}$  与  $Z_{S_i}$  分别表示虚拟阻抗封闭曲面的法向振速与特性阻抗, 取  $Z_{S_i} = \rho_0 c_0$  可取得最优的消除不规则频率的效果。将各阶干模态振型的源强代回考虑 CVIS 法修正的简单源积分:

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma(\vec{r}_0) G(\vec{r}, \vec{r}_0) ds + \frac{1}{4\pi} \iint_{S_i} \frac{Z_{S_i} u_{ni}(\vec{r}_0)}{\rho_0} \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n_i(\vec{r}_0)} - i\omega u_{ni}(\vec{r}_0) G(\vec{r}, \vec{r}_0) ds \quad \vec{r} \in S \quad (3)$$

得到各阶干模态振型的辐射速度势  $\varphi_r(\vec{r})$ 。若不考虑 CVIS 修正, 式(2)与式(3)则分别简化为

$$\frac{\partial \varphi(\vec{r})}{\partial n(\vec{r})} = -\frac{1}{2} \sigma(\vec{r}) + \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma(\vec{r}_0) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n(\vec{r})} ds \quad \vec{r} \in S \quad (4)$$

与

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \sigma(\vec{r}_0) G(\vec{r}, \vec{r}_0) ds \quad \vec{r} \in S \quad (5)$$

对于水下的流固耦合振动, 各阶干模态振型是非正交的。将第  $r$  阶干模态振型的位移与各阶干模态振型引起的辐射速度势按式(6)组合, 可得到流体附加质量矩阵  $[A]$ 、附加阻尼矩阵  $[B]$  与广义恢复力矩阵  $[C]$ , 矩阵中各元素<sup>[20]</sup>分别为

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{\rho_0}{\omega^2} \operatorname{Re} \left[ \iint_S \vec{n} \cdot \vec{u}_r \cdot i\omega \varphi_j ds \right] \\ B_{ij} = -\frac{\rho_0}{\omega} \operatorname{Im} \left[ \iint_S \vec{n} \cdot \vec{u}_r \cdot i\omega \varphi_j ds \right] \\ C_{ij} = -\rho_0 \iint_S \vec{n} \cdot \vec{u}_r g w_j ds \end{cases} \quad (6)$$

将干结构广义质量矩阵  $[a]$ 、广义阻尼矩阵  $[b]$ 、广义刚度矩阵  $[c]$ 、流体附加质量矩阵  $[A]$ 、附加阻

尼矩阵  $[B]$  和广义恢复力矩阵  $[C]$  组装成为流固耦合动力学方程:

$$[-\omega^2([a] + [A]) + i\omega([b] + [B]) + ([c] + [C])]\{q\} = \{f_c(\omega)\} \tag{7}$$

从中可以解出模态坐标响应  $\{q\}$ 。与声场 Green 函数相结合,采用式(5)可以求出场点  $\vec{r}$  处的辐射速度势,进而得到辐射声压。对于需要考虑不规则频率消除的虚拟阻抗曲面,可采用等效源 CVIS 法,将 CVIS 表面上的声压与法向振速分布数据转换为—对相位近似相反、振速近似相等的等效单极子源  $\sigma(\vec{r}_0^*)$ ,在式(5)基础上叠加 CVIS 等效源对声场的贡献<sup>[24]</sup>:

$$\varphi(\vec{r}) = \iint_{S_i} \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}_0)}{\partial n(\vec{r}_0)} \frac{Z_s}{\rho_0} \sum_{r=1}^m u_{r,ni}(\vec{r}_0) q_r - G(\vec{r}, \vec{r}_0) \sum_{r=1}^m i\omega u_{r,ni}(\vec{r}_0) q_r ds \tag{8}$$

### 1.2 波束位移射线简正波(BDRM)理论

在垂直分层的深海声道中,声场 Green 函数可以采用简正波模型<sup>[17]</sup>表示为

$$G(R, z_s, z; \omega) = \sqrt{8\pi/R} e^{im/4} \cdot \sum_l \Phi(z_s, \nu_l) \Phi(z, \nu_l) \sqrt{\nu_l} e^{i\nu_l R - \beta_l R} \tag{9}$$

式中,  $R, z_s, z$  分别表示湿表面单元与接收点间的水平距离、湿表面单元的深度及接收点的深度,  $\Phi(z, \nu_l)$  为深度方向的本征函数。复数本征值  $\nu_l = \mu_l + i\beta_l$ , 其中,  $\mu_l$  与  $\beta_l$  分别为水平波数与衰减系数。本征函数  $\Phi(z, \nu_l)$  在负跃层以下可采用广义相积分(WKBZ)<sup>[17]</sup>近似表示,根据本征函数的连续性,可求得负跃层以上的本征函数。

本征方程<sup>[17]</sup>可表示为

$$2 \int_{\xi_n}^{\xi_n} \sqrt{k^2(z) - \mu_l^2} dz + \phi_1(\mu_l) + \phi_2(\mu_l) = 2l\pi \quad l = 0, 1, 2, \dots \tag{10}$$

$$\beta_l = \frac{-\ln|V_1(\mu_l)V_2(\mu_l)|}{S(\mu_l) + \delta_1(\mu_l) + \delta_2(\mu_l)} \tag{11}$$

式中,  $\phi_1(\mu_l)$  与  $\phi_2(\mu_l)$  分别为本征声线在海面与海底的相移,  $S(\mu_l), \delta_1(\mu_l)$  与  $\delta_2(\mu_l)$  分别为第  $l$  阶本征声线的跨度以及在海面与海底的波束位移。若  $\mu_l > k_0$ , 本征声线在参考界面以下反转,即反转简正波;若  $\mu_l \leq k_0$ , 本征声线在参考界面处反射,即反射简正波。

采用 Airy 函数  $Ai(t)$  与  $Bi(t)$ , 相移<sup>[17]</sup>可表达为

$$\phi_s = \begin{cases} \frac{\pi}{2} + \arctg\left(\frac{Ai(t)}{Bi(t)}\right) + \arctg\left(\frac{Ai'(t)}{Bi'(t)}\right) & \mu_l > k(h_s) \\ 2 \arctg(hcsc(\Delta\alpha) - \cot(\Delta\alpha)) & \mu_l \leq k(h_s) \end{cases} \tag{12}$$

## 2 数值分析

### 2.1 轴系-艇体耦合模型

本文采用 Suboff 艇型,建立轴-艇耦合系统的有限元模型,在螺旋桨安装处分别施加轴向、垂向及侧向激振力,幅值均为 10 N,如图 1 所示。Suboff 模型艇体主要参数如表 1 所示。轴系通过弹簧结构在艉后轴承、艉前轴承与推力轴承处与艇体连接(如图 1 所示),其中艉后轴承、艉前轴承处垂向与横向弹簧的刚度均为  $1.0 \times 10^8$  N/m,推力轴承处垂向与横向弹簧的刚度均为  $4.5 \times 10^8$  N/m,轴向刚度为  $9 \times$

表 1 轴-艇体耦合系统主要参数

Tab.1 Main parameters of the shaft-hull coupled system

参数名及单位	数值	参数名及单位	数值
艇长/m	74.28	肋骨板厚/mm	24
主艇体半径/m	4.28	轴系外径/mm	150
耐压壳板厚/mm	32	轴系内径/mm	75
肋骨间距/m	1.668		

$10^9$  N/m。有限元尺度为每肋间距7个四边形单元(边长约180 mm),左舷一半模型共划分为约26 000个单元,如图1所示。用于消除不规则频率的CVIS长方体长32 m,截面为3.2 m×3.2 m, CVIS单元边长0.8 m;湿表面左舷一半模型共划分为6037个单元,单元尺度约420 mm,如图2所示。激励频段为20~300 Hz,频率步长为1 Hz。纳入计算的干模态振型的固有频率最高为750 Hz。对最高分析频段,每声波长至少含6个湿表面单元。

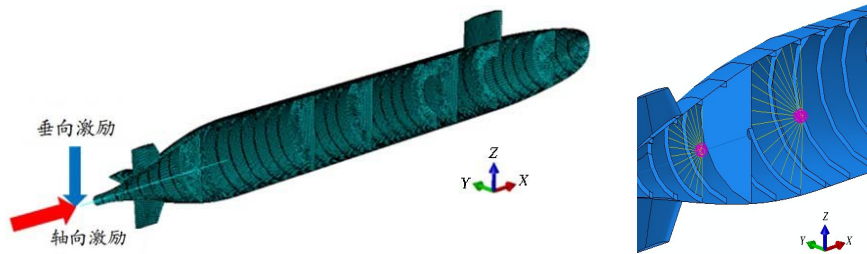


图1 轴系-艇体耦合系统的有限元模型

Fig.1 Finite element model of the shaft-hull coupled system

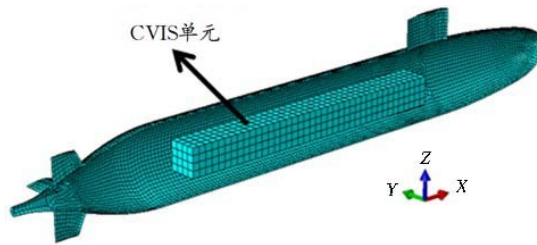


图2 艇体边界元及内域CVIS单元模型

Fig.2 Boundary element and CVIS element of the submarine model

### 2.2 不规则频率分布特性分析

在深度为5000 m的深海环境中,将轴-艇系统置于200 m深度处。取固有频率低于250 Hz、500 Hz、750 Hz的所有对称模态振型,分别计算20~100 Hz、100~200 Hz、200~300 Hz频段的辐射噪声。

#### 2.2.1 近场频响特性

计算200 m深度、半径300 m处各声场点的辐射声压级,频率步长为1 Hz,场点沿圆周方向间隔为10°,如图3所示。

规则的圆柱壳结构声学边界元不规则频率的解析表达式<sup>[7]</sup>为

$$k'_{mnq} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{2b}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{nq}}{a}\right)^2} \tag{13}$$

式中,2b为圆柱壳轴向长度,a为圆柱壳半径, $\alpha_{nq}$ 为n阶柱贝塞尔函数的第q个零点;轴向波数 $m = 1, 2, 3, \dots$ ,其物理意义为虚拟内域流体轴向共振时的波数;周向波数 $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ ,其物理意义为虚拟内域流体周向共振时的波数。

首先,取 $q=1, n=0, 1$ ,计算 $a=4.28$  m,  $2b=8.56$  m、17.12 m、34.24 m、68.48 m及74.28 m时,水中圆柱壳结构的不规则频率,结果如图4所示。可见,n取定值时,随着圆柱壳的长径比增大,首阶不规则频率趋于一个固定值。这是由于在公式(13)中,随着2b增大,根号下第一项的贡献逐渐变小,无量纲波数 $k'$ 仅取决于n、q、a的取值;同时,随着圆柱壳的长径比增大,各阶不规则频率更加密集,从影响单个频点变成影响整个频段。

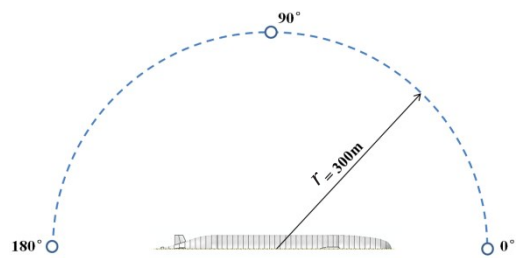


图3 近场辐射声压测点分布

Fig.3 Distribution of near field radiated SPL spots

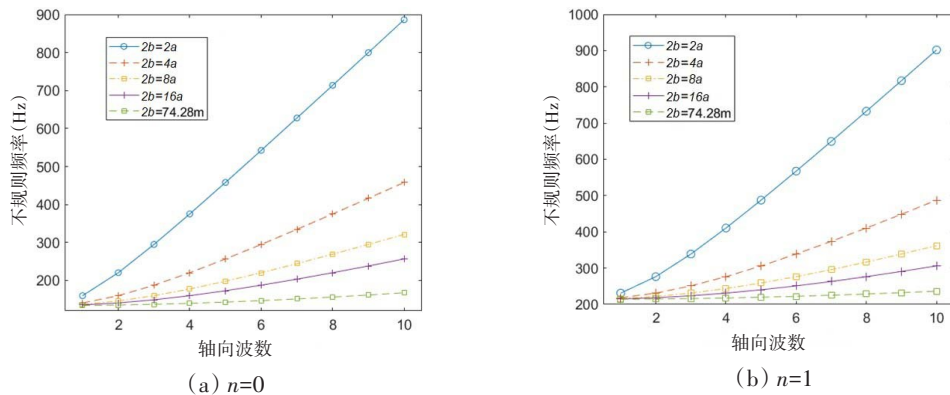


图4 各长径比的圆柱壳结构的水中不规则频率

Fig.4 Irregular frequencies of cylindrical shell with various length-radius ratios

进一步将上图中与艇体等长、等半径的细长圆柱壳结构的不规则频率分布列于表2。

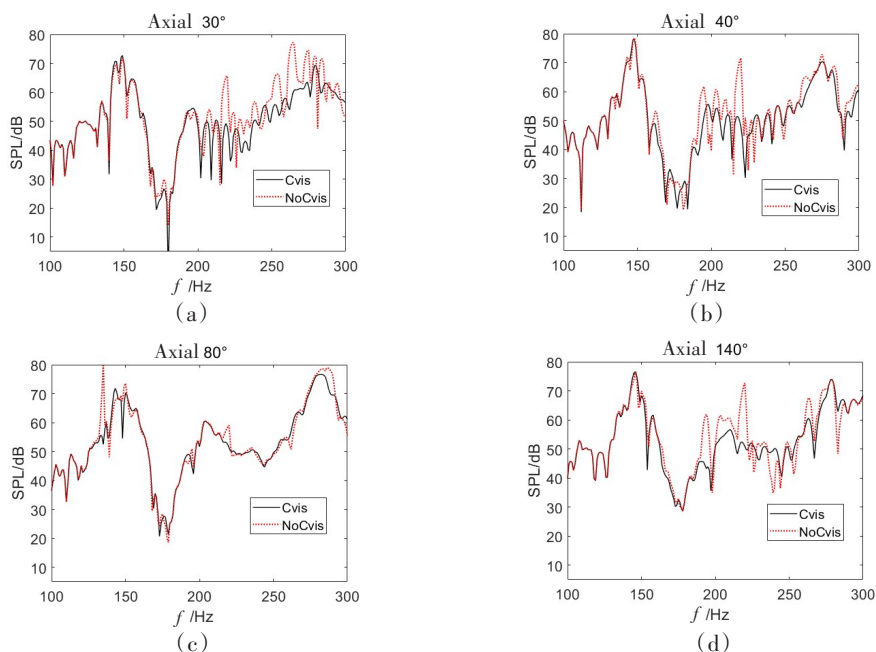
表2 与轴系-艇体系统等尺度规则圆柱壳的不规则频率分布 (取  $n=0, 1; q=1; m=1, 2, 3, \dots$ )

Tab.2 Irregular frequencies of a cylindrical shell with same dimension as the shaft-hull coupled system ( $n=0, 1; q=1; m=1, 2, 3, \dots$ )

不规则频率	轴向波数 $m$						
	0	1	2	3	4	5	.....
$f_{m01}/\text{Hz}$	134.148	134.526	135.659	137.525	140.095	143.333	.....
$f_{m11}/\text{Hz}$	213.744	213.982	214.695	215.879	217.526	219.625	.....

可见,虚拟内域流体共振的周向波数为0,即发生呼吸振动时,与艇体等尺度圆柱壳的不规则频率在约134 Hz时出现。取水中声速为1500 m/s,可得出对应的无量纲频率为  $ka \approx 2.4$ ,其中  $k$  为声波波数,  $a$  为主艇体半径。不规则频率随着轴向波数增大连续出现,较为密集。同样,虚拟内域流体共振的周向波数为1,即发生弯曲振动时,与艇体等尺度圆柱壳的不规则频率在约213 Hz时出现,随着  $m$  增大,不规则频率也“频频”出现。可见,从第一个不规则频率出现后,后续计算频带几乎均会受到不规则频率的“污染”。

分别采用消除不规则频率的CVIS法与未消除不规则频率算法,计算如图3所示的各场点上轴-艇耦合系统的声振响应。结果表明:在20~100 Hz频段,未出现不规则频率;在100~300 Hz频段,计算距



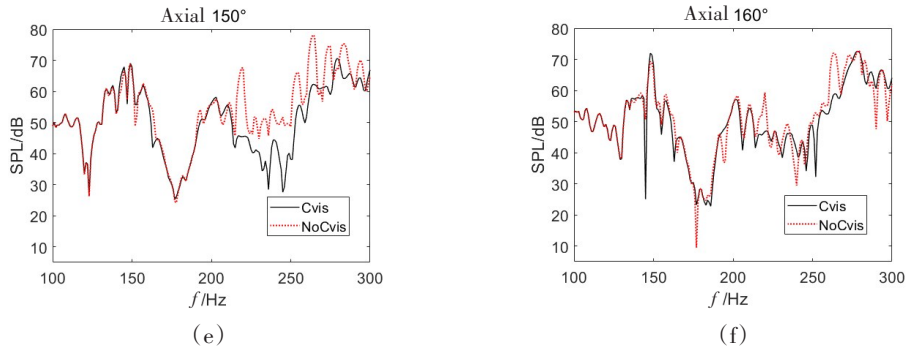


图5 轴向激励不规则频率对典型方位场点声压频响特性的影响(Cvis:消除不规则频率;NoCvis:未消除不规则频率)

Fig.5 Influences of irregular frequencies on field SPL at typical directions when the system is enduring axial excitation forces

(Cvis: the irregular frequencies are eliminated; NoCvis: theirregular frequencies are not eliminated)

艇体中心 300 m 不同方位上辐射声压级的频响曲线,典型结果如图 5~6 所示。

从轴向激励计算结果可见：

(1) 不规则频率的影响大约从 135 Hz 开始(如图 5(c)),与同尺度的细长圆柱壳结构的不规则频率基本吻合;在不同方位上误差大小有一定差别,但均与规则圆柱壳结构的周向波数为 0,即呼吸振动的不规则频率吻合较好(表 2 中  $f_{m01}$ )。这是由于艇体受到轴向激励时,在周向产生的振动模式中包含较强的呼吸振动模式。

(2) 不规则频率对各方位辐射声压指向性影响各不相同,这是由艇体结构辐射噪声的指向性与内域虚拟流体共振模式对声场影响的指向性共同决定的;自第一个不规则频率出现后,不规则频率开始“扎堆”出现,形成“不规则频带”与同尺度细长圆柱壳结构的不规则频率分布特性基本一致。

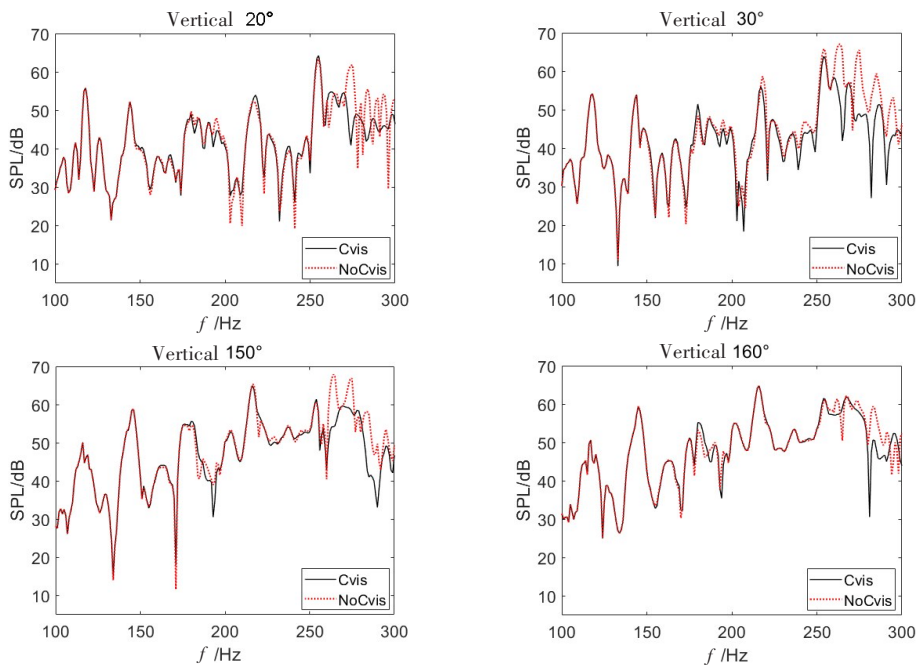


图6 垂向激励不规则频率对典型方位场点声压频响特性的影响(Cvis:消除不规则频率;NoCvis:未消除不规则频率)

Fig.6 Influences of irregular frequencies on field SPL at typical directions when the system is enduring vertical excitation

forces(Cvis: the irregular frequencies are eliminated; NoCvis: the irregular frequencies are not eliminated)

如图 6 所示,垂向激励工况的辐射声压结果同样受不规则频率影响。需要注意的是,虽然垂向激励主要激发艇体的振动模式在周向上以  $n=1$  的弯曲振动及更高阶振动为主,但轴系的弯曲振动在一定程度上会引起艇体的呼吸振动。因此,在 150~200 Hz 频段,不规则频率对辐射声场会产生较小的影响。在 200 Hz 以上频段,内域虚拟流场周向波数  $n=1$  的共振引起的不规则频率开始显现,并成为垂向

激励工况下不规则频率的主要来源,这也与表 2 中的  $f_{m,1}$  较为吻合。

另外,图 5~6 所示的不规则频率的曲线均比较光滑,而通常见到的不规则频率以尖刺型的线谱为主。造成这种现象主要原因在于:传统的不规则频率分析通常是针对球壳结构,其不规则频率较为离散;而本文计算的艇体外形是以细长圆柱壳为主,长径比超过了 8:1,导致不规则频率扎堆出现(如表 2 所示),而计算的频率步长为 1 Hz,使得不规则频率紧密相邻,呈现出比较光滑的形态。

### 2.2.2 远场会聚区特性

考虑典型深海 Munk 声道(如图 7 所示),计算 30° 方位 40~140 km 距离范围上 100~300 Hz 频段辐射声压级的频响特性,计算结果如图 8~9 所示。可见,若不采用 CVIS 法进行修正,无论采用轴向或垂向激励,在约 220 Hz 处均会出现较强的不规则频率导致的线谱;同时,在 250~300 Hz 频段,会产生多个连续不规则频率线谱,影响范围可达第二会聚区(105~120 km 范围)。这说明不规则频率对实尺度轴-艇系统的频段辐射噪声边界元计算产生较大影响,必须予以消除。

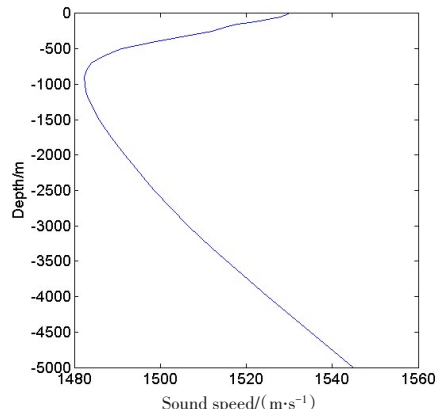


图 7 深海 Munk 声道

Fig.7 Munk underwater acoustic channel

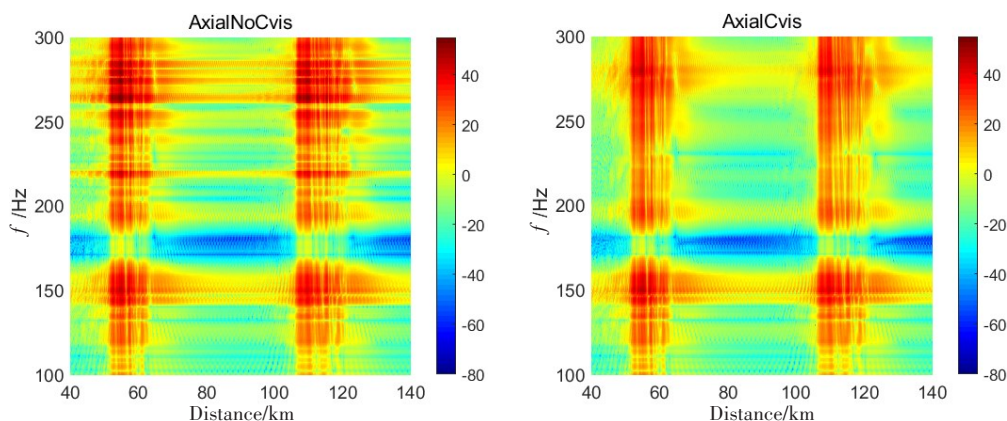


图 8 轴向激励工况 30° 方位辐射噪声的会聚区特性(Cvis:消除不规则频率;NoCvis:未消除不规则频率)

Fig.8 Radiated SPL in convergence zones in the direction of 30° when the system is excited axially (Cvis: the irregular frequencies are eliminated; NoCvis: the irregular frequencies are not eliminated)

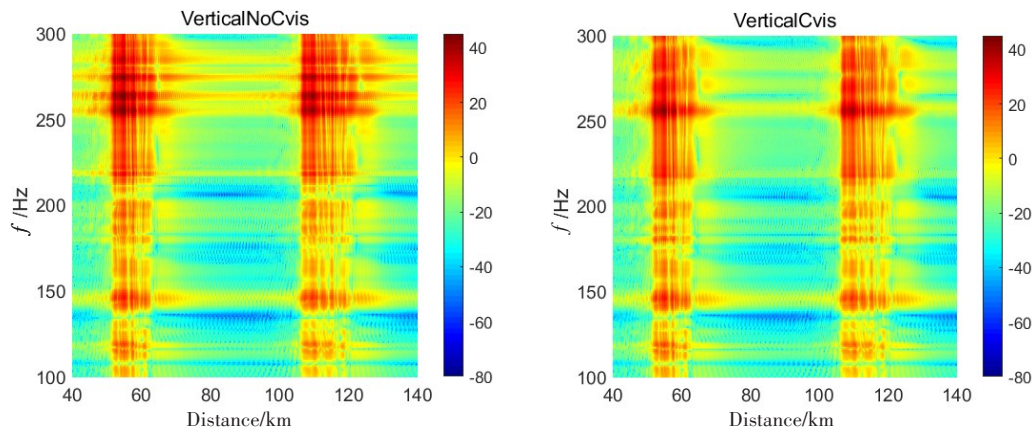


图 9 垂向激励工况 30° 方位辐射噪声的会聚区特性(Cvis:消除不规则频率;NoCvis:未消除不规则频率)

Fig.9 Radiated SPL in convergence zones in the direction of 30° when the system is excited vertically (Cvis: the irregular frequencies are eliminated; NoCvis: the irregular frequencies are not eliminated)

进一步计算 80°方位轴向激励工况的辐射声压会聚区效应,结果如图 10 所示。可见,若不采用 CVIS 法修正,在 135 Hz、150 Hz 等频点处均会出现不规则频率导致的线谱,影响范围同样可达第二会聚区。这说明虚拟内域流场的共振在不同方位上导致的不规则频率各不相同,这是由内域共振的声场影响与复杂结构辐射声场的指向性共同决定的。

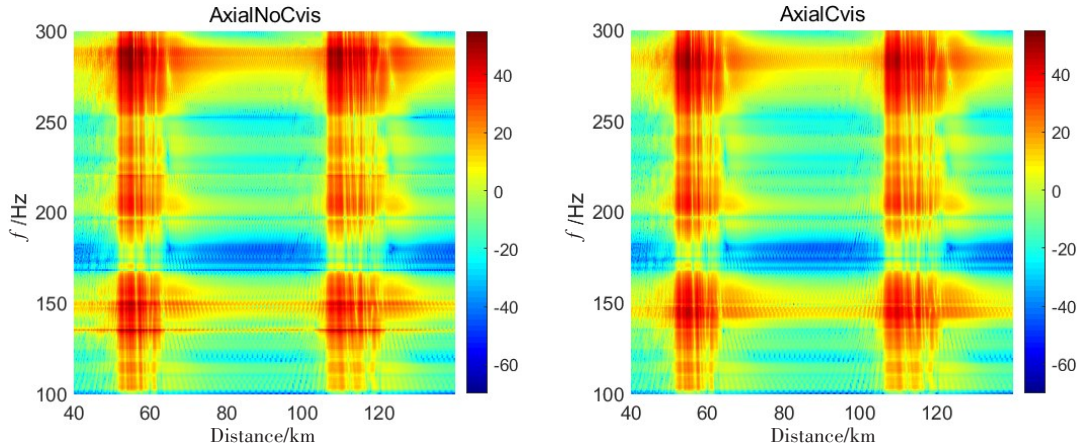


图 10 轴向激励工况 80°方位辐射噪声的会聚区特性(Cvis:消除不规则频率;NoCvis:未消除不规则频率)  
 Fig.10 Radiated SPL in convergence zones in the direction of 80° when the system is excited axially  
 (Cvis: the irregular frequencies are eliminated; NoCvis: the irregular frequencies are not eliminated)

图 11 为 265 Hz 时,半径 40~140 km 范围内,激励频率轴向激励工况下分别采用/不采用 CVIS 法修正的轴-艇系统辐射噪声的会聚区效应。可见,在 30°及 150°附近区域,不规则频率对辐射噪声第一、二会聚区的传播特性有明显影响,对其他方位影响虽不及上述方位,但在量级上未修正的声场结果也同样高于采用 CVIS 修正的结果。这进一步说明,不规则频率对轴-艇耦合系统辐射噪声的影响在各方位上是不同的。

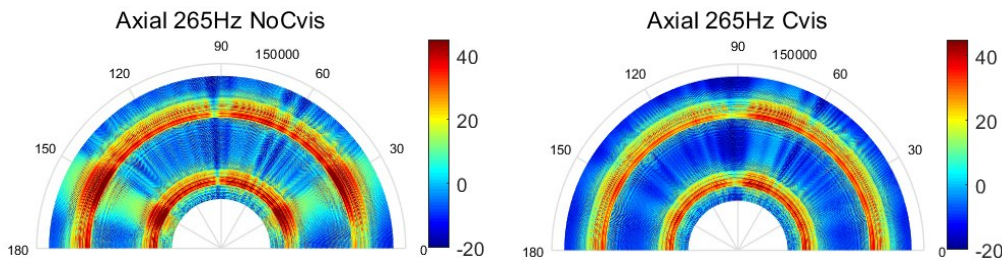


图 11 不规则频率对轴向工况 265Hz 辐射噪声会聚区效应的影响(Cvis:消除不规则频率;NoCvis:未消除不规则频率)  
 Fig.11 Radiated SPL in convergence zones at the 265 Hz when the system is excited axially(Cvis: the irregular frequencies are eliminated; NoCvis: the irregular frequencies are not eliminated)

### 3 结 论

本文采用 FEM/BEM 法,计算了实尺度轴系-艇体耦合系统在深海 Munk 声道中的中频段辐射噪声。在边界元计算中,采用 CVIS 法消除不规则频率,并与未消除不规则频率的辐射声场结果,以及同尺度细长圆柱壳的不规则频率的解析表达式进行了对比。结果表明:

(1) 由于 Suboff 艇体外形细长,采用边界元进行声辐射计算时,内域虚拟流场的周向任意一阶共振模式,均可以对应轴向上多阶共振模式,导致不规则频率非常密集,形成“不规则频带”,这对中频的边界元计算有很大影响。

(2) 由于 Suboff 艇型的主艇体结构形式为细长圆柱壳,因此根据与模型艇艇长、平行舢体直径相

等的细长圆柱壳的不规则频率计算公式,可以较准确地估计模型艇的不规则频率的出现频率。首个无量纲不规则频率 $ka \approx 2.4$ 。

(3)不规则频率对轴系-艇体耦合系统辐射噪声的影响与激励方式有关,这是由激励方式导致的内域虚拟流场的共振模式不同造成的。在轴向激励作用下,艇体周向以无指向性的呼吸振动( $n=0$ )为主,虚拟内流场的共振模式同样为呼吸模式,因此不规则频率可以影响到的频率下限更低。垂向激励主要激发周向弯曲振动( $n=1$ ),而呼吸模式成份较小,因此不规则频率的影响频段高于轴向激励情形。

(4)在艇体的不同方位上,不规则频率的影响形式各不相同,且无明显规律,这是由艇体辐射噪声复杂的指向性与内域虚拟流场共振模式叠加造成的。本文为了尽可能聚焦不规则频率本身的影响,同时尽量减小海底反射带来的影响,分析的海洋水声环境为深海环境。对于浅海环境,海底地质的反射与吸收会在远场产生显著的干涉效应,对不规则频率的影响将更加复杂。

### 参 考 文 献:

- [1] 谭 路,周其斗,纪 刚,等. 推进结构形式对艇体结构声学特性的影响[J]. 船舶力学, 2020, 24(7): 951-961.  
Tan Lu, Zhou Qidou, Ji Gang, et al. Influence of propulsion structure form on the structural acoustic characteristics of submarine[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(7): 951-961. (in Chinese)
- [2] 刘文玺,周其斗,谭 路,等. 尾后轴承刚度对潜艇结构声辐射特性的影响[J]. 船舶力学, 2018, 22(2): 235-247.  
Liu Wenxi, Zhou Qidou, Tan Lu, et al. Effect of rear bearing stiffness on vibro-acoustic radiation of submarine[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(2): 235-247. (in Chinese)
- [3] Qi Libo, Wu Yousheng, Zou Mingsong, et al. Propeller-shaft-hull coupled vibration and its impact on acoustic radiation utilizing sono-elasticity theory[J]. Ocean Engineering, 2019, 171: 391-398.
- [4] Zhou Q, Joseph P F. A numerical method for the calculation of dynamic response and acoustic radiation from an underwater structure[J]. J. Sound Vib., 2005, 283: 853-873.
- [5] Huang Zhenwei, Zheng Han, Guo Liang. Influence of the position of artificial boundary on computation accuracy of conjugated infinite element for a finite length cylindrical shell[J]. Acoustics Australia, 2020: 1-8.
- [6] Marburg S, Wu T W, Nolte B. Computational acoustics of noise propagation in fluids-Finite and boundary element methods [M]. Berlin, Heidelberg: SpringerVerlag, 2008.
- [7] Schenck H A. Improved integral formulation for acoustic radiation problems[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1967, 44: 41-58.
- [8] Burton A J, Miller G F. The application of integral equation methods to the numerical solution of some exterior boundary-value problems[J]. Proc of the Royal Soc of London, A: Math and Phys. Sciences, 1971, 323: 201-210.
- [9] Seybert A F, Rengarajan T K. The use of CHIEF to obtain unique solutions for acoustic radiation using boundary integral equations[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1987, 81(5): 1299-1306.
- [10] Wu T W. A weighted residual formulation for the CHIEF method in acoustics[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(3): 1608-1614.
- [11] Chen J T, Lin S R. Fictitious frequency revisited[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2009, 33(11): 1289-1301.
- [12] Zheng Changjun, Chen Haibo, Gao Haifeng, et al. Is the Burton-Miller formulation really free of fictitious eigenfrequencies [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 59: 43-51.
- [13] Harris P, Amini S. On the Burton and Miller boundary integral formulation of the exterior acoustic problem[J]. J. Vibr. Acoust., Trans ASME, 1992, 114: 540-545.
- [14] Liu Y, Rizzo F J. A weakly singular form of the hypersingular boundary integral equation applied to 3D acoustic wave problems[J]. Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 1992, 96(2): 271-287.
- [15] Li S D, Huang Q B. An improved form of the hypersingular boundary integral equation for exterior acoustic problems[J]. Eng. Ana. Boundary Element, 2010, 34(3): 189-195.

- [16] 刘 宝, 王德石, 周奇郑, 等. 基于 Burton-Miller 方程的轴对称结构声学边界元方法[J]. 声学学报, 2019, 44(3): 303-313.  
Liu Bao, Wang Deshi, Zhou Qizheng, et al. Acoustic boundary element method for axisymmetric structures based on Burton-Miller equation[J]. Acta Acustica, 2019, 44(3): 303-313.
- [17] Zhang Lin, Da Lianglong, Lu Xiaoting. Application of BDRM theory in the two-AXIS underwater channel[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 9(2): 12-17.
- [18] Bucker H P. A simple 3-D Gaussian beam sound propagation model for shallow water[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1994, 95: 2437-2440.
- [19] Collins M D, Chin-Bing S A. A three-dimensional parabolic equation model that includes the effects of rough boundaries [J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 87: 1104-1109.
- [20] 邹明松, 吴有生, 沈顺根, 等. 考虑航速及自由液面影响的声介质中三维结构水弹性力学研究[J]. 船舶力学, 2010, 14(11): 1305-1311.  
Zou Mingsong, Wu Yousheng, Shen Shungen, et al. Three-dimensional hydroelasticity with forward speed and free surface in acoustic medium[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(11): 1305-1311.
- [21] 段文洋, 贺五洲. 一种消除水动力求解中不规则频率影响的边界元法[J]. 水动力研究与进展, 2002, 17(2): 156-160.  
Duan Wenyang, He Wuzhou. A boundary element method for removing the effects of irregular frequency in solving the hydrodynamic coefficients[J]. Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(2): 156-160.
- [22] 邹明松, 吴有生, 祁立波. 声介质中水弹性力学消除不规则频率的方法[J]. 船舶力学, 2013, 17(10): 1202-1208.  
Zou Mingsong, Wu Yousheng, Qi Libo. Method to eliminate irregular frequencies in three dimensional hydroelasticity in acoustic medium[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(10): 1202-1208.
- [23] Duan Jiayi, Zhang Lin, Da Lianglong, et al. A hybrid algorithm of underwater structure vibration and acoustic radiation-propagation in ocean acoustic channel[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12: 680-690.
- [24] Duan Jiayi, Zhang Lin, Sun Xuehai, et al. An equivalent source CVIS method and its application in predicting structural vibration and acoustic radiation in ocean acoustic channel[J]. Ocean Engineering, 2021, 222: 108570.
- [25] Ross D. Mechanics of underwater noise[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.