DOI：10.13245/j.hust.250552

圆柱壳干湿模态映射关系的影响机制研究

原春晖[1] 刘梦涵[2] 杨超振[2] 王 婷[2] 陈美霞[2]
(1．汉江实验室，湖北 武汉 430060；
2．华中科技大学船舶与海洋工程学院，湖北 武汉 430074)

摘要 为探究加筋圆柱壳结构干湿模态之间的关联机制，采用有限元方法，通过引入壳体外表面的声辐射阻抗矩阵，构建以圆柱壳结构干模态振型作为基向量的湿模态振型表达式，系统揭示不同边界条件与内部结构特征对加筋圆柱壳干湿模态关联性的影响机理，从而阐明加筋圆柱壳结构干湿模态映射机制，结果表明：加筋圆柱壳的湿模态与干模态并非呈现简单的阶次对应关系，当在自由边界约束下或含内部结构时，湿模态实质上由多阶干模态线性耦合叠加形成；当在简支边界或固支边界约束时，湿模态多与单阶干模态一一对应；当部分湿模态由两阶固有频率相同的干模态贡献时，这两阶干模态分别为对称模态和反对称模态．

关键词 圆柱壳；模态分析；声辐射阻抗；有限元；流固耦合
中图分类号 O327 **文献标志码** A **文章编号** 1671-4512(2026)10-0059-07

Research on influencing mechanism of mapping relationship between dry and wet modes of cylindrical shells

YUAN Chunhui[1] *LIU Menghan*[2] *YANG Chaozhen*[2] *WANG Ting*[2] *CHEN Meixia*[2]
(1．Hanjiang National Laboratory，Wuhan 430060，China；2．School of Naval Architecture and Ocean Engineering，Huazhong University of Science and Technology，Wuhan 430074，China)

Abstract To investigate the correlation mechanism between dry and wet modes of stiffened cylindrical shells，the finite element method was employed，and by introducing the acoustic radiation impedance matrix on the outer surface of the shell，a wet mode shape expression was constructed with the dry mode shapes of the cylindrical shell as basis vectors，The influencing mechanisms of different boundary conditions and internal structural characteristics on the dry-wet mode correlation of stiffened cylindrical shells were systematically revealed，and thereby the dry-wet mode mapping mechanism of stiffened cylindrical shells was clarified，Results show that a simple order-to-order correspondence is not exhibited between the wet modes and dry modes of stiffened cylindrical shells，and under free boundary constraints or when internal structures are presented，the wet modes are essentially formed by the linear coupling and superposition of multiple dry modes，When simply supported or clamped boundary constraints are applied，most wet modes are in a one-to-one correspondence with single dry modes；when some wet modes are contributed by two dry modes of identical natural frequency，these two dry modes are respectively identified as the symmetric mode and the antisymmetric mode．

Key words cylindrical shell；modal analysis；acoustic radiation impedance；finite element；fluid-structure interaction

圆柱壳以结构简单、承载能力强等特点在海洋工程等领域应用广泛，因此精准预报圆柱壳结构的振动特性，对保障结构安全具有重要的工程意义[1-3]，结构的动力学响应特性主要由其模态参数决定，自由振动频率和振型是动态性能分析的重要参数，模态分析作为识别结构固有振动特性的关键手段，是工程振动领域不可或缺的研究方法[4]．

在理论分析中，传统解析或半解析方法常基于

收稿日期 2025-11-19．
作者简介 原春晖(1970—)，男，研究员；陈美霞(通信作者)，教授，E-mail：chenmx26@hust.edu.cn．
基金项目 国家自然科学基金资助项目(52371320，52571347)；汉江国家实验室基金资助项目(ZC2024003)．

Flügge，Donnell-Mushtari等壳理论建立振动控制方程，进而求解圆柱壳的固有频率与振型[5-7]，随着计算力学的不断发展，有限元法、边界元法等数值方法逐渐成为分析复杂加筋圆柱壳动力响应的重要工具[8-11]，在求解圆柱壳的连续阶频率和振型方面，展现了良好的求解效率，然而，现有方法在水下环境中仍面临精度与适用性挑战，水下圆柱壳结构周围流体介质与结构本身存在强烈的流固耦合效应，该效应会引入显著的附加质量与附加阻尼，导致其在水中的振动特性与在空气中相比存在显著差异[12]．

从原理上讲，通过水下试验直接测量振动响应，是获取结构真实动力学特性最直接的方法，然而，该方法在工程中成本高昂且实施困难[13]，而空气中的干模态试验技术成熟、实施简便，因此工程中常通过干模态参数来预报水下振动与声辐射特性．

有学者对干湿模态间的差异展开研究：邹元杰等[14]指出水的加载效应会显著降低结构在水中的振动频率，且干湿模态振型存在明显差异；熊吕露等[15]提出仅在深浸没或低频等特定条件下干模态才可近似替代湿模态的结论；赵北斗[16]基于虚拟质量法的仿真结果证实，圆柱壳的干湿模态振型具有显著区别，孙华伟等[17]基于精细传递矩阵法发现静水压力会使浸没圆柱壳的固有频率降低，YE等[18]指出波数较高的圆柱壳湿模态随着静水压的增加频率降低，在一定条件下会发生模态交换，邵浩峰等[19]指出随着外部水压载荷逐步增大，正交各向异性圆柱壳干湿模态振型存在明显差异．

以上研究说明，干湿模态之间存在差异，在理论计算中不能简单地用干模态等效替代湿模态，然而已有研究对于边界条件和内部结构所导致的干湿模态不一致性少有报道，本研究以加筋圆柱壳为研究对象，采用模态叠加法，引入水下辐射阻抗矩阵，深入分析干湿模态频率及振型之间的映射关系，为水下圆柱壳振动特性的高精度预报提供更为可靠的方法支撑．

1　理论推导

当结构在水下振动时，水作为重流体，其对结构固有振动的影响不可以忽略，水对结构的附加质量效应[12]为

$$\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}(\omega)=\Delta s\cdot \mathrm{Im}\left(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}}(\omega)\right)/\omega_{\mathrm{w}},\tag{1}$$

式中：$\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}$为水对结构的附加质量；$\omega_{\mathrm{w}}$为结构水下固有频率；$\omega$为圆频率；$\Delta s$为将面压力转化为节点力时节点等效面积；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{a}}$为声辐射阻抗矩阵，水下结构的无阻尼自由振动的控制方程可写为

$$[\boldsymbol{K}-\omega_{\mathrm{w}}^{2}(\boldsymbol{M}+\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}(\omega))]\cdot \boldsymbol{U}=0,\tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{K}$为结构刚度矩阵；$\boldsymbol{M}$为结构质量矩阵．

由于存在附连水质量$\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}(\omega)$的影响，因此求解式(2)得到湿模态固有频率与空气中圆柱壳的干模态固有频率不一致，$\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}(\omega)$为正实数矩阵，因此$\omega_{\mathrm{w}}$小于对应阶数干模态固有频率$\omega_{\mathrm{d}}$．

由干模态正交性可得

$$\{\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{d},i}\}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\{\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{d},j}\}=0\quad(i\neq j),$$

式中：$\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{d},i}$为第$i$阶干模态振型向量；$\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{d}j}$为第$j$阶干模态振型向量，在附加质量影响下，基于湿模态基的质量矩阵$\boldsymbol{M}+\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}(\omega)$正交性满足

$$\{\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{w},i}\}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{M}+\Delta \boldsymbol{M}_{\mathrm{w}}(\omega)]\{\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{w},j}\}=0\quad(i\neq j),\tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{w},i}$为第$i$阶湿模态振型向量；$\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{w},j}$为第$j$阶湿模态振型向量．

在低阶模态或弱耦合系统中，常采用干湿模态振型一一对应的常规方法近似湿模态振型，而对于强耦合系统，用一一对应的干模态振型近似替代湿模态振型计算，会导致式(3)无法满足，进而在计算振动响应时会造成误差．

基于此，本研究假设任意一阶湿模态均以多阶干模态作为基向量叠加得到，基于这一假设，水下任意一阶湿模态可表示为

$$\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{w}i}=\begin{bmatrix}\phi_{\mathrm{d}1} & \phi_{\mathrm{d}2} & \cdots & \phi_{\mathrm{d}N}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\eta_{i1}\\ \eta_{i2}\\ \vdots\\ \eta_{iN}\end{Bmatrix}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{\eta}_{i},$$

式中：$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}$为干模态矩阵；$\boldsymbol{\eta}_{i}$为系数向量且元素均为非零值，以干模态作为基向量的湿模态振型表达式为

$$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{w}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{\eta}.\tag{4}$$

令$\boldsymbol{U}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{w}}\boldsymbol{Q}$将式(4)代入式(2)，将式(2)左乘$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}$，可得

$$\{\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}-\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}[\omega_{\mathrm{w}i}^{2}\boldsymbol{M}+\omega_{\mathrm{w}i}^{2}\Delta \boldsymbol{M}(\omega_{\mathrm{w}i})]\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}\}\boldsymbol{\eta}_{i}\boldsymbol{Q}=0.\tag{5}$$

将式(5)简化得

$$\{\boldsymbol{K}_{\mathrm{m}}-\omega_{\mathrm{w}i}^{2}[\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}+\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\Delta \boldsymbol{M}(\omega_{\mathrm{w}i})\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}]\}\boldsymbol{\eta}_{i}\boldsymbol{Q}=0,\tag{6}$$

式中$\boldsymbol{K}_{\mathrm{m}}$和$\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}$分别为干模态基下的模态刚度矩阵和模态质量矩阵，均为对角阵，模态计算采用质量归一化，即

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{m}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{I};\tag{7}$$

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{m}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}};\tag{8}$$

$$\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{d}}=\mathrm{diag}\left(\omega_{\mathrm{d}1}^{2},\ \omega_{\mathrm{d}2}^{2},\ \cdots,\ \omega_{\mathrm{d}N}^{2}\right);\tag{9}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}}\Delta\boldsymbol{M}\left(\omega_{\mathrm{w}i}\right)\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix} m_{11}(\omega_{\mathrm{w}i}) & m_{12}(\omega_{\mathrm{w}i}) & \cdots & m_{1N}(\omega_{\mathrm{w}i}) \\ m_{21}(\omega_{\mathrm{w}i}) & m_{22}(\omega_{\mathrm{w}i}) & \cdots & m_{2N}(\omega_{\mathrm{w}i}) \\ \vdots & & & \\ m_{N1}(\omega_{\mathrm{w}i}) & m_{N2}(\omega_{\mathrm{w}i}) & \cdots & m_{NN}(\omega_{\mathrm{w}i}) \end{bmatrix}.\tag{10}$$

联立式(6)～(10)，式(6)可写为

$$[\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{d}}-\omega_{\mathrm{w}i}^{2}\bar{\boldsymbol{M}}_{\mathrm{w}i}]\times\boldsymbol{\eta}_{i}\boldsymbol{Q}=0,$$

式中

$$\bar{\boldsymbol{M}}_{\mathrm{w}i}=\begin{bmatrix} m_{11}(\omega_{\mathrm{w}i})+1 & m_{12}(\omega_{\mathrm{w}i}) & \cdots & m_{1N}(\omega_{\mathrm{w}i}) \\ m_{21}(\omega_{\mathrm{w}i}) & m_{22}(\omega_{\mathrm{w}i})+1 & \cdots & m_{2N}(\omega_{\mathrm{w}i}) \\ \vdots & & & \\ m_{N1}(\omega_{\mathrm{w}i}) & m_{N2}(\omega_{\mathrm{w}i}) & \cdots & m_{NN}(\omega_{\mathrm{w}i})+1 \end{bmatrix}.$$

其特征值问题即为

$$\left|\boldsymbol{\Omega}_{\mathrm{d}}-\omega_{\mathrm{w}i}^{2}\bar{\boldsymbol{M}}_{\mathrm{w}i}\right|=0.$$

建立了圆柱壳基于干模态迭代计算湿模态的方法如图1所示，在工程实际中，由于水中结构的模态参数不易获得，因此基于圆柱壳干模态计算圆柱壳水下湿模态的方法具有较高的应用价值.

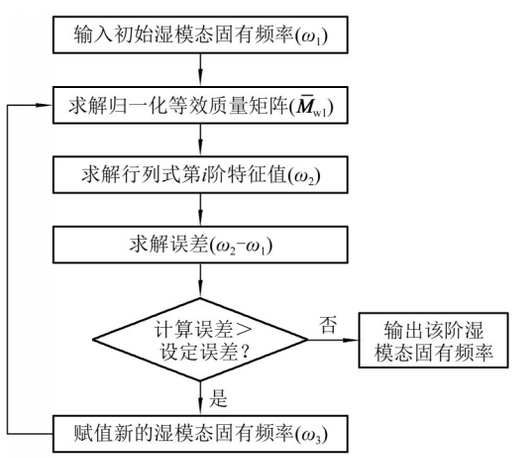


图1　干湿模态换算方法

2　数值分析

本研究以加筋圆柱壳为例研究边界条件和内部结构对圆柱壳干湿模态对应关系的影响，加筋圆柱壳几何模型如图2所示，模型参数：壳体长L=4.8 m；壳体直径D=3.5 m；壳体厚t_{s}=0.015 m；环肋厚t_{r}=0.012 m；环肋高h_{r}=0.12 m；肋距l_{r}=0.3 m，结构材料为钢.

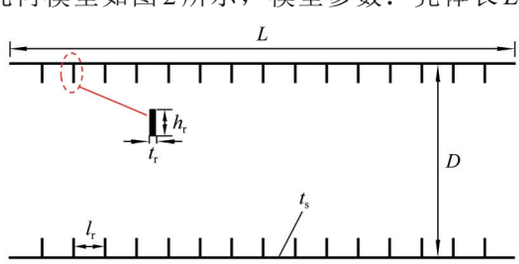


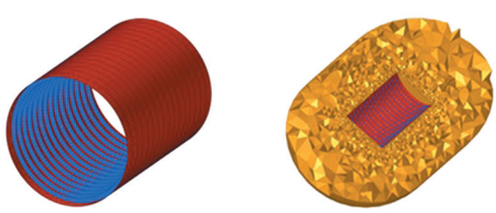
图2　舱段壳体几何模型

选用shell单元建立加筋圆柱壳有限元模型，考虑到结构弯曲波的作用，网格划分须满足一个波长内至少包含六个单元，即网格单元尺寸须小于结构弯曲波波长的1/6，因此设定结构单元最大尺寸为0.076 m，设定水域网格最大尺寸为0.625 m，加筋圆柱壳有限元模型网格参数如表1所示.

表1　加筋圆柱壳有限元模型参数

参数	网格属性	网格类型	单元数量/10^3
壳体	Shell单元	四边形	7.680
环肋	Shell单元	四边形	3.600
水	Solid单元	四面体	458.031

由于采用边界元方法计算结构声辐射阻抗矩阵，因此辐射阻抗矩阵的大小仅与结构外表面有关，与内部结构和边界条件无关，考虑到本研究模型壳体结构相同，因此本研究模型声辐射阻抗矩阵一致，结构的有限元网格模型如图3所示.



(a) 圆柱壳　　(b) 水下圆柱壳

图3　水下加筋圆柱壳有限元模型

3　结果与讨论

3.1　流体介质的影响

当圆柱壳的周围介质是水时，要考虑结构与介质交界面上流体压力对结构的影响，图4为自由边

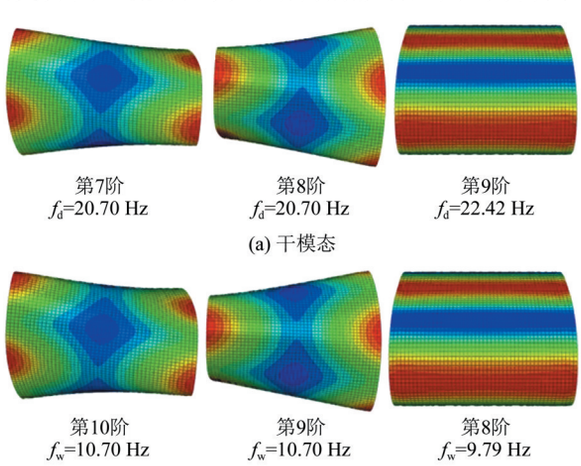


图4　自由边界加筋圆柱壳干湿模态对比

界加筋圆柱壳干湿模态对比，图中：f_w为湿模态固有频率；f_d为干模态固有频率．从图4可以看出：相同边界下，流体附加质量的存在使圆柱壳水中前六阶弹性模态固有频率明显低于空气中固有频率，且水中和空气中的相似低阶模态振型存在阶次偏差，即圆柱壳的湿模态与干模态并非呈现简单的阶次对应关系．因此，本研究基于湿模态由多阶干模态线性耦合叠加形成的理论，聚焦边界条件与内部结构对干湿模态对应关系进行进一步分析．

3.2　边界条件的影响

边界条件直接影响结构刚度，进而影响模态参数，因此研究边界条件对干湿模态对应关系的影响是必要的．

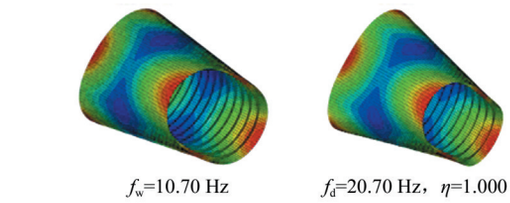
3.2.1　自由边界下加筋圆柱壳干湿模态对比分析

不考虑刚体模态，列出前5阶自由边界下加筋圆柱壳湿模态与干模态如表2所示，表中η为干模态参与系数，可以发现自由边界下加筋圆柱壳大部分湿模态由多阶干模态参与贡献，固有频率为9.79 Hz的湿模态与固有频率为22.42 Hz干模态一一对应；固有频率为10.70 Hz的湿模态与固有频率为20.70 Hz干模态一一对应，30.78 Hz的湿模态则由两阶固有频率相同的干模态线性叠加组成，且这两阶干模态分别为对称模态和反对称模态，两阶干模态的参与系数分别为0.983和0.179，存在贡献度更高的主导模态，31.72 Hz和63.27 Hz的湿模态也由两阶干模态共同贡献，且存在主导模态．

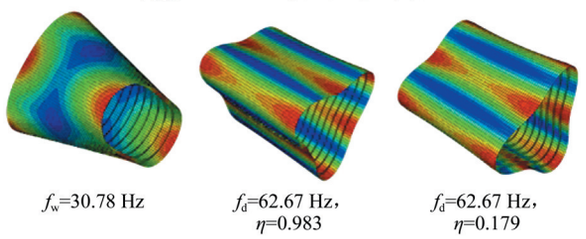
表2　自由边界下加筋圆柱壳湿模态的干模态参与系数

f_w/Hz	f_d/Hz	η
9.79	22.42	1.000
10.70	20.70	1.000
30.78	62.67	0.983
	62.67	0.179
31.72	59.65	0.971
	59.65	0.241
63.27	115.39	0.966
	135.26	0.257

为了明晰自由边界下湿模态振型与干模态振型对应关系，图5列出了部分湿模态与主要参与贡献的干模态振型云图，由图可见自由边界下加筋圆柱壳湿模态与主要参与贡献干模态周向波数一致，由于湿模态与干模态的差异主要来自于声辐射阻抗矩阵，自由边界下结构整体刚度较低，模态密集且整体运动显著，因此导致声辐射阻抗矩阵的特征向量由多阶结构刚度矩阵的特征向量线性叠加而成，即自由边界下的加筋圆柱壳的湿模态由若干阶干模态线性叠加而成．



(a) f_w=10.70 Hz湿模态及对应干模态



(b) f_w=30.78 Hz湿模态及对应干模态

图5　自由边界下加筋圆柱壳干湿模态振型对比

3.2.2　简支边界下加筋圆柱壳干湿模态对比分析

表3列出前5阶简支边界下加筋圆柱壳湿模态与干模态，发现湿模态与干模态固有频率部分一一对应，部分湿模态由两阶固有频率相同的干模态构成，例如80.27 Hz的湿模态由两阶固有频率为154.76 Hz的干模态线性叠加组成，两阶干模态的参与系数分别为0.715和0.699，对湿模态的贡献相当，不存在主导模态．

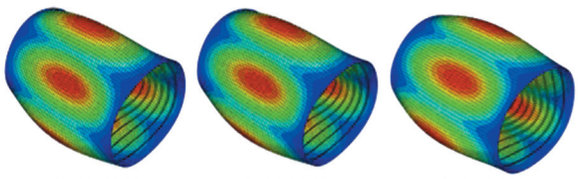
表3　简支边界下加筋圆柱壳湿模态的干模态参与系数

f_w/Hz	f_d/Hz	η
40.52	83.35	0.760
	83.35	0.650
40.63	92.89	1.000
68.02	128.51	1.000
74.66	179.25	0.225
	179.25	0.974
80.27	154.76	0.715
	154.76	0.699

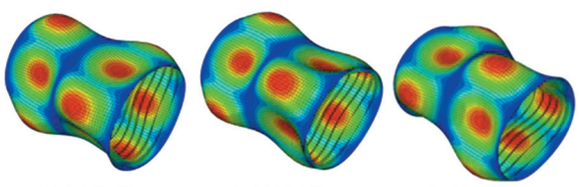
设m为轴向半波数，n为周向波数，图6列出了湿模态与主要参与贡献的干模态振型云图，表明当简支边界下加筋圆柱壳湿模态由两阶干模态线性叠加形成时，这两阶干模态分别为对称模态和反对称模态，振型上表现为周向波型沿周向偏转$\pi/(2n)$．

3.2.3　固支边界下加筋圆柱壳干湿模态对比分析

表4列出固支边界下前5阶加筋圆柱壳湿模态与干模态，发现：干湿模态固有频率对应关系与简支边界类似，湿模态也是由一阶或者两阶干模态组



(a) 湿模态及对应干模态(m=1，n=3)



(b) 湿模态及对应干模态(m=2，n=3)

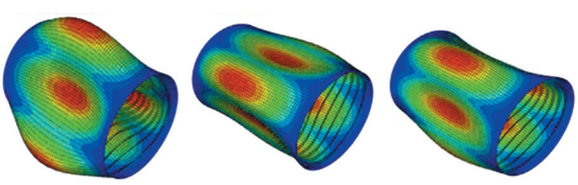
图6　简支边界下加筋圆柱壳干湿模态振型对比

表4　固支边界下加筋圆柱壳湿模态的干模态参与系数

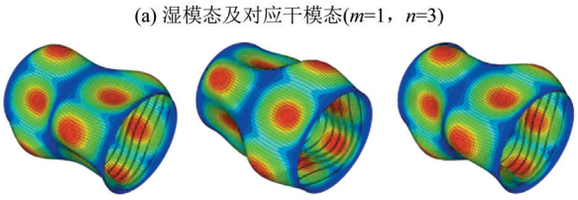
f_w/Hz	f_d/Hz	η
47.63	98.19	0.257
	98.19	0.966
50.76	117.42	1.000
70.56	133.27	1.000
77.63	193.96	0.993
84.51	162.98	0.855
	162.98	0.519

成，当湿模态由两阶干模态线性叠加形成时，这两阶干模态固有频率相同.

图7列出固支边界下加筋圆柱壳部分干湿模态振型，表明：当固支边界下加筋圆柱壳湿模态由两阶干模态线性叠加形成时，这两阶干模态为对称模态和反对称模态，振型上表现为周向波型相差$\pi/(2n)$.



(a) 湿模态及对应干模态(m=1，n=3)



(b) 湿模态及对应干模态(m=2，n=3)

图7　固支边界下加筋圆柱壳干湿模态振型对比

基于上述研究发现：自由边界下结构整体刚度较低，模态密集且整体运动显著，导致加筋圆柱壳结构干湿模态存在一对多的现象，并且参与主要贡献的干模态周向波数一致，简支与固支边界显著提高结构刚度，约束整体运动，局部模态明显，流体耦合作用相对局部化，因此湿模态多与单阶干模态一一对应；部分湿模态由两阶固有频率相同的干模态贡献时，这两阶干模态为对称模态和反对称模态.

3.3　含内部结构加筋圆柱壳干湿模态映射关系研究

3.3.1　含基座加筋圆柱壳干湿模态映射关系

研究含基座加筋圆柱壳干湿模态的映射关系，对含基座加筋圆柱壳进行干湿模态分析，圆柱壳参数同上节，基座参数：基座长b_l为1.2 m；基座宽b_w为0.8 m；基座高b_h为0.8 m；基座面板厚度t_{bm}为0.02 m；基座腹板厚度t_{bf}为0.015 m，几何模型如图8所示，网格尺寸见第2节，含基座加筋圆柱壳有限元模型如图9所示.

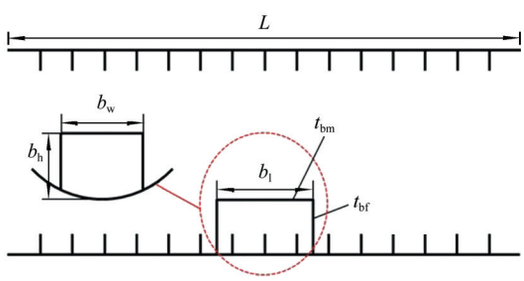
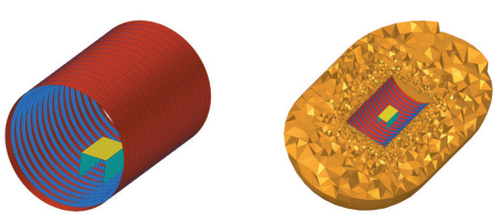


图8　含基座加筋圆柱壳几何模型



(a) 空气中　　(b) 水下

图9　含基座加筋圆柱壳有限元模型

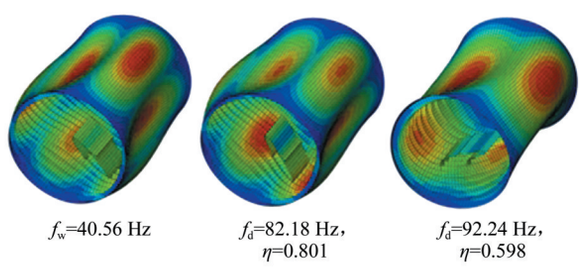
简支边界下含基座加筋圆柱壳湿模态与干模态如表5所示，发现：一阶湿模态由多阶干模态线性叠加形成，多阶干模态共同参与，不存在主导模

表5　含基座加筋圆柱壳湿模态的干模态参与系数

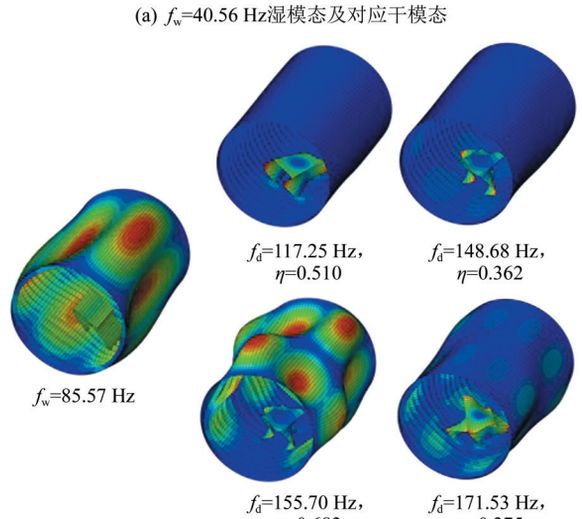
f_w/Hz	f_d/Hz	η
40.56	82.18	0.801
	92.24	0.598
85.57	117.25	0.510
	148.68	0.362
	155.70	0.683
	171.53	0.375

态，这是由于基座改变了壳体刚度矩阵的分布，导致整体模态发生改变，因此当引入声辐射阻抗矩阵计算湿模态时，造成多阶干模态参与主要贡献.

由图10可知湿模态振型由多阶干模态振型线性叠加形成，以固有频率为40.56 Hz的湿模态为例，该阶湿模态是由82.18 Hz的基座模态和92.24 Hz的壳体模态参与贡献得到，两阶干模态的贡献相当，不存在主导模态，二者共同决定了该阶湿模态的最终形态. 值得注意的是：固有频率为85.57 Hz的湿模态由三阶基座模态和一阶壳体模态共同贡献，不存在主导模态，因此含基座加筋圆柱壳湿模态由多阶干模态贡献得到. 对于内部存在基座等含复杂附加结构的水下航行器，本研究通过干模态叠加计算湿模态的方法更简单，机理揭示更明确，为后续声振响应计算奠定了坚实基础.



(a) f_w=40.56 Hz湿模态及对应干模态



(b) f_w=85.57 Hz湿模态及对应干模态

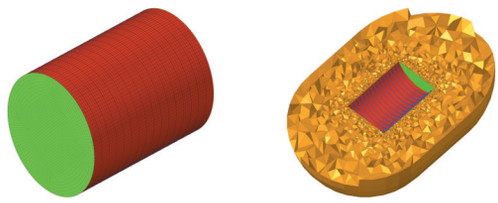
图10　简支边界下含基座加筋圆柱壳干湿模态振型对比

3.3.2　含舱壁加筋圆柱壳干湿模态映射关系

研究含舱壁加筋圆柱壳干湿模态映射关系，在加筋圆柱壳模型的基础上，构造两端舱壁如图11所示，舱壁厚度为45 mm，两端边界为自由.

对含舱壁加筋圆柱壳模型进行干湿模态分析，由表6可知，自由边界下含舱壁加筋圆柱壳部分干湿模态存在一对多关系.

由图12发现在自由边界下含舱壁加筋圆柱壳干湿模态存在一对多关系，因此含舱壁加筋圆柱壳

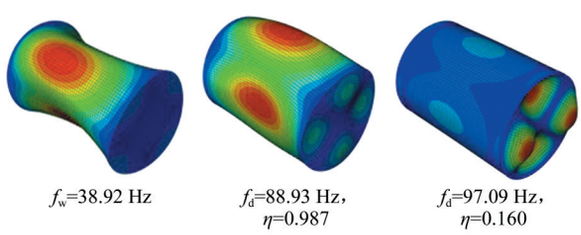


(a) 空气中　　(b) 水下

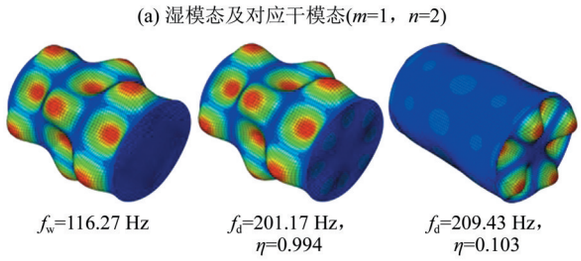
图11　含舱壁加筋圆柱壳有限元模型

表6　含舱壁加筋圆柱壳湿模态的干模态参与系数

f_w/Hz	f_d/Hz	η
18.67	刚体模态	0.513
	26.86	0.858
38.92	88.93	0.987
	97.09	0.160
116.27	201.17	0.994
	209.43	0.103
123.43	223.33	1.000
160.96	201.17	0.114
	209.26	0.992



(a) 湿模态及对应干模态(m=1，n=2)



(b) 湿模态及对应干模态(m=3，n=4)

图12　含舱壁加筋圆柱壳干湿模态振型

湿模态是由多阶干模态贡献得到的，本研究显示干湿模态之间频率和振型之间存在较大不同，与文献[14]中干湿模态振型和频率存在明显差异的结论一致，证明了本文方法的有效性.

4　结论

a. 边界条件的影响. 固支和简支边界对于干湿模态振型一致性影响相对较小，自由边界影响较大，主要是由于简支与固支边界约束整体运动，提高结构刚度，局部模态明显，因此流体耦合作用局部化，自由边界下结构整体刚度较低，模态密集从而导致加筋圆柱壳结构干湿模态一对多映射.

b．基座结构的影响．含基座圆柱壳湿模态由多阶干模态参与贡献，内部基座对圆柱壳干湿模态一致性的影响较大主要是由于基座改变壳体刚度矩阵的分布，导致壳体整体模态改变，当引入声辐射阻抗矩阵叠加计算湿模态时，造成多阶干模态参与贡献．

c．舱壁结构的影响．含舱壁圆柱壳湿模态由多阶干模态参与贡献，舱壁对于圆柱壳干湿模态一致性的影响较大主要是由于舱壁自身模态参与贡献，从而导致壳体模态存在一对多的现象．

参　考　文　献

[1] LUO Q R，MIAO W，ZHAO Z，et al．Transient vibro-acoustic characteristics of double-layered stiffened cylindrical shells[J]．Acoustics，2025，7(3)：50．

[2] GU W G，FAN H G．Buckling analysis and equivalent simulation of composite cylindrical shells with delaminations under axial compression[J]．International Journal of Structural Stability and Dynamics，2025，34：2650320．

[3] 李华东，杨锴，吕岩松，等．静水压力作用下夹层复合材料圆柱壳的屈曲特性[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2026，54(4)：80-87．

[4] 吴江海，严斌，吴文伟，等．基于谱元法的加肋圆柱壳振动特性分析[J]．中国造船，2024，65(6)：43-53．

[5] SINGH R，GUPTA A，JAIN N K．Vibration analysis of partially cracked thin orthotropic cylindrical shells with linearly and quadratically varying thickness：an analytical approach[J]．Thin-Walled Structures，2026，218：113939．

[6] 王献忠，陈立，喻敏，等．含内部子结构的圆柱壳振动特性研究[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2022，50(3)：101-107．

[7] 庞福振，高聪，李玉慧，等．基于里兹法的圆柱壳振动特性分析[J]．华中科技大学学报(自然科学版)，2020，48(7)：71-76．

[8] WANG Y L．Mesh refinement of finite element method for free vibration analysis of variable geometrical rotating cylindrical shells[J]．Engineering Computations，2023：40(1)：210-228．

[9] WANG Y L，WANG J H．An *hp*-version adaptive finite element algorithm for eigensolutions of moderately thick circular cylindrical shells *via* error homogenisation and higher-order interpolation[J]．Engineering Computations，2022，39(5)：1874-1901．

[10] WANG Y L，HU J S，KENNEDY D，et al．Adaptive mesh refinement for finite element analysis of the free vibration disturbance of cylindrical shells due to circumferential micro-crack damage[J]．Engineering Computations，2022，39(9)：3271-3295．

[11] 王永亮．中厚圆柱壳振型的有限元超收敛拼片恢复解和网格自适应分析[J]．振动与冲击，2021，40(18)：112-118．

[12] 李广生，陈美霞，原春晖．基于陆上振动测试的水中圆柱壳结构声振响应计算方法[J]．中国舰船研究，2022，17(6)：252-260．

[13] 王永辉．圆柱壳结构振动传递特性及声辐射研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2024．

[14] 邹元杰，赵德有．水下结构声固耦合振动的特征值计算[J]．船舶力学，2004，8(2)：109-120．

[15] 熊吕露，王德禹．基于源汇分布法的浸水结构振动特性分析[J]．振动与冲击，2017，36(17)：165-169．

[16] 赵北斗．船舶典型结构声振畸变相似方法研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2024．

[17] 孙华伟，马伟佳，王献忠，等．基于精细传递矩阵法的静压下圆柱壳自由振动分析[J]．中国造船，2021，62(1)：62-71．

[18] YE T G，ZHAO T T，CHEN Y K，et al．Buckling and vibro-acoustic behavior analysis of laminated immersed cylindrical shells with hydrostatic pressure based on Chebyshev-Fourier spectral approach[J]．Thin-Walled Structures，2024，205：112376．

[19] 邵浩峰，靳洋，林壮，等．水压载荷作用下正交各向异性圆柱壳自由振动分析[J]．振动与冲击，2024，43(17)：34-40，70．