

文章编号: 1001-2486(2011)04-0043-05

超空泡航行体双层壳结构动力稳定性分析*

麻震宇, 胡凡, 陈广南, 张为华

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对超空泡航行体轴向受力特点,建立超空泡航行体双层壳结构有限元模型,对结构动力稳定性进行分析。数值计算表明,当壳间实肋板厚度增大或环向肋骨数量和尺寸增加时,动力失稳区域整体下移,不稳定激发频率下降,失稳区域宽度减小幅度较小;当壳间间距减小或纵向肋骨数量和尺寸增加时,双层壳结构动力不稳定激发频率上升,动力失稳区域宽度较大幅度减小,动力不稳定激发程度显著降低。

关键词:超空泡; 双层壳体; 有限元方法; 动力稳定性

中图分类号: O351.3 **文献标识码:** A

Dynamic Stability Analysis of Supercavitating Double Shells

MA Zhen-yu, HU Fan, CHEN Guang-nan, ZHANG Wei-hua

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A finite element model for supercavitating underwater vehicles was developed and the dynamic stability of supercavitating double shells was investigated to obtain the instability maps for varying vehicle's velocity considering the time-dependent properties of the longitudinal loads. The computational results indicate that with the increment of the thickness of the annular plates linking between inner and outer shells or the number and dimension of the circumferential stiffeners, the frequencies corresponding to dynamic instability decline and the extension of the regions of dynamic instability is reduced lightly, while the frequencies corresponding to dynamic instability ascend and the dynamic stability is enhanced remarkably with the space between inner and outer shells decreased or the number and dimension of the longitudinal stiffeners increased.

Key words: supercavitation; double shells; finite element method; dynamic stability

超空泡技术为水下航行体减阻提供了新的途径。当水下航行体速度较高或人工在空化区通入气体时,流场将出现超空化现象,使水下航行体绝大部分表面包裹在超空泡的低密度水蒸气或气体包层中,从而使航行体运动阻力减小 90% 左右,实现水下高速航行。

超空泡航行体在高速运动过程中,只有头部空化器和尾部小部分表面与水接触,使航行体在轴向受到空化器阻力、尾部发动机的推力以及尾部沾湿面的流体动力轴向分量而保持推阻平衡,空化器受力与尾部沾湿面的大小由超空泡的流场特性决定^[1]。由于超空泡的生长和发展极易受周围流场扰动影响,其形态随航行体运动历史和弹道不断变化,当航行体轴向受力随时间周期变化时,将引起航行体动力参数失稳,导致结构屈曲破坏。

Ruzzene^[2-3]通过对航行体壳体动力屈曲的失稳区域计算表明,对壳体结构进行环向肋骨加强

可以有效提高航行体临界速度,减小航行体的动态失稳范围。Choi 等^[4]通过与固定空化器的结构模型对比分析表明,具有可调整空化器结构的航行体动力失稳区域较小,结构性能较好。Ahn 等^[5]以航行体壳体质量最小、动力稳定性区域面积最大为目标函数,对渐缩壳体和环向加肋壳体结构进行优化计算,得到较优的两种壳体形式尺寸参数配置。

国内外学者对超空泡航行体单层壳体结构动力特性开展了一些研究,但对于壳体结构形式的设计与方法仍处于探索阶段。当前超空泡航行体结构设计面临两个重要问题:一是采用水冲压发动机作为推进装置时的进水方式与布局设计如何与航行体壳体结构形式结合;二是如何减小超空泡与航行体之间相互作用引起的结构振动^[6]。与单层结构相比,潜艇结构中广泛采用的双层壳体结构不但容易满足夹层进水要求,而且由于在结构振动声辐射方面的研究较为成熟^[7-8],在超空

* 收稿日期: 2011-04-13

作者简介: 麻震宇(1982—),男,博士生。

泡航行体设计中具有潜在的优势。由于与单层壳体形式在动力特性上有较大不同,双层壳结构的动力性能亟待深入研究。

综上所述,本文以超空泡航行体双层圆柱壳结构为研究对象,采用有限元方法对双层壳体进行动力稳定性分析,得到其动力性能,为超空泡结构设计提供参考和理论依据。

1 模型建立及求解方法

1.1 有限元模型

参考潜艇结构形式^[9],超空泡航行体双层壳体结构配置如图1(a)所示,内壳体内部布置测控系统和推进装置等设备,内外壳之间可以为水冲压发动机需要的海水资源提供充足空间。

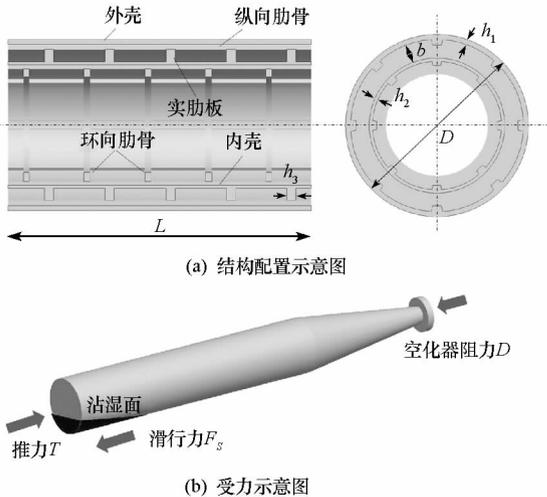


图1 超空泡航行体双层壳体配置示意图

Fig.1 Schematic of supercavitating double shells configurations

航行体在超空泡中高速航行时,通过头部空化器部分和尾部沾湿面与空泡发生作用产生流体动力,从稳定性分析角度考虑,航行体壳体在轴向受到空化器阻力、尾部发动机推力以及尾部沾湿面与空泡作用的滑动力,如图1(b)所示。空化器阻力计算公式为

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (1)$$

式中 C_D 表示空化器阻力系数, ρ 为流体密度, V 表示航行体速度, A 为航行体壳体最大横截面积。空化器阻力系数由下式给出:

$$C_D(\sigma, \alpha_n) \cong C_{D0}(1 + \sigma) \cos^2 \alpha_n \quad (2)$$

式中 α_n 表示空化器攻角, σ 为空化数, C_{D0} 表示空化器在零攻角和空化数为零情况下的阻力系数。航行体定常直线超高速航行阶段攻角为零,假设空化数为零, C_D 取为 $0.03^{[1]}$ 。

航行体在稳态流动条件下轴向方向的受力应

保持常值,但由于超空泡流场特性极不稳定,其形态随航行体运动历史和弹道不断发生变化,导致空化器阻力和尾部滑动力大小随时间变化且易发生振荡。超空泡航行体结构壳体的轴向受力可简化表示为静力分量 p_0 与一个动力分量的叠加:

$$p(t) = p_0(1 + \beta \cos \Omega t) \quad (3)$$

其中 β 为动力载荷比例系数, p_0 即为式(1)求得空化器阻力,动力载荷分量随时间周期变化。

在双层壳结构的有限元建模中,内外壳和壳间的实肋板均采用八节点超参数壳单元^[10-11],环向和纵向加强肋骨采用三节点 timoshenko 梁单元进行模拟^[10]。对航行体头部与尾端节点均匀施加方向相反的轴向外载,同时约束其径向和环向自由度,模拟航行体在空泡中运动的边界条件。

1.2 动力稳定性求解

在有限元离散的基础上,根据哈密顿原理得到壳体运动方程:

$$M\ddot{\delta} + (K + K_g)\delta = 0 \quad (4)$$

其中 M 为壳体结构整体质量矩阵, K 为整体刚度矩阵, K_g 为整体几何刚度矩阵, δ 为模型中整体节点自由度。由式(3)可将壳体运动方程(4)转化为带有周期性系数的矩阵形式 Mathieu 方程:

$$M\ddot{\delta} + [K + (1 + \beta \cos \Omega t) K_g] \delta = 0 \quad (5)$$

其中 K_g 为外载为 p_0 时的几何刚度矩阵。设 T 为 $p(t)$ 的激振周期,根据 Floquet 的周期性系数微分方程理论,与结构动力不稳定的临界状态对应的是该方程周期为 T 或 $2T$ 的解^[12],研究表明,与周期 $2T$ 的解对应的为第一动力失稳区,其动力不稳定区域面积最大,为结构的主要失稳区^[13],也为本文的求解对象。运用协调平衡法,可得到解的存在条件的无限行列式,取一阶近似可得

$$\left| K + \left(1 \pm \frac{1}{2} \beta\right) K_g - \frac{\Omega^2}{4} M \right| = 0 \quad (6)$$

2 静力稳定性分析

2.1 模型验证

通过有限元离散计算得到单层壳体在轴向均匀受压情况下的静力临界屈曲载荷,并与理论分析和有限元软件计算结果进行比较,壳体结构配置与材料参数如表1所示。

表1 壳体材料和几何参数

Tab.1 Shell material properties and geometry

$E/(N/m^2)$	$\rho/(kg/m^3)$	D/m	L/m
7.1×10^{10}	2700	0.2	2.0

图2给出了单层普通壳体长度和直径保持不变、厚度在0.002~0.006m时,静力屈曲临界载荷

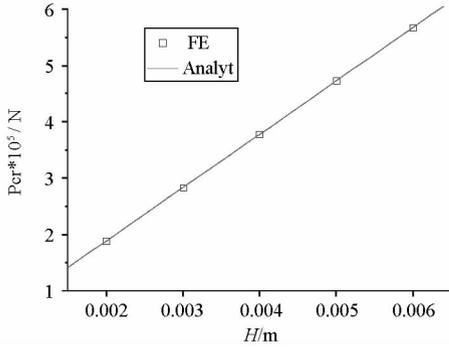


图2 单层壳体静力屈曲与理论分析结果比较
Fig.2 Static buckling loads for plain shells: between analytical and FE results

与理论公式计算^[14]的比较。由图可得,由有限元离散得到的静力稳定性计算结果与理论分析结果较为吻合。

表2给出了单层加肋壳体静力屈曲临界载荷与有限元软件 Ansys 计算结果的比较。计算中壳体的长度、直径和厚度均保持不变(壳体厚度为0.003m),加强肋骨沿环向和纵向均匀布置, n 为环向肋骨数量, m 为纵向肋骨数量,肋骨横截面均为正方形,其边长都为0.006m。由表可见,环向和纵向加强肋骨不同程度地提高了静力屈曲临界值,纵向肋骨的作用更明显^[15],且有限元离散得到的计算结果与 Ansys 计算较为吻合,有限元模型建立较为合理准确。

表2 单层加肋壳体静力屈曲与 Ansys 结果比较

Tab.2 Static buckling loads for stiffened shells : between Ansys and FE results

肋骨配置	$n = 0, m = 0$	$n = 3, m = 0$	$n = 5, m = 0$	$n = 7, m = 0$	$n = 5, m = 4$	$n = 5, m = 8$
Ansys 结果						
$p_{cr} \times 10^5 / N$	2.7022	2.7703	2.8324	2.8876	3.0475	3.2622
本文结果						
$p_{cr} \times 10^5 / N$	2.7019	2.7611	2.8356	2.8894	3.0495	3.2629

2.2 双层壳耦合性能分析

双层壳体材料与几何参数如表1所示,结构形式如图1(a)所示,内外壳厚度 h_1 和 h_2 在0.001~0.003m,5个实肋板沿壳体纵向均匀布置,改变内外壳之间的距离 b 和实肋板的厚度 h_3 ,分析未加肋普通双层壳体在轴向均匀受压情况下壳间连接对结构静力稳定性的影响。

图3给出了内外壳之间距离 b 为0.02m时,双层壳结构在三种内外壳厚度配置下随实肋板厚度 h_3 变化的静力屈曲临界载荷。由图可见,当 $h_3 = 0$ 时,内外壳之间没有连接,不存在耦合作用,实肋板的施加使双层壳之间产生相互作用,显著提高了静力屈曲载荷,随着实肋板厚度的增加,静力屈曲载荷继续提高,但提高幅度较小。

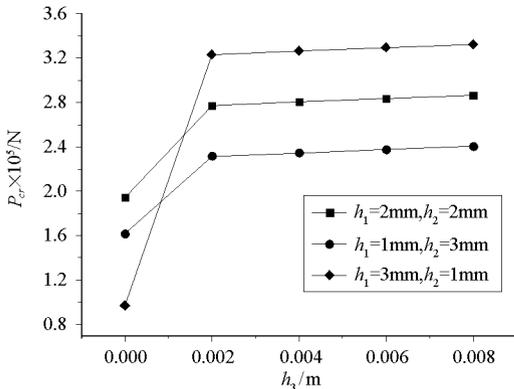


图3 双层壳体静力屈曲载荷随 h_3 变化曲线
Fig.3 Static buckling loads for varying h_3

图4给出了实肋板厚度 h_3 为0.005m时,双层壳结构在三种内外壳厚度配置下随内外壳间距 b 变化的静力屈曲临界载荷。由图可得,随着内外壳之间距离的减小,静力屈曲载荷明显提高,当 $b = 0$ 时,内外壳叠加在一起成为较厚单层壳,静力屈曲载荷达到最大值。

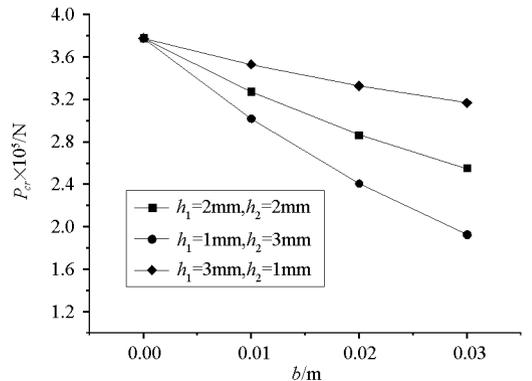


图4 双层壳体静力屈曲载荷随 b 变化曲线
Fig.4 Static buckling loads for varying b

综上所述,壳间连接配置对双层壳结构静力稳定性影响较大。当壳间间距减小或实肋板厚度增加时,结构静力屈曲临界载荷提高,减小内外壳间距对提高静力屈曲载荷影响更显著。

3 动力稳定性分析

壳体结构的参数和配置如表1和图1(a)所示,壳体长度和外壳直径保持不变,内外壳的厚度

$h_1 = h_2 = 0.002\text{m}$ 。5个实肋板沿壳体纵向均匀布置,加强肋骨沿环向和纵向均匀布置,肋骨横截面均为正方形。设动力载荷系数 β 为 0.5, 频率 $f = \Omega/(2\pi)$, 根据式(1)和式(6)得到超空泡航行体速度与动力载荷频率参数面内的的动力失稳区域, df 表示失稳区域宽度。

图5给出了内外壳间距 b 为 0.02m, 实肋板厚度 h_3 在 2~8mm 时的未加肋普通双层壳结构动力失稳区域。由图可见, 随着实肋板厚度增加, 结构动力失稳区域整体下移, 不稳定激发频率下降; 失稳区域宽度有较小幅度减小, 增大实肋板厚度对降低动力不稳定激发程度影响较小。

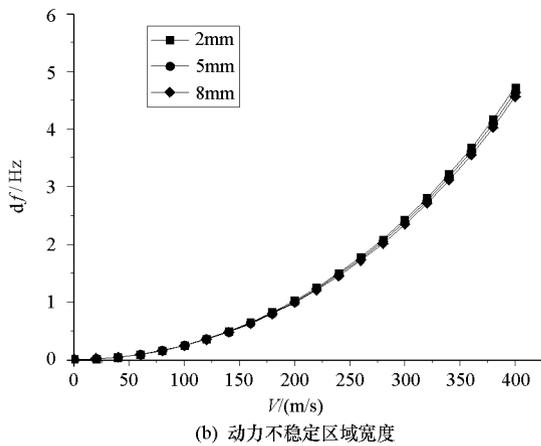
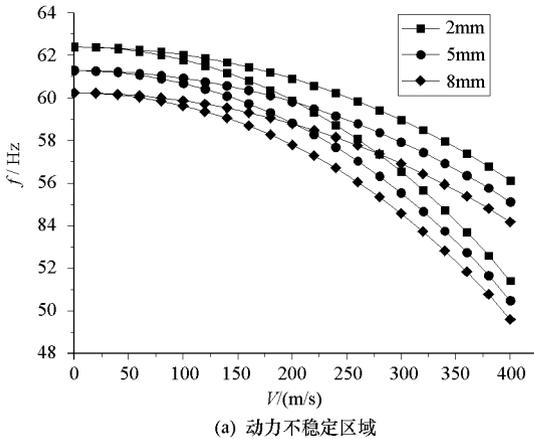


图5 实肋板厚度对双层壳体动力稳定性影响
Fig.5 Dynamic stability maps for varying h_3

图6给出了实肋板厚度 h_3 为 5mm, 内外壳间距 b 在 0.01~0.03m 时的未加肋普通双层壳结构动力失稳区域。由图可见, 随着内外壳间距的减小, 结构动力失稳区域整体上移, 不稳定激发频率上升; 失稳区域宽度明显减小, 内外壳间距对动力不稳定激发程度影响较大。

图7和图8给出了内外壳间距 b 为 0.02m, 实肋板厚度 h_3 为 5mm 时, 变化环向和纵向肋骨的数量和尺寸对结构动力稳定性的影响, 其中 n 和 m 分别表示环向和纵向肋骨数量, a 和 c 分别

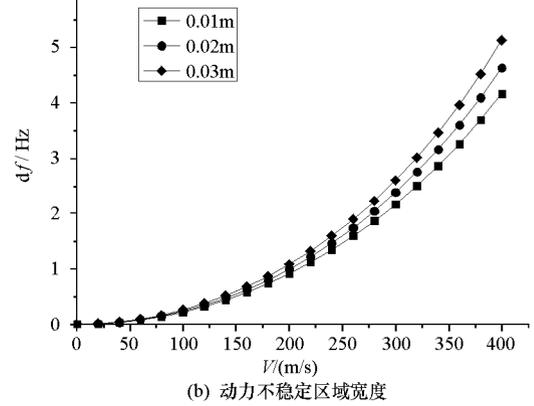
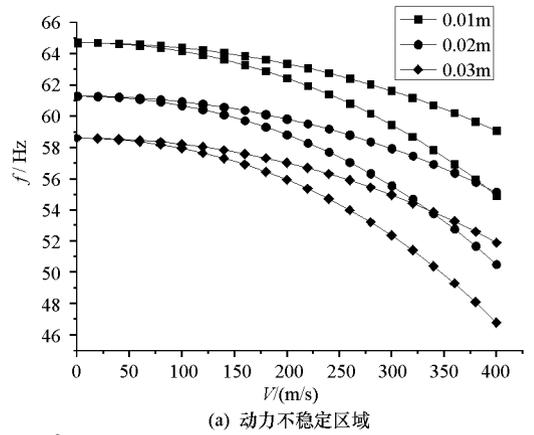


图6 内外壳间距对双层壳体动力稳定性影响
Fig.6 Dynamic stability maps for varying b

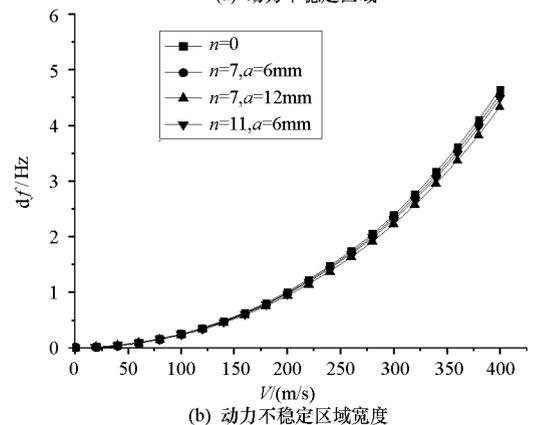
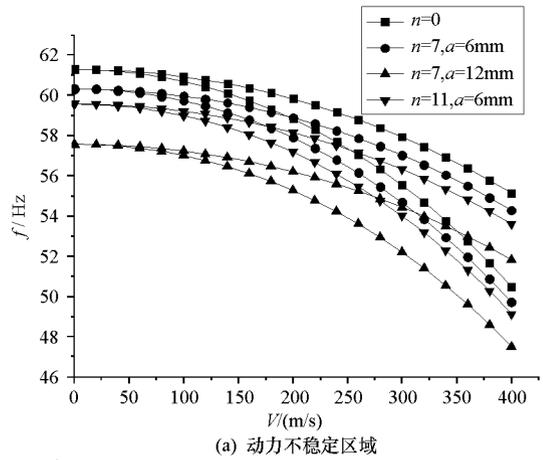
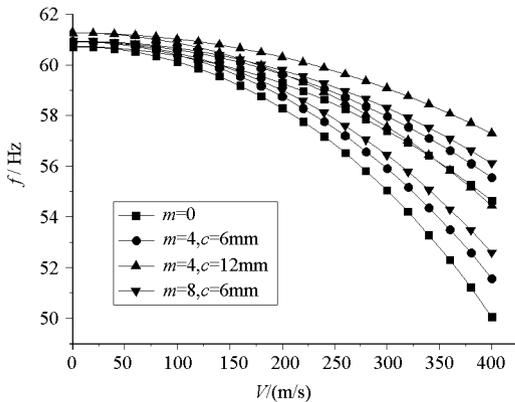


图7 环向肋骨对双层壳体动力稳定性影响
Fig.7 Dynamic stability maps for varying circumferential stiffeners

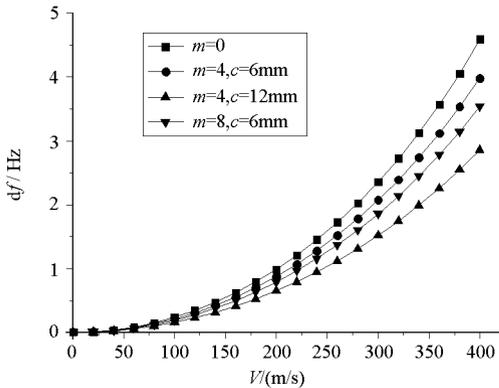
表示环向和纵向肋骨横截面边长。

如图7所示,随着环向肋骨数量和尺寸的增加,结构动力失稳区域整体下移,且肋骨尺寸的增加对不稳定激发频率的下降影响更大;失稳区域宽度有较小幅度减小,增加环向肋骨数量和尺寸对降低动力不稳定激发程度影响较小。

如图8所示,随着纵向肋骨数量和尺寸的增加,结构动力失稳区域整体有较小幅度上移,肋骨数量和尺寸的变化对不稳定激发频率影响较小;失稳区域宽度显著减小,且增大肋骨尺寸对降低动力不稳定激发程度影响更大。



(a) 动力不稳定区域



(b) 动力不稳定区域宽度

图8 纵向肋骨对双层壳体动力稳定性影响

Fig.8 Dynamic stability maps for varying longitudinal stiffeners

综上所述,当壳间实肋板厚度增加或环向肋骨数量和尺寸增加时,双层壳结构动力失稳区域整体下移,不稳定激发频率下降,但动力失稳区域宽度减小幅度较小;当壳间间距减小或纵向肋骨数量和尺寸增加时,双层壳结构动力失稳区域整体上移,动力不稳定激发频率上升,动力失稳区域宽度较大幅度减小,动力不稳定激发程度显著降低。

4 结论

以超空泡航行体双层壳结构为对象,采用八

节点超参数壳单元和三节点 Timoshenko 梁单元建立有限元模型,对结构静动力稳定性进行计算可得:

(1)当壳间间距减小或实肋板厚度增加时,结构静力屈曲临界载荷提高,减小内外壳间距对提高静力屈曲载荷影响更显著。

(2)当壳间实肋板厚度增加或环向肋骨数量和尺寸增加时,双层壳结构动力失稳区域整体下移,动力失稳区域宽度减小幅度较小;当壳间间距减小或纵向肋骨数量和尺寸增加时,双层壳结构动力失稳区域整体上移,动力失稳区域宽度较大幅度减小。

(3)双层壳体结构在超空泡航行体结构设计中具有潜在的发展优势,超空泡航行体双层壳结构动力性能有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 张宇文. 空化理论与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007.
- [2] Ruzzene M. Dynamic Buckling of Periodically Stiffened Shells: Application to Supercavitating Vehicles [J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41: 1039–1059.
- [3] Ruzzene M. Non-Axisymmetric Buckling of Stiffened Supercavitating Shells: Static and Dynamic Analysis[J]. Computers and Structures, 2004, 82: 257–269.
- [4] Choi J Y, Ruzzene M. Stability Analysis of Supercavitating Underwater Vehicles with Adaptive Cavitator [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48: 1360–1370.
- [5] Ahn S S, Ruzzene M. Optimal Design of Cylindrical Shells for Enhanced Buckling Stability: Application to Supercavitation Underwater Vehicles[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42: 967–976.
- [6] Ahn S S. An Integrated Approach to the Design of Supercavitating Underwater Vehicles[D]. Georgia Institute of Technology, August 2007.
- [7] 陈美霞, 骆东平, 杨叔子. 壳间连接形式对双层壳声辐射性能的影响[J]. 振动与冲击, 2005(5): 77–80.
- [8] 姚熊亮, 计方, 钱德进, 等. 壳间连接介质对双层壳声辐射性能的影响[J]. 声学技术, 2009(6): 312–317.
- [9] 陈小宁. 双层壳潜艇舱段结构静动力性能分析[D]. 武汉:华中科技大学, 2004.
- [10] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [11] 罗伯特·库克, 戴维·马尔库斯, 迈克尔·普利沙, 等. 有限元分析的概念与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2007.
- [12] Basar Y, Eller C, Kratzig W B. Finite Element Procedures for Parametric Resonance Phenomena of Arbitrary Elastic Shell Structures[J]. Computational Mechanics, 1987(2): 89–98.
- [13] 杨平, 马志敏. 薄壁骨材的动力侧倾屈曲分析[J]. 武汉理工大学学报, 2004(4): 167–170.
- [14] 吴连元. 板壳稳定性理论[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1996.
- [15] Alyanak E, Venkayya V, Grandhi R, et al. Structural Response and Optimization of a Supercavitating Torpedo [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 41: 563–582.