

文章编号: 1007-7294(2024)05-0651-12

弹性浮体的二阶平均漂移力研究

李 帅^{1,2}, 付世晓^{1,2}, 张仕元^{1,2}

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 本文基于离散模块思想, 提出一种求解弹性浮体二阶平均漂移力的数值方法。首先将连续弹性浮体离散为弹性梁连接的刚性模块系统, 实现弹性梁刚度和各模块水动力信息的耦合, 在频域内求解浮体一阶水弹性响应。然后利用二阶多体水动力理论, 并考虑计及结构弹性变形影响后的各模块一阶运动信息, 获得各刚性模块上的二阶平均漂移力。最后, 利用该方法求解自由柔性驳船的平均漂移力, 并与基于模态叠加思想的三维水弹性理论的计算结果进行对比验证。此外, 由于本文方法在水动力求解方面的离散特性, 该方法可直接拓展到非均匀波浪场下浮体的水弹性响应分析。

关键词: 水弹性; 离散模块; 平均漂移力; 频域

中图分类号: U441 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.05.002

Numerical study of mean drift force on a flexible floating body

LI Shuai^{1,2}, FU Shi-xiao^{1,2}, ZHANG Shi-yuan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Collaborative Innovation Centre for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on the discrete module methodology, this paper proposes a numerical method to estimate the mean drift forces on flexible floating bodies. The continuous structure was first discretized into rigid modules connected by elastic beams. The first-order hydroelastic responses were solved by coupling the hydrodynamics on modules and the structural stiffness of elastic beams in the frequency domain. Based on the first-order motions of the modules, the second-order mean drift forces on each rigid module were calculated by second-order multi-body hydrodynamic theory. The motions and mean drift forces of a freely floating flexible barge using the proposed method were verified against the results obtained by the 3D hydroelastic theory based on modal superposition. Moreover, due to the discrete property of the present method for hydrodynamics, the method can be directly extended to inhomogeneous wave conditions.

Key words: hydroelasticity; discrete module; mean drift force; frequency domain

0 引 言

随着船舶和海洋结构物尺度的增加, 结构变得更柔, 波浪作用下的弹性变形不可忽略, 必须利用水弹性理论求解其在波浪作用下的动力响应。水弹性理论自1970年提出以来, 从二维线性^[1]到三维

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(52088102)

作者简介: 李 帅(1995-), 男, 博士; 付世晓(1976-), 男, 教授, 通讯作者, E-mail: shixiao.fu@sjtu.edu.cn;

张仕元(1994-), 男, 博士研究生。

线性^[2],从二维非线性^[3]到三维非线性^[4],已经被广泛地应用于船舶和超大型浮体(VLFS)等海洋结构物的水弹性响应分析和结构设计^[5]。长期以来,水弹性理论相关的研究,主要集中在波浪作用下结构的总体水弹性响应和局部应力分析,针对弹性结构二阶平均漂移力的研究较少。

针对浅吃水的超柔性VLFS,日本学者^[6-9]基于薄板弯曲理论,提出了系列方法对浮体的二阶平均漂移力开展了深入讨论,研究发现浮体的弹性变形会降低平均漂移力。然而,这些方法均假设VLFS的刚体运动可忽略,只考虑垂向弹性变形的影响,无法推广到任意浮体的二阶波浪力求解。Wu等^[4]最早考虑刚体转动的二次项和浮体瞬时湿表面变化对二阶波浪力的影响,提出了可适用于任意浮体的三维非线性水弹性理论;在该理论基础,Chen等^[10]对一系泊浮体的水弹性响应进行预报,其研究主要关注于二阶力引起的浮体运动响应,没有讨论弹性变形对平均漂移力的影响;Heo等^[11]基于模态叠加思想,采用Rankine源在时域内求解了浮体的平均漂移力,结果显示由于弹性变形的影响,浮体的平均漂移力向高频移动;Park等^[12]将时域三维Rankine源和三维有限元相结合,提出了一种浮体水弹性响应计算的直接时域求解算法,并采用近场法和远场法获得了弹性体的平均漂移力。

上述对于弹性体二阶波浪力的研究可分为直接法和模态叠加法。近年来,Lu等^[13]提出了一种基于离散模块思想的水弹性分析方法,在频域内求解了一均匀薄板的弹性变形和弯矩;位巍等^[14]在模态空间内,建立了该方法和传统三维线性水弹性理论的联系,并系统地验证了该方法和三维水弹性理论在广义激励力、广义水动力系数以及主坐标响应等方面求解的正确性;Zhang等^[15]结合卡明斯理论,利用该方法分析了波浪和移动载荷联合作用下浮体的水弹性响应;Wei等^[16-17]通过将非均匀波浪场离散为系列均匀波浪场的手段,实现了非均匀波浪场下浮体的频域和时域水弹性响应分析,不同于上述均匀板模型的水弹性响应研究,该方法在悬浮隧道^[18]、风机^[19]、浮桥^[20-21]和波浪能发电装置^[22]等其他类型的海洋结构物上也呈现出良好的适用性,然而上述关于该方法的发展和应用都集中于一阶波浪力作用下的浮体水弹性响应分析。

本文基于离散模块思想,建立一种求解弹性浮体二阶平均漂移力的数值方法。在本方法中,连续浮体将首先被离散为弹性梁连接的刚性模块系统,实现结构刚度和各模块一阶水动力载荷的耦合,建立一阶频域水弹性方程并求解浮体水弹性响应。然后,提取各刚性模块重心处的运动,基于多体水动力理论获得考虑结构弹性变形后各模块的二阶平均漂移力。为验证该方法,本文以一个柔性箱型驳船为数值模型,求解不同浪向下浮体的一阶水弹性响应和二阶平均漂移力,并与基于模态叠加思想的三维水弹性理论得到的结果进行对比,两者吻合良好。通过对浮体弹性变形和刚体运动对平均漂移力影响的讨论分析,发现在弹性变形的作用下,浮体的平均漂移力峰值向小波长区间集中。此外,由于该方法在浮体水动力方面可离散求解的特性,本文方法可进一步拓展到非均匀波浪场下的弹性浮体二阶水弹性响应分析。

1 基本理论

图1所示为基于离散模块思想的弹性体二阶平均漂移力的求解过程。在本方法中,连续浮体将首先被离散为弹性梁连接的多模块刚性系统。然后,基于三维势流理论并计及模块之间的水动力干扰,获得各模块的一阶波浪激励力、附加质量和阻尼系数等水动力系数信息;同时,浮体变形的连续性通过在各模块重心设定与浮体刚度等效的弹性梁系统来保证。进而,依据牛顿第二定律实现各模块水动力和弹性梁的耦合,建立浮体在波浪作用下的一阶频域动力学方程^[14]:

$$\left(-\omega^2 \left([\mathbf{M} + \mathbf{A}]_{6N \times 6N} \right) - i\omega [\mathbf{C} + \mathbf{c}]_{6N \times 6N} + [\mathbf{K} + \mathbf{k}]_{6N \times 6N} \right) \{ \mathbf{u}^{(1)} \}_{6N \times 1} = \{ \mathbf{F}^{(1)} \}_{6N \times 1} \quad (1)$$

式中, $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{A}]$ 、 $[\mathbf{C}]$ 和 $[\mathbf{K}]$ 分别为刚性模块的质量矩阵、附加质量矩阵、水动力阻尼系数矩阵和静水恢

复系数矩阵; $[c]$ 和 $[k]$ 分别为弹性梁的结构阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{u^{(1)}\}$ 和 $\{F^{(1)}\}$ 分别为弹性梁节点位移列阵和一阶波浪激励力列阵。

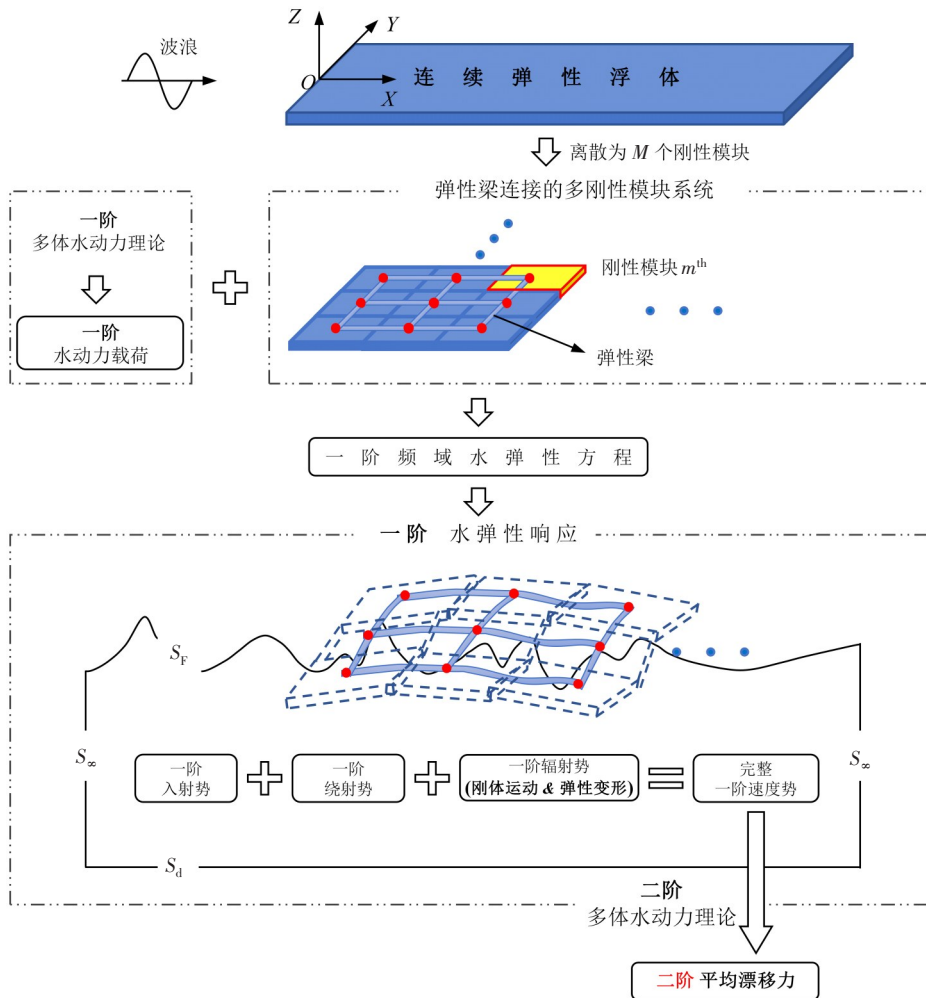


图1 数值模拟流程图

Fig.1 Flow diagram of the numerical simulation

然后,求解方程(1)得到浮体的一阶水弹性响应,并提取各刚性模块重心处的运动信息。在弹性梁连接的刚性多模块系统中,模块运动由整个系统的刚体运动和弹性变形两部分组成。进而,结合各模块的一阶规范化辐射势,获得由于模块运动引起的一阶辐射势。进一步考虑流场的一阶入射势和绕射势,得到计及结构弹性影响后整个流场的一阶速度势。最后,利用二阶多体水动力理论,求解各刚性模块的平均漂移力。本文以细长体模型作为数值模型,只需将浮体在长度方向进行离散,在宽度方向当作刚性处理。

1.1 坐标系定义

本文将连续弹性浮体视为由弹性梁连接的多浮体系统,为描述该多浮体系统在波浪作用下的运动响应,采用三个右手坐标系,分别为大地坐标系 $OXYZ$ 、参考坐标系 $o'_m x'_m y'_m z'_m$ 和随体坐标系 $o_m x_m y_m z_m$ ($m = 1, 2, \dots, M$),如图2所示。其中,大地坐标系 $OXYZ$ 在空间固定, OXY 平面位于静水面, Z 轴竖直向上;参考坐标系 $o'_m x'_m y'_m z'_m$ 始终位于浮体的平衡位置,不随浮体摇荡;随体坐标系 $o_m x_m y_m z_m$ 随各浮体一起运动,其初始位置与大地坐标系 $OXYZ$ 的坐标轴平行。本文规定波浪入射方向与 X 轴平行并指向 X 轴正方向时, $\theta = 0^\circ$,且逆时针方向为正。

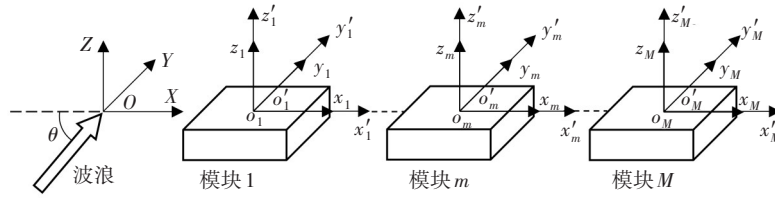


图2 多体系统的坐标系定义

Fig.2 Coordinate systems of a multi-body system

1.2 刚性体二阶平均漂移力计算方法

本文采用基于刚体假设的多体水动力理论计算二阶波浪力。关于刚性浮体二阶波浪力的求解主要有三种方法:近场法^[23]、中场法^[24]和远场法^[25]。本文将采用近场法和远场法求解浮体的平均漂移力。

近场法由Pinkster^[23]提出,又称之为直接压力积分法,其基本思想是首先利用Bernoulli方程获得浮体湿表面上的压强,并精确到二阶分量,然后在浮体瞬时湿表面上积分,得到作用在浮体上的力和力矩表达式,其中二阶部分即为作用在浮体上的二阶波浪力。基于该方法可以获得单浮体或者多浮体系统中各个浮体的六自由度二阶力(力矩)分量。其中,近场法求解的浮体二阶波浪力分量表达式^[26]如下:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}^{(2)} = & \frac{1}{2} \rho g \int_{WL} (\eta_r^{(1)})^2 \frac{\mathbf{n}^{(0)}}{\sqrt{1-n_3^2}} dl + \boldsymbol{\xi}_R^{(1)} \times \mathbf{f}^{(1)} - \rho \iint_{S_0} \frac{1}{2} |\nabla \Phi^{(1)}|^2 \mathbf{n}^{(0)} dS - \\
 & \rho \iint_{S_0} \mathbf{X}^{(1)} \cdot \nabla \left(\frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} \right) \mathbf{n}^{(0)} dS - \rho \iint_{S_0} g (X_3^{(2)} \mathbf{n}^{(0)} + x_3^{(0)} \mathbf{N}^{(2)}) dS
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

式中, ρ 和 g 分别为流体密度和重力加速度; $\eta_r^{(1)}$ 为相对波面升高,即浮体平均湿表面的水线 WL 在运动时和波面的距离; $\mathbf{n}^{(0)}$ 和 n_3 为浮体物面上某一点在随体坐标系 $o_m x_m y_m z_m$ 下的法向矢量和 z 方向的分量; $\boldsymbol{\xi}_R^{(1)}$ 为浮体的一阶角位移矢量; $\mathbf{f}^{(1)}$ 为浮体的一阶水动力矢量,包括一阶波浪激励力和因一阶运动引起的辐射力以及静水恢复力; $\mathbf{x}^{(0)}$ 和 $x_3^{(0)}$ 分别为浮体物面上某一点在随体坐标系 $o_m x_m y_m z_m$ 下的坐标矢量和 z 方向的坐标分量; $\mathbf{X}^{(1)}$ 和 $X_3^{(2)}$ 分别为大地坐标系 $OXYZ$ 下浮体物面上某一点的一阶位移矢量和二阶位移矢量 Z 方向的坐标分量。 $\mathbf{N}^{(2)}$ 为大地坐标系 $OXYZ$ 下浮体物面的二阶法向矢量; $\Phi^{(1)}$ 为流场的一阶速度势,是一阶入射波速度势 $\Phi_I^{(1)}$ 、一阶绕射势 $\Phi_D^{(1)}$ 与一阶辐射势 $\Phi_R^{(1)}$ 之和。对于多体系统, $\Phi_R^{(1)}$ 表达式为

$$\Phi_R^{(1)} = \text{Re} \left\{ -i\omega \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 \xi_{jm}^{(1)} \cdot \phi_{jm}^{(1)} e^{-i\omega t} \right\}
 \tag{3}$$

式中, $\xi_{jm}^{(1)}$ 表示单位规则波作用下浮体 m^{th} 第 j^{th} 阶自由度的一阶运动复数幅值,为刚体运动 $\xi_{jm}^{(1)R}$ 和弹性变形 $\xi_{jm}^{(1)F}$ 之和; $\phi_{jm}^{(1)}$ 是当其他浮体固定不动,浮体 m^{th} 第 j^{th} 阶自由度作单位速度运动时产生的空间速度势,称为规范化速度势。

式(2)中没有二阶速度势 $\Phi^{(2)}$ 项,因为 $\frac{\partial \Phi^{(2)}}{\partial t}$ 中没有定常项,对于平均漂移力无贡献。

远场法的基本思想是在由物体表面 S_0 、自由液面 S_F 、半径无限大的垂直圆柱面 S_∞ 和在 S_∞ 之内的海底面 S_d 围成的封闭流域内,利用动量守恒方程,求解浮体的平均漂移力,故又称之为动量守恒法。Newman^[25]推导的三维浮体的三个水平自由度的二阶平均漂移力的公式如下:

$$\begin{aligned}
 F_1^{(2)} = & - \iint_{S_\infty} \left[p \cos\theta + \rho V_R (V_R \cos\theta - V_\theta \sin\theta) \right] R d\theta dZ \\
 F_2^{(2)} = & - \iint_{S_\infty} \left[p \sin\theta + \rho V_R (V_R \sin\theta + V_\theta \cos\theta) \right] R d\theta dZ \\
 F_6^{(2)} = & - \rho \iint_{S_\infty} (\rho V_R V_\theta R^2) d\theta dZ
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

式中,右边的积分项在柱坐标系 (R, θ, Z) 中表示, p 为垂直圆柱面 S_∞ 上的压强,可根据完整的Bernoulli方程计算:

$$p = -\rho \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho |\nabla \Phi^{(1)}|^2 - \rho g Z \tag{5}$$

V_R 表示流体质点在垂直圆柱面 S_∞ 上的径向速度,即法向速度; V_θ 表示流体质点在垂直圆柱面 S_∞ 上的切向速度,可根据流场的一阶速度势求解。

$$V_R = \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial R}, \quad V_\theta = \frac{1}{R} \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \theta} \tag{6}$$

从公式(4)可以看出,远场法需要选取无限远处的控制面,故只能输出单浮体或者多浮体系统总的平均漂移力。此外,由于远场法只与无限远处圆柱面上的速度和压强相关,因此弹性体和刚性体的平均漂移力远场法积分公式相同。

2 方法验证

2.1 数值模型

本文选取一个质量均匀分布的箱型驳船作为数值研究对象,模型长200 m、宽16 m、吃水5 m,不考虑结构阻尼,详细信息参见表1。此外,为降低横摇共振的影响,本文在浮体横摇自由度设定了无量纲阻尼比为5%的线性阻尼^[12]。为讨论弹性变形对二阶平均漂移力的影响,本文所考虑的驳船模型刚度相对较低,其中前8阶弹性模态(第7~14阶模态)的固有频率信息见表2。图3为模型示意图,浮体被离散为由弹性梁连接的8个刚性模块,图中“M1~M8”表示模块编号。模型的水动力网格信息如图4所示,总网格数为5376。为保证结果的可比性,连续浮体和弹性梁连接的多浮体系统采用相同的水动力网格离散方式。

表1 数值模型的主要参数

Tab.1 Main parameters of the numerical model

名称	数值	名称	数值
总长 L/m	200	排水量 M/kg	1.64E7
单刚性模块长度 l_m/m	25	垂向弯曲刚度 $EI_y/(N \cdot m^2)$	1.68E11
型宽 B/m	16	水平弯曲刚度 $EI_z/(N \cdot m^2)$	8.40E11
型深 D/m	10	扭转刚度 $GJ_x/(N \cdot m^2)$	1.94E11
吃水 d/m	5	水深 H/m	500
重心距基线垂向距离 KG/m	5		

表2 数值模型前14阶干模态和湿模态对应的固有频率

Tab.2 Natural frequencies of the numerical model in dry and wet conditions for the first 14 modes

模态序号	干模态对应的固有频率/Hz	湿模态对应的固有频率/Hz	模态形状
1	0	0	纵荡
2	0	0	横荡
3	0	0	首摇
4	0	0.102	横摇
5	0	0.151	纵摇
6	0	0.152	垂荡
7	0.127	0.176	两节点垂向弯曲

续表 2

模态序号	干模态对应的固有频率/Hz	湿模态对应的固有频率/Hz	模态形状
8	0.285	0.276	两节点水平弯曲
9	0.351	0.276	三节点垂向弯曲
10	0.689	0.470	四节点垂向弯曲
11	0.706	0.606	一节点扭转
12	0.785	0.716	三节点水平弯曲
13	1.138	0.748	五节点垂向弯曲
14	1.412	1.099	两节点扭转

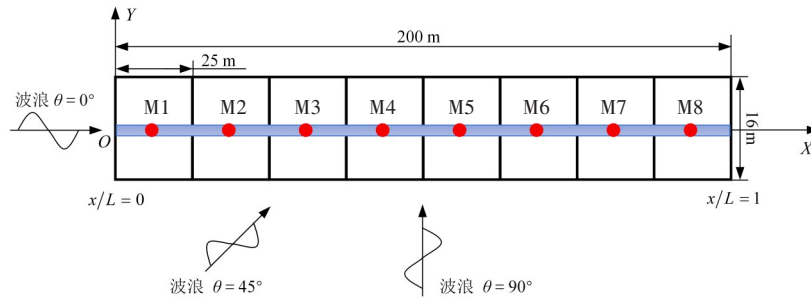


图3 数值模型和等效梁的示意图

Fig.3 Schematic diagram of the numerical model and the equivalent beam

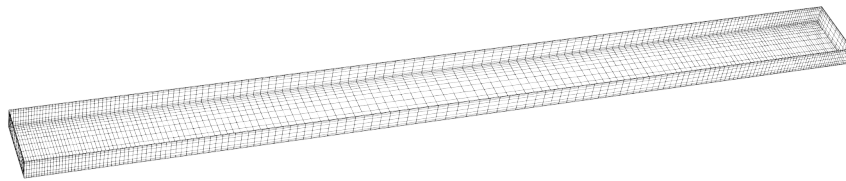
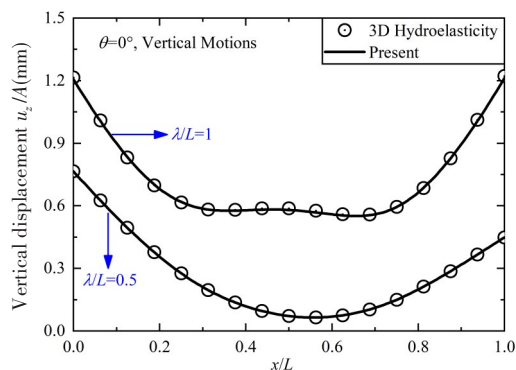


图4 数值模型的水动力网格

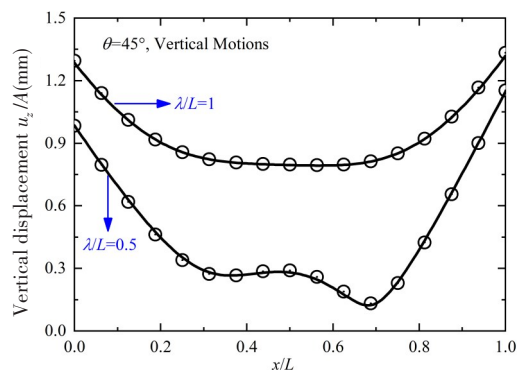
Fig.4 Hydrodynamic meshes of the numerical model

2.2 一阶水弹性响应验证

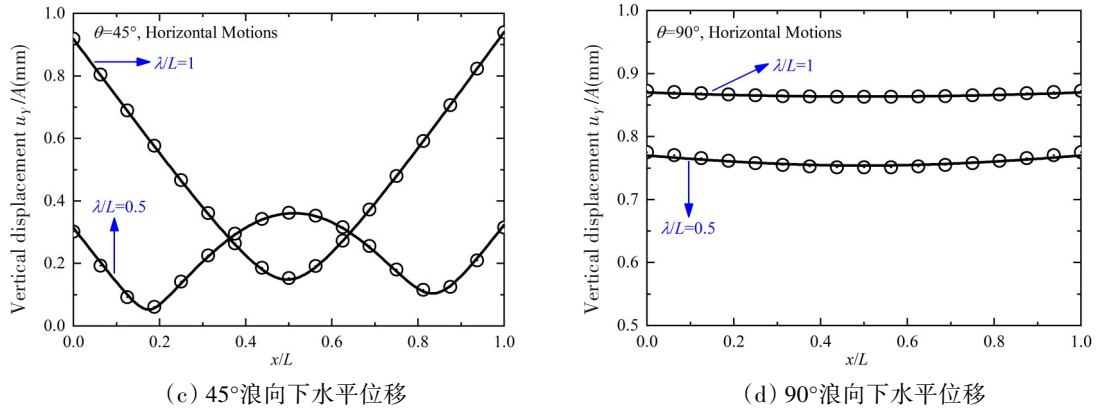
由于浮体的平均漂移力和一阶运动直接相关,因此本节首先验证浮体一阶水弹性响应求解的正确性。图5给出了在0°、45°和90°浪向下,分别采用本文方法和三维水弹性理论得到的垂向位移(Z 轴)和水平位移(Y 轴)沿浮体长度分布的对比结果图。图中“3D Hydroelasticity”表示三维水弹性理论计算的结果。从图中可看出,在不同浪向和波长下两种数值方法计算的结果吻合良好。在0°和45°浪向下,浮体的弹性变形显著;而在90°浪向下,当波长与船长之比(λ/L)为0.5时,浮体也发生了较小的水平弯曲。文中三维水弹性理论的结果采用商业软件WAMIT中广义模态水动力求解功能计算。



(a) 0°浪向下垂向位移



(b) 45°浪向下垂向位移



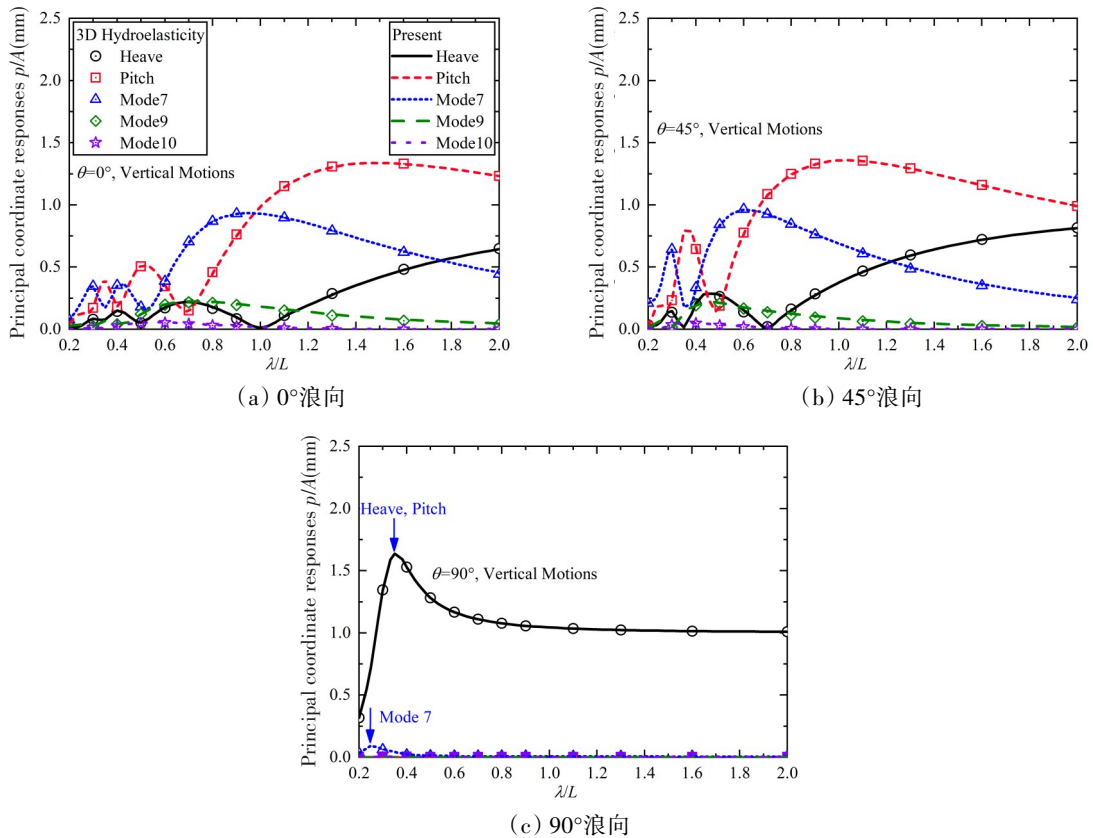
(c) 45°浪向下水平位移

(d) 90°浪向下水平位移

图5 两种数值方法求解的不同浪向下浮体的垂直和水平位移对比

Fig.5 Comparison of the vertical and horizontal displacements of the floating body under different wave angles between the 3D hydroelasticity theory and the present method

基于本文方法求解的浮体位移信息,可进一步采用模态叠加的逆向分析手段^[14]获得浮体各阶模态对应的主坐标响应。图6和图7分别给出了浮体垂向和水平运动相关模态的主坐标响应幅值随波长的分布结果。其中,横摇运动模态对应的结果也被包含在图7中。在本文计算的波长区间内,浮体的第十一阶模态(一节点扭转)、第十三阶模态(五节点垂向弯曲)和第十四阶模态(两节点扭转)的贡献很低,故没有在图6和图7中给出。为保证结果可比性,刚体运动和弹性变形模态均采用最大幅值归一振型。从图中可以看出,两种方法获得的结果吻合良好。由于本文分析的模型相对“较柔”,在0°



(a) 0°浪向

(b) 45°浪向

(c) 90°浪向

图6 两种数值方法求解的不同浪向下浮体垂向运动相关模态的主坐标响应

Fig.6 Comparison of the principal coordinate responses of the modes for vertical motions under different wave angles between the 3D hydroelasticity theory and the present method

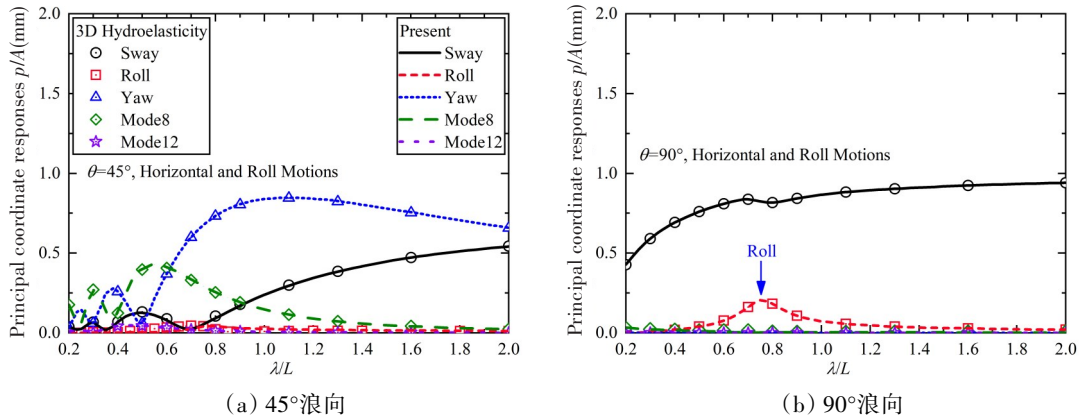


图7 两种数值方法求解的不同浪向下浮体水平和横摇运动相关模式的主坐标响应

Fig.7 Comparison of the principal coordinate responses of the modes for both horizontal and roll motions under different wave angles between the 3D hydroelasticity theory and the present method

和45°浪向下弹性模态和刚体运动模态的主坐标响应幅值处于同一量级。在90°浪向下,浮体的水平弹性变形相较于刚体运动可以忽略,而在小波长($\lambda/L < 0.4$)情况下,浮体的第七阶模态(两节点垂向弯曲)被激发。

2.3 二阶平均漂移力验证

由于弹性体和刚性体的远场法积分公式一致,因此可以用WAMIT实现弹性体的二阶平均漂移力求解。图8分别给出了0°、45°和90°浪向下,基于本文方法的远场法和近场法计算的弹性体平均漂移

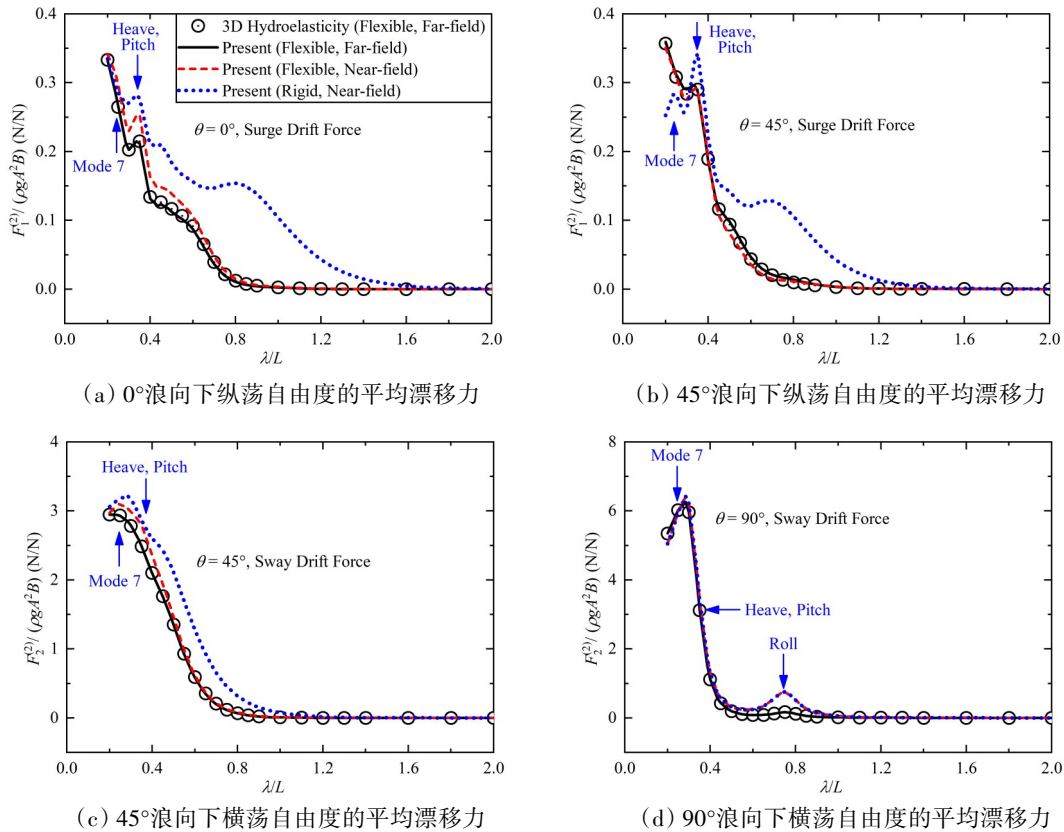


图8 两种数值方法求解的不同浪向下浮体的二阶平均漂移力对比

Fig.8 Comparison of the second-order wave drift forces under different wave angles between the 3D hydroelasticity theory and the present method

力,以及三维水弹性理论的结果。从图中可以看出三者结果基本一致,证明基于离散模块思想的水弹性分析方法可用于弹性体的二阶平均漂移力求解。此外,由于近场法和远场法两者数值积分公式的差异,90°浪向下在浮体横摇共振频率附近,近场和远场法两种计算结果也出现了一定的偏差。

为讨论弹性变形对平均漂移力的影响,图8还给出了刚性体的平均漂移力。从图中可看出,0°浪向下,计及弹性变形影响后的浮体平均漂移力明显降低;45°浪向下,当波长与船长之比(λ/L)小于0.3时,相较于刚性体,弹性体的纵荡自由度平均漂移力增大,而横荡自由度的平均漂移力降低;90°浪向下,弹性体和刚性体的平均漂移力无明显差异。上述现象与 Heo 等^[11]和 Park 等^[12]的研究结论基本一致。

3 结果与讨论

为进一步讨论弹性变形的贡献,下面将刚体运动和弹性变形对浮体二阶平均漂移力的贡献分别进行求解,如图9所示。图中,Mode 1-n”表示弹性浮体的平均漂移力,“Mode 1-6”和“Mode 7-n”分别表示把浮体运动分解为纯刚体运动和纯弹性变形后求解的平均漂移力。其中,由于平均漂移力的非线性特性,弹性体的平均漂移力不是纯刚体运动贡献和纯弹性变形贡献的直接叠加,还需包含刚体运动和弹性变形两者的耦合影响。

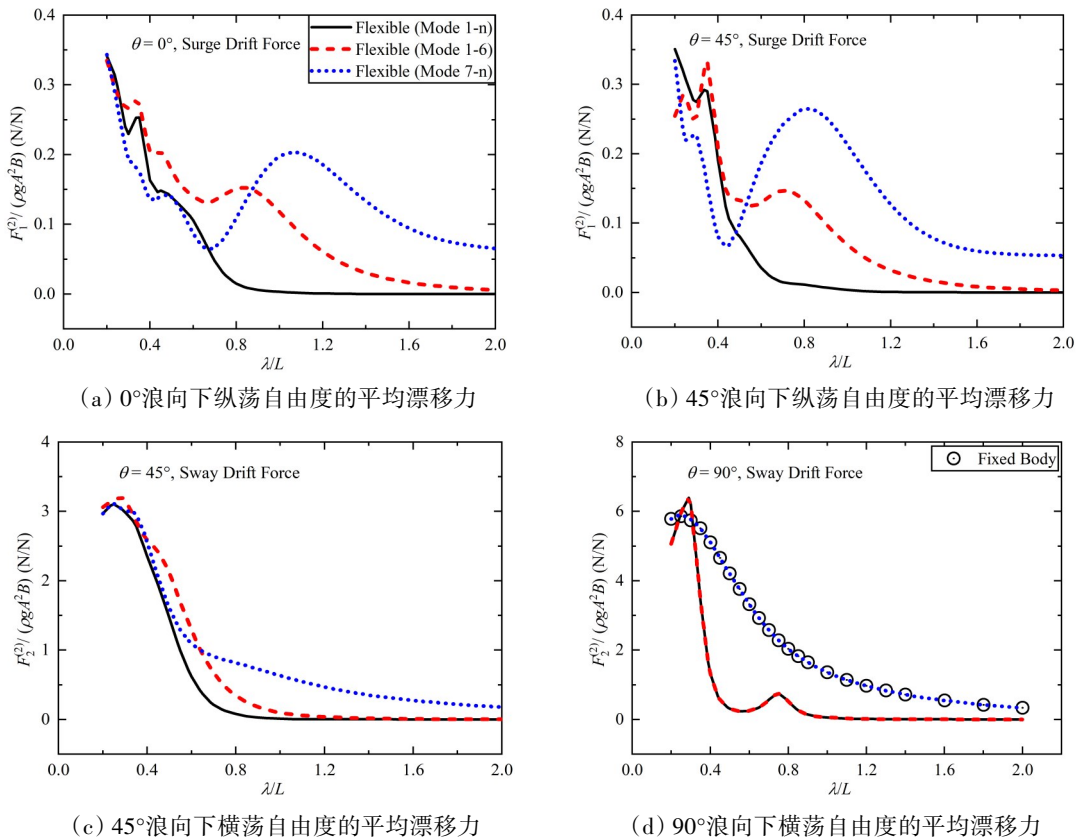


图9 不同浪向下刚体运动和弹性变形对二阶平均漂移力的影响分析

Fig.9 Effect of the rigid body motion and flexible deformation on the second-order wave drift force under different wave angles

从图中可以看出,在0°和45°浪向下,弹性变形对纵荡自由度的二阶平均漂移力的影响较大,平均漂移力随波长的变化呈现出明显的峰谷交替特征,而对横荡自由度的平均漂移力影响较小。此外,在

波长与船长之比(λ/L)大于1时,纯刚体运动下的平均漂移力较快地衰减为零,而纯弹性变形的平均漂移力结果则随波长的增加而收敛缓慢。在 90° 浪向下,由于弹性变形较小,弹性体的结果和只考虑刚体运动获得的平均漂移力基本重合,而自由浮体的纯弹性变形引起的平均漂移力和浮体固定时的结果基本吻合。

由于本文方法在浮体水动力求解上的离散特性,可分别获得浮体上不同位置处刚性模块的二阶平均漂移力幅值,结果见图10。如图10(a)和(b)所示,在 0° 和 45° 浪向下,由于模块的遮蔽效应,在小波长情况下($\lambda/L < 0.6$),位于远离波浪入射端模块(模块8)的平均漂移力明显小于靠近波浪入射端模块(模块1)的平均漂移力;浮体中部模块(模块2和模块4)的平均漂移力随着波长逐渐减小而趋于零;浮体端部模块(模块1和模块8)的平均漂移力随波长的增加逐渐平稳并趋于定值。在 90° 浪向下,波浪从浮体横向入射,没有模块遮蔽效应的影响,作用于各模块的平均漂移力差异不大。但在波长与船长之比(λ/L)小于0.4时,由于浮体发生了一定的弹性变形,导致位于浮体中间位置模块的平均漂移力比位于两端模块的平均漂移力稍大。

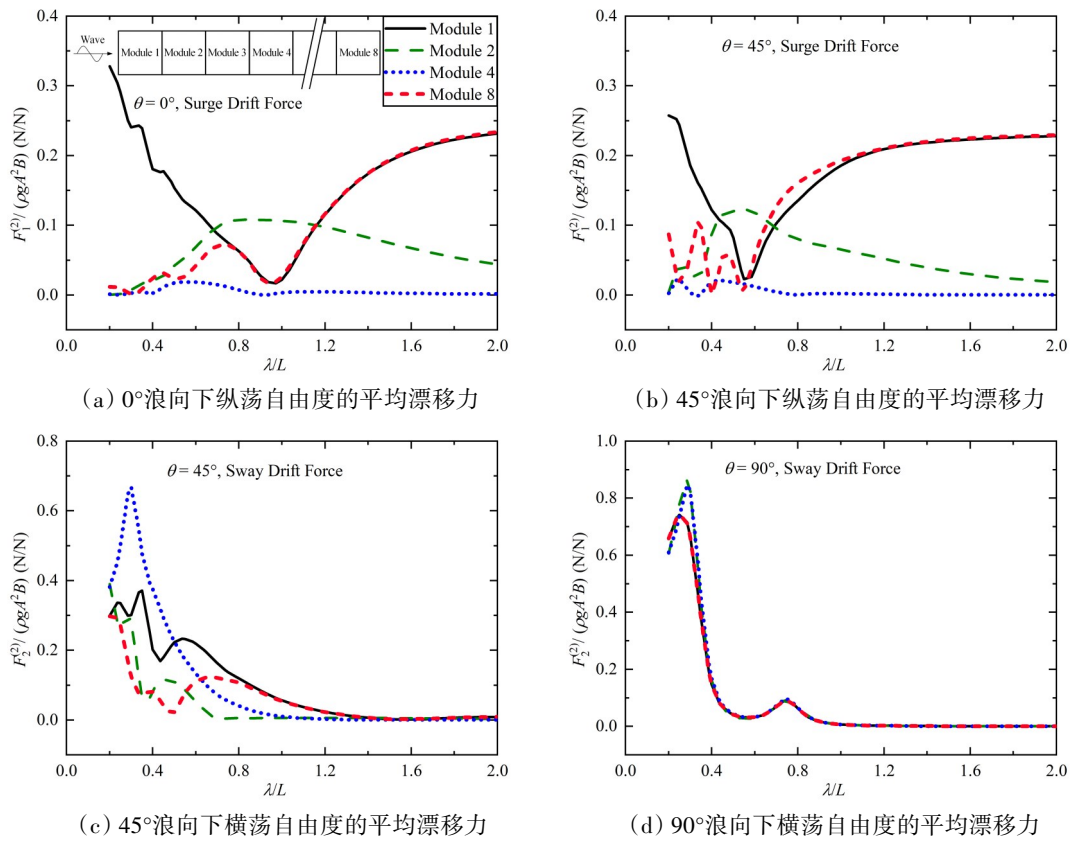


图10 不同浪向下模块的二阶平均漂移力对比

Fig.10 Comparison of the second-order wave drift forces on different modules under different wave angles

4 结 语

本文基于离散模块思想,提出了一种弹性浮体的二阶平均漂移力分析方法。采用提出的方法对一柔性箱型驳船的二阶平均漂移力进行了研究,并与基于模态叠加思想的三维水弹性理论得到的结果进行了对比验证,两者吻合良好,证明了本文提出方法的正确性和可靠性。此外,本文方法还可独立得到各个模块的平均漂移力信息,为非均匀海洋环境下弹性结构的非线性水弹性响应分析奠定了基础。

参 考 文 献:

- [1] Bishop R E D, Price W G. Hydroelasticity of ships[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [2] Wu Y S. Hydroelasticity of floating bodies[D]. London: Brunel University, 1984.
- [3] Jensen J J, Pedersen P T. Wave-induced bending moments in ships—A quadratic theory[J]. Royal Institution of Naval Architects, 1979, 121: 151–165.
- [4] Wu Y S, Maeda H, Kinoshita T. The second order hydrodynamic actions on a flexible body[J]. Journal of Institute of Industrial Science, 1997, 49(4): 8–13.
- [5] Chen Y J, Wu Y S, Cui W C, et al. Review of hydroelasticity theories for global response of marine structures[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(3–4): 439–457.
- [6] Kashiwagi M. A B-spline Galerkin scheme for computing wave forces on a floating very large elastic plate[C]//The Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, OnePetro, 1997: 229–236.
- [7] Ikoma T, Maeda H, Masuda K, et al. Hydroelastic responses of pontoon type very large offshore structure—The 4th report estimation method of slowly varying wave drift force and fender reaction force[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1998(184): 291–296.
- [8] Namba Y, Kato S, Saito M. Estimation method of slowly varying wave drift force acting on very large floating structures 1st report model tests in long crested irregular waves[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1999(186): 235–242.
- [9] Utsunomiya T, Watanabe E, Nakamura N. Analysis of drift force on VLFS by the near-field approach[C]//The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, OnePetro, 2001: 217–221.
- [10] Chen X J, Wu Y S, Cui W C, et al. Nonlinear hydroelastic analysis of a moored floating body[J]. Ocean Engineering, 2003, 30(8): 965–1003.
- [11] Heo K, Kashiwagi M. Numerical investigation of second-order hydroelastic response for the flexible floating body[C]//The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference, OnePetro, 2018: 69–76.
- [12] Park D M, Kim J H, Kim Y. Numerical study of mean drift force on stationary flexible barge[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 74: 445–468.
- [13] Lu D, Fu S X, Zhang X T, et al. A method to estimate the hydroelastic behaviour of VLFS based on multi-rigid-body dynamics and beam bending[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(4): 354–362.
- [14] 位 巍, 付世晓, 宋春辉. 一种基于离散模块的浮体水弹性响应预报方法[J]. 船舶力学, 2019, 23(1): 43–50.
Wei W, Fu S X, Song C H. A discrete-module-based hydroelasticity method for floating structures[J]. Journal of Ship Mechanics, 2019, 23(1): 43–50. (in Chinese)
- [15] Zhang X T, Lu D, Gao Y, et al. A time domain discrete-module-beam-bending-based hydroelasticity method for the transient response of very large floating structures under unsteady external loads[J]. Ocean Engineering, 2018, 164: 332–349.
- [16] Wei W, Fu S X, Moan T, et al. A discrete-modules-based frequency domain hydroelasticity method for floating structures in inhomogeneous sea conditions[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 74: 321–339.
- [17] Wei W, Fu S X, Moan T, et al. A time-domain method for hydroelasticity of very large floating structures in inhomogeneous sea conditions[J]. Marine Structures, 2018, 57: 180–192.
- [18] Deng S, Li S, Xu Y W, et al. Numerical study on the dynamic response of a submerged floating tunnel under current loads based on the segment model towing test results[C]//The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, OnePetro, 2020: 2447–2456.
- [19] Li L. Full-coupled analysis of offshore floating wind turbine supported by very large floating structure with consideration of hydroelasticity[J]. Renewable Energy, 2022, 189: 790–799.
- [20] 位 巍, 宋春辉, 付世晓, 等. 分置式浮桥水弹性响应频域预报方法[J]. 船舶力学, 2020, 24(10): 1302–1314.
Wei W, Song C H, Fu S X. A frequency-domain method to predict hydroelastic responses of a pontoon-separated floating bridge[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(10): 1302–1314. (in Chinese)
- [21] Wei W, Fu S X, Moan T, et al. A time-domain method for hydroelasticity of a curved floating bridge in inhomogeneous waves[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2019, 141(1): 1–8.

-
- [22] Zhang X T, Zheng S M, Lu D, et al. Numerical investigation of the dynamic response and power capture performance of a VLFS with a wave energy conversion unit[J]. *Engineering Structures*, 2019, 195: 62–83.
- [23] Pinkster J A. Low frequency second order wave exciting forces on floating structures[D]. Delft: Delft University of Technology, 1980.
- [24] Chen X B. Middle-field formulation for the computation of wave-drift loads[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2007, 59(1): 61–82.
- [25] Newman J N. The drift force and moment on ships in waves[J]. *Journal of Ship Research*, 1967, 11(01): 51–60.
- [26] 朱仁传, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019: 251–254.
Zhu R C, Miao G P. Theory of ship motion on waves[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019: 251–254. (in Chinese)