

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2025.03.014

延伸薄板附体对浮式风机平台水动力影响研究

薛瑛杰¹, 王金光², 赵伟文¹, 万德成^{1*}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 船海计算水动力学研究中心(CMHL), 上海 200240,

E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn;

2. 中南勘测设计研究院有限公司, 长沙 410027)

摘要: 为提升浮式风机平台水动力性能以应对更加复杂恶劣的海洋环境, 可在平台垂荡浮筒底部增设延伸薄板附体结构。基于自研计算流体力学水动求解器 naoe-FOAM-SJTU, 该文开展了自由衰减实验, 分析了不同布置形式、不同延伸长度下薄板附体对浮式风机平台水动力性能影响。通过数值模拟发现: 适当增加薄板延伸长度能有效增长浮式风机平台垂荡运动固有周期, 但只有水平布置形式下的薄板能够降低衰减运动的振幅; 无因次阻尼系数会随水平薄板延伸宽度的增加而增加, 随垂直薄板延伸高度的增加而减小。该文还开展了涡流分析, 发现相较于原始平台, 水平布置的薄板能够抑制脱落涡对浮体的二次作用, 加快能量耗散。

关键词: 漂浮式风机平台; 延伸薄板附体; 自由衰减; 数值模拟; 运动抑制

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

Numerical Analysis of Effect on Extended Thin Plate Attachment to Hydrodynamic Performance of Floating Offshore Wind Turbine Platform

Xue Yingjie¹, Wang Jingguang², Zhao Weiwen¹, Wan Decheng^{1*}

(1. Computational Marine Hydrodynamic Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410027, China)

Abstract: To improve the hydrodynamic performance of floating offshore wind turbine (FOWT) platforms and cope with increasingly complex and harsh marine environments, an extended thin plate attachment structure has been added to the bottom of the FOWT platforms. Based on the self-developed computational fluid dynamics hydrodynamic solver naoe-FOAM-SJTU, free decay tests are conducted in this paper to analyze the influence of thin plate with different configurations and extension length on the hydrodynamic performance of FOWT platforms. Numerical simulations reveal that appropriately increasing the extended length of the thin plate can effectively extend the natural period of the platform's heave motion, but only horizontally arranged plates can reduce the amplitude of decay motion. The dimensionless damping coefficients increase with the horizontal plate's extended width but decrease with the vertical plate's extended height. Vortex analysis shows that, compared to the original platform, the horizontally arranged plate can suppress the secondary effects of shed vortices on the floater and accelerate energy dissipation.

Key words: FOWT platform; Extended thin plate attachment; Free decay; Numerical simulation; Motion suppression

0 引言

随着全球各国在新能源领域持续发力及我国向“双碳”目标的逐渐靠近, 风电行业早已炙手可热。根据国家能源局公布的数据(截至2024年8月)

显示, 我国现有风电装机容量已达 $47\,403\times 10^4$ kW, 占全国发电装机容量的15.16%^[1], 仅次于排名第二的光电。

近些年, 风电产业已覆盖大部分内陆平原中的风资源丰富地区, 我国风电行业正向沙漠、戈壁、荒漠地区以及海上等复杂环境地区过渡^[2]。其中, 海上风电已由近岸工程向深远海漂浮式进发, 相继开展了“三峡引领号”、“扶摇号”和“海油观澜号”

收稿日期: 2024-12-22 **修改稿收到日期:** 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(521311102)

作者简介: 薛瑛杰(1999—), 男, 博士研究生。

等多项重点试验项目^[3-5], 复杂多变的深海环境对漂浮式风机基础平台的设计提出了更高的要求。因此, 提高基础平台稳性、减小恶劣工况下平台运动响应成为了一项重要的研究课题。

垂荡板可显著提高漂浮式风机平台的耐波性, 国内外学者已开展广泛的研究与分析。郑建才等^[6]在OC3 Spar平台底部安装带孔的垂荡板, 通过CFD (Computational Fluid Dynamic) 研究发现: 带有分形孔的垂荡板能够有效降低平台纵荡、垂荡与纵摇运动响应, 提高风机气动功率。黄致谦等^[7]通过势流软件对带有开孔垂荡板的OC4半潜式平台开展了频域计算与时域分析, 研究表明: 垂荡板能够有效增加垂荡、纵摇与横荡方向的附加质量, 在垂荡方向起到最佳的抑制效果。丁勤卫^[8]提出使用垂荡板替换Spar平台立柱的去材安装方式, 研究了在不同位置安装垂荡板的平台水动力表现, 发现: 垂荡运动对安装位置的敏感性较低, 安装在平台底部能够降低纵摇幅值, 安装在平台顶部可提高机舱纵荡振动稳定性。Jiang等^[9]对WindFloat^[10]和HexaSemi^[11]这2种带有垂荡抑制结构附体的半潜式平台在自由衰减运动中泻涡问题开展了研究, 相较于WindFloat平台底部使用圆形撑杆进行连接, HexaSemi平台各立柱间采用方形横梁结构, 通过CFD自由衰减试验, 能明显看到横梁边缘会产生更多的涡脱落, 起到运动抑制效果。Li等^[12]在OC4平台底部设置了双层垂荡板, 发现其能提高平台垂荡运动自由衰减周期。Jang等^[13]在KRISO (Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering) 水池中针对一台多机组方形半潜式平台开展了试验研究, 发现: 在方形角位置处的垂荡板能够减小垂荡与纵摇运动, 且通过增加附加质量改变降低了自由衰减频率。

然而, 不同垂荡板的布置形式对平台水动力性能影响的研究与机理分析较少, 因此本文针对带有延伸薄板附体结构的漂浮式风机二维立柱平台开展自由衰减运动计算。本文先介绍涉及的基础理论与计算原理, 展示延伸薄板布置形式的计算模型与计算网格, 再通过自由衰减结果进行对比分析, 研究无因阻尼系数随薄板延伸长度、薄板布置形式的变化趋势, 通过涡分析进行解释说明。

1 数值模拟方法

本文采用自研船舶与海洋工程水动力求解软件naoe-FOAM-SJTU开展CFD仿真。该求解器依托于开源软件OpenFOAM, 能够进行浮式结构物六自由度 (Six Degrees of Freedom, 6DOF) 运动与系泊缆张力等问题的求解。

1.1 控制方程

计算流体力学的控制方程包括连续性方程和动量方程, 不可压缩流体问题可表达为

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \cdot \nabla \mathbf{U}) \quad (2)$$

式中: ∇ 为梯度算子; $\mathbf{U}$ 为流场速度; ρ 为流体密度; t 为时间; p 为压力; μ_{eff} 为动力黏性系数。

1.2 VOF两相流模型

自研求解器使用VOF (Volume of Fluid) 两相流模型求解自由液面^[14], 其输运方程为

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

式中: α_v 为相体积分, 表征网格中每种流体所占的百分比。 $\alpha_v = 0$ 时, 网格为气相; $\alpha_v = 1$ 时, 网格为液相; $0 < \alpha_v < 1$ 时, 该网格位于气液两相交界处。

1.3 数值消波

在自由衰减试验过程中, 物体运动会引起液面扰动, 为减少计算域四周边界受扰后所产生反射效应, 在靠近边界位置的一段距离内设置海绵层消波区。消波区通过在式(2)右端添加消波源项 f_s 实现, 其表达式为

$$f_s(x) = -\rho \alpha_s \frac{(x - x_s)^2}{L_s} (U - U_{\text{ref}}) \quad (4)$$

式中: α_s 为用于控制消波强度的无因次化黏性系数, $\alpha_s = 6$; x 为坐标; x_s 为消波区起始位置坐标;

L_s 为消波区长度; U 为速度; U_{ref} 为边界入口处参考速度, 用于保证计算域内质量守恒, 本文取为0。

1.4 动网格技术

在求解物体运动时需实时计算并更新运动物体的边界, 并改变计算域内其他网格大小与节点位置以匹配运动边界的移动^[15]。本文采用变形网格方法, 通过求解拉普拉斯方程, 在不改变单元拓扑关系的前提下, 完成对网格节点的拉伸、压缩, 即

$$\nabla \cdot (\gamma \nabla \mathbf{x}_g) = 0 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}_g$ 为网格节点位移; γ 为变形系数, 与网格中心到运动边界之间的距离 r 有关, 即

$$\gamma = \frac{1}{r^2} \quad (6)$$

1.5 无因次阻尼系数计算理论

以浮体垂荡自由衰减运动为例, 其运动方程可被描述为

$$(M + \lambda_{zz})\ddot{Z} + 2N_{zz}\dot{Z} + \rho g S_w Z = 0 \quad (7)$$

式中: M 为浮体质量; λ_{zz} 为浮体 z 方向附加质量; Z 为浮体沿 z 方向垂荡运动的位移; N_{zz} 为浮体 z 方向阻尼系数; S_w 为浮体水线面面积。将方程两侧同时除以 $(M + \lambda_{zz})$, 得到

$$\ddot{Z} + \frac{2N_{zz}}{M + \lambda_{zz}}\dot{Z} + \frac{\rho g S_w}{M + \lambda_{zz}}Z = 0 \quad (8)$$

$$\ddot{Z} + 2\nu_{zz}\dot{Z} + n_z^2 Z = 0 \quad (9)$$

式中: ν_{zz} 为垂荡运动衰减系数; n_z 为垂荡固有频率, 垂荡固有周期 $T_z = 2\pi / n_z$ 。

式(9)为二阶线性常微分方程, 由于衰减系数小于固有频率, 即 $\nu_{zz} < n_z$, 故其通解为

$$Z = Z_0 e^{-\nu_{zz}t} \left(\cos n_{z1}t + \frac{\nu_{zz}}{n_{z1}} \sin n_{z1}t \right) \quad (10)$$

式中: Z_0 为 $t=0$ 时刻的初始值; $n_{z1} = \sqrt{n_z^2 - \nu_{zz}^2}$ 。将上式对时间进行微分, 整理可得

$$\dot{Z} = -Z_0 e^{-\nu_{zz}t} \frac{n_z^2}{n_{z1}} \sin n_{z1}t \quad (11)$$

因此, 在自由衰减试验中, 每个峰值的对应时刻为 $t = nT_{z1} / 2$ (n 为波峰数, $T_{z1} = 2\pi / n_{z1}$), 振幅 $Z_n = Z_0 e^{-\nu_{zz}T_{z1}/2}$, 如图1所示。 ν_{zz} 相较于 n_z 为小量, 故 $n_{z1} \approx n_z$, $T_{z1} \approx T_z$ 。故对相邻振幅的比值取对数, 可得

$$\ln \frac{Z_n}{Z_{n+1}} = \frac{\nu_{zz}T_{z1}}{2} \approx \frac{\nu_{zz}T_z}{2} = \nu_{zz} \frac{\pi}{n_z} = \pi \mu_{zz} \quad (12)$$

式中: μ_{zz} 为无因次阻尼系数, 也可称为无因次衰减系数。得到垂荡自由衰减曲线后, 利用式(12)可计算得出无因次阻尼系数。除此之外, 也可利用自由衰减曲线近似拟合得到相邻振幅差与平均值函数关系表达, 绘制衰减曲线, 计算 μ_{zz} 。

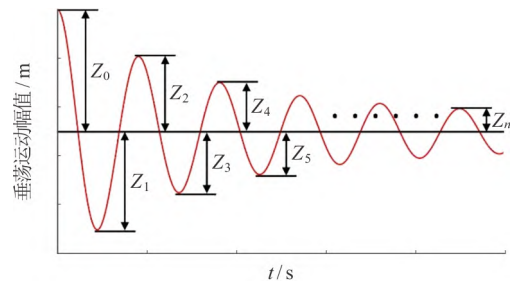


图1 垂荡自由衰减曲线示意图
Fig.1 Free decay curve of heave motion

2 计算模型及工况设置

2.1 二维立柱模型

本文提取半潜式平台模型侧立柱作为研究对象, 如图2所示。立柱直径为14.5 m, 下侧垂荡浮筒直径为26 m, 高度为2.5 m, 立柱总高为39.5 m, 吃水为25 m。在单立柱垂荡浮筒上布置厚度为0.5 m的薄板形式附体结构, 共设有5种不同长度, 分别为 $l = 1.0$ m、1.5 m、2.0 m、2.5 m和3.0 m, 布置位置分别位于与垂荡浮筒底部平行的位置和与垂直的位置, 如图2(b)和2(c)所示。本文共针对11款模型开展垂荡自由衰减分析, 相关参数已列入表1。

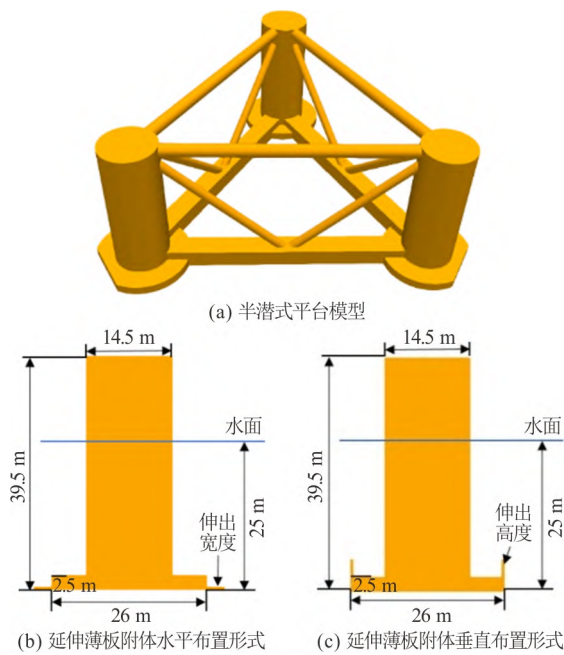


图2 模型结构样式与延伸薄板布置形式

Fig.2 Model structure and configuration of extended thin plates

表1 计算模型尺寸
Table 1 Model dimension

布置形式	l/m					
水平布置	0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
垂直布置	0	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0

2.2 计算域设置与边界条件

本文采用二维(xoz 方向)数值计算,计算域左右两端范围为 $-400\sim 400\text{ m}$,高度方向范围为 $-200\sim 100\text{ m}$,如图3所示。四周速度边界条件分别是:入口为zeroGradient(零压梯度),出口为zeroGradient,底部为slip(滑移壁面),顶部为pressureInletOutletVelocity。压力边界条件分别是:入口为fixedValue,出口为fixedValue,底部为slip,顶部为totalPressure。

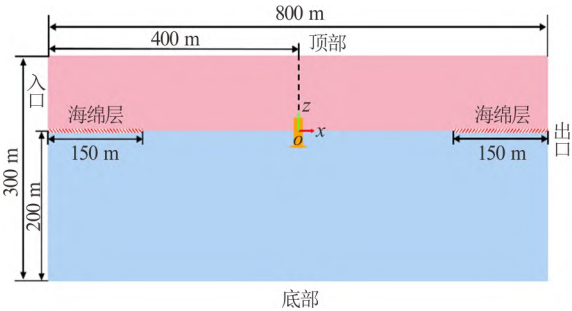


图3 计算域

Fig.3 Calculation domain

2.3 网格收敛性分析

针对计算域内的网格,背景网格采用变比例划分策略,如图4所示。在背景网格的基础上,不同区域采用变加密策略。在 x 方向上,靠近物体区域保证网格尺寸相同,其余区域网格向两侧边界逐渐增大。在 z 方向上,网格在液面附近保证相同尺寸,其他区域网格向上下两侧逐渐增大。

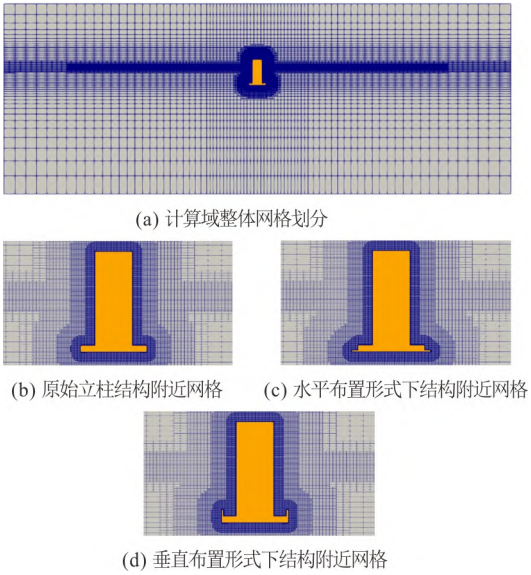


图4 网格划分

Fig.4 Mesh distribution

为确保后续计算准确,针对原始立柱平台,采用3套不同网格开展自由衰减实验的网格收敛性分析。3个算例的网格数量分别为:粗糙(Coarse)网格16 886,中等(Medium)网格36 075,良好(Fine)网格50 099。图5展示了平台垂荡自由衰减的计算结果,可以看出:粗糙网格未能很好地捕获二维物体边界,因此计算结果较差;中等网格已能得出正确的计算结果,本文后续计算将采用中等网格。

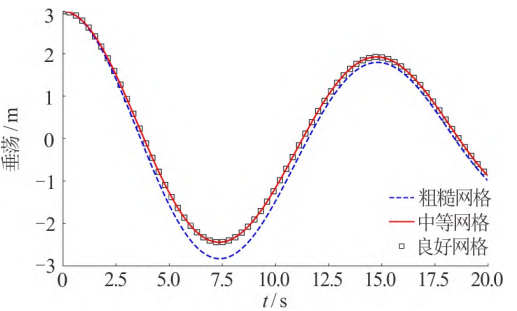


图5 网格收敛性分析

Fig.5 Grid convergence analysis

在中等网格中,液面附近位置采用2级加密策略,物体周围液面网格尺寸为 $\Delta x=0.133\ 3\ \text{m}$, $\Delta z=0.500\ 0\ \text{m}$ 。同时,为了精确捕捉三维物体结构,在结构周围网格采用5级加密策略,物体表面网格尺寸为 $\Delta x=0.166\ 7\ \text{m}$, $\Delta z=0.062\ 5\ \text{m}$ 。

3 数值模拟结果与分析

3.1 水平布置形式下垂荡自由衰减

对原始平台模型与水平布置形式下的5种结构进行垂荡自由衰减计算。平台从液面上3.0 m位置开始释放,计算得到的衰减曲线如图6所示。从图中可直接看出:带有延伸薄板的模型比原始平台模型衰减更快,且随着薄板延伸长度的增加,模型在前期衰减更加剧烈,垂荡固有周期也随之增加。统计前7次衰减内的平均固有周期:原始平台的平均固有周期为14.65 s;延伸宽度 $l=1.0\ \text{m}$ 、1.5 m、2.0 m、2.5 m和3.0 m平台的平均固有周期分别为14.99 s、15.41 s、15.66 s、15.94 s和16.33 s。与原始平台模型相比,其他5个工况的平均固有周期增长率分别为2.38%、5.21%、6.92%、8.86%和11.45%。

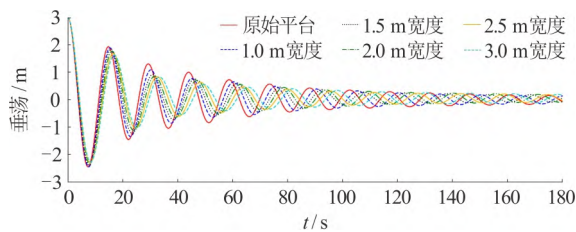


图6 带有不同延伸宽度水平薄板的模型垂荡自由衰减曲线
Fig.6 Free decay curve of models with horizontal thin plates of different extended widths

根据图6自由衰减时间历程曲线,统计每个衰减周期内正向振幅,根据式(12)可得

$$\mu_{zz} = \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{Z_n}{Z_{n+2m}} \quad (13)$$

式中: m 为第 m 个衰减周期。

据此,从 $t=0$ 时刻开始统计不同衰减周期内无因次阻尼系数 μ_{zz} 变化,得到表2和图7。从图中可以直观地看出:随着衰减时间的延长, μ_{zz} 将逐渐降低并趋于一个稳定值;由水平薄板延伸宽度增加

引起的 μ_{zz} 增加也将随衰减时间的增加而逐渐降低,现象不再明显。例如,在第4个衰减周期时,相较于原始平台,带有延伸水平薄板模型的 μ_{zz} 分别增加了8.11%、13.05%、19.22%、30.86%和32.63%。而在第7个衰减周期时,增加量只有3.46%、6.91%、9.15%、11.59%和13.00%。

表2 带水平薄板模型无因次阻尼系数 μ_{zz}
Table 2 Damping coefficient μ_{zz} of models with horizontal thin plates

m	原始平台	1.0 m 宽度	1.5 m 宽度	2.0 m 宽度	2.5 m 宽度	3.0 m 宽度
1	0.070 8	0.074 1	0.077 9	0.084 8	0.092 8	0.097 8
2	0.066 6	0.081 3	0.094 9	0.100 0	0.102 0	0.103 8
3	0.058 6	0.072 6	0.073 8	0.076 9	0.082 2	0.090 4
4	0.056 7	0.061 3	0.064 1	0.067 6	0.074 2	0.075 2
5	0.053 2	0.058 1	0.060 2	0.060 9	0.064 6	0.066 2
6	0.052 2	0.055 1	0.056 2	0.057 1	0.058 4	0.060 2
7	0.049 2	0.050 9	0.052 6	0.053 7	0.054 9	0.055 6

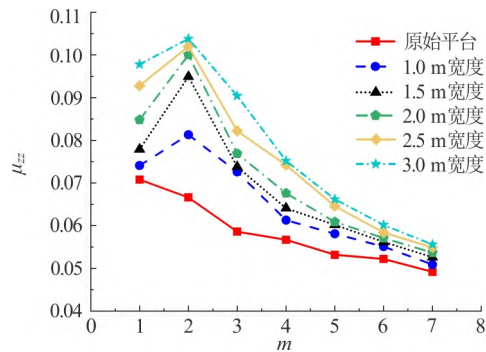


图7 带水平薄板模型不同衰减周期内 μ_{zz} 变化
Fig.7 Damping coefficient μ_{zz} changes of models with horizontal thin plates at different decay periods

在本文研究团队针对该模型开展的面向三维平台垂荡板数值计算研究^[16-17]中,固有周期与无因次阻尼系数表现出的规律与本文相似,即随着水平薄板延伸宽度增加,垂荡固有周期增加,黏性阻尼加大。并且,二维模型更易于阻尼系数变化与涡结构的机理分析。

3.2 垂直布置形式下垂荡自由衰减

针对垂直布置形式下的5种结构进行垂荡自由衰减计算,与水平布置相同,平台均从液面上3.0 m位置开始释放,得到衰减曲线如图8所示。从图中

可以看到,垂直薄板对垂荡自由衰减所带来的影响在不同衰减周期内并不相同。在第1个衰减周期内,薄板延伸高度越高,运动响应越剧烈,即垂直延伸薄板结构带来了负面影响;在第2个衰减周期内,带有延伸高度 $l=1.0\text{ m}$ 和 1.5 m 附体的模型运动响应高于原始平台, $l=2.0\text{ m}$ 、 2.5 m 和 3.0 m 的则低于原始平台;在这之后,随着衰减周期持续增大,薄板延伸高度越高的浮体衰减越慢,原始平台衰减快于其他平台。采用垂直式薄板结构不利于增加垂荡阻尼,反而可能会引起更大的运动;其固有周期变化与水平布置形式表现相同,即随着伸出高度的增加,垂荡固有周期逐渐增加。在前7个周期内,平均固有周期分别为 14.65 s (原始平台)、 14.95 s ($l=1.0\text{ m}$)、 15.02 s ($l=1.5\text{ m}$)、 15.04 s ($l=2.0\text{ m}$)、 15.14 s ($l=2.5\text{ m}$)和 15.19 s ($l=3.0\text{ m}$)。相较于原始平台,带垂直薄板模型固有周期的增长率分别为 2.05% 、 2.53% 、 2.66% 、 3.35% 和 3.69% 。

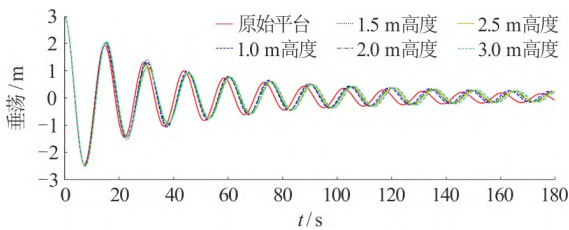


图8 带有不同延伸高度垂直薄板的模型垂荡自由衰减曲线
Fig.8 Free decay curve of models with vertical thin plates of different extended widths

根据图8自由衰减曲线与式(13),计算无因次阻尼系数 μ_{zz} ,给出表3和图9。从图中可以明显看出,不同附体高度的带垂直薄板模型的 μ_{zz} 没有展现出

表3 带垂直薄板模型无因次阻尼系数 μ_{zz}

Table 3 Damping coefficient μ_{zz} of models with thin vertical plates

m	原始平台	1.0 m高度	1.5 m高度	2.0 m高度	2.5 m高度	3.0 m高度
1	0.070 8	0.063 8	0.061 9	0.061 0	0.060 3	0.059 7
2	0.066 6	0.065 8	0.060 9	0.068 4	0.077 7	0.080 9
3	0.058 6	0.059 4	0.062 8	0.064 0	0.062 3	0.062 7
4	0.0567	0.053 7	0.054 0	0.055 5	0.054 4	0.055 2
5	0.0532	0.049 3	0.050 6	0.052 6	0.050 9	0.052 0
6	0.0522	0.046 9	0.048 2	0.049 2	0.048 0	0.048 5
7	0.0492	0.044 5	0.044 7	0.045 1	0.044 7	0.044 9

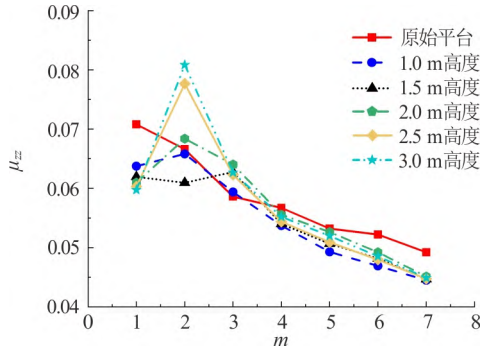


图9 带垂直薄板模型不同衰减周期内 μ_{zz} 变化
Fig.9 Damping coefficient μ_{zz} changes of models with vertical thin plates at different decay periods

与带水平薄板模型相同的规律性。在衰减初期,垂直薄板的确能提升黏性阻尼,但随着垂荡衰减时间的增加, μ_{zz} 将逐渐降低,且最后低于原始平台模型的。

3.3 泻涡分析

为了更直观地分析水平与垂直这2种布置形式带来的影响,通过后处理展示涡量场 ω_y 。由于模型众多,不同延伸长度表现出相似的变化规律,因此只取原始平台与延伸宽度和延伸高度为 3.0 m 的3个模型进行比较,如图10所示。

从图中可以发现,泻涡主要发生于结构表面尖端位置。不同的是,原始平台模型存在2个明显的涡脱落点,分别位于垂荡浮筒底部尖端和垂荡浮筒顶部尖端;对于拥有延伸薄板附体的2个模型,涡脱落现象还会发生在延伸薄板的顶端。

对于原始平台模型,脱落后的涡将持续运动。由于从垂荡浮筒顶部尖端脱落的涡滞后于浮体运动,因此会出现其重新聚集于垂荡浮筒上表面的现象,见图10(a₁)到图10(a₃);从垂荡浮筒底部脱落的涡将逐渐运动到平台底部,形成一种反括号“(”的结构形式。

对于带有水平布置薄板的模型,涡结构优先从薄板尖端开始脱落,并逐渐在流场中扩散,只有少量小尺度涡出现了垂荡浮筒表面聚集和下侧“反括号”现象,如图10(b)所示。这种涡结构的快速扩散对浮体的稳性是有利的。如果大部分脱落后的涡结构依然向原始平台浮体靠近,将有可能引起对浮体的二次扰动,即已经由垂荡浮筒两侧涡脱落所耗散

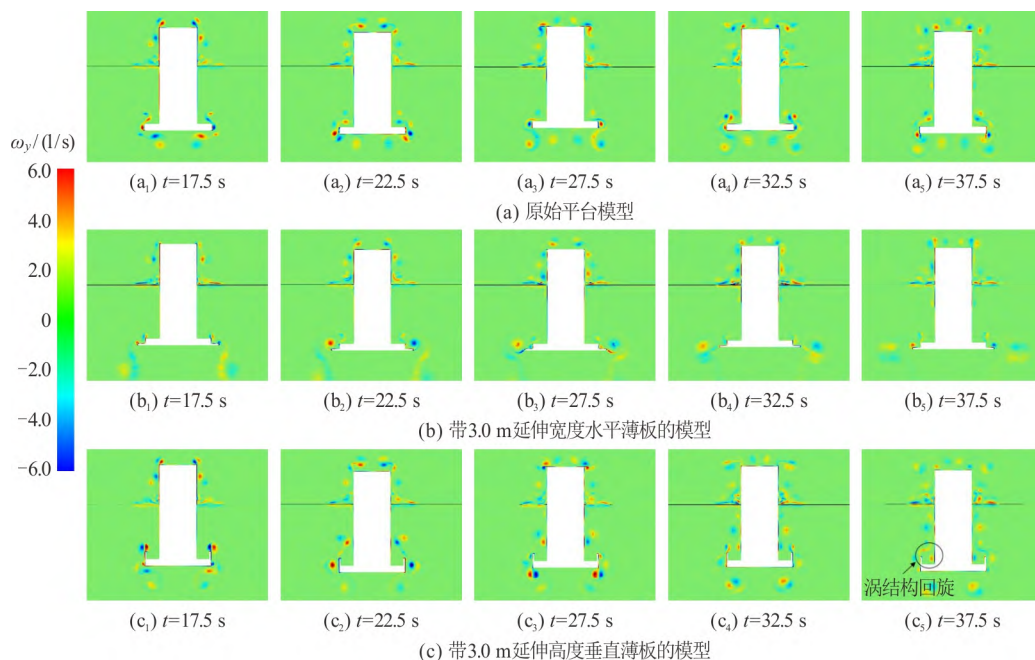


图 10 带不同布置形式延伸薄板的模型涡流对比

Fig.10 Comparison of vortex shedding for models with extended thin plates in different configurations

掉的能量,在顶部和底部又重新作用于浮体。这也是设置延伸水平薄板能够提高无因次阻尼系数的原因。

对于带有垂直布置薄板的模型,与水平布置形式不同,虽然涡脱落都主要发生在垂荡浮筒底部尖端和延伸薄板的顶部尖端,但布置垂直薄板后壁面附近的涡流不会完全扩散到流场中。从图10(c)可以看到:从垂直薄板尖端脱落的涡受浮体运动影响,在垂荡浮筒上侧流场内往复运动,部分涡结构甚至回旋至垂荡薄板与垂荡浮筒夹层之中;从垂荡浮筒底部尖端脱落的涡与原始平台相似,沿浮体壁面向下运动(相对于浮体壁面),堆积至浮体底部。正是这些已经扩散的涡旋在一定程度上对浮体运动产生了扰动,这也解释了自由衰减运动过程振幅变化与延伸高度之间为何无明显规律。

4 结论

本文基于自研求解器naoe-FOAM-SJTU,通过CFD数值模拟,研究了不同延伸长度、不同布置形式的薄板附体结构对二维单立柱风机平台自由衰减运动的影响规律,针对无因次阻尼系数与涡脱落变化情况开展讨论,得出如下结论:

(1) 针对水平和垂直这2种布置形式,在浮体底部增设延伸薄板都将导致浮体垂荡衰减周期增

加,并随着薄板延伸长度的增加,衰减周期逐渐变大。如延伸长度为3.0 m时,水平布置形式下固有周期增加11.45%,竖直布置形式下增加3.69%。不同的是,水平布置形式能有效抑制浮体衰减运动,而垂直布置则会加大运动振幅。

(2) 随着垂荡运动时间的增加,浮体无因次阻尼系数逐渐降低,逐渐趋于一个稳定值。但整体上,浮体的无因次阻尼系数将随水平薄板延伸宽度的增加而增加,随垂直薄板延伸高度的增加而减小。如延伸长度为3.0 m时,最后一个统计周期内,水平布置形式下无因次阻尼系数增加13.0%,竖直布置形式下则减小8.74%。

(3) 由泄涡分析可知,水平布置的延伸薄板能促使涡结构从薄板尖端开始脱落,扩大涡扩散范围,加快能量耗散,减小脱落涡对浮体的二次作用。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布2024年1-8月份全国电力工业统计数据 [J]. 电力勘测设计, 2024(9): 39.
- [2] 甄妮. 风电产业新格局: 基地规模化、风机大型化支撑行业高质量发展 [J]. 能源, 2022(7): 25-28.
- [3] 李晓雨, 范可, 陈鹏飞, 等. 漂浮在海面上, 随风浪移动“三峡引领号”助风电产业走向深远海 [N]. 科技日报, 2021-08-18(005).
- [4] 时下. “扶摇号”离网运行成功 [N]. 机电商报, 2023-09-04(A06).

- [5] 李丽君. 世界首个半潜式“双百”深远海浮式风电项目并网成功 [J]. 世界石油工业, 2023, 30(3): 74.
- [6] 郑建才, 赵伟文, 万德成. 带分形孔垂荡板浮式风力机性能的大涡模拟分析 [J]. 中国造船, 2022, 63(2): 1-12.
- [7] 黄致谦, 丁勤卫, 李春. 新型垂荡板对漂浮式风力机半潜式平台垂荡运动的抑制效果研究 [J]. 动力工程学报, 2019, 39(5): 402-408.
- [8] 丁勤卫. 风波耦合作用下漂浮式风力机平台动态响应及稳定性控制研究 [D]. 上海: 上海理工大学, 2019.
- [9] Jiang Y, Hu G, Zong Z, et al. Influence of an integral heave plate on the dynamic response of floating offshore wind turbine under operational and storm conditions [J]. *Energies*, 2020, 13(22): 6122.
- [10] Roddier D, Cermelli C, Aubault A, et al. WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines [J]. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2010, 2: 033104.
- [11] Jiang Y, Hu G, Jin G, et al. Hydrodynamic performance of a novel floating foundation for offshore wind turbine [C]. *International Ocean and Polar Engineering Conference*, Sapporo, Japan, 2018.
- [12] Li H, Zheng J, Zhang J, et al. Numerical investigation on dynamic responses of a semi-submersible wind turbine with different types of heave plates [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 310: 118650.
- [13] Jang H K, Park S, Kim M H, et al. Effects of heave plates on the global performance of a multi-unit floating offshore wind turbine [J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 526-537.
- [14] 曹洪建. 海洋工程粘性数值波浪水池开发及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [15] 赵伟文. 立柱式平台涡激运动计算方法与应用研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [16] Wan D C, Zhao W, Xu S, et al. Ongoing floating offshore wind farm projects in China: Part I Coupled aero-hydro-elastic behaviors [C]. *International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2024.
- [17] Wan D C, Zhao W, Xu S, et al. Ongoing floating offshore wind farm projects in China: Part II Safety examination and optimization [C]. *International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, 2024.