

文章编号: 1000-4882 (2022) 02-0001-12

# 带分形孔垂荡板浮式风力机 性能的大涡模拟分析

郑建才, 赵伟文, 万德成\*

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

## 摘 要

垂荡板作为一种能增加浮式支撑平台附加质量和水动力阻尼的被动装置, 能抑制平台的运动响应, 提高风力机的效率。论文研究带分形孔的垂荡板对浮式风力机水动力-气动力耦合性能的影响。用两相流求解器naoe-FOAM-SJTU求解系泊状态浮式平台的水动力响应。将非稳态致动模型嵌入两相流求解器, 用来求解受平台运动影响的风力机气动性能。研究表明: 开孔垂荡板能提升浮式风力机系统的稳定性, 减小平台运动响应的幅值, 增大风力机气动功率。此外, 开分形孔的垂荡板的效果优于开规则孔的垂荡板, 它是增强系统稳定性的可行方案。

**关键词:** 非稳态致动模型; 水动力-气动力耦合; 垂荡板; 分形特征孔

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## 0 引 言

海上风资源具有平均风速大、湍流强度低和剪切指数小等特点<sup>[1]</sup>。应用于深远海的漂浮式风力机支撑平台承受着风、浪、流等环境载荷<sup>[2]</sup>, 会产生明显的摇荡运动, 这不仅影响系泊系统的水动力性能, 而且影响风力机的气动性能。垂荡板是一种抑制浮式平台运动响应的被动装置, 能有效增大平台的附加质量和流体阻尼<sup>[3]</sup>。吴维熊等<sup>[4]</sup>研究了不同透空率的垂荡板对 Spar 平台水动力性能的影响, 结果表明在透空率为10%时, 垂荡板水动力性能表现最优。Sang 等<sup>[5]</sup>用 AQWA 水动力学分析软件研究垂荡板结构参数对半潜式平台垂荡运动响应的影响。Chua 等<sup>[6]</sup>对不同开孔尺寸的升沉板的水动力特性在水池进行了模型试验, 表明开孔率越大, 附加质量系数越小, 阻尼系数就越大。

关于垂荡板对浮式风力机系统作用的研究, 通常基于叶素动量理论求解风力机气动性能和应用三维势流理论求解附加了垂荡板的平台的水动力性能。丁勤卫等<sup>[7]</sup>和 Yue 等<sup>[8]</sup>基于叶素动量理论对软件 AQWA 进行了二次开发, 研究附加开孔率为 10% 的垂荡板对浮式风力机平台运动响应的抑制效果, 表明风载荷是不可忽略的因素, 且垂荡板安放在底部时抑制效果最佳。Jang 等<sup>[9]</sup>采用 1/50 的缩尺模型进行试验, 并结合自行开发的软件进行分析, 表明无垂荡板平台的垂荡和纵摇运动响应幅值与有垂荡板的情况相比分别增大 35% 和 72%。

然而在三维势流理论中, 未考虑水的黏性, 在垂荡板的阻尼力中只考虑了辐射阻尼力(约占总

收稿日期: 2021-10-10; 修改稿收稿日期: 2022-02-13

阻尼的10%)。Wang等<sup>[10]</sup>的研究发现分形孔板的多孔结构可增加湍流度和增强换热效果。有的学者将分形理论应用于垂荡板设计,如Wang等<sup>[11]</sup>用Fluent中的动态网格技术对不同分形孔垂荡板的强迫运动进行数值模拟。

本文将改进后的非稳态致动线模型嵌入两相流CFD求解器naoe-FOAM-SJTU,形成自主开发的浮式风力机气动力-水动力耦合求解器FOWT-UALM-SJTU。基于该求解器研究垂荡板开孔面积和开孔形状对风力机气动性能、平台运动响应以及系泊载荷的影响。最后采用三代涡识别方法分别对旋转风轮后方的尾涡以及浮式支撑平台周围的漩涡进行分析。

## 1 数值方法

### 1.1 非稳态致动线模型

致动线模型是由Sørensen<sup>[12]</sup>提出的。与经典的叶素动量理论不同的是,在致动线模型中进一步将不同展向位置的叶素简化为带有翼型数据的致动点。若已知致动点处的相对入流风速为 $\mathbf{U}_{rel}$ ,根据致动点局部攻角下的升、阻力系数 $C_l$ 和 $C_d$ ,得到致动点处单位展长上的体积力 $\mathbf{f}^{[12]}$ 为

$$\mathbf{f} = \frac{1}{2} \rho c |\mathbf{U}_{rel}|^2 (C_l \mathbf{e}_l + C_d \mathbf{e}_d) \quad (1)$$

式中, $\rho$ 为流体密度, $c$ 为弦长, $\mathbf{e}_l$ 和 $\mathbf{e}_d$ 分别为升力和阻力方向的单位向量。

然而用上式计算得到的一系列致动点上的体积力不能直接用于流场数值模拟,否则会出现剧烈的数值振荡和发散。本文采用较为常见的三维高斯分布对体积力光顺,将致动点上的力光顺过渡到周围的网格上。光顺后的体积力 $\mathbf{f}_\varepsilon$ 为

$$\mathbf{f}_\varepsilon(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \mathbf{f}(x_i, y_i, z_i, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left(-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right) \quad (2)$$

式中, $(x_i, y_i, z_i)$ 是第 $i$ 个致动点的位置; $d_i$ 是点 $(x, y, z)$ 与点 $(x_i, y_i, z_i)$ 之间的距离; $\varepsilon$ 为高斯光顺参数,为了保证数值收敛,本文参照Troldborg<sup>[13]</sup>的取值, $\varepsilon = 2 \Delta x$ ( $\Delta x$ 为叶片附近网格单元的长度)。

与叶素动量理论相比,致动线模型能进行风力机三维流场的求解,获得尾流场细节;与实尺度的CFD数值模拟相比,致动线模型不要求解叶片表面边界层,节省了计算资源。

由于系泊平台的运动会诱导风力机非稳态速度 $\mathbf{U}_M$ ,本文将致动线模型嵌入两相流求解器,构成非稳态致动线模型。致动点速度矢量三角形如图1所示。

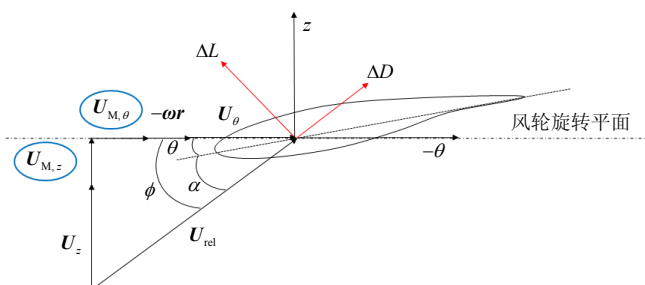


图1 非稳态致动线模型速度多角形

在图1中, $\omega$ 为叶片旋转角速度, $U_z$ 和 $U_\theta$ 分别为致动点处风速 $\mathbf{U}_{rel}$ 的轴向和切向分量, $U_{M,z}$ 和 $U_{M,\theta}$ 分别为平台的诱导速度 $\mathbf{U}_M$ 在轴向和切向的分量, $\Delta L$ 和 $\Delta D$ 分别为单位翼展上的升力和阻力。则

该致动点处的相对风速  $U_{rel}$  为

$$U_{rel}^2 = |U_z + U_{M,z}|^2 + |U_\theta + U_{M,\theta}|^2 \quad (3)$$

## 1.2 浮式风机水动力-气动力耦合方法

将非稳态致动线模型 UALM 嵌入两相流动求解器 naoe-FOAM-SJTU, 形成能耦合风力机、浮式支撑平台和系泊系统的求解器 FOWT-UALM-SJTU。使用大涡模拟 (LES) 方法进行浮式风力机气动力-水动力耦合数值模拟, 控制方程为

$$\frac{\partial \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \tilde{\mathbf{u}} = -\frac{1}{\rho} \nabla \tilde{p} + \nu \nabla^2 \tilde{\mathbf{u}} - \nabla \cdot (\tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}}) + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_e \quad (4)$$

式中, 符号“ $\sim$ ”表征空间过滤;  $\mathbf{f}_\sigma$  为表面张力;  $\mathbf{f}_s$  为消波力;  $\mathbf{f}_e$  为体积力。  $\tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}} = \tau_{SGS}$  为亚格子应力, 可采用经典的 Smagorinsky 模型求解。

按时间步求解 LES 控制方程, 然后更新系泊平台 6 自由度运动速度, 并将其传递到 UALM 中。同时将受到平台运动影响的风力机气动载荷传递到平台 6 自由度运动方程中, 实现风力机-平台-系泊三者耦合求解, 求解流程如图 2 所示。

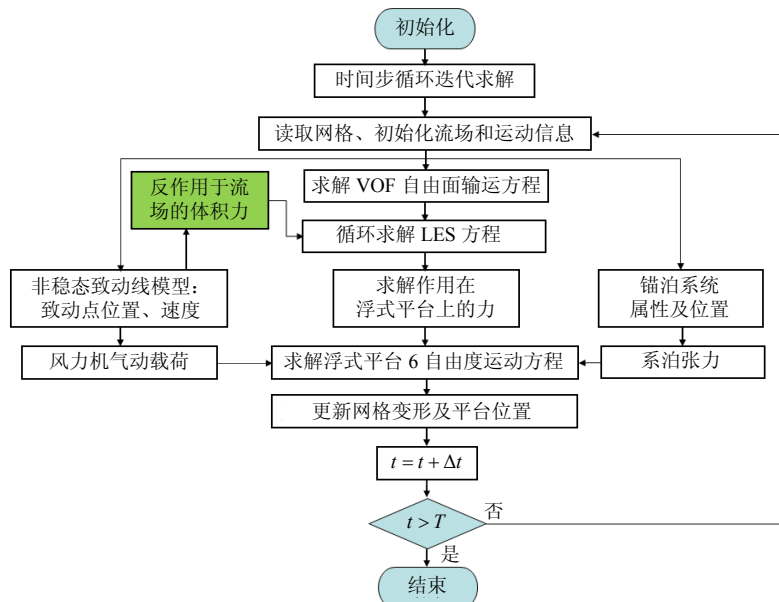


图 2 浮式风力机气动力-水动力耦合求解流程

采用随体坐标系和大地坐标系。对于平台的运动响应, 在大地坐标系中沿平台表面积分得到作用在平台上的合力和力矩, 通过转换矩阵得到随体坐标系中的力和力矩。然后由刚体运动方程计算角加速度和线加速度, 再沿时间积分得到平台的运动速度和位移。系泊载荷求解采用准静态分段外推法 (piecewise extrapolating method, PEM)。该方法考虑了系泊线预张力和流体力的影响, 又考虑了躺底段系泊线的影响, 而且解决了动态有限元方法耗时的问题, 因此被用于浮式风力机系泊张力和力矩的求解。

## 1.3 涡识别方法

风力机风轮叶尖部位下游会产生沿流向的叶尖涡, 在轮毂处也会产生沿流向的毂涡 (叶根涡)。对于如何捕捉旋涡运动, 总的来说可分为三代涡识别方法。在第一代涡识别方法中使用 Vorticity 方法捕捉涡结构, 表征为两个方向的速度在彼此方向上梯度的差值。然而由于该方法并没有区分旋转和剪切

运动, 在物理意义上存在不合理性。

在第二代涡识别方法中有  $Q$  准则,  $\lambda$  数等。其中 Hunt<sup>[14]</sup> 提出的  $Q$  准则的数学表达式为

$$Q = \frac{1}{2} (\|B\|_F^2 - \|A\|_F^2) \quad (5)$$

式中,  $A$  为对称张量,  $B$  为反对称张量,  $\|\cdot\|_F$  表示矩阵的 Frobenius 范数。 $Q$  准则同时考虑了反对称张量和具有抵消作用的对称张量, 能够表征涡结构。但是阈值的选取直接关系到涡捕捉能否成功。此外,  $Q$  准则不能考虑漩涡的向量特性。

在最新一代涡识别方法中有刘超群课题组<sup>[15-17]</sup>提出的  $\Omega_R$  方法和 Liutex 向量方法。其中 Liutex 向量定义为

$$R = \left( \langle \Omega, r \rangle - \sqrt{\langle \Omega, r \rangle^2 - 4\lambda_{ci}^2} \right) r \quad (6)$$

式中,  $\Omega$  表示涡量,  $r$  表征旋转轴方向,  $\lambda_{ci}$  为速度梯度张量特征根的虚部。

在  $\Omega_R$  方法中,  $\Omega_R$  的表达式为

$$\Omega_R = \frac{\|B\|_F^2}{\|A\|_F^2 + \|B\|_F^2 + \delta} \quad (7)$$

式中,  $\delta$  是防止分母为零的很小的正数。在工程应用中取  $\Omega_R = 0.51$  或  $\Omega_R = 0.52$ 。该方法可以减少阈值选取对涡结构的影响。

## 2 计算设置

影响垂荡板性能的因素主要有: 板的数量和间距; 板的厚度和直径; 板的尺寸和多孔结构。

为了研究附加分形孔垂荡板对浮式风力机气动力和水动力的影响, 设计了无孔垂荡板、开规则孔垂荡板和开分形孔垂荡板。与无开孔垂荡板数值模拟结果进行比较可以得知透空率对浮式风力机气动力-水动力耦合效应的影响, 而与相同透空率下规则孔垂荡板的比较则能反映分形孔的效果。垂荡板厚度为 0.5 m, 横截面形状为直径 12.22 m 的圆。算例设置如表 1 和图 3 所示。垂荡板设置在 130m 水深处。

表 1 算例设置

算例编号	开孔形况	透空率/%
1	无开孔	0
2	规则孔	10
3	分形孔	10



图 3 垂荡板开孔形式

平台中心与入口边界的距离为  $\lambda$ , 消波区与出口边界的距离为 100 m。令  $D$  为叶片直径, 在风轮后方沿流向长度为  $3D$ 、展向宽度为  $3D$ 、轮毂高度上方为  $1.5D$  的区域观察风力机叶片旋转产生的旋涡系和尾流膨胀现象。此外, 设置水深为  $-1.7d$  ( $d$  为平台吃水)。计算域如图 4 所示。

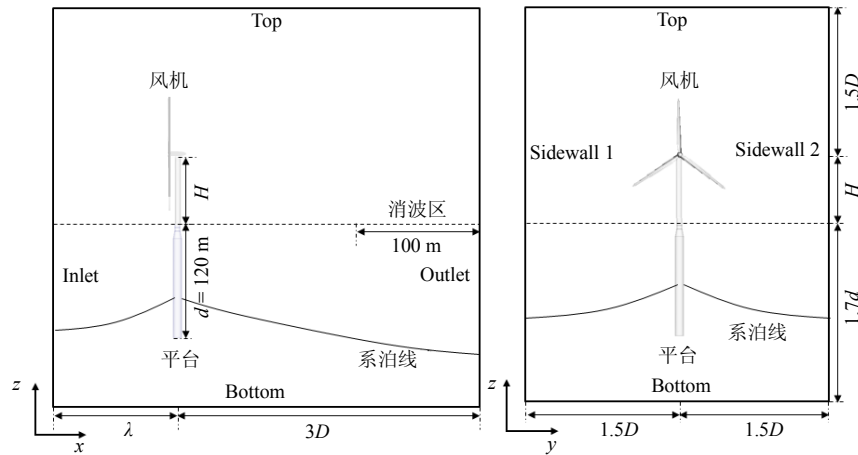


图 4 计算域设置

为了避免致动点附近的网格在插值过程出现数值振荡, 还要较好地捕捉风轮后方的尾涡, 需要在风轮后方沿流向进行两级网格加密。其中第一级网格加密在高度方向上是从自由面至轮毂上方  $1D$  范围, 宽度方向在  $\pm 1D$  的范围, 长度方向从风轮截面一直延伸至出口; 第二级网格加密的范围在高度和宽度上分别减小  $0.1D$ , 而在长度方向保持不变。

波浪设置为一阶斯托克斯深水波, 波浪参数的设置参考 Jonkman<sup>[18]</sup>的工作, 波高  $H_s = 6$  m, 周期  $T = 10$  s。在轮毂高度处的进流风速用额定风速  $U_0$  表征, 不同高度  $H$  处进流风速  $U_H$  服从指数分布:

$$U_H = U_0 \left( \frac{z}{H} \right)^{0.143} \quad (8)$$

### 3 求解器验证

浮式风力机气动力-水动力耦合求解器 FOWT-UALM-SJTU 已经经过课题组的验证。程萍等<sup>[19]</sup>进行了风浪联合作用下浮式风力机耦合性能计算分析, 并将非稳态致动线模型的计算结果与重叠网格的计算结果进行对比, 表明该求解器具有相当高的精度。黄扬等<sup>[20-21]</sup>进行了平台 6 自由度运动对浮式风力机气动力-水动力耦合效应影响的分析, 进行了网格收敛性分析, 验证了求解器的可靠性。

本文进一步将计算结果与开源软件 OpenFAST 的数值结果进行对比。计算工况设置为一阶斯托克斯深水波和均匀风进流, 额定风速  $U_0 = 11.4$  m/s。

气动推力计算结果的对比如图 5 所示, 两者在幅值和周期上基本一致, 推力系数的误差为 5.524%。这说明在一定的误差范围内, FOWT-UALM-SJTU 求解器能较为准确地进行浮式风力机气动力-水动力耦合性能计算。

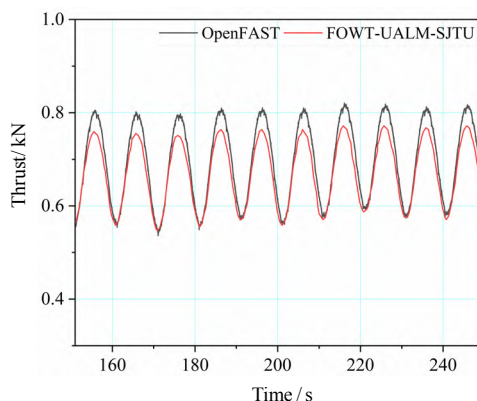


图5 气动推力

将两相流求解器 *naoe-FOAM-SJTU* 计算得到的运动响应与开源软件 *OpenFAST* 基于三维势流理论得到的计算结果进行对比, 如图 6 所示。两者在各个方向运动响应的幅值基本保持一致, 且响应周期也基本相同, 这表明 *FOWT-UALM-SJTU* 求解器对浮式风力机气动力-水动力耦合数值模拟的可靠性和准确性。在图 6(a) 中, 与 *OpenFAST* 的计算结果相比, 纵荡运动响应的幅值较小, 系泊力与外力达到动态平衡时的值也较小, 这一方面是由于 CFD 数值模拟考虑了水的黏性效应, 另一方面是由于系泊张力使用了不同的数值计算方法。

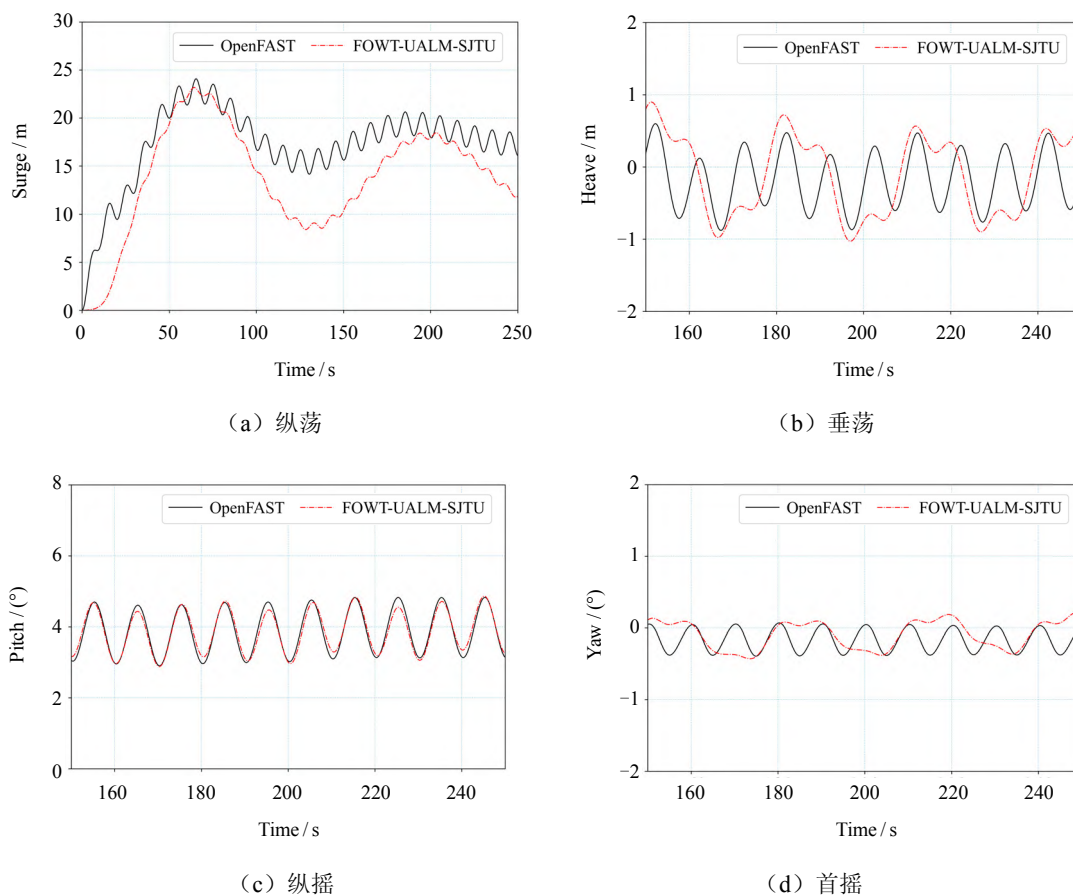


图6 平台运动响应



## 4 数值计算结果

### 4.1 气动性能

气动功率和气动推力幅值的计算结果如图 7 所示。透空率为 10% 的开孔垂荡板对气动性能的提升优于未开孔垂荡板。在相同透空率下, 分形孔垂荡板对气动性能的提升优于规则孔垂荡板。

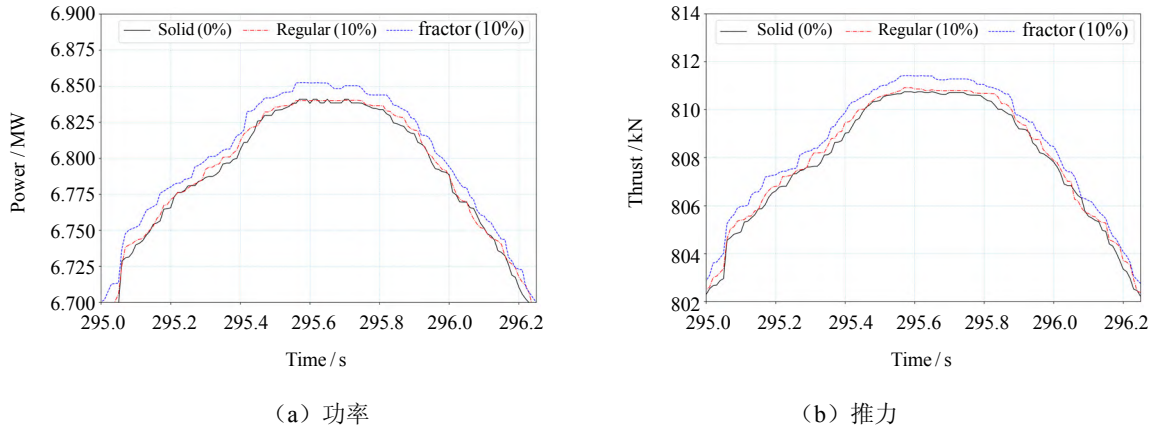


图 7 气动性能

### 4.2 水动力性能

附加了 3 种形式垂荡板的浮式平台运动响应如图 8 所示。对于纵荡而言, 开分形孔的垂荡板减小了纵荡幅值达 0.261 m, 然而开规则孔的垂荡板增大了响应幅值达 0.296 m。总体而言, 透空率和分形孔对纵荡运动响应影响均较小。对于横荡, 开规则孔的垂荡板横荡幅值减小 0.193 m, 开分形孔垂荡板使运动幅值减小 0.384 m。由此可见, 透空率的主要作用是抑制浮式平台的横荡运动响应, 且分形孔垂荡板比规则孔垂荡板对横荡的抑制更为显著。对于横摇, 两种开孔垂荡板的作用与横荡情况基本一致, 横摇运动响应幅值分别减小 0.0143° 和 0.0286°。这说明透空率也有利于抑制平台横摇运动, 且规则孔垂荡板对横摇运动响应的抑制作用略大于分形孔垂荡板。此外, 对于垂荡、纵摇和首摇, 无论是开规则孔和分形孔, 平台的运动响应基本无变化。这说明透空率对平台垂荡、纵摇和首摇运动响应的作用是微小的。

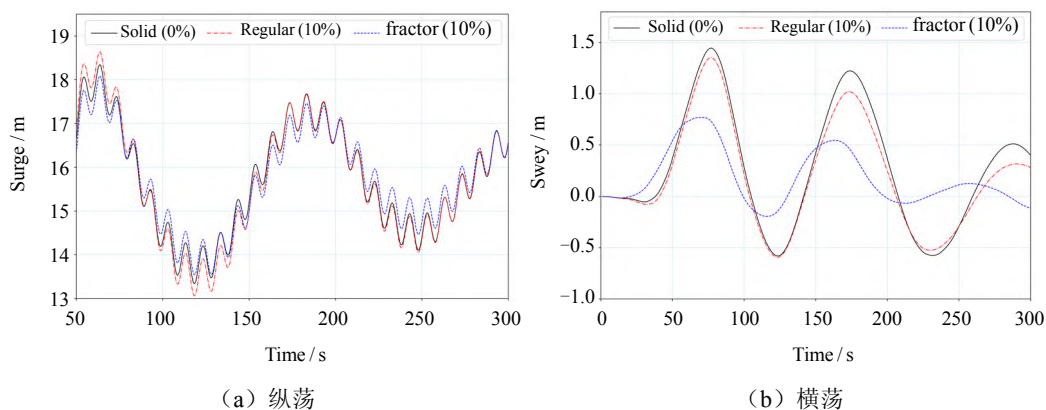


图 8 平台运动响应

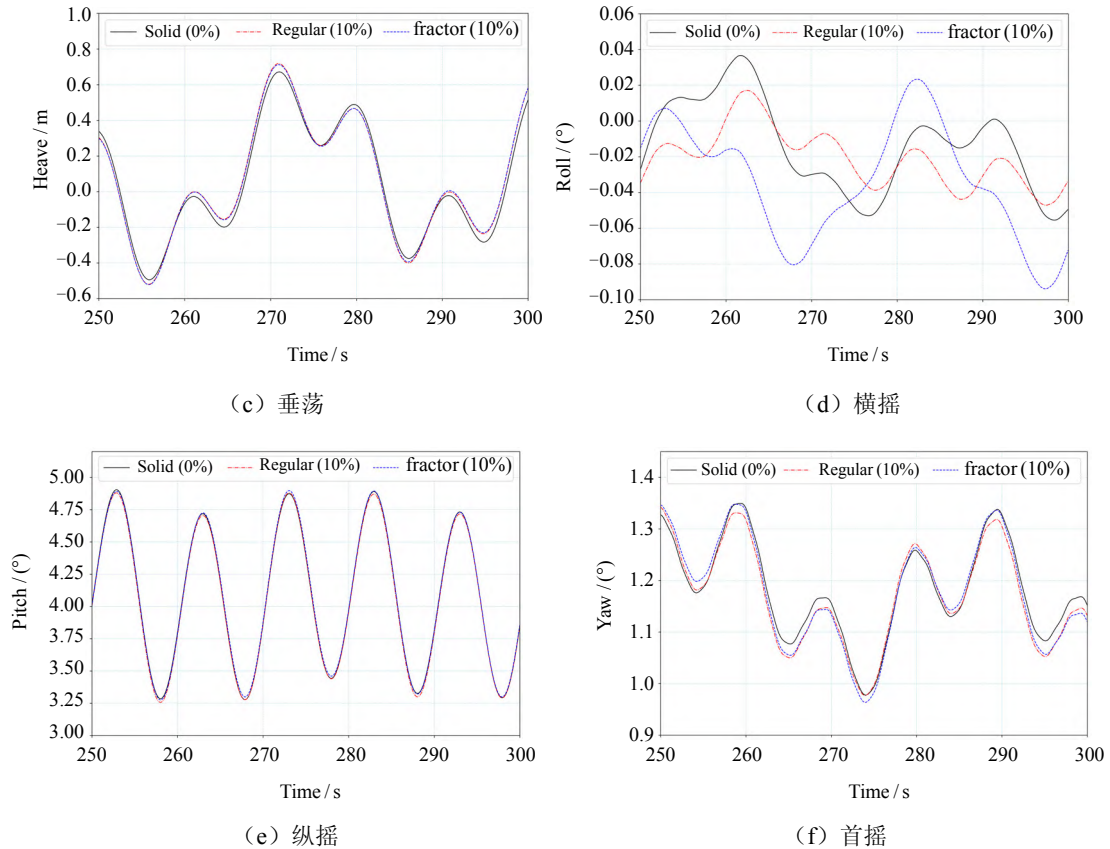


图 8 续 平台运动响应

附加了 3 种形式垂荡板的平台系泊张力如图 9 所示, 其中图 9(a) 所示为系泊张力在流向的分量, 图 9(b) 为系泊张力在垂向的分量。开规则孔垂荡板在流向和垂向对系泊线张力的影响都很微弱。与开规则孔垂荡板相比, 相同透光率下的分形孔在流向和垂向减小系泊张力幅值分别为 2.685% 和 1.291%。

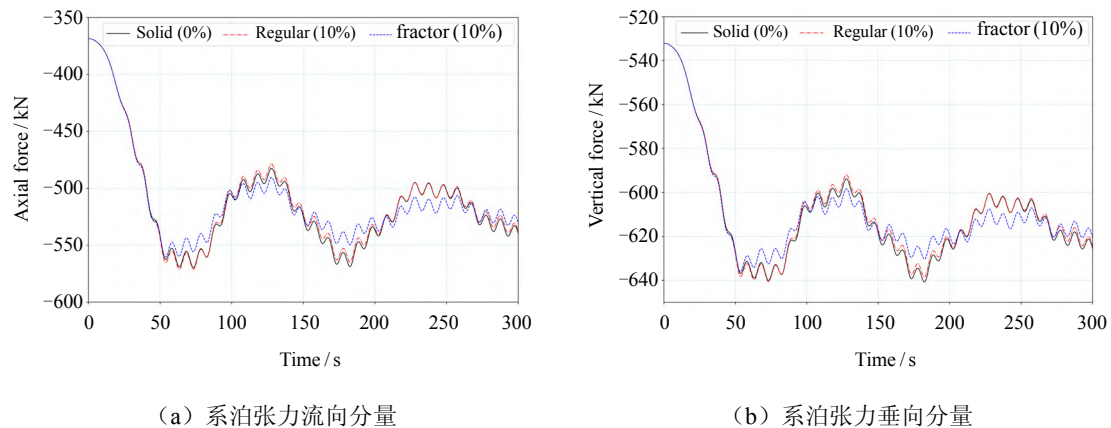


图 9 系泊张力时历曲线

### 4.3 尾流场

风经过风轮盘面后的速度损失, 称为尾流速度损失。尾流速度损失是衡量风力机性能的关键指标。附加了规则孔垂荡板与无孔垂荡板的浮式风力机的平均尾流速度差值如图 10(a) 所示, 附加了分形孔垂荡板与规则孔垂荡板的浮式风力机平均尾流速度差值如图 10(b) 所示。

由图 10(a) 可知, 附加了透光率为 10% 的规则孔垂荡板后, 对风轮盘面处的速度几乎没有影响,



然而距离风轮盘面  $2D$  的后方尾流速度普遍增大, 这说明开孔垂荡板虽然对浮式风力机的气动性能提升较小, 但提升了系统的稳定性, 因此加快了风轮后方尾流速度的恢复。图 10(b) 表明, 附加了分形孔的垂荡板对风力机尾流场的影响较小, 表现为尾流速度差值关于尾流中心对称, 且平均速度的差值基本相同。这说明开孔形状主要影响浮式风力机的水动力性能, 而对风轮尾流场的影响不大。

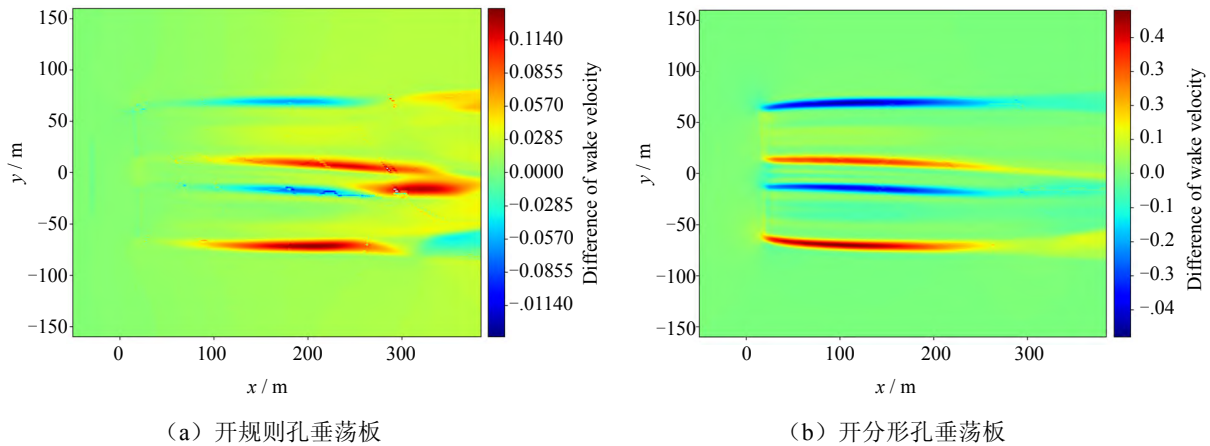


图 10 风轮尾流场速度差

分别用第一代涡识别 Vorticity 方法、第二代涡识别  $Q$  准则方法和第三代涡识别 Liutex 和  $\Omega_R$  方法捕捉带分形孔垂荡板的浮式风力机的尾流, 如图 11 所示。

用这 4 种涡识别方法捕捉自由涡结构。用这 4 种方法在风轮后方一定距离内均能捕捉风力机叶尖处产生的叶尖涡和叶根处产生的叶根涡。在风力机下游  $1D$  距离之后, 用 Vorticity 方法计算的涡量等值面不能识别涡环脱落以及在下流汇集成涡片的过程, 这与第二代和第三代涡识别方法得到的结果存在明显的差异, 同时也说明了第一代涡识别方法的物理意义不明确。与第一代涡识别方法相比,  $Q$  准则能较好地表征风轮后方两个涡系的发展, 观察到涡环之间的距离向下游逐渐增大, 以及涡环脱落和聚集成大型涡片的现象。第三代涡识别方法 Liutex 能同时表征涡的等值面和涡的方向, 由图 11(c) 可知, Liutex 方法不仅能识别叶尖涡和叶根涡, 而且捕捉到位于叶尖涡和叶根涡之间的自由涡, 这些涡是由于压力差引起的。第三代涡识别  $\Omega_R$  方法不需要设定阈值, 它能更好地捕捉风轮后方的涡系, 如图 11(d) 所示。

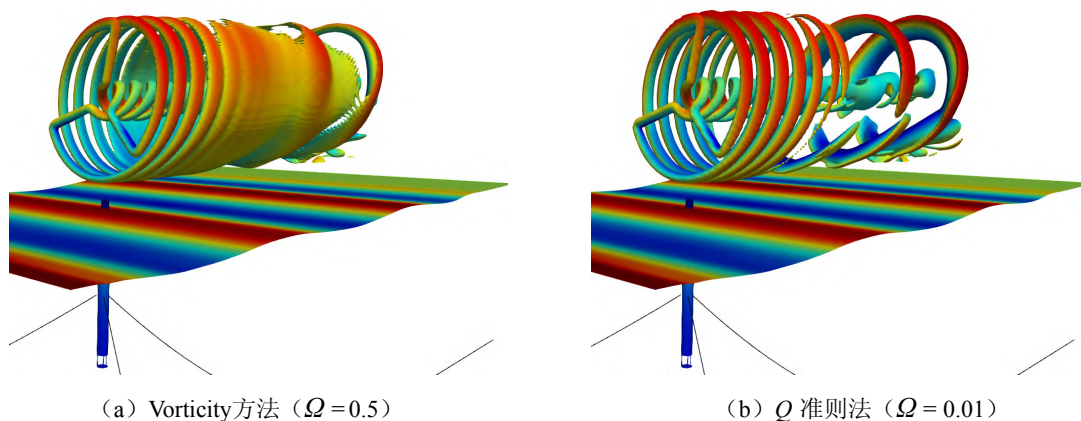


图 11 不同涡识别方法得到的尾流结构

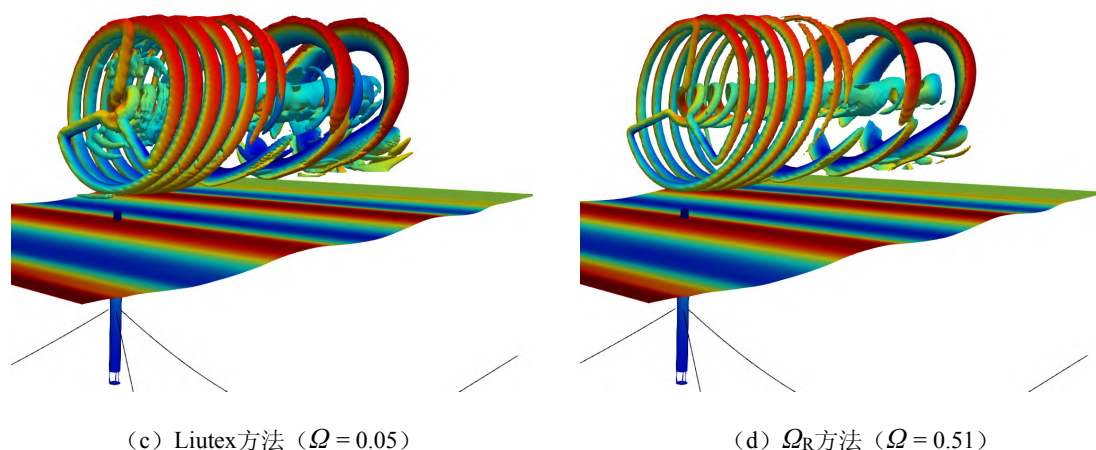


图 11 续 不同涡识别方法得到的尾涡结构

由上述分析可知,分形孔垂荡板能减小系泊载荷和浮式平台运动响应的幅值,从而提升风力机的气动功率。现对此作进一步分析,分别对带有规则孔和分形孔垂荡板的浮式平台使用第三代 $\Omega_R$ 涡识别方法捕捉平台运动诱导的涡结构,如图12所示。

就浮式平台整体涡量而言,附加了分形孔垂荡板的平台在垂荡板处的涡量较大,而在平台中部的涡量较小。这说明分形孔垂荡板在平台底部能提供较大的水动阻尼,从而减小平台运动响应的幅值。

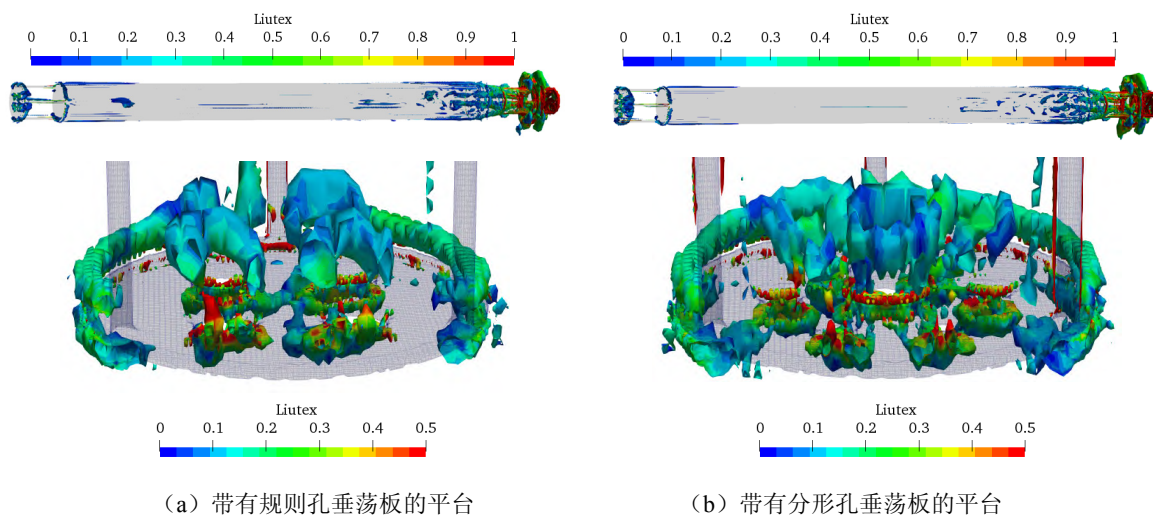


图 12 尾涡结构

## 5 结 语

本文将非稳态致动线模型嵌入两相流求解器,形成浮式风力机气动力-水动力耦合求解器 FOWT-UALM-SJTU,并将数值模拟结果与开源软件 OpenFAST 进行比较,验证了求解器的可靠性和准确性。基于该求解器研究附加的无孔垂荡板、规则孔垂荡板和分形孔垂荡板对浮式风力机气动力-水动力耦合性能的影响。

研究表明,规则孔垂荡板能降低浮式支撑平台的横荡、横摇和首摇运动响应的幅值。在垂荡板透空率相同时,开分形孔的垂荡板能进一步减小平台的纵荡、横荡、垂荡和横摇运动响应幅值,能进一步提升风力机的气动功率和推力。

用多种涡识别方法对风轮后方的尾涡结构和附加垂荡板引起的旋涡进行分析。第一代涡识别方法 Vorticity 不能明确表达尾涡的演化,第二代涡识别方法  $Q$  准则存在阈值选取这样的人工干预问题;第三代涡识别方法 Liutex 虽然也存在阈值选取的问题,但是它能同时表征涡量的大小和方向,且能捕捉到风力机叶尖和叶根之间的小涡结构。 $\Omega_R$  方法则不存在阈值选取的问题,它能较好地捕捉风轮后方尾涡结构的发展。因此建议选用第三代  $\Omega_R$  方法捕捉浮式风力机的尾涡结构。

## 致 谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(51879159, 52131102)和国家重点研发计划项目(2019YFB1704200)的资助。在此一并表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- [1] REN Z, JIANG Z, SKJETNE R, et al. Development and application of a simulator for offshore wind turbine blades installation[J]. Ocean Eng., 2018, 166:380-395.
- [2] CHEN X, JIANG Z, LI Q, et al. Extended environmental contour methods for long-term extreme response analysis of offshore wind turbines[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2020, 142 (5) : 052003.
- [3] WEI Y F, YANG J M, CHEN G. A review of the hydrodynamic performance of heave damping plates on Spar platform[J]. China Offshore Platform, 2010, 25 (6): 1-4.
- [4] 吴维武, 缪泉明, 匡晓峰, 等. Spar平台垂荡板受迫振荡水动力特性研究[J]. 船舶力学, 2009, 13(1): 27-33.
- [5] SANG S, YI S Y, SHI X, et al. Study on motion performance effect of semi-submersible platform derives from heave plates structures[J]. China Offshore Platform 2015, 30 (5): 35-41.
- [6] CHUA K H, CLELLAND D, SHUANG S, et al. Model experiments of hydrodynamic forces on heave plates[C]// Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE2005-67459, 2005.
- [7] 丁勤卫, 李春, 袁伟斌, 等. 风波耦合作用下垂荡板对漂浮式风力机Spar平台动态响应影响[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 1113-1126.
- [8] YUE M A, LIU Q S, LI C, et al. Effects of heave plate on dynamic response of floating wind turbine Spar platform under the coupling effect of wind and wave[J]. Ocean Engineering, 2020, 201(1) : 107103.
- [9] 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.
- [10] WANG W. Fractal porous media and flow numerical simulation study of thermal conductivity[R]. Institute of Engineering Thermophysics, 2006.
- [11] WANG B, XU Z, LI C, et al. Hydrodynamic characteristics of forced oscillation of heave plate with fractal characteristics based on floating wind turbine platform[J]. Ocean Engineering, 2020, 212: 107621.
- [12] SØRENSEN J N. SHEN W Z. Numerical modeling of wind turbine wakes[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2):393-399.
- [13] TROLDORGBORG N, SØRENSEN J N, MIKKELSEN R F. Actuator line modeling of wind turbine wakes[R]. Technical University of Denmark, Kongens Lyngby, Denmark, 2008.
- [14] HUNT J, WRAY A, MOIN P. Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows[R]. Center for Turbulent Research Report CTR-S88, 1988.
- [15] LIU C, GAO Y, TIAN S, et al. Rortex-a new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions[J]. Physics of Fluids, 2018, 30: 035103.

- [16] GAO Y, LIU C. Rortex and comparison with eigenvalue-based vortex identification criteria[J]. *Physics of Fluids*, 2018, 30: 085107.
- [17] WANG Y, GAO Y, LIU J, et al. Explicit formula for the Liutex vector and physical meaning of vorticity based on the Liutex-Shear decomposition[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(3): 464-474.
- [18] JONKMAN J, MUSIAL W. Offshore code comparison collaboration (OC3) for IEA task 23 offshore wind technology and deployment[R]. *Contract*, 303(December), 275-3000, 2010.
- [19] CHENG P, HUNAG Y, WAN D C. A numerical model for fully coupled aero-hydrodynamic analysis of floating offshore wind turbine[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 183-196.
- [20] HUNAG Y, CHENG P, WAN D C. Numerical analysis of a floating offshore wind turbine by coupled aero-hydrodynamic simulation[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2019, 18(1): 82-92.
- [21] HUNAG Y, WAN D C. Investigation of interference effects between wind turbine and spar-type floating platform under combined wind-wave excitation[J]. *Sustainability*, 2020, 12(1):246.

## Large Eddy Simulation of Floating Offshore Wind Turbine Having Heave Plate with Fractal Holes

ZHENG Jiancai, ZHAO Weiwen, WAN Decheng\*

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

### Abstract

Heave plate is a kind of passive device equipped on a floating support platform to increase its added mass and hydrodynamic damping. In this paper, influence of the heave plate with fractal holes on the hydro-aerodynamic coupling performance of the floating offshore wind turbine is studied. The two-phase flow solver naoe-FOAM-SJTU is applied to solve the hydrodynamic response of the mooring platform. Aerodynamic performance of the wind turbine under the influence of platform motions are solved by inserting the unsteady actuating line model into the two-phase flow solver. The results show that the stability of the wind turbine could be improved when the perforated heave plate is applied, amplitude of motion responses of the platform could be reduced, and the aerodynamic power of the wind turbine could be increased. It is found that the effect of the heave plate with fractal holes is better than that with regular holes, and is a feasible scheme to enhance the stability of the floating offshore wind turbine system.

**Key words:** unsteady actuator line model; hydro-aerodynamic coupling; heave plate; fractal hole

### 作者简介

郑建才 男, 1994年生, 博士。主要从事海上浮式风机气动-水动-结构变形耦合数值模拟工作。

赵伟文 男, 1989年生, 博士。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学研究工作。

万德成 男, 1967年生, 博士, 教授。主要从事船舶与海洋工程结构物复杂流场数值模拟分析一体化工作。

\*通讯作者: 万德成