

文章编号: 1005-9865(2015)01-0090-10

非均匀风影响下风力机三维气动粘性流场的数值模拟

周 胡, 赵文超, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与海洋开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 基于面向对象的开源软件 OpenFOAM, 选择美国国家新能源实验室(NREL) Phase VI 风力机为对象, 对以往研究较少的非均匀来流风速作用下风力机三维气动粘性流场进行数值模拟。采用较为接近于真实情况的指数型风剖面, 计算了轮毂处风速分别为 5、10、15 和 25 m/s 四种工况下的叶片表面压力分布、叶片的推力、尾涡等气动力数据, 并与均匀来流风速下的风力机气动力学性能进行详细的对比, 探讨非均匀风剖面对风力机流场结构和流动特性影响的物理现象和规律。

关键词: 风力机; 非均匀风; OpenFOAM; 空气动力特性; 风能开发; 海上风电

中图分类号: TK83 文献标志码: A DOI: 10.16483/j.issn.1005-9865.2015.01.011

Numerical simulation of 3D viscous flow field of wind turbine under nonuniform wind

ZHOU Hu, ZHAO Wenchao, WAN Decheng

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center of Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: A numerical simulation of 3D viscous flow field around NREL Phase VI wind turbine was carried out with open source software OpenFOAM under nonuniform wind conditions, about which little research has been done. Exponential wind profile which is close to real situations is chosen. Based on this hypothesis, the following aerodynamic results were analyzed, such as the pressure coefficient distribution at different sections, and rotor thrust and wake structures at mean wind speeds of 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s and 25 m/s respectively. At the same time, the results under nonuniform wind conditions were compared with those under uniform conditions to deepen the understanding of the shear wind effects on the flow structure and flow characteristic around the wind turbine.

Keywords: wind turbine; nonuniform wind; OpenFOAM; aerodynamic performance; wind energy development; offshore wind power

在可再生能源领域中, 风能的开发和利用技术是最为成熟也是最具大规模商业开发前景的, 受到了世界各国的广泛关注。特别是最近几年海上风能发电的兴起, 再一次掀起了研究和利用风能的热潮。风力机将风能转化为机械能, 风资源的品质对风力机的功率、寿命和运行等起着重要影响。风力机的来流风由于受地球表面的影响, 最显著的特征是在时间或空间上的分布不均。这种非均匀的来流风可以用风速廓线的形式予以量化表示。由于风速廓线引起的风切变效应的存在, 叶片在旋转过程中将经历风速的周期性变化, 导致风轮受到风力载荷的不均, 这种不均会对风力机的使用寿命和运行安全产生深远影响。同时, 在未来海上风

收稿日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 51411130131, 11432009); 上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2013CB036103); 工信部高技术船舶科研项目; 美国船级社(AB)中国有限公司; 上海交通大学高性能计算中心(HPC)的资助

作者简介: 周 胡(1989-) 男, 江苏人, 硕士, 主要从事海上风机流场数值模拟的研究。E-mail: zhouhu1989@163.com

通讯作者: 万德成。E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

电发展过程中,为了降低成本,叶轮直径会随着额定功率的增加而增加,风切变对风力机功率的影响将更为重要,必须在设计时引起注意。

随着计算机性能和计算方法的飞速提高和发展,使用计算流体力学理论数值模拟风力机空气动力学性能的方法日益受到了重视,数值的方法不仅能够准确预测风力机性能,还能够清楚地观察流场细节,深化对绕流场流动问题本质的理解。使用基于雷诺时均 Navier-Stokes 方程求解风力机绕流场的研究已有很多^[1-4],但是使用数值方法模拟非均匀风或剪切风作用下风力机空气动力学性能的工作还不是很多^[5-6],这也正是本文的立足点。

Nilay Sezer-Uzol 等^[5]使用基于自由涡流理论的势流方法研究了稳态和瞬态风剪切对水平轴风力机的性能特别是涡结构的影响,文中着重研究了三种典型工况,分别是均匀风、指数率的风速廓线及瞬态极限剪切风,研究表明风速廓线的存在对风力机的尾涡结构和叶片表面的压力将产生很大非对称影响。廖明夫等^[7]基于对数律分布的风切变模型从理论上对非均匀风对风力机功率影响进行了详细的研究和分析,得出了非均匀风引起的风力机设计功率的损失与风力机叶轮直径的大小相关等有用结论。刘磊等^[6]依据指数率的风速分布曲线,使用了 CFD 方法对非均匀风作用下风力机三维非定常气动特性进行了研究,同时还研究了不同风切变指数对风力机载荷波动振幅的影响。文中基于 OpenFOAM 开源平台,选用任意网格界面元法瞬态求解器进行非均匀风作用下风力机空气动力学性能预报方法的研究。

1 OpenFOAM 简介

OpenFOAM 全称为 Open Field Operation and Manipulation,即场的操作和处理的开源计算平台。它是一个基于有限体积法,可用于对连续介质力学问题进行数值计算的面向对象的 C++ 库,同时还提供了许多预编译好的求解器、辅助工具和模型库等。由于使用了许多 C++ 语言的高级工具,例如模板类、操作符重载、多态等^[8],OpenFOAM 具有强大的可定制性和可拓展性,使用者和开发者可以根据所求问题的特殊性编写自己的求解器,重点关注求解的流程,而不需要关注离散和求解的最底层知识,这是许多商业软件无法比拟的。将 OpenFOAM 作为底层库类来构建自己的求解器是许多研究者选择 OpenFOAM 作为求解器开发平台的重要原因。

上海交通大学万德成课题组已经在 OpenFOAM 的开发和使用上做了大量丰富工作。查晶晶、曹洪建等^[9-10]基于 OpenFOAM 求解器 interDyMFoam,开发实现了数值粘性水池造波和阻尼消波,对圆柱波浪爬高等进行了广泛研究。沈志荣等^[11]将六自由度运动模块植入 OpenFOAM,开发了 naoe-FOAM-SJTU 求解器,实现了对船舶在波浪上运动的数值模拟。王强、周胡等^[12-14]基于 MRFSimpleFoam 和 pimpleDyMFoam 求解器对风力机风轮的气动力性能、风力机叶片与支撑塔架相互作用的耦合流场进行了数值模拟。

2 计算模型与网格生成

Phase VI 实验风力机两叶片模型是美国国家新能源实验室于 2000 年在美国国家航空航天局 Ames 120 × 80 ft 风洞中进行系列实验的模型。由于该模型具有详细的实验数据^[15],所以模型常被用来进行风力机叶片空气动力学特性数值模拟结果的验证。通过求解 RANS 方程结合 $k-\omega$ SST 模型对实验风力机模型外流场非定常流动进行数值计算。计算模型为上风向风力机,从 x 轴正向看,风轮逆时针转动,转速为 72 转/分钟。风力机直径 10.058 m,轮毂高度为 12.192 m,叶片翼型为 NREL S809,详细模型数据可以参考文献[16]。

网格的生成流程大致可以分为两过程,首先借助 ICEM CFD 网格软件划分背景网格,再使用 OpenFOAM 自带的 SnappyHexMesh 工具通过调整 system 文件夹下的 snappyHexMeshDict 字典参数自动生成最终网格。最终划分的网格情况如图 1 所示,风力机距入口 5 m,距出口 20 m。在来流风向,靠近风力机前后 0.8 m 范围内进行了加密,同时为了捕捉尾涡,风力机后方 5 m 内也进行了加密。最终网格量大概为 80 万左右。滑移界面(AMI)网格如图 2 所示,交接面的具体生成过程可以参考下文任意网格界面元法的介绍。

计算工况中的空气密度、运动粘度、转速和桨矩角参考 Sequence S 系列实验,选取轮毂处 5、10、15 和 25 m/s 四个风速进行数值计算,四个风速下的初始参数设置参如表 1 所示。

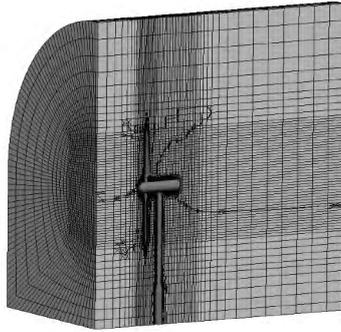


图 1 整体网格情况
Fig. 1 Global mesh

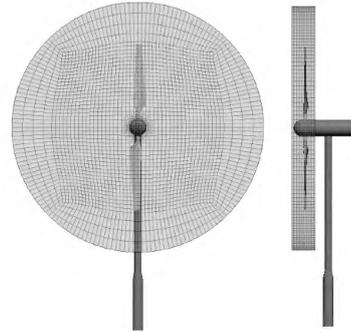


图 2 AMI 界面网格
Fig. 2 Mesh of AMI Interface

表 1 实验各工况参数

Tab. 1 Experiment parameter of different computation cases

实验编号	轮毂处风速/(m·s ⁻¹)	空气密度/(kg·m ⁻³)	运动粘度/(m ² ·s ⁻¹)	转速/rpm	桨距角/(°)
S0500000	5	1.243	1.424E-5	72	3
S1000000	10	1.246	1.423E-5	72	3
S1500000	15	1.224	1.450E-5	72	3
S2500001	25	1.220	1.454E-5	72	3

3 数值模拟

3.1 控制方程

在惯性参考系中,风力机风轮以设定的角速度绕固定轴转动,流场为非定常。由于风力机外流场的风速较低,绕流场可以看成不可压。其时均控制方程可以表述为:

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0$$

$$\frac{\partial \rho \bar{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{U} \bar{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (2\mu \bar{S} + \bar{\tau}_t)$$

式中: \bar{U} 和 p 分别为平均场的速度矢量和压强, μ 为动力粘度, $\bar{S} = (\bar{U} + \bar{U}^T)/2$ 为应变率张量, $\bar{\tau}_t$ 为雷诺应力。

3.2 湍流模型

为了计算雷诺应力项,需要引入 $k-\omega$ SST模型^[17]使控制方程封闭。其中 k 和 ω 分别代表湍动能和涡量脉动强度。两者的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i \omega)}{\partial x_i} = \alpha \frac{1}{\nu_t} \tilde{P}_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

式中:湍粘系数 $\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$, $F_2 = \tanh\left[\left[\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right)\right]^2\right]$, $\tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega)$; $CD_{k\omega} = \max\left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-20}\right)$; $F_1 = \tanh\left\{\left[\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega}\right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2}\right]\right]^4\right\}$ 。其中, y 是到最近的壁面的距离, S 是应力率, ρ 是密度, U_i 是流体速度。式中的其它一些常数在OpenFOAM中已经定义,在此不再赘述。

3.3 离散方法

OpenFOAM 软件包基于有限体积法,采用空间网格的形式将计算区域划分为若干的控制体,在每个控制体上分别求解连续性方程、动量方程和能量方程。

在控制方程各项离散中,时间项采用隐式欧拉方法,对流项采用一阶高斯迎风格式,扩散项采用修正的高斯线性方法。控制方程中的速度和压力的解耦使用 PIMPLE 算法(PISO(pressure-implicit split-operator)和 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)混合算法),PIMPLE 算法的主要结构是从 PISO 中继承的,主要的区别表现在对 PISO 算法的每个时间步再用 SIMPLE 算法求解以得到更稳定的解。速度与压力解耦算法的深入解析可以参考文献[18]。

3.4 边界条件

3.4.1 入口边界条件

风速廓线能确定风速沿高度的变化规律,是确定给定高度处风力机输出功率的前提。风速沿高度的变化是风的重要特性之一。风速廓线一般有两种描述方式:一种是按边界层理论得到的对数风速廓线;一种是按实测结果得到的指数风速廓线。文中采用指数风速廓线来描述入口的速度分布。

风速廓线的指数分布规律可以近似表示为^[19]:

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_s)} = \left(\frac{z}{z_s}\right)^\alpha$$

其中, $\bar{V}(z)$ 为高度 z 处的平均风速; $\bar{V}(z_s)$ 为离地参考高度 z_s 处的平均风速; α 为风速廓线指数。根据我国建筑结构物规范, α 与地表粗糙度有关,一般可以分为 A、B、C、D 四类^[20],分类的标准主要根据地形、建筑物和树木高度等。这里取 α 为 0.16,特指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区。文中取轮毂处的高度为 z_s ,轮毂处 5 m/s 和 15 m/s 风速下的入口的风速廓线如图 3 所示。

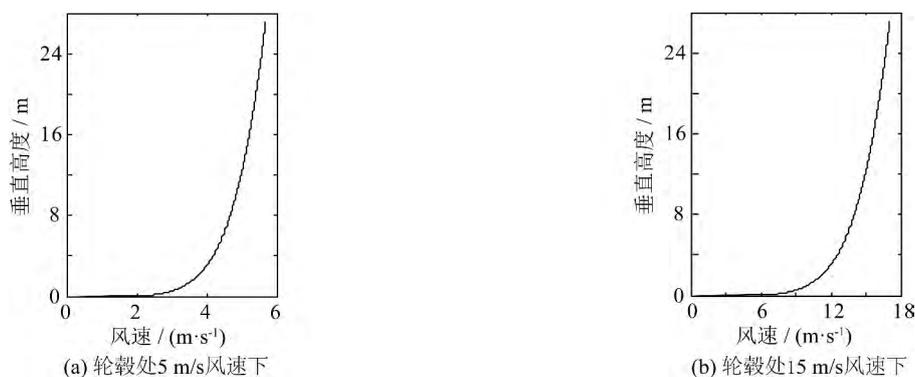


图 3 轮毂处两种风速下的入口风速廓线

Fig. 3 Wind profile of 5 m/s and 15 m/s at hub location

在 OpenFOAM 中,没有现成的指数分布速度边界条件,需要自己编写。一般有两种边界条件编写的方法:其一是将边界条件加到某一个特定求解器,在使用求解器的时候就可以使用编译好的新的边界条件;其二是将需要添加的边界条件编译成一个动态链接库,需要使用该边界条件的时候,只需要在 OpenFOAM 的 system 文件夹里的 controlDict 中添加相关语句即可。文中将使用一个名为 windprofileVelocity 类型的边界条件,通过编写动态链接库的方法添加。

在 windprofileVelocity 边界条件编译好后,边界条件的使用就像使用其它已经编译好的边界条件一样。0 文件夹下的 U 文件里新的边界设置如下:

```
inlet
{
type      windprofileVelocity;
n         ( 1  0  0 );
meanValue 5;
```

```

value      uniform (0 0 0);
}

```

其中 `inlet` 是入口边界的名字, n 是来流风速的方向, `meanValue` 是轮毂处的风速, `value` 为入口速度初始值。最终计算时入口的速度分布如图 4 所示, 与预定义的速度廓线一致, 说明入口边界条件编写正确。

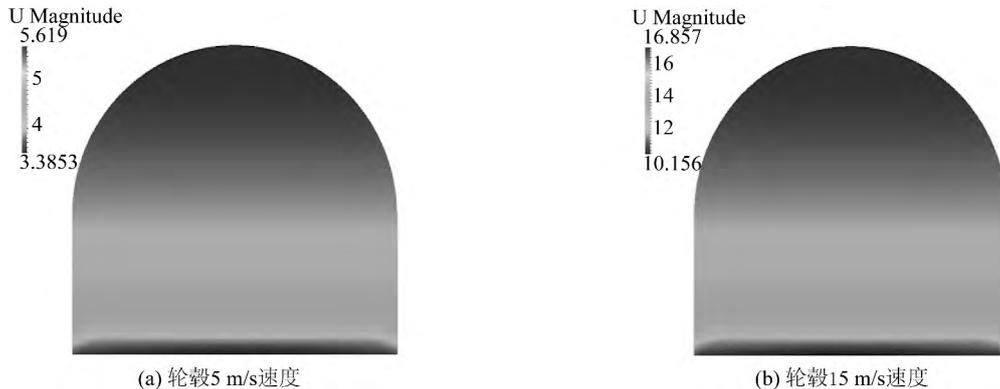


图 4 轮毂处 5 m/s 和 15 m/s 速度计算模型入口速度分布

Fig. 4 Inlet velocity distribution at speeds of 5 m/s and 15 m/s

入口处的压力设为零梯度, 湍动能 k 和湍流脉动强度 ω 设为固定值, 固定值的取法可根据经验公式求得, 涡粘度也通过计算求得。

3.4.2 出口边界条件

出口处的速度边界条件为零梯度, 压力为固定值 0, 湍动能 k 和湍流脉动强度 ω 设为固定值, 湍动能 k 和湍流脉动强度 ω 设为零梯度, 涡粘度通过计算求得。

3.4.3 壁面条件

计算域外围的速度设为固定值 0; 压力设为零梯度; 湍动能 k 、湍流脉动强度 ω 和涡粘度采用壁面函数。

3.4.4 风力机模型边界条件

风力机的塔架和不动的轮毂的速度设为固定值 0, 叶片和转动的轮毂设为 `movingWallVelocity`; 整个风力机的压力边界条件设为零梯度; 湍动能 k 、湍流脉动强度 ω 和涡粘度采用壁面函数。

3.5 任意网格界面元法

在 OpenFOAM 新的版本中, 采用任意网格界面元法来处理旋转的交界面。任意网格界面元法的本质是一种滑移网格技术。任意网格界面元法和之前版本中的通用网格界面法原理基本类似, 但是也存在一些细微区别。任意网格界面元法主要是通过插值实现动静区域流场参数和信息的交换。为描述方便, 界面两边运动和静止的面分别定义为主面 (master) 和从面 (slave)。其求解过程主要步骤如下:

3.5.1 创建 AMI 交界面

在 OpenFOAM 中, 创建 AMI 交界面可以通过网格的拓扑运算完成, 例如使用 `topoSet` 工具来选取相应的面域。之后需要把该交界面复制一份, 使得一个面属于主面, 一个属于从面, 如图 5 所示, 图中 `rotor side` 代表主面, `stator side` 代表从面。这一步操作可以使用 OpenFOAM 中的 `createBaffles` 和 `splitOrMergeBaffles` 两个工具完成。

3.5.2 寻找相邻面

当 AMI 交界面生成后, 就可以开始计算了。计算的第一步便是寻找相邻面。寻找相邻面的过程是已知主面寻找相邻从面的过程。

如图 6 所示, 运动部分的主面 O 与静止部分的从面 a 、 b 、 c 三个面相邻, 故可得这三个面为主面 O 的相邻面。具体搜寻相邻面的算法在此不作介绍。

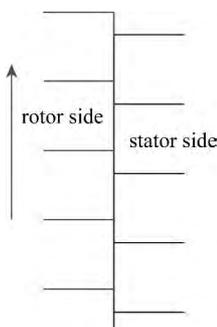


图 5 主从面的关系示意

Fig. 5 Sketch map of relation between rotor and stator

3.5.3 计算权重

权重的计算是相互的,即需要计算从主面到从面的权重,也需要计算从从面到主面的权重。权重由相重叠区域占该面的面积来表示:

主面到从面的权重:

$$W_{M_j \to S} = \frac{|S_{M_j \to S}|}{|S_{M_j}|}, \quad \text{其中 } W_{M_j \to S} \in [0, 1]$$

从面到主面的权重:

$$W_{S_i \to M} = \frac{|S_{M_i \to M}|}{|S_{S_i}|}, \quad \text{其中 } W_{S_i \to M} \in [0, 1]$$

式中: i 为某一个主面的第 i 个相邻从面; j 为某一个

从面的第 j 个相邻主面; $|S_{M_j \to S}|$ 、 $|S_{S_i \to M}|$ 为第 j 个主面和从面重叠区域面积大小,第 i 个从面和主面重叠面积大小; $|S_{M_j}|$ 和 $|S_{S_i}|$ 为某一从面第 j 个主面的面积和某一主面第 i 个从面的面积。

例如对于图 6, 想要计算从面 b 到主面 O 的权重, 那么可以通过以上公式计算得到权重。由此可以得到与主面 O 相邻的所有从面到主面的权重。

3.5.4 差值

有了权重, 那么就可以通过带权重差值的方式把速度场、压力场等在滑动面两侧实现数据交互。

由主面中变量差值得出从面中变量值:

$$\Phi_S = \sum W_{M_j \to S} \Phi_{M_j}$$

由从面中变量差值得出主面中变量值:

$$\Phi_M = \sum W_{S_i \to M} \Phi_{S_i}$$

式中: Φ_{M_j} 、 Φ_{S_i} 为某一从面第 j 个主面中 Φ 值和某一主面第 i 个从面中的 Φ 值。

通过这种带权重的差值, 就实现了网格相对运动时主面和从面之间数据的交互。

4 计算结果与分析

4.1 推力的时历曲线

风力机在非均匀风的作用下, 叶片在旋转过程处于不同的位置将经历风速的周期性变化, 这种变化会导致叶片在整个的受风面上风载荷的不均匀, 会对风力机的使用年限和运行安全产生很大影响。图 7(a) ~ (d) 分别表示一圈内不同风速均匀风和剪切风作用下推力随方位角的变化对比图。为方便比较, 此处的推力为单个叶片所受的推力, 非均匀风下的叶片经历了从高风速区到低风速区再回到高风速区的过程。从图中可以明显观察到推力也经历了一个从高到低再到高的过程, 并且推力在风速最低处(对应方位角 180°) 出现了最低值, 这与理论分析完全一致。经过计算发现一圈内的叶片所受推力的平均值变化不超过 5%, 但是由于非均匀风引起的脉动值却差距很大。例如 10 m/s 风速下, 均匀风下推力的脉动量占平均推力的 7% 左右, 但是非均匀风作用下推力的脉动量却占了平均推力的 14.3%, 几乎是均匀风的两倍。对于 25 m/s 风速, 均匀风和非均匀风对推力脉动量的影响差异将更大, 均匀风影响下推力的脉动量约是平均推力的 4.2%, 非均匀风影响下推力的脉动量约是平均推力的 11.1%, 约是均匀风的三倍。

从上面的分析可以看出, 非均匀风影响下风力机叶片所受推力的脉动值会比均匀风影响下的脉动值大很多, 这对于结构的疲劳将产生非常不利的影响。所以在风力机的疲劳设计阶段, 需要根据具体风场的风速廓线情况, 对非均匀风所引起的疲劳载荷予以考虑。

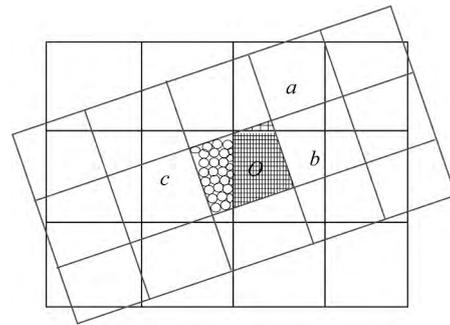


图 6 相互滑动网格交界面的处理^[21]

Fig. 6 Interaction of different sliding meshes

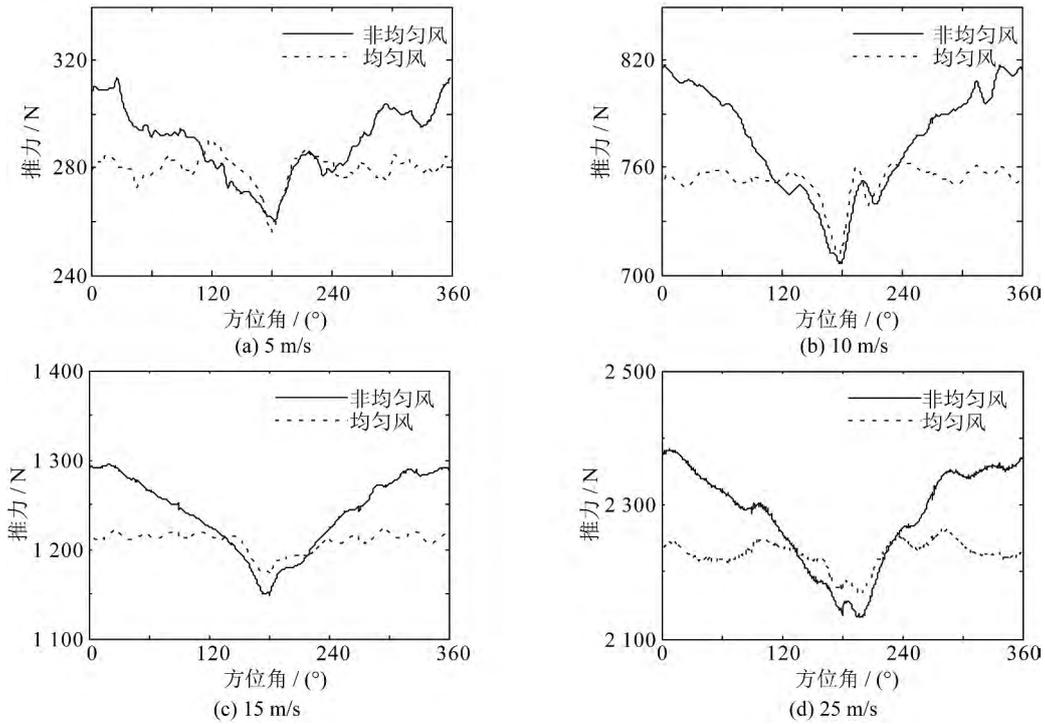


图7 四种不同风速下剪切风与均匀风推力时历曲线

Fig. 7 Comparison of time histories of thrust for different uniform and nonuniform winds

4.2 涡的分布

尾流区的紊流结构以及叶尖涡的捕获是风力机气动力学研究所感兴趣的,使用速度梯度张量的二阶不变量 Q 对尾流场的涡结构进行可视化处理 Q 的定义为:

$$Q = \frac{1}{2}(\Omega_{ij} \times \Omega_{ij} - S_{ij} \times S_{ij})$$

其中, Ω_{ij} 代表漩涡的强度, S_{ij} 表示剪切应变率,分别是速度梯度反对称和对称分离,可以理解为剪切应变率和涡量间的局部平衡量^[22]。

2.6 s 轮毂处风速为 5、10、15 和 25 m/s 时,非均匀风影响下风力机尾涡情况如图 8 所示。图中 Q 使用上面定义的速度梯度张量的二阶不变量的等值线表达,并且使用速度染色。风轮上部区域涡的颜色要比下部涡的颜色深,这与非均匀风入口设置是一致的,也验证了文中计算模型的正确性。从图中可以清晰看到叶尖涡和叶片根部过渡区的涡的脱落,同时在高风速下还能看到叶片处涡的分离。此外,塔架和叶尖涡相互作用也可以明显看出,而塔架下半部分没有明显的涡生成,可能是下半部分网格变稀疏的缘故造成的。

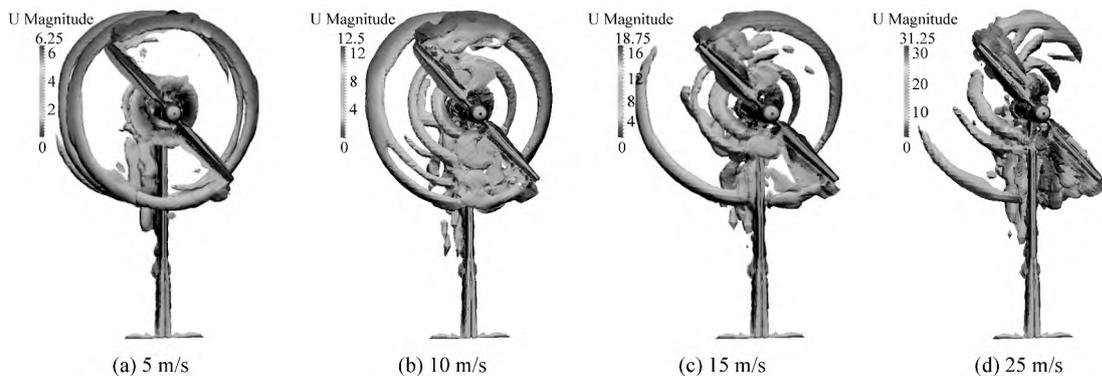


图8 不同风速非均匀风影响下风力机尾涡情况

Fig. 8 Vortex structure for uniform and nonuniform winds at different speeds

4.3 尾流场分析

尾迹区分析是风力机空气动力学分析的重要部分。图 9 (a) 给出了轮毂处 5 m/s 风速非均匀风作用下不同顺风向位置中剖面处的风速曲线, 分别截取了距叶片 4、8、12 和 16 m 处与塔架平行的直线上风速随高度的变化关系。从图中可以清晰的观察到, 距离叶片越近尾流场越紊乱, 在距离叶片 4 m 纵坐标为 0 时, 风力机轮毂的地方风速有急剧的下降, 这主要是由于轮毂的遮蔽作用, 同时也注意到在距离叶片 16 m 处风速基本恢复且接近于入口处的非均匀分布。图 9 (b) 给出了轮毂处 10 m/s 风速非均匀风下不同顺风向位置中剖面处的风速曲线。与图 9 (a) 一样, 在距离轮毂较近的尾流区风速骤降, 随着据叶片距离的增大, 风速逐渐恢复但是 10 m/s 的恢复比 5 m/s 风速下要慢很多, 可以推出高风速下尾流区的影响更长, 需要更长的距离进行恢复。在进行风场风力机布置时, 一定要着重考虑风力机之间的间距以减小上一风力机尾流场对下一风力机功率的影响。



图 9 轮毂处 5 m/s 和 10 m/s 横风向尾迹区风速曲线

Fig. 9 Cross-wake speed distribution at 5 m/s and 10 m/s

为了进一步探讨非均匀风影响下塔架与叶片的相互作用, 以 10 m/s 风速为例, 取 2.5 s 时风力机下方叶片 $r/R=0.15$ 和 $r/R=0.95$ 位置的水平截面进行研究, 如图 10 所示。图中背景以速度值染色, 涡由 Q 等值面表达并由速度染色, 白色圆圈代表塔架, 白色翼型代表的是叶片。首先观察速度场, 可以看到塔筒前后的速度值有明显下降, 而塔筒后的速度场有明显的波浪形变化, 这是典型的圆柱绕流的速度场。从图中还可以看出叶片尖部 ($z = -4.78$ m) 的攻角要比叶片根部 ($z = -1.51$ m) 的攻角小, 叶片尖部泄涡更为明显。叶片尖部的泄涡与塔架的尾涡相互作用可以从图 10 (b) 中看出, 而叶根处塔架与叶片尾涡相互作用的过程却不是特别明显。在轮毂 10 m/s 非均匀风速下叶片分离涡中的叶尖涡与塔架尾涡相互作用的过程更明显, 影响更大。

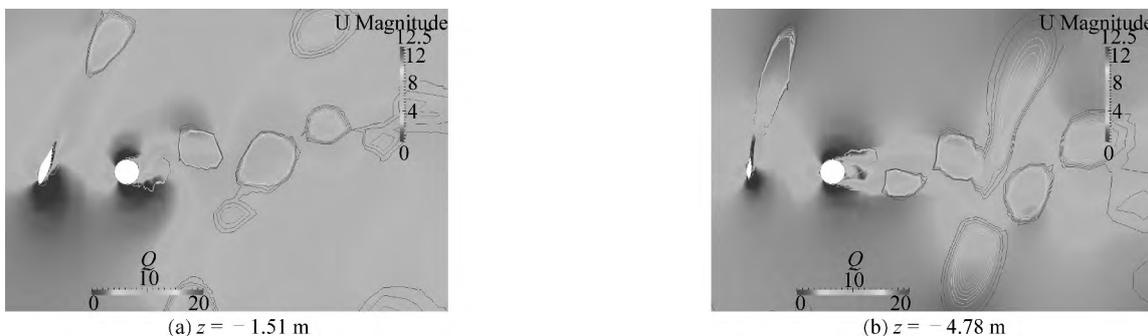


图 10 10 m/s 非均匀风速下风力机下叶片不同截面塔架与叶片相互作用尾涡情况

Fig. 10 Blade tip vortices and tower vortices interaction for uniform and nonuniform winds at two different sections (cut plane at $z = -1.51$ m and -4.78 m)

4.4 叶片截面的压力系数

通过将均匀风和非均匀风作用下叶片各个截面压力分布情况进行对比可以进一步探讨非均匀风对风力机空气动力性能的影响的细节。选取了 2.5 s 时 (即风力机正好旋转 3 圈时) 对四个不同截面 ($r/R = 0.466$,

0.633、0.8、0.95) 的压力情况做对比研究。文中用到的压力系数定义如下:

$$C_p = \frac{P_0 - P_\infty}{0.5\rho[U^2 + (\omega r)^2]}$$

其中, P_0 为叶片表面附近的压力值; P_∞ 为无穷远处的压力值, 文中取 0; U 代表风速; ω 代表风轮角速度; r 代表截面距转动中心的距离。

从图 11 中能够清晰的看出在 5 m/s 低风速时, 非均匀风的影响很小, 叶片截面的压力系数只有细微差别, 同时随着截面从根部向叶尖处发展, 这种影响会越来越小, 这从 10 m/s 风速下的不同截面的压力系数分布能更清晰的看出。

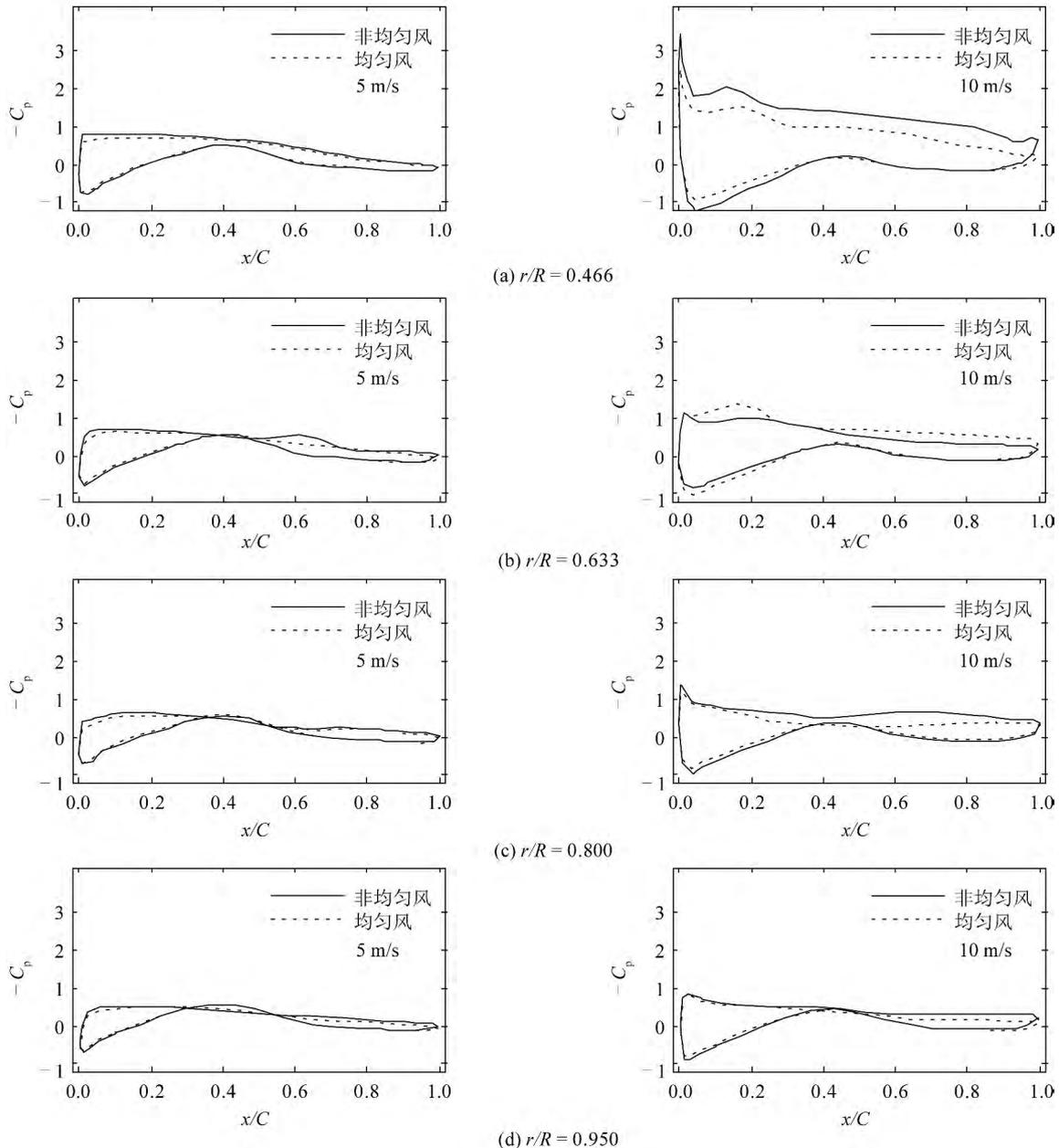


图 11 5 m/s 和 10 m/s 均匀风和非均匀风叶片各截面压力系数分布曲线

Fig. 11 Pressure coefficient distribution for uniform and nonuniform winds at four sections at 5, 10 m/s

5 结 语

在考虑非均匀风影响的情况下, 对风力机整体结构的三维非定常气动问题进行了数值模拟, 得出以下

结论:

1) 在非均匀风影响下, 风力机所受推力的脉动值会比均匀风影响下的脉动值大很多, 这对结构的疲劳将产生非常不利的影响。所以在风力机的疲劳设计阶段, 需要根据具体风场的风速廓线情况, 对非均匀风所引起的疲劳载荷予以考虑。

2) 非均匀风的存在会引起尾涡结构的非对称, 同时对尾流场的分析中可以发现尾流区风速分布非常紊乱, 且高风速下风速的恢复更慢。

3) 非均匀风影响下的叶片截面压力系数在低风速时与均匀风相比变化不大, 但是高风速时有很大差距, 且随着截面从叶片根部到叶片尖部发展, 这种影响会逐渐变小。

参考文献:

- [1] Sørensen N N, Michelsen J, Schreck S. Navier-Stokes predictions of the NREL phase VI rotor in the NASA Ames 80 ft × 120 ft wind tunnel[J]. *Wind Energy*, 2002, 5(2-3): 151-169.
- [2] 李宇红, 张庆麟. 风力机叶片三维流动特性与气动性能的数值分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(9): 1172-1176. (LI Yuhong, ZHANG Qinglin. Numerical simulation of flow field and aerodynamic performance of a wind turbine blade[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2008, 29(9): 1172-1176. (in Chinese))
- [3] 张果宇, 蒋劲, 刘长陆. 风力发电机整机气动性能数值模拟计算与仿真研究[J]. *华东电力*, 2009, 37(3): 449-452. (ZHANG Guoyu, JIANG Jin, LIU Changlu. Numerical simulation of aerodynamic performance for wind turbines[J]. *East China Electric Power*, 2009, 37(3): 449-452. (in Chinese))
- [4] 任年鑫, 欧进萍. 大型海上风力机尾迹区域风场分析[J]. *计算力学学报*, 2012, 29(3): 327-331. (REN Nianxin, OU Jinping. Numerical analysis for the wake zone of large offshore wind turbine[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, 29(3): 327-331. (in Chinese))
- [5] SEZER-UZOL N, UZOL O. Effect of steady and transient wind shear on the wake structure and performance of a horizontal axis wind turbine rotor[J]. *Wind Energy*, 2013, 16(1): 1-17.
- [6] 刘磊, 石可重, 杨科 等. 风切变对风力机气动载荷的影响[J]. *工程热物理学报*, 2010, 31(10): 1667-1670. (LIU Lei, SHI Kezhong, YANG Ke, et al. Effect of wind shear on the aerodynamic load of wind turbine[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2010, 31(10): 1667-1670. (in Chinese))
- [7] 廖明夫, 徐可, 吴斌, 等. 风切变对风力机功率的影响[J]. *沈阳工业大学学报*, 2008, 30(2): 163-167. (LIAO Mingfu, XU Ke, WU Bin, et al. Effect of wind shear on wind turbine power[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2008, 30(2): 163-167. (in Chinese))
- [8] JASAK H, JEMCOV A, TUKOVIC Z. Openfoam: A c++ library for complex physics simulations [C]//Proceedings of International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics. 2007.
- [9] 查晶晶, 万德成. 用 OpenFOAM 实现数值水池造波和消波[J]. *海洋工程*, 2011, 29(3): 1-12. (CHA Jingjing, WAN Decheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM[J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(3): 1-12. (in Chinese))
- [10] CAO H J, WAN D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver [J]. *International Journal of Ocean System Engineering* 2014, 4(1): 52-59.
- [11] SHEN Z R, WAN D C. RANS computations of added resistance and motions of ship in head waves [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2013, 23(4): 263-271.
- [12] 周胡, 王强, 万德成. 风机叶片三维绕流场数值模拟 [C]//第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰 110 周年纪念大会. 2012: 627-636. (ZHOU Hu, WANG Qiang, WAN Decheng. Numerical Simulation of the 3D viscous flow field over wind turbine Blade [C]//Proceedings of 11th National Conference of Hydrodynamics. 2012: 627-636. (in Chinese))
- [13] WANG Q, ZHOU H, WAN D C. Numerical simulation of wind turbine blade-tower interaction [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2012, 11(3): 321-327.
- [14] 周胡, 万德成. 下风向风力机塔影效应的非定常数值模拟 [C]//第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议. 2013: 277-283. (ZHOU Hu, WAN Decheng. Unsteady numerical simulation of tower shadow of downwind wind turbine [C]//Proceedings of 12th National Conference of Hydrodynamics. 2013: 277-283. (in Chinese))

(下转第 124 页)

Engineering Mechanics ,2007 ,24(10) : 186-192. (in Chinese)

- [12] XIA Yong , FUJION Y. Auto-parametric vibration of a cable stayed-beam structure under random excitation [J]. Journal of Engineering Mechanics ,2006(5) : 279-286.
- [13] 宋军伟,方坤河. 应用 Lyapunov 指数研究混凝土阶段特征的稳定判据 [J]. 重庆建筑大学学报,2008 ,30(3) : 129-133. (SONG Junwei , FANG Kunhe. Research on stability criterion of concrete feature in different stress stage with Lyapunov Exponent [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University ,2008 ,30(3) : 129-133. (in Chinese))
- [14] FAGGIANO B , LANDOLFO R , MAZZOLANI F M. Design and modelling aspects concerning the submerged floating tunnels: an application to the Messina strait crossing [C]//Proceedings of the 3rd International Conference on Strait Crossing. 2001: 1-5.
- [15] WOLF A , SWIFT J B , SWINNEY H L , et al. Determining Lyapunov exponents from a time series [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena ,1985 ,16(3) : 285-317.

(上接第 99 页)

- [15] FINGERSH L J , SIMMS D , HAND M , et al. Wind tunnel testing of NREL' s unsteady aerodynamics experiment [J]. AIAA paper ,2001: 35-46.
- [16] HAND M M , SIMMS D , FINGERSH L , et al. Unsteady aerodynamics experiment phase v: test configuration and available data campaigns [R]. National Renewable Energy Laboratory ,2001.
- [17] MENTER F R. Two - equation eddy - viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal ,2012 ,32 (8) : 76-82.
- [18] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows [D]. London: University of London ,1996.
- [19] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社,2006. (HE Dexin. Wind engineering and industrial aerodynamics [M]. Beijing: National Defense Industry Press ,2006. (in Chinese))
- [20] GB. 建筑结构荷载规范 [S]. 2002. (GB. Load code for the design of building structures [S]. 2002. (in Chinese))
- [21] JASAK H , BEAUDOIN M. OpenFOAM TURBO TOOLS: from general purpose CFD to turbomachinery simulations [C]// Proceedings of ASME - JSME - KSME Joint Fluids Engineer - ing Conference (AJK2011-FED) . 2011.
- [22] JEONG J , HUSSAIN F. On the identification of a vortex [J]. Journal of Fluid Mechanics ,1995 ,285(69) : 69-94.

(上接第 118 页)

- [14] 吴喆莹,李扬,江龙克,等. 新型海洋勘探拖缆位置控制器的设计研究 [C]//第八届军事海洋战略与发展论坛. 2011. (WU Zheyang , LI Yang , JIANG Longke et al. Design and study of a new type of marine exploration towing position controller [C]//The Eighth Military Strategy and Development Forum. 2011. (in Chinese))
- [15] PABON J , TEIGEN O. Marine seismic streamers: U. S. Patent Application 13/004 419 [P]. 2011-01-11.
- [16] 李日东,鞠文斌,皮桂英. 动态海浪、水深综合压力传感器的研究 [J]. 今日科苑,2010 (10) : 21-21. (LI Ridong , JU Wenbin , PI Guiying. Research on dynamic waves , water depth integrated pressure sensor [J]. Modern Science ,2010 (10) : 21-21. (in Chinese))
- [17] 刘涛,张维竞,马捷. 基于 Lyapunov 函数方法的海洋资源勘探拖缆水平振动的控制 [J]. 上海交通大学学报,2010 ,44 (10) : 1460-1464. (LIU Tao , ZHANG Weijing , MA Jie. Control strategy for horizontal vibration of towed seismic cables via lyapunov method [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University ,2010 ,44(10) : 1460-1464. (in Chinese))
- [18] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京: 国防工业出版社,1999. (ZHOU Ming , SUN Shudong. Genetic algorithms: theory and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press ,1999. (in Chinese))
- [19] 李扬,张维竞. 基于 MATLAB 遗传算法工具箱的水鸟水翼控制研究 [J]. 信息技术,2013 (5) : 24-27. (LI Yang , ZHANG Weijing. Study on the control of embedded bird's wings based on GA toolbox of MATLAB [J]. Information Technology , 2013 (5) : 24-27. (in Chinese))
- [20] 雷英杰,张善文,李续武. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社,2005. (LEI Yingjie , ZHANG Shanwen , LI Xuwu. MATLAB genetic algorithm toolbox and its application [M]. Xi'an: The Press of Xidian University ,2005. (in Chinese))