

两种新修正工程模型对多台风力机尾流 数值模拟分析

杨祥生, 赵 宁, 田琳琳

(南京航空航天大学江苏省风力机设计高技术研究重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 基于 Park 模型尾流区线性膨胀假设、径向风速呈高斯分布和多项式分布假设, 提出两种新的修正工程尾流模型 Park-Gauss 模型和 Park-polynomial 模型, 并对两台风力机全尾流和偏尾流效应进行数值模拟研究。分别对 Park 模型、2D Jensen 模型、Park-Gauss 模型以及 Park-polynomial 模型进行对比研究。经过与 LES 数值结果比较, 结果表明, 新修正的 Park-Gauss 模型可很好模拟全尾流效应, 其计算精度要优于 Park 模型、2D Jensen 模型以及 Park-polynomial 模型; Park-Gauss 和 Park-polynomial 模型均能比较好地模拟偏尾流效应, 但 Park-polynomial 模型更优于前者; 两种新的修正工程尾流模型在精度上不仅与 LES 结果接近一致, 而且在径向分布上也更符合真实流场。

关键词: 风力机; 高斯分布; 多项式分布; 工程尾流模型; 数值模拟

中图分类号: V211.3

文献标识码: A

0 引 言

随着不可再生能源短缺问题日益严重, 作为未来可持续开发且绿色无污染的风能成为新型能源领域的研究热点之一。风电场选址是风场建设前期的重要工作, 其对后期风场建设和效益预测都有重要作用。而尾流效应是影响风电场微观选址的主要因素之一, 因此开展风力机尾流效应研究对于风电场项目来说具有重要意义。目前, 针对尾流效应主要有 3 种研究方法: 风场实测、风洞试验以及数值模拟。而对风力机尾流效应数值模拟方法主要分为 3 大类: 涡流理论模型、基于求解 N-S 方程的 CFD 模型以及工程模型^[1]。

涡流理论模型基于升力线、升力面(又称涡格法)或者边界层积分法(又称面源法), 再结合自由尾迹或固定尾迹对风场尾流展开模拟研究。Jeng 等^[2]用升力线理论模拟尾流, 并得到较为精确的结果。Dumitrescu 等^[3]对附着涡模型进行改进, 在非稳态来流下对尾流场进行了计算。Bossing^[4]使用升力面结合自由尾迹对尾流场进行数值模拟。

CFD 模型, 2011 年 Ott 等^[5]提出了 Fuga 模型, 它是一个线性 RANS 模型, 把风力机等效成制动盘来模拟尾流。2011 年 Montavon 等^[6]提出了 WindModeller 模型, 采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 制动盘模型模拟风力机, 被应用于商业软件 CFX。Trolldborg^[7]和 Xue 等^[8]用 LES 方法数值模拟风力机尾流场, 其可以很好对尾流进行数值模拟的同时也付出了较大的计算代价。

在大型风场的微观选址中, 受到目前计算资源和能力限制, 采取全 CFD 方法模拟预测计算成本会很昂贵。在风能发电工程领域, 一些精度可接受且形式简单的工程尾流模型具有很强的实用性^[9]。本文主要是对工程尾流模型展开研究。20 世纪 80 年代 Jensen^[10]提出 Park 模型, 之后得到 Katic 等^[11]的发展, 其假设尾流区呈线性扩张(尾流膨胀半径与衰减常数 k 相关), 尾流区速度仅与下游距离相关, 风速在径向呈常数分布。该模型具有形式简单, 计算高效等优点。但是, 文献[9]研究表明该模型不足之处是低估了尾流区的风速亏损, 在径向风速分布与真实流场不符合。根据真实风电场试验测量^[12],

收稿日期: 2016-03-02

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB046200); 国家自然科学基金(11372005); 江苏省自然科学基金重点项目(BK20140059); 江苏高校优势学科建设工程

通信作者: 赵 宁(1963—), 男, 博士、教授, 主要从事流体力学数值方面的研究。zhaoam@nuaa.edu.cn

径向尾流风速呈高斯型分布或多项式分布。针对 Park 模型的不足,田琳琳^[9,13]提出 2D Jensen 模型,采用 cosine 型曲线描述速度在径向的分布。

为了得到更符合真实风场尾流径向速度分布,并具有形式简单、计算高效等优点,本文基于 Park 模型尾流区线性膨胀假设、径向风速呈高斯分布和多项式分布假设,分别提出 Park-Gauss 和 Park-polynomial 两种新的修正工程尾流模型,并对两台风力机全尾流和偏尾流效应进行数值模拟研究。结果表明, Park-Gauss 模型可很好地模拟全尾流效应,其计算精度要优于 Park 模型、2D Jensen 模型以及 Park-polynomial 模型; Park-Gauss 和 Park-polynomial 模型均能较好地模拟偏尾流效应,但 Park-polynomial 模型更优于前者;两种新的修正工程尾流模型在精度上不仅与 LES 结果接近一致而且在径向分布上也更符合真实流场,同时继承了工程模型的形式简单、易编码、计算高效等优点。

1 模型建立

1.1 Park 模型

Park 尾流模型作为常用风资源分析软件 WAsP 的核心尾流模型,是由 Jensen^[11]基于动量守恒原理提出的:

$$u_* = u_0 \left[1 - \frac{2a}{(1 + kx/r_0)^2} \right] \quad (1)$$

式中, a ——轴向诱导因子; r_0 ——风轮后初始尾流半径; u_* ——距离轮盘 x 处的尾流半径的风速; u_0 ——来流风速; k ——尾流区的膨胀速率。

若不知预安装风力机位置处的地表粗糙度时,可以依据 Barthlmie 等^[12]建议,对于陆上风力机 k 可取 0.075,对于海上风力机 k 可取 0.05。若能测量出地表粗糙度,可采用 Frandsen 等^[14]提出的经验公式:

$$k = 0.5 / \ln(z/z_0) \quad (2)$$

式中, z ——轮毂高度; z_0 ——地表粗糙度。

由于 Park 模型假设尾流区为全湍流流动状态,并且忽略叶尖涡等现象。所以 Park 尾流模型不能精准模拟近尾流特征。在文献[11]中认为初始尾流半径 r_0 等于风轮半径 r_d 。考虑叶尖涡等现象的存在,真实初始半径肯定会比风轮半径

r_d 要大。文献[9]采用紧靠风轮下游处的尾流半径为初始尾流半径,根据制动盘理论可以推导出:

$$r_0 = r_d \sqrt{\frac{1-a}{1-2a}} \quad (3)$$

文献[15,16]指出式(2)的假设过于简单和理想化,真实的尾流膨胀速率受多因素影响,如粗糙度、湍流强度(包括空气来流中大气湍流和风力机的存在产生的附加湍流^[17])以及大气的稳定性等因素影响。湍流强度越大,尾流风速恢复越快。Bastankhah 等^[18]提出,风力机由于旋转叶尖和叶根产生涡从而使得尾流区湍流强度增大,膨胀系数 k 也要相应发生变化。尾流膨胀速度与湍流强度相关,Frandsen 等^[14]给出了一个湍流强度计算模型:

$$I_{\text{wake}} = \sqrt{K_n \frac{C_T}{(x/D)^2} + I_0^2} \quad (4)$$

式中, K_n ——经验常数一般取值为 0.4; I_0 ——来流大气湍流强度; I_{wake} ——修正湍流强度。

修正后的膨胀系数 k_{wake} 计算公式为式(5):

$$k_{\text{wake}} = k \frac{I_{\text{wake}}}{0.005 I_0} \quad (5)$$

1.2 2D Jensen 模型

Park 尾流模型假设尾流速度只随下游风向 x 的距离变化,在径向方向风速为常数。径向速度分布呈帽子形状,因此 Park 模型又被称为 top-hat 模型,但这与真实径向风速分布不符。田琳琳^[9]提出 2D Jensen 模型,采用余弦型曲线描述速度在径向的分布。

2D Jensen 尾流模型主要分为 2 步来实现:

$$\text{预测步: } u_* = u_0 \left[1 - 2a / \left(1 + k_{\text{wake}} \cdot x / r_0 \right)^2 \right]$$

$$\text{校正步: } u = (u_0 - u_*) \cos(\pi / r_x \cdot r + \pi) + u_* \quad (6)$$

1.3 Park-Gauss 模型的提出

经试验测量,在真实的流场中,径向尾流风速呈高斯型分布或多项式分布。为了获得更加接近真实尾流场分布模型,本文提出了一种新的修正工程尾流模型——Park-Gauss 模型。该模型假设:尾流区呈线性扩张,膨胀速率为 k_{wake} ,尾流区径向风速呈高斯对称分布。Park-Gauss 模型示意图如图 1 所示。

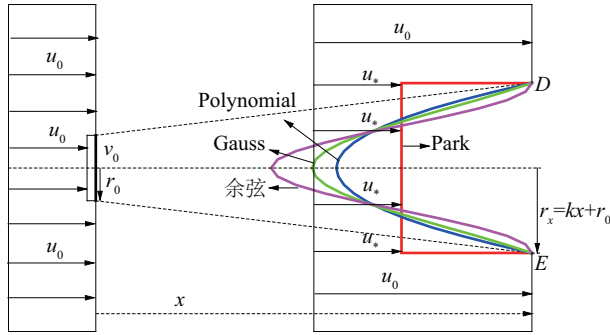


图1 尾流模型示意图

Fig. 1 Sketch of the wake model

假设 Park-Gauss 模型为:

$$u = Ae^{-\frac{(r-B)^2}{r_x^2}} + C \quad (7)$$

式中, A, B, C ——待定系数; r_x ——风力机下游 x 位置处的尾流半径; r ——径向上距离风轮中心的距离。

由于该 Park-Gauss 模型是基于 Park 模型修正的,所以满足以下几点假设:

1) 假设当径向距离 r 扩展到尾流半径 r_x 时,在 D 点和 E 点处风速恢复到来流风速 u_0 。

$$Ae^{-\frac{(r_x-B)^2}{r_x^2}} + C = u_0 \quad (8)$$

$$Ae^{-\frac{(-r_x-B)^2}{r_x^2}} + C = u_0 \quad (9)$$

2) 假设两个模型的尾流半径相同,并且质量通量相等(即速度型下所包含的面积相等)。

$$\int_{-r_x}^{r_x} (Ae^{-\frac{(r-B)^2}{r_x^2}} + C) dr = 2r_x u_* \quad (10)$$

由式(8)、式(9)得出:

$$B = 0, \frac{A}{e} + C = u_0 \quad (11)$$

把 $B=0$ 代入式(10)得:

$$\int_{-r_x}^{r_x} Ae^{-\frac{r^2}{r_x^2}} dr + 2r_x C = 2r_x u_* \quad (12)$$

由于 $e^{-\frac{r^2}{r_x^2}}$ 无原函数,所以这里用幂级数展开式近似值来计算。

$$e^{-\frac{r^2}{r_x^2}} = 1 - \frac{r^2}{r_x^2} + \frac{r^4}{2!r_x^4} - \frac{r^6}{3!r_x^6} + O(r^8) \quad (13)$$

$$\int_{-r_x}^{r_x} e^{-\frac{r^2}{r_x^2}} dr = \int_{-r_x}^{r_x} 1 - \frac{r^2}{r_x^2} + \frac{r^4}{2!r_x^4} - \frac{r^6}{3!r_x^6} dr \quad (14)$$

$$\frac{52}{35} r_x A + 2r_x C = 2u_* r_x \quad (15)$$

联立式(11)、式(15)可求得 A, B, C :

$$A = \frac{u_0 - u_*}{\frac{1}{e} - \frac{26}{35}}, B = 0, C = u_0 - \frac{u_0 - u_*}{1 - \frac{26e}{35}} \quad (16)$$

再将式(16)代入式(7)整理得:

$$u = u_0 + \frac{u_0 - u_*}{1 - \frac{26e}{35}} \left(e^{\frac{1 - (\frac{r}{r_x})^2}{e} - 1} \right) \quad (17)$$

综上所述, Park-Gauss 主要分为两步来实现:

预测步: $u_* = u_0 [1 - 2a / (1 + k_{wake} x / r_0)^2]$

校正步: $u = u_0 + \frac{u_0 - u_*}{1 - \frac{26e}{35}} \left(e^{\frac{1 - (\frac{r}{r_x})^2}{e} - 1} \right)$

1.4 Park-polynomial模型的提出

经试验测量^[13]在真实的流场中,在径向尾流风速呈高斯型分布或多项式分布。由此,结合 Park 模型尾流区线性膨胀假设和尾流区径向风速呈二次多项式分布假设,提出新的修正工程模型, Park-polynomial 模型。尾流模型示意图见图1。

假设 Park-polynomial 模型为:

$$u = Ar^2 + Br + C \quad (18)$$

由于该模型是基于 Park 模型修正的,所以满足以下假设:

1) 假设当径向距离 r 扩展到尾流半径 r_x 时,在 D 点和 E 点处风速恢复到来流风速 u_0 。

$$Ar_x^2 + Br_x + C = u_0 \quad (19)$$

$$A(-r_x)^2 + B(-r_x) + C = u_0 \quad (20)$$

2) 假设两个模型的尾流半径相同,并且质量通量相等(即速度型下所包含的面积相等)。

$$\int_{-r_x}^{r_x} (Ar^2 + Br + C) dr = 2r_x u_* \quad (21)$$

式中, u_* 采用原 Park 尾流模型在 r_x 处计算的大小。

联立式(19)~式(21)可得:

$$A = \frac{3(u_0 - u_*)}{2r_x^2}, B = 0, C = \frac{3u_* - u_0}{2} \quad (22)$$

再将式(22)代入式(18)得:

$$u = \frac{3(u_0 - u_*)}{2r_x^2} r^2 + \frac{3u_* - u_0}{2} \quad (23)$$

综上所述, Park-polynomial 主要分为两步来实现:

预测步: $u_* = u_0 [1 - 2a / (1 + k_{wake} x / r_0)^2]$

校正步: $u = \frac{3(u_0 - u_*)}{2r_x^2} r^2 + \frac{3u_* - u_0}{2}$

1.5 多台风力机尾流数值模拟

在大型风电场中,下游风力机通常会受到上游多台风力机尾流的影响,此时需要考虑多个尾流对下游处风力机的叠加效应。因下游风力机可能会出现部分处于上游风力机尾流区,所以可分两种情况对叠加效应进行计算。若下游风力机 WT_i 完全处于上游风力机 WT_j 尾流区,则要计算 WT_j 对 WT_i 的全尾流效应;若下游风力机 WT_i 部分处于上游风力机 WT_j 尾流区,则要计算 WT_j 对 WT_i 的偏尾流效应。

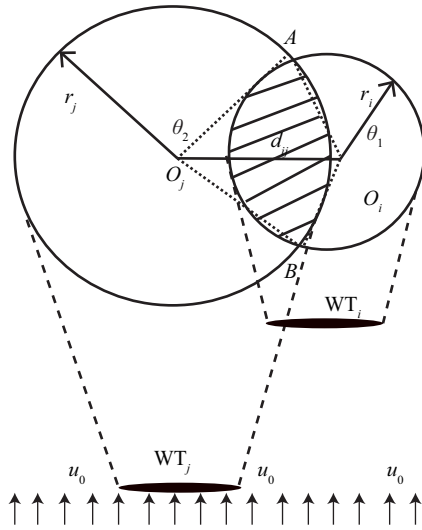


图2 2台风力机尾流相互干扰示意图

Fig. 2 Sketch of wake flow mutual interference between two turbines

针对全尾流效应,文献[19]给出4种尾流叠加计算模型:几何和模型、线性叠加模型、能量守恒模型以及平方和模型。Erik等[20]通过与 Garrad Hassan 风洞实验结果比较得出平方和模型精度优于其他模型。本文也采用平方和模型对多台风力机尾流进行数值模拟。

$$\left(1 - \frac{u_i}{u_0}\right)^2 = \sum_j^{N_T} \left(1 - \frac{u_{ij}}{u_j}\right)^2 \quad (24)$$

式中, u_i ——风力机 i 在轮毂高度处的风速 (u_j 同理); u_{ij} ——仅有第 j 台风力机的尾流影响时第 i 台风力机处的风速; N_T ——风力机数量。

针对偏尾流效应,下游风力机只有部分面积受到上游尾流的影响,因此需要对式(24)叠加尾流计算模型进行修正,由式(25)进行计算。

$$\left(1 - \frac{u_i}{u_0}\right)^2 = \sum_j \frac{A_{ij}}{\pi r_i^2} \left(1 - \frac{u_{ij}}{u_j}\right)^2 \quad (25)$$

$$A_{ij} = \begin{cases} \pi r_j^2, & d_{ij} \leq r_i - r_j \\ \frac{1}{2}(\theta_1 - \sin \theta_1) + \frac{1}{2}r_j^2(\theta_2 - \sin \theta_2), & r_i - r_j < d_{ij} \leq r_i + r_j \\ 0, & d_{ij} \geq r_i + r_j \end{cases} \quad (26)$$

$$\theta_1 = \angle AO_i B = 2 \arccos \left(\frac{r_i^2 + d_{ij}^2 - r_j^2}{2r_i d_{ij}} \right) \quad (27)$$

$$\theta_2 = \angle AO_j B = 2 \arccos \left(\frac{r_j^2 + d_{ij}^2 - r_i^2}{2r_j d_{ij}} \right) \quad (28)$$

式中, A_{ij} ——第 i 台风力机尾流区占第 j 台风力机尾流区所在平面上投影的面积; d_{ij} ——风力机 WT_i 和 WT_j 垂直来流方向轮毂之间的距离; θ_1 ——风轮与尾流影响截面的中心夹角 (θ_2 同理); r_i ——第 i 台风力机尾流半径 (r_j 同理)。

2 结果与分析

2.1 研究对象

本文选取两台 2 MW NM80 风力机为研究对象,分别采用新修正的 Park-Gauss 模型和 Park-polynomial 模型对两台风力机全尾流效应、偏尾流效应进行数值模拟。并与 Trolborg 等[7]用 LES 方法对两台风力机尾流数值模拟结果进行对比分析。风力机风轮直径 $D=80$ m, 轮毂高度 $z=75$ m, 粗糙度 $z_0=0.005$, 来流风速 $u_0=8$ m/s, 推力系数 $C_T=0.793$ 。

2.2 全尾流效应数值模拟

目前风电场类型主要有两大类,陆基风电场和海基风电场。由于风力机组所处环境不同,大气湍流强度也不一样,陆上风电场大气湍流强度要强于海上的。所以本算例中选用 $I_0=10\%$ 和 $I_0=5\%$ 两种湍流强度进行数值模拟。两台风力机相距 $\Delta x=3.3D$, 径向相距 $\Delta y=0.0D$, 此时下游风力机完全处于上游尾流区,对其全尾流效应进行数值模拟,并与 LES 数值结果对比分析。

经计算得各个尾流模型在风力机组尾流区轮毂高度处的风速 (U/U_0) 大小见表 1。

表1 尾流区轮毂高度处风速大小

Table 1 Velocity at the height of winds hub in wake region

工况		LES	Park	2D Jensen	Park-Gauss	Park-ploynomial
$\Delta y = 0.0D$,	$7.0D$	0.6571	0.8127	0.6255	0.6843	0.7190
$I_0 = 10\%$	$9.0D$	0.7600	0.8659	0.7317	0.7739	0.7988
$\Delta y = 0.0D$,	$7.0D$	0.5314	0.7112	0.4224	0.5132	0.5668
$I_0 = 5\%$	$9.0D$	0.6343	0.7964	0.5928	0.6568	0.6946
$\Delta y = 0.6D$,	$7.0D$	0.6772	0.7823	0.6011	0.6544	0.6804
$I_0 = 10\%$	$9.0D$	0.7829	0.8450	0.7174	0.7551	0.7678

从图3~图6分析可知：

1) Park 模型低估了全尾流效应, 风速比 LES 结果高。在大气湍流强度 $I_0 = 10\%$, 风力机组下游 $7.0D$ 、 $9.0D$ 处分别比 LES 结果高出 23.7%、13.9%；在大气湍流强度 $I_0 = 5\%$, 风力机组下游 $7.0D$ 、 $9.0D$ 处分别比 LES 结果高出 33.8%、25.6%。

2) 2D Jensen 模型高估了全尾流效应, 风速比 LES 结果低。在大气湍流强度 $I_0 = 10\%$, 风力机组下游 $7.0D$ 处与 LES 结果比较接近, 在 $9.0D$ 处比 LES 结果低于 3.7%；在大气湍流强度 $I_0 = 5\%$, 风力机组下游 $7.0D$ 、 $9.0D$ 处分别比 LES 结果高出 20.5%、6.5%。虽然 2D Jensen 模型结果低于 LES, 但在径向尾流趋势却有较大改善。

3) Park-polynomial 模型低估了全尾流效应, 风速要高于 LES 数值结果。在大气湍流强度 $I_0 = 10\%$, 风力机组下游 $7.0D$ 、 $9.0D$ 处分别比 LES 结果高出 9.4%、5.1%；在大气湍流强度 $I_0 = 5\%$, 风力机组下游 $7.0D$ 、 $9.0D$ 处分别比 LES 结果高出 6.7%、9.5%。

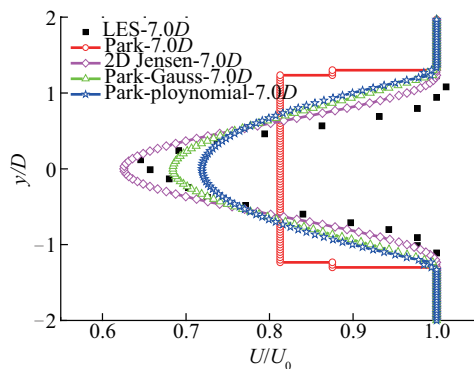


图3 混合尾流区在下游 $7.0D$ 处径向速度分布
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 10\%$)

Fig. 3 Cross-wind velocity distributions at $7.0D$ in the downstream of the mixed wake region
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 10\%$)

4) Park-Gauss 模型在全尾流区不仅风速大小, 而且在径向风速分布都与 LES 数值结果非常接近。

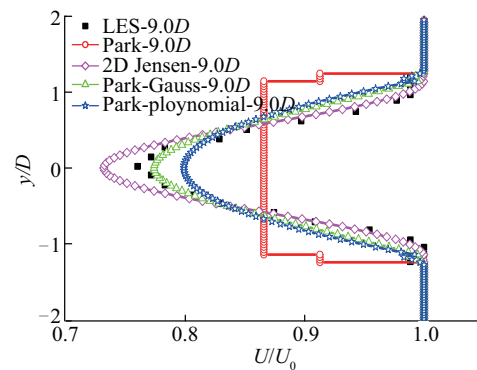


图4 混合尾流区在下游 $9.0D$ 处径向速度分布
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 10\%$)

Fig. 4 Cross-wind velocity distributions at $9.0D$ in the downstream of the mixed wake region
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 10\%$)

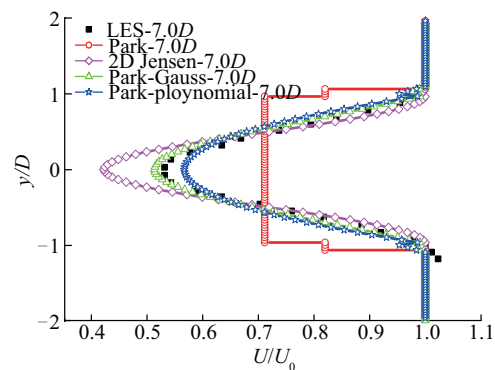


图5 混合尾流区在下游 $7.0D$ 处径向速度分布
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 5\%$)

Fig. 5 Cross-wind velocity distributions at $7.0D$ in the downstream of the mixed wake region
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 5\%$)

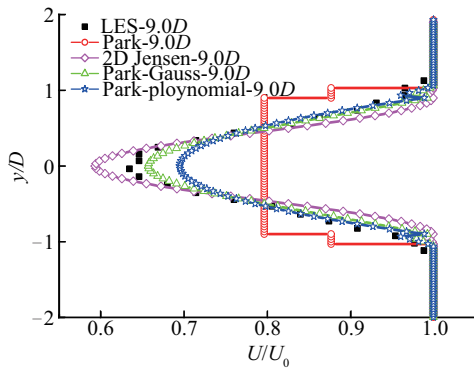


图6 混合尾流区在下游9.0D处径向速度分布
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 5\%$)

Fig. 6 Cross-wind velocity distributions at 9.0D in the downstream of the mixed wake region
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.0D$, $I_0 = 5\%$)

2.3 偏尾流效应数值模拟

本算例对两台风力机相距 $\Delta x = 3.3D$, 径向相距 $\Delta y = 3.3D$, 大气湍流强度 $I_0 = 10\%$ 风况下的偏尾流效应进行数值模拟, 并与 LES 数值模拟结果进行对比分析。结果如图 7、图 8 所示。

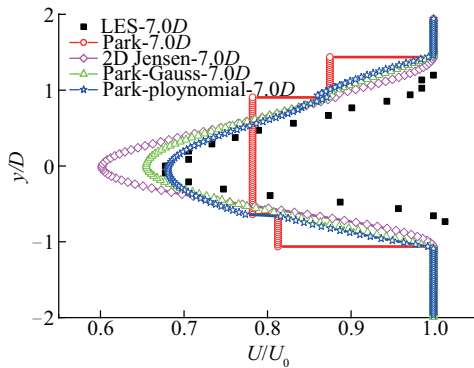


图7 混合尾流区在下游7.0D处径向速度分布
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.6D$, $I_0 = 10\%$)

Fig. 7 Cross-wind velocity distributions at 7.0D in the downstream of the mixed wake region
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.6D$, $I_0 = 10\%$)

由图 7、图 8 可知:

1) Park 模型低估了尾流效应, 风速都比 LES 数值结果大。在风力机组下游 7.0D、9.0D 处分别比 LES 结果高 15.5%、7.9%。

2) 2D Jensen 模型高估了尾流效应, 风速都比 LES 结果高。在风力机组下游 7.0D、9.0D 处分别比 LES 结果低 11.2%、8.4%。

3) Park-polynomial 模型与 LES 数值结果吻合较好。在风力机组下游 7.0D 处几乎与 LES 完全吻合, 在 9.0D 处也与 LES 结果较接近, 低于 LES 结果 2%。

4) Park-Gauss 模型结果稍稍低于 LES 数值结果。在风力机组下游 7.0D、9.0D 处分别比 LES 结果低 3.3%、3.5%。

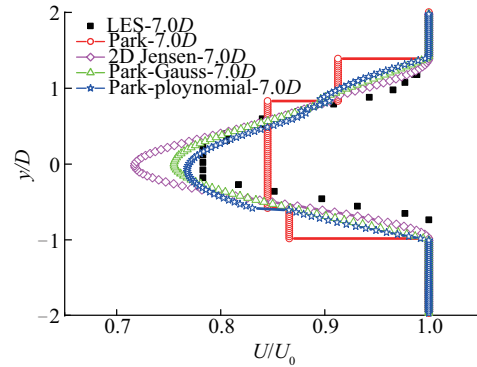


图8 混合尾流区在下游9.0D处径向速度分布
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.6D$, $I_0 = 10\%$)

Fig. 8 Cross-wind velocity distributions at 9.0D in the downstream of the mixed wake region
($\Delta x = 3.3D$, $\Delta y = 0.6D$, $I_0 = 10\%$)

3 结 论

本文基于 Park 模型尾流区线性膨胀假设、径向风速呈高斯分布和多项式分布假设, 提出两种新的修正工程尾流模型 Park-Gauss 模型和 Park-polynomial 模型, 并对两台风力机全尾流效应和偏尾流效应进行数值模拟研究。分别对 Park 模型、2D Jensen 模型、Park-Gauss 模型以及 Park-polynomial 模型进行对比研究。经过与 LES 数值结果比较, 得出以下结论:

1) 新修正的 Park-Gauss 模型可以很好的模拟全尾流效应, 其计算精度要优于 Park 模型、2D Jensen 模型以及 Park-polynomial 模型(精度较其他 3 种模型高约 20%、5% 及 8%);

2) Park-Gauss 和 Park-polynomial 模型均能较好地模拟偏尾流效应, 但 Park-polynomial 模型更优于前者(精度可提高约 3%);

3) 两种新的修正工程尾流模型在精度上不仅与 LES 结果接近一致而且在径向分布上也更符合真实流场。

[参考文献]

- [1] Vermeera L J, Sørensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2003, 39: 467—510.
- [2] Jeng D R, Keith T G, Alakbarkhanafteh A. Aerodynamic analysis of a horizontal axis wind turbine by use of helical vortex theory volume I: Theory[R]. Washington: NASA, 1982.
- [3] Dumitrescu H, Cardoso V. Predictions of unsteady hawt aerodynamics by lifting line theory[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2001, 33(4-5): 469—481.
- [4] Mads Bossing. Vortex lattice modelling of winglets on wind turbine blades[R]. Roskilde: Risø, 2007
- [5] Ott S, Berg J, Nielsen M. Linearised CFD models for wakes [R]. Technical Report from the Risø National Laboratory (Risø-R-1772), 2011.
- [6] Montavon C, Hui S Y, Graham J, et al. Offshore wind accelerator: Wake modelling using CFD[A]. Proceedings from the EWEA Offshore Conference[C], 2011.
- [7] Troldborg N, Larsen G C, Madsen H A, et al. Numerical simulations of wake interaction between two wind turbines at various inflow conditions[J]. Wind Energy, 2011, 14(7): 859—876.
- [8] Xue M, Droegemeier K K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)-A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. PartI: Model dynamics and verification[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2000, 75: 161—193.
- [9] 田琳琳. 风力机尾流数值模拟及风电场机组布局优化研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [9] Tian Linlin. Numerical simulation of wind turbine wakes and the study of wind farm layout optimization [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [10] Jensen N O. A note on wind generator interaction [R]. Technical Report from the Risø National Laboratory (Risø-M-2411), 1983, 5—14.
- [11] Katic I, Hojstrup J, Jensen N O. A simple model for cluster efficiency [A]. Proceedings from the European Wind Energy Conference[C], Rome, 1986, 1—4.
- [12] Barthelmie R J, Folkerts L, Larsen G C, et al. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(7): 888—901.
- [13] 田琳琳, 赵宁, 武从海. 风电场的机组布局优化研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35(3): 462—468.
- [13] Tian Linlin, Zhao Ning, Wu Conghai. Numerical analysis of the wind farm layout optimization [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2014, 35(3): 462—468.
- [14] Frandsen S, Chacén L, Crespo A, Measurements on and modeling of offshore wind farms [R]. Risø-R-903 (EN), Risø National Laboratory, Copenhagen, 1996.
- [15] Ishihara T, Yamaguchi A, Fujino Y. Development of a new wake model based on a wind tunnel experiment[R]. Global Wind Power, 2004.
- [16] Mittal A, Taylor L K, Sreenivas K, et al. Investigation of two analytical wake models using data from wind farms [A]. ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2011 [C], Denver, Colorado, US, 2011.
- [17] Politis E S, Prospathopoulos J, Cabezon D, et al. Modeling wake effects in large wind farms in complex terrain: The problem, the methods and the issues [J]. Wind Energy, 2011, 15(1): 161—182.
- [18] Bastankhah M, Porte A F. A new analytical model for wind-turbine wakes[J]. Renewable Energy, 2014, 70 (1): 116—123.
- [19] Schepers J G, Van der Pijl S P. Improved modelling of wake aerodynamics and assessment of new farm control strategies[J]. Journal of Physics: Conference, 2007, 75 (1): 012—039.
- [20] Erik D. Evaluation of the software program windfarm and comparisons with measured data from Alsvik [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2000.

NUMERICAL SIMULATION ANALYSIS OF MULTIPLE WIND TURBINE WAKE BASED ON TWO NEW MODIFIED ENGINEERING MODELS

Yang Xiangsheng, Zhao Ning, Tian Linlin

(Jiangsu Key Laboratory of Hi-Tech Research for Wind Turbine Design, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the linear expansion assumption of Park model in the wake region, radial wind speed with Gaussian distribution and polynomial distribution assumption, two new-modified engineering wake models, the Park-Gauss model and Park-polynomial model were proposed, and the numerical simulation research of full wake and partial wake effects for two wind turbines was conducted. The comparative study of the Park model, the 2D Jensen model, the Park-Gauss model and the Park-polynomial model was carried out, respectively. Through comparing with LES numerical results, the results show that the new modified Park-Gauss model can better simulate full wake effect, its calculation accuracy is superior to that of Park model, 2D Jensen model and Park-polynomial model. Both Park-Gauss model and Park-polynomial model can simulate well the partial wake effect, however, the Park-polynomial model is better than the former. The two new-modified engineering wake models not only in accuracy are close to the LES results, but also in the radial wind speed distribution is more consistent with the real flow field.

Keywords: wind turbine; Gauss distribution; polynomial distribution; engineering wake model; numerical simulation