

基于尾流风速场风速矢量计算的 风电场输出功率优化模型

葛维春^{1,2}, 李景瑞², 滕 云², 李家珏³, 张 涛³, 回 茜⁴

(1. 辽宁省电力有限公司, 沈阳 110004; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870;

3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006; 4. 国网辽宁电力有限公司电力科学研究院客户服务中心, 沈阳 110004)

摘 要: 针对尾流效应在风电机组之间产生影响的问题, 为了更加合理利用风能, 增加风场的输出功率, 在风场面积不变的前提下对风场内风电机组进行布局优化, 根据风场实际仿真数据训练建立尾流风速场风速矢量计算模型和尾流影响区域风速计算误差函数, 迭代计算尾流区域的风速矢量最优解; 然后, 基于改进粒子群算法对粒子群进行参数密度熵分簇优化, 对不同种群进行寻优, 计算出最优的风场布局排列, 提高计算机的计算效率; 最后, 通过CFD仿真对尾流风速矢量迭代模型及通过改进粒子群算法计算的风电机组布局进行仿真验证, 当输入风速矢量发生变化时, 模型能够计算出尾流效应区域的风速矢量, 仿真结果及分析证明模型和优化算法的正确性。

关键词: 风电; 风力涡轮机; 数值模型; 粒子群优化算法; CFD

中图分类号: TM614

文献标识码: A

0 引 言

优化风电场布局的主要目的是增加风场功率的输出, 提高能源的利用率^[1]。影响风力发电场的发电量的因素有风速、空气密度、尾流效应等^[2], 上游涡轮机的尾流效应干扰造成的生产损失, 称为尾流损失^[3], 尾流效应可使风电场的年发电量减少10%~20%。风场面积不变, 合理规划风场布局, 减小风电场投资成本回收周期是风场建设和改进的目标之一。因此, 合理的优化机组布局, 减小尾迹干扰造成的损失至关重要。

目前, 在研究平坦地形或海上风力发电机组的尾流效应时, 多采用 Jensen 模型来计算尾流效应; 相反, 在复杂地形的前提下, Lassiman 模型的使用更加普遍^[4], 本文则以海上风力发电机组尾流效应对风场出力的影响为研究对象, 文献[5]对 Jensen 模型进行优化改进, 通过考虑尾流边界处环境风场对于研究区域的渗透误差来优化模型。文献[6, 7]采用 Jensen 模型和 Lassiman 模型相结合的方法模拟尾流效应模型, 采用最基本的尾流效应计算方

法, 即使用经验公式对尾流风速分布进行估算, 文献[8~10]采用粒子群算法和高斯分布求解算法对模型进行优化。

如果在风速风向变化过程中风轮是运动的, 那么在尾流效应中所表现出来的就是尾流风速在整个尾流作用区域都是动态变化的^[11]。因此, 在风速矢量不断变化的情况下, 本文提出尾流风速矢量迭代模型, 建立计算点风速矢量和叶片输入风速矢量之间的误差函数, 考虑由空气黏度决定的静态尾流效应所占比例较大时, 通过迭代计算点的风速和风向最优值, 以减小迭代结果与实际尾流风速之间的误差为目标, 迭代计算尾流效应的计算风速大小和风向。根据风矢量的迭代计算可进一步将风轮和风速风向的变化进行解耦。在求解动态尾流风速时需已知相邻动态时刻的风速风向变化参数, 进行改变输入风矢量和计算点风矢量的迭代计算可得到这些变化参数, 根据迭代结束的结果就可得到计算点的风矢量。本文提出粒子群优化算法, 建立基于尾流风速矢量迭代模型的快速风场风力发电机组布局优化模型, 提高计算寻优的效率; 最后, 建立

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家电网公司科技项目(2018YF-06); 国家重点研发计划(2017YFB0902100)

通信作者: 滕 云(1973—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源发电、微网技术等方面的研究。tengyun.sut@163.com

风电机组和风场 CFD 仿真模型,对尾流风速矢量迭代模型及风场布局优化算计进行数值仿真分析。

1 尾流风速场风速矢量计算模型

实际风场的尾流风速和风向变化难以预知,但通过实际风场仿真数据,建立仿真数据与输入计算风速和风向之间的误差函数,迭代出误差最小时的尾流区域风速矢量的最优解,进而通过仿真结果验证当风速和风向发生改变时,通过模型计算的结果更加接近实际风场尾流风矢量。

定义:建立直角坐标系:以风轮圆心原点,风力发电机塔筒轴心线为 z 轴坐标,风轮圆周平面上经过原点且与塔筒轴心线垂直的直线为 x 轴坐标,以垂直于风力发电机圆周平面经过原点的直线为 y 轴坐标。现给出风速计算误差公式:

$$E(R, t) = \sum_{i=1}^n \left\| (I - \hat{V}_i)(Rp_i + t) \right\|^2 \quad (1)$$

式中, I ——单位矩阵; \hat{V}_i ——计算 i 点时的输入风速矩阵, $\hat{V}_i = \hat{v}_i \hat{v}_i^T / (\hat{v}_i^T \hat{v}_i)$, $\hat{v}_i = [u_i \quad v_i \quad m_i]^T$ 为计算 i 点时的输入风速在坐标系下的风速矩阵; p_i ——计算 i 点时风轮的转速; R 、 t ——迭代初始计算点的风速和风向。

$$t(R) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{V}_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n (\hat{V}_i - I) R p_i \quad (2)$$

其迭代过程开始时需要给一个初始的 R , 即可将初始风速设为输入风速值,然后再根据结合风力发电机转速迭代出风向 t ,再利基于 SVD 的绝对定向问题的最优解更新 R ,从而不断迭代更新 R 和 t 。

迭代停止的条件选择为目标函数小到一定程度,或目标函数的相对变化量小到一定程度,或达到预设的迭代次数上限。

为了方便后续的推导,首先引入一个矩阵计算的公式:

$$\text{vec}(ABC) = (C^T \otimes A) \text{vec}(B) \quad (3)$$

式中, vec 表示把一个矩阵按列堆栈成一个列向量, \otimes 表示 Kronecker 积。

对参考点进行零均值化:

$$p_i \leftarrow p_i - \bar{p} \quad (4)$$

式中, \bar{p} ——所有参考点的平均值。

根据式(2),利用式(3),有:

$$t = G_{3 \times 9} r \quad (5)$$

式中, $r = \text{vec}(R)$ 。

$$\begin{aligned} G &= \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{V}_j \right)^{-1} \sum_{j=1}^n [p_j^T \otimes (\hat{V}_j - I)] \\ &= \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \hat{V}_j \right)^{-1} \sum_{j=1}^n [p_j^T \otimes \hat{V}_j] \end{aligned} \quad (6)$$

对投影点进行规整:

$$\begin{aligned} o_i^k &= \hat{V}_i q_i^{(k)} = \hat{V}_i (R^k p_i + t^k) \\ &= (p_i^T \otimes \hat{V}_i + \hat{V}_i G) r^k = J_i r^k \end{aligned} \quad (7)$$

为了利用绝对定向最优解进行迭代,在每一迭代中需要计算矩阵:

$$\begin{aligned} M^k &= \sum_{i=1}^n (o_i^k - \bar{o}^k) p_i^T = \sum_{i=1}^n o_i^k p_i^T \\ &= \sum_{i=1}^n J_i r^k p_i^T \end{aligned} \quad (8)$$

式中, \bar{o}^k ——第 k 次迭代时所有投影点的平均值。设 $m^k = \text{vec}(M^k)$, 则根据式(8),有:

$$m^k = \sum_{i=1}^n (p_i \otimes J_i) r^k = B_{9 \times 9} r^k \quad (9)$$

从而确定了 M^k 。根据绝对定向最优解,对其进行奇异值分解有 $M^k = U D V^T$, 则:

$$R^{k+1} = U V^T \quad (10)$$

式(10)给出了正交迭代算法更新 R 矩阵的表达式,而式(9)中, B 矩阵可用式(11)在迭代开始之前求解出来。并且迭代过程中 B 矩阵是常矩阵。

$$\begin{aligned} B &= \sum_{i=1}^n (p_i \otimes J_i) = \sum_{i=1}^n (p_i \otimes (p_i^T \otimes \hat{V}_i + \hat{V}_i G)) \\ &= \sum_{i=1}^n (p_i \otimes p_i^T \otimes \hat{V}_i) + \sum_{i=1}^n (p_i \otimes \hat{V}_i G) \\ &= \sum_{i=1}^n (p_i \otimes p_i^T \otimes \hat{V}_i) + \sum_{i=1}^n (p_i \otimes \hat{V}_i) (I \otimes G) \\ &= \sum_{i=1}^n (p_i \otimes p_i^T \otimes \hat{V}_i) + \sum_{i=1}^n (p_i \otimes \hat{V}_i) (G) \end{aligned} \quad (11)$$

在迭代过程中,只需存储 B 矩阵,便可利用式(9)、式(10)对 R 进行迭代计算,迭代结束时输出 R_{out} ,最后再利用式(5)计算一次 t_{out} 。因为一开始对参考点进行了零均值化,所以最后再进行平移。最终输出 t 的公式为:

$$t_{\text{out}} \leftarrow t_{\text{out}} - R_{\text{out}} \bar{p} \quad (12)$$

显而易见,根据式(9)、式(10)加速后,每一次迭代过程中,求解 R 的计算复杂度为 $O(1)$,也就是常值。针对目标函数(1),有:

$$\begin{aligned}
E(R, t) &= \sum_{i=1}^n \left\| (I - \hat{V}_i)(R p_i + t) \right\|^2 \\
&= \sum_{i=1}^n \left\| (I - \hat{V}_i)(p_i^T \otimes I + G)r \right\|^2 \quad (13) \\
&= r^T C_{9 \times 9} r
\end{aligned}$$

式中,

$$C = \sum_{i=1}^n (p_i \otimes I + G^T)(I - \hat{V}_i)(p_i^T \otimes I + G) \quad (14)$$

式中, p_i 是零均值化后的 p_i 。可见 C 矩阵也可在迭代开始前计算, 在迭代过程中, C 矩阵保持不变, 从而根据式(13), 每一次目标函数的计算复杂度也为 $O(1)$ 。

综上所述, 只要在迭代开始前, 先计算 G , 然后再计算 B 和 C 矩阵。迭代过程中仅使用 B 和 C 矩阵, 利用式(9)、式(10)更新旋转矩阵 R , 利用式(13)计算目标函数, 所以每一次迭代的计算复杂度就为 $O(1)$, 从而可大幅减少迭代过程中的计算量。迭代结束后, 再利用式(5)、式(12)计算风向 t 即可, 叠加上最优的计算点风速大小和风向就能进行风场布局优化。

2 风场布局多种群粒子群优化模型

风场布局优化前提是能计算风力发电机尾流效应的影响区域^[12], 根据本文的尾流风速矢量迭代模型可对每台风力发电机进行尾流计算, 进而考虑尾流效应对风场布局进行优化。在实际的风电场, 所有相邻风力发电机之间都存在尾流效应的相互作用^[13], 但如果考虑所有风轮间的相互影响, 在应用本文提出的尾流风速矢量迭代模型进行整个风场的总尾流效应数值仿真时, 整个风场的数值模型尺度将达到 $2 \sim 10 \text{ km}^3$, 计算量将非常巨大, 且易导致计算过程无法收敛。因此, 在进行风场布局的粒子群优化模型建模时, 首先根据尾流风速矢量迭代模型计算结果进行风力发电机组分簇。将风场分成有限个区域面积不尽相同的子区域, 将区域内的风力发电机归为一个子种群, 且每个种群的风力发电机数量可能不同。

种群优化分簇步骤如下:

将风场内所有风力发电机编号 $1, 2, \dots, N_w$ 。以风电机组 1 为例: 将以塔筒为圆心, 4 倍叶片长度为半径的风电机组下游半圆区域所有的风电机组分为同一种群, 假设分簇结果 $1, j, j+1, j+2$; 一

次分簇后的剩余风力发电机, 从风电机组 2 开始, 按上述方法继续进行分簇, 以此类推, 直至所有风电机组都有所属的种群。

假设初始分簇结果分成 M 个种群, 每个编号为 $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_M$, 其中一个种群有 n 个风力发电机。定义每个种群中的风力发电机布局密度熵为:

$$H(n) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n H_j(n) \quad (15)$$

式中, $H_j(n) = \sum_{p=1}^n -z_{jp} \lg z_{jp}$; z ——计算点尾流风速。

种群内风力发电机间的尾流效应影响最小的密度熵应满足: $1.2 < H(n) < 2.0$ 。所以计算种群内风力发电机之间的密度熵时应满足 $1.2 < H(n) < 2.0$ 时结束此种群内的风电机组排布计算。当密度熵大于 2.0 时, 风力发电机间距离过大, 浪费空间, 采取减小距离方法; 相反密度熵小于 1.2 时, 彼此影响过大, 增加彼此间距; 满足密度熵要求时, 确定此种群为最优种群, 以此类推计算其他种群密度熵, 逐一求解每个种群的密度熵。然后对最优种群之间进行粒子群寻优排列。

通过模型计算出的尾流风速为输入量, 采用密度熵计算种群内部的粒子排列方式, 下面需要进行种群间的排列方式寻优, 采用经典的粒子群寻优算法对种群进行排列计算。具体如下: 每个种群的编号表示为: $Z_i = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_M)^T$, 初始分簇得到的种群位置即为位置初始输入条件, 位置转换速度为: $v_i = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_M)$, 输入初始转换速度为 0, 位置和位置转换速度公如式(16)、式(17), 每个种群整体以此来进行更新位置转换速度和位置更新。

$$v_i^{k+1} = v_i^k + c_1 \times \text{rand}_1^k \times (P_{\text{best}i}^k - x_i^k) + \quad (16)$$

$$c_2 \times \text{rand}_2^k \times (G_{\text{best}i}^k - x_i^k) \quad (17)$$

$$Z_i^{k+1} = Z_i^k + v_i^{k+1}$$

式中, c_1, c_2 ——学习因子, 可加快收敛, 减小出线局部最优的可能性; rand_1 和 rand_2 ——介于 $[0, 1]$ 之间的随机数; $P_{\text{best}i}^k$ ——种群在极值点的位置; $G_{\text{best}i}^k$ ——所有种群全局的极值位置找到最优的种群排列方式。最优排列的计算结束方式为种群亲和度判断, 判断方式如下:

定义: 选取第 n 和第 m 个种群之间的亲和

度为:

$$\alpha_{n,m} = \frac{1}{1+H(2)} \quad (18)$$

根据式(18)对排列的所有结果进行亲和度计算,通过对仿真结果的分析,本文给出 $\alpha_{n,m}=0.7$ 为亲和度指标。对每种排列的两两风力发电机亲和度值进行计算,如果所有亲和度 $\alpha_{n,m}>0.7$,计算停止。否则,重新计算,亲和度过低的 2 台风力发电机可能引起周围风向产生较大的变化,影响整个布局排列的正确性。

算法计算流程图如图 1 所示,其中 M 表示风场分簇后,将风场分为 M 个种群。

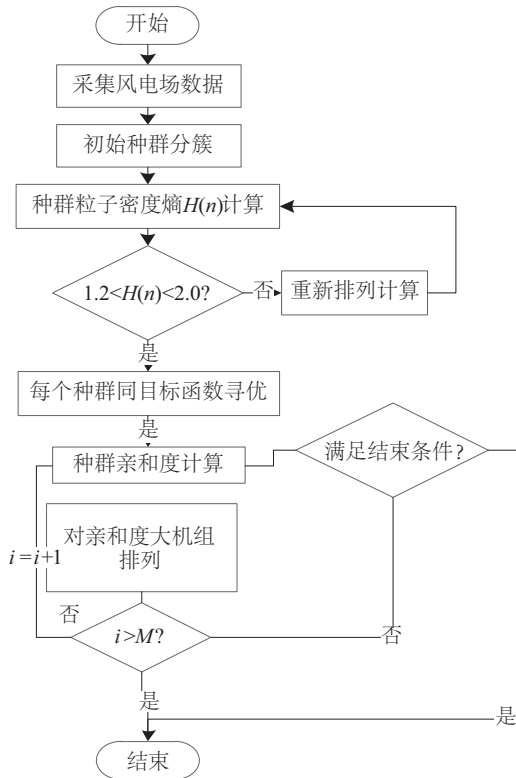


图1 算法计算流程

Fig. 1 Algorithm calculation flow

3 算例分析与仿真

以辽宁某风电场内 1.5 MW 风力发电机为例,此风场处于平原地带,风力发电机塔筒高度相同,叶片长度为 50 m、轮毂高度为 80 m 及额定容量为 1.5 MW 的风力发电机为例,选取此风场 1 号风力发电机,建立风力发电机数值仿真模型,并对模型进行入口出口设置,选择左端为风入口方向,右端

为风出口方向,不考虑叶片旋转变形。仿真结果如图 2 所示。

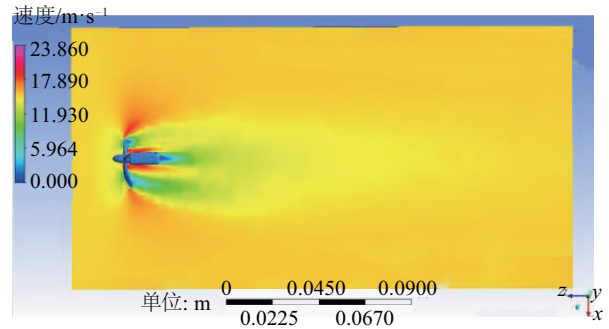


图2 单台风力发电机尾流风速仿真

Fig. 2 Wake wind speed simulation of a single wind turbine

由仿真得到的结果,可读取不同区域的风速大小和方向。将不同的风速进行对比总结,可清晰看到风力发电机下游尾流效应影响的区域以及尾流效应分布距离和区域形状。在 z 轴上,随着距离增加,风速非线性增加,在经过风力发电机叶片直径的 5 倍距离时,风电机组下游风场恢复到周围环境风速。选取此风场机组布局数据作为初始布局与优化布局进行仿真,图 3 为风电场的初始布局,共 25 台风力发电机,风力发电机参数与图 2 中模型一致,以左下角为坐标原点建立坐标系见图 3。

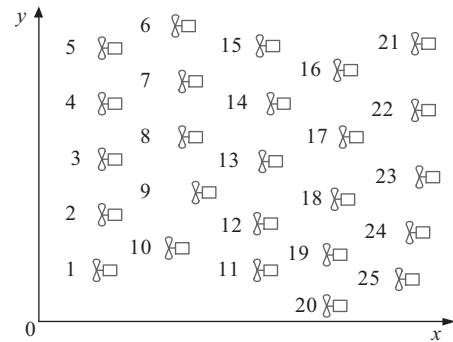


图3 风场初始布局

Fig. 3 Initial layout of wind field

已知某天风场风速曲线如图 4a 所示,风向曲线如图 4b 所示,初始风向为南风,曲线表示南偏西的方向。本文将尾流风速矢量迭代模型和经典的 Jensen 尾迹模型计算结果进行对比。在风速和风向不断变化的动态条件下,Jensen 模型假设风速和风向的变化为一系列分段函数^[14],即在某段时间是不变的,并在多个静态的环境下对尾流效应进行分析。本文提出的尾流风速矢量迭代模型在

风速风向变化过程中,对风速矢量进行迭代计算,有效提高风速风向动态变化过程中尾流效应的计算精度。

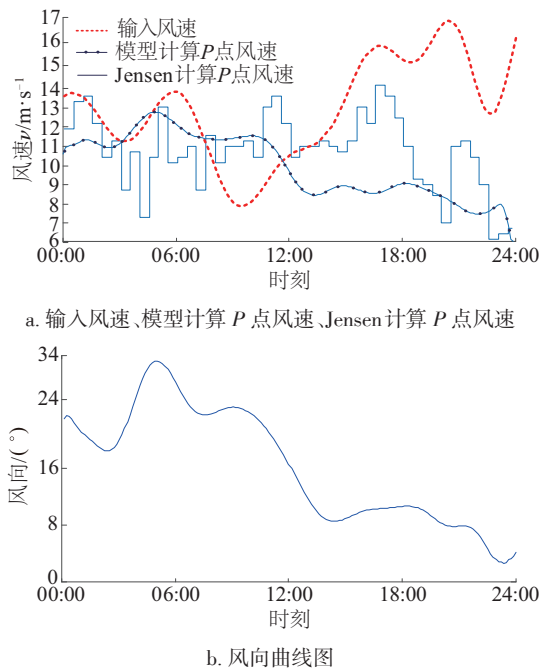


图4 输入风速、风向及模型计算曲线
Fig 4 Input wind speed, wind direction and model calculation curve

为了验证模型实时性和准确性,本文针对算例分析中风场,假设风向不变,风速变化曲线如图 4a,任意选取尾流效应区域内的一点作为尾流风速矢量计算点,此处选择计算 1 号风力发电机轴心下游距离 3 倍于叶轮面积直径 D 的位置点 P 的风速矢量。通过 Matlab 分别采用 Jensen 模型和全局尾流效应动态鲁棒估计模型进行 P 点风速矢量计算。得到结果如图 4a 所示。

尾流风速矢量迭代模型在误差最小的目标函数下迭代得到最优的风速矢量, P 点的风速值随时间平滑变化;Jensen 模型假设某段时间风速矢量不变为前提,认为尾流区域某切平面风速矢量都是相同的,所以在此时间尺度上,计算时间段上风速大小相同,在 06:00,环境风速和风向均发生了较大的变化,但在 15 min 之内,Jensen 模型输入风速无变化。此时, P 点位于下游尾流效应影响较大的区域, P 点风速较小;当进行下一次计算时, P 点位于尾流效应边缘,实测风速较大,导致 Jensen 模型计算时出现误差。

为了验证当风速大小发生变化时,模型计算同样具有准确性,在图 2 的单台风力发电机组有限元仿真中,同样选取 1 号风力发电机轴心下游距离 3 倍于叶轮面积直径 D 的位置点 P 为风速计算点,模型输入风速设置为图 4a 中变化的输入风速值,计算 P 点风速值。读取 P 点计算结果如图 5 所示。

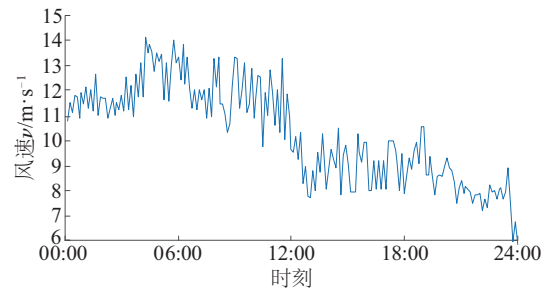


图5 P 点仿真风速结果
Fig. 5 Simulation results of wind speed P

通过计算曲线可看出,模型能在变化的风速下快速做出计算,具有实时性和准确性,拟合后曲线变化趋势与输入风速变化趋势一致。快速计算的准确结果可在时间尺度上保证尾流区域的正确判断,减小计算误差。模型计算的结果符合实际尾流效应风速。对于风场布局优化给出了更准确的尾流计算结果。

风力发电机编号建立直角坐标系方法同图 3,风力发电机编号固定不变。采用本文提出的模型计算尾流风速以及改进的多种群粒子群算法进行布局寻优。为了验证优化结果正确性,对优化结果进行 CFD 仿真,对优化前后风场等比例建模,风电机组设置输入风速为 5、10、13 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向设置为南风、东风以及西风。现读取 7 号、14 号、15 号仿真数据,并将数据记录在表 1 中。

表1 3 台风电机组仿真参数读取

Table 1 Three typhoon simulator parameters

风力发电机	下游恢复环境 风速距离 l/m	切入风速 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相邻单点影响 因数 $\chi/\%$
7 号	318	15.0	0
14 号	304	14.4	4.0
15 号	301	13.9	7.3

注:影响因数即下游受到尾流效应影响的风速损失在输入风速中的比例。

通过不同风速和风向的仿真结果表明,环境风速经过叶片后大小和方向均发生变化,风速减小明

显,优化后尾流效应的影响明显减小,验证了模型和优化结果的正确性,通过对输入风速和风向的改变多次仿真,结果显示优化后尾流效应影响均较原始布局减小。通过数据读取计算得到风电机组之间的风速场损失小于环境风速场的 10%,验证模型具有较好的普遍实用性。具体数据见表 2,不同风速和风向,相邻 2 个风力发电机之间影响最大的影响因数明显降低。

表 2 仿真结果参数读取			
Table 2 Simulation result parameter reading			
方向	相邻单点最大影响因数 $\chi/\%$		
	南风 (5 m/s)	东风 (10 m/s)	西风 (13 m/s)
前	10.1	11.2	10.9
后	4.5	5.2	5.6

仿真结果如图 6、图 7 所示,通过对模型进行不同风速、不同风向的仿真,表明原始布局方式易产生风阻,造成风力发电机组之间的风速滞留,导致更大的风速差,优化后的排列方式风速更加畅通,风阻更小,呈现较小的风速差。

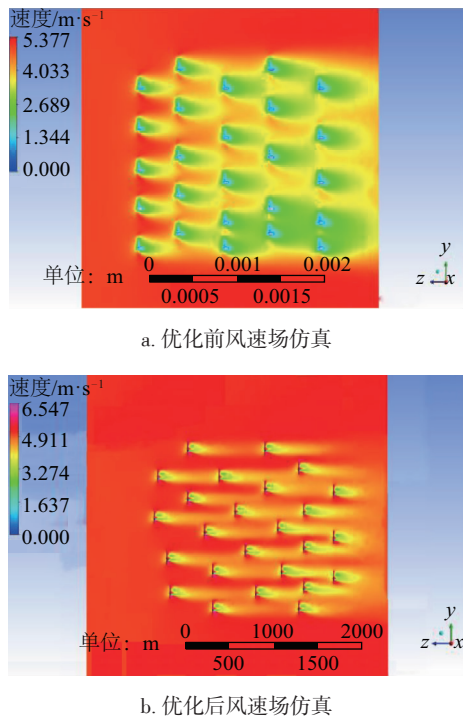


图6 5 m/s 南风仿真云图

Fig. 6 5 m/s south wind simulation cloud map

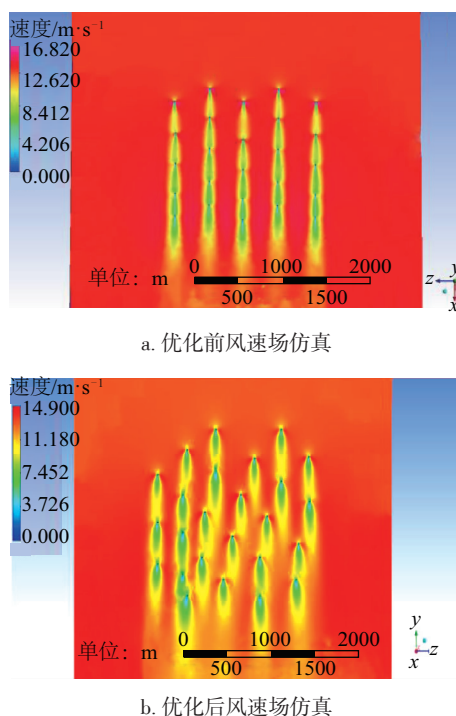


图7 13 m/s 西风仿真云图

Fig. 7 13 m/s westerly simulation cloud map

4 结 论

针对尾流效应对风电场功率预测有一定影响的问题,本文做了如下工作:

- 1) 提出尾流风速场风速矢量计算模型。建立尾流效应区域风速矢量计算误差函数,通过迭代计算出尾流风矢量。
- 2) 对粒子群算法分簇优化,分簇计算可减少计算机的计算量,提高计算机的处理速度,对每个种群进行亲和度优化排列,得到风场布局优化结果。
- 3) 通过仿真验证了优化尾迹模型的正确性,分析尾流仿真结果,实现风能更加合理的利用,减小尾流效应的影响。

[参考文献]

- [1] 张 扬. 风力发电技术概述[J]. 信息技术材料. 2017, 18(6): 9—10.
- [1] Zhang Yang. An overview of wind power technology[J]. Information Technology Materials, 2017, 18(6): 9—10.
- [2] 郭 辉, 岳良明, 王海文. 大型水平轴风力机风轮模型风洞试验[J]. 太阳能学报, 2018, 39(1): 253—257.

- [2] Guo Hui, Yue Liangming, Wang Haiwen. Wind tunnel test for rotor model of a large scale horizontal-axis wind turbine [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2018, 39 (1): 253—257.
- [3] Wilson J M, Davis C J, Venayagamoorthy S K, et al. Comparisons of horizontal-axis wind turbine interaction models [J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2015, 137(3): 031001-1—031001-8.
- [4] 张兆德, 张鑫文, 徐超. 大型风力机叶片气动噪声研究一种有效的支持向量机参数优化算法 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38(5): 1346—1353.
- [4] Zhang Zhaode, Zhang Xinwen, Xu Chao. Study of aerodynamic noise for large-scale wind turbine [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2017, 38(5): 1346—1353.
- [5] 李春曦, 李新颖. 叶片切割对轴流风机性能影响的数值研究 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(10): 183—190.
- [5] Li Chunxi, Li Xinying. Numerical study on the effect of blade cutting on axial fan performance [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (10): 183—190.
- [6] 刘洋, 吴国庆, 宋晨光. 1 kW 垂直轴风力发电机叶片静力分析 [J]. *南通大学学报: 自然科学版*, 2016, 15(3): 1—6.
- [6] Liu Yang, Wu Guoqing, Song Chenguang. Static force analysis of 1 kW vertical axis wind turbine blades [J]. *Journal of Nantong University: Natural Science Edition*, 2016, 15 (3): 1—6.
- [7] Bartl J, Pierella F, Sxtrana L. Wake measurements behind an array of two model wind turbines [J]. *Energy Procedia*, 2012, 24: 305—312.
- [8] 李彩林, 郭宝云, 季铮. 多视角三维激光点云全局优化整体配准算法 [J]. *测绘学报*, 2015, 44(2): 183—189.
- [8] Li Cailin, Guo Baoyun, Ji Zheng. Globally optimized global registration algorithm for multi-view 3D laser point cloud [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(2): 183—189.
- [9] Gao Xiaoxia, Yang Hongxing, Lu Lin. Study on offshore wind power potential and wind farm optimization in Hong Kong [J]. *Applied Energy*, 2014, 130(5): 519—531.
- [10] Wen Binrong, Wei Sha, Wei Kexiang. Power fluctuation and power loss of wind turbines due to wind shear and tower shadow [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12(3): 321—332.
- [11] 王慕华, 惠建忠, 唐千红, 等. 风电功率预测预报系统的设计与实现 [J]. *计算机与现代化*, 2013, (7): 224—227.
- [11] Wang Muhua, Hui Jianzhong, Tang Qianhong, et al. Design and implementation of wind power prediction and forecasting system [J]. *Computer and Modernization*, 2013, (7): 224—227.
- [12] 文晓庆, 柳阳威, 方乐, 等. 提高 $k-\omega$ SST 模型对翼型失速特性的模拟能力 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(8): 1127—1132.
- [12] Wen Xiaoqing, Liu Yangwei, Fang Le, et al. To improve the simulation capability of the $k-\omega$ SST model for airfoil stall characteristics [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39 (8): 1127—1132.
- [13] 刘小民, 赵嘉, 李典. 单圆弧等厚叶片前后缘多元耦合仿生设计及降噪机理研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 39(3): 1—10.
- [13] Liu Xiaomin, Zhao Jia, Li Dian. Multi-discrepancy bionic design and noise reduction mechanism for the front and rear edge of a single circular-arc thick blade [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 39 (3): 1—10.
- [14] 褚双磊. 用于轴流风机的轴流叶轮气动性能试验研究 [J]. *流体机械*, 2014, 42(4): 6—10.
- [14] Chu Shuanglei. Experimental research on the axial-flow impeller aerodynamic performance of the axial-flow fan [J]. *Fluid Machinery*, 2014, 42(4): 6—10.

WIND FARM SPEED OUTPUT VECTOR OPTIMIZATION BASED ON WAKE WIND VELOCITY FIELD CALCULATION

Ge Weichun^{1,2}, Li Jingrui², Teng Yun², Li Jiajue³, Zhang Tao³, Hui Qian⁴

(1. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110004;

2. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

3. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Electric Power Research Institute, Shenyang 110006, China;

4. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute Customer Service Center, Shenyang 110004, China)

Abstract: For the problem that the wake effect has an influence between the wind turbines, in order to make more rational use of the wind power and increase the output of the wind farm, the optimization method of the layout of wind turbines in the wind farm under the premise of constant wind farm area is proposed. Firstly, according to the actual simulation data of wind field, the wind speed vector calculation model of wake wind speed field and the wind speed calculation error function of wake area are established. The wind speed vector optimal solution of wake region is iteratively calculated. Then, based on the improved particle swarm optimization algorithm, the particle swarm is optimized by optimized parameter density entropy clusters and different populations. The optimal wind field layout is calculated and the computational efficiency of the computer is improved. Finally, this paper simulates the wake velocity vector iteration model and the wind turbine layout calculated by the improved particle swarm optimization algorithm through CFD simulation. When the input wind speed vector changes, the model can calculate the wind speed vector of the wake effect region. The simulation results and analysis prove the correctness of the model and the optimization algorithm.

Keywords: wind power; wind turbines; numerical models; particle swarm optimization(PSO); CFD