

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.02.017

# 基于遗传算法的风电场布置优化研究

谢寻晗, 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,  
E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn;)

**摘要:** 为了使得风电场的经济效益最大化, 风电场的发展趋向于大型化, 鉴于此, 有限区域内多台风力发电机的尾流不可避免地存在相互干扰, 而导致风电场的整体发电性能有所下降。与此同时, 考量风电场的经济效益也需要同时兼顾年发电量和经济成本。该文基于 Park 尾流模型和遗传算法, 首先以年发电量为单一优化目标, 讨论在 20 台风机规模的风电场中进行水平布置优化、垂直布置优化以及双重布置优化策略, 接着以风电场的年发电量和成本作为多重目标函数, 对风电场的轮毂高度进行垂直布置优化。结果表明, 垂直优化布置影响最大, 年发电量提升 2.7%, 水平布置优化下的提升较少, 双重优化策略可以降低功率输出的不均匀性。考虑建造成本后, 增加了优化方案选择的多样性。

**关键词:** 风电场; 布置优化; 轮毂高度; 风电成本**中图分类号:** U661.1**文献标志码:** A

## Wind Farm Layout Optimization Based on Genetic Algorithm

Xie Xunhan, 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:** In order to maximize the economic efficiency of wind farms, the development of wind farms tends to be large, and in view of this, the wake of multiple wind turbines in a limited area inevitably interferes with each other, which can make the overall power generation performance of the wind farm degraded. At the same time, the economic efficiency of wind farms needs to take into account both the annual power generation and the economic cost. In the paper, based on the Park wake model and genetic algorithm, the optimization strategies of horizontal arrangement, vertical arrangement and dual arrangement in a 20-turbine wind farm are firstly discussed with a single optimization objective of annual power generation, and then the vertical arrangement of the hub height of the wind farm is optimized with the annual power generation and cost as multiple objective functions. The results show that the vertical optimized arrangement has the greatest impact with a 2.7% increase in annual power generation, the increase under the horizontal arrangement optimization is less, and the dual optimization strategy can reduce the unevenness of power output. The diversity of optimization options increases after considering the construction cost.

**Key words:** Wind farms; Layout optimization; Hub height; Wind power cost

## 0 引言

面对日益严峻的能源问题和环保危机, 风电凭借其储量丰富且清洁可再生的优势, 逐渐成为能源开发方向的研究热点, 适当地发展和使用风力资源能够有效地解决目前资源短缺和传统能源而产生的环境污染问题。

为了使得风电场的经济效益最大化, 风电场的

发展趋向于大型化, 也正因如此, 有限区域内多台风力发电机的尾流不可避免地存在相互干扰, 产生十分明显的“尾流效应”。风力发电的本质是将来流风的动能转化为电能, 因此当来流风经过前排风机后, 风轮平面后的风速降低而湍流强度增加, 形成尾流区域, 当风机间距较小情况下, 会对位于尾流区域中后排风机的气动性能产生较大影响, 使风电场年发电量降低, 叶片疲劳载荷增大。在大型风电场中, 由于场区范围和成本的限制, 尾流效应造成的发电量损失可达10%~20%<sup>[1]</sup>。因此, 如何在风

**收稿日期:** 2022-12-05 **修改稿收到日期:** 2022-12-17**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(52131102)**作者简介:** 谢寻晗(1999—), 女, 硕士。

场中合理布置风力机,减少尾流效应的影响,提升风场整体发电效率是目前风电场的研究热点<sup>[2-3]</sup>。

为了减少尾流损失,提升风电场的产能,常常通过改变风力机组之间的距离来形成水平错列。此外,改变风力机轮毂高度可以避免后排风力机在变化的入流风向下形成串列式排布。因此,对风电场同时进行水平和垂直维度的优化布置研究具有重要意义。

水平布置优化策略是通过对风电场中各台风机的水平位置坐标进行错列排布,以减少尾流干扰。在过去数年中,许多研究人员对风电场水平布置优化问题进行了研究,希望可以得到一种普适的且不依赖于经验的布置优化方法。Mosetti等<sup>[4]</sup>结合物理实验与优化算法开展了风电场布置优化工作,基于Jensen的尾流衰减模型,以简化的成本模型计算投资成本,以单位千瓦成本最低作为优化目标,假设可能的涡轮机位置在10×10个网格中,通过遗传算法解决了风电场布局优化问题,以找到最佳的风力涡轮机数量和位置。Grady等<sup>[5]</sup>研究了风电场设计中的尾流衰减效应,他们通过修改GA设置,复制了Mosetti等<sup>[4]</sup>的实验,计算并发现Mosetti等<sup>[4]</sup>的研究中,由于遗传参数的选取导致并未得到真正的最优解。在此之后,许多学者通过使用不同的优化算法和尾流模型对风电场的布置优化开展了研究。如:Rivas等<sup>[6]</sup>以年发电量作为目标函数,基于模拟退火算法来进行海上风电场的优化布置;Salcedo-Sanz等<sup>[7]</sup>基于珊瑚礁优化算法,以年发电量为目标函数优化了海上风电场;Gao等<sup>[8]</sup>以多种群遗传算法为基础,优化了近海海上风电场布局,目标是成本最小。

垂直布置优化策略是指对风电场中各台风机的轮毂高度进行优化,改变轮毂高度会减少尾流的重叠面积,并可以增加风力,实现垂直方向上的错列排布。目前,关于考虑了具有不同轮毂高度风机的布置优化研究鲜有报道。Chowdhury等<sup>[9]</sup>首先提出了在水平布置优化的同时,进行不同轮毂高度风机的选择。后来,DuPont等<sup>[10]</sup>提出了一种先进的建模系统,用于使用扩展模式搜索(EPS)-多代理系统(MAS)方法优化具有多个风力涡轮机的风电场布局。Abdulrahman等<sup>[11]</sup>研究了考虑商业涡轮机选择和轮毂高度变化的风

电场布局优化。之后,MirHassani等<sup>[12]</sup>研究了使用具有不同轮毂高度的风力涡轮机对总功率的影响,他们根据多涡轮尾流效应的交互矩阵提出了一个精确的数学公式,并开发了一种新的混合-整数二次优化模型。此外,Wang等<sup>[13-14]</sup>基于风机的位置和轮毂高度对风电场布置优化进行了系统研究,发现通过改变轮毂高度可以对风电场的发电效益产生实质提升,这与Yang等<sup>[15]</sup>的结论相似。Yang等<sup>[15]</sup>认为,改变涡轮机轮毂高度特别适合将风力涡轮机选址在高密度电网中。Vasel-Be-Hagh等<sup>[16]</sup>对涡轮机周围的流动进行了大涡模拟(LES),结果证实优化轮毂高度是有益的,并且分析了尾流模型与LES结果。

综上所述,目前缺少在风电场内水平和垂直的布置优化策略对整体发电效益的敏感性分析。且考虑经济成本的研究大多集中于风电场的水平布置优化,然而采用垂直布置优化策略时,轮毂高度的改变将显著影响到风机的建造成本。基于此,本文使用Park尾流模型及多目标遗传算法,首先讨论在20台规模的风电场中,水平布置优化和垂直布置优化策略对年发电量提升效益程度,接着以风电场的年发电量和成本作为目标函数,对风电场的轮毂高度进行垂直布置优化。第一节介绍了采用的数值方法;第二节为算例设置;第三节为结果与分析,讨论了不同布置优化策略对风电场的提升效果,以及考虑成本的布置优化对风电场经济效益的提升;第四节为本文结论。

## 1 数值方法

### 1.1 尾流模型

Park尾流模型是一种基于动量守恒原理得到的一维尾流模型,由N. O. Jensen最早提出,并经过Katic等<sup>[17]</sup>的补充修正。模型假设尾流区域的截面速度呈均匀分布(顶帽分布),尾流区的速度损失大小与风机自身推力系数有关,尾流区的宽度呈线性扩张,扩张系数与地表粗糙度有关。

如图1所示,对于风轮盘面与下游距离 $x$ 位置处尾流截面,利用质量守恒定律可得

$$\rho\pi R^2 U_1 + \rho\pi(R_w^2 - R^2)U_\infty = \rho\pi R_w^2 U_2 \quad (1)$$

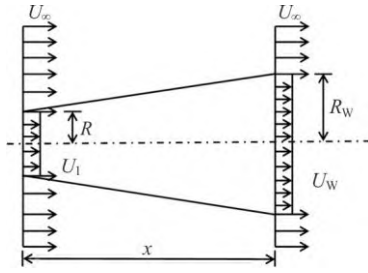


图1 Park 尾流模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of Park wake model

式中:  $U_\infty$ 为大气入流速度,  $R$ 为风力机半径,  $R_w$ 为下游距离 $x$ 处的尾流半径,  $U_w$ 为下游距离 $x$ 处的尾流速度。

由尾流线性扩张假设可以得到风力机下游距离 $x$ 处的尾流半径为

$$R_w = R + kx \quad (2)$$

式中:  $k$ 为尾流膨胀系数, 由地面粗糙度决定:  $k = 0.5/\ln(\frac{z}{z_0})$ , 式中 $z$ 为风力机轮毂高度,  $z_0$ 为地面粗糙度系数。实际工程中, 一般陆地情况下 $k$ 值取0.075, 海面情况下 $k$ 值取0.04~0.05。

基于一维动量定理, 推导得到尾流区压力恢复至大气压时的尾流速度与入流速度关系式为

$$U_2 = (1 - \alpha)U_\infty \quad (3)$$

式中:  $\alpha$ 为风轮轴向诱导因子, 是风轮推力系数 $C_T$ 的函数, 可表示为

$$\alpha = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \quad (4)$$

联立式(1)-式(4)可以得到尾流区位置 $x$ 处的尾流速度分布为

$$U = U_\infty \left[ 1 - \left( 1 - \sqrt{1 - C_T} \right) \left( \frac{R}{R + kx} \right)^2 \right] \quad (5)$$

## 1.2 风电场成本模型

对风电场的布局进行优化时, 除了年发电量以外, 在实际工程中也需要对风电场的成本进行评

估。Chen<sup>[18]</sup>提出了一个相对更准确的计算风电场成本的表达式, 该表达式基于JEDI模型(就业和经济发展影响)。在这个JEDI模型中, 考虑了各种各样的因素, 包括土地租赁成本、就业市场和劳动力成本<sup>[19]</sup>, 如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \text{cost}(H_0) = & -0.1539 \times P_r - 0.001 \times N + \\ & 2 \times P_r \times N + 0.2504 \end{aligned} \quad (6)$$

这个成本模型的单位是百万美元,  $P_r$ 为风机额定功率, 单位为 MW,  $N$ 为风机安装台数,  $H_0$ 为轮毂高度。由于在进行垂直布置优化时, 轮毂高度的变化将影响风电场成本中的建塔架造成本, 参考文献[11]指出假设每增加1 m的塔架, 将增加1/80的塔架成本, 因此总风力涡轮机成本增加约为1/200。不同轮毂高度( $H$ )的涡轮机的风电场成本可以由式(7)所得, 即有

$$\text{cost} = \text{cost}(H_0) \left[ 1 + \frac{1}{200} \left( \sum_{i=1}^N \frac{H_i - H_0}{N} \right) \right] \quad (7)$$

## 1.3 多目标遗传算法

在风电场的布置优化问题中, 通常以年发电量最大和经济成本最小作为优化目标, 然而这两个优化目标存在相互制约的关系。例如: 当采用垂直布局优化策略, 对风电场内风机的轮毂高度进行布置优化时, 随着轮毂高度的增大, 上层大气风速增大, 风场发电量增加, 但相应的成本将增加, 因此两个目标无法同时优化得到最优情况。针对这类包含多个存在冲突的目标函数的优化问题, 一方面可以通过将多目标转换成单目标进行解决, 但这存在一定局限性; 另一方面可以通过基于Pareto最优解的多目标优化算法, 如NSGA-II算法, 采用精英保留策略, 其可以对每个目标进行调和折中, 达到尽可能的最优解。优化流程如图2所示。

## 2 计算设置

### 2.1 风机信息

本节将以20台海装185-6.25MW型风机组成的大型风电场为例, 进行不同布置优化策略的计算分析。风力机的主要参数如表1所示。

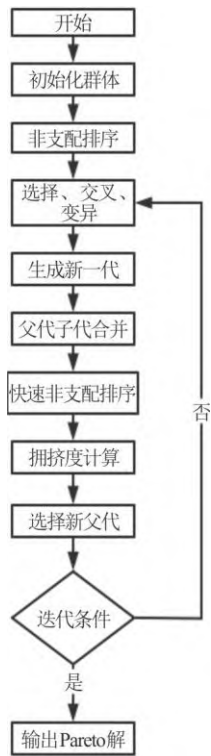


图2 多目标遗传算法流程图  
Fig.2 Multi-objective genetic algorithm flow chart

表1 海装 185-6.25MW 型风力机主要参数  
Table 1 The main parameters of wind turbine 185-6.25MW

项目	参数	单位
额定功率	6.25	MW
转子朝向	上风向	-
叶片数目	3	-
切入、切出风速	3.5, 25	m/s
轮毂高度	122.6	m
风机直径	185	m

### 2.2 风资源信息

该风电场的入风资源如图3所示，以风玫瑰图表示，可以简明得到风速和风向分布。通过测风塔可以得到观测点全年每小时的风速和风向数观察据。按照风向将这些数据分成 12 组，并对每组风向下的风速值进行威布尔拟合，得到不同风向下的威布尔分布函数，进而可以计算得到每一组风向和风速的概率。由此判断主风向。

考虑到风速沿高度分布的不均匀性，不同高度下的风力机的入流风速会有所不同，因此文中根据风剪切公式(式(8))，沿轮毂高度方向设定了不同的入流风速，具体入流风设置见表2。

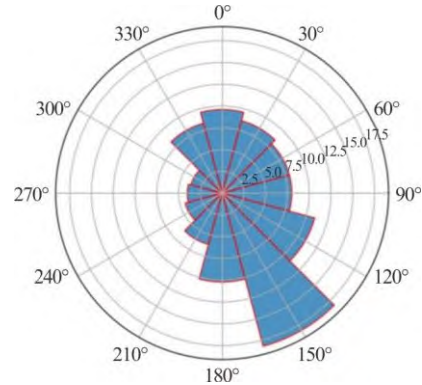


图3 (网上彩图) 风玫瑰图  
Fig.3 (Color online) Wind Rose Chart

$$\frac{V_1}{V_2} = \left( \frac{H_1}{H_2} \right)^a \tag{8}$$

表2 入流风设置  
Table 2 Inlet wind setting

湍流强度	风剪切指数	参考高度/m	参考风速/(m · s <sup>-1</sup> )
0.1	0.143	100	11.4

### 2.3 算例设置

为了研究不同布置优化策略的作用效果，以年发电量作为单一优化目标，分别对单一水平布置优化策略、单一垂直布置优化策略、同时采用水平和垂直优化布置策略以及无布置优化的四个算例分别进行模拟计算。同时，为了研究考虑经济成本的多目标优化策略的有效性，以年发电量和经济成本为双重优化目标，进行垂直优化布置研究。算例1作为未优化的基线组，其中风机垂直主风向进行成行成列的串列排布，根据Churchfield等<sup>[20]</sup>研究，取纵向间距为7D，横向间距4D，尽量减少尾流效应，其中D为风机直径。算例2对算例1的风电场进行了水平布置优化，考虑到实际工程中，风机组的布局常要求成行排列，因此对每排风机的行内间距进行优化布置，风场横向范围限制在3 950 km内；算例3对算例1的风电场进行垂直布置优化，根据白鹤鸣等<sup>[21]</sup>的研究，轮毂高度差在0.5D时，效果才较为明显，因此设定风机的轮毂高度在100 m至190 m之间选择；算例4对算例2的风电场进行垂直布置优化；算例5对算例1的风电场进行多目标优化，同时考虑年发电量与成本两个优化目标。对算例具体设置如表3。



表 3 计算算例  
Table 3 Calculation example

算例编号	优化目标	优化策略	水平布置	轮毂高度/m	纵向间距	横向间距
1	年发电量	未优化	串列排布	122.6	7D	4D
2	年发电量	水平优化	优化排布	122.6	7D	3D ~7D
3	年发电量	垂直优化	网格排布	100 /190	7D	4D
4	年发电量	水平、垂直优化	优化排布	100 /190	7D	3D ~7D
5	年发电量、成本	垂直优化	网格排布	100 /190	7D	4D

\*D 为风机直径

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同布置优化策略对比分析

图4(a)和图4(b)为算例1的风电场内布置图以及主风向(150°)下的速度云图, 年发电量为521.19 GW h。原始风电机组在布置上遵循于尽量与主风向垂直对齐的经验原则, 按照4×5成行成列串列排布, 为尽量减少尾流干扰效应, 横向间距设为4D, 纵向间距7D, 作为后续优化的基础布置。由图4(b)可以观察到, 正对风向的首排五个风机不受到尾流干扰, 而后排风机正好处于前排的尾流区域内, 受到湍流扰动的影响, 入流风速降低, 风机的功率输出减小。图4(c)展示了各台风机的年平均功率, 可以发现后排尤其是位于中部的风机受到影响很大, 其中年平均功率最大的是3 011 kW, 最小为2 941 kW。

图5、图6与图7分别为单一水平优化策略(算例2)、垂直优化策略(算例3)及双重优化策略下的风电场布置及计算结果。图8为不同优化策略下年发电量的对比。此外, 由于在全年中, 风机受到的入流风来自不同方向, 因此为直观观察尾流效应对后排风机的功率输出影响, 对比不同优化策略下的尾流损失情况, 选取主风向下的各排风机的归一化功率进行分析, 如图9所示。需要说明的是, 为了排除风的垂直梯度变化带来的功率影响, 算例3和算例4中使用各台风机在对应轮毂高度入流风速下的额定功率进行归一化。

在采用单一水平优化策略时, 以算例1的布局作为基准组, 对每排风机的行内间距进行优化, 以实现交错布局, 能使后排风机尽量远离前排尾流区域, 入流风速增大, 功率输出增加, 在单一风向下水平交错布局带来的提升更为显著(图5(b))。在根据算例1串列排布的情况下, 第三排和第四排尤其是

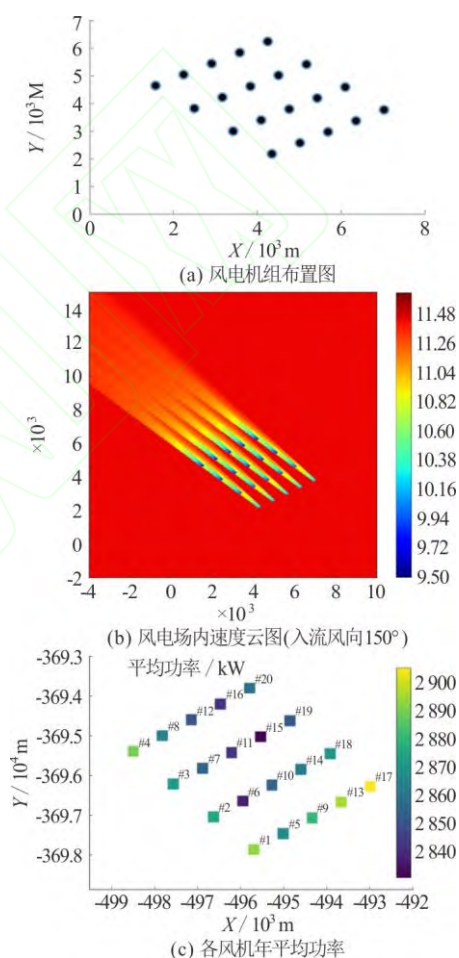


图 4 (网上彩图) 算例 1 计算结果  
Fig.4 (Color online) Calculation results of Example 1

中心位置处的风机通常是受到尾流效应影响最严重的区域(图9), 且尾流损失随着排数的增加而愈发严重。经过水平布置优化后, 相较于串列布置, 水平优化下第二排风机的功率输出显著增加, 尾流损失减少达5%; 第三排风机由于受到的大气环境更为复杂, 风轮盘面前入流风的湍流强度受前两排风机的尾流叠加的影响, 风机捕获的风力更少, 功率输出降低, 尾流损失程度较串列布置减少3%; 第四排风

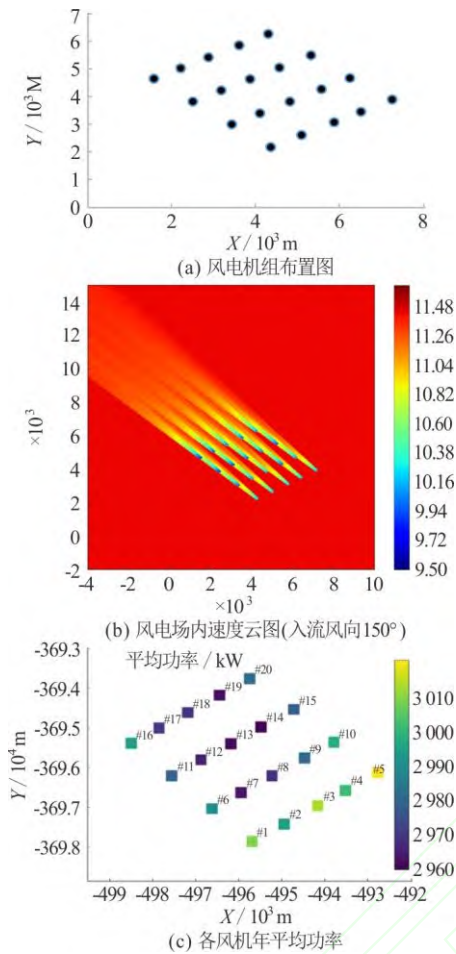


图5(网上彩图) 算例2 计算结果

Fig.5 (Color online) Calculation results of Example 2

机的功率输出反超过了第三排,这一方面是因为更多地错开了尾流区域,另一方面是因为湍流在向下发展的过程中,对尾流区与周围大气的能量交换,促进风速的恢复。尽管水平优化策略在单一风向,尾流损失的减少作用效果明显,但其整体的年发电量相较于串列布置并无较大增长(图8),这是因为在计算年发电量时,入流风的风向会发生变化,这导致在一些风向,风机组仍然会呈现串列排布,后排风机完全落在尾流区域内,导致风电场内尾流损失增大。

算例3仍然是基于算例1的布置采用单一垂直布置优化策略,对风机的轮毂高度进行了优化。在20台风机组中,10台轮毂高度取100 m,另外10台取190 m,并尽量均匀地分布在各排间,形成垂直交错,这样下游风机可以避免入流风速不足。可以发现,布置在高位的风机入流风速较大,功率输出明显增加(图6(b)和图6(c)),尽管仍然会受到前排风机的尾流影响,但仍然有着较高功率输出性能。

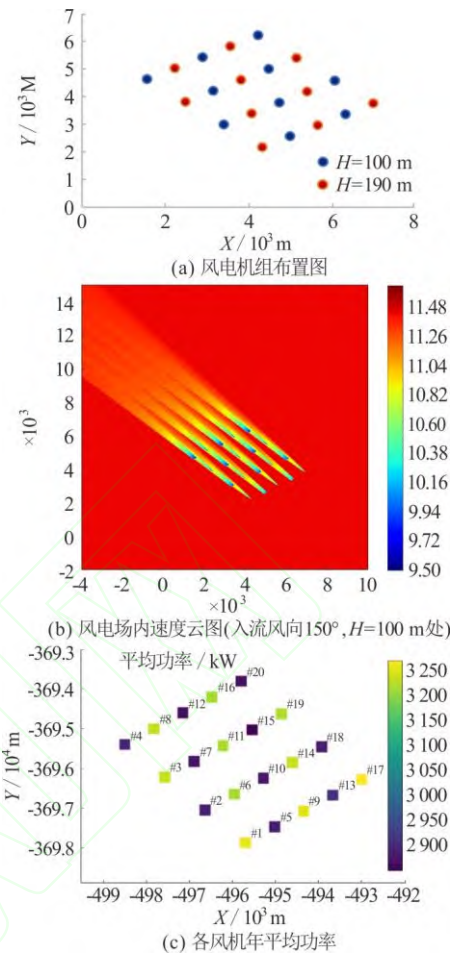


图6(网上彩图) 算例3 计算结果

Fig.6 (Color online) Calculation results of Example 3

与水平优化策略不同,垂直优化策略下的风电场整体年发电量有明显增长,增长率达2.7%(图8)。但在单一风向下的归一化功率却小于算例2,这是因为基于串列布置下的垂直优化,尽管轮毂高度之间的差值达90 m,但由于风机半径大于90 m,因此后排的风机无法避免地与前排尾流区域有所重叠,导致尾流损失较大。由于轮毂高度的增大,其入流风速依照指数分布增长,使得风机的输出功率显著增加,与算例1相比,风电场内最大功率增长8%涨至3 257 kW,但同时最小功率也下降3%至2 855 kW。这表明除了尾流效应带来的附加湍流影响外,风机的输出功率受大气入流风速的影响更大,通过垂直布置优化选取合适地点布置高位风机,可以在减少尾流损失的同时显著增加年发电量。

算例4对风电场进行了水平与垂直组合的双重优化。与单一优化策略相比较,在布置上水平优化的结果十分相似,垂直优化的布置规划也保持着数量上的

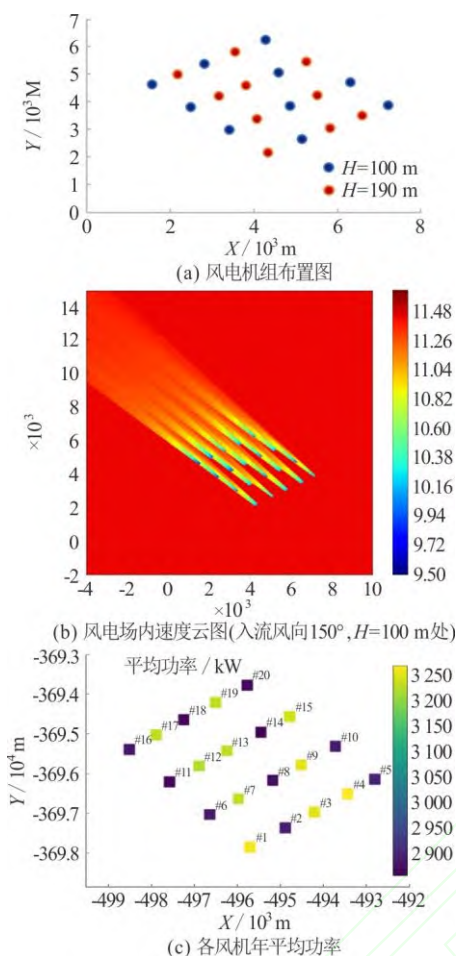


图7(网上彩图) 算例4计算结果

Fig.7 (Color online) Calculation results of Example 4

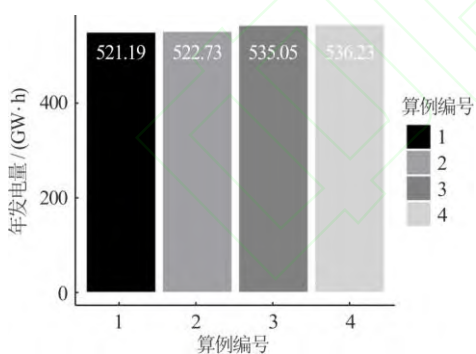


图8 不同优化策略下风电场的年发电量

Fig.8 Annual electricity production of wind farms under different optimization strategies

均匀分布,但在位置上发生了一些改动(图7(a))。可以发现,风电场内大部分风机均与前排尾流区域在不同维度上形成交错,受到的尾流干扰显著减少,入流条件得到明显改善,后排风机的功率输出提升(图7(b))。从图9中也可观察到,双重优化策略能够大大减少后排风机的尾流损失,与算例1相比,第四排风机的尾流损失差异达到了10%。但从发电量

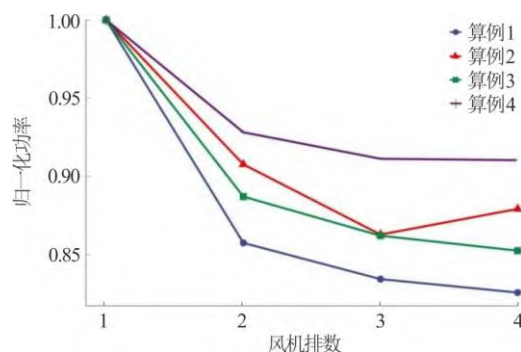


图9(网上彩图) 不同布置优化策略下的多台机组的平均归一化功率(入流风向150°)

Fig.9 (Color online) Average normalized power of multiple units with different layout optimization strategies (150 degrees in the incoming wind direction)

的角度来看,与算例3相比较仅从535.05 GW h增长到了536.23 GW h,这说明于单一垂直优化策略而言,对所增加其他优化策略并不敏感,这也代表在使用双重策略时,可以根据需求进行分步布局优化。

同时本文使用各台风机年平均功率的标准差来评估不同优化策略下风电场中风机功率输出的不均匀性,如表4所示。与未优化的风电场相比较,采取水平优化策略后,风机的最大功率与最小功率均有提升,同时输出功率的标准差降低,这说明水平优化策略能够使风电场内风机的功率输出更均匀;与此相反,当进行垂直优化策略时,风速的指数分布导致风机组产生较大的标准差,而采用组合的双重优化策略能够减少垂直优化带来的不均匀性。

表4 不同优化策略下的功率输出

Table 4 Power output under different optimization strategies

算例编号	最大功率/kW	最小功率/kW	标准差/kW
1	3 011	2 941	18.77
2	3 012	2 960	18.02
3	3 257	2 855	171.36
4	3 256	2 871	165.78

### 3.2 考虑经济成本的布置优化

度电成本是评估风电场经济效益的一个重要指标,成本由式(6)和式(7)计算。

$$\text{度电成本} = \text{年发电量} / \text{成本} \quad (9)$$

由于水平布置优化对风电场的风机成本影响较小,本节讨论采用垂直优化策略时,轮毂高度变化对风电场成本的影响。垂直优化策略下,尽管年



发电量更大,但由于轮毂高度的增加,导致风机的塔架成本上升,实际上度电成本反而大于未优化的布置(表5),因此需要进行考虑成本的多目标垂直布置优化策略。

表5 不同布置下的风电场度电成本

算例编号	年发电量/GW h	成本/ 百万元	度电成本/(元/(kW h))
1	521.19	1744.88	3.3479
2	522.73	1744.88	3.3380
3	535.05	1940.31	3.6264
4	536.23	1940.31	3.6184

为了实现经济效益最大化,年发电量更大,成本更低。在算例5中,基于多目标遗传算法,以年发电量和经济成本同时作为优化目标进行风电场的垂直布置优化。图10是算例5计算得到的Pareto前沿面,由一共21组Pareto解组成,每一个解都不会优于其他解,坐标轴分布代表两个目标函数。由图可知,一个目标值的增大会导致另一目标值减小,而Pareto解则是在两个存在冲突的目标函数间尽量最优的结果。

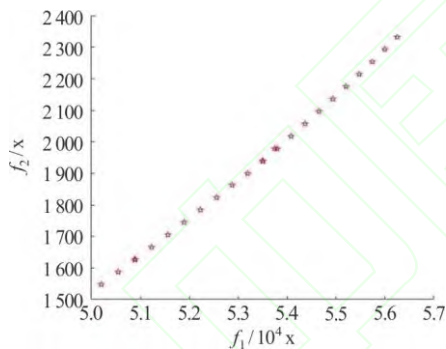


图10 (网上彩图) Pareto 前沿面  
Fig.10 (Color online) Pareto front surface

选取其中的三组解进行分析(表6),可以发现随着风电场内所布置的轮毂高度为190 m的风机的增多,年发电量上升的同时成本也增加,最终度电成本增大。此外,Pareto前沿面中也包含了算例3的计算结果,这说明多目标优化求解不是为了得到取最小度电成本时的布置优化,而是增加了选择最优垂直布置方案的多样性,保证在相同成本条件下,即风电场内风机轮毂高度数量分布相同时,该解所映射得到的垂直布置方案的年发电量最大。实际工程中,可以根据对年发电量和成本的要求,在Pareto解集中选取布置方案,以实现效率选型。

表6 算例5的垂直布置方案

方案 编号	年发电量 /(GW h)	成本/ 百万元	度电成本 /(元/(kW h))	轮毂高度 190 m 的风机个数
1	528.72	1861.53	3.520 9	8
2	535.05	1940.31	3.626 4	10
3	543.70	2057.80	3.784 8	13

## 4 结论

本文基于Park尾流模型和遗传算法,对不同优化策略下的风电场布置优化进行了对比分析。首先以年发电量作为单一优化目标,研究发现由于全年风向分布的不确定性,水平布置优化策略对整体年发电量的提升效果较小,但在单一风向下,能够明显减少后排风机尾流损失达到10%以上;而由于入流风的指数分布效应,轮毂高度提升时风速增大,因此垂直布置优化策略下,风电场的年发电量提升了2.7%,但同时风机功率输出的标准差增大;双重布置优化策略下,风机的尾流损失大大减少,同时可以削弱垂直布置优化策略带来的不均匀性。此外,进一步分析同时考虑年发电量和成本的垂直布置优化,可以增加布置方案的多样性,为实际工程中优化方案设计提供了不同选择。

## 参 考 文 献:

- [1] Cheng P, Wan D C, Hu C H. Numerical simulations of flows around floating offshore wind turbine [C]. *Proceedings of the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, Sapporo, Japan, 2018.
- [2] Wu Y T, Liao T L, Chen C K, et al. Power output efficiency in large wind farms with different hub heights and configurations [J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 941-949.
- [3] Vermeer L J, Sørensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics [J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39(6-7): 467-510.
- [4] Mosetti G, Poloni C, Diviacco B. Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1994, 51(1): 105-116.
- [5] Grady S A, Hussaini M Y, Abdullah M M. Placement of wind turbines using genetic algorithms [J]. *Renewable energy*, 2005, 30(2): 259-270.



- [6] Rivas R A, Clausen J, Hansen K S, et al. Solving the turbine positioning problem for large offshore wind farms by simulated annealing [J]. *Wind Engineering*, 2009, 33(3): 287-297.
- [7] Salcedo-Sanz S, Gallo-Marazuela D, Pastor-Sánchez A, et al. Offshore wind farm design with the coral reefs optimization algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 109-115.
- [8] Gao X, Yang H, Lu L. Study on offshore wind power potential and wind farm optimization in Hong Kong [J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 519-531.
- [9] Chowdhury S, Zhang J, Messac A, et al. Optimizing the arrangement and the selection of turbines for wind farms subject to varying wind conditions [J]. *Renewable Energy*, 2013, 52: 273-282.
- [10] DuPont B, Cagan J, Moriarty P. An advanced modeling system for optimization of wind farm layout and wind turbine sizing using a multi-level extended pattern search algorithm [J]. *Energy*, 2016, 106: 802-814.
- [11] Abdulrahman M, Wood D. Investigating the Power-COE trade-off for wind farm layout optimization considering commercial turbine selection and hub height variation [J]. *Renewable Energy*, 2017, 102: 267-278.
- [12] MirHassani S A, Yarahmadi A. Wind farm layout optimization under uncertainty [J]. *Renewable Energy*, 2017, 107: 288-297.
- [13] Wang L, Cholette M E, Fu Y, et al. Combined optimization of continuous wind turbine placement and variable hub height [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 180: 136-147.
- [14] Wang L, Cholette M E, Zhou Y, et al. Effectiveness of optimized control strategy and different hub height turbines on a real wind farm optimization [J]. *Renewable Energy*, 2018, 126: 819-829.
- [15] Yang Q, Hu J, Law S-s. Optimization of wind farm layout with modified genetic algorithm based on boolean code [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 181: 61-68.
- [16] Vassel-Be-Hagh A, Archer C L. Wind farm hub height optimization [J]. *Applied energy*, 2017, 195: 905-921.
- [17] Katic I, Højstrup J, Jensen N O. A simple model for cluster efficiency [C]. *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, Rome, Italy, 1987.
- [18] Chen Y. Commercial wind farm layout design and optimization [D]. Kingsville, the United States: Texas A&M University-Kingsville, 2013.
- [19] Golberg M, Sinclair K. Job and economic development impact (JEDI) model: A user-friendly tool to calculate economic impacts from wind projects [C]. *Global Windpower Conference*, Chicago, the United States, 2004.
- [20] Churchfield M J, Lee S, Michalakes J, et al. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics [J]. *Journal of Turbulence*, 2012(13): N14.
- [21] 白鹤鸣, 万德成, 王尼娜, 等. 大气边界层入流下错列排布三风机气动性能数值模拟 [J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2021, 36(1): 10-19.