



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116266258 B

(45) 授权公告日 2024. 07. 23

(21) 申请号 202211615132.6

F03D 7/04 (2006.01)

(22) 申请日 2022.12.15

G06F 111/04 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06F 111/10 (2020.01)

申请公布号 CN 116266258 A

G06F 113/06 (2020.01)

G06F 119/06 (2020.01)

(43) 申请公布日 2023.06.20

G06F 119/14 (2020.01)

(73) 专利权人 天津大学

(56) 对比文件

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

CN 111881572 A, 2020.11.03

(72) 发明人 徐宪东 李国浩 赵禹泽 宋长鹏

CN 107559143 A, 2018.01.09

张立栋

Jili Sun等.Multi-Objective Offshore

(74) 专利代理机构 北京中创博腾知识产权代理

Wind Farm Wake Redirection Optimization

事务所(普通合伙) 11636

for Power Maximization and Load

专利代理师 李艳艳

Reduction.《2022 American Control

(51) Int. Cl.

Conference (ACC)》.2022,第5235-5236-5237

G06F 30/28 (2020.01)

页.

H02J 3/38 (2006.01)

审查员 轩海珍

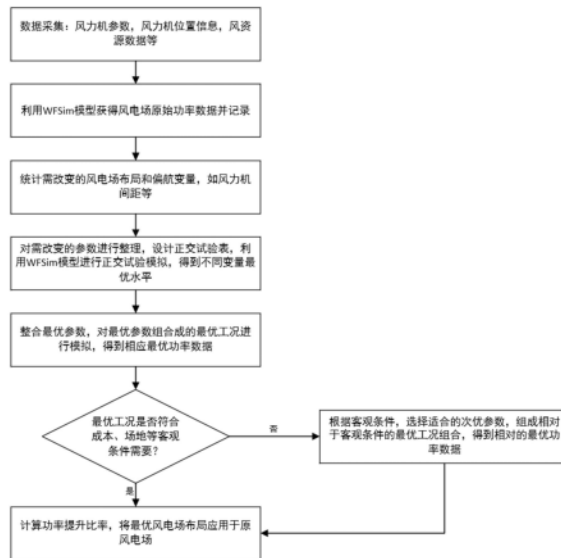
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种风电场排布、偏航控制方法及电子设备

(57) 摘要

本发明涉及一种风电场排布、偏航控制方法及电子设备,风电场排布、偏航控制方法包括以下步骤:获取风电场数据,并将所述风电场数据导入WFSim模型进行模拟,获得风电场原始功率数据,统计并记录可改善的风电场布置和偏航参数,并对需改变的变量参数进行调整,利用WFSim模型进行模拟,得到不同变量的最优参数范围并组合获得最优工况,利用WFSim模型进行模拟,得到最优功率数据。本发明所提供的风电场排布、偏航控制方法基于对风电场功率输出进行优化,信息采集十分便捷,同时通过采用WFSim二维中保真度模型对风电场进行模拟求解,可在保证数据准确性的同时减少模拟时间。



1. 一种风电场排布及偏航控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

获取风电场数据;

将所述风电场数据导入WFSim模型进行模拟,获得风电场原始功率数据;

统计并记录可改善的风电场布置和偏航参数;

对需改变的变量参数进行调整,根据所述参数进行正交试验,利用WFSim模型进行模拟,获得变量数值变化对风电场功率的影响趋势,得到不同变量的最优参数范围;

将所述不同变量的最优参数进行组合获得最优工况,再次利用WFSim模型进行模拟,得到最优功率数据;

判断所述最优工况是否能够应用于原风电场;

所述WFSim模型基于修正的二维 Navier-Stokes 方程和普朗特混合长度模型,

所述修正的二维 Navier-Stokes 方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_H) \mathbf{u} + \nabla_H \cdot \boldsymbol{\tau}_H + \nabla_H p - \mathbf{f} = \mathbf{0};$$

$$\nabla_H \cdot \mathbf{u} = -\frac{\partial v}{\partial y};$$

$\mathbf{u} = (u \ v)^T$  表示风力机的来流风速,  $\partial$  表示偏导数,  $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$  整体表示风速对时间求偏导数,

$u$  和  $v$  分别表示  $x$  和  $y$  方向上的风速,  $\frac{\partial v}{\partial y}$  表示  $v$  对  $y$  求偏导;  $t$  表示时间;  $T$  为矩阵转置符号;

$\nabla_H = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^T$ ;  $p$  表示压力场;  $f$  表示风力机对流量的影响;

所述风电场数据包括风力机参数、风力机位置信息、风资源信息、大气条件、风力机偏航设置信息;所述风力机参数包括叶轮直径  $D$ 、轮毂高度  $H$ 、推力系数曲线;所述风力机偏航设置信息包括偏航速率、偏航角度、偏航风机位置;

风力机使用致动器盘模型建模,具有偏航和轴向感应驱动。

2. 根据权利要求1所述的风电场排布及偏航控制方法,其特征在于,将混合长度参数化为:

$$l_u(x, y) = G(x'_n, y'_n) * l_u^n(x'_n, y'_n)$$

;

$$l_u^n(x'_n, y'_n) = (x'_n - d') l_s$$

$l_u(x, y)$  表示混合长度,  $n$  表示第  $n$  台风力机,  $G(x, y)$  表示一个半径为 3 的球盒滤波器, \* 是二维空间卷积算子,  $x'_n$  和  $y'_n$  被定义为平均风向, 约束为  $x'_n = \{x'_n: d' \leq x'_n \leq d\}$ ,  $y'_n = \{y'_n: |y'_n| \leq D\}$ , 设置  $|\varphi| \leq 45^\circ$ , 通过  $\cos(\varphi)d \leq |x_q - x_n|$  来约束  $d$ , 其中,  $d$ 、 $d'$  均为模型中人为设置的变量,  $D$  表示风力机转子直径,  $x_n$  为风力机的  $x$  坐标,  $x_q$  为下游风力机的  $x$  坐标, 将  $l_u^n(x'_n, y'_n)$  视为属于风力机  $n$  的局部混合长度,  $\varphi$  为平均风向与  $x$  轴的夹角,  $l_s$  为调谐参数, 该参数定义了局部混合长度参数的斜率。

3. 根据权利要求1所述的风电场排布及偏航控制方法,其特征在于,所述WFSim模型中,功率计算的方程为:

$$P = \sum_{n=1}^{\aleph} \frac{1}{2} \rho A C_{P_n} [u_n \cos(\gamma_n)]^3;$$

$A$ 表示转子面积,  $\rho$ 表示空气密度,  $C_{P_n}$ 表示功率系数,  $\aleph$ 表示风力机总数,  $u_n$ 为第 $n$ 个风力机来流风速,  $\gamma_n$ 为偏转角。

4. 一种电子设备, 其特征在于, 包括至少一个处理器及用于存储处理器可执行指令的存储器, 指令被处理器执行时实现包括权利要求1-3任一项所述的风电场排布及偏航控制方法。

## 一种风电场排布、偏航控制方法及电子设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及风电技术领域,具体为一种风电场排布、偏航控制方法及电子设备。

### 背景技术

[0002] 风能是一种清洁的可再生能源,提高风能等新能源资源的开发速度,可在一定程度上减少碳排放和防止能源危机问题。风力机的尾流效应导致风电场发电量出现了一定的损失,这通常能占到年度发电量的10%至20%。与此同时,由于尾流区内湍流强度较高,会导致下游风力机的来流风速降低,下游机组会出现疲劳载荷增加,进而导致风电场发电量降低、叶片和塔筒寿命降低。因此,在风电场的开发设计阶段进行布局优化是尽可能减少风电场中尾流影响的关键技术,其将直接决定风电场投产后的发电量,进而影响全生命周期的经济效益。

[0003] 风电场布局优化需考虑众多因素,并且这些因素之间多为非线性影响,导致风电场布局优化问题非常复杂,且准确性难以保证。因此,亟需一种快捷、高效、准确的风电场布局优化方法。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种风电场排布、偏航控制方法及电子设备,以削减尾流效应的影响,并可降低风力机的载荷和提高风电场功率输出。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供如下技术方案:一种风电场排布、偏航控制方法,包括以下步骤:

[0006] 获取风电场数据;

[0007] 将所述风电场数据导入WFSim模型进行模拟,获得风电场原始功率数据;

[0008] 统计并记录可改善的风电场布置和偏航参数;

[0009] 对需改变的变量参数进行调整,利用WFSim模型进行模拟,获得变量数值变化对风电场功率的影响趋势,得到不同变量的最优参数范围;

[0010] 将所述不同变量的最优参数进行组合获得最优工况,再次利用WFSim模型进行模拟,得到最优功率数据;

[0011] 判断所述最优工况是否能够应用于原风电场。

[0012] 作为优选方案,所述风电场数据包括风力机参数、风力机位置信息、风资源信息、大气条件、风力机偏航设置信息。

[0013] 作为优选方案,所述风力机参数包括叶轮直径D、轮毂高度H、推力系数曲线。

[0014] 作为优选方案,所述风力机偏航设置信息包括偏航速率、偏航角度、偏航风机位置。

[0015] 作为优选方案,对需改变的变量参数进行调整,根据所述参数进行正交试验,利用WFSim模型进行模拟。

[0016] 作为优选方案,所述WFSim模型基于修正的二维Navier-Stokes方程和普朗特混和

长度模型,所述修正的二维Navier-Stokes方程为:

$$[0017] \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_H) \mathbf{u} + \nabla_H \cdot \tau_H + \nabla_H p - f = 0$$

$$[0018] \quad \nabla_H \cdot \mathbf{u} = -\frac{\partial v}{\partial y}$$

[0019] 普朗特混和长度模型为:

$$[0020] \quad \tau_H = -\frac{1}{2} v_t (\nabla_H \mathbf{u} + (\nabla_H \mathbf{u})^T)$$

$$[0021] \quad v_t = l_u(x, y)^2 \left| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \right|$$

[0022]  $\mathbf{u} = (uv)^T$ , 表示风力机的来流风速,  $\partial$  表示偏导数,  $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$  整体表示风速对时间求偏导数,  $u$  和  $v$  分别表示  $x$  和  $y$  方向上的风速,  $\frac{\partial v}{\partial y}$  表示  $v$  对  $y$  求偏导;  $t$  表示时间;  $T$  为矩阵转置符号;

$\nabla_H = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^T$ ;  $p$  表示压力场;  $f$  表示风力机对流量的影响;

[0023]  $\nabla_H \mathbf{u}$  表示应变张量的二维速率,  $v_t$  表示涡流粘度,  $l_u(x, y)$  表示混合长度。

[0024] 将所述混合长度参数化为:

$$[0025] \quad l_u(x, y) = G(x'_n, y'_n) * l_u^n(x'_n, y'_n)$$

$$[0026] \quad l_u^n(x'_n, y'_n) = (x'_n - d') l_s$$

[0027]  $n$  表示第  $n$  台风力机,  $G(x, y)$  表示一个半径为 3 的球盒滤波器,  $*$  是二维空间卷积算子,  $x'_n$  和  $y'_n$  被定义为平均风向, 约束为  $x'_n = \{x'_n : d' \leq x'_n \leq d\}$ ,  $y'_n = \{y'_n : |y'_n| \leq D\}$ , 设置  $|\varphi| \leq 45$ , 通过  $\cos(\varphi)d \leq |x_q - x_n|$  来约束  $d$ , 其中,  $d, d'$  均为模型中人为设置的变量,  $D$  表示风力机转子直径,  $x_n$  为风力机的  $x$  坐标,  $x_q$  为下游风力机的  $x$  坐标, 将  $l_u^n(x'_n, y'_n)$  视为属于风力机  $n$  的局部混合长度,  $\varphi$  为平均风向与  $x$  轴的夹角。

[0028] 作为优选方案, 风力机使用致动器盘模型建模, 具有偏航和轴向感应驱动。

[0029] 作为优选方案, 所述 WFSim 模型中, 功率计算的方程为:

$$[0030] \quad P = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \rho A C_{P_n} [\mathbf{u}_n \cos(\gamma_n)]^3$$

[0031]  $A$  表示转子面积,  $\rho$  表示空气密度,  $C_{P_n}$  表示功率系数,  $N$  表示风力机总数。

[0032] 本发明还提供一种电子设备, 包括至少一个处理器及用于存储处理器可执行指令的存储器, 指令被处理器执行时实现包括上述任一方案所述的风电场排布、偏航控制方法。

[0033] 与现有技术相比, 本发明的有益效果是: 通过本发明所提供的风电场排布、偏航控制方法, 在有效削减尾流效应, 降低风力机的载荷和提高风电场功率输出的同时, 还包括以下有益效果:

[0034] 1) 本发明所提供的风电场排布、偏航控制方法基于对风电场功率输出进行优化, 信息采集十分便捷, 仅需采集风电场位置数据、风资源数据、大气条件数据、偏航控制数据、风力机参数数据, 相比于传统的风电场布局优化方法, 本发明数据处理用时较短;

[0035] 2) 本发明通过采用WFSim二维中保真度模型对风电场进行模拟求解,可在保证数据准确性的同时减少模拟时间。

[0036] 3) 本发明通过引入正交试验法可以大幅缩短模拟时长,快速得出合适的风力机位置和偏航方法。

### 附图说明

[0037] 图1为本发明风电场排布、偏航控制方法的流程示意图;

[0038] 图2为本发明中风力机非旋转致动器盘模型的示意图;

[0039] 图3为本发明实施例中的风电场布局图;

[0040] 图4为本发明实施例中不同参数下风电场平均功率的分布。

### 具体实施方式

[0041] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0042] 在本发明的描述中,需要理解的是,术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“顶”、“底”、“内”、“外”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本发明和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本发明的限制。

[0043] 参见图1,本发明公开了一种基于优化风电场功率输出的风电场排布、偏航控制方法,包括以下步骤:

[0044] 步骤一:获取当前的风电场原始数据,风电场数据包括风力机参数,风力机位置信息,风资源信息,大气条件,风力机偏航设置信息等。所述风力机参数包括但不限于:叶轮直径 $D$ ,轮毂高度 $H$ 以及推力系数曲线等。所述风力机偏航设置信息包括但不限于:偏航速率,偏航角度,偏航风机位置等。

[0045] 步骤二:将获得的风电场原始数据导入WFSim模型进行模拟,获得风电场原始功率数据,并进行记录。

[0046] 步骤三,统计并记录可改善的风电场布置和偏航参数。

[0047] 步骤四,对需改变的变量参数进行调整,设计正交试验表,利用WFSim模型进行正交试验模拟。获得变量数值变化对风电场功率的影响趋势,得到不同变量的最优参数范围。

[0048] 由于风力机布局优化所涉及变量较多,对各个变量组成的所有工况进行研究所需试验数较多,可达上千次。引入正交试验法可以大幅缩短模拟时长,快速得出合适的风力机位置和偏航方法。

[0049] 步骤五,将不同变量的最优参数进行组合获得最优工况,再次利用WFSim模型进行模拟,得到最优功率数据。

[0050] 需要指出的是,传统风电场布局优化方法所采用的模型多为三维模型,相比于二维模型,模拟时间大大延长。而海上风电场的风力机多处于同一水平线,因此,采用WFSim二

维中保真度模型对风电场进行模拟求解,可在保证数据准确性的同时减少模拟时间。

[0051] 步骤六,根据成本、场地等客观原因,判断最优工况组合是否符合实际需求。若符合需求,即可将所得最优数据应用于原风电场。若不符合需求,则根据试验所得变量对风电场功率影响趋势选择相对于客观条件得最优工况组合,进而运用于原风电场,达到优化目的。

[0052] 上述方法中提及的各模型信息参见下述介绍:

[0053] 1.WFSim模型,该模型采用了基于修正后的二维Navier-Stokes方程和普朗特混和长度模型的动态风电场模型,称为WindFarmSimulator(WFSim)。二维N-S方程对忽略的垂直尺寸进行了部分修改。

[0054] 二维N-S方程为:

$$[0055] \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla_H) \mathbf{u} + \nabla_H \cdot \boldsymbol{\tau}_H + \nabla_H p - f = 0$$

$$[0056] \quad \nabla_H \cdot \mathbf{u} = -\frac{\partial v}{\partial y}$$

[0057] 其中, $\mathbf{u} = (uv)^T$ ,表示风力机的来流风速, $\partial$ 表示偏导数, $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}$ 整体表示风速对时间求偏导数, $\mathbf{u}$ 和 $v$ 分别表示 $x$ 和 $y$ 方向上的风速, $\frac{\partial v}{\partial y}$ 表示 $v$ 对 $y$ 求偏导; $t$ 表示时间; $T$ 为矩阵转置符号; $\nabla_H = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)^T$ ;  $p$ 表示压力场; $f$ 表示风力机对流量的影响; $\boldsymbol{\tau}_H$ 为普朗特混和长度模型,表示为:

$$[0058] \quad \boldsymbol{\tau}_H = -\frac{1}{2} v_t (\nabla_H \mathbf{u} + (\nabla_H \mathbf{u})^T)$$

$$[0059] \quad v_t = l_u (x, y)^2 \left| \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} \right|$$

[0060] 其中, $(\partial/\partial x, \partial/\partial y) \cdot \mathbf{u} = (\partial \mathbf{u}/\partial x, \partial \mathbf{u}/\partial y)$ 表示风速 $\mathbf{u}$ 对 $x$ 求偏导和对 $y$ 求偏导组成的矩阵, $\nabla_H \mathbf{u}$ 表示应变张量的二维速率, $v_t$ 表示涡流粘度, $l_u(x, y)$ 表示混合长度。每个线段都有自己的 $(x'_n, y'_n)$ 坐标系,位于全局 $(x, y)$ 坐标系中。将混合长度参数化为:

$$[0061] \quad l_u(x, y) = G(x'_n, y'_n) * l_u^n(x'_n, y'_n)$$

$$[0062] \quad l_u^n(x'_n, y'_n) = (x'_n - d') l_s$$

[0063] 其中, $n$ 表示第 $n$ 台风力机, $G(x, y)$ 表示一个半径为3的(平滑)球盒滤波器,\*是二维空间卷积算子, $x'_n$ 和 $y'_n$ 被定义为平均风向,约束为 $x'_n = \{x'_n: d' \leq x'_n \leq d\}$ ,  $y'_n = \{y'_n: |y'_n| \leq D\}$ 。此外,我们设置 $|\varphi| \leq 45$ ,并通过 $\cos(\varphi)d \leq |x_q - x_n|$ 来约束 $d$ 。其中, $d, d'$ 均为模型中人为设置的变量, $D$ 表示风力机转子直径。 $x_n$ 为风力机的 $x$ 坐标, $x_q$ 为下游风力机的 $x$ 坐标,并将 $l_u^n(x'_n, y'_n)$ 视为属于风力机 $n$ 的局部混合长度, $\varphi$ 为平均风向与 $x$ 轴的夹角。

[0064] 综上,在对湍流模型进行调整时,仅需调整所述 $l_s, d, d'$ 三个调节变量,降低了操作繁琐度,其中, $l_s$ 为调谐参数,该参数定义了局部混合长度参数的斜率。

[0065] 2. 风力机非旋转致动器盘模型(ADM):本方法中,每个风力机都使用致动器盘模型(ADM)建模,并具有偏航和轴向感应驱动。利用此模型,风力机施加的影响表示为:

$$[0066] \quad f = \sum_{n=1}^n \frac{c_f}{2} C'_{T_n} [\mathbf{u}_n \cos(\gamma_n)]^2 \begin{pmatrix} \cos(\gamma_n + \varphi) \\ \sin(\gamma_n + \varphi) \end{pmatrix} \times H \left[ \frac{D}{2} - \|s - t_n\|_2 \right] \delta[(s - t_n) \cdot \mathbf{e}_{\perp, n}]$$

[0067] 其中,  $c_f$  视为模型中的一个变量,  $u_n$  为上文所述风力机来流风速,  $\gamma_n$  为偏转角,  $\varphi$  平均风向与x轴的夹角,  $s$  为所设一矩阵,  $s = (x, y)^T$ , 表示风力机坐标;  $D$  表示风力机直径;  $H[\cdot]$  表示Heaviside函数,  $\delta[\cdot]$  表示Dirac $\delta$ 函数,  $\mathbf{e}_{\perp, n}$  是垂直于位置为  $t_n$  的第  $n$  个转子盘的单位矢量。  $C'_{T_n}$  为盘的推力系数, 可以使用以下关系式表示:

$$[0068] \quad C'_{T_n} = C_{T_n} / (1 - a_n)^2$$

[0069] 其中,  $a_n$  为第  $n$  个风力机的轴向感应系数, 基于盘的推力系数  $C'_{T_n}$ , 可用经典推力系数  $C_{T_n}$  表示。在WFSim模型中,  $C'_{T_n}$  和  $\gamma_n$  被视为控制变量, 因此可用于调节尾迹, 从而调节风电场性能。

[0070] 3. 功率计算模型: 在WFSim模型中, 有关功率计算的方程为:

$$[0071] \quad P = \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} \rho A C_{P_n} [\mathbf{u}_n \cos(\gamma_n)]^3$$

[0072] 其中  $A$  表示转子面积,  $\rho$  表示空气密度,  $C_{P_n}$  表示功率系数,  $N$  表示风力机总数。

[0073] 4. 偏航速率确定方法: 本方法在偏航控制方面包含了风力机最优偏航速率的确定, 并将偏航速率确定方法规定如下:  $\omega = \gamma / t$

[0074] 其中,  $\omega$  为偏航速率,  $\gamma$  为偏航角度,  $t$  为风力机偏航过程用时。

[0075] 关于风力机非旋转致动器盘模型 (ADM) 请参见图2, 其中,  $U$  代表来流风速,  $\gamma$  代表偏航角度,  $\varphi$  代表风速与x轴夹角,  $f$  代表风力机施加的影响。

[0076] 为便于理解, 下面进一步结合实施例以详细说明本发明, 同样应理解, 以下实施例只用于对本发明进行进一步说明, 不能理解为对本发明保护范围的限制, 本领域的技术人员根据本发明的上述内容作出的一些非本质的改进和调整均属于本发明的保护范围。

[0077] 本实施例中, 构建一个由18台风机组成的大型风电场, 该大型风电场进一步由两个小型风电场组成。风电场布局请参见图3。

[0078] 本实施例中, 所采用的风力机为NREL 5MW风力机, 基础布局和偏航设置为  $x_{xt} = 6.0D$ ,  $x_{wf} = 12.0D$ ,  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\omega = 0.0122 \text{ rad/s}$ ,  $n = L1 + L4$ 。其中,  $x_{xt}$  表示盛行风向下风力机纵向间距,  $x_{wf}$  表示风电场间距,  $\gamma$  表示偏航角度,  $\omega$  表示偏航速率,  $n$  表示偏航风力机位置,  $D$  表示风力机转子直径。其它变量在此次举例中不做更改。利用WFSim模型模拟得到平均功率数据为31.129MW。随后对所述变量进行更改, 并设计正交试验表, 进行正交试验, 探究所述变量对风电场平均功率输出的影响。正交试验参数见表1。

[0079]

	A ( $x_{xt}$ )	B ( $x_{wf}$ )	C ( $\gamma$ ) [°]	D ( $\omega$ ) [rad/s]	E ( $n$ )	F (空列)
1	4.5D	9.0D	5	0.00698	L1 L2	
2	5.0D	10.0D	10	0.00873	L1 L4	
3	5.5D	11.0D	15	0.0105	L1 L5	
4	6.0D	12.0D	20	0.0122	L2 L4	
5	6.5D	13.0D	25	0.014	L2 L5	
6	7.0D	14.0D	30	0.0157	L3 L4	
7	7.5D	15.0D	35	0.0175	L3 L5	

[0080] 其中,基于现有技术,风力机纵向间距应在3-8D范围内,风电场间距应大于风力机纵向间距,因此,我们将风力机纵向间距研究范围定为4.5D-7.5D,风电场间距研究范围定为9D-12D。偏航角度在超过35°时,风力机所接收到的风速会有大幅度的缩减,且会加大风力机载荷,对风电场平均功率输出和风力机寿命有较大影响,因此选择在5-35°范围内进行研究。0.00698-0.0175rad/s的偏航速率对应风力机每秒偏转0.4-1.0°,过小的偏航速率会导致偏航时间的增加,进而导致偏航对尾流效应的削减更晚到达下游风机,而过大的偏航速率会加大风力机的水平受力,从而影响风力机寿命,因此选择0.00698-0.0175rad/s的偏航速率范围进行研究。

[0081] 根据所述参数设置进行正交试验,得到正交实验结果如表2所示:

[0082]

试验号	A 风机纵向	B 风电场间	C 偏航角度	D 偏航速率	E 偏航风机	F 空白	平均功率 (MW)

[0083]

	间距	距	(°)	(rad/s)	位置		
1	1	1	1	1	1	1	30.100
2	1	2	3	4	5	6	30.693
3	1	3	5	7	2	4	32.942
4	1	4	7	3	6	2	31.670
5	1	5	2	6	3	7	31.438
6	1	6	4	2	7	5	31.691
7	1	7	6	5	4	3	32.926
8	2	1	7	6	5	4	30.533
9	2	2	2	2	2	2	30.639
10	2	3	4	5	6	7	31.095
11	2	4	6	1	3	5	32.988
12	2	5	1	4	7	3	31.168
13	2	6	3	7	4	1	31.886
14	2	7	5	3	1	6	35.140
15	3	1	6	4	2	7	32.659
16	3	2	1	7	6	5	30.287
17	3	3	3	3	3	3	31.499
18	3	4	5	6	7	1	31.377
19	3	5	7	2	4	6	32.416
20	3	6	2	5	1	4	32.211
21	3	7	4	1	5	2	31.978
22	4	1	5	2	6	3	30.667
23	4	2	7	5	3	1	32.821
24	4	3	2	1	7	6	30.823
25	4	4	4	4	4	4	31.837
26	4	5	6	7	1	2	34.703
27	4	6	1	3	5	7	31.443
28	4	7	3	6	2	5	30.188
29	5	1	4	7	3	6	31.755
30	5	2	6	3	7	4	31.209

	31	5	3	1	6	4	2	30.981
	32	5	4	3	2	1	7	33.104
	33	5	5	5	5	5	5	31.983
	34	5	6	7	1	2	3	33.760
	35	5	7	2	4	6	1	32.281
	36	6	1	3	5	7	2	30.909
	37	6	2	5	1	4	7	32.123
	38	6	3	7	4	1	5	34.225
	39	6	4	2	7	5	3	31.434
[0084]	40	6	5	4	3	2	1	33.114
	41	6	6	6	6	6	6	32.988
	42	6	7	1	2	3	4	32.275
	43	7	1	2	3	4	5	30.957
	44	7	2	4	6	1	3	33.625
	45	7	3	6	2	5	1	31.909
	46	7	4	1	5	2	6	31.329
	47	7	5	3	1	6	4	32.119
	48	7	6	5	4	3	2	33.145
	49	7	7	7	7	7	7	32.438

[0085] 根据上述正交试验结果,得到如图4所示的各变量对风电场平均功率输出的影响。

[0086] 根据图4可知,所得数据几乎全部处于置信带内,这进一步验证了此方法的准确性。该案例下最优变量参数为 $x_{xt}=7.0D$ , $x_{wf}=15.0D$ , $\gamma=30^\circ$ , $\omega=0.0122\text{rad/s}$ , $n=L1+L2$ ,利用WFSim对最优工况组合进行模拟,得到风电场平均功率数据为35.188MW,相较于原风电场布局和偏航设置的平均功率数据提升了13.05%。

[0087] 因为所述最优工况组合相较于原风电场布局在纵向增加了7.0D的距离,可能导致目标风电场布局超出了风电场预计范围,在这种情况下,可以根据图4进一步进行参数调整,从而达到符合预期目标的风电场布局及偏航配置。

[0088] 以上显示和描述了本发明的基本原理、主要特征和本发明的优点。本行业的技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的仅为本发明的优选例,并不用来限制本发明,在不脱离本发明精神和范围的前提下,本发明还会有各种变化和改进,这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

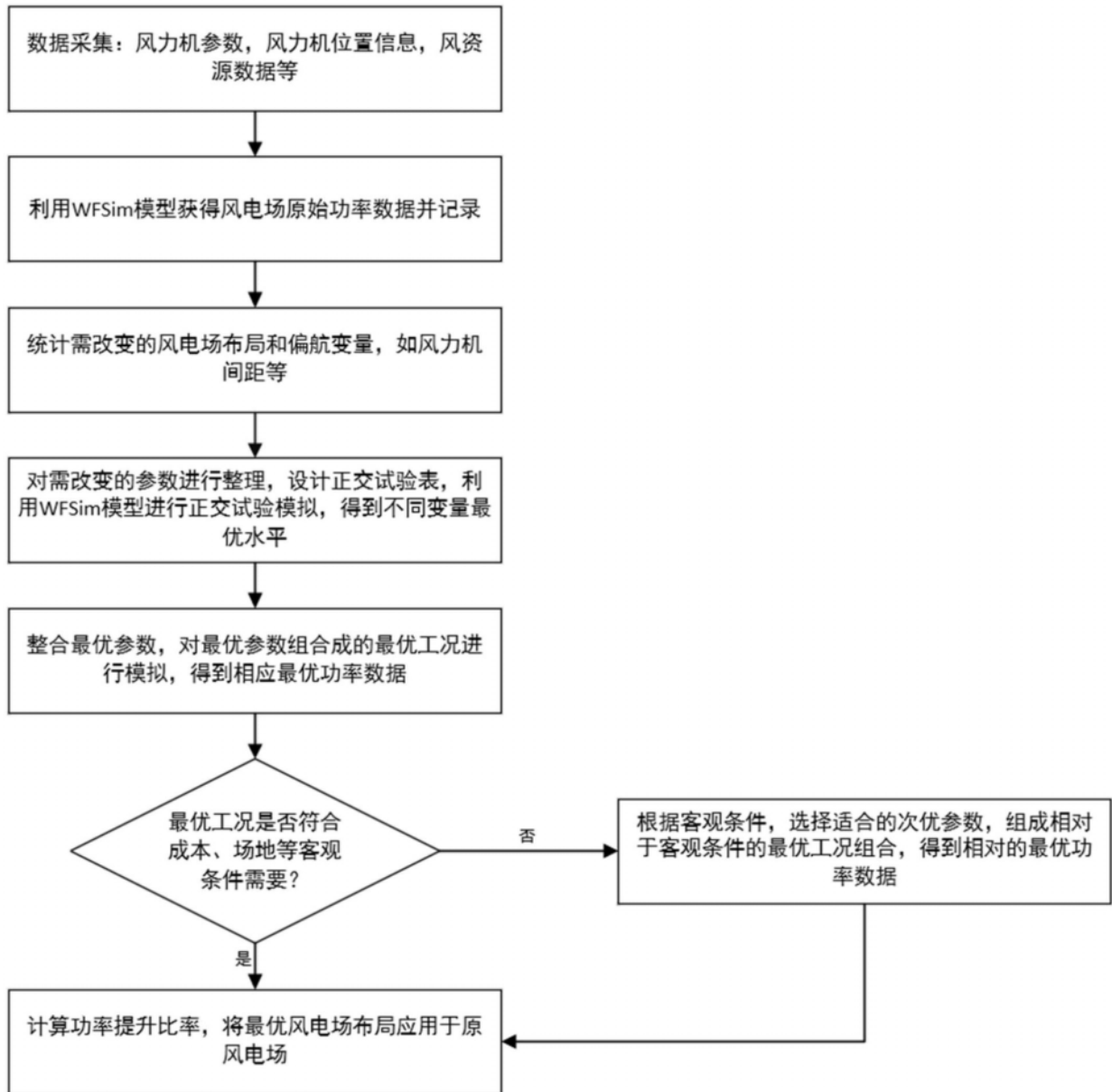


图1

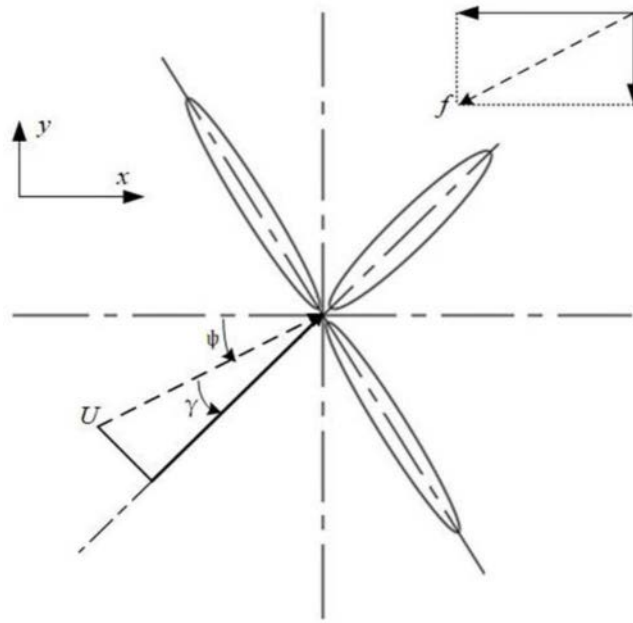


图2

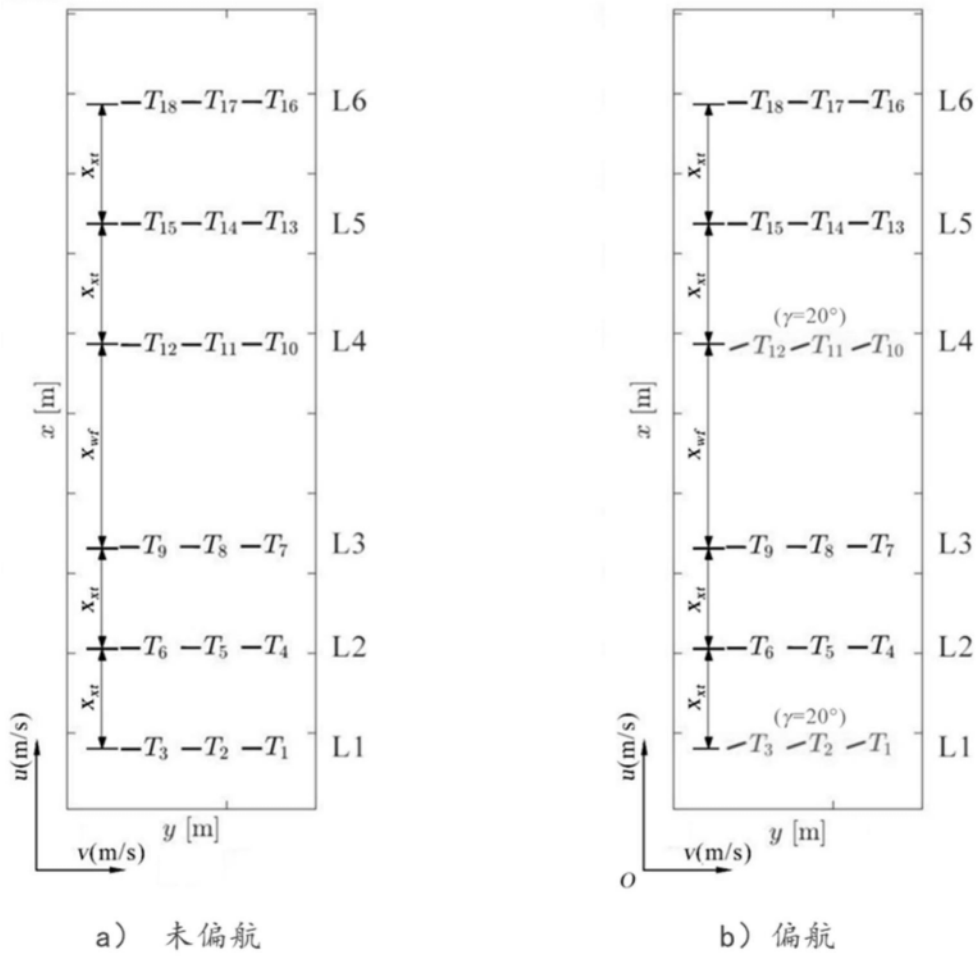


图3

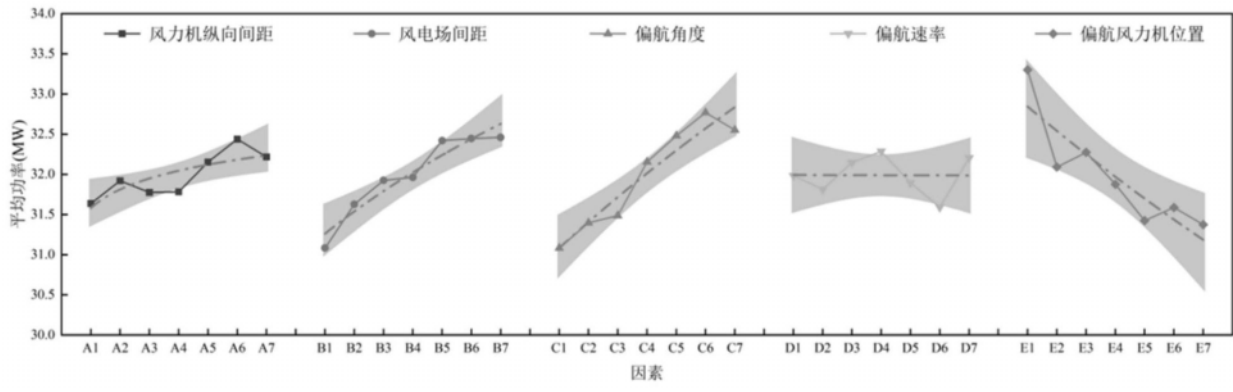


图4