http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0444

面向垂直轴风力发电机的柔性叶片结构优化

王晓喆[1]，王钰博[2,3]，吴坤[3]，万志强[4,*]

(1. 北京航空航天大学 无人系统研究院，北京 100191；2. 北京航空航天大学 国家卓越工程师学院，北京 100191；
3. 北京航空航天大学 飞行学院，北京 100191；4. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：垂直轴风力发电机的风轮旋转轴垂直于地面或气流方向，其在风向改变时无需对风，能够始终保持稳定的发电功率。应用柔性叶片可进一步提高发电功率，但缺乏相关理论及方法。基于此，提出一种基于二维气动力及简支梁理论的柔性叶片流固耦合分析及优化方法。基于现有叶片的基本信息开展柔性叶片设计与结构简化，提出分布载荷作用下的高效简支梁静力学解析方法；将二维黏性/无黏气动力与结构变形通过曲线插值拟合，建立柔性叶片的流固耦合响应分析框架；研究柔性叶片的刚度特性对发电机周期发电功率的影响规律，采用遗传算法和Kriging方法，以最大发电功率为目标进行柔性叶片的刚度优化。结果表明：柔性叶片结构有助于提升发电功率，可为垂直轴风力发电机的研究、设计和进一步应用提供参考。

关 键 词：垂直轴风力发电机；柔性叶片；流固耦合；结构设计；刚度优化
中图分类号：V211.47
文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)11-3770-09

垂直轴风力发电机(vertical axis wind turbine, VAWT)[1]是指风轮的旋转轴垂直于地面或气流方向的风力发电机。垂直轴风力发电机不仅简化了风力发电机的结构设定，也减小了风轮对风时的陀螺力。

按照发电机受力发电的方式进行分类，垂直轴风力发电机主要分为阻力型和升力型。阻力型垂直轴风力发电机主要利用空气流过叶片产生的阻力作为驱动力，而升力型垂直轴风力发电机则利用空气流过叶片产生的升力作为驱动力。目前，大功率多兆瓦级大型垂直轴风力发电机是未来的主要发展方向[2]，国内外均已提出10 MW级的垂直轴风力发电概念机[3]。

柔性叶片的设计灵感来源于鸟类翅膀，主要是通过羽毛高效地捕捉风能，羽毛虽轻，却具有很好的捕风性能，并且能够根据风力条件的不同进行灵活地调整。基于仿生学的启示，通过对羽毛的独特构造进行深入分析，从中提取相应的结构特性，进而研发出柔性羽形叶片。柔性叶片的设计充分考虑了空气动力学原理，可以完全克服刚性叶片的缺点，具有良好的空气动力学特性[4-5]。

飞机在流场中运动时，由于空气动力的作用，机翼结构会发生变形，进而影响到机翼的初始气动特性。流固耦合分析是指对流体与固体结构的相互作用进行计算的一种方法，空气动力和结构变形的相互作用和影响会被考虑在内，在工程领域十分重要。

流固耦合分析方法是当前的热点，国内外均开展了相关研究。武岳等[6-7]采用分区迭代算法求解流固耦合的作用，对大跨结构的等效风荷载、风振响应分析及风致气弹耦合效应等相关问题进行了深入研究。国外开展相关研究相对较早，Bathe等[8-10]

收稿日期：2024-06-18；**录用日期**：2024-08-09；**网络出版时间**：2024-08-27 10:19
网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240826.1636.001
基金项目：中国科协青年人才托举工程项目(2022QNRC001)；航空科学基金(2022Z012051001)
* **通信作者**. E-mail：wzq@buaa.edu.cn

引用格式：王晓喆，王钰博，吴坤，等. 面向垂直轴风力发电机的柔性叶片结构优化[J]. 北京航空航天大学学报，2026，52(11)：3770-3778. Wang X Z，Wang Y B，Wu K，et al. Structural optimization of flexible blades for vertical axis wind turbines[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52(11)：3770-3778 (in Chinese).

每年都会在美国主持一次关于流固耦合问题的学术交流会, 并领导开发了 ADINA 软件系统, 其流固耦合模块(fluid-structure interaction, FSI)包含了强耦合和弱耦合等功能, 可根据实际问题选择不同方法进行分析。以 Nastran 为代表的大型商用有限元软件集成了静气动弹性、飞行载荷、颤振等典型模块, 是流固耦合分析方法在飞行器设计中的进一步应用。

目前, 流固耦合分析方法广泛应用于不同领域。刘为佳等采用双向流固耦合计算方法对激波/边界层干扰下壁板的气动弹性响应过程进行数值模拟[11]; 罗剑桥等通过建立跨介质飞行器近水面滑跳流固耦合模型, 研究了复杂跨介质飞行器的近水面滑跳运动特性[12]; 李秋琳等则通过开展不同出口宽高比下的双 S 弯喷管双向流固耦合数值研究, 分析出口宽高比这一关键几何参数对双 S 弯喷管耦合特性影响及其流动特征影响[13]; 许云涛等发展了一种结合模态叠加法的高效率高精度计算流体力学/计算结构动力学(computational fluid dynamics/computational structural dynamics, CFD/CSD)双向耦合计算方法, 完成了典型超空泡射弹尾拍过程的流固耦合仿真计算[14]; 吴越等在进行柔性扑翼翼面形状和运动参数的优化设计中, 通过搭建流固耦合计算框架, 增加了适应涡格法自由尾涡迭代时间步长的框架结构, 提高了计算效率[15]; 李岳等在进行飞机滑水安全问题研究时, 通过构建飞机轮胎滑水流固耦合仿真分析模型, 基于单因素云模型数字特征及变权向量求解综合隶属度, 建立多元决策下的飞机滑水风险等级及划分标准[16]; 郭跃阳等在研究扑翼共振机理时, 采用流固耦合模拟, 研究了从传统结构模态和声学结构相互作用模态分析得出的模态频率下扑翼的空气动力学性能[17]; 聂顺辰等则在研究高速性能降落伞充气过程中顶篷损伤时采用了流固耦合方法进行分析[18]。

以上流固耦合分析方法在不同学科中的广泛应用展示了其较强的适应性。但基于 CFD/CSD 耦合的计算方法涉及流体力学与结构力学的反复迭代, 这一过程极其繁琐, 计算量大, 同时也存在着网格畸变、易发散等问题。如果分析场景较为复杂, 则收敛过程会十分困难。耦合过程的数据传递效率和映射精度同样影响着计算结果, 网格前处理工作较为依赖科研人员的经验。

垂直轴风力发电机叶片具有大展弦比平直机翼的特征, 其流固耦合问题具有典型二维特性, 可在合理假设的前提下进一步简化, 在提高效率的同时保证计算精度和鲁棒性。针对上述特点, 本文提出一种适用于垂直轴风力发电机的柔性叶片, 结合二维气动力和简支梁理论, 发展了相应的流固耦合分析方法和刚度优化方法。首先, 搭建柔性叶片的气动/结构耦合分析框架; 然后, 研究柔性叶片的刚度特性对风力发电机周期发电功率的影响规律; 最后, 结合遗传算法和 Kriging 方法, 以最大发电功率为目标, 完成垂直轴风力发电机柔性叶片的刚度优化。

1　流固耦合分析方法

1.1　气动力计算方法

H 型垂直轴风力发电机的基本结构和发电原理如图 1 所示。

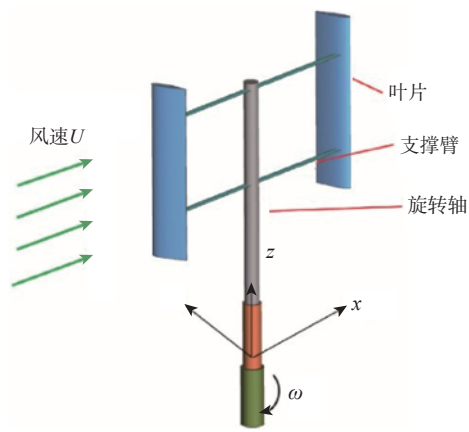

图 1　H 型垂直轴风力发电机基本结构和发电原理[19]

Fig. 1　Basic structure and power generation principle of the H-type vertical axis wind turbine[19]

其叶片具有大展弦比机翼特征, 可忽略展向流动, 仅考虑翼型的作用和影响。二维气动力的基本 Navier-Stokes 方程如下:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial u}{\partial t}+u\dfrac{\partial u}{\partial x}+v\dfrac{\partial u}{\partial y}+\dfrac{1}{\rho}\cdot\dfrac{\partial p}{\partial x}=\upsilon\left(\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+u\dfrac{\partial v}{\partial x}+v\dfrac{\partial v}{\partial y}+\dfrac{1}{\rho}\cdot\dfrac{\partial p}{\partial y}=\upsilon\left(\dfrac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中: u、v分别为沿着 x、y方向上的速度分量; t为时间; p为压强; ρ为密度; υ为运动黏性系数。

当前成熟的商用空气动力学分析软件较多, 可满足不同的分析场景和计算需求。其中, XFOIL 是一种针对亚声速翼型的开源气动力分析程序, 由 Drela 开发, 采用黏性/无黏迭代方法, 具有较高的精度和效率, 本文选用 XFOIL 进行二维叶片的气动力分析[20]。

1.2　柔性叶片结构设计

对柔性叶片的结构进行展开设计, 具体包括: 中心梁、垂直梁、结构梁和蒙皮, 如图 2 所示。中心梁是叶片的主承力构件, 中心梁的结构刚度是主要优化对象。垂直梁和结构梁作刚性假设处理, 作

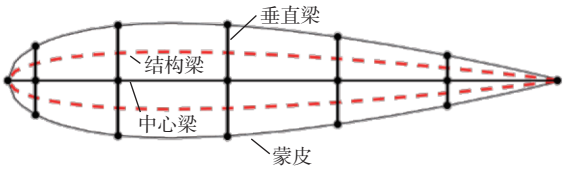

图2 柔性叶片结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flexible blade structure

用于蒙皮的气动力可通过垂直梁直接传递至中心梁。结构梁可限制中心梁扭转，只产生垂向位移。

叶片上表面蒙皮为柔性膜，可以在气动力作用下变形，内部压强保持不变。作用于蒙皮的气动力可转化为分布的静载荷（本文分布静载荷数量取40，可根据实际情况调整），将叶片中心梁和蒙皮分为40段，前5段和后5段在计算中假设为刚性梁，其余30段为柔性梁，两端分别采用固支铰和活动铰约束，其刚度描述如下：

$$\begin{cases} K_{1,2}=\max(v_1,v_{\min}) \\ K_{2i-1,2i}=\max\left(v_1-\sum_{j=2}^{i}v_j,v_{\min}\right) \qquad 2\leqslant i\leqslant 7 \\ K_{\min}=\max\left(v_1-\sum_{j=2}^{7}v_j,v_{\min}\right) \\ K_{2i-1,2i}=K_{\min}+\sum_{j=8}^{i}X_j \qquad 8\leqslant i\leqslant 15 \end{cases} \tag{2}$$

式中：K_i为梁的刚度；$v_{\min}$为梁刚度的设计下限；v_1为第1段梁的刚度；v_i为该段梁刚度的减少量；$K_{\min}$为梁中心最小刚度；X_i为该段梁刚度的增加量。梁的刚度先减小后增大，其分布趋势与材料厚度分布一致。

1.3 结构静力学解析方法

在发电过程中，叶片的长度与弦长几乎不变，且与厚度相比，长度足够长。根据叶片受力、边界约束及无扭转假设，可将中心梁简化为具有不同刚度分布特性的简支梁[21]，如图3所示。简支梁受到固支铰约束及活动铰约束，沿梁施加从F_2～F_n的$n-1$个静载荷来模拟分布的气动力，F_1为边界约束反作用力。根据分布载荷，中心梁被划分为n段，与式(2)对应，则$K_n=E_nI_n$，其中，E_n和I_n分别表示中心梁第n段的弹性模量和截面惯性矩。F_n的施加点与固支铰约束点之间的距离为c_n，梁总长度为l。

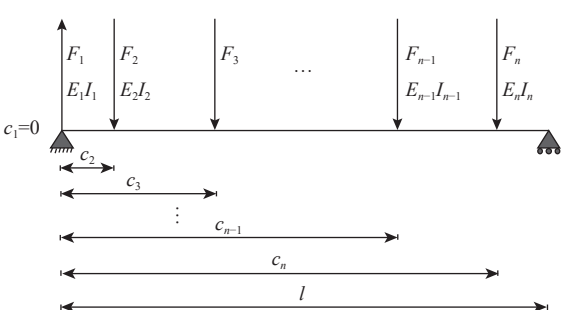

图3 叶片中心梁模型

Fig. 3 Central beam model of blades

采用单位载荷法求解中心梁的垂直位移。如图4所示，假设一个虚拟的单位载荷δF作用于中心梁上，其中，$\overline{F}_1$和$\overline{F}_3$为简支梁的约束力。

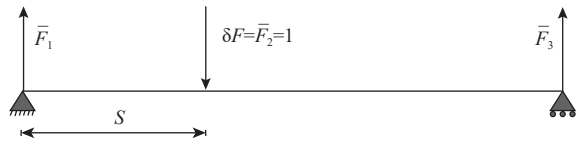

图4 虚功原理及单位载荷示意图

Fig. 4 Schematic diagram of virtual work principle and unit load

基于单位载荷法和虚功原理[22]，结合载荷分布情况，与约束点距离为S的点的垂直位移为

$$\begin{aligned} w(S)=&\int_{c_1}^{c_2}\frac{M_1(x)\overline{M}_1(x)}{E_1I_1}\mathrm{d}x+\int_{c_2}^{c_3}\frac{M_2(x)\overline{M}_1(x)}{E_2I_2}\mathrm{d}x+\cdots+\\ &\int_{c_k}^{S}\frac{M_k(x)\overline{M}_1(x)}{E_kI_k}\mathrm{d}x+\int_{S}^{c_{k+1}}\frac{M_k(x)\overline{M}_2(x)}{E_kI_k}\mathrm{d}x+\cdots+\\ &\int_{c_{n-1}}^{c_n}\frac{M_{n-1}(x)\overline{M}_2(x)}{E_{n-1}I_{n-1}}\mathrm{d}x+\int_{c_n}^{c_{n+1}}\frac{M_n(x)\overline{M}_2(x)}{E_nI_n}\mathrm{d}x \end{aligned} \tag{3}$$

式中：$M_n(x)$表示气动载荷作用在中心梁第n段的弯矩分布；$\overline{M}_1(x)$和$\overline{M}_2(x)$分别表示虚拟单位载荷分别在作用点前后所引起的弯矩分布。

1.4 建模及方法校验

通过商用有限元软件MSC.Nastran验证上述解析方法，简支梁的弦向截面参数如图5所示。

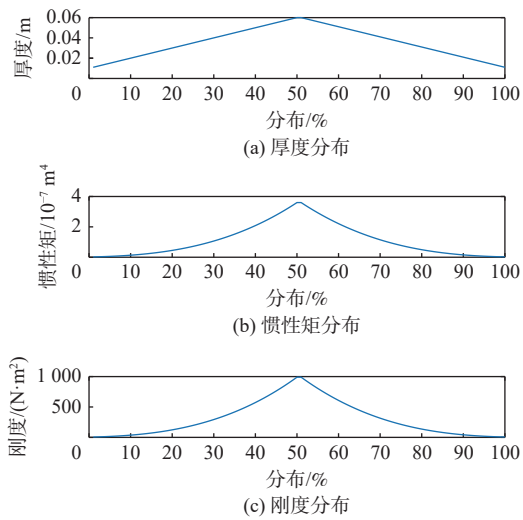

图5 简支梁结构特性

Fig. 5 Structural characteristics of simply supported beams

通过XFOIL计算叶片上/下表面的压强，并积分得到分布载荷，计算式如下：

$$\begin{cases} \Delta C_p=\int_0^l C_{p_\mathrm{low}}\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{n}_{\mathrm{normal}}\mathrm{d}x+\int_0^l C_{p_\mathrm{up}}\hat{\boldsymbol{n}}\cdot\boldsymbol{n}_{\mathrm{normal}}\mathrm{d}x \\ \Delta p=\dfrac{1}{2}\rho V^2\Delta C_p \end{cases} \tag{4}$$

式中: ΔC_p为上下翼面压力差系数; Δp表示上下翼面压力差; V 表示来流速度; ρ为空气密度; $\hat{\boldsymbol{n}}$为翼型外方向单位向量; $\boldsymbol{n}_{\text{normal}}$为梁法向单位矢量; 下标 up、low 分别表示翼型上、下表面。

迎角为 0°时, 有限元方法和解析法的结果对比如图 6 所示。可以看出, 2 种方法分别计算得到的垂直位移吻合较好, 本文分布载荷作用下的简支梁结构静力学解析方法具有较高的计算精度和效率。

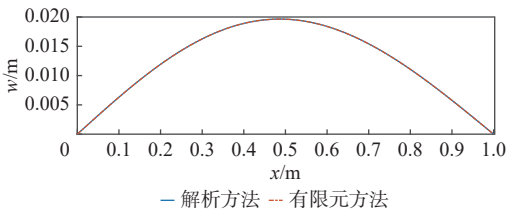

图 6　有限元方法和解析方法的结果比较

Fig. 6　Comparison of results between finite element method and analytical method

1.5　流固耦合分析

叶片流固耦合分析的基本流程如下:

1) 叶片的初始结构参数及风力发电机工作环境设定。

2) 采用 XFOIL 计算叶片的二维气动力, 通过压强积分和曲线插值拟合, 得到作用于中心梁的分布静载荷。

3) 应用简支梁静力学解析方法计算中心梁的垂直位移, 通过曲线插值拟合更新叶片的上表面气动外形, 并开始新一轮的气动力计算。

4) 重复上述流程, 当结构位移小于设定值时, 流固耦合计算收敛。

根据上述流程, 进行柔性叶片初始结构的流固耦合分析, 4 轮迭代后, 垂直位移收敛, 如图 7 所示。可以看出, 柔性叶片的上表面相对于刚性叶片的上表面有所改变, 叶片厚度稍有增加, 受风面积增大, 会影响垂直轴风力发电机的发电功率。

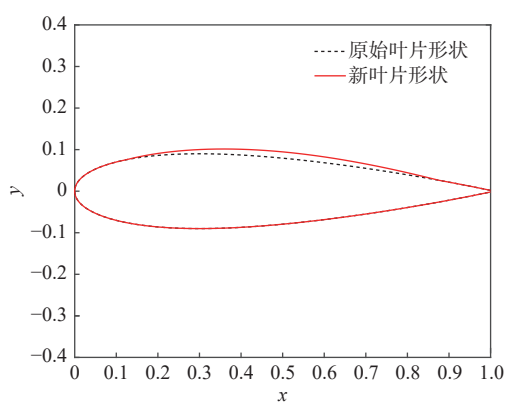

图 7　迭代前后叶片简化图对比

Fig. 7　Comparison of simplified diagrams of blades before and after iteration

2　发电功率分析方法

垂直轴风力发电机的叶片转子赤道面各个角、力、速度向量的示意图如图 8 所示。

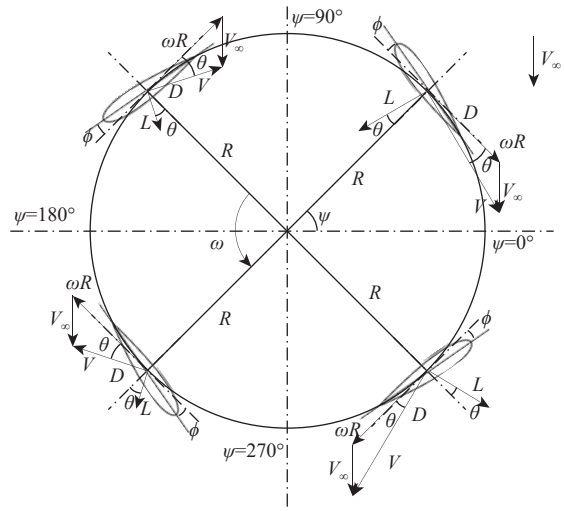

图 8　转子赤道面示意图

Fig. 8　Schematic diagram of the equatorial plane of the rotor

垂直轴风力发电机的旋转角速度与叶片气动力之间的关系如图 9 所示。

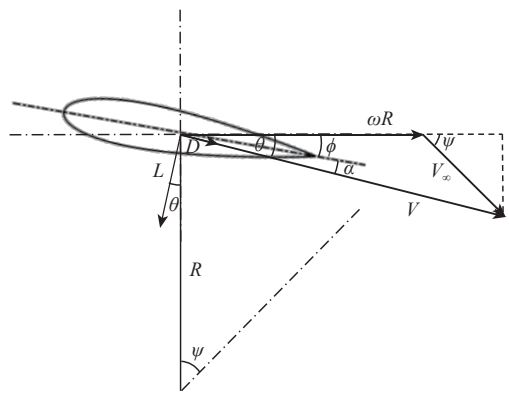

图 9　角速度与力的向量关系

Fig. 9　Vector relationship between angular velocity and force

根据图 9 中的几何关系, 当风速、角速度、俯仰角保持为常数时, 输出功率 P 为方位角的积分函数, 表达式如下:

$$P=\frac{\omega}{2\pi}\int_0^{2\pi}Q(\psi)\mathrm{d}\psi \tag{5}$$

式中: ω为角速度; ψ为叶片的方位角。

根据文献 [23], 叶片翼型选用 NACA0018 翼型, 其基本数据及风力发电机的工作环境如表 1 所示。

H 型垂直轴风力发电机旋转时的角度关系可表示为

$$\theta=\arctan\left(\frac{\sin\psi}{\cos\psi+\lambda}\right) \tag{6}$$

式中: $\lambda=\omega R/V_\infty$为转速比。

表1 基础环境设置

Table 1 Basic environment setting

风速 V_∞/(m·s^{-1})	额定转速ω/(rad·s^{-1})	叶片长度 l/m	叶片弦长 c/m	旋转半径 R/m	叶片数量n_b	俯仰角 ϕ/(°)	空气密度 ρ/(kg·m^{-3})
5.5	4.05	1	0.61	8.4	2	0	1.225

迎角α和入流角θ的关系如下：

$$\alpha=\theta-\phi \tag{7}$$

式中：ϕ为俯仰角。

叶片的俯仰角设定为0°，迎角α与入流角度θ相等，在旋转一周的过程中，其迎角α随方位角ψ的具体变化如图10所示。

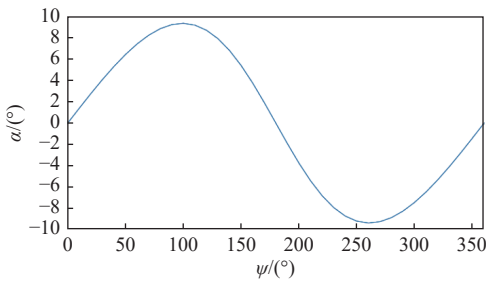

图10 迎角随方位角的变化

Fig. 10 Diagram of angle of attack changing with azimuth

根据发电机叶片的角度关系及合成速度V情况，得到计算式如下：

$$V=V_\infty\sqrt{(\lambda+\cos\psi)^2+\sin^2\psi} \tag{8}$$

根据式(8)，可得出叶片的合成速度与方位角之间的联系，如图11所示。

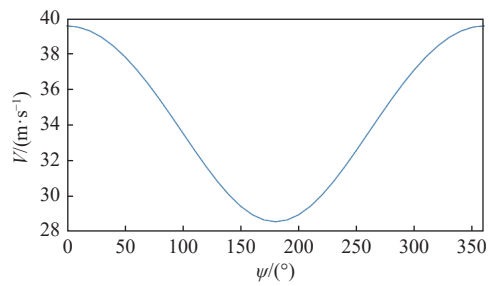

图11 合成速度曲线

Fig. 11 Resultant velocity curve

在叶片旋转一周的过程中，叶片的升力系数C_l、阻力系数C_d和切向力系数C_t随方位角的变化情况如图12～图14所示。

根据式(5)，结合表1中叶片参数及发电机工作参数，假设叶片在气动力的作用下无任何形变，可计算得出刚性叶片旋转一周的周期发电功率为2.100 kW。

按照式(2)所设定的柔性叶片结构的中心梁初始刚度分布，结合1.5节中的流固耦合计算方法，开展柔性叶片垂直轴风力发电机的发电功率计算，得

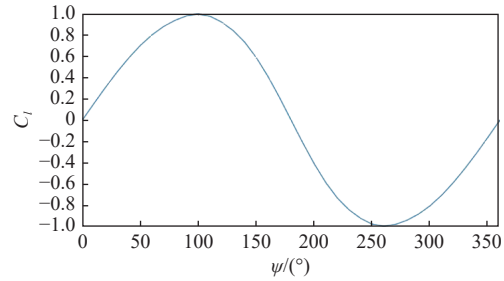

图12 升力系数随方位角变化

Fig. 12 Variation of lift coefficient with azimuth angle

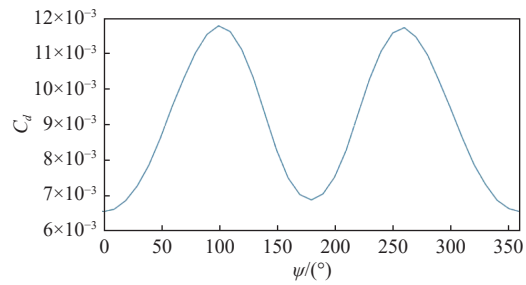

图13 阻力系数随方位角变化

Fig. 13 Variation of drag coefficient with azimuth angle

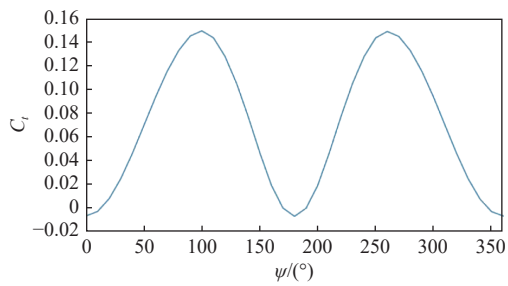

图14 切向力系数随方位角变化

Fig. 14 Variation of tangential force coefficient with azimuth angle

到柔性叶片旋转一周的发电功率为2.099 kW。

根据计算结果，将刚性叶片变为柔性叶片后，垂直轴风力发电机的发电功率有所减小，需要研究柔性叶片中心梁刚度对发电功率的影响规律，并开展刚度分布优化，以提升整体发电功率。

3 柔性叶片垂直轴风力发电机优化设计

3.1 基于代理模型的优化方法

遗传算法是一种现代启发式算法，其不依赖敏度信息，不易陷入局部最优解且具有较好的稳定性。遗传算法的核心是将问题的解决策略抽象为类似于生物遗传和进化中染色体的特性，并通过模拟生物进化过程中的杂交、基因突变等生物学过程来不断优化解决方案[24-25]。

为解决遗传算法样本数量多、计算耗费大等问

题, 引入 Kriging 代理模型以提高优化效率。Kriging 方法是依据协方差函数对随机过程或随机场进行空间建模和预测(插值)的回归算法。在特定的随机过程中, Kriging 方法能够给出最优线性无偏估计, 因此, 在地理统计学中也被称为空间最优无偏估计器[26]。

Kriging 模型表示如下:

$$y_k = f_k(\boldsymbol{x}) + z_k(\boldsymbol{x}) \qquad k = 1,2,\cdots,q \tag{9}$$

式中: y_k为未知函数; $\boldsymbol{x}$为n维向量; $f_k(\boldsymbol{x})$为回归模型, 可选用 0、1、2 次多项式; $z_k(\boldsymbol{x})$为随机函数。本文选用 2 次多项式和高斯函数构建 Kriging 模型[27]。有关 Kriging 模型及其改进形式的更多内容可参考文献 [28]。

相对误差是实际响应值和预测值之间的差异, 常用来校验代理模型的精度, 可表示为

$$e = \left| r_{\mathrm{a}} - r_{\mathrm{p}} \right| / r_{\mathrm{a}} \tag{10}$$

式中: r_{a}为实际响应值; r_{p}为模型的预测值。

Kriging 模型的建立流程如图 15 所示。

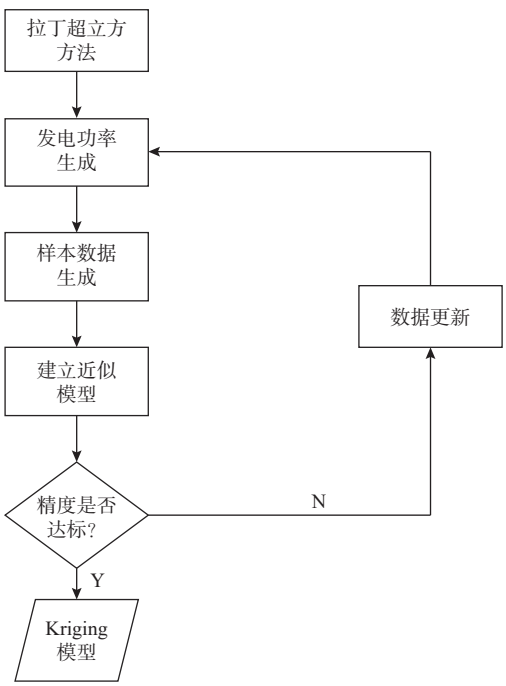

图 15　Kriging 模型建立流程

Fig. 15　Process of establishing Kriging model

首先, 设定中心梁刚度参数值的取值范围, 在设计变量的取值范围内采用拉丁超立方抽样选取足够数量的样本点。然后, 计算各柔性叶片样本的周期发电功率, 以样本的刚度分布为输入、周期发电功率为输出, 建立柔性叶片的发电功率 Kriging 模型。最后, 应用遗传算法, 以最大发电功率为目标函数, 开展基于 Kriging 代理模型的柔性叶片刚度优化, 将代理优化得到的最优刚度分布代入第 2 节建立的垂直轴柔性叶片风机发电功率计算方法得到真实的发电功率, 代理优化流程如图 16 所示。

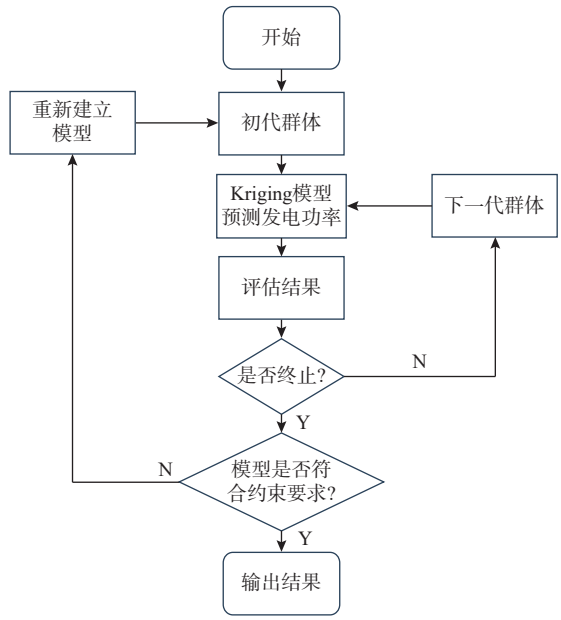

图 16　代理优化流程

Fig. 16　Flowchart of surrogate-based optimization

3.2　优化结果及分析

3.2.1　代理模型精度验证

以刚度分布为设计变量, 在变量空间内选取 200 个样本点计算对应的柔性叶片发电功率, 建立 Kriging 模型。在相同的样本空间内选取 50 个校验样本点并计算真实发电功率, 同时使用 Kriging 模型预测上述校验样本点的发电功率。对比 Kriging 模型的预测值和真实值, 并计算校验样本的相对误差, 如图 17 和图 18 所示。

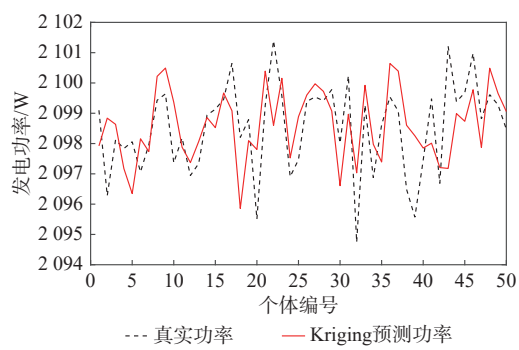

图 17　Kriging 方法得到的功率与真实功率的对比

Fig. 17　Comparison between power obtained by Kriging method and actual power

发电功率的代理预测值和真实仿真值的相对误差平均值为 $5.334\,6\times10^{-4}$, 误差值很小, 2 种方法得到的结果可以视为一致的, Kriging 模型具有较高的预测精度。

3.2.2　优化流程及结果

应用 MATLAB 优化工具箱中的遗传算法, Kriging

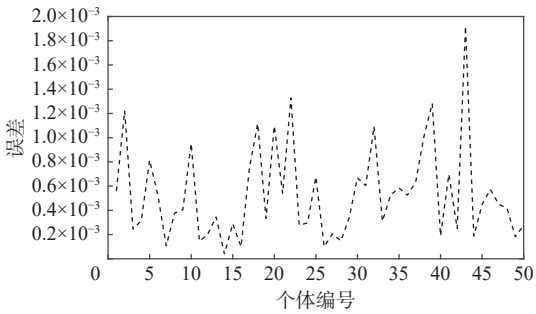

图 18 相对误差绝对值

Fig. 18 Absolute value of relative error

模型选用 DACE 工具箱。遗传代数设定为 20，每代样本数量设定为 100。在进化到第 8 代时，发电功率趋于收敛，经过叶片刚度优化后的最优发电功率为 2 107.59 W。

将 Kriging 代理优化得到的最优刚度分布信息进行真实柔性叶片发电功率仿真计算，得到发电功率为 2 107.54 W。通过结果的比较，可以看到，Kriging 方法优化得出的发电功率基本准确，优化结果可信且有效。

在第 2 节已开展了刚性叶片的发电功率计算，发电功率为 2 100.06 W，而未经优化的柔性叶片发电功率为 2 099.05 W。可以看出，通过优化设计，柔性叶片刚度分布更为合理，可有效提升发电功率，并取得 8 W 的功率收益，本文的柔性结构和优化方法有效可行。

由于叶片内部梁的设计较为简单，仅由弹性中心梁和刚性垂直梁组成，且表面蒙皮变形程度较小，未能充分发挥柔性叶片的提升潜力，使得功率收益较小。

4 结 论

垂直轴风力发电机风能利用率高、起动风速低，相比水平轴风力发电机具有效率高等优点。本文针对垂直轴风力发电机，提出一种柔性叶片结构，建立了高效的流固耦合分析框架及刚度优化方法。主要结论和创新点如下：

1）基于现有叶片的基本信息开展柔性叶片设计与结构简化，提出了分布载荷作用下的高效简支梁静力学解析方法。

2）将二维黏性/无黏气动力与结构变形通过曲线插值拟合，建立了柔性叶片的流固耦合响应分析框架。

3）研究了柔性叶片的刚度特性对发电机周期发电功率的影响规律，采用遗传算法和 Kriging 方法，以最大发电功率为目标进行了柔性叶片的刚度优化，可有效提升发电功率。

通过对垂直轴风力发电机的叶片进行柔性设计和刚度分布优化，可有效提升发电功率，可为垂直轴风力发电机的研究、设计和进一步应用提供参考。当前柔性叶片内部的梁结构较为简单，在未来工作中，将继续深入开展柔性叶片的变形结构、机构设计研究，以进一步提高发电功率。

参考文献（References）

[1] 何志宁, 刘座铭, 张宗珍. 垂直轴风力发电机的发展历史及现状[J]. 机械工程师, 2014(2): 39-40.
He Z N, Liu Z M, Zhang Z Z. Status quo and development of vertical-axis wind turbine[J]. Mechanical Engineer, 2014(2): 39-40(in Chinese).

[2] 张涵, 唐清春, 黄健友. 垂直轴风力发电机力学性能研究综述[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(2): 144-153.
Zhang H, Tang Q C, Huang J Y. A review of research on the mechanical performance of vertical axis wind turbines[J]. Mechanical Engineering and Technology, 2024, 13(2): 144-153(in Chinese).

[3] Tjiu W, Marnoto T, Mat S, et al. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation II: challenges in HAWT and the opportunity of multi-megawatt Darrieus VAWT development[J]. Renewable Energy, 2015, 75: 560-571.

[4] 张雷. 柔性叶片结构气弹稳定性分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2013.
Zhang L. Analysis of the flexible blade structure aeroelastic stability[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2013 (in Chinese).

[5] 高荣臻. 柔性风力机叶片气弹响应试验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
Gao R Z. Experimental study on aeroelastic response of flexible wind turbine blades[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023(in Chinese).

[6] 沈世钊, 武岳. 膜结构风振响应中的流固耦合效应研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 1-9.
Shen S Z, Wu Y. Research progress on fluid-solid interaction effect of wind-induced vibration response of membrane structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2006, 23(1): 1-9(in Chinese).

[7] 武岳, 沈世钊. 索膜结构风振响应中的气弹耦合效应研究[J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(2): 30-36.
Wu Y, Shen S Z. Study on wind-induced vibration of membrane-cable structures with the consideration of aeroelastic effect[J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(2): 30-36(in Chinese).

[8] Bathe K J, Zhang H, Ji S H. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions[J]. Computers & Structures, 1999, 72(1-3): 1-16.

[9] Bathe K J, Zhang H. A flow-condition-based interpolation finite element procedure for incompressible fluid flows[J]. Computers & Structures, 2002, 80(14-15): 1267-1277.

[10] Kohno H, Bathe K J. A nine-node quadrilateral FCBI element for incompressible fluid flows[J]. Communications in Numerical Methods in Engineering, 2006, 22: 917-931.

[11] 刘为佳, 李映坤, 陈雄, 等. 基于流固耦合的激波/边界层干扰作用下壁板颤振特性[J]. 航空学报, 2023, 44(6): 108-121.

Liu W J, Li Y K, Chen X, et al. Panel flutter characteristics on shock wave/boundary layer interaction based on fluid-structure coupling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(6): 108-121(in Chinese).

[12] 罗剑桥, 解春雷, 金泽华, 等. 跨介质飞行器近水面滑跳流固耦合仿真及可滑跳区域研究[J]. 航空学报, 2023, 44(21): 377-394.
Luo J Q, Xie C L, Jin Z H, et al. Water-skipping fluid-structure interaction simulation and slippable area study of trans-medium vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(21): 377-394(in Chinese).

[13] 李秋琳, 周莉, 孙鹏, 等. 出口宽高比对 S 弯喷管流固耦合特性影响[J]. 航空学报, 2023, 44(14): 149-163.
Li Q L, Zhou L, Sun P, et al. Influence mechanism of aspect ratio on fluid-structure interaction characteristics of serpentine nozzle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(14): 149-163(in Chinese).

[14] 许云涛, 檀大林, 杨超. 基于 CFD/CSD 耦合的高速射弹尾拍载荷特性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2539-2546.
Xu Y T, Tan D L, Yang C. Study on tail-slap load characteristics of high-speed projectile based on CFD/CSD coupling[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(9): 2539-2546(in Chinese).

[15] 吴越, 谢长川, 杨超. 面向柔性扑翼翼面形状和运动参数的优化设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(12): 3311-3320.
Wu Y, Xie C C, Yang C. Optimal design of shape and motion parameters of a flapping wing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(12): 3311-3320(in Chinese).

[16] 李岳, 胡宇祺, 蔡靖, 等. 基于变权重-正态云模型的飞机轮胎滑水风险[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(9): 2299-2305.
Li Y, Hu Y Q, Cai J, et al. Hydroplaning risk of aircraft tire based on variable weight theory-normal cloud model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(9): 2299-2305 (in Chinese).

[17] Guo Y Y, Yang W Q, Dong Y B, et al. Resonance mechanism of flapping wing based on fluid structure interaction simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2024, 37(5): 243-262.

[18] Nie S C, Yu L, Li Y J, et al. Fluid structure interaction of supersonic parachute with material failure[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2023, 36(10): 90-100.

[19] Zhang Y F, Li Q A, Zhu X Y, et al. Wind tunnel experiments and numerical study on performance characteristics of an H-type vertical axis wind turbine in the spanwise direction[J]. Journal of Thermal Science, 2021, 30(3): 758-771.

[20] Drela M. XFOIL: subsonic airfoil development system[DB/OL]. (2026-01-01)[2026-07-02]. https://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/.

[21] 单辉祖. 材料力学Ⅰ[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2016: 37-62.
Shan H Z. Mechanics of materials Ⅰ[M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2016: 37-62(in Chinese).

[22] Hibbeler R C. Mechanics of materials[M]. New York: Pearson Education, Inc., 2014: 718-785.

[23] Kuester J F. Preliminary design of a vertical axis wind turbine with flexible sails[D]. Cranfield: Cranfield University, 2011.

[24] 王铁方. 计算机基因学: 基于家族基因的网格信任模型[M]. 北京: 知识产权出版社, 2016: 93-94.
Wang T F. Computer genetics: a grid trust model based on family genes[M]. Beijing: Intellectual Property Publishing House, 2016: 93-94(in Chinese).

[25] 郑树泉. 工业智能技术与应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019: 250-251.
Zheng S Q. Technology and application of industrial intelligence [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2019: 250-251(in Chinese).

[26] 刘国峰, 孟小红, 岳延波, 等. 克里金法在 GPS 数据内插中的应用[J]. 物探与化探, 2006, 30(2): 175-178.
Liu G F, Meng X H, Yue Y B, et al. The application of Kriging to GPS data interpolation[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2006, 30(2): 175-178(in Chinese).

[27] Wang X Z, Wan Z Q, Liu Z, et al. Integrated optimization on aerodynamics-structure coupling and flight stability of a large airplane in preliminary design[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(6): 1258-1272.

[28] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
Han Z H. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225(in Chinese).

Structural optimization of flexible blades for vertical axis wind turbines

WANG Xiaozhe[1]，WANG Yubo[2, 3]，WU Kun[3]，WAN Zhiqiang[4, *]

(1. Institute of Unmanned System，Beihang University，Beijing 100191，China；
2. National Superior College for Engineers，Beihang University，Beijing 100191，China；
3. School of Aviation，Beihang University，Beijing 100191，China；
4. School of Aeronautic Science and Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China)

Abstract：A vertical-axis wind turbine has a rotation axis that is perpendicular to the ground or the direction of the airflow, allowing it to generate stable power without having to orient it as the wind direction changes. Applying flexible blades can further improve power generation, but there is currently a lack of relevant theories and methods. This article proposes a fluid-structure coupling analysis and optimization design method for the flexible blade based on two-dimensional aerodynamics and simply supported beam theory. First, an effective static analysis approach for simply supported beams under distributed loads is proposed, and flexible blade design and structural simplification are carried out based on the fundamental data of current blades. Then, the two-dimensional viscous/inviscid aerodynamic forces and structural deformation are fitted through curve interpolation to establish a fluid-structure coupling response analysis framework for flexible blades. Finally, the influence of the stiffness characteristics of flexible blades on the periodic power generation of generators is studied. The genetic algorithm and Kriging method are employed to maximize power generation by searching for the optimum stiffness of the flexible blades. The results indicate that the flexible blade structure helps to improve power generation, and this study can provide a reference for the research, design, and further application of vertical axis wind turbines.

Keywords：vertical axis wind turbine；flexible blades；fluid-structure coupling；structural design；stiffness optimization

Received：2024-06-18；**Accepted**：2024-08-09；**Published Online**：2024-08-27 10：19

URL：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240826.1636.001

Foundation items：Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2022QNRC001); Aeronautical Science Foundation of China (2022Z012051001)

* **Corresponding author**. E-mail：wzq@buaa.edu.cn