

引用格式: 罗必雄, 胡均亮, 杨亚军, 等. 计及纵向扰动稳定的高空风电系统建模与稳定运行控制方法 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 1-11. LUO Bixiong, HU Junliang, YANG Yajun, et al. Modeling and stable operation control method for airborne wind energy system considering longitudinal disturbance stability [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 1-11. DOI: 10.16516/j.cec.2024-306.

计及纵向扰动稳定的高空风电系统建模与 稳定运行控制方法

罗必雄¹, 胡均亮², 杨亚军^{2,✉}, 任宗栋¹, 何亚东²

(1. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100101;

2. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: [目的] 文章旨在探索伞梯式陆基高空风力发电系统 (Airborne Wind Energy systems, AWEs) 动态建模方法及高空风场变化的纵向扰动时伞梯及伞梯间稳定轨迹跟踪控制方法。[方法] 以 25 MW 级伞梯式陆基 AWEs 为例, 探究伞梯组件力学响应特性, 构建伞梯系统多刚体绳索动力学模型, 在施加纵向扰动的高空风场模拟环境中, 基于伞梯姿态控制, 设计跟踪与同步控制律, 实现伞梯轨迹跟踪与运行安全控制。[结果] 研究表明: 调整伞梯的有效迎风面积能够实现高空风场变化的纵向扰动下, 伞梯的实际运动轨迹与期望轨迹之间的误差收敛, 且基于所设计同步控制律, 实现了多伞梯间的运行同步, 达到防碰撞的安全运行目的。[结论] 可基于伞梯姿态控制, 设计伞梯式陆基 AWEs 运行的跟踪与同步控制策略, 实现系统在高空风场动态环境中的安全高效运行控制目标。

关键词: 高空风电系统; 系统建模; 姿态控制; 同步控制; AWEs

DOI: 10.16516/j.cec.2024-306

文章编号: 2095-8676(2025)01-0001-11

CSTR: 32391.14.j.cec.2024-306

中图分类号: TK89; TM614



论文二维码

Modeling and Stable Operation Control Method for Airborne Wind Energy System Considering Longitudinal Disturbance Stability

LUO Bixiong¹, HU Junliang², YANG Yajun^{2,✉}, REN Zongdong¹, HE Yadong²

(1. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100101, China;

2. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute, Co., Ltd., Hefei 230601, Anhui, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to explore dynamic modeling methods for airborne wind energy systems (AWEs) and trajectory tracking control methods for stable trajectories of kite trains and between kite trains when subjected to longitudinal disturbances in high-altitude wind fields. [Method] Taking a 25 MW-level kite-based AWEs as an example, this study investigated the mechanical response characteristics of kite arrays and constructed a multi-rigid body dynamic model of the kite-based system. In a simulated environment replicating high-altitude wind fields subjected to longitudinal disturbances, the study employed kite attitude control to design synchronous control laws, enabling trajectory tracking and ensuring operational safety of the kite-based system. [Result] The results demonstrate that adjusting the effective windward area of the kite can mitigate longitudinal disturbances caused by variations in high-altitude wind fields, leading to the convergence of errors between the actual and desired trajectories of the kite-based system. Moreover, based on the synchronous control laws designed, synchronization among multiple kite-based systems has been achieved, thereby ensuring collision-free and safe operation. [Conclusion] Using kite attitude control as a basis, a synchronous control strategy can be

收稿日期: 2024-09-10 修回日期: 2024-10-10 网络首发日期: 2024-10-28

基金项目: 国家重点研发计划项目“大型伞梯式陆基高空风力发电关键技术及装备”(2023YFB4203400); 中国能源建设股份有限公司重大科技项目“25 MW 级高空风能发电技术与装备研究”(CEEC-KJZX-03)

designed for the operation of kite-based AWEs, thereby achieving the objective of safe and efficient operation control in dynamic high-altitude wind environments.

Key words: airborne wind energy systems; system modeling; attitude control; synchronous control; AWEs

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

风能是环境友好型的清洁能源,在能源供应领域发挥着重要作用^[1-2]。然而,传统近地风能项目在满足日益增长的电力需求时,仍存在如风力涡轮机轮毂高度约束等诸多技术限制^[3-4]。基于空中风力发电技术突破而开发的高空风能项目开辟了风电领域的新赛道。目前,全球已有超过 50 家研发公司与数十个研究机构展开高空风力发电系统(Airborne Wind Energy systems, AWEs)相关的控制、电子和机械设计研究,国内首个 AWEs 示范电站已于安徽芜湖建立并实现稳定发电^[5-6]。

根据风能捕获与机电能量转化方式的不同,AWEs 的技术路线可分为陆基和空基 2 种方式。陆基 AWEs 通过飞行组件带动缆绳往复牵引地面发电机运转实现发电;空基 AWEs 则利用飞行器将风力涡轮机送至高空,通过空地能量传输完成电能输出^[7-8]。伞梯式陆基 AWEs 是中国对 AWE 技术发展的全新探索,是一项具有前沿性、颠覆性的新型风力发电技术,在大型化、轻量化、安全性等方面具有明显优势^[9]。如图 1 所示,伞梯式陆基 AWEs 由氦气

球、平衡伞、做功伞、地面卷扬-发电机组等基本元件组成。

如图 1 所示,机组利用特殊设计的做功伞以捕获高海拔区域风能,并通过牵引缆绳将风力传输至地面卷扬-发电机组,实现高空风能的捕获、转化和利用。受技术和工程经济性限制,其结构尺寸也必然伴随着功率等级而变化^[10]。由于伞梯式陆基 AWEs 用缆绳取代了传统风机的塔架结构,因此,机载系统需要保持升力并指向来风,以便在动态变化的风场和天气条件下长时稳定运行。此外,鉴于该技术的高度自主性与创新性,有必要进一步研究如何提高最终生产系统的安全稳定性,使伞梯式陆基 AWEs 与其他能源相比更具竞争力。

目前,国内尚缺少伞梯式陆基 AWEs 技术稳定运行控制的研究成果,该技术仍存在无成熟控制系统建模方案、运行依赖人工手动控制和伞梯群间缺少协同等技术难题,如何确保其安全地、稳定地运行成为亟待解决的问题。文章以中国能源建设集团参与建设运营的安徽某伞梯式陆基 AWEs 发电站示范工程为研究对象,开展高空风电控制系统建模与同步控制方法研究,以实现伞梯式陆基 AWEs 在高空

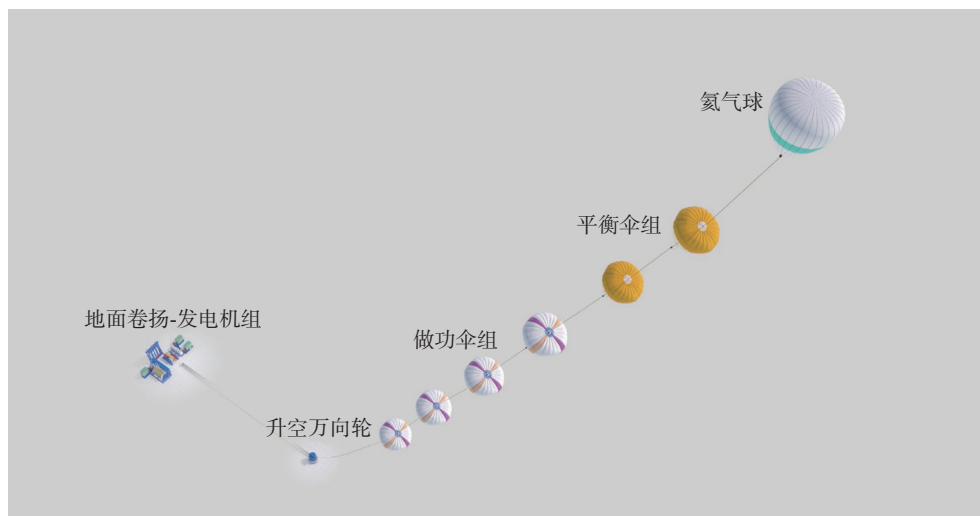


图 1 伞梯式陆基 AWEs 结构示意图

Fig. 1 Kite train ground-based AWEs structural diagram

风场动态环境中的安全高效运行, 为高空风力发电站工程自动安全控制运行策略提供参考。

1 动力学模型

动力学模型是伞梯式陆基 AWEs 设备和控制设计的关键基础。本节将建立适用于伞梯式陆基 AWEs 空中设备的坐标系, 并基于有限段的方法建立系统缆绳的多刚体绳索模型^[1]。

1.1 坐标系建立

构建地面坐标系、伞体相对坐标系和伞体对风坐标系以表征空中伞体位置, 为建立伞梯式陆基 AWEs 动力学模型奠定基础。

1) 地面坐标系: 以系统的单伞动力学模型为例, 构建如图 2 所示的地面参考坐标系, 3 个坐标系向量均统一于该坐标系。如图, O 为坐标系原点, 在本文中代指卷扬-发电机组坐标系位置, P 为伞组设备质心坐标系位置, P' 为伞组设备质心在水平面的投影位置。(结合项目实况, x 轴指向地理东方, y 轴指向地理北方, 分别描述伞组设备在水平面上东西向和南北向移动; z 轴垂直于 x 轴和 y 轴, 竖直向上)。

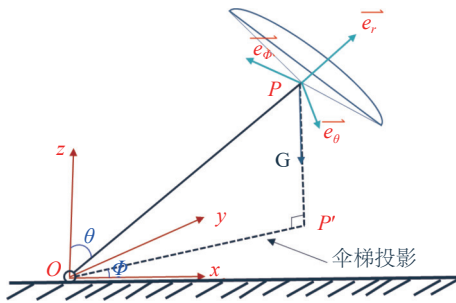


图 2 单伞坐标系示意图

Fig. 2 Single kite coordinate system diagram

2) 伞体相对坐标系: 以空中伞体的质心为原点构建伞体相对坐标系以表征伞体极坐标 (θ, Φ, r) 的变化。 \vec{e}_r 表示缆绳长度 r 变化的正方向, $\vec{e}_r = \frac{\vec{OP}}{\|\vec{OP}\|}$; \vec{e}_θ 表示坐标 θ 变化的正方向, 处于平面 OPP' 内, 且 $\vec{e}_\theta \perp \vec{e}_r$; \vec{e}_ϕ 表示伞体投影 \vec{OP}' 与水平 x 轴方向夹角 Φ 变化的正方向, $\vec{e}_\phi = \frac{\vec{OP}' \times \vec{P}'\vec{P}}{\|\vec{OP}' \times \vec{P}'\vec{P}\|}$ 。

3) 对风坐标系: 如图 3 所示, 坐标系原点位于伞的质心; 伞所受气动阻力方向与相对风速 W_e 平行; 气

动阻力 F_D 和气动升力 F_L 在投影面 S 内, 且 $F_L \perp F_D$ 。则记 x_w, y_w 和 z_w 为对风坐标系的坐标轴。

1.2 基于多刚体绳索的伞梯系统动力学模型

考虑到伞梯式陆基 AWEs 运行过程中, 缆绳为具有一定柔性的非刚体, 在高空风场环境中难以保持直线形状。因此, 使用有限段方法建立主缆绳的多刚体绳索模型, 以更真实地模拟伞梯式陆基 AWEs 的动力学行为。

如图 4 所示, 将柔性的、线密度均匀的缆绳离散为 n 段, 每一段假定为细长的刚性杆, 其质量分布在段的末端。在上述假设的前提下, 缆绳被视为为开链式多刚体系统。本节假设缆绳各个节点只受重力以及系统内部约束力的作用。则缆绳各节点间位置、速度和加速度的地面坐标系表示如式(1)~式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ z_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{i+1} \sin(\theta_{i+1}) \cos(\phi_{i+1}) \\ l_{i+1} \sin(\theta_{i+1}) \sin(\phi_{i+1}) \\ l_{i+1} \cos(\theta_{i+1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

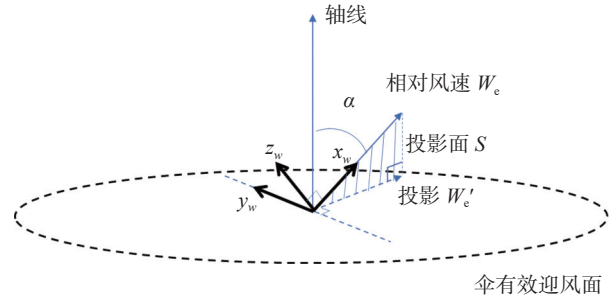
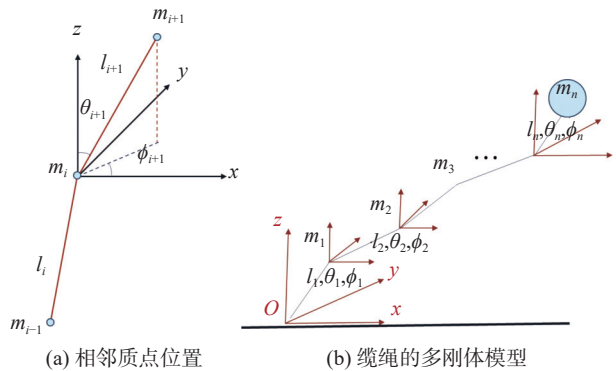


图 3 对风坐标系示意图

Fig. 3 Wind coordinate system diagram



(a) 相邻质点位置

(b) 缆绳的多刚体模型

图 4 多刚体模型中相邻质点的位置关系与缆绳的多刚体模型示意图

Fig. 4 The positional relationship between adjacent mass points in the multi-rigid body model and the multi-rigid body model of the cables schematic diagram

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i+1} \\ \dot{y}_{i+1} \\ \dot{z}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} + \mathbf{E}(\theta_{i+1}, \phi_{i+1}) \begin{bmatrix} l_{i+1} \dot{\theta}_{i+1} \\ l_{i+1} \sin(\theta_{i+1}) \dot{\phi}_{i+1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_{i+1} \\ \ddot{y}_{i+1} \\ \ddot{z}_{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_i \\ \ddot{y}_i \\ \ddot{z}_i \end{bmatrix} + \dot{\mathbf{E}}(\theta_{i+1}, \phi_{i+1}) \begin{bmatrix} l_{i+1} \dot{\theta}_{i+1} \\ l_{i+1} \sin(\theta_{i+1}) \dot{\phi}_{i+1} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{E}(\theta_{i+1}, \phi_{i+1}) \begin{bmatrix} l_{i+1} \ddot{\theta}_{i+1} \\ l_{i+1} \sin(\theta_{i+1}) \ddot{\phi}_{i+1} + l_{i+1} \cos(\theta_{i+1}) \dot{\theta}_{i+1} \dot{\phi}_{i+1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cos(\Phi) & -\sin(\Phi) & \sin(\theta) \cos(\Phi) \\ \cos(\theta) \sin(\Phi) & \cos(\Phi) & \sin(\theta) \sin(\Phi) \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:

(x, y, z) ——各节点在地面坐标系的位置坐标表示

(m) ;

\mathbf{E} ——旋转矩阵;

l_i ——第*i*段缆绳长度(m);

θ ——第*i*段缆绳与竖直方向夹角(rad);

ϕ ——第*i*段缆绳投影与水平轴方向夹角

(rad)。

Kane 方法由 Kane 在 20 世纪 80 年代提出^[12], 是一种用于描述和分析多体动力学系统的数学建模方法, 现已成为研究机械系统动力学的重要工具之一^[13-15]。基于 Kane 方法对上述多刚体系统建模。离散的 n 个节点 Kane 动力学方程如下:

$$\begin{cases} F_{\theta_j} + F_{\theta_j}^* = 0, j = 1, 2, \dots, n \\ F_{\phi_j} + F_{\phi_j}^* = 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} F_{\theta_j} = \sum_{i=1}^n F_{\text{ext},i} \cdot \frac{\partial v_i}{\partial \dot{\theta}_j} \\ F_{\theta_j}^* = \sum_{i=1}^n -m_i a_i \cdot \frac{\partial v_i}{\partial \dot{\theta}_j} \\ F_{\phi_j} = \sum_{i=1}^n F_{\text{ext},i} \cdot \frac{\partial v_i}{\partial \dot{\phi}_j} \\ F_{\phi_j}^* = \sum_{i=1}^n -m_i a_i \cdot \frac{\partial v_i}{\partial \dot{\phi}_j} \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial \dot{\theta}_j} = \begin{cases} 0, i < j \\ \frac{\partial v_j}{\partial \dot{\theta}_j}, i \geq j \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial \dot{\phi}_j} = \begin{cases} 0, i < j \\ \frac{\partial v_j}{\partial \dot{\phi}_j}, i \geq j \end{cases} \quad (8)$$

式中:

F_{θ_j} —— θ 方向广义主动力(N);

$F_{\theta_j}^*$ —— θ 方向广义惯性力(N);

F_{ϕ_j} —— ϕ 方向广义主动力(N);

$F_{\phi_j}^*$ —— ϕ 方向广义惯性力(N);

m_i ——第*i*段缆绳质点质量(kg);

$\frac{\partial v_i}{\partial \dot{\theta}_j}$ ——第*i*段缆绳广义速度相对 θ 方向的偏速度;

$\frac{\partial v_i}{\partial \dot{\phi}_j}$ ——第*i*段缆绳广义速度相对 ϕ 方向的偏速度。

式(6)即作用在多刚体系统的任一广义坐标 θ_j 和 ϕ_j 上的广义外力与广义惯性力之和为 0。

化简 Kane 动力学方程, 有如式(9)所示封闭形式的动力学模型:

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 & \ddot{\phi}_1 & \dots & \ddot{\theta}_n & \ddot{\phi}_n \end{bmatrix}^T = \mathbf{B} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} M_{2j-1, 2k-1} = \sum_{i=j}^n m_i l_j l_k f, f = \begin{cases} \mathbf{R}(j, k)_{1,1}, k \leq i \\ 0, k > i \end{cases} \\ M_{2j-1, 2k} = \sum_{i=j}^n m_i l_j l_k f, f = \begin{cases} \sin(\theta_k) \mathbf{R}(j, k)_{1,2}, k \leq i \\ 0, k > i \end{cases} \\ M_{2j, 2k-1} = \sum_{i=j}^n m_i l_j l_k f, f = \begin{cases} \sin(\theta_j) \mathbf{R}(j, k)_{2,1}, k \leq i \\ 0, k > i \end{cases} \\ M_{2j, 2k} = \sum_{i=j}^n m_i l_j l_k f, f = \begin{cases} \sin(\theta_j) \sin(\theta_k) \mathbf{R}(j, k)_{2,2}, k \leq i \\ 0, k > i \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中:

\mathbf{M} ——质量的参数矩阵;

\mathbf{B} ——力的参数矩阵;

\mathbf{R} ——旋转矩阵组成的算子。

2 伞梯轨迹跟踪控制策略

由伞梯式陆基 AWEs 的运行动力学分析可知, 伞梯空中设备的运动轨迹控制最终等效于多刚体缆绳模型的节点位移控制。该系统具有显著的时变性和非线性特点, 为便于设计控制系统控制律, 将式(9)改写如式(11)所示状态模型:

$$\mathbf{M}(\mathbf{s}) \ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{G}(\mathbf{s}) = \mathbf{F} \quad (11)$$

式中:

- $M(s)$ —— 惯性项;
- $C(s, \dot{s})$ —— 科里奥利项;
- $G(s)$ —— 重力项(N);
- F —— 外力项(N)。

如上述多刚体绳索系统模型, 可将链式多刚体附着质点 $i = 1 \dots n$ 分为如下 3 类 (如式(12)–式(14)所示):

- 1) $i = n$ 。即该质点为氦气球所处的质点, 该质点同时受到浮力与空气动力。
- 2) $i \in S_P$ 。即该质点为平衡/做功伞所处的质点, 集合 S_P 中的质点受到空气动力作用, 但不受浮力作用。
- 3) $i \neq n, i \notin S_P$ 。即该质点非附着平衡/做功伞或氦气球的质点, 此类质点不受浮力与空气动力作用。

$$F_{\text{ext}_1} = -\rho V g + \frac{1}{2} \rho A_n \|W_{e,n}\|^2 C_{d,n} \dot{z}_{w,n}, \quad i = n \quad (12)$$

$$F_{\text{ext}_2} = \frac{1}{2} \rho A_i \|W_{e,i}\|^2 (C_1(\alpha_i) \dot{x}_{w,i} + C_d(\alpha_i) \dot{z}_{w,i}) = A_i \cdot F_{\text{basis},i}, \quad i \in S_P \quad (13)$$

$$F_{\text{ext}_3} = 0, \quad i \neq n, i \notin P \quad (14)$$

式中:

- A —— 所构造表示各个质点有效迎风面积的列向量(m^2), 其各行元素满足 $A_i = 0, i \neq n, i \notin S_P$;
- α_i —— 第 i 个伞体质点攻角(rad);
- F_{ext} —— 上述 3 类质点所受外力(N)。

则各伞体质点 $m_i, i \in S_P$ 的空气动力均可表示为自身有效迎风面积 A_i 与一个基向量 $F_{\text{basis},i}$ 的线性乘积,

式(11)外力项转为:

$$\begin{cases} F = F_\alpha + F_\beta u, \\ u = [\dots A_i \dots]^T, i \in S_Q, S_Q \subseteq S_P \end{cases} \quad (15)$$

式中:

- S_Q —— 可自由开合的平衡/做功伞所处的质点的集合;
- u —— S_Q 中质点上的伞体有效迎风面积组成的控制向量。

则本节所设计伞梯轨迹跟踪控制策略实现形式为调整各伞所处的质点的位置, 并且通过改变伞体连接分缆绳长度以改变伞体有效迎风面积, 以姿态控制方法实现伞梯多刚体系统各节点的轨迹跟踪控制, 克服风速扰动的对伞梯系统运行的影响。伞梯轨迹跟踪控制策略设计示意图如图 5 所示。

如上述伞梯多刚体模型, 为其设计用广义坐标描述的期望轨迹 s_d , 该期望轨迹表示伞梯从初始状态运动到期望的平衡状态过程。此时定义伞梯的状态误差如式(16)所示:

$$e = s_d - s \quad (16)$$

$$s = [\theta_1 \quad \phi_1 \quad \dots \quad \theta_n \quad \phi_n]^T \quad (17)$$

式中:

- e —— 伞梯轨迹状态误差(rad);
- s —— 广义坐标系下的伞梯运动轨迹(rad)。

则可设计增广比例微分 (Proportional Differential, PD) 控制律:

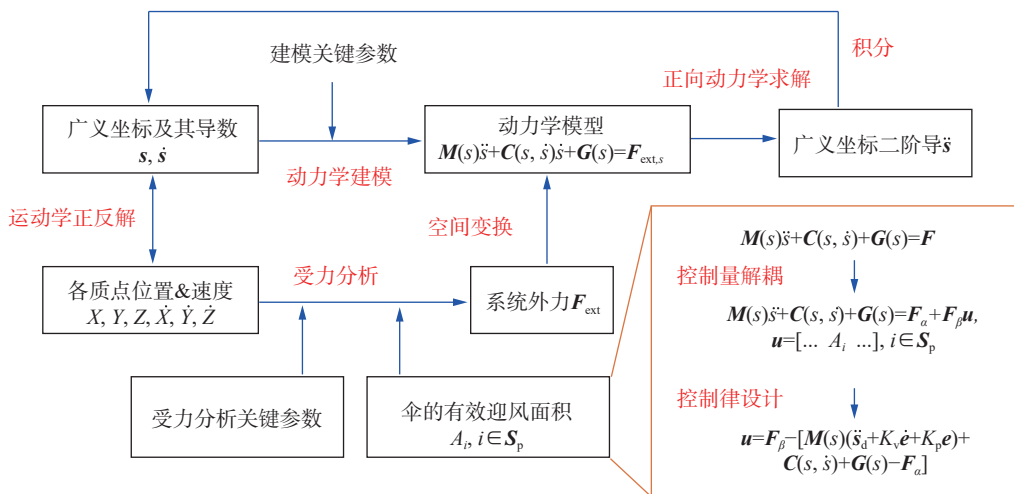


图 5 伞梯轨迹跟踪控制策略设计示意图

Fig. 5 Design diagram of kite train trajectory tracking control strategy

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}_\beta^{-1} [\mathbf{M}(\mathbf{s})(\ddot{\mathbf{s}}_d + \mathbf{K}_v \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_p \mathbf{e}) + \mathbf{C}(\mathbf{s}, \dot{\mathbf{s}}) + \mathbf{G}(\mathbf{s}) - \mathbf{F}_\alpha] \quad (18)$$

伞梯式陆基 AWEs 位置控制系统各参数设置如表 1 所示。

表 1 伞梯系统参数

Tab. 1 Kite train system parameters

参数/单位	控制系统参数取值	描述
$\rho_s / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.5	氦气球和伞的材质面密度
r_b / m	10	氦气球半径
$C_l / \text{常系数}$	0	氦气球气动升力系数
$C_d / \text{常系数}$	0.6	氦气球气动阻力系数
l_b / m	600	氦气球与地面锚固点距离
r_p / m	20	平衡伞最大半径
A_{\max} / m^2	1 256	平衡伞最大有效迎风面积
m_b / kg	628	平衡伞质量
$\Delta L / \text{m}$	60	平衡伞之间间距

3 伞梯系统同步控制策略

对于伞梯式陆基 AWEs, 伞梯群分散协调与智能协同尤为重要。为实现运行安全控制, 针对毗邻的多个伞梯, 在保证状态误差的收敛性的同时, 应考虑规避伞梯之间的碰撞风险, 尤其是高空风场存在时变的纵向扰动时。本节通过设计同步控制律以使伞梯之间达到运动的同步, 实现系统在高空风场动态环境中的安全高效运行的控制目标。

如图 6 所示, 多伞梯系统中的每个毗邻的伞梯分别具有广义坐标 $(\mathbf{s}_1 \dots \mathbf{s}_k)$, 期望状态 $(\mathbf{s}_{d,1} \dots \mathbf{s}_{d,k})$ 以及

状态误差 $(\mathbf{e}_1 \dots \mathbf{e}_k)$ 。记伞梯间混合状态误差如式 (19) 所示:

$$\begin{cases} \mathbf{e}_{c,i} = \mathbf{e}_i + d \int_0^t \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_{i+1}, i = 1 \dots k-1 \\ \mathbf{e}_{c,k} = \mathbf{e}_k + d \int_0^t \mathbf{e}_k - \mathbf{e}_1 \end{cases} \quad (19)$$

式中:

d ——比例系数。

装置 $i = 1 \dots k$ 的动力学模型如式 (20) 所示:

$$\mathbf{M}(\mathbf{s}_i) \ddot{\mathbf{s}}_i + \mathbf{C}(\mathbf{s}_i, \dot{\mathbf{s}}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{s}_i) = \mathbf{F}_{\alpha,i} + \mathbf{F}_{\beta,i} \mathbf{u}_i \quad (20)$$

则可设计装置 $i = 1 \dots k$ 如式 (21) 的计算力矩同步控制律:

$$\begin{cases} \mathbf{u}_i = \mathbf{F}_{\beta,i}^{-1} [\mathbf{M}(\mathbf{s}_i)(\ddot{\mathbf{s}}_{d,i} + d(\dot{\mathbf{e}}_i - \dot{\mathbf{e}}_{i+1}) + \mathbf{K}_{v,i} \dot{\mathbf{e}}_{c,i} + \mathbf{K}_{d,i} \mathbf{e}_{c,i}) + \\ \mathbf{C}(\mathbf{s}_i, \dot{\mathbf{s}}_i) + \mathbf{G}(\mathbf{s}_i) - \mathbf{F}_{\alpha,i}], i = 1 \dots k-1 \\ \mathbf{u}_k = \mathbf{F}_{\beta,k}^{-1} [\mathbf{M}(\mathbf{s}_k)(\ddot{\mathbf{s}}_{d,k} + d(\dot{\mathbf{e}}_k - \dot{\mathbf{e}}_1) + \mathbf{K}_{v,k} \dot{\mathbf{e}}_{c,k} + \mathbf{K}_{d,k} \mathbf{e}_{c,k}) + \\ \mathbf{C}(\mathbf{s}_k, \dot{\mathbf{s}}_k) + \mathbf{G}(\mathbf{s}_k) - \mathbf{F}_{\alpha,k}] \end{cases} \quad (21)$$

式中:

$\mathbf{F}_{\beta,i}^{-1}, i = 1 \dots k$ ——矩阵 $\mathbf{F}_{\beta,i}, i = 1 \dots k$ 的伪逆, 满足 $\mathbf{F}_{\beta,i} \cdot \mathbf{F}_{\beta,i}^{-1} = \mathbf{I}$;

$\mathbf{K}_{d,i}$ ——所设计增广 PD 控制律中的比例项系数;

$\mathbf{K}_{v,i}$ ——所设计增广 PD 控制律中的微分项系数。

则可得各伞梯的闭环方程如式 (22) 所示:

$$\ddot{\mathbf{e}}_{c,i} + \mathbf{K}_{v,i} \dot{\mathbf{e}}_{c,i} + \mathbf{K}_{d,i} \mathbf{e}_{c,i} = \mathbf{0}, i = 1 \dots k \quad (22)$$

如上, 通过设计的增广 PD 控制律可以得到多伞梯式陆基 AWEs 的渐近收敛的同步误差。假设为各

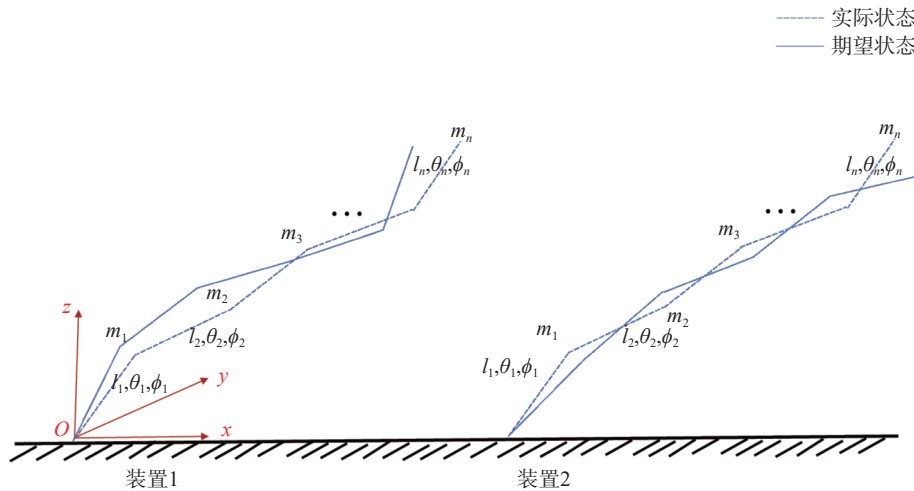


图 6 毗邻伞梯间的位置关系示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the positional relationship between adjacent kite trains

伞梯规划期望状态 $s_{d,i} = s_d, i = 1 \dots k$, 并且期望状态 s_d 关于时间的 1, 2 阶微分 \dot{s}_d 、 \ddot{s}_d 具有合理的变化情况, 此时实施上述控制律可以得到系统的渐近收敛的混合误差, 在各伞梯向期望轨迹收敛的同时防止多伞梯系统内伞梯之间的碰撞。

4 仿真分析

本文在 Matlab/Simulink 中基于上述动力学模型与控制算法进行仿真分析, MATLAB 作为一款强大的数学计算与可视化软件, 广泛应用于科学研究、工程计算及数据分析等领域^[16-17]。而 Simulink 作为其扩展工具箱之一, 专注于动态系统和嵌入式系统的模拟与仿真, 提供了图形化编程环境, 使得用户可以通过拖拽组件构建复杂的系统模型^[18-19]。

4.1 纵向扰动高空风场的伞梯运动跟踪控制仿真

在该实验阶段, 假设伞梯式陆基 AWEs 所处高空风场风向风速为沿地面坐标系 x 轴方向、大小为 10 m/s 的来风, 并连续施加沿地面坐标系 y 轴方向、大小为 3 m/s 的纵向风扰动。依照指数规律设计伞梯各个质点的广义坐标期望值 θ_d 随时间的变化情况如式(23)所示:

$$\begin{cases} \theta_{d,i} = (\theta_{s,i} - \theta_{e,i})e^{-\frac{t}{T}} + \theta_{e,i} \\ \dot{\theta}_{d,i} = -\frac{1}{T}(\theta_{s,i} - \theta_{e,i})e^{-\frac{t}{T}} \end{cases} \quad (23)$$

式中:

θ_s ——期望轨迹的起始状态(rad);

θ_e ——期望轨迹的平衡状态(rad);

T ——过渡过程时间常数。

实验参数设置如表 2 所示。

表 2 跟踪控制实验参数

Tab. 2 Tracking control experimental parameters

实验参数	实验参数取值
$\theta_{s,i}$	$\frac{\pi}{2} - 0.1, i = 1 \dots n$
θ_e	$[0.63, 0.63, 0.63, 0.62, 0.61, 0.59, 0.53, 0.50, 0.46, 0.37]^T$
T	15
K_v	diag(25)
K_d	diag(50)

在伞梯在运动过程中, 伞体广义坐标下期望轨迹如图 7 所示, 广义坐标 θ 随时间的变化如图 8 所示,

与 θ_d 的误差随时间的变化如图 9 所示, 各个伞的 α 角随时间的变化如图 10 所示。如图 9—图 10, 伞梯受控运行过程的轨迹状态误差与各伞体 α 角在 50 s 后均基本趋于稳定, 保持在稳定值附近, 且伞梯各质点的轨迹状态误差都近似收敛到 0 附近, 实现了纵向扰动下的稳定轨迹跟踪控制。

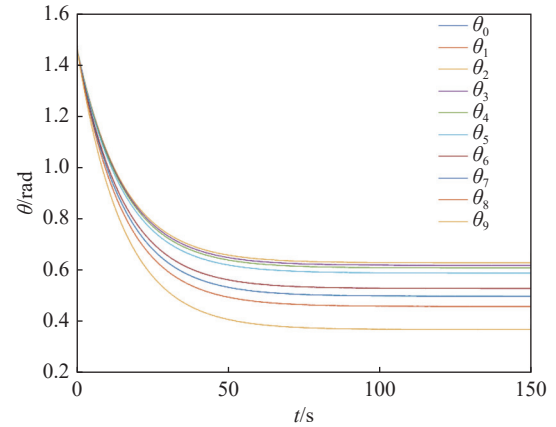


图 7 所设定伞梯各质点期望轨迹

Fig. 7 Expected trajectories of each particle on the set kite train

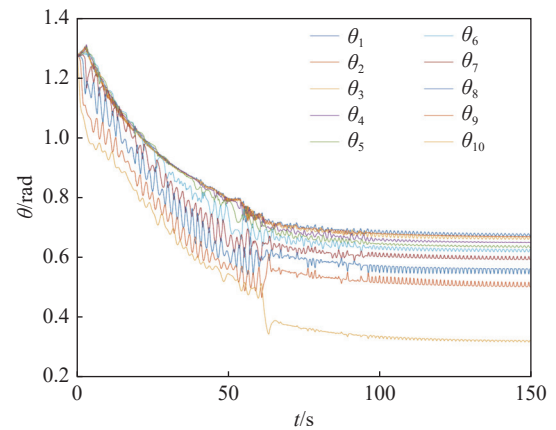


图 8 伞梯各质点实际轨迹

Fig. 8 Actual trajectories of each particle on the kite train

4.2 纵向扰动高空风场的多伞梯同步控制仿真

如上述式(19)所示同步控制律, 本节进行纵向扰动高空风场的多伞梯同步控制仿真实验, 实验参数设置如表 3 所示, 伞梯间的同步误差变化情况如图 11—图 12 所示, 在前期运行过程中, 两伞梯系统间的同步误差较大, 但随着运行控制, 多刚体模型各质点的同步误差在 150 s 后基本稳定。经过一段时间的控制后, 两伞梯的形状达到近似平行, 符合系统防碰撞控制的安全考虑需求。显然, 在所设计的同

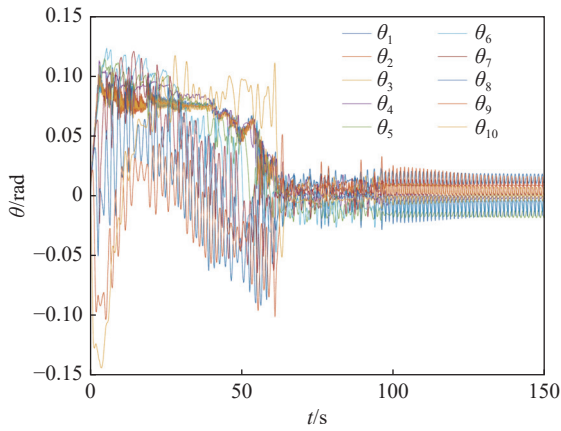
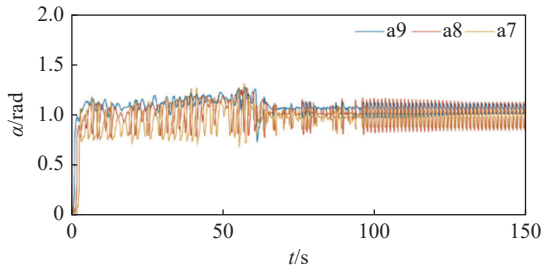
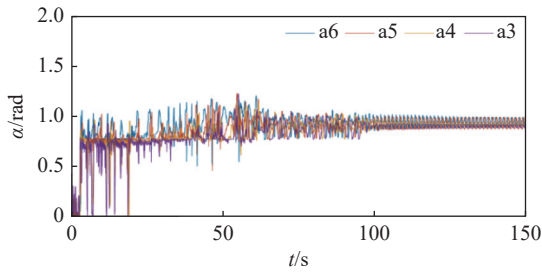


图 9 伞梯实际轨迹与期望轨迹误差示意图
Fig. 9 Schematic diagram of the error between the actual trajectory and the expected trajectory of the kite train



(a) 伞梯1平衡伞 α 角变化



(b) 伞梯1做功伞 α 角变化

图 10 伞梯各伞体 α 角变化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of changes in the α angles of each umbrella of the kite train

步控制律控制作用下,伞梯间的状态误差收敛能力相比于单个伞梯而言有所下降。事实上,由于控制量由各个伞的有效迎风面积组成,具有实际物理意义,需要保持严格的有界性^[20];此外,伞梯的链式多刚体模型是高度非线性的欠驱动系统,控制量之间高度耦合,不具有全局能控性,在同步控制实验中可能存在不可估计的不能控的状态。虽然多伞梯系统同步控制实验状态误差较于单伞梯有所增大,但是伞梯之间仍然在有限时间内取得了较好的同步性,足见同步控制律的有效性。

表 3 同步控制实验参数

Tab. 3 Synchronous control experimental parameters

实验参数	实验参数取值
d	10
$K_{v,i}$	diag(80)
$K_{d,i}$	diag(25)

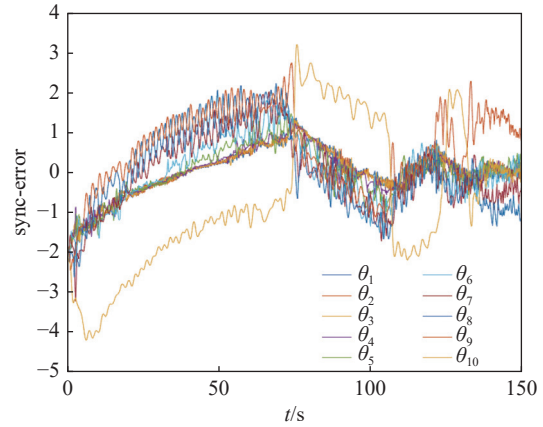


图 11 伞梯 1 同步误差变化

Fig. 11 Kite train 1 synchronization error change

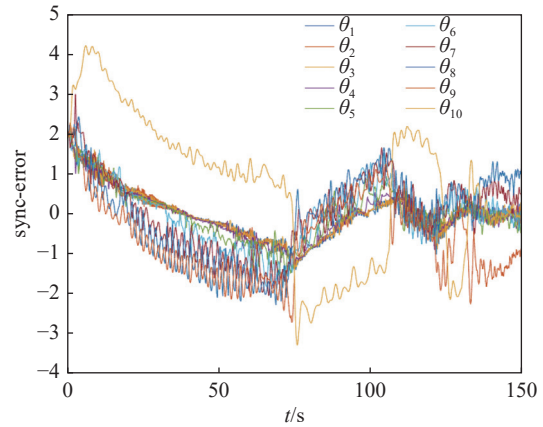


图 12 伞梯 2 同步误差变化

Fig. 12 Kite train 2 synchronization error change

4.3 噪声纵向扰动下的伞梯系统稳定性分析

为进一步证明所提出控制策略的有效性,本节的仿真实验中,在沿地面坐标系 x 轴方向、大小为 10 m/s 的恒定来风基础上,为风速施加不同频率、不同幅度的正弦扰动,观察施加上述轨迹跟踪控制律的伞梯与同步控制律的多伞梯系统的运动过程,以研究伞梯系统在噪声纵向扰动环境下的稳定性。

在本节跟踪控制仿真实验中,当在上述噪声纵向扰动的高空风场环境下,做功伞所处各质点 θ 角的

误差大小超过 0.1 rad, 则认为该伞梯系统不能够通过本文所设计跟踪控制策略以克服高空风速扰动的影响, 此时判定伞梯运行是不稳定的。仿真实验进行 50 s 后, 加上不同幅度、不同周期的纵向正弦扰动, 伞梯稳定性情况记录如表 4 所示。

表 4 正弦扰动对受控制单伞梯的稳定性影响

Tab. 4 The influence of sinusoidal disturbance on the stability of controlled single umbrella ladder

幅度	周期			
	20 s	10 s	5 s	2 s
5 m/s	稳定	稳定	稳定	稳定
7 m/s	稳定	稳定	稳定	稳定
9 m/s	不稳定	稳定	稳定	稳定
11 m/s	不稳定	稳定	不稳定	不稳定
13 m/s	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定

在本节同步控制仿真实验中, 设置伞梯缆绳锚固点间隔为 200 m。当两个伞梯受到不同的噪声纵向扰动时, 其做功伞所处各质点 θ 角误差大小超过 0.1 rad, 或伞梯间距小于 140 m, 则认为该伞梯系统不能够通过本文所设计同步控制策略以克服高空风速扰动的影响, 此时判定伞梯运行是不稳定的。仿真实验进行 50 s 后, 加上不同幅度、不同周期的纵向正弦扰动, 伞梯稳定性情况记录如表 5 所示。

表 5 正弦扰动对受同步控制的多伞梯系统的稳定性影响

Tab. 5 The influence of sinusoidal disturbance on the stability of multi parachute ladder systems under synchronous control

幅度	周期			
	20 s	10 s	5 s	2 s
2.5 m/s	稳定	稳定	稳定	稳定
5 m/s	不稳定	稳定	稳定	稳定
7 m/s	不稳定	稳定	稳定	稳定
9 m/s	不稳定	稳定	不稳定	稳定
11 m/s	不稳定	不稳定	不稳定	稳定
13 m/s	不稳定	不稳定	不稳定	不稳定

如表 4—表 5 所示, 当为高空风场所施加正弦纵向扰动幅度与周期较小时, 本文所设计跟踪控制策略与同步控制策略仍保持较好的控制效果, 实现伞梯控制系统运行过程的稳定与误差收敛, 这证明了本文控制策略的有效性。然而, 随着所施加正弦纵向扰动幅度与频率的增长, 当到达高幅度高频率变

化的极端风场环境, 伞梯控制系统稳定性逐渐降低, 尤其是多伞梯同步控制策略, 对高空风场风速变化更为敏感。因此, 在伞梯式陆基 AWEs 运行过程中, 应准确掌握实时风场变化信息, 实现在极端运行环境下的紧急停运等操作, 以规避风险, 确保设备的安全运行。

本文所设计控制策略是基于具有实际物理意义的控制量设计, 需要保持严格的有界性, 这限制了控制律的灵活性和响应速度。同时, 所建立伞梯链式多刚体模型高度非线性且欠驱动, 控制量之间高度耦合, 导致系统不具有全局能控性, 可能存在不可控状态。但是在较小幅度和周期的正弦纵向扰动仿真环境下, 跟踪控制和同步控制策略均表现出良好的控制效果, 系统稳定性高, 足见所设计控制策略有效性。在未来的研究中, 有必要对模型进一步优化简化, 同时结合对高空风场风速信息的预测, 开发具有迭代优化特性的模型预测控制方案, 并嵌套设计极端风况下的机组自停自动控制策略, 以推动伞梯式陆基 AWEs 技术的进一步发展。

5 结论

高空风力发电技术是一种创新且潜力巨大的可再生能源解决方案, 有望成为未来能源结构的重要组成部分。25 MW 级高空风能发电技术与装备研究将推动我国千米级高空风能发电原创技术策源地建设和产业发展。本文以中国能源建设集团参与建设运营的某伞梯式陆基 AWEs 发电站示范工程为研究对象, 开展高空风电系统建模与稳定运行控制方法的试验研究, 得到如下结论:

1) 基于所建立的伞梯式陆基 AWEs 多刚体模型, 设计了以安全稳定运行控制目标的跟踪控制与同步控制方法, 通过调整伞体的有效迎风面积能够实现高空风场变化的纵向扰动下, 伞梯的实际运动轨迹与期望轨迹之间的误差收敛, 且基于所设计同步控制律, 实现了多伞梯间的运行同步, 达到防碰撞的安全运行目的, 且所设计控制方法具有实际物理意义。

2) 在多种噪声纵向扰动的高空风场模拟环境中, 若达到系统安全运行的目的, 需应准确掌握实时风场变化信息, 在高幅度高频率变化的风场环境中系统仅依靠设计的控制律难以保持稳定, 这是由于伞梯系统控制量之间的高度耦合, 不具有全局能控性

导致,需设计额外的紧急回收等控制措施,以保证系统设备安全。

3) 未来的高空风电控制系统研究,需聚焦于复杂多变工况及运行环境下系统的稳定运行控制方法,控制量可进一步探究地面电机设备与空中设备耦合关系,不局限于空中伞体姿态控制,开发系统鲁棒控制策略,以实现伞梯式陆基 AWEs 系统安全、高效、稳定运行,推动高空风力发电技术进一步发展和应用。

参考文献:

- [1] 黄玲玲,石孝华,符杨,等.基于 DCGCN 模型的海上风电场超短期功率预测 [J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(15): 64-72. DOI: 10.7500/AEPS20231101006.
- HUANG L L, SHI X H, FU Y, et al. Ultra-short-term power prediction for offshore wind farms based on dual channel graph convolution network model [J]. *Automation of electric power systems*, 2024, 48(15): 64-72. DOI: 10.7500/AEPS20231101006.
- [2] 黄穗,蔡彦枫,王俊,等.海面风场资料在广东省阳江海上风电场区域的适用性 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(6): 111-123. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.12.
- HUANG Sui, CAI Yanfeng, WANG Jun, et al. Applicability analysis of sea surface wind field data for Yangjiang offshore wind farm in Guangdong Province [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(6): 111-123. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.12.
- [3] LI Q W, WANG J Z, ZHANG H P. Comparison of the goodness-of-fit of intelligent-optimized wind speed distributions and calculation in high-altitude wind-energy potential assessment [J]. *Energy conversion and management*, 2021, 247: 114737. DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114737.
- [4] 姜阳,陆超,袁志昌,等.高空风力发电系统能量捕获及变换技术:现状与展望 [J/OL]. (2024-08-29) [2024-09-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240829.1325.012.html>.
- JIANG Y, LU C, YUAN Z C, et al. Energy capture and conversion technology of high altitude wind power generation systems: current situation and prospect [J/OL]. (2024-08-29) [2024-09-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20240829.1325.012.html>.
- [5] CHERUBINI A, PAPINI A, VERTECHY R, et al. Airborne wind energy systems: a review of the technologies [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 51: 1461-1476. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.053.
- [6] VERMILLION C, COBB M, FAGIANO L, et al. Electricity in the air: insights from two decades of advanced control research and experimental flight testing of airborne wind energy systems [J]. *Annual reviews in control*, 2021, 52: 330-357. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2021.03.002.
- [7] 韩爽,刘杉.高空风力发电关键技术、现状及发展趋势 [J]. *分布式能源*, 2024, 9(1): 1-9. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2409101.
- HAN S, LIU S. Key technologies, current status and development trends of high-altitude wind power generation [J]. *Distributed energy*, 2024, 9(1): 1-9. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2409101.
- [8] FAGIANO L, QUACK M, BAUER F, et al. Autonomous airborne wind energy systems: accomplishments and challenges [J]. *Annual review of control, robotics, and autonomous systems*, 2022, 5: 603-631. DOI: 10.1146/annurev-control-042820-124658.
- [9] 蔡彦枫,李晓宇.面向空中风力发电系统的高空风场观测 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(1): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.01.
- CAI Y F, LI X Y. High-altitude wind field observation of airborne wind energy system [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(1): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.01.
- [10] 邵垒,毛虹霖,邢胜,等.高空风力发电发展现状及关键技术研究综述 [J]. *新能源进展*, 2020, 8(6): 477-485. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.06.005.
- SHAO L, MAO H L, XING S, et al. Review on development status and key technology of airborne wind energy system [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2020, 8(6): 477-485. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.06.005.
- [11] 周林,施伟,张松浩,等.破碎波作用下单桩式海上风机水动力学数值分析 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(3): 70-80. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.009.
- ZHOU L, SHI W, ZHANG S H, et al. Numerical analysis of hydrodynamic characteristics of monopile-type OWT under breaking wave [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(3): 70-80. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.009.
- [12] KANE T R, LEVINSON D A. The use of Kane's dynamical equations in robotics [J]. *The international journal of robotics research*, 1983, 2(3): 3-21. DOI: 10.1177/027836498300200301.
- [13] DONOHUE B, BEKNALKAR S, BRYANT M, et al. A dynamic model for underwater propulsion of an amphibious rover developed from Kane's method [C]// Anon. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, USA, October 29-November 2, 2023. New Orleans: American Society of Mechanical Engineers, 2023: V006T07A012. DOI: 10.1115/IMECE2023-113559.
- [14] BANERJEE A. Flexible multibody dynamics: efficient formulations with applications [M]. Boca Raton: CRC Press, 2022. DOI: 10.1201/9781003231523.
- [15] 商德勇,黄欣怡,黄云山,等.基于 Kane 方程的 Delta 并联机器人刚柔耦合动力学研究 [J]. *机械工程学报*, 2024, 60(7): 124-

133. DOI: [10.3901/JME.2024.07.124](https://doi.org/10.3901/JME.2024.07.124).
SHANG D Y, HUANG X Y, HUANG Y S, et al. Research on rigid-flexible coupling dynamics of Delta parallel robot based on Kane equation [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2024, 60(7): 124-133. DOI: [10.3901/JME.2024.07.124](https://doi.org/10.3901/JME.2024.07.124).
- [16] SOBIE E A. An introduction to MATLAB [J]. *Science signaling*, 2011, 4(191): tr7. DOI: [10.1126/scisignal.2001984](https://doi.org/10.1126/scisignal.2001984).
- [17] ATTAWAY S. MATLAB: a practical introduction to programming and problem solving (6th ed.) [M]. Waltham: Butterworth-Heinemann, 2022.
- [18] KARRIS S T. Introduction to Simulink with engineering applications [M]. Orchard Publications, 2006.
- [19] HORRI N, PIETRASZKO M. A tutorial and review on flight control co-simulation using Matlab/Simulink and flight simulators [J]. *Automation*, 2022, 3(3): 486-510. DOI: [10.3390/automation3030025](https://doi.org/10.3390/automation3030025).
- [20] LIU K L, GAO Y Z, ZHU C, et al. Electrochemical modeling and parameterization towards control-oriented management of lithium-ion batteries [J]. *Control engineering practice*, 2022, 124: 105176. DOI: [10.1016/j.conengprac.2022.105176](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105176).

作者简介:



罗必雄

罗必雄(第一作者)
1966-, 男, 正高级工程师, 主要从事能源数字化转型和碳达峰碳中和专题研究工作 (e-mail) bxluo@cpecc.net。



杨亚军

杨亚军(通信作者)
1988-, 男, 高级工程师, 主要从事新型发电技术研究工作 (e-mail) yangyajun@ahedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 国家重点研发计划项目“大型伞梯式陆基高空风力发电关键技术及装备”(2023YFB4203400)

承担单位 中国电力工程顾问集团有限公司、西北工业大学、重庆交通大学、清华大学、华北电力大学、中国能源建设集团有限公司、中国科学院工程热物理研究所、上海中路(集团)有限公司、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

项目概述 大力开发和利用以风能为代表的新能源电力,是我国确保国家能源安全和实现双碳目标的必然选择。21世纪以来,风力发电在我国得到了跨越式发展,有力支撑了我国能源结构的转型发展。目前,我国陆上风电、海上风电装机均居全球首位,预计到2030年,风电在我国电源装机中的占比将超过21%。相较于海陆风能,高空风能具有功率密度大、风向风能平稳等优势,近年来已得到了国内外研究机构和企业广泛关注,大规模开发利用潜力较大。根据风能捕获与机电能量转化方式的不同,高空风电分为陆基和空基2种方式。考虑到装备重量等因素约束,陆基高空风力发电在大型化量产上具有一定优势。目前,国内外已完成的空基高空风电最大功率为600kW,而我团队前期研发的伞梯式陆基高空风电机组,已在安徽绩溪实现了单机2.4MW的工程示范。瞄准机组未来的大型化、规模化发展,伞梯式高空风电在实际运行过程仍暴露出风能高效捕获难、空地能量高效转换难、长时稳定控制难等诸多难题。亟需探明伞梯式陆基高空风力发电关键技术中的核心原理,提出具有先进性的系统设计方案。瞄准高空风资源的开发利用,突破高效风能捕获、高效能量传输、长时稳定协调控制等一系列技术难题,建立大型伞梯式陆基高空风力发电理论体系,提出全自主知识产权的大功率、高效、高可靠高空风力发电一体化解决方案,研制10MW样机并实现应用验证,形成高空风力发电行业标准,填补国内高空风力发电技术空白,推动我国高空风力发电产业化发展。

主要创新点 本项目拟解决2项关键科学问题:(1)伞梯复杂流固耦合动力学机制与高效风能捕获机理;(2)高空风力发电系统的能量传递、耗散、转化机理及协同调控机制。拟攻克5项关键技术:(1)考虑高空风环境与柔性伞流-固耦合效应的高精度数值模拟方法及气动布局优化技术;(2)多变向载荷随向顺应及重载分流流高效高可靠传输技术;(3)强非恒定环境下发电组件全过程动态耦合仿真和全系统协同设计技术;(4)适应长时稳定高效运行的伞梯系统多目标优化控制技术;(5)大型伞梯式陆基高空风力发电装备一体化集成技术。

(责任编辑 孙舒)