



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2404770

引用格式:郑传啸,卢浩,何蓓华,等.光伏组件表面灰尘沉积特性的三维数值模拟仿真[J].科学技术与工程,2025,25(17):7173-7179.

Zheng Chuanxiao, Lu Hao, He Beihua, et al. Three-dimensional numerical simulation of dust deposition characteristics on photovoltaic module surfaces[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(17): 7173-7179.

能源与动力工程

光伏组件表面灰尘沉积特性的三维数值模拟仿真

郑传啸¹, 卢浩^{1,2*}, 何蓓华^{1,3}, 赵文君⁴

(1. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 530017; 2. 新疆大学智能科学与技术(未来技术)学院, 乌鲁木齐 530017;
3. 中国长江三峡集团有限公司安徽分公司, 合肥 230031; 4. 英国诺丁汉大学工程学院, 诺丁汉 315119)

摘要 为了探究光伏组件表面灰尘沉积特性,针对地面光伏的积灰问题,利用计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟方法,从倾斜角度和风速两个因素研究了不同粒径的灰尘颗粒的沉积特性。结果表明:随着光伏组件倾斜角度的增大,光伏组件表面灰尘的沉积率逐渐减小,除此之外,发现当光伏组件迎风时,灰尘沉积率随着风速的增加而增加,最大灰尘沉积粒径均会随着风速的增加而变大。同时随着粒径的增大,光伏组件表面灰尘的沉积率先增大后减小。研究结果对探究光伏积灰特性及解决光伏电站的积灰问题有着重要的意义。

关键词 光伏组件; 灰尘沉积; 倾斜角度; 风速; 粒径

中图分类号 TK514;

文献标志码 A

Three-dimensional Numerical Simulation of Dust Deposition Characteristics on Photovoltaic Module Surfaces

ZHENG Chuan-xiao¹, LU Hao^{1,2*}, HE Bei-hua^{1,3}, ZHAO Wen-jun⁴

(1. Electrical Engineering College, Xinjiang University, Urumqi 530017, China;
2. School of Intelligent Science and Technology (Future Technology), Xinjiang University, Urumqi 530017, China;
3. Anhui Branch of China Yangtze River Three Gorges Group Company Limited, Hefei 230031, China;
4. School of Engineering, The University of Nottingham, Nottingham 315119, UK)

[Abstract] In order to explore the dust deposition characteristics on the surface of photovoltaic(PV) modules. For the dust accumulation problem of ground-mounted photovoltaic, the deposition characteristics of dust particles with different particle sizes were investigated from two factors, namely, tilt angle and wind speed, by using CFD numerical simulation method. The results show that as the tilt angle of the PV module increases, the deposition rate of dust on the surface of the PV module gradually decreases, in addition, it is found that when the PV module is facing the wind, the rate of dust deposition increases with the increase of wind speed, and the maximum particle size of dust deposition will become larger with the increase of wind speed. At the same time, with the increase of particle size, the deposition of dust on the surface of the PV module is the first to increase and then decrease. The study is of great significance in solving the problem of dust accumulation in photovoltaic power plants.

[Keywords] photovoltaic module; dust deposition; tilt angle; wind speed; particle size

光伏电站在全世界广泛分布,为了获得充足的太阳能和不影响人类的正常活动,光伏电站大多都建立在戈壁、沙漠等开阔却干旱的地方^[1]。虽然光伏电站在这些地方能充分接受太阳光并把它转化成电能以供人类使用,但是它们要经受强烈的风沙和鸟粪等杂质的污染^[2]。Tian等^[3]发现,粉尘已成

为戈壁、沙漠、高原等地区光伏发电的一个严重问题。长此以往,这种污染会造成光伏阵列的老化、腐蚀^[4]。更重要的是,在这些地区,大量的灰尘沉积在光伏板表面会严重影响光伏电池的发电效率。当太阳光到达光伏板时,它会首先通过玻璃层,玻璃层的传输能力对光电转换效率影响很大^[5-7]。

收稿日期:2024-06-26 修订日期:2025-03-11

基金项目:国家自然科学基金(5226601);新疆天山创新团队计划(2023TSYCTD0009);新疆大学优秀博士研究生创新项目(XJU2022 BS100);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2021D01E08)

第一作者:郑传啸(1993—),男,汉族,湖北襄阳人,硕士,工程师。研究方向:光伏积灰及自清洁。E-mail:cxz@stuxju.edu.cn。

*通信作者:卢浩(1989—),男,汉族,湖北洪湖人,博士,教授。研究方向:光伏积灰及自清洁。E-mail:luhao@xju.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

因此,研究光伏玻璃表面的灰沉积机理对提高光伏发电效率有着重要的作用,对光伏发电行业的发展有着巨大的促进作用。很多学者研究怎样减少光伏板灰尘沉积。光伏组件上的粉尘沉积主要受环境因素、光伏组件因素和粉尘因素的影响。有研究发现像降雨、风、湿度等环境因素会显著影响光伏板表面的灰尘沉积^[8-11]。除此之外,光伏阵列放置的位置、倾角以及高度对灰尘沉积率也有着显著的影响。将光伏板安装在高海拔的地方能够减少光伏板表面的灰尘沉积,并且会延长光伏组件的使用寿命^[12]。除了环境和光伏阵列自身的因素,灰尘颗粒本身的尺寸、密度、粉尘材料对灰尘沉积率都有影响^[13-16]。有学者调查了欧洲污染最严重的城市之一克拉科夫在非采暖季节不同气象条件下光伏组件覆盖玻璃上的灰尘沉积过程。发现光伏组件表面的灰尘沉积率受到该城市的降水和湿度影响强烈^[17]。Lu等^[18]采用离散粒子模预测了光伏电池板上的灰尘沉积率。研究了太阳能光伏系统周围的湍流风场、不同粉尘直径和风速下光伏电池板的粉尘沉积率以及对不同类型光伏组件输出效率的影响。发现当粉尘直径增大时,光伏电池板上的粉尘沉积速率先增大后减小。以往对光伏系统流场的研究大多集中在二维仿真模拟,这种方法简单并且成本低,但是不能全面地贴近现实情况。三维仿真模拟能相对真实地体现光伏系统周围流场地状态。

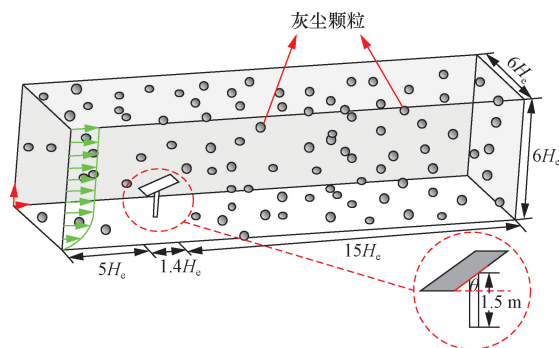
现通过使用计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法研究迎风状态下光伏组件表面的灰尘沉积特性,从倾斜角度和风速两个因素研究不同粒径的灰尘颗粒的沉积特性。

1 仿真模型及求解方法

1.1 仿真模型

研究的计算域如图 1 所示。计算域的长度为 35.31 m,高度为 9.9 m。在计算域内部放置一块光伏组件,光伏组件为单面单晶硅组件,其功率为 500 W,根据该光伏组件 1:1 建立仿真模型,光伏板的长为 2.48 m,宽为 2.48 m,厚为 5 cm,支撑高度为 1.5 m。光伏板的倾斜角度为 θ ,光伏支架是一个长、宽均为 0.1 m 的长方体。光伏板到入口处的距离是 $5H_c$,到出口的距离是 $15H_c$, H_c 为光伏组件高度。 $H_c = 1.65$ m。灰尘颗粒从入口处释放,初始速度采用用户自定义函数 (user-defined functions, UDF)。

采用结构性网格,主要原因是流动复杂程度不高,且方便调节网格参数,如网格间距、增长率等。图 2 展示了研究域的结构化网格,网格总数达 40 万。在光伏板近壁区域考虑了边界层的作用,设计



H_c 为光伏组件高度, $H_c = 1.65$ m

图 1 光伏组件表面灰尘沉积的物理模型

Fig. 1 Physical modeling of dust deposition on the surface of photovoltaic modules

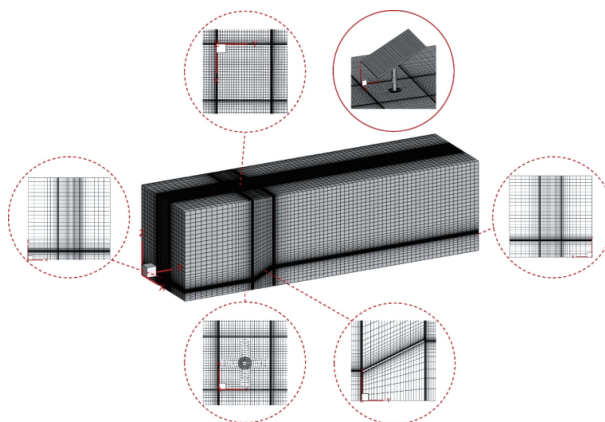


图 2 物理模型的结构化网格

Fig. 2 Structured grids for physical models

了渐变网格。第一个网格无量纲壁面距离 y^+ 为 1.4×10^{-4} m,网格的生长因子为 1.2。由于光伏支架可以视为一个截面圆柱体,因此对其进行 o-block 切块划分。不同倾斜角度、风速的网格数相同,均为 40 万,但 y^+ 墙距会根据风速进行对应修改。

1.2 求解方法及边界条件

模拟光伏系统表面吹灰过程中,应用 Navier-Stokes 方程对进口来风的风速、质量以及动能进行了解和研究。一般来说,随着风流吹来的灰尘颗粒是离散的。因此需要通过求解一些颗粒动力学方程不同的灰尘颗粒的运动轨迹进行跟踪。采用方程离散颗粒 (discrete phase, DPM) 模型,考虑了热泳力、萨夫曼升力以及质量力等影响粒子运动轨迹的力以达到预测粒子运动和扩散的目的。除此之外,与粒子的湍流分散过程有关的模型是通过离散随机游走 (discrete random walk, DRW) 模型来建立的。光伏系统周围的湍流风场和灰尘沉积规律分别通过剪切应力传递 (shear stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型和 DPM 进行求解和预测。

在分析灰尘颗粒沉积之前,对光伏系统周围的

空气流场的模拟尤为重要。因为空气流场在很大程度上影响着灰尘颗粒的运动轨迹。在 CFD 模拟方面,直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)或大涡模拟(large eddy simulation, LES)因为其准确性被广泛应用。但是它们具有计算和时间成本高的缺点。所以,为了减少计算成本,采用雷诺平均纳维-斯托克斯(Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS)模型预测气流场。RANS 方法在预测建筑周围流场的颗粒物沉积情况时也比较准确^[19]。Karava 等^[20]比较了不同湍流模型对建筑物周围风流的数值结果,发现与其他模型相比, SST $k-\omega$ 湍流模型预测的准确率最好。这是因为 SST $k-\omega$ 湍流模型结合了壁面附近的 $k-\omega$ 模型和自由剪切层中的 $k-\omega$ 模型。故采用 SST $k-\omega$ 湍流模型预测风流场。孤立太阳能光伏系统周围湍流空气流场质量守恒和动量守恒可以通式(1)和式(2)来描述, SST $k-\omega$ 湍流模型的运输方程在式(3)和式(4)中得到解释^[21]。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} &= 0 + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \tilde{G}_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \\ &G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度; \bar{u}_i 和 \bar{p} 分别为时间平均速度和压力; \tilde{G}_k 和 Γ_k 分别为湍流动能的产生项和扩散项; G_ω 和 Γ_ω 分别为比耗散率的产生项和扩散项; Y_k 和 Y_ω 分别为湍流动能和比耗散率的耗散项; S_k 和 S_ω 分别为用户定义的源术语, 将 S_k 和 S_ω 均设为零。

利用 DPM 模型来对光伏板表面的灰尘颗粒轨迹进行预测。DPM 模型可以很好地反映光伏板表面平地灰尘沉积率, 其控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} &= \frac{1}{\tau} \frac{C_D Re_p}{24} (u_g - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho_g)}{\rho_p} + \\ &\zeta \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}} + \frac{2\rho K_c v^{0.5}}{\rho_p d_p (S_{ik} S_{kl})} S_{ij} (u - u_p) \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中: C_D 为阻力系数; Re_p 为粒子雷诺数, 表示每单位质量的惯性力与黏性力的比值; u_g 和 u_p 分别为流场中流体和灰尘颗粒的运动速度; g 为重力加速度; ρ_g 和 ρ_p 分别为流体和颗粒的密度; ζ 为正态分布

的随机数; S_0 为随机力的强度参数; Δt 为时间步长; K_c 为与颗粒碰撞或流体作用相关的系数; v 为运动黏度; S_{kl} 和 S_{ik} 为无量纲参数; S_{ij} 为变形张量; u 为局部速度; τ 为弛豫时间, 可通过方程式(6)计算, 即

$$\tau = \frac{Sd_p^2 C_c}{18v} \quad (6)$$

式(6)中: S 为灰尘颗粒和流体的密度比; C_c 为 Cunningham 滑移修正因子。

C_D 的表达式为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p}, & Re_p < 1 \\ \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.687}), & 1 < Re_p < 400 \end{cases} \quad (7)$$

为了正确预测灰尘颗粒的运动轨迹, 考虑了不同的影响颗粒作用的力, 例如曳力、重力、浮力、布朗力和萨夫曼升力。这些力对光伏板表面灰尘沉积行为有着重要的影响。由于研究中的光伏系统布置在沙漠、戈壁等干旱地区, 所以忽略了湿度对气流和颗粒间碰撞的影响。

计算域入口条件参考 Tominaga 等^[22]获得的实验测量。入口风流的主要参数是风速和湍流动能(turbulent kinetic energy, TKE)。采用 UDF, 初始速度设为 2.6 m/s。灰尘颗粒在入口处以空气流速进入计算域。注入的高度控制在光伏系统的 3 倍高度以内。在忽略灰尘颗粒的反弹和再悬浮效果后, 假设灰尘颗粒一旦到达光伏板表面就会沉积。因此在 Ansys Fluent 中对光伏板表面设置“Trap”条件。假设灰尘颗粒一旦到达出口就会离开计算域。因此, 在计算域出口处设置“Escape”条件。使用的灰尘颗粒为碳酸钙, 定义为球形, 密度为 2 800 kg/m³。

2 网格独立性研究及数值验证

网格无关性研究可以很好反映出网格的分辨率。分别取用 20 万、40 万、60 万、80 万的网格数。通过数值验证测得这几种不同网格数的模型在 $Z = 1.5$ m 处的风速分布, 如图 3 所示。发现几种网格的速度分布图差别不大, 40 万以上的网格的速度分布基本上没有差别。相比之下, 20 万的速度分布则跟其他有一些细微的差别, 尤其是在 Y 轴上的距离在 13 ~ 15 m。因此, 使用的网格为 40 万以防止出现任何非持久性结果。

为了验证模拟的准确性, 将模拟的入口处的风速和湍流动能与 Tominaga 等^[22]在风洞实验中获得的数据进行对比, 发现有很好的拟合效果, 如图 4 所示。

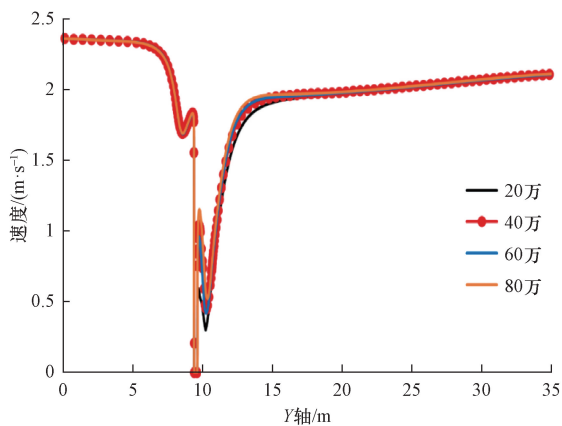
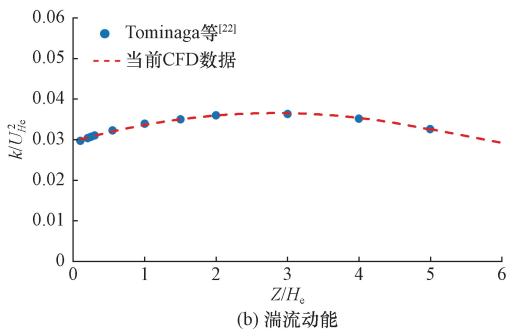
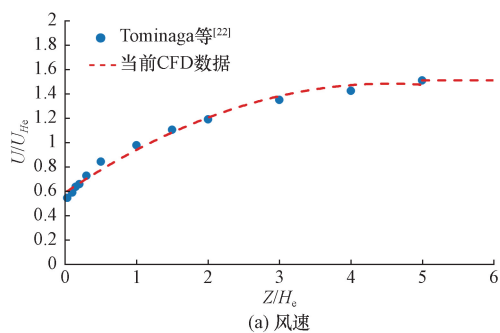


图3 Z = 1.5 m 处的网格无关性验证
Fig. 3 Verification of grid-independence at Z = 1.5 m



横坐标 Z/H_e 为入口处的高度,纵坐标 U/U_{He} 和 k/U_{He}^2 分别为风速和湍流动能

图4 风速及湍流动能用户自定义功能^[22]

Fig. 4 User-defined functions for wind speed and turbulent kinetic energy^[22]

3 结果与分析

3.1 倾斜角度对光伏积灰的影响

光伏系统在实际应用的时候,倾斜角度的改变对其表面灰尘沉积有着很大的影响,将倾斜角度改变,采取 30° 、 45° 以及 60° 等不同的角度来探究其对灰尘沉积的影响。并且研究了在这种变化下,不同的颗粒粒径的沉积特性有何不同。图5是 $Y-Z$ 平面上不同倾斜角度下的光伏组件周围流场风速流线图。图6是不同的倾斜角度下,不同颗粒粒径的灰尘沉积率。

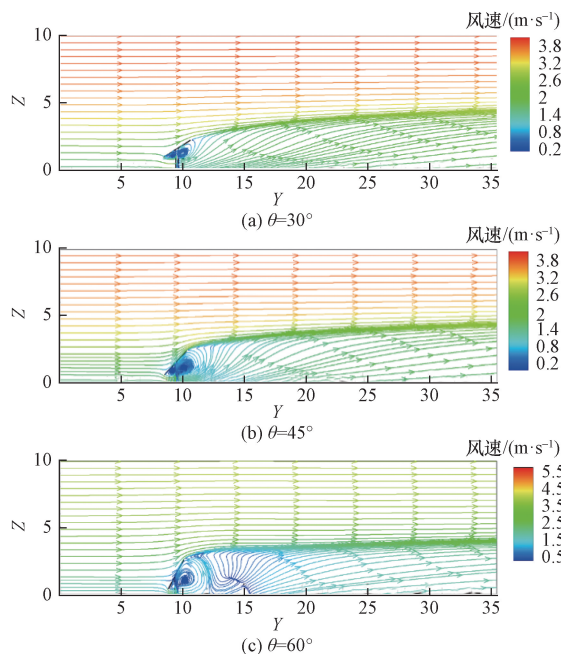


图5 Y-Z 平面上不同倾斜角度光伏组件的风速耦合云图
Fig. 5 Coupled cloud map of wind speed for PV modules with different tilt angles in the Y-Z plane

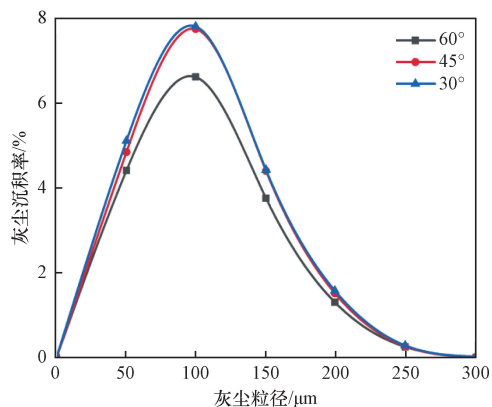


图6 不同倾斜角度下不同颗粒粒径的沉积率
Fig. 6 Deposition rates of different particle sizes at different tilt angles

观察图5可以发现,光伏支架的湍流涡旋出现在光伏组件背面,涡旋回流的灰尘不与光伏组件表面直接发生碰撞。光伏组件涡旋的产生与光伏面板、光伏支架和地面之间的封闭空间体积密切相关。从图6发现,灰尘沉积率随着光伏组件倾斜角度的增加而减小。当倾斜角度为 30° 时, $100 \mu\text{m}$ 的灰尘沉积率最高,达 7.82% 。其次是 45° 时为 7.80% , 60° 时为 6.63% 。观察 30° 和 45° 的速度场[图5(a)、图5(b)],可以发现 30° 和 45° 的流场非常相似,因此它们的沉积特性差距不大。一方面,倾斜角度的大小决定了光伏组件表面与迎风吹来的灰尘的碰撞接触面积,当倾斜角逐渐增

大时,迎风面积越大,灰尘的碰撞角更接近垂直,因此更不容易沉积在光伏组件表面;另一方面,当光伏组件倾斜角度越大,灰尘颗粒受重力的影响更大,灰尘更不易沉积在光伏组件上。这一结论与 Khodakaram-Tafti 等^[23]关于不同倾角光伏系统积灰后性能影响的实验研究结果相一致。研究表明,随着光伏组件倾斜角度的增大,积灰量逐渐减少,同时光伏组件日均发电量的减少幅度也随之降低。

3.2 入口风速对光伏积灰的影响

为了研究入口风速对光伏组件灰尘沉积特性的影响,选择 45° 倾斜的光伏组件进行模拟。研究了入口风速分别为 1.3、2.6、3.9 和 5.2 m/s,灰尘密度为 2 800 kg/m³ 时 CaCO₃ 的灰尘沉积特性,灰尘入射初始速度为光伏组件高度(H_e)处的风速。

图 7 为不同风速下光伏组件的灰尘沉积特征。当光伏组件迎风时,随着风速的逐渐增大,灰尘沉积率随粒径的增大先增大后减小。总灰尘沉积率、灰尘沉积范围、最大灰尘沉积粒径随风速的增大而增大。当风速达到 5.2 m/s 时,灰尘沉积率最大达到 11.47%。此外,灰尘的最大粒径也有所增大,在 1.3 m/s 时最大粒径为 50 μm,在 2.6 m/s 时最大粒径为 100 μm,在 3.9 m/s 时最大粒径约为 125 μm,在 5.2 m/s 时最大粒径为 150 μm。这一发现与 Goossens 等^[24]的研究结果相吻合,他们探讨了在不同风速条件下光伏组件积灰对电池性能的影响。研究揭示,风速对电池性能的下降低具有显著影响:风速越大,积灰量越多,相比之下,大风情况下电池性能的下降低幅度要大于小风时的情况。

图 8 展示了不同风速下灰尘颗粒运动轨迹图,可以发现灰尘在不受光伏组件遮挡时在流场中做抛物线运动,受光伏组件结构影响,灰尘运动轨迹发生变化,且风速越大,灰尘运动距离越远,灰尘运动范围越广。这是因为风速为流场中运动的灰尘提

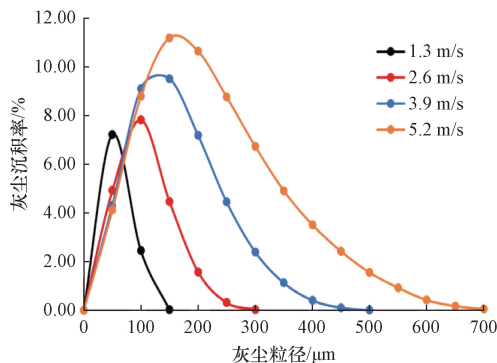


图 7 不同风速下光伏组件灰尘沉积率
Fig. 7 Dust deposition rate of PV modules under different wind speeds

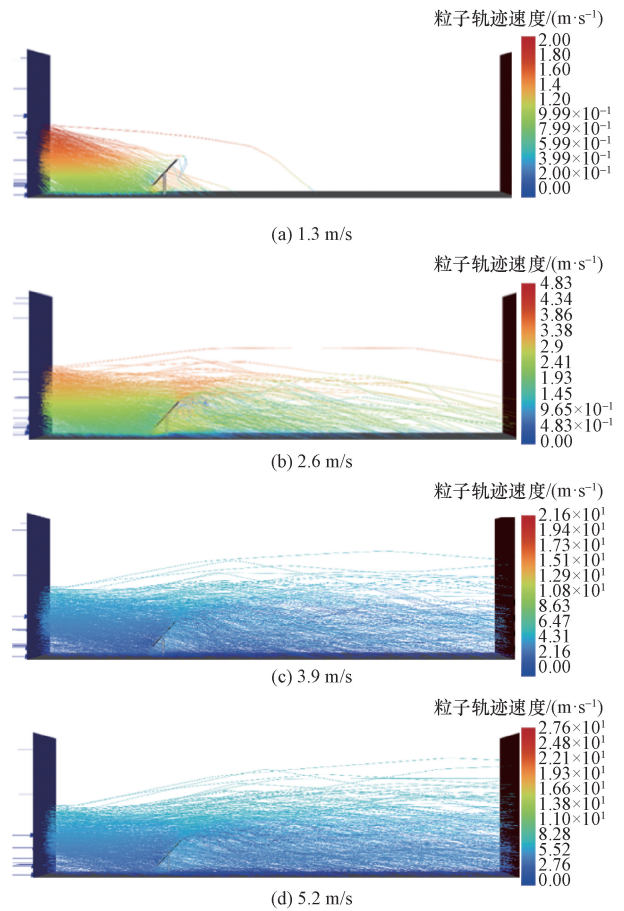


图 8 不同风速下流场颗粒运动轨迹图
Fig. 8 Trajectories of particles in the flow field at different wind speeds

供一定的动能,灰尘在流场中做抛物运动,在横向上由入口风速提供动力,在垂直方向上由重力提供动力。灰尘携带的动能随着风速的增大而增大,原本沉积在光伏组件前方的灰尘因为风速的变大移动得更远,灰尘沉积速率增大。光伏组件后方产生的涡团会夹带部分灰尘回流,但大部分灰尘与光伏组件背面发生碰撞,少量灰尘会与光伏组件正面发生碰撞沉积,因此涡旋在不同风速下对光伏组件表面灰尘沉积特性的影响不显著,可以忽略。因此,灰尘沉积率随着风速的增加而增加。

3.3 灰尘粒径对光伏积灰的影响

如图 7 所示,在相同风速下,随着粒径的增大,光伏组件表面灰尘的沉积率先增大后减小。首先,随着颗粒粒径增大,颗粒的惯性效应增强,这使得颗粒在空气流动中更容易保持稳定的沉积状态。较大的颗粒由于惯性较大,对空气流的惯性阻力也随之增加,因此它们更容易被流体带动并沉积在光伏组件表面上。这是沉积率先增大的主要原因之一,因为在一定范围内,随着颗粒尺寸增大,它们的沉积速度会随之增加,从而使沉积率随粒径增大而

增大。然而,随着颗粒粒径继续增大,其惯性效应并非线性增加。较大的颗粒可能达到一个临界点,超过这个点后,颗粒的惯性阻力增加到一定程度会使其难以随流体流动而保持稳定沉积在表面上。此时,流体的运动特性也会对颗粒的悬浮和沉积产生影响,可能会导致颗粒重新悬浮或者在表面上短暂停留而未能长期稳定沉积。因此,随着颗粒粒径进一步增大,沉积率会因颗粒的惯性效应增强到一定程度而开始下降,形成沉积率先增大后减小的趋势。

4 结论

以孤立地面光伏系统为研究对象,研究了不同的倾斜角度下光伏组件周围流畅的不同,以及不同粒径的灰尘颗粒的沉积规律。除此之外,将入口处的风速改变,研究了分别在 1.3、2.6、3.9 和 5.2 m/s 时,光伏组件表面的灰尘颗粒的沉积特性。发现倾斜角度和风速对灰尘沉积特性有着显著的影响,具体结论如下。

(1)研究三维模型不同倾斜角度对光伏组件表面灰尘沉积特性的影响,发现灰尘沉积率随着光伏组件倾斜角度的增加而减小。

(2)研究不同风速对灰尘沉积特性的影响,发现风速并不会影响光伏系统流场的速度、湍流动能以及迹线的分布情况,仅仅改变离散项灰尘颗粒的运动方式。当光伏组件迎风时,最大灰尘沉积粒径均会随着风速的增加而变大。

(3)研究不同风速对灰尘沉积特性的影响,发现随着粒径的增大,光伏组件表面灰尘的沉积率先增大后减小。

以上研究系统分析了光伏组件表面灰尘沉积特性,通过模拟不同风向和风速下灰尘在光伏组件表面沉积的模式,可以帮助制定更有效的清洁策略。例如,了解哪些区域最容易积尘,可以在清洁时重点关注这些区域,对光伏系统除灰有着重要的作用。然而光伏阵列的研究更加接近真实的情况,因此在未来的研究中可以考虑研究不同影响因素下方来风对光伏阵列的影响。

参 考 文 献

- [1] Izam N S M N, Itam Z, Sing W L, et al. Sustainable development perspectives of solar energy technologies with focus on solar photovoltaic: a review[J]. *Energies*, 2022, 15(8): 2790.
- [2] 鲍官军, 张林威, 蔡世波, 等. 光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述[J]. *机电工程*, 2013, 30(8): 909-913.
Bao Guanjun, Zhang Linwei, Cai Shibo, et al. Review on dust depositing on PV module and cleaning techniques[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(8): 909-913.
- [3] Tian M, Su Y, Zheng H, et al. A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 1272-1296.
- [4] 魏东, 代敏, 唐九龄, 等. 光伏模组积灰与阴影特性分析及识别方法[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(7): 2742-2748.
Wei Dong, Dai Min, Tang Jiuling, et al. Analysis and identification method of dust accumulation and shadow characteristics of photovoltaic modules[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(7): 2742-2748.
- [5] Zheng C, Lu H, Zhao W. Numerical simulation of dust deposition characteristics of photovoltaic arrays taking into account the effect of the row spacing of photovoltaic modules[J]. *Solar Energy*, 2024, 278: 112804.
- [6] Zheng C, Lu H, Zhao W, et al. Study of ash deposition characteristics of photovoltaic arrays taking into account the effect of photovoltaic module spacing and its effect on output characteristics: indoor experiment[J]. *Energy*, 2024, 310: 133138.
- [7] 章涛, 柳玉宾, 崔承刚, 等. 基于语义分割的光伏组件积灰检测与分析[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(32): 14259-14266.
Zhang Tao, Liu Yubin, Cui Chenggang, et al. Research on ash deposition monitoring of photovoltaic modules based on semantic segmentation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(32): 14259-14266.
- [8] 吕玉坤, 魏子安, 魏壮, 等. 不同环境下光伏组件自然积灰特性模拟[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(17): 6966-6972.
Lü Yukun, Wei Zian, Wei Zhuang, et al. Simulation on the characteristics of natural dust accumulation of photovoltaic modules in different environments[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(17): 6966-6972.
- [9] 陈宇翔, 崔凝, 李斌, 等. 积灰性质对光伏组件输出性能影响研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(1): 11-19.
Chen Yuxiang, Cui Ning, Li Bin, et al. Study on the effect of ash accumulation on the output performance of photovoltaic modules[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2024, 45(1): 11-19.
- [10] Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 3124-3131.
- [11] 吕玉坤, 杨宇星, 赵伟萍. 低风速环境下光伏组件积灰特性模拟研究[J]. *电源技术*, 2021, 45(6): 801-804, 827.
Lü Yukun, Yang Yuxing, Zhao Weiping. Ash deposition characteristics of photovoltaic modules under low wind speed numerical simulation[J]. *Power Supply Technology*, 2021, 45(6): 801-804, 827.
- [12] Thornton J P. The effect of sandstorms on PV arrays and components[R]. Golden: National Renewable Energy Lab., 1992.
- [13] El-Shobokshy M S, Hussein F M. Degradation of photovoltaic cell performance due to dust deposition on to its surface[J]. *Renewable Energy*, 1993, 3(6/7): 585-590.
- [14] 牛海明, 崔青汝, 刘厚旭. 积灰对光伏电池板输出特性影响研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(2): 110-117.
Niu Haiming, Cui Qingru, Liu Houxu. Effect of ash accumulation on output performance of photovoltaic panels[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(2): 110-117.
- [15] He B, Lu H, Zheng C, et al. Characteristics and cleaning meth-

- ods of dust deposition on solar photovoltaic modules—a review [J]. *Energy*, 2022, 263: 126083.
- [16] Fouad M M, Shihata L A, Morgan E S I. An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 80: 1499-1511.
- [17] Styszko K, Jaszczur M, Teneta J, et al. An analysis of the dust deposition on solar photovoltaic modules[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26: 8393-8401.
- [18] Lu H, Zhao W. CFD prediction of dust pollution and impact on an isolated ground-mounted solar photovoltaic system[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131: 829-840.
- [19] Zhao B, Wu J. Modeling particle deposition from fully developed turbulent flow in ventilation duct[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(3): 457-466.
- [20] Karava P, Jubayer C M, Savory E. Numerical modelling of forced convective heat transfer from the inclined windward roof of an isolated low-rise building with application to photovoltaic/thermal systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(11/12): 1950-1963.
- [21] Lu H, Lu L. Effects of rib spacing and height on particle deposition in ribbed duct air flows[J]. *Building and Environment*, 2015, 92: 317-327.
- [22] Tominaga Y, Akabayashi S, Kitahara T, et al. Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: wind tunnel experiments and CFD simulations[J]. *Building and Environment*, 2015, 84: 204-213.
- [23] Khodakaram-Tafti A, Yaghoubi M. Experimental study on the effect of dust deposition on photovoltaic performance at various tilts in semi-arid environment[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2020, 42: 100822.
- [24] Goossens D, Van Kerschaever E. Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance[J]. *Solar Energy*, 1999, 66(4): 277-289.