

DOI:10.11784/tdxbz202401001

光伏组件自然通风冷却系统内肋片布置形式的优化研究

何锁盈^{1,2}, 刘王瑞^{1,2}, 赵斌³, 刘凯丽⁴, 梁昌振^{1,2}, 高明^{1,2}

(1. 山东大学能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 高效储能及氢能利用山东省工程研究中心, 济南 250061;
3. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 长沙 410114; 4. 山东沐阳新能源有限公司, 日照 276500)

摘要: 光伏发电因其符合“双碳”战略而成为研究热点。为了解决光伏组件因为运行温度过高导致的转换效率低、使用寿命短的问题, 已有学者提出了光伏组件自然通风冷却系统, 本文在此系统的基础上增加了肋片, 旨在利用自然通风+肋片强化光伏组件处的散热。本文建立了带有肋片的光伏组件自然通风冷却系统的数值仿真模型, 采用 FLUENT 软件模拟研究了 9 组肋片间距($0.2D \sim 1.0D$)和 7 组肋片高度($0.2H \sim 1.4H$)下光伏组件平均温度和转换效率的变化规律。模拟时的基准肋片布置为肋片间距 $D=68$ mm, 即肋片数量为 10 时的肋片间距; 肋片高度 $H=100$ mm。研究发现: 将肋片高度固定为 100 mm、肋片间距为 $0.4D$ 时, 光伏组件平均温度最小为 55.16 °C, 光电转换效率最大为 17.29%。将肋片间距固定为 $0.4D$ 即 27.2 mm, 随着肋片高度从 $0.2H$ 增加到 $1.2H$, 光伏组件平均温度逐渐减小直至趋于稳定(趋于稳定的温度为 54.73 °C), 光电转换效率逐渐增大直至趋于稳定(趋于稳定的效率为 17.32%)。应用于光伏组件自然通风冷却系统的优化肋片布置形式为: 肋片间距 $0.4D$ 即 27.2 mm, 肋片高度 $1.2H$ 即 120 mm。当环境温度为 35 °C、太阳辐射强度为 800 W/m² 时, 与无肋片相比, 光伏组件自然通风冷却系统在优化肋片布置下可将光伏组件的平均温度降低 6.24 °C, 光电转换效率提高 0.56%。本研究可为光伏产业的提质增效提供一定的理论指导。

关键词: 光伏组件; 肋片; 自然通风冷却; 数值模拟

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2025)03-0300-09

Optimization of Fin Arrangement in Photovoltaic Modules Cooled by a Natural-Draft Cooling System

He Suoying^{1,2}, Liu Wangrui^{1,2}, Zhao Bin³, Liu Kaili⁴, Liang Changzhen^{1,2}, Gao Ming^{1,2}

1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Shandong Engineering Research Center for High-Efficiency Energy Storage and Hydrogen Energy Utilization, Jinan 250061, China;

3. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

4. Shandong Muyang New Energy Co., Ltd., Rizhao 276500, China)

Abstract: Photovoltaic power generation has become a research hotspot because it meets the goals of carbon peaking and neutrality. However, the high operating temperature of photovoltaic modules will decrease photoelectric conversion efficiency and shorten the service life. Therefore, a natural-draft cooling system for photovoltaic modules is proposed. Herein, fins are added to the natural-draft cooling system, which uses a combination of a natural draft and fins to strengthen the heat transfer of photovoltaic modules. A numerical simulation model for the natural-draft cooling system of photovoltaic modules with fins is established. The variation of the average temperature and photoelectric

收稿日期: 2024-01-04; 修回日期: 2024-02-23.

作者简介: 何锁盈(1987—), 男, 博士, 副教授, s.he@sdu.edu.cn.

通信作者: 赵斌, zhaobin19680507@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52476206); 中国博士后科学基金资助项目(2023M732102); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME008); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程资助项目(2022TSGC2018, 2023TSGC0756).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52476206), the China Postdoctoral Science Foundation(No. 2023M732102), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China(No. ZR2022ME008), the Shandong Provincial Science and Technology SMEs Innovation Capacity Improvement Project(No. 2022TSGC2018, No. 2023TSGC0756).

conversion efficiency of photovoltaic modules with nine different fin spacings ($0.2D$ — $1.0D$) and seven different fin heights ($0.2H$ — $1.4H$) are studied using FLUENT. The reference fin arrangement considered in this study is a fin spacing and height of $D = 68$ mm (for 10 fins) and $H = 100$ mm. As the fin spacing is adjusted at a fixed fin height of 100 mm, a minimum average temperature of 55.16 °C and a maximum photoelectric conversion efficiency of 17.29% are achieved when the fin spacing is $0.4D$. When the fin spacing is fixed at $0.4D$ (27.2 mm), the average temperature of the photovoltaic modules gradually decreases and becomes stable (the temperature tends to stabilize at 54.73 °C), and the photoelectric conversion efficiency gradually increases and becomes stable (the efficiency tends to stabilize at 17.32%) as the fin height increases from $0.2H$ to $1.2H$. Therefore, the optimal fin arrangement for a natural-draft cooling system in photovoltaic modules is a fin spacing and height of $0.4D$ (27.2 mm) and $1.2H$ (120 mm). Compared with the use of no fins, the average temperature of photovoltaic modules is reduced by 6.24 °C, the photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules is increased by 0.56% under the optimal fin arrangement when the ambient temperature is 35 °C, and the solar radiation intensity is 800 W/m². The results of this study provide theoretical guidance for improving the quality and efficiency of photovoltaic systems.

Keywords: photovoltaic module; fin; natural-draft cooling; numerical simulation

随着“双碳”政策的提出及推动,以煤炭为主的能源消费结构需要进行转型,即向清洁低碳的方向发展^[1]. 太阳能资源丰富,应用地区广泛,地球表面每年从太阳照射中接收的能量大约为 1.2×10^5 TW. 通过光伏组件将太阳能转换为可利用的电能,光伏组件的光电转换效率在 10% ~ 20%^[2]. 光伏组件的温度是影响光电转换效率的关键参数,对于晶体硅材料,温度系数的范围为 (0.4% ~ 0.5%) / °C,说明光伏组件温度每升高 1 °C,光电转换效率的降低值为标准效率的 0.4% ~ 0.5%^[3]. 因此,有效降低光伏组件的温度成为提高太阳能利用率的必要措施. 根据冷却介质,可将光伏组件冷却分为水冷和空冷.

水冷主要通过两种形式进行冷却:对流和蒸发. 对流传热对冷却水量的需求较高,冷却水流经光伏组件表面,吸收光伏组件的热量,以此来降低光伏组件的温度^[4]. 蒸发冷却主要利用了冷却水的相变特性,冷却水在光伏组件表面形成一层水膜,水膜蒸发吸热,光伏组件的温度得以降低^[5]. 空冷分为主动冷却和被动冷却,主动冷却不需要额外能量消耗^[6],但被动冷却传热效果好,冷却效果更佳^[7]. 对于太阳能资源丰富但水资源短缺的地区,空冷相比于水冷更加适用. 本文针对西北干旱地区对光伏组件进行降温研究,因此选用空气作为冷却介质进行后续探究.

为了强化空冷的冷却效果,可在光伏背板后构建气流通道,添加风扇使得通道内空气流速增大以增强换热^[8]. 除此之外,还有学者在光伏背板后增设肋片,用以增大光伏组件和空气间的换热面积^[9]. 何锁盈等^[6]利用浮升力的特性构建了一种新型气流通道,提升空气流速的同时还能不借助外界动力设备. 传统自然通风冷却系统构建的气流通道只在光伏组件

处形成浮升力,何锁盈等^[6]构建的新型气流通道增设了由支撑板和导流板组成的进风通道,弥补了传统气流通道浮升力较小的问题. 本文在何锁盈等^[6]的研究基础上对肋片进行模拟仿真,进一步降低光伏组件的温度,提升其发电效率. 针对肋片的形状 Ozcan 等^[9]已做出详细的对比,弯曲肋片相较于矩形肋片可使光伏组件温度的降低幅度更大. 但采用弯曲肋片也会使得空气压降更大、风机功耗更大,导致系统的效率降低. 因新型气流通道采用浮升力作为驱动力,所以选用压降较低的矩形肋片进行仿真模拟.

通过苗佳雨^[10]的研究,在光伏背板后构建新型气流通道可以有效降低光伏组件的温度,提升光电转换效率. 但从气流通道内部温度云图可看出在光伏背板处存在较大的温度梯度,进入气流通道内的空气没有得到充分利用. 因此本文提出在光伏背板处添加矩形肋片,将光伏组件的热量通过热传导进行扩散,增大空气与光伏组件的换热面积,从而进一步降低光伏组件的温度.

数值模拟过程主要分为 2 个阶段:第 1 阶段改变肋片间距;第 2 阶段改变肋片高度. 添加肋片对于降低光伏组件温度可起到明显积极作用,本文通过 FLUENT 软件模拟优化肋片参数,对何锁盈等^[6]提出的光伏组件自然通风冷却系统进行了完善优化. 本文建立了一种带有肋片的光伏组件自然通风冷却系统的数值仿真模型,仿真研究了不同肋片间距和肋片高度下光伏组件温度和转换效率的变化规律,获得了适用于光伏组件自然通风冷却系统的肋片布置形式. 将优化肋片布置形式与无肋片时进行对比,发现增设肋片对于光伏组件转换效率的提升有一定效果.

1 数学模型

1.1 几何模型

图 1 为光伏组件自然通风冷却系统示意,在光伏背板后构建如图 1 所示的气流通道. 气流通道由支撑板、导流板和气流通道斜板组成. 光伏组件倾角为 30°, 在光伏背板处添加矩形肋片. 肋片布置如图 2 所示,矩形肋片的肋片间距用 D 表示,肋片高度用 H 表示,肋片采用等间距布置. 光伏组件运行时吸收太阳辐射,将光能转换为电能,未转换的能量以热能的形式存在,因此光伏组件的温度逐渐升高. 在压差作用下,气流通道内部形成浮升力,入口空气在浮升力的作用下进入气流通道与光伏组件进行热量交换,以此降低光伏组件的温度. 添加矩形肋片不仅增强了气流扰动,而且换热面积大幅增加,对于降低光伏组件的温度起到积极作用.

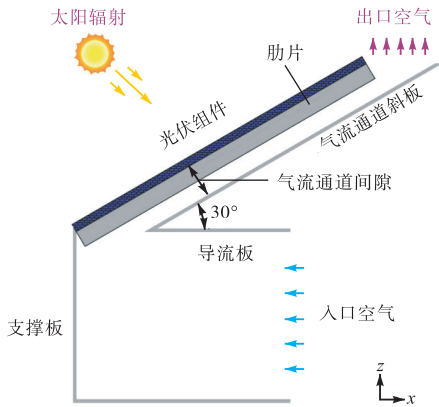


图 1 光伏组件自然通风冷却系统示意

Fig.1 Schematic of the natural-draft cooling system of photovoltaic modules

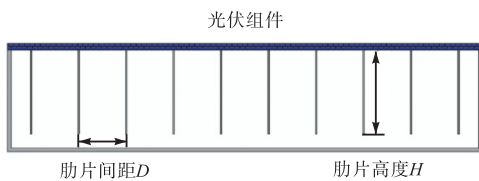


图 2 肋片布置示意

Fig.2 Schematic of the fin arrangement

光伏组件内部结构如图 3 所示,将光伏组件细化为 6 层结构,分别为 4 mm 玻璃、0.5 mm 乙烯-醋酸乙烯共聚物 (ethylene vinyl acetate copolymer, EVA)、0.5 mm 电池片、0.5 mm EVA、1 mm 聚氟乙烯薄膜和 3 mm 吸热板. 矩形肋片为吸热板的延伸,以便能更好地冷却光伏组件. 6 层结构内部热量传递的方式为热传导,外部热量传递的方式为热辐射和热对流.

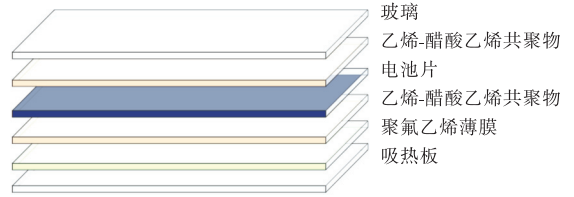


图 3 光伏组件示意

Fig.3 Schematic of the photovoltaic modules

光伏组件自然通风冷却系统的几何模型如图 4 所示. 光伏组件的宽度 $W = 680 \text{ mm}$, 长度 $C = 1360 \text{ mm}$, 光伏组件的倾角 $\theta = 30^\circ$. 根据苗佳雨^[10]的研究,导流板、支撑板和气流通道间隙存在最佳值. 导流板的长度 $B = 588.9 \text{ mm}$, 支撑板的高度 $A = 680 \text{ mm}$, 气流通道间隙 $F = 140 \text{ mm}$.

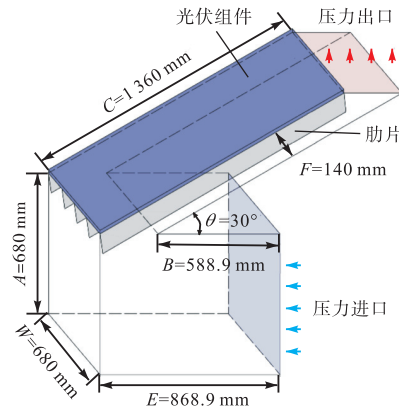


图 4 自然通风冷却系统的几何模型

Fig.4 Geometric model of the natural-draft cooling system

1.2 控制方程

本文在自然通风条件下进行研究,空气流速为 1 m/s. 经计算空气进口处水力直径为 0.68 m, 当环境温度为 35 °C 时,标准大气压下计算的雷诺数 $Re = 40997$, 所以流体通道内空气流动为湍流.

假设空气为不可压缩气体. 空气流动过程中涉及的质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程^[11]和组分守恒方程^[12]分别如下.

质量守恒方程为

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v})\mathbf{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f} \tag{2}$$

能量守恒方程为

$$\rho c_p \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v})T \right] = k_m \nabla^2 T + \Phi \tag{3}$$

$$\Phi = T\sigma \tag{4}$$

$$\sigma = J_j \nabla \left(\frac{1}{T} \right) = -J_j \frac{\nabla T}{T^2} \tag{5}$$

组分守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho w_j)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} w_j) = \nabla \cdot (\rho d_j \nabla w_j) + m_j \quad (6)$$

$$w_j = \frac{m_j}{m} \quad (7)$$

式中: \mathbf{v} 为速度矢量, m/s; f 为单位质量体积力, N/(kg·m³); p 为压强, Pa; T 为温度, K; ν 为运动黏度, m²/s; c_p 为定压比热容, J/(kg·K); ρ 为密度, kg/m³; k_m 为导热系数, W/(m·K); J_j 为热流量, W; t 为时间, s; Φ 为耗散函数; w 为质量分数; j 为物种; d 为扩散系数, m²/s; m 为质量流量, kg/s.

采用可实现 k - ε 模型对空气流动进行模拟. 可实现 k - ε 模型的输运方程如下. k 表示湍流脉动能, m²/s²; ε 表示耗散率, m²/s³.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (9)$$

式中: G_k 和 G_b 均为湍流动能, (kg/s³)/m, G_k 因平均

速度梯度而产生, G_b 因浮力作用而产生; Y_M 表示波动膨胀对总耗散率的影响, (kg/s³)/m; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 方程和 ε 方程对应的湍流普朗特数, 分别为 1.0、1.2^[13]; S_k 和 S_ε 为自定义源项; C_1 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 C_2 、 $C_{3\varepsilon}$ 为常数; S 为平均应变率张量的模.

采用离散坐标模型 (discrete ordinates model) 来求解辐射传递方程^[14-15], 即

$$\underbrace{\frac{dI_\lambda(\mathbf{r}, s)}{ds}}_A + \underbrace{(K_\lambda + \sigma_\lambda) I_\lambda(\mathbf{r}, s)}_B = \underbrace{K_\lambda n^2 I_\lambda(\mathbf{r}, t)}_C + \underbrace{\frac{\sigma}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\mathbf{r}, s') \Phi_\lambda(s, s') d\Omega'}_F \quad (10)$$

式中: A 为厚度 ds 处的亮度变化; B 为吸收损失; C 和 F 分别表示通过发射和扩散获得的亮度增益.

1.3 边界条件

表 1 为模拟过程中边界条件的设置情况. 如图 4 所示, 空气进口为压力进口, 空气出口为压力出口. 对流换热温度 T_{amb} 根据具体模拟情况设置, 分别为 20℃、25℃、30℃、35℃、40℃; 相对湿度设置为 45%. 光伏组件正面为混合边界, 外部发射率设置为 0.95, 外部辐射温度为 T_{sky} , $T_{sky} = T_{amb} - 6$ ^[16]. 假设光伏组件侧面和气流通道斜板为绝热壁面, 即通过壁面的热流密度为 0.

表 1 边界条件设置

Tab.1 Setting of the boundary conditions

位置	边界条件	数值
空气进口	压力进口	对流换热温度 $T_{amb} = 20, 25, 30, 35, 40$ ℃, 相对湿度为 45%
空气出口	压力出口	对流换热温度 $T_{amb} = 20, 25, 30, 35, 40$ ℃, 相对湿度为 45%
光伏组件正面	混合边界	外部发射率为 0.95, 外部辐射温度 $T_{sky} = T_{amb} - 6$
光伏组件侧面	绝热壁面	通过壁面的热流密度为 0
气流通道斜板	绝热壁面	通过壁面的热流密度为 0

1.4 网格独立性验证

在 ANSYS 2021 R1 WORKBENCH 软件中对光伏组件自然通风冷却系统进行建模, 将建立好的模型导入 ICEM 中进行网格划分. 本文研究空气在流动通道中与光伏组件的换热状况, 边界层处的热量交换不可忽视. 四面体网格生成较为容易, 对模型的适应性强. 但对于流体分析尤其是需要考虑边界层的情况, 六面体网格更为适用, 且六面体网格计算精度高, 所需计算时间少. 因此本文选择六面体网格进行网格划分. 在边界层与肋片处对网格进行加密处理, 以增强结果的准确性.

选取表 2 所示的 3 套网格数分别进行模拟, 环境温度均设置为 35℃. 随着网格数增加, 光伏组件的

平均温度逐渐趋于稳定. 网格数从 932 464 增加到 2 495 663, 光伏组件平均温度的相对误差从 0.300% 降低到 0.018%. 因此, 选择 1 580 500 网格数进行后续模拟.

表 2 光伏组件自然通风冷却系统的网格独立性验证

Tab.2 Grid independence verification of the natural-draft cooling system of photovoltaic modules

网格数	环境温度/℃	光伏组件平均温度/℃
932 464	35	56.34
1 580 500	35	56.51
2 495 663	35	56.52

1.5 模型验证

通过与 Guardian 等^[17]的实验数据进行对比以验

证光伏组件自然通风冷却系统数值模型. 光伏组件自然通风冷却系统在光伏背板后加设斜板形成气流通道, 实验仅仅在光伏背板处加设肋片用以增强冷却效果. 模拟时所采用的模型参数以及环境条件等设置均与实验一致, 实验采用的光伏组件规格为 $600\text{ mm} \times 620\text{ mm}$, 肋片高度为 50 mm , 肋片厚度为 2 mm . 实验测量了不同太阳辐射强度下光伏背板处的温度, 验证结果如图 5 所示. 模拟是在完全理想的条件下进行, 所以与实验结果存在一定误差. 但模拟值与实验值的最大误差为 1.18% , 说明模型可靠, 可用于后续研究.

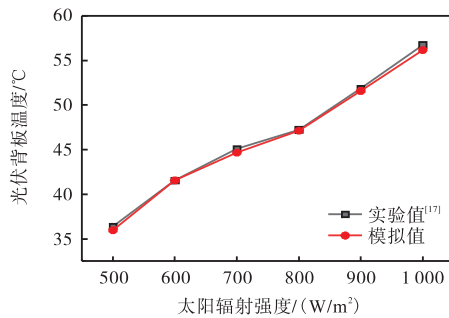


图 5 光伏组件自然通风冷却系统的模型验证

Fig.5 Model verification of the natural-draft cooling system of photovoltaic modules

2 结果与讨论

在光伏背板后构建新型气流通道, 以浮力驱动空气流动, 增强换热的同时也不需要额外驱动. 在气流通道的基础上添加肋片, 可进一步提高冷却效果. 有学者针对肋片布置进行了研究^[18], 一般均采用肋片数量为 10 的布置方式. 因此本文在 10 个肋片的基础上, 进行肋片间距和肋片高度的细化研究, 目的是找出适合光伏组件自然通风冷却系统的优化肋片布置. 基于本文所研究的光伏组件尺寸, 采用 10 个肋片等间距布置方式时, 肋片间距 $D = 68\text{ mm}$, 肋片高度 $H = 100\text{ mm}$, 并进行变肋片高度和变肋片间距的研究, 光伏组件的光电转换效率的计算式^[16]为

$$E = E_0 [1 - \beta_{\text{ref}} (T_{\text{pv}} - T_{\text{ref}})] \quad (11)$$

式中: T_{ref} 为参考温度, $T_{\text{ref}} = 25\text{ }^\circ\text{C}$; T_{pv} 为光伏组件的平均温度; β_{ref} 为光伏组件的温度系数, $\beta_{\text{ref}} = 0.0045/^\circ\text{C}$; E_0 为参考温度下的光电转换效率, $E_0 = 0.2$. 参数 E_0 、 β_{ref} 、 T_{ref} 均由光伏组件材料决定, 已有学者对其进行了综述汇总^[19]. 即对于一种确定的光伏组件来说, 影响其光电转换效率的因素为光伏组件的平均温度 T_{pv} .

2.1 肋片间距对光伏组件自然通风冷却系统性能的影响研究

本节将肋片高度固定为 100 mm , 针对不同肋片间距进行模拟, 变化范围为 $0.2D \sim 1.0D$, $D = 68\text{ mm}$. 在不同太阳辐射强度和环境温度下对不同肋片间距进行仿真模拟, 旨在找出适用于光伏组件自然通风冷却系统的最佳肋片间距.

2.1.1 肋片间距和太阳辐射强度的影响研究

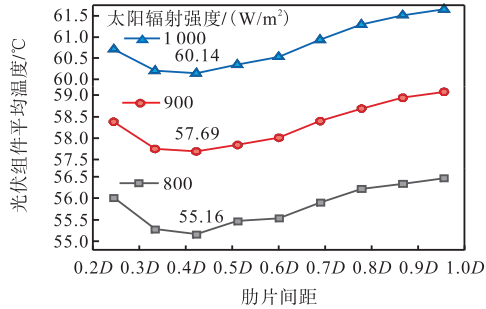
图 6(a) 为肋片间距对光伏组件平均温度的影响, 图 6(b) 为肋片间距对光伏组件光电转换效率的影响. 环境温度为 $35\text{ }^\circ\text{C}$, 太阳辐射强度每升高 100 W/m^2 , 光伏组件平均温度升高 $2.5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右. 在 3 种太阳辐射强度下, 即 800 W/m^2 、 900 W/m^2 和 1000 W/m^2 , 分别对不同肋片间距进行模拟. 随着太阳辐射强度增加, 光伏组件吸收的能量增加, 造成光伏组件平均温度升高. 由式(11)可看出, 光电转换效率随着光伏组件平均温度的增大而减小, 因此光电转换效率降低.

气流通道内空气流动复杂, 存在回流. 从图 6 可看出, 随着肋片间距变大, 光伏组件平均温度先降低后升高, 而光电转换效率则相反. 当肋片间距为 $0.4D$ 时, 光伏组件的平均温度最低, 分别为 $55.16\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $57.69\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60.14\text{ }^\circ\text{C}$; 光电转换效率最高, 分别为 17.29% 、 17.06% 和 16.84% . 因此当肋片高度为 100 mm 时, 最佳肋片间距为 $0.4D$, 即 27.2 mm .

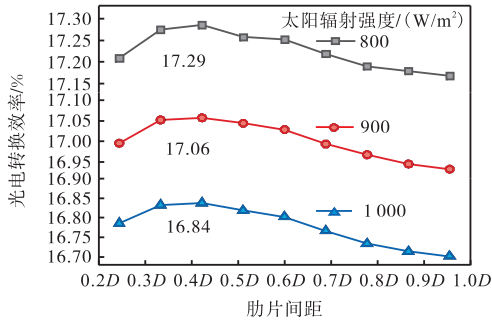
2.1.2 肋片间距和环境温度的影响研究

由图 7 可知, 随着环境温度从 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $40\text{ }^\circ\text{C}$, 光伏组件平均温度逐渐升高. 太阳辐射强度为 800 W/m^2 , 环境温度每升高 $10\text{ }^\circ\text{C}$, 光伏组件平均温度升高将近 $10.00\text{ }^\circ\text{C}$. 肋片间距为 $0.4D$ 时, 光伏组件平均温度最低, 分别为 $40.40\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $50.24\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $60.14\text{ }^\circ\text{C}$. 肋片间距为 $1.0D$ 时, 光伏组件平均温度最高, 相比 $0.4D$ 肋片间距布置, 光伏组件平均温度分别提高 $1.48\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.38\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1.19\text{ }^\circ\text{C}$. 肋片间距为 $0.4D$ 时, 光伏组件光电转换效率最高, 分别为 18.61% 、 17.73% 和 16.84% . 相比 $1.0D$ 肋片间距布置, 光伏组件光电转换效率分别提高 0.13% 、 0.12% 和 0.11% .

太阳辐射强度和环境温度均对光伏组件的平均温度和光电转换效率产生影响. 从图 6、图 7 中可看出, 在不同环境条件下, $0.4D$ 肋片间距均表现出最优性能. 因此, 在 $0.4D$ 肋片间距下对肋片高度进行研究.



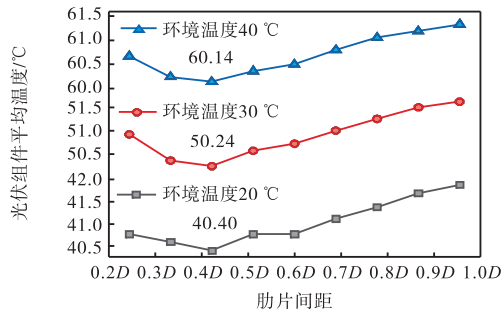
(a) 光伏组件平均温度



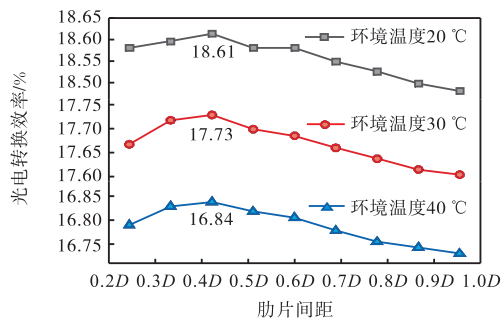
(b) 光伏组件光电转换效率

图6 肋片间距和太阳辐射强度对光伏组件平均温度和光电转换效率的影响 ($D = 68 \text{ mm}$)

Fig.6 Effects of fin spacing and solar radiation intensity on the average temperature and photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules ($D = 68 \text{ mm}$)



(a) 光伏组件平均温度



(b) 光伏组件光电转换效率

图7 肋片间距和环境温度对光伏组件平均温度和光电转换效率的影响 ($D = 68 \text{ mm}$)

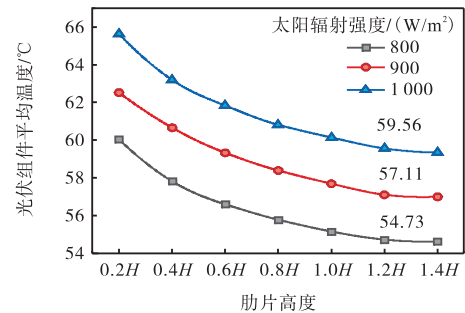
Fig.7 Effects of fin spacing and ambient temperature on the average temperature and photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules ($D = 68 \text{ mm}$)

2.2 肋片高度对光伏组件自然通风冷却系统性能的影响研究

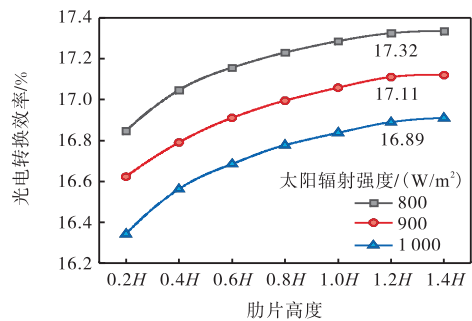
将肋片间距固定为 $0.4D$, 研究不同肋片高度下光伏组件的性能参数. 气流通道间隙 $F = 140 \text{ mm}$, 所以肋片高度最大为 $1.4H$. 本文研究的肋片高度范围为 $0.2H \sim 1.4H$, $H = 100 \text{ mm}$.

2.2.1 肋片高度和太阳辐射强度的影响研究

在不同太阳辐射强度下对肋片高度进行研究, 结果如图8所示. 与图6类似, 环境温度为 35°C , 随着辐射强度从 800 W/m^2 增加到 1000 W/m^2 , 光伏组件平均温度升高, 光电转换效率降低. 随着肋片高度增加, 拓宽了肋片的表面积, 使得换热面积增加, 所以光伏组件平均温度逐渐降低, 光伏组件光电转换效率相应增加. 随着肋片高度增加, 光伏组件平均温度和光电转换效率的变化幅度逐渐降低. 当肋片高度从 $1.2H$ 增加到 $1.4H$, 在3种太阳辐射强度下, 光伏组件平均温度分别降低 0.11°C 、 0.11°C 和 0.22°C , 光电转换效率分别提高 0.01% 、 0.01% 和 0.02% . 说明在不同太阳辐射强度下, 当肋片高度增加到 $1.2H$ 时, 光伏组件平均温度和光电转换效率趋于稳定.



(a) 光伏组件平均温度



(b) 光伏组件光电转换效率

图8 肋片高度和太阳辐射强度对光伏组件平均温度和光电转换效率的影响 ($H = 100 \text{ mm}$)

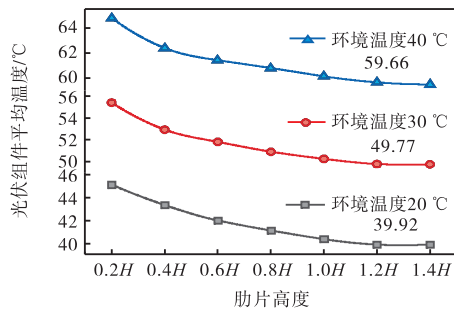
Fig.8 Effects of fin height and solar radiation intensity on the average temperature and photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules ($H = 100 \text{ mm}$)

2.2.2 肋片高度和环境温度的影响研究

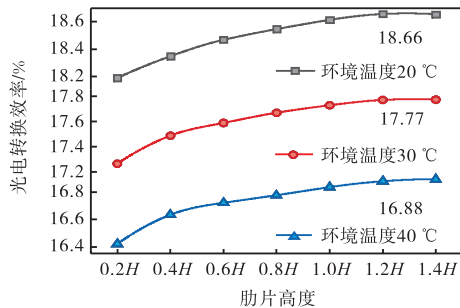
在环境温度分别为 20°C 、 30°C 和 40°C 的条件

下,对不同肋片高度的光伏组件自然通风冷却系统进行模拟.如图 9 所示,太阳辐射强度为 800 W/m^2 ,随着环境温度升高,光伏组件平均温度升高,光电转换效率下降.当肋片高度从 $1.2H$ 增加到 $1.4H$,环境温度为 40°C 时,光伏组件平均温度变化最大,降低了 0.17°C ,光电转换效率提高了 0.02% .说明在不同环境温度下,当肋片高度增加到 $1.2H$ 时,光伏组件平均温度和光电转换效率趋于稳定.

综合图 8 和图 9 可看出,在不同环境条件下,当肋片间距为 $0.4D$ 时,肋片高度最佳为 $1.2H$.所以针对本文的光伏组件自然通风冷却系统,优化肋片布置为:肋片间距 $0.4D$ 即 27.2 mm ,肋片高度 $1.2H$ 即 120 mm .



(a) 光伏组件平均温度



(b) 光伏组件光电转换效率

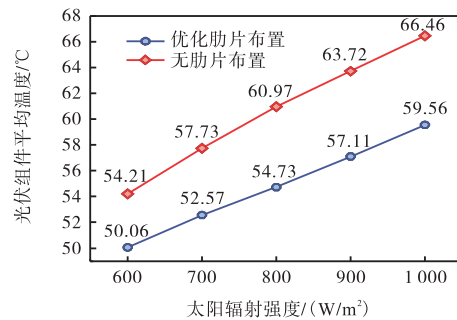
图 9 肋片高度和环境温度对光伏组件平均温度和光电转换效率的影响 ($H = 100 \text{ mm}$)

Fig.9 Effects of fin height and ambient temperature on the average temperature and photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules ($H = 100 \text{ mm}$)

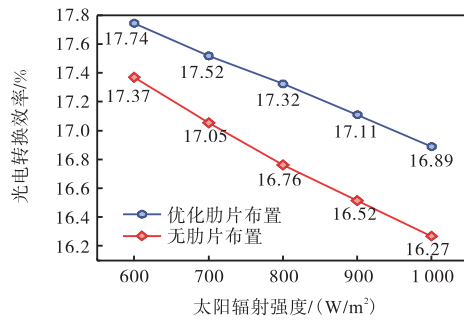
2.3 有/无肋片的对比研究

为了探明优化肋片布置对光伏组件自然通风冷却系统性能的提升效果,在不添加肋片的情况下,对光伏组件自然通风冷却系统进行了仿真模拟.不同太阳辐射强度下,肋片对光伏组件的影响如图 10 所示.当系统添加优化肋片时,在 5 种太阳辐射强度下,光伏组件平均温度分别为 50.06°C 、 52.57°C 、 54.73°C 、 57.11°C 和 59.56°C ,光电转换效率分别为

17.74% 、 17.52% 、 17.32% 、 17.11% 和 16.89% .当系统没有添加肋片时,光伏组件平均温度分别为 54.21°C 、 57.73°C 、 60.97°C 、 63.72°C 和 66.46°C ,光电转换效率分别为 17.37% 、 17.05% 、 16.76% 、 16.52% 和 16.27% .光伏组件平均温度分别降低了 4.15°C 、 5.16°C 、 6.24°C 、 6.61°C 和 6.90°C ,光电转换效率分别提高了 0.37% 、 0.47% 、 0.56% 、 0.59% 和 0.62% .可见,光伏组件平均温度每降低 1.00°C ,其光电转换效率提升约 0.09% .有学者进行了实验研究,发现光伏组件平均温度每升高 1.00°C ,光电转换效率下降 $0.06\% \sim 0.08\%$ ^[20].文献的研究结果与本文的研究结果相当,说明结果合理.



(a) 光伏组件平均温度



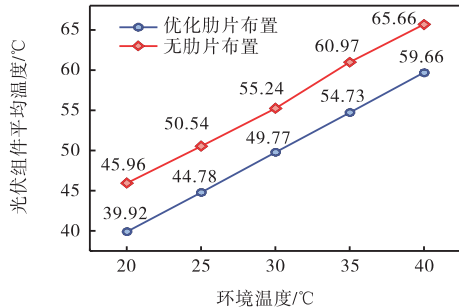
(b) 光电转换效率

图 10 太阳辐射强度对光伏组件平均温度和光电转换效率的影响

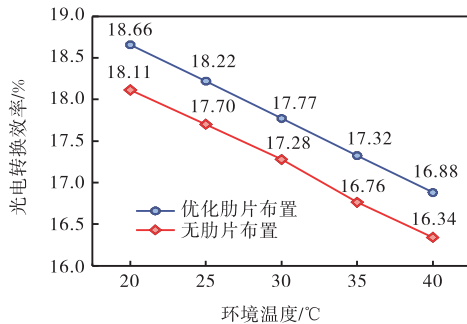
Fig.10 Effects of solar radiation intensity on the average temperature and photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules

不同环境温度下,肋片对光伏组件的影响如图 11 所示.当系统添加优化肋片时,在 5 种环境温度下,光伏组件平均温度分别为 39.92°C 、 44.78°C 、 49.77°C 、 54.73°C 和 59.56°C ,光电转换效率分别为 18.66% 、 18.22% 、 17.77% 、 17.32% 和 16.88% .当系统没有添加肋片时,光伏组件平均温度分别为 45.96°C 、 50.54°C 、 55.24°C 、 60.97°C 和 65.66°C ,光电转换效率分别为 18.11% 、 17.70% 、 17.28% 、 16.76% 和 16.34% .光伏组件平均温度分别降低了 6.04°C 、 5.76°C 、 5.47°C 、 6.24°C 和 6.00°C ,光电转换效率分

别提高了 0.55%、0.52%、0.49%、0.56%和 0.54%。在不同太阳辐射强度和环境温度下,光伏组件自然通风冷却系统添加优化肋片可明显降低光伏组件的温度,提升光电转换效率。



(a) 光伏组件平均温度



(b) 光电转换效率

图 11 环境温度对光伏组件平均温度和光电转换效率的影响

Fig.11 Effects of ambient temperature on the average temperature and photoelectric conversion efficiency of photovoltaic modules

3 结论

本文建立了带有肋片的光伏组件自然通风冷却系统的数值仿真模型,并研究了 9 组肋片间距 ($0.2D \sim 1.0D$) 和 7 组肋片高度 ($0.2H \sim 1.4H$) 下光伏组件平均温度和光电转换效率的变化规律,研究结论如下。

(1) 肋片高度为 100 mm 时,最佳肋片间距为 $0.4D$,即 27.2 mm ($D = 68$ mm)。随着肋片间距从 $0.2D$ 增加到 $1.0D$,光伏组件平均温度先减小后增大,光电转换效率先增大后减小;太阳辐射强度为 800 W/m^2 、环境温度为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,当肋片间距为 $0.4D$ 时,光伏组件平均温度最小为 $55.16 \text{ }^\circ\text{C}$,光电转换效率最大为 17.29%。

(2) 肋片间距为 $0.4D$ (27.2 mm) 时,最佳肋片高度为 $1.2H$,即 120 mm ($H = 100$ mm)。随着肋片高度从 $0.2H$ 增加到 $1.2H$,光伏组件平均温度逐渐减小

至趋于稳定,光电转换效率逐渐增大至趋于稳定;太阳辐射强度为 800 W/m^2 ,环境温度为 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,当肋片高度从 $0.2H$ 增加到 $1.2H$ 时,光伏组件平均温度从 $60.04 \text{ }^\circ\text{C}$ 减小到 $54.73 \text{ }^\circ\text{C}$,光电转换效率从 16.85% 增大至 17.32%。

(3) 对于光伏组件自然通风冷却系统,优化肋片布置为:肋片间距 27.2 mm,肋片高度 120 mm。优化肋片布置与无肋片情况下的光伏组件自然通风冷却系统相比,在环境温度 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 、太阳辐射强度 800 W/m^2 时,可将光伏组件的平均温度降低 $6.24 \text{ }^\circ\text{C}$,光电转换效率提高 0.56%。

可见,在光伏组件自然通风冷却系统的背板处添加矩形肋片可有效降低光伏组件的温度,提高其光电转换效率,从而为光伏产业的提质增效提供理论指导。

参考文献:

- [1] 姜 飞, 林政阳, 何桂雄, 等. 基于动态一致性算法的光伏-储能分布式协调电压控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(12): 1299-1308.
Jiang Fei, Lin Zhengyang, He Guixiong, et al. Coordinated voltage control of distributed photovoltaic-energy-storage systems based on a dynamic consensus algorithm[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2021, 54(12): 1299-1308 (in Chinese).
- [2] Panda S, Gupta M, Panda B, et al. A review on advanced cooling techniques for photovoltaic panel[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62(12): 6799-6803.
- [3] Nabil T, Mansour T M. Augmenting the performance of photovoltaic panel by decreasing its temperature using various cooling techniques[J]. Results in Engineering, 2022, 15(9): 100564.
- [4] Rahim M S B A, Tajuddin M F N B, Saad M S, et al. Power generation improvement using active water cooling for photovoltaic (PV) panel[C]//International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies. Erode, India, 2021: 1-6.
- [5] Alktrancee M, Peter B. Energy and exergy analysis for photovoltaic modules cooled by evaporative cooling techniques[J]. Energy Reports, 2023, 9(12): 122-132.
- [6] 何锁盈, 苗佳雨, 赵 斌, 等. 太阳能电池板自然通风冷却系统流动与传热的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3811-3821.
He Suoying, Miao Jiayu, Zhao Bin, et al. Numerical

- simulation on flow and heat transfer in natural draft cooling system of solar panels[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(10): 3811-3821 (in Chinese).
- [7] Rahman N M A, Haw L C, Kamaluddin K A, et al. Investigating photovoltaic module performance using aluminium heat sink and forced cold-air circulation method in tropical climate conditions[J]. *Energy Reports*, 2023, 9(12): 2797-2809.
- [8] Nebbali D, Nebbali R, Ouibrahim A. Improving photovoltaic panel performance via an autonomous air cooling system—Experimental and numerical simulations[J]. *International Journal of Ambient Energy*, 2020, 41(12): 1387-1403.
- [9] Ozcan Z, Gulgun M, Sen E, et al. Cooling channel effect on photovoltaic panel energy generation[J]. *Solar Energy*, 2021, 230: 943-953.
- [10] 苗佳雨. 光伏板自然通风冷却系统内流动与传热过程的数值仿真[D]. 济南: 山东大学能源与动力工程学院, 2022.
- Miao Jiayu. Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer Process in the Natural Draft Cooling System of Photovoltaic Panels[D]. Jinan: School of Energy and Power Engineering, Shandong University, 2022 (in Chinese).
- [11] Hussien A, Eltayesh A, EL-Batsh H M. Experimental and numerical investigation for PV cooling by forced convection[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, 64: 427-440.
- [12] Bhowmik P K, Schlegel J P, Kalra V, et al. CFD validation of condensation heat transfer in scaled-down small modular reactor applications, part 1: Pure steam[J]. *Experimental and Computational Multiphase Flow*, 2022, 4(4): 409-423.
- [13] Liu A, Xu C, Lu X, et al. Coupling effect of multiple factors on the diffusion behavior of leaking natural gas in utility tunnels: A numerical study and PIV experimental validation[J]. *Gas Science and Engineering*, 2023, 118: 205086.
- [14] Rahmoune I, Bougoul S. Study of turbulent natural convection coupled with thermal radiation in a vertical cavity having a large form factor[J]. *Heat Transfer*, 2021, 50(1): 145-157.
- [15] 马天增, 张强强, 付铭凯, 等. 基于 CFD-DEM 方法的太阳能阻碍流吸热器内部颗粒吸热和流动特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(7): 2741-2752.
- Ma Tianzeng, Zhang Qiangqiang, Fu Mingkai, et al. Research on heat absorption and flow characteristics of particles in solar obstructed flow heat receiver based on CFD-DEM method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(7): 2741-2752 (in Chinese).
- [16] Amr A A, Hassan A A M, Abdel-Salam M, et al. Enhancement of photovoltaic system performance via passive cooling: Theory versus experiment[J]. *Renewable Energy*, 2019, 140: 88-103.
- [17] Guardian I, Sutanto B, Rachmanto R A, et al. Improving the performance of photovoltaic panels by using aluminum heat sink[C]//International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced Materials. Surakarta, Indonesia, 2020: 437-448.
- [18] Shafiee M, Firoozzadeh M, Ebrahimi M, et al. The effect of aluminum fins and air blowing on the electrical efficiency of photovoltaic panels; environmental evaluation[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2023, 210(5): 801-813.
- [19] Skoplaki E, Palyvos J A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations[J]. *Solar Energy*, 2009, 83(5): 614-624.
- [20] Rahman M M, Hasanuzzaman M, Rahim N A. Effects of various parameters on PV-module power and efficiency[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 103(10): 348-358.

(责任编辑: 王晓燕)