doi:10.3969/j.issn.1001-4616.2026.03.003

建筑光伏一体化瓦屋面构造优化

冯连元[1,2],孙　畅[3],张靖媛[3],鲁永飞[3],鞠晓磊[3]

(1.河北水利电力学院,河北 沧州 061016)
(2.河北省数据中心相变热管理技术创新中心,河北 沧州 061001)
(3.中国建筑设计研究院有限公司,北京 100044)

[**摘要**] 本文提出了一种建筑光伏一体化瓦(光伏瓦)屋面模块,在北京搭建试验台,建立其数值模型,优化结构参数,以解决光伏瓦屋面散热问题. 采用田口法和计算流体力学仿真,设计和模拟正交方案,首次综合考虑顺水条高度、散热孔半径和散热孔间距 3 个因素,优化光伏瓦构造. 结果表明,散热孔半径对光伏背板温度影响最大,其次是散热孔间距和顺水条高度. 在北京地区,优化方案是顺水条高度 60 mm,散热孔半径 60 mm,散热孔间距 250 mm. 与对照组相比,优化方案的光伏板背板温度降低了 1.43 ℃.

[**关键词**] 建筑光伏一体化瓦屋面,结构优化,散热,田口法,计算流体力学仿真
[**中图分类号**]TK519　[**文献标志码**]A　[**文章编号**]1001-4616(2026)03-0016-07

Structure Optimization of Building Integrated Photovoltaic Tile Roof

Feng Lianyuan[1,2], Sun Chang[3], Zhang Jingyuan[3], Lu Yongfei[3], Ju Xiaolei[3]

(1.Hebei University of Water Resources and Electric Engineering, Cangzhou 061016, China)
(2.Thermal Management of Data Center, Hebei Technology Innovation Center of Phase Change, Cangzhou 061001, China)
(3.China Architecture Design & Research Group, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper proposes a novel building-integrated photovoltaic (BIPV) tile module, builds an experimental test rig in Beijing, and establishes a corresponding numerical model to optimize the structural parameters of the module, addressing the heat dissipation problem of BIPV tile roofs. Taguchi method and Computational Fluid Dynamics (CFD) numerical simulation were employed to design and simulate orthogonal schemes, optimizing photovoltaic tile roof structure for the first time by considering three factors: height of counter batten, radius of heat emission hole and hole spacing. The results indicate that the radius of heat emission hole has the most significant impact on the temperature of the photovoltaic backsheet, followed by hole spacing and the height of counter batten. In the Beijing area, the optimal scheme features a counter batten height of 60 mm, radius of heat emission hole of 60 mm and spacing between heat emission holes of 250 mm. Compared with the control group, the temperature of the photovoltaic panel backsheet is reduced by 1.43 ℃.

Key words: building integrated photovoltaic tile roof, structure optimization, heat dissipation, Taguchi method, Computational Fluid Mechanics simulation

建筑能耗占全球能耗的 30%,其节能减排对于减缓全球变暖意义重大[1]. 可再生能源技术,特别是光伏,已经成为世界范围内最有前途的建筑降碳技术之一[2]. 作为建筑光伏集成技术的典型应用,光伏瓦屋面采用瓦式安装,承担屋面第一道防水功能[3]. 丹麦 1.5 kW 光伏瓦系统[4],年发电量 1 871.72 kWh,减少 335.7 $kgCO_2$ 当量温室气体排放,为可持续社会做出重大贡献.

温度是影响光伏瓦发电量的关键因素,光伏发电效率随组件温度的升高而降低[5-6],传统的光伏冷却方法,如喷水[7]、热管[8]和散热片[9]可有效冷却太阳能电池板,但随着运行时间延长,维护成本逐渐增加. 应用硅铝合金电池[10]、被动辐射冷却涂层[11]、反射涂层[12]等材料,可一定程度上降低组件温度,但增加初始成本,材料性能易受环境影响,且涂层不与所有光伏材料兼容.

收稿日期:2025-04-28.
基金项目:河北水利电力学院基本科研业务费项目(SYKY2402)、中国建筑设计研究院有限公司科技创新项目(1100C080240213).
通讯作者:孙畅,硕士,建筑能源环境研究室主任,研究方向:暖通、可再生能源. E-mail:sunc@cadg.cn

增强光伏板下方空气流动被认为是最有效的方法,流畅的自然通风可有效改善屋面太阳能电池热环境[13],实验证明冷却管深度和风量流量对系统运行效率有重要影响[14-15]. 现有研究多集中于对 PV/T 系统开展流道尺寸、长宽比、质量流量和流动方向的优化[16],而针对光伏瓦屋面的构造研究尚处于空白.

既有研究为解决光伏屋面散热问题做出相当大的努力,但需要在混凝土基础和光伏系统之外补充设备和装置,增加了系统复杂性和成本. 本文通过实验和数值仿真等方法,通过优化光伏瓦屋面构造,以降低光伏板温度,提升光伏板发电性能.

1 光伏瓦模块

光伏瓦屋面由单晶硅光伏瓦组件、挂瓦条、顺水条和混凝土基础由上至下组成,如图 1. 挂瓦条两端封闭,防止雨水进入挂瓦条间隙而无法排出. 沿顺水条方向的空腔与屋脊空腔直接相连,便于雨水排水,同时形成气流通道,加强自然通风,辅助光伏板散热.

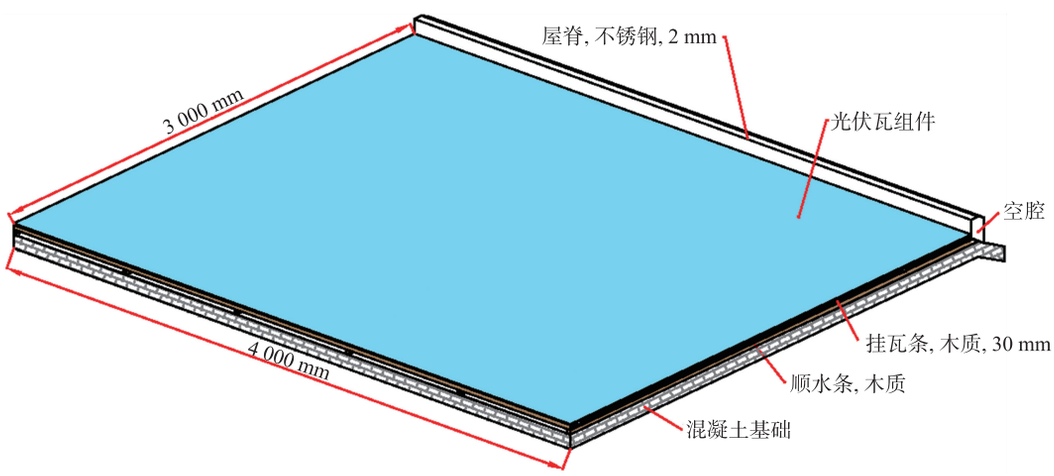


图 1 光伏瓦屋面模块

Fig. 1 Building Integrated Photovoltaic tile roof

2 试验台与数值仿真模型搭建

屋脊和顺水条之间的空腔形成气流通道,利用自然通风散发光伏发电伴生热量. 为优化光伏瓦屋面构造,在北京密云搭建试验台,测试背板温度,建立并验证数值模型.

2.1 试验台

如图 2,屋面模块长 4 m,宽 3 m,光伏组件、挂瓦条、顺水条高度分别为 7.59 mm、30 mm、80 mm. 屋面模块朝南,坡度 10%,组件发电效率 21.40%,温度系数-0.34%/℃.

根据国际电工委员会技术规范《光伏系统性能—第 2 部分:性能评估方法》(IEC TS 61724-2)[17],在

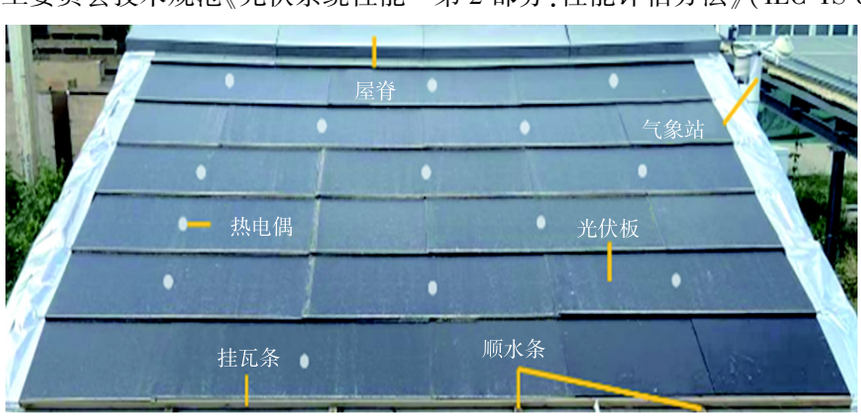


图 2 光伏瓦屋面试验台

Fig. 2 Photovoltaic(PV)tile roof testbed

2023 年 8 月 13 日—9 月 23 日,测试光伏背板温度,检测仪器如表 1,气象站包含温度传感器、辐照度探头和风速计.

表 1　测试仪器

Table 1　Detection instrument

位置	仪器	测试范围和精度	安装方法	步长/(次/min)
室外	气象站	−50~80 ℃,±0.3 ℃ 0~70 m/s,±0.3 m/s 0~1500 W/m^2,±0.5 W/m^2 不确定度<5%(置信水平 95%)	距离试验台 2 m 以内,高度 2 m	12
室外	热电偶	−200~350 ℃,±0.5 ℃	被测组件背面	12
室内	功率分析仪	0~1 000 V,0.1V 60 mA~20 A,1 mA 不确定度<0.1%(置信水平 95%)	光伏板通过电缆与逆变器连接,连接功率分析仪,记录组串电性能数据。	12
	逆变器	转换效率 95.5%		/

2.2　数值模型

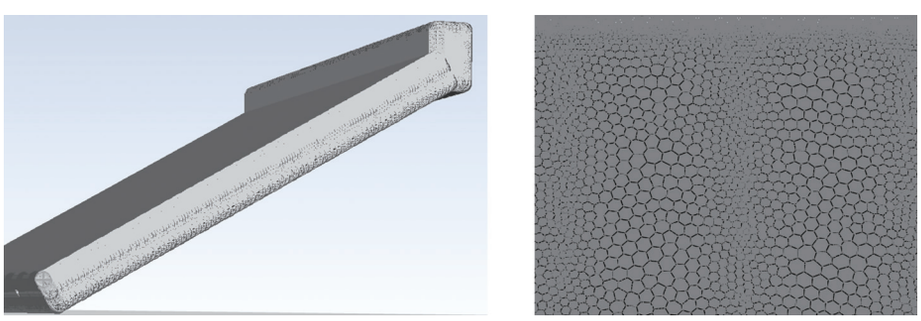
应用 ANSYS FLUENT(2020)建立光伏瓦屋面数值模型,为准确模拟通过屋脊和顺水条空腔的气流,在模块周围定义一个流体域,流体域尺寸 6.5 m×6.5 m×7.5 m,流体域四个面作为固体壁面用以仿真周围环境辐射. 数值模型包括光伏板、挂瓦条、顺水条、混凝土基础、屋脊、流体域,参数如表 2.

表 2　材料参数

Table 2　Material parameters

材料	密度(kg/m^3)	传热性能/(W/(m·K))	比热(J/(kg·K))
光伏板	2 330.00	148.00	677
挂瓦条/顺水条	645.00	0.12	1 750
混凝土	130.00	0.44	750
屋脊	7.85	55.00	460
流体域	1.29	/	/

应用 Fluent Meshing 划分网格,采用多面体网格,并局部加密,如图 3,网格 skeness 保持在 0.9 以下,平均值 0.22,表明网格质量较高,网格总数为 121.32 万. 经过网格独立性验证,将网格导入 Fluent,选择 Double Precision 求解器.



(a) 整体网格　　(b) 局部网格

图 3　光伏瓦屋面网格划分

Fig. 3　Grid division of PV tile roof

2.2.1　求解器设置

光伏背板温度受室外气象条件影响较大,故将光伏组件发电伴生热量简化为内热源,选择某一时刻气象参数,计算该时刻光伏发热功率,仿真模拟光伏背板温度,对比实测数据以验证数值模型. 因此,数值模型设置如下:(1)求解器设置为基于压力的类型、绝对速度公式和稳态;(2)开放重力;(3)湍流方程采用 RNG k-ε 两方程模型和加强壁面函数[18];(4)应用 DO 模型[18],光伏组件、混凝土和流体域参与辐射,吸收系数分别为 0.5、0.45 和 0.5;(5)流体域与混凝土基础进行布尔切割,流体域入口为速度边界,其他边界为自由出流;(6)根据 9 月 20 日 12 时气象数据,求得[19]组件发热功率 76 870.48 W/m^3. (7)在 ANSYS FLUENT 中计算设置如下:压力与速度耦合方式采用 SIMPLE 算法,对于离散格式,压力采用 Standard,采

用一阶迎风格式,当能量的残差低于 1×10^{-6}、其他变量的残差低于 1×10^{-3}、并且监测点的参数变化稳定时,认为所计算的流场已经达到收敛.

2.2.2 模型验证

图 4 为实验测点测量值与数值模拟结果对比. 一些测点处,模拟结果比实验值高 2~3 ℃,模拟结果基本与实验结果具有相同的趋势,整体可以反映光伏板温度变化规律,因此可通过数值模拟方法开展本研究.

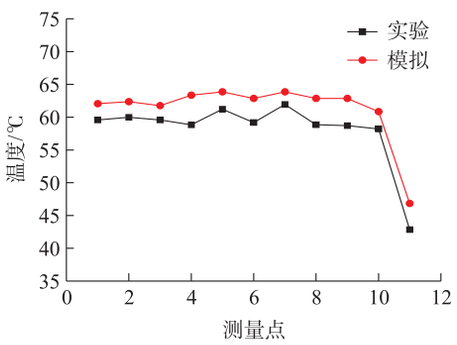


图 4 光伏背板温度实测与仿真值对比

Fig. 4 PV backplane temperature comparison of testbed and numerical model

3 光伏瓦屋面构造优化

田口法采用正交试验筛选关键设计参数,通过质量损失函数的概念,来定量核算产品质量的损失,并通过信噪比将质量损失函数模型转化为衡量设计参数稳健程度的指标,然后再通过设计田口正交试验来确定设计因素的最佳水平组合. 田口法用最少的试验次数识别最优构造,广泛应用于流体力学与数值模型结合问题[20-23]. 采用田口法、残差分析等方法,优化光伏瓦屋面构造,优化步骤如图 5 所示.

3.1 正交仿真方案

光伏瓦屋面采用自然通风散热,在屋脊加设散热孔,散热孔设置在屋脊背侧动力阴影去内,主要考虑增强自然通风动力,有助于空气流通,加强散热效果,如图 6. 光伏瓦屋面构造优化涉及顺水条高度、散热孔半径、散热孔间距,三者共同影响通风体积. 根据工程经验,顺水条高度取 50~80 mm,散热孔半径取 30~60 mm,散热孔间距取 250~400 mm. 设计正交仿真表 $L_{16}(4^3)$,如表 3,将模拟次数从 64 次减少到 16 次.

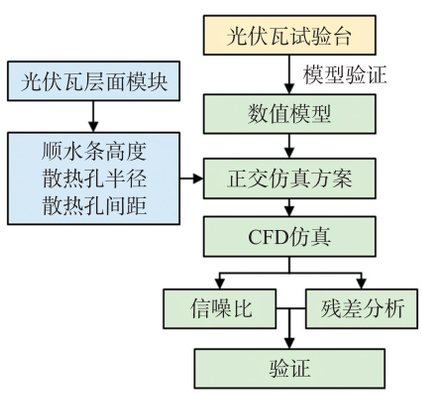


图 5 光伏瓦屋面优化步骤

Fig. 5 Optimization process of PV tile roof

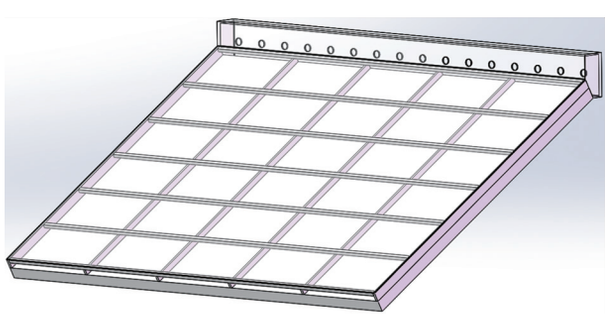


图 6 光伏瓦屋面物理模型

Fig. 6 PV tile roof physical model

表 3 正交仿真方案

Table 3 Orthogonal simulation schemes mm

编号	项目			编号	项目		
	顺水条高度	散热孔半径	散热孔间距		顺水条高度	散热孔半径	散热孔间距
1	1(50)	1(30)	1(250)	9	3(70)	1	3
2	1	2(40)	2(300)	10	3	2	4
3	1	3(50)	3(350)	11	3	3	1
4	1	4(60)	4(400)	12	3	4	2
5	2(60)	1	2	13	4(80)	1	4
6	2	2	1	14	4	2	3
7	2	3	4	15	4	3	2
8	2	4	3	16	4	4	1

3.2 信噪比

信噪比(S/N)用于评估实际值与目标值之间的稳定性,实际值与理想值的偏差越小,信噪比越大,其

波动也越小. 信噪比包括三种特性类型:望小特性、望大特性和望目特性[20]. 本研究优化的目标是更小的背板平均温度,遵循望小特性. 望小特性中,最理想化质量特性值为 0. 信噪比如式(1).

$$S/N_{\text{望小特性}} = -10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right), \tag{1}$$

式中,S/N 为信噪比,y_i 为样本实际数值,n 为样本数量.

3.3　构造优化

仿真模拟表 3 所示方案,各方案对应光伏背板最高温度及其信噪比如图 7 所示,三个关键因素影响分析如图 8.

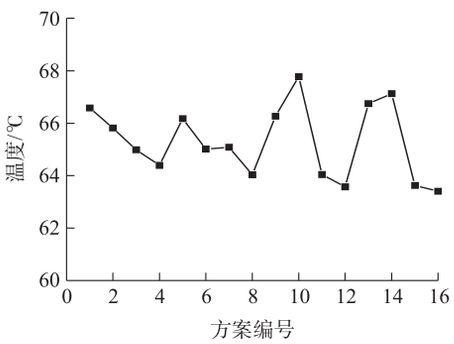


图 7　仿真结果

Fig. 7　Simulation results

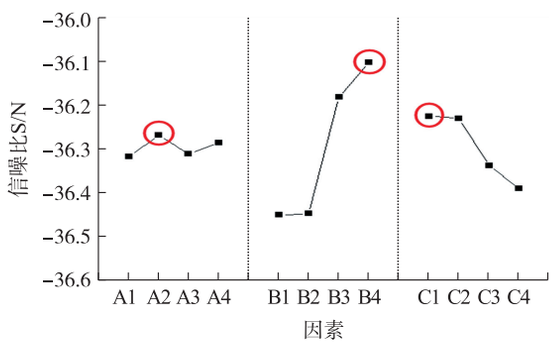


图 8　信噪比分析

Fig. 8　Analysis of signal to noise ratio

仿真结果表明,方案 16 光伏背板平均温度最低,信噪比最高,是表 3 所列方案的最佳选择. 图 8 关于信噪比分析表明,在顺水条信噪比中,A2 对应信噪比最大,说明 60 mm 是最佳顺水条高度. 类似的,散热孔半径、散热孔间距的最佳水平分别为 60 mm、250 mm.

为了进一步探寻三个因素对光伏背板温度的影响,仿真结果残差分析如表 4.

表 4　残差分析

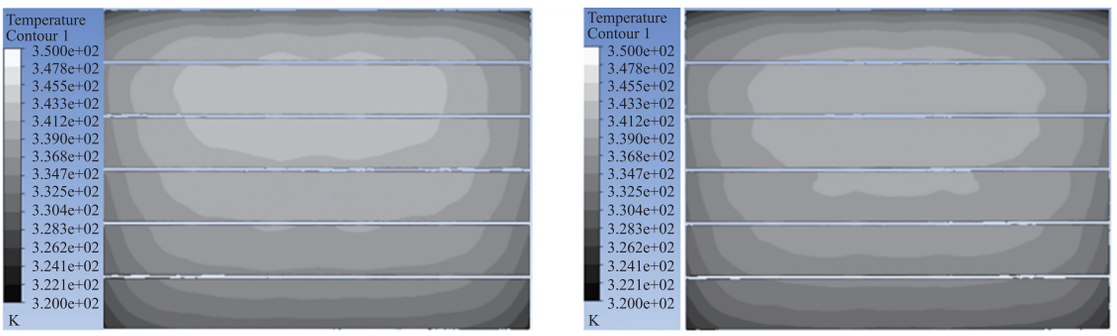
Table 4　Range analysis　　℃

编号	项目		
	顺水条高度(A)	散热孔半径(B)	散热孔间距(C)
K_1	261.78	265.77	259.05
K_2	260.31	265.73	259.19
K_3	261.66	257.74	262.41
K_4	260.90	255.41	264.00
k_1	65.45	66.44	64.76
k_2	65.08	66.43	64.80
k_3	65.42	64.44	65.60
k_4	65.23	63.85	66.00
残差(R)	0.37	2.59	1.24

$R_B > R_C > R_A$,即散热孔半径是影响光伏背板温度的主要因素,其次是散热孔间距和顺水条高度. k_2^A 是最小的 k^A,表明 60 mm 是最佳的顺水条高度,相似地,散热孔半径和散热孔间距的最优值是 60 mm 和 250 mm.

3.4　优化方案验证

为了分析优化效果,选择表 3 正交表的中间水平作为对照组(顺水条高度 65 mm,散热孔半径 45 mm,散热孔间距 325 mm),仿真模拟对照组和优化方案(顺水条高度 60 mm,散热孔半径 60 mm,散热孔间距 250 mm)的光伏背板平均温度,分别为 64.72 ℃、63.29 ℃,信噪比分别为−36.22、−36.03,与对照组相比,优化方案的背板平均温度降低了 1.43 ℃. 如图 9 所示光伏板背面温度分布,两组光伏背板温度分布趋势相同,呈环状分布,温度最高区域位于光伏背板中心靠近屋脊的位置. 对照组的光伏背板最高温度明显高于优化组 2 ℃. 因此通过优化方案可明显降低背板的平均温度以及最高温度,有利于提升光伏板光电转化性能.



(a) 对照组　　(b) 优化组

图 9　光伏背板温度对比

Fig. 9　PV backplane temperature comparison

表 3 中列出的 16 个方案的平均光伏背板温度为 65.29 ℃,与平均值相比,最优方案的光伏背板平均温度降低了 2 ℃. 结合仿真结果表明,优化方案显著降低了光伏瓦屋面组件背板温度,结合以往研究降低光伏板温度可以提高发电效率[5-6],因此最优方案是:顺水条高度 60 mm,散热孔半径 60 mm,散热孔间距 250 mm.

4　结论

为降低光伏瓦屋面的光伏背板温度,搭建了测试平台和数值模型,优化光伏瓦屋面构造. 主要结论如下:

(1)光伏瓦屋面包括光伏瓦组件、挂瓦条、顺水条、混凝土基础、屋脊,屋脊上设有散热孔,顺水条高度、散热孔半径、散热孔间距是构造优化的重点;

(2)影响光伏瓦背板温度的主要因素由大到小依次为:散热孔半径、散热孔间距、顺水高度;

(3)最优方案:顺水条高度 60 mm,散热孔半径 60 mm,散热孔间距 250 mm,与对照组相比,最优方案的光伏背板温度降低 1.43 ℃.

本文提出一种新型建筑光伏一体化瓦屋面,结合试验数据和仿真平台,优化结构参数,为光伏瓦屋面的工程实际应用提供方法指导和理论依据.

[参考文献]

[1] Ali K A, Ahmad M I, Yusup Y. Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector[J]. Sustainability, 2020: 7427.

[2] Chandel R, Chandel S S, Malik P. Perspective of new distributed grid connected roof top solar photovoltaic power generation policy interventions in India[J]. Energy Policy, 2022, 113122(168): 113122.

[3] 中国工程建设标准化协会. T/CECS 10341 模块化光伏屋面构件[S]. 北京:中国标准出版社, 2023.

[4] Ahmed W, Sheikh J A, Kerekes T, et al. Solar roof tiles: unleashing technical advantages and contribution to sustainable society[J]. Science of the Total Environment, 2024, 176818(954): 176818.

[5] Mei L, Infield D G, Gottschalg R, et al. Equilibrium thermal characteristics of a building integrated photovoltaic tiled roof[J]. Solar Energy, 2009(83): 1893-1901.

[6] Čurpek J, Čekon M. Climate response of a BiPV façade system enhanced with latent PCM-based thermal energy storage[J]. Renewable Energy, 2020, 152: 368-384.

[7] Nižetić S, Čoko D, Yadav A, et al. Water spray cooling technique applied on a photovoltaic panel: the performance response [J]. Energy Conversion and Management, 2016(108): 287-296.

[8] Moradgholi M, Nowee S M, Abrishamchi I. Application of heat pipe in an experimental investigation on a novel photovoltaic/thermal(PV/T) system[J]. Solar Energy, 2014(107): 82-88.

[9] Farhan A A, Hasan D J. An experimental investigation to augment the efficiency of photovoltaic panels by using longitudinal fins[J]. Heat Transfer, 2021(50): 1748-1757.

[10] Tong Y,Yang W. Numerical analysis and experimental study on the thermoelectric characteristics of the Al-Si alloy used for building energy storage tile[J]. Renew Energy,2022(200):1447-1457.
[11] Cui X,Ma W,Zheng Y,et al. Thermal analysis of radiative cooling coating on the rear surface of photovoltaic tile[J]. Solar Energy,2022(248):210-220.
[12] Alim M A,Tao Z,Saeed N,et al. Effect of reflective coating on thermal and electrical performances of solar roof tiles[J]. Energy Conversion and Management,2022(270):116251.
[13] Huang Y C,Chan C C,Wang S J,et al. Development of building integrated photovoltaic(BIPV)system with PV ceramic tile and its application for building façade[J]. Energy Procedia,2014(61):1874-1878.
[14] Lukasik J,Wajs J. Experimental and numerical study of thermal and electrical potential of BIPV/T collector in the form of air-cooled photovoltaic roof tile[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2024(227):125554.
[15] Wajs J,Golabek A,Bochniak R,et al. Air-cooled photovoltaic roof tile as an example of the BIPVT system:an experimental study on the energy and exergy performance[J]. Energy,2020(197):117255.
[16] Ghani F,Duke M,Carson J K. Effect of flow distribution on the photovoltaic performance of a building integrated photovoltaic/thermal(BIPV/T)collector[J]. Solar Energy,2012(86):1518-1530.
[17] 国际电工委员会. 光伏系统性能—第 2 部分:性能评估方法:IEC TS 61724-2[S]. Geneva:IEC,2016.
[18] 孙贺江,冯连元,何卫兵,等. 飞机后设备舱自然对流换热的实验与模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(8):863-868.
[19] Sun C,Lu Y,Ju X. Experimental and numerical study to optimize building integrated photovoltaic(BIPV)roof structure[J]. Energy and Buildings,2024,309:114070.
[20] 柯清. 基于田口法实木椅类家具结构稳健设计研究[D]. 北京:北京林业大学,2016.
[21] Erfani T,Erfani R. An evolutionary approach to solve a system of multiple interrelated agent problems[J]. Applied Soft Computing,2015,37:40-47.
[22] Radhakrishnan J,Sridhar S,Zuber M,et al. Design optimization of a Contra-Rotating VAWT:a comprehensive study using Taguchi method and CFD[J]. Energy Conversion and Management,2023,298:117766.
[23] Fatahian H,Mishra R,Jackson F F,et al. Design optimization of an innovative deflector with bleed jets to enhance the performance of dual Savonius turbines using CFD-Taguchi method[J]. Energy Conversion and Management,2023,296:117655.

[责任编辑:杜忆忱]

(上接第 15 页)

[11] Guo H,Han Y,Weng X,et al. Near-field focusing of the dielectric microsphere with wavelength scale radius[J]. Optical Express,2013,21(2):2434-2443.
[12] Yang H,Trouillon R,Huszka G,et al. Super-resolution imaging of a dielectric microsphere is governed by the waist of its photonic nanojet[J]. Nano Letter,2016,16(8):4862-4870.
[13] Darafsheh A. Photonic nanojets and their applications[J]. Journal of Physics:Photonics,2021,3:022001.
[14] Yang S,Taflove A,Backman V. Experimental confirmation at visible light wavelengths of the backscattering enhancement phenomenon of the photonic nanojet[J]. Optical Express,2011,19(8):7084-7093.

[责任编辑:杜忆忱]