

文章编号:1001-2060(2023)03-0141-09

管板式 PV/T 组件结构参数优化

彭 浩^{1,2},寿春晖^{1,2},代彦军^{3,4},纪培栋^{1,2}

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司,浙江 杭州 311121; 2. 浙江省太阳能利用及节能技术重点实验室,浙江 杭州 311121;
3. 上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240; 4. 上海交通大学 太阳能发电与制冷教育部
工程研究中心,上海 200240)

摘要:以无玻璃盖板管板式 PV/T 组件为研究对象,采用 Trnsys 软件仿真与实验测试相结合的方法,从发电角度确定吸热板厚度、换热管数量及换热管管径;从成本角度提出适用于不同效率组件、不同光资源区域工况下的最佳设计参数。结果表明:换热管管间距、吸热板厚度和换热管内径对管板式 PV/T 组件发电性能的影响程度依次减小;以实现 PV/T 发电性能不低于传统 PV 组件为目标,换热器结构参数建议为吸热板厚度 0.4 mm、换热管管径 6 mm 及换热管管间距不大于 99.2 mm;以全生命周期内总投入最低为目标,Ⅱ类光资源地区最佳管间距为 70.86 mm,Ⅲ类和Ⅳ类光资源地区的最佳管间距为 82.67 mm;优化后 PV/T 组件的太阳能利用率达到 42.75%~48.69%,发电效率比传统 PV 高 1.17%~2.08%。

关键词:PV/T 组件;PV 组件;发电效率;结构参数;成本;管间距

中图分类号:TK513.5 **文献标识码:**A **DOI:**10.16146/j.cnki.rndlge.2023.03.019

[引用本文格式]彭 浩,寿春晖,代彦军,等.管板式 PV/T 组件结构参数优化[J].热能动力工程,2023,38(3):141~149. PENG Hao, SHOU Chun-hui, DAI Yan-jun, et al. Optimization of structural parameters of tube-sheet PV/T collector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 141~149.

Optimization of Structural Parameters of Tube-sheet PV/T Collector

PENG Hao^{1,2}, SHOU Chun-hui^{1,2}, DAI Yan-jun^{3,4}, JI Pei-dong^{1,2}

(1. Zhejiang Energy Group R&D Institute Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code:311121; 2. Key Laboratory of Solar Energy Utilization & Energy Saving Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, China, Post Code:311121;
3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240; 4. Engineering Research Center of Solar Energy and Refrigeration, MOE, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: Selecting unglazed PV/T module as research object, numerical simulation by Trnsys software and experimental test were combined. The heat absorption plate thickness and heat exchange tube quantity and diameter were determined from the perspective of power generation; the optimal design parameters suitable for modules with different efficiencies and regions with different solar resources were proposed from the perspective of cost. The results show that the electricity generation performance of tube-sheet PV/T collector is in descending order influenced by heat exchange tube spacing, heat absorption plate thickness, and inner diameter of heat exchange tube. To achieve the goal that PV/T power generation efficiency is no less than that of traditional PV module, the recommended structural parameters of heat exchanger are as follows: thickness of absorbing plate is 0.4 mm, heat exchange tube diameter is 6 mm and

收稿日期:2022-03-07; 修订日期:2022-06-10

基金项目:国家重点研发计划(2019YFE0104900)

Fund-supported Project:National Key Research and Development Program of China (2019YFE0104900)

作者简介:彭 浩(1989-),男,浙江浙能技术研究院有限公司工程师.

通讯作者:纪培栋(1989-),男,浙江浙能技术研究院有限公司工程师.

tube spacing is no more than 99.2 mm. To minimize the total investment of tube-sheet PV/T module in the whole lifecycle, the suggested optimal tube spacing is 70.86 mm in class II solar resource areas, and 82.67 mm in class III and class IV solar resource areas. The solar energy utilization rate of optimized PV/T module reaches 42.75% to 48.69%, meanwhile, the power generation efficiency is 1.17% to 2.08% higher than that of traditional PV module.

Key words: PV/T collector, PV module, power generation efficiency, structural parameters, cost, tube spacing

引言

目前商用晶体硅光伏组件光电转换效率有限,大部分入射太阳辐照被转换为热能。Kern 等人^[1]在 1978 年提出了光伏/光热组件(简称为 PV/T 组件)的概念,即在光伏电池背面铺设换热流道,通过空气或水带走热量而降低光伏电池温度,在提高光伏电池光电转换效率的同时提供热能,可有效降低建筑能耗和碳排放。

Kosti 等人^[2]综述了水冷型 PV/T 组件的研究、发展和应用,指出管板式 PV/T 组件具有效率高、结构简单和成本低等优点,非常具有应用和推广前景。Charalambous 等人^[3]对不同结构型式和使用不同工质的平板型 PV/T 组件进行了对比综述,指出液体冷却的管板式 PV/T 组件由于具有较高的电、热效率和经济性,适合大规模应用。刘仙萍等人^[4]利用 TRNSYS 软件模拟结构参数对 PV/T 组件能量转换性能的影响,结果表明,减小集热板排管间距与管径的比值有利于提高光热与光电转换性能。Bergene 等人^[5]研究了管间距与管径比(W/D)对 PV/T 系统的影响,当 W/D 由 1 逐渐增加至 10 时 PV/T 系统出口流体温度逐渐降低。马双等人^[6]发现竖向弯管比横向弯管使得光伏背部温度更低、发电效率更高。Touafek 等人^[7]设计了一种采用镀锌钢材质的管间距 30 mm 的管板式 PV/T 组件,经过仿真和实验研究,该组件的热效率可达 50% 左右。张乾等人^[8]研究发现,采用超白压延玻璃作为 PV/T 组件的盖板可以有效提升 PV/T 组件的性能。安丽芳^[9]评估了积尘条件下 PV/T 系统的光电性能,并制定了适宜的清洁策略。刘健圳等人^[10]研究了水流量对 PV/T 系统效率、

(烟)能及环境效益的影响。

水冷型 PV/T 组件各参数影响趋势逐渐明确,但在热、电互相影响条件下,少有从发电性能和成本角度指出 PV/T 组件换热器结构参数设计的具体要求的研究。本文针对无玻璃盖板管板式 PV/T 组件,利用 Trnsys 软件建立管板式 PV/T 组件及传统光伏发电仿真模型,同时搭建相应实验测试装置对其进行验证;再利用验证后的系统模型,以循环泵运行期间 PV/T 组件发电效率不低于传统 PV 组件为目标,确定 PV/T 组件换热器的吸热板厚度、换热管数量、换热管管径的最低要求;然后以全生命周期内系统总投入最低为目标,提出适用于不同组件效率、不同光资源区域工况下的最佳设计参数;最后制作优化后的 PV/T 组件并进行测试验证。

1 实验装置

PV/T 集热系统测试装置及 PV 组件测试装置如图 1 所示,包含 PV/T 组件(多晶硅)、PV 组件(多晶硅)、水泵(0~0.069 kg/s)、水箱(60 L)、流量计和 PT100 温度传感器(组件进出口 2 个测点、水箱上、中、下 3 个测点)等。PV/T 组件和 PV 组件分别配置 MPPT 控制器、蓄电池和负载。PV/T 组件和 PV 组件固定倾角为 21°。气象仪(辐照、温湿度和风速)、温度传感器、MPPT 控制器等信号分别接入数据采集仪。实验测试时间从 9:30 开始,直至水箱温度达到最高点。PV/T 组件及 PV 组件参数如表 1 所示。PV/T 组件是在 PV 组件背部涂刷导热胶,将换热器固定于组件背部。换热器钢管采用 U 型、左右对称布置方式,将其近似为 6 根钢管处理。为减少热损失,在换热器下部铺设保温层。



图 1 PV/T 实验系统图

Fig. 1 Experimental system for PV/T

表 1 PV/T 组件参数

Tab. 1 Parameters of PV/T collector

参数	数值
PV/T 面积(外框)/m ²	1.63
PV/T 额定功率/W	270
功率温度系数/(%·℃ ⁻¹)	-0.42
吸热板厚度/mm	0.06
吸热板导热系数/W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	201
换热管内径/mm	6
换热管数量	6
保温层厚度/m	0.02
PV 面积(外框)/m ²	1.63
PV 额定发电功率/W	270

2 系统仿真建模

采用 TRNSYS 软件建立 PV/T 集热模型和 PV 组件发电仿真模型,如图 2 所示。

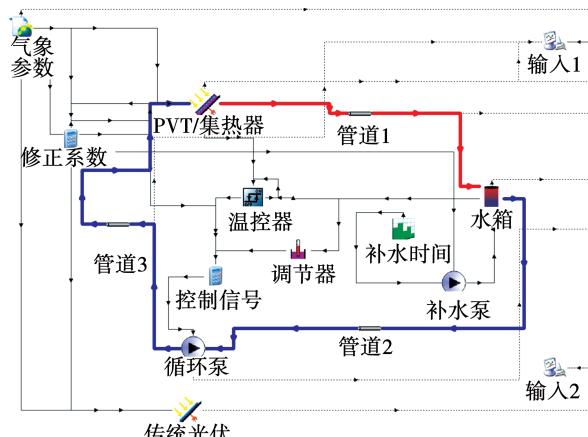


图 2 PV/T 集热模型和 PV 发电模型

Fig. 2 PV/T heat collection model and PV generation system model

PV/T 组件采用 TYPE 560 模块,PV 组件采用 TYPE 562 模块,气象数据通过 TYPE 109 模块导入。当模型用于验证时,气象数据和水箱起始温度均采用实际测量数据。当模型用于系统年度性能预测时,气象数据采用典型气象年数据(1991~2010),采用模块 TYPE 2b 模块控制循环水泵的运行,温差设置为 5 ℃。

假定水箱的热水当天用完,补水温度 t_{water} 为^[11]:

$$t_{\text{water}} = -0.0005 t_{\text{air}}^2 + 0.51 t_{\text{air}} + 5.6 \quad (1)$$

式中: t_{air} —环境温度,℃。

模型中自定义参数通过计算器模块实现,涉及 PV/T 组件表面对流热损系数、天空温度、组件换热管对流换热系数和水的物性参数等。

天空温度为^[12]为:

$$t_{\text{sky}} = 0.0552(t_{\text{air}} + 273.15)^{1.5} - 273.15 \quad (2)$$

对流热损系数 h_{air} 为^[13]:

$$h_{\text{air}} = 2.8 + 3v_{\text{wind}} \quad (3)$$

式中: v_{wind} —风速,m/s。

3 评价指标

PV/T 集热系统热效率为:

$$\eta_{\text{ts}} = \frac{Q_{\text{ts}}}{Q_{\text{sun}}} = \frac{mc_p(t_{\text{end}} - t_{\text{int}})}{Q_{\text{sun}}} \quad (4)$$

式中: Q_{ts} —系统得热量,kW·h; m —水箱工质质量,kg; t_{end} —水箱最终温度,℃; t_{int} —水箱起始温度,℃; Q_{sun} —测试期内组件表面辐照量,kW·h。

PV/T 组件或 PV 组件发电效率 η_e :

$$\eta_e = Q_e/Q_{\text{sun}} \quad (5)$$

式中: Q_e —测试期内 PV/T 组件或 PV 组件发电量,kW·h。

PV/T 集热系统太阳能利用率 η_o :

$$\eta_o = \eta_{\text{ts}} + \eta_e \quad (6)$$

选用电加热进行补热,电加热效率为 95%,系统年度耗电量 Q_{el} 为:

$$Q_{\text{el}} = Q_{\text{pump}} + Q_{\text{sp}} \quad (7)$$

式中: Q_{pump} —水泵耗电量,kW·h; Q_{sp} —补热耗电量,kW·h。

系统年度上网电费 C_1 为:

$$C_1 = Q_{\text{PV-year}} \times \eta_1 \times P_1 \quad (8)$$

式中: $Q_{\text{PV-year}}$ —年度发电量(首年衰减 2.5%, 以后每年衰减 0.7%), $\text{kW}\cdot\text{h}$; η_1 —逆变器效率, 取值 96%; P_1 —上网电价, 参考当地价格, 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

系统年度耗电费 C_2 为:

$$C_2 = Q_{\text{el}} \times P_2 \quad (9)$$

式中: P_2 —所在市电价, 按第 1 阶梯平均电价, 元/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

系统年度 CO_2 排放量 G 为:

$$G = 0.785(Q_{\text{PV-year}} \times \eta_1 - Q_{\text{el}}) \quad (10)$$

系统全生命周期内净现值 NPV 为^[14]:

$$\text{NPV} = \sum_{t=0}^n \frac{C_1 - C_2}{(1+K)^t} - I \quad (11)$$

式中: K —折现率, 取值 7%; t —时间, a; n —系统使用寿命(光伏发电系统取值 25 a; PV/T 集热系统光伏部分取值 25 a, 换热器取值 15 a; 电热水器取值 15 a); I —系统初始投资总额, 如表 2 所示。

表 2 初始投资金额

Tab. 2 Initial investment

组 成	PV/T 系统 (6 根换热管)/元	电热水器 系统/元	PV + 电热水器 系统/元
光伏	675	-	675
换热器	520	-	-
逆变器	500	-	500
支架	100	-	100
电加热器	1 200	1 200	1 200
其他	980	-	50
总造价	3 975	1 200	2 525

对 PV/T 系统、电热水器系统、PV + 电热水器系统全生命周期内的总投入进行分析。光伏价格按 2.5 元/W; 6 根换热管的换热器价格为 520 元, 每增加一根换热管增加 30 元成本(10% 范围内波动); 其他费用包含导热胶、保温棉、保护板、循环泵、水管配件、温控和安装费。系统运行模式: 传统 PV 及 PV/T 组件产生的电力直接上网; PV/T 组件前 15 年正常发电, 后 10 年 PV/T 组件按纯发电模式进行发电。

4 模型验证

选择 6 个晴朗或多云的天气(2021 年 7 月 14 日~9 月 1 日)进行实验测试, 测试结果及模拟误差如表 3 所示。图 3 为 2021 年 8 月 31 日 PV/T 组件和 PV 组件发电性能及制热性能模拟值与实验值的对比。6 个工况下 PV/T 组件的模拟发电量相对误差范围为 $-0.11\% \sim 2.14\%$, 水箱模拟最终温度相对误差范围为 $-0.7\% \sim -2.7\%$, PV 组件模拟发电量相对误差为 $-0.09\% \sim 1.5\%$ 。相同工况下, 采用的 PV/T 组件测试期内发电量要比 PV 组件发电量低 $2.41\% \sim 5.30\%$ 。采用验证后的模型, 选用杭州市典型气象年数据, 对换热器结构参数(吸热板厚度、换热管数量、换热管管径)进行优化。

表 3 模拟与实验结果的对比

Tab. 3 Comparison of simulated and experimental results

日期	质量流/	平均辐照强	累计辐照/	环境温	平均风速/	PV/T 发电	PV 发电量/	水箱最终	PV/T 发电	PV 发电量	水箱温度
	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{度}/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\text{kW}\cdot\text{h}$	度/°C	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	量/(kW·h)	(kW·h)	温度/°C	量误差/%	误差/%	误差/%
7.14	0.059	793.90	5.57	37.72	1.59	1.11	1.17	54.43	1.36	-1.05	-1.59
8.09	0.029	760.27	4.80	35.80	1.08	1.00	1.02	50.75	0.94	1.04	-2.00
8.18	0.042	722.62	4.01	32.76	1.13	0.84	0.86	45.72	2.14	1.57	-2.78
8.30	0.060	862.52	5.35	36.76	1.26	1.09	1.14	54.01	1.71	-0.09	-1.21
8.31	0.059	881.24	5.14	36.04	1.49	1.04	1.10	55.13	2.13	0.08	-1.28
9.01	0.046	747.32	4.75	37.26	1.14	0.97	1.01	56.63	-0.11	-0.10	-0.71

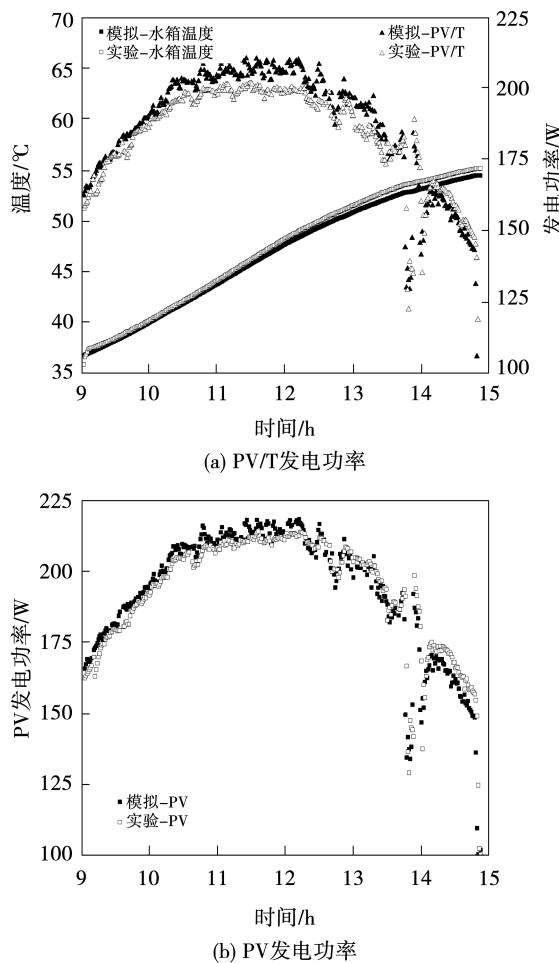


图 3 模拟与实验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulated and experimental results

5 结果与分析

5.1 换热器关键结构参数

5.1.1 吸热板厚度

随换热管管间距减小(即换热管数量增加)工质质量流增加,所需最小吸热板厚度减小,如图4和表4所示。换热管管间距为165.33 mm时,质量流量小于0.04 kg/s,增加吸热板厚度无法使得PV/T组件发电效率高于PV组件;质量流量 ≥ 0.04 kg/s时存在最小吸热板厚度使得PV/T组件发电效率高于PV组件,如质量流量为0.04 kg/s和0.05 kg/s时的最小吸热板厚度分别为1.50 mm和0.50 mm(见图4(a)圆圈处)。换热管管间距减小为124 mm,换热能力增强,质量流量为0.01 kg/s时也存在最小吸热板厚度,且该厚度随质量流量增加而减小。

质量流量从0.01 kg/s增加至0.05 kg/s,最小吸热板厚度从0.40 mm减小至0.03 mm,如图4(b)所示。

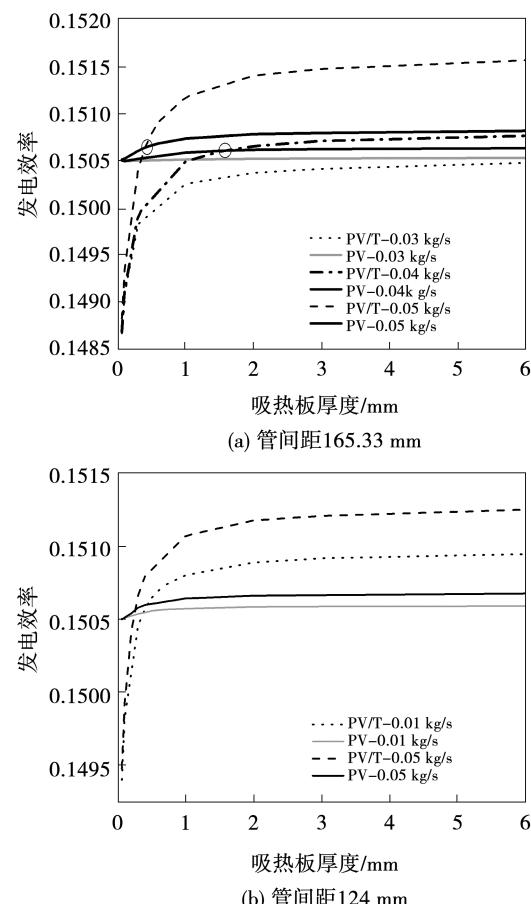


图 4 吸热板厚度对发电效率的影响

Fig. 4 Influence of thickness of absorbing plate on power generation efficiency

换热管管间距为165.33 mm时,虽然可通过增加工质质量流和吸热板厚度使得PV/T组件发电效率与PV组件相同,但需付出较大运行成本和制造成本。根据水泵运行功耗实测数据拟合曲线,质量流为0.01~0.05 kg/s时的年度耗电量为4.81~42.81 kW·h,结合发电量增益和加热量增益,选用质量流0.01 kg/s更合适。换热管数量则要选择8及以上合适(偶数是因为光伏接线盒一般处于正中间)。在质量流为0.01 kg/s、换热管数量为8时,结合管板式焊接工艺要求,最小厚度要求可以确定为0.4 mm。

表 4 所需最小吸热板厚度(mm)

Tab. 4 Minimum absorbing plate thickness(mm)

质量流量/kg·s ⁻¹	165.33 mm (6 根)	124 mm (8 根)	99.2 mm (10 根)	82.76 mm (12 根)	70.86 mm (14 根)
0.01	—	0.40	0.20	0.07	0.06
0.02	—	0.40	0.20	0.06	0.06
0.03	—	0.40	0.20	0.06	0.06
0.04	1.50	0.30	0.20	0.06	0.06
0.05	0.50	0.30	0.20	0.06	0.06

5.1.2 换热管管间距

换热管管间距对发电效率和太阳能利用率的影响如图 5 所示。换热管数量增加, 管间距减小, PV/T 组件换热能力得到较大提升。当管间距从 165.33 mm 减小至 33.07 mm 时(换热管数量从 6 增加至 30), PV/T 组件发电效率从 14.99% 增加至 15.27%, 太阳能利用率从 35.29% 增加至 45.24%。

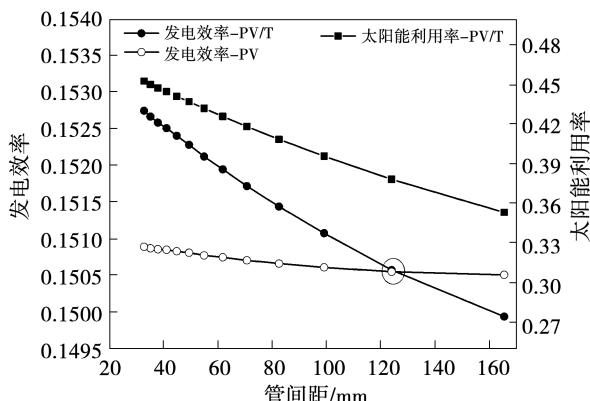


图 5 换热管管间距对发电效率和太阳能利用率的影响

Fig. 5 Influence of heat exchange tube spacing on power generation efficiency and solar power utilization rate

5.1.3 换热管管径

换热管管径对发电效率和太阳能利用率的影响如图 6 所示。换热管管径增加可以缓慢提升 PV/T 组件发电效率和太阳能利用率, 其影响程度不如换热管管间距。换热管管径从 6 mm 增加至 16 mm, PV/T 组件发电效率、太阳能利用效率变化范围分别为 15.06% ~ 15.07% 及 37.80% ~ 38.14%, 性能没有根本性的变化, 所以后续分析采用 6 mm 换热管管径。

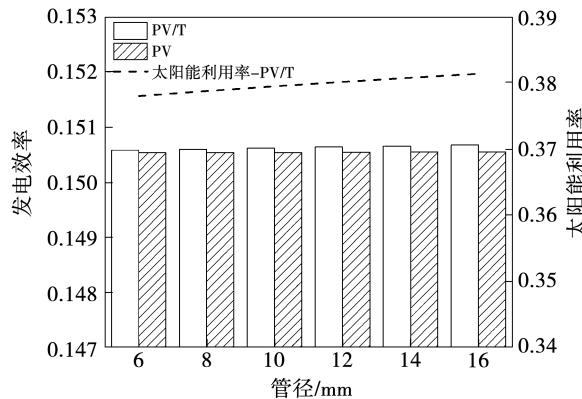


图 6 换热管管径对发电效率及太阳能利用率的影响

Fig. 6 Influence of heat exchange tube diameter on power generation efficiency and solar power utilization rate

5.2 适用性分析

换热器各结构参数中, 换热管管间距对 PV/T 组件发电性能影响最大, 其次是吸热板厚度和吸热管管径。本部分研究不同组件额定发电效率、不同太阳能资源下换热管管间距的最低要求(PV/T 组件发电效率与 PV 组件相等)和最佳参数(全生命周期内总投入最低)。在进行计算时, 换热器其他参数保持不变: 工质质量流 0.01 kg/s、吸热板厚度 0.4 mm、换热管管径 6 mm。

5.2.1 组件额定发电效率

组件额定发电效率较小时, 组件接收热量较多, 需要组件具有较强换热能力才能降低光伏温度; 组件额定发电效率较大时, 则会降低对组件换热能力的要求。管间距为 124 mm 时(8 根), 组件额定发电效率要不小于 16.6% 才能实现 PV/T 组件与 PV 组件发电效率相等, 如图 7(a)所示。换热管管间距为 99.2 mm 时(10 根), 组件额定发电效率要不小于 10%, 如图 7(b)所示。目前的光伏组件主要分为两类: 一类以高效率发电为目标, 组件效率在 20% 以上, 此时需要选用管间距 124 mm; 一类是发电与美观兼顾, 如 CdTe 组件, 量产平均效率为 15.1%, 此时需要选用管间距 99.2 mm。

不同额定发电效率下的最佳换热管数量如图 8 所示。从全生命周期内系统总投入角度, 换热器换热管管间距存在最佳值。对于额定发电效率为 16.6% 的 PV/T 组件, 每增加 1 根换热管会增加 30 元的成本投入, 但其同时增加了系统吸热量, 运行成本减小量大于换热管数量增加所带来的成本投入。

换热管数量为 12 根时达到平衡。管间距为 82.67 mm, 总投入为 6 643.02 元。额定发电效率为 10% 和 20% 的 PV/T 组件都存在类似规律, 即随着换热管管间距减小, 系统总投入先减小后增加, 而且这两种工况下的最佳换热管管间距都为 82.67 mm。另外, 虽然采用高效光伏电池会增加 PV/T 组件成本, 但其带来的发电量增加量减小了系统耗电量。额定发电效率为 10% 的 PV/T 组件总投入最高, 为 6 718.67 元; 额定发电效率为 20% 的 PV/T 组件总投入最低, 为 6 605.15 元。由此可知, PV/T 组件在设计时, 尽可能选择高效光伏电池。

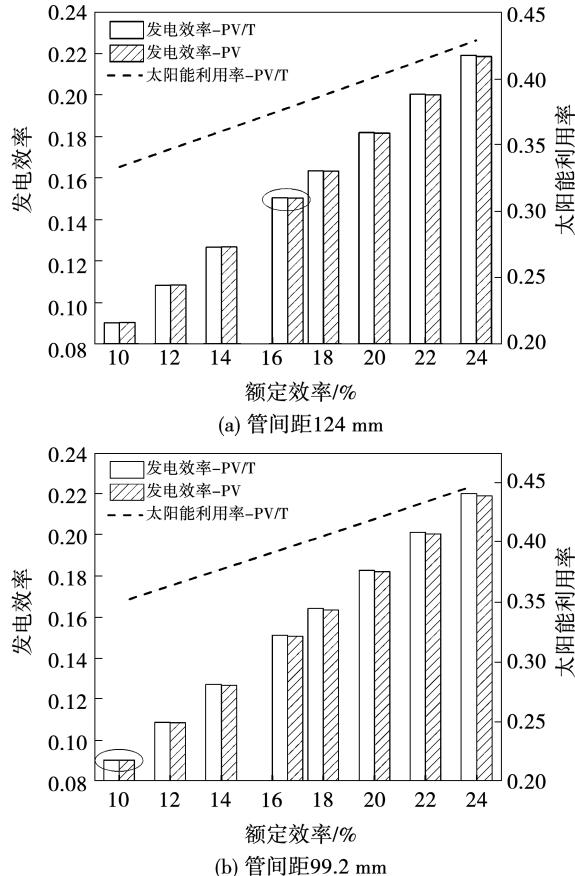


图 7 额定发电效率的影响

Fig. 7 Influence of rated generation efficiency

5.2.2 太阳能资源

太阳能资源对 PV/T 组件性能的影响类似于组件额定发电效率。太阳能资源对发电效率和太阳能利用率的影响如图 9 所示。辐照度较高时, 需要组件具有较强换热能力才能有效降低光伏电池温度。换热管管间距为 124 mm 时(换热管 8 根),

PV/T 组件只有在重庆、杭州、广州等辐照度低的Ⅳ类太阳能资源城市运行, 才能实现其发电效率不低于 PV 组件发电效率, 如图 9(a)所示; 换热管管间距为 99.2 mm 时(换热管 10 根), PV/T 组件在Ⅱ类~Ⅳ类太阳能资源城市运行时都能实现发电效率不低于 PV 组件, 适用性更强。

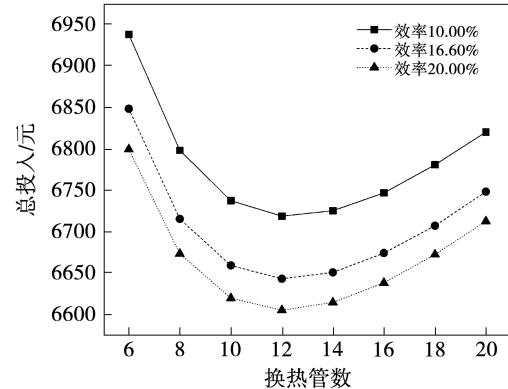


图 8 不同额定发电效率下的最佳换热管数量

Fig. 8 Optimal number of heat exchange tubes under different rated generation efficiencies

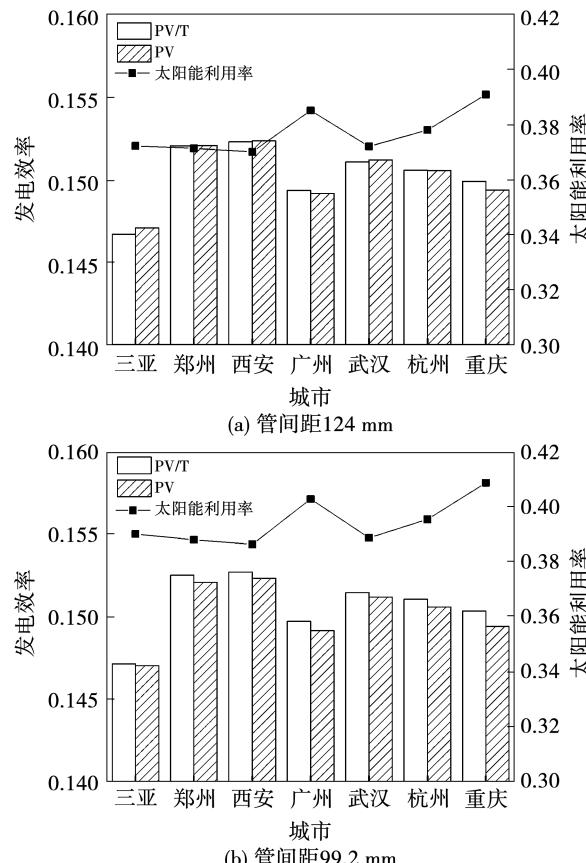


图 9 太阳能资源的对发电效率和太阳能利用率影响

Fig. 9 Influence of solar energy resource

以全生命周期内系统总投入最低为目标,PV/T 组件在不同城市应用时,换热管管间距/换热管数量存在最佳值,如图 10 所示,CO₂ 排放量对比如图 11 所示。当所处城市太阳能资源较好时,减小换热管管间距,系统运行成本减小量大于换热管数量增加所带来的成本增加量。三亚地区最佳换热管管间距为 70.86 mm, 郑州和西安最佳换热管管间距为 82.67 mm(光资源较好,但环境温度低),广州、武汉、杭州由于光资源接近,最佳换热管管间距均为 82.67 mm;重庆最佳换热管管间距为 99.2 mm。

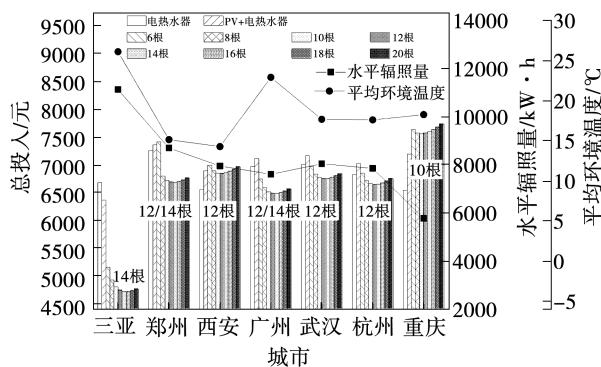
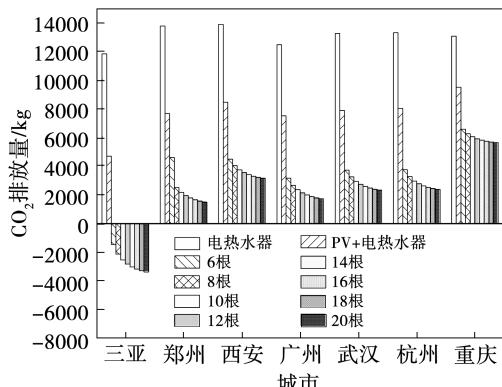


图 10 总投入对比

Fig. 10 Comparison of total investment

图 11 CO₂ 排放量对比Fig. 11 Comparison of CO₂ emissions

重庆因为光资源差、西安因为上网电价低,导致 PV/T 系统竞争力低于电热水器。在三亚、郑州、广州、武汉和杭州,PV/T 系统的总投入和 CO₂ 排放量低于电热水器和(PV + 电热水器)。PV/T 系统全生命周期内总投入比纯电热水器低 0 ~ 29.36%, CO₂ 排放量低 53.69% ~ 100%;PV/T 系统总投入比(PV + 电热水器)低 0 ~ 25.89%, CO₂ 排放量低 36.29% ~ 100%。

5.3 讨论及验证

综上,要实现 PV/T 组件发电性能与 PV 组件发电性能一致,PV/T 组件换热器结构参数的最低要求:吸热板厚度 0.4 mm, 换热管管径 6 mm, 换热管管间距不大于 99.2 mm;以全生命周期内系统总投入最低为目标,适用于杭州的最佳换热管管间距为 82.67 mm。选用额定功率为 380 W 的单晶硅组件(效率 20.9%, 功率温度系数 -0.34%/°C)制作了 PV/T 组件。优化后的 PV/T 组件如图 12 所示。结合组件接线盒位置,实际布置的换热管数量为 18 根,管间距为 85 mm,吸热板厚度为 0.4 mm,换热管管径 6 mm。

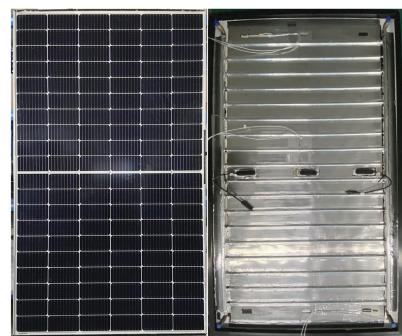


图 12 优化后的 PV/T 组件

Fig. 12 Optimized PV/T module

2021 年 12 月 30 日 ~ 2022 年 2 月 27 日,对优化前后的 PV/T 组件进行对比测试,如图 13 所示。

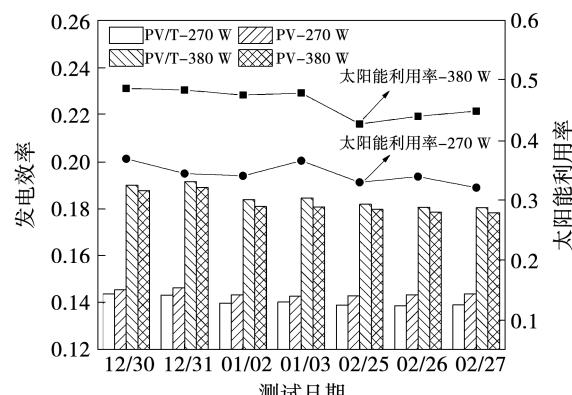


图 13 发电性能对比

Fig. 13 Power generation performance comparison

辐照量变化范围为 9.83 ~ 13.73 kW·h,平均环境温度变化范围为 10.96 ~ 17.91 °C,质量流量变化范围为 0.016 3 ~ 0.085 kg/s。对于优化前的 PV/T 组件(额定功率 270 W),各工况下发电效率比传统

光伏组件相对低 1.15% ~ 3.24%, 太阳能利用率为 32.14% ~ 36.95%; 对于优化后的 PV/T 组件(额定功率 380 W), 各工况下发电效率比传统光伏相对高 1.17% ~ 2.08%, 太阳能利用率达到 42.75% ~ 48.69%。另外, 计算得到该 PV/T 集热系统在杭州应用时, 全生命周期内系统总投入为 6 399.19 元, CO₂ 排放量为 560.99 kg, 比优化前(如图 8 和图 11 所示)分别相对减小 6.56% 和 85%。

6 结 论

对无玻璃盖板管板式 PV/T 组件换热器结构参数进行了优化, 得出结论:

(1) 换热器结构参数对 PV/T 组件发电性能影响程度从大到小依次为: 换热管管间距、吸热板厚度和换热管内径。

(2) 要实现 PV/T 组件发电性能不低于传统 PV 组件, 并适用于不同功率光伏组件、Ⅱ类及以下太阳能资源地区, 换热器设计参数建议为: 吸热板厚度 0.4 mm, 换热管管径 6 mm, 换热管管间距不大于 99.2 mm。

(3) 以全生命周期系统总投入最低为目标, Ⅱ类光资源地区的 PV/T 组件换热器最佳管间距为 70.86 mm; Ⅲ类和Ⅳ类光资源地区的 PV/T 组件换热器最佳管间距为 82.67 mm。

(4) PV/T 加热系统比电热水器、PV + 电热水器这两种加热方式更加具有竞争力。在成本相当的情况下, 前者 CO₂ 排放量分别比后两者小 53.69% ~ 100% 和 36.29% ~ 100%。

(5) 优化后的 PV/T 组件发电效率比传统光伏高 1.17% ~ 2.08%, 太阳能利用率达 42.75% ~ 48.69%; 全生命周期内系统总投入和 CO₂ 排放量比优化前分别相对减小 6.56% 和 85%。

参 考 文 献:

- [1] KERN E C, RUSSELL M C. Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems [C]//Washington DC, USA: Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists, 1978:1153 ~ 1157.
- [2] KOSTI L T, ALEKSI J S. Review of research, development and application of photovoltaic/thermal water systems [J]. Open Physics, 2020, 18(1):1025 ~ 1047.
- [3] CHARALAMBOU P G, MAIDMENT G G, KALOGIROU S A, et al. Photovoltaic thermal (PV/T) collectors: a review [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2):275 ~ 286.
- [4] 刘仙萍, 饶政华, 廖胜明. 太阳能光伏/光热复合组件能量转换性能的数值模拟 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6):2554 ~ 2560.
- [5] LIU Xian-ping, RAO Zheng-hua, LIAO Sheng-ming. Numerical simulation of energy conversion performance for hybrid photovoltaic/thermal solar collector [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(6):2554 ~ 2560.
- [6] BERGENE T, LØVVIK O M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells [J]. Solar Energy, 1995, 55(6):453 ~ 462.
- [7] 马 双, 吴家正, 阮应君. 水冷型 PV/T 系统的高效利用与发展现状 [J]. 建筑节能, 2015, 43(2):32 ~ 36, 57.
- [8] MA Shuang, WU Jia-zheng, RUAN Ying-jun. Efficient utilization and development situation of water-cooling PV/T system [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(2):32 ~ 36, 57.
- [9] TOUAFEK K, KHELIFA A, ADOUANE M. Theoretical and experimental study of sheet and tubes hybrid PVT collector [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80:71 ~ 77.
- [10] 张 乾, 庞 瑎, 于洪文, 等. 不同玻璃盖板对吹胀式 PV/T 组件的性能影响 [J]. 可再生能源, 2020, 38(12):1604 ~ 1609.
- [11] ZHANG Qian, PANG Wei, YU Hong-wen, et al. The influence of different glass covers on the performance of roll-bond PV/T module [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(12):1604 ~ 1609.
- [12] 安丽芳, 景金龙. PV/T 太阳能光伏光热系统关键参数影响特性研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(11):147 ~ 153.
- [13] AN Li-fang, JING Jin-long. Research on effect characteristic of key parameters of PV/T solar photovoltaic photothermal system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11):147 ~ 153.
- [14] 刘健圳, 田丽亭, 吴转转, 等. 水流量对 PV/T 系统效率、(烟)能及环境效益的影响 [J]. 可再生能源, 2022, 40(5):619 ~ 626.
- [15] LIU Jian-zhen, TIAN Li-ting, WU Zhuan-zhuan, et al. Influences of flow rate on PV/T system efficiency, exergy and environmental benefit [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(5):619 ~ 626.
- [16] 吴静怡, 江明旒, 王如竹, 等. 空气源热泵热水机组全年综合能效评定 [J]. 制冷学报, 2009, 30(5):14 ~ 18.
- [17] WU Jing-yi, JIANG Ming-liu, WANG Ru-zhu, et al. Seasonal energy efficiency assessment of air source heat pump water heaters [J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(5):14 ~ 18.
- [18] SWINBANK W C. Long-wave radiation from clear skies [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2010, 89(381):339 ~ 348.
- [19] ASTE N, PERO C D, LEONFORTE F, et al. Performance monitoring and modeling of an uncovered photovoltaic-thermal (PVT) water collector [J]. Solar Energy, 2016, 135:551 ~ 568.
- [20] 韩雷涛, 苏庆益, 陈 华, 等. 家用太阳热水器与太阳热水系统的技术经济比较 [J]. 可再生能源, 2007, 25(4):49 ~ 52.
- [21] HAN Lei-tao, SU Qingyi, CHEN Hua, et al. Tech-economic comparison between domestic solar water heater and solar water heating systems [J]. Renewable Energy Resources, 2007, 25(4):49 ~ 52.