文章编号:1674-2974(2024)11-0074-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024109

一种新型多功能一体化太阳能利用系统研究

李洪强[1,2,3†],缪思凯[1,2,3],刘丽芳[4],毛颖杰[5]

[1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
2. 建筑安全与节能教育部重点实验室(湖南大学),湖南 长沙 410082;
3. 国家级建筑安全与环境国际联合研究中心,湖南 长沙 410082;
4. 湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201;
5. 湖南大学设计研究院有限公司,湖南 长沙 410082]

摘 要:针对轻钢装配式建筑中太阳能技术应用的研究不足,提出一种新型多功能一体化太阳能利用系统.为深入分析系统性能,根据系统特点以及能量转换关系,建立了系统发电效率、发电功率、热效率以及热水温度的理论模型.利用该模型探究了太阳辐照度、热水箱容量、热水箱水温预设值以及系统串联量等设计参数对系统电、热性能的影响.研究结果表明,综合考虑当地太阳辐照度和所需热水温度,合理设定系统热水箱容量、水温预设值以及系统串并联数量,可提升热效率、发电效率.在特定集热器参数下,当太阳辐照度达550 W/m^{2}时系统满足设计要求,此时系统高温阵列热水温度为74.5 ℃,热效率为52.6%;低温阵列热水温度为52.3 ℃,热效率为60.4%;发电功率为58 W,发电效率为9.46%;系统太阳能综合利用效率为79.1%,相较于此前文献的研究结果,太阳能综合利用效率提升了30%.该系统为日后太阳能利用系统的设计以及其与轻钢装配式建筑一体化设计提供了一种新思路,对高效利用太阳能具有重要参考价值.

关键词:太阳能系统;太阳能;光伏光热;装配式建筑

中图分类号:TU201.5 **文献标志码**:A

Research on a Novel Multifunctional Integrated Solar Energy Utilization System

LI Hongqiang[1,2,3†], MIAO Sikai[1,2,3], LIU Lifang[4], MAO Yingjie[5]

[1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China;
3. National Center for International Research Collaboration in Building Safety and Environment, Changsha 410082, China;
4. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
5. Hunan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410082, China]

* **收稿日期**:2023-12-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52008166,520082163),National Natural Science Foundation of China(52008166,520082163);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ30256),Natural Science Foundation of Hunan Province(2021JJ30256)

作者简介:李洪强(1980—),男,河北唐山人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人,E-mail: lhq@hnu.edu.cn

Abstract: A novel multifunctional integrated solar energy utilization system is proposed in view of the lack of research on solar energy technology applied in light steel prefabricated buildings. To better analyze the performance of the system, theoretical models for generation efficiency, generation power, thermal efficiency and hot water temperature are established based on system characteristics and energy conversion relationships. The influences of design parameters including solar irradiance, capacity of hot water tank, preset temperature of hot water tank and system series quantity on electrical and thermal performance of the system are analyzed by using these established models. The results show that, to obtain higher thermal and electrical efficiency, it is essential to comprehensively consider the local solar irradiance and the required hot water temperature to determine the capacity of the hot water tank, the preset value of water temperature and the number of series and parallel connection of the system. Under given collector parameters, when the solar irradiance reaches 550 W/m^2, the design requirements can be met. At this time, the hot water temperature of the high-temperature array of the system is 74.5 ℃, the thermal efficiency is 52.6%, the hot water temperature of the low-temperature array is 52.3 ℃, the thermal efficiency is 60.4%, the power generation is 58 W, the power generation efficiency is 9.46% and the comprehensive utilization efficiency of solar energy of the system is 79.1%. Compared with the experimental results of literature research, the overall solar energy utilization efficiency is increased by 30%. The proposed system provides a new idea for the design of solar energy utilization systems and integrated design with light steel prefabricated buildings in the future, which has important reference significance for the efficient utilization of solar energy.

Key words: solar energy system; solar energy; photovoltaic/thermal(PV/T); prefabricated construction

当前,全球气候变化加剧且环境挑战增多,推动可持续建筑成为建筑领域发展的重要方向[1].轻钢装配式建筑作为其中的重要组成部分,凭借设计标准化、部件工厂化、施工装配化、装修一体化以及技术智能化等优势,正逐渐成为未来建筑发展的趋势[2],相较于传统建筑,装配式建筑具有更高的施工效率、更优的工程质量、更低的环境污染等[3-4],对我国建筑质量的提升至关重要.

与此同时,《"十四五"建筑节能与绿色建筑发展规划》指出,提高建筑节能标准,优化建筑用能结构,推广可再生能源应用,将助力我国实现碳达峰碳中和目标[5].装配式建筑与可再生能源集成潜力巨大[6-7],我国可再生能源资源丰富,尤其是太阳能资源[8],充分利用这些可再生能源并将其与装配式建筑结合,减少对传统能源的依赖[9],能够极大促进建筑领域的绿色发展.

在装配式建筑中,太阳能的应用主要有两种方式:一是被动式,通过增强围护结构热工性能,减少对空调采暖的依赖,降低能耗;二是主动式,在建筑屋顶、立面等部位采用太阳能光电及光热技术降低对外部能源的需求[10],例如郭清华等[11]将新型太阳能墙板与预制墙板一体化设计应用于装配式建筑中.然而,装配式建筑具有区别于传统建筑的特殊建造方式,在建筑中应用太阳能技术不是简单的叠加.在充分了解装配式建筑设计原则的基础上,如何将太阳能技术与建筑科学地融合,以提升建筑的整体性能,是未来研究的重点.

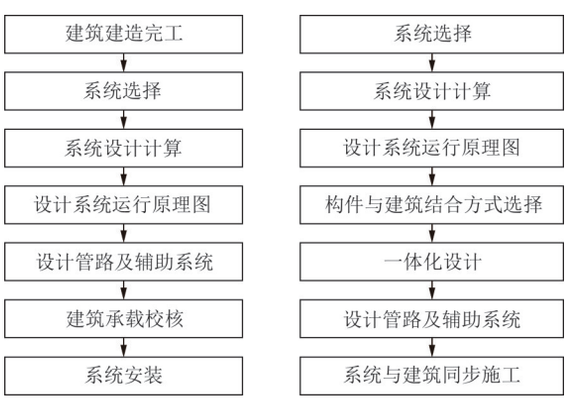
针对轻钢装配式建筑中太阳能技术应用的研究不足,本文提出一种多功能一体化太阳能利用系统,该系统利用集热器串并联与建筑屋顶集成设计,并设置高低温双水箱,提高了一体化程度和太阳能利用率.通过建立分析模型,对关键设计参数——串并联数量、高低温水箱温度设置以及水箱容量等进行分析,并与常规建筑中设计的热水系统进行比较.本研究为日后该领域的下一步研究提供了新思路.

1　一体化太阳能利用系统设计

太阳能利用系统的研究设计历来由能源机构和太阳能企业主导,他们更多关注太阳能集热器和热水箱等核心部件的性能.传统建筑中,太阳能系统大多在建筑完工后设计,建筑设计师和施工方都不参

与其中，从而导致很多问题产生，如支架固定、管线穿墙会对原建筑结构、美观等造成影响[12]，难以发挥出太阳能利用系统的优势.

轻钢装配式建筑是一个复杂的系统、一个完整的统一体，一体化设计不是太阳能构件与建筑的简单叠加，而是从建筑开始设计时，就将太阳能利用系统的所有构件作为建筑不可或缺的一部分加以考虑，将各个构件与建筑巧妙地融合，使其成为建筑物不可分割的一部分. 这与此前的常规建筑设计流程有所不同，具体如图1所示. 本研究提出的系统在建筑外部的应用如图2所示，本章将详细介绍系统各部分具体设计.



(a)常规热水系统设计流程图 (b)本研究热水系统设计流程图

图1 设计流程对比

Fig.1 Comparison between design process

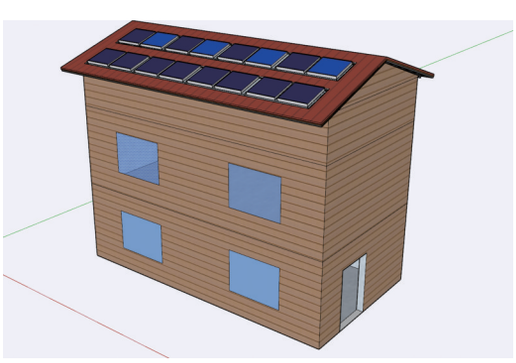


图2 太阳能在建筑中的应用

Fig.2 Application of solar energy in buildings

1.1 设计基本原则

针对轻钢装配式建筑和太阳能利用系统的特点，要保障建筑的安全性、美观性、实用性，须遵循4个基本设计原则，即结构安全性原则、功能需求性原则、节能高效性原则以及运维简便性原则. 结构安全性原则是指在满足结构安全的前提下，对太阳能构件与建筑部件进行耦合设计；功能需求性原则是指针对建筑功能需求选取合适的太阳能利用形式；节能高效性原则是指设计时需考虑在建筑中的应用部位以及应用形式特点，尽可能实现太阳能高效利用；运维简便性原则是指将太阳能构件设计成便于维修、更换的组件，并预留维修空间，便于后期运维.

1.2 太阳能利用系统与建筑一体化设计

太阳能利用系统能否成功应用于建筑中，取决于其系统构件的设计及选取是否合理. 该系统主要包含集热器、热水箱、蓄电池及循环管路等，只有选择合理的设计方案和理念，才能综合解决建筑功能、空间组合等多方面问题，进而开展一体化太阳能构件的研究.

建筑屋顶因其日照充足、无朝向限制且遮挡少，成为太阳能利用的理想部位. 针对低层轻钢装配式住宅，本研究采用与建筑坡屋顶结合的方式[12-13]，将建筑屋顶坡度设为太阳辐射最佳接收角度. 利用预留支承构件来固定太阳能构件支架，太阳能集热器以嵌入式安装于支架上，如图3所示. 此种设计方案能充分体现太阳能构件与建筑融合的优势.

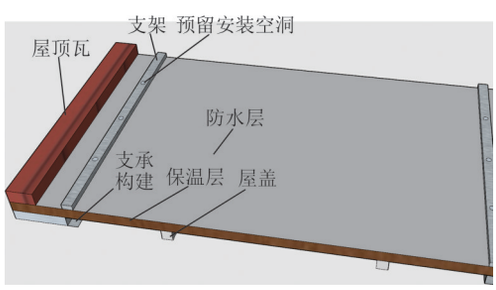


图3 屋顶预装支架

Fig.3 Roof pre-installed

热水箱体积较大，常置于建筑屋顶、附近地面或建筑内部，若安装在建筑外部则会影响建筑外观，若在建筑内部则会占用一定空间且须提前规划管道线路，为使集热器与热水箱尽量靠近，作者建议在建筑顶部增设设备夹层，既能隐藏热水箱，又可安置蓄电池等构件. 此夹层不仅可以解决部分构件的安置问题，还兼具保温隔热作用.

1.3 热水系统设计

太阳能热水系统设计主要考虑以下几个方面：①太阳能集热器的选择；②集热器连接方式；③太阳能系统运行方式；④系统换热方式.

本研究聚焦于太阳能的有效利用及热能电能输出的提升，针对住宅建筑热水和电力需求，采用光伏光热集热器(PVT集热器)和平板型集热器作为主要

应用构件[14-15]. 为优先满足热水供应并提升出口水温,集热器采用串并联形式,如图4所示. 同时,根据不同用途的水温需求,设置高低温双水箱. 鉴于系统各部件的布局,系统采取间接强制循环方式,该方式的循环工质可加入防冻液以增强地区适应性,并确保用水侧水质安全.

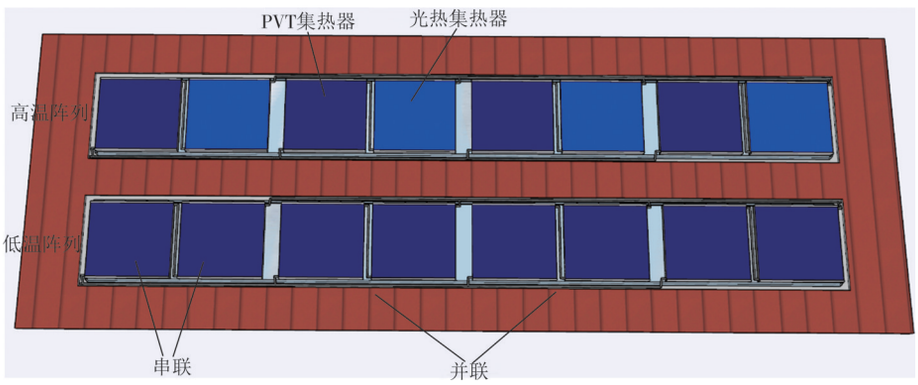


图4　集热器连接方式

Fig.4　Connection mode of collector

此前太阳能热水系统设计大多是单一功能的单水箱系统,其基本原理如图5所示. 而本研究的热水系统原理如图6所示. 根据系统设计特点,运行工况分为以下3种.

1)工况一:常规运行模式. 此模式下,太阳辐照能使水温度升至预设值,如图7所示黑色部分,系统按照高低温相互独立运行. 工质在循环系统中经水泵、集热器、换热器完成一次换热,将热水箱内的水加热至预设值,从而完成热水供应.

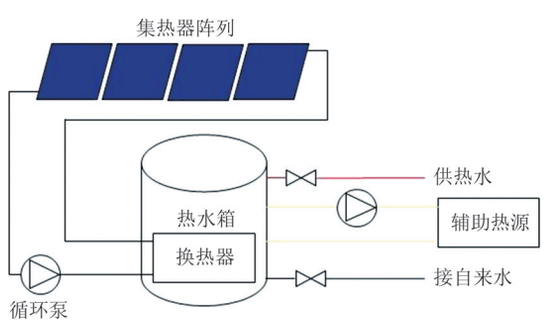


图5　常规热水系统原理图

Fig.5　Schematic diagram of conventional hot water system

2)工况二:辅助运行模式. 太阳能具有不稳定性,在太阳能不足的情况下,水温难以升至预设值. 如图7所示,为正常提供热水,在常规模式运行基础上增设辅助热源(红色部分),让其在水箱内水温低于50 ℃(生活热水供应不低于45 ℃且留有一定余量)时运行.

3)工况三:超常运行模式. 太阳辐照很充分时运行此模式,能够使水温快速升至预设值,为充分利用太阳能,如图7所示,在常规模式基础上增设水箱之间的串联管路(绿色部分),当高温水箱水温升至预设值后,开启串联管路,让高低温水箱内的水不断混合,直至系统输出热量不足以继续提升水温时关闭.

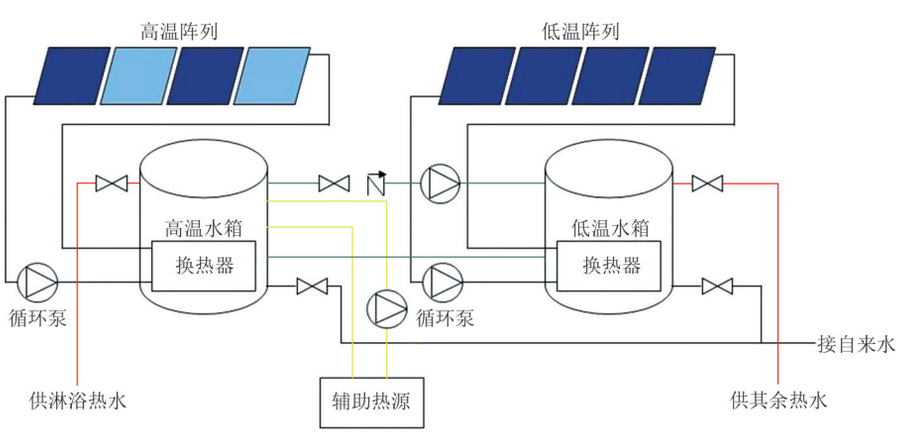


图6　本研究热水系统原理图

Fig.6　Schematic diagram of hot water system in this study

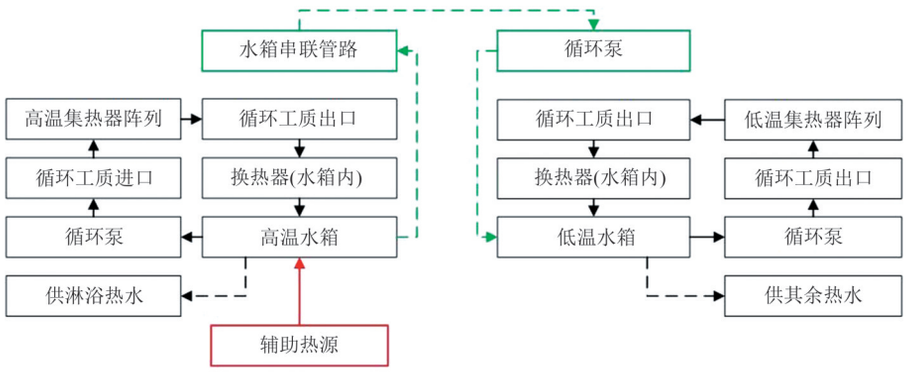


图7 系统运行工况图

Fig.7 Diagram of system operating condition

2 系统基本结构及理论模型建立

2.1 系统基本结构

PVT集热器由玻璃盖板、光伏电池、吸热板、铜管、保温层以及边框组成[16],图8为集热器截面结构示意图,平板集热器与PVT集热器类似,由玻璃盖板、吸热板、铜管、保温层以及边框组成.本研究参考市面上常见的集热器参数进行建模,构建串联模型如图9所示.

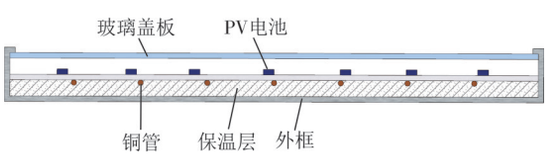


图8 集热器截面

Fig.8 Section of the collector

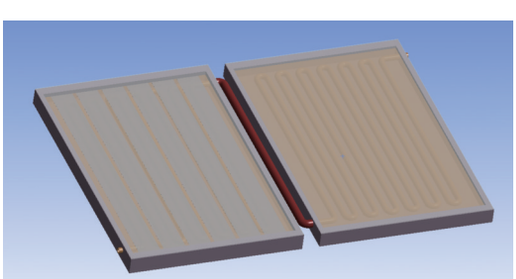


图9 集热器模型

Fig.9 Model of the collector

2.2 系统设计分析模型建立

本文的太阳能利用系统主要分为光伏发电和集热两大部分,根据系统特点以及能量转换关系,建立系统发电效率、发电功率、热效率以及热水温度分析模型.

2.2.1 发电效率理论模型

本研究采用的PVT集热器由光伏电池和平板集热器组成,发电部分主要是光伏电池.光伏电池采用硅材料,工作温度直接影响其转换效率,其转换效率与温度的关系为:

$$\eta_{\mathrm{p}}=\eta_{\mathrm{b}}[1-B_{\mathrm{r}}(T_{\mathrm{p}}-T_{\mathrm{b}})] \tag{1}$$

其中,

$$T_{\mathrm{P}}=T_{\mathrm{a}}+(T_{\mathrm{N}}-20)\cdot\frac{E}{800} \tag{2}$$

式中:η_{p}为光伏电池实际转换效率;η_{b}为标准测试条件下光伏电池转换效率;B_{r}为温度系数,0.004 5 K^{-1};T_{P}为光伏电池工作温度,K;T_{b}为标准测试条件下电池温度,K;T_{a}为环境温度,K;T_{N}为标准条件下工作温度,K;E为太阳辐照度,$\mathrm{W/m^2}$.

由式(1)、式(2)结合系统特点,系统发电效率可表示为[17]:

$$\eta_{\mathrm{PV}}=\tau k\eta_{\mathrm{b}}\left[1-B_{\mathrm{r}}\left(T_{\mathrm{a}}+(T_{\mathrm{N}}-20)\cdot\frac{E}{800}-T_{\mathrm{b}}\right)\right] \tag{3}$$

式中:τ为玻璃盖板透射率;k为光伏电池最大功率点跟踪系数.

2.2.2 发电功率理论模型

根据式(3),系统运行期间,其发电功率可表示为:

$$P_{\mathrm{PV}}=\eta_{\mathrm{PV}}A_{\mathrm{PV}}E=\tau k\eta_{\mathrm{b}}\left[1-B_{\mathrm{r}}\left(T_{\mathrm{a}}+(T_{\mathrm{N}}-20)\cdot\frac{E}{800}-T_{\mathrm{b}}\right)\right]A_{\mathrm{PV}}E \tag{4}$$

2.2.3 热效率理论模型

平板集热器是太阳能集热的主要部件,其材料与结构直接影响系统的集热效率.集热器的各参数包含排管内外径、排管间距、集热器总热损系数、翅片效率、管板结合热阻、传热工质和管壁换热系数等,参数间的关系通常用集热器效率因子F表示[18]:

$$F=\frac{\frac{1}{U_{\mathrm{L}}}}{W\left[\frac{1}{U_{\mathrm{L}}[D+(W-D)F_{\mathrm{C}}]}+\frac{1}{C_{\mathrm{b}}}+\frac{1}{\pi D_{\mathrm{i}}h_{\mathrm{f,i}}}\right]} \tag{5}$$

其中,

$$F_{\mathrm{C}}=\frac{\tanh[m(W-D)/2]}{m(W-D)/2},m=\sqrt{\frac{U_{\mathrm{L}}}{\lambda\delta}} \tag{6}$$

式中:W为排管的中心距,m;D为排管外径,m;D_{i}为排管内径,m;U_{L}为集热器总热损系数,W/(m²·K);$h_{\mathrm{f,i}}$为传热工质与管壁的换热系数,W/(m²·K);F_{C}为翅片效率;C_{b}为结合热阻,W/(m·K);λ为翅片的导热系数,W/(m·K);δ为翅片厚度,m.

PVT集热器的效率因子F_{PVT}还与光伏电池参数有关,具体表示为[19]:

$$F_{\mathrm{PVT}}=\frac{\frac{1}{U_{\mathrm{L}}}}{W\left[\frac{1}{U_{\mathrm{L}}[D+(W-D)F_{\mathrm{P}}]}+\frac{1}{C_{\mathrm{b}}}+\frac{1}{\pi D_{\mathrm{i}}h_{\mathrm{f,i}}}+\frac{1}{W\cdot h_{\mathrm{ca}}}\right]} \tag{7}$$

其中,

$$F_{\mathrm{P}}=\frac{\tanh[m_{\mathrm{P}}(W-D)/2]}{m_{\mathrm{P}}(W-D)/2},m_{\mathrm{P}}=\sqrt{\frac{U_{\mathrm{L}}}{\lambda\delta+\lambda_{\mathrm{PV}}\cdot\delta_{\mathrm{PV}}}} \tag{8}$$

式中:h_{ca}为光伏电池与集热器之间的导热系数,W/(m²·K);λ_{PV}为光伏电池导热系数,W/(m·K);δ_{PV}为光伏电池厚度,m.

PVT集热器利用传热工质带走光伏电池发电过程中产生的热量输出热能,根据平板集热器基本原理,系统热效率由系统输出有用热能与集热器表面太阳辐照的比值表示[20],针对本研究提出的高低温双阵列,计算公式如下:

$$\eta_{\mathrm{H}}=\frac{Q_{\mathrm{H}}}{A_{\mathrm{H}}E},\eta_{\mathrm{L}}=\frac{Q_{\mathrm{L}}}{A_{\mathrm{L}}E} \tag{9}$$

其中,系统输出有用热能Q_{H}、Q_{L}为:

$$\begin{cases}Q_{\mathrm{H}}=[(1-\xi)A_1F+\xi A_1F_{\mathrm{PVT}}+A_2F][E(\tau a)_{\mathrm{e}}-U_{\mathrm{L}}(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{a}})]\\Q_{\mathrm{L}}=[(1-\xi)A_1F+\xi A_1F_{\mathrm{PVT}}][E(\tau a)_{\mathrm{e}}-U_{\mathrm{L}}(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{a}})]\\T_{\mathrm{m}}=(T_2+T_1)/2\end{cases} \tag{10}$$

式中:η_{H}、η_{L}分别为高温和低温阵列的热效率;A_{H}、A_{L}分别为PVT高温和低温阵列集热器的表面积,m²;ξ为光伏电池填充系数;A_1、A_2分别为PVT集热器和平板集热器的表面积,m²;$(\tau a)_{\mathrm{e}}$为玻璃盖板透射比与吸热板吸收比的有效乘积;T_{m}为集热器平均温度,K;T_{a}为环境温度,K;T_2为集热器出口温度,K;T_1为集热器进口温度,K.

由式(9)和式(10),集热系统的热效率可表示为:

$$\begin{cases}\eta_{\mathrm{H}}=\left[(1-\xi)\frac{A_1}{A_{\mathrm{H}}}F+\xi\frac{A_1}{A_{\mathrm{H}}}F_{\mathrm{PVT}}+\frac{A_2}{A_{\mathrm{H}}}F\right]\times\left[(\tau a)_{\mathrm{e}}-\frac{U_{\mathrm{L}}(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{a}})}{E}\right]\\\eta_{\mathrm{L}}=\left[(1-\xi)\frac{A_1}{A_{\mathrm{L}}}F+\xi\frac{A_1}{A_{\mathrm{L}}}F_{\mathrm{PVT}}\right]\times\left[(\tau a)_{\mathrm{e}}-\frac{U_{\mathrm{L}}(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{a}})}{E}\right]\end{cases} \tag{11}$$

2.2.4　热水温度理论模型

水箱内水吸收热量与温度变化的关系为:

$$Qt=m_{\mathrm{w}}c_{\mathrm{p}}(T_4-T_3) \tag{12}$$

式中:t为水加热时间,s;m_{W}为水质量,kg;c_{p}为水的比热容,J/(kg·K);T_4为水加热后温度,K;T_3为水的初始温度,K.

由式(10)和式(12),根据光伏电池和集热器的集成结构,可用光伏电池温度近似代替集热器平均温度以简化计算,系统热水温度计算式为:

$$\begin{cases}T_{\mathrm{H}}=\frac{[(1-\xi)A_1F+\xi A_1F_{\mathrm{PVT}}+A_2F]}{mc_{\mathrm{p}}}\times\left[E(\tau a)_{\mathrm{e}}-EU_{\mathrm{L}}\frac{(T_{\mathrm{N}}-20)}{800}\right]t+T_1\\T_{\mathrm{L}}=\frac{[(1-\xi)A_1F+\xi A_1F_{\mathrm{PVT}}]}{mc_{\mathrm{p}}}\times\left[E(\tau a)_{\mathrm{e}}-EU_{\mathrm{L}}\frac{(T_{\mathrm{N}}-20)}{800}\right]t+T_1\end{cases} \tag{13}$$

2.2.5　太阳能综合利用效率

在系统运行过程中,会同时产生电能和热能,鉴于电能属于高品位能源,为综合评价系统整体性能,采用太阳能综合利用效率,计算公式如下[21]:

$$\eta_{\mathrm{s}}=\eta_{\mathrm{w}}+\xi\frac{\eta_{\mathrm{PV}}}{\eta_{\mathrm{power}}} \tag{14}$$

式中:η_{w}为系统热效率;η_{power}为火力发电厂发电效率,一般取38%.

3　结果分析

根据2.2节建立的关于发电效率、发电功率、热

效率以及热水温度的分析模型,选取如表1所示的太阳能集热器参数,深入分析太阳辐照度、热水箱容量等对系统性能的影响,并将分析结果与现有文献[22-23]结果进行对比.在下文分析中,太阳能集热器单块面积均为1.5 m^2,且假定系统每天运行8 h,环境温度为固定值20 ℃.

表1 太阳能集热器参数

Tab.1 Solar collector parameters

参数	数值	参数	数值
玻璃盖板透射率τ	0.9	光伏电池与集热器的传热系数h_{ca}/[W·(m^2·K)$^{-1}$]	45
翅片厚度δ/m	0.002	光伏电池导热系数λ_{PV}/[W·(m·K)$^{-1}$]	84
翅片的导热系数λ/[W·(m·K)$^{-1}$]	393	光伏电池厚度δ_{PV}/m	0.004
管间距W/m	0.15	光伏电池填充系数ξ	0.75
传热工质与管壁的换热系数$h_{f,i}$/[W·(m^2·K)$^{-1}$]	300	玻璃盖板透射比与吸热板吸收比的有效乘积$(\tau a)_e$	0.8
排管内径D_i/m	0.02	最大功率点跟踪系数k	0.7
排管外径D/m	0.025	集热器总热损系数U_L/[W·(m^2·K)$^{-1}$]	5
结合热阻C_b/[W·(m·K)$^{-1}$]	45	光伏电池转换效率η_b	0.15

3.1 不同设计参数对系统性能的影响

3.1.1 太阳辐照度对系统热效率以及热水温度的影响

根据给定集热器参数条件以及分析模型,对高温阵列采用2串3并、低温阵列采用2串2并的形式以及高低温水箱容量分别为300 L、200 L[根据1.2节选取的住宅建筑类型结合《建筑给水排水设计标准》(GB 50015—2019)[24]确定]的系统受太阳辐照度的影响进行分析,高低温系统热效率和热水温度随太阳辐照度变化折线图分别如图10、图11所示.

图10、图11显示,随着太阳辐照度的增加,高低温阵列输出热水温度逐渐升高,而热效率逐渐降低.具体而言,随着太阳辐照增强,集热器的集热量增加,利用工质不断循环提升热水箱内水温.然而,集热器工作温度的上升会对系统性能产生不利影响,导致热效率降低.此外,高温阵列热效率低于低温阵列,原因在于高温条件下热量散失更为显著,从而降低了热效率.因此,在满足实际应用需求的前提下,应尽量控制并降低集热器的工作温度,以获得更高的系统效率.

从图10、图11中热水温度变化可进一步分析所提3种工况.当辐照度低于350 W/m^{2}时,高温水箱难以将热水温度提升至50 ℃以上,因此需开启辅助热源;当辐照度达到550 W/m^{2}时,高低温水箱输出热水温度均可达到预设值,此时,高温阵列热水温度为74.5 ℃,热效率为52.6%;低温阵列热水温度为52.3 ℃,热效率为60.4%;系统太阳能综合利用效率为79.1%.而当辐照度高于550 W/m^{2}时,高低温水箱之间的串联管路即可开启,进一步提升低温水箱水温.根据上述分析可知提出的3种工况是可行的.

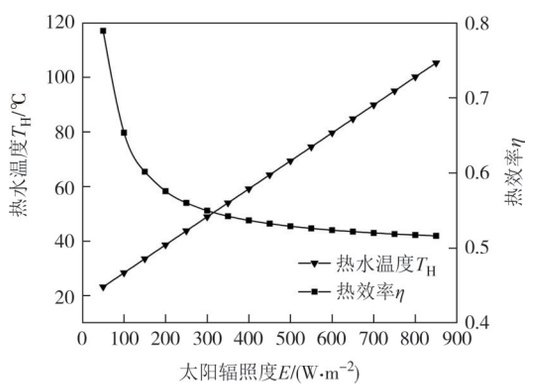


图10 高温阵列热效率及热水温度随太阳辐照度变化

Fig.10 Variation of thermal efficiency and hot water temperature of high temperature array with solar irradiation

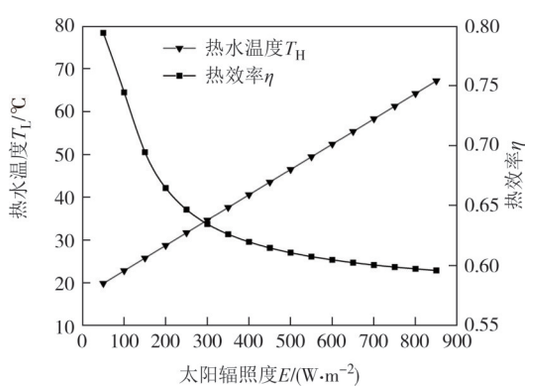


图11 低温阵列热效率及热水温度随太阳辐照度变化

Fig.11 Variation of thermal efficiency and hot water temperature of low temperature array with solar irradiation

由本节分析可知,在同样辐照条件下,本文提出的高低温双水箱设计能够获得更高的热水温度,因此,在相同温度需求条件下降低了对天气的依赖,从

而提升了全年的热水满足率.

3.1.2　热水箱容量对系统热性能的影响

根据给定集热器参数条件以及分析模型,对高温阵列采用2串3并、低温阵列采用2串2并的形式时对系统不同热水箱容量进行分析,热水温度随热水箱容量的变化如图12、图13所示.

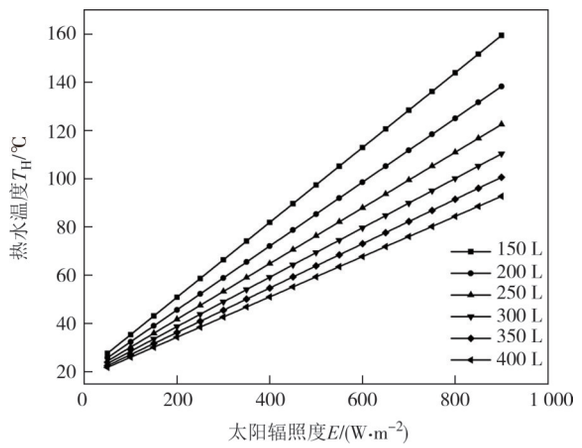


图12　高温热水箱容量对热水温度的影响

Fig.12　Effect of capacity of high temperature hot water tank on hot water temperature

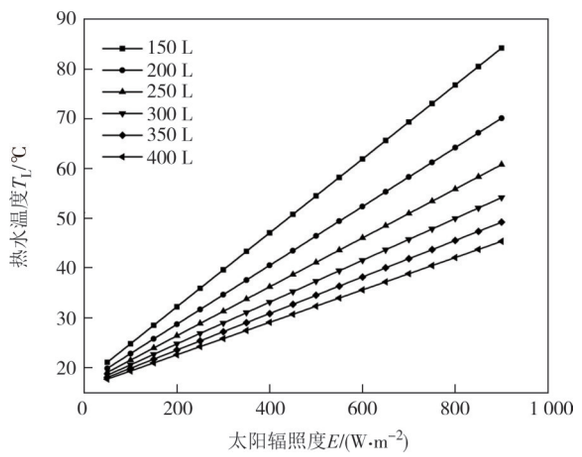


图13　低温热水箱容量对热水温度的影响

Fig.13　Effect of capacity of low temperature hot water tank on hot water temperature

由图12、图13可以看出,随着热水箱容量增加,系统输出的热水温度逐渐降低,同时随着太阳辐照增强,温升量逐渐减小.此外,热水箱容量与集热器并联量为对应关系,即一组串联集热器提升水温至指定值的容量是恒定的,当并联的集热器数量增多时,所需的热水箱容量会减小,但能够提升的水温则会相应提高.以太阳辐照度为550 W/m^{2}为例,高温阵列温升量从最高90.2 ℃降低到48.5 ℃,低温阵列温升量从最高43.1 ℃降低到18.9 ℃.热水系统设计可根据平均太阳辐照度和集热器的温度提升量选取合理的热水箱容量和并联量,以满足建筑居住的热水需求.

由上述分析可知,可根据高低水温的不同用途灵活设定容量值,从而在满足热水需求的前提下,提高太阳能的利用效率,避免能源浪费.

3.1.3　热水温度预设值对系统热性能的影响

根据给定集热器参数条件以及分析模型,对高、低温集热器阵列水温预设值所需的最低太阳辐照度进行分析,水温升至预设值所需的太阳辐照度随温度变化曲线如图14所示.

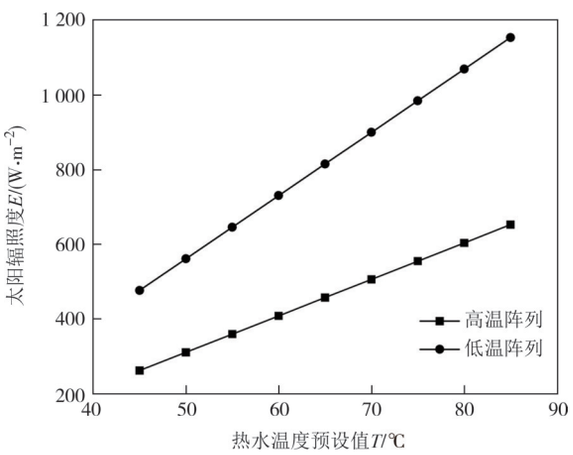


图14　不同水温预设值所需太阳辐照

Fig.14　Solar irradiation required for different water temperature presets

由图14可知,随着水箱水温预设值的增大,所需太阳辐照度呈线性增长的趋势,由于高温阵列多串联一块平板集热器,其所需太阳辐照度增幅相较于低温阵列显著降低.在相同条件下,高温阵列更能有效地满足高温热水需求.设计系统需综合考虑所在地区的平均太阳辐照度以选取恰当的水温预设值,从而实现在相同辐照条件下,高低温双阵列均能正常运行以满足建筑居住的热水需求.

3.1.4　系统串联数量对系统热性能的影响

根据给定集热器参数条件以及分析模型,对高、低温阵列串联不同数量的PVT集热器进行分析,并根据3.1.2节分析结果选取固定热水箱容量,高、低温阵列热水温度随PVT集热器串联数量变化分别如图15、图16所示.

从图15、图16中可以看出,随着PVT集热器串联数量增多,系统输出热水温度升高,但在相同辐照条件下,增幅逐渐减小,这是因为在串联多个集热器时,第一个集热器流出的工质温度较高,因此在下一

个集热器中温升量会变小,串联越多,温升量越小.并且串联集热器会增大系统循环阻力,需选配更大功率的水泵,反而增加了能耗.以太阳辐照度为550 W/m²为例,高温阵列温升量从最低59.5 ℃增加到89.3 ℃,低温阵列温升量从最低34.4 ℃增加到88.4 ℃.在设计系统串联数量时要综合考虑所需温升量以及系统循环阻力.

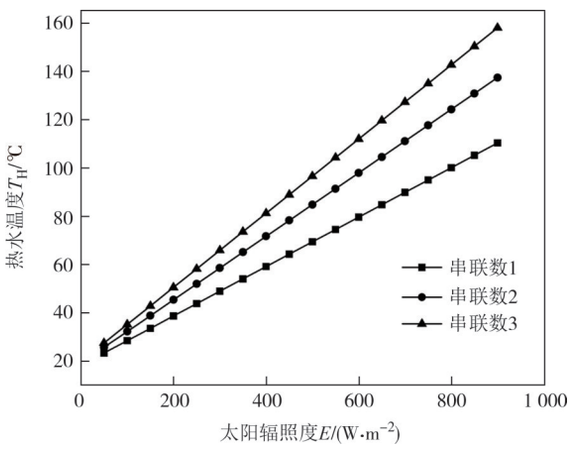


图15 高温阵列串联量对热水温度的影响

Fig.15 Effect of array series quantity of high temperature on hot water temperature

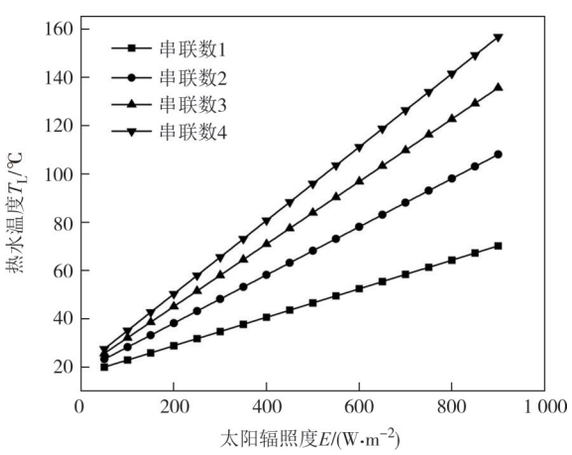


图16 低温阵列串联量对热水温度的影响

Fig.16 Effect of array series quantity of low temperature on hot water temperature

根据上述分析,适当地串联集热器能够显著提升热水供应温度,有效解决单块集热器热水温度不足的问题.

3.1.5 太阳辐照度对系统电性能的影响

根据给定集热器参数条件以及分析模型,对PVT集热器进行发电效率以及发电功率的分析,发电效率以及发电功率随太阳辐照度变化如图17所示.

从图17中可以看出,随着太阳辐照度的增加,发电功率逐渐增大,而发电效率逐渐降低.这是因为随着辐照度增加,光伏组件温度逐渐升高,光伏组件工作温度升高会导致光电转换效率降低,从而影响系统发电效率.根据3.1.1至3.1.5节分析结果,在太阳辐照为550 W/m²时,能够满足系统热水温度要求,此时系统发电功率为58 W,发电效率为9.46%.根据系统选取的串并联数量可以确定系统日均发电量,根据发电量可以确定其用途.

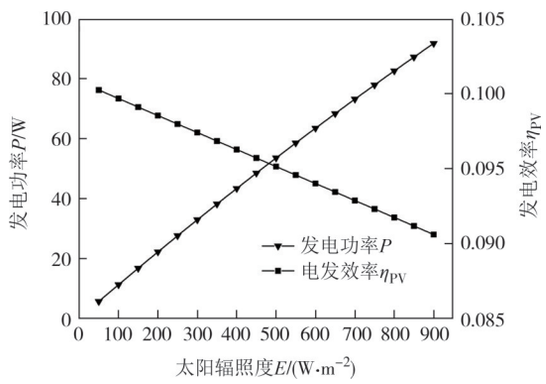


图17 发电效率以及发电功率随太阳辐照度变化

Fig.17 Variation of electrical efficiency and power with solar irradiance

3.2 与文献[22-23]研究系统比较

在此前的研究中,童维维[22](简称研究一)及郭超等[23](简称研究二)通过模拟和试验的方法对其设计的PVT集热器进行性能分析,为了验证本研究建立的分析模型以及系统具有更好的性能,在相同条件(太阳辐照度为550 W/m²、热水箱容量为120 L)下对系统性能进行对比分析,结果如表2所示.

表2 本研究与文献[22-23]研究结果对比

Tab.2 Comparison of data from this study with previous studies [22-23]

组别	热水温度/℃	热效率/%	发电效率/%	发电功率/W	太阳能综合利用效率/%
研究一	39.6	36.1	10.6	54.3	57.0
研究二	46.2	45.7	9.7	48.7	64.8
高温阵列	53.6	61.3	9.5	58.5	80.1
低温阵列	44.5	45.2	9.5	58.5	64.0

由表2可以看出,本文的低温阵列和文献[22-23]均只采用PVT集热器.其理论热性能和电性能与研究一、研究二的试验结果基本一致,证实了本文所构建的分析模型可用于分析太阳能利用系统的热性能和电性能.其中热水温度和热效率存在差异的主要原因是分析模型计算数值是基于环境参数均为理想

条件下的理论计算值,同时,试验测试选取的测量方法产生的测量误差等也会影响实际结果,从而导致理论分析与试验测试之间存在差异;而发电功率和发电效率存在差异主要原因是理论分析模型采用了简化计算,而实际光伏电池运行过程中存在更多影响因素,因此理论分析值略高于试验值.

此外,本文高温阵列在多串联一块平板集热器后,其热水温度提升量和热效率明显高于研究一和研究二,热水温度大约提高了20%,与2.2.5节建立的太阳能综合利用效率分析模型相比,高温阵列太阳能综合利用效率提升了大约30%.由此可见,本研究提出的高低温双水箱热水系统相较于单块集热器具有更高的太阳能利用效率,增加了该系统在实际工程中应用的可能性.

4 结 论

本研究提出了一种新型多功能一体化太阳能利用系统,在设计之初就将系统内各构件与轻钢装配式建筑进行耦合,根据系统特点以及能量转换关系建立太阳能利用系统基本分析模型,包含发电效率、发电功率、热效率以及热水温度,并利用模型分析不同参数对系统性能的影响,得出如下结论.

1)在给定集热器参数下,当太阳辐照达到550 W/m^{2}时即可满足系统设计要求,此时,高温阵列热水温度为74.5 ℃,热效率为52.6%;低温阵列热水温度为52.3 ℃,热效率为60.4%;发电功率为58 W,发电效率为9.46%;系统太阳能综合利用效率为79.1%.

2)随着太阳辐照度增加,系统输出热水温度及发电功率呈线性增长趋势,而热效率和发电效率却相应降低.在满足使用需求的前提下,应尽量降低集热器的工作温度,以提升热效率和发电效率.

3)随着热水箱容量的增大,系统所能提升的热水温度逐渐越低,同时,随着太阳辐照度增加,温升量逐渐减小.因此,在选择热水箱容量时,应综合考虑平均太阳辐照度和集热器的温度提升量.

4)随着水箱设定水温升高,所需太阳辐照度呈线性增长趋势,设计系统可根据所在地区的平均太阳辐照度选取合适的水温预设值.

5)随着系统集热器串联数量的增加,系统输出热水的温度逐渐升高,但在相同辐照条件下,温度增幅逐渐减小,同时系统阻力增大.因此,在选择集热器串联数量时,需综合考虑所需的温升量和系统循环阻力.

此外,在相同测试条件下,与文献[22-23]试验结果对比分析发现,对于低温阵列,理论分析结果与试验结果基本一致,本文模型可用于分析系统的热性能和电性能;对于高温阵列,多串联一块平板集热器能有效提高系统输出热水温度,同时太阳能综合利用效率提升大约30%.

本研究提出的新型系统对日后太阳能利用系统设计以及与轻钢装配式建筑一体化设计提供了一种新思路,对太阳能高效利用具有重要参考意义.

参考文献

[1] 李道增,王朝晖. 迈向可持续建筑[J]. 建筑学报,2000(12):4-8.
LI D Z, WANG Z H. Towards sustainable architecture [J]. Architectaral Journal, 2000(12): 4-8.(in Chinese)

[2] 何泉, 石翠莹, 黄炜. 低能耗装配式建筑外墙设计研究综述[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(3): 30-36.
HE Q, SHI C Y, HUANG W. Review on the design of exterior wall of low energy consumption prefabricated buildings [J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(3): 30-36.(in Chinese)

[3] FENG X Y, MA T, YAMAGUCHI Y, et al. Potential of residential building integrated photovoltaic systems in different regions of China[J]. Energy for Sustainable Development, 2023, 72: 19-32.

[4] 王俊,赵基达,胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报,2016,49(5):1-8.
WANG J, ZHAO J D, HU Z Y. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal,2016,49(5):1-8.(in Chinese)

[5] 中华人民共和国住房和城乡建设部."十四五"建筑节能与绿色建筑发展规划[J]. 安装, 2022(5): 1-6.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Building energy conservation and green building development planning in the 14th five-year plan[J]. Installation, 2022(5): 1-6.(in Chinese)

[6] SARANTI A, TSOUTSOS T, MANDALAKI M. Sustainable energy planning. design shading devices with integrated photovoltaic systems for residential housing units[J]. Procedia Engineering, 2015, 123: 479-487.

[7] 张泠, 张烨琳, 刘忠兵, 等. 遮阳式光伏新风系统性能模拟与优化[J].湖南大学学报(自然科学版), 2018,45(7):135-140.
ZHANG L, ZHANG Y L, LIU Z B, et al. Performance simulation and optimization analysis of A fresh air system integrated with shading photovoltaics[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(7): 135-140.(in Chinese)

[8] SHAO N N, MA L D, ZHANG J L. Experimental study on electrical and thermal performance and heat transfer characteristic

of PV/T roof in summer[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 162: 114276.

[9] 王君, 余本东, 王矗垚, 等. 太阳能光伏光热建筑一体化(BIPV/T)研究新进展[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 72-78.
WANG J, YU B D, WANG C Y, et al. New advancements of building integrated photovoltaic/thermal system (bipv/t)[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 72-78. (in Chinese)

[10] 邵亚飞, 胡冗冗. 装配式建筑太阳能利用研究综述与前景展望[J]. 建筑节能(中英文), 2023, 51(12): 81-87.
SHAO Y F, HU R R. Review and prospects for solar energy utilization in prefabricated buildings [J]. Building Energy Efficiency, 2023, 51(12): 81-87. (in Chinese)

[11] 郭清华, 夏斐, 刘晶. 装配式建筑中太阳墙复合墙板的设计及热性能模拟研究[J]. 世界建筑, 2021(3): 108-113.
GUO Q H, XIA F, LIU J. Research on the design and thermal performance simulation of solar composite wall panel in prefabricated building[J]. World Architecture, 2021(3): 108-113. (in Chinese)

[12] 黄心雨, 陈稳. 光伏建筑一体化(BIPV)应用现状与发展前景[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(3): 160-166.
HUANG X Y, CHEN W. Application status and development prospects of building integrated photovoltaic (BIPV)[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2022, 39(3): 160-166. (in Chinese)

[13] VASSILIADES C, AGATHOKLEOUS R, BARONE G, et al. Building integration of active solar energy systems: a review of geometrical and architectural characteristics[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 164: 112482.

[14] ABDELRAZIK A S, SHBOUL B, ELWARDANY M, et al. The recent advancements in the building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems: an updated review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 170: 112988.

[15] MA T, KAZEMIAN A, HABIBOLLAHZADE A, et al. A comparative study on bifacial photovoltaic/thermal modules with various cooling methods[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 263: 115555.

[16] HERRANDO M, FANTONI G, CUBERO A, et al. Numerical analysis of the fluid flow and heat transfer of a hybrid PV-thermal collector and performance assessment[J]. Renewable Energy, 2023, 209: 122-132.

[17] GUO C, JI J, SUN W, et al. Numerical simulation and experimental validation of tri-functional photovoltaic/thermal solar collector[J]. Energy, 2015, 7: 470-480.

[18] 罗运俊, 何梓年, 王长贵. 太阳能利用技术[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2014.
LUO Y J, HE Z N, WANG C G. Solar energy utilization technology [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2014. (in Chinese)

[19] 何永泰, 肖丽仙, 冯明军, 等. 基于模型分析的光伏/热(PV/T)太阳能系统设计方法及应用研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(11): 2937-2944.
HE Y T, XIAO L X, FENG M J, et al. The design method and application research of photovoltaic/thermal (PV/T) solar system by using model analysis[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(11): 2937-2944. (in Chinese)

[20] 民用建筑太阳能热水系统应用技术标准: GB 50364—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 10-20.
Technical standard for solar water heating system of civil buildings: GB 50364—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018: 10-20. (in Chinese)

[21] FUDHOLI A, SOPIAN K, YAZDI M H, et al. Performance analysis of photovoltaic thermal (PVT) water collectors [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 641-651.

[22] 童维维. 新型太阳能PV/T集热器光伏/光热性能的理论和实验研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.
TONG W W. Numerical and experimental study of photovoltaic/thermal performance of new solar collector [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020. (in Chinese)

[23] 郭超, 季杰, 孙炜, 等. 多功能太阳能PV/T集热器的光电/光热性能研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 372-377.
GUO C, JI J, SUN W, et al. Performance study of multi-function solar PV/T collector [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017, 38(2): 372-377. (in Chinese)

[24] 建筑给水排水设计标准: GB 50015—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 20-26.
Standard for design of building water supply and drainage: GB 50015—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019: 20-26. (in Chinese)