

基于 TRNSYS 的 CIGS 薄膜光伏余热-土壤源 双热源热泵系统模拟

于 靓,毕然冉,李辰琦,董玉宽

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 模拟 CIGS 薄膜光伏余热-土壤源热泵双热源系统运行特性以及性能表现,优化 CIGS-BIPV/T 组件参数,建立组件发电量预测模型。方法 通过 DeST 平台搭建沈阳市某居住建筑模型,模拟其建筑冷热负荷,并以建筑负荷为目标需求,通过 TRNSYS 平台构建 CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统模型;通过 Genopt 软件调用 Hooke-Jeeves 算法对系统参数进行迭代计算优化;利用多元线性回归方法建立 CIGS-BIPV/T 组件发电量预测模型。结果 CIGS-BIPV/T 组件的倾角设置范围为 42° 到 45° ,方位角设置范围为正南到南偏西 1.56° 时能够获得日最大发电量,组件发电量预测模型模型的 R^2 为 0.989,方差检验量的计算值为 772 877.5,明显大于 $F_{0.05}$,差异性检验值 < 0.05 ,组件发电量预测模型能够对系统运行参数进行精准预测。结论 薄膜光伏组件余热-土壤源热泵双热源热泵系统能够满足建筑全年冷热负荷及生活热水需求,实现太阳能与地热能的综合利用。

关键词 BIPV;CIGS;地源热泵;Hooke-Jeeves 算法;多元线性回归

中图分类号 TU111.19⁺5

文献标志码 A

Based on TRNSYS's Simulation of CIGS Film Photovoltaic Waste Heat and Soil Source Double Heat Source Heat Pump System

YU Liang, BI Ranran, LI Chenqi, DONG Yukuan

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The operation characteristics and performance of CIGS film photovoltaic waste heat-soil source heat pump dual heat source system was studied to optimize the parameters of CIGS-BIPV/T module and establish the module power generation prediction model. A residential building model in Shenyang was built by DeST platform. the cooling and heating load of this building was simulated by the model. The CIGS-BIPV/T-soil source double heat pump system model was built

收稿日期:2021-03-21

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51878417);国家重点研发计划(2019YFE0100300)

作者简介:于靓(1976—),女,教授,博士研究生,主要从事绿色建筑/节能建筑方面研究。

by TRNSYS platform with building load as the target demand. The system parameters were iteratively calculated and optimized by calling Hooke-Jeeves algorithm in Genopt software. The power generation prediction model of CIGS-BIPV/T module is established by using multiple linear regression method. Results showed that when the Angle of CIGS-BIPV/T module was set from 42° to 45°, and the azimuth Angle was set from south to south by west 1.56°, the maximum daily power generation could be obtained. The linear regression relationship of the module power generation prediction model was good, and the fitting degree was high, which could accurately predict the system operating parameters. The waste heat pump system of the film photovoltaic module and soil source heat pump can meet the annual cooling and heating load and domestic hot water demand of the building, and realize the comprehensive utilization of solar energy and geothermal energy.

Key words: BIPV; CIGS; Ground source heat pump; Hooke-Jeeves algorithm; Multiple linear regression

太阳能作为极具发展前景的可再生能源,近年来已在我国得到了广泛利用。其应用方式主要有太阳能集热系统、太阳能光伏系统、太阳能光电/光热一体化(Photovoltaic/Thermal, PV/T)系统以及其他可再生能源的耦合系统^[1-2]。但在太阳能光伏系统中,光伏组件只能将 18% 的太阳辐射能转化为电能,高达 82% 的能量都会作为热能散失^[3]。CIGS 薄膜光伏电池作为第二代太阳能电池具有光电转化效率高、弱光效应好等优势,但它同样面临余热积聚面板温度升高带来的光电转化效率降低问题。根据 Aish 的实验研究表明,单晶硅、多晶硅、CIGS 太阳能光伏电池分别在面板温度由 25℃ 升高至 45℃ 时电量的下降程度依次为单晶硅(0.54%/℃)、多晶硅(0.49%/℃)、铜铟镓硒(0.38%/℃)^[4]。CIGS 薄膜光伏电池的工作温度每降低 1℃,光电转换效率可提高 0.36% 左右^[5]。而热泵 cop 值与蒸发温度和冷凝温度密切相关,冷凝温度趋于一定时,蒸发温度越高,热泵的循环性能系数也越高。因此笔者将 CIGS 光伏组件余热与土壤源热泵组合形成 CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统,提高 CIGS 光电转化效率及热泵制热性能,满足居住建筑物用电、冷热负荷及生活热水的需求。由于太阳辐射产生的热量沿电池层垂直厚度方向的导热很微弱,而 CIGS

电池组件中电池层采用溅射法制成,厚度不超过 10 μm^[6],且可选用玻璃、金属等柔性衬底,便于流体通道焊接,从而一体化制作 PV/T 组件。

1 组件结构

系统中 CIGS-BIPV/T 组件的结构如图 1 所示,自上而下依次分别为钢化玻璃盖板、EVA 胶合粘膜材料层、CIGS 薄膜电池层、基底玻璃层。基底玻璃与下方的集热背板在 EVA 胶粘膜的作用下紧密贴合,平行铜管焊接于背板下方,铜管与集热板间的间隙使用热绝缘材料填充。

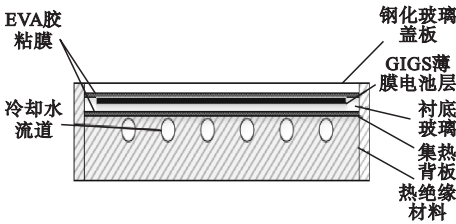


图 1 CIGS-BIPV/T 组件结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of CIGS-BIPV / T module

2 物理模型及参数

2.1 建筑模型

选取沈阳市某别墅型建筑为实例,建筑总面积为 300 m²,建筑高度为 10.2 m。在 DeST 软件中建立了如图 2 所示的建筑模型。

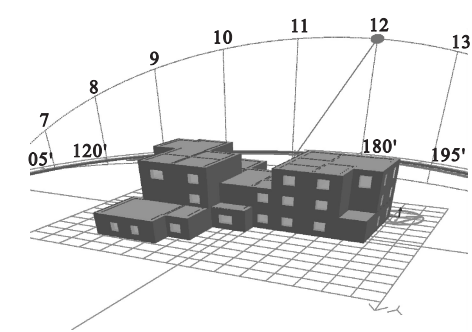


图 2 DeST 建筑模型图

Fig. 2 Dest building model drawing

围护结构设计是严寒地区建筑节能设计的重点内容^[7-10],建筑模型按照《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)进行围护结构热工参数选取,参数结果如表 1 所示。

表 2 CIGS-BIPV/T 组件主要参数选取

Table 2 Main parameters of CIGS-BIPV module

采光面		玻璃盖板					集热背板					绝热层
宽度/ m	厚度/ m	导热系数/ (W·(m· K) ⁻¹)	透射 率/%	发射 率/%	厚度/ mm	EVA 厚度/ mm	电池温 度系 数/K ⁻¹	发射 率/%	吸收 率/%	导热系数 (W·(m· K) ⁻¹)	排管管 径/mm	导热系数 (W·(m· K) ⁻¹)
1.0	1.7	0.4	88	92	3.2	0.5	-0.003 6	14	97	201	250	0.041

在 TRNSYS 软件中设置各模块所需的参数和模拟量并输入初始值,按照实际运行

表 1 DeST 建筑模型围护结构热工参数选取
Table 1 Thermal parameters of the envelope structure in the DeST building model

围护结构	构造	厚度/ mm	传热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)
外墙	外保温外墙	400	0.12
外窗	90 系列隔热铝合金窗	30	0.9
地面	水泥砂浆地面	120	0.23
屋面	面层 + 保温层 + 防水层 + 结构层	600	0.13

2.2 系统模型

系统主要由 CIGS-BIPV/T 组件、热泵机组、蓄热水箱等设备模块组成,其中 CIGS-BIPV 组件的参数设置如表 2 所示。

方式进行环路连接。构建的 CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统模型如图 3 所示。

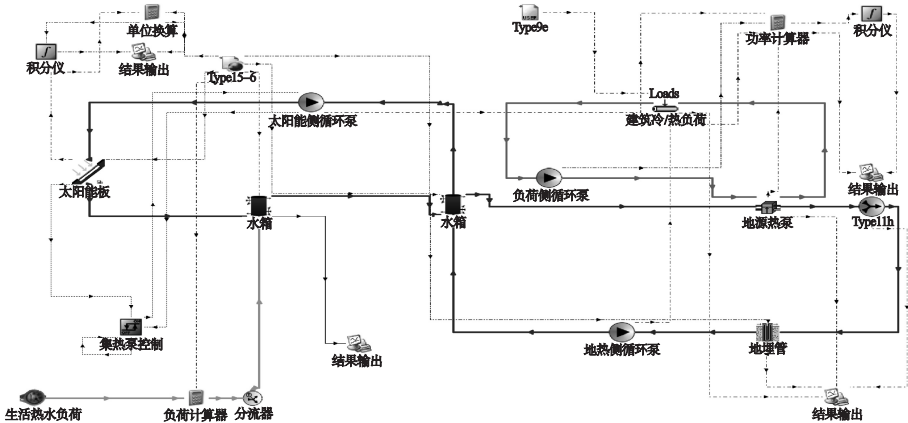


图 3 CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统模型图

Fig. 3 Model diagram of CIGS-BIPV/T-soil source double heat pump system

其中 CIGS 薄膜光伏电池产生电能用于建筑物内生活用电,冬季工况时,土壤源热泵内循环水流经连接 CIGS-BIPV/T 组件背部带走光伏余热,余热环路与地源侧环路通过

蓄热水箱 2 进行连接并由蓄热水箱 2 完成光伏余热与浅层地热能的汇聚与迁移,热泵机组的循环方向为制热循环;夏季工况时通过启停装置关闭蓄热水箱 2,两个环路相互独

立,CIGS-BIPV/T 组件的余热用于加热蓄热水箱 1 中的生活热水,满足建筑物夏季的生活热水需求,热泵机组的循环方向为制冷循环。冷却水泵设置为定频运行,冷冻水泵设置为变频运行,根据 DeST 软件得到的逐时负荷改变其逐时流量。DeST 负荷数据以 Type9e 模块链接,通过 Type682 链接至负荷侧。

3 模拟结果及分析

3.1 建筑负荷分布

由 DeST 软件模拟计算得全年 8 760 h 的建筑负荷分布结果如图 4 所示。沈阳市为严寒地区典型城市,由于室外温度的变化导致整个供暖期内的热负荷值波动较大。根据数值模拟结果显示,全年累计采暖热负荷值为 13 121.54 kW·h,冷负荷值为 1 874.15 kW·h,冷热负荷都存在较为明显的多峰值分布情况。总体来看,负荷的分布情况呈现为波动型的正态分布。过渡季当中未出现冷热负荷共存的现象。

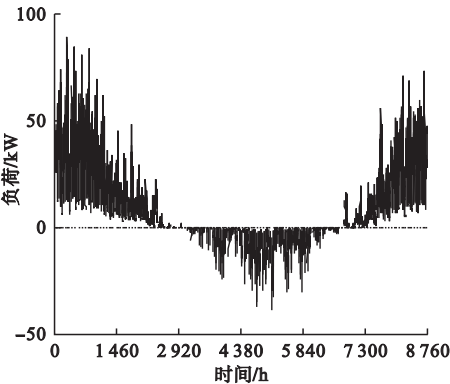


图 4 建筑全年逐时负荷分布图

Fig. 4 Hourly load distribution of the building

3.2 双水箱温度分布情况

为便于系统的运行和调节,笔者设计了双水箱运行模式,其温度变化趋势以及波动情况对比如图 5 所示。由图可知,两种水箱的温度分布基本保持一致。连接红色光伏余热环路与蓝色地源侧环路的蓄热水箱 1,其可利用能量效率基本与 CIGS-BIPV/组件所

接收的总辐射量变化趋势大致相同,导致运行过程中的温度分布区间较大。尤其是在冬季运行工况中的 12 月初供暖时,系统并未实现全月供热,故被有效利用的太阳辐射热能较少,温度分布的波动情况较大。1 月为采暖季最冷月,室外温度最低,建筑采暖热负荷增大,系统供热量增大,CIGS-BIPV/T 组件有效利用余热量也增大。夏季工况中,由于室外气温较高,双水箱运行温度的波动情况较为一致,沈阳地区进入到 9 月雨水天气减少,主要以晴朗天气为主,太阳辐射最为强烈,因此 9 月时水箱温度达到峰值。双水箱供热系统中 CIGS-BIPV/T 环路采用独立供/储热的方式,可通过对双水箱温度进行实时监测,在不同的运行工况下进行智能切换来满足不同室外气象条件下室内用能的需求。

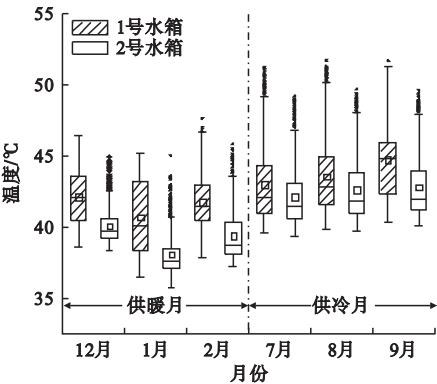


图 5 双水箱温度分布情况

Fig. 5 Temperature distribution of double water tanks

3.3 系统参数优化

由于 CIGS-BIPV/T 组件空间位置关系是影响组件接收太阳辐射的关键因素,为了实现 CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统中关键参数的优化匹配,笔者重点对组件的倾角、方位角进行参数优化^[11-13]。以组件整体表面所接受到的最高辐射量为目标函数,以组件的倾角和方位角为优化变量,通过 Genopt 软件调用 Hooke-Jeeves 算法对优化变量进行迭代计算优化,计算过程结果如图 6 所示。

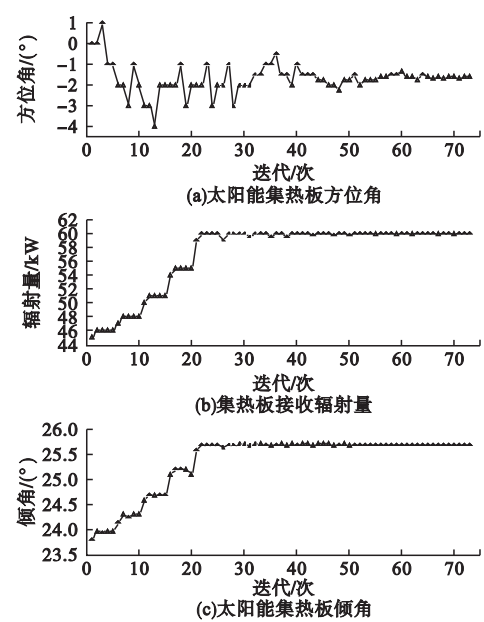


图6 迭代计算寻优过程

Fig. 6 Iterative computational optimization process

表3 回归系数表

Table 3 Regression coefficient

参数名称	非标准化系数		标准化系数	偏相关系数	共线性统计	
	数值	标准误差			容差	VIF
常量	0.028	0.005				
太阳入射辐射	0.119	0	1.001	0.991	0.429	2.331
室外气温	-0.001	0	-0.009	-0.114	0.386	2.590
1号水箱温度	-0.003	0	-0.01	-0.114	0.274	3.644
2号水箱温度	0.002	0.001	0.006	0.043	0.124	8.069
PVT出水温度	0.002 7	0	0.001	0.009	0.545	1.833

由表3可知,所选取的5个解释变量的容差均大于0.1,同时方差膨胀因子VIF均远远小于10,表明这5个解释变量的选取是合理的,不会存在多重共线性的问题。

表4 回归模型参数值

Table 4 Regression model parameters

调整R ²	标准估计误差	Durbin-Watson
0.989	0.04278	2.330

由表4可以看出,调整后的R²为0.989,在其取值范围(0,1)内,证明回归模型的线性回归效果显著,模型的拟合程度较高。

表5 ANOVA^a
Table 5 ANOVA^a

模型名称	平方和	自由度	均方	F
回归	7 073.250	5	1 414.65	772 877.5
残差	16.023	8 754	0.002	
总计	7 089.273	8 759		

Hooke-Jeeves 算法通过不断的变化目标变量的参数取值进行迭代计算,以证明算法的应用合理性^[14]。经过76次迭代计算时,目标函数取得最大值,同时优化变量得到最优解。因此组件倾角设置范围为42°到45°,方位角设置范围为正南到南偏西1.56°时能够获得日最大发电量。

3.4 多元线性回归计算

在CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统中,CIGS光伏余热环路是影响系统运行的重要组成环路,环路参数较多,参数之间互相耦合。因此对整个系统的运行参数进行了线性相关水平分析,以发电功率为因变量,以太阳入射辐射、水箱温度、室外气温和薄膜组件出水温度为解释变量建立多元线性回归模型^[15]。回归系数如表3所示,线性回归模型参数值如表4所示,方差分析如表5所示。

从表5可以看出,方差检验量的计算值为772 877.5,明显大于F_{0.05},模型回归效果显著。同时差异性检验值<0.05,方程具有明显的统计学意义,能够作为预测方程。光伏系统中的发电量预测模型:

$$y=0.119x_1-0.001x_2-0.003x_3+0.002x_4+0.0027x_5+0.028.$$

(8)

式中:x₁为太阳入射辐射;x₂为室外气温;x₃为1号水箱温度;x₄为2号水箱温度;x₅为CIGS-BIPV/T组件出水温度。

4 结 论

(1)实例建筑全年累计采暖热负荷13 121.54 kW·h,冷负荷1 874.15 kW·h,生活热水年耗热量12 455.48 kW,完全由

CIGS-BIPV/T-土壤源双热源热泵系统提供,系统能够满足建筑物内冷热负荷及生活热水需求。

(2)对 CIGS-BIPV/T 组件的倾角和方位角进行迭代优化计算得出热组件倾角的设置范围为 42°到 45°,方位角设置范围为正南至南偏西 1.56°。在此放置条件下能够获得日最高发电量,其值为 1.89(kW·h)/m²。

(3)CIGS-BIPV/T 组件发电量多元线性回归模型的 R² 为 0.989,方差检验量的计算值为 772 877.5,明显大于 F_{0.05},线性回归关系较好,模型的拟合度较高,预测方程能够实现 CIGS-BIPV/T 组件发电量的精准预测。组件全年发电量的预测值为 5 427.35 kW·h。

参考文献

[1] 王宏伟,于鑫. 太阳能-地源热泵系统供暖模式[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013,29(3):519-524.
(WANG Hongwei, YU Xin. Research on heating conditions of the solar energy-ground source heat pump system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2013,29(3):519-524.)

[2] 李莉莉,白羽,黄宏宇,等. 太阳能光电/光热一体化技术及其应用进展研究[J]. 可再生能源,2020,38(6):752-757.
(LI Lili, BAI Yu, HUANG Hongyu, et al. Progress in research and application of hybrid solar photovoltaic/thermal collectors [J]. Renewable energy,2020,38(6):752-757.)

[3] LAZZARIN R, NORO M. Photovoltaic/Thermal (PV/T)/ground dual source heat pump: optimum energy and economic sizing based on performance analysis [J]. Energy & buildings,2020,3(1):211-212.

[4] 季强. 太阳能薄膜发电在 BIPV 技术方面的应用[J]. 中国科技信息, 2015(增刊 3): 111-112.
(JI Qiang. Application of solar thin film power generation technology in BIPV [J]. China science and technology information, 2015 (S3):111-112.)

[5] 徐晓明,钟晓晖,王立志,等. CIGS 光伏发电与热泵热电联产系统研究[J]. 可持续能源, 2019,9(1):8-13.
(XU Xiaoming, ZHONG Xiaohui, WANG Lizhi, et al. Research on CIGS photovoltaic power generation and heat pump cogeneration system [J]. Sustainable energy, 2019,9(1): 8-13.)

[6] 董科枫,李舒宏. 铜钢镓硒光伏管板式集热器

的模拟与性能分析[J]. 制冷技术,2016,36(5):24-30.
(DONG Kefeng, LI Shuhong. Modeling and performance analysis on CuInGaSe photovoltaic/thermaltube-sheet collector [J]. Refrigeration technology,2016,36(5):24-30.)

[7] BIROL M. Development of a composite PVT panel with PCM embodiment, TEG modules, flat-plate solar collector, and thermally pulsing heat pipes [J]. Solar energy, 2019, 4(2): 56-59.

[8] YASMINA O, MOSTAFA, F, MOUSTAFA H. Optimized CIGS based solar cell towardsan efficient solar cell: impact of layers thickness and doping [J]. Optical and quantum electronics,2021,53(5)173-175.

[9] 韩秀,刘男. 高寒地区低能耗民居建筑 DeST 模拟 [J]. 计算机仿真, 2021, 38(2): 169-173.
(HAN Xiu, LIU Nan. DeST simulation of low energy consumptions residential buildings in alpine region [J]. Computer simulation,2021, 38(2):169-173.)

[10] 王岳人,焦曼丽. 基于 DeST 能耗模拟的建筑内围护结构保温对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(6): 977-981.
(WANG Yueren, JIAO Manli. Effect of insulation on interior building enclosure based on DeST [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2007,23(6):977-981.)

[11] ZHOU J Z, ZHONG W, WU D, et al. A review on the heat pipe photovoltaic/thermal (PV/T) system [J]. Journal of thermal science,2021,12(4):114-116

[12] VAISHAK S, PURNANAND V. Investigation on the effect of different backsheets materials on performance characteristics of a photovoltaic/thermal (PV/T) system [J]. Renewable energy,2021,31(6):168-175.

[13] 周兴操,张伟斌,赵新哲. PV/T 组件动态传热建模及温度预测[J]. 节能,2020,39(4): 14-18.
(ZHOU Xingcao, ZHANG Weibin, ZHAO Xinzhe. PV/T component dynamic modeling and temperature prediction [J]. Energy saving, 2020,39(4):14-18.)

[14] REDAM N, SPINNLERM A. Assessment of condensation and thermal control in a photovoltaic panel by PV/T and ground heat exchanger [J]. Solar energy, 2021, 3(2): 221-225.

[15] 张昕宇,殷翀,张磊,等. 太阳能光伏光热组件 (PV/T)性能评价方法研究[J]. 建筑科学, 2019,35(12):152-156.
(ZHANG Xinyu, YIN Chong, ZHANG Lei, et al. Research on the method of evaluatingthe performance of photovoltaic/thermalunit [J]. Building science,2019,35(12):152-156.)
(责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)