

文章编号: 1671-6612 (2026) 01-029-09

严寒和寒冷地区空气源热泵 与 PVT 联合供暖系统优化性能对比研究

谢丽娅¹ 唐亮¹ 李金伟²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司 济南 250013;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 光伏-热 (PVT) 与空气源热泵 (ASHP) 联合技术在寒冷气候中的高效供暖方面展现出巨大潜力。然而, 目前少有研究系统性比较不同寒冷地区气候及不同太阳能资源水平下 PVT-ASHP 系统的优化性能。研究针对这一问题, 基于耦合 TRNSYS-MATLAB 仿真平台, 对中国严寒和寒冷地区的 PVT-ASHP 系统进行了多目标优化。TRNSYS 负责计算建筑冷热负荷并模拟 PVT 系统, MATLAB 则应用遗传算法进行优化。选取了四个具有代表性的典型地点, 涵盖不同的太阳辐射和温度条件。结果表明, 为实现相似的建筑负荷满足率, 严寒地区所需投资远高于寒冷地区。太阳辐射水平的提升显著增强了寒冷地区的负荷满足率, 但对严寒地区影响有限。较大的 PVT 阵列能够降低热泵容量需求, 从而维持系统的高性能运行。研究为寒冷气候区 PVT-ASHP 系统的优化设计提供了切实参考, 兼顾了经济成本与能源可靠性。

【关键词】 PVT; 空气源热泵; 多目标优化; 寒冷和严寒地区

中图分类号 TU833 文献标志码 A

Optimization Performance Comparison of Air-Source Heat Pump Coupled with PVT Heating Systems in Severe Cold and Cold Regions

Xie Liya¹ Tang Liang¹ Li Jinwei²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd, Jinan, 250013;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 Combined photovoltaic-thermal (PVT) and air-source heat pump (ASHP) technologies have shown great potential for efficient heating in cold climates. However, few studies have systematically compared the optimization performance of PVT-ASHP systems under different cold region climates and varying solar resource levels. This study addresses this gap by conducting a multi-objective optimization of PVT-ASHP systems in severe cold and cold regions of China using a coupled TRNSYS-MATLAB simulation platform. TRNSYS calculates building heating and cooling loads and simulates the PVT system, while MATLAB applies a genetic algorithm for optimization. Four typical locations with distinct solar radiation and temperature conditions were selected for analysis. Results reveal that severe cold regions require substantially higher investment than cold regions to achieve similar building load satisfaction rates. Solar radiation improvements significantly enhance load satisfaction in cold regions but have limited impact in severe cold areas. Larger PVT arrays reduce the required heat pump capacity to maintain

high performance. This study provides practical insights for optimizing PVT-ASHP systems in cold climates, balancing economic cost and energy reliability.

【Keywords】 PVT; ASHP; Multi-objective optimization; Cold and severe cold regions

0 引言

全球经济增长与人口扩张推动能源需求激增,传统化石能源主导的能源结构,其大量使用引发了全球变暖、大气污染等系列环境问题,严重制约生态稳定与人类可持续发展。

建筑供暖作为高能耗、高排放领域,是碳减排与能源转型的关键环节。我国寒冷与严寒地区冬季供暖需求旺盛,采暖能耗在建筑总能耗中占比显著,燃煤供暖是这些地区长期以来的主要采暖方式之一^[1]。传统燃煤供暖虽具有一定经济性,但排放的污染物易引发雾霾、危害人体健康,显著增加呼吸系统与心血管疾病发病风险^[2,3],推动供暖系统向低碳、高效、清洁化转型,是践行“双碳”战略、改善人居环境的迫切需求。

太阳能作为资源丰富的可再生能源,被广泛视为最具发展潜力的可再生能源之一^[4],在建筑中主要通过光伏发电(PV)与光热利用(T)两大路径应用^[5-8]。光伏/光热一体化技术(PVT)融合二者优势,可同步输出电能与热能,能源综合利用效率更高,按与建筑结合方式分为建筑一体化(BIPVT)与独立式两类,其中BIPVT系统兼具美观性与功能性^[9],独立式系统则布置灵活、适应性强^[10],凭借优良性能受到广泛关注。

但太阳能的间歇性与不稳定性,限制了PVT系统的规模化应用^[11],需与储能技术结合以提升供能可靠性。现有储能技术中,显热储热因技术成熟、运行稳定、集成难度低,是当前建筑供热系统中最具应用价值的路径,常以水箱、地埋管等形式与太阳能系统耦合,有效提升系统性能^[12,13]。潜热储热与热化学储热虽各具优势,但受技术成熟度、系统复杂性限制,目前应用范围有限。Ma等^[14]将化学吸附系统与太阳能集热器耦合,可满足建筑约57.4%的冬季热负荷;Jiang等^[15]提出的混合吸附式热能存储系统与PVT集成后,在严寒地区展现出

良好适用性。

显热储热水箱与PVT系统的耦合,是提升系统稳定性的可行方案,按水箱数量可分为单水箱^[16]、双水箱^[17]及多水箱^[18]结构,其数量配置影响储能容量与控制难度。智能优化算法为系统参数优化提供了有力支撑,Zhang等^[18]通过优化集热器方位角、倾角,显著提升了系统冬季运行稳定性;Lyu等^[19]研究发现,优化水箱容积与热泵容量可有效提升系统节能率,保障运行稳定性。

现有PVT储能系统研究已取得阶段性成果,但针对我国寒冷与严寒地区气候特征及建筑热负荷特点的适应性研究仍较薄弱。为此,本研究构建适用于该区域的PVT-显热储热水箱供热系统模型,以PVT面积、水箱容量与热泵容量为优化变量,结合遗传算法优化系统配置,分析不同太阳能资源水平下的负荷满足率与经济性,为区域清洁供暖技术发展及“双碳”目标实现提供理论支撑与工程参考。

1 方法

本研究采用TRNSYS和MATLAB联合仿真优化。基于TRNSYS计算了建筑的冷热负荷,并搭建了PVT系统,之后采用MATLAB对所建立的模型进行优化。

1.1 典型建筑

本研究所选择的典型建筑是一栋两层的住宅楼,长度为46.8m,宽度为19.4m。一楼房间的主要功能包含了一间餐厅、一间厨房以及13间卧室,建筑坐北朝南,窗墙比为0.45。二楼除一间储物室和一间活动室外,其他房间均为卧室。根据设计,每间卧室可容纳两人,房间的照明功率设定为5W/m²,用电设备功率密度为3.8W/m²。围护结构的主要性能参数如表1所示。总采暖面积约为1416m²。

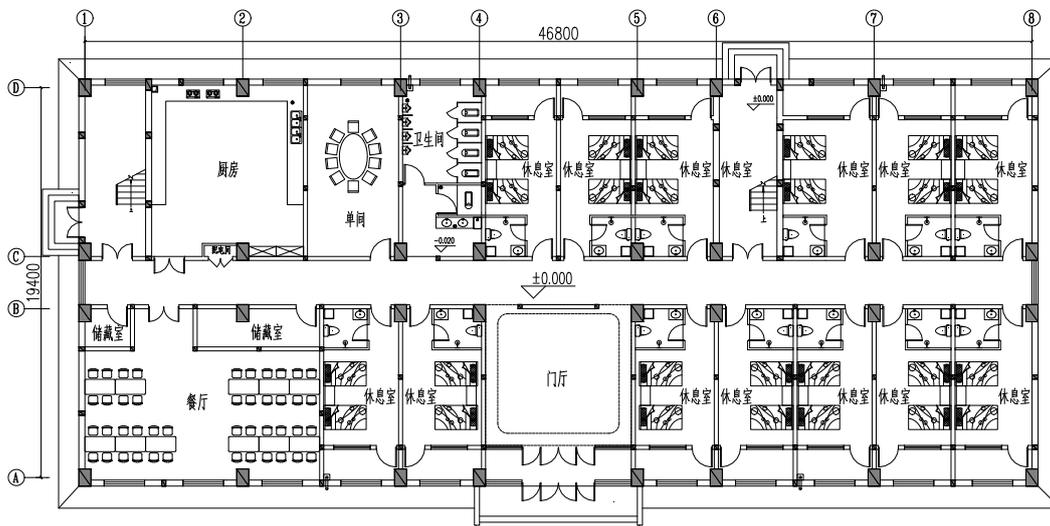


图 1 本研究中使用的典型建筑一层平面布置图

Fig.1 The level 1 floor plan of the typical building used in this study

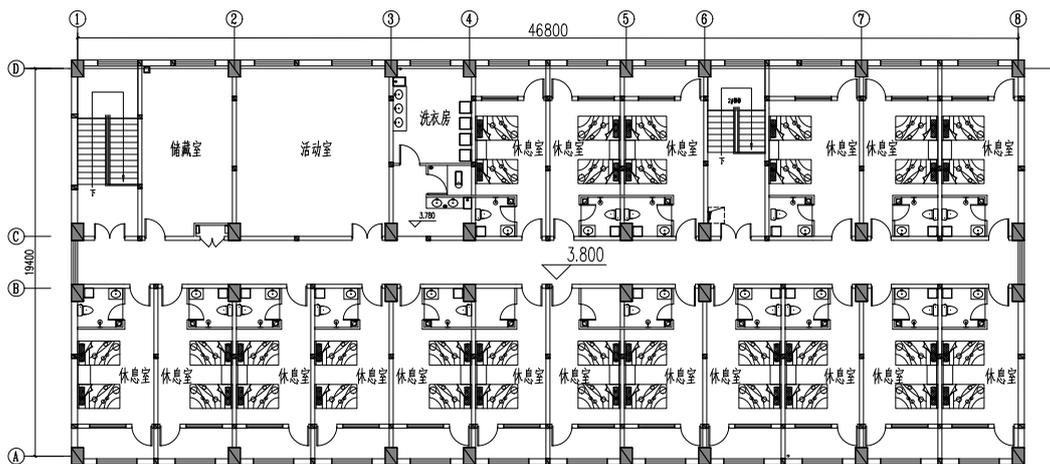


图 2 本研究中使用的典型建筑二层平面布置图

Fig.2 The level 2 floor plan of the typical building used in this study

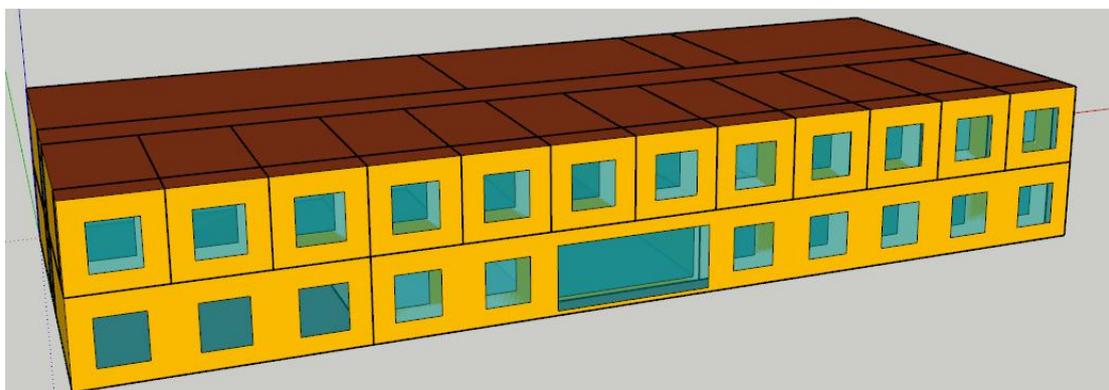


图 3 本研究中使用的典型建筑的立体图

Fig.3 The 3D view of the typical building used in this study

表 1 围护结构的性能参数

Table 1 Thermal performance parameters of the building envelope

	外墙	内墙	地板	屋顶	窗户
严寒地区 (SCZ)	0.42	0.70	1.30	0.34	1.7
寒冷 (CZ)	0.50	1.01	1.30	0.45	1.90

1.2 优化方法

本研究采用 TRNSYS 和 MTALAB 联合仿真优化。基于 TRSNYS 计算了建筑的冷热负荷，并搭建了 PVT 系统，之后采用 MATLAB 对所建立的模型进行优化。图 4 展示了本研究的优化方法。

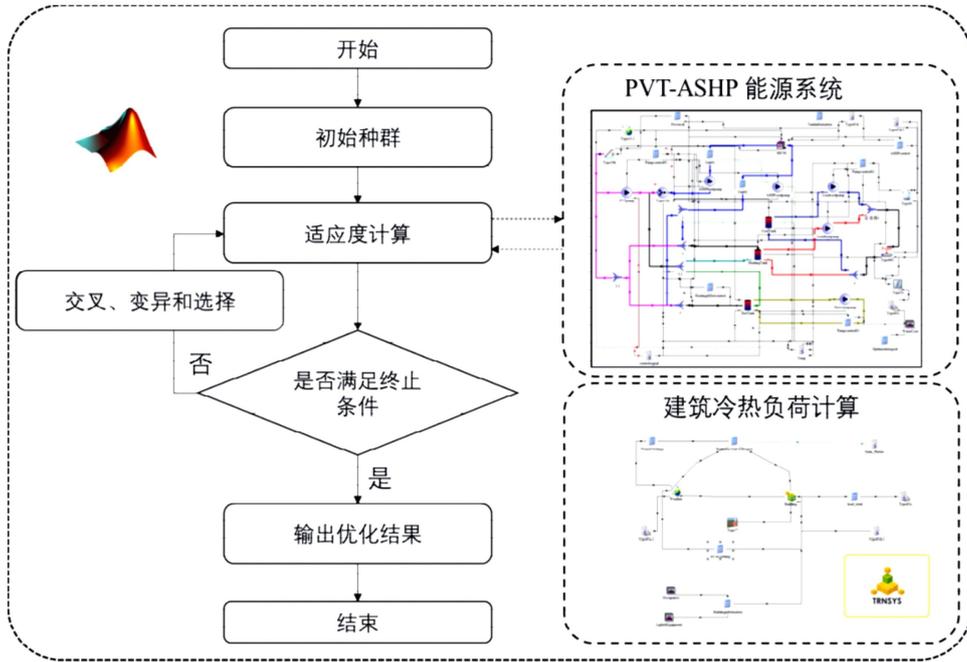


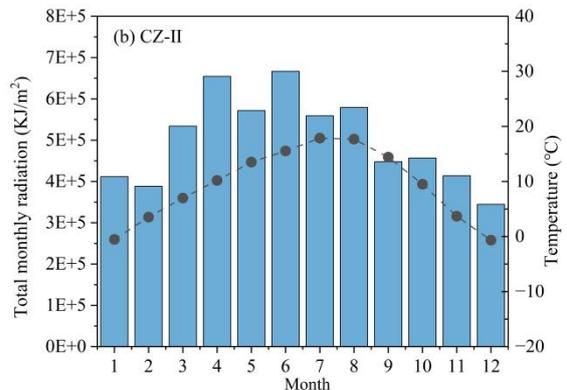
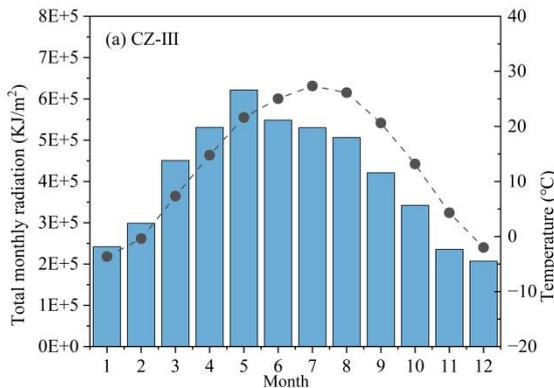
图 4 本研究所采用的优化方法

Fig.4 The optimization method adopted in this study

1.3 选择地点

为了充分研究在不同气候区的不同太阳能资源水平下，PVT-ASHP 系统的优化及运行特性。本研究选择了四个地点，如图 5 所示，该图展示了所选择地点的太阳能资源及环境温度条件。需要指出的是由于中国太阳能资源分布不均匀，因此在同一个气候区很难包含所有的太阳能资源水平，为了便于对比本研究在寒冷和严寒地区仅选择第三类和

第二类太阳能资源水平研究。由图 5 (a) 和 (b) 可以看出在 CZ-III 地区，太阳辐射在夏季较高，在冬季相对较低；在 CZ- II 地区，太阳辐射在冬季远高于 CZ-III 的太阳辐射。而由图 5 (c) 和 (d) 可以看出，在 SCZ-III 地区，其辐射也是在夏季较高，在冬季较低；而在 SCZ- II 地区，其夏季的辐射高于 SCZ-III 的辐射，在冬季两地相似。



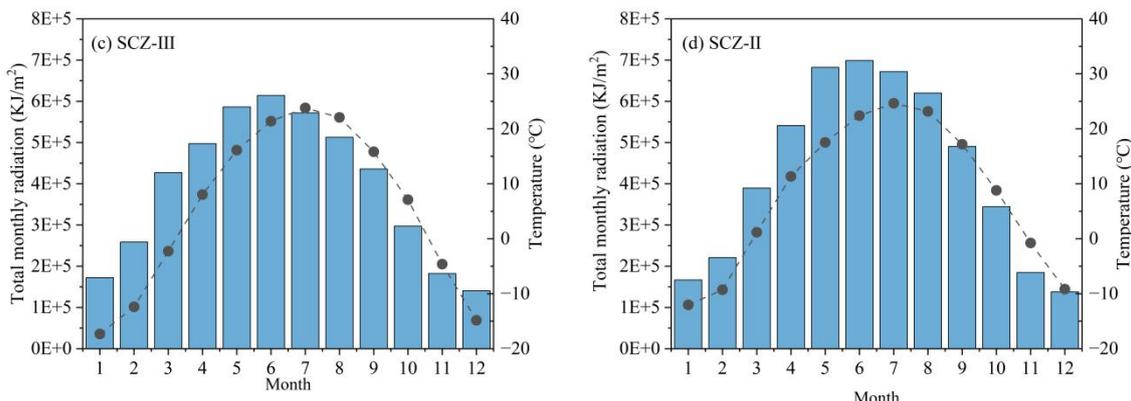


图 5 研究地点的太阳资源及温度条件

Fig.5 Solar radiation and ambient temperature conditions at the selected study locations

1.4 系统模型及优化目标

正如前文所述, 本研究基于 TRNSYS 平台开展数值研究, 如表 2 所示, 主要利用了其中的 13 个模块, 包含天气读取模块、PVT 模块、水箱模块、热泵模块、输出模块等, 只要调用实现这些特定功能的模块, 给定输入条件, 这些模块程序就可以对某种特定热传输现象进行模拟, 最后汇总就可对整个系统进行瞬时模拟分析。

表 2 仿真模型主要模块对应表

模块型号	符号	说明
Type 15-2		天气读取
Type 56		建筑负荷计算
Type 77		土壤温度
Type 516		时间表
Type 50b		PVT
Type 401		空气源热泵
Type 158		水箱
Type 24		质量累计
Type 649		合流阀

续表 2 仿真模型主要模块对应表

Table 2 Correspondence of simulation model modules

模块型号	符号	说明
Type 647		分流阀
Type 682		理想末端
Type 9c		负荷读取
Type 65a		逐时输出

需要指出的是本研究所使用的空气源热泵模块是基于 DOE2 模型进行编写的, 该模型被广泛应用于冷水机组或热泵的性能建模中^[2,3]。其主要原理是通过对比在变工况条件和标准工况下的机组的制热或制冷容量与输入功率建立容量及性能曲线, 如式 (1) 和 (2) 所示, CAPFT 代表的是可用容量作为蒸发器和冷凝器温度的函数, EIPFT 满载效率作为蒸发器和冷凝器温度的函数。表 3 展示了本研究基于该模型建立的空气源热泵的模型的主要参数及其效果, 可以看出无论是在制冷还是制热条件下, 该模型的 R2 均超过了 0.99, 说明了该模型在本研究中是适用的。

$$CAPFT = a_1 + b_1 t_{chws} + c_1 t_{chws}^2 \quad (1)$$

$$d_1 t_{cws} + e_1 t_{cws}^2 + f_1 t_{chws} t_{cws}$$

$$EIPFT = a_2 + b_2 t_{chws} + c_2 t_{chws}^2 \quad (2)$$

$$d_2 t_{cws} + e_2 t_{cws}^2 + f_2 t_{chws} t_{cws}$$

式中： t_{chws} 为供水温度， $^{\circ}\text{C}$ ； t_{cws} 为冷凝水温度或室外干球温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

表 3 本研究所采用的空气源热泵的 DOE2 模型参数

Table 3 Parameters of the air-source heat pump DOE-2

	Model used in this study			
	Cooling condition		Heating condition	
	CAPFT	EIPFT	CAPFT	EIPFT
a_1/a_2	0.93240000	0.6186000	0.8353000	0.8017
b_1/b_2	0.04395000	-0.001271	0.0018220	-0.0108900
c_1/c_2	0.00017430	0.0001487	0.0000458	0.0002993
d_1/d_2	0.00186700	0.0007494	0.0322100	-0.003692
e_1/e_2	-0.0001508	0.0002094	0.0002426	0.0000401
f_1/f_2	-0.0005243	0.0004087	-0.0001935	0.0003367
R^2	0.9999	0.9999	0.9994	0.9994

本研究的优化属于多目标优化，优化目标包含提高建筑负荷满足率（Building Load Satisfaction Rate, BLSR）、提高净太阳能余量（Net Solar Energy Surplus, NSES）以及降低投资（Cost）。其分别可以通过式（3）-（5）计算。其中表 4 展示了本研究所使用的各部分费用计算方法^[4]。

$$BLSR = \frac{Load_{met}}{Load} \quad (3)$$

$$NSES = E_{ab} - E_u \quad (4)$$

$$Cost = C_{tank} + C_{ASHP} + C_{pump} + C_{PVT} \quad (5)$$

式中： $Load_{met}$ 为系统满足的负荷量，kW； $Load$ 为建筑所需要的负荷量，kW； E_{ab} 为 PVT

转化的太阳能能量，kW； E_u 为系统消纳的太阳能能量，kW； C_{tank} 为水箱的费用，元； C_{ASHP} 为空气源热泵的费用，元； C_{pump} 为水泵的费用，元； C_{PVT} 为 PVT 的费用，元。

表 4 本研究所采用的各部分费用计算方法

Table 4 Cost calculation methods for each component

Cost	used in this study			
	C_{tank}	C_{ASHP}	C_{pump}	C_{PVT}
	CNY/m ³	CNY/kW	CNY/unit	CNY/m ²
	800	2500	800	1500

2 结果与讨论

2.1 负荷分析

图 6 展示了典型建筑在四个地区的全年冷热负荷变化情况，可以看出由于是在寒冷和严寒地区，其夏季冷负荷非常小，全年的热负荷较大。在 CZ-III 地区，建筑的尖峰热负荷为 81.20kW，建筑总热负荷为 202485.79kWh，在 CZ-II 地区，建筑的尖峰热负荷为 71.03kW，建筑总热负荷为 197606.37kWh，在 SCZ-III 地区，建筑的尖峰热负荷为 109.28kW，建筑总热负荷为 298206.74kWh，在 SCZ-II 地区，建筑的尖峰热负荷为 99.79kW，建筑总热负荷为 266413.16kWh。进一步分析可以发现，在同一气候区，太阳能资源水平的提高可以降低建筑热负荷。

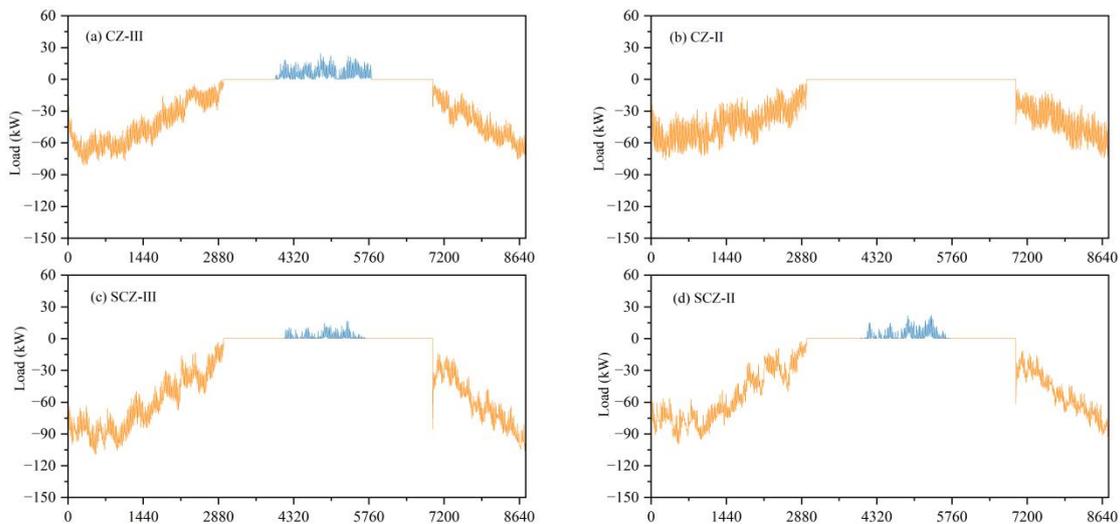


图 6 不同地区典型建筑的冷热负荷

Fig.6 The heating and cooling load of the typical building in different regions

2.2 优化结果

图 7 展示了所研究的四个地点的多目标优化后的帕累托前沿。由图 7 (a) 和图 7 (b) 可以看出, 在 CZ 地区, 若要实现 90% 以上的建筑负荷保证率, 在不考虑提高净太阳能余量的情况下, 则只需要 100 万元的初投资, 而在相同得初投资下, 如图 7 (c) 和图 7 (d) 所示, 在 SCZ 地区仅能实现 32%~40% 的建筑负荷保证率。进一步分析可知, 在 SCZ 地区, 若要实现 90% 以上的建筑负荷保证率, 则需要 250 万元以上的初投资。产生这一结果的可能原因是在严寒地区, 建筑的总负荷高出严寒地区总负荷的约 34.82%~50.91%。

而在相同的气候区, 太阳辐射水平的差异是对于建筑负荷保证率有影响的, 具体来说, 在寒冷地区, III 类太阳能资源下, 所有帕累托前沿的平均建筑负荷保证率为 72.30%, 最低的建筑负荷保证率仅为 6.20%, 在 II 类太阳能资源下, 所有帕累托前沿的平均建筑负荷保证率为 83.85%, 最低的建筑

负荷保证率为 39.43%。可以看出在寒冷地区, 太阳辐射水平的增强对于提高系统的建筑负荷保证率效果显著。而在严寒地区, III 类太阳能资源下, 所有帕累托前沿的平均建筑负荷保证率为 54.35%, 最低的建筑负荷保证率仅为 1.21%, 在 II 类太阳能资源下, 所有帕累托前沿的平均建筑负荷保证率为 55.24%, 最低的建筑负荷保证率为 7.05%。可以看出在严寒地区, 太阳辐射水平的增强对于提高系统的建筑负荷保证率效果有限。

此外, 如若在考虑建筑负荷保证率的同时, 兼顾净太阳能余量, 则必须适当增加初投资。不过需要指出的是受限于环境水平, 净太阳能余量的最大值是不同的, 例如在 CZ-III, 净太阳能余量的最大值为 200584.91, 在 CZ-II 净太阳能余量的最大值为 241091.22, 产生这一结果的可能原因是由于 CZ-II 的太阳辐射水平高于 CZ-III 地区。类似的结果在 SCZ 地区也有出现。

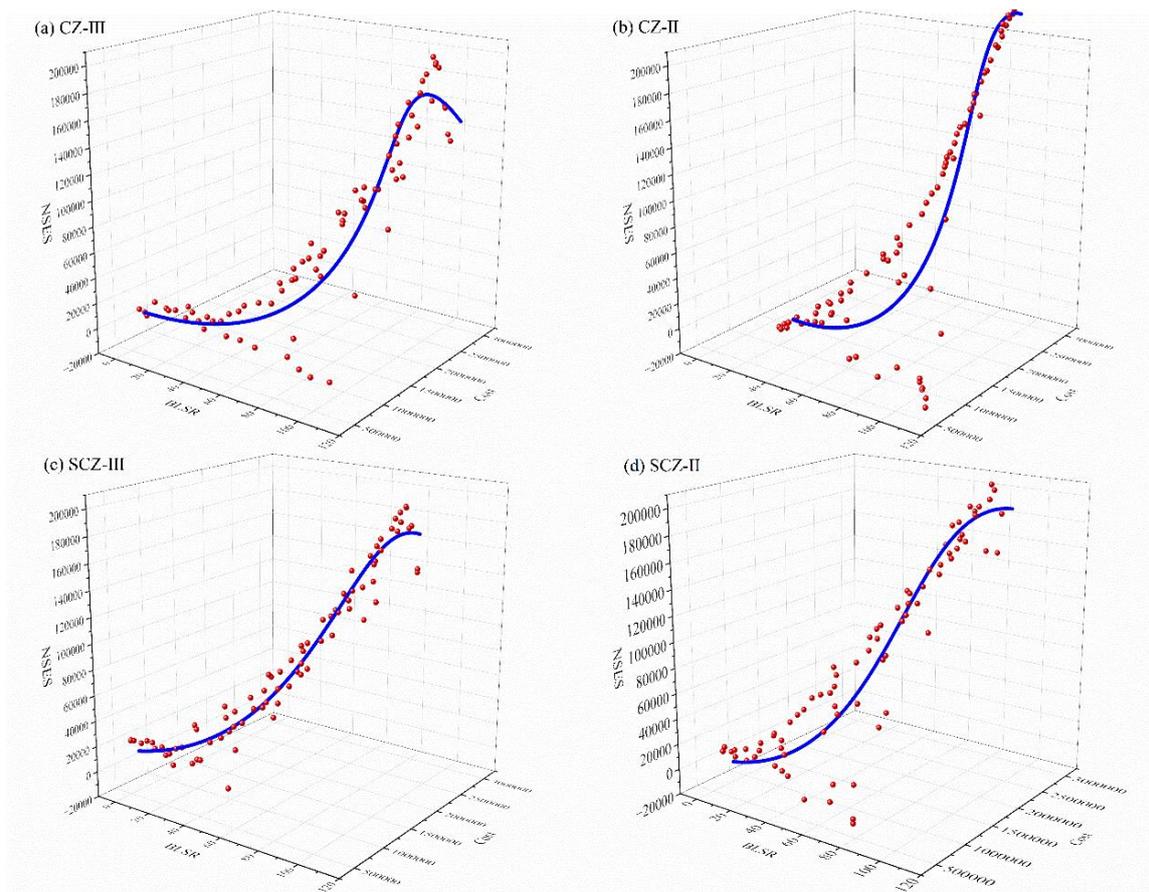


图 7 多目标优化结果的 Pareto 前沿

Fig.7 The Pareto frontiers of multi-objective optimization

2.3 配置分析

图 8 展示了所研究的四个地点优化结果的帕累托前沿的系统主要配置情况。由图 8 (a) 和图 8 (b) 可以看出, 在寒冷地区, 大部分帕累托解下的建筑负荷保证率均接近 100%, 且随着太阳能辐射水平的提高, 建筑负荷保证率接近 100% 的帕累托解的数量更多。而在严寒地区, 大部分帕累托解下的建筑负荷保证率接近 90%, 而接近 100.0% 的帕累托解较少。且随着太阳能辐射水平的提高, 建筑负荷保证率接近 90% 的帕累托解的数量也并没有增多。产生这一原因的可能是因为严寒地区气温更低, 负荷需求大, 因此建筑负荷保证率较寒冷地区有所降低。

进一步分析可以发现, 当 PVT 的安装面积较大时, 则小容量的热泵即可达到较高的建筑负荷保证率。例如在 CZ-III 地区, 当 PVT 的安装面积为 1396 时, 仅需 47.1kW 的热泵即可实现最高 97.8% 的建筑负荷保证率, 当 PVT 的安装面积为 917 时, 则需要 86.6kW 的热泵才能实现 96.9% 的建筑负荷

保证率。此外还可以看出, 大部分帕累托解的单位采光面积的储热水箱的容积在 100-300, 这一结果符合相关的太阳能工程设计规范。

同时在经济性方面, 在相同的建筑负荷保证率下, 系统所需要的投资差异较大。例如在 CZ-II 地区, 当建筑负荷保证率为 99.56% 时, 系统所需投资为 2561079, 当建筑负荷保证率为 99.13% 时, 系统所需投资为 1933768。在这种情况下, 建筑负荷保证率仅提高了 0.4% 左右, 但系统所需投资却提高了 32.4%。同样地, 在相同的建筑负荷保证率下, 系统净太阳能余量也差异较大, 例如在 CZ-II 地区, 当建筑负荷保证率为 99.56% 时, 系统所需投资为 241091, 当建筑负荷保证率为 99.13% 时, 系统所需投资为 166561。在这种情况下, 建筑负荷保证率仅提高了 0.4% 左右, 但系统所需投资却提高了 44.7%。因此在选择系统配置时不仅要关注系统投资成本, 也需要考虑系统带了的收益, 以确定合适的容量。

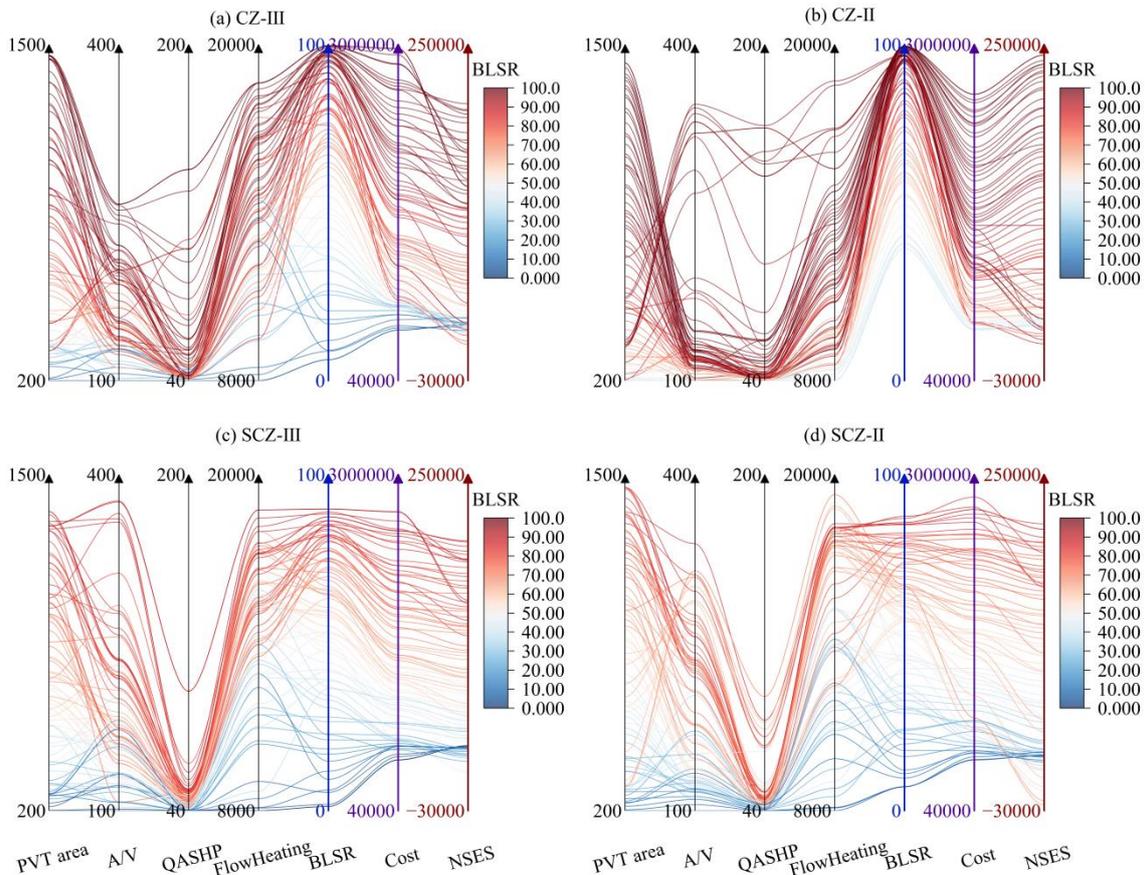


图 8 四个地区系统帕累托前沿的主要系统配置

Fig.8 The main system configurations along the Pareto fronts of the optimization results for the four studied locations

3 结论

针对我国严寒和寒冷地区的PVT与热泵耦合的建筑能源系统配置优化问题,本研究采用了TRNSYS与MATLAB耦合的遗传算法,对严寒和寒冷地区不同太阳能资源水平下的PVT与热泵耦合系统展开的优化研究,本研究结果为严寒和寒冷地区的PVT与热泵系统的设计优化提供了参考,主要结论如下:

(1) 在严寒地区实现与寒冷地区相同的建筑负荷保证率所需要的PVT与热泵系统的费用远高于寒冷地区。

(2) 在寒冷地区,太阳辐射水平的增强对于提高系统的建筑负荷保证率效果显著,在严寒地区,太阳辐射水平的增强对于提高系统的建筑负荷保证率效果有限。

(3) 相较于严寒地区,寒冷地区的PVT和热泵耦合系统的建筑负荷保证率更加容易超过90.0%。

参考文献:

- [1] Zhu L, Liao H, Hou B, et al. The status of household heating in northern China: a field survey in towns and villages[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020,27:16145-16158.
- [2] Chen Y, Li J, Zhang Y, et al. Pollution and carbon reduction effects of the pilot policy on clean winter heating in Northern China: Evidence from the county level[J]. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 2025,23:85-95.
- [3] Liu L, Yuan X, Ni W, et al. Long-term exposure to low-level ambient air pollution and mortality among 0.3 million Chinese older adults[J]. *Environment International*, 2023,168:107445.
- [4] Kabir E, Kumar P, Kumar S, et al. Solar energy: Potential and future prospects[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,82:894-900.
- [5] Tiwari AK, Chatterjee K, Agrawal S, et al. A comprehensive review of photovoltaic-thermal (PVT) technology: Performance evaluation and contemporary development[J]. *Energy Reports*, 2023,10:2655-2679.
- [6] Zhou X, Cao X, Leng Z, et al. Study on the temperature control performance of photovoltaic module by a novel phase change material/heat pipe coupled thermal management system[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023:64.
- [7] Chouchane H, Hassani S, Mekhilef S, et al. A novel ribbed photovoltaic thermal solar dryer with phase change materials: Thermal regulation and drying performance[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025:122.
- [8] Yin N, Chang R, Wei H, et al. Thermal performance of plate type solar Air/Water composite collector study[J]. *Solar Energy*, 2025:287.
- [9] Tang Y, Zhang C, Ji J, et al. Semi-transparent BIPV/T System's synergistic operation with air treatment for electricity generation and complementary cold-heat utilization: Assessment of energy and daylight performance[J]. *Applied Energy*, 2025,383.
- [10] Bayrak F, Aktas M, Aktas A, et al. Analysis of a novel PVT dryer using a sustainable control approach[J]. *Renewable Energy*, 2025,245.
- [11] Notton G, Nivet M-L, Voyant C, et al. Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,87:96-105.
- [12] Wang H, Li S, Lei K, et al. Performance analysis of cross seasonal thermal storage solar soil source heat pump drying system[J]. *Renewable Energy*, 2025:241.
- [13] Xu B, Zhang T, Wang S, et al. Dynamic characteristics and energy efficiency evaluation of a novel solar seasonal thermal storage - heating system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023:234.
- [14] Ma Z, Bao H, Roskilly AP. Seasonal solar thermal energy storage using thermochemical sorption in domestic dwellings in the UK[J]. *Energy*, 2019,166:213-222.
- [15] Jiang L, Liu W, Lin YC, et al. Hybrid thermochemical sorption seasonal storage for ultra-low temperature solar energy utilization[J]. *Energy*, 2022:239.
- [16] Zhao J, Lyu L, Li X. Numerical analysis of the operation regulation in a solar heating system with seasonal water pool thermal storage[J]. *Renewable Energy*, 2020,150:1118-1126.