

日间供暖太阳能热泵系统负荷分析及面积优化

展浩¹, 吴荣华¹, 于灏²

(1. 青岛大学机电工程学院, 山东青岛 266071; 2. 青岛科创蓝新能源股份有限公司, 山东青岛 266313)

摘要:以青岛市某公司办公楼太阳能热泵系统为研究对象,通过 TRNBuild 建立建筑模型,仿真分析同一建筑全天供暖与日间供暖热负荷分布特点,针对建筑日间供暖需求建立太阳能-空气源热泵仿真供热系统,利用 TRNSYS 软件进行供热季仿真模拟,计算日间供暖集热器最佳设计面积。仿真结果表明:相较于全天供暖,建筑日间供暖热负荷波动更为剧烈,最大峰值约为全天供暖的 2 倍,针对日间供暖设计的太阳能热泵系统在集热器面积为 417 m² 时运行经济性最佳,系统 COP 可达 4.1,对应太阳能贡献率为 24.7%,供暖季相较于传统空气源热泵可节约电能 9 091 kW·h。

关键词:太阳能;空气源热泵;日间供暖;负荷分析;系统优化

中图分类号: TU832.1 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.mdlgc.2022.05.017

[引用本文格式]展浩,吴荣华,于灏. 日间供暖太阳能热泵系统负荷分析及面积优化[J]. 热能动力工程,2022,37(5):124-130. ZHAN Hao, WU Rong-hua, YU Hao. Load analysis and area optimization of solar heat pump system for daytime heating[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 124-130.

Load Analysis and Area Optimization of Solar Heat Pump System for Daytime Heating

ZHAN Hao¹, WU Rong-hua¹, YU Hao²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao, China, Post Code: 266071;
2. Qingdao Kc Blue New Energy Co., Ltd., Qingdao, China, Post Code: 266313)

Abstract: Taking the solar heat pump system of the office building of a company in Qingdao as the research object, the building model was established through TRNBuild to simulate and analyze the heat load distribution characteristics of all-day heating and daytime heating in the same building. And the solar-air source heat pump simulation heating system was established for the building's daytime heating needs. The heating season was simulated and the best design area of the daytime heating collector was calculated by using TRNSYS software. The simulation results show that compared with all-day heating, the heat load of the building's daytime heating fluctuates more drastically, and the maximum peak value is about twice that of all-day heating. The solar heat pump system with collector area of 417 m² designed for daytime heating has the best operating economy, the system COP can reach 4.1, the corresponding solar energy contribution rate is 24.7% and the electric energy can be saved by 9 091 kW·h in heating season compared with traditional air source heat pump.

Key words: solar energy, air source heat pump, daytime heating, load analysis, system optimization

收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-08-27

基金项目: 青岛市民生科技计划项目“低品位能源供热供冷技术及应用示范”(19-6-1-79-nsh)

Fund-supported Project: Qingdao Citizens' Health Science and Technology Plan Project "Low-grade Energy Heating and Cooling Technology and Application Demonstration" (19-6-1-79-nsh)

作者简介: 展浩(1997-), 男, 山东泰安人, 青岛大学硕士研究生。

引言

太阳能是一种清洁、环保的可再生能源,被广泛应用于发电及供热行业。太阳能用于建筑采暖时存在不稳定、不连续及波动变化大的问题,因此将太阳能与同样清洁、可再生的空气能结合,采用空气源热泵辅助供暖的太阳能热泵系统应运而生。

建筑供暖分为24 h供暖的全天供暖模式与仅在工作时段供暖的日间供暖模式,后者主要针对办公楼等夜间无人建筑特殊设计。目前,已有的针对太阳能热泵系统集热器面积进行的研究主要集中在全天供暖。袁喜鹏等人^[1]针对吉林省某小区进行系统瞬态仿真优化,得到设计互补供暖系统最优集热器面积为2 340 m²,相较于优化前设计值减少779 m²;杨雪秀等人^[2]研究发现,北方农村单体式建筑采暖集热器面积最优为50 m²,所耗费用为4 910元/a。赵芝蓉等人^[3]通过优化分析,确定内蒙古建筑面积3 401 m²的工厂采用面积为435 m²的集热器时供热经济性最佳,系统运行COP达到4.74;张捷雄等人^[4]通过仿真计算表明,对长沙建筑面积5 308.24 m²的员工宿舍供暖时,集热器面积为344 m²时具有最优的系统性能。

针对同一建筑,日间供暖与全天供暖具有完全不同的设计要求。由于太阳能可利用时间与日间供暖时间较为吻合,采用太阳能热泵系统为建筑供热时,集热器面积的计算方法需要进行改进。为研究太阳能热泵系统用于日间供暖时集热器最佳设计面积,以青岛市某公司办公楼为研究对象,建立太阳能空气源热泵日间供暖间接膨胀式系统^[5],并利用TRNSYS软件建模仿真,分析了系统的能耗特性。

1 系统介绍

1.1 建筑热负荷分析

青岛市属于太阳能资源较丰富的地区,冬季日平均太阳能辐照量^[6]约为12.7 MJ/m²。采暖建筑位于青岛市胶州区,建筑主体共3层,层高3.5 m,东西向,总建筑面积1 470 m²。建筑围护结构按照公共建筑节能50%标准^[7]设计,厂区内预留有太阳能系统建设用地,最大可利用面积5 000 m²。

日间供暖时,建筑供暖时间为工作日(周一~

周五)8:00~17:00,供暖季持续140 d,具体设计参数如表1所示。

根据表1,建立TRNBuild建筑模型,分别对供暖季内建筑采用全天供暖与日间供暖两种供暖方式时的供暖热负荷进行仿真^[8],根据青岛市TMY-2典型气象年数据^[9],将全年划分为8 760 h,跨年的仿真时间在8 760 h的基础上累加,供暖季对应仿真时间为7 650~11 016 h。

表1 建筑热负荷设计参数

Tab. 1 Building heat load design parameters

参数	数值
供回水温度/℃	45/35
供热温度/℃	18
相对湿度/%	40
室内人数/人·m ⁻²	0.18
人员在室率	0.7

注:供暖时间11月15日~次年4月5日,采暖方式为地板辐射。

仿真得到的建筑全天供暖逐时热负荷和日间供暖逐时热负荷如图1、图2所示。

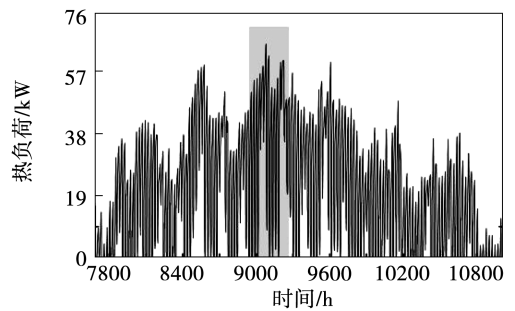


图1 建筑全天供暖逐时热负荷

Fig. 1 Hourly heat load of building heating throughout the day

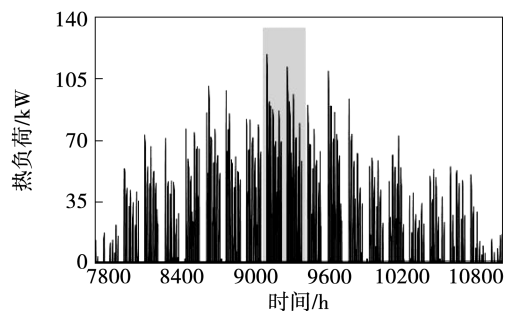


图2 建筑日间供暖逐时热负荷

Fig. 2 Hourly heat load of building day heating

全天供暖时建筑最大热负荷为 65 kW, 供暖季热负荷总量为 67.8 MW · h; 日间供暖时建筑最大热负荷为 119 kW, 供暖季热负荷总量为 44.7 MW · h。

对比图 1、图 2 可知, 当建筑只进行日间供暖时, 由于非工作时间建筑持续散热, 每周一早 8:00 建筑热负荷达到该周峰值, 热负荷峰值远大于全天供暖时对应时间的实时热负荷, 最大差值达到 66.5 kW。此后该周热负荷逐渐下降, 每日热负荷呈现早晚大、正午小的特点。在供暖季内, 相较于全天供热, 仅日间供暖时建筑热负荷波动更为剧烈, 峰值明显增大。因此, 针对日间供暖方式设计的太阳能热泵系统, 需要采用与全天供暖方式不同的设计参数。

1.2 太阳能热泵系统工作原理

供暖系统采用并联设计^[5], 工作原理如图 3 所示。供暖系统分为 3 个子系统: 太阳能集热系统、热泵辅热系统和水箱供热系统。集热系统与辅热系统通过蓄热水箱连接, 供回水温度及流量由供热系统调节。

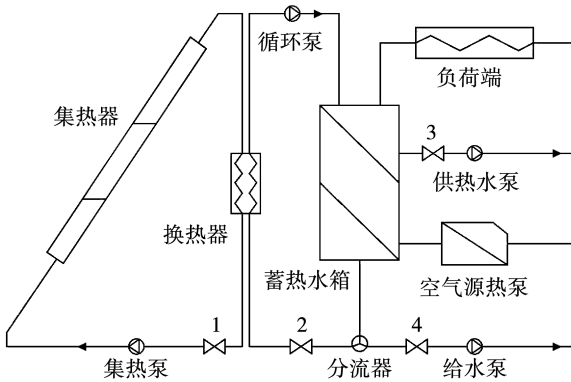


图 3 供暖系统工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of heating system

系统共有 3 种工作模式: (1) 晴朗天气太阳能集热器集热量充足时, 阀门 1, 2, 3 打开, 阀门 4 关闭, 集热器吸收太阳能, 通过换热器加热蓄热水箱, 热负荷全部由太阳能承担; (2) 太阳能辐射强度较弱时, 阀门 1, 2, 3, 4 同时打开, 集热系统与辅热系统联合供热; (3) 阴雨天气太阳能严重不足时, 关闭阀门 1, 2, 打开阀门 3, 4, 辅热系统承担全部热负荷, 热泵机组单独供热。

2 计算模型

2.1 太阳能集热系统模型

太阳能集热系统吸收工质为循环水。为防止夜间冻管, 选用全玻璃真空管型集热器^[10], 循环水流量为 $0.035 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$, 集热器面积 A_c 为:

$$A_c = \frac{86 \ 400 k Q_N f}{J_T \eta_{cd} (1 - \eta_L)} \quad (1)$$

式中: k —太阳能热负荷系数; Q_N —建筑采暖季最大热负荷, W; f —太阳能保证率, 取值 50%; J_T —当地冬季日平均太阳能辐射量, $\text{J} / (\text{m}^2 \cdot \text{d})$; η_{cd} —基于总面积的平均集热效率, 取值 50%; η_L —热损失率, 取 10% ~ 15%。

在安装集热器时, 当地太阳高度角、太阳能辐射强度、运行时间及周围环境温度等都会影响到集热器的集热效率^[11]。集热效率 η_s 为:

$$\eta_s = \frac{c_p \rho V_s (t_1 - t_0)}{I A_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中: t_0 —换热器进水温度, $^{\circ}\text{C}$; t_1 —换热器出水温度, $^{\circ}\text{C}$; I —单位面积集热器太阳直射辐射值, W / m^2 ; ρ —水密度, kg / m^3 ; V_s —集热器水流量, m^3 / s 。

集热系统采用强制循环, 集热泵设计流量 G_s 和功率 P_s 为:

$$G_s = G_m A_c \quad (3)$$

$$P_s = \frac{G_s g \rho H}{3 \ 600 \eta_p} \quad (4)$$

式中: G_m —集热器单位面积工质流量, $\text{m}^3 / (\text{h} \cdot \text{m}^2)$; g —重力加速度, 取 9.81; H —水泵扬程, 按取值为 8 m 计算; η_p —泵效率, 取值为 0.85。

2.2 空气源热泵机组模型

根据市场上某产品的实际性能参数及变工况运行数据, 建立 TRNSYS 热泵模块数学模型, 根据该模型拟合得到热泵机组的性能拟合公式:

$$\begin{cases} Q_h = 20.636 \ 72 + 0.291 \ 94 t_{\text{wout}} + 0.093 \ 51 t_{\text{env}} + \\ \quad 0.005 \ 01 t_{\text{wout}}^2 + 0.000 \ 210 \ 472 t_{\text{env}}^2 - \\ \quad 0.000 \ 307 \ 56 t_{\text{wout}} \cdot t_{\text{env}} \\ R^2 = 0.969 \ 61 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_h = 91.48468 + 1.21367t_{\text{wout}} + 1.51031t_{\text{env}} - \\ 0.00806t_{\text{wout}}^2 - 0.00654t_{\text{env}}^2 + \\ 0.01337t_{\text{wout}} \cdot t_{\text{env}} \\ R^2 = 0.99557 \end{cases} \quad (6)$$

式中: Q_h —制热量, kW; P_h —输入功率, kW; COP—能效比; t_{wout} —热泵出水温度, °C; t_{env} —环境温度, °C。

热泵机组运行过程中, 对应制热工况下流体从环境吸收的热量 Q_{env} 及源侧输出空气温度 t_{aout} 与负荷侧出水温度 t_{wout} :

$$Q_{\text{env}} = Q_h - P_h \quad (7)$$

$$t_{\text{aout}} = t_{\text{ain}} - \frac{Q_{\text{env}}}{m_s c_{p, \text{air}}} \quad (8)$$

$$t_{\text{wout}} = T_{\text{win}} - \frac{Q_h}{m_l c_p} \quad (9)$$

式中: t_{ain} —热源侧空气温度, °C; m_s —热源侧空气流量, kg/s; t_{win} —负荷侧供水温度, °C; m_l —负荷侧供水流量, kg/s。

作为太阳能不足时的补充热源, 热泵机组在最不利工况下需要满足建筑全部供热需求。热泵机组额定制热量^[12] Q_h :

$$Q_h = \frac{Q_N}{K_w} \quad (10)$$

式中: K_w —冬季机组制热量修正系数, 取值 0.7。

热泵机组给水泵的工质流量由分流器控制, 当热泵机组单独供热时, 给水泵流量达到额定值。给水泵额定流量 G_b 与额定功率 P_b :

$$G_b = \frac{Q_h}{c_p \Delta t} \quad (11)$$

$$P_b = \frac{G_b g \rho H}{3600 \eta_p} \quad (12)$$

2.3 系统运行评价指标

太阳能热泵系统采用强制循环, 集热系统、辅热系统和供热系统都是电驱动, 系统的总功耗为集热泵、循环水泵、给水泵、供热水泵和热泵机组功耗之和。供暖系统总功耗计算式^[13]为:

$$P = P_s + P_b + P_r + P_g + P_h \quad (13)$$

式中: P_r , P_g —循环水泵及供热水泵功耗, kW。

太阳能热泵系统能效比 COP 定义为供暖系统供热量与功率的比值:

$$\text{COP} = \frac{Q_b}{P\tau} \quad (14)$$

式中: Q_b —太阳能热泵系统供热量, kW·h; τ —太阳能热泵系统供热时间, h。

太阳能贡献率 f_s ^[14] 为太阳能提供的热量占总供暖量的比例:

$$f_s = \frac{Q_{\text{sol}}}{Q_{\text{sol}} + Q_{\text{pum}}} \times 100\% \quad (15)$$

式中: Q_{sol} —太阳能提供的热量, kW·h; Q_{pum} —热泵机组提供的热量, kW·h。

太阳能集热器单位面积节电量 E 是指供暖季内每平米集热器节省的电量:

$$E = \frac{E_{\text{pumb}} - E_{\text{sol+pumb}}}{A_c} \quad (16)$$

式中: E_{pumb} —空气源热泵机组单独供热时的系统能耗, kW·h; $E_{\text{sol+pumb}}$ —太阳能热泵系统供热时的系统能耗, kW·h。

采用投资回收期法对系统进行经济性评价。静态投资回收期 N ^[15] 为空气源热泵系统引入太阳能供热设备后增加的初投资与采用太阳能热泵系统节省的运行费用的比值:

$$N = \frac{C_s + C_Y + C_P}{A_c E} \quad (17)$$

式中: C_s —太阳能集热器投资; C_Y —板式换热器投资; C_P —循环水泵投资。

3 结果分析

为研究太阳能热泵系统仅用于日间供热时系统实际供暖效果及集热器面积的最佳设计参数, 根据系统各部件模型, 以太阳能热负荷系数 k 为变量进行仿真计算, 不同太阳能热负荷系数相对应的集热器面积如表 2 所示。

表 2 不同太阳能热负荷系数对应的集热器面积

Tab. 2 Collector areas corresponding to different solar heat load coefficients

太阳能热负荷系数 k	集热器面积 A_c/m^2
0.25	174
0.5	347
1	695
2	1390
3	2085
4	2780

3.1 室内温度

对采暖季内建筑实际室温进行仿真计算,得到办公楼一楼室温仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知,采用太阳能热泵系统为建筑物日间供暖时,供暖季内建筑室内温度呈周期性变化,工作时间室内温度保持在 18 ℃ 左右,最冷日室内温度为 16 ℃,较好地满足了建筑供暖需求。非工作时间室内自然降温,每周一供暖初期室内温度与设计供暖温度存在最大温差,这与该周建筑热负荷峰值时间相吻合。热泵机组选型时应对建筑最大热负荷进行特殊设计。

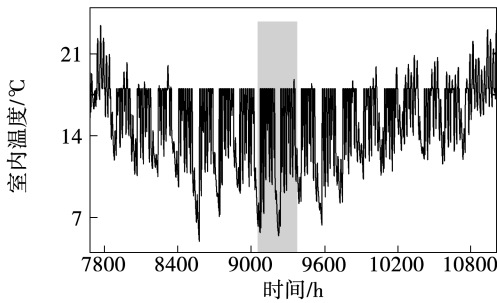


图 4 供暖季一楼室内温度仿真结果

Fig. 4 Simulation results of indoor temperature on the first floor during heating season

3.2 供暖系统 COP 及太阳能贡献率

供暖系统 COP 及太阳能贡献率随太阳能热负荷系数 k 变化的拟合曲线如图 5 所示。根据拟合结果,当太阳能热负荷系数 k 在 0 ~ 4 范围内变化时,太阳能热泵系统的 COP 随 k 的增大线性增长,当 $k = 0$ 时,热泵机组单独供热,供暖系统的 COP 为 2.59,此时供暖系统供暖季耗电总量为 17 241 kW · h,与实际运行结果较为接近;当 $k > 0$ 时,太阳能集热系统参与供热; $k = 0.25$ 时供暖系统的 COP 为 2.81; $k = 4$ 时供暖系统的 COP 达到 14.2,具有极佳的运行能效比。供暖系统太阳能贡献率随着太阳能热负荷系数 k 的增大呈渐近线趋势变化,当 $k = 0.25$ 时太阳能贡献率为 15.5%;当 $k = 4$ 时,太阳能贡献率达到 55.9%。

从拟合结果可以看出,太阳能集热器面积增大使得供暖系统 COP 及太阳能贡献率都有一定程度提升,适度地增大集热器面积可以显著提高系统运行经济性。

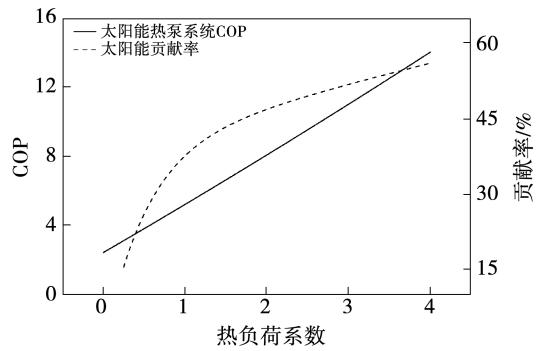


图 5 太阳能热泵系统 COP 及太阳能贡献率拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of COP and solar contribution rate of solar heat pump system

3.3 集热器集热效率与单位面积节电量

太阳能热泵系统集热器集热效率及单位面积节电量与太阳能热负荷系数 k 的拟合曲线如图 6 所示。根据拟合结果,当太阳能热负荷系数 k 在 0 ~ 4 范围内变化时,集热器集热效率随集热器面积的增大而减小, $k = 0.25$ 时集热效率为 28.9%, $k = 4$ 时集热效率下降到 11%。太阳能辐射在集热器表面的能量只有很少一部分被用于供热,大部分太阳能因为集热器运行时段与辐射强度峰值不匹配等原因,没有得到有效利用。

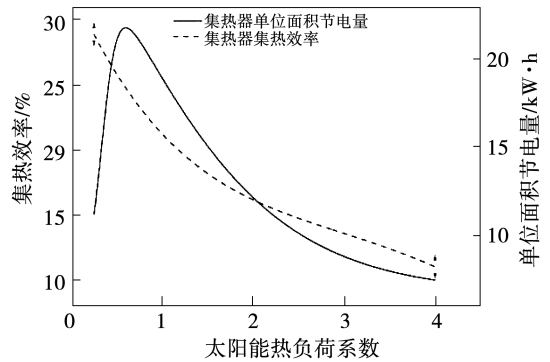


图 6 太阳能集热器集热效率及单位面积节电量拟合曲线

Fig. 6 Fitting curves of solar collector efficiency and electricity saving per unit area

太阳能集热器单位面积节电量及太阳能集热器总节电量与集热器的面积有关。随着集热器面积的增大,热泵机组节电量增加的同时,集热器的能耗和集热系统初投资也在增加。由于集热系统初投资与集热器面积正相关,每平方米集热器及其配套设施的初投资总额是固定的,所以这一系数实质反映了

集热系统的投资回报率。从拟合结果可以看出,集热器单位面积节电量呈现先增大、后减小的变化趋势, $k=0.25,1$ 和 4 时集热器单位面积节电量分别为 $11.2,19$ 和 $7.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。曲线上上升段反映了水泵能耗对节电量的影响,下降段则可能与集热器集热效率减小有关。

集热器单位面积节电量具体拟合结果:

$$\begin{cases} E = 6.721 + \frac{36.52}{1 + e^{-\frac{k-0.351+3.25 \times 10^{-29}}{0.085}}} \cdot \\ \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{k-0.351-3.25 \times 10^{-29}}{0.948}}}\right) \\ R^2 = 0.99538 \end{cases} \quad (18)$$

相较于单一热泵供热系统,复合系统新增设备主要为循环泵、集热泵、集热器和板式换热器。系统设备初投资^[15]如表 3 所示。

表 3 复合系统初投资情况

Tab.3 Initial investment of composite system

名称	数值
太阳能集热器/元·m ⁻²	150
板式换热器/元	400
循环水泵/元	200

根据青岛市采暖季电价政策,仿真建筑按照青岛市一般工业用电计价 $0.8363 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,计算得到不同太阳能热负荷系数 k 对应的太阳能热泵系统投资回收期如图 7 所示。

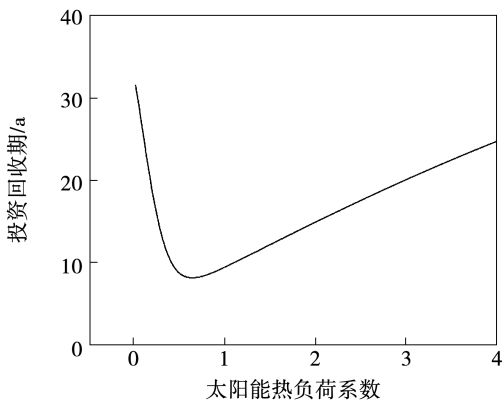


图 7 太阳能热泵系统投资回收期计算结果

Fig.7 Calculation result of investment payback period of solar heat pump system

可以发现,复合系统投资回收期的变化趋势与集热器单位面积节电量变化趋势恰好相反,当太阳能热负荷系数 $k=0.603$ 时有最小投资回收期为 8.32 a 。

根据公式(18),计算得到的集热器最佳设计参数及对应经济评价指标如表 4 所示。该设计参数与最小投资回收期对应的太阳能热负荷系数基本一致。

表 4 集热器最佳设计参数及对应评价指标

Tab.4 The best design parameters of collectors and corresponding evaluation indexes

k	A_c/m^2	COP	$f_s/\%$	$\eta_s/\%$	N/a
0.6	417	4.1	29.1	24.7	8.3

4 结 论

针对青岛地区某办公楼进行的热负荷模拟与太阳能热泵系统集热器面积数值分析,可以得到结论:

(1) 对于同一建筑,相较于全天供暖,日间供暖热负荷波动更为剧烈,其最大热负荷约为全天供暖最大热负荷的 2 倍,建筑日间供暖热负荷峰值对应时间为每周供暖初期。

(2) 太阳能热泵系统日间供暖时,随着集热器面积的增大,供暖系统 COP 与太阳能贡献率都有显著提高,但集热器集热效率逐渐减小,集热器单位面积节电量呈现先增大后减小的变化特点,复合系统投资回收期呈现先减小后增大的变化特点。

(3) 对于所研究建筑,太阳能集热器面积为 417 m^2 时太阳能热泵系统有最佳的运行经济性,此时供暖系统的 COP 相较于热泵机组单独供暖时提高了 1.51,太阳能贡献率为 24.7%,供暖季总节约电能 $9090.6 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

参考文献:

[1] 袁喜鹏,白 珍,周李庆,等. 互补供暖系统集热器面积优化[J]. 工业技术创新,2019,6(5):45-49.
YUAN Xi-peng, BAI Zhen, ZHOU Li-qing, et al. Collector area optimization of complementary heating system[J]. Industrial Technology Innovation, 2019, 6(5):45-49.

[2] 杨雪秀,赵 薇,满鑫香. 基于 TRNSYS 的北方农村太阳能与

- 生物质锅炉联合供暖系统优化分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2021, 41(1): 43-48.
- YANG Xue-xiu, ZHAO Wei, MAN Xin-xiang. Optimization analysis of northern rural solar and biomass boiler combined heating system based on TRNSYS[J]. Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 41(1): 43-48.
- [3] 赵芝蓉, 唐汝宁, 李军军. 严寒C区空气源热泵辅助太阳能供暖系统正交优化分析[J]. 建筑节能, 2020, 48(11): 16-22, 44.
- ZHAO Zhi-rong, TANG Ru-ning, LI Jun-jun. Orthogonal optimization analysis of air source heat pump auxiliary solar heating system in severe cold zone C[J]. Building Energy Efficiency, 2020, 48(11): 16-22, 44.
- [4] 张健雄, 曹小林, 代微. 太阳集热器与空气源热泵联合供热系统研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 29-34.
- ZHANG Jian-xiong, CAO Xiao-lin, DAI Wei. Research on combined heating system of solar collector and air source heat pump[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(1): 29-34.
- [5] 顾祥红, 彭齐鑫. 太阳能集热器和空气源热泵联合供暖的研究现状[J]. 大连大学学报, 2020, 41(3): 24-27.
- GU Xiang-hong, PENG Qi-xin. Research status of combined heating by solar collectors and air source heat pumps[J]. Journal of Dalian University, 2020, 41(3): 24-27.
- [6] 王芳超, 姜雯, 崔日鲜. 青岛市太阳总辐射的变化特征分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2014, 31(4): 266-271.
- WANG Fang-chao, JIANG Wen, CUI Ri-xian. Variation characteristics of total solar radiation in Qingdao city[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 31(4): 266-271.
- [7] 徐伟, 邹瑜, 陈曦. 国家标准《公共建筑节能设计标准》GB50189-2015[J]. 建设科技, 2018(16): 39-45.
- XU Wei, ZOU Yu, CHEN Xi. National Standard "Design Standard for Energy Efficiency of Public Buildings" GB50189-2015[J]. Construction Technology, 2018(16): 39-45.
- [8] 吴玥. 严寒地区典型办公建筑空气源热泵运行特性及效果提升[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- WU Yue. Operational characteristics and effect improvement of air source heat pumps for typical office buildings in severe cold areas[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [9] 付昱曦, 李红莲, 王赏玉. 建筑节能分析用典型年数据的获取方法[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2021, 53(1): 147-154.
- FU Yu-xi, LI Hong-lian, WANG Shang-yu. Acquisition method of typical year data for building energy efficiency analysis[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2021, 53(1): 147-154.
- [10] 李金平, 叶何立, 邓聪聪. 集热方式对全玻璃真空管太阳能热水器性能的影响[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 103-111.
- LI Jin-ping, YE He-li, DENG Cong-cong. The effect of heat collection methods on the performance of all-glass evacuated tube solar water heaters[J]. Acta Solar Energy, 2021, 42(1): 103-111.
- [11] 李世孝. 空气源热泵耦合太阳能集热器运行能效评价[J]. 工程建设与设计, 2021(4): 57-58, 65.
- LI Shi-xiao. Operational energy efficiency evaluation of air source heat pump coupled with solar collector[J]. Engineering Construction and Design, 2021(4): 57-58, 65.
- [12] 杨永鲁. 空气源热泵联合太阳能供暖运行策略及评价[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- YANG Yong-lu. Operation strategy and evaluation of air source heat pump combined with solar heating[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [13] 李大庆, 杨鲁伟, 陈嘉祥. 太阳能热泵联合烟草干燥系统[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 25-32.
- LI Da-qing, YANG Lu-wei, CHEN Jia-xiang. Solar heat pump combined with tobacco drying system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 25-32.
- [14] 郑汝奎, 刘乃玲. 太阳能-空气能复合系统用于供暖性能分析[J]. 建筑热能通风空调, 2019, 38(2): 66-69.
- ZHENG Ru-kui, LIU Nai-ling. Solar-air energy composite system used in heating performance analysis[J]. Building Thermal Ventilation and Air Conditioning, 2019, 38(2): 66-69.
- [15] 张晓月. 北京农村地区太阳能空气源热泵双水箱复合供热系统性能模拟研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- ZHANG Xiao-yue. Research on performance simulation of combined heating system with solar air source heat pump and double water tanks in rural areas of Beijing[D]. Beijing: Beijing Jianzhu University, 2020.

(丛敏编辑)