

内蒙古地区太阳能-地源热泵系统运行特性研究

金光¹, 张宏葛¹, 郭少朋^{1,2}, 郝楠¹

(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 天津大学中低温热能高效利用教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 通过对我国内蒙古地区的太阳能-地源热泵系统运行模式及性能参数进行研究, 得到适合该地区运行的最佳方式. 以包头市住宅建筑为模型, 建筑面积为 6 451.94 m², 对该建筑的太阳能-地源热泵系统的辅助模式与补热模式两种模式进行仿真, 结果表明: 辅助模式明显优于补热模式. 集热器参数在最优条件下, 太阳能-地源热泵系统连续运行 5a 时, 辅助模式下的土壤温度仅下降 0.32 °C. COP 均值为 4.82, 辅助模式较补热模式的 COP 值提高 24.9 %. 又分析了不同模式下的热泵机组制热量及系统的耗电量, 辅助模式较补热模式下热泵机组的年制热量降低 49.3 %, 年耗电量降低了 4.26 %.

关键词: 太阳能-地源热泵; TRNSYS; 土壤温度; 运行模式; 集热器参数

中图分类号: TU83

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)05-0751-06

Study on the operation characteristics of solar energy-ground source heat pump system in Inner Mongolia

JIN Guang¹, ZHANG Hongge¹, GUO Shaopeng^{1,2}, HAO Nan¹

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Inner Mongolia

Baotou 014010, China; 2. Key Laboratory of Low-Cost Thermal Energy Efficient Utilization of

Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Through the research on the operation mode and performance parameters of the solar-ground source heat pump system in Inner Mongolia in China, the best way to operate is obtained in this area. Taking a residential building, which covers an area of 6 451.94 m² in Baotou as the model, the auxiliary mode and the supplementary mode of the solar-ground source heat pump system of the building are simulated. Results show that the auxiliary mode is obviously better than the heating mode. When the collector parameters under optimal conditions and the solar-ground source heat pump system is continuously operated for 5 years, the soil temperature in the auxiliary mode only decreased by 0.32 °C, the COP average is 4.82, and the assist mode increased by 24.9 % as compared with the supplemental heat mode. Different modes of heating capacity of the heat pump unit and the power consumption of the system are also analyzed. The auxiliary mode is reduced by 49.3 % and annual electricity consumption decreased by 4.26 % compared with the annual heat of the heat pump unit in the supplementary heat mode.

Key words: Solar energy-ground source heat pump; TRNSYS; soil temperature; operating mode collector parameters

随着我国经济的可持续发展, 绿色能源要求逐步增高. 地源热泵(GSHP)是一种高效的新能源, 在我国京津冀地区已投入使用. 因内蒙古地区气温变化明显, 地源热泵系统的性能并未得到显著优化, 因此并未投入使用. 我国西北地区约占全国面积 30%, 年日照时数可达 2 500 h, 年辐射总量约达 5 800 MJ/m²[1], 太阳能资源极其丰富. 因此, 在严寒地区对太阳能-地源热泵系统(SGSHP)的性能进行优化研究具有重要意义.

Emmi. G. 等人[2] 利用 TRNSYS 软件针对 GSHP 系统加入太阳能辅助系统进行了六个寒冷

地区的模拟研究, 分析了钻孔长度对热泵能效的影响, 并确定了合适的控制策略来管理太阳能集热器和埋管换热器. Razavi S H 等人[3] 针对伊朗一座住宅建筑利用 TRNSYS 软件模拟了五种不同的太阳能辅助 GSHP 系统的组合, 结果表明, 考虑到生活热水的情况时, 单一地源热泵不能提供生活热水所需的热量. 在低平均气温地区, 适合集热器辅助 GSHP 系统以增强埋管流体温度的模式. E Parham 等人[4] 又对 SGSHPs 系统进行了实验研究, 通过交替使用太阳能辅助热泵和单一地源热泵模式, 证明在该地区由 SGHPs 加热是可行

收稿日期: 2018-12-08

修改稿日期: 2019-09-29

基金项目: 内蒙古自治区科技成果转化基金项目(CGZH2018150), 内蒙古自治区科技创新引导奖励资金项目(2017CXYS-1), 内蒙古科技大学创新基金优秀项目(2017YQL07)

第一作者: 金光(1970-), 女, 博士, 教授, 从事可再生能源建筑应用技术及地源热泵方向研究. E-mail: annzhg@163.com

的。我国的杨卫波等人通过对 SGSHP 在不同双热源耦合模式下的热性能进行实验与模拟研究,测试了太阳能集热器效率和埋管进出口温度分别对系统 COP 的影响,并以青岛地区作为模拟实验地点,对 SGSHP 的交替运行进行了数值模拟研究,实验结果表明,节能效果显著并且运行性能更好^[5-6]。李新国^[7]等人对天津地区的太阳能、蓄热与地源热泵组合系统进行模拟研究,对太阳能向地下的跨季节储热量进行了分析。季永明^[8]等人对大连地区定时蓄热与随时蓄热两种模式下的系统热利用率进行分析,确定了两种模式下最佳集热器面积参数。

国内外大部分学者利用 TRNSYS 对当地地区 SGSHP 系统进行了研究,由于系统无普遍适用性,不同地区的性能参数分配比例以及运行方式不同,针对太阳能-地源热泵系统在不同气候地区适应性的研究目前显得尤为重要。但在我国严寒地区并未形成复合系统的设计方法,实际工程中系统的性能及运行策略仍需进一步验证。因此,以包头市为例,对太阳能-地源热泵系统的补热模式和辅助模式进行研究,并基于仿真模型对太阳能集热器的参数进行优化设置,得到最佳的系统运行模式,为实际工程予以参考。

1 模型建立

1.1 建筑模型

建筑物以包头市民用住宅为选取模型,面积为 6 451.94 m²。包头市位于北纬 40°38', 东经 109°59', 海拔为 1 067 m, 日照辐射小时数可达 2 200 h^[8]。包头市全年太阳辐射量如图 1 所示。因包头市属于严寒地区,夏季供冷时间短,因此不考虑供冷需求,冬季供暖时间为 10 月 15 日到次年 4 月 15 日^[9]。通过 DeST 建立模型,得到建筑物全年热负荷。其中,全年最大热负荷为 179.51 kW,总负荷为 216.23 kW,指标为 38.99 W/m²。负荷模拟结果如图 2 所示。

1.2 参数选取

1.2.1 热泵机组的选型

该模型的热泵机组采用的是满液式水源热泵螺杆机组。制热名义工况为:埋管的进水温度为 15℃,热水的进水温度为 40℃;制热工况的最高热水温度为 55℃。

1.2.2 埋管参数

埋管是地源热泵系统的重要组成部分,其设计是总体系统设计的核心内容。故此部分的数

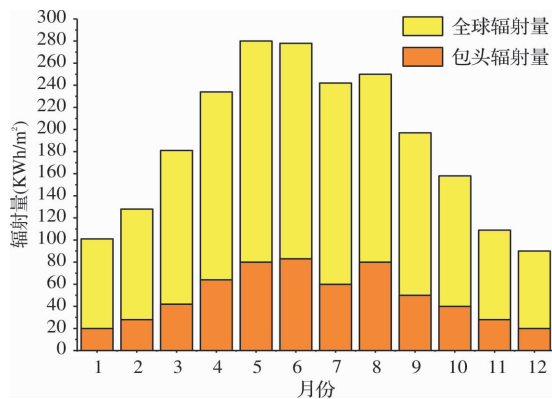


图1 包头市太阳能辐射量图

Fig.1 Solar radiation in Baotou

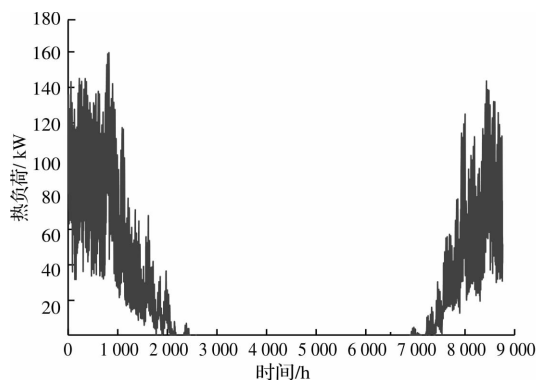


图2 负荷模拟结果

Fig.2 Result of load simulation

据计算对后期的参数设置至关重要。具体计算公式如下:

(1)确定埋管吸热量^[10]

$$Q = Q_1 \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \quad (1)$$

式中, Q 为冬季埋管从土壤中的吸热量, kW; Q_1 为设计总热负荷, kW; COP 为设计工况下热泵机组的制热性能参数。

(2)确定埋管长度

埋管换热器的长度与地质、地温及进入热泵机组的水温等参数有关。本研究前期未进行土壤热响应实验,故每延米换热量确定为 45 W/m^[10]。埋管换热器的长度的计算公式如下:

$$L = 1\,000nQ/q \quad (2)$$

式中, L 为冬季工况下所需埋管长度, m; q 为单位埋深吸热量, W/m; n 为埋管长度修正系数,单 U 为 2, 双 U 为 4。

(3)确定钻孔数量及井间距

$$N = \frac{L}{nH} \quad (3)$$

式中, N 为钻孔数量; H 为钻孔深度, m。

根据参考设计规范^[11], 运用半经验公式法,

基于傅里叶导热定律, Kelvin 线热源理论为基础得到井间距, 具体公式如下:

$$L = \frac{q_a R_{ga} + (Q_1 - \overline{W})(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{T_g - \frac{T_{wi} - T_{wo}}{2} - T_p} \quad (4)$$

式中, q_a 为年平均对土壤的排热率; \overline{W} 为耗功率, W; R_{ga} 为热脉冲产生的有效热阻, $(m \cdot ^\circ C)/W$; R_b 为钻孔热阻, $(m \cdot ^\circ C)/W$; PLF_m 为设计月热泵运行率; T_g 为土壤初始温度, $^\circ C$; T_p 为相邻钻孔间由热干扰产生的补偿温度, $^\circ C$; T_{wi} 、 T_{wo} 为热泵进、出口温度, $^\circ C$. 计算结果参数选取如表 1 所示.

表 1 仿真中主要部件参数

Tab. 1 Main component parameters in the simulation

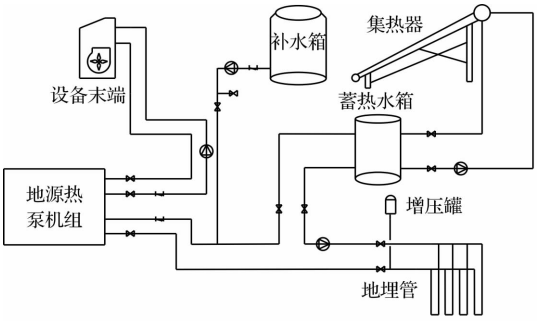
部件	名称	参数	数值
Type927	热泵机组	源侧比热	3.9 KJ/ kg · k
		负荷侧比热	4.19 KJ/ kg · k
Type557a	地埋管	井深	150 m
		井数	110
		井间距	5.5 m
		埋管直径	32 mm
		土壤导热系数	1.8 W/ m · k
		土壤热容量	2 632 KJ/m ³ · k
Type4a	水箱	土壤初始温度	13.0 $^\circ C$
		管道热导率	0.45 W/ m · k
		流体比热	3.9 KJ/ kg · k
		流体密度	1 100 kg/m ³
		水箱体积	16 m ³
		流体比热	4.19 KJ/ kg · k
Type73	集热器	流体密度	1 000 Kg/m ³
		集热器面积	250 m ²
		流体比热	4.19 KJ/ kg · k
		吸收板发射率	0.05
		吸收板吸收率	0.95

2 系统模式

2.1 太阳能-地源热泵系统补热模式

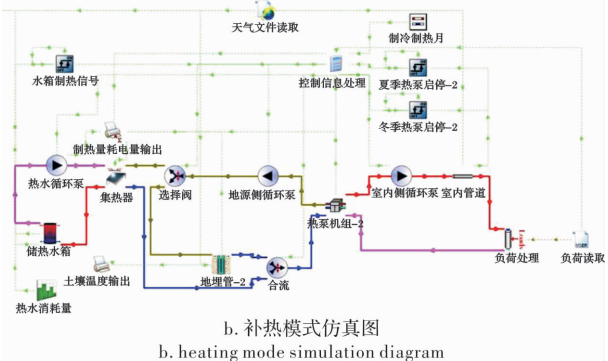
此模式在夏季 6 月为地埋管蓄热, 采用集热器与地埋管串联的模式. 因内蒙古地区气候变化明显, 夏季太阳能总辐射量辐射高达 6 490 MJ/m², 选择在 6 月份进行蓄热. 冬季单独利用地埋管系统为用户供暖, 夏季利用太阳能系统向土壤中补热, 补热时间为 6 月份每日 9~17 时. 系统图如图 3

所示.



a. 补热模式系统简化图

a. Supplementary heat system simplified diagram



b. 补热模式仿真图

b. heating mode simulation diagram

图 3 SGSHP 系统补热模式

Fig. 3 SGSHP system heating mode

2.2 太阳能-地源热泵系统辅助模式

此模式在供暖期间进行蓄热, 系统采用地埋管与集热器并联的模式. 两者的出口流体进入热泵机组前, 在分混水泵中进行混合, 再通过用户侧进行循环. 太阳能系统辅助时间为供暖期每日 10~16 时, 系统图如图 4 所示.

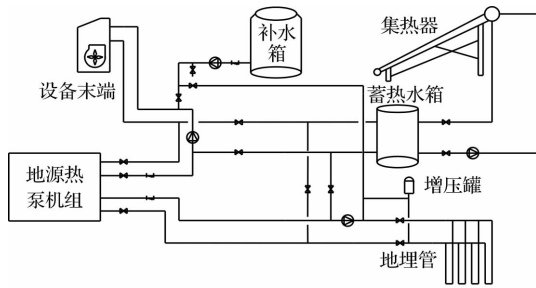
3 模拟结果与分析

3.1 不同集热器面积下土壤温度的变化特性

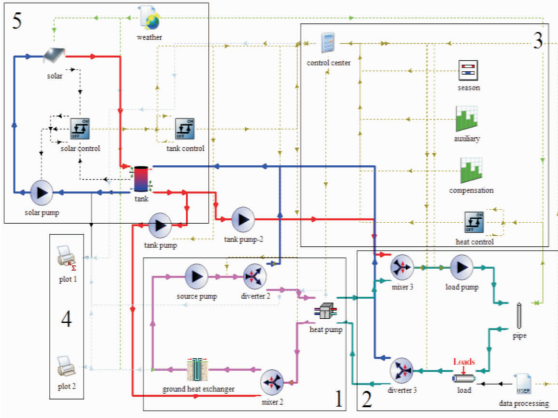
通过对土壤温度变化的情况进行分析, 比较补热与辅助两种模式. 系统的模拟结果分别如图 5、6 所示. 以集热器面积作为变换量, 分析土壤的热失衡情况. 因建筑物为 6 451.94 m², 考虑到集热器之距离, 集热器最大面积取为 250 m², 取集热器面积分别为 100、150、200、250 m², 对该建筑物进行 5 年时间的模拟, 分析土壤温度的变化趋势.

补热模式下, 土壤温度随时间的变化情况如图 5 所示. 从图中可以看出, 在集热器面积不同的情况下, 每年 1~5 月土壤温度呈下降趋势, 6~12 月土壤温度回升, 但波动幅度较大, 并且整体呈现下降的趋势. 集热器面积为 100、250 m²时, 土壤进行补热后的回升温度分别为 0.33、0.67 $^\circ C$, 在一个完整的供暖期后, 土壤平均温降为 0.81、

0.84℃, 由于在补热模式下建筑物所需热量均由土壤提供, 故土壤温降基本相同。



(a) 辅助模式系统简化图



(b) 辅助模式仿真图

图4 SGSHP系统辅助模式

Fig. 4 SGSHP system assist mode

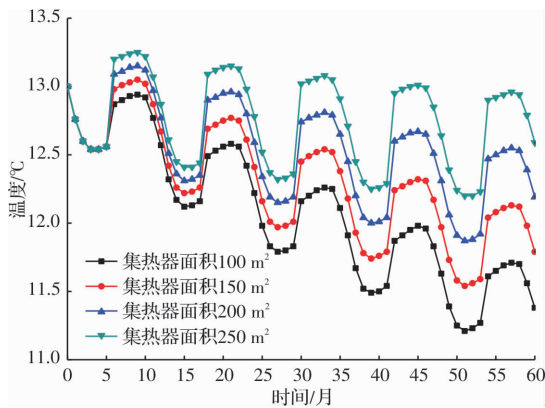


图5 补热模式下不同集热器面积的土壤温度

Fig. 5 Soil temperature of different collector areas in the heat supplement mode

在辅助模式下, 土壤温度随时间的变化情况如图6所示。从图中可以看出与补热模式土壤的温度变化趋势大体一致, 土壤温度随运行时间整体呈下降趋势, 辅助模式较补热模式土壤温度变化更为平缓。当集热器面积为100、200、250 m²时, 在一个完整的供暖期后, 土壤温降的平均值分别为0.59、0.30、0.25℃。集热器面积为100 m²时土壤温降变化最大, 集热器面积为250 m²时土壤温降趋于稳定, 集热器面积为200 m²与集热器面积为250 m²相比, 土壤温降相差明显。

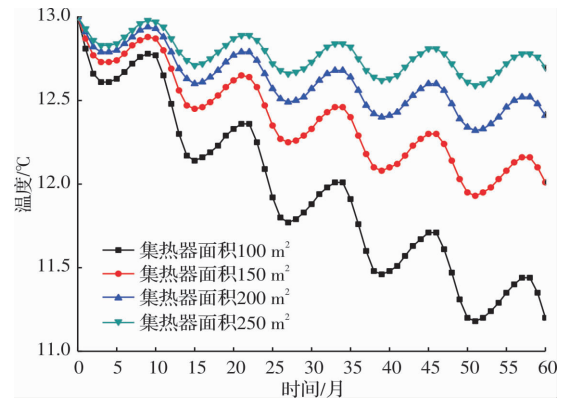


图6 辅助模式下不同集热器面积的土壤温度

Fig. 6 Soil temperature of different collector areas in auxiliary mode

3.2 不同模式下集热器倾角参数的确定

集热器倾角是影响热量的关键因素之一^[12], 因此通过确定集热器最佳倾角, 分析补热模式与辅助模式下土壤温度的变化情况。太阳能集热器倾角分别为0~55°时, 集热器单位面积得热量随月份的变化如图7所示。从图中可以看出, 在5~7月, 集热器角度越小, 得热量越大。其中, 当倾角为0°、30°、40°时, 得热量呈正态分布, 分别为0.72、0.71、0.67 GJ/m²。在供暖期间内, 集热器倾角为50°、55°时, 得热量最大, 其平均值分别约为0.57、0.56 GJ/m²。因此, 在补热模式下, 集热器倾角取0°; 辅助模式下, 集热器倾角取50°。

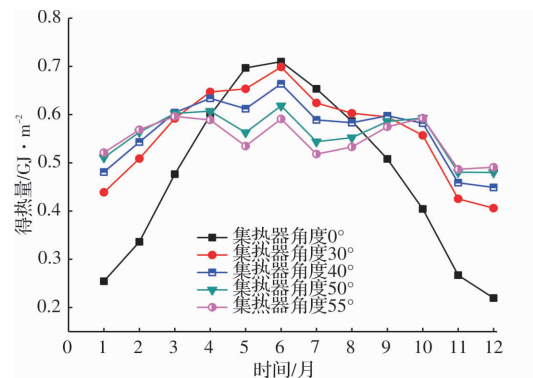


图7 集热器角度随时间变化的得热量

Fig. 7 Heat gain of the collector angle with time

3.3 最优集热器参数下土壤温度的变化特性

随着集热器的面积增大, 两种模式下土壤温降平均值均减小。因此, 在集热器参数优化的两种模式条件下, 集热器面积取250 m²时, 补热模式与辅助模式下土壤温度随时间的变化关系如图8所示。可以看出补热模式下, 土壤年平均温降0.80℃; 辅助模式下, 土壤年平均温降为0.32℃。补热模式下土壤温度变化幅度显著, 因此辅助模式

较补热模式土壤温度变化更为稳定。

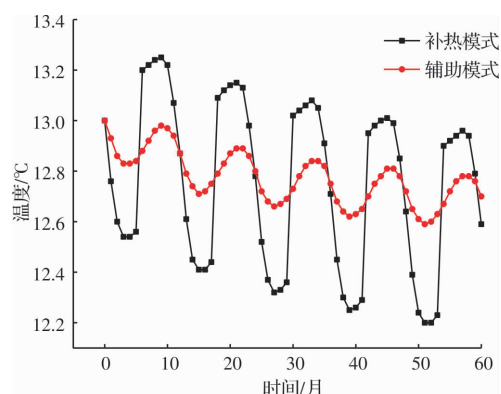


图8 集热器参数优化下不同模式土壤温度

Fig. 8 Different model soil temperature under the optimization of collector parameters

3.4 热泵制热量与系统耗电量分析

集热器面积为 250 m^2 时, 补热模式及辅助模式下全年逐月热泵机组制热量的对比如图9所示。从图中可以看出, 满足建筑物所需供暖量时的全年逐月对比中, 补热模式的制热量均高于辅助模式的制热量。补热模式下热泵的全年制热量为 $236.44 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 辅助模式下全年制热量为 $158.36 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。

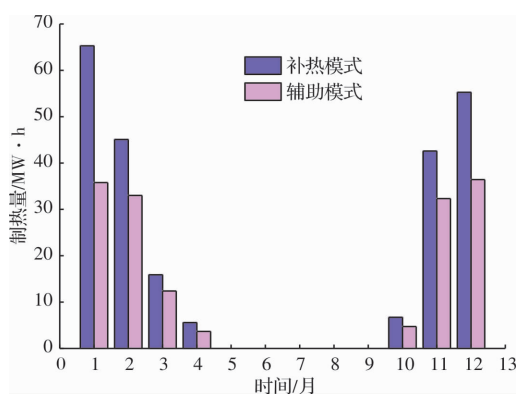


图9 不同模式下热泵制热量对比

Fig. 9 Heat pump heat comparison in different modes

集热器面积为 250 m^2 时, 补热模式及辅助模式下全年总耗电量的对比如图10所示。其中, 总耗电量包括热泵机组耗电量和各循环泵的耗电量。从图中可以看出, 1、6、12月补热模式耗电量多于辅助模式耗电量, 补热模式在1月份耗电量达到 $20 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。2、3、4、10、11月辅助模式多于补热模式的耗电量。补热模式需在6月向地埋管补热, 辅助模式下在供暖期间增加太阳能, 因此, 耗电量也增加, 补热模式下全年总耗热量为 $86.46 \text{ MW} \cdot \text{h}$, 辅助模式下全年总耗热量为 $83.02 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。辅助模式下年耗电量相比补热模式下年耗电量降低 4.26% 。

通过对 SGSHP 系统进行5年时间模拟, 得到

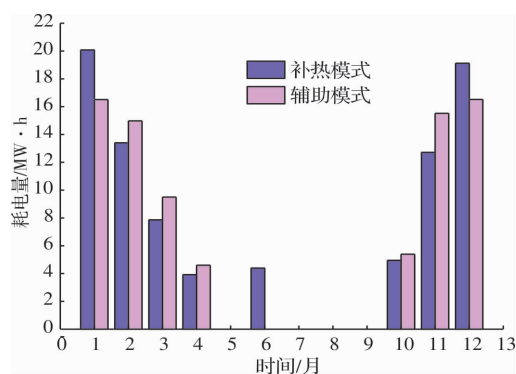


图10 不同模式下全年耗电量对比

Fig. 10 Comparison of annual power consumption in different modes

补热模式与辅助模式下的平均 COP 值如图11所示。从图中可以看出, 补热模式与辅助模式下的年平均 COP 值的变化均趋于稳定, 说明土壤热失衡现象得到改善。补热模式下 COP 平均值为 3.86 , 辅助模式下 COP 平均值为 4.82 , 辅助模式下的 COP 值较补热模式下提高了 24.9% 。

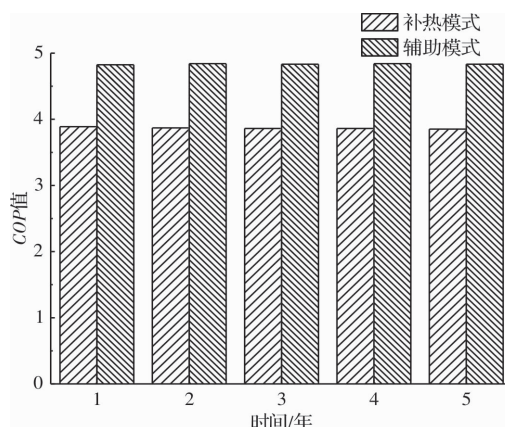


图11 不同系统模式下年平均COP值

Fig. 11 Annual averageCOP value in different system modes

4 结论

模拟了包头地区住宅建筑太阳能-地源热泵系统的两种模式, 补热模式和辅助模式。分析了土壤温度的变化情况、不同模式下热泵机组的制热量和系统的耗电量, 以及在我国严寒地区集热器的倾斜角度最优模式下的系统性能。结论如下:

(1)集热器参数优化的条件下, 即选取集热器面积 250 m^2 时, 补热模式下集热器角度为 0° , 辅助模式下集热器角度为 50° , 补热模式下土壤年平均温降为 0.80°C , 辅助模式下土壤年平均温降为 0.32°C 。补热模式下土壤温降为辅助模式下土壤温降的 1.5 倍。补热模式虽然在夏季太阳能资源丰富, 但相对辅助模式而言, 土壤恢复能力更弱。

(2)随着集热器面积的增大,两种模式下土壤温度均减小.补热模式下土壤温度变化幅度明显,辅助模式下土壤温度变化相对平缓,辅助模式可有效的改善土壤热的堆积现象.与最优集热器面积相比,选择较小的集热器面积对于土壤温度的变化影响不大.

(3)辅助模式与补热模式下SGSHP系统的机组COP平均值分别为4.82、3.86,辅助模式下COP值较补热模式下COP值提高了24.9%.辅助模式相比补热模式下热泵机组的年制热量降低了49.3%,年耗电量降低4.26%.在相同制热量的情况下,辅助模式与补热模式相比,可选择型号较小的热泵机组,从而减少电能的消耗和初投资.辅助模式在土壤热失衡与系统性能方面,均较补热模式下更为优化.

参考文献 References

- [1] 徐伟. 中国地源热泵发展研究报告[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
XU Wei. Research report on the development of ground source heat pump in China [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2013.
- [2] EMMI G, ZARRELLA A, CARLI M D, et al. An analysis of solar assisted ground source heat pumps in cold climates[J]. Energy Conversion & Management, 2015, 106:660-675.
- [3] RAZAVI S H, AHMADI R, ZAHEDI A. Modeling, simulation and dynamic control of solar assisted ground source heat pump to provide heating load and DHW [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 102: 229-246.
- [4] PARHAM E, MICHEL B. Coupling of geothermal heat pumps with thermal solar collectors using double U tube boreholes with two independent circuits[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31:3066-3077.
- [5] YANG Weibo, ZHANG Heng, LIANG Xingfu. Experimental performance evaluation and parametric study of a solar-ground source heat pump system operated in heating modes[J]. Energy, 2018, 149:173-18.
- [6] 杨卫波,施明恒,董华. 太阳能土壤源热泵系统联合供暖运行模式的探讨[J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 25-31.
- [7] 李新国,胡晓辰,王健. 太阳能、蓄热与地源热泵组系统能量分析与实验[J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 640-646.
LI Xinguo, HU Xiaochen, WANG Jian. Energy analysis and experiment of solar energy, heat storage and ground source heat pump system[J]. Journal of Solar Energy, 2012, 33(4): 640-646.
- [8] 季永明,端木琳. 太阳能辅助埋管地源热泵复合系统过渡季运行模式[J]. 暖通空调, 2017, 47(10):127-131.
JI Yongming, DUANMU lin. Operation mode of solar-assisted buried ground source heat pump composite system in the transitional season[J]. HVAC, 2017, 47(10): 127-131.
- [9] 金光,王正文,吴晔,等. 混合式土壤源热泵系统的研究现状及展望[J]. 流体机械, 2016. 44 (2):82-88.
JIN G, WANGZ W, WU X, et al. Research status and prospect of hybrid ground source heat pump system[J]. Fluid Machinery, 2016, 44(2):82-88
- [10] 杨卫波. 土壤源热泵技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2015.
YANG Weibo. Soil source heat pump technology and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.
- [11] 中国建筑科学研究院. 地源热泵系统工程技术规范(2009版): GB50366-2005. [S]. 北京:中国建工出版社. 2009.
China Academy of Building Research. Geothermal heat pump system engineering technical specification (2009 edition): GB50366-2005[S]. Beijing: China Construction Engineering Press. 2009.
- [12] ELISABETH K jellsson, Optimization of systems with the combination of ground-source heat pump and solar collectors in dwellings [J]. Energy, 2010, 35 (6): 2667-2673.

(编辑 沈 波)