

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231215002

桩基埋管地源热泵与空气源热泵系统对比研究*

王福慧, 孔纲强

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

摘要: 能量桩技术作为超低能耗建筑的技术手段之一, 逐步获得工程技术人员的关注; 面向超低能耗建筑采暖/制冷需求, 依托“坝道工程医院”中试场地示范绿色建筑, 基于Revit软件构建超低能耗建筑及桩基埋管(能量桩)、钻孔埋管地源热泵系统模型, 结合TRNSYS软件分析河南平舆地区超低能耗办公建筑全年负荷需求; 对比研究地源热泵系统与空气源热泵系统供给端的性能, 研究源侧以及负荷侧供回水温差变化, 探讨地源热泵系统运维过程中土层温度变化规律, 初步分析通过能量桩替代部分钻孔埋管的可行性。研究结果表明: 由桩基埋管与钻孔埋管组成的地源热泵系统相比空气源热泵系统节能率超过30%; 经过一个制冷季或采暖季埋管系统土层温度分别上升1.84℃或降低1.40℃, 系统运行10年后, 能量桩土层平均温度上升至17.40℃, 埋管土层平均温度上升至18.00℃, 导致土层产生“热堆积”; 依托工程条件下, 通过建筑桩基内埋管替代部分钻孔埋管, 可以节省约25%的初始投资费用, 系统运行节能率超过30%。

关键词: 超低能耗建筑; 地源热泵系统; 空气源热泵系统; 能量桩; 钻孔埋管

中图分类号: TU831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)02-0477-08

Comparative Study of Pile Foundation Ground-source Heat Pump Systems and Air-source Heat Pump Systems

WANG Fuhui, KONG Gangqiang

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

Abstract: As one of the technical solutions for ultra-low-energy buildings, energy pile technology has been attracting growing attention from engineering professionals. To address the heating/cooling demands of ultra-low-energy buildings, a demonstration green building at the pilot site of "BeSTDR Infrastructure Hospital" was used as an example. Using Revit software, models were established for ultra-low-energy buildings integrated with ground-source heat pump systems with pile foundation (energy piles) and borehole buried pipes. Combined with TRNSYS software, the annual load demands of ultra-low-energy office buildings in Pingyu, Henan Province were analyzed. A comparative study was then conducted on the supply-side performance between ground-source and air-source heat pump systems. The temperature differences between supply and return water on both the source and load sides were investigated, aiming to explore the variation patterns of soil layers during the operation and maintenance of ground-source heat pump systems. Moreover, a preliminary feasibility analysis of replacing

* 收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-01-31

基金项目: 大连市“揭榜挂帅”技术攻关项目(2021JB12SN047)资助

作者简介: 王福慧(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事能源地下结构与工程方面的研究。E-mail: 3419207515@qq.com

通信作者: 孔纲强(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事能源地下结构与工程方面的研究。E-mail: gqkong1@163.com

some borehole buried pipes with energy piles was conducted. The results showed that ground-source heat pump systems composed of pile foundation and borehole buried pipes achieved an energy-saving rate of over 30% compared to the air-source heat pump systems. After a cooling or heating season, the soil layer temperature of the buried pipe systems increased by 1.84°C or decreased by 1.40°C, respectively. After the system was in operation for 10 years, the average temperature of the soil layer of the energy pile rose to 17.40°C, and the average temperature of the soil layer of the underground pipe rose to 18.00°C, resulting in "thermal accumulation" in the soil layer. Therefore, under engineering conditions, replacing some borehole buried pipes with pile foundation buried pipes can reduce the initial investment cost by approximately 25%, while achieving over 30% energy-saving rate in system operation.

Keywords: ultra-low energy buildings; ground-source heat pump systems; air-source heat pump systems; energy piles; borehole buried pipes

0 引言

全球能源需求将持续攀升,其增速将达到近十年以来的峰值^[1],对世界的能源消耗提出了巨大的挑战。浅层地热能具有资源量大、能源利用效率高特点^[2],是替代化石能源较为理想的可再生能源;地埋管地源热泵技术是目前利用浅层地热能、实现资源循环利用的有效措施之一^[3]。国内外相关学者对地埋管换热器做了系统研究,李晓燕等^[4]针对严寒地区水平埋管的土壤源热泵建立了物理模型,但存在占地面积较大,浅层土壤易受外部天气影响。陈乐等^[5]对竖直埋管及桩基埋管换热器的不同传热模型进行综述,总结出不同换热器的适用性。王子红等^[6]对中深层地埋管的换热性能建立数值模型,对运行流量、进出口水温、岩土导热系数以及地埋管深度等影响因素及可持续性进行了研究。张哲菲等^[7]对中深层地埋管实际运行验证分析,用户侧冷热负荷的变化会导致回水温度波动。地源热泵相比于空气源热泵具有高效节能环保,运行效率高等优点^[8-9]。能量桩具备承担上部荷载与提取浅层地热能的双重作用^[10-11]。戴国豪等^[12]从五个方面对比了能量桩技术标准的异同点,并提出了相应完善方法,为我国能量桩应用提供参考。魏叶青等^[13]对能源管廊,采取间歇或连续运行,得出两种运行模式换热效率基本不变,但管廊的热致应力可减少50%的结论。为使系统运行更加贴合实际,尚少文等^[14]以吉林某办公建筑进行办公建筑的设计,得出地源热泵的冬/夏两季运行可实现取热排热的互补,利于长期运行,但“热堆积”现象仍未得到缓解。C.Sun等^[15]采用优化后的系统控制策略在非采暖季

利用太阳能补热,提供了一套降本增效的解决方案。陈剑波等^[16]在上海地区建立单U地源热泵试验台,对“土壤自恢复温度”进行研究,但运行时间较短仅为9 h,与实际运行时间差距较大。Y.Chen等^[17]以现场测量数据为样点,采用机器学习算法应用于能量桩热泵性能系数预测。C.Kaneko等^[18]对日本温暖地区的地源热泵进行了长期监测,得出温暖地区比寒冷地区更容易存在“热堆积”。

基于此,缺少对桩基埋管联合地埋管供给端的分析研究,对平舆地区超低能耗办公楼进行地源热泵设计和三维建模,利用TRNSYS对两栋办公建筑不同源侧系统进行搭建,对比地源热泵与空气源热泵系统机组能耗,负荷侧回水温差,并对长期运行地源热泵系统的土层温度进行规律总结,对能量桩地源热泵系统长期运行提供指导。

1 依托办公建筑简介

1.1 依托工程概况

依托工程为位于河南平舆的“坝道工程医院”中试场地示范绿色建筑,该建筑共2栋,分别为1号办公楼与2号办公楼,对其进行地埋管地源热泵系统设计。该层建筑分为地下1层、地上2层。地下1层层高3.3 m,地上1层和2层层高均为3.6 m。总建筑面积约为329.7 m²,采暖面积为152.5 m²。建筑物围护结构传热系数见表1,所建超低能耗办公建筑模型如图1(a)所示。该建筑物基础形式为桩-筏基础,桩基为16根PRC预应力混凝土管桩,混凝土强度等级为C80,筏板为500 mm厚度C30抗渗混凝土,管桩内埋设15.0 m长度PE25换热管,采用M15

表1 围护结构传热系数及构造措施

Table 1 Heat transfer coefficients and construction plans of building envelope

类型	外墙	屋顶	楼板	外窗
传热系数/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	0.25	0.28	0.95	2.20
构造措施	200 mm 蒸汽混凝土砌块+15 mm 水泥砂浆+100 mm 岩棉板	120 mm 钢筋混凝土+10 mm 岩棉板+20 mm 水泥砂浆+35 mm 细石混凝土+10 mm 块瓦	100 mm 钢筋混凝土+120 mm 细石混凝土+20 mm 水泥砂浆+20 mm 挤塑聚苯板	6 mm+12A+6 mm 中空玻璃

型水泥砂浆回填。钻孔埋管敷设形式为垂直单U形,钻孔直径为200 mm,钻孔间距为5.0 m,循环液为水,桩基埋管与钻孔埋管平面布置如图1(b)所示。

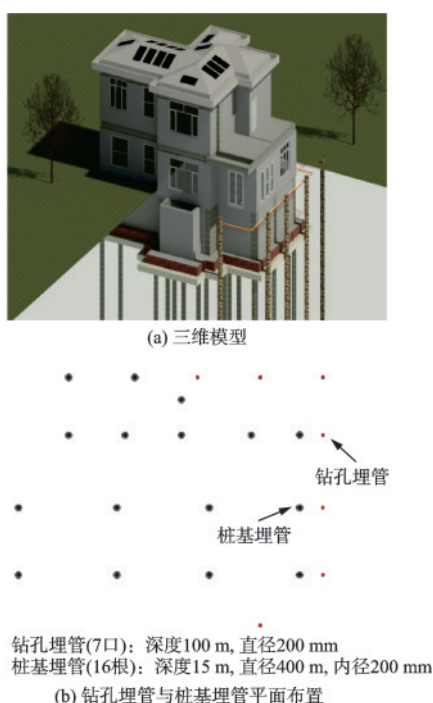


图1 超低能耗建筑及能量桩模型与平面布置

Fig.1 Model and layout plan of ultra-low-energy building with energy piles

1.2 超低能耗建筑逐时负荷计算

河南平舆所处地区为夏热冬冷地区,天气文件为Meteonorm软件导入的TMY2格式文件,全年平均温度为15.9℃。极端最低温度为-7.7℃,极端最高温度为37.7℃,夏季室内设计温度为26.0℃,室内相对湿度为65%,冬季采暖温度为20.0℃,冬季不考虑相对湿度。计算步骤包括:

(1)SketchUP软件创建各个热工分区,通过识别窗户与门构件,将建筑划分为不同的热工分区,其中一层热工分区为5个,二层热工分区为3个。

(2)设置人员、设备、灯光等内热扰^[19-20],内热扰与工作日相关联。

(3)搭建负荷输出系统,冷负荷考虑了潜热负荷,降温原理为:先除湿再降温。

对该超低能耗建筑1年的负荷进行模拟,过渡季节如春秋两季仅依靠室外通风,可获得较为舒适的环境。全年逐时负荷如图2所示;该建筑物全年最大热负荷和冷负荷分别为15.87 kW和29.47 kW,全年累计热负荷和冷负荷分别为 5.75×10^7 kJ和 7.02×10^7 kJ,全年累计冷负荷大于全年累计热负荷,计算得负荷不平衡率约为18.1%。

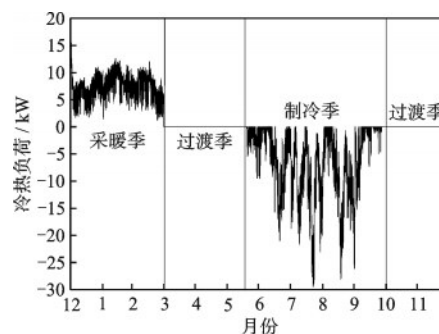


图2 全年冷热负荷分布

Fig.2 Distribution of annual cooling and heating load

1.3 地源热泵与空气源热泵系统供给端建立

地源热泵(桩基埋管联合钻孔埋管)系统供给端如图3所示。①超低能耗办公建筑1号冷热源由地源热泵机组提供;②超低能耗办公建筑2号冷热源为模块式风冷机组提供,输出末端均为两管制风机盘管。由图3可知,地源热泵系统由水平集管、分集水器和循环水泵组成。地源热泵机组采用type927模块,源侧为地温土壤中的能量,通过循环水来提取地热,供给冷热源。地埋管系统水平集管距离室外地坪0.8 m,能量桩水平集管距室外地坪4.5 m,钻孔埋管与能量桩系统采用并联的方式,通过分水器将回水分别输送至地埋管系统、能量桩系

统与土壤进行换热,采用埋管与能量桩地下管线总长度确定进出口流量比为3:1。通过地源侧水泵,将管内的水泵送至地源热泵机组内。1号地源热泵机组装机位置在地下室一层;空气源热泵机组必须装在室外以保证进风量。地源热泵机组可根据季节调控,经过分水器分别产生制热分流与制冷分流,并分别输送至相应的风机盘管,实现房间冷热需求,经过换热的水,可通过集水汇总泵送至缓冲水箱,完成一个循环。

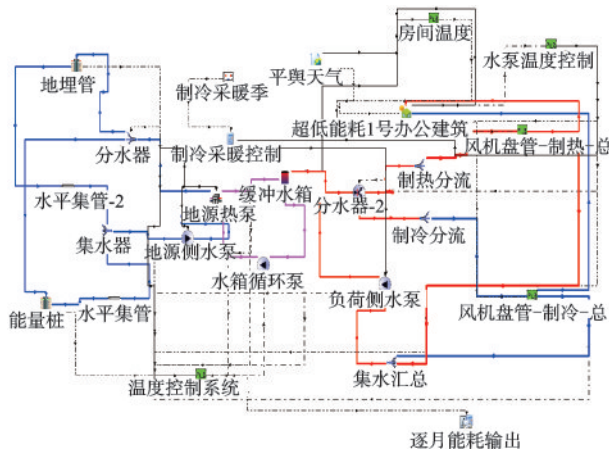


图3 地源热泵系统 TRNSYS 模拟

Fig.3 TRNSYS simulation of ground-source heat pump system

空气源热泵系统如图4所示,包括源侧和负荷侧,源侧由空气源热泵吸收空气中的能量,负荷侧为风机盘管输出冷热风。系统中房间温度的控制模式为“Temperature level”,通过风机盘管加热或制冷后的空气输送到房间内,如空气温度、流

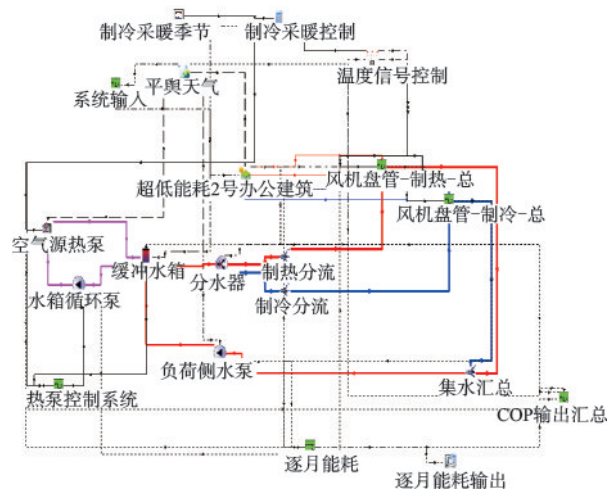


图4 空气源热泵系统 TRNSYS 模拟

Fig.4 TRNSYS simulation of air-source heat pump system

量、相对湿度等参数,实现房间温度控制^[21]。制冷采暖的转换控制采用Type19部件,利用输出的函数的不同进行转换。Type689温度信号控制部件,可监测各个房间内的温度,并将识别到的温度与加热死区温度的范围做对比,若符合制热条件,则输出加热信号,开启水泵。具体控制流程如下:经过空气源热泵加热后的水,供给到分水器实现制热分流与制冷分流;经过加热与制冷后的水,将水温与流量参数供给到风机盘管,而后风机盘管将输出的温度、湿度、流量等参数反馈到房间,以实现房间温度的控制。由于该系统管线中水量较少,设置缓冲水箱,物理水箱模型具有固有的时间延迟和非理想性,添加水箱可以重建这些非理想状态,显著提高控制策略的稳定性,并使计算更加稳定。

1.4 系统运行可行性分析

地源热泵与空气源热泵系统运行结果如图5所示。由图5可知,地源热泵和空气源热泵系统可将冬季水箱温度稳定控制在44~46℃,满足负荷侧风机盘管的供热需求,可使房间的温度稳定在20℃左右;夏季水箱温度控制在7℃,满足负荷侧风机盘管

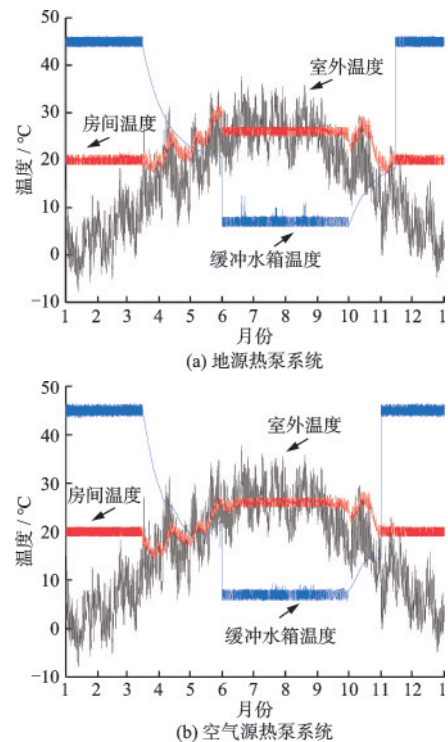


图5 热泵系统房间、水箱温度

Fig.5 Temperatures of room and water tank in heat pump systems

制冷需求,可使房间温度稳定在 26 °C 左右;对于过渡季节,房间温度会随着室外温度的上升而上升,可采用通风的方式,降低室内房间温度,获得较为舒适的环境。

2 研究结果与分析

2.1 地源热泵与空气源热泵全年能耗分析

空气源热泵与地源热泵的 COP(制热能效比)与 EER(制冷性能系数)对比结果如图 6(a)所示;空气源热泵的制热 COP 和制冷 EER 分别为 2.5 和 3.0,桩基埋管联合钻孔埋管地源热泵 COP 和 EER 分别为 4.0 和 5.2,可见地源热泵系统更能发挥节能作用。采暖季设置为 12 月 1 日至 2 月 28 日,制冷季为 5 月 15 日至 10 月 1 日;由图 6(b)可知,空气能热泵机组的能耗比地源热泵机组的能耗大,而地源热泵机组的总水泵能耗大于空气能热泵机组。1 月份采暖需求最大,空气能热泵机组与地源热泵机组的制热能耗分别达到 1 826 kWh 和 1 220 kWh,地源热泵机组节能约 33.1%;7 月份制冷需求达到最大,空气能热泵机组与地源热泵机组能耗分别为 670 kWh 和 512 kWh,地源热泵机组节能率约 21.6%。以达

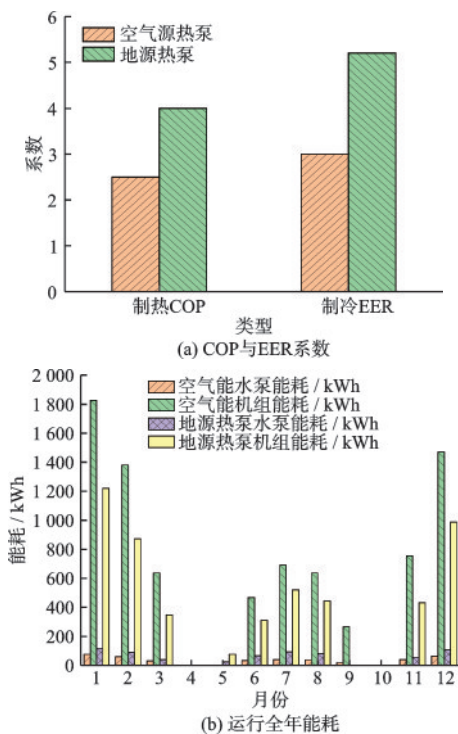


图 6 热泵系统性能系数与能耗

Fig.6 Performance coefficients and energy consumption of heat pump systems

到全年制冷采暖需求为标准,对比全年总能耗结果可以得出,空气源热泵机组与地源热泵机组总能耗分别为 8 521 kWh 和 5 874 kWh,地源热泵机组节能率为 31.1%。

2.2 地源热泵系统对土层温度的影响分析

对于地源热泵系统,需进行长期运行条件下,对土壤温度变化规律的分析。平舆地区处于夏热冬冷地区,热负荷大于冷负荷。由图 7 可知,随着制冷季释热不断进行,土壤吸收室内排放的热量,导致土壤逐渐升高;采暖季时,土壤温度随着取热的不断进行,温度逐渐降低,得出结论为:释热比取热更易进行。埋管系统制冷季进出口水温最大差值为 -5.78 °C,原因是受天气影响使用户侧负荷较大,进而使得供回水温差波动较大,埋管供回水温差在 3.0 °C 左右。在不考虑春秋两过渡季的采暖/制冷需求,经过一个制冷季埋管土层温度由 15.38 °C 上升至 17.22 °C,土层温度上升 1.84 °C。之后进入秋季过渡季节,土层平均温度回随季节下降。埋管系统采暖季进出口水温最大差值为 2.41 °C,在经过一个采暖季埋管土层温度由

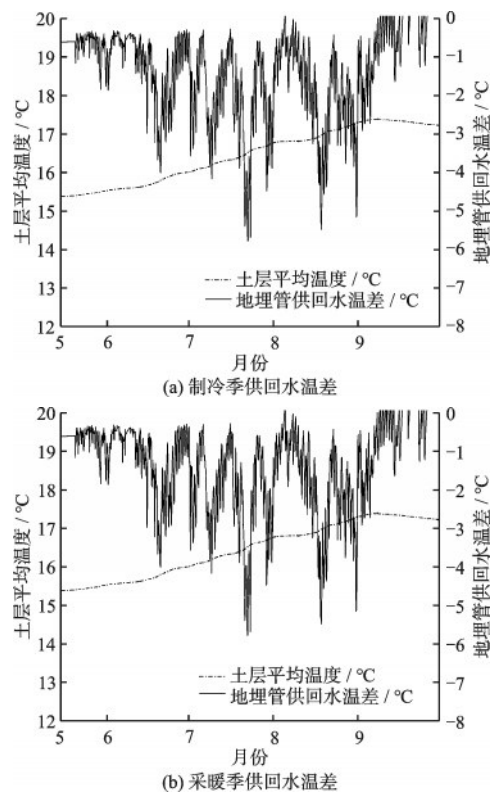


图 7 埋管土层平均温度及供回水温差

Fig.7 Average soil temperatures and temperature differences between supply and return water of buried pipes

16.91℃下降至15.51℃,土层温度下降1.40℃。地埋管系统运行1年后,土层平均温度上升约0.40℃。

由图8可知,冬季负荷侧的出水温度可稳定在45℃,负荷侧回水温度在42~43℃,夏季负荷侧的出水温度会稳定在7℃,负荷侧的回水温度在8~10℃,可保证冬季房间温度在20℃、夏季房间26℃,相对湿度65%人体的舒适范围。在过渡季节,超低能耗建筑可通过室外的通风,获得良好的室内舒适环境。

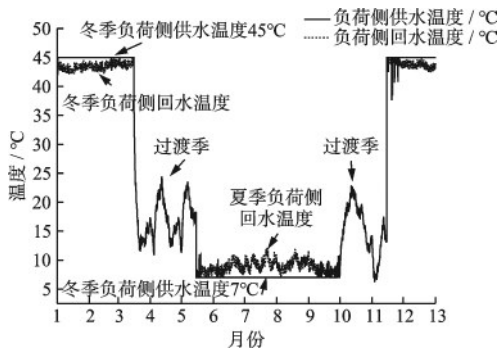


图8 负荷侧供回水温度

Fig.8 Temperature of supply and return water on load side

系统运行10年后土层温度变化如图9所示;能量桩的土体位于较浅层,且受地埋管与换热桩同时取热的影响,其温度的变化幅度较大。能量桩系统土层平均温度由15.90℃上升至17.40℃,地埋管系统土层平均温度由15.90℃上升至18.00℃。温度变化的原因如下:由夏季进入过渡季节,不再向土层排热,土层温度会随着季节变化有一定的回落,而到达采暖季,随着取热的进行,土层温度下降的明显比过渡季速率快,且深度越深温度的季节性波动越小,温度达到最大值的时间滞后越长,深部的土层温度受影响较小。

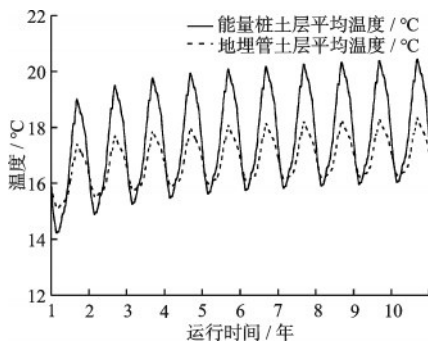


图9 地埋管系统10年仿真分析结果

Fig.9 10-year simulation analysis results of buried pipe system

2.3 经济性分析

根据上文的能耗结果,针对空气源热泵和地源热泵的经济性进行评价。经济性评价指标可分为静态和动态评价指标,本文采用动态年值费用法^[22]来评价地源热泵的经济效益。

动态费用年值法的计算公式:

$$A_e = \frac{i(1+i)^k}{(1+i)^k - 1} \times C_m + C_n \quad (1)$$

式中, A_e 为年计算费用,万元/年; i 为年利率, $i=8\%$; C_m 为设备初始投资,万元; C_n 为年经营成本,万元; k 为设备使用年限, k 取值20年。

地源热泵系统的初始投资 C_m 由设备费用 C_{ep} ,竖直钻孔费用 C_{zk} ,换热管材费用 C_{pe} ,三部分组成。

$$C_m = C_{ep} + C_{zk} + C_{pe} \quad (2)$$

式中, C_{ep} 为主机费用43000元; C_{zk} 钻孔费用取决于地质情况,对于土层取60元/m,对于岩石层取120元/m,若在桩基内埋管,则不需要钻孔费用,可充分利用预制桩内的空间,本项目在桩基内埋设换热管长度为240m,钻孔埋管长度为700m,预计可节约25%的初始钻孔费用; C_{pe} 为换热管费用。

C_n 根据平舆阶梯电价政策:第一档执行0.56元/千瓦时的电价;第二档执行0.61元/千瓦时的电价;第三档执行0.86元/千瓦时的电价。空气源热泵系统的年运行费用为6440元,地源热泵用电为光伏发电。

通过计算,地源热泵设备初始投资12.45万元,费用年值为1.34万元,空气源热泵机组的初始投资为8万元,费用年值为1.46万元,地源热泵机组初始投资较大,但在长期运行地源热泵机组年值费用提升了8%,具有良好的经济效益。

3 结论

考虑建筑实际的逐时负荷情况,基于Reivt建模,完成地埋管供回水管线走向、混凝土算量以及现场预留孔洞等以实现超低能耗建筑的可视化;通过TRNSYS仿真系统,对建筑的长期运行进行了模拟,可以得出如下几点结论:

(1)本文提出的桩基埋管联合钻孔埋管地源热泵系统,可提供更可靠的温度输出,消耗部分低品质的能源,获得更多的高品质能源。

(2) 本文的埋管联合能量桩系统是满足采暖/供冷需求, 可将冬季房间采暖温度控制在 20℃, 夏季控制在 26℃, 土层温度经过一个制冷季上升 1.84℃, 经过一个采暖季下降 1.40℃, 土层的温度会随着取热放热出现下降或上升的趋势, 但过渡季的存在, 使土层温度发生季节性波动, 利于长期运行。

(3) 在管桩内敷设换热管, 埋管耦合能量桩系统, 使钻孔费用降低了 25%, 且埋管耦合能量桩地源热泵系统比空气源热泵系统的节能率超过 30%, 达到高效空调系统目的, 利于节能减排。

参考文献:

- [1] Bae S, Nam Y. Comparison between experiment and simulation for the development of a Tri-generation system using photovoltaic-thermal and ground source heat pump[J]. *Energy & Buildings*, 2021, 231:110623.
- [2] Wang Q, Zhang X, Zhang H, et al. Optimization of solar-assisted GWHP system based on the Trnsys model in cold regions [J]. *Renewable Energy*, 2022, 196: 1406-1417.
- [3] 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 等. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1):1-9.
Wang G L, Liu Y G, Zhu X, et al. The status and development trend of geothermal resource in China[J]. *Earth-Science Frontiers*, 2020, 27(1): 1-9. (in Chinese)
- [4] 李晓燕, 于佳文, 杜世强, 等. 严寒地区土壤源热泵地下水平埋管换热性能影响研究[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(3):544.
Li X Y, Yu J W, Du S Q, et al. Study on the performance impact of horizontal buried pipes heat exchanger in severe cold area [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2014, 35(3): 544. (in Chinese)
- [5] 陈乐, 王尔觉, 郭易木, 等. 竖直埋管及桩基内埋管换热器传热模型研究进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2017, 37(4):557-564.
Chen L, Wang E J, Guo Y M, et al. Review of analytical models for vertical-borehole ground heat exchangers and energy piles[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2017, 37(4): 557-564. (in Chinese)
- [6] 王子红, 郭亮亮, 周雪雨, 等. 严寒地区中深层埋管换热影响因素及可持续性研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(9):483-491.
Wang Z H, Guo L L, Zhou X Y, et al. Study on influencing factors and sustainability of heat exchange of middle-deep geothermal energy in severe cold region [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2023, 44 (9) : 483-491. (in Chinese)
- [7] 张哲菲, 刘洪涛, 刘攀峰, 等. 中深层地热埋管实际运行影响因素研究[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(12): 503-509.
Zhang Z F, Liu H T, Liu P F, et al. Study on actual operation and influencing factors of middle-deep geothermal buried pipe [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2022, 43(12): 503-509. (in Chinese)
- [8] 张宇航, 孙博, 张小松, 等. 住宅地源热泵系统设计及冬季运行性能分析[J]. *制冷学报*, 2020, 41(5):89-95.
Zhang Y H, Sun B, Zhang X S, et al. Design and performance analysis under winter condition of a residential-ground-source heat pump system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(5): 89-95. (in Chinese)
- [9] 倪龙, 周超辉, 姚杨, 等. 空气源热泵蓄热系统形式及研究进展[J]. *制冷学报*, 2017, 38(4):23-30.
Ni L, Zhou C H, Yao Y, et al. Research progress of air source heat pump heat storage system[J]. *Journal of Refrigeration*, 2017, 38(4): 23-30. (in Chinese)
- [10] Kong G, Chang H, Wu D, et al. Effects of pile configuration on the group behavior of semi-floating energy piles [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 77:107487.
- [11] Kong G, Cao T, Hao Y, et al. Thermomechanical properties of an energy micro pile-raft foundation in silty clay[J]. *Underground Space*, 2021, 6:76-84.
- [12] 戴国豪, 孔纲强, 钟国, 等. 国内外能量桩技术标准对比分析与探讨[J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(5): 945-952.
Dai G H, Kong G Q, Zhong G, et al. Comparative analysis on technical standards of energy piles[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42(5): 945-952. (in Chinese)
- [13] 魏叶青, 孔纲强, 张继兵, 等. 间歇或连续运行下能源管廊热力响应特性现场试验 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2022, 42(3): 579-585.
Wei Y Q, Kong G Q, Zhang J B, et al. Field tests on thermal responses of energy utility tunnel under intermittence or continuous operation mode[J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2022, 42 (3): 579-585. (in Chinese)
- [14] 尚少文, 朱天然, 刘兵红, 等. 基于 TRNSYS 的埋管换热器温度场变化规律研究[J]. *沈阳建筑大学学报*

- (自然科学版), 2017, 33(4): 744-750.
- Shang S W, Zhu T R, Liu B H, et al. Research on the change law of temperature field of TRNSYS-based buried tube heat exchangers[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33(4): 744-750. (in Chinese)
- [15] Sun C, Ju X, Hao W, et al. Research on multi-objective optimization of control strategies and equipment parameters for a combined heating system of geothermal and solar energy in cold and arid regions based on TRNSYS[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 50:103441.
- [16] 陈剑波, 王坛, 曲明璐. 上海地区地源热泵单U型埋管运行特性研究[J]. 建筑节能, 2015, 43(297):5-11.
Chen J B, Wang T, Qu M L, et al. Operating performance of single U-tube buried pipe of ground-source heat pump in Shanghai [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(297): 5-11. (in Chinese)
- [17] Chen Y, Kong G, Xu X, et al. Machine-learning-based performance prediction of the energy pile heat pump system [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 77: 107442.
- [18] Kaneko C, Yoshinaga M. Long-term operation analysis of a ground source heat pump with an air source heat pump as an auxiliary heat source in a warm region [J]. Energy & Buildings, 2023, 289:113050.
- [19] 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [20] 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [21] Safa A A, Fung A S, Kumar R. Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation [J]. Renewable Energy, 2015, 83:565-575.
- [22] 黄凯良, 侯旭, 冯国会. 基于 TRNSYS 的严寒地区地热辅助的空气源热泵系统研究[J]. 流体机械, 2023, 7(51):83-90.
Huang K L, Hou X, Feng G H, Study on geothermal-assisted air source heat pump system in cold region based on TRNSYS [J]. Fluid Machinery, 2023, 7(51): 83-90. (in Chinese)

(本文编辑:张艺)