

光热提温地源热泵系统最佳效率分析

孟巾帼¹, 丑雪松^{2*}, 王杨洋²

¹吉林建筑科技学院科研处, 吉林, 长春

²吉林建筑科技学院能源与环境工程学院, 吉林, 长春

收稿日期: 2024年9月19日; 录用日期: 2024年10月14日; 发布日期: 2024年11月15日

摘要

太阳能耦合地源热泵系统是一种将太阳能光热系统与地源热泵供暖系统相结合, 并利用太阳能光热系统直接供暖后所余下的不可再为建筑供暖的“低温水”为地源热泵机组源侧提温继续为室内供暖, 从而来提升热泵机组性能和提高可再生能源利用率的能源系统。本文通过实验进行数据整理分析, 当蓄热水箱温度达到35℃时, 着手运行源侧提温供暖系统模式为建筑供暖。并分析水箱温度从35℃持续下降期间, 机组效率与水箱温度的关系以及计算出比较35℃时, 机组最佳效率时性能提升率情况。实验结果表明: 在水箱温度由35℃降至15℃的三组实验期间, 地源热泵平均制热效率与水箱的出水温度呈线性关系。在35℃~25℃区间, 制热效率随温度的降低而升高, 25℃时平均效率达到最高的3.85。热泵机组的性能参数提升率为14.2%, 之后效率随温度的降低而降低。

关键词

太阳能光热系统, 地源热泵系统, 制热效率

Optimal Efficiency Analysis of Solar Thermal Heating Ground Source Heat Pump System

Jinguo Meng¹, Xuesong Chou^{2*}, Yangyang Wang²

¹Scientific Research Department, Jilin University of Architecture and Technology, Changchun Jilin

²School of Energy and Environmental Engineering, Jilin University of Architecture and Technology, Changchun Jilin

Received: Sep. 19th, 2024; accepted: Oct. 14th, 2024; published: Nov. 15th, 2024

Abstract

The solar coupled ground source heat pump system is an energy system that combines a solar thermal system with a ground source heat pump heating system, and uses the remaining “low-

*通讯作者。

temperature water” that cannot be used for building heating after direct heating by the solar thermal system to heat the source side of the ground source heat pump unit and continue to provide indoor heating, thereby improving the performance of the heat pump unit and increasing the utilization rate of renewable energy. This article conducts data sorting and analysis through experiments. When the temperature of the thermal storage water tank reaches 35°C, the source side heating system mode starts to operate as building heating. The relationship between unit efficiency and water tank temperature during the continuous decrease of water tank temperature from 35°C is analyzed, and the performance improvement rate at the optimal efficiency of the unit when compared to 35°C is calculated. The experimental results showed that during the three experimental periods when the water tank temperature decreased from 35°C to 15°C, the average heating efficiency of the ground source heat pump was linearly related to the outlet temperature of the water tank. In the temperature range of 35°C~25°C, the heating efficiency increases with the decrease of temperature, and the average efficiency reaches the highest of 3.85 at 25°C. The performance parameter improvement rate of the heat pump unit is 14.2%, and then the efficiency decreases with the decrease of temperature.

Keywords

Solar Thermal System, Ground Source Heat Pump System, Heating Efficiency

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景与意义

为了应对气候的不确定变化，减少温室气体的不明排放，需要开发更环保节能的能源技术，而太阳能耦合地源热泵供暖系统正契合这一主题。太阳能作为一种丰富且可再生的能源取之不尽，是当今尤其被重视的可再生能源，但会受到天气气候影响而导致不稳定供热；而地源热泵可以持续稳定地高效供热，但长期单独运行可能会使地下土壤温度失衡从而降低热泵机组制热效率的问题。在这种严峻的问题下，将太阳能与地源热泵耦合起来，可以充分利用两者的优势，取长补短，在提高机组制热效率、节约能耗的情况下也能做到降低碳排放、缓解环境压力，推动可持续发展理念。尤其我国北方寒冷乡村地区依靠火炕、火炉等传统的采暖方式。近年来虽然有些乡村地区已经大量使用气代煤的方式进行清洁能源替代，但仍存在一些问题[1]。而北方丰富的太阳能与地热能资源会为乡村地区开拓一种新型供暖模式。且高效低能耗的运行方式也是清洁能源技术应用中重要的一环，在解决环保问题的同时，对我国“双碳”目标的发展具有重大意义。

对于太阳能耦合地源热泵供暖系统国内外也有着许多研究。关于太阳能、地热能的利用，国外研究相对较早，1956年，Calise等[2]通过软件模拟对太阳能辅助地源热泵供暖系统的运行效率做了研究，结果表明系统热效率可以达到40%以上；Verma等[3]提出一种太阳能耦合地源热泵供暖模式：日间利用太阳能对土壤蓄热，夜间利用储存的能量与土壤自身的能量进行供暖，有效地提升了系统COP。国内起步相对较晚，但也逐渐步入正轨。Yang等人[4]采用三种混合模式对太阳能耦合地源热泵系统进行了比较，研究结果表明，在蓄热和不蓄热的情况下，地源热泵在耦合模式下运行较传统地源热泵分别节约了14.5%和10.4%的能量。

2. 系统简介

太阳能耦合地源热泵系统是指将太阳能光热系统与地源热泵系统有机结合在一起，共同为建筑物提

供供暖服务的一种综合能源利用系统。在此系统中，太阳能集热器通过室外循环收集热量可直接用于太阳能直接供暖，而当储热水箱内水温不足以为室内供暖时，则是通过地源热泵供暖系统继续为建筑提供热量。但为了进一步提高热泵机组的制热效率以及充分利用太阳能。当太阳能储热水箱无法满足室内供暖的最低限值时(该建筑光热供暖、储热水箱出水温度应高于 35°C)，通过水箱内利用后的“低温水”与地源热泵源侧溶液进行换热，换热提温后的溶液进入热泵机组的源侧蒸发器。二者相互配合可以实现更高效、稳定、可持续的供暖效果，充分发挥地能与太阳能的结合，提高可再生能源利用的同时也能提升地源热泵供热效率。本文主要研究当太阳能光热为地源热泵源侧提温时，太阳能蓄热水箱提供的温度与地源热泵制热效率之间的关系。进而发现光热提温地源热泵系统，储热水箱出水的最佳温度以及机组的最佳效率。图 1 为建筑太阳能光热耦合地源热泵系统的流程图。

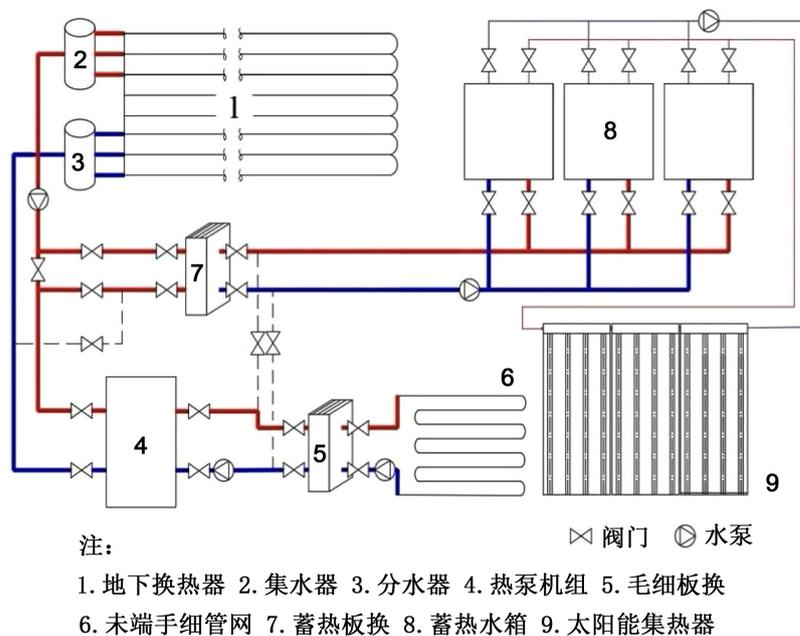


Figure 1. Process diagram of solar coupled ground source heat pump system
 图 1. 太阳能耦合地源热泵系统流程图

3. 运行测试

3.1. 实验内容

本次的实验建筑为国家级近零能耗建筑，位于严寒地区，建筑面积 1200 m^2 。建筑内部含有多种清洁能源供暖系统：太阳能光热系统室外集热系统共有 48 组集热器，集热面积为 158.4 m^2 ；地源热泵系统源侧共有 122 口 100 m 浅层地埋井用于建筑供暖，两套供暖系统可耦合使用。建筑采用高性能的外围护结构，墙体传热系数小于 $0.15\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ，窗体传热系数小于 $0.8\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ；末端采用毛细管辐射供暖/供冷系统，冬季室内设计温度为 20°C ，热水温度与室内温差为 11°C ，热水均温为 31°C ，故供暖供回水温度为 $30^{\circ}\text{C}/32^{\circ}\text{C}$ 就能满足房间的制热需求。因此该建筑的供暖原则为优先使用太阳能光热系统，无法使用光热系统直接供暖后，采取太阳能耦合地源热泵提温系统，最后采用地源热泵直接供暖系统。考虑到毛细管板式换热器会有热量损失的前提下，蓄热水箱以及热泵机组的出水水温设定在 35°C 。实验期间先在日间正常运行太阳能室外循环为水箱蓄热以及为建筑太阳能光热直接供暖。当水箱温度达到 35°C 左右时，停

止室外循环以及室内供暖，并使其一直维持在 35℃左右，为提温实验做好前期准备。如果由于自然温降导致水箱温度不能维持在 35℃，会在提温系统运行前为其电辅助加热至 35℃。并在提温实验运行前 2 h，启动地源热泵系统，保证在实验期间，机组运行稳定。

3.2. 实验数据

实验期间所需测得的数据包括：蓄热水箱温度、水箱供回水温度，蓄热循环流量、蓄热水泵能耗；地源侧供回水温度、流量以及源侧水泵能耗；负荷侧供回水温度、流量以及负荷侧水泵能耗；毛细管网末端供回水温度、流量以及末端水泵能耗；热泵机组能耗等。所用到的实验仪器为机房中的能耗表，管道上的温度传感器以及电磁流量计等设备。设备具体参数见下表 1。数据采集由建筑内监测系统记录并整理，数据更新周期为 5 s/次。由于温度传感器的温度变化以 0.07℃/次进行温度增减，因此在挑选蓄热水箱出水温度时，以接近整数温度的数据计算。即 32.15℃、32.08℃、32.01℃、31.94℃四组数据中，以 32.01℃这一时刻的这组数据进行计算。

Table 1. Data collection equipment and operating equipment parameter information table

表 1. 数据采集设备以及运行设备参数信息表

序号	设备名称	参数信息
1	温度传感器	型号：GL-131WD-C4；温度范围：0℃~100℃
2	三相四线电子式电能表	型号：DTSU666 型
3	电磁流量计	型号：NRLD-100；流量范围：3~100 m ³ /h；口径：100 mm
4	地源热泵机组	型号：VKC100WR7010AA8；制热量 110 kW，制热功率 27.2 kW
5	太阳能蓄热水泵	型号：KQW65/125-3/2；功率 3 kW，流量 19 m ³ /h，扬程 20 m
6	地源热泵系统源侧水泵	型号：KQW65/160-4/2；功率 4 kW，流量 29 m ³ /h，扬程 23 m
7	地源热泵系统负荷侧水泵	型号：KQW65/125-3/2；功率 3 kW，流量 25 m ³ /h，扬程 18 m
8	地源热泵系统末端水泵	型号：KQW65/300-3/4；功率 3 kW，流量 13 m ³ /h，扬程 21 m

3.3. 实验方案

为了避免实验结果具有偶然性，实验共分为工况相同的三组，即每组实验的条件几乎一致。提温供暖运行时间为室外无太阳辐射量后的 1 h~2 h，热水箱温度起始均为 35℃，室内环境温度均保持在 21℃ ± 0.5℃左右(实验前人为调节)，在无太阳辐射影响的前提下，选择室外环境温度为 -20℃ ± 1℃左右的三个时间点进行提温供暖实验。每组实验数据记录时间间隔一致，所用设备相同，计算方法一致，分析的结论内容相同，仅运行环境条件略有细微的差别。正常的太阳能光热系统直接供暖之后，采取该模式下的运行。蓄热水箱温度均由 35℃开始与地源侧溶液换热，随着供暖的持续进行，水箱出水温度持续下降，记录蓄热水箱出水温度从 35℃下降的每个具体时刻温度下(即 35℃、34℃、33℃……)对应的上列数据，在实验记录结束后，将数据整理起来，并计算出各个温度时刻下对应的热泵机组制热效率值，再进行分析将效率随温度的运行规律分析出来。

4. 数据分析

太阳能提温地源热泵供暖系统的机组制热效率受到多种因素的影响，包括地下土壤温度、系统负荷、运行时间、水箱出水温度、运行控制策略等多种因素影响。但本文实验为短期实验，即在室外工况相差不大的条件下进行，土壤温度并不会发生变化，系统负荷在实验期间均保持一致。本次仅研究通过计算

太阳能蓄热水箱出水温度变化的同时所对应的地源热泵机组制热效率值的变化规律。讨论太阳能提温地源热泵供暖系统中热泵机组最佳制热效率下所对应的水箱出水温度值以及较常规地源热泵供暖系统，制热效率提升率情况。

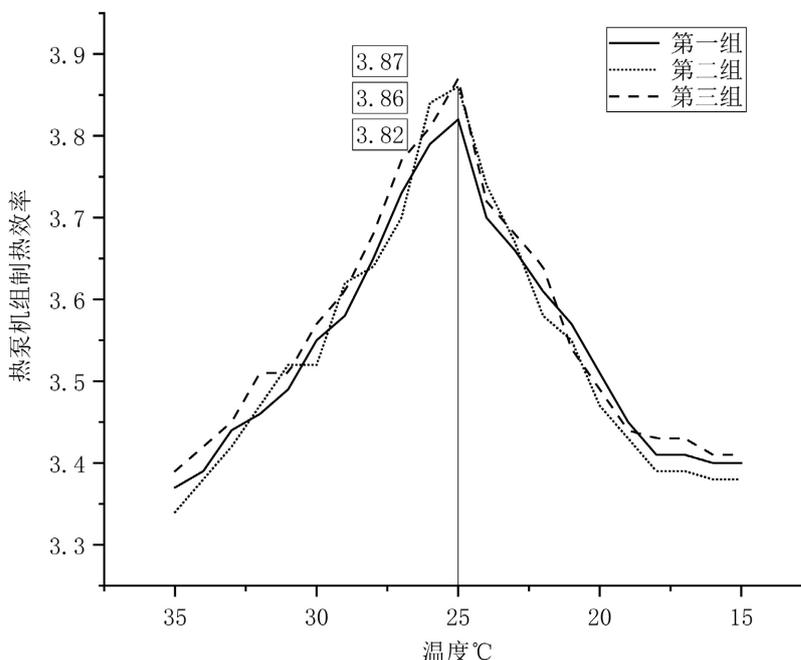


Figure 2. The relationship between heating efficiency and water tank outlet temperature under coupling

图 2. 耦合下制热效率与水箱出水温度关系

如图 2 所示，本图为在整理耦合供暖下不同水箱出水温度下对应的机组制热效率曲线，可以清晰地看到不同水箱出水温度下对应的效率值，为了防止数据具有偶然性，在相同工况下做了 3 组提温供暖实验。从图中看到，水箱出水温度为 35°C 时对应的效率值分别为 3.37、3.34、3.39，出水温度为 25°C 时对应的 COP 值达到顶峰，分别为 3.82、3.86 以及 3.87，在此温度区间内，水箱出水温度逐渐地降低，热泵机组蒸发器侧入口溶液的温度随着不断的换热而升高，导致机组制热效率也逐渐地升高。三组实验在出水温度 25°C 时机组制热效率均达到最高，平均为 3.85。经由太阳能光热提温地源热泵供暖系统后，热泵机组制热效率最高可提升 14.2%。随着出水温度由 25°C 继续降低，机组效率也随之降低，在出水温度下降到 15°C 左右时，此时机组在运行时出水温度无明显变化，说明耦合提温已无意义。

从图中可以看出太阳能-地热能耦合提温下的机组制热效率随水箱出水温度下降的变化趋势是先上升，在上升到最大值时开始逐渐下降，在水箱温度为 25°C 时效率值达到最大平均为 3.85。由于水箱出水温度从 35°C 降到 25°C 时，在这段时间内，储热水箱可以传递高效稳定适宜的热量给热泵源侧端溶液换热提温，因此这时的制热效率在逐渐增大并在 25°C 达到最大；而从 25°C 到 15°C 时，储热水箱内的温度在下降，随着热泵源侧端的溶液温度不断的升高，导致板式换热器的两侧溶液温差在逐渐减小，储热水箱不再能够传递足够多的热量，用以持续提高源侧溶液温度，制热效率值也在逐渐降低，直至耦合提温模式与地源直供模式无差别。

5. 总结

太阳能提温地源热泵供暖系统中，三组实验均体现出：随着提温实验的进行，当蓄热水箱出水温度

达到 25℃时，热泵机组的制热效率达到最高值，平均为 3.85，较常规地源热泵直接供暖系统的机组制热效率提升 14.2%。此次结论为近零能耗建筑双能耦合供暖系统的自控系统的最佳运行方案逻辑提供了一份可靠的数据支撑。

推进北方地区冬季清洁取暖，是党中央、国务院为保障广大群众温暖过冬、深入打好蓝天保卫战做出的一项重要决策部署，是一项重大民生工程、民心工程。为加强农村地区冬季清洁取暖技术服务，发挥好农村可再生能源在解决冬季清洁取暖的作用中太阳能耦合地源热泵供暖系统会是一个很好的选择，是一种低碳清洁的供暖方式，值得应用。因此文中所得到的结论会为之后的技术应用提供一个可借鉴性的经验，也为新型农村太阳能耦合地源热泵供暖系统的技术应用提出一个合理的高效运行方案。

在之后的发展中，这项系统的技术可能还会进行突破，与相变储热技术结合以及太阳能集热器的完善都会影响系统的整体性能。未来这项技术可能会应用到更加广阔的建筑领域上，为建筑的能源供应提供最稳定的帮助。而且对环境的保护愈加明显，减少传统能源、化石燃料的使用，在保障人们的体验时也对环境起着重大的作用，在满足人们的高品质需求的同时也保障着环境的共同发展。

基金项目

吉林省科技发展计划 2024 年度创新发展战略研究项目《清洁能源技术创新对吉林省绿色经济发展影响研究》(20240701098FG)。

参考文献

- [1] 薛道荣, 施得权, 张晶. 太阳能户用供暖技术在乡村振兴中的应用及效果分析[J]. 中国建筑金属结构, 2023, 22(6): 74-76.
- [2] Calise, F., Dentice d'Accadia, M., Figaj, R.D. and Vanoli, L. (2016) Thermoeconomic Optimization of a Solar-Assisted Heat Pump Based on Transient Simulations and Computer Design of Experiments. *Energy Conversion and Management*, **125**, 166-184. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.063>
- [3] Verma, V. and Murugesan, K. (2017) Experimental Study of Solar Energy Storage and Space Heating Using Solar Assisted Ground Source Heat Pump System for Indian Climatic Conditions. *Energy and Buildings*, **139**, 569-577. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.041>
- [4] Yang, W.B., Shi, M.H. and Dong, H. (2006) Numerical Simulation of the Performance of a Solar-Earth Source Heat Pump System. *Applied Thermal Engineering*, **26**, 2367-2376. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.017>