

Preliminary Study on Performance of Solar Energy-Ground Source Heat Pump Combined Heating Device

Guo Ma¹, Qi Zhao^{1,2*}, Shuyi Wang¹, Yong Zeng¹, Meng Wang¹, Haoxiang Song¹, Ling Lan¹, Zeyuan Cao¹

¹School of Energy and Power, Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin

²Jilin Province Construction Test Research Center for Source Supply and Indoor Environmental Control Engineering, Changchun Jilin

Email: *hithot2@163.com

Received: June 4th, 2019; accepted: June 19th, 2019; published: June 26th, 2019

Abstract

In this paper, solar energy and ground source heat pump are combined, and a solar energy-ground source heat pump combined heating device is proposed. Based on the analysis of its working principle and operation mode, the thermodynamic calculation model of the system is established. Case analysis shows that the system has good thermal performance and its dynamic payback period is 5.81 years, with good economy.

Keywords

Solar Energy, Ground Source Heat Pump, Heating, Economy

太阳能 - 土壤源热泵联合供热装置性能初探

马 果¹, 赵 麒^{1,2*}, 王舒艺¹, 曾 勇¹, 王 萌¹, 宋昊祥¹, 兰 玲¹, 曹泽源¹

¹长春工程学院, 能源动力工程学院, 吉林 长春

²吉林省建筑能源供应及室内环境控制工程研究中心, 吉林 长春

Email: *hithot2@163.com

收稿日期: 2019年6月4日; 录用日期: 2019年6月19日; 发布日期: 2019年6月26日

摘 要

本文联合太阳能和土壤源热泵, 提出了太阳能 - 土壤源热泵联合供热装置, 在分析其工作原理和运行模

*通讯作者。

文章引用: 马果, 赵麒, 王舒艺, 曾勇, 王萌, 宋昊祥, 兰玲, 曹泽源. 太阳能-土壤源热泵联合供热装置性能初探[J]. 电力与能源进展, 2019, 7(3): 39-45. DOI: 10.12677/aepe.2019.73005

式的基础上，建立了系统的热力计算模型。案例分析表明，系统具有良好的热力性能，且其动态回收期为5.81年，经济性良好。

关键词

太阳能，土壤源热泵，供热，经济性

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



1. 绪论

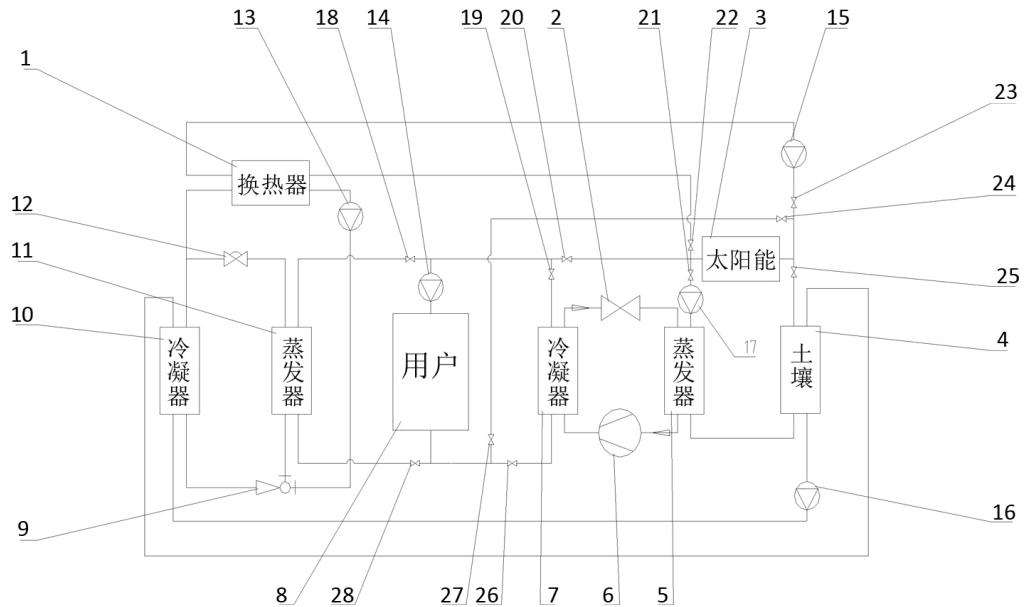
能源短缺问题一直是我国面临的巨大问题，对此我国国务院于2012年发布了《中国的能源政策》白皮书。该书明确地指出“维护能源长期稳定可持续利用，是中国政府的一项重要战略任务”[1]。在能源方面，随着我国对于能源问题的重视，二十一世纪以来我国新出台了《节约能源法》[2]、《可再生能源法》[3]等相关的法律法规来解决我国的能源问题。

本文提出一种太阳能-土壤源热泵联合供热装置，充分利用可再生能源，达到节能减排的目的。

2. 系统的提出

系统的组成：

太阳能-土壤源热泵联合供热装置，收集太阳能用于夏季制冷，并将多余的太阳能存储于土壤埋管中，在冬季将所收集能量来提供建筑热负荷，系统组成如图1。



换热器1；节流阀2；太阳能集热板3；土壤埋管4；第二蒸发器5；压缩机6；第二冷凝器7；热用户8；喷射器9；第一冷凝器10；第一蒸发器11；膨胀阀12；循环泵13~17；止回阀18~28

Figure 1. Benyang Energy-Ground Source Heat Pump Combined Heating Device

图1. 太阳能-土壤源热泵联合供热装置

系统的工作原理:

根据该系统的特点,有三种运行模式:

1) 夏季运行工况:热水经过太阳能集热板 3 充分加热后与换热器 1 进行换热。换热器 1 中输出的高温水经循环泵 13 与喷射器 9 相连接,由喷射器 9 出口的中温中压水通过管路流经第一冷凝器 10,与土壤埋管 4 进行换热。第一冷凝器 10 换热完毕的低温水一部分经过膨胀阀 12 进入第一蒸发器 11 用于吸取室内热量,最终被引射诱导入喷射器 9 中与高温水充分混合后进入第一冷凝器 10。另一部分低温水进入换热器 1。

2) 冬季运行工况一:当太阳能充足时,太阳能集热板直接给用户供暖。

3) 冬季运行工况二:当太阳能不足时,太阳能集热板 3 中的热水进入土壤埋管 4 先进行第一步加热,提高水温,再流经第二蒸发器 5,使第二蒸发器 5 中的冷凝剂蒸发,经过压缩机 6 提升能量品位后,进入第二冷凝器 7 充分释放热能给用户 8。冷凝剂由第二冷凝器 7 冷凝后经过节流阀 2 再流入第二蒸发器 5 中。

系统的优点:

1) 冬季太阳足时,太阳能直接与用户相连,为室内供热。

2) 冬季太阳不足时,蒸发器的水经土壤被土壤储存热量加热,再进入太阳能被进一步加热,随后进入压缩式热泵与冷凝器中的地热水混合为室内供热。

3) 在利用土壤中的热量时,与普通方法相比,无需消耗电能却得到了一样的效果,同时土壤中的热量取自夏季多余的太阳能,更加减少了电能消耗,使得低品位热能得到了充分的利用,与普通方法相比,更加节能减排。

本系统所述利用了可再生能源中的太阳能的热量,并采取了具有良好节能效果的土壤源热泵,使之与现有的传统散热器采暖和地板辐射采暖相比,节约冬季的供热能耗,降低供热系统的污染物排放,具有良好的经济和环境效益。

一、系统在采暖期充分利用了太阳能集热器收集到的可再生能源,降低系统的供热能耗,达到节能减排的显著效果。

二、在运行方面,加入了蓄热装置,可以使得在太阳能充足时储存剩余的热量,减少了向采暖系统的供水量;在太阳能不足时作为热源给室内采暖系统提供热量。实现太阳能充分的利用,节约了煤等不可再生资源,并且可以减少新建供暖锅炉的投资,减少对环境的污染。

三、土壤源热泵的使用使得在没有太阳能及太阳能提供热量不足时,能够照常给室内采暖系统提供热量,以备在太阳能不足的时候使用。

本系统已申请实用新型专利,专利正在受理中。

3. 数学模型

为计算系统的性能,建立如下数学模型。

太阳能集热器总面积[4]:

$$A_c = \frac{Q_w c \rho f (t_2 - t_1)}{J_t \eta_{cd} \eta_L} \quad (1)$$

式中: A_c 为直接式系统集热器总面积, m^2 ; Q_w 为用户日平均用热量, L ; c 为水的比热容; ρ 为热水密度, kg/L ; t_2 为储水箱内水的最终设计水温, $^{\circ}C$; t_1 为水箱进水温度, $^{\circ}C$; f 为太阳能保证率,根据系统使用期内的太阳辐射量、系统经济性及用户需求等因素考虑取值,一般范围在 30%~80%; J_t 为太阳能

集热器所在地集热器总面积上的年平均日或月平均日太阳辐照量, kJ/m^2 ; η_{cd} 为集热器年或月的集热效率, 具体取值根据产品实际测试结果而定; η_L 为管路及储热水箱热损失率, 经验值取值范围是 0.2~0.3。

真空管太阳能集热器流量计算[4], 太阳能集热系统的流量与太阳能集热器的特性有关, 一般由生产太阳能集热器的生产厂家给出。若没有相关参数, 则真空管型太阳能集热器取值在 $0.015\text{--}0.02\text{L}/(\text{s}\cdot\text{m}^2)$ 进行估算。根据能量守恒定律, 在稳定工况下, 真空集热管的能量平衡方程为[4]:

$$Q_A = Q_U + Q_L \quad (2)$$

式中, Q_A 为透射在集热管上的太阳辐照能量, W ; Q_U 为同一时段内集热管输出的有用能量, W ; Q_L 为同一时段内集热管对周围环境散失的热量, W 。

垂直埋管换热器换热量可由下式计算:

$$Q_e = Av\rho c\Delta T \quad (3)$$

$$q = \frac{Q}{l} \quad (4)$$

其中: Q_e 为垂直埋管换热器换热量; A 为 U 型管内径面积; v 为 U 型管水的进口流速; ρ 为循环水密度; c 为循环水比热容; ΔT 为水的进、出口温差; l 为钻井的深度; q 为单位井深换热量。

土壤侧的钻井数可由下式确定[5]:

$$n = \frac{4000G}{\pi v d_j^2} \quad (5)$$

式中: n 钻井数; G 机组水流量, l/s ; v 竖埋管管内流速, 假定流速 0.4 m/s ; d_j 竖埋管管内径, mm 。

地下埋管换热动态分析温度场变化由下式确定[5], 地下温度场变化, 采用线热源-常热流模型, 该模型将埋管在土壤中的传热看作为一恒定的线热源, 导体初始温度为 t_0 的无限长圆柱体的一维非稳态导热问题, 其温度解析式可表示为:

$$\Delta T_g = T(\tau, r) - T_g = \frac{q}{4\pi\lambda_s} I\left(\frac{r_2}{4\alpha_s T}\right) \quad (6)$$

式中: ΔT_g 为 τ 时刻半径 r 处的土壤与远边界温度之差, $^\circ\text{C}$; 当 r 为孔洞半径时即为孔洞壁面与土壤远边界温差; $T(\tau, r)$ 、 T_g 分别为 τ 时刻半径 r 处的土壤温度及土壤远边界初始温度, $^\circ\text{C}$; q 为单位长度埋管的热流, W/m ; α_s 为土壤的导温系数, m^2/s ; λ_s 为土壤导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; I 为指数积分函数, 其表达式:

$$I(X) = \int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = x - \ln(x) - C - \frac{x^2}{2 \times 2!} + \frac{x^3}{3 \times 3!} + \dots + \frac{(-1)^{n+1} x^n}{n \times n!} \left(x = \frac{r^2}{4\alpha_s \tau} \right) \quad (7)$$

式中: C 为欧拉常数, $C = 0.57726$ 。

热泵相关参数计算公式:

$$Q_c + W = Q \quad (8)$$

$$\text{cop} = \frac{Q_c}{W} \quad (9)$$

式中: Q_c 为系统的制热量, W 为系统的输入功率, cop 为系统的制热性能系数。

工程的总费用通常包括初投资和年运行费用两部分, 将初投资费用进行折算再与运行费用相加, 得出费用年值。其计算公式如下[6]:

$$Z = C_i \left| \frac{j(1+j)^n}{(1+j)^n - 1} \right| + C_r \quad (10)$$

式中： Z 为费用年值，元/年； C_i 为初投资，元； C_r 为年运行费用，元/年； j 为年利率，10%； n 为设备使用寿命，年。

净现值(NPV)指标是通过计算方案寿命期内每年发生的现金流量，并按一定折现率将各年的净现金流量折算到投资期初，将各年现值进行叠加就得到净现值，可由下式计算[7]：

$$NPV = \sum_{n=0}^n (CI - CO)_t (1+i)^{-t} \quad (11)$$

式中： CI 为流入净现金； CO 为流出净现金； i 为基准收益率； n 为设备的寿命期。

回收期反映了方案投资回收的速度。动态投资回收期是指方案净现金流量现值累计为零时的时间。回收期越短，说明方案越早的开始盈利，设备的寿命期内收益越多，动态投资回收期可由下式计算[7]：

$$PBP = m - 1 + \frac{\sum_{t=0}^{m-1} F_t (1+i)^{-t}}{F_m (1+i)^{-m}} \quad (12)$$

式中： m 为累计净现金流量首次为正值或零的年数； F_t 为第 t 年的净现金流量。

4. 算例分析

本文选择长春地区某 173 m² 的保温建筑为研究对象，冬季采暖热负荷为根据系统管道的循环水流量、各时刻的采暖热负荷等数据并参考相关文献[7]进行反复试算最终确定了一个最佳的集热器面积 90 m²。结合地质勘测报告，确定土壤埋管的相关计算参数，见表 1。

Table 1. Relevant parameters of soil buried pipes

表 1. 土壤埋管相关参数

热导率(w/m·k)	井深(m)	比热容(kJ/kg·k)	导热系数(w/m·k)	单位散热量(w/m)	直径(mm)	个数
1.99	150	9.46	2.97	29.63	100	5

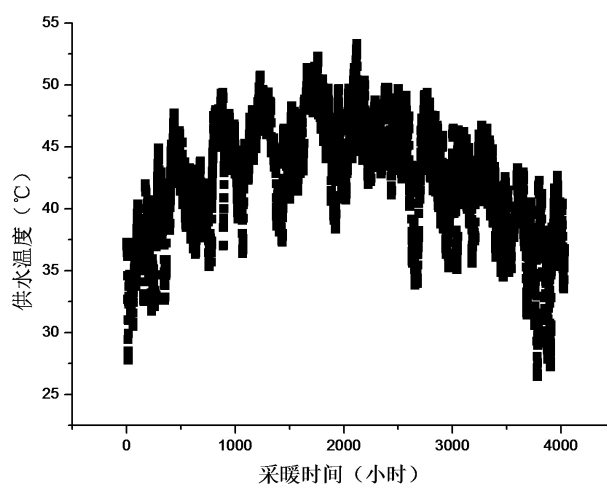


Figure 2. Variation curve of water supply temperature during heating period

图 2. 采暖期供水温度变化曲线

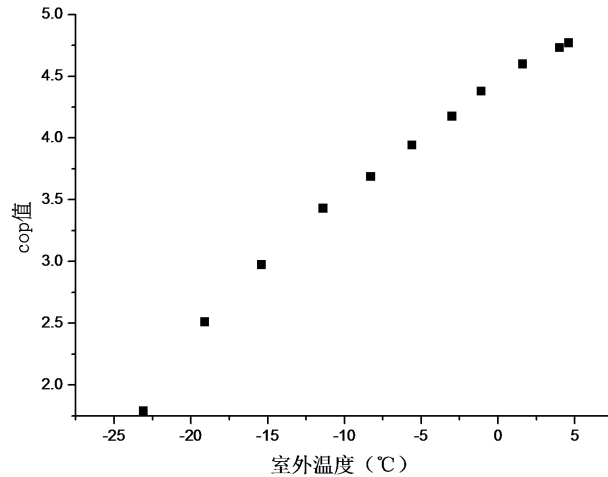


Figure 3. Variation curve of COP with outdoor temperature during heating period

图 3. 采暖期 COP 随室外温度变化曲线

采暖期热泵出水温度和系统的 COP 值变化情况见图 2 和图 3。采暖期热泵的最高、低出水温度分别为 49.3°C 和 27.8°C，并随室外温度的升高而增大；系统的 COP 值随室外温度的下降而降低，采暖期的最大和最小性能系数值分别为 4.77 和 1.79，且室外温度越低时，系统的 COP 值衰减越快，整个采暖期的平均值为 3.23，可以看出该系统的冬季热力性能良好。

经过与设备商家的咨询，对系统中的设备的价格进行确定，得到系统初投资见表 2。从表 2 中数据可以看出，系统中价格较贵的设备是太阳能集热板和土壤源热泵，约占总投资的 95.48%。

Table 2. Calculation of initial investment of the system

表 2. 系统的初投资计算

土壤源热泵(万元)	循环水泵(元)	管材(含人工费)(元)	太阳能集热板(万元)	总投资(万元)
1.64	425	1500	2.61	4.4510

将采暖期电能消耗及初投资参数代入经济性指标计算公式得到系统的相关经济性指标，见表 3。

Table 3. Calculation results of system economic index

表 3. 系统经济性指标计算结果

初投资(万元)	运行费用(万元/年)	费用年值(万元)	净收入(万元/年)	净现值(万元/年)	采暖及空调收费(万元/年)
4.4510	0.295	0.8178	1.0478	4.4699	1.0478

该系统每年的运行费用为 0.295 万元，系统的费用年值和净现值分别约为 0.9 万元和 4.47 万元，从上述两指标的角度来看，系统是可行的。系统的动态资金流量表情况见表 4。

Table 4. Fund flow table of dynamic payback period

表 4. 动态回收期资金流量情况表

收入(元)	系数	折算后收入	资金流量
10478.16	0.9091	9525.70	34984.30
10478.16	0.8264	8659.15	26325.15
10478.16	0.7513	7872.24	18452.91

Continued

10478.16	0.683	7156.58	11296.33
10478.16	0.6209	6505.89	4790.44
10478.16	0.5645	5914.92	-1124.48

本系统的动态回收期为:

$$PBP = m - 1 + \frac{\left| \sum_{t=0}^{m-1} F_t (1+i)^{-t} \right|}{F_m (1+i)^{-m}} = 6 - 1 + \frac{4790.44}{1124.48 + 4790.44} = 5.81$$

可见,本系统的动态回收期(*PBP*)均小于其设备寿命,系统可行。从动态回收期的角度看本系统也具有一定优势。

5. 结论

本文提出了太阳能-土壤源热泵联合供热系统,分析了该系统的工作原理和运行模式,建立了系统热力分析模型。通过算例分析发现,对于 173 m² 的建筑,系统的冬季平均 COP 为 3.23,系统的热力性能良好;系统的投资为 4.451 万元,采暖季的运行费用 1.0478 万元,系统的费用年值和净现值分别为 0.9 万元和 4.47 万元,动态回收期为 5.81 年,系统的经济性可行。

基金项目

国家大学生创新创业训练项目(201811927005);吉林省发改委项目:严寒地区复杂负荷条件下负荷热源协同研究与应用(编号 2019C057-4)。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的能源政策[Z]. 2012.
- [2] 第八届全国人大常委. 中华人民共和国节约能源法[Z]. 2017.
- [3] 全国人民代表大会常委会. 可再生能源法[Z]. 2010.
- [4] 危日光,刘中良,李聪,等. 太阳能-土壤源热泵示范系统运行特性分析[J]. 建筑技术, 2018, 49(5): 472-475.
- [5] 赵麒,王琛. 太阳能热泵地板供暖系统测试与经济性研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2016, 32(4): 492-497.
- [6] 喻凡,赵涪涪. 太阳能-土壤源热泵供热系统换热动态分析研究[J]. 区域供热, 2017(6):43-46+51.
- [7] 赵麒,韩铁鹰,谭羽非. 适用于热电联产改造的汽机热泵联合循环系统[J]. 节能技术, 2016, 34(1): 16-20.



知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2328-0514, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aepe@hanspub.org