

严寒地区太阳能-土壤源热泵运行经济性分析

刘 逸¹, 李炳熙¹, 付忠斌¹, 方明洙²

(1. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 吉林省延边州科技情报研究所, 吉林 延吉 133001)

摘 要: 针对北方严寒地区光照特性和冬天室外温度偏低的特点, 提出利用太阳能-土壤源热泵进行供暖的方案, 并以哈尔滨市为背景, 对太阳能-土壤源热泵、土壤源热泵、燃油锅炉、燃气锅炉和电锅炉 5 种供暖方式的一次能源利用率和燃料价格变化对运行能耗费用等因素的影响进行了比较分析, 得出太阳能-土壤源热泵是 5 种供暖方式中能源消耗费用最低、一次能源利用率最高的结论。

关 键 词: 太阳能-土壤源热泵; 一次能源利用率; 经济性分析

中图分类号: TK513; TK521 文献标识码: A

引 言

太阳能和土壤源是一种可再生资源, 通过太阳能-土壤源热泵系统冬季从太阳和土壤取热, 夏季向土壤中排热, 可以减少热污染, 同时降低运行成本。太阳能资源较为丰富、土壤温度相对较高是北方严寒地区利用太阳能-土壤源热泵的有利条件, 一方面能保证供热系统在室外温度很低时能够维持较高的制热系数, 另一方面能够克服风冷型热泵由于外界温度下降导致制热量下降与供热需求增大的矛盾。将太阳能和土壤源热泵结合起来对建筑进行供暖和制冷, 可以比单独采用土壤源热泵供暖节省更多的费用。

总体来看, 国内对太阳能-土壤源热泵的研究还处于初始阶段^[1-10], 是否能够在国内得到广泛的应用, 主要取决于其经济性。文献 [11~12] 对土壤源热泵的投资成本和经济性进行分析。本研究利用经济评价方法, 通过与土壤源热泵、燃油锅炉、燃气锅炉和电锅炉的对比, 分析太阳能-土壤源热泵系统运行的经济性。

1 太阳能-土壤源热泵系统

太阳能-土壤源热泵系统结构如图 1 所示, 系

统主要包括太阳能集热器、储热水箱、土壤源热泵机组、埋地换热器、循环泵和建筑物等。系统通过太阳能集热器采集太阳能, 冬季辅助土壤源热泵供暖, 夏季往地下储存能量以备冬用。利用埋地换热器吸取地下低品位热能, 经热泵提升为高品位的热能。该系统在设计过程中, 应综合考虑初投资和运行费用等因素, 太阳能集热器的设计负荷以满足光照期间内建筑供暖负荷为主, 太阳能-土壤源热泵的设计负荷应满足建筑最大负荷。

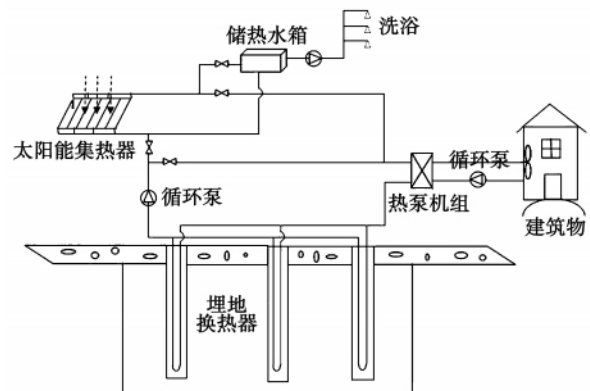


图 1 太阳能-土壤源热泵系统结构

2 系统经济性分析

2.1 一次能源利用率

一次能源利用率 PER (Primary Energy Ratio) 的计算式为:

$$PER = \text{供热量} / \text{一次能源消耗量}$$

太阳能-土壤源热泵的一次能源利用率为:

$$PER_{SC} = \eta_{ET} \times COP_{SC} \quad (1)$$

式中: COP_{SC} —太阳能-土壤源热泵系统制热系数;
 η_{ET} —电厂供电效率。

土壤源热泵的一次能源利用率为:

收稿日期: 2010 - 07 - 14; 修订日期: 2010 - 09 - 08

作者简介: 刘 逸 (1975 -) 男, 黑龙江兰西人, 哈尔滨工业大学博士生, 现工作在哈尔滨商业大学, 讲师。

$$PER_C = \eta_{ET} \times COP_C \quad (2)$$

式中: COP_C —土壤源热泵制热系数; η_{ET} —电厂供电效率。

燃油、燃气锅炉的一次能源利用率为:

$$PER_B = COP_B \quad (3)$$

式中: η_B —燃油锅炉的热效率。

电锅炉一次能源利用率为:

$$PER_{EB} = \eta_{EB} \times \eta_{ET} \quad (4)$$

式中: η_{EB} —电锅炉的热效率。

哈尔滨地区太阳能—土壤源热泵制热系数可达到 3.9, 土壤源热泵制热系数为 $3.1^{[13]}$; 若设燃油锅炉效率为 85%, 燃气锅炉效率为 85%, 电锅炉的效率为 98%^[14], 供电效率 30.4%^[15], 则可得不同供热方式的一次能源利用率, 各方式一次能源利用率如表 1 所示。

表 1 不同供热方式的一次能源利用率比较

太阳能-土壤源热泵	土壤源热泵	燃油锅炉	燃气锅炉	电锅炉
1.19	0.943	0.85	0.85	0.298

可见, 太阳能—土壤源热泵的一次能源利用率最高, 比土壤源热泵高出 26.2%, 比燃油、燃气高出 40%, 比电锅炉高出 299.3%。

2.2 运行能源消耗费用

供暖系统的运行能源消耗费用主要是驱动能源和辅助能源的能耗费用。

$$\begin{aligned} \text{COST} &= \text{Fuel} \times \text{Price} \\ &= \text{Heat} / \text{Heat_unit} \times \text{Price} \\ &= \text{Heat} / (\text{Heat_unit} / \text{Price}) \end{aligned}$$

式中: Fuel —系统所消耗的燃料量, Price —燃料的单价, Heat —系统的供暖量, Heat_unit —单位燃料供热能力, 即消耗单位的能源所能供给的热量。

系统效率、热泵的性能系数是体现供热系统供热能力的性能参数。

$$\text{令 } \beta = \text{Heat_unit} / \text{Price}$$

β 定义为能价比, 即单位货币所能供给的热量, β 的大小能够体现出系统的运行经济性。

3 实例计算分析

以哈尔滨地区为例, 一年供暖天数为 180 天, 以供热面积 1 000 m^2 为例, 室内供暖温度达到 20 $^{\circ}\text{C}$, 最大负荷约为 70 kW。目前, 哈尔滨的电价为 0.51 元/(kW·h), 柴油价为 6 元/kg, 天然气价格为 2.9

元/ m^3 。固定资产原值按总投资的 95% 计算, 系统初投资参考文献 [14, 16 ~ 18], 设备折旧费为固定资产的 6.7%, 燃油、燃气锅炉维护费为固定资产的 2.5%。

太阳能—土壤源热泵系统的设计供热负荷为 80 kW, 太阳能集热器和土壤源热泵互补运行, 土壤源热泵采用间歇式供暖方式来保证系统的供热性能。在整个供暖期内, 包括设备折旧维修费和能源消耗费用在内, 5 种不同形式的供暖系统的运行费用如表 2 所示。

表 2 不同供热方式的运行费用 (元/a)

太阳能-土壤源热泵	土壤源热泵	燃油锅炉	燃气锅炉	电锅炉
38 867	41 423	86 403	52 508	81 866

目前, 哈尔滨地区集中供暖的费用为 40 350 元 (40.35 元/ m^2), 5 种供暖方式中太阳能—土壤源热泵的供暖费用最低, 比锅炉房集中供暖费用低 3.8%; 燃油锅炉的供暖费用最高, 比锅炉房集中供暖费用高出 114%。太阳能—土壤源热泵的供暖费用比单独采用土壤源热泵供暖低 6.6%, 比运行费用最高的燃油锅炉供暖低 122%。

5 种供暖方式的能价比如表 3 所示, 太阳能—土壤源热泵供暖的经济性最好, 燃油供暖的经济性是最差的。

表 3 几种供热方式 β 值大小比较 (MJ/元)

太阳能-土壤源热泵	土壤源热泵	燃油锅炉	燃气锅炉	电锅炉
26.9	21.4	5.7	10	6.9

在各种供暖方式中, 燃料价格的变化对供暖运行能耗费用的影响较大。

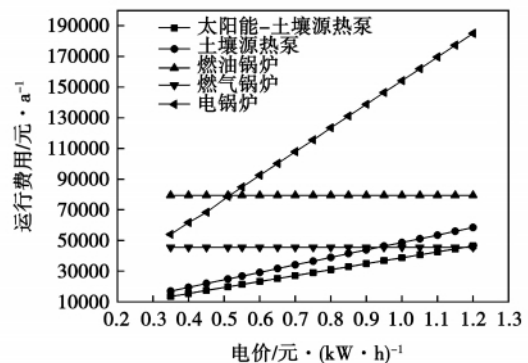


图 2 电价变化对运行能耗费用的影响

油价为 6.0 元/kg、天然气价格为 2.9 元/m³时, 电价变化对运行能耗费用的影响如图 2 所示。由于电价变化, 电锅炉运行能耗费用变化最明显, 电价超过 0.5 元/(kW·h) 时, 电锅炉供暖的能耗费用是最高的。当电价达到 0.95 元/(kW·h) 时, 土壤源热泵与燃气锅炉的运行能耗费用基本持平, 而太阳能-土壤源热泵与燃气锅炉的运行能耗费用相等时的电价为 1.18 元/(kW·h)。

电价为 0.51 元/(kW·h)、天然气价格为 2.9 元/m³时, 油价变化对运行能源消耗费用的影响如图 3 所示。可见, 油价变化对燃油锅炉运行能耗费用的影响很大。油价为 3.4 元/kg 时, 燃油锅炉与燃气锅炉的费用是持平的。当油价超过 6 元/kg 时, 燃油锅炉超过了电锅炉的运行能耗费用。

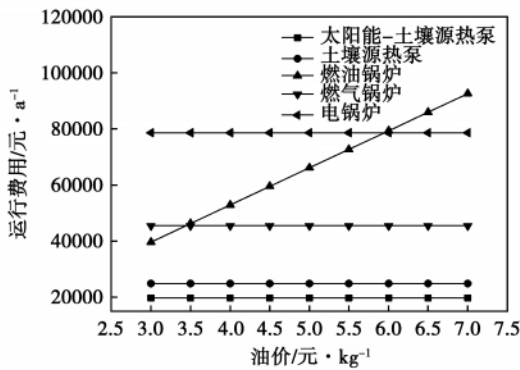


图 3 油价变化对运行能耗费用的影响

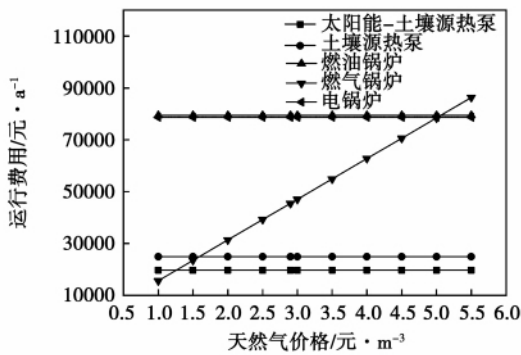


图 4 天然气价格变化对运行能耗费用的影响

电价为 0.51 元/(kW·h)、油价为 6.0 元/kg 时, 天然气价格变化对运行能源消耗费用的影响如图 4 所示。天然气价格为 1.6 元/m³时, 燃气锅炉与土壤源热泵的运行能耗费用相等。天然气价格为 5 元/m³时, 燃气锅炉与燃油锅炉、电锅炉的运行能耗费用相近。当天然气价格为 1.26 元/m³时, 燃气锅炉才与太阳能-土壤源热泵的运行能耗费用相近。

电价变化对运行能源消耗费用的影响如图 5 所示。电价为 0.88 元/(kW·h) 时, 土壤源热泵的能源消耗价格与集中供暖相等。当电价为 1.04 元/(kW·h) 时, 太阳能-土壤源热泵的能源消耗价格才与集中供暖相等。

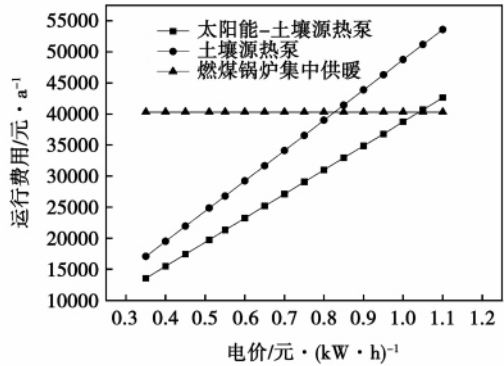


图 5 电价变化时热泵运行能耗费用与集中供暖费用的比较

通过以上分析不难看出, 按当前的燃料价格, 太阳能-土壤源热泵的能源消耗费用是 5 种供暖方式中最低的, 而一次能源利用率却最高。

4 结 论

针对北方严寒地区光照特性和冬天室外温度偏低的特点, 提出利用太阳能-土壤源热泵进行供暖的方案, 并以哈尔滨市为背景, 对太阳能土壤源-热泵、土壤源热泵、燃油锅炉、燃气锅炉和电锅炉 5 种供暖方式的一次能源利用率、运行能耗费用、燃料价格变化对运行能耗费用等因素进行了比较分析, 得到如下结论:

- (1) 太阳能-土壤源热泵的一次能源利用率是几种供暖方式中最高的。
- (2) 按目前的燃料价格, 太阳能-土壤源热泵供暖的运行费用比锅炉房集中供暖低 3.8%; 比单独采用土壤源热泵供暖的运行费用低 6.6%; 比燃油锅炉供暖的运行费用低 122%。
- (3) 燃料价格的变化对采用该燃料的供暖系统运行费用影响很大, 所以应根据当地的实际情况选择合理的供暖方式。

参考文献:

[1] SPORN P, AMBROSE E R. The heat pump and solar energy proceedings of the world symposium on applied [J]. Solar Energy,

1955 ,11: 1 - 5.

[2] KAYGUSUZ K. Experimental and theoretical investigation of a solar heating system with heat pump[J]. *Renewable Energy* ,2000 , 1: 79 - 102.

[3] 罗南春,司家锋. 太阳能热泵供热水系统的数学模型[J]. 山东建筑工程学院学报,1996 ,11(4): 62 - 67.

[4] 毕月虹. 太阳能—土壤源热泵用于冬季供暖的性能研究[D]. 天津: 天津大学,1995.

[5] 杨卫波,施明恒,陈振乾. 太阳能—U形埋管土壤蓄热特性数值模拟与实验验证[J]. 东南大学学报(自然科学版),2008 , 38(4): 651 - 656.

[6] 李朝佳,孙友宏,吴晓寒. 太阳能辅助地源热泵联合供暖(制冷)运行模式分析[J]. *能源工程* 2008 6:61 - 64.

[7] 杨卫波,董华,周恩泽,等. 太阳能—土壤源热泵系统联合运行模式的研究[J]. *流体机械*,2004 ,32(4): 41 - 49.

[8] 余延顺. 寒区太阳能—土壤源热泵系统运行工况模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2001.

[9] DE SWARDT. A performance comparison between an air-source and a ground source reversible heat pump[J]. *International Journal of Energy Research* ,2001 25(10): 899 - 910.

[10] KAVANANGH. Simulation of ground - coupled heat pumps with an analytical solution[J]. *International Solar Energy Conference part1* ,1992: 395 - 400.

[11] 苏劲松,施恂根,冯晓伟. 地源热泵的经济性分析[J]. *现代商贸工业* 2007 ,19(9): 276 - 277.

[12] 姜宝成,王永鏢,李炳熙. 地源热泵的技术经济性评价[J]. *哈尔滨工业大学学报* 2003 ,35(2): 195 - 202.

[13] 宫克勤,刘逸,刘丹,等. 太阳能地源热泵式空调系统研究[J]. *太阳能学报* 2007 28(4): 416 - 420.

[14] 杨照. 燃气热泵及其它供热空调系统的能源利用分析评价[J]. *太阳能学报* ,2001 ,22(2): 171 - 175.

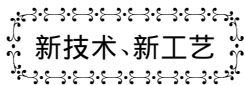
[15] 中国电力信息中心. 1998 年电力工业统计摘要(之五) [J]. *中国电力* ,1998 ,11:83.

[16] 盛晓文. 燃油燃气锅炉的应用与前景展望[J]. *哈尔滨建筑大学学报* 2000 23(1): 121 - 125.

[17] 李新国. 地源热泵调峰供暖系统的热力及经济分析[J]. *太阳能学报* ,1997 ,1(2): 146 - 151.

[18] 叶瑞芳. 地源热泵供应生活热水的经济性[J]. *给水排水* , 2001 ,27(2): 71 - 73.

(编辑 陈滨)



俄罗斯船级社入级第一个浮动核电站

据《Offshore Marine Technology(近海船舶技术)》2010 年第三季刊报道,俄罗斯船级社已宣布,将入级一个目前正在波罗的海造船厂建造并命名为“罗曼诺索夫院士”的新浮动核电站。这里有史以来的第二艘船,并且是第一艘建造入级船。

完全独立进行的浮动核电站具有高安全性的反应堆装置,可给俄罗斯远南和远东地区供电和供热,并计划给岸基设施生产并配合给电能和热能。

目前,该核电站正在圣彼得堡波罗的海造船厂建造,船长 140 m,宽 30 m,排水量 21 000 t,于 2007 年 4 月 15 日铺设龙骨。据报道,计划至少还要为俄罗斯联邦原子能部另外建造 7 艘 FNPS 船。

该船的核反应堆已于 2009 年 5 月交货,第二个于 2009 年 8 月交货。“罗曼诺索夫院士”已于 2010 年 6 月 30 日下水,预期将在 2012 年交会给俄罗斯联邦原子能部。

FNPS 船开启了新纪元,并为俄罗斯偏远和独立地区电能的基础设施提供了新的发展前景。

该 FNPS 船装有两个 KLT-40S 破冰船型反应堆,每个反应堆的装机容量为 35 MW,供热 586×10^6 kJ。该装置预期寿命为 38 年,包括三个 12 年周期大修停机。

该 FNPS 船预算的输出电功率为 70 MW,热功率为 300 MW。符合目前利用核能的安全和环境标准要求;能在居民区附近使用并可与各种用途的设施一起使用。

俄罗斯船级社是世界上唯一的具有民用核动力船舶入级资格的船级社。

(学牛摘译)

different water flow rates and the corresponding output characteristics of the photovoltaic cells were studied. The test results show that when the temperature of the heat dissipating device is 1373 K, the cooling water flow rate reaches 25 mL/s and the cell temperature hits 302 K, the heat dissipating device thus designed can effectively control the temperature of the photovoltaic cells. By using the software Fluent, the influence of such structural parameters as the height and number of guide baffles, and the diameters of the cooling water inlet and outlet tubes etc. on the performance of the device was analyzed. The calculation results show that to increase the diameters of the cooling water inlet and outlet tubes can effectively reduce the pressure loss but not affect the heat dissipating effectiveness. The numerical simulation results are in a relatively good agreement with the test ones, thus verifying the correctness of the numerical simulation method. **Key words:** thermophotovoltaic power generation system, water-cooled heat dissipating device, cell temperature, pressure loss

注入模式下 DSG 槽式系统滑模温度控制器设计 = **Design of a Sliding Mode Temperature Controller in a DSG (Direct Steam Generation) Trough Type System Under an Injection Mode** [刊, 汉] PAN Xiao-di, WANG Gui-rong (College of Electromechanical Engineering, China Metering College, Hangzhou, China, Post Code: 310018), JI Yun-feng (Hangzhou Hollysys Automation Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 466 ~ 470

With a solar energy array in a DSG (direct steam generation) trough type solar energy power generation system under an injection mode serving as an object of study, designed was a temperature controller by creatively employing a sliding mode control and combining the PI (proportional and integral) control algorithm with the cascade one. Moreover, the steam temperature control was studied by using a method integrating the theoretical analysis with the simulation investigation. Under the condition that the sunshine illumination intensity is allowed and the feedwater has been heated and stabilized at 200 °C, the steam temperature at the outlet of the solar energy array was controlled to stably and accurately attain 320 °C by adjusting the feedwater flow rate of the feedwater valve and the steam temperature at the outlet of various stages of the heat accumulator was controlled and stabilized at a value above the expected one, thus preliminarily solving the problem in controlling the stability and accuracy of the steam temperature at the outlet of the solar energy array. It has been found that to use the sliding mode algorithm to control the steam temperature of a solar energy array is fully feasible and the stability, accuracy and disturbance-resistant control performance are relatively good. **Key words:** DSG (direct steam generation), solar energy array, injection mode, nonlinear equation, outlet temperature, cascade control, sliding mode algorithm

严寒地区太阳能-土壤源热泵运行经济性分析 = **Analysis of the Operation Cost-effectiveness of a Solar Energy-Soil Source Heat Pump in Frigid Regions** [刊, 汉] LIU Yi, LI Bing-xi, FU Zhong-bin (College of Energy

Science and Engineering , Harbin Institute of Technology , Harbin , China , Post Code: 150001) , FANG Ming-zhu (Jinlin Provincial Yanbian Korean Nation Autonomous Prefecture Science and Technology Intelligence Research Institute , Yanji , China , Post Code: 133001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26 (4) . - 471 ~ 474

In the light of the illumination characteristics and the specific features that the outdoor temperature in winter in the northern frigid regions is excessively low , presented was a scheme for heating by using solar energy-soil source heat pumps and with Harbin City serving as a background , the influence of such factors as the primary energy source utilization rate , change in fuel prices etc. on the operation energy consumption and cost was compared and analyzed under the following five heating modes: solar energy-soil source heat pumps , soil source heat pumps , oil-fired boilers , gas-fired boilers and electrically heated boilers. The authors have come to a conclusion that the solar energy-soil source heat pumps have a lowest energy consumption and cost and the highest energy source utilization rate among the above-mentioned five heating modes. **Key words:** solar energy-soil source heat pump , primary energy source utilization rate , cost-effectiveness analysis

螺旋埋管地热换热器的线圈热源模型及其解析解 = **Coil Heat Source Model for Embedded Spiral Tube-based Geothermal Heat Exchangers and Its Analytical Solutions** [刊 汉] LI Xin , FANG Liang , FANG Zhao-hong (Education Ministry Key Laboratory on Renewable Energy Source Architectural Utilization Technologies , Shandong Architectural University , Jinan , China , Post Code: 250101) , ZHAO Qiang(Shandong Fangya Geothermal Source Heat Pump and Air Conditioning Technology Co. Ltd. , Jinan , China , Post Code: 250101) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(4) . - 475 ~ 479

With applications of a pile foundation embedded tube-based geothermal source heat pump system in engineering projects serving as a background , an analysis and argumentation was conducted of an unsteady-state heat transfer model for spiral embedded tube-based geothermal heat exchangers. On this basis , a coil heat source model was presented with the temperature distribution in the embedded coil tubes along the depth direction and the influence of the pitch being considered. By using the Green's function method and the dummy heat source method , the expressions of the analytic solutions to the infinite and finite long coil heat source models for an unsteady state temperature field were obtained respectively. Based on these analytic solutions , the influence of various parameters in the model on the heat exchange performance of the embedded coil tube-based heat exchange was analyzed. **Key words:** geothermal source heat pump , pile foundation embedded tube-based heat exchanger , heat transfer model

用于生物反应器的旋转热管传热性能的研究 = **Investigation of the Heat Transfer Performance of Rotating**