

地源热泵运行经济性分析

王永鏢, 李炳熙, 姜宝成

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 根据北方寒冷地区冬天室外温度偏低的特点, 提出利用地源热泵供暖。地源热泵存在三种驱动方式: 电动机、柴油机、燃气机。三种辅助供暖热源: 电锅炉、燃油锅炉、燃气锅炉。本文对其一次能源利用率和燃料价格变动时, 系统运行经济性进行比较分析, 得出燃气热泵的供暖费用比锅炉房集中供热的费用要高 6%; 电动热泵的供暖费用比锅炉房集中供热费高 40%; 柴油机热泵的供暖费用比锅炉房集中供热高出 57%。

关键词: 地源热泵; 供暖; 一次能源利用率; 运行经济性

中图分类号: F407.2TK123

文献标识码: A

1 引言

地源热泵是一种利用地热资源(包括地下水、土壤或地表水), 既可供暖又能制冷的高效节能空调系统。地源热是一种再生资源, 通过地源热泵系统, 冬季可以从地源中采热, 夏季可以向地源中排热, 减少热污染。由于地源温度比较高, 这对于北方寒冷地区是一个非常有利的条件, 一方面保证供热系统在室外温度很低时能够维持一个很高的制热系数, 另一方面地源温度很稳定, 克服了风冷型热泵由于外界温度下降导致制热量下降与同时温度下降导致供热量需要增大的矛盾。Swardt、Derder、Kavanagh 利用数值计算、试验等方法对地源热泵和空气源热泵进行比较^[1-3], 指出地源热泵在制热容量、制热系数和温室气体排放等方面具有明显的优势。地源热泵虽然系统成本较高, 但是从长远上考虑, 由于地源热泵节能, 其平均运行费用比供热、制冷型空气源热泵低 30%~40%^[4], 地源热泵的经济性要比空气源热泵好。

1998 年美国商业建筑物中的地源热泵系统已占空调保有量的 19%, 其中在新建的建筑物中占 30%^[4]。目前国内地源热泵处于研究阶段, 尚未得到商业上的应用。地源热泵是否能够在国内得到广

泛的应用, 主要决定于它的经济性, 目前已有文献对地源热泵的投资成本进行分析^[5-6], 本文着重分析了地源热泵采用不同驱动源和辅助热源, 在不同燃料价位下运行的经济性。

2 地源热泵系统

图 1 是地源热泵系统简图, 系统包括蒸发器、冷凝器、节流装置、压缩机、驱动源及辅助热源和埋地管。系统通过地下埋管, 吸取地下低品位热能, 经热泵提升为高品位的热能。系统在设计过程中, 一般都是设计负荷小于最大负荷, 大于设计负荷部分由辅助热源补偿, 其形式可以是燃油、燃气或电。压缩机的驱动源可以选择电动机、柴油机或燃气机。当以柴油机或燃气机作为驱动源时, 柴油机和燃气机的废热可以回收。本文对三种驱动源和三种辅助热源搭配组成的九种不同系统的运行经济性进行分析。

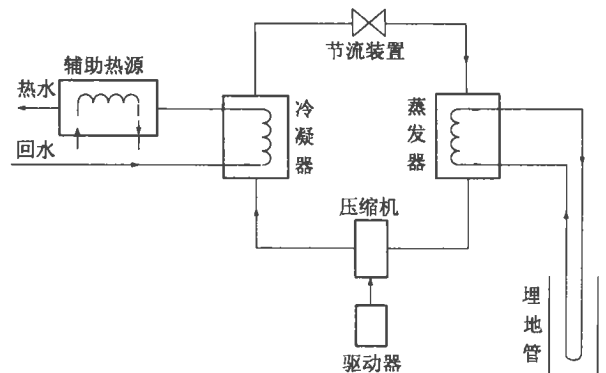


图 1 地源热泵系统简图

3 经济性分析

3.1 一次能源利用率 PER (Primary Energy Ratio)

$$PER = \text{供热量} / \text{一次能源耗量}$$

3.1.1 燃气机、柴油机驱动热泵

收稿日期: 2002-02-06; 修订日期: 2002-03-21

基金项目: 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金资助项目(2001HITMD16)

作者简介: 王永鏢(1977-)男, 福建古田人, 哈尔滨工业大学博士研究生

$$PER_{G,D} = (Q_L + Q_R) / Q_{G,D} \quad (1)$$

式中: $Q_{G,D}$ 为燃气机、柴油机的一次能源耗量

$$Q_R = \alpha(1 - \eta_{G,D})Q_{G,D} \quad (2)$$

$$Q_L = COP \times \eta_{G,D} \times Q_{G,D} \quad (3)$$

式中: α 为燃气机、柴油机废热回收率, $\eta_{G,D}$ 为燃气机和柴油机的热效率(输出功与燃料发热量之比), COP 为热泵制热系数。

$$PER_{G,D} = \eta_{G,D} \times COP + \alpha(1 - \eta_{G,D}) \quad (4)$$

3.1.2 电动热泵

$$PER_E = \eta_{ET} \times COP_E \quad (5)$$

式中: COP_E 为热泵制热系数; η_{ET} 为电厂供电效率。

3.1.3 燃油、燃气锅炉

$$PER_B = \eta_B \quad (6)$$

式中: η_B 为燃油、燃气锅炉的热效率。

3.1.4 电锅炉

$$PER_{EB} = \eta_{EB} \times \eta_{ET} \quad (7)$$

式中: η_{EB} 为电锅炉的热效率。

若设电动热泵 COP 3.4, 燃气、燃油热泵 COP 3.6, 柴油机与燃气机的热效率 30%, 燃气机的废热回收率 60%, 电锅炉的效率 98%, 燃油锅炉效率 85%, 燃气锅炉效率 85%^[7], 柴油机废热回收率 60%^[8], 供电效率 30.4%^[9], 则可得一次能源利用率:

表1 不同供热方式的一次能源利用率比较

燃油热泵	燃气热泵	电动热泵	电锅炉	燃气锅炉	燃油锅炉
1.50	1.50	1.034	0.298	0.85	0.85

可见燃油、燃气、电动热泵的一次能源利用率要比同燃料的锅炉高出很多, 同时由于燃油、燃气热泵对废热进行再回收利用, 一次能源利用率要比电动热泵高出 45% 以上。

3.2 运行能源消耗费用

地源热泵供暖系统的运行能源消耗费用主要是驱动源的能耗费用和辅助热源的燃料费用。

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

式中: $Fuel$ 为系统所消耗的燃料量, $Price - F$ 燃料的单价, $Heat$ 为系统的供暖量, $Heat\text{-}unit$ 定义为单位燃料供热能力, 即消耗单位的能源, 所有供给的热量。系统效率、热泵的性能系数、废热回收系数燃料发热值的函数是体现供热系统供热能力的性能参数。

$$\beta = Heat\text{-}unit / Price - F$$

β 定义为能价比, 即单位货币所能供给的热量, 它是一个经济参数, β 的大小, 体现出系统的运行经济性。

4 实例计算分析

以哈尔滨地区供热面积 100 m² 为例, 室内供暖达到 20 °C, 最大负荷约为 7 kW, 一年供暖天数为 180 天。目前哈尔滨的电价为 0.4 元/(kWh), 柴油价为 3.0 元/kg, 目前哈尔滨还没有管道天然气供应, 天然气价格以全国大部分城市管道天然气的供应价格 1.2 元/m³ 计算。系统设备折旧费为固定资产的 6.7%, 设备维修费为固定资产的 2.5%, 固定资产原值按总投资的 95% 计算, 系统初投资参考文献[5~7, 10]。

地源热泵系统的设计供热负荷为 6 kW, 当负荷大于设计负荷时, 启动辅助锅炉进行补偿。当负荷小于设计负荷时, 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, 三种驱动源和三种辅助热源的不同组合的地源热泵供暖系统的运行费用如表 2 所示, “+”前项为设备折旧维修费, “+”后项为系统运行能源消耗费用。

目前哈尔滨地区利用锅炉房集中供暖的费用为 3 100 元(31 元/m²), 对于表 2 中 9 种供暖组合, 燃气热泵的供暖费用比锅炉房集中供暖的费用要高 6%; 电动热泵的供暖费用比锅炉房集中供暖费高 40%; 柴油机热泵的供暖费用比锅炉房集中供暖高出 57%。由于这几种供热组合, 辅助热源的供热量都一样, 所以可以知道电锅炉的费用最高, 燃气锅炉费用量低, 这可以从表 3 得出。

表2 不同供热方式的运行费用 (元/年)

辅助热源	电动热泵	燃气热泵	柴油机热泵
电	1 233+3 199=4 432	1 353+2 026=3 379	1 117+3 841=4 958
燃油	1 205+3 135=4 340	1 322+1 961=3 283	1 087+3 776=4 863
燃气	1 245+3 018=4 263	1 364+1 844=3 208	1 129+3 659=4 788

从表 3 可以得出, 三种驱动源中, 柴油机热泵费用最高, 燃气热泵费用最低, 因为柴油和燃气发热值差不多, 但是柴油的价格比管道天然气的高出两倍多。三种辅助热源中, 燃气锅炉的供热费用最低, 电锅炉供热费用最高。

表3 几种供热方式 β 值大小比较 (MJ/元)

电动热泵	柴油机热泵	燃气热泵	电锅炉	燃油锅炉	燃气锅炉
30.6	20.9	45.7	8.8	11.9	25.8

燃料价格是随着国家政策及国内外经济环境变化而变化的。

图 2 表示电价变化对运行能源消耗费用的影响, 其中油价 3.0 元/kg 不变, 管道天然气价格 1.2 元/m³ 不变。图中“—”前项表示驱动方式, 后项表示辅助热源形式。

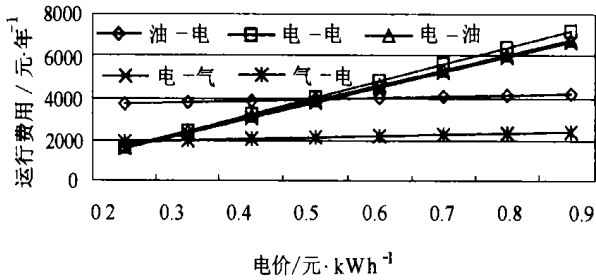


图 2 电价变化对运行能源消耗费用的影响

从图中可以看出, 对于电动机驱动的地源热泵系统, 由于电价变化, 其运行费用变化很明显, 电价上升 0.1 元, 则运行费用上涨 750 元左右, 而由于油价和气价不变; 对于“油—电”和“气—电”供暖组合, 因为电价上涨, 费用上涨只是因为电锅炉费用涨价, 但是电锅炉供热占总供热比例不大, 所以费用只是略上升。同时可以知道, 当电价低于 0.25 元/kWh 时, 电动热泵的运行费用最低, 当电价高于 0.5 元/kWh 时, 电动热泵的运行费用最高。

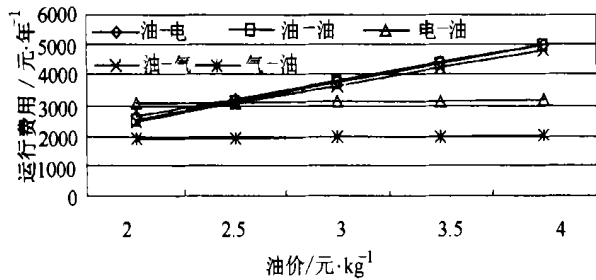


图 3 油价变化对运行能源消耗费用的影响

图 3 表示油价变化对运行能源消耗费用的影响, 其中电价 0.4 元/(kWh), 管道天然气价格 1.2 元/m³ 不变。从图中可以知道, 油价变化对柴油机驱动的热泵运行费用影响很大, 油价每上升 0.5 元/kg, 运行费用上涨 600 元。当油价低于 2.5 元/kg 时, 柴油机热泵的运行费用要低于电动热泵, 但是还是比燃气热泵运行费用高。

图 4 表示采用柴油机驱动费用和电动机驱费用的等价线, 图中当由电价和油价组成的点落在等价线上方时, 表示采用柴油机驱动运行费用相对于电

动机驱动要低, 当点落在等价线下方时, 相反表示柴油机驱动运行费用相对于电动机驱动要高。

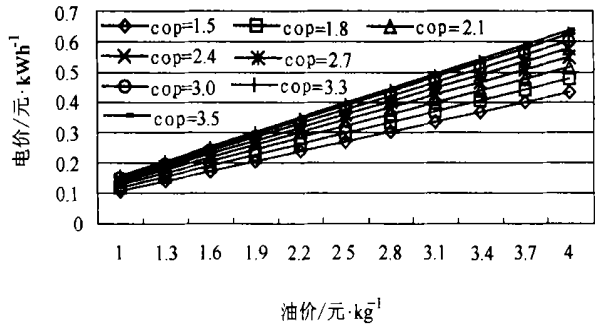


图 4 柴油机热泵和电动热泵等费用

5 结论

(1) 按目前的价格, 燃气热泵的供暖费用比锅炉房集中供热的费用要高 6%; 电动热泵的供暖费用比锅炉房集中供热费高 40%; 柴油机热泵的供暖费用比锅炉房集中供暖高出 57%。

(2) 燃料价格变化对采用该燃料的系统主供热部分运行费用影响很大, 但是由于辅助供热比例很小, 对辅助供热费用影响很小。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] DERDER S. Municipality water reticulation ground-coupled reversible heat pump system as alternative to an air source system[J]. *American Society of Mechanical Engineer(paper)*, 1997, 12: 402-1215.
- [3] KAVANANGH. Simulation of ground-coupled heat pumps with an analytical solution[J]. *International Solar Energy Conference part1*, 1992: 395-400.
- [4] 寿青云. 高效节能的空调—地源热泵[J]. *节能*, 2001, 1: 41-43.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 卢智利. 大型建筑中应用应急柴油机发电实现冷热电三联供及其实例分析[J]. *能源研究与信息*, 2000, 17(1): 6-11.
- [9] 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, 10: 83.
- [10] 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.

Revealing from the Law of Thermodynamics Its Connotation [刊, 汉] / WANG Jia-xun, WANG Qing-zhao, ZHANG Xiao-dong (Power Engineering Department, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 561 ~ 564

The exposition and seeking of an implicit economic theory from many a law of physics can serve as a new approach for combining a thermodynamics analysis with an economic one. A specific analysis has been conducted of the economic theory of revealing its connotation from the first and second laws of thermodynamics. To this end, it is essential to clarify the existing misguidance of these two laws, especially the deep-seated misguidance of the second law. A further deepening of the understanding has been attained of the reasoning used by Georgescu Roegen in the statement "entropy law per se constitutes in substance the most cost-effective economic process among numerous laws". **Key words:** entropy, entropy law, new classic economics, ecological economics

地源热泵运行经济性分析 = An Analysis of the Operating Cost-effectiveness of a Ground-source Heat Pump [刊, 汉] / WANG Yong-biao, LI Bing-xi, JIANG Bao-cheng (Energy Science and Engineering School under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 565 ~ 567

In the light of the excessively low outdoor temperatures prevailing in Chinese northern frigid regions the authors have proposed a space heating system based on the use of ground-source heat pumps. There exist three driving modes for such pumps, namely, by electric motors, diesels and gas engines. In addition, there are three auxiliary heat supply sources, i. e., electric boilers, oil-fired ones and gas-fired ones. The authors have analyzed and compared the operating cost of various systems during a change of primary energy utilization rate and fuel price. The results of this comparison show that the operating cost of the driving modes by using gas engines, electric motors and diesel engines are respectively 6%, 40% and 57% higher than that of a central district heating system using boilers. **Key words:** ground-source heat pump, space heating, primary energy utilization rate, operation cost-effectiveness

纳米流体强化导热系数机理初步分析 = A Preliminary Analysis of the Intensified Thermal-conductivity Mechanism of Nano-fluids [刊, 汉] / LI Qiang, XUAN Yi-min (Power Engineering Institute under the Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, China, Post Code: 210094) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 568 ~ 571, 584

The mechanism of an intensified thermal conductivity achieved through the use of nano-fluids is analyzed from the following two aspects, namely, a changed liquid structure due to the addition of nano-particles and the micro-motion of nano-fluids. The results of the analysis indicate that relative to the enhanced thermal conductivity effected by the addition in fluids of millimeter or micrometer-grade particles the enhanced thermal conductivity made possible by nano-fluids has come about mainly due to the micro-motion of the nano-particles. Through the measurement of the thermal conductivity of nano-fluids under various temperatures it has been verified that the micro-motion of the nano-particles represents a major factor contributing to the enhancement of thermal conductivity by the nano-fluids. **Key words:** nano-fluid, intensified heat transfer, thermal conductivity, micro-motion

电厂送粉系统煤粉浓度测量的热探头方法研究 = Research on a Thermal Probe Method for the Measurement of Pulverized-coal Concentration in a Pulverized-coal Transport System of a Power Plant [刊, 汉] / LIU Lei, ZHOU Fang-de (National Key Laboratory for Power Engineering Multi-phase Flows under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(6). — 572 ~ 575

The measurement of pulverized coal concentration represents one of the problems requiring an urgent solution in the area of gas-solid two-phase flows. The authors have developed a measuring system incorporating thermal probes. The feasibility