

城市原生污水源热泵经济性分析^{*}

哈尔滨工业大学 吴学慧[☆] 孙德兴

摘要 分析了城市原生污水源的特点及其热泵系统的优缺点。以哈尔滨地区的工程为例,对城市原生污水源热泵、天然气直燃热泵机组、燃煤锅炉加电制冷冷水机组进行了经济性、环保性比较。结果表明城市原生污水源热泵系统优于另两个系统。

关键词 城市原生污水 热泵 能耗 经济性

Economic analysis of urban untreated sewage source heat pumps

By Wu Xuehui[★] and Sun Dexing

Abstract Analyses the characteristics of urban untreated sewage source and urban untreated sewage source heat pumps. By means of an actual project in Harbin, compares the economics and environmental protection of three systems, including urban untreated sewage source heat pump, gas direct-fired heat pump and coal boiler plus electric water chiller. The results indicate that urban untreated sewage source heat pump is the best among them.

Keywords urban untreated sewage, heat pump, energy consumption, economy

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

随着生活水平的不断提高,人们对居住环境也有了新的要求。夏季供冷、冬季供暖的范围日益扩大,使得建筑耗能也日趋增大。如何获得经济、清洁的冷热源成为众多研究者的研究主题。传统意义上的空调冷水机组供冷、锅炉供暖需要两套主机设备及两套末端装置系统,而目前的热泵工程技术可以实现冬季供暖(平均温度在 40~45℃,属低温供暖),夏季空调,全年生活热水供应这三种功能,是一种可靠、简便、舒适的供暖空调方式。热泵工程得以实施的先决条件是存在合适的低位冷热源,比较空气、土壤、地下水、地表水而言,城市原生污水具有比热容大,导热系数大,无需打井和回灌,冬夏温度适宜等优点^[1-2]。在本课题组成功解决了污水堵塞问题后,城市原生污水源热泵的应用和推广已经受到了社会各界的高度重视。本文对城市原

生污水热泵机组与其他冷热源的经济性、环保性进行了比较,为城市原生污水源热泵的应用和推广提供参考。

1 城市原生污水源热泵系统及其特点

1.1 城市原生污水源的特点

城市污水的最大特点是冬暖夏凉,冬季温度一般在 13℃左右,夏季温度稳定在 22℃左右,而且一年之内、一天之内的水温相对稳定,水量也相对稳定。水源热泵系统换热设备传热性能好,热泵系统运行稳定、效率高,制热系数 ≥ 4.5 ,而空气源、土壤源热泵制热系数则 ≤ 3.5 ^[3-5]。

城市污水水量巨大,遍布各大中城市市区内,统计资料显示,2001—2005 年我国的污水排水年增长率由最初的 3.2%增至 5.1%,平均污水排放年增长率 4.8%,工业废水年增长率 4%,生活污水

^{*} 北京市“供热、供燃气、通风及空调工程”重点实验室开放课题(编号:KF200503),国家自然科学基金资助项目(编号:50578048)

①☆ 吴学慧,男,1976 年 11 月生,在读博士研究生
150090 哈尔滨工业大学二区市政环境工程学院 2651 室
(0451) 86283783
E-mail: wu99099@sohu.com
收稿日期:2006-10-08
修回日期:2007-02-26

排放年增长率 5.5%^[6]。预计 2006—2010 年污水排放年增长率为 6.7%，这样到 2010 年我国的年污水排放量将达到 730 亿 t 左右。而且城市污水是城市排放废热途径之一，城市污水占城市区域废热排放的百分比很高，例如日本札幌市的约占城市废热的 50%^[7]，我国各城市所占比例在 10%~16% 之间^[8]。

由于城市原生污水水质较差，解决系统的结垢、腐蚀、换热强化等问题是提高系统经济性、可靠性的关键，也是目前研究的主要方向。

1.2 系统的换热原理

如图 1 所示，城市原生污水源热泵系统直接从未经处理的一级污水的干渠取水，经防堵设备 3 进入污水-中介水(乙二醇溶液)换热器 4 与中介水换热，再由热泵机组 6 与中介水完成热量交换。污水返回，经设备 3 回到污水干渠。

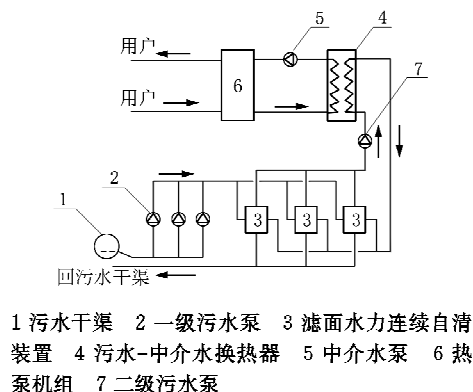


图 1 原生污水源热泵空调系统示意图

2 经济性、环保性分析

2.1 工程概况

哈尔滨某商城综合楼为框架结构，整体 2 层，局部为高层住宅，工程供暖与空调面积 34 000 m²，其中地下部分 15 000 m²，建材、洁具商场 19 000 m²。建筑物冬季供暖设计热负荷 1 600 kW，夏季空调设计冷负荷 1 260 kW。年供暖时间为 180 d，年供冷时间 60 d。

2.2 冷热源备选方案

方案 1 城市原生污水源热泵机组；方案 2 直燃热泵机组；方案 3 燃煤锅炉加电制冷。

2.3 经济评价指标

1) 系统造价^[9]

系统造价包括设备费、安装调试费和增容费。设备费包括机组、冷却塔及冷水循环泵、冷却水循

环泵、热水循环泵等设备费，相应价格均为市场价与成交价之间的参考价；安装调试费按机组费用折算，包括机房内管道、阀门、仪表等材料费及人工费；增容费包括电力、天然气增容费和城市热网入网费用。

2) 净现值^[10]

净现值是指按一定的标准收益率，将各年的净现金流量折现到同一时点的现值累加值，一般计算基准年取工程建设期初。净现值是反映投资方案在计算期内获利能力的动态评价指标。净现值计算公式为

$$F_{NPV} = \sum_{t=0}^n C_t(1+i)^{-t} \quad (1)$$

式中 F_{NPV} 为净现值，元； n 为建设期与经济寿命之和； C_t 为第 t 年的流入现金与流出现金之差，元； i 为标准收益率，其确定方法可参见文献^[10]，本文计算取 6.5%。

3) 净现值率^[10]

净现值率是指项目方案的净现值与总投资现值之比，即单位投资现值所能带来的净现值。计算式为

$$F_R = \frac{F_{NPV}}{I_P} \quad (2)$$

式中 F_R 为项目方案的净现值率； I_P 为项目方案的总投资现值，元。

$$I_P = \sum_{t=0}^m I_t(1+i)^{-t} \quad (3)$$

式中 m 为设备使用年限； I_t 为第 t 年的投资，元。

在多方案选择时，在资金充足的条件下，净现值大的方案为先。但由于各种经济条件不同，加上净现值大小只能表明盈利总额，没有反映出投资规模对资金利用率的影响。单纯用净现值最大的准则进行方案选择时，往往会导致评价人趋向于选择投资大、盈利多的方案，而忽略盈利少、投资少、但投资效益更好的方案，所以净现值法一般要同净现值率法联合使用，以便说明方案的净现值是在什么投资水平上取得的。在资金短缺的条件下，一般应侧重考虑净现值率这项指标。

4) 费用年值^[10-11]

费用年值为年固定费用与年运行费用之和，年固定费用是指系统各设备的总投资在使用年限内

每年消耗的费用;年运行费用包括水费、能源费(电费、天然气费)、维修费、人员工资及空间占用费等。其计算式为

$$F_A = \sum_{j=1}^N i \frac{(1+i)^m}{(1+i)^m - 1} K_j + C \quad (4)$$

式中 F_A 是按动态法计算的年计算费用,元; N 为供暖设备的种类数; K_j 为供暖设备(编号 j) 的投资额,元; C 为供暖系统的年运行费用,元。

根据哈尔滨地区全年能耗分布情况,分析不同机组运行工况及不同机组相应的制热、制冷性能系数,计算能源消耗量。能源消耗量计算公式为

$$S = \frac{Q_h}{\eta_h Q} + \frac{Q_c}{\eta_c Q} \quad (5)$$

式中 S 为年能源消耗量, m^3/a 或 kWh/a ; Q_h 为年供热量, J/a ; Q_c 为年供冷量, J/a ; η_h 为机组供热效率; η_c 为机组供冷效率; Q 为天然气或电的热值,分别为: $35.7 \text{ MJ}/\text{m}^3$ 和 $3.6 \text{ MJ}/(\text{kWh})$ 。表 1 为部分设备投资单价选取参考值,表 2 为各系统燃料价格与能耗性能系数选取参考值。

表 1 部分设备投资单价额

	原生污水源 热泵机组	直燃机	燃煤锅炉+冷水机组 燃煤锅炉	冷水机组
主机单价/(元/kW)	700	1 000	1 050	400
冷却塔/(元/t)		500		500
辅助设备、材料比例 系数/%	25	25		25
末端系统投资额/ (元/ m^2)	60	60		60

表 2 各系统燃料价格与能耗性能系数

	原生污水源 热泵机组	直燃机	燃煤锅炉+冷水机组 燃煤锅炉	冷水机组
燃料热值	3 600 kJ/(kWh)	35 700 kJ/ m^3	18 800 kJ/kg	3 600 kJ/(kWh)
燃料单价	0.47 元/(kWh)	1.2 元/ m^3	0.45 元/kg	0.47 元/(kWh)
性能系数	制热 4.0 制冷 5.0	制热 0.9 制冷 1.2	制热 0.7	制冷 4.0
电力效率			31.35%	
辅助设备能 耗系数/%	10	10	10	10
负荷系数	0.67	0.67		0.67

2.4 计算结果分析

1) 3 种方案的系统造价、净现值、净现值率见表 3。原生污水源热泵机组的造价分别是燃气直燃机组和燃煤锅炉加电制冷的 88.5%, 81.8%; 而净现值分别为方案 2, 3 的 125.6%, 131.6%, 净现值率分别为 140.7%, 159.7%。方案 1 的投资最小而收益最大, 由此可知污水源热泵系统很经济。

表 3 3 种方案的系统造价、净现值、净现值率

	系统造价/万元	净现值/万元	净现值率
方案 1	371.4	709.70	1.90
方案 2	419.6	564.86	1.35
方案 3	453.8	539.12	1.19

2) 各方案的费用年值见表 4。方案 1 的年运行费用分别是方案 2, 3 的 88.3%, 89.3%; 费用年值分别为方案 2, 3 的 88.4%, 86.6%; 方案 1 年运行费用和费用年值都是最低的。这也直接体现了污水源热泵系统的节能效果。

表 4 3 种方案的费用年值

	年固定费用/万元	年运行费用/万元	费用年值/万元
方案 1	39.50	75.71	115.21
方案 2	44.63	85.72	130.35
方案 3	48.26	84.80	133.06

2.5 各方案的一次能源平均利用率

定义系统的一次能源平均利用率为供给终端的冷热量与所需要或消耗的一次能源量的比值, 以符号 E_0 表示。

供暖终端年耗热量为 Q_h , 供冷终端年耗热量为 Q_c , 则全年一次能源平均利用率 E_0 可表示为

$$E_0 = \frac{Q_h + Q_c}{\frac{Q_h}{E_h} + \frac{Q_c}{E_c}} = \frac{1 + \frac{Q_c}{Q_h}}{\frac{1}{E_h} + \frac{Q_c}{Q_h} \frac{1}{E_c}} \quad (6)$$

式中 E_h 为供暖时的一次能源利用率; E_c 为供冷时的一次能源利用率。

电动压缩式制冷时有

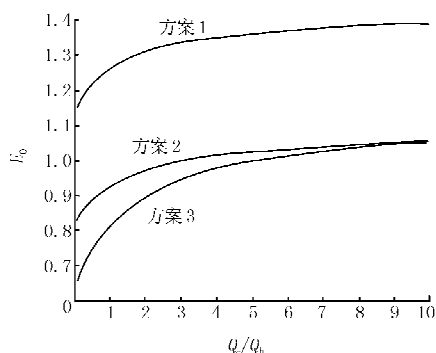
$$E_c = \eta_c D_t (1 - D_s) (1 - f) \quad (7)$$

式中 η_c 为制冷系数; D_t 为一次能源发电效率, 0.33; D_s 为电力输送损耗率, 0.05; f 为辅助设备能耗系数, 0.1。

同理对于电动压缩式机组供热有: $E_h = \eta_h D_t (1 - D_s) (1 - f)$, η_h 为供热性能系数; 对于其他方式的供冷或供热其一次能源利用率 $E = \eta (1 - f)$, η 为系统的制冷或供热性能系数。

由式(6)可知, 同种形式的供暖空调系统, 在不同地区全年一次能源平均利用率不尽相同, 是由制冷与供暖时终端能耗量的比值 (Q_c/Q_h) 大小决定, 也就是由地理位置和建筑物的类型决定的。由图 2 可知, 在 Q_c/Q_h 一定时, 方案 1 的全年一次能源平均利用率明显高于方案 2, 3, 而且大于 1, 体现了污水源热泵在一次能源利用率上的优势。

由表 5 可知, 本算例污水源热泵系统的 E_h , E_c 及 E_0 较大, 其 E_h 是方案 2 的 1.4 倍, 方案 3 的

图 2 各方案 E_0 与 Q_c/Q_h 的关系曲线

1.79 倍; E_c 是方案 2 的 1.31 倍, 方案 3 的 1.23 倍; 而对于全年一次能源平均利用率 E_0 , 方案 2 和 3 分别是方案 1 的 73%, 63%; 随着性能系数的不断提高, 该差距还会加大。因此污水源热泵系统具有很大的节能潜力。

表 5 各方案全年一次能源平均利用率

	供暖 E_h	供冷 E_c	E_0
原生污水源热泵机组	1.13	1.42	1.24
直燃机组	0.81	1.08	0.91
燃煤锅炉+冷水机组	0.63	1.13	0.78

2.6 各方案的 CO_2 排放量

各方案的年能耗量及 CO_2 排放量见表 6。方案 1 的 CO_2 排放量分别为方案 2, 3 的 117.3%, 49.9%。方案 1, 2 的排放量相差不大, 而与燃煤系统相比, 方案 1 有良好的环保性。

表 6 各方案的年能耗量及 CO_2 排放量

方案	年一次能耗量		年二次能耗	折合年一次能耗		年 CO ₂ 排放量/t
	耗煤/t	耗气/m ³	耗电/(kWh)	耗煤/t	耗气/m ³	
1			1 540 000	939.41		2 198.2
2		621 000	615 864	375.68	621 000	1 872.7
3	1 267		996 000	1 884.56		4 409.9

注: 1 kWh 电耗煤 0.61 kg; 1 kg 煤燃烧排放 CO_2 2.34 kg; 1 m^3 天然气燃烧排放 CO_2 1.6 kg。

3 结论

针对哈尔滨地区城市原生污水源热泵与其他

冷热源的对比分析, 可得出以下结论:

1) 城市原生污水源热泵系统在系统造价、净现值、费用年值等经济指标的评价中, 经济性明显; 与燃气直燃机组、燃煤加电制冷系统相比, 在经济上是值得投资的项目。

2) 城市原生污水源热泵系统与燃气直燃机组、燃煤加电制冷系统相比有较高的一次能源利用率和年一次能源平均利用率; 有良好的节能性、环保性, 是很好的绿色替换能; 有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 马最良, 姚杨, 赵丽莹. 污水源热泵系统的应用前景[J]. 中国给水排水, 2003, 19(7): 41-43
- [2] 尹军, 韦新东. 我国回收污水中热能的可行性分析[J]. 中国给水排水, 2000, 16(3): 28-30
- [3] 孟华, 龙惟定. 地源热泵技术在暖通空调中的应用[J]. 节能与环保, 2003(9): 22-25
- [4] Kevin R. Groundwater heat pump systems: experience at two high schools [G] // ASHRAE Trans, 1996, 102(1): 922-928
- [5] David R D. Geothermal systems for school [G] // ASHRAE Trans, 1998, 104(5): 872-876
- [6] 江亿. 建筑节能——实现可持续发展的必由之路[J]. 科技潮, 2005(6): 1
- [7] 全贞花, 尹军. 日本城市污水热能回收的发展现状[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2003, 20(3): 4-6
- [8] 王宏哲, 尹军. 我国城市污水热能有效利用存在的差距与对策[J]. 中国环境管理, 2001(3): 20-22
- [9] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991
- [10] 全国造价工程师执业资格考试培训教材编审委员会. 工程造价管理基础理论与相关法规[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004
- [11] 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): 196-200

· 书讯 ·

《既有建筑节能诊断与改造》

该书共 5 章, 包括: 第 1 章既有建筑的能耗特点, 第 2 章节能型物业管理, 第 3 章节能诊断方法和步骤, 第 4 章无成本/低成本节能措施与改造实例, 第 5 章推动合同能源管理模式。给出了具有指导意义的 108 个改造技术实例。

《既有建筑节能诊断与改造》一书可用于物业管理公司

培训和提高工作人员的节能管理水平, 帮助设计人员了解工程的实际运行效果并改进和完善设计方案, 以及指导能源服务公司 ESCO 对既有建筑进行节能改造, 进而推动我国的建筑节能事业。该书由薛志峰编著, 由中国建筑工业出版社出版, 全书约 30 万字, 定价 35 元。

(齐庆梅)