

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-870-06

# 西安某污水源热泵区域 供能系统设计及节能环保分析

拓炳旭<sup>1</sup> 王艳霞<sup>2</sup>

(1. 中国启源工程设计研究院有限公司 西安 710018;  
2. 深圳市郑中设计股份有限公司西安分公司 西安 710075)

**【摘要】** 以西安某污水源热泵区域供能系统为研究对象, 首先通过测试数据分析水源的水质、水温和水量, 均满足污水源热泵的使用要求; 其次介绍了该污水源热泵区域供能系统的设计; 最后, 针对本工程分析了污水源热泵系统供暖相比于燃气锅炉供暖的节能性和环保性, 分析结果表面, 污水源热泵系统供暖比燃气锅炉供暖每年可节省 2707 吨标准煤, 节能率约 48%, 每年可减少排放 7092 吨二氧化碳、23 吨二氧化硫、20 吨氮氧化物、36 吨 PM10、29 吨 PM2.5, 污水源热泵系统的应用具有显著的节能环保效益。

**【关键词】** 污水源热泵; 燃气锅炉; 区域供能; 节能; 环保  
中图分类号 TK11+5 文献标志码 A

## Design and Analysis of Energy Conservation and Environmental Protection for a Sewage Source Heat Pump District Energy Supply System in Xi'an

Tuo Bingxu<sup>1</sup> Wang Yanxia<sup>2</sup>

(1. China Qiyuan Engineering Corporation, Xi'an, 710018;

2. Shenzhen Zhengzhong Design Co., Ltd, Xi'an Branch, Xi'an, 710075)

**【Abstract】** This paper takes a sewage source heat pump district energy supply system in Xi'an as the research object. Firstly, through the analysis of test data, the water quality, temperature, and quantity of the water source are found to meet the requirements for the use of sewage source heat pumps. Secondly, the design of the sewage source heat pump district energy supply system is introduced. Finally, an analysis is conducted on the energy-saving and environmental-friendliness of the sewage source heat pump system for heating compared to gas-fired boilers. The analysis results show that the sewage source heat pump system can save 2,707 tons of standard coal per year compared to gas-fired boilers, with an energy-saving rate of approximately 48%. It can also reduce emissions of 7,092 tons of carbon dioxide, 23 tons of sulfur dioxide, 20 tons of nitrogen oxides, 36 tons of PM10, and 29 tons of PM2.5 annually. The application of the sewage source heat pump system exhibits significant energy-saving and environmental protection benefits.

**【Keywords】** Sewage Source Heat Pump; Gas-fired Boiler; District Energy Supply; Energy Saving; Environmental Protection

## 0 引言

随着国家对“节能减排”理念的不断重视, 能源系统的清洁、高效、低碳、节能利用成为新的发

展势头<sup>[1-3]</sup>, 尤其是 2020 年 9 月提出 2030 年实现“碳达峰”以及 2060 年实现“碳中和”后“节能减排”的理念被推向新的高潮<sup>[4]</sup>。《2021 中国建筑

能耗与碳排放研究报告: 省级建筑碳达峰形势评估》指出 2019 年中国建筑运行阶段能耗约占全国能源消费总量的 21.2%; 同时 2019 年中国建筑运行阶段碳排放量约占全国碳排放总量的 21.6%<sup>[5]</sup>。因此, 充分利用可再生能源, 提高系统能效水平, 对中国未来实现“双碳”目标具有重要意义。

《西安市大气污染治理专项行动 2024 年工作方案》<sup>[6]</sup>指出: 需大力发展清洁取暖方式, 新建居民住宅、商业综合体等必须使用清洁能源取暖(地热能、空气源热泵、污水源热泵等)。城市污水具有冬暖夏凉、水量大且稳定、水温恒定的特点, 污水中蕴含着巨大的低品位热量, 约占整个城市废热能的 40%<sup>[7]</sup>。利用污水源热泵回收这部分低品位热量, 既实现了城市废热的回收利用, 又开发了一种新的可再生清洁能源的利用方式, 同时替代了传统燃气锅炉和冷却塔, 具有重要的节能与环保价值。本文以西安某污水源热泵区域供能系统为研究对象, 分析其节能减排效果。

## 1 项目概况

本工程位于西安市, 该项目 2014 年建成,

表 1 污水处理厂出水的水质检测结果

Table 1 Water quality test results of the effluent from the sewage treatment plant

检测项目	pH/25℃	浊度/NTU	钙/(mg/L)	总碱度/(mg/L)	游离氯/(mg/L)
检测结果	6.9	9	56.1	150.1	<0.01
检测项目	悬浮物/(mg/L)	Cl <sup>-</sup> /(mg/L)	铁/(mg/L)	异养菌总数/(个/mL)	有机磷/(mg/L)
检测结果	4.0	450	<0.08	1×10 <sup>4</sup>	0.32

基于标准《采暖空调系统水质 (GB/T 29044-2012)》对集中空调开式循环冷却水系统水质要求, 对表 1 的检测结果进行分析。结果显示该污水处理厂出水的水质较好, 可以直接进入水源热泵机组的蒸发器和冷凝器, 作为热泵机组的冷热源。

### 2.2 水温分析

冬季和夏季分别测试污水处理厂出水的温度, 通过对测试数据进行统计分析, 得出冬季和夏季的水温情况, 如表 2 和表 3 所示。

表 2 冬季水温情况

Table 2 Water temperature conditions in winter

时间/月	日平均温度/℃	最高水温/℃	最低水温/℃
12	13.4	14.0	12.8
1	12.8	14.0	12.1
2	14.3	16.2	13.2
3	13.3	16.3	11.8

2014~2022 年该区域能源站一直用燃气锅炉供暖。2022 年底实现中水引水管线贯通, 污水源热泵已具备条件, 2023 年将能源站的冷热源改为污水源热泵+现状燃气锅炉调峰的技术形式, 2023 年底污水源热泵投入使用。该区域能源站负责 A、B、C、D 共 4 个地块的供冷供热, 能源站机房位于 D 区地下一层。末端业态主要为住宅、公寓、商业, 其中住宅仅供热, 公寓和商业供热供冷, 总供热面积 83 万 m<sup>2</sup>, 总供冷面积 15.4 万 m<sup>2</sup>。

## 2 水源状况分析

距离本项目 2km 的污水处理厂是污水源热泵系统的水源, 污水处理厂出水的水源条件是污水源热泵系统安全高效运行的保证, 影响污水源热泵系统能效的主要参数是水源的水质、水温和水量。

### 2.1 水质分析

污水处理厂出水的水质是判断其是否符合热泵用水标准的关键。陕西某监测中心对污水处理厂出水的水质进行检测, 主要项目的检测结果如表 1 所示。

表 3 夏季水温情况

Table 3 Water temperature conditions in summer

时间/月	日平均温度/℃	最高水温/℃	最低水温/℃
6	22.8	22.9	21.7
7	28.2	31.3	21.9
8	28.6	31.9	22.4
9	25.6	30.7	20.8

结果显示: 供暖季污水温度在 11.8~16.3 之间波动; 供冷季污水温度在 20.8~31.9 之间波动。本工程采用钢筋混凝土管输水, 以供暖季为例, 考虑此部分的温降, 通过传热学计算得出从污水处理厂到能源站缓冲水池的污水温降约为 0.2℃。为保证温度最小程度的降低, 检查井井盖采用保温井盖, 能源站缓冲水池采用回流措施, 提高热泵机组的进水温度。因此, 本工程污水的温度可以满足污水源热泵系统的要求。

2.3 水量分析

业主提供冬季和夏季排放的污水量如表 4 和

表 5 所示, 冬季和夏季排放的污水量较为稳定, 满足污水源热泵系统的使用要求。

表 4 冬季排放污水量

Table 4 Wastewater discharge volume in winter

时间/月	日排放量/(m <sup>3</sup> /d)	最大小时排放量/(m <sup>3</sup> /h)	最小小时排放量/(m <sup>3</sup> /h)
12	145116	6046	4131
1	140118	6740	5204
2	115108	6087	3729
3	117369	5833	3605

表 5 夏季排放污水量

Table 5 Wastewater discharge volume in summer

时间/月	日排放量/(m <sup>3</sup> /d)	最大小时排放量/(m <sup>3</sup> /h)	最小小时排放量/(m <sup>3</sup> /h)
6	124105	5343	5053
7	118251	5619	4306
8	110977	5623	3728
9	112564	5578	4126

因此, 本工程的水源状况较好, 水质、水温和水量均能满足污水源热泵的使用要求。

经验数据, 综合考虑后得出冷、热负荷指标<sup>[8]</sup> (见表 6) 和建筑物面积负荷统计 (见表 7)。

表 6 冷、热负荷指标

Table 6 Cooling and heating load indicators

项目	住宅	商业	公寓
冷负荷指标/(W/m <sup>2</sup> )	—	130	90
热负荷指标/(W/m <sup>2</sup> )	40	63	50

3 污水源热泵系统设计

3.1 设计负荷

本项目采用负荷模拟软件对用能地块建筑进行负荷模拟计算并参考西安地区其他类似项目的

表 7 建筑物面积负荷统计

Table 7 Building area load statistics

区域	业态	分区	供热面积/万 m <sup>2</sup>		供冷面积/万 m <sup>2</sup>		热负荷/kW	冷负荷/kW
			接入	实供	接入	实供		
D 区	住宅	低区	36.4	12.3	—	—	4916	—
		高区		13.2	—	—	5276	—
A 区	住宅	低区	17.7	6.2	—	—	2478	—
		高区		6.2	—	—	2478	—
B 区	底商	低区	2.3	1.4	2.3	1.4	869.4	1794
		住宅	13.5	5.4	—	—	2154.6	—
B 区	商业	低区		5.6	3.4	5.6	3.4	2116.8
		高区	4.1		—	—	1625.4	—
C 区	公寓	低区	7.5	2.25	7.5	2.25	1125	2025
		高区		2.25	—	—	1125	2025
合计	—	—	83	56.7	15.4	9.3	24164.2	10212

住宅入住率按 70%考虑, 公建入住率按 60%考虑, 实际总供热面积 56.7 万 m<sup>2</sup>, 总供冷面积 9.3 万 m<sup>2</sup>。计算得到该能源站设计总热负荷为 24.16MW, 设计总冷负荷为 10.22MW; 其中低区设计热负荷为 13.66MW, 设计冷负荷为 8.2MW; 高区设计热负荷为 10.5MW, 设计冷负荷为 2.02MW。

### 3.2 系统设计

污水处理厂处理后的中水, 通过重力流的输送方式进入能源站的缓冲水池。由于处理后的中水水质较好, 本工程设计污水侧与水源热泵机组采用直接换热的方式, 处理后的中水直接进入水源热泵机组, 作为热泵机组的冷热源。直接换热可提高换热效率, 降低能量损失。换热后的中水排至室外雨水井。处理后的中水进入热泵机组前设置全程综合水处理器, 进入机组后设置一套胶球在线清洗装置, 根据供热或制冷工况, 通过阀门控制胶球进入蒸发

器或冷凝器, 避免水质对系统的不利影响, 保证系统的安全高效运行。

该能源站的设计热负荷远大于设计冷负荷, 因此本工程装机容量按设计热负荷选型。夏季冷负荷装机综合使用系数按 0.75 考虑, 冬季热负荷装机按 1 考虑。水源热泵承担全部热负荷, 选择 3 台制热量为 7000kW, 制冷量为 6227kW 和 1 台制热量为 4000kW, 制冷量为 3600kW 的离心式水源热泵机组, 采取大小机组搭配的形式满足末端负荷的变化需求。3 台制热量 4200kW 的现状燃气锅炉作为调峰热源使用。

图 1 为本工程污水源热泵系统原理图。冬季设计取退水温度为 15/9℃, 夏季设计取退水温度为 30/37℃。能源站负荷侧冬季设计供回水温度为 45/35℃, 夏季设计供回水温度为 5/12℃。水源侧和负荷侧循环水泵均采用变频调速+台数控制, 根据主机的负荷率优先调整水泵的转速, 节约运行费用。

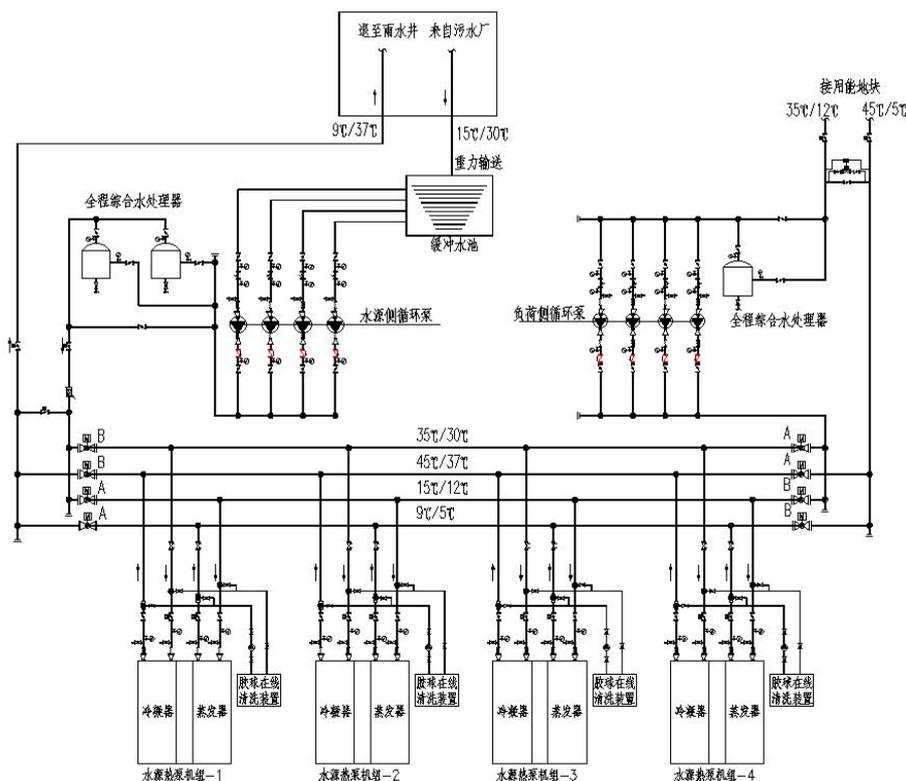


图 1 污水源热泵系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of wastewater source heat pump system

污水源热泵系统通过管路上设置的电动阀进行冬夏季切换, 根据主机供冷或供热状态联动控制电动阀的启闭。冬季供热工况, 阀门 A 开启, 阀门 B 关闭; 夏季供冷工况, 阀门 A 关闭, 阀门 B 开启。通

过监测系统供水温度和主机出水温度, 依次对主机进行加减机, 热泵机组制热时容量调节下限为 40%, 制冷时容量调节下限为 25%, 单机的容量调节下限小于最小负荷要求。表 8 为能源站主要设备表。

表 8 能源站主要设备表

Table 8 List of main equipment in the energy station

序号	设备名称	规格型号	单位	数量	备注
1	离心式	冬季: 制热量 7000kW, 蒸发器 15/9℃, 冷凝器 35/45℃	台	3	ACOP≥5.4
	水源热泵	夏季: 制冷量 6227kW, 蒸发器 12/5℃, 冷凝器 30/37℃			
2	离心式	冬季: 制热量 4000kW, 蒸发器 15/9℃, 冷凝器 35/45℃	台	1	ACOP≥5.4
	水源热泵	夏季: 制冷量 3600kW, 蒸发器 12/5℃, 冷凝器 30/37℃			
3	水源侧	冬季: 流量 920m³/h, 扬程 39m, 功率 132kW	台	4	冬夏季切换, 变频
	循环水泵	夏季: 流量 920m³/h, 扬程 39m, 功率 132kW			
4	负荷侧	冬季: 流量 661m³/h, 扬程 39m, 功率 110kW	台	4	冬夏季切换, 变频
	循环水泵	夏季: 流量 837m³/h, 扬程 37m, 功率 132kW			
5	胶球在线清洗装置	发球流量≥7L/s, 发球机扬程≥20m, 发球周期≤3s, 功率 3.0kW	台	4	——
6	全程综合水处理器	设计水量 2400 m³/h, 单台处理水量 2400 m³/h, 进出水口径 DN600, 功率 1.0kW	台	1	负荷侧
7	全程综合水处理器	设计水量 3200 m³/h, 单台处理水量 1760 m³/h, 进出水口径 DN500, 功率 1.0kW	台	2	水源侧

#### 4 节能环保分析

##### 4.1 年耗热量计算

该能源站服务的末端业态,住宅采用地板辐射供暖,商业和公寓采用空调供暖。根据表 7 的负荷统计,冬季供暖设计热负荷为 18928kW,冬季空调供暖设计热负荷为 5236kW。根据公式(1)、

(2) [9]计算供暖期年耗热量为 139662J/a。

$$Q_h^a = 0.0864 \cdot N \cdot Q_h \cdot \frac{(t_i - t_{ave})}{(t_i - t_{o,h})} \quad (1)$$

式中:  $Q_h^a$  为供暖年耗热量, GJ/a;  $N$  为供暖期天数, d/a;  $Q_h$  为供暖设计热负荷, kW;  $t_i$  为室内计算温度, °C;  $t_{ave}$  为供暖期室外平均温度, °C;  $t_{o,h}$  为供暖室外计算温度, °C。

$$Q_a^a = 0.0036 \cdot T_{a,d} \cdot N \cdot Q_a \cdot \frac{(t_i - t_{ave})}{(t_i - t_{o,a})} \quad (2)$$

式中:  $Q_a^a$  为空调供暖耗热量, GJ/a;  $T_{a,d}$  为供暖期空调装置日平均运行小时数, h/d;  $Q_a$  为空调冬季设计热负荷, kW;  $t_{o,a}$  为冬季空调室外计算温度, °C。

##### 4.2 节能分析

该区域能源站 2014~2022 年一直用燃气锅炉供暖,以燃气锅炉作为比较对象。将燃气锅炉供暖和污水源热泵系统供暖所消耗的能源转化为一次

能源进行比较,分析其节能性。燃气锅炉的效率取 85%, 污水源热泵机组供暖能效比取 5.4, 标准煤的热值取 29270kJ/kg。

供热工况下一次能源利用率是指单位制热量所消耗的一次能源,用  $OEER$  表示,则污水源热泵系统制热工况的一次能源利用率<sup>[10]</sup>为:

$$OEER = \varepsilon_h \cdot \eta_c \cdot \eta_d \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_h$  为热泵冬季工况制热性能系数;  $\eta_c$  为发电厂效率,一般为 0.30~0.35, 一般平均取 0.32;  $\eta_d$  为输配电效率,近似取 0.95。

燃气锅炉供热的一次能源利用率<sup>[10]</sup>为:

$$OEER = \eta_{hb} \quad (4)$$

式中:  $\eta_{hb}$  为锅炉效率,燃气锅炉取 0.85。

由前文可知本工程供暖期年耗热量为 139662GJ/a, 燃气锅炉和污水源热泵系统供暖的能源消耗计算如表 9 所示。

表 9 燃气锅炉和污水源热泵系统供暖的节能计算

Table 9 Energy-saving calculation for heating with gas-fired boiler and sewage source heat pump system

系统	一次能源利用率	一次能源消耗量/GJ	折合标准煤/吨
污水源热泵	1.6416	85076	2907
燃气锅炉	0.85	164307	5614

由此计算结果可知,本工程中污水源热泵系统供暖的一次能源利用率为 1.6416,比燃气锅炉供热

高 0.7916, 一次能源利用率越大则表示系统越节能; 污水源热泵系统供暖的一次能源消耗量为 85076GJ, 燃气锅炉供暖的一次能源消耗量为 164307GJ; 相比于燃气锅炉供暖, 污水源热泵系统供暖的一次能源消耗节省量为 79231GJ, 相当于每年节省 2707 吨标准煤, 节能率约 48%。污水源热泵系统供暖与燃气锅炉供暖相比节能效果明显。

### 4.3 环保分析

由上文计算得到本工程污水源热泵系统供暖比燃气锅炉供暖每年节省 2707 吨标准煤。按照每燃烧 1 吨标准煤产生 2620kg 二氧化碳、8.5kg 二氧化硫、7.4kg 氮氧化物、13.5kgPM10、10.8kgPM2.5 进行计算<sup>[1]</sup>。表 10 是污水源热泵系统供暖相比于燃气锅炉供暖污染物的减排量。

表 10 污水源热泵系统供暖相比于燃气锅炉供暖污染物的减排量

Table 10 Reduction in pollutant emissions from sewage source heat pump system heating compared to gas-fired boiler heating

污染物	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM10	PM2.5
减排量/(吨/年)	7092	23	20	36	29

由表 10 可以看出, 在环保方面污水源热泵系统供暖比燃气锅炉供暖具有明显的优势, 每年可减少排放 7092 吨二氧化碳、23 吨二氧化硫、20 吨氮氧化物、36 吨 PM10、29 吨 PM2.5, 环保效益显著。

## 5 结论

本文以西安某污水源热泵区域供能系统为研究对象, 从系统设计到节能环保分析, 得出以下结论:

(1) 本工程处理后的中水水质较好, 中水直接进入水源热泵机组, 采用直接式污水源热泵系统可提高换热效率。

(2) 本工程采用污水源热泵系统供暖比燃气锅炉供暖每年可节省一次能源量为 79231GJ, 相当于每年节省 2707 吨标准煤, 节能率约 48%, 节能效果明显。

(3) 本工程采用污水源热泵系统供暖比燃气锅炉供暖每年可减少排放 7092 吨二氧化碳、23 吨二氧化硫、20 吨氮氧化物、36 吨 PM10、29 吨

PM2.5, 环保效益显著。

综上所述, 污水源热泵系统能够高效提取污水中的热能, 降低化石类能源的消耗, 结合水源热泵主机效率高、系统运行稳定可靠的特点, 可有效降低系统运行费用。该系统的应用与国家双碳目标高度契合, 为碳排放做出了积极贡献, 实现追求经济效益的同时, 改善环境质量, 保护生态系统。

### 参考文献:

- [1] Li W, Zhang S, Lu C. Exploration of China's net CO<sub>2</sub> emissions evolutionary pathways by 2060 in the context of carbon neutrality[J]. Science of the Total Environment, 2022,831:154909.
- [2] Wang H, Gao L, Jia Y. The predicament of clean energy technology promotion in China in the carbon neutrality context: Lessons from China's environmental regulation policies from the perspective of the evolutionary game theory[J]. Energy Reports, 2022,84706-4723.
- [3] 国务院.《“十三五”节能减排综合工作方案》[J].中国印刷,2017,15(2):10-10.
- [4] 徐伟,倪江波,孙德宇,等.我国建筑碳达峰与碳中和目标分解与路径辨析[J].建筑科学,2021,37(10):1-8,23.
- [5] 中国建筑能耗与碳排放数据专业委员会.2021 中国建筑能耗与碳排放研究报告:省级建筑碳达峰形势评估[R].重庆:中国建筑节能协会,2021.
- [6] 西安市人民政府办公厅.关于印发大气污染治理专项行动 2024 年工作方案的通告:市政办函[2024]25 号[A/OL].(2024-04-07)[2024-04-07].<https://www.xa.gov.cn/gk/zcfg/szfbgtwj/1776797481707249665.html>
- [7] 郑仁春.污水源热泵年运行性能实验研究及预测[J].建筑节能,2020,48(9):29-35.
- [8] 佚名.民用建筑暖通空调设计统一技术措施:2022[M].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [9] CJJ/T 34-2022,城镇供热管网设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [10] 余晓平.暖通空调运行管理[M].杭州:浙江大学出版社,2020.
- [11] 陈雷,尹军,白莉.城市污水再生及热能利用技术[M].北京:化学工业出版社,2010.