

基于自适应权重粒子群的污水提热系统优化策略

徐 辉^{1,2}, 夏佳乐¹, 马振耀¹, 边德军^{2,3}, 艾胜书^{2,3}

(1. 长春工程学院 能源动力工程学院, 长春 130012; 2. 长春工程学院 吉林省城市污水处理重点实验室, 长春 130012; 3. 长春工程学院 市政与环境工程学院, 长春 130012)

摘 要: 针对我国寒带地区冬季污水处理厂因原生污水水温过低导致生化反应效果下降的问题, 以污水热泵提热循环系统模型为基础, 针对热源侧变流量控制方案, 提出了一种基于自适应权重粒子群优化 (PSO) 算法的变频控制策略。以东北某城市污水处理厂为原型, 以系统年运行能耗最低为目标, 优化了全年不同原生污水温度下热源侧的污水泵频率。通过对该系统变流量控制和定流量控制两种不同控制方案进行模拟运行, 仿真验证了本文算法的有效性。

关键词: 环境工程; 污水源热泵; TRNSYS; 粒子群优化算法; 能耗分析

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-3049-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250542

Optimization strategy for sewage heat extraction system based on adaptive weight particle swarm

XU Hui^{1,2}, XIA Jia-le¹, MA Zhen-yao¹, BIAN De-jun^{2,3}, AI Sheng-shu^{2,3}

(1. School of Energy & Power, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Jilin Key Laboratory of Urban Sewage Treatment, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 3. School of Municipal and Environmental Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: To address the issue of reduced biochemical reaction efficiency in wastewater treatment plants located in frigid zones of China during winter, caused by excessively low temperatures of raw sewage, a variable-frequency control strategy based on an adaptive weight particle swarm optimization (PSO) algorithm was proposed. Using a wastewater treatment plant in a northeastern Chinese city as a prototype, with the goal of lowest annual operating energy consumption of the system, the frequency of the sewage pump on the heat source side was optimized for different raw sewage temperatures throughout the year. Simulation runs comparing this system's variable flow rate control scheme with constant flow rate control scheme were conducted. The simulation results demonstrated the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: environmental engineering; sewage heat pump; TRNSYS; particle swarm optimization algorithm; energy consumption analysis

收稿日期: 2025-06-20.

基金项目: 吉林省科学技术厅科技发展计划项目 (20210203172SF).

作者简介: 徐辉 (1976-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 可再生能源综合利用技术. E-mail: 759453070@qq.com

通信作者: 边德军 (1967-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 城市污水及工业废水处理技术. E-mail: ccgxybiandj@163.com

0 引言

目前,污水处理厂常用污水处理工艺为 A^2O 工艺,该工艺处理污水最适宜的温度为 $15\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。而我国寒带地区冬季污水处理厂因原生污水水温低,易导致污水处理效果下降、排水水质不达标。因此,针对污水处理现状提出解决方案,具有重要的现实意义。

目前,对于提高寒带地区冬季污水处理厂污水处理效果的常用方法有:①投加悬浮填料。该方法填料一次投资较大,更换费用较高^[2]。②低温菌培养和投加。该方法高污泥浓度影响二沉池负荷,需增加过滤深度处理^[3]。③增加生化处理单元容积,使生化池停留时间长达 $20\sim 30\text{ h}$ 。该方法占地面积增大,且设计负荷不利于夏季运行^[4]。④污水提温。利用热源与污水的热量交换提高污水温度,以达到处理效果。这种方法较前3种方法成本更低,更加便利。目前,现有技术多采用市政管网供热^[3]、锅炉蒸汽^[5]等作为热源,但建设成本较高,且蒸汽会对生态环境产生污染。因此,寻找高效、节能、可靠的热源成为当前研究热点。

目前,利用热泵加热污水的方法正在兴起,王巧霞^[6]总结了利用低温污水热泵给生化池提温的设计经验,结果表明污水热泵技术不仅可以回收污水的热量,还能将污水提高到合适的温度,该技术能效比高且不会对生态环境产生污染。林波^[7]对比了以原生污水作为热源和以二沉池出水(二次水)作为热源的两种污水提温方案,分析了二者的耗能和运行费用,结果表明将二次水作为热源具有较高的环境效益和经济效益。

粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法具有全局搜索能力强的优势,已应用于污水热泵系统优化领域,且正从单一参数优化向复杂系统协同优化扩展。Shen等^[8]通过PSO算法实现污水处理智能控制,解决了能耗、效率、成本等冲突目标的协同优化。Su等^[9]以活性污泥污水处理法为研究对象,利用PSO算法进行优化,实验分析发现,PSO算法可显著提高污水处理系统能效。

目前,污水热泵系统实际运行中多采用定流量控制策略,如果将定流量控制改为变流量控制,能否降低系统能耗需要进一步研究。本文基于污水热泵提热循环系统,在TRNSYS平台上建立了

该系统的变流量及定流量控制系统模型并进行了仿真。针对变流量控制系统,采用自适应权重粒子群优化算法,以全年综合运行能耗最低为目标进行了优化控制。通过对变流量及定流量控制系统进行仿真实验对比,以验证本文算法的有效性。

1 污水热泵提热循环系统建模

1.1 污水热泵提热循环系统原理

污水热泵提热循环系统的工作原理为:通过污水热泵提取污水处理厂处理后二次水中蕴含的热量加热原生污水,以提高污水生化反应处理效果。该系统原理图如图1所示。

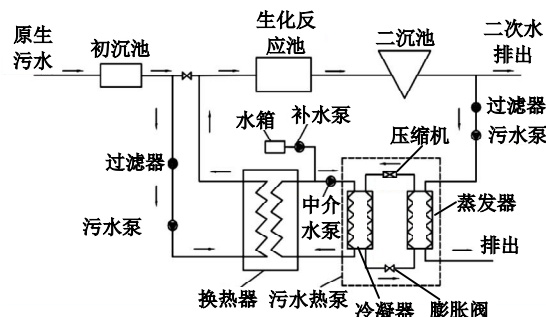


图1 污水热泵提热循环系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the sewage heat pump heat extraction circulation system

该循环系统采用间接式循环,主要设备为污水热泵、污水泵、中介水泵、换热器、水箱等。二次水进入污水热泵的蒸发器释放热量,蒸发器中的制冷剂吸热后汽化,汽化后的制冷剂经压缩机增压进入冷凝器冷凝放热;换热器一侧的中介水(清水)循环至冷凝器,吸收制冷剂释放的热量后温度升高;升温后的中介水被输送至换热器另一侧,与原生污水换热,原生污水提温后送入生化反应池,从而提高生化反应效果。

1.2 污水热泵提热循环系统运行模型

1.2.1 污水热泵

污水热泵的额定性能系数(Coefficient of performance, COP)定义为:

$$\text{COP}_{\text{rated}} = \frac{Q_{\text{heat/rated}}}{P_{\text{input/rated}}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{heat/rated}}$ 为额定制热量,kW; $P_{\text{input/rated}}$ 为额定输入功率,kW。

在变工况情况下,引入负荷率修正函数 $f(x)=0.49x+0.47$,考虑蒸发温度 T_{evap} 和冷凝温度 T_{cond} 波动对性能的影响,建立线性修正模型为^[10]:

$$\text{COP} = \text{COP}_{\text{rated}} \cdot f(x) \cdot \left(1 - k \frac{\Delta T - \Delta T_{\text{rated}}}{\Delta T_{\text{rated}}}\right) \quad (2)$$

式中: ΔT 为实际温差,℃; $\Delta T_{\text{rated}}=45$ ℃为额定温差,该参数参考了某型污水源热泵产品手册的额定工况(额定蒸发温度为5℃、额定冷凝温度为50℃,额定温差为45℃); $k=0.0229$ 为性能衰减系数。

输入功率 P_{input} 的计算公式为:

$$P_{\text{input}} = \frac{Q_{\text{heat}}}{\text{COP}} \quad (3)$$

式中: Q_{heat} 为制热量,kW。

1.2.2 循环水泵

污水热泵提热循环系统的循环水泵有两类:一类是中介水泵;另一类是污水泵,分为二次污水水泵和原生污水泵。

中介水泵的瞬时输入功率 $P_{\text{p,c}}^{[11]}$ 为:

$$P_{\text{p,c}} = \frac{S \cdot G^3}{367 \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_v} \quad (4)$$

式中: S 为管网阻抗, $S=0.003837 \text{ s}^2/\text{m}^5$; G 为水泵流量, m^3/h ; G_A 为归一化流量, $G_A=G/G_{\text{rated}}$, m^3/h ,其中 G_{rated} 为额定水泵流量, m^3/h ; η_p 为水泵效率; η_m 为电动机效率, $\eta_m=0.842$; η_v 为变频器效率, $\eta_v=0.95$ 。

通过对10 m^3/h 额定流量水泵的效率数据进行二次多项式拟合,得到中介水泵的效率模型 $^{[12]}$ 为:

$$\eta_{\text{p,c}} = 0.038091 + 0.953918 \cdot G_A - 0.419697 \cdot G_A^2 \quad (5)$$

污水泵的瞬时输入功率为 $^{[12]}$:

$$P_{\text{p,o}} = \frac{G \cdot (H_0 + S \cdot G^2)}{367 \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_v} \quad (6)$$

式中: S 为管网阻抗, $S=0.003837 \text{ s}^2/\text{m}^5$; G 为水泵流量, m^3/h ; H_0 为水泵吸上高度, $H_0=6.8681 \text{ m}$; $\eta_m=0.871$ 。参数均基于实测数据辨识获得。

污水泵的效率模型为:

$$\eta_{\text{p,o}} = 0.001500 + 1.525149 \cdot G_A - 0.883557 \cdot G_A^2 \quad (7)$$

1.2.3 换热器

换热器的热平衡方程 $^{[13]}$ 为:

$$Q_{\text{heat}} = c_p \cdot \rho \cdot G_{\text{cw}} \cdot (T_{\text{cw,in}} - T_{\text{cw,out}}) \quad (8)$$

式中: Q_{heat} 为换热器的制热量,kW; c_p 为水的比热容; ρ 为水的密度, $\rho=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; G_{cw} 为清水质量流量, kg/s ,取设计值10 $\text{m}^3/\text{h}=2.78 \text{ kg}/\text{s}$; $T_{\text{cw,in}}$ 和 $T_{\text{cw,out}}$ 分别为换热器中介水进、出口温度,℃。

根据寒带城市某污水处理厂全年原生污水温度监测数据,原生污水温度为7.4~21.2℃,而生化反应池最低适宜温度为15℃,因此原生污水需从最低7.4℃提升至15℃。结合换热器换热面积(设计值50 m^2)及总传热系数(实测值850 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$),通过热平衡计算可知,中介水需提供5℃温差,才能满足提热需求。基于上述计算结果,确定换热器中介水入口温度 $T_{\text{cw,in}}=40$ ℃,换热器中介水目标温度 $T_{\text{cw,out}}=45$ ℃。

换热量计算公式为:

$$Q = K \cdot A \cdot \Delta T_{\text{lm}} \quad (9)$$

$$\Delta T_{\text{lm}} = \frac{(T_{\text{cw,in}} - T_{\text{sw,out}}) - (T_{\text{cw,out}} - T_{\text{sw,in}})}{\ln \left(\frac{T_{\text{cw,in}} - T_{\text{sw,out}}}{T_{\text{cw,out}} - T_{\text{sw,in}}} \right)} \quad (10)$$

式中: K 为总传热系数, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$; A 为换热面积, m^2 ; $T_{\text{sw,in}}$ 和 $T_{\text{sw,out}}$ 分别为污水进、出口温度,℃。

1.2.4 蒸发温度-流量耦合模型

在热泵系统性能分析中,蒸发温度与污水流量的动态关系是影响COP的关键因素。基于热力学第一定律和换热器特性,建立蒸发温度计算模型 $^{[13]}$,即:

$$T_{\text{evap}} = T_{\text{sw,in}} - \Delta T_{\text{approach}} \quad (11)$$

$$\Delta T_{\text{approach}} = \alpha \cdot \left(\frac{G_{\text{rated}}}{G} \right)^{\beta} + \gamma \quad (12)$$

式中: $\Delta T_{\text{approach}}$ 为传热接近温差,℃; $G=(f/f_{\text{rated}})$ 为污水实际流量, m^3/h ,其中, f 为二次水污水泵运行频率, f_{rated} 为额定频率; G_{rated} 为额定流量, m^3/h ; α 、 β 、 γ 均为实验拟合参数。

通过搭建试验台,测试不同污水流量(5~15 m^3/h)下的传热接近温差,共获取30组数据(流量间隔0.5 m^3/h),采用最小二乘法对数据进行曲线拟合,以式(12)为目标函数,得到 $\alpha=3.2$ 、 $\beta=0.8$ 、 $\gamma=2.1$,拟合优度 $R^2=0.96$ 。

1.2.5 污水热泵提热循环系统全年能耗模型

对于污水热泵提热循环系统,当污水温度大于15℃时,污水热泵处于关闭状态;当污水温度为7.4~15℃时,污水热泵开启,可通过每小时系统能耗乘以该温度持续小时数的总和计算系统全年能耗,即:

$$E = \sum_{t=7.4}^{15} \left(\frac{Q_{\text{heat}}}{\text{COP}} + P_{\text{pump}} \right) \cdot h_t \quad (13)$$

式中: P_{pump} 为循环水泵总功率,kW; COP为变工况污水热泵性能系数; h_t 为各温度持续小时数。

2 基于自适应权重粒子群的污水提热循环系统优化

粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法。该算法模拟了鸟群、鱼群等生物群体的社会行为,通过群体中个体间的信息共享寻找最优解。粒子群优化算法中,每个解被看做搜索空间中的一个“粒子”,每个粒子都有各自的位置和速度,以及一个由目标函数决定的适应度值。粒子在搜索空间中移动,在每一次迭代中,通过比较适应度值,得到个体极值和全局极值更新自己的位置和速度。其中,个体极值是粒子本身找到的最优位置,全局极值是整个粒子群目前找到的最优位置。粒子通过式(14)(15)实现位置和速度的更新^[14]。

$$v_{id}^{(k)} = \omega \cdot v_{id}^{(k-1)} + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id} - x_{id}^{(k-1)}) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{id} - x_{id}^{(k-1)}) \quad (14)$$

$$x_{id}^{(k)} = x_{id}^{(k-1)} + v_{id}^{(k)} \quad (15)$$

式中: ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 均为加速因子; r_1 、 r_2 均为相互独立且在 $[0,1]$ 之间服从均匀分布的随机变量; p 为个体最优值; g 为群体最优值。

在粒子群优化算法中,惯性权重的设定对粒子的探索和开发行为起着关键作用。较大的惯性权重能使粒子在算法初期快速更新位置,进而强化对目标空间的广泛探索;而较小的惯性权重则会使粒子更倾向于局部开发。本文采用了一种自适应权重策略,该策略可动态调节惯性权重,如式(16)~式(18)所示,在探索与开发间取得平衡,以提升算法寻找全局最优解的能力和效率。

$$\omega(t) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \text{Logistic}\left(\frac{\Delta R \cdot L}{L_{\max}} - R_{\max}\right) \quad (16)$$

$$\text{Logistic}(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (17)$$

$$\Delta R = R_{\max} - R_{\min} \quad (18)$$

式中: $\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别为惯性权重的上限和下限; $R_{\max}$ 和 $R_{\min}$ 均为控制参数。

通过动态调整惯性权重,可控制算法的搜索和优化,具体流程如图2所示。

产生污水热泵提热循环系统能耗的主要设备包括污水热泵和污水泵。系统运行过程中:①当原生污水进水温度升高时,污水热泵所需的提热

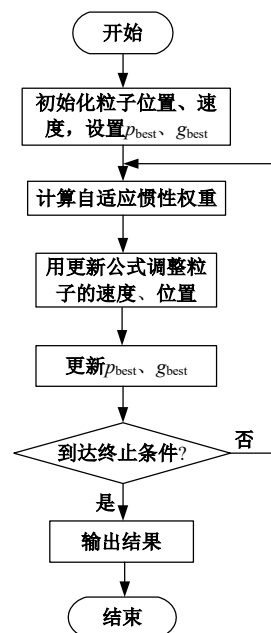


图2 自适应权重粒子群算法计算流程

Fig. 2 Computational procedure of adaptive weight particle swarm optimization algorithm

量减少,污水热泵能耗减小;②二次水污水泵的能耗随频率的降低而降低,但频率降低会导致污水热泵能耗增加。因此,系统运行结果受原生污水进水温度和二次水污水泵频率两个变量影响。本文采用自适应权重粒子群优化算法对系统进行优化,以得到原生污水不同进水温度下全年系统运行能耗最小的二次水污水泵频率,对应的能耗模型为:

$$\min E = \sum_{t=7.4^{\circ}\text{C}}^{15^{\circ}\text{C}} \left[\frac{Q_{\text{heat}}}{\text{COP}} + P_{\text{pump}} \right] \cdot h_t \quad (19)$$

该模型的约束条件为变流量污水泵的频率为 $[25, 50]$ Hz, $Q_{\text{heat}} \leq 105.8$ kW(基于选型的热泵最大制热量)。

3 模拟运行和结果分析

3.1 污水热泵提热循环系统仿真模型搭建

污水热泵提热循环系统的主要模块包括污水热泵模块(Type225)、换热器模块(Type5g)、定流量污水泵模块(Type114)和变流量污水泵模块(Type110),在TRNSYS中连接各个模块,搭建污水热泵提热循环系统,如图3所示。原生污水经换热器提热后直接进入生化反应池,通过TRNSYS的温度监测模块实时采集换热器出口处原生污水的温度(进入生化反应池的温度)。

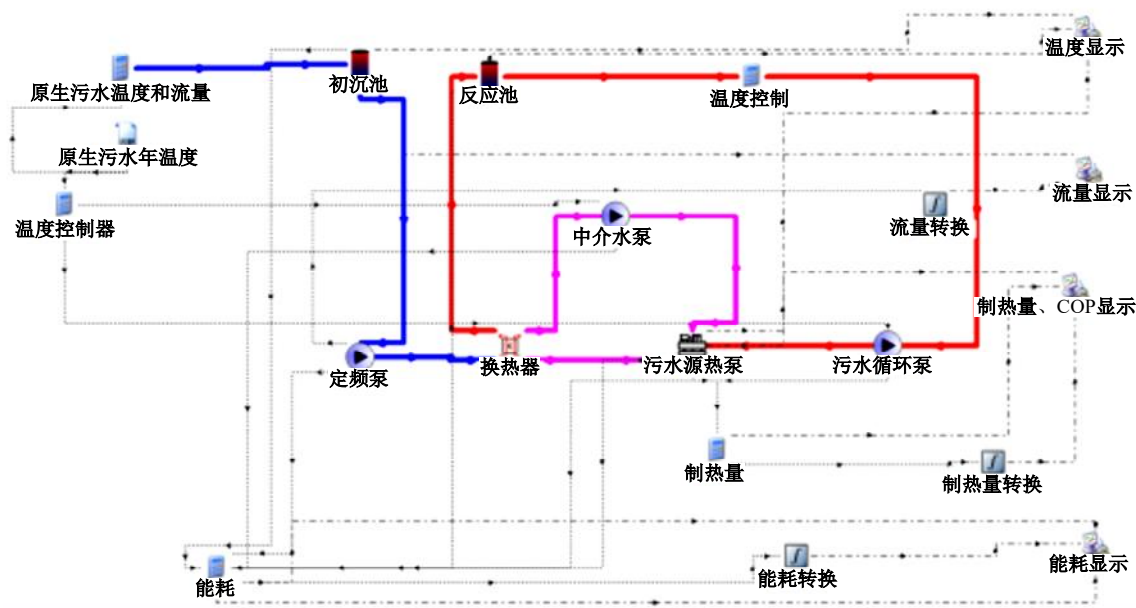


图3 污水热泵提热循环系统 TRNSYS 仿真

Fig. 3 TRNSYS simulation of the sewage heat pump heat extraction circulation system

3.2 温度运行结果分析对比

将冬季寒带城市某污水处理厂全年的实际温度数据导入仿真系统进行模拟,该污水处理厂全年最低污水温度为 7.4℃,最高污水温度为 21.2℃,在 1~4 月和 10~12 月污水温度低于 15℃期间,污水热泵将会开启。以原生污水流量 10 m³/h 为例,8~14℃的原生污水在利用污水热泵提热循环系统提热后进入生化反应池的温度如表 1 所示。

表 1 8~14℃原生污水换热后的温度

Table 1 Temperature of raw sewage after heat exchange at 8~14℃

原生污水 温度/℃	生化反应池污 水温度/℃	原生污水 温度/℃	生化反应池污 水温度/℃
8	16.65	12	20.89
9	17.71	13	21.94
10	18.77	14	23.01
11	19.83		

从表 1 可以看出,原生污水进水温度每升高 1℃,生化反应池的污水温度呈线性增长趋势。根据单一变量原则,在对比变流量和定流量情况下必须控制温度相同,即原生污水提热后进入生化反应池的温度相同。基于此,实验将生化反应池的温度控制在处理效果最佳温度区间的最低温度 15℃。污水热泵提热循环系统全年的原生污水温度,以及定温控制和变温控制下生化反应池污水温度如图 4 所示。

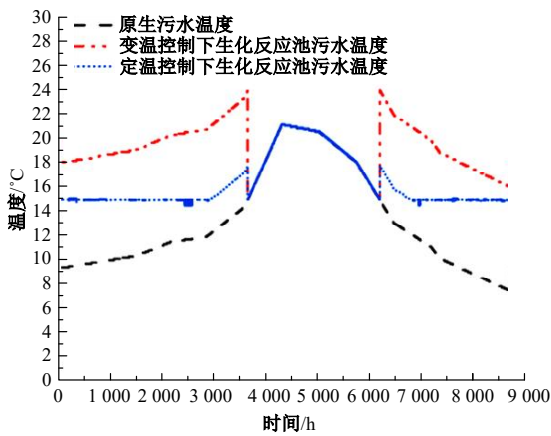


图 4 两种控制系统运行全年温度统计图

Fig. 4 Temperature statistical chart of two control systems in annual operation

由图 4 可以看出,原生污水全年温度呈现季节性特征,5~9 月污水温度>15℃,污水热泵处于关闭状态,此时生化反应池的污水温度等于原生污水温度。其他时间段原生污水温度<15℃,污水热泵开启。在变温控制时,固定流量 10 m³/h,生化反应池中污水温度为 18~24℃;在定温控制时,生化反应池中污水温度保持在 15℃左右,不必经过高温即能达到生化反应效果。

3.3 定温模式下变流量与定流量控制系统运行结果对比

基于污水处理厂全年原生污水进水温度,在 15℃的定温模式下,定流量控制系统和经自适应权重粒子群优化算法优化后的变流量控制系统全

年运行实时污水泵频率、流量、制热量和能耗的变化情况如图 5 所示。

图 5(a)为变流量污水泵和定流量污水泵的

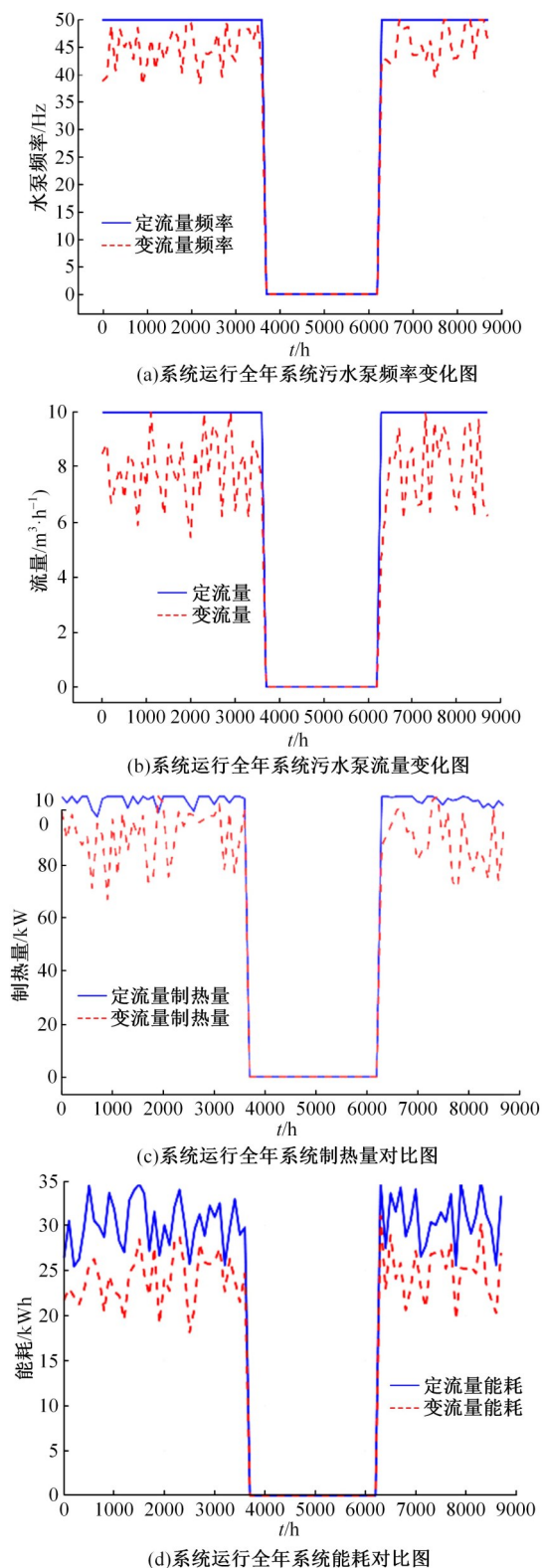


图 5 变流量和定流量控制系统全年运行结果

Fig. 5 Annual operating results for variable and constant flow control systems

频率变化情况。定流量污水泵的频率(见图 5(a)中实线)恒定在 50 Hz,而变流量污水泵频率(见图 5(a)中虚线)在 25~50 Hz 波动。图 5(b)为变流量污水泵和定流量污水泵的流量变化情况。定流量污水泵的流量(见图 5(b)中实线)恒定在设定值 $10 \text{ m}^3/\text{h}$,而变流量污水泵的流量(见图 5(b)中虚线)在 $6 \sim 10 \text{ m}^3/\text{h}$ 间变化。

图 5(c)为两种控制系统全年运行污水热泵制热量曲线。其中,定流量控制系统污水热泵制热量曲线相对平稳,但在部分时段(如曲线中断处),因系统特定工况切换或停机等情况,污水热泵制热量为零,总体来看,该系统仍能稳定输出热量;变流量控制系统在经自适应权重粒子群优化算法优化后,污水热泵制热量随变流量污水泵的流量、频率变化而动态变化,与定流量控制系统相比,该系统能根据原生污水温度及系统需求灵活调整制热量输出,实现热量供应适配。

如图 5(d)所示,定流量控制系统能耗曲线相对平稳,在不同的原生污水温度下,系统运行能耗变化幅度较小,但由于定流量污水泵维持在 50 Hz 较高频率运行,该系统整体能耗相对水平较高;变流量控制系统能耗曲线随变流量污水泵的流量、频率变化而变化,当污水泵的频率和流量降低时,该系统整体能耗随之降低,体现出变流量控制系统在节能方面的优势。通过式(19)计算可得,定流量控制下系统全年总耗能为 $187\,880.39 \text{ kWh}$,变流量控制下系统全年总能耗为 $150\,453.57 \text{ kWh}$,变流量控制系统比定流量控制系统节能约 19.92%,节能效果可观。

4 结束语

本文基于污水热泵提热循环系统,针对热源侧二次水变流量控制方案,通过自适应权重粒子群优化算法对污水热泵提热循环系统实施变流量控制,优化了变频泵频率。当生化反应池污水温度保持在 15°C 时,变流量控制系统的能耗比定流量控制系统降低约 19.92%。仿真结果验证了自适应权重粒子群优化算法的有效性。本文所提系统利用了二次水热能这一清洁能源,可为寒带冬季城市污水处理中污水热能回用循环系统的工程应用提供理论依据。

参考文献:

[1] 肖玉笛,唐占谱,潘继杨,等. 浅析温度对 A2O 工

- 艺一体化生活污水处理设备的效能影响[J]. 清洗世界, 2023, 39(9): 45-47.
- Xiao Yu-di, Tang Zhan-pu, Pan Ji-yang, et al. A brief analysis of the impact of temperature on the efficiency of the integrated A2O process for domestic wastewater treatment equipment[J]. Cleaning World, 2023, 39(9): 45-47.
- [2] 谭杰, 董滨, 戴晓虎. 温度对生物膜-活性污泥复合工艺硝化特性及硝化菌种群的影响[J]. 净水技术, 2016, 35(2): 21-25.
- Tan Jie, Dong Bin, Dai Xiao-hu. Effects of temperature on nitrification characteristics and nitrifying bacterial populations in the biofilm-autotrophic sludge combined process[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(2): 21-25.
- [3] 李娜, 刘来胜, 杨平, 等. 低温条件下AO工艺结合微生物强化技术处理生活污水试验[J]. 净水技术, 2020, 39(9): 98-104.
- Li Na, Liu Lai-sheng, Yang Ping, et al. Experimental study on the treatment of domestic wastewater by AO process combined with microbial enhancement technology under low temperature conditions[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(9): 98-104.
- [4] 赵育华. 低温条件下市政污水处理应对措施探讨[J]. 广东化工, 2023, 50(14): 135-136, 164.
- Zhao Yu-hua. Discussion on technical measures for municipal wastewater treatment under low-temperature conditions[J]. Guangdong Chemical Industry, 2023, 50(14): 135-136, 164.
- [5] 赵亚杰, 王黎明, 郭志江. 基于寒区沼气池增温技术的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2010, 22(6): 23-26.
- Zhao Ya-jie, Wang Li-ming, Guo Zhi-jiang. Research on heat enhancement technology of biogas ponds in cold regions[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010, 22(6): 23-26.
- [6] 王巧霞. 低温污水源热泵在污水厂采暖及生化池提温中的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(14): 167-169.
- Wang Qiao-xia. Application of low-temperature wastewater source heat pump in heating of wastewater treatment plants and temperature increase of biochemical tanks[J]. Innovation Science and Technology Application, 2021, 11(14): 167-169.
- [7] 林波. 寒冷地区市政污水提温设计方案[J]. 建筑技术开发, 2021, 48(11): 22-24.
- Lin Bo. Design scheme for heating municipal sewage in cold regions[J]. Construction Technology Development, 2021, 48(11): 22-24.
- [8] Shen B H, Li D G, Qian F, et al. Optimal design and simulation for the intelligent control of sewage treatment based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 735-746.
- [9] Su B Q, Lin, Y T, Wang J, et al. Sewage treatment system for improving energy efficiency based on particle swarm optimization algorithm[J]. Energy Reports, 2022, 8: 8701-8708.
- [10] Kinab E, Marchio D, Rivière P, et al. Reversible heat pump model for seasonal performance optimization[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(12): 2269-2280.
- [11] Bernier M A, Bourret B. Pumping energy and variable frequency drives[J]. ASHRAE Journal, 1999, 41(12): 37-40.
- [12] 狄洪发, 李吉生, 戴斌文. 开式系统中变速泵的节能分析[J]. 暖通空调, 2002, 32(1): 59-61.
- Di Hong-fa, Li Ji-sheng, Dai Bin-wen. Analysis on energy saving of variable speed pumps in an open system[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2002, 32(1): 59-61.
- [13] 朱跃钊, 廖传华, 史勇春, 传热过程与设备[M]. 北京: 中国石化出版社, 2008.
- [14] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[D]. 长沙: 中南大学信息科学与工程学院, 2009.
- Liu Jian-hua. Basic theory of particle swarm optimization and its improvement research[D]. Changsha: School of Information Science and Engineering, Central South University, 2009.