

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-268-06

# 换热站二级管网质-量调节策略及系统设计应用

梁艳辉

(广州远正智能科技股份有限公司 广州 510000)

**【摘要】** 针对工程应用中集中供热系统的换热站调节策略单一、参数动态调节能力不足的问题, 根据热平衡方程及管网特性, 提出基于室外温度与室内预设温度的供水温度调节模型和流量调节模型, 并引入系数对相对负荷进行修正。在此基础上设计具备实时动态调控能力的换热站节能控制系统, 并应用于换热站的实际运行控制。测试结果表明, 在满足供热需求条件下, 可实现二级管网热水泵节省电量 30.47%, 节省热量 16.50%, 具有良好节能效果, 可为集中供热系统换热站的节能运行提供参考。

**【关键词】** 换热站; 二级管网; 质-量调节策略; 控制系统; 节能  
中图分类号 TU83 文献标志码 A

## Quality-Quantity Regulation Strategy of Secondary Pipe Network and its System Design and Application in Heat Exchange Station

Liang Yanhui

(Guangzhou i-MEC Technology Co., Ltd, Guangzhou, 510000)

**【Abstract】** This paper aims at the problems of single adjusting strategy and insufficient dynamic adjusting ability of parameters in heat exchange station of central heating system in engineering application. According to the heat balance equation and the characteristics of pipe network, the water supply temperature regulation model and flow regulation model based on outdoor temperature and indoor preset temperature are put forward, and the relative load is modified by introducing coefficient. On this basis, the energy-saving control system of heat exchange station with real-time dynamic control ability is designed applied to the actual operation control of the Heat Exchange station. Under the condition of meeting the heating demand, the test results show that the electricity of secondary network hot water pump and heat can be saved by 30.47% and 16.50% respectively. It has good energy-saving effect and can provide reference for energy-saving operation of heat exchange station in central heating system.

**【Keywords】** Heat exchange station; Secondary pipe network; Quality-quantity regulation strategy; Control system; Energy-saving

## 0 引言

集中供热系统广泛分布于我国寒冷地区与严寒地区, 随着人们生活水平提高, 对供热品质要求逐渐提高, 与此同时供热能耗随之增长, 对我国双碳目标的达成带来巨大挑战。

近年来诸多学者开展了集中供热系统节能研究工作。马良栋<sup>[1]</sup>等人提出了基于模型预测控制

的建筑热力入口智能调节方法, 模拟结果表明比传统 PID 控制方法, 模型精度、稳定性及鲁棒性更优。郑立红<sup>[2]</sup>等人采用邻近调节法, 搭建一种基于图论理论的二次供热管网水力调节模型, 改善了调节效果控制精度。周颖<sup>[3]</sup>等人提出供热强度与需热强度修正设计热指标, 建立一套供热系统调控能力评价与节能空间预测的综合分析方

法, 实现节能率 11.17%~35.27%。韩吉兵<sup>[4]</sup>等人通过提出不同年代建筑的供热调节策略, 改善供热运行薄弱环节及挖掘供热节能潜力。赵安军<sup>[5]</sup>等人以系统输配送能耗最小为优化目标, 建立调节阀模型和管网水力模型, 优化水阀开度及并联水泵运行, 可得到较优的管网运行策略, 节能效果较为显著。刘鸽<sup>[6]</sup>对二次管网水泵调频和分阶段变流量的质调节策略研究, 热耗同比下降 5.68%, 电耗同比下降 22.54%。

上述研究主要集中在调节控制精度改善和不同调节策略与方法研究。然而, 在实际供热系统中换热站运行效率仍普遍较低。一方面是多数智能化系统流量调节、温度调节策略单一, 另一方面是供

热运行参数跟随室外气象参数不断变化的精细化动态调节能力不足, 使得整个供热系统运行效率未得到充分挖掘, 引起热量与电量浪费。本文从工程应用的角度出发, 以质-量调节策略为基础建立供水温度与流量调节的修正模型, 设计换热站二级管网节能控制系统, 并将修正模型及控制策略应用于实际案例, 验证其节能效果。

## 1 二级管网质-量调节策略

### 1.1 调节方法

换热站管网调节方法主要分为质调节、量调节、质-量调节 3 种<sup>[7]</sup>, 各调节方法特点如表 1 所示, 从节能效果角度考虑, 质-量调节方法最优。

表 1 调节方法特点

Table 1 Characteristics of adjustment method

序号	调节方法	特点
1	质调节: 改变管网供水温度, 管网流量不变	该方法控制要求简单, 管网水力工况稳定, 但水泵能耗较高
2	量调节: 管网供水温度不变, 改变管网流量	该方法可节省水泵能耗, 避免水力失调, 但划分阶段是难点
3	质-量调节: 管网流量与供水温度同时改变	该方法综合质调节与量调节的优点, 但控制要求非常高

### 1.2 质-量调节数学模型

为提升换热站二级管网参数之间的精细化动态调节能力及节能效果, 采用质-量调节方法, 调节数学模型包含供水温度调节模型和流量调节模型。

#### 1.2.1 供水温度调节模型

假设管网热损忽略不计, 在运行工况与设计工况下, 由二级管网及建筑末端应满足的热平衡方程推导二级管网供水温度  $T_{g2}$  模型<sup>[8]</sup>, 由公式 (1) 表示:

$$T_{g2} = T_n + \frac{1}{2} (T'_{g2} + T'_{h2} - 2T'_n) \bar{Q}^{\frac{1}{b+1}} \bar{F}^{\frac{1}{b+1}} + \frac{\bar{Q}}{2G_2} (T'_{g2} - T'_{h2}) \quad (1)$$

式中:  $T_n$  为室内预设温度, °C;  $T'_{g2}$ 、 $T'_{h2}$ 、 $T'_n$  分别为二级管网供水设计温度、回水设计温度、室内设计温度, °C;  $b$  为末端设计参数;  $\bar{Q}$  为相对负荷比;  $\bar{F}$  为相对散热面积比;  $\bar{G}_2$  为二级管网相对流量比。

相对负荷比  $\bar{Q}$  与室外温度有直接关系<sup>[8]</sup>, 由公式 (2) 表示:

$$\bar{Q} = \frac{T_n - T'_w}{T'_n - T'_w} \quad (2)$$

式中:  $T'_w$ 、 $T'_n$  分别为实际室外温度与设计室

外计算温度, °C。

为确定二级管网相对流量比  $\bar{G}_2$ , 引入了流量调节系数<sup>[9]</sup> $m$ , 由公式 (3) 表示:

$$\bar{G}_2 = \frac{G_2}{G'_2} = \bar{Q}^m \quad (3)$$

式中:  $G_2$  为二级管网实际流量, m<sup>3</sup>/h;  $G'_2$  为二级管网设计流量, m<sup>3</sup>/h;  $m$  取值为 0.2958, 同时考虑到管网水力平衡特性, 管网相对流量比不应低于 0.6。

实际供热过程,  $T'_{g2}$ 、 $T'_{h2}$ 、 $T'_n$ 、 $b$ 、 $T'_w$  可查阅设计资料获知,  $\bar{F}$  与末端空调设备传热面积相关, 依据末端空调设备实际传热面积与设计传热面积取值。将公式 (2)、公式 (3) 代入公式 (1) 得知,  $T_{g2}$  可表示  $T'_w$  和  $T'_n$  的函数,  $T'_w$  可实时检测获取,  $T'_n$  根据室内供热需求动态预设设定。

#### 1.2.2 流量调节模型

根据管网特性, 二级管网实际流量  $G_2$  与供回水压差  $\Delta P$  相关<sup>[10]</sup>, 由公式 (4) 表示:

$$G_2 = \sqrt{\Delta P / S} \quad (4)$$

式中:  $S$  为二级管网总阻抗, Pa/(m<sup>3</sup>/h)<sup>2</sup>。

二级管网总阻抗可近似认为不变, 根据实测流量与压差计算获得。联立公式 (2)、(3) 代入公

式(4)得知, 供回水压差  $\Delta P$  可表示  $T_w$  和  $T_n$  的函数,  $T_w$  可实时检测获取,  $T_n$  根据室内供热需求动态预设定。

### 1.2.3 模型修正

理论设计供热负荷与室内外温差成正比关系<sup>[8]</sup>。由于供热系统按最不利热负荷设计, 供热系统运行过程实际供热负荷小于理论设计热负荷, 因此理论计算结果应用于供热系统实际运行时会导致供热过剩, 引入相对负荷比修正系数  $\varepsilon$ 。修正后的相对负荷比  $\bar{Q}_r$  由公式(5)表示:

$$\bar{Q}_r = \varepsilon \cdot \bar{Q} = \varepsilon \cdot \frac{T_n - T_w}{T'_n - T'_w} \quad (5)$$

修正后的二级管网供水温度调节模型、流量调节模型分别由公式(6)、(7)表示:

$$T_{g2} = T_n + \frac{1}{2}(T'_{g2} + T'_{h2} - 2T'_n) \bar{Q}_r^{\frac{1}{b+1}} F^{\frac{1}{b+1}} \quad (6)$$

$$\Delta P = S \cdot \left( G'_2 \cdot \bar{Q}_r^m \right)^2 \quad (7)$$

## 1.3 质-量调节控制逻辑

### 1.3.1 供水温度控制逻辑

由供水温度调节模型可知, 供水温度  $T_{g2}$  是室外温度  $T_w$  与室内温度预设值  $T_n$  的函数。依据室外温度与室内温度预设值设定供水温度, 当实际供水温度偏离供水温度预设值时, 通过调节板换热器一次侧电动水阀开度改变进入板换热器一次侧的热水流量, 间接控制供水温度, 实现供水温度随室外温度的动态控制。供水温度控制逻辑流程如图1所示。

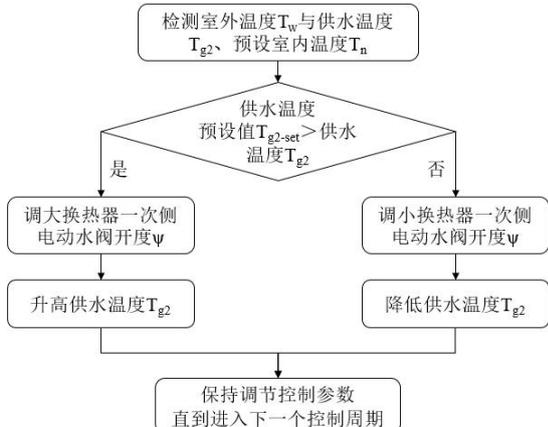


图1 供水温度控制逻辑

Fig.1 Control logic of supply water temperature

供水温度控制逻辑如步骤1~步骤3所示:

步骤1: 检测室外温度  $T_w$  与供水温度  $T_{g2}$ 、预设室内温度  $T_n$ , 比较供水温度预设值  $T_{g2-set}$  与供水温度  $T_{g2}$  的大小。

步骤2: 若  $T_{g2-set} > T_{g2}$ , 则以一定步长调大换热器一次侧电动水阀开度  $\psi$ , 增大进入板换热器一次侧的热水流量, 升高供水温度, 直到  $T_{g2-set} - T_{g2} \leq 0.2^\circ\text{C}$  时, 视为一次侧电动水阀已精准控制到适宜的开度; 若  $T_{g2-set} < T_{g2}$ , 则以一定步长调小换热器一次侧电动水阀开度  $\psi$ , 减小进入板换热器一次侧的热水流量, 降低供水温度, 直到  $T_{g2} - T_{g2-set} \leq 0.2^\circ\text{C}$  时, 视为一次侧电动水阀已精准控制到适宜的开度。

步骤3: 保持调节的控制参数直到进入下一个调节控制周期。

### 1.3.2 流量控制逻辑

由流量调节模型可知, 二级管网供回水压差  $\Delta P$  是室外温度  $T_w$  与室内温度预设值  $T_n$  的函数。依据室外温度与室内温度预设值设定供回水压差, 当供回水压差偏离供回水压差预设值时, 通过调节热水泵的频率或台数改变二级管网供回水压差, 间接控制二级管网流量, 实现二级管网流量随室外温度的动态控制。流量控制逻辑流程如图2所示。

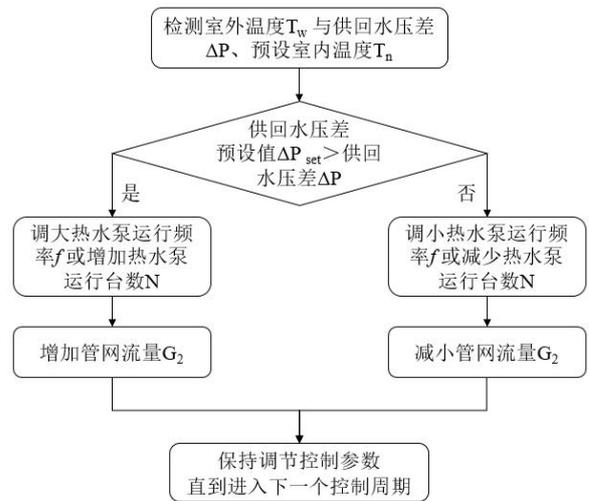


图2 流量控制逻辑

Fig.2 Control logic of water flow

流量控制逻辑如步骤1~步骤3所示:

步骤1: 检测室外温度  $T_w$  与供回水压差  $\Delta P$ 、预设室内温度  $T_n$ , 比较供回水压差预设值  $\Delta P_{set}$  与供回水压差  $\Delta P$  的大小。

步骤2: 若  $\Delta P_{set} > \Delta P$ , 则以一定步长调大热

水泵运行频率或增加热水泵运行台数  $N$ , 升高供回水压差, 直到  $\Delta P_{set} - \Delta P \leq 10\text{Pa}$  时, 视为二级管网流量已精准控制到适宜的大小; 若  $\Delta P_{set} < \Delta P$ , 则以一定步长调小热水泵运行频率或减少热水泵运行台数  $N$ , 降低供回水压差达到预设值, 直到  $\Delta P - \Delta P_{set} \leq 10\text{Pa}$  时, 视为二级管网流量已精准控制到适宜的大小。

步骤 3: 保持调节的控制参数直到进入下一个调节控制周期。

## 2 应用案例

### 2.1 案例对象

本文应用案例对象为集中供热系统的某一栋建筑的换热站, 换热站结构如图 3 所示, 主要由 1 台换热器、3 台热水泵及管网组成。

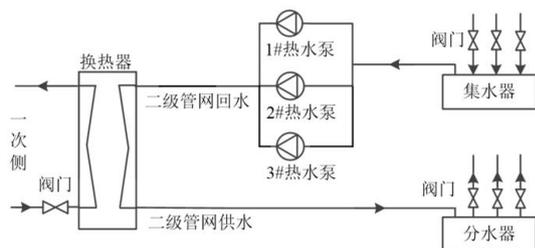


图 3 换热站结构

Fig.3 Structure of heat exchange station

### 2.2 节能控制系统设计

控制系统是实现换热站节能运行的重要基础。综合考虑控制稳定性要求、动态调节能力及质-量调节控制策略, 设计一套换热站节能控制系统, 系统由设备层、控制层、监管层三部分构成。换热站节能控制系统架构如图 4 所示。

#### (1) 系统设备层

系统设备层包括参数采集传感器和执行器, 用于检测换热站运行过程参数和执行控制指令, 含室外温湿度传感器、一次侧电动水阀、供水温度传感器、回水温度传感器、供水压力传感器、回水压力传感器、管网流量计、热水泵变频器。

#### (2) 系统控制层

系统控制层包括换热站 PLC 控制箱, 用于接收监管层指令、采集参数、逻辑判断与运算及下发指令, 是实现换热站节能控制的核心。根据系统 I/O 点及控制要求, 选用西门子 PLC S7-200 SMART CPU ST30 作为核心控制器, 同时扩展 1 个 EM AE08 模拟量输入模块、1 个 EM AE04 模拟量输入

模块、1 个 EM AQ04 模拟量输出模块。控制程序采用 STEP 7-Micro/WIN SMART 软件以梯形图方式编写, 控制程序采用模块化设计, 基于质-量调节策略, 主要程序模块包括条件设置模块、初始化模块、数据采集与处理模块、供水温度调节模块、流量调节模块、故障报警模块、通讯控制模块等。

#### (3) 系统监管层

系统监管层硬件包括服务器、监控工作站, 系统监管软件采用 B/S 架构设计, 用于实现换热站实时监测与远程控制, 具有系统监测、参数设置、参数记录、设备管理、故障报警、系统管理 6 项功能。①系统监测: 实时监测换热站设备与管网的运行参数、运行工况、运行状态等信息; ②参数设置: 实现换热站设备运行条件预设、参数预设及运行时段预设等; ③参数记录: 以曲线和表格形式动态记录换热站设备与管网的运行参数变化趋势; ④设备管理: 记录换热站设备的运行时间, 根据预设的维护时间实现设备维护提示, 支持维护日志在线记录、查阅及信息导出; ⑤故障报警: 实现换热站设备的故障报警提示, 支持报警日志在线记录、查阅及信息导出; ⑥系统管理: 实现系统用户注册、注销及使用操作权限的设置、修改、删除等。

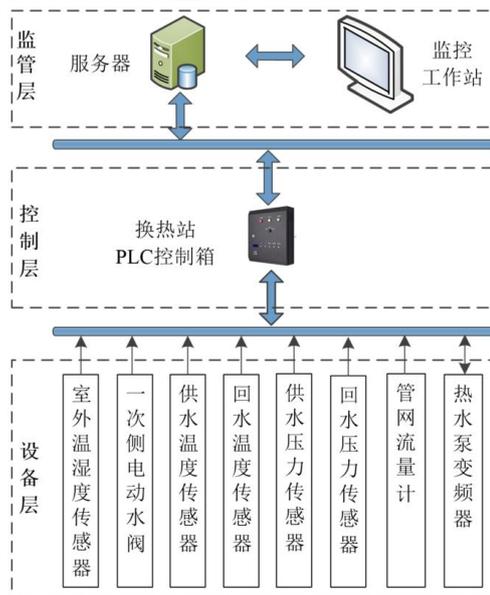


图 4 换热站节能控制系统架构

Fig.4 Energy-saving control system architecture of heat exchange station

### 2.3 质-量调节策略在线控制

质-量调节在线控制主要分为运行条件设置、动态建模计算、运行参数采集与存储、运行参数有

效性检验与处理、在线运行控制四部分，如图 5 所示。

(1) 运行条件设置。通过换热站节能控制系统监管软件设置启停控制条件、参数约束条件、参数采集周期及调节控制周期。设置参数约束条件包含建筑面积、设计参数（设计室外计算温度、供水设计温度、回水设计温度、室内设计温度、末端设计参数、相对散热面积比、设计流量、流量调节系数等）、管网总阻抗、供水温度偏差值、供回水压差偏差值、热水泵频率上下限、室内预设温度等。

(2) 动态建模计算。依据供热季室外温度变化区间分阶段修正相对负荷比  $\bar{Q}_r$ ，表达式见公式 (8)：

$$\bar{Q}_r = \begin{cases} 0.5915 - 3.2864 \times 10^{-2} T_w, & -4 \leq T_w < 4 \\ 0.5081 - 2.8227 \times 10^{-2} T_w, & 4 \leq T_w < 12 \\ 0.4394 - 2.4409 \times 10^{-2} T_w, & 12 \leq T_w < 16 \end{cases} \quad (8)$$

依据管网水泵最低运行频率对应的最小流量，确定二级管网相对流量比  $\bar{G}_2$ ，表达式见公式 (9)：

$$\bar{G}_2 = \begin{cases} \bar{Q}_r^{0.2958}, & -4 \leq T_w < 12 \\ 0.6000, & 12 \leq T_w < 16 \end{cases} \quad (9)$$

修正后的二级管网供水温度调节模型、流量调节模型分别由公式 (10)、(11) 表示：

$$T_{g2} = 18 + 37 \bar{Q}_r^{0.7042} + 5 \frac{\bar{Q}_r}{\bar{G}_2} \quad (10)$$

$$\Delta P = 1.6546 \cdot \left( 180 \cdot \bar{Q}_r^{0.6} \right)^2 \quad (11)$$

(3) 运行参数采集与存储。当换热站满足供热条件运行时，利用换热站节能控制系统采集运行参数及设备反馈信号，包括室外温湿度、供水温度、回水温度、供回水压力、热水泵频率、电动水阀开度、流量等。

(4) 运行参数有效性检验与处理。由于外界干扰、网络中断等原因可能造成运行参数采集不准确或缺失，应检验判断运行参数是否合理。若参数不符合条件，则剔除数据；若参数符合条件，则输入调节模块。为确保系统调控稳定性，一个调节控制周期包含若干参数采集周期，对检验有效的数据取平均值，确定供水温度调节模型、流量调节模型及当前室外温度下的供水温度预设值及供回水压差预设值。

(5) 在线运行控制。基于供水温度控制逻辑调节供水温度，基于流量控制逻辑调节流量，实现换热站节能运行控制。

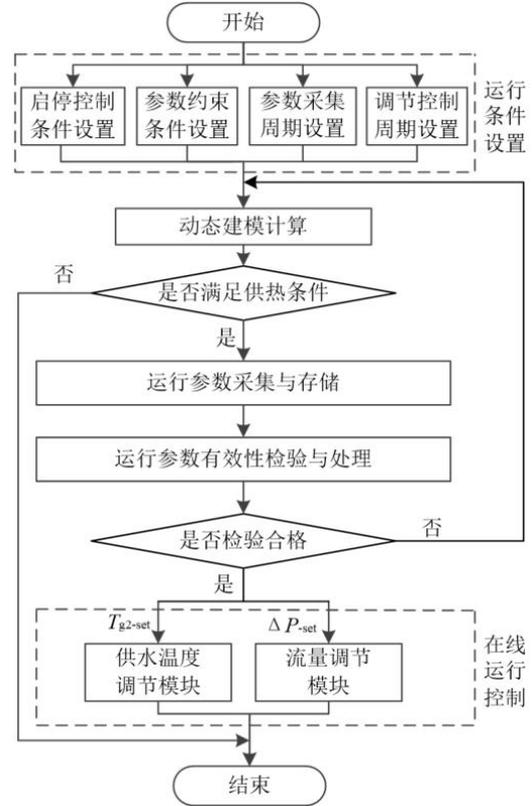


图 5 质-量调节策略在线控制流程

Fig.5 On-line control process of quality-quantity regulation strategy

### 2.4 节能效果验证

为验证二级管网质-量调节策略有效性，供热季节选取室外温湿度变化趋势、变化范围及平均值均接近的相邻两天进行节能测试。在满足供热需求条件下，第 1 天测试采用“手动模式”，即切除节能控制系统按系统投入前的方式运行；第 2 天采用“节能模式”，即投入节能控制系统按质-量调节策略运行。

节能测试期间，采用智能电表、智能热量计分别计量换热站二级管网热水泵电量消耗和换热站热量消耗。节能率计算方法见公式 (12)：

$$R = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \quad (12)$$

式中： $R$  为节能率； $E_1$  为“手动模式”的二级管网热水泵电量消耗（或热量消耗），kWh（或 GJ）； $E_2$  为“节能模式”的二级管网热水泵电量

消耗(或热量消耗), kWh(或GJ)。

节能测试数据如表2所示,“手动模式”的热水泵电量消耗、热量消耗分别为432.2kWh、49.1GJ,“节能模式”的热水泵电量消耗、热量消耗分别为300.5kWh、41.0GJ。根据公式(12)计算,“节能模式”比“手动模式”节省电量30.47%,节省热量16.50%。

表2 节能测试结果分析

Table 2 Analysis of energy-saving test results

	手动模式	节能模式	节能率/%
热水泵电量消耗	432.2kWh	300.5kWh	30.47%
换热站热量消耗	49.1GJ	41.0GJ	16.50%

### 3 结论

提出基于室外温度与室内预设温度的供水温度调节模型和流量调节模型,并引入系数对相对负荷进行修正,在此基础上设计换热站节能控制系统应用于某换热站的运行控制。节能测试结果表明,在满足供热需求条件下,可实现二级管网热水泵节省电量30.47%,节省热量16.50%,具有良好节能效果,可为集中供热系统换热站的节能运行提供参考。

#### 参考文献:

[1] 马良栋,张继谊,李志伟,等.基于模型预测控制的建筑

热力入口智能调节方法模拟研究[J].建筑科学,2021,37(12):85-93.

[2] 郑立红,周志华,郭新川,等.供热管网水力平衡调节方法研究[J].暖通空调,2023,53(5):140-145.

[3] 周颖,袁野,曹姗姗,等.基于热指标修正的供热系统调控能力与节能空间综合分析方法[J].建筑科学,2023,39(2):89-96.

[4] 韩吉兵,李响,刘宝富,等.不同年代居住建筑外墙条件下的供热特点与调节策略探讨[J].暖通空调,2021,51(S1):1-5.

[5] 赵安军,张宇,张育平,等.基于群智能的集中供暖系统水力管网控制策略优化[J].控制与决策,2023,38(9):2461-2469.

[6] 刘鸽.城市住宅小区供热二次管网主动按需供热运行策略研究[D].杭州:浙江大学,2023.

[7] 张春蕾,肖晓劲,丁琦,等.供暖系统质调节与质量-流量调节的技术经济分析[J].暖通空调,2010,40(7):122-124.

[8] 贺连娟,蔡颖.供热工程[M].北京:冶金工业出版社,2012:74-75.

[9] 陈疆.集中供热系统运行优化研究与应用研究[D].北京:北京建筑工程学院,2000.

[10] 周璇,刘国强,王晓佩,等.基于动态水力平衡的集中供热系统二次管网节能优化调节方法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(1):220-233.