文章编号:1001-2060(2024)10-0140-08

考虑管网热延迟特性的热源调度优化

杨光,乔帆,王海

(同济大学 机械与能源工程学院,上海 200092)

摘 要:为了提高能源利用率,改善用户供热体验,本文提出了热源温度变化的非稳态热力优化(Con1)、单一热源 温度的非稳态热力优化(Con2)、考虑时延及其离散度的准稳态优化(Con3)3种热源调度优化方法,以改善调度优 化时集中供热管网的热延迟特性,并以某市一次热网为例,对3种优化方法的优化效果进行分析。结果表明:Con2 的总能耗费用最高且热力站满意度最低;Con3相比 Con1热力站满意度仅偏低1.0%且总能耗费用仅高43.05元/h, 优化得到的热源供水温度结果偏差在1℃以内,Con3计算效率显著提高;Con3可对热源供水温度及流量进行快速 优化,并使总能耗费用节省452元/h,热力站满意度提升7.4%,优化效果良好。

关键 词:热延迟特性;热源调度优化;非稳态热力;时延离散度;遗传算法

中图分类号:TU995.3 文献标识码: A DOI: 10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024. 10.016

[引用本文格式]杨 光,乔 帆,王 海.考虑管网热延迟特性的热源调度优化[J]. 热能动力工程,2024,39(10):140-147. YANG Guang, QIAO Fan, WANG Hai. Heat source scheduling optimization considering thermal delay characteristics of pipe network[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(10):140-147.

Heat Source Scheduling Optimization Considering Thermal Delay Characteristics of Pipe Network

YANG Guang, QIAO Fan, WANG Hai

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092)

Abstract: In order to improve energy efficiency and user heating experience, in this paper, three heat source scheduling optimization methods were proposed, including unsteady thermal optimization (Con1) for heat source temperature variation, unsteady thermal optimization (Con2) for single heat source temperature, and quasi-steady state optimization (Con3) considering delay and dispersion. In order to improve thermal delay characteristics of central heating pipe network during scheduling optimization, taking the primary heating network of a city as an example, the optimization effect of the three optimization methods was analyzed. The results show that the total energy consumption cost of Con2 is the highest and the satisfaction of heat station is the lowest. Compared with Con1, the satisfaction of Con3 is only 1.0% lower and the total energy consumption cost is only 43.05 yuan/h higher. The deviation of the optimized heat source water supply temperature is less than 1 $^{\circ}$. At the same time, the computational efficiency of Con3 is significantly improved. In summary, method Con3 can rapidly optimize the temperature and flow rate of heat source water supply, save the total energy consumption cost per hour by 452 yuan, and increase the satisfaction of the heat station by 7.4%, which has a good optimization effect.

收稿日期:2024-01-29; 修订日期:2024-03-26

基金项目:国家重点研发计划—国际合作"基于数字孪生的供热系统全网动态优化及低碳智慧调控关键技术研究"(2021YFE0116200) Fund-supported Project:National Key R&D Program – International Cooperation Projects "Development of the Digital-twins for a District Heating System and the Smart Control based on Dynamic Simulation Towards a Low-carbon Energy Sector" (2021YFE0116200)

作者简介:杨 光(1995 -),女,同济大学博士研究生. 通信作者:王 海(1976 -),男,同济大学副教授. Key words: thermal delay characteristics, heat source scheduling optimization, unsteady heat, delay dispersion, genetic algorithm

引 言

供热管网热源调度优化一直是众多学者研究的 热点问题。米雷洋[1]基于量调节方法建立了多热 源复杂环状管网系统的水力工况调度优化模型,详 细给出了基于粒子群优化算法求解策略调度模型的 流程及计算方法。Wang 等人^[2]建立了分布式水泵 的精确供热管网模型,利用遗传算法寻优热源处最 优的循环流量和供水温度,再利用遗传算法设定每 个热力站处的最优循环流量。Hui 等人^[3]研究了一 种基于改进烟火算法的调度优化策略,建立了燃气 锅炉、热泵机组与水泵等运行设备能耗模型,并根据 设备的实际情况建立了多目标调度模型。Li 等 人^[4]提出了考虑集中供热管网和建筑热延迟的综 合能源系统调度模型以及柔性评价方法。Zhang 等 人^[5]针对综合能源系统中热网与电网之间传输时 延和损耗的差异,以设备运行状态最佳和日运行成 本最低为目标,提出了一种考虑热网时延特性的超 短期最优调度能源管理方法。

热延迟特性是热源调度优化中不可忽略的因素^[6]。在热源调度优化中,考虑热延迟特性的影响,提出更有效的热源调度策略,将减少不必要的能源消耗,提高能源利用率。此外,热延迟特性的影响会导致用户供热效果体验不佳,存在过热或过冷的现象,在调度优化中需充分考虑此因素。Zhang等人^[7]在综合电力和区域供热系统的调度模型中考虑了供热管网的热延迟特性,仿真结果表明,热延迟特性对提高热电联产的运行灵活性、降低运行成本和提高风电利用率具有很大潜力。

综上所述,针对热源调度优化问题已有充分研 究,包括结合综合能源系统的调度优化、以管网运行 成本最小为目标的优化方案等,现代智能算法在寻 优过程中有良好的应用效果。但是,目前关于供热 管网热延迟时间缺少系统全面的分析,针对考虑热 延迟特性的多热源复杂环状管网的优化研究较少。 供热管网系统中一次热网大多长度长、管径大^[8], 热水流动需要时间长,因此热量传输过程中伴随着 时间延迟及温度衰减,此特性即为管网热延迟,其在 热源调度中的影响不可忽视^[6]。因此,本文提出考 虑管网热延迟特性的热源调度优化方法,以运行成 本小、热力站满意度高为优化目标,通过遗传算法寻 优,比较热源温度变化的非稳态热力优化、单一热源 温度的非稳态热力优化、考虑时延及其离散度的准 稳态优化3种调度方法,得到适合的热源调度策略。

1 理论基础

1.1 求解器计算理论

基于王海等人^[2,9-17]提出的用于管网水力计算 的"网络元"方法调用求解器计算,该方法适用于复 杂环状管网的建模仿真。在"网络元"方法中,管网 中的热源、用户、水泵、阀门、管道和连接件等元件均 分为属性、方法和事件3部分,根据物理关系将所有 元件建立子模型,并将供热管网内热源、水泵、阀门、 连接件、热用户和管段定义为不同元件。"属性"包 括元件的固定设备参数与管网运行的水力热力参 数,通过"方法"建立符合物理规律的控制方程,通 过"事件"表现边界条件的变化。管网水力计算见 文献[18],热动态模型及计算见文献[16]。

1.2 热延迟特性

供热管道的热延迟特性原理如图 1 所示。其 中,t^f 为热源的出水温度,q^f 为热用户在此刻所需 的热量,m_m 为热用户流量,t^f 为热用户处的回水温 度,t^f 为热用户回水到达热源的温度。角标 1,m 分 别代表热源与热用户,f,r 分别代表供水与回水。由 图 1 可以看出,由于热延迟特性以及管道本身的热 损耗,热水从热源流向热力站伴随着时间延迟及温 度衰减。



Fig. 1 Principle of thermal delay characteristic

热延迟特性原理

图 1

以直管为例分析热延迟特性,假设一根直管总 长度为1 km、管径 D 为400 mm,埋深1.5 m,保温层 导热系数为0.025 W/(m·K),土壤为湿砂,其温度 为4 ℃,其导热系数为2 W/(m·K),设水流速度为 1 m/s。管道初始状态入口温度为70 ℃稳态传输,在 第 10 min 时入口温度突然升高2 ℃,模拟管道出口 温度,结果如图2 所示。可以看到,当入口温度突然 升高时,出口响应到温度变化延迟了约17 min,而 72 ℃的热水以1 m/s 的速度流过1 km 长度同样约 需要 17 min,证明了热水的延迟时间约等于流动所 需要的时间^[19]。第 38 min 出口温度为 71.9 ℃,热 损失为0.1 ℃,热量传输过程中的散热损失造成温 度衰减。



Fig. 2 Thermal delay characteristic analysis of single pipe

2 调度优化方法

调度优化问题将通过调整热力站流量及供回水 温差、热源供水温度及流量以达到满足各热力站供 热需求,同时降低能耗费用的目的。为此,分别提出 热源温度变化的非稳态热力优化、单一热源温度的 非稳态热力优化以及考虑时延及其离散度的准稳态 优化3种模型。

2.1 热源温度变化的非稳态热力优化

考虑到管道内水压波的传播速度可达1000 m/s, 因此认为水力波动的响应是瞬态的,即稳态优化过 程得出的热源供水流量最优。非稳态热力优化过程 仅考虑热源温度的最优值,该部分的水力结果通过 稳态优化得出,稳态优化的适应度函数仅考虑热源 热耗费用、电耗费用及热力站满意度3个因素^[20]。

以稳态优化的水力结果为基础,考虑热延迟特性的影响,寻优得到最优热源供水温度。热源温度 变化的非稳态热力优化(Con1)是指以1h为时间步 长,将当日0时到次日0时共25个时刻视为25个 优化工况,设定每小时调节一次供水温度,通过遗传 算法寻优得到热源的供水温度 t^fi。适应度函数包括 热原热耗费用、电耗费用和热力站满意度3部 分,即:

$$Y = \frac{1}{a} \Big[\sum_{j=1}^{a} \Big(\sum_{i=1}^{m} E^{\text{elec}} \times p_i + \sum_{i=1}^{m} E^{\text{heat}} \times Q_i + \sum_{i=1}^{m} E^{c1} \times \Delta Q_i \Big) \Big]$$
(1)

式中: E^{elec} —当地电费,元/(kW·h); p_i —第 i 个水泵 耗电量,kW·h; E^{heat} —当地第 i 个热源热单价,元/GJ; Q_i —第 i 个热源能耗,GJ; E^{cl} —热力站满意度的调 和系数,元/kW; ΔQ_i —热力站模拟供热负荷与需求 值的偏差,kJ/s;j—第j个工况。

2.2 单一热源温度的非稳态热力优化

理论上说, Con1 的热力站满意度最高, 寻优结 果佳, 但是计算效率最低。为减少寻优计算量, 可以 考虑减少决策变量的个数。单一热源温度的非稳态 热力优化(Con2)是将当日0时到次日0时共25个 时刻视为25个优化工况, 其中水力结果同 Con1 的 稳态优化, 设定一天内 tⁱ 保持不变, 通过遗传算法 寻优得到热源的供水温度值。Con2 的适应度函数 同式(1)。

2.3 考虑时延及其离散度的准稳态优化

在保证满足一天的供热需求、tⁱ保持不变时热 力站满意度较低,容易产生管网末端用户冷热不均 的情况。而每小时调控需要多次调用非稳态计算导 致计算效率低,为综合考虑调节频次及计算效率,提 出考虑时延及其离散度的准稳态优化方法(Con3)。

Con3 考虑热源费用、热力站热负荷满意度和热 延迟时间离散程度等因素,通过准稳态优化算法得 到单工况的最优热源供水温度和供水流量,为了得 到 24 h 25 个工况的热源供水参数,需要重复计算 25 次。再考虑热延迟的影响,优化后的结果需要根 据热延迟时间提前供热,提前时间取决于热用户总 体的热延迟时间。Con3 的适应度函数为:

$$Y = \sum_{i=1}^{m} E^{\text{elec}} \times p_i + \sum_{i=1}^{m} E^{\text{heat}} \times Q_i + \sum_{i=1}^{n} E^{c1} \times \Delta Q_i + \sum_{i=1}^{n} E^{c2} \times \sqrt{(S_i - \bar{S})^2}$$
(2)

式中: E^{c^2} —热力站延迟时间离散程度的调和系数, 元/min; S_i —热力站 i 的热延迟时间,min; \bar{S} —所有 热力站热延迟时间的平均值,min。

2.4 优化流程

遗传算法寻优流程如图3所示。





具体步骤为:

(1)输入计算适应度函数需要的参数,如调整的热力站热负荷、所有热力站实际供回水温差等;输入求解器计算需要的输入文件,包括拓扑连接关系、管道物理属性值等。

(2)设置决策变量范围,按照2~3倍决策变量 数的原则设置种群规模。

(3) 随机初始化决策变量,初始化迭代次数

为0。

(4) 将决策变量传入输入文件,用于求解器 计算。

(5)调用求解器计算,得到热源热力站压力、流量、负荷值。

(6) 根据求解器计算结果,计算适应度函数。

(7)判断迭代次数是否等于设置次数 N,若相等,则输出决策变量寻优值,若不等,则进入下一步。

(8) 迭代次数 G = G + 1, 种群选择交叉变异, 产生下一代种群, 重复步骤(4)。

在步骤(6)适应度函数计算中,满意度用热力 站模拟供热负荷与预测值的偏差来衡量,热延迟时 间的离散程度用各热力站热延迟时间与平均热延迟 时间之差的均方根来表示。加入 Con3 的适应度函 数中,通过水力热力调节尽量缩小热力站热延迟时 间离散程度,便于调度调节。为了将该寻优问题转 化为单目标优化问题,引入调和系数 E^{c1} 和 E^{c2} ,调和 系数的单位没有物理意义,只是从单位统一角度出 发,赋予的单位意义。该系数的目的在于将式(2) 中的 ΔQ_i 和 $\sqrt{(S_i - \bar{S})^2}$ 分别转化为系统运行费用 的一部分,进而和水泵运行费用和热费相匹配。调 和系数越大,适应度函数将主要由满意度情况及热

的一部分,进而和水泵运行费用和热费相匹配。调 和系数越大,适应度函数将主要由满意度情况及热 延迟时间离散程度决定;调和系数越小,适应度函数 将主要由总能耗费用决定。因此,存在最合适的调 和系数值,使适应度函数兼顾能耗费用和满意度情 况及热延迟时间离散程度的影响。通过枚举不同调 和系数下适应度函数的情况发现,当调和系数 E^{cl}和 E^{c2}均为1时,优化效果最好。

3 案例分析

根据管网 CAD 图对某市一次热网建立管网拓 扑连接关系如图 4 所示。由于该管网供回水管道为 对称分布,为了使拓扑关系更清晰,所以只给出了供 水管网。该一次热网系统共有热源 2 座,热力站 85 个。管道的管径、管长可直接从 CAD 中量取,管径分 布在 80~900 mm 之间,供回水管网全长 121.2 km。 历史运行压力流量数据每小时传输 1 次。前期已完 成管网仿真水力热力校核。





3.1 热延迟特性分析

选取某典型日 24 h 水力热力数据,对考虑和不 考虑热延迟特性的模型精度进行对比测试,统计该 热网 85 个热力站模拟 24 h 情况下的供水温度误差 情况,结果如图 5 所示。可以看到,考虑热延迟特性 时各热力站供水温度误差平均值为0.12 ℃,不考虑 时为1.16 ℃,是考虑热延迟特性误差的9.7 倍,说 明考虑热延迟特性的影响会大大缩小管网模型误 差。经统计,热延迟时间分布在0~9 h 之间,分布 时间长且范围广,是管网调度优化中需要考虑的重 要因素。



图 5 考虑和不考虑热延迟特性的模型精度对比 Fig. 5 Comparison of model accuracies with and without considering thermal delay characteristics

3.2 优化结果

管网 Con1 有 2 个热源,每小时寻优得到最优 tⁱ,此时决策变量数为 50 个,种群规模设置为 100, 经测试迭代次数 N 设置为 120。

经过 Con1 优化后,热力站满意度为 98.0%,热

源总能耗费用为26000元/h。优化得到的t[¦]如图6 所示。其中,HS1与HS2分别代表热源1与热源2。 由图6可以看出,优化后热源供水温度先降低后升 高,基本在82~88℃之间波动。



Con2 设定一天内 t_i^f 不变,则决策变量为 2 个。 设置种群规模为 6 个,经测试迭代次数 N 设置为 50。 寻优得到的 HS1 和 HS2 的 t_i^f 分别为 84.6 和 85.3 \mathbb{C} , 经 Con2 优化后热力站满意度为 93.4%,热源总能 耗费用为 26 175 元/h。

Con3 决策变量为 2 个热源的供水流量 M_1^f 和供 水温度 t_i^f 及 85 个热力站的流量 m 和供回水温差 $\Delta \theta$,共 174 个。设置种群规模为 400 个,经测试迭代 次数 N 设置为 150 次。通过优化计算,得到一天内 M_i^f 和 t_i^f 分别如图 7 和图 8 所示。可以看出, M_i^f 在下 午 2 点有较明显的下降,之后基本稳定; t_i^f 早晚较 高,中午较低。



图 7 Con3 M^f_i 优化结果 Fig. 7 Optimization result M^f_i of Con3





计算 24 h 25 个工况的热延迟时间,分别得到优化前、优化后的平均热延迟时间分布,如图 9 和图 10 所示。



(优化前)

Fig. 9 Delay time distribution of 85 thermal power stations before optimization



从图中可以看到,优化后热延迟时间分布由原 来的0~9h 缩短至0~7h,且分布更集中,热延迟 时间在2~4h 热力站占比由原来的51.7% 提升至 65.9%。进一步说明在准稳态优化适应度函数中考 虑热延迟时间离散程度具有良好效果,同时为考虑 热延迟的偏移时间调度方法起到了铺垫作用。这是 因为热力站热延迟时间分布越集中,偏移时间的调 度方法越有效。

由于热延迟时间在2~4 h 的热力站最多,且平 均值为3.05 h,因此分别选择提前2,3 和4 h 供热, 比较热力站热满意度情况,结果如表1 所示。从表 中数据可以看到,提前3 h 供热,热力站热负荷满意 度最高,为97.0%;提前2 h 供热,有 85.9% 热力站 被提前供热;提前4 h 供热,有 80.0% 热力站被延迟 供热。因此,应该提前3 h 供热,此时间提前量下热 源费用最小同时热力站满意度最高。另外,通过热 力站延迟时间分析,3 h 恰好是热延迟时间的平 均数。

表1 提前不同时间供热热力站满意度情况(%)

Tab. 1 Satisfaction of thermal power stations at

different times in advance (%)

时刻	提前2h	提前 3 h	提前 4 h
0	96.9	97.1	97.0
1	97.6	97.8	97.7
2	97.3	97.5	97.4
3	96.0	96.6	96.5
4	95.6	96.7	96.5
5	95.3	96.9	96.7
6	96.2	97.5	97.4
7	96.1	97.2	97.0
8	96.1	97.6	97.5
9	95.7	96.8	96.7
10	96.2	97.4	97.3
11	95.6	96.5	96.4
12	95.6	96.7	96.6
13	96.1	97.2	97.0
14	95.6	96.9	96.7
15	95.4	96.6	96.4
16	95.1	96.7	96.4
17	95.3	97.0	96.8
18	95.4	96.8	96.6
19	95.2	96.2	96.1
20	95.8	96.8	96.7
平均值	95.9	97.0	96.8

3.3 对比分析

比较3种调度方式能耗费用及热力站满意度如表2所示。由表2可知,相比于优化前实际工况,采用Con1总费用节省496元/h,Con2总费用节省321元/h,Con3总费用节省452元/h。对于满意度指标,采用Con1热力站满意度提升8.4%,Con2热力站满意度提升3.8%,Con3热力站满意度提升7.4%。

表 2 不同调度方式下的优化结果 Tab. 2 Optimization results in different scheduling modes

调度方法	总费用/	热力站	适应度
	元·h ⁻¹	满意度/%	函数值
未优化	26 496	89.6	63 700
Con1	26 000	98.0	33 066
Con2	26 175	93.4	49 256
Con3	26 044	97.0	37 689

虽然 Con1 的热力站满意度最高且总能耗费用 最低,但是优化效率最低。这是由于该方法决策变 量有 50 个,种群规模为 100,若迭代 120 次,则需调 用求解器 12 000 次,且动态计算需要考虑一天的供 热情况,单次模拟耗时较长,一般不符合实际应用的 需求。

通过比较 Con1 与 Con3 的 t_i^f 发现,两者结果类 似,对比结果如图 11 所示(由于 Con3 提前 3 h 供 热,故只比较了一天内前 21 h 的 t_i^f)。可以看到,各 工况温度偏差基本都在 1 ℃以内。Con3 相比 Con1 满意度降低了 1.0% 且总能耗费用高 44 元/h,但是 Con3 只需要计算每个工况下的一组数据,计算效率 显著高于 Con1。结合各工况 t_i^f 偏差及热力站满意 度,并考虑到优化效率,可以近似用 Con3 替代 Con1 的 t_i^f 结果供热。



图 11 Con1 与 Con3 的 t_i^f 对比结果

Fig. 11 Comparison of t_i^f of Con1 and Con3

4 结 论

(1)考虑热延迟特性时模型误差大幅缩小,热延迟时间较长且分布范围广。考虑热延迟特性时各热力站供水温度误差平均值为0.12℃,不考虑时为1.16℃,是考虑热延迟特性误差的9.7倍,且热延迟时间分布在0~9h之间。可见,热延迟特性在热源调度优化中不可忽视。

(2) Con1 的热力站满意度最高且总能耗费用 最低,但是优化效率最低。Con1 与 Con3 各工况温 度偏差基本在1 ℃以内,Con3 相比 Con1 热力站满 意度仅降低 1.0% 且总能耗费用仅高 44 元/h。 Con3 总能耗费用较优化前实际工况节省 452 元/h, 热力站满意度提升 7.4%。

(3)结合各工况 tⁱ 偏差及热力站满意度情况, 并考虑到优化效率,可以近似用 Con3 替代 Con1 的 tⁱ结果供热,使供热系统既满足热力站的热负荷需 求,又提高了调度效率。

参考文献:

- [1] 米雷洋. 基于粒子群算法的大型多热源环状管网优化调度技术研究[D]. 天津;天津大学,2018.
 MI Leiyang. Research on optimal scheduling of district heating network with ring topology and multiple heat sources based on particle swarm optimization[D]. Tianjin; Tianjin University,2018.
- [2] WANG H, WANG H Y, ZHOU H J, et al. Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps[J]. Energy, 2017, 138:1247 – 1262.
- [3] HUI L, YU J, ZHAO A, et al. Research on multi-heat-source scheduling strategy of heating system based on improved fireworks algorithm[J]. Energy Reports, 2021, 7:7628 - 7639.
- [4] LI X, LI W, ZHANG R, et al. Collaborative scheduling and flexibility assessment of integrated electricity and district heating systems utilizing thermal inertia of district heating network and aggregated buildings[J]. Applied Energy, 2020, 258:114021.
- [5] ZHANG Z, WANG P, JIANG P, et al. Energy management of ultrashort-term optimal scheduling of integrated energy system considering the characteristics of heating network [J]. Energy, 2022, 240:122790.
- [6] 张 斌.集中供热系统热惯性对供热机组调峰性能的影响研究[D].北京:华北电力大学(北京),2022.

ZHANG Bin. Study on influence of thermal inertia of central heating system on peak regulation performance of heating units [D]. Beijing; North China Electric Power University (Beijing), 2022.

- [7] ZHANG B, GHIAS A M Y M, CHEN Z. A double-deck deep reinforcement learning-based energy dispatch strategy for an integrated electricity and district heating system embedded with thermal inertial and operational flexibility[J]. Energy Reports, 2022, 8:15067 – 15080.
- [8] 张赟纲,张志鹏,李登峰. 长输管网蓄热技术在"热电解耦"中的应用探讨[J]. 区域供热,2020(4):22-30. ZHANG Yungang, ZHANG Zhipeng, LI Dengfeng. Application of heat storage technology in long-distance pipeline network in "thermoelectric decoupling"[J]. District Heating,2020(4):22-30.
- [9] 王 海,李铮伟.复杂水系统分析引擎 CAENAE-W:原理、开发及验证[J].暖通空调,2021,51(1):16-22.
 WANG Hai, LI Zhengwei. Complex water system analysis engine CAENAE-W:Principle, development and verification [J]. Journal of HV&AC,2021,51(1):16-22.
- [10] 王 海,王海鹰.智慧供热系统仿真基础研究——从供/回不 对称三维管网开始[C]//2018 供热工程建设与高效运行研 讨会,浙江,杭州,2018.

WANG Hai, WANG Haiying. Basic research on intelligent heating system simulation-starting from asymmetric three-dimensional supply/return pipe network [C]//2018 Seminar on Heating Engineering Construction and Efficient Operation, Hangzhou, Zhejiang,2018.

- [11] 王 海,王海鹰,周海珠. 多热源环状管网的面向对象水力计 算方法[J].浙江大学学报(工学版),2012,46(10):1900-1909.
 WANG Hai, WANG Haiying, ZHOU Haizhu. Analysis of multisources looped-pipe network based on object-oriented methodology
 [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012,46(10):1900-1909.
- [12] 王 海,王海鹰,朱 形.供热管网三维拓扑结构的仿真方法
 [J].中国住宅设施,2016(11):102-108.
 WANG Hai, WANG Haiying, ZHU Tong. Simulation method of three-dimensional topology of heat supply network [J]. China Housing Facilities,2016(11):102-108.
- [13] 王 海,王海鹰,朱 彤,等.基于面向对象方法的多源环状

管网水力计算[J]. 计算物理,2012,29(5):713-720. WANG Hai, WANG Haiying, ZHU Tong, et al. Calculation of multi-source loop pipe network based on object-oriented method [J]. Journal of Computational Physics,2012,29(5):713-720.

- [14] 王 海,周海舰,朱 彤. 新一代节能供热网络的立体拓扑结构建模[J]. 暖通空调,2017,47(8):138-144.
 WANG Hai,ZHOU Haijian,ZHU Tong. Three-dimensional topology structural modeling for a new generation district heating network[J]. Journal of HV&AC,2017,47(8):138-144.
- [15] WANG H, LIU X, ZHOU W. Transient flow simulation of municipal gas pipelines and networks using semi implicit finite volume method[J]. Procedia Engineering, 2011, 12:217 - 223.
- [16] WANG H, MENG H. Improved thermal transient modeling with new 3-order numerical solution for a district heating network with consideration of the pipe wall's thermal inertia [J]. Energy, 2018,160:171-183.
- [17] WANG H, MENG H, ZHU T. New model for onsite heat loss state estimation of general district heating network with hourly measurements [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 157: 71-85.
- WANG H, WANG H, ZHU T, et al. A novel model for steam transportation considering drainage loss in pipeline networks[J].
 Applied Energy, 2017, 188:178 - 189.
- [19] 刘斯斌. 工业园区多能流系统动态分析与运行调度优化
 [D]. 杭州:浙江大学,2020.
 LIU Sibin. Dynamic analysis and operation scheduling optimization of multi-energy system in industrial park [D]. Hangzhou: Zhejiang University,2020.
- [20] 王凤霞. 基于数字孪生技术的一次热网的优化调度研究
 [D]. 上海:同济大学,2022.
 WANG Fengxia. Research on optimal scheduling of primary heat

supply network based on digital twin technology [D]. Shanghai: Tongji University,2022.

(刘 颖 编辑)