

控制与决策

Control and Decision

基于群智能的集中供暖系统水力管网控制策略优化

赵安军, 张宇, 张育平, 董菲菲

引用本文:

赵安军,张宇,张育平,董菲菲. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.2288>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进烟花算法的并联冷机负荷分配优化

Load distribution optimization of parallel chillers based on improved firework algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2618–2626 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0823>

超启发式交叉熵算法求解模糊分布式流水线绿色调度问题

Hyper-heuristic cross-entropy algorithm for green distributed permutation flow-shop scheduling problem with fuzzy processing time

控制与决策. 2021, 36(6): 1387–1396 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1681>

USV&AUV水下目标协同搜索与打击航迹规划

Coordinated path planning of USV&AUV for an underwater target

控制与决策. 2021, 36(4): 825–834 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1038>

分布式最小二乘估计中隐匿FDI攻击策略的设计

Hidden FDI attack strategy for distributed least square estimation

控制与决策. 2021, 36(8): 1963–1969 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1688>

基于改进多目标优化算法的分布式数据中心负载调度

Multi-objective optimization of energy and performance management in distributed data centers

控制与决策. 2021, 36(1): 159–165 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0702>

基于群智能的集中供暖系统水力管网控制策略优化

赵安军^{1†}, 张宇¹, 张育平², 董菲菲¹

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710055;

2. 陕西省煤田地质集团有限公司 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 西安 710021)

摘要: 针对集中供暖系统管网水力失衡、流量供需失衡问题提出一种基于群智能的新型分布式优化算法。首先以系统输配送能耗最小为优化目标,将其分解为管网调节阀开度优化和换热站并联水泵运行优化两个子问题求解;其次建立调节阀模型和管网水力模型,在此基础上进行调节阀开度的优化,从而计算出系统最小供回水压差;然后基于改进的交替方向乘法完成并联水泵的优化运行;最后以集中供暖系统实例验证算法性能。实验结果表明:相比传统集中式求解算法,该算法不受水利管网规模限制,利于实现工程中即插即用;相比其他分布式算法,该算法不仅求解速度快,而且可以得到较优的管网运行策略,节能效果较为显著。

关键词: 集中供暖系统; 管网水力平衡; 控制策略; 群智能; 分布式优化算法; 交替方向乘法

中图分类号: TU831

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.2288

引用格式: 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.

Optimization of hydraulic pipe network control strategy for central heating system based on insect intelligence

ZHAO An-jun^{1†}, ZHANG Yu¹, ZHANG Yu-ping², DONG Fei-fei¹

(1. School of Building Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Shaanxi Coal Geology Group, Co.,Ltd., Xi'an 710021, China)

Abstract: A distributed optimization method based on insect intelligence is developed to address the problem of hydraulic imbalance and flow supply and demand imbalance in the central heating system pipe network. The first goal of the optimization is to minimize the system's energy consumption, which is broken down into two sub-problems: optimizing the opening degree of the pipe network's regulating valve and optimizing the operation of the parallel pumps in the heat exchange station. Secondly, the model of the regulating valve and the hydraulic model of the pipe network are established. On this basis, the opening of the regulating valve is optimized, so as to calculate the minimum water pressure difference between the supply and return of the system. Then, the optimized operation of the parallel pumps is completed based on the improved alternating direction method of multipliers. After that, an example of central heating system is given to verify the performance of the proposed algorithm. Results show that compared with the traditional centralized solution algorithm, this algorithm is not limited by the scale of the hydraulic pipe network, and is beneficial to realize plug and play in engineering. Compared with other distributed algorithms, this algorithm can not only solve the problem quickly, but also obtain a better pipe network operation strategy, and has a significant energy saving effect.

Keywords: central heating system; pipe network hydraulic balance; control strategy; insect intelligence; distributed algorithm; alternating direction method of multiplier

0 引言

长期以来,我国建筑行业能耗位居前茅,其中采暖能耗约占建筑总能耗的50%,而且采暖效率低下,

因此集中供暖系统节能研究对我国“双碳”目标的实现具有重要意义^[1-2]。由于传统控制策略跟不上供热规模的发展,导致用户流量供需不均,这不但增加了

收稿日期: 2021-12-31; 录用日期: 2022-04-15.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0704104-03).

责任编委: 吴淮宁.

[†]通讯作者. E-mail: zhao_anjun@163.com.

*本文附带电子附录文件,可登录本刊官网该文“资源附件”区自行下载阅览.

建筑采暖能耗,而且降低了热舒适性.目前,我国集中供暖系统大多采用量调节的方式,然而管网各支路之间存在耦合,一旦调节方式不合理,不仅会使管网水力失衡,而且还会造成能源浪费^[3].因此,如何在管网水力平衡的前提下得到较优的控制策略是集中供暖系统中节能的关键.

管网水力平衡是实现供暖系统流量供需平衡和节能优化的前提,工程中主要通过安装平衡阀和“以泵代阀”的措施维持管网动态水力平衡^[4-6],但平衡阀无疑会增加管网的阻力,同时“以泵代阀”会额外增加系统能耗,因此,研究智能算法对管网进行动态优化调节具有重要意义.Lu等^[7]以安装流量控制阀的液网为研究对象,利用线性规划优化方法和泵的特性曲线拟合计算水力平衡最优运行,从而使管网达到动态水力平衡;Wang等^[8]基于遗传算法提出了一种水力调节方法,该方法在维持管网水力平衡的同时具有良好的节能效果;周璇等^[9]建立了基于遗传算法的二次管网输配系统节能优化调节模型来在线优化各设备的运行参数,结果表明,动态调节方法相对变压差变流量调节方式可使输配系统运行能耗降低约12.27%.

上述智能算法^[7-10]虽然可以有效地维持管网动态水力平衡,但均是基于集中式控制架构,算法不具通用性,一旦中央数据处理控制器出现故障,则整个系统将无法运行.为了改善建筑集中式控制系统的现状,清华大学建筑节能研究中心提出了一种基于分布式计算框架的智能建筑自动化控制系统,称为群智能系统,该系统将建筑划分为若干个空间单元,并在空间单元内安装智能计算节点(computing processing node, CPN),相邻CPN通过数据接口进行交互,从而完成系统的全局优化.目前,已有学者针对暖通空调中的优化问题基于群智能架构进行了研究^[11-12].于军琪等^[13]针对并联水泵优化算法在群智能控制方面适应性不足的问题,提出了一种群智能控制系统适用的并联水泵优化算法对并联水泵运行进行优化;赵安军等^[14]采用模型预测分布式群控方法对建筑室内温度进行了控制与优化,实验结果表明,相较于传统温控阀控制方式,其能耗降低了14.28%.为使供暖系统水力管网中泵的总能耗最小,文献[15]给出了一种分布式控制算法,实现了水泵之间的通信网络全局优化.调节阀开度优化问题和并联水泵的优化运行问题通常可以等效为分布式计算中的多个可分离算子优化问题,以上在群智能架构下的分布式算法能效虽然有所提升,但是在调节阀开度优化问题和并联水泵的优化运行问题上还有很大的提升空间.

2010年Boyd^[16]将交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)引入分布式优化问题中,该方法结合了对偶上升法和拉格朗日乘数法的良好性能,具有收敛速度快、可扩展性强的特点^[17-18],能够将原本复杂高维的问题转化为两个子问题分别求解.目前已有大量学者针对ADMM推广至多个可分离算子优化问题进行了研究.何炳生^[19]在变分不等式形式的基础上提出了处理3个可分离算子不收敛问题的ADMM类方法;李志刚等^[20]提出了一种基于高斯罚函数的离散变量连续化的处理策略,用于求解含离散变量的无功优化问题;Yu等^[21]针对中央空调冷冻水管网动态水力平衡调节问题,基于新型分布式控制结构和带正则项的ADMM,提出了一种分布式迭代优化算法,结果表明,该算法优化后的运行策略在实现管网动态水力平衡的同时,节能约28.54%.因此,推广至多个可分离算子的ADMM同样适用于求解集中供暖系统水力管网控制策略优化问题.

本文针对集中供暖系统水力管网控制策略优化问题的研究,具有如下贡献:1)将集中供暖系统水力管网控制策略优化问题分解为管网调节阀开度优化和换热站并联水泵运行两个子问题,并基于群智能架构,利用基尔霍夫定律建立分布式的管网水力计算模型;2)对于管网调节阀开度优化问题,基于等百分比特性调节阀的物理模型,提出一种基于物理模型的分布式迭代优化算法(distributed iterative optimization algorithm based on physical model, DIOAPM),称为DIOAM1;3)对于换热站并联水泵运行优化问题,提出一种以ADMM为核心的分布式迭代优化算法,称为DIOAM2.

1 问题描述

集中供暖系统水力管网控制策略优化问题是指,通过调节集中供暖系统二次管网中调节阀的开度和换热站并联水泵的转速达到管网的动态水力平衡和流量供需平衡,同时系统输配送能耗最小.本文将集中供暖系统水力管网控制策略优化问题分解为管网调节阀开度优化和换热站并联水泵运行优化两个子问题并分别求解.

管网调节阀优化问题是以系统总供回水压差最小为目标,在各建筑需求流量和总流量已知的条件下,求解各支路调节阀的开度以及系统最小供回水压差,可表示为

$$\begin{aligned} & \min(\Delta P). \\ & \text{s.t. } Q_{\text{FM}ki} = Q_{\text{FM}ki}^{\text{set}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{1i} + \Delta P_{G1i} &= \Delta P_{1,i+1}; \\
 \Delta P_{1i} &= \Delta P_{L1i} + \Delta P_{f1i}(l_{1i}); \\
 &\vdots \\
 \Delta P_{ki} + \Delta P_{Gki} &= \Delta P_{k,i+1}; \\
 \Delta P_{ki} &= \Delta P_{Lki} + \Delta P_{fki}(l_{ki}); \\
 i &= 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, M. \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中: ΔP 为系统供回水压差, $Q_{FM_{ki}}$ 为第 k 个分支的第 i 个建筑所在支路的流量, $Q_{FM_{ki}}^{set}$ 为第 k 个分支的第 i 个建筑的需求流量, ΔP_{ki} 为第 k 个分支的第 i 个建筑所在支路总压降, ΔP_{Lki} 为第 k 个分支的第 i 个建筑和其所在支路管道阻抗的总和, ΔP_{Gki} 为第 k 个分支的第 i 个建筑的供回水管道总压降, $\Delta P_{fki}(l_{ki})$ 为第 k 个分支的第 i 个建筑的阀门压降, N 为建筑的数量, M 为分支数量。

并联水泵运行优化问题是根据管网调节阀优化问题求解出的系统最小供回水压差和总需求流量, 以并联水泵的总能耗最小为目标, 求解各并联水泵的流量以及转速比, 可表示为

$$\begin{aligned}
 &\min(W). \\
 &\text{s.t. } H_i = \Delta P + \sum_{j=1}^i \left((S_{puj1} + S_{puj2}) \times \left(Q - \sum_{K=1}^{j-1} Q_{pk} \right)^2 \right) + S_{pi} \times Q_{pi}^2; \\
 &\sum_{i=1}^n Q_{pi} = Q, i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中: W 为并联水泵总功率, H_i 为第 i 台水泵的扬程, S_{puj1} 和 S_{puj2} 为第 j 台水泵供、回水管道的阻抗, S_{pi} 为第 i 台水泵所在支路的管道阻抗, Q_{pi} 为第 i 台水泵的流量, n 为水泵的台数。

2 模型建立

2.1 调节阀模型

对于多个分支组成的管网系统, 调节阀在各分支的流量分配中起着至关重要的作用, 在集中供暖系统中常采用等百分比特性的调节阀。等百分比特性调节阀的数学表达式^[22]为

$$\frac{d \frac{Q}{Q_{\max}}}{d \frac{l}{l_{\max}}} = K \frac{Q}{Q_{\max}}. \quad (3)$$

其中: Q 为当前通过调节阀的流量, Q_{\max} 为调节阀能通过的最大流量值; l 为调节阀当前开度, l_{\max} 为调节阀的最大开度。求解式(3), 然后将 $l = 0, Q =$

$Q_{\min}, l_{\max} = 100, Q = Q_{\max}$ 以及 $R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}$ 代入进行求解, 可得下式^[21]:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \left(\frac{2R-1}{R} \right)^{\frac{l}{l_{\max}}} + \frac{1}{R} - 1. \quad (4)$$

其中: R 为调节阀的可调比, 即调节阀能控制的最大流量和最小流量比值。

根据管道阻力特性, 如式(5)所示, 保持阀门在不同开度情况下两端压差不变可以得到等百分比特性调节阀阻抗系数与阀门开度的关系, 即

$$\Delta P_g = S_g \times Q^2, \quad (5)$$

$$S_f(l) = \frac{S_{f0}}{\left(\left(\frac{2R-1}{R} \right)^{\frac{l}{l_{\max}}} + \frac{1}{R} - 1 \right)^2}. \quad (6)$$

其中: ΔP_g 为管道压差, S_g 为管道阻抗, Q 为管道流量, S_{f0} 为调节阀全开时的阻抗, $S_f(l)$ 为调节阀在开度为 l 时的阻抗。基于上述等百分比特性的调节阀模型, 在调节阀全开时的阻抗和可调比已知的条件下, 可以计算出任意开度下调节阀的阻抗。

2.2 水泵模型

当集中供暖系统管网的供回水压差设定为某一值时, 调节水泵的频率可以使水泵的工作状态点发生改变, 从而对水泵的流量和扬程进行调控, 达到系统所需要的流量和扬程。对于同一台水泵, 其在任意转速下的模型如下:

$$\begin{aligned}
 H_i &= a_i Q_i^2 + b_i w_i Q_i + c_i w_i^2, \\
 \eta_i &= d_i \left(\frac{Q_i}{w_i} \right)^2 + e_i \left(\frac{Q_i}{w_i} \right) + f_i, \\
 W &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho g H_i Q_{pi}}{\eta_i} \right). \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中: $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$ 为第 i 台水泵的性能参数, η_i 为第 i 台水泵的工作效率, w_i 为第 i 台水泵的转速比。基于上述并联水泵模型, 在水泵频率大小已知的条件下, 可以计算出该频率下的水泵的流量-扬程、流量-效率性能曲线, 以及相应的功率。

2.3 管网模型

管网水力模型的主要功能是根据各管道、阀门、建筑的阻抗, 以及水泵的性能参数等输入参数, 求解管网系统中各支路的流量和压降值, 本文利用基尔霍夫电压定律和电流定律建立管网水力模型^[23], 管网拓扑等效电气图如图1所示。

图1中: S_{fki}, S_{Lki} 分别为第 k 个分支上第 i 个支路上调节阀的阻抗和建筑与其所在支路管道阻抗的总和, S_{pi} 为第 i 台水泵所在支路的阻抗, S_{pui1}, S_{pui2} 分别为第 i 台水泵的供水管道阻抗和回水管道阻抗。

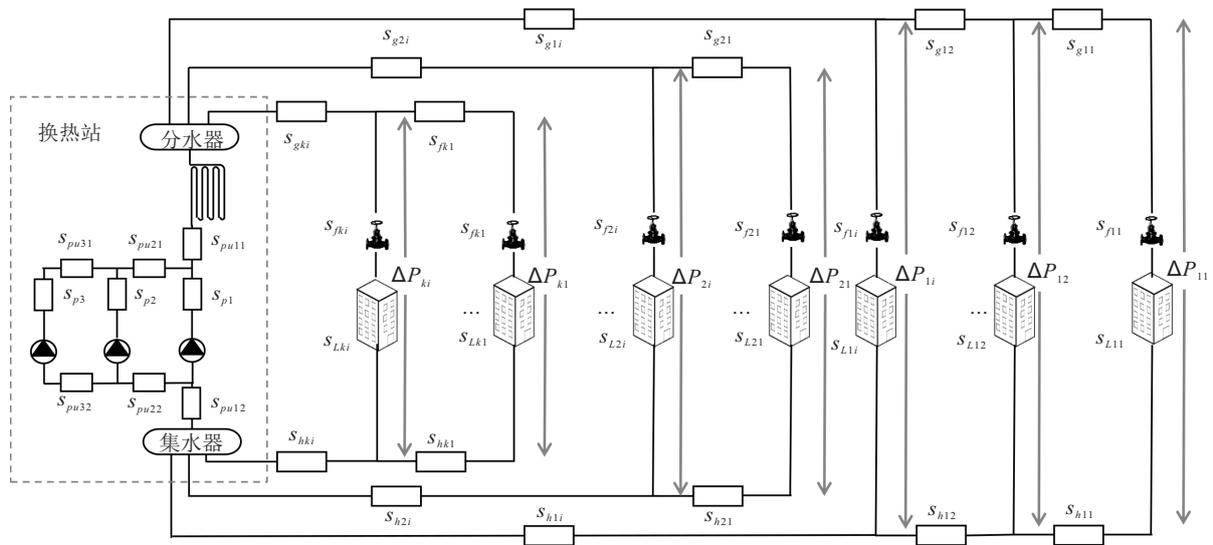


图1 管网拓扑等效电气

从图1中可以看出,接入分集水器各分支的供回水压差均相等,每个分支上的各支路之间的压降关系可表示为

$$\Delta P_{k,j+1} = \Delta P_{kj} + (S_{gkj} + S_{hkj}) \sum_{N=1}^j (Q_{kN}^2) \quad (8)$$

其中: ΔP_{kj} 为第 k 个分支上第 j 个支路的压降, S_{gkj} 、 S_{hkj} 分别为第 k 个分支上第 j 个支路的供水管道阻抗和回水管道阻抗, Q_{kj} 为第 k 个分支上第 j 个支路的流量, $j = 1, 2, \dots, i - 1$.

对于整个管网而言,在其各管段、建筑、阀门阻抗值确定的情况下,一旦已知任一支路的流量值,根据基尔霍夫定律即可得知其余支路的流量值. 假定建筑阻抗值恒定不变,则由基尔霍夫定律和数学归纳法可推导出管网支路流量的计算公式,即

$$Q_{k2} = a_1 Q_{k1}, Q_{k3} = a_2 Q_{k1}, \dots, Q_{ki} = a_{i-1} Q_{k1},$$

$$Q_{k1} = \frac{Q_k}{1 + a_1 + a_2 + \dots + a_{i-1}} \quad (9)$$

由式(9)可以看出,任一分支中的所有支路的流量均可用末端支路 Q_{ki} 表示,其中 a_1, a_2, \dots, a_{i-1} 为包含管道、阀门、建筑阻抗值的流量系数,若支路阀门开度发生改变,则对应的流量系数也会随之发生改变. 由式(8)和(9)即可计算出管网各支路的流量和压降值.

3 优化方法

3.1 群智能架构下设备的通信流程

基于群智能架构,将集中供暖系统水力管网控制策略优化问题分解为调节阀开度优化和并联水泵运行优化两个子问题,利用第2节建立的管网模型对这两个子问题设计优化算法,称为DIOAM1、DIOAM2. 首先需要将CPN安装在各个阀门和水泵上,使其升级为智能设备,然后根据设备的实际连接情况将所有的CPN相互连接,使其可以相互通信,具体通信过程如图2所示.

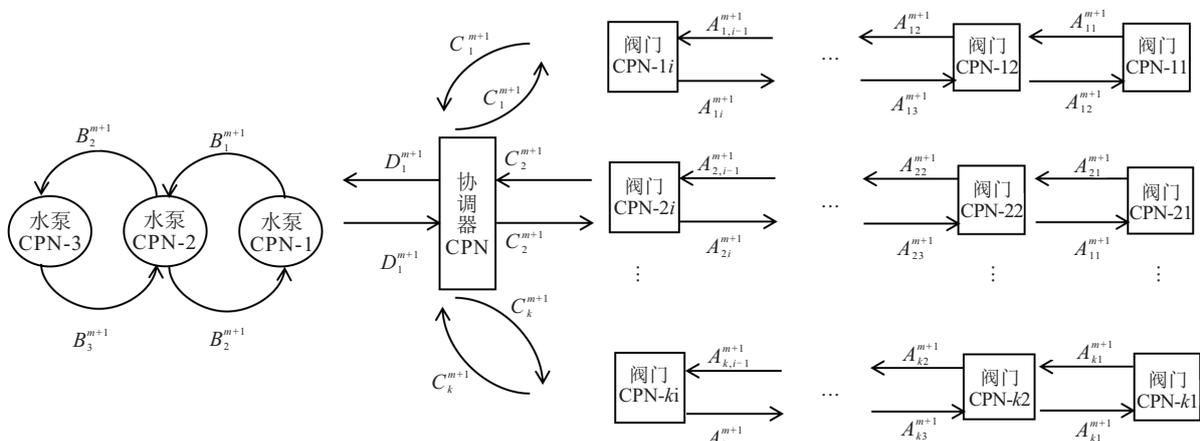


图2 管网CPN通信流程

图2中各阀门CPN根据接收到的信息矩阵对自身进行迭代更新,同时更新信息矩阵 A_{ki}^{m+1} ,然后将 A_{ki}^{m+1} 传递给相邻的CPN;阀门模块优化完成后将信息矩阵 C_k^{m+1} 传递给协调器CPN,协调器CPN将信息矩阵 D_1^{m+1} 传递给水泵CPN;水泵CPN根据接收到的 D_1^{m+1} 对自身进行迭代更新,同时更新信息矩阵 B_j^{m+1} ,然后将 B_j^{m+1} 传递给相邻的CPN.其中,各信息矩阵的定义如下:

$$A_{ki}^{m+1} = [Q_{11}^{m+1}, Q_{12}^{m+1}, \dots, Q_{ki}^{m+1}, S_{f11}^{m+1}, \dots, S_{fki}^{m+1}, \Delta P^{m+1}]; \quad (10)$$

$$B_j^{m+1} = [Q_{p1}^{m+1}, Q_{p2}^{m+1}, \dots, Q_{pj}^{m+1}, Q^{m+1}, \Delta P_{p1}^{m+1}, \dots, \Delta P_{pj}^{m+1}, \Delta P^{m+1}]; \quad (11)$$

$$C_k^{m+1} = [Q_k^{m+1}, \Delta P_k^{m+1}, \Delta P^{m+1}]; \quad (12)$$

$$D_1^{m+1} = [Q^{m+1}, \Delta P^{m+1}]. \quad (13)$$

3.2 调节阀开度优化

DIOAM1的核心思想是根据等百分比特性调节阀的物理特性对阀门开度进行调节,在式(4)中,若已知可调比 R 和阀门全开时能够通过的最大流量 Q_{\max} ,则可以计算出任意开度下阀门通过的流量 Q ,同样也可以计算出支路需求流量下阀门的开度.然而在管网中,阀门全开时能够通过的最大流量不仅与阀门本身的阻抗有关,还与其余阀门的开度以及建筑的阻抗有关,由此可知管网中阀门的 Q_{\max} 是一个不断变化的值.为了计算出 Q_{\max} 的动态值,本文利用2.3节建立的管网计算模型对阀门当前开度下的流量值进行计算,从而得到 Q_{\max} 的值,以此来计算支路需求流量下阀门的开度 l .由于管网中各支路之间相互耦合,需要利用DIOAM1对阀门进行多次调节,DIOAM1算法步骤如下.

step 1: 初始化.将管网中管道阻抗信息写入所有阀门CPN,同时令其信息矩阵 A_{ki}^m, C_k^m 中所有元素为0,令 Q 等于总需求流量, Q_{nki} 等于支路需求流量,调节阀开度 l_{ki} 为全开.

step 2: 求解当前支路流量.根据2.3节建立的管网模型,利用式(9)逐步求解各支路在当前开度下的流量 Q_{ki}^m ,根据式(6)求解 S_{fki}^m ,更新 A_{ki}^m ,并记当前流量与需求流量差值的绝对值为 d_{ki}^m .

step 3: 判断 d_{ki} 是否小于某一定值 ϵ ,若满足则阀门开度不变,否则转到step 4.

step 4: 调节阀开度.首先将 l_{ki}^m 和 Q_{ki}^m 代入式(4),求解当前阀门最大流量 $Q_{\max,ki}^m$,再根据 Q_{nki} 、 $Q_{\max,ki}^m$ 、式(4)和(6)求解出 $l_{ki}^{m+1}, S_{fki}^{m+1}$,更新 A_{ki}^{m+1} .

step 5: 判断 $d_{11}, d_{12}, \dots, d_{ki}$ 是否同时小于某一

定值 ϵ ,若满足,则计算每个分支总流量 Q_k^{m+1} 和最小压差 ΔP_k^{m+1} ,更新 C_k^{m+1} 并转到step 6,否则返回step 2.

step 6: 分支最小压差值比较.各分支传递 C_k^{m+1} 至协调器,协调器通过对比将各分支中最大的压差作为系统最小供回水压差 ΔP^{m+1} ,若管网系统只存在一个分支则无需进行此步骤.

step 7: 调节阀开度更新.首先协调器将系统最小供回水压差 ΔP^{m+1} 传递给各分支中靠近协调器的阀门CPN,然后根据 $Q_{nki}, \Delta P^{m+1}$ 和式(6)求解出各阀门最终开度.

step 8: 输出优化结果 $l_{ki}^{m+1}, Q_{ki}^m, \Delta P^{m+1}$ 的值,算法结束.

3.3 水泵运行优化

DIOAM2是一种以ADMM为核心的分布式迭代算法,以此需将式(2)的目标函数改写为如下形式:

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \mid \sum_{i=1}^n Q_{pi} = Q, Q_{pi} \in X_i, i = 1, 2, \dots, n \right\}. \quad (14)$$

本文水泵优化问题属于多个可分离算子优化问题,为保证算法的收敛性和准确性,文献[24-25]结合ADMM输出校正和多次更新乘法器的想法,提出了一种拉格朗日乘数的顺序更新方案(sequential updating scheme of the Lagrange multiplier, SUSLM),SUSLM求解式(14)所示的优化问题的过程如下:

$$\lambda^{m+0} = \lambda^m - \beta \left(\sum_{i=1}^n Q_{pi}^m - Q \right),$$

$$\tilde{Q}_{p1}^m = \arg \min \left\{ W_1(w_1, Q_{p1}) - \lambda^{m+0} Q_{p1} + \frac{\mu\beta}{2} \|Q_{p1} - Q_{p1}^m\|^2 \mid Q_{p1} \in X_1 \right\}; \quad (15)$$

⋮

$$\lambda^{m+\frac{i}{n}} = \lambda^{m+\frac{i-1}{n}} - \mu\beta(\tilde{Q}_{p,i-1}^m - Q_{p,i-1}^m),$$

$$\tilde{Q}_{pi}^m = \arg \min \left\{ W_i(w_i, Q_{pi}) - \lambda^{m+\frac{i}{n}} Q_{pi} + \frac{\mu\beta}{2} \|Q_{pi} - Q_{pi}^m\|^2 \mid Q_{pi} \in X_i \right\}; \quad (16)$$

$$\tilde{\lambda}^m = \lambda^m - \frac{\beta}{2} \left(\sum_{i=1}^n \tilde{Q}_{pi}^m - Q \right). \quad (17)$$

其中: λ 为拉格朗日乘数, β 为惩罚参数, μ 为松弛因子, m 为迭代次数.

step 1: 初始化.将管网中管道阻抗信息写入所有水泵CPN,同时令其信息矩阵 B_i^m 中所有元素为0, $\lambda = 100, \beta = \mu = 0.5$.

step 2: 水泵1生成转速比种群,并根据协调器传

递的信息矩阵 D_1^m 以及式(16)求解 ΔP_{pi} , 结合改进粒子群算法^[26]和式(15)求解出 \tilde{Q}_{pi}^m .

$$\Delta P_{pi} = \Delta P + \sum_{j=1}^i \left(\left(Q - \sum_{k=1}^{i-1} Q_{pk} \right)^2 \cdot (S_{pui1} + S_{pui2}) + Q_{pi}^2 \cdot S_{pi} \right). \quad (18)$$

step 3: 第 i 台水泵根据邻居 CPN 传递的信息矩阵求解 ΔP_{pi} , 并生成水泵的转速比种群, 结合改进粒子群算法和式(16)求解出 \tilde{Q}_{pi}^m .

step 4: 判断是否满足邻居 CPN 数量为 1 且无协调器, 若满足, 则根据式(17)更新 $\tilde{\lambda}^m$, 否则返回 step 3.

step 5: 判断算式 $\sum_{i=1}^n Q_{pi} - Q$ 是否满足精度要求或迭代次数是否达到最大值, 若满足条件, 则输出各水泵转速比 w_i 和流量 Q_{pi} , 并计算 $\sum_{i=1}^n W_i$, 算法结束, 否则返回 step 2.

4 案例分析

4.1 案例简介

为验证 DIOAM 算法在实际应用中的良好性能, 本文以西安建筑科技大学草堂校区南山书院换热站中并联水泵及二次管网中调节阀为对象进行测试和结果分析. 该系统总设计流量为 $300 \text{ m}^3/\text{h}$, 设计扬程为 20 m , 区域内共有 12 栋宿舍楼, 每栋楼进楼处分别安装有可调比为 30、阀门全开时阻抗为 $14000 \text{ s}^2/\text{m}^5$ 的相同等百分比特性的调节阀, 换热站由 4 台型号为 NBG 100-80-125/127 的并联水泵组成, 该供暖系统具体工况设置见表 1.

表 1 供暖系统工况运行参数表 单位: m^3/h

设备编号	工况 1 流量	工况 2 流量	工况 3 流量
Valve1-1	22	18	12
Valve1-2	20	15	10
Valve2-1	22	18	12
Valve2-2	22	18	12
Valve2-3	20	15	10
Valve2-4	22	18	12
Valve3-1	22	18	12
Valve3-2	20	15	10
Valve3-3	22	18	12
Valve4-1	22	18	12
Valve4-2	20	15	10
Valve4-3	22	18	12

另外, 为了验证 DIOAM 算法的良好性能, 本文采用不同算法分别在集中式架构和分布式架构基础上进行优化实验.

4.2 结果分析

4.2.1 DIOAM 算法在案例中的应用

首先本文将 DIOAM 应用于南山书院供暖系统, 为验证算法的节能性, 采集了 2020 年 11 月 ~ 2021 年

3 月该供暖系统不同工况下的实际运行数据, 然后利用 DIOAM1、DIOAM2 对该供暖时段内的管网调节阀开度和水泵运行策略进行优化, 为避免实验偶然性, 进行了 50 次独立优化实验, 最终将对 12 月 10 日运行控制策略优化的实验结果平均值进行记录, 图 3 和图 4 为工况 2 下的优化结果. 本文所有实验的条件如下: 硬件环境: CPU: 2.20 GHz, 内存容量为 8 GB, 硬盘容量为 500 GB; 软件环境: Windows 64 位操作系统, 采用 Matlab R2017b.

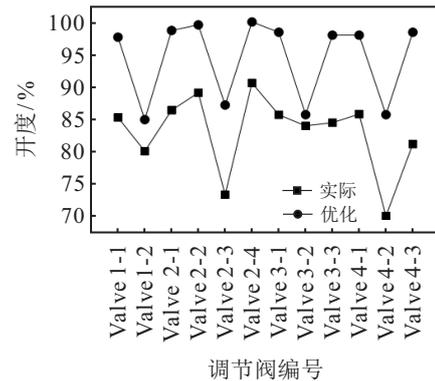


图 3 工况 2 调节阀开度优化对比

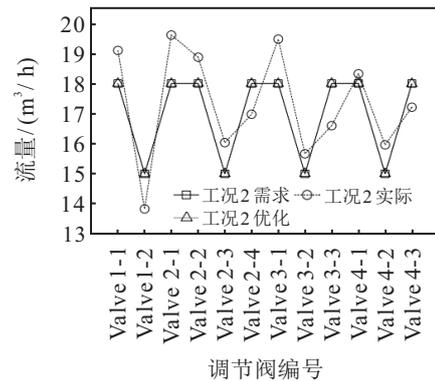


图 4 工况 2 支路流量优化对比

从图 3 和图 4 中可以看出: 该供暖系统运行控制策略在未优化前虽然可以维持管网水力平衡, 但显然各支路的实际流量均未满足支路需求, 与优化后的结果相比, 实际运行中的支路阀门开度偏小, 这导致管网阻抗增大, 增加了水泵的运行能耗; 而经过 DIOAM 优化后, 在 3 种工况下, 各支路调节阀的开度相比优化前显著增大, 并且在此条件下各支路流量均能满足需求, 从而减小了管网系统的阻抗, 使得系统供回水压差降低, 在源头上降低了水泵的能耗.

经 DIOAM 算法优化后, 3 种工况下系统的最小供回水压差由 18.32 Mpa 、 14.74 Mpa 、 11.91 Mpa 降低至 15.61 Mpa 、 12.08 Mpa 、 9.70 Mpa , 由此水泵的工作点发生了变化, 效率提升, 最终水泵的总功率分别减小了 5.468 kW 、 6.244 kW 、 5.734 kW , 系统总共可节约 19.86% 的能耗, 说明 DIOAM 算法对该供暖系统运行

控制策略具有良好的优化效果.

4.2.2 不同算法优化结果分析

为了进一步验证DIOAM的性能,分别利用文献[9]中基于集中式架构的GA、文献[21]中基于分布式

架构DIOA和本文基于分布式架构DIOAM对该供暖系统12月10日不同工况下的运行策略进行优化,同样为了避免实验偶然性,将3种算法在各个工况下独立运行50次的结果平均值记录在表2中.

表2 不同算法优化后策略对比

设备编号	工况1			工况2			工况3			
	GA	DIOA	DIOAM	GA	DIOA	DIOAM	GA	DIOA	DIOAM	
开度/%	Valve1-1	94.362	96.78	97.540	95.445	97.587	97.647	95.796	96.87	97.661
	Valve1-2	90.57	91.19	91.206	83.68	84.49	84.957	84.584	84.951	84.97
	Valve2-1	95.122	97.312	98.607	94.126	97.809	98.688	94.8	98.66	98.71
	Valve2-2	95.509	97.99	99.52	97.6	99.538	99.555	95.79	98.976	99.574
	Valve2-3	89.01	93.012	93.695	85.2	86.621	87.207	86.54	87.225	87.223
	Valve2-4	97.896	100	100	97.451	100	100	96.912	100	100
	Valve3-1	95.141	97.93	98.362	94.85	97.96	98.426	95.43	98.35	98.441
	Valve3-2	87.5	92.108	92.067	83.997	85.359	85.729	81.3	85.178	85.742
	Valve3-3	96.27	96.845	97.873	93.865	98	97.966	97.376	98.02	97.98
	Valve4-1	96.989	97.122	97.873	96.42	97.663	97.966	95.1	97.354	97.98
	Valve4-2	90.4	92.45	92.067	81.26	84.81	85.729	84.875	85.119	85.742
	Valve4-3	98.003	97.97	98.362	97.944	98.023	98.426	96.964	97.976	98.441
	转速比	pump1	0.921	0.911	0.907	0.804	0.793	0.799	0.868	0.864
pump2		0.950	0.943	0.946	0.822	0.826	0.805	0.845	0	0
pump3		0.937	0.930	0.928	0.838	0.819	0.824	0	0	0
pump4		0	0	0	0	0	0	0	0.836	0.839
供回水压差/Mpa	0.1725	0.1604	0.1561	0.1377	0.1279	0.1238	0.1082	0.0998	0.0970	
功率/kW	32.284	30.331	29.295	26.9	25.270	23.616	20.891	19.537	18.337	

从表2的结果中可以看出:3种算法中集中式架构下GA优化后的调节阀开度整体最小,并且供回水压差和水泵能耗最大,而经过分布式架构下DIOA、DIOAM优化后,各支路的调节阀中总能保持一个调节阀全开,并且每个调节阀的开度基本大于GA优化后的调节阀开度,从而使得优化后水泵需提供的供回水压差减小,有效地减少水泵的运行功率.这是由于GA是通过生成种群、种群进化变异来寻找最优解,面对较多个体的寻优问题时,求解精度低且易陷入局部最优,而DIOA、DIOAM本质上是根据公式迭代求解,因此求解精度较高.

对比分布式架构下DIOA与DIOAM优化后的结果,虽然DIOAM优化后的调节阀开度和供回水压差略优于DIOA优化后的结果,但最终水泵的能耗却有了明显的降低,其最大的节能率可达到23.8%.首先,DIOA和DIOAM在求解调节阀优化问题时都是先寻找系统最小供回水压差,再根据系统最小供回水压差优化调节阀开度.但不同的是,DIOA是先计算管网中各个支路调节阀全开时达到其需求流量时的支路压降,然后将其中的最大值当作最小供回水压差;而DIOAM是先根据等百分比特性调节阀的物理特性公式判断阀门应调节到的开度,再通过水力管网计算模型来计算是否满足支路需求,从而计算出

系统最小供回水压差,DIOAM充分考虑了调节阀的物理特性,因此具有更好的寻优精度.其次,DIOA和DIOAM在求解并联水泵运行优化问题时都是在以ADMM为核心的基础上进行求解,DIOA中带正则项的ADMM算法虽然性能较优,但是算法中的正则项只能保证其在求解多个可分离算子问题时结果可以收敛,但结果并不一定是最优值,而SUSLM中多次更新乘法器的思想弥补了正则项的不足,使优化结果的精度有了明显的提升.

图5为工况3条件下不同算法的相对误差图.

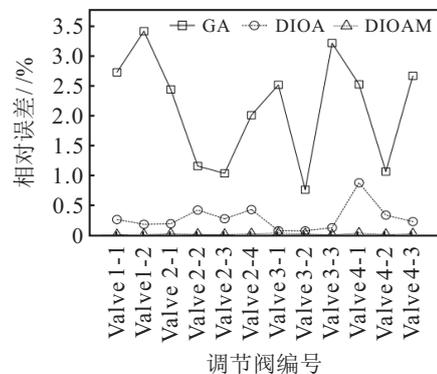


图5 工况3条件下不同算法的相对误差

由图5可以看出,DIOAM优化后的运行策略可使各支路流量值与需求流量值几乎相等,其相对误差最大为0.048%,最小可达到0.005%,在管网动态

水力平衡的前提下可以较好地分配支路流量;而GA优化后的支路流量虽然也能基本满足需求,但其精度低,相对误差最大达到了3.4%,DIOA优化后所得到的运行策略也能较好地控制支路流量,但其相对误差精度略低于DIOAM,最大不超过0.9%。相比之下,本文提出的DIOAM算法在供暖系统管网输配送系统能耗的优化方面具有巨大潜力。

4.2.3 不同算法下水力管网动态调节验证

为了进一步验证DIOAM在水力管网动态调节上的优势,在保持其他支路流量为工况1需求流量不变的情况下,分别设置Valve2-4的流量为工况1需求流量的80%、60%、40%,在这3种条件下对4.2.2节中3种算法的性能进行实验分析。

从优化后的管网动态调节策略来看,随着Valve2-4需求流量不断减少,DIOAM仍然可以保持管网中有一个调节阀全开,并且其他支路的调节阀开度与工况1条件下的开度相比整体上略微变大,得到了更小的供回水压差和更低的水泵能耗;而集中式架构下的GA却不能保证每次都找到使管网阻抗最小的调节策略,在这3种条件下未出现有调节阀全开的情况,同时除Valve2-4外的调节阀开度与工况1条件下的相比无明显变化,其最终的供回水压差和水泵能耗依旧最大;分布式架构下DIOA虽然相比集中式架构下的GA有着明显的优势,但是其仅在Valve2-4需求流量为工况1的60%、40%条件下可以保持管网中有一个调节阀全开,最终的供回水压差和水泵能耗始终大于DIOAM。

从优化后的流量相对误差值可知,GA的求解精度最低,DIOA相对于GA求解精度有所改善,DIOAM的精度最高,其优化后的支路流量与其需求流量值非常相近,最大相对误差不超过0.05%,并且在保证其他支路流量几乎不变的前提下,对Valve2-4支路的流量起到了很好的控制作用,达到了管网流量动态调节的要求。

除此之外,本文还对DIOAM算法收敛性方面的性能进行了实验分析,结果表明,相比GA和DIOA,DIOAM无论在迭代次数还是迭代时间上都有明显的优势。

综上所述,DIOAM适用于集中供暖系统水力管网控制策略优化问题的求解。

5 结论

针对集中供暖系统中二次管网水力失衡以及用户流量供需不平衡的问题,本文将其分解为调节阀开度优化问题和并联水泵运行优化问题,建立了分布

式的管网水力计算模型,并提出了一种基于物理模型的分布式迭代优化算法。本文通过实例对算法进行测试,结果表明,该算法相比于传统集中式架构的智能算法在迭代时间和优化精度上有较为显著的提升。另外,本文建立的分布式水力计算模型和DIOAM算法不但适用于集中供暖系统水力管网控制策略优化问题,同时在面对区域供暖制冷系统中管网拓扑复杂的流量分配问题具有尤为重要的参考价值。

参考文献(References)

- [1] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 30-40.
(Jiang Y. Current building energy consumption in China and effective energy efficiency measures[J]. Hv & AC, 2005, 35(5): 30-40.)
- [2] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报: 社会科学版, 2021, 21(3): 1-15.
(Hu A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches[J]. Journal of Beijing University of Technology: Social Sciences Edition, 2021, 21(3): 1-15.)
- [3] Gao B, Zhang L F, Tian Y F, et al. Analysis on energy saving measures of heat exchange station in central heating system[J]. Procedia Engineering, 2017, 205: 581-587.
- [4] 戴彬彬, 段雪松. 水力平衡调试在空调水系统中的应用[J]. 建筑技术, 2013, 44(3): 249-251.
(Dai B B, Duan X S. Application of hydraulic balance commissioning in air-conditioning water system[J]. Architecture Technology, 2013, 44(3): 249-251.)
- [5] Cholewa T, Balen I, Siuta-Olcha A. On the influence of local and zonal hydraulic balancing of heating system on energy savings in existing buildings-long term experimental research[J]. Energy and Buildings, 2018, 179: 156-164.
- [6] 尹荣杰. 分布式变频泵供热系统的运行调节方式[J]. 区域供热, 2015(1): 6-10.
(Yin R J. The operation regulation mode of distributed frequency conversion pump heating system[J]. District Heating, 2015(1): 6-10.)
- [7] Lu C Y, Ma J F, Wang X H, et al. Hydraulic balance optimization calculation and experimental research on model of fluid network system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 300/301: 681-688.
- [8] Wang H, Wang H Y, Zhu T. A new hydraulic regulation method on district heating system with distributed variable-speed pumps[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 147: 174-189.
- [9] 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.
(Zhou X, Liu G Q, Wang X P, et al. Study on optimal adjustment method of second pipe network in central heating system based on dynamic hydraulic balance[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2019, 50(1): 220-233.)
- [10] Wang Y, Wang Z W. A stochastic load demand-oriented synergetic optimal control strategy for variable-speed pumps in residential district heating or cooling systems[J]. Energy and Buildings, 2021, 238: 110853.
- [11] 洪奕光, 翟超. 多智能体系统动态协调与分布式控制设计[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(10): 1506-1512.
(Hong Y G, Zhai C. Dynamic coordination and distributed control design of multi-agent systems[J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(10): 1506-1512.)
- [12] Guelpa E, Marincioni L. Demand side management in district heating systems by innovative control[J]. Energy, 2019, 188: 116037.
- [13] 于军琪, 张瑞, 赵安军, 等. 中央空调系统并联水泵节能优化群智能控制算法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(10): 2155-2162.
(Yu J Q, Zhang R, Zhao A J, et al. Energy saving optimization insect intelligent control algorithm for parallel pumps in central air-conditioning system[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(10): 2155-2162.)
- [14] 赵安军, 周梦, 于军琪, 等. 基于分布式群控技术的高层建筑集中供暖系统控制与优化研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(6): 23-34.
(Zhao A J, Zhou M, Yu J Q, et al. Research on control and optimization of central heating system for high-rise buildings based on distributed group control technology[J]. Building Science, 2020, 36(6): 23-34.)
- [15] Kallesøe C S, Wisniewski R, Jensen T N. A distributed algorithm for energy optimization in hydraulic networks[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, 47(3): 11926-11931.
- [16] Boyd S. Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers[J]. Foundations and Trends in Machine Learning, 2010, 3(1): 1-122.
- [17] 衣鹏, 洪奕光. 分布式合作优化及其应用[J]. 中国科学: 数学, 2016, 46(10): 1547-1564.
(Yi P, Hong Y G. Distributed cooperative optimization and its applications[J]. Scientia Sinica: Mathematica, 2016, 46(10): 1547-1564.)
- [18] 于军琪, 陈时羽, 赵安军, 等. 改进交替方向乘子法求解冷水机组负荷分配群智能优化问题[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(7): 947-962.
(Yu J Q, Chen S Y, Zhao A J, et al. Improved alternating direction method of multipliers for solving optimal chiller loading problem in swarm intelligent control system[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(7): 947-962.)
- [19] 何炳生. 我和乘子交替方向法20年[J]. 运筹学学报, 2018, 22(1): 1-31.
(He B S. My 20 years research on alternating directions method of multipliers[J]. Operations Research Transactions, 2018, 22(1): 1-31.)
- [20] 李志刚, 吴文传, 张伯明, 等. 一种基于高斯罚函数的大规模无功优化离散变量处理方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 68-76.
(Li Z G, Wu W C, Zhang B M, et al. A large-scale reactive power optimization method based on Gaussian penalty function with discrete control variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 68-76.)
- [21] Yu J Q, Liu Q T, Zhao A J, et al. A distributed optimization algorithm for the dynamic hydraulic balance of chilled water pipe network in air-conditioning system[J]. Energy, 2021, 223: 120059.
- [22] 付祥钊. 流体输配管网[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001: 268-272.
(Fu X Z. Fluid distribution network [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001: 268-272.)
- [23] Martinevi A, Vaak M, Lei V. Identification of a control-oriented energy model for a system of fan coil units[J]. Control Engineering Practice, 2019, 91: 104100.
- [24] Dai Y H, Han D R, Yuan X M, et al. A sequential updating scheme of the Lagrange multiplier for separable convex programming[J]. Mathematics of Computation, 2017, 86(303): 315-343.
- [25] Shen Y, Zuo Y N, Zhang X Y. A faster generalized ADMM-based algorithm using a sequential updating scheme with relaxed step sizes for multiple-block linearly constrained separable convex programming[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2021, 393: 113503.
- [26] 于军琪, 赵泽华, 赵安军, 等. 求解并联冷机负荷分配问题的改进FODPSO算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(6): 1901-1914.
(Yu J Q, Zhao Z H, Zhao A J, et al. Improved FODPSO algorithm for load distribution of parallel chillers[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2021, 52(6): 1901-1914.)

作者简介

赵安军(1975—), 男, 副教授, 博士, 从事智能建筑、能耗检测与评估等研究, E-mail: zhao_anjun@163.com;

张宇(1998—), 女, 硕士生, 从事建筑智能与节能技术的研究, E-mail: ZY19980928@163.com;

张育平(1966—), 男, 教授级高工, 从事地热能开发利用的研究, E-mail: xazyp@163.com;

董菲菲(1997—), 女, 硕士生, 从事建筑智能与节能技术的研究, E-mail: dongfeifei0722@163.com.