

基于动态并行竞争的区域冷热能源站多站选址及热力管网规划算法

韩四维,朱婵霞,潘杭萍,殷俊平,奚巍民

(国网(苏州)城市能源研究院有限责任公司,江苏 苏州 215163)

摘要:能源站选址及热力管网规划,是区域冷热能源站规划过程中最值得关注的问题之一。现有能源站选址及热力管网规划算法大多采用“两步法”,将负荷点分配问题与管网布局问题进行割裂处理,使得决策过程中的决策依据不一致,从而导致负荷点分配与管网布局的结果可能并非最优。针对该问题,提出了一种基于动态并行竞争机制的区域能源站多站选址及热力管网规划算法,算法直接对负荷点连接各能源站管网的方式进行比选,同步确定负荷点的归属及相应的管网最优布置方案。算例分析表明,所提出的动态并行竞争算法能够保证负荷点分配问题与管网布局两个问题的决策一致性,从而使规划结果相对于传统“两步法”而言更优。

关键词:综合能源规划;能源站选址;热力管网规划;图论

Multi-site selection and thermal network planning algorithm of district heating and cooling stations based on dynamic parallel competition

HAN Siwei, ZHU Chanxia, PAN Hangping, YIN Junping, XI Weimin

(State Grid(Suzhou) City and Energy Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215163, China)

Abstract: The selection of energy station sites and planning of thermal network layout are one of the most crucial aspects in the process of regional district heating and cooling station planning. Existing algorithms for energy station site selection and thermal network planning mostly adopt a “two-step method” which separates the problem of load allocation from that of network layout, leading to inconsistent decision-making criteria during the decision process. In consequence, the result of load allocation as well as the network layout may not be optimal. To address this issue, a multi-site selection and thermal network planning algorithm based on dynamic parallel competition mechanism is proposed. This algorithm directly compares the ways in which loads are connected to various energy station networks, synchronously determining the ownership of load points and corresponding optimal network layout schemes. Case studies demonstrate that the proposed dynamic parallel competition algorithm ensures consistency between load allocation and network layout decisions, thereby yielding superior planning results compared to the traditional “two-step method”.

Key words: integrated energy planning; energy station sites; thermal network planning; graph theory

0 引言

区域能源站是城市中进行冷、热、电、气等多种能源集中供应的基础设施^[1]。相比于传统的供能方式,区域能源站具有能源供应效率高、运行灵活、利于可再生能源利用等优势,对于提升城市综合能效、降低碳排放具有重要意义。区域能源站主要面向区域内用户提供供暖与供冷服务,是区域能源站中的一个重要类别。在当前,区域能源站因其能源供应的通用性强、技术相对成熟等优势,已成为工程落地案例最多的区域能源站形式。特别在南方

夏热冬冷地区,区域能源站已成为城市公共建筑、高端办公楼宇、居民小区等用户解决冬季集中供暖问题并满足夏季空调需求的有效解决方案^[2]。

能源站选址及热力管网规划,是区域能源站规划过程中最值得关注的问题之一,需综合考虑与用户的距离、空间布局、当地可开发资源等各方面因素,其对能源站的投资运营成本及能源供应质量起到关键性作用。此外,能源站选址问题与管网规划问题相互耦合,更增加了该问题的复杂性^[3]。文献[4]建立了能源站选址及管网路径布局的P-中位优化模型,并基于枚举法对所建立的模型进行优化求解。文献[5]基于对管网经济性的考察,提出了“能距”的概念,并以能距最小为目标,提出了基于P-中位布局模型的区域能源站-网规划方法。文

收稿日期:2024-02-20;修回日期:2024-05-10

基金项目:国网(苏州)城市能源研究院有限责任公司项目
(CEKY23043)

献[6]在对能源站选址方案进行遍历的基础上,对于每个能源站选址方案进行最优的管网规划,之后通过对所有方案进行经济性比选,得到最终能源站选址及热力管网规划结果。在管网规划的过程中,首先根据负荷点与能源站之间的最小距离对负荷点进行划分,之后采用一种基于动态权重的Prim算法确定管网的布置与走向。现有的研究在对每个特定能源站选址方案进行热力管网规划计算时,大多是基于“两步法”,即首先基于物理距离或能距对负荷点进行分配,之后再分别对每个能源站及其所属的负荷点,采用Prim算法、Kruskal算法等经典最小生成树算法确定管网的布局走向。这种方法存在的主要问题是将负荷点分配问题与管网布局问题进行了割裂。在管网规划时,决策的依据是负荷点与现有管网相连的成本指标,而在负荷分配时,决策的依据是负荷点与能源站直接相连时的成本指标,两者之间存在偏差,这导致第一步中负荷的分配结果可能并非是最优的。

本文提出一种基于动态并行竞争的区域能源站多站选址及热力管网规划算法。针对能源站选址问题,仍然采用遍历的方法,但在对每一个能源站选址方案进行规划计算时,通过设计一种“动态并行竞争”机制,以最小边际相对成本为目标,同步确定负荷点的归属及相应的管网布置方案,之后基于全生命周期成本最优的原则,确定最终的规划方案。

1 问题描述与数学模型

1.1 问题描述与假设

在进行区域能源站规划时,一般以区域的控制性规划图作为依据,可以确定备选能源站选址、负荷点位置及负荷大小、管网可选的铺设走向等信息。热力管网一般沿道路走向进行铺设,因此默认区域内的道路即为管网的可选走向,如有特别规划,可对管网可选的铺设走向进行相应的修改。

- 本文研究的问题基于以下6个简化原则。
- (1) 各能源站的管网之间不互通且为枝状管网;
 - (2) 忽略水流在管网中的局部阻力;
 - (3) 管网水力计算时,统一参照主干线网的相关标准;
 - (4) 将供回水管路简化为单管,即认为供、回水管网布局一致;
 - (5) 即假定所有能源站的能源生产成本一致;
 - (6) 同一能源站的管网,其管径一致。
- 综上,区域能源站及热力管网规划的问题可以

被描述为:在目标区域内,已知能源站的备选位置、负荷点及相应的负荷,确定能源站的个数、位置、每个能源站服务的负荷点,及相应的管网布局方式,使得系统总成本最小。

1.2 数学模型

基于图论的思想,区域中能源站选址、路网以及负荷点之间的关系可以用无向赋权图模型描述。图1展示了一个区域能源站规划问题所对应的无向赋权图,该图可用数学语言描述为 $G=(V, E, L)$, V 为顶点集合, $V=V_1 \cup V_2 \cup V_3$, 其中 $V_1=\{v_i|i=1,2,\dots,m\}$ 为能源站备选位置组成的集合, $V_2=\{v_j^2|j=1,2,\dots,n\}$ 为负荷点组成的集合, $V_3=\{v_k^3|k=1,2,\dots,p\}$ 为道路交叉点组成的集合。为表述方便,按照 V_1 、 V_2 、 V_3 的顺序给 V 中的顶点重新编号,例如当 $m=2$, $n=8$, $p=15$ 时, v_2 为 V_1 中的第2个顶点即 v_2^1 , v_{12} 为 V_3 中的第2个顶点即 v_2^3 , 以此类推; $E=\{e(v, v')|v, v' \in V\}$ 为顶点之间直接相连的边组成的集合,描述了顶点之间的邻接关系, $L=\{L(e)|e \in E\}$ 为 E 中各边的长度所组成的集合。无向赋权图 G 还可用邻接矩阵的形式表示,令矩阵 $A_{N \times N}$ 为图 G 的邻接矩阵,则 $A_{N \times N}$ 具有以下3个性质。

- (1) A 为对称矩阵;
- (2) A 的维数等于 V 中元素的个数,即 $N=m+n+p$;
- (3) A 中的元素 a_{ij} 满足

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & i=j \\ L(e(v_i, v_j)) & i \neq j \text{ 且 } v_i \text{ 与 } v_j \text{ 邻接} \\ \infty & i \neq j \text{ 且 } v_i \text{ 与 } v_j \text{ 不邻接} \end{cases} \quad (1)$$

定义 $P(V_i)$ 为 V_i 的所有非空子集组成的集合,称为 V_i 的真幂集,即 $P(V_i)$ 中包含了所有可能的能源站选址方案;定义 G 的子图 $T_1, T_2, \dots, T_m \subseteq G$ 分别代表由各能源站连接的管网、路口、负荷点所组成

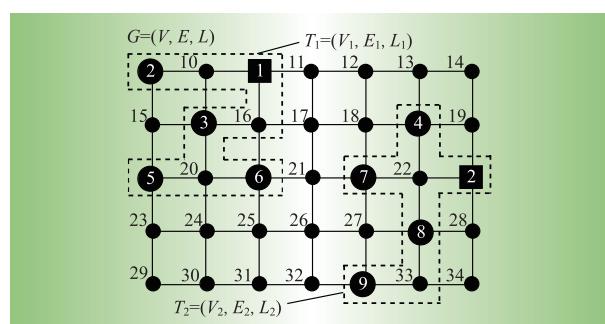


图1 区域冷热能源站多站选址及热力管网规划结构模型

Fig. 1 Structural model of site selection and thermal pipe network planning of district cooling and heating energy stations

的图；子图 T_i 还可以写为 $T_i = (V_i, E_i, L_i)$ ，其中 V_i, E_i, L_i 分别为 T_i 中的能源站、边、边的长度组成的集合； $T = T_1 \cup T_2, \dots, \cup T_m$ 为区域内所有能源站、管网及与之连接的路口和负荷点组成的图； $| \cdot |$ 为集合中元素的个数。

2 优化目标与经济性模型

2.1 总体优化目标

规划的总体目标是使项目的全生命周期成本 (life cycle cost, LCC) 最小, LCC 可用式(2)计算

$$L_{\text{CC}} = C^{\text{cap}} + \sum_{t=1}^N \frac{C^{\text{loss}} + C^{\text{elec}} + C^{\text{op}}}{(1+r_p)^t} \quad (2)$$

式中： C^{cap} 为管网的初始投资成本, 元； C^{loss} 为管网热损失对应的年成本, 元； C^{elec} 为维持管网介质流动需要的年电耗成本, 元； C^{op} 为每年的其他运行成本, 元, 包括燃料、维修及人员成本； N 为项目生命周期, 年； r_p 为资金的折现率。其中 $C^{\text{cap}}, C^{\text{elec}}, C^{\text{loss}}$ 均是与管网规划相关的量, 可由式(3)—式(8)计算

$$C^{\text{cap}} = C^{\text{sta}} + C^{\text{tube}} + C^{\text{cons}} + C^{\text{pump}} \quad (3)$$

$$C^{\text{sta}} = \sum_i [\alpha_{\text{sta},i} \max(Q_{i,c}, Q_{i,h}) + \beta_{\text{sta},i}] \quad (4)$$

$$C^{\text{tube}} = \sum_i \alpha_{\text{tube},i} L_i \quad (5)$$

$$C^{\text{cons}} = \sum_i \alpha_{\text{cons},i} L_i \quad (6)$$

$$C^{\text{pump}} = \alpha_{\text{pump}} \sum_i q_i p_i / \eta_{\text{pump}} \quad (7)$$

$$C^{\text{op}} = \alpha_{\text{ops}} Q_{\text{ann}} \quad (8)$$

式中： C^{sta} 为能源站的总投资成本, 元, 其为所有子图 T_i 中能源站的投资成本之和。单个能源站的投资成本涉及其内部的设备配置, 现有研究指出, 能源站的设备配置问题与能源站管网的规划问题可以通过分层后分别解决^[7]。目前已有大量工作针对能源站内部设备配置问题研究^[8], 而本文主要聚焦于能源站选址及管网规划问题, 因此对于能源站内的设备配置不再赘述。在此, 假定单个能源站的成本是关于该能源站最大供能负荷的线性函数。 $\alpha_{\text{sta},i}, \beta_{\text{sta},i}$ 为线性函数的系数, 其中 $\alpha_{\text{sta},i}$ 为了能源站投资成本中的固定部分, 对应能源站的土建成本; $\beta_{\text{sta},i}$ 为单位负荷供能设备对应的投资成本; $Q_{i,c}$ 为子图 T_i 中的总供冷负荷, MW; $Q_{i,h}$ 为子图 T_i 中的总供热负荷, MW; $Q_{i,c}, Q_{i,h}$ 可分别由式(9)和式(10)计算; C^{tube} 为管道材料成本, 元; $\alpha_{\text{tube},i}$ 为管段的单位长度投资成本, 元/m; L_i 为子图 T_i 的管网长度, m; C^{cons} 为建设施工成本, 元; $\alpha_{\text{cons},i}$ 为管段单位长度施工成

本, 元/m; C^{pump} 为循环泵投资成本, 元; α_{pump} 为单位功率循环泵对应的投资成本, 元/kW; q_i 为子图 T_i 中管网的体积流量, m³/s; p_i 为子图 T_i 中管网的沿程阻力, Pa; η_{pump} 为水泵效率; C^{op} 为管网的运维成本, 元; α_{ops} 为单位供能量对应的管网运维成本, 元/kW; Q_{ann} 为管网中的年总供能量, kWh

$$Q_{i,c} = s_c \sum_j Q_{i,j,c} \quad (9)$$

$$Q_{i,h} = s_h \sum_j Q_{i,j,h} \quad (10)$$

式中: $Q_{i,j,c}, Q_{i,j,h}$ 分别为子图 T_i 中第 j 个负荷点的冷、热负荷, MW; s_c, s_h 分别为冷、热负荷的同时使用系数^[9], 指的是能源站实际最大冷、热负荷需求与该能源站冷、热用户最大热负荷之和的比值。

管网中的体积流量由式(11)—式(13)计算

$$q_i = \max(q_{i,c}, q_{i,h}) \quad (11)$$

$$q_{i,c} = Q_{i,c} / (\rho c_p \Delta T_c) \quad (12)$$

$$q_{i,h} = Q_{i,h} / (\rho c_p \Delta T_h) \quad (13)$$

式中: $q_{i,c}$ 为供冷工况下子图 T_i 中管网的体积流量, m³/s; $q_{i,h}$ 为供热工况下子图 T_i 中管网的体积流量, m³/s; ρ 为介质水的密度, kg/m³; c_p 为介质水的比热容, kJ/(kg·°C); ΔT_c 为管网供冷工况下的供回水温差, °C; ΔT_h 为管网供热工况下的供回水温差, °C。

对于每个子图 T_i 中的管网, 其沿程阻力可用 Hazen-Williams 近似法^[10]进行估计, 如式(14)所示

$$p_i = \rho g L_i \frac{10.67 q_i^{1.85}}{\lambda^{1.85} (2r_i)^{4.87}} \quad (14)$$

式中: 下标 i 为子图 T_i 对应的编号; p_i 为管网的沿程阻力, Pa; λ 为无因次管道粗糙度系数; r_i 为子图管道内径, m; q 为管网中的体积流量, m³/s; g 为重力加速度, m/s²。

基于集总参数法, 管网的热损失对应的成本 C^{loss} 可由式(15)估算

$$C^{\text{loss}} = \alpha_c \sum_i h_{\text{loss}} \Delta \bar{\tau}_c 2 \pi r L_i t_{\text{ann},c} + \alpha_h \sum_i h_{\text{loss}} \Delta \bar{\tau}_h 2 \pi r L_i t_{\text{ann},h} \quad (15)$$

式中: α_c, α_h 分别为单位冷量、热量的生产成本, 元/kWh; h_{loss} 为管道与周围环境之间的传热系数, W/(m³·°C); $\Delta \bar{\tau}_c, \Delta \bar{\tau}_h$ 分别为供冷、供热工况下管内介质与环境温度的平均温差, °C; r 为管道半径, m; $t_{\text{ann},c}, t_{\text{ann},h}$ 分别为管网供冷、供热工况年平均运行小时数, h。

维持管网介质流动需要的电耗成本 C^{elec} 可由式(16)计算

$$C^{\text{elec}} = \int_t \sum_i \alpha_{\text{elec},i} \frac{q_i(t) p_i(t) dt}{\eta_{\text{pump}}} \quad (16)$$

式中: $\alpha_{\text{elec},i}, q_i(t)$ 和 $p_i(t)$ 分别为子图 T_i 在 t 时刻的电

价,元/kWh,管网体积流量,m³/s和沿程阻力,Pa。注意到式(16)的计算需要对每个负荷点的负荷进行时序预测,而精准的时序预测需要对负荷点对应建筑的功能、面积、结构信息、地区的天气情况或历史用能数据有较为精确的掌握。在大部分情况下,对一个地区所有负荷点进行时序预测会因为工作量过于巨大或历史数据无法获得等问题而难以实现。当负荷点的负荷时序数据难以获取时,可采用式(17)—式(21)对电耗成本进行近似计算

$$C_{\text{elec}} = \sum_i \alpha_{\text{elec}} \left(\frac{\bar{q}_{i,c} \bar{P}_{i,c}}{\eta_{\text{pump}}} t_{\text{ann},c} + \frac{\bar{q}_{i,h} \bar{P}_{i,h}}{\eta_{\text{pump}}} t_{\text{ann},h} \right) \quad (17)$$

$$\bar{q}_{i,c} = Q_{\text{ann},c,i} / t_{\text{ann},c} (\rho c_p \Delta T_c) \quad (18)$$

$$\bar{q}_{i,h} = Q_{\text{ann},h,i} / t_{\text{ann},h} (\rho c_p \Delta T_h) \quad (19)$$

$$\bar{P}_{i,c} = \rho g L_i \frac{10.67 \bar{q}_{i,c}^{1.85}}{C^{1.85} (2r_i)^{4.87}} \quad (20)$$

$$\bar{P}_{i,h} = \rho g L_i \frac{10.67 \bar{q}_{i,h}^{1.85}}{C^{1.85} (2r_i)^{4.87}} \quad (21)$$

式中: α_{elec} 为全年的平均电价,元/kWh; $Q_{\text{ann},c,i}$ 、 $Q_{\text{ann},h,i}$ 分别为子图 T_i 中的年总供冷量,kWh、年总供热量,kWh。

2.2 约束条件

在规划的过程中,需保证以下几个约束条件被满足:

- (1) $T = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_m$, 且 T_1, T_2, \dots, T_m 两两之间没有任何交集。
- (2) T 中的所有子图 T_1, T_2, \dots, T_m 都是树。
- (3) 在规划完成时,所有的负荷都被分配,此时式(22)成立

$$V_2 \subseteq T \quad (22)$$

(4) 研究表明,区域供冷系统受其冷损及末端温差的影响,其供能半径不宜过大。现有的相关标准建议,区域供冷的供能距离不宜超过 2 km,因此应有式(23)

$$\forall u, v \in V_{T_i}, V_{T_i} \subseteq T, d(u, v) < 2 \quad (23)$$

对所有 $T_i \subseteq T$ 成立。

(5) 根据相关标准,热力管网主干线比摩阻应在 30~70 Pa 之间。结合式(13),有

$$30 \leq \rho g \frac{10.67 q_i^{1.85}}{\lambda^{1.85} (2r_i)^{4.87}} \leq 70 \quad \forall i = 1, 2, \dots, |V_1| \quad (24)$$

(6) 管网内的流速应不超过最大容许的流速 v_{\max} ,即对所有子图 T_i 中管网的流量 $q_{i,\max}$,则有

$$\frac{q_{i,\max}}{\pi r_i^2} \leq v_{\max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, |V_1| \quad (25)$$

(7) 管径的半径不应大于可选的最大半径,即

$$r_i \leq r_{\max} \quad \forall i = 1, 2, \dots, |V_1| \quad (26)$$

式中: r_{\max} 为可选择的最大管网半径。

3 动态并行竞争算法

本文提出的能源站选址及热力管网规划算法总体思想是对所有可能的能源站选址方案进行遍历,在每一个能源站选址方案下,通过动态并行竞争算法,同步确定负荷的分配及热力管网的布局走向,之后基于所有能源站选址及其热力管网规划方案的经济性比较,确定最终的能源站选址和热力管网规划方案。其中,动态并行竞争算法基于经典 Prim 算法中贪婪算法的思想,设计了一种回合制的动态并行竞争机制来决定每个负荷点对于能源站的归属,在每一回合,考察每个未分配负荷点与每个现有管网节点相连时的最小边际相对成本,并选择其中最小边际相对成本最低的连接方案作为本回合的优胜者,将对应的负荷点与管网节点以最短路径相连,之后进入下一回合,直至所有的负荷点都被接入管网中。在这里,最小边际相对成本定义为某负荷点以最短路径与某管网节点相连时,其造成的 LCC 增加量与该负荷点年供能量之比,如式(27)所示

$$M_{C, v_j, v_k} = \frac{L_{CC, \text{new}} - L_{CC, \text{base}}}{Q_{\text{ann},j}} \quad (27)$$

$$v_j \in V_2 \text{ 且 } v_j \notin T, v_k \in T$$

式中: M_{C, v_j, v_k} 为当前状态下将负荷点 v_j 与图 T 中现有管网节点 v_k 相连时的最小边际相对成本; $L_{CC, \text{base}}$ 为现有管网的 LCC; $L_{CC, \text{new}}$ 为新的负荷点接入现有管网后新管网的 LCC; $Q_{\text{ann},j}$ 为负荷点 v_j 的年供能量。

以下结合图 2 说明动态竞争算法的过程。假设能源站可选地址的数量为 2, 负荷点数量为 6, 初始状态如图 2(a)所示,首先分别计算 3-1, 3-2, 4-1, 4-2, …, 8-1, 8-2 以最短路径相连时的 M_C 值,假设其中 6-2 相连时的 M_C 值最小,则 6-2 方案胜出,将 6-2 以最短路径进行相连,形成的管网如图 2(b)所示。之后分别计算 3-1, 3-2, 3-33, 3-6, …, 8-1, 8-2, 8-33, 8-6 以最短路径相连时的 M_C 值,并选择其中 M_C 值最小的方案,假设此时 5-1 胜出,则将 5-1 以最短路径进行相连,形成的管网如图 2(c)所示,以此类推,直到所有的负荷点都被接入管网为止(如图 2(d))。

规划算法具体的实现步骤如下。

步骤 1: 初始化模型参数及辅助变量:令 $L_{CC, \min} = \text{Inf}$, $T^* = \emptyset$, $M_C = \text{Inf}$, 计数器变量 $c_{PV1} = 1$, $c_{V2} = 1$, $c_{V2r} = 1$, $c_T = 1$; 图 T 及其子图 $T_1 = \{v_1^1\}$, $T_2 = \{v_2^1\}$, …, $T_m = \{v_m^1\}$, $V_{2r} = V_2$;

步骤 2: 基于邻接矩阵,采用 Floyd 算法计算图

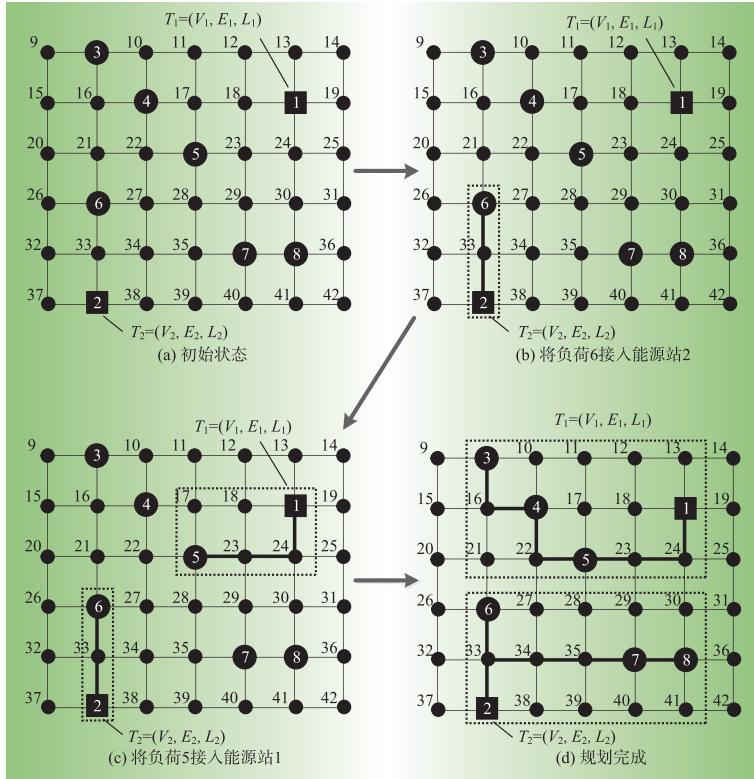


图2 动态并行竞争算法示意

Fig. 2 Schematic of dynamic parallel competition algorithm

中各节点之间的最短路径，并记录实现最短路径所经过的过渡节点；

步骤3：如果 $c_{PV1} \leq |P(V_1)|$ ，则令 $c_{V2} = 1$ ，并继续步骤4，否则跳转至步骤11；

步骤4：读取幂集 $P(V_1)$ 中的第 c_{PV1} 个集合 $P_i(V_1)$ ；

步骤5：如果 $c_{V2} \leq |V_2|$ ，则令 $c_{V2r} = 1$ 并继续步骤6，否则根据图 T 计算 L_{CC} ，若 $L_{CC} < L_{CC,min}$ ，则令 $L_{CC,min} = L_{CC}$ ， $T^* = T$ ， $c_{PV1} = c_{PV1} + 1$ ，重置子图 $T_1 = \{v_1^1\}$ ， $T_2 = \{v_2^1\}, \dots, T_m = \{v_m^1\}$ ， $V_{2r} = V_2$ ，并跳转步骤3；

步骤6：如果 $c_{V2r} \leq |V_{2r}|$ ，则令 $c_T = 1$ ，并继续步骤7；否则将 E_T^*, V_2^*, V_{path} 加入图 T 的子图 T_i 中，将 V_2 从 V_{2r} 中去除，令 $c_{V2} = c_{V2r} + 1$ ，并跳转至步骤5；

步骤7：如果 $c_T \leq |E_T|$ ，则继续步骤8，否则令 $c_{V2r} = c_{V2r} + 1$ ，并跳转至步骤6；

步骤8：计算 V_{2r} 中第 c_{V2r} 个负荷点与 E_T 中第 c_T 个节点相连对应的最小边际相对成本 M_c ；

步骤9：如果 $M_c < M_{C,min}$ 且满足所有约束条件，则令 $M_{C,min} = M_c$ ，并记录此时的负荷点 E_T^* 、节点 V_2^* 及最小路径的过渡节点 V_{path} ，记录 V_2^* 对应的管网子图 T_i ；

步骤10：令 $c_T = c_T + 1$ ，并跳转至步骤7；

步骤11：输出 $L_{CC,min}$ 及最优规划方案 T^* ，算法结束。

4 算例分析

以江苏省昆山市某新建城市中心区域为例，开展算例研究。基于该区域的控制性规划图得到该区域的抽象图，如图3所示。根据区域内自然资源及用地性质情况，确定能源站的备选选址5个，依次编号为 $V_1 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ ，以方形点在图中标出；基于区域内用户情况，将地理位置上相近的若干用户近似为单个负荷点，并假设负荷点置于这些用户的地理中心，如负荷点处于地块内部，则假设负荷点以最短路径与周围道路进行相连，由此确定负荷点节点19个，依次编号为 $V_2 = \{6, 7, \dots, 24\}$ ，以大圆点在图中标出；其余路口节点共77个，编号为 $V_3 = \{25, 26, \dots, 101\}$ ，以小圆点在图中标出。由于能源站建设的备选选址有5个，因此共有31种可能的备选方案。

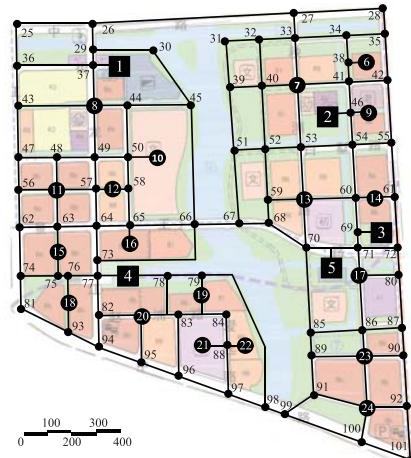


图3 能源站供能区域的抽象图

Fig. 3 Abstract diagram of the area supplied by energy stations

结合本地区负荷密度特点及各负荷点的建筑面积，估计各负荷点的负荷需求，如表1所示，取供冷2 880 h，供热2 160 h，可进一步得到年供冷量及年供热量。计算采用的其他参数如表2所示。

管网的材料成本 $\alpha_{tube,i}$ 与管径有关，部分管径型号的材料成本如表3所示，表3中DN后面的数字指代管材的直径。在计算新的负荷点接入子图 T_i 管网后的LCC时，首先根据选择同时满足式(24)—式(26)的最小型号管径 r ，之后基于表2得到管道的材料成本。

表1 算例负荷需求

Table 1 Loads demand used in case study

负荷点序号	MW		负荷点序号	MW	
	供冷负荷	供热负荷		供冷负荷	供热负荷
6	3.20	2.14	16	22.41	14.94
7	11.33	7.55	17	5.00	3.34
8	15.98	10.65	18	18.21	12.14
9	4.05	2.70	19	28.28	18.85
10	22.53	15.02	20	25.40	16.93
11	15.27	10.18	21	13.31	8.87
12	18.67	12.45	22	4.59	3.06
13	15.30	10.20	23	15.30	10.20
14	8.88	5.92	24	4.64	3.09
15	26.40	17.60			

表2 算例参数

Table 2 Parameters in case study

参数	数值	参数	数值
$\alpha_{\text{cons},i}$ /($\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$)	980	c_p /($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	4.18
α_{pump} /($\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$)	200	λ	120
$\alpha_{\text{sta},i}$ /($\text{元} \cdot \text{m}^{-1}$)	300	h_{loss} /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	0.06
$\beta_{\text{sta},i}$ /元	5 000 000	$\Delta\bar{\tau}$ / $^\circ\text{C}$	10
$\eta_{\text{pump}}\%$	60	ΔT / $^\circ\text{C}$	15
α_{ops} /($\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	0.6	α_{elec} /($\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	0.60
α_{he} /($\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	0.4	$r_p\%$	5
S_e	0.5	$t_{\text{ann},e}$ /h	2 880
S_h	0.5	$t_{\text{ann},h}$ /h	2 160
ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 000	r_{\max} /mm	450

表3 不同管径下的管道材料成本

Table 3 Cost of pipeline materials with different pipe diameters

管材型号	单价	管材型号	单价	元/m
DN900	3 800	DN350	1 400	
DN800	3 500	DN300	1 150	
DN700	3 150	DN250	990	
DN600	2 620	DN200	840	
DN500	2 170	DN150	760	
DN450	1 880	DN125	580	
DN400	1 700	DN100	515	

表4 动态并行竞争算法与传统规划算法的对比结果

Table 4 Results of comparison between dynamic parallel competition algorithm and traditional programming algorithm

算法	动态并行竞争算法				传统算法				总计	
	1	2	3	4	1	2	3	4		
能源站	1	2	3	4	总计	1	2	3	4	总计
管网长度/km	1.43	0.65	1.22	1.57	4.87	0.71	0.65	1.22	2.43	5.01
管网尺寸/mm	350	175	250	350		250	175	250	400	
水泵容量/kW	78	10	52	154	295	15	10	52	383	460
建设成本/亿元	0.25	0.09	0.16	0.29	0.79	0.13	0.09	0.16	0.42	0.80
年电耗成本/亿元	0.012	0.002	0.008	0.024	0.046	0.002	0.002	0.008	0.059	0.071
年热损失成本/亿元	0.038	0.009	0.023	0.042	0.112	0.016	0.009	0.023	0.074	0.122
年其他成本/亿元	0.082	0.016	0.042	0.100	0.240	0.033	0.016	0.042	0.149	0.240
总LCC/亿元				3.87					4.13	

作为对比,采用传统的规划方法针对本案例进行计算,方法为:在遍历每个能源站选址方案时,首先基于文献[5]中“能距”的定义,以最小路径下的LCC作为负荷点与能源站之间的能距,将负荷点分配给与其能距最小的能源站,之后采用文献[6]中的改进最小生成树算法,得到每个能源站子管网的布置方案。

采用动态并行竞争算法以及传统规划算法所得到的所有可行选址方案的LCC如图4所示。可以看出,在采用两种不同的规划算法情形下,第30号选址方案均具有最低的LCC,该方案对应选取1、2、3、4号地块建设能源站,但动态并行竞争算法相比传统规划算法所得到的规划方案具有更低的LCC。

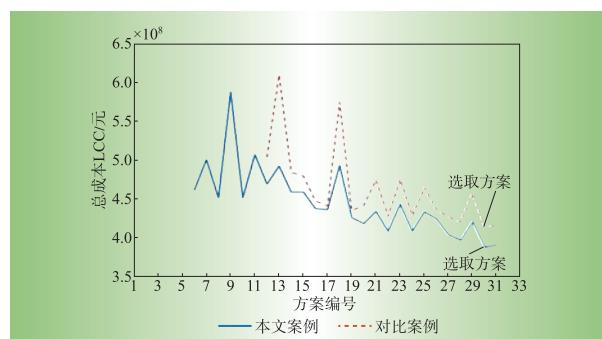


图4 不同能源站选址方案下的总成本

Fig. 4 Total cost under different energy station site selection options

表4针对第30号选址方案对比了动态并行竞争算法与传统规划算法规划结果的部分指标及目标函数,在表中可以看出,动态并行竞争算法得到的方案中,1号能源站的管网长度、水泵功率以及各项成本均略大于传统算法,但4号能源站的管网长度、水泵功率以及各项成本均远小于传统算法得到的方案,最终使得总的LCC也小于传统算法。

将采用动态并行竞争算法及传统规划算法得到的管网规划方案绘制于图5中。图5中的粗实线代表两种算法规划结果中共有的管段,点状线代表本文算法规划的管段,点实线代表对比算法规划的管段。可以看出,两种算法规划结果的差异主要在于负荷点11、

12、16的连接方式即对应的管网布局。在动态并行竞争算法的计算结果中,负荷点11、12、16通过接入1号能源站的管网中。而在传统算法中,负荷点11、12、16接入能源站4的管网中。由图5中不难看出,动态并行竞争算法得到的规划方案中,总管网长度比传统算法更短,这是因为传统算法首先根据负荷点到能源站的能距(即直接以最小路径连接负荷点与能源站所对应的LCC增量),将11、12、16负荷点分配给了能源站4。但从管网布局的角度看,负荷点接入能源站的最佳方式并非是修建管网直接与能源站进行连接,而是就近接入现有管网,最大程度地利用已有的管网。因此,传统算法中负荷点分配的目标和管网布局目标不一致,因此输出的规划结果并非是最优的。虽然负荷11、12、16与4号能源站的距离相比1号能源站的距离更近,但这3个负荷点就近接入1号能源站管网的成本比接入4号能源站所需要的成本更低,从表4的数据中也可以映证这一点。动态并行竞争算法得到上述更优的结果,是因为动态并行竞争算法在规划时对于负荷点分配和管网布局是同步考虑的,即决定负荷点分配的同时也确定了其热力管网的布置,从而保证了负荷最优分配与热力管网最优布置两个目标的一致性。

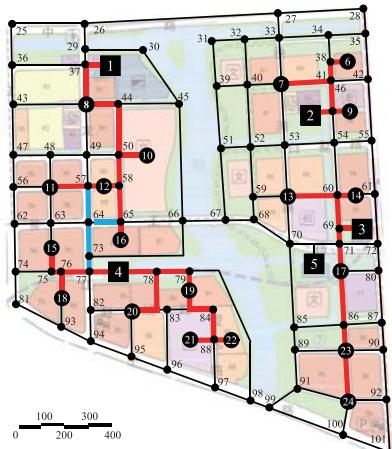


图5 规划结果
Fig. 5 Planning result

5 结束语

本文提出了一种基于动态并行竞争的区域冷热能源站多站选址及热力管网规划算法。以项目全生命周期成本最小为目标,遍历所有可能的能源站选址方案,并对每个能源站选址方案下的负荷分配及热力管网规划方式进行优化计算,最后选择其中最优方案作为最终的输出方案。在针对每个能源站选址方案确定负荷点分配及热力管网布局的过程中,设计了一种回合制的动态并行竞争机制,将负荷点的分配问题与热力管网的布局进行同步决策,确定负荷点归属的同时,生成了对应的最优管网布局方式,解决了传统“两步法”中负荷点分配与管网布局的决策依据存在偏差的问题,从

而可以获得更佳的规划方案。

参考文献:

- [1] 高正平,刘昊宇,李琥,等.从变电站到能源综合服务站:演化路径探讨[J].全球能源互联网,2021,4(4):411–423.
GAO Zhengping, LIU Haoyu, LI Hu, et al. From substation to integrated energy service station: discussion on the evolutionary path[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(4):411–423.
- [2] 周立德,公佩暖.多能互补在南方区域清洁供冷供热系统中的应用[J].节能与环保,2020(Z1):95–96.
ZHOU Lide, GONG Peinuan. Application of multi-energy complementary in clean cooling and heating system in southern region[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2020(Z1):95–96.
- [3] 徐成司,董树锋,吴金城,等.考虑区域综合能源系统拓扑特性的能源站和管线规划[J].电力系统自动化,2020,44(3):74–82.
XU Chengsi, DONG Shufeng, WU Jincheng, et al. Planning of energy station and pipeline considering topological characteristics of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):74–82.
- [4] 易文飞,俞永增,张艺伟,等.基于p-中位模型的区域综合能源系统能源站优化规划[J].电力系统自动化,2019,43(4):107–112.
YI Wenfei, YU Yongzeng, ZHANG Yiwei, et al. Planning of regional integrated energy system based on particle swarm optimization and its operation optimization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43 (4):107–112.
- [5] 陈娟,黄元生,鲁斌. 区域能源互联网“站-网”布局优化研究[J].中国电机工程学报,2018,38(3):675–684.
CHEN Juan, HUANG Yuansheng, LU Bin. Research on “stations-pipelines” layout and optimization of regional energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (3):675–684.
- [6] CHEN Y Y, ZHU J. A graph theory-based method for regional integrated energynetwork planning: A case study of a China-U.S. Low-carbon demonstration city[J]. Energies, 2019, 12(23):4 491.
- [7] 刘洪,郑楠,葛少云,等.考虑负荷特性互补的综合能源系统站网协同规划[J].中国电机工程学报,2021,41(1):52–64,397.
LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Station and network coordinated planning of integrated energy systems considering complementation of load characteristic [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1):52–64, 397.
- [8] 胡泉,尚策,陈东文,等.考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J].电力系统自动化,2019,43(19):22–31,139.
HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dongwen. Multi-objective planning method for regional integrated energysystems considering energy quality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19):22–31, 139.
- [9] 安家正.夏热冬冷地区户式空调系统负荷变化规律研究[D].西安:西安建筑科技大学,2022.
AN Jiazheng. Study on load variation law of household air conditioning system in hot summer and cold winter area [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [10] BEST R E, REZAZADEH KALEHBASTI P, LEPECH M D. A novel approach to district heating and cooling network design based on life cycle cost optimization[J]. Energy, 2020, 194.

作者简介:

韩四维(1988),男,江苏苏州人,博士,高级工程师,主要从事能源系统的建模、规划与先进控制方法等方面的研究工作。
(责任编辑 王蕊)