

长输供热管网配置大温差机组的技术经济分析与优化

薄其明^{1,2}, 周旭³, 严新荣⁴, 冯彦皓¹, 周懿^{1*}, 林雪茹^{1,5}, 钟崑¹

(1. 浙江大学能源工程学院, 浙江省 杭州市 310027; 2. 中国华电集团有限公司宁夏公司, 宁夏回族自治区 银川市 750002; 3. 济南热力集团有限公司, 山东省 济南市 250011; 4. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江省 杭州市 310030; 5. 浙大城市学院信息与电气工程学院, 浙江省 杭州市 310015)

Techno-Economic Analysis and Optimization of Configuring Large Temperature Difference Units in Long-Distance Heating Network

BO Qiming^{1,2}, ZHOU Xu³, YAN Xinrong⁴, FENG Yanhao¹, ZHOU Yi^{1*}, LIN Xueru^{1,5}, ZHONG Wei¹

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China; 2. Ningxia Branch, China Huadian Corporation Ltd., Yinchuan 750002, Ningxia Hui Autonomous Region, China; 3. Jinan Heating Group Co., Ltd., Jinan 250011, Shandong Province, China; 4. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, Zhejiang Province, China; 5. School of Information and Electrical Engineering, Hangzhou City University, Hangzhou 310015, Zhejiang Province, China)

摘要:【目的】为解决长输供热管网中大温差机组配置的经济性评估难题, 提出经济距离的概念, 通过技术经济优化模型, 定量分析不同管网距离下配置大温差机组的适用性。【方法】基于全生命周期成本分析, 建立包含投资安装成本与运行成本的经济性模型, 结合管网水力热力约束, 建立含上层规划设计与下层运行策略的双层优化框架, 该框架将机理模型与深度神经网络代理模型耦合, 以实现优化求解。以某长输供热管网为算例, 研究回水温度、管径、热负荷对经济距离的影响, 得到配置大温差机组的经济距离。【结果】案例分析表明, 配置大温差机组的经济性在很大程度上取决于管网长度, 且存在经济距离。回水温度为30℃的DN1000管网, 其经济距离为58.34 km, 超过该距离后, 运行成本节约量大于投资成本增加量。经济距离与管径呈非线性相关, 管径过大或过小均会使经济距离减小; 回水温度或热负荷增大均会使经济距离增大。【结论】该双层优化框架可定量评估长输供热管网配置大温差机组的经济距离, 为工程规划技术经济分析提供决策依据。

关键词: 长输供热管网; 大温差机组; 经济距离; 技术经济优化; 双层优化; 全生命周期; 深度神经网络

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB4206500); 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2025C02237)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2024YFB4206500); Zhejiang Provincial “Pioneer” and “Leading Goose” R&D Program (2025C02237).

ABSTRACT: [Objectives] To address the challenge of economic evaluation for the configuration of large temperature difference units in long-distance heating networks, this study proposes the concept of economic distance. The aim is to quantitatively analyze the applicability of configuring large temperature difference units with different network distances through a techno-economic optimization model. [Methods] Based on the life cycle cost analysis, an economic model is established, incorporating investment and installation costs and operational costs. By integrating hydraulic and thermal constraints of the network, a bi-level optimization framework comprising upper-level planning and design and lower-level operational strategies is developed. The framework couples a mechanistic model with a deep neural network surrogate model to achieve optimal solutions. A case study of a long-distance heating network is conducted to investigate the effects of return water temperature, pipe diameter, and heating load on the economic distance, and the economic distances for configuring large temperature difference units are obtained. [Results] The results indicate that the economic performance of configuring large temperature difference units significantly depends on network length, with a distinct economic distance existing. For a DN1000 pipe at a return water temperature of 30℃, the economic distance is 58.34 km. Beyond this distance, the savings in operational costs outweigh the increase in investment costs. The economic distance exhibits a non-linear correlation with pipe diameter. Excessively large or small pipe diameters will reduce the economic distance. An

increase in either return water temperature or heating load will increase the economic distance. [Conclusions] This bi-level optimization framework enables quantitative evaluation of the economic distance for configuring large temperature difference units in long-distance heating networks, thereby providing decision-making support for techno-economic analysis in engineering planning.

KEY WORDS: long-distance heating network; large temperature difference units; economic distance; techno-economic optimization; bi-level optimization; life cycle; deep neural network

0 引言

我国集中供热面积逐年上升，2023年末城镇供暖能耗占全国建筑能耗的19%，集中供热面积达173亿 m^2 ^[1]。随着火电“三改联动”推进，为提升电厂灵活性、降低集中供热能耗与碳排放，长输供热技术在城镇集中供热系统中逐步推广应用^[2]。长输供热技术往往具有大输送流量、高投资运行成本等特点，能通过降低回水温度提升供热距离，从而减少供热总成本^[3-4]。

《长输供热热水管网技术标准》^[5]规定长输供热管网应采用大温差机组。大温差换热技术是长输供热管网的核心技术之一^[6-8]，现有研究已逐步展开相关技术方案探索和工程应用研究工作。

技术方案探索研究主要聚焦各类新型大温差机组性能及其影响因素分析。王立元等^[9]通过构建含喷射式热泵大温差模型，研究了质调节下的热泵变工况特性，指出一次网回水温度对热泵运行效率的影响。李岩等^[10]探索了含热水型或燃气型吸收式热泵的新型热网大温差供热系统，结果显示，与常规热电联产供热系统相比，该系统效率提高了29.2%。李少彬等^[4]建立了调峰负荷和吸收式大温差机组模型，模拟结果显示，带吸收式大温差机组的长输供热管网经4 h蓄热可提供14 h调峰时间。Li等^[11]提出了一种结合燃气/热水型的吸收式大温差系统，可在不消耗额外电力的情况下将热网络的回水温度降至15℃，单位供热成本降低18.6%。然而，吸收式大温差热泵机组初投资偏高^[12]，长输供热管网项目设计需兼顾技术和经济性，同时考虑管网设计和运行工况。一方面，新建大温差长输供热管网工程常采用简

单方案分析和技术经济计算，难以结合全生命周期经济分析(life cycle cost analysis, LCCA)^[13-14]准确评估最优成本及方案；另一方面，长输供热管网模拟涉及大规模计算资源，难以满足技术经济分析及优化设计的实际需求^[15]。

在工程应用研究方面，李登峰等^[16]通过规划设计分析了大温差换热机组在郑州集中供热系统中的应用潜力；刘建国等^[17]证明了应用大温差热泵等新技术能够有效提升一次网输送能力并降低污染物排放。虽然大温差机组已逐步应用于长输供热管网并显现出降低回水温度、利用余热及减少热损失的效果，但该类机组初投资较高，在新建长输供热管网工程中，对不同管网长度下配置大温差机组的实际运行经济性缺乏精准量化评估手段，因此需进一步发展长输供热管网中大温差机组的技术经济定量分析方法，以明晰其不同工程场景下的实际应用效益。

基于此，本文提出经济距离的概念，通过构建管网耦合大温差机组的机理模型及深度神经网络代理模型，建立全生命周期成本驱动的机组配置双层优化框架，定量揭示管径、回水温度、热负荷对机组配置经济距离的影响规律，为长输供热管网配置大温差机组的工程规划设计提供量化依据与技术支持。

1 长输供热管网中大温差机组经济距离

1.1 长输供热管网经济性

在长输供热管网中，管网经济性由全生命周期成本 C 决定，主要包括投资安装成本 C_{cap} 与运行成本 C_{op} 两类^[18-19]：

$$\begin{cases} C = C_{\text{cap}} + C_{\text{op}} \\ C_{\text{cap}} = C_{\text{cap, pipe}} + C_{\text{cap, pump}} \\ C_{\text{op}} = N(Q_{\text{total}}C_{\text{op, pump}} + C_{\text{op, heat}} + C_{\text{op, fix}} + C_{\text{op, water}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $C_{\text{cap, pipe}}$ 为管道投资安装成本，包括管道本体材料费、焊接及土建施工费、防腐处理费、保温及附属设施费等，元； $C_{\text{cap, pump}}$ 为泵站(包括供热首站、隔压站和中继泵站等)投资建设成本，元； N 为长输供热管网运行年限； Q_{total} 为供热管长输网年总供热量，GJ； $C_{\text{op, pump}}$ 为水泵运行耗功成本，元/(GJ·a)； $C_{\text{op, heat}}$ 为热损失补热成本，元/a； $C_{\text{op, fix}}$

为维修成本，元/a； $C_{op, water}$ 为补水成本，元/a。由于本文考虑吸收式大温差机组，因而其运行电费可忽略。

1.2 大温差机组经济距离

图1为长输供热管网耦合大温差机组的工艺示意图，大温差机组旨在通过小流量、大温差提升长输供热管网的经济性，其投资安装成本 C_{cap} 将进一步增加，式(1)需改写为

$$C_{cap} = C_{cap, pipe} + C_{cap, pump} + C_{cap, ht} \quad (2)$$

式中 $C_{cap, ht}$ 为大温差机组投资安装成本，元。

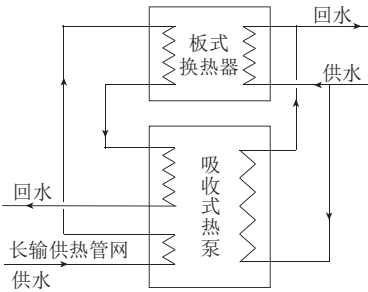


图1 长输供热管网耦合大温差机组工艺示意图
Fig. 1 Process of long-distance heating network with large temperature difference units

大温差机组能够拉大供回水温差，使得长输供热管网的流量适当减小，同时所需管径也会有一定的减小。总阻力损失可分为比摩阻引起的沿程阻力和局部总阻力损失，管径的减小和流量分别将引起总阻力快速升高和降低，故运行成本 $C_{op, pump}$ 的变化需要进一步讨论。

对于不同长度长输供热管网，配置大温差机组的经济性不同，本文先进行先验假设分析，如图2所示。由图2(a)可见，投资安装成本随管网总长度增加而增大，在中继站(虚线突变位置)处呈阶梯式变化。不同长度管网配置大温差机组前后，投资安装成本变化规律不同。若管网总长度小，投资安装成本小，配置大温差热泵机组后，虽然管道投资安装成本降低，但可能无法平衡机组初投资，整体经济性低；若管网总长度大，配置大温差机组后管道初投资成本显著降低，整体经济性需定量分析。

由图2(b)可见，运行成本随管网总长度增加而增大，在中继站处呈阶梯式变化。不同长度管网配置大温差机组前后，运行成本变化规律不同。

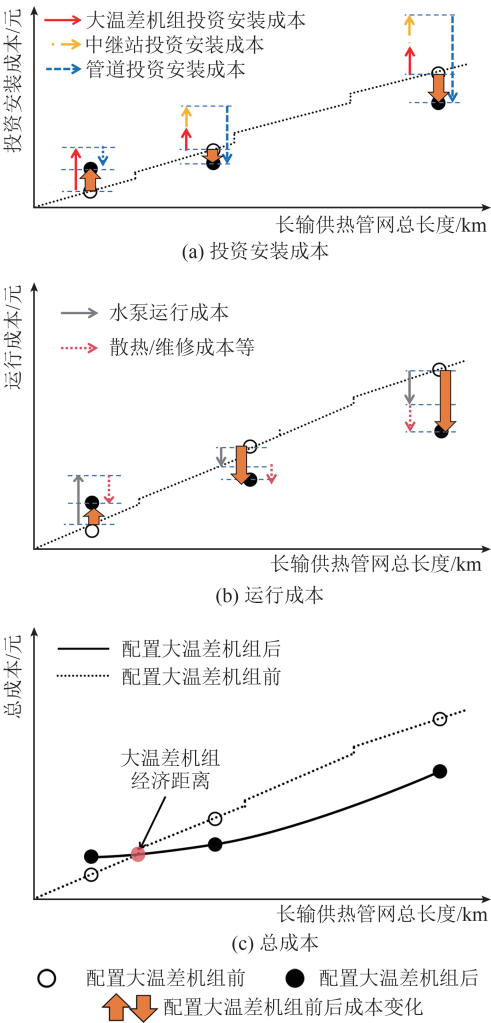


图2 长输供热管网配置大温差机组的经济性示意图
Fig. 2 Economic performance of long-distance heating network with large temperature difference units

若管网总长度小，运行成本小，配置大温差热泵机组后，散热等成本降低，水泵运行成本变化需定量分析。随着管网总长度增加，配置大温差机组后水泵运行成本降幅被放大，运行成本呈降低趋势。

综上，管网总长度不同时，配置大温差机组前后全生命周期总成本发生反转，如图2(c)所示。因此，需用优化方法深入分析建设大温差机组的经济性定量规律。

基于上述分析，本文提出了配置大温差机组经济距离的概念，可基于此优化得到适用于大温差机组的长输供热管网距离范围。大温差机组经济距离即长输供热管网配置大温差机组前后的总成本差异最小时对应的长输供热管网距离，可表

示为

$$L_{\text{cri,cc}} = \operatorname{argmin}_{L_{\text{cri,cc}} \in L_0} (C^{\text{non}} - C^{\text{ht}}) \quad (3)$$

式中： argmin 表示函数最小值对应的变量值； L_0 为长输供热管网距离解集， $L_0 \subset (0, +\infty)$ ； C^{non} 、 C^{ht} 分别为配置大温差机组前后的总成本。

1.3 经济距离双层优化框架

为实现长输供热管网中配置大温差机组的经济距离优化计算，本文建立经济距离双层优化框架，如图3所示，上层为长输供热管网的经济性规划设计；下层在上层得到最优规划设计方案的基础上，获得不同管网长度下的最优管径，进一步研究最优水泵运行策略(水泵压差/扬程)，以降低总成本，并保障运行稳定性。最终，针对不同长度的长输供热管网，分别对配置和未配置大温差机组的工况开展优化计算，即可确定大温差机组的经济距离。

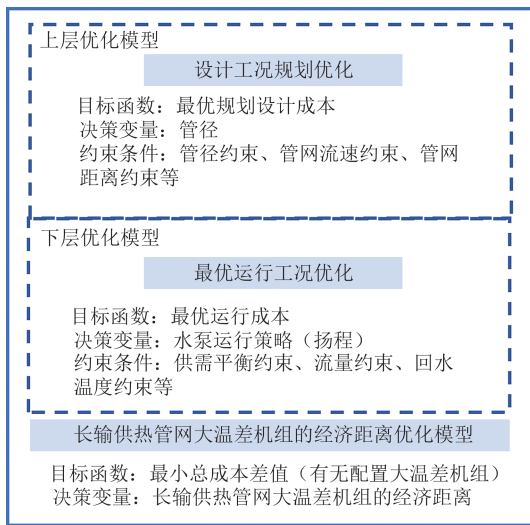
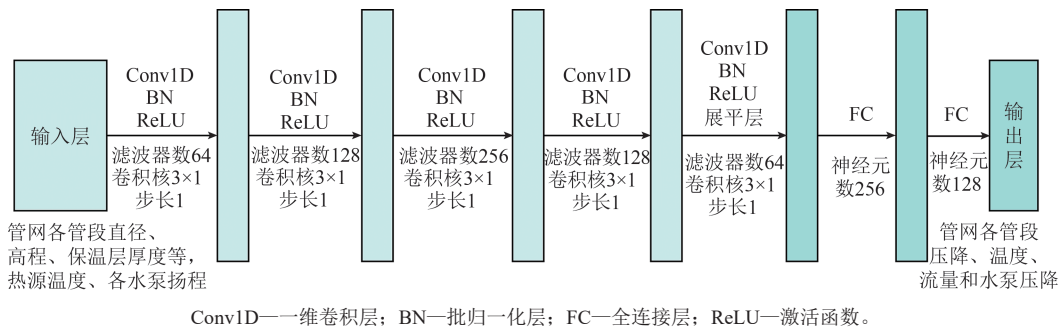


图3 经济距离双层优化框架
Fig. 3 Bi-level optimization framework for economic distance analysis



Conv1D——一维卷积层；BN——批归一化层；FC——全连接层；ReLU——激活函数。

图4 CNN代理模型架构
Fig. 4 Architecture of CNN surrogate model

2 长输供热管网大温差机组数学模型

2.1 长输供热管网动态机理和代理模型

基于图论的方法构建长输供热管网机理模型，假设长输供热管网的流体为不可压缩定常流体^[20]，根据关联矩阵 $\mathbf{A}$ 和回路矩阵 $\mathbf{B}$ 即可确定长输供热管网的拓扑，可得长输供热管网各节点的流量 $\mathbf{M}_{\text{node}}$ 和各供回水组成的回路压降之和 P_{sum} ^[21]：

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{node}} \\ \mathbf{B}\mathbf{P} = P_{\text{sum}} = 0 \\ \mathbf{P} = \mathbf{S}|\mathbf{M}| \mathbf{M} + \mathbf{Z}_h - \mathbf{Z}_{\text{pump}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{P}$ 、 $\mathbf{Z}_h$ 、 $\mathbf{Z}_{\text{pump}}$ 分别表示各管段流量、压降、高程水头和水泵水头。

基于上述机理模型，在国产供热管网水力热力计算软件viHeating上进行建模计算，并结合运行数据进行辨识修正，构建得到长输供热管网参数数据库。为实现经济距离优化，将数据库进行训练以得到代理模型。由于长输供热管网包含管网结构、热源温度、水泵参数等多种输入，以及所有的水泵压降、管段压降、管段温度等多种输出，因而采用一维卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)得到长输供热管网代理模型。CNN架构如图4所示，优化器为Adam，损失函数为均方误差，学习率为0.001，批次大小为32，训练样本量为4 032，包含管网长度(30%~100%总长)、管径(DN1000~DN1600，表示公称直径1 000~1 600 mm)、热源供回水温度(90~130 ℃/15~50 ℃)，其中训练集、验证集、测试集比例为7:2:1，同时采用规则判断对样本进行清洗，剔除管网最不利点(压头最小点)出现在中继水泵上

游的样本。

2.2 大温差机组机理和代理模型

本文在国产能源系统仿真软件 viExergy 中构建吸收式大温差机组的稳态机理模型^[22], 如图5所示。在机理模型基础上构建数据集, 进行代理模型训练, 其方法与构建热网代理模型类似。其中, 代理模型采用长输管网供回水压力和温度作为输入, 大温差机组效率作为输出进行训练。

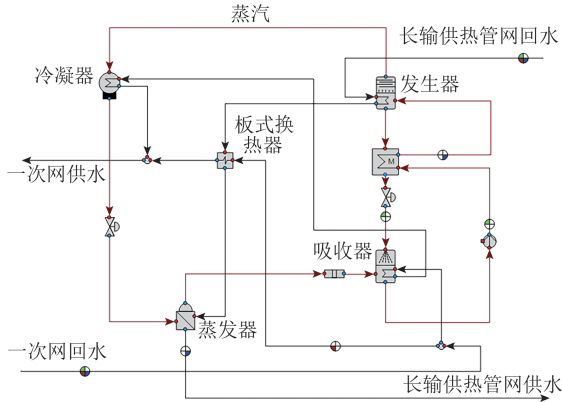


图5 大温差机组机理模型

Fig. 5 Mechanistic model of large temperature difference units

3 大温差机组经济距离优化模型

对于长输供热管网建设大温差机组的经济性优化问题, 在图3双层优化框架中, 本文将经济距离定义转换为总优化目标函数, 如式(5)所示; 对配置大温差机组前后的工况执行上、下层优化函数, 分别如式(6)、(7)所示; 长输供热管网的水力约束、热力约束、管网尺寸约束、水泵约束、平衡约束、最不利点约束分别如式(8)–(13)所示。

$$\min_{L_{\text{crit}, \text{cc}} \in L_0} (C^{\text{non}} - C^{\text{ht}}) \quad (5)$$

$$\min_{L_{\text{crit}, \text{cc}} \in L_0} C_{\text{cap}}^m, m = \text{non, ht} \quad (6)$$

$$\min_{L_{\text{crit}, \text{cc}} \in L_0} C_{\text{op}}^m, m = \text{non, ht} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq p_i \leq p_{\max} \\ p_{\text{sor}} \leq p_{\text{sor}, \max} \\ p_r = p_{r0} < p_g \\ 0 \leq M_i \leq v_{\max} \pi (D_i/2)^2 \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} 0 \leq T_i \leq T_{\max} \\ T_r < T_g \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} L_{\min} \leq L \leq L_{\max} \\ D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

$$H_{\min} \leq H \leq H_{\max} \quad (11)$$

$$\begin{cases} M_{i, \text{in}} = M_{i, \text{out}} \\ Q_{i, \text{in}} = Q_{i, \text{out}} \end{cases} \quad (12)$$

$$Z_{p_{\min}} \notin Z_Z \quad (13)$$

式中: n 为长输供热管网管段数; p_i 、 p_{sor} 分别为管段 i 的压力和热源出口压力; $p_{\text{sor}, \max}$ 为热源出口最大压力, 其值为 1.3 MPa; p_{r0} 为回水定压, 其值为 0.25 MPa; p_g 、 p_r 分别为供水和回水压力; M_i 、 T_i 、 D_i 分别为管段 i 的体积流量、温度、直径; T_g 、 T_r 分别为供水和回水温度; $p_{\max}$ 、 $v_{\max}$ 、 $T_{\max}$ 分别为长输供热管网许用压力、流速、温度的最大值, 按照《长输供热热水管网技术标准》^[5] 规定, 分别取值为 2.5 MPa、3.5 m/s、150 °C; $L_{\max}$ 、 $L_{\min}$ 、 $D_{\max}$ 、 $D_{\min}$ 分别为长输供热管网总长度 L 和直径 D_i 的最大、最小值, 分别取值为 150、15 km 和 1 600、600 mm; $H_{\max}$ 、 $H_{\min}$ 分别为水泵扬程 H 的最大、最小值; $M_{i, \text{in}}$ 、 $M_{i, \text{out}}$ 分别为管段 i 进、出口流量; $Q_{i, \text{in}}$ 、 $Q_{i, \text{out}}$ 分别为管段 i 进、出口热流量; $Z_{p_{\min}}$ 为最不利点位置; Z_Z 为所有中继泵站距供热首站位置的集合。为得到精确的经济距离, 本文假设管径为连续值, 不考虑标准化的离散管径。

本文采用粒子群算法耦合模拟退火算法求解, 以解决传统粒子群算法易陷入局部最优的问题^[23], 其架构如图6所示, 具体求解参考文献[24]。

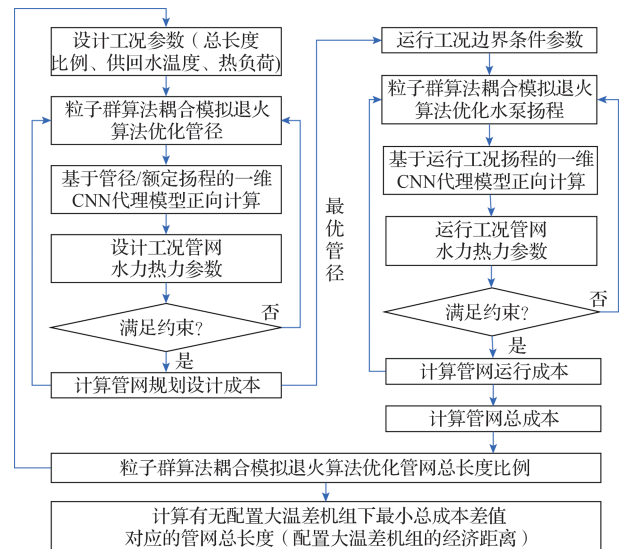


图6 融合CNN的优化算法流程

Fig. 6 Flowchart of optimization algorithm integrating CNN

4 算例分析

4.1 算例设置

本文基于实际运行的某长输供热管网拓扑结构进行计算分析，该长输供热管网采用单回路+大温差热泵的供热型式，即一供一回单环路，设计供、回水温度分别为130、20℃，设计主干管网长度为45.9 km。本文保留长输供热管网的拓扑结构，同时调整热网各管段的长度比例以实现不同长度的计算。在敏感性分析中调整隔压站接带面积实现热负荷的变化，并改变供、回水温度和管径以研究不同工况下大温差机组经济性。图7为基于viHeating的长输供热管网模型。



图7 基于viHeating的长输供热管网模型

Fig. 7 Model of long-distance heating network based on viHeating software

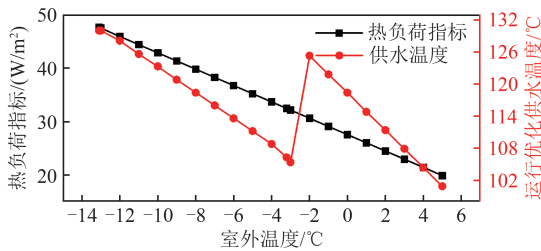
本文中，长输供热管网的总长度设置为设计长度的100%、80%、70%、60%、40%、30%；配置大温差机组后长输供热管网的回水温度为15~50℃，未配置大温差机组时长输供热管网的回水温度为70℃；长输供热管网的初始管径为DN1000~DN1600；隔压站接带面积为200万~600万m²。依据上述设置，制定如下工况：1) 研究不同长输供热管网回水温度下，配置大温差机组后长输供热管网的经济距离；2) 研究不同隔压站接带面积下，配置大温差机组后长输供热管网的经济距离；3) 研究不同初始管径下，配置大温差机组后长输供热管网的经济距离。

运行工况边界条件如图8所示，室外温度取典型年设计值，一个供热季共计3 624 h，同时设置运行年限为50年。其中，在室外温度-3℃附近，因水泵数量增加而产生了供水温度和流量的变化。

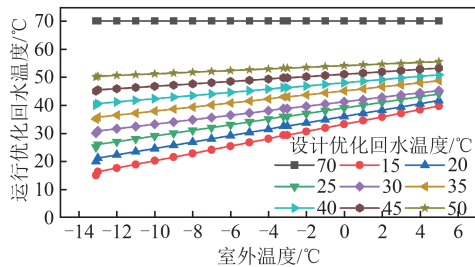
4.2 优化结果与分析

4.2.1 设计规划阶段供热参数与管网长度的关系

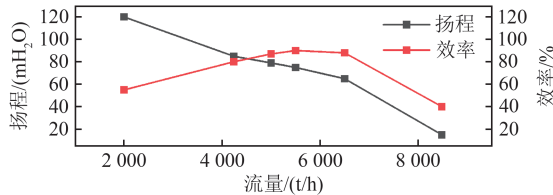
图9展示了DN1000、200万m²接带面积长输



(a) 热负荷指标和供水温度边界条件



(b) 回水温度边界条件



(c) 水泵扬程和效率边界条件

图8 运行工况边界条件

Fig. 8 Boundary conditions of operating conditions

供热管网安装回水温度30℃大温差机组前后，设计规划阶段各指标随管网长度的变化关系。在控制变量前提下，热负荷指标、供热接带面积等参数在不同管网长度中保持不变，中继泵站个数为1。从图9(a)可知，管网长度较小时，配置大温差机组前，热源侧供热压力和管网总阻力小，配置后管网外径减小、比摩阻增大，有利于热源侧供热压力和流量稳定。从图9(b)可知，配置大温差机组能降低管网外径设计值。然而，随着管网长度比例从30%增至100%，沿程阻力损失增加，配置大温差机组降低管网外径的效果从36.7%降至18.6%。需注意的是，本文仅讨论配置大温差机组前后管径降幅，以构建设计规划阶段成本，未涉及建成后水泵选型设计等成本。从图9(c)可知，配置大温差机组后，管道成本大幅下降，管网长度较小时，总设计规划阶段成本比配置前高20%，但该比例随管网长度增加而减小。

4.2.2 运行阶段供热参数与管网长度的关系

图10展示了50年全生命周期供热季运行阶段总成本随管网总长度的变化规律。可以看出，配

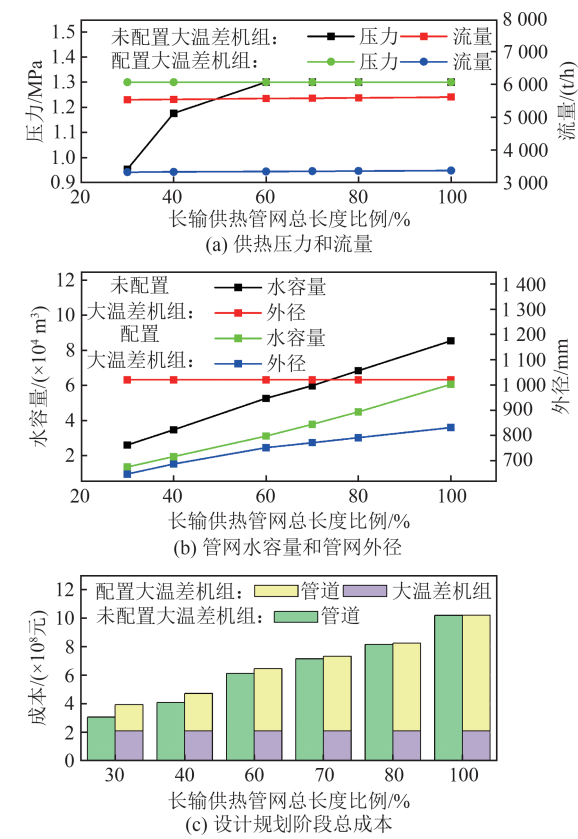


图9 30 °C回水温度下设计规划阶段变化规律

Fig. 9 Variation patterns of planning and design stage at return water temperature of 30 °C

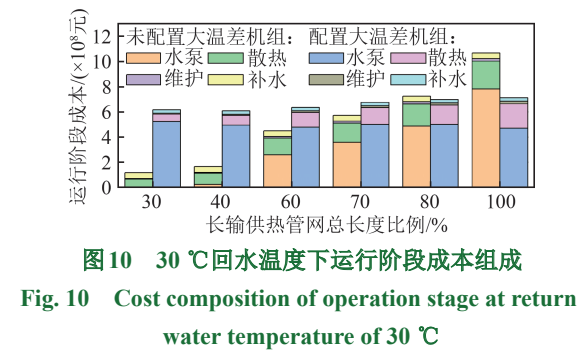


图10 30 °C回水温度下运行阶段成本组成

Fig. 10 Cost composition of operation stage at return water temperature of 30 °C

置大温差机组前，水泵运行成本随管网长度增加呈线性上升趋势；配置后，热负荷不变时系统所需流量降低40%，水泵运行成本基本不随管网长度变化。

基于图9(b)及大温差机组使流量降低40%的结果，结合流速与流量成正比、与管径平方成反比的关系可知，当总长度比例从100%降至30%时，配置大温差机组可使管道流速由下降9.4%转为上升49.4%。该变化趋势表明，100%总长度比例下流量对比摩阻的影响占主导，30%总长度比例下则以管径对比摩阻的影响更为显著。同时，

通过上述管径和流量、流速变化，管网比摩阻基本维持在经济范围内，不同管网长度下水泵运行成本相当。

4.2.3 配置大温差机组总成本

表1为30 °C回水温度下配置大温差机组前后成本对比，可以看出，在70%长输供热管网总长度及以上时，配置大温差机组的总成本较低。因此，在DN1000长输供热管网配置回水温度为30 °C的大温差机组时，经济距离为58.34 km(管网总长度比例为65.31%)。

表1 30 °C回水温度下配置大温差机组前后成本对比

Tab.1 Cost comparison before and after configuration of large temperature difference units at return water temperature of 30 °C

总长度 比例/%	未配置大温差机组/(×10 ⁸ 元)			配置大温差机组/(×10 ⁸ 元)		
	设计规划	运行	总成本	设计规划	运行	总成本
	阶段	阶段		阶段	阶段	
30	3.06	1.18	4.23	3.93	6.16	10.09
40	4.08	1.66	5.74	4.72	6.08	10.79
60	6.12	4.49	10.61	6.45	6.35	12.79
70	10.27	5.72	15.99	7.32	6.75	14.07
80	11.74	7.24	18.98	8.24	6.97	15.21
100	14.67	10.67	25.34	10.21	7.10	17.31

4.3 优化结果敏感性分析

4.3.1 大温差机组回水温度的影响

图11为不同大温差机组回水温度下，DN1600、200万m²接带面积长输供热管网的设计规划和运行阶段总成本随长输供热管网总长度的变化，可以看出，不同回水温度下，相同长输供热管网总长度对应的总成本较相近。回水温度越高，大温差机组的经济距离越大，如15 °C、50 °C

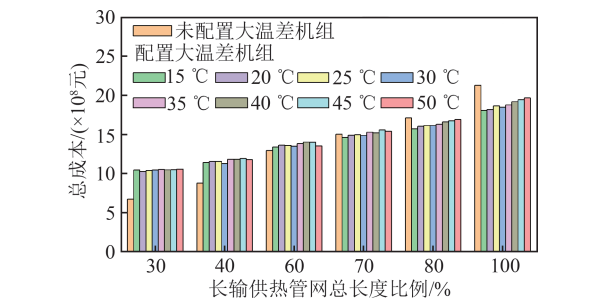


图11 不同回水温度下长输供热管网大温差机组经济性

Fig. 11 Economic performance of long-distance heating network with large temperature difference units at different return water temperatures

回水温度下大温差机组的经济距离分别为 58.24、68.35 km。

4.3.2 管径的影响

图 12 为不同大温差机组初始管径(未配置大温差机组时长输供热管网管径)下, 30℃回水温度、200 万 m² 接带面积长输供热管网的设计规划和运行阶段总成本随长输供热管网总长度的变化。

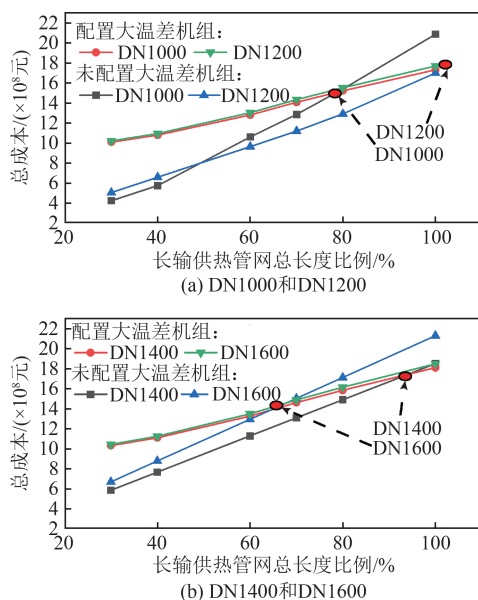


图 12 管径对长输供热管网配置大温差机组经济性影响

Fig. 12 Influence of pipe diameter on economic performance of long-distance heating network with large temperature difference units

从图 12 可以看出, 配置大温差机组后成本上升速率显著下降, 不同管径下的经济距离(黑圈中红点)差别较大。DN1000、DN1600 的经济距离分别小于 DN1200、DN1400, 表明在同一热负荷和大温差机组回水温度下, 管径较大或较小均能减小经济距离, 使得大温差机组在超过经济距离的长输供热管网中发挥降低总成本的作用, 即“两端小中间大”。这是因为管径小, 流速高, 单位长度压降大, 大温差机组带来的节能效果更早显现; 管径大, 初投资高, 大温差机组在降低管网投资成本方面优势更明显, 经济距离提前。

4.3.3 隔压站接带面积(热负荷)的影响

图 13 为不同大温差机组接带面积(相同热负荷指标)下, DN1600、30℃回水温度长输供热管网的设计规划和运行阶段总成本随长输供热管网总长度的变化, 反映了未来总热负荷增长趋势下大

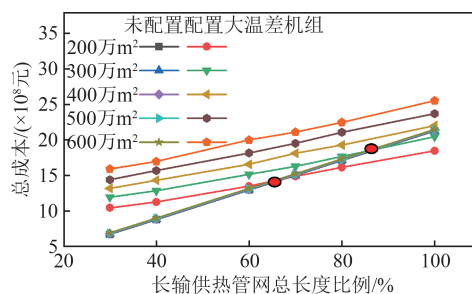


图 13 接带面积对长输供热管网配置大温差机组经济性影响

Fig. 13 Effects of heated area on economic performance of long-distance heating network with large temperature difference units

温差机组经济距离的变化情况。由于 DN1600、30℃回水温度长输供热管网在不同接带面积(热负荷)下的运行水泵成本均为 0, 故未配置大温差机组时对应的总成本线基本重合。随着接带面积增长, 配置大温差机组后总成本随长输供热管网总长度增加而增大, 且经济距离也随之大幅增加。在接带面积为 200 万 m² 时, 经济距离为 57.85~59.92 km, 对应管网总长度比例为 64.79%~67.10%; 接带面积为 300 万 m² 时, 经济距离为 75.93~78.73 km, 对应管网总长度比例为 85.03%~88.16%。因此, 接带面积(热负荷)对经济距离的影响较显著, 且其结果与工程实际经济性(总成本随长度的变化斜率)有强关联。

5 结论

提出长输供热管网中配置大温差机组的经济距离问题, 并构建了一套评估经济距离的优化框架和模型, 通过优化算法和基于 viHeating 生成的代理模型, 进行了经济距离的优化计算和敏感性分析。主要结论如下:

- 1) 大温差机组的经济性显著依赖于管网长度, 当长输供热管网长度超过经济距离后, 运行成本节约相对于投资成本上升而言占优, 总成本下降。
- 2) 配置大温差机组后, 管网外径设计值显著降低(降幅 18.6%~36.7%), 管道成本下降。
- 3) 不同初始管径下, 大温差机组的经济距离存在显著差异, 存在“两端小、中间大”的现象, 表明管径选择应综合考虑投资与运行成本平衡。

4) 回水温度升高导致大温差机组的节能效果减弱, 因此需要更长的管网长度才能实现经济性。

5) 不同热负荷对配置大温差机组的经济性和经济距离的影响较大, 需结合实际工程采用优化方法进行详细分析。

6) 在工程实践中, 可将所得大温差机组的经济距离与长输供热管网的实际主干长度进行对比, 以定量判断配置大温差机组的技术经济性。

参考文献

- [1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2025(城镇住宅专题)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2025: 12-13.
Building energy conservation research center Tsinghua University. China building energy saving annual development research report 2025 (Special topic on urban residential buildings) [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2025: 12-13.
- [2] 薄其明, 朱骏杰, 王丽腾, 等. 面向低碳城市供热系统的长距离输热技术研究进展[J/OL]. 发电技术, 2025-04-21. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250421.1123.004>.
Bo Q M, Zhu J J, Wang L T, et al. Research progress on long-distance heat transportation technology for low-carbon urban heating systems[J/OL]. Power Generation Technology, 2025-04-21. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20250421.1123.004>.
- [3] 付林, 李永红. 利用电厂余热的大温差长输供热模式[J]. 华电技术, 2020, 42(11): 56-61.
FU L, LI Y H. Long-distance heat-supply mode with large temperature difference using waste heat of power plants[J]. Huadian Technology, 2020, 42(11): 56-61.
- [4] 李少彬, 李永华, 董益华, 等. 基于吸收式机组的长输管网蓄热调峰能力研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(7): 52-59.
Li S B, Li Y H, Dong Y H, et al. Study on heat storage and peak shaving capacity of long-distance pipeline network based on absorption unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(7): 52-59.
- [5] T/CDHA 504—2021 长输供热热水管网技术标准[S].
T/CDHA 504—2021 Technical standard for long distance heating hot water pipe network[S].
- [6] 李宏俊, 高永康, 刘松龄, 等. 集中式大温差热力站供热方案技术经济性分析[J]. 煤气与热力, 2025, 45(8): 1-4.
Li H J, Gao Y K, Liu S L, et al. Technical and economic analysis of heating scheme of centralized large temperature difference heating station[J]. Gas & Heat, 2025, 45(8): 1-4.
- [7] 郑刚, 李金刚, 王鼎力, 等. 大温差长输供热管网的防腐防垢策略研究与应用[J]. 材料保护, 2024, 57(9): 168-174.
Zheng G, Li J G, Wang D L, et al. Research and application of corrosion and scaling prevention strategies for long-distance heating pipe network with large temperature difference[J]. Materials Protection, 2024, 57(9): 168-174.
- [8] Gaur A S, Fitiwi D Z, Curtis J. Heat pumps and our low-carbon future: a comprehensive review[J]. Energy Research & Social Science, 2021, 71: 101764.
- [9] 王立元, 刘继平, 符悦, 等. 集成喷射式热泵的大温差供热系统变工况研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(4): 863-869.
Wang L Y, Liu J P, Fu Y, et al. Study on variable condition of large temperature differential heating system with integrated ejector heat pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(4): 863-869.
- [10] 李岩, 王玲玲, 张淑彦, 等. 清洁燃煤热电联产与燃气调峰结合的新型集中供热系统优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9646-9654.
Li Y, Wang L L, Zhang S Y, et al. Optimization study of a novel district heating system combining clean coal-fired cogeneration with gas peak shaving[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9646-9654.
- [11] Li Y, Wang L L, Xu K W, et al. Optimization study of a novel district heating system based on large temperature-difference heat exchange[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115517.
- [12] 王林文. 太原市基于吸收式大温差供热技术应用及问题探讨[J]. 区域供热, 2020(5): 40-45.
Wang L W. Application of absorption-based large temperature-delta heating technology in Taiyuan city and discussion of associated issues[J]. District Heating, 2020(5): 40-45.
- [13] Guelpa E, Capone M, Sciacovelli A, et al. Reduction of supply temperature in existing district heating: a review of strategies and implementations[J]. Energy, 2023, 262: 125363.
- [14] Gjoka K, Rismanchi B, Crawford R H. Fifth-generation district heating and cooling systems: a review of recent advancements and implementation

- barriers[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 171: 112997.
- [15] Wang Y, Zhang S H, Chow D, et al. Evaluation and optimization of district energy network performance: Present and future[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110577.
- [16] 李登峰, 张赞纲, 陈浩然. 大温差换热机组在郑州市集中供热系统中的应用[J]. 区域供热, 2024(5): 147-151.
- Li D F, Zhang B G, chen H R. Application of large temperature-delta heat exchange units in the Zhengzhou district heating system[J]. District Heating, 2024(5): 147-151.
- [17] 刘建国, 闫耀峰, 杨统元, 等. 节能技术在长输供热工程中的应用[J]. 节能, 2023, 42(12): 57-60.
- Liu J G, Yan Y F, Yang T Y, et al. Application of energy-saving technology in long-distance heat supply project[J]. Energy Conservation, 2023, 42(12): 57-60.
- [18] 张永超, 刘学来, 李永安. 长输供暖热水管道经济比摩阻研究[J]. 区域供热, 2021(1): 44-49.
- Zhang Y C, Liu X L, Li Y A. Study on economic specific friction resistance of long distance heating hot water pipeline[J]. District Heating, 2021(1): 44-49.
- [19] Pans M A, Claudio G, Eames P C. Theoretical cost and energy optimisation of a 4th generation net-zero district heating system with different thermal energy storage technologies[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 100: 105064.
- [20] Nigro L, La Bella A, Casella F, et al. Control-oriented modeling, simulation, and predictive control of district heating networks[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 7064-7079.
- [21] 李仲博. 基于数字孪生的城镇供热系统按需精准调控技术研究与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- Li Z B. Research and application of on-demand precise regulation technology of urban heating system based on digital twin[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [22] Misenheimer C T, Terry S D. The development of a dynamic single effect, lithium bromide absorption chiller model with enhanced generator fidelity[J]. Energy Conversion and Management, 2017, 150: 574-587.
- [23] Ramírez-Ochoa D D, Pérez-Domínguez L A, Martínez-Gómez E A, et al. PSO, a swarm intelligence-based evolutionary algorithm as a decision-making strategy: a review[J]. Symmetry, 2022, 14(3): 455.
- [24] Pucuhuayla S J F, Huatuco Ñ Z D, Rodriguez M P Y, et al. Optimal distribution network reconfiguration using particle swarm optimization-simulated annealing: adaptive inertia weight based on simulated annealing[J]. Energies, 2025, 18(20): 5483-5483.

收稿日期: 2026-01-20。

修回日期: 2026-04-09。

作者简介:



薄其明

薄其明(1967), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为智慧能源技术, boqm@163.com;



周旭

周旭(1983), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为长距离多源协同智慧供热系统关键技术, lyf19940124@163.com;



严新荣

严新荣(1972), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为多能互补能源系统、火电机组灵活性、新能源及储能等, yanxinrong@chd.com.cn;



周懿

周懿(1980), 女, 博士, 研究员, 研究方向为智慧能源技术和供热系统调控技术, 本文通信作者, zhouyi0122@zju.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)