

基于网格寻优算法的城市区域多热源供热 系统运行优化研究

于红伟¹, 许道春¹, 刘延太¹, 李建军¹, 涂垚杰², 张燕平^{2*}

- (1. 国家电投荆门绿动能源有限公司, 湖北省 荆门市 448000;
2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

Research on Operation Optimization of Urban Multi-Heat-Source Heating Systems Based on Grid Search Optimization Algorithm

YU Hongwei¹, XU Daochun¹, LIU Yantai¹, LI Jianjun¹, TU Yaojie², ZHANG Yanping^{2*}

- (1. State Power Investment Corporation Jingmen Green Power Energy Co., Ltd., Jingmen 448000, Hubei Province, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074,
Hubei Province, China)

摘要:【目的】区域内多热源构成的供热系统运行涉及供热负荷分配问题,不同的供热负荷分配带来的收益不同,为此,需要根据用户的供热需求对供热系统的热负荷进行优化,从而实现收益最大化。【方法】针对某供热企业多热源供热系统的供热负荷分配优化问题,建立了燃煤锅炉背压供热机组仿真模型,获得了该设备的热电特性与能耗特性。在此基础上,以供热企业的经济收益最大化为优化目标,建立了基于网格寻优算法的供热负荷优化模型,并利用该模型对供热系统的负荷分配进行了优化。【结果】相较于常规运行方案,优化后的供热方案全年经济收益提升约265万元,燃料利用系数最高可提升4.63%。【结论】网格寻优算法能实现对多热源供热系统的供热方案进行快速优化,为区域内机组运行提供指导方案。

关键词: 供热系统; 网格寻优; 多热源供热; 热负荷分配; 仿真建模; 运行优化

ABSTRACT: [Objectives] The operation of a heating system composed of multiple heat sources within a certain region involves heating load distribution, and different heat load distribution schemes lead to different revenues. Therefore, it is necessary to optimize the heating load of the heating system according to heating demands of users in order to maximize the overall revenue. [Methods] Given the heat load distribution optimization problems in a multi-heat-source

heating system of a heat-supply enterprise, a simulation model of a coal-fired boiler back-pressure heating unit is established to determine the thermoelectric characteristics and energy consumption characteristics of the equipment. On this basis, with the objective of maximizing the economic revenue of the heat-supply enterprise, a heating load optimization model is developed based on grid search optimization algorithm, and this model is adopted to optimize the load distribution of the heating system. [Results] Compared with the conventional operation scheme, the optimized heating scheme increased the annual revenue by approximately 2.65 million yuan, with a maximum increase of 4.63% in the fuel utilization coefficient. [Conclusions] The grid search optimization algorithm can achieve rapid optimization of heating schemes for multi-heat-source heating systems, thereby providing guidance for the operation of units within the region.

KEY WORDS: heating system; grid search optimization; multi-heat-source heating; heating load distribution; simulation modeling; operation optimization

0 引言

随着工业化进程的推进,我国工业园区的供热负荷需求逐年增加。单一类型的热力设备难以灵活应对热负荷变化,通常采用多热源协同供热的方案。为满足逐渐增长的热负荷需求,供热公司在原有供热系统基础上扩建新的热力设备,不

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4100703)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2022YFB4100703).

同热力设备的热电特性不同，如何科学、高效地调度这些耦合在一起的多种热源，以实现整体运行效益的最大化，成为一个亟待解决的关键问题。若要解决该问题，需要先了解多台热力设备的热电特性，再配合优化算法得到热负荷分配方案。

对于热电特性的研究常采用仿真建模法，其实质是利用计算机仿真软件来模拟各种复杂工况，以便于更加深入分析机组变工况的运行性能，从而对机组的经济性诊断进行研究。宫卫平等^[1]利用 Ebsilon 软件搭建了 200 MW 及 300 MW 机组的联机供热系统模型，有效缓解了联机组能耗大、运行成本高的问题。Aminov 等^[2]利用 Ebsilon 软件对苏联时期搭建的常规发电机组及新搭建的联合循环机组进行仿真建模，并对比了其能源利用效率。王子杰^[3]利用 Ebsilon 软件对热电联产机组进行建模，得到案例机组的能耗规律及全工况运行数据。刘双白等^[4]利用 Ebsilon 软件对某 320 MW 供热机组进行建模，分析了低压缸零出力方式下的供热性能和经济性。宋金时等^[5]利用 Ebsilon 软件对 SGT5-4000F 重型燃气轮机进行建模，并分析了燃气轮机排气温度对联合循环发电机组性能的影响。罗城鑫等^[6]运用 Ebsilon 软件分析不同环境温度对单循环燃气轮机和联合循环机组性能的影响。柯冬冬等^[7]利用 Ebsilon 软件对燃气-蒸汽联合循环机组进行建模，得出不同工况下整个联合循环系统的效率及热耗变化。谭锐等^[8]利用 Ebsilon 软件对耦合熔盐储热的 300 MW 亚临界热电联产机组进行建模并开展热经济性研究。王乙博^[9]利用 Ebsilon 软件对东北某地区 350 MW 热电联产机组进行仿真建模并与 MATLAB 编程相结合，对改造前后机组的碳排放特性及经济性进行对比分析。在了解热源热电特性的基础上，利用优化算法可求得供热负荷下的优化分配方案。随着计算机技术的发展及优化算法的深入研究，国内外学者已尝试采用多种优化算法解决该问题。高新勇等^[10]采用粒子群算法对复杂供热系统进行热电负荷分配，优化后的分配结果可使全厂总煤耗量降低 3.1~13.6 t/h。陈然璟等^[11]提出一种耦合罚函数的灰狼算法来解决双机热电联供系统的热电负荷分配问题，该方法在求解成功率和求解误差方面具

有明显优势。张德利等^[12]为了优化热电厂内多台供热机组热电负荷分配，建立了机组能耗分析模型，基于鸟群优化算法得到不同供热需求下的最佳分配方案。文珏等^[13]针对多台机组联合供热问题，采用粒子群算法进行热电负荷分配，优化后全厂煤耗量降低了 0.6~10 t/h。丁衡等^[14]针对传统灰狼算法时效性差的问题，采用一种优化后的灰狼算法为热电联产机组中热电负荷分配提供方案。李军等^[15]针对多机型多热源的复杂热电负荷分配问题，采用一种改进的遗传算法为机组提供运行指导，优化后的热耗明显降低。李梦辉等^[16]以热电联供系统的整体热耗率为优化目标，采用遗传算法进行寻优，优化后单机运行工况下机组热耗率降低了 1.3%。

综上所述，利用 Ebsilon 等商业软件对机组进行仿真建模与热力特性分析的研究已较为成熟。然而，在热电联供系统负荷分配方面，所研究系统包含的热源种类较为单一，对于由多种不同类型的热源构成的系统负荷分配问题研究较少。为此，本文以湖北省某供热公司的多热源供热系统为研究对象，利用 Ebsilon 软件建立背压供热机组的仿真模型，分析供热机组的能耗变化规律和发电功率变化特性。以收益最大为供热负荷优化目标，建立多热源供热系统的优化模型，选用网格法作为寻优算法，对多热源供热负荷分配进行研究，给出供热优化分配方案，并分析关键运行参数对系统收益及供热分配结果的影响。

1 供热系统建模

1.1 系统组成

湖北省某供热公司的供热系统包括 4 类热源：1) 2 台燃气轮机-余热锅炉供热机组；2) 2 台燃煤背压供热机组；3) 4 台天然气调峰锅炉；4) 外部企业生产的蒸汽。供热系统结构如图 1 所示。燃气轮机-余热锅炉机组中，燃气轮机排出的高温烟气进入余热锅炉，在余热锅炉中生产供热蒸汽，燃煤背压机组利用背压汽轮机排汽供热，调峰锅炉直接将给水加热后供热，对于不同设备生产的蒸汽不考虑品位差异。燃煤背压机组及燃气轮机-余热锅炉机组生产的电能可售卖给电网。

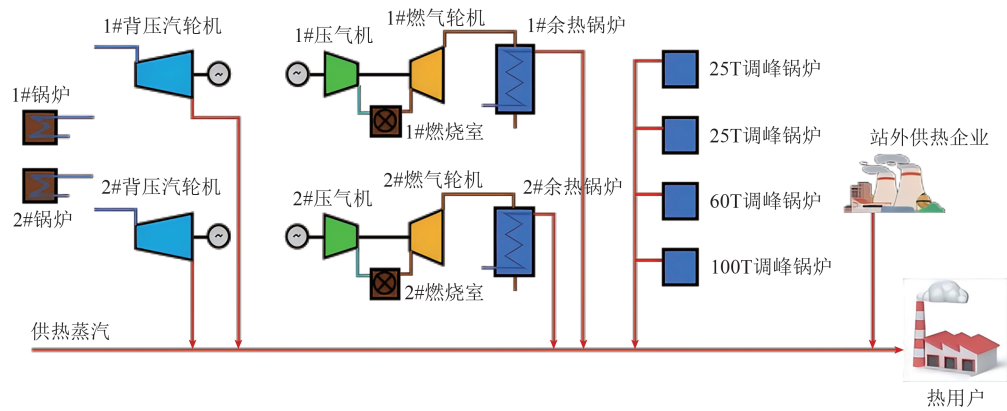


图1 供热系统结构

Fig. 1 Heating system structure

1.2 燃煤供热机组模型搭建与验证

燃煤供热机组由燃煤锅炉、背压汽轮机组成，锅炉型号为UG-130/13.73-M，汽轮机型号为B15-13.0/535-1.4，额定发电功率为15 MW。主蒸汽系统采用母管制，背压汽轮机存在两级抽汽回热，排汽进入分汽缸后分别送往除氧器及厂外热用户。

小背压机进汽取自背压汽轮机排汽，补水加热器的加热蒸汽取自小背压机的排汽。利用Ebsilon软件搭建燃煤背压供热机组仿真模型，如图2所示。对于燃煤背压供热机组，当主蒸汽质量流量改变时，设备生产的热电负荷互相关联，通过仿真分析可得到供热机组的热电特性与能耗特性。

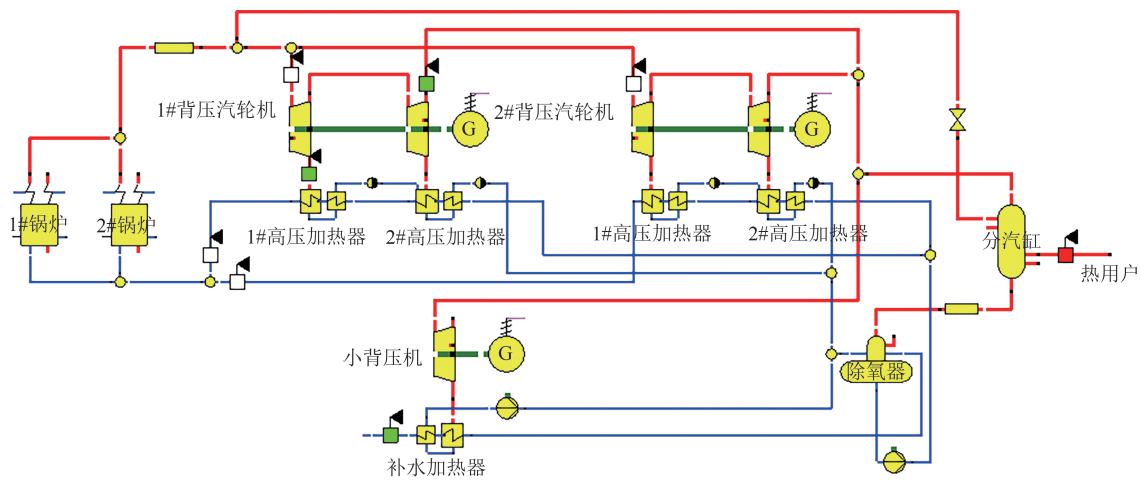


图2 燃煤背压机组的Ebsilon仿真模型

Fig. 2 Ebsilon simulation model of coal-fired back-pressure units

改变主蒸汽流量、各级焓降与中间级抽汽压力，进行变工况计算，若各组件的工质流量仿真结果与设计参数一致，则表明该仿真模型正确。表1为燃煤背压机组仿真模型验证结果，可以看出，在平均供热、最大供热2种工况下，参数仿真值与设计值的相对误差均在5%以内，满足工程应用要求。

1.3 热源特性

本文的核心问题为在某一确定总供热量下寻找收益最大时4类热源各自承担的供热量，因此

将4类热源供热量作为自变量。定义燃煤背压机组提供的供热量为 Q_1 ，燃气轮机-余热锅炉提供的供热量为 Q_2 ，调峰锅炉生产的供热量为 Q_3 ，外购蒸汽量为 Q_4 。已知调峰锅炉每生产1 t供热蒸汽需消耗约84.15 m³天然气，外购蒸汽无热源特性。

利用搭建的Ebsilon模型进行变工况运算，得到燃煤背压机组发电量 E_1 、耗煤量 C_1 随供热量 Q_1 的变化关系：

$$E_1 = 198.4Q_1 - 1\,610.8 \quad (1)$$

$$C_1 = 126.67Q_1 - 117.45 \quad (2)$$

表1 燃煤背压机组仿真模型验证结果

Tab. 1 Verification results of simulation model for coal-fired back-pressure units

参数	平均供热工况			最大供热工况		
	设计值/(t/h)	仿真值/(t/h)	相对误差/%	设计值/(t/h)	仿真值/(t/h)	相对误差/%
1段回热抽汽量	18.8	18.75	0.29	23.0	22.96	0.19
2段回热抽汽量	12.5	12.32	1.43	15.4	15.10	1.98
除氧器加热蒸汽量	14.1	13.85	1.74	17.3	17.38	0.45
化补水加热蒸汽量	15.6	16.13	3.38	19.2	19.75	2.89
供汽量	156.4	156.36	0.03	191.9	191.52	0.03

根据公司历史运行数据拟合燃气轮机-余热锅炉机组发电量 E_2 、天然气消耗量 G_2 随供热量 Q_2 的变化关系：

$$E_2 = -0.6017Q_2^2 + 307.42Q_2 - 8326 \quad (3)$$

$$G_2 = -3.211Q_2^2 + 1429.6Q_2 - 48516 \quad (4)$$

2 优化方法

2.1 网格法

网格法属于直接寻优法，通过将设计变量的界限区间划分为格点，对比可行域内格点上的目标函数，以求出最优解。该方法采用代表点表示区间，从而避免对参数空间的全局搜索。图3为利用网格法寻优的流程图。

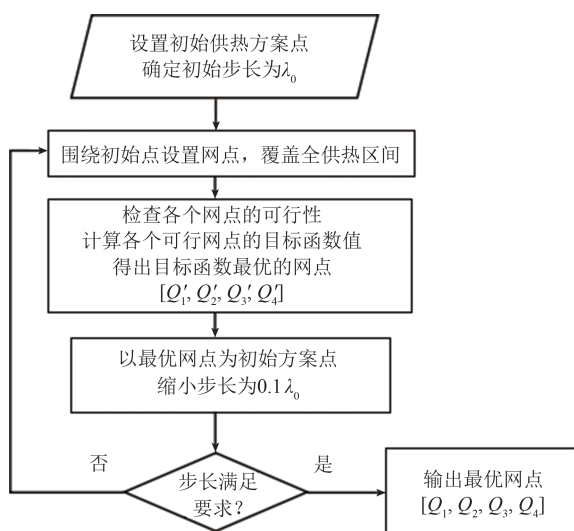


图3 网格法寻优流程图

Fig. 3 Flowchart of grid search optimization algorithm

在应用网格法时，需要满足变量之间的连续性假设，本文所研究4类热源的热电产量随输入燃料量均呈现连续变化关系，满足使用条件。本文中网格划分采用均匀划分法。针对供热分配方案优化问题，先以10 t/h为步长对全局空间进行划

分，得到该步长下的最优点 $[Q_1', Q_2', Q_3', Q_4']$ ；再在该最优工况代表点周边以1 t/h的步长进行划分，并求出可满足工程需求的最优工况点 $[Q_1, Q_2, Q_3, Q_4]$ 。相较于遗传算法、粒子群算法等智能优化算法，网格法不涉及随机过程和复杂的迭代机制，其计算结果同样具有高度的稳定性和可重复性。本文中热源数量有限，网格法的计算时间成本在可接受范围内，具有“全局最优”和“稳健可靠”的优势，计算量较大的劣势在本文的设定场景中可以忽略不计。

2.2 目标函数及约束条件

热电联产机组的收益为向工业用户售卖蒸汽的收入及机组发电上网获得的收入。热电联产机组的成本包含人员工资、燃料成本、机组设备维护成本、折旧成本等，其中燃料成本占总成本的70%以上，机组运行的关联性强，可以很好地反映出机组实际运行情况，因此构建目标函数时成本方面仅考虑机组的燃料成本、水费成本，以及外购蒸汽的购入成本。以公司收益 W_{total} 最大为优化目标，目标函数表示如下：

$$S = \max W_{\text{total}} \quad (5)$$

$$W_{\text{total}} = Q_0 p_{\text{sold}} + E p_{\text{ele}} - T \quad (6)$$

式中： $Q_0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$ ，为总供热量； $E = E_1 + E_2$ ，为总发电量； p_{ele} 为电价； p_{sold} 为蒸汽售价； T 为总成本，计算式为

$$T = (G_2 + G_3) p_{\text{gas}} + C_1 p_{\text{coal}} + Q_4 p_{\text{wg}} + (Q_1 + Q_2 + Q_3) p_{\text{water}} \quad (7)$$

式中： p_{gas} 、 p_{coal} 、 p_{water} 、 p_{wg} 分别为天然气、煤、水、外购蒸汽价格； $G_3 = 84.15Q_3$ ，为调峰锅炉的天然气使用量。

根据式(1)–(4)，将多热源供热分配问题转化为求 W_{total} 最大时的 Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ，在控制不同

机组进行供热发电时，还需要满足以下约束条件：

$E_1 + E_2 \geq E_{\min}$ (8)

$G_2 + G_3 \geq G_{\min}$ (9)

$G_2 + G_3 \leq G_{\max}$ (10)

$Q_{i\min} \leq Q_i \leq Q_{i\max}, i = 1, 2, 3, 4$ (11)

式(8)为总发电量约束，其中 $E_{\min}$ 为系统最小发电量；式(9)、(10)分别为天然气最小及最大使用量约束，其中 $G_{\min}$ 、 $G_{\max}$ 分别为系统天然气最小、最大使用量；式(11)为4类热源供热边界约束，其中 $Q_{\min}$ 、 $Q_{\max}$ 分别为第 i 类热源能提供的最小、最大供热量。

2.3 优化算法验证

将网格优化法与 MATLAB 中的 quadprog 函数处理供热优化问题得出的供热分配结果进行对比，以验证网格法的正确性。quadprog 函数可以解决简单的二次规划问题，其研究成果比较成熟，该函数标准数学模型为

$$\min f(X) = \frac{1}{2} X^T G X + C^T X \quad (12)$$

表2 quadprog 函数与网格法分配结果对比

Tab. 2 Comparison of distribution results between quadprog function and grid search optimization algorithm

总供热量/(t/h)	求解方法	各热源所提供的蒸汽量/(t/h)					
		1#燃煤 背压机组	2#燃煤 背压机组	1#燃气轮机-余热 锅炉机组	2#燃气轮机-余热 锅炉机组	调峰锅炉	外购蒸汽
400	quadprog 函数	100	100	84	0	0	116
	网格法	100	100	84	0	0	116
500	quadprog 函数	100	100	84	0	0	216
	网格法	100	100	84	0	0	216
600	quadprog 函数	100	100	90	0	60	250
	网格法	100	100	90	0	60	250

3 结果与讨论

3.1 供热分配优化结果

本文对总供热需求在 300~800 t/h 时的供热方案进行了优化，结果如图4所示。

由图4可见，随着总供热需求的增加，不同热源所承担供热量的优化分配结果在变化。根据优化结果可知，该区域供热系统的优化运行策略如下：总供热量小于 510 t/h 时，优先启用2台燃煤背压机组直至满负荷运行，随后启用外购蒸汽补充；总供热量在 510~540 t/h 时，2 台燃煤背压机组及 1 台燃气轮机-余热锅炉机组均达到最大供

式中： X 为待求解的 n 维决策变量向量； G 为决定目标函数二次项系数的 n 阶对称矩阵； C 为决定目标函数一次项系数的 n 维向量。

该函数调用须满足约束条件为线性。由于式(3)、(4)为二次函数，约束条件不为线性，因此可以先用精度较低的一次函数拟合式进行验证计算，式(3)、(4)改写为：

$E_2 = 1\,017.4Q_2 - 46\,836$ (13)

$G_2 = 222.1Q_2 - 6\,144$ (14)

网格寻优法与 quadprog 函数得到的供热分配结果对比如表2所示，可以看出，2种方法得出的结果一致，证明了利用网格法解决该问题的正确性。然而 quadprog 函数仅可解决线性约束的二次规划问题，对于目标函数和约束条件都有限制，若目标函数和约束条件中存在非二次项(如三次项、指数项、对数项)，就不能采用 quadprog 函数。而网格寻优法属于直接搜索法，其目标函数及约束条件无形式限制，仅需满足连续的条件，应用范围更广。

热量，剩余部分由外购蒸汽补充；总供热量在 540~600 t/h 时，2 台燃煤背压机组、1 台燃气轮机-余热锅炉机组、外购蒸汽均达到最大供热量，剩余部分由调峰锅炉补充；总供热量在 600~630 t/h 时，2 台燃煤背压机组及 2 台燃气轮机-余热锅炉机组均达到最大供热量，剩余部分由外购蒸汽补充；总供热量大于 630 t/h 时，2 台燃煤背压机组、2 台燃气轮机-余热锅炉机组、外购蒸汽均达到最大供热量，剩余部分由调峰锅炉补充。

优化前该公司采用常规负荷分配方案，即根据4类热源的经济性排序并结合长期运行历史数据得到的运行方案：依次使用燃煤背压机组、外

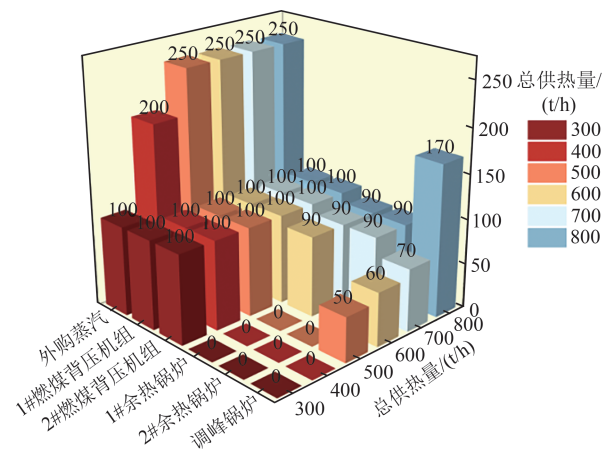


图4 不同供热需求下最优运行方案

Fig. 4 Optimal operation schemes under different heating demands

购蒸汽、燃气轮机-余热锅炉机组、调峰锅炉，燃气轮机一旦开启即以满负荷运行。将利用网格法寻优得到的方案与依据经验总结得出的常规运行方案进行对比，根据该区域内全年热负荷持续时间数据计算得出，相较于常规运行方案，采用网格寻优法得到的运行方案可提升全年经济效益约265万元。

为了进一步对比采用优化算法后的供热系统运行性能，本文以供热系统燃料利用系数 η 作为评价指标，以表征供热系统的能源利用效率。燃料利用系数定义为供热系统对外输出热负荷及电负荷的总能量之和除以供热系统消耗的燃料能量之和，计算式如下：

$$\eta = \frac{3600(W_1 + W_2) + (Q_{h1} + Q_{h2} + Q_{h3})}{B_{\text{coal}}Q_{\text{coal,net}} + (B_{\text{gas,2}} + B_{\text{gas,3}})Q_{\text{gas,net}}} \quad (15)$$

式中： W_1 、 W_2 分别为燃煤背压机组的电负荷、燃气轮机产生的电负荷，具体数值由Ebsilon软件计算得出； Q_{h1} 、 Q_{h2} 、 Q_{h3} 分别为燃煤背压机组、燃气轮机-余热锅炉机组、调峰锅炉的供热出力，其中 Q_{h1} 、 Q_{h2} 由供热量乘以供热蒸汽与给水的焓差得到， Q_{h3} 由输入燃料总热值反推得到； $Q_{\text{coal,net}}$ 、 $Q_{\text{gas,net}}$ 分别为燃煤、天然气的热值； B_{coal} 为燃煤背压机组消耗的煤量； $B_{\text{gas,2}}$ 、 $B_{\text{gas,3}}$ 分别为燃气轮机、调峰锅炉消耗的天然气量。

常规运行方案与网格法优化方案的燃料利用系数在全年供热负荷范围内的变化情况对比如图5所示。

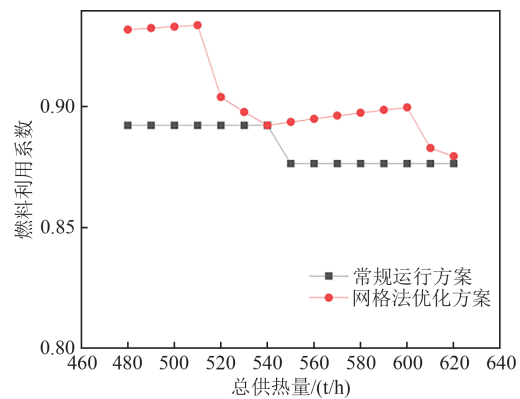


图5 常规运行方案与网格法优化方案燃料利用系数对比

Fig.5 Comparison of fuel utilization coefficients between conventional operation scheme and grid search optimization scheme

从图5可以看出，与常规运行方案相比，网格寻优法所得运行方案的能源利用率平均提升1.51%，最高可提升4.63%。

3.2 关键参数对系统收益的影响

在收益计算时，天然气价格、燃煤价格、上网电价和外购蒸汽价格等关键参数会直接影响公司收益及最优运行方案，需对这些参数进行敏感性分析。目前天然气价格为2.7元/ m^3 ，燃煤价格为1200元/t，上网电价为0.4元/(kW·h)，外购蒸汽价格为210元/t，蒸汽售价为240元/t。

3.2.1 天然气价格变化

天然气价格在2.0~4.0元/ m^3 变化，间隔为0.5元/ m^3 ，根据优化算法对总供热量在500~800 t/h的供热方案进行对比分析，收益变化情况如图6所示。

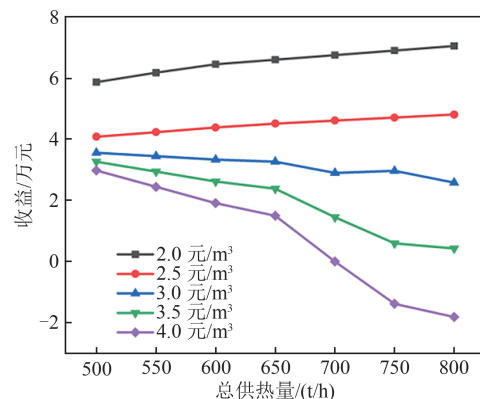


图6 不同天然气价格下收益随总供热量变化情况

Fig.6 Variation of revenue with total heating output at different natural gas prices

在天然气价格较低时，利用这4类热源进行供热均能产生收益。当天然气价格高于2.85元/m³时，调峰锅炉生产1 t蒸汽的成本高于240元，燃气轮机-余热锅炉机组也给系统带来负收益。在500~800 t/h的供热区间内，燃煤背压机组及外购蒸汽均达到满负荷，采用负收益的燃气轮机-余热锅炉机组及调峰锅炉进行供热，因此收益随着总供热量增加而降低。

表3给出总供热量600 t/h，天然气价格分别为2.0、2.5、3.0元/m³时的最优分配方案。燃煤背

压机组供热的经济效益在4类热源中最高，因此始终保持满负荷运行。其他3类热源供热经济效益与天然气价格有关，当天然气价格为2.0元/m³时，供热经济效益由高到低依次为：燃气轮机-余热锅炉机组、调峰锅炉、外购热源。当天然气价格为2.5元/m³时，供热经济效益由高到低依次为：燃气轮机-余热锅炉机组、外购热源、调峰锅炉。当天然气价格为3.0元/m³时，供热经济效益由高到低依次为：外购热源、燃气轮机-余热锅炉机组、调峰锅炉。

表3 总供热量为600 t/h时不同天然气价格下最优分配方案

Tab. 3 Optimal distribution schemes at different natural gas prices with a total heating output of 600 t/h

天然气价格/ (元/m ³)	各热源供热量/(t/h)					
	1#燃煤 背压机组	2#燃煤 背压机组	1#燃气轮机-余热 锅炉机组	2#燃气轮机-余热 锅炉机组	调峰锅炉	外购蒸汽
2.0	100	100	90	90	210	10
2.5	100	100	90	90	0	220
3.0	100	100	0	0	150	250

3.2.2 燃煤价格变化

燃煤背压机组对于其他3类热源在当前条件下经济性最高。选取煤价1 800、2 400、3 000元/t进行计算，收益随总供热量变化情况如图7所示。

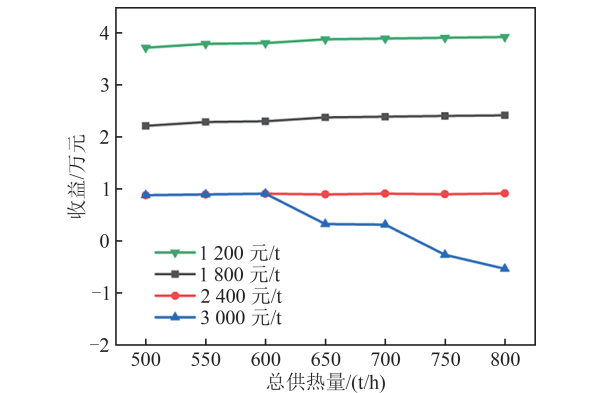


图7 不同燃煤价格下收益随总供热量变化情况

Fig.7 Variation of revenue with total heating output at different coal prices

煤价仅影响燃煤背压机组的供热经济性，随着煤价升高，燃煤背压机组的供热经济性降低。煤价较低时，燃煤机组供热带来的收益是总收益的主要组成部分。目前煤价为1 200元/t时，燃煤背压机组的供热经济性远超另外3类热源，4类热源的供热经济效益由高到低依次为：燃煤背压机组、外购热源、燃气轮机-余热锅炉机组、调峰锅

炉。当煤价升至2 100元/t时，外购蒸汽的供热经济性超越燃煤背压机组；当煤价升至2 300元/t时，燃气轮机-余热锅炉机组的供热经济性超越燃煤背压机组；当煤价升至2 500元/t时，调峰锅炉的经济性超越燃煤背压机组。当煤价达到3 000元/t时，燃煤背压机组经济性最低，且带来的收益为负，因此曲线呈下降趋势。

3.2.3 电价变化

选择电价0.2、0.4、0.6元/(kW·h)进行计算，收益随总供热量的变化情况如图8所示。

电价对于公司收益及供热分配结果的影响较

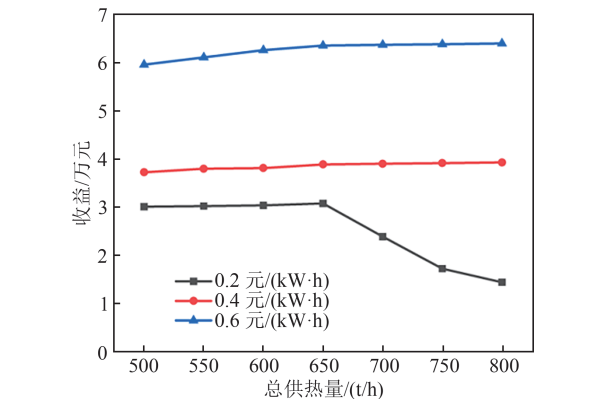


图8 不同电价下收益随总供热量变化情况

Fig. 8 Variation of revenue with total heating output at different electricity prices

为复杂,体现为电价的变化会对燃气轮机-余热锅炉机组和燃煤背压机组的供热经济性造成影响,且影响程度随2类机组运行负荷率变化而变化。由图8可知,随着电价升高,燃煤背压机组的经济性提高,在供热方案中的优先级不变。然而运行燃气轮机-余热锅炉机组的收益中超过40%来自发电收益,当电价仅为0.2元/(kW·h)时,燃气轮机-余热锅炉机组的经济性最低,随着电价提高,其经济性逐渐超越调峰锅炉及外购蒸汽。低电价时,启用燃气轮机-余热锅炉机组的成本高于收益,因此当电价为0.2元/(kW·h)时,在总供热量高于650 t/h的情况下收益随供热量增加而逐渐降低。

3.2.4 外购蒸汽价格变化

外购蒸汽是4类热源中最简单的,现假定其变化范围为180~240元/t,间隔取20元/t,收益随总供热量的变化情况如图9所示。

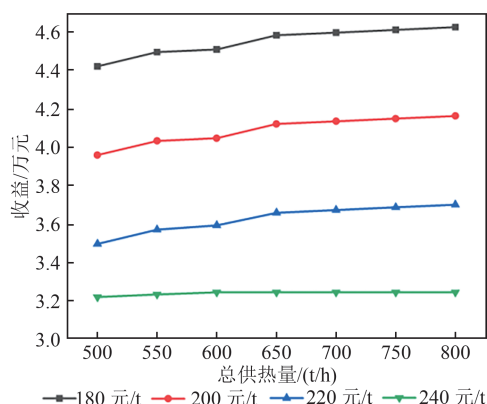


图9 不同外购蒸汽价格下收益随总供热量变化情况

Fig.9 Variation of revenue with total heating output at different outsourced steam prices

由图9可见,外购蒸汽价格为180、200、220元/t时,收益随供热量变化趋势基本一致,相邻曲线之间间隔5 000元的收益,外购蒸汽虽然具有较高的经济效益,但其对总效益的贡献有限,其供热经济性随着价格的升高而降低。目前外购蒸汽价格为180元/t时,4类热源的供热经济效益由高到低依次为:燃煤背压机组、外购热源、燃气轮机-余热锅炉机组、调峰锅炉。当外购蒸汽价格升至220元/t时,燃气轮机-余热锅炉机组的供热经济性超越外购热源;当外购蒸汽价格升至

230元/t时,调峰锅炉的供热经济性超越外购热源。

4 结论

针对多热源供热分配方案优化问题,通过仿真建模,分析热源的输入-输出特性,建立目标函数并考虑约束条件,采用网格寻优算法得出在某一确定供热需求下收益最大时的热量分配方案,以指导热力设备运行。具体结论如下:

1) 采用网格寻优算法得到的运行策略在总供热量分别为510、540、600、630 t/h时发生供热设备的调整,体现为燃气轮机-余热锅炉机组及调峰锅炉的交错使用。

2) 相较于采用常规运行方案,采用网格寻优法得到的运行方案可使全年经济效益提升约265万元,燃料利用系数平均提升1.51%,最高提升4.63%。

3) 天然气价格、煤价、电价等参数均会对运行优化方案产生影响,但这些影响因素并非单一变化,在实际生产中通常为多个因素同时变化,因此需要借助优化算法实时计算出收益最大时系统各类热源负荷分配情况。

4) 所采用网格优化算法适用于维度较低的最优化问题,其优点在于寻优流程清晰直观,对目标函数及约束条件无特殊要求,易于编程实现。

参考文献

- [1] 宫卫平,管洪军,李宏伟,等.基于EBSILON仿真软件的联机供热负荷分配优化[J].山东大学学报(工学版),2021,51(4):77-83.
Gong W P, Guan H J, Li H W, et al. Optimization of heating load distribution of combined unit based on EBSILON simulation software[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(4): 77-83.
- [2] Aminov Z, Nakagoshi N, Xuan T D, et al. Evaluation of the energy efficiency of combined cycle gas turbine. Case study of Tashkent thermal power plant, Uzbekistan[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 501-509.
- [3] 王子杰.热电联产机组运行能效及灵活性提升关键技术研究[D].北京:华北电力大学,2024.

- Wang Z J. Key technologies research for operation energy efficiency and flexibility enhancement of CHP system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [4] 刘双白, 张晶, 吴昕, 等. 320 MW 机组低压缸零出力性能分析及应用研究[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 213-220.
- Liu S B, Zhang J, Wu X, et al. Performance analysis and application research of low-pressure cylinder zero output technology on 320 MW unit[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 213-220.
- [5] 宋金时, 雷晓龙, 徐凯, 等. 基于EBSILON的燃气轮机排烟温度提升改造对联合循环发电机组性能的影响[J]. 热能动力工程, 2022, 37(11): 1-6.
- Song J S, Lei X L, Xu K, et al. Effect of EBSILON-based gas turbine exhaust gas temperature improvement on combined cycle generator unit performance[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(11): 1-6.
- [6] 罗城鑫, 张海珍, 王明晓, 等. 基于Ebsilon软件的联合循环机组进气冷却系统分析[J]. 浙江电力, 2020, 39(8): 108-113.
- Luo C X, Zhang H Z, Wang M X, et al. Analysis of intake cooling system of combined cycle unit based on ebsilon software[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(8): 108-113.
- [7] 柯冬冬, 谢玉荣, 赵大周, 等. 基于Ebsilon软件的燃气-蒸汽联合循环热力系统分析[J]. 节能, 2018, 37(9): 10-12.
- Ke D D, Xie Y R, Zhao D Z, et al. Analysis of gas-steam combined cycle thermodynamic system based on Ebsilon software[J]. Energy Conservation, 2018, 37(9): 10-12.
- [8] 谭锐, 严志远, 王顺, 等. 耦合熔盐储热系统的热电联产机组热经济性研究[J/OL]. 发电技术, 2025-11-28. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20251128.1023.002>.
- Tan R, Yan Z Y, Wang S, et al. Research on thermal economic efficiency of combined heat and power units coupled with molten salt heat storage systems[J/OL]. Power Generation Technology, 2025-11-28. <https://link.cnki.net/urlid/33.1405.TK.20251128.1023.002>.
- [9] 王乙博. 考虑碳交易的热电联产机组灵活性改造经济性分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2025.
- Wang Y B. Economic analysis of flexibility retrofit for combined heat and power units considering carbon trading[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2025.
- [10] 高新勇, 郑立军, 喻珮, 等. 热电联产电站复杂供热系统的热电负荷智能分配研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(8): 86-93.
- Gao X Y, Zheng L J, Yu P, et al. Research on intelligent scheduling of heat and power loads for complex heating system of a cogeneration power station[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(8): 86-93.
- [11] 陈然璟, 曹越, 司凤琪. 基于PC-GWO的高背压抽凝热电联供系统负荷优化研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(2): 18-25.
- Chen R J, Cao Y, Si F Q. Research on load optimization of high backpressure extraction CHP units based on PC-GWO[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(2): 18-25.
- [12] 张德利, 庞春风. 基于鸟群优化算法的机组多供热方式优化分配研究[J]. 汽轮机技术, 2024, 66(4): 253-257.
- Zhang D L, Pang C F. Research on optimal distribution of multiple heating modes of unit based on bird optimization algorithm[J]. Turbine Technology, 2024, 66(4): 253-257.
- [13] 文珏, 施宏波, 薛康康, 等. 基于粒子群算法的多机组供热模式耦合热电负荷分配优化[J]. 热力发电, 2025, 54(12): 94-101.
- Wen J, Shi H B, Xue K K, et al. Optimization of thermoelectric load distribution in coupled multi-unit heating modes based on particle swarm algorithm[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(12): 94-101.
- [14] 丁衡, 胡慧, 曹越, 等. 基于改进灰狼算法的热电联供系统负荷优化分配策略研究[J]. 动力工程学报, 2023, 43(11): 1515-1522.
- Ding H, Hu H, Cao Y, et al. Research on load optimal distribution strategy of combined heat and power system based on improved gray wolf algorithm[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(11): 1515-1522.
- [15] 李军, 陈利, 李华东, 等. 基于遗传算法的多机型多热源复杂热电负荷优化分配方法[J]. 节能技术, 2021, 39(2): 185-188.
- Li J, Chen L, Li H D, et al. Optimal allocation of complex thermal and electrical loads with multiple models and multiple heat sources based on genetic algorithms[J]. Energy Conservation Technology, 2021, 39(2): 185-188.
- [16] 李梦辉, 郭琳琳, 刘磊, 等. 多级抽汽热电联产机组的负荷优化分配方法[J]. 汽轮机技术, 2025, 67(4): 303-307.
- Li M H, Guo L L, Liu L, et al. Load optimization

distribution method of combined heat and power units with multi-stage extraction steam[J]. Turbine Technology, 2025, 67(4): 303-307.

收稿日期: 2026-01-08。

修回日期: 2026-04-09。

作者简介:



于红伟

于红伟(1983), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统优化, 360642293@qq.com;



刘延太

刘延太(1971), 男, 高级工程师, 研究方向为安全生产管理, pwplyt@sina.com;



许道春

许道春(1977), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统优化, 43279998@qq.com;



李建军

李建军(1982), 男, 工程师, 研究方向为电气工程及其自动化, 18566369031@126.com;



涂垚杰

涂垚杰(1989), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高温工业过程节能减排, tuyaojie@hust.edu.cn;



张燕平

张燕平(1971), 女, 博士, 教授, 研究方向为热力系统优化, zyp2817@hust.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)