

# 热电联产电站复杂供热系统的热电负荷智能分配研究

高新勇<sup>1</sup>, 郑立军<sup>1</sup>, 喻珮<sup>2</sup>, 刘明<sup>2</sup>

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 热电联产是提升燃煤发电机组能量利用效率的有效手段, 通过热电联产电站的热电负荷优化分配可提升热电联产电站的综合能量利用效率。本文针对5台热电联产机组和2个供热热网构成的热电联产电站进行研究, 获得了不同类型热电联产机组的变工况运行特性和能耗特性, 采用粒子群智能算法建立了热电联产电站运行优化模型, 以电站总煤耗量最低为优化目标开展了两个热网的供热优化。结果表明: 在不同的对外电热负荷量下, 相比于现有平均分配等常用负荷分配方式, 采用粒子群算法得到的优化分配结果可以使全厂总煤耗量降低约3.1~13.6 t/h, 占各自总煤耗量的0.97%~2.27%。

**关键词:** 热电联产; 多机组; 负荷分配; 能耗分析; 粒子群算法

中图分类号: TK212 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.08.010

[引用本文格式] 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 Xinyong, ZHENG Lijun, YU Pei, 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.

## Research on Intelligent Scheduling of Heat and Power Loads for Complex Heating System of a Cogeneration Power Station

GAO Xinyong<sup>1</sup>, ZHENG Lijun<sup>1</sup>, YU Pei<sup>2</sup>, LIU Ming<sup>2</sup>

(1. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310030;  
2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)

**Abstract:** Cogeneration is an effective way to enhance the energy utilization efficiency of coal-fired power units. The comprehensive energy utilization efficiency of cogeneration power plants can be improved through the optimal scheduling of heat and power loads of cogeneration power plants. In this paper, the operational and energy consumption characteristics of different types of cogeneration units under variable working conditions were obtained for the cogeneration power station composed of five cogeneration units and two heating networks. The operation optimization model of the cogeneration power station was developed with particle swarm intelligence algorithm, and the heating optimization of two heating networks was carried out with the minimum total coal consumption as the optimization goal. The results show that under different external power and heating loads, compared with the existing common load scheduling methods such as average distribution, the optimal scheduling results obtained by the particle swarm optimization algorithm can reduce the total coal consumption of the whole plant by about 3.1-13.6 t/h, accounting for 0.97%-2.27% of each total coal consumption.

**Key words:** cogeneration, multiple units, load distribution, energy consumption analysis, particle swarm algorithm

## 引言

随着风能、太阳能等可再生能源的快速发展,我国的电源结构正在向着清洁低碳的方向转型。截至2022年底,火电装机占比仅为51.9%,风能、太阳能装机占比分别达到14.2%、15.3%,比上年增长11.2%、28.1%<sup>[1]</sup>。然而,风能、太阳能发电出力的不确定性和随机性<sup>[2]</sup>,使电力系统电力电量平衡面临极大挑战,燃煤等常规机组被大量替代也会增加电网的安全风险<sup>[3]</sup>。为了适应能源结构的新变化并保证新能源嵌入后电网的稳定运行,目前的热电联产电厂不仅需要提高自身经济性,还需要提高机组灵活性以应对调峰任务<sup>[4]</sup>。

热电联产机组参与调峰时,合理进行多机组统筹调配对提高全厂热经济性具有重要意义。在对多机组进行负荷分配时,首先需要了解不同类型机组的变工况特性以及能耗特性。最典型的热电联产形式是抽汽供热,为了进一步挖掘节能潜力可以对汽轮机进行改造,低压缸零出力改造对可再生能源的消纳效果更好,高背压改造的节能效果更好<sup>[5]</sup>,这3类常见热电联产机组的运行特性和热经济性均已得到广泛研究<sup>[6-8]</sup>。Chen等人<sup>[9]</sup>分析了300 MW高背压热电联产机组的节能机理和热电耦合特性,高背压改造通过降低排汽能量损失和抽汽流量,提高换热过程的焓效率,进而改善机组性能。高背压机组具有更高的能源利用效率,常与抽凝机组联合运行,Zhao等人<sup>[10]</sup>为进一步加强高背压抽凝机组的运行优势,利用排汽加热空气和冷凝水,提出一种深度蒸汽余热回收机制,系统供热能力提高了16.26%。Ma等人<sup>[11]</sup>提出了一种新型超高压背压串级供热方案,通过调节抽汽流量或汽轮机背压来满足不同的供热需求,在整个采暖期内,平均供热煤耗率仅为5.30 kg/GJ,共节约标准煤7.2万t。

其次,需要从整个热电联产电站的角度出发,进行厂级运行优化,提高整体运行灵活性<sup>[12]</sup>。常使用遗传算法<sup>[13]</sup>、模拟退火算法<sup>[14]</sup>、粒子群优化算法<sup>[15]</sup>、灰狼算法<sup>[16]</sup>以及动态寻优法<sup>[17]</sup>等智能算法来解决多机组分配问题。吴涛等人<sup>[18]</sup>建立了热电联产机组煤耗率模型,并采用自适应遗传算法对机

组热电负荷进行智能分配。王珊等人<sup>[19]</sup>建立了能耗分析模型,采用粒子群算法对双机组负荷分配进行优化,全厂总煤耗量降低49.17 t/d。陈然璟等人<sup>[20]</sup>采用灰狼算法对双机600 MW高背压抽凝热电联产系统进行运行优化,机组热耗平均下降了117.96 GJ/h。这类多目标负荷优化分配问题求解复杂,常配合使用以提高算法速率和有效性<sup>[21-24]</sup>。

综上所述,国内外学者在热电厂负荷优化分配方面已经进行了大量研究,但主要分析了单一类型双机组的智能算法优化分配,而实际运行的热电厂中往往存在多台多类型机组,对智能优化算法的使用提出了更多要求。本文对5台不同功率、不同供热类型机组进行了能耗分析,建立机组煤耗量计算模型以简化变工况计算程序,嵌入粒子群算法中以提高算法的运行效率,然后在热电厂不同负荷量下对5台机组的热电负荷进行了优化分配。

## 1 热电联产电站及供热系统概况

### 1.1 热电联产电站概况

本文以某热电厂为例开展研究。该热电厂由5台热电联产机组构成,其中,1号、2号和3号机组为亚临界、一次中间再热、单轴、双缸双排汽、凝汽式汽轮机,4号和5号机组为超临界、一次中间再热、单轴、三缸四排汽、直接空冷凝汽式汽轮机。供热改造后,1号、2号和4号机组为抽汽供热方式,3号机组为低压缸零出力供热方式,5号机组为抽汽及高背压乏汽供热方式。各机组主要设计参数见表1。

表1 各机组主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of each unit

参 数	机 组		
	1/2 号	3 号	4/5 号
额定功率/MW	352.0	315.0	620.0
最大功率/MW	389.0	336.6	677.2
额定主蒸汽流量/t·h <sup>-1</sup>	1 056.68	944.55	1 879.50
额定主蒸汽压力/MPa	17.476	16.670	24.200
额定主蒸汽温度/℃	538	538	566
额定再热压力/MPa	2.999	3.028	4.088
额定再热温度/℃	538	538	566
额定给水温度/℃	273.0	269.1	285.1
额定排汽压力/kPa	4.9	5.2	16.0

## 1.2 电厂供热系统概况

该电厂供热系统原理图如图 1 所示。同时对 A、B 两个热网供热, A 热网热负荷由 1 号和 2 号机组承担, B 热网热负荷由 2 号、3 号、4 号和 5 号机组承担。两热网回水首先进入 5 号机组高背压乏汽凝汽器, 加热后的出水在热网加热器中二次加热后对外供出, 乏汽优先承担部分热负荷, 其余热负荷由对应机组的中排抽汽提供。

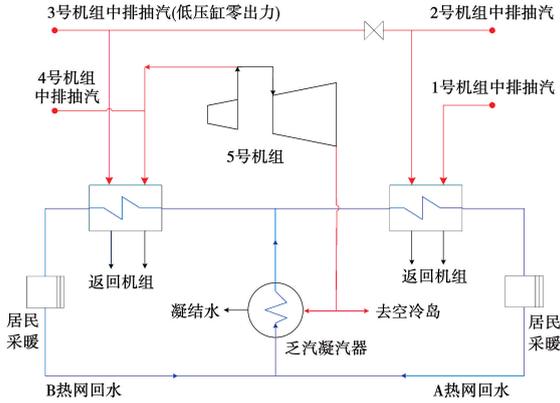


图 1 电厂供热系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of power plant heating system

## 2 机组的能耗特性

### 2.1 供热机组能耗计算模型

在一定的热负荷  $Q$  下, 热电联产机组电负荷  $P$  存在相应的限制范围, 从而可以得出机组在正常运行中的热电负荷限制区域。不同类型热电联产机组的热电负荷运行特性如图 2 所示。图中,  $P_{\max}$  和  $P_{\min}$  分别为机组最大和最小电负荷,  $Q_{\max}$  为机组能够达到的最大热负荷,  $Q_{\text{med}}$  为机组最小电负荷对应的热负荷。在图 2(a) 中,  $ABCD$  区域为抽汽供热机组运行范围, 线段  $AB$ ,  $CD$  和  $BC$  分别表示锅炉最大蒸发量线、锅炉最小蒸发量线以及低压缸最小凝汽流量线; 线段  $EF$  为低压缸零出力线, 相比于抽汽供热机组, 低压缸零出力机组最大供热能力提高。在图 2(b) 中, 线段  $GH$  和  $HJ$  分别表示锅炉最大蒸发量线和低压缸最小凝汽流量线; 线段  $GI$  为乏汽供热, 对应乏汽热负荷  $Q_{\text{fq}}$ , 限制了机组的最低热负荷。

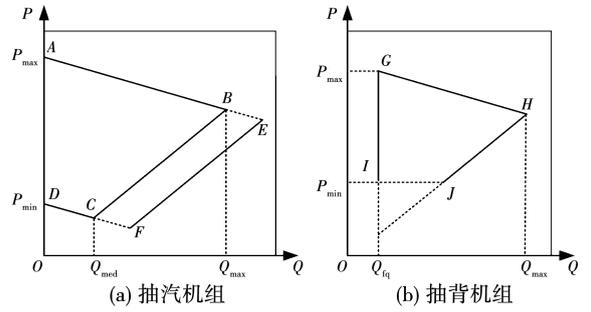


图 2 不同类型热电联产机组热电特性图

Fig. 2 Thermoelectric characteristics diagrams of different types of cogeneration units

通过变工况计算得到各机组实际运行区域, 对边界线进行拟合, 得到机组电负荷  $P_i$  与热负荷  $Q_i$  之间的函数关系式:

$$P_i = f(Q_i) \quad (1)$$

煤耗量反映热电联产机组供热的热经济性, 已知机组热负荷和电负荷, 可以得到该机组的煤耗量, 三者间存在一定的函数关系式, 即:

$$B_i = f(P_i, Q_i) \quad (2)$$

利用最小二乘法进行数学拟合, 借助 MATLAB 工具可以得到机组煤耗量  $B_i$  与电负荷  $P_i$ 、热负荷  $Q_i$  之间详细的函数关系:

$$B_i = \sum_{m=0}^s \sum_{n=0}^m k_{mn} P_i^n Q_i^{m-n} \quad (3)$$

式中:  $B_i$ —第  $i$  个机组的煤耗量,  $t/h$ ;  $P_i$ —第  $i$  个机组的电负荷,  $MW$ ;  $Q_i$ —第  $i$  个机组的热负荷,  $MW$ ;  $s$ —拟合函数中最高次项的次数;  $m$  和  $n$ —非负整数,  $m = \{0, 1, \dots, s\}$ ,  $n = \{0, 1, \dots, m\}$ ;  $k_{mn}$ —各项前系数。

3 号机组采用“以热定电”的低压缸零出力供热方式, 发电量由供热量决定, 满足式(1), 代入式(3)可简化函数关系式, 煤耗量仅为热负荷的函数, 满足  $B_3 = f(Q_3)$ 。

### 2.2 供热机组能耗特性

不同类型机组的煤耗量与热、电负荷之间的函数关系有所差异, 通过式(3)拟合得到如图 3 所示关系图。

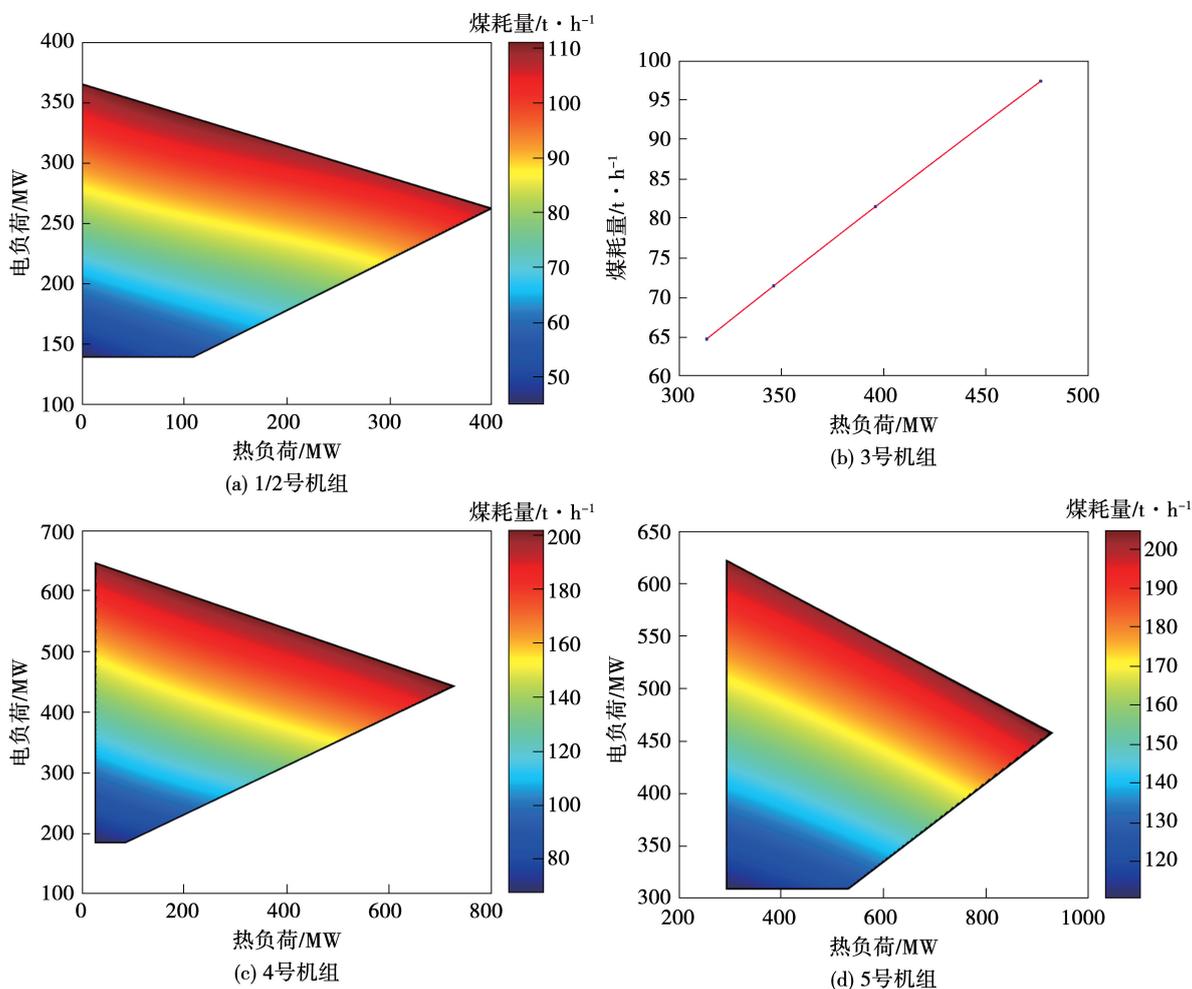


图3 机组煤耗量与热、电负荷关系图

Fig. 3 Relationship diagrams of coal consumption of units and heat and power loads

可以看到,各机组煤耗量随电负荷、热负荷的变化趋势基本一致,当电负荷不变时,热负荷越大机组煤耗量越大,当热负荷不变时,电负荷越大机组煤耗量越大。对于1号和2号352 MW级抽汽供热机组,热负荷最大可达397.30 MW,此时电负荷为262.34 MW,煤耗量为108.32 t/h,最高和最低煤耗量分别为44.92和111.44 t/h。3号315 MW级机组采用低压缸零出力进行热电解耦,可以降低机组发电量,有助于促进新能源消纳,而供热能力提高,能耗降低,热负荷调节范围可达313.88~476.80 MW,其煤耗量仅与热负荷有关,热负荷越大煤耗量越大,煤耗量最大为97.34 t/h。4号和5号机组同为620 MW级抽汽供热机组,4号机组最大热负荷为715.92 MW,煤耗量最高达到202.18 t/h。5号机组增加了高背压供热,在固定背压下,乏汽供热量维持在296.78 MW,最大供热量可达925.69 MW,

此时电负荷为457.68 MW。5号机组相比于4号机组扩大了热负荷调节范围,在相同负荷条件下煤耗量大幅降低。

综上所述,热负荷、电负荷越大,煤耗量也越大,但不同机组合适的热电负荷运行区域不同,在相同热电负荷下不同机组的热经济性不同,因而存在一定的优化空间。通过对各机组承担的热电负荷进行适当分配,可以使每台机组都达到较为合适的负荷状态,进而使全厂综合煤耗最低,提高全厂热经济性。

### 3 机组热电负荷分配的粒子群优化

#### 3.1 粒子群算法优化模型

##### 3.1.1 标准粒子群优化算法

粒子群算法(PSO)源于对鸟群觅食行为的研究。在标准粒子群算法中,单个粒子通过跟踪个体

最优适应度值  $p_{\text{best}}$  和群体最优适应度值  $g_{\text{best}}$  来更新自身的位置和速度,通过逐次迭代收敛到最优适应度值。粒子变量的速度和位置更新公式<sup>[25]</sup>为:

$$v_{i,d}^{(k+1)} = w^{(k+1)} v_{i,d}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{i,d}^{\text{best}} - s_{i,d}^{(k)}) + c_2 r_2 (g_d^{\text{best}} - s_{i,d}^{(k)}) \quad (4)$$

$$x_{i,d}^{(k+1)} = x_{i,d}^{(k)} + v_{i,d}^{(k+1)} \quad (5)$$

式中:  $v_{i,d}^{(k)}$ —第  $i$  个粒子第  $d$  维变量在第  $k$  次迭代中的速度;  $p_{i,d}^{\text{best}}$ —第  $i$  个粒子最优适应度值的第  $d$  维变量;  $s_{i,d}^{(k)}$ —第  $i$  个粒子第  $d$  维变量在第  $k$  次迭代中的位置;  $g_d^{\text{best}}$ —第  $k$  次迭代中群体最优适应度值的第  $d$  维变量;  $r_1$  和  $r_2$ —(0,1) 内的随机数;  $x_{i,d}^{(k)}$ —第  $i$  个粒子第  $d$  维变量在第  $k$  次迭代中的位置;  $w^{(k)}$ —惯性权重,且  $w^{(k)} = w_{\text{max}} - (w_{\text{max}} - w_{\text{min}}) \frac{k}{K}$  ( $w_{\text{max}}, w_{\text{min}}$  为设定的最大和最小惯性权重值,  $K$  为设定的总迭代次数,  $k$  为迭代次数);  $c_1$  和  $c_2$ —学习因子。

### 3.1.2 带有约束的粒子群优化算法

标准粒子群优化算法常用于解决无约束优化问题,而实际热电厂的多机组统筹优化分配往往存在许多约束条件。惩罚函数法是处理约束问题的常用方法,其基本思想是将约束条件的违反度作为惩罚项加入到目标函数中构造带有惩罚项的适应度函数<sup>[26-27]</sup>,从而将约束优化问题转换为无约束的优化问题,再利用标准粒子群算法求解。

根据惩罚函数法构造的带有惩罚项的适应度函数为:

$$\text{Fitness}(x) = f(x) + g(x) \quad (6)$$

式中:  $f(x)$ —优化问题的目标函数;  $g(x)$ —惩罚函数。

本文采用的惩罚函数<sup>[28]</sup>为:

$$g(x) = \sum C \times G_j(x) \quad (7)$$

式中:  $C$ —惩罚系数,本文取定值  $10^4$ ;  $G_j(x)$ —有  $j$  个约束条件的优化问题粒子违反约束  $j$  的程度。

$$G_j(x) = \begin{cases} \max\{0, s_j(x)\}, & s_j(x) \leq 0 \\ \max\{0, |h_j(x) - e|\}, & h_j(x) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $s_j(x)$ —不等式约束;  $h_j(x)$ —等式约束;  $e$ —等

式约束容忍值,取  $e > 0$ 。

### 3.1.3 优化目标

以电厂内多台热电联产机组的总煤耗量(粒子群算法适应度)最小为优化目标,其目标函数为:

$$B = \sum_{i=1}^5 B_i \quad (9)$$

式中:  $B$ —多台热电联产机组的总煤耗量, t/h;  $B_i$ —第  $i$  台机组的总煤耗量, t/h。

### 3.1.4 约束条件

#### (1) 发电平衡约束

各热电联产机组的总发电量等于热电厂向外界提供的电负荷,即:

$$P = \sum_{i=1}^5 P_i \quad (10)$$

式中:  $P$ —外界总电负荷, MW;  $P_i$ —第  $i$  台机组的发电量, MW。

#### (2) 供热平衡约束

各热电联产机组的总供热量等于热电厂向外界提供的热负荷,本文实例热电厂向 A, B 两个热网供热,分别满足供热平衡约束,即:

$$Q_A = Q_1 + Q_{2A} \quad (11)$$

$$Q_B = Q_{2B} + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

式中:  $Q_A, Q_B$ —A, B 两热网的总热负荷, MW;  $Q_{2A}, Q_{2B}$ —2 号机组对 A, B 热网的供热负荷, MW。

#### (3) 运行域约束

根据上述粒子群算法优化过程,结合热电厂实际情况,在考虑各类型机组供热特性和运行约束的基础上,建立适用于复杂供热系统的优化模型。机组要保持正常运行,其热电负荷有一定的限制区域,运行区域的边界线满足式(1),作为热电负荷优化分配的不等式约束。

### 3.1.5 适用于电厂的粒子群优化模型

以多机组总煤耗量为优化目标,以各机组电负荷、热负荷为优化参数,以热电厂对外供热、发电平衡和各机组运行域为约束条件,采用粒子群算法求解多机组热电负荷最优分配问题的优化流程如图 4 所示。

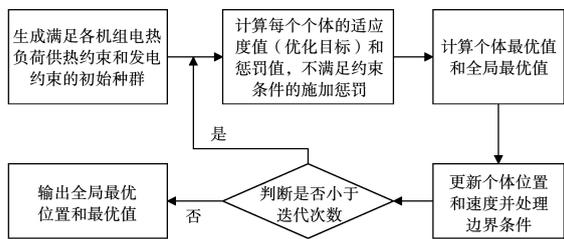


图 4 粒子群优化模型流程图

Fig. 4 Flow chart of particle swarm optimization model

### 3.2 热电负荷优化结果

面对调峰需求,热电厂对外提供的热负荷和电负荷总量会发生变化,为了探究粒子群优化算法在热电厂不同的负荷总量下的普遍性,选取以下 3 种不同的负荷总量进行粒子群优化:(1) 电负荷 1 500 MW,A 热网热负荷 500 MW,B 热网热负荷 1 320 MW;(2) 电负荷 1 200 MW,A 热网热负荷 450 MW,B 热网热负荷 920 MW;(3) 电负荷 1 000 MW,A 热网热负荷 300 MW,B 热网热负荷 750 MW。

该热电厂的热电负荷历史调配具有以下特点:2 号机组优先对 A 热网供热,是 B 热网的备用热源;5 号机组优先进行乏汽供热,必要时进行抽汽供热进一步增大对外供热能力。

在多机组热电联产系统中,热电负荷平均分配给各机组是最常见的分配方案,遵循平均分配的基本原则,考虑热电联产电站的历史调配特点,选择以下 3 种负荷分配方式,与粒子群优化算法的计算结果进行对比分析:(1) 电热负荷基本平均分配;(2) A 热网热负荷由 1 号和 2 号机组平均分配,2 号机仅向 A 热网供热,B 热网由热经济性较好的 3 号低压缸零出力机组和 5 号高背压抽汽机组承担较多热负荷,电负荷平均分配;(3) 在方式 2 的基础上让 5 号机组仅乏汽供热,不足热负荷由 2 号机向 B 热网提供。

在不同负荷总量下,比较 4 种分配方式的优劣,不同分配方式下各机组热负荷占比情况和对应的总煤耗量分别如图 5 所示。由图 5 可知,虽然 5 号机组仅作为背压机使用时其煤耗量较低,但电厂总煤耗量相对较高,需要承担一定的抽汽热负荷才能提高整体热经济性。抽汽供热机组相比于高背压、低压缸零出力机组热经济性较差,因而可以适当降低

抽汽供热机组承担的负荷量,由热经济性较好的 3 号和 5 号机组承担更多负荷。

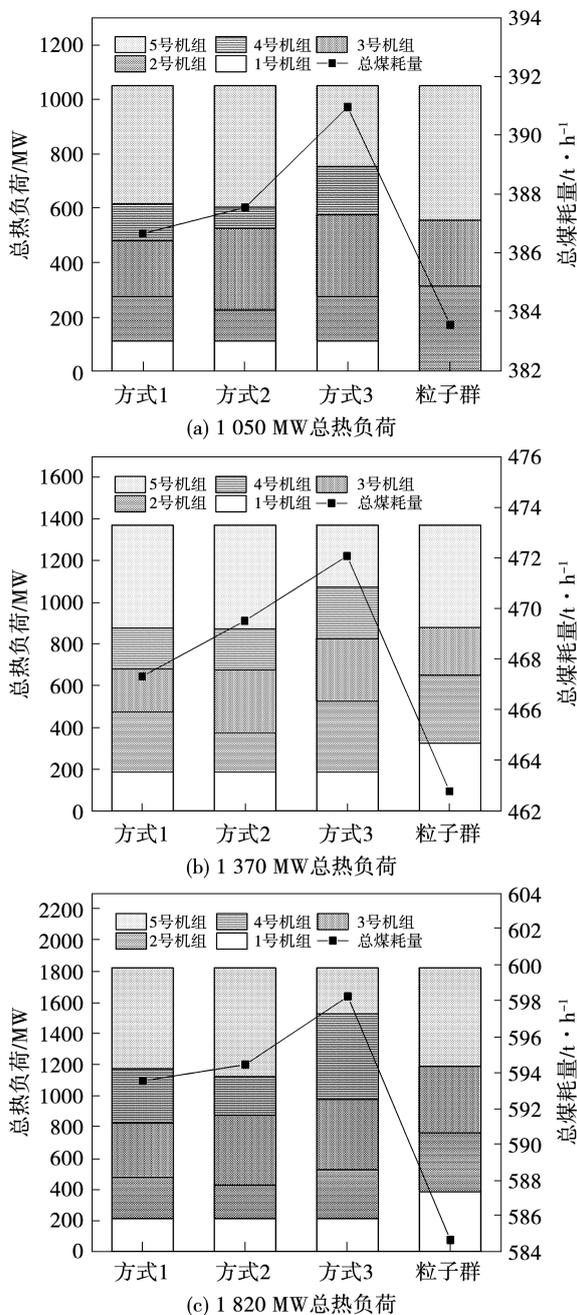


图 5 不同总热负荷下机组热电负荷分配及总煤耗量对比结果

Fig. 5 Comparison results of heat load distribution of units and total coal consumption under different total heat load conditions

在不同总负荷量下,分别计算这 3 种分配方式以及粒子群优化分配下的全厂总煤耗量以及平均发电煤耗率,得到表 2 中的结果。可以看到,粒子群优

化算法得到的热电负荷分配结果可以使全厂总煤耗量更低,此时全厂平均发电煤耗率也更低。相比于其他分配方式,粒子群优化分配可以使全厂总煤耗量降低 3.1 ~ 13.6 t/h,占各自总煤耗量的 0.97% ~ 2.27%,提高了热电联产电站整体的热经济性。

表 2 热电负荷分配结果

Tab. 2 Heat and power load distribution results

电负荷	负荷总量/MW		分配方式	总煤耗量/ t · h <sup>-1</sup>	平均发电 煤耗率/ g · (kW · h) <sup>-1</sup>
	A 热 负荷	B 热 负荷			
1 000	300	750	1	386.35	217.17
			2	387.55	198.40
			3	390.95	228.65
			粒子群	383.56	196.48
1 200	450	920	1	467.30	219.79
			2	469.50	212.69
			3	472.06	234.85
			粒子群	462.77	206.11
1 500	500	1 320	1	593.52	215.79
			2	594.43	210.05
			3	598.23	230.90
			粒子群	584.64	194.61

## 4 结 论

对于拥有多类型热电联产机组和复杂供热热网的热电厂,采用智能算法寻求最优分配方式有助于快速对各机组进行热电负荷统筹调配,并降低热电厂的总能耗。本文讨论了多类型机组的能耗特性,建立了总煤耗量与热负荷、电负荷之间的关系模型,采用粒子群算法对热电厂在不同总负荷量下的运行进行了热电负荷优化分配,得出以下主要结论:

(1) 各机组煤耗量随电负荷、热负荷的变化趋势基本一致,但不同机组合适的热电负荷运行区域不同,在相同热电负荷下的热经济性也不同,因而在多类型机组共同供热时,负荷分配存在一定的优化空间。

(2) 实际热电厂机组运行存在众多约束条件,采用惩罚函数法对标准粒子群算法进行适当改进,使之适应于实际工程应用。

(3) 在不同总负荷量下,通过粒子群优化算法得到的热电负荷分配方案均优于其他分配方案,可

以使全厂总煤耗量降低 3.1 ~ 13.6 t/h,占各自总煤耗量的 0.97% ~ 2.27%,提高了热电联产电站整体的热经济性。

## 参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 2022 年全国电力工业统计快报一览表 [R]. 北京:中国电力企业联合会,2023.  
China Electricity Council. List of 2022 national power industry statistical bulletin [R]. Beijing: China Electricity Council, 2023.
- [2] NUYTTEN T, CLAESSENS B, PAREDIS K, et al. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating [J]. Applied Energy, 2013, 104: 583 - 591.
- [3] 刘永奇, 陈龙翔, 韩小琪. 能源转型下我国新能源替代的关键问题分析 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 515 - 523.  
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515 - 523.
- [4] 王金星. 大型燃煤热电联产系统研究现状和展望 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 90 - 98.  
WANG Jinxing. Research status and prospect for large coal-fired combined heat and power generation system [J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(6): 90 - 98.
- [5] WANG Congyu, SONG Jiwei, YOU Daning, et al. Combined heat and power plants integrated with steam turbine renovations: Optimal dispatch for maximizing the consumption of renewable energy [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 258: 115561.
- [6] 李代智, 周克毅, 徐啸虎, 等. 600 MW 火电机组抽汽供热的热经济性分析 [J]. 汽轮机技术, 2008, 50(4): 282 - 284.  
LI Dai zhi, ZHOU Keyi, XU Xiaohu, et al. Thermoeconomic analysis for a coal-fired 600 MW CHP power plant [J]. Turbine Technology, 2008, 50(4): 282 - 284.
- [7] 鄂志君, 张利, 杨帮宇, 等. 低压缸零出力实现热电联产机组热电解耦与节能的理论研究 [J]. 汽轮机技术, 2019, 61(5): 383 - 386, 391.  
E Zhijun, ZHANG Li, YANG Bangyu, et al. Theoretical study on heat-electricity decoupling and energy saving of low-pressure cylinder zero output renovation of heat and power cogeneration units [J]. Turbine Technology, 2019, 61(5): 383 - 386, 391.
- [8] 吕凯, 李杰, 安江涛, 等. 330 MW 高背压供热机组热力特性研究 [J]. 汽轮机技术, 2019, 61(1): 59 - 62, 66.  
LYU Kai, LI Jie, AN Jiangtao, et al. Thermodynamic characteristics of a 330 MW unit with high back-pressure circulating water heating [J]. Turbine Technology, 2019, 61(1): 59 - 62, 66.
- [9] CHEN Heng, XIAO Yao, XU Gang, et al. Energy-saving mechanism and parametric analysis of the high back-pressure heating process in a 300 MW coal-fired combined heat and power unit

- [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 829 - 840.
- [10] ZHAO Shifei, GE Zhihua, HE Jie, et al. A novel mechanism for exhaust steam waste heat recovery in combined heat and power unit[J]. Applied Energy, 2017, 204: 596 - 606.
- [11] MA Liqun, GE Zhihua, ZHANG Fuxiang, et al. A novel super high back pressure cascade heating scheme with multiple large-scale turbine units[J]. Energy, 2020, 201: 117469.
- [12] WANG Congyu, SONG Jiewei, ZHU Lingkai, et al. Peak shaving and heat supply flexibility of thermal power plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 193: 117030.
- [13] MANOLAS D A, FRANGOPOULOS C A, GIALAMAS T P, et al. Operation optimization of an industrial cogeneration system by a genetic algorithm[J]. Energy Conversion and Management, 1997, 38(15): 1625 - 1636.
- [14] 温志刚, 王勇, 骆贵兵, 等. 模拟退火算法在供热机组负荷分配中的应用研究[J]. 热力发电, 2003, 32(7): 18 - 20.  
WEN Zhigang, WANG Yong, LUO Guibing, et al. A study on application of simulated annealing algorithm in load-distribution among heating-supplying units [J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(7): 18 - 20.
- [15] TIAN Dongping, SHI Zhongzhi. MPSO: Modified particle swarm optimization and its applications [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2018, 41: 49 - 68.
- [16] 胡慧, 曹越, 王广龙, 等. 600 MW 双机热电联供系统智能优化方法研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(10): 41 - 50.  
HU Hui, CAO Yue, WANG Guang-long, et al. Research on intelligent optimization for the combined heat and power system consisting of 600 MW double units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(10): 41 - 50.
- [17] 谢毅霏, 卫鹏杰, 张建伟. 动态寻优法在供热机组热电负荷优化分配中的应用[J]. 山西电力, 2014(1): 42 - 44.  
XIE Yifei, WEI Pengjie, ZHANG Jianwei. Application of dynamic optimization method in optimal distribution of heat and power load distribution of heating unit[J]. Shanxi Electric Power, 2014(1): 42 - 44.
- [18] 吴涛, 赖菲, 刘震, 等. 热电联产机组在深度调峰模式下的负荷智能分配[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 119 - 127.  
WU Tao, LAI Fei, LIU Zhen, et al. Intelligent load distribution of cogeneration units in deep peak regulation mode [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 119 - 127.
- [19] 王珊, 刘明, 严俊杰. 采用粒子群算法的热电厂热电负荷分配优化[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(9): 159 - 166.  
WANG Shan, LIU Ming, YAN Junjie. Optimizing heat-power load distribution of thermal power plants based on particle swarm algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(9): 159 - 166.
- [20] 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 Ranjing, CAO Yue, SI Fengqi. 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.
- [21] SEDIGHIZADEH D, MASEHIAN E, SEDIGHIZADEH M, et al. GEPSO: A new generalized particle swarm optimization algorithm [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2021, 179: 194 - 212.
- [22] PESARAN H A M, NAZARI-HERIS M, MOHAMMADI-LVATLOO B, et al. A hybrid genetic particle swarm optimization for distributed generation allocation in power distribution networks [J]. Energy, 2020, 209: 118218.
- [23] HE Yi, GUO Su, ZHOU Jianxu, et al. The many-objective optimal design of renewable energy cogeneration system [J]. Energy, 2021, 234: 121244.
- [24] 李涛, 曹越, 司凤琪. 基于 NSGWO 的火电厂负荷优化分配研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(1): 21 - 27.  
LI Tao, CAO Yue, SI Fengqi. Research on optimal load distribution of thermal power plants based on NSGWO [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(1): 21 - 27.
- [25] 阎昌琪, 刘成洋, 王建军. 新型混合粒子群算法在核动力设备优化设计中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(4): 534 - 538.  
YAN Changqi, LIU Chengyang, WANG Jianjun. Application of a new hybrid particle swarm optimization in the optimal design of nuclear power components [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(4): 534 - 538.
- [26] WANG Yong, CAI Zixing, ZHOU Yuren, et al. An adaptive tradeoff model for constrained evolutionary optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2008, 12(1): 80 - 92.
- [27] FARMANI R, WRIGHT J A. Self-adaptive fitness formulation for constrained optimization [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2003, 7(5): 445 - 455.
- [28] 甘敏, 彭辉. 一种新的自适应惩罚函数算法求解约束优化问题[J]. 信息与控制, 2009, 38(1): 24 - 28.  
GAN Min, PENG Hui. A new adaptive penalty function based algorithm for solving constrained optimization problems [J]. Information and Control, 2009, 38(1): 24 - 28.