

DOI: 10.7652/xjtuxb201909021

采用粒子群算法的热电厂热电负荷分配优化

王珊, 刘明, 严俊杰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了优化热电厂内多台机组的热电负荷分配以提高热电厂的经济效益,建立了热电联产机组能耗分析模型和基于粒子群算法的热电厂热电负荷优化分配模型,研究获得了某 330 MW 热电联产机组的运行区间及运行区间内能量利用效率和焓效率的分布规律,进而研究热电负荷分配对热电厂整体能耗特性的影响规律。结果表明:对于单台机组在供热机组的运行区间内,供热量是影响能量利用效率的主要因素,能量利用效率最大、最小值分别为 72.11% 和 34.08%,发电量是影响焓效率的主要因素,焓效率最大、最小值分别为 38.51% 和 29.97%;通过合理的热电负荷分配,热电厂总煤耗降低,焓效率提高。以某热电厂热电负荷边界为例,通过负荷分配优化,热电厂的总煤耗量降低了 49.17 t/d,发电标准煤耗率降低了 2.56 g/(kW·h)。

关键词: 负荷分配;热电联产;焓效率;粒子群算法

中图分类号: TK212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)09-0159-08

Optimizing Heat-Power Load Distribution of Thermal Power Plants Based on Particle Swarm Algorithm

WANG Shan, LIU Ming, YAN Junjie

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To optimize the heat-power load distribution of multiple units in thermal power plants and improve the economic benefits, an energy consumption analysis model of cogeneration unit and a heat-power load optimal distribution model of thermal power plant are developed based on particle swarm algorithm. The feasible operation area of a 330 MW cogeneration unit is obtained, and the distributions of energy efficiency and exergy efficiency in the feasible operation area are also obtained. The influence of heat-power load distribution on the overall energy consumption characteristics of the thermal power plant is then studied. The results show that heat load is the main factor affecting the energy utilization efficiency in the feasible operation area of a cogeneration unit, and the maximum and minimum energy utilization efficiencies are 72.11% and 34.08%, respectively; and power load is the main factor affecting the exergy efficiency, and the maximum and minimum exergy efficiencies are 38.51% and 29.97%, respectively. The total coal consumption of thermal power plant could be reduced and the total exergy efficiency could be improved through optimization of heat-power load distribution. The optimization on a thermal power plant shows that its total coal consumption is reduced by 49.17 tons per day, and the standard power-generation coal consumption rate is reduced by 2.56 g/(kW·h).

Keywords: load distribution; cogeneration; exergy efficiency; particle swarm algorithm

收稿日期: 2019-04-09。 作者简介: 王珊(1995—)女,硕士生;刘明(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51776146);国家重点基础研究发展规划资助项目(2018YFB0604405)。
网络出版时间: 2019-06-06 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190605.1619.006.html>

实现热电联产,同时满足社会的电、热负荷需求,是燃煤发电行业未来发展的主要方向之一,也是节能减排、提高燃煤电站能量利用效率的最有效手段^[1]。近年来,我国燃煤机组热电联产进入了一个快速发展时期,如何挖掘热电联产机组的节能潜力、降低发电成本具有重大意义^[2]。

热电联产机组的变工况特性与能耗特性是热电厂节能的基础。陈媛媛等利用等效焓降思想,建立了热电联产机组热经济性诊断方法^[3-5]。李代智等利用常规热平衡法对某 600 MW 供热机组不同供热抽汽方案进行能耗分析,表明再热冷段抽汽供热经济性较好^[6]。刘兆炼等通过历史用电数据和常见工况数据,拟合了供热机组的能耗曲线^[7-8]。吴龙采用改进的弗留格尔公式研究了供热机组的热力特性^[9]。Nesheim 等分析了常见的热经济性指标用于供热机组的差异^[10]。这些研究为热电联产机组能耗特性分析奠定了理论基础。

由于供热机组自身特性以及热电负荷之间的耦合关系,其热电负荷分配优化是一个多维不连续的非线性问题,约束条件较为复杂,目前很多学者研究了热电负荷分配的方法及优化算法。李俊涛等通过将供热机组划分为等效机组的方法建立了负荷优化调度模型^[11],李崇阳等提出一种将机组的热耗分解为热化发电部分和凝汽发电部分,从而将热电厂负荷的分配简化成为热负荷和电负荷两种相对独立的分配^[12-14]。张营帅等分别研究了遗传算法、多维动态规划算法、模拟退火算法、穷举法等优化算法在热电负荷分配中的应用^[15-19]。

综上所述,相较凝汽式机组,热电联产机组的能耗特性更为复杂,且目前大多数负荷分配研究将供热机组能耗拟合为经验公式,与实际机组有较大偏差,且未考虑电热负荷边界对热电负荷分配的影响。因此,本文以某热电厂为参考电厂,建立了供热机组能耗分析、焓分析及热电负荷优化模型,该优化模型考虑供热机组的电热特性,求解时直接在粒子群优化算法中嵌入供热机组变工况计算程序,以供热量和发电量为输入直接得出供热机组的煤耗,最后对某典型日热电负荷进行了优化分配。

1 数学模型

1.1 供热机组能耗计算模型

对于热电联产机组,在一定的供热量 Q 下,其发电量 P 有一定的限制范围,以单级抽汽式汽轮机为例,其电热特性图如图 1 所示。图中:线段 AB 、

BC 和 CD 分别表示主蒸汽流量最大线、低压缸最小凝汽流量线以及锅炉最小蒸发量线;线段 AB 的斜率 K_{AB} 表示最大进汽量下,增加单位供热量时热电联产机组发电量的减少量;线段 BC 的斜率 K_{BC} 表示低压缸保持最小凝汽流量时电功率或热功率的弹性系数;线段 CD 的斜率 K_{CD} 表示锅炉最小蒸发量下,多供出单位供热量时热电联产机组发电量的减少量。

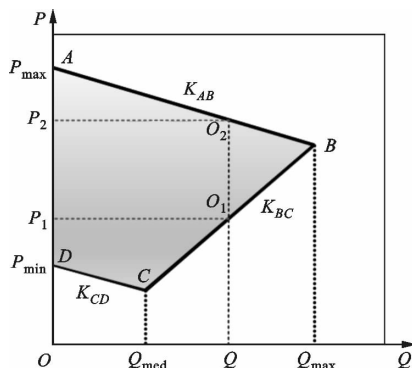


图 1 单级抽汽式汽轮机电热特性图

对于热电联产机组来说,机组的煤耗量 B_i 是发电量 P_i 和供热量 Q_i 的函数

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

该函数与热电联产机组能耗特性有关^[19],本文通过变工况计算获得机组的煤耗量,并将变工况模型嵌入粒子群优化方法中。

热电联产机组的能量利用效率 η_{en} 定义为输出能量与输入能量之比,可用下式计算

$$\eta_{en} = \frac{P_i + Q_i}{B_i Q_{LHV}} \quad (2)$$

式中 Q_{LHV} 为煤的低位发热量。

热电联产机组焓效率 η_{ex} 定义为机组的输出焓和输入焓之比,其输出焓由发电焓 E_{P_i} 和热量焓 E_{Q_i} 两部分组成,输入焓可用所消耗煤中的化学焓 E_{B_i} 表示,即

$$\eta_{ex} = \frac{E_{P_i} + E_{Q_i}}{E_{B_i}} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{P_i} &= P_i \\ E_{Q_i} &= E_{gi} - E_{hi} \\ E_B &= B_i Q_{HHV} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{gi} &= D_{Wi} [h_{gi} - h_0 - T_0 (s_{gi} - s_0)] \\ E_{hi} &= D_{Wi} [h_{hi} - h_0 - T_0 (s_{hi} - s_0)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: Q_{HHV} 为煤的高位发热量; E_{gi} 和 E_{hi} 分别为热网供水焓和热网回水焓; D_{Wi} 为热网水流量; h_{gi} 和 h_{hi} 分别为热网供水焓和回水焓; s_{gi} 和 s_{hi} 分别为热网供水

熵和回水熵; $T_0=293.15\text{ K}$; $P_0=0.1\text{ MPa}$; 下标 0 为环境条件。

1.2 优化模型

本文采用的优化算法为粒子群算法(PSO),其起源于鸟群捕食的行为。PSO 首先随机初始化种群,然后通过迭代收敛到最优值。在迭代过程中,粒子通过跟踪个体最优值 p_{best} 和全局最优值 g_{best} 来更新速度与位置。

粒子的速度和位置更新公式为

$$\left. \begin{aligned} v &= \omega v + c_1 \text{rand}(y)(p_{\text{best}} - x) + c_2 \text{rand}(y)(g_{\text{best}} - x) \\ x &= x + v \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: v 为粒子速度; ω 为惯性权重; x 为粒子当前位置; y 为 0~1 之间的随机数; c_1 、 c_2 是学习因子。

1.2.1 优化目标 本文以电厂内多台热电联产机组的煤耗量之和(适应度)最小为优化目标,其目标函数为

$$B = \sum_{i=1}^n B_i \quad (7)$$

式中 B_i 和 B 分别为第 i 台机组煤耗量和总煤耗量。

1.2.2 约束条件

(1)发电平衡约束。热电厂内多台热电联产机组的总发电量等于外界的电负荷,即

$$P_L = \sum_{i=1}^n P_i \quad (8)$$

式中: P_L 为外界的电负荷; P_i 为第 i 台机组的发电量。

(2)供热平衡约束。热电厂内多台热电联产机组总供热量等于外界的热负荷,即

$$Q_L = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (9)$$

式中: Q_L 为外界的热负荷; Q_i 为第 i 台机组的供热量。

(3)供热约束。每台热电联产机组的供热量存在一定的约束条件,不能超过总的热负荷,也不能超过每台热电联产机组的最大供热量,即

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq Q_i \leq Q_{\text{imax}} \\ 0 \leq Q_i \leq Q \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中 Q_{imax} 为第 i 台热电联产机组的最大供热量。

(4)发电约束。由前述可知,当热电联产机组的供热量一定时,其发电量也存在一定的限制范围。

当 $0 \leq Q_i \leq Q_{\text{imed}}$ 时

$$f_{(\text{CD})i}(Q_i) \leq P_i \leq f_{(\text{AB})i}(Q_i) \quad (11)$$

当 $Q_{\text{imed}} \leq Q_i \leq Q_{\text{imax}}$ 时

$$f_{(\text{BC})i}(Q_i) \leq P_i \leq f_{(\text{AB})i}(Q_i) \quad (12)$$

式中 Q_{imed} 表示第 i 台热电联产机组最小发电量下对应的机组供热量。

1.2.3 模型求解 本文采用的优化算法为标准粒子群算法,以两台机组为例,由于热电联产机组的发电量与供热量有一定的耦合关系,同时两台热电联产机组的发电量之间存在等式关系,故两台热电联产机组的供热量也存在等式关系,其模型求解的流程如图 2 所示。为此,首先生成第 1 台热电联产机组供热量的初始种群,再根据生成的第 1 台热电联产机组供热量计算第 1 台热电联产机组发电量的限制范围,在该限制范围内生成第 1 台热电联产机组发电量的初始种群。

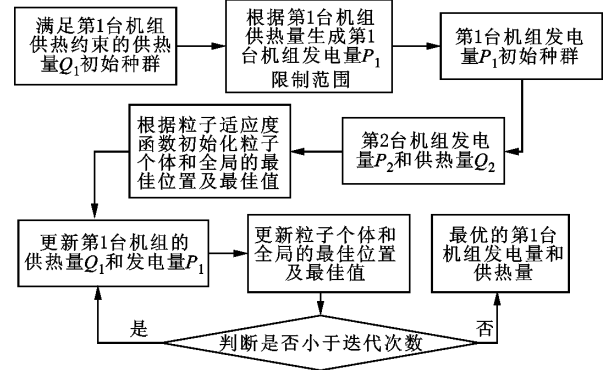


图 2 模型求解的流程图

对于第 2 台热电联产机组的发电约束以及供热约束的处理,本文采用惩罚函数法,如图 3 所示,对于不满足第 2 台热电联产机组发电约束和供热约束的粒子施加惩罚,使得两台热电联产机组的总煤耗量很大(适应度很大),从而达到优化的目的。

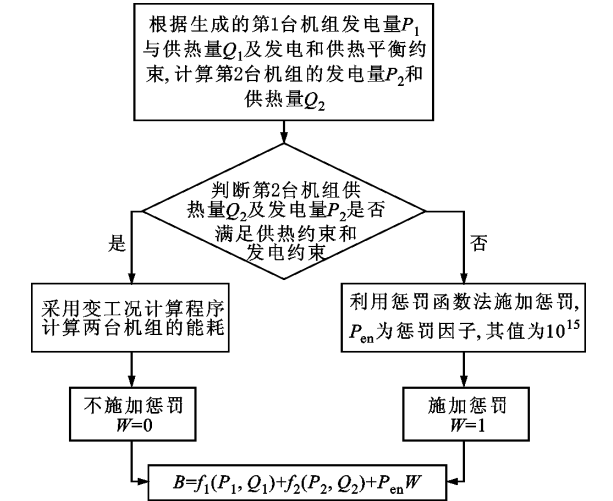


图 3 适应度计算流程图

2 实例机组及其能耗特性

2.1 实例机组

本文以某热电厂为例,该热电厂有两台 330 MW 热电联产机组,均为一次中间再热,供热抽汽均为中压缸排汽,锅炉为单炉膛、自然循环汽包炉。每台机组额定工况参数如表 1 所示,该热电联产机组其他参数如表 2 所示。设计煤种为霍林河煤,其低位发热量为 13 210 kJ/kg。

表 1 额定工况汽轮机参数

参数	数值
主蒸汽流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	960
功率/MW	330
主蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	540
主蒸汽压力/MPa	17.75
再热蒸汽温度/ $^{\circ}\text{C}$	540
再热蒸汽压力/MPa	3.802 7
排汽压力/MPa	0.004 9
供热抽汽压力/MPa	0.39

表 2 热电联产机组参数

参数	数值
最大发电功率/MW	358
最大供热功率/MW	360
K_{AB}	-0.283 6
K_{BC}	0.533 2
K_{CD}	-0.283 6

2.2 供热机组能耗特性

与纯凝汽式机组不同,热电联产机组的能耗不仅与发电量有关,同时也与热电联产机组的供热量有关,其能耗特性具有一定的复杂性。为此,本文计算了机组在其安全运行工作范围内的能量利用效率和焓效率的分布情况,如图 4、图 5 所示。

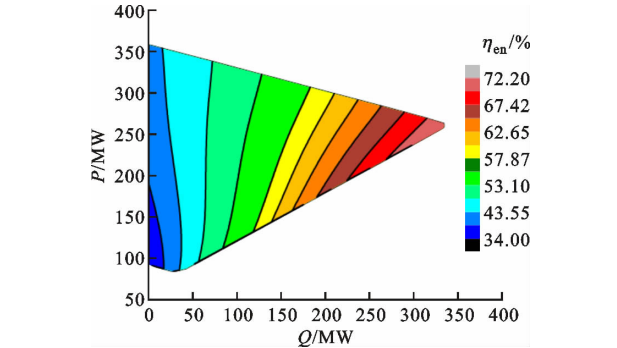


图 4 某 330 MW 供热机组的能量利用效率图

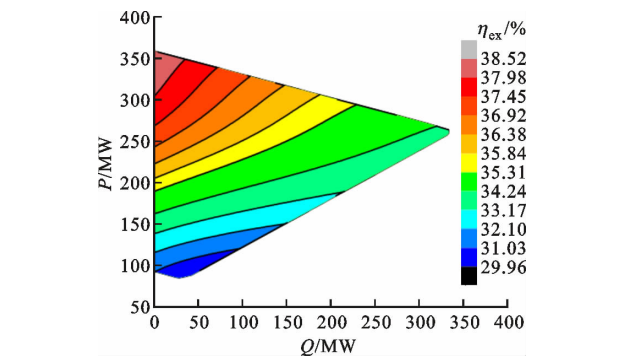


图 5 某 330 MW 供热机组的焓效率图

由图 4 和图 5 可知:当热电联产机组的供热量较大时,该机组整体的能量利用效率较高,且随着供热量增大,能量利用效率逐渐增大,然而此时热电联产机组的焓效率却不是最高的,焓效率最大的区域出现在机组的发电量最大的工况,且随着发电量的增大而增大;能量利用效率的最大值和最小值分别为 72.11% 和 34.08%,焓效率的最大和最小值分别为 38.51% 和 29.97%。

2.3 热电负荷分配对热电联产机组煤耗量的影响

本文对两台机组(总的热负荷和电负荷分别为 380 MW 和 360 MW)采用以下 4 种方式运行的煤耗量进行了计算:①热电负荷在两台机组间平均分配;②热负荷平均分配,电负荷非均匀分配;③电负荷平均分配,热负荷非均匀分配;④热负荷非平均分配,电负荷非均匀分配。

2.3.1 热负荷对于机组煤耗量的影响 当热电负荷均匀分配,即每台机组的电负荷和热负荷均分别为 180 MW 和 190 MW 时,经过机组变工况计算,得出每台机组的煤耗量为 155.9 t/h,热电厂(两台机组)的煤耗量为 311.8 t/h,焓效率为 33.028%。

为分析热负荷分配对热电厂煤耗量的影响规律,保持每台机组的电负荷不变,即两台机组电负荷均为 180 MW,第 1 台机组的热负荷在较平均分配时增加和减少 30 MW 的范围内变化,该运行方式下热电厂煤耗量以及焓效率的计算结果如图 6、图 7 所示。

由图 6 可知:当第 1 台热电联产机组的热负荷升高一定量时,其煤耗量也升高,而第 2 台热电联产机组的热负荷随第 1 台热电联产机组热负荷升高而降低,第 2 台热电联产机组的煤耗量降低;第 2 台热电联产机组的煤耗降低量大于第 1 台热电联产机组的煤耗增加量,即热电厂总煤耗量是降低的。

由图 7 可知,当热负荷在两台热电联产机组间

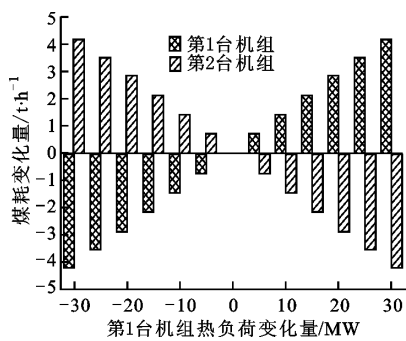


图 6 第 1 台机组热负荷变化时机组的煤耗变化量

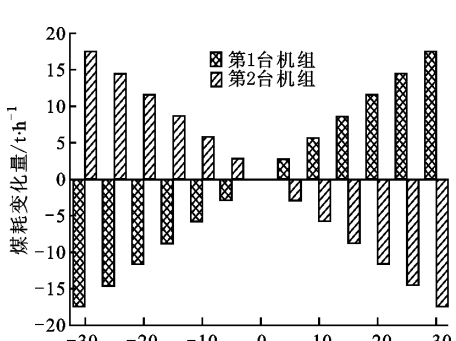


图 8 第 1 台机组电负荷变化时机组的煤耗变化量

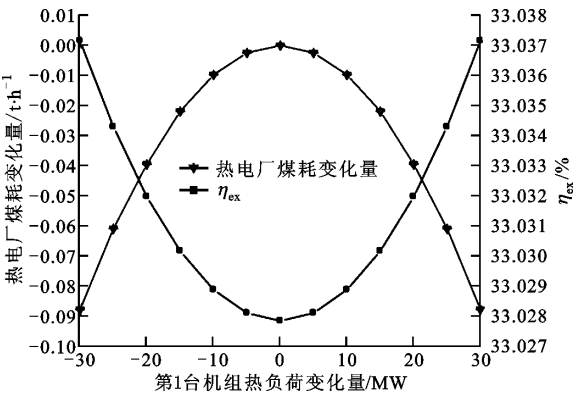


图 7 第 1 台机组热负荷变化时热电厂的煤耗变化量和焓效率

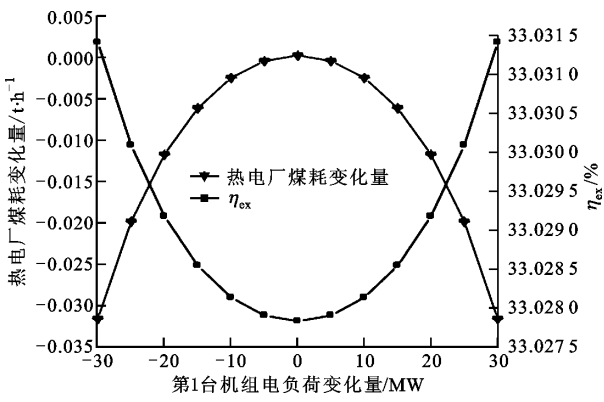


图 9 第 1 台机组电负荷变化时热电厂的煤耗变化量和焓效率

均匀分配时,热电厂(两台机组)的煤耗量最大,焓效率最小,而热负荷分配越不均匀,热电厂煤耗量越小,焓效率越大。出现上述现象的原因主要在于不同情况下热电厂总供热引起的低压缸凝汽流节流损失不一致,当电热负荷均匀分配时,总节流损失最大。第 1 台热电联产机组热负荷变化 30 MW 或 -30 MW,即第 1 台热电联产机组的热负荷为 220 MW 或 160 MW 时,较平均分配时热电厂煤耗的降低量为 0.088 t/h,焓效率为 33.037%。

2.3.2 电负荷对于热电联产机组煤耗的影响 为分析电负荷变化对热电联产机组煤耗量的影响规律,保持每台热电联产机组的热负荷平均分配,即两台热电联产机组热负荷均为 190 MW,第 1 台机组电负荷在较平均分配时增加和减少 30 MW 的范围内变化,该运行方式下热电厂煤耗量以及焓效率的计算结果如图 8、图 9 所示。

由图 8 可知,当第 1 台热电联产机组的电负荷升高一定量时,其煤耗量也升高,而第 2 台热电联产机组的电负荷随第 1 台热电联产机组电负荷升高而降低,相应的第 2 台热电联产机组的煤耗量降低,且第 2 台热电联产机组的煤耗降低量大于第 1 台热电联产机组的煤耗增加量,即热电厂总煤耗量是降低的。

由图 9 可知,当电负荷在两台热电联产机组间均匀分配时,热电厂煤耗量最大,焓效率最小,而电负荷分配越不均匀,热电厂煤耗量越小,焓效率越大。出现该种现象的原因也是由于供热引起的低压缸凝汽流节流损失不同导致的。第 1 台热电联产机组电负荷变化 30 MW 或 -30 MW,即第 1 台热电联产机组的电负荷为 210 MW 或 150 MW 时,较平均分配时热电厂煤耗的降低量为 0.03 t/h,焓效率为 33.031%。

2.3.3 热电负荷变化对于热电联产机组煤耗的影响 以上研究了改变热负荷或电负荷单一因素对热电联产机组煤耗量的影响,同时改变两台机组的电负荷及热负荷,得到机组热负荷和电负荷双因素对机组煤耗量及焓效率的影响,计算结果如图 10、图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知,在热负荷为 380 MW、电负荷为 360 MW 下,热电负荷在两台机组间的分配方式不同,热电厂煤耗量最大相差 1.1 t/h 左右,焓效率相差 0.11% 左右。在热负荷和电负荷都平均分配的情况下,煤耗水平居中,煤耗量最低的点出现在第 1 台热电联产机组的电负荷和热负荷都很小

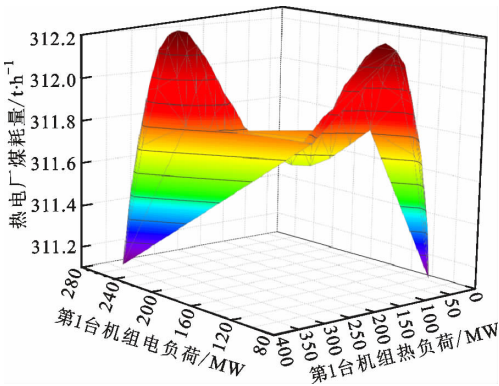


图 10 热电厂煤耗量对机组煤耗量的影响

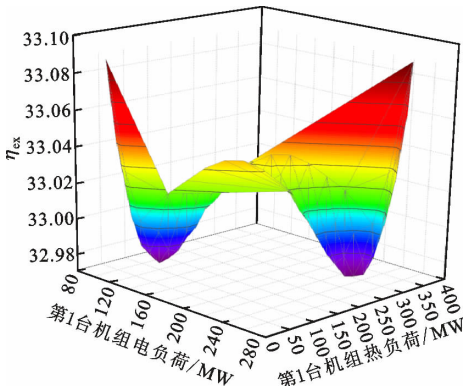


图 11 热电厂煤耗量对机组煤耗量的影响

(第 2 台机组的热负荷和电负荷大)或者第 1 台热电联产机组的电负荷和热负荷都很大(第 2 台热电联产机组的热负荷和电负荷小)的情况,热电厂的煤耗量最小为 311.2 t/h,对应的烟效率为 32.97%。

3 热电厂典型日负荷分配粒子群优化

由上述研究可知,在每台机组的能耗特性、运行区间约束下,通过电厂内机组间的热电负荷分配,有一定的优化节能空间。因此,利用上述所建数学模型,基于粒子群优化算法,对一天的热电负荷在两台机组间进行优化分配。表 3 为某典型日的热电负荷数据,图 12 为该典型日的电热负荷图。该热电厂原

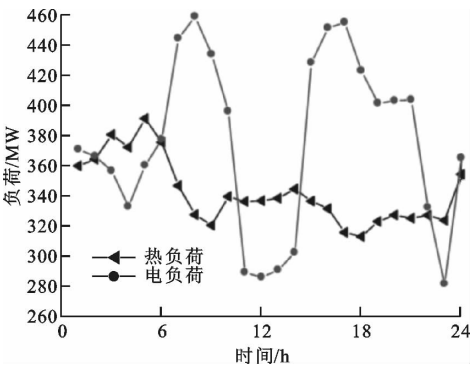


图 12 热电厂某典型日电热负荷图

来的运行方式为两台机组的热负荷和电负荷一致,即热电负荷在两台机组间平均分配。热电负荷分配优化结果如表 4 所示。优化前两台机组的总煤耗量为 7 559.2 t/d,而经过粒子群优化算法对热电负荷优化分配后,两台机组的总煤耗量为 7 510.03 t/d,相对降低了 49.17 t/d,其发电标准煤耗率由原来的 258.53 g/(kW·h)降低为 256.07 g/(kW·h),降低了 2.56 g/(kW·h)。

表 3 热电厂某典型日热电负荷数据

时间/h	热负荷/MW	电负荷/MW	时间/h	热负荷/MW	电负荷/MW
1	359.4	370.3	13	337.8	290.1
2	363.6	365.7	14	343.9	301.8
3	380.1	356.0	15	335.9	427.8
4	371.6	332.3	16	330.9	450.8
5	390.7	359.6	17	315.2	454.5
6	375.0	376.8	18	312.4	422.5
7	346.2	443.9	19	322.4	400.9
8	326.9	458.4	20	326.7	402.5
9	319.9	433.3	21	324.6	403.1
10	338.9	395.5	22	326.5	331.6
11	335.7	288.5	23	323.2	280.9
12	336.2	285.4	24	353.7	364.6

表 4 热电负荷分配优化结果

参数	优化前	优化后
总煤耗量/t·d ⁻¹	7 559.20	7 510.03
发电标准煤耗率/g·(kW·h) ⁻¹	258.53	256.07

4 结 论

对热电厂内多台供热机组进行热电负荷分配优化,有望降低热电厂的总能耗。为此,本文建立了供热机组能耗分析模型及热电负荷优化分配模型,以某热电厂为例,研究了参考机组的电热负荷特性,并对其安全运行区域进行了能量利用分析和焓分析,进而研究了热电负荷对机组煤耗量的影响,最后以某典型日热电负荷数据为例,进行热电负荷优化分配,得出以下主要结论。

(1)通过实例机组的能耗特性分析,对于单台供热机组,其能量利用效率随着供热量的增大而增大,供热量最大时达到最大值 72.11%,而机组的烟效率随着发电量的增大而增大,发电量最大时达到最大值 38.51%。

(2)研究了热负荷对两台机组的煤耗量及烟效率的影响,通过热电单一负荷分配可以降低热电厂总煤耗量,不同的热电负荷分配方式下,煤耗量最大相差 1.1 t/h,烟效率相差 0.11%。

(3)以某典型日为例,通过本文优化方法可使热电厂总煤耗量较平均分配时降低 49.17 t/d,其发电标准煤耗率由原来的 258.53 g/(kW·h)降低为 256.07 g/(kW·h),降低了 2.56 g/(kW·h)。

参考文献:

- [1] WU D W, WANG R Z. Combined cooling, heating and power: a review [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2006, 32(5): 459-495.
- [2] 代百乾, 张忠孝. 我国火力发电节煤和 CO₂/SO₂ 减排潜力探讨 [J]. 节能技术, 2008, 26(2): 163-167.
DAI Baiqian, ZHANG Zongxiao. Discussion on the potential of coal-fired power generation and CO₂/SO₂ emission reduction in China [J]. Energy Saving Technology, 2008, 26(2): 163-167.
- [3] 陈媛媛, 周克毅, 李代智, 等. 等效焓降法在大型机组抽汽供热的热经济性分析中的应用 [J]. 汽轮机技术, 2009, 51(6): 410-412.
CHEN Yuanyuan, ZHOU Keyi, LI Daizhi, et al. Application of equivalent enthalpy method in thermal economic analysis of steam extraction of large units [J]. Turbine Technology, 2009, 51(6): 410-412.
- [4] 张晓辉. 热电冷联产系统经济性诊断方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(11): 8-13.
ZHANG Xiaohui. Research on economic diagnosis method of thermo-electric cooling cogeneration system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(11): 8-13.
- [5] 徐曙, 曹赛. 复杂热力循环等效焓降法计算通式 [J]. 汽轮机技术, 2017, 59(1): 17-20.
XU Shu, CAO Sai. General formula for calculating the equivalent thermodynamic cycle of complex thermodynamic cycles [J]. Turbine Technology, 2017, 59(1): 17-20.
- [6] 李代智, 周克毅, 徐啸虎. 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 Daizhi, ZHOU Keyi, XU Xiaohui. Thermal economic analysis of extraction steam supply of 600 MW thermal power unit [J]. Turbine Technology, 2008, 50(4): 282-284.
- [7] 刘兆炼. 基于遗传算法的电力负荷分配方法 [J]. 科技创新与应用, 2016(8): 185.
LIU Zhaolian. Power load distribution method based on genetic algorithm [J]. Technological Innovation and Application, 2016(8): 185.
- [8] 柏春光, 万杰, 刘娇. 基于遗传算法的抽汽供热机组间的热电负荷分配优化研究 [J]. 节能技术, 2014, 32(3): 201-204.
BO Chunguang, WAN Jie, LIU Jiao. Research on optimization of thermoelectric load distribution between extraction heating units based on genetic algorithm [J]. Energy Saving Technology, 2014, 32(3): 201-204.
- [9] 吴龙, 袁奇, 刘昕. 供热机组热电负荷最佳分配方法分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(35): 6-12.
WU Long, YUAN Qi, LIU Xin. Analysis of optimal distribution method of thermal power load for heating units [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(35): 6-12.
- [10] NESHEIM S J, ERTESVAG I S. Efficiencies and indicators defined to promote combined heat and power [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3): 1004-1015.
- [11] 李俊涛, 冯霄. 供热机组的热电负荷分配 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 311-315.
LI Juntao, FENG Xiao. Heat and power load distribution of heating units [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 311-315.
- [12] 李崇祥, 文尚熙, 刘振. 供热机组热、电负荷经济调度研究 [J]. 热力发电, 2000(5): 13-14.
LI Chongxiang, WEN Shangxi, LIU Zhen. Research on economic dispatch of heat and power load for heating unit [J]. Thermal Power Generation, 2000(5): 13-14.
- [13] 李勤道, 严俊杰, 刘继平. 热电厂热电负荷分配方法的研究 [J]. 动力工程, 2001, 21(1): 1078-1081.
LI Qindao, YAN Junjie, LIU Jiping. Research on thermal power load distribution method in thermal power plant [J]. Power Engineering, 2001, 21(1): 1078-1081.
- [14] 严俊杰, 邢秦安, 林万超, 等. 热电厂最佳负荷分配方法的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(5): 99-104.
YAN Junjie, XING Qin'an, LIN Wanchao, et al. Research on optimal load distribution method of thermal power plant [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(5): 99-104.
- [15] 张营帅, 闫水保, 郑立军. 以变异为主导的遗传算法在热电厂负荷分配中的应用 [J]. 汽轮机技术, 2014, 50(4): 312-320.
ZHANG Yingshuai, YAN Shuibao, ZHENG Lijun.

- Application of mutation-oriented genetic algorithm in load distribution of thermal power plants [J]. Turbine Technology, 2014, 50(4): 312-320.
- [16] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4974-4985.
- YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4974-4985.
- [17] 王培红, 李琳, 董益华. 供热机组热电负荷优化算法研究 [J]. 汽轮机技术, 2004, 46(1): 37-39.
- WANG Peihong, LI Lin, DONG Yihua. Research on thermal power load optimization algorithm for heating unit [J]. Turbine Technology, 2004, 46(1): 37-39.
- [18] 温志钢, 王勇, 骆贵兵, 等. 模拟退火算法在供热机组中的负荷分配研究 [J]. 热力发电, 2003, 32(7): 18-20.
- WEN Zhigang, WANG Yong, LUO Guibing, et al. Research on load distribution of simulated annealing algorithm in heating unit [J]. Thermal Power Generation, 2003, 32(7): 18-20.
- [19] 蔚群超. 基于能效分析的热电联产机组最佳运行方式的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 23-30.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 149 页)

- [14] SIH R, DEGHANI F, FOSTER N R. Viscosity measurement on gas expanded liquid system-methanol and carbon dioxide [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2007, 41(1): 148-157.
- [15] KARIZNOVI M, NOUROZIEH H, ABEDI J. Experimental measurements and prediction of density, viscosity, and carbon dioxide solubility in methanol, ethanol, and 1-propanol [J]. Journal of Chemical Thermodynamics, 2013, 57: 408-415.
- [16] SIH R, ARMENTI M, MAMMUCARI R, et al. Viscosity measurements on saturated gas-expanded liquid system-ethanol and carbon dioxide [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2008, 43(3): 460-468.
- [17] SIH R, FOSTER N R. Viscosity measurement on saturated gas expanded liquid systems-acetone and carbon dioxide [J]. Journal of Supercritical Fluids, 2008, 47(3): 233-239.
- 杨友胜, 陈宇琪, 秦彬. 水液压微型阻尼孔的流量特性和气蚀特性 [J]. 2018, 52(2): 118-124. [doi:10.7652/xjtuxb201802018]
- 董新宇, 毕勤成, 贺宇峰, 等. 钛合金螺旋扁管换热器流阻与传热性能实验研究 [J]. 2018, 52(1): 14-19. [doi:10.7652/xjtuxb201801003]
- 陈东菊, 董丽华, 潘日, 等. 滑移及黏度对超精密气浮工作台性能影响研究 [J]. 2017, 51(11): 63-70. [doi:10.7652/xjtuxb201711010]
- 冯松, 毕勤成, 刘朝晖, 等. 采用双毛细管等流量法测量航空煤油 RP-3 的动力黏度 [J]. 2017, 51(3): 48-53. [doi:10.7652/xjtuxb201703009]
- 潘艳芝, 王栋, 巩大利, 等. 一种计量稠油中油气水三相流的方法和装置研究 [J]. 2016, 50(7): 140-144. [doi:10.7652/xjtuxb201607021]
- 毕胜山, 赵贯甲, 吴江涛, 等. HFE7000、HFE7200 的表面张力和黏度实验研究 [J]. 2015, 49(7): 1-5. [doi:10.7652/xjtuxb201507001]
- 杨竹强, 冯松, 潘辉, 等. 双毛细管式碳氢化合物黏度测量方法研究 [J]. 2015, 49(7): 37-41. [doi:10.7652/xjtuxb201507007]
- 樊祥山, 孙德魁, 王井山, 等. 利用分子理论估算四氢呋喃的热物理特性参数 [J]. 2015, 49(3): 44-49. [doi:10.7652/xjtuxb201503008]
- 宋渤, 徐龙起, 张桂铭, 等. 采用微传感器的黏/密度实验系统及其性能测试 [J]. 2014, 48(3): 44-48. [doi:10.7652/xjtuxb201403009]

(编辑 荆树蓉)

[本刊相关文献链接]

- 张焱, 朱山杉, 孙艳军, 等. 气液饱和溶液黏度实验系统及其性能测试 [J]. 2019, 53(7): 72-77. [doi:10.7652/xjtuxb201907011]
- 王小杰, 王晓坡, 朱山杉. 脂肪酸酯的自由体积理论黏度模型 [J]. 2018, 52(11): 9-14. [doi:10.7652/xjtuxb201811002]
- 吴建华, 雷博雯, 陈振华, 等. 丙烷旋转压缩机油池中矿物油和丙烷混合物的黏度测量与溶解度推算 [J]. 2018, 52(11): 81-85. [doi:10.7652/xjtuxb201811012]