

DOI: 10.19666/j.rlfed.202306096

基于聚类的火电机组深度调峰 负荷优化分配研究

任燕燕¹, 曹惠琳², 姜海岩¹, 喻良¹, 胡才宝¹, 郭晓桐¹, 周怀春¹

(1.中国矿业大学低碳能源与动力工程学院, 江苏 徐州 221116;

2.天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

[摘要] 为了给深度调峰工况下火电机组负荷优化分配提供方法指导, 分别建立了机组中高负荷与低负荷下的优化分配目标函数, 并对不同状态下的负荷优化分配进行了研究。利用 k 均值聚类算法处理数据, 拟合出 2 台机组中高负荷与低负荷下的煤耗特性曲线; 建立负荷分配目标函数, 对比负荷静态分配、增量分配及持续变负荷条件下优化前后的煤耗量; 设定深度调峰工况下 2 台机组总负荷指令, 对比负荷平均分配和优化分配 2 种方案的煤耗量。结果表明: 利用基于聚类的煤耗特性曲线建立中高负荷与低负荷下的优化分配目标函数, 方法可靠, 深度调峰工况下优化效果显著。 k 均值聚类算法可用于火电机组负荷优化分配, 并可为火电机组深度调峰工况下负荷优化分配的研究提供参考。

[关键词] 深度调峰; k 均值聚类; 负荷优化分配; 煤耗量

[引用本文格式] 任燕燕, 曹惠琳, 姜海岩, 等. 基于聚类的火电机组深度调峰负荷优化分配研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 48-57. REN Yanyan, CAO Huilin, JIANG Haiyan, et al. Load optimal distribution of deep peak regulation for thermal power units based on clustering[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 48-57.

Load optimal distribution of deep peak regulation for thermal power units based on clustering

REN Yanyan¹, CAO Huilin², JIANG Haiyan¹, YU Liang¹, HU Caibao¹,
GUO Xiaotong¹, ZHOU Huaichun¹

(1.School of Low-Carbon Energy and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2.State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to provide methodological guidance for the load optimal distribution of thermal power units under the condition of deep peak regulation, the objective functions of optimal load distribution under medium-high load and low load are established respectively, and the load optimal distribution under different conditions is studied. The k -means clustering algorithm is used to process the data and the coal consumption characteristic curves of two units under medium-high load and low load are fitted. The objective function of load distribution is established to compare the coal consumption before and after optimization under static load distribution, incremental load distribution and continuous variable load conditions. After setting the total load instructions of the two units under the condition of deep peak shaving, the coal consumption of the two schemes of load average distribution and optimal distribution is compared. The results show that the clustering-based objective function models of optimal distribution under medium-high load and low load established by the coal consumption characteristic curve are reliable, whose optimization effect is remarkable under the condition of deep peak regulation. The k -means clustering algorithm can be used to optimize the load distribution of thermal power units and provide reference for the study of load optimal distribution under the condition of deep peak regulation of thermal power units.

Key words: deep peak regulation; k -means clustering; load optimal distribution; coal consumption

收稿日期: 2023-06-01

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020QN09); 教育部产学研合作协同育人项目(220605308075918)

Supported by: Fundamental Research Funds for the Central Universities (2020QN09); Ministry of Education Industry-University Cooperation Collaborative Education Project (220605308075918)

第一作者简介: 任燕燕(1983), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为热力系统建模、控制与优化, yyren0812@cumt.edu.cn.

通信作者简介: 曹惠琳(2000), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为热工系统分析、液流电池, 2022201357@tju.edu.cn.

推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳与安全高效的能源体系,实施可再生能源替代行动^[1],降低煤炭消费总量和碳排放强度,助力实现碳达峰与碳中和^[2-5],是我国当前的一项重要国策。在可持续发展要求下,新能源发电技术日趋成熟,以风能、太阳能发电为代表的零碳机组开始大规模并入电网^[6]。作为一次能源,风能和太阳能不可储存,从其能源特点来看,其产生的电能具有随机性和间歇性。随着新能源电力占比逐渐增加,电力系统需要在随机波动的负荷需求与随机波动的电源之间实现能源的供需平衡^[7]。而火力发电技术成熟,具备电源稳定的特点,新型电力系统要求火力发电机组具备深度调峰的能力。

刘峰^[8]提出在今后较长时期内,煤炭在推动我国能源转型发展中还将发挥不可或缺的兜底保障作用;赵剑峰^[9]与陈浮^[10]提出火力发电仍然是我国电力装机结构的中流砥柱,对增强能源供应链的安全性和稳定性尤为重要;甘益明^[11]提出全面推进供热机组深度调峰技术的发展,能够推动燃煤供热产业升级,助力我国“双碳”战略目标的顺利实施。提高火电机组运行效率对“双碳”目标的实现至关重要,深度调峰工况下火电机组的节能降耗符合当代社会需求,而负荷优化分配的研究是降低火电机组能耗的一个重要研究方向。欧阳子区^[12]提出灵活调节电源装机比例、开展调峰技术改造、利用先进储能技术耦合调峰等方式参与机组的深度调峰运行有很大的应用前景;Benato A等^[13]提出了一种连续记录时间的创新方法,对国家电力系统需求高低峰时电量供给及经济性进行了技术和经济分析;Bartnik R等^[14]为解决传统发电机组灵活性低等问题,提出了一种可预测负荷变化中电厂的动态行为的创新程序;慕昀翰^[15]将动态的煤耗特性曲线与转子寿命损耗加入到负荷分配目标函数中,得到优化的负荷优化函数;王海宁^[16]建立了以煤耗率和转子寿命为目标的负荷优化分配模型,并且采用并行的NSGA-II多目标负荷优化目标分配结构;Qi等人^[17]建立了火电机组负荷优化分配中以降低油耗为目标的数学优化模型。

k 均值聚类算法是一种迭代求解的聚类分析算法,不需要建立复杂的函数模型。依据数据的相似性进行分类,每个聚类有1个聚类中心,聚类中心随着样本的更新而不断更新。张文君等^[18]研究了 k 均值算法初始聚类中心的选择对算法本身聚类精

度及效率的影响,提出了一种高效高精度的初始聚类中心选取方案;陶莹等^[19]为了解决初始聚类中心随机性的问题,通过全局化思想对 k 均值聚类算法进行了改进,得到了更好的聚类效果;王惠琴等^[20]利用 k 均值聚类算法对训练样本进行离线训练得到了样本质心与调制符号间的映射关系;杨茂等^[21]利用 k 均值聚类算法确定模型参数,定量描述了风电功率波动的概率分布特性。

本文介绍了一种基于 k 均值聚类算法的负荷优化分配方法。以某电厂2台660MW火电机组为研究对象,分析了2台机组实发功率分布情况;利用有关算法对机组数据进行处理,拟合出了2台机组中高负荷和低负荷下的煤耗特性曲线;建立负荷分配目标函数,分别优化静态分配、增量分配、持续变负荷及深度调峰工况下的负荷分配,并对比分析了优化前后的煤耗量。

1 火力发电机组经济性

1.1 机组煤耗

煤耗分为发电煤耗率和供电煤耗率。火力发电厂或发电机组发出单位电能所消耗的标准煤量称为发电煤耗率 b_f , 其对应的负荷称为发电负荷;扣除厂用电后,向电网供出单位电能所消耗的标准煤量称为供电煤耗率 b_g , 其对应的负荷称为供电负荷。供电负荷等于发电负荷减去厂用电量。

$$b_f = \frac{B_b}{P_G} \quad (1)$$

$$b_g = \frac{B_b}{P_G - P_c} \quad (2)$$

式中: B_b 为标准煤耗量; P_G 为发电机功率; P_c 为厂用电率。

考虑整台机组经济性能时,采用供电煤耗率能更准确地表达电厂的经济性^[22]。

不同电厂投产时煤种可能不同。不同煤种的低位发热量存在较大差距,在分析各台机组运行过程中燃煤消耗量时,需采用标准煤概念——即将实际煤耗量折算到相同基准后再进行机组之间的经济性比较。

我国综合能耗计算通则^[23]规定:标准煤是指收到基低位发热量 $Q_{ar,net,p}$ 为 29 310 kJ/kg 的煤。实际煤耗量 B 与标准煤耗量 B_b 的折算公式为:

$$B_b = B \times \frac{Q_{ar,net,p}}{29\ 310} \quad (3)$$

式中: $Q_{ar,net,p}$ 为煤的收到基低位发热量。

机组运行时的标准煤耗量可以通过实际入炉的煤量及炉煤取样分析的低位发热量计算得到。

1.2 机组负荷优化分配经济性分析

合适的经济性指标是建立负荷优化分配经济模型的基础。

理论上,在讨论机组的经济效益时,不仅要考虑机组运行时投入燃料的成本费用,还要考虑设备折旧费与维修费、用水费、员工工资与福利等其他费用支出,但其他费用与所在地区的生活水平、物价等相关。在分析研究中,为了避免因为其他费用估计的误差而影响负荷优化分配的结果,常用机组标准煤耗量作为全厂机组负荷分配的经济性指标。

因此,煤耗成本虽然只是发电机组经济成本的一部分,但从机组运行角度出发,以煤耗量作为负荷优化的经济性指标,既简化了数学模型,也保证了结果的可靠性。

2 负荷优化分配方法

2.1 k 均值聚类算法

在机组运行中,由于机组运行工况变动的不确定性及操作人员运行水平不同,不同时间相同负荷或相近负荷下的机组煤耗量存在波动性。为了消除数据的波动,采用聚类分析的方法对机组运行数据进行处理。考虑到文中主要研究煤耗量与负荷之间的关系,在处理负荷与煤耗量现场数据时,选定负荷作为聚类指标,用 k 均值聚类的每个聚类中心代替对应负荷下的煤耗量,以形成新的“负荷-煤耗量”数据点。

k 均值聚类算法是一种数据处理方法,其算法是一个迭代的过程。在聚类的过程中,每个样本只能属于 1 个类,所有类的合集等于给定的样本。对于给定含有 n 个样本的集合 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 输出为样本合集的聚类 C^* 时, k 均值聚类算法计算步骤如下^[24]:

1) 初始化样本中心。令 $t=0$, 随机选择集合 K 中的 k 个样本点作为初始聚类中心 $m^0=(m_1^{(0)}, \dots, m_l^{(0)}, \dots, m_k^{(0)})$ 。其中, $m_l^{(0)}$ 作为聚类 G_l 的中心, k 为聚类时指定的类的个数。

2) 对样本进行聚类。依次计算每个样本到各个类中心的欧式距离,并根据计算结果将每个样本指派到与其距离最近的中心类,构成聚类结果 $C^{(t)}$ 。

3) 计算新的聚类中心。对聚类结果 $C^{(t)}$, 计算当前各个类中样本的均值,作为新的类中心 $m^{(t+1)}=$

$(m_1^{(t+1)}, \dots, m_l^{(t+1)}, \dots, m_k^{(t+1)})$ 。

4) 如果迭代收敛或符合停止条件,输出 $C^*=C^{(t)}$ 。否则,令 $t=t+1$,返回步骤 2)。

2.2 最小二乘法拟合曲线

最小二乘法是通过最小化拟合函数与所有数据点之间误差的平方和,寻找与数据点最匹配的拟合函数的一种数学优化方式。对于一组给定的离散数据 $(x_i, y_i)(1, 2, \dots, n)$, 需要满足所有数据点与拟合曲线之间偏差的平方和最小,以此确定拟合曲线。

设超临界发电机组煤耗量是二次曲线模型⁰:

$$B(P) = aP^2 + bP + c \quad (4)$$

其中: P 表示机组负荷, MW; B 表示煤耗量, t/h; 系数 a 、 b 、 c 采用最小二乘法确定。

设经过聚类算法处理后,共有 k 个聚类中心点 $(P_j, B_j), (j=1, 2, \dots, k)$ 。各个聚类中心与曲线 B 的偏差的平方和为:

$$\delta = \sum_{j=1}^k \left((aP_j^2 + bP_j + c - B_j)^2 \right) \quad (5)$$

为求得式(5)取值最小时的 a 、 b 、 c 的值,对其求偏导,即

$$\begin{cases} \frac{\partial \delta}{\partial a} = 2 \sum_{j=1}^k (aP_j^2 + bP_j + c - B_j) P_j^2 = 0 \\ \frac{\partial \delta}{\partial b} = 2 \sum_{j=1}^k (aP_j^2 + bP_j + c - B_j) P_j = 0 \\ \frac{\partial \delta}{\partial c} = 2 \sum_{j=1}^k (aP_j^2 + bP_j + c - B_j) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

整理简化表达为:

$$\begin{cases} \left(\sum_{j=1}^k P_j^4 \right) a + \left(\sum_{j=1}^k P_j^3 \right) b + kc = \sum_{j=1}^k (B_j P_j^2) \\ \left(\sum_{j=1}^k P_j^3 \right) a + \left(\sum_{j=1}^k P_j^2 \right) b + kc = \sum_{j=1}^k (B_j P_j) \\ \left(\sum_{j=1}^k P_j^2 \right) a + \left(\sum_{j=1}^k P_j \right) b + kc = \sum_{j=1}^k B_j \end{cases} \quad (7)$$

求解上述方程,即可求得所需条件下的系数 a 、 b 、 c 值,也就得到了基于负荷的二次煤耗曲线模型。

2.3 负荷优化分配步骤

研究发电机组负荷优化分配需要首先确定优化目标,建立准确的优化目标函数表达式。文中负荷优化分配是基于机组的经济性指标,即采用煤耗量作为负荷优化分配的主要指标。

文中负荷优化分配方法主要包括以下步骤:

1) 获取机组实际运行数据,这里主要是机组负荷和

煤耗量；2) 确定聚类中心，采用 k 均值聚类方法对机组运行数据进行处理，通过计算获取聚类中心；3) 根据聚类中心点的坐标值，通过最小二乘法拟合煤耗特性曲线；4) 将煤耗特性曲线作为负荷优化分配的目标函数，在给定约束条件下，求取目标函数的最小值，进而确定总负荷指令下的不同机组的负荷分配。

文中主要研究 2 台机组的负荷优化分配，其计算流程如图 1 所示。

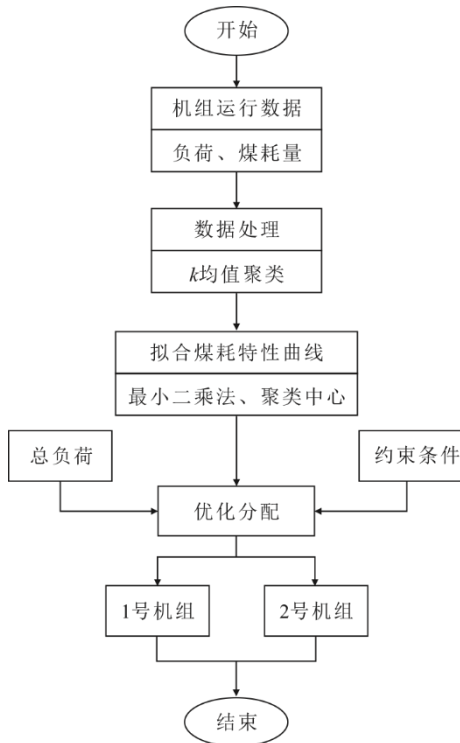


图 1 2 台机组负荷优化分配计算流程
Fig.1 Calculation process of load optimal allocation of two units

3 机组数据处理及煤耗特性曲线拟合

以机组运行数据为基础，拟合机组煤耗特性曲线。需要指出的是：初始数据包括机组全部运行状况下的数据，可能包含坏值或距离理想值偏差较大的值，需要对数据进行合理的判断与数据筛选，剔除坏值和偏离值。这主要包括 3 方面内容：1) 获取机组运行数据；2) 数据处理；3) 特性曲线拟合。

3.1 机组运行数据

收集某厂 2 台 660 MW 火电机组在 2022 年 3 月的运行数据。2 台机组锅炉均为超临界变压运行直流炉，型式为单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧方式、平衡通风、双层等离子无油点火、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构 Π 型锅炉。设备主要参

数见表 1。

表 1 设备主要参数
Tab.1 Main parameters of the device

项目	BMCR 工况	BRL 工况
过热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	2 141	2 079
过热器出口蒸汽压力/MPa	25.4	25.33
过热器出口蒸汽温度/°C	571	571
再热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	1 751	1 692
再热器进口蒸汽压力/MPa	5.16	4.98
再热器出口蒸汽压力/MPa	4.97	4.8
再热器进口蒸汽温度/°C	335	330
再热器出口蒸汽温度/°C	569	569
省煤器进口给水温度/°C	295	293

1 号机组与 2 号机组在相同时间段内投入的煤种相同。根据收集到的煤质分析数据，可以得到不同时间段内使用煤种的低位发热量，见表 2。

表 2 煤质信息
Tab.2 Coal quality information

时刻	00:00	02:00	08:00	14:00	20:00
	—	—	—	—	—
	02:00	08:00	14:00	20:00	24:00
$Q_{ar,net,p}$ /(MJ/kg)	15.97	16.28	15.97	16.28	15.97

根据式(3)及 2 台机组的实际煤耗量，分别计算出 1 号机组与 2 号机组在相应时间段内的标准煤耗量。绘制 1 号机组与 2 号机组标准煤耗量与有功功率的散点图，如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 均可以看出：50% 负荷以下数据点个数较少；50% 负荷以上数据点分布密集，个数较多。数据分布表明，机组多数情况下运行在 50% 负荷以上。采用两段法表示 2 台机组的煤耗特性曲线，即将机组运行数据分成中高负荷段和低负荷段 2 段分别进行数据处理及煤耗特性曲线拟合。

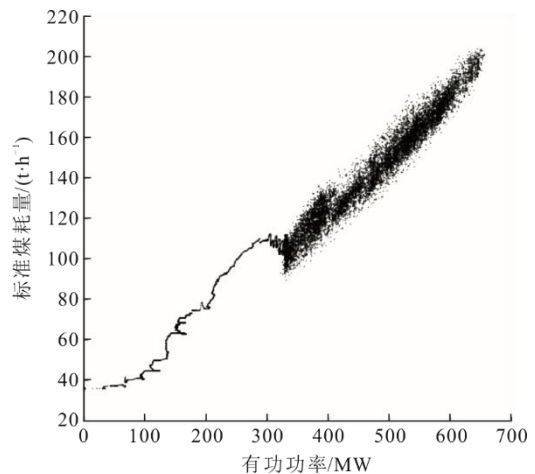


图 2 1 号机组未进行数据处理时的数据分布
Fig.2 Data distribution of unit 1 without data processing

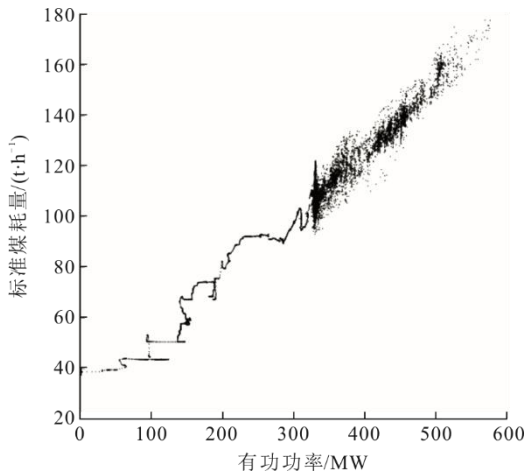


图3 2号机组未进行数据处理时的数据分布
Fig.3 Data distribution of unit 2 without data processing

3.2 聚类与数据剔除

从图2、图3可以看出，机组运行数据大部分处于合理范围内，但边缘处部分数据偏离机组正常工况，因此需要对收集到的运行数据进行筛选和剔除。数据分布的跨度较广，考虑到剔除数据时的准确性，先通过 k 均值聚类的方法，将数据点集合分为多个较为集中的类，再对各类中的数据分别进行选择 and 剔除。根据数据量的多少，确定中高负荷段聚类个数

为 10，低负荷段聚类个数为 6。在每个聚类中剔除距离中心点较远的点，通过拟合每类数据的正态分布图判断数据的集中区域，并根据每类数据的均值和标准差，将 2 倍标准差之外的数据点剔除^[25]。

3.2.1 1号机组中高负荷段数据处理

1号机组中高负荷段的数据处理结果如图4—图5所示。图5中红色标记部分是剔除掉的数据。

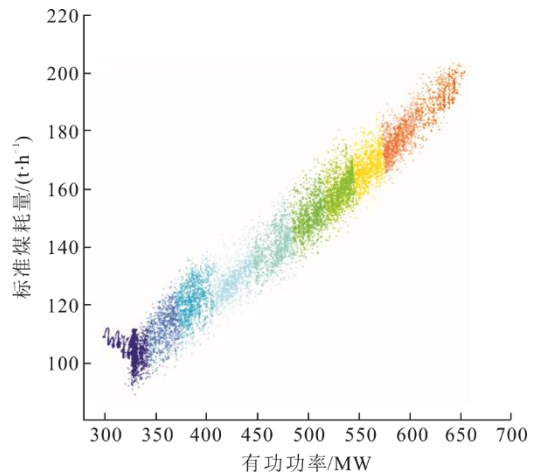


图4 1号机组中高负荷段数据未处理时聚类结果
Fig.4 Clustering results of unprocessed data in high load section of unit 1

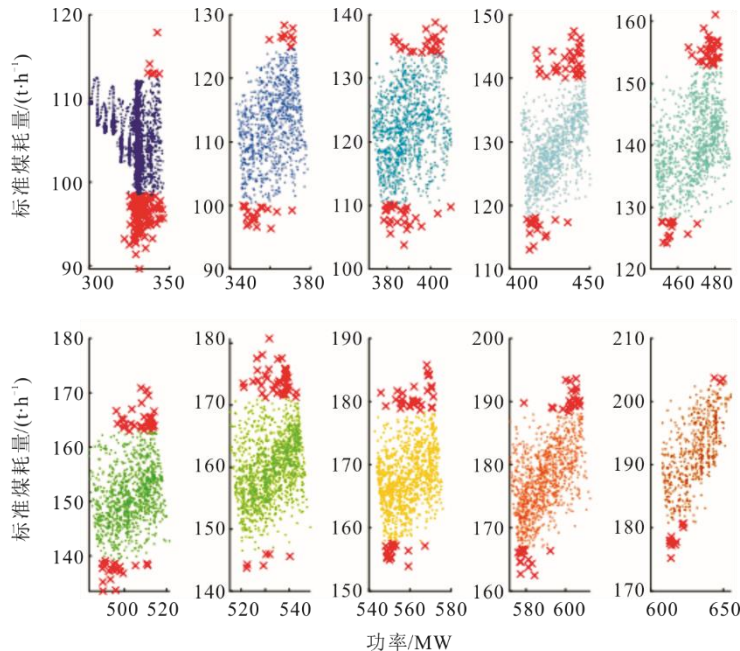


图5 采用2倍标准差时各类的剔除数据结果
Fig.5 Elimination data results of all classes with 2 standard deviation

1号机组中高负荷段内的数据完成筛选和剔除后，得到聚类分布和聚类中心点如图6所示。

分布和聚类中心点如图7所示。

3.2.2 1号机组低负荷段数据处理

对1号机组低负荷段数据进行处理，得到聚类

3.2.3 2号机组中高负荷段数据处理

对2号机组中高负荷段数据进行处理，得到聚类分布和聚类中心点如图8所示。

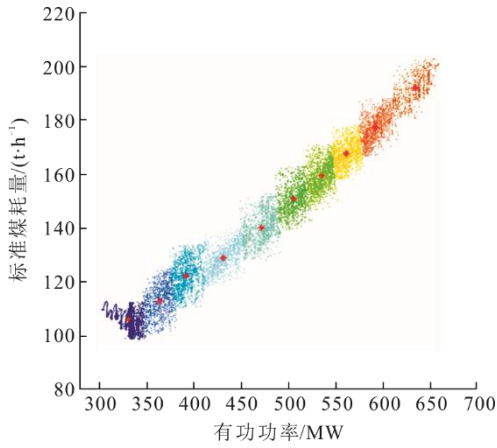


图6 1号机组中高负荷段数据处理后的聚类结果
Fig.6 Clustering results after data processing of high load section in unit 1

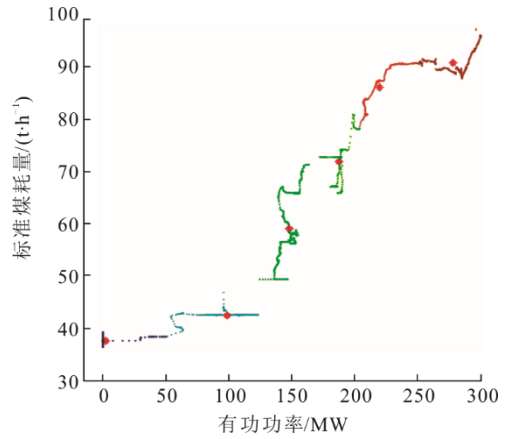


图9 2号机组低负荷段内数据处理后的聚类结果
Fig.9 Clustering results after data processing in the low load section of unit 2

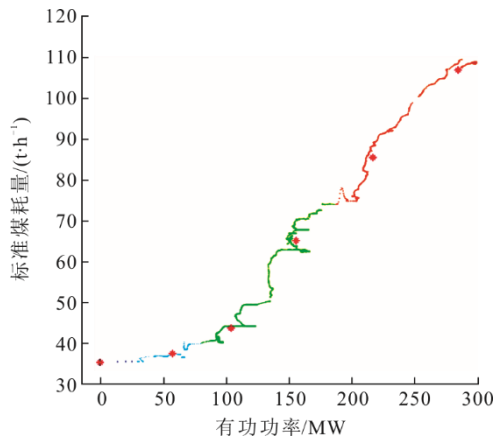


图7 1号机组低负荷段数据处理后的聚类结果
Fig.7 Clustering results after processing of low load section data in unit 1

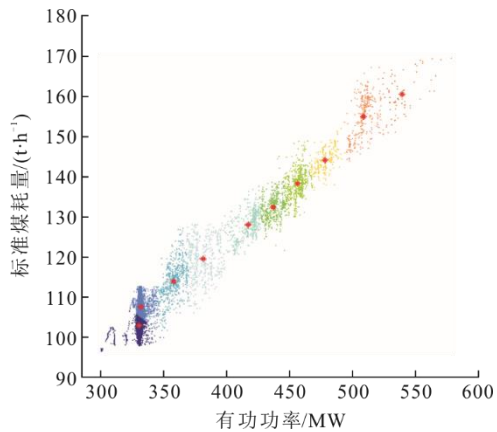


图8 2号机组中高负荷段数据处理后的聚类结果
Fig.8 Clustering results after data processing of high load section in unit 2

3.3 煤耗特性曲线拟合

根据3.2节得到的各个聚类结果,以2台机组中高负荷段的10个聚类中心点和低负荷段的6个聚类中心作为拟合曲线的稳定点,根据式(4),采用最小二乘法分别拟合中高负荷段和低负荷段的煤耗特性曲线。

3.3.1 1号机组中高负荷段拟合结果

1号机组中高负荷段数据处理后的拟合结果如图10所示。

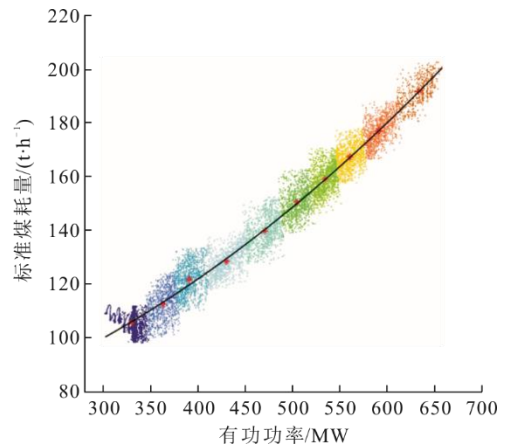


图10 1号机组中高负荷段数据处理后拟合结果
Fig.10 Fitting results after data processing for medium-high load section of unit 1

1号机组中高负荷段拟合结果的表达式为:

$$B_{1-1} = 0.000\ 236\ 4P^2 + 0.056\ 1P + 62.457\ 5 \quad (8)$$

其中: B_{1-1} 表示1号机组中高负荷段的煤耗。

3.3.2 1号机组低负荷段拟合结果

1号机组低负荷段数据处理后的拟合结果如图11所示。

3.2.4 2号机组低负荷段数据处理

对2号机组低负荷段数据进行处理,得到聚类分布和聚类中心点如图9所示。

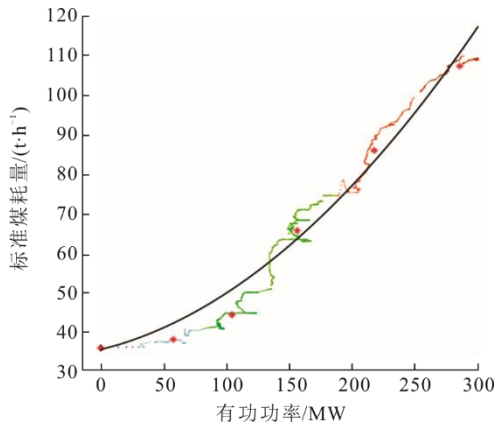


图 11 1 号机组低负荷段数据处理后拟合结果
Fig.11 Fitting results after data processing for low load section of unit 1

1 号机组低负荷段拟合结果的表达式为:

$$B_{1-2}=0.000\ 651P^2+0.078\ 6P+35.500\ 4 \quad (9)$$

其中: B_{1-2} 表示 1 号机组低负荷段的煤耗。

3.3.3 2 号机组中高负荷段拟合结果

2 号机组中高负荷段拟合结果的表达式为:

$$B_{2-1}=0.000\ 030\ 995P^2+0.251\ 5P+19.501\ 9 \quad (10)$$

其中: B_{2-1} 表示 2 号机组中高负荷段的煤耗。

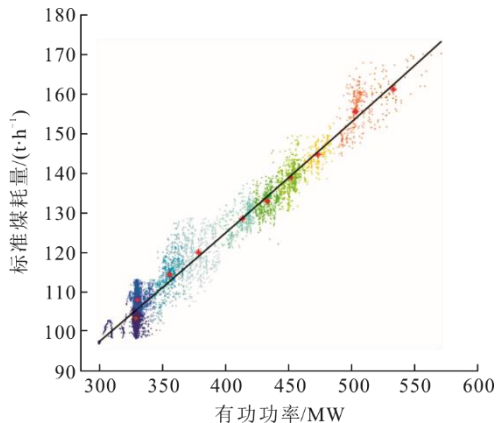


图 12 2 号机组中高负荷段数据处理后拟合结果
Fig.12 Fitting results after data processing for medium-high load section of unit 2

3.3.4 2 号机组低负荷段拟合结果

2 号机组低负荷段拟合结果的表达式为:

$$B_{2-2}=0.000\ 472\ 6P^2+0.085\ 3P+37.096\ 9 \quad (11)$$

其中: B_{2-2} 表示 2 号机组低负荷段的煤耗。

由此可以得出, 1 号机组煤耗特性曲线函数表达式如式(12)所示:

$$B_1 = \begin{cases} (P \leq 300) \\ 0.000\ 651P^2 + 0.078\ 6P + 35.500\ 4 \\ (P > 300) \\ 0.000\ 236\ 4P^2 + 0.056\ 1P + 62.457\ 4 \end{cases} \quad (12)$$

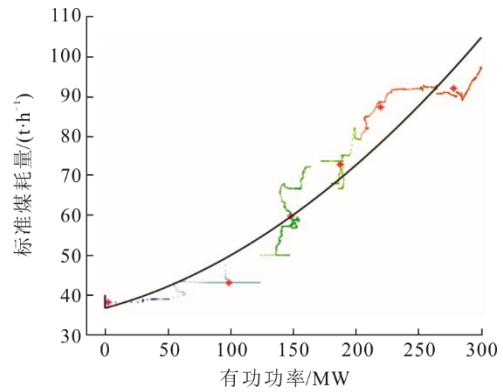


图 13 2 号机组低负荷段数据处理后拟合结果
Fig.13 Fitting results after data processing for low load section of unit 2

2 号机组煤耗特性曲线函数表达式为:

$$B_2 = \begin{cases} (P \leq 300) \\ 0.000\ 472\ 6P^2 + 0.085\ 3P + 37.096\ 9 \\ (P > 300) \\ 0.000\ 030\ 995P^2 + 0.251\ 5P + 19.501\ 9 \end{cases} \quad (13)$$

4 660 MW 燃煤机组负荷优化分配

4.1 优化目标函数

在第 3 节中煤耗特性曲线的基础上, 负荷分配优化目标函数表示为:

$$\min F(P_1, P_2) = \min \left(\sum_{z=1}^2 (a_z P_z^2 + b_z P_z + c_z) \right) \quad (14)$$

其中: $F(P_1, P_2)$ 为 1、2 号机组总的经济指标。

4.2 约束条件

约束条件主要有 2 个: 一个是电网总负荷指令约束, 另一个是功率输出上下限约束。

4.2.1 总负荷指令约束

全厂机组负荷优化分配是在电网下达总负荷指令的前提下, 优化单台机组承担的负荷量, 进而降低全厂供电标准煤耗量。总负荷指令约束为:

$$P_s = \sum_{z=1}^2 P_{sz} \quad (15)$$

式中: P_s 为电网调度中心对电厂下达的总负荷指令, MW; P_{sz} 为第 z 台机组负荷优化分配后的负荷指令, MW。

4.2.2 功率输出上下限约束

机组优化分配后的负荷必须在机组允许的安全范围之内, 即:

$$\sum_{z=1}^2 P_{z \min} \leq P_s \leq \sum_{z=1}^2 P_{z \max} \quad (16)$$

$$P_{z \min} \leq P_{sz} \leq P_{z \max} \quad (17)$$

式中： $P_{z\min}$ 、 $P_{z\max}$ 分别为第 z 台机组安全稳定运行的最低负荷、最高负荷，MW。

4.3 2 台 660 MW 机组负荷优化分配

根据第 3 节得到的 2 台机组煤耗特性曲线及 4.1 节中的优化目标函数，再结合 4.2 节中的约束条件，对总负荷进行优化分配，并对比分析优化分配前后机组的煤耗量。

4.3.1 静态负荷分配

采用遗传算法对全厂静态负荷进行寻优仿真。选取相同时刻 2 台机组的实发功率，分别计算 1 号机组和 2 号机组在该功率下对应的煤耗量及总煤耗量；同时计算 2 台机组的总负荷，对总负荷进行优化分配计算，得到优化分配后 2 台机组的负荷，并计算出此时的总煤耗量；将优化前后的总煤耗量作对比，得出省煤量。具体计算数据见表 3。由表 3 可以看出，优化分配后全厂的整体煤耗量有所降低。尽管不同时刻的节煤量有波动，但大部分时刻的节煤量可以达到 0.5 t/h，假设该电厂 1 年中 1、2 号机组同时运行的时长约 4 500 h，则 1 年可以节约 2 250 t 标准煤；燃煤价格按 950 元/t 计算，估算 1 年大约可以节约成本 213.75 万元。

表 3 静态负荷分配结果
Tab.3 Static load distribution results

时刻	项目	1 号机组 负荷/MW	2 号机组 负荷/MW	总 3 煤 耗量/ (t·h ⁻¹)	节煤量/ (t·h ⁻¹)
08:00:00	实际运行	577.268	418.084	303.688	2.466
	优化后	471.169	524.182	301.221	
10:00:00	实际运行	474.482	337.459	250.200	0.032
	优化后	469.744	342.197	250.168	
12:00:00	实际运行	371.926	329.492	221.758	0.896
	优化后	399.377	302.041	220.862	
14:00:00	实际运行	403.523	357.176	236.874	0.656
	优化后	460.615	300.083	236.218	
16:00:00	实际运行	449.558	433.185	269.719	0.087
	优化后	469.594	413.149	269.632	
18:00:00	实际运行	606.009	510.448	339.227	3.307
	优化后	493.083	623.374	335.920	
20:00:00	实际运行	510.680	500.512	305.904	0.211
	优化后	481.605	529.587	305.693	

4.3.2 负荷增量指令分配

假设某一时刻全厂负荷为 700 MW，1、2 号机组的出力分别为 377.293 1 MW 和 322.706 9 MW。此时，若总负荷增加 100、200、300、400 MW，按照平均分配和优化分配 2 种方案进行负荷分配，并将其结果进行对比，具体数据见表 4。从表 4 可以

看出，优化分配方式比平均分配方式消耗的燃煤量略有降低。负荷优化分配算法不管是在静态负荷分配中还是负荷增量分配中均可以减小总煤耗。

表 4 负荷增量优化分配结果
Tab.4 Optimization results of incremental load allocation

总负荷 增量/MW	分配 方式	1 号机组 负荷增量/ MW	2 号机组 负荷增量/ MW	总煤耗 量/(t·h ⁻¹)	节煤量/ (t·h ⁻¹)
100	平均	50.000	50.000	247.134	0.240
	优化	88.105	11.895	246.894	
200	平均	100.000	100.000	274.439	0.015
	优化	92.733	107.267	274.423	
300	平均	150.000	150.000	303.080	0.566
	优化	103.236	196.764	302.515	
400	平均	200.000	200.000	333.059	1.904
	优化	117.410	282.590	331.155	

4.3.3 变负荷优化分配

根据机组运行数据，对其某天内的负荷变化进行仿真，并按照负荷优化分配算法优化 2 台机组的负荷，得到图 14 和图 15。

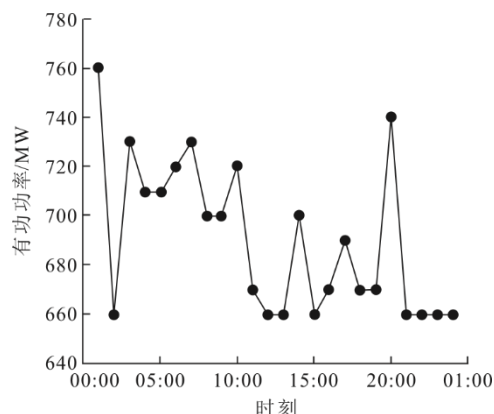


图 14 总负荷变化
Fig.14 Total load change

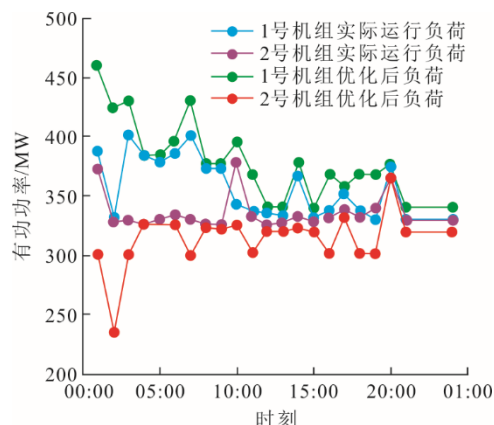


图 15 2 台机组优化前后的负荷
Fig.15 Load before and after optimization of two units

从图 14 和图 15 可以看出，在采用优化算法进行负荷分配后，当厂级指令变化时，2 台机组的负

荷变化趋势并不完全相同,这是因为2台机组的性能不完全一样。从图15中2台机组的负荷变化趋势可知,1号机组的整体性能优于2号机组,其承担的负荷更大。

优化前后2台机组的总煤耗量如图16所示。图16表明,优化后和优化前相比,其总煤耗量有所降低,验证了优化算法的有效性。

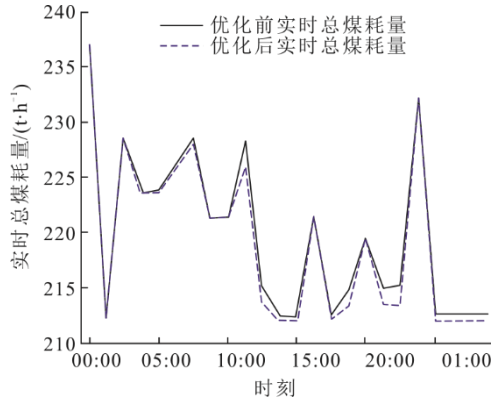


图16 负荷优化分配前后总煤耗量对比
Fig.16 Comparison of total coal consumption before and after optimal load distribution

4.3.4 深度调峰下负荷优化分配

深度调峰运行是一种非常规的运行方式,要求机组在超低负荷工况(20%~50%额定工况)下平稳运行^[6]。机组在较低负荷下运行,其经济性大幅降低,因此考虑将负荷分配优化算法应用到深度调峰运行过程中。

设2台机组总负荷分别为400、450、500、550、600 MW,仍然采用平均分配和优化分配2种方案进行负荷分配,并将2种分配方案的煤耗量进行对比,具体结果见表5。

表5 考虑深度调峰下的负荷优化分配结果
Tab.5 Optimal load distribution results considering depth peak-shaving

总负荷 指令/MW	分配 方式	1号机组 负荷/MW	2号机组 负荷/MW	总煤耗 量/(t·h ⁻¹)	节煤量/ (t·h ⁻¹)
400	平均	200.000	200.000	150.321	2.707
	优化	99.950	300.049	147.615	
450	平均	225.000	225.000	166.357	6.678
	优化	149.997	300.002	159.679	
500	平均	250.000	250.000	183.797	12.231
	优化	354.608	145.392	171.567	
550	平均	275.000	275.000	202.642	19.413
	优化	399.005	150.994	183.229	
600	平均	300.000	300.000	222.891	27.408
	优化	419.858	180.142	195.484	

由表5可以看出:在参与深度调峰时,负荷优化分配算法仍然有效且节煤显著;在150 MW以下

及300 MW以上负荷时,1号机组运行性能较2号机组更佳;150~300 MW负荷范围内,2号机组运行性能优于1号机组。不同总负荷要求下,1号机组和2号机组协调参与到深度调峰中,才能综合提高2台机组总体性能。

5 结 论

针对2台660 MW火电机组运行数据,利用 k 均值聚类理论建立了机组的煤耗特性曲线,由此构成负荷优化目标函数,借助遗传算法实现了机组负荷优化分配。总结如下:

1) 在分析机组运行状况基础上,利用 k 均值聚类算法和2倍标准差方法剔除某些大偏差数据,采用最小二乘法拟合出2台机组中高负荷和低负荷下的煤耗特性曲线。

2) 根据煤耗特性曲线及机组约束条件,建立负荷分配目标函数,对比负荷静态分配、增量分配及持续变负荷条件下优化前后的煤耗量,发现文中负荷优化分配方法均可以不同程度地节约燃料。

3) 考虑火电机组面临深度调峰的需求,假设深度调峰工况下的总负荷指令,对比了负荷平均分配和优化分配2种方案的煤耗量,发现优化后的负荷分配方法省煤显著,所以,深度调峰工况下负荷优化分配尤其重要。

[参考文献]

- [1] 刘吉臻. 支撑新型电力系统建设的电力智能化发展路径[J]. 能源科技, 2022, 20(4): 3-7.
LIU Jizhen. Development path of power intelligence supporting the construction of new power system[J]. Energy Science and Technology, 2022, 20(4): 3-7.
- [2] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.
- [3] 李政, 张东杰, 潘玲颖, 等. “双碳”目标下我国能源低碳转型路径及建议[J]. 动力工程学报, 2021, 41(11): 905-909.
LI Zheng, ZHANG Dongjie, PAN Lingying, et al. Low-carbon transition of China's energy sector and suggestions with the “carbon-peak and carbon-neutrality” target[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2021, 41(11): 905-909.
- [4] 杨光宇, 胡永秋. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而奋斗[EB/OL]. 人民日报网. [2022-10-26](2023-06-01). <http://politics.people.com.cn/n1/2022/1026/c1024-32551597.html>.
YANG Guangyu, HU Yongqiu. Holding high the great banner of socialism with Chinese characteristics and striving for the comprehensive construction of a socialist

- modernized country[EB/OL].The People's Daily Online. [2022-10-26](2023-06-01). <http://politics.people.com.cn/n1/2022/1026/c1024-32551597.html>.
- [5] 中共中央, 国务院. 中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[A]. 北京: 中共中央, 国务院, 2021.
The Central Committee of the Communist Party of China, The State Council. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council are fully prepared to fully implement the new development concept and do a good job in carbon peak carbon neutrality[A]. Beijing: The Central Committee of the Communist Party of China, The State Council, 2021.
- [6] 刘吉臻, 李云鹤, 宋子秋, 等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报, 2022, 42(12): 993-1012. LIU Jizhen, LI Yunzhi, SONG Ziqiu, et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(12): 993-1012.
- [7] 刘吉臻, 王玮, 胡阳, 等. 新能源电力系统控制与优化[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1555-1561. LIU Jizhen, WANG Wei, HU Yang, et al. Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources[J]. Control Theory & Applications, 2016, 33(12): 1555-1561.
- [8] 刘峰, 郭林峰, 赵路正. 双碳背景下煤炭安全区间与绿色低碳技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 1-15. LIU Feng, GUO Linfeng, ZHAO Luzheng. Research on coal safety range and green low-carbon technology path under the dual-carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 1-15.
- [9] 赵剑峰. 低碳经济视角下煤炭工业清洁利用分析及政策建议[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 514-518. ZHAO Jianfeng. Analysis and policy recommendation on coal industry clean-using from the perspective of low-carbon economy[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 514-518.
- [10] 陈浮, 王思遥, 于昊辰, 等. 碳中和目标下煤炭变革的技术路径[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1452-1461. CHEN Fu, WANG Siyao, YU Haochen, et al. Technological innovation paths of coal industry for achieving carbon neutralization[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1452-1461.
- [11] 甘益明, 王昱乾, 黄畅, 等. “双碳”目标下供热机组深度调峰与深度节能技术发展路径[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 1-10. GAN Yiming, WANG Yuqian, HUANG Chang, et al. Development path of deep peak-shaving and deep energy conservation technology for cogeneration units with “dual carbon” target[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 1-10.
- [12] 欧阳子区, 王宏帅, 吕清刚, 等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-22[2023-05-31]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222007>. OUYANG Ziqu, WANG Hongshuai, LYU Qinggang, et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 1-22[2023-05-31]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.222007>.
- [13] BENATO A, BRACCO S, STOPPATO A, et al. LTE: a procedure to predict power plants dynamic behaviour and components lifetime reduction during transient operation[J]. Applied Energy, 2016, 162: 880-891.
- [14] BARTNIK R, BURYAN Z, HNYDIUK-STEFAN A. Thermodynamic and economic analysis of effect of heat accumulator volume on the specific cost of heat production in the gas-steam CHP plant[J]. Energy, 2021, 230: 120828.
- [15] 慕蔚翰. 基于燃煤机组深度调峰安全性条件下负荷优化分配[D]. 北京: 华北电力大学, 2021: 1. MU Junhan. Based on deep peak shaving safety load distribution optimization of coal fired units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021: 1.
- [16] 王海宁. 大型燃煤机组深度调峰运行经济性安全性分析及负荷优化分配[D]. 保定: 华北电力大学, 2012: 1. WANG Haining. Analysis of economy and safety for large coal-fired generating unit on peak-load operation mode and load optimal distribution[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2012: 1.
- [17] QI Y, ZHAO D, LI X. Thermal unit energy conservation load dispatch based on harmony search algorithm combined with dynamic unit commitment[C]// International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development, 2014.
- [18] 张文君, 顾行发, 陈良富, 等. 基于均值-标准差的 k 均值初始聚类中心选取算法[J]. 遥感学报, 2006(5): 715-721. ZHANG Wenjun, GU Xingfa, CHEN Liangfu, et al. An algorithm for initializing of k -means clustering based on mean-standard deviation[J]. Journal of Remote Sensing, 2006(5): 715-721.
- [19] 陶莹, 杨锋, 刘洋, 等. k 均值聚类算法的研究与优化[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(6): 90-92. TAO Ying, YANG Feng, LIU Yang, et al. Research and optimization of k -means clustering algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(6): 90-92.
- [20] 王惠琴, 侯文斌, 彭清斌, 等. 基于 k 均值聚类的SPPM分步分类检测算法[J]. 通信学报, 2022, 43(1): 161-171. WANG Huiqin, HOU Wenbin, PENG Qinbin, et al. Step-by-step classification detection algorithm of SPPM based on k -means clustering[J]. Journal of Communications, 2022, 43(1): 161-171.
- [21] 杨茂, 董骏城. 基于混合分布模型的风电功率波动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(增刊1): 69-78. YANG Mao, DONG Juncheng. Study on characteristics of wind power fluctuation based on mixed distribution model[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(Suppl.1): 69-78.
- [22] 郑体宽, 杨晨. 热力发电厂[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 26-31. ZHENG Tikuan, YANG Chen. Thermal power plant[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 26-31.
- [23] 汪梦麟. 火电厂热效率及供电煤耗率的核定和计算[J]. 华中电力, 1996(3): 8-12. WANG Menglin. Verification and calculation of thermal efficiency and coal consumption rate for power supply in thermal power plants[J]. Central China Electric Power, 1996(3): 8-12.
- [24] 王志明. 数字图像处理与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 1. WANG Zhiming. Digital image processing and analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 1.
- [25] 张强. 综合经济目标下电厂机组负荷优化调度方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 1. ZHANG Qiang. Research on optimal load dispatch of units in power plant for a comprehensive economical goal[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010: 1.

(责任编辑 刘永强)