

文章编号:1006-2467(2021)12-1663-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.368

适用于环境-经济调度研究的燃煤机组 二氧化碳排放特性模型

张展鹏¹, 班明飞¹, 郭丹阳², 陈启超³, 江海洋⁴

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150006; 2. 哈尔滨红光锅炉集团有限公司,
哈尔滨 150050; 3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102211;
4. 国网黑龙江省电力有限公司电力调度控制中心, 哈尔滨 150090)

摘要: 为精准量化不同容量燃煤机组碳排放量,更好地服务于我国“碳达峰、碳中和”目标,建立了一种适用于电力系统环境-经济调度的新型燃煤机组 CO₂ 排放特性模型.首先,总结并分析了近年来我国燃煤机组容量和煤耗变化情况;其次,采用 K-Medoids 聚类分析了典型机组的负荷率与 CO₂ 排放强度的关系,建立了受基本方程规范的新型燃煤机组碳排放特性模型;最后,结合理论分析与实际数据,对所建立的模型进行算例仿真,验证了模型的有效性.

关键词: 电力系统;燃煤机组;二氧化碳;排放强度;排放特性模型

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

A Model for Carbon Dioxide Emission Characteristics of Coal-Fired Units for Environment-Economic Dispatch Research

ZHANG Zhanpeng¹, BAN Mingfei¹, GUO Danyang², CHEN Qichao³, JIANG Haiyang⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150006, China; 2. Harbin Hongguang Boiler Group Co., Ltd., Harbin 150050, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China; 4. Power Dispatch and Control Center, State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Harbin 150090, China)

Abstract: In order to accurately quantify the carbon emissions of coal-fired units with different capacities and serve the goal of “carbon peaking and carbon neutrality” in China better, a novel CO₂ emission characteristic model for environment-economic dispatch of power systems is established. First, the changes in the capacity and coal consumption of coal-fired units in China in recent years are summarized and analyzed. Then, the relationship between the load rate and CO₂ emission intensity is analyzed using the K-Medoids cluster method, and the carbon emission characteristic model of new coal-fired units restricted to basic equations is established. Finally, combined with theoretical analysis and actual data, a simulation is conducted to verify the validity of the model.

Key words: power system; coal-fired units; carbon dioxide; emission intensity; emission characteristic model

收稿日期:2021-06-30

基金项目:国家自然科学基金(52107075),中央高校基本科研业务专项基金(2572020BF04)

作者简介:张展鹏(1998-),男,吉林省长春市人,硕士生,主要从事燃煤机组大气污染物排放特性建模研究.

通信作者:班明飞,男,副教授,电话(Tel.):18945103533;E-mail:mban2@jtu.edu.

为应对温室气体过度排放所造成的气候变化^[1],我国提出了 2030 年前实现“碳达峰”和 2060 年前实现“碳中和”的“双碳”战略目标. 电力行业作为我国最大的碳排放源,其碳减排进程对于“双碳”目标能否如期完成具有决定性影响^[2-3]. 截至 2019 年底,我国碳排放强度比 2015 年下降了 18.2%,提前完成了“十三五”约束性目标任务^[4],但是,面对当前深度减排新形势,电力行业仍需进一步提高科学化、精细化降碳水平.

通过电力环境-经济调度手段从系统层面降低 CO₂ 排放,是电力行业降碳的重要一环,而掌握燃煤机组 CO₂ 排放特性模型,则是电力系统切实实现低碳调度的前提. 当前,应用于电力系统环境-经济调度需求的燃煤机组 CO₂ 排放特性模型,往往源于 20 世纪 90 年代针对国外机组的若干经典文献^[5],多数文献认为机组的 CO₂ 排放量与燃煤消耗量成正比,通过对燃煤成本函数模型添加特定罚因子,即可确定燃煤机组负荷-碳排放特性模型. 文献[6-8]用二次多项式函数表示燃煤机组 CO₂ 的排放特性,并量化了燃煤机组有害气体排放对环境的污染,通过污染排放罚款等方式提高煤电效率. 文献[9]以机组煤耗量和 CO₂ 排放量最小为目标,建立了节能减排下燃煤机组电量分配优化模型,求解机组最优负荷区间. 文献[10]采用机组发电和 CO₂ 排放联合调度的方式,在考虑了线路潮流约束的基础上,寻求经济目标与排放目标的折中解.

此外,部分文献则根据燃煤机组发电量与 CO₂ 排放实测量建立了机组负荷-碳排放特性模型. 文献

[11-13]试图通过引入曲线拟合的方式,采用拟合效果更为准确的三次多项式函数模型表示燃煤机组 CO₂ 排放特性,使得环境-经济调度算法更加靠近最优解,进而优化电力系统环境-经济调度方案. 文献[14-16]则进一步利用包含指数项的多项式函数表示燃煤机组综合排放特性,从而更为精准地计算机组 CO₂ 排放量.

综上所述,国内外学者已对燃煤机组 CO₂ 排放特性模型进行了大量研究,但是需要注意到,由于我国燃煤机组运行已进入超低排放阶段,传统的 CO₂ 排放特性模型与参数已不能充分适用电力系统的精准调度需求.

针对上述问题,本文拟从电力系统环境-经济调度需求角度出发,深入研究燃煤发电与 CO₂ 排放之间的映射关系,确定新型燃煤机组的 CO₂ 排放强度,开发服务于电力系统环境-经济调度研究需求的新型燃煤机组负荷-碳排放特性模型,以期为电力行业降碳研究与实践提供一定的理论和技术支撑.

1 火电装机容量与煤耗量变化情况分析

近年来,我国的能源生产结构和消费结构都呈现向清洁能源转变的大趋势,火电装机容量占比逐年下降^[17],如图 1 所示,其中: I_m 为火电装机容量; C_m 为火电装机容量占比. 2019 年火电装机容量约占全国装机容量的 59.2%,较 2010 年下降近 15%;但是,火电实际装机总量却不降反升,2010 年至 2019 年期间增长近 4 800 GW.

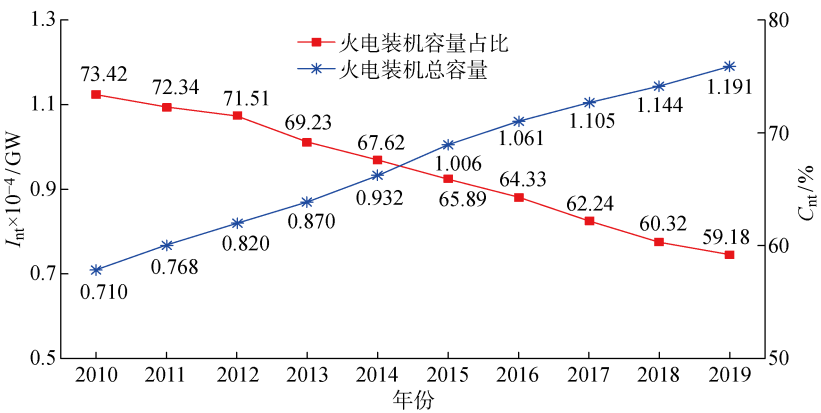


图 1 火电装机容量各阶段变化
Fig. 1 Variation of installed capacity of thermal power at different stages

与此同时,即便煤电在我国能源结构中的占比逐年下降,燃煤消耗总量却呈现波动上升趋势,如图 2 所示. 其中: F_c 为煤电年均燃煤消耗量; C_c 为能源结构占比. 2019 年我国煤电约占能源结构的 57.7%,

与 2010 年相比下降 11.5%;燃煤消耗量约为 28 亿吨标准煤,较 2010 年增长近 20%.

整体而言,虽然我国火电机组装机容量占比逐年下降、煤电能源结构占比逐年降低,但火电装机与

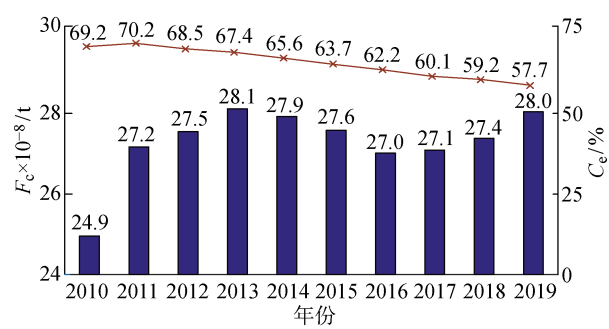


图 2 燃煤消耗总量各阶段变化

Fig. 2 Variation of total coal consumption at different stages

燃煤消耗总量却并未减小.同时,文献[18-19]也指出,虽然我国能源结构不断优化,风电、光电、核电等非化石能源占比逐年增加,但是,未来 15 年我国一次能源以煤为主的自然禀赋并不会发生变化,煤电作为我国电力供应主力之一的地位仍将持续.因此,分析燃煤机组 CO₂ 排放强度变化情况,开发新型燃煤机组负荷-碳排放特性模型,不仅有利于准确地把握我国火电行业温室气体排放量,还将对助力实现我国的“碳达峰、碳中和”目标具有重大现实意义.

2 燃煤机组碳排放强度变化分析

2.1 燃煤机组 CO₂ 排放强度变化情况

自 2010 年以来,我国的煤电 CO₂ 排放强度持续下降[20].经中电联统计,2020 年我国的煤电 CO₂ 排放强度降至 866 g/(kW·h),相比于 2010 年下降近 100 g/(kW·h),具体变化如图 3 所示,其中: E_{int} 为煤电年均 CO₂ 排放强度.

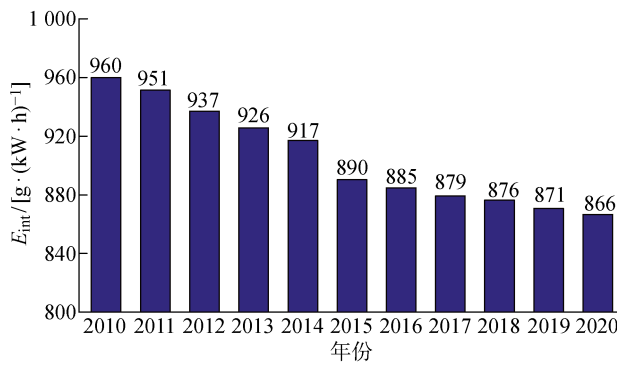


图 3 燃煤机组碳排放强度变化情况

Fig. 3 Change of carbon emission intensity of coal-fired units

电力行业贯彻执行燃煤机组“上大压小”政策是降低我国碳排放强度的关键因素.根据文献[21]中数据,截止 2003 年,我国已关停大部分发电容量小于 50 MW 的燃煤机组,并从 2007 年开始进一步关

停装机容量小于 200 MW 的机组,而在 2016 年之后,300 MW 及以上的机组已成为我国煤电主力,约占煤电总装机容量的 90.56%.机组容量的增大有利于提高发电能效水平,降低电力碳排放强度.

2.2 燃煤机组碳排放测量方法

目前,国际认可的燃煤机组 CO₂ 排放核算方法可分为质量守恒法和在线监测法[22].质量守恒法起源于政府间气候变化专门委员会(IPCC),因其计算简单而被广泛应用.但通过近几年的研究表明,随着监测技术的发展,使用烟气连续监测系统(CEMS)在线测量可以准确地监测机组尾部烟道 CO₂ 体积分数、烟气流量、烟气温度、烟气压力、烟气含湿量等信息,可以更好地弥补质量守恒法中人为干扰多、误差较大、成本高等缺点[23].

为了更加直观地反应燃煤机组负荷率对于 CO₂ 排放强度的影响,便于对不同容量机组进行更为精准的调度,本文基于在线监测法,结合《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》[24],对机组运行过程产生的 CO₂ 表示如下:

M_{CO_2} = \frac{pq_v(1-\beta) \times 44}{RT} \varphi(CO_2) \times 10^{-3} \tag{1}

式中: M_{CO_2} 为 CO₂ 排放速率; p 为烟气压力; q_v 为烟气体积流量; β 为烟气湿度; R 为标准摩尔气体常数; T 为烟气温度; $\varphi(CO_2)$ 为烟气中 CO₂ 体积分数.

监测时间段内 CO₂ 排放强度、排放量可分别采用下式计算:

E_{av} = \frac{1\,000M_{CO_2}}{P_{out}} \tag{2}

G_{CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{1\,000} \tag{3}

式中: E_{av} 为机组单位时间的 CO₂ 平均排放强度; P_{out} 为机组的输出功率; G_{CO_2} 为机组的 CO₂ 排放量.

2.3 燃煤机组 CO₂ 排放强度分析

利用文献[25]中数据,采用上述燃煤机组碳排放强度测量方法,可得出 600 MW 机组不同输出功率下的 CO₂ 排放强度分布,如图 4 所示.由图 4 可以看出,在实际计算中,由于机组工况的具体条件不定,即使在同一负荷水平得出的 CO₂ 排放数据也有所差别.因此,在一定时期内,各负荷水平下得出的 CO₂ 排放强度数据呈现离散现象,各个点均只能反映机组在特定情况下 CO₂ 排放情况,不能代表机组的 CO₂ 排放强度水平.

为了减小测量误差与噪声干扰、保证燃煤机组排放数据的准确性,本文采用 K-Medoids 聚类分析

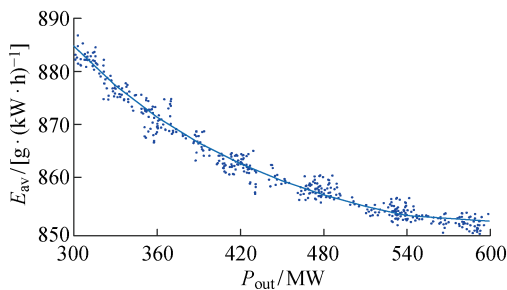


图 4 600 MW 燃煤机组 CO₂ 排放强度散点图

Fig. 4 Scatter diagram of CO₂ emission intensity of 600 MW coal-fired units

的方法确定机组各典型工况下的 CO₂ 排放强度基准值,并在此基础上,归纳分析不同容量机组的供电煤耗率与 CO₂ 排放强度.在 K -Medoide 聚类分析中, $\mathbf{X}=\{\mathbf{X}_l|\mathbf{X}_l\in\mathbf{R},l=1,2,\cdots,n\}$ 为样本数据集, k 为数据所属类别个数, $\mathbf{S}=\{\mathbf{S}_1,\mathbf{S}_2,\cdots,\mathbf{S}_k\}$ 为数据所属聚类簇, $\mathbf{B}=\{\mathbf{B}_j|\mathbf{B}_j\in\mathbf{R},j=1,2,\cdots,k\}$ 为各聚类簇的初始聚类中心,计算过程如下^[26]:

$$\text{Dist}(\mathbf{X}_l,\mathbf{B}_j)=\sqrt{(\mathbf{X}_l-\mathbf{B}_j)^{\text{T}}(\mathbf{X}_l-\mathbf{B}_j)}\quad(4)$$

$$\mathbf{D}_j=\arg\min_{\mathbf{X}_l\in\mathbf{S}_j}\sum_{\mathbf{X}_j\in\mathbf{S}_j}\|\mathbf{X}_j-\mathbf{X}_l\|^2\quad(5)$$

$$\delta=\sum_{j=1}^k\sum_{\mathbf{X}_l\in\mathbf{S}_j}|\mathbf{X}_l-\mathbf{D}_j|\quad(6)$$

式中: \mathbf{D}_j 为聚类簇 \mathbf{S}_j 的聚类中心; δ 为所有数据点聚类偏差和.

首先,随机选择 k 个初始聚类中心 $\mathbf{B}_1,\mathbf{B}_2,\cdots,\mathbf{B}_k$,并利用式(4)计算每一个数据样本 \mathbf{X}_l 到各个聚类中心 \mathbf{B}_j 的欧式距离,从而将数据样本分配到聚类簇 \mathbf{S}_j 中;其次,用聚类簇 \mathbf{S}_j 内样本点替换掉原始中心点,并利用式(5)选取聚类效果最好的样本点 \mathbf{D}_j 作为该聚类簇中新的中心点;上述过程将不断重复

直至准则函数式(6)收敛.

本文以 600 MW 燃煤机组容量的 5% 作为一个单位刻度,将数据样本分为 11 组($k=11$),得出了机组负荷率从 50%~100% 下的 CO₂ 排放强度数据.聚类结果如图 5 所示,其中: E_{ag} 为机组在各典型工况下的 CO₂ 排放强度基准值.由图 5 可以看出,燃煤机组 CO₂ 排放强度基准值随机组负荷的增加而减少.

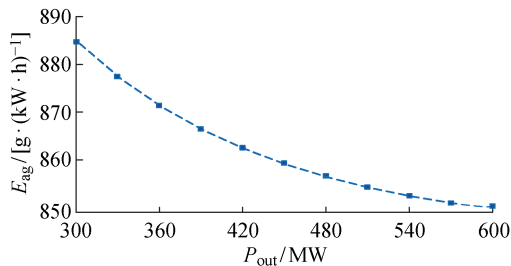


图 5 600 MW 燃煤机组 CO₂ 排放强度聚类图

Fig. 5 Cluster diagram of CO₂ emission intensity of 600 MW coal-fired units

在此基础上,本文选取了 200 MW、300 MW、600 MW 和 1 000 MW 4 种不同容量机组在 50%、75% 和 100% 时的 3 类负荷工况,归纳了每类负荷工况下的机组供电煤耗率与 CO₂ 排放强度,结果如表 1 所示,其中: I_g 为机组成装机容量.由表 1 可以看出,在负荷相同的条件下,机组成装机容量越高,供电煤耗率与 CO₂ 排放强度往往越低.除此之外,机组在不同负荷工况下的供电煤耗率与 CO₂ 排放水平差异较大,对于装机容量在 300 MW 以上的机组,当机组负荷率增加 5% 时,其供电煤耗率可以减少 0.4~3.2 g/(kW·h),CO₂ 排放强度可以减少 1.6 g/(kW·h) 以上.

表 1 不同容量机组供电煤耗和 CO₂ 排放强度典型值

Tab. 1 Typical coal consumption and CO₂ emission intensity of units of different capacities

负荷率/%	$I_g=200\text{ MW}$		$I_g=300\text{ MW}$		$I_g=600\text{ MW}$		$I_g=1\,000\text{ MW}$	
	煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	排放强度/[g·(kW·h) ⁻¹]	煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	排放强度/[g·(kW·h) ⁻¹]	煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	排放强度/[g·(kW·h) ⁻¹]	煤耗/[g·(kW·h) ⁻¹]	排放强度/[g·(kW·h) ⁻¹]
50	380	1 065	337	945	316	885	305	848
75	343	950	322	900	307	859	289	805
100	325	910	318	885	302	851	282	790

3 新型燃煤机组负荷-碳排放特性建模分析

以具有发电调峰代表性的亚临界 300 MW 和

600 MW 机组为例,利用式(1)和(3),对文献[27]中实测的燃煤机组 CO₂ 排放数据进行预处理,并采用 K -Medoide 聚类分析方法得出燃煤机组在不同负荷下的 CO₂ 排放量基准值如图 6 所示,其中: G_{ag} 为机

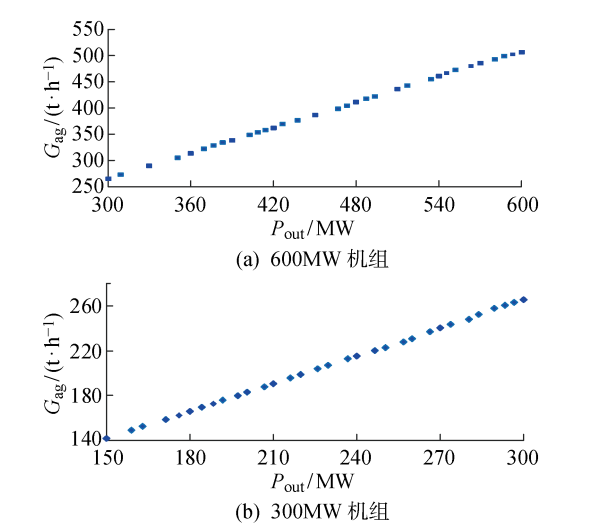


图 6 600 MW 和 300 MW 燃煤机组负荷-碳排放图
Fig. 6 Load-carbon emission diagram of 600 MW and 300 MW coal-fired units

组 CO₂ 排放量基准值。

采用二次函数形式的负荷-碳排放特性模型对图 6 中数据进行拟合,如下式所示:

$$G_{ag} = aP^2 + bP + c \tag{7}$$

式中: P 为机组的平均输出功率; a 、 b 、 c 分别为关于燃煤机组功率二次方、一次方系数和常数项,统称为机组排放系数。

建立负荷-碳排放特性模型的目标函数为

$$\min H = \sum_{s=1}^N [G_{P_s}^{CO_2} \Delta t - G_s]^2 = \sum_{s=1}^N [(aP_s^2 + bP_s + c) \Delta t - G_s]^2 \tag{8}$$

式中: N 为机组调度总时段数; s 为时段号; G_s 为机组第 s 时段的 CO₂ 排放量(在线监测得出); $G_{P_s}^{CO_2}$ 为由待拟合负荷-碳排放特性模型求得的、机组输出功率为 P_s 时的单位小时 CO₂ 排放量; Δt 为调度时段长度; H 为机组调度周期内待拟合模型碳排放计算值和实测值的误差平方总和,拟合的目标是使 H 达到最小。

同时,为保证拟合函数可以反映燃煤机组碳排放特性的关键特征,并在关键特征点上得到有效“钳制”,因此,建立负荷-碳排放特性模型的约束条件为^[28]

$$\overline{G}_{ag} = a\overline{P}^2 + b\overline{P} + c \tag{9}$$

$$G_{P_{max}}^{CO_2} = aP_{max}^2 + bP_{max} + c \tag{10}$$

式中: \overline{G}_{ag} 、 \overline{P} 分别为机组调度周期内 CO₂ 排放总量平均值和功率输出平均值,具体数值由图 6 中 CO₂ 排放量和功率输出累积值折算获得; P_{max} 为机

组额定最大输出功率; $G_{P_{max}}^{CO_2}$ 为机组最大输出功率 P_{max} 对应的单位小时 CO₂ 排放量。若出现多个 $G_{P_{max}}^{CO_2}$ 数据对应同一个 P_{max} 数据的问题,应按数值由大到小排列方式筛选出最靠前的几个数据,将与其余数据偏差较小的点确定为最终数据。

在以上目标函数和相应约束关系式的基础上,参考文献[28],利用增广拉格朗日函数求得模型系数结果如表 2 所示。从表 2 中的拟合结果看出,燃煤机组负荷-碳排放特性模型二次项系数为正值,说明机组的 CO₂ 排放曲线为凸曲线,此时收敛求得的任何局部最优解即为模型全局最优解。因此,该模型可以更好地服务于电力系统环境-经济调度中最优解的求取。

表 2 燃煤机组负荷-碳排放特性模型系数辨识值
Tab. 2 Coefficient identification values of carbon emission characteristics of coal-fired units

$I_g /$ MW	$a / (t \cdot$ $MW^{-2} \cdot h^{-1})$	$b /$ $[t \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	$c /$ $(t \cdot h^{-1})$
100~200	0.000 276 6	0.656 496	39.063 752
200~300	0.000 129 6	0.764 384	24.132 013
300~600	0.000 047 1	0.773 090	29.265 488
600~1 000	0.000 055 2	0.653 291	87.038 448

4 验证分析

4.1 理论验证

根据《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[23] 中的碳守恒法可知,在电厂实际的发电过程中,当煤粉含碳量一定时,碳排放量与煤耗量之间存在近似线性关系,可根据下式按完全燃烧反应计算:



此时,利用单位标准煤的 CO₂ 排放系数与煤耗乘积,即可求得燃煤机组的碳排放强度。计算标准煤的 CO₂ 排放系数需要确定其单位质量含碳量 U_c 以及碳氧化率 γ ,两者可分别由下式表示^[29]:

$$U_c = \frac{Q_{st} W_{ar}(C)}{Q_{lw}} \tag{12}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\lambda_z U_z + \lambda_h U_h}{F_a U_{mc}} \tag{13}$$

式中: Q_{st} 、 Q_{lw} 分别为标准煤和燃煤的低位发热量; $W_{ar}(C)$ 为燃煤的平均收到基含碳量; λ_z 、 λ_h 为炉渣、飞灰产量; U_z 、 U_h 为炉渣、飞灰含碳量; F_a 为机组燃煤消耗量; U_{mc} 为燃煤质量含碳量; η 为除尘器效率。因此,机组碳排放强度可以表示为

$$E_{av} = U_c \gamma \zeta \tag{14}$$

式中: ζ 为机组供电煤耗率. 利用上述方法,采用文献[30]中燃煤机组生产数据与煤耗数据,获得各容量机组碳排放强度如表 3 所示.

表 3 中,各典型容量等级机组所对应碳排放强度与本文提出的燃煤机组负荷-碳排放模型计算值

表 3 燃煤机组供电煤耗和 CO₂ 排放强度值

Tab. 3 Power supply coal consumption and CO₂ emission intensity values of coal-fired units

压力参数	$I_g/$ MW	$\zeta/$ [g · (kW · h) ⁻¹]	$E_{av}/$ [g · (kW · h) ⁻¹]
超超临界	1 000	288	806
超临界	600	306	856
亚临界	300	319	893
超高压	200	360	1 008

表 4 机组性能参数

Tab. 4 Performance parameters of units

机组 编号	机组出力		煤耗成本系数			CO ₂ 排放系数			$r_{\text{amp}}/$ (MW · h ⁻¹)	$t_{\text{on}}/$ h	$t_{\text{off}}/$ h
	$P_{\text{max}}/$	$P_{\text{min}}/$	$\alpha_i/(\text{美元} \cdot$	$\beta_i/[\text{美元} \cdot$	$\gamma_i/(\text{美元} \cdot$	$a_i/(\text{t} \cdot$	$b_i/[\text{t} \cdot$	$c_i/$			
	MW	MW	MW ⁻² · h ⁻¹)	(MW · h) ⁻¹]	h ⁻¹)	MW ⁻² · h ⁻¹)	(MW · h) ⁻¹]	(t · h ⁻¹)			
Y1	455	150	0.000 48	16.19	1 000	0.022	−2.86	130	130	8	8
Y2	455	150	0.000 31	17.26	970	0.020	−2.72	132	130	8	8
Y3	130	20	0.002 00	16.60	700	0.044	−2.94	138	60	5	5
Y4	130	20	0.002 11	16.50	680	0.058	−2.35	130	60	5	5
Y5	162	25	0.003 98	19.70	450	0.065	−2.36	125	90	6	6
Y6	80	20	0.007 12	22.26	370	0.080	−2.28	110	40	3	3
Y7	85	25	0.000 79	27.74	480	0.075	−2.36	135	40	3	3
Y8	55	10	0.004 13	25.92	660	0.082	−1.29	157	40	1	1
Y9	55	10	0.002 20	27.27	665	0.090	−1.14	160	40	1	1
Y10	55	10	0.001 73	27.79	670	0.084	−2.14	138	40	1	1

表 5 系统各时段负荷

Tab. 5 System load in each time period

时段/h	负载/MW	时段/h	负载/MW	时段/h	负载/MW
1	700	9	1 300	17	1 000
2	750	10	1 400	18	1 100
3	850	11	1 450	19	1 200
4	950	12	1 500	20	1 400
5	1 000	13	1 400	21	1 300
6	1 100	14	1 300	22	1 100
7	1 150	15	1 200	23	900
8	1 200	16	1 050	24	800

基本一致,如此,本文对燃煤机组 CO₂ 排放强度的理论分析,以及由此建立的负荷-碳排放特性模型,符合现阶段我国燃煤机组碳排放的实际情况.

4.2 算例验证

为验证燃煤机组负荷-碳排放特性模型在电力系统环境-经济调度中的适用性,本文采用文献[31]中 10 机组算例,在满足系统安全约束的同时,利用环境-经济调度对系统内 10 台燃煤机组的发电量进行合理分配,并比较系统在不同调度目标下的煤耗成本与 CO₂ 排放情况. 本文所采用的经济调度模型与参考文献[32-33]相同,包括功率平衡约束、机组启停约束等. 各机组参数如表 4 所示,各时段负荷如表 5 所示. 其中: P_{min} 为机组额定最小出力; α_i 、 β_i 、 γ_i 为机组 i 的燃煤成本系数; a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的排放系数; r_{amp} 为机组的爬坡速率; t_{on} 、 t_{off} 分别为机组最小开、关机时间.

考虑系统经济性指标最优时,调度目标函数如下^[33-34]:

$$\min J = \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^N (\alpha_i P_{i,s}^2 + \beta_i P_{i,s} + \gamma_i) \Delta t \tag{15}$$

式中: J 为系统煤耗成本; $P_{i,s}$ 为机组 i 第 s 时段的平均输出功率.

考虑系统 CO₂ 排放量最小时,调度目标函数如下:

$$\min G_{\sum}^{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^N (a_i P_{i,s}^2 + b_i P_{i,s} + c_i) \Delta t \tag{16}$$

式中: $G_{\sum}^{\text{CO}_2}$ 为调度周期内系统 CO₂ 排放总量. 排放特性模型系数 a_i 、 b_i 、 c_i 可分为两类,一类是参照文

献[34]生成的燃煤机组传统碳排放特性模型(见表 4);另一类采用本文提出的燃煤机组新型负荷-碳排放特性模型(见表 2).此时,系统中机组 Y1 和 Y2 采用 300~600 MW 容量级模型系数,其余机组采用 100~200 MW 容量级模型系数.

算例包含以下 3 种情形:

- (1) 情形 I——以系统经济性指标为优化目标,采用传统排放特性模型进行调度;
- (2) 情形 II——以系统碳排放量最小为目标,采用传统排放特性模型进行调度;
- (3) 情形 III——以系统碳排放量最小为目标,采用本文的排放特性模型进行调度.

表 6 比较了 3 种情形下的系统总排放量.可以看出,情形 III 中系统的 CO₂ 排放总量为 25 869 t,远小于情形 I 和情形 II 的排放总量.结合算例系统 24 h 的总负荷量(27 100 MW),可由所建模型计算得到燃煤机组平均碳排放强度为 954 g/(kW·h),相较于情形 I 的 2 066 g/(kW·h)和情形 II 的 1 597 g/(kW·h),该值更接近现阶段我国燃煤机组碳排放强度实际值 790~1 065 g/(kW·h)^[29-30].

表 6 不同模型优化结果比较

优化模型	排放总量/t
情形 I	55 984
情形 II	43 272
情形 III	25 869

上述 3 种情形下,系统内 100 WM 容量等级以上机组各时段调度结果如图 7 所示,其中: t 为系统运行调度时段.由于机组 Y1 的煤耗成本较低,所以在以经济性为目标的算例情形 I 中对其利用率最高,而在以系统碳减排为目标的情形 II 和情形 III 中,则增加了排放强度较低的机组 Y2 的出力占比.对比情形 II 和情形 III 的调度结果可以看出,同样是以碳减排为调度目标,不同排放特性模型将产生较大差异的调度结果,而本文所提出模型更加符合我国机组的实际排放情况,根据其制定发电计划,有助于降低电力系统实际碳排放.

相同调度目标下,两种不同排放特性模型各时段的 CO₂ 排放量及排放强度具有较大差异,如图 8 所示.由图 8 可知,情形 III 下各时段的排放强度介于 875 g/(kW·h)和 1 015 g/(kW·h)之间,较情形 II 更为契合我国燃煤机组碳排放强度实际区间.传统的碳排放特性模型多是针对上世纪典型燃煤机

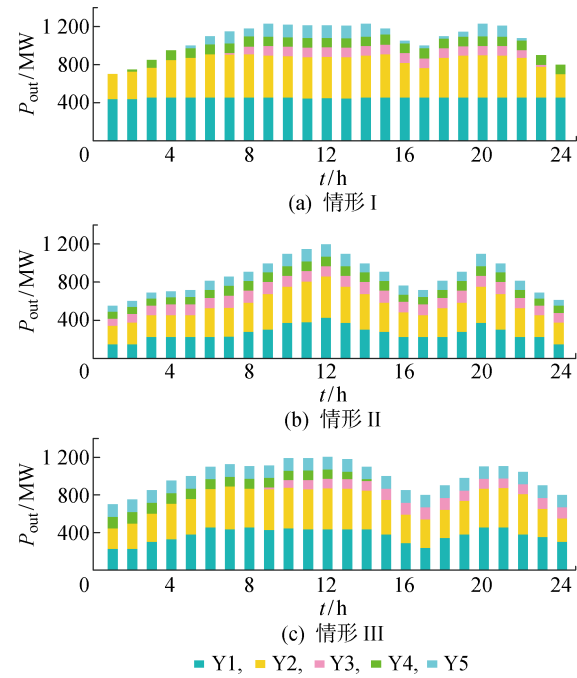


图 7 系统不同时段 of 机组负荷分配图
Fig. 7 Unit load distribution diagram in different periods of system

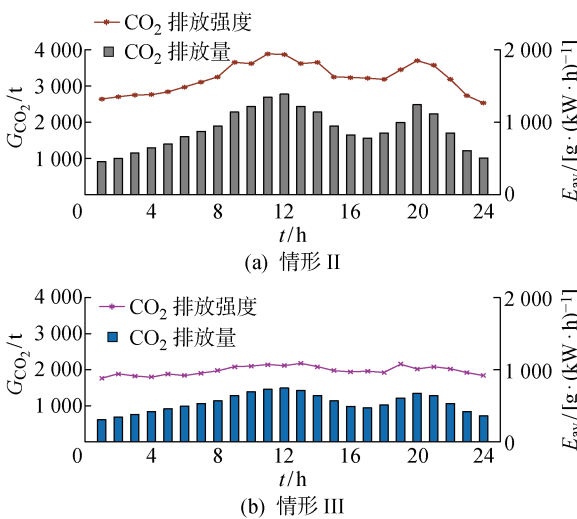


图 8 系统不同时段 of CO₂ 排放图
Fig. 8 CO₂ emission diagram of system in different time periods

组,在其煤耗成本函数基础上添加罚因子而得,目前,我国燃煤机组经历了多轮升级改造,各项技术性明显提升,煤耗强度和排放强度均大幅降低,传统模型的排放系数已难以准确反映当前燃煤机组的排放特性,如此,本文所建立的新型燃煤机组碳排放特性模型具有重要意义,将其应用于环境-经济调度中,能够更好地掌握燃煤机组实际排放特征,提高电力行业科学化、精细化降碳水平.

5 结语

本文在深入研究我国典型燃煤机组 CO_2 排放数据的基础上,分析了不同容量等级机组在不同负荷率下的 CO_2 排放强度,并结合在线监测法与实际数据,建立了受基本方程规范的新型燃煤机组碳排放特性模型;利用典型算例系统,通过与传统碳排放模型比较,证明了所提出模型更加符合我国当前燃煤机组碳排放实际情况,能够为电力系统环境-经济调度提供更为准确的分析依据.后续研究将进一步完善所建立模型,细化考虑燃煤机组运行状态对其碳排放特性的影响.

参考文献:

- [1] 卫志农, 向育鹏, 孙国强, 等. 计及碳排放含有碳捕集电厂电网的多目标动态最优潮流[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 11-17.
WEI Zhinong, XIANG Yupeng, SUN Guoqiang, *et al.* Carbon emission-considered multi-objective dynamic optimal power flow of power system containing carbon-capture plant[J]. **Power System Technology**, 2012, 36(12): 11-17.
- [2] 周媛, 郑丽凤, 周新年, 等. 基于采伐剩余物的生物质固体燃料生态效益分析[J]. 森林工程, 2018, 34(1): 24-29.
ZHOU Yuan, ZHENG Lifeng, ZHOU Xinnian, *et al.* Eco-benefit evaluation of biomass solid fuel based on forest cutting ResiduesFull text replacement[J]. **Forest Engineering**, 2018, 34(1): 24-29.
- [3] 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. **Power System Technology**, 2009, 33(2): 1-7.
- [4] TANG L, QU J B, MI Z F, *et al.* Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards[J]. **Nature Energy**, 2019, 4(11): 929-938.
- [5] TALAQ J H, EL-HAWARY F, EL-HAWARY M E. A summary of environmental/economic dispatch algorithms[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1994, 9(3): 1508-1516.
- [6] VENKATESH P, GNANADASS R, PADHY N P. Comparison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2003, 18(2): 688-697.
- [7] S KULKARNI A G K. Combined economic and emission dispatch using improved backpropagation neural network[J]. **Electric Machines & Power Systems**, 2000, 28(1): 31-44.
- [8] 刘盛松, 邵能灵, 侯志俭, 等. 基于最优潮流与模糊贴近度的电力系统环境保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 21-26.
LIU Shengsong, TAI Nengling, HOU Zhijian, *et al.* Study on environmental protection of power systems based on optimal power flow and fuzzy nearness[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(4): 21-26.
- [9] 谭忠富, 于超. 节能减排目标下燃煤机组电量分配模糊优化模型[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 219-223.
TAN Zhongfu, YU Chao. A fuzzy optimization model for allocation of generated energy among coal-fired units with targets of energy saving and emission reduction[J]. **Power System Technology**, 2012, 36(1): 219-223.
- [10] 刘晓, 艾欣, 彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 213-218.
LIU Xiao, AI Xin, PENG Qian. Optimal dispatch coordinating power generation with carbon emission permit for wind farms integrated power grid considering demand response[J]. **Power System Technology**, 2012, 36(1): 213-218.
- [11] 陈艺璇, 余涛. 考虑大气污染物时空分布控制的多时间尺度协调多目标优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2280-2296.
CHEN Yixuan, YU Tao. Multi-time scale coordinated and multi-objective optimal dispatch strategy incorporating temporal and spatial distribution control of air pollutants[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2019, 39(8): 2280-2296.
- [12] ADHINARAYANAN T, SYDULU M. Particle swarm optimisation for economic dispatch with cubic fuel cost function[C]//TENCON 2006-2006 IEEE Region 10 Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-4.
- [13] KRISHNAMURTHY S, TZONEVA R. Impact of price penalty factors on the solution of the combined economic emission dispatch problem using cubic criterion functions[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 1-9.
- [14] 彭春华. 综合环境保护及竞价风险的发电侧经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 97-102.
PENG Chunhua. Economic operation problem of generating side considering environmental protection and bidding risk[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2008, 28

- (28): 97-102.
- [15] 彭春华, 孙惠娟. 基于非劣排序微分进化的多目标优化发电调度[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(34): 71-76.
- PENG Chunhua, SUN Huijuan. Multi-objective optimization power dispatch based on non-dominated sorting differential evolution [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(34): 71-76.
- [16] ABIDO M A. Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(4): 1529-1537.
- [17] 宁志, 丛星亮, 陈永龙. 300 MW 和 1 000 MW 燃煤机组能耗和污染物排放特性[J]. *电站辅机*, 2019, 40(1): 28-33.
- NI Zhi, CONG XingLiang, CHEN YongLong. Energy consumption and pollutant emission performance of 300 MW and 1 000 MW coal-fired power units[J]. *Power Station Auxiliary Equipment*, 2019, 40(1): 28-33.
- [18] 叶勇健. 2030 年高效、绿色、灵活、经济的燃煤发电技术路线[J]. *电力科技与环保*, 2019, 35(2): 28-33.
- YE Yongjian. Technological roadmap of coal-fired power featuring in high efficiency, green, flexibility and economical competition up to 2030 [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2019, 35(2): 28-33.
- [19] 中电联行业发展与环境资源部. 中国煤电清洁发展报告[J]. *中国电力企业管理*, 2017(28): 49-51.
- Ministry of Industry Development and Environmental Resources at China Electricity Council. China coal power clean development report [J]. *China Power Enterprise Management*, 2017(28): 49-51.
- [20] 朱法华, 许月阳, 孙尊强, 等. 中国燃煤电厂超低排放和节能改造的实践与启示[J]. *中国电力*, 2021, 54(4): 1-8.
- ZHU Fahua, XU Yueyang, SUN Zunqiang, *et al.* Practice and enlightenment of ultra-low emission and energy-saving retrofit of coal-fired power plants in China [J]. *Electric Power*, 2021, 54(4): 1-8.
- [21] MA Z Z, DENG J G, LI Z, *et al.* Characteristics of NO_x emission from Chinese coal-fired power plants equipped with new technologies [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 131: 164-170.
- [22] 王霖晗, 朱林, 张晶杰, 等. 欧盟火电厂二氧化碳排放在线监测系统质量保证体系对中国的启示[J]. *中国电力*, 2020, 53(3): 154-158.
- WANG Muhan, ZHU Lin, ZHANG Jingjie, *et al.* Practice of quality assurance system of carbon dioxide emission on-line monitoring system in the European union [J]. *Electric Power*, 2020, 53(3): 154-158.
- [23] 国家发展和改革委员会. 中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [EB/OL] (2013-11-04) [2021-06-05]. <http://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1101.pdf>.
- National Development and Reform Commission. Guidelines on accounting methods and reporting of greenhouse gas emissions from China's power generation enterprises (Trial) [EB/OL] (2013-11-04) [2021-06-05]. <http://www.gov.cn/gzdt/att/att/site1/20131104/001e3741a2cc13e13f1101.pdf>.
- [24] 李峥辉, 卢伟业, 庞晓坤, 等. 火电企业 CO_2 排放在线监测系统的研发应用[J]. *洁净煤技术*, 2020, 26(4): 182-189.
- LI Zhenghui, LU Weiye, PANG Xiaokun, *et al.* Research and application of on-line monitoring system for CO_2 emissions from thermal power enterprises [J]. *Clean Coal Technology*, 2020, 26(4): 182-189.
- [25] 董玉亮, 袁家海, 马丽荣. 面向灵活性发电的燃煤机组大气排放特性分析[J]. *发电技术*, 2018, 39(5): 425-432.
- DONG Yuliang, YUAN Jiahai, MA Lirong. Air emissions characteristics of coal-fired power unit for flexibility generation [J]. *Power Generation Technology*, 2018, 39(5): 425-432.
- [26] 刘叶, 吴晟, 周海河, 等. 基于 K-means 聚类算法优化方法的研究[J]. *信息技术*, 2019, 43(1): 66-70.
- LIU Ye, WU Sheng, ZHOU Haihe, *et al.* Research on optimization method based on K-means clustering algorithm [J]. *Information Technology*, 2019, 43(1): 66-70.
- [27] 陈亮. 节能发电调度全过程优化模型与关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- CHEN Liang. Study on optimization models and key technologies for the whole process of energy-saving generation dispatch [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [28] 王漪, 柳焯, 柳进. 受基本方程规范的火电机组耗量特性系数辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(4): 1151-1160.
- WANG Yi, LIU Zhuo, LIU Jin. Fuel consumption characteristic coefficients identification restricted to basic equations for thermal power units [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(4): 1151-1160.
- [29] 张辉, 贾思宁, 范菁菁. 燃气与燃煤电厂主要污染物排放估算分析[J]. *环境工程*, 2012, 30(3): 59-62.
- ZHANG Hui, JIA Sining, FAN Jingjing. The major pollutants estimate analysis of gas and coal power

plants[J]. **Environmental Engineering**, 2012, 30(3): 59-62.

[30] 孙友源, 郑张, 秦亚琦, 等. 火电机组碳排放特性研究及管理建议[J]. **中国电力**, 2018, 51(3): 144-149.

SUN Youyuan, ZHENG Zhang, QIN Yaqi, *et al.* Study on carbon emission characteristics and suggestions on carbon emission management of coal-fired power plant[J]. **Electric Power**, 2018, 51(3): 144-149.

[31] ONGSAKUL W, PETCHARAKS N. Unit commitment by enhanced adaptive Lagrangian relaxation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2004, 19(1): 620-628.

[32] 郭丹阳, 班明飞, 于继来. 生态 GDP 核算体系下的差别化燃煤机组安全约束组合模型[J]. **中国电机工程学报**, 2019, 39(2): 524-535.

GUO Danyang, BAN Mingfei, YU Jilai. Security-constrained unit commitment model for differentiated coal-fired units under ecological GDP accounting system[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2019, 39(2): 524-535.

[33] BAN M F, YU J L, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Considering the differentiating health impacts of fuel emissions in optimal generation scheduling[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2020, 11(1): 15-26.

[34] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. **中国电机工程学报**, 2010, 30(22): 71-76.

ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Multi-objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2010, 30(22): 71-76.

(本文编辑:石易文)