

doi: 10.7690/bgzdh.2024.12.016

基于改进遗传算法的电力调度辅助决策模型

肖辅盛, 吴俊杰

(贵州电网有限责任公司贵阳供电局, 贵阳 550000)

摘要: 为改善现有混合配电网调度方法未同时考虑碳价格波动和风电不确定性等问题, 提出一种基于改进遗传算法的电力调度辅助决策模型。考虑风电不确定性和发电碳排放对风电集成系统中功率平衡的影响, 建立电力调度成本和碳排放目标函数以及功率输出约束、功率平衡约束、发电机组爬坡率约束函数; 应用决策空间降维、初始化种群和基因操作等策略, 提高算法执行效率及模型鲁棒性; 以 IEEE 33 节点测试馈线系统对所提电力调度模型进行了分析和验证。结果表明: 当碳价格从低变化到 high 时, 碳排放总量分别减少 0.029% 和 0.197%, 总发电成本分别增加 0.003% 和 0.055%。模型为电力调度辅助决策发展提供了一定借鉴作用。

关键词: 电力系统; 电力调度; 遗传算法; 优化; 目标函数

中图分类号: TP393; TM73 **文献标志码:** A

An Auxiliary Decision Model for Power Dispatching Based on Improved Genetic Algorithm

Xiao Fusheng, Wu Junjie

(Guiyang Power Supply Company, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the existing dispatching method of hybrid distribution network does not consider the fluctuation of carbon price and the uncertainty of wind power at the same time, a power dispatching assistant decision-making model based on improved genetic algorithm is proposed. Considering the influence of wind power uncertainty and power generation carbon emission on power balance in a wind power integration system, establishing a power dispatching cost and carbon emission objective function and power output constraint, power balance constraint and generating set ramp rate constraint function; The proposed power dispatching model is analyzed and verified with IEEE 33-bus test feeder system. The results show that when the carbon price changes from low to high, the total carbon emissions decrease by 0.029% and 0.197%, respectively, and the total power generation cost increases by 0.003% and 0.055%, respectively. The model provides a reference for the development of power dispatching assistant decision.

Keywords: power system; power dispatching; genetic algorithm; optimization; objective function

0 引言

近年来, 减少温室气体排放和应对气候变化是整个人类社会面临的 2 大挑战, 其中煤炭消费量增加是造成这一现象的最重要原因之一。随着网络、大数据、物联网、通信技术^[1-2]的不断发展, 发展低碳电力将促进电力行业的可持续发展, 进而成为实现低碳经济的关键步骤。

作为一种常用的电力调度技术, 动态经济排放调度^[3-4](dynamic economic emission dispatch, DEED)可以同时最小化燃料成本和碳排放, 同时满足考虑发电机在电力系统中行为的约束要求。此外, 在发展低碳电力的过程中, 将可再生能源整合到电力系统中是一种有效方式。尤其是风力发电, 由于其明显的低碳、可再生和廉价等优势, 已被广泛应

用于电力系统, 从而减少二氧化碳排放和发电的燃料成本。综上, 随着风力发电和低碳电力的出现, 将会对混合电力系统的运行提出新的挑战, 并给电力调度带来更多困难。

目前, 许多学者针对混合电力系统电力调度问题进行了研究。文献[5]提出一种改进的二阶段带补偿随机优化算法用于考虑风场出力高维相依性的电网动态经济调度问题求解, 从而有效解决大规模风电并网给电力系统的调度运行带来的问题。文献[6]构建了以燃料成本和污染排放为目标, 考虑传统发电机阀点效应、网络损耗、爬坡速率和旋转备用要求的 DEED 模型。文献[7]构建含风电及电动汽车的电力系统多目标动态环境经济调度模型, 从而有效解决风电的迅速发展及电动汽车的规模化应用给电

收稿日期: 2024-06-23; 修回日期: 2024-07-24

基金项目: 贵州电网有限责任公司贵阳供电局科技项目(060100KK52200010)

第一作者: 肖辅盛(1982—), 男, 重庆人。

力系统调度带来的新挑战。然而，由于研究观点和重点不同，这些模型和方法很少同时考虑碳价格波动和风电不确定性，也忽略了上述 2 个低碳因素与决策者管理态度之间的关系。

笔者综合考虑风电不确定性的干扰、碳价格的波动以及管理层对低碳因素态度的不可估量等特点，建立一种混合配电网电力调度模型。同时，为求得 pareto 解，提出一种改进遗传算法求解多目标电力调度目标函数。

1 模型建立

风电作为低碳能源的代表之一，其固有的不确定性将影响电力调度策略的优化过程。为此，笔者建立了考虑不确定性的 DEED 目标和约束模型。DEED 问题可看作一个多目标随机规划问题，约束模型考虑了发电的碳排放和燃料成本，同时满足负荷需求、旋转备用需求和发电约束。此外，笔者还将碳价格波动作为低碳因素的另一个约束，在这 2 个低碳因素的影响下，最终可以确定一段时间内发电机组的生产水平。

1.1 目标函数

1.1.1 成本函数

考虑到风电不确定性对风电集成系统中的功率平衡的影响，发电成本因描述风电不确定性的风电场景而异。相应地，与每个场景的概率相关的成本函数可以描述如下：

$$\min F_1 = \min \sum_{s=1}^S P(s) \left\{ \sum_{f=1}^I \sum_{j=1}^M C_f(T_{f,t,s}) \right\}. \quad (1)$$

式中： s 为与风力发电不确定性相关的场景数量； I 为计划范围内的时间间隔量； M 为火力发电机组的数量； $T_{f,t,s}$ 为间隔时间 t 内场景 s 的第 f 个火力发电机组的调度输出； $P(s)$ 为场景 s 的概率； C_f 为第 f 个火电机组的成本函数。

考虑到阀点效应，笔者将每个火力发电机组的燃料成本函数构造为融合正弦函数和二次函数的模型。为此，成本函数可以进一步扩展如下：

$$C_f(T_{f,t,s}) = a_f T_{f,t,s}^2 + b_f T_{f,t,s} + d_f + \left| e_f \sin(g_f(T_{f,t,s}^{\min} - T_{f,t,s})) \times g_f \right|, \quad 1 \leq f \leq M, 1 \leq t \leq T, 1 \leq s \leq S. \quad (2)$$

式中： a_f 、 b_f 、 d_f 、 e_f 和 g_f 为第 f 个火电机组的成本系数； $T_{f,t,s}^{\min}$ 为第 f 个火电机组的发电下限。

1.1.2 排放函数

由于风电不确定性对风电集成系统中的功率平衡有影响，发电的碳排放随风电场景而变化，而风电场景与风电不确定性有关。同时，假设火力发电机组产生或多或少的碳排放，而风力发电机组不直接产生碳排放；因此，与每种场景的概率相关排放函数可按以下形式建立：

$$\min F_2 = \min \sum_{s=1}^S P(s) \left\{ \sum_{f=1}^I \sum_{j=1}^M E_f(T_{f,t,s}) \right\}. \quad (3)$$

式中 E_f 为第 f 个火电机组的碳排放函数。

同时，火电机组直接产生的碳排放可看作二次函数和指数函数的叠加，具体描述如下：

$$E_f(T_{f,t,s}) = \alpha_f T_{f,t,s}^2 + \gamma_f T_{f,t,s} + \lambda_f + \delta_f \exp(\tau_f T_{f,t,s}), \quad 1 \leq f \leq M, 1 \leq t \leq T, 1 \leq s \leq S. \quad (4)$$

式中： α_f 、 γ_f 、 λ_f 、 δ_f 和 τ_f 为第 f 个火电机组的碳排放系数。

1.2 约束函数

1.2.1 实际功率输出约束函数

电力调度中实际功率输出约束函数描述如下：

$$T_{f,t,s}^{\min} \leq T_{f,t,s} \leq T_{f,t,s}^{\max}, 1 \leq f \leq M, 1 \leq t \leq I, 1 \leq s \leq S. \quad (5)$$

式中： $T_{f,t,s}^{\max}$ 为第 f 个火电机组的发电上限； $T_{f,t,s}^{\min}$ 为第 f 个火电机组的发电下限。

1.2.2 实际功率平衡约束函数

考虑到系统网络损耗，电力系统必须满足的功率平衡约束：

$$\sum_{f=1}^M T_{f,t,s} + W_{t,s} = D_t + L_{t,s}, 1 \leq t \leq I, 1 \leq s \leq S. \quad (6)$$

式中： $W_{t,s}$ 为间隔时间 t 内场景 s 的风力发电量预测值； D_t 为间隔时间 t 时电力系统的总负荷需求； $L_{t,s}$ 为间隔时间 t 内场景 s 的输电线路损耗。

笔者基于直流潮流法和线路容量约束来计算每条线路的潮流。根据 Kron 损耗方程，电力系统传输损耗描述如下：

$$L_{t,s} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M T_{i,t,s} B_{ij} T_{j,t,s} + \sum_{i=1}^M B_{i0} T_{i,t,s} + B_{00}, \quad 1 \leq t \leq I, 1 \leq s \leq S. \quad (7)$$

式中： B_{00} 、 B_{ij} 和 B_{i0} 为输电网络功率损耗系数。

1.2.3 发电机组爬坡率约束函数

发电机组爬坡率用于约束每个机组在给定时间间隔内减少或增加的功率输出：

$$\begin{aligned} T_{f,t,s} - T_{f,t-1,s} &\leq UR_f I_{60}, \\ 1 \leq f \leq M, 1 \leq t \leq I, 1 \leq s \leq S; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} T_{f,t-1,s} - T_{f,t,s} &\leq DR_f I_{60}, \\ 1 \leq f \leq M, 1 \leq t \leq I, 1 \leq s \leq S. \end{aligned} \quad (9)$$

式中： UR_f 和 DR_f 分别为第 f 个火电机组的上升和下降速率极限； I_{60} 为每个时间间隔的时间长度。

2 模型求解

笔者提出一种基于改进遗传算法解决混合能源电力调度问题。为提高算法执行效率及模型鲁棒性，提出决策空间降维、初始化种群和基因操作等策略。

2.1 决策空间降维

由于电力调度时决策变量的空间维数过高，使得传统搜索算法在搜索时效率较低。提出降低决策空间的维数策略，从而提升算法搜索效率。

为得到降维后的最终搜索空间 O ，笔者首先分别为每个电力场景 s 计算3个长度为 L_e 的候补电力调度列表，分别记为 X_{i1} 、 X_{i2} 和 X_{i3} 。需注意，候补电力调度列表 X_{i1} 、 X_{i2} 和 X_{i3} 当前最优解。其次，将3个候选列表 X_{i1} 、 X_{i2} 和 X_{i3} 组合，得到最终决策空间 O_i ，即：

$$O_i = X_{i1} \cup X_{i2} \cup X_{i3}. \quad (10)$$

式中 \cup 为组合算子。重复上述过程，降维后的总决策空间 O 描述如下：

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_s\}. \quad (11)$$

式中 s 为电力场景的数目。此外，令最终推荐电力调度组合的长度为 L ，为保持降维前后搜索空间中相似的选择比率，有：

$$S/L_e = L_e/L; \quad (12)$$

$$L_e = \lfloor \sqrt{S \times L} \rfloor, S \gg L. \quad (13)$$

式中： $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整。式(12)和(13)表明降维后的决策空间可大大降低搜索负担。

2.2 初始化种群

一般情况下遗传算法种群都是随机生成的，因此覆盖了所有可能的解(搜索空间)。算法将在每一个连续世代中，从现有种群中选出一部分进行遗传形成新种群。

2.2.1 初始化操作

初始群体由一组染色体组成，且每个染色体表

示问题的一个解，并由一个 k 源向量表示。同时需注意，在群体产生过程中，应避免重复基因在同一染色体中。例如在染色体 $\{2, 5, 3, 2\}$ 中，数字2是重复的，这样的染色体构造必须避免。此外也应该避免在群体中重复相同的染色体，例如 $\{3, 4, 5, 8\}$ 和 $\{8, 3, 5, 4\}$ ，虽然顺序变换，但本质是重复过程。

2.2.2 初始化策略

此外，在多场景电力调度过程中，即使降维后，决策空间维数仍然很大；因此，随机初始化得到的初始种群质量较差。为解决上述问题，提出一种改进的初始化策略，不仅可以加快种群的收敛速度，而且可提高算法的性能。

改进的初始化策略执行过程中，对任意的电力场景 s 都有2类目标，即成本函数 C_f 和排放函数 E_f 。笔者在初始化中使用调和平均值平衡 C_f 和 E_f 。因此，有：

$$h = (2 \times C_f \times E_f) / (C_f + E_f). \quad (14)$$

式中 h 为经调和平均值平衡后的矩阵。

改进的初始化策略主要包括2个步骤：1) 对于每个电力场景 s ，可通过 r_{ij} 、 C_f 和 E_f 确定3个个体 P_1 、 P_2 和 P_3 ；2) 采用竞争进行选择。对于每个场景 s ，从 O_i 中随机选择2个调度 m 和 n ，并将 h_m 与 h_n 进行比较。如果 h_m 较小，则将 m 添加到候补列表中；否则，将 n 添加到候补列表中。通过该方式，最终选取 L 个调度，然后将其合并为调度策略。重复上述过程，则可以得到第 i 个场景的种群 P_i 。最后，将初始种群 P 的所有个体进行合并，则有：

$$P = \{P_1, P_2, \dots, P_s\}. \quad (15)$$

式中 S 为初始种群大小。

2.3 基因操作

1) 选择。选择操作思想是优先选择更好的染色体。选择复制具有高适应度值的染色体并移除具有低适应度值的染色体。需注意最佳染色体是通过评估其适应度值来确定。

从群体中选出最佳的候选个体作为其余算子的输入。有多种方法可以用来执行父代的选择，最广泛的选择之一是遵循轮盘赌选择机制。也就是说，来自群体的每个模型片段都有可能被选择，且选择概率与它们的适应度得分成比例。因此，具有高适应度值的候选人被选为下一代的概率更高。

2) 交叉。交叉算子用来模拟自然界中某些生物的有性生殖过程, 从而产生新的个体。也就是说, 2 个个体混合他们的基因组信息产生一个新的个体, 这个个体持有来自父母一方和另一方的一些基因信息。这可能使他更好(或更糟)地适应他的生活环境, 这取决于遗传自父母的遗传信息。

根据这一思想, 笔者应用模型片段的交叉算子以 2 个模型片段和一个随机生成的掩码作为输入, 将它们组合成 2 个新个体。掩码确定如何进行组合, 为模型片段的每个元素指示子代是从一个父代继承还是从另一个父代继承(如果该元素是否存在于父代上, 则包括该元素)。模型片段是产品模型中存在的元素的子集。由于 2 个模型片段都是从同一个产品模型中提取的, 因此它们的组合(应用掩码)将始终返回作为产品模型一部分的模型片段。结果, 将产生 2 个个体, 一个通过直接应用掩码, 另一个通过应用掩码的逆运算。

2.4 算法执行过程

介绍利用改进的遗传算法对电力调度在搜索空间中找到接近最优的调度策略。图 1 给出了该方法的执行过程。该方法包括输入、决策空间降维、初始化种群以及基因操作。

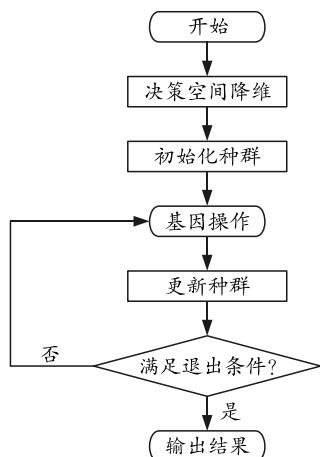


图 1 算法执行过程

步骤 1: 基于决策空间降维策略去除一些劣质解, 从而降低种群搜索难度, 并获得降维搜索空间 O 。

步骤 2: 对于每个电力场景 s , 基于初始化策略生成初始种群 P 。

步骤 3: 基因操作。选取交叉、变异操作最终生成新的种群 P_n 。对于交叉操作, 笔者选择将 2 个个体中相同的候补解保留给子代, 然后随机选择剩余的不同调度来填充其余的子代。对于变异操作,

笔者为交叉生成个体的每个基因位置生成一个随机数。如果随机数小于突变概率, 则从搜索空间 O 中随机选择一个不在推荐列表中的解来替换原始基因位置。

步骤 4: 更新种群。计算种群中所有个体的目标函数值, 然后采用非支配排序和拥挤距离排序获得的新种群 P_n 替换初始种群 P 。

步骤 5: 判断算法是否满足退出条件, 如果是则终止算法, 并输出推荐结果; 否则, 返回至基因操作。

3 仿真与分析

3.1 仿真场景

基于 IEEE 33 节点测试馈线系统对所提电力调度模型进行分析和验证, 具体如图 2 所示。系统包含具有排放水平和非平滑燃料成本函数的 6 个发电机组。表 1 为各发电机组相关参数。

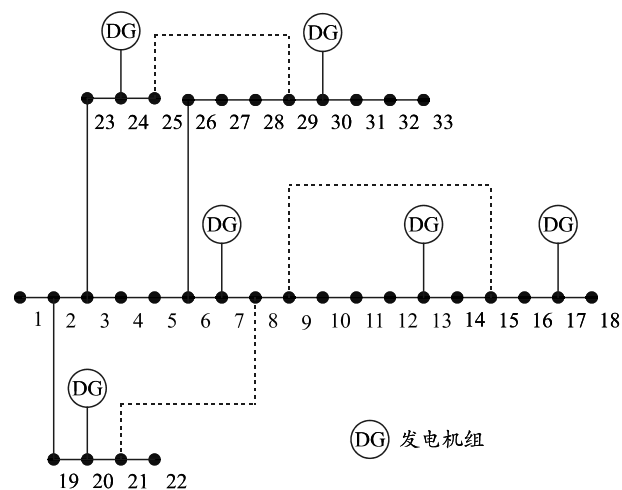


图 2 IEEE 33 节点测试系统

此外, 为简化模型, 假定损耗参数应在一段时间内保持不变。为有效模拟实际用电情况, 假设白天消耗的电力比夜间消耗的电力多。作为低碳因素之一, 依赖于风速分布的风电输出由于其不确定性和不稳定性, 可以视为一个随机变量。由于风功率与风速之间的关系, 风速区间的场景划分相当于风功率区间的划分。本文中, 切入风速和切出风速分别设置为 15 和 45 m/s, 额定风功率为 1 000 MW。根据风速的概率特性, 将风力涡轮机的运行范围细分为 100 个不同的间隔(场景), 风力场景的概率分布服从高斯分布, 具体如图 3 所示。为简化计算, 可以用中心值概率和区间长度的乘积来代替小区间的面积。因此, 每个场景的中心值定义为场景发送的概率。

表 1 各发电机组相关参数

参数	机组 1	机组 2	机组 3	机组 4	机组 5	机组 6
P_i^{\max} /MW	100.000 0	50.000 0	80.000 0	50.000 0	50.000 0	50.000 0
P_i^{\min} /MW	500.000 0	200.000 0	300.000 0	150.000 0	200.000 0	120.000 0
a_f /(元/(MW) ²)	0.007 0	0.009 5	0.009 0	0.009 0	0.008 0	0.007 5
b_f /(元/MWh)	7.000 0	10.000 0	8.500 0	11.000 0	10.500 0	12.000 0
d_f /(元/小时)	240.000 0	200.000 0	220.000 0	200.000 0	220.000 0	190.000 0
e_f /(元/小时)	130.000 0	110.000 0	120.000 0	110.000 0	120.000 0	100.000 0
g_f /(元/小时)	0.031 5	0.030 0	0.045 0	0.030 0	0.040 0	0.005 2
α_f (t/(MW) ² h)	0.327 7	0.327 7	-0.545 5	-0.545 5	-0.511 2	-0.511 2
γ_f (t/MW)	13.859 3	13.959 3	40.266 9	40.266 9	42.895 5	42.895 5
λ_f (t/h)	0.503 5	0.496 8	0.497 2	0.516 3	0.547 5	0.489 5
δ_f (t/h)	0.020 7	0.020 2	0.020 0	0.021 4	0.023 4	0.021 8
τ_f (t/MW)	80.000 0	50.000 0	65.000 0	50.000 0	50.000 0	50.000 0
UR_f /(MW/h)	120.000 0	90.000 0	10.000 0	90.000 0	90.000 0	90.000 0
DR_f /(MW/h)	100.000 0	50.000 0	80.000 0	50.000 0	50.000 0	50.000 0

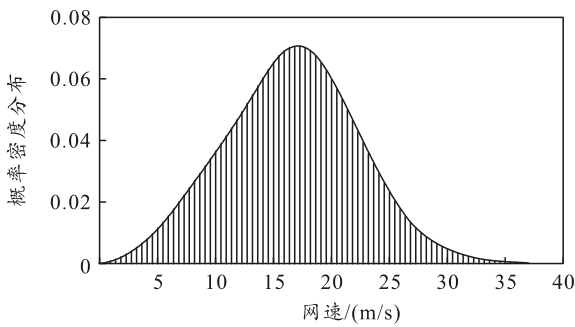


图 3 风力场景的概率分布模型

考虑到碳价格作为低碳因素的另一个指标，其波动性将通过决策中的权重系数间接影响调度策略。为此，笔者以中国某市碳交易市场为例，对其交易价格进行研究。图 4 所示为碳价格波段折线。从图中可以看出，碳价格随着时间的推移波动显著，其波动范围为 30~80 元/吨。

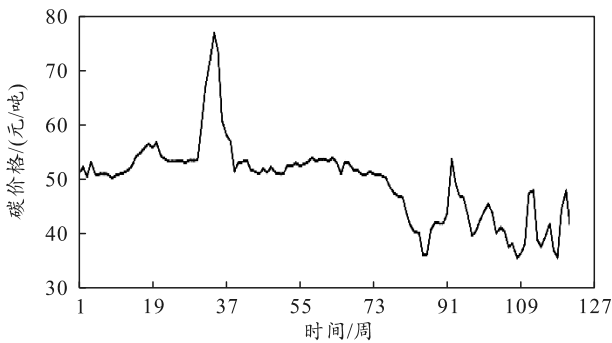


图 4 碳价格波段折线

3.2 模型求解

笔者基于 MatlabR2018B 构建改进遗传算法模型，从而最小化电力调度模型中的 2 个目标(燃料成本和碳排放)。为确保优化过程中进化种群的多样性和收敛性，仿真过程中相关参数设置如下：种群大小设置为 30，最大迭代次数设置为 200，非支配解数设置为 100，交叉概率设置为 0.9，变异概率设置

为 0.3，且有 $1 \leq f \leq 6$ ， $1 \leq t \leq 24$ ， $1 \leq s \leq 100$ 。最终，图 5 为应用改进遗传算法求取 pareto 最优解曲线。曲线横轴表示成本(单位为元)，纵轴为排放量(单位为 t)。

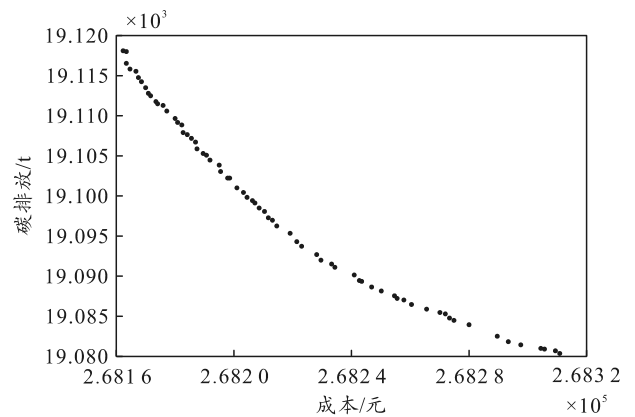


图 5 应用改进遗传算法求取 pareto 最优解曲线

引入满意度指标用来评价决策者对成本和碳排放 pareto 解取舍趋势：

$$\eta(x_i) = \frac{w_1 \mu_1(x_i) + w_2 \mu_2(x_i)}{\sum_{i=1}^K [w_1 \mu_1(x_i) + w_2 \mu_2(x_i)]}; \quad (16)$$

$$w_1 = (P_{CO_2}^{\max} - P_{CO_2})w_2 / (P_{CO_2}^{\max} - P_{CO_2}^{\min}) = 1 - w_2; \quad (17)$$

$$\mu_m(x_i) = \begin{cases} 0 & F_m(x_i) \geq F_m^{\max} \\ \frac{F_m^{\max} - F_m(x_i)}{F_m^{\max} - F_m^{\min}} & F_m^{\min} < F_m(x_i) < F_m^{\max} \\ 1 & F_m(x_i) \leq F_m^{\min} \end{cases} \quad (18)$$

式中： x_i 为第 i 个 pareto 解，且有 $x_i \in X$ ， $i=1, 2, \dots, K$ ； K 为 pareto 解总个数； F_m 为目标函数； F_m^{\max} 为最大目标函数值； F_m^{\min} 为最小目标函数值； w_1 和 w_2 为成本和碳排放权重系数； P_{CO_2} 为当前碳价格； $P_{CO_2}^{\max}$ 为最大谈价格； $P_{CO_2}^{\min}$ 为最小碳价格。上式表明，

满意度越高，决策者更有可能接受当前 pareto 解，且满意度取值为[0, 1]之间。

表 2 为 3 种代表性价格下的最优满意度、成本和碳排放统计。其中，谈价格包括低四分位碳价格 35.5 元/吨、中位碳价格 51 元/吨和高四分位碳价格 73.5 元/吨。可以看出，当碳价格从低四分位价格变化到中位和高四分位价格时，碳排放总量分别减少 0.029%和 0.197%，总发电成本分别增加 0.003%和 0.055%。随着碳价格的上涨，碳排放的减少率优于发电成本的增加率，这证明了碳交易可以在不显著增加成本的情况下控制碳排放。

表 2 3 种代表性价格下的最优满意度、成本和碳排放统计

碳价格/元	满意度	成本/元	碳排放/吨
35.5	0.019 348	268 162.5	191 17.95
51.0	0.013 593	268 171.8	191 12.35
73.5	0.022 574	268 310.9	190 80.35

4 结论

笔者对混合电力网电力调度模型进行了研究与分析，建立一种基于改进遗传算法的电力调度辅助决策模型。根据成本函数和排放函数建立考虑不确定性的动态经济排放调度目标和约束模型。进一步提出利用改进遗传算法求解 pareto 解。该模型为电力经济与节能调度技术的发展提供一定借鉴。未来，

(上接第 61 页)

[10] WEI X, STEWART M G. Model validation and parametric study on the blast response of unreinforced brick masonry walls[J]. International journal of impact engineering, 2010, 37(11): 1150-1159.

[11] CHIQUITO M, LÓPEZ L M, CASTEDO R, et al. Behaviour of retrofitted masonry walls subjected to blast loading: Damage assessment[J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109805.

[12] ZHU H, WANG X, WANG Y, et al. Damage behavior and assessment of polyurea sprayed reinforced clay brick masonry walls subjected to close-in blast loads[J]. International Journal of Impact Engineering,

可对电力数据安全及管理及电能交易领域进行研究，如引入区块链、云计算等技术提高混合配电网交易可靠性及效率，进一步发展智能化电力交易方案。

参考文献：

[1] 毛龙灿, 杨南. 基于大数据背景的皮革人才培养优化研究[J]. 中国皮革, 2021, 50(9): 38-41.

[2] 杨涛. 互联网时代下皮革行业电商物流体系研究分析[J]. 中国皮革, 2021, 50(8): 82-85.

[3] 吴佳欣, 郝正航. V2G 模式下考虑用户满意度的动态经济/排放调度[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(6): 88-96.

[4] 李斌, 刘文胜, 王介生, 等. 基于动态惩罚因子的改进蚱蜢算法求解经济负荷调度和经济排放联合调度问题[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1819-1826.

[5] 谢敏, 柯少佳, 胡昕彤, 等. 考虑风场高维相依性的电网动态经济调度优化算法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(3): 353-362.

[6] 李笑竹, 王维庆. 基于多目标飞蛾扑火算法的含风电电力系统动态环境经济调度[J]. 电气工程学报, 2020, 15(3): 1-12.

[7] 朱永胜, 乔百豪, 瞿博阳, 等. 含风电及电动汽车的多目标电力系统调度[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1722-1730.

2022: 104283.

[13] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D[J]. International journal of impact engineering, 1997, 19(9-10): 847-873.

[14] MALVAR L J, SIMONS D. Concrete material modeling in explicit computations[C]// Proceedings, workshop on recent advances in computational structural dynamics and high performance computing, USAE waterways experiment station. Vicksburg, MS, 1996: 165-194.

[15] Comité Euro-International du Béton. CEB-FIP model code 1990: Design code[M]. Thomas Telford Publishing, 1993: 324-376.