

结合新能源实现火力发电低碳高效运行方法探析

李慧云

国能长源荆州热电有限公司规划发展部, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年4月1日; 录用日期: 2025年4月17日; 发布日期: 2025年6月26日

摘要

为了响应国家低碳号召, 传统的电力系统急需降低化石能源消耗和减少污染气体的排放从而转型成低碳高效的电力系统。在系统负荷需求不变的情况下, 增加对新能源的消纳可以实现电力系统的低碳运行。本文采用拉丁超立方方法结合K-means聚类改进算法得到了风光的综合预测出力情况, 为电力系统对风光调度提供数据支撑。为实现电力系统的低碳高效运行, 本文提出多目标低碳优化调度模型, 考虑碳排放量和发电资源消耗量最少, 采用6台不同性能和参数的火电机组进行调度, 并用粒子群优化算法求解。实验结果表明, 在满足日负荷需求的条件下, 在电力系统中引入新能源, 可以有效地减少系统的碳排放和节省发电资源消耗, 有助于实现低碳高效的电力系统。

关键词

综合预测, 多目标优化, 低碳调度, 粒子群优化算法

Analysis on Low-Carbon and Efficient Operation Methods of Thermal Power Generation Combined with New Energy

Huiyun Li

Planning and Development Department of Guoneng Changyuan Jingzhou Thermal Power Co., LTD.,
Jingzhou Hubei

Received: Apr. 1st, 2025; accepted: Apr. 17th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

Abstract

In response to the national call for a low-carbon power system, the traditional power system urgently

needs to reduce fossil energy consumption and pollutant emissions to transform into a low-carbon and high-efficiency power system. Under the condition of unchanged system load demand, increasing the consumption of new energy can realize the low-carbon operation of the power system. In this paper, the Latin hypercube method combined with the K-means clustering improvement algorithm is used to complete the comprehensive prediction of the wind power output, which provides data support for the power system to dispatch the wind power. In order to realize the low-carbon and high-efficiency operation of the power system, this paper proposes a multi-objective low-carbon optimization scheduling model, which takes into account the minimum carbon emission and power generation resource consumption, and uses six thermal power units with different performances and parameters for scheduling, and solves the problem with particle swarm optimization algorithm. The experimental results show that under the condition of meeting daily load demand, introducing new energy into the power system can effectively reduce carbon emission and save the consumption of power generation resources, which helps to realize a low-carbon and high-efficiency power system.

Keywords

Integrated Forecasting, Multi-Objective Optimization, Low-Carbon Dispatch, Particle Swarm Optimization Algorithm

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国进入“十四五”的收官之年，为响应低碳号召，绿色发展逐渐成为发展目标，促进了我国能源行业向低碳化转型。中国大力发展新能源，因其发电成本相较于传统发电技术明显降低，且在运行过程中几乎不排放碳，但是新能源机组具有明显的波动性和间歇性出力不稳定，大规模地接入电网中会对电网的稳定性带来冲击。

对新能源的出力进行准确的预测，可以减少新能源并网之后的影响。目前新能源出力预测主要有机器学习模型、物理方法和统计模型三类。文献[1]针对一般预测方法需要大量的数据来支撑且在一定程度上可能泄露隐私，提出了一种基于隐私保护机制和集成学习的预测方法，虽然可以在一定程度上规避隐私风险，但是需要大量数据且存在过拟合风险。文献[2]通过大量采集可再生能源的大量的历史数据从而构建预测偏差概率分布并由储能控制的模型，但该方法计算复杂。文献[3]为消除新能源接入电力系统之后的平衡，提出了一种基于统计学的预测预警方法，旨在指导电网柔性运行，该方法以统计学为基础，虽然简单，但是精度有限。由于拉丁超立方其分层特性可覆盖出力分布边缘场景，且对数据要求相对较少，计算相对简便。故本文将会以历史数据为基础，结合已有数学模型，随机生成多组出力数据，结合拉丁超立方抽样和 K-means 算法通过调整聚类中心，提升风光出力场景的准确性。

随着新能源的大量接入，如何确保电力系统的稳定性实现低碳排放仍然是需要解决的问题之一，大量文献均对此问题进行了大量的研究。文献[4]以碳排放成本最小为目标，提出了计算用户侧的碳排放成本的核算模型。但是文中缺乏对新能源接入电力系统的分析。文献[5]以电力系统总的运行成本最小为目标，建立了考虑碳流需求响应的数学模型，但是文中大多仅考虑用户响应，通过改变用户侧需求来降低碳排放，忽略了电力系统中碳排的源头。文献[6]分别从电源侧和负荷侧建立了低碳运行的双目标，以分摊网损的方法，旨在引导负荷侧共同参与与低碳行列，考虑了电源侧和负荷侧的协同作用，但是在减排上

还是仅仅分析碳责，缺少对碳排放源头的分析。以上学者都为实现电力系统的低碳运行做出贡献，但均未从资源的角度分析，本文构建了考虑碳排放成本与发电资源消耗量协同优化的多目标模型，并对比粒子群算法和混合智能优化算法求解结果，选取本文优化算法，以解决高维非线性优化问题。

1.1. 风、光建模

目前，利用最多的新能源种类主要为风力发电和光伏发电，这两者均有着较强的波动性和间歇性，本文将首先探讨如何对风力发电和光伏发电进行准确的预测。大量的研究证实，风力发电的输出功率和风速有着较强的关系，而长期的风速变化满足 Weibull 分布[7]，风速和风力发电的输出有功功率 P_{WT} 的关系见公式(1):

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < V_{in}, v > V_{out} \\ P_r \frac{v - V_{in}}{V_r - V_{in}}, & V_{in} \leq v < V_r \\ P_r, & V_r \leq v < V_{out} \end{cases} \quad (1)$$

其中， P_r 为风力发电的输出功率； V_{in}, V_{out} 分别为切入速度和切出速度。

光伏发电主要由光照强度决定，经众多学者研究可知，光照强度更加符合 Beta 分布，具体见公式(2):

$$f(r) = \frac{T(\alpha + \beta)}{T(\alpha)T(\beta)} \left(\frac{r}{r_{max}} \right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{max}} \right)^{\beta-1} \quad (2)$$

其中， $T()$ 为伽马函数； β, α 均为形状参数； r 为光照强度。

由此可得光照强度和光伏发电得实际输出有功功率 P_{PV} 的关系见公式(3):

$$P_{PV}(r) = \begin{cases} P_{PVr} (r/r_{rated}), & r \leq r_{rated} \\ P_{PVr}, & r > r_{rated} \end{cases} \quad (3)$$

其中， r_{rated} 为额定光照强度。

基于上述对风力发电和光伏发电的输出概率建模，将会以多场景技术对风、光出力进行建模，具体见公式(4):

$$P_{p,t,s}^{ID} = P_{p,t}^A (1 + \xi_p (R_{p,t} - \gamma)) \quad (4)$$

其中， $P_{p,t,s}^{ID}$ 场景生成的预测值； γ, ξ_p 分别为修正因数和预测误差。

1.2. 风、光场景生成

在上述模型的基础上采用拉丁超立方的抽样方法进行场景生成。拉丁超立方是一种基于分层的采样方法，会将原始的样本空间分成多层，保证样本不会出现明显的交集，每一层都保证了采样的全面性。针对常规的采样方法，本文采用分层自适应策略，根据历史数据分布动态调整分层区间，从而可以减少对极端数据的筛选，分层区间划分依据为 Weibull 分布的累积概率函数具体见公式(5):

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (5)$$

将累积概率函数 $F(v)$ 的取值区间[0, 1]等分为 N 层，并对每层的风速边界值通过逆函数来求解，具体见公式(6):

$$v_i = c \cdot \left[-\ln(1 - F_i) \right]^{1/k} \quad (6)$$

对概率密度较高的区间会增加分层数，从而可以提高采样精度。

Table 1. Wind and optical power generation parameters

表 1. 风、光伏发电参数

参数名	数值(单位)
风力发电装机容量	1 MW
切入风速	3 m/s
切出风速	25 m/s
额定风速	11.3 m/s
风力发电标准差	1.8 m/s
风力发电平均值	6.4 m/s
光伏装机容量	2 MW
形状参数	2.5
预测误差	0.1
修正因数	0.5

基于表 1 的数据，可以得到拉丁超立方采样的风、光预测的初始出力场景如图 1、图 2 所示：

本文将使用 K-means 聚类对上述多组场景进行缩减，形成 5 个典型的出力场景，具体见公式(7)：

$$w_j = \frac{\eta_j}{\sum_{i=1}^k \eta_i} \cdot \frac{1}{\sigma_j} \quad (7)$$

式中， η_j, σ_j 分别为场景 j 的样本数和标准差。基于聚类结果如图 3、图 4 所示：

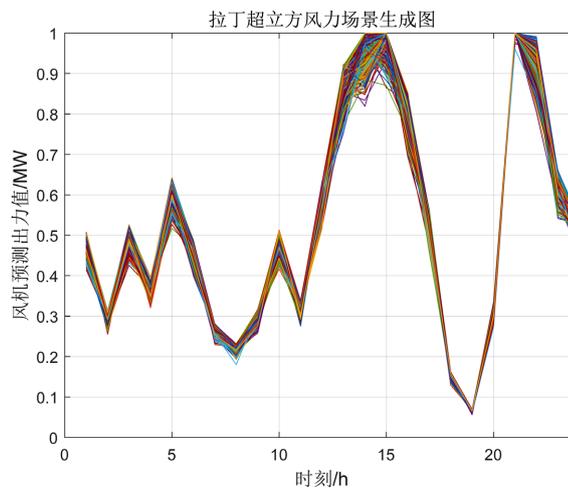


Figure 1. Latin Hypercube wind scene generation

图 1. 拉丁超立方风力场景生成

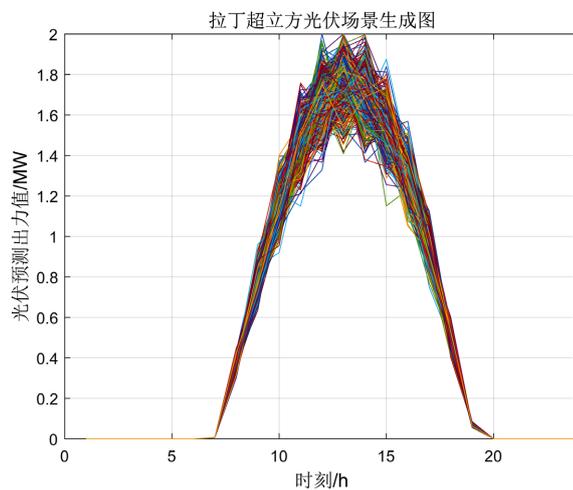


Figure 2. Latin hypercube PV scene generation

图 2. 拉丁超立方光伏场景生成

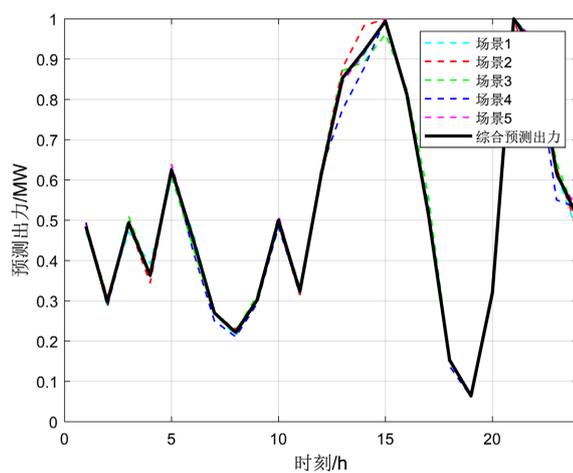


Figure 3. Typical wind output scenario

图 3. 风力典型出力场景

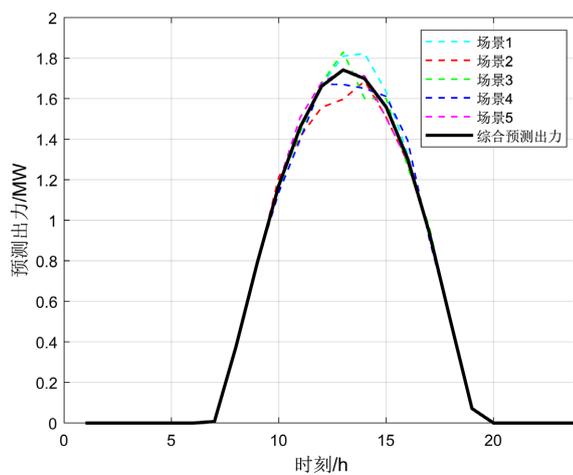


Figure 4. Typical PV output scenario

图 4. 光伏典型出力场景

表 2 为场景生成的概率值，将生成的预测值和实际值进行对比，对比的结果如图 5、图 6 所示：

Table 2. Probability value of generating wind and light scenes
表 2. 风、光场景生成概率值

场景序号	1	2	3	4	5
风力场景概率	11.6%	18.0%	24.8%	7.6%	38.0%
光伏场景概率	8.2%	22.0%	28.0%	21.2%	20.6%

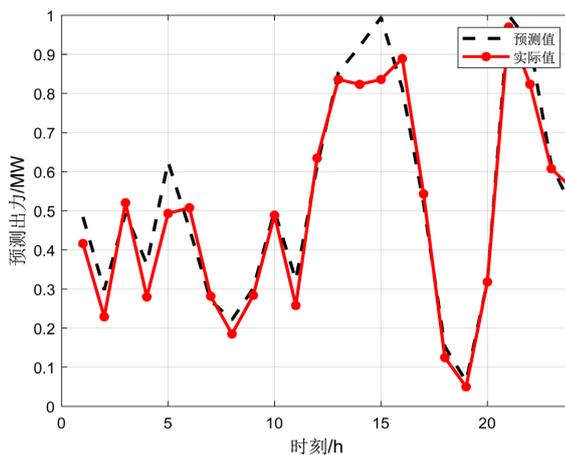


Figure 5. Wind power comparison

图 5. 风力出力对比

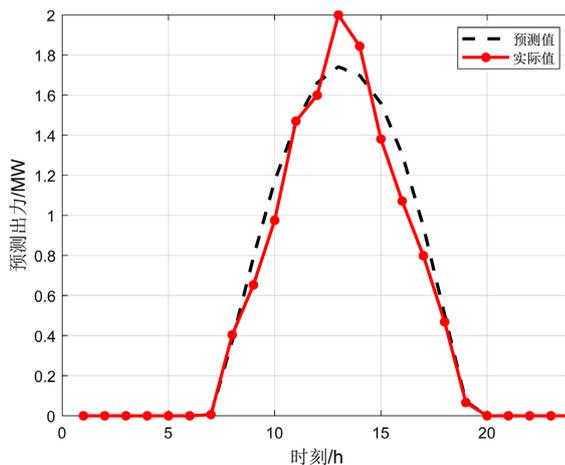


Figure 6. PV output comparison

图 6. 光伏出力对比

2. 考虑新能源并网的低碳调度模型

2.1. 系统碳排放成本最优目标函数

火力机组主要以燃料的燃烧进行发电，但是不同机组在运行的过程中产生的电能和产生单位电能所排放的污染物也不相同。为促进电力系统低碳运行，本文将考虑碳排放成本最优，具体见公式(8)：

$$f_{co_2} = \partial_i \cdot P_{i,t} \quad (8)$$

其中, ∂_i 为机组的碳排放系数; $P_{i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时间段的出力功率。

将风、光出力拟合在一起, 作为本文的新能源出力, 具体如图 7:

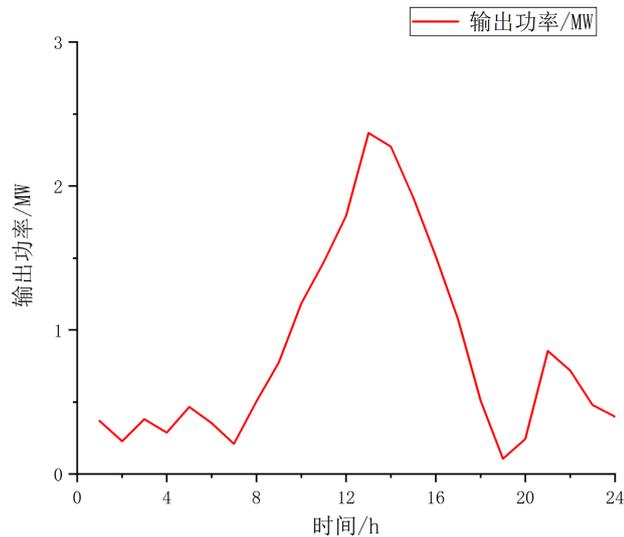


Figure 7. Comprehensive output of new energy
图 7. 新能源综合出力

火力机组不同的运行效率对机组的碳排放系数有着重要影响, 在考虑机组效率对机组的影响下, 本文将在上述模型的基础上进行修订, 具体见公式(9):

$$f_{co_2} = \frac{\partial_i \cdot P_{i,t}}{\eta_i} \quad (9)$$

2.2. 发电资源消耗量最小目标函数

电力系统中碳的排放绝大部分来自于火电机组的运行, 通过控制火电机组的启停运行优化火电机组调度, 可以从源头上减少电力系统的碳排放。发电资源消耗量最小是合理安排机组启停的主要办法, 可以通过效率较高机组的出力减少碳排放, 具体模型见公式(10):

$$F = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^G \left\{ \left[f_{it}(P_{it}) + (1 - I_{i(t-1)}) S_{it} \right] \times I_{it} \right\} \quad (10)$$

其中, S_{it} 为火电机组的启动成本; $f_{it}(P_{it})$ 为耗能函数, 具体为 $f_{it}(P_{it}) = a_i + b_i P_{it} + c_i (P_{it})^2$ 。

1) 系统约束

系统功率平衡约束见公式(11)

$$\sum_{i=1}^G P_{it} + P_{pv} + P_{wt} = P_{Dt} \quad (11)$$

其中, P_{Dt} 为负荷需求功率

2) 火力机组约束

出力功率约束见公式(12)

$$P_i^{\min} \leq P_{it} \leq P_i^{\max} \quad (12)$$

爬坡速率约束见公式(13)

$$r_i^{\text{down}} \Delta T \leq P_{it} - P_{i(t-1)} \leq r_i^{\text{up}} \Delta T \quad (13)$$

其中, r_i^{down}, r_i^{up} 分别为机组的最小和最大爬坡速率。

3. 算例分析

3.1. 基础数据

为求解多目标优化, 本文将采用改进的粒子群优化算法进行求解。粒子群算法是一种高效的求解算法, 相较于其它算法来说具有操作简单, 收敛速度快等优点。粒子群算法依据粒子的寻优不断更新自身的最优位置, 进而更新全局最优位置, 具体见公式(14)、公式(15):

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(P_{best,i}^t - x_i^t) + c_2r_2(G_{best}^t - x_i^t) \quad (14)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (15)$$

其中, t 为迭代次数, c_1, c_2 分别为个体和群体学习因子, 根据已有经验 c_1, c_2 分别为 1.8 和 1.6。

个体最优位置和群体最优位置满足以下关系见公式(16)、公式(17)

$$P_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} P_{best,i}^t, & f(x_i^{t+1}) \geq f(P_{best,i}^t) \\ x_i^{t+1}, & f(x_i^{t+1}) < f(P_{best,i}^t) \end{cases} \quad (16)$$

$$G_{best}^{t+1} = \arg \min f(P_{best,i}^{t+1}) \quad (17)$$

其中, $f()$ 为适应度函数。

但粒子群优化算法容易陷入局部最优解, 为使得本文求解更加准确和高效, 本文将在粒子群优化算法的基础上, 使用混合智能优化算法进行求解。具体思想为, 初期用 PSO 全局搜索, 后期引入模拟退火 (SA) 的 Metropolis 准则跳出局部最优。

改进粒子更新见公式(18):

$$v_i^{t+1} = wv_i^t + c_1r_1(p_{best} - x_i^t) + c_2r_2(g_{best} - x_i^t) + \eta \cdot \text{SA 扰动} \quad (18)$$

参数自适应见公式(19)、公式(20):

$$c_1(t) = c_1 \cdot e^{-kt} \quad (19)$$

$$c_2(t) = c_2 \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (20)$$

PSO-SA 混合算法相较于粒子群算法, 能避免陷入局部最优解, 从而可以使得求解结果更加准确。

为验证本文所提出的低碳优化调度模型的可实施性, 以包含 1 个并网光伏电场和风电场的 6 机系统为例进行分析, 其中迭代次数为 200, 粒子个数为 40。以表 3 机组数据和图 8 日负荷数据均以基准值为 100 MVA 的标么值进行计算。

Table 3. Fire unit parameter

表 3. 火力机组参数

参数	G1	G2	G3	G4	G5	G6
P_i^{\max} (pu)	4.00	1.30	1.30	0.80	0.55	0.55
P_i^{\min} (pu)	1.20	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10
a_i	663.35	932.6582	876.7851	1235.2237	1332.3704	1658.1029

续表

b_i	36.193	45.6024	45.5818	38.2607	39.9277	35.2756
c_i	0.2048	0.1332	0.1298	0.0640	0.0254	0.0128
r_i^{up}	0.8	0.3	0.3	0.25	0.15	0.15
r_i^{down}	0.8	0.3	0.3	0.25	0.15	0.15
S_i	4000	800	860	600	550	550
∂_i	0.24	0.39	0.34	0.40	0.42	0.44
η_i	0.75	0.5	0.55	0.4	0.35	0.3

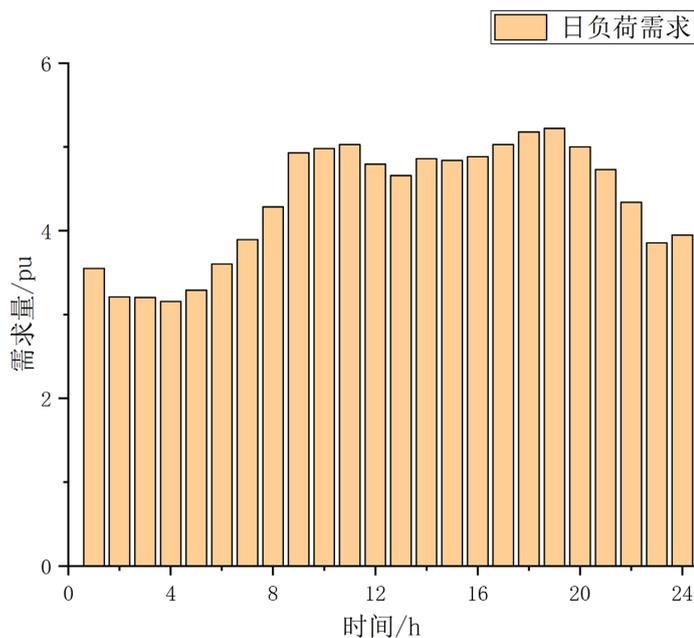


Figure 8. Daily load demand diagram
图 8. 日负荷需求图

3.2. 实验结果

求解机组出力的结果如下图 9、图 10 所示：

对比 PSO 算法与 PSO-SA 混合算法的迭代图如下图 11、图 12 所示：

通过对比两种算法的求解结果可知，PSO-SA 混合算法在求解方面优于粒子群算法。从上述机组出力结果图可以看出，PSO-SA 混合算法能在调度机组出力时，优先性能较好的机组出力，相比较于 PSO 算法减少了 G6 的出力。为进一步验证模型的准确性，本文将会验证新能源不同的消纳比例接入电力系统对电力系统的影响并用 PSO-SA 混合算法求解。

由表 4 实验结果可知，当电力系统中接入不同比例的新能源可以在减少碳排放和减少发电资源消耗量上面得到更好的优化，进一步验证了本文的多目标优化模型的准确性。

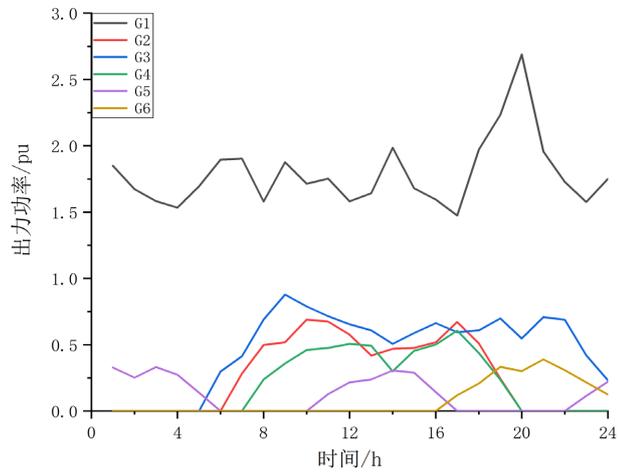


Figure 9. Based on the output of each unit of PSO-SA
图 9. 基于 PSO-SA 各机组出力

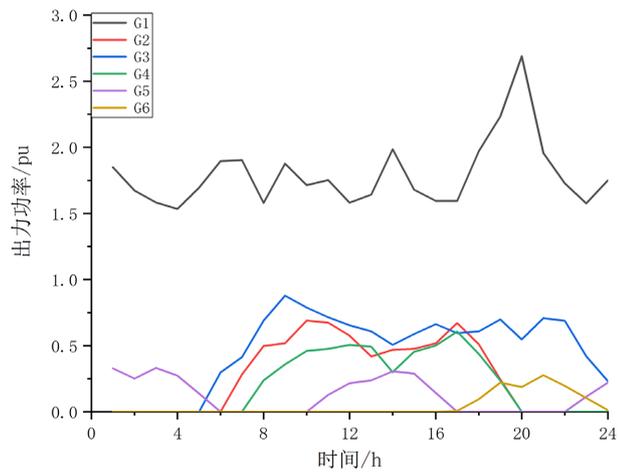


Figure 10. Based on the output of each unit of the PSO
图 10. 基于 PSO 各机组出力

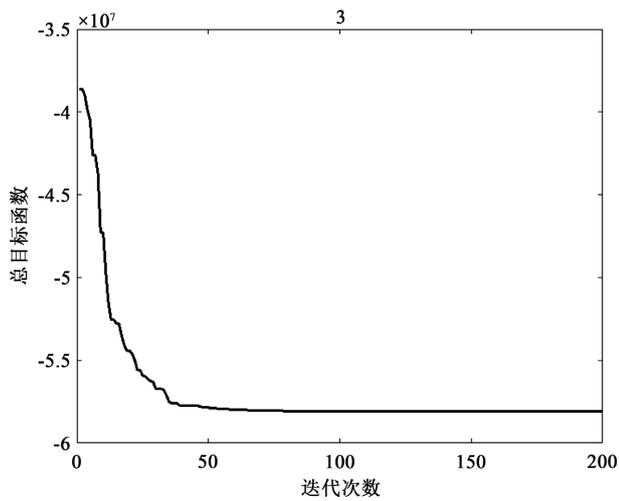


Figure 11. Iterative graph of PSO-SA algorithm
图 11. PSO-SA 算法迭代图

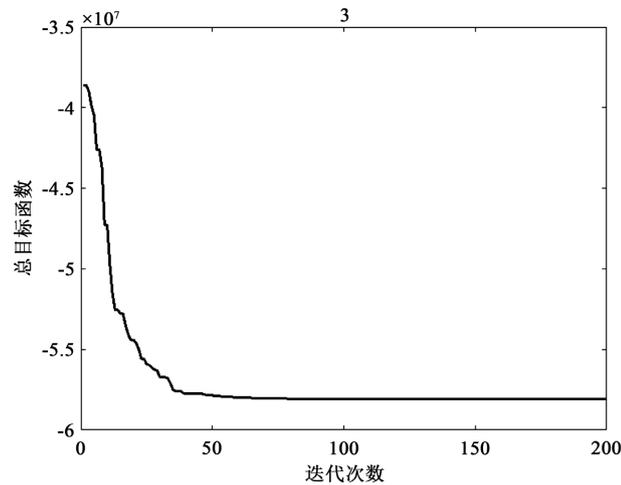


Figure 12. PSO algorithm iteration graph
图 12. PSO 算法迭代图

Table 4. Comparison of experimental results
表 4. 实验结果对比

新能源接入比例	碳排放量(吨)	发电资源消耗量(\$)
0%	27.367	96524.645
50%	24.712	89245.331
60%	20.845	76352.235
70%	18.926	70128.447

4. 结论

随着人们对环境的重视，电力系统的低碳运行迫在眉睫，为此本文从发电侧出发，通过对新能源的预测，为电力系统对新能源的消纳提供数据。为引导电力对高性能机组的调度，本文建立碳排放量最少和发电资源消耗量最少的目标函数增强电力系统对火力机组的选择性，提出改进的混合智能优化算法求解模型。最后分析电力系统接入不同比例的新能源对电力系统的影响，实验结果表明，该模型的准确性。

参考文献

- [1] 李洋, 王臻懿, 谈竹奎. 基于差分隐私和集成学习的可再生能源出力预测方法[J]. 电力大数据, 2024, 27(10): 1-8.
- [2] 朱生刚, 殷奎, 田根海, 等. 基于补偿新能源出力预测曲线偏差的储能控制模型[J]. 能源与环保, 2023, 45(1): 255-261.
- [3] 马晓伟, 张小奇, 赵鑫, 等. 基于统计学特征的新能源预测分级预警研究与实践[J/OL]. 电网技术, 1-11. 2025-03-18. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1916>, 2025-04-23.
- [4] 韦冬妮, 车彬, 张泽龙, 等. 计及电力系统源荷低碳调度的用户侧碳排放成本核算研究[J]. 价格理论与实践, 2024(12): 189-195+232.
- [5] 孙志媛, 孙艳, 刘默斯, 等. 考虑碳流需求响应的电力系统低碳运行策略[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 95-103.
- [6] 强圣婷. 基于源-网-荷协同的电力系统低碳经济优化调度研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- [7] 王长春. 风光储充一体化充电站负荷预测及优化运行方法研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.