DOI: 10.19666/j.rlfd.202505066

基于改进多目标粒子群优化的光伏电站季节性最优清洁策略研究

王海斌，张经炜，杨泽南，曹 尚
（河海大学机电工程学院，江苏 常州 213022）

［摘 要］【目的】针对光伏组件积灰导致的发电效率下降问题，需要一种季节性最优清洁策略，以解决现有固定周期和动态清洁方法未充分考虑季节差异的不足。【方法】基于历史气象数据与历史光伏发电数据，建立了春季、秋季和冬季的能效比与积灰时变特性预测模型，提出改进的多目标粒子群优化算法，通过差分进化变异策略和适应度值缓存机制提升算法性能，并以发电量和清洁费用作为目标函数，优化各季节的清洁周期。【结果】以江苏省常州某光伏电站为例，优化后的清洁周期为春季 25 天、秋季 28 天、冬季 20 天，发电量与不清洁相比分别提升 1.83%、2.01%和 3.52%。【结论】改进的多目标粒子群优化算法收敛速度快、解集分布均匀，所提季节性清洁策略充分考虑了季节对积灰的影响，能在提升发电量的同时控制清洁成本，为光伏电站清洁方案制定提供科学依据。

［关 键 词］光伏阵列；积灰；能效比；季节；清洁策略

［引用本文格式］王海斌，张经炜，杨泽南，等. 基于改进多目标粒子群优化的光伏电站季节性最优清洁策略研究[J]. 热力发电，2026，55(3)：176-184. WANG Haibin, ZHANG Jingwei, YANG Zenan, et al. Research on seasonally optimal cleaning strategy for photovoltaic power stations based on improved multi-objective particle swarm optimization[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(3): 176-184.

Research on seasonally optimal cleaning strategy for photovoltaic power stations based on improved multi-objective particle swarm optimization

WANG Haibin, ZHANG Jingwei, YANG Zenan, CAO Shang
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: [Objective] To address the reduction in power generation efficiency caused by dust accumulation on PV modules, this study proposes a seasonally optimal cleaning strategy that overcomes the limitations of conventional fixed-interval and dynamic cleaning methods which often neglect seasonal variability. [Methods] Based on historical meteorological and PV generation data, time-varying predictive models of the performance ratio (PR) and dust accumulation are established for spring, autumn, and winter. An improved multi-objective particle swarm optimization (IMOPSO) algorithm is developed, incorporating a differential evolution mutation strategy and a fitness value caching mechanism to enhance optimization performance. Taking both power output and cleaning cost as objective functions, the seasonal cleaning intervals are optimized. [Results] Using a PV power station in Changzhou, Jiangsu Province as a case study, the optimized cleaning intervals are determined to be 25 days in spring, 28 days in autumn, and 20 days in winter. Compared to the uncleaned condition, the optimized strategy leads to increases in power generation of 1.83%, 2.01%, and 3.52% for spring, autumn, and winter, respectively. [Conclusion] The IMOPSO algorithm boasts fast convergence speed and uniform solution set distribution. The proposed seasonal cleaning strategy fully accounts for the impact of seasons on dust accumulation, enabling it to increase power generation while controlling cleaning costs. This provides a scientific basis for the formulation of

收 稿 日 期：2025-05-08 修 回 日 期：2025-05-19 接 受 日 期：2025-05-26
基 金 项 目：常州市科技计划（CJ20230043）；中央高校基本科研业务费专项资金（B230201004）
Supported by: Changzhou Science & Technology Program (CJ20230043); Fundamental Research Funds for the Central Universities (B230201004)
第一作者简介：王海斌（1998），男，硕士，主要研究方向为光伏系统智能运维及运维装备，231319010019@hhu.edu.cn。
通信作者简介：张经炜（1989），男，博士，副教授，主要研究方向为太阳能光伏发电技术，jwzhang@hhu.edu.cn。

cleaning schemes for photovoltaic power stations.
Key words: photovoltaic array; dust accumulation; energy efficiency ratio; season; cleaning strategy

光伏发电高度依赖当地的气候环境与天气状况，冬季 $PM_{2.5}$ 质量浓度上升以及春季沙尘暴天气频发使得光伏阵列表面积灰较多，夏季由于降水增加，灰尘难以积聚在光伏阵列上，累计发电量损失较少[1]。光伏阵列表面积灰不仅影响光伏阵列的发电效率，且积灰不均匀或局部异物的污染遮挡，会使光伏组件出现热斑效应，从而降低光伏阵列的寿命。因此，如何控制光伏阵列积灰及其影响是业界和学界广泛关注的问题[2-3]。

有计划的对光伏阵列进行清洁，可以有效提高组件的发电效率和使用寿命[4]。赵波等[5]构建了电功率损失率随积灰时间变化的渐近型预测模型，并建立电池板积灰费用评估数学模型，结果表明在中国蒙东地区的最佳清洁周期为 20.3 天；Chiteka 等人[6]建立了积灰的经验模型，研究结果表明，光伏阵列全年的积灰不均匀，但是建议固定每 15 天清洁 1 次；Jiang 等人[7]基于灰尘沉降速度和沉降密度与光伏阵列发电功率关系，建立沙漠地区光伏阵列清洁周期的设计模型，研究结果表明，在沙漠地区的清洁周期约为 20 天；Sánchez 等人[8]建立了基于马尔可夫链的能源生产退化数学模型，对欧洲地区的对照结果表明，7 月—10 月份的最佳清洁周期为每 3 周 1 次。

上述固定周期的清洁方式未充分考虑季节性因素对光伏阵列积灰和发电量的影响，难以实现清洁效益的最大化。因此，动态清洁周期的清洁方式被提出。Upendra 等人[9]提出一种社会化移动算法优化支持向量机耦合深度卷积神经网络的积灰检测和预测模型，通过功率损失条件和积灰状态确定预测模型中的清洁初始天数，用以动态调整清洁周期；Micheli 等人[10]提出一种根据随机天气生成算法预测积灰损失，据此预先确定最佳清洁计划；Kaiss 等人[11]采用数值分析的方法考虑风速对积灰的影响构建积灰模型，实验结果表明，采用机械清洁的方法每年上半年和下半年的最佳清洁次数分别为 50 次和 51 次；Wang 等人[12]提出一种定期规划和动态调整的混合清洁调度策略，通过预先确定清洁周期，再结合气象参数、发电量等可以动态调整清洁计划；居发礼[13]通过灰色关联分析建立积灰清洁预测模型，但未考虑季节变化对积灰程度的影响；高瑜等[14]基于改进秃鹰算法优化的最小二乘向量机，建立积灰预测模型。上述发电量预测模型尚未充分考虑不同季节对积灰的影响。

要制定科学合理的清洁计划，需要准确预测积灰量及其对发电量的影响。不同季节光伏阵列积灰的影响会变化，因此有必要确定不同季节光伏阵列的清洁周期。为此，本文提出光伏电站季节性最优清洁策略，建立不同季节对积灰和发电量影响关系，在确定影响光伏阵列清洁的相关因素基础上，建立不同季节积灰对光伏阵列发电量的定量关系，进而构建考虑积灰影响的发电量预测模型，再将该模型应用于制定光伏阵列清洁周期。

1 积灰状态光伏阵列时变特性建模

1.1 历史光伏发电及气象数据预处理

实验平台位于我国华东地区常州市，春季和秋季受季节因素的影响风速相对较大，光伏组件上的积灰偏少，对光伏阵列发电量影响较小；夏季由于降水增加，灰尘难以积聚在光伏阵列上，可不安排清洁；冬季 $PM_{2.5}$ 质量浓度的上升使得光伏阵列表面积灰较多，发电量损失较多，所以灰尘沉积受季节影响较大[15-16]。

研究所使用的光伏阵列如图 1 所示，光伏电站的装机容量为 40 kW，本文选取其中 1 个组串，共 24 块光伏组件，选取的组串容量为 5.28 kW，安装面积为 36 m^2。



图 1 光伏阵列测试平台
Fig.1 Photovoltaic array test platform

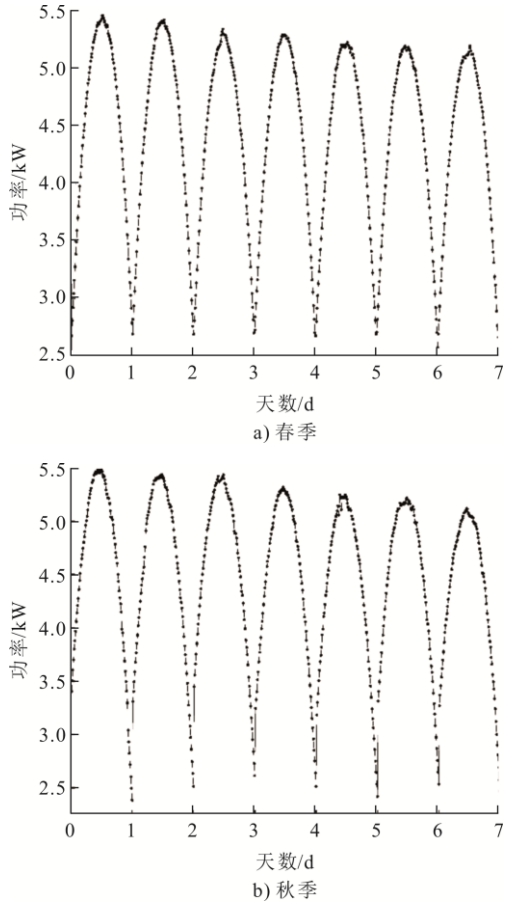
采用的数据为 2018 年 7 月到 2019 年 7 月的历史光伏发电功率数据及光伏电站现场实测历史辐照数据。由于后续要计算光伏阵列的能效比，所以选取的数据采集时间统一为 9:00—16:00，因为这段时间的辐照度较高，可以降低数据测量误差对计算 PR 值的影响[17]，数据采集时间间隔为 5 min，对于

其中缺失的个别数据采用线性插值的方法插值补全。气象数据来源于天气网[18]提供的常州市 2018 年 7 月到 2019 年 7 月的历史气象资料，由于华东地区属亚热带季风气候，因此将数据按照季节特点分为春季 3—5 月、夏季 6—8 月、秋季 9—11 月、冬季 12—次年 2 月，选取不同季节内连续晴天数据大于 7 天的时间段，观察积灰对光伏阵列发电量和能效比的影响。表 1 为光伏组件 TSM-PC05 的性能参数。

表 1 TSM-PC05 性能参数
Tab.1 Performance parameters of TSM-PC05

项目	标准测试条件
最大功率/W	240
开路电压/V	37.3
短路电流/A	8.62
最大功率点的工作电压/V	29.7
最大功率点的工作电流/A	8.10
功率温度系数/(% ·℃$^{-1}$)	−0.43
组件尺寸/mm	1 650×992×35

图 2 为选取的春季、秋季和冬季连续晴天的发电功率曲线。从图 2 看出，每天的发电功率随时间变化呈现下降趋势。



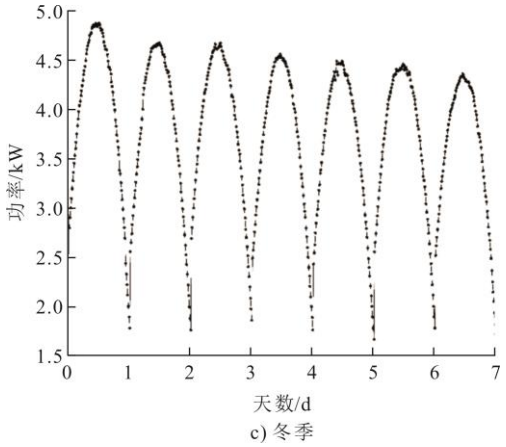


图 2 发电功率曲线
Fig.2 Power output curves

1.2 能效比与积灰的时变特性预测模型构建

由于长期户外暴晒、紫外辐照等造成发电性能退化的老化速率较慢[19]，光伏组件质保年限通常要求 20 年内性能衰减不超过 20%[20]。在数月时间内，除偶发故障或阴影遮挡以外，光伏阵列发电量衰减主要源于积灰影响[21-23]。本文通过能效比间接定量描述光伏阵列积灰状态。能效比 PR 为光伏系统实际发电量 Y_f 与理论电量 Y_r 之比，根据 IEC 标准[24]，可以表示为：

$$\mathrm{PR}=Y_f/Y_r=(E_{out}/P_0)/(H_i/G_{i,ref}) \tag{1}$$

式中：E_{out} 为光伏系统特定时段内的发电量，kW ħ；P_0 为 STC 条件下的光伏系统的额定功率，kW；H_i 为光伏阵列面上特定时段内接收到的辐射量，kW ħ/m^2；$G_{i,ref}$ 为 STC 条件下的辐照度，取 1 kW/m^2。将式(1)展开得到式(2)：

$$\mathrm{PR}=\left(\sum_k \frac{P_{out,k}\cdot\tau_k}{P_0}\right)/\left(\sum_k \frac{G_{i,k}\cdot\tau_k}{G_{i,ref}}\right) \tag{2}$$

式中：$P_{out,k}$ 为某一时刻光伏阵列输出功率，kW；τ_k 为采集间隔时间，h；$G_{i,k}$ 为某一时刻辐照度，kW/m^2。

将计算所得连续晴天工况下每天的 PR 值进行数据拟合，拟合采用对数拟合的方式，根据曲线拟合器得到的春季 PR_1、秋季 PR_2 和冬季 PR_3 与积灰的时变特性模型（式(3)—式(5)）。PR 随时间变化均呈现衰减趋势，由于所在地区春季雾霾天气比秋季多，所以春季衰减的趋势大于秋季；冬季由于 $PM_{2.5}$ 质量浓度上升，衰减趋势最大。

$$\mathrm{PR}_1=0.128\ln t+0.904\ 7 \tag{3}$$

$$\mathrm{PR}_2=-0.184\ln t+0.911\ 7 \tag{4}$$

$$\mathrm{PR}_3=-0.238\ln t+0.913\ 7 \tag{5}$$

2 清洁周期优化建模

本研究中光伏阵列的性能采用发电量来表征，而决定发电量的诸多因素中，积灰是其影响因素之一[25]。本研究通过优化不同季节的清洁周期，得到满足发电量较大的同时，清洁费用较小的最优解。因此，光伏阵列清洁周期优化需要考虑发电量与清洁费用 2 个因素[26]：如果清洁周期过长，积灰越来越多，会大幅度降低光伏阵列可吸收的总辐照度，发电量降低；如果连续清洁，积灰较少，光伏阵列的发电量增大，但是总清洁费用会过高。

第 1 个优化目标为 1 个季节周期内的光伏阵列的发电量。PR 与积灰的时变特性预测模型如式(6)所示，考虑到日均利用小时数 t_{d}，光伏阵列发电量计算式为：

$$E_1 = P \cdot \mathrm{PR}(t) \cdot t_{\mathrm{d}} \tag{6}$$

式中：P 为光伏电站的装机容量，kW；t_{d} 为光伏电站日均利用小时数，h。

$$t_{\mathrm{d}} = H(i) / G_{i,\mathrm{ref}} \tag{7}$$

式中：$H(i)$为日辐照度总值，kW·h/m^2；$G_{i,\mathrm{ref}}$ 为 STC 条件下的辐照度，取 1 kW/m^2。

第 2 个优化目标为 1 个季节周期内的总清洁费用。清洁方式为人工清扫，根据运维人员的数量、工资水平以及工作时间来计算，1 个季节周期内清洁光伏阵列所用的人力成本为：

$$E_2 = n \cdot m \cdot S \cdot C \tag{8}$$

式中：n 为 1 个季节周期内清洁次数；m 为光伏阵列中光伏组件的块数，实验中光伏组件为 24 块；S 为 1 块光伏组件的表面积，m^2，单块光伏组件的面积为 1.5 m^2；C 为清洁单位面积光伏组件的价格，以江苏省常州市人均工资标准为例，取 0.8 元/m^2。所以，清洁一次光伏组件所需费用为 28.8 元。

3 改进 MOPSO 的光伏阵列季节性清洁周期策略

3.1 改进多目标粒子群优化算法

多目标粒子群优化算法（MOPSO）是一种基于粒子群优化（PSO）的多目标优化算法，用于解决具有多个目标函数的优化问题[27-28]。多目标优化问题中多个目标通常相互冲突，无法找到单一最优解，而是一组帕累托 Pareto 最优解集[29]。传统的 MOPSO 算法在每次迭代中，粒子的适应度值可能会被多次计算，运行效率低，同时粒子群容易过早收敛到局部最优解，导致多样性不足，难以找到全局最优解集。为解决这些问题，本文对 MOPSO 算法进行改进，改进后算法流程如图 3 所示。

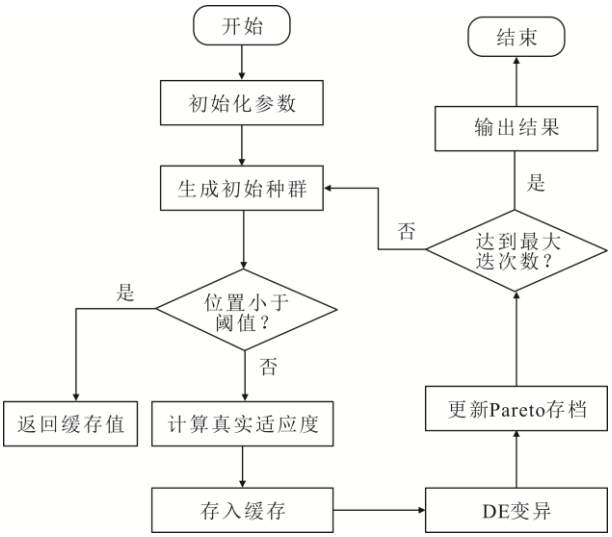


图 3 改进 MOPSO 算法流程

Fig.3 Flow diagram of the improved MOPSO algorithm

改进后算法流程主要包括 2 个方面：

1）*缓存适应度值*　哈希表将每个粒子的位置向量四舍五入到小数点后 4 位减少浮点误差，并通过离散化转换为字符串键，适应度值存储对应的发电量与清洁费用。使用 MATLAB 的内置哈希表容器 containers.Map 缓存已经计算过的粒子位置和适应度值。当新位置与键的欧氏距离小于 10^{-4} 时直接调用缓存，缓存大小上限为 1 000 条，当缓存条目超过 1 000 时，采用先进先出（FIFO）策略淘汰最早条目。

2）*差分进化（DE）的变异策略*　包括 3 个部分，分别是差分扰动，即随机选择种群中 3 个不同个体 X_{r1}、X_{r2}、X_{r3}，按式(9)生成变异向量；将变异向量 Y_i 与原个体 X_i 按照式(10)进行二项交叉，得到新解 U_i；比较新解 U_i 与原解 X_i 的适应度，保留更优者进入下一代。

$$Y_i = X_{\mathrm{r1}} + F \cdot (X_{\mathrm{r2}} - X_{\mathrm{r3}}) \tag{9}$$

式中：X_{r1}、X_{r2}、X_{r3} 为随机选择的个体；F 为缩放因子，取 0.7[30]。

$$U_i = \begin{cases} Y_i & \text{if rand} \leqslant \mathrm{CR} \\ X_i & \text{othewise} \end{cases} \tag{10}$$

式中：CR 为交叉概率，取 0.85[31]。

表 2 为模型的初始参数。模型中优化变量个数为 1 个，初始位置在区间[0,1]上使用均匀分布随机

生成，在算法运行过程中会线性变换至[1,90]，表示清洁周期。

表 2 模型初始参数
Tab.2 Initial parameters of the model

项目	数值
最大迭代次数	200
种群规模	100
精英库最大规模	50
惯性权重	0.5
惯性权重衰减因子	0.99
个体学习因子	1
社会学习因子	2
每维划分的网格数	7
网格膨胀因子	0.1
领导者选择压力	2
精英删除压力	2
变异率控制参数	0.1

图 4 为使用 ZDT1、ZDT2 和 ZDT3 作为测试函数对改进 MOPSO 算法（IMOPSO）与 MOPSO、基于范围选择的进化多目标优化（PESA2）、基于分解的多目标进化算法（MOEA/D）进行收敛性测试的结果对比图。其中，PESA2 的特点是围绕空间划分和精英保留策略展开，但是当目标空间划分不均匀时，可能导致解分布偏差；MOEA/D 的特点是将多目标问题分解为多个单目标子问题，并通过协同优化这些子问题来逼近 Pareto 前沿，但是初始权重分布会影响解集均匀性，邻域过小会导致收敛慢，邻域过大会大幅降低解的多样性[32]。

算法的收敛性能采用世代距离（GD）进行评价。GD 是多目标优化算法收敛性能的常用指标，其核心目的是衡量算法所求得的近似 Pareto 前沿与真实 Pareto 前沿之间的接近程度[33]。从图 4 可以看出：在收敛速度方面 IMOPSO 只比 PESA2 慢；在算法收敛后，IMOPSO、MOPSO 和 MOEA/D 的 GD 的波动较小，收敛性能较好；PESA2 波动较大，收敛性能较差。与传统的 MOPSO 相比，IMOPSO 具有较快的收敛速度，ZDT1 和 ZDT3 收敛后的稳定性基本相同，ZDT2 的测试结果中 IMOPSO 效果更好。

3.2 光伏阵列季节性清洁周期策略

图 5 为使用 IMOPSO 算法的季节性清洁周期策略整体流程，主要包括对实测历史光伏发电功率数据和历史辐照数据预处理、构建光伏阵列清洁周期优化模型、将优化模型代入 IMOPSO 算法，得到不同季节的近似 Pareto 前沿等主要步骤。

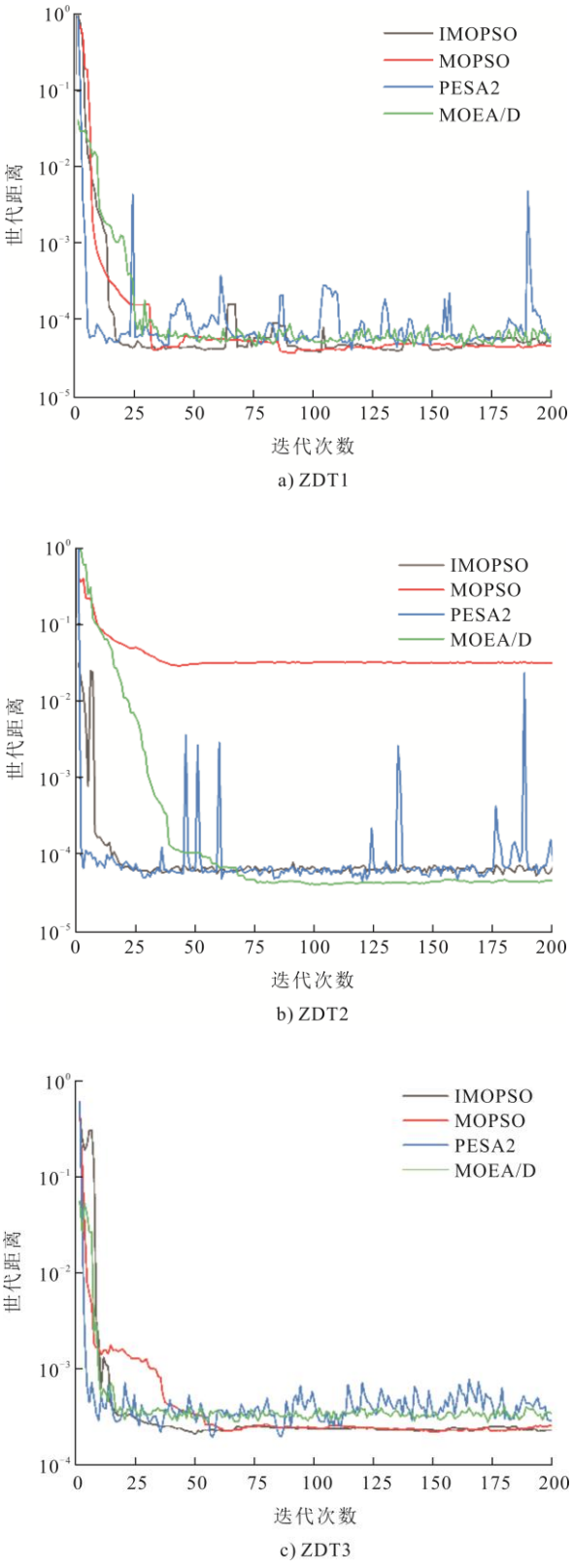


图 4 ZDT 测试函数收敛性
Fig.4 Algorithm convergence tested by the ZDT function

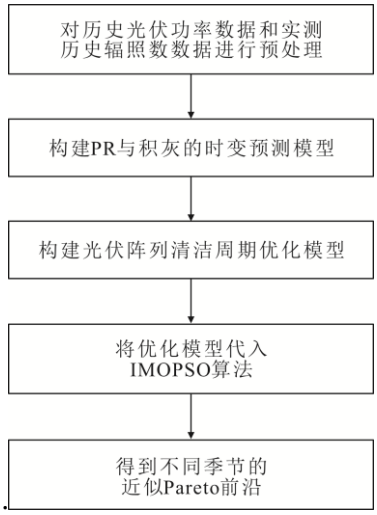
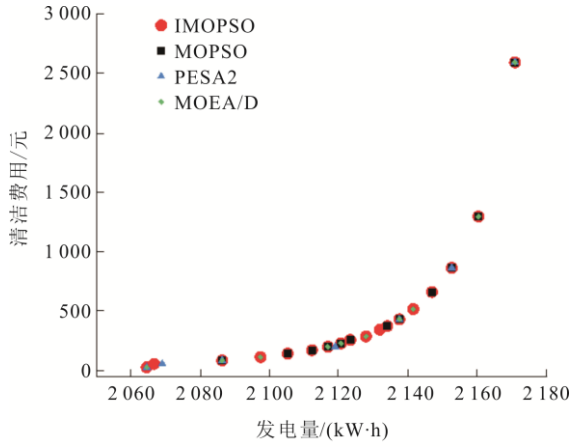
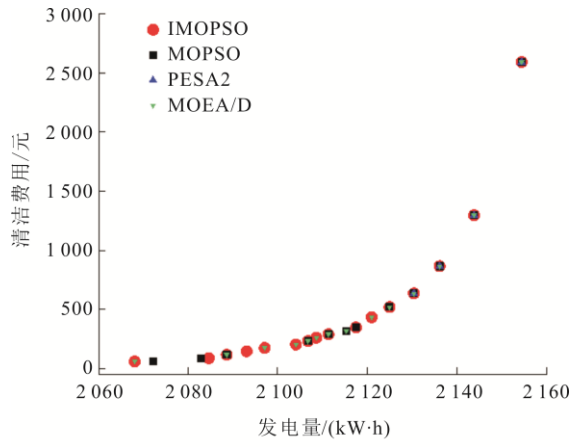


图 5 总体流程
Fig.5 Flow diagram of the overall process

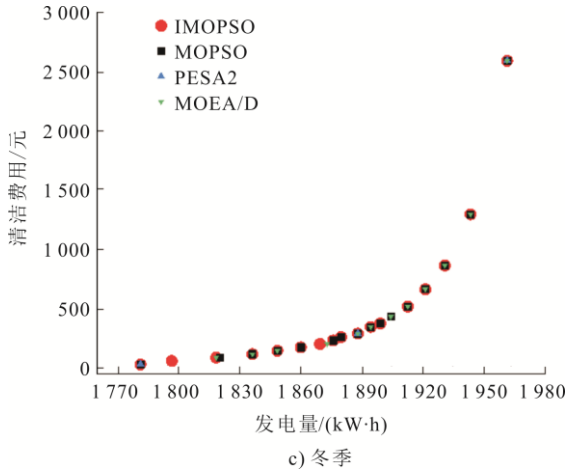
图 6 分别使用 IMOPSO、MOPSO、PESA2、MOEA/D 求解得到的春季、秋季和冬季算法结果对比。IMOPSO 的解集在目标空间中分布平均，覆盖了整个 Pareto 前沿的不同区域，包括两端极值，效果较好。



a) 春季



b) 秋季



c) 冬季

图 6 不同季节算法结果对比
Fig.6 Comparison of results among different algorithms in different seasons

使用 IMOPSO 算法得到的 Pareto 前沿中，发电量与清洁费用按照清洁周期的大小从小到大排列，当发电量增量相较于上一个清洁周期越大，清洁费用增量相较于上一个清洁周期越小，则越符合折衷解。发电量增量和清洁费用增量分别为：

$$Z_1 = (E_{1,i+1} - E_{1,i}) / E_{1,i} \tag{11}$$

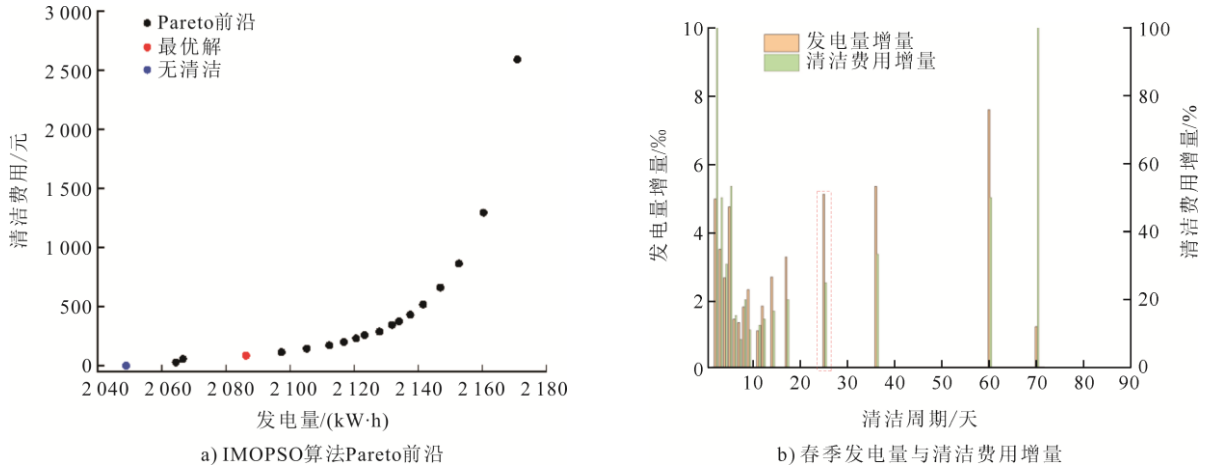
式中：$E_{1,i+1}$、$E_{1,i}$为 Pareto 前沿中第 i+1 个点和第 i 个点的发电量，kW ħ。

$$Z_2 = (E_{2,i+1} - E_{2,i}) / E_{2,i} \tag{12}$$

式中：$E_{2,i+1}$、$E_{2,i}$为 Pareto 前沿中第 i+1 个点和第 i 个点的季节总清洁费用，元。

计算得到春、秋、冬季的折衷解分别为图 7—图 9。图 7a)中红点表示按照发电量增量和清洁费用增量得到的春季 Pareto 前沿中的折衷解，蓝点表示光伏组件不进行清洁时的发电量，为 2 048.8 kW ħ。在图 7b)中，图 7a)红点所对应折衷解的发电量增量和清洁费用增量分别为 0.51%、25%，对应的春季最佳清洁周期为 25 天。按照 25 天为 1 个清洁周期对光伏阵列进行清洁，春季的发电量为 2 086.4 kW ħ，清洁费用为 86.4 元，发电量相比于不清洁时提升了 1.83%。

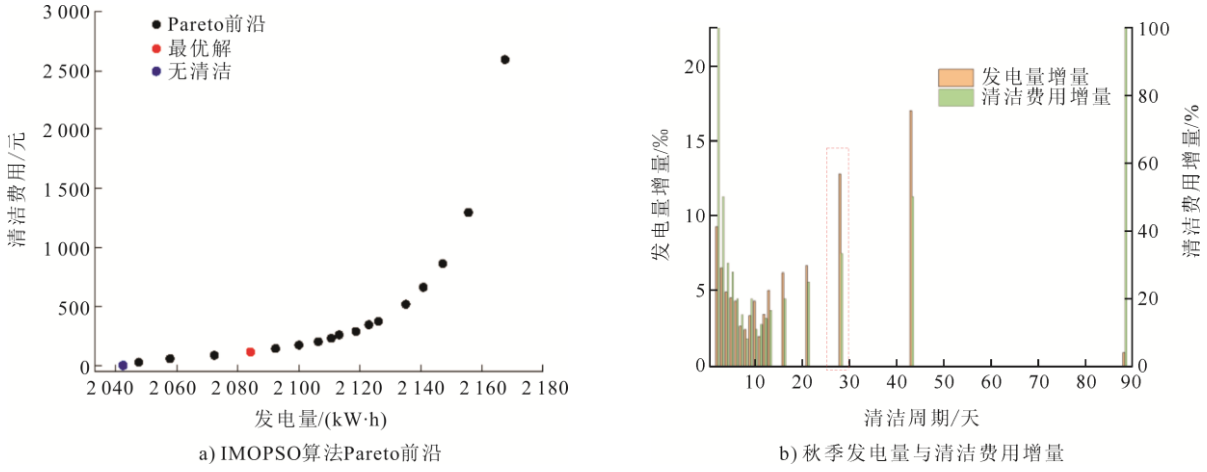
图 8a)中红点表示按照发电量增量和清洁费用增量得到的秋季 Pareto 前沿中的折衷解，蓝点表示不进行清洁时的发电量，为 2 043.4 kW ħ。在图 8b)中红点所对应折衷解的发电量增量和清洁费用增量分别为 1.273%、33.3%，对应的秋季最佳清洁周期为 28 天。按照 28 天为 1 个清洁周期对光伏阵列进行清洁，秋季的发电量为 2 084.5 kW ħ，清洁费用为 86.4 元，发电量相比于不清洁时提升了 2.01%。



a) IMOPSO算法Pareto前沿　　b) 春季发电量与清洁费用增量

图 7 春季折衷解

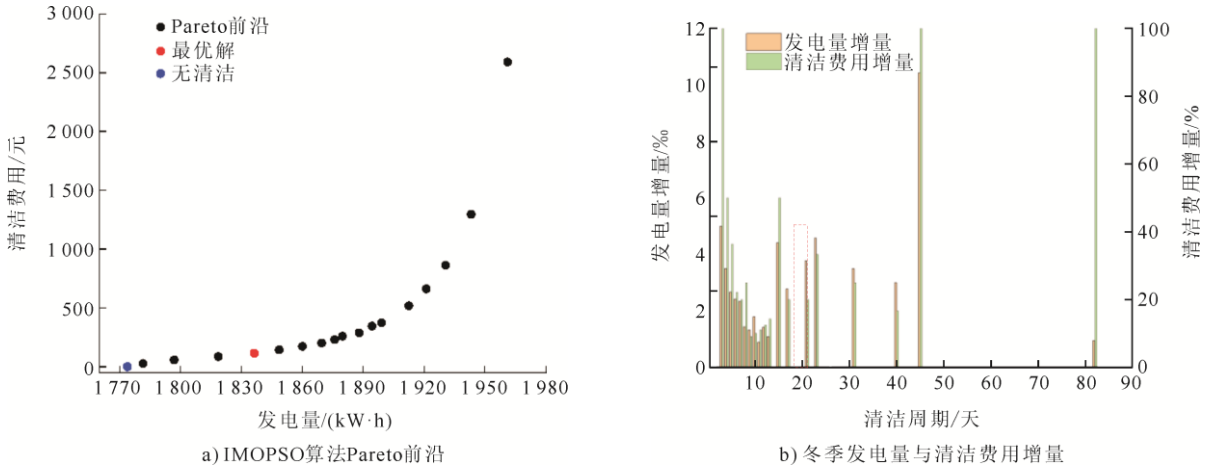
Fig.7 Compromise solution for spring



a) IMOPSO算法Pareto前沿　　b) 秋季发电量与清洁费用增量

图 8 秋季折衷解

Fig.8 Compromise solution for autumn



a) IMOPSO算法Pareto前沿　　b) 冬季发电量与清洁费用增量

图 9 冬季折衷解

Fig.9 Compromise solution for winter

图 9a)中红点表示按照发电量增量和清洁费用增量得到的冬季 Pareto 前沿中的折衷解，蓝点表示不进行清洁时的发电量，为 1 773.7 kW·h。在图 9b)中红点所对应折衷解的发电量增量和清洁费用增量分别为 0.38%、20%，对应的冬季最佳清洁周期为 20 天。按照 20 天为 1 个清洁周期对光伏阵列进

行清洁，冬季的发电量为 1 836.3 kW·h，清洁费用为 115.2 元，发电量相比于不清洁时提升了 3.52%。

文献[5]采用固定清洁周期的策略，其固定清洁周期为 20.3 天，文献[7]的研究结果表明沙漠地区的清洁周期约为 20 天，文献[8]的研究结果表明欧洲地区 7—10 月份的最佳清洁周期为每 3 周 1 次。常州地区冬季 $PM_{2.5}$ 质量浓度的上升使得光伏阵列表面灰尘积累较多，本研究中的冬季清洁周期 20 天与文献中固定清洁周期的天数接近。春季和秋季由于季节因素的影响，清洁周期分别为 25 天、28 天，与冬季清洁周期相比，季节差异显著。本研究中春季和秋季的清洁次数为 3 次，与按照固定周期策略清洁 4 次相比，清洁费用显著降低。

4 结　论

本文选取积灰作为光伏阵列发电量主要影响因素，建立 PR 与积灰的时变特性模型，进而使用改进的 MOPSO 算法将该模型应用到不同季节清洁策略的制定。

1）IMOPSO 算法通过缓存适应度值减少了计算量，提高算法的运行效率，引入差分进化的变异策略增强全局搜索能力，改进后的算法收敛速度得到了提升。IMOPSO 算法求解得到的解集在目标空间中的分布平均，覆盖了整个 Pareto 前沿的不同区域，包括两端极值，效果较好。

2）根据所提出方法的应用研究结果，建议在常州地区的光伏电站不同季节采用最优固定清洁周期策略时，春季、秋季、冬季的清洁周期分别为 25 天、28 天、20 天，按照策略对光伏阵列进行清洁后发电量为春季 2 086.4 kW·h，秋季 2 084.5 kW·h，冬季 1 836.3 kW·h，与不清洁时相比分别提升 1.83%、2.01%、3.52%。

[参 考 文 献]

[1] 曾侨飞, 李斌, 李新福, 等. 基于相似日的光伏组件积灰损失预测[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 21-29.
ZENG Qiaofei, LI Bin, LI Xinfu, et al. Prediction of dust accumulation loss in photovoltaic modules based on similar days[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 21-29.

[2] 宁会峰, 程荣展, 王伟志, 等. 积灰对光伏发电的影响及除尘效果实验研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(11): 120-125.
NING Huifeng, CHENG Rongzhan, WANG Weizhi, et al. Experimental study on influence of dust accumulation on photovoltaic power generation and dust removal effect[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(11): 120-125.

[3] 王平, 杜炜, 张海宁, 等. 表面积灰影响光伏组件泄漏电流与衰减寿命的研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 119-125.
WANG Ping, DU Wei, ZHANG Haining, et al. Pollution impact on the leakage current and power degradation of photovoltaic modules[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(1): 119-125.

[4] 刘卫东, 吴锦华, 胡珊, 等. 自然降雨驱动的光伏组件清洁周期动态更新策略研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(1): 615-623.
LIU Weidong, WU Jinhua, HU Shan, et al. Research on dynamic update strategy of cleaning cycle for photovoltaic modules driven by effect of natural rainfall[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(1): 615-623.

[5] 赵波, 张姝伟, 曹生现, 等. 基于状态监测的电池板积灰清洗周期确定与费用评估[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4205-4213.
ZHAO Bo, ZHANG Shuwei, CAO Shengxian, et al. Cleaning cycle determination and cost estimation for photovoltaic modules based on dust accumulating condition monitoring[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4205-4213.

[6] CHITEKA K, ARORA R, SRIDHARA S N, et al. A novel approach to Solar PV cleaning frequency optimization for soiling mitigation[J]. Scientific African, 2020, 8: e00459.

[7] JIANG Y, LU L, LU H. A novel model to estimate the cleaning frequency for dirty solar photovoltaic modules in desert environment[J]. Solar Energy, 2016, 140: 236-240.

[8] SÁNCHEZ B G, GONZÁLEZ D J, GARCÍA S C J, et al. Markov chains estimation of the optimal periodicity for cleaning photovoltaic panels installed in the Dehesa[J]. Renewable Energy, 2021, 179: 537-549.

[9] UPENDRA P S, SUBHASH C. Enhancing the cleaning scheduling in solar photovoltaic panels using the socialized move algorithm-based hybrid decision-making approach[J]. Energy Sources, 2025, 47(1): 5596-5617.

[10] MICHELI L, FERNANDEZ E F, MULLER M, et al. Extracting and generating PV soiling profiles for analysis forecasting and cleaning optimization[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2020, 10(1): 197-205.

[11] KAISS E C A, HASSAN N M. Optimizing the cleaning frequency of solar photovoltaic(PV) systems using numerical analysis and empirical models[J]. Renewable Energy, 2024, 228: 120691.

[12] WANG Z H, XU Z G, LIU B, et al. A hybrid cleaning scheduling framework for operations and maintenance of photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2022, 52(9): 5925-5936.

[13] 居发礼, 积灰对光伏发电工程的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 2.
JU Fali. Study on the effect of photovoltaic power generation project by dust[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 2.

[14] 高瑜, 康兴国, 周少迪, 等. 基于改进 BES-LSSVM 光伏组件积灰预测[J]. 太阳能学报, 2023, 44(6): 213-219.
GAO Yu, KANG Xingguo, ZHOU Shaodi, et al. Ash deposition prediction of photovoltaic modules based on improved BESLSSVM[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(6): 213-219.

[15] XIANG Y, TANG Q W, XU W T, et al. A multi-factor spatio-temporal correlation analysis method for PV development potential estimation[J]. Renewable Energy, 2024, 223: 119962.

[16] 宋玮琼, 赵成, 郭帅, 等. 考虑天气类型和历史相似日的短期光伏输出功率预测[J]. 电网与清洁能源, 2023,

39(2): 75-82.
SONG Weiqiong, ZHAO Cheng, GUO Shuai, et al. Short-term forecasting of photovoltaic output power considering weather type and historical similar days[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 75-82.
[17] LIU F, ZHANG Z, ZHAO Y, et al. A method of calculating the daily output power reduction of PV modules due to dust deposition on its surface[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2019, 9(3): 881-887.
[18] 天气网.常州历史天气[EB/OL]. [2025-05-06]. https://lishi.tianqi.com/changzhou.html.
Weather Network. Historical weather in Changzhou[EB/OL]. [2025-05-06]. https://lishi.tianqi. com/changzhou.html.
[19] RAHMAN T, MANSUR A A, HOSSAIN L M S, et al. Investigation of degradation of solar photovoltaics: a review of aging factors, impacts, and future directions toward sustainable energy management[J]. Energies, 2023, 16(9): 3706.
[20] DIRK C J, KEVIN A, KIRSTEN P, et al. Photovoltaic fleet degradation insights[J]. Photovoltaics, 2022, 30(10): 1166-1175.
[21] KAZEM H A. Impact of long-term dust accumulation on photovoltaic module performance: a comprehensive review[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(57): 119568-119593.
[22] 吕玉坤, 周庆文, 魏子安, 等. 积灰对光伏组件性能影响的试验研究及数值模拟[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 175-182.
LYU Yukun, ZHOU Qingwen, WEI Zi'an, et al. Experimental study and numerical simulation of influence of ash deposition on performance of photovoltaic modules[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 22(2): 175-182.
[23] RUSĂNESCU C O, RUSĂNESCU M, ISTRATE I A, et al. The effect of dust deposition on the performance of photovoltaic panels[J]. Energies, 2023, 16(19): 6794.
[24] IEC 61724-1 Revised: 2017[EB/OL]. (2017-03-03) [2025-05-06]. https://webstore.iec.ch/en/publication/33622.
[25] 许滢, 朱冰洁, 怀朝君, 等. 光伏组件室内外老化测试比对研究[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 374-380.
XU Ying, ZHU Bingjie, HUAI Chaojun, et al. Comparative study on indoor and outdoor aging test of photovoltaic modules[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(2): 374-380.
[26] MÜLLER S H, MALAYERI M R, WATKINSON A P. Heat exchanger fouling: mitigation and cleaning strategies[J]. Heat Transfer Engineering, 2011, 32(3/4): 189-196.
[27] COELLO C A C, LECHUGA M S. MOPSO: a proposal for multiple objective particle swarm optimization[C]// Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation. 2002: 1051-1056.
[28] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256-279.
[29] 邢毓华, 任甜甜. 改进 MOPSO 在微电网优化调度中的应用研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 191-200.
XING Yuhua, REN Tiantian. Application research of improved MOPSO in microgrid optimal dispatch[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(6): 191-200.
[30] STANOVOV V, SEMENKIN E. Adaptation of the scaling factor based on the success rate in differential evolution[J]. Mathematics, 2024, 12(4): 516-538.
[31] ZHU J H, WANG J S, ZHANG X Y, et al. Multi-objective coyote optimization algorithm based on hybrid elite framework and Meta-Lamarckian learning strategy for optimal power flow problem[J]. Artificial Intelligence Review, 2024, 57(5): 117-171.
[32] AWOL S E, YOUNG J K. Reinforcement learning-based optimization for power scheduling in a renewable energy connected grid[J]. Renewable Energy, 2024, 230: 120886.
[33] FALCÓN C, COELLO C A C. Indicator-based multi-objective evolutionary algorithms: a comprehensive survey[J]. ACM Computing Surveys, 2020, 53(2): 1-35.

（责任编辑　杨嘉蕾）

广告目次

《热力发电》第五届编委会……封三
浙江顺豪新材料有限公司……后彩插 1
隔而固（青岛）振动控制有限公司……后彩插 2