

本文引用格式：彭祖剑.考虑中断负荷的虚拟电厂经济调度模型[J].自动化与信息工程,2024,45(6):41-46.

PENG Zujian. Economic dispatch model for virtual power plants considering interrupted load[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(6):41-46.

考虑中断负荷的虚拟电厂经济调度模型

彭祖剑

(开普云信息科技股份有限公司, 广东 东莞 523000)

摘要: 为提高虚拟电厂的经济性和稳定性, 提出一种考虑中断负荷的虚拟电厂经济调度模型。首先, 以中断负荷成本最小为目标函数, 构建虚拟电厂经济调度模型; 然后, 利用扩展记忆系数改进的粒子群优化 (IPSO) 算法求解虚拟电厂经济调度模型; 最后, 将 IPSO 算法与 PSO 算法、遗传算法 (GA) 进行仿真对比分析。仿真结果表明: IPSO 算法相较于 PSO 算法、GA, 其最小中断负荷成本分别降低了 0.77 万元、1.81 万元, 迭代次数分别减少了 65、84 次; 经过 IPSO 算法的优化调度, 有效降低了虚拟电厂高峰时段的用电负荷, 提升了虚拟电厂运行的经济性和稳定性。

关键词: 虚拟电厂; 经济调度模型; 中断负荷; 改进的粒子群优化算法

中图分类号: TP311.5

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)06-0006-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.06.006

开放获取

Economic Dispatch Model for Virtual Power Plants Considering Interrupted Load

PENG Zujian

(Ucap Cloud Information Technology Co., Ltd., Dongguan 523000, China)

Abstract: To improve the economy and stability of virtual power plants, a virtual power plant economic dispatch model considering interrupted load is proposed. Firstly, a virtual power plant economic dispatch model is constructed with the objective function of minimizing the interruption load cost; Then, the extended memory coefficient improved particle swarm optimization (IPSO) algorithm is used to solve the economic dispatch model of the virtual power plant; Finally, the IPSO algorithm will be compared and analyzed with PSO algorithm and genetic algorithm (GA) through simulation. The simulation results show that compared to the PSO algorithm, the IPSO algorithm GA, The minimum interruption load cost has been reduced by 7700 yuan and 18100 yuan respectively, and the number of iterations has been reduced by 65 and 84 times respectively; Through the optimization scheduling of IPSO algorithm, the electricity load during peak hours of virtual power plants has been effectively reduced, and the economy and stability of virtual power plant operation have been improved.

Keywords: virtual power plants; economic dispatch model; interrupt load; improved particle swarm optimization algorithm

0 引言

近年来, 随着化石能源枯竭危机和环境污染问题的日益严重, 发展可再生能源, 推动可持续发展已成为全球共识^[1]。为了更好地管理分布式电源, 虚拟电厂应运而生, 并已成为研究热点^[2]。虚拟电厂是一种整合了通信技术和能量管理系统的集成性电厂, 可有

效解决风、光等新能源的消纳问题^[3]。研究虚拟电厂的经济调度策略, 对降低其运行成本, 提高新能源消纳具有重要的意义。

为了实现虚拟电厂的经济运行, 专家学者们对其调度方法进行了大量的研究。文献[4]在考虑分布式储能和需求响应对虚拟电厂影响的基础上, 构建了一种

风电的虚拟电厂优化调度模型，通过实时优化调度，降低了风电出力的预测误差，实现了虚拟电厂的经济运行。文献[5]将电力现货市场的竞争博弈策略应用于虚拟电厂，获得了虚拟电厂的最佳购、售电策略；以偏差考核成本最小为优化目标，构建了虚拟电厂的优化调度模型；以某售电公司的运行数据为例进行了仿真分析，验证了该模型能够进一步增加虚拟电厂的运营收益。文献[6]综合考虑了需求响应和阶梯式碳交易对虚拟电厂运行成本的影响；构建了以虚拟电厂运行成本最低为优化目标的低碳经济调度模型；仿真实验结果表明，需求响应和电转气措施不仅提升了虚拟电厂的经济效益，还有效降低了碳排放量。

用户侧需求响应模型主要有基于价格的需求响应模型^[7]和基于激励的需求响应模型^[8]。其中，基于价格的需求响应模型因具有用户参与度高、可操作性好等特点，被广泛应用于虚拟电厂。但相比于基于价格的需求响应模型，中断负荷管理能够更好地调节负荷峰谷差异，提升虚拟电厂的经济效益。因此，考虑中断负荷的虚拟电厂经济调度问题有待进一步研究。

1 模型建立

1.1 可中断负荷

可中断负荷是指用户与电力公司签订负荷中断协议，在用电高峰期，电力公司提出负荷中断请求，用户同意后，在后期可获得电力公司的经济补偿。同时，用户若未按照协议规定执行负荷中断响应，可能会面临相应的经济惩罚^[9]。

在虚拟电厂调度过程中，既要考虑可再生能源的利用，又要考虑负荷削减量是否符合负荷中断协议，这导致了可中断负荷的不确定性。如果将所有的可中断负荷资源都纳入虚拟电厂的调度计划，需要付出较高的经济成本，影响虚拟电厂的经济效益。为此，本文引入机会约束规划作为解决策略，即在优化目标函数时，允许优化结果在一个小范围内越限。本文设置一个置信水平 α ，可中断负荷量与实际中断负荷量满足以下关系：

$$U \left\{ \sum_{n=1}^N S(n,t) Q_{n,t} \geq P_t \right\} \geq \alpha \quad (1)$$

式中： $U \{ \}$ 为事件概率； $S(n,t)$ 为 t 时刻第 n 个中断负荷的状态， $S(n,t)=1$ 表示该负荷中断， $S(n,t)=0$ 表示该负荷未中断； N 为可中断负荷的总容量； $Q_{n,t}$ 为 t 时刻第 n 个中断负荷的负荷量； P_t 为 t 时刻实际中断的负荷总容量； α 为置信水平，其值越大，表示中断负荷的需求总容量越大。

1.2 目标函数

本文构建虚拟电厂经济调度模型时，以中断负荷成本期望值最小为优化目标，具体如下：

$$F = \min E_s \left(\sum_t \sum_{j=1}^{N_L} S(n,t) (C_1 + C_2(\psi_i)) \right) \quad (2)$$

$$C_1 = \int h(\psi_i) z(\psi_i) |\psi_i| d\psi_i \quad (3)$$

式中： E_s 为中断负荷成本期望值， C_1 为中断负荷风险成本， C_2 为中断负荷补偿成本， T 为调度周期， N_L 为负荷中断的用户数量， ψ_i 为客户 i 预期中断负荷量与实际中断负荷量的差值， $h(\psi_i)$ 为停电损失费， $z(\psi_i)$ 为 ψ_i 的概率密度函数。

1.3 约束条件

考虑中断负荷的虚拟电厂经济调度模型的约束条件主要包括中断时间间隔约束、中断持续时间约束、中断次数约束和中断总容量约束。

1.3.1 中断时间间隔约束

负荷中断频繁且短暂，不仅会降低用户的用电体验感，还会加大用户生产恢复的难度。根据中断时间间隔的相关规定^[10]，中断时间间隔约束为

$$|T_i - T_j| \geq T_{\min,n} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S(n, T_i) = 1 \\ S(n, T_{i-1}) = 0 \\ S(n, T_j) = 1 \\ S(n, T_{j-1}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： T_i 、 T_j 为中断负荷时间点， $T_{\min,n}$ 为负荷中断协议规定的中断时间间隔最小值。

1.3.2 中断持续时间约束

负荷中断的持续时间越长，对用户生产的影响越大，用户停电的损失也越大。中断持续时间约束为

$$\sum_{t=j}^{T_{dur,z}+j-1} S(n,t) \leq T_{dur,z} \quad (6)$$

$$\begin{cases} S(n, T_i) = 1 \\ S(n, T_{i-1}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中： $T_{dur,z}$ 为负荷中断协议规定的第 z 个用户负荷中断持续的最长时间。

1.3.3 中断次数约束

负荷中断过于频繁不仅影响供电服务质量，还可能引起用户投诉。中断次数约束为

$$\sum_{t=1}^T S(m,t) \leq N_{T,m} \quad (8)$$

式中： $N_{T,m}$ 为 T 时段内第 m 个用户允许负荷中断的最大次数。

1.3.4 中断总容量约束

根据负荷中断协议，用户负荷中断总容量应限制在一定的范围内：

$$P_{LL,m,\min} S(m,t) \leq P_{LL,m,t} \leq P_{LL,m,\max} S(m,t) \quad (9)$$

式中： $P_{LL,m,\min} S(m,t)$ 为第 m 个用户允许负荷中断容量的下限， $P_{LL,m,\max} S(m,t)$ 为第 m 个用户允许负荷中断容量的上限。

2 模型求解

2.1 改进的粒子群优化算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法通过模拟空中飞鸟的竞争与合作等行为，获得数学优化问题的最优解^[11]。

利用 PSO 算法求解优化问题时：首先，将目标函数的可行解看作是在空间坐标中飞行的鸟，这些鸟即为求解优化问题的粒子；然后，粒子的初始位置和初始速度分别表示为 x 和 v ，并根据适应度函数确定粒子的适应度值 $fitness(x)$ ；最后，每个粒子均以一定的速度向最优解移动，粒子每次位置变化的过程就是一

次迭代过程，直到满足迭代终止条件为止，粒子群最终到达的位置即为全局最优解。

PSO 算法原理如下^[12]：

假设在 D 维空间中，存在一个容量为 z 的粒子群 $X = (x_1, x_2, \dots, x_z)$ ，粒子群中每个粒子均有初始位置和初始速度，令第 i 个粒子的位置集合为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ 、速度集合为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ 。

粒子在移动的过程中，通过比较个体极值（粒子在移动过程中经过的最好位置）与全局极值（粒子群中所有粒子在移动过程中经过的最好位置）来确定下一步的移动方向，粒子的速度和位置更新公式分别为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

式中： $d=1, 2, \dots, D$ 为空间维度； $i=1, 2, \dots, z$ 为粒子个体； k 为迭代次数； v_{id}^k 、 x_{id}^k 分别为第 k 次迭代时第 i 个粒子在 d 次坐标下的速度和位置； v_{id}^{k+1} 、 x_{id}^{k+1} 分别为第 $k+1$ 次迭代时第 i 个粒子在 d 次坐标下的速度和位置； p_{id}^k 、 p_{gd}^k 分别为第 k 次迭代时第 i 个粒子的个体极值和全局极值； ω 为惯性权重； c_1 、 c_2 为学习因子，用于控制粒子的移动速度； r_1 、 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数。

PSO 算法原理简单，易于实现，但粒子在位置更新的过程中，与历史位置、速度信息联系不紧密，导致其局部搜索能力较差，收敛速度较慢，易陷入局部最优^[13]。为此，本文利用扩展记忆系数对 PSO 算法进行改进，提出改进的粒子群优化 (improved particle swarm optimization, IPSO) 算法，使粒子在搜索过程中具备一定的记忆功能。IPSO 算法的速度更新公式为

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 [\xi_k (p_{id}^k - x_{id}^k) + \xi_{k-1} (p_{id}^{k-1} - x_{id}^{k-1})] + c_2 r_2 [\xi_k (p_{gd}^k - x_{id}^k) + \xi_{k-1} (p_{gd}^{k-1} - x_{id}^{k-1})] \quad (12)$$

式中： ξ_k 为当前记忆系数； ξ_{k-1} 为扩展记忆系数，

二者满足 $\xi_k + \xi_{k-1} = 1$ 。

对比公式(10)和(12)可以看出,引入扩展记忆系数的 IPSO 算法能够更好地储存粒子的速度、位置、个体极值和全局极值等历史信息,全局搜索和局部搜索效果更好。

文献[14-15]研究表明,采用扩展记忆系数的 IPSO 算法在寻优过程中具有更好的方向性和目的性,可以帮助粒子积累相关经验,提高 IPSO 算法的寻优精度。

2.2 IPSO 算法求解虚拟电厂经济调度模型

考虑到 IPSO 算法具有良好的寻优性能,本文利用其对虚拟电厂经济调度模型进行求解,求解流程如图 1 所示。

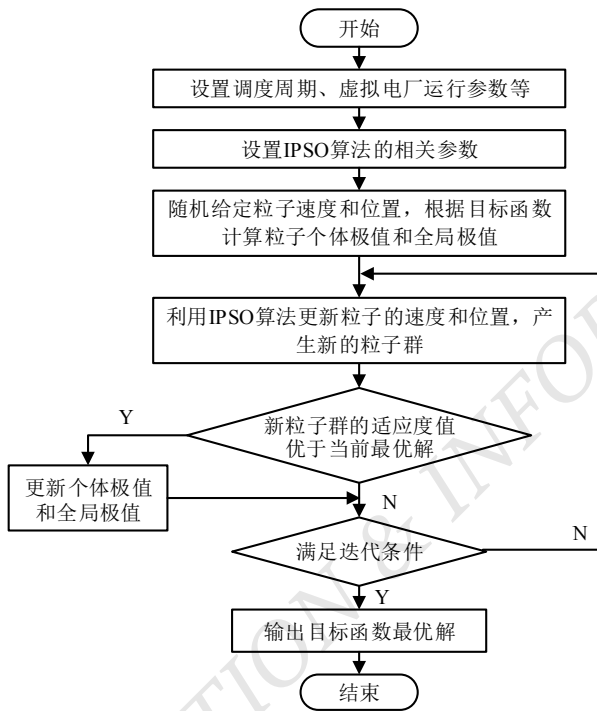


图 1 求解流程图

虚拟电厂经济调度模型主要求解步骤如下:

- 1) 设置虚拟电厂的调度周期、运行参数、相关约束条件;
- 2) 设置 IPSO 算法的相关参数,包括粒子数量、最大迭代次数、惯性权重的最大值和最小值、学习因子调节系数等;
- 3) 随机给定粒子的初始位置、初始速度,将公式(2)作为适应度函数,计算、比较粒子的适应度值,

确定个体极值、全局极值;

4) 利用公式(11)、(12)分别更新粒子的位置和速度,再次计算粒子的适应度值,若其优于个体极值,则更新个体极值,否则,个体极值不变;

5) 将个体极值与全局极值进行比较,若个体极值优于全局极值,则将其替换为全局极值,否则,全局极值保持不变;

6) 判断 IPSO 算法是否达到最大迭代次数,若是,输出目标函数最优解,否则,返回步骤 4)。

3 仿真分析

利用某虚拟电厂的负荷数据进行仿真分析。该虚拟电厂参与负荷中断响应的用户有 90 个。为了使仿真场景更接近于工程实际,将 90 个用户分为 3 组,每组的负荷中断补偿价格、未执行负荷中断协议的惩罚价格、信誉度(负荷实际中断量与中断需求量的标准差)均不同。3 组用户的中断负荷参数如表 1 所示。

表 1 3 组用户的中断负荷参数

组别	补偿价格/ (元/kWh)	惩罚价格/ (元/kWh)	信誉度
第 1 组	1	2	0.10
第 2 组	2	2	0.05
第 3 组	2	3	0.30

设置虚拟电厂的调度周期为 24 h,调度周期内各时段的负荷值如图 2 所示。

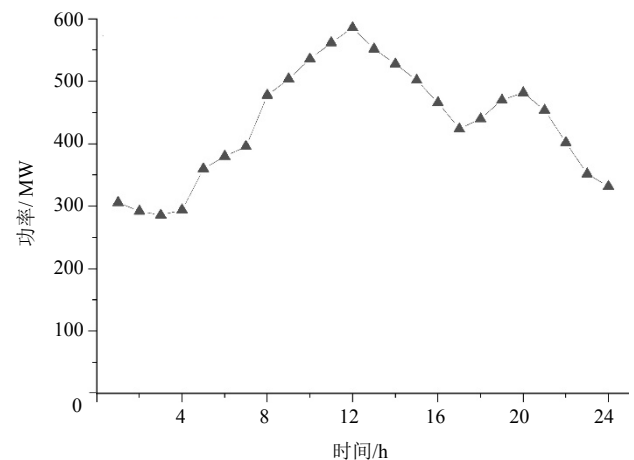


图 2 调度周期内各时段的负荷值

在 MATLAB 中进行仿真计算。仿真计算环境如下：Windows10 系统，主频 3.5 GHz，内存 16.0 GB，仿真软件 MATLAB2019b。利用 IPSO 算法、PSO 算法和遗传算法（genetic algorithm, GA）^[16] 分别对虚拟电厂经济调度模型进行求解，3 种算法的参数设置如表 2 所示。

表 2 3 种算法的参数设置

算法	参数
IPSO	种群规模 $n = 30$ 、最大迭代次数 $k_{\max} = 500$ 、最大惯性权重 $\omega_{\max} = 0.9$ 、最小惯性权重 $\omega_{\min} = 0.4$ 、学习因子 $c_1 = c_2 = 2$ 、当前记忆系数 $\xi_k = 0.6$ 、扩展记忆系数 $\xi_{k-1} = 0.4$
PSO	种群规模 $n = 30$ 、最大迭代次数 $k_{\max} = 500$ 、最大惯性权重 $\omega_{\max} = 0.9$ 、最小惯性权重 $\omega_{\min} = 0.4$ 、学习因子 $c_1 = c_2 = 2$
GA	种群规模 $n = 30$ 、最大迭代次数 $k_{\max} = 500$ 、交叉概率 $P_a = 0.4$ 、变异概率 $P_b = 0.1$

IPSO 算法、PSO 算法和 GA 优化目标函数的收敛曲线如图 3 所示。

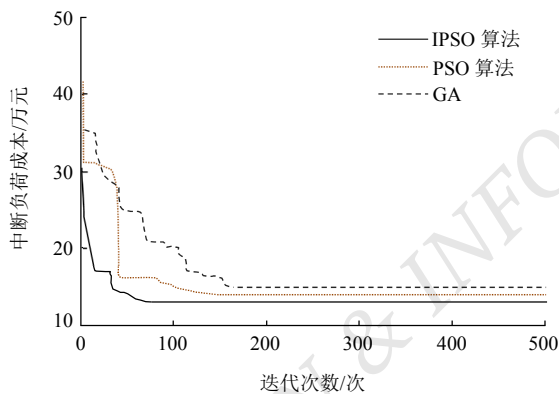


图 3 3 种算法优化目标函数的收敛曲线

由图 3 可知，IPSO 算法以最少的迭代次数获得最优解。

3 种算法的优化结果如表 3 所示。

表 3 3 种算法的优化结果

算法	迭代次数/次	最小中断负荷成本/万元
IPSO	74	13.21
PSO	139	13.98
GA	158	15.02

由表 3 可知：IPSO 算法获得的最小中断负荷成

本为 13.21 万元，迭代次数为 74 次；相较于 PSO 算法和 GA，最小中断负荷成本分别降低了 0.77 万元、1.81 万元，迭代次数分别减少了 65、84 次，表明 IPSO 算法的收敛性能更好，寻优精度更高。

根据 IPSO 算法的优化结果，获得调度周期内各时段的中断负荷量如图 4 所示。

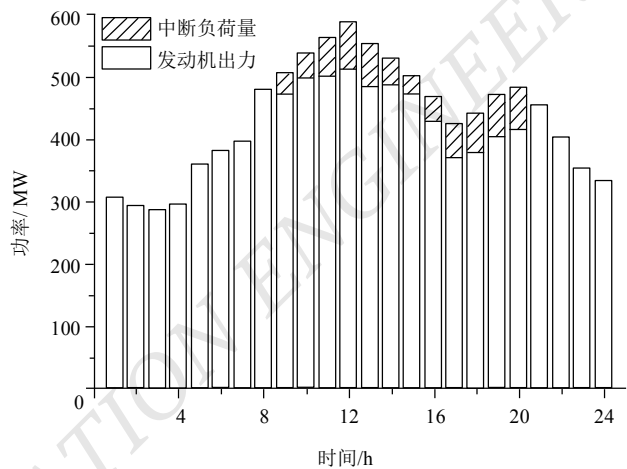


图 4 各时段的中断负荷量

由图 4 可知，负荷中断时间主要集中在 9~20h，且在 11~13h 和 19~20h 用电高峰期负荷中断量相对较大，可见中断负荷削减了虚拟电厂高峰时段的用电负荷，提高了虚拟电厂运行的经济性和稳定性。

4 结论

本文以虚拟电厂中断负荷成本最小为优化目标，综合考虑了 4 种约束条件，构建了考虑中断负荷的虚拟电厂经济调度模型。采用 IPSO 算法求解该模型，并将求解结果与 PSO 算法和 GA 进行仿真分析对比。仿真结果表明：IPSO 算法的收敛性能更好，寻优精度更高；中断负荷削减了虚拟电厂高峰时段的用电负荷，提高了虚拟电厂运行的经济性和稳定性。未来将进一步研究复合需求响应虚拟电厂运行的影响，以期进一步降低虚拟电厂的调度成本。

©The author(s) 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- [1] 张超,赵冬梅,季宇,等.基于改进深度 Q 网络的虚拟电厂实时优化调度[J].中国电力,2024,57(1):91-100.
- [2] 鲁肖龙,潘淼,鞠立伟,等.考虑碳捕集和电转气的热电联合虚拟电厂调度优化模型[J].电力建设,2023,44(8):107-117.
- [3] 杨力帆,周鲲,齐增清,等.基于需求响应的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J].电网与清洁能源,2024,40(3):10-21.
- [4] 黄宸希,吴雪琼,冯荣强,等.基于最优经济效益的虚拟电厂平台优化调度模型[J].水力发电,2024,50(2):90-93;113.
- [5] 王千淳,杜欣慧,赵薇,等.考虑碳交易下虚拟电厂参与现货市场竞争和调度策略[J].现代电力,2024,41(1):152-160.
- [6] 徐慧慧,田云飞,缪猛,等.计及碳交易和需求响应的虚拟电厂低碳经济调度[J].智慧电力,2023,51(8):1-7.
- [7] 马丙泰,刘海涛,郝思鹏,等.基于价格需求响应的储能系统退化成本模型研究[J].太阳能学报,2023,44(10):531-540.
- [8] 李佳桐,初壮.考虑激励型需求响应不确定性的微网储能容量优化配置[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(6):93-102.
- [9] 郭靖琪,李常生,付荣之,等.基于源荷不确定性的虚拟电厂负荷优化调度方法[J].自动化技术与应用,2023,42(10):73-76.
- [10] 李本赛.考虑需求侧响应的主动配电网优化调度研究[D].青岛:青岛大学,2022.
- [11] 马智强,马胜国,陈亮,等.基于粒子群算法的新能源微电网局部停电负荷调度研究[J].电网与清洁能源,2024,40(4):112-117;126.
- [12] 蒋鸣东,刘岩.基于粒子群算法的电机控制策略研究[J].太原学院学报(自然科学版),2024,42(2):56-60.
- [13] 王小军,高广德,吴田,等.基于 PSOEM 优化 LSSVM 的接地网腐蚀预测研究[J].智慧电力,2020,48(11):68-73.
- [14] 刘闯,何沁鸿,卢银均,等.输电线路 PSOEM-LSSVM 覆冰预测模型[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):131-137.
- [15] 刘小臣,何卫东,姚世选,等.基于 IPSO 算法的机器人抓取系统刚度优化研究[J].机床与液压,2021,49(21):1-7.
- [16] 王皓靖,修晓青,张宇,等.基于遗传算法的虚拟电厂经济性分析[J].电器与能效管理技术,2018(6):11-17.

作者简介:

彭祖剑,男,1984年生,软件工程硕士,主要研究方向:人工智能应用。E-mail: 304996311@qq.com

(上接第 40 页)

- [9] LU Z, FU Z, XIANG T, et al. Learning from weak and noisy labels for semantic segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016,39(3):486-500.
- [10] CHEN L C, ZHU Y, PAPANDEOU G, et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation [C]//Proceedings of the European conference on Computer Vision (ECCV), 2018:801-818.
- [11] LIN G, MILAN A, SHEN C, et al. Refinenet: Multi-path refinement networks for high-resolution semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017:1925-1934.
- [12] RIGAMONTI R, SIRONI A, LEPETIT V, et al. Learning separable filters [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013:2754-2761.
- [13] SANDLER M, HOWARD A, ZHU M, et al. Mobilenetv2: Inverted residuals and linear bottlenecks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2018:4510-4520.
- [14] 孔繁星,何腾飞,孙皓章.轻量化 CNN 与时间序列融合识别刀具磨损方法[J].机床与液压,2024,52(17):235-239.
- [15] 朱云云,朱黎,肖天龙,等.基于 YOLOv5-GM 的雾天环境下输电线路异物检测[J].机电工程技术,2024,53(4):100-105.
- [16] LIU Y, SHAO Z, HOFFMANN N. Global attention mechanism: Retain information to enhance channel-spatial interactions[J]. arxiv preprint arxiv:2112.05561, 2021.

作者简介:

陈冬青,男,1983年生,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向:特种设备安全管理、评价及机器人技术开发和应用。E-mail: 13580505705@163.com

邓泳涛(通信作者),男,2001年生,在读硕士研究生,主要研究方向:机器人规划与控制。E-mail: 2287796003@qq.com