

基于动态控制鲸鱼优化算法的热电联产机组经济排放优化调度

闫东

(绿能慧充数字技术有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 热电联产经济排放调度 (CHPEED) 旨在协同优化系统的燃料成本与污染物排放, 属于典型的多目标、非线性与非凸优化难题。本文提出的一种动态控制鲸鱼优化算法 (DCWOA), 是在传统鲸鱼优化算法 (WOA) 中引入动态收缩函数, 增强其处理多目标非凸 CHPEED 问题的能力。针对多目标热电联产经济排放调度问题, DCWOA 的表现显著超越了现有优化算法。该算法在求解效率、解集质量及稳定性方面均展现出明显优势, 能够更精准地捕捉成本与排放目标之间的最佳折衷关系。

关键词 热电联产机组; 经济排放调度; 改进鲸鱼优化算法

中图分类号: TP3; F407

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.004

0 引言

热电联产经济排放调度问题的目标是同时降低成本和减少排放^[1]。为了解决这个多目标、多约束的复杂问题, 需要一种能权衡目标并提供最佳折衷方案的优化技术。近年来, CHPEED 的求解方法不断丰富。研究者提出了一系列创新方法, 涵盖了动态参数调整策略、混合多目标优化框架、改进型进化算法以及基于新型支配机制的两阶段方法等, 并在多机组系统中验证了其有效性^[2]。

鲸鱼优化算法 (Whale Optimization Algorithm, WOA) 是 Mirjalili 提出的一种模拟座头鲸气泡捕食行为的仿生优化算法。该算法因结构简洁、收敛较快等特点, 在热电联产经济调度等领域得到应用。然而, 面对多峰、高维的大规模复杂优化问题时, WOA 仍存在易陷入局部最优、收敛速度慢等不足。学者们从平衡探索与开发能力的角度提出了多种改进策略, 如引入惯性权重的 WOA^[3]、增强型 WOA^[4], 将 WOA 与模拟退火 (SA) 相结合^[5] 以及引入 Tent 混沌映射生成初始种群等算法^[6], 以提升其全局寻优性能与收敛精度。

本文提出了一种动态控制鲸鱼优化算法 (DCWOA), 通过引入动态收缩函数对 WOA 改进。该机制可有效调节算法探索与开发阶段的平衡, 提升整体收敛性能与求解效率。在处理热电联产经济排放调度优化问题时, DCWOA 能获得分布更广且均匀的帕累托前沿, 为决策者提供更清晰的成本与排放权衡信息, 有助于制定科学经济的调度策略。

作者简介: 闫东 (1981-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源产业。

1 热电联产问题表述

1.1 热电联产经济调度问题

热电联产经济调度问题的目标是通过优化分配发电和供热单元的输出, 最小化热电联产系统的总成本:

$$Cost_{fuel} = \text{Min} \left[\sum_{r=1}^{N_E} C_r(P_r^E) \sum_{s=1}^{N_C} C_s(P_s^C, H_s^C) + \sum_{t=1}^{N_H} C_t(H_t^H) \right] \quad (1)$$

发电机的非凸成本函数 $C_r(P_r)$ 为:

$$C_r(P_r) = \left[u_r (P_r^E)^2 + v_r P_r^E + w_r + \left| x_r \sin(y_r (P_r^{E_{\min}} - P)) \right| \right] \quad (2)$$

联合循环机组的二次成本函数 $C_s(P_s^C, H_s^C)$ 为:

$$C_s(P_s^C, H_s^C) = \left[u_s (P_s^C)^2 + v_s P_s^C + w_s + x_s (H_s^C)^2 + y_s H_s^C + z_s H_s^C P_s^C \right] \quad (3)$$

式 (3) 中, u_s 、 v_s 、 w_s 、 x_s 、 y_s 和 z_s 是第 s 个热电联产机组的成本系数。

热单位的成本函数 $C_t(H_t^H)$ 为:

$$C_t(H_t^H) = \left[u_t (H_t^H)^2 + v_t H_t^H + w_t \right] \quad (4)$$

式 (4) 中, u_t 、 v_t 和 w_t 分别是第 t 个纯供热机组的成本系数。

1.2 热电联产排放调度问题

热电联产排放调度问题的目标为:

$$\text{Min} [Mass_{emission}], Mass_{emission} = E_s + E_c \quad (5)$$

$$E_S = \left[\sum_{r=1}^{N_E} \left[a_r + b_r P_r + c_r P_r^2 + d_r e^{(f_r P_r)} \right] + \sum_{s=1}^{N_C} (g_s + h_s) \right. \\ \left. P_S + \sum_{t=1}^{N_H} (i_t + j_t) H_t \right] \quad (6)$$

$$E_c = \left[\sum_{r=1}^{N_E} l_r P_r + \sum_{s=1}^{N_C} k_s P_s + \sum_{t=1}^{N_H} m_t H_t \right] \quad (7)$$

1.3 多目标热电联产经济排放调度 (MO-CHPEED)

MO-CHPEED 的目标是以能够获得最佳折衷方案的方式处理成本和排放这两个相互冲突的目标。

$$\text{Min} [\text{Cost}_{fuel}, \text{Mass}_{emission}] \quad (8)$$

本文采用梯形模糊隶属函数，将各目标的隶属度映射至 [0, 1] 区间，从而实现最佳折衷解的获取。映射关系数学模型为：

$$\text{fitness}_i = \begin{cases} 1, & v_i \leq v_{\min i} \\ Rx_i + S, & v_{\min i} \leq v_i \leq v_{\max i} \\ 0, & v_{\max i} \leq v_i \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中， $v_{\min i}$ 和 $v_{\max i}$ 分别是目标的最小值和最大值限制。系数 R 和 S 是根据模糊指标 v_i 的最小值和最大值界限计算得出的。

$$R = -\frac{1}{v_{\max i} - v_{\min i}} \quad (10)$$

$$S = \frac{v_{\max i}}{v_{\max i} - v_{\min i}} \quad (11)$$

为了在两个相互冲突的目标之间获得最佳折衷方案，适应度函数为：

$$\text{Max fitness} = \sqrt{\text{fitness}_1 \times \text{fitness}_2} \quad (12)$$

1.4 限制条件

$$P_r^{E_{\min}} \leq P_r^E \leq P_r^{E_{\max}} \quad (13)$$

$$P_s^{C_{\min}} (H_s^C) \leq P_s^C \leq P_s^{C_{\max}} (H_s^C) \quad (14)$$

$$H_s^{C_{\min}} (P_s^C) \leq H_s^C \leq H_s^{C_{\max}} (P_s^C) \quad (15)$$

$$H_t^{H_{\min}} \leq H_t^H \leq H_t^{H_{\max}} \quad (16)$$

式 (13)、(14)、(15)、(16) 中， $P_r^{E_{\min}}$ 和 $P_r^{E_{\max}}$ 分别为第 r 个发电机组的最小和最大输出功率， $P_s^{C_{\min}} (H_s^C)$ 、 $P_s^{C_{\max}} (H_s^C)$ 、 $H_s^{C_{\min}} (P_s^C)$ 和 $H_s^{C_{\max}} (P_s^C)$ 是定义第 s 个热电联产机组可行运行区域的线性不等式， $H_t^{H_{\min}}$ 和 $H_t^{H_{\max}}$ 分别是第 t 个热能发生器单元最小和最大输出。

2 改进鲸鱼优化算法

在 WOA 中，个体位置通过系数向量 \bar{M} 与当前位置至猎物位置 P 之间距离的乘积。其中 P 的确定受向量 \bar{M} 的影响，可能引起搜索过程中探索与开发阶段的失

衡，影响收敛性能。本文引入动态惯性权重 $\xi(itr)$ ，自适应调节当前最优解对位置更新的影响度。对 WOA 的位置更新公式如下：

$$\bar{P} = \left[\bar{N} \cdot \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \bar{P} (itr) \right] \quad (17)$$

$$\overline{\text{Pos}^*} (itr+1) = \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \bar{M} \cdot \bar{P} \quad (18)$$

在开发阶段，更新后的方程为：

$$\overline{\text{Pos}} (itr+1) = \bar{P}^i \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) \quad (19)$$

式 (19)，中 \bar{P} 表示第 r 条鲸鱼与猎物之间的距离，即最优解：

$$\bar{P} = \left| \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \overline{\text{Pos}} (itr) \right| \quad (20)$$

所提出的 DCWOA 考虑了与 WOA 相同的 50% 概率，表达式改为：

$$\overline{\text{Pos}} (itr+1) = \begin{cases} \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr) - \bar{M} \cdot \bar{P}, & \text{prob} < 0.5 \\ \bar{P}^i \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}^*} (itr), & \text{prob} \geq 0.5 \end{cases} \quad (21)$$

探索阶段的数学模型为：

$$\bar{P} = \left| \xi(itr) \cdot \bar{N} \cdot \overline{\text{Pos}_{rand}} - \overline{\text{Pos}} \right| \quad (22)$$

$$\overline{\text{Pos}} (itr+1) = \xi(itr) \cdot \overline{\text{Pos}_{rand}} - \bar{M} \cdot \bar{P} \quad (23)$$

式 (22)、(23) 中， $\overline{\text{Pos}_{rand}}$ 是当前种群中选择的随机位置向量。

为了增强 WOA 的性能，在 DCWOA 中考虑了动态控制收缩因子 ζ 。动态控制收缩因子 ζ 按指数变化，即：

$$\xi(itr) = \exp(-\lambda \ln \tau_d) \quad (24)$$

式 (24) 中， $\lambda = itr / itr_{\max}$ ， $itr_{\min} \leq itr \leq itr_{\max}$ ； τ_d 是收缩函数最大值与最小值的比值。

3 动态控制鲸鱼优化算法在 CHPEED 问题中的应用

本文围绕成本与排放两个冲突的目标展开研究，采用了梯形隶属函数的模糊框架。该模糊框架将多目标问题转化为单一目标进行评价，其关键在于确定各目标的最小与最大边界值，包含以下步骤：首先，将问题视为单目标经济调度问题，最小化燃料成本，由此得到燃料成本目标的下限和排放目标的上限；其次，将问题作为单目标排放调度问题，最小化系统排放，从而获得排放目标的下限和燃料成本目标的上限；最后，求解多目标热电联产经济排放调度 (MO-CHPEED) 问题，寻求折衷解。

为验证 DCWOA 的有效性，将其与 WOA 在热电联产机组经济排放案例中进行测试。案例设定的电、热负荷需求分别为 300 MW 和 150 MWth。表 1 展示了 DCWOA 算法

所得的统计结果。表2给出了由DCWOA单独求解成本与排放单目标问题后所确定的两个冲突目标的边界值。

表1 本文DCWOA获得的个体目标质量解决方案

输出	最优热电联产经济调度	输出	最优热电联产排放调度
P1 (MW)	135.00	P1 (MW)	34.99
P2 (MW)	40.75	P2 (MW)	125.79
P3 (MW)	19.23	P3 (MW)	34.20
P4 (MW)	105.00	P4 (MW)	104.99
H2 (MWth)	73.61	H2 (MWth)	133.86
H3 (MWth)	36.71	H3 (MWth)	16.13
H4 (MWth)	0.00	H4 (MWth)	0.00
H5 (MWth)	39.66	H5 (MWth)	0.00
最低成本(美元/小时)	13 672.79	最小值排放量(千克/小时)	1.17
平均成本(美元/小时)	13 673.58	平均排放量(千克/小时)	1.17
最高成本(美元/小时)	13 706.40	最大排放量(千克/小时)	1.17

表2 最优热电联产经济与排放调度的梯形隶属函数边界限制

输出	最优热电联产经济调度	最优热电联产排放调度
成本(美元/小时)	13 672.52	17 212
排放量(千克/小时)	12.05	1.17

表3展示了WOA与DCWOA算法对多目标热电联产经济排放调度问题所得的发电机最优调度结果。表4对比了DCWOA与其他方法对MO-CHPEED问题所获得的最优折衷解。

表3 WOA与DCWOA在MO-CHPEED中的最优调度

输出	WOA	DCWOA
P 1 (MW)	85.70	85.87
P 2 (MW)	74.70	75.05
P3 (MW)	33.07	34.05
P4 (MW)	105	105
H2 (MWth)	75.91	76.94
H3 (MWth)	32.49	32.75
H4 (MWth)	0	0
H5 (MWth)	41.50	40.30
总功率 (MW)	299.99	299.99
总热量 (MWth)	150	150

表4 DCWOA与其他方法的MO-CHPEED优化结果比较

方法	成本(美元/小时)	排放(千克/小时)	适应度
GWO	15 201.7	5.40	0.5 825
NSGA	15 214.7	6.05	0.5 857
SPEA2	14 997.3	6.26	0.5 760
IDBEA	15 112.5	5.21	0.5 981
BCS	15 142.4	5.32	0.6 127
WOA	15 083.3	5.21	0.6 078
DCWOA	15 121.4	5.12	0.6 133

在表4中,本文提出的DCWOA通过引入动态控制的收缩函数,有效调节了全局探索与局部开发行为,获得了最高的适应度值0.6 133。本文采用了模糊决策框架通过计算每种方法所得最优解的适应度值进行综合评价。DCWOA所获解的适应度显著优于其他对比方法,这表明DCWOA能够更有效地协调成本与排放之间的冲突,为MO-CHPEED问题提供更优的折衷解决方案。

4 结束语

针对热电联产机组的多目标经济排放调度这一复杂的非凸、非线性优化问题,本文提出了一种动态控制鲸鱼优化算法。该问题需同时优化相互冲突的燃料成本与污染物排放目标。所提出的DCWOA算法通过其动态控制机制,有效提升了收敛精度与速度,在求解中展现出卓越的综合性能。实验结果表明,相较于基本WOA及其他对比算法,DCWOA能够更稳定、高效地逼近帕累托前沿,所得非支配解集具有更优的分布性与收敛性,为决策者提供了质量更高的多目标权衡方案。实验与统计分析共同验证了DCWOA在应对此类复杂工程优化问题时的有效性、鲁棒性与实用价值。

参考文献:

- [1] 薛丰.基于自适应粒子群算法的热电联产系统优化调度[J].自动化与仪器仪表,2025(03):310-312.
- [2] 杨康源,王启鹏,赵亮.与热电联产机组集成的可持续公用事业系统多目标优化的两阶段随机规划[J].清洁生产杂志,2024(413):142-143.
- [3] 戴春雨,马廉洁,蒋涵存,等.基于多种策略改进的鲸鱼优化算法[J].计算机工程与科学,2024,46(09):1635-1647.
- [4] 柴岩,朱玉,任生.多策略协同的改进鲸鱼优化算法[J].计算机工程与科学,2023,45(07):1308-1319.
- [5] 孙传珠.基于改进鲸鱼优化算法的AGV多目标路径规划[J].青岛大学学报(工程技术版),2025,40(02):18.
- [6] 肖超群,于淼.基于改进鲸鱼方法的地源热泵耦合系统优化改造[J].动力系统与控制,2025,14(04):401-411.