

基于人工蜂群膜算法的电力系统经济负荷分配优化研究

陈廷军 王茂豪 李俊杰^{*} 于文萍

成都工业学院 自动化与电气工程学院, 中国·四川 成都 611730

摘要: 针对电力系统经济负荷分配问题中传统优化算法易陷入局部最优、收敛速度慢的缺陷, 本研究提出一种改进的人工蜂群膜算法 (Artificial Bee Colony Membrane Algorithm, ABC-MA)。该算法通过构建多层膜结构实现全局与局部搜索的协同优化, 显著提升了搜索效率与解的质量。基于标准测试函数及 24 小时动态负荷场景的仿真结果表明, 相较于传统人工蜂群算法, ABC-MA 在总发电成本上明显降低, 且收敛速度与稳定性均显著提升。本研究为复杂电力系统优化问题提供了改进的解决思路。

关键词: 经济负荷分配; 人工蜂群算法; 膜计算; 动态负荷; 全局优化

Optimization of Economic Load Dispatch in Power Systems Using an Enhanced Artificial Bee Colony Membrane Algorithm

Tingjun Chen Maohao Wang Junjie Li^{*} Wenping Yu

School of Automation and Electrical Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu, Sichuan, 611730, China

Abstract: To address the limitations of traditional optimization algorithms in solving the economic load dispatch problem in power systems, such as susceptibility to local optima and slow convergence speed, this study proposes an enhanced Artificial Bee Colony Membrane Algorithm (ABC-MA). The algorithm achieves collaborative optimization of global and local search through a multi-layer membrane structure, significantly improving search efficiency and solution quality. Simulation results based on standard test functions and 24-hour dynamic load scenarios demonstrate that, compared to the traditional Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, ABC-MA significantly reduces total generation costs while exhibiting superior convergence speed and stability. This research provides improved solutions for complex power system optimization problems.

Keywords: economic load dispatch; artificial bee colony algorithm; membrane computing; dynamic load; global optimization

0 前言

电力系统经济负荷分配是能源管理中的核心问题, 其目标是在满足功率平衡与机组出力约束的前提下, 最小化总发电成本。传统方法如动态规划、拉格朗日松弛法等在处理高维、非线性问题时面临计算复杂度高、易陷入局部最优等挑战。近年来, 群体智能算法^[1] (如粒子群优化、人工蜂群算法) 因其并行搜索能力受到广泛关注, 但仍存在早熟收敛、参数敏感等问题。

膜计算是一种新型分布式计算模型, 通过模拟生物细胞的多层膜结构实现并行优化^[2]。论文将其与人工蜂群算法融合, 提出人工蜂群膜算法 (Artificial Bee Colony Membrane Algorithm, ABC-MA), 利用膜间信息交互机制增强全局搜索能力, 并结合膜计算模型的分布性、高度并行性。实验表明, 该算法在动态负荷场景下具有显著优越性。

1 人工蜂群膜算法

人工蜂群算法 (Artificial Bee Colony Algorithm, ABC)

通过模拟蜂群的分工机制与觅食行为实现群体智能优化, 其核心是通过引领蜂、跟随蜂和侦察蜂的角色转换与协作寻找高质量解。论文提出的 ABC-MA 算法基于膜计算模型, 通过构建表层膜和基本膜两层结构优化搜索过程。表层膜用于隔离外部环境并协调内部信息交互, 而每个基本膜独立运行 ABC 算法, 维护一个蜂群种群。在每次迭代中, 各基本膜生成局部最优解, 并通过表层膜进行全局信息交换, 筛选出全局最优解反馈至各基本膜。该过程重复进行, 直至达到最大迭代次数, 输出全局最优解。ABC-MA 算法结构如图 1 所示, 算法流程如图 2 所示。

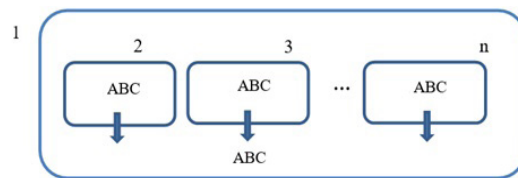


图 1 人工蜂群膜算法结构图

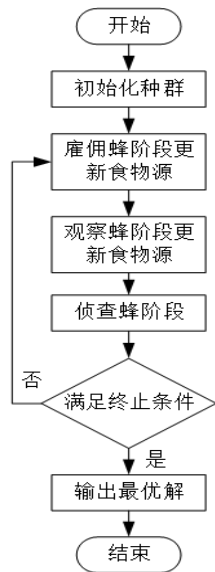


图 2 人工蜂群膜算法内部子算法流程图

2 实验过程及结果分析

火电机组运行管理的核心在于协调电力供需动态平衡与燃煤消耗最小化的多目标优化，通过制定机组负荷分配策略实现综合发电成本最优控制。该多项目标优化问题构成电力系统经济调度的核心命题，需建立机组运行参数与经济性指标的量化模型，借助智能算法寻求全局最优解。人工蜂群算法应用于该领域时，将机组输出功率映射为多维空间坐标，形成迭代解集。系统运行成本作为解集质量评价指标，基于成本函数构建适应度评价体系，通过多维空间定向搜索，在满足约束条件下迭代获取最优负荷分配方案。

一般情况下，一台发电机的发电成本可表示为：

$$F_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i, i = 1, 2, 3, \dots, N$$

式中， F_i 表示机组 i 的燃料成本； P_i 表示机组 i 输出的有功功率； a_i 、 b_i 、 c_i 为常数，表示机组 i 的燃料消耗系数， N 代表机组的个数。

在发电机组运行时，发电功率上限是有限的，有其自身的功率限值约束：

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax}, i = 1, 2, 3, \dots, N$$

式中， P_i 表示第 i 台发电机组输出的有功功率， P_{imin} ， P_{imax} 分别表示第 i 台发电机组输出的最小值与最大值， N 代表机组的个数。同时，还需满足供需功率平衡约束：

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_L$$

式中， P_i 表示第 i 台发电机组输出的有功功率，表示供电系统的总负荷； P_L 是供电系统的总网损。

为验证人工蜂群膜算法的改进效果，本文采用如下的两个标准单目标全局优化函数^[3]进行优化测试，并与原始人工蜂群算法^[4]进行了对比。仿真具体参数如下：蜜蜂数量为 50，最大迭代次数为 100，维度为 30，实验次数为 30（确保统计显著性）。ABC-MA 特有参数：基本膜数量为 3 个。仿真结果如图 3 和图 4 所示，结果对比如表 1 所示。

① Sphere 函数（单峰函数，检验收敛速度）：

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^D x_i^2, x_i \in [-100, 100]$$

② Rastrigin 函数（多峰函数，检验全局搜索能力）：

$$f_2(x) = 10D + \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)), x_i \in [-5.12, 5.12]$$

实验结果表明，该算法在初期具备快速收敛能力，并在后期维持全局搜索性能，显著提升了解的质量。相较于传统方法，ABC-MA 既可满足实时快速响应需求，又可保障高精度场景下的全局收敛性，有效克服早熟收敛缺陷。

表 1 测试函数对比结果

	ABC 算法性能	ABC-MA 算法性能
Sphere 函数平均最优值	60054.650 ± 4491.0052	50402.0665 ± 5156.2084
Rastrigin 函数平均最优值	401.213 ± 19.2026	382.6812 ± 20.173
Sphere 函数 p 值	-	1.7254e-10
Rastrigin 函数 p 值	-	0.00057389

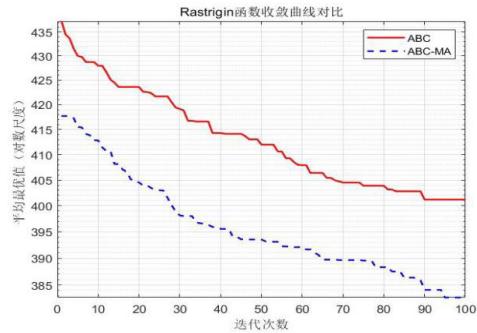


图 3 Sphere 函数（单峰）测试结果

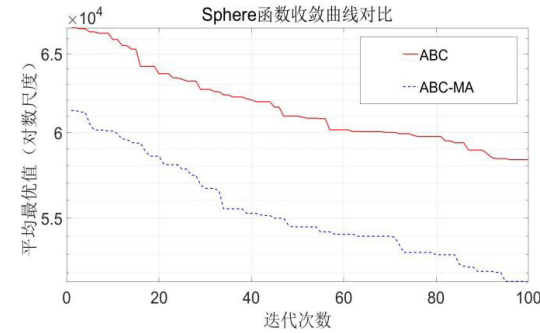


图 4 Rastrigin 函数（多峰）测试结果

针对电力系统经济负荷优化问题，本研究构建动态负荷分配模型，在 3 机组，24 小时动态负荷场景下，通过 50 种群规模、200 次迭代的 10 组实验来验证算法的性能。如表 2 与图 5 所示为实验结果及两种算法的对比，由图表可知，较传统方法而言总成本有效降低，在求解精度及稳定性方面均展现出显著优势，为复杂电网优化提供有效解决方案。

表 2 两种算法总成本仿真对比

指标	ABC	ABC-MA
总成本	162697.7364	151087.3276
标准差	1332.2248	0.00026217
p 值	-	3.5801e-16

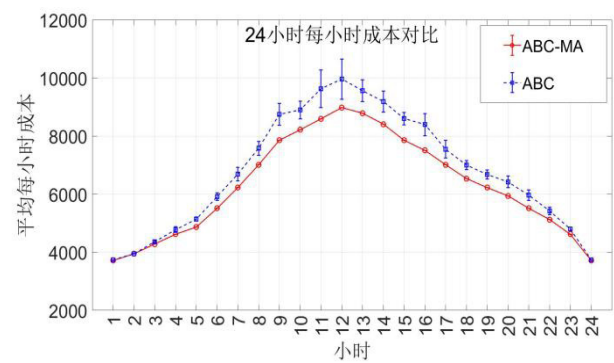


图 5 两种算法 24 小时成本对比图

3 结论

本研究针对电力系统经济调度优化问题，提出了一种基于膜计算框架的改进型人工蜂群算法。通过引入分层膜结构，有效解决了传统方法在多峰搜索空间中的局部最优问题。实验结果表明，ABC-MA 相较于传统 ABC 算法展现出了显著优势：总发电成本平均降低 7.13%，收敛迭代次数显著减少，10 次独立实验的标准差显著降低，验证了多层膜结构分布性、高度并行性的提升作用。

参考文献：

[1] 赵万云,由瑞.基于改进蜂群算法的电力系统经济负荷分配[J].湖南电力,2024,44(5):62-67.

[2] 张葛祥,潘林强.自然计算的新分支——膜计算[J].计算机学报,2010,33(2):208-214.

[3] 涂敏.膜计算在电力系统故障诊断和经济负荷分配中的应用研究[D].成都:西华大学,2014.

[4] 胡欣.改进的人工蜂群算法及其在经济负荷分配中的应用[D].武汉:武汉理工大学,2015.

作者简介：陈廷军（2003-），男，中国四川遂宁人，在读本科生。

通讯作者：李俊杰（1976-），男，本科，讲师，从事电气工程教学与研究。

基金项目：成都工业学院大学生创新创业训练计划项目（基于人工蜂群膜算法的电力系统经济负荷分配系统，项目编号：NO.QM2024008）。