

# 生态金字塔粒子群算法的超启发式框架构建及其在提纯全链调度中的机制研究

索立 扎西桑珠 宋雪琦 丁子俊 葛颖超

陕西理工大学，陕西汉中，723000；

**摘要：**随着科学技术的不断进步，提纯工艺在诸多领域发挥着越来越重要的作用。然而，提纯全链调度问题因其复杂性，传统的优化方法往往难以获得满意的结果。生态金字塔粒子群算法（EP-PSO）作为一种新兴的群智能优化算法，通过引入生态金字塔系统，有效提升了算法的全局搜索能力和收敛速度。本文旨在构建生态金字塔粒子群算法的超启发式框架，并将其应用于提纯全链调度问题中，以探索其在实际应用中的有效性和优越性。通过案例分析和实验验证，本文证明了生态金字塔粒子群算法在提纯全链调度中的有效性和高效性，为相关领域的优化问题提供了新的解决思路。

**关键词：**生态金字塔粒子群算法；提纯全链调度；超启发式框架；全局搜索能力；收敛速度

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.09.003

## 引言

提纯工艺在化工、制药、食品等多个领域具有广泛的应用，其效率和质量直接影响着产品的最终性能和市场竞争力。提纯全链调度问题涉及多个工序、多种资源和复杂的约束条件，如何合理安排各工序的执行顺序和资源分配，以最小化生产成本、最大化生产效率，是提纯工艺优化的核心问题。

传统的优化方法，如线性规划、动态规划等，在处理提纯全链调度问题时，往往因问题的复杂性和非线性而难以获得全局最优解。近年来，群智能优化算法因其强大的全局搜索能力和易于实现的特点，逐渐成为解决复杂优化问题的有力工具。其中，粒子群算法（PSO）作为一种模拟鸟群觅食行为的群智能算法，因其简单易懂、收敛速度快等优点，在多个领域得到了广泛应用。

然而，传统的粒子群算法在处理高维复杂函数时，容易陷入局部最优和早熟收敛的问题。为了克服这些缺陷，研究者们提出了多种改进算法，生态金字塔粒子群算法（EP-PSO）就是其中之一。EP-PSO 算法通过引入生态金字塔系统，使粒子在搜索空间分等级、分子群寻优，有效增加了群体多样性，增强了算法的全局搜索能力。

本文将在分析提纯全链调度问题特点的基础上，构建生态金字塔粒子群算法的超启发式框架，并将其应用于提纯全链调度问题中，通过案例分析和实验验证，探讨其在实际应用中的有效性和优越性。

## 1 生态金字塔粒子群算法概述

### 1.1 粒子群算法基本原理

粒子群算法（PSO）是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种基于群体智能的优化算法。该算法模

拟鸟群觅食行为，将优化问题的潜在解视为搜索空间中的粒子，每个粒子都有一个由目标函数决定的适应值和一个决定其飞行方向和距离的速度。在搜索过程中，粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己的位置和速度：一个是粒子本身所找到的最优解（个体极值），另一个是整个种群目前找到的最优解（全局极值）。

粒子群算法的基本流程如下：

**初始化：**随机初始化一群粒子，包括粒子的位置和速度。

**计算适应值：**根据目标函数计算每个粒子的适应值。

**更新个体极值：**将每个粒子的当前适应值与其历史最优适应值进行比较，如果当前值更优，则更新个体极值。

**更新全局极值：**比较所有粒子的个体极值，找出其中最优的，更新全局极值。

**更新粒子速度和位置：**根据速度更新公式和位置更新公式，更新每个粒子的速度和位置。

**检查终止条件：**如果满足终止条件（如达到最大迭代次数或适应值收敛），则算法结束，输出全局最优解；否则，返回步骤 2 继续迭代。

### 1.2 生态金字塔粒子群算法改进

尽管粒子群算法具有诸多优点，但在处理高维复杂函数时，容易陷入局部最优和早熟收敛的问题。为了克服这些缺陷，研究者们提出了生态金字塔粒子群算法（EP-PSO）。

EP-PSO 算法的主要改进在于引入生态金字塔系统，使粒子在搜索空间分等级、分子群寻优。具体来说，算法将粒子群分为多个子群，每个子群对应生态金字塔中的一个层级。在搜索过程中，粒子不仅跟踪个体极值和

全局极值，还跟踪所在子群的最优解（子群极值）。这种分层搜索机制有效增加了群体多样性，增强了算法的全局搜索能力。

此外，EP-PSO 算法还对处于停滞状态的个体极值和全局极值进行动态变异，以扩大种群的潜在搜索空间，进一步避免早熟收敛。

### 1.3 提纯全链调度问题分析

#### 1.3.1 提纯全链调度问题描述

提纯全链调度问题涉及多个工序、多种资源和复杂的约束条件。以化工提纯工艺为例，其全链调度问题可以描述为：在给定的一组原料和提纯目标下，如何合理安排各工序的执行顺序和资源分配，以最小化生产成本、最大化生产效率。

提纯全链调度问题的复杂性主要体现在以下几个方面：

**多工序性：**提纯工艺通常包含多个工序，每个工序都有特定的操作条件和资源需求。

**资源约束：**提纯过程中需要消耗多种资源，如能源、溶剂、催化剂等，这些资源往往是有限的。

**非线性关系：**提纯效果与操作条件之间往往存在复杂的非线性关系，使得优化问题难以用传统的线性规划方法求解。

**动态性：**提纯过程中可能受到外部因素（如原料质量波动、设备故障等）的影响，导致调度方案需要动态调整。

#### 1.3.2 提纯全链调度问题优化目标

提纯全链调度问题的优化目标通常包括以下几个方面：

**最小化生产成本：**通过合理安排工序顺序和资源分配，降低原料消耗、能源消耗和催化剂使用等成本。

**最大化生产效率：**提高提纯工艺的产出率，缩短生产周期，提高设备利用率。

**保证产品质量：**确保提纯后的产物满足特定的质量指标，如纯度、收率等。

**增强系统鲁棒性：**提高调度方案对外部因素变化的适应能力，确保生产过程的稳定性和可靠性。

## 2 生态金字塔粒子群算法在提纯全链调度中的应用

### 2.1 超启发式框架构建

为了将生态金字塔粒子群算法应用于提纯全链调度问题，本文构建了一个超启发式框架。该框架包括以下几个关键步骤：

**问题建模：**将提纯全链调度问题转化为一个优化问题，定义目标函数和约束条件。目标函数通常包括生产成本、生产效率和产品质量等多个指标，约束条件则包

括资源限制、操作条件限制等。

**粒子编码：**将每个粒子编码为一个提纯全链调度方案。粒子的位置表示各工序的执行顺序和资源分配情况，速度表示调度方案的调整方向和幅度。

**适应值计算：**根据目标函数计算每个粒子的适应值。适应值越小，表示调度方案越优。

**生态金字塔系统构建：**将粒子群分为多个子群，构建生态金字塔系统。每个子群对应生态金字塔中的一个层级，层级之间的粒子通过信息共享和互助机制进行交互。

**粒子更新：**根据生态金字塔粒子群算法的速度更新公式和位置更新公式，更新每个粒子的位置和速度。在更新过程中，粒子不仅跟踪个体极值和全局极值，还跟踪所在子群的最优解。

**动态变异：**对处于停滞状态的个体极值和全局极值进行动态变异，以扩大种群的潜在搜索空间。

**终止条件判断：**如果满足终止条件（如达到最大迭代次数或适应值收敛），则算法结束，输出最优调度方案；否则，返回步骤 4 继续迭代。

### 2.2 案例分析

为了验证生态金字塔粒子群算法（EP - PSO）在提纯全链调度中的有效性，本文选取了一个实际的化工提纯工艺作为案例进行深入分析。该化工提纯工艺涉及多个复杂的工序，包括原料预处理、反应、分离、精制等环节，且每个工序都对特定的资源有需求，如能源、溶剂、催化剂等，同时还受到多种复杂的约束条件限制，如设备容量、操作时间、安全规范等。

首先，我们依据该提纯工艺的特点和目标要求，精心构建了提纯全链调度问题的数学模型。在这个模型中，我们明确了各个工序之间的先后顺序关系、资源消耗情况以及约束条件，并将生产成本、生产效率和产品质量等关键指标量化为目标函数。通过这样的数学建模，我们将实际的提纯全链调度问题转化为了一个可以通过算法求解的优化问题。

接着，我们应用生态金字塔粒子群算法的超启发式框架对该问题进行求解。在算法实现过程中，我们将每个粒子编码为一个具体的提纯全链调度方案，粒子的位置表示各工序的执行顺序和资源分配情况，速度则表示调度方案的调整方向和幅度。通过生态金字塔系统的构建，粒子群被分为多个子群，不同层级的粒子之间通过信息共享和互助机制进行交互，从而增加了群体的多样性，增强了算法的全局搜索能力。

在实验过程中，为了全面探索算法参数对优化结果的影响，我们设置了不同的参数组合进行对比实验。这些参数包括粒子群规模、学习因子、惯性权重等。通过对多组实验数据的分析和比较，我们发现生态金字塔粒

予群算法在提纯全链调度问题中表现出了卓越的性能。

与传统粒子群算法相比,EP-PSO 算法能够更快地找到全局最优解,且解的质量更高。具体来说,在最小化生产成本方面,EP-PSO 算法通过合理安排工序顺序和资源分配,有效降低了原料消耗、能源消耗和催化剂使用等成本。在最大化生产效率方面,该算法提高了提纯工艺的产出率和设备利用率,使得生产过程更加高效。同时,在保证产品质量方面,EP-PSO 算法确保了提纯后的产品满足特定的质量指标,提高了产品的市场竞争力。

综上所述,生态金字塔粒子群算法在化工提纯全链调度问题中具有显著的优势,为解决此类复杂优化问题提供了一种有效的方法。

### 3 实验验证与结果分析

#### 3.1 实验设计

为了进一步验证生态金字塔粒子群算法在提纯全链调度中的优越性,我们设计了一系列实验。实验采用标准测试函数和实际提纯工艺案例相结合的方式,对算法的性能进行全面评估。

在标准测试函数方面,我们选取了多个具有代表性的高维复杂函数进行测试。这些函数具有不同的特性,如多峰性、非线性、不可微性等,能够全面检验算法的全局搜索能力和收敛速度。

在实际提纯工艺案例方面,我们选取了多个不同规模和复杂度的提纯工艺进行调度优化。这些案例涵盖了化工、制药、食品等多个领域,能够充分验证算法在实际应用中的有效性和适应性。

#### 3.2 实验结果与分析

实验结果表明,生态金字塔粒子群算法在提纯全链调度问题中表现出了显著的优势。具体来说,以下几个方面值得注意:

**全局搜索能力:** EP-PSO 算法通过引入生态金字塔系统,有效增加了群体多样性,增强了算法的全局搜索能力。在标准测试函数和实际提纯工艺案例中,EP-PSO 算法均能够更快地找到全局最优解,且解的质量更高。

**收敛速度:** 与传统粒子群算法相比,EP-PSO 算法的收敛速度更快。这得益于算法中的动态变异机制和分层搜索机制,它们能够有效避免早熟收敛,加速算法的收敛过程。

**鲁棒性:** EP-PSO 算法对外部因素变化的适应能力较强。在实际提纯工艺案例中,当原料质量波动、设备故障等外部因素发生变化时,EP-PSO 算法能够及时调整调度方案,确保生产过程的稳定性和可靠性。

**参数敏感性:** 实验还探讨了算法参数对优化结果的影响。结果表明,EP-PSO 算法对参数的选择具有一定的

鲁棒性。在合理的参数范围内,算法均能够取得较好的优化效果。

### 4 结论与展望

#### 4.1 结论

本文构建了生态金字塔粒子群算法的超启发式框架,并将其应用于提纯全链调度问题中。通过案例分析和实验验证,本文证明了生态金字塔粒子群算法在提纯全链调度中的有效性和优越性。具体来说,EP-PSO 算法通过引入生态金字塔系统,有效增加了群体多样性,增强了算法的全局搜索能力和收敛速度。在实际提纯工艺案例中,EP-PSO 算法能够合理安排工序顺序和资源分配,降低生产成本、提高生产效率和保证产品质量。

#### 4.2 展望

尽管本文在生态金字塔粒子群算法及其在提纯全链调度中的应用方面取得了一定的成果,但仍有许多值得进一步研究的问题。未来的研究可以从以下几个方面展开:

**算法改进:** 进一步探索生态金字塔粒子群算法的改进方向,如引入其他群智能算法的思想、优化算法参数选择等,以提高算法的性能和适应性。

**多目标优化:** 将生态金字塔粒子群算法应用于多目标提纯全链调度问题中,探索如何在多个优化目标之间进行权衡和折中。

**实际应用拓展:** 将生态金字塔粒子群算法拓展到其他领域的优化问题中,如物流调度、生产调度、项目管理等,以验证其普适性和有效性。

**并行计算与分布式计算:** 结合并行计算和分布式计算技术,提高生态金字塔粒子群算法的计算效率和求解规模。

通过不断深入研究和探索,相信生态金字塔粒子群算法将在更多领域发挥重要作用,为解决复杂优化问题提供新的思路和方法。

### 参考文献

- [1] 刘亚红, 张玮, 樊吕彬, 等. 生态金字塔粒子群优化算法 [J]. 计算机科学, 2017, 44(10):8. DOI:CNKI:SU N:JSJA.0.2017-10-043.
- [2] Liu Y H , Zhang W , Fan L B . 生态金字塔粒子群优化算法 (Ecological Pyramid Particle Swarm Optimization) [J]. 计算机科学, 2017, 44:237-244. DOI: 10.11896/j. issn. 1002-137X. 2017. 10. 043.
- [3] 刘亚红. 生态金字塔粒子群优化算法及其在蛋壳薄膜胶原蛋白提取中的应用 [D]. 太原理工大学 [2025-04-18]. DOI:CNKI:CDMD:2.1017.831930.