

基于工业互联网平台的订单分配算法优化研究

王雷 金楠

杭州电子科技大学 浙江杭州 311200

摘要: 在数字经济背景下, 工业互联网平台需高效处理海量订单。传统人工分配效率低下, 亟需智能化优化。本文构建了以最小化生产成本、运输成本、延迟交货率, 最大化产品质量为目标的多目标订单分配模型。运用模糊数学法(基于梯形模糊数与专家评价)确定目标权重, 将多目标问题转化为单目标问题。针对模型求解, 提出了一种融合差分进化(DE)策略的改进麻雀搜索算法(SSA-DE), 改进 Circle 混沌映射优化种群初始化和发现者位置更新机制。实验结果表明, SSA-DE 算法收敛速度更快(比改进遗传算法 IGA 快约 28%), 所得方案在总成本、产品质量上均优于 IGA, 为平台订单分配提供了有效解决方案。

关键词: 行业工业互联网平台; 订单分配; 麻雀搜索算法; 多目标优化

引言

工业互联网平台是实现制造资源高效配置的关键, 其订单分配效率直接影响供应链效能与企业成本。面对激增订单, 传统人工分配方式难以应对, 采用智能优化算法势在必行。订单分配问题广泛采用优化算法求解, 早期研究集中于单目标模型^[1]或博弈模型^[2]。后续提出了多目标方法, 如多准则动态规划^[3]、遗传算法^[4]及启发式算法^[5]。麻雀搜索算法(SSA)、差分进化(DE)等高性能算法也被应用。然而, 现有算法易陷入局部最优或计算耗时。为此, 本文提出混合 SSA-DE 算法, 构建高效订单分配模型并设计高性能求解算法以提升平台效率。

1 模型构建

工业互联网平台上, 多个供应商响应同一客户订单, 需在满足订单需求、产能限制、质量和交货约束下, 最优分配订单。因此, 本文针对单个产品, 多客户下单、多平台供应商接单的订单分配问题, 综合生产成本、运输成本、产品质量及交货能力四个目标, 建立多目标优化模型。

1.1 多目标模型构建与标准化

模型假设每订单仅生产一种电动工具, 单位生产成本恒定, 所有供应商具备生产能力, 供应商接单后即开始生产且分配期间供应商数量不变。

为消除量纲差异, 对生产成本、交货能力、质量和运输成本分别标准化, 构建如下目标函数:

生产成本:

$$\text{Min}Z_1 = X' \cdot p_i \cdot x_i \quad (1)$$

交货能力:

$$\text{Min}Z_2 = X' \cdot c_i \cdot x_i \quad (2)$$

产品质量:

$$\text{Max}Z_3 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot q_i \cdot x_i \quad (3)$$

运输成本:

$$\text{Min}Z_4 = X' \cdot v_i \cdot d_i \quad (4)$$

其中为极差标准化值^[7], 用以消除上述不同量纲对评价结果的影响。

$$X' = \sum_{i=1}^n \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

p_i 、 c_i 、 q_i 、 v_i 、 d_i 分别为单价、延迟交货率、合格率、单位运费率和距离, x_i 为供应商 i 的分配量。

1.2 分配多目标模型转化

考虑多目标间权衡, 引入模糊权重法将多目标转化为单目标。采用 Zadeh^[6]的梯形模糊数和 Chen^[7]等方法将 5 位行业平台专家打分语言变量映射为模糊数, 经归一化后得各目标权重, 得到订单分配的最终目标函数为:

$$\text{Min}Z = 0.29X' \cdot p_i \cdot x_i + 0.258X' \cdot c_i \cdot x_i - 0.236X' \cdot q_i \cdot x_i + 0.216X' \cdot v_i \cdot d_i \quad (6)$$

约束条件为:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i = D \quad (7)$$

$$\lambda_i x_i \leq PR_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i q_i \geq QD \quad (9)$$

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \geq 0.95 \quad (10)$$

$$x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

2 基于 SSA-DE 的订单求解方法设计

为求解平台订单分配问题, 本文设计了基于差分进化 (DE) 策略改进的麻雀搜索算法 (SSA-DE)。该算法融合两种优化策略优势, 以提升解的收敛速度与全局搜索能力, 整体包括种群初始化、适应度函数构建及优化更新操作。采用改进 Circle 混沌映射初始化种群, 以提升初始解多样性。

2.1 适应度函数设定

以电动工具行业工业互联网平台的目标函数作为 SSA-DE 的适应度函数 (式 19), 其包括生产成本、交货能力、产品质量、运输成本四个权重系数不同的子目标函数。因此, 在迭代过程中, SSA-DE 算法根据式 (12) 计算种群适应度值, 并进行相应的优化操作。

$$f_u = 0.29 \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \frac{x_i^y - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot p_i \cdot x_i^y + 0.258 \sum_{i=1}^n \frac{x_i^y - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot c_i \cdot x_i^y - 0.236 \sum_{i=1}^n \frac{x_i^y - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot q_i \cdot x_i^y + 0.216 \sum_{i=1}^n \frac{x_i^y - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot v_i \cdot d_i \quad (12)$$

其中, f_u 表示第 u 个解的适应度值。

2.2 DE 算法优化操作

因 DE 算法全局寻优能力强但收敛速度慢, 将其变异、交叉、选择操作融入 SSA-DE: 通过随机选择 3 个解生成变异解 (式 13) 以探索新方案, 基于改进 Circle 混沌映射执行交叉 (式 5.8) 增加解多样性, 采用贪婪策略选择适应度更优解, 提升收敛精度与全局搜索能力。

$$V_p(t) = \bar{X}_{u1}(t) + F \cdot (\bar{X}_{u2}(t) - \bar{X}_{u3}(t)) \quad (13)$$

$$\bar{X}_u(t) = \begin{cases} V_p(t) & \text{if } \chi \leq CR \\ \bar{X}_u(t) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

2.3 SSA 算法优化操作

因 SSA 收敛快但易陷入局部最优, 优化两点: ①针对传统随机初始化种群多样性不足、原始 Circle 混沌映射分布不均的问题, 用改进 Circle 混沌映射 (式 15) 生成随机数, 结合产品需求向量初始化种群 (式 16), 增强初始解多样性; ②针对原始发现者位置更新中搜索范围受限的问题, 通过 (式 17) 引入影响因子扩大搜索范围, 加入随机数增强随机性, 提升全局搜索能力。

$$\chi_{x+1} = \text{mod} \left(\delta_1 \chi_x + \delta_2 - \frac{\delta_3}{2\pi} \cos(2\pi \times \chi_x + 0.5\pi), 1 \right) \quad (15)$$

$$\bar{X}_u = \rho D \text{ s.t. } \sum_b^g \phi_b^u = 1 \quad (16)$$

$$\bar{X}_{u,y}(t+1) = \begin{cases} \bar{X}_{u,y}(t) \cdot \left(1 / \exp \left(\frac{\tilde{z}_1 t}{(\alpha \times t_{\max})^{0.5}} \right) \right) & \text{if } R_z < ST \\ \bar{X}_{u,y}(t) + Q & \text{if } R_z \geq ST \end{cases} \quad (17)$$

2.4 SSA-DE 算法流程设计

最终建立 SSA-DE 的算法流程如图 1 所示。

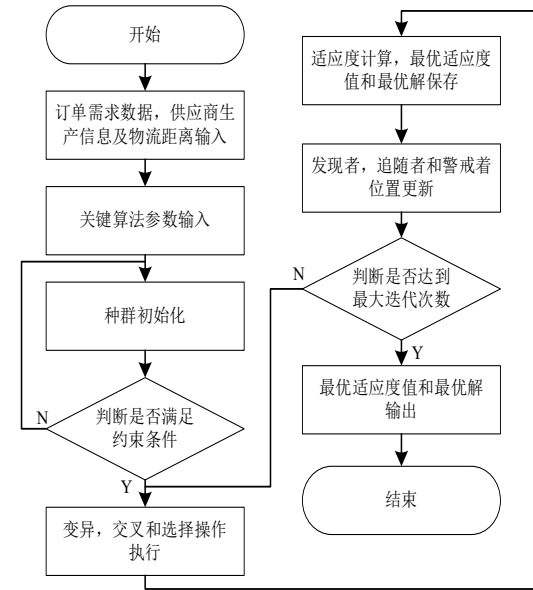


图 1 SSA-DE 算法流程图

3 模型应用与结果分析

本文所提出的 SSA-DE 算法主要运行在 MATLAB2019 平台, 同时, 本文设置算法的关键参数: 种群数量 ρ 为 50, 最大迭代次数 $it_{\max}$ 为 200, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 分别为 2、0.3、0.7, 变异因子 F 为 0.5, 交叉率 CR 为 0.1, 发现者比例 PD 为 0.2, 警戒者比例 SD 为 0.1, 运输费率 V_i 为 1.5。

本文讨论单种产品下 5 家供应商情况, 2 位客户在平台下单, 其订单均含 3 种不同类型产品, 有 10 家供应商接单, 生产信息数据来自中国永康电动工具行业工业互联网平台 (附录一: <https://pan.quark.cn/s/b596dbcb172f>)。

3.1 算法性能对比与结果分析

本文将 SSA-DE 算法与改进遗传算法 (IGA) 在电动工具行业工业互联网平台订单分配问题中进行性能对比, 重点从收敛速度、成本及质量等维度验证 SSA-DE 的优势, 核心结果如下:

(1) 收敛速度对比: 两种算法的适应度值均随迭代次数增加而降低, 但 SSA-DE 算法迭代 127 次即达到收敛, 适

应度值为 0.8607；而 IGA 算法需迭代 177 次才收敛，收敛速度比 SSA-DE 慢约 28%。这表明 SSA-DE 在快速逼近最优解方面更具优势。

(2) 订单分配方案：以单产品（产品 1）分配给 5 家供应商的场景为例，SSA-DE 生成的最优分配方案为：供应商 1 分配 5032 件，供应商 2 分配 2135 件，供应商 3 分配 2141 件，供应商 4 分配 5327 件，供应商 5 分配 1165 件，总数量为 15800 件，与订单需求完全匹配，满足供需平衡约束。

(3) 子目标优化结果对比：具体指标看，SSA-DE 的优化效果显著优于 IGA。其中，生产成本 SSA-DE 为 851420 元，低于 IGA 的 857998 元，成本降低约 0.77%；产品质量 SSA-DE 的产品合格数为 15629 件（合格率 98.9%），高于 IGA 的 15621 件（合格率 98.8%）；

(4) 延迟交货与运输成本：两者延迟交货数接近（SSA-DE 为 134 件，IGA 为 133 件），运输成本均为 3399 元，表现相当。

综上，SSA-DE 在收敛速度、生产成本控制及产品质量保障上均优于 IGA，虽计算时间（7.34 秒）略长于 IGA（7.04 秒），但整体优化效果更贴合平台对高效、低成本、高质量订单分配的需求。

4 总结与启示

工业互联网平台上，供应商间订单资源分配问题至关重要。本文基于现有电动工具行业工业互联网平台运营情况，构建平台订单分配数学模型，设计 SSA-DE 算法求解，以 IGA 算法作对比，通过平台实际数值验证了 SSA-DE 算法有效性，为订单分配问题提供方法支撑。因本文构建的优

化模型以生产成本最小、产品质量最优、交货能力最强、运输成本为目标，且随平台发展，客户需求、影响因素和权重会改变，所以未来研究可完善订单分配影响因素，使分配结果更合理。

参考文献：

- [1] 向晋乾, 黄培清, 王子萍. 横向型企业集团利润最大化的订单分配模型[J]. 西南交通大学学报, 2006(02): 241-244.
- [2] 张旭梅, 李国强, 张翼. 供应链中供应商订单分配的不完全信息动态博弈研究[J]. 管理学报, 2006(05): 519-523.
- [3] Mafakheri F, Breton M, Ghoniem A. Supplier selection-order allocation: A two-stage multiple criteria dynamic programming approach[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 132(1): 52-57.
- [4] 王棋, 唐敦兵, 齐培培等. 产品族设计与供应商的订单分配关联优化研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(02): 107-112+119.
- [5] Liu S, He L, Shen M Z. On-Time Last-Mile Delivery: Order Assignment with Travel-Time Predictors[J]. Management Science, 2020, 67(7): 4095-4119.
- [6] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. Information & Control, 1965. 8(3): 338-353.
- [7] Chen C T, Lin C T, Huang S F. A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 102(2): 289-301.