

逆向物流供应链最佳供应商选择及订单量分配*

高更君, 黄宇[†], 梁承姬

(上海海事大学 物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 在逆向物流供应链研究中,为了解决市场需求、供应商供货能力、回收产品数量等不确定问题以及逆向物流系统中存在的目标冲突,建立了制造商收益最大化和所选供应商不合格零件数最少化的多目标数学优化模型来确定最佳供应商选择、订单量分配以及提货点选址。运用基于模糊目标规划的蒙特卡罗仿真模型把多目标函数重构成单目标函数。采用自适应遗传算法(AGA)对单目标函数进行求解,并给出了最佳供应商选择及订单量分配。在此基础上讨论了不同权重分配下结果的优劣性及供应商选择风险。最后,针对不同权重分配,比较了自适应遗传算法和 Gurobi 求解。实验表明,对于该问题模型自适应遗传算法在解的运行速度以及精度上都优于 Gurobi。

关键词: 逆向物流供应链; 模糊目标规划; 自适应遗传算法; Gurobi

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2017)04-1067-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2017.04.025

Best supplier selection and order quantity allocation in reverse logistics supply chain

Gao Gengjun, Huang Yu[†], Liang Chengji

(Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper on reverse logistics supply chain, in order to solve the uncertainties of market demand, supplier's delivery capacity and recycling products' quantity as well as the goal conflict in the reverse logistics system, it established a multi-objective mathematical optimization model to determine the optimal supplier selection, order allocation and delivery point selection, which aims for the maximum of manufacturer's profit and the minimum number of unqualified parts. By using the Monte Carlo simulation integrated with fuzzy goal programming, it refactor the multi-objective function into single objective function which it then solved through the adaptive genetic algorithm (AGA) and gave the best supplier selection and order quantity allocation. On this basis, it discussed the pros and cons of the results and the risk of supplier selection under different weight distribution. In the end, it compared AGA and Gurobi under different weights distribution. The experimental results show that AGA is better than Gurobi both in the running speed and the accuracy of the settlement for this problem.

Key words: reverse logistics supply chain; fuzzy goal programming; adaptive genetic algorithm(AGA); Gurobi

0 引言

在供应链中购买生产所需零件对制造商来说是最重要的部分。购买成本可以达到生产总成本的 50% 以上。为了减少总成本,提出了逆向物流网络设计。在逆向物流网络设计中制造商所需的零件一部分可以从供应商那里购买,一部分从回收产品中提取再利用。在制造商生产计划整个环节中购买成本固然重要,但是对供应商服务水平、零件质量及回收网点中提货点选址同样不可忽视。例如在逆向物流过程中制造商购买零件时供应商选择、订单量分配、产品合格率、回收产品数量以及提货点选址这些因素的正确选择对判定一个多准则逆向物流供应链是否合理非常重要,同时其可以大大提升逆向物流供应链的竞争力。因此,这些因素的研究有着重要意义。

因逆向物流供应链问题有着重要意义,它得到了较多国内

外学者关注。El-Sayed 等人^[1]基于风险模型建立了一个多阶段多层次的闭环供应链网络,并利用随机整数规划来最大化期望利润。该模型可以解决大规模数量问题,但缺点是在一段时间内,只有整数可以被传输到该模型的应用范围。Moghaddam 等人^[2]在研究逆向物流的模糊供应商选择以及订单量分配中建立了一个模糊多目标函数,其优点是在此模型中考虑了影响制造商选择供应商的因素,并把这些因素带入到约束条件中,最后基于启发式算法得出最优解。Arikan^[3]考虑了最小化成本、最大化质量以及最大化准时交货等因素,并在此基础上提出多目标线性规划模型来解决多个供应商选择问题。Konstantaras 等人^[4]在研究整个闭环供应链的生产批次问题中,加入了缺货成本、检验和分类等概念。虽然完善了闭环供应链中生产批次问题的模型,但是缺乏对逆向物流回收产品的研究。徐兵等人^[5]针对回收再制造供应链网络中存在多个节点问题,建立了同时包含正向和逆向物流的均衡变分不等式模型。

收稿日期: 2016-02-29; **修回日期:** 2016-04-07 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(71471110,71301101);上海市科委重点资助项目(12510501600);上海市科委工程中心能力提升项目(14DZ2280200);上海海事大学横向科研项目(20140057)

作者简介:高更君(1971-),男,河南三门峡人,硕导,博士,主要研究方向为物流管理与规划、供应链金融、物流战略与商业运作等;黄宇(1991-),女(通信作者),山西大同人,硕士,主要研究方向为物流与供应链金融、物流战略与商业运作(1293282054@qq.com);梁承姬(1970-),女(朝鲜族),吉林龙井人,教授,硕导,博士,主要研究方向为物流系统运作计划与优化、资源配置/分派优化与模拟、港口布局优化与模拟、口岸物流流程模拟与重组、安全工程。

该模型的优点是定性和定量地分析了多个生产商之间以及多个零售商之间的竞争行为,最后得出供应链竞争力由链内成员整体效率决定。Amin 等人^[6,7]在一般的闭环供应链基础上提出了多目标混合整数线性规划模型来优化供应链网络。该模型不仅决定产品的数量和闭环供应链网络的节点,而且同时选择出最佳供应商和加工点。通过实用软件系统(GAMS)进行求解,得出相应的优化方案。但是该 GAMS 只能求解小规模数据问题。陈傲等人^[8]在针对供应商优选的问题上,结合闭环供应链中核心企业与供应链节点企业合作关系的特点,提出了基于 DEA 数据处理 AHP 选择模型。徐兴等人^[9]针对供应商问题,提出了改进的 QFD 供应商选择模型,在客户需求与评价指标体系之间的关系矩阵基础上利用 AHP 层次分析法和独立配点法进行供应商选择。王文杰等人^[10]针对需求不确定和供应商供货能力有约束的情况下,建立了成本最小化、质量最大化以及供应商柔性选择的多目标模型。最后,通过遗传算法验证了模型有效性,并得出供应商的柔性系数与总成本成正比关系。公彦德等人^[11]研究了基于物流费用分摊比例的闭环供应链模型,提出了不对称的 NASH 协商模型来分析供应链系统的利益分配,并得出零售商承担的正向或逆向物流费用比例应该大于其他供应链网络节点企业。Sifaleras 等人^[12]针对在需求已知且动态、时间段有限的条件下安排生产,提出了多阶段生产目标函数,在求解过程中引进 VND 进行求解,并且在求解的过程中讨论了不同个数可变领域对结果优劣性的影响,并在最后与前学者所提出的 Gurobi 算法进行对比,验证了 VND 的有效性。

虽然逆向物流供应链受到相当重视,但多数文献只考虑产品回收预测或供应商选择,只有少数文献中提出的模型结合逆向物流网络设计与正向物流网络设计并以多目标进行综合配置。此外,在求解模型方法上大多采用传统的多目标规划方法,在技术上是逐点确定性优化程序来找到一个 pareto 最优解。但多目标优化问题具有同等重要的 pareto 最优解,理想的方法是在一次程序运行中找到多个 pareto 最优解。其次,上述文献中所提出的智能算法多数不能求解大规模数据,或者运行时间过长等缺点。本文创新点在于考虑众多不确定问题环境下,并在 Moghaddam^[2]学者研究的基础上建立模糊多目标数学模型来确定最佳供应商、订单量及提货点选址,优化逆向物流供应链。引进 AGA 对该模型进行求解,并给出相应的优化方案。

1 问题描述

在本文中把逆向物流网络与正向物流网络进行综合配置。在满足制造商生产计划条件下,尽可能从供应商那里订购的零件数量最少,从而减少购买成本和库存费用。其中,在供应商选择及订单量分配时考虑了以下因素:购买单位零件成本、供应商供货能力、供应商与制造商之间的距离及供应商生产零件不合格率。在提货点选址时要考虑各回收点回收产品数量、提货点与回收点以及与制造商之间的距离。如何在这些因素的决策下合理地优化逆向物流供应链是本文研究的重点。

在不确定环境下优化逆向物流供应链过程中,制造商需要作出两种类型的决策:a) 供应商评估和选择被视为战略决策;b) 制造商生产产品数量及提货点选址被视为战术决策。主要可描述为制造商根据模糊市场需求生产一批产品,其所需要的零件一部分来自候选供应商购买,另一部分来自产品回收再制造。回收产品分为可重用和不可重用部分。不可重用部分将被运到特殊机构进行处理;可重用部分发送到制造商进行翻

新。这些翻新零件最终被添加到零件清单,与新的零件一起进行加工生产成产品。如果制造商所需的翻新零件和新零件这两个来源缺乏合理协调,会最终影响制造商生产计划。低效的生产计划则也会导致成品的总成本增加,最终影响整个供应链竞争力水平。如图 1 所示,制造商根据实际情况有 $m_q \{q = 1, 2, \dots, n\}$ 家候选供应商有制造商所需的零件,从其中选择几家作为逆向物流供应链上的节点为其提供零件,并从 n 家 $n_1(x, y), n_2(x, y), \dots, n_n(x, y)$ 回收点回收产品,选择其中 w 家作为提货点, (x, y) 代回收点地理位置坐标。

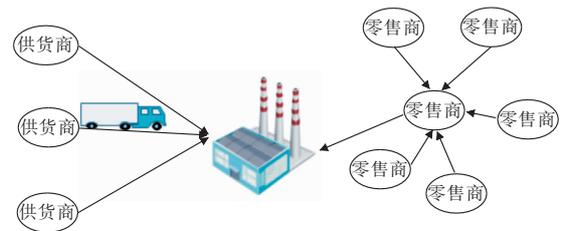


图 1 制造商生产产品示意图

2 模型建立

2.1 模型假设

- a) 供应商到制造商、提货点到制造商以及回收点到提货点运费相同;
- b) 提货点规模容量总可以满足回收点回收需求,并由其回收辐射范围内的回收量确定;
- c) 一个回收点的回收产品只能送往一个提货点;
- d) 每个供应商生产的零件与回收产品重用零件无区别;
- e) 因为本文是在制造商为主导的基础上建立了自营式逆向物流网络运营模式^[13],所以在整条逆向物流供应链中,建立提货点费用、回收点到提货点以及提货点到制造商之间的运输费用由制造商承担。

2.2 符号说明

M : 供应商集合; U : 目标函数集合; N : 制造商生产产品数量; N_1 : 供应商生产零件数量; K : 所有回收点序号集合; p_1 : 制造商卖一单位产品价格; c_1 : 制造商生产单位产品成本; c_2 : 建立一个提货点所需成本; c_3 : 制造商储存单位产品成本; c_4 : 制造商回收单位产品成本; p_2 : 制造商从供应商 i 处购买单位产品所需价格; p_{im} : i 供应商的最大供货能力 n ; tp : 每公里单位产品运费; sp_{im} : 供应商 i 生产不合格产品数量 m ; sp_n : 制造商生产的产品中不合格数量 n ; $Fr_{i\max}$: 供应商 i 生产单位不合格零件最大概率; $Fr_{i\min}$: 供应商 i 生产单位不合格零件最小概率; \overline{Fr}_i : 供应商 i 生产不合格零件的模糊概率; Fr_{\max} : 制造商生产单位不合格产品最大概率; Fr_{\min} : 制造商生产单位不合格产品最小概率; \overline{Fr} : 制造商生产单位不合格产品模糊概率; Md_n : 市场模糊需求量; δ : 回收产品中可重用零件部分; ru_{jn} : 回收点 j 回收产品数量 n ; req_m : 生产单位的产品需要的零件数量 m ; Msc_{\max} : 制造商最大储存能力; p_j : 需要的提货点个数; d_j : 表示回收点 i 到它最近的提货点 j 之间的距离; d_i : 制造商到提货点 i 的距离; M_m : 到回收点 m 的距离小于 s 的提货点集合; s_{\max} : 新建提货点离它服务回收点的距离上限。

2.3 决策变量

x_{im} : 制造商从供应商 i 购买的零件的数量 m ; y_n : 制造商制造的产品数量 n ; L_l : 供应商 l 被选中则为 1, 否则为 0; Z_{ij} : 在回

收点 i 的回收产品送到提货点 j 则为 1, 否则为 0; H_j : 表示 j 被选为提货点, 则为 1。

2.4 模型建立

$$\text{Max } f_1 = (p_1 - c_1)y_n - \sum_{i \in M} \sum_{m \in N_1} (p_1 + tp + c_3)x_{im} - \sum_{j \in M_m} c_2 H_j - \sum_{j \in M_m} p_j H_j d_i tp - \sum_{j \in K} ru_{jn} * c_4 - \sum_{i, m \in K} \sum_{j \in M_m} p_j d_{mj} Z_{ij} tp \quad (1)$$

$$\text{Min } f_2 = \sum_{i \in M} \sum_{m \in N_1} \overline{Fr}_i \times x_{im} \quad (2)$$

subject to:

$$y_n (1 - \overline{Fr}) \cong Md_n \quad \forall n \in N \quad (3)$$

$$y_n \text{ req}_m \leq \sum_{i \in M} \sum_{m \in N_1} x_{im} (1 - \overline{Fr}_i) + \sum_{j \in K} ru_{jn} \delta \quad \forall n \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{m \in N_1} x_{im} \leq Msc_{\max} \quad \forall m \in N_1 \quad (5)$$

$$x_{im} \leq p_{in} L_i \quad \forall i, l \in M, m, n \in N_1 \quad (6)$$

$$Fr_{i \min} \leq \overline{Fr}_i \leq Fr_{i \max} \quad (7)$$

$$Fr_{\min} \leq Fr \leq Fr_{\max} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{m \in N_1} sp_{im} = \sum_{i \in M} \sum_{m \in N_1} x_{im} * \overline{Fr}_i \quad (9)$$

$$sp_n = y_n * Fr \quad \forall n \in N \quad (10)$$

$$\sum_{j \in M_m} Z_{ij} = 1 \quad \forall i \in K \quad (11)$$

$$Z_{ij} \leq H_j \quad i \in K, j \in M_m \quad (12)$$

$$\sum_{j \in M_m} H_j = p_j \quad (13)$$

$$d_{ij} \leq s_{\max} \quad \forall i \in k, \forall j \in M_m \quad (14)$$

$$Z_{ij}, L_i, H_j \in \{0, 1\} \quad \forall l \in M \quad \forall j \in M_m \quad \forall i \in K \quad (15)$$

$$x_{im}, y_n, sp_{im}, sp_n, ru_{jn} \geq 0 \quad \forall i \in M, \forall n \in N, \forall j \in K, \forall m \in N_1 \quad (16)$$

目标函数式(1)代表是制造商最大收益, 第一部分为制造商的利润, 第二部分为从供应商那里购买产品所需成本(购买价格和运费)及制造商储存成本, 第三部分是建立一个提货点成本, 第四部分为制造商到提货点运费, 第五部分为回收产品所需成本, 第六部分为回收点到提货点运费; 目标函数式(2)代表供应商生产的最少不合格零件; 式(3)代表制造商生产量要满足市场的模糊需求; 式(4)代表制造商生产的产品所需零件可以从供应商购买和回收产品再利用; 式(5)代表制造商生产产品数量要小于制造商最大的储存能力; 式(6)代表从供应商购买的零件要小于其最大供货能力; 式(7)代表供应商生产零件不合格率; 式(8)代表制造商生产产品不合格率; 式(9)代表供应商不合格零件数量; 式(10)代表制造商不合格产品数量; 式(11)代表每个回收点只能由一个提货点服务; 式(12)代表回收点的回收量只能被设为提货点的点回收; 式(13)代表所需提货点个数; 式(14)代表回收点要在提货点可回收范围内; 式(15)(16)代表限制决策变量和参数变量非负。

因本文所建立的模型是多目标模糊目标规划, 运用基于模糊目标规划的蒙特卡罗仿真模型来确定 pareto 最优解方案, 其基本思想是: 先求出各个分目标在其自身约束条件下的理想值, 再利用这些理想值将各个分目标函数模糊化, 把多目标函数重构成一个单目标混合整数规划模型, 然后求其隶属函数的交集取得最大值解, 该解便是多目标优化问题的最优解。

2.5 模糊目标函数隶属函数

对于求解最大类型的目标函数隶属函数:

$$u_k(f_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_k \geq f_k^{\max} \\ \frac{f_k - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} & \text{if } f_k^{\min} \leq f_k \leq f_k^{\max} \\ 0 & \text{if } f_k \leq f_k^{\min} \end{cases} \quad (17)$$

对于求解最小类型的目标函数隶属函数

$$u_k(f_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } f_k \leq f_k^{\min} \\ \frac{f_k^{\max} - f_k}{f_k^{\max} - f_k^{\min}} & \text{if } f_k^{\min} \leq f_k \leq f_k^{\max} \\ 0 & \text{if } f_k \geq f_k^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

其中: f_k^{\min} 为第 k 个目标的理想最小值, f_k^{\max} 为第 k 个目标的理想最大值。通过隶属函数的转换, 把 k 个目标整合成一个模糊目标规划模型。

2.6 模糊约束条件隶属函数

因市场需求模糊, 所以约束条件式(3)是一个模糊约束条件, 市场需求为 $Md_n = (Md_n^L, Md_n, Md_n^U)$, Md_n^L, Md_n, Md_n^U 分别代表市场需求最小值、最有可能值及最大值。根据市场需求波动范围和利用下面的分段函数来转换模糊约束条件式(3)。

$$\eta_n(Md_n) = \begin{cases} 0 & \text{if } y_n < Md_n^L \\ \frac{y_n - Md_n^L}{Md_n - Md_n^L} & \text{if } Md_n^L \leq y_n \leq Md_n \\ \frac{Md_n^U - y_n}{Md_n^U - Md_n} & \text{if } Md_n \leq y_n \leq Md_n^U \\ 0 & \text{if } y_n > Md_n^U \end{cases} \quad (19)$$

2.7 模型重构

整合隶属函数式(17)~(19)并结合上面提出的约束条件, 将模型进行重构, 把多目标转换为单目标混合整数规划模型, 以便于适应下面章节所介绍的求解算法。

$$\text{max } \sum_{k \in U} w'_k \lambda_k + \frac{1}{N} \sum_{n \in N} \delta_n \quad (20)$$

$$\text{subject to: } \lambda_k \leq u_k(f_k) \quad \forall k \in U \quad (21)$$

$$\delta_n \leq \eta_n(Md_n) \quad \forall n \in N \quad (22)$$

其中: w_1, w_2 为 $[0, 1]$ 的随机数; $w'_1 = w_1 / \sum_{k \in U} w_k$, $w'_2 = w_2 / \sum_{k \in U} w_k$; w'_k 为第 k ($k=1, 2$) 个分目标函数的权重; λ_k, δ_n 为水平截。通过隶属函数, 把多目标转换为单目标混合整数规划模型, 便于下面算法求解。

3 遗传算法

3.1 AGA 必要性和适用性

本文是一个制造商收益最大及所选供应商提供不合格零件数最少的多目标优化问题。采用 AGA 求解, 一方面此智能算法以种群的进化为搜索方式并考虑了种群间进化过程中的信息交互, 表现出全局性和多向性; 另一方面算法实现简单, 并且与传统算法相比, 可以一次性找到多个 pareto 最优解, 可适用于大规模数据的计算。

3.2 染色体编码

本文采用实数和 0-1 混合编码方式。令 $N_1 = |M|, N_2 = |K|$ 。因本问题包含供应商选择和提货点选择两部分, 采用两段编码, 编码长度为 $N_1 + N_2$, 前 N_1 表示供应商的选择。采用实数编码, 每个基因位置的基因值是供应商的供应量 $[0, Msc_{\max}]$ 中的随机值。第 m 个位置如果非 0, 则代表此供应商被选中。 $N_1 + 1 \sim N_1 + N_2$ 为提货点选择, 采用 0-1 编码。如果 $k_1 = 1$, 则代表此回收点当做提货点。若要选择 W 家作为提货点, 则在 $N_1 + 1 \sim N_1 + N_2$ 中随机生成 W 个 1。如图 2 所示, 供应商 2、4、5 的供应量分别为 321、259、351, 回收点 2 为提货点。

供应商编码						提货点编码						
0	321	0	259	351	0	0	0	0	1	0	0	0

图 2 染色体编码

3.3 初始种群

由于在供应商选择和提货点选址时涉及约束条件较多, 采用惩罚函数处理方法会产生大量不可行解, AGA 收敛时间增

加,所以本文引进随机贪婪适应性搜索方法(greedy randomized adaptive search procedure, GRASP)对算法进行改进。采用 GRASP 构造初始种群,在此过程中分为可行解构造与可行解优化两个阶段,即随机地选出候选供应商供应量以及提货点位置,在此基础上进行局部搜索优化。在 GRASP 所构造的初始种群基础上采用 AGA,在交叉变异过程中对满足约束条件的染色体进行局部优化。

3.4 适应度函数

本文直接采用 $\max \sum_{k \in U} w'_k \lambda_k + \sum_{n \in N} \theta_n / N$ 作为适应度函数进行计算。

3.5 遗传操作

3.5.1 选择算子

为避免随机因素的影响导致优秀解的丢失,采用精英选择保留策略,将适应度值高的前 20% 染色体复制到下一代和父代染色体组成新的染色体种群。通过该机制确保每代优秀个体不会在种群进化过程中丢失,确保优秀个体进入下一代,增加种群多样性,加快了算法收敛,并且可以保证下一代种群中的最优个体不会比上一代差。

3.5.2 交叉

因本文采用的是实数编码和 0-1 混合编码,分别为供应商选择和提货点选择。为避免两段界限被打破,产生非法的染色体,采用田小梅等人^[14]提出的混合单点交叉方法,增大种群的多样性。假设当进化到 t 代时,两个父本 $p_a^t = [x_{a,1}^t, \dots, x_{a,k-1}^t, x_{a,k}^t, \dots, x_{a,n}^t]$, $p_b^t = [x_{b,1}^t, \dots, x_{b,k-1}^t, x_{b,k}^t, \dots, x_{b,n}^t]$ 。交叉后得到的 $t+1$ 代个体分别为 $c_a^{t+1} = [x_{a,1}^{t+1}, \dots, x_{a,k-1}^{t+1}, x_{a,k}^{t+1}, \dots, x_{a,n}^{t+1}]$, $c_b^{t+1} = [x_{b,1}^{t+1}, \dots, x_{b,k-1}^{t+1}, x_{b,k}^{t+1}, \dots, x_{b,n}^{t+1}]$,交叉点分别为 $x_{a,k}^t$ 和 $x_{b,k}^t$, n 为染色体长度。全文设置 $\lambda = 0.3$ 。

$$\begin{cases} x_{a,s}^{t+1} = \lambda x_{a,k}^t + (1-\lambda)x_{b,k}^t \\ x_{b,s}^{t+1} = (1-\lambda)x_{a,k}^t + \lambda x_{b,k}^t \end{cases} \quad (23)$$

在 t 代随机选择两个父代,在父代 $0 \sim |M|$ 选择交叉点为 $k = \text{round}(\text{rand}(|M| - 1) + 1)$ 进行交叉。其交叉点前后的基因片段也同步进行交换。如图 3 所示,若重新生成的染色体合法,则得到子代染色体 c_1, c_2 ;若重新生成的染色体不满足约束条件,则该子代染色体不合法,对该子代染色体进行修复,应对策略为拒绝交叉。

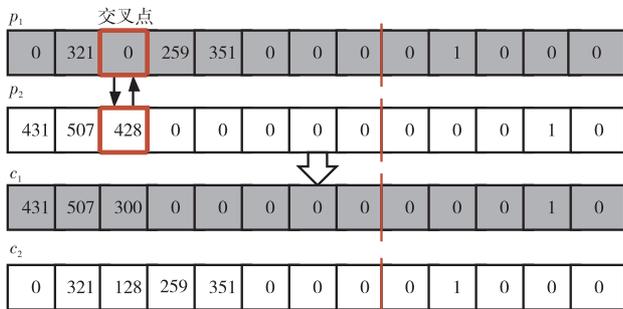


图3 交叉

3.5.3 变异

选择一个父代 p_1 ,随机选择四个切点,在 $0 \sim |M|$ 随机选择两个位置,在 $N_1 + 1 \sim N_1 + N_2$ 随机选择两个位置。交换它们基因值,若编码合法,则生成子代染色体 c_1 ,如图 4 所示;若生成的子代染色体不满足约束条件,则该染色体不合法,对该子代染色体进行修复,应对策略为拒绝变异。

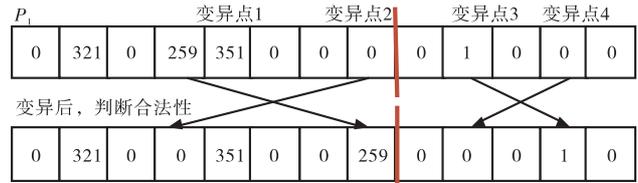


图4 染色体变异

3.6 控制参数的选择

交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 在遗传算法过程中起着重要的作用。相对于传统遗传算法,AGA 首先判断种群代数,其次判断 f 与 f_{ave} 的大小。其特点为交叉和变异概率随着个体适应度、迭代代数的改变而改变。 f_{max} 为群体中最大的个体适应度值; f 为要变异个体的适应度值; f_{ave} 为每代群体的平均适应度值; x 为当前迭代代数; N 为迭代总代数。

$$p_c = \begin{cases} 0.3 \frac{f-f_{avg}}{f_{max}-f_{avg}} + 0.2 \frac{N-x}{N} + 0.4 & f > f_{ave} \\ 0.7 \frac{N-x}{N} & f \leq f_{ave} \end{cases} \quad (24)$$

$$p_m = \begin{cases} 0.02 \frac{f_{max}-f}{f_{max}-f_{ave}} + 0.03 \frac{N-x}{T} & f > f_{ave} \\ 0.05 + 0.05 \frac{N-x}{N} & f < f_{ave} \end{cases} \quad (25)$$

在交叉过程适应度大的染色体有更多机会产生新染色体,同时当进化趋于稳定时,要求交叉概率减少,即 p_c 随着迭代代数增大而减少。在突变过程当中 p_m 也随着迭代代数增大而减少。适应度值高的染色体被保护起来,尽量不使其进行突变,对于低于平均适应度值染色体以尽可能大的突变概率去破坏它^[15]。

4 算例及结果分析

4.1 案例分析

通过案例来分析验证算法的有效性。设定某一制造商根据市场需求生产一批成品,制造商生产产品系数如表 1 所示。制造商生产产品不合格率为 $[0, 0.2]$,供应商零件指标系数如表 2 所示。可变参数 $c_2 = \{200, 500, 2\ 000\}$, $tp = \{0.2, 0.6, 0.8\}$ 。回收点坐标如表 3 所示。各个回收点回收产品数量如表 4 所示。提货点可以覆盖的回收点的最大距离为 7 km。每件回收产品可利用部分为 20%。制造商与五家供应商之间的距离如表 5 所示。市场需求为 $(900, 1\ 043, 1\ 300)$,制造商地理坐标为 $(3\ 160, 2\ 145)$,建立一个提货点成本费用为 1 000 元。制造商单位产品卖价为 60 元。本文 AGA 参数 popsize = 100,最大迭代代数 maxgen = 500, p_c, p_m 如上文所示。采用 MATLAB 语言编程实现算法开发。

表 1 制造商生产产品系数

制造商	系数	制造商	系数
单位制造成本/元	10	单位需求零件/个	5
单位储存成本/元	0.2	最大储存数量/个	1 400

表 2 供应商生产零件指标系数

	供应能力/个	单位制造成本/元	failurerate _{min}	failurerate _{max}
S_1	6 500	0.35	0	0.1
S_2	10 000	0.25	0	0.25
S_3	4 500	0.3	0	0.15
S_4	5 000	0.4	0	0.1
S_5	10 000	0.3	0	0.25

注:failurerate_{min}为最小不合格率,failurerate_{max}为最大不合格率。

表3 回收点坐标

回收点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X	1 304	3 639	4 177	3 712	3 488	3 326	2 545	2 778	2 370	4 263
Y	2 312	1 315	2 244	1 399	1 535	1 556	2 357	2 826	2 975	2 931

表4 回收点需要返回的产品 /个

回收点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
回收量	120	100	100	130	110	120	100	140	100	140

表5 制造商与各供应商之间的距离 /km

供应商	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
距离	408	876	369	269	573

4.2 案例求解结果

根据第3章设置的AGA参数和求解步骤,利用AGA对模型进行求解。求得收敛情况如图5所示。当tp取值不同时,供应商选择及订单量分配如表6所示,不同参数下制造商收益如表7所示。提货点选择及服务辐射范围如表8和图6所示。

表6 供应商i供应量

tp	供应商	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
0.2	供应量	3 382	—	—	2 601	—
	不合格数	271	—	—	183	—
0.4	供应量	3 264	—	—	2 511	—
	不合格数	276	—	—	252	—
0.6	供应量	—	2 802	—	3 384	—
	不合格数	—	561	—	305	—

表7 不同参数下制造商收益 /元

ID	tp × c ₂	value	ID	tp × c ₂	value
1	0.2 × 200	5 048.4	4	0.4 × 200	5 411.2
2	0.2 × 500	5 408.5	5	0.4 × 500	5 987.6
3	0.2 × 2000	61 374.6	6	0.4 × 2000	7 3543.9

表8 提货点选择及服务辐射范围

回收点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
提货点选择及覆盖点	—	—	—	—	yes	—	—	yes	—	—
	8	5	5	5	—	5	8	—	8	8

注:表6,8中“—”代表没有被选中,表8中“yes”为提货点。

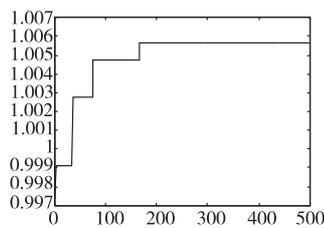


图5 自适应遗传算法收敛图

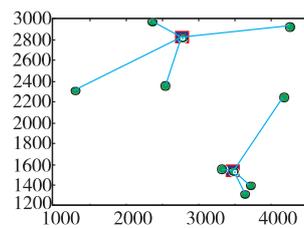


图6 提货点位置及辐射范围

4.3 不同权重分配结果优劣性比较

若将非劣解接近理想解的相关性用模糊数学中的隶属来表示,相关性越大,则越接近理想解。其中f*为理想解。f_{ni}为目标函数i求得解,Σω(f_{ni})越大,则越接近理想解,结果越优。

$$\omega(f_{ni}) = 1 / (1 + \frac{f_{ni} - f^*}{1 + f^*}) \quad (26)$$

多目标函数下不同权重参数比较结果如表9所示。通过分析目标函数1与2之间的权重分配比例,可以看出当此模糊多目标函数中目标函数1权重分配比例越大,则整体结果越优。

表9 多目标函数不同权重参数比较结果

w' ₁ , w' ₂	f _{n1}	f _{n2}	ω(f _{n1})	ω(f _{n2})	Σω(f _{ni})
0.8, 0.2	50 265.13	581	0.979 3	1.174 2	2.153 6
0.2, 0.8	47 670.35	1 730	0.329 3	1.238 1	1.567 4
0.7, 0.3	50 265.13	598	0.951 6	1.174 2	2.125 8
0.3, 0.7	53 707.59	1 591	0.358 0	1.098 9	1.457 0
0.6, 0.4	51 948.32	647	0.879 6	1.136 1	2.015 8
0.4, 0.6	56 086.27	1 652	0.951 6	1.052 3	1.397 3

注:f_{n1}为制造商收益最大目标函数,f_{n2}为供应商不合格零件最小目标函数。

4.4 候选供应商风险分析

为了评估供应商选择风险,运用上述案例数据进行了四次实验,每次实验运行10次,对10次结果取平均值进行结果分析。四次实验中目标函数1权重w'₁分别取0.8、0.7、0.6、0.5,目标函数2权重w'₂分别取0.2、0.3、0.4、0.5。最终候选供应商如表10所示。

表10 最终候选供应商

实验编号	权重 w' ₁ × w' ₂	供应商被选中概率				
		S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
1	0.8 × 0.2	0.53	0.4	0	0.47	0.1
2	0.7 × 0.3	0.42	0.36	0.09	0.58	0.15
3	0.6 × 0.4	0.59	0.213	0.03	0.36	0.172
4	0.5 × 0.5	0.52	0.27	0.092	0.54	0.144

从表中可得出四次实验结果中供应商1、2、4最有可能被选中,风险最小;供应商3由于其风险最大,最不可能被选中。

5 算法比较

因为增加了计算的难度,Gurobi无法解决任何实例最优,所以Gurobi只有计算最优目标函数值的一个上界。本章用Gurobi与自适应遗传算法进行对比。

根据各分目标权重不同分成四组实验进行两种方法的对比,每组实验运行10次,取平均值,对比结果如表11所示。

表11 自适应遗传算法计算结果

实验编号	权重 w' ₁ × w' ₂	结果 Σw(f _{ni})		运行时间/s	
		Gurobi	AGA	Gurobi	AGA
1	0.8 × 0.2	1.764 63	2.125 793	27.081	11.079
2	0.7 × 0.3	1.347 65	2.116 468	30.084	12.063
3	0.6 × 0.4	1.151 13	2.015 543	26.152	10.127
4	0.5 × 0.5	0.962 17	1.953 837	31.130	10.037

如表11所示的四组实验中,AGA在结果的优劣性上优于Gurobi算法;对于程序运行时间,自适应遗传算法更快得到最优解。综上对比,自适应遗传算法优于Gurobi算法。

6 结束语

根据逆向物流供应链实际的考虑因素,本文建立了制造商收益最大和所选供应商不合格零件数最小的多目标数学函数。在求解此模型过程中,先求出各个分目标在其自身约束条件下的理想值,再利用这些理想值将各个分目标函数模糊化,最后运用模糊目标规划的蒙特卡罗仿真模型把多目标函数重构成一个单目标混合整数规划模型。采用AGA对案例进行求解,实验表明,该AGA对解决逆向物流供应链最佳供应商选择及订单量分配有良好效果。虽然本文对逆向物流供应链设计中以多目标综合进行配置,并运用AGA求得最佳供应商及订单量分配,但是在实际的逆向物流环境中复杂程度远远大于理想状态,在选择供应商方法上还有许多因素需要考虑,如制造商对供应商送货服务时间满意度,而这种扩展模型可以更切近实际问题,可以使处于供应链节点上的企业利润都得到提升,最大利益化整条供应链。这将会成为今后研究的重点。

参考文献:

[1] Ei-Sayed M, Afia N, Ei-kharbotly A. A stochastic model for forward-reverse logistics network design under risk[J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(3): 423-431.

[2] Moghaddam K S. Fuzzy multi-objective model for supplier selection and order allocation in reverse logistics systems under supply and demand uncertainty[J]. Expert Systems with Application, 2015, 42(15-16): 6237-6254. (下转第 页)

率增加了5.5%。对使用非关键工序调整法前后的方案进行比较,机器上的碳排放和机器利用率分别如图4、5所示。

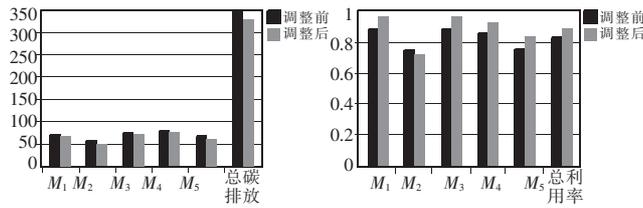


图4 非关键工序调整前后的碳排放对比

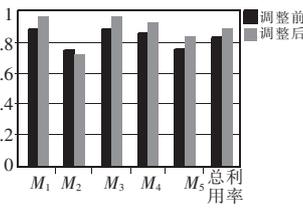


图5 非关键工序调整前后的机器利用率对比

4 结束语

本文以制造车间的实际情况为研究对象,建立了考虑机器速度的低碳柔性作业车间调度问题模型。该模型在经典的柔性作业车间调度问题上考虑了机器加工速度,并加入了加工机器的启动时间、工件的装夹和卸载时间、机器不同状态下的碳排放参数,使问题更具现实性。对有效的遗传操作方法进行重构,设计了高效的遗传算法,提出了两阶段求解方法,在保证第一阶段目标不变的前提下,通过对非关键工序的调整,降低生产方案的总碳排放量,增加机器总利用率。最后通过实际案例进行求解,实验结果证明了所提出模型和方法是可行和有效的。

参考文献:

- Mestl H E S, Aunan K, Fang Jinghua, *et al.* Cleaner production as climate investment: integrated assessment in Taiyuan City, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2005, 13(1): 57-70.
- Yusoff S. Renewable energy from palm oil-innovation on effective utilization of waste [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(1): 87-93.
- 张国辉, 聂黎, 毛学港. 生物地理学算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(4): 1005-1008.
- 蒋增强, 左乐. 低碳策略下的多目标柔性作业车间调度 [J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 1023-1031.
- Lu P H, Wu M C, Tan Hao, *et al.* A genetic algorithm embedded with a concise chromosome representation for distributed and flexible job-shop scheduling problems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015: 1-16.
- 马雪丽, 曹德弼, 刘晓冰. 面向柔性工艺的作业车间调度问题混合遗传算法 [J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(5): 1353-1357.
- Zhang Guohui, Gao Liang, Shi Yang. An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(4): 3563-3573.
- 吴正佳, 罗月胜, 周玉琼, 等. 一种求解典型 JSP 的改进离散粒子群优化算法 [J]. *计算机应用研究*, 2013, 30(8): 2405-2409.
- Singh M R, Singh M, Mahapatra S S, *et al.* Particle swarm optimization algorithm embedded with maximum deviation theory for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 85(9): 2353-2366.
- 刘长平, 叶春明, 唐海波. Job-Shop 调度问题的量子蚁群算法求解 [J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(12): 4507-4509.
- 陈鸿海, 蒋增强, 左乐, 等. 基于近亲变异 NSGA-II 算法的多目标柔性作业车间调度 [J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 344-350.
- 赵宁, 李开典, 田青, 等. 考虑运输时间柔性作业车间调度问题的快速寻优方法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(3): 724-732.
- 彭建刚, 刘明周, 张铭鑫, 等. 基于改进非支配排序的云模型进化多目标柔性作业车间调度 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(12): 198-205.
- 刘琼, 田有全, John W S, 等. 产品制造过程碳足迹核算及其优化问题 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2336-2343.
- Fang Kan, Uhana N, Zhao Fu, *et al.* A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2011, 30(4): 234-240.
- Salido M A, Escamilla J, Giret A, *et al.* A genetic algorithm for energy-efficiency in job-shop scheduling [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 85(5): 1304-1314.
- Tang Dunbing, Dai Min. Energy-efficient approach to minimizing the energy consumption in an extended job-shop scheduling problem [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 28(5): 1-8.
- 施金良, 刘飞, 许弟建, 等. 数控机床空载运行时节能决策模型及实用方法 [J]. *中国机械工程*, 2009, 20(11): 1344-1346.
- 张超勇, 饶运清, 李培根, 等. 柔性作业车间调度问题的两级遗传算法 [J]. *机械工程学报*, 2007, 43(4): 119-124.
- 张国辉, 高亮, 李培根, 等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. *机械工程学报*, 2009, 45(7): 145-151.
- 徐兴, 李仁旺, 吴新丽, 等. 面向供应链协同的供应商选择模型的研究 [J]. *浙江工业大学学报*, 2011, 39(5): 550-554.
- 王文杰, 张春雨. 柔性供应链中供应商选择模型 [J]. *东华大学学报*, 2009, 35(5): 592-608.
- 公彦德, 李帮义, 刘涛. 基于物流费用分摊比例的闭环供应链模型 [J]. *系统工程学报*, 2011, 26(1): 39-49.
- Sifaleras A, Konstantaras I. Variable neighborhood descent heuristic for solving reverse logistics multi-item dynamic lot-sizing problems [J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 78: 385-392.
- 邓云霞. 企业逆向物流模式的决策研究 [D]. 上海: 上海海事大学, 2009.
- 田小梅, 郑金华. 一种有效的基于实数编码的多目标遗传算法 [J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2007, 27(2): 70-76.
- Srinivas M, Patnail L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 2004, 24(4): 656-666.

(上接第 页)

- Arikan F. A fuzzy solution approach for multi objective supplier selection [J]. *Expert System with Applications*, 2013, 40(3): 947-952.
- Konstantaras I, Shouri K. Lot sizing for a single product recovery system with variable setup numbers [J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203(2): 326-335.
- 徐兵, 张小平. 回收再制造下的供应链网络均衡模型研究 [J]. *中国管理科学*, 2010, 18(7): 384-388.
- Amin S H, Zhang Guoqing. An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: multi-objective approach [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(8): 6782-6791.
- Amin S H, Zhang Guoqing. A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty [J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(1): 1405-1425.
- 陈傲, 王旭坪. 闭环供应链中逆向物流供应商选择模型研究 [J]. *工业技术经济*, 2011, 29(10): 51-57.