

废旧汽车零部件再制造回收模型优化研究^①

宣博文^② 王秋成 孙伟策 柳政卿^③

(浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023)

摘 要 建立废旧汽车零部件回收与再制造智能交易平台,对我国废车市场的建设和完善以及汽车零部件再制造产业链的发展具有重大的工程实用价值。为研究适用于第三方平台的回收模式和策略,本文构建了由制造商、再制造商、销售商、回收平台和激励政策共同组成的再制造闭环供应链回收模型,通过利润函数来揭示再制造供应链中各企业的定价策略和相关变量的关系。分别利用逆向归纳法和多目标遗传算法求解该模型,并以废旧汽车变速箱为案例,验证和比较了 2 种算法的可行性和优劣性。仿真分析结果表明,基于多目标遗传算法求解下制定的回收策略优于逆向归纳法,预期闭环供应链整体回收率和企业利润可得到全面优化,为再制造产业链各参与者的回收决策提供了具有现实意义的理论依据。

关键词 废旧汽车零部件;再制造;回收模型;多目标优化算法

废旧汽车零部件再制造产业是国内外再制造产业中企业数量最多、技术成熟度最高和产业规模最大的领域之一^[1]。我国传统的再制造供应链在管理中存在协调性差、管理成本高、顾客服务水平低、“牛鞭效应”显著等缺点^[2]。因此,基于“互联网+”建立废旧汽车零部件回收与再制造智能交易平台,科学布局大中型回收、拆解、检测和再制造企业,形成再制造供应链管理新模式,是促进再制造产业良性发展的有效途径。

废旧汽车零部件的回收决策问题是再制造产业链的起点,也是建立第三方回收平台的基础。从回收模式的角度出发,Savaskan 和 Wassenhove^[3]将再制造原材料的获取分为 3 种模式/渠道:M 模式(制造商回收)、R 模式(零售商回收)和 3P 模式(第三方回收)。在此基础上,周雄伟等人^[4]构建了 3 种再制造闭环供应链决策模型,考察不同渠道下参与主体最优决策差异和基于回收产品质量水平的回收渠道选择问题。Yan^[5]以再制造逆向物流为研究对

象,通过分析 3 种回收模式的特点,得出最优的回收渠道结构。Younes 等人^[6]在零售商负责回收的供应链中分别考虑合作及非合作博弈的情况,并在逆向供应链主导的情况下,对供应链系统的定价策略问题进行了研究和讨论。

从回收策略角度出发,Li 等人^[7]以时尚产品为研究目标,讨论了在闭环供应链成员之间存在产品返回时的最佳定价策略和采购策略。Zhu 和 Wang^[8]通过实验对比分析定价策略,发现完全理性的定价策略与实际决策结果往往存在较大的差异。Savaskan 等人^[3]和 Zhao^[9]将回收投入费用和回收数量假设为关于回收率的凸函数。诸多学者沿用该假设,在此基础上研究闭环供应链的回收决策问题。王道平等^[10]考虑了在再制造回收努力和时间等多种因素影响下的动态回收率对闭环供应链合作策略的影响。此外,Liu 等人^[11]建立了双渠道全局闭环供应链网络,探究随机需求和回收率对社会经济效益的影响。

① 浙江省基础公益研究计划(LGG21E050016)资助项目。

② 男,1996 年生,硕士生;研究方向:再制造,多目标优化算法;E-mail: bowen_xuan@163.com。

③ 通信作者,E-mail: liuzhengqing@zjut.edu.cn。

(收稿日期:2022-12-25)

国内外学者在再制造闭环供应链、回收模式和回收策略等诸多方面开展了相关研究,积累了一定的研究基础,但仍然存在以下问题。

(1)关于回收模型的求解方法,多数研究集中在使用传统的 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 条件或逆向归纳法求解动态或静态博弈的纳什均衡。也有部分学者通过搭建演化博弈模型^[12],使用雅可比矩阵找到演化均衡点。传统的求解方法受到函数求导和连续性的约束,不仅推导过程复杂,而且最优解还存在一定的局限性,并不适用于解决工程实际问题。

(2)在闭环供应链研究中,少有聚焦到具体的产品。已有的文献以废旧电子产品或电池回收研究居多^[13],而废旧汽车零部件相关的研究较少。

针对上述问题,本文将多目标遗传算法应用于废品回收模型的求解,并以废旧汽车变速箱为例进行算例仿真分析,通过与逆向归纳法进行对比,验证了算法的可行性。该工作具有重要的科学研究价值和工程应用前景,也是当前废旧汽车零部件回收与再制造的主要研究方向。

1 基于废旧汽车零部件的平台回收模型

1.1 回收模型搭建

再制造作为正向物流和逆向物流的结合体,在传统的正向供应链中加入了逆向供应链,从而形成了全新的闭环供应链(closed loop supply chain, CLSC)^[14]。

本文搭建的供应链模型由再制造商、制造商、零售商和第三方回收平台组成,如图 1 所示。再制造商生产再制品,制造商生产新产品,两者以批发价批量提供给销售商;销售商则以市场价将两类产品出售给消费者;第三方平台负责从消费者手中回收废旧品并交由再制造商进行再制造从而形成再制品;此外,激励机制对再制造商给予一定的再制造补贴。本模型的基本参数设置如表 1 所示。

为了将模型参数化,提出以下假设。

假设 1 再制品和新产品在质量、包装、功能上完全相同,但消费者对再制品存在消费价值折扣 α , 故设再制品的零售价 $P_r = \alpha P$, 批发价 $\omega_r = \alpha \omega$, $\alpha \leq 1$ 。通过设立消费价值折扣,消费者对再制品不再存在偏见,再制品拥有和新产品等同的市场竞争力。简化计算过程,令 $X = 1 - \alpha$ 。

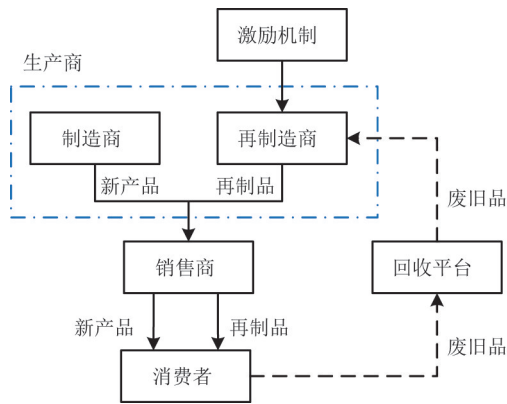


图 1 回收模型

表 1 基本参数设置

符号	释义	单位
C_n	新产品单位生产成本,包含物料、设备、人工、储存、能源等	元
C_r	再制品单位生产成本,同样包含物料、设备、人工、储存、能源等,但不包括废品回收成本	元
P	新产品单位售价	元
ω	新产品单位批发价格	元
D	某类汽车零部件的总市场需求,包括新产品和再制品	件
Z_k	供应链成员 k 的利润, $k \in \{M, R, T\}$, 其中 M, R, T 分别表示生产商、销售商、平台, 其中生产商为制造商和再制造商的统称,将两者利益视为整体	元
A	平台、销售商和再制造商从消费者回收废旧品的单位回收支付	元
B	再制造商从平台或销售商批量购买废旧品的单位收购支付	元
τ	废汽车零部件的回收率,也表示当期产品中再制品所占的比例	

假设 2 市场需求 $D = \phi - \beta P$, P 为新产品单位 售价, ϕ 为市场容量, β 为市场需求关于产品价格的

敏感系数。

假设 3 本文考虑生产商、销售商和平台三者的单周期供应,以一个季度作为周期,研究工作针对闭环供应链的稳定运营阶段。生产商生产和销售商售卖的产品数量满足市场需求 D ,不考虑产品剩余和存储问题。

假设 4 考虑再制品生产所消耗的能源与原材料都低于新产品,即 $C_n > C_r$, 设 $\Delta = C_n - C_r$, 称为废旧汽车零部件的剩余利用价值。为了获得足够的经济性,单位回收支付 A 和单位收购支付 B 应满足 $A < B < \Delta$ 。

假设 5 τ 为回收平台的废件回收率,参考文献[15]的假设, $\tau = (I/C_L)^{1/2}$ 。其中, I 表示回收成本; C_L 是一个缩放参数,表示废旧品回收和宣传活动所设计的规模,常用于广告响应模型。本文将回收率 τ 看作平台为回收废品做出的努力,则回收成本 I 和回收努力 τ 呈现边际效用递减规律,即 $I = C_L \tau^2$ 。

假设 6 国家为了激励再制造业的发展,对再制造商给出了线性激励机制,激励函数为 $F = K(\tau - \tau_0)D$, 其中 K 为常数, τ_0 为最低回收率。若实际回收率高于 τ_0 , 则再制造商得到补贴;反之则受到惩罚。为了避免“恶意骗补”行为,再制造商一个生产周期内得到的补贴应不超过 E 。

假设 7 在本文研究的再制造闭环供应链模型中,生产商有足够的渠道力量支配销售商和回收平台充当领导者,所有成员都按照自身利益的最大化来做决策。

据此列出该回收模型中各参与者的利润函数:

$$Z_M = D(1 - \tau)(\omega - C_n) + D\tau(\alpha\omega - C_r) - DB\tau + F \quad (1)$$

$$Z_R = D(P - \omega)(1 - \tau) + D\tau(\alpha P - \alpha\omega) \quad (2)$$

$$Z_T = D\tau(B - A) - I \quad (3)$$

式中, Z_M 表示生产商利润函数, Z_R 表示销售商利润函数, Z_T 表示平台利润函数。

1.2 基于逆向归纳法的理论推导过程

在传统的统筹学和经济学中,将该模型视为完全信息动态博弈,生产商作为博弈的主导者,主要决策为批发价 ω ; 而销售商和平台作为跟随者,会在

主导者给出决策后调整自己的决策,其中销售商的决策为市场零售价 P , 平台的决策为回收率 τ 。在假设博弈参与者完全理性、非合作、动态博弈的前提下,使用逆向归纳法进行求解其纳什均衡,其求解过程如下。

(1) 首先对销售商和平台的利润函数分别求关于 P 和 τ 的一阶偏导。

$$\begin{cases} \frac{\partial Z_R}{\partial P} = (1 - X\tau)(\phi - 2\beta P + \beta\omega) \\ \frac{\partial Z_T}{\partial \tau} = (B - A)(\phi - \beta P) - 2C_L\tau \end{cases} \quad (4)$$

联立 $\frac{\partial Z_R}{\partial P} = \frac{\partial Z_T}{\partial \tau} = 0$, 得:

$$\begin{cases} \tau = \frac{(B - A)(\phi - \beta\omega)}{4C_L} \\ P = \frac{\phi + \beta\omega}{2\beta} \end{cases} \quad (5)$$

式中 β 表示市场敏感参数。

(2) 再对销售商和平台的利润函数求关于 P 和 τ 的二阶偏导。

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 Z_R}{\partial P^2} = -2\beta(1 - X\tau) < 0 \\ \frac{\partial^2 Z_T}{\partial \tau^2} = -2C_L < 0 \end{cases} \quad (6)$$

由此可知,销售商和平台的利润函数存在唯一最大值,且相应的最大值点即为式(5)。

(3) 将式(5)代入生产商的利润函数 Z_M 中,对 Z_M 求关于 ω 的一阶导。

$$\begin{aligned} 8C_L \frac{\partial Z_M}{\partial \omega} = & -3X\beta^2(B - A)\omega^2 \\ & + [2\beta^2(B - A)(\Delta + K - B) \\ & + 4\beta\phi X(B - A) - 8\beta C_L]\omega \\ & + 4C_L + 4\beta C_L(C_n + K\tau_0) \\ & - 2\beta\phi(B - A)(\Delta + K - B) - X(B - A)\phi^2 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, ϕ 、 φ 为市场容量参数。

为了简化求解过程,令:

$$\begin{cases} a = -3X\beta^2(B - A) < 0 \\ b = 2\beta^2(B - A)(\Delta + K - B) + 4\beta\phi X(B - A) - 8\beta C_L \\ c = 4C_L\phi + 4\beta C_L(C_n + K\tau_0) - 2\beta\phi(B - A)(\Delta + K - B) - X(B - A)\phi^2 \end{cases}$$

Z_M 的一阶导为一元二次方程,其中自变量 ω 为新产品批发价, $\omega > 0$, 二次项系数 $a < 0$, 可分为以下 3 种情况讨论其极值问题。

1) $c \geq 0$, 此时 Z_M 原函数在 $\omega > 0$ 时先递增, 后递减, 生产商的决策问题存在唯一最大值解, 其最大值点为一阶导函数的正根。

2) $b > 0, c < 0$, 若此时 $(b^2 - 4ac)^{1/2} > 0$, 则

Z_M 原函数在 $\omega > 0$ 时先递减, 后递增, 再递减, 生产商的决策问题存在唯一最大值解, 其最大值点为一阶导函数较大的根; 若此时 $(b^2 - 4ac)^{1/2} \leq 0$, 则 Z_M 原函数在 $\omega > 0$ 时单调递减, 无最大值。

3) $b \leq 0, c < 0$, 此时 Z_M 原函数在 $\omega > 0$ 时单调递减, 无最大值。

据此, 列出该博弈的 Nash 均衡如表 2 所示。

表 2 纳什均衡(函数解)

符号	释义	函数解	单位
a		$-3X\beta^2(B-A)$	
b		$2\beta^2(B-A)(\Delta+K-B)+4\beta\phi X(B-A)-8\beta C_L$	
c		$4C_L\phi+4\beta C_L(C_n+K\tau_0)-2\beta\phi(B-A)(\Delta+K-B)-X(B-A)\phi^2$	
ω	新产品批发价	$(-b-\sqrt{b^2-4ac})/2a$	元/件
P	新产品市场价	$(\phi+\beta\omega)/2\beta$	元/件
τ	回收率	$(B-A)(\phi-\beta\omega)/4C_L$	
F	激励函数	$\frac{\phi-\beta\omega}{2}K\left[\frac{(B-A)(\phi-\beta\omega)}{4C_L}-\tau_0\right]\leq E$	元
Z_M	生产商利润	$\frac{\phi-\beta\omega}{2}\left[\omega-C_n-K\tau_0+\frac{(B-A)(\phi-\beta\omega)}{4C_L}(\Delta-X\omega+K-B)\right]$	元
Z_R	销售商利润	$\frac{(\phi-\beta\omega)^2}{4\beta}-X\frac{(B-A)(\phi-\beta\omega)^3}{16\beta C_L}$	元
Z_T	平台利润	$(B-A)^2(\phi-\beta\omega)^2/(16C_L)$	元

1.3 基于多目标遗传算法的求解思路

逆向归纳法的本质是一种多目标函数优化问题的算法, 将闭环供应链所有参与者视为完全理性且非合作的状态, 根据博弈思想逆推反应函数, 由此得到 Nash 均衡。但使用逆向归纳法时受到诸多规则的约束, 且求解过程较为繁琐, 在复杂模型中无法进一步推导。

在实际应用中, 闭环供应链的参与者往往并非是完全理性的, 并且存在着合作的可能。因此本文在博弈过程中引入学习和进化的思想, 假设生产商、销售商和平台之间存在合作的空间, 并通过试错的方式不断调整决策, 最终达到各自的利益最大化。

遗传算法是一种具有“生成 + 检测”的迭代过程启发式的搜索算法, 其本质是一种高效、并行、全局搜索的方法^[16], 且不存在求导和函数连续性问题, 非常适用于求解多目标函数的最优解问题。其具体工作流程如图 2 所示。

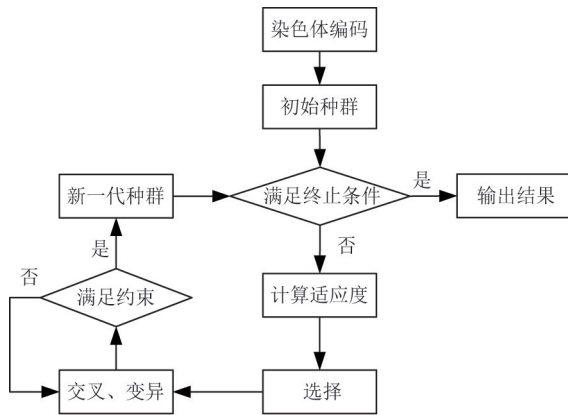


图 2 遗传算法流程图

在本文研究的模型中, 将各参与者的回收和定价决策视为自变量, 并将自变量的取值范围和精度转化为基因编码的形式, 一组基因生成一个染色体, 带有染色体特征的实体则称为个体。在算法求解过程中, 首先随机生成一组个体, 数量为 N , 称之为初代种群。接着计算该种群中所有个体的适应度, 也

就是目标函数值,并从中筛选出适应度高的个体遗传到下一代。再对适应度高的个体进行遗传操作,控制其染色体进行交叉和变异,从而生成新一代的种群。对新种群重复进行筛选和遗传,经过 M 次迭代后使种群的适应度不断逼近极限值,进而得到目标函数的最优解。

遗传算子设置如下。

(1) 适应度函数。本文研究的多目标遗传算法适应度函数即为目标利润函数,利润函数值越大,代表其适应度越高,各参与者的主要决策则为自变量。故模型的适应度函数即为式(1)~(3),取 ω 、 P 、 τ 为 3 个自变量。

(2) 遗传编码。在遗传算法中,需要将自变量转换为染色体以进行遗传操作。常用的遗传编码方法有二进制编码、格雷编码、浮点编码和符号编码等。本文研究的回收模型中, ω 和 P 均为正整数,对精度要求较低,因此选择二进制编码进行染色体编码。

(3) 选择函数。一定数量的个体形成父代种群,从中筛选出优秀的个体进行交叉变异,形成新的子代种群,因此需要设立选择函数。锦标赛选择法(tournament selection)每次从种群中取出一定数量个体,然后选择其中适应度最高的个体进入子代种群,重复该操作直到新的种群规模达到原来的种群规模,如图 3 所示。锦标赛选择法非常适用于多目标遗传算法,可以快速筛选出适应度高的个体,作为新一代的父体继续遗传,以便目标函数快速收敛。

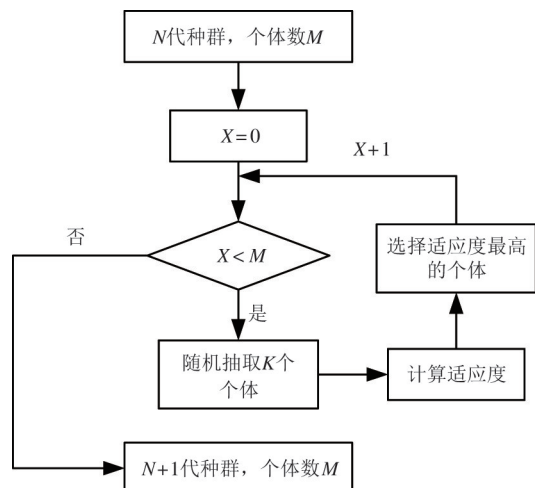


图 3 锦标赛选择法

(4) 交叉函数。遗传算法通过交叉来维持种群的多样性,使得适应度函数快速收敛。两点交叉法(two-points crossover)是指在 2 条染色体中随机设置了 2 个交叉点,然后再进行部分基因交换,从而得到 2 个不同的子染色体。两点交叉相比于单点交叉有更快的收敛速度和更高的多样性,相比多点交叉又不易对染色体造成破坏,适用于本文研究的模型。

(5) 变异是遗传算法中非常重要的一个环节,通过随机选择某个子染色体上的一点或一段进行变异从而得到新的个体,有利于扩大遗传算法的搜索范围,跳出局部最优解。在进行变异算子设置时,需要确定变异概率,变异概率过小不利于跳出局部最优解,变异概率过大又容易破坏优良基因,不利于函数快速收敛。本文选用自适应变异函数(adaptive feasible)进行遗传变异,其变异过程可控性高,根据个体适应度动态调整变异概率^[17]。

(6) 约束函数。约束函数由回收模型中的规则所产生,主要包含线性等式、线性不等式、非线性等式、非线性不等式以及整数约束。当随机生成初代种群或子染色体发生交叉和变异时,均需要使用约束条件来验证遗传迭代的可行性。需要注意的是,约束函数会增加算法的复杂性,影响求解速度,因此约束函数不宜设置过多。

(7) 终止条件。当遗传算法迭代到一定的次数,触发终止条件,即可输出最终结果。常用的终止条件有 3 种。1) 最大代数限制:当遗传算法迭代次数达到最大代数时,算法停止循环;2) 函数容差:随着迭代进行,当种群适应度的变化值小于函数容差时,一般认为达到了最优解,则算法停止;3) 运行时间限制:对于复杂的遗传算法,通过限制其最大运行时间来得到有效时间内的最优解。

2 算例分析

2.1 数据来源

为了验证上述求解方法的可行性,同时进行更深入的分析,本文利用 Matlab 软件对上述模型进行算例分析。本文以某再制造企业的某款无级变速箱(continuously variable transmission, CVT)再制造为案

例,探究最佳的回收策略以及各个变量对结果的影响。其部分再制造参数如表 3 所示,由于涉及商业机密,本文设立的所有参数均为实地考察后得到的合理范围或均值,并不代表企业的生产经营现状。

表 3 某款 CVT 变速箱的再制造参数

符号	释义	数据	单位
P_n	新产品售价	14 000 ~ 18 000	元
P_r	再制品售价	7 000 ~ 8 000	元
C_n	新产品成本	7 000 ~ 9 000	元
C_r	再制品成本	1 500 ~ 2 000	元
α	再制品价值折扣	≤ 0.5	
ϕ	市场容量参数	22 350	
β	市场敏感参数	1.15	
B	单位回收支付	800 ~ 1 200	元
K	激励参数	1 000	
τ_0	最低回收率	0.1	
E	激励补贴上限	500 000	元

根据已有数据,结合部分参考文献,取再制造商的相关参数: $C_n = 8\,000$, $\alpha = 0.5$, $B = 1\,000$; 取平台的相关参数: $A = B/2 = 500$, $C_L = 5\,000\,000$ 。

2.2 纳什均衡

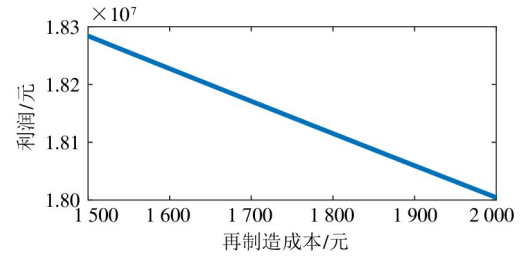
纳什均衡(Nash equilibrium),又称为非合作博弈均衡,是指一组博弈者在给定各自策略空间时,以期望效用最大化为目的进行策略选择,最终基于全部博弈者的策略实现一组结果的过程。

在表 2 中已得到回收模型的 Nash 均衡,现以再制品的单位成本 C_r 为自变量,验证纳什均衡的可行性,得到 a 、 b 、 c 和 F 的值: $a < 0$, $b < 0$, $c > 0$, $F \leq E$, 满足求解约束条件。

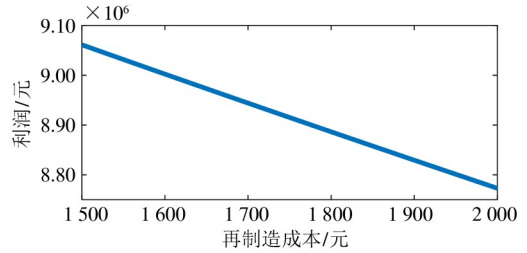
再制造商的主要定价决策:

$$\omega = [-b - (b^2 - 4ac)^{1/2}]/2a \in [13\,568, 13\,666]$$

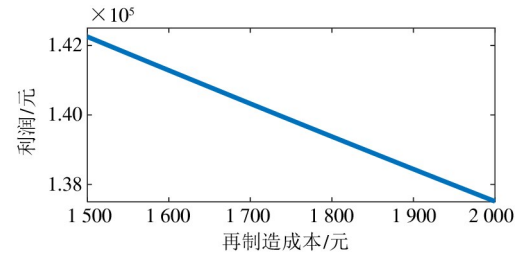
据此得到模型的纳什均衡如图 4 所示,分析可知:生产商、销售商和回收平台的利润 Z_k 以及回收率 τ ,都随着再制造成本 C_r 增加而单调递减,符合经济规律。在 $C_r = 1\,500$ 时,利润函数和回收率取到最大值 $Z_M = 18\,284\,157$ 、 $Z_R = 9\,061\,294$ 、 $Z_T = 142\,253$,此时闭环供应链各参与方的主要决策 $\omega = 13\,568$, $P = 16\,501$, $\tau = 0.168\,7$ 。



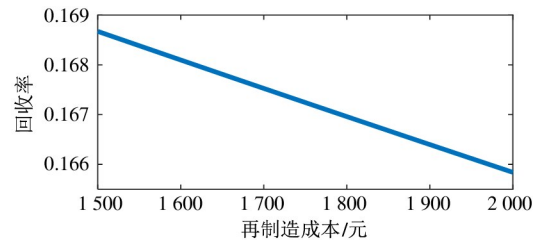
(a) 生产商利润



(b) 销售商利润



(c) 平台利润



(d) 回收率

图 4 纳什均衡(数值解)

2.3 帕累托最优

帕累托(Pareto)最优是多目标进化算法中的一种最优解,其本质是资源分配的一种理想状态。在多目标博弈模型中,如果任何一方参与者都无法在不损害他人利益的前提下优化自己的利益,称之为达到了帕累托最优。在复杂的模型求解问题中,帕累托最优往往是一组解集。

本文在 Matlab 中使用多目标遗传算法对回收模型进行求解,其算法设置如下。

(1) 遗传算法适应度函数即为生产商、销售商和平台的利润函数,由于遗传算法通常求解最小值,

需要将利润函数转化为负值;

(2) 自变量为闭环供应链参与者的主要决策,分别是新产品批发价 ω 、新产品零售价 P 和废件回收率 τ ;

(3) 选择函数使用锦标赛选择法 (tournament selection);

(4) 交叉函数选用两点交叉法 (two-points crossover),交叉比例为 0.600;

(5) 变异函数使用自适应突变函数 (adaptive feasible),初始变异概率为 0.080;

(6) 设置种群大小 600,最大代数 500,帕累托集比例 0.050,约束容差和函数容差均为 0.001;

(7) 为防止出现市场恶性竞争,添加线性约束 $P \geq 1.2\omega$,且 P 和 ω 均为正整数;

(8) 考虑到激励补贴存在上限 E ,添加非线性约束:

$$\begin{cases} F = K(\tau - \tau_0)D < 500\,000, & F \\ F = K(\tau - \tau_0)D \geq 500\,000, & F = 500\,000 \end{cases}$$

F 为再制造商实际得到的激励补贴。

(9) 再制造成本 $C_r = 1\,500$,其他参数均不变,以便与纳什均衡作比较。

据此得到模型的帕累托前沿如图 5 所示,是一组空间为 30 的最优解集,收敛为一个空间曲面,现从中筛选出最适合本模型的帕累托最优。

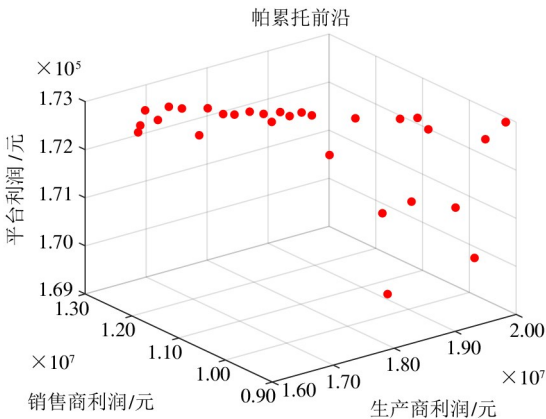


图 5 帕累托前沿 (数值解)

令 $Z = Z_M + Z_R + Z_T$,代表整个逆向供应链的总利润,从中筛选出 10 组总利润 Z 最高的帕累托最优解,如表 4 所示。

表 4 10 组帕累托最优和对应的目标函数值

策略	ω	P	τ	Z_M	Z_R	Z_T	Z
1	12 500	16 200	0.175	16 530 750	12 559 650	172 375	29 262 775
2	12 667	16 200	0.175	17 097 632	11 992 769	172 375	29 262 775
3	12 551	16 200	0.178	16 706 375	12 366 169	172 660	29 245 204
4	12 862	16 200	0.179	17 760 586	11 306 006	172 735	29 239 327
5	13 291	16 200	0.179	19 213 634	9 852 958	172 735	29 239 327
6	12 727	16 200	0.181	17 304 348	11 750 340	172 855	29 227 543
7	12 513	16 200	0.181	16 580 313	12 474 375	172 855	29 227 543
8	12 758	16 200	0.181	17 409 232	11 645 456	172 855	29 227 543
9	13 449	16 202	0.180	19 735 745	9 313 694	172 593	29 222 032
10	12 837	16 200	0.182	17 676 819	11 371 917	172 900	29 221 636

策略 1~10 中,闭环供应链的总利润 Z 基本相同,但不同策略下的利益分配导致 Z_M 、 Z_R 和 Z_T 有较大的变化。其中,生产商想获得最大利润应选策略 9;零售商想获得最大利润则选择策略 1;平台想获得最大收益则对应策略 10。在本文研究的回收模型中,生产商处于主导地位,故选择策略 9 作为本模型的帕累托最优。

3 仿真结果与讨论

结论 1 逆向归纳法可以得到逻辑性较强的函数解,但推导过程复杂,不适用于复杂的回收模型;遗传算法只能得到数值解,更偏向于实际应用,可以高效地解决复杂的工程问题。逆向归纳法求解的纳

什均衡受到规则和制度的约束,代表了各参与者独立的决策行为,其结果是趋于稳定的;而遗传算法求解下的帕累托最优摆脱了函数求导与连续性的约束,将一个动态的博弈模型转化为静态的资源配置过程,通过一次次迭代收敛目标函数,得到带有一定随机性的近似最优解。

结论 2 在本文构建的回收模型中,使用多目标遗传算法求解的帕累托最优解优于使用逆向归纳法求解的纳什均衡,得到了更优的回收策略。如表 5 所示,取再制造成本为 1 500 元,对比 2 种算法在模型求解结果中的表现。相较于逆向归纳法,多目标遗传算法求解结果中的生产商的利润 Z_M 提升了约 7.9%;零售商的收益 Z_R 提升约 2.7%;第三方平台的利润 Z_T 提升约 21.3%;回收率 τ 从 0.1687 提升至 0.1800;对消费者而言,新产品和再制品的售价 P 降低了 1.9%,因此总销量 D 提升了 10.2%。

表 5 帕累托最优解和纳什均衡对比

	Pareto	Nash
ω	13 449	13 568
P	16 202	16 501
τ	0.1800	0.1687
Z_M	19 735 745	18 284 157
Z_R	9 313 694	9 061 294
Z_T	172 593	142 253
Z	29 222 032	27 487 704

结论 3 激励政策在帕累托最优中发挥更好的激励作用。逆向归纳法求解结果中 $\tau = 0.1687, D = 3374$, 此时再制造商的利润函数中得到的激励补贴 $F = K(\tau - \tau_0)D = 2.318 \times 10^5$;而在多目标遗传算法求解的帕累托最优中, $\tau = 0.1800, D = 3718$, 此时激励补贴 $F = K(\tau - \tau_0)D = 2.974 \times 10^5$ 。国家为了激励再制造商进行废件回收和再制造生产所设立的补贴上限 $E = 5 \times 10^5$, 说明激励机制在帕累托最优中起到了更好的激励作用,有效提高了废件回收率和再制品的产量。

结论 4 多目标遗传算法的随机性是不可消除的,但本文通过合理的算法设置极大地提高了其收敛性,降低了随机性。如图 6 所示为遗传算法迭代

过程中帕累托散布图,其数值越大则代表离散性越强。本文在遗传算法求解过程中通过添加约束、改变遗传操作等方式提高了帕累托前沿的收敛性,随着遗传迭代次数的增加,帕累托平均散布逐渐减小至 0.06 左右。

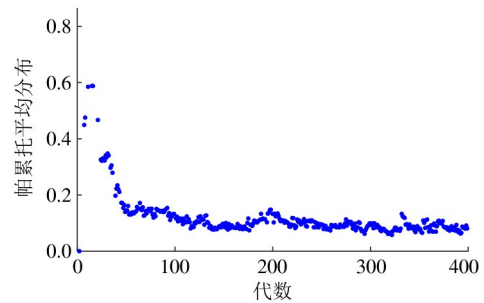


图 6 遗传迭代过程中的帕累托平均散布图

结论 5 零售商和生产商的利益基本呈负相关;回收平台的利益基本保持不变。取筛选后的 10 组帕累托最优,即表 4 中的数据,使用多项式拟合函数(polyfit)拟合成 Z_M 、 Z_R 和 Z_T 的二维图像,如图 7 所示。从图中可以看出,随着生产商的利润增加,零售商利益减少,而平台利润变化范围较小,趋于稳定。

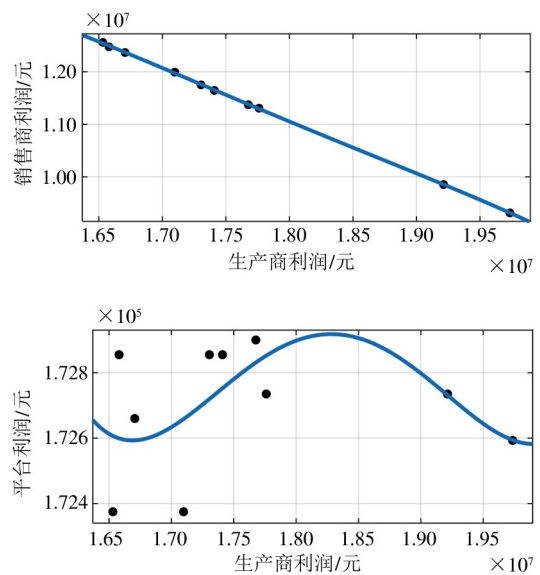


图 7 企业利润曲线

结论 6 平台进行回收活动时,回收成本 I 制约了回收率 τ 的增长,根据假设 5, $I = C_L \tau^2$, 列出纳什均衡和帕累托最优中的回收成本占比(回收成本/

利润)如表6所示。

表6 回收成本占比

	回收率	回收成本	回收成本占比/%
帕累托最优	0.180 0	162 000.00	93.86
纳什均衡	0.168 7	142 298.45	100.03

在2种求解结果中,平台的回收成本均与净利润持平,接近总收入的1/2,回收方选择较低的回收率以控制成本。根据结论3可知,适当的激励政策将有效提高平台运营者回收意愿,有助于改变我国废旧汽车零部件的回收现状。

4 结 论

本文建立了一个由第三方平台回收的废旧汽车零部件再制造闭环供应链模型,分别使用逆向归纳法和多目标遗传算法求解该模型,并以废旧CVT系列变速箱为例,验证和比较了2种算法的可行性和优劣性,从而建立了高效的回收优化模型。本文的主要研究结果如下。

(1)在本文假设的回收模型中,逆向归纳法可以求解得到稳定的函数解,但其求解过程复杂,限制性较大;遗传算法求解速度快,不受规则约束,但只能得到随机的近似数值解,其离散分布概率约为6%。

(2)相较于逆向归纳法,遗传算法求解得到了更优的回收策略,其生产商的利润提升了约7.9%;零售商的收益提升约2.7%;第三方平台的利润提升约21.3%,回收率由0.168 7提升至0.180 0;对消费者而言,新产品和再制品的售价降低了1.9%,因此总销量提升了10.2%。

(3)激励机制在遗传算法中可以起到更强的激励作用,帕累托最优中再制造商每年得到的激励补贴增加约28.3%,回收率和再制品产量也随之提升。

参考文献

[1] 史佩京. 中国汽车零部件再制造产业技术发展现状及趋势[J]. 表面工程与再制造, 2021, 21(6): 27-30.

- [2] 强飞, 姚星. 基于供应链的光伏发电系统网络协同制造模式分析[J]. 机械工业标准化与质量, 2021, 6: 45-47.
- [3] SAVASKAN R C, WASSENHOVE L N V. Reverse channel design: the case of competing retailers[J]. Management Science, 2006, 52(1): 1-14.
- [4] 周雄伟, 熊花纬, 陈晓红. 基于回收产品质量水平的闭环供应链渠道选择模型[J]. 控制与决策, 2017, 32(2): 193-202.
- [5] YAN N. Dynamic models and coordination analysis of reverse supply chain with remanufacturing[J]. Physics Procedia, 2012, 24: 1357-1363.
- [6] YOUNES H, QIANG P Q, KAILANI G. A closed-loop supply chain equilibrium model with random and price-sensitive demand and return[J]. Networks and Spatial Economics, 2017, 17(2): 459-503.
- [7] LI Y, WEI C, CAI X. Optimal pricing and order policies with B2B product returns for fashion products[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 135(2): 637-646.
- [8] ZHU X, WANG M. Optimal pricing strategy of a hybrid trade old for new and remanufactured products supply chain[J]. Optimization Letters, 2018, 15: 1-17.
- [9] ZHAO H. Raising awareness and signaling quality to uninformed consumers: a price-advertising model[J]. Marketing Science, 2000, 19(4): 390-396.
- [10] 王道平, 梁思涵, 王婷婷. 考虑动态回收率和拆解商参与的闭环供应链合作策略[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(12): 3979-3990.
- [11] LIU A, ZHANG Y, LUO S, et al. Dual-channel global closed-loop supply chain network optimization based on random demand and recovery rate[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(23): 8768.
- [12] 王一新, 薛兰兰, 缙文娟. 社会资本参与建筑垃圾资源化项目演化博弈分析——基于政府奖惩机制视角[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(7): 30-37.
- [13] 李芷源, 黄祖庆. 考虑消费者偏好的废旧电子产品回收再造模式选择[J]. 物流技术, 2021, 40(12): 44-49, 151.
- [14] 冯章伟. 绿色消费行为下闭环供应链定价与再制造模式研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
- [15] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, WASSENHOVE

- L N V. Closed-loop supply chain models with product re-manufacturing[J]. Management Science, 2004,50(2): 239-252.
- [16] ZHANG J, LI N, ZHANG D, et al. Multi-UAV cooperative route planning based on decision variables and improved genetic algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,1941(1):1-7.
- [17] 李铖. 基于博弈的自适应高效遗传改进算法研究[J]. 移动通信, 2017,41(18):85-90.

Optimization of remanufacturing-recovery model for used vehicle parts

XUAN Bowen, WANG Qiucheng, SUN Weice, LIU Zhengqing

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

The establishment of an intelligent trading platform for recycling and remanufacturing of wasted vehicle parts has a great engineering practical value to the contribution of the waste vehicle market and the development of an industrial chain for remanufacturing system. This paper constructs a recycling model of remanufacturing a closed-loop supply chain, which is composed of the manufacturer, remanufacturer, seller, recycling platform and incentive policy. The profit function is used to reveal the relationship between pricing strategy and related variables of each enterprise in remanufacturing supply chain. The backward induction method and multi-objective genetic algorithm are used to solve the recycling model, and the feasibility and advantages of the two algorithms are verified and compared by a case study of wasted vehicle gearboxes. The simulation results show that the recycling strategy based on the multi-objective genetic algorithm is better than the backward induction method, and the overall recovery rate and enterprise profit of the closed-loop supply chain are expected to be comprehensively optimized, which provides a theoretical basis of practical significance for the recycling decision of each participant in the remanufacturing industry chain.

Key words: waste vehicle part, remanufacture, recycling model, multi-objective optimization algorithm