

报废汽车逆向物流的建模与优化研究

孙晔婷, 何胜学*

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月30日; 录用日期: 2025年1月23日; 发布日期: 2025年1月29日

摘要

随着全球汽车数量的增长, 报废汽车的管理与回收问题变得愈加紧迫。现有的逆向物流网络在效率和成本控制方面仍存在诸多瓶颈, 如流程复杂、资源配置不当及高昂的再制造成本。为解决这些问题, 本文提出了一个多层次供应链网络均衡优化模型, 将变分不等式应用于报废汽车逆向物流中, 系统刻画了供应链各方的利益博弈。通过基于多尺度模型学习算法的求解策略, 有效解决了非线性和非凸性问题, 显著提升了资源配置合理性和物流网络的运行效率。实验结果表明, 该模型不仅降低了成本, 还具备高效的实际应用价值, 同时综合考虑了再制造、再循环等多种资源回收方式, 增强了模型的灵活性与可持续性。该研究为实现报废汽车逆向物流的经济效益与环境可持续性提供了新的路径。

关键词

报废汽车, 逆向物流处理, 资源回收利用, 供应链网络均衡优化模型, 回收, 拆解, 变分不等式

Modeling and Optimization of Reverse Logistics for End-of-Life Vehicles

Yeting Sun, Shengxue He*

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 30th, 2024; accepted: Jan. 23rd, 2025; published: Jan. 29th, 2025

Abstract

With the increase in the number of cars in the world, the management and recycling of end-of-life vehicles has become more urgent. The existing reverse logistics network still has many bottlenecks in efficiency and cost control, such as complicated process, improper allocation of resources and high remanufacturing cost. To solve these problems, a multi-level supply chain network equilibrium optimization model is proposed in this paper. Variational inequality is applied to reverse

*通讯作者。

文章引用: 孙晔婷, 何胜学. 报废汽车逆向物流的建模与优化研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 1384-1395.
DOI: 10.12677/mos.2025.141124

logistics of scrapped vehicles for the first time, and the interesting game of all parties in the supply chain is described systematically. Through the solution strategy based on multi-scale model learning algorithm, the nonlinear and non-convex problems are effectively solved, and the rationality of resource allocation and the operation efficiency of logistics network are significantly improved. The experimental results show that the model not only reduces the cost, but also has efficient practical application value. At the same time, it takes into account a variety of resource recovery methods such as remanufacturing and recycling, which enhances the flexibility and sustainability of the model. This study provides a new way to realize the economic benefit and environmental sustainability of reverse logistics of scrapped vehicles.

Keywords

End-of-Life Vehicles, Reverse Logistics Management, Resource Recycling, Supply Chain Network Equilibrium Optimization Model, Recycling, Dismantling, Variational Inequalities

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球化的背景下, 汽车产业持续扩张, 与之相伴的是报废汽车数量的激增。报废汽车逆向物流涉及将不再使用的汽车回收、拆解、处理和再制造, 对实现环境可持续发展具有重要意义。然而, 报废汽车逆向物流的供应链网络面临诸多挑战, 如成本效益、环境影响和资源回收效率等。为此, 本文提出研究报废汽车逆向物流的供应链网络均衡优化问题, 以促进资源的高效利用和环境的可持续发展。

以往研究多聚焦前向物流与制造过程的供应链优化, 对逆向物流链网络设计和优化关注不足, 而其网络结构受再生资源处理方式影响, 报废汽车资源化方式主要有再制造、再循环和再利用。董贵颖[1]等人构建了“客户-回收拆解中心-再制造中心”三层级报废汽车再制造逆向物流网络结构; 汤齐等人[2]设计了“回收站点-回收中心-处理再制造中心”三层级逆向物流系统; MERKISZ-GURANOWSKA [3]仅考虑再循环设计了含 7 个物流节点的五层级逆向物流网络。根据报废汽车资源化产品流向, 逆向物流网络分开环和闭环, MORA [4]等人建立了闭环物流网络结构; OZCEYLAN 等人[5]等人使物料流入汽车零部件供应商形成循环流; SHANKAR 等人[6]设计了汽车制造系统闭环供应链网络结构, 正逆向均为四层级。

闭环物流网络构建常基于生产商责任延伸制, 以汽车制造商为主体集成新车制造与报废汽车回收拆解。同时, 以第三方回收拆解企业为主体的报废汽车逆向物流网络设计研究在发展中国家兴起。MAHMOUDZADEH [7]等人结合伊朗实际构建了第三方报废汽车逆向物流网络。VLADIMIR [8]以政府为主体构建了四层级逆向物流网络, 以缓解回收与拆解利用间的矛盾。

物流节点功能集成度影响布局节点类型、数量及逆向物流网络层级结构。ZAREI [9]等人将新车配送与报废汽车回收功能集成于“配送-回收中心”; KUSAKCI [10]等人集中多种功能于拆解中心, 降低成本提高效率; PHUC [11]等人分设独立节点构建多层级复杂逆向物流网络, 含 12 个节点。此外, 国内外因产业实际情况不同, 国外多设拆解中心与破碎中心为独立节点, 国内常将报废汽车拆解、破碎等功能集成于拆解中心。

报废汽车逆向物流网络优化借助构建数学模型与应用算法实现。孙岩林[12]采用 ANP-COTRC 模型

构建混合整数规划模型并进行河南实例分析；高艺轩[13]建立碳税与碳交易双重约束下模型，用两阶段遗传算法求解，经 MATLAB 算例验证有效性；林天鹤[14]预测回收数量构建多层级模型和模糊规划模型优化网络；王燕[15]用灰色关联和预测方法预测数量并构建模型优化网络；张明明[16]预测回收量构建模型运用算法优化；狄鑫悦[17]用演化博弈论构建三方模型分析策略互动；董燕[18]采用相关模型研究逆向物流模式与网络构建；郝皓[19]基于改进方法构建蓄电池逆向物流可行性评价模型。

现有的报废汽车供应链网络均衡变分不等式模型为了方便求解，往往简化了约束条件，导致无法解决报废汽车逆向物流市场效率低下和成本高昂的问题。为了解决这一问题，我们构建了一个包含非线性、非单调和非连续约束条件的应急供应链网络均衡变分不等式模型，并将其转换为一个等效的非线性规划模型。最后，我们通过模拟仿真，并使用多尺度榜样学习算法这一启发式算法进行求解，以验证所提出模型的有效性。

2. 报废汽车逆向物流供应链网络建模

2.1. 利润视角下的报废汽车逆向供应链网络的均衡条件

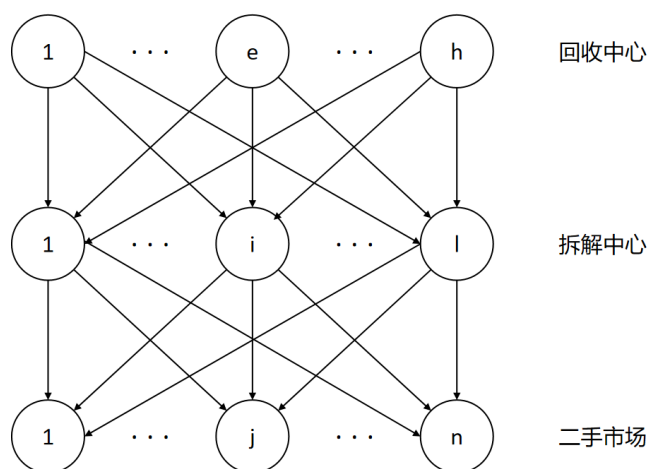


Figure 1. Diagram of three-layer supply chain network
图 1. 三层供应链网络示意图

图 1 展示了一个多层级的报废汽车逆向物流网络，该网络包含了回收中心、拆解中心和二手市场三个层次。报废汽车在回收中心进行集中回收，之后运到拆解中心，在拆解中心对汽车进行拆解，将汽车拆解为金属、塑料和橡胶等，最后将可进行二次销售的部分送往二手市场进行销售。本文的目的是确保在这两个阶段中，所有参与方的利益能够得到公平合理的分配，以实现报废汽车逆向物流网络的整体效益最大化。

在报废汽车逆向物流网络模型中，不同层级决策者之间的链接可以通过有序对 (i, j) 来刻画，其中 i 和 j 分别代表报废汽车或拆解的金属、橡胶、和塑料的起始点和目的地。链接 (i, j) 上的流动量用 f_{ij} 表示，而每单位报废汽车或拆解的金属、橡胶、和塑料的运输成本 $c_{ij}(f_{ij})$ 是一个关于流动量 f_{ij} 的函数，可以表示为：

$$c_{ij}(f_{ij}) = \begin{cases} a_{ij} f_{ij} + b_{ij} f_{ij}^2 + c_{ij} f_{ij}^3 + d_{ij}, & \text{if } f_{ij} \neq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中， a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} 和 d_{ij} 分别是链接 (i, j) 上给定的四个系数。我们用 $p_i(i, j)$ 和 $p_j(i, j)$ 分别表示原材料或产成

品在 i 地和 j 地上的售价和买价。当地点间的价格差异足以覆盖运输成本时, 供应链参与者会尽可能多地地进行产品交易, 即均衡状态下的流动量 f_{ij}^* = 流动量的最大限制 $f_{ij}^{\max}$; 而当价格差不能覆盖运输成本时, $f_{ij}^* = 0$; 当价格差刚好等于运输成本时, f_{ij}^* 可以在 $[0, f_{ij}^{\max}]$ 范围内任意取值。这一现象很好地反映了参与方利润视角下的网络均衡条件, 因此, 我们认为网络中所有链接都应该满足以下不等式:

$$\left(p_{i,(i,j)}^* + c_{ij}(f_{ij}^*) - p_{j,(i,j)}^*\right)(f_{ij} - f_{ij}^*) \geq 0, \quad \forall (f_{ij} - f_{ij}^*) \geq 0, \forall (f_{ij} - f_{ij}^*) \leq 0, \forall (i, j) \quad (2)$$

$$0 \leq f_{ij} \leq f_{ij}^{\max} \quad (3)$$

2.2. 各参与方的决策制定

2.2.1. 回收中心的决策

回收中心需要根据能力和市场需求预测来决定回收多少汽车。这些数学公式共同工作以保证供应商在多链路供应链网络中按照既定的权重分配原材料, 同时满足流量守恒的条件。通过这种方式, 供应商可以根据预设的权重和市场条件来决定各链路上的原材料分配。回收中心需要决定回收的汽车数量, 表示为 Q_e , 其中 e 代表特定的供应商, $Q_e \in [0, Q_{e\max}]$, $Q_{e\max}$ 表示供应商 e 能生产的最大数量。回收中心需要决定将多少回收的汽车分配给不同的制造商, 这通常基于制造商的需求和合同条件。图 2 展示了原材料供应商 e 和其下游制造商之间的关系。供应商 e 首先要确定三个决策内容: 一是确定原材料的生产数量 Q_e ; 二是设定对下游制造商的重视程度 $w_{e,i}$, 其值域为 0, 1; 三是决定利润率 r_e , 这将影响最终的售价的制定。供应商 e 对下游制造商的重视程度 $w_{e,i}$ 决定了向他们出售原材料的数量比 $r_{e,i}$:

$$r_{e,i} = \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_{g=1}^l w_{e,g} = 0 \\ w_{e,i} / \sum_{g=1}^l w_{e,g}, & \text{if } \sum_{g=1}^l w_{e,g} \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

确定了原材料的生产量 Q_e 和链路权重 $w_{e,i}$ ($i = 1, 2, \dots, l$) 后, 可以计算出要销售的原材料数量 $Q_{e\text{Sold}}$:

$$Q_{e,\text{Sold}} = \begin{cases} 0, & \text{if } r_{e,i} = 0, \forall i \\ \min_{r_{e,i} \neq 0} \{Q_e, f_{ei}^{\max} | r_{e,i}\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

需要满足流量守恒条件, 即所有销售的原材料总量等于各链路上的流量之和。回收中心根据成本、市场状况和预期利润率来设定原材料的销售价格。确定了销售量后, 供应商需要计算生产成本。接着, 基于生产成本和期望利润率, 确定原材料的销售价格。计算总成本(TC_e)和平均成本(AC_e):

$$TC_e = CP_e + C_{e\text{Left}}(Q_{e\text{Left}}) + C_{e\text{Sold}}(Q_{e\text{Sold}}) \quad (6)$$

$$AC_e = \frac{TC_e}{Q_e} \quad (7)$$

总成本包括回收成本、未销售材料的处理成本($C_{e\text{Left}}$)以及销售材料的处理成本($C_{e\text{Sold}}$)。确定销售价格($P_{e\text{Sold}}$)和最终利润(Z):

$$P_{e\text{Sold}} = AC_e(1 + r_e) \quad (8)$$

$$Z = (P_{e\text{Sold}} \times Q_{e\text{Sold}}) - TC_e \quad (9)$$

这里, r_e 是预期利润率, 用于确定销售价格, Z 是从销售报废汽车或部件中得到的最终利润。通过调整 Q_e 、 r_e 等变量来最大化 Z , 同时需满足 $Q_e \leq Q_{e\max}$ 和 $Q_{e\text{Sold}} \leq f_{\max ei}$ 的约束条件。

2.2.2. 拆解中心的决策

拆解中心的决策过程如下: 这里提供的模型主要考虑从报废汽车中回收有价值材料的量和回收活动的成本, 以此来计算拆解中心的净利润。假设一个拆解中心处理两种类型的报废汽车。第一种类型的汽车由编号为 1 至 e 的收集点收集, 第二种类型的汽车由编号为 $e + 1$ 至 h 的收集点收集。对于拆解中心 i 来说, 从编号为 1 至 e 的收集点收集到的第一种类型的汽车数量记为 $Q_{i,1}$, 由以下公式确定:

$$Q_{i,1} = \sum_{g=1}^e f_{gi} \quad (10)$$

类似地, 拆解中心 i 收集到的第二种类型的汽车数量记为 $Q_{i,2}$, 由以下公式确定:

$$Q_{i,2} = \sum_{g=e+1}^h f_{gi} \quad (11)$$

拆解中心 i 的汽车转化功能可以用以下抽象形式表示:

$$Q_i = M_i(Q_{i,1}, Q_{i,2}) \quad (12)$$

其中, $M_i(\cdot)$ 表示拆解中心 i 的转化函数, 将收集到的报废汽车转换为可回收的金属、橡胶的数量。设 RT_i 为拆解中心 i 的转换率。汽车转换函数的具体形式如下: 拆解中心 i 的汽车转化函数:

$$Q_i = M_i(Q_{i,1}, Q_{i,2}) \quad (13)$$

其中 M_i 表示拆解中心 i 的转化函数, 将收集到的报废汽车转换为可回收的金属、塑料和橡胶等材料的数量。接下来, 我们为拆解中心 i 设定一个具体的汽车转换函数, 该函数基于给定的转换率 $R_{M,i,1}$ (将第一种汽车转换成金属的比例) 和 $R_{p,i,1}$ (将第一种汽车转换成橡胶的比率), (将第一种汽车转换成塑料的比例), 以及 $R_{M,i,2}$ (将第二种汽车转换成金属的比例), $R_{p,i,2}$ (将第二种汽车转换成橡胶的比例), 和 $R_{R,i,2}$ (将第二种汽车转换成塑料的比例), 将两种类型的汽车转换为可回收的金属、橡胶和塑料。满足以下条件: 拆解中心 i 的汽转转换函数的具体形式如下: 第一种类型的汽车转换为金属、塑料和橡胶的数量分别为:

$$Q_{M,i,1} = R_{M,i,1} \times Q_{i,1} \quad (14)$$

$$Q_{p,i,1} = R_{p,i,1} \times Q_{i,1} \quad (15)$$

$$Q_{R,i,1} = R_{R,i,1} \times Q_{i,1} \quad (16)$$

第二种类型的汽车转换为金属、塑料和橡胶的数量分别为:

$$Q_{M,i,2} = R_{M,i,2} \times Q_{i,2} \quad (17)$$

$$Q_{p,i,2} = R_{p,i,2} \times Q_{i,2} \quad (18)$$

$$Q_{R,i,2} = R_{R,i,2} \times Q_{i,2} \quad (19)$$

总的来说, 拆解中心 i 将两种类型的汽车转换为金属、塑料和橡胶的数量分别为:

$$Q_{M,i} = Q_{M,i,1} + Q_{M,i,2} \quad (20)$$

$$Q_{p,i} = Q_{p,i,1} + Q_{p,i,2} \quad (21)$$

$$Q_{R,i} = Q_{R,i,1} + Q_{R,i,2} \quad (22)$$

由于拆解必须遵循严格的匹配要求, 可能会有一些汽车残余。设 $Q_{i,left1}$ 和 $Q_{i,left2}$ 分别表示拆解中心 i 残余的第一种和第二种类型的汽车数量, 则有:

$$Q_{i,left1} = Q_{i,1} - \frac{Q_{Mi} + Q_{Ri}}{(1 + R_{Ti})} \quad (23)$$

$$Q_{i,left2} = Q_{i,2} - \frac{Q_{Mi} + Q_{Ri}}{(1 + R_{Ti})} \quad (24)$$

在实际场景中, 拆解中心可能会选择存储一定数量的汽车以备未来适用。在这种情况下, 可能需要以下存储条件:

$$Q_{i,left1}^{\min} \leq Q_{i,left1} \leq Q_{i,left1}^{\max} \quad (25)$$

$$Q_{i,left2}^{\min} \leq Q_{i,left2} \leq Q_{i,left2}^{\max} \quad (26)$$

其中下标“min”和“max”代表第一种和第二种类型汽车残余数量的下限和上限。拆解中心 i 的产品流动情况可以用以下公式表示: 连接拆解中心和再制造中心的链接上的产品流由链接权重决定, 链路流率的计算方法如下:

$$r_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_{g=1}^m w_{i,g} = 0 \\ w_{i,j} / \sum_{g=1}^m w_{i,g}, & \text{if } \sum_{g=1}^m w_{i,g} \neq 0 \end{cases} \quad (27)$$

根据每个下游再制造商 $j (j=1, 2, \dots, m)$ 的既定费率 $r_{i,j}$, 可以得到制造商 i 实际销售的产品数量如下:

$$Q_{i,sold} = \begin{cases} \min_{r_{i,j} \neq 0} \left\{ \frac{Q_{i, f_{ij}^{\max}}}{r_{i,j}} \right\}, & \exists r_{i,j} \neq 0, j=1, 2, \dots, m \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

由拆解中心发出的链路流由下式表示:

$$f_{ij} = Q_{i,sold} r_{i,j} \quad (29)$$

此外, 拆解中心决定支付特定汽车的收购价格取决于最低的提供价格。可以用以下公式计算:

$$p_{i,buy1} = \min \{ p_{g,sold} + c_{gi} \}, g=1, \dots, e \quad (30)$$

$$p_{i,buy1} = \min \{ p_{g,sold} + c_{gi} \}, g=e+1, \dots, h \quad (31)$$

拆解中心 i 的生产成本由以下公式计算:

$$R_{Mi} + R_{Ri} = 1 \quad (32)$$

接下来计算拆解中心的成本, 拆解中心的生产成本(CP)包括固定成本, 固定成本是一个固定的常数值。可变成本是生产量的函数, 公式为:

$$VC_e = a_e Q_e + b_e Q_e^2 \quad (33)$$

其中, a_e 和 b_e 是与供应商相关的给定系数, Q_e 是生产量。因此, 生产成本(CP_e)为:

$$CP_e = FC_e + VC_e \quad (34)$$

总生产成本(TC_e)不仅包括生产成本(CP_e), 还包括剩余原材料的持有成本($C_{e,Left}$)和销售原材料的交易成本($C_{e,Sold}$)。

$$TC_e = CP_e + C_{e,Left}(Q_{e,Left}) + C_{e,Sold}(Q_{e,Sold}) \quad (35)$$

平均生产成本(AC_e)通过将总生产成本除以生产量计算得到:

$$AC_e = \frac{TC_e}{Q_e} \quad (36)$$

供应商 e 生产的一单位材料的销售价格用平均生产成本和预期利润率按以下公式确定:

$$p_{e,sold} = AC_e (1 + r_e) \quad (37)$$

其中, r_e 是预期利润率, r_e 的取值范围为 $[\underline{r_e}, \overline{r_e}]$, 是一个决策变量。

2.2.3. 二手市场的决策

$$Q_s = M \times f_{js} \quad (38)$$

在这个公式中: Q_s 代表在二手市场 s 上所有供应商提供的报废汽车的总量。 M 是参与市场的供应商总数。 f_{js} 是第 j 个供应商提供给市场 s 的报废汽车数量。这个公式简单地将每个供应商提供的汽车数量相加, 得到市场上的总供应量。这个总量决定了市场的供给水平。市场定价函数如下:

$$p_{s,Sell} = \max\{0, p_s^{\max} - a_s Q_s - b_s Q_s^2\} \quad (39)$$

在这个公式中, $p_{s,Sell}$ 表示在市场 s 上报废汽车的销售价格。 $p_s^{\max}$ 是市场 s 在供应量接近零时的最高可能销售价格。 a_s 是价格对供应量 Q_s 线性变化的敏感度系数。 b_s 是价格对供应量 Q_s 非线性(二次项)变化的敏感度系数。 $\max\{0, \dots\}$ 确保价格不会低于零, 因为价格不能为负数。这个函数表达了市场价格与市场供给量的关系。当市场供给量 Q_s 增加时, 第二项和第三项(包含 $a_s Q_s$ 和 $b_s Q_s^2$)会增加, 这会导致 $p_{s,Sell}$ 减少, 反映了供给量增加导致价格下降的经济原理。这种价格设置可能适用于非完全竞争市场买价格由供给量的变化而动态调整。简而言之, 公式(38)计算市场上报废汽车的总供应量, 而公式(39)则根据这个供应量来确定报废汽车的市场销售价格。这两个公式共同体现了市场供需关系对价格的影响。

2.3. 变分不等式模型的等效转化

我们统一用向量 x 来表示该应急供应链网络均衡模型中的决策变量, $B(x)$ 包含了所有的线性和非线性约束条件, L 代表了该应急供应链网络里所有的链接, 则该多层供应链网络便分不等式模型可以表示为:

$$\sum_{(i,j) \in L} (p_{i,(i,j)}^* + c_{ij}(f_{ij}^*) - p_{j,(i,j)}^*) (f_{ij} - f_{ij}^*) \geq 0 \quad (40)$$

$$x \in B(x) \quad (41)$$

因为模型中涉及的函数缺乏单调性和可微性这样的必要属性, 我们无法使用传统方法如投影法来求解该变分不等式模型。为了解决这一难题, 本文引入了一个与原便分不等式模型等家的非线性规划模型, 并通过后续介绍的元启发式算法进行求解。该等价的非线性规划模型可以表示为:

$$\min_{x \in B(x)} \sum_{ij} \left\{ f_{ij} \max\{0, -p_{i,(i,j)} + p_{i,(i,j)} + c_{ij}(f_{ij})\} \right\} + (f_{ij}^{\max} - f_{ij}) \max\{0, p_{j,(i,j)} - p_{j,(i,j)} - c_{ij}(f_{ij})\} \quad (42)$$

当然, 上述目标函数可以用其他同样有效的函数来替代, 以达到供应链网络的均衡状态。我们设, $PA_{ij} = \max\{0, -p_{j,(i,j)} + p_{i,(i,j)} + c_{ij}(f_{ij})\}$ 并让 $PB_{ij} = \max\{0, p_{j,(i,j)} - p_{i,(i,j)} - c_{ij}(f_{ij})\}$, 则一个可行的目标函数的一般形式如下所示:

$$\min \sum \left\{ f_{ij} PA_{ij}^\alpha + (f_{ij}^{\max} - f_{ij}) PB_{ij}^\beta \right\} \quad (43)$$

其中, α 和 β 是两个给定的正系数。

4. 算例分析

本节详细说明了通过多尺度模型学习算法(MMLA)对两个供应链网络中的均衡模型进行求解的过程和结果。本样例部分数据来自上海市 2023 年车辆回收产业和废品回收产业报告, 如报废汽车拆解产品中, 废钢占比 69%, 废塑料占比 6%, 废橡胶占比 5%。2023 年 10 月的报废汽车回收价格在 1800~2200 元/吨之间。

4.1. 供应链网络配置

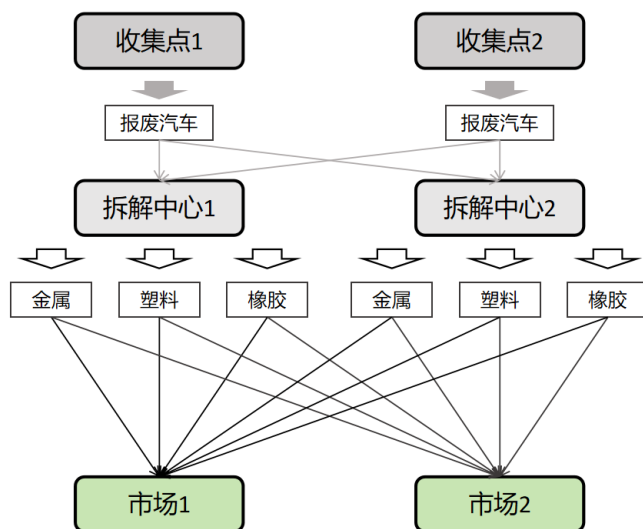


Figure 2. Schematic diagram of three-layer supply chain network simulation
图 2. 三层供应链网络模拟示意图

在这一部分中, 模拟的供应链网络包括两个回收中心(标记为 s1 和 s2)、两个拆解中心(标记为 p1 和 p2)以及两个市场(标记为 m1 和 m2)。这个模型的设定是在没有存储任何原材料或成品的情况下达到供应链的均衡状态。如果存在存储原材料的情况, 则在 MMLA 的目标函数中会引入相应的惩罚项, 以确保整个模型的精确性和效率。在本文中, 判断不同链路上的商品流动是否达到经济效益最优化状态是通过目标函数的特定构成和条件来完成的。这里主要涉及的是变分不等式模型和非线性模型的应用, 用于找到供应链网络中的均衡状态。具体步骤和方法如下:

目标函数设定为: $\min \sum_{i,j} \left\{ f_{ij} PA_{ij}^{\alpha} + (f_{\max_{ij}} - f_{ij}) PB_{ij}^{\beta} \right\}$ 。

PA_{ij} 和 PB_{ij} 计算链路 (i, j) 上的潜在经济效益和成本。

PA_{ij} 表示在给定的流量 f_{ij} 下, 流动从节点 i 到节点 j 的成本超出收益的部分。

PB_{ij} 也应尽可能趋近于零, 表示在反向情况下收益不应超出成本。目标函数的总和应最小化, 这表示整个供应链网络达到了一个成本最低且经济效益最大化的状态。通过优化算法多尺度模型学习算法, MMLA 迭代求解, 使得目标函数值达到最小。当目标函数的值趋于一个非常小的值或不再显著变化时, 可以认为达到了供应链网络的均衡状态。该算法通过不断调整链路上的商品流量 f_{ij} , 寻找使得 PA_{ij} 和 PB_{ij} 同时最小的流量配置。

4.2. 成本和交易设置

回收中心 s1 和 s2: 具有固定生产成本, 分别为 20 和 23, 持有成本分别为 0.0020 和 0.0022, 每单位

原材料的交易成本均为 1.8。拆解中心 p1 和 p2：具有固定生产成本为 50，原材料的变动生产成本函数定义为 $VC_i = a_i Q_i + b_i Q_i^2$ 。其中 p1 的 a_i 和 b_i 分别为 0.0011 和 0.00003。这表示制造商在生产过程中原材料成本随产量增加而递增。交易和持有成本：拆解中心的每单位产品交易成本为 0.001，持有成本为 0.0002，这反映了库存维护的成本。

Table 1. The correlation coefficient of the cost
表 1. 关于成本费用相关系数

Decisionmaker	FC	VC = aQ + bQ ²		AHC	ATC
		a	b		
s1	20	0.0020	0.0001	0.01	0.001
s2	23	0.0022	0.0001	0.02	0.001
p1	50	0.0011	0.000030	0.0005	0.0005
p1	58	0.0012	0.000029	0.0004	0.0006

Table 2. Disassembly center related parameters (car disassembly for metal, rubber, plastic)
表 2. 拆解中心有关的(汽车拆解为金属、橡胶、塑料)相关参数

Manufacturer	RP _{i,2}	RP _{i,2}	RT _i	AHC of material one	AHC of material two
p1	0.52	0.48	0.81	0.0011	0.0012
p2	0.49	0.051	0.80	0.0016	0.0015

Table 3. The correlation coefficient of the cost
表 3. 方程中涉及单位运输成本系数

sn	a _{ij}	b _{ij}	c _{ij}	d _{i,j}
1	0.0002	0.00001	0.00001	0.1
2	0.0002	0.00001	0.00001	0.1
3	0.0002	0.00001	0.00001	0.1
4	0.0002	0.00001	0.00001	0.1
5	0.0001	0.00004	0.00001	0.1
6	0.0003	0.00005	0.00001	0.2
7	0.0001	0.00004	0.00001	0.1
8	0.0003	0.00005	0.00001	0.2
9	0.0001	0.00004	0.00001	0.1
10	0.0003	0.00005	0.00001	0.2
11	0.0001	0.00004	0.00001	0.1
12	0.0003	0.00005	0.00001	0.2
13	0.0002	0.00004	0.00001	0.1
14	0.0002	0.00004	0.00001	0.1
15	0.0002	0.00004	0.00001	0.1
16	0.0002	0.00004	0.00001	0.1

4.3. 均衡模型的验证

通过使用多尺度模型学习算法(MMLA)，这一部分展示了如何对非线性编程模型进行求解，以达到供

应链网络的均衡状态。

模型使用公式:

$$\min \sum_{i,j} \left\{ f_{ij} P A_{ij}^{\alpha} + (f_{\max_{ij}} - f_{ij}) P B_{ij}^{\beta} \right\} \quad (44)$$

作为目标函数, 其中包含参数 $\alpha=1$ 和 $\beta=2$ 。这个目标函数有助于计算和优化供应链中的成本和交易, 使得整个供应链系统达到一个成本效益最优的状态。

MMLA 中涉及到的参数为:

$n_p = 3$ 、 $n_{p,1} = 500$ 、 $n_{p,2} = 150$ 、 $n_{p,3} = 130$ 、 $r_p = 0.001$ 、 $r_s = 0.1$ 、 $n_u = 50$ 。

目标函数中所涉及到的系数 α 和 β 分别赋值为 2 和 1。计算精度采用 $1.0e^{-4}$ 来确定链接是否满足平衡条件。而与供应链各参与方相关的系数由表 1、表 2、表 3 和表 4 所展示。

Table 4. Balanced results for all links

表 4. 所有链接的平衡结果

sn	$r_{i,j}$	$W_{i,j}$	$P_{i,(i,j)}$	C_{ij}	$P_{j,(i,j)}$	$P_{j,(i,j)} - C_{ij} - P_{i,(i,j)}$	$f_{i,j}$
1	1.000000	0.240771	1.449545	0.122976	1.572520	0.000000	38.965163
2	0.000000	0.000000	1.449545	0.100000	1.543156	-0.006388	0.000000
3	1.000000	0.119830	1.443156	0.129436	1.572529	-0.000072	45.169102
4	0.000000	0.000000	1.443156	0.100000	1.543156	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	2.850651	0.100000	3.000000	0.049349	0.000000
6	0.491077	0.960159	6.298450	0.201051	6.499909	0.000407	2.478983
7	1.000000	0.173481	2.850651	0.244629	2.995280	-0.100000	58.893986
8	0.508923	0.995053	6.298450	0.201101	6.499890	0.000339	2.569072
9	0.000000	0.000000	20.000000	0.100000	3.000000	-17.100000	0.000000
10	1.000000	0.711352	20.000000	0.200000	6.499909	-13.700091	0.000000
11	0.000000	0.000000	20.000000	0.100000	2.995280	-17.104720	0.000000
12	0.000000	0.000000	20.000000	0.200000	6.499890	-13.700110	0.000000
13	1.000000	0.215527	12.898401	0.101549	12.999850	-0.000100	4.206713
14	0.000000	0.000000	12.898401	0.100000	13.000000	0.001599	0.000000
15	1.000000	0.387566	20.000000	0.100000	12.999850	-7.100150	0.000000
16	0.000000	0.000000	20.000000	0.100000	13.000000	-7.100000	0.000000

MMLA 中所涉及的链接总数为 16 条。经过总共 759 个学习阶段, MMLA 收敛到最终最优解, 目标函数值为 0.5847903424358925。整个计算过程耗时 2865 毫秒。三个学习周期所需要的学习阶段数分别为 496、133 和 130。

4.4. 结果分析

通过 MMLA 求解得到的优化结果验证了非线性编程模型在实际供应链网络中的应用效果。具体而言, 此次使用的数据参考表 5 中展示的 2023 年上海市报废汽车市场的部分信息, 针对汽车拆解件的售价进行了计算。最终, 测算得到的拆解产品价格与真实数据相比较, 差距较小: (1) 对于废钢的预测价格为 2788 元每吨, 而真实价格范围为 2400 元每吨到 2700 元每吨, 虽然预测值略超出真实价格范围内, 但误差低于 4%; (2) 废塑料的预测价格为 6400 元每吨, 与真实价格范围 5000 元每吨到 6500 元每吨的平均

值相近; (3) 废橡胶的预测价格为 12200 元每吨, 与真实价格范围 11800 元每吨到 13100 元每吨的平均值非常接近。

这些结果表明本文所提出的模型可以有效地对各拆解产品的售价进行合理预测, 所得到的价格与真实数据之间差距小(如表 5 所示), 展示了算法在实际应用中的高效性和准确性。此外, 模型能够有效找到满足供应链网络平衡性和效率的运行方式, 进一步验证了其在复杂现实条件中的实用性和有效性。

Table 5. Result coefficient
表 5. 结果系数

Product	Calculation results	Real data
Scrap steel	2.788023	[2.4, 2.7]
Waste plastic	6.399821	[5.0, 6.5]
Waste rubber	12.199853	[11.8, 13.1]

6. 讨论

本文研究得出以下核心结论:

- (1) 我们提出的供应链网络均衡优化模型有效解决了报废汽车逆向物流的效率和成本问题, 考虑了非线性等约束条件。
- (2) 多尺度模型学习算法(MMLA)能有效求解模型, 实现供应链均衡。
- (3) 模型降低了成本并提高了资源配置和物流效率, 具有实际应用价值。
- (4) 模型考虑了再制造和再循环, 增强了可持续性。
- (5) 模型准确预测了报废汽车拆解产品价格, 验证了其实际应用的有效性。
- (6) 模型找到了供应链网络平衡和效率的运行方式, 具有现实应用潜力。
- (7) 研究为政策制定者提供了优化报废汽车逆向物流网络的见解。

这些结论证明了模型和算法在报废汽车逆向物流中的实用性, 为未来研究和实践提供了参考。

参考文献

- [1] 董贵颖, 胡坚堃, 黄有方. 废旧汽车再制造逆向物流网络模型优化[J]. 上海海事大学学报, 2018, 39(1): 60-66.
- [2] 汤齐, 肖震斌. 河北地区废旧汽车逆向物流 LPIP 研究[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版), 2014, 16(s2): 68-71.
- [3] Merksiz-Guranowska, A. (2012) Bicriteria Models of Vehicles Recycling Network Facility Location. *Archives of Transport*, **24**, 187-202. <https://doi.org/10.2478/v10174-012-0012-6>
- [4] Mora, C., Cascini, A., Gamberi, M., Regattieri, A. and Bortolini, M. (2014) A Planning Model for the Optimisation of the End-of-Life Vehicles Recovery Network. *International Journal of Logistics Systems and Management*, **18**, 449-472. <https://doi.org/10.1504/ijlsm.2014.063980>
- [5] Özceylan, E., Demirel, N., Çetinkaya, C. and Demirel, E. (2017) A Closed-Loop Supply Chain Network Design for Automotive Industry in Turkey. *Computers & Industrial Engineering*, **113**, 727-745. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.022>
- [6] Shankar, R., Bhattacharyya, S. and Choudhary, A. (2018) A Decision Model for a Strategic Closed-Loop Supply Chain to Reclaim End-of-Life Vehicles. *International Journal of Production Economics*, **195**, 273-286. <https://doi.org/10.1016/j.ijspe.2017.10.005>
- [7] Mahmoudzadeh, M., Mansour, S. and Karimi, B. (2011) A Decentralized Reverse Logistics Network for End of Life Vehicles from Third Party Provider Perspective. *Proceedings of the 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology (ICEST 2011)*. Singapore, 26-28 February 2011, 818-822.
- [8] Simic, V. (2015) A Two-Stage Interval-Stochastic Programming Model for Planning End-of-Life Vehicles Allocation under Uncertainty. *Resources, Conservation and Recycling*, **98**, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.005>

-
- [9] Zarei, M., Mansour, S., Husseinzadeh Kashan, A. and Karimi, B. (2010) Designing a Reverse Logistics Network for End-of-Life Vehicles Recovery. *Mathematical Problems in Engineering*, **2010**, Article ID: 649028. <https://doi.org/10.1155/2010/649028>
- [10] Kuşakcı, A.O., Ayvaz, B., Cin, E. and Aydın, N. (2019) Optimization of Reverse Logistics Network of End of Life Vehicles under Fuzzy Supply: A Case Study for Istanbul Metropolitan Area. *Journal of Cleaner Production*, **215**, 1036-1051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.090>
- [11] Phuc, P.N.K., Yu, V.F. and Tsao, Y. (2017) Optimizing Fuzzy Reverse Supply Chain for End-of-Life Vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, **113**, 757-765. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.11.007>
- [12] 孙岩林. 基于 ANP-COTRC 模型的废旧汽车逆向物流网络构建研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- [13] 高艺轩. 碳中和背景下报废汽车逆向物流网络优化模型研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [14] 林天鹤. 不确定环境下报废汽车逆向物流网络构建与优化[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [15] 王燕. 上海市报废汽车逆向物流网络优化研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2023.
- [16] 张明明. 报废汽车逆向物流网络优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- [17] 狄鑫悦. 报废汽车逆向物流的多主体演化博弈分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2023.
- [18] 董燕. 报废汽车逆向物流模式选择与网络构建研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
- [19] 郝皓, 张骞, 王治国. 报废汽车蓄电池逆向物流可行性评价——基于改进的模糊神经网络[J]. *中国流通经济*, 2018, 32(6): 15-24.