

废旧锂电池逆向供应链网络均衡研究

——多种关键金属资源回收

文许林, 何胜学

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年9月4日; 录用日期: 2024年12月6日; 发布日期: 2024年12月13日

摘要

本研究以废旧锂电池回收为背景, 从动力电池回收工艺流程的实际出发, 基于供应链网络均衡理论, 考虑到电池实际回收过程中多种稀缺金属资源的再生利用, 模型构建了一个包含多材料流的三层供应链均衡决策模型, 决策者包括电池回收企业、电池处理企业和电池生产企业。后创新性地采用变分不等式方法进行求解, 并通过数值仿真验证模型的有效性。研究表明, 多材料流各环节的均衡状态和相互作用显著提升了供应链的整体效率和资源利用率。本研究为废旧动力电池回收提供了新的理论框架和实际策略, 建立的均衡模型有助于协调供应链各成员的利益关系, 提升整体运作效率, 为电池回收行业的长期稳定发展提供科学依据。

关键词

供应链网络均衡, 变分不等式, 定价决策, 金属资源回收

Network Equilibrium Research on Reverse Supply Chain of Spent Lithium Batteries

—Multi-Critical Metals Resource Recovery

Xulin Wen, Shengxue He

Business School, Shanghai University of Technology, Shanghai

Received: Sep. 4th, 2024; accepted: Dec. 6th, 2024; published: Dec. 13th, 2024

Abstract

In this study, with the background of waste lithium battery recycling, from the actual power battery

recycling process flow, based on the supply chain network equilibrium theory, considering the re-generation of many kinds of scarce metal resources in the actual battery recycling process, the model constructs a three-layer supply chain equilibrium decision-making model that contains multi-materials flow, and the decision-makers include battery recycling enterprises, battery processing enterprises and battery production enterprises. Later, the variational inequality method is innovatively adopted to solve the model, and the validity of the model is verified by numerical simulation. The results show that the equilibrium state and interaction of each link of the multi-material flow significantly improve the overall efficiency and resource utilization of the supply chain. This study provides a new theoretical framework and practical strategy for the recycling of used power batteries, and the established equilibrium model helps to coordinate the interests of each member of the supply chain, improve the overall operational efficiency, and provide a scientific basis for the long-term stable development of the battery recycling industry.

Keywords

Supply Chain Network Equilibrium, Variational Inequalities, Pricing Decisions, Metal Resource Recovery

Copyright © 2024 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

动力电池是新能源汽车的关键核心部件, 在汽车产业链价值链中的比重不断提升, 已成为重塑全球产业格局、筑牢我国竞争优势重要领域[1]。而锂离子电池因其能量密度高、循环寿命长等优点成为新能源汽车制造商的最优选择[2]。据统计数据显示, 2009~2019 年间投放到全球市场锂电池约从 27 GWh 增加到 218 GWh, 相当于超过 120 万吨锂电池进入全球市场。结合电池的报废年限和使用寿命等因素, 预计 2030 年将达到 7.08 万吨的报废规模[3]。一方面, 随着对新能源汽车需求的增长, 制作动力电池所必须的如锂、钴、镍等稀缺金属资源的不可再生性和消耗性, 使得锂电池原材料长期的开采和提取活动变得难以为继, 仅依赖天然矿产资源难以满足未来的市场需求[4]。另一方面, 废弃锂电池含有重金属化合物、苯和酯化合物等危险物质, 这些物质难以被微生物降解。若废旧电池处理不当可能导致土壤污染和地下水污染[5]。因此对废旧锂电池进行回收是实现资源再利用, 缓解资源短缺, 降低生产成本的有效途径[6]。

锂电池回收背后可观的经济价值, 吸引了许多企业涌入回收行业[7]。电池回收行业呈现出复杂的供应链网络结构, 这一网络由全球范围内的整车企业、动力电池企业、材料及第三方企业构成, 通过与退役电池相关的物流、信息流、资金流紧密联系在一起[8]。通过构建供应链网络均衡模型, 刻画网络成员中的竞争与协调关系, 进一步探求供应链网络整体均衡条件与相关决策者最优决策, 进行合理的流量规划和定价决策, 能够有效降低回收成本, 提高回收效率, 推动整个电池回收产业链的升级, 实现供应链上下游协同高效[9]。因而供应链网络均衡问题成为研究电池回收供应链发展问题的焦点之一。

针对供应链网络均衡的研究, 2002 年, Nagurney 等学者提出包括制造商、零售商和需求市场的三级供应链网络模型, 研究了供应链网络成员的决策行为和最优均衡条件, 并将 Nash 博弈的均衡解转化为变分不等式的解, 并采用修正投影法求解。该模型也成为供应链网络均衡优化的通用基础模型, 为后续研究搭建了基本框架[10]。2005 年, Nagurney 在此前的研究基础上, 考虑风险因素和随机需求问

题, 提出了电子商务供应链网络均衡模型, 进一步拓展了供应链网络均衡模型[11]。但上述研究其假设条件与现实问题仍存在一定的差距与缺口, 国内外学者们从多角度改进并拓展, 其中包括市场需求[12][13]、产品多样性[14][15]、销售渠道[16][17]、贸易政策[18][19]等多角度。但目前, 供应链网络均衡理论的研究成果都是从宏观和理论层面展开的, 针对具体行业的研究较少。王众托院士指出供应链网络均衡研究缺乏具体行业层面的应用, 他提出在解决超网络问题的已有研究基础上, 应该考虑更多的风险和其它因素, 将超网络模型进一步完善, 使之更符合现实, 这也成为供应链网络重要的研究方向[20][21]。

目前关于电池回收供应链网络协调的研究, 主要集中在运用博弈论解决网络节点间关系和利益的分配上。张子健等[22]创建了以电池制造商为回收责任方的电池梯次利用模型, 并分别在供应链集中式决策与分散式决策条件下对动力电池的梯度利用问题展开研究, 得到了不同决策条件下的最优决策组合及最优利润; 谢隽阳等[23]构建整车企业、动力电池生产企业和第三方回收拆解企业的三方博弈模型, 通过模型求解, 分析帕累托均衡状态; 侯强等[24]建立了制造商、回收商和梯次利用商组成的动力电池闭环供应链动态系统, 基于纳什公平参考点的微分博弈模型, 研究各博弈主体的均衡策略的制定问题。从这些研究可以看出, 目前关于电池回收供应链网络协调问题的研究大多都是运用博弈论的方法进行决策优化, 关注成员之间的互动和策略选择。

而供应链网络均衡关注的是整个网络在成员互动下的稳定状态。在当今快速发展的电池回收行业, 供应链结构已经逐渐演变为一种错综复杂的网状布局。这种结构的转变导致了企业间博弈关系的新动态, 各参与企业必须重新审视自身与合作伙伴之间的利益分配和竞争合作关系。本文将探索拓展这一领域的研究, 将网络均衡理论和变分不等式模型应用于网络结构下的电池回收行业供应链利益均衡分配问题, 为电池回收行业更好地调整决策以适应网络协作关系提供新的理论依据; 对回收的多种金属资源进行科学定价, 通过构建科学合理的供应链网络模型, 旨在推动退役动力电池的有效利用, 促进电池回收利用市场循环健康发展。

2. 问题描述与模型假设

2.1. 问题描述

当新能源汽车动力电池经过一段时间的使用后, 其剩余容量下降到标准容量的 80% 时, 已不能满足电动汽车使用的要求。然而, 由于动力电池制造工艺的特殊性及其先进性, 容量低于 80% 的退役动力电池仍然具有优良的电性能, 目前政策引导鼓励先梯次利用、后拆解回收, 以发挥退役电池最大的剩余价值, 当退役电池剩余容量为 20%~80% 时可满足基站备电、储能、充换电等领域的用电需求, 当退役电池剩余容量低于 20% 时可对其进行拆解回收, 提取电池内有金属资源以满足对于稀缺金属资源的需要。

本节中, 我们将考虑建立由废旧动力电池回收企业、处理企业及动力电池生产商组成的三层回收逆向供应链网络均衡模型, 如图 1 回收供应链网络拓扑图所示, 现设计废旧电池回收流程如下: 电池回收企业从各种来源(如消费者、汽车制造商、4S 店等)收集废旧动力电池, 并对收集来的电池进行测试分级, 将分类后的电池运输至电池处理企业进一步处理; 而后电池处理企业对回收的废旧电池进行拆解, 提取并回收废旧电池中的稀缺金属资源, 即锂和钴两种金属原料, 对材料进行再加工并运输至电池生产商; 电池生产商将利用回收的金属材料制造新的动力电池。运输过程中产生相关费用。在此供应链网络中, 处于同一层中的决策者间是非合作竞争关系, 每个决策者以利润最大化为目标。本文中的符号及其定义如表 1 所示, 模型决策变量及说明如表 2 所示。

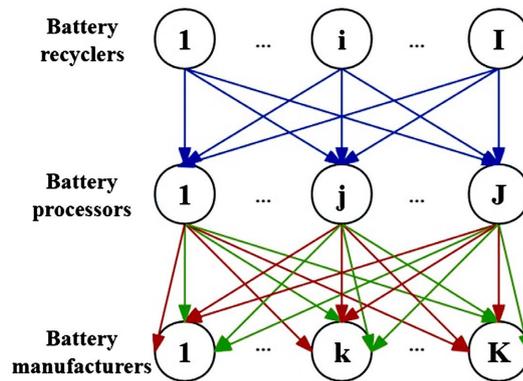


Figure 1. Topology of used battery recycling supply chain network structure
图 1. 废旧电池回收供应链网络结构拓扑图

Table 1. Basic symbols and definitions
表 1. 基本符号及定义

参数	含义
i	逆向供应链网络中电池回收企业的索引, $i \in \{1, 2, \dots, I\}$
j	逆向供应链网络中电池处理企业的索引, $j \in \{1, 2, \dots, J\}$
k	逆向供应链网络中电池生产企业的索引, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$

Table 2. Model decision variables and descriptions
表 2. 模型决策变量及说明

变量	说明
w_{ij}	电池回收企业 i 分配给级电池处理企业 j 的废旧动力电池的数量权重
$w_{j1,k}$	电池处理企业 j 分配给级电池生产企业 k 的第一种金属原料的数量权重
$w_{j2,k}$	电池处理企业 j 分配给级电池生产企业 k 的第二种金属原料的数量权重
$r_{i,j}$	电池回收企业 i 分配给级电池处理企业 j 的废旧动力电池的流量比率
$r_{j1,k}$	电池处理企业 j 分配给级电池生产企业 k 的第一种金属原料的流量比率
$r_{j2,k}$	电池处理企业 j 分配给级电池生产企业 k 的第二种金属原料的流量比率
f_{ij}	由电池回收企业 i 流向电池处理企业 j 的废旧动力电池数量
$f_{j1,k}$	由电池处理企业 j 流向电池生产企业 k 的第一种金属的数量
$f_{j2,k}$	由电池处理企业 j 流向电池生产企业 k 的第二种金属的数量
γ_i	电池回收企业 i 对废旧动力电池的期望回收利润率
$\gamma_{j,1}$	电池处理企业 j 对售出的第一种金属原料的期望回收利润率
$\gamma_{j,2}$	电池处理企业 j 对售出的第二种金属原料的期望回收利润率

2.2. 模型假设

假设 1 前端回收市场能够收集到足够数量的废旧动力电池;

假设 2 电池处理企业能够有效地从废旧电池中按固定比例提取有价值的金属原材料;

假设 3 回收市场上废旧动力电池剩余容量按确定比例分布;

假设 4 废旧动力电池回收过程是一增值过程, 因此后一层级会向前一层级收取相关费用, 且经各层级处理后回收价格是逐级增加的。

3. 均衡模型构建

3.1. 供应链网络环节平衡条件分析

在分散决策下, 网络组织中所有成员分别各自作出决策。接下来, 根据上述的基本假设和参数设定, 依次对供应链网络中各层决策者的最优决策行为及网络均衡条件进行分析建模。



Figure 2. A link in the transaction chain
图 2. 某一环节交易链路

现分析合理的流量模式链路条件下的平衡状态, 在图 2 中, 我们可以看到一个典型的交易链路及其相关的决策者, 连接决策者 i 和 j 之间的链路表示为 (i, j) 。产品或原材料的流量表示为 f_{ij} 。成品或原材料从起点节点(决策者 i)到终端节点(决策者 j)的单位运输成本为 $C_{ij}(f_{ij})$ 。我们将采用以下形式来表示单位产品运输成本函数:

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

其中, a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 和 d_{ij} 是与链路 (i, j) 相关的四个给定系数。设 $p_{i,(i,j)}$ 和 $p_{j,(i,j)}$ 分别为 i 处的产品销售价格和 j 处的产品购买价格。当达到均衡状态时, 即所有决策者的决策和由此产生的流量都保持不变时, 下面的不等式在网络中的每个链路上都应成立:

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

(i, j) 链路上的产品流满足流量约束:

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

若 $p_{j,(i,j)}^* - (p_{i,(i,j)}^* + c_{ij}(f_{ij}^*)) \geq 0$, 则 $f_{ij} - f_{ij}^* \leq 0$, 说明: 如果产品能够以高于成本的价格卖出, 则卖方有动力卖出尽可能多的产品。

若 $p_{j,(i,j)}^* - (p_{i,(i,j)}^* + c_{ij}(f_{ij}^*)) \leq 0$, 则 $f_{ij} - f_{ij}^* \geq 0$, 说明: 如果买方提供的价格不能覆盖掉成本费用, 则卖方不愿与其进行交易。

3.2. 各层决策者决策行为和网络均衡条件分析

3.2.1. 电池回收企业

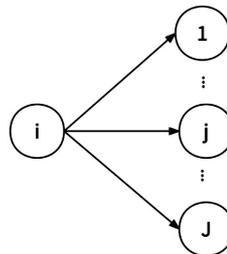


Figure 3. Battery recycling business transaction chain
图 3. 电池回收企业交易链路

图 3 展示了一个典型的电池回收企业及相关电池处理企业。在逆向物流过程中, 记 $P_{i,buy}$ 为电池回收企业 i 从消费者手中回收容量低于 20% 的动力电池的收购价格, 回收数量 Q_i 是关于回收价格 $P_{i,buy}$ 的函数, 可表示为:

$$Q_i = f(P_{i,buy}) \quad (4)$$

在逆向供应链回收网络中共有 I 个动力电池回收企业, 其中 i 是一个典型的电池回收企业, 回收企业 i 需要做出的决策有: 1) 分配给下一层级电池处理企业的废旧动力电池的数量权重, 表示为 $w_{ij} \in [0,1]$; 2) 预期利润率 γ_i , 同时也意味着在相关成本费用的基础上确定生产的动力电池的售出价格。这两个数值是供应链网络均衡状态下的内生值。

在模型中, 权重 w_{ij} 表示回收企业向电池处理企业分配废旧动力电池的比例。流量 $r_{i,j}$ 则是基于权重 w_{ij} 和回收企业的总供应能力计算出的实际供应量。权重 w_{ij} 与流量 $r_{i,j}$ 之间的关系可以通过以下公式表达:

$$r_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^J w_{ij} = 0 \\ \frac{w_{ij}}{\sum_{j=1}^J w_{ij}} & \text{if } \sum_{j=1}^J w_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad (5)$$

根据向每个下游电池处理企业 j 的既定流量 $r_{i,j}$, 电池回收企业 i 实际交易的废旧电池数量 $Q_{i,sold}$ 可表示为:

$$Q_{i,sold} = \begin{cases} \min_{w_{ij} \neq 0} \left\{ Q_i, \frac{f_{ij}^{\max}}{r_{i,j}} \right\}, & \exists r_{i,j} \neq 0, j=1,2,\dots,J \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

电池回收企业 i 向下一层级电池处理企业 j 运输的电池数量 f_{ij} 可表示为:

$$f_{ij} = Q_{i,sold} r_{i,j} \quad (7)$$

在现实情境中, 不是所有的废旧电池都能够售卖出去, 因此回收点可能还会有废旧电池剩余, 产生库存成本, 现记为 $Q_{i,left}$, 可表示如下:

$$Q_{i,left} = Q_i - Q_{i,sold} \quad (8)$$

现分析电池回收企业在生产经营过程中产生的系列成本费用, 其中包括生产固定成本和可变成本、废旧电池收购成本、库存成本和交易成本:

因此, 总成本可表示为:

$$TC_i = CP_i + P_{i,buy} Q_i + C_{i,left} (Q_{i,left}) + C_{i,sold} (Q_{i,sold}) \quad (9)$$

电池回收企业 i 的单位平均成本 AC_i 可表示为:

$$AC_i = \frac{TC_i}{Q_i} \quad (10)$$

废旧电池单位出售价格 $P_{i,sold}$, 可用单位平均处理成本和期望利润率来表示:

$$P_{i,sold} = AC_i (1 + r_i) \quad (11)$$

$r_i \in [\underline{r}_i, \bar{r}_i]$ 是电池回收企业对两种金属原料的期望利润率。

3.2.2. 电池处理企业

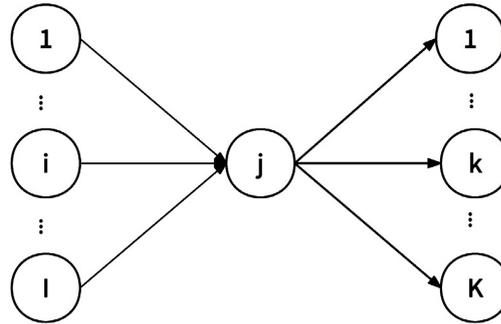


Figure 4. Battery handling business transaction chain
图 4. 电池处理企业交易链路

图 4 展示了一个典型的电池处理企业及其上游电池回收企业和下游电池生产企业。电池处理企业 j 回收的废旧电池数量记为

$$Q_j = \sum_{i=1}^I f_{ij} \tag{12}$$

一块废旧动力电池可转化为 x 吨 Li, y 吨 Co, 因此电池处理企业 j 通过拆解废旧动力电池可获得两种金属原料的数量依次为:

$$Q_{j1} = xQ_j \tag{13}$$

$$Q_{j2} = yQ_j \tag{14}$$

在闭环供应链回收网络中共有 J 个动力电池处理企业, 其中 j 是一个典型的电池处理企业, 其需要做出的决策有: 1) 分配给下一层级电池生产商的两种金属原料的数量权重, 表示为 $w_{j1,k} \in [0,1], w_{j2,k} \in [0,1]$; 2) 两种金属的期望利润率。

在模型中, 权重 $w_{j1,k}$ 和 $w_{j2,k}$ 表示电池处理企业向电池生产企业分配两种金属原料的比例。流量 $r_{j1,k}$ 和 $r_{j2,k}$ 则是基于权重 $w_{j1,k}$ 和 $w_{j2,k}$ 和回收企业的总供应能力计算出的实际供应量。权重与流量之间的关系可以通过以下公式表达:

$$r_{j1,k} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{k=1}^K w_{j1,k} = 0 \\ \frac{w_{j1,k}}{\sum_{k=1}^K w_{j1,k}} & \text{if } \sum_{k=1}^K w_{j1,k} \neq 0 \end{cases} \tag{15}$$

$$r_{j2,k} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{k=1}^K w_{j2,k} = 0 \\ \frac{w_{j2,k}}{\sum_{k=1}^K w_{j2,k}} & \text{if } \sum_{k=1}^K w_{j2,k} \neq 0 \end{cases} \tag{16}$$

$Q_{j1, left}$ 表示电池处理企业 j 剩余的未售出产品数量, 而 $Q_{j1, sold}$ 表示电池处理企业 j 实际售出的产品数量。现根据已知比率 $r_{j1,k}, r_{j2,k}$ 来确定 $Q_{j1, sold}, Q_{j2, sold}$ 。

$$Q_{j1, sold} = \begin{cases} \min_{r_{j1,k} \neq 0} \left\{ Q_{j1}, \frac{f_{j1,k}^{\max}}{r_{j1,k}} \right\}, & \exists r_{j1,k} \neq 0, \forall k = 1, 2, \dots, K \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{17}$$

$$Q_{j2,sold} = \begin{cases} \min_{r_{p2,h} \neq 0} \left\{ Q_{j2}, \frac{f_{j2,k}^{\max}}{r_{j2,k}} \right\}, & \exists r_{j2,k} \neq 0, \forall k = 1, 2, \dots, K \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

电池处理企业 j 向下一层级电池生产商 k 运输的 Ni 的数量 $f_{j1,k}$ 可表示为:

$$f_{j1,k} = Q_{j1,sold} r_{j1,k} \quad (19)$$

$$f_{j2,k} = Q_{j2,sold} r_{j2,k} \quad (20)$$

在现实情境中, 处理企业可能会考虑储存一些原料, 以备将来使用。

$$Q_{j1,left} = Q_{j1} - Q_{j2,sold} \quad (1)$$

$$Q_{j2,left} = Q_{j2} - Q_{j2,sold} \quad (22)$$

在这种情况下, 需要考虑以下边界条件如下所示:

$$Q_{j1,left}^{\min} \leq Q_{j1,left} \leq Q_{j1,left}^{\max} \quad (23)$$

$$Q_{j2,left}^{\min} \leq Q_{j2,left} \leq Q_{j2,left}^{\max} \quad (24)$$

电池处理企业还需要确定第一种金属原料 Ni 的销售价格, 这与前面提到的定价机制相同。电池处理企业 j 愿意支付的购买价格应最小化, 可按以下公式确定可按以下方法确定:

$$P_{j,buy} = \min_{i=1,2,\dots,I} \{ p_{i,sold} + c_{ij} \} \quad (25)$$

现分析电池处理企业在生产经营过程中产生的系列成本费用, 其中包括生产固定成本和可变成本、废旧电池收购成本、库存成本和交易成本:

因此, 总成本可表示为:

$$TC_j = CP_j + P_{j,buy} Q_j + C_{j1,left} (Q_{j1,left}) + C_{j1,sold} (Q_{j1,sold}) + C_{j2,left} (Q_{j2,left}) + C_{j2,sold} (Q_{j2,sold}) \quad (26)$$

电池处理企业 j 的单位平均成本 AC_j 可表示为:

$$AC_j = \frac{TC_j}{Q_j} \quad (27)$$

第一种金属原料 Ni 的单位出售价格 $P_{j,sold1}$, 第二种金属原料 Co 的单位出售价格 $P_{j,sold2}$ 可用单位平均处理成本和期望利润率来表示:

$$P_{j,sold1} = AC_j (1 + r_{j,1}) \quad (28)$$

$$P_{j,sold2} = AC_j (1 + r_{j,2}) \quad (29)$$

$r_{j,1} \in [r_{j,1}, \overline{r_{j,1}}]$, $r_{j,2} \in [r_{j,2}, \overline{r_{j,2}}]$ 是电池处理企业对两种金属原料的期望利润率。

3.2.3. 电池生产企业

在本文中, 我们将研究寡头垄断市场。在逆向物流过程中, 回收的金属原料的交易价格会受到每个电池处理企业供应数量的影响。图 5 展示了一个典型的电池制造商 k , 电池制造商相当于金属原料的需求市场, 其上游是电池处理企业, 电池处理企业向电池制造商出售两种金属原料。市场 k 供应的两种金属原料数量可由如下公式表示。

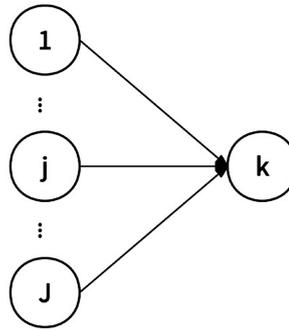


Figure 5. Battery manufacturer transaction link
图 5. 电池生产企业交易链路

$$Q_{k1} = \sum_{j=1}^J f_{j1,k} \tag{30}$$

$$Q_{k2} = \sum_{j=1}^J f_{j2,k} \tag{31}$$

本文中, 两种金属原料简单的市场价格公式分别描述如下:

$$p_{k1, buy} = \max \{0, p_{k1}^{\max} - a_{k1}Q_{k1} - b_{k1}Q_{k1}^2\} \tag{32}$$

$$p_{k2, buy} = \max \{0, p_{k2}^{\max} - a_{k2}Q_{k2} - b_{k2}Q_{k2}^2\} \tag{33}$$

$a_{k1}, a_{k2}, b_{k1}, b_{k2}$ 代表相关正系数, 而 $p_{k1}^{\max}, p_{k2}^{\max}$ 表示市场 k 在数量 Q_{k1}, Q_{k2} 接近于零时所能提供的最高价格。

3.3. 供应链网络均衡条件

供应链网络平衡模型包含三类决策变量。第一类是与所有电池回收企业相关的金属原料数量, 在 1 到 P 之间的所有 p 均表示为 Q_p 。第二类包括集合 L 中所有环节 (i, j) 的权重 w_{ij} , 其中 L 代表供应链中的所有交易环节。第三种类型包括集合 I 中所有决策者的预期利润率 r_i , 其中包括电池回收企业、电池处理企业和电池生产商。为简化后续表达, 我们将使用向量 x 来表示这些变量。除不等式(2)外, 其余(1)至(32)的不等式和方程都表示变量 x 需要直接或间接满足的约束条件。我们将满足这些约束条件的变量 x 的集合表示为 $x \in B(x)$ 。显然, $B(x)$ 由线性和非线性约束组合而成。值得注意的是, 其中一些约束条件表现出高度的非平稳性和非可分性。

利用不等式(2)作为目标均衡状态的条件, 并考虑 $x \in B(x)$ 作为决策变量的约束条件, 我们可以将多层供应链网络的变量不等式模型(VIM)表述如下:

$$\sum_{(i,j) \in L} (P_{i,(i,j)}^* + C_{ij}(f_{ij}^*) - P_{j,(i,j)}^*)(f_{ij} - f_{ij}^*) \geq 0 \tag{34}$$

$$x \in B(x) \tag{35}$$

由于缺乏所需的属性, 如模型中相关函数的单调性和可微分性, 使用投影法或修正投影法等经典方法求解上述 VIM 投影法或修正投影法几乎是不可能的。为克服这一难题, 我们将首先为 VIM 引入一个等效的非线性编程模型。随后, 在下一节中, 我们将提出一种启发式算法来求解由此产生的非线性编程模型。上述 VIM 的等效非线性编程模型(NLPM)如下:

$$\min_{x \in B(x)} \sum_{ij} f_{ij} \max \{0, -p_{j,(i,j)} + p_{i,(i,j)} + C_{ij}(f_{ij})\} + (f_{ij}^{\max} - f_{ij}) \max \{p_{j,(i,j)} - p_{i,(i,j)} - C_{ij}(f_{ij})\} \tag{36}$$

现记 $PA_{ij} = \max\{0, -p_{j,(i,j)} + p_{i,(i,j)} + C_{ij}(f_{ij})\}$, $PB_{ij} = \max\{p_{j,(i,j)} - p_{i,(i,j)} - C_{ij}(f_{ij})\}$, 因此式(33)可简化为:

$$\min \sum_{ij} f_{ij} PA_{ij}^{\alpha} + (f_{ij}^{\max} - f_{ij}) PB_{ij}^{\beta} \quad (37)$$

下面, 我们将概述从给定的 x 得出供应链各链路流量模式及其相应目标函数值的详细过程:

步骤 1 为电池回收企业分配产品流量并设定销售价格。首先, 根据权重使用公式(2)确定下游链路的流量。接着, 利用公式(3)计算售出废旧电池的数量。然后使用公式(4)获得链路具体流量。第三, 利用公式(6~7)计算总成本和平均成本。最后, 根据预期利润率, 利用公式(8)简单定价机制确定售出价格。

步骤 2 将废旧动力电池转化为两种金属原料, 分配产品流, 并为电池处理企业设定两种原料销售价格。首先, 利用公式(10)~(11)确定两种金属原料的提取数量。然后, 使用公式(14)~(15)计算售出的两种金属数量。接着利用公式(16)~(17)计算下游环节的流量。再利用公式(18)~(19)计算剩余材料和已用材料。最后, 利用公式(25)~(26)确定销售价格。

步骤 3 确定市场交易价格。利用公式(27)~(28)计算市场上的两种金属产品总量, 然后利用公式(29)~(30)确定两种金属的交易价格。

步骤 4 计算目标函数值。利用获得的链接流量和相关成本, 根据公式(36)计算目标函数。

4. 实例分析

4.1. 榜样学习算法

榜样学习算法(MMLA)是一种模拟学生学习行为的优化策略。在算法中, 每个个体代表一个解决方案, 通过模仿表现最好的个体来提升自身的解决方案。随着学习阶段的深入, 个体的学习效率逐渐提高, 并且学习因素的调整范围逐渐缩小, 使得个体能更专注于优化。通过这种方式, 算法逐步优化解决方案, 以解决复杂的优化问题。

采用榜样学习算法求解供应链网络均衡问题步骤如下:

Step 0 初始化: 为算法参数赋值, 包括个体数量(n_u)、学习周期数(n_p)、每个学习周期的学习阶段数($n_{p,s}$)、收缩率(r_p)和微调区域半径比例(r_s)。设置当前学习周期的序列号 $k = 1$ 。

Step 1 开始新的学习周期: 如果 $k = 1$, 设置当前搜索范围 U 为初始可行范围, 则 $\mathfrak{U}_j^0 = \mathfrak{U}_j$; 否则, 根据上一个学习周期的金牌获得者的学习因素更新搜索范围, $\mathfrak{U}_j^k = \mathfrak{U}_j \cap [u_{G,j}^{k-1} - d(\mathfrak{U}_j^{k-1}), u_{G,j}^{k-1} + d(\mathfrak{U}_j^{k-1})]$, 其中, $\mathfrak{U}_j^0 = \mathfrak{U}_j$, $u_{G,j}^{k-1}$ 是学习期 $k-1$ 的金牌得主的第 j 个学习因子。

Step 2 开始新的学习阶段: 设置当前学习阶段计数 $t = 1$ 。

Step 3 生成初始种群 $U^{k,t}$: 如果 $k = 1$, 则在相应的可行范围中随机选择学习因子, 逐个生成所有个体 n_u 。否则, 保留当前搜索空间中的个体位置, 其余个体随机生成。

Step 4 基于表现排序并选择模型: 根据表现对个体进行排序, 选择前三名作为模型(金牌 u_G 、银牌 u_S 和铜牌 u_B 获得者)。如果银牌 u_S 和铜牌 u_B 获得者都在金牌 u_G 获得者的当前邻域内, 跳至步骤 9。

Step 5 计算学习效率: 设置 T 为 $n_{k,s}$ 的值, 并使用公式计算学习效率 $P(t, T)$ 。

Step 6 执行普通学习者的学习搜索操作: 除了奖牌获得者外, 对所有普通学习者执行学习搜索操作。

Step 6.1 & 6.2 选择模型和修改学习因素: 使用轮盘赌方法从奖牌获得者中选择模型。根据学习效率 $P(t, T)$ 修改学习因素。

Step 7 执行奖牌获得者的自我改进操作: 对奖牌获得者执行自我改进操作, 生成新个体。

Step 8 学习阶段和周期的迭代: 如果当前阶段 $t < n_{k,s}$, 令 $t = t + 1$ 并返回步骤 4; 如果当前周期 $k < n_p$, 令 $k = k + 1$ 并返回步骤 1。

Step 9 输出结果: 输出当前种群的金牌获得者作为最佳解决方案。

4.2. 供应链实例分析

在本小节中, 我们将使用一个供应链网络(SCNs)来演示 MMLA 的有效性, 用于解决这些例子的 MMLA 的参数如下: $n_p = 3$, $n_{p,1} = 500$, $n_{p,2} = 150$, $n_{p,3} = 130$, $r_p = 0.001$, $r_s = 0.1$, $n_u = 50$ 。目标函数(33)在计算中被使用, 参数 $\alpha = 2$ 和 $\beta = 1$ 。采用计算精度 $1.0e-4$ 来确定是否满足链接中的平衡条件(2)。

供应链网络由两个电池回收企业(s1 和 s2)、两个电池处理企业(p1 和 p2)和 1 个电池生产商即金属需求市场(m1)组成, 如图 6 所示。假设 p1 和 p2 均提供两种不同的金属原料。在均衡状态下, 假设没有一个决策者储存任何原材料或成品。在 MMLA 中, 通过在目标函数中引入惩罚项来解决关于货物储存的违反假设的问题。

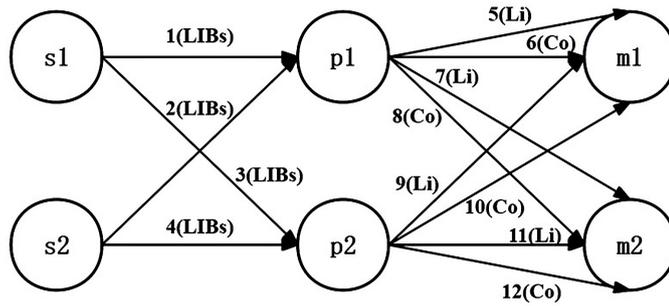


Figure 6. Example of a supply chain network
图 6. 供应链网络实例

供应链网络相关函数与数值设定如表 3 所示, 运输成本函数中各参数取值如表 4 所示。所有链路的最大允许流量 f_{ij}^{Max} 设置为 5000。在表 3 中, (i, j) 表示连接决策者 i 和 j 的链路。在图 6 中相应的链路旁边标注了链路的序号。

Table 3. Correlation function and value setting
表 3. 相关函数与数值设定

给定回收价格下, 电池回收企业的回收数量	$Q_i = f(P_{i, buy}) = 1.17P_{i, buy} + 0.15, i = 1, 2$
通过拆解, 电池处理企业可获得的两种原料量	$Q_{j1} = 0.121Q_j; Q_{j2} = 0.023Q_j, j = 1, 2$
两种金属原料的最高价格	$p_{k1}^{Max} = 155, p_{k2}^{Max} = 350$
Eq.(29)中给定正系数 a_{k1} 和 b_{k1}	$a_{k1} = 0.0032, b_{k1} = 0.000076$
Eq.(30)中给定正系数 a_{k2} 和 b_{k2}	$a_{k2} = 0.004, b_{k2} = 0.000045$

Table 4. Parameters of the transportation cost function
表 4. 运输成本函数的参数

(i, j)	a_{ij}	b_{ij}	c_{ij}	d_{ij}
1	0.0004	0.00002	0.005	0.5
2	0.0005	0.00003	0.005	0.5
3	0.0004	0.00002	0.006	0.5
4	0.0004	0.00004	0.005	0.5

续表

5	0.0004	0.00005	0.005	0.5
6	0.0006	0.00002	0.004	0.5
7	0.0004	0.00006	0.004	0.5
8	0.0008	0.00002	0.004	0.5
9	0.0005	0.0006	0.005	0.5
10	0.0006	0.0004	0.004	0.5
11	0.0004	0.0005	0.005	0.5
12	0.0008	0.0002	0.004	0.5

电池回收企业 s1 和电池回收企业 s2 的固定生产成本分别为 354 和 411。与 s1 和 s2 相关的单位废旧动力电池的持有成本分别为 0.01 和 0.02。s1 和 s2 的单位废旧动力电池交易成本均为 0.002。所有交易的最大数量 Q_i^{\max} 设置为 500。

电池处理企业 p1 和电池处理企业 p2 的固定生产成本分别是 502 和 498。与 p1 和 p2 相关的单位废旧动力电池的交易成本分别为 0.001 和 0.002。可变生产成本函数 $VC = a_j Q_j + b_j Q_j^2$ 中 p1 的参数 a_j 和 b_j 分别为 0.01 和 0.00002, p2 的参数 a_j 和 b_j 分别为 0.02 和 0.00002。对于电池处理企业 p1 和 p2, 每单位成品、两种金属原料的持有成本等于 0.001 和 0.002。电池回收企业与电池处理企业与成本相关的参数如表 5 所示。

Table 5. Cost-related parameters

表 5. 与成本相关的参数

决策者	FC	$VC = aQ + bQ^2$		AHC	ATC
		a	b		
s1	354	0	0	0.01	0.002
s2	411	0	0	0.02	0.002
p1	502	0.01	0.00002	0.001	0.0002
p2	498	0.02	0.00002	0.002	0.0004

经过总共 319 个学习阶段后, MMLA 收敛到最终最优解, 目标函数值为 4324585.6577。表 6 具体显示了与十二个环节相关的均衡量。 $r_{i,j}$ 的值不仅表示所选择的运输路径, 还代表了从同一起点出发的链路流量的比率。将每个环节最后两列的数值相乘, 就可以验证均衡条件(2)是否得到严格满足。除第 6 个环节外, 其他环节都能很好地满足平衡条件(2)。表 7~9 列出了与不同决策者相关的均衡量。此外, 所有决策者的剩余材料和剩余产品数据都证实, 零库存要求已得到满足。

Table 6. Equalization results for each link

表 6. 各链路均衡结果

(i, j)	$r_{i,j}$	w_{ij}	$P_{i(i,j)}$	c_{ij}	$P_{j(i,j)}$	$P_{j(i,j)} - c_{ij} - P_{i(i,j)}$	f_{ij}
1	0	0	20	0.5	8.8564	-11.6436	0
2	0	0	20	0.5	4.2258	-16.2742	0
3	0.9848	0.7268	3.7207	5.1357	8.8564	-4.4409	471.5423

续表

4	0.0152	0.0112	3.7207	0.5050	4.2258	0	7.2576
5	0.3118	0.4529	82.0146	0.5229	154.9428	-72.4052	17.7879
6	0.6882	1	82.0146	0.6082	349.8383	267.2154	39.2687
7	0.2708	0.3713	82.0150	0.5140	154.9503	-72.4213	15.4499
8	0.7292	1	82.0150	0.5679	349.8289	-267.2461	41.6067
9	0	0	349.3984	0.5	154.9428	-194.9557	0
10	1	0.7378	349.3984	0.5	0.5005	-0.0606	1.0887
11	0	0	349.3693	0.5	154.9503	-194.9189	0
12	1	0.8617	349.3693	0.5	0.5009	-0.0412	1.0887

Table 7. Equilibrium results for battery recycling companies**表 7.** 电池回收企业的均衡结果

i	Q_i	$Q_{i,sold}$	$Q_{i,left}$	$P_{i,sold}$	r_i
1	480.8299	480.8299	0	3.2941	0.9998
2	478.8	478.8	0	20.0	0.7256

Table 8. Equilibrium results for battery handling firms**表 8.** 电池处理企业的均衡结果

j	$Q_{j,1}$	$Q_{j,2}$	$Q_{j1,sold}$	$Q_{j2,sold}$	$Q_{j1,left}$	$Q_{j2,left}$	$P_{j1,sold}$	$P_{j2,sold}$	$r_{j,1}$	$r_{j,2}$
1	57.0566	1.0886	57.0566	1.0886	0	0	82.0146	349.3984	0.9999	0.4389
2	56.8214	1.0592	56.8214	1.0592	0	0	82.0149	349.3692	0.9997	0.4387

Table 9. Equilibrium results for battery producers**表 9.** 电池生产企业的均衡结果

k	Q_{k1}	Q_{k2}	$P_{k1,buy}$	$P_{k2,buy}$
1	17.7878	40.3573	154.9427	349.8382
2	15.4499	42.6953	154.9502	349.8289

5. 结论与讨论

本研究针对废旧动力电池回收再利用问题, 构建了一个包含电池回收企业、电池处理企业和电池生产企业的三层供应链均衡决策模型。通过变分不等式方法和榜样学习算法, 我们对模型进行了求解, 并通过数值仿真验证了模型的有效性。研究结果揭示了多材料流逆向供应链网络均衡状态下各环节的相互作用和决策行为, 以及它们对供应链整体效率和资源利用率的显著影响。模型求解结果显示, 合理的流量规划和定价决策能够有效降低回收成本, 提高资源回收率, 这对于缓解资源短缺、促进资源的循环利用具有重要意义。此外, 研究中发现不同决策者的利润率存在差异, 这可能与各自的成本控制和市场策略有关。这一发现为供应链各环节的经营管理提供了策略指导。

榜样学习算法在求解过程中表现出良好的性能, 但其参数设置对算法效率和解的质量有显著影响。因此, 未来的研究可以进一步探索参数优化策略, 以提高算法的适用性和鲁棒性。同时, 本研究的模型和算法可以为政策制定者在制定相关激励机制和法规时提供参考, 以促进废旧动力电池的有效回收和资

源的再利用。

尽管本研究取得了一定的成果, 但仍存在局限性, 未来的研究可以在此基础上进一步扩展。例如, 考虑电池回收过程中的环境影响和社会责任, 或者将不同回收技术对供应链网络均衡的影响纳入模型。此外, 模型可以进一步细化, 以适应不同地区、不同规模的电池回收网络, 以及不断变化的市场环境。

参考文献

- [1] Sun, X., Hao, H., Geng, Y., Liu, Z. and Zhao, F. (2024) Exploring the Potential for Improving Material Utilization Efficiency to Secure Lithium Supply for China's Battery Supply Chain. *Fundamental Research*, **4**, 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.12.008>
- [2] Sharmili, N., Nagi, R. and Wang, P. (2023) A Review of Research in the Li-Ion Battery Production and Reverse Supply Chains. *Journal of Energy Storage*, **68**, Article ID: 107622. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107622>
- [3] Wu, Y., Yang, L., Tian, X., Li, Y. and Zuo, T. (2020) Temporal and Spatial Analysis for End-Of-Life Power Batteries from Electric Vehicles in China. *Resources, Conservation and Recycling*, **155**, Article ID: 104651. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104651>
- [4] Ding, G., Liu, F., Fan, X., Gao, X., Cao, G., Ban, J., et al. (2024) Research on Green Recycling of Lithium-Ion Batteries Cathode Waste Powder. *Chemical Engineering Journal*, **493**, Article ID: 152837. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152837>
- [5] Xu, J., Thomas, H.R., Francis, R.W., Lum, K.R., Wang, J. and Liang, B. (2008) A Review of Processes and Technologies for the Recycling of Lithium-Ion Secondary Batteries. *Journal of Power Sources*, **177**, 512-527. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>
- [6] Li, P., Luo, S., Zhang, L., Liu, Q., Wang, Y., Lin, Y., et al. (2024) Progress, Challenges, and Prospects of Spent Lithium-Ion Batteries Recycling: A Review. *Journal of Energy Chemistry*, **89**, 144-171. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.10.012>
- [7] 刘宜, 尚闽, 谭刚, 等. 动力锂离子电池规范回收利用的效益及对策[J]. 电池, 2023, 53(6): 664-667.
- [8] 李克卿, 陆文星, 梁昌勇. 管理视角下中国新能源汽车动力电池的回顾与展望[J]. 科技管理研究, 2020, 40(5): 173-177.
- [9] 周晓阳, 吕娜, 姚锋敏, 等. 供应链网络均衡优化研究现状综述及展望[J]. 系统工程学报, 2022, 37(3): 375-396.
- [10] Nagurney, A., Dong, J. and Zhang, D. (2002) A Supply Chain Network Equilibrium Model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, **38**, 281-303. [https://doi.org/10.1016/s1366-5545\(01\)00020-5](https://doi.org/10.1016/s1366-5545(01)00020-5)
- [11] Nagurney, A., Cruz, J., Dong, J. and Zhang, D. (2005) Supply Chain Networks, Electronic Commerce, and Supply Side and Demand Side Risk. *European Journal of Operational Research*, **164**, 120-142. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.11.007>
- [12] 段彩泉, 姚锋敏, 滕春贤. 随机需求下考虑广告遗忘效应的多周期闭环供应链网络均衡[J]. 运筹与管理, 2023, 32(2): 29-37.
- [13] Dong, J., Zhang, D. and Nagurney, A. (2004) A Supply Chain Network Equilibrium Model with Random Demands. *European Journal of Operational Research*, **156**, 194-212. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(03)00023-7)
- [14] 滕春贤, 高广振. 不确定的多商品流多准则供应链网络模型[J]. 系统工程, 2009, 27(1): 25-29.
- [15] 徐兵, 蒋昆. 多商品流供应链网络应对随机需求扰动研究[J]. 运筹与管理, 2014, 23(6): 144-151.
- [16] 张铁柱, 周倩. 双渠道多期供应链网络均衡模型研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008(8): 1512-1520.
- [17] 李晓婧, 郭春芳, 兰洪杰. 低碳经济环境下双渠道闭环供应链网络均衡模型[J]. 统计与决策, 2016(17): 173-178.
- [18] 吴海翔, 徐兵. 技术扩散和贸易保护主义下的多期供应链网络均衡[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 324-334.
- [19] 杨玉香, 管倩, 张宝友, 等. 碳税政策下闭环供应链网络均衡分析[J]. 中国管理科学, 2022, 30(1): 185-195.
- [20] 王众托, 王志平. 超网络初探[J]. 管理学报, 2008(1): 1-8.
- [21] 王众托. 关于超网络的一点思考[J]. 上海理工大学学报, 2011, 33(3): 229-237.
- [22] 张子健, 郭明波, 陈全朋. EPR 下动力电池梯度利用的闭环供应链定价策略与协调机制[J]. 工业工程, 2020, 23(3): 10-18.
- [23] 谢隽阳, 乐为, 郭本海. 基于生产者责任延伸的新能源汽车动力电池回收帕累托均衡[J]. 中国管理科学, 2022, 30(11): 309-320.
- [24] 侯强, 刘继文, 包婉婷. 制造商公平关切梯次利用闭环供应链博弈研究[J]. 系统工程, 2023(2): 1-11.