

# 基于合作博弈的动力电池梯次利用双闭环 供应链的利润分配机制

侯 强, 刘中洋

(沈阳工业大学管理学院, 沈阳 110870)

**摘要:** 针对以制造商(M)、回收商(R)和梯次利用商(T)为主体的双闭环供应链利润分配问题, 构建集中决策模型、分散决策模型、MR 决策模型和 RT 决策模型。通过 Stackelberg 博弈对供应链成员进行最优解分析, 基于 3 种影响因素改进 Shapley 值, 并利用改进 Shapley 值对供应链各参与主体的利润进行重新分配。研究表明: 供应链成员间的合作可以有效提高供应链的整体利润及成员的利润; 低容量电池具有较高的成本优势, 实现了利润与环境的双赢; 通过改进 Shapley 值提出的利润分配方案增加了梯次利用商的利润, 提高了梯次利用商的合作及梯次利用积极性, 促进了供应链利润分配的公平和供应链合作联盟的稳定。

**关键词:** 闭环供应链; 梯次利用; 动力电池; 利润分配

**中图分类号:** F274; F224 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)03-0046-11

能源是推动经济社会发展的动力, 而传统的化石能源一方面不可再生面临枯竭, 另一方面产生的温室气体形成不良的气候影响。各国积极探索新能源替代化石能源, 在中国应用最成熟的是新能源汽车。

据公安部统计, 截至 2023 年 9 月底, 中国新能源汽车的数量已达到 1 821 万辆。新能源汽车的销售势头同时也推动了动力电池的使用量不断上升。预计到 2030 年, 国内动力电池的退役量能达到 437 GW·h。动力电池的容量在衰减至 80% 以下时便达到退役状态<sup>[1]</sup>, 但是如果在动力电池还有 80% 电量的情况下就过早地进行报废回收, 是对资源的极大浪费, 因此需要对退役的动力电池进行梯次利用和再生利用<sup>[2]</sup>。梯次利用是指将不再符合高性能要求的退役动力电池, 重新应用于对电池性能要求较为宽松的场景。例如作为太阳能和风能的储能设备<sup>[3]</sup>、给太阳能路灯供电, 或者安装在游览区的电动车上。再生利用是将从已退役的动力电池冶炼出的金属元素回收, 并再次用于电池生产制造的过程。梯次利用和再生利用延长了动力电池的使用寿命<sup>[4]</sup>。实践中大部分是需要梯次利用后进行再生利用。

从产业实践的角度, 4R Energy、日本 GS、三菱

商会、三菱汽车以及 Lithium Energy Japan (LEJ) 等公司也在对新能源汽车的动力电池的梯次利用进行研究。针对欧洲的能源短缺现状, JT Energy Systems 公司采用梯次利用电池储能系统, 提升能量利用效率, 稳定能源价格, 实现能源转型<sup>[5]</sup>。

截至 2022 年, 国内已经建立了 10 235 个回收服务网点, 并成功培育了 45 家核心企业, 它们在动力电池的梯次利用和再生利用领域发挥着关键作用<sup>[6]</sup>。

由于在回收利用的过程中会涉及梯次利用产业链上的各级企业之间因为自身利益的相互博弈。同时动力电池梯次利用闭环供应链中各级企业都是以逐利为导向, 而在其独立运作的情况下, 供应链各成员以自己利益为中心<sup>[7]</sup>, 必然会造成各成员为了自己的超额利润而进行风险转移, 一旦某个成员在追求自己利益的过程中导致他人的损失过大时, 将会加剧成员间的冲突, 进而影响到动力电池闭环供应链企业间的合作关系, 降低企业之间的信任度, 加速整个供应链中的企业脱离, 最终威胁到梯次利用闭环供应链的稳定与发展。通过良好的利益分配机制提升供应链的收益, 增强稳定性, 是迫在眉睫需要解决的问题。

**收稿日期:** 2024-08-28

**基金项目:** 国家社会科学基金一般项目(22BJY135)

**作者简介:** 侯强(1980—), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 教授, 研究方向为供应链管理; 刘中洋(1998—), 男, 吉林大安人, 硕士研究生, 研究方向为低碳供应链。

既有供应链利润分配研究,多运用合作和非合作博弈的方法。学者运用非合作博弈的方法对供应链的利润进行分配。刘泽源等<sup>[8]</sup>基于 Nash-Harsanyi 博弈构建成员利润分配模型对联盟利润进行分配,该方法实现了成员间利益分配的公平合理。江泽武等<sup>[9]</sup>基于随机反应均衡,设计最佳的激励机制,优化了供应链中供应商和零售商之间的关系,获得最优的期望利润。Giri 等<sup>[10]</sup>搭建了一个由制造商、零售商和传统的物流公司组成的供应链,分析对比了在不同场景下的所做的决策得出的利润。Omkar 等<sup>[11]</sup>基于价格和利润共享的协调机制对两级供应链上成员的数量和利润进行合理分配。部分学者基于 Stackelberg 合作博弈的方法进行利润分配。李洁等<sup>[12]</sup>针对停车者、停车场运营者和交通管理者构建三方效用模型,基于 Stackelberg 博弈确定利益方案,发现该 Stackelberg 博弈利润分配方案是各方矛盾最小的方案。郝丽等<sup>[13]</sup>基于 Stackelberg 构建可持续供应链决策模型,使利润分配方案帕累托最优,为可持续供应链的协调发展提供了理论支持。但是大部分的学者选用 Shapley 值合作博弈的方法对供应链的利润进行分配。王梦<sup>[14]</sup>基于委托代理模型改进 Shapley 值设计学术期刊数字出版产业链利益分配机制,该利润分配机制有助于提高供应链的整体利益。许可等<sup>[15]</sup>通过考虑各成员在合作中的贡献程度,对 Shapley 值法进行了优化,以更公平合理地进行利润分配。詹瑜和李志翠<sup>[16]</sup>在棉纺产业链各主体的利润分配现状的比较分析基础上,运用 Shapley 值法得到了产业链利润分配的最优模式。既有研究多基于单闭

环供应链的利润分配研究,尚缺乏存在两个闭环的研究。

作为新生事物的动力电池梯次利用闭环供应链的利润分配的研究尚处于探索阶段。本文利用改进 Shapley 值法对梯次利用闭环供应链的利润分配机制进行研究。分别建立合作和非合作模型,研究供应链的利润分配机制,实现各主体利润分配的公平,以期构建互惠互赢的动力电池闭环供应链的合作模式,推动供应链合作的稳定性。

## 1 模型描述与相关假设

### 1.1 模型描述

本文考虑由制造商(M)、第三方回收商(R)和梯次利用商(T)及电动汽车市场构成的双闭环供应链。制造商是该闭环供应链的主导者,制造商收购原材料并生产动力电池,在电动汽车市场出售;回收商回收退役电池并进行分类,将可再次利用在其他对储能要求不高的领域的部分给梯次利用商,将不能梯次利用的部分拆解提纯后给制造商进行再制造。梯次利用商进行梯次利用,并将梯次利用后的电池材料拆解提纯后给制造商进行再制造。根据上述的描述构建了本文所讨论 4 种决策模型,即分散决策模型(模型 D):供应链各成员之间互不合作;模型 MR:制造商和第三方回收商合作;模型 RT:回收商与梯次利用商合作;集中决策模型(模型 C):制造商、回收商和梯次利用商形成一个联盟,集中决策,如图 1 所示。

为明确阐述问题,对本文所采用的符号进行了定义和解释,见表 1。

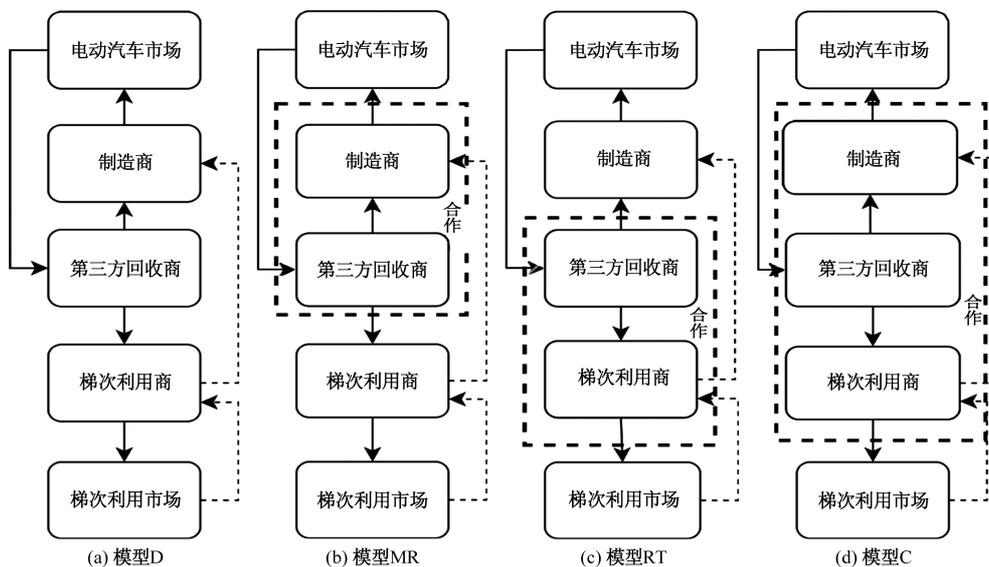


图 1 闭环供应链的合作与非合作模型

表 1 相关符号及含义

| 符号       | 含义               |
|----------|------------------|
| $p_n$    | 动力电池的单位售价        |
| $c_m$    | 动力电池的单位生产成本      |
| $c_r$    | 再制造废旧动力电池的单位成本   |
| $\theta$ | 回收退役电池所占的比例      |
| $h$      | 废旧动力电池回收单价       |
| $b$      | 价格敏感系数           |
| $g$      | 高容量退役动力电池的单位售价   |
| $f$      | 制造商回购退役动力电池的固定价格 |
| $p_t$    | 梯次利用商出售高容量电池的单价  |
| $c_1$    | 梯次利用商回收电池的单位成本   |
| $n$      | 梯次利用商的努力程度       |
| $o$      | 梯次利用努力效用成本系数     |
| $e$      | 成本优势             |
| $m$      | 梯次利用努力效用         |

## 1.2 模型假设

根据问题描述和实际情况,参考既有研究成果,做以下假设。

(1) 制造商、回收商和梯次利用商属于完全信息下的斯塔柯尔伯格博弈,制造商为领导者,且均为风险中性。

(2) 动力电池的需求函数为  $D(p_n) = 1 - bp_n$ , 且  $c_r < c_m < p_n$ , 电动汽车市场规模为 1。

(3) 回收商对于废旧动力电池的回收数量可以表示为  $Q(\theta)$ , 具体表示为  $Q(\theta) = \theta(1 - bp_n)$ , 回收固定成本为  $I = \frac{1}{2}A\theta^2$ 。其中  $A$  为回收难度系数,即随着  $A$  值的增加,废旧动力电池回收的难度也随之增加。

(4) 梯次利用市场的需求函数为  $D(p_t) = (k - lp_t)n$ , 且  $g < p_t < p_n$ 。梯次利用努力效用成本为  $I = \frac{1}{2}om^2$ 。梯次利用市场与一般再利用市场在需求上存在差异,梯次利用市场对电池的需求与电动汽车市场对电池的需求不形成竞争关系。梯次利用商回收电池的单位成本  $c_1$ 。

(5) 梯次利用市场尚处于起步阶段,回收的退役动力电池能够满足梯次利用市场的需求。

(6) 电池制造商同时作为再制造商,其对所有的低容量电池以统一的价格进行回收再制造,且  $0 < h < f < g, c_m - c_r = e > f$ 。消费者对再制品和采用新材料生产的电池的偏好无差异。该模型仅考虑单周期动力电池的销售、回收、梯次利用和再制造等环节的单一循环。

## 2 非合作博弈决策模型及求解

### 2.1 分散决策模型

在分散决策模型 D 中,制造商的利润由销售

新动力电池的收入和回收低容量电池的成本优势组成;回收商的利润由销售退役电池所得的收入以及固定回收成本组成;梯次利用商的利润由销售高容量电池的收入以及梯次利用努力效用成本组成。

根据上述的假设,制造商 M 的利润函数为

$$\pi_M^D = (p_n - c_m)D(p_n) + (e - f)Q(\theta) = (p_n - c_m)(1 - bp_n) + (e - f)\theta(1 - bp_n) \quad (1)$$

回收商 R 的利润函数为

$$\pi_R^D = (g - h)D(p_t) + (f - h)[Q(\theta) - D(p_t)] - I_r = (g - h)(k - lp_t)n + (f - h)[\theta(1 - bp_n) - (k - lp_t)n] - \frac{1}{2}A\theta^2 \quad (2)$$

梯次利用商 T 的利润函数为

$$\pi_T^D = (p_t - c_1 + f - g)D(p_t) - I_t = (p_t - c_1 + f - g)(k - lp_t)n - \frac{1}{2}om^2 \quad (3)$$

在分散决策模型 D 中,决策过程为制造商 M 先决策动力电池的单位售价  $p_n$  和制造商回购退役动力电池的固定价格  $f$ , 随后回收商决策回收退役电池所占的比例  $\theta$ , 最后梯次利用商 T 决策梯次利用商出售高容量电池的单价  $p_t$ 。

**命题 1:** 制造商 M、回收商 R 和梯次利用商 T 的博弈均衡解及最优利润为

$$\begin{aligned} f^D &= \frac{e+h}{2}, \theta^D = \frac{b(e-h)(1-bc_m)}{4Ab - (e-h)^2b^2}, \\ p_t^D &= \frac{k}{2l} + \frac{2c_1 - e - h + 2g}{4}, \\ p_n^D &= \frac{2A + 2Abc_m - (e-h)^2b}{4Ab - (e-h)^2b^2}, \\ \pi_M^D &= \frac{[4A^2b - Ab^2(e-h)^2](1-bc_m)^2}{[4Ab - b^2(e-h)^2]^2}, \\ \pi_R^D &= \frac{Ab^2(e-h)^2(1-bc_m)^2}{2[4Ab - b^2(e-h)^2]^2} + \\ &\quad \frac{n[2k - l(2c_1 + 2g - e - h)](2g - e - h)}{8}, \\ \pi_T^D &= \frac{n[2k + l(e + h - 2c_1 - 2g)]^2}{16l} - \frac{1}{2}om^2. \end{aligned}$$

**证明:** 为了保证模型存在最优解,需满足  $b^2(e-h)^2 - 4Ab < 0$ , 采用逆向求解法求解,首先对式(3)求  $p_t$  的偏导,即

$$\frac{\partial \pi_T^D}{\partial p_t} = 0.$$

此时式(3)关于  $p_t$  的二阶导  $-2nl < 0$  有最优解。

其次将  $p_t$  代入式(2),对式(2)求关于  $\theta$  的偏导,即

$$\frac{\partial \pi_R^D}{\partial \theta} = 0。$$

式(2)关于  $\theta$  的二阶导  $-A < 0$  有最优解。

最后将  $\theta$  代入式(1)中,对式(1)求关于  $p_n$  和  $f$  的偏导,即

$$\frac{\partial \pi_M^D}{\partial p_n} = 0, \frac{\partial \pi_M^D}{\partial f} = 0。$$

式(1)求关于  $p_n$  和  $f$  的海塞矩阵  $H_M = \begin{pmatrix} -\frac{(1-bp_n)^2}{A} & -\frac{2b(1-bp_n)(h+e-2f)}{A} \\ 0 & \frac{b^2(e-h)^2-4Ab}{2A} \end{pmatrix}$ , 该

海塞矩阵负定,存在唯一最优解。

## 2.2 集中决策模型

在集中决策模型 C 中,形成一个大联盟,由制造商 M、回收商 R 和梯次利用商 T 组成。在这一模型中,所有梯次利用闭环供应链的成员构成一个超组织集中决策者。值得注意的是,制造商 M、回收商 R 和梯次利用商 T 之间的所有交易行为被视为组织内部行为,即在超组织内进行。因此,集中决策模型 C 的闭环供应链的利润函数可以表述为

$$\max_{(p_n, f, p_t, \theta)} \pi_{MRT}^C = \frac{Ab(1-bc_m)^2[2A-b(e-h)^2]}{2[2Ab-b^2(e-h)^2]^2} + \frac{n(k-lc_1)^2}{4l} - \frac{1}{2}om^2 \quad (4)$$

**命题 2:**集中决策模型中博弈的均衡解及最优利润为

$$P_t^C = \frac{lc_1+k}{2l}, P_n^C = \frac{A+Abc_m-b(e-h)^2}{2Ab-b^2(e-h)^2},$$

$$\theta^C = \frac{b(1-bc_m)(e-h)}{2Ab-b^2(e-h)^2},$$

$$\pi_{MRT}^C = \frac{Ab(1-bc_m)^2[2A-b(e-h)^2]}{2[2Ab-b^2(e-h)^2]^2} + \frac{n(k-lc_1)^2}{4l} - \frac{1}{2}om^2。$$

证明过程与命题 1 类似,运用最优化求解。

## 2.3 制造商与回收商合作模型

在决策模型 MR 中,制造商 M 与回收商 R 建立了一个联盟 MR,与梯次利用商 T 进行 Stackelberg 博弈。其中制造商和回收商先共同决策动力电池的单位售价  $p_n$  和制造商回购退役动力电池的固定价格  $f$  和回收退役电池所占的比例  $\theta$ , 然后梯

次利用商再决策梯次利用商出售高容量电池的单价  $p_t$ 。其相应的利润函数为

$$\pi_{MR}^{\text{MR}} = (p_n - c_m)(1 - bp_n) + (e - f)\theta(1 - bp_n) + (g - h)(k - lp_t)n + (f - h)[\theta(1 - bp_n) - n(k - lp_t)] - \frac{1}{2}A\theta^2 \quad (5)$$

$$\pi_T^{\text{MR}} = (p_t - c_1 + f - g)(k - lp_t)n - \frac{1}{2}om^2 \quad (6)$$

**命题 3:**决策模型 MR 中博弈的均衡解及最优利润为

$$f^{\text{MR}} = \frac{2lg - k + lc_1}{2l}, p_t^{\text{MR}} = \frac{3k + lc_1}{4l},$$

$$p_n^{\text{MR}} = \frac{A + Abc_m - b(e-h)^2}{2Ab - b^2(e-h)^2},$$

$$\theta^{\text{MR}} = \frac{b(1-bc_m)(e-h)}{2Ab - b^2(e-h)^2},$$

$$\pi_{MR}^{\text{MR}} = \frac{Ab(1-bc_m)^2[2A-b(e-h)^2]}{2[2Ab-b^2(e-h)^2]^2} + \frac{n(k-lc_1)^2}{8l},$$

$$\pi_T^{\text{MR}} = \frac{n(k-lc_1)^2}{16l} - \frac{1}{2}om^2。$$

证明过程与命题 1 类似,运用逆向求解法先后对式(6)和式(5)求偏导,得出模型最优解。

## 2.4 回收商与梯次利用商合作模型

回收商 R 和梯次利用商 T 之间形成了一个联盟 RT,而制造商 M 则与联盟 RT 进行 Stackelberg 博弈。在这个博弈模型中,制造商 M 被认为是博弈的领导者<sup>[17]</sup>,而联盟 RT 则是追随者。这意味着制造商 M 在制定决策时可以预期到联盟 RT 的反应,从而在整个博弈过程中占据主导地位。其中制造商先决策动力电池的单位售价  $p_n$  和制造商回购退役动力电池的固定价格  $f$ , 然后回收商和梯次利用商再共同决策回收退役电池所占的比例  $\theta$  和梯次利用商出售高容量电池的单价  $p_t$ 。其利润函数为

$$\pi_M^{\text{RT}} = (p_n - c_m)(1 - bp_n) + (e - f)\theta(1 - bp_n) \quad (7)$$

$$\pi_{RT}^{\text{RT}} = n(k - lp_t)(p_t - c_1) + (f - h)\theta(1 - bp_n) - \frac{1}{2}A\theta^2 - \frac{1}{2}om^2 \quad (8)$$

**命题 4:**决策模型 RT 中博弈的均衡解及最优利润为

$$\begin{aligned}
p_1^{\text{RT}} &= \frac{lc_1 + k}{2l}, f^{\text{RT}} = \frac{e + h}{2}, \\
\theta^{\text{RT}} &= \frac{b(e-h)(1-bc_m)}{4Ab - (e-h)^2 b^2}, \\
p_n^{\text{RT}} &= \frac{2A + 2Abc_m - b(e-h)^2}{4Ab - b^2(e-h)^2}, \\
\pi_{\text{M}}^{\text{RT}} &= \frac{[4A^2b - Ab^2(e-h)^2](1-bc_m)^2}{[4Ab - (e-h)^2 b^2]^2}, \\
\pi_{\text{RT}}^{\text{RT}} &= \frac{Ab^2(e-h)^2(1-bc_m)^2}{2[4Ab - (e-h)^2 b^2]^2} + \\
&\quad \frac{n(k-lc_1)^2}{4l} - \frac{1}{2}om^2.
\end{aligned}$$

证明过程与命题 1 类似,运用逆向求解法先后对式(8)和式(7)求偏导,得出模型最优解。记:  $f_1 = 4Ab - b^2(e-h)^2$ ,  $f_2 = 2Ab - b^2(e-h)^2$ ,  $f_3 = 1 - bc_m$ ,  $f_4 = (k - lc_1)^2$ ,  $f_5 = 4A - b(e-h)^2$ ,  $f_6 = 2A - b(e-h)^2$ ,  $f_7 = b^2(e-h)^2$ ,  $f_8 = 2k + l(e + h - 2c_1 - 2g)$ ,  $f_9 = 2g - e - h$ ,  $f_{10} = 8A - b(e-h)^2$ ,  $f_{11} = 12Ab^3(e-h)^2 - b^4(e-h)^4 - 16A^2b^2$ ,  $f_{12} = k - lc_1$ 。

**命题 5:** 当参数满足  $f_2 \geq 0, f_{11} \geq 0, l^2 f_9^2 \geq f_4$ , 分散决策的整体利润小于其他决策情况下的整体利润。

**证明:**  $\pi_f = \frac{Abf_{10}f_3^2}{f_1^2} + \frac{4nf_4 - nl^2f_9^2}{16l} - \frac{1}{2}om^2$ ,

$$\pi_{\text{MRT}} = \frac{Abf_3^2f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2}om^2, \pi_e = \frac{Abf_3^2f_6}{2f_2^2} + \frac{3nf_4}{16l} - \frac{1}{2}om^2, \pi_h = \frac{Abf_{10}f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2}om^2.$$

$$\pi_h - \pi_f = \frac{nl^2f_9^2}{16l} \geq 0,$$

$$\pi_e - \pi_f = \frac{Af_3^2f_2f_{11}}{2f_2^2f_1} + \frac{nl^2f_9^2 - nf_4}{16l} \geq 0,$$

$$\pi_{\text{MRT}} - \pi_f = \frac{Af_3^2f_2f_{11}}{2f_2^2f_1} + \frac{nl^2f_9^2}{16l} \geq 0.$$

可得  $\pi_f \leq \pi_h, \pi_f \leq \pi_{\text{MRT}}, \pi_f \leq \pi_e$ 。其中  $\pi_f$  为分散决策下供应链的整体利润;  $\pi_{\text{MRT}}$  为集中决策下供应链的整体利润;  $\pi_e$  为 MR 决策下供应链的整体利润;  $\pi_h$  为 RT 决策下供应链的整体利润。

命题 5 表示,任意联盟下供应链的总利润比各自运作时供应链的总利润都要大,但并不是供应链上的每个企业的利润都在增加,因此需要采用 Shapley 值法对供应链的利润进行重新分配,以增加各个企业的利润和供应链的总利润。

**命题 6:**  $p_n^{\text{RT}} = p_n^{\text{D}} > p_n^{\text{MR}} = p_n^{\text{C}}$ 。

**证明:**

$$\begin{aligned}
p_n^{\text{RT}} &= p_n^{\text{D}} = \frac{2A + 2Abc_m - b(e-h)^2}{4Ab - b^2(e-h)^2}, \\
p_n^{\text{MR}} &= p_n^{\text{C}} = \frac{A + Abc_m - b(e-h)^2}{2Ab - b^2(e-h)^2}, \\
&\quad \frac{2A + 2Abc_m - b(e-h)^2}{4Ab - b^2(e-h)^2} - \\
&\quad \frac{A + Abc_m - b(e-h)^2}{2Ab - b^2(e-h)^2} = \\
&\quad \frac{Ab^2(e-h)^2(bc_m - 1)}{[4Ab - b^2(e-h)^2][2Ab - b^2(e-h)^2]} > 0.
\end{aligned}$$

可得  $p_n^{\text{RT}} = p_n^{\text{D}} > p_n^{\text{MR}} = p_n^{\text{C}}$ 。

命题 6 表示,对于动力电池的单位售价,决策模型 RT 和 D 相等且比其他决策模型高,这是由于联盟 RT 对分散决策 D 中制造商和回收商之间的动力电池的交易没有影响。因此,不仅制造商回购退役动力电池的价格相同,而且它们的回收退役电池比例也相同。与决策模型 RT 和模型 D 相比,决策模型 C 与 MR 中的联盟关系消除了动力电池交易的双重边际,因此消费者可以以较低价格购买产品。

### 3 动力电池梯次利用闭环供应链合作模型构建及利润分配

在激烈的供应链竞争环境中,供应链的多方参与者虽然存在利益上的冲突,更希望的是保持供应链稳定的同时获得更大的竞争力<sup>[18]</sup>。而这一行为是否稳定取决于利益分配机制。

#### 3.1 基于 Shapley 值法动力电池梯次利用闭环供应链的利润分配

为解决梯次利用闭环供应链各参与方的合作利益的问题,Shapley 值法模型的相关表示方法和概念如下:假设  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  是梯次利用闭环供应链参与者的集合,任一利益相关者  $S \in N$ , 都对应一个特征函数  $V(S)$ ,  $V(S)$  表示  $S$  所获得的利益,满足<sup>[19]</sup>:

$$V(\emptyset) = 0,$$

$$V(S_1 \cup S_2) \geq V(S_1) + V(S_2),$$

$$S_1 \cap S_2 = \emptyset (S_1, S_2 \in N).$$

$[S, V]$  表示多个利益相关者协同合作的策略组合,其中  $V$  是这些策略的特征函数。

设  $\phi_i(v)$  为第  $i$  个成员从大联盟合作收益  $V(N)$  中获得收益。则合作利润分配需满足条件如下:

$$\sum_{i=1}^n \phi_i(v) = V(N) \text{ 且 } \phi_i(v) \geq V(\{i\}), i = 1, 2, \dots, n.$$

利用 Shapley 值法确定在合作中每个参与者个体  $i$  的分配利益为

$$\Psi_i(\nu) = \sum_{i \in s \subseteq I} \omega(|s|) [\nu(s) - \nu(s \setminus \{i\})] \quad (9)$$

式中:  $\omega(|s|) = \frac{(n-|s|)! (|s|-1)!}{n}$ ;  $|s|$  为集合  $s$  中元素的数量;  $\nu(s)$  为集合  $s$  的价值;  $\omega(|s|)$  为加

权系数;  $\nu(s \setminus \{i\})$  为集合  $s$  中排除个体  $i$  后取得的价值。

通过上述分析和计算, 获得在不同联盟中参与个体的利润, 见表 2~表 4。

表 2 合作博弈下制造商 M 利益分配方案求值表

| 收益分配方案                        | 不同合作状态                                  |  |   |   |
|-------------------------------|---|--|---|---|
|                               | M                                       | MR   | MT  | MRT   |
| $\nu(s)$                      | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$             | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l}$   | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2} + \frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$ | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2$                   |
| $\nu(s - \{m\})$              | 0                                       | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_8 f_9}{8}$   | $\frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$                             | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2$                    |
| $\nu(s) - \nu(s - \{m\})$     | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$             | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l} - \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} - \frac{nf_8 f_9}{8}$                            | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$                                       | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} - \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2}$                            |
| $ s $                         | 1                                       | 2  | 2   | 3   |
| $\Psi s $                     | 1/3                                     | 1/6  | 1/6   | 1/3   |
| $\Psi s  [\nu(s) - \nu(s -)]$ | $\frac{1}{3} \frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$ | $\frac{1}{6} \left( \frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l} - \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} - \frac{nf_8 f_9}{8} \right)$ | $\frac{1}{6} \frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$                           | $\frac{1}{3} \left( \frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} - \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} \right)$ |

表 3 合作博弈下回收商 R 利益分配方案求值表

| 收益分配方案                        | 不同合作状态  |   |   |  |
|-------------------------------|---|---|---|--|
|                               | R   | MR  | RT  | MRT  |
| $\nu(s)$                      | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_8 f_9}{8}$                            | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l}$  | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2$                            | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2$  |
| $\nu(s - \{r\})$              | 0   | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$   | $\frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$   | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2} + \frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$  |
| $\nu(s) - \nu(s - \{r\})$     | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_8 f_9}{8}$                            | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l} - \frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$                            | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{nf_8}{16l}$                            | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} - \frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2} - \frac{nf_8}{16l} + \frac{nf_4}{4l}$                            |
| $ s $                         | 1   | 2   | 2   | 3  |
| $\Psi s $                     | 1/3   | 1/6   | 1/6   | 1/3  |
| $\Psi s  [\nu(s) - \nu(s -)]$ | $\frac{1}{3} \left( \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_8 f_9}{8} \right)$ | $\frac{1}{6} \left( \frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l} - \frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2} \right)$ | $\frac{1}{6} \left( \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{nf_8}{16l} \right)$ | $\frac{1}{3} \left( \frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} - \frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2} - \frac{nf_8}{16l} + \frac{nf_4}{4l} \right)$ |

表 4 合作博弈下梯次利用商 T 利润分配方案求值表

| 收益分配方案                        | 不同合作状态   |   |  |   |
|-------------------------------|--|---|--|---|
|                               | T  | MT  | RT   | MRT   |
| $\nu(s)$                      | $\frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$                            | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2} + \frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$ | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2$   | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2$ |
| $\nu(s - \{t\})$              | 0  | $\frac{Abf_5 f_3^2}{f_1^2}$                                       | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_8 f_9}{8}$   | $\frac{Abf_3^2 f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{8l}$                    |
| $\nu(s) - \nu(s - \{t\})$     | $\frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$                            | $\frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2$                             | $\frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2 - \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} - \frac{nf_8 f_9}{8}$                            | $\frac{nf_4}{8l} - \frac{1}{2} om^2$                              |
| $ s $                         | 1  | 2   | 2  | 3   |
| $\Psi s $                     | 1/3  | 1/6   | 1/6  | 1/3   |
| $\Psi s  [\nu(s) - \nu(s -)]$ | $\frac{1}{3} \left( \frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2 \right)$ | $\frac{1}{6} \left( \frac{nf_8}{16l} - \frac{1}{2} om^2 \right)$  | $\frac{1}{6} \left( \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2} om^2 - \frac{Af_7 f_3^2}{2f_1^2} - \frac{nf_8 f_9}{8} \right)$ | $\frac{1}{3} \left( \frac{nf_4}{8l} - \frac{1}{2} om^2 \right)$   |

根据表 2、表 3 和表 4 中的数据可分别求得动力电池闭环供应链 3 个参与主体的利润。

制造商 M 分配得到的利润为

$$\Phi_M(\nu) = \frac{Abf_5f_3^2}{2f_1^2} + \frac{Abf_3^2f_6}{4f_2^2} - \frac{Af_7f_3^2}{4f_1^2} + \frac{nf_4}{48l} - \frac{nf_8f_9}{48}$$

回收商 R 分配的利润为

$$\Phi_R(\nu) = \frac{Af_7f_3^2}{4f_1^2} + \frac{nf_8f_9}{24} + \frac{Abf_3^2f_6}{4f_2^2} - \frac{Abf_5f_3^2}{2f_1^2} - \frac{nf_8^2}{32l} + \frac{7nf_4}{48l}$$

梯次利用商 T 分配的利润为

$$\Phi_T(\nu) = \frac{nf_8^2}{32l} + \frac{nf_4}{12l} - \frac{nf_8f_9}{48} - \frac{1}{2}om^2$$

**命题 7:** 当参数  $f_6 > 0, 2f_4 + 5l^2f_9 > 4lf_{12}f, 20f_4 + 5f_9^2 > 16f_{12}f_9$  时,  $\Phi_M(\nu) > \pi_M^D, \Phi_R(\nu) > \pi_R^D, \Phi_T(\nu) > \pi_T^D$ 。

**证明:**

$$\Phi_M(\nu) - \pi_M^D = \frac{2f_7(A + f_6)}{4b_2f_5^2f_6} + \frac{n(f_4 - lf_9)^2}{48l} > 0;$$

$$\Phi_R(\nu) - \pi_R^D = \frac{2f_7(A + f_6)}{4b_2f_5^2f_6} + \frac{n(2f_4 - 4lf_{12}f_9 + 5l^2f_9^2)}{48l} > 0;$$

$$\Phi_T(\nu) - \pi_T^D = \frac{n(20f_4 - 16f_{12}f_9 + 5f_9^2)}{96l} > 0。$$

命题 7 表示, 利用 Shapley 值得出的各参与主体的利润高于分散决策情况下各个成员的利润。因此在合作博弈下, 制造商、回收商和梯次利用商能够在供应链中获得更高的利润。

### 3.2 基于改进 Shapley 值法的利润分配

经典 Shapley 值法存在强调效益公平分配的不足, 在一定程度上忽视了联盟成员对供应链的贡献的差异性, 不能使供应链的利润分配最优。显然, 完全按照经典 Shapley 值法进行利润分配是不合理的<sup>[20]</sup>。为此, 就需要对 Shapley 值的利润分配方法进行改进<sup>[21]</sup>。考虑供应链各成员在风险承担、努力水平和贡献程度等方面因素的差异, 先使用层次分析法(AHP)确定各成员在利润分配中的比重, 再结合所占的比重来调整分配系数, 最后基于改进的 Shapley 值法重新计算, 以更准确地反映各企业的实际贡献<sup>[22]</sup>。

修正后的模型:

$$\begin{cases} \Phi'_i = \Phi_i + \nu(s)\omega_i \\ \omega_i = \gamma - \frac{1}{n} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\gamma$  为联盟成员的权重;  $\omega_i$  为利益分配的修正量。

为了最大限度地使梯次利用闭环供应链利润分配的合理化, 本文考虑了成员的努力水平、贡献程度, 以及风险因子 3 种影响因素。在梯次利用闭环供应链中联盟中, 各成员参与活动的努力水平会影响供应链联盟的稳定程度<sup>[23]</sup>, 努力水平的表达式

$$\rho_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}, R_i \text{ 为成员的努力成本, } \rho_i \text{ 为个体成员}$$

的努力水平,  $\sum_{i=1}^n R_i$  为供应链各参与主体努力总成本。

闭环供应链成员在联盟活动中的贡献程度对供应链的利润分配有着重要的影响<sup>[24]</sup>, 个体成员对供应链贡献程度的表达式为  $\vartheta_i = \frac{J_i}{\sum_{i=1}^n J_i}$ ,  $J_i$  为成员

的投入成本,  $\vartheta_i$  为个体成员对供应链的贡献程度,  $\sum_{i=1}^n J_i$  为供应链各参与主体的投入总成本。

愿意在联盟活动中积极承担风险的成员最终获得的收益也会越大<sup>[25]</sup>, 各参与主体在供应链的事务中所承担

风险的表达式为  $\mu_i = \frac{K_i}{\sum_{i=1}^n K_i}$ ,  $K_i$  为参与主体所承担

的风险,  $\mu_i$  为风险因子,  $\sum_{i=1}^n K_i$  为供应链各参与主体所受的总风险。

**3.3 基于多因素的利润分配方案的改进**

根据上节的关键影响因素, 构建层次结构模型。其中, 梯次利用闭环供应链利润分配是最高层来修正权重, 中间层是制造商、回收商和梯次利用商, 最底层是努力水平  $\rho_i$ 、贡献程度  $\vartheta_i$  以及风险因子  $\mu_i$ 。利用层次分析法(AHP)构建影响利润分配的指标体系, 对各项影响因素进行赋值、加权和标准化处理<sup>[26]</sup>, 并根据改进 Shapley 值模型求得制造商 M、回收商 R 和梯次利用商 T 所占供应链的比例分别为  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 。考虑影响因素后, 闭环供应链各成员基于改进的 Shapley 值利润分配的利润如下:

制造商 M 重新分配的利润为

$$\Phi_M(\nu)' = \frac{Abf_5f_3^2}{2f_1^2} + \frac{Abf_3^2f_6}{4f_2^2} - \frac{Af_7f_3^2}{4f_1^2} + \frac{nf_4}{48l} - \frac{nf_8f_9}{48} + \omega_1 \left( \frac{Abf_3^2f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2}om^2 \right)。$$

回收商 R 重新分配的利润为

$$\Phi_R(\nu)' = \frac{Af_7f_3^2}{4f_1^2} + \frac{nf_8f_9}{24} + \frac{Abf_3^2f_6}{4f_2^2} - \frac{Abf_5f_3^2}{2f_1^2} - \frac{nf_8^2}{32l} + \frac{7nf_4}{48l} + \omega_2 \left( \frac{Abf_3^2f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2}om^2 \right)。$$

梯次利用商 T 重新分配的利润为

$$\Phi_T(\nu)' = \frac{nf_8^2}{32l} + \frac{nf_4}{12l} - \frac{nf_8f_9}{48} - \frac{1}{2}om^2 + \omega_3 \left( \frac{Abf_3^2f_6}{2f_2^2} + \frac{nf_4}{4l} - \frac{1}{2}om^2 \right)。$$

以上得出的基于改进 Shapley 值对供应链利润进行分配的结果是在经典 Shapley 值法对供应链的利润进行分配后供应链整体利润不变的基础上根据各个成员对供应链的贡献等影响因素的差异进行再分配,且利润分配结果随着利益修正量的改变而改变。

#### 4 算例分析

针对梯次利用闭环供应链利润分配问题,参考文献[25]的相关研究并结合现实情况,梯次利用闭环供应链的基础参数为  $A = 30, b = 30, e = 3, h = 2, k = 4, l = 0.2, c_1 = 6, c_m = 4, g = 1, n = 2, o = 20, m = 0.2$ 。通过对上述公式进行计算,可以得出在分散决策下,制造商、回收商和梯次利用商的利润分别为  $\pi_M = 157, \pi_R = 22, \pi_T = 24$ 。在 Shapley 值法下,制造商、回收商及梯次利用商的收益分别为  $\Phi_M = 197, \Phi_R = 49, \Phi_T = 19$ 。利用 AHP 法对经典 Shapley 值进行改进,各个成员影响因素的标准化取值见表 5。

根据专家评分和层次分析法,确定各个影响因素的权重,得出各个影响因素的权重集为  $x_n^T = (0.26, 0.29, 0.44)$ ,则制造商、回收商和梯次利用商的利益修正量分别为  $\omega_1 = 0.26 - \frac{1}{3} = -0.068$ ,  $\omega_2 = 0.29 - \frac{1}{3} = -0.042$ ,  $\omega_3 = 0.44 - \frac{1}{3} = 0.111$ 。加入修正系数后制造商、回收商及梯次利用商的收益分别为  $\Phi'_M = 179, \Phi'_R = 38, \Phi'_T = 48$ 。不同分配方案的利益分配结果见表 6。

表 5 制造商、回收商、梯次利用商影响因素的标准化取值

| 成员       | 努力水平 | 贡献程度 | 风险因子 |
|----------|------|------|------|
| 制造商(M)   | 0.24 | 0.25 | 0.30 |
| 回收商(R)   | 0.44 | 0.25 | 0.20 |
| 梯次利用商(T) | 0.32 | 0.50 | 0.50 |

表 6 不同分配方案下的利润分配

| 成员       | 分散决策 | Shapley 法 | 改进 Shapley 值法 |
|----------|------|-----------|---------------|
| 制造商(M)   | 157  | 197       | 179           |
| 回收商(R)   | 22   | 49        | 38            |
| 梯次利用商(T) | 24   | 19        | 48            |
| 供应链总利润   | 203  | 265       | 265           |

通过对比梯次利用闭环供应链联盟的 3 个主体在分散决策、利用 Shapley 值法分配及对 Shapley 值修正后的值可知,Shapley 值的利润分配及改进的 Shapley 值的利润分配均满足大联盟合理性分配特征。通过对 3 种利润分配方案进行比较,采用 Shapley 值法后,不论是整个供应链的总利润还是各个节点的成员利润都得到了提升,进而实现了供应链的共赢局面。其中由于梯次利用商在进行梯次利用过程中承担的风险,做出的贡献较大,所以在对 Shapley 值修正后,供应链总体利润不变的情况下,梯次利用商所占供应链总利润的比例在提升,回收商和制造商的分配利润的比例有所下降。

经过利用加权修正后的 Shapley 值分配方法使梯次利用闭环供应链联盟成员间的合作关系更加紧密,各节点的利润分配也更加合理,使分配更加准确,更加符合实际情况。

#### 5 敏感性分析

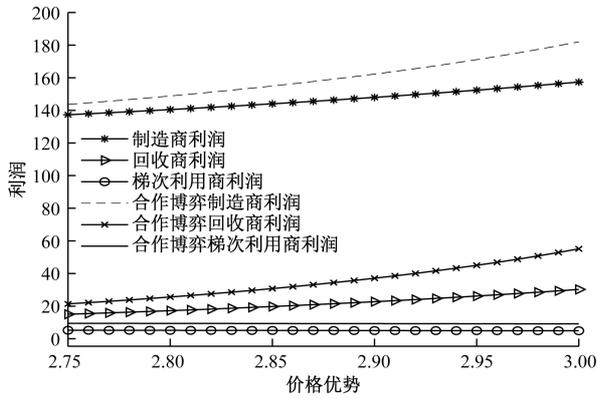
参考文献[26]的相关研究并结合现实情况,将参数设为  $A = 30, b = 30, h = 2, k = 0.5, l = 1.3, c_1 = 6, c_m = 4, g = 1, n = 1, o = 20, m = 0.2$ 。

成本优势下供应链利润的敏感性分析如图 2、图 3 所示。

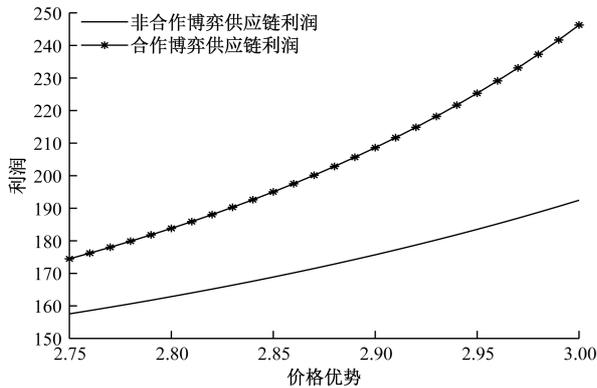
由图 2 可知,制造商和回收商的利润以及供应链的总利润皆随着成本优势的增加而增加,且在成本优势下非合作博弈所分配的利润皆小于合作博弈机制下所分配的利润,这说明使用低容量电池再制造新产品的成本优势增加,利用合作博弈分配利润对供应链各成员的利润是均有利的。由图 3 可知,改进合作博弈下各成员的利润随着成本优势的增加而增加,改进合作博弈下供应链的总利润与合作博弈下供应链的总利润相等,且梯次利用商获得比合作博弈下更高的利润。

回收难度系数下供应链利润的敏感性分析如图 4、图 5 所示。

由图 4 可知,制造商和回收商的利润以及供应链的总利润随着回收难度系数的增大而降低,且非合作博弈所分配的利润低于合作博弈所分配的利润,说明回收商回收低容量电池的成本增高,制造



(a) 供应链成员利润的敏感性分析



(b) 供应链利润的敏感性分析

图 2 成本优势的敏感性分析

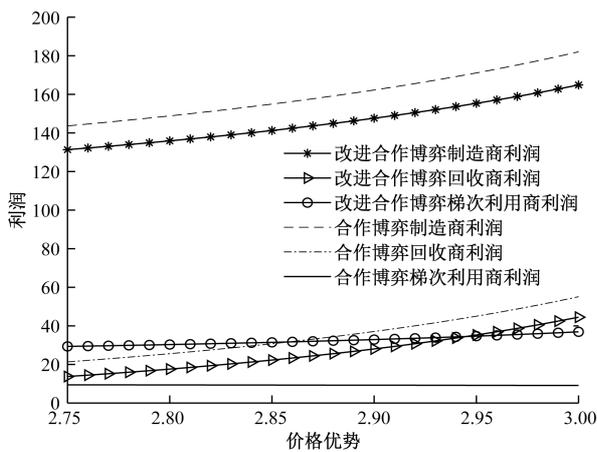
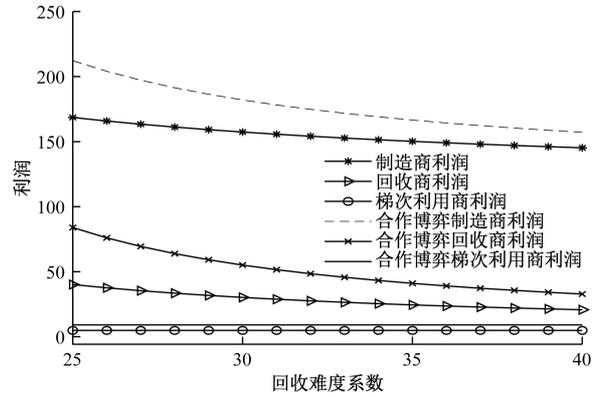


图 3 成本优势下合作博弈与改进合作博弈利润的敏感性分析

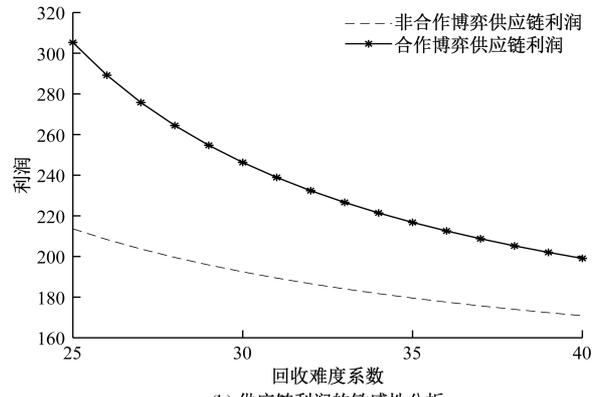
商利用废旧电池再制造成本增加,利润下降。由图 5 可知,改进合作博弈下各成员的利润随着回收难度系数的增加而下降。

梯次利用商的努力程度下供应链利润的敏感性分析如图 6、图 7 所示。

由图 6、图 7 可知,随着梯次利用商努力程度的增加,回收商和梯次利用商的利润及供应链的总利润均呈线性递增趋势,合作博弈及改进合作博弈制



(a) 供应链成员利润的敏感性分析



(b) 供应链利润的敏感性分析

图 4 回收难度系数的敏感性分析

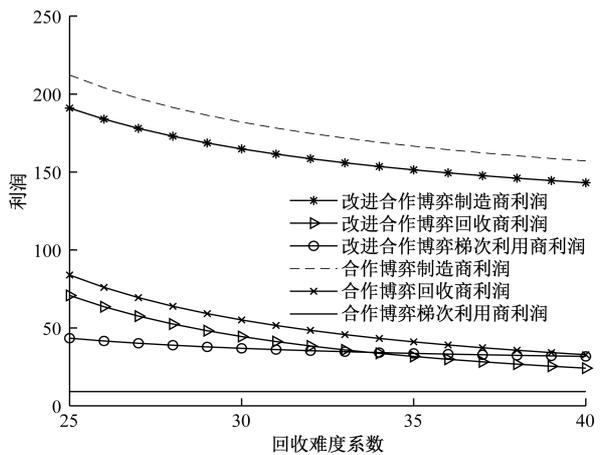
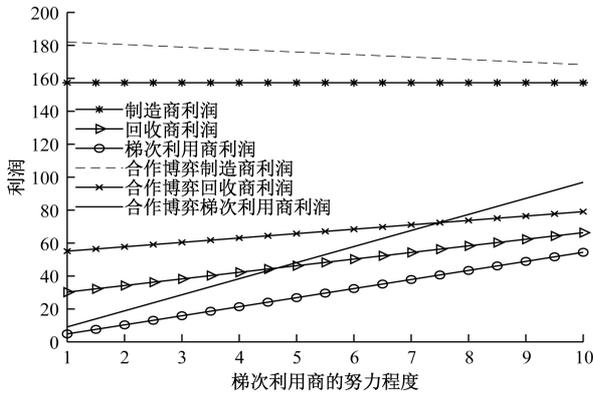


图 5 回收难度系数下合作博弈与改进合作博弈利润的敏感性分析

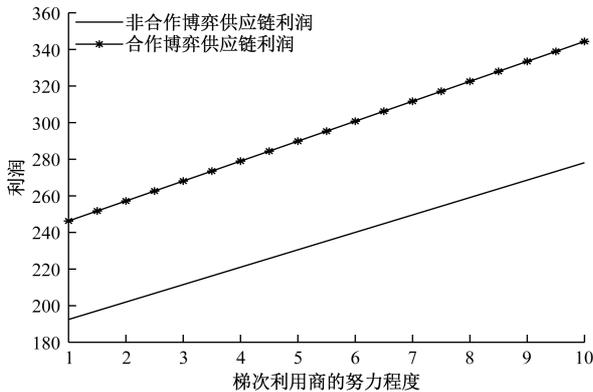
造商的利润呈线性递减的趋势,非合作博弈的制造商的利润呈线性递增的趋势。

## 6 结论

针对由制造商、回收商和梯次利用商组成的闭环供应链利润分配的问题,构建合作博弈模型,研究制造商、回收商、梯次利用商之间联盟的形成及利润分配的机制。主要的结论如下:①使用低容量动力电池的成本优势较大时,有利于提高供应链成



(a) 供应链成员利润的敏感性分析



(b) 供应链利润的敏感性分析

图6 梯次利用商的努力程度的敏感性分析

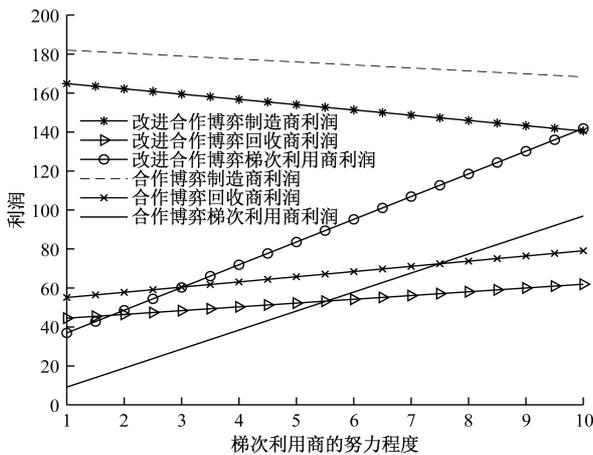


图7 梯次利用商的努力程度下合作博弈与改进合作博弈利润的敏感性分析

员及供应链的利润,因此制造商、回收商和梯次利用商应积极地参与到梯次利用供应链中,提高低容量动力电池的利用价值。②动力电池闭环供应链各主体在单独经营时,利润分配结构不合理,抗风险能力低。因此,需要改进利润分配机制,建立起企业之间的信任体系。③梯次利用闭环供应链各主体的合作实现整体利润的优化。采用 Shapley 值法时,供应链各主体有着较为合理的利润分配。

④改进的 Shapley 值法弥补了传统 Shapley 值法的不足,考虑了影响动力电池梯次利用闭环供应链的利润分配的因素,主要包括努力水平、贡献程度和承担的风险等因素,得到了动力电池闭环供应链的利润分配的优化策略,协调了各利益相关方之间的利益冲突,确保供应链上各参与主体的利润公平,从而激发企业在合作方面的积极性。本文仅考虑供应链的利润在确定情况下的利润分配,未来可研究梯次利用供应链的利润在模糊情况下的利润分配。

## 参考文献

- [1] 杨世春, 卢宇, 周思达, 等. 车用动力电池标准体系研究与分析[J]. 机械工程学报, 2023, 59(22): 3-19.
- [2] 李建林, 李雅欣, 郭丽军. 退役动力电池梯次利用发展态势与政策体系研究[J]. 分布式能源, 2021, 6(3): 32-37.
- [3] WANG L F, GENG M M, DING X N, et al. Research progress of the electrochemical impedance technique applied to the high-capacity lithium-ion battery[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2021, 28(4): 538-552.
- [4] 郝思越, 张伟, 张慧, 等. 废旧动力电池回收再生利用概况[J]. 时代汽车, 2022(20): 107-109.
- [5] 谭震, 范茂松, 赵光金, 等. 动力电池梯次利用国家标准体系分析[J]. 电池, 2022, 52(4): 443-446.
- [6] 周媛, 信天, 王鑫, 等. 动力电池梯次利用标准化现状探讨[J]. 电池, 2021, 51(5): 534-537.
- [7] 迟琳, 张建军, 杜富林. 基于修正 Shapley 值法的肉羊产业链利益分配[J]. 草业科学, 2023, 40(4): 1083-1092.
- [8] 刘泽源, 刘俊勇, 刘继春, 等. 基于 Nash-Harsanyi 博弈理论的多主体联盟利益分配方法[J/OL]. 电测与仪表, 1-11[2024-08-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220602.1700.008.html>.
- [9] 江泽武, 赵晓波, 薛超, 等. 基于随机反应均衡的供应链激励机制设计[J]. 运筹与管理, 2023, 32(8): 1-8.
- [10] GIRI B C, CHAKRABORTY A, MAITI T. Pricing and return product collection decisions in a closed-loop supply chain with dual-channel in both forward and reverse logistics[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2016, 42: 104-123.
- [11] PALSULE-DESAI O D, TIRUPATI D, CHANDRA P. Stability issues in supply chain networks: implications for coordination mechanism[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 142(1): 179-193.
- [12] 李洁, 胡演诚, 秦晨洋. 基于 Stackelberg 博弈的停车场管理策略[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(9): 92-101, 126.
- [13] 郝丽, 刘九强, 陈胜利, 等. 基于 Stackelberg 博弈理论下风险偏好对可持续供应链风险协调策略[J]. 科技和产业, 2022, 22(4): 19-28.

- [14] 王梦. 基于合作博弈原理的学术期刊数字出版产业链利益分配机制设计[J]. 科技和产业, 2023, 23(15): 135-142.
- [15] 许可, 刘芳, 王琛. 北京市奶业链利益分配机制优化研究[J]. 中国畜牧杂志, 2020, 56(10): 175-180.
- [16] 詹瑜, 李志翠. 棉纺产业链利益分配及优化研究[J]. 丝绸, 2023, 60(10): 15-23.
- [17] 曾蔚, 马北玲, 汪继, 等. 考虑消费者绿色偏好的闭环供应链决策研究[J]. 软科学, 2018, 32(9): 108-113, 118.
- [18] 黄肖玲, 贾银银, 刘进平, 等. “前港后厂”供应链“链-链”联盟利益分配[J]. 系统管理学报, 2024, 33(2): 330-340.
- [19] QING Z, GAO H, WANG R, et al. Trading model of virtual power plant considering Shapley contribution based revenue distribution[J]. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan: IEEE, 2020: 2385-2390.
- [20] FANG F, YU S, LIU M. An improved Shapley value-based profit allocation method for CHP- VPP[J]. Energy, 2020, 213: 118805.
- [21] 蔡雁岭, 凡槿. 农村电商供应链主体利益分配机制研究: 以河南省县域农村数据为基础的分析[J]. 价格理论与实践, 2021(12): 177-180, 202.
- [22] 葛嘉怡, 高更君. 基于改进模糊 Shapley 值的“两票制”医药冷链收益分配研究[J]. 制造业自动化, 2022, 44(4): 13-16, 49.
- [23] SONG J, MA X, CHEN R. A profit distribution model of reverse logistics based on fuzzy DEA efficiency-modified Shapley value[J]. Sustainability, 2021, 13(13): 13137354.
- [24] 宦梅丽, 迟亮, 陈鹏飞, 等. 基于修正 Shapley 值的生鲜乳供应链收益分配机制[J]. 中国乳品工业, 2020, 48(1): 32-37.
- [25] 刘娟娟, 马俊龙. 考虑梯次利用的动力电池闭环供应链逆向补贴机制研究[J]. 工业工程与管理, 2021, 26(3): 80-88.
- [26] 刘继文, 侯强, 包婉婷. 制造商公平关切梯次利用闭环供应链博弈[J]. 系统工程, 2023, 41(2): 89-99.

## Profit Distribution Mechanism of Dual-closed-loop Supply Chain of Power Battery Recycling Based on Cooperative Game

HOU Qiang, LIU Zhongyang

(School of Management, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of profit distribution in a double closed-loop supply chain with manufacturers(M), recyclers(R) and ladder utilizers(T) as the main body, centralized decision-making, decentralized decision-making, MR decision-making and RT decision-making models were constructed. The optimal solutions for the supply chain members through the Stackelberg game were analyzed. The Shapley value was improved based on the three influencing factors, and the improved Shapley value was utilized to redistribute the profits of the supply chain's participating bodies. The results show that the cooperation among supply chain members can effectively improve the overall profit of the supply chain and the profit of the members, low-capacity batteries have a high cost advantage, realizing a win-win situation in terms of profit and the environment, the profit distribution scheme proposed by improving the Shapley value increases the profit of the ladder utilizers, improves the cooperation of the ladder utilizers and the ladder utilizing motivation, and promotes the fairness of profit distribution in the supply chain and the stability of the supply chain cooperative alliance. It promotes the fairness of supply chain profit distribution and the stability of supply chain cooperative alliance.

**Keywords:** closed-loop supply chain; cascade utilization; power battery; profit distribution