

# 考虑梯次利用的动力电池回收供应链网络规划

乐嘉\*, 贾永基

东华大学旭日工商管理学院, 上海

收稿日期: 2023年11月6日; 录用日期: 2024年1月4日; 发布日期: 2024年1月15日

## 摘要

基于“双碳”目标, 对考虑梯次利用的动力电池回收供应链网络进行规划是应对退役动力电池回收处理问题、满足回收再利用需求促进可持续发展的有效措施。因此考虑不同类型动力电池的回收数量和梯次利用率, 构建了以总成本最小为目标的动力电池回收供应链网络模型, 并采用Benders分解算法进行精确求解, 随机算例结果验证了模型和方法的有效性, 为新能源汽车企业建立可持续发展的动力电池回收供应链网络提供参考。

## 关键词

动力电池回收, 供应链网络规划, 梯次利用, Benders分解算法

# Power Battery Recycling Supply Chain Network Planning Considering Cascade Utilization

Jia Le\*, Yongji Jia

Glorious Sun School of Business and Management, Donghua University, Shanghai

Received: Nov. 6<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 4<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 15<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Based on the “double carbon” goal, planning the power battery recycling supply chain network considering cascade utilization is an effective measure to deal with the problem of decommissioned power battery recycling, meet the recycling demand and promote sustainable development. Therefore, a power battery recycling supply chain network model aiming at the minimum total cost was constructed considering the recycling quantity and cascade utilization of different types

\*通讯作者。

of power batteries, and the Benders decomposition algorithm was used for accurate solution. The results of random examples verified the effectiveness of the model and method. It provides a reference for new energy automobile enterprises to establish a sustainable power battery recycling supply chain network.

## Keywords

Power Battery Recycling, Supply Chain Network Planning, Cascade Utilization, Benders Decomposition Algorithm

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

“双碳”背景下, 新能源汽车已成为我国汽车行业的主流趋势, 2022年我国新能源汽车产销分别达到705.8万辆和688.7万辆, 同比分别增加96.9%和93.4% [1]。随着我国新能源汽车销量的增加, 动力电池作为新能源汽车的零部件, 其数量也迅速增长。然而, 当动力电池的容量下降至80%时, 电池的续航能力大幅度降低, 将无法满足电动汽车的使用需求, 需要退役[2]。但此类退役电池仍然存在64%的能量剩余, 可以用于对电池性能要求较低的场景, 如通信基站、储能系统、低速电动交通工具等, 并且随着行业标准与商业模式逐渐完善, 梯次利用市场规模巨大。若能对废旧的动力电池进行梯次利用, 其所对应的新能源车每公里碳排放量将分别下降22g, 进而显著降低新能源汽车全生命周期的碳排放量[3]。因此, 不仅需要对动力电池开展回收工作, 更需要对其开展梯次利用工作, 进一步提高能源使用效率。随着最早一批成规模的动力电池自2019年起陆续达到退役年限, 市场将形成规模化退役的新常态。因此, 退役动力电池的回收处理成为我国面临的一个主要问题, 回收再利用需求有望逐年走高。基于此, 研究动力电池回收再利用网络规划问题具有重要意义。

## 2. 文献综述

目前, 大多数学者关于动力电池回收的研究主要集中在回收模式[4] [5] [6]、技术[7] [8] [9]和供应链决策[10] [11] [12]领域, 较少研究动力电池回收网络规划问题, 对网络设计中的设施选址、流量分配或路径规划等进行决策。其中, Yu等[13]构建了一个基于大数据技术的新能源汽车动力电池回收平台, 通过分析平台运行机制、利用交通大数据建立运输优化系统并采用改进蚂蚁算法获得最短路径模型, 提升了信息资源价值并推动了动力电池的回收。Guan等[14]基于动力电池第三方回收模式, 构建了逆向物流网络的双目标混合整数线性规划模型, 采用遗传算法求解并分析了社会负效应的调整系数对设施位置和总成本的影响。杨玉香等[15]人考虑线上线下两种动力电池回收渠道, 通过构建模型和运用改进混合协同进化遗传算法求解, 分析回收宣传和价格竞争的影响以及不确定情况下各主体的最佳决策。刘娟娟等[16]通过模糊求解方法和加权理想点法求解多目标模糊规划模型, 得到动力电池回收网络的设施选址及流量分配方案。包菊芳[17]构建了考虑风险损失的退役电池回收网络模型, 采用遗传算法确定了设施的位置、数量及之间的流量分配。

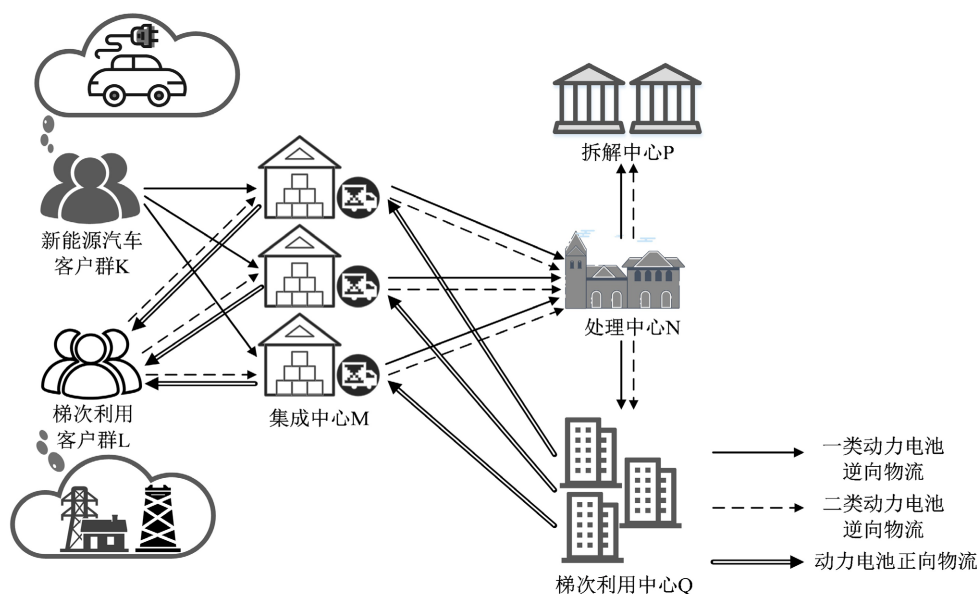
以上文献基于新能源汽车动力电池的某一回收模式, 构建了逆向物流网络模型, 大多采用启发式算法求解得到设施选址及流量分配方案, 并未考虑梯次利用电池, 也较少将精确算法运用于动力电池回收

网络模型的求解。因此, 本文除了考虑回收新能源动力电池, 也将梯次利用电池的回收和出售考虑在内, 构成了两大动力电池回收及梯次利用电池销售的完整供应链循环, 然后基于该动力电池回收供应链网络, 建立以总成本最小为目标的混合整数规划数学模型, 并采用 Benders 分解算法进行求解。

### 3. 问题描述与数学模型

#### 3.1. 问题描述

本文设计了考虑梯次利用的动力电池回收供应链网络, 主要由两类客户群、集成中心、处理中心、拆解中心和梯次利用中心所组成, 如图 1 所示。其中, 新能源汽车客户群 K 是经新能源汽车使用后的退役动力电池市场, 梯次利用客户群 L 是动力电池梯次利用市场, 如通信基站、储能备电系统、低速电动车等, 既产生经梯次利用后的废旧动力电池, 又购买可梯次利用的退役动力电池; 企业自营的集成中心 M 则负责回收两类客户群分别产生的车用退役动力电池和经梯次利用后的动力电池, 并且出售可梯次利用动力电池, 具有“回收+销售”两大功能, 起到整合前后向资源降本增效的作用; 而处理中心 N 也由企业自营, 负责废旧动力电池的回收收集和预处理, 如检测评估、拆解、分选等环节; 拆解中心 P 和梯次利用中心 Q 则外包给第三方电池回收企业, 经预处理后未达标的动力电池交由拆解中心 P 进行资源回收利用和无害化处置, 而达标电池交由梯次利用中心 Q 进行重组、测试和安全试验等。



**Figure 1.** Power battery recycling supply chain network design considering cascade utilization  
**图 1.** 考虑梯次利用的动力电池回收供应链网络设计

由图 1 可知, 首先, 新能源汽车客户群 K 和梯次利用客户群 L 将废旧动力电池送往集成中心 M, 新能源汽车企业从集成中心 M 将收集的两类废旧动力电池运送至处理中心 N, 由处理中心 N 对其进行检测评估和筛选。随后, 未达标的废旧动力电池将被运输至拆解中心 P, 达标的废旧动力电池则被运输至梯次利用中心 Q。梯次利用中心 Q 将废旧动力电池变为梯次利用动力电池后, 运输至集成中心 M, 最后由集成中心 M 出售或出租给梯次利用客户群 L。

因此, 本文考虑梯次利用主要体现在, 一方面, 除了考虑新能源动力电池的回收, 还考虑了梯次利用电池的回收问题, 将这两类客户的动力电池回收整合在了同一供应链网络中; 另一方面, 本文设计的

动力电池回收供应链网络中, 集成中心  $M$  除了回收两类客户的废旧动力电池, 还可以出售经梯次利用中心处理后的可梯次利用动力电池给梯次利用市场的客户, 如低速电动车、储能备电系统等, 即具有回收加销售两大功能, 整合了前后向资源。

该新能源汽车企业所面临的决策问题是: 在两类客户群回收数量已知的情况下, 对自营的集成中心  $M$  和处理中心  $N$  进行选址, 以及确定网络中各设施之间的流量分配。该决策问题的优化目标是使选址成本、运输成本以及碳排放成本之和最小。该优化问题具有两阶段决策特征, 第一阶段决策, 即选址决策, 是一个长期的战略层决策; 第二阶段的决策, 即流量分配决策, 是一个短期的战术层决策。针对上述问题特征, 以最小化总成本为目标, 建立动力电池回收供应链网络模型。

### 3.2. 模型假设与符号说明

#### 3.2.1. 模型假设

为了简化问题, 本文做出如下假设:

- 1) 不考虑集成中心、梯次利用中心在处理过程中的内部消耗;
- 2) 回收供应链网络中各候选点的位置和最大库存容量已知;
- 3) 单位配送成本和单位运输费率、单位碳排放量以及碳税成本有关, 与距离成正比, 且相邻环节的单位配送成本和距离已知;
- 4) 梯次电池的市场需求足够大, 所有产品都能卖出, 且不需要完全满足市场需求。

#### 3.2.2. 符号说明

构建模型的相关符号说明如下所示。

集合:

$K$ : 新能源汽车客户点集合,  $k \in K$ ;

$L$ : 梯次利用客户点集合,  $l \in L$ ;

$M$ : 候选配送中心集合,  $m \in M$ ;

$N$ : 候选处理中心集合,  $n \in N$ ;

$P$ : 拆解中心集合,  $p \in P$ ;

$Q$ : 梯次利用中心集合,  $q \in Q$ ;

参数:

$U_m$ : 配送中心  $m$  的容量上限;

$U_n$ : 处理中心  $n$  的容量上限;

$U_p$ : 拆解中心  $p$  的容量上限;

$U_q$ : 梯次利用中心  $q$  的容量上限;

$\mu_n$ : 处理中心  $n$  的新能源汽车客户废旧动力电池梯次利用率;

$w \cdot \mu_n$ : 处理中心  $n$  的梯次利用客户废旧动力电池梯次利用率, 其中  $w$  表示一定比例;

$r_k$ : 新能源汽车客户  $k$  废旧动力电池的回收数量;

$r_l$ : 梯次利用客户  $l$  废旧动力电池的回收数量;

$c_{km}$ : 从新能源汽车客户  $k$  运送至配送中心  $m$  的单位配送成本;

$c_{lm}$ : 从梯次利用客户  $l$  运送至配送中心  $m$  的单位配送成本;

$c_{mn}$ : 从配送中心  $m$  运送至处理中心  $n$  的单位配送成本;

$c_{np}$ : 从处理中心  $n$  运送至拆解中心  $p$  的单位配送成本;

$c_{nq}$ : 从处理中心  $n$  运送至梯次利用中心  $q$  的单位配送成本;

$c_{qm}$ : 从梯次利用中心  $q$  运送至配送中心  $m$  的单位配送成本;

$c_{ml}$ : 从配送中心  $m$  运送至梯次利用客户  $l$  的单位配送成本;

$f_m$ : 建设配送中心  $m$  的固定成本;

$f_n$ : 建设处理中心  $n$  的固定成本;

决策变量:

$X_{km}$ : 从新能源汽车客户  $k$  运送至配送中心  $m$  的运输量;

$X_{lm}$ : 从梯次利用客户  $l$  运送至配送中心  $m$  的运输量;

$X_{mn}$ : 从配送中心  $m$  运送至处理中心  $n$  的运输量;

$X_{mn}^k$ : 从配送中心  $m$  运送至处理中心  $n$  的新能源汽车客户  $k$  废旧动力电池运输量;

$X_{mn}^l$ : 从配送中心  $m$  运送至处理中心  $n$  的梯次利用客户  $l$  废旧动力电池运输量;

$X_{np}$ : 从处理中心  $n$  运送至拆解中心  $p$  的运输量;

$X_{nq}$ : 从处理中心  $n$  运送至梯次利用中心  $q$  的运输量;

$X_{qm}$ : 从梯次利用中心  $q$  运送至配送中心  $m$  的运输量;

$X_{ml}$ : 从配送中心  $m$  运送至梯次利用客户  $l$  的运输量;

$Y_m$ : 0-1 变量, 若开设候选配送中心  $m$  则为 1, 否则为 0;

$Y_n$ : 0-1 变量, 若开设候选处理中心  $n$  则为 1, 否则为 0.

### 3.3. 数学模型

考虑梯次利用的动力电池回收供应链网络模型如下:

$$\min F = \sum_{m \in M} f_m Y_m + \sum_{n \in N} f_n Y_n + \left( \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} c_{km} X_{km} + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{lm} X_{lm} + \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} c_{mn} X_{mn} \right. \\ \left. + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} c_{np} X_{np} + \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} c_{nq} X_{nq} + \sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} c_{qm} X_{qm} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} c_{ml} X_{ml} \right) \quad (1)$$

$$\sum_{m \in M} X_{km} \geq r_k, \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M} X_{lm} \geq r_l, \forall l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{n \in N} X_{mn}^k = \sum_{k \in K} X_{km}, \forall m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{n \in N} X_{mn}^l = \sum_{l \in L} X_{lm}, \forall m \in M \quad (5)$$

$$X_{mn} = X_{mn}^k + X_{mn}^l, \forall m \in M, n \in N \quad (6)$$

$$\sum_{q \in Q} X_{nq} = \sum_{m \in M} \mu_n X_{mn}^k + \sum_{m \in M} w \cdot \mu_n X_{mn}^l, \forall n \in N \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} X_{np} = \sum_{m \in M} (1 - \mu_n) X_{mn}^k + \sum_{m \in M} (1 - w \cdot \mu_n) X_{mn}^l, \forall n \in N \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} X_{qm} = \sum_{n \in N} X_{nq}, \forall q \in Q \quad (9)$$

$$\sum_{l \in L} X_{ml} = \sum_{q \in Q} X_{qm}, \forall m \in M \quad (10)$$

$$\sum_{q \in Q} X_{qm} + \left( \sum_{k \in K} X_{km} + \sum_{l \in L} X_{lm} \right) \leq Y_m U_m, \forall m \in M \quad (11)$$

$$\sum_{m \in M} X_{mn} \leq Y_n U_n, \forall n \in N \quad (12)$$

$$\sum_{n \in N} X_{np} \leq U_p, \forall p \in P \quad (13)$$

$$\sum_{n \in N} X_{nq} \leq U_q, \forall q \in Q \quad (14)$$

$$Y_m, Y_n \in \{0, 1\}, \forall m \in M, n \in N \quad (15)$$

$$X_{km}, X_{lm}, X_{mn}, X_{mn}^k, X_{mn}^l, X_{np}, X_{nq}, X_{qm}, X_{ml} \geq 0, \forall k \in K, l \in L, m \in M, n \in N, p \in P, q \in Q \quad (16)$$

其中, 目标函数(1)表示由选址固定成本、运输成本和碳排放成本所构成的总成本最小。约束(2)~(3)表示两类客户产生的废旧动力电池数量都被配送中心回收了。约束(4)~(10)表示各中心的流量守恒。其中, 约束(4)表示配送中心从新能源汽车客户处收集到的废旧动力电池数量之和等于其运往处理中心的新能源汽车客户废旧电池数量之和; 约束(5)表示配送中心从梯次利用客户处收集到的废旧动力电池数量之和等于其运往处理中心的梯次利用客户废旧电池数量之和; 约束(6)表示配送中心将两类电池运往处理中心的总流量等于配送中心到处理中心的流量; 约束(7)表示处理中心将新能源汽车废旧电池以梯次利用率  $\mu_n$  回收为梯次利用电池, 梯次利用废旧电池以比例  $w \cdot \mu_n$  回收为梯次利用电池, 且两者流量之和等于处理中心运往梯次利用中心的流量; 约束(8)表示处理中心将新能源汽车客户、梯次利用客户的废旧电池分别以剩余比例  $(1 - \mu_n)$  和剩余比例  $(1 - w \cdot \mu_n)$  进行资源回收利用和无害化处置, 且两者流量之和等于处理中心运往回收中心的流量; 约束(9)表示梯次利用中心运往配送中心的总流量等于从处理中心运来的总流量; 约束(10)确保配送中心关于梯次利用电池的流量守恒。约束(11)~(14)表示各中心的容量限制。其中, 约束(11)表示配送中心收到的梯次利用电池数量与回收到的两类客户废旧动力电池数量之和不超过配送中心的最大容量。约束(15)表示 0-1 变量约束。约束(16)表示各节点之间的流量不能为负数。

#### 4. Benders 分解算法求解

Benders 分解算法是求解混合整数规划问题大规模算例的有效算法, 被广泛运用于具有两阶段决策特征的问题, 因此, 适合用于求解本文多层次、多节点的动力电池回收供应链网络规划问题。Benders 分解算法的大体思想是, 将具有两阶段决策特征的混合整数规划原问题拆解为主问题和子问题两部分, 然后通过迭代求解主问题和对偶子问题, 最终得到原问题的最优解。因此, 采用 Benders 分解算法求解动力电池回收供应链网络模型的流程如图 2 所示。

##### 4.1. 主问题

拆分后的主问题 MP 如下所示:

$$\min \sum_{m \in M} f_m Y_m + \sum_{n \in N} f_n Y_n + t \quad (17)$$

$$Y_m, Y_n \in \{0, 1\}, \forall m \in M, n \in N \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha_k^i r_k + \sum_{l \in L} \alpha_l^i r_l - \sum_{m \in M} \gamma_m^i Z_m - \sum_{n \in N} \lambda_n^i Z_n - \sum_{p \in P} v_p^i U_p - \sum_{q \in Q} \pi_q^i U_q \leq t, \forall i \in \rho \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \alpha_k^j r_k + \sum_{l \in L} \alpha_l^j r_l - \sum_{m \in M} \gamma_m^j Z_m - \sum_{n \in N} \lambda_n^j Z_n - \sum_{p \in P} v_p^j U_p - \sum_{q \in Q} \pi_q^j U_q \leq 0, \forall j \in \zeta \quad (20)$$

$$t \geq 0 \quad (21)$$

其中,  $t$  是辅助变量, 是表达式

$$\sum_{k \in K} \sum_{m \in M} c_{km} X_{km} + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{lm} X_{lm} + \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} c_{mn} X_{mn} + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} c_{np} X_{np} + \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} c_{nq} X_{nq} + \sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} c_{qm} X_{qm} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} c_{ml} X_{ml}$$



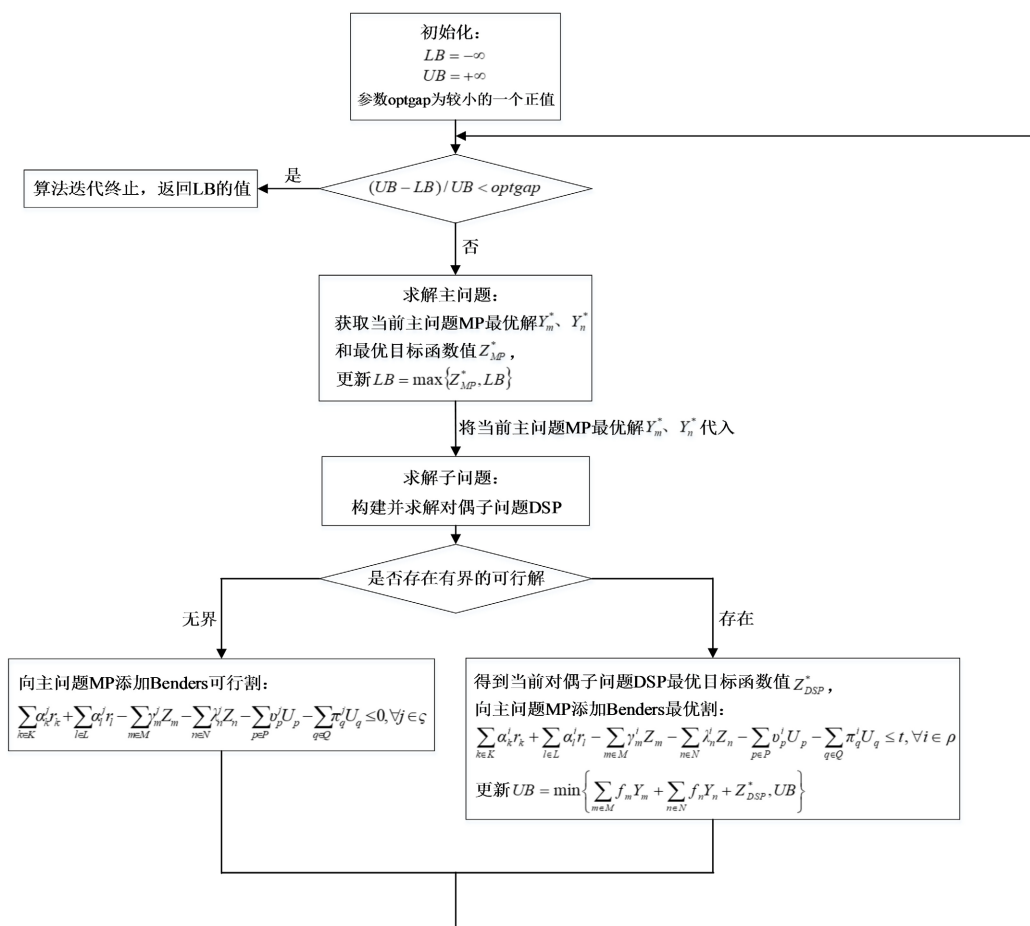


Figure 2. Benders decomposition algorithm flow chart

图 2. Benders 分解算法流程图

下界；式(19)表示 Benders 优化割，其中的  $\rho$  表示迭代过程中找到的对偶子问题 DSP 的极点集合， $(\alpha_k^i, \alpha_l^i, \gamma_m^i, \lambda_n^i, v_p^i, \pi_q^i)$  表示对偶子问题 DSP 的一个极点；式(20)表示 Benders 可行割，其中  $\zeta$  的表示迭代过程中找到的对偶子问题 DSP 的极射线集合， $(\alpha_k^j, \alpha_l^j, \gamma_m^j, \lambda_n^j, v_p^j, \pi_q^j)$  表示对偶子问题 DSP 的一个极射线。

### 4.2. 子问题及其对偶问题

拆分后的子问题 SP 如下所示：

$$\begin{aligned} \min & \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} c_{km} X_{km} + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} c_{lm} X_{lm} + \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} c_{mn} X_{mn} + \sum_{n \in N} \sum_{p \in P} c_{np} X_{np} \\ & + \sum_{n \in N} \sum_{q \in Q} c_{nq} X_{nq} + \sum_{q \in Q} \sum_{m \in M} c_{qm} X_{qm} + \sum_{m \in M} \sum_{l \in L} c_{ml} X_{ml} \end{aligned} \quad (22)$$

式(2)至式(10)

$$\sum_{q \in Q} X_{qm} + \left( \sum_{k \in K} X_{km} + \sum_{l \in L} X_{lm} \right) \leq \bar{Y}_m U_m, \forall m \in M \quad (23)$$

$$\sum_{m \in M} X_{mn} \leq \bar{Y}_n U_n, \forall n \in N \quad (24)$$

式(13)至式(14)

式(16)

其中,  $\bar{Y}_m$  和  $\bar{Y}_n$  是求解主问题得到  $Y_m$  和  $Y_n$  的值。

然后根据对偶理论, 记  $\alpha_k$ 、 $\alpha_l$ 、 $\beta_m^1$ 、 $\beta_m^2$ 、 $\beta_{mn}$ 、 $\theta_n^1$ 、 $\theta_n^2$ 、 $\delta_q$ 、 $\varepsilon_m$ 、 $\gamma_m$ 、 $\lambda_n$ 、 $\nu_p$ 、 $\pi_q$  依次为式(2)至式(10)、式(23)至式(24)以及式(13)至式(14)的对偶变量, 将子问题 SP 转化为对偶子问题 DSP, 如下所示:

$$\max \sum_{k \in K} \alpha_k r_k + \sum_{l \in L} \alpha_l r_l - \sum_{m \in M} \gamma_m \bar{Y}_m U_m - \sum_{n \in N} \lambda_n \bar{Y}_n U_n - \sum_{p \in P} \nu_p U_p - \sum_{q \in Q} \pi_q U_q \quad (25)$$

$$\alpha_k + \beta_m^1 - \gamma_m \leq c_{km}, \forall k \in K, m \in M \quad (26)$$

$$\alpha_l + \beta_m^2 - \gamma_m \leq c_{lm}, \forall l \in L, m \in M \quad (27)$$

$$-\beta_{mn} - \lambda_n \leq c_{mn}, \forall m \in M, n \in N \quad (28)$$

$$-\theta_n^2 - \nu_p \leq c_{np}, \forall n \in N, p \in P \quad (29)$$

$$\delta_q - \theta_n^1 - \pi_q \leq c_{nq}, \forall n \in N, q \in Q \quad (30)$$

$$\varepsilon_m - \delta_q - \gamma_m \leq c_{qm}, \forall q \in Q, m \in M \quad (31)$$

$$-\varepsilon_m \leq c_{ml}, \forall m \in M, l \in L \quad (32)$$

$$\beta_{mn} - \beta_m^1 + \mu_n \theta_n^1 + (1 - \mu_n) \theta_n^2 \leq 0, \forall m \in M, n \in N \quad (33)$$

$$\beta_{mn} - \beta_m^2 + w \cdot \mu_n \theta_n^1 + (1 - w \cdot \mu_n) \theta_n^2 \leq 0, \forall m \in M, n \in N \quad (34)$$

$$\alpha_k, \alpha_l, \gamma_m, \lambda_n, \nu_p, \pi_q \geq 0, \forall k \in K, l \in L, m \in M, n \in N, p \in P, q \in Q \quad (35)$$

$$\beta_{mn}, \beta_m^1, \beta_m^2, \theta_n^1, \theta_n^2, \delta_q, \varepsilon_m \text{ 无约束}, \forall m \in M, n \in N, q \in Q \quad (36)$$

因为求解主问题 MP 得到的解是模型的一个松弛解, 所以求解主问题 MP 能得到模型的一个下界 LB; 而求解对偶子问题 DSP 得到的目标值与  $\sum_{m \in M} f_m Y_m$  和  $\sum_{n \in N} f_n Y_n$  的总和即为模型的上界 UB。如果上下界收敛, 算法就迭代结束。

## 5. 随机算例实验与分析

### 5.1. 参数设置

由于目前动力电池回收产业未成规模体系, 缺少历史数据, 因此, 本文构造不同规模的 6 个算例, 在 300 km × 300 km 的区域内随机生成点坐标, 新能源汽车客户群 K 和梯次利用客户群 L 的回收数量在 [80, 120] 的区间随机生成并服从正态分布, 其余参数设置如表 1 所示, 各设施规模设置如表 2 所示。

Table 1. Other parameter settings table

表 1. 其余参数设置表

参数	设置
$U_m$	1000
$U_n$	2500
$U_q$	1500
$U_p$	1200
$f_m$	7,800,000



续表

$f_n$	20,750,000
$\mu_n$	0.5
$w$	0.8
$c_{ij}$	$d_{ij} \times t$ , $d_{ij}$ 为两点间距离, $t = 0.44$ , 为每单位配送成本

Table 2. Example scale setting table

表 2. 算例规模设置表

算例	$m$	$n$	$q$	$p$	$k$	$l$
Instance-1	2	2	2	2	6	3
Instance-2	3	2	2	2	8	4
Instance-3	4	3	2	2	10	5
Instance-4	5	3	2	2	12	6
Instance-5	6	4	2	2	16	8
Instance-6	8	4	2	2	20	8

## 5.2. 算例结果

本文使用 python 调用商业求解器 Gurobi 编写 Benders 分解算法求解, 测试平台为 AMD R7-5800H 处理器和 16GB 内存的笔记本电脑, 各算例测试结果如表 3 所示, 可知迭代时间虽然增加但总体较短, 并且 GAP 接近 0 且迭代次数较少, 而且随着算例规模的增大, 迭代次数增加不多, 另外如图 3 所示, 迭代至第 5 次左右, 不同规模算例的上下界差距都显著缩小, 收敛速度较快, 因此, 通过 Benders 分解算法求解本模型较稳定且求解效率较高, 效果良好。

Table 3. Benders example results

表 3. Benders 算例结果

算例	时间(ms)	迭代次数	GAP	上界	下界(obj)
Instance-1	463	6	0.00%	36482560	36481473
Instance-2	476	4	0.00%	36442633	36442633
Instance-3	560	12	0.00%	36524817	36524817
Instance-4	605	10	0.00%	36562360	36562360
Instance-5	1092	17	0.00%	44393725	44393725
Instance-6	2039	21	0.00%	44433361	44433361

## 5.3. 决策结果分析

以算例 6 为例, 选址和流量分配结果以及所对应的目标函数值如表 4 所示, 可知, 处理中心和集成中心的建设数量与两类客户的总回收数量及设施容量有关, 从 4 个处理中心备选点和 8 个集成中心备选点中选取 1 个处理中心和 3 个集成中心即可满足该算例的全部动力电池回收需求, 且每个集成中心负责存放的动力电池数量较均衡。其中, 以总成本最小为优化目标, 求解得到集成中心 5 负责梯次利用电池的出售, 且由于容量限制, 新能源汽车客户 13 由两个集成中心服务。为了进一步分析决策结果的合理性, 对该算例中的所有客户和设施布局进行可视化处理, 如图 4 所示。然后通过求解模型, 得到集成中心的

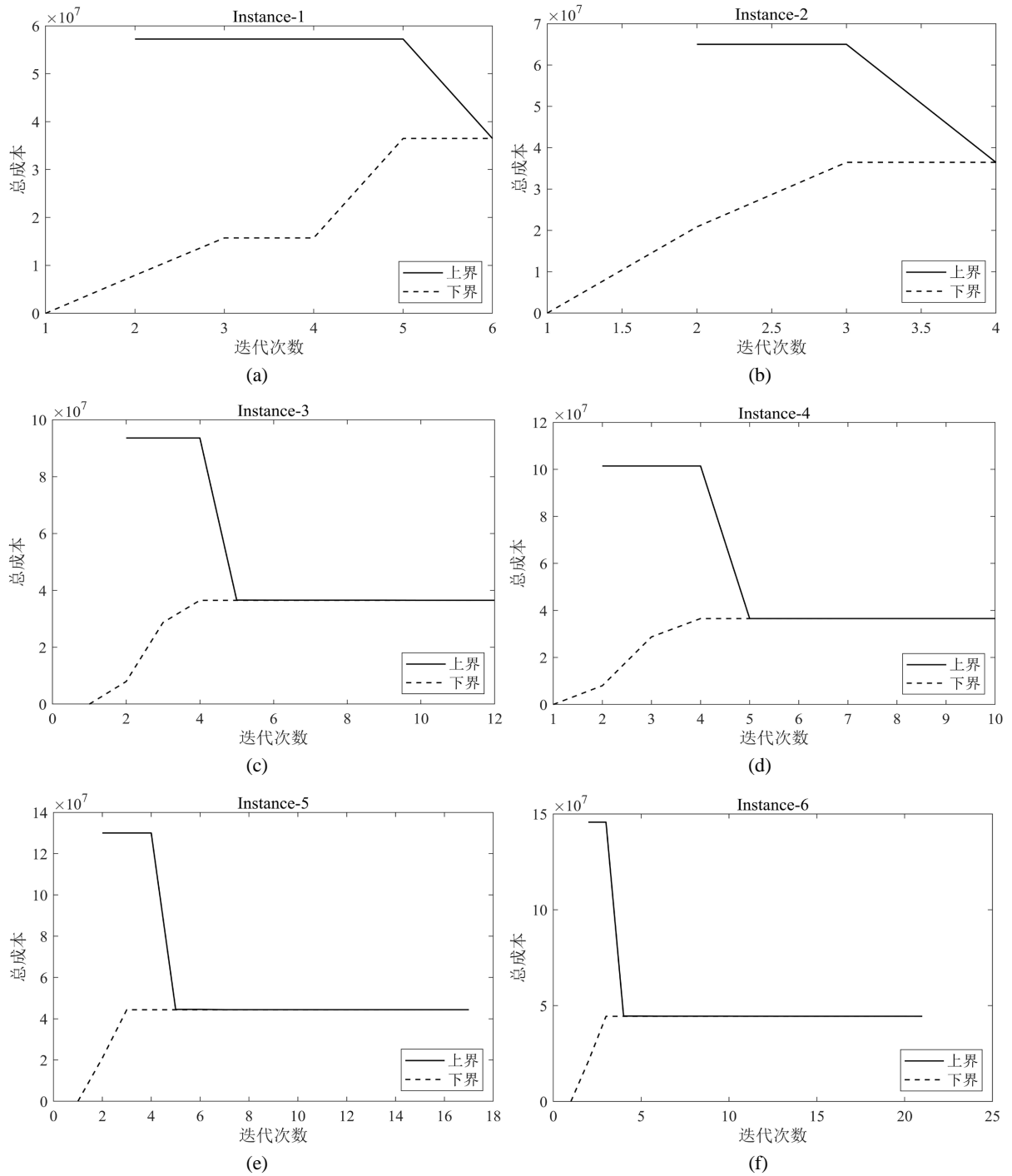
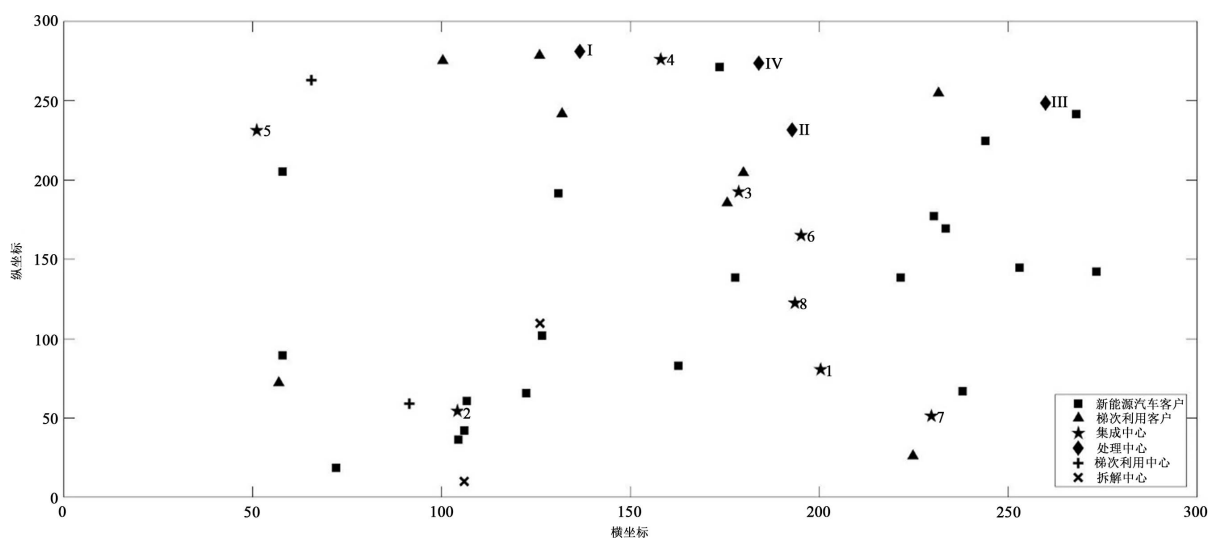


Figure 3. Solve iterative graphs for each example  
图 3. 各算例求解迭代图

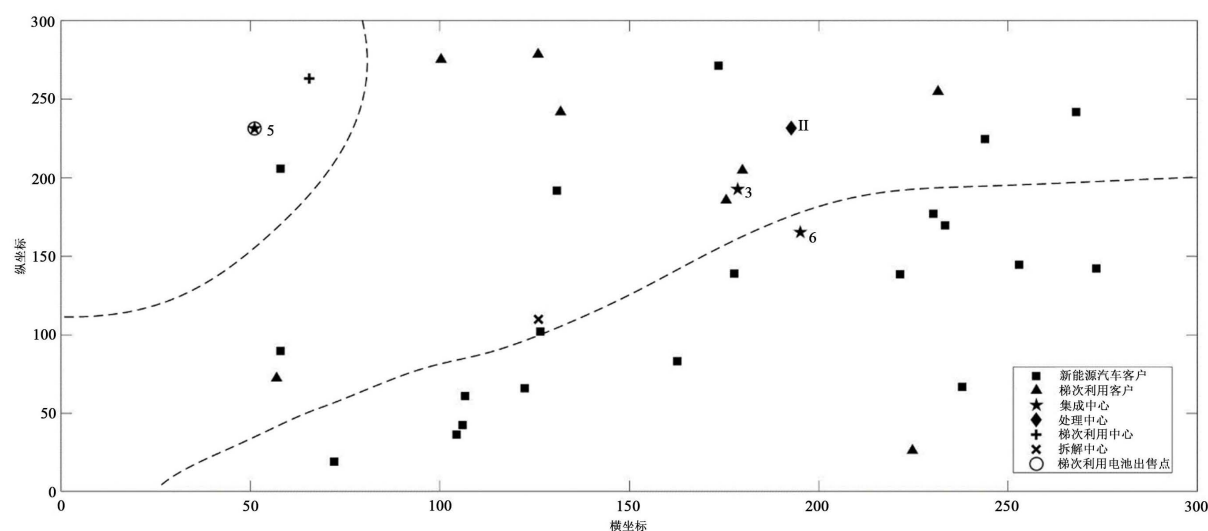
选址位置和服务关系, 以及其他参与运输的设施位置, 如图 5 所示, 所有客户的退役动力电池都被某个集成中心回收了, 且为了降低运输成本, 选取了靠近两类客户群和处理中心的集成中心 3 和 6, 而考虑到梯次利用中心与集成中心之间的运输成本, 选取了靠近梯次利用中心的集成中心 5 作为可梯次利用电池的出售点。

**Table 4.** Specific decision results table of example 6  
**表 4.** 算例 6 具体决策结果表

处理中心 编号	集成中心 编号	梯次利用 电池出售点	新能源汽车客户编号	梯次利用 客户编号	集成中心实 际总容量 (吨)	总成本 (元)
	3		2, 3, 13, 15, 18, 20	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8	1000	
2	5	*	6		915.9	44,433,361
	6		1, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19	6	964.6	



**Figure 4.** Customer and facility candidate location map  
**图 4.** 客户和设施备选点分布图



**Figure 5.** Customer and facility map after decision  
**图 5.** 决策后的客户和设施分布图

## 6. 结论

在“双碳”背景下, 针对动力电池回收再利用网络规划问题, 本文考虑了新能源动力电池的回收及梯次利用电池的回收和销售, 构成了完整供应链循环, 以包含选址固定成本、运输成本和碳排放成本在内的总成本最小为目标, 建立了考虑梯次利用的动力电池回收供应链网络模型, 并采用 Benders 分解算法求解该混合整数规划数学模型。然后, 选取一定区域随机生成不同规模的 6 个算例进行仿真实验, 验证了模型和方法的有效性, 为新能源汽车企业进行动力电池回收供应链网络规划提供决策支持。未来研究可以进一步考虑多周期或者库存因素拓展模型。

## 参考文献

- [1] 何珺. 2022 年我国汽车产销小幅增长商用车整体需求放缓[N]. 机电商报, 2023-02-13(A05). <https://doi.org/10.28408/n.cnki.njdsb.2023.000051>
- [2] 周维, 陈正, 黄鹏, 等. 基于老化仿真的电动汽车新型双源电池系统全生命周期成本研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(8): 1-10. <https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.08.001>
- [3] 卢超, 赵梦园, 陶杰, 等. 考虑需求和质量双重风险的动力电池回收定价策略和协调机制研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(4):195-203.
- [4] Liang, X., Yao, B., Ye, M., et al. (2021) Decision Analysis of Spent Power Battery Recovery Mode under Hybrid Dual-Channel Collection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **647**, Article ID: 012094. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/647/1/012094>
- [5] 姚海琳, 王昶, 黄健柏. EPR 下我国新能源汽车动力电池回收利用模式研究[J]. 科技管理研究, 2015, 35(18): 84-89.
- [6] 董庆银, 谭全银, 郝硕硕, 李金惠, 刘嘉辰. 北京市新能源汽车动力电池回收模式及经济性分析[J]. 科技管理研究, 2020, 40(20): 219-225.
- [7] Liu, C., Lin, J., Cao, H., et al. (2019) Recycling of Spent Lithium-Ion Batteries in View of Lithium Recovery: A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*, **228**, 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.304>
- [8] 李建林, 李雅欣, 吕超, 赵伟, 周京华. 退役动力电池梯次利用关键技术及现状分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 172-183.
- [9] 颜宁, 李相俊, 钟瑶, 马少华. 基于静动态一致性的退役动力电池模组阶梯式筛选方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220824.1402.008.html>, 2022-11-09.
- [10] 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/OL]. 系统工程, 2022: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1115.n.20220824.1703.008.html>, 2022-11-09.
- [11] 伊辉勇, 刘佳. 碳交易政策下动力电池闭环供应链定价决策[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2022: 1-18. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220517.1717.035.html>, 2022-11-09.
- [12] 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/OL]. 中国管理科学, 2022: 1-12. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0956>, 2022-11-09.
- [13] Yu, H., Dai, H., Tian, G., et al. (2020) Big-Data-Based Power Battery Recycling for New Energy Vehicles: Information Sharing Platform and Intelligent Transportation Optimization. *IEEE Access*, **8**, 99605-99623. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998178>
- [14] Guan, Q. and Yang, Y. (2020) Reverse Logistics Network Design Model for Used Power Battery under the Third-Party Recovery Mode. 2020 16th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS), Guangxi, 27-30 November 2020, 293-297. <https://doi.org/10.1109/CIS52066.2020.00069>
- [15] 杨玉香, 管倩. 双渠道动力电池回收模式下可持续逆向物流网络优化模型[J/OL]. 计算机集成制造系统, 2022: 1-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220411.1055.022.html>, 2022-11-09.
- [16] 刘娟娟, 郭炎可. 考虑不确定性的电动汽车动力电池逆向物流网络设计[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(2): 96-102. <https://doi.org/10.13340/j.jsmu.2021.02.016>
- [17] 包菊芳, 姜盛. 考虑风险损失的退役汽车动力电池逆向回收物流网络设计[J]. 物流技术, 2023, 42(1): 74-77+94.