

回收质量与价格不确定下城市动力电池回收网络优化研究

马成林, 雷湘豫*, 张琳, 高续瑞, 韩宇坤

东北林业大学土木与交通学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年4月22日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月27日

摘要

为了提升新能源汽车动力电池回收利用效率, 完善城市动力电池回收网络。考虑回收质量与价格不确定性, 以及政府补贴、“碳减排”影响, 引入模糊参数, 建立多节点、多周期不确定型动力电池回收网络选址模型。通过导入三角模糊数, 将此模型转化为清晰等价类, 最后以哈尔滨市动力电池回收网络优化为研究背景进行实例分析, 采用多目标线性加权规划和编程进行计算求解, 得出不确定条件下的优化结果, 并根据结果绘制出哈尔滨动力电池回收网络示意图及地理分布。结论得出在回收质量和回收价格不确定的条件下, 得到动力电池回收网络优化方法最优方案, 提高废旧电池回收率和回收质量的同时, 避免资源浪费及环境污染。并通过Pareto深度学习可以确定动力电池回收网络经济成本与环境成本合理权值。

关键词

动力电池回收网络, 多目标, 不确定性

Research on Optimization of Urban Power Battery Recycling Networks Based on Uncertain Recycling Quality and Price

Chenglin Ma, Xiangyu Lei*, Lin Zhang, Xurui Gao, Yukun Han

School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Apr. 22nd, 2025; accepted: May 14th, 2025; published: May 27th, 2025

Abstract

In order to improve the recycling efficiency of new energy vehicle power battery, the urban power

*通讯作者。

文章引用: 马成林, 雷湘豫, 张琳, 高续瑞, 韩宇坤. 回收质量与价格不确定下城市动力电池回收网络优化研究[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(3): 653-667. DOI: 10.12677/mse.2025.143075

battery recycling network is improved. Considering the uncertainty of recycling quality and price, as well as the influence of government subsidies and carbon emission reduction, a multi-node, multi-period uncertain power battery recycling network location model was established with fuzzy parameters. By importing triangular fuzzy numbers, this model was transformed into clear equivalence class. Finally, the optimization of Harbin power battery recovery network was analyzed as the research background, and the optimization results under uncertain conditions are obtained by using multi-objective linear weighted planning and programming. According to the results, it was shown that the schematic diagram and geographical distribution of Harbin power battery recovery network. The results show that under uncertain conditions of recycling quality and price, the optimal solution for optimizing the power battery recycling network can be obtained, which can improve the recycling rate and quality of waste batteries while avoiding resource waste and environmental pollution. And Pareto deep learning is used to determine the reasonable weights of the economic and environmental costs of power battery recycling network.

Keywords

Power Battery Recycling Network, Multi-Objective, Uncertainty

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

近年来,我国新能源汽车行业飞速发展,中国汽车工程学会预测,2025年全国新能源汽车保有量约为5000万~8000万辆,2030年将会上升至0.8亿~1亿辆。在市场拉动与政策驱动下,新能源汽车应用普及越来越广泛,同时带来废旧动力电池回收利用的问题。新能源汽车的使用寿命为4~6年,动力电池使用寿命为5~10年,当新能源汽车动力电池剩余容量降低至80%以下时,需要进行回收利用或拆解。废旧动力电池回收不当不仅浪费资源,而且不利于生态环保。由于动力电池回收网络的结构混乱,各回收环节监管不力,我国废旧动力电池整体回收率与回收质量远低于日本、美国等发达国家。利用废弃动力电池不但对环保具有意义,而且有着很大的经济价值,动力电池利用后的两种渠道是梯次利用和拆解回收,充分发挥这二种渠道的相互促进关系才能合理提升效率。根据调研结果与测算显示,在物理回收废旧三元电池以及磷酸铁锂电池的收益分别为16,728元/吨和7703元/吨,随着梯次利用技术的进一步发展,其经济价值也会不断增加,在政策的不断完善之下,预计2020~2030年动力电池累计回收空间将达1305亿元[1]-[3]。

动力电池理论基础与回收模式创新方面的研究成果主要有:一是关于动力电池回收模式研究。研究以电池制造企业为主体的多方联合运营物流模式与框架,提出动力电池的逆向物流链结构与运营模式[1]-[4]。二是关于动力电池回收合作机制研究。注重实现符合可持续性发展的多目标最优问题,从供给侧角度探讨了动力电池回收的合作机制,结果表明动态奖惩机制有助于促进多方参与到动力电池回收网络建设[5]-[7]。三是动力电池回收物流网络选址研究。研究动力电池逆向物流网络节点设计,并利用算法确定区域节点位置、实现运输量优化计算,并以实例验证有效性[8]-[10]。2009年,Melo等[8]提出了设施选址决策在供应链网络的战略设计中起着至关重要作用的概念。首次解决了在何处定位或安置新网点以优化至少一个给定目标的问题。2017年,李明[9]在研究物流配送中心选址问题中,对一般的线性规划问题进行改进,建立非线性混合0-1规划模型,运用LINGO求解,在获得最优成本的同时也确定了建设物流

中心的数量。2018年,贾月恬[10]在研究电动汽车的充电站选址中使用了多目标规划模型,其研究的是动态网络,区别于静态模型,研究在建立模型时将目标变成了两个,又加入时间因素使得模型具有记忆功能,最后运用遗传算法进行求解。然而由于市场的变动以及消费者的主观能动性不一,实际回收过程中会出现诸多不确定性因素,在已有研究基础上,为使模型更具备实际意义,需要考虑多目标与不确定性,包括不确定环境下多产品、多时间、多梯队容量的闭环供应链网络设计、回收质量不确定和成本最低情况下建模、考虑了财务、收款风险以及不确定性类型下使用多种风险度量模型等[11][12]。

目前国内具有完善体系的动力电池回收网络示范城市较少,通过对我国动力电池网络进行研究,将新能源汽车中生产成本较高的动力电池进行回收、拆解、利用,既对我国新能源汽车产业有极大的积极作用,也对我国促进环境保护、实现“双碳”目标产生积极影响。目前,我国废旧动力电池回收缺乏规范性,废旧电池难以得到科学合理的回收处理。为避免资源浪费及环境污染,提高废旧电池回收率和回收质量,有必要对我国动力电池回收网络进行研究,构建考虑碳减排影响的动力电池逆向物流网络。

2. 不确定型动力电池回收网络模型

2.1. 问题描述

回收服务网点具有国家认证资质,并为退役电池收集、处理等过程提供必要支撑,其次建立区域性回收中心,依据回收电池型号、回收质量等不同,对网点收集的电池进行筛选、分类,同时建立处理中心,进而对回收电池综合利用、产品再制造、废弃处理[13]。形成完整的动力电池回收网络结构,如图1所示。

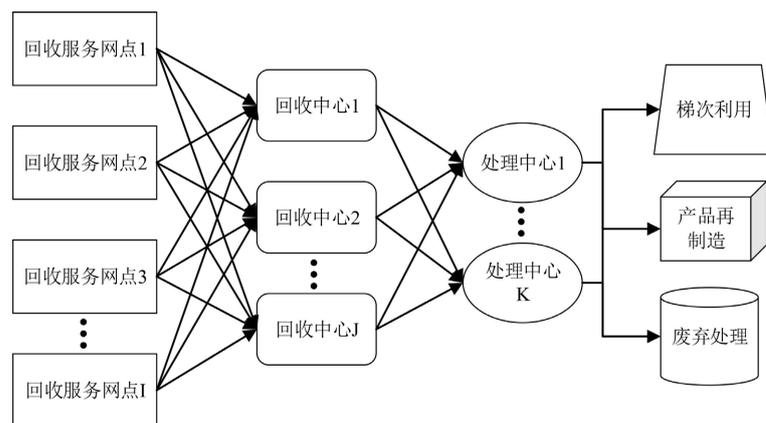


Figure 1. Power battery recycling network structure
图 1. 动力电池回收网络结构

我国具有一定综合实力和回收战略规划的企业组成产业联盟,在此基础上,首先利用现有回收服务网点,收集各局部区域内的退役动力电池;然后选址并建立各行政辖区内的回收中心,实现退役电池的筛选、分类、转运及存储;在已具国家资质的梯次利用企业前提下,扩建、增加电池处理中心,进而对回收电池进行梯次利用、产品再制造及废弃处理工作。回收质量由回收服务中心面对消费者回收时初步筛选阶段进行认定,电池在容量大于80%时回收是对资源的极大浪费,因此认为回收电池容量均小于80%,电池容量在40%至80%时,可进行产品再制造、二次利用,电池容量小于40%时,适宜拆解[11]-[13]。

由于市场的变动以及消费者的主观能动性不一,实际回收过程中会出现诸多不确定性因素,如各回收服务网点回收电池数量的不确定性、回收电池质量的不确定性、回收过程中物流成本的不确定性以及

回收电池处理方法的不确定性等等，其不确定性对整个回收网络带来正/负反馈，影响整个供应链的成本计算。其中，对于回收电池质量的不确定性，针对不同的质量等级的废旧动力电池会有不同的处理方式。而回收价格受市场影响发生浮动，不确定性较为显著，且对模型成本影响很大。

本文构建的不确定型网络模型中，回收电池质量的不同直接影响预期收益，因此假设回收服务中心 i 回收电池的电池容量在 40%至 80%之间的比率为模糊变量 $\tilde{\theta}_{i1}$ ，回收价格为 \tilde{H}_1 ；则回收服务中心 i 回收电池的电池容量在 40%以下的比率为 $\tilde{\theta}_{i2}$ ，回收价格为 \tilde{H}_2 。

2.2. 模型假设

基于图 1，为了简化模型，对此回收过程作出以下假设：

- 1) 认为此回收网络为单周期，并以单产品形式流通，单位回收与处理价格已知固定，每个回收服务网点回收的电池数目为已知量。
- 2) 备选的回收中心、处理中心的位置和数量是已知条件，其投资和运营成本是已知数额，其回收、处理能力均有限制。
- 3) 回收服务网点、回收中心及处理中心之间的单位运输成本已知，运输距离均按地图软件中车辆驾驶最短距离来算，并假设为单程运输。
- 4) 各区域内动力电池回收量为已知量。
- 5) 政府对各环节的单位补贴为已知量，且同一环节内单位补贴金额相同。
- 6) 本文只考虑运输过程中碳排放对环境的影响，且碳排放成本只与运输距离和运输量有关，回收处理过程中的碳排放影响暂不考虑。

2.3. 参数及变量

本文在建模中所涉及到的所有变量符号的具体含义描述如表 1 所示。

Table 1. Explanation of symbols for the power battery recycling network model

表 1. 动力电池回收网络模型符号说明

符号	含义
I	表示所有回收服务网点的集合， $I \in \{1, 2, \dots, I\}$
J	表示所有回收中心的集合， $J \in \{1, 2, \dots, J\}$
K	表示所有处理中心的集合， $K \in \{1, 2, \dots, K\}$
x_{ij}	表示回收服务网点 i 运输到回收中心 j 的电池量
α_{ij}	0~1 变量，表示回收服务网点 i 是否向回收中心 j 运输电池，是为 1，否为 0
y_{jk}	表示回收中心 j 运输到处理中心 k 的电池量
β_{jk}	0~1 变量，表示回收中心 j 是否向处理中心 k 运输电池，是为 1，否为 0
C_{ij}	表示回收服务网点 i 到回收中心 j 的单位运输量、单位距离运输费用
D_{ij}	表示回收服务网点 i 运输到回收中心 j 的运输距离
E_{jk}	表示回收中心 j 到处理中心 k 单位运输量、单位距离的运输费用
F_{jk}	表示回收中心 j 到处理中心 k 的运输距离
H_1	表示回收服务网点回收电池容量在 40%至 80%之间的价格
H_2	表示回收服务网点回收电池容量小于 40%的价格

续表

X_i	表示回收服务网点 i 回收的电池量
L_j	表示回收中心 j 的运营成本
M_j	表示回收中心 j 的建设成本
γ_j	0~1 变量, 表示是否在回收中心备选点 j 处建立回收中心, 是为 1, 否为 0
N_j	表示回收中心 j 的回收能力
O_k	表示处理中心 k 的运营成本
P_k	表示处理中心 k 的建设成本
δ_k	0~1 变量, 表示是否在处理中心备选点 k 处建立处理中心, 是为 1, 否为 0
Q_k	表示处理中心 k 的处理能力
r_i	表示政府对回收服务网点 i 的单位补贴金额
s_j	表示政府对回收中心 j 的单位补贴金额
t_k	表示政府对处理中心 k 的单位补贴金额
S	表示回收中心的最大建设数量
T	表示处理中心的最大建设数量
U	表示车辆单位运输距离、单位运输量的碳排放成本
θ_{i1}	表示回收服务中心 i 回收电池的电池容量在 40%至 80%之间的比率
θ_{i2}	表示回收服务中心 i 回收电池的电池容量在 40%以下的比率
确定型建设和运营成本	Z_1
环境成本	Z_2
不确定型建设和运营成本	Z_3

2.4. 模型建立

1) 目标函数

① 建设和运营成本最小

首先考虑动力电池回收网络以建设和运营成本最小为优化目标的模型, 具体包括建设成本、运输成本及运营成本, 并考虑政府补贴, 具体如公式(1)所示。

$$\begin{aligned}
 \min & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (M_j + L_j x_{ij}) \gamma_j + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (P_k + O_k y_{jk}) \delta_k + \sum_{i \in I} G_i X_i \\
 & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \gamma_j x_{ij} \alpha_{ij} C_{ij} D_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \delta_k y_{jk} \beta_{jk} E_{jk} F_{jk} \\
 & + \sum_{i \in I} (\tilde{H}_1 \tilde{\theta}_{i1} + \tilde{H}_2 \tilde{\theta}_{i2}) X_i - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} s_j \gamma_j x_{ij} \alpha_{ij} \\
 & - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_k \delta_k y_{jk} \beta_{jk} - \sum_{i \in I} r_i X_i
 \end{aligned} \tag{1}$$

② 环境影响成本最小

其次考虑动力电池回收网络以环境影响成本最小为优化目标的模型, 具体受运输量, 运输距离以及车辆单位运输距离、单位运输量的碳排放成本, 具体如公式(2)所示。

$$\min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} U x_{ij} \alpha_{ij} \gamma_j D_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} U y_{jk} \beta_{jk} \delta_k F_{jk}$$

2) 约束条件

① 回收服务网点约束:

$$\sum_{j \in J} \alpha_{ij} x_{ij} \gamma_j = X_i, i = 1, 2, \dots, I \tag{3}$$

$$\sum_{j \in J} \alpha_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, I \tag{4}$$

$$\tilde{\theta}_{i1} + \tilde{\theta}_{i2} = 1 \tag{5}$$

约束公式(3)表示回收服务网点 i 向所有回收中心 j 输送的电池数量和为回收服务网点 i 回收的电池数量; 约束公式(4)限制一个回收服务点只能向一个回收中心输送电池; 约束公式(5)表示回收服务中心 i 回收电池的电池容量在 40%至 80%之间的比率与在 40%以下的比率之和为 1

② 回收中心约束:

$$\sum_{i \in I} \alpha_{ij} x_{ij} \gamma_j \leq N_j, j = 1, 2, \dots, J \tag{6}$$

$$\sum_{i \in I} \alpha_{ij} x_{ij} \gamma_j = \sum_{k \in K} \beta_{jk} y_{jk} \delta_k, j = 1, 2, \dots, J \tag{7}$$

$$\sum_{k \in K} \beta_{jk} = 1, j = 1, 2, \dots, J \tag{8}$$

$$\sum_{j \in J} \gamma_j \leq S \tag{9}$$

约束公式(6)表示回收中心 j 接收的电池数量不超过其自身回收能力; 约束公式(7)表示回收中心 j 接收的电池数量与其向所有处理中心输送的电池数量之和相等; 约束公式(8)限制一个回收中心只能向一个处理中心输送电池; 约束公式(9)限制回收中心建设数量不超过其最大建设数量。

③ 处理中心约束:

$$\sum_{j \in J} \beta_{jk} y_{jk} \delta_k \leq Q_k, k = 1, 2, \dots, K \tag{10}$$

$$\sum_{k \in K} \delta_k \leq T \tag{11}$$

约束公式(10)表示处理中心 k 接收的电池数量不超过其自身处理能力; 约束公式(11)限制处理中心建设数量不超过其最大建设数量。

④ 决策变量约束:

$$0 \leq x_{ij} \leq X_i, j = 1, 2, \dots, J \tag{12}$$

$$0 \leq y_{jk} \leq \sum_{i \in I} X_i, j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K \tag{13}$$

$$\alpha_{ij}, \beta_{jk} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K \tag{14}$$

$$\gamma_j, \delta_k \in \{0, 1\}, j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K \tag{15}$$

约束公式(12)、(13)表示决策变量 x_{ij} 、 y_{jk} 的取值范围; 约束公式(14)、(15)表示 0~1 变量 α_{ij} 、 β_{jk} 、 γ_j 及 δ_k 的取值范围。

3) 模糊机会约束规划模型

在不确定型回收网络模型中含有不确定模糊参数 $\tilde{\theta}_{i1}$ 、 $\tilde{\theta}_{i2}$ 、 \tilde{H}_1 、 \tilde{H}_2 , 本文采用模糊规划方法, 该模型一般公式如下:

$$\begin{cases} \min \tilde{f}(x, \sigma) \\ \text{s.t.} \\ \text{Pos}(f(x, \sigma) \leq \tilde{f}) \geq \chi \\ \text{Pos}(g_p(x, \sigma) \leq 0) \geq \omega_p \end{cases} \quad (16)$$

其中, x 为决策变量; σ 表示模糊变量; $\text{Pos}\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中事件成立的可能性; $p=1,2,\dots,q$; χ 表示目标函数的置信水平; ω_p 表示 $\text{pos}(g_p(x, \sigma) \leq 0) \geq \omega_p$ 的置信水平; $f(x, \sigma)$ 为目标函数; \tilde{f} 表示最优目标值。

将模型中含有模糊变量 $\tilde{\theta}_{i1}$ 、 $\tilde{\theta}_{i2}$ 、 \tilde{H}_1 、 \tilde{H}_2 的目标函数转化成如下模型:

$$\begin{aligned} & \text{Pos} \left\{ \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (M_j + L_j x_{ij}) \gamma_j + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (P_k + O_k y_{jk}) \delta_k \right. \\ & + \sum_{i \in I} G_i X_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \gamma_j x_{ij} \alpha_{ij} C_{ij} D_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \delta_k y_{jk} \beta_{jk} E_{jk} F_{jk} \\ & + \sum_{i \in I} (\tilde{H}_1 \tilde{\theta}_{i1} + \tilde{H}_2 \tilde{\theta}_{i2}) X_i - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} s_j \gamma_j x_{ij} \alpha_{ij} \\ & \left. - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_k \delta_k y_{jk} \beta_{jk} - \sum_{i \in I} r_i X_i \leq \tilde{f} \right\} \geq \chi \end{aligned} \quad (17)$$

4) 模糊模型清晰化处理

本文引入三角模糊数的一般形式。定义在实数域上的模糊数 $\tilde{a} = (a^l, a^m, a^u)$, 其中 $a^l \leq a^m \leq a^u$, 称 \tilde{a} 为三角模糊数, 隶属函数 $\mu(x)$, 则:

$$\begin{cases} \text{Pos}(\tilde{a} \leq Z) = \text{Pos}\{\mu_{\tilde{a}} / x \in R, Z \geq x\} \\ \text{Pos}(\tilde{a} \geq Z) = \text{Pos}\{\mu_{\tilde{a}} / x \in R, Z \leq x\} \\ \text{Pos}(\tilde{a} = Z) = \mu_{\tilde{a}}(Z) \end{cases} \quad (18)$$

假设有 $\tilde{a} = (a^l, a^m, a^u)$, 对于任意置信水平 $\chi (0 \leq \chi \leq 1)$, 当且仅当 $(1-\chi)a^l + \chi a^m \leq Z$ 时, 有 $\text{Pos}(\tilde{a} \leq Z) \geq \chi$ 成立; 对于任意置信水平 $\omega (0 \leq \omega \leq 1)$, 当且仅当 $\begin{cases} (1-\omega)a^l + \omega a^m \geq Z \\ (1-\omega)a^u + \omega a^m \leq Z \end{cases}$ 时, 有 $\text{Pos}(\tilde{a} = Z) \geq \omega$ 成立。

将在动力电池回收网络模型中模糊变量用三角模糊数 $\tilde{a} = (a^l, a^m, a^u)$ 来表示, 表示为 $(\theta_{i1}^l, \theta_{i1}^m, \theta_{i1}^u)$, $(\theta_{i2}^l, \theta_{i2}^m, \theta_{i2}^u)$, (H_1^l, H_1^m, H_1^u) , (H_2^l, H_2^m, H_2^u) 。由于对于任意置信水平 $\chi (0 \leq \chi \leq 1)$, 当且仅当 $(1-\chi)a^l + \chi a^m \leq Z$ 时, 有 $\text{Pos}(\tilde{a} \leq Z) \geq \chi$ 成立, 因此可将目标函数中含有模糊变量的模糊机会约束规划模型转化为清晰等价类:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (M_j + L_j x_{ij}) \gamma_j + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} (P_k + O_k y_{jk}) \delta_k + \sum_{i \in I} G_i X_i \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \gamma_j x_{ij} \alpha_{ij} C_{ij} D_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \delta_k y_{jk} \beta_{jk} E_{jk} F_{jk} \\ & + \sum_{i \in I} [(1-\chi)H_1^l + \chi H_1^m] [(1-\chi)\theta_{i1}^l + \chi \theta_{i1}^m] X_i \\ & + \sum_{i \in I} [(1-\chi)H_2^l + \chi H_2^m] [(1-\chi)\theta_{i2}^l + \chi \theta_{i2}^m] X_i \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} s_j \gamma_j x_{ij} \alpha_{ij} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_k \delta_k y_{jk} \beta_{jk} - \sum_{i \in I} r_i X_i \end{aligned} \quad (19)$$

将(15)约束改为如下:

$$\theta_{i1}^l + \theta_{i2}^l = 1 \quad (20)$$

$$\theta_{i1}^m + \theta_{i2}^m = 1 \quad (21)$$

2.5. 模型求解

多目标 Pareto 最优解: 本文采用线性加权规划法求解多目标模型。求出目标函数的下界为 Z_1^{\min} 、 Z_2^{\min} 、 Z_3^{\min} ，计算得出，各目标函数上界记为 Z_1^{\max} 、 Z_2^{\max} 、 Z_3^{\max} 。为衡量每个目标的完成情况，构造相对偏差变量 d_1 、 d_2 、 d_3 ，并进行归一化处理:

$$d_1 = \frac{Z_1 - Z_1^{\min}}{Z_1^{\max} - Z_1^{\min}} \quad (22)$$

$$d_2 = \frac{Z_2 - Z_2^{\min}}{Z_2^{\max} - Z_2^{\min}} \quad (23)$$

$$d_3 = \frac{Z_3 - Z_3^{\min}}{Z_3^{\max} - Z_3^{\min}} \quad (24)$$

其中 $0 \leq d_1 \leq 1$ ， $0 \leq d_2 \leq 1$ ， $0 \leq d_3 \leq 1$ 。

设立各偏差变量所对应的权值为 w_1 ， w_2 ， w_3 ，取值范围均在 $[0, 1]$ 之间，满足 $w_1 + w_2 = 1$ ，构造各目标函数与其最优值之间的偏差函数:

$$Z' = w_1 d_1 + w_2 d_2 \quad (25)$$

$$Z'' = w_3 d_3 + w_2 d_2 \quad (26)$$

为得到 Pareto 最优解，设定步长为 0.1，在满足条件下使 w_1 ， w_2 进行数值变动，求解出 11 种权值组合下的结果，依据最优结果，确定权值，并用 LINGO18.0 完成编程代码。

3. 实例分析

为验证上述模型的有效性和可行性，以哈尔滨市动力电池回收网络优化为研究背景，进行算例分析，求解上述规划模型。

3.1. 实例描述

1) 哈尔滨市动力电池回收服务网点备选点。本文拟选取哈尔滨市具有四个及以上回收网点的汽车生产企业作为产业联盟成员，共 7 家企业，对应 26 个回收服务网点，如图 2 所示。

2) 哈尔滨市动力电池回收中心备选点。电池回收中心选址要求所建位置符合城乡总体规划建设、主体功能区和安全生产、污染防治，综合考虑 26 个回收服务网点的地理位置、周边环境，将已具备回收资质的资源再生回收网点为基础，建设为回收中心，选取 6 个回收中心备选点。

3) 哈尔滨市动力电池处理中心备选点。废旧动力电池处理中心是整个回收网络中的关键节点，直接影响经济收益、资源利用及环境保护，因此对处理中心选址应考虑地理环境因素和技术能力因素两方面，对已有资质和能力的企业进行扩建或新建，选取 2 个处理中心备选点。

4) 节点间距离及运输成本。针对各节点间距离计算通过谷歌地图软件驾车最短距离来确定，其中回收中心与处理中心间距离如表 2 所示。

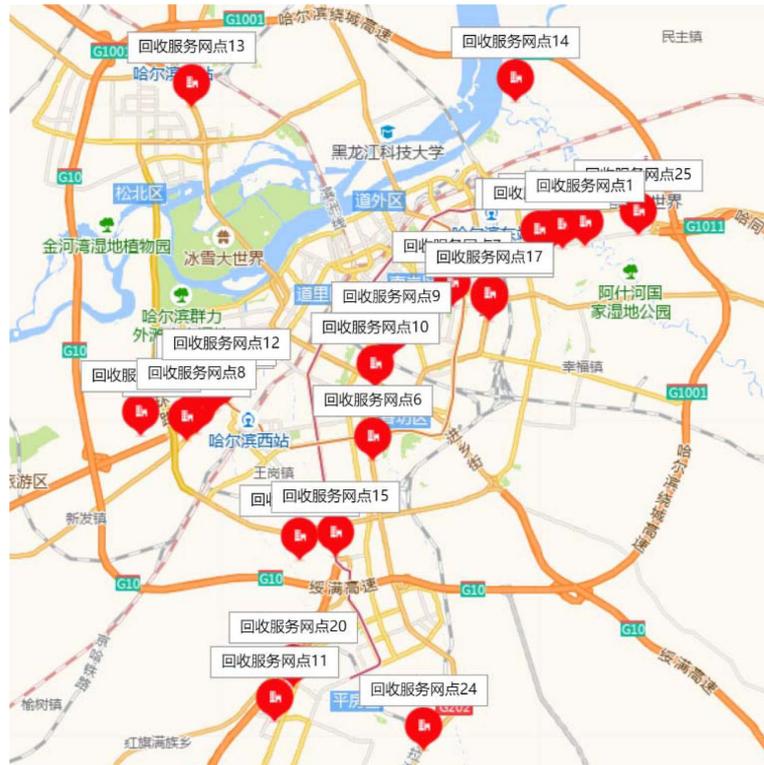


Figure 2. Distribution map of recycling service outlets
图 2. 回收服务网点分布图

Table 2. Distance between recycling center and processing center (unit: km)
表 2. 回收中心与处理中心间距离(单位: km)

处理中心	回收中心					
	1	2	3	4	5	6
1	28	23	34	7.8	21	39
2	13	26	24	21	17	30

根据中国公路网统计, 各个节点之间的运输成本为 0.33 元/吨公里。

5) 各项成本及其他参数描述。为方便计算, 本文认为同一层级节点同项成本费用相同, 根据数据调查确定各节点各项成本如表 3 所示。

Table 3. Construction cost, operating cost, and recovery/processing capacity of each node
表 3. 各节点建设成本、运营成本及回收/处理能力

参数	回收服务网点	回收中心	处理中心
建设成本(万元)	#	300	800
运营成本(万元/吨)	0.3	0.5	1
回收/处理能力(吨)	#	500	1000
政府补贴金额(万元/吨)	0.03	0.05	0.1

本文参考已有文献中确定电池回收量的方法，认为各辖区的新能源汽车报废量占哈尔滨市新能源汽车报废总量的比例与汽车 4S 店比例一致，考虑实际情况将 4S 店数量为 0 由 0.1 代替。

假设各辖区内各回收服务网点的回收电池量为满足均匀分布的随机数，由 MATLAB 生成随机数并计算结果如表 4 所示。

Table 4. Battery recycling volume at recycling service outlets
表 4. 回收服务网点电池回收量

序号	电池回收量(吨)	序号	电池回收量(吨)	序号	电池回收量(吨)
1	9.47	10	63.22	19	34.64
2	10.60	11	41.19	20	62.02
3	0.43	12	91.13	21	54.12
4	1.36	13	40.23	22	87.73
5	2.39	14	28.27	23	140.73
6	15.66	15	82.03	24	91.00
7	3.99	16	122.31	25	221.35
8	39.91	17	116.67	26	203.31
9	95.15	18	141.09		

根据中国技术研究院 2018 年发布的《动力电池回收利用行业报告》，动力电池回收平均价格约为 1.5 万元/吨，本文假设电池容量在 40%至 80%之间的回收电池价格为 1.7 万元/吨，电池容量在 40%以下的回收电池价格为 1.3 万元/吨。碳排放成本按目前二氧化碳的市场价格 470 元/吨计算，普通货车碳排放量约为 0.68 千克/吨公里，计算可得车辆单位运输距离、单位运输量的碳排放成本为 319.6 元/吨公里。

6) 模糊参数描述。据市场调查统计，电池容量在 40%至 80%之间的回收电池约占 70%，电池容量在 40%以下的回收电池约占 30%，取模糊隶属度映射在模糊中心数的 10%以内，本文设置置信水平为 0.85，模糊数表示如表 5 所示。

Table 5. Fuzzy number representation
表 5. 模糊数表示

指标	$\tilde{\theta}_{i1}$	$\tilde{\theta}_{i2}$	\tilde{H}_1	\tilde{H}_2
参数值	(0.63, 0.70, 0.77)	(0.27, 0.30, 0.33)	(1.53, 1.7, 1.87)	(1.17, 1.3, 1.43)

3.2. 实例求解

多目标 Pareto 最优解：已求出目标函数的下界为 $Z_1^{\min} = 46561.700$ 、 $Z_2^{\min} = 1319.787$ 、 $Z_3^{\min} = 46759.114$ ，经计算，各目标函数上界记为 $Z_1^{\max} = 77463.39$ 、 $Z_2^{\max} = 3360.709$ 、 $Z_3^{\max} = 77661.314$ 。

3.3. 模型结果

计算不确定条件下的结果，如表 6 所示。

Table 6. Cost calculation results under different weight combinations under uncertain conditions
表 6. 不确定条件下不同权值组合下成本计算结果

权值组合(w_3, w_2)	偏差函数 Z'' 最优值	Z_3	Z_2
(1, 0)	0.001186%	46758.11	1635.312
(0.9, 0.1)	1.891165%	46758.58	1705.717
(0.8, 0.2)	3.273644%	46758.83	1653.845
(0.7, 0.3)	3.644888%	46759.04	1567.762
(0.6, 0.4)	8.062798%	46759.11	1731.166
(0.5, 0.5)	7.89713%	46759.12	1642.135
(0.4, 0.6)	15.12615%	46759.31	1834.299
(0.3, 0.7)	14.01968%	46759.20	1728.543
(0.2, 0.8)	15.68349%	46759.23	1719.895
(0.1, 0.9)	18.0645%	46759.26	1729.433
(0, 1)	1.315994%	63981.84	1319.787

同理，在除去权值(0, 1)点处数据后，绘制散点图，如图 3 所示。

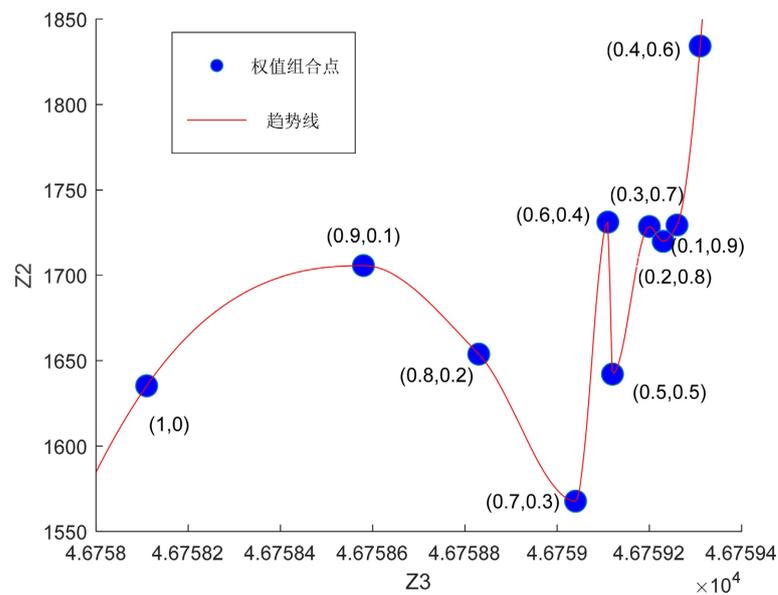


Figure 3. Scatter chart of costs under different weight combinations under uncertain conditions

图 3. 不确定条件下不同权值组合下成本散点图

从图 3 可以看出，不确定型模型求解结果的波动性更大，在权值点(1, 0)处经济成本 Z_3 取得最优值，在权值点(0.7, 0.3)处环境成本取得最优值。在权值点(0.7, 0.3)之前，经济成本增加，环境成本出现波动性变化，从(1, 0)至(0.7, 0.3)，只需付出 0.93 万元的经济成本，即可降环境成本 67.55 万元；而在权值点(0.7, 0.3)之后，经济成本与环境成本均比该点大，因此认为不确定型多目标函数在权值点(0.7, 0.3)处取得最优解。

3.4. 结果分析

根据不确定条件下最优值的结果，建设、运营成本最优值为 46759.04 万元，环境成本最优值为 1567.762 万元，回收中心选择建设 2、3、4、5，处理中心选择建设 1、2。本方案中的节点间流量分布如表 7、表 8 所示。

Table 7. Traffic between service outlets and recycling centers (unit: tons)

表 7. 收服务网点与回收中心间流量(单位: 吨)

回收服务网点	回收中心			
	2	3	4	5
1	0	0	9.47	0
2	0	0	10.60	0
3	0	0	0.43	0
4	0	0	1.36	0
5	0	0	2.39	0
6	0	0	15.66	0
7	0	0	0	3.99
8	39.91	0	0	0
9	0	0	95.15	0
10	0	0	63.22	0
11	0	0	0	41.19
12	91.13	0	0	0
13	0	0	40.23	0
14	0	0	0	28.27
15	0	82.03	0	0
16	0	0	0	122.31
17	0	116.67	0	0
18	0	0	141.09	0
19	0	34.64	0	0
20	0	62.02	0	0
21	0	0	0	54.12
22	0	87.73	0	0
23	140.73	0	0	0
24	0	91.00	0	0
25	0	0	0	221.35
26	203.31	0	0	0

Table 8. Flow between recycling center and processing center (unit: tons)
表 8. 回收中心与处理中心间流量(单位: 吨)

处理中心	回收中心			
	2	3	4	5
1	0	474.09	379.6	0
2	475.05	0	0	471.23

根据运行结果绘制优化后的哈尔滨市动力电池回收网络图, 并标注地图分布, 如图 4、图 5 所示。

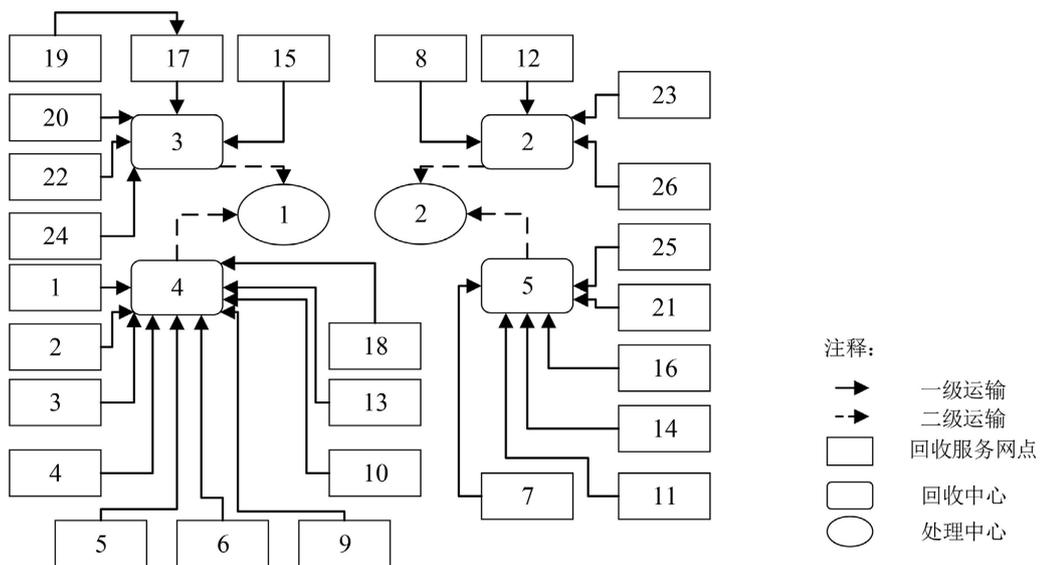


Figure 4. Network diagram of power battery recycling in Harbin under uncertain conditions
图 4. 不确定条件下哈尔滨市动力电池回收网络图

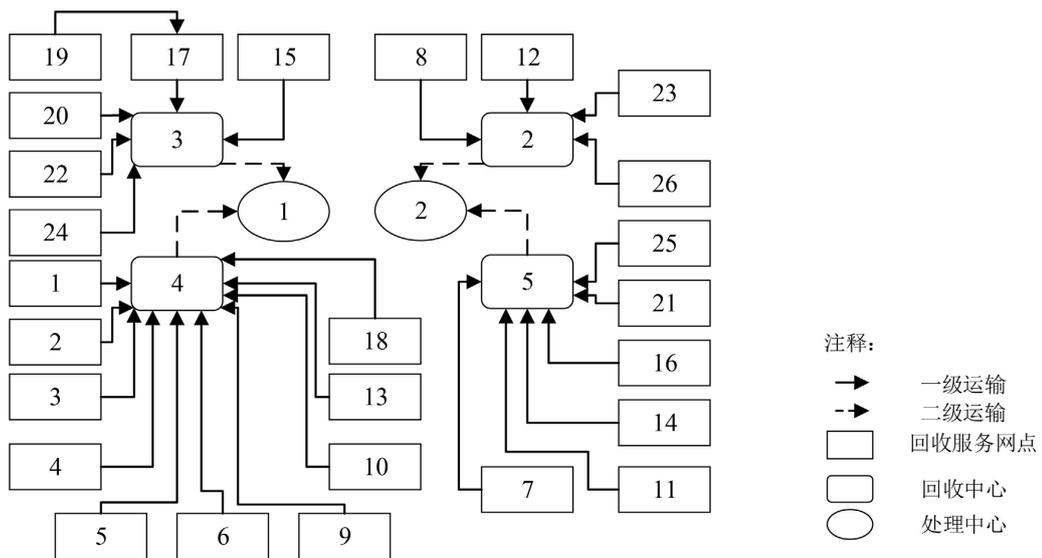


Figure 5. Distribution of power battery recycling network map in Harbin under uncertain conditions
图 5. 不确定条件下哈尔滨市动力电池回收网络地图分布

在图4与图5中,已明确表示出各个节点选址分布与运输指向关系,展示出哈尔滨市动力电池回收网络的优化结果,在此基础上提前做出布局规划工作,有助于新能源动力电池的回收效率和回收质量,并能更好地实现废旧电池的剩余价值,降低了环境的污染风险。

4. 结论

本文以我国动力电池回收问题研究为出发点,结合现存的回收的运作流程、回收网络现状以及国内外现存回收模式,设计出动力电池回收网络模型,以经济、环境两个维度为最优目标,考虑不确定性,分别建立不确定型的非线性多目标混合整数规划模型。在LINGO18.0软件中编程求解出最优解。由此得到以下结论:

1) 构建了我国新能源汽车动力电池回收网络模型,建立多目标数学模型,通过模型求解验证其有效性。在回收质量和回收价格不确定的条件下,动力电池回收网络优化方法得出最优方案的经济成本与环境成本,提高废旧电池回收率和回收质量的同时,避免资源浪费及环境污染。

2) 考虑环境成本的不确定条件下动力电池回收网络优化结果所产生的经济成本明显低于环境成本,即损失较小的经济效益,将带来更好的生态效益。通过哈尔滨实例测算,从“只考虑经济成本”到“经济与生态兼顾”,只需付出0.93万元的经济成本,即可降低环境成本67.55万元。

3) 不确定条件下动力电池回收网络模型在不同权值影响下优化结果的波动性较大,通过Pareto进行深度学习训练,可以找到多目标Pareto最优解。通过实例测算,哈尔滨市动力电池的回收网络多目标权值点为(0.7, 0.3)。

基金项目

黑龙江省自然科学基金项目: LH2023G002。

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目: 2572022BL02。

国家自然科学基金项目: 62176050。

大学生创新训练项目: 202310225625。

参考文献

- [1] 危浪, 王翠霞, 李雅琴. 新能源汽车动力电池回收利用政策影响效应的仿真研究[J/OL]. 安全与环境学报: 1-12. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2023.1792>, 2024-06-17.
- [2] Fleischmann, M., Krikke, H.R., Dekker, R. and Flapper, S.D.P. (2000) A Characterisation of Logistics Networks for Product Recovery. *Omega*, **28**, 653-666. [https://doi.org/10.1016/s0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/s0305-0483(00)00022-0)
- [3] Schultmann, F., Engels, B. and Rentz, O. (2003) Closed-Loop Supply Chains for Spent Batteries. *Interfaces*, **33**, 57-71. <https://doi.org/10.1287/inte.33.6.57.25183>
- [4] 赵乾, 李健, 崔宏祥, 等. 基于生产者责任延伸制的废旧电池回收模式研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(12): 194-198.
- [5] Li, Y., Zhou, W. and Huang, Y.H. (2012) The Idea of Establishment of New Energy Automotive Battery Recycling System. *Renewable Resources*, **1**, 28-30.
- [6] Han, X., Ji, T., Zhao, Z. and Zhang, H. (2015) Economic Evaluation of Batteries Planning in Energy Storage Power Stations for Load Shifting. *Renewable Energy*, **78**, 643-647. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.01.056>
- [7] 陈广华, 崇章. “双碳”背景下新能源汽车蓄电池回收利用的法治优化路径[J/OL]. 烟台大学学报(哲学社会科学版), 1-11. <https://doi.org/10.13951/j.cnki.issn1002-3194.2024.0315.08>, 2024-06-30.
- [8] Melo, M.T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2009) Facility Location and Supply Chain Management—A Review. *European Journal of Operational Research*, **196**, 401-412. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>
- [9] 李明, 刘航, 张晓建. 多物流配送中心的选址布局问题优化模型研究[J]. 重庆交通大学学报, 2017, 31(1): 97-102.
- [10] 贾月恬, 王德光, 钟妍. 电动汽车动态网络选址模型[J]. 经济研究导刊, 2018(24): 192-193.

-
- [11] Subulan, K., Baykasoğlu, A., Özsoydan, F.B., Taşan, A.S. and Selim, H. (2015) A Case-Oriented Approach to a Lead/acid Battery Closed-Loop Supply Chain Network Design under Risk and Uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*, **37**, 340-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.07.013>
- [12] 杨玉香, 管倩, 于艳娜, 等. 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]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(7): 2461-2473.
- [13] 韩宇坤, 马成林, 李春萍, 等. 黑龙江省木材加工企业可持续供应链优化研究[J]. 森林工程, 2021, 37(5): 137-144.