

考虑回收质量和风险值的动力电池逆向物流网络设计

任 鹏, 刘华琼

山东交通学院, 交通与物流工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年10月28日; 录用日期: 2024年11月24日; 发布日期: 2024年11月29日

摘 要

随着新能源汽车销售量和保有量的急剧上升, 作为新能源汽车中的重要零部件, 动力电池也得到了快速发展。在动力电池大量退役背景下, 考虑废旧动力电池运输、处理对周围居民的风险、回收处理数量不确定性等因素, 以逆向物流成本最小与居民风险最小为目标, 构建废旧动力电池逆向物流网络多目标规划模型。运用不确定规划理论引入回收质量的三角模糊数, 对模型进行确定性转化。引入决策者偏好系数, 采用加权理想点法将多目标模型转化为单目标模型进行求解, 通过Lingo18软件计算案例, 得到考虑不确定性的逆向物流网络设施的选址、数量以及设施间废旧动力电池流量分配方案, 验证模型的可靠性。

关键词

动力电池, 逆向物流, 模糊机会约束规划, 加权理想法

Design of Reverse Logistics Network for Power Battery Considering Recovery Quality and Risk Value

Peng Ren, Huaqiong Liu

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: Oct. 28th, 2024; accepted: Nov. 24th, 2024; published: Nov. 29th, 2024

Abstract

With the sharp rise in the sales and ownership of new energy vehicles, as an important part of new

energy vehicles, power batteries have also been rapidly developed. Under the background of a large number of decommissioning power batteries, a multi-objective planning model for the reverse logistics network of used power batteries was established with the objective of minimizing the cost of reverse logistics and the risk of residents, considering the risks of transportation and disposal of used power batteries to the surrounding residents and the uncertainties of the quantity of recycling and disposal. The triangular fuzzy number of recovery quality is introduced by the uncertain programming theory to transform the model deterministically. By introducing the decision-maker's preference coefficient, the weighted ideal point method was used to transform the multi-objective model into a single-objective model for solving the problem. The site selection and quantity of reverse logistics network facilities and the flow distribution scheme of used power batteries between facilities were obtained by calculating cases with Lingo18 software, and the reliability of the model was verified.

Keywords

Power Battery, Reverse Logistics, Fuzzy Chance Constrained Programming, Weighted Ideal Method

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

据中国汽车工业协会、乘联会、文献综述研究数据表明, 预计到 2025 年, 新能源动力电池退役量将达到 122.4 GWh, 而且新能源汽车动力电池属于第 9 类危险品, 能量密度大, 在回收、运输、检测、处置、梯次利用等环节均易发生自燃和爆炸等各类事故[1], 如果没有一个有效的逆向物流网络进行回收, 会对经济运行和公众健康带来威胁。

目前针对动力电池逆向物流研究主要集中在动力电池梯次利用、再生利用, 生产者责任延伸制度、经济型等单目标的逆向物流网络及回收模式。Sato 和 Nakata [2]基于系统动力学建立新能源汽车销售模型, 预测退役锂离子电池的数量, 并进一步研究回收动力电池得到贵金属比例。贾志杰[3]等采用 LCA 方法, 设定磷酸铁锂电池使用后直接报废和梯次利用两个场景, 对磷酸铁锂电池不同使用场景开展环境影响评价分析。确定设施的位置、数量以及设施间的废旧动力电池流量分配方案是网络设计的关键[4]。李玉文[5]从废旧动力电池经过维修可以被储能中心再生利用分析, 考虑废旧动力电池逆向物流网络中储能中心节点的设计, 利用启发算法对逆向物流网络区域库选址。丁艳和梁宝平[6]综合考虑物流网络节点到公司之间的因素建立位置布局模型, 提高了逆向物流网络质量。

由于经济环境、社会环境、自然环境等不确定因素的影响和逆向物流自身结构的复杂性, 使逆向物流网络常处于一个不确定的运营环境之中, 极大地影响逆向物流的运营情况。忽略不确定因素是不合理的[7]。考虑不确定性的逆向物流网络设计成为未来研究的热点问题[8]。并且现有研究只是将新能源动力电池看作普通的产品进行分析, 未进一步分析其作为危险品对居民带来的负效用风险。因此, 从居民风险角度研究具有理论和现实意义。基于此, 本文以新能源汽车动力电池逆向物流网络总成本最小和风险值最小为目标, 建立回收质量不确定因素的多目标逆向物流网络规划模型, 并基于不确定规划理论, 利用模糊机会约束规划引入三角函数处理不确定参数。引入决策者偏好系数, 采用加权理想点法将多目标模型转化为单目标模型进行求解, 通过数值算例验证模型和算法的可行性和有效性[9]。

2. 多目标规划模型

2.1. 问题描述

研究新能源汽车动力电池逆向物流网络, 回收流程如图 1 所示。废旧动力电池从回收地运至回收分类检测中心, 回收检测分类中心将电池进行质量检测。一部分可用容量处于 30%~70%的电池[10], 检测合格且经过简单的修理运至梯次利用市场; 另一部分有利用价值的废旧电池运至处理中心, 拆解中心进行拆解之后, 有价值的原材料、零部件等运往电池制造厂作为生产电池的原材料进行再制造, 没有价值的部分运往废弃物处理厂采取无害化处理。其中居民风险的基本形式为:

$$P = \varepsilon \cdot X \cdot d + \frac{X}{G} \tag{1}$$

其中, 第一项, ε 是居民风险系数, X 是运输的废旧动力电池总量, d 为运输距离; 第二项, X 是处理的废旧动力电池总量, G 为物流设施周围的最近的居民区距离。

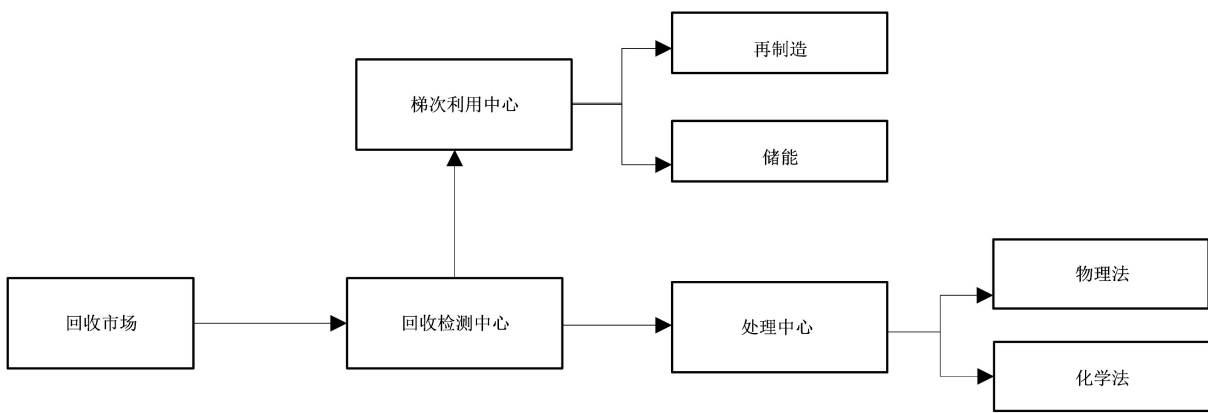


Figure 1. Recycling process for retired electric vehicle batteries
图 1. 退役动力电池回收流程

2.2. 数学模型构建

- 为明确研究范围, 在构建新能源汽车动力电池回收模型之前, 设定如下假设条件:
- 1) 在废旧动力电池逆向物流网络中废旧动力电池不能跨级运输;
 - 2) 备选回收检测分类中心和处理中心已知, 且具有最大处理能力限制, 其他节点已知;
 - 3) 回收检测分类中心和处理中心建设成本已知, 仅考虑运营、运输、回收成本;
 - 4) 废旧动力电池的运输费用与运输距离、运输数量相关;

2.3. 符号说明

根据构建的模型背景, 设置模型的集合、参数、决策变量和模糊变量见表 1 参数符号及说明所示。

Table 1. Parameter symbols and explanations
表 1. 参数符号及说明

符号	含义
集合	I 回收市场的集合: $I = \{1, 2, \dots, i\}$;
	J 回收检测分类中心的集合: $J = \{1, 2, \dots, j\}$;

续表

	K	处理中心的集合： $K = \{1, 2, \dots, k\}$ ；
	L	梯次利用中心的集合： $L = \{1, 2, \dots, l\}$ ；
参数	f_j	回收检测分类中心 J 的固定建设成本；
	f_k	处理中心 K 的固定建设成本；
	f_l	梯次利用中心 L 的固定建设成本；
	$\max s_j$	回收检测分类中心 J 的最大处理能力；
	$\max s_k$	处理中心 K 的最大处理能力；
	$\max s_l$	梯次利用中心 L 的最大处理能力；
	h_j	回收检测分类中心 J 的单位处理成本；
	h_k	处理中心 K 的单位处理成本；
	h_l	梯次利用中心 L 的单位处理成本；
	d_{ij}	回收地 i 到回收检测分类中心 J 的距离；
	d_{jk}	回收检测分类中心 J 到回收处理中心 K 的距离；
	d_{jl}	回收检测分类中心 J 到梯次利用中心 L 的距离；
	x_i	回收市场 I 所回收的动力电池数量；
	c_i	回收市场 I 所回收的动力电池单位成本；
	u	单位电池的单位距离运输成本；
	$\tilde{\theta}_1$	动力电池运至处理中心 K 的比例；
	$\tilde{\theta}_2$	动力电池运至梯次利用中心 L 的比例；
	$\omega、\gamma$	相应系数对居民风险的影响程度；
	G_j	回收检测分类中心 J 距离周围居民区的距离；
	G_k	处理中心 K 距离周围居民区的距离；
	G_l	梯次利用中心 L 距离周围居民区的距离；
	$G_{ij}、G_{jk}、G_{jl}$	分别为回收市场 I 至分类中心、分类中心 J 至处理中心 K 和梯次利用中心 L 距离周围居民区的距离；
决策变量	Y_j	0~1 变量，若建回收检测分类中心则为 1，否则 0；
	Y_k	0~1 变量，若建处理中心则为 1，否则为 0；
	Y_l	0~1 变量，若建梯次利用工厂则为 1，否则为 0；
	x_{jk}	回收检测分类中心 J 运至处理中心 K 动力电池数量；
	x_{jl}	回收检测分类中心 J 运至梯次利用市场 L 动力电池量；

2.4. 模糊模型构建

2.4.1. 目标函数

目标 1 为总成本最小：

$$\text{Min } Z = C_1 + C_2$$

(2)

其中

$$C_1 = \sum_{j=1}^J Y_j \cdot f_j + \sum_{k=1}^K Y_k \cdot f_k + \sum_{l=1}^L Y_l \cdot f_l \quad (3)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (d_{ij}u + h_j) x_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (d_{jk}u + h_k) x_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L (d_{jl}u + h_l) x_{jl} + \sum_{i=1}^I x_i c_i \quad (4)$$

C_1 为废旧动力电池逆向物流设施固定建设成本； C_2 为废旧动力电池的处理成本、运输成本和回收成本。

目标 2 为逆向物流居民风险值最小：

$$\begin{aligned} \text{Min } P = & \varepsilon_1 \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} (d_{ij})^\omega + \varepsilon_2 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{jk} (d_{jk})^\omega + \varepsilon_3 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L x_{jl} (d_{jl})^\omega \\ & + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{X_{ij}}{(G_j)^\gamma} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \frac{X_{jk}}{(G_k)^\gamma} + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{X_{jl}}{(G_l)^\gamma} \end{aligned} \quad (5)$$

目标函数 P 为风险最小，包括各节点间的各级设施周围人群的运输风险和回收检测分类中心、处理中心、梯次利用中心在运营过程中产生的居民负面风险。

2.4.2. 约束条件

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} Y_j = \sum_{k=1}^K x_{jk} + \sum_{l=1}^L x_{jl} \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

$$\tilde{\theta}_1 \sum_{i=1}^I x_{ij} = \sum_{k=1}^K x_{jk} \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (7)$$

$$\tilde{\theta}_2 \sum_{i=1}^I x_{ij} = \sum_{l=1}^L x_{jl} \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} Y_j \leq Y_j \max s_j \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jk} Y_k \leq Y_k \max s_k \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jl} Y_l \leq Y_l \max s_l \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (11)$$

$$\tilde{\theta}_1 + \tilde{\theta}_2 = 1 \quad (12)$$

$$x_{ij}, x_{jl}, x_{jk} \geq 0 \quad (13)$$

$$X_j, Y_k \in \{0, 1\}, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (14)$$

3. 模型求解

废旧动力电池逆向物流回收利用多目标模糊规划模型涉及不确定参数和多目标处理，为方便求解，将模型转化为确定型混合整数规划模型。

3.1. 模糊模型清晰化转换

定理 1 设三角模糊数 $\tilde{r} = (l_i, m_i, r_i)$ ， $l_i \leq m_i \leq r_i$ ，则对任意给定的置信水平 $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$ ，当且仅当

$(1-\alpha)l_i + \alpha m_i \leq z$, $(1-\alpha)r_i + \alpha m_i \geq z$ 时, 有 $\text{Pos}\{\tilde{\tau} = z\} \geq \alpha$ 成立。

证明: 根据可能性定义 $\text{Pos}\{\tilde{\tau} = z\} = \mu_{\tilde{\tau}}(z)$ 可知, 若 $\text{Pos}\{\tilde{\tau} = z\} \geq \alpha$ 成立, 必有 $\mu_{\tilde{\tau}}(z) \geq \alpha$, 则 z 一定处于 $\tilde{\tau}$ 的 α 水平截集 $[(1-\alpha)l_i + \alpha m_i, (1-\alpha)r_i + \alpha m_i]$ 内。因此, 有 $(1-\alpha)l_i + \alpha m_i \leq z$, $(1-\alpha)r_i + \alpha m_i \geq z$ 。证毕。

对模糊变量约束条件去模糊化, 将模型转化为等价的确定模型:

$$\min \bar{Z}、\min \bar{P} \quad (15)$$

s.t

$$\text{pos}\{C_1 + C_2 \leq \bar{Z}\} \geq \alpha \quad (16)$$

$$\text{pos}\{P \leq \bar{P}\} \geq \alpha \quad (17)$$

$$\text{Pos}\left\{\tilde{\theta}_1 \sum_{i=1}^I x_{ij} = \sum_{k=1}^K x_{jk}\right\} \geq \beta_1 \quad j=1,2,\dots,J \quad (18)$$

$$\text{Pos}\left\{\tilde{\theta}_2 \sum_{i=1}^I x_{ij} = \sum_{l=1}^L x_{jl}\right\} \geq \beta_2 \quad j=1,2,\dots,J \quad (19)$$

确保单条无人机配送线路的距离不超过无人机的最大航程。

3.2. 模型清晰化

根据引理 1、引理 2 可将上式转化成清晰等价类, 将带模糊变量的目标函数的约束条件去模糊化

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \left\{ \sum_{j=1}^J Y_j \cdot f_j + \sum_{k=1}^K Y_k \cdot f_k + \sum_{l=1}^L Y_l \cdot f_l + u \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} d_{ij} \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^I \sum_{k=1}^J x_{jk} [(1-\alpha)\tilde{\theta}_{li} + \alpha\tilde{\theta}_{mi}] (d_{jk}u + h_k) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L x_{jl} [(1-\alpha)\tilde{\theta}_{2li} + \alpha\tilde{\theta}_{2mi}] (d_{jl}u + h_l) \right\} \\ & \leq \bar{Z} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{Min } P = & \left\{ \varepsilon_1 \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} + \varepsilon_2 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K d_{jk} x_{jk} ((1-\alpha)\tilde{\theta}_{li} + \alpha\tilde{\theta}_{mi}) + \varepsilon_3 \cdot d_{jl} \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L x_{jl} ((1-\alpha)\tilde{\theta}_{2li} + \alpha\tilde{\theta}_{2mi}) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{X_{ij}}{G_j} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \frac{X_{jk}}{G_k} ((1-\alpha)\tilde{\theta}_{li} + \alpha\tilde{\theta}_{mi}) + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \frac{X_{jl}}{G_l} ((1-\alpha)\tilde{\theta}_{2li} + \alpha\tilde{\theta}_{2mi}) \right\} \\ & \leq \bar{P} \end{aligned} \quad (21)$$

St.

$$\sum_{j=1}^J x_{jk} \geq ((1-\beta_1)\theta_{li} + \beta_1\theta_{mi}) \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad J=1,2,\dots,J \quad (22)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jk} \leq ((1-\beta_1)\theta_{1ri} + \beta_1\theta_{1mi}) \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad J=1,2,\dots,J \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jl} \geq ((1-\beta_2)\theta_{2li} + \beta_2\theta_{2mi}) \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad J=1,2,\dots,J \quad (24)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{jl} \leq ((1-\beta_2)\theta_{2ri} + \beta_2\theta_{2mi}) \sum_{i=1}^I x_{ij} \quad J=1,2,\dots,J \quad (25)$$

3.3. 多目标处理

上述多目标规划模型采取加权理想点法对多目标进行处理, 将多目标混合整数规划模型转化为:

$$\text{Min } W | W = \rho \frac{(\bar{Z}) - (\bar{Z})^*}{(\bar{Z})^*} + (1 - \rho) \frac{\bar{P} - (\bar{P})^*}{(\bar{P})^*} \tag{26}$$

加权理想点法目的表示各目标最大限度接近各自的理想值, 其中, $(\bar{Z})^*$ 和 $(\bar{P})^*$ 分别表示将逆向物流网络成本 Z 和居民风险 P^* 作为一个单一目标所求得理想解。此外, $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ 为决策者的偏好系数, 由逆向物流网络决策者根据实际情况确定。逆向物流网络若偏好成本效益则 ρ 值偏大, 若偏好居民风险则 ρ 值较小。

4. 算例分析

4.1. 算例描述

参考文献[11][12]中的数据, 并根据本模型进行了设计。在算例中, 废旧动力电池逆向物流网络有 5 个备选消费区域候选点 A、4 个备选回收检测分类中心候选点 B、4 个备选处理中心候选点 C 和 3 个备选梯次利用中心候选点 D。算例具体数据见表 2~8 所示。根据文献, 回收后的废旧动力电池质量等级层次不齐, 不定参数的置信水平 α 取 0.9, $\beta_1 = \beta_2 = 0.8$, 居民风险系数 $\varepsilon_1 = 0.2$, $\varepsilon_2 = 0.12$, $\varepsilon_3 = 0.08$, 居民风险的影响程度系数均取 1 [13], 单位运输成本为 5 元/吨·公里。从回收检测分类中心 J 运至处理中心 K 梯次利用中心 L 的废旧动力电池比例 $\tilde{\theta}_1$ 的三角模糊数为(0.24, 0.28, 0.32); 运至梯次利用中心 L 的废旧动力电池比例 $\tilde{\theta}_2$ 的三角模糊数(0.66, 0.72, 0.78)。

Table 2. Distribution of recycling rates by consumption area

表 2. 消费区域回收量分布

区域(A)	1	2	3	4	5
回收量(t)	1110	760	820	1210	700

Table 3. Collect the relevant data of the detection and classification center

表 3. 回收检测分类中心相关数据

区域(B)	1	2	3	4
最大处理能力(吨)	2100	1700	2300	1800
固定建设成本(万元)	125	165	100	150
单位处理成本(万元)	10	13	15	14
居民区距离(米)	5000	4900	5380	4320

Table 4. Processing center related data

表 4. 处理中心相关数据

区域(C)	1	2	3	4
最大处理能力(吨)	1900	1600	1800	1700
固定建设成本(万元)	300	360	320	250
单位处理成本(万元)	40	80	55	73
居民区距离(米)	6505	7680	4809	5050

Table 5. Echelon utilization center related data
表 5. 梯次利用中心相关数据

区域(D)	1	2	3
最大处理能力	1200	1500	1700
固定建设成本(万元)	1800	1500	1700
单位处理成本(万元)	110	230	170
居民区距离(米)	4350	5300	5620

Table 6. Distance from recycling market to recycling testing and sorting center (km)
表 6. 回收市场到回收检测分类中心距离(km)

I	J			
	1	2	3	4
1	20	11	13	32
2	18	31	20	27
3	33	15	21	23
4	26	27	14	21
5	12	43	18	37

Table 7. The distance from the detection sorting center to the processing center (km)
表 7. 回收检测分类中心到处理中心的距离(km)

J	K			
	1	2	3	4
1	31	20	32	18
2	23	27	34	13
3	17	23	40	16
4	21	38	18	23

Table 8. The distance from the detection sorting center to the step utilization center (km)
表 8. 回收检测分类中心到梯次利用中心的距离(km)

J	L		
	1	2	3
1	22	18	25
2	18	21	15
3	15	23	26
4	27	32	19

4.2. 算例求解

根据相关资料和实际企业应用数据调研结果，并假设决策者对总成本和总风险同等重视，即两个目标函数的权重值取值相等，偏好系数 $\rho=0.5$ ，利用 LINGO18 软件编程求解得到设施选址结果。此时，动力电池逆向物流网络总成本为 837906.2 万元，逆向物流网络总风险为 16465.01。设施选址及关键节点

流量分布如表 9 所示。

Table 9. Facility location and traffic distribution of key nodes
表 9. 设施选址及关键节点流量分布

A 到 B		
B1	B2	B3
A5: 700	A1: 880	A1: 230
	A3: 820	A2: 760
		A4: 1210
B 到 C		
C1	C2	
B3: 688.6	B1: 210.6	
	B2: 489.6	
B 到 D		
D1		
B1:498.4	B2: 1210.4	B3: 1566.4

至此, 考虑成本最小和风险最小的新能源汽车废旧动力电池逆向物流网络涉及完毕。该算例共 5 个回收市场, 选取 B1、B2、B3 为回收检测分类中心, 选取 C1、C2 为处理中心, 选取 D1 为梯次利用中心可使逆向物流网络最小成本和最小风险达到最优。

4.3. 动力电池回收量对逆向物流网络设计的影响

考虑动力电池“退役潮”来临, 动力电池回收量不断增加, 在不确定参数的置信水平 $\alpha = 0.9$, $\beta_1 = \beta_2 = 0.8$, $\rho = 0.5$ 时, 分析废旧动力电池回收量对逆向物流网络设计的影响, 决策结果见表 10。由表 10 可知: 随着动力电池回收比例的增加, 回收检测分类中心、处理中心、梯次利用中心规模先保持稳定后增大, 符合实际情况。回收处理比例设施选址的影响不大, 对回收比例增加只需扩大现有逆向物流网络的规模, 使在可控范围内保证运营策略的稳定性。面对动力电池的退役潮, 决策者应提前布局, 在合理、规范的前提下, 不断完善动力电池逆向物流网络体系, 并动态预测动力电池报废数量, 紧跟国家政策, 在即将到来的废旧动力电池报废潮中占据主动。此外, 在废旧动力电池随着动力电池回收比例的增加, 逆向物流网络的成本和危险目标值也增大, 对设施选址提出了更高的要求。

Table 10. The impact of recycling amount on facility location and flow
表 10. 回收量对设施选址、流量的影响

X 变化比例	Z	P	回收检测分类中心	处理中心	梯次利用中心
60%	1,444,188	29154.4	1, 2, 3, 4	1, 3, 4	1, 3, 4
40%	1,219,073	24447.71	1, 2, 3, 4	3, 4	1, 3
20%	1,017,568	20418.57	1, 2, 3	4	1
0	837906.2	17004.11	1, 2, 3	1, 2	1

4.4. 无决策者偏好系数对逆向物流网络设计的影响

由于动力电池含有大量有毒重金属, 在运输、处理过程处置不当会对周围居民造成生命安全和财产

损失风险。应该更加关注逆向物流网络的安全性,从风险优化角度进行研究,减少居民风险损失。因此,提升风险关注度,增加对风险的决策者偏好系数,在不确定参数的置信水平 $\alpha = 0.9$, $\beta_1 = \beta_2 = 0.8$, $\rho = 0.5$ 时,决策结果见表 11。由表 11 可知:在决策者不同偏好下(提高风险系数,降低成本系数)回收检测分类中心选址集中在候选点 1、2、3,处理中心选址集中在候选点 4,梯次利用中心选址必选候选点 1,这说明决策者偏好对逆向物流网络选址没有影响,反映了逆向物流网络方案的稳定性。决策者风险偏好系数增加,逆向物流网络总成本增加,风险值减少。若决策者对成本和风险的偏好相同,则逆向物流网络成本和风险值最优,具有更好的综合效益。当前废旧动力电池回收处于起步期,信息数据有限,面对废旧动力电池急剧增加的情形,不能将废旧动力电池视作普通物资分析,需要综合考虑其作为易燃易爆危险品的属性,一方面,避免因安全因素重新规划回收网络和建设基础设施,另一方面,降低废旧动力电池在运输、再生利用过程中给周围居民带来的经济和人身安全风险。

Table 11. The influence of improving risk preference coefficient on reverse logistics network design
表 11. 提高风险偏好系数对逆向物流网络设计的影响

风险系数	Z	P	回收检测分类中心	处理中心	梯次利用中心
0.9	889619.6	16702.55	1, 2, 3	4	1
0.7	849029.4	16910.01	1, 2, 3	4	1
0.5	837906.2	17004.11	1, 2, 3	4	1

4.5. 动力电池处理技术对逆向物流网络设计的影响

根据动力电池质量的衰减程度,可将动力电池大体分为 2 个梯度,对其进行不同的处理。分别为梯次利用和再生利用。动力电池回收技术水平提高,动力电池梯次利用的比例也会提高,即运至梯次利用中心的新能源汽车数量也会增多。在文中,将梯次利用的比例提升和降低 10%,即 $\tilde{\theta}_2$ 的三角模糊数(0.76, 0.82, 0.88)、(0.56, 0.62, 0.68),其他参数不变,在不确定参数的置信水平 $\alpha = 0.9$, $\beta_1 = \beta_2 = 0.8$, $\rho = 0.5$ 时,决策结果见表 12。由表 12 可知:在不同的梯次利用比例下,回收检测分类中心选址集中在候选点 1、2、3,处理中心选址集中在候选点 4,梯次利用中心选址必选候选点 1,短期内逆向物流网络方案是稳定的。随着处理技术的提高,流入梯次利用中心的新能源汽车数量增多,流入处理中心的新能源汽车数量减少,网络设计产生总成本和风险成本减少。提升梯次利用技术水平有利于新能源汽车循环利用,在实现新能源汽车使用价值最大化同时降低逆向物流网络设计中经济成本和风险值,达到预期目标。

Table 12. Improve the influence of processing technology on reverse logistics network design
表 12. 提高处理技术对逆向物流网络设计的影响

梯次利用比例	Z	P	回收检测分类中心	处理中心	梯次利用中心
+10%	772038.2	16584.54	1, 2, 3	4	1
0	837906.2	17004.11	1, 2, 3	4	1
-10%	948197.4	17558.48	1, 2, 3	4	1

5. 结语

本文考虑了废旧动力电池在回收运输和处理过程中一旦发生事故,必然会对整个网络造成经济损失,以及对周围居民造成不可避免的风险。因此,提出一个考虑居民风险的废旧动力电池回收网络,建立模

糊规划模型, 采用加权理想点法并使用 Lingo18 软件确定逆向物流设施的位置、数量和流量分配, 并分析回收数量、决策者偏好系数对废旧动力电池逆向物流网络成本、风险值和设施选址的影响。结果表明:

① 随着废旧电池回收比例的增加, 设施数量先保持稳定后增加, 逆向物流网络成本增加。② 决策者的偏好影响废旧动力电池逆向物流网络的成本和风险值, 决策者选择合适的偏好系数既可以减少逆向物流网络经济成本, 又可以降低废旧动力电池回收利用对周围居民风险的影响, 对现实中完善不规范的回收处理现象, 推动废旧动力电池回收利用产业进步, 更有利于实现废旧动力电池逆向物流网络的可持续发展。③ 废旧动力电池处理技术提升影响废旧动力电池的处理方式, 进而影响梯次利用中心和处理中心回收废旧动力电池数量。梯次利用比例 10%以内上下浮动时, 逆向物流网络设计设施选择不变, 逆向物流网络设计总成本和风险成本减少, 可以实现废旧动力电池最大化使用。在现实中引起行业从业者对废旧动力电池回收处理过程中安全的重视, 完善、规范废旧动力电池回收网络, 推动废旧动力电池回收利用发展具有一定作用。此外, 新能源汽车废旧动力电池逆向物流网络还受到前端正向物流动力电池装机量, 和回收再利用技术的影响, 下一步研究的方向是将两种影响因素纳入闭环逆向物流网络设计。

参考文献

- [1] Jiang, T., Sun, J., Wang, T., Tang, Y., Chen, S., Qiu, S., et al. (2021) Sorting and Grouping Optimization Method for Second-Use Batteries Considering Aging Mechanism. *Journal of Energy Storage*, **44**, Article ID: 103264. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103264>
- [2] Sato, F.E.K. and Nakata, T. (2019) Recoverability Analysis of Critical Materials from Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries through a Dynamic Fleet-Based Approach for Japan. *Sustainability*, **12**, Article No. 147. <https://doi.org/10.3390/su12010147>
- [3] 贾志杰, 高峰, 杜世伟, 等. 磷酸铁锂电池不同应用场景的生命周期评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1975-1984.
- [4] Govindan, K., Fattahi, M. and Keyvanshokoh, E. (2017) Supply Chain Network Design under Uncertainty: A Comprehensive Review and Future Research Directions. *European Journal of Operational Research*, **263**, 108-141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>
- [5] 李文玉. 动力电池逆向物流网络优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [6] 丁艳, 梁宝平. 基于第三方企业回收的再制造品逆向物流网络设计[J]. 物流科技, 2018, 41(1): 98-100.
- [7] 郭雪婷. 不确定环境下再制造逆向物流网络设计研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] 张群, 卫李蓉. 逆向物流网络设计研究进展[J]. 中国管理科学, 2016, 24(9): 165-176.
- [9] 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.
- [10] 范志强, 罗一帆, 梁宁宁, 等. 动力电池逆向物流网络多目标设计: 风险优化与求解分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(11): 333-342.
- [11] 丁于思, 李雪, 高阳. 多周期多目标再制造物流网络设施动态选址研究[J]. 管理学报, 2014, 11(3): 428-433.
- [12] 岳辉, 钟学燕, 叶怀珍. 随机环境下再制造逆向物流网络优化设计[J]. 中国机械工程, 2007, 18(4): 442-446.
- [13] 李雨晴. T 公司废旧动力电池逆向物流网络设计研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.