

动力电池回收模式选择的多属性决策问题

丁雪枫, 马 瑜

(上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 电动汽车动力电池的回收利用不仅能够保护环境, 而且对电动汽车的可持续发展具有积极影响. 针对电动汽车动力电池回收模式的多属性群决策问题, 提出一种二维不确定语言信息与 VIKOR 方法相结合的决策方法, 即 2DUL-VIKOR 法. 首先, 专家采用二维不确定语言信息对动力电池回收模式在考虑多种因素影响下进行评价; 其次, 运用二维不确定语言聚合因子对专家意见进行聚合; 第三, 采用变异系数法对指标权重进行求解; 第四, 运用改进 VIKOR 法对动力电池回收模式方案进行排序, 选择最优方案; 最后, 通过对实例进行计算与分析, 对所提出方法的有效性和实用性给予验证.

关键词: 动力电池; 回收模式; 多属性决策; 二维不确定语言; 2DUL-VIKOR 法

中图分类号: C939

文献标志码: A

Multiple Attribute Decision Making Problem in Power Battery Recycling Mode Selection

DING Xuefeng, MA Yu

(School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The recycle of power batteries of electric vehicles not only protect the environment, but also has a positive impact on the sustainable development of electric vehicles. To solve the electric vehicle battery recycling mode decision-making problem, an improved method which combines the 2-dimensional uncertain linguistic variables (2-dimension uncertain linguistic variables, 2DULVs) and the VIKOR method (called 2DUL-VIKOR method) is proposed. First, 2DULVs is used to evaluate the power battery recycling mode in consideration of criteria. Then, experts' opinions are aggregated by using the 2DULVs aggregation operator. Next, the weights of criteria are calculated by the coefficient of the variation method. After that, the VIKOR method is used for selecting the best power battery recycling mode. Finally, an

illustrative example is given to verify the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words: power battery; recycling mode; multiple attribute decision making; 2-dimension uncertain linguistic variables; 2DUL-VIKOR method

目前, 电动汽车因其具有无尾气排放、噪音小、污染小等优点, 得到了世界各国政府的大力支持. 但是电动汽车动力电池若不能合理回收利用, 会对环境造成严重污染. 2020 年前后, 我国电动汽车类动力电池累计报废量将达到 12 万~17 万 t, 报废动力电池的回收利用需求将会越来越大^[1]. 动力电池回收受多种因素的影响, 既涉及到企业的回收能力、基础设施、回收处理技术水平等, 也需要考虑回收成本、回收规模以及资源利用情况等. 因此, 合理回收及利用动力电池对企业而言是一项艰巨但又不可避免的问题.

目前, 对于动力电池回收模式决策问题 (battery recycling mode decision-making problem, BRMDP) 的研究尚处于起步阶段, 主要的研究成果包括: Ordonez 等^[2]为使电池中有价值的元素得以有效回收利用, 运用定性分析法对锂电池的回收和再生技术进行研究; Turner 等^[3]分析比较了 EPR (extended producer responsibility) 和 EOL (end of life) 两种制度对回收率、回收效率、管理成本等的影响, 并得出 EPR 的有效实施更有利于动力电池回收利用的结论; 尤建新等^[4]从环境质量成本控制角度出发考虑动力电池回收问题, 构建对称信息条件下及非对称信息条件下废弃动力电池回收商的环境质量成本控制模型和政府的环境质量检测成本控制模型, 从而得出信息对称条件下更有益于动力电池回收的结论; 姚海琳等^[5]从动力电池回收的经济、资源与环境

收稿日期: 2017-12-21

基金项目: 国家自然科学基金(71502098); 教育部人文社科青年基金(13YJC630023); 上海市优秀青年教师科研专项基金

第一作者: 丁雪枫(1980—), 女, 讲师, 管理学博士, 主要研究方向为不确定性理论与方法、应急决策与风险管理等.

E-mail: athena_tju@sina.com

效益角度,设计了制造商回收、销售商回收和第三方回收 3 种回收模式,并采用定性方法分析比较 3 种回收模式. 现有的研究多是从技术、制度层面,或者定性的角度对动力电池的回收模式展开的,采用定量方法研究回收模式的文章较少,可查阅到的相关文章主要是从回收成本控制的角度进行的回收问题研究.

多属性决策 (multiple attribute decision making, MADM) 问题是指在考虑多个属性的情况下,选择最优备选方案或进行方案排序的决策问题. BRMDP 是在考虑多种模糊或不确定影响因素的作用下,从最优方案的选择进行决策,因此属于 MADM 问题. 不确定语言变量 (uncertain language variables, ULVs) 能有效反映客观事物的复杂不确定性以及人类思维的模糊性,因此常被用于解决 MADM 问题. 但是由于评价者评价时受到专业限制以及主观思维的影响,ULVs 会有一定的局限性. Zhu 等^[6] 基于 ULVs 提出了二维不确定语言变量 (2-dimension uncertain linguistic variables, 2DULVs) 的概念. 2DULVs 增加了评价者对所给评价信息可靠性的描述,使得决策结果更加合理有效. Liu 等^[7] 提出了 2DULVs 的运算规则、聚合算子等,并应用其解决多属性群决策问题.

VIKOR 法是由 Opriconvic 等^[8] 于 2004 年提出的一种 MADM 方法. VIKOR 方法可以得到最佳妥协解,能有效解决有冲突准则的决策问题,因此受到很多国内外学者的关注. You 等^[9] 在进行供应商选择 MADM 问题时,提出了多准则供应商选择的区间二元语义扩展 VIKOR 法,通过实例验证了其方法在解决模糊信息条件下供应商选择的有效性;丁日佳等^[10] 在研究煤炭企业综合竞争力时,基于 VIKOR 法对 5 个煤炭企业进行实证研究,评价结果与煤炭企业综合竞争力的实际情况相符.

结合 2DULVs 和 VIKOR 的优势,本文从定性和定量的角度,提出一种基于 2DULVs 的 VIKOR 法(即 2DUL-VIKOR 法)求解 BRMDP. 从定性角度分析影响动力电池后的因素,并从定量角度进行回收模式的评价、比较与选择,这种方法有助于减少决策信息的丢失,更具有有效性和稳定性,有助于更准确地做出决策.

1 背景知识

1.1 二维不确定语言变量

1.1.1 不确定语言变量

设语言评价标度为: $S = (s_0, s_1, \dots, s_{L-1})$, 其中,

$s_\alpha \in S (\alpha = 0, 1, \dots, L-1)$ 表示语言变量, L 为奇数. 设 s_i 与 s_j 任意两个语言变量,则它们具有如下性质^[11-12]:

- (1) 若 $i > j$, 则 $s_i > s_j$.
- (2) 存在负算子 $\text{neg}(s_i) = s_{L-1-i}$.
- (3) 若 $s_i \geq s_j$, $\max(s_i, s_j) = s_i$.
- (4) 若 $s_i \leq s_j$, $\min(s_i, s_j) = s_i, s_i, s_j \in S$.

其中,性质(1)中的“ $>$ ”表示优于. L 一般选取 3, 5, 7, 9 等,例如:若 L 为 5,则表示 $S = (s_0, s_1, s_2, s_3, s_4) = (\text{很差, 较差, 中, 好, 很好})$. 由于在运算过程中语言决策信息可能会丢失,需要将离散语言转化成连续语言.

定义 1^[13] 设 $\tilde{s} = [s_a, s_b]$, $s_a, s_b \in \bar{S}$, 且 $a \leq b$, 则 $a \leq b$ 分别代表 \tilde{s} 的下限和上限, 则称 \tilde{s} 为不确定语言变量.

1.1.2 二维不确定语言变量

定义 2^[7] 设 $\hat{s} = ([s_a, s_b][\check{s}_c, \check{s}_d])$, 其中 $[s_a, s_b]$ 是第一类不确定语言信息, 表示决策者对评估对象给出的评价值, s_a, s_b 为预先定义好的语言评价集 $S_I = (s_0, s_1, \dots, s_{l-1})$ 中的元素; 而 $[\check{s}_c, \check{s}_d]$ 为第二类不确定语言信息, 表示决策者对第一类评判值给出的可靠性评价, \check{s}_c, \check{s}_d 为预先定义好的语言评价集 $S_{II} = (\check{s}_0, \check{s}_1, \dots, \check{s}_{l-1})$ 中的元素, 则 \hat{s} 称为二维不确定语言变量.

同上,为了减少评价信息的失真,一般将离散的语言评价集转化成连续集.

1.1.3 2DULVs 运算规则

假设 $\hat{s}_1 = ([s_{a_1}, s_{b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}])$, $\hat{s}_2 = ([s_{a_2}, s_{b_2}][\check{s}_{c_2}, \check{s}_{d_2}])$ 为任意两个 2DULVs, 则运算法则如下^[7]:

$$\hat{s}_1 \oplus \hat{s}_2 = ([s_{a_1}, s_{b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}]) \oplus ([s_{a_2}, s_{b_2}][\check{s}_{c_2}, \check{s}_{d_2}]) = ([s_{a_1+a_2}, s_{b_1+b_2}][\check{s}_{\min(c_1, c_2)}, \check{s}_{\min(d_1, d_2)}]) \quad (1)$$

$$\hat{s}_1 \otimes \hat{s}_2 = ([s_{a_1}, s_{b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}]) \otimes ([s_{a_2}, s_{b_2}][\check{s}_{c_2}, \check{s}_{d_2}]) = ([s_{a_1 \times a_2}, s_{b_1 \times b_2}][\check{s}_{\min(c_1, c_2)}, \check{s}_{\min(d_1, d_2)}]) \quad (2)$$

$$\hat{s}_1 / \hat{s}_2 = ([s_{a_1}, s_{b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}]) / ([s_{a_2}, s_{b_2}][\check{s}_{c_2}, \check{s}_{d_2}]) = ([s_{a_1/a_2}, s_{b_1/b_2}][\check{s}_{\min(c_1, c_2)}, \check{s}_{\min(d_1, d_2)}]) \quad (3)$$

$$\lambda \hat{s}_1 = \lambda ([s_{a_1}, s_{b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}]) = ([s_{\lambda a_1}, s_{\lambda b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}]), \lambda \geq 0 \quad (4)$$

$$(\hat{s}_1)^\lambda = ([s_{a_1}, s_{b_1}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}])^\lambda = ([s_{(a_1)^\lambda}, s_{(b_1)^\lambda}][\check{s}_{c_1}, \check{s}_{d_1}]), \lambda \geq 0 \quad (5)$$

1.1.4 Hamming 距离

定义 3^[7] 设 $\hat{s}_1 = ([\hat{s}_{a_1}, \hat{s}_{b_1}][\hat{s}_{c_1}, \hat{s}_{d_1}])$, $\hat{s}_2 = ([\hat{s}_{a_2}, \hat{s}_{b_2}][\hat{s}_{c_2}, \hat{s}_{d_2}])$ 为任意两个 2DULVs. 则 2DULVs 之间的 Hamming 距离为

$$d(\hat{s}_1, \hat{s}_2) = \frac{1}{4(l-1)} (|a_1 \frac{c_1}{t-1} - a_2 \frac{c_2}{t-1}| + |a_1 \frac{d_1}{t-1} - a_2 \frac{d_2}{t-1}| + |b_1 \frac{c_1}{t-1} - b_2 \frac{c_2}{t-1}| + |b_1 \frac{d_1}{t-1} - b_2 \frac{d_2}{t-1}|) \quad (6)$$

1.1.5 期望值

定义 4^[7] 设 $\hat{s}_1 = ([\hat{s}_{a_1}, \hat{s}_{b_1}][\hat{s}_{c_1}, \hat{s}_{d_1}])$ 为任意一个 2DULV, 则 \hat{s}_1 的期望值 $E(\hat{s}_1)$ 为

$$E(\hat{s}_1) = [\frac{a_1 + b_1}{2(l-1)}][\frac{c_1 + d_1}{2(t-1)}] \quad (7)$$

若 $E(\hat{s}_1) \geq E(\hat{s}_2)$, 则有 $\hat{s}_1 \geq \hat{s}_2$, 反之亦然.

1.2 聚合算子

1.2.1 GWA (geometric weighted aggregation) 算子

定义 5^[11] 设 (a_1, a_2, \dots, a_n) 为实数集, 其权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 满足 $w_i \geq 0$, 且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$. 若 $\lambda \neq 0$ 且满足

$$GWA(a_1, a_2, \dots, a_n) = (\sum_{i=1}^n w_i a_i^\lambda)^{1/\lambda} \quad (8)$$

则 GWA 函数称为广义加权平均算子, 简称 GWA 算子.

1.2.2 PA(power average)算子

定义 6^[14] 设 (a_1, a_2, \dots, a_n) 为实数集合, 若满足

$$PA(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{\sum_{i=1}^n (1 + T(a_i)) a_i}{\sum_{i=1}^n (1 + T(a_i))} \quad (9)$$

式中: $T(a_i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \text{Sup}(a_i, a_j)$, $\text{Sup}(a_i, a_j)$ 表示的是 a 对 b 的支撑度, 若满足: ① $\text{Sup}(a_i, a_j) \in [0, 1]$; ② $\text{Sup}(a_i, a_j) = \text{Sup}(a_j, a_i)$; ③ $\text{Sup}(a_i, a_j) \geq \text{Sup}(x, y)$, if $|a - b| < |x - y|$, 则 PA 称为幂均算子, 简称 PA 算子.

1.2.3 2DULPGWA 算子

定义 7^[7] 设 $\hat{s}_j = ([\hat{s}_{a_j}, \hat{s}_{b_j}][\hat{s}_{c_j}, \hat{s}_{d_j}])$ 是二维不确定语言变量, \hat{S} 是二维不确定语言变量的集合,

$\hat{s}_j \in \hat{S}, \omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 是 $\hat{s}_j (j=1, 2, \dots, n)$ 的权重向量, 若满足

$$2DULPGWA(\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_n) = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_j) \hat{s}_j^\lambda)^{1/\lambda}}{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_j))} \right]^{1/\lambda} \quad (10)$$

其中, λ 变量的取值范围为 $(0, +\infty)$, 则称 2DULPGWA 为二维不确定语言变量广义加权集结算子, 简称 2DULPGWA 算子.

由公式(1)~(5), 可得

$$2DULPGWA(\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_n) = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_j) \hat{s}_j^\lambda)^{1/\lambda}}{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_j))} \right]^{1/\lambda} = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_{a_j})) a_j^\lambda}{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_{a_j}))} \right]^{1/\lambda}, \left[\frac{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_{b_j})) b_j^\lambda}{\sum_{j=1}^n \omega_j (1 + T(\hat{s}_{b_j}))} \right]^{1/\lambda} [\hat{s}_{\min_j c_j}, \hat{s}_{\min_j d_j}] \quad (11)$$

1.3 VIKOR 法

VIKOR 方法通过确定正理想解和负理想解, 对各个评价对象的指标值与理想解的接近程度进行判断. 其中, 正理想解是各评价指标中的最佳值, 而负理想解是各评价指标中的最差值. VIKOR 方法综合考虑群体和个体的妥协关系, 可从几组备选方案中确定折衷方案. 假设 $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$ 为 m 个方案的集合, $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ 是 n 个指标集合, 方案 A_i 在考虑指标 C_j 影响下的评价值为 r_{ij} , 构成决策矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$, 则 VIKOR 计算步骤如下^[8]:

Step 1 将决策化信息集 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 转化为规范化信息集 $D = (s_{ij})_{m \times n}$.

$$s_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & j \in I_1, j \in N \\ \text{neg}(r_{ij}) & j \in I_2, j \in N \end{cases} \quad (12)$$

式中: I_1 和 I_2 分别表示效益型和成本型的下标集; $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

Step 2 确定各个评价对象的理想解与负理想解为

$$D^+ = (s_1^+, s_2^+, \dots, s_n^+) = \{(|s_{a_1}^+, s_{b_1}^+| |s_{c_1}^+, s_{d_1}^+|), (|s_{a_2}^+, s_{b_2}^+| |s_{c_2}^+, s_{d_2}^+|), \dots,$$

$$D^- = (s_1^-, s_2^-, \dots, s_n^-) = \{(|s_{a_1}^-, s_{b_1}^-| | s_{c_1}^-, s_{d_1}^-|), (|s_{a_2}^-, s_{b_2}^-| | s_{c_2}^-, s_{d_2}^-|), \dots, (|s_{a_n}^-, s_{b_n}^-| | s_{c_n}^-, s_{d_n}^-|)\} \quad (13)$$

式中: $s_{a_i}^+ = \max_i(s_{a_{ij}})$; $s_{b_i}^+ = \max_i(s_{b_{ij}})$; $s_{c_i}^+ = \max_i(s_{c_{ij}})$; $s_{d_i}^+ = \max_i(s_{d_{ij}})$; $s_{a_i}^- = \min_i(s_{a_{ij}})$; $s_{b_i}^- = \min_i(s_{b_{ij}})$; $s_{c_i}^- = \min_i(s_{c_{ij}})$; $s_{d_i}^- = \min_i(s_{d_{ij}})$.

Step 3 计算各评价对象的群体效用值、个别遗憾值分别为

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{w_j d(s_j^+, s_{ij})}{d(s_j^+, s_{ij})} \quad (14)$$

$$R_i = \max_j \frac{w_j d(s_j^+, s_{ij})}{d(s_j^+, s_{ij})} \quad (15)$$

Step 4 计算综合排序指标 Q_i .

$$Q_i = h \frac{(S_i - S^-)}{(S^+ - S^-)} + (1 - h) \frac{(R_i - R^-)}{(R^+ - R^-)} \quad (16)$$

式中: $S^+ = \max_j S_j$; $S^- = \min_j S_j$; $R^+ = \max_j R_j$; $R^- = \min_j R_j$; h 表示“大多数准则”下的决策系数,取值一般为 0.5.

当满足以下条件时, Q_i 排序中值最小的方案被认为是最优的方案.

条件 1 利益被接受的条件满足

$$Q(a_2) - Q(a_1) \geq 1/(I - 1)$$

式中: a_1 表示根据 Q_i 排序得到的第一个备选方案; a_2 表示根据 Q_i 排序得到的第二个备选方案; I 为备选方案的数目.

条件 2 决策可靠性被接受的条件:对 Q_i 值按照从小到大进行排序,排在前两位的结果满足排在第一位的备选方案的群体效用值 S_i 必须同时比排在第二位的备选方案的群体效用值小;或者根据 R 值排序结果,排在第一位的备选方案的个别遗憾值必须同时比排在第二位的备选方案的个别遗憾值小.

方案评判准则:如果不满足条件 1 和条件 2 中的任何一个,那么会得到一个折衷解集.

2 2DUL-VIKOR 决策模型

2.1 问题描述

设有 m 个候选方案,方案集合为 $A = (A_1, A_2, \dots, A_m)$,有 n 个评价指标,指标集合为 $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$, w_j 为指标权重,且满足 $w_j \geq 0, j = 1,$

$2, \dots, n, \sum_{j=1}^n w_j = 1$. 假设 p 个专家对备选方案 $A_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 在考虑指标 $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 下进行评价,专家集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$,专家权重为 $\gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_p)$,满足 $\gamma_k \geq 0$,且 $\sum_{j=1}^p \gamma_k = 1 (k = 1, 2, \dots, p)$. 专家 e_k 对方案 A_i 在指标 C_j 影响下的评价矩阵为 $\hat{R}_k = [\hat{r}_{ij}^k]_{m \times n} (k = 1, 2, \dots, p)$, $\hat{r}_{ij}^k = ([\hat{r}_{a_{ij}}^k, \hat{r}_{b_{ij}}^k] | [\hat{r}_{c_{ij}}^k, \hat{r}_{d_{ij}}^k])$,其中, $[\hat{r}_{a_{ij}}^k, \hat{r}_{b_{ij}}^k]$ 为第 I 类不确定语言信息, $\hat{r}_{a_{ij}}^k, \hat{r}_{b_{ij}}^k \in \mathbf{R}_I, \mathbf{R}_I = (\hat{r}_0, \hat{r}_1, \dots, \hat{r}_{l-1})$, $[\hat{r}_{c_{ij}}^k, \hat{r}_{d_{ij}}^k]$ 为第 II 类不确定语言信息, $\hat{r}_{c_{ij}}^k, \hat{r}_{d_{ij}}^k \in \mathbf{R}_{II}, \mathbf{R}_{II} = (\hat{r}_0, \hat{r}_1, \dots, \hat{r}_{l-1})$. 对所有备选方案进行排序,并选择最优方案.

2.2 决策过程

这里,采用 2DUL-VIKOR 方法对所有备选方案进行决策,决策过程如图 1 所示.

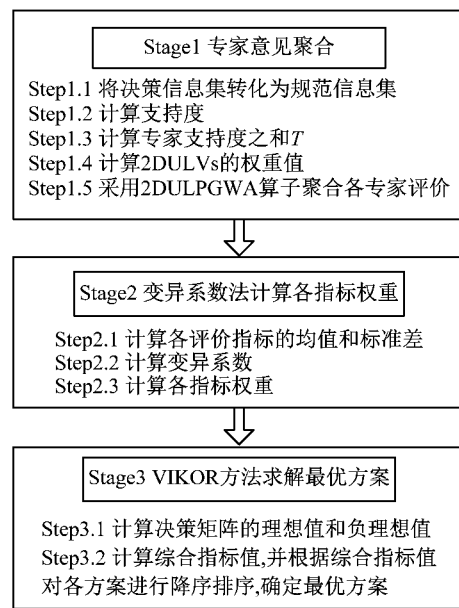


图 1 2DUL-VIKOR 方法基本流程图

Fig. 1 Basic flowchart of the 2DUL-VIKOR method

2DUL-VIKOR 方法的具体决策步骤如下:

Stage 1 专家意见聚合.

Step 1.1 将决策信息集 $\hat{R}_k = [\hat{r}_{ij}^k]_{m \times n}$, 转化为规范信息集 $\hat{S}_k = [\hat{s}_{ij}^k]_{m \times n}$.

Step 1.2 计算支持度 $\text{Sup}(\hat{s}_{ij}^k, \hat{s}_{ij}^l)$.

$$\text{Sup}(\hat{s}_{ij}^k, \hat{s}_{ij}^l) = 1 - d(\hat{s}_{ij}^k, \hat{s}_{ij}^l) \quad k, l = 1, 2, \dots, p \quad (17)$$

式中: $d(\hat{s}_{ij}^k, \hat{s}_{ij}^l)$ 表示二维不确定语言变量之间的 Hamming 距离.

Step 1.3 计算 $T(\hat{s}_{ij}^k)$.

$$T(\hat{s}_{ij}^k) = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^p \text{Sup}(\hat{s}_{ij}^k, \hat{s}_{ij}^l) \quad (18)$$

Step 1.4 计算二维不确定语言变量 \hat{s}_{ij}^k 相关权重 $\omega_{ij}^k (k=1, 2, \dots, p)$.

$$\omega_{ij}^k = \frac{\gamma_k(1 + T(\hat{s}_{ij}^k))}{\sum_{k=1}^p \gamma_k(1 + T(\hat{s}_{ij}^k))} \quad (19)$$

Step 1.5 采用 2DULPGWA 算子聚合专家的评价信息.

$$\hat{s}_{ij} = 2DULPGWA(\hat{s}_{ij}^1, \hat{s}_{ij}^2, \dots, \hat{s}_{ij}^p) = (\left[\hat{s}(\sum_{k=1}^p \omega_{ij}^k (a_{ij}^k)^{\lambda})^{1/\lambda}, \hat{s}(\sum_{k=1}^p \omega_{ij}^k (b_{ij}^k)^{\lambda})^{1/\lambda} \right] [\hat{s}_{\min a_{ij}^k}, \hat{s}_{\min b_{ij}^k}]) \quad (20)$$

Stage 2 变异系数法计算指标权重.

变异系数法是一种客观赋权方法,它是利用各项评价指标所包含的决策信息,并根据观测值的变异程度大小,来确定指标权重^[15].此方法直接根据指标实测值经过一定数学处理后获得权重信息,使用各个构成要素内部指标权重的确定,因此指标的信息价值可以得到充分体现,观测值变异系数的大小可以较好地地区分各个方案在评价指标的重要程度.观测值变异系数越大则赋予其权重值就越大;反之,权重值越小.假设指标值 r_{ij} 是规范化的评价价值.

Step 2.1 计算第 j 项评价指标的均值 \bar{r}_j 和标准差 D_j .

$$\bar{r}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E(r_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

$$D_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (E(r_{ij}) - \bar{r}_j)^2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

Step 2.2 计算变异系数 Y_j .

$$Y_j = \frac{D_j}{\bar{r}_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

Step 2.3 计算指标权重 w_j .

$$w_j = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

式中: $w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n, \sum_{j=1}^n w_j = 1$

Stage 3 求解最优方案.

Step 3.1 根据公式(13)计算聚合决策矩阵的理想解 \hat{S}^+ 与负理想解 \hat{S}^- .

$$\hat{S}^+ = (\hat{s}_1^+, \hat{s}_2^+, \dots, \hat{s}_n^+) = \{([\hat{s}_{a_1}^+, \hat{s}_{b_1}^+] [\hat{s}_{c_1}^+, \hat{s}_{d_1}^+]), ([\hat{s}_{a_2}^+, \hat{s}_{b_2}^+] [\hat{s}_{c_2}^+, \hat{s}_{d_2}^+]), \dots, ([\hat{s}_{a_n}^+, \hat{s}_{b_n}^+] [\hat{s}_{c_n}^+, \hat{s}_{d_n}^+])\}$$

$$\hat{S}^- = (\hat{s}_1^-, \hat{s}_2^-, \dots, \hat{s}_n^-) = \{([\hat{s}_{a_1}^-, \hat{s}_{b_1}^-] [\hat{s}_{c_1}^-, \hat{s}_{d_1}^-]), ([\hat{s}_{a_2}^-, \hat{s}_{b_2}^-] [\hat{s}_{c_2}^-, \hat{s}_{d_2}^-]), \dots, ([\hat{s}_{a_n}^-, \hat{s}_{b_n}^-] [\hat{s}_{c_n}^-, \hat{s}_{d_n}^-])\} \quad (25)$$

式中: $\hat{s}_{a_i}^+ = \max_i(\hat{s}_{a_{ij}})$; $\hat{s}_{b_i}^+ = \max_i(\hat{s}_{b_{ij}})$; $\hat{s}_{c_i}^+ = \max_i(\hat{s}_{c_{ij}})$; $\hat{s}_{d_i}^+ = \max_i(\hat{s}_{d_{ij}})$; $\hat{s}_{a_i}^- = \min_i(\hat{s}_{a_{ij}})$; $\hat{s}_{b_i}^- = \min_i(\hat{s}_{b_{ij}})$; $\hat{s}_{c_i}^- = \min_i(\hat{s}_{c_{ij}})$; $\hat{s}_{d_i}^- = \min_i(\hat{s}_{d_{ij}})$.

Step 3.2 根据公式(14)~(16),计算综合指标值 Q_i ,并进行降序排序,确定最优解.

3 算例

3.1 案例描述

A 企业是一家新能源汽车的生产商,从 2011 年起开始向市场出售新能源汽车.截至 2015 年,A 企业出售的电动汽车总量累计超 6 万量.根据国家《示范应用新能源汽车生产企业及产品备案管理细则》规定,电动汽车动力电池使用寿命为 5~8 年,因此,A 企业首批出售的电动汽车动力电池开始进入报废阶段.目前,A 企业可选的动力电池回收模式主要有 3 种:OEMT(生产商自主回收)模式 A_1 、PROT(生产者联盟企业回收)模式 A_2 和 TPT(第三方企业回收)模式 A_3 ,即 $A = \{A_i\} (i = 1, 2, 3)$.影响 A 企业动力电池回收模式选择的因素主要来自 3 个方面:第一来自于企业自身,包括供应链控制能力(C_1)、回收配套设施(C_2)和回收专业化程度(C_3);第二为经济成本指标,包括回收规模(C_4)、回收成本(C_5);第三为社会效益指标,即资源再利用情况(C_6),则指标集合表示为 $C = \{C_j\} (j = 1, 2, \dots, 6)$.设 w_j 为指标权重,且 $w_j \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^6 w_j = 1$.5 位专家 $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5\}$ 采用 2DULVs 对方案 A_i 在指标 C_j 影响下进行评价.这里,设专家权重 $\gamma_k (k=1, 2, \dots, 5)$ 分别为 0.2,则评价矩阵为 $\hat{R}_k = [\hat{r}_{ij}^k]_{m \times n}, (k = 1, 2, \dots, p), \hat{r}_{ij}^k = ([\hat{r}_{a_{ij}}^k, \hat{r}_{b_{ij}}^k] [\hat{r}_{c_{ij}}^k, \hat{r}_{d_{ij}}^k])$,其中, $[\hat{r}_{a_{ij}}^k, \hat{r}_{b_{ij}}^k]$ 为方案 A_i 在考虑指标 C_j 影响下的评价价值, $\hat{r}_{a_{ij}}^k, \hat{r}_{b_{ij}}^k \in \mathbf{R}_I, \mathbf{R}_I = (\hat{r}_0, \hat{r}_1, \dots, \hat{r}_6); [\hat{r}_{c_{ij}}^k, \hat{r}_{d_{ij}}^k]$ 是对第一类语言评价价值的可靠性评价, $\hat{r}_{c_{ij}}^k, \hat{r}_{d_{ij}}^k \in \mathbf{R}_{II}, \mathbf{R}_{II} = (\hat{r}_0, \hat{r}_1, \dots, \hat{r}_4)$.受篇幅所限,这里只给出专家 e_1 的评价矩阵,如表 1 所示.对 3 种回收模式进行评价,并选出最优方案.

3.2 方案评价

采用所提出的 2DUL-VIKOR 方法对 A 企业电

动汽车动力电池的回收模式进行决策.

所示.

Stage 1 专家意见聚合.

Step 1.2 根据公式(17),计算支持度 $\text{Sup}(\hat{s}_{ij}^k,$

Step 1.1 根据公式(12),将决策信息集 $\hat{R}_k =$

$\hat{s}_{ij}^k)$,如表 3 所示.

$[\hat{r}_{ij}^k]_{m \times n}$,转化为规范信息集 $\hat{S}_k = [\hat{s}_{ij}^k]_{m \times n}$,如表 2

表 1 专家 e_1 对方案 A_i 在指标 C_j 影响下的 2DUL 评价矩阵

Tab. 1 2DUL evaluation matrix of alternative A_i with respect to criterion C_j by expert e_1

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	$([\hat{r}_4, \hat{r}_5], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_3, \hat{r}_4], [\check{r}_3, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_2, \hat{r}_3], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_2, \hat{r}_3], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_5, \hat{r}_5], [\check{r}_3, \check{r}_4])$	$([\hat{r}_4, \hat{r}_5], [\check{r}_2, \check{r}_3])$
A_2	$([\hat{r}_4, \hat{r}_5], [\check{r}_2, \check{r}_4])$	$([\hat{r}_5, \hat{r}_6], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_4, \hat{r}_5], [\check{r}_3, \check{r}_4])$	$([\hat{r}_2, \hat{r}_3], [\check{r}_3, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_3, \hat{r}_4], [\check{r}_3, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_5, \hat{r}_6], [\check{r}_3, \check{r}_4])$
A_3	$([\hat{r}_1, \hat{r}_2], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_4, \hat{r}_5], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_4, \hat{r}_5], [\check{r}_3, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_3, \hat{r}_5], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_2, \hat{r}_3], [\check{r}_2, \check{r}_3])$	$([\hat{r}_2, \hat{r}_2], [\check{r}_2, \check{r}_3])$

表 2 专家 e_1 针对 3 个备选方案的规范化评价

Tab. 2 Normalized evaluation values of the three alternatives by expert e_1

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	$([\hat{s}_4, \hat{s}_5], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_3, \hat{s}_4], [\check{s}_3, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_2, \hat{s}_3], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_2, \hat{s}_3], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_1, \hat{s}_1], [\check{s}_3, \check{s}_4])$	$([\hat{s}_4, \hat{s}_5], [\check{s}_2, \check{s}_3])$
A_2	$([\hat{s}_4, \hat{s}_5], [\check{s}_2, \check{s}_4])$	$([\hat{s}_5, \hat{s}_6], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_4, \hat{s}_5], [\check{s}_3, \check{s}_4])$	$([\hat{s}_3, \hat{s}_4], [\check{s}_3, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_2, \hat{s}_3], [\check{s}_3, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_5, \hat{s}_6], [\check{s}_3, \check{s}_4])$
A_3	$([\hat{s}_1, \hat{s}_2], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_4, \hat{s}_5], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_4, \hat{s}_5], [\check{s}_3, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_1, \hat{s}_3], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_3, \hat{s}_4], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_2, \hat{s}_2], [\check{s}_2, \check{s}_3])$

表 3 专家 e_1 的支持度值

Tab. 3 Support degree of expert e_1

k	$\text{Sup}(\hat{s}_{l1}^k, \hat{s}_{l1}^k)$				
	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$	$l=5$
1	0	0.906	0.844	0.906	0.740
2	0.906	0	0.896	0.917	0.792
3	0.844	0.896	0	0.813	0.833
4	0.906	0.917	0.813	0	0.833
5	0.740	0.792	0.833	0.833	0

Step 1.3 根据公式(18),计算 $T(\hat{s}_{ij}^k)$.

$T(\hat{s}_{11}^1) = 3.396, T(\hat{s}_{12}^1) = 3.302, T(\hat{s}_{13}^1) =$
 $3.719, T(\hat{s}_{14}^1) = 3.542, T(\hat{s}_{15}^1) = 3.500, T(\hat{s}_{16}^1) =$
 $3.052, T(\hat{s}_{21}^1) = 3.281, T(\hat{s}_{22}^1) = 3.542, T(\hat{s}_{23}^1) =$
 $3.323, T(\hat{s}_{24}^1) = 3.583, T(\hat{s}_{25}^1) = 3.677, T(\hat{s}_{26}^1) =$

$3.479, T(\hat{s}_{31}^1) = 3.617, T(\hat{s}_{32}^1) = 3.180, T(\hat{s}_{33}^1) =$
 $3.336, T(\hat{s}_{34}^1) = 3.555, T(\hat{s}_{35}^1) = 3.606,$
 $T(\hat{s}_{36}^1) = 3.685.$

Step 1.4 根据公式(19),计算二维不确定语言变量 \hat{s}_{ij}^k 相关权重.

$\omega_{11}^1 = 0.200, \omega_{12}^1 = 0.188, \omega_{13}^1 = 0.199, \omega_{14}^1 =$
 $0.204, \omega_{15}^1 = 0.192, \omega_{16}^1 = 0.195, \omega_{21}^1 = 0.192, \omega_{22}^1 =$
 $0.205, \omega_{23}^1 = 0.197, \omega_{24}^1 = 0.204, \omega_{25}^1 = 0.200, \omega_{26}^1 =$
 $0.201, \omega_{31}^1 = 0.198, \omega_{32}^1 = 0.197, \omega_{33}^1 = 0.204, \omega_{34}^1 =$
 $0.199, \omega_{35}^1 = 0.204, \omega_{36}^1 = 0.201.$

Step 1.5 根据公式(20)采用 2DULPGWA 算子对各专家评价进行聚合,结果如表 4 所示.

表 4 2DUL 聚合决策矩阵

Tab. 4 2DUL aggregation decision matrix

方案	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	$([\hat{s}_{4.49}, \hat{s}_{5.31}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{2.19}, \hat{s}_{3.19}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{3.40}, \hat{s}_{3.40}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{2.60}, \hat{s}_{3.81}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{0.39}, \hat{s}_{1.81}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{4.20}, \hat{s}_{5.40}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$
A_2	$([\hat{s}_{4.20}, \hat{s}_{5.20}], [\check{s}_2, \check{s}_4])$	$([\hat{s}_{4.59}, \hat{s}_{5.61}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{4.19}, \hat{s}_{5.40}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{2.80}, \hat{s}_{3.60}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{1.99}, \hat{s}_{3.20}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{4.61}, \hat{s}_{5.81}], [\check{s}_3, \check{s}_3])$
A_3	$([\hat{s}_{1.60}, \hat{s}_{2.60}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{4.39}, \hat{s}_{5.39}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{4.60}, \hat{s}_{5.39}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{0.79}, \hat{s}_{1.80}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{3.00}, \hat{s}_{3.80}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$	$([\hat{s}_{1.42}, \hat{s}_{2.41}], [\check{s}_2, \check{s}_3])$

Stage 2 采用变异系数法计算指标权重.

Step 2.1 采用公式(21)、(22)计算第 j 项指标的均值 \bar{r}_j 和标准差 D_j .

$\bar{r}_1 = 0.439, \bar{r}_2 = 0.440, \bar{r}_3 = 0.441, \bar{r}_4 =$
 $0.267, \bar{r}_5 = 0.246, \bar{r}_6 = 0.450.$

$D_1 = 0.194, D_2 = 0.139, D_3 = 0.121, D_4 =$
 $0.115, D_5 = 0.122, D_6 = 0.230.$

Step 2.2 采用公式(23)计算第 j 项指标的变异系数 Y_j .

$Y_1 = 0.443, Y_2 = 0.316, Y_3 = 0.274, Y_4 =$
 $0.429, Y_5 = 0.493, Y_6 = 0.512.$

Step 2.3 采用公式(24)计算指标权重 w_j .

$w_1 = 0.180, w_2 = 0.128, w_3 = 0.111, w_4 =$
 $0.174, w_5 = 0.200, w_6 = 0.207.$

Stage 3 求解最优方案.

Step 3.1 根据公式(13)确定聚合专家意见后的信息集的理想解 \hat{S}^+ 与负理想解 \hat{S}^- .

$$\hat{S}^+ = \{([\hat{s}_{4.487}, \hat{s}_{5.314}][\check{s}_2^+, \check{s}_4^+])([\hat{s}_{4.594},$$

$$\{\hat{s}_{5.610}^+][\hat{s}_2^+, \hat{s}_3^+)([\hat{s}_{4.600}^+, \hat{s}_{5.401}^+][\hat{s}_2^+, \hat{s}_3^+)([\hat{s}_{2.802}^+, \hat{s}_{3.805}^+][\hat{s}_2^+, \hat{s}_3^+)([\hat{s}_{3.001}^+, \hat{s}_{3.800}^+][\hat{s}_2^+, \hat{s}_3^+)([\hat{s}_{4.609}^+, \hat{s}_{5.810}^+][\hat{s}_3^+, \hat{s}_3^+)]\}.$$

$$\hat{S}^- = \{([\hat{s}_{1.601}^-, \hat{s}_{2.601}^-][\hat{s}_2^-, \hat{s}_3^-)([\hat{s}_{2.191}^-, \hat{s}_{3.190}^-][\hat{s}_2^-, \hat{s}_3^-)([\hat{s}_{2.399}^-, \hat{s}_{3.400}^-][\hat{s}_2^-, \hat{s}_3^-)([\hat{s}_{0.791}^-, \hat{s}_{1.797}^-][\hat{s}_2^-, \hat{s}_3^-)([\hat{s}_{0.391}^-, \hat{s}_{1.810}^-][\hat{s}_2^-, \hat{s}_3^-)([\hat{s}_{1.415}^-, \hat{s}_{2.410}^-][\hat{s}_2^-, \hat{s}_3^-)]\}$$

Step 3.2 根据公式(14)~(16),计算综合指标值 Q_i ,并根据 Q_i 值进行降序排序,确定最优解.

$S_1=1.058, S_2=0.903, S_3=1.050; R_1=0.267, R_2=0.215, R_3=0.231; Q_1=1, Q_2=0, Q_3=0.627$, 其排序结果为: $Q_2 < Q_3 < Q_1$. Q_i 同时满足 2.3 节中 Step4 的条件 1 和条件 2,故备选方案的排序为: $A_2 > A_3 > A_1$. A_2 为最佳方案.

综上所述, A 企业选择 A_2 ,即生产商联盟对动力电池进行回收最为合适. A_2 回收模式的优势主要体现在:①回收设施以及专业性较生产商自主回收更强;②生产商联盟回收可分担逆向物流回收成本;③动力电池回收后资源的利用率较第三方回收模式更高.

4 结语

本文从电动汽车生产商的角度针对动力电池回收模式的多属性群决策问题进行研究,通过文献回顾分析了 2DULVs 以及 VIKOR 法各自求解多属性决策问题的优势及局限,提出了一种基于 2DULVs 与 VIKOR 相结合的 2DUL-VIKOR 法. 首先,在进行专家意见聚合时运用 2DULPGWA 算子,确保聚合信息的准确性;其次,运用变异系数法求解指标权重,保证其客观性;结合 VIKOR 法求解聚合后的信息集并进行排序,求得最优解;最后结合实例对所提出的方法的有效性和实用性进行验证. 现阶段,综合考虑经济效益、回收成本以及资源利用方面的影响,动力电池的回收采取生产商联盟模式较为适合.

参考文献:

[1] 中国电动车网.我国电动汽车动力电池到 2020 年累计报废量将达到 12 万到 17 万吨[EB/OL].[2017-12-18]. http://news.ddc.net.cn/newsview_61213.html.
Chinese Electric Vehicle Networks. Chinese electric automobile power batteries will reach 1.2 million tons to 1.7 million tons by 2020[EB/OL].[2017-12-18]. http://news.ddc.net.cn/newsview_61213.html.

[2] ORDONEZ J, GAGO E J, GIRARD A. Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 60:195.

[3] TURNER J M, NUGENT L M. Charging up battery recycling policies: extended producer responsibility for single-use batteries in the European Union, Canada, and the United States [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(5):1148.

[4] 尤建新,段春艳,黄志明,等.动力电池回收的环境质量成本控制模型构建[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6):969.
YOU Jianxin, DUAN Chunyan, HUANG Zhiming, et al. Construction of environmental quality cost control model for power battery recovery [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(6):969.

[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.
YAO Hailin, WANG Chang, HUANG Jianbai. Research on recycling and utilization mode of power battery of new energy vehicle in China under EPR [J]. *Science and Technology Management Research*, 2015, 35(18):84.

[6] ZHU W D, ZHOU G Z, YANG S L. An approach to group decision making based on 2-dimension linguistic assessment information [J]. *Systems Engineering*, 2009, 27(2):113.

[7] LIU P, YU X. 2-dimension uncertain linguistic power generalized weighted aggregation operator and its application in multiple attribute group decision making [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 57(2):69.

[8] OPRICOVIC S, TZENG G H. Compromise solution by MCDM methods: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [J]. *European Journal of Operation and Research*, 2004, 156:445.

[9] YOU X Y, YOU J X, LIU H C, et al. Group multi-criteria supplier selection using an extended VIKOR method with interval 2-tuple linguistic information [J]. *Expert Systems with Applications*, 2015, 42(4):1906.

[10] 丁日佳,孙晓阳.基于 VIKOR 的煤炭企业综合竞争力评价[J]. *煤炭技术*, 2017, 1(36):318.
DING Rijia, SUN Xiaoyang. Comprehensive competitiveness evaluation of coal enterprises based on VIKOR [J]. *Coal Technology*, 2017, 1(36):318.

[11] XU Z S. Uncertain linguistic aggregation operators based approach to multiple group decision making under uncertain linguistic environment [J]. *Information Science*, 2004, 168(1):171.

[12] YAGER R R. Generalized OWA aggregation operators [J]. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2004, 3(1):93.

[13] XU Z S. Induced uncertain linguistic OWA operators applied to group decision making [J]. *Information Fusion*, 2006, 7(2):231.

[14] YAGER R R. The power average operator [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics—Part A: Systems and Humans*, 2001, 31(6):724.

[15] HENDRICKS W A, ROBEY K W. The sampling distribution of the coefficient of variation [J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1936, 7(3):129.