

基于二元语义云模型的拆卸方案评价

陈兆芳¹,徐政¹,郑祥盘²,黄文翰³

(1. 福建理工大学 管理学院,福建 福州 350118;

2. 闽江学院 物理与电子信息工程学院,福建 福州 350108;

3. 福建省特种设备检验研究院,福建 福州 350008)

摘要:针对拆卸方案评价指标具有的模糊性和复杂耦合关系特点,提出基于二元语义云模型的拆卸方案评价模型。在查阅文献和咨询相关行业专家的基础上结合废旧产品拆卸特点,建立废旧产品拆卸方案评价指标体系,该指标体系包括技术性、经济性、环境性3个一级指标和9个二级指标;引入二元语义表征各指标相对重要度,利用层次分析法构建二元语义判断矩阵,确定评价指标权重。通过各指标分级标准计算获得云模型的数字特征,在此基础上结合指标权重,构建基于二元语义云模型的废旧产品拆卸方案的评价模型;以圆柱圆锥齿轮减速器拆卸方案为例进行评价方法应用,结果表明,所提方法不仅兼顾当前政策导向且评价结果真实、可靠。

关键词:拆卸方案;二元语义;层次分析法;云模型

中图分类号:TB472

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2023)04-0392-09

Evaluation of disassembly schemes based on binary semantic cloud model

CHEN Zhaofang¹, XU Zheng¹, ZHENG Xiangpan², HUANG Wenhan³

(1. School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. School of Physics & Electronic Information Engineering, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

3. Fujian Special Equipment Inspection & Research Institute, Fuzhou 350008, China)

Abstract: A disassembly plan evaluation model based on binary semantic cloud model was proposed to address the fuzziness and complex coupling characteristics of the evaluation indicators for disassembly plans. Firstly, based on extensive literature review and consultation with relevant industry experts, combined with the characteristics of waste product disassembly, an evaluation index system for waste product disassembly plans was established. This index system has three primary indicators, including technical, economic, and environmental aspects, and nine secondary indicators; secondly, binary semantics was introduced to represent the relative importance of each indicator, and analytic hierarchy process was used to construct a binary semantic judgment matrix to determine the weight of evaluation indicators. The digital features of the cloud model were obtained by calculating the grading standards of each indicator, and the indicator weights were combined with the digital features of the cloud model to construct an evaluation model for the disassembly plan of waste products based on the binary semantic cloud model; finally, the disassembly scheme of cylindrical bevel gear reducers was taken as the object for the application of the evaluation method. Results show that the proposed method not only takes into account the current policy orientation of social environmental protection, but also has authenticity and reliability in the evaluation results.

Keywords: disassembly scheme; binary semantics; AHP; cloud model

收稿日期:2023-04-13

第一作者简介:陈兆芳(1984—),女,福建龙海人,副教授,博士,研究方向:多属性决策,优化理论。

回收及再制造是废旧产品循环利用中不可或缺的一环,在产品初期,将拆卸设计技术考虑到产品的设计方案中,使得产品生命周期结束时,更易于拆卸,促进废旧产品的回收再利用。废旧产品在拆卸过程中不仅需要考虑能耗、效率和时间,还要考虑有害物质和拆卸噪声等环境问题,因此,选择合适的产品拆卸设计方案对环境的可持续发展,实现碳达峰和碳中和的环境目标具有积极的意义。

为合理评价废旧产品的可拆卸性,国内外学者利用先进的科学方法对产品的拆卸方案评估进行研究^[1]。目前常用的拆卸评估方法包括信息熵评估法^[2]、时间测度法^[3]、专家打分法^[4]、多属性决策法^[5]、模糊综合评价法^[6]和主成分分析法^[7]等。上述方法在一定程度上实现了产品可拆卸性的评估,但却难以描述复杂环境和人类模糊思维下的专家评价信息。同时,缺少专家权重的考虑,难以有

效解决专家差异带来的群体决策问题。本文采用的二元语义 AHP 确定权重的方法不仅可以在语言信息集结的过程中确保信息的完整性和真实性,还具有简便、灵活的特点,同时可以兼顾当前政策导向,客观评价出指标的偏好权重。在此基础上,结合云模型特性能更好地实现定性概念与定量数据间转换,使评价过程更客观,评价结果更可靠。

1 建立拆卸方案评价指标体系

拆卸是将零部件从产品、总成或部件等装配体上分离移出,为达到合理节约资金、资源和保护环境的目的,在拆卸过程中,需要考虑能耗、效率、时间、环境问题,且拆卸方案在评价过程中也受到较多因素影响,本文在咨询相关行业专家拆卸经验和文献^[8]查阅基础上,将拆卸方案评价体系分为3个二级指标、9个三级指标,如图1。

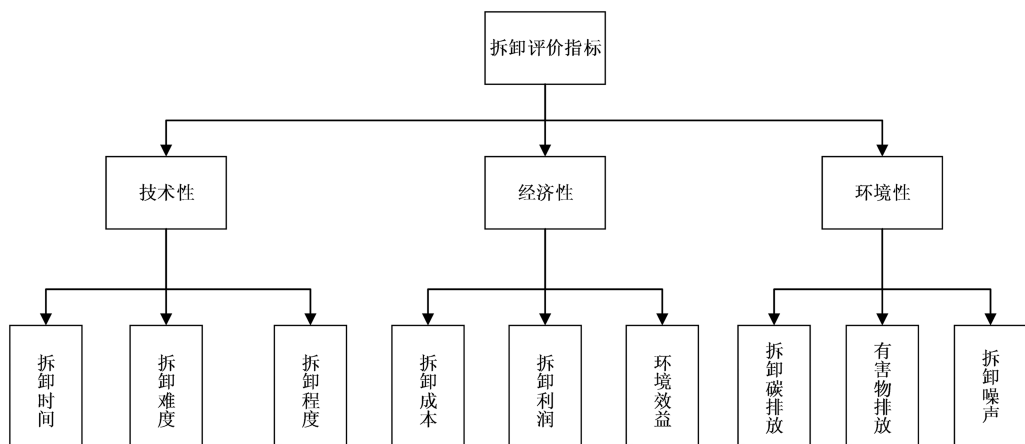


图1 拆卸方案评价指标体系

Fig.1 Evaluation index system of disassembly scheme

1.1 技术性指标

废旧产品拆卸设计过程中,需要重视拆卸的技术问题,使产品在生命周期结束时,拆卸的效率达到最大值。其中,拆卸的时间和程度可以作为拆卸效率的体现,拆卸难度用于判断方案的技术可行性^[9]。

拆卸产品所花费的时间越长,表明该拆卸方案的匹配度越低。对产品拆卸过程的技术难度进行评级:困难(0.7~1)、中等(0.4~0.6)、简单(0~0.3),拆卸难度越低,表明该拆卸方案越优。拆卸程度即整个拆卸过程中拆卸部分占拆卸对象的比例,拆卸程度越高,对应的产品设计方案也越优。

1.2 经济性指标

拆卸产品的经济可行性,是指进行产品拆卸所投入的成本资金小于其综合产出效益,主要包

括经济效益和环境效益。评价产品拆卸方案的经济可行性,即确定拆卸方案是否为推动废旧产品拆卸的原动力。

拆卸成本即拆卸过程中产生的一系列费用,拆卸成本越低,拆卸方案越优。拆卸利润是拆卸所得收入扣除拆卸成本的金额,拆卸利润越高,方案的匹配度越高。环境效益是指废旧产品拆卸所得材料投入再制造及其产品在社会上利用产生的环境影响,可以通过拆卸产品全生命周期的原材料生产阶段碳排放估算,碳排放当量越大,说明拆卸方案的环境效益越高,方案的匹配度越优。

1.3 环境性指标

产品拆卸过程本身会对环境造成影响,主要包括能源消耗、有害物质排放和噪声3个方面。产

品拆卸过程需要消耗能源,主要是电能,也包括石油、天然气等,采用碳排放指标来度和评估,拆卸过程碳排放越大则方案匹配度越低^[10]。在产品的拆卸过程中,如果废旧产品采用过时的技术而导致有害物质的排放超过相关标准,那么就没有必要对其进行拆卸和再利用,或者应通过先进技术手段控制其中的有害物质,避免对环境造成二次污染,有害物质包括废水、废气和固体废弃物,有害物排放量越低则方案越优。当拆卸过程的声音过大,对人及周围环境造成不良影响时,就形成噪声污染,拆卸噪音越大,表示该拆卸方案的性能越低。

2 基于二元语义 AHP-云模型的废旧产品拆卸方案评价

2.1 拆卸方案评价流程

步骤 1: 构建语言评价集,对产品拆卸方案进行定性描述评价,本文的语言评价集分 9 个等级,包括: z_1 为极端不重要(JBZ), z_2 为强烈不重要(QBZ), z_3 为明显不重要(MBZ), z_4 为稍不重要(SBZ), z_5 为同等重要(TZ), z_6 为稍重要(SZ), z_7 为明显重要(MZ), z_8 为强烈重要(QZ), z_9 为极端重要(JZ)^[11]。

步骤 2: 构建决策矩阵。由专家从语言评价集中挑选适当的语义元素对因素集或因素之间进行两两比较,并构建相对模糊的决策矩阵。

步骤 3: 规范化语言评价信息。运用公式(1)(2)(3)将专家给出的初始语言矩阵转化为二元语义判断矩阵。

步骤 4: 基于共识法的专家权重确定。根据公式(5)计算出各专家与全体专家评估矩阵的共识度;运用公式(6)构建线性规划方程求解专家权重。

步骤 5: 基于二元语义的 AHP 权重确定。运用公式(4)将多个专家的二元语义矩阵加权形成综合二元语义判断矩阵,通过公式(7)转化为模糊互补矩阵。运用定理 3, 构建一致判断矩阵,并计算得到各判断矩阵下的指标权重。基于 AHP 理论,根据二三级指标之间的关系,得到三级影响指标的最终权重 w 。

步骤 6: 根据公式(9)(10)(11)求出各指标的 3 个云特征数 Ex 、 En 、 He 。根据案例所提供各指标的数据算出其各自的隶属度,通过公式(13)求出案例各方案的隶属度,根据最大隶属度原则,

评价出各拆卸方案的等级。

2.2 二元语义及其运算

对现实中评价的复杂性和多变性,二元语义可以通过二元组 (Z_i, Y_i) 来表达评价信息,使得评价结果更加准确。二元语义的基本理论如下^[12]。

定义 1: 设语言评价集 $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, z_n 是语言短语,则对应的二元语义形式通过函数 C 可得到:

$$\begin{cases} C: Z \rightarrow Z \times [-0.5, 0.5] \\ C(Z_i) = (Z_i, 0), z_i \in Z \end{cases} \quad (1)$$

定义 2: 实数 $R \in [1, n]$ 是集结运算的结果, R 可以通过函数 Δ 得到:

$$\begin{aligned} \Delta: [1, n] &\rightarrow Z \times [-0.5, 0.5] \\ \Delta(R) &= \begin{cases} Z_i, i = \text{round}(R) \\ Y_i = R - i, Y_i \in [-0.5, 0.5] \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\text{round}(\cdot)$ 表示四舍五入取整算子; n 为语言评价集 Z 的元素个数;反之,存在一个逆函数 Δ^{-1} 可以将二元语义形式转换为实数 R 。

$$\Delta^{-1}: Z \times [-0.5, 0.5] \rightarrow [1, n] \quad (3)$$

$$\Delta^{-1}(Z_i, Y_i) = i + Y_i = R$$

若存在任意两个二元语义 (x_a, y_a) 和 (x_b, y_b) , 则两个二元语义算子存在以下规则:

- (1) 当 $a > b$, 则 $(x_a, y_a) > (x_b, y_b)$;
- (2) 当 $a = b$, 若 $x_a > x_b$, 则 $(x_a, y_a) > (x_b, y_b)$;
- (3) 若 $x_a = x_b$, 则 $(x_a, y_a) = (x_b, y_b)$; 若 $x_a < x_b$, 则 $(x_a, y_a) < (x_b, y_b)$ 。

定义 3: 设 $x \{ (z_1, y_1), (z_2, y_2), \dots, (z_n, y_n) \}$ 是根据 n 位专家所给的二元语义评价信息所集成的综合评价信息,根据能力偏好等差异给出相应的专家权重 $\gamma = \{ \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n \}$, 则二元语义加权算子 α 为:

$$\begin{aligned} \alpha &[(z_1, y_1), (z_2, y_2), \dots, (z_n, y_n)] = \\ &\Delta \left[\sum_{i=1}^n \Delta^{-1}(z_i, y_i) \lambda_i \right] \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 基于最大共识法的专家权重

引入最大共识法确定专家权重 γ 。最大共识法的基本理论如下^[13]。

定义 4: 设 m^n ($n = 1, 2, \dots, k$) 和 m 分别为专家 E^n ($n = 1, 2, \dots, k$) 评估矩阵和群体集结评估矩阵,则专家 E^n 与全体专家评估矩阵共识度为 $CDD^n(X^n, X)$ 。

$$CDE_{ij}^n(X^n, X) = 1 - d(x_{ij}^n, x_{ij}) \quad (5)$$

式中, $d(x_{ij}^n, x_{ij}) = \Delta[\Delta^{-1}(x_{ij}^n) - \Delta^{-1}(x_{ij})]$,

$$CDD^n(X^n, X) = \frac{1}{n \cdot n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n CDE_{ij}^n(X^n, X)。$$

根据各专家的 $CDD^n(X^n, X)$, 构建线性规划方程, 以此求解不完整信息下的专家权重 γ 。

$$\begin{aligned} \max f(\lambda_n) &= \sum_{n=1}^m CDD^n(X^n, X) \lambda_n \\ \text{s.t.} &\begin{cases} \sum_{n=1}^m \lambda_n = 1 \\ \lambda_n \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

2.4 基于二元语义的 AHP 权重确定

将二元语义与 AHP 结合, 利用 AHP 分析方法的框架结构, 以二元语义判断矩阵为依据, 按下述定义及定理构建 AHP 判断矩阵, 进而确定各评价指标权重 w 。

定义 5: 设第 r 个专家的语言决策矩阵为 S^r , 而通过定义 1 将 S^r 转换为二元语义形式的判断矩阵 $A = [(S_{ij}, 0)]_{n \times m}$, 并定义 $U = (u_{ij})_{n \times m}$ 为过渡矩阵, 其中: k 代表语言评价集中的元素个数。

$$u_{ij} = \frac{\Delta^{-1}(s_{ij}, 0)}{k-1} \quad (7)$$

定理 1: 存在二元语义判断矩阵 $A = [(S_{ij}, 0)]_{n \times m}$, 和过渡矩阵 $U = (u_{ij})_{n \times m}$, 对 $\forall i, j$, 当满足不等式 $x_{ij} \geq x_{ji}$, 则有 $u_{ij} \geq u_{ji}$ 。

定理 2: 若 U 为模糊互补矩阵, 则满足 $u_{ij} + u_{ji} = 1, u_{ii} = 0.5$ 。

定理 3: 设 $B = (a_{ij})_{n \times m}$ 为 $[1/M, M]$ 标度的判断矩阵, 令 $u_{ij} = 0.5(\log_M a_{ij} + 1)$, $U = (u_{ij})_{n \times m}$, 则 U 为其模糊互补矩阵。因此, 若 $U = (u_{ij})_{n \times m}$ 是模糊互补矩阵, 令 $a_{ij} = M^{(2u_{ij}-1)}$, 则 $B = (a_{ij})_{n \times m}$ 为 $[1/M, M]$ 标度的一致判断矩阵。

2.5 云模型理论

云模型是一种认知模型, 能够较好地实现从定性概念到定量数值间的转换, 云模型的 3 个特征数分别为期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He 。

期望值 Ex 是云滴在论域中的分布期望, 是最能够代表定性概念的点。熵 En 在云模型中代表概念的不确定性程度, 熵越大, 模糊性越强。超熵 He 是熵的不确定度量, 即熵的熵, 超熵越大, 云离散程度越大, 隶属度的随机性也随之增大, 云厚度也越大。

云模型定义^[14]: 设 x, y, v 为任意的定量集合, y 称作论域, 满足 $x \in y$ 且 v 作为 y 上的定性概念。若 y 中的任意研究对象 x 都存在一个稳定倾向的随机数 $\mu(x) \in [0, 1]$, 则称 $\mu(x)$ 对 v 的隶属度, 即确定度。确定度在 y 上的分布被称作隶属云。若 x 满足 $x \sim N(Ex, En'^2)$, 而 En' 满足 $En' \sim N(En, He^2)$, 且 $\mu(x)$ 满足:

$$\mu_x = \exp\left(\frac{(x_i - Ex)^2}{2En^2}\right) \quad (8)$$

则称 $\mu(x)$ 在论域 y 上的分布为正态云。

在废旧产品拆卸方案评价中, 用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 来表征拆卸方案的优劣程度。云模型每个等级的期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 的计算公式如下:

$$Ex = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} \quad (9)$$

$$En = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{6} \quad (10)$$

$$He = k \quad (11)$$

式中, x_{\max}, x_{\min} 分别为各指标对应等级的上、下边界值; k 取经验值 0.05^[14]。

2.6 指标权重确定

分析实例对象的影响指标, 划分技术性指标 (C_1)、经济性指标 (C_2) 和环境性指标 (C_3) 3 个二级指标, 并根据指标特点得到 9 个三级指标。通过收集专家意见, 得到初始语言决策矩阵。举例二级指标的初始语言决策矩阵, 如表 1。其中, E_i 表示第 i 个专家。

表 1 二级指标的初始语言决策矩阵

Tab.1 Initial linguistic decision matrix for secondary indicators

指标	C_1				C_2				C_3			
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_1	E_2	E_3	E_4	E_1	E_2	E_3	E_4
C_1	TZ	TZ	TZ	TZ	MBZ	QBZ	SBZ	SBZ	SBZ	MBZ	MBZ	SZ
C_2	MZ	QZ	SZ	SZ	TZ	TZ	TZ	TZ	SZ	SZ	SBZ	MZ
C_3	SZ	MZ	MZ	SBZ	SBZ	SBZ	SZ	MBZ	TZ	TZ	TZ	TZ

(1)运用语言评价集和公式(1)(2)(3),将初始语言决策矩阵转化为二元语义判断矩阵。如表 2。

表 2 二级指标的二元语义决策矩阵

Tab.2 Binary semantic decision matrix for secondary indicators

指标	C ₁				C ₂				C ₃			
	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄
C ₁	Z ₅	Z ₅	Z ₅	Z ₅	Z ₃	Z ₂	Z ₄	Z ₄	Z ₄	Z ₃	Z ₃	Z ₆
C ₂	Z ₇	Z ₈	Z ₆	Z ₆	Z ₅	Z ₅	Z ₅	Z ₅	Z ₆	Z ₆	Z ₄	Z ₇
C ₃	Z ₆	Z ₇	Z ₇	Z ₄	Z ₄	Z ₄	Z ₆	Z ₃	Z ₅	Z ₅	Z ₅	Z ₅

(2)根据公式(5),计算得到专家 1~4 的共识度,分别为 CDD(E₁) = 0.583 3; CDD(E₂) = 0.527 8; CDD(E₃) = 0.472 2; CDD(E₄) = 0.527 8。

再通过公式(6),构建线性规划方程:

$$\max f(\lambda) = 0.583\ 3\lambda_1 + 0.527\ 8\lambda_2 + 0.472\ 2\lambda_3 + 0.527\ 8\lambda_4$$

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1 \\ \lambda_1 + \lambda_4 \leq 0.7 \\ 0.2 \leq \lambda_1 \leq 0.4, 0.2 \leq \lambda_2 \leq 0.4, 0.2 \leq \lambda_3 \leq 0.4 \\ 0.15 \leq \lambda_4 < 1 \end{cases}$$

(12)

求解线性规划方程,得到当 $\gamma = \{0.4, 0.225, 0.15, 0.225\}$ 时, $\max f(\lambda)$ 处于最大值,所以专家 1~4 的权重为 0.4, 0.225, 0.15, 0.225。

(3)将专家权重代入公式(4),得到综合二元语义判断矩阵,如表 3。利用定理 3 和公式(7),将综合二元语义判断矩阵转化为标度为 [1/9, 9] 的一致判断矩阵,见表 4。

表 3 二级指标的综合二元语义判断矩阵

Tab.3 Comprehensive binary semantic judgment matrix for secondary indicators

指标	C ₁	C ₂	C ₃
C ₁	Z ₅	(Z ₃ , 0.375)	(Z ₅ , -0.475)
C ₂	(Z ₇ , -0.375)	Z ₅	(Z ₆ , 0.150)
C ₃	(Z ₅ , 0.475)	(Z ₄ , -0.250)	Z ₅

表 4 二级指标的判断矩阵

Tab.4 Judgment matrix of secondary indicators

指标	C ₁	C ₂	C ₃
C ₁	1	0.23	0.44

续表

指标	C ₁	C ₂	C ₃
C ₂	4.23	1	3.26
C ₃	2.25	0.30	1

(4)根据 AHP 计算各层次的权重,并将层次间权重相乘,得到各指标最终的权重。见表 5。

表 5 各指标最终权重

Tab.5 Weight of each indicator

元素集	权重	评价指标	权重
C ₁	0.124 5	C ₁₁	0.025 6
		C ₁₂	0.005 8
		C ₁₃	0.093 1
C ₂	0.641 0	C ₂₁	0.071 6
		C ₂₂	0.450 2
		C ₂₃	0.119 2
C ₃	0.234 5	C ₃₁	0.041 9
		C ₃₂	0.165 1
		C ₃₃	0.027 5

表 5 中, C₁₁ 为拆卸时间, s; C₁₂ 为拆卸难度; C₁₃ 为拆卸程度; C₂₁ 为拆卸成本, 元; C₂₂ 为拆卸利润, 元; C₂₃ 为环境效益, kg/m³; C₃₁ 为拆卸碳排放, g; C₃₂ 为有害物排放, mg; C₃₃ 为拆卸噪声, dB。

2.7 云模型数字特征确定

确定拆卸方案评价指标后,根据专家经验结合可接受程度确定各指标分级标准,见表 6。评价等级分为 4 个区间,等级越高,拆卸方案越优。

表 6 拆卸方案评价指标及分级标准

Tab.6 Scheme evaluation indicators and grading standards

等级	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{32}	C_{33}
I	60~75	0~0.3	0~14/23	55~71	160~197	182~205	155~174	10.0~14.5	76~82
II	75~82	0.3~0.5	14/23~19/23	71~81	132~160	153~182	174~207	14.5~15.8	82~86
III	82~100	0.5~0.7	19/23~22/23	81~99	117~132	127~153	207~249	15.8~16.6	86~90
IV	100~115	0.7~1.0	22/23~1	99~107	85~117	120~127	249~268	16.6~18.0	90~93

根据表 6 中拆卸方案评价指标的参数范围及分级标准,用公式(9)~(11)计算拆卸方案评估与模型数字特征,例如拆卸时间的 3 个云特征数,计算结果如下:

$$E_x = \frac{60+75}{2} = 67.5$$

$$E_n = \frac{75-60}{6} = 2.5$$

$$H_e = 0.05$$

同理剩余指标的结果见表 7,利用 Matlab 软件可将表 7 中的数据转化为对应的标准云图,如图 2 所示。每个云图横轴是各个变量的值,纵轴是隶属度的值,每张云图包含 4 朵云,从左到右依次是 I、II、III、IV(依次代表优、良、中等、差)等级 4 种状态云,当给定某一变量的值时,可得出该特定点属于某一状态级的确定度。

表 7 预测指标云模型数字特征

Tab.7 Digital features of forecast indicator cloud model

等级	数字特征	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{32}	C_{33}
I	E_x	67.5	0.15	0.303 5	63	178.5	193.5	164.5	12.25	79
	E_n	2.5	0.05	0.101 2	2.666 7	6.166 7	3.833 3	3.166 7	0.75	1
	H_e	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
II	E_x	78.5	0.4	0.7165	76	146	167.5	190.5	15.15	84
	E_n	1.166 7	0.033 3	0.036 5	1.666 7	4.666 7	4.833 3	5.5	0.216 7	0.666 7
	H_e	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
III	E_x	91	0.6	0.891 5	90	124.5	140	228	16.2	88
	E_n	3	0.033 3	0.021 8	3	2.5	4.333 3	7.00	0.133 3	0.666 7
	H_e	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
IV	E_x	107.5	0.85	0.978 5	103	101	124.5	258.5	17.2	91.5
	E_n	2.5	0.05	0.007 2	1.333 3	5.333 3	1.5	3.166 7	0.233 3	0.5
	H_e	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05

2.8 拆卸方案等级评价

结合二元语义专家最大共识和 AHP 法计算拆卸方案的指标权重;基于指标分级区间计算云模型的期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 3 个特征数;结合指标权重及式(13)计算出待评估样本隶属于各等级的综合确定度 M ,根据最大确定度原则判定拆卸方案的优劣等级。

$$M = \sum_{i=1}^n \mu_i w_i \quad (13)$$

3 实例应用

以文献[10]拆卸圆柱圆锥齿轮减速器为实例,对本文所提出的拆卸方案评价方法进行验证。选取 15 个拆卸方案进行评估,拆卸方案评价等级

预测结果如表 8 所示。

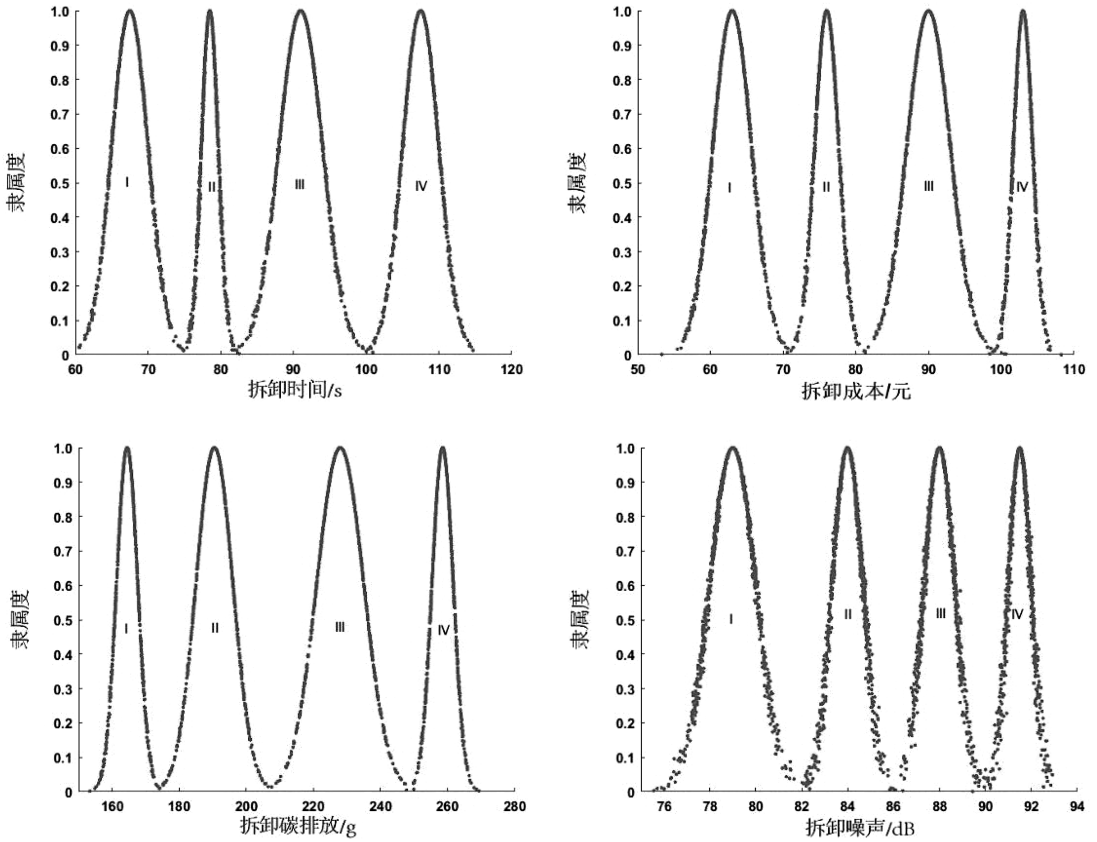


图 2 部分指标标准云图

Fig.2 Part of cloud chart of various indicator standards

表 8 拆卸方案的评估样本和评估结果

Tab.8 Disassembly scheme evaluation samples and evaluation results

样本编号	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	各等级确定度				评价等级
										I	II	III	IV	
1	80	0.8	16/23	79.61	131.49	138.43	186.79	14.8	79.0	0.027 5	0.306 3	0.007 4	0.004 1	II
2	101	0.7	21/23	74.45	174.354	196.3	247.19	17.6	87.7	0.359 0	0.046 4	0.112 1	0.001 1	I
3	73	0.5	14/23	91.97	104.13	122.35	158.40	15.7	91.1	0.008 9	0.000 3	0.045 7	0.384 5	IV
4	114	0.8	23/23	66.83	196.97	201.00	248.20	16.2	92	0.030 7	0.000 0	0.165 7	0.086 7	III
5	77	0.3	16/23	106.03	126.27	130.17	188.09	15.3	83.9	0.000 0	0.276 8	0.362 4	0.003 9	III
6	99	0.7	21/23	78.61	172.19	204.52	206.39	15.4	92.5	0.262 0	0.031 0	0.088 1	0.001 4	I
7	69	0.4	13/23	59.51	88.59	128.87	173.90	14.5	88.6	0.068 2	0.005 8	0.015 3	0.030 7	I
8	81	0.3	16/23	89.19	131.91	150.26	163.39	14.3	92.5	0.043 3	0.090 1	0.081 9	0.001 4	II
9	92	0.5	19/23	99.31	156.99	172.65	227.19	16	85.5	0.000 0	0.116 0	0.083 7	0.001 6	II
10	94	0.7	20/23	88.27	159.53	171.3	267.59	16.6	85.1	0.000 0	0.093 0	0.183 7	0.016 6	III
11	76	0.7	15/23	80.49	116.61	127.83	195.49	15.8	86.8	0.000 0	0.086 5	0.005 3	0.014 9	II

续表

样本 编号	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	各等级确定度				评价 等级
										I	II	III	IV	
12	83	0.8	17/23	70.63	140.67	150.78	189.49	13.0	84.3	0.094 1	0.337 3	0.000 7	0.005 4	II
13	87	0.7	17/23	88.79	146.31	153.00	192.49	13.2	79.7	0.082 8	0.581 3	0.078 6	0.000 0	II
14	91	0.4	18/23	98.77	147.33	160.43	217.99	14.5	89.4	0.002 9	0.500 9	0.045 0	0.000 0	II
15	106	0.9	22/23	76.81	188.99	181.74	263.70	16.0	81.1	0.108 8	0.065 2	0.023 2	0.125 4	IV

以样本1为例,通过9个具体指标的数值,可判断出其各自属于的等级区间,并通过公式(8)求得所属区间的隶属度,其次根据表5中求出的各指标的权重,通过公式(13)可求出样本在区间I、II、III、IV上的确定度,以最大确定度原则,最终判断样本1的评价等级为II。

由表5可见,权重占比最大的元素集为经济性指标,其次是环境性指标;而权重占比最大的指标为拆卸利润,占比最小的指标为拆卸难度。由此也可以看出,专家在评价拆卸指标的过程中,更重视方案的经济效益,同时也对拆卸过程中产生的环境问题较为关注。相反,随着拆卸技术的更新,专家对于拆卸难度方面的关注不高。通过二元语义云模型计算废旧产品的拆卸设计方案模型,得到表8的评价等级结果。拆卸方案2、6、7的等级区间为I为最优方案。同时,方案3和方案15的评价等级区间为IV为最劣方案。方案2和方案6虽然在技术性和环境性指标上表现不是最高,但在经济型方面表现较为优秀,而权重占比最大的也为经济指标中的拆卸利润指标,从而导致方案2和6的评价等级为优。方案7虽然在经济性指标上表现不是最高,但在环境方面和技术方面表现较为优秀,所以方案7的评价等级也为

优。而方案3和方案15尽管在经济指标方面表现较为优秀,但在技术性和环境性指标方面的表现却不如人意,因此导致其综合评价等级为差。

4 结论

1) 运用二元语义表征各指标相对重要度,刻画专家评价信息的模糊性,可以确保信息在集结的过程中的真实性和完整性。有利于评价结果的准确性和真实性。

2) 运用最大共识法,根据专家评价信息与群体评价矩阵的距离,以各专家的共识度构建线性规划方程来确定专家权重;利用层次分析法构建二元语义判断矩阵,确定评价指标权重。可以准确兼顾和反应当前政策的方针和变动。

3) 废旧产品拆卸过程存在许多不确定因素,需要综合考虑以获取最大拆卸收益,且在产品拆卸过程中具有随机性和模糊性。而云模型不仅具有模糊性和随机性,还能较好地转换定性与定量信息。因此,本文通过计算各方案指标的隶属度结合权重所得出的各方案指标等级的确定度,根据最大确定度原则,进而得到各方案的评价结果。所提方法在一定程度上为拆卸废旧产品提供了决策和支持。

参考文献:

- [1] 田广东,刘玉梅,熊明烨,等. 基于最大熵原理的产品拆卸费用定量分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2011,41(6): 641-645.
- [2] DEMPSEY P G, MATHIASSEN S E, JACKSON J A, et al. Influence of three principles of pacing on the temporal organisation of work during cyclic assembly and disassembly tasks[J]. Ergonomics, 2010, 53(11): 1347-1358.
- [3] DESAI A, MITAL A. Evaluation of disassemblability to enable design for disassembly in mass production[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2003, 32(4): 265-281.
- [4] AJAY GURU DEV C, SENTHIL KUMAR V S. Analysis on critical success factors for agile manufacturing evaluation in original equipment manufacturing industry—an AHP approach[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(5): 880-888.
- [5] 储江伟,金晓红,崔鹏飞,等. 基于拆解时间概率的产品可拆解性评价方法[J]. 机械设计, 2008, 25(10): 24-28.

- [6] 赵京,李立明,尚红,等. 基于主成分分析法的机械臂运动灵活性性能综合评价[J]. 机械工程学报,2014,50(13):9-15.
- [7] 张秀芬,张树有,伊国栋. 产品多粒度层次可拆卸性评价模型与方法[J]. 浙江大学学报(工学版),2010,44(3):581-588.
- [8] 田广东,张洪浩,王丹琦. 基于模糊 AHP-灰色关联 TOPSIS 的拆解方案评估研究[J]. 机械工程学报,2017,53(5):34-40.
- [9] 郭钧,王振东,杜百岗,等. 考虑不定拆卸程度的选择性异步并行拆卸序列规划[J]. 中国机械工程,2021,32(9):1080-1090,1101.
- [10] 汤可石,王玉琳. 产品拆解过程的碳排放分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2017,40(1):18-23.
- [11] 陈兆芳,黄文翰,陈石玮,等. 基于二元语义的装配式建筑方案评价研究[J]. 工程管理学报,2021,35(6):19-24.
- [12] WANG W J, TIAN G D, ZHANG T Z, et al. Scheme selection of design for disassembly (DFD) based on sustainability: a novel hybrid of interval 2-tuple linguistic intuitionistic fuzzy numbers and regret theory[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281:124724.
- [13] 朱江洪,李延来. 基于区间二元语义与故障模式及影响分析的地铁车门故障风险评估[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7):1630-1638.
- [14] 赵岩. 基于主成分分析-云模型的黄土隧道施工稳定性评估[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(9):1529-1536.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 391 页)

- [12] CHENG Z J, XUE G Y, WANG C, et al. Adaptive chaos synchronization control of nonlinear PMSM system using extended state observer[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016:1-10.
- [13] HEMATI N. Strange attractors in brushless DC motors[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1994, 41(1):40-45.
- [14] 张波,李忠,毛宗源. 永磁同步电动机的混沌模型及其模糊建模[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(6):841-844.
- [15] 高远,李忠富,袁海英,等. 复杂网络中众多混沌运动电机的同步控制研究[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2011, 42(3):355-360.
- [16] HORN R A, JOHNSON C R. Topics in matrix analysis[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1991.
- [17] HUANG X Q, LIN W, YANG B. Global finite-time stabilization of a class of uncertain nonlinear systems[J]. Automatica, 2005, 41(5):881-888.
- [18] HU C, YU J, JIANG H J. Finite-time synchronization of delayed neural networks with Cohen-Grossberg type based on delayed feedback control[J]. Neurocomputing, 2014, 143:90-96.
- [19] WEI R Y, CAO J D, ALSAEDI A. Finite-time and fixed-time synchronization analysis of inertial memristive neural networks with time-varying delays[J]. Cognitive Neurodynamics, 2018, 12(1):121-134.
- [20] YANG S J, LI C D, HUANG T W, et al. Fixed-time consensus of complex dynamical networks with nonlinear coupling and fuzzy state-dependent uncertainties[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2019, 365:81-97.
- [21] CHEN C, LI L X, PENG H P, et al. A new fixed-time stability theorem and its application to the fixed-time synchronization of neural networks[J]. Neural Networks, 2020, 123:412-419.
- [22] XU Y H, WU X Q, LI N, et al. Fixed-time synchronization of complex networks with a simpler nonchattering controller[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2020, 67(4):700-704.

(责任编辑:方素华)