

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.07.004

基于组合赋权-TOPSIS法的拆卸方案决策研究

宋守许, 姚大翔, 周丹, 田永廷

(合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009)

摘要:拆卸是回收和再制造的重要步骤,为了使拆卸方案达到高效率、低排放以及高经济效益的目标,文章建立一种基于组合赋权-TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution)法的拆卸方案决策模型。针对拆卸方案,从环境、技术和经济3个角度构建拆卸方案评价指标体系;依据最小信息熵原理,综合改进层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)、熵权法与CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法,为各指标进行组合赋权;使用组合权重改进TOPSIS模型,构建拆卸方案的贴近度指标,对拆卸方案进行判定;以银行自动取款机(automated teller machine, ATM)拆卸为实例进行分析,并与其他决策模型对比,验证所提决策模型的合理性及有效性,实现多拆卸方案的决策。

关键词:层次分析法(AHP);熵权法;CRITIC法;组合权重;TOPSIS法;方案决策

中图分类号: TB112 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)07-0886-08

Decision-making for dismantling solutions based on portfolio assignment-TOPSIS method

SONG Shouxu, YAO Daxiang, ZHOU Dan, TIAN Yongting

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Dismantling is an important step in recycling and remanufacturing. In order to achieve high efficiency, low emissions and high economic benefits for dismantling solutions, a dismantling solution decision-making model based on the portfolio assignment-technique for order preference by similarity to an ideal solution(TOPSIS) method is developed. The evaluation index system for dismantling solutions is constructed from economic, technical and environmental perspectives. Based on the principle of minimum information entropy, the improved analytic hierarchy process(AHP), entropy weight method and criteria importance through intercriteria correlation(CRITIC) method are combined to assign weights to each index. The TOPSIS model is improved by using the portfolio weights to construct a closeness index for the dismantling solution and to determine the dismantling solution. The analysis on the demolition of a bank automated teller machine(ATM) is carried out, and the result shows that compared with other decision-making models, the proposed model is rational and effective in the decision-making for multiple dismantling solutions.

Key words: analytic hierarchy process(AHP); entropy weight method; criteria importance through intercriteria correlation(CRITIC) method; portfolio weight; technique for order preference by similarity to an ideal solution(TOPSIS); solution decision-making

伴随着科技的进步和对环保的重视,产品的回收和再制造技术越来越受到人们的重视^[1],而拆卸是回收和再制造的首要环节,若不能及时有

效地拆卸废弃产品,不仅会危害环境,还会造成资源的浪费^[2-3]。高效低碳的拆卸方案既可以提升资源利用率,也可以提高经济效益,有助于绿色可

收稿日期:2022-03-17;修回日期:2022-06-06

基金项目:国家重点研发计划重点专项资助项目(SQ2019YFC190110)

作者简介:宋守许(1964—),男,安徽霍山人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

持续发展,因而近些年来受到广泛关注^[4]。

国内外很多学者对拆卸方案做过研究。文献[5]提出了一种基于几何约束关系的拆卸层次模型,解决了拆卸序列信息复杂、构建难的问题,为自动化拆卸提供了理论支持;文献[6]构建了零件回收评价模型,提出一种基于序列和拆解深度的决策方法,该方法可快速确定最为合理的拆解序列,提高了回收效益;文献[7]通过构建多标准评估模型,分析了机器人拆解相对于手工拆解的优势,证明其可以应用在电子元器件的拆卸;文献[8]以拆卸时间为依据,建立了一种拆卸方案的评估模型,考虑了产品在拆卸时的真实状况,解决了基于时间分析可拆卸性存在的问题;文献[9]通过模糊层次分析法对报废汽车拆卸的经济性进行了研究,得出了机器结合人工拆卸的方式更具优势;文献[10]将模糊层次分析法与灰色 TOPSIS (technique for order preference by similarity to an ideal solution)理论相结合,对空调室外机的拆卸方案做出了评估,克服了因素多产生的拆卸评估不准确问题,为拆卸企业的发展提供了理论指导;文献[11]计算出拆卸设计的综合回报率及环境影响,分析了产品属性和边界条件对主动拆卸设计经济和环境的影响;文献[12]发现退役飞机拆卸带来的高价值,提出改进 TOPSIS 方法,为飞机的拆卸方案构建了决策模型,结果表明,该模型确定的拆卸方案的可靠性达到 94.3%,提升了飞机的拆卸效率。

拆卸方案的决策问题实质是在多个方案中进行优劣评估并做出排序,其本质可归为多目标决策问题,因此可以将熵权 TOPSIS^[13]、层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)^[14]、组合赋权法^[15]等方法运用于决策中。但是传统方法在赋予权重时,会因权重的计算方法而存在一定的局限性。例如,用熵权法赋权会因数据的差异而忽略指标之间的关系,其计算结果常常缺失主观性;将模糊层次分析法与熵权法相结合,虽然兼顾了计算结果的主观性和客观性,但两者之间缺乏有效的合并规则,导致计算结果与实际存在偏差,影响决策。由于熵权法更多强调的是数据的差异性,没有考虑指标间的冲突性^[16],通过引入 CRITIC(criteria importance through intercriteria correlation)法可以有效地弥补这一不足。

为解决上述问题,本文将改进 AHP 法、熵权法和 CRITIC 法通过最小信息熵原理结合起来,构建一种新的组合权重,可使权重在不失主观性

的前提下更为客观,且有效地考虑指标信息量及指标间冲突;在此基础上引入 TOPSIS 法,形成一种新的决策模型;最后通过银行自动取款机 (automated teller machine, ATM) 的拆卸进行算例分析,并与其他常用方法进行对比,验证其合理性和有效性。

1 评价体系的建立

拆卸是一个复杂的过程,因此构建一套完善的拆卸评估体系需要考虑多方面的因素。本文主要从环境、技术和经济 3 个角度,构建 7 个技术指标如图 1 所示,用以对拆卸方案做出具体的评估。拆卸的环境性包括环境排放和拆卸噪声;技术性包括拆卸时间、可达性、拆卸复杂程度;经济性包括成本利润和总利润。

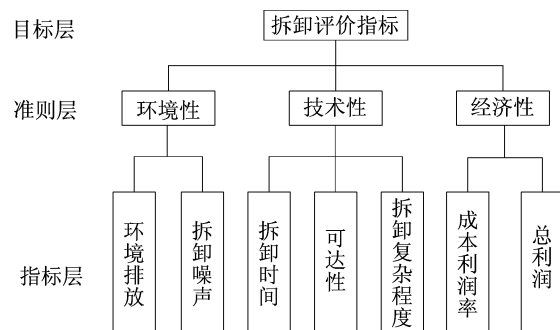


图 1 拆卸评价体系

2 组合权重的计算

AHP 法和熵权法被广泛应用于组合权重的计算。因为 AHP 法需一致性检验,所以主观权重计算时适应性较差^[17]。本文引入改进 AHP 法,提升主观权重计算时的适应性;熵权法强调数据间的差异性,缺乏对指标间冲突性的考虑^[18],将熵权法与 CRITIC 法结合,补充了对指标冲突性的考量,同时熵权法也弥补了 CRITIC 法不能衡量指标离散程度的缺陷^[19]。基于此,本文将改进 AHP 法、熵权法和 CRITIC 法组合起来,形成组合权重,在不失主观性的前提下更为客观,且有效地考虑指标信息离散性及指标间冲突。

2.1 改进 AHP 法

本文采用改进 AHP 法,通过标度构造法构建判断矩阵,依据此方法构建的判断矩阵均满足一致性检验^[20]。

构建判断矩阵 $\mathbf{R} = [r_{ij}]_{n \times n}$, 满足条件:

① $r_{ij} > 0$; ② $r_{ii} = 1$; ③ $r_{ij} = 1/r_{ji}$; ④ $r_{ij} = r_{ik} r_{kj}$ 。

其中, r_{ij} 表示第 i 个指标相对于第 j 个指标的标度值。标度值的具体含义见表 1 所列。

表 1 标度值含义

标度值	含义
1.0	2 个因素同等重要
1.2	因素 i 比因素 j 稍微重要
1.4	因素 i 比因素 j 强烈重要
1.6	因素 i 比因素 j 明显重要
1.8	因素 i 比因素 j 绝对重要

设有 n 个指标 x_1, x_2, \dots, x_n , 按照重要程度不减的原则为所有指标排序, 并对照表 1 确定指标 x_i 和 x_{i+1} 之间的重要度关系, 对应的标度值记为 t_i , 最终得到所有相邻指标之间的标度值 t_1, t_2, \dots, t_{n-1} 。根据重要程度的传递性得到判断矩阵中的其他元素, 最终的判断矩阵 $\mathbf{R}=[r_{ij}]_{n \times n}$ 为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \cdots & \prod_{i=1}^{n-1} t_i \\ 1/t_1 & 1 & t_2 & \cdots & \prod_{i=2}^{n-1} t_i \\ 1/(t_1 t_2) & 1/t_2 & 1 & \cdots & \prod_{i=3}^{n-1} t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/\prod_{i=1}^{n-1} t_i & 1/\prod_{i=2}^{n-1} t_i & 1/\prod_{i=3}^{n-1} t_i & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

各项指标的主客观权重由下式确定:

$$\alpha_j = \left(\prod_{i=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} / \sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n r_{ij} \right)^{1/n} \quad (2)$$

其中: α_j 为第 j 项指标的权重值, $\alpha_j \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$; $\prod_{j=1}^n r_{ij}$ 为矩阵 \mathbf{R} 中第 i 行所有元素乘积。

2.2 熵权法

熵权法是在已有的客观条件下, 由评价指标提供的客观信息来确定评价指标权重的一种方法。其主要思想是研究对象在某项指标上的数值差越大, 则该项指标所占的权重越大, 因此熵权法能够反映数据隐藏的信息, 增强指标之间的差异性, 客观地为各项指标赋予权重。

假设被评价对象有 m 个, 每个对象共有评价指标 n 个, 构建判断矩阵为:

$$\mathbf{X} = [x_{ij}]_{m \times n} \quad (3)$$

其中: i 为方案, $i = 1, 2, \dots, m$; j 为评价指标, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对判断矩阵进行标准化处理:

$$x_{ij}' = x_{ij} / \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

得到标准化矩阵为:

$$\mathbf{X}_1' = \begin{bmatrix} x_{11}' & x_{12}' & \cdots & x_{1n}' \\ x_{21}' & x_{22}' & \cdots & x_{2n}' \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}' & x_{m2}' & \cdots & x_{mn}' \end{bmatrix} \quad (6)$$

计算指标的熵 H_j :

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (7)$$

其中: $p_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^m x_{ij}'}$; $k = \frac{1}{\ln m}$ 。

计算熵权权重 β_j :

$$\beta_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{i=1}^n (1 - H_i)} \quad (8)$$

其中, $\beta_j \in [0, 1]$ 且 $\sum_{j=1}^n \beta_j = 1$ 。

2.3 CRITIC 法

CRITIC 法是一种客观权重的计算方法。该方法不仅考虑了各个方案之间的对比度, 同时也将所有指标之间的冲突性纳入计算, 可使计算出的权重客观合理, 具体步骤如下。

构造评价矩阵, 如式(4)所示。

对评价矩阵中的极小型指标进行同向化处理:

$$x_{ij}'' = \frac{1}{p + \max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\} + x_{ij}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中, p 表示协调系数, 通常取值为 0.1。

$$x_{ij}''' = \frac{x_{ij}''}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij}'')^2}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

通过以上处理可以得到矩阵 $\mathbf{X}''' = [x_{ij}''']_{m \times n}$ 。

计算平均值:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}''', \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

计算标准差:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij}''' - \bar{x}_j)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

计算变异系数:

$$v_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

计算相关系数:

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m (x_{ki}''' - \bar{x}_i)(x_{kj}''' - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ki}''' - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^m (x_{kj}''' - \bar{x}_j)^2}} \quad (14)$$

其中, ρ_{ij} 表示第 i 个指标和第 j 个指标之间的相关系数, $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

计算指标所含信息量:

$$\eta_j = v_j \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij}), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

计算 CRITIC 权重:

$$\gamma_j = \frac{\eta_j}{\sum_{i=1}^n \eta_i}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

2.4 组合权重

依据最小鉴别信息原理^[21], 可使组合权重更加接近 α, β, γ , 而不是偏向其中一方。求解公式如下:

$$\begin{cases} \min J(\omega) = \sum_{j=1}^n \omega_j \left(\ln \frac{\omega_j}{\alpha_j} + \ln \frac{\omega_j}{\beta_j} + \ln \frac{\omega_j}{\gamma_j} \right), \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n \omega_j = 1, \quad \omega_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (17)$$

求解可得组合权重为:

$$\omega_j = \frac{\sqrt[3]{\alpha_j \beta_j \gamma_j}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[3]{\alpha_i \beta_i \gamma_i}}, \quad j = 1, 2, \dots, n。$$

3 拆卸方案决策模型

本文将组合赋权计算出的组合权重与 TOPSIS 模型相结合, 设计正理想解、负理想解和贴进度的计算方法, 具体步骤如下。

对判断矩阵 $\mathbf{X} = [x_{ij}]_{m \times n}$ 进行规范化处理:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max_{1 \leq i \leq m} \{x_{ij}\}}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

得到规范化矩阵 $\mathbf{Y} = [y_{ij}]_{m \times n}$ 。

加权规范化矩阵为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} y_{11}\omega_1 & y_{12}\omega_2 & \cdots & y_{1n}\omega_n \\ y_{21}\omega_1 & y_{22}\omega_2 & \cdots & y_{2n}\omega_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{m1}\omega_1 & y_{m2}\omega_2 & \cdots & y_{mn}\omega_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

其中: i 表示方案, $i=1, 2, \dots, m$; j 表示评价指标, $j=1, 2, \dots, n$ 。

确定正负理想解:

$$Z_j^+ = \{ \max_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\} (j \in J^+), \min_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\} (j \in J^-) \} \quad (20)$$

$$Z_j^- = \{ \min_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\} (j \in J^+), \max_{1 \leq i \leq m} \{z_{ij}\} (j \in J^-) \} \quad (21)$$

其中: J^+ 表示极大型指标; J^- 表示极小型指标。

计算各个方案距离最优解和最劣解的欧氏距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (22)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (23)$$

计算方案的贴近度:

$$D_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (24)$$

其中, $D_i \in [0, 1], i=1, 2, \dots, m$ 。

拆卸方案的决策流程如图 2 所示。

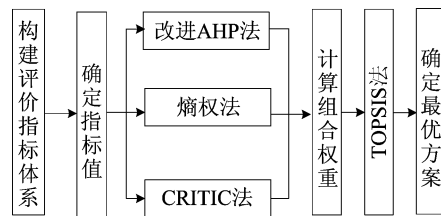


图 2 拆卸决策流程

4 实例分析

4.1 拆卸方案

以某型号 ATM 的拆卸为例, 通过收集拆卸数据来验证本文拆卸方案决策模型的有效性。该型号 ATM 内部可分为电源模块、主机模块、操作面板模块、凭条打印模块、日志打印模块、读卡器模块、现金存取款机芯上部组件以及现金存取款机芯下部组件共 8 个模块。拆卸时可以只将模块拆卸下来, 通过再制造或重用获得收益, 也可以将模块拆解成如图 3 所示的零件, 通过回收零件提高回收经济效益。



图 3 ATM 零件

拆卸方案由泰州某废旧服务终端回收公司工程师设计。根据快速处理大批量机器、获取高经

济利润、有效回收 ATM 内部零件等需求,共设计了 5 种拆卸方案。

具体方案如图 4 所示。图 4 中:✓表示拆卸至零件级别;○表示拆卸至模块级别。

方案 1 只拆到模块级别,因此拆卸时间最短,可快速处理大批量废旧机器,外部壳体交由相应的材料回收商,内部模块做粉碎填埋处理。

方案 2 中,被拆卸的模块所需时间较短,也可

以大批量处理废旧的 ATM 机。

方案 3 中,主机模块和现金存取款机芯上部组件所获利润较大,可以在最短拆卸时间内获得最大利润。

方案 4 中,所涉及的模块经过拆卸所获收益均为正,有效提高利润。

方案 5 将全部模块均拆卸至零件级别,可有效回收 ATM 机内部所有零件。

	电源模块	主机模块	操作面板	凭条打印	日志打印模块	读卡器	机芯上部组件	机芯下部组件
方案1	○	○	○	○	○	○	○	○
方案2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	○	○
方案3	○	✓	○	○	○	○	✓	○
方案4	○	✓	✓	○	✓	✓	✓	○
方案5	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

图 4 ATM 拆卸方案

5 种方案的具体数据见表 2 所列。

表 2 拆卸方案数据

方案	环境排放	拆卸噪声	拆卸时间/min	可达性	拆卸复杂程度	成本利润率	总利润/元
1	0.8	0.9	84.3	0.8	0.8	1.305	317.8
2	0.7	0.7	125.1	0.6	0.7	1.410	435.4
3	0.7	0.8	130.7	0.6	0.7	1.561	597.6
4	0.6	0.7	144.3	0.6	0.6	1.588	630.8
5	0.5	0.6	174.2	0.5	0.4	1.585	635.9

表 2 中,环境排放、拆卸噪声、可达性、拆卸复杂程度按照差(0~0.3)、中等(0.4~0.7)、优(0.8

~1.0)3 个等级进行打分。拆卸时间、成本利润率、总利润通过调研而知,环境排放、拆卸噪声、可达性、拆卸复杂程度由该企业工程师按实际情况评定。

4.2 组合权重计算

4.2.1 改进 AHP 法计算

首先按重要度不减的原则给出各评价指标的重要性排序为总利润、环境排放、收入成本比率、拆卸时间、拆卸复杂程度、可达性、拆卸噪声;然后通过专家打分法确定指标之间的标度值: $t_1=1.6, t_2=1.2, t_3=1.4, t_4=1.2, t_5=1, t_6=1$;最后得到判断矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1.600 & 0 & 1.920 & 0 & 2.688 & 0 & 3.225 & 6 & 3.225 & 6 & 3.225 & 6 \\ 0.625 & 0 & 1 & 1.200 & 0 & 1.680 & 0 & 2.016 & 0 & 2.016 & 0 & 2.016 & 0 \\ 0.520 & 8 & 0.833 & 3 & 1 & 1.400 & 0 & 1.680 & 0 & 1.680 & 0 & 1.680 & 0 \\ 0.372 & 0 & 0.595 & 2 & 0.714 & 3 & 1 & 1.200 & 0 & 1.200 & 0 & 1.200 & 0 \\ 0.310 & 0 & 0.496 & 0 & 0.595 & 2 & 0.833 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.310 & 0 & 0.496 & 0 & 0.595 & 2 & 0.833 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.310 & 0 & 0.496 & 0 & 0.595 & 2 & 0.833 & 3 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

根据判断矩阵 R 和式(2)可以计算出各指标的改进 AHP 权重,并重新排序为: $\alpha=(0.1813, 0.0899, 0.1079, 0.0899, 0.0899, 0.1511, 0.2900)$ 。

4.2.2 熵权法计算

根据拆卸方案和数据构建判断矩阵 X :

$$X = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.9 & 84.3 & 0.8 & 0.8 & 1.305 & 317.8 \\ 0.7 & 0.7 & 125.1 & 0.6 & 0.7 & 1.410 & 435.4 \\ 0.7 & 0.8 & 130.7 & 0.6 & 0.7 & 1.561 & 597.6 \\ 0.6 & 0.7 & 144.3 & 0.6 & 0.6 & 1.588 & 630.8 \\ 0.5 & 0.6 & 174.2 & 0.5 & 0.4 & 1.585 & 635.9 \end{bmatrix}$$

对矩阵 X 进行标准化处理,并根据式(7)计算得到指标的熵为 $H=(0.9924, 0.9941, 0.9842,$

0.992 5, 0.985 0, 0.998 2, 0.980 6)。根据式(8)计算出熵权法的权重为 $\beta=(0.104 0, 0.080 4, 0.216 9, 0.102 6, 0.205 6, 0.025 1, 0.265 4)$ 。

4.2.3 CRITIC 权重计算

首先构建判断矩阵 X , 并根据式(9)、式(10)对矩阵进行同向化处理, 得到矩阵 X'' :

$$X'' = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.9 & 0.003 9 & 0.8 & 0.8 & 1.305 & 317.8 \\ 0.7 & 0.7 & 0.003 3 & 0.6 & 0.7 & 1.410 & 435.4 \\ 0.7 & 0.8 & 0.003 3 & 0.6 & 0.7 & 1.561 & 597.6 \\ 0.6 & 0.7 & 0.003 1 & 0.6 & 0.6 & 1.588 & 630.8 \\ 0.5 & 0.6 & 0.002 9 & 0.5 & 0.4 & 1.585 & 635.9 \end{bmatrix}。$$

$$\rho = \begin{bmatrix} 1 & 0.923 1 & 0.937 6 & 0.880 7 & 0.983 1 & -0.818 7 & -0.835 3 \\ 0.923 1 & 1 & 0.937 6 & 0.920 7 & 0.896 4 & -0.680 7 & -0.698 5 \\ 0.937 6 & 0.937 6 & 1 & 0.975 9 & 0.881 1 & -0.888 5 & -0.898 5 \\ 0.880 7 & 0.920 7 & 0.975 9 & 1 & 0.842 7 & -0.836 7 & -0.846 8 \\ 0.983 1 & 0.896 4 & 0.881 1 & 0.842 7 & 1 & -0.739 3 & -0.759 3 \\ -0.818 7 & -0.680 7 & -0.888 5 & -0.836 7 & -0.739 3 & 1 & 0.999 5 \\ -0.835 3 & -0.698 5 & -0.898 5 & -0.846 8 & -0.759 3 & 0.999 5 & 1 \end{bmatrix}。$$

根据式(15)、式(16)计算出指标所含信息量和权重:

$$\eta = (0.678 8, 0.570 3, 0.459 7, 0.717 9, 0.923 0, 0.762 9, 2.437 4),$$

$$\gamma = (0.103 6, 0.087 1, 0.070 2, 0.109 6, 0.140 9, 0.116 5, 0.372 1)。$$

4.2.4 组合权重的计算

根据最小信息鉴别原理, 将 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i=1, 2, \dots, n)$ 代入 $\omega_j = \sqrt[3]{\alpha_j \beta_j \gamma_j} / \sum_{i=1}^n \sqrt[3]{\alpha_i \beta_i \gamma_i}$, 可得组合权重:

$$\omega = (0.131 8, 0.090 3, 0.124 3, 0.105 8, 0.145 0, 0.080 3, 0.322 5)。$$

4.3 拆卸方案的决策

根据式(18)、式(19)可得加权规范化矩阵 Z 为:

$$Z = \begin{bmatrix} 0.131 8 & 0.115 3 & 0.115 3 & 0.098 8 & 0.082 4 \\ 0.090 3 & 0.070 2 & 0.080 3 & 0.070 2 & 0.060 2 \\ 0.060 2 & 0.089 3 & 0.093 3 & 0.103 0 & 0.124 4 \\ 0.105 8 & 0.079 3 & 0.079 3 & 0.079 3 & 0.066 1 \\ 0.145 0 & 0.126 9 & 0.126 9 & 0.108 7 & 0.072 5 \\ 0.066 0 & 0.071 3 & 0.078 9 & 0.080 3 & 0.080 1 \\ 0.161 2 & 0.220 8 & 0.303 1 & 0.319 9 & 0.322 5 \end{bmatrix}^T。$$

根据式(20)、式(21)确定正负理想解:

$$Z^+ = (0.131 8, 0.090 3, 0.060 2, 0.105 8, 0.145 0, 0.080 3, 0.322 5),$$

$$Z^- = (0.082 4, 0.060 2, 0.124 4, 0.066 1, 0.072 5, 0.066 0, 0.161 2)。$$

根据式(11)~(13)分别计算平均值、标准差和变异系数, 得:

$$x = (0.442 0, 0.443 0, 0.444 9, 0.441 7, 0.437 5, 0.445 9, 0.434 7),$$

$$s = (0.076 4, 0.068 3, 0.0504, 0.078 0, 0.103 7, 0.037 9, 0.117 2),$$

$$v = (0.172 8, 0.154 1, 0.113 4, 0.176 7, 0.237 0, 0.085 1, 0.269 7)。$$

根据式(14)计算得到相关系数矩阵 ρ , 具体如下:

最后, 根据式(22)、式(23)计算各个方案距离最优解和最劣解的欧氏距离:

$$D^+ = (0.162 0, 0.113 9, 0.053 6, 0.073 1, 0.119 6),$$

$$D^- = (0.119 6, 0.095 5, 0.160 9, 0.166 5, 0.161 9)。$$

方案贴近度为:

$$D = (0.424 7, 0.456 2, 0.749 9, 0.694 8, 0.575 2)。$$

由计算结果可知, 方案合理性由大到小的排序为方案 3、方案 4、方案 5、方案 2、方案 1。方案 1 虽然拆卸时间最短, 但是所获利润最小; 与方案 1 相比, 方案 2 虽然将利润提升了 37%, 但是相较于方案 3 提升的 88% 而言, 相差 51%; 方案 4 收入与成本比值最高, 但却是以大幅提高拆卸时间所换来的, 与方案 1 相比, 时间增加了 71.2%; 方案 5 总利润最高, 但是拆卸时间最长, 且收入与成本比值并不是最高的。综合来看, 方案 3 最具合理性, 在获得较高利润的同时, 拆卸时间、环境排放等指标也有好的表现, 这一决策结果也与实际相符。

为了验证本文提出的组合赋权-TOPSIS 法的合理性及有效性, 选择了方法 1(改进 AHP 熵权-TOPSIS 法)、方法 2(改进 AHP-TOPSIS 法)、方法 3(CRITIC 改进 AHP-TOPSIS 法)这 3 种决策方法来进行对比, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 本文提出的方法与改进 AHP-TOPSIS 法及 CRITIC 改进 AHP-TOPSIS 法的决策结果相同, 与改进 AHP 熵权-TOPSIS 法有部分差异。这是因为熵权法在计算权重的过程中考虑的是各指标

数据的变化幅度,其结果会受数据的影响而与实际产生偏差。

4 种方法的指标权重值如图 6 所示。图 6 中,评价指标 1~评价指标 7 分别为环境排放、拆卸噪声、拆卸时间、可达性、拆卸复杂程度、成本利润率、总利润。由图 6 可知,4 种方法关于指标 7 (总利润)的权重值均为最高,其中方法 2、方法 3 及本文方法的综合权重均高于方法 1,这是由于总利润指标对数据差异的敏感性小于该指标的主观需求和冲突性,导致熵权权重值小于改进 AHP 和 CRITIC 权重,使得综合权重变小,影响决策结果。指标 3(拆卸时间)在数据上的差异性较大,致使其熵权权重值较高,因此方法 1 在计算贴近度时拆卸时间所占的综合权重高,使得拆卸时间最短的方案 1 排在第 3,与其他方法结果不同。

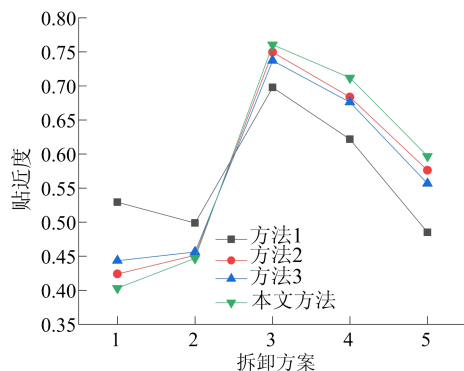


图 5 4 种方法的贴近度

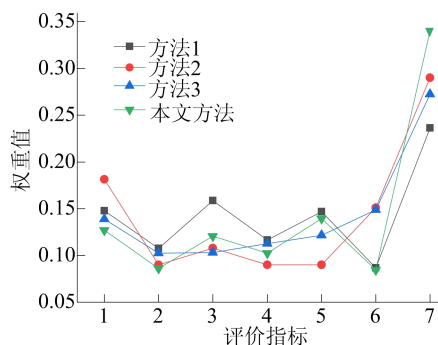


图 6 4 种方法的指标权重值

综合来看,以上 4 种方法的决策结果基本相同,综合指标的数值相差较小,且贴近度也基本相近,验证了本文提出方法的合理性和有效性。

5 结 论

本文将改进 AHP 法、熵权法和 CRITIC 法通过最小信息熵原理进行组合,形成了一种新的组合

权重。组合权重考虑到指标的信息量,同时兼顾指标之间的差异性与冲突性,在不失主观的前提下更加客观,有效规避了传统赋权法的局限性。

利用组合权重规范化 TOPSIS 法的计算矩阵,通过计算欧式距离得到与理想方案的贴近度,进而对各拆卸方案进行评估并做出决策。

通过 ATM 的拆卸方案决策对模型进行了验证,分析结果表明,应对 ATM 内部的高价值部件拆卸回收,可提高拆卸的整体效益。最后将计算结果与其他 3 种决策模型进行对比,验证了该模型的合理性。

[参 考 文 献]

- [1] 宋守许,刘明,刘光复,等. 现代产品主动再制造理论与设计方法[J]. 机械工程学报,2016,52(7):133-141.
- [2] TIAN G D, CHU J W, HU H S, et al. Technology innovation system and its integrated structure for automotive components remanufacturing industry development in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 85(12): 419-432.
- [3] 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.
- [4] CHENG H P, XU W J, AI Q S, et al. Manufacturing capability assessment for human-robot collaborative disassembly based on multi-data fusion [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 26-36.
- [5] TIAN Y T, ZHANG X F, LIU Z H, et al. Product cooperative disassembly sequence and task planning based on genetic algorithm [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105: 5-6.
- [6] 郭洪飞,陈志彬,任亚平,等. 基于零件回收综合评价的废旧产品拆解序列与拆解深度集成决策研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 258-268.
- [7] LI J, BARWOOD M, RAHIMIFARD S. A multi-criteria assessment of robotic disassembly to support recycling and recovery [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 140(10): 158-165.
- [8] MARCOFAVI M, CLAUDIO F, MICHELE G, et al. Time-based disassembly method; how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1): 409-430.
- [9] TIAN J, CHEN M. Assessing the economics of processing end-of-life vehicles through manual dismantling [J]. Waste Management, 2016, 56(10): 384-395.
- [10] 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.

(下转第 899 页)

4.2%,而有效热效率减小 5.3%;其他体积分数均增加了比油耗,且随甲醇体积分数的减小而增大;有效热效率均比原机有所降低,且随甲醇体积分数的减小而减小,而随混合液体积流量的增大而减小。

3) 在排放方面,进气喷水时 CO 和 HC 排放相较于原机有所降低,进气掺混甲醇体积分数为 30%的溶液时的 HC 排放量降低,进气掺混甲醇体积分数 60%、90%、100%溶液时的 NO_x 排放量降低,在进气中喷流量为 40 mL/min、甲醇体积分数为 100%的溶液时的 NO_x 排放量最小,相较于原机降低了 15.1%。

4) 在 2 000 r/min、200 N·m 工况下,向柴油机进气中喷流量为 40 mL/min、甲醇体积分数为 100%的溶液可以最大程度地降低柴油比油耗和 NO_x 排放量。

[参 考 文 献]

- [1] 岳克川. 柴油掺水 节约柴油 减轻震击 消除积炭 全国许多地区使用推广柴油掺水[J]. 石油炼制与化工, 1959(23): 34-35.
- [2] 姚光荣. 发动机进气道喷水的研究:降低 NO_x 排放[D]. 武汉:武汉理工大学, 2004.
- [3] 柴油机应用醇类燃料课题组. 柴油机掺烧甲醇蒸汽的试验研究[J]. 长安大学学报(自然科学版), 1991, 11(1): 51-60.
- [4] 陆克久, 蒋耘农, 代西良. 柴油机掺烧不同比例甲醇混合燃料的试验研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(3): 205-208, 213.
- [5] 张隆康. 增压式柴油机柴油/甲醇和柴油/掺水甲醇组合燃烧性能研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [6] WANG C H, PAN K L, UENG G J, et al. Burning behaviors of collision-merged water/diesel, methanol/diesel, and water + methanol/diesel droplets [J]. Fuel, 2013, 106: 204-211.
- [7] HEYWOOD J B. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 2018.
- [8] 林杰伦. 内燃机工作过程数值计算[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1986.
- [9] CHENG W, GENTRY R. Effects on charge non-uniformity on diesel heat release analysis[J]. SAE Transactions, 1986: 907-918.
- [10] GATOWSKI J A, BALLE E N, CHUN K M, et al. Heat release analysis of engine pressure data[J]. SAE Transactions, 1984: 961-977.
- [11] 周龙保. 内燃机学[M]. 3 版. 北京:机械工业出版社, 2016: 216.
- [12] JAMROZIK A, TUTAK W, PYRC M, et al. Study on co-combustion of diesel fuel with oxygenated alcohols in a compression ignition dual-fuel engine[J]. Fuel, 2018, 221: 329-345.
- [13] CHEN Z F, YAO C D, YAO A R, et al. The impact of methanol injecting position on cylinder-to-cylinder variation in a diesel methanol dual fuel engine[J]. Fuel, 2017, 191: 150-163.
- [14] CANAKCI M, SAYIN C, OZSEZEN A N, et al. Effect of injection pressure on the combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine fueled with methanol-blended diesel fuel[J]. Energy & Fuels, 2009, 23(6): 2908-2920.
- [11] JEF R P, PAUL V, WIM D, et al. Economic and environmental evaluation of design for active disassembly [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140(1): 1182-1193.
- [12] MAHD S, CHRISTIAN M, PIERREI B. Evaluation of products at design phase for an efficient disassembly at end-of-life [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 116(5): 177-186.
- [13] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 217-227.
- [14] 彭庭睿, 刘海鹏, 刘彦, 等. 基于模糊层次分析法和图像对比毁伤评估法的目标权重计算方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(1): 173-180.
- [15] 韩文东, 李晶. 基于组合赋权的 TOPSIS 模型在刀具优选中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8): 19-22.
- [16] 王昆, 宋海洲. 三种客观权重赋权法的比较分析[J]. 技术与管理研究, 2003(6): 48-49.
- [17] 刘晓悦, 杨伟, 张雪梅. 基于改进层次法与 CRITIC 法的多维云模型岩爆预测[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(2): 118-124.
- [18] 傅为忠, 储刘平. 长三角一体化视角下制造业高质量发展评价研究:基于改进的 CRITIC-熵权法组合权重的 TOPSIS 评价模型[J]. 工业技术经济, 2020, 39(9): 145-152.
- [19] 吴忠, 关娇, 何江. 最低工资标准测算实证研究:基于 CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J]. 当代经济科学, 2019, 41(3): 103-117.
- [20] 李娜娜, 何正友. 主客观权重相结合的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 55-61.
- [21] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148, 162.

(责任编辑 胡亚敏)

(责任编辑 宋晓临)

(上接第 892 页)