

DOI:10.16356/j.1005-2615.2020.01.009

## 面向再制造设计方案的去主观混合多属性决策方法

江志刚<sup>1</sup>, 王 涵<sup>2</sup>, 张 华<sup>3</sup>, 王 彦<sup>4</sup>, 龚青山<sup>3,5</sup>

(1. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉, 430081;

2. 英国诺丁汉大学工程学部, 诺丁汉, NG7 2RD;

3. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室, 武汉, 430081;

4. 英国布莱顿大学计算机、工程和数学系, 布莱顿, BN2 4GJ;

5. 湖北汽车工业学院机械工程学院, 十堰, 442002)

**摘要:** 面向再制造设计(Design for remanufacturing, DfRem)是将再制造特征考虑到产品设计过程,因设计者缺乏明确定义的再制造知识,面向再制造方案决策受设计者主观偏好、经验等主观因素的影响,导致不合理决策设计方案。为了客观地得到面向再制造最优设计方案,提出一种去主观的混合多属性决策方法克服设计过程主观因素的影响。首先,通过物元理论表征设计特征与需求信息,结合设计准则得到初步设计方案,接着建立考虑技术、经济和环境因素的评价指标体系,采用熵权法和模糊集通过多属性决策得到最优设计方案。最后,以面向再制造的电机拆解机设计为案例验证上述方法的可行性与实践性,结果表明上述方法对面向再制造设计的方案决策有效可行。

**关键词:** 再制造; 面向再制造设计; 多属性决策; 模糊集; 熵权法

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2020)01-0073-06

## Hybrid Multi-attribute Decision Making for Remanufacturing Design Based on Subjectivity Reduction

JIANG Zhigang<sup>1</sup>, WANG Han<sup>2</sup>, ZHANG Hua<sup>3</sup>, WANG Yan<sup>4</sup>, GONG Qingshan<sup>3,5</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science &

Technology, Wuhan, 430081, China; 2. Faculty of Engineering, University of Nottingham, Nottingham,

NG7 2RD, United Kingdom; 3. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology,

Wuhan University of Science & Technology, Wuhan, 430081, China; 4. Department of Computing,

Engineering and Mathematics, University of Brighton, Brighton, BN2 4GJ, United Kingdom;

5. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Automation Technology, Shiyan, 442002, China)

**Abstract:** Design for remanufacturing is a process of considering the remanufacturing characteristics into production design. Due to the lack of defined remanufacturing knowledge, decision making schemes for DfRem are subjected to subjective factors, such as subjective preferences and experience of the designers, resulting in indecisive decision-making for design schemes. In order to obtain the best design scheme objectively, a hybrid multi-attribute decision making method for remanufacturing design based on subjectivity reduction is proposed. First, matter-element theory is adopted to characterize design characters and demands information. Coupled with design principles, the initial design scheme can then be obtained. Second, the evaluation criteria system is established from technical, economic and environmental perspectives. Third,

**基金项目:** 国家自然科学基金(51675388)资助项目。

**收稿日期:** 2019-07-11; **修订日期:** 2019-11-13

**通信作者:** 王涵, 男, 博士研究生, E-mail: hanw07@foxmail.com。

**引用格式:** 江志刚, 王涵, 张华, 等. 面向再制造设计方案的去主观混合多属性决策方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(1): 73-78. JIANG Zhigang, WANG Han, ZHANG Hua, et al. Hybrid multi-attribute decision making for remanufacturing design based on subjectivity reduction[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2020, 52(1): 73-78.

entropy weight and vague set are used to obtain the optimal design scheme via multi-attribute decision-making. Finally, the design for remanufacturing of motor disassembly machine is taken as the example to demonstrate the feasibility and applicability, and the results show that the proposed method is effective and feasible.

**Key words:** remanufacturing; design for remanufacturing (DfRem); multi-attribute decision making; vague set; entropy weight

资源急剧消耗与环境严重污染促使再制造业的发展,相比传统制造,再制造在节约材料、节省能量消耗、降低成本和污染排放方面具有显著优势<sup>[1-3]</sup>。尽管再制造技术能带来经济、环境、社会等方面的效益,但再制造产品使用过程中的能量消耗、成本等很大程度由设计过程决定<sup>[4]</sup>。面向再制造的产品设计是在产品设计初期考虑产品寿命末端的再制造性并极大化利用材料和产品附加值的过程。相比一般产品设计过程,面向再制造的产品设计会受结构参数、空间结构耦合、功能集成等因素的影响,并且需要考虑再制造阶段的特征,因而形成的设计方案可能并非最合适。为了得到最优的面向再制造产品设计方案,许多学者在面向再制造设计方案多属性决策方面做了大量研究工作。熊颖清等<sup>[5]</sup>从生命周期角度考虑再制造服务设计方案决策,提出基于决策表和模块化实例库的二级决策方法。Yang等<sup>[6]</sup>开发了一种面向再制造设计(Design for remanufacturing, DfRem)和可再制造性评估的工具,采用模糊理想点法(Technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)方法支持面向再制造的产品设计并结合全生命周期分析提升设计决策的稳定性。Ismail等<sup>[7]</sup>提出面向再制造设计决策工具分类方法支持

面向再制造产品设计与生产系统决策。Ke等<sup>[8]</sup>提出基于产品和关键零部件性能与失效状态的主动再制造的时机决策方法;Subramoniam等<sup>[9]</sup>开发了一种包括产品规划、面向再制造的设计、工厂选址、生产系统等的再制造决策框架体系。

上述文献报道了面向再制造产品设计决策的方法、工具等,但在面向再制造设计方案决策过程中解决设计者主观性的报道较少。基于此,本文提出面向再制造设计方案的去主观混合多属性决策方法,该方法首先采用物元理论表征设计特征与需求信息,通过面向再制造产品设计准则,得到初步设计方案,然后建立评价指标体系,最后采用熵权法和模糊集的方法通过多属性决策得到最优面向再制造产品设计方案。

## 1 设计方案多属性决策框架

### 1.1 设计框架

面向再制造设计方案的去主观混合多属性决策过程集成了面向再制造设计过程与多属性决策过程,首先是通过基本设计过程得到候选方案,然后构建评价指标体系并采用决策方法选出最优设计方案,该过程如图1所示。

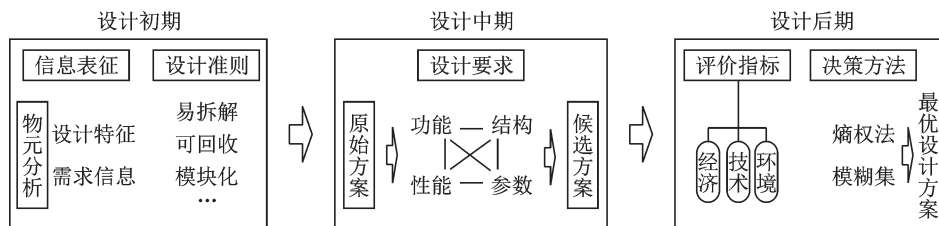


图1 面向再制造设计方案的去主观多属性决策框架

Fig.1 Framework of multi-attribute decision making for DfRem based on subjectivity reduction

以上框架由3个设计阶段组成,具体如下。

#### (1) 设计初期

在对机械产品进行设计初期需要准备基础信息包括设计特征、需求信息和面向再制造的设计准则等,其中设计特征指产品基本物理信息,如尺寸、材料、外形等,需求信息指顾客对产品的要求、研发机构相关指标要求和公司设计要求等,以上信息通过物元理论进行表征,结合面向再制造的设计准则,转化为机械产品具体设计要求。

#### (2) 设计中期

根据设计初期得到的具体设计要求,基于产品

原始方案,通过在功能升级、结构优化、性能提升和参数调整等维度获得面向再制造设计候选方案。

#### (3) 设计后期

基于机械产品设计候选方案,建立技术性、经济性和环境性评价指标体系,采用混合熵权法和模糊集方法对候选方案进行多属性决策,其中熵权法克服设计者的主观偏好与经验,模糊集确保面向再制造的设计方案在不确定性允许范围的可靠程度。

### 1.2 信息表征与设计准则

在机械装备面向再制造设计初期需要准备相关信息,接着采用物元理论以矩阵的形式表征面向

再制造的设计特征与需求信息,结合设计准则,辅助设计者开展面向再制造的机械装备设计活动。

### 1.2.1 信息表征

机械装备信息包括结构、形状、材料和参数等多方面的信息,为使所收集的信息易于展示和操

作,采用物元理论对信息进行定性和定量描述<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 面向再制造的设计准则

面向再制造的机械装备设计是在产品设计时就考虑再制造特征,包括材料和结构层面的特征,对应的设计准则如表 1 所示。

表 1 面向再制造的材料层面和结构层面的设计准则

Table 1 Design disciplines of DfRem from material and structure perspectives

材料属性	设计准则描述	结构属性	设计准则描述
类型	减少材料使用类型	模块化	零部件应该模块化
重量	降低所使用材料重量	标准件	应使用标准零部件
化学性质	避免使用有毒有害的材料,并且易于回收处理	联接类型	零部件间联接类型应尽可能少
物理性质	产品关键零部件的材料应该易于制造和再制造	联接数量	零部件间联接数量应尽可能少
价格	应当使用常见且性价比高的材料,避免使用稀有材料		

## 2 评价指标体系构建

多属性决策首要步骤是构建评价指标体系,决策方案与资源消耗、环境影响和技术可行性等多方面因素相关,以机械装备为设计对象,建立技术性、经济性和环境性指标。

### 2.1 技术性指标

机械装备的技术性指标主要体现在机械装备生产运行过程中的稳定性和可靠性,与企业经济效益直接关联。根据文献<sup>[10]</sup>可知,机械装备可靠性依赖于关键零部件的最低可靠性,采用如下 3 参数威布尔分布模型获取关键零部件的可靠程度,公式如下

$$L = R(t) = \exp\left(-\left(\frac{t-\mu}{\theta}\right)^\beta\right) \quad (1)$$

$$t > \mu, \theta > 0, \beta > 0$$

$$L_2 = \frac{L - L_{\min}}{L_{\max} - L_{\min}} \quad (2)$$

式中: $R(t)$ 表示关键零部件的可靠性; $t$ 表示关键零部件的运行时间; $\mu$ , $\theta$ 和 $\beta$ 分别表示位置、尺寸和形状参数,其数值可由相同或类似机械装备零部件的历史数据获得; $L_2$ 表示归一化后关键零部件的可靠性; $L_{\max}$ 和 $L_{\min}$ 分别表示关键零部件中最高和最低的可靠性。

### 2.2 经济性指标

面向再制造的机械装备设计的经济性一直是企业关注的焦点,主要体现其生产过程成本,包括制造和再制造过程的加工成本和辅助操作成本。

#### 2.2.1 加工成本

当确定机械装备的面向再制造设计方案前,需要考虑其制造和再制造过程的成本,公式如下

$$C_p = \sum_{m=1}^M c_m t_m + \sum_{n=1}^N c_n t_n \quad (3)$$

$$c_m > 0, t_m > 0, c_n > 0, t_n > 0$$

$$C_1 = \frac{C_p - C_{p\min}}{C_{p\max} - C_{p\min}} \quad (4)$$

式中: $C_p$ 表示制造与再制造过程中机械装备加工成本; $C_1$ 表示机械装备制造与再制造过程归一化的加工成本; $M$ 和 $N$ 分别表示需要制造与再制造的机械装备零部件数量; $c_m$ 和 $t_m$ 分别表示制造的单位时间加工成本与单位加工时间; $c_n$ 和 $t_n$ 分别表示再制造单位加工成本与单位加工时间; $C_{p\max}$ 和 $C_{p\min}$ 分别为机械装备包括制造和再制造过程的最大加工成本与最小加工成本。

#### 2.2.2 辅助操作成本

为满足机械装备制造与再制造,需要考虑辅助操作,如辅助设备与材料,公式如下

$$C_a = c_1 + c_2 \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{C_a - C_{a\min}}{C_{a\max} - C_{a\min}} \quad (6)$$

式中: $C_a$ 和 $C_2$ 分别表示机械装备辅助操作成本和归一化的辅助操作成本; $c_1$ 和 $c_2$ 分别表示辅助设备成本(如:空气压缩机、空调)和辅助材料成本(如:新材料的成本、再制造加工的材料成本)。

### 2.3 环境性指标

面向再制造设计的机械装备环境性指标可以从整个再制造过程考虑,建立包括拆卸、清洗、检测、再制造加工和再装配工艺在噪声、有害物质、空气污染、水污染和固体污染方面的环境性评价指标体系。设计者结合生产历史数据,通过德尔菲法获取机械装备面向再制造设计的环境性指标,分值设置为{1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2},该数值对应环境影响程度语义分别为{很高,高,中等,低,很低},然后采

用加权求和的方式对环境影响进行综合评价。

### 3 设计方案的去主观多属性决策方法

面向再制造设计去主观混合多属性决策方法主要包括3个阶段,其中第1阶段采用熵权法确定每个设计方案中评价指标的权重,第2阶段采用模糊集计算每个设计方案的模糊数值,第3阶段采用评价函数,通过模糊数值确定最佳设计方案。

#### 3.1 熵权法

熵权法是基于信息熵的评价方法,其中熵值用于评估指标的离散程度,该方法包括如下两步。

##### 3.1.1 确定指标熵值

根据文献[11],基于概率的熵权公式表示如下

$$E_i = -\frac{1}{\ln p} \sum_{j=1}^q \frac{\chi_{ij}}{\chi_i} \ln \frac{\chi_{ij}}{\chi_i} \quad (7)$$

式中: $E_i$ 表示第*i*个指标的熵值, $\chi_{ij}$ 表示第*j*个候选方案中第*i*个指标值的比重; $q$ 表示候选方案的数量; $p$ 表示评价指标数量。

$$\chi_i = \sum_{j=1}^q \chi_{ij} \quad i=1,2,\dots,p \quad (8)$$

式中 $\chi_i$ 表示所有方案中第*i*个指标值的比重。

##### 3.1.2 确定设计方案熵权集合

基于上述熵值,评价指标熵权表示如下

$$w_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^p (1 - E_i)} \quad (9)$$

式中 $w_i$ 表示第*i*个指标的熵权。

除了熵权法,德尔菲法也应用于形成评价指标的权重,如下公式所示

$$W = \begin{cases} [w_i, w'_i] & w_i < w'_i \\ [w_i, w_i] & w_i = w'_i; i=1,2,\dots,p \\ [w'_i, w_i] & w'_i < w_i \end{cases} \quad (10)$$

式中 $w'_i$ 表示从德尔菲法获取的权重,因此综合评价范围可表示如下

$$W = ([w_{11}, w_{12}], [w_{21}, w_{22}], \dots, [w_{p1}, w_{p2}]) \quad (11)$$

式中 $w_{i1}$ 和 $w_{i2}$ 分别表示综合评价权重下限和上限。

#### 3.2 模糊集

模糊集是一种表示模糊信息的集合,首先需要根据满意度划分目标集合,表示如下。

##### 3.2.1 目标集合划分

$$S_j = \{h_i \in h | \chi_{ij} > \lambda^U\} \quad (12)$$

$$N_j = \{h_i \in h | \chi_{ij} < \lambda^L\} \quad (13)$$

$$O_j = \{h_i \in h | \lambda^L \leq \chi_{ij} \leq \lambda^U\} \quad (14)$$

式中: $\lambda^L$ 和 $\lambda^U$ 分别表示决策者可以接受的不满意程度下限和满意程度上限; $S_j, N_j$ 和 $O_j$ 分别表示支持集、中立集和反对集。

##### 3.2.2 权重范围确定

$$V(x_j) = ([t_1(x_j), t_2(x_j)], [1 - h_2(x_j), 1 - h_1(x_j)]) \quad (15)$$

$$t(x_j) = [t_1(x_j), t_2(x_j)] \quad (16)$$

$$h(x_j) = [h_1(x_j), h_2(x_j)] \quad (17)$$

式中: $V(x_j)$ 表示设计方案模糊集,代表决策者对方案的满意程度; $t_1(x_j)$ 和 $t_2(x_j)$ 分别表示支持集中权重的下限之和和上限之和; $h_1(x_j)$ 和 $h_2(x_j)$ 分别表示反对集中权重的下限之和和上限之和。

##### 3.2.3 综合评价函数

结合面向再制造的机械装备设计特征,采用文献[12]的评价函数,表达式如下

$$EF = t_1(x_j) + t_2(x_j) - [h_1(x_j) + h_2(x_j)] \quad (18)$$

式中 $EF$ 表示基于模糊集范围的综合评价函数。

## 4 案例分析

电机拆解机是废旧机械装备电机拆解作业中使用最频繁的设备之一,对该设备进行面向再制造设计对制造业绿色发展具有重要影响。以某机械装备再制造公司的电机拆解机为例开展面向再制造设计方案多属性决策。

#### 4.1 产生设计方案

获取原始产品信息如框架、驱动系统和传输系统,通过物元理论表征产品设计特征与需求信息,根据设计法则得到如表2中电机拆解机设计方案。

#### 4.2 设计方案决策

考察某公司电机拆解机设计、制造和再制造过程数据,采用本文建立的面向再制造设计方案评价指标方法确定表2中3种设计方案的评价指标决策矩阵,如表3所示。

结合该公司电机拆解机设计的历史数据与设计者经验,设定电机拆解机设计的满意程度中等偏上,因此设置 $\lambda^L$ 和 $\lambda^U$ 分别为0.6和0.8,可以得到对应设计方案的模糊集数值

$$\begin{cases} V_1 = ([0.2474, 0.8000], [0.2500, 0.7486]) \\ V_2 = ([0.8998, 2.1502], [0, 0]) \\ V_3 = ([0.9998, 2.2002], [0, 0]) \end{cases} \quad (19)$$

根据式(18)的评价函数,得到如表4所示各设计方案的评价值及其排序。



表 2 3种设计方案部分细节

Table 2 Part details of three design schemes

方案	材料类型	物理和化学性质	材料分布
(a)	HT250	高强度,耐磨,热稳定性	液压油
	45 钢	高强度,易于加工和获取	
	液压油	矿物油	
(b)	HT250	高强度,耐磨,热稳定性	无有害零部件
	45 钢	高强度,易于加工和获取	
	铜	易铸造,耐磨,化学性稳定	
(c)	Q235	综合性能好,高强度,易于装配	无有害零部件
	45 钢	高强度,易于加工和获取	
	铜	易铸造,耐磨,化学性稳定	

表 3 面向再制造设计方案评价指标决策矩阵

Table 3 Evaluation decision making matrix of DfRem schemes

设计方案	可靠性	加工成本	辅助成本	环境性
(a)	0.75	0.65	0.80	0.371
(b)	0.90	0.40	0.45	0.271
(c)	0.85	0.45	0.50	0.242

表 4 设计方案排序

Table 4 Sequence of design schemes

设计方案	评价值	排序
(a)	$EF_1 = 0.0488$	3
(b)	$EF_2 = 3.0500$	2
(c)	$EF_3 = 3.2000$	1

4.3 灵敏度分析与方法对比

为了测试上述方法的稳定性,通过调整  $\lambda^L$  和  $\lambda^U$  形成并执行以下试验,结果如图 2 和表 5 所示。

为了突出上述方案有效性,采用文献[13]和文献[14]中的方法进行对比,结果如图 3 和表 6 所示。

采用文献[13]和文献[14]中的评价函数,分别得到如图 3(a)和(b)所示的评价结果。对比图 3(a)、图 3(b)和图 2,可以得到当满意程度超过(0.2, 0.55)范围时,文献[13]和[14]的评价函数得到的设计方案与本文评价函数得到的设计方案差异很大,如表 6 所示,以每两个场景为单位组,文献[13]中的评价

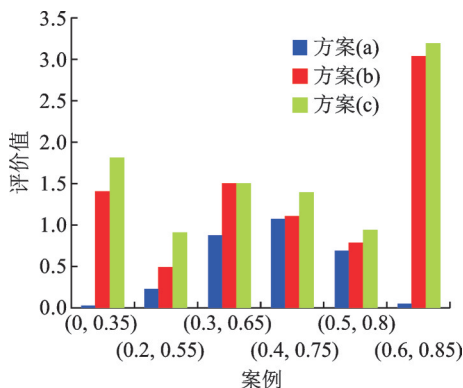


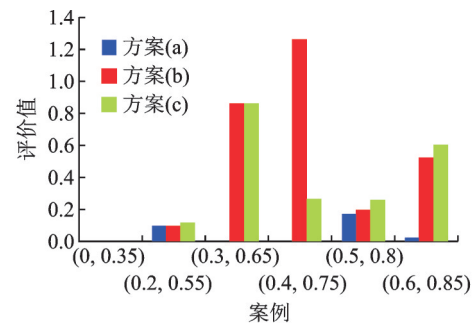
图 2 6种场景下的灵敏度分析

Fig.2 Sensitivity analysis under six scenarios

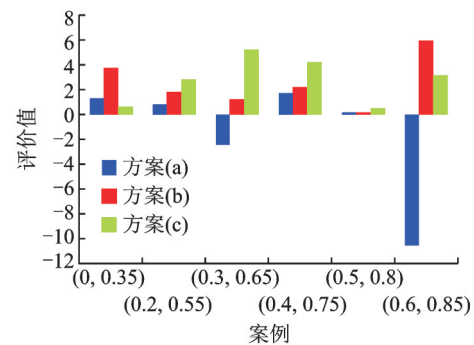
表 5 灵敏度分析

Table 5 Sensitivity analysis

场景	$(\lambda^L, \lambda^U)$	设计方案排序
1	(0, 0.35)	(c) > (b) > (a)
2	(0.2, 0.55)	(c) > (b) > (a)
3	(0.3, 0.65)	{(c),(b)} > (a)
4	(0.4, 0.75)	(c) > (b) > (a)
5	(0.5, 0.8)	(c) > (b) > (a)
6	(0.6, 0.85)	(c) > (b) > (a)



(a) Result of comprehensive evaluation function from Ref.[13]



(b) Result of comprehensive evaluation function from Ref.[14]

图 3 文献方法对比结果

Fig.3 Result comparison from references

方法得到的设计方案在 3 个单位组中均不一致,当满意程度处于(0, 0.35)或(0.6, 0.85)范围时,采用文献[14]的评价函数无法可靠选出设计方案。

通过上述灵敏度分析与方法对比,本文所提方法能有效克服评价过程主观因素的影响,还能保证所得设计方案稳定可靠。

表6 6种场景下方法对比

Table 6 Methods comparison under six scenarios

场景	$(\lambda^L, \lambda^U)$	文献[13]设计 方案排序	文献[14]设计 方案排序
1	(0, 0.35)	{(a),(b),(c)}	(b) > (a) > (c)
2	(0.2, 0.55)	(c) > (b) > (a)	(c) > (b) > (a)
3	(0.3, 0.65)	{(b),(c)} > (a)	(c) > (b) > (a)
4	(0.4, 0.75)	(b) > (c) > (a)	(c) > (b) > (a)
5	(0.5, 0.8)	(c) > (b) > (a)	(c) > (b) > (a)
6	(0.6, 0.85)	(c) > (b) > (a)	(b) > (c) > (a)

## 5 结 论

本文提出面向再制造设计的去主观多属性决策方法,包括信息表征、形成设计方案、设计方案去主观混合多属性决策等,设计特征与需求信息通过物元理论进行表征,结合面向再制造的设计准则,得到待选设计方案,建立包括技术性、经济性和环境性的评价指标体系,采用熵权法和模糊集通过多属性决策获得最优设计方案,以面向再制造的电机拆解机的设计为对象验证上述方法的有效性。

上述研究方法表明如果不解决权重主观性和评价函数单一性问题,则无法保证所得设计方案的合理性与客观性。文中所提方法可以在面向再制造设计方案多属性决策过程更稳定、可靠和有效,此外,许多其他因素如专家数量、评价指标属性、设计者的经验等对面向再制造设计方案多属性决策有一定的影响,考虑以上因素将作为未来研究方向。

### 参考文献:

- [1] WANG Han, JIANG Zhigang, ZHANG Hua, et al. An integrated MCDM approach considering demands-matching for reverse logistics[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208: 199-210.
- [2] 王涵,江志刚,张华,等.基于目标级联的废旧机械装备多目标优化再设计方法研究[J].机械工程学报, 2019, 55(3): 147-153.  
WANG Han, JIANG Zhigang, ZHANG Hua, et al. Research on multi-objective optimization redesign method for used mechanical equipment based on analytical target cascading[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 147-153.
- [3] 唐娟,李帮义,刘志.再制造闭环供应链产品设计责任延伸研究综述[J].南京航空航天大学学报(社会科学版), 2017, 19(4): 31-36.  
TANG Juan, LI Bangyi, LIU Zhi. Extending the Product Design Responsibility in Remanufacturing Closed-loop Supply Chain. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences), 2017, 19(4): 31-36.

- [4] 杜彦斌.退役机床再制造评价与再设计方法研究[D].重庆:重庆大学, 2012.  
DU Yanbin. Research on remanufacturing evaluation and redesign method for retired machine tools [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [5] 熊颖清,夏绪辉,王蕾,等.面向多生命周期的再制造服务活动决策方法研究[J].机械设计与制造, 2017(2): 108-111.  
XIONG Yingqing, XIA Xuhui, WANG Lei, et al. Research on method of the remanufacturing service activities decision making based on the multi-life cycle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(2): 108-111.
- [6] YANG S S, ONG S K, NEE A Y C. A decision support tool for product design for remanufacturing [J]. Procedia CIRP, 2016, 40: 144-149.
- [7] ISMAIL H N, ZWOLINSKI P, MANDIL G, et al. Decision making system for designing products and production systems for remanufacturing activities [J]. Procedia CIRP, 2017, 61: 212-217.
- [8] KE Qingdi, WANG Hui, SONG Shouxu, et al. A timing decision-making method for product and its key components in proactive remanufacturing [J]. Procedia CIRP, 2016, 48: 182-187.
- [9] SUBRAMONIAM R, HUISINGH D, CHINNAM R B, et al. Remanufacturing decision-making framework (RDMF): Research validation using the analytical hierarchical process [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 40: 212-220.
- [10] SCHROEDER N B. Design of a second life product family from the perspective of the remanufacturing agent [D]. Chicago, USA: University of Illinois, 2011.
- [11] YAN T, HAN C. A novel approach of rough conditional entropy-based attribute selection for incomplete decision system [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(5): 1-15.
- [12] 王珏,刘三阳,张杰.基于Vague集的模糊多目标决策方法[J].系统工程理论与实践, 2005, 25(2): 119-122.  
WANG Jue, LIU Sanyan, ZHANG Jie. Fuzzy multiple objectives decision making based on Vague sets [J]. System Engineering Theory and Practice, 2005, 25(2): 119-122.
- [13] 赵庆庆,黄天民.基于熵权Vague集的多目标决策方法[J].计算机应用, 2018, 38(5): 1250-1253.  
ZHAO Qingqing, HUANG Tianmin. Multi-objective decision making based on entropy weighted-Vague sets [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(5): 1250-1253.
- [14] ELZARKA H M, YAN H, CHAKRABORTY D. A vague set fuzzy multi-attribute group decision-making model for selecting onsite renewable energy technologies for institutional owners of constructed facilities [J]. Sustainable Cities & Society, 2017, 35: 430-439.