

基于 RS-TOPSIS 的再制造曲轴毛坯质量评价方法^{*}

温海骏^{1,2}, 刘长义¹, 刘从虎¹

(1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 中北大学 机械与动力工程学院, 太原 030051)

摘 要: 针对不确定条件下的再制造发动机曲轴质量等级划分问题, 研究了基于粗糙集属性约简方法, 并将逼近理想解的排序法运用到该问题中。选取主轴颈最大磨损量、连杆颈最大磨损量和主轴颈圆度等 10 个因素作为再制造曲轴的质量评价指标, 利用粗糙集理论的离散和约简算法, 将特征属性进行等级划分并计算出对应的特征属性权重, 在约简结果基础上建立质量等级评价矩阵, 通过计算评价对象的相对贴近度给出了质量分类区间。选取 3×200 组实测曲轴数据, 建立 RS-TOPSIS 再制造曲轴质量等级评价模型, 并对检测样本进行回检, 误判率最大为 2.1%。结果表明: 所采用的 RS-TOPSIS 评价模型能够对再制造曲轴进行合理的等级评定, 能够获得良好的判别效果, 具有实际工程价值。

关键词: 再制造; 曲轴质量评价; 粗糙集; 逼近理想解排序法(TOPSIS)

中图分类号: TH16

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)01-0101-08

Quality Evaluation Method for Remanufactured Crankshaft Blank Based on RS-TOPSIS

WEN Hai-jun^{1,2}, LIU Chang-yi¹, LIU Cong-hu¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009; 2. College of Mechanical Engineering & Automatization, North University of China, Taiyuan 030051)

Abstract: The attribute reduction method based on rough set (RS) was investigated for the problem of quality grading for remanufactured engine crankshafts under conditions of uncertainty. The technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method was also used for the problem. Ten quality evaluation criteria including the maximum abrasion of the main journal crankshaft and the connecting rod and roundness of the main journal crankshaft were first selected. All feature attributes were then classified and their corresponding weights were calculated by using discrete and reduction algorithm of rough set theory, and a matrix to evaluate quality classification was established based on these results. The quality classification interval was finally determined according to the relative closeness degree of evaluation objects. 3×200 groups of data of measured crankshaft were selected to develop the RS-TOPSIS quality grade evaluation model of remanufactured crankshaft. The test sample was checked to have 2.1% misjudgment rate. The results show that the RS-TOPSIS method proposed can grade the quality of remanufactured crankshafts rationally and achieve good result, and thus would be useful in engineering practice.

Keywords: remanufacture; quality evaluation of crankshaft; rough set; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)

0 引 言

再制造是在保证资源能源节约的条件下生产出经济发展所需要的产品, 是建设资源节约

型、环境友好型社会的有效途径^[1-2]。

我国 2011 年民用汽车保有量已突破 1 亿辆, 汽车报废量超过 400 万辆, 预计 2020 年报废量将

收稿日期: 2014-10-20; 修回日期: 2014-12-17; 基金项目: * 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB013406)

通讯作者: 温海骏(1975—), 男(汉), 讲师, 博士生; 研究方向: 生产管理和作业调度; Tel: (0351) 3925 385; E-mail: whjnuc@126.com

网络出版日期: 2015-01-05 17:03; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1007-9289.2015.01.001.html>

引文格式: 温海骏, 刘长义, 刘从虎. 基于 RS-TOPSIS 的再制造曲轴毛坯质量评价方法 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(1): 101-108.

Wen H J, Liu C Y, Liu C H. Quality evaluation method for remanufactured crankshaft blank based on RS-TOPSIS [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1): 101-108.

超过 1400 万辆,再制造行业发展潜力巨大。与制造过程相比,再制造发动机以回收的废旧发动机为“毛坯”,减少了大量的制造及加工环节,其能源消耗只为制造发动机的一半,劳动价值为制造的 $2/3$,而材料消耗仅为制造的 20% ,因此可以显著地节约能源和减少资源消耗。然而与制造过程不同,再制造“毛坯”由于使用工况、运转时间以及磨损程度等的不同,使得质量差异较大,影响了再制造生产过程的正常进行。故科学合理的对再制造“毛坯”进行质量评价和等级划分是其低成本、高效率地进行再制造的必要前提。由于再制造“毛坯”状态的复杂性,需要通过大量检测指标进行检测,判断其质量状态,并按照再加工特性及工艺要求进行分类。然而由于再制造系统中众多不确定因素的存在^[3],导致检测过程的检测指标存在不完备、冗余甚至是互相矛盾的情况。导致对“毛坯”的检测和分类成为再制造生产过程中的瓶颈,也造成了后续再制造工序工艺混乱,高成本、低效率情况的产生。因此如何选择有效的评价指标并消除冗余因素,准确高效对“毛坯”进行检测并进行质量等级划分,成为合理进行再制造的亟待解决的问题。

针对回收产品质量及其不确定性因素对于再制造“毛坯”的影响,众多学者从不同角度进行了研究。徐滨士^[1]提出再制造毛坯质量评价是保证再制造零件质量的主要环节,目前急需加强再制造质量检测评价方法的研究。Behret^[4]和 Tang^[5]分别指出废旧零部件的质量差异是导致再制造工艺路线和工艺时间具有高度不确定性的直接原因。Denuzel 等^[6]对废旧产品进行了质量等级划分,建立了动态规划模型,确定了不同质量分类产品的最优产量、备用入库的废旧产品数量和无法再制造的废旧产品数量。李聪波等^[7]提出废旧零部件再制造工艺过程具有不确定性和模糊性的双重特征,构建了一个废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统。Aras 等^[8]研究了再制造零部件质量不确定对再制造率、再制造成本、再制造加工时间的影响。Zhou 等^[9]提出了不确定条件下基于模糊层次分析法的废旧轮式装载机零部件可重用度的质量评价模型,李成川等^[10]针对不同质量分类的废旧零部件,分析了再制造工艺路线不确定性的影响参数,建立基于图形评审技术的某废旧零部件再

制造工艺路线模型。JIN 等^[11]针对回收品质量不确定性条件下的再制造系统最优控制策略进行了相关研究。

上述文献主要针对由于质量因素引起的再制造不确定生产决策问题做出了一定探索,但鲜有文献从检测分类和质量评价方法上对再制造不确定性问题进行深入研究。因此文中结合粗糙集理论(RS)和多目标决策分析的特点,通过属性约简去除冗余信息,以获得不含多余属性并保证分类正确的最小条件属性集,并结合逼近理想解的排序法(Technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS),提出了质量等级评价模型,将其用于再制造曲轴的质量判定,以期为再制造不确定优化决策提供理论支持。

1 曲轴分类评价指标确定

对再制造曲轴采取合理的检测方法和手段是保证再制造曲轴质量的关键环节。检测的项目包括了外观几何形状、内在物理化学性能、表面质量等。在实际生产中对于再制造曲轴检测指标的选择,缺乏较为深入地系统分析判断,往往还停留在主观经验判断上或个人喜好上,缺少较为完备的方法。此外,除了具体量化指标以外,一些非量化指标对再制造性的影响也不容忽视。其指标因素主要包括如下内容:①几何精度,包括了零件的关键尺寸、尺寸公差、形状公差及位置公差。②表面质量,包括表面粗糙度、烧伤、划伤、腐蚀、磨损、擦伤、裂纹、剥落、锈蚀等缺陷。③理化性能,包括零件硬度、硬化层深度、应力状态、弹性、刚度、运行过程中的平衡和振动状况等。④潜在缺陷,包括毛坯内部夹渣、气孔、疏松、空洞、焊缝等缺陷及微观裂纹等。⑤磨损程度,根据再制造产品寿命周期要求,正确检测判断摩擦磨损零件的磨损程度并预测其再使用时的情况和使用寿命等。

目前发动机再制造企业受现有批量修复工艺技术条件所限,根据目前再制造车间通用的检测指标并结合专家调查结果,文中选取以下质量评价指标:主轴颈最大磨损量 C1,连杆颈最大磨损量 C2,主轴颈圆度 C3,主轴颈圆柱度 C4,弯曲度 C5,扭曲度 C6,曲轴轴向间隙 C7,粗糙度 C8,裂纹程度 C9,烧蚀程度 C10,这些指标基本反映了再制造曲轴毛坯质量状况。结合企业实际生

产要求,将曲轴分为 4 级,分类标准如表 1 所示。

根据上述分类标准采用不同的工艺方案,第一类工件各检测指标处在正常范围之内,进行表面和油道清洗后,再对主轴颈和连杆颈进行抛光至表面粗糙度满足要求为止;第二类工件检测指标处于修理尺寸范围内,利用轴瓦和止推垫进行不同等级的修配再制造,以降低再制造成本。由于裂纹在修理尺寸内故可通过磨削进行消除,故

此类工件可在除油除锈后进行校直、磨削、抛光的工艺路线;第三类工件超差较大,需要结合表面工程和机械加工修复方法,实施再加工后重用。可采用清洗→找正→磨削→非喷保护→预热→堵油孔→拉毛→金属粉末火焰喷涂→校直→磨削的工艺路线进行曲轴的修复作业;第四类工件超差严重,修复代价过高或无法修复,可将此类工件进行材料回收再利用。

表 1 曲轴检测指标等级分类标准

Table 1 Grading standard of the crankshaft quality index

Class	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
I	(0,0.03]	(0,0.03]	(0,0.04]	(0,0.04]	(0,0.15]	(0,0.1]	(0.08,0.25]	(0.2,0.4]		
II	(0.03,0.75]	(0.03,0.75]	(0.04,0.08]	(0.04,0.08]	(0.15,0.3]	(0.1,0.2]	(0.25,0.50]	(0.4,0.6]	Slight	Slight
III	(0.75,1.5]	(0.75,1.5]	(0.08,0.12]	(0.08,0.12]	(0.3,0.5]	(0.2,0.3]	(0.50,1.00]	(0.6,0.8]	Medium	Medium
IV	(1.5,3.0]	(1.5,3.0]	(0.12,0.20]	(0.12,0.20]	(0.5,1.2]	(0.3,0.5]	(1.00,3.00]	(0.8,1.0]	Serious	Serious

2 基于粗糙集理论的特征属性约简

在再制造曲轴检测过程中,由于受到检测方法本身的限制,检测精度误差以及检测因素间互相关的影响,再制造方案的选择及出于成本的考虑,对曲轴再制造质量评价的影响因素的考虑并不是多多益善的,此外为了降低后续再制造过程中数据杂乱性和冗余性对再制造决策的扰动,有必要去除与决策目标无关或相关性较小的冗余信息,以减小检测成本和提高检测效率。这就涉及到一个指标因素遴选问题或称为影响属性的约简问题,即从现有的影响因素中选出对再制造性影响较大的关键因素。粗糙集理论被证明特别适合于解决数据简化,数据相关性、相似性的查找,发现数据模式,从数据中提取推理规则等问题^[12]。

由于再制造曲轴检测指标特征属性多为连续值,而粗糙集属性约简方法对连续变化的属性值是无法处理的,要利用粗糙集方法进行属性约简,首先必须要对输入的属性值进行离散化处理。引入如下定义:

定义 1 设 $S = (U, A, V, f)$ 是一个知识表达系统, A 中的属性又可分为两个不相交的子集,即条件属性集 C 和决策属性集 D , 即: $A = C \cup D, C \cap D = \varnothing, V$ 为属性值域,具有条件属性集和决策属性集的知识表达系统称为决策表。

$f:U \times R \rightarrow V$ 为一个信息函数,指定了 U 中每个对象的属性值。连续属性的离散过程就是

利用选取的断点来对条件属性构成的空间进行划分的问题,即把 $m(m$ 为条件属性的个数)维空间划分成有限个区域。文中采用文献^[13]提出的基于信息熵的粗糙集离散化算法,该算法对每一个候选断点定义了信息熵,并以此作为对断点重要性的量度,该算法属于启发式局部寻优算法,在算法中考虑了由连续条件属性和离散条件属性构成的混合知识系统,具有多项式级的复杂性,它不改变决策表的相容性,而且当样本量和属性个数较大时仍有较高的计算效率。

属性约简就是找到不含多余属性并保证正确分类的最小属性集。约简属性集的分类质量与原属性集的分类质量相同。引入如下定义:

定义 2 对于知识系统 $S = (U, A, V, f)$, 则决策属性集 D 与条件属性集 C 的依赖性可以定义为:

$$\gamma_C(D) = \text{card}(\text{POS}_C(D)) / \text{card}(U)$$

其中, $\text{POS}_C(D) = \bigcup_{x \in U / \text{IND}(D)} \overline{\text{apr}}_C(D)$, 是属性集 C 在 $U / \text{IND}(D)$ 中的正域, $\text{card}(\cdot)$ 为集合的基数。

若最小的属性子集 $P \subseteq C \subseteq A$, 满足 $\gamma_P(X) = \gamma_C(X)$, 则集合 P 称为集合 C 的一个约简, 记为 $\text{red}(P)$, 可见约简就是不含多余属性并保证正确分类的最小条件属性子集。决策表往往不仅仅有一个约简, 所有约简的交称为决策表的核, $\text{core}(P) = \bigcap_{R_i \in \text{red}(P)} R_i, i = 1, 2, \dots$ 。

经过特征属性离散化处理后,可得到离散化

的决策表 $S = (U, A, V, f)$, $A = C \cup D$, 对于 $\forall p_k \in C, k \in [1, m], m$ 为特征属性个数。属性 p_k 的重要度为:

$$sgf(p_k, D) = \frac{|POS_C(D)| - |POS_{C - \{p_k\}}(D)|}{|U|} \tag{1}$$

$sgf(p_k, D)$ 越大, 表明特征属性对检测结果的影响越重要。将各特征属性对应的重要度进行规范化处理, 即可得到各特征属性的权重。

$$w(p_k) = \frac{sgf(p_k)}{\sum_{p_k \in C} sgf(p_k)} \tag{2}$$

式中, $0 \leq w(p_k) \leq 1$, 且 $\sum_{k=1}^m w(p_k) = 1$

根据上述内容, 设计属性约简算法如图 1 所示:

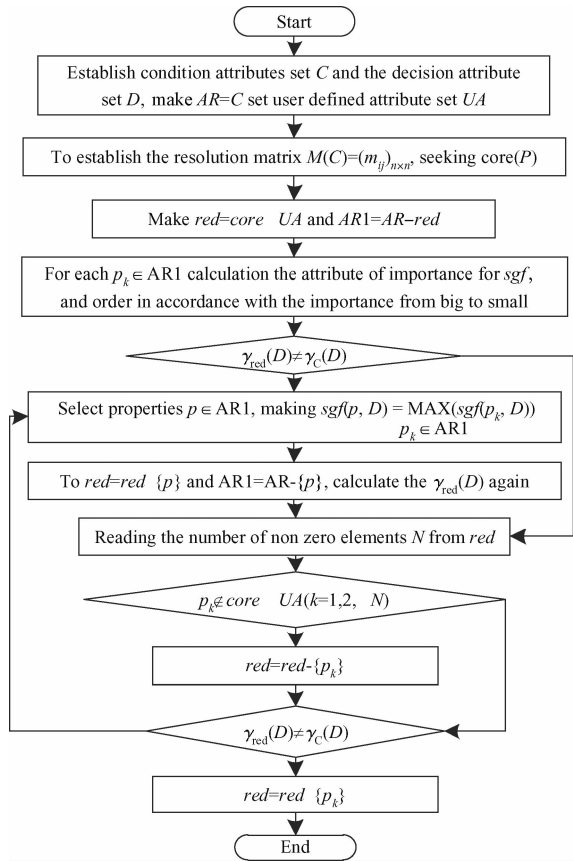


图 1 属性约简算法流程图

Fig. 1 Flow chart of attribute reduction algorithm

3 TOPSIS 法原理及评价步骤

逼近理想解排序法于 1981 年由 Hwang 等

首次提出, 是一种适用于根据多属性指标对多个评价对象进行比较选择的分析方法。其基本原理是构造 n 维属性空间的最优解与最劣解, 通过求解评价对象与最优、最劣解的欧氏距离, 评测该对象靠近最优解同时又远离最劣解的叠加状态(相对贴进度), 并将相对贴进度作为最终衡量评价对象的综合指标^[14-15]。

采用 TOPSIS 法的基本步骤如下:

Step 1: 建立初始评价矩阵

$$A = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \tag{3}$$

上式表示评价矩阵 A 有 m 个评价单元, n 个评价指标, a_{ij} 表示第 $i (i = 1, 2, \dots, m)$ 个评价对象的第 $j (j = 1, 2, \dots, n)$ 个属性评价指标。

Step 2: 建立标准化决策矩阵

由于被检测对象的不同指标往往具有不同的量纲和量纲单位。为消除由此而产生的指标的不可公度性, 要对矩阵 A 进行归一化处理, 同时消除不同属性指标之间的量纲与数量级影响。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \tag{4}$$

b_{ij} 表示第 i 个评价指标在第 j 个属性指标下的经过无量纲化处理后的指标值。

标准化决策矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$ 。

Step 3: 建立加权标准化决策矩阵

加权标准化决策矩阵通过将权重矩阵 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$ 右乘评价矩阵 B 得到, 表示如下:

$$V = B \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \cdots & v_{mn} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中权重 $w_i > 0, \sum_{i=1}^n w_i = 1$

Step 4: 确定理想解

确定加权标准化决策矩阵 V 的正理想解 V^+ 和负理想解 V^- , 即

$$V^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \mid j \in J^+), (\min_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \mid j \in J^-)\} =$$

$$\{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$
$$V^- = \{(\min_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \mid j \in J^+), (\max_{1 \leq i \leq m} v_{ij} \mid j \in J^-)\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \tag{6}$$

式中, J^+ 为效益型指标,即越大越优型指标; J^- 为成本型指标,即越小越优型指标。

Step 5: 计算评价对象到理想解的距离
分别计算第 i 个评价对象到正理想解 V^+ 的距离 D_i^+ 和到负理想解 V^- 的距离 D_i^- , 即

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \tag{7}$$

Step 6: 计算评价对象相对贴近度

表 2 曲轴检指标测特征属性表
Table 2 Feature attribute table of the crankshaft quality index

Example	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
X1	1.7	1.5	0.15	0.15	0.09	0.15	0.26	0.9	Slight	Medium
X2	0.45	0.61	0.09	0.10	0.16	0.10	0.41	0.6	Slight	Slight
X3	0.48	0.50	0.07	0.11	0.08	0.10	0.33	0.5		Slight
X4	0.02	0.04	0.05	0.05	0.07	0.00	0.50	0.7	Slight	Medium
X5	0.30	0.35	0.06	0.06	0.20	0.20	0.30	0.5	Medium	Medium
X6	2.10	2.00	0.11	0.12	0.31	0.40	0.45	0.7	Slight	Medium
X7	1.20	1.30	0.07	0.07	0.42	0.20	0.50	0.5	Slight	
X8	1.40	1.40	0.10	0.11	0.35	0.10	0.30	0.4		Slight
X9	1.90	2.00	0.10	0.15	0.6	0.10	0.35	0.8	Medium	Slight
X10	0.25	0.30	0.05	0.05	0.18	0.00	0.20	0.3	Serious	Slight
X11	0.45	0.45	0.03	0.03	0.22	0.20	0.28	0.4	Slight	Slight
X12	0.03	0.03	0.04	0.04	0.10	0.00	0.10	0.3		Slight
X13	0.85	0.90	0.07	0.09	0.40	0.10	0.70	0.8	Medium	Slight
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X199	1.4	1.5	0.12	0.12	0.4	0.3	0.75	0.6	Serious	Medium
X200	0.50	0.55	0.07	0.08	0.40	0.20	0.35	0.5	Slight	Medium

4.1 权重累积评价

根据粗糙集理论,再制造曲轴质量评价系统可以用一知识表达系统 $S = (U, C \cup D, V, f)$ 来进行表述,其中论域 $U = (1, 2, \dots, 200)$ 为检测曲轴,条件属性 $C = (s_1, s_2, \dots, s_{10})$ 为检测指标值,决策属性 $D = (1, 2, 3, 4)$ 。对表 2 中连续特征属性进行离散化后,构成决策表,如表 3 所示。

根据前面所诉定义及相应计算公式,建立分辨矩阵 M ,求得核为:

$$core_D(C) = \{C1, C2, C4, C5, C9\}$$
$$U/IND(D) = \{\{X_{12}, X_{17}, X_{26}, X_{27}, X_{34}, \dots, X_{184}\},$$

$$E_i^* = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-) \tag{8}$$

Step7: 根据 E_i^* 的大小进行排序, E_i^* 值越大,表示评价对象越优,显然 $E_i^* \in [0, 1]$ 。通过对评价对象进行贴近度降序排列,可以对其进行选择、评价。

4 实例应用

以某汽车再制造 STR 曲轴为研究对象。选取连续 3 个月,每月 200 组曲轴毛坯检测指标数据作为 RS-TOPSIS 模型的训练样本。由于再制造车间生产规模较小,故采用简单随机抽样方法进行曲轴的选取。限于篇幅所限此处仅列出其中一组特征属性表如表 2 所示。

$$\{X_2, X_3, X_4, X_5, X_{11}, \dots, X_{200}\}, \dots\}$$

$$U/(C - \{C1\}) = \{\{X_{11}, X_{26}, \dots\}, \{X_2, X_3, \dots\}, \dots\}$$

$$POS_{C - \{C1\}}(D) = \{X_2, X_3, X_4, X_5, \dots, X_{198}, X_{200}\}$$

$$POS_{C - \{C2\}}(D) = \{X_1 X_2, X_3, X_6, \dots, X_{198}, X_{199}\}$$

同理可得出 $POS_{C - \{C3\}}(D), \dots, POS_{C - \{C9\}}(D)$ 等值。

由上述重要度公式可得:

$$sgf(C1, D) = \frac{|POS_C(D)| - |POS_{C - \{C1\}}(D)|}{|U|} = 0.241$$

表 3 离散化特征属性表

Table 3 Discretization of the feature attribute

Example	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	D
X1	4	4	4	4	1	2	2	4	2	3	4
X2	2	2	3	3	2	1	2	2	2	1	2
X3	2	2	2	3	1	1	2	2	1	2	2
X4	1	2	2	2	1	1	2	3	2	3	2
X5	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2
X6	4	4	3	3	3	4	2	3	2	3	4
X7	3	3	2	2	3	2	2	2	2	1	3
X8	3	3	3	3	3	1	2	1	1	2	3
X9	4	4	3	4	4	1	2	3	3	2	4
X10	2	2	2	2	2	1	1	1	4	2	4
X11	2	2	1	1	2	2	2	1	2	2	2
X12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1
X13	3	3	2	3	3	1	3	3	3	2	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X199	3	3	3	3	3	3	3	2	4	3	4
X200	2	2	2	2	3	2	2	2	2	3	2

同理可得：

$$sgf(C2,D)=0.241,sgf(C3,D)=0,$$
$$sgf(C4,D)=0.176,sgf(C5,D)=0.193,$$
$$sgf(C6,D)=0.070,sgf(C7,D)=0.085,$$
$$sgf(C8,D)=0,sgf(C9,D)=0.215,$$
$$sgf(C10,D)=0。$$

将上述结果进行归一化计算后得到各特征属性权重如下：

$$sgf(C1,D)=0.197,sgf(C2,D)=0.197$$
$$sgf(C3,D)=0,sgf(C4,D)=0.144$$
$$sgf(C5,D)=0.158,sgf(C6,D)=0.057$$
$$sgf(C7,D)=0.070,sgf(C8,D)=0$$
$$sgf(C9,D)=0.176,sgf(C10,D)=0$$

同理将其他两组数据按照上述步骤进行属性权重的计算,计算结果表明,检测指标属性中,属性 C1,C2,C4,C5,C6,C7,C9 是绝对必要的,而 C3,C8,C10 是不必要的,但其不一定可以同时省略。根据属性权重值分析可知,主轴颈最大磨损量、连杆颈最大磨损量、裂纹程度、径向跳动、主轴颈圆柱度对再制造曲轴质量等级划分的影响权重较大,轴向间隙和扭曲度影响次之,主轴颈圆度,粗糙度,烧蚀程度属于冗余属性。这个结果和实际试验经验基本吻合。

基于以上分析,可以建立三级分层等级指标,各层特征属性按权重依次降低。

一级特征属性指标集:主轴颈最大磨损量→连杆颈最大磨损量→裂纹程度→径向跳动→主轴颈圆柱度。

二级特征属性指标集:轴向间隙→扭曲度。

三级特征属性指标集:主轴颈圆度、粗糙度、烧蚀程度。

4.2 TOPSIS 评价模型检验

根据 TOPSIS 定义及评价步骤,结合表 1 的指标分类区间上限构造的 4 个不同等级的典型样本和 200 组再制造曲轴检测学习样本建立初始评价矩阵 A,将典型样本用“*”进行标记。

A =

0.03	0.03	0.04	0.15	0.10	0.25	1	1*
0.75	0.75	0.08	0.30	0.20	0.50	2	2*
1.50	1.50	0.12	0.50	0.30	1.00	3	3*
3.00	3.00	0.20	1.20	0.50	3.00	4	4*
1.70	1.50	0.15	0.09	0.15	0.26	2	1
0.45	0.61	0.10	0.16	0.10	0.41	2	2
0.48	0.50	0.11	0.08	0.10	0.33	1	3
0.02	0.04	0.05	0.07	0.00	0.50	2	4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.95	0.98	0.09	0.40	0.10	0.70	3	197
0.03	0.04	0.04	0.10	0.02	0.10	1	198
1.40	1.50	0.12	0.40	0.30	0.75	4	199
0.50	0.55	0.08	0.40	0.20	0.35	2	200

由于原始指标对于再制造方式的影响都是指标值越小越优,则可根据(4)式进行计算处理,最终得到规范化矩阵 B 。

$B =$

1.00	1.00	0.94	0.93	0.80	0.94	1.00
0.76	0.76	0.71	0.80	0.60	0.86	0.67
0.50	0.51	0.47	0.62	0.40	0.68	0.33
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.44	0.51	0.29	0.98	0.70	0.94	0.67
0.86	0.80	0.59	0.92	0.80	0.89	0.67
0.85	0.84	0.53	0.99	0.80	0.91	1.00
1.00	1.00	0.88	1.00	1.00	0.86	0.67
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.70	0.68	0.65	0.71	0.80	0.79	0.33
0.91	1.00	0.94	0.97	0.96	0.99	1.00
0.54	0.51	0.47	0.71	0.40	0.77	0.00
0.84	0.82	0.71	0.71	0.60	0.91	0.67

结合前述通过粗糙集理论所得到的影响质量分类的各因素的权重,再利用(5)式计算得到加权规范化的矩阵 V 。

$V =$

0.190	0.198	0.139	0.143	0.046	0.066	0.176
0.149	0.149	0.102	0.126	0.034	0.060	0.117
0.099	0.099	0.068	0.098	0.023	0.048	0.059
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.086	0.099	0.042	0.155	0.040	0.066	0.117
0.169	0.159	0.085	0.145	0.046	0.062	0.117
0.167	0.166	0.076	0.157	0.046	0.064	0.176
0.197	0.196	0.127	0.158	0.057	0.060	0.117
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.136	0.134	0.093	0.112	0.046	0.055	0.059
0.178	0.196	0.136	0.154	0.055	0.070	0.176
0.106	0.099	0.068	0.112	0.023	0.054	0.000
0.165	0.163	0.102	0.112	0.034	0.064	0.117

根据得到的加权标准化决策矩阵,由(6)式可得规范化矩阵的正负理想解分别为:

$V^+ = [0,0,0,0,0,0,0]$,

$V^- = [0.197,0.197,0.136,0.158,0.057,0.070,0.176]$

运用(7)式求出各指标因素到正负理想解的距离,再由(8)式求出各指标的相对贴近度,结果如表 4 所示。

通过分析表 4 可知,再制造曲轴质量的贴近度分类为:

- 1 级分类: $0 \leq E_i^* \leq 0.050$
- 2 级分类: $0.050 \leq E_i^* \leq 0.259$
- 3 级分类: $0.259 \leq E_i^* \leq 0.508$
- 4 级分类: $0.508 \leq E_i^* \leq 1.000$

表 4 中存在数据误判情况,如 1 号样本实际判别为 4 级,在评价模型中误判为 3 级,但在所采集的 200 根曲轴总样本中误判情况为 3 根,误判率仅为 1.5%。依次求解其余两组数据所得判别结果如表 5 所示,其中误判率最大为 2.1%,表明模型判别结果与实际判断结果比较吻合,并且该方法具有较好的继承性,当选定质量评判指标后,根据其评价指标值,即可对其等级进行准确的判定。

表 4 再制造曲轴质量 RS-TOPSIS 模型评价结果

Table 4 Evaluate results of the remanufactured crankshaft based on RS-TOPSIS model

Sample	D_i^+	D_i^-	E_i^*	Model checking	Actual result of judgment
1*	0.393	0.021	0.050	1	\
2*	0.298	0.104	0.259	2	\
3*	0.200	0.207	0.508	3	\
4*	0.000	0.400	1.000	4	\
X1	0.251	0.185	0.425	3	4
X2	0.319	0.093	0.227	2	2
X3	0.350	0.075	0.176	2	2
X4	0.373	0.060	0.139	2	2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
X197	0.257	0.161	0.385	3	3
X198	0.389	0.019	0.047	1	1
X199	0.204	0.239	0.539	4	4
X200	0.309	0.098	0.240	2	2

表 5 分组样本判别结果

Table 5 Judgement ratio of the grouping samples

Sample group	1	2	3
Misjudgment rate	1.5%	2.1%	1.7%

5 结 论

(1) 针对再制造过程中影响废旧曲轴质量的

不确定因素,确定以主轴颈最大磨损量、连杆颈最大磨损量等指标作为影响曲轴的质量因素,引入粗糙集理论的离散和约简算法实现对特征属性的约简和属性权重的计算,消除了冗余信息,实现了决策系统的简化。

(2) 结合多目标决策理论中的逼近理想解排序法,建立了 RS-TOPSIS 再制造曲轴质量评价模型,通过对 3×200 组样本数据进行学习,得到回收曲轴的质量分类贴近度区间,进而对学习样本进行回检,结果表明评价模型所得值能够与实测类别有效吻合,体现了评价模型的稳定性与高效性。该方法具有实际的工程应用价值,可以应用于再制造曲轴的质量评定,为再制造毛坯质量评价提供了快速有效的解决方法。

参考文献

- [1] 徐滨士,董世运,史佩京. 中国特色的再制造零件质量保证技术体系现状及展望 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 84-90.
Xu B S, Dong S Y, Shi P J. States and prospects of China characterised quality guarantee technology system for remanufactured parts [J]. Journal of Mechanic Engineering, 2013, 49(20): 84-90 (in Chinese).
- [2] 徐滨士,董世运,朱胜,等. 再制造成形技术发展及展望 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 96-105.
Xu B S, Dong S Y, Zhu S, et al. Prospects and developing of remanufacture forming technology [J]. Journal of Mechanic Engineering, 2012, 48(15): 96-105 (in Chinese).
- [3] Guide V D R. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs [J]. Journal of Operational Management, 2000, 18(4): 467-483.
- [4] Behret H, Korugan A. Performance analysis of a hybrid system under quality impact of returns [J]. Computers and Industrial Engineering, 2009, 56(2): 507-520.
- [5] 汤希峰,毛海军,李旭宏. 零部件质量不确定对其再制造加工的影响 [J]. 东南大学学报(英文版), 2011, 27(1): 92-95.
Tang X F, Mao H J, Li X H. Effect of quality uncertainty of parts on performance of reprocessing system in remanufacturing environment [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2011, 27(1): 92-95 (in Chinese).
- [6] Denuzel M, Ferguson M, Souza G C. Multi-period remanufacturing planning with uncertain quality of inputs [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2010, 57(3): 394-404.
- [7] 李聪波,李玲玲,曹华军,等. 废旧零部件不确定性再制造工艺时间的模糊学习系统 [J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 137-146.
Li C B, Li L L, Cao H J, et al. Fuzzy learning system for uncertain remanufacturing process time of used components [J]. Journal of Mechanic Engineering, 2013, 49(15): 137-146 (in Chinese).
- [8] Aras N, Boyaci T, Verter V. The effect of categorizing returned products in remanufacturing [J]. IIE transactions, 2004, 36(4): 319-331.
- [9] Zhou J, Huang P, Zhu Y G, et al. A quality evaluation model of reuse parts and its management system development for end-of-life wheel loaders [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 35(10): 239-249.
- [10] 李成川,李聪波,曹华军,等. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 298-305.
Li C C, Li C B, Cao H J, et al. Uncertain remanufacturing process routings model for used components based on GERT network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 298-305 (in Chinese).
- [11] Jin X, Jun N, Koren Y. Optimal control of reassembly with variable quality returns in a product remanufacturing system [J]. Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 25-28.
- [12] 张文修,仇国芳. 基于粗糙集的不确定决策 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
Zhang W X, Qiu G F. Uncertainty decision based on rough set [M]. Beijing: Tsinghua Press, 2005 (in Chinese).
- [13] 谢宏,程浩忠,牛东晓. 基于信息熵的粗糙集连续属性离散化算法 [J]. 计算机学报, 2005, 28(9): 1570-4.
Xie H, Cheng H Z, Niu D X. Discretization of continuous attributes in rough set theory based on information entropy [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(9): 1570-4 (in Chinese).
- [14] 徐玖平,吴巍. 多属性决策的理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 28-30.
Xu J P, Wu W. Multiple attribute decision making theory and methods [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 28-30 (in Chinese).
- [15] 胡建华,尚俊龙,雷涛. 基于 RS-TOPSIS 法的地下工程岩体质量评价 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(11): 4412-9.
Hu J H, Shang J L, Lei T. Rock mass quality evaluation of underground engineering based on RS-TOPSIS method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(11): 4412-9 (in Chinese).