

废旧产品再制造性评估指标 *

刘 赞¹, 徐滨士¹, 史佩京¹, 刘渤海^{1,2}

(1. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室 北京 100072; 2. 合肥工业大学管理学院 合肥 230009)

摘 要: 通过剖析再制造生产过程,在已有模块的基础上,结合当前社会关注的问题,提出了一种全新的再制造性指标评价体系。优化了以往的模糊评价方法和离散的评估方法,用 $[0,1]$ 区间上连续的函数来表示再制造性的大小,并增加了一些关于循环经济指标。可以为再制造企业进行再制造生产提供理论依据,以及可以通过指标评价体系对现有的再制造企业进行评价,以实现资源的合理化配置。文中以济南复强动力有限公司生产斯太尔 WD615 再制造发动机为例,来说明再制造性的计算过程。

关键词: 再制造性; 指标体系; 评估

中图分类号: TH16; TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2011)05-0094-06

Assessment Indexes of Used Products Remanufacturability

LIU Yun¹, XU Bin-shi¹, SHI Pei-jing¹, LIU Bo-hai^{1,2}

(1. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. Management School of Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: The paper raises a new system on remanufacturability assessment indexes based on the existing modules, dissecting the process of remanufacturing and considering the common focuses. The system is different from vague assessment and discrete assessment, which uses a continuous function on $[0, 1]$ to weight remanufacturability. At the same time, some economic indexes are added into the system. It can not only provide a theoretical basis for remanufacturing factory, but also can appraise remanufacturing factory's existing assessment system to rationalize the allocation of resources. Finally, taking JiNan FuQiang power Company Limited's Steyr WD-615 engine remanufacturing for example, the system was explained how the remanufacturability works.

Key words: remanufacturability; indexes system; assessment

0 引 言

产品的再制造性评估有两种方式,一是对已经使用和报废的产品再制造前对其进行再制造合理性评估^[1-3];二是在设计新产品时对其进行再制造性评估,利用评估结果改进设计,增加再制造性^[4]。废旧机电产品的再制造性^[5](Remanufacturability)是决定其能否进行再制造的前提,是再制造基础理论研究中的首要问题。废旧产品再制造性可定义为:废旧产品在规定的条件及时间内,综合考虑技术、经济和环境因素后,通过再制造,恢复或提高原产品功能和性能的能力。随着再制造技术的发展废旧产品的再制造性也

会随着变化。产品能否再制造以及再制造的效果如何,不仅关系到再制造生产的继续进行,也对再制造产品的质量提供了一个基本保证。对产品可再制造性的评价是再制造生产的一个重要环节。可再制造性决定了对产品实施再制造的可能性和经济性。文中主要是通过对一些评价指标的量化来最终达到一个适合废旧产品再制造性的定量指标,从数量上客观反映废旧产品是否适合再制造。

1 再制造性评价

虽然 Steinhilper^[1] 和 Lund^[2] 给出废旧产品是否适合再制造的一个判断准则,但是这并不是一个定量的评价,而且对于准则的判断很大程度上依赖人的主观因素,不能很好的对废旧产品的再制造性进行客观的评估。而随着中国再制造

收稿日期: 2011-09-02; 修回日期: 2011-09-06

基金项目: * 国家 973 项目(2011CB013405);国防预研实验室基金(代号略)

作者简介: 刘 赞(1988—),男(汉),安徽六安人,硕士生。

产业的发展与推进,人们对再制造越来越认可,再制造在环境等方面的贡献越来越受到国家政府和有关部门的重视,但在指标评价体系方面相对欠缺。目前对废旧的毛坯进行再制造性的评价主要从技术可行性、经济可行性和环境可行性三个系统层面进行考虑^[6]。

1.1 技术可行性^[7](R_1)

技术可行性要求废旧产品进行再制造加工技术及工艺上可行,可以通过原产品恢复或者升级恢复达到或者提高原产品性能的目的。再制造加工过程主要包括拆卸、清洗、分类检测、修复和升级、再制造零部件检测、装配、整体检测。所以对再制造技术方面的可行性评价可以从以下几个方面进行。

1.1.1 拆解合格率(R_{11})

目前废旧产品的拆解还是以手工和半机械化拆解为主,废旧产品本身经过了长时间的服役,导致的锈蚀等因素导致了其不能够完全无损的拆解或者不能够完全分解。拆解合格率就是指可再制造件在拆解过程中未经破坏的比例,即:

$$R_{11} = \frac{Q_u}{Q_r} \times 100\% \quad (1)$$

其中: Q_u 表示无损的可再制造件数量; Q_r 表示可再制造件总数。

1.1.2 检测可靠性(R_{12})

在进行再制造之前的毛坯检测是进行再制造加工的重要环节之一。检测会出现两种情况:一种是把不合格的毛坯错误的当成合格的毛坯,从而影响最终的产品质量;另一种是把合格的毛坯当作不合格毛坯进行回炉处理,虽然不会影响最终再制造品的质量,但是却增加了成本。其评价方式可以用以下公式表达:

$$R_{12} = \left(1 - \frac{N_r}{N}\right) \left(1 - \frac{N_i}{N}\right) \times 100\% \quad (2)$$

其中: N_r 表示合格的检验成不合格的数量; N_i 表示不合格的检验成合格的数量; N 总的检验数量。

1.1.3 新品可靠性(R_{13})

虽然再制造产品的质量不低于原始新品的质量,但是随着科技的进步以及人们对产品的要求的严格,现有的产品质量可能会高于报废零部

件生产时候的质量要求,为了保持再制造产品和现有同类产品之间的竞争优势,再制造产品的质量不能和现有同类型产品新品的质量相差太多。新品可靠性是衡量再制造产品适应新的竞争的能力(质量和价格)的一个重要的指标,用以下评估方法来评估:

$$R_{13} = \frac{n_1 + n_2\omega + n_3(1-\omega)}{n_1 + n_2 + n_3 + n_4} \quad (3)$$

其中: n_1 表示质量比现有新品好、价格比现有新品低的数量; n_2 表示质量比现有新品差、价格比现有新品低的数量; n_3 表示质量比现有新品好、价格比现有新品高的数量; n_4 表示质量比现有新品差、价格比现有新品高的数量; ω 表示性能所促进的竞争优势比重。

1.1.4 整机性能(R_{14})

再制造零部件虽然在单个性能上面不低于原始新品的质量,但是再制造产品很多情况下作为一个整体,作为一个系统,其性能是否不低于原始的整机性能。对于不同的再制造产品,所关心的具体内容也不同,对于再制造发动机,我们关心的是发动机的动力、扭矩、可靠性等,而再制造轮胎,所关心的就是耐磨性和寿命。所以整机性能这个指标就用达到或者超过原始新品的比例来表示,即:

$$R_{14} = \frac{Q_u}{Q} \times 100\% \quad (4)$$

其中: Q_u 表示达到原始新品数量的整机数; Q 表示整机总数。

1.1.5 相容性(R_{15})

再制造产品作为一个整体,其中的每个零部件的使用寿命不尽相同,在使用的过程中,可能会出现零部件的损坏而需要对零部件进行更换,这要求其中的再制造零部件要与其他零部件有着良好的兼容性,所以文中用以新件代替再制造件而不影响整机性能与总的数目的比值作为评价与其他零部件相容性的方法,即:

$$R_{15} = \sum_{A_i} \frac{A_r}{A_c A_w} \quad (5)$$

其中: A_r :用新品替换某个再制造零部件后整机性能不低于原始新品数量; A_c :每个整机的再制造零部件数目; A_w :整机的总数目。

1.1.6 加工效率(R_{16})

加工效率是衡量在再制造加工环节的一个结合时间性的指标,是指废旧毛坯进入再制造工厂进行清洗拆解开始到装配检测成为一个新的再制造产品所消耗的时间。

$$R_{16} = \begin{cases} 1 & t < t_0 \\ \frac{t_0}{t} & t > t_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: t 表示再制造加工平均所用时间; t_0 表示维修所需的平均时间。

1.2 环境可行性(R_2)

再制造性的环境可行性是对废旧产品再制造加工过程本身以及再制造后的产品在社会上使用时对环境影响的成本估计和预测。环境可行性的评价需要一个参照。再制造作为制造的延续与补充,并且弥补了原始制造的一些缺点,其显著特点之一就是对环境友好,所以再制造的环境可行性是和制造相比得到的结果。

1.2.1 旧件利用率(R_{21})

进入工厂的废旧整机其拆解后的零部件分成可再制造件、直接利用件和不可再制造件。旧件利用率用来衡量再制造过程对废旧产品的利用率,用可再制造件和直接利用件重量之和与整机的重量之比来表示,即:

$$R_{21} = \frac{W_{\text{reman}} + W_{\text{reuse}}}{W} \times 100\% \quad (7)$$

其中: W_{reman} 表示再制造件重量; W_{reuse} 表示可利用件重量; W 表示整机重量。

1.2.2 节能(R_{22})

原始制造出的产品经过一个寿命周期后要经过回炉变成原料再进行加工成零部件,而再制造以废旧产品为毛坯,进行加工生产,不需要经过回炉处理,因而节约大量能量,其计算公式为:

$$PW_{\text{reman}} = PW_{\text{hreman}} \times R_{21}$$
$$R_{22} = 1 - \frac{PW_{\text{reman}}}{PW_{\text{md}}} \times 100\% \quad (8)$$

其中: PW_{reman} 表示实际再制造耗能; PW_{hreman} 表示完全再制造耗能; PW_{md} 回炉耗能。

1.2.3 减少 CO₂ 排放量(R_{23})。

减少 CO₂ 排放量是将废旧毛坯经回炉成原始材料与其再加工成零部件的过程相比所减少的 CO₂ 排放量;完全再制造是指再制造率为 1 的

再制造过程。其计算公式如下:

$$E_r = E_{\text{cr}} \times R_{21} + E_{\text{md}} \times (1 - R_{21})$$
$$R_{23} = \frac{E_r}{E_{\text{md}}} \times 100\% \quad (9)$$

其中: E_r :再制造 CO₂ 排放量; E_{cr} :完全再制造 CO₂ 排放量; E_{md} :回炉制造 CO₂ 排放量。

1.3 经济可行性(R_3)

技术可行性和环境可行性决定了废旧产品能否进行再制造,而经济可行性却最终反映了进行再制造活动是否继续下去的最终判断标准和人们从事经济活动的根本出发点之一。考虑再制造活动的经济因素,不仅要考虑回收、加工、以及废弃物处理的成本还要考虑再制造加工过程中对环境的影响所带来的环境成本。所以,引进 2 个指标:利润率和环境收益率,用来评估再制造的经济性。

利润率(R_{31})是指净利润与销售收入之间的比值。净利润借鉴杜邦财务分析法可得其计算示意图如图 1 所示

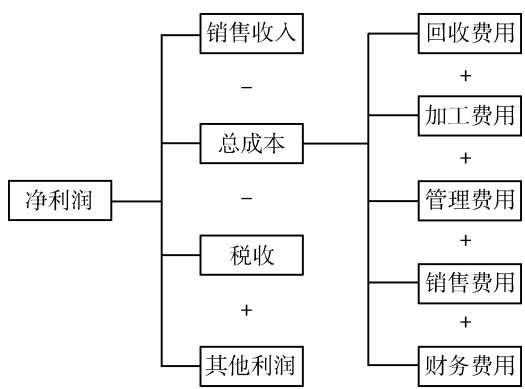


图 1 净利润计算示意图

Fig. 1 Sketch map of the net profit calculation

环境收益率(R_{32})是用来衡量再制造对环境经济的影响。废旧产品通过再制造变成了性能等同或稍高于原先新品的再制造品,这个过程不仅带来了可用的“新品”,而且避免了废旧产品的回炉所造成的原先产品附加值的丢失。环境收益率就是因再制造所引起的产品附加值的减少与新品价值的比值。

2 指标权重确定

对已经确定的评价指标间权重的确定是建立再制造性指标评价模型关键问题之一。对于

这种多层次、多要素、多准则的非结构化的决策问题层次分析法给出了很好的解决方法。

2.1 层次分析法^[8] (AHP)

层次分析法是美国运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种定性和定量相结合的决策方法。AHP 常常被用于多目标、多准则、多要素、多层次的非结构化的复杂决策问题。再制造性指标评价体系的权重的确立考虑的因素多,且指标间存在着千丝万缕的联系。利用 AHP 方法来确定指标的权重,不仅减少了人为因素对指标的权重的影响,增加了模型的可信度,而且建立起了模糊评价与精确评价之间的联系。

2.1.1 AHP 标度

在进行层次分析法确定权重之前要进行 AHP 标度的确定,标度的确定一般是根据以往经验确定的,如表 1 所示。

2.1.2 AHP 一致性检验

利用 AHP 标度,可以得到一个 AHP 判断矩阵 B 。通过对 B 的一致性检验来验证上面所定义 AHP 标度是否合理,其方法如下:

表 1 层次分析法的 (AHP) 标度	
Table 1 Analytic hierarchy process scale	
标度	含义
1	一个因素与另一个因素同样重要
3	一个因素与另一个因素稍微重要
5	一个因素与另一个因素明显重要
7	一个因素与另一个因素强烈重要
9	一个因素与另一个因素极为重要
2	1、3 两个相邻判断的中间值
4	3、5 两个相邻判断的中间值
6	5、7 两个相邻判断的中间值
8	7、9 两个相邻判断的中间值
倒数	因素 i 与因素 j 比较,得到的判断为 $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 且 $a_{ij} = 1$ (在 $i = j$ 时)

计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$, 并计算

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad CR = \frac{CI}{RI}$$

其中: n 为判断矩阵 B 的阶数; RI 为平均随机一致性指标(见表 2)。

表 2 平均随机一致性指标						
Table 2 Mean indexes of stochastic consistency						
阶数	4	5	6	7	8	9
RI	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

当 $CR < 0.10$ 时,判断矩阵有一致性,否则调整 AHP 标度使判断矩阵有一致性。

2.2 系统层权重的确定

对于技术、环境和经济 3 个系统层面来说,目前比较关心的是环境和经济,所以环境和经济相对于技术这个系统层来说稍微重要一点,根据上面的 AHP 标度得到相关权重,如表 3 所示。

表 3 AHP 法系统层权重确定					
Table 3 Determination of system weight with AHP method					
	R_1	R_2	R_3	总计	权重/%
R_1	1.0	0.5	0.5	2.0	20.0
R_2	2.0	1.0	1.0	4.0	40.0
R_3	2.0	1.0	1.0	4.0	40.0

判断矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \lambda_{\max} = 3, \text{ 可得 } CI =$$

$$0, CR = 0 < 0.10$$

所以 AHP 标度是有效的,且技术可行性、环境可行性和经济可行性权重分别为 20.0%、40.0%和 40.0%。

2.3 指标层权重的确定

表 4 中所给出的是技术可行性指标关系。可得技术可行性评价指标拆解合格率、检测可靠性、新品可靠性、整机性能、相容性和加工效率的权重分别为:16.46%、16.46%、22.78%、17.72%、17.72%和 8.86%。

根据环境可行性指标间的关系,可得到表 5 的数据,即环境可行性评价指标旧件利用率、节能和减少 CO_2 排放量的权重分别为 20.0%、40.0%和 40.0%。

根据经济可行性间的关系,可得表 6,即经济可行性评价指标利润率和环境收益率的权重分别为 50.0%和 50.0%。

表 4 AHP 法技术可行性权重确定

Table 4 Determination of technical feasibility weight with AHP method

	R_{11}	R_{12}	R_{13}	R_{14}	R_{15}	R_{16}	总计	权重/%
R_{11}	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	2.0	6.5	16.46
R_{12}	1.0	1.0	0.5	1.0	1.0	2.0	6.5	16.46
R_{13}	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	2.0	9.0	22.78
R_{14}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	7.0	17.72
R_{15}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	7.0	17.72
R_{16}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	3.5	8.86

$CI = 0.0162, CR = 0.0131 < 0.10$

表 5 AHP 法环境可行性权重确定

Table 5 Determination of environment feasibility weight with AHP method

	R_{21}	R_{22}	R_{23}	总计	权重/%
R_{21}	1.0	0.5	0.5	2.0	20.0
R_{22}	2.0	1.0	1.0	4.0	40.0
R_{23}	2.0	1.0	1.0	4.0	40.0

$CI = 0, CR = 0 < 0.10$

表 6 AHP 法经济可行性权重确定

Table 6 Determination of economy feasibility weight with AHP method

	R_{31}	R_{32}	总计	权重/%
R_{31}	1.0	1.0	2.0	50.0
R_{32}	1.0	1.0	2.0	50.0

$CI = 0, CR = 0 < 0.10$

3 计算实例

以济南复强动力有限公司再制造一批斯太尔 WD615 (500 台) 为例。发动机总重量为 873.68 kg。工厂对发动机缸体、缸盖、曲轴、连杆、气门、挺住和凸轮轴进行再制造,其相关数据见表 7。

由式(1)和式(7)可得:拆解合格率 $R_{11} = 94.92\%$,旧件利用率 $R_{21} = 56.32\%$ 。

通过对该批发动机统计分析,拆解合格的零部件经检测后均可再制造,由于没有对报废的零部件进行二次检验,所以由式(2)可以估算出 $R_{12} \geq 94.92\%$ 。

再制造发动机的价格均低于原先新品的价格,该批 500 台再制造发动机有 14 台因质量问题被召回,通过对用户的调查,约 80%的用户是

因为再制造发动机便宜而选择使用再制造发动机,所以,由式(3)、式(4)可得: $R_{13} = (500 - 14 + 14 \times 0.2)/500 = 97.76\%$, $R_{14} = (500 - 14)/500 = 97.20\%$ 。

表 7 济南复强再制造基本数据

Table 7 Basic remanufacturing data of JiNan FuQing Power Co. LTD

再制造零部件	报废率/%	重量/kg
缸体	5.62	260.00
缸盖	4.48	93.60
曲轴	3.70	103.00
连杆	3.43	21.10
气门	4.12	3.15
挺住	2.98	
凸轮轴	6.15	11.25

公司采用表面工程技术结合尺寸恢复法来再制造发动机,所得到的再制造发动机的零部件均可以和原先零部件进行互换使用,所以由式(5)可得: $R_{15} = 1$ 。

发动机大修平均所需时间为 36 h,再制造一台发动机平均所需时间为 24 h,由式(6)可得 $R_{16} = 1$ 。

每回炉 1 吨钢铁、铝材、铜材耗能分别为 1 784 kwh/t、2 000 kwh/t 和 1 726 kwh/t,排放 CO₂ 分别为 0.086 吨、0.17 吨和 0.25 吨;再制造 1 台发动机耗能 102.857 度,排放 CO₂ 0.0281 吨(工厂实际数据);用回炉后的型材制造 1 台新发动机耗能 205.714 度,排放 CO₂ 0.0562 吨。一台发动机含钢铁:583.668 kg;铝材:16.01 kg;铜材:1.886 kg。

可计算出:一台发动机从回炉到再制造所需的能量为 1769.22 kwh、排放的 CO₂ 为 133.70 kg;再制造一台发动机所消耗的能量为:785.68 kwh、排放的 CO₂ 为 86.50 kg。利用式(7)、式(8)可以计算出节能 $R_{22} = 1 - 785.68/1769.22 = 55.59\%$ 、 $R_{23} = 1 - 86.50/133.70 = 35.3\%$ 。

单台再制造发动机的售价为 29 000 元,其中设备费 400 元、材料费 300 元、能源费 300 元、新加零件费 10 000 元、税费 3 400 元、人力费 1 600 元和管理费 400 元。可计算出获得利润为 13 000 元, $R_{31} = 13\,000/29\,000 = 44.82\%$,和新品的利润率 27.5%相比,利润率大大提高。

每台发动机平均价格 4.5 万元,实行再制造

部件价格分别为:气缸体总成 1 件 10 500 元、连杆总成 6 件共 1 466.5 元、气门挺柱 12 件共 386.4 元、气缸盖总成 6 件共 5 241.6 元、凸轮轴 1 件 520 元。 $R_{32}=(10\,500+1\,466.5+386.4+5\,241.6+520)/45\,000=40.25\%$

综上,计算出该批废旧发动机可再制造性为: $R=55.91\%$

4 结 论

(1) 再制造过程是一个对资源高级利用的过程,其产品的质量不低于新品。

(2) 通过对节能和节材指标的计算,可以看出再制造在能源节约和环境保护方面具有良好效果。

(3) 通过计算利润率发现,再制造的利润与销售新品发动机相比有了明显提高,使资源得到了进一步的合理化配置。

(4) 济南复强再制造动力有限公司只是对斯太尔 WD615 系列发动机气缸体总成、连杆总成、气门挺柱和气缸盖总成进行再制造,对废旧发动机的剩余价值尚没有达到最大限度的利用,应积极开展其他零部件的再制造,以实现再制造对废旧产品剩余价值的充分利用。

参考文献

[1] Steinhilper R. Product recycling and eco-design: challenges, solutions and examples [R]. International Conference on Clean Electronics, 1995.

[2] Robot T L. The remanufacturing industry hidden giant [R]. Research Report, 1996.

[3] Daniel V R. Production planning and control for remanufacturing [J]. Journal of Operations Management, 2000, 18: 467-483.

[4] Bras B. Towards design for remanufacturing - metrics for assessing remanufacturability [C]. Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse, Eindhoven, The Netherlands, 1996.

[5] 徐滨士,马世宁,刘世参,等.绿色再制造工程设计基础及关键技术 [J]. 中国表面工程, 2001, 2: 12-15.

[6] 朱胜,姚巨坤.装备再制造设计及其内容体系 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(4): 1-6.

[7] 再制造技术标准体系及评价体系研究 [R]. 中国标准化研究院, 2009, 11.

[8] 赵焕臣,许树柏,和金生.层次分析法 [M]. 北京:科学出版社, 1986.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072
Tel: 152 1068 4981
E-mail: liuyun_1988@126.com

• 学术动态 •

全国绿色制造技术标准化技术委员会
再制造分技术委员会成立

根据国家标准化管理委员会的有关要求,全国绿色制造技术标准化技术委员会再制造分技术委员会成立暨一届一次会议于 2011 年 10 月 15 日在北京召开,国家标准化管理委员会工业一部殷明汉主任、再制造技术重点实验室主任徐滨士院士、全国绿色制造技术标准化技术委员会李冬茹主任等领导出席成立大会。委员会主要开展再制造领域的共性基础和工艺技术的国家标准制修订工作。

委员会聘请国家发改委资源节约和环境保护司郭启民处长、工业和信息化部节能与综合利用司刘文强处长、科技部社会发展科学司黄圣彪处长等主管再制造业务的政府机关人员担任顾问,聘请开展再制造科研教学的高校院所人员和从事再制造生产的企业代表等 27 人担任委员,装甲兵工程学院再制造技术重点实验室作为秘书处挂靠单位。

会议主要围绕委员会章程、秘书处工作细则等相关管理工作进行讨论修订,重点对委员会近三年工作规划、再制造标准体系框架和《再制造术语》、《机械产品再制造通用技术要求》等 3 项再制造国家标准草案等进行了详细讨论。

会议的召开对于充分发挥标准化在绿色再制造技术发展中的基础支撑、技术导向和市场规范作用和实现我国装备制造业的绿色制造目标具有重要意义。

(周新远 供稿)