

退役工程机械产品再制造绿色性评价^{*}

邓乾旺, 罗井知, 王长文, 罗正平

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 退役工程机械产品再制造不仅延续了产品的生命周期, 而且有利于资源再利用及生态环境保护, 并具有巨大的经济价值。目前对回收后的退役产品的绿色性评价研究多将环境和经济因素进行分开评价, 将两个因素合并成一个统一评价尺度量值的研究较少。以某工程机械企业再制造过程为研究对象, 提出多属性效用决策方法构建绿色性评价的多目标决策模型, 采用总效用值对绿色性进行度量。运用生命周期评价、生命周期成本的集成思想建立了绿色性评价指标体系, 包括资源、生态环境、人因和经济等方面因素。最后, 通过实例分析了退役产品再制造修复方案的绿色性效用值计算过程。该方法模型可为再制造企业选择最优的处理方案以及再制造加工工艺提供决策支持。

关键词: 工程机械; 再制造; 绿色性评价; 多属性效用决策; 生命周期评价

中图分类号: TH17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2014)03-0101-07

Green Evaluation of Retired Construction Machinery Products Remanufacturing

DENG Qian-wang, LUO Jing-zhi, WANG Chang-wen, LUO Zheng-ping

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082)

Abstract: Remanufacturing of retired construction machinery products has not only extended the life cycle of the products, but also taken in some advantages, such as the reuse of resources, the ecological environment protection and great economic benefits. However, numerous researches on green assessment of the recycled products took the environmental and economic factors into consideration separately so far, it was rare to integrate the two factors into a unified evaluation scale research of the value. Therefore, a multi-attribute utility decision method was put forward to build the green evaluation of multi-objective decision-making model which utilizes the total utility value to measure the size of the green performance by taking the recycling and remanufacturing process of certain construction machinery remanufacturing enterprise as the research subject. Then, the green evaluation index system which contains the thought of integrating, life cycle assessment and life cycle cost assessment was built, including resources, environment, ergonomics, and economy factors. Finally, the calculation process of green utility value for the remanufacturing repair was analyzed through a relevant case. The model can assist remanufacturing enterprises to choose the optimal treatment and provide decision support for the selection of different remanufacturing process technology.

Key words: construction machinery; remanufacturing; green evaluation; multi-attribute utility decision; life cycle assessment

0 引 言

随着国民经济的快速发展,越来越多的工

程机械产品进入报废阶段,工程机械大部分为重型或超重型机械设备,其构件大型化,对其进

行绿色再制造可以显著实现资源循环利用,大大减少对环境的污染^[1]。退役工程机械产品绿色再制造是指以产品全生命周期设计和管理为指导,以优质、节能、高效和环保为目标,以先进再制造技术为基础,对退役产品进行修复和改造,升级产品性能或全面恢复到新产品的质量状态的活动总称^[2-3]。再制造产品和新品拥有同样的产品质量和服务保证,其售价仅为新品的50%~70%。

随着绿色再制造及其相关问题的研究日益深入,对其进行环境性、经济性评价则是绿色再制造过程得以实现非常关键的一环。目前,再制造绿色性评价研究主要集中在对汽车发动机和机电产品的评价,而对工程机械的再制造绿色评价研究甚少,如曾寿金、周胜等运用模糊层次分析法对机电产品再制造的绿色性进行评价^[4-5],该方法具有较强的主观性。而刘纯、曹华军等运用定性和定量相结合、模糊综合评价方法来建立评价模型^[6],通过对原始制造和再制造进行比较得出再制造修复的绿色性,对目前亟待解决的退役产品回收处理决策借鉴作用不大。已有的生命周期综合评价软件大多侧重于材料和汽车产业,

对工程机械产业,特别是针对工程机械再制造的评价鲜有涉及^[7]。

文中在前人研究基础上,以某工程机械再制造企业为研究对象,对回收与再制造业务流程进行分析,首次提出基于多属性效用多目标决策方法对退役工程机械产品再制造进行绿色性评价,并运用生命周期的思想建立一套基于客观事实的环境、经济指标的绿色综合评价指标体系^[8-9],为再制造企业选择最优的处理方案和再制造加工工艺提供决策支持。

1 业务流程

退役工程机械产品经回收中心回收入厂后,先进行初步鉴定,鉴定结果分为整机再制造和专项再制造;整机再制造需完全拆解至零件级,专项再制造则将已坏的零部件进行更换即可;对目测可再制造的零件进行检测分类,对有严重缺陷的零件直接进行材料回收或者报废处理;根据检测结果,对可再制造退役工程机械进行绿色性评估,选择最佳的处理方案,再制造修复后经装配调试合格后贴上再制造标识入库或者出售给买家。具体业务流程见图1。

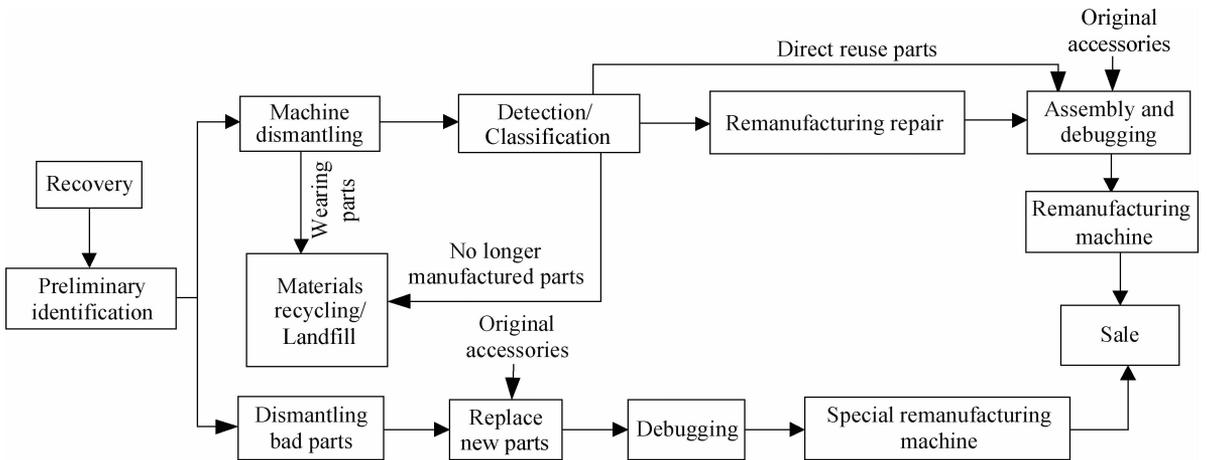


图1 退役工程机械产品的再制造业务流程

Fig. 1 Remanufacturing process of retired construction machinery products

2 评价体系

评价的目的是对退役产品回收后处理的备选方案进行优选,依据评价结果选择是再制造修复、材料回收还是报废填埋处理,并可以通过敏感性分析找出制约处理策略的关键因素。利用该评价还可以比较不同再制造加工工艺的绿色

性,增强退役工程机械产品处理的环境友好性与经济性。

对退役产品进行拆解检测后,备选处理决策有4种:直接再利用、再制造修复、材料回收和报废,在国内外节能减排的大背景下,选择合适的处理决策需要对退役产品进行再制造绿色性评价。在现有再制造技术基础上,绿色性评价不仅

要考虑经济性因素,还要考虑环境性因素。多属性效用理论 (Multi - attribute utility theory, MAUT) 是一种量化多目标决策分析方法^[10-11], 主要用来评价对最终结果起作用的各个因素对各种决策的影响,以确定最佳选择的方案。文中利用生命周期评价 (Life cycle assessment, LCA)、生命周期成本 (Life cycle cost, LCC) 集成思想进行清单分析及影响评价^[9,12], 建立处理过程的环境、经济性指标的绿色评价多目标优化模型,运用多属性效用方法来求解该多目标优化问题。文中的输入、输出数据有环境性数据和经济性数据,因此涉及的效用函数有两类:成本型和效益型。环境性评价运用成本型效用函数,即指标值越小越好;经济性评价运用效益型效用函数,即指标值越大越好。为简化运算,采用以下函数来计算效用值:

$$\text{成本型: } u_i = 1 - d_i/d_{i(\text{REF})} \quad (1)$$

$$\text{效益型: } u_i = d_i/d_{i(\text{REF})} \quad (2)$$

其中: d_i 是第 i 个指标值, u_i 是第 i 个指标值的效用值, $d_{i(\text{REF})}$ 是备选方案中第 i 个指标最大值的参考值。

由于直接再利用相对其他 3 种处理决策对环境和经济的影响很小,因此只考虑这 3 种处理策略。企业再制造过程绿色性评价流程见图 2。

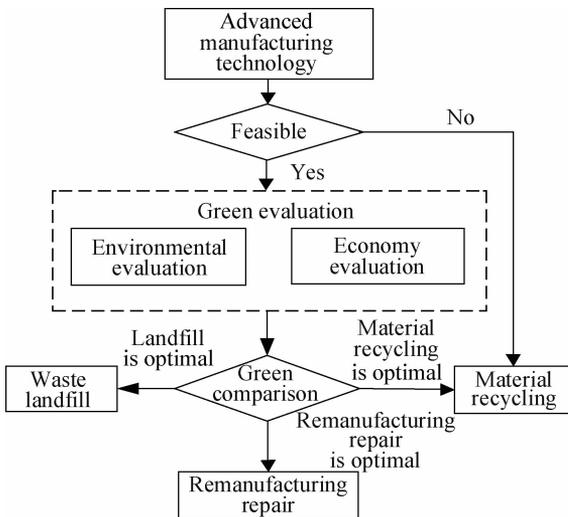


图 2 再制造绿色性评价流程

Fig. 2 Remanufacturing process of green evaluation

2.1 清单分析

退役工程机械产品清单分析是指针对处理

过程各阶段的输入和输出,根据 LCA、LCC 集成思想进行数据收集、量化、分析并列出清单分析表的过程^[13],即对退役产品所涉及过程的环境影响、经济效益等数据进行收集、分类和处理。其评价系统边界和清单分析表如图 3 和图 4 所示,这些数据通过企业调研、文献查阅以及参考中国基础数据库 (Chinese life cycle database, CLCD)^[9,13-15] 来确定。

对于再制造修复方案的清单分析数据涉及退役产品从回收直到再制造产品销售的环境和经济数据;材料回收方案是指为减少这些材料对环境的潜在影响,将材料经过简单分类后以废旧物资(如废铁)卖给材料收购方,数据涉及回收、拆解分类直到卖给收购商家为止的所有过程;而报废填埋方案则是指为减少对环境的影响,最后选择安全填埋的方法,记录这些过程的所有环境影响、经济数据。

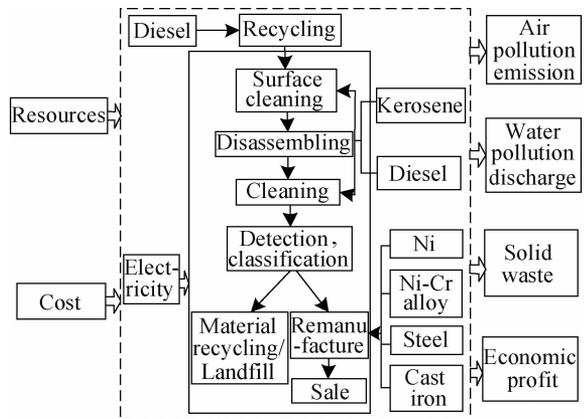


图 3 评价系统边界

Fig. 3 Evaluation system boundary

2.2 影响评价

根据 LCA、LCC 集成思想方法建立退役工程机械产品再制造绿色性综合评价指标体系,如图 5 所示。影响评价建立在清单分析的基础上,把评价过程的输入、输出参数转化成定量的指标来表示该过程对环境、经济造成的影响。根据国际标准组织制定的产品生命周期影响评价标准 ISO14042:2000^[16],影响评价包括分类、特征化和量化 3 个部分。

2.2.1 环境性评价

ISO14042:2000 标准将环境影响分为资源消耗影响、人体健康影响和生态影响 3 大类。文中将 3 类环境影响进一步细分为 8 个具体类型(见图 5),各具体影响类型的主要影响物质见图 4。

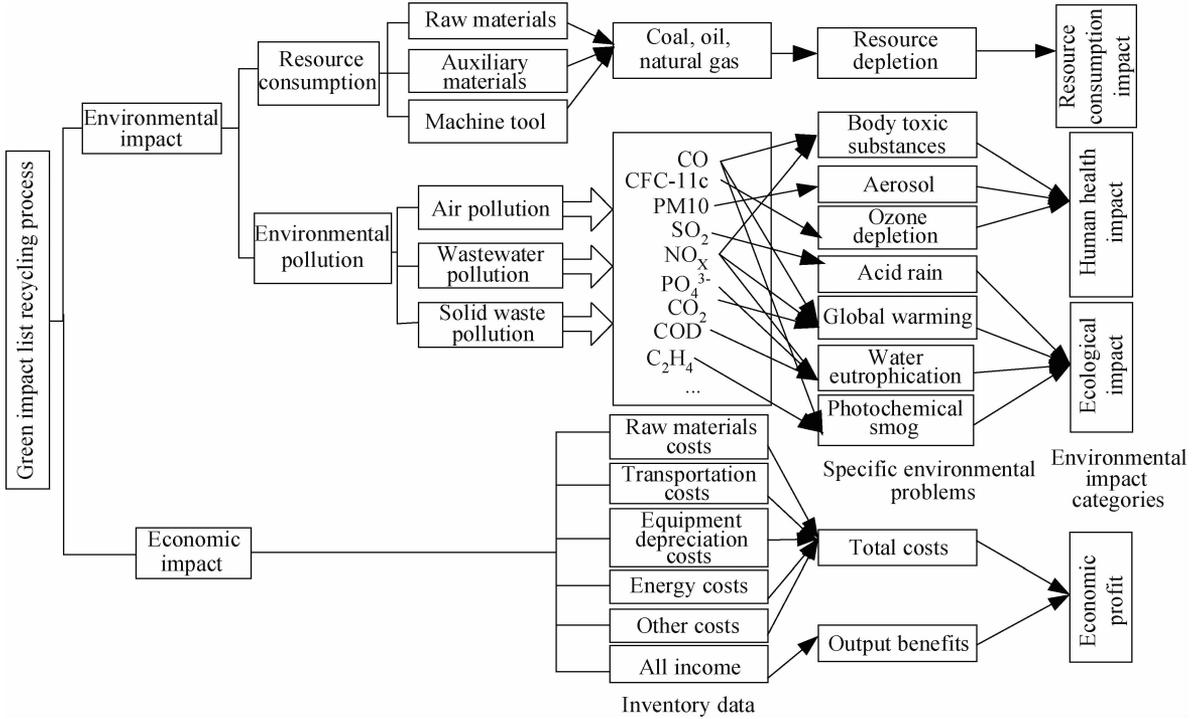


图4 清单分析表

Fig. 4 Inventory analysis table

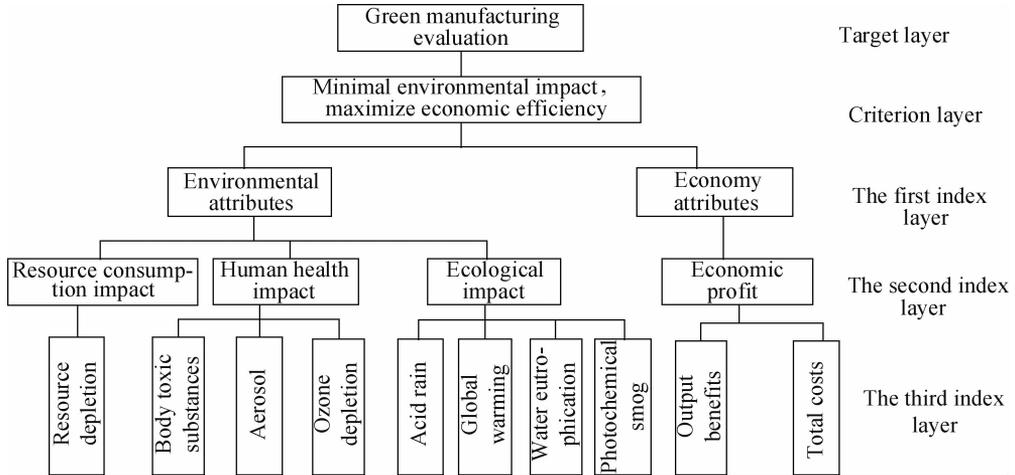


图5 工程机械再制造绿色性评价指标体系

Fig. 5 Green evaluation index system of construction machine remanufacturing

特征化也称环境影响潜值计算,指环境影响物质对各种具体环境影响类型的潜在贡献。该研究采用当量模型法进行特征化分析(当量系数采用国际上的标准),利用价值模型的效用方程进行量化分析,具体的计算如下:

设清单分析结果的数据集合为 Z , $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$, m 是整数, P 是 8 个具体环境影响类集合:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_8\} \quad (3)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, 8$ 分别表示资源耗竭、人体毒性物质、气溶胶、臭氧层破坏、酸雨、全球变暖、水体富营养化、光化学烟雾。按照一定的环境作用机制,将 Z 中的数据分类到每个 p_i 类中(n 是整数),可得:

$$p_i = \{z'_1, z'_2, \dots, z'_i\}, z'_n \in Z \quad (4)$$

特征化处理每个具体环境影响类 p_i 中的数据,得到对应的当量值 z'_{ic} , l 为整数,相加得该类的特征指数值 p_{ic} :

$$p_{ic} = \sum_{l=1}^l z'_{ic}, P_c = \{p_{1c}, \dots, p_{8c}\} \quad (5)$$

对每个具体环境影响类特征指数值 p_{ic} 运用多属性效用函数归一化得到环境影响类的效用值 U'_i , $i = 1, 2, \dots, 8$ 分别表示各具体环境影响类型,运用效用函数公式(1)计算得到:

$$U'_i = 1 - p_{ic}/p_{ic(\text{REF})} \quad (6)$$

其中, $p_{ic(\text{REF})}$ 为备选方案中具体环境影响类型 i 的最大值的参考值。

(1) 资源消耗影响评价

文中资源消耗指能源物资消耗,只考虑一级能源消耗,如煤、原油、天然气 3 大类,二级能源如电能均按其生产所耗费的一级能源计算,具体换算过程在 CLCD 中可实现。用能源消耗潜值来计算能源消耗对环境的影响大小,利用式(3)~(6)分别得到能源消耗对资源消耗影响的效用值 U'_1 ,因此资源消耗影响的效用值 $U_1 = U'_1$ 。

(2) 人体健康影响评价

人体健康影响分 3 种具体环境影响类,分别用对应影响潜值来表征对环境的影响。由式(3)~(6)可分别得到人体健康影响的 3 类具体环境影响效用值 U'_2, U'_3, U'_4 ,因此人体健康影响的效用值 $U_2 = U'_2 + U'_3 + U'_4$ 。

(3) 生态影响评价

生态影响分 4 种具体环境影响类,分别用对应影响潜值来表征其对生态的影响。由式(3)~(6)可分别求得生态影响的 4 类具体环境影响的效用值 U'_5, U'_6, U'_7, U'_8 ,因此生态影响的效用值 $U_5 = U'_5 + U'_6 + U'_7 + U'_8$ 。

(4) 环境影响总评价

根据 Keeney 和 Raiffa 提出的多属性效用决策方法^[17],假设决策者对资源消耗、人体健康和生态影响 3 个方面(属性)的偏好是可加的,并且之间的效用相互独立,则各类指数值乘权重相加就可以得到环境影响总评价 U_{env} 。这样得到基于生命周期环境评价的决策模型:

$$U_{\text{env}} = \sum_{i=1}^3 W_i U_i \quad (7)$$

其中, $i = 1, 2, 3$ 分别为资源消耗影响、人类

健康影响、生态影响的权重。

2.2.2 经济性评价

第 i 个备选方案的经济性影响用经济利润 P_{sti} 来描述,运用全生命周期评价对回收后处理过程的投入成本和收益进行清单分析,根据清单分析表,总投入成本 C_{Ti} 包括原材料成本 C_1 、运输成本 C_2 、能源成本(包括燃料、电力等成本) C_3 、设备成本(包括折旧费用) C_4 、其他费用(职工工资福利等) C_5 ,单位均是元。收益 P_{spi} 包括成品售价或材料回收价。计算处理过程的经济利润 P_{sti} :

$$P_{\text{sti}} = P_{\text{spi}} - C_{\text{Ti}} \quad (8)$$

$$C_{\text{Ti}} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (9)$$

其中, C_{Ti} 为总投入成本。

运用公式(2)计算出备选方案 i 处理过程经济利润的效用值 P'_{sti} :

$$P'_{\text{sti}} = P_{\text{sti}}/P_{\text{sti}(\text{REF})} \quad (10)$$

其中, $P_{\text{sti}(\text{REF})}$ 指备选方案中经济利润最大值的参考值,备选方案中经济利润最小值可取负数。

这里仅有经济利润,所以权重为 1,即处理过程经济性评价决策模型为经济利润的效用值,采用如下公式:

$$U_{\text{Ti}} = P'_{\text{sti}} \quad (11)$$

其中, U_{Ti} 是经济性评价在整个绿色性评价中的效用值。

2.2.3 环境及经济性总体决策评价模型

文中所建立的决策目标中包含有环境、经济两方面的因素。假设决策者对这两方面的偏好是可加的,并且之间的效用相互独立^[17],可以建立起最终的决策模型:

$$U_{\text{agi}} = W_{\text{env}} U_{\text{envi}} + W_{\text{c}} U_{\text{Ti}} \quad (12)$$

其中, U_{agi} 表示备选方案 i 绿色性总效用值, W_{env} 、 W_{c} 分别表示绿色性评价中环境、经济因素权重。由决策者根据实际和偏好决定权重大小。

决策者根据比较各方案总效用值 U_{agi} 的大小选择最优的处理策略, U_{agi} 值越大代表绿色性能最佳——最小的环境影响及最大的经济性。

3 实证分析

以某柴油发动机 WD615.87 为例,对原始制

造和再制造修复的绿色性效用值进行计算并比较。原始制造数据包括原材料生产到销售为止所有过程的数据,再制造修复过程如前所述。

3.1 环境性评价

原始制造和再制造修复的清单明细如表 1

所示,其数据来源于文献[14]。

运用当量法和前述公式得出各具体影响类型的特征化值及该类的效用值,各项指标最大值参照原始制造的数据。方案特征化值、效用值计算结果如表 2 所示。

表 1 方案清单明细表
Table 1 List table of the plans

Environmental attributes	Specific problems	List of substances	Characteristic factors	Equivalent value	Inventory data	
					OM	RM
Resource consumption impact	Resource depletion	Coal		0.714	2 703.74	582.21
		Oil	Kg ce	1.429	104.13	68.58
		Natural gas		0.909	24.81	6.35
Human health impact	Body Toxic substances	CO	Kg	0.012	15.37	12.56
		NO _x		0.78	11.83	4.42
	Aerosol		Kg PM10	1	0	0
	Ozone depletion	CFC-11c	Kg CFC-11c	1	6.11E-06	2.64E-06
Ecological impact	Acid rain	SO ₂		1	14.44	11.49
		NO _x	Kg SO ₂	0.7	11.83	4.42
		H ₂ S		1.88	0.03	0.43
		HCL		0.88	0.84	0.25
	Global warming	CO ₂		1	4 844.01	1 048.63
		NO _x	Kg CO ₂	320	11.83	4.42
		CO		2	15.37	12.56
		CH ₄		25	13.42	3.68
	Water eutrophication	NO _x		0.78	11.83	4.42
		COD	Kg PO ₄ ³⁻	0.005 8	5.94	1.08
NH ₄			0.33	0.05	0.02	
Photochemical smog	CH ₄	C ₂ H ₄	0.007	13.42	3.68	
	CO		0.03	15.37	12.56	

表 2 方案特征化值和效用值

Table 2 Characteristic and utility values of the plans

Plan	OM	RM	OM U' _i	RM U' _i
p _{1c}	2 101.82	519.47	0	0.75
p _{2c}	9.41	3.60	0	0.62
p _{3c}	0	0	0	0
p _{4c}	6.11E-06	2.64E-06	0	0.57
p _{5c}	23.52	15.61	0	0.34
p _{6c}	8 995.85	2 680.15	0	0.70
p _{7c}	9.28	3.46	0	0.63
p _{8c}	0.56	0.40	0	0.27

由此得到再制造修复方案各项数据:

$$U_1 = U'_1 = 0.75$$

$$U_2 = 0.62 + 0 + 0.57 = 1.19$$

$$U_3 = 0.34 + 0.70 + 0.63 + 0.27 = 1.94$$

采用 Eco-indicators99 方法^[18], W₁ = 0.2, W₂ = 0.4, W₃ = 0.4, 因此,再制造修复加工环境影响总效用值为:

$$U_{env1} = 0.2 \times 0.75 + 0.4 \times 1.19 + 0.4 \times 1.94 = 1.40$$

而原始制造各项环境数据如下:资源影响类

效用值 $U_1 = U'_1 = 0, U_2 = 0, U_3 = 0, U_{env0} = 0$ 。

3.2 经济性评价

调研各项费用可知,WD615.87 型号发动机再制造修复总成本约为 20 150 元,售价约 31 000 元,则利润为 10 850 元;原始制造阶段总成本约为 40 000 元,售价约 50 000 元,则其利润为 10 000 元。因此利润最大值参考值取 10 850。

由公式(10)~(11)计算得到再制造修复方案经济利润效用值、经济性总效用值、原始制造经济利润效用值、经济性总效用值分别为:

$$\begin{aligned} P'_{st1} &= 1 \\ U_{T1} &= 1 \\ P'_{st0} &= 0.92 \\ U_{T0} &= 0.92 \end{aligned}$$

3.3 绿色性总评价

W_{env} 、 W_c 分别取 0.5,得到再制造修复方案总效用值和原始制造总效用值分别为:

$$\begin{aligned} U_{ag1} &= 0.5 \times 1.40 + 0.5 \times 1 = 1.20 \\ U_{ag0} &= 0.5 \times 0 + 0.5 \times 0.92 = 0.46 \end{aligned}$$

由此可见再制造修复比原始制造绿色性高。这主要是由于再制造修复的环境影响总评价 U_{env} 相对原始制造要高得多。

4 结论

根据退役工程机械产品的特性,并结合再制造绿色性评价体系的已有研究成果,对退役工程机械产品的再制造绿色性评价进行了研究,运用多属性效用决策方法,初步建立了基于 LCA、LCC 集成评价思想的退役产品再制造绿色性评价体系,并以实例验证了该评价体系的可行性。

参考文献

- [1] 朱胜,姚巨坤.再制造技术与工艺[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 张安峰.绿色再制造工程基础及其应用[M].北京:中国环境科学出版社,2005:13-156.
- [3] 朱绍华,徐滨士.废旧机械产品再制造的资源环境评价

[J].中国表面工程,2006,19(2):6-12.

- [4] 曾寿金,刘志峰,江吉彬.基于模糊 AHP 的机电产品绿色再制造综合评价方法及应用[J].现代制造工程,2012(7):1-6.
- [5] 周胜,胡树根,黄长林.基于模糊层次分析法的机电产品绿色度综合评价的研究与实现[D].杭州:浙江大学,2002.
- [6] 刘纯,曹华军,刘飞,等.机电产品绿色再制造综合评价模型及应用[J].现代制造工程,2008(11):1-3.
- [7] 刘继永,杨前进.工程机械产品全生命周期评价模型构建研究[J].机电产品开发与创新,2013,26(5):40-42.
- [8] Wood R, Hertwich E G. Economic modeling and indicators in life cycle sustainability assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(9): 1710-21.
- [9] 刘钢.机电产品全生命周期环境经济性能评估理论与方法研究[D].北京:清华大学,2003.
- [10] 姜树元,姜青舫.基于现代效用的产品功能评估模型与方法[J].系统工程,2001,19(6):83-88.
- [11] 刘华,陈维平,赵海东,等.基于效用函数逼近的绿色产品评价方法[J].机械工程学报,2006,41(10):17-22.
- [12] Weidema B P. The integration of economic and social aspects in life cycle impact assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(1): 89-96.
- [13] Klöpffer W. ISO/TR 14049 [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 7(1): 53-53.
- [14] 刘志超.发动机原始制造与再制造全生命周期评价方法[D].大连:大连理工大学,2013.
- [15] 邓南圣,王小兵.生命周期评价[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [16] Ryding S O. ISO 14042 environmental management - life cycle assessment - life cycle impact assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1999, 4(6): 307.
- [17] Keeney R L, Raiffa H. Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs [M]. Cambridge University Press, 1993.
- [18] 吴小珍.制造企业生产过程环境影响评估系统研究[J].环境工程,2010,28(2):109-113.

作者地址:湖南省长沙市岳麓区 410082
 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室
 Tel:(0731)8882 2826
 E-mail:deng_arbeit@163.com

(责任编辑:王文宇)