

面向工艺路线的废旧零部件可再制造性评价

刘清涛,蔡宗琰,刘晓婷,咎杰,梁虎

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:废旧品作为再制造的对象,其拆卸后的废旧零部件是否适合再制造,需要进行可再制造性评价,而且每个废旧零部件可再制造的程度与其采用的工艺路线相关。针对废旧零部件的材料特征、失效形式和失效程度等均具有高度不确定性的特点,以原产品制造数据和国家环境排放标准为基准,建立了面向工艺路线的废旧零部件可再制造性评价模型。模型包括竞争性因子评价和可持续性因子评价 2 个模块,采用层次分析法,分别从废旧零部件再制造的经济可行性、质量可行性、资源可行性和环境可行性等 4 个方面评价其可再制造度,并为适合再制造的废旧零部件选取最优的再制造工艺路线。最后,通过发动机废旧零部件可再制造性评价实例,证明了该评价方法能够有效地解决具体的、个性化的废旧零部件再制造的工程技术操作问题。

关键词:机械工程;废旧零部件;可再制造性评价;工艺路线

中图分类号:TH12

文献标志码:A

Assessment on remanufacturability of waste parts for process route

LIU Qing-tao, CAI Zong-yan, LIU Xiao-ting, ZAN Jie, LIANG Hu

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Waste product is the object of remanufacturing, and its waste parts' remanufacturability needs to be assessed before remanufacturing, and the remanufacturability for each waste part is relevant to the process route. According to those uncertain factors of waste parts in terms of different materials, failure types and failure degree, the assessment model of remanufacturability of waste parts for process route was established on the benchmark of the original manufacturing data and the national environmental emission standards. The model includes two sub-modules of competitive assessment model and sustainable assessment model, the remanufacturability of waste parts is assessed by analytic hierarchy process from four feasibility aspects of economic, quality, resources and environment respectively, and the optimal remanufacturing process routes are selected for waste parts which are suitable for remanufacturing. Finally, an example of remanufacturability assessment for waste engine parts is studied. The results show that the assessment method can solve engineering and technical operation of remanufacturing for specific, personality waste parts effectively. 3 tabs, 1 fig, 8 refs.

Key words: mechanical engineering; waste parts; remanufacturability assessment; process route

0 引言

随着资源危机和环境污染问题的日益突出,再制造逐渐受到人们的重视,再制造是国家实施可持续发展战略的重要举措。与传统制造不同的是,再制造的对象是回收的废旧品,其材料、数量、规格、失效形式、失效程度和剩余疲劳寿命等均具有高度的不确定性,在进入再制造系统之前,需要对废旧品进行可再制造性分析。Guide 通过对 75 种不同类型的再制造废旧零部件进行归纳,提出了废旧品的可再制造性准则,但没有提出具体的评价模型和评价方法^[1];有学者给出了再制造品的可再制造性评价模型,通过计算废旧品的可再制造性值来判断该类型产品是否适合再制造,评价包括了再制造系统的拆卸和清洗模块,显然该类评价模型属于废旧品进入再制造系统前的初始评价,对于拆卸、清洗后的每一个具体废旧零部件是否适合再制造,并未给予分析^[2-4];文献[5]针对再制造工艺决策过程中存在的诸多不确定性,提出一种基于专家评判和模糊回归分析的工艺规划优化方法,但工艺决策并未涉及废旧零部件的可再制造性分析。归纳现有文献可知,目前的再制造性评价文献较少,已有的文献都是从宏观角度,针对某一类型废旧品进行可再制造性评价。但在再制造实践中发现,某型废旧品适合再制造,并不意味着其每一个废旧零部件都能进行再制造;而且,对于同一种废旧零部件,不同的再制造工艺路线,其再制造修复加工费用、再制造质量、再制造资源消耗和环境污染程度也是不同的,即同一种废旧零部件,在不同工艺路线下的可再制造性是有差别的^[6]。因此,有必要对面向工艺路线的废旧零部件的可再制造性评价进行研究。

1 可再制造性评价方法

可再制造的工艺路线,是指废旧零部件在再制造系统中的修复路线,废旧零部件是否适合某条工艺路线再制造并非 0、1 二值概念,其可再制造的程度是由可再制造度来描述的。不同工艺路线中的修复设备不同,其可再制造度也不同,因此,可通过计算废旧零部件在不同工艺路线下的可再制造度来评价废旧零部件是否适合再制造。下文中,如无明确说明,可再制造度计算的各项性能指标均指废旧零部件 i 在工艺路线 j 下的性能指标。

1.1 可再制造性评价指标及基准

2008 年 9 月, Jovane F 等在 CIRP(国际生产工

程学院)的期刊中提出竞争性可持续制造(Competitive Sustainable Manufacturing, CSM)的概念,本文借鉴这一思想,将可再制造性评价的决策目标分为竞争性指标和可持续性指标^[7]。

(1)竞争性指标:再制造成本 C 和再制造质量 Q 。再制造成本主要指与设备相关的修复成本,再制造质量通常指废旧零部件再制造后的可靠性、维修性、用户友好性和表面硬度等性能。

(2)可持续性指标:资源消耗 R 和环境影响 E 。资源消耗主要包括能源消耗和材料消耗等;环境影响是指在修复过程中产生的副产品,如废气、废液、废渣、噪声和安全性等。

废旧零部件可再制造性评价的因素多而且复杂,选择不同的标准将会影响到评价的可行度,在进行可再制造度计算时,需要确定评价基准。本文以原型产品制造数据和国家环境排放标准为基准,通过建立废旧零部件再制造的竞争性因子和可持续性因子评价模型,计算废旧零部件的可再制造度。

1.2 可再制造性评价流程

如下页图 1 所示,可再制造性主要评价流程如下所述。

(1)废旧品经过拆卸、清洗和检测后,根据废旧零部件 i 的失效形式、失效程度、材料特征和零部件的性能要求,在再制造设备库中查找适合废旧零部件 i 再制造的(流程)工艺路线,若没有找到合适的技术和设备,则转入流程(7);若找到合适的再制造修复设备,则确定修复废旧零部件 i 的工艺路线 j 。

(2)根据采用工艺路线 j 再制造产生的利润和原产品利润,判断废旧零部件 i 再制造的经济性是否满足要求,若满足,则转入流程(3);若不满足,则转回流程(1)。

(3)计算废旧零部件 i 采用工艺路线 j 再制造的质量可行度,判断其再制造质量能否达到原产品的质量要求,若满足,则转入流程(4);否则,转回流程(1)。

(4)按照废旧零部件 i 采用工艺路线 j 进行修复时消耗的材料和能源,计算其资源可行度,判断其资源属性能否满足要求,若满足,则转入流程(5);若不满足,则转回流程(1)。

(5)根据废旧零部件 i 采用工艺路线 j 修复时产生的废气、废水、噪声、废渣和修复安全性等,计算其环境可行度,判断其环境影响是否满足国家环境标准要求,若满足,则转入流程(6);若不满足,则转回流程(1)。

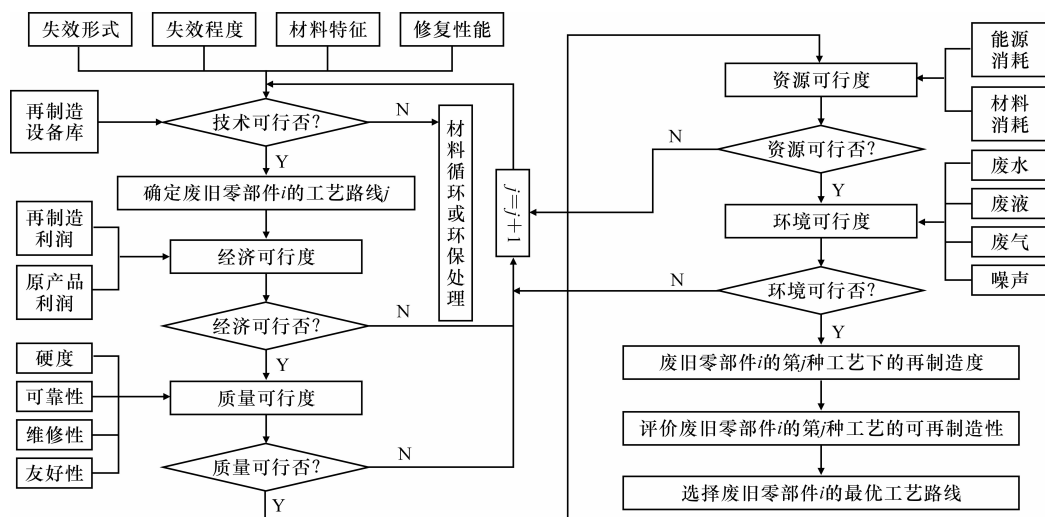


图1 废旧零部件可再制造性评价流程

(6)根据经济可行度和质量可行度,计算废旧零部件 i 在工艺路线 j 下再制造的竞争性因子;根据资源可行度和环境可行度,计算其可持续因子,进而求出可再制造度。

(7)材料循环处理或者环保处理。

(8)记录废旧零部件 i 的所有再制造工艺路线以及相应的可再制造度,并根据可再制造度值评价废旧零部件 i 在不同工艺路线下的再制造属性,并为其选择最优的再制造工艺路线。

2 可再制造性评价模型

现有一批废旧零部件 $1, 2, \dots, n$,需要进行可再制造性评价。对于废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线,其可再制造度计算模型如下所述。

2.1 废旧零部件再制造的竞争性因子

废旧零部件 i 采用工艺路线 j 再制造的竞争性因子包括经济可行度和质量可行度。

2.1.1 经济可行性判断

目前,再制造企业对于某种废旧产品是否选择再制造的根本出发点,是从经济性上考虑。文献[2]提出,通过 $C/C_r - 1$ 的大小来判断,当其值大于0时,则适合再制造;当其值小于0时,不适合再制造。其中, C 是新产品制造成本, C_r 是再制造产品成本。文献[6]也提出了类似的判断方法,但这种判断方法显然不够完善,因为,在现实生活中,再制造产品的销售价格通常低于新产品的销售价格,即便该废旧零部件的再制造费用低于新产品制造费用,也不能说明该废旧零部件再制造在经济上是可行的。显然,在不考虑政府资助时,再制造企业的主要收益来源于再制造产品本身的价值,更稳妥的办法

是,通过考虑再制造产品和原产品的销售价格来综合判断,则废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线下的经济可行性模型为

$$R_{eij} = K_e - \frac{b \sum_{j=1}^K C_{eijk}}{a C_o} \frac{Q_o}{Q_r} \quad (1)$$

式中: R_{eij} 为废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线下的经济可行度; C_{eijk} 为废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线中第 k 台设备的修复费用; C_o 为原产品的加工费用; Q_o 为原产品的销售价格; Q_r 为再制造产品的销售价格; a 为再制造修复费用在整个再制造总费用中所占的比例; b 为原产品加工费用在整个制造总费用中所占的比例; K_e 为一常数,根据可再制造属性评价设定。

通过式(1)可知,将原产品的销售价格和再制造的销售价格之比作为再制造修复费用和原产品加工费用之比的系数,更能反映再制造生产的实际情况。当 R_{eij} 大于 $K_e - 1$ 时,废旧零部件再制造的经济价值大于原产品;当 R_{eij} 小于 $K_e - 1$ 时,则再制造该废旧零部件不如购买新件划算。

2.1.2 质量可行性判断

废旧零部件的质量可行性判断,是通过该工艺路线再制造后的废旧零部件的质量与原产品的质量的比较来判断的,假设有 H 个判别因素,则废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线的质量可行性评价因素集为

$$q_{ij} = \{q_{ij1}, q_{ij2}, \dots, q_{ijH}\} \quad (2)$$

与之相应的原产品的评价因素集为

$$q_{oi} = \{q_{oi1}, q_{oi2}, \dots, q_{oiH}\} \quad (3)$$

将废旧零部件再制造的质量性能与原产品的质量性能相比,量纲一化的评价因素集为

$$q_{ij0} = \left\{ \frac{q_{ij1}}{q_{oi1}}, \frac{q_{ij2}}{q_{oi2}}, \dots, \frac{q_{ijH}}{q_{oiH}} \right\} \quad (4)$$

建立各个评价因素的权重系数为

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_H\}, \sum_{h=1}^H a_h = 1 \quad (5)$$

则废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线再制造的质量可行度为

$$R_{qij} = \sum_{h=1}^H a_h \frac{q_{ijh}}{q_{oih}} \quad (6)$$

式中: q_{ij} 为废旧零部件 i 在第 j 条工艺路线下再制造的质量因素集合; q_{ijh} 为废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线第 h 个质量元素值; q_{oi} 为对应的原产品的质量因素集合; q_{oih} 为原产品的第 h 个质量元素值; q_{ij0} 为量纲一化的质量元素值集合; R_{qij} 为废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线再制造的质量可行度。

通过以上计算,可得出废旧零部件 i 在第 j 条工艺路线下的经济可行度和质量可行度,则其竞争性因子为

$$R_{ij}^c = \omega_e R_{eij} + \omega_q R_{qij} \quad (7)$$

式中: R_{ij}^c 为废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线再制造的竞争性因子; ω_e 、 ω_q 分别为经济可行度权重系数和质量可行度权重系数。

2.2 废旧零部件再制造的可持续性因子

废旧零部件 i 采用工艺路线 j 再制造的可持续因子包括资源可行度和环境可行度。文献[2]提出,通过计算环境排放量与国家标准相比较,排放量在国家标准范围允许之内,则该环境影响因素为 1,否则为 0。然而,通过实践发现,再制造的各项环境排放量大多远小于国家环境标准允许的排放量,因此,这种计算方法体现不出再制造良好的环境收益,而且,文中也没有考虑资源消耗的影响。文献[8]考虑了资源消耗的情况,将资源消耗作为输入,将环境影响作为输出,通过二者的比值来度量再制造的环境影响。这种自身输入与输出比较的方法显然不合适,再制造的资源消耗和环境影响较原产品的资源消耗和环境影响均小,但是相比出来的结果却不能反映这种情况。本文综合二者的优缺点,提出以原产品的资源消耗和环境影响作为度量再制造资源消耗和环境影响的基准;同时,考虑国家环境排放标准,当环境排放中任一项因素不符合国家标准时,均认为该工艺路线不满足要求。其计算模型如下所述。

2.2.1 资源可行性判断

资源消耗包括能源消耗和材料消耗等,其大小通过转化为费用进行计算,具体过程如质量可行性

判断模型的步骤,其最终的资源可行度为

$$R_{rij} = \sum_{l=1}^L b_l (K_r - \frac{r_{ijl}}{r_{oil}}), \sum_{l=1}^L b_l = 1 \quad (8)$$

式中: R_{rij} 为废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线再制造的资源可行度; b_l 为第 l 个资源元素的权重系数; r_{ijl} 为废旧零部件 i 在第 j 条工艺路线下的第 l 个资源元素消耗值; r_{oil} 为与之对应的原产品第 l 个资源元素消耗值; K_r 为一常数,根据可再制造属性评价设定。

2.2.2 环境可行性判断

环境影响包括废气、废液、废渣和噪声等对人体健康有害的因素,如同前面的计算过程,其大小为

$$R_{enij} = \sum_{g=1}^G c_g (K_{en} - \frac{e_{ijg}}{e_{oig}}), \quad g = 1, 2, \dots, G, \sum_{g=1}^G c_g = 1 \quad (9)$$

式中: R_{enij} 为废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线再制造的环境可行度; c_g 为第 g 个环境元素的权重系数; e_{ijg} 为废旧零部件 i 在第 j 条工艺路线下的第 g 个环境元素值; e_{oig} 为与之对应的原产品第 g 个环境元素值; K_{en} 为一常数,根据可再制造属性评价设定。

通过以上计算,可得出废旧零部件 i 的第 j 条工艺路线的资源可行度和环境可行度,则其可持续性因子为

$$R_{ij}^s = \omega_r R_{rij} + \omega_{en} R_{enij} \quad (10)$$

式中: R_{ij}^s 为废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线再制造的可持续性因子; ω_r 、 ω_{en} 分别为资源可行度权重系数和环境可行度权重系数。

2.3 废旧零部件可再制造度计算

根据前面的计算结果,废旧零部件 i 采用第 j 条工艺路线修复的可再制造度为

$$R_{ij} = \omega_c R_{ij}^c + \omega_s R_{ij}^s \quad (11)$$

经过循环求解,则废旧零部件 i 的所有工艺路线的可再制造度集合可表示为

$$R_i = \{R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ip_i}\} \quad (12)$$

则所有废旧零部件的所有工艺路线的可再制造度集合可表示为

$$R = \{R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ip_i}\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: R_{ij} 为废旧零部件 i 在第 j 条工艺路线下的可再制造度; ω_c 、 ω_s 分别为竞争性因子权重系数和可持续因子权重系数; R_i 为废旧零部件 i 的所有工艺路线的可再制造度集合; R 为所有废旧零部件的所有工艺路线的可再制造度集合; p_i 为零部件 i 的工艺

路线个数。

计算出废旧零部件在各工艺路线下的可再制造度后,即可为其选择最优的再制造工艺路线。

3 实例分析

某废旧发动机再制造企业现有一批废旧零部件需要再制造。废旧零部件可再制造性评价信息见表 1;各个废旧零部件对应的原产品加工信息见表 2。

根据废旧零部件的失效形式、材料特征和失效程度等信息,为每个废旧零部件制定了相应的工艺路线。由于表中的数据单位不同,故在计算中各数

据均为去单位处理后的数据。其中, a 为 0.333, b 为 0.5, Q_o 与 Q_r 之比取为 1.25, ω_e 为 0.5, ω_q 为 0.5, ω_r 为 0.5, ω_{en} 为 0.5, ω_c 为 0.667, ω_s 为 0.333,这些权重系数均经过一致性检验; K_e 取值为 1.5, K_r 为 1.5, K_{en} 取为 1.5。根据这些取值,再制造度为 0~0.6 时,不适合再制造;再制造度为 0.6~0.8 时,适合再制造;再制造度大于 0.8 时,非常适合再制造。按照本文建立的模型,通过 Matlab7.0 进行编程运算,经过再制造评价后,每个废旧零部件的可再制造情况以及不同工艺路线对应的可再制造性评价结果见表 3。

表 1 废旧零部件可再制造性评价信息

废旧零部件	材料	失效形式	工艺路线	竞争性指标			可持续性指标				
				加工成本	再制造质量		资源消耗		环境影响		
					可靠性	维修性	电能	材料	噪音	废液	安全性
缸体	铸铁	磨损 裂纹	1	2.0	3.0	3.0	1.50	0	76	0	0.95
			2	8.0	8.0	7.0	5.25	4.0	77	0.80	0.80
			3	7.0	7.0	7.0	4.25	5.0	78	0.70	0.80
连杆	合金钢	磨损 抱瓦	1	6.0	8.0	9.0	2.80	2.0	76	0.85	0.85
			2	8.0	8.0	8.5	4.20	2.8	78	0.70	0.70
主轴瓦	巴氏合金	磨损									
曲轴	合金钢	磨损 抱轴	1	10.5	7.5	8.8	4.28	5.0	79	0.60	0.65
			2	7.5	7.2	8.5	3.55	4.2	78	0.80	0.75
			3	12.5	7.0	8.7	4.77	5.5	80	0.85	0.65
活塞环	硅铝合金	磨损									
喷油泵	铸铝	渗漏	1	4.5	8.0	9.0	4.20	2.0	78	0.55	0.65

表 2 原产品制造信息

零部件	竞争性指标			可持续性指标				
	加工成本	再制造质量		资源消耗		环境影响		
		可靠性	维修性	电能	材料	噪音	废液	安全性
缸体	25	7	7.0	8.05	10.0	85.0	0.90	0.65
连杆	16	8	8.5	3.44	4.0	85.4	0.88	0.70
主轴瓦	12	6	5.5	3.28	3.0	82.6	0.70	0.80
曲轴	25	7	8.5	4.21	8.0	85.2	0.95	0.65
活塞环	6	5	3.0	2.33	6.0	82.3	0.80	0.65
喷油泵	11	8	9.0	3.85	3.5	82.5	0.75	0.75

从评价结果可以看出,主轴瓦和活塞环没有再制造的价值;缸体、连杆、曲轴和喷油泵均适合再制造,其最优再制造工艺路线分别为 2、1、2 和 1。其中,缸体的工艺路线 1 在实际的再制造生产中为,通过调整换位实现缸体再制造,即将缸体旋转 90°后安装,利用缸体未磨损或磨损较轻的部位继续工作,这种方法经济实惠,但再制造后的质量得不到保证,故该工艺路线不予采用。需要注意的是,有些废

表 3 可再制造性评价结果

废旧零 部件	工艺 路线	竞争性 因子	可持续 性因子	可再制 造度	可再制 造评语
缸体	1	再制造质量达不到要求,不予采纳			
	2	0.990	0.843	0.941	非常适合
	3	0.986	0.825	0.932	非常适合
连杆	1	0.913	0.725	0.850	非常适合
	2	0.781	0.566	0.709	适合
主轴瓦		没有合适的工艺方法,无再制造价值			
曲轴	1	0.883	0.664	0.810	非常适合
	2	0.976	0.721	0.891	非常适合
	3	0.786	0.572	0.715	适合
活塞环		没有合适的工艺方法,无再制造价值			
喷油泵	1	0.866	0.613	0.781	适合

旧零部件在不同工艺路线下的再制造度相差很小,严格来说,选择最优的可再制造度对应的工艺路线未必能使再制造系统的性能达到最优,至于选择哪条工艺路线作为废旧零部件最终的修复路线,则需要通过再制造系统的柔性调度来解决,因篇幅有限,故另行撰文研究。

4 结 语

(1)建立了面向工艺路线的废旧零部件可再制造评价模型,一方面可以判断该废旧零部件是否适合再制造;另一方面为再制造系统的生产计划和车间调度提供必要的信息。

(2)将废旧零部件的可再制造性用模块化、可操作的多属性进行评价,解决了具体的、个性化的废旧零部件能否进行再制造的工程技术操作问题。

(3)模型以原产品制造数据为评价基准,在原始设备制造商从事的再制造模式中,原产品数据较容易采集,但对于独立再制造商来说,采集原产品的制造数据是难以实现的,为此,选择适合独立再制造商的可再制造性评价基准是下一步研究的目标。

参考文献:

References:

- [1] Guide J. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs[J]. Journal of Operations Management, 2001, 8(4): 467-483.
- [2] 张国庆,荆学东,浦耿强,等. 汽车发动机可再制造性评价[J]. 中国机械工程, 2005, 16(8): 739-742.
ZHANG Guo-qing, JING Xue-dong, PU Geng-qiang,
- (上接第 104 页)
- [4] 张君媛,兰海涛,杨秀坤,等. 汽车正面气囊充气过程仿真技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2008, 38(6): 1262-1266.
ZHANG Jun-yuan, LAN Hai-tao, YANG Xiu-kun, et al. Simulation technology of vehicle frontal airbag inflating[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(6): 1262-1266.
- [5] Zhang H, Raman S, Gopal M, et al. Evaluation and comparison of CFD integrated airbag models in LS-DYNA MADYMO and PAMCRASH[C]//SAE. Proceedings of SAE 2004 World Congress & Exhibition, Detroit; SAE Global Mobility Database, 2004; 1627.
- [6] 陆善彬,董丽萍,陈光,等. 基于任意拉格朗日-欧拉算法的气帘展开数值模拟[J]. 汽车工程, 2009, 31(12): 1158-1161.
LU Shan-bin, DONG Li-ping, CHEN Guang, et al.

et al. Assessment on remanufacturability of the automobile engines[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(8): 739-742.

- [3] Sundin E, Bras B. Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2005, 13(9): 913-925.
- [4] Majumder P. Competition in remanufacturing[J]. Production and Operations Management, 2001, 10(2): 125-141.
- [5] 曹华军,王本涛,刘飞,等. 再制造工艺过程二阶优化决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5): 935-941.
CAO Hua-jun, WANG Ben-tao, LIU Fei, et al. Two phase decision-making strategy for remanufacturing process planning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(5): 935-941.
- [6] Seitz M. A critical assessment of motives for product recovery: the case of engine remanufacturing[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(12): 1147-1157.
- [7] Jovane F, Yoshikawa H, Alting L, et al. The incoming global technological and industrial revolution towards competitive sustainable manufacturing[J]. CIRP Annals Manufacturing Technology, 2008(57): 641-659.
- [8] 徐滨士. 再制造与循环经济[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- based on arbitrary Lagrangian-Eulerian algorithm[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(12): 1158-1161.
- [7] 赵海鹰. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [8] Hirth A, Haufe A, Olovsson L. Airbag simulation with LS-DYNA past-present-future[C]//ERAB. Proceedings of the 6th European LS-DYNA Users Conference Gothenburg, Sweden; ERAB, 2007; 23-46.
- [9] 代小芳,宗智,王喜军,等. 折叠气囊展开过程 CV 和 ALE 数值模拟方法对比研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(8): 676-680.
DAI Xiao-fang, ZONG Zhi, WANG Xi-jun, et al. A comparative study on the CV and ALE methods for simulating folded airbag deployment[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(8): 676-680.
- [10] 田婧婷. 汽车正面安全气囊充气过程模拟及试验验证技术[D]. 长春: 吉林大学, 2009.