

DOI:10.13196/j.cims.2015.01.015

基于失效特征的机械零部件可再制造度评价方法

杜彦斌^{1,2}, 廖 兰^{1,2}

(1. 重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067;

2. 重庆工商大学 机械工程学院, 重庆 400067)

摘 要:为评判实施机械零部件再制造的可再制造度, 提出机械零部件可再制造度评价的总体流程框架; 基于模糊评判量化分析机械零部件的失效特征, 并建立涵盖技术可行性、经济可行性和资源环境性三个方面的可再制造度评价指标体系及量化方法, 进而形成一种基于失效特征的机械零部件可再制造度评价模型。结合蜗轮副再制造对所提出的模型进行验证分析, 结果表明该蜗轮副具有较好的可再制造度。

关键词:可再制造度; 失效特征; 机械零部件; 隶属函数

中图分类号:TH17 **文献标识码:**A

Remanufacturability evaluation method for mechanical parts based on failure features

DU Yan-bin^{1,2}, LIAO Lan^{1,2}

(1. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control,

Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. College of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: To judge the remanufacturability of implementing mechanical parts remanufacturing, the overall framework of remanufacturability evaluation for mechanical parts was proposed. The failure condition of mechanical parts was determined based on fuzzy evaluation. The quantification methods of remanufacturability evaluation indexes including technical feasibility, economic feasibility as well as resource and environment index were presented, and the model of remanufacturability evaluation for mechanical parts based on quantified failure features was established. The proposed model was illustrated in a case of worm gear remanufacturing, and the result showed the better remanufacturability of this worm gear.

Key words: remanufacturability; failure features; mechanical parts; membership function

0 引言

2009 年, 工信部确定在汽车零部件、机床和工程机械等领域开展机电产品再制造试点工作, 这些产品实施再制造的主体集中于机械零部件, 具有附加值高、回收与重用性好、服役寿命可靠性高等特

点。随着再制造试点工作的深入开展, 将有大量且不断动态产生的废旧机械零部件需要实施再制造。而机械零部件经历过一次服役周期, 外部特征和内部材料发生了不确定性的变化, 表现为断裂、磨损和变形等多种失效模式^[1-2], 要对废旧机械零部件实施再制造, 需要根据失效特征判定其剩余寿命和可再

收稿日期:2014-07-20; **修订日期:**2014-10-15. Received 20 July 2014; accepted 15 Oct. 2014.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51305470); 重庆市基础与前沿研究计划资助项目(cstc2014jcyjA70008); 重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ130734); 重庆工商大学博士科研启动资助项目(2013-56-08). **Foundation items:** Project supported by the National Natural Science Foundation, China(No. 51305470), the Fundamental and Advanced Research Program of Chongqing Municipality, China(No. cstc2014jcyjA70008), the Science and Technology Research Foundation of Chongqing Education Commission, China(No. KJ130734), and the Doctoral Scientific Research Funds of CTBU, China(No. 2013-56-08).

制造度。

再制造毛坯在服役过程中,失效机理的复杂性、失效模式的多样性及失效特征的不确定性给可再制造度评估带来了极大的困难。目前,已有很多高校、科研院所和企业对产品或零部件的可再制造度开展了研究。Bras 等建立了针对新产品设计的可再制造度评判原则与指标,并应用于电子电器和汽车等产品^[3]。Amezquita 等从装配、拆卸、控制、检测和清洗以及再升级等角度定性与量化地评判再制造工艺过程,设计了相关指标,并使用这些评判原则对一次性相机的再制造过程进行了评估^[4]。英国再制造与再利用研究中心开发了再制造机会评定工具 (remanufacturing opportunity tool),用于评判从个人消费品到重型机械等多个行业产品的可再制造度,帮助管理者快速决策该公司产品是否适合开展再制造^[5]。Lund 对 75 类实施再制造的产品进行分析与识别,建立了如下七条再制造度评判原则:①产品为耐用品;②产品功能性失效;③产品实现标准化,并且零件具有互换性;④残余附加值较高;⑤旧件获取成本低于残留附加值;⑥产品技术具有稳定性;⑦再制造产品具有一定的客户认可度^[6-7]。Nabil 等开发设计了某机构的可再制造度评价方法及系统,主要从该产品的总体状况、是否适合操作规范、安全优先性等角度评判选择最优的再制造方案^[8]。Subramanian 等对产品的两项设计属性进行了建模分析,一项为环境性能的线性评价,一项为产品可再制造性的评估(对产品使用终期可回收的部分进行建模)^[9]。笔者团队针对机床等产品,提出一种集成的产品可再制造度评价方法,并分别对各项指标进行了量化描述^[10-11]。

目前所提出的可再制造度评价方法仍然主要针对机械装备产品进行定性评价与专家评判,而且侧重于宏观分析,针对价值较高的机械零部件的可再制造度评价涉及较少。零部件可再制造度评价必须结合失效特征对其进行定量评价,以制定科学的再制造工艺。因此,本文将从失效特征出发,形成一套再制造毛坯可再制造度量化的评判标准,对规范再制造过程、提高再制造效率、提升再制造成功率具有非常重要的意义。

1 机械零部件可再制造度评价总体流程框架

再制造的最终目的是实现废旧零部件附加价值的回收重用,而零部件的价值回收是一个随零部件

本身失效特征、外界条件、时间和技术进步等因素的变化而变化的随机变量。本文用可再制造度作为评定废旧机械零部件是否可以再制造以及再制造价值大小的定量描述,并将其设定为废旧零部件的一种固有属性。可再制造度可以简单定义为废旧零部件达到满足再制造要求的合格零部件的可行性,一般应综合考虑技术可行性、经济可行性和资源环境性等多个方面。不同类型零部件的可再制造度一般不同,即使为同一类别或者同种零部件,也会因其退役前的服役工况、产品失效情况、报废原因等的不同而使可再制造度千差万别。在对机械零部件失效过程及再制造过程进行分析的基础上,本文建立一种基于失效特征的机械零部件可再制造度综合评价方法,如图 1 所示。

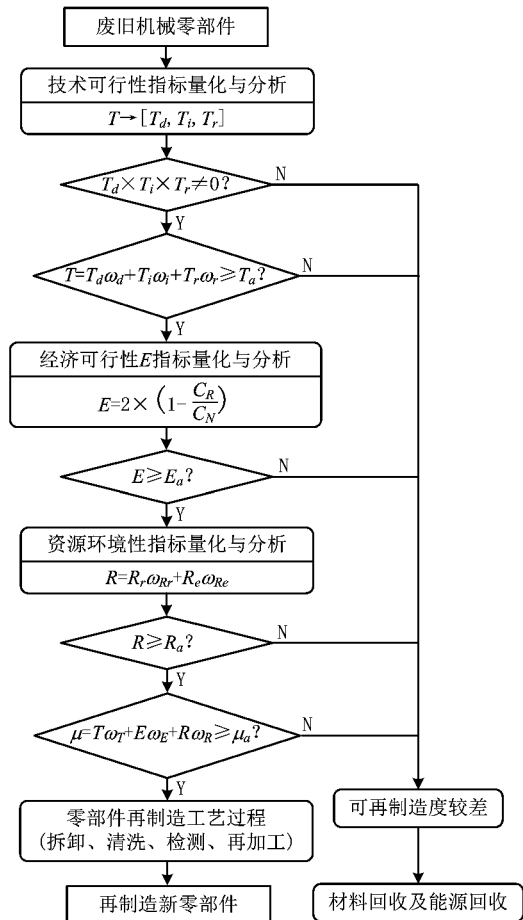


图1 机械零部件可再制造度评价总体框架流程

机械零部件可再制造度评价的步骤如下:

步骤 1 考虑到废旧机械零部件失效的表面特征及内部材料的特性变化,再制造过程的实施具有一定难度且存在较大的不确定性,需要考虑并分析再制造技术可行性,以确保该零部件可以采用先进

的机械加工或表面工程等技术恢复其性能。如果该零部件的某一项技术性指标较差(评价值为 0,即无法实施该工艺过程)或者评价价值较低(低于设定的阈值 T_a),则只能对其进行材料回收与资源化处理。

步骤 2 需要对具有较好技术可行性的机械零部件的再制造成本进行核算与评定,并将再制造成本与新零部件制造成本进行对比形成经济性指标,该指标如果小于设定的阈值 E_a ,则采取材料回收等方式进行处理。

步骤 3 从物料(能源)节约性、环境友好性的角度分析该零部件再制造的资源环境性。如果评价价值大于设定的阈值 R_a ,则进入综合评价阶段;否则,采取材料回收的处理方式。

步骤 4 综合技术可行性、经济可行性和资源环境性三方面的评价结果,计算得到机械零部件可再制造度值 μ 并进行分析。如果 μ 大于设定的阈值 μ_a ,则说明可再制造度较好,可进入再制造工艺过程;否则,只能进行材料回收。

2 基于失效特征量化的机械零部件可再制造度评价模型

2.1 机械零部件失效特征的量化

机械零部件存在磨损、变形、断裂和腐蚀等多种失效模式,而其经过长时间服役后,失效特征往往是多种失效模式耦合并存所致,从而使失效特征很难通过某一个函数或者指标值进行量化。模糊评判法是一种基于模糊数学的综合评价方法,可以根据模糊数学的隶属度理论将定性评价转化为定量评价,即用模糊数学对受多种因素制约的事物或对象做一个总体评价^[12]。

本文将零部件失效特征的状态划分为五个等级,评语集表示为 $F \rightarrow$ [基本无失效,微小失效,一般失效,中度失效,严重失效];对应评价值为 $f = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5]$, f_i 值需根据零部件的特点和失效特征确定;失效特征的隶属关系采用专家评判法(假设 N 个专家)确定,评判结果为 $A = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5]$,其中 $a_i = \frac{n_{a_i}}{N}$ ($i = 1, 2, \dots, 5$)表示第 i 种评价结果的隶属度, n_{a_i} 表示选择第 i 种评价结果的专家数量。将专家评判结果与失效特征的量化等级进行综合,得到失效特征 f 的量化评价价值,

$$f = F \times A^T. \quad (1)$$

式中 f 为归一化的失效特征量化值, f 越大,表明失

效越严重; f 越小,表明失效越轻微。

2.2 可再制造度评价指标体系及量化方法

判断机械零部件的可再制造度需要结合再制造工艺的各个过程(如拆卸与清洗、检测与分类、再加工等),从技术可行性、经济可行性及资源环境性等多个方面综合分析。基于此,可建立机械零部件可再制造度评价的指标体系,如表 1 所示。

表 1 机械零部件可再制造度评价指标体系

评判准则	评价指标	符号表示
技术可行性 T	拆洗可行性	T_d
	检测与分类可行性	T_i
	再加工可行性	T_r
经济可行性 E	/	E
资源环境性 R	资源(含能源)节约性	R_s
	环境友好性(再制造过程)	R_e

2.2.1 技术可行性指标 T 量化方法

技术可行性主要分析该零部件是否可以采用现代先进的机械加工、表面工程等技术实现其尺寸或性能恢复,可从拆卸与清洗可行性、检测与分类可行性和再加工可行性等方面考虑。机械零部件可再制造度分析没有涉及产品装配,故此处不考虑再装配可行性,而再装配可行性属于产品可再制造度评价的重要指标。

(1) 拆洗可行性 T_d

拆卸、清洗可行性与零部件的失效特征关联不大,因此拆洗可行性指标的量化主要采用专家模糊评判法。按照拆洗的难易程度,将拆洗可行性划分为四个等级,评语集表示为 $\Delta_D \rightarrow$ [无法拆洗,较难拆洗,较好拆洗,便于拆洗],对应评价值为 $[\Delta d_1, \Delta d_2, \Delta d_3, \Delta d_4]$;拆洗可行性指标隶属度关系由专家(专家数为 N_d)评判,评判结果 $D = [d_1, d_2, d_3, d_4]$,其中: $d_i = \frac{n_{d_i}}{N_d}$ ($i = 1, 2, 3, 4$)表示第 i 种评价结果的隶属度, n_{d_i} 表示选择第 i 种评价结果的专家数量。将评判结果与拆洗可行性的量化等级进行综合,得到拆洗可行性的量化评价价值

$$T_d = \begin{cases} \Delta_D \times D^T, & T_d \geq \Delta d_2; \\ 0, & T_d < \Delta d_2. \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_d 为归一化的拆洗可行性量化值, Δd_2 为设定的拆洗可行性的阈值。 T_d 越大,表明该机械零部件更便于拆洗; T_d 越小,表明该机械零部件难以拆洗。如果 $T_d < \Delta d_2$,则表明零件较难拆卸与清洗,说

明可再制造度很差,不适合于再制造。

(2) 检测与分类可行性 T_i

回收的废旧零部件需要对其表面损伤和内部性能变化进行检测,以分析该零部件是否适合于再制造。检测与分类对零部件能否实现性能恢复不起决定性作用,但可以为决策提供重要的信息支持。检测可行性主要体现在检测时间的长短、检测数据获取的难易程度及检测数据的准确性等方面,并与失效特征存在关联。检测与分类可行性专家模糊评判评语集表示为 $\Delta_i \rightarrow$ [无法检测(检测工作量太大,无法获得检测值),很难检测,可检测,便于检测],对应评价值为 $[\Delta i_1, \Delta i_2, \Delta i_3, \Delta i_4]$; 建立检测与分类可行性与失效特征的隶属函数(隶属函数可以根据零部件的不同进行修改),如图 2 所示。

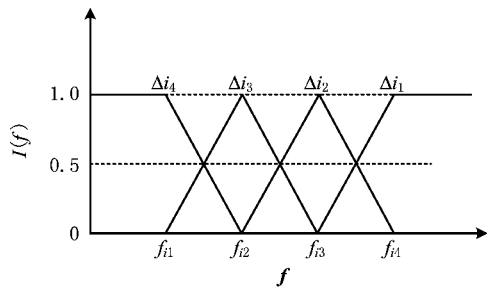


图2 检测与分类可行性与失效特征的隶属函数

由图 2 可知,根据失效特征 f 值的范围,可以确定其隶属于 $[\Delta i_i, \Delta i_j]$ 的隶属度分别为 $[\Delta_i^i, \Delta_i^j]$, 计算可得检测与分类可行性指标值 $T_r = \Delta i_i \times \Delta_i^i + \Delta i_j \times \Delta_i^j$ 。

(3) 再加工可行性 T_r

再加工可行性与失效特征紧密相关。要恢复机械零部件性能,必须有较好的再加工可行性。部分零件失效程度较严重,难以实施再制造,而部分零件失效程度较轻,经过简单的再加工即可恢复性能。再加工可行性专家模糊评判评语集表示为 $\Delta_r \rightarrow$ [无法再加工,较难再加工,可再加工,便于再加工],对应评价值为 $[\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3, \Delta r_4]$ 。建立再加工可行性与失效特征的隶属函数(隶属函数可以根据零部件的不同进行修改),如图 3 所示。

由图 3 可得,根据失效特征 f 值的范围,可以确定其隶属于 $[\Delta r_i, \Delta r_j]$ 的隶属度分别为 $[\Delta_r^i, \Delta_r^j]$, 计算可得再加工可行性 $T_r = \Delta r_i \times \Delta_r^i + \Delta r_j \times \Delta_r^j$ 。一般设定 $f > (f_{r3} + f_{r4})/2$ 时技术可行性较差,直接取值 $T_r = 0$ 。

2.2.2 经济可行性指标 E 量化方法

经济可行性主要对机械零部件再制造的成本进

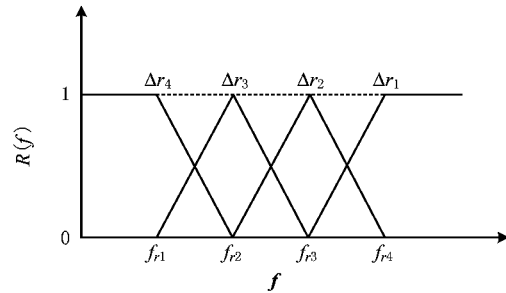


图3 再加工可行性与失效特征的隶属函数

行核算与评定,并通过分析再制造成本与新零部件制造成本之间的关系确定。经过多家再制造商估算,当再制造成本 C_R 为新零部件制造成本 C_N 的 50% 左右时,说明该机械零部件具有非常好的经济性。基于此,将经济可行性指标 E 进行量化(对再制造实践获取相关数据进行回归分析获得):

$$E = \begin{cases} 1, & \frac{C_R}{C_N} < 0.5; \\ 2 \times \left(1 - \frac{C_R}{C_N}\right), & 0.5 \leq \frac{C_R}{C_N} \leq 1; \\ 0, & \frac{C_R}{C_N} > 1. \end{cases} \quad (3)$$

式中 E 为经济可行性指标,当 $\frac{C_R}{C_N} = 1$ 时,再制造成本等于新零部件制造成本,再制造不具有竞争性, $E = 0$; 当 $\frac{C_R}{C_N} = 0.5$ 时,再制造成本为新零部件制造成本的一半,再制造竞争性较好, $E = 1$ 。

2.2.3 资源环境性指标 R 量化方法

资源环境性主要从资源(含能源)节约、环境友好性等角度分析机械零部件再制造的资源环境效益。实施再制造的目的是通过废旧资源的回收与再利用达到节省资源(能源)、减少排放,如果再制造过程导致二次污染较为严重,则再制造不是回收处理的最佳形式,应该将其进行材料回收与循环重用。

(1) 资源节约性 R_s

再制造可以实现废旧机械零部件资源的重用,节省大量物料的消耗,同时减少物料制备过程中的能源消耗。再制造过程消耗的物料、节省的物料消耗及节省的能源消耗均与零部件的失效特征存在一定关系。综合几方面因素,一般失效情况越严重,再制造过程消耗的物料越多,同时需要消耗更多的能量来完成再制造工艺过程,导致资源节约性指标变差。将资源节约性指标的专家模糊评判评语集表示为 $\Delta_s \rightarrow$ [资源节约性较差,资源节约性尚可,资源节

约性较好,资源节约性非常好],对应评价值为 $[\Delta s_1, \Delta s_2, \Delta s_3, \Delta s_4]$,建立资源节约性指标与失效特征的隶属函数(隶属函数可以根据零部件的不同进行修改),如图 4 所示。

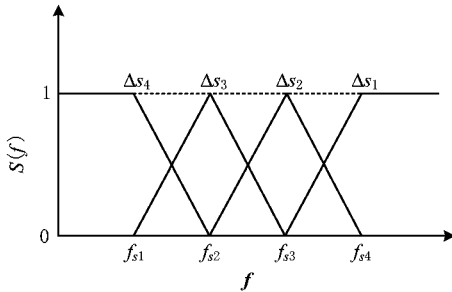


图4 资源节约性与失效特征的隶属函数

由图 4 可得,根据失效特征 f 值的范围可以确定其隶属于 $[\Delta s_i, \Delta s_j]$ 的隶属度分别为 $[\Delta_i^s, \Delta_j^s]$,计算可得资源节约性指标值 $R_s = \Delta s_i \times \Delta_i^s + \Delta s_j \times \Delta_j^s$ 。

(2) 环境友好性(再制造过程) R_e

机械零部件制造过程中伴随着大量的污染物排放,尤其是铸造、锻压、焊接、热处理、机加工和表面处理等工艺过程。再制造可重用大量的废旧机械零部件,不需要经过高能耗、高排放的工艺过程,减排效果显著。将环境友好性划分为四个等级,评语集表示为 $\Delta_E \rightarrow$ [环境友好性差(排放不达标),环境友好性一般(基本达标),环境友好性较好(排放较少),环境友好性非常好(基本无排放)],对应评价值为

$[\Delta e_1, \Delta e_2, \Delta e_3, \Delta e_4]$, Δe_i 值需根据零部件再制造过程的排放情况进行确定。环境友好性的隶属关系采用专家评判法(假设 N_e 个专家)确定,评判结果为 $E = [e_1, e_2, e_3, e_4]$,其中: $e_i = \frac{n_i}{N_e}$ ($i = 1, 2, 3, 4$) 表示第 i 种评价结果的隶属度, n_i 表示选择第 i 种评价结果的专家数量。将专家评判结果与环境友好性的量化等级进行综合,得到环境友好性 R_e 的量化评价价值,

$$R_e = \Delta_E \times E^T \quad (4)$$

式中 R_e 为归一化的环境友好性量化值, R_e 越大,表明该零部件再制造的环境友好性越好; R_e 越小,表明该零部件再制造的环境友好性越差。

2.3 可再制造度评价指标权重的确定

为了确定各个评价准则的量化值,应该首先确定各个指标的权重。当然,不可能获取一种完全准确的权重绝对值,只能确定一种相对权重值。层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)根据问题的性质和要达到的总目标,将问题分解为不同的组成因素,并按照因素间的相互关联影响和隶属关系将因素按不同层次聚集组合,形成一个多层次的分解结构模型,最终使问题归结为最低层(供决策的方案、措施等)相对于最高层(总目标)的相对重要权值的确定或相对优劣次序的排定^[11,13]。下面通过 AHP 法确定技术可行性各指标的权重,图 5 所示为技术可行性指标权重确定的流程图。

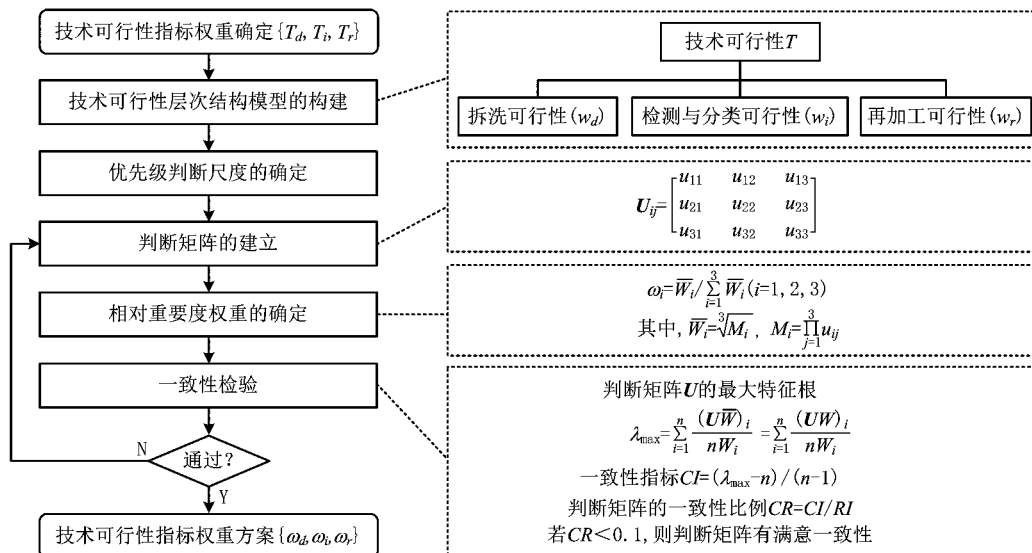


图5 基于层次分析法的技术可行性指标权重确定流程图

确定技术可行性指标权重的步骤如下:

步骤 1 针对技术可行性指标权重确定问题,建立层次分析模型。

步骤 2 参照文献[10-13]建立优先级判断尺度。

步骤 3 根据要素比较的判断尺度,以各指标

对综合评价结果的重要性而言,专家对各指标进行两两比较,建立判断矩阵 U_{ij} 。

步骤 4 基于 AHP 确定技术可行性指标的相对重要度权重 $\{\omega_d, \omega_i, \omega_r\}$ 。

步骤 5 建立判断矩阵 A 的一致性指标 CI ,并计算判断矩阵的一致性比例 CR (RI 值参照文献 [14]),对判断矩阵进行一致性检验:若 $CR < 0.1$,则认为判断矩阵有满意一致性,指标权重方案可以接受;若不满足,则重新建立判断矩阵,直至满意一致性。

同理,可以确定资源环境性各指标的权重 $\{\omega_R, \omega_{Re}\}$ 以及总体评价各指标的权重 $\{\omega_T, \omega_E, \omega_R\}$ 。

3 案例应用

分度蜗轮蜗杆副是滚齿加工机床上重要的传动部件,其齿距精度将直接影响加工件的精度。滚齿机经过长期运行之后,分度蜗轮副磨损及精度下降情况严重,无法满足零部件加工要求。分度蜗轮副价值较高,而且制造周期比较长,大多数情况下选择对其进行修复与再制造。下面以 YX3120 滚齿机蜗轮蜗杆副为例,对其可再制造度进行评价分析。

3.1 蜗轮蜗杆副失效特征的量化

蜗轮蜗杆副经过长期运行,常因磨损出现较大的侧隙,导致分度精度下降,在恶劣切削条件下可能出现掉牙、磨成尖牙等现象。由于蜗轮的价值远大于蜗杆,一般主要对蜗轮的失效特征进行分析,以判断其可再制造度。通过对蜗轮蜗杆副(如图 6 为蜗杆,图 7 为蜗轮)的失效情况进行分析,发现蜗杆齿面有一些研沟,存在精度降低的情况;蜗轮齿面存在磨损,部分齿面上有一些研沟,为轻度损伤。

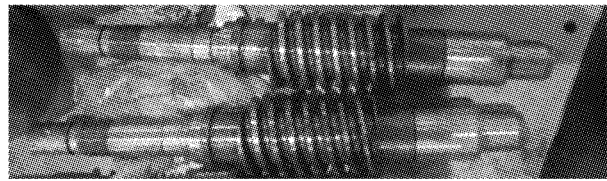


图6 YX3120滚齿机工作台蜗杆



图7 YX3120滚齿机工作台蜗轮

本文将蜗轮蜗杆副失效特征评语集对应的评价价值设定为[基本无失效,微小失效,一般失效,中度失效,严重失效] $\rightarrow F = [0.1, 0.4, 0.6, 0.75, 0.9]$;通过 20 个专家对蜗轮蜗杆副的失效特征进行评价,得出评价结果 $A = [0, 0.35, 0.45, 0.2, 0]$ 。将专家评判结果与失效特征的量化等级进行综合,得到失效特征 f 的量化评价价值 $f = F \times A^T = 0.56$ 。结果表明,该蜗轮蜗杆副的失效状况一般。

3.2 可再制造度评价指标的量化

(1) 技术可行性指标

分析该蜗轮副是否可以通过再制造技术恢复其尺寸或性能,各个指标评价过程及指标如表 3 所示。

表 3 技术可行性指标评价结果

序号	项目	评价过程	结果
1	拆洗可行性 T_d	$\Delta_D = [0.1, 0.4, 0.7, 0.9]$ $D = [0, 0.1, 0.7, 0.2]$ $T_d = 0.71$ (设 $\Delta d_2 = 0.60$) $\Delta_I = [0.1, 0.35, 0.75, 0.95]$	该蜗轮副可实施拆卸与清洗
2	检测与分类可行性 T_i	$f_{i1} = 0.45; f_{i2} = 0.60; f_{i3} = 0.75; f_{i4} = 0.90$ $T_i = 0.803$ $\Delta_R = [0.1, 0.35, 0.75, 0.95]$	检测与分类可行性较好
3	再加工可行性 T_r	$f_{r1} = 0.40; f_{r2} = 0.60; f_{r3} = 0.75; f_{r4} = 0.85$ $T_r = 0.79$ 指标权重的确定: $W_T = \{0.297, 0.163, 0.540\}$	蜗轮副可再加工,但需加强再制造过程的质量控制

综合评价结果 $T = 0.768$ (设定 $T_d = 0.7$),结果表明该蜗轮副可实施再制造,技术上可行

(2) 经济性指标

该蜗轮副的修复采用修复蜗轮(精滚、剃修复齿形精度)后再更换相配蜗杆的方法,比较方便经济。蜗轮副的再制造成本主要包括蜗轮的再加工费用以及新蜗杆的制造费用。经核算,再制造费用约为 $C_R = 1\ 950$ 元左右,新蜗轮蜗杆副的制造成本约为 C_N

$= 4\ 100$ 元。利用式(3)计算可知,经济性指标 $E = 1$,表明该蜗轮副再制造成本较低,经济可行性较好。

(3) 资源环境性指标

主要从资源节约性以及环境友好性的角度对蜗轮副再制造的资源环境性进行评价分析,评价过程及结果如表 4 所示。

表 4 资源环境性指标评价结果

序号	项目	评价过程	结果
1	资源节约性 R_s	$\Delta_s = [0.2, 0.5, 0.7, 0.9]$ $f_{s1} = 0.45; f_{s2} = 0.60; f_{s3} = 0.75; f_{s4} = 0.90$ $R_s = 0.753$	具有较好的资源节约性
2	环境友好性 R_e	$\Delta_E = [0.1, 0.5, 0.7, 0.9]$ $E = [0, 0.3, 0.7, 0]$ $R_e = 0.64$	再制造过程环境友好性较好,但仍需注意避免二次污染

指标权重的确定: $W_R = \{0.50, 0.50\}$ (两项指标对资源环境性指标具有相同的影响程度)
 综合评价结果 $R = 0.697$ (设定 $R_a = 0.60$), 结果表明该蜗轮副再制造的资源环境性尚可

3.3 评价结果分析

综合蜗轮蜗杆副再制造的技术可行性、经济可行性和资源环境性的评价结果,采用 AHP 法确定各指标的权重,进而计算得到机械零部件可再制造度值 μ 并进行分析,评价结果如表 5 所示。结果表明,该蜗轮副的可再制造度较好,实施再制造的成功率较高,而且可以获取较好的综合效益。经过与再制造车间实际情况进行对比分析,评价结果与实际情况基本相符,为再制造决策提供了重要的信息支撑。

表 5 蜗轮副再制造度综合评价结果

序号	指标	指标值	指标权重值
1	技术可行性 T	0.768	$\omega_T = 0.399$
2	经济可行性 E	1.000	$\omega_E = 0.399$
3	资源环境性 R	0.697	$\omega_R = 0.202$

综合评价值 $\mu = 0.846 > \mu_a$ (设定 $\mu_a = 0.75$)

4 结束语

本文从失效特征的角度出发,提出机械零部件可再制造度评价的总体流程,并对技术可行性、经济可行性、资源环境性等指标的量化方法进行了分析,进而形成一种基于失效特征的机械零部件可再制造度评价方法。然后,结合蜗轮副再制造过程进行了验证分析,结果表明:所形成的可再制造度评价方法

具有可应用性,可为实际决策提供重要的信息支撑。

由于再制造毛坯本身以及再制造过程存在较大的不确定性,失效特征较难量化,而文中对失效特征的量化主要采用专家评判法,存在一定的主观局限性,下一步研究将从失效机理与损伤演变规律、外部表象与内部特征变化映射关系、跨尺度融合等角度出发,对失效特征进行更为准确的量化;另外,本文所形成的评价指标与失效特征的隶属关系属于理论方法模型,还需要进一步深入分析,以形成更为科学、准确的分界值;同时,将结合本文所提出的方法,开发相应的切合再制造企业实际的软件支持工具,以实现机械零部件可再制造度评价的软件流程化。

参考文献:

[1] XU Binshi. State of the art and future development in remanufacturing engineering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(1): 10-14 (in Chinese). [徐滨士. 再制造工程的现状与前沿[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(1): 10-14.]

[2] HE Bolin, WANG Bin. Research status and development trend of fatigue failure prediction[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(4): 279-281 (in Chinese). [何柏林, 王斌. 疲劳失效预测的研究现状和发展趋势[J]. 机械设计与制造, 2012(4): 279-281.]

[3] BRAS B, HAMMOND R. Towards design for remanufacturing-metrics for assessing remanufacturability[C]//Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse. Eindhoven, the Netherlands: Eindhoven University of Technology, 1996: 5-22.

- [4] AMEZQUITA T, HAMMOND R, SALAZAR M, et al. Characterizing the remanufacturability of engineering systems [C]//Proceedings of the 1995 ASME Advances in Design Automation Conference. New York, N. Y., USA: ASME, 1995: 271-278.
- [5] Centre for Remanufacturing & Reuse. Remanufacturing opportunity tool (ReOpT) [EB/OL]. [2014-07-25]. <http://www.remanufacturing.org.uk/remanufacturing-decision-tool.lasso>.
- [6] GUIDE V D R. Production planning and control for remanufacturing; industry practice and research needs[J]. Journal of Operations Management, 2000, 18(4): 467-483.
- [7] GUIDE V D R, WASSENHOVE L N. Managing product returns for remanufacturing[J]. Production and Operations Management, 2001, 10(2): 142-155.
- [8] NASR N, BOLD T, HEINTZ J, et al. Method and system for assessing remanufacturability of an apparatus; US, 7467073[P/OL]. (2008-12-16) [2014-07-25]. <http://www.google.com/patents/US7467073>.
- [9] SUBRAMANIAN R, GUPTA S, TALBOT B. Product design and supply chain coordination under extended producer responsibility [J]. Production and Operations Management, 2009, 18(3): 259-277.
- [10] DU Yanbin, CAO Huajun, LIU Fei, et al. An integrated method for evaluating the remanufacturability of used machine tool[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 20(1): 82-91.
- [11] DU Yanbin, CAO Huajun, LIU Fei, et al. Evaluation of machine tool remanufacturing scheme based on entropy weight and AHP[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(1): 84-88 (in Chinese). [杜彦斌, 曹华军, 刘飞, 等. 基于熵权与层次分析法的机床再制造方案综合评价[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1): 84-88.]
- [12] XIAO Renbin, CHENG Xianfu, LIAO Xiaoping. Evaluation method and its application for design scheme based on fuzzy information axiom[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(12): 2331-2338 (in Chinese). [肖人彬, 程贤福, 廖小平. 基于模糊信息公理的设计方案评价方法及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(12): 2331-2338.]
- [13] SAATY T L. Decision making with the analytic hierarchy process[J]. International Journal of Services Sciences, 2008, 1(1): 83-98.
- [14] LIU Fei, CAO Huajun, ZHANG Hua, et al. Theory and technology of green manufacturing [M]. Beijing: Science Press, 2005 (in Chinese). [刘飞, 曹华军, 张华, 等. 绿色制造的理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.]

作者简介:

杜彦斌(1982—),男,河北鹿泉人,讲师,博士,研究方向:机械装备再制造、装备可靠性分析等,E-mail:duzi2009@163.com;
廖兰(1958—),女,重庆璧山人,教授,研究方向:绿色制造、装备设计与制造等。