

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.09.010

基于失效模式的曲轴再制造工艺优化方法研究*

崔翔,张秀芬*,薛俊芳

(内蒙古工业大学机械学院,内蒙古呼和浩特010051)

摘要:针对曲轴再制造过程中工艺路线复杂多样的问题,从曲轴的工作状况、材料选择、失效原因和损伤程度等方面进行了研究,提出了基于失效模式的曲轴再制造工艺优化方法。通过故障树分析法分析了曲轴失效的主要原因,用树形图表示出来,从中提取了影响再制造工艺的关键因素作为失效特征;基于实际工作经验给出了失效特征的量化标准,并将量化结果作为选取再制造工艺的主要条件;根据再制造工艺标准剔除了不合理的工艺路线,并将结果用与或图简明表示出来,建立了涵盖经济成本与时间成本的再制造成本函数,对结果数据进行了无量纲化处理,分析比较了简化后的工艺路线,选取了成本最低的路线作为最优再制造工艺路线;选取 DB-7020 帕萨特汽车废旧曲轴为目标,从磨损、裂纹和变形失效角度进行了分析,应用再制造工艺优化方法获得了可行的再制造工艺路线,并通过再制造成本函数评价得到了最优路线。研究结果表明:再制造工艺优化方法可以解决由于废旧曲轴失效形式和失效程度不同而导致的工艺复杂性问题,能够提高再制造工艺选择的合理性和再制造效率。

关键词:再制造;曲轴;失效模式;工艺优化;材料

中图分类号:TH16;TK413.3⁺1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)09-0938-06

Remanufacturing process optimization method for crankshaft based on failure modes

CUI Xiang, ZHANG Xiu-fen, XUE Jun-fang

(The College of Mechanical Engineer, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: Aiming at the problem that the process routes are complicated and diversified in crankshaft remanufacturing, the crankshaft working conditions, material selection, failure causes and damage degree were studied and a remanufacturing process optimization method for crankshaft based on failure modes was presented. The main causes of crankshaft failure were analyzed by fault tree analysis method and expressed by tree diagram. Furthermore, the key factors affecting remanufacturing process were extracted as failure characteristics. The quantitative criteria of failure characteristics for crankshaft were proposed based on engineering experience in practical work, and the quantified results were taken as the main conditions for selecting remanufacturing process. The unreasonable process routes were removed by remanufacturing process standards and the result was expressed as AND/OR diagrams. Remanufacturing cost function including economic and time costs was established. And the evaluation results were processed by dimensionless method. The simplified routes were analyzed and compared, the lowest cost route was selected as the optimal route of remanufacturing process. The point of wear, crack and deformation failure of DB-7020 Passat automobile crankshaft was analyzed. Remanufacturing process routes were obtained by applying remanufacturing process optimization method, and the optimal route was obtained by remanufacturing cost function. The results indicate that the problem of process complexity caused by different failure forms and degrees of used crankshaft can be solved by remanufacturing process optimization method. And the rationality of process selection and remanufacturing efficiency can be improved.

Key words: remanufacturing; crankshaft; failure modes; process optimization; material

0 引言

曲轴是汽车发动机的重要零部件之一,结构复杂,需求量多且价格昂贵,占整机成本的10%~20%。曲

轴再制造是废旧产品再资源化的有效途径,可降低成本^[1]。废旧曲轴结构、失效形式和失效程度的不确定性,导致了再制造工艺选择的复杂性。通过提高再制

收稿日期:2019-03-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017MS(LH)0510);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划资助项目(NJYT-17-B08);内蒙古工业大学科学研究项目(ZS201017)

作者简介:崔翔(1994-),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,主要从事产品再制造设计方面的研究。E-mail:2394469503@qq.com

通信联系人:张秀芬,女,教授,硕士生导师。E-mail:xxff_6188@163.com

造工艺方案的合理选择可以提高再制造质量和效率。

再制造工艺优化受到了国内外学者的普遍关注。ABU 等^[2]基于田口正交矩阵来评估退役曲轴参数的临界性,通过关键参数优化了成本;WANG 等^[3]采用故障树分析和模糊综合评价方法识别了故障特征,并且量化了其损伤程度,利用规则推理和操作有向图生成了再制造工艺方案的备选方案,通过遗传算法和人工神经网络获得了最优方案;向鹏等^[4]基于 BP 神经网络进行了再制造工艺方案的快速精确确定;江亚^[5]结合废旧零部件不同失效特征产生的原因,利用故障树模型提取了损伤量,对失效特征进行了定量分析,结合有向图简约模型,最后将时间、成本和能耗的多目标转化为单目标,利用遗传神经网络算法优化了路线;李成川等^[6]研究了再制造系统的工艺路线不确定性问题,建立了图形评审模型和工艺概率分支和加工时间分布函数,通过剧目函数和信号流图求解得到了零件达到某一结点的期望概率与时间。上述方法通用性较强,但是算法复杂,而且没有考虑材料对再制造工艺的影响。

为此,在上述文献研究的基础上,本研究从失效模式和损伤状况角度,求解再制造工艺路线优化问题,针对曲轴进行再制造工艺优化研究。

1 废旧曲轴失效模式分析

1.1 废旧曲轴再制造故障树的构建

故障树分析法是一种通过绘制故障逻辑因果关系树形图,推演出故障原因和故障表现及发生概率的图形分析技术。本文应用故障树分析法构建废旧曲轴再制造故障树的步骤如下:

(1) 确定顶层事件。失效是曲轴报废的主要原因,所以将该问题设定为顶层事件;

(2) 中间事件和基本事件。曲轴失效的主要原因包括圆角应力集中引起的圆角疲劳裂纹、载荷不均引起的曲轴变形、长期服役造成的曲轴轴颈磨损和弯扭复合疲劳造成的曲轴裂纹等^[7-9],所以本研究将曲轴圆角疲劳断裂、曲轴变形、轴颈磨损、弯扭复合疲劳断裂等引起曲轴失效的事件作为中间事件;而导致这些中间事件的曲轴故障定义为基本事件,根据文献[10],选择圆角淬火不当、圆角加工刀痕损伤、圆角氮化工艺不当、圆角校正裂纹、工作不平稳和冲击载荷、装配不当和两件尺寸偏、轴瓦烧伤、表面微裂纹、深裂纹等为基本事件;

(3) 按照层次关系绘制故障树图。

曲轴再制造故障树如图 1 所示。

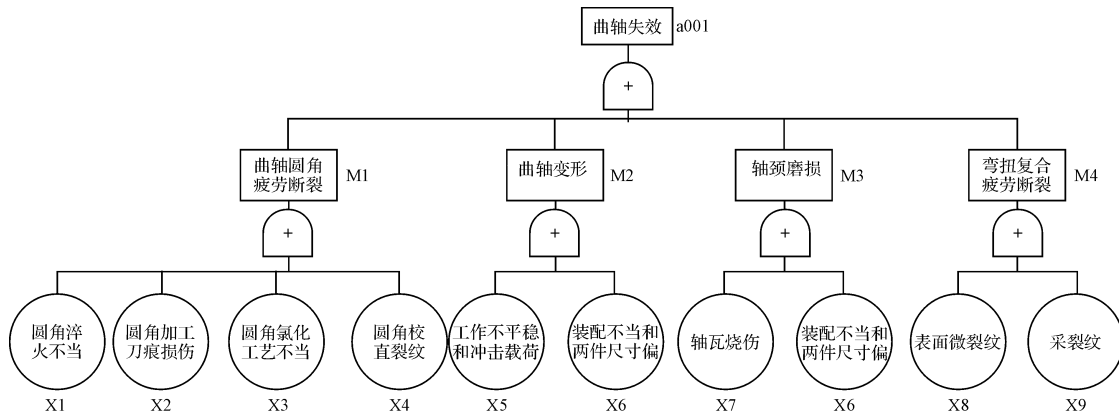


图 1 曲轴再制造故障树

1.2 曲轴失效模式特征的提取

根据图 1 中曲轴失效原因,本文提取磨损量、圆角裂纹、轴颈裂纹、变形比例为特征量,量化标准参照文献[4]。曲轴材料的性能很大程度上影响曲轴的性能,曲轴常用的材料包括球墨铸铁、中碳钢和合金钢等。材料不仅影响再制造工艺的选择,且对再制造成本也有较大影响,所以增加材料选择作为一个新的特征量。

特征量作为评判再制造工艺的标准,为了便于操作和后续的计算,对特征量进行量化。

曲轴失效模式特征量等级划分如表 1 所示。

表 1 曲轴失效模式特征量等级划分

失效模式特征	等级划分			
磨损量	0(无磨损)	0-0.6 mm ³ (轻微)	0.6 mm ³ -2 mm ³ (中度)	大于 2 mm ³ (重度)
圆角裂纹	0(无裂纹)	0-0.1 (浅裂纹)	0.1-0.2 (中度裂纹)	大于 0.2 (深裂纹)
轴颈裂纹	0(无裂纹)	0-0.1 (浅裂纹)	0.1-0.2 (中度裂纹)	大于 0.2 (深裂纹)
变形比例	0(无变形)	0-0.05 mm (轻微)	0.05 mm-0.1 mm (中度)	0.1 mm-0.2 mm (偏重)
材料	1.2(球墨铸铁)	1.5(中碳钢)	1.8(合金钢)	

1.3 基于特征量的曲轴再制造工艺初始方案生成

鉴于失效模式、失效程度和材料的差异,再制造工艺方案也有所差异。例如,对于曲轴轴颈磨损,若磨损量较小,可以对其表面采用电镀技术,若磨损量较大,则可采用喷涂等技术,若超出可修复的范围,则选择报废。对于曲轴轴颈裂纹,若裂纹较浅,则可以磨削后使用,若裂纹较大,则需要对裂纹进行焊补再制造修复。球磨铸铁不适合激光熔覆进行再制造^[11-13]。

本文对表 1 所示的曲轴失效模式特征进行量化,并根据专业知识和工程经验给出生成曲轴再制造工艺的初始方案,特征量量化标准及其对应再制造工艺方案如表 2 所示。

表 2 特征量量化标准及其对应再制造工艺方案

失效模式特征	量值	量化值区间	量化值计算公式	再制造工艺方案
磨损量	0	0	0	—
	$0 < x \leq 0.6 \text{ mm}^3$	(0,1]	$a = \frac{x-0}{0.6-0}$	清洗—电镀
	$0.6 \text{ mm}^3 < x < 2.0 \text{ mm}^3$	(1,2)	$a = \frac{x-0}{2-0.6} + 1$	清洗—磨削—冷焊(等离子喷涂、激光熔覆)—磨削
	$x \geq 2.0 \text{ mm}^3$	2	2	报废
圆角裂纹	0	0	0	—
	$0 < x \leq 0.05$	(0,1]	$b = \frac{x-0}{0.05-0}$	精磨—氮化—抛光或滚压—精磨
	$0.05 < x < 0.2$	(1,2)	$b = \frac{x-0}{0.2-0.05} + 1$	磨削—喷丸—抛光—应力测试
	$x \geq 0.2$	2	2	报废
轴颈裂纹	0	0	0	—
	$0 < x \leq 0.05$	(0,1]	$c = \frac{x-0}{0.05-0}$	磨削
	$0.05 < x < 0.2$	(1,2)	$c = \frac{x-0}{0.2-0.05} + 1$	磨削—焊补—缓冷—探伤
	$x \geq 0.2$	2	2	报废
变形比例	0	0	0	—
	$0 < x \leq 0.05 \text{ mm}$	(0,1]	$d = \frac{x-0}{0.05-d}$	(敲击)—磨削
	$0.05 \text{ mm} < x \leq 0.1 \text{ mm}$	(1,2]	$d = \frac{x-0}{0.1-0.05} + 1$	冷压校正
	$0.1 \text{ mm} < x < 0.2 \text{ mm}$	(2,3]	$d = \frac{x-0}{0.2-0.1} + 2$	热烘顶法—缓冷—磨削
材料	$x \geq 0.2 \text{ mm}$	3	3	报废
	球墨铸铁	$f=1.2$	$f=1.2$	不适合激光熔覆
	中碳钢	$f=1.5$	$f=1.5$	—
	合金钢	$f=1.8$	$f=1.8$	硬度较高

2 曲轴再制造工艺方案的表示与优化

2.1 曲轴再制造工艺方案与或图

与或图是由“初始节点”、“与节点”、“或节点”和弧组成的一种拓扑图。一般,初始节点表示原始问题,通过分解或等价变换操作对当前节点进行扩展,为每个节点设置指向父节点的指针,直到不可分解为止。其中,“与节点”的指针增加弧线;“或节点”是只要解决任意一个子问题就可以解决父辈问题的节点;“与节点”是只有解决了所有子问题才能解决父辈问题的节点。

假设共有 5 个再制造工艺,则集合 $G = \{1,2,3,4,5\}$,按照工艺聚类原则分为 $\{1,2\}$ 和 $\{3,4,5\}$,其中前者优先于后者,则必须前者节点执行完后执行后者节点;对节点继续划分, $\{1\}$ 和 $\{2\}$ 为与的关系,且没有顺序要求, $\{3\}$ 和 $\{4,5\}$ 为与的关系,但是 3 的优先级高于 $\{4,5\}$; $\{4\}$ 和 $\{5\}$ 为或的关系。工艺路线包括 $(1,2,3,4)$ 和 $(1,2,3,5)$ 和 $(2,1,3,4)$ 和 $(2,1,3,5)$ 。

该工艺路线的与或图如图 2 所示。

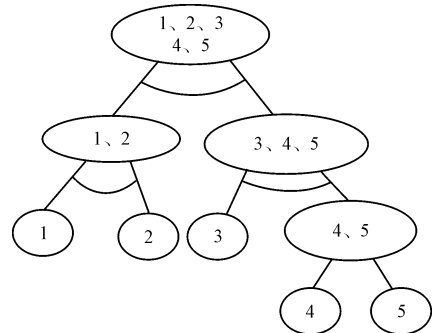


图 2 再制造工艺与或图

2.2 再制造工艺准则

通过文献资料查阅,本文将所有的曲轴再制造过程中所有可能用到的工艺进行了归纳。

典型再制造工艺如表 3 所示。

表 3 典型再制造工艺

编号	工艺名称	编号	工艺名称
1	清洗	11	精磨
2	检测	12	喷丸
3	磨削	13	应力测试
4	电镀	14	焊补
5	冷焊	15	缓冷
6	等离子喷涂	16	探伤
7	激光熔覆	17	敲击
8	氮化	18	冷压矫正
9	滚压	19	热烘顶法
10	抛光		

与制造工艺顺序类似,表 3 所示再制造工艺的先

后顺序需要满足一定的条件。因此,根据曲轴的制造工艺准则,给出了曲轴的再制造工艺准则^[14-15]:

(1) 由粗到细原则。废旧曲轴的再制造工艺应参照曲轴制造过程中由粗加工、半精加工到精加工的过程;

(2) 邻近原则。部分工艺要紧安排在其相关工艺之后;

(3) 聚类原则。相似工艺最好安排在一起。

根据上述准则,在曲轴再制造加工中,圆角的强化作为精细工艺最后进行,避免形变是其他工艺的基础,应安排在靠前位置。由于磨削不能消除深裂纹的影响,曲轴的焊补应该放在磨削之前;微裂纹和轻微磨损的表现相似,将其工艺安排在相邻位置或者依靠同种工艺解决。

2.3 再制造成本函数

因为失效特征的多样性和再制造工艺的不确定性导致了多种工艺路线。为确定其中效益最大化的路线,本研究从时间和经济成本出发,构建再制造成本函数。将再制造成本函数 F 分为时间成本函数 T 和工艺成本函数 W 。

如果再制造工艺中依次进行 n 项工艺,且 $1 < i < n$,则工艺切换函数 T 可定义为:

$$T = \alpha(t_{12} + t_{23} + \dots + t_{i,i+1} + \dots + t_{n-1,n}) \quad (1)$$

式中: α —时间成本系数; $t_{i,i+1}$ —第 i 项工艺切换到第 $i + 1$ 项工艺所需要的时间, s 。

工艺成本函数 W 定义为:

$$W = \beta(W_1 + W_2) \quad (2)$$

式中: W_1 —基础费用; W_2 —损伤造成的加工费用; β —工艺成本系数。

基础费用 W 和损伤造成的加工费用 W_2 为:

$$W_1 = \sum_{i=1}^n w_i \quad (3)$$

$$W_2 = \sum_{i=1}^n w_{2i}(s) \quad (4)$$

式中: w_i —第 i 项工艺的基础费用; w_{2i} —第 i 项工艺的加工费用; n —再制造工艺数量。

主要的再制造加工工艺如镀刷、焊补、车削和磨削等,这些工艺相对于时间的函数主要呈常数分布、正态分布等^[16]。考虑到再制造工艺类似,特征量相对于再制造工艺函数的分布函数类型也大致相同。

对于表2中清洗、检测、应力测试、缓冷、探伤等工艺,不会因为特征量值大小产生太多变化,其费用基本为常数,所以计入 W_1 中;对于其他工艺,其损伤特征量对费用 W_2 的影响,经济函数 $w_{2i}(s)$ 基于特征量的再

制造工艺费用,如表4所示。

表4 基于特征量的再制造工艺费用

工艺编号及名称	成本量分布	经济函数 $w_{2i}(s)$
工艺3 磨削	均值为 x_3 方差为 σ_3^2 的正态分布, x_3 可以是 a, b, c, d	$\delta_3 f e^{(x_3 s + 0.5 \sigma_3^2 s^2)}$
工艺4 电镀	均值为 x_4 方差为 σ_4^2 的正态分布, x_4 可以是 a	$\delta_4 f e^{(x_4 s + 0.5 \sigma_4^2 s^2)}$
工艺5 冷焊	均值为 x_5 方差为 σ_5^2 的正态分布, x_5 可以是 a	$\delta_5 f e^{(x_5 s + 0.5 \sigma_5^2 s^2)}$
工艺6 等离子喷涂	均值为 x_6 方差为 σ_6^2 的正态分布, x_6 可以是 a	$\delta_6 f e^{(x_6 s + 0.5 \sigma_6^2 s^2)}$
工艺7 激光熔覆	均值为 x_7 方差为 σ_7^2 的正态分布, x_7 可以是 a	$\delta_7 f e^{(x_7 s + 0.5 \sigma_7^2 s^2)}$
工艺8 氮化	均值为 x_8 方差为 σ_8^2 的正态分布, x_8 可以是 b	$\delta_8 f e^{(x_8 s + 0.5 \sigma_8^2 s^2)}$
工艺9 滚压	均值为 x_9 方差为 σ_9^2 的正态分布, x_9 可以是 b	$\delta_9 f e^{(x_9 s + 0.5 \sigma_9^2 s^2)}$
工艺10 抛光	均值为 x_{10} 方差为 σ_{10}^2 的正态分布, x_{10} 可以是 b	$\delta_{10} f e^{(x_{10} s + 0.5 \sigma_{10}^2 s^2)}$
工艺11 精磨	均值为 x_{11} 方差为 σ_{11}^2 的正态分布, x_{11} 可以是 b	$\delta_{11} f e^{(x_{11} s + 0.5 \sigma_{11}^2 s^2)}$
工艺12 喷丸	均值为 x_{12} 方差为 σ_{12}^2 的正态分布, x_{12} 可以是 b	$\delta_{12} f e^{(x_{12} s + 0.5 \sigma_{12}^2 s^2)}$
工艺14 焊补	均值为 x_{14} 方差为 σ_{14}^2 的正态分布, x_{14} 可以是 c	$\delta_{14} f e^{(x_{14} s + 0.5 \sigma_{14}^2 s^2)}$
工艺17 敲击	均值为 x_{17} 方差为 σ_{17}^2 的正态分布, x_{17} 可以是 d	$\delta_{17} f e^{(x_{17} s + 0.5 \sigma_{17}^2 s^2)}$
工艺18 冷压校正	均值为 x_{18} 方差为 σ_{18}^2 的正态分布, x_{18} 可以是 d	$\delta_{18} f e^{(x_{18} s + 0.5 \sigma_{18}^2 s^2)}$
工艺19 热烘顶法	均值为 x_{19} 方差为 σ_{19}^2 的正态分布, x_{19} 可以是 d	$\delta_{19} f e^{(x_{19} s + 0.5 \sigma_{19}^2 s^2)}$

2.4 多目标优化求解

当遇到多目标优化求解时,通常将其转化为单目标求解,而加权求和是经常采用的一种方法,转化后单目标函数为:

$$\begin{cases} \min F(s) \\ F(s) = \omega_1 T(s) + \omega_2 W(s) \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_1 —时间成本的权重; ω_2 —经济成本的权重。

对时间目标函数、经济目标函数数量纲不同进行无量纲化处理,即:

$$F(s) = \omega_1 \frac{T(s) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} + \omega_2 \frac{W(s) - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} \quad (6)$$

式中: T_{\min} —时间函数最小值; T_{\max} —时间函数最大值;

W_{min} —经济函数最小值; W_{max} —经济函数最大值。

将再制造工艺路线优化描述为对所有工艺流程路线进行计算,使得 $F(s)$ 值最小,最小值的路线为最优路线。

3 再制造工艺流程优化框架

曲轴再制造工艺流程优化旨在获得废旧曲轴最优的再制造工艺,以最大限度地节约再制造成本。本文通过故障树分析得出废弃曲轴失效原因和具体表现,提取特征量作为评判再制造工艺的标准;利用与或图得到所有可行的再制造工艺流程路线,根据再制造工艺准则剔除不合理路线,最后从经济成本和时间成本角度评估最优路线。

废旧曲轴工艺流程优化总体框架图如图 3 所示。

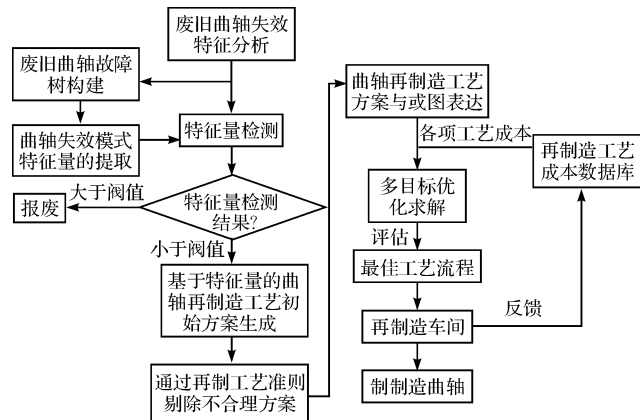


图 3 工艺流程优化总体框架图

4 应用研究

笔者以 DB-7020 帕萨特汽车发动机曲轴作为研究对象,对本文所提方法进行应用研究。

对曲轴进行检测,发现造成曲轴的主要失效模式有磨损、裂纹和变形。根据工艺优化方法,曲轴失效模式特征量为磨损量、圆角裂纹、轴颈裂纹、变形比例和材料。根据表 2 对其进行量化,并获得相应的再制造工艺。

特征量检测值及其量化值如表 5 所示。

表 5 特征量检测值及其量化值

失效模式特征	检测值	量化值	再制造工艺
磨损量(a)	0.73 mm ³	1.52	清洗—磨削—冷焊(等离子喷涂、激光熔覆)—磨削
圆角裂纹(b)	0.042	0.84	精磨—氮化—抛光或滚压—精磨
轴颈裂纹(c)	0.067	1.45	磨削—焊补—缓冷—探伤
变形比例(d)	0.024	0.48	(敲击)—磨削
材料(e)	QT800-2	1.2	不适合激光熔覆

由表 5 可获得曲轴的所有再制造工艺,并表示为

与或图。

曲轴再制造工艺与或图如图 4 所示。

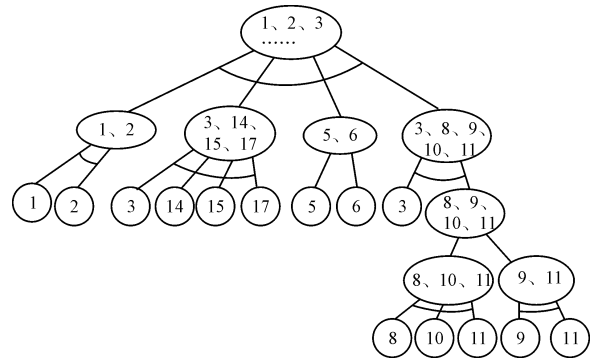


图 4 曲轴再制造工艺与或图

根据再制造工艺准则,分析与或图,可以得到再制造造线路图,如表 6 所示。

表 6 再制造造线路图

序号	路线
1	1 → 2 → 17 → 3 → 14 → 15 → 16 → 5 → 3 → 9 → 11
2	1 → 2 → 17 → 3 → 14 → 15 → 16 → 6 → 3 → 9 → 11
3	1 → 2 → 17 → 3 → 14 → 15 → 16 → 5 → 3 → 11 → 8 → 10
4	1 → 2 → 17 → 3 → 14 → 15 → 16 → 6 → 3 → 11 → 8 → 10

根据公式(1) 计算工艺切换函数值,其中:

$$T(1) = \alpha(t_{1,2} + t_{2,17} + t_{17,3} + t_{3,14} + t_{14,15} + t_{15,16} + t_{16,5} + t_{5,3} + t_{3,9} + t_{9,11}) = 0.015(50 + 100 + 50 + 100 + 100 + 50 + 50 + 100 + 50 + 50) = 10.5;$$

$$T(2) = 11.25; T(3) = 12; T(4) = 12.75.$$

根据公式(3) 计算可得:

$$W_1(1) = 40 + 50 + 20 + 30 + 30 + 20 + 50 + 40 + 30 + 20 + 30 = 360;$$

$$W_1(2) = 370; W_1(3) = 390; W_1(4) = 400.$$

曲轴再制造加工成本函数如表 7 所示。

表 7 再制造加工成本函数

工艺序号	再制造加工成本 W_2
工艺 17	$f = 1.2, \delta_{17} = 3, x_{17} = 4.8, \sigma_{17}^2 = 2$ 的正态分布
工艺 3	$f = 1.2, \delta_3 = 4, x_3 = 4.8, \sigma_3^2 = 2$ 的正态分布
工艺 14	$\delta_{14} = 5, x_{14} = 14.5, \sigma_{14}^2 = 2.5$ 的正态分布
工艺 5	$\delta_5 = 6, x_5 = 15.2, \sigma_5^2 = 2.5$ 的正态分布
工艺 6	$f = 1.2, \delta_6 = 8, x_6 = 15.2, \sigma_6^2 = 2$ 的正态分布
工艺 3	$f = 1.2, \delta_3 = 4, x_3 = 15.2, \sigma_{17}^2 = 2$ 的正态分布
工艺 9	$\delta_9 = 5, x_9 = 8.4, \sigma_9^2 = 2.5$ 的正态分布
工艺 11	$f = 1.2, \delta_{11} = 8, x_{11} = 8.4, \sigma_{11}^2 = 2.5$ 的正态分布
工艺 8	$f = 1.2, \delta_8 = 6, x_8 = 8.4, \sigma_8^2 = 2.5$ 的正态分布
工艺 10	$\delta_{10} = 5, x_{10} = 8.4, \sigma_{10}^2 = 2.5$ 的正态分布

依此计算 W_2 的期望:

$$W_2(1) = (17.28 + 23.04 + 72.5 + 91.2 + 72.96 + 42 + 80.64) = 399.62;$$

$$W_2(2) = 454.34; W_2(3) = 460.1; W_2(4) = 514.82。$$

根据公式(2),得:

$$W(1) = \beta[W_1(1) + W_2(1)] = 0.02(360 + 399.62) \approx 15.2; W(2) \approx 16.5; W(3) \approx 17; W(4) \approx 18.3。$$

根据公式(6),得:

$$F(1) = \omega_1 \frac{T(1) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} + \omega_2 \frac{W(1) - W_{\min}}{W_{\max} - W_{\min}} =$$

$$0.4 \frac{10.5 - 10.5}{12.75 - 10.5} + 0.6 \frac{15.2 - 15.2}{18.3 - 15.2} = 0;$$

$$F(2) = 0.385; F(3) = 0.615; F(4) = 1。$$

由此可见,第一种工艺流程方案路线为最佳路线。

5 结束语

本文从曲轴的工作状况、材料选择、失效原因和损伤程度等方面进行了研究,提出了一种基于失效模式的曲轴再制造工艺优化方法,解决了曲轴再制造过程中工艺路线复杂多样性问题,并克服了已有再制造工艺路线优化方法计算复杂的不足。具体特点如下:

(1)归纳影响曲轴再制造的失效模式特征。给出量化标准,根据失效模式特征及其特征量大小确定可行的再制造工艺路线解集;充分重用已有的工程经验知识,提高了曲轴再制造工艺规划的可行性;

(2)剔除不合理工艺路线。利用再制造工艺准则对解集进行简化,并表示为与或图;从经济、时间角度出发,构建工艺路线评价函数,并获得了成本最低的最优路线;

(3)本研究对废弃 DB-7020 帕萨特汽车曲轴进行了验证分析。证明了所提出的曲轴再制造工艺优化方法合理可行。该方法可为其他产品的再制造工艺路线规划提供思路。

参考文献(References):

- [1] 刘长赛,王玉江,盛忠起,等.曲轴维修与再制造现状与展望[J].材料导报,2018,32(1):141-148.
- [2] ABU M Y, NORIZAN N S, RAHMAN M S. Integration of Mahalanobis-Taguchi system and traditional cost accounting for remanufacturing crankshaft [J] **Materials Science and Engineering**,2018,342(012005):1-9.
- [3] WANG H, JIANG Z, ZHANG X, et al. A Fault Feature Characterization Based Method for Remanufacturing Process Planning Optimization[J]. **Journal of Cleaner Production**, 2017(161):708-719.
- [4] 向鹏,秦威.基于改进BP神经网络的再制造工艺方案选择研究[J].组合机床与自动化加工技术,2017(11):130-133.
- [5] 江亚.基于失效特征的废旧零部件再制造工艺路线优化研究[D].武汉:武汉科技大学机械工程学院,2016.
- [6] 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.
- [7] 刘行,张秀芬,朱明新.面向再制造的曲轴材料选择方法分析[J].机械设计与研究,2017,33(6):134-137,141.
- [8] 田丽.拖拉机曲轴出现裂纹和断裂的原因分析及检修[J].农机使用与维修,2015(2):68.
- [9] 李东.发动机曲轴变形的检验与修复[J].农机使用与维修,2014(8):74.
- [10] 牛红杰.铸坯毛刺去不净 FreeFta 软件故障树分析法[J].冶金设备,2018(4):31-35.
- [11] 董云庆,岳文,张巧丽,等.曲轴疲劳机理分析与圆角喷丸工艺技术研究[J].柴油机,2017,39(6):43-46.
- [12] 汪磊,王柯雄,李晨.曲轴圆角滚压的加工工艺[J].汽车工艺师,2017(8):56-57.
- [13] 康永,王坤.汽车发动机曲轴材料选择及工艺设计[J].重型汽车,2016(6):28-30.
- [14] 邢晨.发动机用曲轴加工工艺研究[J].中国新技术新产品,2017(12):56-57.
- [15] 陈晨.曲轴制造工艺的研究及应用[D].武汉:湖北工业大学机械工程学院,2017.
- [16] 杨保华,方志耕,张娜,等.基于多种不确定性参数分布的U-GERT网络模型及其应用研究[J].中国管理科学,2010,18(2):96-101.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

崔翔,张秀芬,薛俊芳.基于失效模式的曲轴再制造工艺优化方法研究[J].机电工程,2019,36(9):938-943.

CUI Xiang, ZHANG Xiu-fen, XUE Jun-fang. Remanufacturing process optimization method for crankshaft based on failure modes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(9):938-943.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>