

DOI: 10.3901/JME.2014.19.144

# 再制造曲轴径向跳动不确定性的内涵与测度<sup>\*</sup>

刘长义<sup>1,2</sup> 刘明周<sup>1</sup> 刘从虎<sup>1</sup> 葛茂根<sup>1</sup> 温海骏<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009;

2. 安徽工程大学管理工程学院 芜湖 241000)

**摘要:** 再制造曲轴径向跳动不确定性是影响再制造发动机质量稳定性和服役安全性的关键因素之一。从回收废旧曲轴失效形式不同、再制造修复工艺各异导致径向跳动存在差异的角度,分析再制造曲轴径向跳动不确定性的内涵;根据径向跳动不确定性产生的原因将其归结为随机不确定性和模糊不确定性;应用“随机熵”测度径向跳动的随机不确定性,运用“模糊熵”测度径向跳动的模糊不确定性,建立基于积空间  $P \times M$  的复合熵模型,量化描述曲轴径向跳动的整体不确定度;以某重型发动机再制造企业 WD615 系列 68 型曲轴再制造为例,对测度方法进行实例验证,结果证明了方法的有效性和实用性,研究内容为再制造不确定优化决策提供了理论依据。

**关键词:** 再制造; 不确定性; 径向跳动

**中图分类号:** TH161

## Connotation and Measurement of the Uncertainty of Radial Runout of Remanufactured Crankshaft

LIU Changyi<sup>1,2</sup> LIU Mingzhou<sup>1</sup> LIU Conghu<sup>1</sup> GE Maogen<sup>1</sup> WEN Haijun<sup>1</sup>

(1. Mechanical and Automotive Engineering Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009;

2. School of Management Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000)

**Abstract:** The uncertainty of radial runout of remanufactured crankshaft is a key factor affecting the quality and the safety of the remanufactured engine. First, the connotation of radial runout's uncertainty of the remanufactured crankshaft journal is analyzed, based on the failure mode of the recycled scrap crankshafts and the diversity of the uncertainty of radial runout which is caused by different remanufacturing repair technology. The uncertainty of the radial runout is classified into random uncertainty and fuzzy uncertainty based on the reasons of the uncertainty of radial runout. Then, “random entropy” is used to measure the random uncertainty and “fuzzy entropy” is applied to measure the fuzzy uncertainty of radial runout respectively. A composite entropy model based on product space  $P \times M$  is built to quantitatively describe the overall uncertainty of radial runout of crankshaft. Last, the verification of the measure methods is carried out with the WD615 series 68 crankshaft remanufacturing of a heavy duty engine remanufacturing enterprise as example, it is shown that the methods are effective and feasible. This research provides a theoretical basis for the decision-making of remanufacturing uncertainty optimization.

**Key words:** remanufacturing; uncertainty; runout

## 0 前言

全球资源的日益枯竭和生态环境的日趋恶化促使人类反思传统的工业发展模式,在竭力开发新能源、新物质的同时不断地探索实现可持续发展的途径<sup>[1]</sup>。再制造是建设资源节约型、环境友好型社会的主要手段之一。

再制造是将废旧产品制造成“与新品一样好”的再循环过程<sup>[2]</sup>。再制造使得废旧资源中蕴含的价值得到最大限度的开发和利用,可以缓解资源短缺与资源浪费之间的矛盾,减少大量失效、报废产品对环境的危害,是资源循环利用的最佳形式<sup>[3]</sup>。再制造工程,作为我国新世纪重点发展起来的新方向,高度契合了国家构建循环经济的战略需求,再制造的初步应用也已经取得了明显的节能减排效果<sup>[4]</sup>。

与此同时,由于诞生时间较短,多学科交叉的再制造工程仍然存在一些基础技术问题没有解决,对再制造不确定性的测度就是关键问题之一。通过

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2011CB013406)、教育部人文社会科学青年基金(12YJC630111)和安徽省自然科学基金(1308085MG109)资助项目。20131022 收到初稿, 20140707 收到修改稿

分析国内外与再制造相关文献, 我们发现“不确定性”是出现频次最高的一个词语, 其作为再制造的研究基础, 很多学者已经从不同的角度开展了研究。包括: 有关产品回收时间、数量和质量不确定性方面的研究, GALBRETH 等<sup>[5]</sup>在考虑回收废旧零件质量不确定性的情况下, 对最优回收数量进行了研究; KETZENBERG 等<sup>[6-7]</sup>从废旧零件回收、需求不确定性及产出不确定性出发, 对再制造系统的信息有效性进行了研究, 并将研究结果进一步运用到有容量限制的再制造回收系统中; JIN 等<sup>[8]</sup>对在回收品质量不确定性条件下的再制造系统最优控制策略进行了研究。有关再制造生产计划不确定性方面的研究, 苏春等<sup>[9]</sup>综合考虑了再制造生产计划中的各种不确定因素, 建立以利润最大化为优化目标的混合不确定性生产计划模型, 利用基于证据理论的不确定性规划方法, 对再制造生产进行决策分析; 李聪波等<sup>[10]</sup>提出了一种基于关键链的再制造系统不确定性生产调度方法。有关再制造加工路径不确定性方面的研究, 李成川等<sup>[11]</sup>首先分析了再制造工艺路线不确定性的影响参数, 阐述了四种典型再制造工艺路线, 然后建立基于图形评审技术的某废旧零部件再制造工艺路线模型。有关不确定环境下再制造生产过程质量控制机制方面的研究, ZHOU 等<sup>[12]</sup>基于模糊层次分析法提出了考虑废旧轮式装载机零部件可重用度的质量评价模型; LIU 等<sup>[13]</sup>研究了面向不确定性和质量目标的再制造零件公差分级选配方法等。

以上研究对不确定再制造生产决策问题做出了一定探索, 但鲜有文献对再制造不确定性的内涵与测度问题进行研究。

由于再制造过程自身的特殊性和复杂性, 其不确定性要高于传统制造过程, 而这些更高的不确定性最终影响着再制造产品的质量, 制约着再制造产品的服役安全性能。再制造的高不确定度, 正表明我们对再制造过程的某些环节认识得不够深入细致, 或没有做到准确定量。再制造不确定性分析就是要在这种情况下, 设法获得尽可能多的有用信息, 对再制造生产过程不确定性进行定量化描述, 并根据度量结果作出恰当的判断和再制造决策。因此, 对再制造不确定性科学问题的研究, 已成为再制造规模化 and 产业化亟待解决的理论基础之一。

发动机再制造是再制造产业的推进重点, 发展潜力巨大。曲轴是发动机承受冲击载荷、传递动力的关键零件, 其成本约占整机成本的 20%~30%。本课题以发动机曲轴作为研究对象, 径向跳动是衡量曲轴再制造质量的重要特征量。由于再制造过程的

特殊性及其复杂性, 导致曲轴径向跳动有着较大的不确定性, 而目前对径向跳动的研究主要集中在跳动检测方法 & 公差设计等方面<sup>[14]</sup>, 未见关于曲轴径向跳动不确定及其测度方面的研究。因此, 本文以再制造曲轴径向跳动不确定性测度作为研究内容, 通过分析再制造曲轴轴颈径向跳动不确定性的内涵, 建立了曲轴径向跳动的不确定度测度模型, 探索定量化描述再制造不确定性方法, 为再制造不确定优化决策提供理论支持。

## 1 再制造曲轴径向跳动不确定性内涵分析

### 1.1 曲轴径向跳动不确定性分析

曲轴轴颈径向跳动也称轴颈摆差, 它是反映各轴颈的圆度、同轴度、弯曲度等的综合形位公差, 同时也是衡量曲轴质量的重要特征量<sup>[15]</sup>。发动机运转过程中曲轴围绕着主轴颈的中心轴作定轴转动, 如果曲轴发生了弯曲变形, 实际转动轴线必然与理想轴线发生偏移。

曲轴径向跳动对发动机的传动性能、振动噪声、疲劳寿命和耐磨性能等方面都有着直接或者间接的影响。曲轴的制造、使用、再制造过程中均会产生轴颈的跳动以及使跳动量变大。它的存在会使得曲轴附加应力增加, 直接加剧主轴颈的磨损从而导致其寿命下降, 同时会使轴瓦加速磨损发热, 甚至烧熔。

由于再制造过程的特殊性和复杂性, 再制造曲轴径向跳动不确定性要远远高于新品。一方面, 曲轴再制造以废旧曲轴为原料, 其存在的尺寸超差、残余应力、内部裂纹和表面变形等一系列失效形式各有不同, 导致回收曲轴径向跳动等质量特征量具有较大的不确定性; 另一方面, 由于回收曲轴损伤程度不相同, 曲轴再制造要采用减级修复、电刷镀技术或热喷涂等不同修复工艺, 不同的修复技术使得轴颈径向跳动产生了更大的不确定性。而径向跳动不确定性是直接影响再制造发动机装配质量的关键因素之一。

### 1.2 不确定性测度思想

不确定性是事物或者过程确定性的缺乏, 曲轴再制造的不确定性意指曲轴再制造过程本身具一定的规律性、真理性或者完备性, 但同时又具有一定的不肯定性, 或从产生原因上理解为曲轴再制造过程中无序的、模糊的、或然的、近似的等属性。

由于受各种随机因素的影响, 回收的废旧曲轴

径向跳动大小及状态的变化,均具有一定的不确定性,同时,对其可再制造性分析过程又不可避免地受人们认识水平的影响,且这些影响也具有不确定性。这里将曲轴径向跳动不确定性归结为两类。

(1) 随机不确定性。对于径向跳动的变化,由于无法控制其发生的条件,一些偶然的和不可控因素使得发展的结果不可能准确地预先知道,这种由于条件的不确定和因果关系不明确而形成的后果的不确定性称为随机不确定性。

(2) 模糊不确定性。模糊性是事件本身有多大规模属于某一类别的度量,属于事物内在的不确定性。回收的废旧曲轴首先要进行弯曲、裂纹、磨损、腐蚀等检测,虽然有的可以得到确切的数值,但“严重的磨损”、“过大的跳动”、“变形不大”等因界限不明确而难以确定其外延,即使事物本身是确定的,对其认识的不确定性也可能依然存在。

## 2 再制造曲轴径向跳动不确定性测度模型

### 2.1 不确定性测度尺度选择

给不确定性一个定量测度是不确定系统研究的基础,其实质就是要对系统不确定的程度进行描述和定量计算,不确定度越大说明系统越无序。本文以“熵”作为不确定性度量的尺度,构造尺度的数学空间及量化模型。德国物理学家 CLAUSIUS 首先把熵引入到热力学。熵作为状态函数,它的含义十分丰富,在热力学中它是不可用能的度量;在统计物理中它是系统微观态数目的度量;在信息论中它是随机事件不确定程度的度量。

信息熵是熵概念的泛化,在各个学科领域中存在着大量的不同类别、不同层次的随机事件的集合,每一种随机事件集合包含的不确定性和无序性都具有相应的概率分布特征。熵是关于概率分布的函数,因此,所有这些不确定性和无序性都可以不受学科内容的限制,用熵这个统一的概念来度量。度量的目的一方面是认清系统内部不确定的状态或者规律;另一方面是为了使高度有序的主体(控制者)向有序度低的被控对象系统输入信息,减少其熵与不确定性,提高系统的有序度及效率<sup>[16]</sup>。

### 2.2 径向跳动不确定性测度模型

#### 2.2.1 径向跳动随机不确定性测度

定义 1 设有径向跳动测量试验  $E = \langle H, P \rangle$ , 把测量值可能出现的状态定义为基本事件  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ ,  $p(X_i) = p_i$  ( $0 \leq p_i \leq 1$ ,

$i = 1, 2, \dots, n$ ) 为状态概率,  $\sum_{i=1}^n p_i = 1$ 。则径向跳动随机不确定性定义为

$$H_p(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (1)$$

式中  $H_p$ ——试验  $E$  的信息含量或称熵值。

$H_p$  刻画出径向跳动随机不确定性的大小,径向跳动不确定性越大,随机熵也越大。

引理 1  $H_p(p_1, p_2, \dots, p_n) = H_p(p_{k_1}, p_{k_2}, \dots, p_{k_n})$ , 其中,  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  为  $(1, 2, \dots, n)$  的任意一个排列。

引理 1 表明径向跳动不确定度只与测量值出现状态的总体结构有关,与状态的具体取值无关,与个别符号的概率没有直接关系。

引理 2 对于独立的随机事件  $X$  和  $Y$ , 有  $H_p(XY) = H_p(X) + H_p(Y)$ 。

引理 2 表明两个曲轴径向跳动出现状态相对独立,则其联合不确定度即等于各自不确定度之和。

引理 3  $H_p(X) = H_p(p_1, p_2, \dots, p_n) \leq \log n$ , 其中,等号成立当且仅当  $p_k = 1/n$ ,  $k = 1, 2, \dots, n$ 。

引理 3 表明径向跳动状态等概率出现时具有最大的不确定度。

由于曲轴再制造过程的特殊性及其复杂性,无法准确确定测量变量的分布函数,所以,本文根据以上随机不确定度的定义、引理及再制造过程监测数据给出一种等间距算法。

假设有  $m$  缸发动机曲轴,样本量为  $n$  个。设  $x(t)$  表示测量的内容属性,  $x(t)_{ij}$  表示第  $t$  个内容属性第  $i$  个观测点的第  $j$  个样本值。

(1) 根据监测数据计算所有内容属性的各个观测点样本值的平均值

$$E(t)_i = \frac{\sum_{j=1}^n x(t)_{ij}}{n} \quad (2)$$

(2) 计算样本数据与其平均值之差  $x(t)_{ij} - E(t)_i$ 。

(3) 根据所得差值范围,以等差为原则,将差值分成  $k$  个状态,计算每种状态出现的频率、概率和熵

$$H_{p_i}(X) = -\sum_{r=1}^k p_{i-r} \log p_{i-r} \quad (3)$$

式中  $p_{i-r} = \frac{\eta_{i-r}}{\eta_i}$ 。

$k$  的数值代表着基本事件的总数,应按照变量分布特征及有关客观因素事先定出基本事件数及各种事件的划分,才是较合理的。但是,实际工作中

常面对的只是一系列数据,一般只能按照经验划分,本文根据数理统计学中对分组数的研究给出确定  $k$  的公式

$$k = 1.87(n-1)^{2/5} \quad (4)$$

(4) 求出所有内容属性的熵之和即为总熵值。

$$H_p(X) = \sum_i H_{p_i}(X) \quad (5)$$

### 2.2.2 径向跳动模糊不确定性测度

模糊不确定的测度应考虑以下基本要求<sup>[17]</sup>。

(1) 分明集的模糊不确定性为 0。

(2)  $[1/2]$  是隶属性最难确认的模糊集,  $[1/2]$  的模糊不确定性应最大。

(3) 模糊集  $U$  与其余集  $U^c$  距  $[1/2]$  的远近程度一样, 所以  $U$  与  $U^c$  的模糊不确定性应一样。

(4)  $U$  越接近  $[1/2]$ ,  $U$  的模糊不确定性越大;  $U$  越远离  $[1/2]$ ,  $U$  的模糊不确定性越小。

根据以上要求, 给出径向跳动模糊不确定性度量。

定义 2  $P$  为径向跳动的某一模糊特征, 测量值  $x_i$  对特征  $P$  的拥有程度为  $A_i$ , 即隶属度函数, 记为  $U = \sum_{i=1}^n A_i/x_i$ , 则径向跳动由于可能性分布而具有的模糊不确定度定义为

$$H_f(U) = -K \sum_{i=1}^n [A_i \log A_i + (1 - A_i) \log(1 - A_i)] \quad (6)$$

式中  $K$  ——归一化常数。

### 2.2.3 径向跳动复合不确定性测度

径向跳动的随机不确定度和模糊不确定度是由两种截然不同的机理引起的, 分别取值于概率空间和模糊空间这两种无关的空间, 为统一考虑两者引起的系统总不确定度, 应建立如下映射,  $f: P \times M \rightarrow [0, 1]$ , 将系统总的不确定度建立在由  $P$  和  $M$  共同确定的积空间  $P \times M$  中。用复合不确定度表征径向跳动的整体不确定性, 当随机性(模糊性)消失时, 整体不确定性要退化为普通的模糊不确定性(随机不确定性)。考虑到这个基本要求, 给出径向跳动复合不确定度的度量

$$H_h(U, P) = -\sum_{i=1}^n (S_i \lg S_i + Q_i \lg Q_i) \quad (7)$$

式中  $S_i(p_i, A_i) = p_i A_i$ ;

$Q_i(p_i, A_i) = p_i(1 - A_i)$ 。

可以证明,  $H_h(U, P)$  具有以下几条性质。

性质 1 当且仅当所有径向跳动模糊隶属度  $A_i = 0.5$ , 并且状态出现概率  $p_i = 1/n$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 时,  $H_h(U, P)$  取得最大值。

性质 2 当且仅当所有径向跳动模糊隶属度

$A_i = 1$  或者 0, 并且某个状态出现概率  $p_i = 1$ , 而其他的状态出现概率  $p_j = 0$  ( $j \neq i, i = 1, 2, \dots, n$ ) 时,  $H_h(U, P) = 0$ 。

性质 3  $H_h(U, P)$  一定大于等于  $H_h(U^*, P)$ , 这里  $U^*$  是  $U$  的峰化模糊集, 即若  $A_i \leq 0.5$  时,  $0 \leq A_i^* \leq A_i \leq 0.5$ ;  $0.5 \leq A_i \leq 1.0$  时,  $0.5 \leq A_i \leq A_i^* \leq 1.0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。

## 3 实例分析

本文以某重型发动机再制造企业 WD615.68 系列曲轴再制造为例, 对提出的轴颈径向跳动不确定性测度方法及其应用进行实例分析。图 1 为 68 型曲轴主轴颈示意图。

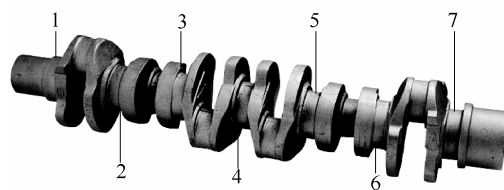


图 1 68 型曲轴主轴颈示意图

曲轴是发动机承受冲击载荷、传递动力的关键部件, 因工作环境恶劣, 受力复杂, 曲轴易产生弯曲和扭弯变形, 使轴颈产生不均匀磨损。另外, 由于润滑油中杂质影响及润滑故障, 曲轴轴颈处也会产生擦伤、划痕、磨料磨损及黏着磨损, 轴颈磨损会产生失圆度和锥形度。

目前, 减级修复仍然是曲轴再制造的重要手段, 可以按照磨损情况加大一级或者两级来修磨曲轴, 磨削机械加工后加厚轴瓦的方法对曲轴进行再制造。也可以选用电刷镀、热喷涂或埋弧焊等表面强化工艺将曲轴尺寸恢复到粗加工尺寸, 再进行磨削处理。

再制造工艺选择, 是发动机曲轴再制造加工过程中遇到的一个难题, 课题组在经过企业长期调研和试验的基础上, 发现可以结合对轴颈质量指标不确定性的度量, 评价不同再制造方式的有效性和再制造产品的质量稳定性。

实证企业曲轴再制造主要采用图 2 所示两种工艺流程。

收集整理采用两种不同再制造工艺进行再制造加工后的曲轴径向跳动数据, 各 40 批次。对于六缸大功率发动机而言, 要重点控制 3、4、5 主轴颈的径向跳动, 以免在发动机运行时发生曲轴的“拉瓦”或者“抱瓦”等质量事故。表 1 所列为两种再制造工艺 3、4、5 主轴颈径向跳动抽样测试数据。

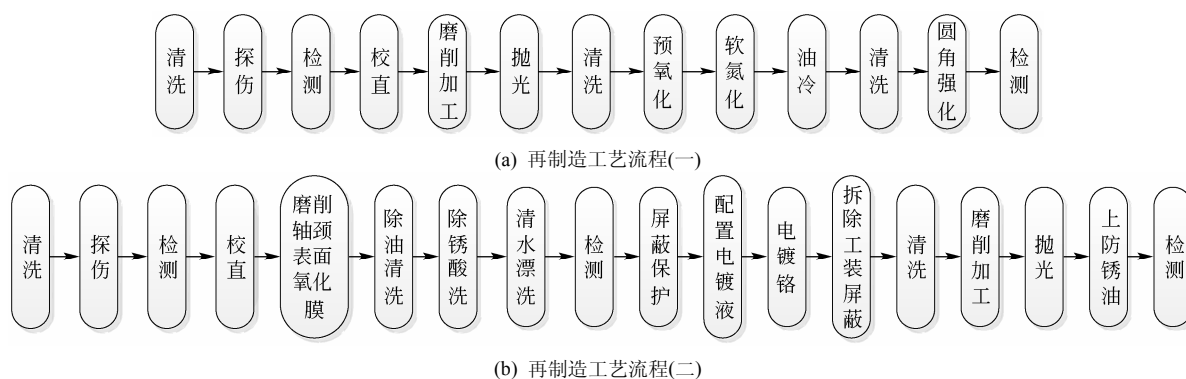


图 2 68 型曲轴再制造工艺流程图

根据表 1, 计算可得各轴颈跳动值的期望为  $[0.032, 0.037, 0.032]$  和  $[0.021, 0.026, 0.025]$ , 将各轴颈的跳动数据与相应的跳动期望比较求出差

值, 考虑差值的取值范围及样本容量, 利用公式(5), 将差值等分为 7 份, 从而得到 7 个状态, 统计每个状态出现的频率, 计算各轴颈的状态概率见表 2。

表 1 再制造曲轴主轴颈径向跳动不确定度抽样测试数据

mm

工艺一				工艺二			
批次 序列	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	批次 序列	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
B1	0.028	0.032	0.029	B21	0.029	0.033	0.034
B2	0.017	0.025	0.015	B22	0.062	0.072	0.071
B3	0.025	0.018	0.019	B23	0.034	0.031	0.042
B4	0.017	0.028	0.026	B24	0.044	0.052	0.031
B5	0.025	0.033	0.028	B25	0.033	0.052	0.057
B6	0.033	0.008	0.013	B26	0.043	0.065	0.034
B7	0.035	0.025	0.023	B27	0.015	0.043	0.036
B8	0.013	0.035	0.023	B28	0.035	0.036	0.035
B9	0.019	0.015	0.021	B29	0.018	0.036	0.026
B10	0.025	0.051	0.021	B30	0.025	0.025	0.025
B11	0.031	0.021	0.028	B31	0.026	0.031	0.021
B12	0.035	0.024	0.011	B32	0.023	0.023	0.023
B13	0.042	0.033	0.025	B33	0.027	0.028	0.026
B14	0.058	0.089	0.049	B34	0.036	0.032	0.019
B15	0.039	0.039	0.038	B35	0.024	0.036	0.022
B16	0.051	0.051	0.051	B36	0.031	0.032	0.041
B17	0.032	0.033	0.034	B37	0.081	0.095	0.081
B18	0.012	0.032	0.011	B38	0.031	0.043	0.029
B19	0.049	0.048	0.048	B39	0.014	0.019	0.021
B20	0.012	0.021	0.033	B40	0.033	0.044	0.041
P1	0.021	0.034	0.028	P21	0.018	0.029	0.018
P2	0.008	0.010	0.013	P22	0.015	0.025	0.017
P3	0.022	0.023	0.024	P23	0.021	0.031	0.039
P4	0.014	0.010	0.008	P24	0.024	0.025	0.033
P5	0.015	0.027	0.021	P25	0.017	0.025	0.032
P6	0.024	0.015	0.015	P26	0.009	0.038	0.027
P7	0.019	0.022	0.033	P27	0.015	0.015	0.015
P8	0.020	0.022	0.022	P28	0.032	0.036	0.021
P9	0.014	0.015	0.016	P29	0.019	0.026	0.025
P10	0.009	0.009	0.009	P30	0.018	0.022	0.023
P11	0.017	0.021	0.026	P31	0.030	0.031	0.033
P12	0.032	0.035	0.019	P32	0.022	0.023	0.023
P13	0.045	0.044	0.031	P33	0.015	0.017	0.016
P14	0.026	0.031	0.044	P34	0.035	0.029	0.020
P15	0.007	0.011	0.015	P35	0.034	0.034	0.034
P16	0.020	0.047	0.049	P36	0.013	0.025	0.016
P17	0.005	0.012	0.014	P37	0.021	0.048	0.049
P18	0.066	0.081	0.083	P38	0.021	0.042	0.033
P19	0.013	0.014	0.016	P39	0.014	0.018	0.021
P20	0.005	0.006	0.005	P40	0.031	0.024	0.029

利用式(1)计算得到由随机熵表示的径向跳动随机不确定度。计算中规定,  $\log$  以 2 为底,  $0\log_2 0 = 0$ 。以“径向跳动小”作为模糊特征, 请生产现场的 119 名专家分别给出“径向跳动小”的跳动量区间段, 分别统计每个跳动量的隶属度, 可作出模糊集  $U = \text{“径向跳动小”}$  的隶属函数曲线。通过分析比较, 发现其与 2 次抛物型分布的偏小型十分相似。结合径向跳动公差, 确定  $a = 0.02$ ,  $b = 0.12$ , 得到主轴颈径向跳动对于“径向跳动小”这一模糊特征的隶属函数。

$$A_i(x) = \begin{cases} 1 & x < 0.02 \\ [10(0.12 - x)]^2 & 0.02 \leq x \leq 0.12 \\ 0 & 0.12 < x \end{cases}$$

利用式(6), 取  $K = 1/40$ , 计算得到由模糊熵表示的径向跳动模糊不确定度。

表 2 再制造曲轴主轴颈径向跳动状态概率

状态 序列	工艺一			工艺二		
	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
1	0.225	0.100	0.250	0.200	0.250	0.300
2	0.325	0.375	0.350	0.525	0.375	0.350
3	0.250	0.300	0.225	0.125	0.250	0.225
4	0.125	0.125	0.100	0.100	0.100	0.100
5	0.025	0.025	0.025	0.025	0.000	0.000
6	0.025	0.025	0.025	0.000	0.000	0.000
7	0.025	0.050	0.025	0.025	0.025	0.025

复合不确定度确定的首要问题是要给出各个状态的隶属度, 这里用各状态径向跳动中位数对应

的隶属度来定义状态隶属度。由于中位数不受分布数列的极大或极小值影响,从而对各个状态的分布数列具有一定的代表性。表 3 给出各个状态的隶属度。

表 3 再制造曲轴主轴颈径向跳动状态隶属度

状态 序列	工艺一			工艺二		
	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
2	0.883 6	0.846 4	0.883 6	1.000 0	0.940 9	0.970 2
3	0.731 0	0.883 6	0.722 5	0.883 6	0.765 6	0.756 9
4	0.577 6	0.705 6	0.511 2	0.756 9	0.555 0	0.540 2
5	0.384 4	0.302 5	0.396 9	0.562 5	—	—
6	0.336 4	0.230 4	0.240 1	—	—	—
7	0.152 1	0.078 4	0.152 1	0.291 6	0.152 1	0.136 9

结合表 2 和表 3 的数据,利用式(7)可以计算得到径向跳动的复合不确定度,与随机不确定度和模糊不确定度的数值度量结果共同列于表 4,为更加形象、直观地表达度量结果,绘制结果的柱形分析图,见图 3。

表 4 再制造曲轴主轴颈径向跳动随机不确定度、模糊不确定度及复合不确定度 bit

不确定度	工艺一			工艺二		
	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>	3 <sup>#</sup>	4 <sup>#</sup>	5 <sup>#</sup>
随机	2.285 3	2.241 1	2.245 6	1.925 7	1.995 9	2.000 6
模糊	0.573 1	0.654 0	0.372 9	0.221 9	0.430 8	0.364 1
复合	2.849 2	2.799 5	2.778 4	2.117 1	2.428 2	2.362 3

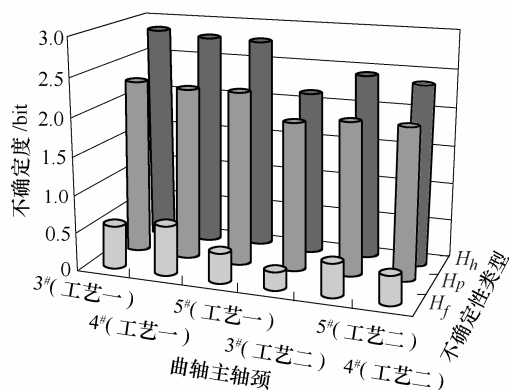


图 3 再制造曲轴主轴颈径向跳动不确定度柱形图

由曲轴径向跳动不确定性测度模型的性质可知,随机不确定度的大小取决于测量值出现状态的总体结构,各个状态以等概率出现时具有最大的随机不确定度。随机不确定度较小,意味着径向跳动会集中出现在某几个状态区间内,从而表明径向跳动作为质量特征量,其值的出现具有一定的稳定性。径向跳动的模糊不确定度在隶属度为 0.5 时最大,模糊集越接近 0.5,其模糊不确定度越大。按照 2 次抛物型分布的偏小型隶属函数计算可知,隶属度为 0.5 时的径向跳动值大约为 0.05 mm,径向跳动

值比 0.05 小得越多,其模糊不确定度越小,因此,模糊不确定度可以表征该质量特征量的优越性。

根据现场经验,径向跳动的随机不确定度临界值为 2.5 bit,模糊不确定度为 0.8 bit,结合表 4 数据可知,采用两种再制造工艺进行曲轴再制造后,径向跳动的随机不确定性和模糊不确定性均下降到了临界值以内,采用工艺二主轴颈径向跳动的复合熵比采用工艺一分别低 25.7%,13.3%和 15.0%,表明两种再制造工艺均有效,但工艺二相比工艺一更为优越。

以再制造质量特征量的随机、模糊不确定度作为再制造方式评价指标,可以衡量企业采取再制造方式的有效性和再制造产品的质量稳定性,为再制造工艺的选择提供一个新思路和方法。

## 4 结论

(1) 在分析再制造曲轴径向跳动不确定性的内涵基础上,将曲轴径向跳动不确定性归结为随机不确定性和模糊不确定性。

(2) 建立了基于信息熵的径向跳动随机不确定性与模糊不确定性测度模型,利用复合熵模型度量由随机性和模糊性共同引起的整体不确定性,以实现再制造质量属性不确定性的定量描述。

(3) 通过对某企业不同曲轴再制造工艺主轴颈径向跳动不确定度的比较计算,为再制造工艺选择提供了新的思路与方法。

## 参 考 文 献

- [1] SUTHERLAND J W, ADLER D P, HAAPALA K R, et al. A comparison of manufacturing and remanufacturing energy intensities with application to diesel engine production[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 5-8.
- [2] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.
- [3] XU Binshi. Remanufacture engineering and its development in China [J]. Chinese Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6.
- [4] 徐滨士,董世运,朱胜,等. 再制造成形技术发展及展望[J]. 机械工程学报, 2012, 48(15): 96-105.
- [5] XU Binshi, DONG Shiyun, ZHU Sheng, et al. Prospects and developing of remanufacture forming technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(15): 96-105.
- [6] WESTKAMPER E, ARNDT G. Life cycle management and assessment: Approaches and visions towards

- sustainable manufacturing[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2000, 49(2): 501-526.
- [5] GALBRETH M R, BLACKBURN J D. Optimal acquisition quantities in remanufacturing with condition uncertainty[J]. Production and Operations Management, 2010, 19(1): 61-69.
- [6] KETZENBERG M, LAAN V D, TEUNTER R H. Value of information in closed loop supply chains[J]. Production & Operations Management, 2006, 15(3): 393-406.
- [7] KETZENBERG M. The value of information in a capacitated closed loop supply chain[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(2): 491-503.
- [8] JIN Xiaoning, NI Jun, KOREN Y. Optimal control of reassembly with variable quality returns in a product remanufacturing system[J]. Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 25-28.
- [9] 苏春, 沙洋娟. 基于混合不确定性和证据推理的再制造生产计划[J]. 东南大学学报, 2010, 40(4): 712-716.
- SU Chun, SHA Yangjuan. Remanufacturing production planning based on mixed-uncertainty and evidence theory[J]. Journal of Southeast University, 2010, 40(4): 712-716.
- [10] 李聪波, 刘飞, 易茜, 等. 基于关键链的再制造系统不确定性生产调度方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 121-126.
- LI Congbo, LIU Fei, YI Qian, et al. A critical chain based uncertain production scheduling method for remanufacturing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 121-126.
- [11] 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.
- LI Chengchuan, LI Congbo, CAO Huajun, et al. Uncertain remanufacturing process routings model for used components based on GERT network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 298-305.
- [12] ZHOU Jun, HUANG Panling, ZHANG Yaguang, et al. A quality evaluation model of reuse parts and its management system development for end-of-life wheel loaders[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 35(10): 239-249.
- [13] LIU Mingzhou, LIU Conghu, XING Lingling, et al. Study on a tolerance grading allocation method under uncertainty and quality oriented for remanufactured parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 20: 1-8.
- [14] 邹林峰, 廖日东, 向建华. 基于润滑的曲轴径向圆跳动公差设计[J]. 内燃机学报, 2012, 30(5): 474-479.
- ZOU Linfeng, LIAO Ridong, XIANG Jianhua. Design of tolerance of radial circular run-out on crankshaft considering bearings' lubrication performance[J]. transactions of CSICE, 2012, 30(5): 474-479.
- [15] 李丽云. 汽车曲轴缺陷与成形因素的分析及优化[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 138-140.
- LI Liyun. Analysis and optimization on defects and forming factors of automotive crankshaft[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(5): 138-140.
- [16] 格雷. 熵与信息论[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2012.
- GRAY R M. Entropy and information theory[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012.
- [17] 张继国, SINGH V P. 信息熵——理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- ZHANG Jiguo, SINGH V P. Information entropy——theory and application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.
- 
- 作者简介: 刘长义(通信作者), 女, 1977 年出生, 博士研究生, 副教授。主要研究方向为制造系统工程。  
E-mail: pipiflora@163.com
- 刘明周, 男, 1968 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为制造过程监测与控制、制造系统建模与仿真和 CIMS 等。  
E-mail: liumingzhou0551@163.com