

DOI: 10.3901/JME.2022.19.221

尺寸精度约束下再制造产品零部件选配 优化方法研究*

邢世雄^{1,2} 江志刚³ 朱硕⁴ 张华⁵

- (1. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081;
2. 黄冈师范学院机电与汽车工程学院 黄州 438000;
3. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室 武汉 430081;
4. 武汉科技大学精密制造研究院 武汉 430081;
5. 武汉科技大学绿色制造工程研究院 武汉 430081)

摘要: 合理选配再利用件、再制造件、新件等不同来源形式的零部件,是保障再制造产品质量与成本的关键环节。针对待选配零部件尺寸公差对再制造产品质量损失、成本的双重影响特征,通过设计零部件尺寸公差的精度分级机制,实现再制造产品各零部件尺寸精度不低于原新品,获取可行选配方案集;进一步以产品尺寸链精度不低于原新品为约束,建立关于零部件尺寸公差的再制造产品尺寸链精度损失函数、再制造产品总成本函数,构建面向再制造产品成本与质量协同优化的多目标选配优化模型,采用协同进化算法获取最终的选配优化方案,实现在全面提升再制造产品及其零部件尺寸精度的同时,降低产品成本。最后以某机床的再制造进给箱零部件优化选配为例,验证了所提出方法能够有效解决零部件来源形式多、尺寸精度与成本差异性大环境下,以不低于新产品尺寸精度为约束的再制造零部件选配优化问题。

关键词: 再制造; 零部件选配; 精度分级; 尺寸公差; 多目标优化

中图分类号: TH161

Research on Optimization Method for Parts Selection of Remanufactured Products Under Dimensional Accuracy Constraints

XING Shixiong^{1,2} JIANG Zhigang³ ZHU Shuo⁴ ZHANG Hua⁵

- (1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Its Control of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;
2. School of Electromechanical and Automotive Engineering, Huanggang Normal University, Huangzhou 438000;
3. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;
4. Institute of Precision Manufacturing, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;
5. Research Institute of Green Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract: The rational selection of components from different sources such as reused, remanufactured and new parts is the key stage to ensure the quality and cost of remanufactured products. Aiming at the double influence of dimensional tolerance of parts to be selected on the quality loss and cost of remanufactured products, by designing the accuracy grading mechanism of dimensional tolerance of parts, the dimensional accuracy of each part of remanufactured products is not lower than that of the original new product,

* 国家重点研发计划(2018YFB2002103)和国家自然科学基金(52075396, 51905392)资助项目。20211126收到初稿, 20220511收到修改稿

and the set of feasible matching schemes is obtained. Further, the dimension chain accuracy loss function and the total cost function of remanufactured products are established with the restriction that the precision of the product dimension chain is not less than that of the original product. A multi-objective optimization model for co-optimization of cost and quality of remanufactured products is constructed. The final optimization scheme is obtained by Enhanced Cooperative Co-evolutionary algorithm(ECCA), which can improve the dimension accuracy of remanufactured products and their parts in an all-round way while reducing the product cost. Finally, an example is taken to illustrate the optimization of the components of the remanufacture feed box of a machine tool. The results show that the proposed method can effectively solve the problem of remanufactured parts selection and assembly optimization under the constraint of not less than the dimensional accuracy of new products in the environment of multiple parts sources and large differences in dimensional accuracy and cost.

Key words: remanufacturing; parts selection; accuracy classification; dimensional tolerance; multi-objective optimization

0 前言

再制造是对废旧产品进行专业化恢复或升级改造,使其质量不低于原新品的过程^[1]。其中,实现废旧产品零部件尺寸精度的恢复或升级,是废旧产品再制造的一项重要内容。由于再制造产品通常包含再制造件、再利用件、新件多种不同来源形式的零部件,尺寸精度与成本差异性大,开展再制造产品零部件选配,以不低于原新品的尺寸精度为约束,在提升再制造产品尺寸精度的同时,尽可能降低再制造产品成本,已成为保障再制造产品质量与成本的有效途径。

当前,相关研究主要集中于在装配过程中实施再制造产品的零部件选配。如文献[2]考虑再制造产品零部件选配对装配精度和装配成本等的综合影响,提出了一种面向再制造装配过程的零部件选配优化方法。文献[3]研究了再制造装配过程中零部件的分组选配问题,建立了再制造公差优化分配函数,提出了一种寻找装配间隙最小化的选配模型,并利用遗传算法寻找最优的选配方案组合。文献[4]以进给箱活塞连杆再制造装配过程为对象,提出了一种基于质量分级的分组优化选配方法。文献[5]针对工程机械再制造装配效率低、精度差以及不匹配零件较多等问题,提出了一种复杂产品再制造装配的零部件选配优化方法,并通过蚁群算法进行求解。文献[6]研究了再制造装配过程中,时间、数量和质量等的不确定性,基于客户需求对再制造产品质量等级进行分类,并建立了面向再制造产品零部件选配的马尔可夫决策过程。文献[7]研究了再制造装配过程中零部件选配的公差分配与成本之间的关系,建立了产品再制造公差分配与再制造成本的数学模型。文献[8]在分析复杂机械产品装配特点的基础上,提出了不同质量等级再制造产品的装配过程控

制方法,建立了再制造零部件选配方案优化模型,并利用遗传算法对模型进行求解。

上述研究主要以新品装配间隙作为再制造产品装配质量的最优指标,通过各零部件的公差分配,实现再制造产品装配成本与尺寸精度的协同优化。为面向尺寸精度与成本协同优化的再制造零部件选配提供了很好的方法支持。然而,由于没有考虑以不低于新品尺寸精度为约束,在成本指标的影响下,往往使得选配得到的再制造产品尺寸精度“不如”新品;另一方面,受产品尺寸链中增、减环的影响,随着产品尺寸精度的提升,可能会出现部分零部件尺寸精度下降的情况,造成再制造产品零部件相对于原新品而言,存在零部件“以次换好”的问题。此外,由于再制造以废旧产品零部件为毛坯,毛坯的尺寸精度损失情况,以及是否存在精度的再制造升级目标,决定了再制造产品零部件来源形式、尺寸精度与成本的选配方案。而装配环节不考虑废旧产品本身的尺寸损伤情况、零部件来源等问题,使得针对装配过程的再制造零部件选配对于产品质量与成本的控制能力有限。

鉴于此,部分学者考虑在废旧产品拆解检测后的再制造方案设计阶段,考虑再制造产品零部件的选配问题,如文献[9]以废旧机械装备零部件重用组合寿命均衡性及成本为优化目标,构建了一种面向废旧机械装备再设计的零部件多目标选配优化模型。文献[10]针对废旧零部件重用策略的不确定性及其零件间耦合关系的复杂性,提出一种基于非合作博弈的废旧机械装备零部件重组策略研究方法,以不同重组策略的成本与寿命均衡性作为非合作博弈双方,得到最优选配方案。以上研究拓展了再制造零部件选配的研究边界,即再制造零部件选配应基于废旧产品零部件的损伤特征,以不低于原新品的质量为约束,通过对再制造件、再利用件、新件等不同来源形式的零部件进行选配,实现再制造产品

质量与成本等的协同优化。然而, 当前关于尺寸精度约束下的再制造产品零部件选配, 仍是有待探究的问题。

为此,本文在总结现有研究的基础上,在再制造方案设计阶段考虑再制造产品零部件选配问题,为使再制造产品及其零部件的尺寸精度不低于原新品,基于废旧产品零部件尺寸精度损失情况,并针对多来源形式的待选配零部件尺寸公差对再制造产品质量损失、成本的双重影响特征,提出一种尺寸精度约束下再制造产品零部件的选配优化方法。

1 再制造产品零部件选配过程框架

再制造产品零部件选配是以待选零部件尺寸精度不低于同类新件尺寸精度为前提,在设计阶段对再制造产品零部件进行选配。通过分析并获取再制造产品零部件尺寸精度损失、待选配零部件尺寸公差以及再利用件和新件尺寸公差等信息的基础上,以再制造产品零部件精度不低于原新品尺寸精度为下限,再制造企业加工能力约束为上限,形成再制造零部件尺寸提升约束区间,并建立再制造产品零部件选配尺寸链精度损失最小、再制造产品零部件选配总成本之间的目标函数,从而构建再制造产品零部件选配多目标优化模型。再制造产品零部件选配过程框架如图 1 所示。

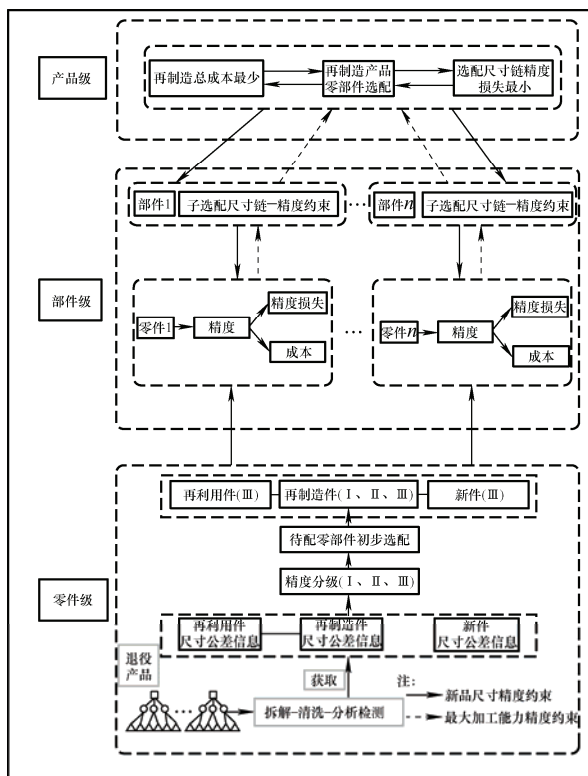


图1 基于尺寸精度约束的再制造产品零部件选配过程框架

再制造产品零部件选配主要包含两大过程。

(1) 由于再制造产品零部件由新件、再制造件、再利用件等不同来源形式组合而成。通过综合分析待选零部件的尺寸精度状态信息,引入精度分级机制,以新件尺寸精度三级为最低标准,将待选零部件尺寸精度与同类新件比较,根据其是否存在精度的再制造升级目标,制定再制造产品零部件的初步选配方案。

(2) 以再制造产品不低于原新品尺寸精度为下限, 再制造企业加工能力约束为上限, 根据再制造产品选配精度的要求, 封闭环的实际公差小于或等于封闭环的规定公差, 建立再制造零部件尺寸精度提升约束区间, 建立尺寸精度约束下以再制造产品零部件选配尺寸链精度损失最小、再制造产品零部件选配总成本最少为目标对再制造产品零部件进行选配, 保障再制造产品尺寸精度不低于新品的尺寸精度。

2 再制造产品零部件选配优化模型

2.1 再制造产品零部件精度分级机制与方案初选

为了达到再制造产品零部件质量不低于新品的要求,针对待选零部件尺寸特性所具备的提升潜力,建立基于再制造产品零部件精度分级的初步选配模型,如图2所示。

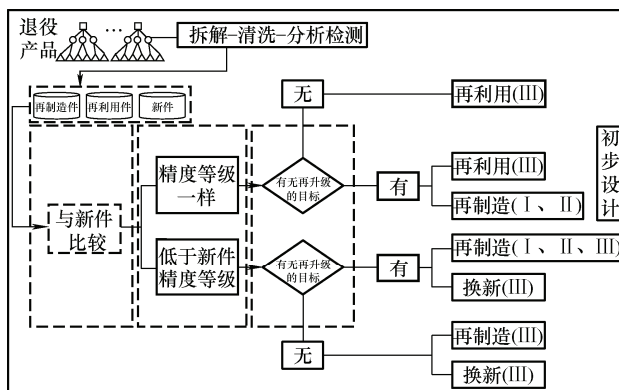


图2 基于精度分级的初步选配机制

结合再制造企业的生产数据,设计精度分级机制,以不低于新品零部件尺寸精度为基准,以再制造企业最优加工能力为目标,设计再制造零部件尺寸提升区间,将零部件分为三个精度等级(I, II, III), T_{i1} 、 T_{i2} 、 T_{i3} 分别为零部件 T_i 对应的一、二、三级精度,各等级精度对应不同的选配质量尺寸。其中:三级零部件的公差比二级零部件的公差宽放 β (与新品零部件公差相同),二级零部件的公差比一级零部件的公差宽放 α ,一级零部件的公差为最高加工

能力公差(设计目标值)。 $0 < \alpha < \beta < 1$ (公差缩小量 α 和 β 根据企业历史加工能力水平确定^[11-13])。

2.2 再制造产品零部件选配尺寸链精度损失函数

再制造产品零部件选配过程受到待选零部件的尺寸精度特性的限制,同时面临原始尺寸参数、功能等方面的干涉,加大了待选零部件尺寸精度提升难度。因此,待选零部件的尺寸精度的改变与选配尺寸链精度的波动关系需要建立合理的映射机制。再制造产品由不同来源的零部件经选配组合后,精度分级提升后零部件尺寸精度的波动会存在一定的精度损失。为保证再制造选配待选零部件的质量损失最小,建立精度损失函数,从定量的角度分析再制造零部件的精度损失。

$$F(T) = \sum_{i=1}^n [f(T_{ij}) - f(T_i)] \quad (1)$$

式中, $f(T_i)$ 表示第 i 个待选零件设计目标公差函数; $f(T_{ij})$ 表示第 i 个待选零件精度等级为 j 的公差函数,其中 n 表示待选零件个数。其中公差设计值 T 由尺寸链中的组成环公差 T_i 和封闭环公差 T_0 组成。其中 $j = \{1, 2, 3\}$ 。

再制造产品选配尺寸链由待选零部件尺寸组成相互联系且按一定顺序排列的封闭尺寸组合,按性质分为组成环和封闭环,各组成环之间相互独立。再制造产品零部件尺寸精度恢复或提升会导致精度的损失。考虑待选零部件尺寸精度设三个精度等级(I, II, III)。表征再制造产品选配尺寸链精度的在特定的精度等级下精度损失关系式为

$$F(T) = \sum_{i=1}^l [f(T_{ij}) - f(T_i)] + \sum_{i=1}^m [f(T_{ij}) - f(T_i)] + \sum_{i=1}^k [f(T_{ij}) - f(T_i)] \quad (2)$$

式中, l 为待选I级精度的零部件个数, m 为待选II级精度的零部件个数, k 为待选III级精度零部件个数,待选零部件总数为 $n = l + m + k$ 。

2.3 再制造产品零部件选配成本函数

再制造产品选配总成本由其待选的再制造件成本 C_R 、新件价值成本 C_N ,再利用件成本 C_L 构成。不同精度的再制造件新件和再利用件来说其独立工序成本不同。 C_M 表示由 n 个待选零件组合的再制造产品所需要的总成本

$$C_M = C_R + C_N + C_L \quad (3)$$

(1) 再制造件成本(主要包括拆卸、清洗与检测、表面修复技术、机械加工等费用)

$$C_R(T_{ij}) = A_{ij} + \frac{B_{ij}}{T_{ij}^p} \quad (4)$$

(2) 再利用件 k 件成本为 $\sum_{x=1}^k C_{Lj}$ (主要包括拆卸、清洗与检测、保养维护等费用)。

(3) 购买 $n-i-k$ 件新件成本为 $\sum_{x=1}^{n-i-k} C_{N(n-i-k)}$ 。

(4) 再制造产品所需要的总成本为

$$C_M = \sum_{x=1}^i \sum_{j=1}^3 (A_{ij} + \frac{B_{ij}}{T_{ij}^p}) + \sum_{x=1}^k C_{Lj} + \sum_{x=1}^{n-i-k} C_{N(n-i-k)} \quad (5)$$

式中, T_{ij} 对应第 i 个待选零件对应公差精度等级 j 下的公差设计值,系数 A 和 B 均反映的是企业再制造过程能力, A 与 B 的值可通过最小二乘法对统计样本进行拟合获得, p 是工序公差指数,反映了当前工序能否稳定的生产符合要求的产品,是协调再制造生产成本与质量的关键因素,该指数也可以通过再制造产品的统计数据确定^[14-15]。其中 $j = \{1, 2, 3\}$ 。

2.4 再制造产品零部件选配约束目标

再制造产品零部件选配需要满足再制造产品市场竞争质量需求,以不低于新品质量为最低标准实施精度设计目标。根据上述分析,对待选配零件的关键尺寸建立需求端与设计端的约束区间 $[T_0, T_{0def}]$,依据再制造企业的要求,再制造选配尺寸链中的封闭环实际公差 T_0 和再制造产品的选配精度要求 T_{0def} 可以参考新品尺寸链封闭环实际公差和选配精度要求依据正态函数分布性质计算获得。

根据再制造产品选配精度的要求,封闭环的实际公差 T_0 必须小于或等于封闭环的规定公差 T_{0def} ,即

$$T_0 \leq T_{0def} \quad (6)$$

考虑到有 n_s 个标准件的公差已定,剩余 n_t 个再制造零件的公差之和为^[16]

$$\sum_{c=1}^{n_t} \xi_i^2 k_i^2 T_c^2 = k_0^2 T_0^2 + \sum_{j=1}^{n_s} \xi_j^2 k_j^2 T_j^2 \quad (7)$$

式中, k_j 为组成环相对分布系数, T_c 为需要求解的组成环公差, T_j 为已知的组成环公差。 ξ_j 为尺寸链组成环传递系数。综合式(6)和式(7)可得,再制造零件公差分配约束如下

$$\sum_{i=1}^{n_t} \xi_i^2 k_i^2 T_c^2 \leq k_0^2 T_{0def}^2 + \sum_{j=1}^{n_s} \xi_j^2 k_j^2 T_j^2 \quad (8)$$

2.5 再制造产品零部件选配方案优化模型

综合考虑再制造产品零部件选配总成本函数、再制造产品零部件选配尺寸链精度损失最小以及待选配零部件尺寸精度约束区间, 构建再制造产品零部件选配优化模型如下

$$\begin{cases} \min F(T) = \sum_{i=1}^l [f(T_{ij}) - f(T_i)] + \sum_{i=1}^m [f(T_{ij}) - f(T_i)] + \\ \quad \sum_{i=1}^k [f(T_{ij}) - f(T_i)] \\ \min C_M = \sum_{x=1}^i \sum_{j=1}^3 (A_{ij} + \frac{B_{ij}}{T_{ij}^p}) + \sum_{x=1}^k C_{Lj} + \sum_{x=1}^{n-i-k} C_{N(n-i-k)} \\ \text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^{n_i} \zeta_i^2 k_i^2 T_c^2 \leq k_0^2 T_{0def}^2 + \sum_{j=1}^{n_s} \zeta_j^2 k_j^2 T_j^2 \\ \sum_{j=1}^3 T_{ij} = 1 \\ i = \{1, 2, \dots, n\}, j = \{1, 2, 3\} \\ T_0 \leq T_i \leq T_{0def} \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $\sum_{j=1}^3 T_{ij} = 1$ 表示将第 i 个待选零部件公差精度划分为三个等级。

3 基于 ECCA 算法的模型求解

再制造产品零部件选配是待选零部件精度分级得到初步选配方案前提下, 实现再制造产品选配尺寸链精度损失最小, 再制造产品零部件选配总成本最少的多目标问题。基于分治策略的协同进化优化算法在同时优化多个子问题方面表现出了优于其他元启发式算法的优点, 受到了广泛的关注^[17-19]。基于此, 针对尺寸精度约束下的再制造产品零部件选配两个子目标函数优化求解, 本文采用增强型协同进化优化算法对模型进行求解寻优^[21], 求解流程如图 3 所示, 步骤如下所述。

(1) 对解群进行初始化, 在初始化种群中选择一个最优个体。

(2) 将个体通过增环和减环进行划分为两个片段。

(3) 判断当前迭代次数是否达到总迭代此数, 如果达到则输出结果, 如果没有达到则执行步骤(4)。

(4) 分别对增环和减环片段执行局部搜索操作, 并对不符合解进行修复。

(5) 随机选择固定一个片段, 若选择减环片则

按照步骤(6)、(7)执行, 否则按照步骤(7)、(6)执行。

(6) 固定最优个体中减环片段, 评估和更新最优个体中的增环片段。

(7) 固定最优个体中增环片段, 评估和更新最优个体中的减环片段。

(8) 迭代此数+1, 执行步骤(2)。

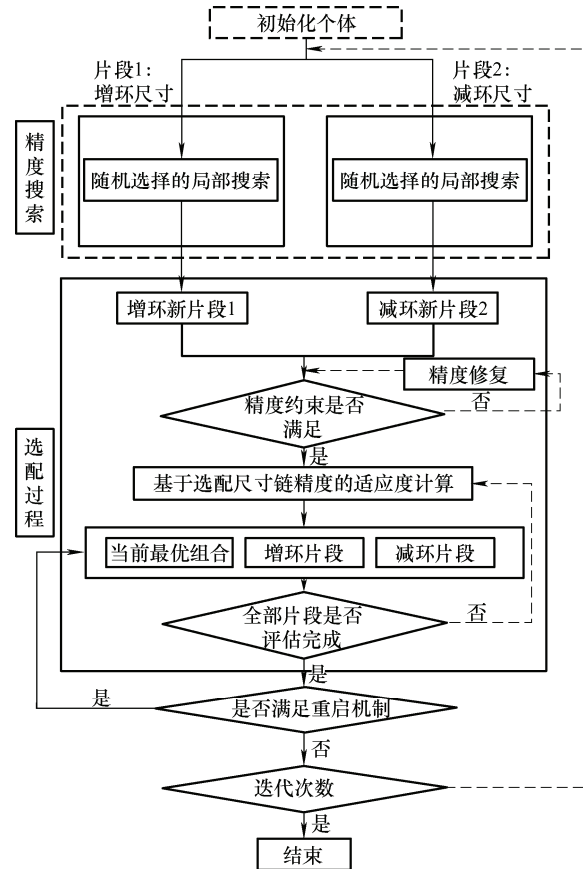


图3 协同进化优化算法(ECCA)的求解流程

4 案例研究

以某机床再制造进给箱传动轴零部件选配优化方法进行验证。该机床再制造进给箱传动轴零部件主要包括传动轴齿轮安装轴、左传动齿轮、右传动齿轮、止推片和中间隔环。机床进给箱传动轴齿轮安装轴向间隙是影响刀具进给精度重要因素, 也是机床再制造过程质量控制的关键环节。再制造机床进给箱传动轴间隙装配示意图, 如图 4 所示。

图 4 中 A_1 表示轴颈宽度, A_2 表示左传动齿轮宽度, A_3 表示右传动齿轮宽度, A_4 表示止推片厚度, A_5 表示中间隔环厚度, A_0 表示传动轴轴向间隙, 其中: 轴向间隙 A_0 是由尺寸链中组成环 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 和 A_5 共同确定的。已知该型号新品进给箱的传动轴轴向间隙必须控制在 $0.01 \sim 0.20 \text{ mm}$, 轴颈宽度

$A_1 = 84^{+0.10}_{-0.10}$ mm, 左右齿轮宽度 $A_2 = A_3 = 35^{+0.10}_{-0.10}$ mm, 止推片厚度 $A_4 = 2.5^{+0.04}_{-0.04}$ mm, 中间隔环厚度 $A_5 = 11.5^{+0.05}_{-0.05}$ mm。

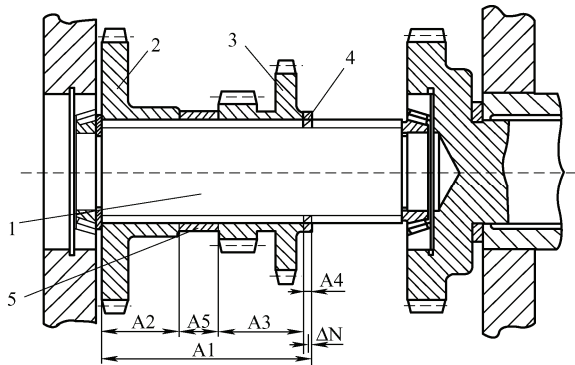


图 4 传动轴轴向间隙选配示意图

1—轴颈 2—左齿轮 3—右齿轮 4—止推片 5—中间隔环

基于机床再制造企业加工该再制造进给箱传动轴零部件的历史加工精度数据, 对各待选配零部件进行精度分级, 将各零件的再制造升级需求作为一级精度目标, 以各零部件的原新品精度作为三级精度, 并基于企业对该零件的加工能力, 将 I 级精度适当放宽作为二级精度, 如下表 1 所示。

表 1 待配零部件精度等级信息

零件名称	一级精度 /mm	二级精度 /mm	三级精度 /mm
轴 颈 A_1	$84^{+0.06}_{-0.06}$	$84^{+0.07}_{-0.07}$	$84^{+0.10}_{-0.10}$
左齿轮 A_2	$35^{+0.06}_{-0.06}$	$35^{+0.07}_{-0.07}$	$35^{+0.10}_{-0.10}$
右齿轮 A_3	$35^{+0.06}_{-0.06}$	$35^{+0.07}_{-0.07}$	$35^{+0.10}_{-0.10}$
止推环 A_4			$2.5^{+0.04}_{-0.04}$
中间隔环 A_5	$11.5^{+0.035}_{-0.035}$	$11.5^{+0.04}_{-0.04}$	$11.5^{+0.05}_{-0.05}$

制造零部件在尺寸链中的增减环属性, 以及原新品即三级精度的再利用件和换新件成本, 如表 2 所示。

表 2 待选配零部件的成本参数

零部件名称	增减环	三级精度选配成本/元
轴颈	增环	再利用 5.8
	换新	6.0
左齿轮	减环	再利用 1.8
	换新	2.03
右齿轮	减环	再利用 1.8
	换新	2.03
止推环	减环	再利用 6.5
	换新	7.4
中间隔环	减环	再利用 3.7
	换新	4.2

基于表 1 和表 2, 以再制造零部件的损失情况同新品相比较, 除止推环外, 各零部件都有再制造升级的目标, 得到表 3 所示的零部件初步选择方案。

表 3 零部件初步选择方案

零部件名称	同新件比较	有无再升级目标	初选方案
轴径	精度等级一样	有	再制造 I/II/III 级 再利用 III 级
左齿轮	精度等级一样	有	再制造 I/II/III 级 再利用 III 级
右齿轮	精度等级一样	有	再制造 I/II/III 级 再利用 III 级
止推环	低于新件精度等级	无	再制造 I/II/III 级 换新 III 级
中间隔环	精度等级一样	有	再制造 I/II/III 级 换新 III 级

进一步以再制造产品零部件选配尺寸链精度质量损失和再制造产品零部件选配总成本为目标, 基于公式(10)的建立再制造产品零部件选配优化模型, 采用 ECCA 算法对选配模型求解, 两个最优解空间的变化如图 5 所示。

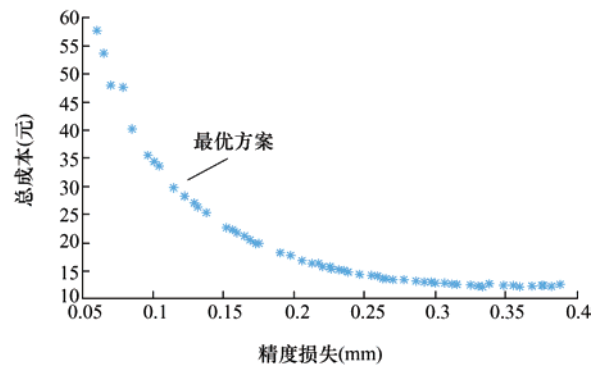


图 5 ECCA 算法求解过程

将再制造产品零部件选配尺寸链精度质量损失和再制造产品零部件选配总成本两个目标视为同等重要的情况下, 根据对各自最优解的接近程度, 选择出权重相同情况下的最优方案, 如表 4 所示。

表 4 选配最优方案及结果

	精度等级	尺寸/mm
轴颈	再制造精度 I	83.949
左齿轮	再制造精度 I	35.016
右齿轮	再制造精度 I	34.988
止推环	换新精度 III	2.520
中间隔环	再制造精度 I	11.522
成本/元	29.7	
精度损失/mm	0.121	

表 4 所得方案即为再制造产品零部件选配优化模型中的最优方案。该最优方案中, 再制造零部件精度比原新件精度高, 精度损失比原新件小, 轴向

间隙为 0.010 2 mm, 小于新品进给箱的传动轴轴向间隙尺寸, 满足轴向间隙的约束。轴颈尺寸通过再制造提升到一级精度, 左右齿轮宽度尺寸通过再制造提升到一级精度, 止推片考虑成本因素换新件, 中间隔环尺寸精度达到原新件三级精度水平进行回收再利用。

5 结论

(1) 考虑了来源不同的再制造件、重用件和新件的尺寸精度特性对再制造产品质量和成本的影响, 以不低于新件质量为基准, 依据待选零部件精度升级目标, 对待选零部件公差进行综合分析, 建立零部件精度分级初步选配机制, 提升再制造产品零部件尺寸精度。

(2) 在初步选配方案基础上建立了再制造产品零部件选配尺寸链精度损失最小、再制造产品零部件选配总成本最少的多目标优化模型, 采用一种协同进化优化算法对模型进行寻优求解, 得到再制造产品零部件选配最优方案。以某机床再制造进给箱传动轴选配为例, 并对结果分析, 验证了所提方法的有效性和可行性。

(3) 目前对再制造产品零部件选配模型的研究, 主要考虑零部件尺寸特征和精度分级, 具有一定的局限性。在下一阶段, 将进一步深入研究如何集成产品升级的特性建立选配目标函数, 并从零部件全生命周期可靠服役方面对选配约束条件等进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 中国机械工程学会. 中国机械工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2016.
Chinese Mechanical Engineering. China's mechanical engineering technology roadmap[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2016.
- [2] 姜兴宇, 王蔚, 张皓垠, 等. 考虑质量、成本与资源利用率的再制造机床优化选配方法[J]. 机械工程学报, 2019, 55(1): 180-188.
JIANG Xingyu, WANG Wei, ZHANG Haogen, et al. Optimal selective assembly method for remanufacturing product considering quality, cost and resource utilization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(1): 180-188.
- [3] KANNAN SM, JAYABALAN V, JEEVANANTHAM K. Genetic algorithm for minimizing assembly variation in selective assembly[J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(14): 3301-3313.
- [4] 宿彪, 黄向明, 任莹晖, 等. 基于蚁群算法的工程机械再制造优化选配方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 60-68.
SU Biao, HUANG Xiangming, REN Yinghui, et al. Research on selective assembly method optimization for construction machinery remanufacturing based on ant colony algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 60-68.
- [5] 林巨广, 杨兰和, 刘明周, 等. 基于工序能力指数的零件选配优化模型[J]. 农业机械, 2007, 38(4): 130-136.
LIN Juguang, YANG Lanhe, LIU Mingzhou, et al. Study on optimization model of matching parts assembly based on the process capability index [J]. Farm Machinery, 2007, 38(4): 130-136.
- [6] JIN X, NI J, KOREN Y. Optimal control of reassembly with variable quality returns in a product remanufacturing system[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1): 25-28.
- [7] SIVAKUMAR M, KANNAN SM, JAYABALAN V. A new algorithm for optimum tolerance allocation of complex assemblies with alternative processes selection[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 40(7-8): 819-836.
- [8] LIU M, LIU C, XING L. et al. Assembly process control method for remanufactured parts with variable quality grades[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85: 1471-1481.
- [9] 薛臣, 江志刚, 张旭刚, 等. 废旧机械装备零部件重用组合多目标优化模型及应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 76-85.
XUE Chen, JIANG Zhigang, ZHANG Xugang, et al. Multi-objective optimization model and application of components reuse combination for used mechanical equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 76-85.
- [10] 陈颜祥, 江志刚, 朱硕, 等. 基于非合作博弈的废旧机械装备零部件重组策略研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(9): 203-212.
CHEN Yanxiang, JIANG Zhigang, ZHU Shuo, et al. Research on reassembly strategy of used mechanical equipment components based on non-cooperative game[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(9): 203-212.
- [11] 刘明周, 刘从虎, 邢玲玲, 等. 面向质量目标的再制造复杂机械产品选配分组优化配置方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(8): 150-155.

- LIU Mingzhou, LIU Conghu, XING Lingling, et al. Quality oriented assembly grouping optimal allocation method for remanufactured complex mechanical products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 150-155.
- [12] 刘从虎, 李文艺, 蔡维, 等. “因件制宜”再制造选配过程控制方法[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(6): 1357-1366.
- LIU Conghu, LI Wenyi, CAI Wei, et al. Control method of suiting operation to different conditions of remanufactured parts for reassembly process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(6): 1357-1366.
- [13] 邵将. 发动机曲轴再制造加工过程质量控制方法及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- SHAO Jiang. Research on quality control method and key technology of engine crankshaft remanufacturing process[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [14] 牛同训. 再制造公差设计优化模型及其应用[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(2): 232-238.
- NIU Tongxun, Optimal model for remanufacturing tolerance design and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(2): 232-238.
- [15] 付颖斌, 江平宇, 刘道玉, 等. 多工序尺寸及公差优化[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 142-146.
- FU Yinbin, JIANG Pinyu, LIU Daoyu, et al. Optimization approach for multi-process dimension and its tolerance[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(1): 142-146.
- [16] 刘少岗, 金秋, 刘超. 统计公差优化模型的解析求解方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(11): 2736-2741.
- LIU Shaogang, JING Qiu, LIU Chao. Analytical solution method of statistical tolerance optimization model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(11): 2736-741.
- [17] TIRKOLAEI E, GOLI A, FARIDNIA A, et al. Multi-objective optimization for the reliable pollution-routing problem with cross-dock selection using Pareto-based algorithms[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 1-23.
- [18] 申晓宁, 郭毓, 陈庆伟, 等. 基于多目标协同进化算法的多机器人路径规划[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(2): 245-249.
- SHEN Xiaoning, GUO Yu, CHEN Qingwei, et al. Multi-robot path planning based on multiobjective multi-evolutionary algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(2): 245-249.
- [19] 张祥飞, 鲁宇明, 张平生. 基于协同进化的约束多目标优化算法[J]. 计算机应用, 2021, 41(7): 2012-2018.
- ZHANG Xiangfei, LU Yuming, ZHANG Pingsheng. Constrained multi-objective optimization algorithm based on coevolution[J]. Journal of Computer Applications, 2021, 41(7): 2012-2018.
- [20] 葛茂根, 王少明, 刘明周, 等. 不确定环境下再制造发动机曲轴轴向间隙优化控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(8): 99-106.
- GE Maogen, WANG Shaoming, LIU Mingzhou, et al. Optimal control of remanufacturing engine crankshaft's axial clearance under uncertain environment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(8): 99-106.
- [21] CHENG Lixin, TANG Qiuhua, ZHANG LiPing, et al. Mathematical model and enhanced cooperative co-evolutionary algorithm for scheduling energy-efficient manufacturing cell[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: 1-14.
-
- 作者简介: 邢世雄, 男, 1981 年生, 博士研究生。研究方向为绿色制造、再制造、制造信息化。
E-mail: xingshixiong_123@163.com
- 江志刚, 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为绿色制造、机械装备再制造技术、制造系统工程。
E-mail: jzg100@163.com
- 朱硕(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 副教授, 研究方向为绿色制造、再制造、制造信息化。
E-mail: tczswilly@163.com
- 张华, 女, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为绿色制造、制造系统工程、制造业信息化。
E-mail: zhanghua@wust.edu.cn