DOI: 10.3901/JME.2019.01.180

考虑质量、成本与资源利用率的再制造机床 优化选配方法*

姜兴宇 王 蔚 张皓垠 张 凯 李 丽
(沈阳工业大学机械工程学院 沈阳 110870)

摘要: 针对再制造机床装配过程中存在的装配精度低, 再制造资源利用率低以及生产成本高等问题, 提出一种新的再制造机床综合优化选配方法, 综合考虑装配精度、再制造资源利用率与成本, 采用田口质量损失函数与剩余件成本函数, 以封闭环尺寸链为约束条件, 在保证装配精度及最小成本的目标下, 建立综合选配模型, 并给出基于粒子群遗传算法的模型求解过程, 求解出再制造装配过程的最优选配方案, 减少了再制造装配过程中的不确定因素, 降低因选配方案不合理而带来的资源浪费, 保证了装配产品的质量。最后, 以废旧 CAK6150 机床主轴箱为例, 对其主轴装配过程进行优化选配, 最终验证了该方法不仅解决了再制造零件选配过程中精度低的问题, 而且大大提高了选配过程的再制造资源利用率, 降低企业成本。

关键词: 再制造; 装配质量; 选配方法; 粒子群遗传算法

中图分类号: TG502

Optimal Selective Assembly Method for Remanufacturing Product Considering Quality, Cost and Resource Utilization

JIANG Xingyu WANG Wei ZHANG Haoyin ZHANG Kai LI Li
(School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870)

Abstract: Aiming to poor assembly accuracy, low utilization of remanufacturing resource and low assembly efficiency in the process of remanufacturing assembly, a new selective assembly method optimization for remanufactured machinery is proposed. Considering assembly accuracy, utilization of remanufactured parts and assembly efficiency, Taguchi quality loss function(QLF) and cost function of remaining parts are both employed. Ensuring assembly accuracy and minimum cost, a comprehensive matching model is established with closed loop dimension chain as the constraint condition, and the solution procedure of PSO-GA model is given to obtain the optimal matching scheme. Uncertainties and resource wastes causing by unreasonable matching schemes are both reduced to ensure the quality of remanufactured machine. Finally, the spindle box of a wasted CAK6163 is selected to implement optimization and matching to the reassembly procedure, and the results show the proposed method can not only eliminate the problem of low success rate in remanufactured parts matching process, but also greatly improve the utilization of remanufacturing resource and reduce the cost.

Key word: remanufacturing; assembly quality; selective assembly method; PSO-GA model

0 前言

再制造机床的装配过程作为整个再制造的最后环节,直接决定了再制造机床的质量和性能^[1]。与传统装配过程相比,再制造装配是混合装配(装配过程包括新件、再利用件、再制造件三种类型的零件),

由于再制造件与再利用件公差带离散程度大,导致再制造机床的装配精度低、再制造资源利用率低及成本高等问题。而传统的分组选配法和互换法,仅适合新件间的相互匹配,并不能解决再制造装配过程中所遇到的问题^[2]。因此,研究再制造装配过程的选配,对于提高机床精度,提高装配效率,降低再制造成本有着重要的现实意义。

目前,针对再制造机床的装配过程,国内外专家学者从不同方面进行了相关研究。如:PRABHAHARAN等^[3]基于对成本的公差分配进行了研究,并采用蚁

* 国家自然科学基金(51305279)、2016 绿色制造系统集成、辽宁省教育厅一般项目(LGD2016023)和辽宁省科技厅博士启动(20170520331)资助项目。20180412 收到初稿,20180919 收到修改稿

群算法对关键尺寸偏差进行了优化。SIVA 等^[4]将启发式算法与禁忌搜索相结合应用于复杂机械产品装配公差分配。FEI 等^[5]按照装配体中各零件的精度及重要性进行分类,通过遗传优化算法得到选配方案,该方案对于减少零件的剩余数量有较好效果。RAJ 等^[6]将蚁群算法应用到气缸活塞的选择装配中,通过实例表明了使用较低精度的零件就能得到较高精度的装配体;姚巨坤等^[7]探讨了指定再制造装配工艺规程的内容和步骤,对推进废旧机械产品再制造的工业化提供了有益参考;张根保等^[8-9]对数控机床的装配质量建模与诊断技术进行了深入研究;刘明周等^[10-12]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,在保证装配质量的同时提高了再制造的经济性;宿彪等^[13]提出了一种面向再制造的优化选择装配方法,通过蚁群算法进行优化并用实例验证了该方法的可行性,但是由于加入了过多的人为参数,导致模型不稳定,过于依赖经验。

综上,国内外学者对再制造的装配过程方面取得了一定的研究成果。而再制造装配属于复杂、多因素影响的过程,多数现有成果仅是考虑装配精度或成本进行选配,缺乏对整个再制造装配过程中问题(再制造机床的装配精度,利用率以及成本等)的综合考虑,从而导致在实际工程应用中受到一定的限制。基于此,提出一种新的再制造装配过程综合优化选配方法,综合考虑装配精度、再制造资源利用率与装配效率,采用田口质量损失函数与剩余件成本函数,以封闭环尺寸链为约束条件,在保证装

配精度及最小成本的目标下,建立综合选配模型,实现再制造资源的优化配置,最大化提高再制造资源的利用率。

1 再制造选配方法内涵

1.1 再制造机床装配特点分析

根据企业的实际生产状况,选择最佳的再制造装配方案是提高企业产品质量,降低再制造生产成本的关键。再制造机床装配具有以下特点。

(1) 再制造机床的装配是由再利用件、再制造件以及新件共同构成,由于再利用件和再制造件原料均是回收而来的零件,它们的尺寸公差带较标准件更大,尺寸中心偏移,增大了再制造机床装配过程的质量不稳定性。

(2) 装配过程中由于再利用件、再制造件和新件混合搭配安装,导致不确定因素存在动态非线性关联,这种关联以装配误差的形式存在,随着装配过程不断积累,最终影响着再制造机床的质量。

(3) 再制造机床装配过程由于缺乏系统的标准,往往采用传统装配质量控制方法,最终对再制造装配精度和装配效率产生了较大的负面影响。

1.2 再制造机床优化选配方法流程

在对再制造机床装配特点研究的基础上,本文提出了一种再制造机床装配过程的优化选配方法,其总体流程如图 1 所示。该方法以零件质量损失、封闭环尺寸链约束、剩余件成本及加工成本和装配质量精度为基础,建立了装配过程优化选配模型,

图 1 再制造综合优化选配总体流程

并通过粒子群遗传算法的求解, 得到再制造优化最佳方案, 最终实现提高再制造资源率及装配成功率, 降低生产制造成本的目的。

2 再制造装配综合选配模型

2.1 质量损失成本函数

根据田口博士的质量观点, 产品的质量特性值偏离目标时, 不管偏离多少都会给社会和顾客造成一定的损失。装配件质量的高低, 取决于零件偏离目标尺寸的程度。本文以机床零件的装配为例, 零件的实际质量特性在目标值两侧波动, 因此采用田口望目质量特性, 质量损失成本函数如下

$$L(y) = \sum_{i=1}^n k_i [y_i - y_i^0]^2 \quad (1)$$

式中, y_i^0 为产品零部件质量特性目标值; n 为参与装配过程的零件数量; k_i 为质量损失成本系数。

而质量损失成本系数 k_i 可表示为

$$k_i = \frac{A_{0i}}{\Delta y_i^{ul}} \quad (2)$$

式中, Δy_i^{ul} 为产品第 i 个零件尺寸公差带上下限范围; A_{0i} 是指当质量特性值超出标准时, 即产品不合格时所带来的经济损失。

2.2 剩余件成本函数

再制造装配过程最为关键的就是以低成本零件获得尽可能多的合格产品, 尽可能多的采用再利用件和再制造件, 而尽可能少的使用新件。为了保证较高的再制造资源利用率, 不应该单单只从使用再制造件及再利用件数量上来判断资源利用率的高低, 而应通过再制造件及再利用件的价值成本来决定, 例如再制造过程中的关键件主轴的价值远高于那些隔套、平键及轴承的价值, 因此本章节在再制造选配过程中会优先选用库存中关键的价值高的再制造件及再利用件, 因此通过计算剩余再制造件与再利用件价值来保证利用率, 引入剩余件成本函数

$$C = \sum_{i=1}^n J_i + \sum_{j=1}^m G_j \quad (3)$$

式中, G_j 为剩余再制造零件 j 的成本; J_i 为参与装配的再制造件 i 的加工成本; n 为参与装配的再制造零件数量; m 为未参与装配的再制造件及再利用件数量。其中 $G = r + f$, r 和 f 分别表示再利用零件和再制造零件的回收成本。

由上式可以得知, 在再制造优化选配过程中所剩余的再利用件及再制造件越少, 则剩余成本 C 越低, 则说明再制造资源利用率越高, 越经济, 节约

企业成本。

2.3 封闭环尺寸链约束函数

再制造装配过程中, 除了要保证装配质量之外, 还应保证再制造装配过程的装配精度, 而装配尺寸链是装配精度的核心, 装配尺寸链中的封闭环是装配链结束时间接形成的尺寸, 即封闭环是装配形成的装配精度。

再制造装配过程是通过让各组成环的偏差相互抵消以满足装配精度的要求。对于待匹配的组成环, 封闭环的偏差范围越大, 则供选择的零件完成匹配的机会越大, 匹配越容易完成, 同时封闭环的偏差范围越大, 也会使得装配精度相对就会越低, 因此建立封闭环尺寸链约束来使再制造装配过程满足装配精度的同时, 来提高匹配成功率。

封闭环的标准尺寸等于该装配尺寸链中所有增环的标准尺寸之和减去所有减环的标准尺寸之和, 即

$$T_0 = \sum_{i=1}^m A_{0i}^+ - \sum_{m+1}^{n-1} A_{0i}^- \quad (4)$$

式中, T_0 为封闭环标准尺寸; A_{0i}^+ 为增环标准尺寸; A_{0i}^- 为减环标准尺寸。

同理封闭环的实际尺寸等于所有增环的实际尺寸之和减去所有减环的实际尺寸之和, 为

$$T = \sum_{i=1}^m A_i^+ - \sum_{m+1}^{n-1} A_i^- \quad (5)$$

式中, T 为封闭环实际尺寸; A_i^+ 为增环实际尺寸; A_i^- 为减环实际尺寸。

那么封闭环尺寸偏差为

$$\Delta T = T - T_0 \quad (6)$$

对于待匹配的组成环, 如果封闭环的偏差范围越大, 则供选择的零件完成匹配的机会越大, 匹配越容易完成。同时再制造装配过程是在尽可能利用旧件的情况下, 使装配后的机床达到精度要求。因此封闭环尺寸链约束函数如下

$$\Delta T_i \leq \Delta T_{0i} \quad (7)$$

式中, T_{0i} 为在一次再制造装配过程中的第 i 个封闭环允许的偏差范围;

2.4 整合后的综合模型

再制造选配优化过程主要是提高再制造装配过程的质量和精度, 而再制造的质量精度主要是由封闭环装配尺寸链的偏差程度决定, 为了提高装配过程的质量和精度, 就需要降低封闭环装配尺寸链的波动程度, 对尺寸链上的各组成环进行合理匹配组合, 从而提高装配的质量和精度, 同时根据再制造的要求, 在满足质量精度的前提下, 需充分利用再

制造件和再利用件来降低企业的成本, 提高再制造利用率。综合以上机床再制造的质量损失函数、剩余件成本函数以及封闭环装配尺寸链等约束, 将多目标优化问题转变为以装配成本最小化为目标来构建再制造装配过程选配模型。

目标函数

$$\min L(y) = \sum_{i=1}^n k_i [y_i - y_i^0]^2 \quad (8)$$

$$C = \sum_{i=1}^n J_i + \sum_{j=1}^m G_j$$

约束函数

$$\Delta T_i \leq T_{0i}$$

最终成本最小化, 利用率最高的再制造装配过程选配综合模型为

$$Q = L + C = \sum_{i=1}^n k_i [y_i - y_i^0]^2 + \left[\sum_{i=1}^n J_i + \sum_{j=1}^m G_j \right] \quad (9)$$

$$\text{s.t. } i = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$j = \{1, 2, \dots, m\}$$

$$\Delta T_i \leq T_{0i}$$

3 基于粒子群遗传算法的模型求解

再制造装配过程选配综合模型在满足封闭环尺寸链的约束条件下, 还要满足零件装配质量损失小, 装配成本低, 装配成功率以及再制造资源利用率高等多目标, 因此, 该模型是一个多目标优化问题。针对多目标优化, 传统粒子群优化具有相当快的逼近最优解的速度, 可以有效对系统的参数进行优化, 但是它容易产生早熟收敛(尤其是在处理复杂的多峰搜索问题中)、全局寻优能力较差; 遗传算法可以对搜索空间中的多个解进行评估, 减少了陷入局部最优解的风险, 同时算法本身易于实现并行化, 然而编码时易形成致死染色体, 容易过早收敛同时效率较低; 蚁群算法与其他启发式算法相比, 在求解性能上, 具有很强的鲁棒性和搜索较好解的能力, 但其由于初始信息素匮乏导致收敛速度慢、易陷入局部最优^[15-19]; 因此本文提出一种粒子群遗传优化算法, 该算法是在研究粒子群算法和遗传算法的基础上, 将遗传算法中的遗传选择、交叉算子以及变异算子融入到粒子群算法中, 通过适当的调节, 发挥各自的优点, 提高算法的开发能力, 增加变异操作防止算法早熟, 从而提高算法的全局寻优能力。

3.1 粒子群遗传优化算法思路

本文应用的是实值编码, 遗传操作中的选择算子, 为了提高寻优的速度以及精确度, 将粒子群体

按照适应度高低进行排列, 根据最终排列结果采用确定性选择和随机性选择相结合的方法。交叉就是把两组父代个体的部分结构进行相互替换重新组合而生成的新个体的操作, 从而提高新算法的搜索能力。设某一 k 时刻的两个体 x_k^m 、 x_k^n ($m \neq n$) 进行了遗传和交叉, 则交叉后的 $n+1$ 时刻产生的新个体可以表达为

$$x_{k+1}^m = ax_k^m + (1-a)x_k^n \quad (10)$$

$$x_{k+1}^n = ax_k^n + (1-a)x_k^m \quad (11)$$

变异运算则是模拟生物界基因突变的过程, 主要作用主要是为了增加新算法的局部搜索能力, 变异操作可以更快速的向最优解收敛; 其次则是为了防止新算法在迭代时出现未成熟收敛的现象。最终引入变异算子的位置速度更新公式为

$$\Delta v_{id}^{k+1} = \Delta v_{id}^k + c_1 \xi (\Delta p_{id}^k - \Delta x_{id}^k) + c_2 \eta (\Delta p_{gd}^k - \Delta x_{id}^k) \quad (12)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + \Delta v_{id}^{k+1} \quad (13)$$

式中: c_1 为粒子跟踪自身的历史最优点的权重, 表示粒子自身的认知, 通常设为 2; c_2 为粒子跟踪群体最优值的权重, 它表示粒子对群体的认知, 通常设为 2; ξ 和 η 为 [0,1] 区间均匀分布的随机数; r 是对速度的约束因子; 根据以上公式, 让粒子群具备了学习的能力, 同时也提高了粒子群的局部和全局搜索能力。

3.2 个体适应度函数

机床再制造装配过程选配的的目的是实现成本最小、利用率最高。因此可以将该模型的函数作为适应度函数为

$$\min Q = L + C =$$

$$\sum_{i=1}^n k_i [y_i - y_i^0]^2 + \left[\sum_{i=1}^n J_i + \sum_{j=1}^m G_j \right] \quad (14)$$

最终的零件选配优化配置方案集生成方式, 如图 2 所示。

图2 零件选配优化方案生成图

其中白色件表示新件；灰色件表示再利用件；黑色件表示再制造件；圆圈、三角、五边形表示不同的零件，按照现场实际的装配顺序依次向右排列。

3.3 优化算法具体流程

粒子群遗传算法是利用粒子群算法具有较快的

搜索能力，遗传算法具有很好的全局搜索能力，再基于机床再制造装配过程的特点，将遗传算法的选择、交叉和变异算子融入到粒子群算法之中，改进后的优化算法同时具备了学习能力。经改进的粒子群遗传优化算法流程如图3所示。

图3 粒子群遗传优化算法求解步骤

4 实例分析

主轴作为机床的关键零件，其装配精度直接决定着机床的加工精度和性能，因此如何保证主轴的装配精度是整个机床装配的重点和难点。本文以CAK系列再制造机床主轴箱为例，综合考虑质量、成本及效率因素，对主轴装配过程中的再制造件、新件、再利用件进行综合优化选配。主轴周边零件装配及主轴箱内部如图4所示。

图4 主轴周边零件装配示意图

4.1 再制造机床主轴装配流程

机床的主轴部分是由多个零部件组合而成的复杂混合装配体。本文以主轴装配体中的主轴和齿轮装配为例进行选配问题的验证。

由于主轴与齿轮装配是具有很小的间隙，精确定位的配合。其转动精度高且时有冲击，但要求一定的同轴度或紧密性的配合，同时由于是再制造机床装配，主轴的成本要比齿轮成本高得多，因此采用基轴制间隙配合。

4.2 机床主轴与齿轮配合的尺寸链

主轴在工作过程中会高速运转，受自身及外界环境的作用，要求主轴必须要具备足够的平稳性和耐磨性，因此在机床主轴与齿轮装配的过程中，为了保证传动的平稳性及耐磨性，就需要对主轴及齿轮的间隙进行严格控制，间隙过大则会使得主轴工作过程中会产生径向跳动，会大大降低主轴性能、滚键及齿轮错位等故障。齿轮主轴配合如图5所示。

图5 齿轮与主轴配合图

4.3 主轴及周身零部件再制造设计尺寸

为了保证再制造机床的装配精度和使用性能，

对主轴轴身装配的配合间隙及各零部件的尺寸进行控制，具体要求如表 1、2 所示。

表 1 主轴与齿轮配合间隙

名称	配合	配合尺寸/mm
主轴齿轮配合	间隙配合	0~0.020

表 2 主轴和齿轮零件的设计尺寸要求 mm

零件	机床主轴	主轴径	齿轮 1 内孔径	齿轮 2 内孔径
尺寸要求	$\phi 102_{-0.018}^0$	$\phi 101_{-0.018}^0$	$\phi 102_0^{+0.015}$	$\phi 101_0^{+0.015}$

从某 S 机床再制造车间采集到的 CAK6150 机床部分零件成本信息，如表 3~7 所示。

表 3 CAK6150 机床部分零件成本

名称	型号	价格/元
主轴	A15D02214L	2444
齿轮 1	02056L1	270.46
齿轮 2	02405L	127.28

表 4 参数及零件尺寸标准

	主轴	齿轮 1	齿轮 2
A_0 值/元	2444	270.46	127.28
目标尺寸/mm	$D_1=102$	$D_2=101$	102

表 5 CAK6150 主轴径尺寸

零件类型	编号	主轴径直径/mm		加工成本/元
		D_1	D_2	
再利用件	R1	101.982	100.989	0
再利用件	R2	101.991	100.984	0
再制造件	F1	101.998	100.987	97
再制造件	F2	101.989	100.998	97
再制造件	F3	101.988	100.991	97
新件	N1	101.992	100.996	0

注：同一类型零件装配的制造费用取平均值。

表 6 齿轮 02056L1 内孔径尺寸

零件类型	编号	内径尺寸/mm	加工成本/元
再利用件	R1	102.004	0
再利用件	R2	102.011	0
再利用件	R3	102.007	0
再制造件	F1	102.009	12
再制造件	F2	102.001	12
再制造件	F3	102.012	12
再制造件	F4	102.009	12
再制造件	F5	102.003	12
新件	N1	102.005	0
新件	N2	102.007	0

表 7 齿轮 02405L 内孔径尺寸

零件类型	编号	内径尺寸/mm	加工成本/元
再利用件	R1	101.012	0
再利用件	R2	101.008	0
再制造件	F1	101.002	9
再制造件	F2	101.010	9
再制造件	F3	101.002	9
再制造件	F4	101.011	9
再制造件	F5	101.005	9
新件	N1	101.004	0
新件	N2	101.005	0
新件	N3	101.007	0

4.4 再制造优化选配

机床的再制造装配对主轴装配精度的要求较高，由于受到现有技术和成本的限制，相对于新件，再制造件精度较低。离散程度略大，如果采用传统的互换法选配，会使得零件的尺寸偏差随着装配过程逐渐积累，根据上述机床主轴和齿轮尺寸可得主轴齿轮装配后的间隙公差带(VB)为

$$B=D_{k0}^{+0.015}-D_{z-0.018}^0=0_0^{+0.033} \tag{15}$$

有间隙公差带可以看出，装配后的间隙范围在 0~0.033 之间，由于机床的主轴和齿轮装配是需要精确定位的配合，要求有一定的同轴度和紧密性，最大间隙不应超过 0.020 mm，因此传统选配方法无法满足主轴齿轮的装配需求。

本文将粒子群算法同遗传算法进行融合，从而提高算法的优化效率，解决遗传算法早熟收敛以及搜索精度不高的问题。该模型具体求解过程如下。

- (1) 初始化种群的相关参数(种群规模，迭代次数，交叉和变异概率)、学习因子及粒子最大速度。
- (2) 种群初始化，对生成的 N 个粒子的适应度值即模型最小值 Q 进行计算。
- (3) 并根据式(12)和(13)来对粒子的速度和位置进行更新。
- (4) 根据粒子适应度值 Q 对其进行排序，按照一定比例提取较优的粒子，并将剩下的粒子进行选择、交叉和变异操作生成下一代粒子。
- (5) 再将上一代提取出的较优粒子与之合并共同形成新一代种群。
- (6) 在迭代中不断更新模型的最小值 Q ，最终输出最优选配方案和最优的适应度函数值 Q 。

4.5 优化方案对比

某 S 机床企业采用分组选配的方法，来对主轴齿轮进行装配，根据以上采集到的主轴齿轮数据，选配结果如表 8 所示。

表 8 某 S 机床主轴齿轮装配的选配结果

分组方案	主轴编号	齿轮 1	齿轮 2
1	F2	R1	F1
3	N1	N2	R2
4	N2	F1	F4

根据企业的选配方法选择装配出的主轴齿轮的成功率仅为 50%，同时零件浪费严重，剩余件成本高达 11 907 元，再制造资源利用率不足 44%。因此从表中可以看出按照现有的装配方式进行装配，会给企业带来巨大的资源浪费，增加了企业的运营成本。

而通过传统粒子群算法进行仿真，迭代次数为 100 次，由于粒子群算法容易产生早熟收敛，陷入局部最小。最终结果如表 9 所示。

表 9 再制造优化选配方案

分组方案	主轴编号	齿轮 1 编号	齿轮 2 编号
1	N1	F4	R1
2	R1	F2	N1
3	R2	N1	F1
4	F3	N2	F2
5	F1	F1	F5

利用传统粒子群算法进行优化后，得到的结果剩余件成本为 4 178.14 元，匹配成功率为 80%，对应的再制造资源利用率为 62%。

本文提出的粒子群遗传算法具有较强的全局搜索能力和较快的收敛速度，快速获得最佳组合配置，实现再制造机床装配过程的高速和精确管理。运用 Matlab 进行优化仿真，当一个最优选配方案的零部件装配完，则进入下一个循环搜索，继续搜索剩余再制造零部件的最优组合配置。最终通过优化获得了 6 组满足机床主轴齿轮装配间隙要求的组合方案，如表 10 所示。

表 10 再制造优化选配方案

分组方案	主轴编号	齿轮 1 编号	齿轮 2 编号
1	N1	N1	N2
2	R2	R1	F3
3	F3	F1	R2
4	F2	F4	R1
5	R1	F2	N1
6	F1	F3	F5

对上述方案进行比较，采用再制造优化选配模型方案中，剩余件成本仅为 1 193.22 元，对应的再制造资源利用率为 85%，企业现行方法与再制造

优化选配方法的结果对比如图 6 所示。

图 6 优化结果对比图

综上，本文提出的综合优化选配方法具有以下特点及优势。

(1) 降低了再制造机床的质量波动，整体提升装配质量。通过综合优化选配方法中封闭环尺寸链的约束，使得装配过程封闭环偏差控制在一定的范围内，可以有效减少机械产品的质量波动。

(2) 提高再制造资源利用率。该方法能够在符合再制造装配精度要求的情况下，优先将再利用件及再制造件进行优先匹配，大大提高了资源利用效率。

(3) 降低企业成本。选配过程优先采用价格低廉的再利用件及再制造件，较少采用价格昂贵的新件，大大节约了企业生产制造的成本。

5 结论

再制造机床的装配作为再制造过程的最终环节，直接决定了再制造机床的质量和性能。本文以再制造机床为研究对象，提出一种新的再制造装配过程综合优化选配方法，在综合考虑装配精度、再制造件利用率与成本的基础上，采用田口质量损失函数与剩余件成本函数，以封闭环尺寸链为约束条件，在保证装配精度及最小成本的目标下，应用粒子群遗传算法，优化配置装配零件的组合方式。通过实例验证了该方法能够有效降低装配过程的不确定性因素，保证再制造装配精度，并且能够显著提高再制造资源利用率，降低再制造成本。

参 考 文 献

- [1] 张根保, 赵洪乐, 李冬英. 多装配特征影响下的装配质量特性预测方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(3): 709-712.
- ZHANG Genbao, ZHAO Hongle, LI Dongying. Prediction method of assembly quality characteristics

- under the influence of multiple assembly features[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 32(3): 709-712.
- [2] 朱胜, 姚巨坤. 再制造技术与工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- ZHU Sheng, YAO Jukun. Remanufacturing technique and technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] PRABHAHARAN G, ASOKAN P, RAJENDRAN S. Sensitivity-based conceptual design and tolerance allocation using the continuous ants colony algorithm (CACO) [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 25(5-6): 516-526.
- [4] SIVA K M, KANNAN S M, 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.
- [5] FEI J F, LU C, WANG S L. Minimizing surplus parts in selective assembly using GA[J]. Applied Mechanics&Materials, 2012, 215(8): 175-181.
- [6] RAJ M V, SANKAR S S, PONNAMBALAM S G. Ant colony optimization to improve precision of complex assembly[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011, 152(12): 86-93.
- [7] 朱胜, 姚巨坤. 再制造设计理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- ZHU Sheng, YAO Jukun. Remanufacturing design theory and application [M]. Beijing: China Mechine Press, 2009.
- [8] 张根保, 赵洪乐, 李冬英. 多装配特征影响下的装配质量特性预测方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(3): 709-712.
- ZHANG Genbao, ZHAO Hongle, LI Dongying. Prediction method of assembly quality characteristics under the influence of multi-assembly features[J]. Journal of Computer Applications, 2015, 32(3): 709-712.
- [9] 张根保, 王立平. 国产数控机床可靠性技术综述[J]. 航空制造技术, 2013 (5): 26-31.
- ZHANG Genbao, WANG Liping. Overview of reliability technology of domestic CNC machine tools[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2013(5): 26-31.
- [10] 刘明周, 王强, 赵志彪, 等. 机械机械产品再制造装配过程动态工序质量控制系统[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 817-824.
- LIU Mingzhou, WANG Qiang, ZHAO Zhibiao, et al. Dynamic process quality control system for mechanical and mechanical product remanufacturing and assembly process[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(4): 817-824.
- [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装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. Assembly grouping optimization method for remanufacturing complex mechanical products oriented to quality objectives[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(8): 150-155.
- [12] 刘明周, 邢玲玲, 刘从虎, 等. 面向再制造复杂机械产品装配过程的质量控制点公差带在线优化方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(1): 55-62.
- LIU Mingzhou, XING Lingling, LIU Conghu, et al. On-line optimization method for quality control point tolerance zone for remanufacturing complex mechanical product assembly process[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(1): 55-62.
- [13] 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 optimization method of engineering machinery remanufacturing based on ant colony algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 60-68.
- [14] 王俊伟, 汪定伟. 粒子群算法中惯性权重的实验与分析[J]. 系统工程学报, 2005 (2): 194-198.
- WANG Junwei, WANG Dingwei. Experiment and analysis of inertia weight in particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Systems Engineering, 2005 (2): 194-198.
- [15] 黄辉先, 陈资滨. 一种改进的粒子群优化算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(21): 4922-4925.
- HUANG Huixian, CHEN Zibin. An improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(21): 4922-4925.
- [16] 潘勇, 郭晓冬. 一种基于遗传算法改进的粒子群优化算法[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(9): 222-224.
- PAN Yong, GUO Xiaodong. A particle swarm optimization algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Computer Applications and Software, 2011, 28(9): 222-224.
- [17] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on. IEEE, 1995: 1942-1948.

- [18] 刘逸, 慕彩红, 刘敬. 结合邻域信息粒子群聚类用于 SAR 图像变化检测[J]. 西安电子科技大学学报, 2015, 42(1): 187-193.

LIU Yi, MU Caihong, LIU Jing. Combining neighborhood information particle swarm clustering for SAR image change detection[J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(1): 187-193.

- [19] FERGUSON M, GUIDC VD, KOCA E, et al. The value

of quality grading in remanufacturing[J]. Production and Operations Management Society, 2009, 18(3): 300-314.

作者简介: 姜兴宇, 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机床绿色再制造、现代质量工程。

E-mail: xy_jiang9211@sut.edu.cn

王蔚(通信作者), 女, 1984 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机床绿色再制造。

E-mail: wangwei_neu@126.com