

# 基于 GA 和 FEM 的夹具布局和变夹 紧力优化设计<sup>\*1)</sup>

陈蔚芳 陈 华 倪丽君  
(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

## 摘 要

通过夹具布局和夹紧力大小的优化可以提高薄壁件加工精度. 建立了夹具布局和变夹紧力分层优化模型. 首先, 以工件加工变形最小化和变形最均匀化为目标函数, 对夹具布局进行优化设计; 其次, 基于优化的夹具布局对变夹紧力进行设计. 采用有限元法计算工件的加工变形, 加工变形求解时综合考虑了接触力、摩擦力、切削力、夹紧力和切屑的影响. 采用遗传算法求解优化模型, 获得优化的夹具布局和变夹紧力. 通过实例分析, 验证了分层优化设计方法可以进一步减小工件加工变形, 提高加工变形均匀度.

**关键词:** 夹具布局; 遗传算法; 有限元; 变夹紧力; 优化

**MR (2000) 主题分类:** 74P10

## OPTIMIZATION OF FIXTURE LAYOUT AND DYNAMIC CLAMPING FORCE BASED ON GENETIC ALGORITHM AND FINITE ELEMENT METHOD

Chen Weifang Chen Hua Ni Lijun  
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and  
Astronautics, Nanjing, 210016, China)

## Abstract

In order to improve the machining accuracy of a thin-walled workpiece, the fixture layout and clamping forces should be optimized for the machining operation. A dual optimization model of fixture layout and dynamic clamping forces has been established. Firstly, an optimal fixture layout is generated by considering the deformation degree and distribution. Thereafter, dynamic clamping forces are optimized based on the optimal fixture layout. The finite element method is used to analyze the workpiece machining deformation. A genetic algorithm is developed to solve the optimization model to obtain the optimal fixture layout and dynamic clamping forces. Finally, an example is used to illustrate that the optimization method can reduce the machining deformation effectively and improve the distribution condition.

**Keywords:** fixture layout; genetic algorithm; finite element; dynamic clamping forces; optimization

**2000 Mathematics Subject Classification:** 74P10

\* 2007年4月8日收到.

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金(50775111)资助项目.

## 1. 引言

随着航空航天产品向高精度和轻量化方向发展,精密薄壁件装夹变形控制问题逐渐引起人们重视.不同的夹具布局、夹紧力和切削力引起不同程度的变形,造成不同的加工误差,由于夹具装夹不当引起的装夹变形和加工变形不容忽视,20%~60%的加工误差是由工件的装夹引起的<sup>[1]</sup>.国内外文献从装夹角度对薄壁件装夹变形的控制进行了一定的研究,主要围绕最小夹紧力预测、夹具布局优化等<sup>[2-8]</sup>,存在的不足主要为:大多数文献仅考虑单一因素的优化,并以单一目标(如最小变形或最小夹紧力等)作为优化目标,没有考虑因素和目标之间的耦合等.由于加工过程是动态变化的,工件在固定夹紧力作用下并非永远处于稳定接触,理想的情况是采用可变夹紧力代替固定夹紧力以适应切削过程的动态性<sup>[9]</sup>.因此,本文将围绕夹具布局和变夹紧力优化设计问题进行研究.

## 2. 夹具布局和变夹紧力分层优化模型

在精密薄壁件装夹及加工过程中,元件与工件间的接触力、刀具和夹紧元件对工件的作用力(切削力和夹紧力)会使工件产生弹性变形和接触变形,导致刀具加工点处工件偏移,影响加工精度.不同的夹具布局、夹紧力和切削力造成不同的弹性变形、接触变形和工件偏移.为减少装夹变形和加工变形,本文提出采用分层优化设计方法优化装夹方案,以有效控制装夹变形.分层优化设计方法分为两步:1)夹具布局和夹紧力的同步优化;2)基于优化布局的变夹紧力优化.

### 2.1. 夹具布局和夹紧力多目标优化模型

#### 1) 优化模型

由于夹具布局与夹紧力之间存在耦合性,因此单一因素优化不能确保布局优化结果是全局最优的结果,为此,夹具布局优化时的设计变量应包括夹具与工件的接触位置和夹紧力大小.由于航空航天零件的加工精度要求极高,提出以最小化加工路径上各加工点处最大偏移量,以及均匀化各加工点处的偏移量为目标函数进行优化模型设计.

假设有  $p$  个夹具元件与工件相接触,切削力对工件的作用被分解为  $n$  步,可以建立夹具布局与夹紧力多目标优化数学模型:

$$\min(\max(|\Delta_1|, |\Delta_2|, \dots, |\Delta_k|, \dots, |\Delta_n|)) \quad (2.1)$$

$$\min(\sqrt{\sum(\Delta_k - \bar{\Delta})^2/n}) \quad (2.2)$$

s.t.

$$F_{n_i} \geq 0, i = 1, \dots, p \quad (2.3)$$

$$\mu_i |F_{n_i}| \geq \sqrt{F_{\tau_i}^2 + F_{\eta_i}^2} \quad (2.4)$$

$$pos(i) \in V(i), i = 1, 2, \dots, p \quad (2.5)$$

式中  $\Delta_k$  为切削力作用到第  $k$  步时加工点处的最大变形绝对值,  $\bar{\Delta}$  是工件加工变形的平均值,  $F_{n_i}$  是夹具元件  $i$  与工件之间的法向力,  $\mu$  是夹具元件  $i$  与工件之间的摩擦系数,  $F_{\tau_i}$ ,  $F_{\eta_i}$  是

夹具元件  $i$  与工件之间的两个切向力,  $pos(i)$  是夹具元件  $i$  与工件的接触位置,  $V(i)$  是工件上与夹具元件  $i$  相应的定位表面的有效区域.

## 2) 优化设计约束分析

### (1) 力平衡约束

在布局优化设计中, 由于定位和夹紧位置不当或夹紧力大小不合适会使工件在力、力矩作用下产生翻转等趋向, 使定位不稳定. 为了避免翻转, 必须保证工件在支承力、摩擦力、夹紧力和切削力作用下的力平衡和力矩平衡, 这是夹具优化的基本约束, 用数学表达式可表示为 [3]:

$$\begin{cases} \sum R_i + \sum P_j + \sum F_k + \sum F_m + G = 0 \\ \sum (r_{Ri} \times R_i) + \sum (r_{Pj} \times P_j) + \sum (r_{Fk} \times F_k) + \sum (r_{Fm} \times F_m) + r_G \times G = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

式中  $R_i$ ,  $P_j$ ,  $F_k$ ,  $F_m$  和  $G$  分别为支承力、夹紧力、摩擦力、切削力和重力;  $r_{Ri}$ ,  $r_{Pj}$ ,  $r_{Fk}$ ,  $r_{Fm}$ ,  $r_G$  分别为位置矢量.

### (2) 定位约束

工件定位是夹具设计的基本要求, 它保证了工件在夹具中的准确位置. 无论采用点定位还是平面定位, 必须确保工件在夹具元件上定位或支承时要充分接触, 也即接触力的方向必须始终指向工件表面, 支承力必须大于零, 以保持工件的稳定性, 以免发生脱离现象, 如公式 (2.3) 所示.

另外, 为了不破坏工件的准确定位, 工件与定位元件间不能存在滑动, 因此, 基于库仑摩擦定理, 建立如公式 (2.4) 所示的约束关系.

### (3) 定位有效区域约束

夹具优化设计时, 现有研究往往忽略定位件和夹紧件等在工件上的位置约束, 虽然经优化获得了最优位置, 但夹具元件无法放置, 为此, 本文考虑了夹具元件与工件之间的有效接触问题, 即根据工件和夹具元件形状考虑装夹位置的约束, 以避免凸台和槽等特殊区域, 例如, 当采用三支承钉定位 ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ) 时, 如果定位基准上有不规则凸台, 则在确定优化有效区域时应除去相应的凸台部分, 文中采用多边形逼近法, 如图 1 所示.

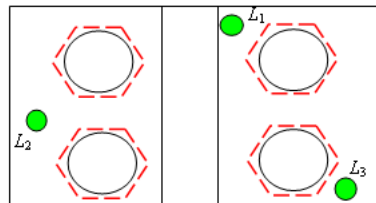


图 1 定位支承点约束示例

### (4) 夹紧力约束

夹紧的主要目的是使工件在整个加工过程中保持定位位置不变. 对工件施与夹紧力后不能破坏工件在夹具中的正确位置; 不能使工件产生移动、转动或发生振动, 也不能损坏工件表面或使工件产生较大变形. 夹紧位置应与定位和支承位置相对应, 并合理布置, 以期达到最佳布局. 夹紧力的方向一般指向工件以固紧工件, 因此夹紧力与其接触面的外法线的标量积必须小于零.

## 2.2. 基于优化布局的变夹紧力优化模型

数控加工中, 为了保证零件在不同切削力状态下稳定加工, 夹具的夹紧力一般按最大切削用量确定, 这往往造成弱刚度零件的装夹变形. 如果按 2.1 节优化得到的布局与夹紧力进行装夹, 有时也不一定能保持整个加工过程中所有支承力都为正, 从而导致工艺系统失稳, 出现超差变形. 为此在夹具布局和夹紧力同步优化的基础上提出采用变夹紧力法进一步控制工件在动态加工过程中的装夹变形, 即根据刀具切出处的变形相应地调整工件 - 夹具系统的夹紧力大小, 使工件切削瞬时让刀变形最小. 变夹紧力的获取是变夹紧力装夹变形控制的关键, 本文提出采用基于遗传算法和有限元法的优化方法对变夹紧力进行求解.

假设有  $q$  个夹紧点, 切削力的作用被分解为  $n$  步, 优化模型可表示为

$$\min(|\Delta_j|) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2.7)$$

式中  $\Delta_j$  是切削力作用到第  $j$  步时加工点处的最大变形的绝对值, 约束条件同前.

## 3. 基于遗传算法和有限元方法的夹具优化方法

### 3.1. 基于 GA 和 FEM 的夹具优化设计流程

遗传算法 (genetic algorithms, GA) 是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法. 它将待解决的问题编成二进制码或十进制码 (基因), 若干基因组成一个染色体, 一定数量的个体组成群体. 遗传算法首先随机产生若干初始群体, 利用目标函数构造适应度函数, 根据适应度函数计算个体适应度, 较高适应度的个体被遗传到下一代群体中的概率较大, 通过杂交、变异等遗传操作产生进化的下一代群体, 如此反复操作, 不断向更优解方向进化, 直至获得问题最优解. 遗传算法不关注设计变量同目标函数之间的函数关系, 可以同时优化多个设计变量, 并不需要辅助信息或辅助知识, 因此适合求解没有显式函数, 且多态的夹具布局和夹紧力优化问题. 减少工件装夹变形和加工变形是精密薄壁件装夹优化的主要目标函数, 一般情况下, 工件受力情况比较复杂, 无法使用材料力学经典公式求解, 通常借助于比较成熟的有限元法 (finite element method, FEM) 求解.

基于 GA 和 FEM 的分层优化设计流程如图 2 所示, 从工件模型中获取设计和工艺信息, 建立有限元网格模型, 由切削模型计算出相应切削用量下的切削力, 根据工件装夹特点施加边界条件和载荷, 利用有限元方法计算工件变形, 通过遗传算法寻求最优的布局, 在最优布局基础上再寻求优化的变夹紧力.

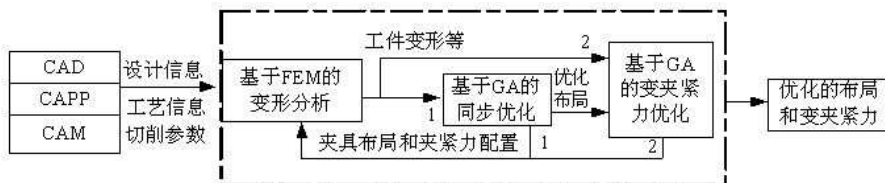


图 2 基于 GA 和 FEM 的夹具优化设计流程

### 3.2. GA 中的参数设定

#### 1) 编码

夹具优化分两步进行, 设计变量不一样, 染色体长度也不一样. 夹具布局和夹紧力同步优化时, 以定位位置、夹紧位置、夹紧力大小作为基因, 例如:  $L_{x1}L_{y1}L_{z1}L_{x2}L_{y2}L_{z2}L_{x3}L_{y3}L_{z3}F_{x1}F_{y1}F_{z1}F_{x2}F_{y2}F_{z2}f_1f_2$  ( $L_{x1}L_{y1}L_{z1}$  等为定位点坐标,  $F_{x1}F_{y1}F_{z1}$  等为夹紧点坐标,  $f_1f_2$  为夹紧力大小), 布局优化时把夹紧力当作基因, 主要是考虑到夹紧力与夹具布局之间的耦合性; 变夹紧力优化时以优化的布局为基础, 以夹紧力大小作为基因, 如  $f_1f_2f_3$ .

#### 2) 适应度比例参数

适应度比例参数是把适应度函数返回的适应度值转换为适合选择函数的值. 由于变形大小的多样性, 本文采用排列方法, 即根据个体适应度值的排列顺序来衡量个体的优劣, 根据个体的排列顺序赋予一定范围的适应度值.

#### 3) 遗传操作

选择算子: 采用最佳保留选择和误差最小的无回放式余数随机选择方法, 可以结合无回放式随机选择法和轮盘赌选择法的优点, 确保适应度比平均适应度大的一些个体能够被遗传到下一代群体中, 而又不失随机性.

交叉算子: 由于每个定位点的约束范围不同, 所以采用非均匀算术交叉, 由两个个体的线性组合产生出新的个体.

变异算子: 采用非均匀变异方法对原有基因值做一随机扰动, 以扰动后的结果作为变异后的新基因值.

#### 4) 算法控制参数

为了改善标准遗传算法的早期收敛和后期搜索迟钝的状况, 本文采用自适应遗传算法. 自适应算法中对交叉和变异算子协调使用, 将进化过程划分为渐进和突变两个不同的阶段, 渐进阶段强交叉, 弱变异; 突变阶段弱交叉, 强变异. 当最佳个体保持不变的迭代个数达到阈值时, 发生阶段的变化.

#### 5) 约束条件的处理

为了加快优化过程, 在产生初始群体, 以及运用交叉函数、突变函数时都要求个体的初始有效性, 即接触点在给定的定位面和夹紧面有效范围内, 夹紧力的大小在其取值范围内. 对不符合约束条件的个体采取惩罚函数的方法, 赋予很大的变形值. 在产生初始群体以及交叉和变异操作时都要求产生的个体满足定位、夹紧可行域约束.

### 3.3. GA 中的适应度求解

采用遗传算法进行分层优化模型求解时, 适应度值 (工件变形) 的求解采用有限元法. 有限元仿真模型建立时, 主要考虑以下问题:

#### 1) 接触问题的处理

薄壁件 - 夹具系统接触模型主要采用弹性无接触模型、有摩擦半弹性接触模型和有摩擦弹性接触模型. 弹性无接触模型的建立比较简单, 只需找到对应的接触节点, 将其自由度固定即可. 弹性接触模型采用三个相互垂直的弹簧模拟定位元件, 由一个法向力和两个沿工件切向的弹簧模拟夹紧元件. 在施加边界条件时, 法向接触弹簧的夹具连接端的三个自由度都固定, 切向接触弹簧的夹具连接端的两个沿工件切向的自由度固定. 接触刚度是接触力的函数, 由于接触力随外力而变化, 因此接触刚度也不是定值, 文中采用最小二乘法拟合变化的弹簧刚

度, 近似得到一个固定值. 如果接触点不落在网格节点上, 则需将弹簧等效到接触位置周围的多个节点上.

### 2) 切削力的施加

切削力是一个面力, 作用在工件 - 刀具的接触曲面上, 在有限元分析中, 为了能更方便地体现切削力和切除材料之间的关系, 将切削中的铣刀和加工面的接触面简化为台阶面, 将切削力均匀作用于台阶面中的待切削面的节点上. 切削力根据加工路径分步施加, 由工况模拟.

### 3) 切屑的处理

对于加工过程中的切屑作如下考虑: 工件余量大时, 考虑加工前后工件刚度的变化, 选择加工前的工件作为建模对象; 工件余量很小时, 不考虑加工前后工件形状的变化, 选择加工后得到的工件作为建模对象. 为考虑切屑的影响, 在建模时应建立相应的单元, 在求解时利用生死单元技术实现去除切屑的模拟.

## 4. 优化实例分析

### 4.1. 夹具布局和夹紧力多目标优化

图 3 为某薄壁支架零件, 加工工序为铣孔. 采用 3-2-1 定位方式, 底面采用支承板定位, 后侧面和右侧面分别采用 2 个支承钉和 1 个支承钉定位. 在与底面相对的两个面上施加 4 个对称的夹紧力  $F_3$ ,  $F_4$ ,  $F_5$  和  $F_6$ , 为减少加工过程中切削力引起的加工变形, 在工件腰部施加对称辅助夹紧力  $F_1$  和  $F_2$ . 工件材料为铝合金, 杨氏模量  $E=71\text{GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.3$ . 铣削加工时, 最大切向力为  $162.3\text{N}$ , 最大径向力为  $137.9\text{N}$ , 加工过程由 36 个工况模拟, 每个工况中力大小相同. 为了加快运算速度, 以辅助夹紧力  $F_2$  的位置和大小为优化参数 ( $F_1$  对称), 忽略其它定位和夹紧位置, 目标函数为式 (2.1) 和式 (2.2). 设定群体规模为 20, 迭代次数为 70, 杂交概率为 0.8, 初始变异概率为 0.2, 终止条件为最佳适应度不变的代数达到 20. 当最佳适应度停滞变化 6 代时改变杂交和变异概率, 分别为 0.3 和 0.6. 该工件多目标优化过程如图 4 和图 5 所示.

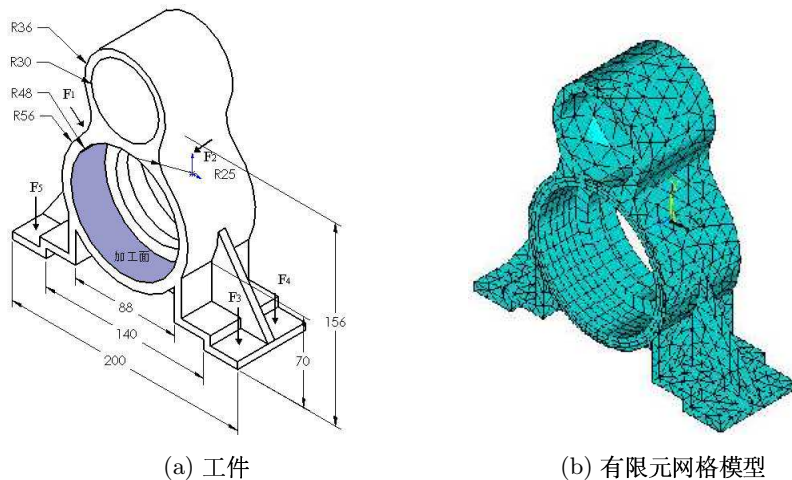


图 3 薄壁支架零件装夹及其网格模型

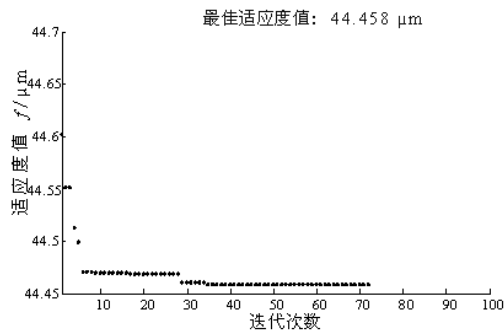


图 4 支架零件每代的适应度最佳值

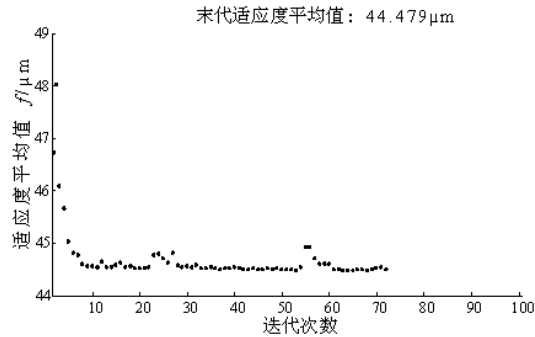


图 5 支架零件每代的适应度平均值

求得最佳的适应度值为  $44.458\mu\text{m}$ , 对应的各设计变量见表 1, 其中  $C_2$  表示  $F_2$  的位置.

表 1 多目标优化后的夹具布局、夹紧力和目标函数值

	$R/\text{mm}$	$\theta/^\circ$	$Z/\text{mm}$
$C_2$	25	-141.988	15.195
$F_2/\text{N}$	31.550		
$\Delta_{max}/\mu\text{m}$	36.023		
$\sigma/\mu\text{m}$	8.435		

按照经验设计原则, 设计夹具布局和夹紧力, 各设计变量如表 2 所示.

上述两种方法得到的加工面的变形分布如图 6, 可以看出多目标优化得到的变形分布优于经验方法. 同经验设计相比, 多目标优化方法得到的最大变形值降低了 22.6%, 变形分布均匀度提高了 22.1%, 所需最大夹紧力比经验设计夹紧力降低了 93.7%.

表 2 经验设计的夹具布局、夹紧力和目标函数值

	$R/\text{mm}$	$\theta/^\circ$	$Z/\text{mm}$
$C_2$	25	-145	45
$F_2/\text{N}$	500		
$\Delta_{max}/\mu\text{m}$	46.544		
$\sigma/\mu\text{m}$	10.834		

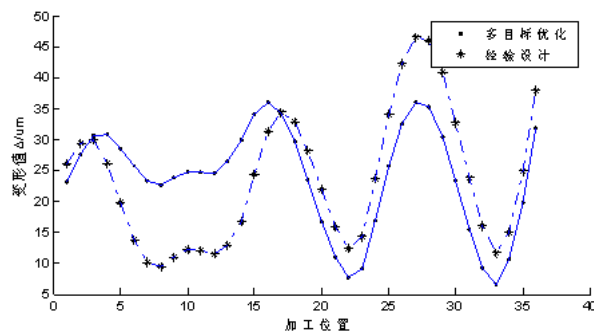


图 6 加工变形分布图

## 4.2. 基于优化布局的可变夹紧力优化

仍以图 3 的薄壁支架零件为例进行说明, 以表 1 中的优化布局作为已知布局, 以辅助夹紧力  $F_1$  和  $F_2$  的大小作为优化参数, 目标函数为式 (2.7). 设群体规模为 20, 迭代次数为 100, 杂交概率为 0.8, 初始变异概率为 0.2, 终止条件为最佳适应度不变的代数达到 30. 当最佳适应度停滞变化 6 代时改变杂交和变异概率为 0.3 和 0.6. 图 7 为求解得到的变夹紧力图.

为了比较采用变夹紧力的效果, 图 8 给出了经验设计、多目标优化 (夹具布局优化) 和变夹紧力三种情况下加工变形分布图, 总的趋势是施加变夹紧力后得到的变形更小且均匀度更高. 由于遗传算法有一定的随机性, 且夹紧力与布局有耦合性, 所以施加变夹紧力后, 在某些加工位置的变形大于多目标优化后的相应变形值. 在实际应用中可以取多目标和变夹紧力中的最优解, 流程如图 9 所示, 如图中在加工位置 6 至 13 时夹紧力大小可以取多目标优化结果  $F_1 = F_2 = 31.550\text{N}$ .

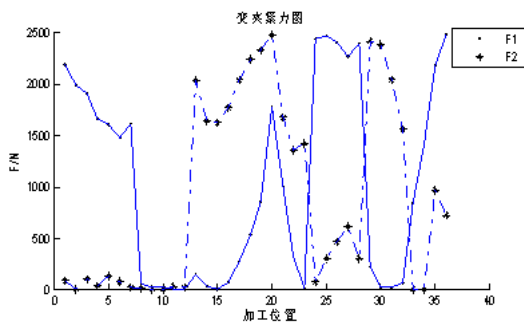


图 7 变夹紧力大小图

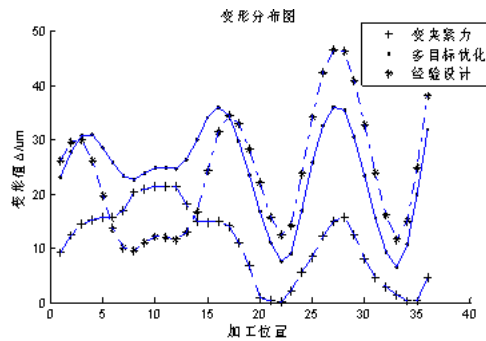


图 8 三种情况下变形分布的比较

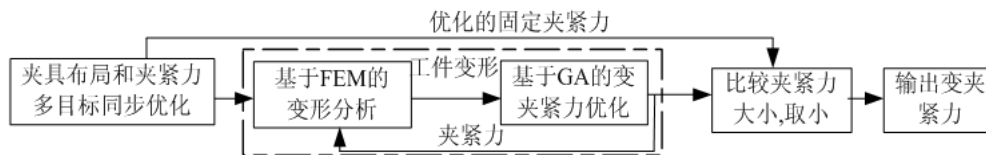


图 9 变夹紧力输出

## 5. 结束语

针对精密薄壁件装夹变形问题, 建立了夹具布局优化、基于优化布局的变夹紧力优化分层优化模型, 采用遗传算法和有限元方法相结合的方法, 求解了该优化模型. 以支架工件为例, 进行了布局优化和变夹紧力优化, 验证了多目标布局优化与经验设计方法相比, 能够有效减少加工变形, 提高变形分布的均匀性; 基于优化布局的变夹紧力优化可以进一步减少装夹变形, 为精密薄壁件装夹变形控制提供一种新的方法.



## 参 考 文 献

- [1] Li B, Melkote S N. Fixture clamping force optimization and its impact on workpiece location accuracy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(2): 104-113.
- [2] Cogun C. Importance of the application sequence of clamping forces on workpiece accuracy[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1992, 114(4): 539-543.
- [3] Wang Y F, Wong Y S, Fuh J Y H. Off-line modelling and planning of optimal clamping forces for an intelligent fixturing system[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1999, 39(2): 253-271.
- [4] De Meter E C, Xie W, Choudhuri S, et al. A model to predict minimum required clamp preloads in light of fixture-workpiece compliance[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(7): 1031-1054.
- [5] Deng H Y, Melkote S N. Determination of minimum clamping forces for dynamically stable fixturing[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(7-8): 847-857.
- [6] Kulankara K, Melkote S N. Machining fixture layout optimization using the genetic algorithm[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(4): 579-598.
- [7] Kulankara K, Satyanarayana S, Melkote S N. Iterative fixture layout and clamping force optimization using the genetic algorithm[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2002, 124(1): 119-125.
- [8] 周孝伦, 张卫红, 秦国华, 等. 基于遗传算法的夹具布局和夹紧力同步优化 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(3): 339-342.
- [9] Nee A Y C, Senthil kumar A, Tao Z J. An intelligent fixture with a dynamic clamping Scheme[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2000, 214(3): 183-196.