

基于遗传算法的飞机弱刚性件夹持方案优化设计

李西宁¹, 王悦舜¹, 李玉华¹, 王守川²

(1. 西北工业大学机电学院现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072;

2. 中航飞机技术装备设计所, 西安 710089)

[摘要] 针对飞机装配过程中零件刚度弱、易变形的特点, 提出了一种基于遗传算法的飞机弱刚性薄壁件夹持方案优化方法。该方法以自重等外载引起的薄壁件最大变形量最小为目标, 建立夹持布局和夹紧顺序同步优化模型, 通过有限元仿真获得夹持方案下薄壁件最大变形量, 利用遗传算法和有限元批处理技术实现优化模型求解。以飞机典型零件长桁为例, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 飞机装配; 弱刚性薄壁件; 夹持变形; 夹持方案优化; 遗传算法; 有限元

Optimization Design of Aircraft Weak Rigid Parts Clamping Scheme Based on Genetic Algorithm

LI Xining¹, WANG Yueshun¹, LI Yuhua¹, WANG Shouchuan²

(1. Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Ministry of Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Tooling Design Institute of China Aviation Aircraft Co., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] In view of the characteristics of weak rigidity and easy deformation of parts during aircraft assembly process, an optimization method based on genetic algorithm for the clamping scheme of the weak rigid thin-walled parts of the aircraft is proposed. The objective of this method is to minimize the maximum deformation of thin-walled components caused by gravity external loads. A synchronous optimization model of clamping layout and clamping sequence is established. The maximum deformation of the thin-walled components under the clamping scheme is obtained through finite element simulation, and the optimization model is solved by genetic algorithm and finite element batch technology. Finally, taking the typical aircraft part long truss as an example, the feasibility and effectiveness of the method are verified.

Keywords: Aircraft assembly; Weak rigid thin-walled parts; Clamping deformation; Gripping optimization; Genetic algorithm; Finite element

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.01/02.082

现代飞机结构尽管零件数量多且形状复杂、尺寸大、刚度弱、易变形, 但飞机零件的装配精度和准确度却要求很高^[1]。飞机产品中使用大量的弱刚性件, 如蒙皮、长桁等, 其结构在受力情况下抵抗变形的能力较小, 航空制造业往往面临着在装配过程中由于弱刚性件的变形而导致产品的装配质量受影响的问题^[2]。随着计算机硬件水平的不断提高及新的优化算法的不断出现, 预测并控制飞机弱刚性件在装配过程中的夹持变形, 对提高飞机产品的装配质量具有重要意义。

工件在被装夹的整个过程中所发生的变形称为工

件的夹持变形, 通过对夹持方案进行优化可以控制工件的夹持变形。国内外的专家学者在对夹持变形的控制方法方面做了很多研究。Kulankara 等^[3] 基于遗传算法对三维工件进行了夹具布局与夹紧力的迭代优化, 得到在整个刀具路径下工件最小的弹性变形值。Deng 等^[4] 在确保工件动态稳定性的前提下, 针对加工过程建立了求解最小夹紧力的模型, 考虑切削力引起的工件振动, 采用粒子群优化算法对夹紧力进行了优化。Prabhakaran 等^[5] 以有限元软件为平台, 以工件弹性变形最小为目标, 分别采用遗传算法和蚁群算法对加工过程中零件的定位布局进行优化。Padmanaban 等^[6] 采用有限元方法模拟工件加工过程中的动态性,

* 基金项目: 装备预研共用技术项目(41423010202)。

以工件弹性变形最小为目标,基于蚁群算法对加工过程中夹具布局进行优化。董辉跃等^[7]采用有限元分析方法,模拟分析了装夹位置、装夹顺序以及加载方式等对框类薄壁零件变形产生的影响。姜潮等^[8]基于ANSYS结合遗传算法提出了一种用于电阻点焊焊装夹具的定位点优化设计方法。赵敬安^[9]研究了不同夹紧顺序对复杂薄壁件定位及加工变形的影响,针对薄壁框体零件得出多夹紧点时确定最优夹紧顺序和最优加工顺序的方法。周静^[10]针对工件变形,建立了其定量分析模型,以工件主要加工面形位误差最小为目标函数,利用有限元和遗传算法相结合对夹具布局和夹紧力进行同步优化,但未考虑夹紧顺序对工件变形的影响。石志云等^[11]在ANSYS环境下利用APDL语言基于遗传算法开发了定位点优化布置计算方法,但仅限于简单形状的模型,且对工件的受力情况做了一定简化。

综合以上研究成果,对于加工过程中的定位布局,夹紧力的优化研究相对较多,而对于夹紧顺序的研究相对较少。本文针对飞机装配过程中零件刚度弱、易变形的特点,提出一种基于遗传算法的飞机弱刚性薄壁件夹持方案优化方法。通过建立夹紧布局与夹紧顺序同步优化模型,并选择遗传算法进行夹持方案的优化设计,实现对被夹持对象的变形控制。

1 夹持方案优化模型构建

1.1 优化模型

夹持方案的优化设计中,定位夹紧元件的数量和位置构成了定位夹紧布局,对应每一种定位夹紧布局又有不同的夹紧顺序,不同的夹紧顺序又将引起不同的工件变形。为了获得一种优化的定位夹紧布局和夹紧顺序使工件的最大变形不超差且整体变形均匀,本文以工件最大变形量最小作为目标函数,建立优化模型:

$$\begin{aligned} \Omega &= \text{Min}(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_p) \\ A_i &= \text{Min}(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k, \dots, \delta_q) \\ \text{s.t. } \delta_k &= \sum_{s=1}^j U_s \end{aligned} \quad (1)$$

其中, Ω 为所有夹持方案中最优方案对应的工件变形,该夹持方案共有 p 种定位夹紧布局, $p \times q$ 种夹紧顺序; A_i 为第 i 种定位夹紧布局下最优夹紧顺序时的工件变形。将每种夹紧顺序分解为 $1 \sim j$ 个夹紧步骤,则第 k 种夹紧顺序方案所对应的 $1 \sim j$ 个夹紧步骤下的工件整体最大变形节点的最大位移用 δ_k 表示, U_s ($1 \leq s \leq j$) 表示 s 个夹紧步骤下节点的位移增量。

模型约束条件:

(1) 定位夹紧位置的约束。每个定位夹紧元件都必须在工件允许的有效区范围内:

$$\begin{aligned} \text{pos}_i &\in W_i \\ \text{pos}_i &\neq \text{pos}_j \\ |\text{pos}_i - \text{pos}_{i+1}| &\geq s \end{aligned} \quad (2)$$

其中, pos_i 表示工件与第 i 个夹持元件的接触位置; pos_j 表示工件与第 j 个夹持元件的接触位置; W_i 表示工件与第 i 个夹持元件的有效接触区域。当夹具元件数量为 N 时,首先 N 个夹具元件不能重合,即 $\text{pos}_i \neq \text{pos}_j$ 。其次,它们之间的距离 s 应足够大,保证实际情况下两个夹具元件不发生干涉即 $|\text{pos}_i - \text{pos}_{i+1}| \geq s$,此外夹持元件的位置应该避开某些特定位置,如制孔位置、铆接位置以及卡板的定位位置等。

(2) 稳定夹紧约束。定位夹紧元件在定位或支撑时要与工件充分接触,不能发生脱离或者相对滑动,且支撑力必须大于零;夹紧力的大小不应使工件产生塑性变形,且其方向必须指向工件。

(3) 工件的最大变形应保证在允许的变形范围内,且整体变形均匀。

1.2 优化流程

遗传算法是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的随机搜索算法,它不依赖于梯度信息^[12],而是通过模拟自然进化过程来搜索最优解(Optimal Solution)。本文采用遗传算法与有限元模拟相结合的方法,以遗传算法为优化主程序,利用有限元数值模拟计算工件变形值,夹持方案优化流程如图1所示。

2 优化模型求解方法

2.1 夹持方案优化中的参数控制

将遗传算法应用于夹持方案优化过程,首先需要将设计变量进行编码转化为遗传算法可识别的优化参数;之后对适应度函数进行选取,最后对算法中遗传算子进行确定。

(1) 设计变量的染色体编码形式。采用具有诸多优良特性的二进制编码。

(2) 适应度函数。本文以工件的最大变形量最小为优化的目标函数,鉴于变形量大小的多样性,因此采用如下函数作为适应度函数:

$$\text{fitness}(x) = \begin{cases} T_{\max} - f(x), & \text{if } f(x) < T_{\max} \\ 0, & \text{if } f(x) \geq T_{\max} \end{cases}$$

式中, $f(x)$ 为工件的变形量; T_{\max} 为预先指定的一个相对较大的数。当工件的变形量过大超过预定的 T_{\max} 时,就对在解空间中的对应个体赋予一个很小的适应度值,以此来降低其被遗传到下代种群中的概率,避免早熟现象,提高计算效率。

(3) 选择算子。随机遍历抽样选择算子。

- (4)交叉算子。采用单点交叉算子进行交叉操作。
- (5)变异算子。采用离散变异算子进行优化研究。

2.2 基于Python的有限元参数化建模

本文选择以 Python 语言为基础脚本接口对 ABAQUS 进行二次开发,借助 abaqus.rpy 文件创建基于 Python 的有限元参数化模型。利用 Abaqus/CAE 建模时自动生成 abaqus.rpy 文件,将其中有效的脚本提取出来,删除多余的操作记录,在预定修改参数值的位置,设定特殊的字符串作为关键字,保存修改后的脚本文件(后缀保存为 .py)作为程序优化文件。

针对夹持方案优化建立的程序优化文件,前置处理部分使用 Python 语言编制有限元参数化模型,将设计变量即定位夹紧布局用事先定义的关键字代替,提交分析作业,在 ABAQUS 产生的结果文件中,利用 Python 进行后处理数据的处理,提取出所需的工件变形值并保存在相应的文本文件中,便于后续 MATLAB 的使用。

2.3 遗传算法与有限元参数化模型的集成

本文通过 MATLAB 语言编写遗传算法主程序,应用前述方法建立以定位夹紧布局为设计变量的有限元

参数化建模文件 *.py,之后利用 MATLAB 调用 *.py 文件,将遗传算法生成的一系列布局参数赋予 *.py 中定义好的关键字,有限元分析之后获得适应度函数值,经过循环迭代获得工件最大变形值最小所对应的优化夹持方案。遗传算法主程序负责搜索优化方向,python 语言建立的批处理程序则负责计算工件的变形量。遗传算法与有限元集成的流程,如图 2 所示。

控制循环程序为 MATLAB 编制的遗传算法程序,每次循环通过 MATLAB 将算法生成的每代种群的信息写入 Python 参数化脚本文件中,以 ABAQUS 脚本命令的方式经过 Python 解释器来调用 ABAQUS/CAE 内核进行计算,得到输出数据库(ODB)文件,通过后处理对变形值进行提取,并将得到的适应度函数值写入相应数据文件中,通过 MATLAB 对数据文件进行读取并将相应的适应度值赋予种群个体,具体过程如图 3 所示。

以脚本方式调用 ABAQUS/CAE:

`fprintf(Output, 'call abaqus cae no GUI=opt.py\n')`,其中, opt.py 文件为计算工件变形量的脚本文件,在

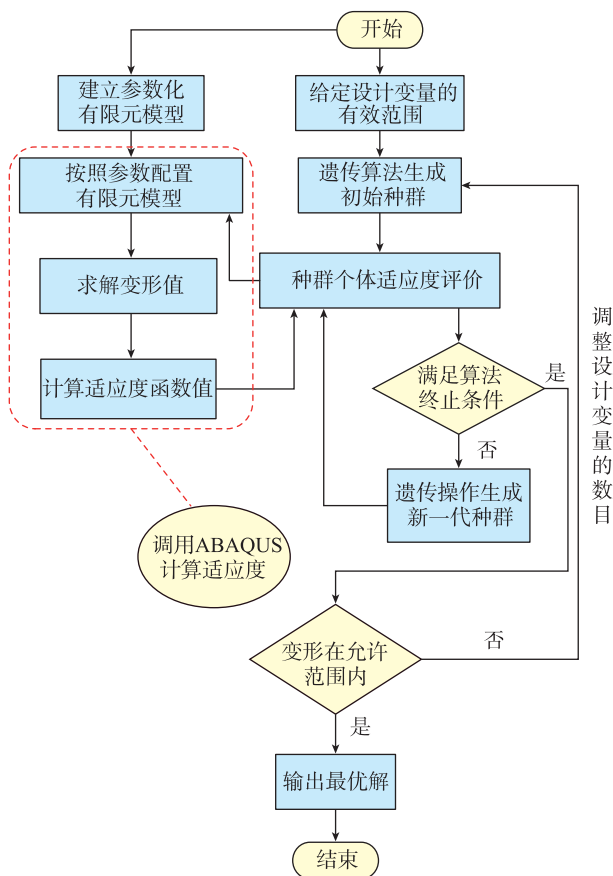


图1 夹持方案优化流程

Fig.1 Optimization process of clamping scheme

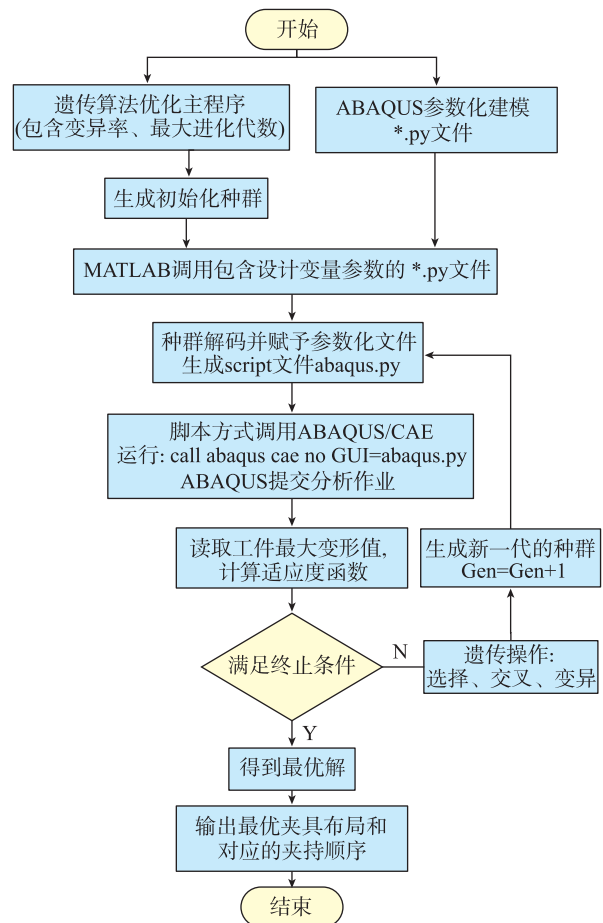


图2 遗传算法与有限元集成流程

Fig.2 Integration flow of genetic algorithm and finite element method

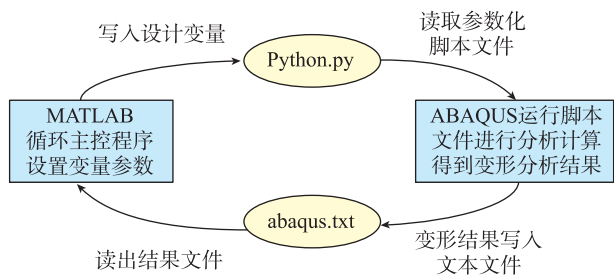


图3 MATLAB与ABAQUS的数据传递过程
Fig.3 Data transfer between MATLAB and ABAQUS

MATLAB 中使用 dos() 函数,运行批处理文件:

dos('CalculationOrders1.bat')

3 实例分析

定位夹紧机构的主要作用是使被装配的飞机零部件或组件在装配过程中获得准确的位置。本文采用图4所示的长桁定位夹紧机构,该机构主要包括飞机长桁夹持装置中的夹持爪、夹持胶垫和定位块,其中定位块的外形尺寸为 $28\text{mm} \times 23\text{mm} \times 15\text{mm}$,夹紧块的外形尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。

长桁采用航空材料 7075 铝合金,密度 ρ 为 $2.81 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,杨氏模量 E 为 71GPa ,泊松比 μ 为 0.334 。只关注长桁的变形,为了建模方便,将定位块和夹紧块的材料属性定义与长桁相同。长桁长 3420.589mm ,夹紧力为 500N 。长桁截面尺寸如图5所示。

3.1 建立有限元模型

利用有限元分析软件 Abaqus 求解工件变形时,在建模过程中将定位块定义刚体约束,并建立参考点作为控制点,后续边界条件均施加在相应的控制点上,夹紧块定义为变形体。采用库仑摩擦模型来描述接触面之间相互作用的摩擦,定位块与长桁之间摩擦系数为 0.3 ,

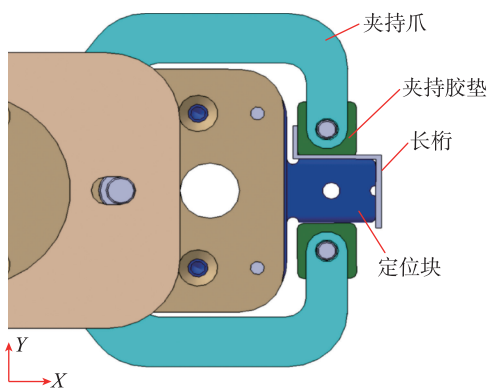


图4 长桁定位夹紧机构
Fig.4 Positioning and clamping mechanism of stringer

夹紧块(夹持胶垫)与长桁之间摩擦系数为 0.4 。单元类型选择三维 8 节点 6 面体线性减缩积分单元 C3D8R,采用扫掠网格下的进阶算法进行网格划分。定位块完全约束,夹紧块夹紧力方向不约束,其他两个方向自由度约束,长桁一端限制 Z 向移动。

定义好有限元的相关参数后,以工件 4 个定位块和与之对应的夹紧块作为优化设计变量,将模型中的 4 个定位夹紧块的布局从右至左依次定义为参数 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 ,以最大变形值(绝对值)最小为优化目标函数,建立有限元模型,如图6所示。

夹紧顺序的体现是通过在不同的分析步施加不同夹持位置上的夹紧力,规定图6中从右至左的夹紧块分别表示为 jia1、jia2、jia3、jia4。夹紧顺序按 1-4-2-3 的分析步骤设置,则应是 Step-1 对应 jia1, Step-2 对应 jia4, Step-3 对应 jia2, Step-4 对应 jia3,前一步施加的夹紧力应累计继承到下一个分析步,对于相应夹紧块与工件的接触也只在对应的分析步起作用。

根据算例的特点和试算的结果,选取遗传算法的控制参数:个体数目为 20,变量的维数为 4,变量二进制位数为 48 (每一维分量为 12 位),代沟 0.9,交叉概率 0.8,变异概率 0.03, T_{\max} 取 3mm ,算法终止最大代数 100。考虑到定位夹紧块的实际尺寸,各定位夹紧块的位置取值范围为 $L_i \in [0, 3405.589]$, ($i = 1, 2, 3, 4$)。

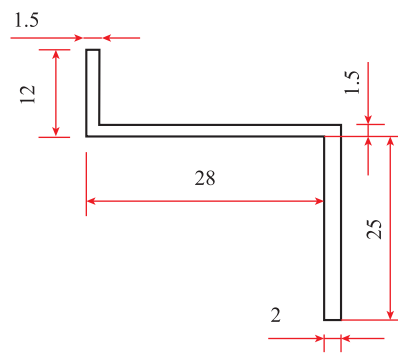


图5 长桁截面尺寸
Fig.5 Sectional dimensions of stringer

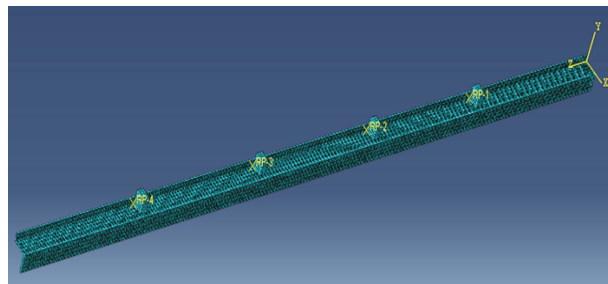


图6 4点夹持长桁有限元模型
Fig.6 Finite element model of four-point gripped stringer

3.2 优化结果

初始的 20 组布局由遗传算法随机生成,因而种群的最大变形量差值较大,但是算法在经过 100 次的迭代计算后,得到满足要求的最优解,种群最优解随遗传代数的变化以及种群均值随遗传代数的变化如图 7 所示。求得的最大变形量最小为 0.05544mm,工件的变形仿真结果如图 8 所示,对应的夹紧顺序为 1-2-3-4,定位夹紧布局分别为 $[L_1, L_2, L_3, L_4]=[339.3114, 1222.5191, 2100.7369, 2973.9649]$ 。

工程应用通常根据经验,夹持方案按照 1m 之内必须有一个定位夹紧点,1.5m 以上至少两个定位夹紧点。结合产品结构,经验设计的定位夹紧布局为 $[L_1, L_2, L_3, L_4]=[318.5, 1224.2, 2112.7, 3185.8]$,夹紧顺序为同时夹持。在有限元软件中对该定位夹紧布局和夹紧顺序进行模拟,得到工件最大变形为 0.1187mm,工件变形仿真结果如图 9 所示。

通过对比分析,优化设计得到的最优解比经验值减小 0.06326mm,降低了 53.3% 的工件变形量。可见,采用遗传算法进行夹持方案优化可收敛得到最优解,优化过程切实有效。

4 结论

本文针对飞机弱刚性件的夹持方案优化问题,给出了一种基于遗传算法的飞机弱刚性薄壁件夹持方案优化方法。以自重等外载引起的薄壁件最大变形量最小为目标,建立了夹持布局和夹紧顺序同步优化模型,基于 Python 脚本语言实现了零件的参数化建模,通过 MATLAB 调用 ABAQUS 的方式利用遗传算法和有限元批处理技术实现了优化模型的求解。以飞机长桁为实例实现了夹持布局和夹紧顺序同步优化,验证了优化

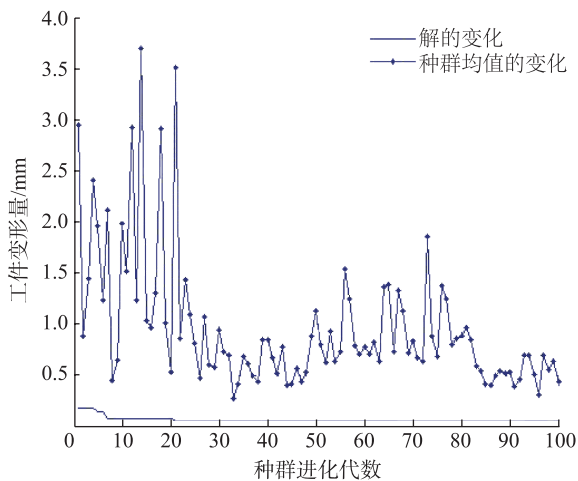


图7 优化计算收敛情况

Fig.7 Optimization calculation convergence

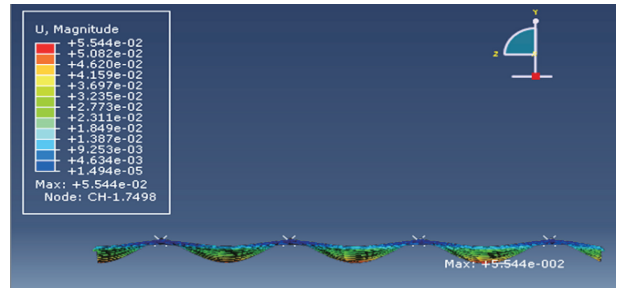


图8 优化方案仿真结果

Fig.8 Simulation results of optimization scheme

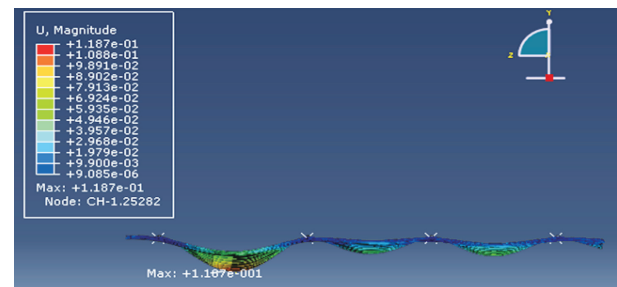


图9 经验方案仿真结果

Fig.9 Simulation results of empirical scheme

方法的有效性。结果表明该优化方法可以有效降低弱刚性薄壁件的夹持变形,提高飞机产品的装配质量。

参考文献

- [1] 王云渤,张关康,冯宗律,等.飞机装配工艺学(修订版)[M].北京:国防工业出版社,1990.
WANG Yunbo, ZHANG Guankang, FENG Zonglü, et al. Aircraft assembly technology (revised edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
- [2] SAADAT M, CRETIN L, SIM R, et al. Deformation analysis of large aerospace components during assembly[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(1-2): 145-155.
- [3] 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.
- [4] DENG H, MELKOTE S N. Determination of minimum clamping forces for dynamically stable fixturing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(7-8): 847-857.
- [5] PRABHAKARAN G, PADMANABAN K P, KRISHNAKUMAR R. Machining fixture layout optimization using FEM and evolutionary techniques[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(11-12): 1090-1103.
- [6] PADMANABAN K P, ARULSHRI K P, PRABHAKARAN

(下转第94页)

kinematic characteristics of S part[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 729-738.

[4] WANG W, JIANG Z, LI Q C, et al. A new test part to identify performance of five-axis machine tool—Part II validation of S part[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79(5-8): 739-756.

[5] JIANG Z, DING J X, SONG Z Y, et al. Modeling and simulation of surface morphology abnormality of 'S' test piece machined by five-axis CNC machine tool[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9-12): 2745-2759.

[6] FLORUSSEN G H J, SPAAN H A M. Dynamic R-test for rotary tables on 5-axis machine tools[J]. Procedia CIRP, 2012, 1: 536-539.

[7] ZHONG L, BI Q Z, HUANG N D, et al. Dynamic accuracy evaluation for five-axis machine tools using S trajectory deviation based on R-test measurement[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2017, 125: 20-33.

[8] 王帅, 胡毅, 何平, 等. 基于 OPC 技术实现西门子数控系统的数据采集 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4): 69-71.

WANG Shuai, HU Yi, HE Ping, et al. The realization of data acquisition about Siemens CNC system based on OPC technology[J]. Combination of Machine Tools and Automatic Processing Technology, 2016(4): 69-71.

[9] 张高尉. 基于西门子 840D 的数控机床生产过程状态监测系统研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.

ZHANG Gaowei. Research on production processing state monitor system for Siemens 840D NC machine tool[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.

[10] 付林云. MES 中数控车间数据采集系统的研究和应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

FU Linyun. Research and application of MES numerical control workshop data acquisition system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

[11] CONTE E G D, SCHÜTZER K, ABACKERLI A J. A hybrid monitoring-simulation system for contour error prediction on complex surfaces manufacturing[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77(1-4): 321-329.

[12] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏. SINUMERIK 810D/840D 数控系统螺距误差补偿技术研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(4): 34-36.

LIU Zhaohua, DAI Yi, SHI Xiumin. Study on pitch error compensation of SINUMERIK 810D/840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(4): 34-36.

[13] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏. SINUMERIK 840D 数控系统垂直度误差补偿技术研究 [J]. 机床与液压, 2009, 37(7): 30-31.

LIU Zhaohua, DAI Yi, SHI Xiumin. Study on sag error compensation of SINUMERIK 840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(7): 30-31.

[14] 刘朝华, 戴怡, 石秀敏, 等. 西门子 840D 数控系统温度误差补偿的研究与应用 [J]. 机床与液压, 2009, 37(9): 12-13.

LIU Zhaohua, DAI Yi, SHI Xiumin, et al. Study and application on temperature error compensation based on Siemens 840D CNC system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(9): 12-13.

通讯作者: 李迎光, 教授、博士生导师, 研究方向为飞机复杂零件智能数控加工, E-mail: liyingguang@nuaa.edu.cn.

(责编 逸飞)

(上接第86页)

G. Machining fixture layout design using ant colony algorithm based continuous optimization method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 45(9-10): 922-934.

[7] 董辉跃, 柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2004(1): 18-22.

DONG Huiyue, KE Yinglin. Finite element simulation for optimal clamping scheme of thin-walled workpiece in Milling Process[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004(1): 18-22.

[8] 姜潮, 韩旭, 钟志华. 电阻点焊焊装夹具定位点的优化设计 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 192-196.

JIANG Chao, HAN Xu, ZHONG Zhihua. Locator optimization for resistance-spot-welding fixtures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 192-196.

[9] 赵敬安. 基于复杂薄壁件综合误差控制的装夹优化方法研究 [D]. 上海: 东华大学, 2010.

ZHAO Jing'an. Research on fixture optimize of the thin-walled parts based on the composite error control[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.

[10] 周静. 装夹误差及其主动控制方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.

ZHOU Jing. Research on the clamping error and its active control method[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[11] 石志云, 刘渝, 余时建. 基于遗传算法的柔性薄板冲压件定位位置优化设计 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(7): 1145-1149.

SHI Zhiyun, LIU Yu, YU Shijian. The Locators' layout optimization for flexible sheet metal workpiece using the genetic algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(7): 1145-1149.

[12] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.

LEI Yingjie, ZHANG Shanwen. MATLAB genetic algorithm toolbox and application[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2005.

通讯作者: 李西宁, 博士、副教授, 研究方向为板料成形技术、飞机装配技术, E-mail: lixining@nwpu.edu.cn.

(责编 铃兰)