

基于0-1整数规划的航空薄壁件定位布局优化*

李西宁¹, 赵志浩¹, 仝梦佳¹, 王守川²

(1. 西北工业大学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] 为了减少航空薄壁件的定位变形, 提出了一种基于0-1整数规划的定位布局优化方法, 并对适应自动钻铆的预装配工装的内型卡板布局进行了优化设计。该方法基于“N-2-1”定位原理, 将布局优化问题转化为0-1整数规划问题; 以对薄壁件定位系统参数化建模分析得到的薄壁件最大变形量最小为优化目标, 建立定位布局递推优化模型; 采用分步求解的策略, 通过混合粒子群算法对薄壁件进行定位布局优化。

关键词: 航空薄壁件; 0-1 整数规划; 参数化建模; 布局优化; 混合粒子群算法

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.036



李西宁

博士, 副教授, 研究方向为装配与连接技术、板料成形技术。主持和参加“863”计划、国防基础科研、科技支撑计划等 20 余项。

大型薄壁结构件由于重量轻、整体性能优越, 在航空航天和军事装备等领域得到了广泛应用^[1]。但此类工件平面尺寸远大于厚度方向尺寸, 结构的刚度、强度、屈曲、振动等力学性能较差, 在加工与装配过程中因受装夹力、切削力、重力等的影响而极易产生不同程度的变形。因此, 研究航空薄壁件装配过程中的定位点布局优化方法对其变形进行预测和控制, 对于保证产品的装配质量和效率具有重要意义。

对于复杂薄壁件定位布局的优化, 目前主要有 3 种方法, 第 1 种是根据设计经验, 先估计若干个可能的定位区域, 然后逐一进行分析, 最后比较分析结果, 找到最佳的定位方式^[2]; 第 2 种方法是有限元方法与优化算法相结合, 在优化算法指导下改变有限元模型中定位元件位置, 寻找最优定位布局, 减少工件变形; 第 3 种方法是将结构拓扑优化设计的

思路运用到薄壁件定位结构的优化设计中, 通过拓扑优化计算出最佳的定位位置, 使加工工件指定面的变形符合加工要求。前两种属于离散型的布局优化, 第 3 种是连续型的布局优化求解方式。

Li 等^[3]在建模时将工件和夹具的接触关系设定为弹性接触, 以铣削过程中工件在铣削点处的最大偏移量最小为优化目标, 利用牛顿欧拉方程式求解定位点和夹紧点的位置。Wang 等^[4]研究了一种适用于复杂几何元件的夹具布局优化方法。Kaya^[5]、Krishnakumar 等^[6]以工件有限元切削模型为基础, 以加工过程中薄壁工件的最大变形最小化为优化目标, 采用遗传算法对装夹布局进行了优化。董跃辉等^[7]使用有限元软件, 分别就框类薄壁零件装夹过程中的装夹位置、装夹顺序及加载方式等因素对其变形产生的影响进行模拟分析, 得到了较优的装夹方案。王运

* 基金项目: 陕西省科技统筹创新工程项目 (2016KTCQ01-50); 装备预研共用技术项目 (41423010202)。

巧等^[8]针对薄壁弧形件在加工过程中容易产生变形的问题进行研究,建立了装夹布局有限元优化模型,并对其进行了优化得到最优装夹布局,从而减少了由于切削力引起的工件弹性变形,并使分布更加均匀。陈蔚芳等^[9]、Chen等^[10]基于遗传算法和有限元方法,提出了一种优化夹具布局 and 夹紧力的方法,对某一薄壁件的夹具优化进行了分析,提高了加工精度。林正英等^[11]为了减少车身覆盖件在冲压输送过程中的结构变形,提出了基于均匀设计法、神经网络和遗传算法相结合的智能的夹持点位置优化算法。刘胤等^[1]以减小工件装夹的最大弹性变形量为目标,利用ABAQUS建立了弱刚度结构件的铣削加工装夹布局模型,并对各装夹方案进行了模拟分析,得出了最终的优化布局方案。Wu^[12]、刘钦辉等^[2]将夹具与工件看作同一实体,采取多组件、多约束的拓扑优化方法,借助Ansys Workbench中的拓扑优化模块对零件的定位支撑结构进行了拓扑优化设计。此外还有一些相关学者研究了通过粒子群算法实现优化的方法^[13-17]。

以上研究多是针对在某个连续可行区域内优化定位点布局的问题,而对在已知离散的定位布局基础上求解最优布局问题的研究较少。在实际加工中大多是根据前述第1种定位布局优化方法确定最优布局的。随着数字化装配技术的发展,在航空薄壁件装配过程中,此类布局优化成为亟待解决的问题。因此,本文提出了一种适合航空薄壁件的定位布局优化方法,以“N-2-1”定位原理为指导,将位置组合优化问题转化为0-1整数规划问题,采用参数化建模分析不同定位布局下薄壁件的变形,利用混合粒子群算法优化定位点数目与位置,并应用于适应自动钻铆的预装配工装的内型卡板布局优化中,验证方法的有效性 with 实用性。

定位布局优化模型构建

航空薄壁件定位布局的优化问题,可以归结为寻找各种定位方案所对应的最大变形处的最小值。在航空薄壁件装配过程中,为了能够减少薄壁件主定位面的变形,工件通常按照“N-2-1”定位原理进行装夹定位。若定位点数目过少,会造成加工或装配过程中变形超差,难以保证精度;若定位点数目过多,会增加加工与装配的成本,减少装配操作空间,降低装配效率。所以,定位点的位置应该使薄壁件的最大变形最小,而对定位点的数目要求是“最少且足够”。

根据上述分析,将定位点的数目及其位置作为优化的设计变量,以航空薄壁件的最大变形量最小为优化目标,建立如下优化模型:

$$\begin{aligned} & \text{Find : } N, \{W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{iN}\} \\ & \text{Min : } (U_1(W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{iN}), \\ & \quad U_2(W_{21}, W_{22}, \dots, W_{2N}), \dots, \\ & \quad U_n(W_{n1}, W_{n2}, \dots, W_{nN})) \\ & \text{S.T. : } W_{ij} = W_{ij}(x, y, z) \\ & \quad W_{ij}(x, y, z) \in A \\ & \quad j = 1, 2, \dots, N \\ & \quad 3 \leq N < N_0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, N 为定位点的数目, W_{ij} 为第 i 种方案中第 j 个定位点的位置, $U_i (W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{iN})$ 为第 i 种布局方案对应的薄壁件最大变形量, A 为工件中已知的可布置定位点的位置, N_0 为初始所有的定位点数目。

由于已知定位点的初始预留位置,所以在优化过程中,定位点的数目和位置均代表了定位点的存在与否,因此,本文将该问题转化为0-1整数规划问题,当定位点存在时,设计变量取值为1,定位点不存在时,设计变量取值为0。

$$\begin{aligned} & \text{Min : } (U_1(x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1N}), \\ & \quad U_2(x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2N}), \dots, \\ & \quad U_n(x_{n1}, x_{n2}, \dots, x_{nN})) \\ & \text{S.T. : } x_{ij} = 0, 1 \\ & \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, N) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $U_i (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ 为第 i 种布局方案对应的薄壁件最大变形量,

x_{ij} 为第 i 种定位方案中第 j 个定位点或面的存在性。

定位布局优化策略

1 定位布局参数化建模方法

在薄壁件定位过程中,为了寻找最优的位置使薄壁件的不利变形最小,需要在一定范围内不断改变定位点的位置,直至找到最优的布局方案。既然将定位点的有无作为设计变量,那么下一步就要考虑如何通过定位点的有无计算薄壁件的最大变形量。本文通过建立参数化分析模型,完成定位点接触条件或边界条件的选择性释放,实现不同定位方案下薄壁件最大变形量的获取。

定位点在实际定位过程中对应的定位元件形式不同,可能是点的形式,也可能是面的形式。在建模时要按照具体形式,将定位元件编号,建立薄壁件定位系统有限元模型,然后提前建立所有可能的接触条件和边界条件,对应定位元件的编号命名接触条件及边界条件,在之后的计算中只需控制接触条件或边界条件的删除,这样定位对薄壁件就不会起到定位作用。一般面接触式的定位元件变换位置时修改其接触条件,点接触式的定位元件变换位置时修改其边界条件。

当 $x_{ij}=0$, 即第 i 种定位方案中第 j 个定位元件不起定位作用时,需要将该定位元件与工件的接触条件或边界条件删除。边界条件对应的python删除语句为:

```
mdb.models['Model-1'].
boundaryConditions['BC-j'].suppress()
```

接触条件对应的python删除语句为:

```
mdb.models['Model-1'].
interactions['Int-j'].suppress()
```

当定位元件处于不同布局时,人为修改工作量会很大,因此本文采用MATLAB读取参数化建模生成的py文件,并通过设计变量的不同赋值

来修改对应的接触条件或边界条件。以面接触式的定位元件为例,修改其接触条件,即将第 j 个面定位元件接触条件命名为 int-j, 对应 MATLAB 中的修改语句为:

```
AssemblyStr=strcat('mdb.
models[' Model-1 '].
interactions['Int-',num2str(j),''],'\n')
```

另外,在 py 文件中自动书写删除语句时,要注意语句的位置,必须在 inp 文件自动提交前修改。因此,本文在提交语句前书写关键字,当 MATLAB 搜索到关键字时,将删除语句写入 py 文件中。

2 混合粒子群算法

寻找 0-1 整数规划模型目标函数最小值样本点的优化搜索算法采用混合粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法。标准的 PSO 算法是利用 N 个粒子,即个体,组成的粒子群在 D 维问题空间中以重复迭代的方式搜索最优解。粒子在空间飞行时,具有位置和速度两个特征。种群中每个粒子的位置与速度按公式(3)进行迭代:

$$\begin{aligned} v_{id}^{(k+1)} &= \omega v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + \\ & c_2 r_2 (p_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \\ x_{id}^{(k+1)} &= x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, k 为当前迭代次数; $1 \leq i \leq N$, $1 \leq d \leq D$, c_1 和 c_2 为正常数,分别称为认知学习率和社会学习率,代表每个粒子进化为个体最优和全局最优的加速度权重,通常取值为 $c_1=c_2=2$; r_1 和 r_2 为两个均匀分布在 $[0, 1]$ 范围内的随机数; 粒子位置 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}, \dots, x_{iD}]$, 速度 $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}, \dots, v_{iD}]$ 。

粒子 i 在迭代过程中可以记录自己在飞行过程中曾经经历过的最优位置,即个体最优位置 $pbest_i=[pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{iD}]$, 及整个粒子群经历过的最优位置,即全局最优位置 $gbest=[gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D]$, 其在种群每一代上的迭代如公式(4)所示:

$$\begin{aligned} pbest_i &= \begin{cases} pbest_i^{(k)}, & \text{if } F(P_i^{(k+1)}) \geq F(pbest_i^{(k)}) \\ P_i^{(k+1)}, & \text{if } F(P_i^{(k+1)}) < F(pbest_i^{(k)}) \end{cases} \\ gbest^{(k+1)} &= \min \{ F(pbest_1^{(k+1)}), \\ & F(pbest_2^{(k+1)}), \dots, F(pbest_D^{(k+1)}) \} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $F(\cdot)$ 为适应度函数,即根据适应度先更新所有粒子的个体最优 $pbest_i$, 然后用最优个体最优值来更新全局最优 $gbest$ 。

本文所采用的混合粒子群算法的速度和位置迭代公式采用遗传算法交叉操作的思想,式(3)中的 $\omega v_{id}^{(k)}$ 项相当于遗传算法的变异操作, $c_1 r_1 (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + c_2 r_2 (p_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)})$ 项相当于遗传算法的交叉操作,让当前解与个体极值和全局极值分别作交叉操作,产生的解为新位置。

3 定位布局优化流程

航空薄壁件定位布局优化问题的求解,分为两步骤。第1步:假定定位数目,寻找各种定位方案所对应

的最大变形值的最小值,即求不同定位数目下对应布局最优;第2步:比较不同定位数目的布局最优时变形值,使其在允许变形范围内定位数目最少。本文提出的布局优化方法实现的流程如图1所示。

第1步:确定不同 N 值下的最优布局位置。

首先,在基于混合粒子群算法的定位布局优化过程中,定位点即为算法中的粒子,薄壁件定位模型的仿真信息包含在由 ABAQUS 生成的 py 文件中,粒子的取值对应定位点或面的位置。先给定初始定位数目 N , 优化算法经过参数初始化设置后,利用 MATLAB 程序语言调用该 py 模板文件,将粒子的位置解码,并把删除或恢复语句写入新的 py 文件中;然后进行模拟,得到此种布局情况下薄壁件的变形,并根据建立的算法步骤终止条件判断是否可以终止优化,若满

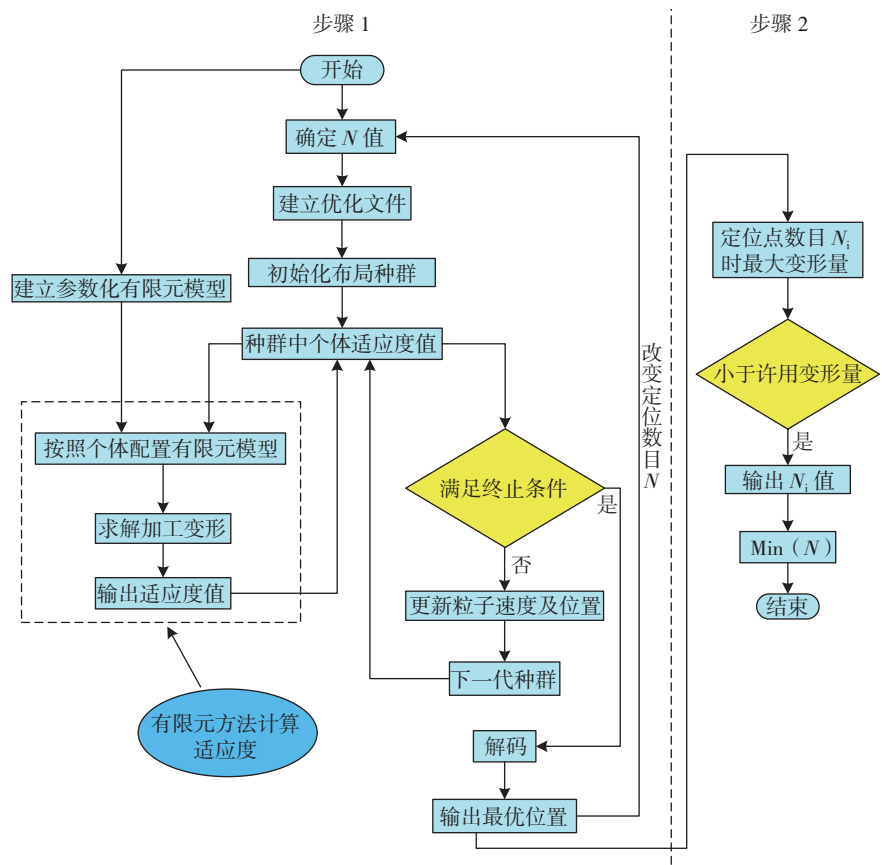


图1 定位布局优化流程
Fig.1 Optimization process of locator layout

足,则算法结束,否则改变粒子的速度与位置继续进行优化;最后得到优化的布局参数种群,其中最佳的个体即为最优定位布局。

其次,改变定位数目 $N(N \geq 3)$,使得 $N=N+1$,重新进行优化,如此反复,得到不同定位数目下对应的最优定位布局及产品最大变形。

第2步:变形允许范围内确定最优布局数目。

N 值的确定原则为:在满足精度的前提下,用尽可能少的定位点来定位薄壁件和限制变形。为此,比较不同定位数目对应的最优变形量值,并找出最大变形量小于许用变形值时的最小定位数目作为所求 N 值,则此时所对应的布局位置即为最优位置。

飞机壁板组件定位布局优化

1 实例分析

本文实例为如图2所示的基于壁板预装配、自动钻铆、壁板拼接的思想来设计一种适应自动钻铆的壁板预装配柔性定位装置^[18]。图2(a)是预装配工装工作时的柔性定位装置状态,图2(b)是自动钻铆时柔性定位装置与自动钻铆机托架的配合状态。该装置利用小围框组件的结构形式对飞机壁板进行定位,通过在小围框上固定内型卡板保证所定位壁板的外形准确度。在预装配时卡板的位置和数量要与壁板隔框的位置和数量保持一致,以定位剪切片;而在自动钻铆时,卡板的主要作用是定位支撑壁板,若此时内型卡板数目过多会造成钻铆区域太小,进而使卡板与自动钻铆机的铆头产生干涉且补铆区域过多,降低钻铆质量和效率。因此,本文以适应自动钻铆的预装配工装壁板预装配柔性定位装置为研究对象,在壁板预装配完成后,将其移至自动钻铆机进行钻铆之前,对内型卡板布局进行优化,以使其在不影响自动钻铆的情况下,实现壁板

定位的卡板数量最少且位置最优。

图3展示了刀型壁板预装配时卡板布局,定位刀型壁板和其剪切片一共需要11块卡板,其中卡板之间最小距离为卡板1和卡板2之间的距离,为173mm;最大距离为卡板7和卡板8之间的距离,为1070mm;其他卡板之间的距离基本相近,均在520mm左右。由此可见,在这块壁板上的内型卡板数量较多,分布较密,在自动钻铆时需要避让的区域很多,甚至卡板1和卡板2之间就没有钻铆空间,无法进行自动钻铆,严重影响了自动钻铆的效率。

2 优化求解

在对卡板布局进行优化时,必须考虑到壁板在自动钻铆情况下的蒙皮和长桁连接部分变形不能太大,以至于影响自动钻铆的精度。在壁板进行自动钻铆时,壁板平行于航向方向放置,即壁板和卡板是水平放置,此时壁板产生的变形主要是由壁板和卡板自重所导致的,而这些变形要足够小才能保证不对自动钻铆的

精度产生影响。因此,该问题优化设计的目标为在壁板和内型卡板自重情况下,在初始内型卡板布局的基础上,优化卡板的数目及位置,减小壁板在自动钻铆时的变形,提高自动钻铆的效率。由于卡板1要起到横向壁板定位作用,所以必须存在,不属于设计变量,因此本问题的设计变量一共有10个。

对所有卡板编号,建立壁板-卡板定位模型,依照定位所需要的精度,选择合适的单元划分方法对壁板-卡板定位模型进行网格划分,初始有限元模型如图4所示。在优化时,根据布局变量的取值,通过MATLAB程序修改相应的接触条件,提交进行有限元分析,即可获得壁板的最大变形量。由于重力作用下壁板在横向和纵向变形很小,所以本文以壁板定位后重力方向的位移变化为判断依据。

卡板的布局优化由混合粒子群优化算法来确定。粒子群中的粒子数目越多,计算精度越高,但是效率

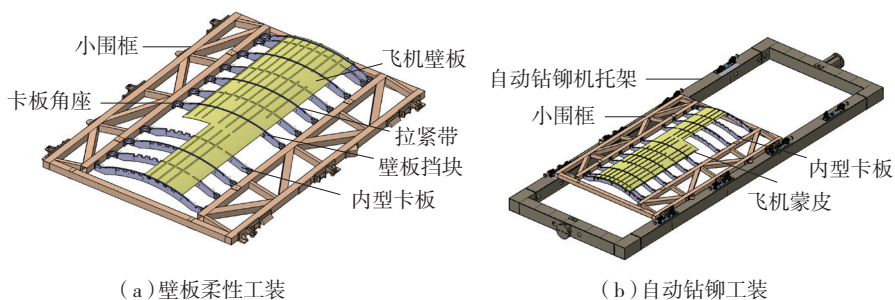


图2 适应自动钻铆的壁板预装配柔性定位装置

Fig.2 Flexible positioning device for aircraft panel preassembly to accommodate automatic drilling and riveting

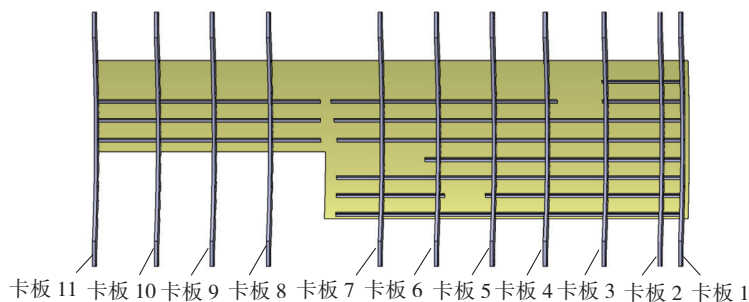


图3 刀型壁板预装配时卡板布局

Fig.3 Board layout of panel in preassembly

会降低。为了保证全局最优值收敛及算法的计算效率,根据设计变量的个数选取 30 个粒子(代表 30 种定位点布置方法),迭代次数设置为 100 次,惯性权重系数为 0.8,学习因子为 $c_1=c_2=2$ 。由于卡板 1 必须存在,不能被去除,因此在粒子群初始化时,需要对每一个粒子的第一个元素赋值为 1,且其在后面的交叉变异中也不参与位置运算。

3 确定卡板数目及位置

从 $N=3$ 开始,依次设定不同 N 值,不同 N 值下优化定位布局及对应的壁板最大变形量如表 1 所示,其中“1”代表该编号卡板存在,“0”代表该编号卡板不存在。

根据表 1,建立了最大变形量随 N 变化曲线如图 5 所示,其中 U_0 为许用变形量, U 为实际变形量。在满足产品装配精度的条件下,根据 N 的确定原则,从中可以确定 N 为 5,此时卡板布置的最优位置为 1、5、7、8、10,每两块卡板之间的距离分别为 1851mm、1100mm、1100mm 和 1100mm,定位状态如图 6 所示,优化后壁板的局部最大变形情况如图 7 所示。

优化后的卡板数量比预装配时的 11 块卡板少了 6 块。由图 7 可知,壁板的变形对长桁和蒙皮连接处产生的影响较小,在变形允许范围内,

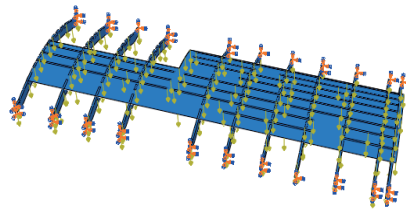


图4 自动钻铆时初始模型
Fig.4 Initial model in automatic drilling and riveting

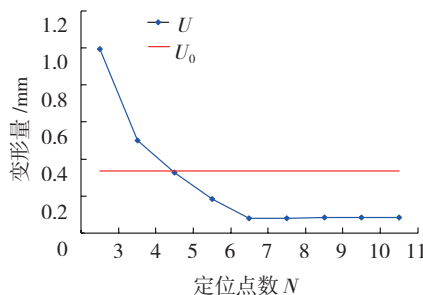


图5 壁板最大变形量随N增大的变化趋势
Fig.5 Variation tendency of maximum deformation for panel with the increase of N

可以保证自动钻铆的精度;同时,由于卡板的数量较少,每两块卡板之间的距离比较大,保证了足够的空间进行自动钻铆,从而可提高自动钻铆的效率。

结论

本文在已知离散的定位布局基础上,提出了基于 0-1 整数规划的定位布局优化方法,通过对定位系统参数化建模,利用 MATLAB 自动修改模型并提交分析,获得了薄壁件在不

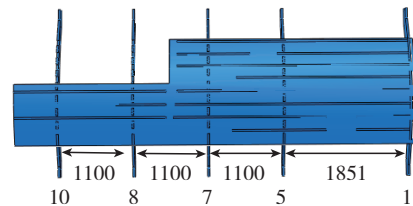


图6 卡板优化布局(单位: mm)
Fig.6 Optimal layout of card board

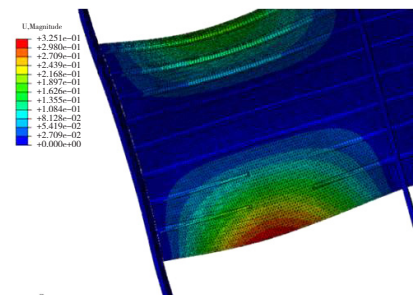


图7 局部最大变形
Fig.7 Local maximum deformation of panel

同定位布局下最大变形量,自动实现定位点的优化;并应用该方法实现了适应自动钻铆的蒙皮定位布局优化设计,可有效提高装配效率。

参考文献

[1] 刘胤,胡小秋.基于 ABAQUS 的弱刚度结构件装夹布局优化技术[J].工具技术,2008(11):19-22.
LIU Yin, HU Xiaoqi. Optimum technology on clamping distribution of low-rigidity structure part based on ABAQUS[J]. Tool Engineering, 2008(11): 19-22.
[2] 刘钦辉,李蓓智,杨建国,等.基于拓扑优化的薄壁零件装夹布局确定方法[J].组合机床与自动化加工技术,2012(7):99-102.
LIU Qinhui, LI Beizhi, YANG Jianguo, et al. Topological optimization based thin-walled fixture layout design[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(7): 99-102.
[3] LI B, MELKOTE S N. Optimal fixture design accounting for the effect of workpiece dynamics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(10): 701-707.
[4] WANG M Y, PELINESCU D M. Optimizing fixture layout in a point-set domain[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001,17(3): 312-323.

表1 不同N值下优化定位布局及壁板最大变形

N	卡板 1	卡板 2	卡板 3	卡板 4	卡板 5	卡板 6	卡板 7	卡板 8	卡板 9	卡板 10	卡板 11	最大变形 / mm
3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0.99240
4	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0.49980
5	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0.32510
6	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0.18290
7	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0.07899
8	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0.08141
9	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0.08392
10	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.08385
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.08381

- [5] KAYA N. Machining fixture locating and clamping position optimization using genetic algorithms[J]. *Computers in Industry*, 2006, 57(2): 112–120.
- [6] KRISHNAKUMAR 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] 董辉跃, 柯映林. 铣削加工过程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, 38(1): 17–21.
- 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, 38(1): 17–21.
- [8] 王运巧, 梅中义, 范玉青. 薄壁弧形件装夹布局有限元优化[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 214–217.
- WANG Yunqiao, MEI Zhongyi, FAN Yuqing. Finite element optimization of clamping distribution for thin walled curved pieces[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 214–217.
- [9] 陈蔚芳, 倪丽君, 王宁生. 夹具布局和夹紧力的优化方法研究[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(12): 1413–1417.
- CHEN Weifang, NI Lijun, WANG Ningsheng. Investigation on optimization method for fixture layout and clamping forces[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(12): 1413–1417.
- [10] CHEN W F, NI L J, XUE J B. Deformation control through fixture layout design and clamping force optimization[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 38(9/10): 860–867.
- [11] 林正英, 沈斌. 车身覆盖件的夹持位置优化研究[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(19): 220–223.
- LIN Zhengying, SHEN Bin. Research on optimization of pickup position for automobile panels[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(19): 220–223.
- [12] WU T J, LOU P H, QIN G H. Novel approach to locator layout optimization based on genetic algorithm[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 28(2): 176–182.
- [13] DEVI S, GEETHANJALI M. Optimal location and sizing determination of distributed generation and dstatcom using particle swarm optimization algorithm[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2014(62): 562–570.
- [14] ALVES M J, COSTA J, PAULO O. An algorithm based on particle swarm optimization for multiobjective bilevel linear problems[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 247: 547–561.
- [15] ZHAO F Q, LI G Q, YANG C, et al. A human-computer cooperative particle swarm optimization based immune algorithm for layout design[J]. *Neurocomputing*, 2014, 132: 68–78.
- [16] KAVEH A, BAKHSHPOORI T, AFSHARI E. An efficient hybrid particle swarm and swallow swarm optimization algorithm[J]. *Computers and Structures*, 2014, 143: 40–59.
- [17] CLARKE J, MCLAY L, JAMES T, et al. Comparison of genetic algorithm to particle swarm for constrained simulation-based optimization of a geothermal power plant[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2014, 28: 81–90.
- [18] 凌扬洋, 李西宁, 李卫平. 适应自动钻铆的壁板预装配柔性定位装置设计[J]. *机械科学与技术*, 2014, 33(3): 465–468.
- LING Yangyang, LI Xining, LI Weiping. The design of the flexible positioning device for aircraft panel preassembled to accommodate the automatic drilling and riveting[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2014, 33(3): 465–468.

通讯作者: 李西宁, E-mail: lixining@nwpu.edu.cn。

Location Layout Optimization Method Based on 0–1 Integer Programming for Thin-Wall Parts of Aircraft

LI Xining¹, ZHAO Zhihao¹, TONG Mengjia¹, 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 Corporation, Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] In order to reduce the localization deformation of aircraft thin-wall components, the layout optimization method is proposed based on 0–1 integer programming. The method is used for aircraft skin pre-assembled to accommodate automatic drilling and riveting. Firstly, the layout optimization problem is transformed to 0–1 integer programming problem on the basis of the “N–2–1” position principle. Secondly, the optimization model of location layout recursive is established taking the minimum of maximum deformation of thin-walled parts as the target of optimization. The maximum deformation is obtained through parametric modeling analysis of thin-walled parts positioning system. Finally, the layout optimization is fulfilled using the hybrid particle swarm optimization algorithm through stepwise solving strategy.

Keywords: Aircraft thin-wall part; 0–1 integer programming; Parametric modeling; Layout optimization; Hybrid particle swarm algorithm

(责编 铃兰)