

飞机框间单向压紧制孔预紧固件布置优化

齐振超, 王 珉, 陈文亮, 王 威

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

[摘要] 单向压紧制孔工艺是飞机轻型自动化制孔系统的关键技术。选取某型号飞机机身与机头段框间对接处的典型位置作为研究对象, 重点研究单向压紧制孔时预紧固件的布置对制孔质量的影响。首先, 建立仿真模型, 确定影响参数; 然后, 设计仿真试验, 得到离散样本点数据; 最后, 以 Isight 作为平台响应面近似模型, 以模拟退火全局搜索算法作为工具实现离散数据的分析与优化, 得到最优预紧固件的布置参数, 从而确定最优布置方案。

关键词: 飞机装配; 机械连接; 单向压紧; 预紧固件; 优化; 有限元仿真; 制孔

Optimization of Pre-Tightening Arrangement for One-Side Pressed Hole Making Between Aircraft Frames

QI Zhenchao, WANG Min, CHEN Wenliang, WANG Wei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] The one-side pressed hole making process is a key technology for light automated holing system of aircraft. This article selects the typical position of the docking between aircraft fuselage and head section of a certain model as the research object, and mainly studies the influence of arrangement of the pre-tightening fixture on the quality of the hole during the unidirectional compression. Firstly, a simulation model was established to determine the influence parameters. On this basis, the simulation experiment was performed to obtain the discrete sample point data. Finally, the response surface methodology approximation model was established through Isight platform and an adaptive simulated annealing algorithm was used to analyze and optimize discrete data. Optimization results obtain the optimal pre-tightening arrangement parameters and corresponding layout scheme.

Keywords: Aircraft assembly; Mechanical connection; One-side pressed; Pre-tightening; Optimization; Finite element simulation; Hole making

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.20.058

在飞机装配过程中, 机械连接是最主要的结构件连接工艺, 这就要求在飞机结构连接件上加工大量的连接孔^[1]。在飞机总装上, 普遍采用先对结构件进行预装配, 再对待加工孔位处统一制通孔的方法。由于飞机结构件存在刚性弱的特点, 再加上零部件表面的容差以及制孔时钻头轴向力的作用, 会导致零部件贴合面发生分离。而较大的夹层间隙会不可避免地产生钻削出入口毛刺, 当刀具每次钻出钻入时, 还会造成断屑, 这些切屑可能填充在板件之间, 进一步影响夹层贴合, 严重影响连接处的装配质量^[2]。

轻型自动化装配系统是一种成本较低、适用于小批量产品的新型自动化装配系统。它已经较成熟地应用在飞机总装上。当前轻型自动化制孔系统主要包括工

业机器人制孔系统、柔性轨道系统和爬行机器人制孔系统。它采用单向压紧制孔工艺来避免夹层毛刺和切屑的产生。即在蒙皮外侧的钻孔位置处施加局部压紧力使贴合面更好地贴合, 保证夹层间隙在一定范围内(一般阈值为 0.127mm), 很好地满足航空制孔要求, 实现钻孔“无毛刺”(图 1)。

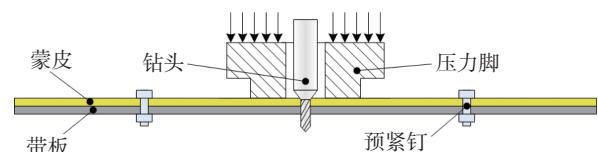


图1 轻型自动化装配系统单向压紧制孔示意图

Fig.1 Schematic diagram of unidirectional compression hole making by light automated assembly system

对于单向压紧制孔工艺,国外的研究比较少, Melkote 等^[3]对飞机蒙皮和框装配的制孔进行了一定的试验设计与研究,分析了工件材料、钻削参数、夹紧方式等对钻孔毛刺的影响。王珉等^[4]研究了压紧力对框上对接结构的单向压紧制孔的影响。姜丽萍等^[5]针对单向压紧工艺,提出了一种自适应响应面的优化方法,提高了效率和精度。李聪^[6]研究了面向机器人自动化叠层制孔过程的压紧力优化方法,将层间毛刺控制在 0.08mm 以内。上述研究取得了一定的成果,然而并未涉及框间部位大量密集孔位的制孔工艺及优化方法。

本文主要针对飞机典型框间对接结构,深入研究预紧固件布置及压紧力对制孔时夹层间隙的影响。而预紧固件数目是决定预紧固件布置方案的主要参数。该参数是一种离散型的整型变量,其解决的途径为将这些离散数据通过一种拟合方法转换为连续的函数模型,对该函数模型寻优再离散化。本文主要利用多学科优化软件 Isight 来完成整个优化过程。

1 框间对接单向压紧制孔工艺参数

图 2 是从某民用飞机机身与机头对接处三维模型截取的典型结构。两侧分别有机身框和机头框支撑,中间的对接蒙皮通过带板来缝合间隙,以一定数量的对接接头和长桁接头作为连接件,从而实现机身与机头的对接。

影响单向压紧制孔工艺的因素很多,包括加工工件的材料与安装结构、所使用的钻孔工具和压紧设备、设定的钻削参数等,对于本文来说飞机框间对接处的结构和各零部件(蒙皮、带板)的材料均是固定的,其他主要影响钻孔时夹层间隙大小的参数如下。

(1) 压紧力: 钻孔时压力脚由钻孔的入口侧施加一定的单向压紧力,使蒙皮与带板在弹性变形下会很好地贴合在一起,成为“一体”,有效地抑制钻头轴向力引起带板弹性变形所产生的间隙。

(2) 轴向力: 钻头在钻孔时不断地进给会产生一个持续的轴向进给力,这个力垂直于钻孔表面很容易使加工表面产生法向变形,引起很大的夹层间隙,从而产生毛刺及切屑。

(3) 预紧固件位置: 在所有待加工孔位的合适位置预先制孔并装上紧固螺钉,增加接触面的法向约束力,增加制孔时带板表面抵抗变形的能力。

(4) 预紧力: 预紧固件所施加的预紧力太小会达不到夹紧效果,太大会伤害工件表面。

由于飞机框间对接结构部位内部无任何支撑结构,同时所需制孔量大、制孔质量高,导致对该位置进行单

向压紧自动化钻孔的难度很高。此时预紧固件的安装疏密与位置将对制孔时夹层间隙产生很大影响。为便于研究预紧固件位置参数,消除其他工艺参数影响。考虑到实际工况,从而确定轴向力 F_a 为 100N, 预紧力 F_p 为 200N, 压紧力 F_c 数值控制在 100~1000N。

轴向力是根据《航空制造工程手册》中的《金属材料切削加工》分册,查询得钻削铝合金的切削力和功率,采用 W6Mo5Cr4V2 (高速钢) 钻头钻削铝合金的轴向力为

$$F=340d_0f^{0.8} \quad (1)$$

按照式(1),采用钻削直径为 4mm,进给量 4mm/s, 转速 6000r/min, 即 f 为 0.04mm/r 时,钻削力为 104N。此时,进给 10mm 厚钻一个孔需 2.5s,保证了加工效率,在 6000r/min 的高转速下,既保证了较大的钻削速度,又保证了较小的进给量 f 。

预紧力是根据目前航空领域普遍采用的弹簧夹对工件进行预紧,利用测力传感器测量适用于直径 4mm 孔的预紧弹簧夹在夹紧状态下的力为 200N 左右。

压紧力是据国外设备实际范围 30~100kg 而确定,因此本文在分析时取压紧力的范围为 100~1000N。

2 预装配临时紧固件的布置分析与优化

2.1 优化方法

根据初步分析结果,将决定预紧固件布置方案的参数确定为外侧和内侧预紧固件数目。故本次优化将主要集中在确定最优的外侧和内侧预紧固件数目上。由于该参数水平较多和安装方案的不确定性,采用逐一进行计算分析然后比较优选的办法能得到较好的结果,但是时间及精力耗费较多。

本文采用的优化思想路线是,首先根据外侧和内侧预紧固件数量来设计合理的试验方案;然后分别对每个试验方案下的布置方案进行有限元建模与仿真,以期得到所有试验方案对制孔时夹层间隙的影响结果;最后以每种试验方案的最危险孔位下所能达到的最小间隙作为输出结果,外侧预紧固件数和内侧预紧固件数作为输

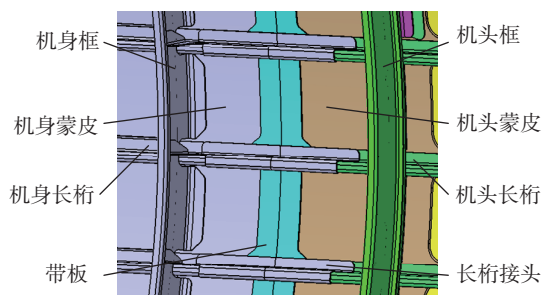


图2 典型框间对接结构

Fig.2 Typical inter-frame docking structure

入参数,这样将多组样本点数据导入 Isight 软件中,先拟合成一个连续的响应面模型,再通过一种全局优化算法找到在满足制孔间隙要求下,外侧和内侧预紧固件数目之和最小的最优解。根据最优解设计最优预紧固件安装方案。

该过程中先将离散的两个整型参数通过响应面转化为连续的参数变量,再用全局搜索算法获得满足约束条件的整型输入数值,最终得到的结果将两个输入参数又转换成原来的离散变量,解决了离散变量优化问题。

2.2 预装配临时紧固件试验方案设计

飞机框间对接处的筒段结构由若干个滚弯的蒙皮和带板钣金件拼接而成,其典型基本结构如图 2 所示。本试验截取了三维模型中的两个基本结构段作为分析典型(有利于表达安装方案的规律性),找到该段的预紧固件最优安装方案进而推广到整个对接段的安装方案中。如图 3 所示,空心圆处表示孔位,将所有孔位根据其在带板上的位置分成两种,靠近带板边缘的孔位为外侧孔位,靠近带板中心的孔位为内侧孔位。平均每个基本结构段有 9 个孔位,所以本文分析相应的内侧、外侧预紧固件数目水平均为 0~18,即水平数共 19 个。

采用正交数组试验设计方法可有效减少试验分析次数。本试验两个主要影响因子分别是内侧预紧固件数、外侧预紧固件数。两个因子设计 4 个水平,均为 0、2、6、9。用正交表表示为 $L_{16}(4^2)$,如表 1 所示,L 为正交表的代号,16 为试验的次数,4 为水平数,2 为列数。

要确定的方案必须是该数目下最有利于对所有孔

进行制孔的方案,即使确定了预紧固件数目,也很难确定该数目下预紧钉安装方案。由此提出了以下几个原则来初步确定预紧固件安装方案。

(1) 凸耳孔位处要有预紧固件。凸耳位于连接处,必须有用预装配对接接头的预装配孔。

(2) 对所有孔位达到理论上的最大紧固作用,使钻孔时产生的最大间隙值最小。

(3) 紧固钉尽量分布均匀,充分利用零件的结构力学性质。

(4) 确定方案时优先考虑外侧预紧。同样的外部条件下外侧孔位制孔间隙明显比内侧孔位大,一般地,危险孔位均发生在外侧孔位处。

由于试验 1 无任何紧固件的情况将不满足要求,不再进行分析。对于其他 15 种试验方案,能够满足条件的预紧固件安装布置方案就会很受局限,一般只会 1~2 种。而后者需要分别对这两种方案进行有限元分析,以夹层间隙结果最小的方案作为该预紧固件数目的最优方案。图 4 为预紧固件布置方案示意图(外侧预紧固件-内侧预紧固件),其中黑色圆表示有预紧固件,五角星孔位为需要分析的危险孔位。

2.3 建立有限元分析模型

采用非线性有限元软件 ABAQUS 进行有限元分析,有限元模型如图 5 所示。各个零件的材料属性定义如表 2 所示。

本文中的蒙皮、带板与螺栓均是相对规则的三维实体,可通过 ABAQUS 本身的网格划分技术将它们都划分为 C3D8R(八节点六面体线性减缩积分单元)。网格单元尺寸的定义,要遵循接触面的面网格比主面网格细的原则,同时兼顾整个仿真分析成本。在确定接触的主从面后,定义各零件的全局网格单元尺寸,即蒙皮 8mm,带板 6mm,螺栓与螺母均为 0.8mm。蒙皮与带板是承受载荷的主体,为了使模拟结果更精确,在厚度方向上采用 4 个减缩积分单元。同时要对压紧环、螺栓、轴向力加载圆处等受力部位的网格进行细化,更好地保证仿真精度,以便输出更详细的结果,如图 6 所示。

在 CAE 分析过程中设定的工况必须尽量与实际工况相近。压紧力可通过在蒙皮表面分割出的压环上施

表1 L16(42) 试验正交表

Table 1 L16(42) test orthogonal table

试验号	外侧预紧固件数	内侧预紧固件数
1	0	0
2	0	2
3	0	6
4	0	9
5	2	0
6	2	2
7	2	6
8	2	9
9	6	0
10	6	2
11	6	6
12	6	9
13	9	0
14	9	2
15	9	6
16	9	9

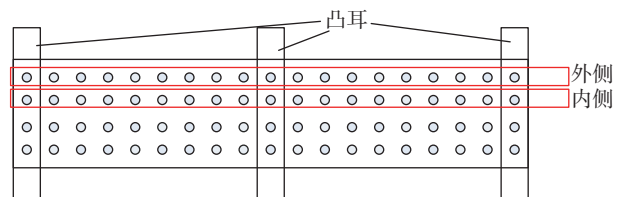


图3 框间对接带板基本结构及孔位模型

Fig.3 Basic structure and hole model of the butt strap between frames

加一个持续作用力来实现,力从 100N 开始,以每 100N 为一个增量单位,一直加载到 1000N 为止。钻头轴向力可用一个施加在带板表面圆(该圆与蒙皮压环同轴)上 100N 的力来代替。预紧力是通过在每个螺栓施加 200N 的螺栓载荷来实现。

定义的边界及约束条件。如图 5 蒙皮左右两侧端面分别连接到机身框和机头框,此处相当于固支约束,限制其 U_1 、 U_2 、 U_3 的自由度;蒙皮与带板上下端面均施加对称约束;螺栓与螺母定义为绑定约束;其他接触面均定义为点-面接触。

2.4 有限元分析结果

以外侧 6 个、内侧 2 个预紧固件为例,仿真分析方案中所示的危险孔位,会得到如图 7 所示的影响曲线图。图 7 中共 28 条曲线分别反映危险孔位周边 28 个

表2 材料属性

Table 2 Material properties

参数	蒙皮	带板	预紧固件
弹性模量 E/MPa	72400	72400	71000
泊松比 μ	0.33	0.33	0.33

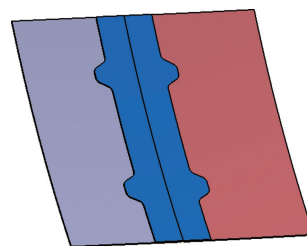


图5 框间对接有限元分析模型

Fig.5 Inter-frame docking finite element analysis model

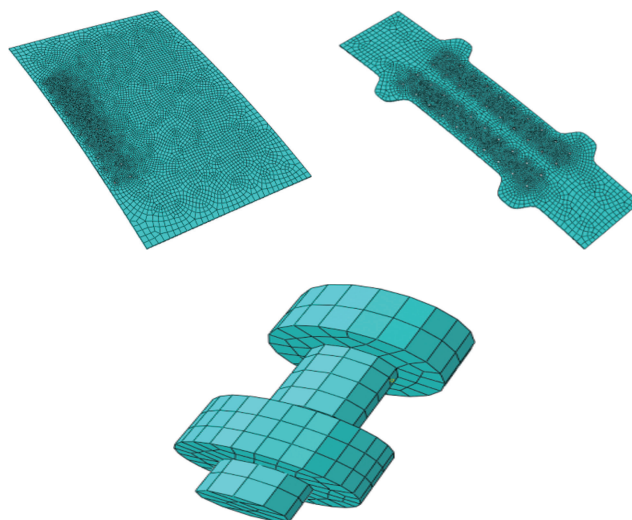


图6 模型各部分网格划分

Fig.6 Mesh partitioning of each part of the model

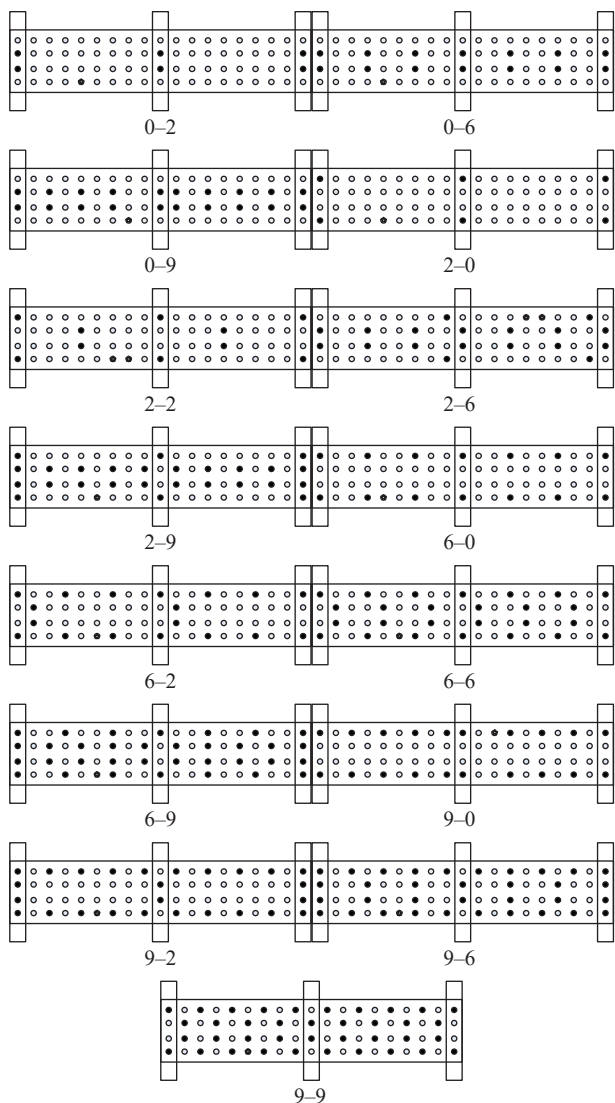


图4 预紧固件布置方案示意图

Fig.4 Schematic diagram of the pre-tightening fixture arrangement

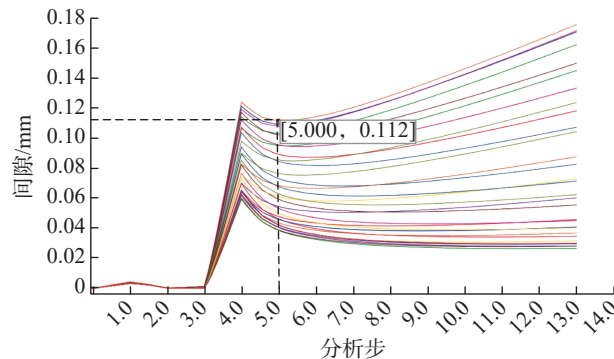


图7 单向压紧力变化对夹层间隙影响曲线

Fig.7 Effect curve of different one-side pressed forces on interlayer clearance

节点处间隙受压紧力变化的影响。最高曲线为此危险孔位的危险节点,极小值点位是 [5.000,0.112],即通过控制压紧力使该节点处所能达到的间隙最小值为 0.112mm,定义此值为方案输出值,此时对应的压紧力数值为 200N。

逐次分析 15 种布置方案得到表 3 的数据。对于拥有多个危险孔位的方案,如 5 号和 6 号孔位,需要比较这些危险孔位的危险节点的间隙最小值,取较大的值作为方案输出值。

2.5 离散变量的分析与优化

Isight 可以整合设计流程中所使用的各种软件,并且是能进行多学科设计最优化的软件,素有“软件机器人”之称。Isight 主要侧重于提供多学科设计优化和不同层次优化的技术以及优化过程管理能力,整合了 4 大数学算法(试验设计、近似模型、探索优化和 6 Sigma),让计算机自动化驱动 CAE 设计仿真流程,从而更快、更好、更经济地改进产品性能,降低能源消耗,并且节约成本。Isight 已广泛应用于汽车、动力、航空航天、电子、船舶、兵器等多个行业/领域。

由于 Isight 软件在处理离散数据方面和多学科优化分析方面的优势,本文选择该软件作为优化分析平台。直接调用其逼近模型模块中合适的近似模型方法及优化工具包中合适的搜索式算法分析仿真所得的离散数据。在 Isight 进行参数优化的 Task workflow 如图 8 所示。

响应面法(Response Surface Methodology)作为一种近似模型,其核心是试验设计响应样本点,结合试验或仿真获得样本点响应值,通过多项式函数拟合设计空间模型。可以通过较少的试验在局部范围内比较精确的逼近函数关系,用简单的代数表达式展现出来,计算简单,并且给设计优化带来极大的方便。通过选择回归模型,拟合了复杂的响应关系,具有良好的选择鲁棒性。

以上述 15 个样本点数据构建 4 阶响应面模型。运行得到响应面方程为:

$$\delta=0.288984+0.0087944X_1-0.006810X_2-0.011557X_1^2+0.00202587X_2^2+0.00020504X_1X_2+0.0008721X_1^3-0.0001637X_2^3 \quad (2)$$

式中, X_1 、 X_2 分别为内侧与外侧预紧固件数目, δ 为间隙值。将同样的 15 组预紧方案代入响应面模型,通过比较得到的预测值与仿真真实值来检验该响应面模型的拟合精度。响应面所预测的值与真实值非常接近,拟合效果很好,如图 9 所示。

以上述响应面模型为基础,选择 ASA (模拟退火算法)作为优化算法,该算法在离散变量的组合优化问题

表3 所有方案分析结果
Table 3 Results of all program analysis

试验号	外预紧固件数	内预紧固件数	方案输出值 / mm	对应压紧力 / N
1	0	2	0.2938	500
2	0	6	0.2815	400
3	0	9	0.265	400
4	2	0	0.2682	500
5	2	2	0.243	400
6	2	6	0.2784	400
7	2	9	0.26	400
8	6	0	0.1124	200
9	6	2	0.112	200
10	6	6	0.1146	200
11	6	9	0.1115	200
12	9	0	0.06853	1000
13	9	2	0.06898	100
14	9	6	0.07137	100
15	9	9	0.06684	100

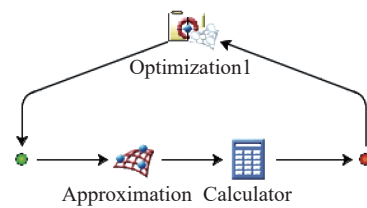


图8 Isight分析 workflow
Fig.8 Analysis workflow of Isight

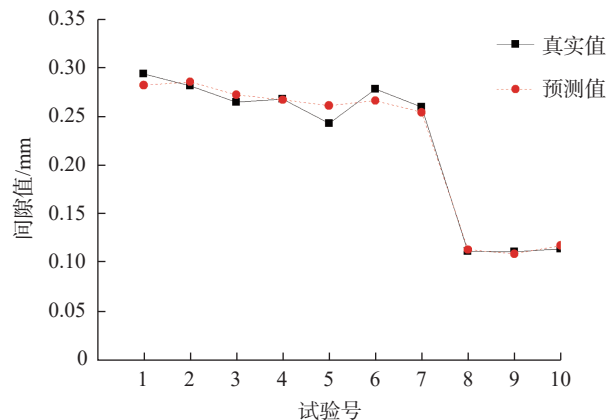


图9 拟合精度检验
Fig.9 Accuracy test of curve fitting

和连续变量函数的极小化问题方面都获得了很大成功。其优势包括：能够处理任意的系统和目标函数；能有效探索全局最优解；适合处理实数型、离散型设计变量；具有较好的收敛性。

最终经过约 70 次的运算,得到了优化结果,即外侧预紧固件数为 6,内侧预紧固件数为 0。

2.6 结果分析

(1) 外侧预紧固件对间隙影响很大,内侧预紧固件对间隙影响很小。在制孔过程中,可将带板横截面看作是一个类悬臂梁结构,每种预紧位置方案的最大间隙孔位均发生在距离带板中线较远的外侧孔位。外侧预紧固件数目越多,对所加工孔位处的纵向(带板中线方向)约束力就越大,增强了带板抵抗钻削力致使其变形的能力;内侧孔位距带板中线较近,产生的间隙明显较外侧小。增加内侧预紧固件数目对外侧间隙影响微乎其微,没有太大意义。图 10 为内外侧预紧钉变化对间隙的影响曲线。

(2) Isight 所得最优解的仿真间隙值为 0.1124mm,符合制孔要求,可根据这个最优解来设计最优布置方案。如图 11 所示,与前期预定方案 6-6 相比,既达到了工艺要求,又大大提高了制孔效率。

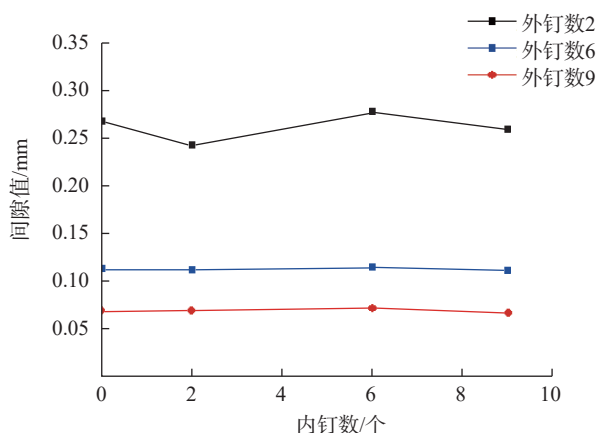


图10 内外侧预紧钉变化对间隙影响曲线

Fig.10 Influence curve of gap change under the inner and outer pre-tightening nails

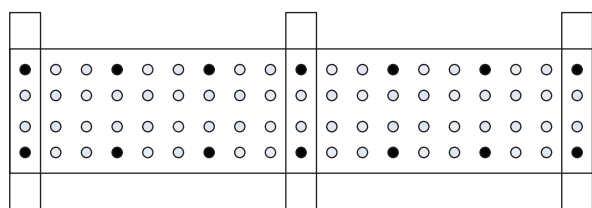


图11 最优预紧固件布置方案

Fig.11 Optimal pre-tightening arrangement

3 结论

本文主要研究了飞机框间对接处预紧固件的布置优化,通过对有限元仿真与优化进行分析,并对结果进行讨论,得出如下结论:

(1) 压紧力的变化对不同方案下制孔的影响不同,存在一个间隙最小的极值点,该点的压紧力数值为最适于该方案的压紧力。

(2) 预紧固件数对制孔过程中叠层间隙影响很大,间隙量随预紧固件数目的增加而减小,尤其是带板外侧预紧固件数目影响尤为明显。

(3) 最优预紧固件数目为平均每个基本机构段上的外侧安装 3 个预紧固件,内侧没有预紧固件,此时的压紧力为 200N 最佳。

(4) 本文的预紧固件布置优化分析为试验分析提供了依据,可以有效降低试验成本。

参考文献

- [1] 王良,郭春英.飞机装配制孔技术发展浅析[J].航空制造技术,2017,60(23): 88-92.
WANG Liang, GUO Chunying. Drilling technology development analysis in aircraft assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(23): 88-92.
- [2] KELLY B, COSTELLO C. FEA modeling of setting and mechanical testing of aluminum blind rivets[J]. Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 74-79.
- [3] MELKOTE S N, NEWTON T R, HELLSTERN C, et al. Interfacial burr formation in drilling of stacked aerospace materials[C]// Proceedings of the CIRP International Conference on Burrs. New York: Springer, 2009.
- [4] 王珉,薛少丁,陈文亮.面向飞机自动化装配的单向压紧制孔毛刺控制技术[J].航空制造技术,2011,54(9): 26-29.
WANG Min, XUE Shaoding, CHEN Wenliang. One-side pressed burrless drilling technology for aircraft automatic assembly[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(9): 26-29.
- [5] 姜丽萍,陈文亮,王珉.单向压紧制孔工艺的自适应响应面优化方法[J].中国机械工程,2015,26(23): 3156-3161.
JIANG Liping, CHEN Wenliang, WANG Min. An approach to adaptive response surface optimization of one-side pressed drilling process[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(23): 3156-3161.
- [6] 李聪.面向机器人自动化叠层制孔过程的压紧力优化[D].杭州:浙江大学,2016.
LI Cong. Optimization of the clamping force during aircraft stacked panels hole-making process[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.

通讯作者:齐振超,工学博士,讲师,研究方向为先进飞机装配技术,主持自然科学基金、航空科学基金等数项, E-mail: qizhenchao2007@foxmail.com。

(责编 知舟)