

飞机壁板装配偏差传递与演变及其优化方法



康永刚,李国茂,宋嗣仁,陈勇刚,华硕果,王仲奇

西北工业大学, 陕西 西安 710072

摘要:壁板的装配准确度直接影响飞机的气动力特性,在装配过程中受到夹紧力、铆接力、回弹力、装配顺序等影响,壁板将发生不同程度的变形,装配变形与零件偏差、夹具偏差等相互耦合,导致壁板最终的装配准确度难以预测和控制。针对以上问题,本文对壁板装配过程中偏差的传递与演变规律进行研究,构建了壁板装配偏差传递与演变的刚柔混合模型与壁板装配准确度的评价准则;采用确定性分析法计算壁板的刚性定位偏差,并通过建立多步夹紧和不同长桁装配顺序下的偏差状态空间模型,揭示了壁板装配过程中偏差的演变规律,实现了壁板装配偏差的准确预测;提出了基于代理模型和智能优化算法的长桁装配顺序稳健优化设计方法,通过装配顺序优化使壁板的装配质量得到了整体提升。

关键词:飞机装配;飞机壁板;偏差传递与演变;装配顺序优化

中图分类号:V262.4

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.04.006

飞机装配是飞机制造过程的主要环节,组件是构成部件和整机的基础,装配精度对后续部件和整机的装配质量有着直接的影响。壁板是构成飞机气动外形的重要组件,其装配质量的好坏直接影响着后续部件和整架飞机的装配精度,对保证飞机的飞行性能至关重要^[1]。由于零件制造偏差、夹具偏差及装配工艺等多源随机误差的耦合作用,导致壁板偏差发生传递和演变,这给装配偏差的准确预测、实时测量和精准控制带来了挑战^[2]。

装配偏差是指产品实际装配尺寸与设计尺寸之间的偏离值,其产生和演变受到多种工艺因素的影响^[3],目前,针对刚体零件的装配偏差分析与综合理论已相对成熟,但无法满足薄壁结构件装配偏差分析的需求。刚性假设中基于确定性分析的偏差模型得到广泛使用,Cai等^[4-5]通过建立零件在定位点处的约束方程分析了零件偏差、夹具偏差与零件位姿变动之间的关系。而在线弹性、小变形假设条件下,基于柔性假设的偏差模型主要有直接有限元法、影响系数法和多工位状态空间法。Menassa和Kashyap等^[6-7]采用有限元法、分析定位点布局对定位偏差的影响,控制零件在主定位面的法向变形。Liu等^[8]提出了基于有限元分析的

柔性零件装配偏差分析方法,即影响系数法(MIC),建立了装配与零件偏差之间的关系。Camelio等^[9]借鉴控制理论中的状态空间方法,建立了薄壁件多工位偏差传递的状态空间模型。赵仕伟等^[10]建立了柔性后缘可变形机翼气动弹性系统的状态空间模型,用于计算柔性后缘可变形机翼的颤振特性和阵风响应。

在装配顺序优化方面,基于时间的方法-时间-测量法(MTM)规定了一些常见动作所需的基本作业时间。在基于成本的装配顺序优化方面,施祥玲等^[11]针对航天产品装配公差优化设计问题,提出一种引入装配成本的多目标优化方案。张海洋等^[12]基于装配质量,在确定性优化的基础上,考虑产品性能在不确定因素影响下的波动,对其进行稳健性优化设计。

目前,薄壁结构装配偏差刚柔混合建模的研究并不充分,主要将夹具定位偏差和零件制造偏差进行简单累加,一同视为刚性建模中确定性分析的输入偏差;且没有考虑夹紧顺序对偏差传递的影响,即认为零件是同时夹紧的;在偏差的演变上,将铆接装配引起的壁板变形过程进行简化建模;装配顺序优化方面,以装配时间和装配成本为评价指标

收稿日期: 2023-10-15; 退修日期: 2024-01-16; 录用日期: 2024-02-23

基金项目: 国家自然科学基金(52375517,92067205);航空科学基金(2018ZE53050)

引用格式: Kang Yonggang, Li Guomao, Song Siren, et al. Transfer and evolution of aircraft fuselage panel assembly deviation and optimization methods[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(04): 40-51. 康永刚,李国茂,宋嗣仁,等. 飞机壁板装配偏差传递与演变及其优化方法[J]. 航空科学技术, 2024, 35(04): 40-51.

并不能保证产品的装配质量,需要综合考虑变形对偏差传递的影响,对壁板的装配准确度进行预测,并以装配质量稳健性为评价指标对壁板的装配顺序进行优化。

本文开展了飞机壁板装配偏差传递与演变及其优化方法的研究。首先,基于装配准确度的评价准则,采用确定性分析和状态空间法构建壁板的装配偏差模型,并利用蒙特卡罗法进行求解。其次,基于代理模型和智能优化算法提出了壁板装配顺序稳健优化设计方法。最后,通过对壁板装配偏差建模以及装配顺序优化进行实例分析,对比优化前后装配质量变化,验证本文所提方法的可行性和有效性。

1 偏差分析与建模求解思路

1.1 飞机薄壁件装配偏差源分析

由蒙皮、长桁、框以及角片等壁板组件,通过连接装配形成的组合式壁板具有壁厚薄、尺寸大、刚性差、结构复杂的特点,在定位夹紧、连接和释放的过程中极易产生变形,使偏差的传递过程发生演变。本文结合多点支撑柔性工装开展飞机壁板装配偏差的研究,如图1所示。

壁板具体的装配定位过程为:(1)蒙皮确定性定位点和过定位点夹紧;(2)长桁定位夹紧,以蒙皮及长桁上预制的

定位孔和蒙皮内型面定位长桁,并将长桁夹紧;(3)蒙皮与长桁铆接装配,即将长桁按照一定的顺序与蒙皮铆接装配在一起形成蒙皮-长桁子装配体;(4)框、角片依次完成定位夹紧和装配铆接,形成壁板。

在壁板装配过程中,受设备精度、生产能力、环境等各种因素的影响,会产生各种各样的偏差,根据偏差作用规律的不同,将各类偏差进行分类整理,如图2所示。

对于零件和夹具偏差,只有确定性定位点(LP)处的偏差才会引起定位后零件各关键特征点(CP)的位置偏移。而定位偏差主要受零件偏差和夹具偏差以及定位策略的影响,考虑到本文主要研究偏差的传递和演化,因此可将定位偏差视为零件偏差和夹具偏差综合作用的结果。装配工艺包括多种因素,不同的定位布局、不同的装配顺序等都会使零件产生不同的位置偏移。变形偏差产生的因素众多,如在重力、夹紧力、连接力等作用下极易产生变形,而变形偏差会改变零件上其余各CP偏差的传递方向,即偏差演变。

1.2 建模思路与求解方法

本文采用关键特征点来表征薄壁件的关键几何特性,达到“以点代面”的效果,通过关键测量点(KMP)^[13]偏差的“均值+标准差”来衡量装配准确度以实现对壁板装配准确度的检测,偏差的均值 μ 反映尺寸的正确性,标准差 σ 表示尺寸的稳定性。

根据飞机壁板装配工艺并结合前面的偏差源分析,确定性定位采用刚体分析,过定位及铆接装配则考虑被连接件为柔性体构建壁板的装配偏差模型,并基于蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟法实现模型的求解。即建立以蒙皮制造偏差、长桁制造偏差和夹具偏差为输入,关键测量点(KMP)偏差为输出的装配偏差模型,统计计算出关键测量点装配偏差的均值和标准差特性,实现装配偏差分析。建模与求解思路如图3所示。

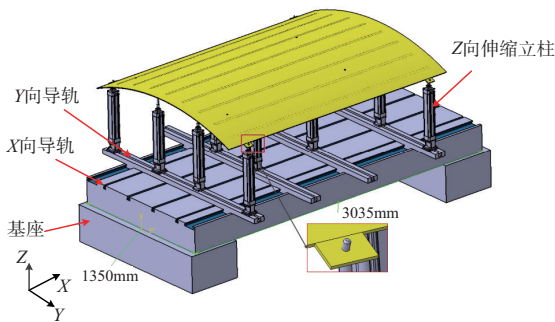


图1 多点支撑柔性工装

Fig.1 Multi-point support flexible tooling

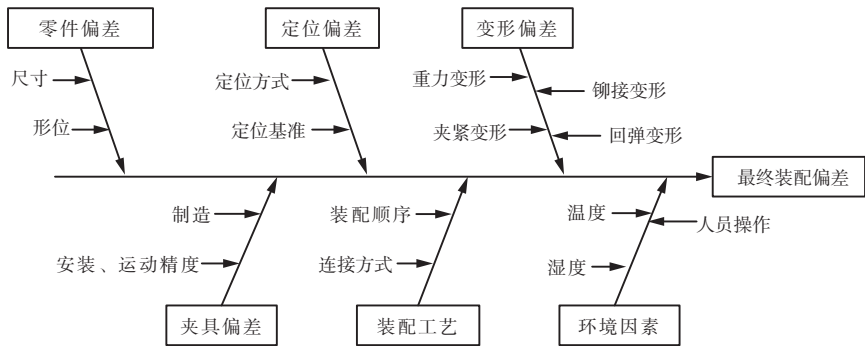


图2 壁板装配偏差源鱼刺图

Fig.2 Panel assembly deviation source fishbone diagram

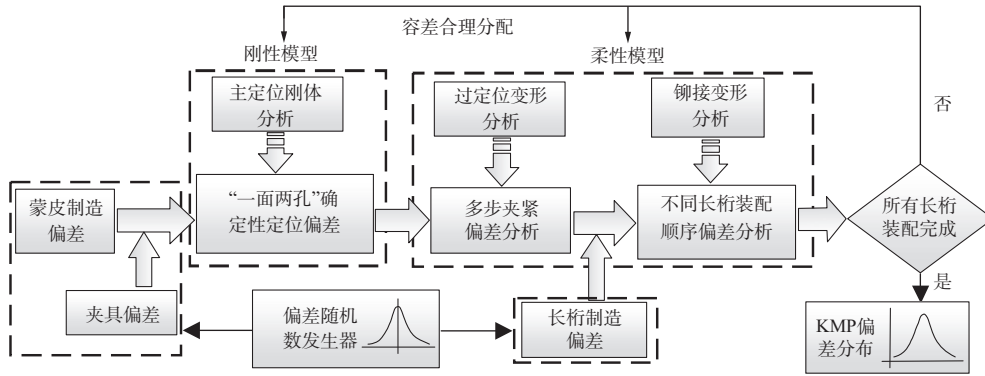


图3 建模与求解思路

Fig.3 Modeling and solving ideas

为了全文符号统一,结合壁板的装配工艺及特征点分类对偏差符号做以下规定:为了区分装配过程的不同阶段,分别采用左上标(0)、(1)、(2)、(3)来表示初始、确定性定位、夹紧、铆接装配阶段;右下标L、A、J、M分别表示确定性定位点(LP)、过定位点(AP)、铆接点(JP)和关键测量点(KMP);右上标于不同阶段有不同的符号作为附加定义,下文再作解释。

2 壁板装配偏差传递与演变建模

2.1 壁板确定性定位偏差分析

壁板组件在定位时通常采用N-2-1定位原理进行定位以减少法向变形,即在主定位面上设置N个定位点,现就N-2-1定位原理建立具体的计算模型^[4]。假设蒙皮在确定性定位时是由定位孔H1和H2以及H1、H2和H3组成的平面实现的,即“一面两孔”定位,结构如图4所示。H1相当于一面两孔定位中的圆柱孔,约束X、Y、Z三个方向的自由度,H2约束X、Z向自由度相当于一面两孔定位中的销孔,H3只约束Z向自由度,H4和其他定位点作为过定位点对蒙皮进行定位。当采用一面两孔定位时,6个确定性定位点在夹具坐标系中可以表示为 $P_{L1}^F=[0 \ P_{H1y}^F \ 0]^T$, $P_{L2}^F=[0 \ P_{H2y}^F \ 0]^T$, $P_{L3}^F=[P_{H3x}^F \ P_{H3y}^F \ 0]^T$, $P_{L4}^F=[0 \ P_{H1y}^F \ 0]^T$, $P_{L5}^F=[0 \ P_{H2y}^F \ 0]^T$, $P_{L6}^F=[0 \ P_{H1y}^F \ 0]^T$ 。按照六点定位的确定性定位原理^[4,15],通过建立零件在定位点处的约束方程,利用线性变分法建立定位偏差与夹具偏差的关系

$$\delta r^F = -J^{-1} \Phi_R \delta R \quad (1)$$

当夹具坐标系与零件坐标系重合时,第*i*个雅克比矩阵为 $J_i = [-n_{ix}^F - n_{iy}^F - n_{iz}^F \ n_{ix}^F - n_{iy}^F - n_{iz}^F \ n_{ix}^F - n_{iy}^F - n_{iz}^F \ n_{ix}^F - n_{iy}^F - n_{iz}^F \ n_{ix}^F - n_{iy}^F - n_{iz}^F \ n_{ix}^F - n_{iy}^F - n_{iz}^F]$ 。

设定位点处夹具偏差在夹具坐标系中为 ${}^{(0)}V_L^F$,则由其引起的零件位置偏移为

$$\delta r^F = S^F \cdot {}^{(0)}V_L^F \quad (2)$$

式中, S^F 表示夹具偏差的敏感度矩阵。联立式(1)和式(2),并注意到 ${}^{(0)}V_L^F = \Phi_R \delta R$,因此敏感度矩阵 $S^F = -J^{-1}$ 。

对于零件上确定性定位特征的偏差引起的位置偏移,可以利用不同坐标系间的相互转换来计算装配单元的定位偏差,即齐次坐标变换。对于图4所示的一面两孔定位,共有5个定位特征,位于主定位面的约束Z向自由度的三个定位特征H1~H3,以及两个定位孔h1和h2,当零件上的定位特征存在偏差时,引起的零件位置偏移为

$$\delta r^P = S^P \cdot {}^{(0)}V_L^P = S_{H1}^P \cdot \delta r_{H1}^G + S_{H2}^P \cdot \delta r_{H2}^G + S_{H3}^P \cdot \delta r_{H3}^G + S_{h1}^P \cdot \delta r_{h1}^G + S_{h2}^P \cdot \delta r_{h2}^G \quad (3)$$

S^P 为零件上的定位特征偏差对零件位置偏移的敏感度矩阵。定位后零件上对应定位特征与夹具接触的点在夹具坐标系中表示为 $P_1^F \sim P_5^F$,数值上与 $P_{L1}^F \sim P_{L5}^F$ 相同,由齐次变换 $T_G^H \cdot T_F^G \cdot \tilde{P}_i^F = \tilde{P}_i^H (i=1,2,3)$; $T_G^{h1} \cdot T_F^G \cdot \tilde{P}_4^F = \tilde{P}_4^{h1}$; $T_G^{h2} \cdot T_F^G \cdot \tilde{P}_5^F = \tilde{P}_5^{h2}$ 可得5个定位特征点相对各自特征坐标系的齐次坐标矢量,并注意其在各特征坐标系下垂直于相应特征方向的

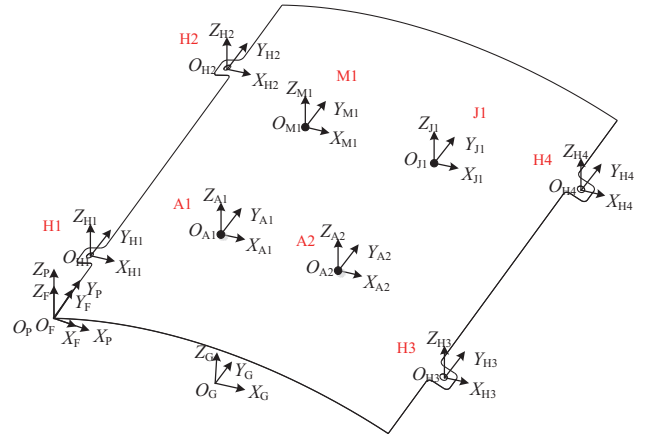


图4 蒙皮及各坐标系

Fig.4 Skin and each coordinate system

坐标为0。由齐次坐标变换的性质 $T_1^2 = {}^0T_1^2 \cdot \delta T_1^2 = {}^0T_1^2 + {}^0T_1^2 \Delta_1^2$, 以及 Zhou Shiyu^[16]所提的方法计算并重新排列各项将其置于式(3)的形式中^[17], 可得出 $S_{11}^p \sim S_{13}^p, S_{h1}^p \sim S_{h2}^p$ 。利用式(2)和式(3)可得夹具偏差和零件偏差引起的零件位置偏移, 将两部分相加可以得到确定性定位后蒙皮的位置偏移为

$$\delta r = \delta r^F + \delta r^P = S^F \cdot {}^0V_L^F + S^P \cdot {}^0V_L^P \quad (4)$$

设任意CP在全局坐标系下的坐标为 $P_{CP}^G = [P_{CPx}^G, P_{Cpy}^G, P_{CPz}^G]$, 夹具坐标系原点为 $P_F^G = [P_{Fx}^G, P_{Fy}^G, P_{Fz}^G]$, 则由确定性定位后零件的位置偏移 δr 可以求出零件上任意一个CP在全局坐标系下的偏差^[18]

$$V_{CP}^G = {}^0SS_{CP} \cdot \delta r = \begin{bmatrix} I & Q_{CP} - Q_F \\ 0 & I \end{bmatrix} \delta r \quad (5)$$

其中

$$Q_{CP} = \begin{bmatrix} 0 & P_{CPz}^G & -P_{Cpy}^G \\ -P_{CPz}^G & 0 & P_{CPx}^G \\ P_{Cpy}^G & -P_{CPx}^G & 0 \end{bmatrix}, Q_F = \begin{bmatrix} 0 & P_{Fz}^G & -P_{Fy}^G \\ -P_{Fz}^G & 0 & P_{Fx}^G \\ P_{Fy}^G & -P_{Fx}^G & 0 \end{bmatrix}。$$

因此由式(5)可求出任意CP在全局坐标系下的偏差为

$${}^0V_{CP} = {}^0S \cdot \delta r + {}^0V_{CP}^P = \begin{bmatrix} {}^0S_A \\ {}^0S_J \\ {}^0S_M \end{bmatrix} \delta r + \begin{bmatrix} {}^0V_A^P \\ {}^0V_J^P \\ {}^0V_M^P \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 壁板组件多步夹紧偏差传递建模与求解

壁板在确定性定位后对过定位点逐个夹紧时所产生的变形会不断演变并向后传递。考虑到夹紧操作在时间上的离散性, 故可将零件上每个过定位点的夹紧过程视为一个状态, 并以第 k 个过定位点夹紧时零件上各CP的偏差 ${}^2V_{CP}^{(k)}$ 作为状态矢量, 建立如图5所示的多步夹紧偏差传递的状态空间模型, 并基于改进的影响系数法对模型进行求解^[19]。

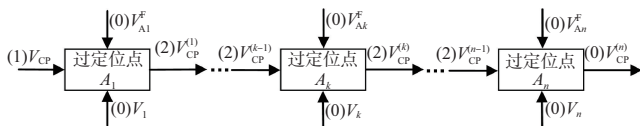


图5 多步夹紧偏差传递状态空间模型

Fig.5 Multi-step clamping deviation transfer state space model

壁板多步夹紧的偏差来源于三个方面: (1)上一步夹紧后各CP的偏差; (2)过定位点的夹具偏差; (3)夹紧过程的随机干扰偏差, 因此该状态空间模型为

$${}^2V_{CP}^{(k)} = A(k) \cdot {}^2V_{CP}^{(k-1)} + B(k) \cdot {}^0V_{A_k}^F + {}^0V_k \quad (7)$$

式中, $A(k)$ 为状态矩阵; $B(k)$ 为输入矩阵, 设AP、JP、KMP的个数为 n, u, w , 则状态矢量表示为 ${}^2V_{CP}^{(k)} = [({}^2V_{A1}^{(k)})^T \cdots ({}^2V_{J1}^{(k)})^T \cdots ({}^2V_{M1}^{(k)})^T]^T$ 。状态矩阵和输入矩阵可以通过分析壁板组件的夹紧过程求取, 多步夹紧过程如图6所示。

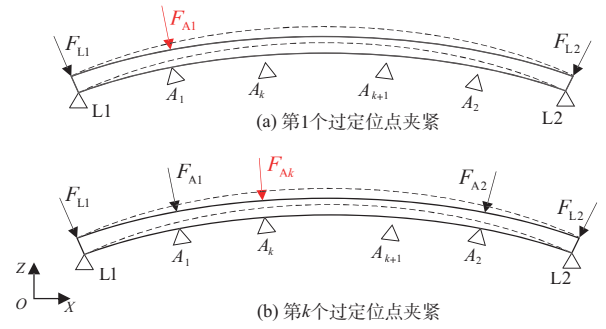


图6 多步夹紧示意图

Fig.6 Multi-step clamping diagram

第一个过定位点夹紧: 该点处的夹紧变形量为 A_1 点处夹具与蒙皮之间的法向间隙值, 设 ${}^0V_{A1}^F$ 为 A_1 点处的夹具偏差, 此时零件上各CP的偏差变为

$${}^2V_{CP}^{(1)} = S_{CP}^{(1)} \cdot n_{A1}^T \cdot ({}^0V_{A1}^F - {}^0V_{A1}) + {}^0V_{CP} \quad (8)$$

第 k 个过定位点夹紧: 在第 k 个过定位点进行夹紧时, 前面的 $k-1$ 个过定位点已夹紧, 此时零件上各CP的偏差为

$${}^2V_{CP}^{(k)} = S_{CP}^{(k)} \cdot n_{Ak}^T \cdot ({}^0V_{Ak}^F - {}^2V_{Ak}^{(k-1)}) + {}^2V_{CP}^{(k-1)} \quad (9)$$

${}^2V_{Ak}^{(k-1)}$ 为第 $k-1$ 个过定位点夹紧后蒙皮在 A_k 点处的偏差, 其包含于 ${}^2V_{CP}^{(k-1)}$, 同时将 ${}^0V_{Ak}^F$ 表示为 ${}^0V_k^F = [0_{1 \times 3(k-1)} \quad ({}^0V_{Ak}^F)^T \quad 0_{1 \times 3(n-k+u+w)}]^T$, 并将各CP的法矢量表示为 $n = \text{diag}[n_{AP} \quad n_{JP} \quad n_{MP}]_{(n+u+w) \times 3(n+u+w)}$, 相应地敏感度矩阵表示为 ${}^2S_{CP}^{(k)} = [0_{3(n+u+w) \times (k-1)} \quad S_{CP}^{(k)} \quad 0_{3(n+u+w) \times (n+u+w-k)}]$, 于是式(9)可变形为

$${}^2V_{CP}^{(k)} = (I - {}^2S_{CP}^{(k)} \cdot n) \cdot {}^2V_{CP}^{(k-1)} + {}^2S_{CP}^{(k)} \cdot n \cdot {}^0V_k^F \quad (10)$$

从而可得 $A(k) = (I - {}^2S_{CP}^{(k)} \cdot n)$, $B(k) = {}^2S_{CP}^{(k)} \cdot n$ 。

本文将某点沿法向产生变形时, 其余各点沿三个坐标上的位移响应作为敏感度矩阵, ${}^2S_{CP}^{(k)}$ 的求解过程包括: (1)有限元模型划分网格, 选取或近似选取网格节点表示相应的CP点; (2)按照预先设定的定位策略设置边界约束, 分别约束确定性定位点和已经夹紧的 $k-1$ 个过定位点; (3)在第 k 个过定位点处沿法向施加单位位移, 由有限元计算出零件各CP点三个方向上的位移响应, 即得 $S_{CP}^{(k)} = [V_{1x} \quad V_{1y} \quad \cdots \quad V_{Ny} \quad V_{Nz}]^T$, N 为所有CP的个数。

2.3 不同长桁装配顺序偏差传递建模与求解

定位夹紧完成后, 由于蒙皮和长桁在定位夹紧过程中产生了偏差, 两者之间并不是理想的面面接触, 而是离散的点接触。长桁与蒙皮、框和补偿角片与蒙皮的铆接装配都会使蒙皮发生变形, 本文以蒙皮和长桁的铆接装配为例进行理论分析和实例验证, 其余壁板组件和长桁的分析过程相同。

基于柔性假设的偏差建模理论将薄壁件的装配过程分为定位、夹紧、铆接、释放回弹4个阶段^[8], 如图7所示。对

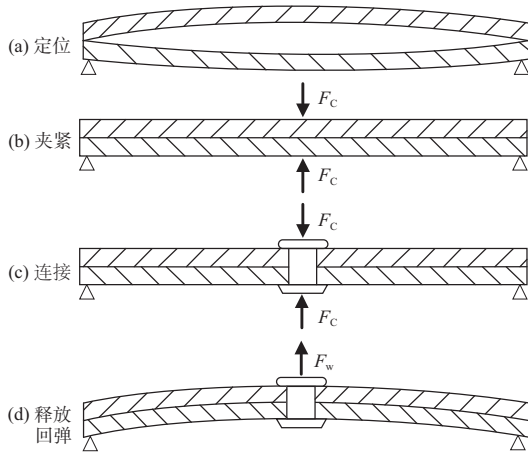


图7 薄壁件铆接装配过程示意图

Fig.7 Thin-wall riveting assembly process diagram

于壁板的铆接装配来说,装配过程中的变形主要来源于两个方面:一是铆接回弹变形;二是铆接翘曲变形。

(1) 铆接回弹变形

夹紧力一般沿零件法向施加,在夹紧时长桁上铆接点的变形沿着该点的法向,变形量为蒙皮和长桁对应铆接点的法向间隙^[20],即 $\delta V_j^{(1)n} = n_j^{(1)} ({}^{(0)}V_j^{(1)} - {}^{(2)}V_j)$ 或 $\delta V_j^{(k)n} = n_j^{(k)} ({}^{(0)}V_j^{(k)} - {}^{(3)}V_j^{(k)})$, $k \geq 2$ 。 ${}^{(0)}V_j^{(k)}$ 为第 k 根长桁在各铆接点处的制造偏差, ${}^{(3)}V_j^{(k)}$ 为子装配体的蒙皮在第 k 根长桁铆接点处的偏差。引入第 k 根长桁法向刚度矩阵 $\mathbf{K}_s^{(k)}$ 和第 k 根长桁与蒙皮形成的子装配体的刚度矩阵 $\mathbf{K}_{sa}^{(k)}$,并通过夹紧力和子装配体回弹力大小相等方向相反的关系,可得子装配体的法向回弹引起蒙皮各CP的偏差量为

$$\delta V_{CP}^{(k)} = -\mathbf{S}_{CP}^{(k)} \cdot (\mathbf{K}_{sa}^{(k)})^{-1} \cdot \mathbf{K}_s^{(k)} \cdot \delta V_j^{(k)n} \quad (11)$$

令 $\mathbf{S}^{(k)} = -\mathbf{S}_{CP}^{(k)} \cdot (\mathbf{K}_{sa}^{(k)})^{-1} \cdot \mathbf{K}_s^{(k)}$, 设第 k 根长桁共有 u 个铆接点,则 $\mathbf{S}^{(k)}$ 可通过影响系数法求解:(1)长桁法向刚度矩阵 $\mathbf{K}_s^{(k)}$:依次对长桁上的 u 个铆接点处沿法向施加单位力,利用有限元计算并记录此时长桁各铆接点处的法向位移响应,以求得 $\mathbf{D}_{(i)} = [d_{1(i)} \ d_{2(i)} \ \cdots \ d_{u(i)}]^T$, $i = 1, \dots, u$,把所有铆接点的响应组成矩阵 $\mathbf{D} = [\mathbf{D}_{(1)} \ \mathbf{D}_{(2)} \ \cdots \ \mathbf{D}_{(u)}]$, $\mathbf{D}^{-1}$ 即为第 k 根长桁的刚度矩阵 $\mathbf{K}_s^{(k)}$;(2)子装配体刚度矩阵 $\mathbf{K}_{sa}^{(k)}$:将蒙皮和长桁的有限元模型在各铆接点处设置绑定约束,其求解与 $\mathbf{K}_s^{(k)}$ 一致。(3)子装配体敏感度矩阵 $\mathbf{S}_{CP}^{(k)}$:对子装配体上的第 i 个铆接点沿法向施加单位位移,记录其余各CP点沿三个方向的位移响应,得 $\mathbf{S}_{CP(i)}^{(k)} = [V_{CP1x(i)}^{(k)} \ V_{CP1y(i)}^{(k)} \ V_{CP1z(i)}^{(k)} \ \cdots \ V_{CPNx(i)}^{(k)} \ V_{CPNy(i)}^{(k)} \ V_{CPNz(i)}^{(k)}]^T$, N 为CP点的个数且 $N = u + w$,分别求出各铆接点的响应,即得 $\mathbf{S}_{CP}^{(k)} = [\mathbf{S}_{CP(1)}^{(k)} \ \mathbf{S}_{CP(2)}^{(k)} \ \cdots \ \mathbf{S}_{CP(u)}^{(k)}]_{3(u+w) \times u}^{\circ}$

(2) 铆接翘曲变形

壁板装配过程更关注整体的弯扭变形,但由于材料、接触、几何形状的非线性以及大量铆钉,直接有限元法仿真计算非常困难。为简化有限元模拟并增强实用性,Liu Gang等^[21]忽略了钉孔附近的局部弹塑性变形,将铆接件的翘曲变形视为等效弯矩作用的结果,变形机理如图8所示。

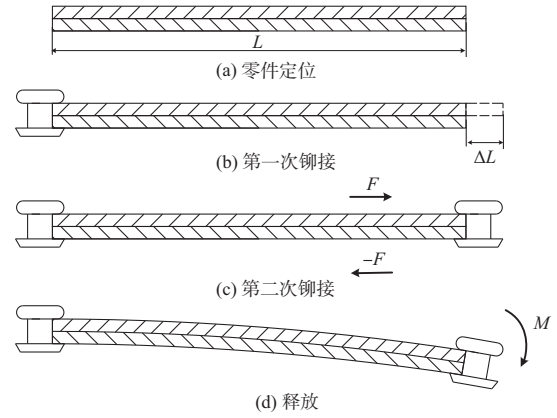


图8 铆接变形机理

Fig.8 Riveting deformation mechanism

以单排铆钉的铆接来说,假设有 m 个铆钉,则子装配体两端施加的弯矩为

$$M_i = 2(m-1)M = \frac{2(m-1)EA\Delta L}{L} \quad (12)$$

式中, t 为两板的厚度; A 为沿铆缝的截面面积; E 为两板弹性模量;铆接引起的上下板件径向位移差值为 $\Delta L = d\Delta\delta/2$, d 为铆钉的直径, $\Delta\delta$ 为铆钉在内外侧板件中的径向干涉量差值。通过弯矩等效的方法,利用有限元计算一个铆钉的相对干涉量,求出应施加的弯矩值大小,将复杂的铆接变形过程转化为弯矩加载,简化计算。

在整个铆接装配过程中,长桁与蒙皮的铆接装配在时间上是线性离散的,故可以将每根长桁的装配过程视为一个状态,以蒙皮上各CP的偏差 ${}^{(3)}V_{CP}^{(k)}$ 作为状态矢量,建立如图9所示的不同长桁装配顺序下偏差传递的状态空间模型。

长桁不同装配顺序的偏差来源于三个方面:(1)上一根长桁装配产生的偏差;(2)第 k 根长桁的制造偏差;(3)第 k 根长桁铆接变形。

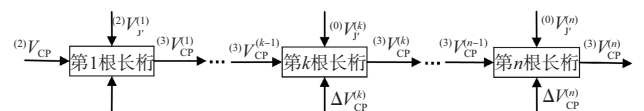


图9 长桁不同装配顺序下偏差传递的状态空间模型

Fig.9 State space model of deviation transfer under different assembly sequences of stringer

因此该状态空间模型为

$${}^{(3)}V_{CP}^{(k)} = C(k) \cdot {}^{(3)}V_{CP}^{(k-1)} + D(k) \cdot {}^{(0)}V_J^{(k)} + \Delta V_{CP}^{(k)} \quad (13)$$

按照前面所述方法计算铆接回弹变形与整体翘曲变形,可得第 k 根长桁装配后各CP的偏差为

$${}^{(3)}V_{CP}^{(k)} = S^{(k)} \cdot n_j^{(k)} ({}^{(0)}V_J^{(k)} - {}^{(3)}V_J^{(k)}) + {}^{(3)}V_{CP}^{(k-1)} + \Delta V_{CP}^{(k)} \quad (14)$$

注意到 ${}^{(3)}V_J^{(k)}$ 包含于 ${}^{(3)}V_{CP}^{(k-1)}$,且 $S^{(k)}$ 可变形为 $3(u+w) \times (u+w)$ 的 ${}^{(3)}S_{CP}^{(k)}$,将 $n_j^{(k)}$ 扩充为 n 表示各CP的法矢量矩阵,则式(14)可以写为

$${}^{(3)}V_{CP}^{(k)} = (I - {}^{(3)}S_{CP}^{(k)} \cdot n) \cdot {}^{(3)}V_{CP}^{(k-1)} + {}^{(3)}S_{CP}^{(k)} \cdot n \cdot {}^{(0)}V_J^{(k)} + \Delta V_{CP}^{(k)} \quad (15)$$

从而有 $C(k) = (I - {}^{(3)}S_{CP}^{(k)} \cdot n)$, $D(k) = {}^{(3)}S_{CP}^{(k)} \cdot n$

要实现对长桁不同装配顺序状态空间模型的求解就要计算影响系数矩阵 ${}^{(3)}S_{CP}^{(k)}$ 和铆接变形 $\Delta V_{CP}^{(k)}$,由于不同的装配顺序下所形成的子装配体的结构不同,因此需要不断地修改模型并进行大量的有限元计算。为了减少人工操作,提高计算的效率,本文结合前面的理论分析,利用MATLAB和ABAQUS二次开发编写了快速求解不同装配顺序下各子装配体刚度矩阵、敏感度矩阵以及铆接变形的MATLAB子程序。ABAQUS脚本接口与ABAQUS/CAE的通信关系如图10所示。

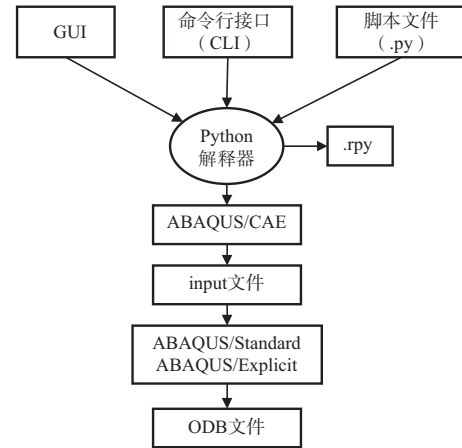


图10 ABAQUS脚本接口与ABAQUS/CAE的通信关系

Fig.10 Communication relationship between ABAQUS script and ABAQUS/CAE

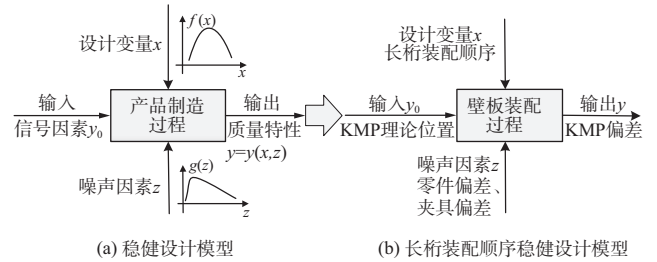


图11 壁板装配顺序稳健设计模型

Fig.11 Robust design model for panel assembly sequence

3 壁板装配顺序稳健优化设计

稳健设计^[22]的思想是尽量降低产品质量特性对影响因素变化的敏感性,使质量特性尽量达到目标值的同时使其散布范围尽量密集。壁板装配顺序稳健设计模型如图11所示,为了最小化KMP的装配偏差,需要在已知各偏差分布参数和装配变形规律的情况下设计长桁的装配顺序,使得输出偏差对不可控的噪声因素最不敏感。

稳健优化设计流程如图12所示。首先,对每根长桁和应装配位置进行编号,用编号的先后次序表示长桁的装配顺序;然后对每种长桁装配顺序进行编码,并均匀抽取若干组长桁装配顺序作为训练样本,利用设计的MATLAB求解子程序计算训练样本的刚度矩阵、敏感度矩阵和铆接变形,

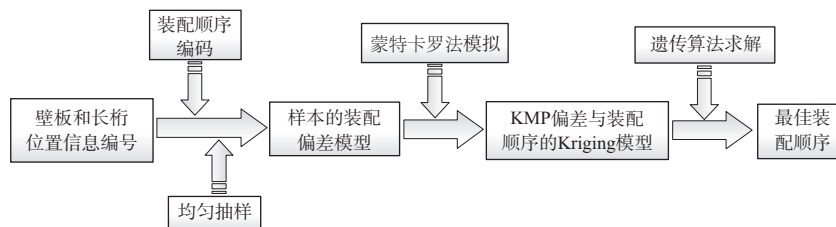


图12 壁板装配顺序稳健设计流程

Fig.12 Panel assembly sequence robust design process

构建样本的偏差传递和演变模型,采用蒙特卡罗法模拟计算KMP偏差的均值和标准差,并建立Kriging模型来描述KMP偏差的均值和标准差与装配顺序之间的关系。最后,基于遗传算法对Kriging模型求解,得出最佳的装配顺序。

(1) 基于Kriging的装配顺序响应面模型

响应面模型的选择关系到模型能否反映目标与设计变量的真实关系,而Kriging具有平滑效应及估计方差小等特征,是一种近似精度很高的响应面模型方法,在计算量、易用性和非线性逼近等方面都具有较好的表现。本文以长桁的装配顺序为自变量,以KMP偏差的均值和标准差为响应,基于Kriging建立KMP装配偏差均值和标准差与装配

顺序的响应面模型^[23]。Kriging 模型响应值与自变量之间的函数关系式为

$$y(x) = f(x)^T \beta + z(x) \quad (16)$$

式中, $f(x)^T \beta$ 为多项式函数, 为模型提供拟合的全局近似, $f(x) = [f_1(x) f_2(x) \cdots f_k(x)]^T$; β 为多项式的待定系数阵; $z(x)$ 为期望为 0 且方差为 σ^2 的静态随机过程。

要基于 Kriging 建立 KMP 装配偏差均值和标准差与装配顺序的响应面模型, 就必须对装配顺序进行数值编码以进行 Kriging 拟合, 以 8 根长桁为例, 假设每根长桁有自己确定的编号和确定的装配位置, 首先将顺序装配 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ 编码规定为 1, 前 6 个数字不变, 则只存在一种顺序, 即 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 7\}$, 编码为 2, 表示按次序将第 1、2、3、4、5、6、8、7 号长桁在相应的装配位置处进行铆接装配; 前 5 个顺序不变, 则存在 4 种不同的顺序, 依次即可实现装配顺序的编码, 将装配顺序转化为十进制数。由于装配顺序为设计变量且为单因素, 因此在进行试验设计时可采取均匀采样的方法, 以便于建立装配顺序与 KMP 偏差均值和标准差的映射关系。

作为一种近似的替代模型, 必须对响应面模型的拟合精度进行评价。常用的是评价指标有决定系数 (R^2), 均方根误差 (RMSE) 等, 本文采用 RMSE 作为评价指标, 具体表达式如下

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (17)$$

式中, y_i 为通过蒙特卡罗模拟获得 KMP 的装配质量评价指标, $\hat{y}_i$ 为 Kriging 模型的预测值。RMSE 越接近于 0 说明误差越小, 即模型拟合精度越高。

(2) 基于遗传算法的装配顺序优化

对于复杂的目标函数, 遗传算法相比其他智能优化算法具有较好的自适应与自组织性, 运算过程面向结构对象, 整个过程中没有对函数连续性以及求导可行性的要求, 且不要求映射关系具有确切的表达式, 遗传算法优化的流程如图 13 所示。

适应度值是稳健优化设计中采用损失函数作为稳健设计的准则函数, 用以保证结果的稳健性^[24]。对于 n 个 KMP, 稳健优化设计的目标函数为整体的稳健性指标

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R_i = \sum_{i=1}^n \lambda_i \sum_{j=1}^3 (\mu_j + 3\sigma_j) \quad (18)$$

式中, R_i 表示所得的装配顺序中至少有 99.73% 的装配样本在设计范围内, 且单个测点的稳健性指标由三个方向上的偏差构成。x 表示装配顺序的十进制编码, 系数 λ_i 表示各 KMP 的重要性程度, $F(x)$ 具有望小特性, 因此长桁装配顺

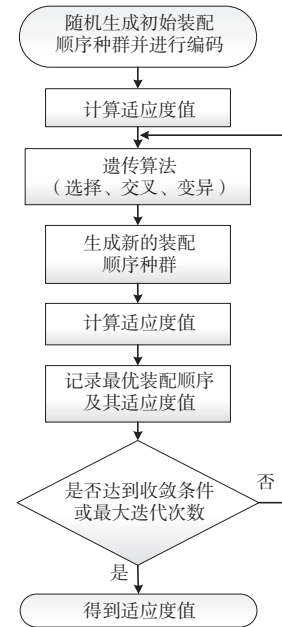


图 13 遗传算法优化流程

Fig.13 Genetic algorithm to optimize flow chart

序优化的目标函数为

$$\begin{cases} \min F(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R_i \\ \text{s.t.: } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, x \in [1, k!] \end{cases} \quad (19)$$

式中, k 为装配的长桁总数。通过遗传算法对模型进行求解, 可得到最佳的装配顺序。

在遗传操作中, 由于每种顺序不能有相同的数字出现, 因此采用部分匹配交叉 (PMX) 进行操作, 首先利用单点交叉随机产生一个交叉点位, 将交叉点位以后的序列进行交叉, 最后根据交叉段之间的映射关系消除子代中的重复基因, 交叉概率一般取 0.4~0.99^[25]。再采用倒位变异避免因直接变异产生装配顺序重复的错误个体, 倒位变异是通过随机将个体上的两个或多个基因颠倒顺序来实现的。变异概率一般取 0.0001~0.2。

4 实例验证与分析

4.1 壁板多阶段装配偏差建模与分析实例

本文以 1 块蒙皮与 8 根长桁的装配为例, 将柔性工装的多个可调立柱简化为主定位平面上的 N 个定位点, 建立壁板装配偏差传递与演变模型, 分析各 CP 的偏差变化情况, 并通过蒙特卡罗模拟预测 KMP 装配偏差的均值和标准差; 在装配顺序稳健优化设计案例中介绍稳健设计的详细过程, 验证本文所提方法的可行性和有效性。

壁板装配模型如图14所示,蒙皮为圆弧曲面,半径为2600mm,长度为2500mm,宽度为2000mm,厚度为2mm。长桁为Z形长桁,长度为2300mm,厚度为2mm。蒙皮和长桁的材料均为7075铝合金,弹性模量 $E=71200\text{Pa}$,泊松比 $\mu=0.33$,密度 $\rho=2800\text{kg/m}^3$,单元类型均为S8R。

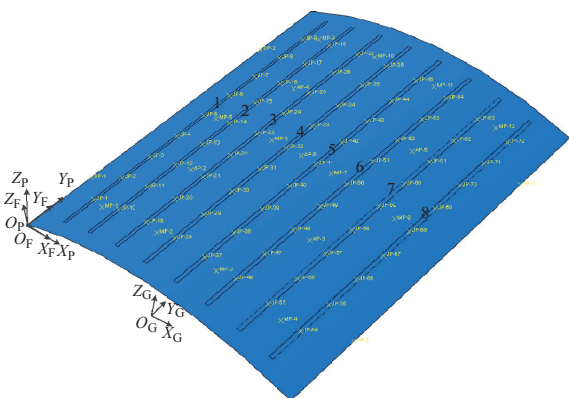


图14 壁板装配模型

Fig.14 Panel assembly model

蒙皮通过位于主定位面上的三个定位孔实现确定性定位,对应特征DP1~DP3,在过定位点A1~A6处进行夹紧。该壁板共有8根长桁,每根长桁通过两个定位孔和蒙皮表面实现定位。蒙皮上设置12个KMP反映壁板的装配质量,各点坐标和偏差均在全局坐标系下进行表示。以编码为1的长桁装配顺序{1,2,3,4,5,6,7,8}为例建立壁板装配偏差传递与演变模型。

(1) 刚性偏差建模

采用确定性定位方法由定位点的坐标可得夹具偏差的敏感度矩阵 $\mathbf{S}^F$,以及零件定位特征偏差的敏感度矩阵 $\mathbf{S}_{D1}^P$, $\mathbf{S}_{D2}^P$, $\mathbf{S}_{D3}^P$, $\mathbf{S}_{h1}^P$, $\mathbf{S}_{h2}^P$,并通过式(6)可以求出确定性定位后蒙皮各CP点的偏差。

(2) 柔性偏差建模

主要分析过定位夹紧与铆接装配引起的偏差。按2.2节介绍的影响系数法可以依次求得每个过定位点的敏感度矩阵 ${}^{(2)}\mathbf{S}_{CP}^{(1)} \sim {}^{(2)}\mathbf{S}_{CP}^{(6)}$,矩阵维数为 270×90 。利用设计的MATLAB求解子程序计算所有子装配体的刚度矩阵、敏感度矩阵和铆接变形,代入状态空间模型中计算出所有长桁装配完成后各CP的偏差。

(3) 利用蒙特卡罗法进行装配偏差模型仿真求解

以 ${}^{(0)}\mathbf{V}_L^F$, ${}^{(0)}\mathbf{V}_L^P$, ${}^{(0)}\mathbf{V}_A^F$, ${}^{(0)}\mathbf{V}_A^P$, ${}^{(0)}\mathbf{V}_J^P$, ${}^{(0)}\mathbf{V}_M^P$, ${}^{(0)}\mathbf{V}_r$ 分别表示LP、AP、JP、KMP和长桁铆接点处的初始偏差。取每个CP偏差沿三个方向的分量均服从正态分布 $N(0,0.5^2)$,随机产生偏差源三个坐标分量上的偏差,代入偏差传递与演变模型中。本

文设定偏差样本数量为5000,利用蒙特卡罗法进行装配偏差模型仿真求解,得到所有KMP沿三个坐标方向的偏差分布,如图15所示为KMP沿三个坐标方向仿真结果的均值和标准差。

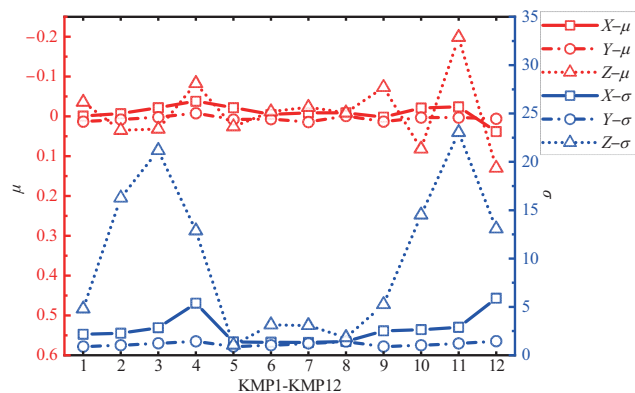


图15 各KMP仿真结果

Fig.15 Simulation results of each KMP

从模拟结果可以看出,KMP沿Y方向偏差的均值和标准差都比较小,而沿X向和Z向偏差的均值和标准差比较大,这和实例模型的结构特点有关,可以看出变形对壁板装配过程中偏差的传递有显著的影响。

4.2 壁板装配顺序规划

首先对每种装配顺序进行编码,通过所建立的装配偏差模型对均匀抽样的100种装配顺序进行计算,得到每种装配顺序下各KMP偏差的均值和标准差,前两个KMP偏差均值和标准差的仿真计算结果如图16~图19所示。

基于样本数据,以长桁装配顺序为自变量,各KMP均值和标准差为响应,分别建立长桁装配顺序与KMP均值和

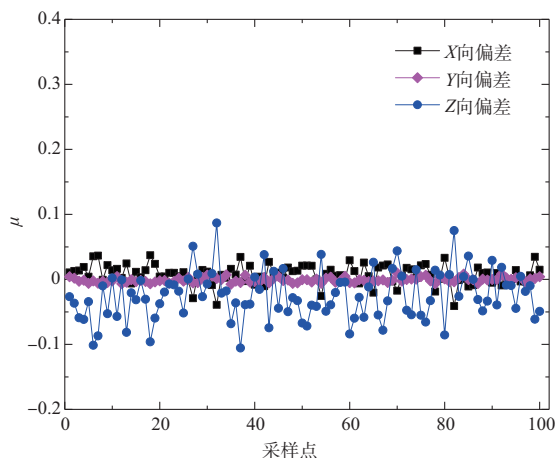


图16 KMP1均值

Fig.16 KMP1 mean

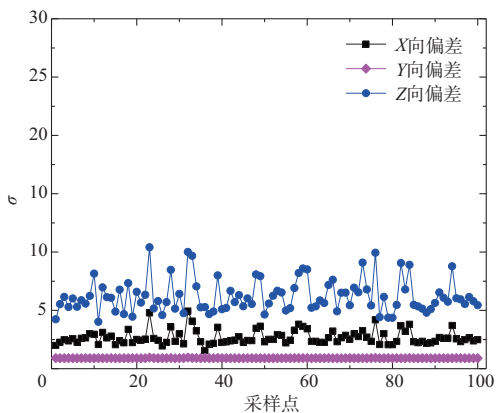


图 17 KMP1 标准差

Fig.17 KMP1 standard deviation

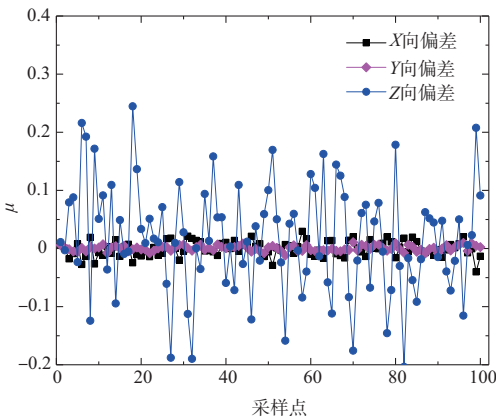


图 18 KMP2 均值

Fig.18 KMP2 mean

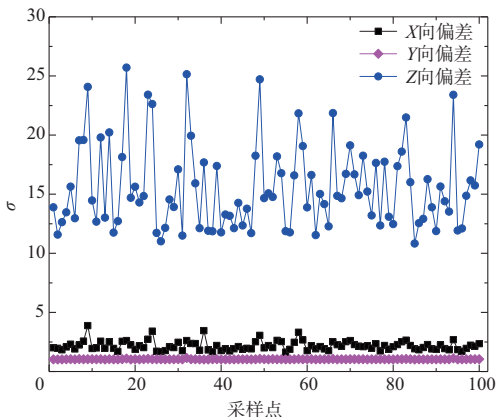


图 19 KMP2 标准差

Fig.19 KMP2 standard deviation

标准差的Kriging模型,回归模型采用完全二次多项式的形式,相关函数模型采用高斯函数的形式,分别记为 M_i-E_X 、 M_i-E_Y 、 M_i-E_Z ($i=1\sim 12$)和 M_i-S_X 、 M_i-S_Y 、 M_i-S_Z ($i=1\sim 12$)。利用随机数发生器产生10种装配顺序作为检验样本,分别利用所建立的Kriging模型和壁板装配偏差传递与演变模型计

算10种装配顺序下各KMP均值和标准差,求取Kriging模型RMSE值,结果如图20所示。

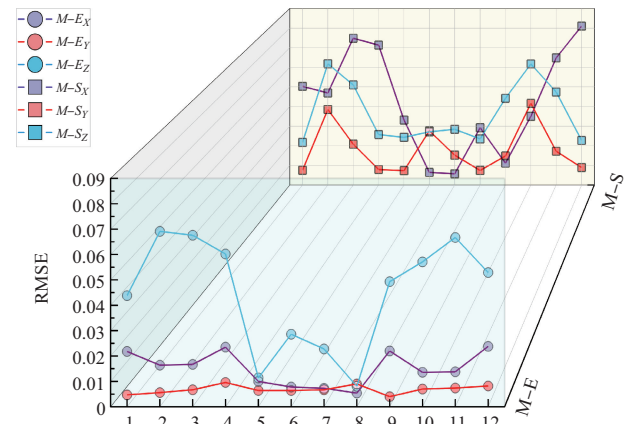


图 20 Kriging 模型的RSME 值

Fig.20 RSME values of the Kriging model

从图中可以看出,各响应面模型的RSME均在9%以内,具有较高的拟合精度,能够满足装配顺序稳健优化设计的要求。因此通过Kriging模型建立的长桁装配顺序稳健优化模型为

$$\begin{cases} \min F(x) = \sum_{i=1}^{12} \lambda_i (M_i - E_X + M_i - E_Y + M_i - E_Z + \\ \quad 3(M_i - S_X + M_i - S_Y + M_i - S_Z)) \\ \text{s.t.: } x \in [1, 8!] \end{cases} \quad (20)$$

取 $\lambda_i = 1/12$,表示各KMP点重要性程度相同,基于建立的Kriging模型和遗传算法对装配顺序进行优化,参数设置见表1。

表 1 遗传算法参数设置

Table 1 Genetic algorithm parameter setting

参数	数值
种群规模	50
最大代数	200
交叉概率	0.4
变异概率	0.09

装配顺序优化过程如图21所示,在优化到第50代时的适应度值基本达到最小,经最后计算得到的最佳装配顺序为{8,7,3,4,6,1,2,5},最优综合稳健性指标为26.78。

利用蒙特卡罗法模拟计算最佳装配顺序下各KMP偏差的均值和标准差,并与优化前采用{1,2,3,4,5,6,7,8}装配顺序的模拟结果进行对比,结果如图22所示。

从图22中可以看出,优化后各KMP偏差的均值绝对值和标准差整体有所减小,壁板装配的整体稳健性得到了提高,个别点均值的绝对值和标准差有所升高,但对于壁

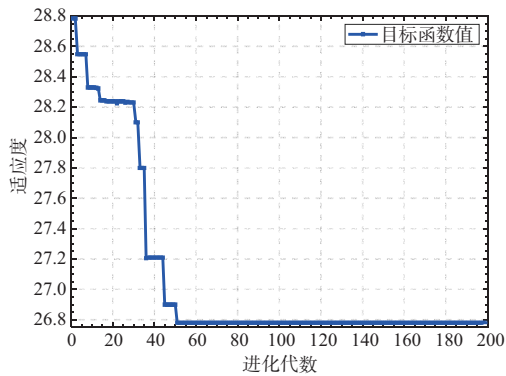


图21 装配顺序优化过程

Fig.21 Assembly sequence optimization process

板的装配来说,我们更关注整体的装配质量,因此所得结果是令人满意的。

5 结论

通过对飞机壁板装配偏差的建模求解以及装配顺序的稳健优化设计,本文分析了装配偏差的传递和演变规律。主要结论如下:

(1)基于多点支撑柔性工装构建了刚柔混合的壁板装配偏差建模思路,提出了通过KMP偏差的“均值与标准差”进行装配准确度评价的准则。建立了一面两孔薄壁件确定

性定位的刚性偏差模型,建立了壁板多步夹紧和不同长桁装配顺序的偏差状态空间模型,并利用 MATLAB 和 ABAQUS 二次开发功能设计了壁板不同装配顺序下刚度矩阵、敏感度矩阵和铆接变形快速计算子程序,基于改进的影响系数法对模型进行求解。

(2)以长桁的装配顺序优化为例,基于 Kriging 模型提出了以壁板整体稳健性指标为目标函数的长桁装配顺序稳健优化设计模型,并利用遗传算法对模型进行求解。

(3)以某飞机壁板的装配为例,介绍了壁板装配偏差模型的构建,并利用蒙特卡罗模拟和 Kriging 模型预测 KMP 偏差,再结合遗传算法对长桁的装配顺序进行了优化,优化后壁板装配的整体稳健性指标得到了提高。

AST

参考文献

- [1] 辛朝阳. 基于飞机数字化装配工艺的仿真技术研究[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(19):114-117.
Xin Chaoyang. Research on simulation technology based on aircraft digital assembly process[J]. Technology Innovation and Application, 2023, 13(19):114-117. (in Chinese)
- [2] 王文娟, 薛景锋, 张梦杰, 等. 基于光纤传感的结构变形实时监测技术研究[J]. 航空科学技术, 2022, 33(12):97-104.

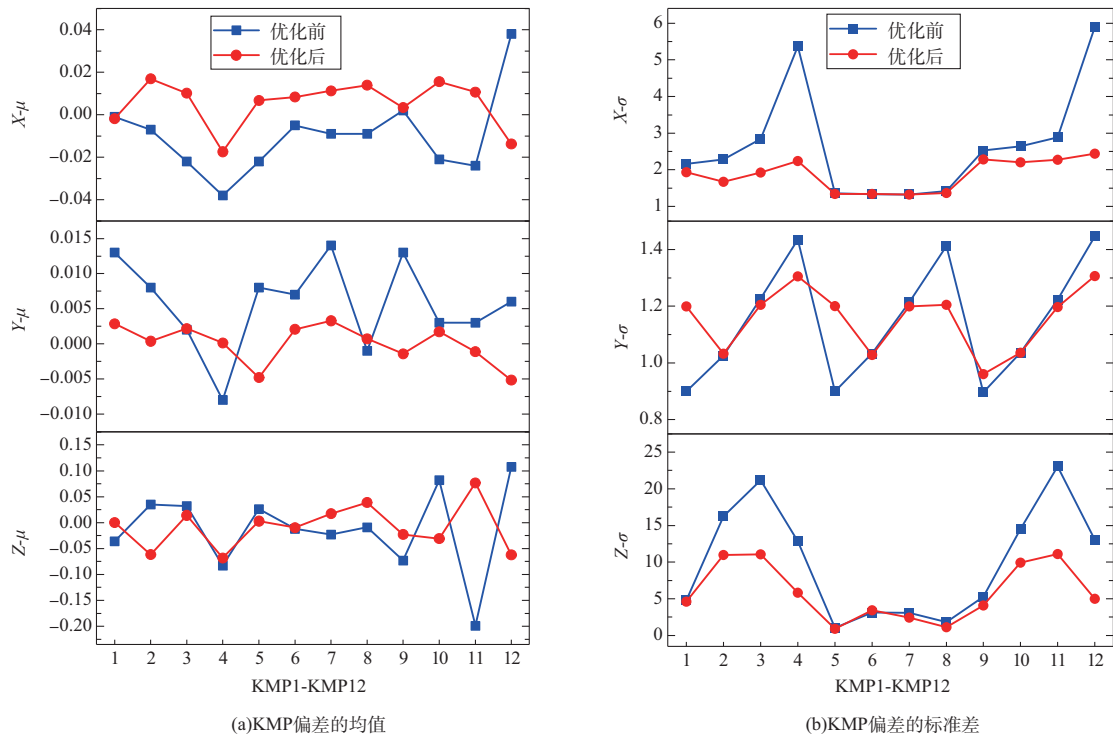


图22 优化前后 KMP 偏差的均值与标准差对比

Fig.22 Comparison of mean and standard deviation of KMP deviation before and after optimization

- Wang Wenjuan, Xue Jingfeng, Zhang Mengjie, et al. Research on real-time monitoring technology of structural deformation based on optical fiber sensing[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12):97-104. (in Chinese)
- [3] 刘殷杰, 田锡天, 耿俊浩, 等. 飞机薄壁零件装配偏差建模与仿真分析[J]. *机床与液压*, 2020, 48(2):138-143.
- Liu Yinjie, Tian Xitian, Geng Junhao, et al. Modeling and simulation analysis of aircraft thin-walled parts assembly deviation[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(2): 138-143. (in Chinese)
- [4] Cai W, Hu S J. A variational method of robust fixture configuration design for 3-D workpieces[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1997, 119(4A): 593-602.
- [5] Cai W. Robust pin layout design for sheet-panel locating[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2006, 28(5-6):486-494.
- [6] Menassa R J, Devries W R. Optimization methods applied to selecting support positions in fixture design[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1991, 113(4):412-418.
- [7] Kashyap S, Devries W R. Finite element analysis and optimization in fixture design[J]. *Structural Optimization*, 1999, 18(2-3):193-201.
- [8] Liu S C, Lee H W, Hu S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods[J]. *Journal of Manufacturing Science & Engineering*, 1997, 119(3):368-374.
- [9] Camelio J, Hu S J, Ceglarek D. Modeling variation propagation of multiStation assembly systems with compliant parts[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2003, 125:673-681.
- [10] 赵仕伟, 阚梓, 李道春. 柔性后缘可变形机翼气动弹性分析方法研究[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(12):62-69.
- Zhao Shiwei, Kan Zi, Li Daochun. Research on the aeroelastic analysis method of flexible trailing edge morphing wing[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(12): 62-69. (in Chinese)
- [11] 施祥玲, 徐小明, 苏林林, 等. 基于NSGA-II算法的航天产品装配公差多目标优化[J]. *上海航天*, 2020, 37(3):121-125.
- Shi Xiangling, Xu Xiaoming, Su Linlin, et al. Multi-objective optimization based on NSGA-II algorithm for assembly tolerance of aerospace products[J]. *Aerospace Shanghai*, 2020, 37(3):121-125. (in Chinese)
- [12] 张海洋, 吕晓江, 周大永, 等. 考虑稳健性的汽车结构耐撞性优化设计[J]. *汽车工程*, 2020, 42(2):222-227.
- Zhang Haiyang, Lyu Xiaojian, Zhou Dayong, et al. Optimization design of vehicle structural crashworthiness with consideration of robustness[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(2):222-227. (in Chinese)
- [13] 张勇德, 王青, 杨伟峰. 基于关键测量特征的机翼对接容差分配[J]. *工程设计学报*, 2022, 29(3):300-308.
- Zhang Yongde, Wang Qing, Yang Weifeng. Wing docking tolerance allocation based on key measurement features[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2022, 29(3):300-308. (in Chinese)
- [14] Lu Cong, Wang Yang. Positioning variation analysis for the sheet metal workpiece with N-2-1 locating scheme[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 89:3021-3035.
- [15] 张荣宁, 王志国, 谭昌柏. 飞机机身壁板件装配偏差分析建模[J]. *机械制造与自动化*, 2017, 46(4):72-77.
- Zhang Rongning, Wang Zhiguo, Tan Changbai. Assembly variation analysis and modeling of aircraft fuselage panels[J]. *Machine Building & Automation*, 2017, 46(4):72-77. (in Chinese)
- [16] Zhou Shiyu, Huang Qiang, Shi Jianjun. State space modeling of dimensional variation propagation in multistage machining process using differential motion vectors[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2003, 19(2):296-309.
- [17] Cai Na, Qiao Lihong. Rigid-compliant hybrid variation modeling of sheet metal assembly with 3D generic free surface[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2016, 41(3):45-64.
- [18] Huang Wenzhen. Methodologies for modeling and analysis of stream-of-variation in compliant and rigid assemblies[D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [19] Jandaghi Shahi V, Masoumi A. Integration of in-plane and out-of-plane dimensional variation in multi-station assembly process for automotive body assembly[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2020, 234(6):1690-1702.
- [20] Lu Cong, Huo Dengsheng, Wang Ziyue. Assembly variation analysis of the aircraft panel in multi-stage assembly process with N-2-1 locating scheme[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2019, 233(19-20):6754-6773.
- [21] Liu Gang, Huan Honglun, Ke Yinglin. Study on analysis and prediction of riveting assembly variation of aircraft fuselage

- panel[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(5-8):991-1003.
- [22] 杨锋, 李睿, 朱立坚, 等. 基于满意度函数的强力旋压壁厚偏差稳健设计优化[J]. *锻压技术*, 2021, 46(2):130-135.
- Yang Feng, Li Rui, Zhu Lijian, et al. Robust design optimization on wall thickness deviation for power spinning based on satisfaction function[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2021, 46(2):130-135. (in Chinese)
- [23] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. *航空学报*, 2016, 37(11):3197-3225.
- Han Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3197-3225. (in Chinese)
- [24] 殷浩, 李永华, 杜江. 基于随机模型的动车组制动模块稳健优化设计[J]. *机械与电子*, 2020, 38(10):3-7.
- Yin Hao, Li Yonghua, Du Jiang. Robust optimization design of brake module for EMU based on the stochastic model[J]. *Machinery & Electronics*, 2020, 38(10):3-7.(in Chinese)
- [25] 杨雄, 吴东. 遗传算法在经典密码分析中的应用综述[J]. *信息工程大学学报*, 2021, 22(5):577-583.
- Yang Xiong, Wu Dong. Review on the application of genetic algorithm[J]. *Journal of Information Engineering University*, 2021, 22(5):577-583.(in Chinese)

Transfer and Evolution of Aircraft Fuselage Panel Assembly Deviation and Optimization Methods

Kang Yonggang, Li Guomao, Song Siren, Chen Yonggang, Hua Shuoguo, Wang Zhongqi
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: Due to the influence on clamping force, riveting force, resilience force, assembly sequence and other parameters in the assembly process of skin and stringer of aircraft wing panel, different degrees of deformation will occur. Assembly deformation is coupled with part deviation and fixture deviation, which makes the final assembly accuracy of the panel difficult to predict and control. In view of the above problems, this paper studies the transfer and evolution of deviation in the process of panel assembly, and constructs the rigid-flexible hybrid model of the transfer and evolution of panel assembly deviation and the evaluation criterion of panel assembly accuracy. The rigid positioning deviation of the panel is calculated by the deterministic analysis method. By establishing the deviation state space model under multi-step clamping and different stringer assembly sequences, the evolution law of the deviation in the panel assembly process is revealed, and the accurate prediction of the panel assembly deviation is realized. A robust optimization design method of stringer assembly sequence based on surrogate model and intelligent optimization algorithm is proposed. The assembly quality of panel is improved by assembly sequence optimization.

Key Words: aircraft assembly; aircraft panel; deviation transmission and evolution; assembly sequence optimization

Received: 2023-10-15; **Revised:** 2024-01-16; **Accepted:** 2024-02-23

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52375517, 92067205); Aeronautical Science Foundation of China (2018ZE53050)