

引文格式: 张硕, 贾志新, 张辉, 等. 考虑过程状态变化的航空薄壁结构装配协调误差累积传递机理及评价方法[J]. 航空制造技术, 2026, 69(7): 25010074.
 ZHANG Shuo, JIA Zhixin, ZHANG Hui, et al. Accumulated transmission and evaluation method of assembly coordination error considering process state change for aeronautical thin-walled structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(7): 25010074.

考虑过程状态变化的航空薄壁结构装配协调误差累积传递机理及评价方法

张 硕¹, 贾志新¹, 张 辉², 鲍强伟¹, 郭飞燕¹

(1. 北京科技大学, 北京 100083;

2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 沈阳 110850)

[摘要] 针对现行以几何量控制为主的装配工艺协调方法所带来的装配精度传递不确定度大、事后强迫校形等问题, 对融合真实误差状态的装配协调误差累积传递机理及量化评价方法展开研究。首先, 针对航空薄壁结构装配过程中的变形问题, 基于柔性配合面符号矩阵, 构建柔性装配体误差传递路径模型; 其次, 结合小位移旋量理论及齐次变换理论, 建立初始偏差传递计算矩阵, 通过实时获取多物理场耦合偏差值, 动态更新装配过程中的偏差传递因子并修正传递计算矩阵, 精准计算装配误差; 进而, 借助稳定性熵函数, 建立以装配误差值为主导指标、局部熵值为附加指标的综合评价体系, 实现薄壁表面误差累积状态的精确评估; 最后, 以翼盒结构为例开展验证, 结果表明该方法可有效提升装配质量。

关键词: 航空薄壁件; 误差传递路径; 协调误差; 传递计算矩阵; 量化评价

中图分类号: V262.4

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010074

Accumulated Transmission and Evaluation Method of Assembly Coordination Error Considering Process State Change for Aeronautical Thin-Walled Structures

ZHANG Shuo¹, JIA Zhixin¹, ZHANG Hui², BAO Qiangwei¹, GUO Feiyan¹

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Shenyang Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China)

[ABSTRACT] For the problems such as high uncertainty in assembly accuracy transmission and post-assembly forced alignment by the current assembly coordination methods that are mainly based on geometric quantity control, this study investigates the cumulative transmission mechanism and quantitative evaluation methods of assembly coordination errors that incorporate the practical error state. Firstly, the deformation during the assembly process of aeronautical thin-walled parts was analyzed, and an error transmission path model for flexible assemblies was constructed based on the symbolic matrix of flexible mating surfaces. Secondly, based on the small displacement torsor theory and homogeneous transformation theory, an initial deviation transmission calculation matrix was constructed. By obtaining the multi-physical field coupling deviation in real-time, the deviation transmission factors were dynamically updated during the assembly process and the transmission calculation matrix was corrected to accurately calculate the assembly error. Furthermore, with the help of the stability entropy function, a comprehensive evaluation system was established with the assembly error value as the leading indicator, and the local entropy value as the additional indicator, and the accurate evaluation of the

收稿日期: 2025-05-14; 退修日期: 2025-06-09; 录用日期: 2025-06-17

基金项目: 国防基础科研项目(JCKY2023205B006); 国家自然科学基金(52175450)

通信作者: 郭飞燕, 副教授, 博士, 研究方向为航空航天先进装配与连接技术等。

cumulative error state on the thin-wall surface could be achieved. Finally, a wing-box structure was taken as an example for verification, and the improvement of the assembly quality was achieved significantly.

Keywords: Aeronautical thin-walled parts; Error transmission path; Coordination error; Transfer calculation matrix; Quantitative evaluation

由于航空薄壁结构尺寸大、刚性差且易发生柔性形变等特点,在装配生产过程中不可避免地会出现零件尺寸、形状和夹具位置等误差,并随着装配过程的进行逐步传递累积,最终影响飞机的气动外形、力学性能^[1-2]。目前装配几何量分析方法与装配公差仿真中,通常将配合特征的误差变动赋予统一公差值,使得工件全局装配偏差形态难以精细获取,容易引起装配精度传递不确定度大、事后强迫校形等问题。而分析多工序装配过程中误差源与传递途径,并对装配累积误差进行精准计算与评价,是实现装配质量量化控制的有效途径。具体地,通过构建误差传递路径与传递计算模型,清晰地展现装配过程中误差从源头在各个装配环节的传播路径;通过量化评价每个零部件误差对最终装配精度的影响程度,发现装配过程中的薄弱环节和问题,可为装配工艺过程改进、质量控制策略调整等现场决策提供数据支持。

在装配误差传递路径模型构建中,Liu等^[3]针对复杂刚性产品,提出基于矢量环的装配误差传递路径模型分析方法;李健等^[4]根据机械系统自由度约束理论,提出基于自由度约束理论的误差传递路径模型构建的方法;李林蔚等^[5]基于小位移旋量理论,针对特征面几何要素变动构建误差模型,借助装配有向图分析误差传递属性,获取涵盖6个自由度偏差的传递路径模型;应用多色集合理论,吕程等^[6]建立了可描述结合面的几何形状、连接方式等信息的结合面符号矩阵,并搜索获得装配体的误差传递路径,但其结合面类型局限于平面和圆柱面;李冬英等^[7]研究误差在特征间的传递及其相互影响,给出其误差传递链图、误差传递网络,通过多色集合理论建立误差传递链接矩阵。当前研究在构建误差传递路径模型时,主要聚焦于刚性零部件的规则几何特征层面,对柔性因素的考量较少,无法根据现场复杂多变的装配工况、工装条件等因素,精准分析航空薄壁件装配力学状态信息,导致难以有效获取准确的装配误差传递路径。

在误差传递计算模型构建中,梁航龙^[8]基于小位移旋量和齐次变换理论,建立装配体在尺寸与形位公差共同约束下的误差传递计算矩阵模型;针对大型航空薄壁结构,Gao等^[9]将其结构划分为装配和非装配区域,建立非线性刚度矩阵,并结合装配过程中的变形协调条

件,构建了适用于大型薄壁结构的装配偏差模型;王仲奇等^[10]综合考虑制造误差和真实配合关系等因素,对雅可比旋量模型进行修正,提出基于数字孪生模型的偏差传递计算方法;进一步地,Li等^[11]从基本偏差场角度考虑形状缺陷影响,提出考虑柔性装配过程中形状缺陷的新偏差传递模型,为柔性装配过程中的误差控制提供新的思路和方法;Xue等^[12]提出刚-柔混合的装配偏差分析方法,将装配偏差分解为刚性偏差传递和柔性变形,并利用离散余弦变换和代理模型预测柔性变形量,以及结合雅可比旋量模型构建了刚性偏差传递模型。然而,现有装配偏差传递的计算矩阵,多依据历史装配变形结果构建,在多工序装配持续推进过程中,缺乏融合真实误差状态的实时更新机制,难以实现传递计算矩阵动态精准计算。

在装配误差量化评价中,常规方法为通过设定参考基准、制定相应的评价方案来判定装配误差。Liu等^[13]基于状态空间模型,构建多工位装配偏差传递数学模型,将计算获取装配特征的偏移量作为评价基准,实现装配的判断误差;栗万羽^[14]以尺寸变动度为基准评价不同装配序列的装配精度,对装配误差的优劣性做出了系统的评价;徐人月^[15]基于信息熵理论,针对元动作装配单元提出“单元质量熵”的概念,建立装配单元装配质量评价模型;郭少伟^[16]通过剖析各功能特征表面误差均值、标准差、表面总体高度熵等几何分布表征参数与装配精度的关系,提出基于装配精度能力指数的零件几何形状误差评价方法,构建从定性约束分析到定量误差建模的完整评价体系;Wang等^[17]针对目前研究只能评估精密机电产品最大装配应力大小和应力大小均匀性,而无法评估应力位置分布的现状,提出以应变能密度分布为特征的应力分布差异性评估方法,可为装配几何精度的量化评价提供方法参考。然而,针对航空柔性装配体不规则曲面的表面装配外形误差进行量化评估,却需进一步考虑不同外形误差在表面的分布状态对装配精度的影响。

本研究通过分析航空薄壁件的装配误差源,构建其装配误差传递路径模型,并建立零部件间偏差传递计算矩阵。结合不同装配序列下的物理变形信息,对传递计算矩阵中的形变偏差传递因子进行实时更新,从而实现考虑过程状态变化的偏差传递计算矩阵的动态与准确

计算。基于航空薄壁板表面关键特征点的实测数据,对薄壁件表面装配外形误差进行量化评价。结合某机翼整体结构对上述方法开展装配验证工作,以实现装配累积误差的精准预测、量化评价及工艺优化。

1 柔性装配体的多源误差传递路径模型构建

飞机部件装配零件众多、协调关系复杂,为系统地分析薄壁件装配过程中的误差传递路径,需精准识别影响精度的各类误差,并分析获取多源误差的偏差值,构建其误差旋量模型;进而,需结合柔性装配体结构特点和装配工艺特性,考虑真实变形状态,构建其柔性装配体配合面符号矩阵,对柔性装配体所有可能存在的误差传递路径进行搜索与判定,获取起主导作用的误差传递路径。

1.1 航空薄壁件多源误差分析

在装配过程中,航空薄壁零部件结构受由零件自身较大的制造误差场、工装自身定位误差(由工装定位末端自身加工误差、工装安装测量误差、工装运动执行机构控制误差等组成)、强迫定位装夹力、自身重力等力组成的复杂载荷场作用,零部件连接界面接触状态会发生

动态变化,并引起结构的变形。对于上述误差源,基于小位移旋量理论,将平面、空间曲面等典型几何特征的位置、形状偏差特性转化为误差旋量矩阵模型,再以不等式约束形式映射到公差域,实现零件尺寸公差与形位公差及装配变形范围的统一量化描述。具体几何特征的误差模型与约束关系详见表1。

1.2 柔性装配体的误差传递路径构建

装配配合面由零件几何要素通过约束关系耦合形成,典型形式包括曲面配合面、平面配合面、圆柱配合面(含过盈/间隙连接),还有可能是由线/点要素构成的特殊配合面。配合面作为加工误差、定位误差与变形误差的汇聚点,考虑到在装配过程中零部件变形会改变装配零件的实际尺寸和形状,进而影响误差的传递路径和大小。则基于理论模型获取的、使误差累积结果最小化的误差传递路径,通常与考虑结构变形后的误差传递路径所对应的装配误差计算结果存在差异。因此,在研究误差传递路径时,需考虑变形因素的真实误差状态,并将其体现在误差传递路径中配合面及其误差变动属性上。为精准描述其误差传递特性,可借助小位移旋量理论定义配合面误差传递函数矩阵为 S ,其中不参与传递的

表1 典型几何特征的误差旋量模型及约束不等式
Table 1 Error torsor model and constraint inequality for typical geometric features

特征类型	公差域形状	误差旋量模型	约束不等式
特征点		$T_{\text{point}} = \begin{bmatrix} 0 & u \\ 0 & v \\ 0 & w \end{bmatrix}$	$\begin{cases} -T/2 \leq u \leq T/2 \\ -T/2 \leq v \leq T/2 \\ -T/2 \leq w \leq T/2 \\ u^2 + v^2 + w^2 \leq T^3/8 \end{cases}$
圆柱特征		$T_{\text{cylinder}} = \begin{bmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{cases} -T/l \leq \alpha \leq T/l \\ -T/l \leq \beta \leq T/l \\ -T/2 \leq u \leq T/2 \\ -T/2 \leq v \leq T/2 \\ u^2 + v^2 \leq T^2/4 \end{cases}$
平面特征		$T_{\text{plane}} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ \beta & 0 \\ 0 & w \end{bmatrix}$	$\begin{cases} -T/a \leq \alpha \leq T/a \\ -T/b \leq \beta \leq T/b \\ -T/2 \leq w \leq T/2 \end{cases}$
曲面特征		$T_{\text{surface}} = \begin{bmatrix} \alpha & u \\ \beta & v \\ \gamma & w \end{bmatrix}$	$\begin{cases} -T/a \leq \alpha \leq T/a \\ -T/b \leq \beta \leq T/b \\ -T/l \leq \gamma \leq T/l \\ -T/2 \leq u \leq T/2 \\ -T/2 \leq v \leq T/2 \\ -T/2 \leq w \leq T/2 \end{cases}$

注:表中 T 为公差值; l, a, b 为尺寸长度参数; $\alpha, \beta, \gamma, u, v, w$ 为误差的变动量。

误差分量以零元素表征。为方便系统描述柔性装配体的配合面类型与误差传递属性,对典型柔性配合面符号(Fitting flexible surface symbols, FFSS)进行了定义,如表2所示。其中,平面、曲面配合面的法向量均假设与X轴平行,圆柱面配合面的轴线均假设与X轴平行。此外,鉴于误差传递特性与配合面局部坐标系方向的强相关性,需基于右手法则统一各配合面局部坐标系的坐标轴方向,以确保误差传递特性描述的一致性。

以某柔性装配体为例,其FFSS矩阵编码示例及装配信息表达如图1所示。

具体地,针对多工位多层次的柔性装配体,可根据其拓扑结构梳理其装配层级关系,通过层次化分解完成结构划分并构建FFSS矩阵。首先,为准确描述各层次装配关系,将柔性装配体依次划分为装配体、部件、零件3个层次,在划分过程中,将具备独立功能且可再拆分的部分作为部件,将不具备进一步拆分的部分设定为零件,并将装配体中部件定义为 $C_i (i=1,2, \dots, a)$,零件定义为 $P_j (j=1,2, \dots, b)$;其次,结合装配工艺过程,确定各零部件对应的配合面,构建柔性装配体的FFSS矩阵。在FFSS矩阵构建过程中,可忽略对功能和精度影响小的配合面,以降低后续分析工作的难度;进而,在已构建的FFSS矩阵的基础上,依据误差精度的要求明确起点(初始基准零部件)和终点(最终精度输出零部件),搜索柔性装配体的所有潜在路径;最后,根据搜索到的误差传递路径,归纳出 $\alpha, \beta, \gamma, \mu, \nu, w$ 各个误差分

量的变动作用范围,结合装配体的装配精度要求,对装配误差传递路径进行判定。假设按照装配体的装配精度要求需求解 α, β, w 方向的装配误差,则分析出 α, β, w 误差分量的传递路径,当对应误差分量有多条误差传递路径时,应选取这几条误差传递路径中对应的装配误差最小的一条,并将其作为该误差分量的有效传递路径。

2 考虑装配变形的偏差传递计算矩阵的动态更新

2.1 零部件间的装配偏差传递计算初始矩阵构建

在装配偏差传递计算矩阵构建中,首先需构建装配体的全局坐标系 O_A ,以及各组成零件的局部坐标系 O_1, O_2, \dots, O_n ,并定义零件 i 的局部坐标系 O_i 转化到全局坐标系的齐次变换矩阵为 T_i^A ;其次,分析两零件间的装配误差传递机制,假设零件I和零件II上关键特征 F_{1i} 和 F_{2i} 的耦合误差在各自局部坐标系 O_1, O_2 中误差旋量模型分别为 $\Delta F_{1i} = (\alpha_{1i}, \beta_{1i}, \gamma_{1i}, u_{1i}, v_{1i}, w_{1i})^T, \Delta F_{2i} = (\alpha_{2i}, \beta_{2i}, \gamma_{2i}, u_{2i}, v_{2i}, w_{2i})^T$ 。根据零件I与II的零件局部坐标系 O_1, O_2 与全局坐标系 O_A 的转换关系,可得到其坐标变换矩阵,即

$$T_{li}^{O_A} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{z1} & \theta_{y1} & d_{x1} \\ \theta_{z1} & 1 & -\theta_{x1} & d_{y1} \\ -\theta_{y1} & \theta_{x1} & 1 & d_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

表2 各类柔性配合面的误差传递属性及符号表示

Table 2 Error transmission properties and symbol representations of various flexible mating surfaces

配合面类型	曲面配合	平面配合	圆柱过盈配合	圆柱间隙配合
误差传递属性	$[\alpha', \beta', \gamma', u', v', w']$	$[0, \beta', \gamma', u', 0, 0]$	$[0, \beta', \gamma', 0, v', w']$	$[0, \beta', \gamma', 0, v', w']$
配合面的符号	\boxtimes	\boxplus	\otimes	\odot

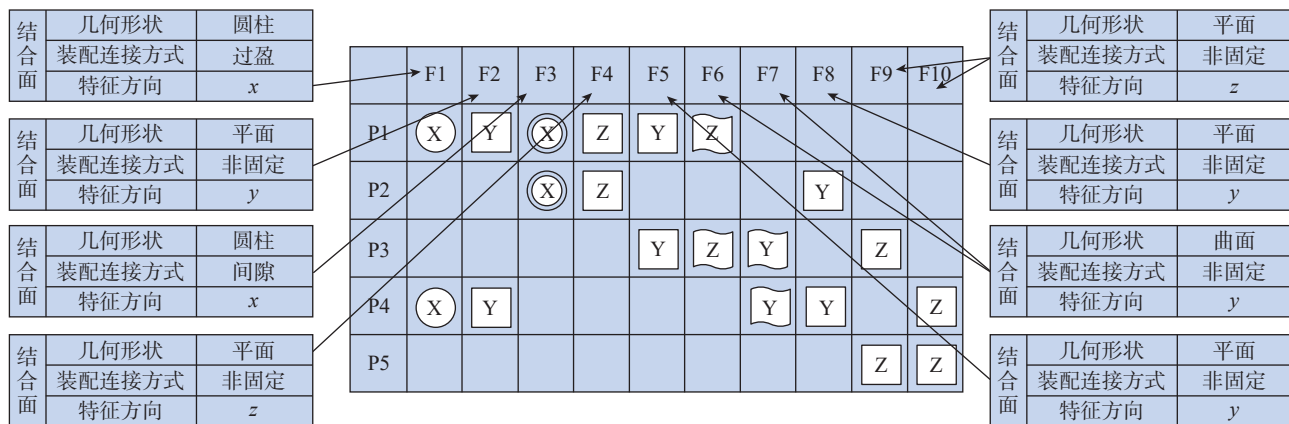


图1 某柔性装配体的FFSS矩阵及其信息表达

Fig.1 FFSS matrix and its information expression of a flexible assembly body

$$T_{2i}^{O_A} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{z2} & \theta_{y2} & d_{x2} \\ \theta_{z2} & 1 & -\theta_{x2} & d_{y2} \\ -\theta_{y2} & \theta_{x2} & 1 & d_{z2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则关键特征 F_{1i} 和 F_{2i} 相对于装配体全局坐标系中的误差旋量分别表示为

$$\delta_{\Delta F_{1i}} = T_{1i}^{O_A} \Delta F_{1i} = (\alpha_1 + \theta_{x1}, \beta_1 + \theta_{y1}, \gamma_1 + \theta_{z1}, u_1 + d_{x1}, v_1 + d_{y1}, w_1 + d_{z1})^T = (\alpha'_1, \beta'_1, \gamma'_1, u'_1, v'_1, w'_1)^T \quad (2)$$

$$\delta_{\Delta F_{2i}} = T_{2i}^{O_A} \Delta F_{2i} = (\alpha_2 + \theta_{x2}, \beta_2 + \theta_{y2}, \gamma_2 + \theta_{z2}, u_2 + d_{x2}, v_2 + d_{y2}, w_2 + d_{z2})^T = (\alpha'_2, \beta'_2, \gamma'_2, u'_2, v'_2, w'_2)^T \quad (3)$$

假设零件 I、II 间相互配合区域的尺寸公差范围为 $\Delta h = (0, 0, 0, \Delta h_{x1} + \Delta h_{x2}, \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}, \Delta h_{z1} + \Delta h_{z2})^T$, 则由两零件的配合误差 $\delta_{(1,2)}$ 引起零件 II 的位姿变动量可表示为

$$\Delta p_{12} = \left(\frac{\alpha'_1 \Delta h_{x1} + \alpha'_2 \Delta h_{x2}}{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2}}, \frac{\beta'_1 \Delta h_{y1} + \beta'_2 \Delta h_{y2}}{\Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}, \frac{\gamma'_1 \Delta h_{z1} + \gamma'_2 \Delta h_{z2}}{\Delta h_{z1} + \Delta h_{z2}}, u'_1 + u'_2, v'_1 + v'_2, w'_1 + w'_2 \right)^T \quad (4)$$

式中, $\Delta u_{12}, \Delta v_{12}, \Delta w_{12}$ 为特征 F_{2i} 相对于 F_{1i} 在全局坐标系中的空间位置偏差。在计算零件 I 与零件 II 装配累积误差的过程中, 将零件 I、II 的配合误差矩阵 $T_{\Delta p_{12}}$ 与零件 II 关键特征 F_{2i} 和 F_{2j} 之间的齐次变换矩阵 T_{2j}^{2i} 相乘, 可得到零件 II 与零件 III 相互配合的关键特征 F_{2j} 的装配累积误差的矩阵形式。忽略高阶非线性项对位姿误差的影响, 将位姿误差矩阵 T_{δ} 转换为矢量形式, 得到零件 II 上与零件 III 相互配合的关键特征 F_{2j} 在各方向上的变动误差累积分量 δ_2 。

$$\delta_2 = T_{2j}^{2i} \Delta p_{12} = (\Delta \alpha_{12} + \Delta \alpha_{ij}, \Delta \beta_{12} + \Delta \beta_{ij}, \Delta \gamma_{12} + \Delta \gamma_{ij}, \Delta u_{12} + \Delta u_{ij}, \Delta v_{12} + \Delta v_{ij}, \Delta w_{12} + \Delta w_{ij}) \quad (5)$$

在单次装配过程中, 偏差源借助零部件间的配合面实现偏差传递, 此时可利用传递矩阵进行量化计算。对于由多次装配构成的复杂序列, 通过逐次应用装配偏差传递矩阵, 可计算出各装配阶段的偏差累积效应, 最终得到整个装配体的装配累积偏差值。

2.2 二次形变驱动的装配偏差传递计算矩阵动态修正

在多工位装配过程中, 工件自重与接触力是影响配合面变形的关键因素。随着装配过程中载荷与重力因零件持续叠加而发生动态变化, 导致同一配合面在不同装配工艺阶段或者装配工序中产生新的变形, 即“二次形变”^[18-19]。其本质是装配体在自重与接触力耦合作用下的非线性变形过程, 变形随装配序列持续发生, 每新增一个装配单元, 基准零件配合面会因附加荷载产生新

一轮变形。以图 2 中的零件 I、II 为例, 其中实线、短虚线及长虚线分别表示零件理论装配位姿、实际装配位姿、实际表面状态。当零件 I 与 II 装配后, 零件 II 上参与配合的关键特征 F_{2j} 发生位姿变动。该变动通过同一零件上特征间的几何关联, 导致另一关键特征 F_{2i} 实际位置偏离理论值。该位姿传递关系可通过特征间位姿变换矩阵 T_{2j}^{2i} 量化描述, 从而实现零件 I 与 II 间的误差传递计算。

根据式 (5) 中 $\delta_2 = T_{2j}^{2i} \Delta p_{12}$, 在配合面发生二次形变后, 主要导致的是装配偏差传递因子 Δp_{12} 发生变化。下面以一个两工位装配构件的简化示意图为例展开分析, 如图 3 所示。

在图 3 中, 先将零件 I_2 安装于零件 I_1 之上, 由此形成了 I_{12} 配合面; 再将零件 I_3 安装到零件 I_2 上, 进而产生 2-3 配合面。此时, 零件 I 所承受的压力因增添了零件 I_3 的重力与受到过程载荷而额外增加, 致使 1-2 配合面发生二次形变。当变形量较大时, 必须对该矩阵进行迭代更新以确保装配偏差累积计算的准确性。因此, 在动态更新装配偏差传递计算矩阵时, 其核心在于通过实时形变信息重新计算偏差传递因子矩阵。

$$T'_{\Delta p_{12}} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta \gamma'_{12} & \Delta \beta'_{12} & \Delta u'_{12} \\ \Delta \gamma'_{12} & 1 & -\Delta \alpha'_{12} & \Delta v'_{12} \\ -\Delta \beta'_{12} & \Delta \alpha'_{12} & 1 & \Delta w'_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, X、Y、Z 轴方向上的位移与角位移的增量由接触变形量所计算。基于构建的初始装配误差传递模型, 结合在各装配环节中现场测量设备所测量的数据及 CAE 仿真计算, 可分析获取的各装配阶段关键特征物理形变

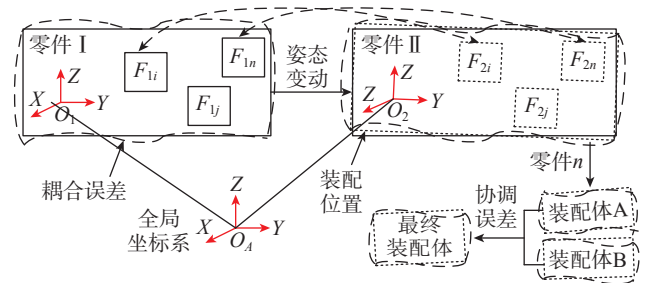


图 2 多源误差耦合的装配偏差传递示意图

Fig.2 Schematic diagram of assembly deviation transmission with multi-source error coupling

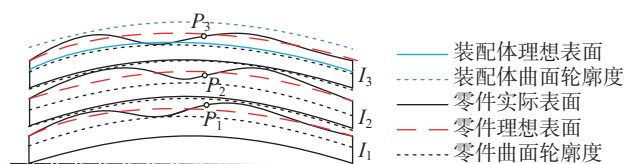


图 3 柔性薄壁零部件装配结构简图

Fig.3 Simplified assembly structure diagram of flexible thin-walled components

信息,并实时求解出各装配序列的偏差传递因子 Δp ,从而实现柔性零部件装配偏差传递计算矩阵的动态更新。在装配过程中,若薄壁件变形量难以直接测量获取,则需引入 CAE 仿真数据作为辅助;若离线数据包含各装配工序对应的装配变形数据,同样可满足使用需求。进而,结合整个装配体的装配序列,实现装配协调误差累积的精准计算,为装配质量提升提供依据,如图 4 所示。

在图 2 零部件装配过程中,假设当前该装配体由 n 个零件依次连接装配,其包含 F_1, F_2, \dots, F_n 共计 n 个关键特征。该装配体所涉及的 n 个关键特征之间存在大量不同的装配工序,每一道装配工序中均会产生变化,为方便计算误差累积结果,可先假设其装配过程按零部件编号依次装配,则在该装配体全局坐标系中,装配体在历经该特定完整的装配序列后,整个装配体的最终位姿累积误差 δ'_n 为

$$\delta'_n = \prod_{k=2}^n T_{k-1}^k \Delta p_{(k-1)k}^{v(k-2)} \quad (n \geq 2) \quad (7)$$

式中, T_{k-1}^k 表示装配体中关键特征 F_{k-1} 和 F_k 间的变换矩阵; δ'_n 表示装配末端零件 n 上关键特征在装配体全局坐标系中的位姿误差; $\Delta p_{(k-1)k}^{v(k-2)}$ 表示关键特征 F_{k-1} 和 F_k 的配合面经过 $k-2$ 次二次形变后的偏差传递因子。此时,根据式(7)可快速计算该装配体上关键特征的装配偏差在某一完整装配序列中的装配累积误差,实现对其他装配体在各自对应装配序列下最终装配误差的求解。

进而,计算装配体间的装配协调误差。假设装配偏差传递示意图 2 中相互配合协调的装配体 A、B 的装配

累积误差分别为 $\Delta \delta'_{An}, \Delta \delta'_{Bn}$, 则可获得装配体 A、B 间的最终装配协调误差为

$$\nabla \delta'_{An, Bn} = |\Delta \delta'_{An} - \Delta \delta'_{Bn}| \quad (8)$$

结合薄壁零部件具体装配要素信息与装配工艺,通过计算每个装配体的最终累积误差,得出各装配体之间的协调误差。若该结果无法满足装配指标要求,需明确产生较大装配累积误差的具体环节,并对这些环节进行工艺优化。

3 航空薄壁表面装配外形误差的量化评价

考虑到航空薄壁件普遍呈现不规则曲面的形态,在不同装配序列下,装配体中的各航空薄壁零部件会产生不同的装配变形误差,并呈现出不同的形状误差分布特性。由于装配表面形状误差分布不同,曲面上不同关键测量特征点处的几何变动,会确定出不同的被装配件测量基准面,进而展现出不同的装配误差结果。然而现有针对柔性装配体表面装配外形误差累积值的评价方法,通常仅依据局部误差累积值大小或者关键点误差的变动范围,难以对装配精度做出精确评价。因此,结合曲面薄壁件的几何结构特点,使用稳定性熵函数,在本节中综合考虑装配外形误差累积值和局部/全局误差真实状态的分布情况,对航空薄壁表面装配外形误差累积结果进行量化评价。

稳定性熵函数是用来量化和评估系统稳定性的一种数学工具。通过特定的计算方式,将系统的稳定性状态转化为一个具体的数值,即熵值,从而实现对系统稳定性水平的直观描述和量化分析^[17,20]。熵函数 $H(X)$ 是基于离散型随机变量 X 的概率分布函数,该函数具有极值特性。当所有事件等概率发生时,熵达到最大值,表示为

$$H_{\max} = -\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (9)$$

根据熵的特性可知,熵函数可用于评价一个随机变量所有可能值的概率均匀性。随机变量的不确定性越小,其所有可能值的概率就越接近、越集中,进而产生的熵值越大。零部件的实际表面存在形状误差,从而导致实际零件表面 (Practical component face, PCF) 高度不均匀。因此,基于熵函数和 PCF 各自的特点及其相互关系,可实现 PCF 装配外形误差的量化评价。归一化熵值越大,PCF 高度越均匀,因此产生的装配误差越小。

曲面形状误差量化评价过程(图 5),可分为以下 5 个步骤:(1)采用相对熵方法对平面形状分布误差进行初步评价;(2)当初步熵评价的结果表明 PCF 的形状误差非均匀分布时,在 PCF 上搜索凸壳;(3)根据搜索

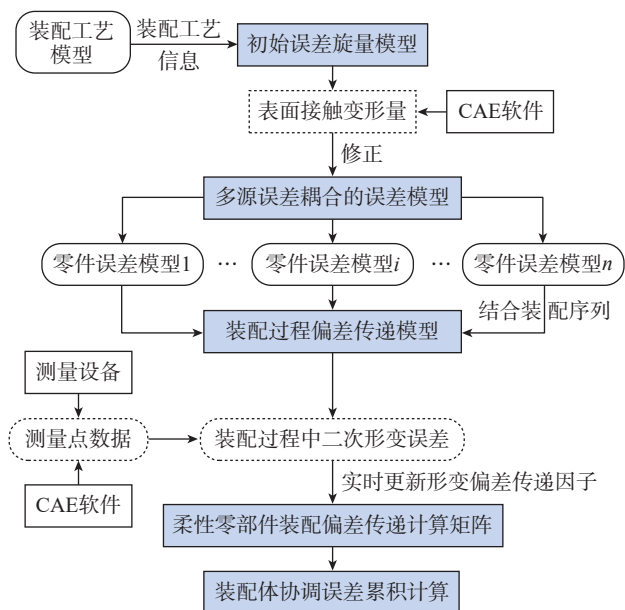


图 4 融合装配序列下物理变形的偏差传递计算矩阵更新机制

Fig.4 Mechanism for updating the deviation transmission calculation matrix of physical deformation under fusion assembly sequence

的凸壳,构建顶部平面,并结合理想表面计算得到装配后曲面的最大形状误差;(4)针对凸壳区域进行局部熵分析,获取各凸壳的局部熵值;(5)利用步骤(3)和步骤(4)的计算结果,得到装配 PCF 形状分布误差的综合评价结果。

3.1 PCF 形状误差分布的初步评价

为了评估 PCF 外形误差分布均匀性,需先在薄壁曲面上构建评价坐标系并选取大量测点,通过对比各测点在评价坐标系中的实际与理想 z 坐标,获取各测点的误差值,分别记为 $\Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \Delta z_i$,其中 m 为测点个数。考虑到概率空间的非负性和完备性,在评价坐标中对所有测点的 z 方向的误差值进行归一化,得到归一化的 $\Delta z'$ 误差值,即

$$\Delta z'_i = \frac{\Delta z_i}{\sum_{i=1}^m z_i} \quad (10)$$

式中, Δz_i 为评价坐标中第 i 个测点的误差值; $\Delta z'_i$ 为第 i 个测点的归一化值。进而,计算 PCF 的总熵 H_0 、对应的极值熵 $H_{0\max}$ 、归一化总熵 H_{0S} ,即

$$\begin{cases} H_0 = -\sum_{i=1}^m \Delta z'_i \log_2 \Delta z'_i \\ H_{0\max} = \log_2 m \\ H_{0S} = \frac{H_0}{H_{0\max}} \end{cases} \quad (11)$$

当 H_{0S} 趋近于 1 时,表明测点高度接近面轮廓度误差 Δ ,凸壳的分布均匀,此时外形误差对装配精度的影响较小,实际应用中可忽略不计;反之,若 H_{0S} 偏离 1 较远,则需将装配表面划分为 4 个区域,通过区域熵方法进行量化评估。以几何中心为原点,将 PCF 划分为四等分区域。对于高精度的翼类零部件装配系统的配合表面,形状误差值与公称尺寸相比非常小,支撑装配零件配合表面的 3 个凸壳会落在坐标系中的 3 个象限或两个对角区域。因此,如果 3 个区域或两个对角区域的熵与总熵相差很大,则 PCF 对装配零件造成的位置或方向误差非常大。为了量化评估这种误差情况,分别计算由 XOY 坐标轴四等分划分的 4 个区域的区域熵 H_{ki} 、

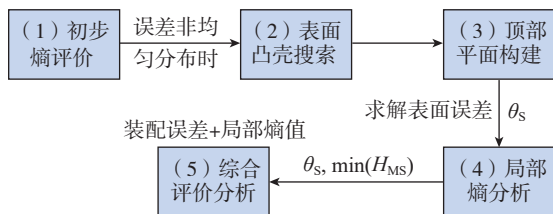


图 5 实际柔性零部件表面外形误差的评定过程

Fig.5 Evaluation process of surface shape error of actual flexible components

极值熵 $H_{k\max}$ 、归一化区域熵 H_{kS} ,即

$$\begin{cases} H_{ki} = -\sum_{i=1}^{m_k} \Delta z'_{ki} \log_2 \Delta z'_{ki} \\ H_{k\max} = \log_2 m_k, k = 1, 2, 3, 4 \\ H_{kS} = \frac{H_k}{H_{k\max}} \end{cases} \quad (12)$$

式中, z_{ki} 为第 k 区域内第 i 个测点的误差值; m_k 为第 k 区域内测点个数。如果各 H_{kS} 相互接近,表明 PCF 上凸壳的数量少且在 XOY 面分布均匀。如果各 H_{kS} 之间的差异较大,则 PCF 上形状误差分布不均,对装配精度影响较大,需进一步定量分析。

3.2 表面凸壳搜索

在航空薄壁零部件的实际装配表面上,凸点及其周围点集构成凸壳。建立实际装配表面的顶部平面需先搜索所有凸点及其凸壳,考虑到凸点 z 方向的误差值大于周围点,本文采用八邻域搜索 PCF 上凸点和凸壳。按行遍历点云数据矩阵,从坐标原点对应的起始点开始,逐点比较当前点与八邻域点的 z 坐标值,判断是否为凸点并确定下一目标。若该点 z 坐标值大于八邻域任一点的误差值,说明是凸壳,将停止搜索;当搜索目标到达测量网格边缘时,其周围不满足 8 个测量点,只需将目标点与周围测量点进行比较。

3.3 顶部平面构建

顶部平面通常由 3 个最高的凸点组成,假设 PCF 上 3 个凸点的位置分别为 M_1, M_2 和 M_3 ,其在评价坐标系中的位置向量分别为 r_1, r_2 和 r_3 ,如图 6 所示。

假设 M_1, M_2 和 M_3 的坐标为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ 和 (x_3, y_3, z_3) ,则可构建顶部平面方程,即

$$Ax + By + Cz = D \quad (13)$$

式中, A, B, C, D 可由 M_1, M_2 和 M_3 的坐标进行求解。然后判断式(14)是否对上述得到的所有凸点都成立。

$$z = \frac{D - Ax - By}{C} \geq z_i \quad (14)$$

式中, z_i 是任意凸点的实际高度。如果不等式(14)成立,则式(13)表示的平面为 PCF 的顶平面;否则,将利用“凸壳搜索”中搜索的另外 3 个凸点,通过式(13)建

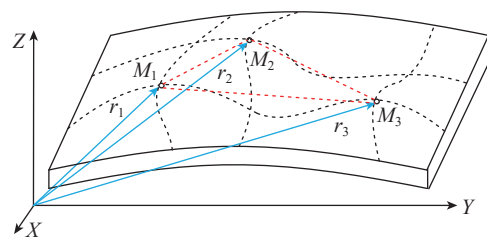


图 6 蒙皮表面凸点的位置及其向量

Fig.6 Position and vector of convex points on the skin surface

立平面,直到式(14)成立。

同理,以凸点的 z 向误差值构建顶部平面,则存在 ΔM_1 、 ΔM_2 和 ΔM_3 的坐标是 $(x_1, y_1, \Delta z_1)$ 、 $(x_2, y_2, \Delta z_2)$ 和 $(x_3, y_3, \Delta z_3)$,则平面 $\Delta M_1 \Delta M_2 \Delta M_3$ 的平面方程为

$$A'x + B'y + C'z = D' \quad (15)$$

根据 ΔM_1 、 ΔM_2 和 ΔM_3 的坐标,可求解平面方程中 A' 、 B' 、 C' 、 D' 的值,并得到式(16)。

$$\Delta z = \frac{D' - A'x - B'y}{C'} \geq \Delta z_i \quad (16)$$

其中, Δz_i 是任意点的实际误差值,即 θ 。故PCF的最大形状误差为

$$\theta_{\max} = \max \Delta z_i = \frac{D' - A'x - B'y}{C'} \quad (17)$$

则归一化形状误差可表示为

$$\theta_s = \frac{\theta}{\theta_{\max}} \quad (18)$$

3.4 局部熵分析

计算柔性薄壁零部件上装配误差后,需对3个接触凸壳的平面度进行分析。PCF的几何形状通常非常复杂,仅能用近似方法选择凸壳的区域。若凸点 M_1 、 M_2 和 M_3 的测点数目分别为 m_1 、 m_2 和 m_3 ,则凸壳局部熵 H_j 、局部极值熵,归一化的局部熵分别为

$$\begin{cases} H_{M_j} = -\sum_{i=1}^{m_j} \Delta z'_{ji} \log_2 \Delta z'_{ji} \\ H_{M_j, \max} = \log_2 m_j, j = 1, 2, 3 \\ H_{M_j S} = \frac{H_{M_j}}{H_{M_j, \max}} \end{cases} \quad (19)$$

当 $H_{M_j S}$ 越大时,凸壳越平坦,装配精度更高。

3.5 PCF形状误差分布综合评价指标

基于上述计算分析,提出了PCF形状误差分布的

综合评价指标,即

$$I_c = [\theta_s, \min(H_{M_j S})] \quad (20)$$

式中, θ_s 为由式(20)得到的装配误差,作为主导评价指标; $\min(H_{M_j S})$ 为式(25)中局部熵的最小值,作为附加评价指标。 θ_s 值较大,表示该PCF具有较大的极值误差; $\min(H_{M_j S})$ 值较小,表明PCF表面的凸壳很不均匀,将会导致较大的装配误差。

因此,在采用上述量化评价方法对不同装配序列下薄壁表面装配累积误差进行评价时,薄壁表面的 θ_s 值越小,且 $\min(H_{M_j S})$ 值越大,则该壁板的装配性能越好。进而,筛选出装配性能较高的装配序列,并结合容差优化的结果,从薄壁零部件的装配顺序和几何公差等方面,对其进行装配工艺优化,从而有效提升薄壁零部件的装配精度。

4 实例验证

4.1 翼盒结构装配工艺分析

翼盒作为飞机机翼内部的框架结构,其主要包含机加金属墙、肋、长桁、复材蒙皮等零件。翼盒整体构型及装配特征如图7所示。该机翼翼盒的上壁板蒙皮与下壁板蒙皮均采用复合材料成型制作而成,且在两壁板间的对缝处基本实现了净边交付。本试验结合验收的指标要求,对其壁板进行简化建模。在该型翼盒的验收过程中,主要检测其中两上壁板蒙皮对缝阶差的装配精度,确保机翼翼盒的装配质量符合验收标准。翼盒组成零部件的轮廓尺寸、公差信息和材料属性如表3所示。装配过程中所使用的装配工装系统如图8所示。该工装配备了采用真空吸盘的压紧单元,通过位移传感器实时监测并精准调控压紧伸缩量,保证部件贴合紧密又避免施压过度。同时,工装设有带6自由度力传感器的测量平台,能全方位感知装配受力情况,为偏差调整提供精确数据依据。

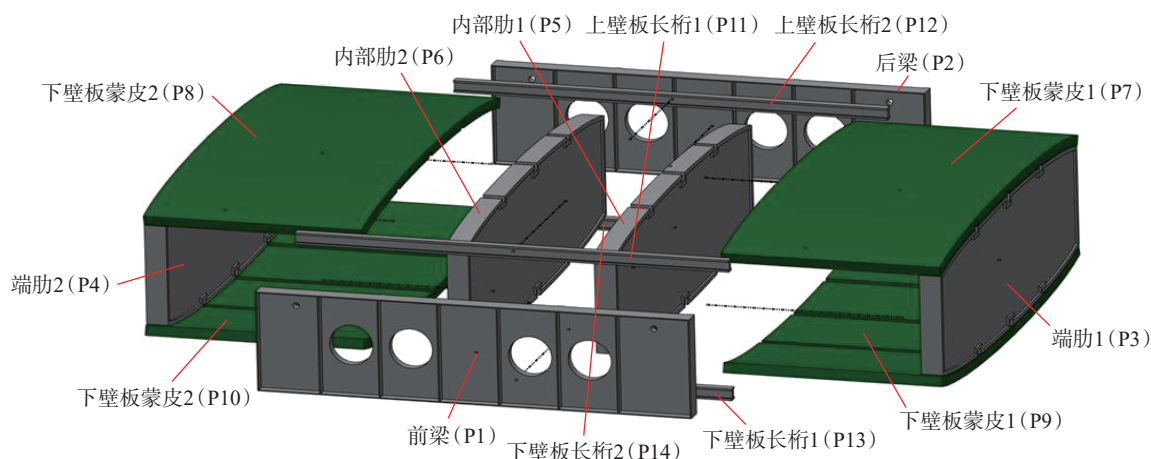


图7 翼盒整体结构及装配特征

Fig.7 Overall structure and assembly features of wing box

4.2 翼盒部件装配误差传递路径求解

以翼盒模型装配为例,求解影响上壁板蒙皮装配精度的有效装配误差传递路径。由装配精度要求可知,本研究主要针对两段上壁板蒙皮 P7、P8 间装配对缝阶差展开分析,需求解得到 P7 和 P8 在 z 方向上的误差分量 α 、 β 、 w 所对应的有效误差传递路径。具体步骤如下。

(1) 根据图 7 对机翼翼盒的装配体结构层次进行划分。其结构主要分为 3 层:第一层总装配体为机翼翼盒总体结构;第二层部件分为机翼骨架 C1、上壁板 C2、下壁板 C3;第三层零部件为机翼翼盒各组成零部件。其中,机翼骨架部件 C1 由前梁 P1、后梁 P2、端肋 P3、P4 零件组成;上壁板部件 C2 由上壁板蒙皮 P7、P8 和桁条 P11、P12 组成;下壁板部件 C3 由上壁板蒙皮 P9、P10 和桁条 P13、P14 组成。根据机翼翼盒的零部件编号,建立机翼翼盒装配体的 FFSS 矩阵,如图 9 所示。P 为零件编号,F 为零部件间的配合面。

(2) 确定翼盒装配误差传递路径的起点和终点,搜索其装配误差的传递路径。在翼盒装配阶差的计算过程中,需分别求解上壁板蒙皮 P7、P8 在 Z 方向上的偏差,

然后再求解上壁板蒙皮 P7 与 P8 在 Z 方向上的装配阶差。上壁板蒙皮 P7、P8 装配误差传递路径的基准件为前梁 P1,精度输出件为上壁板蒙皮 P7、P8。根据上述装配过程及 FFSS 矩阵,搜索得到 P1~P7 的上壁板蒙皮 P7 装配误差传递路径。

- 路径 1: P1→P3→P11→P7 (F1→F9→F21);
- 路径 2: P1→P3→P12→P7 (F1→F10→F22);
- 路径 3: P1→P5→P11→P7 (F3→F15→F21);
- 路径 4: P1→P5→P12→P7 (F3→F16→F22);
- P1~P8 的上壁板蒙皮 P8 装配误差传递路径为
- 路径 1: P1→P4→P11→P8 (F2→F12→F23);
- 路径 2: P1→P4→P12→P8 (F2→F13→F24);
- 路径 3: P1→P6→P11→P8 (F4→F18→F23);
- 路径 4: P1→P6→P12→P8 (F4→F19→F24);

上壁板蒙皮 P7 与 P8 的装配阶差误差传递路径的基准件为上壁板蒙皮 P7,精度输出件为上壁板蒙皮 P8。同理,根据上述装配过程及 FFSS 矩阵,可搜索获取上壁板蒙皮 P7~P8 的装配阶差误差传递路径共有 8 条。

进而,根据机翼翼盒的功能及结构特征,计算各传递路径的误差传递属性与各误差分量的传递路径。对上述所搜索到的上壁板蒙皮 P7 的装配误差传递路径展开分析,可得到上壁板蒙皮 P7 的各路径的误差传递属性均为 (1,1,0,0,0,1)。故误差分量 γ 、 μ 、 ν 上不存在对应的误差传递路径,误差分量 α 、 β 、 w 上存在 4 条相对应的误差传递路径。结合机翼翼盒的装配精度要求,需求解得到 P7 和 P8 在 z 方向上的误差分量 α 、 β 、 w 所对应的有效误差传递路径,则上壁板蒙皮 P7 的有效误差传递路径有 4 条。

最后,对装配误差传递路径进行判别。根据上述误差分量传递路径的计算可知,翼盒上壁板蒙皮在 Z 方向的阶差误差传递路径共有 4 条,其中涉及前梁 P1、端肋

表 3 翼盒零部件的轮廓尺寸、公差信息和材料属性

Table 3 Outline dimensions, tolerance information, and material properties of wing box components

名称	轮廓尺寸/ (mm × mm × mm)	材料	特征点位置度公差信息/mm
上、下壁板蒙皮	1500 × 1200 × 5	T800 复合材料	± 0.10
上、下壁板长桁	3000 × 30 × 44	铝锂合金	± 0.05
前、后梁	3000 × 640 × 10	铝锂合金	± 0.05
内部肋	1200 × 680 × 10	铝锂合金	± 0.10
端肋	1200 × 680 × 10	铝锂合金	± 0.05

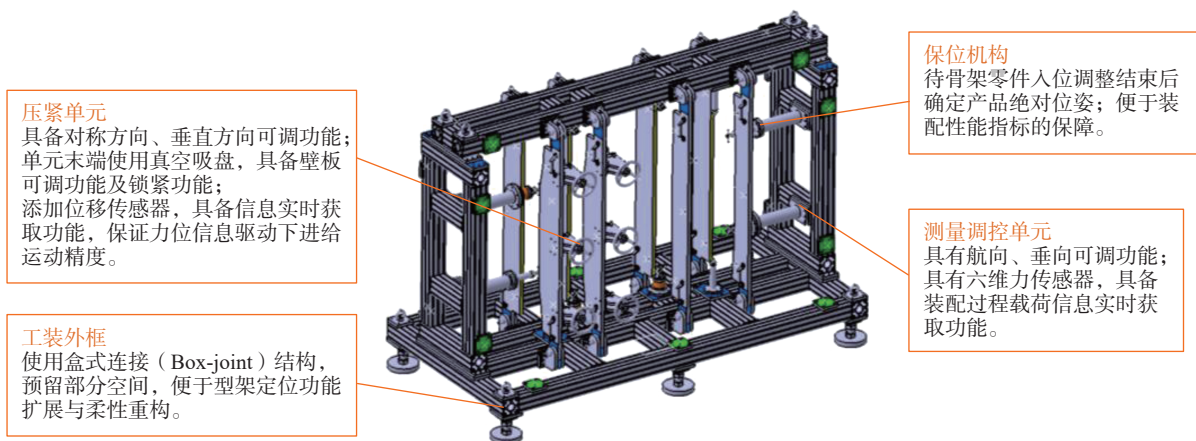


图 8 某翼盒装配工装组成结构及调整功能说明

Fig.8 Structure and adjustment function description of a wing box assembly tooling

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18	F19	F20	F21	F22	F23	F24
P1	(Y)	(Y)	(Y)	(Y)																				
P2					(Y)	(Y)	(Y)	(Y)																
P3	(Y)				(Y)				(X)	(X)	(Z)													
P4		(Y)				(Y)						(X)	(X)	(Z)										
P5			(Y)				(Y)								(X)	(X)	(Z)							
P6				(Y)				(Y)										(X)	(X)	(Z)				
P7																					(Z)	(Z)		
P8																							(Z)	(Z)
P9																								
P10																								
P11									(X)			(X)			(X)			(X)				(Z)		(Z)
P12										(X)			(X)			(X)			(X)			(Z)		(Z)
C3											(Z)			(Z)			(Z)			(Z)				

图9 翼盒装配体 FFSS 矩阵

Fig.9 FFSS matrix of wing box assembly

P3、内部肋 P5、上壁板长桁 P11 和 P12 等翼盒零部件。结合表 3 中翼盒零部件特征点公差信息及有限元耦合误差分析结果,可判断出内部肋的尺寸公差与变形误差相较于端肋均更为显著。路径 1、2 的传递序列为前梁 P1—端肋 P3—上壁板长桁 P11/P12—上壁板蒙皮 P7,相比于另外两条经过内部肋的路径,这两条路径所产生的误差较小。因此,上壁板蒙皮 P1~P7 的主导误差传递路径为路径 1、2。

4.3 翼盒部件装配误差传递计算与量化评价

根据分析得到的翼盒装配误差传递路径,采用装配偏差传递矩阵对上壁板蒙皮 P7 的装配误差进行展开计算。

首先,确定各组成零件关键特征间的配合关系与全局坐标系方向,建立各零部件组件的局部坐标系。依据翼盒上壁板蒙皮 P7 的装配误差传递的形成与传递过程,在翼盒前梁的表面处建立全局坐标系,并根据翼盒误差传递顺序依次在端肋、上壁板桁条、上壁板蒙皮功能特征配合表面上分别建立局部坐标系。

其次,依据考虑装配变形的偏差传递计算矩阵动态更新机制方法,对偏差传递计算矩阵进行实时修正。具体地,按照装配工序步骤,采用 GAPGUN、激光跟踪仪等测量装置,如表 4 所示,获取翼盒上壁板蒙皮、前梁、端肋、上壁板长桁等零部件中定位装夹载荷造成的变形、紧固连接变形与下架回弹变形误差值,修正误差传递路径上的各装配特征面,依靠拟合的表面变形数据调整各装配特征面的位置与形状变动数值,得到各零部件功能特征修正后的装配误差变动量范围,即功能

表 4 翼盒装配过程中涉及的测量设备

Table 4 Measuring equipment involved in wing box assembly

测量设备	设备参数
激光跟踪仪	量程约 20 m; 精度约 0.02 mm; 俯仰角小于 80°
六维力传感器	量程 5000 N
GAPGUN 间隙阶差测量仪	精度 0.0254 mm; 测量间隙范围 20.32 mm; 测量阶差范围 20.32 mm

特征偏差传递因子。

进一步,根据偏差传递因子矩阵(式(6)),将各零件功能特征误差旋量模型转化为误差传递矩阵的形式,结合翼盒各零部件关键特征点的坐标系,可获得翼盒上壁板蒙皮 P7 的装配误差 FR。

$$FR = T_1^0 T_{FE11}^1 T_3^1 T_{FE31}^3 T_{11}^3 T_{FE11}^3 T_7^1 T_{FE71}^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0.0004 & 0 \\ 0 & 1 & -0.0001 & 0 \\ -0.0004 & 0.0001 & 1 & 1.1781 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

由式(21)可知,翼盒上壁板蒙皮 P7 在 Z 方向的装配误差为 1.1781 mm。同理,可计算获得上壁板蒙皮 P8 在 Z 方向的装配误差为 1.2013 mm。利用装配协调误差计算公式计算出上壁板 P7 与上壁板 P8 的装配阶差 ε 为 1.7396,将其与仿真分析结果 1.6112 mm 进行对比,结果表明两者误差值较为接近,相似度为 92.6189%,这

一对比结果有效验证了该方法的可行性。

为精准把控机翼翼盒上壁板蒙皮的装配质量,采用基于熵函数装配外形误差量化评价方法,针对不同装配顺序下的上壁板蒙皮开展系统评估。首先,结合激光跟踪仪、六维传感器测量的实测值,分析获取上壁板蒙皮在4个装配误差顺序的下蒙皮上关键特征点的实测数据,并定义各关键特征点的坐标;其次,将所有测点的Z指标值转移到评价坐标中,得到相应的函数值后,计算上壁板蒙皮在4条不同装配序列下的实际表面状态的归一化总体熵 H_{os} ,以及四等分后各区域的归一化熵 H_{is} ,进行壁板装配外形误差的初级评价,结果如表5所示。

表5中的初步评价表明,各上壁板蒙皮形状分布误差较大。因此,有必要进行进一步的综合评价。4条不同装配序列下的实际表面装配状态(PCF)的综合评价指标分别为

$$Ic1=[1.1712, 0.8209], Ic2=[1.1957, 0.6810] \quad (22)$$

$$Ic3=[1.4036, 0.7274], Ic4=[1.3787, 0.7802] \quad (23)$$

4种不同装配顺序下PCFs的综合评价指标属性曲线如图10所示。

分析图10中的数据可知,在不同装配序列下,各PCF表现出不同的误差特性。就装配路径1下PCF1而言,其装配误差极大值是PCF中最小的,且其误差分布均匀效应也是PCF中最佳的。这两者共同作用,充分说明PCF1的装配质量是最好的。

表5 上壁板蒙皮4种实际表面状态的综合熵评价结果

Table 5 Comprehensive entropy evaluation results of four actual surface states of the upper wall panel skin

实际表面状态	总体熵 H_{os}	区域1的熵 H_{1s}	区域2的熵 H_{2s}	区域3的熵 H_{3s}	区域4的熵 H_{4s}
PCF1	0.8712	0.8385	0.9386	0.8451	0.8604
PCF2	0.7303	0.6472	0.8426	0.7151	0.7264
PCF3	0.7421	0.7549	0.8141	0.7444	0.7786
PCF4	0.8181	0.7803	0.8634	0.7946	0.7852

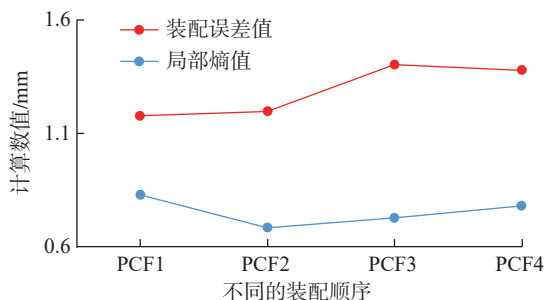


图10 4种装配路径上壁板蒙皮的综合评价结果曲线

Fig.10 Comprehensive evaluation result curves of upper wall panel skin under four assembly paths

再对比PCF2与PCF3,虽然PCF2的误差分布均匀效应略小于PCF3,即PCF2的误差分布略为集中,但PCF2的绝对误差极大值略小于PCF3。在装配过程中,绝对误差极大值直接关系到因极端偏差导致装配失败的风险,其值越小,风险越低。相比误差分布均匀度对装配质量的影响,主导评价指标误差极大值的重要性相对较高。因此,综合考虑这两个关键因素,PCF2在装配质量上优于PCF3。同理,PCF4在装配质量上优于PCF3,但次于PCF2。

综合上述,对各PCF的详细分析,按照装配质量从高低排序为:PCF1>PCF2>PCF4>PCF3。该评价方法能够准确识别出装配性能较高的表面,其评价结果与前文分析得出的各蒙皮表面装配性能基本一致。此外,该方法评价得更为全面、标准,可验证其有效性。

4.4 翼盒部件装配工艺优化

装配偏差优化可从调整装配顺序、调整定位方案、调整公差范围这3个方面着手。然而,受工装设备及铆接工艺等因素限制,若要对定位方案进行有效调整,往往需要开发新的工装设备,导致定位方案的调整在实际工程应用中难度较大。因此,本试验通过先采用优化装配顺序,再减小装配零件尺寸公差的方式,对机翼翼盒的装配精度进行优化控制。

根据对不同装配序列下薄壁表面装配累积误差量化评价结果,可分析得到最优装配顺序为装配路径1:前梁P1—端肋P3—上壁板长桁P11—上壁板蒙皮P7。在此基础上,结合前文对机翼翼盒装配偏差传递预测与评估的分析结果,以机翼翼盒装配偏差仿真敏感度分析报告,能够确定上壁板蒙皮轮廓度公差范围对蒙皮装配阶差的偏差贡献度最大。

本试验在公差优化方面构思了两个方案。

方案一:仅对上壁板蒙皮的公差范围进行调整,其他零部件的公差保持不变,借助仿真分析手段获取单偏差调整情况下容差优化后的装配偏差结果。

方案二:在仿真分析软件内,将边界条件设定为优化目标,开展容差优化工作(在VSA中综合分析装配顺序方案、装配工艺信息及零件公差等相关信息,可确定翼盒零部件所有公差最优调整量),进而获取综合调整所有偏差后容差优化的装配误差结果。具体的公差调整信息详见表6。

提出这两个方案具有双重意义:一方面可以验证前文误差累积分析方法所得的结果。基于前文对机翼翼盒装配偏差传递所进行的预测与评估分析可知,上壁板蒙皮轮廓度公差范围对蒙皮装配阶差的偏差贡献度最大,通过方案一能够聚焦上壁板蒙皮公差调整,精准验证这一关键结论;方案二则从全局出发,与方案一对比,

表6 翼盒零部件特征点调整前后公差信息

Table 6 Tolerance information of wing box components before and after feature point adjustment mm

名称	调整前公差	单项调整后公差	综合调整后公差
蒙皮上、下壁板	± 0.10	± 0.05	± 0.05
上、下壁板长桁	± 0.05	± 0.05	± 0.03
前、后梁	± 0.05	± 0.05	± 0.04
内部肋	± 0.10	± 0.10	± 0.08
端肋	± 0.05	± 0.05	± 0.04

进一步对该结论进行验证。另一方面,能够更好地实现装配质量的优化提升。通过对比这两个方案,筛选出优化效果更为显著的方案,并将其应用于工艺优化环节,切实有效地提升装配质量。

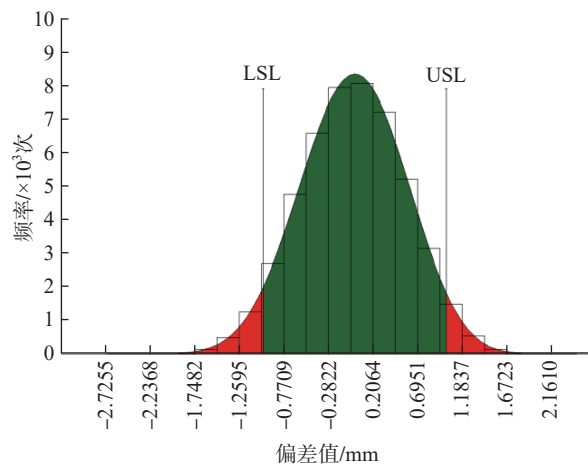
完成上述参数设定后,按照同等计算条件与流程,再次开展仿真计算分析,最终输出相应的结果报告,以便根据报告内容进一步评估优化效果。图11所示为机翼翼盒上壁板装配偏差调配前与单项调配、综合调配后仿真分析结果。

经分析可知,在采用方案一进行单项调整后,壁板阶差的装配误差从1.6112 mm显著降至0.9881 mm,降幅高达38.67%,成功满足了1 mm的装配精度标准;而运用方案二实施综合调整后,壁板阶差的装配误差从1.6112 mm进一步降至0.9611 mm,降低幅度达40.35%,同样符合1 mm的装配精度要求。

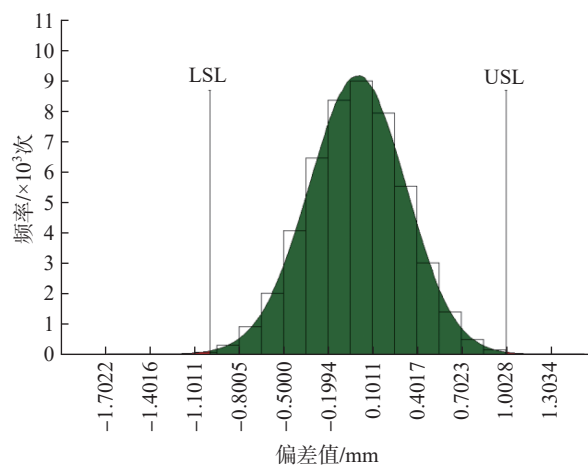
对比两种方案可知,仅调整单项上壁板蒙皮公差的方案一,与综合调整所有偏差的方案二,二者的优化效果较为接近,且均能有效控制翼翼盒壁板的装配质量,大幅提高装配准确率。因此,在装配过程中需高度重视蒙皮结构的定位与连接环节,尽可能规避过大变形,以切实保障上壁板蒙皮间阶差的装配质量。若综合权衡成本及其他相关因素,方案一在保障装配效果的同时,展现出更高的性价比,其优势更为明显。

5 结论与展望

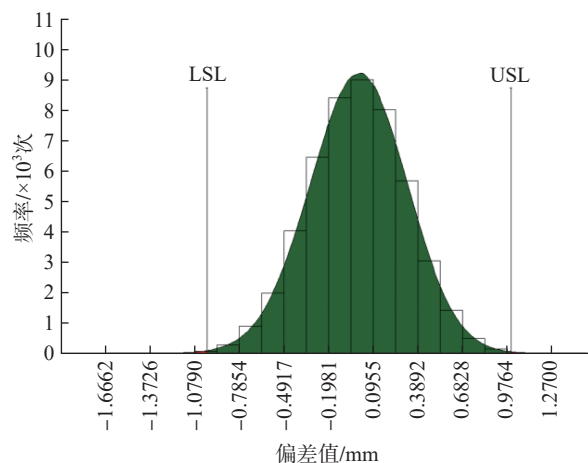
(1) 针对飞机装配多层次、误差源多,以及不同装配序列下零部件间变形传递的差异化等问题,提出柔性装配体的多源装配误差传递路径分析,以及零件间偏差传递矩阵动态更新计算方法。该方法基于有色集合理论建立了柔性配合面符号矩阵,实现柔性装配体误差传递路径模型构建,并对其进行路径搜索与判定,确定了主导误差传递路径;通过构建初始装配偏差传递矩阵,并结合实测数据实时提取形变偏差传递因子,动态更新



(a) 公差调整前的装配偏差仿真分析结果



(b) 公差单项调整后的装配偏差仿真分析结果



(c) 公差综合调整后的装配偏差仿真分析结果

图11 机翼翼盒上壁板装配偏差调配前与单项、综合调配后仿真分析结果

Fig.11 Simulation analysis results of wing box upper panel assembly deviation before and after single and comprehensive adjustment

传递矩阵,实现了装配协调误差传递累积计算。

(2) 针对传统装配误差累积分析仅聚焦于局部误差值,难以对其整个表面装配精度做出准确评价的问

题,提出柔性薄壁表面装配外形误差累积效应的量化评价方法。该方法基于稳定性熵函数,建立以装配误差值为主导指标、局部熵值为附加指标的综合评价体系,实现了对薄壁表面装配外形误差累积效应的量化评估。

(3)以某翼盒装配过程为例,研究其装配误差传递路径求解、装配误差累积计算及量化评价的应用案例。通过对比仿真分析结果与实测数据,提出装配工艺优化方案,仅调整单个参数,可使壁板阶差的装配误差从1.6112 mm显著降至0.9881 mm,降幅高达38.67%,满足1 mm的装配要求,不仅验证了本文研究方法的可行性和准确性,而且实现了翼盒装配质量的提升。

(4)在薄壁件的装配过程中,需借助工装夹具实现定位与保形。在工装的多重夹紧力及接触面变形的共同影响下,工装与薄壁件间会产生复杂的力学耦合:一方面,薄壁件定位点易发生位置偏移;另一方面,定位元件自身变形与薄壁件变形相互叠加,最终导致零件整体产生位姿偏差与变形偏差。后续可建立工装误差与薄壁件变形的耦合模型,解析工装定位偏差甚至是装配内应力在装配序列中的传递路径,量化其对最终装配精度的影响。

参考文献

[1] 刘检华,孙清超,程晖,等.产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J].机械工程学报,2018,54(11):2-28.

LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28.

[2] 赵罡,李瑾岳,徐茂程,等.航空发动机关键装配技术综述与展望[J].航空学报,2022,43(10):527484.

ZHAO Gang, LI Jinyue, XU Maocheng, et al. Research status and prospect of key aero-engine assembly technology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527484.

[3] LIU Z Y, ZHOU S E, QIU C, et al. Assembly variation analysis of complicated products based on rigid-flexible hybrid vector loop[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2019, 233(10): 2099-2114.

[4] 李健,张根保,冉琰,等.基于自由度约束的元动作单元误差传递路径识别方法[J].中国机械工程,2023,34(2):135-141.

LI Jian, ZHANG Genbao, RAN Yan, et al. Error transmission path identification method of meta-action unit based on DOF constraints[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(2): 135-141.

[5] 李林蔚.基于三维公差模型的车载雷达举升机构装配误差分析与公差优化[D].武汉:武汉理工大学,2019.

LI Linwei. Tolerance optimization and assembly accuracy analysis of vehicle-borne radar lifting mechanism based on 3D-tolerance[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

[6] 吕程,刘子建,秦欢,等.基于JSS矩阵的装配误差传递路径求解方法[J].机械工程学报,2015,51(20):177-184.

LÜ Cheng, LIU Zijian, QIN Huan, et al. Method of calculating the assembly error transfer path based on JSS matrix[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(20): 177-184.

[7] 李冬英,李梦奇,张根保,等.元动作装配单元误差源及误差传递模型研究[J].机械工程学报,2015,51(17):146-155.

LI Dongying, LI Mengqi, ZHANG Genbao, et al. Mechanism analysis of deviation sourcing and propagation for meta-action assembly unit[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(17): 146-155.

[8] 梁航龙.大型复杂装配关键尺寸链误差评估与调整策略研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

LIANG Hanglong. Research on error evaluation and adjustment strategy of critical number chain in large complex assembly[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.

[9] GAO C, YU H D, GU B, et al. Modeling and analysis of assembly variation with non-uniform stiffness condensation for large thin-walled structures[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 191: 111042.

[10] 王仲奇,杨盼,陈世洁,等.飞机舱门数字孪生模型构建及偏差传递分析研究[J].航空制造技术,2022,65(12):36-47.

WANG Zhongqi, YANG Pan, CHEN Shijie, et al. Research on construction of digital twin model and deviation transmission analysis of cabin door of airplane[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(12): 36-47.

[11] LI Y Y, ZHAO Y, YU H D, et al. Modeling deviation propagation of compliant assembly considering form defects based on basic deviation fields[J]. Assembly Automation, 2019, 39(1): 226-242.

[12] XUE D, YU J F, LI Y, et al. An advanced rigid-flexible hybrid assembly deviation analysis method for aerostructures[J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 58: 102173.

[13] LIU X, AN L L, WANG Z G, et al. Assembly variation analysis of aircraft panels under part-to-part locating scheme[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019, 2019(1): 9563596.

[14] 栗万羽.数控机床结合面特性对其装配精度影响规律的研究[D].成都:电子科技大学,2014.

LI Wanyu. The research of the assembly precision of cnc machine tools considering the joint surface characteristics[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

[15] 徐人月.数控机床元动作单元的装配质量评价与控制技术研究[D].重庆:重庆大学,2016.

XU Renyue. Research of assembly quality evaluation and control technology based on meta-action of CNC machine tool[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[16] 郭少伟.面向精密装配的零件几何形状误差评价方法研究[D].北京:北京理工大学,2016.

GUO Shaowei. Research on part geometric shape error evaluation method for precise assembly[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[17] WANG Z F, ZHANG Z J, CHEN X, et al. An optimization method of precision assembly process based on the relative entropy evaluation of the stress distribution[J]. Entropy, 2020, 22(2): 137.

[18] 刘晓军,易扬,程亚龙,等.数字孪生驱动的高精度装配[M].北京:科学出版社,2024.

LIU Xiaojun, YI Yang, CHENG Yalong, et al. High precision assembly with digital twin drive[M]. Beijing: Science Press, 2024.

[19] 郭飞燕,刘检华,邹方,等.数字孪生驱动的装配工艺设计现状 & 关键实现技术研究[J].机械工程学报,2019,55(17):110-132.

GUO Feiyan, LIU Jianhua, ZOU Fang, et al. Research on the state-of-art, connotation and key implementation technology of assembly process planning with digital twin[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(17): 110-132.

[20] JIN X, ZUO F C, ZHANG T Y, et al. An entropy-based method to evaluate plane form error for precision assembly[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(5): 726-734.

(责编 阳光)