

引文格式:姜一博,韦磊,崔展博,等.基于刚度模态分解的航空薄壁件装配偏差预测方法[J].航空制造技术,2026,69(19):26020042.

JIANG Yibo, WEI Lei, CUI Zhanbo, et al. A stiffness modal decomposition-based method for assembly deviation prediction of aeronautical thin-walled structures[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(19): 26020042.

基于刚度模态分解的航空薄壁件装配偏差预测方法

姜一博¹, 韦磊¹, 崔展博^{2,3}, 杨睿¹, 孙士勇¹

(1. 大连理工大学, 大连 116024;

2. 石家庄海山实业发展总公司, 石家庄 050071;

3. 河北省航空器检测与修复科技重点实验室, 石家庄 050071)

[摘要] 大型薄壁结构广泛应用于飞机、航空发动机等高端装备领域,由于该类结构具有尺寸大、厚度小、刚度低的特点,制造公差在装配过程中易与结构弹性变形相互耦合,导致整体外形光滑表面产生变形、阶差,严重影响装备的隐身性能和气动性能。如果能在设计阶段即对装配偏差进行精准预测,既能降本增效,也能为结构设计、公差设计提供有效参考。为实现装配偏差的精准预测,提出一种基于刚度模态分解的大型薄壁结构装配偏差预测方法。该方法以有限元刚度模型及零件设计公差为输入,对零件的刚度矩阵进行特征分解,构建零件基本偏差场的数学表达。结合各零件的装配约束关系,构建偏差场之间的传递映射模型。采用蒙特卡洛法模拟零件制造公差的分布范围,最终得到装配偏差结果的统计分布特征。经过与商用三维公差分析软件分析结果相比,误差约为3.8%。研究表明,该方法能够有效、准确预测大型薄壁结构装配偏差的统计分布特性规律,可为此类结构的装配精度控制提供可靠技术支撑。

关键词: 薄壁件; 装配变形; 装配偏差; 蒙特卡洛法; 公差设计

中图分类号: V261.4

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.26020042

A Stiffness Modal Decomposition-Based Method for Assembly Deviation Prediction of Aeronautical Thin-Walled Structures

JIANG Yibo¹, WEI Lei¹, CUI Zhanbo^{2,3}, YANG Rui¹, SUN Shiyong¹

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Shijiazhuang Haishan Industry Development General Company, Shijiazhuang 050071, China;

3. Hebei Provincial Key Laboratory of Aircraft Inspection and Repair Technology, Shijiazhuang 050071, China)

[ABSTRACT] Large thin-walled structures are widely used in aircraft and aero-engines. Due to their large size, small thickness, and low stiffness, manufacturing tolerances tend to couple with elastic deformation during assembly, resulting in surface distortion and step discontinuities that degrade stealth and aerodynamic performance. Accurate prediction of assembly deviations at the design stage can reduce cost and improve efficiency, and support structural and tolerance design. To this end, a stiffness modal decomposition-based method for predicting assembly deviations in large thin-walled structures was proposed. Finite element stiffness models and part design tolerances were taken as inputs. The stiffness matrices of individual parts were decomposed to construct basic deviation fields, and a deviation transfer mapping model was established based on assembly constraints. Monte Carlo simulation was used to model manufacturing tolerance distributions, yielding the statistical characteristics of assembly deviations. Comparison with a

收稿日期: 2026-02-09; 退修日期: 2026-02-26; 录用日期: 2026-03-26

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT25GF303)

通信作者: 韦磊, 高级实验师, 研究方向为公差分析与设计。

commercial three-dimensional tolerance analysis software shows an error of approximately 3.8%. The results show that the proposed method accurately predicts the statistical distribution of assembly deviations and provides reliable support for assembly accuracy control of large thin-walled structures.

Keywords: Thin-walled structures; Assembly deformation; Assembly deviations; Monte Carlo method; Tolerance design

飞机蒙皮、舱门等关键外形部件为大型薄壁结构,其装配质量直接影响飞机的隐身性能与气动性能。这类部件因为具有宽厚比大、刚度低、易变形的特点,导致装配后外形表面出现柔顺性差、有阶差的情况,为保证性能,需耗费大量时间修配,降低了生产效率。因此,在设计阶段对其装配偏差进行预测,从而合理分配公差,能够极大地提升产品合格率,提高生产效率。

现有装配偏差预测方法可以分为刚性装配偏差传递和柔性装配变形分析两种^[1],其中,刚性装配偏差传递分析方法国内外学者主要围绕矢量环模型和雅可比-旋量模型这两种方法展开研究。矢量环模型^[2]是将装配体的公差由矢量连接的方式建模。雅可比-旋量模型^[3-5]以小旋量表示公差的范围,根据零件间的装配关系,通过雅可比矩阵进行公差传递,从而计算出装配偏差结果。

在实际装配过程中,大型薄壁结构不可避免会产生变形,依据当前工艺水平,其变形量与公差范围在相同数量级。因此,在装配偏差预测分析中将装配变形因素纳入统一建模与评估框架,不仅有助于提升装配预测精度的真实性与可靠性,也为工艺参数优化和结构设计改进提供了理论依据。杨溢涛等^[6]将雅可比-旋量模型与零件形貌变形相结合,但并没有考虑零件的整体协调变形。影响系数法(Method of influence coefficients, MIC)是当前零部件柔性装配变形分析计算的主流方法,该方法由Liu等^[7]提出,使用蒙特卡罗随机数生成零件的初始公差分布,并对零件进行有限元建模,对装配过程进行有限元仿真,得到零件装配完成后的装配偏差分布。国内外学者对影响系数法也开展了一系列研究与改进工作,Lupuleac等^[8]将接触状态作为边界条件引入影响系数矩阵的计算中,对于解决弱刚性薄壁件在装配受力时的真实形变预测具有理论参考价值;潘伟等^[9]将传统影响系数法生成的力学变形数据作为基础支撑,引入了条件生成对抗网络进行小样本数据集的训练;Zhao等^[10]探讨了如何将影响系数法与线性接触分析结合,从而在保证计算精度的同时大幅提升柔性装配偏差分析的效率;耿浩然等^[11]采用影响系数法对柔性件的装配偏差进行了数学建模,并重点结合有限元分析了复杂受热变形状态下对装配偏差最终结果的影响;Hu等^[12]结合影响系数法的底层力学传递思想,针对飞机薄壁件在铆

接装配中由于“非均匀干涉”带来的复杂变形进行了预测建模。

但是以影响系数法为基础的柔性零部件装配偏差分析方法只对零件关键特征节点的偏差进行分析,没有考虑到整体结构偏差特性,对于飞机口盖、蒙皮、舱门这类大尺寸柔性零部件,其偏差分布呈空间场分布特征,如影响系数法这类基于点的偏差传递模型无法有效描述大尺寸柔性零部件整体的偏差传递特性。而且影响系数法依赖有限元提供数据,当所需测量的关键特征节点较多时需要大量有限元分析进行计算,对算力要求较高。综上所述,当前公差设计缺乏一种既能表征全局空间场特性,又能兼顾计算效率与物理意义的偏差传递统一模型。这使得设计阶段的预测往往停留于局部和静态,难以对柔性薄壁结构的整体装配质量提供全场域的精准指导。

本文针对大型薄壁结构装配偏差预测问题,采用刚度模态分解的方法,考虑零部件上各点位偏差对装配体整体偏差的影响,将零件的初始偏差映射到其刚度各阶模态上,建立偏差场传递模型。核心思路如下:首先对零件的刚度矩阵进行特征分解,提取零件刚度的各阶模态;随后将零件的初始制造偏差值投影到零件的每一阶模态上,得到该零件当前偏差状态下的偏差因子;根据零件之间的装配关系,计算得到偏差因子间的相关系数,即敏感系数;再整合得到装配体整体的偏差因子后,结合装配关系构建装配体的刚度矩阵,进而生成装配体的基本偏差场;最后将装配体的偏差因子与基本偏差场耦合,得到装配体最终的装配偏差。

1 柔性零部件的偏差场传递模型

1.1 薄壁零件的初始偏差场

薄壁零件存在面积大、厚度小、刚度低的特点,为方便计算零件的刚度矩阵,采用有限元网格划分的方法定义零件上的节点。假设零件上有 n 个节点的离散点集,对任意的离散点 X ,设第 i 个节点的理想位置为 $X_i(x, y, z)$,实际位置为 $X_i(x', y', z')$,则点 X_i 的偏差向量为

$$\Delta X_i = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (1)$$

所以,若是一个零件上是 n 个节点,每个节点的偏差向量记为 ΔX_n ,则这个零件的偏差向量 ΔX 可以表示为

$$\Delta X = [\Delta X_1 \quad \Delta X_2 \quad \cdots \quad \Delta X_n]^T \quad (2)$$

假设零件的 n 阶模态作为零件偏差场在空间中可以投影的 n 个基,如图1所示,则零件的初始偏差表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \\ \vdots \\ \Delta X_n \end{bmatrix} = \alpha_1 \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{21} \\ \vdots \\ \varphi_{n1} \end{bmatrix} + \alpha_2 \begin{bmatrix} \varphi_{12} \\ \varphi_{22} \\ \vdots \\ \varphi_{n2} \end{bmatrix} + \cdots + \alpha_n \begin{bmatrix} \varphi_{1n} \\ \varphi_{2n} \\ \vdots \\ \varphi_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(1),可以将零件的偏差写成

$$\Delta X = (\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \cdots \quad \varphi_n) \alpha \quad (4)$$

式中, $\varphi_i (i=1 \sim n)$; α 为零件的偏差因子,其每个子项为对应偏差场所占零件偏差的权重系数。

1.2 利用刚度模态分解解算零件初始偏差

根据力和变形的关系,在给定边界条件下,零件的初始偏差 ΔX 和所受外力 F 成正比,即

$$F = K \Delta X \quad (5)$$

式中, K 为根据边界条件消元后的刚度矩阵,将其进行特征分解为

$$\varphi^T K \varphi = \begin{pmatrix} f_1 & & & \\ & f_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & f_n \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中, φ 为零件整体刚度矩阵的特征矩阵,其每一列 φ_i 为各阶特征向量,也是该零件的各阶模态,也是零件的基本偏差场,因此在装配过程中零件力和变形的关系可以表示为

$$\Delta X = C F = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{f_i} \varphi_i^T F \right) \varphi_i \quad (7)$$

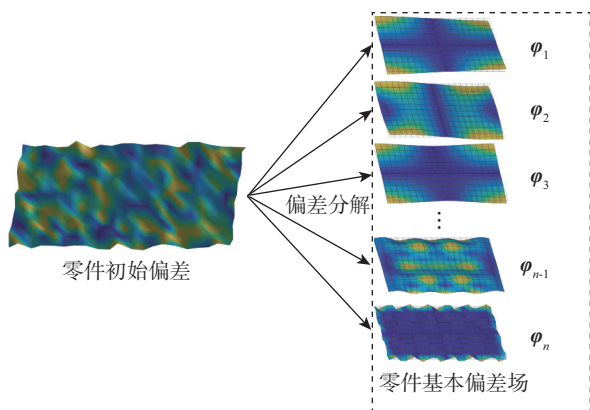


图1 偏差投影分解示意图

Fig.1 Schematic of deviation projection decomposition

式中, C 为零件的柔度矩阵。那么,实际零件的偏差场 ΔX 可以被分解为一系列的基本偏差场 $\varphi_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 的线性组合,即

$$\Delta X = \alpha_1 \varphi_1 + \alpha_2 \varphi_2 + \cdots + \alpha_i \varphi_i + \xi = (\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \cdots \quad \varphi_i) \alpha + \xi = \varphi \alpha + \xi \quad (8)$$

式中, α_i 为第 i 个基本偏差场对应的偏差因子,代表该基本偏差场的权重系数; ξ 是对应于高阶柔度的残余变形。

用最小二乘法求解式(8),则有

$$\alpha = (\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T \Delta X \quad (9)$$

故,对零件的实际偏差场 ΔX^* 进行表征,则可以写成

$$\Delta X^* = \sum_{i=1}^n X^i = \sum_{i=1}^n \varphi_i \alpha_i \quad (10)$$

1.3 零件装配偏差传递模型的建立

基于零件装配特性,本文从力学平衡角度对装配变形过程进行分析。假定装配过程中结构材料处于弹性变形范围内,忽略塑性变形及能量耗散因素,则在装配约束加载与释放过程中,结构需满足整体的静力平衡条件。在此基础上,可将装配过程视为由“受约束变形状态”向“自由平衡状态”的转化过程。根据薄壁结构在装配过程中的释放后结构的力平衡条件,结合装配约束形式与连接关系,如图2所示,可以得到

$$F_{as} = F_1 + F_2 \quad (11)$$

式中, F_{as} 为装配结束后装配体应力释放产生的回弹力; F_1 和 F_2 分别为零件1和零件2在装配过程中由于定位、装夹、连接等工序所受到的校形力。

由式(5)和式(8)可得

$$F = K \Delta X = K \varphi \alpha \quad (12)$$

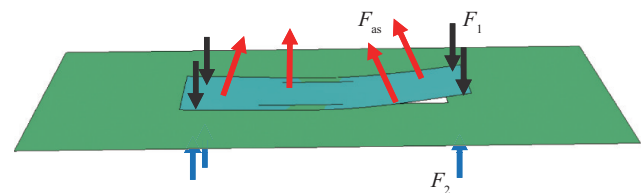
由式(11)和式(12)可得

$$K_{as} \varphi_{as} \alpha_{as} = K_1 \varphi_1 \alpha_1 + K_2 \varphi_2 \alpha_2 \quad (13)$$

根据零件的单元离散方式、节点编号及零件之间装配关系,可以建立每个零件的节点坐标与装配体节点坐标之间的映射关系,即

$$K_{as} = T_1^T K_1 T_1 + T_2^T K_2 T_2 \quad (14)$$

式中, T_1 和 T_2 分别是装配体的两个子零件或子装配体相对整个装配体广义坐标的坐标变换矩阵,假设零件1



注:红色箭头表示 F_{as} ;黑色箭头表示 F_1 ;蓝色箭头表示 F_2 。

图2 零件装配过程中力平衡条件

Fig.2 Force equilibrium conditions during part assembly

有 n 个节点,零件2有 m 个节点,其中 $i \sim j$ 号节点因为装配关系重合,则映射矩阵 T_1 和 T_2 的表达式分别为

$$T_1 = \begin{pmatrix} I_{6(i-1)} & 0 & 0 \\ 0 & I_{6(j-i+1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad T_1 \in \mathbf{R}^{6n \times 6N} \quad (15)$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} 0 & I_{6(j-i+1)} & 0 \\ 0 & 0 & I_{6(m-(j-i+1))} \end{pmatrix}, \quad T_2 \in \mathbf{R}^{6m \times 6N} \quad (16)$$

由此得到装配体的刚度矩阵 K_{as} 后,将其进行特征分解,得到装配体各阶模态的基本偏差场 φ_{as} 。由式(14)可得装配体的偏差因子为

$$\alpha_{as} = (K_{as} \varphi_{as})^{-1} K_1 \varphi_1 \alpha_1 + (K_{as} \varphi_{as})^{-1} K_2 \varphi_2 \alpha_2 \quad (17)$$

其中,令 $S_1 = (K_{as} \varphi_{as})^{-1} K_1 \varphi_1$, $S_2 = (K_{as} \varphi_{as})^{-1} K_2 \varphi_2$,代入式(17)中可得

$$\alpha_{as} = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 \quad (18)$$

式中, S_1 和 S_2 分别为各自零件的灵敏度矩阵。

根据装配偏差传递模型,已知两零件的偏差因子 α_1 和 α_2 ,求得 α_{as} 。结合装配体的变形模式 φ_{as} ,得到装配后装配体偏差场和零件关键特征点偏差的传递关系为

$$\Delta X_{as} = \varphi_{as} \alpha_{as} = \varphi_{as} S_1 \varphi_1^{-1} \Delta X_1 + \varphi_{as} S_2 \varphi_2^{-1} \Delta X_2 \quad (19)$$

1.4 基于蒙特卡洛仿真的零部件基本偏差分布

在实际制造过程中,零部件的几何尺寸、形位精度及装配基准均不可避免地受到加工误差、装夹误差和测量误差等多种不确定因素的影响,其公差本质上表现为随机变量而非确定性常量。因此,零部件偏差及其在装配过程中的传递规律具有显著的随机性和统计特征,仅通过单一工况或确定性分析方法难以全面反映装配精度的真实分布状态。

基于上述特点,基于公差设计的装配偏差分析在方法论上与传统的确定性有限元变形分析存在本质区别。确定性有限元分析通常针对给定的几何模型和载荷条件,计算结构在特定偏差或工况下的响应结果,其分析结论对应的是某一确定输入条件下的单一解。而在基于零件公差的装配偏差预测分析中,更关注的是在给定公差区间内大量可能偏差组合所对应的装配结果分布特性,包括装配偏差的均值、方差、极值区间及其概率特征等,这要求采用统计分析方法对偏差传递过程进行描述。

为此,本文引入蒙特卡洛仿真方法(Monte Carlo simulation, MCS)对零部件的基本偏差分布进行建模与分析。在每一次蒙特卡洛仿真中,首先针对各零部件节点或特征点,在其公差区间内随机生成零件的初始偏差,用以表征零部件在装配前的初始几何误差;随后,将该偏差场引入装配偏差传递模型,完成一次装配偏差求解过程。通过重复上述过程,获得大量装配偏差样本数

据。随着仿真次数的不断增加,装配偏差结果在统计意义上逐渐趋于稳定,从而能够对装配精度的统计特性进行可靠评估。在完成足够数量的蒙特卡洛样本计算后,可进一步对装配偏差结果进行统计分析,这些统计结果可为后续的公差分配优化与装配精度控制策略制定提供依据。

2 某机检修口盖装配偏差分析实例

某机机身检修口盖模型如图3(a)所示,本文将根据前文提出的方法对该部位的装配精度进行分析。

飞机检修口盖核心结构通常由薄壁盖板、格栅式加强筋、密封槽以及螺纹紧固结构组成,通过《飞机舱门系统可靠性分析、设计与实验》中航空薄壁件材料选型标准可知,飞机检修口盖材料通常采用铝合金或碳纤维复合材料,其结构和材料特性表现出总体厚度薄、尺寸大、刚性差的特点,通过螺纹紧固到飞机蒙皮盖板上,在装配过程中极易产生翘曲变形。

2.1 案例介绍

为方便划分飞机检修口盖结构各个零件上的网格节点,且方便对案例进行计算,对飞机检修口盖结构进行简化,忽略圆角结构,保持整个结构的曲率。简化后口盖结构如图3(b)所示,主要由飞机蒙皮、口盖框和口盖本体3部分组成。

(1)零件及材料。口盖部分结构包含部分蒙皮,由1个口盖框和1个口盖本体组成。该口盖整体尺寸约为600 mm×600 mm。蒙皮和口盖的材料为碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP),采用层合板结构,通过特定的铺层顺序和角度保证其面内性能各向同性,厚度为3 mm,杨氏模量 E 为68 GPa,泊松比 ν 为0.30,密度 ρ 为1550 kg/m³。口盖框为铝合金材质,厚度为3 mm,杨氏模量 E 为72.4 GPa,泊松比 ν 为0.33,密度 ρ 为2780 kg/m³。

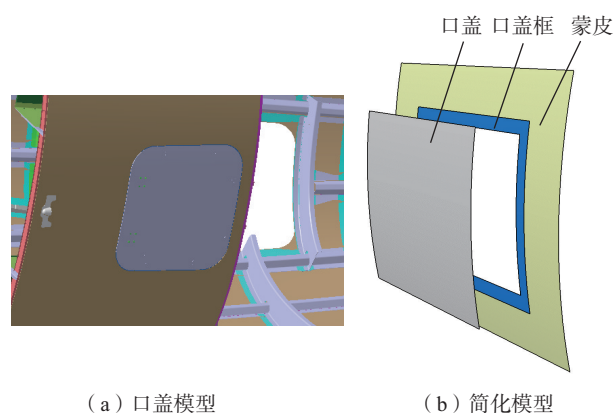


图3 某机检修口盖模型及其简化模型

Fig.3 Model and simplified model of an aircraft access panel

(2)装配过程及关键装配工艺。该口盖组件的装配顺序为蒙皮子装配体→口盖框→口盖。首先,将整个蒙皮和长桁、梁架组成的子装配体固定在刚性工装上;然后,口盖框通过确定性装配定位孔(Determinant assembly, DA)定位到蒙皮上,并进行铆接;最后,将口盖通过DA孔定位到口盖框上,并通过螺栓连接。DA孔、螺栓连接点的位置如图4所示。

(3)装配工况及边界条件设定。针对该检修口盖大尺寸、弱刚度以及多层级装配的特点,本文分析所面临的具体工况设定为多工序静态约束与弹性回弹平衡工况。具体过程为:将带有制造公差的各零部件映射至其初始几何偏差场;在装配节点施加强制位移边界条件,模拟刚性工装定位与螺栓/铆钉的强制拉合过程,此时结构处于内部应力累积的受迫变形状态;随后模拟工装释放工况,结构在弹性范围内自发寻找最低势能点,达到最终的自由回弹平衡状态。此外,为聚焦于柔性偏差场传递机理的验证,本文设定装配环境为恒温标准状态,忽略热变形,并假设结构处于理想支撑姿态。

(4)偏差源分析。偏差源为蒙皮、长桁、梁架组成的子装配体所带来的蒙皮表面平面度误差,以及口盖框和口盖各关键特征的制造偏差。各特征具体公差方案如表1所示。

2.2 基于偏差场传递模型和蒙特卡洛仿真计算实施

通过HyperMesh对部分蒙皮、口盖框及口盖3类零部件进行有限元网格划分,建立满足精度要求的节点与单元模型。在此基础上,将网格模型导入ABAQUS平台,分别完成3类零部件的有限元建模与边界条件施加,并提取各零部件在消除刚体自由度后的整体刚度矩阵 $K_i(i=1,2,3)$ 。所获得的刚度矩阵综合反映了零部件在弹性变形范围内的结构刚度特性。按照式(6)对零部件刚度矩阵 K_i 进行特征分解,可得到对应的特征向量与特征值。其中特征向量 ϕ_i 表征零部件在不同模式下的基本偏差场,反映了结构在低能量变形模式下的主要变形特征;特征值的倒数 $1/f_i$ 则对应各模式的柔度系数,用以衡量零部件在该偏差场方向上的变形敏感性。以口盖零部件为例,其前20阶模态及对应柔度系数分布如图5所示,可以看出,低阶模态在整体变形中占据主导地位,随着阶数增大,高阶模态的变形减小。

在获得零部件的基本偏差场后,可将制造过程中产生的初始几何偏差投影到基本偏差场空间中,得到表征零件初始偏差特征偏差因子向量。该偏差因子反映了各阶基本偏差场在实际制造偏差中的参与程度,其计算结果如图6所示,偏差因子的绝对值越大,表明对应阶模态对装配偏差的影响程度越大。由图6可知,在超过1500阶之后,该部件的模态对部件初始偏差影响较

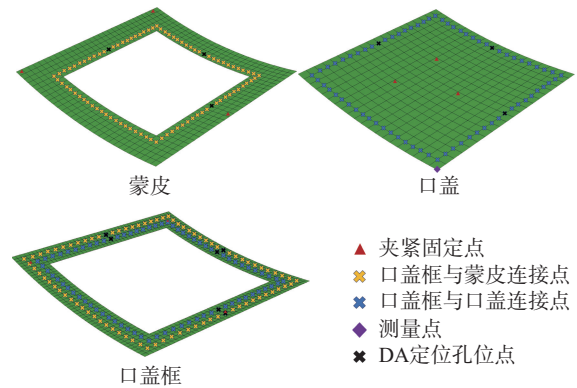


图4 口盖结构各部件网格结构及点位划分

Fig.4 Mesh structures and node definition of access panel components

表1 飞机口盖结构各零部件的公差值

Table 1 Tolerances of components for an aircraft access panel structure

零件名称	特征	公差种类	公差值/mm
蒙皮	表面	面轮廓度 $\bigtriangleup$	± 0.75
	定位孔	位置度 Φ	$\Phi 0.3$
	连接孔	位置度 Φ	$\Phi 0.3$
口盖框	表面	面轮廓度 $\bigtriangleup$	± 0.75
	定位孔	位置度 Φ	$\Phi 0.3$
	连接孔	位置度 Φ	$\Phi 0.3$
口盖	表面	面轮廓度 $\bigtriangleup$	± 0.75
	定位孔	位置度 Φ	$\Phi 0.3$
	连接孔	位置度 Φ	$\Phi 0.3$

小。随后,根据零件间的装配关系,利用式(14)得到子装配体和最终装配体的刚度矩阵 K_{12} 和 K_{123} ,根据刚度分解得到对应的基本偏差场。

为了对装配精度的统计特性进行可靠评估,利用蒙特卡洛仿真对零部件的基本偏差分布进行建模与分析。结合表1所示的公差方案,具体的仿真实施步骤如下。

(1)在实际工程中,制造误差通常服从一维高斯分布。根据 6σ 制造控制准则,零部件特征点的公差带宽度 T 与其分布标准差 σ 的关系满足 $T=6\sigma$ 。以表1中蒙皮表面轮廓度公差 ± 0.75 mm为例,其公差带宽度为1.5 mm,由此可确定该节点在法向上的随机偏差服从均值为0、标准差为0.25 mm的正态分布。

基于上述统计参数,在第 k 次蒙特卡洛仿真循环中(设定总仿真次数 $N=1000$),利用随机数发生器为各零部件的离散网格节点生成初始偏差矢量样本 $\Delta X^{(k)}$ 。

$$\Delta X^{(k)}=[dx_1, dy_1, dz_1, \dots, dx_n, dy_n, dz_n]^T \quad (20)$$

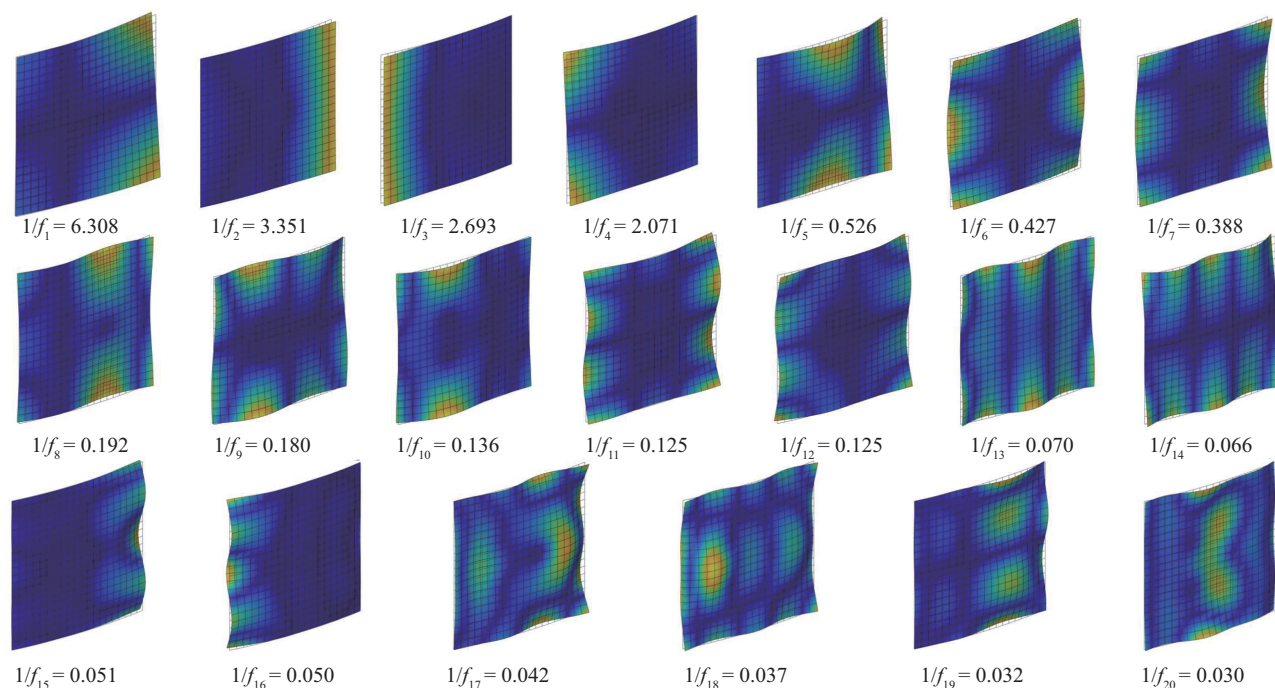


图5 口盖部件前20阶模态及对应柔度系数

Fig.5 First 20 modes and corresponding compliance coefficients of the access panel component

(2)利用已提取的零部件刚度模态矩阵 ϕ 进行数据降维。按式(9)将生成的高维空间节点初始偏差 $\Delta\mathbf{X}^{(k)}$ 投影到基本偏差场中,解算出该随机样本对应的偏差因子向量 $\mathbf{a}^{(k)}$ 。根据式(18)求装配体的偏差因子 $\mathbf{a}_{\text{as}}^{(k)}$ 。

(3)结合装配体的基本偏差场 $\phi_{\text{as}}^{(k)}$ 解算出零装配体的偏差,在完成5000次蒙特卡洛仿真循环后,提取测量点的装配偏差数据进行统计分析,得到装配完成后测量点偏差分布结果如图7所示。可知,在装配后,该测量点在 $[-1.890, 1.908]$ 区间范围内浮动,均值为 -0.003 mm,标准差为 0.535 mm。该结果不仅明确了偏差的波动范围,也为后续判定设计公差是否达标提供了量化依据。

3 基于3DCS公差仿真建模的算法验证

为验证所提方法在工程应用中的合理性与有效性,引入成熟的工业级公差分析软件进行对比仿真。本文选用3DCS作为对比验证工具,在相同零件模型、公差输入及装配关系条件下,对装配误差分布特性进行仿真分析,并将结果与本文方法的预测结果进行对比,从而验证所建模型的准确性与工程适用性。

基于3DCS蒙特卡洛仿真循环5000次,对关键测量点的装配偏差进行统计分析,获得其均值、标准差及极值范围,其结果如图8所示。结果表明,在制造公差作用下,口盖结构的装配偏差呈现明显的随机分布特征,且偏差幅值与结构柔度较大的区域高度相关,其分布区

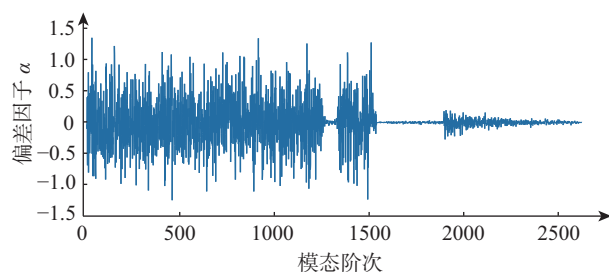


图6 口盖部件在某偏差分布下前2628阶模态与偏差因子折线图

Fig.6 Modal orders and deviation factors of the first 2628 modes of the access panel component under a given deviation distribution

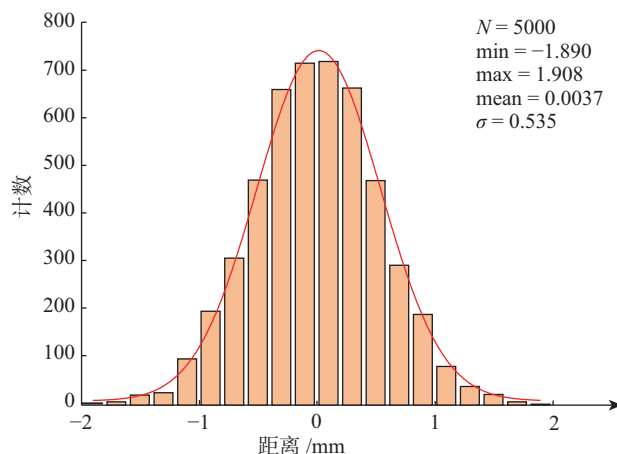


图7 口盖结构测量点装配偏差结果分布

Fig.7 Assembly deviation distribution at measurement points of the access panel structure

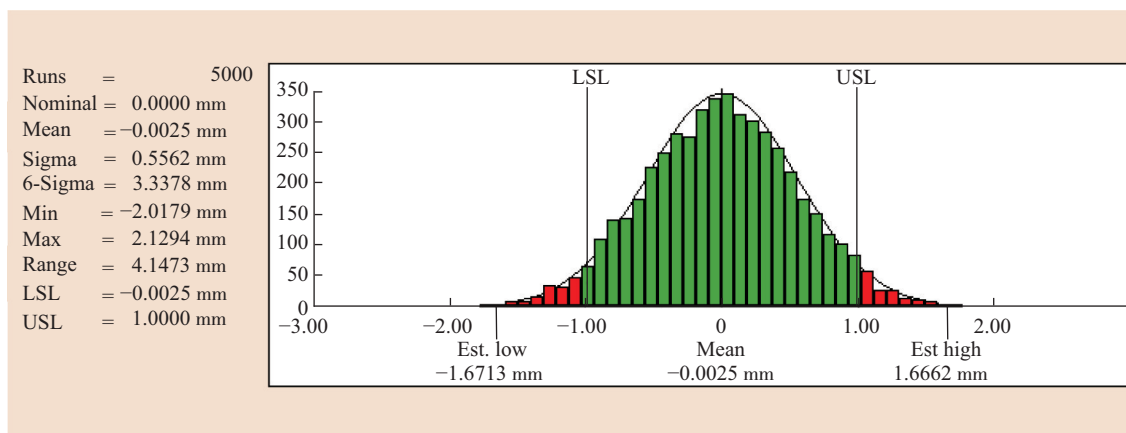


图8 口盖结构3DCS柔性分析结果
Fig.8 3DCS flexible analysis results of the access panel structure

间范围为 $[-2.017\text{ mm}, 2.129\text{ mm}]$,平均值为 -0.0025 mm ,标准差为 0.5562 mm 。

因为标准差反映了功能要求偏差的分散程度,描述了各公差在不同 σ 下功能要求偏差的分布情况,是评估该公差设计是否符合期望的最关键指标。因此,以标准差的相对误差作为评估本文方法所得计算结果精确程度的指标。本文基于刚度模态分解方法得到的标准差与3DCS结果相比,相对误差仅为3.8%,表明本文所采用装配偏差分析模型能够有效指导工程师在设计阶段更合理地设计公差。

4 结论

针对飞机口盖等大型薄壁结构在装配过程中因零件柔性变形和制造公差耦合作用导致装配精度难以预测的问题,本文提出了一种基于刚度模态分解的装配偏差预测方法。该方法涵盖零件偏差的表征、偏差传递模型的建立以及装配偏差的计算与验证3个核心步骤,从理论分析和仿真验证两方面介绍了装配偏差预测分析方法。

(1)采用刚度模态分解的方式,提取各个零件的各阶模态作为基本偏差场,并根据初始偏差计算每个零件的偏差因子。

(2)结合装配节点约束关系与装配顺序,构建多零件装配体的偏差传递与叠加模型,得到各个零件偏差因子之间的传递系数。

(3)引入蒙特卡洛方法对零件制造公差进行统计采样,实现了装配误差在统计意义下的定量预测,最终得到装配体偏差分布结果。

(4)将所得分布结构的标准差与3DCS计算结果进行对比,发现分布基本一致,标准差的相对误差约为3.8%,从而能够对该公差设计下的装配偏差累计结果进

行初步评定。

本文对于薄壁结构的柔性变形装配偏差分析建立在理想的线弹性假定与静态约束回弹工况下,适用于整体刚度分布均匀的大柔性结构的基准装配过程预测。然而,在实际航空航天制造中,装配精度受到更为复杂的物理工况交织影响。针对未来的研究与工程应用,需进一步将热力耦合、非线性接触及变形、自重等多物理场工况纳入偏差传递模型,建立融合多复杂工况的偏差传递模型,这将是进一步提升大型薄壁结构装配预测精度的重要研究方向。

参考文献

- [1] 余海东, 高畅, 赵勇, 等. 机械产品装配偏差分析方法研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2023, 59(9): 212–229.
Yu Haidong, Gao Chang, Zhao Yong, et al. Progress and prospect on assembly deviation propagation of mechanical products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(9): 212–229.
- [2] Li J Y, Zhao G, Wei J H, et al. Assembly simulation and optimization method for underconstrained frame structures of aerospace vehicles[J]. Aerospace, 2024, 11(8): 689.
- [3] Liu S, Yu H D, Xia Z K, et al. A new virtual functional element method for deviation prediction of assembled structures with parallel connection chain[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2024, 48: 42–54.
- [4] 金贺荣, 孙中锐, 韩雪艳, 等. 飞航舱段薄壁筒件装配误差分析与调控[J]. 航空制造技术, 2025, 68(18): 104–113, 132.
Jin Herong, Sun Zhongrui, Han Xueyan, et al. Assembly error analysis and control of thin-walled cylindrical parts in flight section of aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(18): 104–113, 132.
- [5] Wei W, Mu X K, Zhang W, et al. A novel prediction method for assembly accuracy of rudder systems considering clearance factors[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 131(9): 4621–4634.

[6] 杨溢涛, 赵强强, 胡晓坤, 等. 零件形貌误差和受力变形融合表征的装配精度分析研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(18): 120–132.

Yang Yitao, Zhao Qiangqiang, Hu Xiaokun, et al. Research on assembly accuracy analysis integrating surface profile errors of part and force-induced deformations[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(18): 120–132.

[7] Liu S C, Hu S J. Variation simulation for deformable sheet metal assemblies using finite element methods[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(3): 368–374.

[8] Lupuleac S, Petukhova M, Shinder J, et al. Nonlinear tolerancing: Variation simulation and assembly analysis with regard to contact interaction of parts[J]. Axioms, 2024, 13(1): 67.

[9] 潘伟, 赵勇, 刘禹铭, 等. 基于条件生成对抗网络的柔性薄壁结构装配偏差预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2026, 60(5): 786–799.

Pan Wei, Zhao Yong, Liu Yuming, et al. Assembly deviation

prediction method of thin-walled structures based on conditional generative adversarial network[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2026, 60(5): 786–799.

[10] Zhao D P, Yuan Z, Zhao X S, et al. An assembly accuracy analysis method for weak rigid components[J]. Machines, 2025, 13(8): 694.

[11] 耿浩然, 徐旭松, 刘文君, 等. 柔性件对接点焊装配偏差有限元分析[J]. 制造技术与机床, 2024(5): 160–166.

Geng Haoran, Xu Xusong, Liu Wenjun, et al. Finite element analysis of misalignment in spot welding assembly of flexible parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(5): 160–166.

[12] Hu Y F, Zhu Y G. Modeling of non-uniform interference and deformation prediction for riveting assembly of aircraft thin-walled components[J]. Aerospace, 2025, 12(6): 526.

(责编 阳光)