

航天大型薄壁结构装配制造尺寸精度预测 与控制方法

余海东, 来新民, 林忠钦

(上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 大型薄壁结构的弱刚性导致其在制造过程中变形是影响尺寸精度的主要因素, 如何对加工和装配过程零部件的偏差场进行精确预测与控制是提升制造质量、改进工艺参数的关键。本文针对大型薄壁结构制造与装配过程偏差场特性进行研究, 提出适用于航天大型薄壁产品装配过程偏差场预测与控制方法。以基本变形模式的线性组合构建大型薄壁结构空间偏差场, 考虑大型薄壁结构装配过程内应力的协调变形, 以零件与装配体之间基本变形模式的映射关系建立大型薄壁结构装配过程偏差场预测模型。基于零件基本变形模式对装配体偏差的贡献量化值进行薄壁结构装配过程偏差溯源, 提出两步寻优方法求解零件特定基本变形模式的最优控制点集, 以最优控制点集的偏差调整实现大型薄壁结构装配过程的偏差控制, 为航天大型薄壁结构装配过程的尺寸精度预测与控制提供理论基础与技术指导。

关键词: 大型薄壁结构; 偏差表征; 偏差传递; 基本变形模式; 偏差控制

中图分类号: V 11

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2020.03.001

Deviation Prediction and Control of Large Thin-Walled Structures in Spacecraft Manufacture

YU Haidong, LAI Xinmin, LIN Zhongqin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The deformation in the manufacturing process for large thin-walled structures is the main factor affecting the dimensional accuracy due to their weak structural stiffness. The accurate prediction and control of the deviation field of parts in the manufacturing and assembly processes are the key to improve the manufacturing quality and process parameters. In this paper, the deviation description and propagation characteristic in the manufacturing and assembly processes of large thin-walled structure are studied. A deviation prediction and control method of large thin-walled structures is proposed. A linear combination of the basic deformation patterns is used to describe the spatial deviation field of large thin-walled structures. Considering the compatible deformation of the internal stress during the assembly process, a deviation prediction model of large thin-walled structures is established based on the relationship of the basic deformation patterns between the parts and the assembly. The contributions of the basic deformation patterns between the parts and assembled structures are calculated to reveal their internal relationship. The optimization method is used to solve the optimal control points of the basic deformation patterns, and the assembly deviation control of large thin-walled structures is realized by the adjustment of the deviations of the key points. The results may provide theoretical basis and technical guidance for the dimensional accuracy prediction and control for large thin-walled structures of aerospace products.

Key words: large thin-walled structure; deviation description; deviation propagation; basic deformation pattern; deviation control

收稿日期: 2020-05-01; 修回日期: 2020-05-25

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB046600); 国家自然科学基金资助项目(51775345)

作者简介: 余海东(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为薄壁结构装配偏差分析与控制、大型薄壁结构装配装备设计、复杂结构与材料的力学行为分析。

0 引言

随着载人航天、卫星通信、深空探测等民用航天事业的发展,航天产品的需求越来越大,航天产业成为代表国家科技实力和竞争力的重要战略性新兴产业。进入 21 世纪以来,发达国家继续将航天技术作为谋求在科技、军事、经济领域占主动地位的重要手段。俄罗斯于 2005 年提出了 Angara 重型火箭计划,美国于 2011 年启动了新一代“航天发射系统”计划,国际航天发射市场日趋活跃,火箭发射频率越来越高,航天产品制造质量和市场响应能力的竞争更加激烈^[1]。2010 年起,我国卫星发射也开始步入密集期,每年发射次数达 15 次以上,而近三年每年的发射频率在 30 次以上。目前,继我国重型运载火箭进入“关深”阶段以后,2020 年 4 月又启动了行星探测的“天问”计划,并于 2020 年发射火星探测装置。作为航天器的运载工具,火箭由现役直径 3 350 mm 到正在研制的直径 9 500 mm,直径与板厚逐渐增大,而为了满足焊接要求,装配时绝对定位精度基本保持不变,这对大型薄壁结构的装配时尺寸精度控制提出了巨大的挑战。

目前薄壁结构装配的尺寸精度控制主要有刚性结构的尺寸链法和考虑变形的影响系数法^[2-4],它们在刚度较大的薄壁结构(如汽车车身结构装配偏差预测与控制)中得到成功的应用。但是,这些结构主要采用多点点焊的方式连接,变形小,因此,偏差预测与控制具有较高的精度^[5]。在点焊装配中采用影响系数法进行偏差分析,考虑装配零件的柔性,将焊接工艺简化为零件定位、装夹校形、焊接装配、释放回弹 4 个过程。基于零件变形的线弹性假设,对每个装配过程进行分析,建立描述初始零件偏差与回弹变形之间的线性敏感矩阵,研究零件、焊枪及夹具等偏差源与柔性装配偏差的关系,从而实现装配体偏差的预测^[6-7]。但在影响系数法建模过程中,采用线性小变形假设,无法考虑材料的非线性特性和零件表面几何特征对装配偏差的影响以及连续焊接过程结构非线性变形的影响,因此,难以实现大型薄壁结构装配偏差的精确预测^[8]。

经过几十年的发展,我国航天产品虽然已经形成了完整的制造工艺,但结构产品尺寸精度和性能控制仍是制造的瓶颈问题之一,导致结构装焊时需要反复“验合匹配”,制造效率低。结构产品从现在“验合匹配”制造模式向“互换制造”模式转变是航天

产品制造的关键,实现航天产品大型薄壁结构制造过程尺寸精度预测与控制是解决这个问题的核心^[9]。航天大型薄壁结构径厚比大多在 600 以上,连接方式为长程封闭焊缝连接,热输入大,结构的几何非线性与材料非线性使其发生翘曲变形,这些成为影响其尺寸精度的主要因素,而整体弱刚性使得变形引起的零组件偏差呈空间场分布,因此,航天大型薄壁结构偏差分析必须考虑零组件的变形特征^[10]。

本文针对航天大型薄壁结构的偏差分布及装配工艺的特点,考虑零组件偏差的空间场分布特征和装配过程的协调变形,提出大型薄壁结构装配过程偏差预测与控制新方法;以基本变形模式线性组合进行大型薄壁结构空间偏差场的表征,考虑零组件装配过程的协调变形,建立大型薄壁结构装配过程偏差传递模型;以零件与装配体的基本变形模式的关联关系揭示大型薄壁结构装配过程的偏差传递规律,针对影响装配体偏差的特定基本变形模式,提出两步优化方法确定其最优偏差控制点集,实现航天大型薄壁结构制造过程偏差的精确控制。

1 航天大型薄壁结构装配过程偏差特性分析方法

航天大型薄壁零件一般由冷成形或机械加工而成,然后采用连续焊接形成封闭整体。薄壁结构制造过程中偏差主要表现为两种形式,即由于成形或者加工产生的尺寸偏差和结构回弹变形引起的形状偏差。由于航天产品制造过程为高精密加工,零件的尺寸偏差控制严格,一般满足设计尺寸精度要求。但是由于大型薄壁结构具有尺寸大、刚度弱的特征,制造过程中结构的内应力和几何非线性约束造成其发生翘曲变形,构件每点的偏差矢量不同,整体结构的偏差在型面上呈场分布的特征,每一点偏差的改变都会引起零件整体偏差的重新分布。大型薄壁结构装配过程中,零件必须装夹到标准位置,初始偏差的校形会带来内应力,加之长程封闭焊缝的连接引入新的内应力,夹具去除后,回弹变形成为装配体偏差的主要形式,薄壁结构每一点偏差均受协调变形的影响。

由于大型薄壁结构零组件偏差均与变形相关,本文采用将零件偏差场分解成基本变形模式的方法,提出一种适用于航天大型薄壁结构装配过程偏差场分析的新方法,具体过程如图 1 所示。

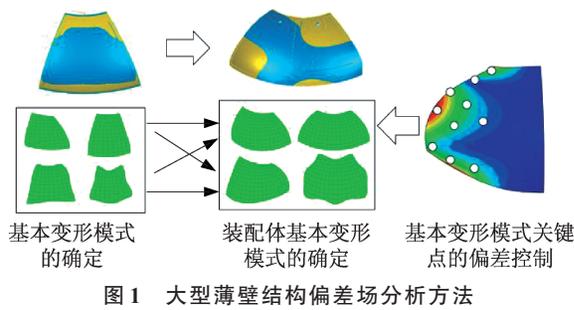


图 1 大型薄壁结构偏差场分析方法
Fig.1 Analysis method for the deviation field of large thin-walled structures

由于零件与装配体的偏差与变形相关,将零件和装配体偏差分解成一系列基本变形模式的线性组合,基本变形模式的权重因子反映其对结构偏差的影响程度。考虑薄壁结构装配过程的装夹与焊接变形,基于连续介质力学建立装配过程变形协调模型,以零件和装配体的基本变形模式建立大型薄壁结构装配过程偏差分析模型,通过零件与装配体基本变形模式之间的关联关系进行装配过程偏差的溯源,针对偏差影响大的基本变形模式,采用优化方法确定特定基本变形模式的有效独立测点,通过关键测点的偏差调整减少装配体偏差,提高装配质量。

2 基于变形模式分解的大型薄壁结构偏差场表征

采用基本变形模式的线性组合进行零组件的实际偏差精确表征的关键,是确定一组独立有效的基本变形模式。零件的基本变形模式需要满足两个特征:一是各个基本变形模式应该相互独立;二是它们能够代表一些典型变形特征。薄壁结构在自由状态下模态振型不仅具有非相关性特点,而且低阶频率下的模态振型可以反映结构的拉伸、弯曲、扭转等力学特征^[11]。因此,在对实际薄壁结构偏差场进行描述时,可以对无偏差的零件进行模态分析,选取低阶模态振型作为表征零件偏差的基本变形模式。结构的模态振型数目越多,零件“场”偏差表征得越准确。

为了得到无偏差标准尺寸构件的模态振型,首先计算结构的整体刚度矩阵 K 和质量矩阵 M ,采用模态分析方法计算构件不同频率 ω 下的模态振型作为表征构件偏差的基本变形模式,将 k 个基本变形模式组成矩阵 φ ,其中矩阵中元素 φ_{ij} 代表第 j 阶变

形模式中第 i 个节点的偏差^[10]:

$$\begin{aligned} M\ddot{q} + Kq &= 0 \\ K\varphi - \omega^2 M\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1k} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{n2} & \cdots & \varphi_{nk} \end{bmatrix}$$

将无偏差标准构件进行网格划分,得到结构的整体偏差场可以写为所有节点(n 个)的偏差组成的向量 $V = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$,其中 $V_k = (V_{kx}, V_{ky}, V_{kz})$ 表示第 k 个节点 3 个坐标方向上的偏差。假设构件的整体偏差场可以直接测量,将构件偏差 V 投影到基本变形模式 φ 上,如图 2 所示。每个基本变形模式对应的偏差因子 λ 的计算为

$$\lambda = \varphi^{-1}V \quad (2)$$

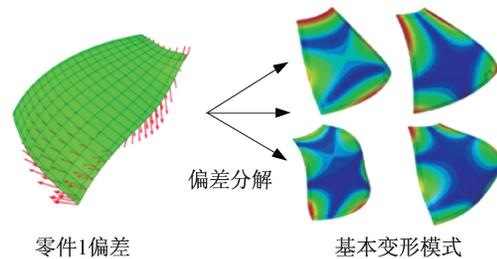


图 2 零件偏差的基本变形模式分解

Fig.2 Decomposition of the part deviation with basic deformation patterns

实际测量时,由于构件尺寸大,向量 V 中所有节点的偏差值难以全部测量,利用三坐标测量仪测量少部分测点的偏差,组成偏差向量 V_{local} ,如图 3 所示。

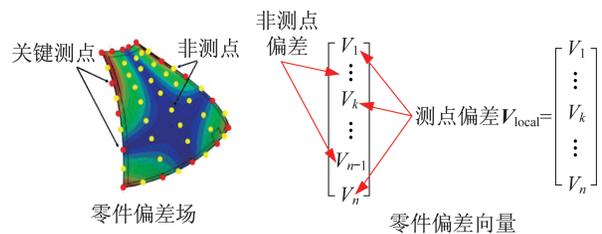


图 3 关键测点的偏差

Fig.3 Deviations of the key measuring points

由于零件的每个基本变形模式中的偏差向量与零件的节点偏差存在一一对应关系,提取零件变形模式中关键测点位置的偏差向量构成 φ_{local} ,记为

$$\varphi_{\text{local}} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1k} \\ \varphi_{k1} & \varphi_{k2} & \cdots & \varphi_{kk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{n1} & \varphi_{k2} & \cdots & \varphi_{kk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将关键测点测量得到的偏差 V_{local} 向 φ_{local} 上投影, 计算得到局部偏差因子 λ_{local} 为

$$\lambda_{\text{local}} = \varphi_{\text{local}}^{-1} V_{\text{local}} \quad (4)$$

则实际构件的整体偏差场 V^* 可以表示为局部偏差因子和对应零组件基本变形模式的线性组合, 即

$$V^* = \sum_{i=1}^k \varphi_i \lambda_{\text{local}} \quad (5)$$

将 $\lambda_{\text{local}} = V^{-1} \varphi_{\text{local}}$ 代入式(5), 得到构件整体偏差场 V^* 与零组件关键测点偏差 V_{local} 的映射关系为

$$V^* = \varphi (\varphi_{\text{local}}^{-1} V_{\text{local}}) \quad (6)$$

采用关键测点集表征的零组件偏差场与结构实际偏差之间的误差可以写为

$$\epsilon = \max \| V^* - V \|_2 \quad (7)$$

3 大型薄壁结构装配协调变形计算与偏差传递模型

航天薄壁产品装配时一般为连续焊缝焊接而成, 为了保证零件连接处的对接面差, 在装配校形阶段需要采用过约束装夹的方式将零件校形到标准位置, 装配完成后夹具释放, 在内应力作用下结构协调变形形成最后的偏差。因此, 需要根据装配过程中夹具释放前后的力平衡及变形协调建立偏差场传递模型, 得到零件与装配体基本变形模式之间的关联关系。

3.1 大型薄壁结构装配偏差场传递模型

已知装配前零件的偏差分别为 V_1 、 V_2 , 假设装配后结构的偏差为 V_{as} , 则零件由于校形及装配后结构的变形能分别为

$$\begin{aligned} U_1 &= \frac{1}{2} (\varphi_1 \lambda_{1\text{lal}})^T K_1 (\varphi_1 \lambda_{1\text{lal}}) \\ U_2 &= \frac{1}{2} (\varphi_2 \lambda_{2\text{lal}})^T K_2 (\varphi_2 \lambda_{2\text{lal}}) \\ U_{\text{as}} &= \frac{1}{2} (\varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}})^T K_{\text{as}} (\varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $V_1 = \varphi_1 \lambda_{1\text{lal}}$; $V_2 = \varphi_2 \lambda_{2\text{lal}}$; $V_{\text{as}} = \varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}}$

根据装配过程中的变形能守恒可得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} (\varphi_1 \lambda_{1\text{lal}})^T K_1 (\varphi_1 \lambda_{1\text{lal}}) + \\ & \frac{1}{2} (\varphi_2 \lambda_{2\text{lal}})^T K_2 (\varphi_2 \lambda_{2\text{lal}}) = \\ & \frac{1}{2} (\varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}})^T K_{\text{as}} (\varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}}) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $\lambda_{1\text{lal}} = \varphi_1^{-1} V_{1\text{local}}$; $\lambda_{2\text{lal}} = \varphi_2^{-1} V_{2\text{local}}$

薄壁结构装配过程力平衡条件如图 4 所示, 则可以得到

$$K_{\text{as}} \varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}} = \begin{bmatrix} K_1 \varphi_1 \lambda_{1\text{lal}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_2 \varphi_2 \lambda_{2\text{lal}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

取 $D = (K_{\text{as}} \varphi_{\text{as}})^{-1} = [D_1 \ D_2]$, 代入式(10)得到装配前后基于偏差因子和基本变形模式的偏差传递模型为

$$\lambda_{\text{as}} = D_1 K_1 \varphi_1 \lambda_{1\text{lal}} + D_2 K_2 \varphi_2 \lambda_{2\text{lal}} \quad (11)$$

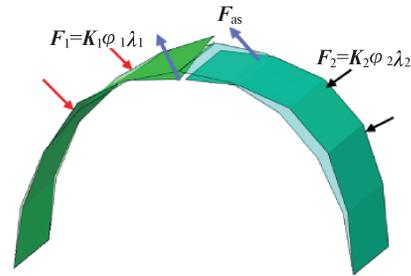


图 4 薄壁结构装配协调变形

Fig.4 Compatible deformation of the assembly of thin-walled structures

根据装配偏差传递模型, 首先对零件关键测点的偏差进行测量, 计算得到两零件的偏差因子 $\lambda_{1\text{lal}}$ 和 $\lambda_{2\text{lal}}$, 然后可以求得 λ_{as} 。由结合装配体的变形模式 φ_{as} , 得到装配后结构的偏差场和零件关键特征点偏差的传递关系为

$$\begin{aligned} V_{\text{as}} = \varphi_{\text{as}} \lambda_{\text{as}} = & \varphi_{\text{as}} (D_1 K_1 \varphi_1 \varphi_{\text{as}}^{-1}) V_{1\text{local}} + \\ & \varphi_{\text{as}} (D_2 K_2 \varphi_2 \varphi_{\text{as}}^{-1}) V_{2\text{local}} \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 零件与装配体偏差传递贡献度计算

基于式(12)所建立了装配前后偏差因子的关联关系, 可以分析零件不同变形模式对装配体偏差的贡献程度。假设 $S^1 = D_1 K_1 \varphi_1$, $S^2 = D_2 K_2 \varphi_2$, 则偏差因子的映射关系可以写成

$$\lambda_{\text{as}} = S^1 \lambda_1 + S^2 \lambda_2 \quad (13)$$

其矩阵的形式为

$$\lambda_{as} = \begin{bmatrix} S_{11}^1 & S_{12}^1 & \cdots & S_{1k}^1 \\ S_{21}^1 & S_{22}^1 & \cdots & S_{2k}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{k1}^1 & S_{k2}^1 & \cdots & S_{kk}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^1 \\ \lambda_2^1 \\ \vdots \\ \lambda_k^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11}^2 & S_{12}^2 & \cdots & S_{1k}^2 \\ S_{21}^2 & S_{22}^2 & \cdots & S_{2k}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{k1}^2 & S_{k2}^2 & \cdots & S_{kk}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1^2 \\ \lambda_2^2 \\ \vdots \\ \lambda_k^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

这里装配体的第 p 个变形模式 λ_{asp} 可以写为

$$\lambda_{asp} = [S_{p1}^1 \quad S_{p2}^1 \quad \cdots \quad S_{pk}^1] \begin{bmatrix} \lambda_1^1 \\ \lambda_2^1 \\ \vdots \\ \lambda_k^1 \end{bmatrix} + [S_{p1}^2 \quad S_{p2}^2 \quad \cdots \quad S_{pk}^2] \begin{bmatrix} \lambda_1^2 \\ \lambda_2^2 \\ \vdots \\ \lambda_k^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

则零件变形模式的贡献度可以定义为

$$\lambda_m^1 \rightarrow \lambda_{asp} = \frac{|S_{pm}^1 \lambda_m^1|}{\sum_{i=1}^k (|S_{pi}^1 \lambda_i^1| + |S_{pi}^2 \lambda_i^2|)} \quad (16)$$

$$\lambda_m^2 \rightarrow \lambda_{asp} = \frac{|S_{pm}^2 \lambda_m^2|}{\sum_{i=1}^k (|S_{pi}^1 \lambda_i^1| + |S_{pi}^2 \lambda_i^2|)}$$

式中: $\lambda_m^1 \rightarrow \lambda_{asp}$ 代表零件 1 的第 m 个变形模式对装配体第 p 个变形模式的贡献程度; $\lambda_m^2 \rightarrow \lambda_{asp}$ 表示零件 2 的第 m 个变形模式对装配体第 p 个变形模式的贡献程度。

4 基于多点协调变形的大型薄壁结构装配偏差控制

大型薄壁结构装配过程中零件每一点偏差改变对整体结构偏差会产生影响,基于基本变形模式建立零件与装配体之间偏差传递的关系,可以有针对性确定影响装配体偏差最大的基本变形模式,通过对其表征的偏差进行控制来减少装配体的偏差,实现几何精度的控制。但是,由于每一点偏差改变会影响其他变形模式对装配体偏差的贡献程度,造成整体结构偏差控制“此起彼伏”,因此,针对特定基本变形模式确定独立的最少测点是大型薄壁结构偏差控制的关键。

基于零部件的优化测点布置,通过关键测点的偏差实现零件偏差场的表征计算。理论上采用控

制所有关键测点集的偏差可以精确控制零件的制造质量,以此优化装配偏差,但是成本高,难度大。因此,本文提出采用两步优化的方法实现基本变形模式最优测点的确定。首先,建立零件所有基本变形模式和关键测点的映射关系,寻找影响所有基本变形模式的全部测点;然后,经过第二步优化确定与特定基本变形模式相关的测点集,同时这些点集对其他基本变形模式影响最小。具体过程如图 5 所示,空心点集是第一次优化得到的与所有基本变形模式相关的测点,实心点集为第二次优化得到的特定基本变形对应的关键测点。

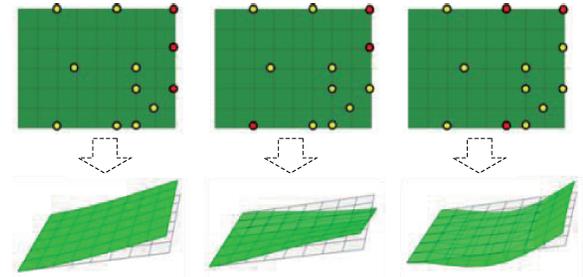


图 5 关键测点与基本偏差场的映射关系

Fig.5 Mapping relationship between the key measuring points and the basic deviation patterns

为了求解基本变形模式相关的最优关键控制点位置和偏差校形量大小,采用有效独立性和遗传优化算法构建基本变形模式相关的最优关键控制点的计算方法。以有效独立性方法,逐步消除对零件偏差表征影响最小的测点,得到 1 组有限的优化测点集实现零件偏差因子的精确表征;然后建立基本变形模式相关的测点集偏差调整量的优化模型,采用遗传优化算法求解每个基本变形模式对应的最优控制点集及偏差调整量,通过控制关键测点的偏差抑制特定基本变形模式对装配体偏差的影响,实现装配偏差溯源后的优化控制。

4.1 关键测点优化布置

根据薄壁结构产品的几何形状特点,在零件上均匀布置 1 组测点,形成零件上初始 N 个测点方案,如图 6(a)所示。由于零件几何连续性的影响,零件上的测点偏差都有一定的相关性,因而可以在初始测点集中通过优化的方法筛选出 1 组关键测点集,如图 6(b)所示,通过测量该组关键测点集的偏差,实现对 k 个偏差因子的近似计算。

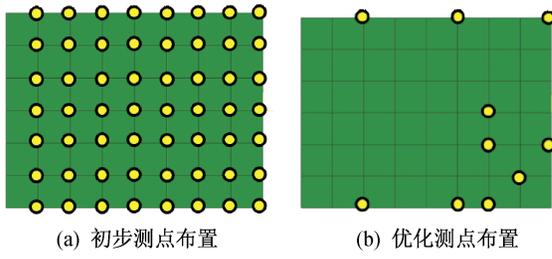


图 6 零件测点布置

Fig.6 Distribution of the measuring points on a part

采用有效独立性方法,基于测点的初步布置方案,在优化过程中逐步消除对模态检测影响最小的测点,最终实现用最少的测点尽可能地采集到最多的模态信息。按照有效独立性原理,定义薄壁结构测点的优化布置 Fisher 阵为

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{\varphi}^T \boldsymbol{\varphi} \quad (17)$$

由于零件的各个基本变形模式是相互独立的,所以 Fisher 阵 \mathbf{Q} 必定满足满秩的条件。

在优化过程中,按照有效独立性方法的定义原则,第 i 个测点的有效独立性指数 E_{φ_i} 可以表示为

$$E_{\varphi_i} = \frac{|\mathbf{Q}| - |\mathbf{Q}_{\varphi_i}|}{|\mathbf{Q}|} \quad (18)$$

式中: \mathbf{Q}_{φ_i} 为去掉第 i 个测点对应的 $\boldsymbol{\varphi}$ 得第 i 个行向量后的 Fisher 矩阵。

比较各测点的有效独立性指数,去掉最小值对应的测点,保留有效独立性指数大的各测点。如此不断进行循环,直到测点数量满足设计要求。

4.2 零部件偏差场优化控制

为了进行特定基本变形模式的关键测点求解,首先基于关键测点优化布置,得到关键测点偏差和零件偏差因子的关系为

$$\hat{\mathbf{V}}_{N_0 \times 1} = \hat{\boldsymbol{\varphi}}_{N_0 \times k} \hat{\boldsymbol{\lambda}}_{k \times 1} \quad (19)$$

式中: $\hat{\mathbf{V}}_{N_0 \times 1}$ 为进行测点优化后的关键测点偏差向量; N_0 为优化后的测点个数; $\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{N_0 \times k}$ 为关键测点组成的基本变形模式空间。

假设 $\boldsymbol{\gamma} = (\hat{\boldsymbol{\varphi}}^T \hat{\boldsymbol{\varphi}})^{-1} \hat{\boldsymbol{\varphi}}^T$, 则偏差因子和关键特征点的关系可以写为

$$\hat{\boldsymbol{\lambda}}_i = \sum_{j=1}^{N_0} \gamma_{ij} \hat{\mathbf{V}}_j \quad (20)$$

这里, $\boldsymbol{\gamma}$ 矩阵中第 j 列代表改变第 j 个关键特征点的单位偏差引起基本变形模式对应偏差因子的变化。

假定每个基本变形模式对应的局部测点的数目为 p 个,定义控制第 i 个基本变形模式对应的测点序号为 $\text{Index}^i = [a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_p]$, 其中, Index^i 表示第 i 个基本变形模式对应的测点序号组合, a_j 表示第 j 个测点所在的序号。选定第 i 个基本变形模式对应的关键特征点后,假定为了控制第 i 个基本变形模式对应的偏差因子发生单位 1 的变化,每个特征点对应的调整量分别为 $\Delta V_{a_1}^i, \Delta V_{a_2}^i, \dots, \Delta V_{a_p}^i$, 则在偏差控制过程中需要满足:

$$\sum_{g=1}^p \gamma_{i(a_g)} \Delta V_{(a_g)}^i = 1 \quad (21)$$

在控制第 i 个基本变形模式的偏差因子过程中会对其他偏差因子造成影响,为了衡量在控制第 i 个基本变形模式对第 q 个基本变形模式的影响,采用第 q 个偏差因子改变量绝对值 $|\Delta \lambda_q|$ 进行如下表示:

$$|\Delta \lambda_q| = \left| \sum_{g=1}^p \gamma_{q(a_g)} \Delta V_{(a_g)}^i \right| \quad (22)$$

为了评价控制第 i 个偏差因子对其他偏差因子的影响,定义影响控制系数 f , 它可以描述当第 i 个偏差因子发生单位变化 $|\Delta \lambda_i| = 1$ 时,对其他所有偏差因子的影响之和的均值,具体表达式为

$$f = \frac{\sum_{q=1}^k \left| \sum_{g=1}^p \gamma_{q(a_g)} \Delta V_{(a_g)}^i \right|}{(k-1)}, \quad q \neq i \quad (23)$$

在分析控制第 i 个偏差因子对其他偏差因子的影响的基础上,采用优化方法求解每个基本变形模式对应的关键测点编号及每个测点偏差的调整量。假设选定控制第 i 个基本变形模式对应的测点集编号为 $\text{Index}^i = [a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_p]$, 则 p 个设计变量可以定义为该点集中各测点偏差的改变量 $\Delta V_{(a_g)}^i$, 即

$$\mathbf{X} = [\Delta V_{a_1}^i \quad \Delta V_{a_2}^i \quad \dots \quad \Delta V_{a_p}^i]^T = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_p]^T \quad (24)$$

在该模型中,优化的目标函数是第 i 个偏差因子发生单位变化时,其他所有偏差因子的变化均值 f , 该函数表示如下:

$$\min f(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{c=1}^k \left| \sum_{g=1}^p \gamma_{ca_g} x_g \right|}{k} \quad (25)$$

优化过程中,为了防止每个关键特征点的偏差调整范围过大,影响计算的稳定性,定义每个关键特征点的偏差调整范围,即

$$-1/\gamma_{i(a_g)} \leq x_g \leq 1/\gamma_{i(a_g)} \quad (26)$$

$$g = 1 \sim p$$

式中: $\gamma_{i(a_g)}$ 为 Indexⁱ中第 a_g 个测点对第 i 个基本变形模式对应的偏差因子敏感度。

同时在调整控制过程中需满足 $\sum_{g=1}^p \gamma_{i(a_g)} x_g = 1$,

因此优化目标函数的约束条件定义为

$$\begin{cases} -1/\gamma_{i(a_g)} \leq x_g \leq 1/\gamma_{i(a_g)}, & g = 1 \sim p \\ \sum_{g=1}^p \gamma_{i(a_g)} x_g = 1 \end{cases} \quad (27)$$

依据该模型的设计变量、目标函数和约束条件,采用遗传优化算法求解每个基本变形模式对应的最优控制点集及偏差调整量,通过控制关键测点的偏差抑制特定的基本变形模式对装配体偏差的贡献,实现装配偏差溯源后的优化控制。

综上所述,求解特定基本变形模式的最优局部点集的算法流程如图 7 所示。首先,定义控制每个基本变形模式的局部测点个数 P ,根据关键测点数 N_0 计算所有可能的测点组合情况 $C = C_{N_0}^P$;其次,定义每种组合情况下的约束条件及最优目标函数,利用遗传算法求解每种情况下最优目标函数 $f(X)$;最后,从最优目标函数值中选出最小值 $\bar{f}(X)$,将这种情况下的关键测点组合结果作为特定基本变形模式的最优局部测

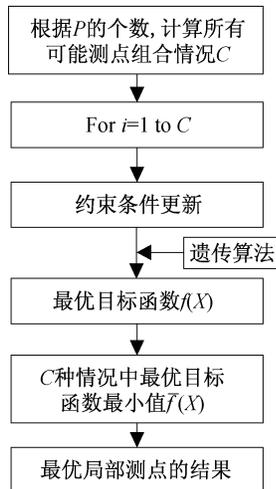


图 7 基本变形模式最优局部测点分析流程

Fig.7 Analysis flowchart of the optimal local measuring points of the basic deformation patterns

点集,并记录对应的测点编号及偏差改变量。

5 案例分析

以两个壁板装配为例,对建立的薄壁结构装配偏差分析与控制模型进行验证,其中,单个壁板的半径是 500 mm,厚度是 1 mm,薄壁结构采用滚弯成形,材料是 6061 铝合金。在装配前,2 个零件均存在初始偏差场。薄壁结构装配的实验装置和测量的零件偏差分别如图 8 和图 9 所示。

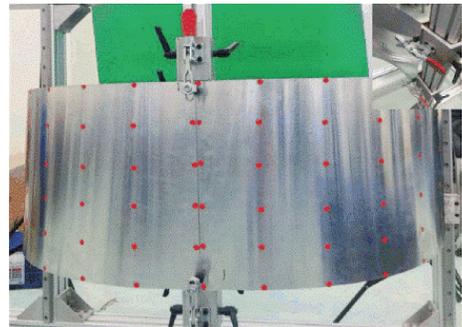
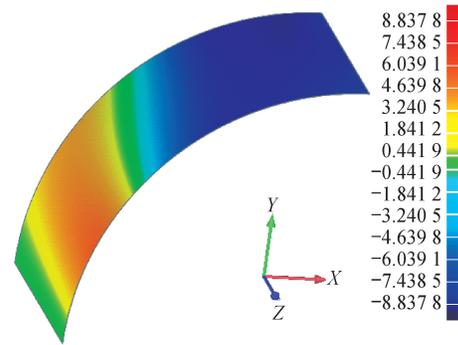
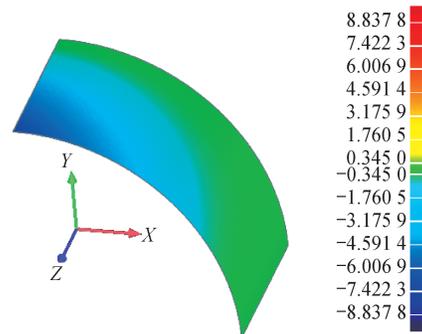


图 8 薄壁结构装配实验装置

Fig.8 Experimental devices of the assembly for thin-walled structures



(a) 零件A



(b) 零件B

图 9 零件初始制造偏差

Fig.9 Initial manufacturing deviations of two parts

为了构造壁板零件的基本变形模式,采用有限元软件得到每个零件的刚度阵和质量阵。2个零件的初始偏差表征结果如图 10 所示,纵坐标表示各个

基本变形模式对应的偏差因子。计算标准零件前 15 阶基本变形模式来表示零件的形状偏差,如图 11 所示。

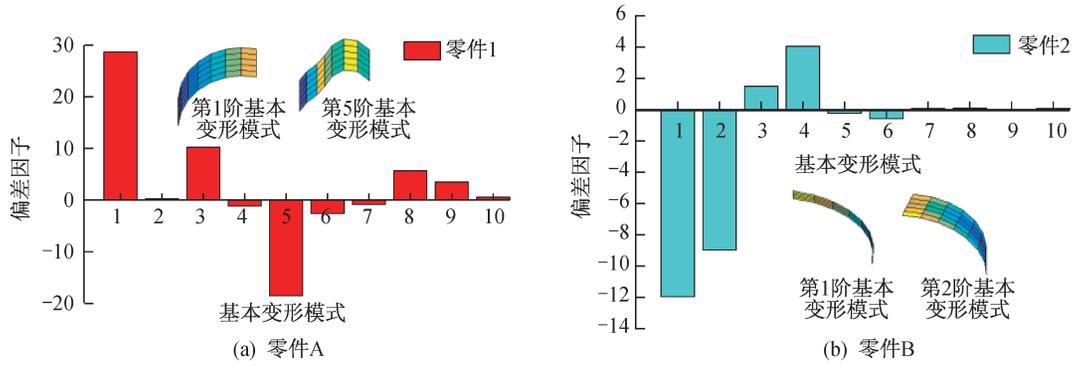


图 10 零件偏差表征结果

Fig.10 Deviation description results of the parts

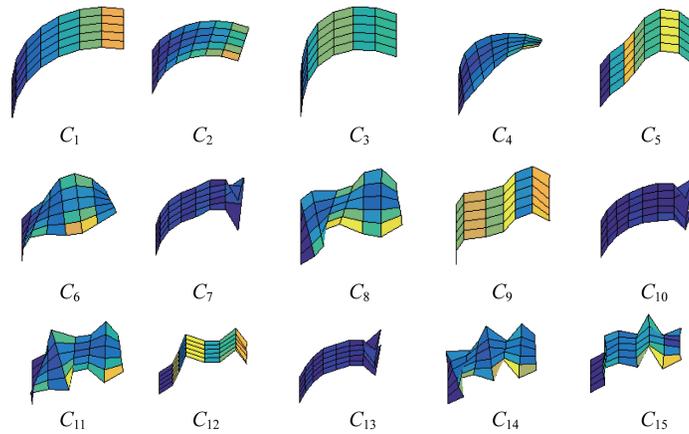


图 11 零件 A 的基本变形模式

Fig.11 Basic deformation patterns of part A

采用基本变形模式、有限元和影响系数法得到零件装配后的偏差与实验结果比较,如图 12 所示。

结果表明:基于变形模式进行装配偏差的预测与有限元计算结果、实验测量的数据基本一致,可以进行薄壁结构装配过程偏差分析。与有限元方法比较,在精确预测装配偏差的基础上,还可以得到零件与装配体之间的偏差关联关系,为进一步进行偏差溯源与控制提供依据。而影响系数法结果表明仅在装配界面处的节点偏差与实验很接近,在远离装配界面的位置,节点偏差预测不准确,存在较大的误差。例如,19号节点偏差的实验结果是 5.04 mm,影响系数法结果是 2.54 mm,因此,采用本文提出的新方法可以实现大型薄壁结构的偏差表

征与传递特性分析。

装配过程中零件的基本变形模式对装配体偏差的贡献特性如图 13 所示,其中箭头的粗细代表贡献率的大小。由图可知,零件 A 的第 5 阶基本变形模式对装配体的第 3、5 和 7 阶基本变形模式贡献率分别是 67.7%、92.9% 和 62.5%。以该基本变形模式为对象,通过零件关键测点的偏差调整实现装配体几何精度的控制。

在校形前,零件 A 的第 5 阶基本变形模式对应的偏差因子为 -18.48。为了控制零件 A 的第 5 阶基本变形模式对装配体偏差的贡献量化,而不引起其他基本变形模式的变化,通过调整零件 A 的第 5 阶基本变形模式对应的 5 个局部测点的偏差(测点编号 13、19、25、42、47,见图 14),将零件的第 5 阶基

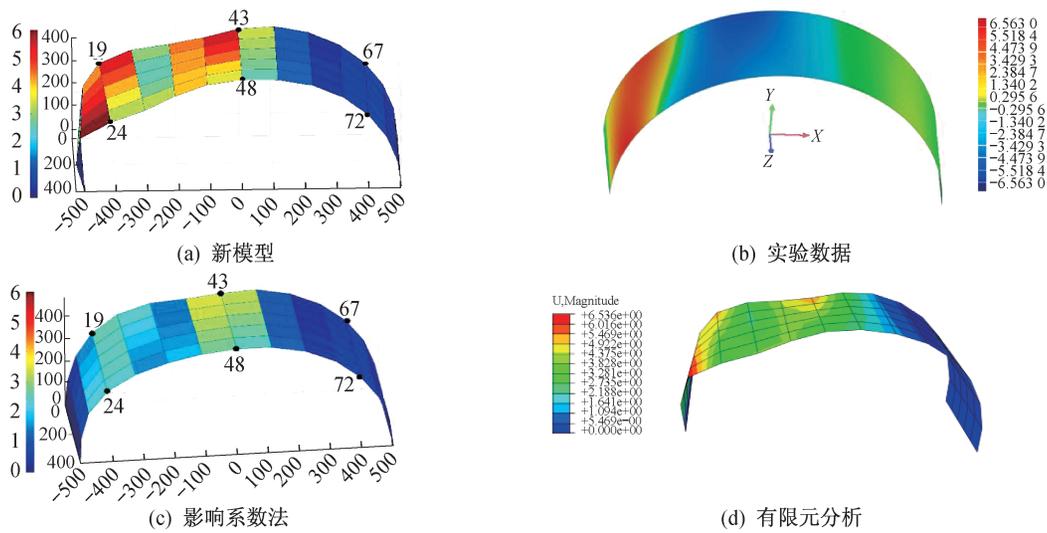


图 12 装配体偏差结果对比

Fig.12 Comparison of the assembly deviation results

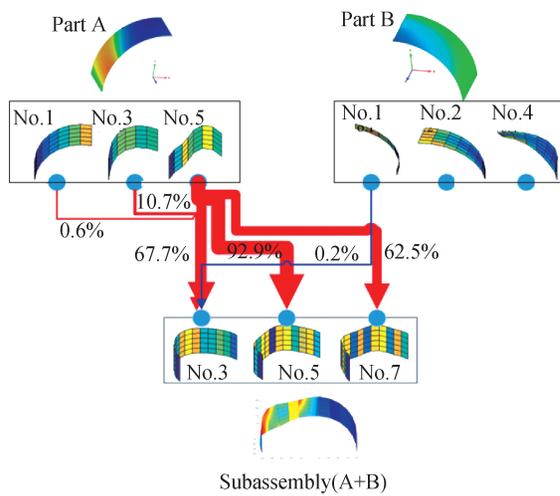


图 13 装配过程中的偏差贡献度

Fig.13 Deviation contributions in the assembly process

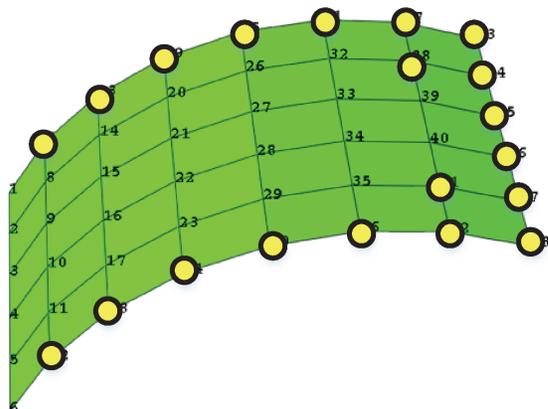


图 14 零件 20 个关键测点布置图

Fig.14 Distribution of the 20 key measurement points of Part A

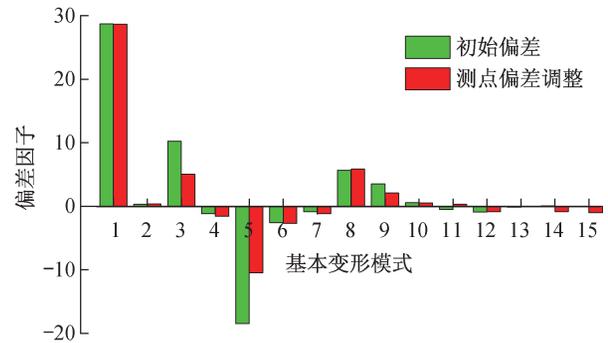


图 15 零件偏差因子控制前后对比

Fig.15 Comparison of the deviation factor of Part A before and after optimization

本变形模式由-18.477调整到-10.477,其对应的偏差因子及其他基本变形模式的变化如图15所示。显然零件A的第5阶基本变形模式表征偏差的偏差因子有显著减小,其他基本变形模式对应的偏差因子变化很小,达到了独立控制第5阶基本变形模式以进行偏差控制的效果。

采用校形后的零件A和零件B进行仿真装配,计算装配后的部件偏差场。控制前后装配体的偏差场及其偏差因子对比如图16所示。

结果表明:装配体的第3阶基本偏差场得到了很好的控制。经过优化控制后,装配体的偏差显著减小。其中,控制前装配体最大的偏差值为6.60 mm,在18号节点上,控制后装配体的最大偏差值为4.12 mm。为了更好地评价控制前后的装配偏差,采用计算装配体上66个节点偏差的均值作为平

均偏差,其中,控制前装配体的平均偏差值为 2.30 mm,控制后装配体的平均偏差值为 1.28 mm,减少幅度约 44.52%。

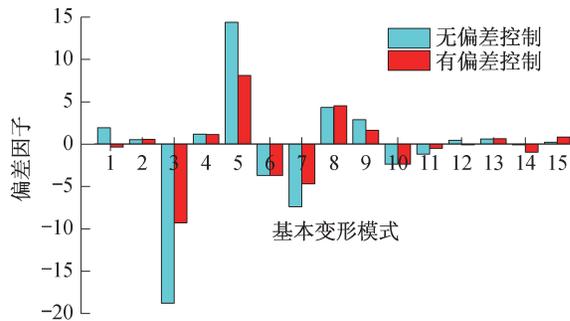


图 16 装配体优化前后的偏差因子

Fig.16 Deviation factor of the assembly before and after optimization

6 结论

本文考虑航天大型薄壁结构制造过程偏差与变形的关系,提出了适用于大型薄壁结构装配偏差表征、传递、优化控制新方法。以模态分解方法,建立描述零组件偏差的基本变形模式,通过它们的线性叠加实现构件空间偏差场分布的表征,弥补了现有方法中仅采用局部特征点描述的不足;考虑大型薄壁结构装配过程中的协调变形条件,建立了大型薄壁结构装配过程偏差场传递模型,以零件与装配体之间基本变形模式的关系揭示了薄壁结构装配偏差场传递规律;对影响装配体偏差严重的特定基本变形模式进行关键测点位置和偏差调整量的优化,通过多点协调变形实现大型薄壁结构的偏差控制,为航天大型薄壁结构制造质量控制提供了理论基础与技术指导。

参考文献

- [1] 龙乐豪,王小军,容易.我国一次性运载火箭的发展展望[J].中国科学:E辑,2009,39(3):460-463.
[2] CAI W. Robust pin layout design for sheet-panel

locating [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 28(5/6): 486.

- [3] 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.
[4] CARNELIO J, HU S J, CEGLAREK D. Modeling variation propagation of multi-station assembly systems with compliant parts [J]. Journal of Mechanical Design, 2003, 125(4): 673-681.
[5] 田兆青.轿车车身装配偏差流的状态空间建模方法及应用基础研究[D].上海:上海交通大学,2008.
[6] 张媛媛.柔性薄板件装配偏差建模分析及应用研究[D].上海:上海交通大学,2009.
[7] 魏建军,范真,徐旭松.柔性件装配偏差的有限元分析[J].机械设计与制造,2020(1):33-35,39.
[8] YU H D, ZHAO C Z, LAI X M. Compliant assembly variation analysis of scal-loped segment plates with a new irregular quadrilateral plate element via ANCF [J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2018, 140(9): 091006.
[9] 王国庆,林忠钦.航天结构产品精确高效制造工程展望[J].工业工程与管理,2016,21(4):1-5,136.
[10] LI Y Y, ZHAO Y, YU H D, et al. Modeling variation propagation of compliant assembly considering form defects based on basic variation fields [J]. Assembly Automation, 2019, 39(1): 226-242.
[11] SAMPER S, ADRAGNA P A, FAVRELIERE H, et al. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2009, 9(4): 1-18.
[12] LI Y Y, ZHAO Y, YU H D, et al. Compliant assembly variation analysis of sheet metal with shape errors based on primitive deformation patterns [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 232(13): 2334-2351.

作者简介:

余海东,1975年1月出生于湖北宜城,1993年7月本科毕业于西北工业大学工程力学专业,2004年6月博士毕业于西北工业大学固体力学专业。现任上海交通大学机械与动力工程学院教授,博士生导师,主要研究方向为薄壁结构装配偏差分析与控制、大型薄壁结构装配装备设计、复杂结构与材料的力学行为分析等。

