

采用离散余弦变换的复合材料构件制造偏差建模方法

常正平¹, 李学文¹, 严康赫¹, 李晓锋¹, 罗群^{1,2}, 王仲奇¹

(1. 西北工业大学机电学院, 710072, 西安; 2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 710089, 西安)

摘要: 为能够更精确、高效地表达碳纤维增强复合材料构件制造偏差,提出了一种基于离散余弦变换的制造偏差建模方法。首先,对构件理论表面进行离散化得到网格模型,计算网格模型节点与对应区域实测点云数据的法向距离以表征制造偏差,进而得到复合材料构件制造偏差场,实现了理论模型与实测数据的融合。其次,采用二维离散余弦正变换,将制造偏差场分解为一系列偏差模态的线性组合,并结合离散余弦变换的能量集中特性与核函数的正交性,对复合材料构件制造偏差场组成模态进行识别与筛选,确定了构成制造偏差场的关键模态。然后,对确定的制造偏差场关键模态进行离散余弦逆变换,并重构制造偏差场,实现了构件制造偏差场的数据精简,该方法在保证重构模型精度的同时减少了计算复杂度与数据存储量。最后,通过复合材料蒙皮构件开展实例验证。结果表明:点云数据网格尺寸与重构精度、偏差模态总数成反比,当数据删减率为60.54%时,其相对重构误差为7.62%。研究结果证明了基于离散余弦变换的偏差建模方法可精确、高效地表征复合材料构件的制造偏差特征。

关键词: 离散余弦变换;复合材料构件;制造偏差;模态识别

中图分类号: TH124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503018 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0201-09

Modeling Method for Manufacturing Deviation of Composite Components Using Discrete Cosine Transform

CHANG Zhengping¹, LI Xuewen¹, YAN Kanghe¹, LI Xiaofeng¹,

LUO Qun^{1,2}, WANG Zhongqi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

Abstract: To more accurately and efficiently express the manufacturing deviations of carbon fiber reinforced composite components, a modeling method based on discrete cosine transform is proposed. Firstly, the theoretical surface of the component is discretized to obtain a mesh model. The normal distances between the mesh model nodes and the corresponding region's measured point cloud data are calculated to characterize the manufacturing deviations, thereby obtaining the manufacturing deviation field of the composite component and achieving the fusion of theoretical models and measured data. Secondly, using the two-dimensional discrete cosine transform, the

收稿日期: 2024-08-09。 作者简介: 常正平(1989—),男,副研究员,硕士生导师;王仲奇(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905443);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2024JC-YBMS-318)。

网络出版时间: 2024-10-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241016.0849.002>

manufacturing deviation field is decomposed into a linear combination of a series of deviation modes. By combining the energy concentration characteristics of the discrete cosine transform with the orthogonality of the kernel function, the modal composition of the manufacturing deviation field of composite components is identified and selected, determining the key modes that constitute the manufacturing deviation field. Subsequently, the identified key modes of the manufacturing deviation field are subjected to discrete cosine inverse transform to reconstruct the manufacturing deviation field, achieving data simplification of the component's manufacturing deviation field. This method reduces computational complexity and data storage while ensuring reconstruction model accuracy. Finally, an example verification is conducted on a composite skin component. The results show that the mesh size of point cloud data is inversely proportional to reconstruction accuracy and the total number of deviation modes. When the data reduction rate is 60.54%, the relative reconstruction error is 7.62%. The research results demonstrate that the deviation modeling method based on discrete cosine transform can accurately and efficiently characterize the manufacturing deviation characteristics of composite components.

Keywords: discrete cosine transform; composite component; manufacturing deviations; modal identification

新一代航空航天装备为满足高承载、远航程和高综合服役性能的要求,其主承力构件趋于大型化、集成化和整体化,大量使用以碳纤维增强树脂基复合材料为代表的先进材料。如中国商飞正在研制的C929,其复合材料前机身筒段环向壁板分为4块,通过纵缝拼接而成,单块最大壁板约长15 m,弧约长6 m^[1];空客A350机翼长约32 m、宽6 m,是目前航空器中尺寸最大的碳纤维复合材料部件^[2]。然而,复合材料构件在成型过程中因材料各向异性、树脂收缩不均及模具和材料热膨胀系数差异等因素而易产生翘曲变形^[3-4];同时,复合材料层间强度弱,在外力作用下易发生损伤,因此,其对装配质量控制要求更加严格。

另一方面,随着航空航天产品形状和性能要求的极端化,传统基于理论模型的装配质量预测逐步向基于实测物理特性的装配性能仿真设计模式转变^[5]。空客公司在欧盟FP7项目支持下,联合巴黎大学开发了考虑零件制造偏差、材料属性、接触关系和装配顺序的柔性件装配偏差模拟软件(ANATOLEFLEX)^[6],并初步实现了行业应用。波音公司利用机器学习和稀疏传感数据来预测飞机装配中的垫片填隙间隙,通常仅需约3%的点云数据即可实现测量公差范围内99%的间隙预测^[7]。洛·马公司在CHARLIE项目复合材料组件验证件上采用全尺寸确定性装配方法(FSDA),构建了精确的虚拟模型开展装配工艺规划以指导实物装配,实现制孔对齐度100%^[8]。当前,我国相关项目在研制中提出,产品形态要从几

何要素向性能保障跨越,需在装配精度分析中综合考虑产品表面形貌与受力变形,其中产品制造偏差精确建模是装配精度分析的基础。

近年来,国内外学者针对零件制造偏差建模开展了大量研究,Requicha等^[9]首次提出了漂移公差带模型,用于描述零部件尺寸和形位公差的空间偏差变动域。Nayroles等^[10]在精度分析中引入小位移旋量(SDT)模型,采用3个移动和3个转动分量来表示零件名义几何特征的变动量。Laperriere等^[11]提出采用雅可比旋量矩阵来表示零件结合面的偏差变动范围。上述方法主要基于理想表面假设给出不同类型表面的名义特征偏差范围,但无法精确描述该表面的形状偏差特征。为进一步表征零件真实表面,陆续提出了基于多项式、基函数、模态分解、分形理论的形状误差建模方法。陈晖^[12]通过勒让德多项式和正弦多项式来描述零部件表面的几何形状偏差和波纹度偏差。刘检华等^[13]采用泽尼克多项式来表征圆环面的表面形状误差,并基于勒让德-傅里叶多项式表达圆柱面的形状误差。Pan等^[14]基于分形几何和小波理论研究了微几何特征对装配变形的影响。Homri等^[15]提出了基于模态分解的薄壁件表面形状偏差建模方法,并对常见零件形状缺陷类模态进行了分析。徐旭松等^[16]基于半空间和多面体的定义,构建了非理想表面的公差多面体不等式组。多项式在表征复杂表面形状误差上展现出很大优势,但在偏差统计分析方面存在一定局限性,而基于基函数和模态分解的制造偏差建

模本质上是一组特征基的线性组合。Schleich 等^[17]采用肤面模型描述零件制造和装配过程中的形状偏差,其表面采用离散几何方式表示,包含大量点云数据,不利于存储、计算和统计分析。易扬等^[18-20]通过小波分析理论将零件表面模型进行多尺度形貌误差表征与成分合成,但其表面模型的偏差采用抽样分析合成,与零件真实表面存在一定的偏差。

综上,诸多学者采用模态分解、多项式组合等方法构建零件制造偏差场模型,在一定程度上提高了零件制造偏差的建模精度。然而,复合材料构件成型精度较低,制造偏差与装配变形之间呈现出复杂的映射关系。采用传统的规律性偏差描述方法易导致装配偏差预测结果与实际相差较大,装配时易造成构件装配变形和应力集中;而直接采用点云肤面模型构建零件制造偏差场模型,处理效率较低。因此,综合考虑建模精度与效率的复合材料构件制造偏差场模型建模方法仍有待研究。

为此,本文提出了一种基于离散余弦变换

(DCT)的制造偏差场模型构建方法,首先对理论模型与点云数据进行格栅化处理,选取适宜的网格尺寸建立构件制造偏差场模型。其次对构件制造偏差场模型进行模态分解、识别与重构,实现制造偏差场关键模态识别,并采用部分关键模态实现制造偏差场高精度重构。最后以复合材料蒙皮构件制造偏差建模为例开展验证,确保制造偏差模型精度的同时减少计算复杂度与数据储存量,提高制造偏差建模效率。

1 制造偏差场建模

本文以复合材料平板类构件为例,针对理论模型与点云数据进行格栅化处理,建立基于实测数据的复合材料构件制造偏差场。然后,利用离散余弦变换的能量压缩特性和核函数的正交性,实现制造偏差场模态分解、识别与重构。其优势在于在保障制造偏差场模型精度的基础上,采用少量的数据实现偏差场重构,以简化数据存储和计算的复杂度,具体流程如图 1 所示。

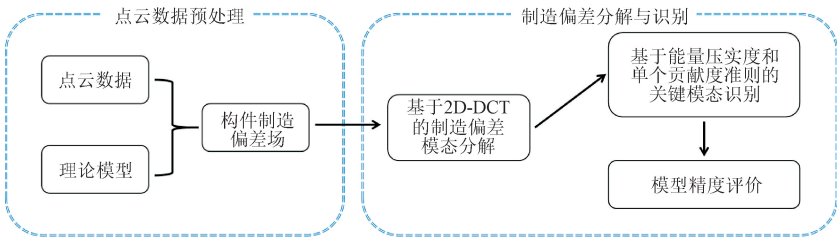


图 1 制造偏差场模型构建流程

Fig. 1 Flowchart of manufacturing deviation model construction

复合材料构件制造偏差主要由固化以及加工过程中引入的制造偏差组成。一般采用激光扫描仪、三坐标测量机等测量仪器实现构件表面真实形貌点云数据的采集,但构件理论模型的名义特征由各曲面组成,难以直接嵌入 3D 点云数据。故以理论模

型作为基准,基于实测数据对构件非理想表面进行建模,首先对构件理论模型表面特征进行网格化,用得到的网格模型节点与对应实测点云数据的法向距离来表征制造偏差,如图 2 所示,最终得到构件表面的制造偏差场。

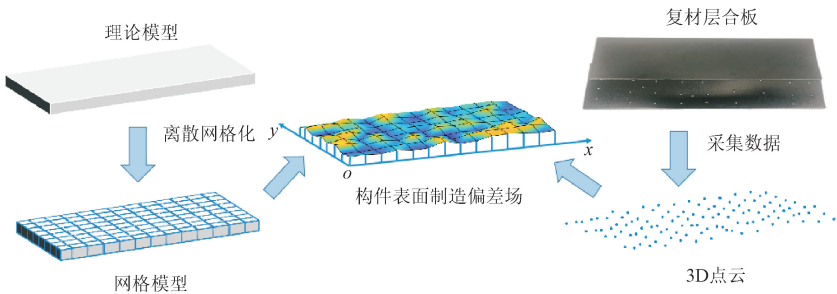


图 2 数据预处理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of data preprocessing

此过程中需将网格化处理后的三维点云数据与基于理论模型生成的网格节点模型进行配准,确保实测数据的采样点与理论模型中的网格节点一一对应。通过比对网格尺寸与偏差模型重构精度、制造偏差模态数量间的关系,选择合适的网格粒度对点云数据进行精简,并确定适宜的理论模型网格尺寸,实现实测数据中采样点与理论模型网格节点的配准^[21]。

最终得到的构件制造偏差场 $f(m, n)$ 可表示为

$$f(m, n) = f_a(m, n) - f_n(m, n) \quad (1)$$

式中: $f_a(m, n)$ 表示采样点的实际测量值; m, n 表示采样点在 x, y 方向上的编号; $f_n(m, n)$ 表示采样点的名义值。

2 制造偏差场分解、识别与重构

离散余弦变换是一种以余弦函数为核的可分离

正交变换方法,一般用于对信号场的精简重构。在二维图像处理中,可以将像素点在横纵轴上的变化视为信号,人眼易于识别的信号为低频变化信号,不易识别的信号为高频变化信号。当对二维图像进行 DCT 正变换后,图像的关键特征信息主要集中在低频部分,这就实现了信号的能量集中^[22-24]。

非理想表面建模需要在不同精度层级上构建其几何偏差,可以将模型的非理想表面视为二维偏差信号场。通过 DCT 方法的能量集中特性,在保证制造偏差场模型精度的同时,使用较少的数据以减轻数据存储与计算难度;利用 DCT 的正交特性使不同精度层级上的偏差模态具有线性可叠加性,叠加和即为制造偏差。充分利用 DCT 方法的能量集中特性和核函数的正交性,可实现基于 DCT 的复合材料构件制造偏差场模型构建,其具体流程如图 3 所示,其中加红色圈的为重要模态。

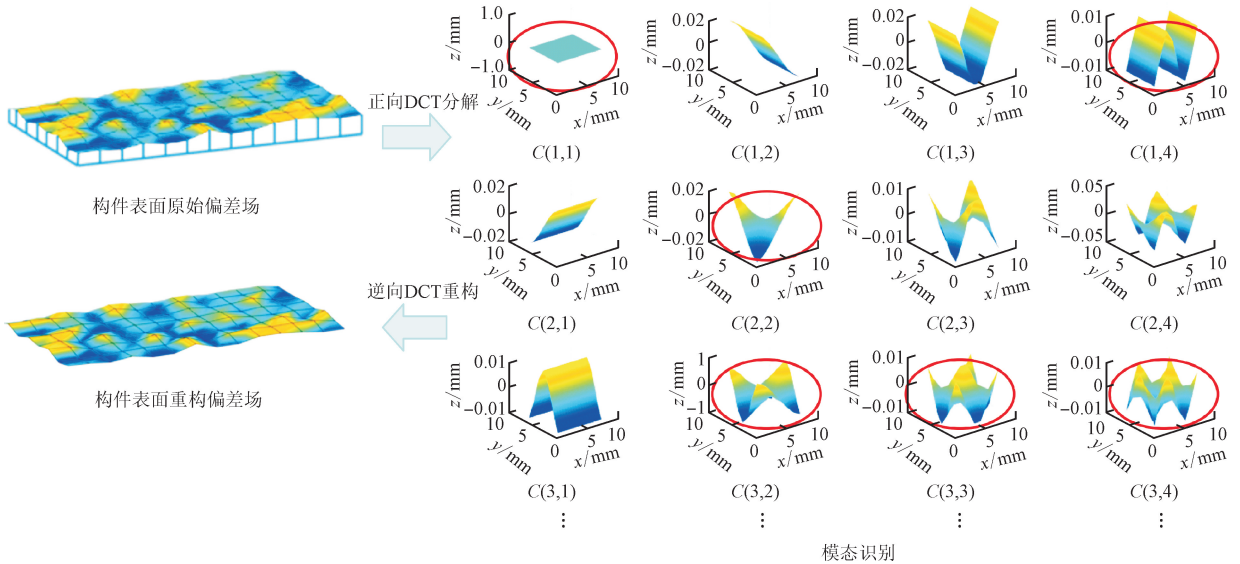


图 3 制造偏差场模型构建流程

Fig. 3 Construction process of manufacturing deviation model

2.1 制造偏差场模态分解

将式(1)所得构件制造偏差场进行 2D-DCT 正向变换

$$C(\mu, \nu) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m, n, \mu, \nu) \quad (2)$$

$$g(m, n, \mu, \nu) =$$

$$\frac{2c(\mu)c(\nu)}{\sqrt{MN}} \cos \frac{(2m+1)\mu\pi}{2M} \cos \frac{(2n+1)\nu\pi}{2N} \quad (3)$$

$$c(\mu) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & \mu = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases}; c(\nu) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & \nu = 0 \\ 1, & \text{其他} \end{cases}$$

式中: $g(m, n, \mu, \nu)$ 为 DCT 正变换核函数; μ, ν 为频

率; $m, \mu = 0, 1, \dots, M-1; n, \nu = 0, 1, \dots, N-1; M, N$ 为两方向上的采样点总数; C 为 DCT 正变换系数矩阵。

通过 DCT 正向变换,制造偏差数据存储到 DCT 正变换系数矩阵 $C(\mu, \nu)$ 中,由于余弦函数具有正交性,正变换系数矩阵 $C(\mu, \nu)$ 中各系数相互独立,每个系数经过 DCT 逆变换后均代表一种制造偏差模态,通过将整体 $C(\mu, \nu)$ 进行 DCT 逆变换即可得到构件表面实际制造偏差

$$f(m, n) = \sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} C(\mu, \nu) h(m, n, \mu, \nu) \quad (4)$$

$$h(m, n, \mu, \nu) = \frac{2c(\mu)c(\nu)}{\sqrt{MN}} \cos \frac{(2m+1)\mu\pi}{2M} \cos \frac{(2n+1)\nu\pi}{2N} \quad (5)$$

式中: $h(m, n, \mu, \nu)$ 为 DCT 逆变换核函数。对比式(3)与式(5)可得,正、逆变换核函数一致,其本质上都是一组基函数,构件表面制造偏差通过 DCT 基函数组以变换系数为权重加权叠加而成。

2.2 制造偏差场关键模式识别

对于给定的构件,当离散采样点数量越多,构件制造偏差的重构精度越高。然而,过多的采样点经过变换后会生成大量的制造偏差模式,给数据的存储和计算带来了困难,为了缩减计算量,需要利用 DCT 方法的能量集中特性,对偏差模式进行取舍。通过保留少量对构件制造偏差场贡献度较大的模式,舍弃贡献度小的模式,使其在满足制造偏差建模精度的前提下实现数据的精简。

根据 Parseval 定理^[25],信号在时域和频域上计算得到的总能量相等。将构件表面制造偏差场视为时域信号,经过 DCT 变换后,时域信号转换到频域下,结合 Parseval 定理,采用能量压实度和单个贡献度来识别关键偏差模式。每个模式的贡献可通过模式参数 $|C(\mu, \nu)|$ 的大小来表征,该模式下信号能量表征为 $C^2(\mu, \nu)$,其具体表达式如下

$$\sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} C^2(\mu, \nu) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^2(m, n) \quad (6)$$

引入能量压实度 E ,用选定的重要偏差模式 i 的能量 $C_i^2(\mu, \nu)$ 与采样数据的总能量 $f^2(m, n)$ 之比表示

$$\frac{\sum_{\mu=0}^{M-1} \sum_{\nu=0}^{N-1} C_i^2(\mu, \nu)}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^2(m, n)} \times 100\% \geq E, C_i(\mu, \nu) \in \Omega \quad (7)$$

式中: Ω 为模式集; E 为能量压实度, $0 \leq E \leq 100\%$ 。 E 与偏差模式数量呈正相关,即能量压实度 E 间接反映制造偏差建模精度。当 E 达到 100% ,代表保留所有偏差模式,后续重构的偏差场模型与基于实测点云重构偏差模型完全一致,表明能量压实度 E 可间接体现制造偏差场的建模精度。

在对关键模式进行识别过程中,将不可避免引入一些不重要的制造偏差模式,影响制造偏差场模型的重构效率。为此,引入贡献度阈值 η 衡量单一制造偏差模式对整个偏差场模型建模的贡献度

$$\frac{C_i^2(\mu, \nu)}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^2(m, n)} \times 100\% \geq \eta \quad (8)$$

对比式(7)和式(8)发现,当只给定能量压实度 E 而没有对单一制造偏差模式进行贡献度估算,可能会引入若干个不重要的制造偏差模式而舍弃关键制造偏差模式,通过对每个制造偏差模式贡献度进行预估能避免关键模式不能被准确识别的问题。因此,本文通过不断调整贡献度阈值 η 实现既定能量压实度 E ,从而在保障偏差场模型重构精度的前提下,使采样数据进一步缩小。

2.3 制造偏差场重构及精度评价

将已进行关键模式识别的 DCT 变换系数矩阵 $\tilde{C}$ 进行 DCT 逆变换,可重构复合材料构件的制造偏差场 $\tilde{f}(m, n)$ 。该重构制造偏差场 $\tilde{f}(m, n)$ 的均方误差 θ 为

$$\theta = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [\tilde{f}(m, n) - f(m, n)]^2}{MN} \quad (9)$$

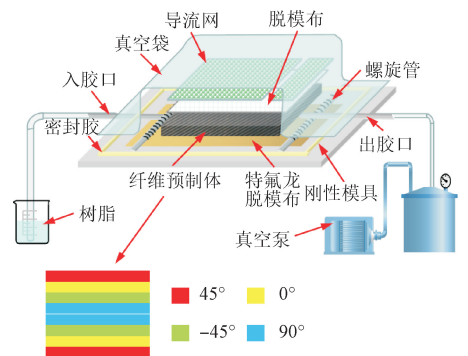
相对重构误差 δ 为

$$\delta^2 = \frac{\theta MN}{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f^2(m, n)} \quad (10)$$

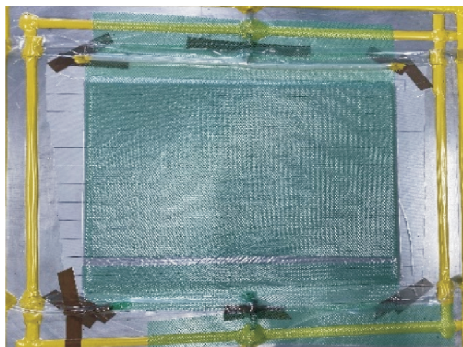
通过均方误差 θ 和相对重构误差 δ 可以表征构件表面制造偏差的建模精度,若重构表面的精度不满足设计需求,重新调节能量压实度 E 和贡献度阈值 η ,以满足精度要求。

3 实例分析

采用前文基于 DCT 的制造偏差场分解、识别和重构方法,本节通过复合材料蒙皮构件进行制造偏差场建模实例分析。先通过真空辅助树脂灌注(VARI)成型工艺来制备具有同等规格的3件复合材料层合板,制备的构件尺寸为 $400 \text{ mm} \times 550 \text{ mm}$,构件铺层采用准各向同性对称铺层,铺层顺序为 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ/45^\circ]$,单层名义铺层厚度为 0.225 mm 。VARI 成型工艺示意图如图4所示。



(a) VARI 成型工艺原理



(b) VARI 成型工艺制得实物

图 4 VARI 成型工艺示意图

Fig. 4 Diagram of VARI molding process

首先在模腔中预先依次放置规定尺寸和铺层角度的碳纤维布,然后通过真空泵将模腔内部抽成真空状态,进行密封。再通过气压将树脂灌注到模腔内部,待树脂充满整个模腔后放入烘箱进行固化成型,固化完成后进行脱模得到复合材料层合板,最后对层合板进行裁剪以达到设计尺寸。

采用三维激光扫描仪 HandySCAN 700(测量精度为 0.03 mm)在距离构件约 0.3 m 处进行扫描,获取复合材料蒙皮构件(550 mm×400 mm×1.8 mm)表面的点云数据;同时,在构件表面贴一定的靶标点以确定构件与设备间的相对位置,提高测量精度。

将实测点云数据进行网格化处理,并分割成规则的网格单元,取每个网格单元内的点云数据平均值以代表整个网格单元的偏差特征,达到简化点云数据的目的;再计算平均绝对误差,求取精简后点云相对误差,进而得到点云精简后的精度。点云相对误差表示为

$$e = \frac{\sum_{j=1}^{M \times N} \sum_{i=1}^{T(j)} |P(i, j) - \bar{P}(j)|}{\sum_{m=1}^s |P(i, j)|} \quad (11)$$

式中: M 、 N 为 x 、 y 方向上的网格总量; j 是网格标号; T 为网格 j 中点的总数; i 是第 j 个网格内点的标号; $P(i, j)$ 为精简前点云高度特征; $\bar{P}(j)$ 为每个网格单元内的点云数据平均值; s 为点的总数; e 为精简后点云的相对误差。

选取其中 1 件复合材料蒙皮构件进行数据分析,图 5 所示为该构件点云数据网格尺寸与处理后精度间的关系,发现当网格尺寸在 10 mm 以内时,点云模型精度超过 99%。

制造偏差场模态总数近似等于采样点数,为了尽可能精确完整地描述构件的制造偏差特征,在保

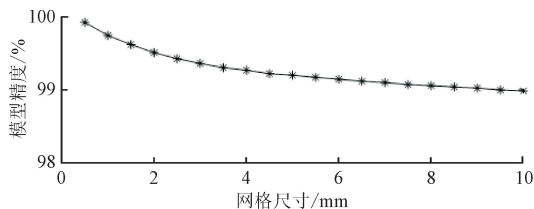


图 5 点云数据网格尺寸与精度关系

Fig. 5 Relationship between size and accuracy of point cloud data grid

证计算效率的情况下需要采用尽可能多的采样点,网格尺寸与制造场偏差模态数量关系如图 6 所示。

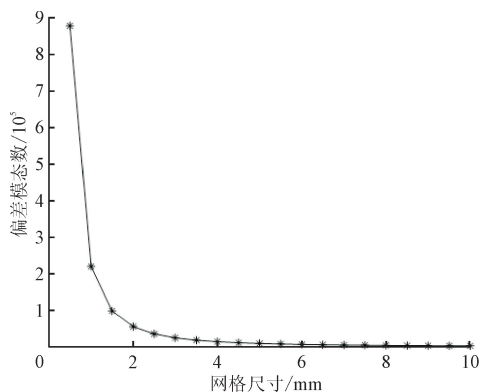


图 6 点云数据网格尺寸与偏差场模态数量的关系

Fig. 6 Relationship between the size of point cloud data grid and the number of deviation modes

从图 5 与图 6 可知,随着网格密度的增加,构件表面的重构精度在一定程度上得到了提高,这是因为更高的网格密度意味着更多的采样点,能够捕捉到更细微的表面细节,从而提高了模型的精度。然而,网格密度增加也会带来数据处理和存储的挑战。因此,在实际应用中,需要在建模精度与计算效率之间取得平衡。为了提高数据处理效率,偏差模态总数不宜超过 50 000,本文选取的网格尺寸为 2.5 mm(模态数量为 35 200),此时蒙皮表面采样数据点为 220×160。复合材料构件的表面偏差特征包含波纹度和形状偏差,忽略尺度较小的粗糙度特征,基于网格节点的制造偏差场数据集 $f(m, n)$ 如图 7 所示。

基于 DCT 正变换实现制造偏差模态分解,获得变换参数矩阵 $C(\mu, \nu)$,通过单个贡献度准则,计算各个模态对应贡献度,剔除贡献度较小的制造偏差模态,且保证 99% 的能量压实度,从而实现关键制造偏差模态识别,如表 1 所示。

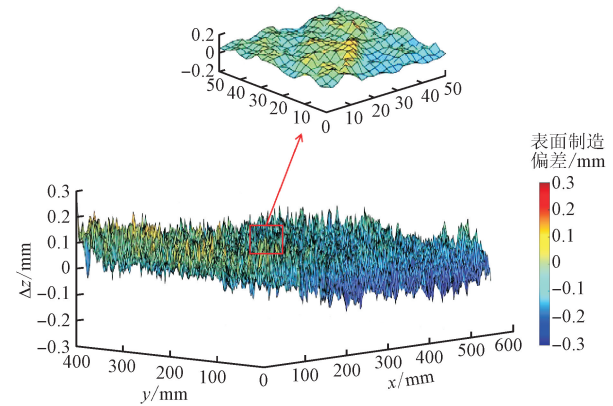


图 7 复合材料蒙皮构件表面制造偏差数据

Fig.7 Surface manufacturing deviation data of composite skin component

表 1 99%能量压实度下制造偏差模态变换参数矩阵
($\mu=1,2,\cdots,220$)

Table 1 Manufacturing deviation modal transformation parameter matrix at 99% energy compaction degree ($\mu=1,2,\cdots,220$)

ν	$C(\mu,\nu)$					
	1	2	3	...	219	220
1	4.373	4.913	2.563	...	-0.037	-0.022
2	-2.055	0.446	0.119	...	0	0.025
3	-0.680	0.353	0.099	...	0	0.019
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
159	0	0.072	0.048	...	0.024	0.025
160	0	0	0.068	...	0	0

在给定能量压实度 E 为 99% 的情况下,制造偏差场模型的绝对重构误差为 0.005 4 mm,相对重构误差为 7.62%,制造偏差模态从 35 200 个删减到 13 891 个,数据删减率达到 60.54%,实现了保障重构精度与简化数据的效果。

如图 8 所示,在保证制造偏差场模型相对重构误差在 10% 以内时,制造偏差模态最多可减少至 10 660 个,数据删减率高达 69.7%,能量压实度基本保持在 98% 以上。与快速傅里叶变换(FFT)重构方法^[26]相比,在同一重构误差率情况下,DCT 重构方法可用更少的数据来表征构件制造偏差,重构精度较高,减少了运算难度,且建模过程更加简洁,表明基于离散余弦变换的制造偏差场模型构建方法对复合材料构件制造偏差分析的准确性和效率更高。

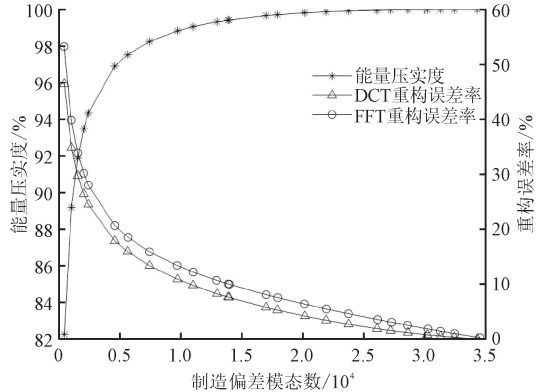


图 8 基于 DCT 的制造偏差场模型精度及数据简化

Fig.8 Precision and data simplification diagram of manufacturing deviation model based on DCT

4 结 论

本文以复合材料构件制造偏差为研究对象,提出了一种基于离散余弦变换的制造偏差场模型建模方法。首先,选择适宜的网格尺寸,生成基于理论模型的网格节点模型,建立了二维网格节点与三维实测点云间的映射关系。然后,通过对网格节点模型与实测数据融合得到制造偏差场数据集,利用离散余弦变换正变换,将制造偏差场分解成一系列偏差模态的线性组合,采用能量压实度和单个贡献度指标对关键模态进行识别,并利用离散余弦变换逆变换,完成构件制造偏差场模型的重构。最后,以复合材料蒙皮构件开展制造偏差实例分析,实验结果表明:制造偏差场模型重构精度和偏差模态总数与点云数据网格尺寸成反比,当数据删减率为 60.54% 时,其相对重构误差为 7.62%,表明了本文提出的建模方法能够更精确、高效地表征复合材料构件制造偏差场。

DCT 的计算复杂度较低,能够以较低的计算成本对基于平面的大规模点云数据进行处理。由于可展面可以在不发生拉伸、压缩或剪切变形的情况下展开成一个平面,使得该方法在可展面的非理想表面模型重构上具有较高的实用性:能够快速提供制造偏差的定量分析结果,支持实时质量控制和反馈;能够精细地捕捉到微小的几何偏差,特别是在高精度制造要求的领域,能够提供比传统方法更为准确的偏差检测结果。但是,对于部分具有复杂曲面和自由形状的构件,DCT 的离散化过程可能会丢失形状细节,从而导致偏差场模型的准确性下降,这也是下一步需要关注的研究点。

参考文献:

- [1] 中国商用飞机有限责任公司. CR929 飞机复合材料机身攻关项目进入新阶段 [N]. 中国航空报, 2018-02-06(1).
- [2] Bangalore Aviation. Photos: first wing for Airbus A350 XWB arrives at Toulouse assembly line [EB/OL]. [2024-05-08]. <https://www.bangaloreaviation.com/2012/09/photos-first-wing-for-airbus-a350-xwb.html>.
- [3] 刘镇阳, 翟雨农, 李东升, 等. 飞机复合材料壁板装配变形控制技术研究与应用进展 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(18): 46-54.
- LIU Zhenyang, ZHAI Yunong, LI Dongsheng, et al. Research and application progress of deformation control technology for aircraft composite panel assembly [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(18): 46-54.
- [4] 张立新, 钟顺录, 刘小冬, 等. 先进战斗机强度设计技术发展与实践 [J]. 航空学报, 2020, 41(6): 102-128.
- ZHANG Lixin, ZHONG Shunlu, LIU Xiaodong, et al. Development and application of strength design technology of high performance fighter [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 102-128.
- [5] 张学睿, 郭飞燕, 肖庆东, 等. 基于大偏差原理的多维偏差源扰动下装配精度保持性分析方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(8): 2633-2645.
- ZHANG Xuerui, GUO Feiyan, XIAO Qingdong, et al. Assembly accuracy retentivity under multi-dimensional variation sources disturbance based on large deviation principle [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(8): 2633-2645.
- [6] FALGARONE H, THIÉBAUT F, COLOOS J, et al. Variation simulation during assembly of non-rigid components: realistic assembly simulation with ANATOLEFLEX software [J]. Procedia CIRP, 2016, 43: 202-207.
- [7] MANOHAR K, HOGAN T, BUTTRICK J, et al. Predicting shim gaps in aircraft assembly with machine learning and sparse sensing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48(Part C): 87-95.
- [8] Lockheed Martin Corporation. How to build aircraft articles in half the time [EB/OL]. (2021-05-12) [2023-04-25]. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/news/features/2021/How-to-Build-Aircraft-Articles-in-Half-the-Time.html>.
- [9] REQUICHA A A G. Toward a theory of geometric tolerancing [J]. The International Journal of Robotics Research, 1983, 2(4): 45-60.
- [10] NAYROLES B. Plate theory and complementary displacement method [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(9): 1329-1368.
- [11] LAPERRIÈRE L, ELMARAGHY H A. Tolerance analysis and synthesis using Jacobian transforms [J]. CIRP Annals, 2000, 49(1): 359-362.
- [12] 陈晖. 考虑零件形状和材料参数误差的柔性件装配偏差计算 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [13] 刘检华, 张志强, 夏焕雄, 等. 考虑表面形貌与受力变形的装配精度分析方法 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(3): 207-219.
- LIU Jianhua, ZHANG Zhiqiang, XIA Huanxiong, et al. Assembly accuracy analysis with consideration of form defects and surface deformations [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(3): 207-219.
- [14] PAN Minghui, TANG Wencheng, XING Yan. The deformation analysis, prediction, and experiment verification for thin-wall part assembly based on the fractal theory model with WNNM [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 92(9): 4145-4159.
- [15] HOMRI L, GOKA E, LEVASSEUR G, et al. Tolerance analysis: form defects modeling and simulation by modal decomposition and optimization [J]. Computer-Aided Design, 2017, 91: 46-59.
- [16] 徐旭松, 王皓, 孙志英, 等. 考虑形状偏差的公差多面体建模与分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(11): 3681-3691.
- XU Xusong, WANG Hao, SUN Zhiying, et al. Tolerance polyhedron modeling and analysis considering surface shape deviation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(11): 3681-3691.
- [17] SCHLEICH B, WARTZACK S. Approaches for the assembly simulation of skin model shapes [J]. Computer Aided Design, 2015, 65: 18-33.
- [18] 易扬. 基于数字孪生的复杂产品装配精度预测关键技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2021.
- [19] 易扬, 刘晓军, 冯锦丹, 等. 面向数字孪生的产品表面模型表达与生成方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1454-1462.
- YI Yang, LIU Xiaojun, FENG Jindan, et al. Representation and generation method of digital twin-oriented product skin model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(6): 1454-1462.
- [20] 易扬, 冯锦丹, 刘金山, 等. 复杂产品数字孪生装配模型表达与精度预测 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(2): 617-630.

- YI Yang, FENG Jindan, LIU Jinshan, et al. Model expression and accuracy prediction method of digital twin-based assembly for complex products [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2): 617-630.
- [21] 刘峻峰, 何小妹, 黄翔, 等. ICP 算法在叶型点云数据配准中的应用 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(12): 79-82.
- LIU Junfeng, HE Xiaomei, HUANG Xiang, et al. Application of ICP algorithm in data registration of blade profile point cloud [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(12): 79-82.
- [22] 张爱华, 常康康. 基于 DCT 快速变换的图像压缩编码算法 [J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(7): 92-94.
- ZHANG Aihua, CHANG Kangkang. A fast image compression coding algorithm based on DCT [J]. Computer Technology and Development, 2014, 24(7): 92-94.
- [23] 王继争, 王成, 陈建伟, 等. 基于自适应字典压缩感知的欠定工作模态参数识别 [J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 285-295.
- WANG Jizheng, WANG Cheng, CHEN Jianwei, et al. Underdetermined operational modal parameter identification based on adaptive dictionary compressed sensing [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(1): 285-295.
- [24] 张志杰, 邹建华. 面向压缩域视频拷贝检测的主要边缘相对相位算法 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 8-11.
- ZHANG Zhijie, ZOU Jianhua. A relative phases algorithm of key edges for detecting compressed video copies [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(10): 8-11.
- [25] HUANG Wenzhen, LIU Jinya, CHALIVENDRA V, et al. Statistical modal analysis for variation characterization and application in manufacturing quality control [J]. IIE Transactions, 2014, 46(5): 497-511.
- [26] 王成, 缙锦, 白俊卿, 等. 利用主成分分析的模态参数识别 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(11): 97-104.
- WANG Cheng, GOU Jin, BAI Junqing, et al. Modal parameter identification with principal component analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 97-104.

(编辑 杜秀杰)