

基于光学几何测量的整体叶盘几何失谐建模与辨识

张元¹, 赵景超¹, 周标¹, 吕福慧², 金易璇²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院

航空发动机热环境与热结构工业和信息化部重点实验室, 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 通过光学几何测量技术获取精确的叶片型面差异化信息(即几何失谐)建立整体叶盘的高保真动力学模型的方法, 并进一步开展整体叶盘几何失谐辨识的研究。采用先进的三维结构蓝光扫描系统测量构建精确的叶片几何型面点云模型, 然后采用网格变形技术, 将谐调叶片有限元模型的表面节点自动投射至实测的点云表面, 以回避传统逆向工程的实体模型重建环节, 从而实现整体叶盘高保真动力学模型的快速构建。该模型可直接用于量化识别叶片几何失谐对其固有频率和振型的影响, 其中各叶片“一弯”频率失谐量在 2.1% 以内, 同时可以精确对比各叶片间的模态置信因子, 因此可大幅提高整体叶盘建模和动力学仿真分析的准确性。

关 键 词: 整体叶盘; 几何失谐; 光学几何测量; 网格自适应变形; 高保真建模

中图分类号: V231.92

文献标志码: A

Modeling and identification of geometric mistuning in blisks based on optical geometry measurement

ZHANG Yuan¹, ZHAO Jingchao¹, ZHOU Biao¹, LÜ Fuhui², JIN Yixuan²

(1. Key Laboratory of Aero-engine Thermal Environment and Structure,

Ministry of Industry and Information Technology, College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Establishing a model for description of blade geometric mistuning is one of the fundamental problems for dynamic analysis of blisk. The blade profile difference (geometric mistuning) was captured accurately by using optical geometry measurement technology and then a high-fidelity blisk modeling method was established. According to the core idea of this method, an accurate point cloud representing blade geometries was built by means of advanced three-dimensional structured blue light scanning system. An adaptive mesh deformation technology was developed to automatically project the finite element model nodes of the blade to the measured point cloud. Without solid model reconstruction in the traditional reverse engineering, it enabled rapid generation of high-fidelity blisk model. The high-fidelity blisk model can be directly used to quantitatively capture the influence of blade geometry

收稿日期: 2021-07-31

基金项目: 国家科技重大专项 (2017-IV-0006-0043); 国家自然科学基金 (52175098); 欧盟地平线 2020 玛丽·居里学者项目 (891197)

作者简介: 张元(1997—), 男, 硕士生, 主要从事结构动力学研究。E-mail: yuanzhang@nuaa.edu.cn

通信作者: 周标(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构动力学研究。E-mail: biao.zhou@nuaa.edu.cn

引用格式: 张元, 赵景超, 周标, 等. 基于光学几何测量的整体叶盘几何失谐建模与辨识[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 61-69. ZHANG Yuan, ZHAO Jingchao, ZHOU Biao, et al. Modeling and identification of geometric mistuning in blisks based on optical geometry measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 61-69.

variations on both its natural frequencies and mode shapes. Frequency mistuning of each blade was within 2.1%, and the modal assurance criterion between each blade can be accurately compared. It is thus able to significantly improve the accuracy of modeling and dynamic analysis of blisk.

Keywords: blisk; geometric mistuning; optical geometry measurement; mesh adaptive deformation; high-fidelity modeling

整体叶盘技术的广泛应用是航空发动机部件结构设计朝着轻量化、整体化方向发展的结果。理想情况下的整体叶盘各叶片具有完全相同的几何型面和物理性质,即所谓的循环对称特性。然而,实际上由于加工误差和运行磨损等因素影响,各叶片几何型面存在不可避免的随机微小差异,即叶片几何失谐。相较于榫头榫槽连接的叶盘,整体叶盘无结构阻尼,因此由叶片几何失谐导致的模态局部化现象和强迫振动放大效应会极大地影响叶片振动应力水平,从而诱发叶片高循环疲劳失效。长期以来,如何准确建立对叶片几何失谐的模型描述是整体叶盘动力学分析与设计的基础问题之一^[1-3]。

传统的失谐叶盘建模大多建立在叶片频率失谐假设(即叶片固有频率发生微小变化而振型保持不变)的基础之上^[4-7]。人们往往通过测试手段获取实际整体叶盘结构的叶片频率失谐分布形式并确定失谐量(固有频率偏差)的大小,由此可反推得到叶片模型参数(一般为材料弹性模量)的差异化分布,即所谓的失谐辨识^[8]。然而由于整体叶盘独有的耦合模态密集分布现象和对叶片失谐的高度敏感性,基于整体叶盘常规模态测试的叶片失谐辨识问题在物理本质上极具困难和挑战性^[9]。

须重点指出,由于叶片几何失谐将同时改变叶片的固有频率和模态振型,上述基于频率失谐假设的整体叶盘结构建模分析方法应用于几何失谐整体叶盘结构面临准确度严重不足的问题^[10]。随着测量技术的进步,人们开始探索通过测量叶片几何型面坐标以获取精确的叶片型面差异化信息(即几何失谐)的方法。Sinha 等^[11]首先开展了基于三坐标测量仪的整体叶盘有限元建模方法研究。其结果表明,该接触式几何测量技术具备足够的测量精度来捕捉叶片型面微小变化对其模态特性的影响。Brown、Kaszynski 等^[12-13]进一步使用非接触式光学测量系统实现整体叶盘的自动化测量,提出了从光学测量数据处理、逆向工程建模、网格变形等一系列解决方案,建立了由加工容差引起的微小几何失谐整体叶盘有限元模型。该模型能够综合反映叶片几何型面变化对其固有频率和振型的影响,大幅提高了模型的准确度,

也推动了整体叶盘全寿命周期数字孪生技术研究的发展。类似地,Schoenenborn 等^[14]提出了基于光学测量技术,批量建立整体叶盘所有叶片有限元模型的方法。由于该方法部分环节可批处理作业运行,与传统的基于设计模型的整体叶盘建模方法相比,其准确性和效率大幅提升。然而,该方法与传统的逆向工程建模方法相近,基于实测叶片点云数据逐一重建叶片 CAD(computer aided design)模型以及后续有限元分网环节耗时且效率低下。

综上所述,叶片几何型面测量技术与传统整体叶盘有限元建模方法的融合,可有效提高整体叶盘动力学模型的准确性,同时也为整体叶盘几何失谐的辨识提供了新的技术途径。本文拟开展基于先进光学几何测量技术的整体叶盘几何失谐建模与辨识方法的探索研究。具体而言,首先,采用先进的三维结构蓝光几何测量技术获取精确的叶片型面差异化信息(即几何失谐);其次,深入研究整体叶盘高保真动力学模型的快速建立方法,以突破基于频率失谐假设的传统叶盘建模与分析方法的局限性;最后,在整体叶盘高保真动力学模型的基础上,进一步识别并量化分析叶片几何失谐对其固有频率和振型的影响。

1 基于光学测量的整体叶盘快速高保真建模方法

本文将引入三维结构蓝光几何测量技术精准捕获叶片型面几何信息,并使其反映在整体叶盘动力学模型之中。事实上,利用三维光学几何测量系统对复杂结构进行扫描得到测量点云数据,然后基于测量点云进行几何重建得到逆向设计 CAD 模型,进而对其进行网格划分获取结构的有限元仿真模型是逆向工程实践中的常规技术途径,如图 1(a)所示。然而,传统的逆向工程建模过程中,基于实测点云数据重建 CAD 模型以及后续生成结构化/非结构化有限元网络的环节极其耗时且效率低下。

为此,本文提出了新型高保真快速建模方法,采用网格变形技术将谐调的整体叶盘设计有限元模型直接关联至实测叶片型面点云数据,以回避

传统逆向工程中的三维实体模型重建环节, 从而实现几何失谐整体叶盘高保真动力学模型的快速构建, 如图1(b)所示。

下面将以图2中所示, 用于研究目的的整体叶盘试验件为例, 对新型整体叶盘快速高保真动力学建模的各个环节逐一进行详细介绍。

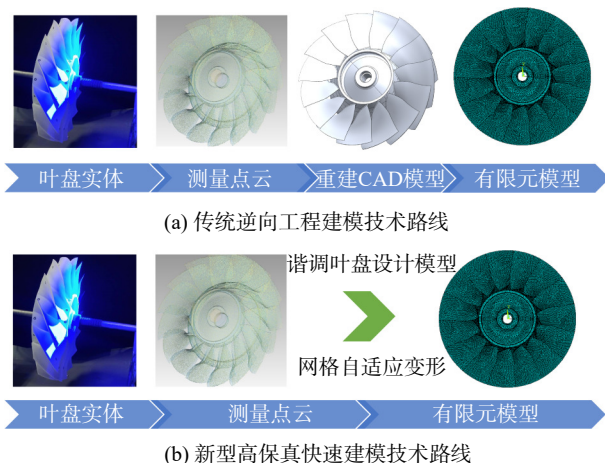


图1 传统逆向工程建模与新型高保真快速建模技术路线对比

Fig. 1 Comparison between modeling process in traditional reverse engineering and novel high-fidelity and fast modeling process



图2 整体叶盘试验件
Fig. 2 Blisk test piece

1.1 整体叶盘光学几何测量

本文依托南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室提供的 GOM ATOS 三维结构蓝光光栅投影仪开展整体叶盘的数字化光学测量, 如图3所示。蓝光光栅投影仪是由1组光栅投射设备和工业 CCD(charge coupled device)相机组成的非接触式几何测量系统, 广泛应用于逆向工程、结构快速成型和质量检测等高端制造业场合。工作时, 其光栅投射设备将特定的蓝色条纹状光栅投射到被测物体表面, 同时由工业 CCD 相机进行图像采集(图4), 进一步的图像数据处理

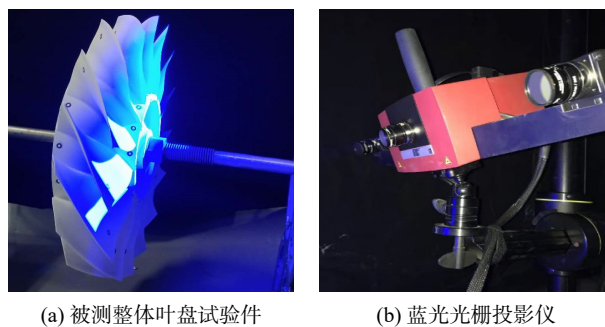


图3 整体叶盘试验件与蓝光光栅投影仪

Fig. 3 Blisk test piece and blue light fringe projector

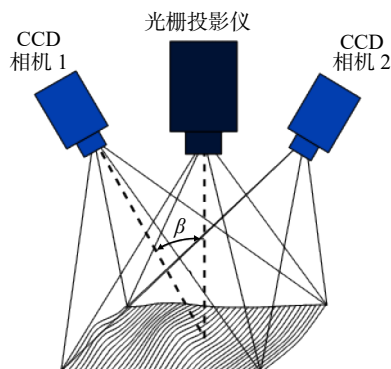


图4 光栅投影

Fig. 4 Fringe projection

可根据不同高度物体表面对反射光栅信号的相位变化情况来计算物体表面的空间位置信息, 从而获取被测物体的三维几何轮廓^[14]。本文所采用的 ATOS 三维结构蓝光光栅投影仪测量精度可达 $10\ \mu\text{m}$, 可精准捕获整体叶盘试验件由于标准加工公差 ($50\ \mu\text{m}$) 所致叶片几何型面的微小差异。

在实际测量过程中, 需要在整体叶盘试验件表面喷涂钛白粉以增强其表面的光漫反射能力, 进而提高光学几何扫描测试数据质量^[15]。此外, 由于整体叶盘试验件尺寸相对较大(最大直径为 $384\ \text{mm}$) 且叶栅通道几何形状复杂, 无法通过单次扫描完成整体叶盘的测量, 故而必须及时调整蓝光扫描投影仪的位置进行多次扫描和数据叠拼。为此, 在被测整体叶盘试验件表面曲率变化较小的区域布置辅助定位的参考标记^[16]。每次进行整体叶盘局部区域的扫描测量之前, 须先进行拍照以定位参考标记。借由参考标记的辅助定位, 可将逐次扫描的数据结果导入至统一的测量坐标系, 最终叠拼整合形成完整的整体叶盘几何测量数据。

通过以上测量过程可以获取大量分布于整体叶盘试验件表面的空间离散点, 其三维空间坐标反映了整体叶盘的实际几何型面数据信息, 故而

被称为点云(图 5)。原始的整体叶盘高分辨率点云密度极高,且存在较多的噪点和冗余,须对其进行滤波处理去除噪点和离群点,以降低其规模形成相对稀疏的点云数据。

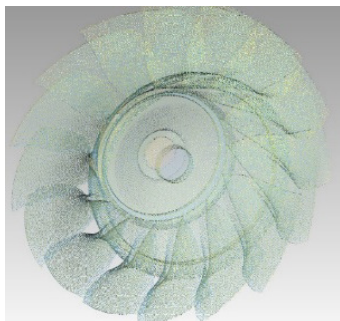


图 5 实测高分辨率整体叶盘点云

Fig. 5 High-fidelity point cloud of the blisk under test

进一步对稀疏点云作网格化处理,即通过规则的三角网格使点云数据结构化,获得具有连续表面的网格化点云模型(相对于离散点云而言),如图 6 所示。最后,针对整体叶盘被测表面曲率较大和扫描测量结果不理想的局部区域(如叶片进排气边),如有必要,需对可能存在的微小孔洞进行修复,以保证网格化点云模型的完整性。

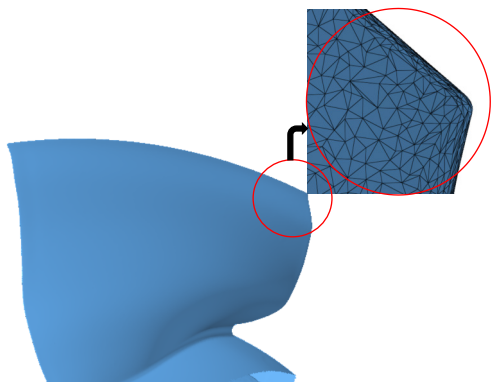


图 6 网格化的点云模型

Fig. 6 Tessellated point cloud model

1.2 谐调整体叶盘设计有限元模型

谐调整体叶盘的设计有限元模型将作为文中第 2.3 节中“网格变形”的“种子”网格。整体叶盘设计 CAD 模型具有循环对称特性,故而只需对整体叶盘的单个扇区进行有限元分网。本文选用带中间节点的四面体单元,对叶片和盘区域进行了不同密度的分网操作。同时,在此过程中开展了网格密度的收敛性分析,即针对具有不同网格密度的叶盘扇区有限元模型进行模态分析,根据其固有频率随网格密度增加所呈现出的收敛性趋势

确定理想的网格密度,最终得到计算精度与计算时间均可接受的有限元模型。如图 7 所示,该整体叶盘扇区单元数目约为 8 万个,节点数约为 14 万个。

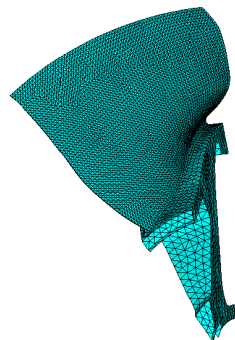


图 7 谐调整体叶盘单扇区有限元模型

Fig. 7 Finite element model of a single sector of tuned blisk

1.3 基于网格变形的整体叶盘快速建模

该方法的主要思路是令谐调叶片有限元模型的每一个表面节点自动投影至网格化点云模型中相邻最近的网格平面,从而实现叶片有限元表面网格的自适应变形。其后,根据变形后的表面网格重新生成叶片内部体网格。由此建立新的叶片有限元模型能够较好地匹配通过光学测量技术所获取的实测叶片几何型面差异化分布信息,从而达到对叶片几何失谐精准建模的目的。具体流程如图 8 所示,其中“节点投影”和“矢量校准”两个核心环节通过自行编制的 Python 程序实现。

1.3.1 模型配准

所谓模型配准,是令点云模型与谐调整体叶

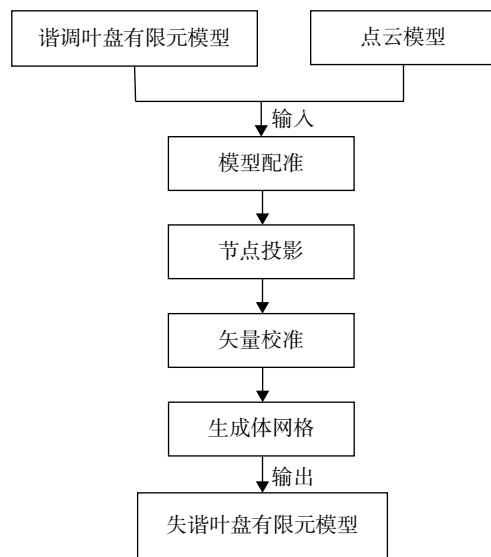


图 8 网格变形流程

Fig. 8 Mesh deformation procedure

盘设计有限元模型的重合度尽可能地高, 以便于实现后续的网格变形步骤。为此, 需要将点云模型和整体叶盘 CAD 设计模型置于同一空间坐标系内, 基于最佳拟合对齐的原理, 通过点云模型的刚性平移和旋转等变换, 使点云模型的质心、最小惯性主轴与 CAD 设计模型的质心、最小惯性主轴基本匹配^[17]。这一操作步骤在 Geomagic 软件环境下进行。

1.3.2 节点投影

节点投影的核心是针对谐调叶片有限元模型的每一个表面节点 $N(x, y, z)$, 寻找其在点云模型中的 3 个最近邻点 P_1 、 P_2 和 P_3 及其构成的网格平面 (P_1, P_2, P_3) , 完成该有限元模型节点 N 向网格平面 (P_1, P_2, P_3) 的投影, 从而获取变形后的有限元模型表面节点 $N'(x', y', z')$, 如图 9 所示。图中

$$\mathbf{v}_1 = P_2 - P_1 \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_2 = P_3 - P_1 \quad (2)$$

则由向量的垂直关系 $\mathbf{v}_1 \perp NN'$, $\mathbf{v}_2 \perp NN'$ 可以求得垂足坐标 N' 。

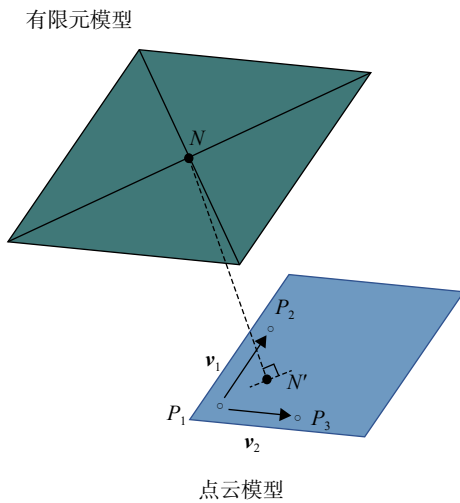


图 9 节点投影

Fig. 9 Node projection

在此需要强调, 一般认为轮盘区域表面轮廓变化对于几何失谐整体叶盘振动特性的影响几乎可以忽略不计, 本文仅将叶片及其根部过渡区域的有限元模型表面网格纳入网格变形的范畴。

由于点云模型和谐调叶片有限元模型的节点数量都非常大(分别约为 4×10^6 和 2.7×10^4), 这给寻找有限元表面节点的 3 个最近点云模型邻点造成了实质性的困难。如果使用传统的穷举搜索方案, 则搜索运算次数约 1.1×10^{11} , 其计算效率无法

满足实用需求。为了解决这个问题, 本文在 Python 环境下编制程序时, 使用了高效的 k -dimensional tree algorithm(KD 树算法)来进行最近邻点的搜索^[18]。该算法首先利用所有点云模型的节点空间坐标构建三维 KD 树(一种数据结构), 亦即建立对所有点云节点的快速索引; 然后, 将有限元模型表面节点作为输入, 基于 KD 树数据结构搜索其 3 个最近点云邻点。结果表明, KD 树搜索算法可以极大地提高最近点云邻点搜索和有限元节点投影的计算效率。对于本文处理的整体叶盘有限元模型, 其搜索运算时间不到传统穷举搜索方案消耗时长的 0.01%。

1.3.3 矢量校准

基于变形后的有限元模型表面节点形成的新叶片表面网格在表面曲率较大的地方可能出现网格重叠或相交等表面单元形状不理想的情况。这一现象在叶尖部分尤为突出, 将给后续叶片内部体网格的生成造成困难。为此, 在网格变形之后需要增设矢量校准这一环节来微调变形异常的节点, 从而保证可生成较为理想的叶片内部体网格。

矢量校准的本质是针对变形前后位移矢量与其附近节点差距较大的节点进行调整, 其基本过程如下:

1) 甄别投影前后位移矢量与其附近节点偏差较大的节点。如图 10 所示, $N_1(x_1, y_1, z_1), \dots, N_m(x_m, y_m, z_m)$ 是投影前谐调叶片有限元模型表面网格节点 $N(x, y, z)$ 附近的节点。投影后的节点记为 $N'_1(x'_1, y'_1, z'_1), \dots, N'_m(x'_m, y'_m, z'_m)$ 和 $N'(x', y', z')$ 。 $\mathbf{u}, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_m$ 为各节点投影前后变形的位移矢量, 其中

$$\mathbf{u} = N' - N = \begin{bmatrix} x' - x \\ y' - y \\ z' - z \end{bmatrix} \quad (3)$$

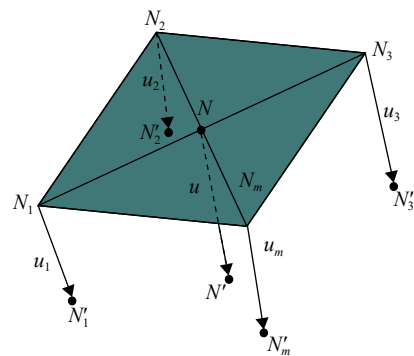


图 10 矢量校准

Fig. 10 Vector alignment

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}'_i - \mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} x'_i - x_i \\ y'_i - y_i \\ z'_i - z_i \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

节点 N 与其相邻节点 N_i 的位移矢量偏差为

$$d\mathbf{u}_i = \mathbf{u} - \mathbf{u}_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

则对于节点 N 的每个相邻节点 N_i ($i = 1, 2, \dots, m$), 其位移矢量偏差需满足

$$|d\mathbf{u}_i| < r \cdot \overline{N_i N} \quad (6)$$

其中 $\overline{N_i N}$ 为谐调叶片有限元模型表面网格节点 N_i 和 N 之间的距离, r 为调控节点投影后相对变形的可变系数。本文中给定 r 值为 1.0 即可达到良好的甄别效果。

2) 针对变形位移矢量偏差过大的节点进行微调。对于不满足式(6)的节点 N , 其位移矢量需进行如下的校准处理:

$$\mathbf{u}_{\text{align}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \mathbf{u}_i \quad (7)$$

上式表明, 针对节点 N 校准后的变形位移矢量 $\mathbf{u}_{\text{align}}$ 为其邻近节点 $N_1, N_2, \dots, N_m$ 的变形位移矢量的平均值。则谐调叶片有限元模型表面网格节点 N 在变形位移矢量校准之后的新节点为

$$N_{\text{morph}} = N + \mathbf{u}_{\text{align}} \quad (8)$$

3) 生成体网格

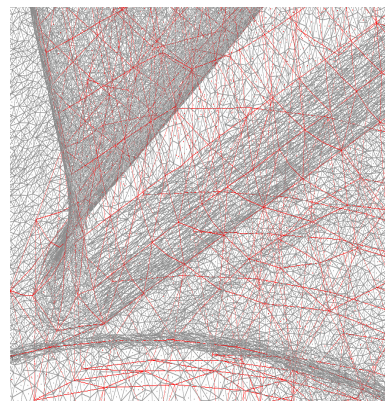
矢量校准这一环节结束后, 将变形后的有限元模型表面节点读入 ANSYS 软件的前处理器, 可由表面网格快速生成体网格, 最终获取基于光学几何测量数据的几何失谐整体叶盘高保真模型。

1.4 整体叶盘高保真建模结果分析

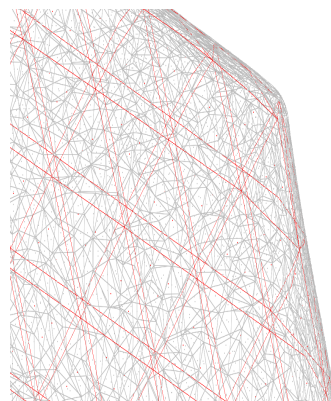
按照上述技术路线建立整体叶盘试验件的高保真有限元模型后, 下面对该建模方法和模型进行评估。

传统的逆向工程建模方法需要花费数个多小时的时间和大量的人工操作用于重构 CAD 模型和分网操作, 其建模效率和自动化程度较低。而本文所提出的快速高保真建模方法, 直接将谐调的整体叶盘设计有限元模型关联至实测点云数据, 通过普通配置的桌面计算机运行自行编制的程序, 仅需 20 余秒就可以完成 1 个叶盘扇区的叶片表面节点投影和叶片内部体网格的重新生成。不包括光学几何测量环节, 整体叶盘高保真有限元建模流程耗时在 10 min 以内, 故其建模效率得到了极大提升。

图 11 直观展示了整体叶盘高保真有限元模型网格(红色)与实测点云模型网格(灰色)的对比。不论是在叶根区域还是在表面曲率变化比较大的叶尖和进排气边区域, 两者都具有良好的契合度, 初步证明了节点投影环节的有效性。



(a) 叶根区域



(b) 叶尖区域

图 11 整体叶盘高保真有限元模型网格与点云模型网格

Fig. 11 Mesh of high-fidelity finite element model of blisk and point cloud model

下面进一步量化评估整体叶盘高保真模型几何型面的准确度。图 12(a) 首先给出了节点投影环节前谐调叶盘扇区有限元模型表面节点与点云模型距离偏差的分布云图。显然, 在进排气边和叶尖区域叶片几何型面相较于设计模型易发生较大偏差。图 12(b) 为节点投影后生成的整体叶盘高保真有限元模型表面节点与点云模型距离偏差的分布。从图中可以看出, 经过网格自适应变形环节, 叶片有限元模型与点云模型已接近于完美重合, 最大距离偏差从 0.55 mm 减少到 0.000 3 mm。

上述结果表明, 本文所建立的整体叶盘高保真有限元模型能够准确反映通过三维数字化光学测量技术所捕获的叶片型面几何信息, 亦即所谓

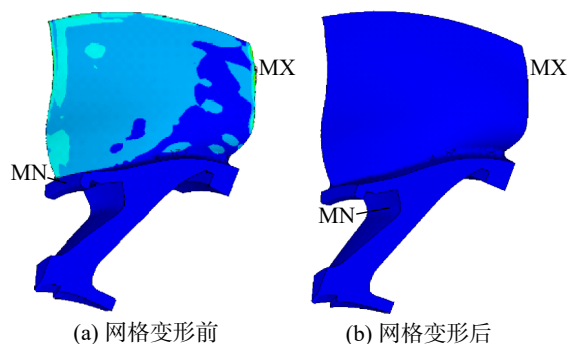


图 12 有限元模型表面节点与点云模型距离偏差分布云图

Fig. 12 Cloud plot of distance between finite element nodes and point cloud model nodes

的几何失谐。这是基于频率失谐假设的传统整体叶盘建模方法无法比拟的优势。

2 基于整体叶盘高保真模型的几何失谐辨识

建立在光学几何测量数据基础之上的整体叶盘高保真有限元模型可直接用于量化辨识叶片几何失谐对其固有频率和振型的影响。

2.1 叶片频率失谐量的辨识

由于实际整体叶盘结构的叶片几何型面相较于其设计模型普遍存在偏离, 所谓的叶片几何失谐或对整体叶盘“单个”叶片的固有振动频率产生显著影响。如图 13 所示, 将整体叶盘高保真模型的叶片部分“隔离”出来, 在其叶根处节点施加约束边界条件, 可计算获取叶片各阶模态频率。整体叶盘试验件为铝合金 6061 所制, 故而模型材料参数设置为密度为 2700 kg/m^3 , 弹性模量为 69 GPa , 泊松比为 0.33 。

获取所有“单个”叶片的同一阶模态频率后, 通过下式可以计算得到整体叶盘中该阶叶片模态的频率失谐量的分布:

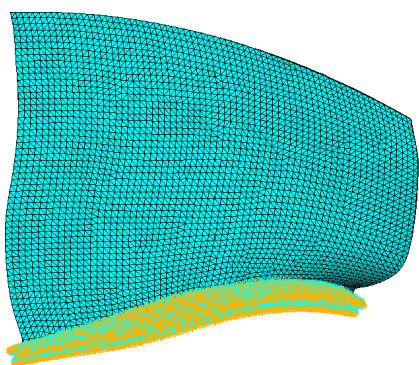


图 13 “单个”叶片模型与根部约束

Fig. 13 A single blade model with root constraints

$$\delta_{i,j} = \frac{f_{i,j} - \bar{f}_j}{\bar{f}_j} \quad (i = 1, 2, \dots, 15) \quad (9)$$

其中 $f_{i,j}$ 为编号为 i 的叶片第 j 阶模态频率, $\bar{f}_j$ 为各叶片第 j 阶模态频率的均值。

图 14(a) 首先展示了叶片 1 弯模态的频率失谐量分布。1~14 号叶片由于加工误差导致的微小几何失谐使其 1 阶弯曲模态频率呈差异化分布。而 15 号叶片几何型面由于存在目测可见的相对较大的变形(在运输过程中意外所致), 故而其频率失谐量达到 2.15% 。而图 14(b) 中叶片 1 阶扭转模态的频率失谐分布与图 14(a) 相比呈完全不同的趋势, 频率失谐量最高达到 6.25% 。特别重点指出, 传统的失谐整体叶盘建模方法普遍通过对各个叶片设置不同的弹性模量来获取等效的频率失谐叶盘模型。其内在缺陷在于由此获得的各阶叶片模态频率失谐分布完全一致, 显然与试验现象相悖。而这也说明, 基于光学几何测量的整体叶盘高保真有限元模型在研究叶片几何失谐的影响方面, 具有先天性的优势。

2.2 叶片几何失谐对振型的影响

叶片几何失谐同时也将使叶片的各阶模态振型产生微小变化。下面随机选取 1 号叶片和 15 号叶片的模态振型进行模态相关性分析。图 15 展示了 2 个叶片前 5 阶模态振型的模态置信因子(ρ)

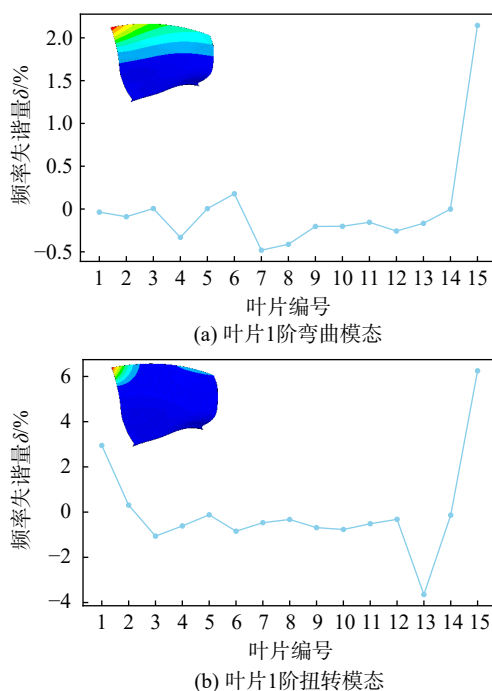


图 14 几何失谐整体叶盘频率失谐量分布

Fig. 14 Frequency mistuning distribution of geometrically mistuned blisk

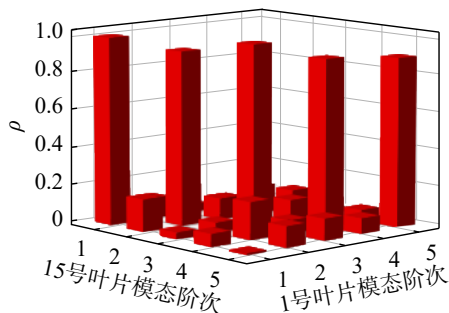


图15 1号和15号叶片的模态置信因子

Fig. 15 Modal assurance criterion between blade 1 and blade 15

计算结果。模态置信因子数值分布于[0,1]区间之内,当其数值越趋近于1时,表明两个振型相似度高。

从图15中可以看出,两个叶片同阶模态振型的模态置信因子略小于1,其中第1阶振型的模态置信因子值最高,为0.986;第4阶振型的模态置信因子值最小,为0.881。这意味着叶片几何形面的差异导致不同叶片同阶模态振型之间存在少量差异。上述结果也再一次说明本文所建立的整体叶盘高保真模型,能够有效反映叶片微小几何失谐及其振动频率和振型的影响,可大幅提升整体叶盘建模和振动分析的准确性。

3 结论

本文将先进的三维数字化光学测量技术应用整体叶盘,以精准捕获所有叶片的几何型面信息,成功建立了整体叶盘的快速高保真有限元建模方法,并实现了对整体叶盘几何失谐的有效辨识和量化分析。

该建模方法直接将谐调整体叶盘设计有限元模型关联至实测点云数据,通过叶片有限元模型节点表面投影这一核心环节实现了对实际叶片型面差异的精准模型化反映,同时回避了传统逆向工程建模方法中冗长的CAD模型重建和后续有限元分网环节,极大地提高了建模工作效率。然而,本文所建立的节点投影方法仅适用于整体叶盘设计模型与实际叶片型面偏差相对较小的情况。针对具有几何大变形的叶片节点投影方法尚待进一步深入研究。

基于光学几何测量的整体叶盘高保真有限元模型能够同时体现叶片几何失谐对其固有频率和振型的影响,有效突破了基于单一频率失谐假设的传统整体叶盘结构建模方法的局限性,也为整体叶盘几何失谐辨识提供了新的途径,可提高后

续整体叶盘振动分析和预测的准确性。

该方法的本质是借助先进的数字化检测技术针对整体叶盘实体结构创建其高保真有限元模型(数字化映射系统),以期更为准确可靠地预测实体结构的动态特性、健康状况等,这与当下整体叶盘数字孪生技术发展理念高度一致。后续将进一步开展基于模态测试的整体叶盘模型确认研究,即对该模型的有效性进行确认,确保该模型与对应的整体叶盘实体对象之间形成准确的映射关系。

致谢

特别感谢南京航空航天大学逆向工程及三维数字检测中心叶南老师在整体叶盘光学几何测量过程中提供的设备支持和专业指导。

参考文献:

- [1] 白斌,白广忱,童晓晨,等.整体叶盘结构失谐振动的国内外研究状况[J].航空动力学报,2014,29(1):91-103.
BAI Bin, BAI Guangchen, TONG Xiaochen, et al. Research on vibration problem of integral mistuned bladed disk assemblies at home and abroad[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1): 91-103. (in Chinese)
- [2] 王建军,李其汉,朱梓根.失谐叶片-轮盘结构系统振动局部化问题的研究进展[J].力学进展,2000,30(4):517-528.
WANG Jianjun, LI Qihan, ZHU Zigen. Vibratory localization of mistuned bladed disk assemblies-a review[J]. Advances in Mechanics, 2000, 30(4): 517-528. (in Chinese)
- [3] 臧朝平,兰海强.失谐叶盘结构振动问题研究新进展[J].航空工程进展,2011,2(2):133-142.
ZANG Chaoping, LAN Haiqiang. Advances in research vibration problem of mistuned blisk assemblies[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(2): 133-142. (in Chinese)
- [4] 张伟伟,高奔奇,全金楼,等.失谐叶栅的受迫振动响应特性分析[J].航空学报,2017,38(9):193-202.
ZHANG Weiwei, GAO Yiqi, QUAN Jinlou, et al. Characteristics analysis of forced vibration response of mistuned cascades[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(9): 193-202. (in Chinese)
- [5] JIE Y, SCARPA F, ALLEGRI G, et al. Efficient computational techniques for mistuning analysis of bladed discs:a review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 87: 71-90.
- [6] KLAUKE T, KUEHHORN A, BEIROW B, et al. Numerical investigations of localized vibrations of mistuned blade integrated disks (blisks)[J]. Journal of Turbomachinery, 2009, 131(3): 12-22.
- [7] 王帅,王建军,李其汉.一种基于响应信息的整体叶盘结构失谐识别方法[J].航空学报,2009,30(10):1863-1870.
WANG Shuai, WANG Jianjun, LI Qihan. Mistuning identification for integrally bladed disk from measured response information[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1863-1870. (in Chinese)
- [8] BECK J A, BROWN J M, GILLAUGH D L, et al. Integrally bladed rotor mistuning identification and model updating using geometric mistuning models[R]. ASME Paper GT2021-43272, 2021.
- [9] BEIROW B, KUEHHORN A, FIGASCHEWSKY F, et al. Effect of mistuning and damping on the forced response of a compressor

- blisk rotor[R].ASME Paper GT2019-91337, 2015.
- [10] 姚建尧, 高阳, 王建军. 航空发动机失谐叶盘动态特性研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(21): 76-85,92.
- YAO Jianrao, GAO Yang, WANG Jianjun. A review of dynamic characteristics of mistuned bladed disks[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(21): 76-85,92. (in Chinese)
- [11] SINHA A, HALL B, CASSENTI B, et al. Vibratory parameters of blades from coordinate measurement machine data[R].ASME Paper 2005-69004, 2005.
- [12] BROWN J M, CARPER E, KASZYNSKI A A, et al. Emulation of frequency and mode shape variation of as-manufactured airfoils with eigenvalue veering and crossing[R].AIAA-2019-2000, 2019.
- [13] KASZYNSKI A A, BECK J A, BROWN J M. Automated meshing algorithm for generating as-manufactured finite element models directly from as-measured fan blades and integrally bladed disks [R].ASME Paper GT2018-76375, 2018.
- [14] SCHOENENBORN H, GROSSMANN D, SATZGER W, et al. Determination of blade-alone frequencies of a blisk for mistuning analysis based on optical measurements[R].ASME Paper GT2009-59148, 2009.
- [15] BACKHAUS T, HARDING M, SCHRAPE S, et al. Validation methods for 3D digitizing precision concerning jet engine blisks[R]. Munich, Germany: German Aerospace Congress 2017, 2017.
- [16] CAZENOVE J D, COGAN S, MBAYE M. Finite-element modelling of an experimental mistuned bladed, disk and experimental validation[R].ASME Paper GT2013-95985, 2013.
- [17] 杨凯, 王永军, 刘天骄, 等. 型材拉弯件回弹的激光扫描检测技术研究[J]. *工具技术*, 2015, 49(12): 95-98.
- YANG Kai, WANG Yongjun, LIU Tianjiao, et al. Research on laser scanning test for springback of stretch bending formed profiles[J]. *Tool Engineering*, 2015, 49(12): 95-98. (in Chinese)
- [18] FRIEDMAN J H, BENTLY J L, FINKEL R A. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time[J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1977, 3(3): 209-226.

(编辑: 陈 越)