

基于逆向工程的航空发动机叶片 三维重建模型构建

孙同明¹, 任俊², 张峰¹, 廖春云²

(1. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007;

2. 上海航翼高新技术发展研究院有限公司, 上海 200433)

摘要: 为精准控制航空发动机叶片型面数据, 设计出更符合实际应用需求的发动机叶片, 针对基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型构建方法展开研究; 按照逆向工程原理, 采集三维数据样本, 并根据误差修正条件, 定义发动机叶片三维数据的拓扑关系, 从而分析三维数据样点的邻域形式, 实现航空发动机叶片三维数据的邻域构建; 实施对三维数据的点云拼接处理, 遵循三维拟合原则, 提取完整的发动机叶片边界, 再根据三维重建节点配置需求, 确定重建四元数的取值范围, 推导具体的重建模型表达式, 完成基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型的构建; 实验结果表明, 上述模型的应用可以保证建模时标志点、三维重建后标志点间的坐标误差不超过 0.5 mm, 符合精准构建航空发动机叶片的实际应用需求。

关键词: 逆向工程; 发动机叶片; 三维重建模型; 误差修正; 数据邻域; 点云拼接; 叶片边界; 四元数

3D Reconstruction Modeling Construction of Aeroengine Blades Based on Reverse Engineering

SUN Tongming¹, REN Jun², ZHANG Feng¹, LIAO Chunyun²

(1. State owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China;

2. Shanghai Hangyi High tech Development Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: In order to accurately control the surface data of aeroengine blades, and meet practical application requirements of engine blades, this paper studies the 3D reconstruction model construction method for aeroengine blades based on reverse engineering. According to the principle of reverse engineering, collect the 3D data samples, and define the 3D data topological relationship with engine blades according to the error correction conditions, so as to analyze the neighborhood form of the 3D data samples and realize the 3D data neighborhood construction of aeroengine blades. Implement the 3D data point cloud splicing processing, follow the 3D fitting principle, extract the complete engine blade boundary, determine the range of the reconstructed quaternion according to the 3D reconstruction node configuration requirements, derive the specific reconstruction model expression, and complete the 3D reconstruction model of the aeroengine blades based on reverse engineering. Experimental results show that the coordinate error of the above model between the landmarks during modeling and the landmarks after the 3D reconstruction does not exceed 0.5 mm, which meets actual application requirements for precise construction of aeroengine blades.

Keywords: reverse engineering; engine blades; 3D reconstruction model; error correction; data neighborhood; point cloud splicing; blade boundary; quaternion

0 引言

获取航空发动机叶片型面数据需要对其进行准确测量, 根据测量时所应用设备是否接触被测对象, 可将获取叶片型面数据分为接触式测量、非接触式测量两种类型。三坐标测量机是一种较为常见的接触型测量装置, 在发动机叶片保持完整的情况下, 其测量精度可以达到 0.001~0.003 mm 之间, 然而该元件的扫描速度受到机械部件运

动行为的限制影响, 故其测量速度相对较低, 在叶片转弯与连接处的测量效果不佳, 由于其测量过程中无法照到所有标志节点, 所以存在无法测量的盲区, 一般不会单独应用^[1]。非接触式测量主要采用磁、光、声等原理, 通过求解模拟量参数的方式, 确定航空发动机叶片型面标志点之间的三维坐标关系。通常情况下, 为保证航空发动机叶片三维重建结果的准确性, 同时采用接触型、非接触型

收稿日期: 2023-08-28; 修回日期: 2023-10-16。

作者简介: 孙同明(1985-)男, 硕士, 工程师。

引用格式: 孙同明, 任俊, 张峰, 等. 基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型构建[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(9): 249-255.

测量方法, 预测标志节点所处的具体位置。

文献 [2] 提出基于增强特征信息的航空发动机叶片双目建模方法, 首先在发动机叶片外表面张贴标记物, 以突出叶片表面的特征信息; 其次通过多角度拍摄的方式, 获得完整的叶片全貌图片; 然后按照圆心特征匹配算法, 将叶片左侧、右侧区域内的圆形标记对象匹配起来; 最后根据双目视觉三维重建原理, 计算与标记对象相关的点云数据, 从而实现对航空发动机叶片型面的三维重建。文献 [3] 提出基于深度学习的三维重建方法按照 patch-match 原则, 对航空发动机叶片型面内的标志节点进行迭代取样, 联合视觉方差条件, 判断所取样标志点在叶片型面内所处的大致区域, 又根据最优视差值指标的计算结果, 调整重建后标志节点所处位置, 得到具体的航空发动机叶片三维重建方案。文献 [4] 研究了制造工艺引起的几何不确定性对轴流压缩机振动转子叶片模态强迫的影响。研究作为振动叶片激励源的力的振幅, 上游定子的几何变化被视为输入不确定性。通过光学表面扫描开始对可变性进行建模, 创建随机模型以表示测量到的制造几何偏差与标称模型的偏差。制造几何变化模型允许输入不确定性, 并概率地评估其对气动弹性问题的影响, 评估作用于振动转子叶片的模态强迫的最终变化。文献 [5] 提出航空铝合金微动疲劳寿命的混合人工神经网络多轴疲劳非局部模型, 提出了一种基于人工神经网络和非局部多轴疲劳分析的新型混合模型, 用于预测航空叶片微动疲劳寿命。选择铝合金叶片微动疲劳数据进行分析 and 验证。得出该模型能够准确估算叶片寿命, 还吸收了平均正应力、应力梯度和接触尺寸对叶片寿命的影响。文献 [6] 提出机器人自动磨削航空叶片非线性材料去除深度模型。首先, 基于仿真和理论推导, 研究了接触应力与接触力的关系, 并通过实验进一步研究了接触轮廓。然后, 根据普雷斯顿方程建立非线性材料去除深度模型, 预测磨削深度。同时, 引入多元线性回归方法对材料去除深度模型的参数进行分析。根据提出的模型开发了非均匀材料去除和可变接触力策略, 并将该策略应用于机器人自动研磨航空叶片系统, 以实现航空叶片表面逐点定量研磨深度。

逆向工程是指通过分析和研究已有产品或系统的设计、构造以及运行方式, 以获得产品或系统的相关信息和知识。简单来说, 就是对目标产品进行逆向分析与研究, 从而演绎出与该产品相关的设计要素, 以保证后续操作过程中能够设计出与原产品功能相似, 但却不完全相同的新型应用产品 [7]。逆向工程技术的应用有助于缩短产品的设计周期与开发周期, 可以在加快产品更新换代速度的同时, 降低新产品的开发风险与成本。对于航空发动机叶片组织而言, 增强特征信息建模方法、深度学习重建方法无法有效控制建模时标志点、三维重建后标志点间的坐标误差, 特别是在标志节点分布较为密集的情况下, 上述两种方法的应用并不符合精准构建航空发动机叶片的实际应用需求。为解

决上述问题, 利用逆向工程技术的应用优势, 设计一种新型的航空发动机叶片三维重建模型, 并通过对比实验的方式, 突出该模型的实际应用价值。

1 航空发动机叶片三维数据邻域构建

在处理航空发动机叶片的三维数据时, 为了进一步分析和处理, 需要构建叶片数据的邻域。通过叶片数据的邻域来帮助识别叶片数据中的局部特征, 可以对叶片进行更加详细的形状分析和描述。

1.1 基于逆向工程的三维数据采集

航空发动机叶片的三维数据采集对于逆向工程而言是建模过程中的必要处理步骤。逆向工程技术利用专业测量工具对航空发动机叶片的外轮廓数据进行直接测量, 得到基本数据样本后, 再借助专用的数据处理软件, 直接形成与叶片型面重建相关的三维数据信息 [8]。所谓三维采集就是指逆向工程技术在处理航空发动机叶片数据时, 并不局限在某一具体方向对型面信息进行加工与处理, 而是应该在完成数据样本的全方位采集之后, 再按照三维标定原则, 完成对标志节点的按需排列。

基于逆向工程航空发动机叶片三维数据的采集参考如下表达式:

$$M = \delta \sum_{\theta=1}^{+\infty} \beta \cdot \left(\frac{|\Delta N|}{\vec{m}_x \cdot \vec{m}_y \cdot \vec{m}_z} \right)^{\alpha+1} \quad (1)$$

其中: \vec{m}_x 表示横轴方向上的叶片型面数据标记向量, \vec{m}_y 表示纵轴方向上的叶片型面数据标记向量, \vec{m}_z 表示空间轴方向上的叶片型面数据标记向量, ΔN 表示基于逆向工程技术所标定的叶片型面数据单位采集区域, β 表示基于逆向工程的叶片型面数据三维采集系数, δ 表示型面标志点的位置定义参数, α 表示标志点坐标的三维定义项, χ 表示单位型面区域内的叶片建模数据三维标定系数。

应用逆向工程技术重建航空发动机叶片模型, 就是根据三维型面标志点所处位置, 推导出具体的建模表达式, 而三维数据采集则是实现叶片型面建模的基础环节, 逆向工程算法规定, 建模过程中三维数据标定条件的定义必须参考型面标志点之间的位置关系, 且单位三维型面区域内, 横轴、纵轴、空间轴方向上至少应存在一个标志坐标点 [9]。

1.2 采集数据的误差修正

采集数据误差修正就是按照逆向工程技术, 在采集所得的三维数据样本中, 去除不符合型面标记条件的坐标对象, 从而保障了航空发动机叶片三维模型的重建准确性。对于航空发动机叶片的三维型面模型而言, 采集所得的数据样本越多, 重建后标志点与建模时标志点间的误差值水平也就越大 [10]。

设 v_1, v_2, \dots, v_n 表示 n 个随机选取的航空发动机叶片型面数据对象, 且 $v_1 \neq v_2 \neq \dots \neq v_n$ 的不等式取值条件恒成立, $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ 分别表示与航空发动机叶片型面数据对应的三维取样误差值, \bar{B} 表示建模时标志点的定义参数, ϵ 表示

邻域组织内的建模标志点记录值, 联立上述物理量, 可将航空发动机叶片型面数据的误差值标记项表示为:

$$b = \frac{1}{n(\epsilon - 1)} \bar{B} \left| \frac{\gamma_1}{v_1} \right|^2 + \left| \frac{\gamma_2}{v_2} \right|^2 + \dots + \left| \frac{\gamma_n}{v_n} \right|^2 \quad (2)$$

联立公式 (1)、公式 (2), 推导基于逆向工程的采集数据误差修正条件表示为:

$$B = \frac{\sum_{c=1}^c \sum_{a=1}^a b \times |\bar{\omega}_c^2 - \bar{\omega}_a^2|}{\varphi \times (\bar{X}_0 \cdot \bar{Y}_0 \cdot \bar{Z}_0)} \quad (3)$$

式中, c 、 a 表示两个不相等的航空发动机叶片型面数据查询参数, φ_c 表示基于参数 c 的型面数据误差值修正向量, φ_a 表示基于参数 a 的型面数据误差值修正向量, \bar{X}_0 表示横轴方向上的标志点重建基向量, \bar{Y}_0 表示纵轴方向上的标志点重建基向量, \bar{Z}_0 表示空间轴方向上的标志点重建基向量, φ 表示基于逆向工程的标准误差值修正参数。

在实施建模处理的过程中, 若不能对标志点误差进行及时修正, 则会使重建后的叶片三维模型出现较大偏差^[1]。因此, 在构建航空发动机叶片三维数据邻域组织时, 必须在完成误差修正处理后, 才可以定义三维数据之间的拓扑关系。

1.3 发动机叶片三维数据的拓扑关系定义

拓扑关系又称发动机叶片三维数据基于逆向工程的重建检索关系, 它将误差修正后的采集数据推广到高维空间之中, 从而使得主机元件能够根据拓扑索引条件, 完成对重建后标志节点的重排处理。构建航空发动机叶片三维重建模型所需处理的数据量通常很大, 而且每一型面区域内都包含大量的维度数据信息, 若单纯按照逆向工程原则定义三维建模条件, 有可能导致标志点重合的问题, 但若在误差修正条件的基础上, 定义取样所得发动机叶片三维数据的拓扑关系, 则可以将型面区域内距离较近的标志节点区分开来, 从而在解决标志点重合问题的同时, 提升主机元件对三维数据邻域组织的处理能力, 从而达到精准重建发动机叶片三维模型的目的^[12-13]。

图 1 反映了逆向工程中航空发动机叶片三维数据的邻域拓扑关系。

设 λ 表示邻域组织中的航空发动机叶片三维数据拓扑参数, \bar{S} 表示三维建模过程中的叶片型面数据应用量均值, \dot{x} 表示航空发动机叶片型面数据的三维建模连线特征。在上述物理量的支持下, 联立公式 (3), 可将发动机叶片三维数据的拓扑关系定义式表示为:

$$A = \min \left[\sum_{-\infty}^{+\infty} (\lambda B - \dot{x} \bar{S})^2 \right] \quad (4)$$

随着航空发动机叶片三维型面区域的扩大, 建模数据的累积量也会不断增大, 当前情况下, 邻域组织中三维建模连线、逆向工程虚拟连线的密度水平也会随之增大。

1.4 针对拓扑关系的三维数据样点邻域形式分析

应用逆向工程技术在邻域组织中采集所得到的数据仅

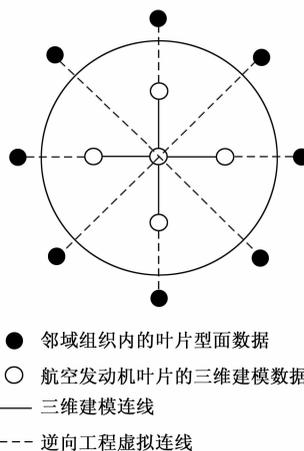


图 1 基于逆向工程的发动机叶片三维邻域拓扑关系

仅是以标志节点样式存在独立信息, 由于这些数据点在视觉层面上构成了完整的三维模型, 所以标志数据样点在邻域组织中的定义形式始终满足三维拓扑条件。三维邻域内, 主机元件所采集到的航空发动机叶片数据保持点云状态, 在实施建模处理之前, 出于准确性考虑, 需要按照拓扑定义条件, 计算出具体的几何数据信息, 而这些计算流程的实现都必须参考近邻标志节点之间的坐标值影响关系^[14]。因此, 三维数据样点邻域形式分析为航空发动机叶片标志点的点云拼接处理提供了数据样本支持。

规定 κ 表示航空发动机叶片标志节点的几何拓扑参量, \dot{d} 表示基于三维拓扑条件的三维数据样点定义向量, \bar{g} 表示邻域组织内的三维标志节点拓扑连接特征, 联立公式 (4), 推导航空发动机叶片三维数据样点的邻域形式分析表达式如下:

$$D = \left| \frac{A}{(\kappa + 1)\dot{d}} \right| \times \frac{1}{2} \sum \bar{g}^2 \quad (5)$$

由于主机元件对航空发动机叶片三维数据样点邻域形式的分析参考基于逆向工程建模原则, 取样标志点对象时, 要求每个建模数据参量在邻域组织中只能与一个样点数据参量保持对应关系, 且无论建模比例如何缩放变化, 一个主机元件也只能在其附近的邻域组织中完成对标志节点的搜索^[15]。此外, 为保证三维重建模型的准确性, 还应在分析三维数据样点邻域形式时, 定义唯一的发动机叶片三维拓扑条件。

2 三维邻域内的航空发动机叶片重建

以航空发动机叶片三维数据样点的邻域为数据支撑, 在逆向工程技术支持下, 对航空发动机叶片三维数据进行点云拼接处理, 并按照三维拟合原则, 提取关键边界节点, 再通过配置重建节点的方式, 确定四元数指标的取值范围, 从而实现基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型的构建。

2.1 航空发动机叶片三维数据的点云拼接

点云拼接是在数据层面上的标志节点连接处理, 利用

逆向工程技术重建航空发动机叶片模型, 必然获得大量的点云数据样本, 所以点云拼接是构建三维重建模型的必要环节。标志点云数据呈现线性分布状态, 在拼接处理之前, 相邻曲线的间隔较远, 对于重建主机而言, 如果直接进行数据对象取样, 则有可能导致建模时标志点、三维重建后标志点间出现较大的坐标误差; 拼接处理之后, 相邻点云曲线的间隔距离较小, 单位重建周期内, 主机元件可以同时提取到多种不同的数据对象, 参照邻域拓扑关系定义重建模型表达式时, 能够较好控制标志点间的坐标误差^[16-17]。

利用公式 (5), 推导航空发动机叶片三维数据的点云拼接表达式如公式 (6):

$$F = \sum_{i=1}^{+\infty} \left\| fD - \frac{1}{G}(\bar{H}) \right\| \quad (6)$$

其中: t 表示同一点云曲线内航空发动机叶片三维数据标志节点的个数, f 表示基于逆向工程技术的点云数据筛选系数, G 表示点云数据样本的实时拼接向量, \bar{H} 表示点云曲线内的航空发动机叶片三维数据分布特征。构建叶片三维重建模型的过程中, 点云曲线的取值数量并不固定, 一般来说, 单位邻域组织中至少需要包含两条完整的点云曲线, 随着邻域组织的增大, 点云曲线的取值数量也会不断增多。

2.2 利用点云数据的三维拟合

在三维建模过程中, 点云数据拟合精度影响主机元件对航空发动机叶片标志节点的定位能力。完成拟合后的航空发动机叶片三维模型由风扇叶片、涡轮叶片两部分组成。其中, 风扇叶片半径较大, 发动机运行时, 其转动速度相对较慢, 该类型叶片型面邻域组织中三维标志节点的数量水平也就相对较小。涡轮叶片半径较小, 存在于风扇叶片下部, 发动机运行时, 其转动速度相对较快, 该类型叶片型面邻域组织中三维标志节点的数量水平也就相对较多^[18-19]。具体的航空发动机叶片的三维拟合模型如图 2 所示。

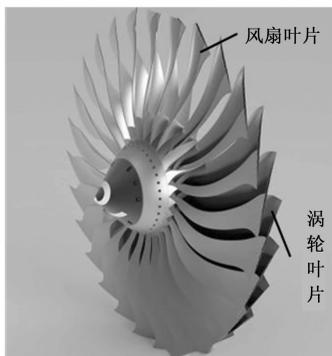


图 2 航空发动机叶片的三维拟合模型

设 h_1 表示风扇叶片型面邻域组织中的三维标志节点拟合向量, j_1 表示风扇叶片在发动机运行过程中的实时转速,

h_2 表示涡轮叶片型面邻域组织中的三维标志节点拟合向量, j_2 表示涡轮叶片在发动机运行过程中的实时转速, η 表示主机元件对航空发动机叶片三维标志节点的拟合效率, \hat{k} 表示点云拼接条件下的标志节点三维拟合系数。在上述物理量的支持下, 联立公式 (6), 可将航空发动机叶片点云数据的三维拟合条件表示为:

$$J = \frac{\sqrt{\left(\frac{h_1}{j_1}\right) \cdot \left(\frac{h_2}{j_2}\right)}}{\eta \times F \times \hat{k}} \quad (7)$$

为保证航空发动机叶片三维重建模型的准确性, 同一型面邻域组织中只存在一项三维拟合条件, 实施点云拼接处理时, 只有满足该条件的标志节点对象才符合主机元件对建模数据的取样需求。

2.3 发动机叶片边界提取

发动机叶片边界提取是三维建模的重要环节, 提取的好坏直接决定了点云数据三维拟合结果的质量。在测量得到航空发动机叶片三维点云数据之后, 首先按照逆向工程技术进行预处理, 之后再根据三维拟合原则, 完成对叶片型面边界标志节点的提取。因为边界标志节点覆盖了航空发动机的三维建模边界线, 所以在提取边界标志点时, 必须保证每一个节点对象的完整性^[20]。发动机叶片被蒙皮包裹, 受到叶片旋转、振动等行为的影响, 皮质表面极易发生褶皱、堆叠的情况, 因此提取叶片边界时, 还要将蒙皮结构的非平整问题考虑在内。叶片接入端边界会突出一个较小的平台结构, 在三维重建过程中, 为避免非精准行为的出现, 应在平台结构中设置大量的三维标志节点^[21]。具体的发动机叶片边界三维提取模型如图 3 所示。

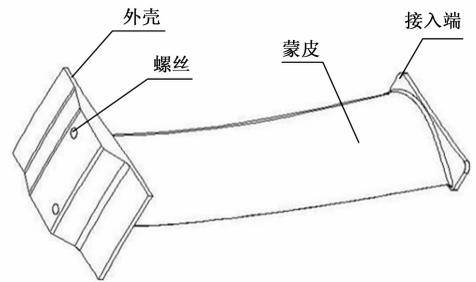


图 3 发动机叶片边界的三维提取模型

对于发动机叶片边界提取表达式的求解参考公式 (8):

$$L = \frac{1}{(\mu + \nu - 1)^2} J \cdot \sum_{i=1}^{+\infty} \vec{l} \times P_0 \quad (8)$$

式中, μ 表示蒙皮褶皱处的叶片边界标记指征, ν 表示接入端突出结构处的叶片边界标记指征, \vec{l} 表示三维条件下的标志节点取样向量, P_0 表示发动机叶片外壳边界与核心建模节点的间隔距离。如果 P_0 取值远大于三维邻域组织的半径长度, 则表示航空发动机叶片所处位置距离核心建模节点过远, 若在此条件下完成对叶片结构的三维重建, 有可能对建模精准性造成影响。

2.4 叶片边界区域内的三维重建节点配置

为了让航空发动机叶片三维重建曲面达到光滑的要求, 不仅需要提取合适的边界节点, 还需要根据边界点所处位置, 完成对边界区域内的三维重建节点配置。三维重建节点配置涉及横轴、纵轴、空间轴3个方向上的标志点调节。

1) 横轴方向上的标志点调节:

横轴节点就是指保持水平分布状态的叶片边界标志点, 横轴方向上的调节就是按照逆向工程技术, 推导水平标志点的分布定义式^[22]。具体计算式如下:

$$p_x = L \cdot \tilde{O}_x \sin \tilde{\omega}_x \cdot i_x \quad (9)$$

\tilde{O}_x 表示最末位标志点在水平轴方向上的长度映射向量, $\tilde{\omega}_x$ 表示横轴标志点在水平方向上的夹角, i_x 表示叶片边界区域内的横轴标志点调节参数。

2) 纵轴方向上的标志点调节:

纵轴节点就是指保持竖直分布状态的叶片边界标志点, 纵轴方向上的调节就是按照逆向工程技术, 推导竖直标志点的分布定义式。具体计算式如下:

$$p_y = \frac{\tilde{O}_y}{i_y} \cdot L \cos \tilde{\omega}_y \quad (10)$$

\tilde{O}_y 表示最末位标志点在竖直轴方向上的长度映射向量, $\tilde{\omega}_y$ 表示纵轴标志点在竖直方向上的夹角, i_y 表示叶片边界区域内的纵轴标志点调节参数。

3) 空间轴方向上的标志点调节:

空间轴节点就是指分布在三维空间区域内的叶片边界标志点, 空间轴方向上的调节就是按照逆向工程技术, 推导三维空间标志点的分布定义式^[23]。具体计算式如下:

$$p_z = i_z \times \sqrt{\frac{L \cdot \tan \tilde{\omega}_z}{O_z}} \quad (11)$$

\tilde{O}_z 表示最末位标志点在空间轴方向上的长度映射向量, $\tilde{\omega}_z$ 表示空间轴标志点在三维空间内的夹角, i_z 表示叶片边界区域内的空间轴标志点调节参数。

联立公式(9)、公式(10)、公式(11), 推导叶片边界区域内的三维重建节点配置表达式为:

$$P_{xyz} = \sum_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{3} |p_x \cdot p_y \cdot p_z|^2 \quad (12)$$

为保证航空发动机叶片三维重建的精准性, 必须在同一空间区域内, 完成对标志点对象的取样。

2.5 节点配置条件下的重建四元数计算

四元数是由角度和数值向量共同组成的物理量, 利用逆向工程技术重建航空发动机叶片三维模型的过程中, 该项物理量可以看作是固定标志点绕空间轴旋转而得到的映射向量。所谓四元除了配置三维重建节点所需的横轴、纵轴与空间轴, 还包括旋转过程中关联节点连线中点与重建坐标系原点连线所在轴线, 相较于前三类坐标轴, 第四类轴线的连接任意性较强, 所选定关联节点的改变, 必然导致第四类轴线定义条件发生变化, 因此为保证四元数计算结果的唯一性, 所选定关联节点必须存在于叶片边界的三

维重建区域内^[24-25]。

对于节点配置条件下重建四元数的计算参考如下表表达式:

$$u = 1 - \vartheta \left[\frac{(\theta U)^2}{P_{xyz}} \right] \quad (13)$$

ϑ 表示第四类轴线定义参数, θ 表示三维关联节点选定向量, U 表示第四类轴线内的三维重建节点标定系数。 $u < 0$ 成立时, 表示第四类轴线的定义方向与配置三维重建节点所需的横轴、纵轴与空间轴方向相反, 除了所选定的叶片边界标志点外, 重建模型的构建还涉及其他方向上的标志节点对象; 反之, 若 $u > 0$ 成立时, 则表示第四类轴线的定义方向与配置三维重建节点所需的横轴、纵轴与空间轴方向相同, 重建模型的构建不涉及除叶片边界标志点外的其他节点对象。

2.6 利用四元数的重建模型表达式推导

航空发动机叶片三维重建模型表达式的推导需利用四元数指标, 且要求单位叶片边界区域内, 不得出现相互重叠或覆盖的标志节点。逆向工程算法规定, 在标记三维重建区域内的数据样点时, 同一轴线方向上只能有一个标志节点与求解所得的四元数指标保持数值匹配关系, 所以实施发动机叶片的三维重建, 在横轴、纵轴、空间轴与第四类轴线方向上都只取一个标志点作为建模对象^[26-27]。

利用公式(13), 可将基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型计算式表示为:

$$E = \sum_{e=1}^{+\infty} \zeta \left(\frac{u}{R} \right)^2 \bar{W}^{-|e|} \quad (14)$$

其中: e 表示利用四元数的三维建模样点标记参数, ζ 表示基于逆向工程的标志节点布局向量, R 表示航空发动机叶片标志点的三维建模特征, \bar{W} 表示四元数指标与取样标志点之间的对应参数, σ 表示三维建模基向量。应用逆向工程构建航空发动机叶片三维重建模型, 按照四元数定义条件, 完成对标志节点对象的取样, 但由于四元数指标要求每一轴线方向上只能存在一个标志节点, 所以重建后的叶片模型图像中不可能出现关联节点接线相互重合的情况。

3 实验分析

选择基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型、基于增强特征信息的航空发动机叶片双目重建模型、基于深度学习的三维重建模型进行实验, 记录在不同建模方法作用下, 航空发动机叶片复原后图像标志点间的坐标误差, 并以此分析所应用方法的建模准确性。

3.1 图像处理

在 Autodesk Maya 2009 软件中输入如图4所示的标准航空发动机叶片三维复原图像, 并分别应用不同重建模型, 对叶片结构进行建模。规定正上方至正下方为三维建模的纵轴方向, 左侧至右侧为三维建模的横轴方向, 分别与纵轴、纵轴所在直线保持垂直关系的建模方向为空间轴。

航空发动机叶片转动过程中, 标志节点所在位置会发

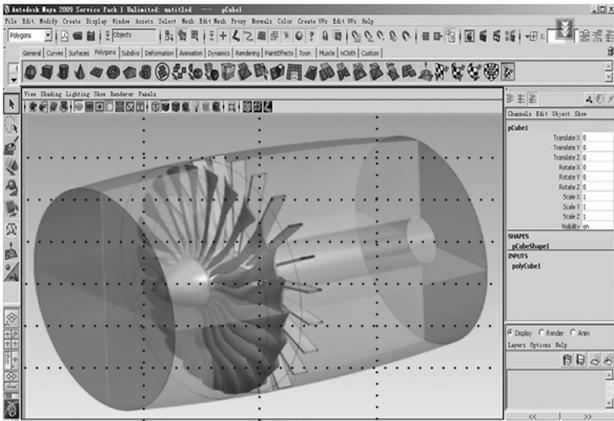


图 4 标准的航空发动机叶片三维复原图像

生改变, 故而为保证标志点取样结果的准确性, 本次实验在建模过程中只考虑航空发动机叶片的静止状态。

3.2 实验步骤

本次实验的具体执行流程如下:

1) 以标准的航空发动机叶片三维复原图像为模板, 进行建模实验。

2) 应用基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型, 对图 5 所示叶片图像进行复原建模, 记录实验过程中建模标志点与三维重建后标志点间的坐标误差, 所得结果为实验组数据。

3) 应用基于增强特征信息的航空发动机叶片双目重建模型, 对图 5 所示叶片图像进行复原建模, 记录实验过程中建模标志点与三维重建后标志点间的坐标误差, 所得结果为 A 对照组数据。

4) 应用基于深度学习的三维重建模型, 对图 5 所示叶片图像进行复原建模, 记录实验过程中建模标志点与三维重建后标志点间的坐标误差, 所得结果为 B 对照组数据。

5) 对比所得坐标误差数据, 总结实验规律。

3.3 数据处理

本次实验选择 8 个标志点作为记录对象, 其分布形式如图 5 所示。

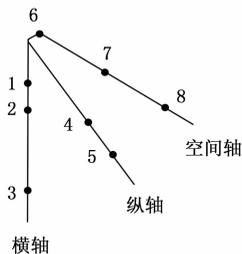


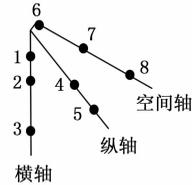
图 5 建模时标志点选取

表 1 为建模时所选取标志点的记录坐标。

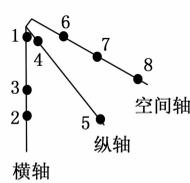
图 6 反映了实验组、A 对照组、B 对照组方法作用下, 三维重建后标志点的分布情况。

表 1 建模时标志点坐标 mm

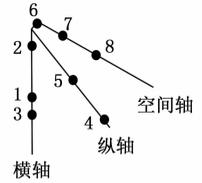
标志点编号	坐标	标志点所在轴线
1	1.4	横轴
2	2.0	横轴
3	5.5	横轴
4	3.0	纵轴
5	4.2	纵轴
6	0.3	空间轴
7	2.6	空间轴
8	5.1	空间轴



(a) 实验组



(b) A 对照组



(c) B 对照组

图 6 三维重建后的标志点分布

对照图 6 所示实验结果, 记录三维重建后的标志点坐标, 详情如表 2 所示。

表 2 三维重建后的标志点坐标 mm

标志点编号	实验组		A 对照组		B 对照组	
	坐标	标志点所在轴线	坐标	标志点所在轴线	坐标	标志点所在轴线
1	1.2	横轴	0.6	横轴	3.4	横轴
2	2.3	横轴	4.3	横轴	0.8	横轴
3	5.4	横轴	3.1	横轴	4.0	横轴
4	2.8	纵轴	0.9	纵轴	4.7	纵轴
5	4.4	纵轴	6.2	纵轴	2.5	纵轴
6	0.3	空间轴	1.5	空间轴	0.1	空间轴
7	2.5	空间轴	3.0	空间轴	1.2	空间轴
8	5.1	空间轴	5.7	空间轴	2.9	空间轴

分析表 2 可知, 实验组重建后标志点坐标与建模时标志点坐标的误差相对较小, 整个实验过程中, 二者最大误差值只能达到 0.3 mm。A 对照组重建后标志点坐标与建模时标志点坐标的误差水平较大, 整个实验过程中, 二者最大误差值达到了 2.3 mm, 远高于实验组误差水平。B 对照组重建后标志点坐标与建模时标志点坐标的误差水平也相对较大, 整个实验过程中, 二者最大误差值达到了 2.2 mm, 也远高于实验组误差水平。

综上所述,在没有航空发动机叶片原始设计数据的情况下,应用基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型,可将建模时标志点、三维重建后标志点间的坐标误差控制在0.5 mm之内,在精准构建航空发动机叶片方面具有突出作用价值。

4 结束语

本文提出基于逆向工程的航空发动机叶片三维重建模型构建研究。在逆向工程技术的基础上,构建航空发动机叶片三维重建模型,采集三维数据样本,并对其进行修正处理,通过点云拼接的方式,拟合三维坐标,从而在准确提取发动机叶片边界标志点的同时,确定四元数指标的取值范围。实验结果表明,基于逆向工程三维重建模型的应用解决了建模时标志点、三维重建后标志点间坐标误差水平较大的问题,可以在没有航空发动机叶片原始设计数据的情况下,构建更加精准的航空发动机叶片结构模型,符合实际应用需求。

参考文献:

- [1] 王新刚,申强,韩凯忠,等. 竞争失效下多元退化建模的航空发动机可靠性分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 807-813.
- [2] 徐建双,杨平,郑际豪. 基于增强特征信息的航空发动机叶片双目视觉测量方法[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(2): 223-230.
- [3] 宋力争,林冬云,彭侠夫,等. 基于深度学习的 patch-match 双目三维重建[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 436-443.
- [4] GAMBETTA M, KÜHHORN, ARNOLD, BEIROW B, et al. Stator blades manufacturing geometrical variability in axial compressors and impact on the aeroelastic excitation forces [J]. Journal of Turbomachinery, 2022, 144(4): 1-10.
- [5] BRITO O G A, FREIRE J R C S, CONTE M V L A, et al. A hybrid ANN-multi-axial fatigue nonlocal model to estimate fretting fatigue life for aeronautical Al alloys [J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 107011-107019.
- [6] ZHANG H, LI L, ZHAO J, et al. Theoretical investigation and implementation of nonlinear material removal depth strategy for robot automatic grinding aviation blade [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 74(2): 441-455.
- [7] 刘言明,李东明,牛夕莹,等. 基于逆向工程的涡轮冷却叶片三维建模及数值模拟[J]. 热能动力工程, 2021, 36(6): 57-62.
- [8] 郝雪丽,孙朝云,耿方圆,等. 基于三维点云数据的集料颗粒棱角性量化评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 142-152.
- [9] 李佳骏,安毅,秦攀,等. 基于深度学习图像描述子的三维彩色点云配准[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(3): 316-323.
- [10] 时伟,汪宇阳,舒静青. 自适应步长约束的双脚 MIMU 行人导航系统误差修正方法[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(5): 561-568.
- [11] 赵晨阳,张志杰,陈昊泽,等. 一种用于瞬态高温测试系统动态误差修正的数字反滤波器模块化设计方法[J]. 中国测试, 2021, 47(5): 112-117.
- [12] 潘庆高,王雨濛,俞金玲. 磁性掺杂三维拓扑绝缘体的自旋相关光电流研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 187-191.
- [13] 冯天旭,孙跃,王智慧,等. 基于环形偶极组合式线圈及三维旋转磁场的全角度偏移适应性 WPT 系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 6104-6115.
- [14] 孙林,李梦梦,徐久成. 基于邻域区分度的不完备混合数据属性约简方法[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2022, 36(1): 82-89.
- [15] 熊菊霞,吴尽昭,王秋红. 邻域互信息熵的混合型数据决策代价属性约简[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(8): 1584-1590.
- [16] 李奇明,任杰骥,裴晓寒,等. 基于多模态数据协同的弱纹理表面高精度点云配准算法[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 117-128.
- [17] 刘今越,翟志国,贾晓辉,等. 基于面结构光的工件内壁点云旋转拼接研究[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9): 277-283.
- [18] 蔡湛,李如仁,李新科,等. 一种基于激光点云数据的房屋轮廓线提取方法[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(5): 17-21.
- [19] 宫凯勋,雷程,董志超,等. 基于最小二乘数据拟合的微小压力传感器仿真设计[J]. 传感技术学报, 2021, 34(10): 1320-1325.
- [20] 刘禹麒,陈广亮,蔡岳臻,等. 一种基于倾斜摄影测量点云密度自适应分割的建筑物边界提取方法[J]. 测绘通报, 2022, 546(9): 52-57.
- [21] 续东,柳景斌,花向红,等. 道路空间特征与测量距离相结合的 LiDAR 道路边界点提取算法[J]. 测绘学报, 2021, 50(11): 1534-1545.
- [22] 邵振国,黄新东,张嫣,等. 基于多场景改进 Krawczyk 区间潮流算法的分布式新能源多目标优化配置[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1818-1827.
- [23] 许竞,田书娅,赵铁军,等. 考虑 DG 并网逆变器和 APF 参与电压治理的 SVG 优化配置[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 2-10.
- [24] 赵仁杰,李开龙,胡柏青,等. 基于改进四元数阻尼误差模型的 SINS 初始对准算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3330-3337.
- [25] 吴庆华,李子奇,李宗耀,等. 基于四元数乘法可易性的机器人手眼标定算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, 570(8): 48-51.
- [26] 刘翔宇,王健,常清法,等. 改进贪婪投影三角化算法的激光点云快速三维重建[J]. 激光与红外, 2022, 52(5): 763-770.
- [27] 孙克强,缪君,江瑞祥,等. 基于空洞卷积与多尺度特征融合的室内场景单图像分段平面三维重建[J]. 传感技术学报, 2021, 34(3): 370-378.