

基于逆向软件的涡轮叶片数字化建模

张 仟, 谢冬和

(湖南汽车工程职业大学, 湖南 株洲 412001)

摘要: 涡轮叶片是航空发动机的核心零件, 其质量好坏直接影响着发动机的整体性能和服役寿命。由于涡轮叶片经常在高速度、高温、高压环境下工作, 承受热、气动和机械负荷, 极易出现变形、磨损、龟裂和烧蚀等缺陷而影响发动机的正常运行。新制涡轮叶片周期长、成本高, 难以满足工程需求, 因此涡轮叶片快速修复工作至关重要。在无原始数据的情况下, 获取涡轮叶片 3D 数模是修复工作的初始, 为了给已损伤涡轮叶片提供精准的 3D 数模, 以提高修复效率, 基于以 Geomagic Wrap、Geomagic Design X、Geomagic Control 为主体的逆向建模软件, 探索了一套数字化建模流程及方案。根据 3D 建模需求, 对所采集的涡轮叶片点云数据进行交互处理、模型曲面重构、截面二维误差分析和整体三维误差分析。分析结果表明, 该数字化建模方法可行, 实现了对涡轮叶片的数字化快速建模, 为涡轮叶片快速修复提供了有效的技术手段, 具有良好的应用价值和推广意义。

关键词: 涡轮叶片; 数字化建模; 曲面重构; 误差分析

中图分类号: TH122.5 **文献标志码:** A

Digital Modeling of Turbine Blades Based on Reverse Engineering Software

ZHANG Qian, XIE Donghe

(Hunan Automotive Engineering Vocational University, Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: Turbine blades are core components of aero-engines, and their quality directly impacts the overall performance and service life of the engine. Due to their operation in high-speed, high-temperature, and high-pressure environments, turbine blades endure thermal, aerodynamic, and mechanical loads, which often lead to defects such as deformation, wear, cracking, and ablation, thereby affecting engine reliability. The lengthy production cycle and high cost of manufacturing new turbine blades make it challenging to meet engineering demands, highlighting the critical importance of rapid blade repair. In the absence of original design data, obtaining a 3D digital model is the first step in the repair process. To provide an accurate 3D model for damaged turbine blades and improve repair efficiency, this study proposes a digital modeling workflow and methodology based on reverse engineering software, including Geomagic Wrap, Geomagic Design X, and Geomagic Control. According to 3D modeling requirements, the collected point cloud data of turbine blades undergoes interactive processing, surface reconstruction, 2D cross-sectional error analysis, and 3D global error analysis. The results demonstrate the feasibility of this digital modeling approach, enabling rapid digitization of turbine blades. This method offers an effective technical solution for fast blade repair, with significant application value and potential for broader adoption.

Keywords: turbine blade; digital modeling; surface reconstruction; error analysis

1 引言

涡轮是航空发动机的典型零件, 主要作用是把高温、

高压燃气的热能和压力能转变成旋转的机械功, 从而带动压气机及其他附件工作^[1], 其结构如图 1 所示。

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2022JJ60062); 湖南汽车工程职业大学课题 (HQZYKY2023B1)



图1 涡轮叶片

涡轮在高速、高温、高压环境下工作,服役一定周期后涡轮叶片极易产生变形、磨损、龟裂或烧蚀等缺陷,因此在发动机服役期间,为有效提升发动机使用寿命,需要及时对涡轮叶片进行检修,其修复质量的优劣与叶片服役寿命密切相关。而我国民航客机多年来以进口为主,发动机零部件修复过程中难以获取原始图纸资料,是多年来航空发动机修复领域的工程痛点。传统的修复方法是标准样板法、自动绘图测量法、坐标测量法等方法进行获取实物数据^[2],然后通过人工操作逐步建模,最后完成二次加工的修补工作。传统方法需要工艺分离,工作效率较低,修复质量稳定性不高。通过逆向工程的思想,整合多款逆向造型软件优点,采用平台化数字化建模理念,快速建立起涡轮叶片的三维数字化模型,为解决以上问题提供了参考依据。

2 涡轮叶片数字化建模总体方案

在以 Geomagic Wrap、Geomagic Design X、UG 和 Geomagic Control 等软件为主体进行数字化建模,利用 GOM ATOSQ 型三维激光扫描仪来采集涡轮叶片表面离散的坐标数据信息^[3],然后利用 Geomagic Wrap 强大的数据计算能力,对所采集到的涡轮叶片数据进行散点排序、多视角数据拼合、坐标找正、去除杂点、数据精简和光顺处理等预处理^[4-5],并采用手动方法提取实物所具有的与建模、制造强相关的特征数据。在 Geomagic Wrap 中完成相关数据处理之后,导入 Geomagic Design X 中进行数字建模^[6],重构涡轮叶片 3D 数字模型。重构完成的初步模型在 UG 中进行创新性二次建模,完成其个别复杂曲面的造型。将二次建模后的 3D 模型在 Geomagic Control 中进行 3D 及 2D 误差分析^[7],根据分析结果再次在 Geomagic Design X 中对模型进行最终优化,最后完成模型数字化建模,其方案流程如图 2 所示。

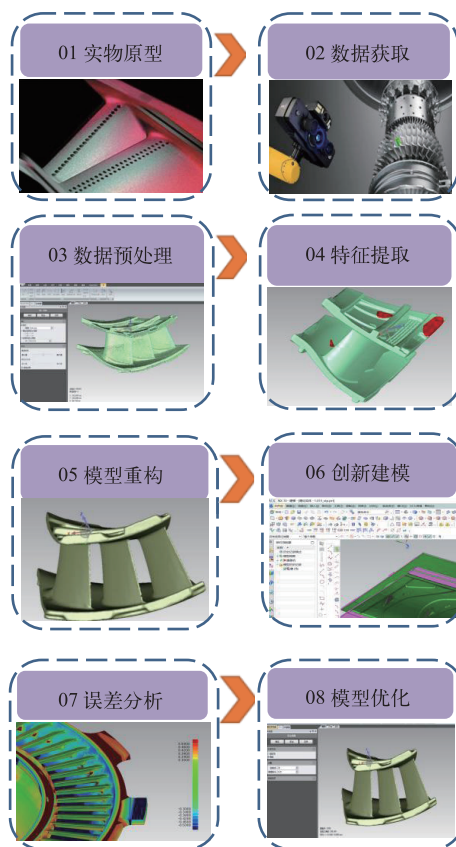


图2 涡轮叶片数字化建模方案流程

3 涡轮叶片表面数据预处理

一般通过三维扫描仪获取的数据因工件的结构特征分为有序和无序数据,对于特征明显且简易的工件,获取有序数据,复杂工件获取的为无序数据。由于涡轮叶片包含有复杂空间曲面,为保留其比较全面的数据信息,通常获取的是大量的无序点云数据。由于点云数据量大,测量时难免会出现散乱的噪声点,因此需要在海量点云数据分块之前,进行多视拼合、简化、去噪等预处理。数据预处理的品质直接影响到生成曲面的质量。为了获得较高的点云数据拼合精度,在 Geomagic Wrap 中,采用多点拼合技术对多视角点云数据进行拼合如图 3 所示,点云拼合偏差色谱图及点云数据图像如图 4 所示。多点注册拼合后,系统显示采样点为 4 202 656 个,数据达到百万级别,很庞大,后续建模速度会受到很大影响,同时点云数据中的杂点、噪声点和冗余点也会影响模型重构的质量,因此需要对拼合后数据中的噪声点进行平滑处理。由于中值滤波法的滤波器消除数据毛刺的效果较

好^[8],因此在涡轮叶片的噪声点平滑处理采用中值滤波法。经过平滑处理及数据采样之后,点云数据得到精简,精简后的点云数据为2 081 239个,偏差在-0.051 6~+0.015 0,偏差较小,说明点云数据拼合质量较高。然后对精简后的数据进行三角网格化处理,处理之后点云模型转化成了多边形网格模型,然后对多边形网格进行表面光顺处理,大大改善数据质量。

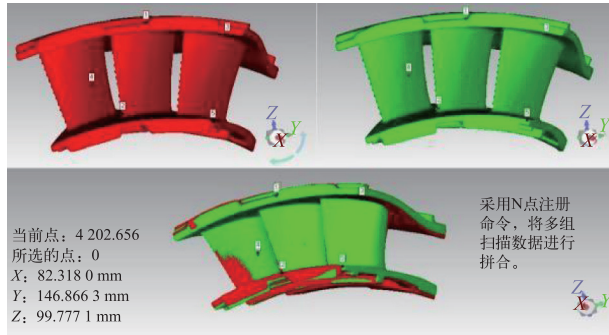


图3 点云数据多点拼合

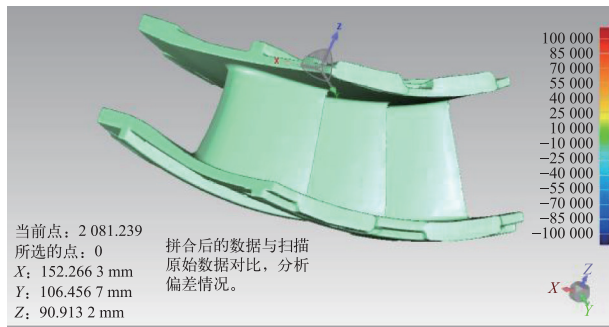


图4 拼合偏差色谱图

4 涡轮叶片三维模型数字化重构

4.1 曲面重构方法

如何把预处理后的大量无规则排列的涡轮叶片点云数据拟合成高精度的曲线和曲面,构造成具有复杂外形的涡轮叶片三维模型,是数字化重构的核心问题。依据自由曲线曲面理论,曲面重构有三种方法^[9]:①以Bezier曲线为基础构造曲面,②以B-Spline或NURBS曲线为基础的曲面,③以多面体方式来逼近曲面物体构造曲面。由于较平坦的数据点Bezier和B-Spline曲线比较适合,不平坦的数据点会产生局部扭结现象^[10]。相比较而言,NURBS曲线对于不平坦的数据点有较好的处理效果,以B-Spline或NURBS曲线为基础的曲面构造可以通过

控制点和权因子灵活改变形状,获得较好曲面。又因为NURBS曲线为基础的曲面重构方法是现在最常用的方法,适合Geomagic Wrap软件。因此选用该方法进行涡轮叶片三维模型数字化重构。

4.2 曲面数学模型

NURBS方法是一种既能描述自由型曲线曲面又能精确表示二次曲线与二次曲面的数学方法^[11]。NURBS曲线的数学方程为

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) w_i} = \sum R_{i,p}(u) P_i \quad (1)$$

$$R_{i,p}(u) = \frac{N_{i,p}(u) w_i}{\sum_{j=0}^n N_{j,p}(u) w_j} \quad (2)$$

式中, P_i 为控制顶点, N_i , w_i 为加权值, u 为参数值, $R_i, p^{(u)}$ 为有理基函数。函数中加入了加权值 w_i , w_i 的加入使得控制点在控制曲线/曲面的过程中,产生不同程度的影响,当 w_i 修改时,曲线会远离或逼近控制多边形,使得系统有更大的空间去控制曲线,以便进行曲面重构。

NURBS曲面是由其曲线自一维参数空间(u)延伸至二维参数空间(u, v)而得到,其数学方程为

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij}} \quad (3)$$

$$R_{i,p,j,q}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{ij}} \quad (4)$$

式中, P_{ij} 为曲面控制点, $R_{i,p,j,q}^{(u,v)}$ 为NURBS曲面的基函数。

在Geomagic Wrap中,基于以上数学方程原理,通过软件程序迭代计算,速度快,且比较稳定。该方法能用统一的数学方程便能精确描述曲线、曲面,通过调整控制点或权因子便可比较灵活完成曲线、曲面形状的修改。由于在Geomagic Wrap中NURBS方法的以上计算优势,同时由于Geomagic Wrap支持高级几何形状转换,在曲面数值拟合时,能快速将多边形转为NURBS曲面,有效解决曲面重构中复杂表面的扭结难题,使得曲面更加光顺,因此涡轮叶片曲面的重构采用了该数学模型。

4.3 曲面数值拟合

在 Geomagic Wrap 中经过封装预处理后的多边形数据进行曲面片化处理如图 5 所示, 并对曲面片网格进行处理, 直至网格中孔洞、重叠面等缺陷全部去掉如图 6 所示, 之后通过拟合曲面命令对曲面片进行拟合便可直接得到 NURBS 曲面模型如图 7 所示。在 Geomagic Design X 中进行基于特征的参数化建模以便于后续修改, 然后在 UG 中对模型进行二次优化建模如图 8 所示, 利用 UG 中强大的曲面建模功能, 对涡轮叶片的前后缘、叶背局部截面曲线进行编辑, 经过多次修改, 最终扫描出光滑的曲面。

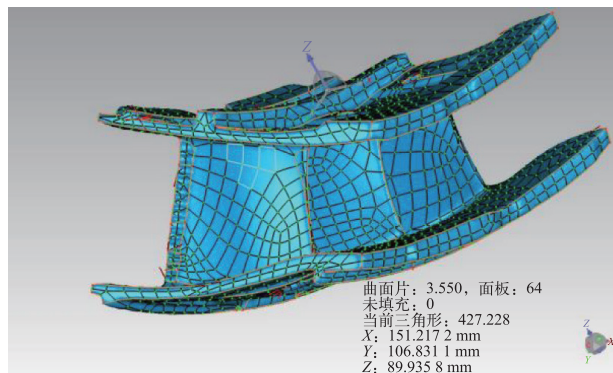


图 5 模型曲面片化

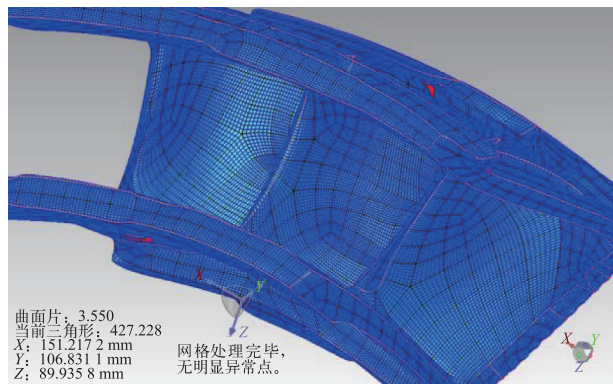


图 6 网格模型处理

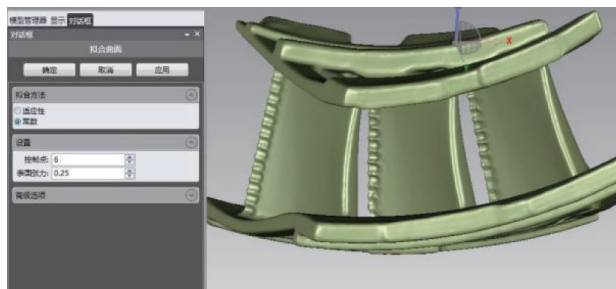


图 7 拟合 NURBS 曲面

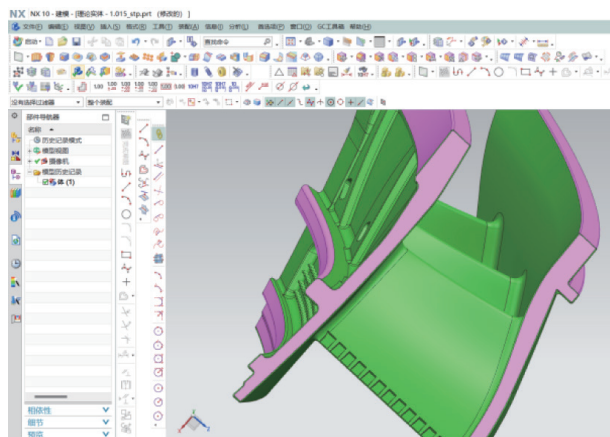


图 8 UG 二次优化建模

5 涡轮叶片三维数模检测分析

为了有效评判所重构模型的质量优劣, 利用 Geomagic Control 中的检测模块对模型的原始点云模型和曲面进行三维误差分析和截面二维分析, 以分析结果数据为指导, 若有必要再进行模型二次修改, 直至得出较为理想的三维模型。

5.1 三维数模误差分析

为了保证重构后的涡轮叶片三维模型符合精度要求, 需要对其进行误差分析。将点云数据导入到 Geomagic Control 中, 通过操作“3D 比较”功能, 并通过色谱图将偏差显示出来, 从而可以得出重构模型和原始点云模型之间存在的偏差数值。根据建模要求, 涡轮叶片整体精度要求在 $\pm 0.15\text{mm}$ 范围内。经过误差比较, 得到如图 9 所示的 3D 比较色谱图, 以及表 1、表 2 所示的偏差注释。最大正负偏差为 $+0.039\text{mm}$, -0.100mm , 正负平均偏差为 $+0.039\text{mm}$, -0.059mm , 标准偏差为 0.056mm , 满足精度要求, 说明经过重构的三维模型比较理想。如不满足要求, 则重新回到 UG 中进行优化修改, 直至满足条件要求。

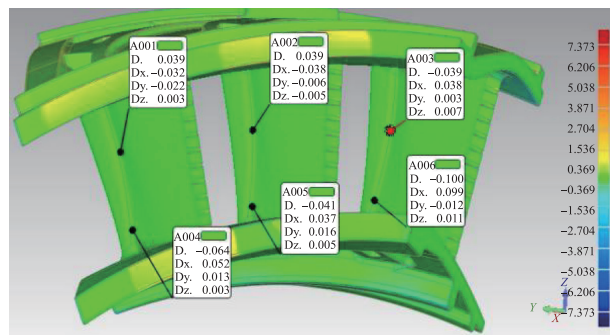


图 9 重构三维模型 3D 比较分析

表 1 偏差注释 (一)

名称	偏差	状态	上公差	下公差
A001	+0.039	状态	0.150	-0.150
A002	+0.039	通过	0.150	-0.150
A003	-0.039	通过	0.150	-0.150
A004	-0.054	通过	0.150	-0.150
A005	-0.041	通过	0.150	-0.150
A006	-0.100	通过	0.150	-0.150

5.2 截面二维误差分析

选择 XY 平面截取叶片腰部如图 10 所示, 对涡轮叶片重构模型和原始点云模型进行截面分析, 通过操作“2D 比较”功能, 并设置相应系统参数, 系统计算给出重构模

型和原始点云模型之间的偏差数值, 如图 11 所示。由分析结果可以得到重构模型和原始点云模型之间正负平均偏差分别为 +0.062mm、-0.049mm, 标准偏差为 0.113mm。截面误差在精度要求范围内, 符合建模要求。

表 2 偏差注释 (二)

名称	偏差半径	偏差 X	偏差 Y	偏差 Z
A001	1.000	-0.032	-0.022	0.003
A002	1.000	-0.038	-0.006	-0.005
A003	1.000	0.038	0.003	0.007
A004	1.000	0.052	0.013	0.003
A005	1.000	0.037	0.016	0.005
A006	1.000	0.099	-0.012	0.011

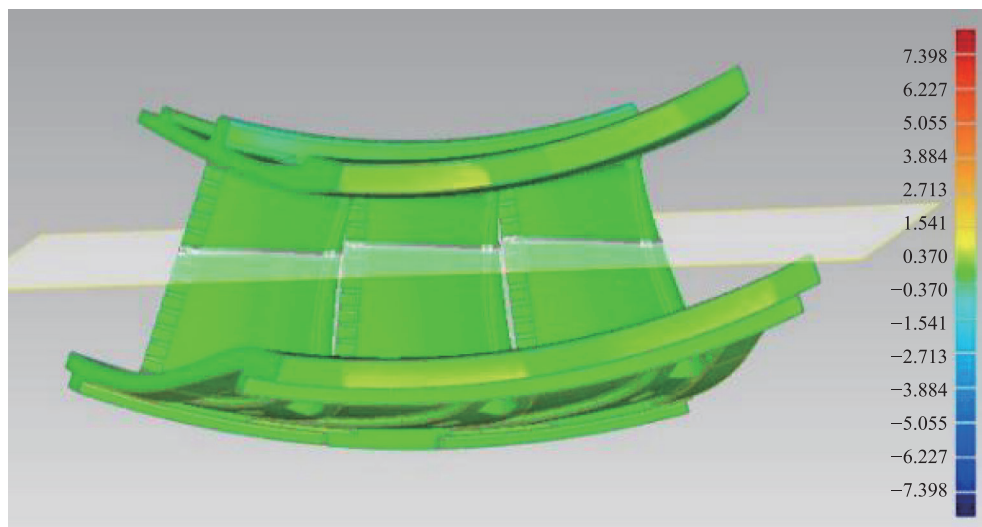


图 10 XY 平面截取叶片

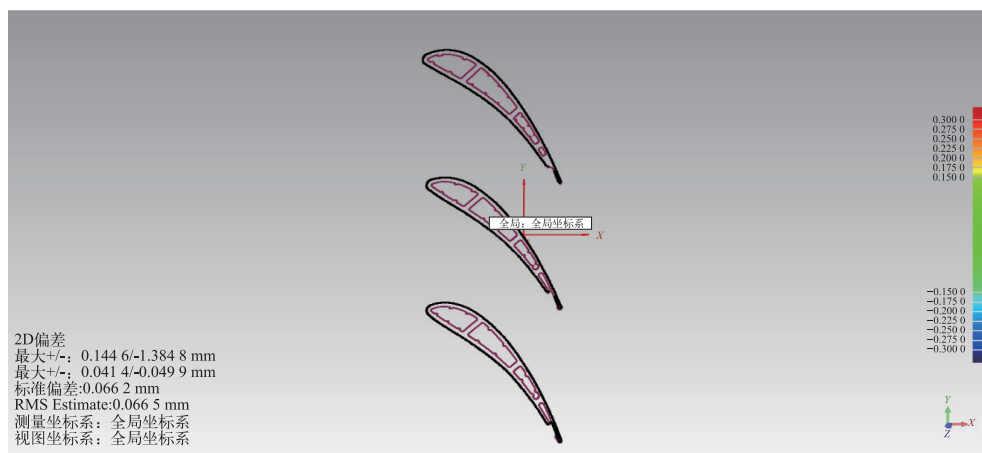


图 11 截面 2D 比较分析

6 结束语

1) 经过重构及优化完成后的该型涡轮叶片 3D 数模, 便可导入自动精密焊接数控设备中, 为磨损叶片表面修复提供有效的数据支撑。

2) 该型涡轮叶片结构复杂, 激光三维扫描仪从多个角度采集了多组点云数据, 在 Geomagic Wrap 中通过 N 点注册拼合技术, 选取叶片叶根、叶缘四个以上参考点能较好地完成数据拼合。

3) 涡轮叶片噪声点适合用中值滤波法去除, 基于中值滤波法在 Geomagic Wrap 中设置平滑处理及数据采样参数之后, 可有效精简点云数据, 提高后续计算效率。

4) Geomagic Wrap 点云数据封装处理之后初步拟合曲面, 在 Geomagic Design X 中创建 CAD 几何形状, 然后导入 UG 中进行局部复杂曲面优化建模, 综合各软件的优势, 很好地完成了曲面重构建模。

5) Geomagic Control 中将对重构好的模型 3D 及 2D 截面数据与采集的点云数据进行误差对比分析, 可以直观地检测模型的误差, 以检测结果为指导, 进行模型二次修订, 便于快速创建准确的 3D 模型。

6) 该模型重构方案具有较好的推广意义, 可以应用至汽车、轨道交通等领域, 为重要核心零件快速建模提供数据参考。IM

参考文献

- [1] 苏运来. 双辐板盘典型应力特征概率寿命模型及寿命可靠性自动优化建模方法 [D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [2] 于之靖, 宋四同, 王涛, 等. 基于逆向工程的航空

发动机叶片数字化建模 [J]. 机床与液压, 2011, 39 (17): 122-123.

- [3] 谢丹. 涡轮叶片表面缺陷视觉检测技术研究 [D]. 贵州: 贵州大学, 2023.
- [4] 陈雪芳, 孙春华. 逆向建模与快速成型 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [5] 韦迎, 欧洪金, 张云鹏, 等. 基于零件特征的逆向建模技术研究 [J]. 装备制造技术, 2023 (4): 91-93.
- [6] 赵明炯, 许鹏宇, 江萍. 基于 Geomagic studio 和 Design X 的端盖逆向建模 [J]. 内燃机与配件, 2021 (8): 28-29.
- [7] 罗城仔, 魏永超, 邓岚, 等. 基于 Geomagic Studio 的航空发动机叶片曲面建模 [J]. 机械工程与自动化, 2020, 220 (3): 13-14.
- [8] 刘勇, 刘存平, 郭晟. 叶片零件的逆向建模与偏差对比分析 [J]. 机械工程与自动化, 2019 (3): 52-53.
- [9] 文怀兴, 上燕燕, 李新博. 发动机叶片的反求建模和检测分析 [J]. 机械建模与制造, 2014 (7): 95-96.
- [10] 张美琴. 烟气轮机动叶片的逆向重构及特性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [11] 张绍国. 逆向工程在发动机气道造型中的应用研究 [D]. 郑州: 河南科技大学, 2011.

作者简介: 张仟 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机械建模制造及其自动化。

谢冬和 (1964—), 男, 本科, 教授, 高级工程师, 主要研究方向为机械建模制造及其自动化。

收稿日期: 2024-11-05