

基于逆向工程的航空发动机叶片再制造修复方法研究*

陈振林¹, 陈志同², 朱正清^{2,3}, 张云²

- (1. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043;
2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;
3. 北京航空航天大学能源与动力工程学院, 北京 100191)

[摘要] 航空发动机叶片长期服役在高温、高压和高速的环境下, 极易出现损伤, 而损伤叶片的修复技术一直是国内航空领域的研究重点和难点。以双联高导涡轮叶片为例, 研究了一种基于逆向工程的航空发动机叶片再制造修复方法。该方法不依赖原始设计模型, 而是基于同期服役非损伤叶片, 这样重构的目标修复曲面更接近损伤叶片的变形状态。首先, 用 3D 蓝光扫描仪扫描已损伤叶片及同期服役非损伤叶片以获取其点云模型; 其次, 对两叶片点云模型进行最佳拟合配准并分析识别出修复加工区域和边界; 然后, 基于非损伤区域配准后的误差情况, 用多项式方程拟合曲线预测损伤区域的误差数据, 再以非损伤叶片截面曲线为基础, 叠加预测误差值求取修复区域的目标截面线; 最后, 通过蒙皮方法构建出目标修复曲面, 编制数控加工程序, 完成修复加工。以非损伤叶片的逆向模型为参考, 对损伤叶片修复结果进行精度检测和误差分析。结果表明: 该叶片修复轮廓精度基本上在 0.03mm 以内, 满足修复公差要求, 且修复区域与非修复区域能实现光滑搭接过渡, 利用提出的方法对双联高导涡轮叶片有很好的修复效果。

关键词: 涡轮叶片; 修复; 多项式拟合; 模型重构; 逆向工程

Research on Remanufacturing and Repairing Method of Aero-Engine Blade Based on Reverse Engineering

CHEN Zhenlin¹, CHEN Zhitong², ZHU Zhengqing^{2,3}, ZHANG Yun²

- (1. AECC Shenyang Liming Aero-Engine Co., Ltd., Shenyang 110043, China;
2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Aero-engine turbine blades are vulnerable to be damaged due to the serving environment of high temperature, high pressure and high speed. At present, the repair technologies of damaged blades have been a hotspot in the aircraft maintenance. In this paper, a method of remanufacturing and repairing aero-engine blades based on reverse engineering is studied by taking a turbine blade as an example. The target repairing surface reconstructed in this method based on non-damaged blade serving at the same time instead of the original design model will more accord with deformation state of damaged blades. Firstly, the damaged blade and non-damaged blade serving at the same time are scanned by the 3D blue-light scanner and the point cloud model of two blades can be acquired. Secondly, the repairing area and boundary can be identified after best fitting. And then, the errors between these two blades in repaired area will be predicted according to polynomial curves fitted by these errors in non-repaired area after registration. Furtherly, the section curves of target repairing surface can be obtained based on the predicted errors and section curves of non-damaged blade. Finally, the target repairing surface can be constructed using the skin method. And the constructed surface is used for the generation of NC tool paths which will achieve repair processing. The repaired results of the damaged blade are analyzed according to the reverse model of non-damaged blade. And the results show that the profile errors are basically within 0.03mm which meet the tolerance requirements of repairing blades and there are smooth transition between repaired and non-repaired areas. The method presented in this paper has a good effect on repairing aero-engine blades.

Keywords: Turbine blade; Repair; Polynomial fitting; Model reconstruction; Reverse engineering

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.080

* 基金项目: 国家科技重大专项 (2018ZX04004001)。

涡轮叶片是航空发动机的核心部件之一,承担着将高温高压空气膨胀热能转换为发动机机械能的工作。服役期间长期工作在高温、高压等恶劣环境中,对材料以及耐高温技术有着极高的要求。通常采用性能优异的镍基和钴基高温合金材料,造价非常昂贵。但是涡轮叶片在服役完一定的时间后会产生不同程度的损伤,如烧蚀、扭曲、磨损、断裂等,从而不再满足发动机使用要求。因此为了降低发动机制造成本,对其损伤叶片的再制造修复有着极其重大的意义^[1]。据统计数据可知,民航发动机叶片在运转 3500h 后进行修复,修理费仅为更换新叶片成本的 20%,并且修理后叶片依然可以工作 3000h 以上。从中可知,发动机叶片修复能显著降低叶片使用成本,带来可观的经济效益^[2]。

欧美发达国家早已认识到航空发动机再制造修复技术的重要意义和巨大技术经济效益。20 世纪 70 年代末,美、英等国就在军用和民用喷气发动机叶片部件修复技术的研究中投入巨额资金,取得了一批新的修复技术^[3]。国外航空发动机制造和维修企业如 MTU 和 Chromalloy 等也已经掌握叶片部件修复相关技术^[4-5],大都采用激光熔覆结合自适应磨削加工,叶片修复后有好的精度和性能。而国内发动机修理厂和航空公司由于缺乏叶片修复成熟的关键技术,大部分损伤叶片只能直接更换或者将损伤叶片拿到国外去修复,这样将大大地增加我国航空发动机制造产业的生产和运营成本。

另外,在叶片修复理论学术方面,国内外学者也做了大量的研究。Huang 等^[6]研究开发了一套用于航空发动机叶片自动修复的机器人磨削和抛光系统,但是其修复过程中的目标模型仍然是之前的设计模型,没有考虑到叶片长期工作在高温、高压环境下所导致形状和尺寸的变化。Gao 等^[7-8]基于商业逆向软件 Polyworks 研究了一种弯扭叶片叶尖模型重构方法,并建立一个基于 3D 扫描测量的叶片修复集成系统。Yilmaz 等^[9]针对涡轮叶片焊接修复后叶尖顶部模型重建进行了研究,提出了一种基于扫描方式重建叶片顶部模型的方法,该方法主要以焊接区域下方两条叶身截面线和前后缘端点构成的引导线为数据源重建叶片叶尖模型。该方法只适用于重建高度小和空间扭曲小的叶片,不适用于大部分叶片修复。Piya 等^[10]研究提出了一种半自动的目标修复模型的重建方式,该方法可适用于叶片中部损伤的情况,操作起来相对比较复杂。丁华鹏^[11]基于灰色系统理论,预测了损伤区域叶型中弧线和厚度,进而重构完整的叶片模型,然后通过布尔求差得到修复缺损模型,获得了一定的修复效果。Hou 等^[12]提出了一种叶片叶身自适应的修复方法,包括焊接表面建模以及目标

修复曲面的优化建模,并最后用仿真证明该修复方法的有效性。Zhang 等^[13]提出了一种发动机叶片自动化损伤区域检测和重构的算法,该方法是在识别损伤区域后,直接通过材料熔覆成形,与传统的修复工艺方法相比,有一定的创新性,但针对复杂空心涡轮叶片有一定的难度。Penaranda 等^[14]也研究了一种基于激光熔覆修复的叶片叶尖修复的方法,与机械加工方法相比,该方法的重点研究是在熔覆激光能量方面。Kaieler 等^[15-16]在单晶涡轮叶片修复方面做了相关研究,探索性地提出了一种用于涡轮叶片的单晶材料激光熔覆和重熔的方法。Yu 等^[17]提出了一种对损伤区域邻近参考线变形来重构目标修复曲面的修复方法,该方法有效地降低了修复模型重构的不确定度,在叶身修复方面一定的适用性。

通过上述文献分析可以得知,国内外学者在航空发动机叶片再制造修复方面做了不少的研究开发工作,但是目前仍然有些关键难题没有成熟的解决方法。如基于损伤叶片模型建立叶片修复后的目标模型,一直是一个具有普遍性关键技术的难题,虽然上述文献中提了很多不同的目标修复模型的重建方法,但都有各自应用局限性,且在重建目标修复曲面时大部分都需要利用理论设计模型。本文在上述修复研究的基础上,以双联高导涡轮叶片为例,研究了一种基于逆向工程的航空发动机叶片再制造修复的方法,此方法属于叶片修复工艺中的机械加工部分,适用于损伤后在公差范围内的叶身局部损伤形式,目标修复曲面是基于损伤叶片和同期服役非损伤叶片而建立的,并不需要使用设计模型。同期服役非损伤叶片主要依据是在损伤叶片的相邻位置选取,同期服役相邻叶片在很大概率上与待修复的损伤叶片变形方式和大小是相同的,以同期服役非损伤叶片为数据指导重构的目标修复曲面更符合损伤叶片的变形状态和趋势。

1 修复方法描述

本文提出的双联高导涡轮叶片修复方法主要包含 3 个部分:模型获取、修复区域识别以及目标修复曲面重构,其具体流程如图 1 所示。

点云模型获取:在重构目标修复曲面过程中需要的数据源通过逆向工程创建。在本文研究中,损伤叶片的模型和同期服役非损伤叶片的模型都通过课题组拥有的 Okio-5m 立式蓝光扫描仪获取创建,扫描仪实物如图 2 所示,技术参数如表 1 所示。本文逆向工程使用软件为常用商用软件 Polyworks^[18],光学扫描输出格式的 STL 数据正是 Polyworks 数据处理的常用格式。

修复区域识别:逆向工程创建的非损伤叶片数字模型和损伤叶片数字模型,在最佳拟合配准后,通过比较

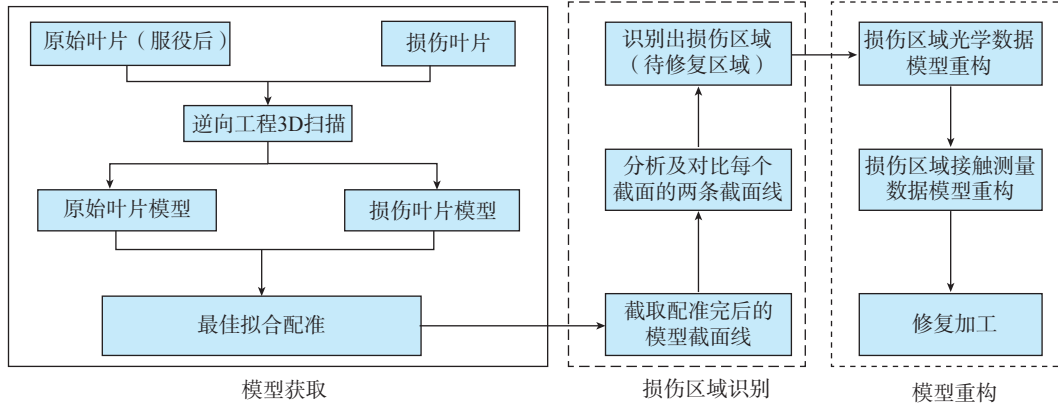


图1 修复流程图

Fig.1 Flowchart of repairing of engine blade

分析此两个模型之间的误差以确定修复边界,识别出修复区域。

模型重构: 此部分为整个修复过程的核心,利用配准后两数模非损伤区域的误差,采用多项式方程拟合,推导出损伤区域的状态,从而建立目标修复曲面的截面曲线簇,最终蒙皮生成叶片待修部分的目标修复曲面。

2 点云模型获取

通常情况下,点云模型的获取有两种方法:接触式测量和非接触式测量。接触式测量方式最常用的是三坐标测量机,虽然其测量精度高,但测量叶片这种复杂曲面的时候效率很低,尤其是在某些不规则区域,因此三坐标接触式测量并不适合叶片的点云模型获取。非接触式测量方式是采用激光或蓝光扫描,该方法可快速获取被测物体的完整点云数据,不受被测物体的形状和结构限制,因此这种扫描测量的方式很适合叶片的点云模型获取,考虑到精度和其他各种因素的影响,本文采用立式蓝光扫描仪扫描获取叶片的点云模型数据。

损伤叶片实物和同期服役非损伤叶片实物如图3所示。其中,图3(a)为损伤叶片即待修复叶片,只加工去除多余的材料;图3(b)为损伤叶片同期服役后非损伤叶片。

利用蓝光扫描仪对图3两个叶片进行扫描采集点云数据,获取的叶片光学模型如图4所示。该模型是在逆向软件 Polyworks 中显示的三角面片格式。

在扫描测量过程中,被测叶片一般是手工随机放置在被测区域,其初始位置和方向是不确定的,扫描完成的叶片点云模型都会产生空间姿态偏离。从图4可以看到两个叶片的空间姿关系,因此对两个叶片点云模型的配准对齐是不可缺少的一步。目前,有关点云及曲面配准的算法已经有了较多的研究^[19-20],其中有许多算

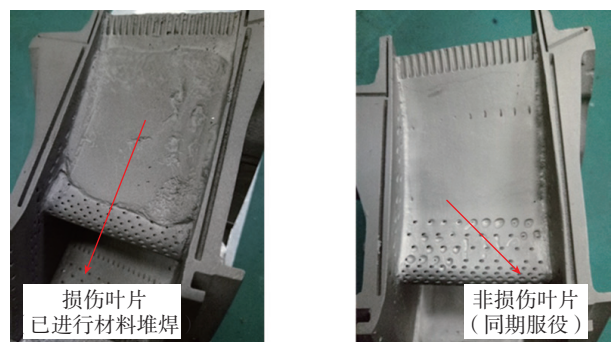


图2 3D蓝光扫描仪

Fig.2 3D blue ray scanner

表1 Okio-5m立式蓝光扫描仪参数
Table 1 Okio-5m blue light scanner parameters

参数	值
分辨率 /PX	5000000
测量精度 /mm	0.005~0.01
测量范围 /mm	200 × 150
扫描速度 /s	<1.5
扫描方式	非接触拍照式



(a) 损伤叶片

(b) 非损伤叶片

图3 损伤叶片和同期服役非损伤叶片

Fig.3 Damaged blade and intact blade

法也都已经在商用软件中应用了,且配准算法也相当成熟。本文所用配准方式是采用 Polyworks 里面的配准模块,经过对非损伤区域特征结构的多次配准迭代,最终配准效果如图 5 所示。

3 待修复区域识别

在损伤叶片光学模型和非损伤叶片光学模型最佳拟合配准完之后,为了方便在 CAM 软件中分析并识别出修复区域,本文采用的方法是利用间隔为 5mm 的等距截面去截取配准后的两个模型,截取完后每个截面上都会有两条点云截面曲线,如图 6 所示(其中红色为损伤叶片点云截面曲线,蓝色为非损伤叶片点云截面曲线)。

从图 6 可以明显识别出损伤后的激光熔覆区域和未损伤区域。在一定的配准误差范围内,损伤待修复区域的两条截面线点云差别和非损伤区域的两条截面线点云之间的差别有明显的区别,因此可以通过误差特征快速识别出待修复区域。另外,由于损伤区域是需要机械加工去除材料的区域,因此该区域的数据只作为识别修复区域用,在修复区域确定完之后,此数据可以删除,重构目标修复曲面不需要修复区域的数据,只需要分析利用非损伤区域的数据。

4 目标修复曲面重构

在待修复区域识别完成后,接下来就是重构目标修

复曲面,目标修复曲面的重构效果直接影响后续的多余材料修复加工。

4.1 非损伤叶片截面线拟合

因为目标修复曲面是基于非伤叶片模型而构建的,所以在重构目标修复曲面前必须先构建出非损伤叶片模型。通过前面步骤已经获得了非损伤叶片截面点云,因此,接下来的问题是对截面点云进行拟合以构建截面曲线。在叶片造型设计中,NURBS 样条是最常用的造型曲线,一条 k 次 NURBS 曲线可以表示为一段有理多项式矢函数:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}$$

其中, k 为 NURBS 曲线的阶次; n 为控制顶点的数量; ω_i 为控制顶点的权因子($i=0,1,\dots,n$); d_i 为控制顶点的数量; u 为曲线参数变量; $N_{i,k}(u)$ 为 B 样条基函数,其中 $u=[u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 。

因此,在对非损伤叶片截面点云进行曲线拟合时,基于叶片模型重构经验,选取 3 次 NURBS 样条对 7 条截面线进行拟合,其拟合完的曲线和曲率情况如图 7 所示,可以看出,拟合完的曲线曲率连续,没有拐点,说明 3 次 NURBS 样条拟合效果很好。

4.2 目标修复曲面重构

对于损伤叶片截面点云,将其待修复区域的点云数据删除后,两端非损伤区域的测量点云也通过 3 次

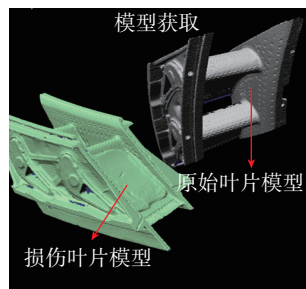


图4 光学扫描的STL模型
Fig.4 STL model of optical scanning

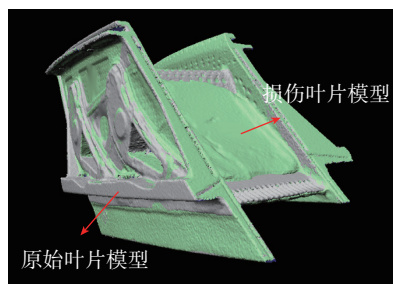


图5 配准后的空间状态
Fig.5 Registration state in Polyworks

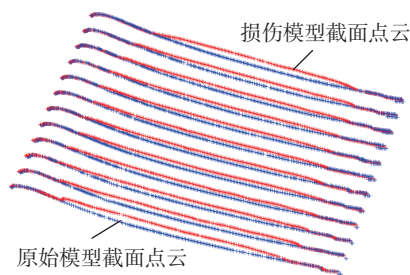


图6 点云截面曲线图
Fig.6 Sketch map of cross section curve

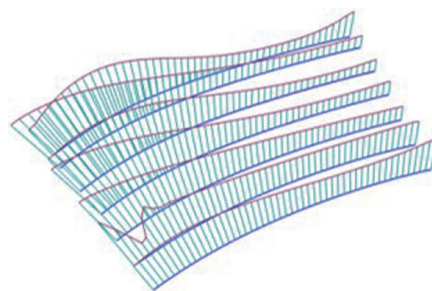


图7 非损伤叶片重构截面线
Fig.7 Reconstructed section lines of non-damaged blade

NURBS 样条拟合成样条曲线,然后对于每个截面的非损伤区域,分别计算损伤叶片截面线与非损伤叶片截面线误差。计算方法是将拟合的损伤叶片曲线离散成点云,分别单个计算其到非损伤叶片拟合曲线的距离,并且区分正负。考虑曲线长短以及拟合精度,每个截面离散的误差点数为 20 个点,两边各 10 个,其分析示意图如图 8 所示。

以误差 error 为纵坐标,误差对应点在非损伤截面线上的参数值 w 为横坐标,利用多项式方程对此 20 个误差值进行拟合,7 个截面分别得到如下 7 个拟合方程:

$$\text{Eq 1: } y(w) = 0.03445 + 0.10362 \times w + 0.059075 \times w^2 \quad (1)$$

$$\text{Eq 2: } y(w) = 0.108998 - 1.50237 \times w + 1.61856 \times w^2 \quad (2)$$

$$\text{Eq 3: } y(w) = 0.514926 - 4.92224 \times w + 4.67694 \times w^2 \quad (3)$$

$$\text{Eq 4: } y(w) = 0.626497 - 1.89828 \times w - 1.39065 \times w^2 \quad (4)$$

$$\text{Eq 5: } y(w) = 0.152235 + 0.20019 \times w + 0.09858 \times w^2 \quad (5)$$

$$\text{Eq 6: } y(w) = 0.30346 + 0.26796 \times w - 0.233239 \times w^2 \quad (6)$$

$$\text{Eq 7: } y(w) = 0.20146 + 0.11786 \times w - 0.198413 \times w^2 \quad (7)$$

式中, w 为参数值, $y(w)$ 为误差值。

在得到误差多项式方程后,以非损伤截面线参数 w 为索引,将误差值 $y(w)$ 叠加到非损伤截面线上,以求得目标修复截面线,如图 9 所示(其中,蓝色线为非损伤模型截面线,紫红色线为求解生成的目标修复截面线)。目标修复截面线生成后,以蒙皮生成曲面的方法构建出目标修复曲面,如图 10 所示。

5 修复结果分析

基于重构创建的修复目标曲面,在 CAM 软件 UG 中编制修复数控加工程序,完成修复加工,由于堆焊材料的难加工性和修复搭接精度的需求,本部分修复加工采用超硬磨料的磨抛加工方式。先采用超硬砂轮磨削去除堆焊余量,然后再利用弹性抛光轮^[21]抛光以保证损伤区域与非损伤区域的光滑搭接,其实际加工过程如图 11 所示。

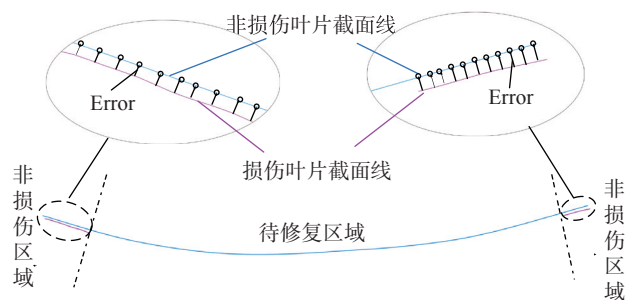


图8 误差分析示意图

Fig.8 Schematic diagram of error analysis

其最终修复效果实物图如图 12 所示。以非损伤叶片的重构数字模型为理论检测模型,截取损伤叶片修复完后的叶片 3 个截面进行测量。测量结果的误差分析情况如图 13 所示,可以看出,修复完后的叶片型面误差

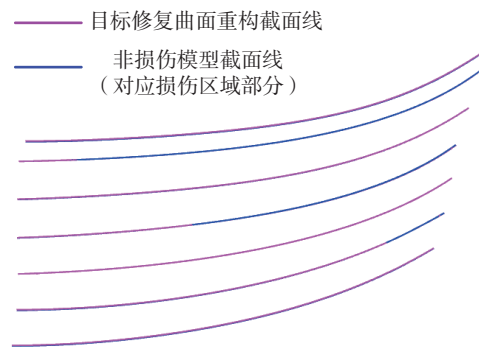


图9 重构截面线

Fig.9 Reconstructed section lines

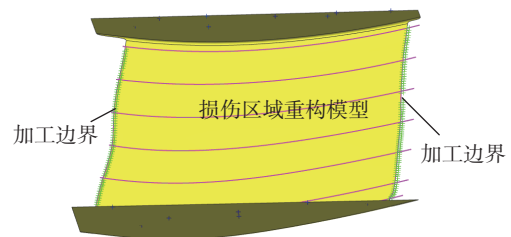


图10 目标修复曲面

Fig.10 Target repair surface



图11 磨抛加工过程

Fig.11 Grinding and polishing process

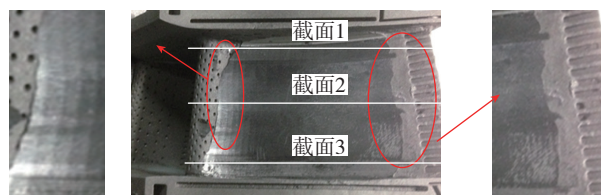
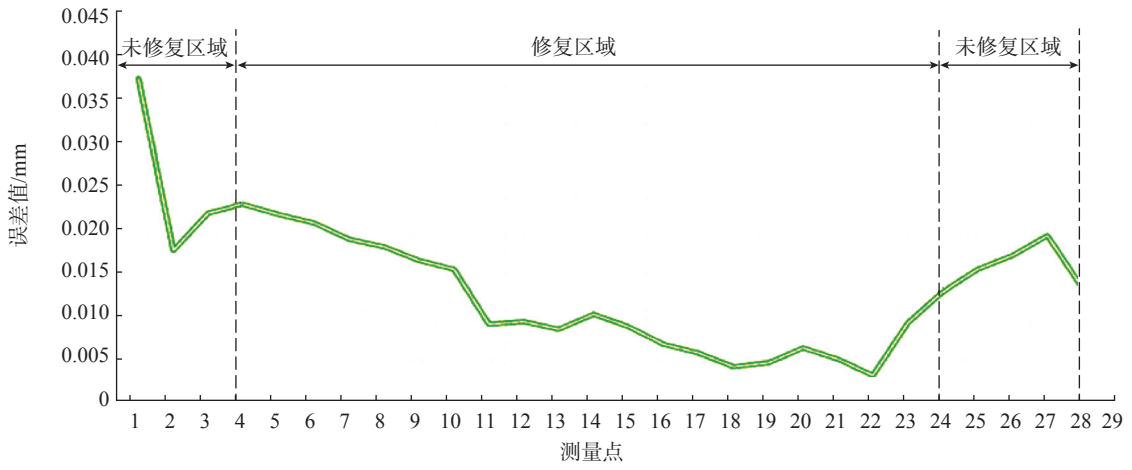
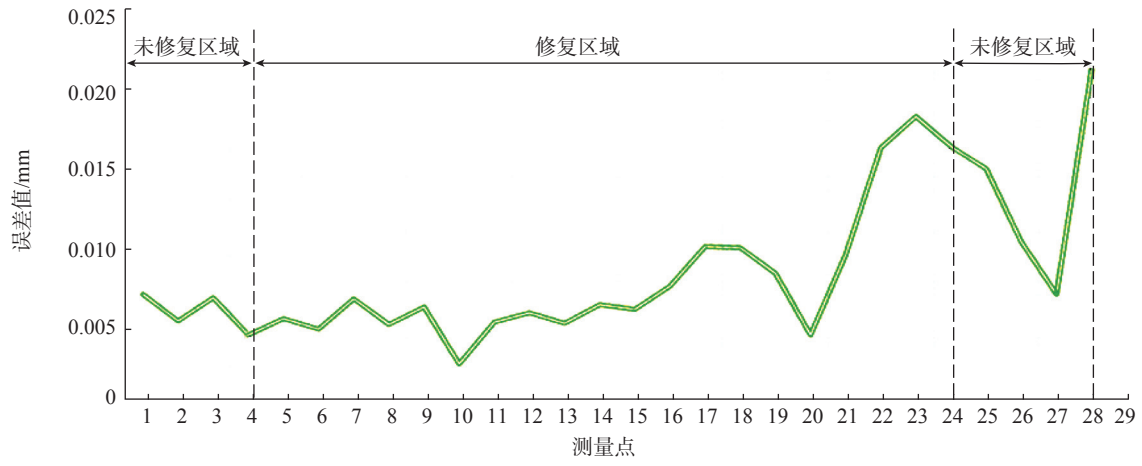


图12 修复后叶片的实物图

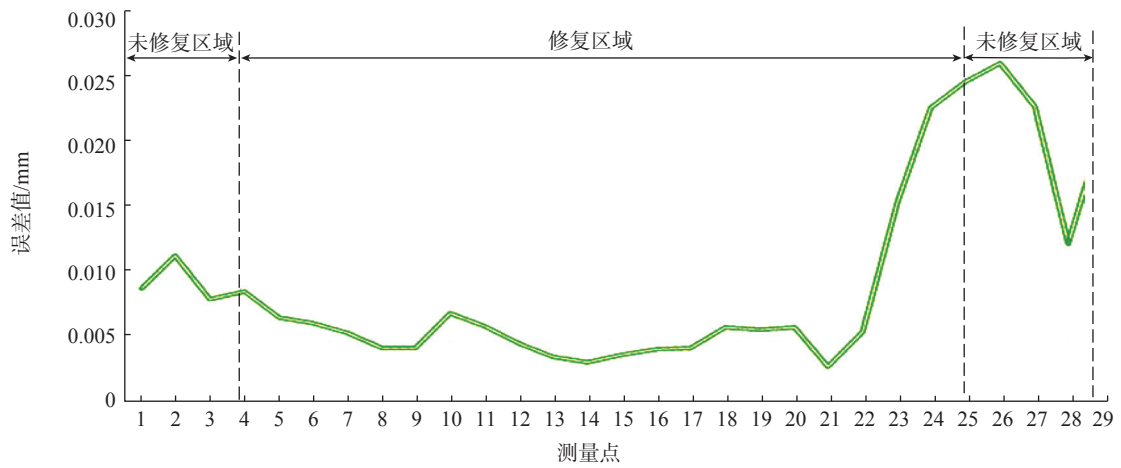
Fig.12 Blade after repaired



(a) 截面 1



(b) 截面 2



(c) 截面 3

图13 截面分析误差图
Fig.13 Error analysis diagram of 3 sections

大部分在 0.03mm 以内,符合修复叶片的公差要求,其损伤区域和非损伤区域也实现了光滑过渡。因此,也证明了本文的方法对双联高导涡轮叶片修复的有效性。

另外,通过对修复完叶片的误差进行分析,认为本文的修复方法产生误差的原因主要有两个:(1)在点云模型获取中,扫描仪的扫描过程必然会产生精度损失,带来一定的积累误差;(2)在本文的方法实现过程中,误差多项式拟合和截面线拟合重构都会带来一定的误差。

6 结论

(1)本文以航空发动机某型号双联高导涡轮叶片为研究对象,建立一套点云数据获取—配准—修复区域重构—加工修复的解决方案。

(2)考虑到叶片长期工作在高温、高压环境下所导致形状和尺寸的变化,其设计模型已不能作为叶片修复后的目标模型。本文提出了一种基于损伤叶片和同期服役非损伤叶片建立损伤区域目标修复模型的方法,此方法能独立于叶片设计模型,让目标修复模型更符合叶片服役变形状态。

(3)基于课题组的试验平台,对双联高导涡轮损伤叶片进行再制造修复,并对修复后叶片的精度进行检测和误差分析。结果表明,利用本文提出的方法,修复叶片的加工区域与非加工区域的搭接能实现光滑过渡,且整体修复型面满足最终公差要求,证明本文提出方法的可行。

参考文献

[1] WANG T, DINGH P, TANG J, et al. Recent repair technology for aero-engine blades[J]. *Recent Patents on Engineering*, 2015, 9(2): 132-141.

[2] 刘磊. 航空发动机涡轮叶片在机测量及自适应修复加工技术研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.

LIU Lei. Research on on-machine inspection and adaptive repairing technology for aero-engine turbine blade[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.

[3] 张胜, 侯金保, 李晓红. 大推力航空发动机热端部件损伤修复技术综述[C]//大型飞机关键技术高层论坛论文集, 北京: 中国航空学会, 2007.

ZHANG Sheng, HOU Jinbao, LI Xiaohong. A review on repairs of hot-end parts in high thrust aero-engine[C]//Proceedings of key techniques of large airplanes and seminar of Chinese Aviation Academy. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2007.

[4] 王浩, 王立文, 王涛, 等. 航空发动机损伤叶片再制造修复方法与实现[J]. *航空学报*, 2016, 37(3): 1036-1048.

WANG Hao, WANG Liwen, WANG Tao, et al. Method and

implementation of remanufacture and repair of aircraft engine damaged blades[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(3): 1036-1048.

[5] ZHANG Y, CHEN Z T, NING T. Reverse modeling strategy of aero-engine blade based on design intent[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015 81: 1781-1796.

[6] HUANG H, ZHOU L, CHEN X Q, et al. SMART robotic system for 3d profile turbine vane airfoil repair[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2003, 21(4): 275-283.

[7] GAO J, FOLKES J, YILMAZ O, et al. Investigation of a 3D non-contact measurement based blade repair integration system[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2005, 77(1): 34-41.

[8] GAO J, CHEN X, YILMAZ O, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 36(11-12): 1170-1179.

[9] YILMAZ O, GINDY N, GAO J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2010, 26(2): 190-201.

[10] PIYA C, WILSON J M, MURUGAPPAN S, et al. Virtual repair: Geometric reconstruction for remanufacturing gas turbine blades[C]//Proceedings of ASME conference on ASME 2011 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference. 2012: 895-904.

[11] 丁华鹏. 航空发动机受损叶片逆向重构与激光熔覆技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

DING Huapeng. Research on model reconstruction of aero-engine damaged blades and laser cladding[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.

[12] HOU F R, WAN N, CHANG Z Y, et al. An adaptive repair surface modeling approach for worn blades[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(1-4): 523-532.

[13] ZHANG X C, LI W, LIOU F. Damage detection and reconstruction algorithm in repairing compressor blade by direct metal deposition[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(5-8): 2393-2404.

[14] PENARANDA X, MORALEJO S, LAMIKIZ A, et al. An adaptive laser cladding methodology for blade tip repair[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 92(9-12): 4337-4343.

[15] KAIERLE S, OVERMEYER L, ALFRED I, et al. Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2017, 19: 196-199.

[16] ROTTWINKEL B, NÖLKE C, KAIERLE S, et al. Crack repair of single crystal turbine blades using laser cladding technology[J]. *Procedia CIRP*, 2014, 22: 263-267.

[17] YU H Y, LYU X G. Repair of defective 3D blade model based on deformation of adjacent non-defective cross-sectional curve[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018,

(下转第93页)

抛光变形造成的面形误差大幅下降,通过调整工艺参数可以有效改变面形精度。该试验说明拓扑优化后的夹具能够有效改善系统动态特性,大幅度降低了抛光变形对面形精度的影响。

4 结论

(1) 模态分析结果表明,在高速抛光过程中,由夹具、光学元件、机床运动机构组成的动力学系统的动态特性会直接影响大径厚比深矢高光学元件的面形精度,而且面形误差特征与动力学系统低阶频率和重频(密频)的振型特征相似。

(2) 通过对夹具结果进行拓扑优化,能够有效改善系统动态特性,提高固有频率,特别是避免低阶重频(密频)现象,降低加工变形对面形精度的影响。

参考文献

- [1] 陈冰, 杨宝通, 牛智场, 等. 面向航空发动机薄壁零件加工的自适应夹具设计现状与进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(7): 14-24.
- CHEN Bing, YANG Baotong, NIU Zhiyang, et al. Adaptive fixture designing of thin-walled aero-engine workpiece: a survey of the state of art[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(7): 14-24.
- [2] 于金, 高彦梁. 薄壁件多点柔性加工变形的分析和控制研究[J]. 航空制造技术, 2016, 59(14): 52-55.
- YU Jin, GAO Yanliang. Research on analysis and improvement of thin-walled components multi-point flexible machining distortion[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(14): 52-55.
- [3] 王家颖. 大型薄壁零件防变形加工工艺[J]. 航空制造技术, 2011, 54(23): 79-82.
- WANG Jiaying. Anti-deformation process of machining large-size thin walled parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011, 54(23): 79-82.
- [4] 陈华男, 李显凌, 孙振. 光学加工中真空夹具设计及分析[J]. 真空, 2013, 50(4): 78-82.
- CHEN Huanan, LI Xianling, SUN Zhen. Design and analysis of vacuum fixture in optical processing[J]. Vacuum, 2013, 50(4): 78-82.
- [5] 王晨升. 基于弹性变形原理的非球面工件加工真空吸附夹具研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- WANG Chensheng. Study on vac-sorb jig for aspheric workpiece machining based on the elastic deformation principle[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [6] 耿健. 气压砂轮抛光工具的有限元建模及动力学分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.
- GENG Jian. The finite element modeling and dynamics anlysis of penumatic wheel finishing tools[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [7] CHIU J T, LIN Y Y. Modal analysis of multi-layer structure for chemical mechanical polishing process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(1-2): 83-91.
- [8] 赵珉乾. 高精度双面研抛机动态特性研究及工艺参数优化[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- ZHAO Minqian. Research of dynamic characteristics and technologic parameters optimization of high precision double-sided polishing machine[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [9] ZHOU L, WEI Q C, LI J, et al. Research on precision grinding technology of large scale and ultra thin optics[C]//Young Scientists Forum 2017. Shanghai, 2017.
- [10] 王凤. 拓扑优化方法在航空用钣金零件设计中的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(1): 87-89, 93.
- WANG Feng. Application of topology optimization technique to the design of aviation sheet metal parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(1): 87-89, 93.
- 通讯作者: 张昊, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为光学制造技术, E-mail: zhanghao_opti@qq.com.
- (责编 古京)
-
- (上接第86页)
- 95(5-8): 3045-3055.
- [18] POLYWORKS I M. Inspect comparison and verification software, reference guide version 8.0 for windows[M]. Quebec: InnovMetric Software Inc, 2003.
- [19] 戴静兰, 陈志杨, 叶修梓. ICP算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007(3): 517-521.
- DAI Jinglan, CHEN Zhiyang, YE Xiuzi. The application of ICP algorithm in point cloud alignment[J]. Journal of Image and Graphics, 2007(3): 517-521.
- [20] 李欢, 陈志同, 屈新河. 毛坯海量点集与CAD数模的自适应快速精确配准方法研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 101-105.
- LI Huan, CHEN Zhitong, QU Xinhe. Research on the fast and high accuracy adaptive method to register blank points and CAD model[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 101-105.
- [21] 陈志同. 一种具有局部增强结构的复杂母线抛光轮及其制作方法: 201610168879.X[P]. 2016-01-16.
- CHEN Zhitong. A complex bus polishing wheel with local reinforcing structure and manufacturing method: 201610168879 X[P]. 2016-01-16.
- 通讯作者: 陈志同, 教授, 博士, 主要研究方向为先进数控加工技术与装备, E-mail: ztchen@buaa.edu.cn.
- (责编 古京)