

离心压缩机受损叶轮再制造方法

王浩¹ 赵世伟² 王立文³ 王涛⁴ 丁华鹏⁴ 陈董燕⁵

(1. 中国民航大学工程技术训练中心, 天津 300300; 2. 安柏瑞德航空航天大学工程学院, 佛罗里达 32114;
3. 中国民航大学地面特种设备科研基地, 天津 300300; 4. 中国民航大学航空工程学院, 天津 300300;
5. 中航工业成都发动机集团有限公司, 成都 610503)

摘要: 叶轮是离心压缩机的核心功能部件, 极易出现损坏。受损叶轮再制造技术国内面临的主要问题是缺少设计数据。为此, 提出一种基于受损叶轮结构特征建立再制造目标模型的方法。设计了离心压缩机受损叶轮的再制造流程; 对受损叶轮原始三维点云进行滤波和精简; 针对叶轮叶片的损伤区域和未损伤区域, 分别提取并拟合叶片截面的边界曲线; 重建叶轮叶片的再制造目标模型, 通过布尔运算得到叶片损伤部位的三维模型。以离心压缩机受损叶轮为例, 进行了再制造实验, 再制造后的叶轮误差精度在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内, 满足工作要求并已投入使用, 证明了本方法的可行性。

关键词: 离心压缩机; 叶轮; 再制造; 点云处理; 叶片型面特征; 激光熔覆

中图分类号: TH12; TP391.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0407-06

Remanufacture Method of Damaged Impeller in Centrifugal Compressor

Wang Hao¹ Zhao Shiwei² Wang Liwen³ Wang Tao⁴ Ding Huapeng⁴ Chen Dongyan⁵

(1. *Engineering Technology Training Center, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*
2. *Department of Engineering, Embry-Riddle Aeronautical University, Florida 32114, USA*
3. *Ground Special Equipment R&D Base, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*
4. *College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*
5. *China Aviation Industry Chengdu Engine Group Co., Ltd., Chengdu 610503, China*)

Abstract: Impeller is key functional unit of centrifugal compressor. It is widely used in industrial and agricultural fields and often subjects to damage because of the bad work environment. Since the technology of remanufacturing the impeller has been dominated by foreign companies, domestic companies have to invest a tremendous amount of cost and time in having damaged impeller repaired. This paper is to put forward a method in an attempt to remanufacture damaged impeller based on structure characteristics. Firstly, the process of remanufacturing the damaged impeller was designed. Secondly, the point cloud data of damaged impeller was acquired; the original point cloud data were filtered and simplified reasonably to improve modeling accuracy and efficiency. Thirdly, for the un-damaged area of the impeller blade, the SS, PS, LE and TE of the cross-section point cloud were automatically identified, the cross-section curve of the impeller blade was extracted and fitted based on design features; for the damaged area of the impeller blade, the boundary curve of the impeller blade cross-section was extracted and fitted using grey prediction method; the 3D digital models of impeller blade were reconstructed and the 3D model of damaged blade was obtained via Boolean operation. Finally, the 3D point cloud process

收稿日期: 2016-01-28 修回日期: 2016-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1333121)、工信部重大专项 (2013ZX04001071)、天津市应用基础与前沿技术研究计划项目 (14JCONJC05000) 和中央高校科研基本业务费专项资金项目 (3122014D12)

作者简介: 王浩 (1985—), 男, 讲师, 主要从事机械部件再制造修复技术研究, E-mail: hbgdwh@126.com

通信作者: 王立文 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事流体力学与传动、航空特种设备研究, E-mail: wlw@cauc.edu.cn

platform and reconstruction experiment platform were introduced; using laser cladding forming technology and adaptive grinding, an application example of remanufactured impeller was given, which proved that the method is feasible, and the future research direction was also proposed.

Key words: centrifugal compressor; impeller; remanufacture; point clouds processing; blade cross-section characteristics; laser cladding forming

引言

离心压缩机是一种利用高速旋转的叶轮实现能量转换的机械装置,广泛应用于农林灌溉、石油化工、能源电力等国民经济支柱产业^[1]。叶轮是离心压缩机的核心功能部件,具有几何空间结构复杂、加工制造困难等特点。叶轮长时间工作在大流量和高转速等复杂工况环境下,时常出现一些不同程度和不同部位的损坏。如果直接更换新叶轮,价格昂贵。而且,国内的很多企业由于缺少叶轮的再制造技术,对于轻微损坏的叶轮往往直接报废,造成巨大的资源浪费。

欧美发达国家早已认识到高附加值动力部件再制造技术的重要意义和巨大的经济效益。MOHAGHEGH 等^[2-3]和 YILMAZ 等^[4-5]对燃气轮机叶片的修复技术进行了系统研究,提出了一种叶片修复的系统化解决方案,但是在模型重建方面以手动操作为主。PIYA 等^[6]提出通过获取叶片部件若干个特征截面的方法重建叶片三维模型,但在选取特征截面时也采用手工随机选取。HUANG 等^[7]研究开发了一套用于燃气轮机叶片自动修复的机器人磨削和抛光系统。总体来看,大部分研究人员在几何模型重建的环节往往忽略一个关键问题,即叶轮在长期使用过程中,其几何形状已发生蠕变,如仍然使用设计模型作为再制造的目标模型,将大大影响最终的再制造修复精度。

相比之下,国内学者^[8-9]在离心压缩机叶轮的流体设计和动力学性能分析等方面做了很多有意义的工作,但目前关于离心压缩机叶轮再制造方面的研究仍比较少。

激光熔覆成型技术(Laser cladding forming technology, LCFT)越来越广泛应用于再制造修复过程,其具有再制造组织细密、材料适用性较广、易实现自动化作业等优点,相比其它再制造方法具有明显的优势^[10-12]。任乃飞等^[13]对金属粉末的选择性激光烧结开展了研究,指出机械动力装置的关键部件可采用激光快速成型的方法获得。

本文以离心压缩机的受损叶轮为研究对象,基于课题组现有的实验条件,提出一种基于受损叶轮结构特征的再制造目标模型重建方法,并通过激光

熔覆进行再制造修复,最后通过实验验证方法的有效性。

1 离心压缩机叶轮再制造流程

离心压缩机叶轮的再制造流程分为 4 个步骤,如图 1 所示。首先,对受损的叶轮进行再制造可行性评估,如可进行修复,则进入下一流程,否则直接报废。其次,使用非接触三维测量系统获取受损叶轮的三维点云数据,并对点云数据进行精简和滤波。再次,基于叶轮的结构特征建立叶轮再制造目标模型,并与受损叶轮的三维模型进行布尔运算,得到叶轮受损区域的三维模型。最后,通过激光熔覆成型技术(LCFT)和自适应打磨,将受损叶轮恢复到可用状态。

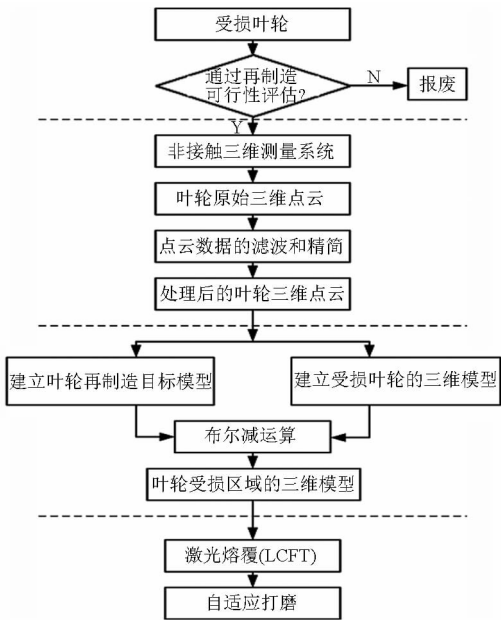


图 1 叶轮的再制造流程

Fig. 1 Flowchart of impeller remanufacturing process

2 点云数据获取和处理

2.1 点云数据的获取

获取物体点云数据的方法包括接触式测量和非接触式测量。接触式测量主要利用三坐标测量机进行检测,虽然精度很高,但是对于具有空间曲面的复杂零件测量效率很低,并不适用于受损叶轮点云的获取;非接触式测量利用激光三维视觉测量系统,可快速获取被测物体的点云数据,不受形状和结构的

限制。因此,本文选用非接触式测量方法获取损伤叶轮的点云数据。

2.2 点云数据的滤波和精简

虽然现代激光三维视觉测量系统已经具有较高的精度,但是在点云数据获取过程中,对于某些无法避免的人为操作或环境因素(如场地振动、光源、背景反射等)的影响,所获取的原始点云数据会含有大量的噪声点和背景干扰点。再则,三维视觉测量可以快速获取数以万计的点云数据,但大量的点云数据不但直接降低了数据处理的效率,也间接影响了后续建模的精度。基于以上两个原因,采用以下步骤对三维视觉测量获取的原始点云数据进行精简和滤波。具体步骤如下:

- (1)计算采样点邻域内的平均高斯曲率值,将三维点云分成不同区域。
- (2)对于点云模型局部邻域曲率变化较小的部分,如叶轮叶片区域的压力面和吸力面,采用标准高斯滤波算法。
- (3)对于点云模型局部特征显著、曲率变化较大的部分,采用自适应双边滤波算法^[14]。
- (4)为了在保持点云特征的前提下,进一步精简点云数据,采用曲面特征保持的点云精简方法^[15]。

叶轮的原始点云数量为 399 372 个,经过点云的滤波和精简后,点云数量为 114 763 个。点云处理后的效果对比如图 2 所示。

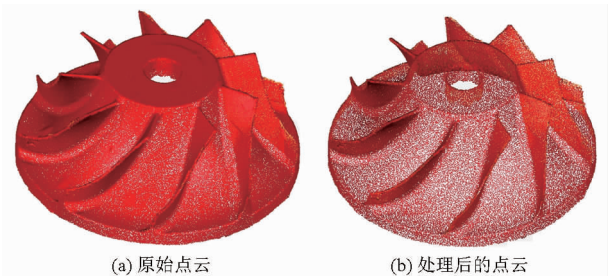


图 2 叶轮点云处理效果对比图

Fig. 2 Comparison of impeller point clouds processing

3 叶轮受损区域三维模型提取

叶轮受损区域三维模型是进行后续再制造修复的必要条件。此模型是将叶轮再制造的目标模型和受损叶轮模型进行布尔“减”运算得到的。受损叶轮模型可以从三维视觉测量系统直接获得。因此,如何获取叶轮再制造的目标模型是一个关键问题。

由于叶轮的工作条件十分恶劣,当发现其受损时,受损叶轮的几何形状一般都偏离设计模型。如果仍然将设计模型作为再制造目标模型是不能保证最终的再制造精度的,况且国内工业现场使用的叶

轮大部分都不会配备图纸或与设计相关的技术资料。所以,本研究基于受损叶轮的结构特征从设计角度实现叶轮再制造目标模型重建。

3.1 未损伤区域的叶轮叶型曲线重建

3.1.1 叶片型面点云的提取

从叶轮的设计角度,叶轮叶片型面曲线最能够直接反映其结构特征。对于叶轮点云的未受损区域,通过提取其叶型曲线重建三维模型。流程如图 3 所示,具体步骤为:

- (1)根据叶轮叶片受损区域,将三维点云分成受损区域和未受损区域。
- (2)对于未受损区域的叶片点云,沿叶片高度方向,利用两个平行的平面截取对应的点云片段。
- (3)将所得到的点云片段投影到 $X-Y$ 平面。
- (4)对于受损区域的点云,将在 3.2 节中进一步讨论。

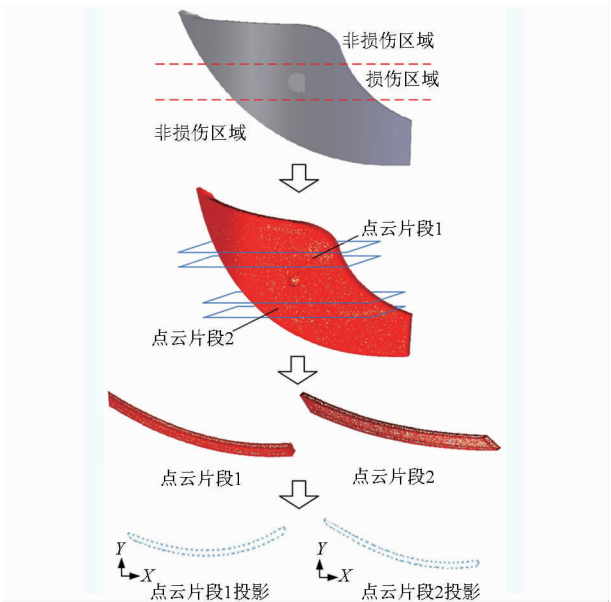


图 3 叶片型面点云提取流程

Fig. 3 Extraction process of blade cross-section point clouds

3.1.2 叶型点云的自动识别

根据叶型设计理论^[16],叶片型面由 4 部分组成:吸力面 SS (Suction side)、压力面 PS (Pressure side)、前缘 LE (Leading edge) 和后缘 TE (Trailing edge)。以点云片段 1 为例,采用点云数据的自动识别算法对叶片型面点云进行识别,具体流程参见文献^[17],不再赘述。点云片段 1 的自动识别结果见图 4。

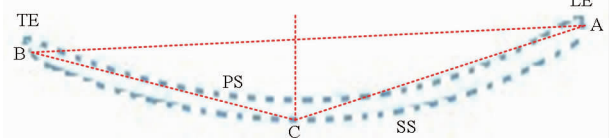


图 4 叶型点云的自动识别结果

Fig. 4 Automatic identification of cross-section point clouds

3.1.3 叶型曲线的拟合

(1)吸力面 SS 和压力面 PS 点云拟合

在逆向工程中,点云的曲线拟合常常采用 NURBS 曲线。这种方法虽然可以达到较高的拟合精度,却没有考虑叶轮等复杂部件的结构特征。因此,从设计角度出发,采用高次多项式来进行拟合。以压力面 PS 和吸力面 SS 为例,综合比较拟合的速度和效果,选取六次多项式来进行拟合,并使用最小二乘法确定多项式的系数。

六次多项式数学表达为

$$f(x)=p_1x^6+p_2x^5+p_3x^4+p_4x^3+p_5x^2+p_6x+p_7$$

(1)

式中, p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 、 p_5 、 p_6 、 p_7 分别为六次多项式中的系数,具体取值见表 1。

表 1 压力面 PS 和吸力面 SS 的截面曲线拟合系数
Tab.1 Cross-section curve fitted coefficients of PS and SS

系数	压力面 PS 截面曲线	吸力面 SS 截面曲线
p_1	-1.7×10^{-8}	0.023 6
p_2	2.487×10^{-5}	0.013 89
p_3	-0.032 68	-1.32
p_4	133.4	-1.027
p_5	-2.35×10^4	-3.598
p_6	1.09×10^6	-2.56×10^3
p_7	-6.51×10^9	605.1

注:置信区间为 95%。

(2)前缘 LE 和后缘 TE 的拼接

当吸力面 SS 和压力面 PS 的曲线拟合后,为完成截面曲线的拼接,设计了一个基准元搜索算法(Base circle search method,BCSM),算法流程如下:
①分别取 LE 和 TE 区域点云中任意三点建立若干小圆,作为备选基准圆。
②根据以下约束条件,搜索基准圆。

约束条件:基准圆同时与吸力面 SS 和压力面 PS 的曲线相切;基准圆至少经过 LE 和 TE 区域点云中的一点。

本算法的执行流程如图 5a 所示,叶片型面曲线拟合拼接的效果如图 5b 所示。

最后,重复上述步骤,建立叶片未损伤区域的叶型曲线簇。

3.2 损伤区域的叶轮叶型曲线重建

损伤区域的叶型曲线无法按照上述方法来获取。很多再制造领域的研究人员直接采用“跨越损伤区域”的放样方法(Loft method)来建立叶轮叶片三维模型,参见文献[18]。通过研究发现,这种方法对于出现在边角的微小损伤适用性很好,但是对于出现叶轮叶片表面损伤的建模效果不好。

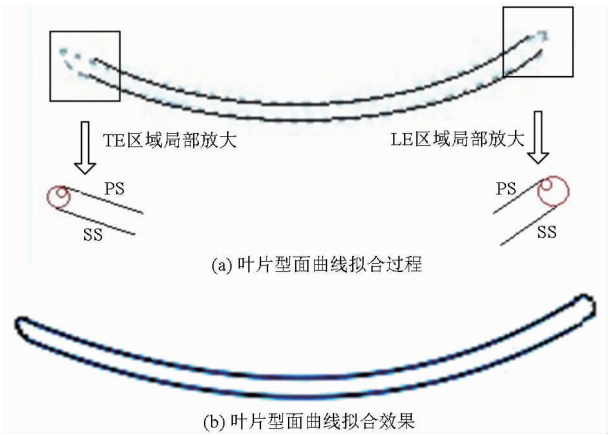


图 5 叶型曲线拟合拼接流程

Fig.5 Fitting and stitching process of cross-section curves

灰色预测理论常用于数据或运行趋势的预测,在工业故障诊断和金融领域中应用十分成熟。采用基于灰色 GM(1,1)模型来预测损伤区域的叶型截面点云,即利用已知的少量数据点通过建立灰色模型预测损伤区域的截面点云,具体可参考文献[19],损伤区域叶型曲线重建流程如图 6。

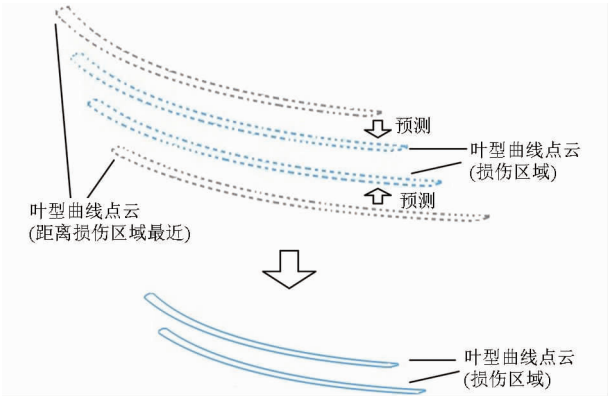


图 6 损伤区域叶型曲线重建流程

Fig.6 Reconstruction process of cross-section curves (Damaged area)

3.3 叶片受损区域模型提取

如图 7 所示,通过对损伤区域和非损伤区域叶曲线簇的放样,得到叶轮叶片再制造目标模型,将其与叶轮受损叶片的三维模型进行布尔“减”运算,最后得到缺陷模型,并用于激光熔覆(LCFT)再制造。

离心压缩机的叶轮损伤主要出现在叶片部位。典型损伤位置包括:压力面 PS、吸力面 SS 和叶片边缘。典型损伤位置的缺陷模型提取过程见图 8。

4 实验

4.1 再制造实验平台

对上述的离心压缩机叶轮再制造方法在实验平台上进行实验验证,再制造硬件实验平台如图 9 所示。

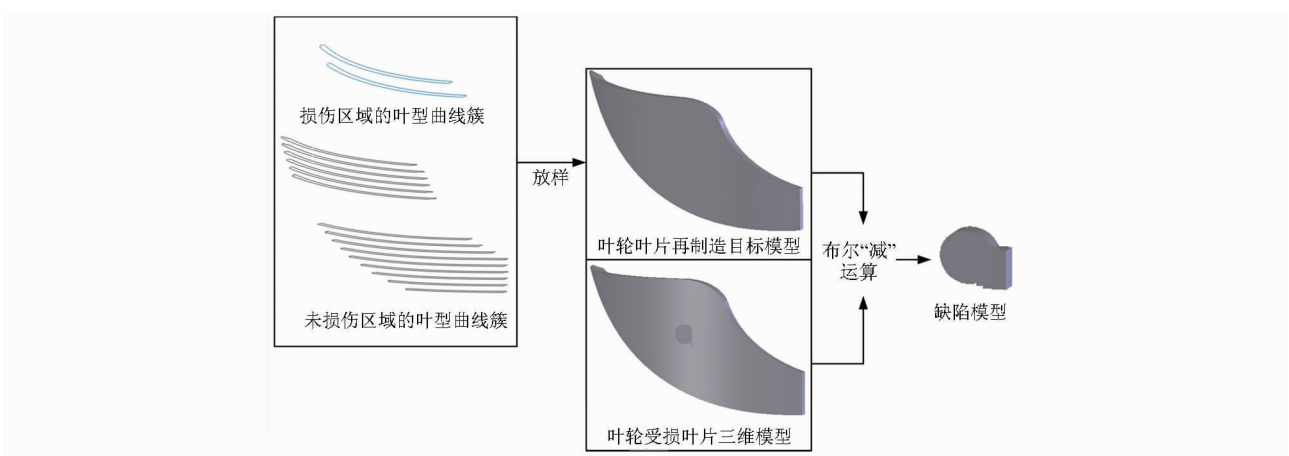


图 7 缺陷模型提取流程

Fig. 7 Extraction process of defect model

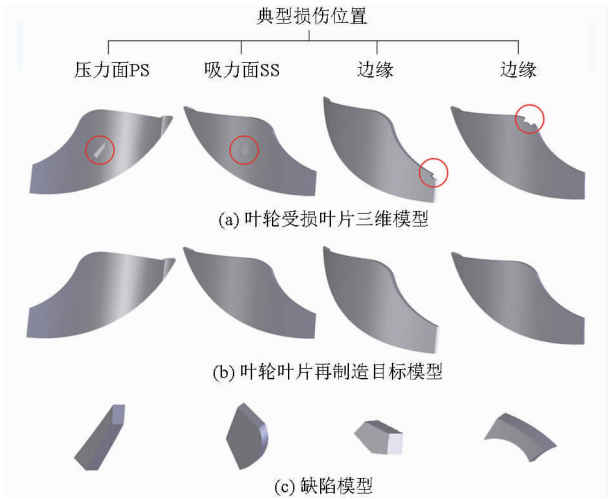


图 8 典型损伤位置的缺陷模型提取过程

Fig. 8 Extraction process of defect model in typical damaged position

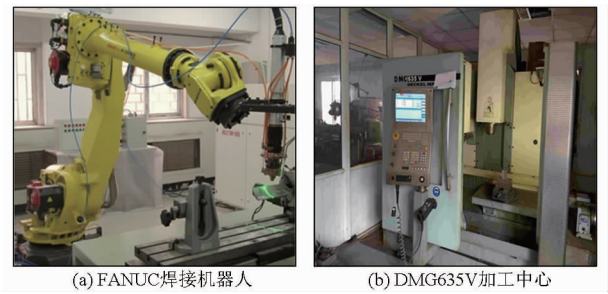


图 9 再制造实验平台

Fig. 9 Remanufactured experiment platform

具体包括：点云数据处理平台：Intel CPU I7 - 4710MQ 2.5 GHz CPU, 16 GB RAM；非接触式激光扫描仪：Leica T - Scan 型手持式激光三维扫描仪，三维点云采样误差在 $\pm 0.05\text{ mm}$ 范围内（测量范围在 8.5 m 范围内）；焊接机器人：FANUC R - 2000iB 型，重复定位精度在 $\pm 0.15\text{ mm}$ 范围内；DMG 数控加工中心：DMC - 635V，数控系统 Siemens840D，加工精度在 $\pm 0.005\text{ mm}$ 范围内。

4.2 实验结果

图 10 所示为某型号离心压缩机，其中部分叶片出现损伤。由于工作现场无原始图纸，通过对损伤类型和区域进行评估，采用本文所述方法进行再制造修复。

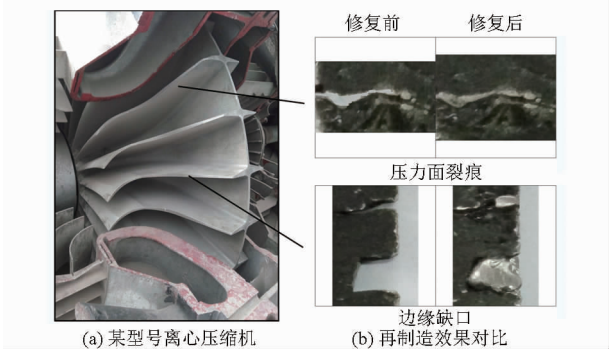


图 10 再制造效果

Fig. 10 Comparison of remanufacture result

获取受损叶轮原始三维点云，并进行滤波和精简；通过提取并拟合叶片截面的边界曲线，重建叶轮的再制造目标模型；通过布尔运算得到损伤部位的三维模型。采用激光熔覆方法对叶轮受损区域进行修复。

由于激光熔覆的工艺特点，在熔覆区域的边缘易出现毛边、凸起等，一般通过现场钳工进行修正即可解决，少量需要使用加工中心进行自适应打磨。LCFT 再制造的效果如图 10 所示。

使用激光三维扫描仪再次获取修复后的叶片点云，将再制造修复后的叶片与未受损的叶片进行对比，几何误差在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内。经过现场检验，再制造修复后的叶轮满足工作要求，并已投入使用，证明了本文提出方法的可行性。

5 结论

(1) 以离心压缩机受损叶轮为研究对象，设计

了一套损伤叶轮点云获取—叶轮再制造模型重建—激光再制造修复的解决方案。

(2)考虑到叶轮长期工作后形状和尺寸已发生变化,提出了一种基于叶轮叶片结构特征建立叶片

再制造目标模型的方法。

(3)通过对受损离心压缩机叶轮进行再制造修复实验,结果表明再制造后的叶轮满足工作要求,证明了本方法的可行性。

参 考 文 献

- 舒林森,曹华军,许磊,等.离心压缩机再制造叶轮结构特征建模方法及应用[J].机械工程学报,2014,50(3):184-190.
SHU L S, CAO H J, XU L, et al. 3D characteristic modeling method and application for remanufactured impeller of centrifugal compressor[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 184-190. (in Chinese)
- MOHAGHEGH K, SADEGHI M H, ABDULLAH A. Reverse engineering of turbine blades based on design intent[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(6): 1009-1020.
- MOHAGHEGH K, MOHAMMAD H, ABDULLAH A, et al. Improvement of reverse-engineered turbine blades using construction geometry[J]. International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(7): 675-678.
- YILMAZ O, DOMINIC N, NABIL G, et al. A study of turbomachinery components machining and repairing methodologies[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2005, 77(6): 455-466.
- 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.
- PIYA C, WILSON J M, MURUGAPPAN S. Virtual repair: geo-metric reconstruction for remanufacturing gas turbine blades[C]//Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, 2011: 1-10.
- HUANG H, GONG Z M, CHEN X Q, et al. Smart robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(3): 275-283.
- 周佩剑,王福军,姚志峰.旋转失速条件下离心泵叶轮压力脉动特性研究[J].农业机械学报,2015,46(10):56-61.
ZHOU P J, WANG F J, YAO Z F. Investigation of pressure fluctuation in centrifugal pump impeller under rotating stall conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 56-61. (in Chinese)
- 李伟,杨勇飞,施卫东,等.基于双向流固耦合的混流泵叶轮力学特性研究[J].农业机械学报,2015,46(12):82-88.
LI W, YANG Y F, SHI W D, et al. Mechanical properties of mixed-flow pump impeller based on bidirectional fluid-structure interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 82-88. (in Chinese)
- 董玲,杨洗陈,张海明,等.自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J].中国激光,2012,39(7):1-6.
DONG L, YANG X C, ZHANG H M, et al. Path generation for repairing damaged parts of freeform[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 1-6. (in Chinese)
- 董玲,杨洗陈,雷剑波,等.基于机器视觉的激光再制造机器人离线自动编程研究[J].中国激光,2012,40(10):1-8.
DONG L, YANG X C, LEI J B, et al. Off-line automatic programming research of laser remanufacturing robot based on machine vision[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 40(10): 1-8. (in Chinese)
- 符永宏,杨巍,张华伟,等.激光微造型凸轮副的摩擦磨损[J].农业机械学报,2010,41(1):216-219.
FU Y H, YANG W, ZHANG H W, et al. Friction and wear of cam with laser micro-texture under lubrication[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 216-219. (in Chinese)
- 任乃飞,曹松.选择性激光烧结金属粉末材料的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(8):147-153.
REN N F, CAO S. Research advances of metallic powder materials by selective laser sintering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 147-153. (in Chinese)
- 曹爽,岳建平,马文.基于特征选择的双边滤波点云去噪算法[J].东南大学学报:自然科学版,2013,43(11):351-354.
CAO S, YUE J P, MA W. Bilateral filtering de-noise algorithm for point cloud based on feature selection[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2013, 43(11): 351-354. (in Chinese)
- 李启东,李文龙,周莉萍.一种曲面特征保持的航空叶片点云精简方法[J].中国机械工程,2014,25(16):2204-2212.
LI Q D, LI W L, ZHOU L P. A surface feature-preserving point cloud simplification method for aviation blades[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(16): 2204-2212. (in Chinese)
- 赖喜德.叶片式流体机械的数字化设计与制造[M].成都:四川大学出版社,2007:109-115.
- 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 H, WANG L W, WANG T, et al. Method and implementation of remanufacture and repair of aircraft engine blades[J]. Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 1036-1048. (in Chinese)
- 王涛,丁华鹏,刘一骝,等.基于叶型特征重建和缺陷模型提取的 LDMD 叶片再制造[J].农业机械学报,2015,46(8):333-337.
WANG T, DING H P, LIU Y L, et al. LDMD-oriented blade remanufacturing based on CSC character reconstruction and defect model extraction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 333-337. (in Chinese)
- 田庆国,葛宝臻,郁道银.基于灰色预测 GM(1,1)模型的网格孔洞填补算法[J].工程图学学报,2007,28(3):78-83.
TIAN Q G, GE B Z, YU D Y. Hole-filling algorithm in mesh surface based on grey model GM(1,1) [J]. Journal of Engineering Graphics, 2007, 28(3): 78-83. (in Chinese)