

航空发动机叶片表面微小损伤修复目标型面再设计方法

江竺沈¹, 张明德¹, 刘立飞¹, 谢乐², 陈星宇¹

1. 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054

2. 重庆妙奇丰科技有限公司, 重庆 400054

摘要:目的 针对目前损伤叶片的模型重构修复方法主要是增材制造(激光烧焊填充)的传统方式,提出一种新的适用于减材制造(磨削、铣削)的损伤叶片的模型重构修复方法,并将模型重构问题转化为最优化问题。方法 首先,划定叶片的损伤区域并导出损伤区域的相应损伤截面线;其次,将损伤模型与理论模型进行配准,输出损伤模型的损伤截面线对应理论模型的理论型线,采用 NURBS 和空气动力学相结合的曲线插值重构方法建立目标函数模型并求解,从而把理论型线与损伤模型的未损伤型线进行光滑衔接;最后,将重构修复的每层截面线与其他未损伤截面线进行放样建模得到重构模型并进行仿真流体力学验证。结果 实验结果表明:经过重构修复的损伤叶片升力得到约 1.5%的提升,这表明适用于减材制造的损伤叶片表面重构修复方法是能够起到修复作用的;另外,其他参数如速度和湍流动能也有一定的提升,且压力分布有一定程度的降低,图像显示速度和湍流动能主要集中在叶片的前后缘两处,而压力主要集中在先与来流空气接触的前缘,为叶片提供升力。结论 从减材制造的角度出发,提出一种同时考虑 NURBS 和空气动力学的叶片模型重构方法,经过实验证明确实可以得到流体性能更优的 NURBS 曲线和重构修复模型,对损伤叶片修复的全面发展具有一定的促进意义。

关键词:模型重构;NURBS;插值重构;空气动力学;叶片修复

中图分类号:TH16 文献标识码:A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0002.005

Redesign Method of Target Surface for Repairing Minor Damage on Aeroengine Blade Surface

JIANG Zhushen¹, ZHANG Mingde¹, LIU Lifei¹, XIE Le², CHEN Xingyu¹

1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China

2. Chongqing Miaoqifeng Technology Co., Ltd., Chongqing 400054, China

Abstract: Objective Since the current model reconstruction and repair method for damaged blades is mainly the traditional method of additive manufacturing (laser weld filling), a new model reconstruction and repair method for damaged blades with subtractive manufacturing (grinding and milling) was proposed, and the model reconstruction problem was transformed into an optimization problem. **Methods** Firstly, the damage region of the blade was delineated and the corresponding damage cross-section lines of the damage region were derived. Secondly, the damage model was aligned with the theoretical model, and the theoretical profile lines of the theoretical model corresponding to the damage cross-section lines of the damage model were output. The objective function was modeled and solved using a curve interpolation reconstruction method combining NURBS and aerodynamics so that the theoretical profile lines can be

收稿日期:2023-08-14 修回日期:2023-10-23 文章编号:1672-058X(2025)02-0033-08

基金项目:重庆市高校创新研究群体项目(CXQT20022);重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-M202301101);重庆市研究生科研创新项目(CYS23708)。

作者简介:江竺沈(1998—),男,硕士研究生,从事航空叶片损伤曲面修复研究。

通讯作者:张明德(1975—),博士,教授,从事数字化与智能制造技术研究。Email:zmd@cqut.edu.cn。

引用格式:江竺沈,张明德,刘立飞,等.航空发动机叶片表面微小损伤修复目标型面再设计方法[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):33-40.

JIANG Zhushen, ZHANG Mingde, LIU Lifei, et al. Redesign method of target surface for repairing minor damage on aeroengine blade surface[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(2): 33-40.

smoothly connected with the undamaged profile lines of the damage model. Finally, the reconstructed model was obtained by lofting and modeling each layer of the reconstructed and repaired cross-section lines with other undamaged cross-section lines, and simulated hydrodynamics verification was carried out. **Results** The experimental results showed that the lifting force of the damaged blade after reconstruction and repair was improved by about 1.5%, which indicated that the reconstruction and repair method of the damaged blade surface applicable to the material reduction manufacturing could be useful for the repair. In addition, other parameters, such as velocity and turbulent kinetic energy, were also improved to some extent, and the pressure distribution was reduced to some extent. The images showed that the velocity and turbulent kinetic energy were mainly concentrated at the leading and trailing edges of the blade, while the pressure was mainly focused at the leading edge that contacted the incoming air first, which provided the lifting force for the blade. **Conclusion** From the perspective of subtractive manufacturing, a blade model reconstruction method considering both NURBS and aerodynamics is proposed. It is experimentally proved that NURBS curves and reconstructed repair models with better fluid properties can be obtained, which is of certain significance for the comprehensive development of damaged blade repair. **Keywords:** model reconstruction; NURBS; interpolation reconstruction; aerodynamics; blade repair

1 引言

航空叶片是航空发动机中数量较多、加工难度较高、生产工作量较大的关键零部件之一。据不完全统计,在发动机出现的故障中,约 80%是由于叶片失效引起的。叶片类零件服役环境恶劣,高温高压等工作条件会使叶片产生裂纹、划痕、点蚀等微小缺陷。产生缺陷之后会使叶片产生应力集中现象进而让叶片性能大大降低,更严重甚至会发生叶片断裂失效引发飞行事故,因此对于叶片的微小损伤修复不容忽视。

目前对于叶片损伤修复大多采用增材制造方式,包括模型重构、曲线拟合与光顺等步骤。其中,叶片模型重构方法有很多,比如 Piya 等^[1]开发了一种半自动几何算法,用于修复大量使用后出现在燃气轮机翼型上的缺陷空隙,并产生一个精确重建的几何模型; Sugiura 等^[2]提出一种将三维线段与 SfM 点云相结合的方法,有效地将高质量三维表面重构为三角形网格; Gao 等^[3]针对不同缺陷的扫描修复模型,提出一种基于逆向工程的磨损部件法向模型几何重构方法;陈振林等^[4]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;周承号等^[5]利用逆向工程技术对涡轮叶片进行曲面重构,对采集到的点云数据进行处理,并在 CATIA 软件下完成叶片的精确曲面模型重建;赵旭升等^[6]采用能量最小化原理对截面曲线进行光顺处理,并提出了一种基于放样建模的叶片模型几何重构方法;Yan 等^[7]将叶片模型通过一系列平面进行切片,生成截面曲线(CSCs),生成叶片体未损伤区域的实测 CSCs,计算模型与实测 CSCs 之间的刚性和变形转换,再利用插值法或外推法重建被测 CSCs 的损坏或缺失部分;Hou 等^[8]结合焊接面和加工面重构,通过三坐标测量机测量的模型对未损坏部件进行自适应修复;

吕学庚^[9]在截面线正确排序和叶片流体性能基础上,构建叶片表面速度场,重构叶片流曲面;Zhang 等^[10]建立了压气机叶片标称模型和损坏模型,通过变换矩阵和重叠面积比较法,将重建的损伤模型与标称模型进行了最佳拟合;Rong 等^[11]建立了截面轮廓重建数学模型,然后采用模板曲线配准和变形交替迭代优化策略进行求解,并使其最优拟合截面点,从而进行曲面重构;Wu 等^[12]采用迭代最近点(ICP)算法确定测点与理论模型之间的关系,然后采用样条插值法进行局部校正,重建了叶片几何模型;Tao 等^[13]提出包括三维非接触数字化、截面平面的获取方法、未破碎区域截面曲线重建和破碎区域截面曲线推导的重建方法;Yu 等^[14]提出对与缺陷截面曲线相邻的参考截面曲线进行递归变形,实现叶片模型重建的目标;Gao 等^[15]基于磨损叶尖附近的可用几何模型,提出一种表面扩展算法来恢复磨损的叶片尖端,该算法实现了磨损叶尖的再生;Zhang 等^[16]提出一种基于截面曲线混合和小波分解的叶片自适应修复几何重构方法。

在进行模型重构的时候离不开 NURBS 曲线插值拟合和光顺,关于曲线插值和光顺的方法也有不少。如徐阳^[17]提出一种面向叶型和翼型的考虑流线场约束的 NURBS 曲线拟合方法;秦贤杰等^[18]以型值点变动量为未知量,以型值点变动量的变动范围为约束条件,给出能量函数,求解得到光顺型值点;Kai 等^[19]提出一种基于指数平滑预测的 NURBS 插补方法,该方法显著降低了计算量,并实现了速度和精度的控制;Kee 等^[20]提出适用于具有特殊顶点的四边形多面体几何数据的 B 样条尺度空间平滑和平滑过程中高频信息恢复的迭代算法;Li 等^[21]提出一种基于非均匀半正交 B 样条小波的 NURBS 曲线整流多分辨率方法,该方法具有更大的灵活性和适用性;兰浩^[22]建立了一个将逼近项和光顺

项统一化的目标函数,采用循环判断和二分查找法求解得到光滑 NURBS 曲线;石迎利^[23]调整参数化的方法使 NURBS 曲线更为光滑;刘武飞^[24]采用最小二乘拟合模型拟合出曲线,并优先对曲率符号不良点和不良区域进行曲率符号光滑。

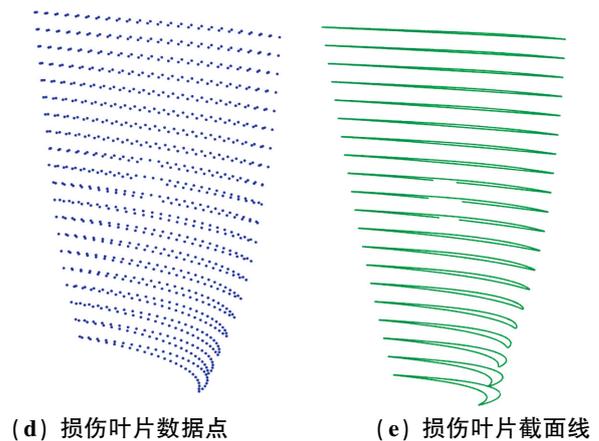
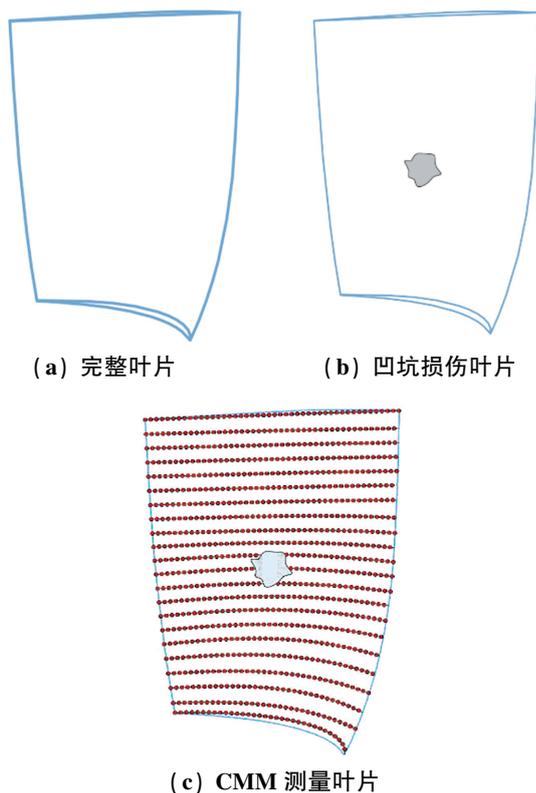
以上研究表明损伤叶片修复大多采用的是增材制造的方式,即使用激光烧焊的方法对损伤缺陷进行填充,并根据重构的叶片模型去除多余填充物。其中,叶片模型重构是以原始设计模型为基础,结合流体力学原理与曲线光滑方法,最终得到重构模型。此时的重构模型无限接近原始设计模型。

为了填补叶片减材制造的空白和促进叶片损伤修复的全面发展,本文提出基于减材制造(磨削、铣削等)的叶片损伤修复方法,即不填充损伤区域而是根据重构模型对叶片损伤区域进行材料去除以达到光滑修复的效果。在模型重构时以原始设计模型为基础,结合流体力学与曲线光滑原理,并将模型重构问题转化为最优化求解问题,此时的重构模型并未无限接近原始设计模型。

2 损伤叶片模型建立

2.1 损伤模型数据

完整的叶片和具有凹坑的损伤叶片如图 1(a)、图 1(b)所示,采用三坐标测量机(Three Coordinate Measuring Machine)对叶片扫描测量,如图 1(c)所示,获得关于凹坑损伤的数据点如图 1(d)所示,损伤叶片截面线如图 1(e)所示。



(d) 损伤叶片数据点 (e) 损伤叶片截面线

图 1 损伤叶片模型建立过程

Fig. 1 Process of building damaged blade model

2.2 曲线拟合

原始叶片是以截面线为单位进行设计的,因此在其进行修复时也应以其截面线为单位进行修复。由三坐标测量机得到的损伤叶片数据点可以通过曲线拟合获得,这里主要采用 NURBS 曲线插值拟合方法,NURBS 曲线是通过控制顶点、权重和节点向量来定义曲线形状的方法。曲线定义如下:

$$p(\mathbf{u}) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(\mathbf{u}) \omega_i d_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,k}(\mathbf{u}) \omega_i} \quad (1)$$

其中, $p(\mathbf{u})$ 是曲线上的点坐标, d_i 是控制顶点的坐标, ω_i 是权重。当各控制顶点的权重 $\omega_i(i=0,1,\dots,n)$ 均取 1 时,NURBS 曲线表达式就变为

$$p(\mathbf{u}) = \sum_{i=0}^n N_{i,k}(\mathbf{u}) d_i \quad (2)$$

$N_{i,k}(\mathbf{u})$ 是曲线中的 B 样条基函数,按照 deBoor-Cox,递推公式如下:

$$\begin{cases} N_{i,0}(\mathbf{u}) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(\mathbf{u}) = \frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} N_{i,k-1}(\mathbf{u}) + \frac{u_{i+k+1}-u}{u_{i+k+1}-u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(\mathbf{u}) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

假设给定型值点有 $m+1$ 个,分别为 p_0, p_1, \dots, p_m ,选择累积弦长参数化法对型值点进行参数化处理,得到节点向量:

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0 \\ u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = u_{n+6} = 1 \\ i = 1, 2, \dots, n-1 \\ u_{i+3} = \frac{u_{i-1} + p_i - p_{i-1}}{\sum_{i=1}^n p_i - p_{i-1}} \end{cases} \quad (4)$$

以切矢条件作为边界条件:

$$\begin{cases} d_1 - d_0 = \frac{\Delta_3}{3} p'_0 \\ d_{n+2} - d_{n+1} = \frac{\Delta_{n+2}}{3} p'_n \end{cases} \quad (5)$$

3 损伤叶片再设计模型的建立

3.1 基于截面线的损伤叶片修复策略

损伤叶片的修复思路是基于叶片损伤区域图 2(a), 重新设计光滑曲面, 而原始叶片是以截面线为单位进行设计的, 因此, 在修复时也应从截面线出发, 主要分为 3 步:

第 1 步: 导入理论模型型线。修复的最终目的是重新设计出光滑的曲线曲面, 而原始设计模型的理论型线则是最适合的, 利用建模软件可以导入, 如图 2(b) 所示。

第 2 步: 偏移理论型线。本文修复方法考虑的是减材制造, 即将损伤区域按照设计的目标曲线曲面进行去除材料修复, 因此需要将理论型线沿着法矢方向进行偏移直至包裹完整损伤区域, 计算出偏移距离、方向并在软件中实现偏移, 如图 2(c) 所示。

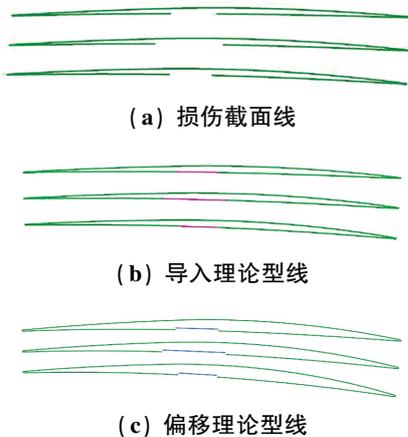


图 2 损伤型线与理论型线

Fig. 2 Damage profile lines and theoretical profile lines

第 3 步: 未损伤型线与理论型线衔接。偏移后的理论型线尽管已经成为损伤区域的目标曲线, 但仍需要与截面线上未损伤部分进行衔接才能构成完整的修复型线。这部分采用的是 NURBS 与空气动力学结合的曲线重构方法。

本文提出建立基于 NURBS 曲线的升力目标函数, 并依据遗传算法对其求解, 具体步骤如下:

(1) 通过微元计算截面线面积。首先, 划定面积区域: 根据叶片修复要求和 NURBS 修复策略大致划分出修复后的截面线面积区域, 该区域必须包括截面线

损伤区域和 NURBS 修复区域, 并且在满足修复的前提下尽可能减少该区域的面积大小。

其次, 分解微元: 根据叶片截面面积计算的静力学方法, 将截面近似分解成 n 个矩形微元, 矩形微元宽度设定为 d_{xi} , 长度设定为 d_{yi} , 微元面积为

$$d_{si} = d_{xi} \times d_{yi} \quad (6)$$

其中, d_{xi} 的方向为修复后的 NURBS 曲线切线方向, 大小依据精度要求而定 (至少小于 $50 \mu\text{m}$, 且每个矩形微元的 d_{xi} 大小一致); d_{yi} 的方向与 d_{xi} 垂直, 即垂直于 NURBS 切线, 大小可通过以下步骤求出:

① 依据确定的面积区域获得最初始的边界点 (x_1, y_1) , 并求出基于 NURBS 切线方向的边界点直线方程 $f_1(x)$:

$$f_1(x) = A(x - x_1) + y_1 \quad (7)$$

式(7)中, A 为 $f_1(x)$ 在 (x_1, y_1) 切线方向上的矢量大小, 可通过对 NURBS 求导得出:

$$A = \frac{d_{p(u)}}{d_x} = \sum_{i=0}^n N'_{i,k}(u) d_i \quad (8)$$

② 根据 d_{xi} 与 d_{yi} 互相垂直的性质得出 d_{yi} 方向的直线方程 $f_2(x)$:

$$f_2(x) = \frac{1}{A}(x_1 - x) + y_1 \quad (9)$$

③ 通过多项式拟合上段未损伤截面线并得到曲线方程 $f_3(x)$:

$$f_3(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (10)$$

这里上段未损伤截面线是足够光滑的, 因此采用三次多项式拟合可以满足要求。

④ 根据有效取值范围求出 $f_2(x)$ 与 $f_3(x)$ 的交点 (x_2, y_2) , 并求出 d_{yi} 的长度。其中关于交点的求解即是对三次多项式进行求解, 可以使用卡丹公式 (Cardano's formula) 进行求解, 如式(11):

$$x = \left(q + (q^2 + r^3)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(q - (q^2 + r^3)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{b}{3a} \quad (11)$$

其中,

$$q = \frac{3ac - b^2}{9a^2}$$

$$r = \frac{9abc - 27a^2 - 2b^3}{54a^3}$$

此处 a, b, c, d 是关于相交之后的三次多项式系数, 则 d_{yi} 的长度为

$$d_{yi} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (12)$$

⑤ 以此类推求出每个矩形微元的 d_{yi} 长度。

最后,微元面积累加:计算出 n 个沿着 NURBS 曲线切向的矩形微元面积 d_{si} ,衔接流程如图 3 所示。

$$S = \sum_{i=0}^{n-1} d_{si} = \sum_{i=0}^{n-1} d_{xi} d_{yi} \quad (13)$$

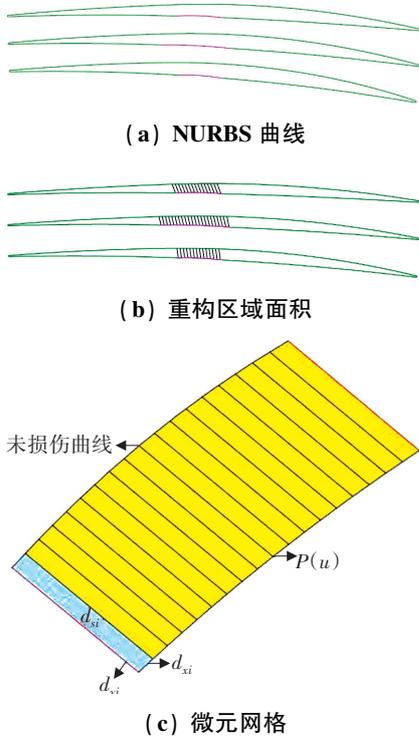


图 3 衔接流程

Fig. 3 Connection process

(2) 升力目标函数。根据气动力学和流体力学理论,叶片横截面的升力公式如下:

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (14)$$

其中, L 是升力; ρ 是空气密度; V 是飞行速度(来流速度); S 是横截面面积; C_L 是升力系数,与迎角和几何形状相关。

横截面的升力系数 C_L 是与横截面形状和气动特性相关的无量纲系数,可以通过实验、数值模拟或理论计算来获得。这里的 C_L 使用理论模型设计值。

目标函数:以升力为目标 NURBS 曲线的目标函数可以表达为升力值 L 最大,即 L_{\max} ,并结合前面,计算出面积公式,则有

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 C_L \sum_{i=0}^{n-1} d_{si} \quad (15)$$

由于 ρ 、 V 、 C_L 均为常数,因此 L_{\max} 等价于

$$\max \left(\sum_{i=0}^{n-1} d_{si} \right) \quad (16)$$

(3) 遗传算法求解目标函数。为了对式(16)进行

最优化求解,采用遗传算法,其具有内在的并行性、全局解空间搜索能力以及良好的鲁棒性,确定的数学表达式并不会对遗传算法的求解产生影响。遗传算法的操作过程是一个模糊求解过程,可行集中包含了可行点和不可行点,特别适合求解多目标优化问题。采用遗传算法求解目标函数的流程如图 4 所示。

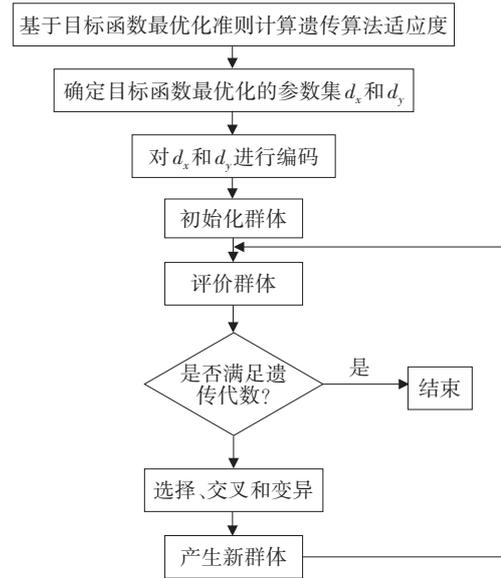


图 4 求解目标函数的遗传算法流程图

Fig. 4 Flow chart of genetic algorithm for solving objective function

3.2 截面线放样建模

将重构修复的截面线依次导入建模软件,利用放样建模功能进行模型重建,具体结果如图 5 所示。

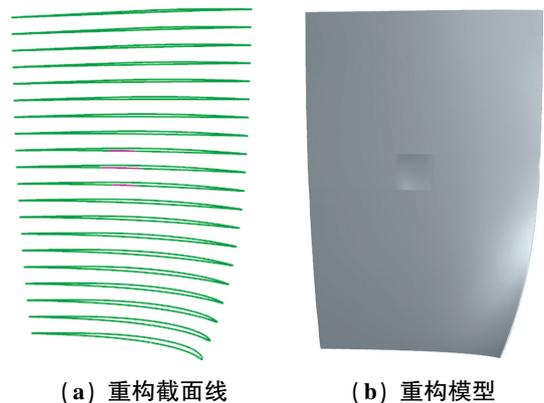


图 5 放样建模重构模型图

Fig. 5 Diagram of lofting and modeling reconstruction model

4 仿真实验与结果分析

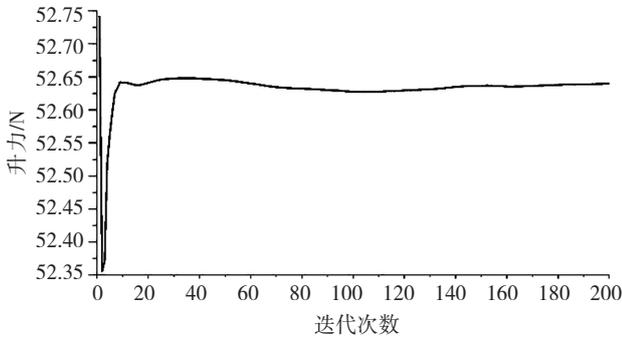
将修复过后的叶片模型和损伤模型分别导入流体仿真软件。为了模拟出真实的叶片飞行环境,设置一定体积的流场区域,根据精度要求生成网格,设定流体

速度和边界条件,经过一定次数的迭代,计算出叶片在给定条件下的升力,如图 6 所示。并对叶片表面的速度、压力分布和湍流动能进行分析,如图 7、图 8、图 9 所示。表 1 显示修复前后的参数对比。

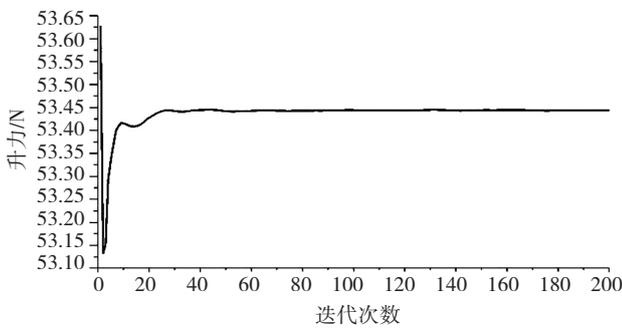
表 1 参数对比结果统计

Table 1 Statistical results of parameter comparison

类别	升力/ N	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	压力 /Pa	湍流动能 /($m^2 \cdot s^{-2}$)
原始模型	54.03	119	5 976	493.7
损伤模型	52.45	99.40	5 693	342.2
修复模型	53.24	99.69	5 673	364
提升	1.5%	0.2%	-0.35%	6.37%



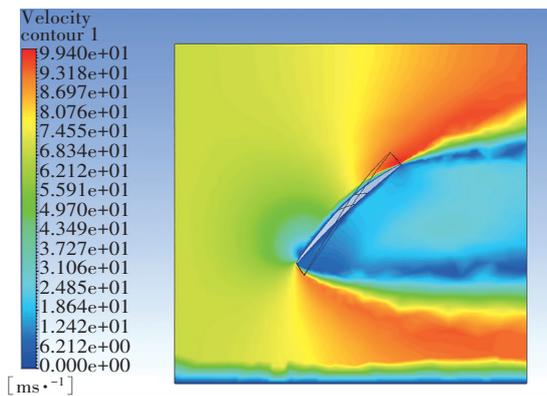
(a) 损伤模型



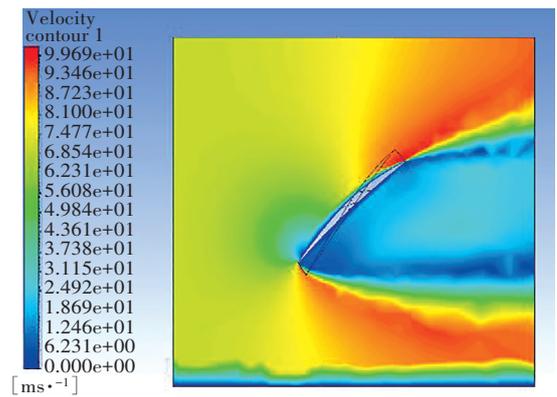
(b) 修复模型

图 6 损伤、修复模型的升力曲线图

Fig. 6 Lift curves of damage and repair models



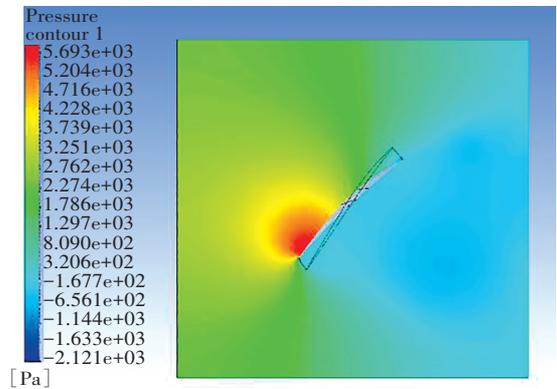
(a) 损伤模型



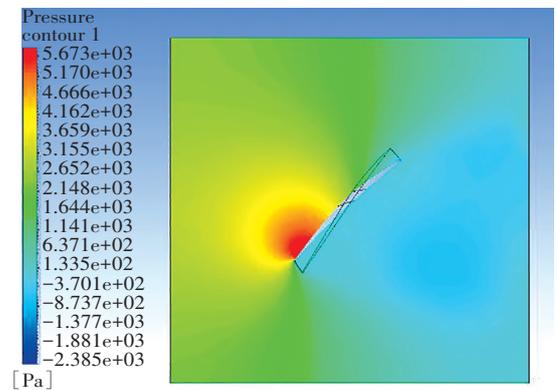
(b) 修复模型

图 7 损伤、修复模型的速度分布图

Fig. 7 Velocity distribution of damage and repair models



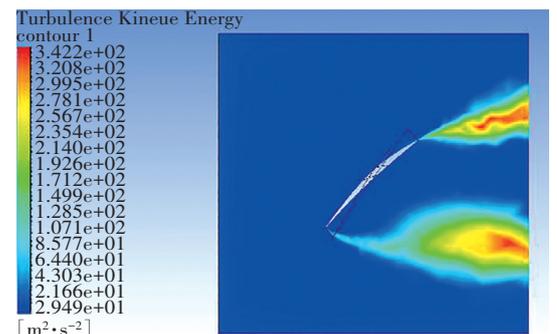
(a) 损伤模型



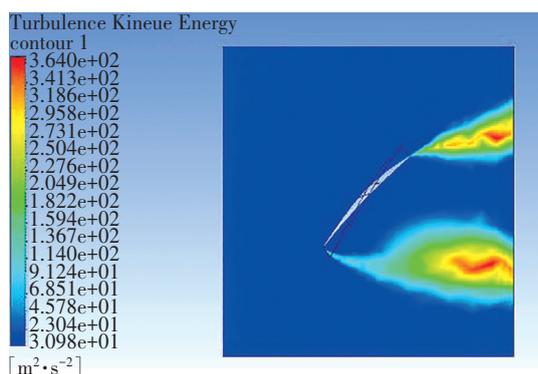
(b) 修复模型

图 8 损伤、修复模型的压力分布图

Fig. 8 Pressure distribution of damage and repair models



(a) 损伤模型



(b) 修复模型

图9 损伤、修复模型的湍流动能分布图

Fig. 9 Distribution of turbulent kinetic energy of damage and repair models

在设定条件的流场中,损伤叶片和修复叶片的升力大小变化如图6(a)、6(b)所示。从图中可以看出:经过一定次数迭代后,叶片的升力变化趋于稳定,且修复后的叶片稳定升力要比损伤叶片略高。从表1中可以看到:经过修复的叶片升力提升了约1.5%,这也验证了本文所提出的结合NURBS与空气动力学的叶片损伤修复方法具有一定的可靠性。

在给定同样流场条件下,损伤叶片和修复叶片的速度分布如图7所示。从图中可以看出:修复前后叶片的速度分布即较大速度主要集中在叶片前后缘处,未有较大变化。这代表本方法修复叶片极大程度保留了叶片的速度特性,并在一定程度上增大了速度的极值,提升了速度上限,从99.4 m/s提升到99.6 m/s,约0.2%。

在同样流场条件下,损伤叶片和修复叶片的压力分布如图8所示。从图中可以看出:修复前后叶片的压力分布无较大变化,保留了叶片的压力分布特性,并且压力主要集中在先与来流空气接触的前缘,为叶片提供升力。从5 693 Pa到5 679 Pa显示压力分布降低了,约0.35%,在一定程度上降低了应力集中的上限。

在同样流场条件下,损伤叶片和修复叶片的湍流动能分布如图9所示。从图中可以看出:修复前后叶片的湍流动能主要分布在前后缘处,无较大变化,从数值上观察,叶片承受的湍流动能有了一定的提升,即在能量转换方面有了一定的提高,从 $342.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 提升到 $364 \text{ m}^2/\text{s}^2$,约6.37%。

和原始叶片相比,经过修复后的叶片在升力、速度和湍流动能上有着一定的改善,不过仍有一定的差距,在压力分布方面却有一定程度的降低。

5 结论

本文从减材制造的角度出发,提出一种同时考虑NURBS和空气动力学的叶片模型重构方法,给出了具

体思路和流体力学仿真分析实验,得到以下结论:所提出的基于减材制造的叶片模型重构方法对比增材制造方法具有一定的可行性。从流体力学的角度来看,在NURBS曲线的基础之上加入空气动力学因素,确实可以得到流体力学性能更优的NURBS曲线;从流体仿真实验来说,实验结果证明本文提出的方法具有一定的有效性和价值。

利用减材制造修复损伤叶片目前研究较少,因此在这方面还有许多进步空间,比如在空气动力学方面可以考虑更多因素,如阻力、效率、速度等。今后将在此基础上更多考虑空气动力学的NURBS叶片损伤修复方法。

参考文献(References):

- [1] PIYA C, WILSON J M, MURUGAPPAN S, et al. Virtual repair: Geometric reconstruction for remanufacturing gas turbine blades[C]//ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2012: 895-904.
- [2] SUGIURA T, TORII A, OKUTOMI M. 3D surface reconstruction from point-and-line cloud[C]//Proceedings of the International Conference on 3D Vision. Piscataway: IEEE Press, 2015: 264-272.
- [3] 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.
- [4] 陈振林, 陈志同, 朱正清, 等. 基于逆向工程的航空发动机叶片再制造修复方法研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(Z2): 80-86, 93.
CHEN Zhen-lin, CHEN Zhi-tong, ZHU Zheng-qing, et al. Research on remanufacturing and repairing method of aero-engine blades based on reverse engineering[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 63(S2): 80-86, 93.
- [5] 周承号, 王家兴, 宋嘉程, 等. 涡轮叶片曲面重构与流体力学数值分析[J]. 科技创新与应用, 2021(9): 54-56.
ZHOU Cheng-hao, WANG Jia-xing, SONG Jia-cheng, et al. Numerical analysis of turbine blade surface reconstruction and fluid dynamics [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2021, 11(9): 54-56.
- [6] 赵旭升, 杨建中, 陈吉红, 等. 服役破损叶片的曲面重构及刀路生成方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(24): 2906-2915, 2924.

- ZHAO Xu-sheng, YANG Jian-zhong, Chen Ji-hong, et al. Surface reconstruction and tool path generation method of service damaged blade [J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(24): 2906–2915, 2924.
- [7] YAN C, WAN W, HUANG K, et al. A reconstruction strategy based on CSC registration for turbine blades repairing [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 61: 101835.
- [8] HOU F, WAN N, CHANG Z, et al. An adaptive repair surface modeling approach for worn blades [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(1): 523–532.
- [9] 吕学庚. 航空发动机叶片流曲面重构及修复方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
LYU Xue-geng. Aircraft engine blade flow surface reconstruction and repair method research [D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2019.
- [10] ZHANG X, LI W, LIU F. Damage detection and reconstruction algorithm in repairing compressor blade by direct metal deposition [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 9(5): 2393 – 2404.
- [11] RONG Y, XU J, SUN Y. A surface reconstruction strategy based on deformable template for repairing damaged turbine blades [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2014, 228(12): 2358–2370.
- [12] WU B, ZHENG H, WANG J, et al. Geometric model reconstruction and CNC machining for damaged blade repair[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2020, 33(3): 287–301.
- [13] WANG T, DING H, WANG H, et al. Virtual remanufacturing: Cross-section curve reconstruction for repairing a tip-defective blade [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2015, 229(17): 3141–3152.
- [14] YU H Y, LYU X. 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, 95(5): 3045–3055.
- [15] GAO J, WEN H, LIN Z, et al. Geometric model reconstruction through a surface extension algorithm for remanufacturing of twist blades[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(2): 382–390.
- [16] ZHANG Y, ZHANG D, WU B. A geometry reconstruction approach based on cross-section curve blending for adaptive repair of blades [C]//*Proceedings of the 5th International Conference on Responsive Manufacturing-Green Manufacturing. IET*, 2010: 146–151.
- [17] 徐阳, 刘强. 考虑流线场约束的 NURBS 曲线拟合方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, 29(1): 137–144.
XU Yang, LIU Qiang. Nurbs curve fitting method considering streamline field constraints [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Graphics*, 2017, 29(1): 137–144.
- [18] 秦贤杰. 曲线曲面拟合及 B 样条曲线曲面光顺[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
QIN Xian-jie. Curve and surface fitting and B-spline curve and surface fairing [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [19] KAI Z, GUANJUN W, HOZHONG J, et al. Nurbs interpolation based on exponential smoothing forecasting [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 39(11-12): 1190–1196.
- [20] KEE C Y, LEE S L. B-spline scale-space of spline curves and surfaces[J]. *Computer-Aided Design*, 2012, 44(4): 275–288.
- [21] LI A M, GUO W, TIAN H B, et al. Wavelet-based multiresolution NURBS curve fairing [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 314–316: 1562–1565.
- [22] 兰浩. NURBS 曲线整体光顺逼近算法研究与应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
LAN Hao. Research and application of NURBS curve global fairing approximation algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.
- [23] 石迎利. 基于调整参数化的 NURBS 曲线光顺[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
SHI Ying-li. NURBS curve fairing based on adjusted parameterization[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
- [24] 刘武飞. B 样条曲线的光顺重构研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
LIU Wu-fei. B spline smoothing reconstruction research[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.

责任编辑:李翠薇