

基于模型重构的变形叶片配准定位技术*

蒋利洋¹, 陈志同¹, 江泽鹏¹, 赵名绘², 田茂璟²

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 秦川机床工具集团股份公司, 宝鸡 721009)

[摘要] 叶片毛坯的精确定位是叶片数控加工的核心问题, 为了提高叶片数控加工质量, 保证叶片各处余量分配均匀, 本文以叶片进排气边的自适应数控加工中的检测定位为研究对象, 提出了一种基于模型重构的配准定位方法。该方法利用偏置模型的叶片测量方式提高了测量精度, 对基于重构的测量模型进行变形与定位分析, 得出较优的定位参数。通过仿真试验和对比分析, 论证了本文方法的正确性。

关键词: 变形叶片; 配准定位; 模型重构; 余量分配

Registration and Positioning Technology of Deformable Blade Based on Model Reconstruction

JIANG Liyang¹, CHEN Zhitong¹, JIANG Zepeng¹, ZHAO Minghui², TIAN Maojing²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Qinchuan Machine Tool & Tool Group Share Co., Ltd., Baoji 721009, China)

[ABSTRACT] The accurate location of blade blank is the core of the blade CNC machining, in order to improve the CNC machining quality of blade and ensure uniform allowance distribution throughout blade, taking the inlet and exhaust edge of the blade adaptive detection of CNC machining orientation as the research object, this paper proposes a registration and positioning method based on the model reconstruction. This method uses the measurement way of biasing blade model to improve the measuring precision, and then analysis the deformation and localization of the measurement model based on reconstruction, so as to get a better positioning parameters. The correctness of the method is demonstrated by simulation experiments and comparison analysis.

Keywords: Deformable blade; Registration and positioning; Model reconstruction; Allowance distribution

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.18.064

利用数字化检测手段对零件进行快速检测与重构, 并进一步实现数字化检测——模型重构——数控加工一体化的集成加工, 是提高航空发动机叶片类零件的制造精度、加工效率和自动化水平的关键技术, 称之为叶片类零件自适应数控加工技术^[1]。随着叶片精密制坯技术的快速发展, 该技术成为了叶片类零件批量生产的主要加工方式之一, 同时也是实现叶轮、叶片修复及再制造加工的重要方法。但是, 前期工艺都只是相当于完成零件的粗加工过程, 更为严格的加工精度、形状、位置要求需要最终的数控加工手段保证。无论是前期加工还是服役, 都会使叶片产生变形和基准偏移, 若利用叶片原始定位基准进行检测定位会造成余量不均甚至余量不足或超差的情况, 同时影响曲面重构精度, 带来加

工误差。因此, 如何保证变形叶片毛坯的精确定位是叶片数控加工的核心问题^[2]。

本文所提到的配准定位就是对叶片毛坯进行在机测量, 利用叶片的测量数据和它的理论数模进行配准对齐, 实现调姿定位和余量均匀分配的目的。Arun等^[3]提出的迭代最近点(ICP)算法在曲面配准领域得到广泛应用, 但是, 实际叶片毛坯型面测量点相较于理论模型发生了较大的变形, 直接进行配准会产生较大误差。Sun等^[4]建立了有余量约束的数学模型并对单张曲面配准问题进行了试验验证。张定华等^[5]提出了考虑弯扭变形的叶片模型配准方法, 首先通过测量设备获取叶片切片数据, 建立弯扭变形曲线, 据此对测量数据进行预变换, 最后利用ICP算法进行配准, 该方法对于成批具有相似变形规律的叶片具有一定的效果, 但对于变形规律不一致的叶片而言难以实施。现有的配准定位算

* 基金项目: “高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2013ZX04001051)。

法^[6-12],如ICP算法、遗传算法、拟退火算法、能量算法等大多是针对余量较大的结构件的配准定位,对变形叶片的精准定位问题还不能很好地解决。

本文以叶片进排气边的自适应数控加工中的检测定位为研究对象,其特点为叶片进排气边未加工,叶身型面通过前期工艺已满足设计要求,但仍存在较大变形误差。据此提出了一种基于叶片特征参数的配准定位方法,通过在叶片原始基准坐标系下获取典型的测量点集进行求解分析,最终得到叶片变形量以及最优的坐标系变换。

1 模型重构与切片

对于点触式三坐标测量机,由于叶片毛坯面上的实测点存在法矢补偿误差,同时由于变形和粗定位偏差造成实测点与理论点并不一致,为此,本文采用直接采集测头球心点并进行曲面偏置的方式以获得准确的叶片偏差状态。另外,测量过程中设置测量机按照等 Z 值运动,尽量保证所采集的球心点处于同一平面,方便后续模型重构。

如图1所示,设球心采集点为 P_{ij} ($i=1, \dots, m; j=1, \dots, n$), m 为测量截面线条数, n 为每条截面线的测点个数。采用NURBS曲线和曲面原理对球心数据点 P_{ij} 进行曲线和曲面拟合以得到叶片型面,该操作在三维建模软件中也较为容易实现,此处不再赘述。得到球心点拟合曲面之后,对其沿内法矢偏置测头半径以得到实际叶片毛坯曲面。

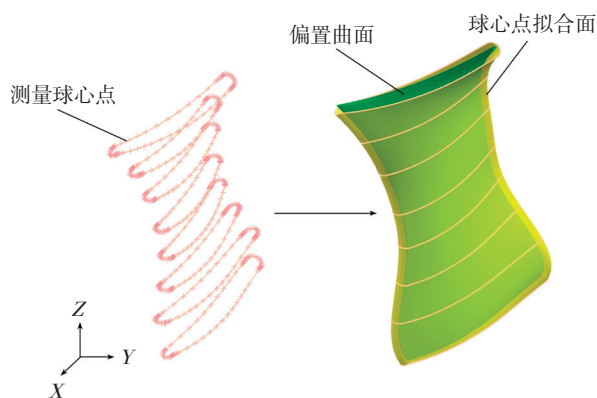


图1 曲面重构示意图

Fig.1 Schematic diagram of curved surface reconstruction

获得偏置面(实际测量叶片毛坯面)之后,需要进行切片化处理,如图2所示。

具体操作为:利用若干等 Z 平面同时截取偏置面与理论模型,获得平面内的实测截面线与理论截面线,同时对实测截面线进行离散,以用于后续配准计算分析。

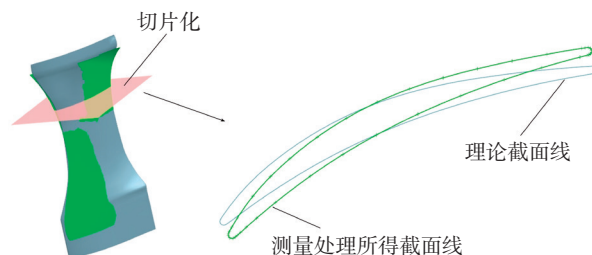


图2 叶片的切片化处理

Fig.2 Slice processing of blade

2 配准定位模型的构建与求解

前期工艺下的叶片存在着较大变形,会直接影响配准求解结果,造成余量分布极不均匀。事实上,当叶片存在变形时,无论怎样求解都不可能得到余量均匀的情况。而如何在余量分布与变形量之间寻找较优的状态是本文研究的核心内容。

2.1 叶片变形定义

本文针对的是变形叶片,所以首先阐述叶片变形定义。叶片设计中,得到流面基元叶型之后,需要按照一定规律叠放以得到三维的叶片,即叶片积叠。叶片的积叠线可以位于叶片的不同位置,对于转子叶片,一般位于叶片流面的形心(积叠点),以减小叶片应力水平。如图3所示, X 轴与 Y 轴交点为理论叶型积叠点, X' 轴与 Y' 轴交点为实际叶型积叠点,其中轴与叶型相对位置不变,则叶片变形归纳为如下3种形式。

(1)扭变形: X 轴与 X' 轴的夹角 θ ,也可以定义为弦线夹角(图3);

(2)掠变形:理论积叠点到实际积叠点在 X 轴上的投影距离 S (图4);

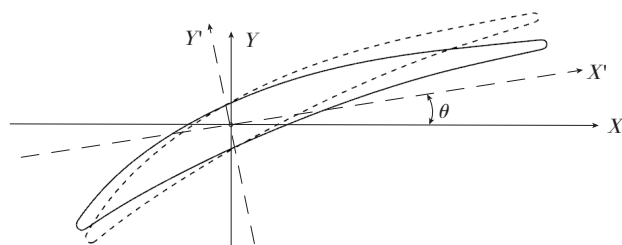


图3 叶片扭变形

Fig.3 Torsional deformation of blade

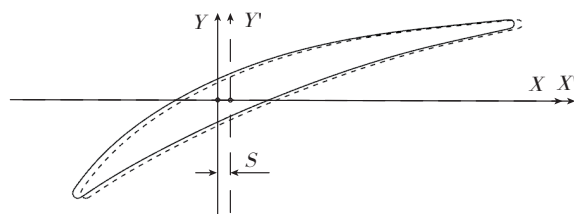


图4 叶片的掠变形

Fig.4 Grazing deformation of blade

(3) 弯变形: 理论积叠点到实际积叠点在 Z 轴上的投影距离 d (图 5)。

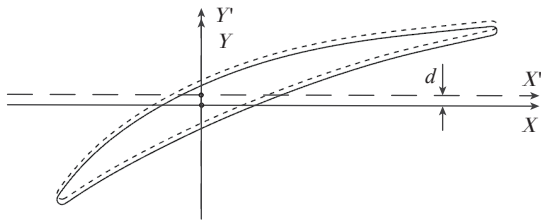


图5 叶片的弯变形
Fig.5 Bending deformation of blade

2.2 配准定位总体策略

基于模型重构的变形叶片配准定位方法总体分为以下 5 个步骤, 流程如图 6 所示。

Step 1 粗配准: 以叶片榫头(原始基准)作为粗定位基准, 利用六点定位法或几何定位法进行粗定位;

Step 2 截面线测量: 提取叶片测量截面线, 设置测量机按照定 Z 值运动, 采集测量过程中的测头球心点坐标;

Step 3 模型重构: 对每条截面线测量球心点分别进行拟合, 并进行放样得到球心轨迹曲面, 沿内法矢偏置测头半径得到实际叶片模型;

Step 4 切片: 选取适当等 Z 平面对理论叶片模型和重构得到的实际叶片模型进行切片, 每个平面内得到两组截面线, 离散实际叶片模型上截面线获得若干点集。

Step 5 参数获取: 将离散点集与对应的理论截面线

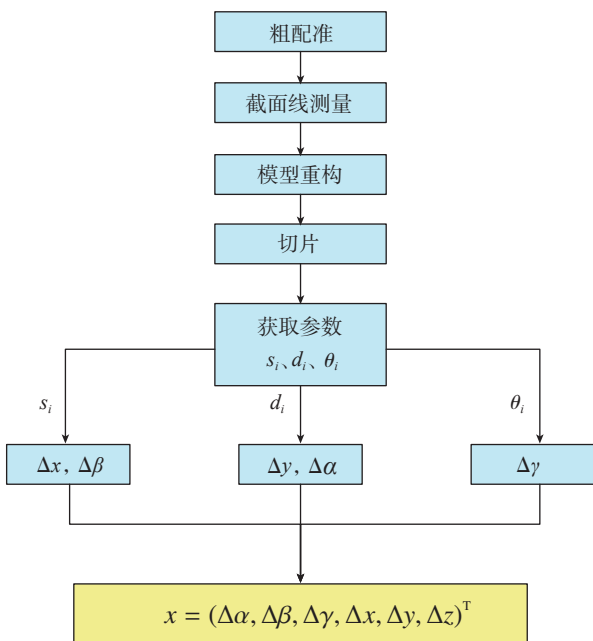


图6 配准定位总体流程图

Fig.6 General flow-process diagram of registering and position

进行配准, 得到一个旋转两个平移参数, 对每个等 Z 平面上的 3 个参数进行分析, 得到最佳定位参数。

2.3 配准定位模型的构建与求解

(1) 求取每条截面线点集的形心。

离散得到的每条截面线点集为:

$$P_{ij} (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n) \quad (1)$$

求解每条截面线上的数据点形心 (\bar{x}_i, \bar{y}_i) 以作为配准计算的原点。其求解按照如下公式进行:

$$\bar{x}_i = \frac{\int x_{ij} dA}{\int dA}, \bar{y}_i = \frac{\int y_{ij} dA}{\int dA} \quad (2)$$

(2) 求取各个等 Z 截面数据的配准参数。

在等 Z 平面内的配准属于二维配准对齐, 其可以调节的定位参数是在等 Z 平面内的平移量 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 绕 Z 轴的旋转量, 其配准过程如图 7 所示。

(3) 配准参数坐标系转换。

配准运算的坐标原点为叶片截面形心, 而定位变换的坐标原点为叶片整体绝对坐标系, 而绝对坐标系 Z 轴与截面的交点与截面形心并不重合, 所以需要进行转换。

如图 8 所示, 设叶片截面形心为 M, 绝对坐标系 Z 轴与截面交点为 N, MN 与 X 轴夹角为 φ 。 s_i, d_i, θ_i 分别为叶片截面以 N 点为原点沿 X 轴的平移、沿 Y 轴的平移、绕 Z 轴的旋转。易知叶片截面绕 M 点顺时针旋转 $\Delta \theta_i$, 等效于绕 N 点顺时针旋转 $\Delta \theta_i$ 与沿 MN 的垂线方向平移 $2l \sin(\Delta \theta/2)$ 。据此可求得 s_i, d_i, θ_i , 如下式所示:

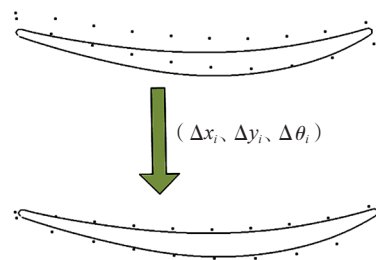


图7 等Z面内的配准对齐

Fig.7 Registering alignment of the equal Z values of the surface

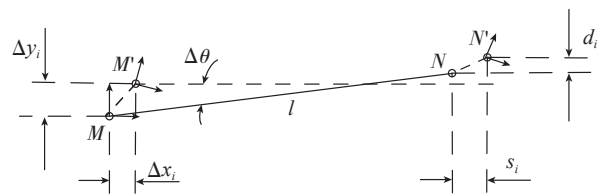


图8 配准参数的转换原理图

Fig.8 Shifting principle diagram of registration parameters

$$\begin{cases} s_i = \Delta x + 2l \sin(\Delta\theta/2) \sin \varphi \\ d_i = \Delta y + 2l \sin(\Delta\theta/2) \cos \varphi \\ \theta_i = \Delta\theta \end{cases} \quad (3)$$

则配准定位结果 $x = (\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 可按照以下 4 步求取:

Step 1: 如图 9 所示, 拟合 s_i-Z 曲线, 并求得最小二乘拟合直线 l_1 , 经分析, 配准参数 s_i 反映的是叶片沿 X 轴的移动 Δx 和绕 Y 轴旋转 $\Delta\beta$ 的补偿量, l_1 与 S 轴的截距便是 Δx , 直线 l_1 斜率的反正切便是 $\Delta\beta$ 。

Step 2: 如图 10 所示, 拟合 θ_i-Z 曲线, 并求得最小二乘拟合直线 l_2 , 配准参数 d_i 反映的是叶片沿 Y 轴的移动 Δy 和绕 X 轴旋转 $\Delta\alpha$ 的补偿量, l_2 与 d 轴的截距便是 Δy , 直线 l_2 斜率的反正切便是 $\Delta\alpha$ 。

Step 3: 如图 11 所示, 拟合 d_i-Z 曲线, 并最小二乘拟合得到直线 l_3 (为了均化两端的最大偏差, 此处的 l_2 只能为平行于横坐标的直线且取拟合数据的中间值), 则可得 $\Delta\gamma$ 。

Step 4: 需要特别说明的是, 经测量试验验证, 以叶片榫头作为测量基准, 叶片 Z 向配准定位的补偿量几乎

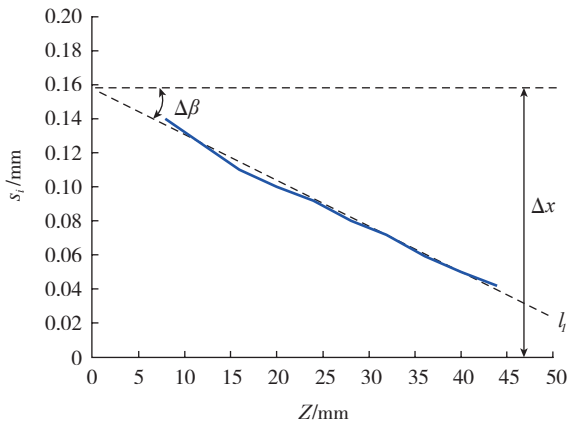


图9 Δx 与 $\Delta\beta$ 求解图
Fig.9 Solving graph of Δx and $\Delta\beta$

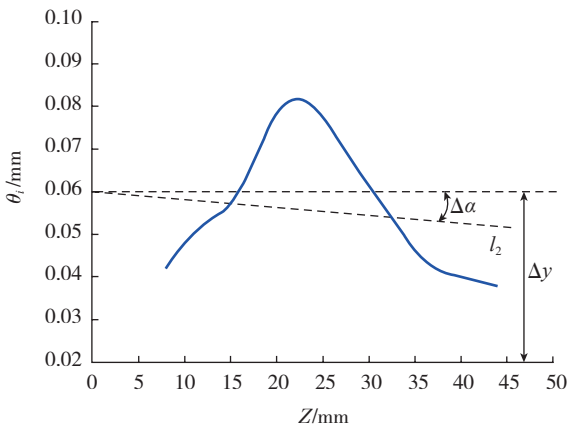


图10 Δy 与 $\Delta\alpha$ 求解图
Fig.10 Solving graph of Δy and $\Delta\alpha$

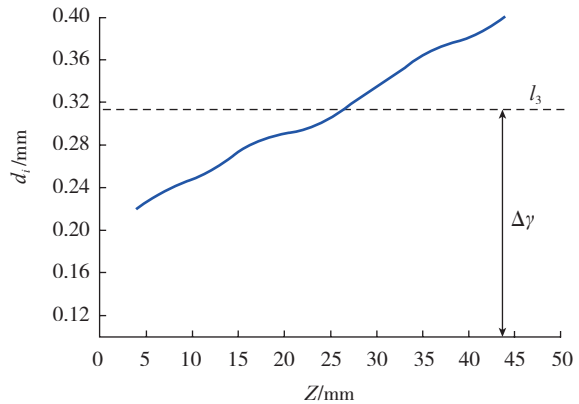


图11 $\Delta\gamma$ 求解图
Fig.11 Solving graph of $\Delta\gamma$

为零, 即 $\Delta z \approx 0$, 据此定位参数 $x = (\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 已全部得到, 定位完成。

3 仿真实验

如图 12 所示, 为某航空发动机理论叶片模型, 在标准叶型上截取 7 个等距平面, 对每个平面与叶型的交线 (L_1, \dots, L_7) 进行一定的旋转平移变换, 利用曲面放样重构变换后的叶片模型, 利用该叶片以仿真带变形实测叶片模型。将重构叶片模型按如下参数进行变换: $(\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z) = (0, 0, 0.5, 0.2, 0.2, 0)$, 以仿真叶片基准偏差。

按照上文所述切片化方法处理得到截面点集如图 12 所示, 将点集与截面曲线进行配准得到结果如表 1 所示。

获得每条截面线的旋转平移变换之后, 以 Z 坐标为自变量, 旋转平移变换为因变量进行线性拟合, 最终结果如图 13 所示, 其中, 拟合函数为:

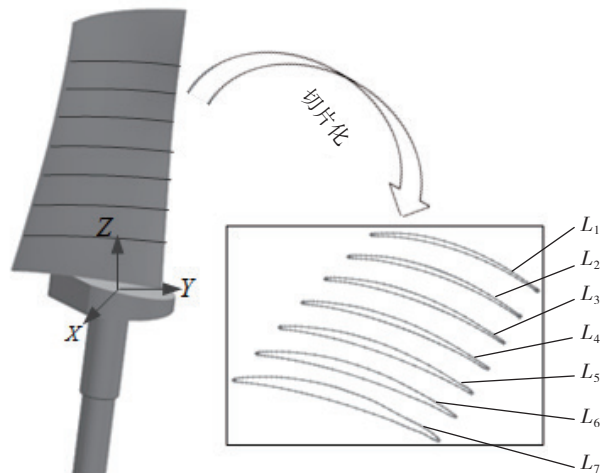


图12 航空发动机叶片模型
Fig.12 Blade model of aero engine

沿 X 轴平移函数: $s(z) = 0.0158z + 0.1039$, (4)

沿 Y 轴平移函数: $d(z) = 0.0177z + 0.0614$, (5)

绕 Z 轴旋转函数: $\theta(z) = 0.75$ 。 (6)

根据 2.3 节求取配准定位结果 $x = (\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma, \Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ 的分析和求解方法, 式(4)所表示的直线方程的截距为 Δx , 直线方程斜率的反正切为 $\Delta\beta$, 即, $\Delta x = 0.01039$, $\Delta\beta = \tan^{-1}(0.0158) = 0.900$; 同理 $\Delta y = 0.061$, $\Delta\alpha = \tan^{-1}(0.0177) = 1.014$; $\Delta\gamma = 0.750$, 故定位结果为 $(1.014, 0.900, 0.750, 0.01039, 0.061, 0)$ 。

不考虑叶片变形影响, 利用 ICP 算法配准得到定位结果为 $(0.9256, 1.1136, 0.7510, 0.0624, 0.1105, 0.03)$, 对比结果如表 2 所示。

3 种配准定位方式下, 叶片加工余量分布(叶片偏差)如图 14 所示: 原始理论偏差分布区间为 $[-0.61, 0.999]$, 榫头基准定位后的偏差分布区间为 $[-0.49, 0.81]$, ICP 配准定位后的偏差分布区间为 $[-0.256, 0.446]$, 考虑叶片变形的配准定位偏差分布区间为 $[-0.165, 0.192]$, 按照本文提出的变形叶片定位方法配

表 1 各截面配准参数

截面线编号	截面位置 Z/mm	沿 X 轴平移 s/mm	沿 Y 轴平移 d/mm	绕 Z 轴旋转 $\theta / (^\circ)$
L_1	10	0.22	0.21	0.6
L_2	15	0.36	0.35	0.65
L_3	20	0.48	0.46	0.7
L_4	25	0.55	0.52	0.75
L_5	30	0.62	0.6	0.8
L_6	35	0.68	0.65	0.85
L_7	40	0.72	0.7	0.9

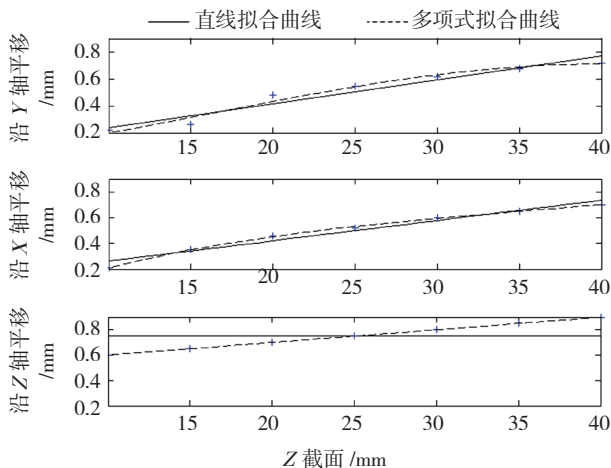


图 13 拟合曲线
Fig.13 Fitting curve

表 2 配准数据对比

定位方式	定位结果
基准定位(理论变换)	$(0, 0, 0.5, 0.2, 0.2, 0)$
无余量定位	$(0.9256, 1.1136, 0.7510, 0.0624, 0.1105, 0.03)$
本节方法	$(1.014, 0.9, 0.750, 0.01039, 0.0614, 0)$

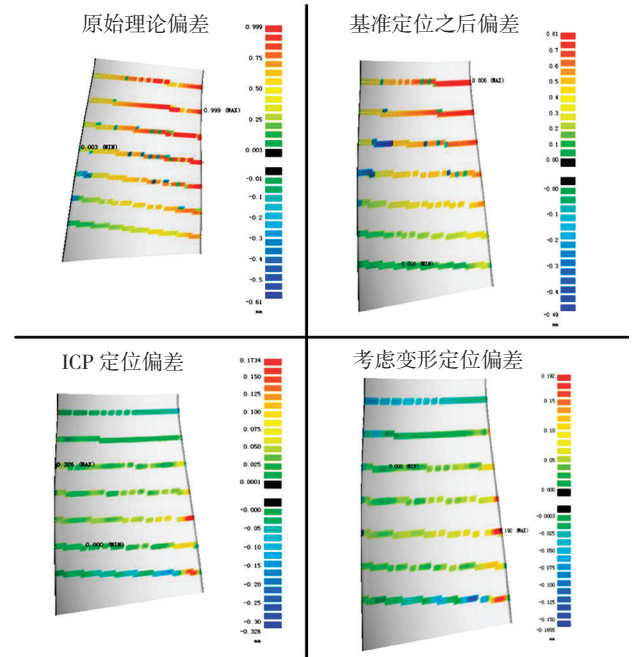


图 14 配准方法的对比分析

Fig.14 Comparative analysis of registration method

准定位后, 其整体偏差小于无余量定位, 偏差分布区间小, 实现叶片余量整体均匀分布的目的。

4 结论

配准定位的目的在于使叶片整体余量尽可能小且均匀, 但因为叶片在前期工艺下存在变形, 所以几乎不可能实现叶片余量整体均匀的目的, 因此, 如何在叶片余量与变形间找到最优的折中状态, 是本文研究的核心内容。从图 14 可以看出, 利用榫头基准定位(即仿真设计中的变换参数)之后的偏差呈现明显的变形趋势, 与仿真截面变换相符; 采用无余量定位之后, 最大偏差为 0.446mm, 按照本文的变形叶片定位方法配准定位后, 其最大偏差为 0.192mm, 整体偏差较小且余量分布均匀, 定位结果更加符合实际需求。因此, 本文所述方法在变形叶片定位上效果显著。

参考文献

[1] ZHANG D H, ZHANG Y WU B H. Research on the adaptive

(下转第 74 页)