

基于定位特征点的叶片锥束 CT 点云模型配准方法*

Registration Technology of Dense Point Cloud of Turbine Blade Based on Positioning Feature Point

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 卜 昆 乔 燕 程云勇
周丽敏 张 亮 黄胜利

[摘要] 针对实际生产过程中锥束 CT 检测空心涡轮叶片的点云数据与计算机辅助设计模型的配准问题,提出了一种基于定位特征点的叶片锥束 CT 点云模型配准方法。首先将点云数据与计算机辅助设计模型进行预配准;然后查找空心涡轮叶片的设计定位特征点坐标;最后根据定位基准点寻找点云数据上与之对应的基准点,并建立各自坐标系,根据坐标系进行几何变换,迭代直至满足要求,从而完成精确配准。试验结果表明,该方法很好地实现了锥束 CT 点云模型的配准定位,满足了实际生产要求。

关键词: 点云数据 CT 测量 配准 涡轮叶片 坐标系

[ABSTRACT] According to the registration problem of the cone beam CT detection point cloud data and computer aided design model of hollow turbine blade, a registration method of feature points based on the location of the blade cone beam CT point cloud model is proposed. First the point cloud data and computer aided design model is pre-registered, and then hollow turbine blade design positioning characteristic points need to find, finally, the corresponding datum points of point cloud data are found according to the design positioning characteristic points, their coordinate systems are established, geometric transformation is made according to the coordinate systems, iterative until the maximum error meets the requirements, the accurate registration is completed. The experimental results show that this method realizes the cone beam CT point cloud model registration positioning well, can meet the actual requirements of the production.

Keywords: Cloud data CT measurement Registration Turbine blade Coordinate system

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.093

* 西北工业大学研究生创业种子基金项目“基于仿真的单晶涡轮叶片精铸工艺参数优化”(Z2012033)资助。

复杂空心涡轮叶片是高推重比发动机的核心技术,被发动机行业誉为“皇冠上的明珠”^[1]。这一类涡轮叶片的内部冷却结构复杂、气动外形和尺寸精度要求高^[2],因此叶片检测是叶片制造技术中的重要内容,在叶片制造总工作量中叶片检测工作量占相当大的比例^[3]。目前,涡轮叶片的测量方法主要有:三坐标测量、工业 CT 扫描、光学扫描仪。三坐标测量机获取的数据精度高,但数据获取时间较长^[4],光学扫描仪扫描精度高^[5],但三坐标测量和光学测量都只能测量到工件的外表面,工业 CT 测量机测量技术,不受样件的材料种类、形状结构等因素的限制,成像直观、分辨率高^[6],在复杂构建的无损检测方面具有独特的优势。

由于测量坐标系和设计模型的设计坐标系不统一,对叶片进行质量检测与分析之前,需要实现测量数据与计算机辅助设计模型的配准^[7]。目前较成熟的配准方法为最近点迭代法^[8]和基于特征的配准方法^[9]。本文针对特定零件的快速检测,设计了一种基于设计定位特征点的配准方法,即把设计模型的 6 个定位点作为特征,建立坐标系,引导测量模型与设计模型的配准。

1 叶片点云模型预配准

通常情况下检测模型与设计模型坐标系是不统一的,为提高配准精度与效率,首先要完成配准对象的预配准。基于 3 参考点的配准方法是一种简单而实用的点云预配准方法^[9-10],本文采用交互式基于 3 参考点预配准方法^[11]:测量数据与 CAD 模型的配准是一种刚体移动,3 点可以建立一个坐标的关系,通过 3 个参考点对齐的问题实质上就是坐标变换的问题。对齐这 3 个参考点即可实现测量数据与 CAD 模型的预配准。

如图 1 所示,在叶片测量模型上选取 3 个目标点 p_0, p_1, p_2 ,在叶片 CAD 模型上选取与 p_0, p_1, p_2 相对应的参考点 q_0, q_1, q_2 (要求 3 个点不能共线)。通过把 3 个目标点 p_0, p_1, p_2 变换到 3 个参考点 q_0, q_1, q_2 的相应位置,就可以实现叶片测量模型与叶片 CAD 模型的预

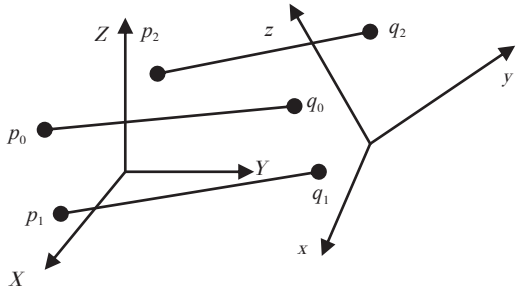


图1 预配准对应控制点

Fig.1 Corresponding control points of pre-registration

配准。

2 定位特征点选取

参照涡轮叶片三坐标测量系统的设计6点定位方法,即3-2-1定位方法^[12],在叶片的叶身上选3个点,在叶片给定两个z坐标的两个截面上分别取其边缘极值点,缘板上取一个点,建立起坐标系,用来定位整个叶片。

叶身上的点和缘板上的点可以通过UG导出,边缘极值点的选取需要通过沿Z向对模型进行截面分割,抽取截面特征曲线,并对抽取到的曲线作与曲线相切并垂直于规定方向的直线,所得到的切点即作为叶片CAD模型上某高度的边缘极值点。

3 定位特征点映射

以叶片CAD模型上6个定位特征点为基准,在CT测量的点云数据上查找与设计定位点相对应的点。对于叶盆上3个点和缘板平面上1个点,采取求邻域内最近点的方法查找其最邻近点。对于给定高度边缘最大点,采取对测量模型上的相应高度取截面,在截面上查找边缘极值点来获得CAD模型上边缘最大点的对应点,又由于测量模型上的点是离散的,相邻两点之间间距约为0.127mm,故得到的边缘极值点并不都与CAD模型的边缘极值点吻合,因此需要把截取到的边缘处的若干点进行3次样条拟合,再把样条曲线进行离散,查找离散后的边缘点,作为映射的边缘极值点。

4 基于定位特征约束的叶片密集点云模型配准方法

如图2所示,用CAD模型上的6个设计点建立一组坐标系,映射到测量模型上的6个点也相应的建立一组坐标系,通过计算两个坐标系的旋转平移矩阵来实现测量模型与CAD模型的配准^[13]。具体步骤如下:

- (1)通过预配准建立一个初始坐标系。
- (2)查找测量模型上与CAD模型点 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、

P_5 、 P_6 相对应的6个点 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 。

(3)用 P_1 、 P_2 、 P_3 确定平面 S_1 ; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 确定平面 S_2 ; 求 S_1 和 S_2 的法向 \vec{N} 和 \vec{n} ,作为坐标系的 Z_1 和 Z_2 轴的方向矢量。

(4)把 P_5 、 P_6 投影到 S_1 上; Q_5 和 Q_6 投影到 S_2 上分别作为待建坐标系的 X_1 轴和 X_2 轴方向。

(5)把 P_4 、 Q_4 分别投影到平面 S_1 、 S_2 上; 分别求得到的点在建立的 X_1 轴和 X_2 轴上的投影点,将其作为待建坐标系的原点 O 和 o 。

(6)将 X_1 的矢量和 \vec{N} 叉乘得到 Y_1 轴的矢量方向, X_2 的矢量和 \vec{n} 叉乘得到 Y_2 轴矢量方向。

(7)计算由 $X_2Y_2Z_2$ 到 $X_1Y_1Z_1$ 旋转平移矩阵。

(8)根据计算的旋转平移矩阵对测量模型进行坐标变换,实现测量模型与CAD模型的配准。

(9)重复步骤(2)~(8)直到所有基准点的实测值与参考值的误差在规定的公差范围内。

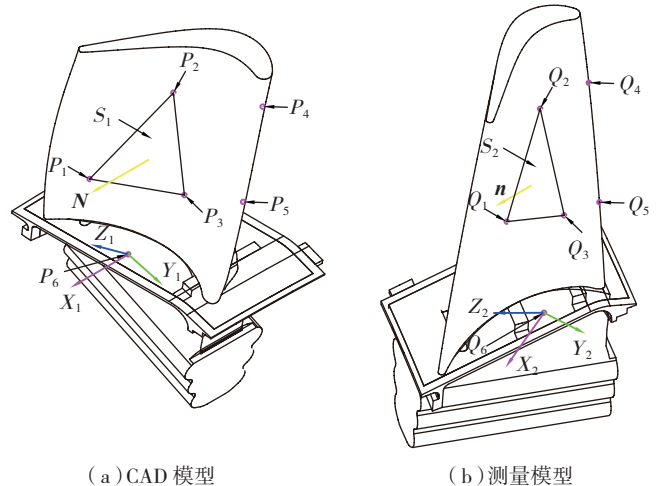


图2 CAD模型与测量模型坐标系的建立

Fig.2 Establishment of coordinate system of CAD model and measurement model

5 基于定位特征约束的叶片密集点云模型配准方法的验证

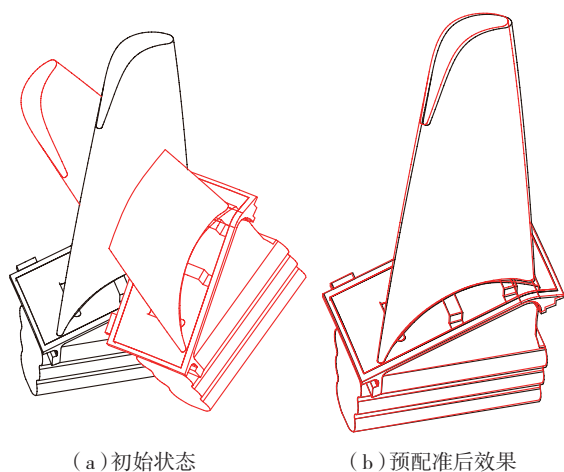
本文是在VC++软件平台基础上,借助VTK可视化类库和UG二次开发函数库完成的。

5.1 基于仿真模型的验证

为了证明该方法的可行性,本文首先使用仿真模型进行验证,仿真模型为设计模型导出的STL模型经过旋转平移后的位置。

5.1.1 预配准效果

分别选取叶片CAD模型与STL模型的叶片缘板边缘的3组点对为控制点,把CAD模型与STL模型进行预配准,把预配准结果导入Geomagic软件进行分析,配



(a) 初始状态 (b) 预配准后效果

图3 预配准效果与误差分析图

Fig.3 Result of pre-registration and error analysis

准结果如图3所示。

5.1.2 基于定位特征点的叶片模型配准

利用预配准后的 STL 模型,采用基于定位特征点的方法进行配准。首先,采用定位特征点的选取方法在 CAD 上进行定位点的选取,然后根据选取的特征点进行迭代配准,直到满足配准要求,最后对配准结果进行分析。

本试验把拟合成的样条离散为 10000 个点,采用的迭代条件为控制点的距离之差小于 0.008mm。表 1 给出了 CAD 基准特征点的坐标,选取叶盆上 3 个点建立坐标系的基准平面 S ,并确定 Z 轴的方向,两个边缘极值点来确定 X 轴的方向,并结合 Z 轴方向确定 Y 轴的方向,缘板上的点用来确定坐标系的原点 O 。

表1 CAD基准特征点的坐标

特征点	x	y	z
P_1	14.159598625	13.374938612	330.0000000
P_2	-9.413969373	0.930886530	330.0000000
P_3	6.029168505	9.091207967	384.796536688
P_4	-20.055484	1.865940	330.000000
P_5	-16.199637	-5.698123	380.000000
P_6	3.333372504	12.034657931	316.838427126

图4为迭代步数与6个定位特征点之间平均误差的关系图。可以看出,平均误差随着迭代步数的增加而减小,在前4步,平均误差的减小非常迅速,表明在开始的几步,两个模型配准之间的变换关系很大,随着步数的增加,每组控制点平均误差的变化逐渐变缓并逐步趋近于0,表明在这一阶段配准效果已经非常好,并逐步向完全重合发展。

经过 19 步迭代,6 组定位特征点之间的误差为: 0.004829, 0.004829, 0.004875, 0.005559, 0.007334,

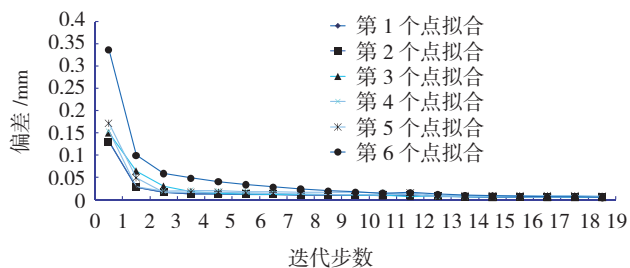
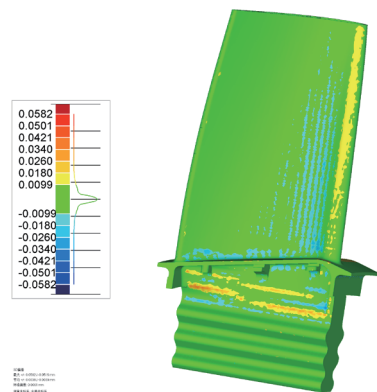


图4 迭代步数与6组定位点间的平均误差

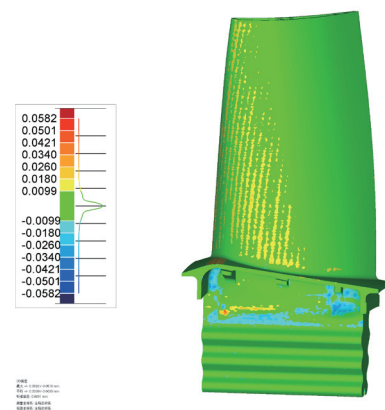
Fig.4 Average error between iterative steps and 6 group positioning points

0.004508。全部控制点都达到了预设的迭代终止条件,把迭代终止后 CAD 模型和 STL 模型预配准结果导入 Geomagic 软件进行分析,偏差云图如图 5 所示,配准后的最大偏差为 0.0582/-0.0516,平均偏差为 0.0039/-0.0039,标准偏差为 0.0061mm。

5.2 基于实测模型的验证



(a) 叶背



(b) 叶盆

图5 配准后的叶片STL模型与CAD模型的偏差云图

Fig.5 Deviation cloud charts of STL model and CAD model of registered blade

为了满足实际生产的需要,本文使用锥束 CT 扫描得到的叶片实测模型的点云数据进行试验。由于 CT 扫描的精度是 0.03mm,因此控制点间误差小于 0.03mm 即

可认为达到了配准效果。试验结果表明,经过 27 步迭代,达到预设要求,配准过程终止。6 组控制点坐标及控制点间的误差如表 2 所示,可以看出每个基准点的偏差都小于 0.03mm;图 6 为实测模型的初始位置,可以看出在初始状态下,两模型的偏差非常大;图 7 为预配准效果图,可以看出预配准以后的两模型较未配准前的重合度有了明显的提高,配准结果导入 Geomagic 软件进行分析;图 8 为配准后的误差云图,可以清楚地看到在设计坐标系下实测模型的各部分的偏差,在实际生产过程中,可以根据偏差数据更加方便地进行检测数据的分析,为实际生产和检测提供帮助。

表2 6组控制点坐标及控制点间的误差

控制点	x	y	z	偏差
P_1	16.406545196	-0.254899995	21.094500972	0.003856
Q_1	16.407181	-0.254916	21.098305	
P_2	-7.517052300	-10.986603271	24.862651463	0.000658
Q_2	-7.516522	-10.986850	24.862953	
P_3	-3.009914246	8.271631937	24.209814467	0.004968
Q_3	-3.009094	8.271740	24.214712	
P_4	-15.459792	0.586173	40.000000	0.018585
Q_4	-15.460215	0.567592	40.000000	
P_5	-12.9688	-4.67394	70	0.028473
Q_5	-12.973570	-4.702011	70.000000	
P_6	1.26070435	1.95721	61.578622500	0.013091
Q_6	1.248228	1.958953	61.582184	

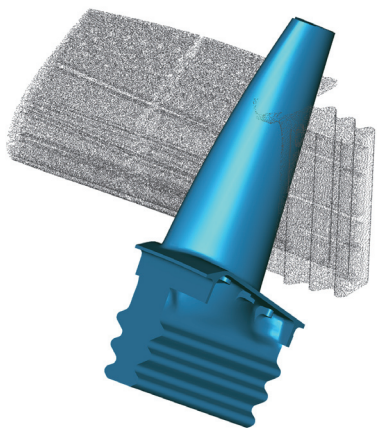


图6 CT实测模型的初始位置
Fig.6 Initial position of CT experimental model

6 结束语

本文针对锥束 CT 检测的空心涡轮叶片点云数据与



图7 CT实测模型预配准后的位置
Fig.7 Position of CT experimental model after pre-registration

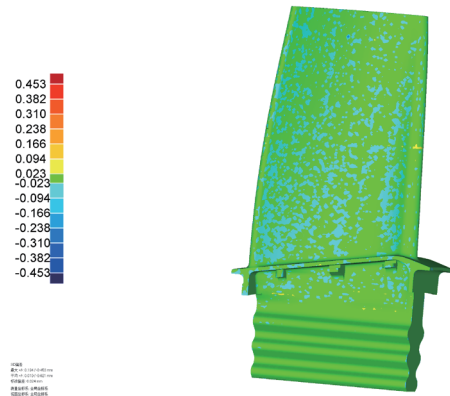


图8 配准后的叶片CT实测模型与CAD模型的偏差云图
Fig.8 Deviation cloud chart of CT experimental model and CAD model of blade after registration

计算机辅助设计模型的配准问题,提出基于定位特征点的叶片锥束 CT 点云模型配准方法,很好的实现了叶片模型的配准定位,通过定位特征点实现精确配准,实现了叶片锥束 CT 点云数据坐标系和设计坐标系的统一,很好地实现了锥束 CT 点云模型的配准定位,为叶片的检测与分析提供了方便,满足了实际生产的要求。

参考文献

- [1] 李世峰,卜昆,董一巍,等.空心涡轮叶片近净形过程变形分析与控制.中国电机工程学报,2011,31(14):109-112.
- [2] 卜昆,王虹,周桐,等.精铸空心涡轮叶片模具虚拟修模方法.航空学报,2011,32(3): 538-545.
- [3] 席平,孙肖霞.基于 CAD 模型的涡轮叶片误差检测系统.北京航空航天大学学报,2008,34(10):1159-1162.
- [4] 王润孝.先进制造技术导论.北京:科学出版社,2004.
- [5] 程云勇,张定华,卜昆,等.基于工业 CT 测量数据的空心涡轮叶片三维壁厚分析.机械强度,2009,31(5):791-796.
- [6] 龚正国.叶片多源测量数据的融合处理与误差分析.西安:西北工业大学,2009.
- [7] 黄胜利,卜昆,程云勇,等.涡轮叶片密集点云数据与 CAD

(下转第 100 页)

表2 蜡模关键尺寸参数测试

	连接槽宽度	总长度	最小厚度	肩台厚度	总厚度	盲孔直径	总高度
标准值	44.35	112.86	6.73	15.84	24.75	14.85	91.20
实际值	44.41	113.21	6.76	15.68	24.53	14.67	90.95

除模具内应力。对消除内应力后的金属树脂模具表面进行砂纸打磨,即可得到最终模具。

3 压蜡与精密铸造

将制造的光固化金属树脂模具应用于压蜡试验中,将模具外接冷却水管道,采用 SMZ09-5LB-Y 立式双工位液压免缸注蜡机进行压蜡中小批量压蜡实例。压蜡实验参数为:压蜡材料 162 型石蜡,注蜡温度 57℃,注蜡压力 2MPa,保压时间 15s,冷却水温 5℃,冷却时间 5min。

使用以上参数进行试验,制造了约 60 个蜡模,蜡模各个特征完整,关键尺寸保证较好。后续的铸造过程使用传统的熔模铸造工艺,将得到的蜡模涂挂多层耐火材料,待涂层固化后采用高温蒸汽除去蜡模,浇筑 AISI316L 不锈钢,得到不锈钢铸件,对不锈钢零件采用喷砂处理接口得到最终铸件。

采用 Tailo Surtronic25 便携式表面粗糙度仪测量铸件表面粗糙度,得到表面粗糙度为 4.97 μm,表面粗糙度较低。

在压蜡试验前后,模具没有出现明显缺陷,采用蜡模进行不锈钢浇铸,零件尺寸精度达到 CT4~CT6,最终获得符合要求的高精度复杂航空零件(见表 2)。

4 结论

本文将 SLA 技术与模具制造技术相结合,提出了一种新型压蜡模具制造方法。

使用光固化型壳填充金属树脂材料可以实现模具的高强度、高导热性能,同时将注塑模具中的冷却水道引入压蜡模具中,进一步加强了模具内部的强制换热,缩短了蜡模制造周期。在填充金属树脂材料过程中,采用真空脱泡、固化、消除内应力等措施,保证了模具的精度。

采用上述方法,整个模具的制造周期 6~8 天,制造成本 1500~2000 元,同时制造的光固化模具能够在较短时间内实现蜡模,因此特别适用于复杂铸件的单件、小批量的快速制造。

参考文献

[1] 汪文虎,张琳,雋英昌,等.航空复杂件精铸蜡模数控成型新工艺研究.机床与液压,2007,35(8):57-58.
[2] 司乃钧,许德珠.热加工工艺基础.北京:高等教育出版

社,2001.

[3] 罗新华.快速原型制造技术的应用及进展.机械制造,1998(3):7-9.
[4] 赵万华,李涤尘,洪军,等.光固化快速成型技术中的精度研究.机械工程学报,1997,8(5):35-36.
[5] Evans M A, Campbell R I. A comparative evaluation of industrial design models produced using rapid prototyping and workshop-based fabrication techniques. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5): 344-351.
[6] Hopkinson N, Dickens P. A comparison between stereolithography and aluminum injection moulding tooling. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(5):344-351.
[7] 宗学文,李涤尘,孙野,等.一种光固化模具及其制作精密铸造用蜡质模样的方法:中国,101954446[P].2011-01-26.
[8] Chung S, Im Y, Kim H, et al. Evaluation for micro scale structures fabricated using epoxy-aluminum particle composite and its application. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2):168-173.
[9] Ma S, Gibson I, Balaji G, et al. Development of epoxy matrix composites for rapid tooling applications. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193:75-82.
[10] 郭永娜.基于 SL 原型的金属树脂模具制造试验研究[D].西安:西安交通大学,2008.
[11] 孙金平.金属树脂模具材料配方与制模工艺实验研究[D].济南:山东大学,2005.
[12] 孙金平,王延庆,韩飞,等.金属树脂快速模具若干关键技术问题研究.模具工业,2007,33(6):65-69.
[13] Hsu C Y, Huang C K, Tzou G J. Using metallic resin and aluminum alloy molds to manufacture propellers with RP/RT technique. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14(2):102-107.
[14] 唐志玉,李德群,徐佩弦.塑料模具设计师指南.北京:国防工业出版社,1999.

(责编 谷雨)

(上接第 96 页)

模型配准方法.中国机械工程,2011,22(14):1699-1703.

[8] 郭慧,林大钧,潘家祯.基于遗传算法和最近点迭代法的多视角数据配准.东华大学学报,2007,33(3):347-349.
[9] 王蕊,李俊山,刘玲霞,等.基于几何特征的点云配准算法.华东理工大学学报,2009,35(5):768-773.
[10] 刘晶.叶片数字化检测中的模型配准技术及应用研究[D].西安:西北工业大学,2006.
[11] 周丽敏,卜昆,董一巍,等.基于简化点云带动的涡轮叶片快速配准技术研究.计算机集成制造系统,2012,18(5):988-992.
[12] 刘朋成,张新全.在三坐标测量机上叶片检测坐标系的建立方法//中国航空学会.中国航空学会青年科技论坛文集.北京:航空工业出版社,2004:521-524.
[13] Hsu T H, Lai J Y, Ueng W D, et al. An iterative coordinate setup, algorithm for airfoil blades inspection. Int J Adv Manuf Technol, 2005(26): 797-807.

(责编 深蓝)