

# 航空发动机精锻叶片自适应数控加工技术\*

Adaptive Techniques in CNC Machining of Aeroengine Precision Forging Blades

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 任军学 冯亚洲 米翔畅 许迎颖



任军学

教授,博士生导师。长期从事整体薄壁构件高效精密加工工艺技术与复杂结构零件多坐标数控加工编程技术研究,主持和参与了多项国家重大科研及国防预研项目。发表学术论文 80 多篇,其中被 SCI、EI 等收录 30 多篇。

为进一步推动国内航空航天等领域的重大装备实现减重、增效和改善性能的目标,大量复合制造工艺背景下的新型叶片被应用到现役或在研的航空发动机风扇和压气机中。随着大飞机的研制对航空发动机涵

航空发动机精锻叶片自适应数控加工技术集成了数字化检测、工件定位和模型重构等数字化制造领域中的多项技术,是实现以精锻叶片为代表的复合制造工艺背景下叶片类零件高效精密加工的一种系统解决方案。该技术的研究与应用对于改善我国航空发动机精锻叶片制造领域现状,提升先进制造技术水平具有重要意义。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.052

道比、推重比及服役寿命要求的不断提高,新型航空发动机多采用精密锻造方法制造叶片毛坯。精锻成形是先进制造技术的一个重要组成部分,广泛地应用于航空、航天、船舶等行业中复杂零件的加工制造,能够有效地节约能源和原材料,简化生产工序,其技术效益和经济效益都十分可观。与普通模锻叶片相比,精锻叶片可节省 20%~25% 左右的金属,材料利用率提高 50% 以上<sup>[1]</sup>。采用精锻工艺制造叶片毛坯在降低叶片制造成本的同时,对精锻叶片的高效精密数控加工技术提出了更为苛刻的要求。

在精锻叶片制造过程中,由于存在加工工艺复杂、毛坯一致性差、装夹定位精度不高等问题,使加工后的叶片精度差、效率低、废品率较高。

研究如何利用数字化检测的手段,对零件毛坯进行快速测量与定位,并进一步实现数字化检测、模型重构、数控加工一体化的自适应加工技术<sup>[2]</sup>对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意义重大。自适应数控加工技术已成为制约我国航空发动机叶片类零件高效精密加工的关键技术问题。本文将分析航空发动机精锻叶片的结构特点及目前制造工艺中存在的问题,讨论自适应数控加工关键技术航空发动机精锻叶片数控加工中的应用。

## 航空发动机精锻叶片制造中存在的问题

航空发动机精锻叶片、叶身型面为复杂空间曲面,且进/排气边圆弧

\* 国家科技重大项目(2013ZX04011031)资助。

半径小,整个叶片部分的曲率、扭转变化较大,是典型的薄壁复杂曲面零件。精锻叶片型面质量由锻模保证,成型精度高,成型后叶身型面不需要二次加工,受限于目前的精锻工艺技术,叶片的榫头、进/排气边均无法精锻成型,需要进行数控加工。在精锻叶片制造过程中,由于存在加工工艺复杂、毛坯一致性差、装夹定位精度不高等问题,其加工后的叶片精度差、效率低、废品率较高。因此,精锻叶片叶身曲面的精确定位和进/排气边的光滑过渡加工是其数控加工技术的关键问题,精锻叶片几何模型如图1所示。

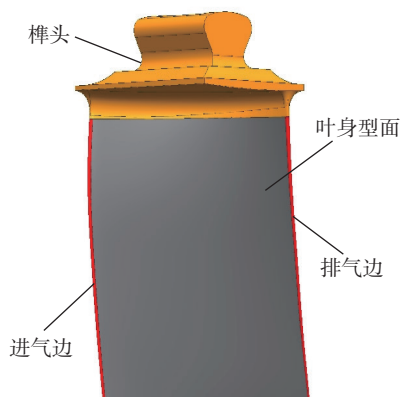


图1 精锻叶片几何模型

目前,精锻叶片通常使用专用夹具和校准工具进行初步装夹,再由操作人员反复调试实现最终装夹与定位。然而,精锻叶片属于薄壁类零件,其精锻叶身型面不一致以及夹具工装等因素导致定位的精度和效率较低,甚至无法满足加工精度的要求。采用专用夹具定位叶身曲面的方法加工叶片榫头,容易出现榫头与叶身位置度超差、加工效率低、产品一致性差等问题。

航空发动机叶片进/排气边加工主要采用手工抛磨、数控磨削、数控铣削等制造工艺<sup>[3]</sup>。传统手工抛磨的方式是依据样板控制叶片截面形状,加工过的精锻叶片进/排气边表面精度低、易烧伤、效率低且产品质量不稳定。采用数控磨削工艺加

工精锻叶片进/排气边,不能很好地解决余量分布不均匀、截面曲面形状及位置超差等问题。采用数控铣削的方式加工进/排气边,可以很好地解决上述加工工艺中存在的问题。然而精锻叶片属于薄壁类零件,精锻后因应力分布不均以及装夹变形等因素会导致叶身型面的几何参数与理论模型出现差异。依据理论模型进行数控铣削加工,会出现过渡区域无法光滑拼接的问题,影响精锻叶片加工质量。

目前,采用传统叶片加工工艺方法,已难以满足精锻叶片对表面完整性和精度控制的要求,制约了复合制造工艺背景下叶片类零件的高效精密加工制造水平和制造能力的提升。

### 自适应数控加工技术的应用

自适应加工可以分为工艺自适应与几何自适应。工艺自适应又可分为最佳自适应控制系统(Adaptive Control Optimization, ACO)和约束式自适应控制系统(Adaptive Control Constraint, ACC)两大类。ACO追求一种最佳的加工过程指标,如加工时间、切除率或表面质量某项指标达到最优。ACC则是要保持某种约束的恒定,如扭矩、切削力或切削功率,以提高加工效率、保持加工过程稳定及保证加工质量。几何自适应是随零件的形状或位置变化而进行的加工,也称为自适应数控加工。自适应数控加工技术集成了数字化检测、工件定位和模型重构等数字化制造领域中的多项技术,是实现航空发动机叶片类零件高效精密加工的一种系统解决方案。鉴于自适应数控加工技术的广阔应用前景,各发达国家开展了相关技术研究。如欧盟第六框架下优先发展的航空空间项目——航空发动机涡轮部件的自动化修复系统(AROSATEC)即为自适应加工技术应用的典型案例<sup>[4]</sup>。该系统集成了德国BCT公司的自适应加工技术,

通过在线检测叶片修复区域的几何形状,自动生成加工路径。英国TTL公司的自适应加工技术相当成熟,并已成功应用于叶片类零件的数控加工和修复加工中<sup>[5]</sup>。英国Delcam公司推出的PowerINSPECT自适应加工模块件,在数字化检测过程中监测零件的实际位置,并自动建立零件与加工路径的位置对应关系<sup>[6]</sup>。国内自适应加工技术的研究起步较晚,GAO等<sup>[7]</sup>通过待修复加工零件的精密检测,基于重构模型重新规划刀位轨迹,实现了航空复杂零件的自适应修复。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在薄壁叶片高效精密数控加工方面积累了丰富的经验,并且在自适应数控加工技术方面开展了大量的研究工作,目前已基本突破自适应数控加工的关键技术问题,建立了叶片类零件的自适应数控加工系统,并通过了试验验证。

自适应数控加工技术适用于余量不均匀的复杂曲面加工、整体叶盘的修复加工及空心叶片的数控加工,是提高传统数控加工精度和效率的有效办法。从技术实现角度,自适应数控加工技术是以待加工零件的设计模型及相应的加工程序为基础,根据加工区域的实测结果获取零件模型的方位变化及形状偏差,在名义加工程序的基础上自适应地生成实际加工区域的加工代码,并保证与前期工艺加工曲面模型的光滑过渡。该项技术涵盖了CAD/CAM领域中的数控加工编程、曲面建模、数字化检测、逆向工程、工件装夹定位等多项关键技术,是先进制造技术的重要组成部分。

自适应数控加工系统主要由4个模块组成:(1)数字化检测模块,通过三坐标测量或在机测量的方式,分别获取配准定位和模型重构所需的特征点集;(2)配准定位模块,基于测量的特征点集,通过配准算法确

定理论模型在毛坯中的位置,实现加工余量的自适应优化;(3)工艺几何模型重构模块,基于测量的特征点集,重新生成待加工区域的工艺几何模型。(4)加工轨迹自动生成模块,基于重构的工艺几何模型,自动生成数控加工刀位轨迹,最终完成零件的自适应数控加工。自适应数控加工基本工作流程如图2所示。

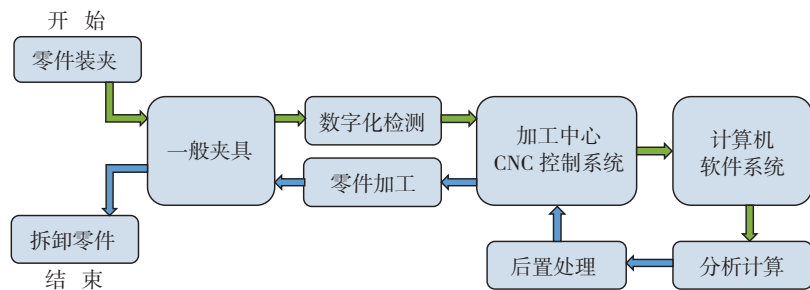


图2 自适应数控加工基本工作流程

## 精锻叶片自适应数控加工关键技术

基于精锻叶片的结构特点及制造工艺,自适应数控加工以叶片理论模型为基础,通过数字化检测的方式获取基于配准与建模的特征点集,将叶片特征点集与其理论模型进行配准,实现叶片的快速定位。在此基础上,通过配准方法实现叶片待加工区域余量的自适应优化,并结合叶片理论模型进行工艺几何模型的自动构建。最后,根据叶片理论模型、工艺几何模型,联机自动生成叶片加工轨迹并传送至数控系统,实现精锻叶片高效精密自适应数控加工。精锻叶片自适应数控加工涉及的关键技术有以下3个方面:

### 1 装夹方案

精锻叶片的数控加工通常基于精锻成型的叶身曲面进行定位,在规划装夹方案时,不仅要保证定位的准确性、稳定性和由装夹引起的叶片自由曲面的夹紧变形控制,而且要满足装卸便捷、定位精度高、夹紧力均匀、重复装夹一致性好等要求。本文使用硬装夹的方式规划精锻叶片的装

夹方案,要求夹具通过对精锻叶片叶身的定位和夹紧,在保证曲面定位精度的前提下,满足自适应数控加工要求的重复性和稳定性要求。精锻叶片自适应数控加工夹具由两部分组成,分别实现对叶片榫根、叶尖和进/排气边的数控铣削加工。夹具设计模型如图3所示。

精锻叶片自适应数控加工夹具

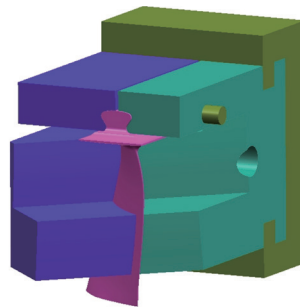
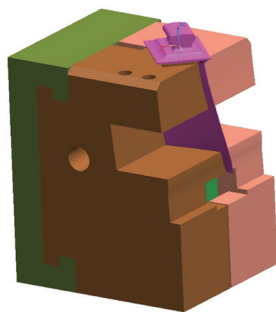


图3 夹具设计模型

主要由转动台、夹具箱体、箱盖、工艺台定位块、紧固螺栓、锥形定位销、定位块等构成,设计满足六点定位原理。其中箱体部分与叶片接触面根据叶身型面加工获得,起到贴合和夹持的作用;通过内六角螺栓对零部件的传递实现对叶片夹紧,起到夹紧力均匀、平稳的作用;叶片装夹时使用力矩扳手紧固螺栓的方式实现叶片的夹紧过程,装夹便捷且避免叶片的夹伤和脱落;夹具通过气动快换卡盘连接机床,方便自动化生产线中机械手的装卸。该夹具结构简单,安装方便,定位精度高,可多次装拆而不影响定位精度,满足精锻叶片自适应数控加工的要求。

### 2 数字化检测

数字化检测是通过特定的测量设备和测量方法,获取叶片表面离散点数据的测量过程。其通过获得零件的表面三维信息,为实现复杂曲面的配准、建模和数控加工提供基础数据。针对精锻叶片的结构特点及高效精密自适应数控加工的要求,将三坐标测量和在机测量相结合是目前较为理想的测量方法。同时,测量点的分布和数量都直接影响配准定位的精度和曲面模型重构的准确性。因此,高效率、高精度地实现零件表面的数据点采集是非常重要的。

测量点数目通常依据设计图纸给定的型面公差、加工精度、测量系统和自由曲面形状及尺寸等情况确定。测量点的分布形式与自由曲面的曲率有很大的关系,如何根据曲面

曲率变化情况,自动调整测点分布使其与曲面特征一致,实现测点的自适应分布,已有很多国内外学者开展过相应的研究。根据测点在曲面上的分布形式,曲面采样方法主要有均匀采样法、曲率采样法、混合采样法等。

针对精锻叶片在进/排气边圆弧半径小、曲率变化较大的结构特点,可以采用将叶身曲面划分为进气边、排气边、叶盆、叶背4个区域。在叶片进/排气边测量时按照曲率采样法分布测量点,而叶盆、叶背按照等弧长和等参数的混合采样法分布测量点,如图4所示。

### 3 模型配准定位

常用的配准方法可以总结为以下3类:(1)基于标记的配准方法。

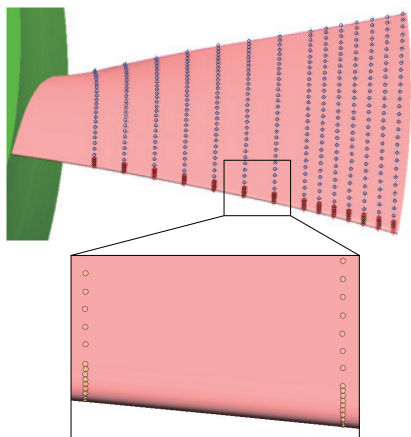


图4 精锻叶片测量点分布

该方法是一种简单有效的配准定位方法,一般用于产品几何形状检测中多视测量数据的拼合定位;(2)基于特征的配准方法。该方法使用产品测量数据与模型上的几何特征作为参考,进行模型的配准定位;(3)基于表面点集的配准方法。该方法使用产品的表面测量数据点进行模型配准运算,确定待配准模型之间的空间变换矩阵<sup>[8]</sup>。迭代最近点(Iterative Closest Point,ICP)算法是典型的基于表面点集的配准方法<sup>[9]</sup>,由于这个算法通用性好,在自由曲面的工件定位与检测中得到了广泛应用。

模型配准是实现零件定位、模型评估、误差分析等的前提条件,配准问题的研究对提高数字化检测精度和效率。针对精锻叶片几何形状检测中的配准定位问题,依据叶片型面不同区域不同公差的设计要求,可以在ICP算法的基础上,采用基于约束区域的配准方法,以实现精锻叶片测量数据与理论模型的快速配准。

以理论模型表面 $S$ 为基准,其向内和向外的误差曲面 $S_1$ 和 $S_2$ 之间所形成区域称为约束区域,约束区域外的区域为自由区域,如图5所示。

通过判断数据点是否位于等距曲面 $S_1$ 与 $S_2$ 之间的区域,来确定该点在配准过程中不同的权值。其中,权因子与点到曲面距离有关的函数,可表示为:

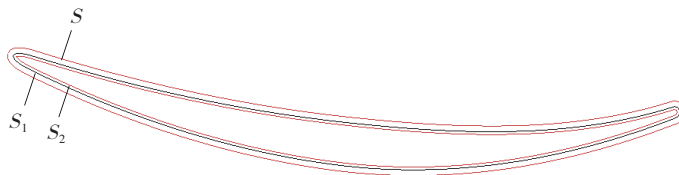


图5 约束区域示意图

$$w_i = \begin{cases} 1 & (-\varepsilon_2 \leq \text{dist}_{(P,Q)}^{(t)} \leq \varepsilon_1) \\ 1 + \frac{\text{dist}_{(P,P_1)}^{(t)}}{\text{dist}_{\max}^{(t-1)}} & (\text{dist}_{(P,P_1)}^{(t)} > \varepsilon_1 \quad \text{dist}_{(P,P_1)}^{(t)} < -\varepsilon_2) \end{cases}$$

其中, $\varepsilon_1$ 为曲面 $S_1$ 与 $S$ 之间的距离; $\varepsilon_2$ 为曲面 $S_2$ 与 $S$ 之间的距离;且 $\varepsilon_1$ 与 $\varepsilon_2$ 都大于0, $\text{dist}_{(P,P_1)}^{(t)}$ 表示在第 $t$ 次迭代过程中,数据点 $P$ 到理论模型上投影点 $P_1$ 的距离; $\text{dist}_{\max}^{(t-1)}$ 表示在第 $t-1$ 次迭代过程中,所有数据点到理论模型对应投影点距离的最大值。引进约束区域权因子的目标函数数学模型如下:

$$F_1 = \frac{1}{N} \min_{R,T} \sum_{i=1}^N w_i \|P'_i - (RP_i + T)\|^2$$

式中, $P_i (i=1,2, \dots, N)$ 为待配准模型上的测量数据, $P'_i$ 为 $P_i$ 在理论模型表面上的最近点, $R$ 、 $T$ 分别为配准时的旋转矩阵和平移矩阵。通过求解旋转矩阵 $R$ 与平移矩阵 $T$ ,从而达到了目标函数 $F_1$ 最小,求解目标函数中变换矩阵 $R$ 、 $T$ 是一个带约束的优化计算问题,可以基于ICP算法进行目标函数数学模型的求解。ICP算法通过求取最小平方和来减小每一次迭代过程中对应点集的平均误差,以及通过查找最近邻点来减小对应点对之间的距离,ICP算法的

收敛效率与参与配准的数据点集相关。

### 基于曲面变形的工艺几何模型重构

针对叶片类零件自适应数控加工工艺几何模型重构,若不存在设计模型,可直接将测量数据拟合合成NURBS曲线,再根据截面线放样生成叶身曲面得到叶片型面;若存在设计模型,可以通过对变形区域特征点的采集与分析,建立待加工区域与设计模型之间的映射关系,构造基于理论模型的工艺几何模型,以精确描述叶片的几何形状变化,从而生成自适应加工程序代码。可以根据叶片类零件的结构特点和制造工艺选择工艺几何模型重构方案。工艺几何模型重构方案如图6所示。

精锻叶片是复杂薄壁类零件,由于锻造工艺、装夹变形等影响因素,设计阶段的理论模型不能直接应用于进/排气边的数控加工编程。此时,需要根据精锻叶片毛坯的实际测量数据,自适应地构建其工艺几何模型

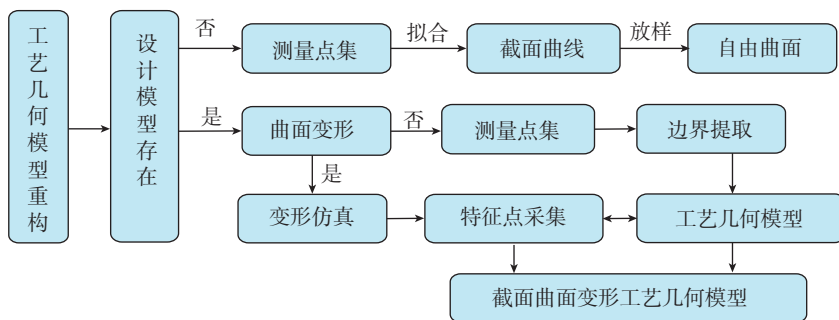


图6 工艺几何模型重构方案 (下转第59页)

零件表面粗糙度值 1~2 个等级,表面应力状态均为压应力,振动光饰后的表面形貌有很大改观,表面纹理均匀规整,零件表面质量和表面完整性大幅度地提高。榫槽边缘采用数控自动倒角机实现了机械自动成型加工,与传统的手工加工比较,榫槽边缘表面粗糙度好,倒圆尺寸均匀,不

同榫槽之间边缘尺寸一致性达 90% 以上,加工质量大幅度地提高,满足使用性能要求。

以上开展的表面完整性制造技术应用研究,已在涡轮盘零件批量生产中应用,并且通过对工艺参数的优化和固化,已形成了典型加工工艺,实现了产品的优质合格交付。该项

技术研究还需要进一步深入和推广,特别是表面完整性指标对其使用性能和寿命的影响程度需要进行系统研究和试验。通过大力开展表面完整性制造技术的创新和探索,以满足新一代航空发动机高可靠性和长寿命的需求。

(责编 春早)

(上接第 51 页)

[2] GINGER G. Albany engineered composites: weaving the future in 3D, Composites World [EB/OL]. 2014[2014-03-04]. <http://www.compositesworld.com/articles/albany-engineered-composites-weaving-the-future-in-3-d>.

[3] KLAUS S, HANS W. Next engine generation: materials, surface technology, manufacturing processes, What comes after 2000 [EB/OL]. 2000[2000-01-01]. <http://www.mtu.de>.

[4] YOUNG W K, WILFRIED S, JUNPIN L, et al. Gamma titanium aluminide alloys 2014: a collection of research on innovation and commercialization of gamma alloy technology. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2014.

[5] REED R C. The superalloys: fundamentals and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

[6] KOTHARI K. Manufacturing Techniques for Titanium Aluminide Based Alloys and Metal Matrix Composites [D]. PhD Dissertation, College Park, Maryland: University of Maryland, 2010.

[7] KYOKO K, AN C Y, Tadaharu Y, et al. Development of an oxidation-resistant high-strength sixth-generation single-crystal superalloy TMS-238. Super Alloys 2012: 12th International Symposium on Superalloys. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 189-195.

[8] WALSTON S, CETEL A, MACKAY R, et al. Joint development of a fourth generation

single crystal superalloy. NASA Technical Report (NASA/TM-2004-213062), Hanover, MD: NASA, 2004.

[9] PAUCHARD A, SYNOYAY. Precision cutting and grooving with the laser microjet [EB/OL]. 2010[2000-01-01]. <http://www.swissphotonics.net>.

[10] MARINESCU (Eds.) I D. Handbook of advanced ceramics machining. Boca Raton: CRC Press, 2007.

[11] KARRREN L M, PETER F, TORTORELLI, et al. Evaluating environmental barrier coatings on ceramic matrix composites after engine and laboratory exposures. Proceedings of ASME TURBO EXPO 2002, Three Park Avenue, New York: ASME, 2002.

(责编 叶枫)

(上接第 55 页)

以精确描述待加工区域的几何形状,并以此为基础规划刀位轨迹,从而实现精锻叶片的高效精密自适应数控加工。

## 结论

本文针对航空发动机精锻叶片制造工艺中存在的问题进行分析,对自适应数控加工中装夹方案、数字化检测、配准定位、工艺几何建模等关键技术进行了系统的阐述。此项技术的深入研究与应用不仅可以有效解决精锻叶片加工中存在的技术难题,同时对复合制造工艺背景下叶片类零件的高效精密加工具有一定的指导意义。该技术作为智能加工的重要组成部分,在满足几何自适应的基础上,实现工艺参数的自适应控制,是未来自适应加工技术的发

展方向。

## 参考文献

[1] 詹梅. 面向带阻尼台叶片精锻过程的三维有限元数值模拟研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2000.

[2] ZHANG D H, ZHANG Y, WU B H. Research on the adaptive machining technology of blisk. Advanced Materials Research, 2009, 69-70: 446-450.

[3] LIM T S, LEE C M, KIM S W, et al. Evaluation of materials of cutter orientations in 5-axis high speed milling of turbine blade. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 30(2): 401-406.

[4] BREMER C. Adaptive machining technology and data management for automated repair of complex turbine components with focus on blisk repair. International Symposium on Air Breathing Engines, 2007, 18: 1-11.

[5] WALTON P. Adaptive machining for turbine blade repair [EB/OL]. [2007-11-02] [2015-10-05]. <http://www.mmsonline.com/>

articles/adaptive-machining-for-turbine-blade-repair.

[6] SULLY M. Delcam adaptive manufacturing: Resolving your manufacturing problems and delivering a global productivity advantage [EB/OL]. [2012-11-2]. [http://theoac.ca/Storage/27/2255\\_Flexible\\_Mfg\\_Systems\\_and\\_Adaptable\\_Machining\\_-\\_Delcam\\_-\\_Nov\\_2012.pdf](http://theoac.ca/Storage/27/2255_Flexible_Mfg_Systems_and_Adaptable_Machining_-_Delcam_-_Nov_2012.pdf).

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

[8] KO K H. Algorithms for three-dimensional free-form object matching [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2003.

[9] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

(责编 春早)