

# 基于光学扫描的叶片截面测量 技术研究\*

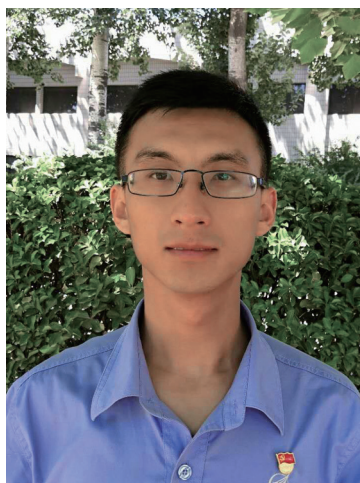
毕超,王津,李迪,房建国

(北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室,北京 100076)

**[摘要]** 航空发动机叶片型面数据的快速精确获取是提高叶片加工质量、保证整机工作性能和使用寿命的关键环节。为实现叶片等空间复杂曲面零件的几何形状和尺寸信息的高精、高效测量,基于非接触式的光学扫描测量系统,开展了其在叶片截面参数检测中的应用研究。该光学扫描测量系统以传统的三坐标测量机为系统平台,配备基于环形激光三角法测量原理的新型激光扫描测头,结合专用的叶片测量软件,实现叶身指定截面的几何参数测量与评价,因而可以作为一个技术领先的用于快速精确测量叶片和质量控制的解决方案。为验证该光学扫描测量系统在叶片型面扫描测量中的应用效果,以一个大扭曲风扇叶片作为被测对象,对其5个截面进行扫描测量,通过模型匹配获得了该叶片的每个截面上的轮廓度误差、形心位置度误差和弦线转角误差等,充分体现出了该测量系统的有效性和实用性。

**关键词:** 非接触;叶片型面;光学测头;三坐标测量机;扫描

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2018.15.091



毕超

工学硕士、高级工程师,主要从事精密测试技术及仪器等方面的研究工作。

在航空领域中,叶片是涉及发动机整体性能的关键零件,不仅数量多、形状复杂、尺寸跨度大,而且其工作性能会受到自身几何形状和尺寸精度的直接影响。通常,叶片型面是根据流体力学原理进行设计的,属于三维自由曲面,多呈现为弯扭上升的形态特征,其设计水平和加工质量在很大程度上决定了发动机的能量转换效率<sup>[1]</sup>。随着我国航空工业的飞速发展,为了满足新一代航空发动机的高性能、大推力、长寿命以及工作安全等的要求,叶片等关键零件必须具有精确的尺寸、准确的形状和严格的表面完整性,这就需要着力提升此类零件的加工质量<sup>[2]</sup>。然而,要制造出大量符合设计要求的叶片,对其进行精确而高效的测量就成为叶片制造过程中的必要环节,而且测量的精度直接决定着制造的精度。

当前,国内对于叶片等复杂曲面

零件的检测,大多采用传统的三坐标测量机,逐点采集叶片轮廓上各个被测点的坐标值,然后通过数据建模等分析手段获取被测叶片的几何尺寸和形状误差等参数。这种方法虽然能够达到很高的检测精度,但由于采用了接触式测头,因而检测效率低、易发生干涉效应,并且存在测端半径补偿误差<sup>[3]</sup>。这些因素使得三坐标测量机在空间自由曲面测量中的应用受到了很大限制,无法应对批量叶片的检测任务,因而迫切需要研制和开发出新型的测量设备。

近年来,随着测量技术的发展和进步,越来越多的非接触式测量手段被引入到航空制造领域中,应用效果显著,极大地弥补了接触式测量方法和设备的局限。在欧美等航空发达国家,针对叶片和喷嘴等发动机关键零件的几何形状和尺寸测量需求,已经形成了较为完善的测量理论,并且

\*基金项目:国家科技重大专项(2013ZX04011-031)。

开发出了商业化的检测设备,从而在加工、测量等方面实现了自动化、智能化<sup>[4]</sup>。例如,德国 Wenzel 公司的光学高速多轴测量系统 CORE-DS,采用新一代的白光点光源测头来取代传统的接触式测头,可以实现叶片型面的快速扫描测量和参数评价,从而克服了接触式测头在测量叶片时的固有弱点,为叶片测量开拓出一片全新领域。而国内在高精度的光学扫描测量技术与设备方面还处于研究阶段,尚不能实现工程化应用。

为了实现叶片等复杂型面零件的几何形状和尺寸的高精高效测量,本文基于非接触式的光学扫描测量系统,开展了其在叶片型面的精密高效测量技术方面的应用研究工作。该测量系统以传统的三坐标测量机为系统平台,并采用新型的激光扫描测头作为前端传感器,能够实现叶片型面数据的高效、精确获取,再结合专用的叶片测量软件,就可以实现被测叶片型面指定截面的几何参数测量与评价。最后,本文应用该测量系统对某型航空发动机的一个大扭曲风扇叶片的 5 个截面进行了扫描测量,并将测量数据与理论模型进行匹配,获得了该叶片在每个截面上的进气边、排气边、叶盆和叶背等部位的轮廓度误差以及截面形心的位置度误差和弦线的转角误差等参数,试验结果充分说明了该光学扫描测量系统在叶片型面测量中的有效性和实用性。

### 叶片的型面结构与测试要求

叶片在航空发动机中的功能和工作特点决定了它是发动机中形状最复杂的零件<sup>[5]</sup>。随着发动机逐步从涡喷系列发展到涡扇系列,叶片的型面结构也越来越复杂,正呈现出扭曲弯度变大、叶弦变宽、叶身变薄且前掠加大的变化趋势<sup>[6]</sup>,这些都给叶片的加工与测量带来了巨大难度。

通常,叶片由叶身、缘板和榫头

3 个部分组成,而叶身又分为进气边、排气边、叶盆和叶背 4 个部分<sup>[7]</sup>。图 1 所示为叶身的一个截面,当叶片处于工作位置时,迎着气流的叶片边缘部分为进气边,即由  $P_1$  到  $P_2$  的一段圆弧(或椭圆弧);而顺着气流的叶片边缘部分为排气边,即由  $P_3$  到  $P_4$  的一段圆弧(或椭圆弧);叶盆为叶身的压力面,是沿排气边到进气边叶身凹进的一面,即由  $P_4$  到  $P_1$  的部分;而叶背为叶身的吸力面,是沿进气边到排气边的叶身凸起的一面,即由  $P_2$  到  $P_3$  的部分。

叶片的每个截面都是由封闭的样条曲线构成的,其复杂性给叶片型面的检测增加了难度。目前,大多数的叶片测量手段都是通过检测叶片截面的特征参数来判断叶片是否合格<sup>[8]</sup>。面对批量叶片的检测需求,需要测量设备满足如下要求:

(1) 测量精度高。对于叶盆和叶背等曲率半径大的部位,要求测量精度达到 0.02~0.08mm;而对于进气边和排气边等曲率半径小的部位,则对测量精度的要求更高,尤其是对形状和轮廓的测量精度要求。

(2) 测量速度快。在整台航空发动机中,叶片的种类和数量都很多,因而应尽可能提高测量速度,以满足批量叶片的检测任务要求。在测量效率方面,光学扫描测头通常要比接触式扫描测头高出 2~3 倍。

(3) 避免叶片在测量过程中发生变形和划伤,造成叶片报废或者留下安全隐患。

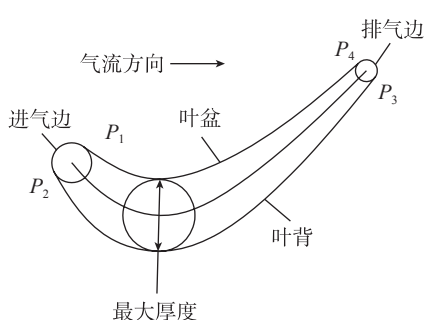


图1 叶片截面的各个部分

Fig.1 Sections of the blade surface

(4) 有利于叶片的设计、加工与检测等过程的集成和一体化。

### 光学扫描测量系统

基于以上要求,本文应用非接触式的光学扫描测量系统对叶片型面进行高速扫描测量,以获取叶片型面的几何形状和尺寸信息。首先,由激光扫描测头获取叶身型面大量点云数据,通过这些三维空间点所构成的点云来表达系统对叶身型面的采样结果。然后,在专用测量软件的辅助下,以标准叶片的 CAD 模型作为参照,对被测叶片的点云数据进行比对分析和评价。

在测量过程中,需要检测的叶片型面参数主要是指型面轮廓和几何尺寸(包括叶型厚度、叶型弯扭、弦长和进排气边位置等)<sup>[9]</sup>。目前,等截面法是叶片型面检测中普遍采用的方法,也符合图纸上对控制截面线轮廓度的要求。所谓等截面法,就是将一条测量轨迹控制在叶片的一个截面内。在等截面法测量中,坐标系的建立非常重要。由于等截面法是测量叶片的截面线,然后通过所获得的截面线数据点云与理论截面线进行比对,从而完成截面线轮廓度误差的评定,因而测量坐标系必须与理论截面线数据的坐标系一致。一般情况下,测量坐标系的 Z 轴要与发动机的积叠轴重合,因而等截面法测量的截面就是与积叠轴垂直的平面。

本文所应用的光学扫描测量系统以常规的三坐标测量机作为系统平台,采用新型的非接触式激光扫描测头 WIZprobe 替代了传统的接触式测头,从而将三坐标测量机的空间移动范围大、定位精度高、通用性强等优点与激光扫描测头的非接触、光斑直径小、采样频率高等优点结合在一起<sup>[10]</sup>,为叶片型面提供了方便、快速和可靠的高精度测量解决方案。

#### 1 系统平台

如图 2 所示,系统平台在整体上

采用了先进的结构设计和工艺技术, 轻便高效, 而且敞开的工作空间更具操作性。工作台的材料为优质天然花岗岩, 具有良好的热稳定性。X、Y 和 Z 3 个直线运动轴均为气浮导轨, 并且都采用了英国 Renishaw 公司的高精度光栅检测系统, 从而保证了运动的平稳和精确, 各轴的行程范围分别为 700mm、650mm 和 500mm, 整体的定位精度可以达到  $(3.0+3.5 \times L) \mu\text{m}$  ( $L$  为被测零件的长度)。

另外, 为了使测量系统更具灵活性, 选用英国 Renishaw 公司的 PH10M 测头座, 以将激光扫描测头 WIZprobe 安装在光学扫描测量系统的 Z 轴移动末端上。PH10M 作为一种测头附件, 具有水平轴和垂直轴两个回转轴, 并且可以按  $7.5^\circ$  的步距角进行转位。其中, 水平轴的转动范围为  $0^\circ \sim 105^\circ$ , 共有 15 个位置; 垂直轴的转动范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 共有 48 个位置。因此, PH10M 一共可以到达 720 个转角位置, 充分满足了根据被测表面调整激光扫描测头空间方位的需求。

## 2 激光扫描测头

在光学测头方面, 选用了以色列 Nextec 公司的新型激光扫描测头 WIZprobe (图 3) 来完成高精度的扫描测量和几何数据采集任务。WIZprobe 测头的体积小, 并且配有标准的 CMM 旋转磁头接口, 因而兼



图2 非接触式的光学扫描测量系统  
Fig.2 Non-contact optical scanning system

容已有的 PH10M 测头座。该型激光扫描测头既能够与三坐标测量机结合以有效取代传统的接触式测头, 也可以作为独立的产品应用于工业生产线上。

WIZprobe 测头基于独特的环形激光三角法测量原理, 其内部光路不同于传统的激光三角法测头, 而是通过一个超环面透镜同时进行不限数量的多个三角法测量(图 4), 从而将激光技术与图像处理相结合, 显著提高了光斑质心的探测精度, 具有适应性强和测量精度高等优势。同时, 基于实时闭环的自适应控制技术, WIZprobe 测头的激光功率和 CCD 灵敏度可以进行自动调整和校准, 因而在测量过程中, 测头可以根据外界条件的不断变化实时进行自动校准, 从而使测量精度受材质、颜色和表面加工形式等因素的影响较小。



图3 激光扫描测头 WIZprobe  
Fig.3 Laser scanning sensor WIZprobe

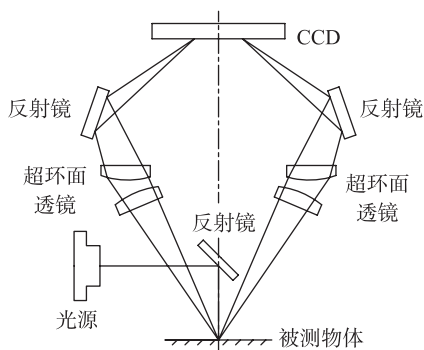


图4 WIZprobe测头的测量原理  
Fig.4 Measuring principle of WIZprobe

WIZprobe 测头的输出形式为高精度的单个数据点, 其激光光斑的直径为  $30 \mu\text{m}$ , 采样的频率为 50 点/s, 测量分辨率为  $1 \mu\text{m}$ , 测量范围为  $(50 \pm 5) \text{mm}$ , 单点精度为  $6 \mu\text{m}$ , 单点重复性可达  $0.3 \mu\text{m}$ , 100 个点的最佳拟合精度可以达到  $2 \mu\text{m}$  ( $2\sigma$ ), 可以应用于扫描小型、精密、软轻薄等特殊零件, 也可以用于复杂壳体的扫描。

基于上述的系统平台与激光扫描测头, 该光学扫描测量系统的测量精度可以达到  $14 \mu\text{m}$  ( $2\sigma$ ), 此精度水平已经可以满足目前绝大多数航空发动机叶片的检测任务需求。在叶片截面的扫描测量过程中, 该测量系统能够准确测量叶片截面的所有轮廓尺寸, 并与理论 CAD 模型进行对比和评价。

## 试验验证

为了验证该光学扫描测量系统在叶片等复杂曲面零件测量中的实用性和有效性, 本文选取某型航空发动机的一个风扇叶片作为被测对象, 在其叶身型面上选取 5 个截面, 并应用该光学扫描测量系统对每个截面的轮廓参数进行扫描测量。如图 5 所示, 该风扇叶片的尺寸大并且形状复杂, 具有现代航空发动机叶片的典型特征。

在测量工作开始前, 需要对该光学扫描测量系统进行精度检定与校准, 以确定系统的各项功能是否正常以及能否达到规定的精度水平。在此过程中, 本文采用“标准球杆规”作为检定器具。该标准球杆规主要由 1 根球杆和 6 个精密钨合金标准球构成, 其中, 每个标准球的尺寸以及相邻标准球之间的距离已经过计量标定, 符合精度检定与校准要求。在该标准球杆规上, 每个标准球的直径为  $20 \text{mm}$ , 而且相邻标准球的球心间距为  $70 \text{mm}$ , 从而组成了  $70 \times 5 = 350 \text{mm}$  的特征与长度计量标

准器具。

图6所示为该光学扫描测量系统的精度检定与校准过程。在系统允许的极限范围内,将标准球杆规放置于7个不同方位(沿着X、Y、Z坐标轴的3个方位以及空间对角线的4个方位),在每个方位处分别对标准球杆规进行3次扫描测量,并计算相邻标准球的球心间距,因而整个过程共进行了105次球心间距的测量。然后,将所获得的数据与标准球杆规

的标定球心间距作对比,其差值即可作为系统的综合测量误差。如果此误差不大于系统的最大允许测量误差,则说明该系统的测量精度符合要求。

经过上述精度检定与校准过程,该系统的重复性精度和综合测量误差均符合要求,因而可以用于开展后续的风扇叶片测量任务。

在测量过程中,首先,通过工装夹具将该风扇叶片的榫根固定在光

学扫描测量系统的工作台上;然后,基于等截面法的测量原理,通过上位机软件规划测量轨迹,以对指定的叶片截面进行扫描测量,从而获取叶片截面上的点云数据;最后,将测量数据与叶片的CAD模型进行匹配以实现测量结果的评价。图7所示为该叶片的5个截面上的进气边、排气边、叶盆和叶背的轮廓度测量结果,图8所示为叶片截面的形心位置度测量结果,图9所示为叶身弦线转角的测量结果。

从图7~9中的误差值大小和分布可以看出,该风扇叶片的5个截面上的轮廓度误差的最大值达到了0.5mm,而叶身的形心位置度误差的最大值处于0.3mm量级,叶身弦线转角误差的最大值处于0.2°量级。另外,各项误差值的大小随着截面高度(Z坐标)的上升呈现出稍显增大的趋势。

从这些数据可以看出,目前该风

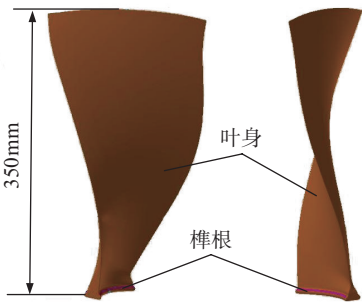


图5 被测风扇叶片

Fig.5 Fan blade to be measured

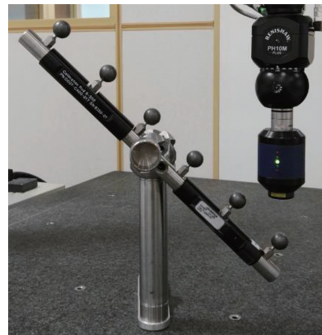
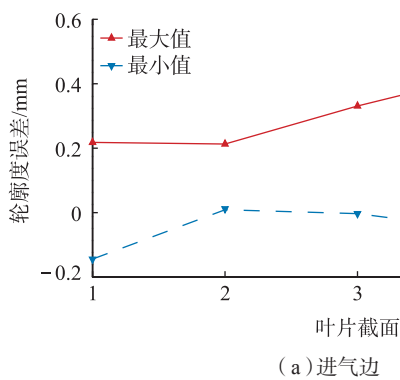
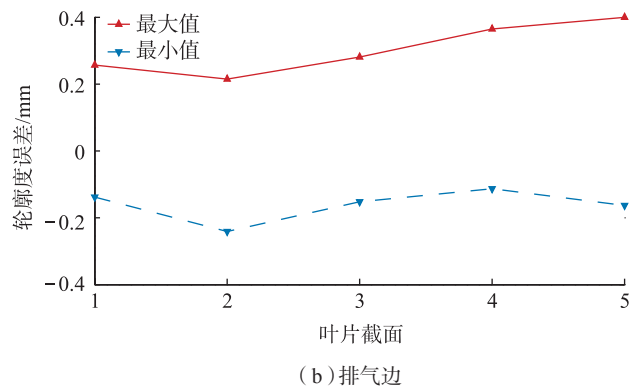


图6 精度检定过程

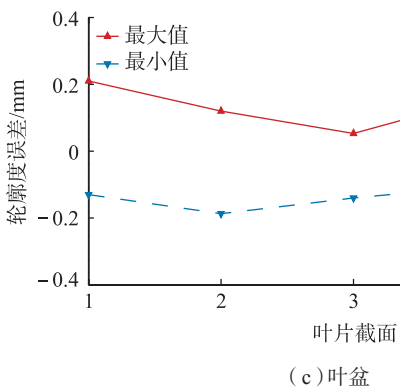
Fig.6 Accuracy verification procedure



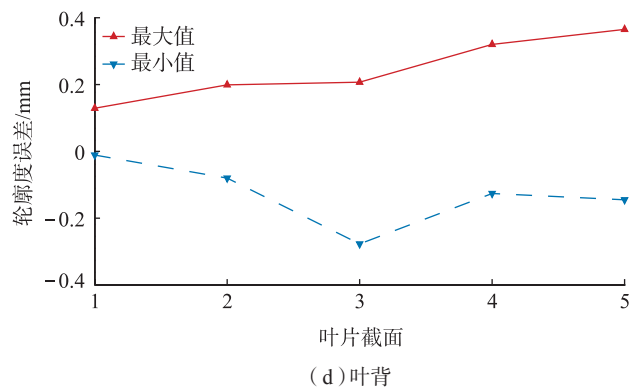
(a) 进气边



(b) 排气边



(c) 叶盆



(d) 叶背

图7 轮廓度的测量结果

Fig.7 Measuring results of the profile

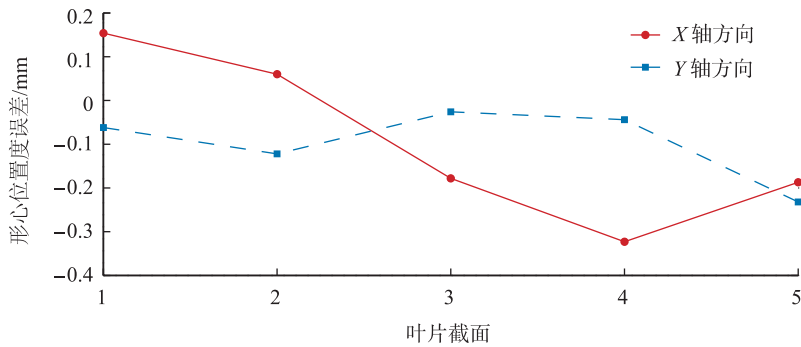


图8 形心位置度的测量结果

Fig.8 Measuring results of the centroid position

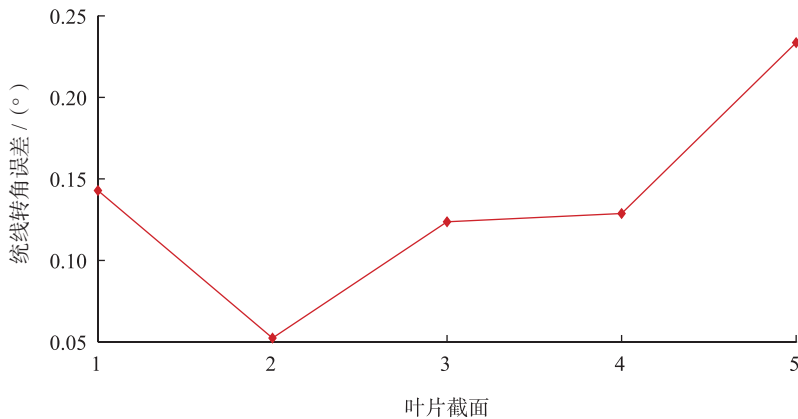


图9 弦线转角的测量结果

Fig.9 Measuring results of the chord angle

扇叶片的叶身制造精度较差,还需要经过后续的修配工艺才能够满足使用要求。同时,这也从侧面体现出了当前发动机风扇叶片的制造难度。随着发动机的涵道比、推重比和服役寿命的不断提高,风扇叶片的形状和结构日趋复杂,而且大多采用高强度不锈钢、钛合金和高温合金等难加工材料,这些都给风扇叶片的加工与制造提出了更为苛刻的要求<sup>[11]</sup>。因此,为了满足我国新一代高性能航空发动机的研制需求,应着力开展风扇叶片的先进加工与检测技术研究。

## 结论

根据我国新一代先进航空发动机的性能需求,叶片将朝着大尺寸、空间任意积叠和复合弯掠等方向发展,这些将给叶片的型面测量任务提出更高的要求。为了高精高效地完成叶片等复杂型面零件的扫描测量,

本文应用非接触式的光学扫描测量系统完成了某风扇叶片多个截面的扫描测量,并获取了各个截面的轮廓度误差、形心位置度误差和弦线转角误差等参数,可以用于叶片制造质量的评价。试验结果表明,该光学扫描测量系统可以在保证高精度的同时,快速便捷地获取叶片的整体形貌信息,从而提高检测精度并减少检测时间和成本。此类叶片型面测量技术与设备的研究,将服务于高性能复杂曲面的制造和检测,从而为当前我国航空发动机制造过程中存在的叶片等复杂零件的测量效率低和精度差等问题提供一项技术解决方案。

## 参考文献

- [1] 刘书桂,毛晨丽,张海涛.基于无序点云的叶片截面特征参数提取[J].航空动力学报,2016,31(9):2226-2232.
- LIU Shugui, MAO Chenli, ZHANG Haitao. Cross-sectional feature parameters

extraction of blade based on unorganized point cloud[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2226-2232.

[2] 李云霞,蒙文,赵尚弘,等.飞机发动机叶片变形的非接触光学测量方法[J].空军工程大学学报,2002,3(6):16-17.

LI Yunxia, MENG Wen, ZHAO Shanghong, et al. An untouched optical method of measuring the deformation of aircraft engine vane[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2002, 3(6): 16-17.

[3] 朱正德.当代测量技术发展的走向—基于智能化制造的背景与需求[J].装备制造与教育,2015,2:53-56.

ZHU Zhengde. The trend of contemporary measuring technology development—based on the background and demand of the intelligent manufacturing[J]. Equipment Manufacturing and Education, 2015, 2: 53-56.

[4] 吴志新,韩巍,黄伟.非接触式白光测量机在叶片检测中的研究与应用[J].航空制造技术,2014,57(13):48-51.

WU Zhixin, HAN Wei, HUANG Wei. Research and application of non-contact measuring machine with white light in the blade detection[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(13): 48-51.

[5] MANSOUR G. A developed algorithm for simulation of blades to reduce the measurement points and time on coordinate measuring machine (CMM)[J]. Measurement, 2014, 54: 51-57.

[6] 李华伟,申作春,覃银红,等.相位测量轮廓术应用于叶片测量[J].航空动力学报,2012,27(2):275-281.

LI Huawei, SHEN Zuochun, QIN Yinhong, et al. Application of phase-measurement-profilometry in blade measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 275-281.

[7] NEUMANN M, DREIER F, GUNTHER P, et al. A laser-optical sensor system for blade vibration detection of high-speed compressors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64-65: 337-346.

[8] 蔺小军,郭研,吴广,等.等高法叶片型面CMM测量数据处理算法研究[J].仪器仪表学报,2013,34(11):2442-2450.

LIN Xiaojun, GUO Yan, WU Guang, et al. CMM measuring data processing algorithms for blades about the contour measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013,

(下转第102页)

**[ABSTRACT]** The NC machining is the most important processing method for the blisk of aero-engine. The NC machining process is an important step to ensure that the geometric precision of the blisk meets the design requirements. According to the design of three-dimension digital model, the shape of the blade after finish milling can meet the dimensional tolerance of the drawing, but the flow-up blade surface finishing and strengthening process have different degrees of influence on the character of the blade shape of the blisk, resulting in final geometric dimensions of the blade shape beyond design requirements. By analyzing the surface finishing and strengthening process such as polishing process, vibratory finishing process, shot peening process, the paper determine its influence law and magnitude on the blade shape parameter, then according to the pre-deformed control technology, revise the machining model and program of the finishing process, allowing the blade to obtain the shape and position opposite to the deformation law of the subsequent surface finishing and strengthening process after finishing milling. At last, eliminate these pre-deformations in subsequent processing to achieve the goal of obtaining a qualified blisk in the delivery state.

**Keywords:** Blisk blade; Surface finishing; Strengthening process; Deformation law; Pre-deformed control

(责编 大漠)

(上接第 95 页)

34(11): 2442–2450.

[9] 毕超, 刘京亮, 刘飞, 等. 激光测头的光束空间矢量标定方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 3775–3781.

BI Chao, LIU Jingliang, LIU Fei, et al. Calibration method of space vector of beam for point laser sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 3775–3781.

[10] 毕超, 吕来鹏, 房建国, 等. 光学

坐标测量机的搭建与实现[J]. 宇航计测技术, 2015, 35(4): 19–23.

BI Chao, LÜ Laipeng, FANG Jianguo, et al. Establishment and realization of the optical coordinate measuring machine[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2015, 35(4): 19–23.

[11] 张军锋, 史耀耀, 蔺小军, 等. 叶片前后缘百页轮抛光工艺参数优化[J]. 计算

机集成制造系统, 2017, 23(7): 1502–1510.

ZHANG Junfeng, SHI Yaoyao, LIN Xiaojun, et al. Process parameters optimization of flap wheel polishing in leading and trailing edges of blade[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2017, 23(7): 1502–1510.

通讯作者: 毕超, E-mail: 773721278@qq.com。

## Study on Measuring Technology of Blade Sections Based on Optical Scanning

BI Chao, WANG Jin, LI Di, FANG Jianguo

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Precision Manufacturing Technology, Beijing Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China)

**[ABSTRACT]** Aero-engine blades have a great influence on the overall performance of the engine. Therefore, inspection of the blade surfaces in a rapid and accurate manner has become a key segment to improve the manufacturing quality of blades, as well as the performance and lifetime of the engine. In order to measure the geometrical shapes and dimensions of those workpieces with complex surfaces such as blades in a way of high accuracy and efficiency, the study on application of an optical scanning system in measuring of section parameters of a blade is carried on in the paper. Taking the traditional coordinate measuring machine (CMM) as the system platform, the optical scanning system is equipped with a new laser scanning probe, which is based on the measuring principle of circumferention triangulation. Also, combining with the special data processing software, the system can be used to inspect and evaluate the geometrical parameters of the specified sections of a blade, which could serve as an advanced solution for the shape inspection and quality control of blades. For verifying the application effect of the optical scanning system in the measurement of blade surfaces, a twisted fan blade is selected as the target. In the measuring procedure, 5 sections of the blade are scanned and measured by the system. After the model matching, the errors of profile, centroid position and chord angle on every section are derived, which fully manifests the effectiveness and practicality of the measuring system.

**Keywords:** Non-contact; Blade surface; Optical sensor; CMM (coordinate measuring machine); Scanning

(责编 铃兰)