

文章编号 1004-924X(2017)10-2744-08

叶片进排气边光学测量系统的实现

毕超^{1*}, 房建国¹, 宋婷婷², 鲍龙祥¹

(1. 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;

2. 日照职业技术学院, 山东 日照 276826)

摘要:针对航空发动机叶片进排气边的制造精度和一致性较差等问题, 搭建了非接触式的叶片进排气边光学测量系统, 以实现叶片进排气边的几何尺寸和轮廓形状的快速精确测量。该系统以传统的三坐标测量机框架为平台, 采用由两个互成一定角度的新型激光扫描测头构成的专用测头作为前端传感器, 并且内置了多种数据后置处理算法。在测量过程中, 在每个叶片截面的进排气边处选取 5 条截线, 分别测量这 5 条截线上的轮廓信息, 从而确定叶片进排气边的几何尺寸和加工余量。该系统可以作为叶片加工系统的组成部分, 从而将叶片的设计、制造和测量 3 个环节紧密地联系在一起。最后, 应用该系统对某一精锻叶片的 3 个等高截面上的进排气边进行了多次测量实验, 结果验证了所搭建的叶片进排气边光学测量系统的实用性和有效性, 而且测量结果的重复性精度能够满足系统的设计要求和叶片进排气边的检测需求。该项研究为叶片进排气边的加工质量提供了一种高效率、高精度和高一致性的评定手段。

关键词:航空发动机; 叶片进排气边; 非接触测量; 光学测头

中图分类号: V232.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172510.2744

Establishment of optical measuring system for blades edges

BI Chao^{1*}, FANG Jian-guo¹, SONG Ting-ting², BAO Long-xiang¹

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

2. Rizhao Polytechnic, Rizhao 276826, China)

* Corresponding author, E-mail: 773721278@qq.com

Abstract: For the low accuracy and bad consistency of blade edges in aero engines, a non-contact optical measuring system was established to measure the geometric dimensions and contour shapes of blade edges in a rapid and accurate way. In the system, a traditional coordinate measuring machine was taken as a platform, a special sensing device composed of two laser scanning sensors fixed at a certain angle to each other was taken as the front-end sensor and several data post-processing algorithms were integrated. In the measuring procedure, five transversals at the leading and trailing edges were selected and their contour information was measured to determine the geometric dimensions and machining allowance of the measured blade edges. The system could be used as a component of the manufacturing system to link the segments of designing, manufacturing and measuring of blades together. Finally, the leading and trailing edges of three sections of a blade after precision forging are

收稿日期: 2017-05-27; 修订日期: 2017-07-04.

基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目 (No. 2013ZX04011031)

measured by the system. The measuring results verify the effectiveness and practicability of the optical measuring system and show that the repeatability of the system meets the requirements for design and measuring of blade edges. In conclusion, the system could serve as an evaluating means for the machining quality of the leading and trailing edges of blades.

Key words: aero-engine; blade edge; non-contact measurement ; optical sensor

1 引言

先进航空发动机的设计与制造是航空领域的重大课题。发动机是飞机推进系统的核心组成部分,为飞机提供持续飞行的动力,对飞行的可靠性、安全性和经济性等都有着至关重要的影响^[1]。叶片是发动机的关键零件之一,不仅数量大、种类多,而且形态各异、结构复杂,在整台发动机的制造工作量中占据了约 30% 的比重^[2]。一般说来,为了保证发动机具有较高的推重比和工作效率,叶身的型面结构都是根据三元流动理论进行设计的^[3],并且以空间自由曲面的形式来表示,主要分为叶盆、叶背、进气边和排气边(以下简称“进排气边”)4 个部分。其中,进排气边为连接叶盆和叶背的过渡区域,是叶片最为关键的部分。该部位的形态近似为一狭长柱面状的复杂凸曲面,其几何形状和尺寸精度对于叶片的气动性能都有着重要影响^[4]。因此,在叶片的制造过程中,进排气边处的几何尺寸成为了叶片质量检测的关键环节。

通常,叶片进排气边的截面形状为圆弧或者椭圆弧^[5],我国新一代航空发动机要求其以更小的体积来获得更大的输出功率,因而叶身的截面形状越来越轻薄,进排气边部位的几何尺寸也越来越小,而精度要求却越来越高。例如,某型压气机叶片的进排气边处的最小设计尺寸在 0.1 mm 以下,而叶片型面轮廓的制造精度要求却高于 0.03 mm;另一方面,常规的三坐标测量机采用接触式探头进行触发测量,其测端半径与叶片进排气边处的半径相近,因而极易造成较大的测量误差,有时候甚至无法进行测量。以上这些情况都增加了叶片进排气边的检测难度,同时也对检测技术与设备的研制和开发提出了挑战。目前,在我国的航空制造领域中,进排气边的检测已成为叶片生产中的瓶颈环节,不论是现役发动机还是在研发发动机,都面临着叶片进排气边的制造精度达不到设计要求、一致性差等问题^[6]。因此,开展叶片

进排气边的检测技术研究,实现进排气边几何尺寸的高效率、高精度和高一致性的测量,已经成为迫在眉睫的任务。

随着测量与传感技术的发展,叶片进排气边的快速精确测量已经成为工业测量领域的研究热点。Sun Bin 等基于激光位移传感器和四轴运动平台搭建了非接触式的叶片型面测量系统,虽然可以实现叶身截面型线的测量,但却无法测量叶片的进排气边部位^[7];蔺小军等应用接触式三坐标测量机实现了叶身型面的等截面法测量,然而在测量过程中,由于未采用测端半径补偿的模式,因而所获得的测量数据为测端的球心坐标,而不是测端与叶片型面接触点的坐标,增加了后续数据处理难度^[8];向志聪等采用数字投影仪和 CCD 相机等研制出了一套相位轮廓测量系统,实现了对金属表面的叶片前缘三维轮廓的高精度测量,综合误差为 ± 0.03 mm^[9],但系统较为复杂。

本文搭建了非接触式的叶片进排气边光学测量系统,既能实现叶片进排气边的快速精确测量,同时具有很高的性价比。该系统以传统三坐标测量机作为系统平台,采用由两个互成一定角度的新型激光扫描测头构成的专用测头装置作为前端传感器,从而为叶片进排气边的几何尺寸提供了一种高效率、高精度和高一致性的检测手段。应用该系统对某个精锻叶片的 3 个截面上的进排气边厚度进行了多次测量,系统的重复性精度能够满足叶片进排气边的检测要求,充分证明了本文所搭建的光学坐标测量系统的有效性和实用性。

2 叶片进排气边的测量模型

对叶片进排气边进行测量,是为了获得进排气边处的加工余量^[10],从而指导加工过程以使叶片的进排气边达到所要求的制造精度和一致性。本文中,叶片进排气边处的加工余量是通过指定位置处的叶片截面轮廓厚度来确定的。因此,首先根据测量和加工要求,应用一族等高截面将叶

身型面离散成一族叶片型线^[11];然后将各个截面上的叶片型线按要求分为叶盆、叶背、进气边和排气边 4 个部分;最后将进气边与排气边的曲线以及极小部分的叶盆和叶背曲线离散成测量点来进行测量,并将实测数据进行拟合以获得叶片进排气边的实际轮廓曲线。

如图 1 所示,根据某精锻叶片的测量和加工要求,通过一族等高截面将叶身型面离散成一族叶片型线后,在每个叶片截面的进排气边处选取 5 条截线,分别编号为 AA、BB、CC、DD 和 EE,通过这 5 条截线上的轮廓厚度即可确定叶片进排气边的几何尺寸,再结合理论轮廓曲线即可获得叶片的加工余量模型。

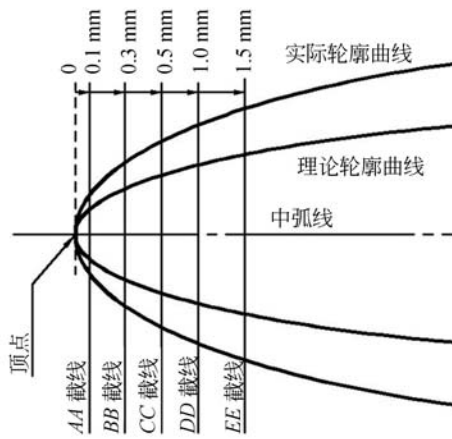


图 1 进排气边的测量模型

Fig. 1 Measuring model of blade edges

3 光学测量系统的组成

本文所搭建的用于叶片进排气边测量的光学测量系统,以常规的三坐标测量机作为系统平台,并采用新型的非接触式激光扫描测头 WIZprobe 来替代传统的接触式测头,从而将测量机的移动空间范围大、定位精度高、通用性强等的优点与激光扫描测头的非接触、响应快、采样频率高等的优点结合起来^[12],为叶片进排气边提供方便、快速和可靠的高精度测量解决方案。如图 2 所示,整个系统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 这 3 个直线轴均为气浮导轨,而且都采用了英国 Renishaw 公司的光栅检测系统,从而

保证了运动的平稳和精确,各轴的行程范围分别为 700 mm、650 mm 和 500 mm,定位精度为 3 μm 。



图 2 叶片进排气边光学测量系统

Fig. 2 Optical measuring system for blade edges

在光学测头方面,本文选用了新型的激光扫描测头 WIZprobe 来完成扫描测量和数据采集任务^[13]。WIZprobe 测头的体积小,并且兼容英国 Renishaw 公司的 PH10M 测头座,既能够与三坐标测量机系统结合,也可以作为独立的产品应用于工业生产线上^[14]。WIZprobe 基于独特的环形光三角法测量原理,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无限数量的多个三角法测量,如图 3 所示,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,并且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 and 校准。因此,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,使得测量精度受材质、颜色和表面加工形式等因素的影响变小^[15]。该测头的输出形式为高精度的单个数据点,其光斑直径为 30 μm ,采样频率为 50/s,测量分辨率为 1 μm ,量程为 (50 ± 5) mm,单点精度为 6 μm ,单点重复性可达 0.3 μm ,100 个点的最佳拟合精度可达 2 μm (2σ)。

为了实现进排气边轮廓信息的有效测量,本文基于叶片进排气边部位的形状特点和测量需求,通过特殊设计的测头支座将两个 WIZprobe 测头(分别编号为“测头 0”和“测头 1”)互成一定角度地安装在一起,从而形成了专用的测头装置,并将该专用测头装置固定在了三坐标测量机平台的 Z 轴末端,如图 4 所示。

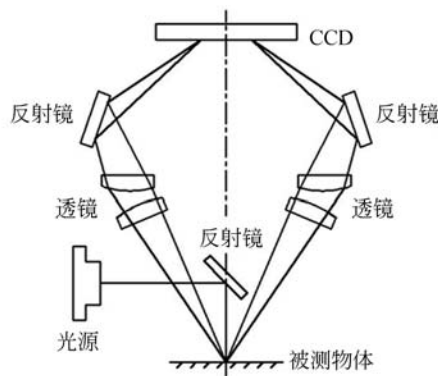
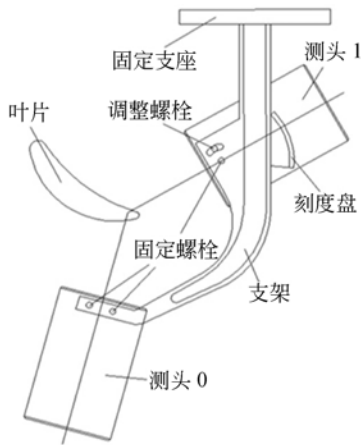


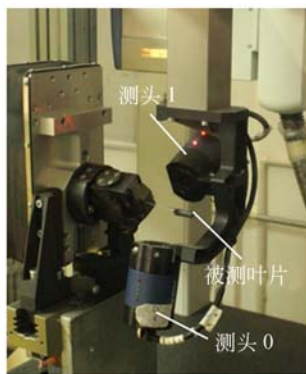
图 3 WIZprobe 测头的测量原理

Fig. 3 Measuring principle of the laser sensor WIZprobe



(a)原理示意图

(a) Schematic diagram



(b)实物

(b) Actual object

图 4 专用测头装置

Fig. 4 Special sensor device

如图 4(a)所示,叶片与专用测头装置之间的相对位置关系可以通过两种方式进行调整,一种是通过调整螺栓改变两个 WIZprobe 测头之间的

角度,另一种是通过旋转叶片来改变叶片进排气边相对于两个 WIZprobe 测头的角度。通过改变叶片进排气边和专用测头装置之间的相对位置关系,既改善了叶片进排气边的测量效果,又增加了系统的灵活性。

在叶片进排气边的测量过程中,测头的扫描轨迹可以通过测量机的 X、Y 和 Z 轴的移动来实现,从而获得各截面上的叶片进排气边的完整轮廓曲线以及少部分的叶盆和叶背曲线。如图 5 所示,在扫描过程中,叶片的进气边和排气边被分为两段扫描,当叶片叶背朝下时,先由测头 0 扫描部

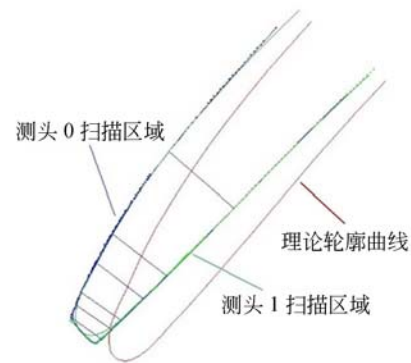


图 5 叶片某个截面的测量结果

Fig. 5 Measuring results of a blade section

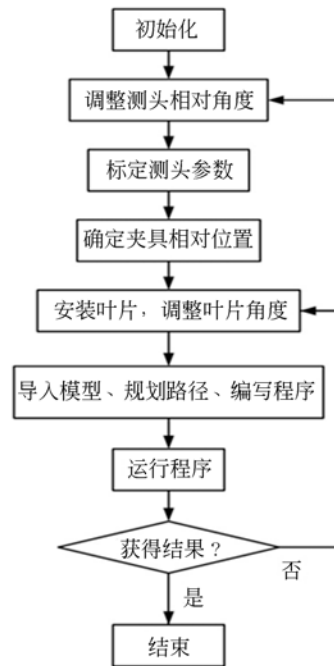


图 6 叶片进排气边的测量流程图

Fig. 6 Flow chart of measuring the blade edges

分叶背曲线和朝下的那部分进排气边曲线,然后切换到测头 1,扫描测量部分叶盆曲线以及朝上的那部分进排气边曲线;而当叶片叶背朝上时,先由测头 0 扫描测量部分叶盆曲线以及朝下的那部分进排气边曲线,然后切换到测头 1,扫描测量部分叶盆曲线以及朝上的那部分进排气边曲线。最后,将这两个 WIZprobe 测头的测量数据融合拼接为一条完整进气边或排气边线,从而得到完整的叶片进排气边实际轮廓以进行后续的分析评价。

应用该光学测量系统对叶片进排气边进行测量的流程如图 6 所示。

4 叶片进排气边测量实验

为了验证所搭建的非接触式的叶片进排气边光学测量系统的实用性和有效性,本文选取某一精锻无余量叶片作为被测对象,其进排气边首先采用铣削方式去除飞边,以将叶片弦长加工到设计尺寸,然后通过柔性砂轮磨削来使进排气边达到设计要求的形状和尺寸,磨削后的进排气边如图 7 所示。

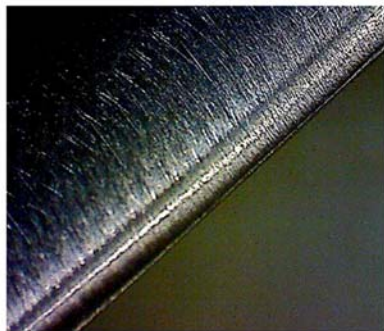


图 7 磨削后的叶片进排气边

Fig. 7 Blade edges after grinding

在该光学测量系统上对磨削后的叶片进排气边的几何尺寸进行测量,在叶身型面上选取 3 个等高截面,在每个截面的进排气边处选取 5 条截线,分别编号为 AA、BB、CC、DD 和 EE,通过这 5 条截线上的轮廓厚度来确定叶片进排气边的几何尺寸。在每个叶片截面上连续测量 3 次,以对系统的重复性测量精度进行验证,实验现场如图 8 所示。

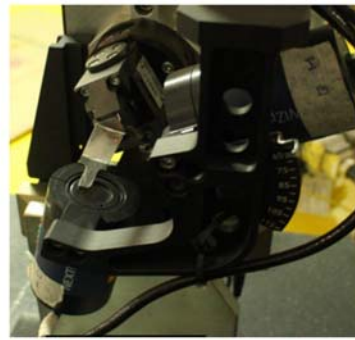


图 8 叶片进排气边的测量现场

Fig. 8 Measuring scene of blade edges

将所获得的实测数据进行拟合以获得叶片进排气边的实际轮廓曲线,再与理论轮廓曲线进行对比,即可确定磨削后的叶片进排气边是否达到了设计要求,如图 9 所示。

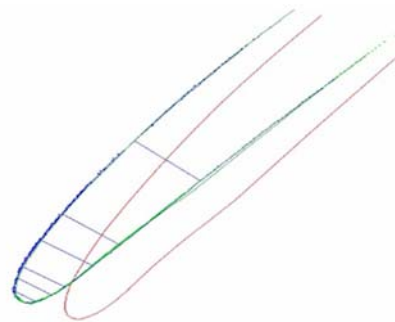


图 9 实际轮廓曲线与理论轮廓曲线

Fig. 9 Actual and theoretical contour curves

该精锻叶片的进气边和排气边上的各条截线的测量结果分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 叶片进气边的测量结果

Tab. 1 Measuring results of leading edges (mm)

截面	序号	AA	BB	CC	DD	EE
第一截面	1	0.004	-0.059	-0.085	-0.113	-0.117
	2	-0.010	-0.062	-0.086	-0.119	-0.119
	3	-0.004	-0.063	-0.087	-0.119	-0.119
第二截面	1	-0.022	-0.047	-0.017	0.021	-0.001
	2	-0.018	-0.045	-0.014	0.023	-0.002
	3	-0.025	-0.046	-0.014	0.021	-0.005
第三截面	1	-0.018	-0.037	-0.011	0.047	0.054
	2	-0.020	-0.040	-0.014	0.046	0.053
	3	-0.013	-0.038	-0.013	0.044	0.051

表 2 叶片排气边的测量结果

Tab. 2 Measuring results of trailing edges (mm)

截面	序号	AA	BB	CC	DD	EE
第一截面	1	-0.021	-0.014	0.003	-0.010	-0.009
	2	-0.017	-0.011	0.007	-0.008	-0.010
	3	-0.015	-0.015	0.006	-0.007	-0.010
第二截面	1	-0.163	-0.132	-0.088	-0.016	0.041
	2	-0.160	-0.136	-0.089	-0.022	0.035
	3	-0.160	-0.134	-0.087	-0.021	0.034
第三截面	1	-0.080	-0.017	0.019	0.061	0.102
	2	-0.065	-0.010	0.024	0.065	0.107
	3	-0.065	-0.010	0.025	0.066	0.107

根据该型叶片的设计和制造要求,叶片进排气边的各个截面上所允许的测量重复性误差的最大允许值如表 3 所示。

表 3 各个截面的重复性误差最大值

Tab. 3 Maximum repeatability error of every section (mm)

截面	AA	BB	CC	DD	EE
重复性误差的最大允许值	0.035	0.025	0.015	0.015	0.015

分析表 1 和表 2 中的数据,以 3 次测量数据的最大值与最小值之差作为重复性误差的最大值。在 3 个截面上的进气边轮廓厚度的测量过程中,AA 截线上的轮廓厚度的测量重复性误差最大值为 0.007 mm,而 BB 截线上的为 0.004 mm,CC 截线上的为 0.003 mm,DD 截线上的为 0.006 mm,EE 截线上的为 0.004 mm;在 3 个截面上的排气边轮廓厚度的测量过程中,AA 截线上的轮廓厚度的测量重复性误差最大值为 0.015 mm,而 BB 截线上的为 0.007 mm,CC 截线上的为 0.006 mm,DD 截线上的为 0.005 mm,EE 截线上的为 0.007 mm。对比表 3,所有截面上的测量数据的重复性误差值都处于测量重复性误差的

参考文献:

[1] 段继豪,史耀耀,张军锋,等. 航空发动机叶片柔

允许范围内,因而此叶片进排气边光学测量系统的性能能够满足使用要求。

此外,该系统还内置了多种基准建立方法与评价算法,并且可以根据叶片的 CAD 模型自动规划出进排气边的测量轨迹,因而该系统可以作为叶片加工与制造系统的一个组成部分,以对未加工的叶片进排气边进行测量并将测量结果反馈给制造系统,或者对加工完成的叶片进排气边进行测量以完成加工误差评定。该光学测量系统可以在叶片的智能制造系统中发挥纽带作用,从而将叶片的数字化设计、制造和测量 3 个环节紧密地联系在一起,并显著地提高叶片进排气边的制造精度和制造效率,有效解决制造过程中的“信息孤岛”问题。

5 结 论

本文应用 WIZprobe 激光扫描测头、专用测头支架和三坐标测量机等搭建了一套非接触式的叶片进排气边光学测量系统,以实现叶片进排气边的几何尺寸和轮廓信息的快速精确测量。针对叶片部位的形状特点和测量需求,系统采用了由两个互成一定角度的激光扫描测头构成的专用测头装置作为前端传感器,能够获得进排气边的实际轮廓曲线。该系统充分发挥了激光测量技术与坐标测量技术的优点,从而扩展了坐标测量技术的应用范围。本文应用该系统对某个精锻叶片的 3 个等高截面上的进排气边轮廓厚度进行了多次测量实验,测量结果的重复性精度满足了系统的设计要求和进排气边的检测需求,因而该系统可以作为叶片加工系统的组成部分以提高叶片进排气边的制造精度和效率,文中得到的实验结果也验证了系统的实用性和有效性。

性抛光技术[J]. 航空学报, 2012, 33(3): 573-578.
DUAN J H, SHI Y Y, ZHANG J F, *et al.*. Flexible polishing technology for blade of aviation engine

- [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2012, 33(3): 573-578. (in Chinese)
- [2] 房建国, 马艳玲, 李迪, 等. 发动机叶片椭圆进排气边智能磨削加工检测一体化技术[J]. *航空精密制造技术*, 2016, 52(6): 1-6, 12.
FANG J G, MA Y L, LI D, *et al.*. Intelligent method of machining-measuring integration for aero-engine elliptical blade-edges[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2016, 52(6): 1-6, 12. (in Chinese)
- [3] 裴景东, 汪文虎, 王姝, 等. 叶片基元叶型椭圆形前缘拟合方法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(3): 243-246.
PEI J D, WANG W H, WANG SH, *et al.*. Elliptical leading edge fitting strategy of elementary blade profile[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2015, 51(3): 243-246. (in Chinese)
- [4] 陈雷, 陈江, 赵石磊, 等. 叶片前缘形状对涡轮气动性能的影响[J]. *航空动力学报*, 2013, 28(4): 921-929.
CHEN L, CHEN J, ZHAO SH L, *et al.*. Effect of blade leading edge on aerodynamic performance of turbine[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(4): 921-929. (in Chinese)
- [5] LIU J, ZHAO J, YANG X, *et al.*. A reconstruction algorithm for blade surface based on less measured points[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 2015: 431824.
- [6] 张春, 宁涛, 沈云超, 等. 平底刀底面加工叶片进排气边[J]. *图学学报*, 2015, 36(6): 834-839.
ZHANG CH, NING T, SHEN Y CH, *et al.*. Machining the leading and trailing surface of turbine blades by the bottom of the flat-end cutter [J]. *Journal of Graphics*, 2015, 36(6): 834-839. (in Chinese)
- [7] SUN B, LI B. A rapid method to achieve aero-engine blade form detection[J]. *Sensors*, 2015, 15(12): 12782-12801.
- [8] 蔺小军, 单晨伟, 王增强, 等. 航空发动机叶片型面三坐标测量机测量技术[J]. *计算机集成制造系*
统, 2012, 18(1): 125-131.
LIN X J, SHAN CH W, WANG Z Q, *et al.*. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aero-engine[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(1): 125-131. (in Chinese)
- [9] 向志聪, 胡忠, 白玉磊, 等. 高精度测量燃气轮机叶片前缘的三维轮廓[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(7): 1761-1765.
XIANG ZH C, HU ZH, BAI Y L, *et al.*. High-precision measurement for the three-dimensional profile of gas turbine blade's leading edge [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2016, 31(7): 1761-1765. (in Chinese)
- [10] VUYE C, VANLANDUIT S, PRESEZNIAK F, *et al.*. Optical measurement of the dynamic strain field of a fan blade using a 3D scanning vibrometer [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(7): 988-997.
- [11] MOUSSAVI S A, BENISI A H, DURALI M. Effect of splitter leading edge location on performance of an automotive turbocharger compressor [J]. *Energy*, 2017, 123: 511-520.
- [12] 李兵, 孙彬, 陈磊, 等. 激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1939-1947.
LI B, SUN B, CHEN L, *et al.*. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1939-1947. (in Chinese)
- [13] 毕超, 房建国, 刘京亮, 等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3): 678-685.
BI CH, FANG J G, LIU J L, *et al.*. Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 678-685. (in Chinese)
- [14] LIN A C, CHANG H C. Automatic 3D measuring system for optical scanning of axial fan blades[J]. *International Journal of Advanced Manufactur-*

ing Technology, 2011, 57(5-8): 701-717.

- [15] 于浩, 张建明, 庞长涛, 等. 基于点云配准算法的叶片进排气边测量技术研究[J]. *航空精密制造技术*, 2014, 50(1): 23-26.

YU H, ZHANG J M, PANG CH T, *et al.*. Re-

search on blade edge measuring techniques based on points cloud registration[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2014, 50(1): 23-26. (in Chinese)

作者简介:



毕 超(1987—),男,河北廊坊人,硕士,高级工程师,2010年于河北工业大学获得学士学位,2013年于天津大学获得硕士学位,主要从事精密测试技术及仪器等方面的研究工作。E-mail: 773721278@qq.com



房建国(1963—),男,北京人,研究员,1985年于南京航空学院(现为南京航空航天大学)获得学士学位,主要从事精密、超精密加工与坐标测量等方面的研究工作。E-mail: fkylek@sina.com