

航空发动机叶片高精度自动测量系统

魏永超¹, 赵 伟²
(1. 中国民用航空飞行学院 科研处, 四川 广汉 618307;
2. 中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307)

摘 要: 为了解决叶片完整型面自动测量存在的问题,提出了一种叶片高精度自动测量融合系统.系统结合双目三维扫描装置和电控转台,利用高精度校准平面旋转,通过平面拟合、虚拟转轴及角度计算,获取高精度四元数及中心位置坐标后完成自身定位.多次测量数据以中心坐标为中心,进行四元数运算,即可实现叶片实时测量融合.对融合后数据采用阈值迭代就近点(ICP)算法收敛处理消除机械转动误差.结果表明:系统装置综合精度为 0.03~0.04 mm,可自动、高效、稳定地实现发动机叶片的高精度测量.

关 键 词: 发动机叶片; 三维测量; 四元数; 电控转台; 数据自动融合

中图分类号: V232.4 **文献标志码:** A

High precision automatic measurement system for aero engine blade

WEI Yong-chao¹, ZHAO Wei²
(1. Department of Research,
Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China;
2. Aviation Engineering Institute,
Civil Aviation Flight University of China, Guanghan Sichuan 618307, China)

Abstract: In order to solve the current problems of the blade surface automatic measurement, a high precision automatic measurement fusion system was put forward. The self-developed measuring equipment and the electronic controlled turntable were combined into one complete measurement system. Using high precision calibration plane rotation, the high precision quaternion and the center position coordinates could be obtained for the system location through the plane fitting, virtual axis and angle calculation. The real time measurement and fusion of the blade could be realized by using the center coordinate and the four element number operation. The convergence of the threshold iterative closest point (ICP) to the fusion data was used to eliminate the error of mechanical rotation. Results show that the integrated precision of the system is 0.03—0.04 mm, which can realize the high precision measurement of the engine blade automatically, efficiently and stably.

Key words: engine turbine blade; three-dimensional measurement; quaternion; electronic controlled turntable; data automatic fusion

收稿日期:2016-05-10

基金项目:国家自然科学基金民航联合基金(U1633127);民航局科技基金(20150215);四川省科技基金(2015JY0188)

作者简介:魏永超(1981—),男,副教授、硕士生导师,博士,主要从事航空检测、光电信息处理方面的研究.

引用格式:魏永超,赵伟.航空发动机叶片高精度自动测量系统[J].航空动力学报,2017,32(3):513-518. WEI Yongchao, ZHAO Wei. High precision automatic measurement system for aero engine blade[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 513-518.

叶片是航空发动机的核心部件,其型面轮廓测量是逆向工程、质量检测、叶片设计以及维修指导等的重要步骤,因此叶片型面测量技术一直是研究的热点^[1-3]. 叶片测量技术通常分为两类:单点式和多点式. 单点式是通过接触或非接触手段,每次获取被测物体表面一个点的位置坐标,典型的如三坐标法^[4-5],该方法效率低下,且成本高,且无法获取全部位置信息,一些研究采用辅助测具与测量路径设计的方法^[6-9]提高效率;多点式是通过光学等手段,一次获取多个坐标值,精度虽然较单点式略低,但效率高,可获取整体面型信息,是目前的研究热点,典型的如相位测量轮廓术^[10-12]. 叶片型面复杂,测量对精度和效率要求都很高,目前还没有效率和精度同时具备的通用测量方法.

多点式中的相位测量法精度目前已完全满足叶片测量需要,且可获取整体面型信息,是目前叶片测量的重要手段之一. 然而,要获取整体面型信息,需要完成多次测量数据的融合,目前通常利用商业软件手工融合,人为因素会极大影响融合的精度与误差. 在数据自动融合方面,贴标记点法可用于规则物体的测量,但叶片曲面复杂,且标记点会物理改变表面形状,无法用于叶片测量. 若直接利用表面特征进行自动融合,由于叶片型面复杂,会产生较大的融合误差. 有研究通过辅助测具的方法^[13],但是需要设计复杂的测具,且测具的精度会影响融合精度,且不适合面型复杂的叶片的 360°测量融合. 因此,亟需解决叶片的高精度自动融合.

针对上述问题,本文提出了一种高精度叶片自动扫描融合技术,通过结合实时扫描,实现每次扫描数据和之前数据的实时融合,最后再整体误差补偿完成高精度型面重构. 该方法利用高精度定位技术计算虚拟转轴及中心点,构造四元数,对测量数据四元数变换,就可实现叶片的高精度自动融合,同时结合迭代最近点(Iterative closest point, ICP)算法,补偿转台机械误差带来的拟合误差,实现了叶片复杂型面的高精度 360°扫描自动融合技术,同时不需要辅助设计测具,具有精度和效率的双重优势.

1 测量系统结构组成

本文核心是自动融合算法,是一套完整测量中的重要组成部分. 整个测量系统的结构如图 1 所示,该系统由计算机、工业相机、投影仪、电控转台以及定位平面构成. 其中计算机用于控制转台、投影仪及双工业相机,并完成相关算法的软件实

现,投影仪投影结构光到被测物体,两个工业相机完成被测物体变形条纹图的抓拍,定位平面用于转台的定位.

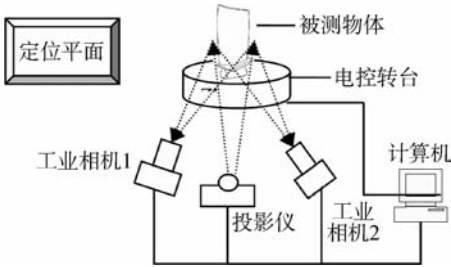


图 1 测量系统结构图
Fig. 1 Figure of measurement system

单次测量采用作者开发的双目结构光测量,这里不做介绍,多次融合算法是本文核心创新内容,后面将详细介绍. 系统流程图如图 2 所示. 测量前首先对双目结构光测量进行标定,再利用标准平面对转台进行定位. 测量时,循环执行测量-转台旋转-融合步骤,就可以得到完整 360°物体信息,最后,利用 ICP 算法,对转台机械误差进行补偿,获取被测物体完整融合高精度数据.

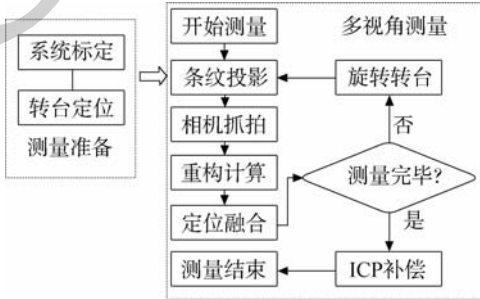


图 2 系统测量流程图
Fig. 2 Flow chart of measurement system

2 自动融合算法

自动融合算法定位电控转台,通过自主开发核心算法,完成多次测量数据的实时自动融合.

2.1 平面拟合

平面平晶作为标准平面,精度为 0.06~0.08 μm . 融合中用于定位转轴及角度,同时可用于系统测量精度的评估. 采集平面初始位置和两次旋转后的点云数据 $P_i(x_j, y_j, z_j)$, 其中 $i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3, \dots, n$. 标定每次旋转角度为 α . 旋转示意图如图 3 所示.

平面模型定义如式(1)

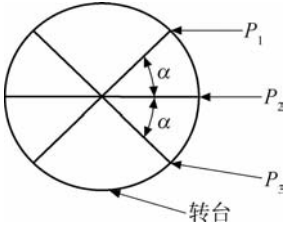


图3 平面转台示意图

Fig.3 Sketch of turntable's rotation

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

其中 a, b, c, d 为待拟合的平面参数。平面点云数据的拟合有最小二乘法、特征法等^[14]，采用非线性最小二乘法，使得采集的点云数据坐标值 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 到平面模型的距离和最小，即式(2)的 L 的值最小^[9]。

$$L = \sum D_i^2 = \sum \frac{(a \cdot x_i + b \cdot y_i + c \cdot z_i + d)^2}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (2)$$

2.2 虚拟旋转角度计算

定位原理示意图如图4所示，每个参数的定义及求取算法，后面将一一介绍。

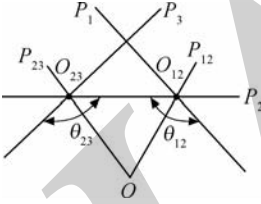


图4 定位原理示意图

Fig.4 Sketch of positioning principle

利用式(3)计算平面夹角 θ_{12} 和 θ_{23} 。

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{a_i a_j + b_i b_j + c_i c_j}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2} \sqrt{a_j^2 + b_j^2 + c_j^2}} \quad (3)$$

其中 θ_{ij} 为平面 P_i 和 P_j 的夹角， $P_i(a_i, b_i, c_i)$ 为平面法向量。

虚拟旋转角 ω 的计算如式(4)所示。

$$\omega = (\theta_{12} + \theta_{23})/2 \quad (4)$$

2.3 虚拟旋转轴

图4中， O 为虚拟旋转轴， O_{12} 为平面 P_1 和 P_2 交线， O_{23} 为 P_2 和 P_3 的交线，平面 P_{12} 为过线 O_{12} 的角 θ_{12} 的平分面，平面 P_{23} 为过 O_{23} 的 θ_{23} 的角平分面，平面 P_{12} 和 P_{23} 的交线即为虚拟转轴。

步骤1 计算得到交线 O_{12} 和 O_{23} 的法向量 n_{12} 和 n_{23} ，定义为式(5)。

$$n_{ij} = \begin{bmatrix} b_i \cdot c_j - c_i \cdot b_j \\ c_i \cdot a_j - a_i \cdot c_j \\ a_i \cdot b_j - b_i \cdot a_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

步骤2 计算平面 P_2 和 P_1, P_3 的法线夹角角平分线向量 m_{12} 和 m_{23} ，定义如式(6)。

$$m_{ij} = \left(\frac{a_i + a_j}{2}, \frac{b_i + b_j}{2}, \frac{c_i + c_j}{2} \right) \quad (6)$$

步骤3 计算平面 P_{12} 的法向量 r_{12} ，和平面 P_{23} 的法向量 r_{23} ，定义如式(7)。

$$r_{ij} = \begin{bmatrix} m_{ij}[2] \cdot n_{ij}[3] - m_{ij}[3] \cdot n_{ij}[2] \\ m_{ij}[3] \cdot n_{ij}[1] - m_{ij}[1] \cdot n_{ij}[3] \\ m_{ij}[1] \cdot n_{ij}[2] - m_{ij}[2] \cdot n_{ij}[1] \end{bmatrix} \quad (7)$$

步骤4 计算角平分面参数。设角平分面 P_{ij} 的方程为

$$a_{ij}x + b_{ij}y + c_{ij}z + d_{ij} = 0 \quad (8)$$

则 $a_{ij} = r_{ij}[1], b_{ij} = r_{ij}[2], c_{ij} = r_{ij}[3], d_{ij}$ 的计算公式为

$$d_{ij} = d_i \cdot T_1 + d_j \cdot T_2 \quad (9)$$

其中 T_1 和 T_2 的定义分别为式(10)和式(11)。

$$T_1 = \frac{a_j \cdot b_{ij} - a_{ij} \cdot b_j}{a_j \cdot b_i - a_i \cdot b_j} \quad (10)$$

$$T_2 = \frac{a_{ij} \cdot b_i - a_i \cdot b_{ij}}{a_j \cdot b_i - a_i \cdot b_j} \quad (11)$$

步骤5 利用式(12)计算平面 P_{12} 和 P_{23} 的法线叉积，就可以得到转轴的方向向量 v 。

$$v = \begin{bmatrix} b_{12} \cdot c_{23} - c_{12} \cdot b_{23} \\ c_{12} \cdot a_{23} - a_{12} \cdot c_{23} \\ a_{12} \cdot b_{23} - b_{12} \cdot a_{23} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.4 旋转中心点和四元数的计算

计算旋转轴中心点 (X_0, Y_0, Z_0) ，就可以得旋转轴，其定义为

$$\begin{cases} X_0 = (-b_{23} \cdot d_{12} + b_{12} \cdot d_{23}) / (a_{12} \cdot b_{23} - a_{23} \cdot b_{12}) \\ Y_0 = -(a_{12} \cdot d_{23} - a_{23} \cdot d_{12}) / (a_{12} \cdot b_{23} - a_{23} \cdot b_{12}) \\ Z_0 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

利用旋转轴矢量和角度，进一步转化为四元数 Q_i ，定义如式(14)。

$$Q_i = (\cos \omega, v[1] \cdot \sin \omega, v[2] \cdot \sin \omega, v[3] \cdot \sin \omega) \quad (14)$$

2.5 测量数据的定位融合

转台每次测量的旋转角度为 β ，则测量数据 $G(x_i, y_i, z_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 相对中心点按照式(15)做平移运算，之后按照式(16)计算就可得

到最终的拼接数据 $G''(x''_i, y''_i, z''_i)$.

$$G'(x'_i, y'_i, z'_i) = G(x_i - X_0, y_i - Y_0, z_i - Z_0) \quad (15)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\begin{cases} x''_i = -tn_0 \cdot \bar{Q}_t[1] + tn_1 \cdot \bar{Q}_t[0] + tn_2 \cdot \bar{Q}_t[3] - tn_3 \cdot \bar{Q}_t[2] + X_0 \\ y''_i = -tn_0 \cdot \bar{Q}_t[2] - tn_1 \cdot \bar{Q}_t[3] + tn_2 \cdot \bar{Q}_t[0] + tn_3 \cdot \bar{Q}_t[1] + Y_0 \\ z''_i = -tn_0 \cdot \bar{Q}_t[3] + tn_1 \cdot \bar{Q}_t[2] - tn_2 \cdot \bar{Q}_t[1] + tn_3 \cdot \bar{Q}_t[0] + Z_0 \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\bar{Q}_t, t_{n_0}, t_{n_1}, t_{n_2}$ 以及 t_{n_3} 的定义如式(17)所示.

$$\bar{Q}_t = Q_t \cdot a/b \quad (17)$$

$$\begin{cases} t_{n_0} = -\bar{Q}_t[1] \cdot x'_i - \bar{Q}_t[2] \cdot y'_i - \bar{Q}_t[3] \cdot z'_i \\ t_{n_1} = \bar{Q}_t[0] \cdot x'_i - \bar{Q}_t[2] \cdot y'_i + \bar{Q}_t[3] \cdot z'_i \\ t_{n_2} = \bar{Q}_t[0] \cdot y'_i + \bar{Q}_t[1] \cdot z'_i - \bar{Q}_t[3] \cdot x'_i \\ t_{n_3} = \bar{Q}_t[0] \cdot z'_i - \bar{Q}_t[1] \cdot y'_i + \bar{Q}_t[2] \cdot x'_i \end{cases} \quad (18)$$

为了验证融合算法的有效性,对定位平面 P_1, P_2 和 P_3 的数据代入上述过程模拟旋转融合,以 P_3 为基准,模拟 P_1 旋转两次, P_2 旋转一次,利用求取的四元数和旋转中心进行处理后,平面 P_1, P_2 和 P_3 完全重合,通过标准偏差分析, P_3 和 P_2 的标准偏差为 0.021 mm, P_3 和 P_1 的标准偏差为 0.026 mm,由于扫描仪的精度为 0.02 mm,可以看出本文算法是完全可行的,且具有很好的精度.

2.6 融合数据的后处理

被测物体要旋转 360° ,由于电控转台的机械误差,将会影响最后的融合结果.对于大尺寸物体,该误差影响很小,但对于小尺寸叶片的高精度测量,随着旋转次数的增加,误差会出现累加效益,对融合结果影响较大.因此,在每次旋转融合后采用 ICP^[15] 算法进行机械误差消除,同时为了加快收敛的速度,提高融合的精度,避免融合的错误,ICP 中限定迭代收敛阈值,通过实验分析与综合评估,阈值为 0.6~0.8 mm.

3 实验测量及结果分析

测量系统构成实物图如图 5 所示,由电控转台、陶瓷平晶、计算机以及双目结构光扫描仪组成.其中双目结构光扫描仪的精度为 0.02 mm,电控转台以 UI-ROBOT 步进电动机为核心搭建,陶瓷平晶直径为 20 cm,精度为 0.08 μm ,计算机为 4



图 5 系统构成实物图

Fig. 5 Photo of system composition

核 8 G 内存, Win8 操作系统.

测量用例为发动机叶片,如图 6 所示,其中图 6(a)测量用例 1,选用具有复杂气动结构的高压涡轮叶片,该叶片外包长方体尺寸约为 38 mm $\times$ 45 mm $\times$ 15 mm. 其中图 6(b)为测量用例 2,为小尺寸压气机叶片,外包长方体尺寸为 34 mm $\times$ 50 mm $\times$ 2 mm.

图 7 为测量用例 1 的测量结果,其中图 7(a)为融合后的数据,图 7(b)为叶片曲面重建结果,图 7(c)为重建曲面截面曲线.融合数据很好的再现了叶片的型面信息,细孔信息以及曲率信息保留完好.截面曲线信息平滑,可以用于叶片的特征分析.

图 8 为测量用例 2 的测量结果,其中图 8(a)为叶片融合后的点云数据,图 8(b)为叶片曲面重建结果,图 8(c)为重建曲面截面曲线.该叶片厚

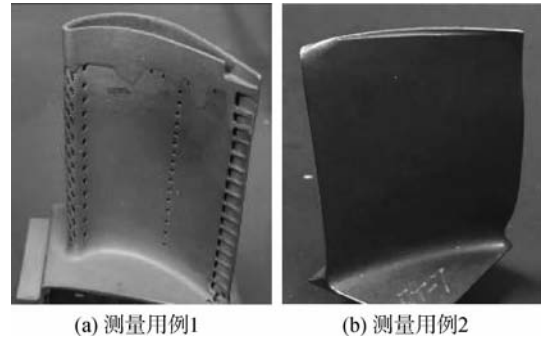


图 6 测量用例图

Fig. 6 Photo of measured examples

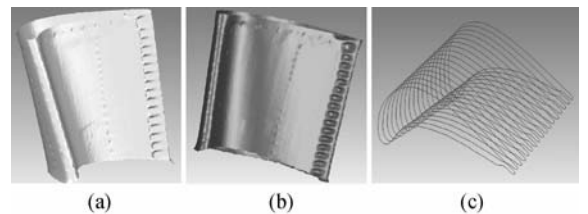


图 7 测量用例 1 测量结果图

Fig. 7 Result figure of measured example 1

度最大值为 1.5 mm,边缘厚度最大为 1mm,从结果可以看出,融合算法高精度的重现了叶片型面,数据平滑且完整.叶片截面分析是叶片数据获取后很重要的应用,常需要提取如弦长、厚度、前后缘半径等特征参数,作为叶片分析的重要依据^[16-18].从图中结果可以看出,叶片截面轮廓清晰,可以很好地用于叶片分析.

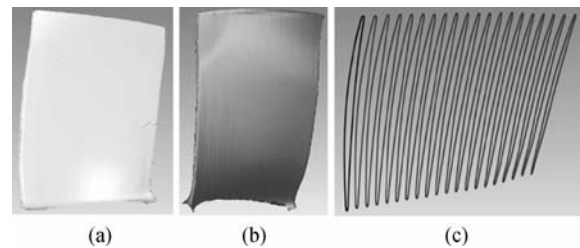


图 8 测量用例 2 测量结果图
Fig. 8 Result figure of measured example 2

4 融合精度及稳定性分析

4.1 融合精度分析

首先要对双目测量的精度进行分析,之后才能完成融合精度分析.单次精度分析通常采用测量标准件,以标准差作为评价系统精度的方法.对平面平晶进行多次测量,平面拟合分析标准差均值为 0.02 mm,得到双目测量精度为 0.02 mm.

融合系统的精度分析,目前没有通用方法.叶片整体模型通常采用商业软件(Geomagic)对多次测量结果进行人工手动融合,并以此结果进一步进行分析.Geomagic 是行业标杆商业软件,在国内外应用广泛,采用通过比较本文算法融合结果和商业软件结果,评价其标准偏差来说明融合算法精度.实验采集 3 个叶片,每个叶片重复测量 3 次,同时为了降低人为因素影响,商业软件采用多次融合结果均值.表 1 为系统精度分析结果.

表 1 测量精度分析
Table 1 Analysis of measuring precision

叶片 编号	偏差/mm			
	比对结果 1	比对结果 2	比对结果 3	均值
1	0.0311	0.0323	0.0317	0.0317
2	0.0364	0.0371	0.0378	0.0371
3	0.0332	0.0341	0.0357	0.0343
均值	0.0336	0.0345	0.0351	0.0344

从表 1 看出,3 组叶片测量结果偏差最大值

为 0.0378 mm,最小值为 0.0311 mm,偏差均值在 0.03~0.04 mm 之间,多次测量的偏差均值为 0.0344 mm,因此,系统的融合精度为 0.034 mm.由于系统的精度为 0.02 mm,融合精度相比只有 0.014 mm 的降低.

4.2 稳定性分析

对每个叶片的 3 次测量结果进行两两两两对比分析,计算其标准偏差,若偏差在系统精度之内,则说明稳定性高.分析结果如表 2 所示.

表 2 测量结果标准差分析
Table 2 Analysis of measuring standard deviation

叶片 编号	标准差/mm		
	比对结果 1	比对结果 2	均值
1	0.0314	0.0333	0.0324
2	0.0346	0.0380	0.0363
3	0.0322	0.0319	0.0321
均值	0.0327	0.0344	0.0336

从表 2 可以看出,系统的标准差均值为 0.0336,在系统精度范围之内,本系统具有很高的稳定性.

5 结 论

本文设计了一种高精度点云数据定位融合算法,通过对虚拟转轴及旋转中心的高精度定位,实现了叶片型面的多视角点云数据实时自动测量与融合,从而很好地解决了结构光测量叶片轮廓的难题,摆脱了手动融合的人为因素干扰,且无需辅助测具.从实际实验和测量结果分析来看,基于四元数转台定位的多视角叶片高精度自动融合方法,具有自动测量、测量精度高、成本低、无需辅助设备 & 二次操作等优势,且证明方法是可行的.

参考文献:

[1] 陆佳艳,熊昌友,何小妹,等.航空发动机叶片型面测量方法评述[J].计测技术,2009,29(3):1-3.
LU Jiayan, XIONG Changyou, HE Xiaomei, et al. Survey of measurement method of aeroengine blade[J]. Metrology and Measurement Technology, 2009, 29(3): 1-3. (in Chinese)
[2] 孙青州.叶片复杂曲面测量系统研究[D].长春:吉林大学.2014.
SUN Qingzhou. Research on measurement system of the blade of complex surface[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)

- [3] 李兵,陈磊,丁建军,等.复合式叶片型面测量系统的误差分析与补偿[J].中国工程科学,2013,15(1):39-44.
LI Bing, CHEN Lei, DING Jianjun, et al. Error analysis and compensation of compound measuring system for blade surface[J]. Engineering Science, 2013, 15(1): 39-44. (in Chinese)
- [4] 郭旗.三坐标测量在汽轮机叶片测量中的应用[J].数字技术与应用,2010,2(12):78-81.
GUO Qi. Application of optical probe in aircraft engine blade inspection[J]. Digital Technology and Application, 2010, 2(12): 78-81. (in Chinese)
- [5] 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 Xiaojun, SHAN Chenwei, WANG Zengqiang, et al. Measurement techniques of coordinate measuring machine for blade surface of aeroengine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(1): 125-131. (in Chinese)
- [6] 吴丽丽,樊锐.叶片型面在线检测方法研究[J].机械设计与制造,2010(9):97-98.
WU Lili, FAN Rui. The research of blade surfaces on-line inspections method[J]. Machine Design and Manufacture, 2010(9): 97-98. (in Chinese)
- [7] 李妙玲,朱春熙,尤惠媛.航空发动机叶片叶身型面测具设计及精度分析[J].制造技术与机床,2011(1):112-116.
LI Miaoling, ZHU Chunxi, YOU Huiyuan. Design and precise analysis of measuring tool for profiles of an air-craft engine[J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2011(1): 112-116. (in Chinese)
- [8] 高晓斐,郑小晖.复杂薄壁叶片测量方法研究[J].航空制造技术,2013(18):44-47.
GAO Xiaofei, ZHENG Xiaohui. Measurement method of complex thin-walled blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(18): 44-47. (in Chinese)
- [9] 兰凌.航空发动机叶片型面测具快速设计技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2012.
LAN Ling. Research on rapid design of profile measuring apparatus of aero-engine blade[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [10] ZHANG Qican, SU Xianyu, XIANG Liqun. Phase height mapping and coordinate simultaneous calibration fourier transform profilometry[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(6): 32-36.
- [11] 李华伟,申作春,覃银红,等.相位测量轮廓应用于叶片测量[J].航空动力学,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. (in Chinese)
- [12] Fu Y, Wang Y, Wan M, et al. Three-dimensional profile measurement of the blade based on surface structured light[J]. Optik-International Journal for light and Electron Optics, 2013, 124(18): 3225-3229.
- [13] 赖文敬,鲍鸿,白玉磊,等.叶片三维轮廓测量点云数据高精度多角度融合[J].航空动力学报,2015,30(3):665-671.
LAI Wenjing, BAO Hong, BAI Yulei, et al. High precision and multiple view point cloud data fusion in blade three-dimensional profile measurement[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(3): 665-671. (in Chinese)
- [14] 官云兰,程效军,施贵刚.一种稳健的点云数据平面拟合方法[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(7):981-984.
GUAN Yunlan, CHENG Xiaojun, SHI Guigang. A robust method for fitting a plane to point clouds[J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2008, 36(7): 981-984. (in Chinese)
- [15] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [16] 陈志强,张定华,金炎芳,等.基于测量数据的叶片截面特征参数提取[J].科学技术与工程,2007,9(7):1972-1975.
CHEN Zhiqiang, ZHANG Dinghua, JIN Yanfang, et al. Cross-sectional feature parameter extraction of blade based measurement data[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 9(7): 1972-1975. (in Chinese)
- [17] 张力宁,张定华.叶片前缘高精度重建方法研究[J].航空动力学报,2006,21(4):722-726.
ZHANG Lining, ZHANG Dinghua. High-precision reconstruction of blade leading edge[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 722-726. (in Chinese)
- [18] 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平[J].航空动力学报,2016,31(7):1761-1765.
XIANG Zhicong, HU Zhong, BAI Yulei, 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)

(编辑:王碧珺)