

文章编号:1000-8055(2012)02-0275-07

相位测量轮廓术应用于叶片测量

李华伟¹, 申作春¹, 覃银红², 鲍 鸿², 周延周²

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院 光电技术研究所, 哈尔滨 150001;

2. 广东工业大学 自动化学院, 广州 510006)

摘 要: 为解决叶片高精度三维轮廓测量成本高、效率低的问题, 搭建了基于相位测量的三维轮廓测量系统. 在完成了系统标定后, 为了检验系统的测量精度, 测量了一个滚珠轴承, 测量精度为 (0.084 ± 0.01) mm. 利用该系统从不同方向对某叶片进行了 6 次数据采集, 采集到的数据通过数据融合得到了整个叶片的三维点云, 利用整个叶片三维点云数据得到了叶片的不同截面图, 为叶片型面轮廓和几何尺寸的检测提供了依据. 相位测量轮廓术用于叶片三维轮廓测量, 在保证测量精度的同时大大降低了测量成本, 因此将相位测量轮廓术用于叶片三维轮廓测量是非常有意义的.

关 键 词: 叶片测量; 相位轮廓测量术; 系统标定; 数据融合; 叶片型面轮廓

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

Application of phase-measurement profilometry in blade measurement

LI Hua-wei¹, SHEN Zuo-chun¹, QIN Yin-hong²,
BAO Hong², ZHOU Yan-zhou²(1. Opto-electric Institute in School of Astronautics, School of Astronautics,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;2. Department of Automation,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to solve the problem that three-dimensional (3-D) profile measurement of blades was costly and had low efficiency, a 3-D profile measurement system based on phase measurement was built. After system calibration, a ball bearing was measured to test the system's measurement accuracy and got the measurement accuracy of 0.08 ± 0.01 mm. Then data acquisition of a blade was carried on from different directions for six times. The 3-D point cloud of the whole blade was get through data fusion and got the different blade sections based on the point cloud, which provided datas for the detection of blade size and surface contours. Phase-measurement-profilometry is used in blade measurement, which ensures the measurement accuracy and has lower costs. So using phase-measurement-profilometry in blade measurement is very meaningful.

Key words: blade measurement; phase-measurement-profilometry;
system calibration; data fusion; blade surface contours

收稿日期: 2011-03-13; **修订日期:** 2011-12-02

作者简介: 李华伟(1978-), 男, 山东新泰人, 博士生, 主要从事相位测量轮廓术系统标定及其应用研究.

E-mail: hwli2005@yahoo.com.cn

叶轮机在航天、航空、汽车、能源等领域都有广泛的应用,叶片是汽轮发电机和涡轮发动机的重要零件之一,叶片的加工量约占整个汽轮机 1/3,由于叶片的质量引起的故障也占 1/3,所以叶片的质量是整台汽轮机质量的保证.叶片形状误差对二次流损耗有较大影响,所以直接影响着汽轮机能量转化效率.这正是叶片型线测量一直受人们关注的原因.叶片的几何形状和尺寸决定着叶片的工作性能,因此在发动机零部件的检测中,叶片型面的检测具有十分重要的意义.然而叶片翼型的多变和空间角度、尺寸的复杂性给叶片的全面测量带来了很大的困难,目前常用的测量方法分为接触测量和非接触测量两大类.常见的接触测量方法包括:标准样模法^[1]、电感测量法^[2],可调导向叶片测量技术^[3]等方法.接触测量法测量速度慢,大多无法给出叶片的三维点云数据,而采用接触式三坐标测量机测量三维数据的测量成本较高.近几年很多非接触测量方法被提了出来,2003 年杨永跃等采用激光投影法实现叶片型面的非接触全型面测量^[4];2005 年清华大学的陈凯云,基于激光扫描法提出了一种用于航空压气机叶片型面在线测量的新型装备方案^[5],该方法精度很高,但是相应的测量成本也较高;2009 年刘建伟等提出一种大型水轮机叶片快速检测的新方法^[6]该方法以摄影测量原理为理论基础,首先在物体表面待测位置粘贴标志点,然后从不同角度拍摄一组照片,最后根据标志点的多个二维坐标重建出对应物体点的三维坐标,从而实现对被测对象的数字化建模和测量.目前还有很多于叶片测量的报道^[7-9],

相位测量轮廓术由激光干涉计量发展而来,其最大优点在于求解物体初相位时是点对点的运算,即在原理上某一点的相位值不受相邻点光强值的影响,从而避免了物面反射率不均匀引起的误差.相位测量轮廓术一次就可测量出物体的整个表面,不需进行附加的一维或二维扫描.英国拉夫堡大学的 Huntley J M 领导的课题组做了很多出色的工作,Olatokunbo 等人将传统的对二维圆的霍夫变换拓展到三维空间并用于对球体的识别,然后将测得尺寸大小的球作为标定物应用于相位测量轮廓术系统的标定中^[10].WANG Zhaoyang 等人提出了一种快速精确测量的新方法^[11],系统每秒可测得两幅三维图.四川大学的 SU Xianyu 领导的课题中的投影仪和摄像机可以随意放置,他们采用多频投影条纹以及逆向自标

定方法,在实验中测量速度可大组在相位测量轮廓术方面也做了很多出色的工作,ZHOU Wens-en 和 SU Xianyu 提出了一种影射算法用于相位测量轮廓术^[12],其利用了相位-高度的影射关系,通过测量几个不同平行平面的相位来获得相位-高度的影射公式,而不是测量系统的几何参数,从而减少了标定所需时间,同时减小了误差. SU Weihung 提出了一种应用于测量大的不连续高度阶梯形物体的条纹投影测量系统的标定方法^[13].CUI Suochao 和 ZHU Xiao 通过扩展投影仪光迹追踪法和图像光迹追踪法,针对相位测量轮廓术提出了一种广义的以参考平面为基础的标定方法^[14].还有将相位测量轮廓术应用于非球面镜的检测^[15].

综上所述,目前叶片测量方法存在的问题主要是:少点、单截面的测量方法虽然测量效率高,测量成本较低,但是其测量精度低,已很难满足现在制造业对叶片精度越来越高的要求.而多点、多截面的测量方法成本普遍较高,例如三坐标测量机虽然测量精度是最高的,但其测量成本高,测量效率差,因此寻找一种低成本测量叶片轮廓和几何尺寸的方法很具有现实意义.相位测量轮廓术可以测量出叶片的三维轮廓,而且三维轮廓中任意两点间的距离能给出,测量精度较高,从而可以做到对叶片型面轮廓和几何尺寸的检测,以及对叶片三维面形的评定,同时相位测量轮廓术的应用大大降低了测量的成本,因此将相位测量轮廓术应用于叶片三维轮廓测量非常具有实际意义.

1 基本理论

1.1 相位测量轮廓术(PMP)原理

当光栅图投影到三维漫反射物体表面时,所探测的正弦光栅受物体表面高度调制的像可以用下式表示:

$$I(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \cos \phi(x, y) \quad (1)$$

式中 $A(x, y)$ 为背景光强, $B(x, y)$ 为条纹的调制深度,相位函数 $\phi(x, y)$ 是由物体三维面形 $z=h(x, y)$ 所决定的条纹变形. $\phi(x, y)$ 与三维面形之间的关系取于与系统的结构参数.为了正确解调出相位函数 $\phi(x, y)$,要求探测的光强应与 $\phi(x, y)$ 的关系严格满足式(1),尽可能避免 $I(x, y)$ 的高次谐波而引入相位误差.

1.2 系统标定

相位测量轮廓术系统模型采用 ZHOU

Wensen 和 SU Xiaogu 提出的共面光轴系统,如图 1 所示。

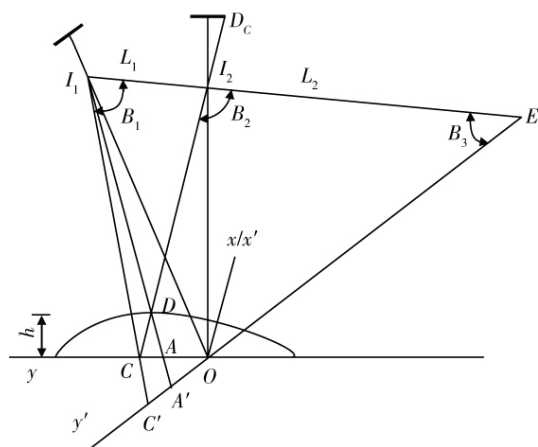


图 1 共面光轴系统^[12]

Fig. 1 Coplanar axis system

I_1, I_2 分别是投影仪和摄像机的光学中心。平面 $x'Oy'$ 正弦光栅投影平面,平面 xOy 是 CCD (charge coupled device) 的拍摄平面,CCD 拍摄图像的点 D_c 对应参考平面上的 C 点,当点沿 CI_2 移动时相位沿 $C'E$ 移动。通过此模型得到了一个有效隐式相位-高度映射关系^[12]

$$\frac{1}{z} = a + b \frac{1}{\Delta\phi} + c \frac{1}{\Delta\phi^2} \quad (2)$$

其中 a, b, c 是与整个系统有关的 3 个参数, $\Delta\phi$ 是各平面相对于参考平面的相位值,分别测量 4 个 z 位置(包括参考平面)处标定平面的相位值,则可以求解系统参数 a, b, c 。

通过标定完成相位与高度的关系,假设高度方向是 z 轴方向,那么高度 z 与像素平面各点的关系 $z(m, n)$ 就已知,只需再知道各个像素点与坐标 x, y 的关系,那么每个像素点对应的空间坐标也就确定了,从而整个系统的标定工作也就完成了。对于 x, y 的标定方法如下:在标定平面上等间距地画一些圆,按照自己规定好的 $x-y$ 坐标系,平板上所有的圆心坐标 (x, y) 都是已知的,然后标定平板沿 z 方向在导轨上移动,采集多组圆心坐标的数据 $m_i, n_i, x_i, y_i (i=1, 2, \dots, k)$ 。假设 x, y 随 m, n 变化的方程形式为

$$x = a_0 + a_1 m + a_2 n \quad (3)$$

$$y = b_0 + b_1 m + b_2 n \quad (4)$$

然后利用测得的多组数据,进行最小二乘法拟合,最终拟合得到其中的系数 a_0, a_1, a_2 和 b_0, b_1, b_2 ,

这样就完成了对系统的标定工作。

2 相位测量轮廓术应用于叶片测量

实验中采用的实验设备是高精度摄像 Kodak ES 1.0、普乐士 V1100 投影仪一台、亮度达到了 1000 ANSI lm,对比度为 2000 : 1; 铝合金架平台; 二维 (x, y) 手动导轨平台,行程为 0~175 mm,精度为 ± 0.01 mm; 还有标定平板若干。实验装置实物图如图 2 所示。

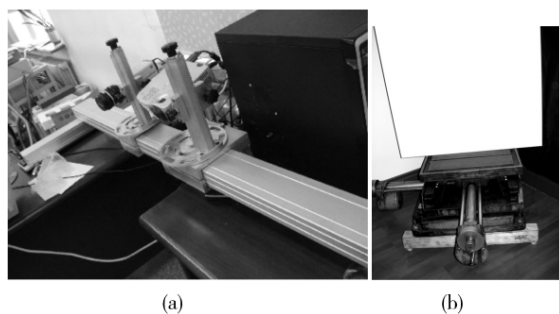


图 2 测量系统装置实物图

Fig. 2 Measuring system devices

图 2(a)为摄像机与投影仪,它们都通过固定装置固定在铝合金平台上,摄像机和投影仪的仰角可以通过调解固定装置来改变,摄像机和投影仪之间的距离也可以通过滑动导轨上的底座来完成。图 2(b)为标定装置,有二维手动导轨平台和放到上面的标定平板组成,移动精度可达 ± 0.01 mm。

为了检验整个系统的测量精度,实际测量了一个直径为 (60 ± 0.01) mm 的滚珠轴承,实验测量的滚珠轴承的三维点云数据如图 3 所示,中间数据缺失部分是由于采集数据过程中球体反光所致。利用 Imageware 软件对得到的点云数据进行处理,处理结果如图 4 所示,通过拟合得到滚珠轴承的半径是 30.0841 mm,测量误差为 (0.0841 ± 0.01) mm。因为一般叶片加工精度要求误差不超过 0.05 mm,但是通过提高标定过程中标定平板的移动精度,以及修正标定平板与摄像机光轴的不垂直引入的倾角误差可进一步提高系统的测量精度,该部分工作会在以后逐步去完成。

2.1 叶片测量结果

要得到叶片的三维数据,必须要采集到叶片各个面的数据,所以拍摄过程中每拍摄完一次就要调整一次叶片面向镜头的角度,直到叶片各个面的数据都采集到为止。在采集叶片数据的时候,

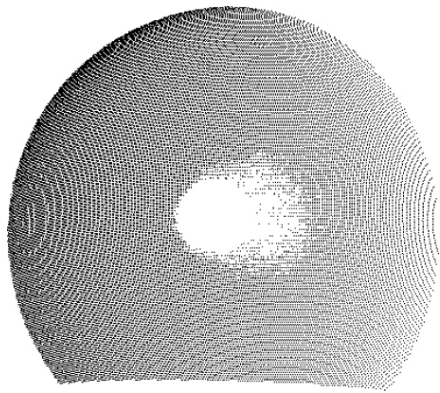


图 3 小球的点云数据

Fig. 3 Piont cloud datas of the small sphere

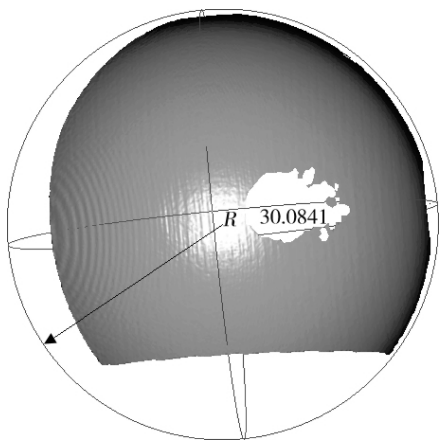


图 4 小球拟合效果图(单位:mm)

Fig. 4 Fitting result of the small sphere(unit:mm)

合理的叶片放置位置,尽可能地减少遮挡区域的出现;设计好叶片每次的转动角度,在达到不同点云数据有足够的重叠区域的同时,以减少采集数据的次数,从而提高系统的测量效率.实验中对叶片采集了 6 次数据,所用时间大约为 3 min,每次采集数据量都在 10 万个点以上,测得了叶片不同侧面的三维点云图,如图 5 所示.

前面采集到的叶片点云放大后如图 6 所示,从图 6 中可以看出大约 1.2 mm 左右的距离采集到了 5 个点,叶片数据曲面面型测量误差=单点测量误差/ $n^{1/2}$, n 为拟合曲面面型时用点的数量;采用系统的单点测量误差为 10^{-2} mm 级,但是一次测量的有效点很多,从而减少了拟合曲面的误差.三坐标测量机虽然单点测量精度很高,但其实际测量过程中测量点的个数有限,从而制约了其曲面面型测量的精度,如果大量增加测量点的个数则会提高其测量成本.

根据上述测得的 6 幅叶片三维点云图,利用

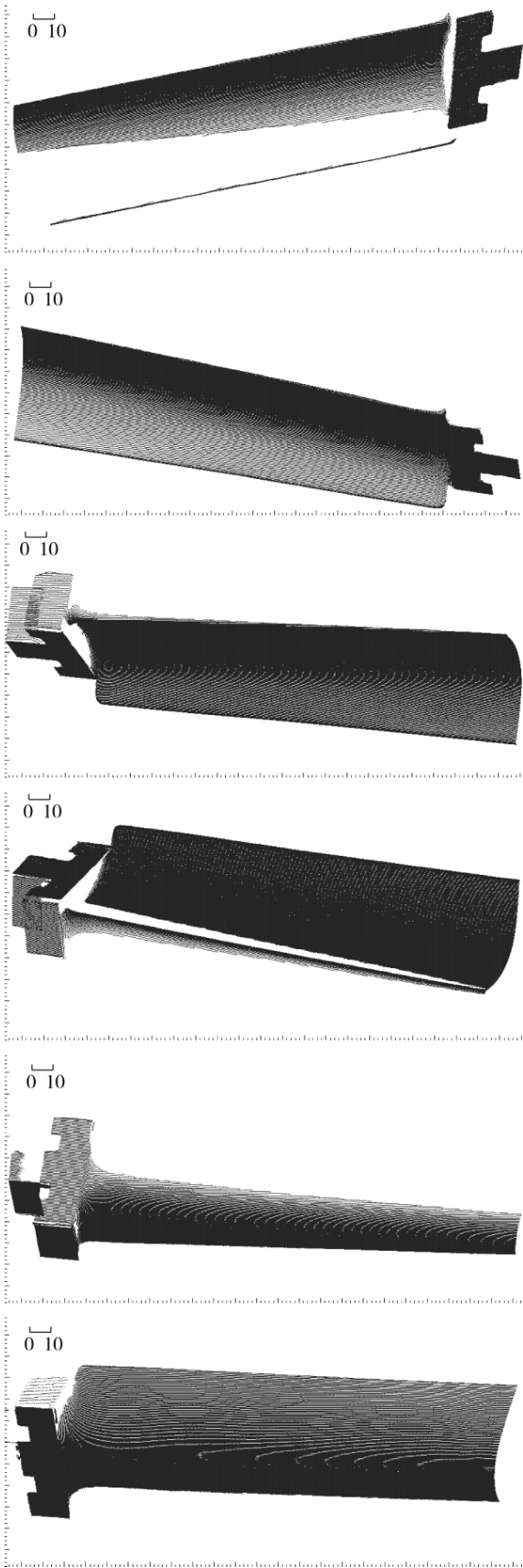


图 5 6 次采集叶片不同侧面的三维点云图
(单位:mm)

Fig. 5 Plots of six measuring different sides of a blade (unit:mm)

Imageware 软件对上述数据进行了融合,得到了较好的融合结果,融合后完整叶片的三维点云图如图 7 所示.

在图 7 中,图 7(a)是从叶片头部向根部方向的视图;图 7(b)是从叶片根部向头部方向的视图;图 7(c)是叶片正面(凹面)视图;图 7(d)是叶片背面(凸面)视图.将上述三维点云图做简单的三角形网格化后的结果,曲面质量不高,但是三维

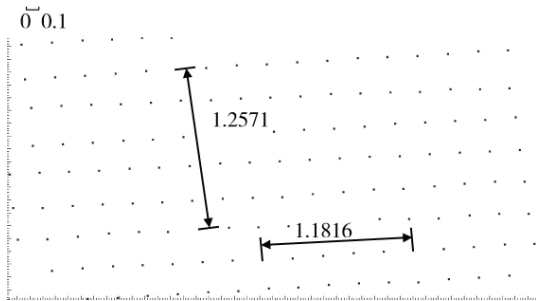


图 6 单次采集得到的叶片点云放大图(单位:mm)
Fig. 6 Amplified picture of a single point cloud
(unit:mm)

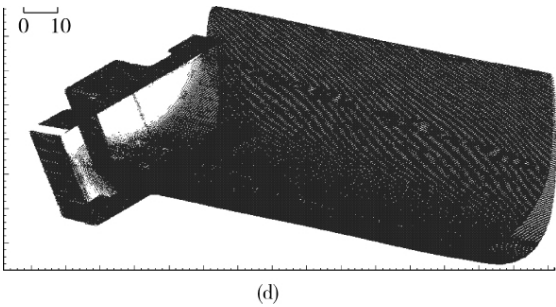
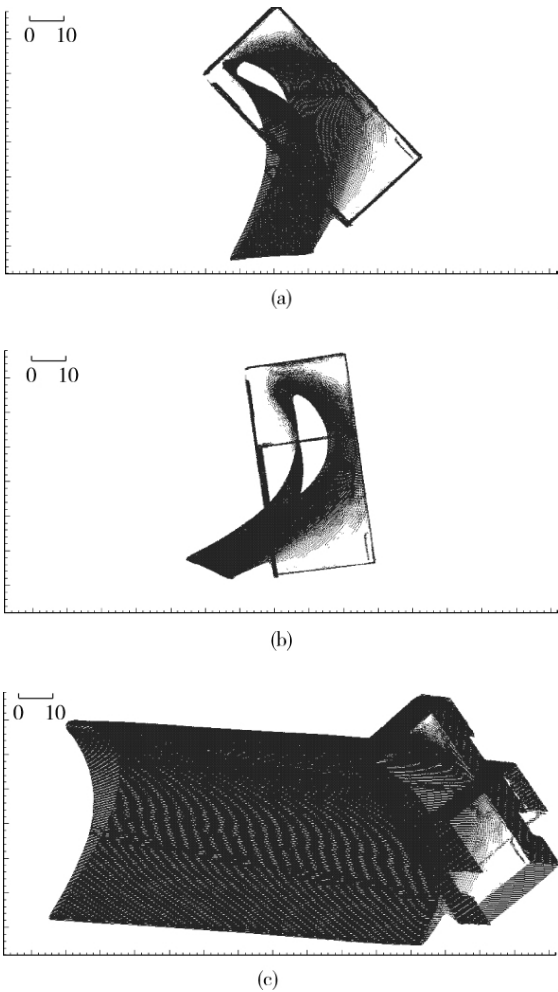


图 7 叶片的三维点云图(单位:mm)
Fig. 7 Three-dimensional point cloud pictures of
the blade (unit:mm)

轮廓已经比较清晰了,如图 8 所示.

在对变截面叶片测量前,应该先选择好测量截面,例如,仿型加工叶片一般每隔 40 mm 取一个测量截面^[16].不管采取何种测量方法,对测量数据的处理大多侧重于叶片截面的分析,即特征参数的计算,如弦长、最大厚度、前后缘半径等,并以此作为判断叶片是否合格的依据^[17].由此可见对叶片截面分析的重要性.根据上面测得的叶片点云图,沿叶片轴线的整体截面如图 9 所示.图 9(a)、图 9(b)是叶片整体截面,其中图 9(a)为叶片截面图叶背向下的视图,我们得到了非常清晰的叶片整体的截面图,图 9(c)~图 9(e)为叶片头部到根部的顺序抽取的 4 个截面.

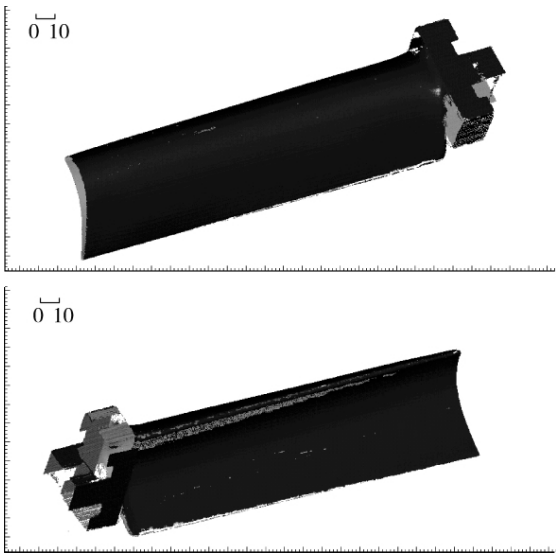


图 8 叶片点云三角形网格化后效果图
(单位:mm)
Fig. 8 Plots of the blade operated by triangle grids
(unit:mm)

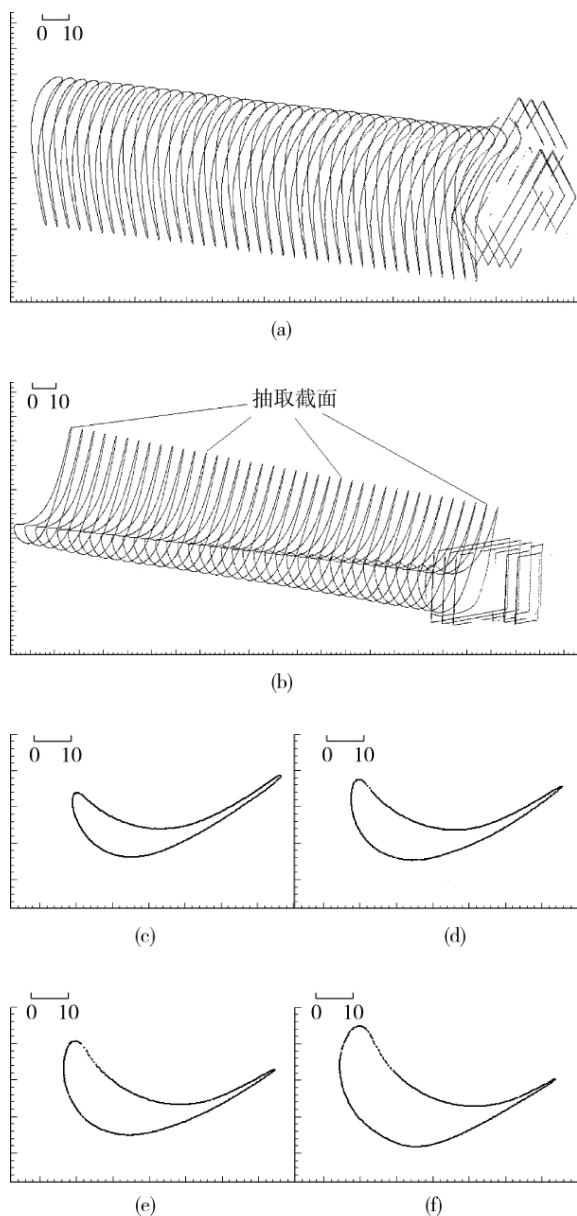


图 9 叶片截面图(单位:mm)

Fig. 9 Sections of the blade (unit:mm)

3 结 论

采用搭建的基于相位测量的三维轮廓测量系统测量了某叶片,通过 6 次采集叶片数据,得到了叶片的三维点云数据,利用该数据取得了叶片的轴向的若干截面型线.叶片型面检测主要是指型面轮廓和几何尺寸(包括叶型厚度、叶型弯扭、叶片弦长、前后缘位置等)的检测;叶片三维面形的评定一般是通过测量沿叶片轴向方向等间距分布的若干截面的型线来实现的.由上面的初步工作可以看出,将相位测量轮廓术应用于叶片测量,测得的点云数据完全满足上述检测的要求,而且相位测量轮廓术应用于叶片测量具有传统方法所没

有的优点;主要优点是一次测量有效点多,曲面测量精度接近于接触式三坐标测量机.另外测量成本要较接触式三坐标测量机低很多,而且测量效率高.在采集数据过程中,每个像素点对应的测量面积大约是 0.3 mm^2 ,虽然该面积很小,但是如果正好落在比较尖锐的棱角处,不可避免地会出现单像素点测量误差加大的现象,对于这样的一些点可以舍掉,在多点拟合的情况下,不会对测量精度有太大影响.由此看来将相位测量轮廓术应用于叶片测量是完全可行有效的.

参考文献:

- [1] 陈非凡,强锡富.汽轮机叶片叶型测量综述[J].航空计测技术,1995,15(3):3-4.
CHEN Feifan, QIANG Xifu. Overview on profile measurement of turbine blade[J]. Aviation Metrology Measurement Technology, 1995, 15(3): 3-4. (in Chinese)
- [2] 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 & Measurement Technology, 2009, 29(3): 1-3. (in Chinese)
- [3] 明兴祖,孙华舟.航空发动机可调导向叶片测量技术[J].航空工艺技术,1998(3):31-32.
MING Xingzu, SUN Huazhou. Measurement technology of adjustable leading vane of aero-engine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1998(3): 31-32. (in Chinese)
- [4] 杨永跃,邓善熙,何革群.风力机叶片检测中的机器视觉技术[J].太阳能学报,2003,24(2):232-236.
YANG Yongyue, DENG Shanxi, HE Gequn. The technology of intellectualized vision for blades measurement[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2003, 24(2): 232-236. (in Chinese)
- [5] 陈凯云.航空压气机叶片型面在线测量新型装备研制[J].航空制造技术,2005(3):92-95.
CHEN Kaiyun. Development of novel on-line measurement machine for aeroengine compressor blade profile[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(3): 92-95. (in Chinese)
- [6] 刘建伟,梁晋,梁新合,等.大型水轮机叶片快速检测的新方法[J].光电工程,2009,36(8):50-56.
LIU Jianwei, LIANG Jin, LIANG Xinhe, et al. A novel rapid measurement approach for blade of large water turbine[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(8): 50-56. (in Chinese)
- [7] 王淼安.光学测头在飞机发动机叶片检测中的应用[J].航空制造技术,2010(13):32-35.
WANG Miaoan. Application of optical probe in aircraft engine blade inspection [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(13): 32-35. (in Chinese)
- [8] 郭旗.三坐标测量机在汽轮机叶片测量中的应用[J].数字

- 技术与应用,2010(12):78.
- GUO Qi. Application of optical probe in aircraft engine blade inspection[J]. Digital Technology & Application, 2010(13):32-35. (in Chinese)
- [9] 王呈. 发动机叶片榫头角度现场检测方法[J]. 计测技术, 2011,31(4):29-31.
- WANG Cheng. Research of aero-engine blade tenon angle scene examination method[J]. Metrology & Measurement Technology,2011,31(4):29-31. (in Chinese)
- [10] Olatokunbo O, Ogundana C, Russell C, et al. Fast hough transform for automated detection of spheres in three-dimensional point clouds[J]. Optical Engineering, 2007, 46(5):051002(11 pages).
- [11] WANG Zhaoyang, DU Hua, Park S, et al. Three-dimensional shape measurement with a fast and accurate approach[J]. Applied Optics, 2009, 48(6):1052-1061.
- [12] ZHOU Wensen, SU Xiaoyin. A direct mapping algorithm for phase-measuring profilometry[J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(1):89-94.
- [13] SU Weihung. Calibration-based two-frequency projected fringe profilometry: a robust, accurate, and single-shot measurement for objects with large depth discontinuities [J]. Optics Express, 2006, 20(14):9178-9187.
- [14] CUI Suochao, ZHU Xiao. A generalized reference-plane-based calibration method in optical triangular profilometry [J]. Optics Express, 2009, 23(17):20735-20746.
- [15] TANG Yan, SU Xianyu, LIU Yuankun, et al. 3-D shape measurement of the aspheric mirror by advanced phase measuring deflectometry [J]. Optics Express, 2008, 19(16):15090-15096.
- [16] 张露牌. 汽轮机动叶片的测绘[J]. 水力电力机械, 1996(2):48-51.
- ZHANG Lupai. The measurement of turbine blades[J]. Water Conservancy & Electric Power Machinery, 1996(2):48-51. (in Chinese)
- [17] 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)