



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190094

数字出版日期: 2020-05-20; 数字出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1355.N.20200520.0944.003.html>

## 基于频闪激光光栅条纹的发动机叶片曲面测量

石培杰, 杨国威, 王以忠, 陈莹  
(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

**摘要:** 航空发动机叶片的点云数据三维重建是叶片加工和修复的必要步骤, 为此提出一种基于频闪激光光栅条纹的叶片曲面重构方法. 频闪激光光栅投射装置投射出的光栅条纹具有高精度、高分辨率和高亮度的特性, 且条纹刷新快. 使用相位-高度测量模型, 通过标定得到频闪激光光栅投射装置到相机的距离和到参考平面的距离. 首先, 用量块的高度测量实验, 验证了测量系统的精度, 均方根误差(RMSE)为 0.07 mm; 其次, 实现发动机叶片曲面的测量. 实验结果表明: 将频闪激光光栅条纹用于叶片曲面测量可以得到很好的重构效果.

**关键词:** 频闪激光光栅条纹; 发动机叶片; 曲面测量

中图分类号: TN919; TH862

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2020)04-0070-05

## Surface Measurement of Engine Blade Based on Stroboscopic Laser Grating Stripes

SHI Peijie, YANG Guowei, WANG Yizhong, CHEN Ying

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology,  
Tianjin 300222, China)

**Abstract:** Three-dimensional reconstruction of point cloud data of aero-engine blades is a necessary step for blade machining and repair. To this end, a method of blade surface reconstruction based on stroboscopic laser grating stripe is proposed. The grating stripe projected by the stroboscopic laser grating projection device has high precision, resolution and brightness, and the stripe refreshes quickly. Using a phase-height measurement model, the distance from the stroboscopic laser grating projection device to both the camera and the reference plane was obtained by calibration. The accuracy of the measurement system was verified by the height measurement experiment of the gauge block, the RMSE was 0.07 mm, and the measurement of the engine blade surface was realized. The experimental results show that the stroboscopic laser grating fringe can be well reconstructed for the blade surface measurement.

**Key words:** stroboscopic laser grating stripe; engine blade; surface measurement

叶片作为航空发动机的重要组成部分,影响着发动机的运行状态,保证发动机叶片的加工精度,对提升发动机工作效率显得尤为重要,因此叶片型面的测量技术一直是研究的热点<sup>[1-3]</sup>. 发动机叶片的三维测量结果主要由以下几个方面进行评价: 积叠点、叶型弦线、弦角、叶型厚度、叶型最大厚度、前缘点、后缘点、前后缘半径、中弧线等轮廓特征参数及叶身扭转角、倾斜度、叶型波纹度等位置参数<sup>[4]</sup>. 目前,国内外

许多学者对发动机叶片各个参数的测量进行了研究. 朱麒元等<sup>[5]</sup>对航空发动机叶片加工的变形因素展开分析,探讨了相应的控制方法. 张现东等<sup>[6]</sup>针对航空发动机叶片三坐标检测测量效率低的问题,提出了一种适用于翼型曲面三坐标测量优化采样算法. 王涛等<sup>[7]</sup>提出了一种基于散斑视觉测量的叶片模型重构方法. 魏永超等<sup>[8]</sup>为解决叶片完整型面自动检测存在的问题,提出了一种叶片高精度自动测量融合系

收稿日期: 2019-03-21; 修回日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51805370)

作者简介: 石培杰(1992—),男,甘肃武威人,硕士研究生; 通信作者: 杨国威,讲师, yangguowei@tust.edu.cn

统. 宋涛等<sup>[9]</sup>提出了一种基于移动最小二乘法(MLS)的曲面重建方法进行航空发动机叶片的曲面重建. 马龙等<sup>[10]</sup>针对民航发动机叶片面型的精密检测问题,提出了一种基于条纹级次识别的民航发动机叶片测量方法. 基于以上研究进展,本文提出一种新的叶片曲面测量方案,该方案由频闪激光光栅条纹投射装置投射光栅条纹,通过量块测量验证了测量系统的精度,并将该投射装置应用于叶片曲面的测量,利用测量结果分析叶片的曲面特征.

## 1 三维测量原理

频闪激光光栅投射装置的投射原理是将精细的线激光投射在多面旋转棱镜上,通过扫描的方式,实现时间调制的线激光转化为空间的光栅条纹. 该投射装置投射的光栅条纹具有高亮度、高分辨、高精细度和刷新速度快的特点. 为适应不同尺寸和表面具有反光特性的物体,可通过本投射装置调节光栅条纹的线宽、密度和强度.

利用该投射装置实现发动机叶片的三维测量,测量模型示意图如图1所示.

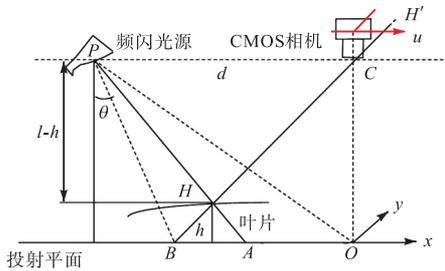


图1 测量模型

Fig. 1 Measurement model

投射装置扫描中心为  $P$  点, CMOS 相机的光心为  $C$  点,且相机光轴垂直于参考平面. 投射装置光轴  $PO$ 、CMOS 相机光轴  $CO$  及参考平面交于点  $O$ ,以点  $O$  为坐标原点建立平面直角坐标系  $xOy$ . 将发动机叶片置于参考平面,其中  $H(x, y)$  为叶片上任意一点. 频闪激光光源投射的光线  $PA$  投射在参考平面的  $A$  点,但由于叶片的存在,实际投射在叶片的  $H$  点处. 从 CMOS 相机角度看,在没有叶片时,投射平面的  $B$  点成像在相机像面坐标系中的  $H'$  点. 而投射平面的点  $B$  是频闪光源发出的光线  $PB$  在没有叶片时投射在参考平面的点,点  $B$  包含着  $PB$  光线信息. 由于叶片的存在,叶片上的  $H$  点被成像到相机像面坐标系中的  $H'$  点,而  $H$  点包含着  $PA$  光线信息. 通过以上分析可得出,由于叶片的存在,成像坐标系中点  $H'$

的信息从投射平面的  $B$  点变化到  $A$  点. 叶片上点  $H$  的高度  $h(x, y)$  的信息反映在投射平面点  $B$  到点  $A$  的距离. 求得  $AB$  的长度便可得到叶片  $H$  点的高度信息. 图1中频闪光源的扫描中心  $P$  与 CMOS 相机光心  $C$  的连线需平行于投射平面. 设  $l$  是投射平面到 CMOS 相机光心  $C$  的距离,  $d$  是频闪光源扫描中心  $P$  到 CMOS 相机光心  $C$  的距离.

设  $AB$  的距离为  $s$ ,根据交叉光轴测量结构,图1中  $\triangle AHB \sim \triangle PHC$ ,故有

$$h(x, y) = \frac{ls(x, y)}{d + s(x, y)} \quad (1)$$

假设投射在投射平面的正弦光栅条纹的周期是  $T_0$ , 投射平面上  $A$ 、 $B$  两点的光强分别可以表示为

$$I_A = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi T_0 x + \varphi_A(x, y)] \quad (2)$$

$$I_B = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi T_0 x + \varphi_B(x, y)] \quad (3)$$

式中:  $a(x, y)$  为光栅条纹背景灰度;  $b(x, y)$  为光栅条纹的调制深度;  $\varphi_A(x, y)$  为 CMOS 相机像面坐标系  $H'$  在存在叶片时  $A$  点的相位;  $\varphi_B(x, y)$  为没有叶片时  $B$  点的相位.

$A$ 、 $B$  两点的相位有以下关系:

$$\varphi_A(x, y) - \varphi_B(x, y) = \frac{T_0}{2\pi s} \quad (4)$$

其中  $AB$  的距离  $s$

$$s(x, y) = \frac{T_0(\varphi_A(x, y) - \varphi_B(x, y))}{2\pi} \quad (5)$$

而  $B$  点的相位值可以通过成像投射平面获得,  $A$  点的相位值则通过成像叶片获得. 因此被测物体  $H$  点的高度可表示为

$$h(x, y) = \frac{l(\varphi_A(x, y) - \varphi_B(x, y))}{(\varphi_A(x, y) - \varphi_B(x, y) + 2\pi d f_0)} \quad (6)$$

其中  $f_0$  为光栅条纹的空间频率,  $\varphi_A(x, y)$  和  $\varphi_B(x, y)$  的值利用相移法解算.

通过光源设置实现光栅条纹的相移,得到若干幅光栅条纹图像:

$$I_i(m, n) = A_0(m, n) + B_0(m, n) \cos[(\varphi(m, n) + \alpha_i)] \quad (7)$$

其中  $(m, n)$  是相机像坐标系的点,  $i$  是相移次数,  $\alpha_i$  是相移值,  $\varphi(m, n)$  是所求的相位. 可得相位  $\varphi(m, n)$  的正切值:

$$\tan(\varphi(m, n)) = \frac{\sum_{n=1}^N I_n(m, n) \sin\left(\frac{2\pi(n-1)}{N}\right)}{\sum_{n=1}^N I_n(m, n) \cos\left(\frac{2\pi(n-1)}{N}\right)} \quad (8)$$

本文采用四步相移法实现相位的解算,相移值依

次取  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  时, CMOS 相机分别采集相移的光栅条纹图像, 故有

$$\tan(\varphi(m, n)) = \frac{I_4(m, n) - I_2(m, n)}{I_1(m, n) - I_3(m, n)} \quad (9)$$

$$\varphi(m, n) = \arctan\left(\frac{I_4(m, n) - I_2(m, n)}{I_1(m, n) - I_3(m, n)}\right) \quad (10)$$

式(10)得到的相位值  $\varphi(m, n)$  是叶片的包裹相位, 并不是真正的相位信息, 需要对得到的包裹相位进行相位展开, 还原出叶片真实的相位值. 本文采用基于积分路径相位解缠的 Goldstein 枝切法还原出真实相位. 该方法通过建立合理的枝切线, 隔绝噪声区, 阻止相位残差点所造成的积分误差在整幅图像的传递<sup>[11]</sup>.

## 2 实验及结果分析

### 2.1 系统标定

叶片的三维测量实验系统搭建如图 2 所示. 实验系统主要由频闪光源、分辨率为  $1024 \times 768$  的 CMOS 相机 (Basler acA1300-60 gm)、投射平面和叶片构成. 根据式(6)可知, 影响系统测量精度的主要是相位  $\varphi$ 、相机与光源的距离  $d$  和光源与投射面的距离  $l$ . 相位信息可以通过准确的相移获取, 而距离  $l$  和  $d$  则需要通过标定准确获得. 在式(6)中, 令  $p(x, y) = \varphi_A(x, y) - \varphi_B(x, y)$ , 则有

$$l \cdot p(x, y) - 2\pi f_0 \cdot h(x, y) \cdot d = h(x, y) \cdot p(x, y) \quad (11)$$

距离标定原理为: (1) 利用实验系统对两个已知尺寸的标准件 (量块) 进行相位获取; (2) 将两个标准件高度和不同点相位代入式(11), 可以得到不同点的距离  $l$  和  $d$ ; (3) 将所有的  $l$  和  $d$  求取算术平均值.

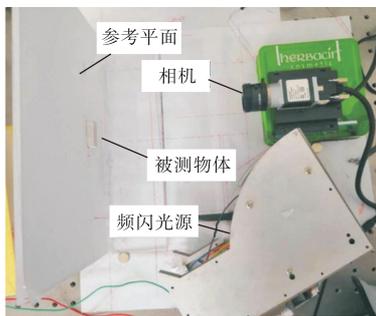


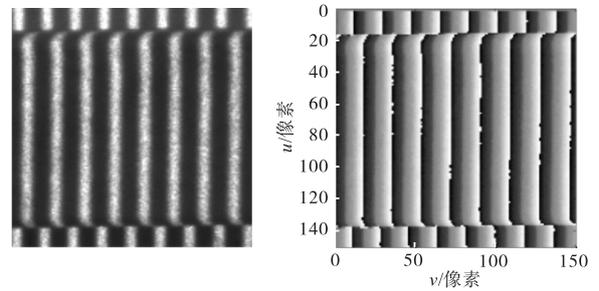
图 2 叶片三维测量实验系统

Fig. 2 Three-dimensional measurement experiment system for blades

CMOS 相机采集的图像包含各种噪声和失真. 如果将噪声图像用于相位解算, 则会引起相位跳变. 因此, 必须处理所获取的相移图像. 首先, 对所

获取的图像进行快速傅里叶变换以获得图像的频谱图, 分析频谱图以获得图像噪声的频率. 其次, 选择高斯低通滤波器对所获取的图像进行滤波以获得条纹的正弦性较高的光栅条纹图案.

利用实验系统对量块测量, 得到 5 mm 和 10 mm 高度量块的真实相位. 实验中, 通过设置光源参数, 实现量块条纹的相移, 依次采集相移条纹图像, 并对条纹图像预处理后进行相位解算得到包裹相位, 如图 3 所示. 将解算得到的相位展开, 得到相位信息. 将两个量块的相位代入式(11)可得到若干个  $l$  和  $d$ ,  $l$  和  $d$  的个数与相位点个数相等. 对  $l$  和  $d$  分别求算术平均值.



(a) 量块条纹图 (b) 包裹相位

图 3 量块条纹和包裹相位

Fig. 3 Gauge stripe and wrapping phase

通过标定得到精确的距离,  $l$  为 156.5 mm,  $d$  为 128.6 mm. 进行量块的高度测量实验, 验证实验系统的测量精度. 选取 10 mm 高度的量块为测量对象, 量块的三维测量结果如图 4 所示, 绘制测量到的高度曲线如图 5 所示.

通过量块高度的测量实验, 得到测量系统的测量精度. 利用测量对象的实际高度和测量高度之间的均方根误差 (RMSE) 来评估测量精度. 在该实验中, 量块的高度为 10 mm, RMSE 为 0.07 mm. 验证了系统的测量精度后, 将该系统应用于发动机叶片的曲面测量.

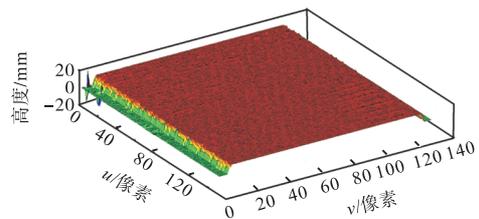


图 4 量块三维测量结果

Fig. 4 Result of three-dimensional measurement of the gauge block

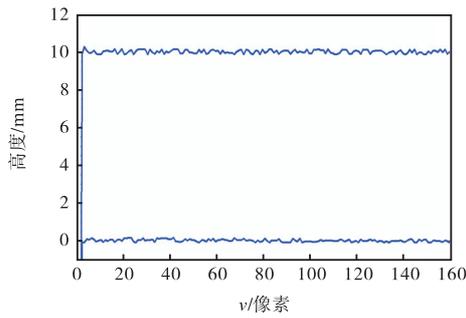


图5 量块高度曲线

Fig. 5 Height curve of the gauge block

2.2 叶片三维测量实验

频闪光源投射光栅条纹至发动机叶片时, 由于发动机叶片的表面具有反光的特性, 造成光栅条纹相位信息的缺失, 导致测量误差. 为解决叶片反光问题, 首先, 通过更改频闪光源的投射角度, 使叶片反光部分减少; 其次, 调节频闪光源条纹的强度及线宽; 最后, 通过设置相机的焦距和光圈值达到最大程度消除反光的目. 经过参数调整后得到发动机叶片的条纹如图 6 所示.

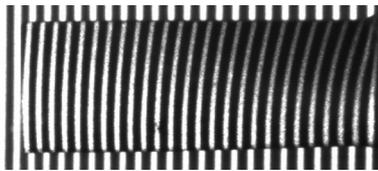


图6 叶片条纹图

Fig. 6 Grating fringe of the blade

CMOS 相机采集叶片的相移光栅条纹图像, 通过高斯滤波器对条纹图像进行噪声滤除, 提高条纹正弦性. 首先, 利用式 (10) 进行相位解算, 得到发动机叶片的包裹相位如图 7 所示.

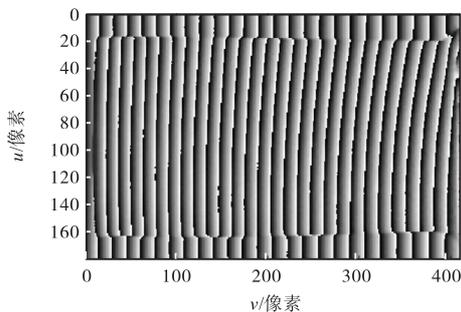


图7 叶片包裹相位

Fig. 7 Blade wrapped phase

其次, 计算包裹相位的残差, 并标记出相位残差点的位置; 之后, 使用 Goldstein 枝切算法得到优化的积分路径, 建立合理的枝切线, 阻止相位残差造成的误差传递; 最后, 使用 FloodFill 算法进行包裹相位的

展开得到叶片的真实相位. 去除基频信息的叶片的展开相位如图 8 所示. 叶片曲面三维测量结果如图 9 所示.

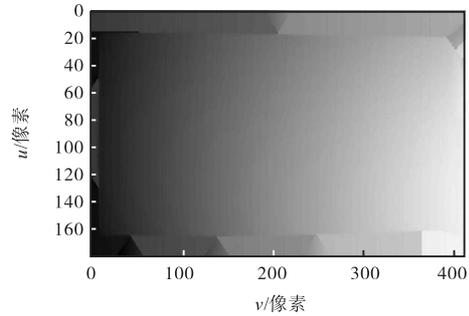


图8 去除基频后叶片相位展开

Fig. 8 Blade phase unwrapped after removal of fundamental frequency

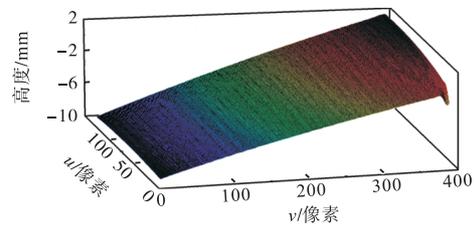
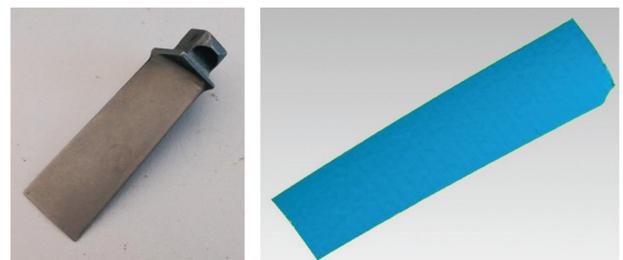


图9 叶片曲面三维测量结果

Fig. 9 Three-dimensional reconstruction of the blade

为了更直观地观测到叶片的曲面重构效果, 利用逆向软件将曲面点云数据生成曲面重构模型, 如图 10 所示.



(a) 发动机叶片实物

(b) 叶片曲面模型

图10 叶片实物和型面模型

Fig. 10 Blade and profile model

为了分析发动机叶片曲面的测量效果, 提取不同位置的叶片截面点云数据, 拟合出不同位置叶片截面的曲线. 选取叶片不同位置的横向截面, 绘制截面曲线, 从图 11 (b)可以看出, 随着截面位置 1 变化到位置 4, 相应的截面曲线曲率变大. 选取叶片的纵截面, 绘制纵截面曲线, 从图 11 (d)可以看出, 随着截面位置 1 变化到位置 4, 纵截面曲线的曲率逐渐增大. 因此, 通过实验表明, 随着截面位置的不同, 叶片的扭转角在逐渐变化, 发动机叶片的曲面特征被很好

地恢复.

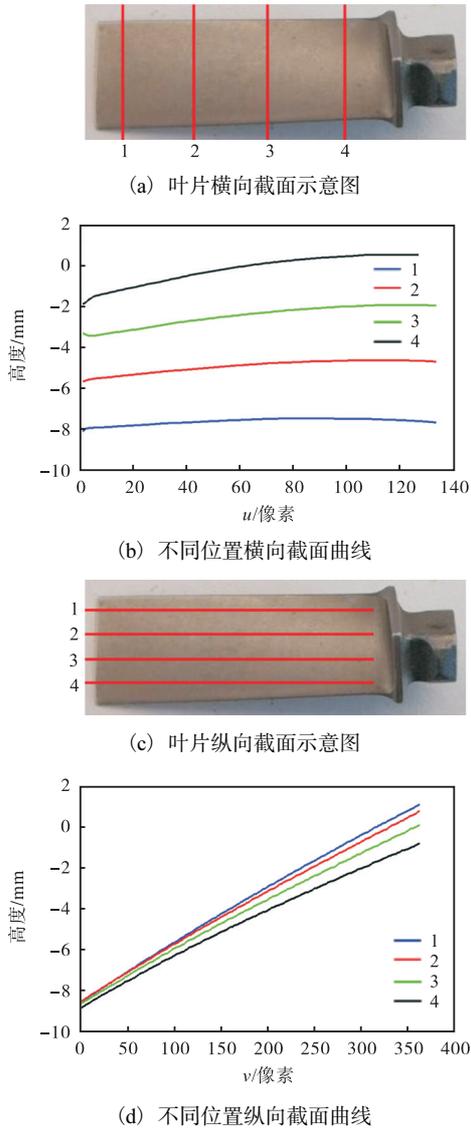


图 11 叶片截面曲线  
Fig. 11 Sectional curve of the blade

### 3 结 语

航空发动机叶片的三维测量对叶片的加工及质

量检测具有重要意义. 鉴于此, 本文提出一种基于频闪激光光源的发动机叶片三维测量方法. 通过对叶片包裹相位的解算、展开, 实现叶片曲面的重建, 充分利用频闪激光光源光栅条纹的优点, 很好地恢复了发动机叶片的型面. 这为频闪激光光源在发动机叶片的高精度三维测量奠定了基础.

### 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.

[2] 孙青州. 叶片复杂曲面测量系统研究[D]. 长春:吉林大学,2014.

[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.

[4] 李凯,赵燎,李超,等. 航空发动机叶片型面轮廓光学测量技术现状及发展趋势[J]. 航空制造技术,2018,61(22):28-35.

[5] 朱麒元,常彬,王东. 航空发动机叶片加工变形因素及控制分析[J]. 南方农机,2018,49(15):170.

[6] 张现东,卜昆,董一巍. 航空发动机叶片三坐标测量优化采样方法[J]. 航空动力学报,2019,34(1):168-176.

[7] 王涛,李战,王盛,等. 基于散斑视觉测量的叶片模型重构[J]. 激光与光电子学进展,2019,56(1):232-241.

[8] 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.

[9] 宋涛,戴士杰,周国香,等. 航空发动机叶片曲面重建研究[J]. 计算机仿真,2018,35(4):33-37.

[10] 马龙,徐泓悦,胡艳敏,等. 基于投影条纹级次识别的发动机叶片三维测量方法[J]. 激光与光电子学进展,2018,55(4):223-234.

[11] 曾凡光,吴光敏,Mai J D,等. Goldstein 枝切法对存在间断相位缺陷的解缠研究[J]. 激光技术,2014,38(3):335-341.

责任编辑: 郎婧

(上接第 64 页)

台设计[J]. 计算机工程与设计,2008,29(15):4109-4110.

[10] 蔡艳平,李艾华,王涛,等. 基于 EMD-Wigner-Ville 的内燃机振动时频分析[J]. 振动工程学报,2010,23(4):430-437.

[11] Chen G H, Ma S W, Liu M, et al. Wigner-Ville distribu-

tion and cross Wigner-Ville distribution of noisy signals[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008,19(5):1053-1057.

[12] 黄文虎,夏松波,刘瑞岩,等. 设备故障诊断原理、技术及应用[M]. 北京:科学出版社,1997.

责任编辑: 周建军