

文章编号:1002-2082(2012)04-0743-04

# 发动机叶尖间隙影像测量系统的设计

范小虎,朱目成,聂诗良

(西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室,四川 绵阳 621010)

**摘要:**发动机转子叶片叶尖到开半机匣内壁径向距离是衡量发动机质量是否合格的一个重要指标,其值的大小对发动机的高效安全运行至关重要。利用立体视觉原理、自动聚焦技术和边缘检测算法,设计了一套发动机装配过程中叶尖间隙静态测量装置。该测量装置实现了对发动机叶尖间隙的非接触测量,且操作简单,测量精度高。实验结果表明该套装置测量精度达到 $20\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:**叶尖间隙;立体视觉;自动聚焦;Canny

**中图分类号:**TN207;TH432.1

**文献标志码:**A

**doi:**10.5768/JAO201233.0403002

## Image measuring system of engine tip clearance

FAN Xiao-hu, ZHU Mu-cheng, NIE Shi-liang

(Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Ministry of Education,  
Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** The gap from the engine rotor blade tip to the open half machine magazine is an important parameter that inspects whether the engine is qualified. And its value is of prime importance to the engine on high efficient and safe operation. Based on stereo vision principle, automatic focus technology, edge detection algorithm, this paper designed a blade tip clearance measurement device used in the process of engine assembling. This device realized the non-contact measurement to aero-engine rip clearance with simple operation and high-accuracy measurement. Experiment result shows that the device accuracy can reach to  $20\ \mu\text{m}$ .

**Key words:** tip clearance; stereoscopic vision; auto-focusing; Canny

## 引言

研究表明<sup>[1]</sup>发动机叶尖间隙值越小,压气机工作效率就越高,所需的耗油量就减少。但叶尖间隙设计过小,或转子叶片安装过程中偏离预定位置。发动机工作时,会造成叶片与机匣内壁的摩擦与碰撞,影响发动机的寿命。目前国内外对发动机的叶尖间隙的动态测量研究比较多,但对其在装配过程中的叶尖间隙的静态测量还比较少。国内大多还采用塞尺法测量,在欧美国家采

取的测量方法<sup>[2]</sup>有激光法、光纤法等。而采用图像方式测量,则很少。在国内清华大学提出的辐射成像测量法<sup>[1]</sup>还处在研究阶段。本文提出了叶尖间隙光学影像测量方法,并展开可行性的实验研究。

## 1 叶尖间隙影像测量系统的原理

发动机叶尖间隙影像测量系统<sup>[3-4]</sup>如图1所示。其工作原理:当工控机发出开始工作命令,照

收稿日期:2011-09-15; 修回日期:2011-11-10

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2012GZ0022)

作者简介:范小虎(1988—),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事光电成像与检测技术研究。

E-mail: potianxing2007@163.com

明系统将均匀、柔和的光照射在被测物体上, CCD 摄像机开始对被测物体成像, 图像采集卡采集图像信号, 并送给上位机。上位机通过调用自动聚焦算法、边缘检测等算法, 对图像进行分析与处理。根据分析的结果, 发出控制命令给运动控制卡, 运动控制卡根据控制命令, 调整摄像机的位置并校正焦距。对焦完成后, 找出二维图像和三维图形间的函数关系, 然后建立发动机叶尖间隙的数学模型, 并精确计算出其值的大小。

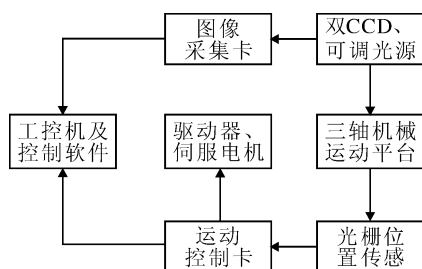


图1 系统原理图

Fig. 1 System schematic diagram

## 2 成像系统硬件组成

本设计中的成像装置采用 LED 环形可调光源, XC-75/75CE 相机, 其 CCD 尺寸为  $6.45 \text{ mm} \times 4.84 \text{ mm}$ , 有效像素为  $768 \times 494$ , 可知一个 CCD 像元的尺寸为  $6.45/768 = 8.34 \mu\text{m}$ , 并配以 20 倍变焦镜头 VS-16TC-XL, 使图像分辨率更高。设计中采用微视 V510 图像采集卡, 具有 CPI 接口, 10 bit A/D 采样精度, 最大采集分辨率:  $768 \times 576$ 。则 CPI 总线一秒传输数据为  $768 \times 494 \times 25 \times 10/8 \text{ Mb} = 11.3 \text{ Mb}$ 。运动控制卡采用雷赛三轴 DMC1380 并配以 XYZ 轴滑台, 可控制 3 个电机转动。

### 2.1 成像原理

立体视觉原理<sup>[5]</sup>是基于针孔相机光心与成像点连线的反向延长线必经过发光点这一事实, 如有两条这样的反向延长线, 则空间中的一点, 就可以被唯一确定。如图 2 所示,  $p$  为空间中的一实点,  $P1'$  和  $P2'$  分别为相机  $c1$  与  $c2$  上的成像点。 $o1$  和  $o2$  分别为相机  $c1$  与  $c2$  的光心。  $P'$  为  $o1P1'$  与  $o2P2'$  两射线的交点上, 因此可以利用双目视觉原理定位空间物体表面的一点。

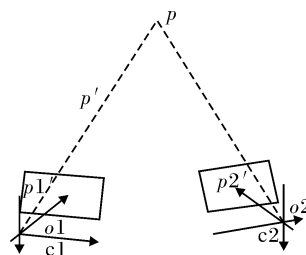


图2 双目视觉工作原理图

Fig. 2 Operating principle of binocular vision

CCD 摄像机成的是二维的图像, 实测间隙是三维的物理模型, 因此要准确测量发动机的叶尖间隙就必须建立二维图像与三维图像关系。若  $M = [X, Y, Z]^T$  为空间物体表面中的一点,  $M_1 = [u_1, v_1]^T$  和  $M_2 = [u_2, v_2]^T$  是  $N$  的两个像点。  $\bar{M}_1 = [u_1, v_1, 1]^T$  和  $\bar{M}_2 = [u_2, v_2, 1]^T$  分别是  $M_1$  和  $M_2$  的齐次坐标,  $\bar{M} = [X, Y, Z, 1]^T$  是  $M$  的齐次坐标。两摄像机标定后获得投影矩阵  $P1$  和  $P2$ 。根据针孔相机模型<sup>[6]</sup>可推出关于  $X, Y, Z$  的 4 个线性方程<sup>[6]</sup>:

$$\begin{bmatrix} u_1 p_{31} - p_{11} & u_1 p_{32} - p_{12} & u_1 p_{33} - p_{13} \\ v_1 p_{31} - p_{21} & v_1 p_{32} - p_{22} & v_1 p_{33} - p_{23} \\ u_2 p_{31} - p_{11} & u_2 p_{32} - p_{12} & u_2 p_{33} - p_{13} \\ v_2 p_{31} - p_{21} & v_2 p_{32} - p_{22} & v_2 p_{33} - p_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{14} - u_1 p_{34} \\ p_{24} - u_1 p_{34} \\ p_{34} - u_2 p_{34} \\ p_{44} - v_2 p_{34} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(1)式中每个方程都表示一个平面, 前两个方程联立为摄像机  $C_1$  的一条视线空间直线方程, 后两个方程为摄像机  $C_2$  的一条视线空间直线方程。若两条视线相交, 则(1)式中只有 3 个独立方程, 可以得到唯一解; 若视线不相交, 则上式变为超定方程组, 则需用最小二乘法解出点  $M$ 。

## 3 软件算法研究

设计中的所有软件程序都在 VC++6.0 环境中完成, 主要包括图像预处理程序、自动聚焦程序、边缘检测程序和、测量计算程序等。

### 3.1 自动聚焦算法

相机标定<sup>[7-8]</sup>后, 本设计采用二叉搜索法和爬山坡法<sup>[9-10]</sup>相结合, 相比传统的自动聚焦效果更好。其聚焦过程分为三部分: 粗对焦、细对焦和监控模式。粗对焦找到焦点大致范围; 细对焦进行微调。一次对焦已经完成, 启动视频监控模式, 为了判断是否需要重新对焦, 用一个函数<sup>[10]</sup>FC 来评估对焦量。

$$FC = |F_i(0) - \overline{F_i(n)}| / F_i(0) \quad (2)$$

(2)式中,  $F_i(i)$ 是进入监控模式后第  $i$  帧图像的对焦量,  $\overline{F_i(n)}$ 是最近  $n$  帧图像对焦量的平均值。  $T1$  和  $T2$  为两个预设的阈值, 并且  $T1 > T2$ 。如果  $T2 < FC < T1$ , 说明图像只是稍有偏焦, 只需重新进行细对焦; 如果  $FC > T1$ , 就需再次进行粗对焦。

### 3.2 Canny 边缘检测算法

应用较多的边缘检测算子<sup>[11-12]</sup>有 Laplacian、Prewitt、Sobel、Canny 等。根据不同的应用场合选择不同的边缘检测算子对图像进行处理。本系统要求所采取的算法必须准确定位图像边缘, 且具有高信噪比。Canny 的目标是找到一个最优的边缘检测算法, 最优边缘检测的含义是: 1) 最优检测, 信噪比高; 2) 最优定位准则; 3) 检测点与边缘点一一对应。图 3 是一副未经边缘检测算子处理的发动机叶片图像, 运用 Canny 算子对其进行处理得到图 4。

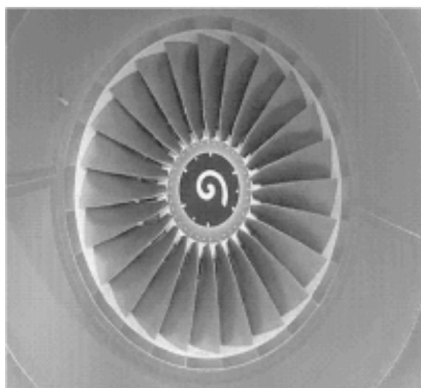


图 3 叶片原图

Fig. 3 Original image of blade



图 4 Canny 边缘检测图

Fig. 4 Image by Canny edge detection

### 3.3 叶尖间隙测量算法

利用 Canny 算子可生成两幅二维离散的边缘图像。根据(2)式, 被测物体表面上的点都能被两幅离散图像中对应的点唯一表示出来。取被测模型一截面, 平移后得到图 5, 图 5 显示的是截面中的一个转子叶片。当摄像机在近距离小视场范围内成像, 可认为图 5 中的两边界曲线中的一小段近似为直线段。对每个小线段进行拟合可求出其数学表达式, 如(3)式。已知发动机的机匣内壁截面为圆形, 直径大小为  $R$ 。

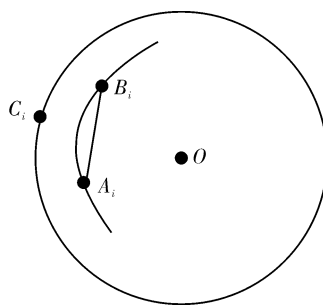


图 5 叶尖间隙示意图

Fig. 5 Schematic of tip clearance

$$\begin{cases} f_i(x, y) = k_i x + b_i \\ x^2 + y^2 = R^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_i(x, y) = k_i x + b_i$  为曲线段  $L_{AB}$  拟合直线段。  $C_i(x, y)$  为圆  $O$  上的动点。  $A_i$  与  $B_i$  为曲线  $L_{AB}$  上的动点。从而可知圆上动点  $C_i$  到动直线段  $L_{AB}$  最小距离公式, 如(4)式:

$$d = \min \left\{ \frac{|k_i x - y + b_i|}{\sqrt{1 + k_i^2}} \right\} (i = 1, 2, 3, n) \quad (4)$$

根据上述理论, 对某型发动机模型的叶尖间隙进行仿真实验得出结果, 如表 1 所示。用影像法测量发动机转子不同级上不同叶片, 从表 1 可知该方法测量结果精确到  $\mu\text{m}$  级。影像测量值与实际值之差的绝对值小于  $20 \mu\text{m}$ , 其差值比较小, 保证了影像测量结果的准确性。

表 1 叶尖间隙测量结果(单位:  $\mu\text{m}$ )

Table 1 Tip clearance measurement results

实际值	影像测量	误差	实际值	影像测量	误差
300	292	-8	380	374	-6
320	330	10	400	386	-14
340	352	12	420	426	6
360	368	8	440	454	14

## 5 结论

在实验条件下,研究了影像测量系统的测量原理,并建立了相关数学模型。实验表明,该系统所采用的软件算法和硬件组合对于测量叶尖间隙值较小的发动机模型,达到了预期的测量精度,证明该设计是可行的。

### 参考文献:

- [1] 肖永顺,陈志强,张丽. 转子叶尖间隙辐射成像测量实验研究[J]. 仪器仪表学报,2009,30(6):688-691.  
XIAO Yong-shun, CHENG Zhi-qiang, ZHANG Li. Experiment research of tip clearance measurement by digital radiography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(6):688-691. (in Chinese with an English abstract)
- [2] 张娜,黄春峰. 航空发动机叶尖间隙测量技术[J]. 航空制造技术,2010,13:41-45.  
ZHANG Na, HUANG Chun-feng. Measuring technology of blade tip clearance of aero-engine [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 13: 41-45. (in Chinese with an English abstract)
- [3] LIRON Y, PARAN Y, ZATORSKY NG, et al. Laser autofocusing system for high-resolution cell biological imaging[J]. Journal of Microscopy-Oxford (S0022-2720), 2006, 221(2):145-151.
- [4] 张舞杰,杨义禄,李迪. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程,2007,15(2):294-301.  
ZHANG Wu-jie, YANG Yi-lu, LI Di. Key algorithms of automatic image measurement system[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2):294-301. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 王荣本,张明恒,石德乐. 双目视觉技术在目标测量中的应用[J]. 2007,24(2):122-125.  
WANG Rong-ben, ZHANG Ming-heng, SHI De-le. Application of binocular vision technology in the environment detection[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(2):122-125. (in Chinese with an English abstract)
- [6] 胡春海,刘斌,郑龙江. 基于双 CCD 的锻件尺寸测量的研究[J]. 红外与激光工程,2008,37:11-14.  
HU Chun-hai, LIU Bin, ZHENG Long-jiang. Dimensional measurement of heavy forging based on double CCD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37:11-14. (in Chinese with an English abstract)
- [7] 马少平,田爱玲,刘丙才. 点阵列标定模板图像特征点提取方法[J]. 应用光学,2010,31(6):950-955.  
MA Shao-ping, TIAN Ai-ling, LIU Bing-cai. Feature point extraction of spot array calibration target[J]. Journal of Applied Optics, 2010, 31(6):950-955. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 郭羽,杨红,杨照金. CCD 摄像系统镜头的畸变测量[J]. 应用光学,2008,29(2):279-282.  
GUO Yu, YANG Hong, YANG Zhao-jin. Distortion measurement of lens in CCD camera system[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2):279-282. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 盛云,秦亚杰,洪志良. 一种用于数码视频相机的实时自动聚焦算法[J]. 光电工程,2008,35(8):139-144.  
SHENG Yun, QING Ya-jie, HONG Zhi-liang. Real-time auto-focusing algorithm for digital video camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(8):139-144. (in Chinese with an English abstract)
- [10] CHEN C Y, HWANG R C, CHUE Y J. A passive auto-focus camera control system [J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2010, 10(1):296-303.
- [11] RAFAEL C. GANZALEZ, RECHARD E W. 数字图像处理[M]. 北京:电子工业出版社,2005.  
RAFAEL C. GANZALEZ, RECHARD E W. Digital image processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [12] BAO P, ZHANG Lei, WU X. Canny edge detection enhancement by scale multiplication[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(9):1485-1490.