

## 结构与可靠性

## 激光光刀三维扫描技术在活塞检测中的应用研究

张 庆, 陆 鹏

(七一一研究所, 上海 200090)

**摘 要:** 针对某型发动机工作时噪声过大, 活塞磨损严重这一问题, 采用激光光刀三维扫描技术对活塞的外形进行检测, 获得其外形数据及关键部位尺寸; 通过粗糙度分析, 研究关心区域的磨损情况。研究表明: 过度磨损系活塞变形造成; 研究同时表明: 激光光刀三维扫描系统因其使用环境要求低, 属非接触式测量, 使用简便, 测量精度高、范围广, 可在实际工程得到进一步的应用。

**关键词:** 激光光刀; 三维扫描; 活塞; 检测

**中图分类号:** TN247; TK423.3\*3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2013)01-0033-04

## Application Research of Laser Knife 3D Scan Technology Used on the Detection of Pistons

Zhang Qing, Lu Peng

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090)

**Abstract:** One type of engine had the problem of big noise and serious piston wearing. Using laser knife 3D scan technology to detect the contour, thus obtained the contour data and diameters of the key locations. By roughness analysis, the wearing condition of the concerned areas was studied. The research results showed that the over-wearing was caused by deformation of the piston. Moreover, as laser knife 3D scan system has little requirements on application environment, and is one kind of non-contact measurement, it is easy for operation, has high accuracy and wide application range, and therefore could be used in further engineering application.

**Keywords:** laser knife; 3D scan; piston; detection

## 0 引 言

内燃机活塞工作条件恶劣。首先, 它承受很大的载荷, 其顶部作用着不断变化的气体压力; 活塞在气缸里高速运动, 产生很大的往复运动惯性力, 而且是周期性的, 易产生疲劳损坏。其次, 活塞在工作中承受很高的热负荷, 活塞顶与燃烧室中最高温度达到  $1\ 800 \sim 2\ 600\ ^\circ\text{C}$ , 而活塞裙部温度相对较低, 造成活塞受热变形不均匀, 易产生变形。再次, 活塞沿气缸做高速滑动, 高速柴油机的活塞平

均速度可达  $12 \sim 14\ (\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ , 承受很大的磨损; 活塞裙部承受侧向力, 加速磨损, 高速发动机中, 活塞组的摩擦损失最高约占总摩擦损失的 65% 以上。此外, 活塞装配与气缸内壁有间隙, 活塞在沿气缸作往复运动过程中还会发生横向晃动, 尤其在由压缩行程终点过渡到工作行程始点时, 活塞的横向晃动相当猛烈, 造成与气缸壁的撞击, 引起活塞裙部变形, 致使气缸套产生振动、穴蚀及开裂。这也是发动机噪声的主要根源之一。

本文主要针对某型发动机工作时噪声过大, 活

收稿日期: 2012-05-21; 修回日期: 2012-09-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10772117)。

作者简介: 张庆(1974-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为内燃机零部件结构强度分析, E-mail: zhangqing@csic-711.com。

塞磨损严重这一问题,开展相关研究,即采用激光光刀三维扫描技术对活塞的外形进行检测<sup>[1]</sup>,检测结果表明,活塞过度磨损系变形造成。

## 1 激光光刀三维扫描系统及测量原理

固体激光体积小、功率大、性能稳定、模式好等优异特点使其在工业生产、科研等领域被广泛应用。激光光刀以固体激光为光源,通过光学元件形成一条较细、能量集中的激光线。将该激光线投射到被测物体表面,结合自行研制的 360°全景扫描专利技术(回转体三维扫描系统,ZL201020685726),可以测量直径波动范围 10~120 mm 物体的外部形貌。测量灵敏度达到 0.01 mm 以上。

如图 1 所示,固体激光器 1 发出的激光经过柱面镜 2 的扩束,形成 Y 方向等厚度而在 ZX 平面发散的“光片”,即光片的宽度是从柱面镜向远处扩大的,而厚度(即 Y 方向)不变;再将非球面透镜 3 放置在柱面镜的焦点处,可以实现光的准直,这样“光片”在 ZX 平面上受到约束,使其宽度一致,而且厚度方向进一步缩小;最后用“刀口”4 遮挡(过滤)掉该片光的边缘杂光,形成一条亮度集中,厚度均匀,宽度一致的“光刀”5。“刀口”4 可以调节宽度,从而决定“光刀”的宽度。

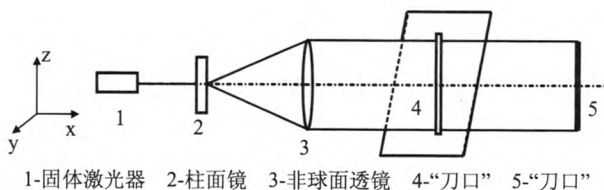


图 1 激光光刀原理示意图

按照如图 2 所示的光路布置,可形成激光光刀三维扫描系统的空间布局,辅助于相应的控制系统、图像采集系统及数字后处理系统就可以实现对活塞等空间三维物体外形的全景扫描<sup>[2][3]</sup>。激光光刀被投射在被测物体的表面,被测物体固定在分度旋转台上,当旋转转台时,以激光光刀投影方向为对称轴,对称布置的两个 CCD 摄像机,可同时连续采集图片到计算机中。

CCD(Charge-coupled Device)摄像机为电荷耦合元件,是一种可以将光学影像转化为数字信号的半导体器件,也称为 CCD 传感器。两个 CCD 摄像机的设置是为了有效地减少盲区<sup>[4]</sup>。两个 CCD 的数据通过标定技术实现匹配,匹配后误差很小。从 CCD 摄像机中采集到的光刀图像,在显示器中是一条与周边产生较大反差的亮线,为提高测量精

度,取其明暗交界处作为摄像机的聚焦中心。

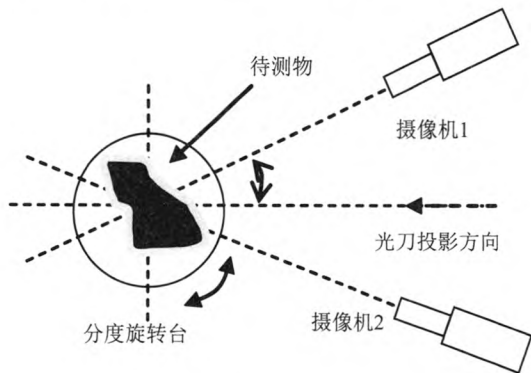


图 2 原理示意图

激光光刀在物体表面上受到物面高低起伏变化的调制,当观察方向与投影方向成一角度  $\theta$  时,就可以观察到光刀投影单线由于受到调制而形成的一条曲线,物面的高度信息就包含在这条曲线当中。当旋转分度旋转台时,该投影单线在模型表面扫掠过,就不断被改变,连续的改变可以产生空间回转的曲面,该信息被成像系统-摄像机捕捉到计算机中。首先进行系统标定,将半径为  $r_0$  的参考柱面(标定柱)放置在分度旋转台的中心,调节摄像机的倾斜角度,并通过调节以保证激光光刀通过旋转中心的同时,激光光刀的方向还与标定圆柱的母线平行,标定结束,获得位置参数,再将待测物体放置在转台中心位置进行实测。分析曲面与参考面的相对关系,可以获得被测物体表面的全部高度数值,再经过三维重构,最终形成空间三维模型的轮廓。利用如下三维形貌的测量计算公式<sup>[5]</sup>,获得三维形貌数据:

$$D = \frac{h}{M \sin \theta + h \cos \theta / k} + r_0 \quad (1)$$

式中:  $h$  为待测表面到参考表面的距离,  $M$  为系统的放大倍率,即 CCD 和成像镜头对被测物体的放大倍率,  $k$  为待测物体到 CCD 靶面的距离,  $\theta$  为光刀投影方向与待测物体表面法线方向的夹角,  $r_0$  为参考柱面(标定柱)的半径。

## 2 试验检测结果分析

将需要检测的发动机活塞放置在分度旋转台上(图 3),将激光光刀投射在其表面,匀速旋转分度旋转台,光刀在其表面均匀扫掠,其过程被摄像机采集到计算机中并最终建立其数字化的三维形貌-数字模型,见图 4。由激光光刀三维扫描系统测量其精确形貌,从而可以分析出可能的变形情况或磨损情况,进一步为设计加工或校核打下基础。

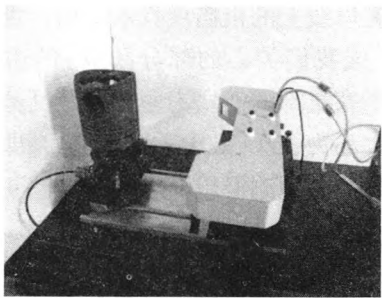


图 3 活塞在测量中

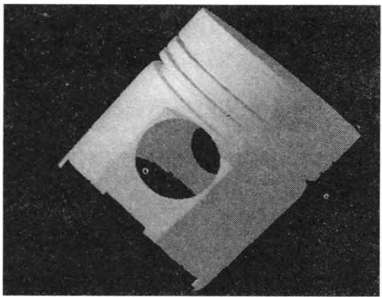


图 4 活塞三维形貌数据模型

2.1 形貌分析

从数字模型中可以获得相关数据，如各个截面的周长、面积以及形状等，见图 5。例如，经激光

光刀三维扫描系统测量后，被测活塞的数字模型(图 5 (a)图)、不同剖面位置的轮廓数据可以立即得到。

获得待测物体的数字模型后，可以获得很多关心的数据。例如，图 6(a)显示了活塞磨损后各个截面的面积数据(mm<sup>2</sup>)，横轴从左向右对应活塞从裙部到顶部，由于活塞销座孔存在，激光光刀未能形成反射，故扫描得到的面积不连续，图 6 中显示该处面积为零，实际不为零。图 6(b)放大显示了活塞第一环岸部到被测活塞顶部，即虚线框中的截面面积，表 1 则对应测量获得的面积数值，采样点为等距离的 9 个点。

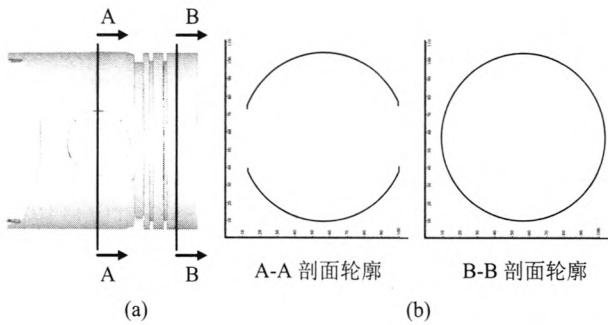


图 5 活塞剖面的轮廓形貌

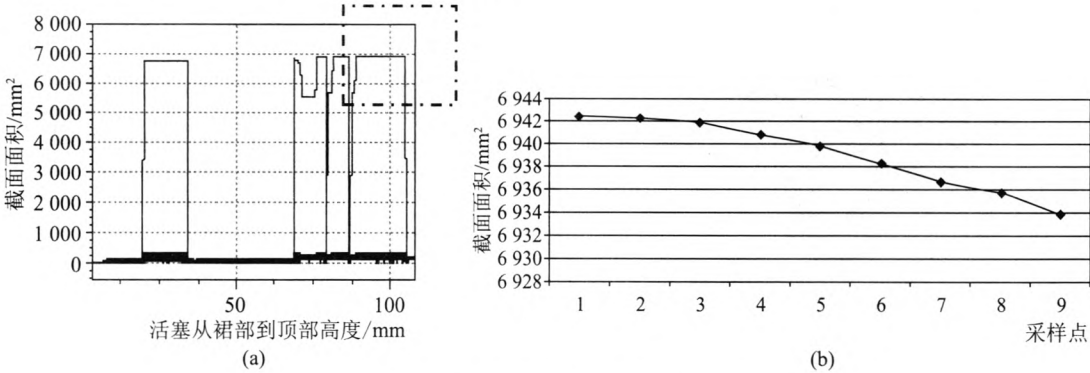


图 6 活塞截面面积数据及局部放大图

表 1 活塞第一环岸部到被测活塞顶部截面面积

单位: mm <sup>2</sup>								
编号	1	2	3	4	5	6	7	8
面积	6 942. 438	6 942. 254	6 941. 901	6 940. 759	6 939. 778	6 938. 181	6 936. 552	6 935. 601
								6 933. 778

上述数据显示：活塞第一环岸部到被测活塞顶部存在一定锥度，这是因为活塞顶部热载荷最大，而热量分布梯度随顶部到裙部的位置递减，故需要给予顶部一定的膨胀余量，但同时也可能是磨损后造成噪音大的原因之一。

2.2 粗糙度分析

从激光光刀三维扫描系统中获得的三维数字模型中还可以得到另一个重要的数据，即表面粗糙度信息，这也是检测活塞磨损情况的重要指标。通常采用高度特性参数  $R_a$ ，又称之为轮廓算术平均偏

差，作为粗糙度的评定标准， $R_a$ 可近似为：取样长度内轮廓偏离基准值的算术平均，计算公式如下：

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

(2)

式中： $y_i$  为第  $i$  点的轮廓偏距，即其至基准线的距离。理论上，找到基准线，并取样测量一段轮廓，就可以得到这段轮廓的粗糙度。实际上这样做比较困难，首先是基准线的选择就有不确定性，其次，逐点测量的精度很难有所保证。而采用激光光刀三维扫描系统可以很好地解决此问题，因为它的计算

基准可以人为指定。

用显微镜观测活塞表面，由于机械加工或工作磨损，活塞表面会产生微小谷峰，这些微小谷峰的高低程度和间距状况称为表面粗糙度，它是一种微观几何形状误差，也称为微观不平度。例如，在 10X 显微镜下可以观测到的活塞圆周的某个局部图 7，其中明暗显示即为微小的谷峰在光线照射下的不同反射效果。同样，当激光光刀扫描到活塞表面上时，由于活塞表面微小的谷峰的存在，笔直的激光光刀将发生变形。

当激光光刀扫描活塞圆周一周后，可获得活塞柱面上的全部粗糙度信息，下图 8 显示了活塞圆柱形表面经扫描后的形貌平面展开图。由于激光光刀在活塞表面沿其母线平行方向扫描，并且活塞圆柱形表面的谷峰造成了直线形的激光光刀被这样的高低起伏所调制，产生微小弯曲，从而表现在图像上是灰度的微小变化，从灰度的微小变化可以反算出粗糙度的大小<sup>[6]</sup>。

如此，可以得到任意一条母线上的粗糙度分

布，将所有母线上的粗糙度算术平均，再得到整个测量区域(或我们关心的部分区域)的粗糙度。例如分别对活塞裙部的活塞销座孔处及其旁边各取一块区域，大小为 300×300Pixel(像素)，即图 8 中方框所围区域，分别测得粗糙度分布如图 9。

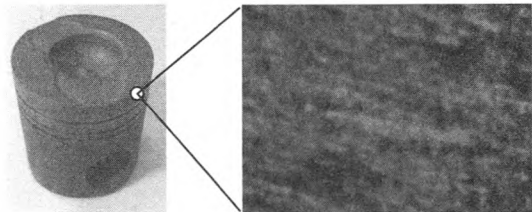


图 7 活塞表面局部显微放大图

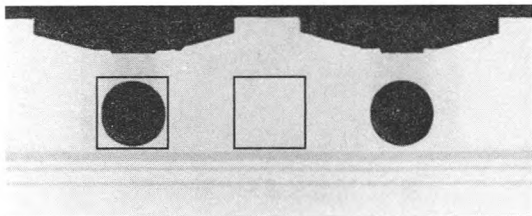


图 8 活塞外表面扫描结果展开

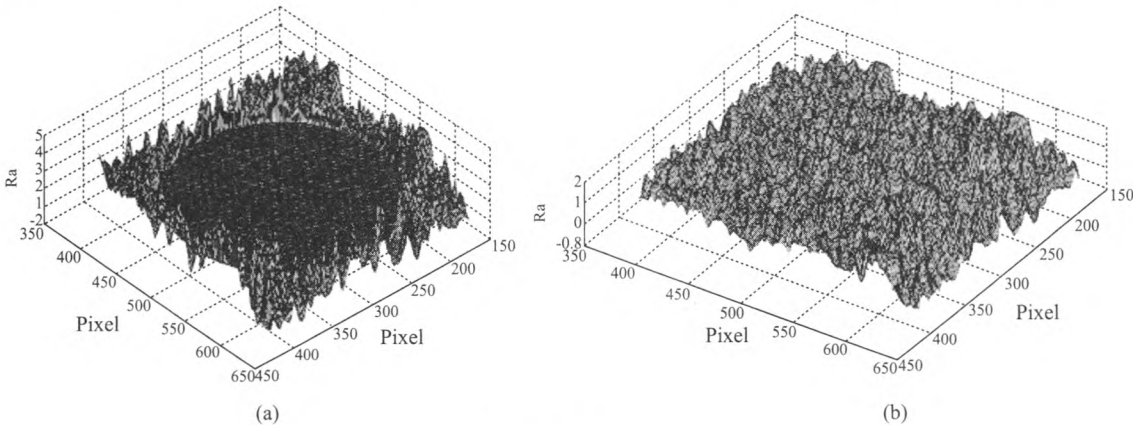


图 9 粗糙度分布图

由于活塞销座孔受力较大，磨损相应也大，故其平均粗糙度大于 3  $\mu\text{m}$ ，而其旁边的区域粗糙度小于 1.5  $\mu\text{m}$ 。

### 3 结 论

本文应用激光光刀三维扫描测量系统对活塞实体进行了检测，得到其三维数字模型，分析三维数字模型可得到待测物体的外形和表面粗糙度信息。从这些关键数据入手，可研判变形、磨损状况。研究结果可以对活塞检测(例如用于推断润滑情况是否理想)、设计、改进等提供重要依据。同时，研究表明：该激光光刀三维扫描系统使用环境要求低，又是非接触式测量，可以广泛地应用在模型测绘、无损检测等领域；该系统使用简便，测量精度

高、范围广，在实际工程应用中前景看好。

### 参考文献

[1] 陆鹏. 应用相移影像云纹法测量燃烧室的形貌研究 [A]. 中国内燃机学会燃烧净化节能分会. 2007 年学术年会论文集[C]. 成都. 2007.

[2] 梁永强 韩耘,续伯钦,等. 全景三维轮廓检测技术的应用[J]. 应用激光,2001(5): 313-316.

[3] 田爱玲,刘洋,郭迎福,等. 双 CCD 光栅投影法测量物体三维轮廓技术[J]. 西安工业大学学报,2009(2), 108-112.

[4] 梁永强,韩耘,续伯钦,等. 全景三维轮廓检测技术的应用[J]. 应用激光,2001,21(5): 313-317.

[5] 吴春亚,刘献礼,王鹏,等. 机械加工表面粗糙度的图像检测方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2007,12(3): 148-151.

[6] 冯建,周晨波,于文莫,等. 基于灰度共生矩阵的表面粗糙度研究[J]. 光学与光电技术,2007,5(2): 79-82.