

文章编号 1004-924X(1999)05-0129-06

# 光电内窥参数检测装置\*

屠大维 陶 靖

(上海大学机械电子工程学院 上海 200072)

**摘 要** 报导一种新的光电内窥参数测量装置。将一半导体激光器发出的光束经柱面镜汇聚成一细线,通过特殊设计的折反棱镜将其沿轴线方向投影到管孔内壁,得到管孔内壁的光截轮廓,该轮廓经物镜成像到 CCD 光敏面,通过图像卡采集到计算机。在计算机图像测量及辅助提示下,完成参数测量。此外,该装置还可在测量显微镜横向移动导轨及读数手轮的配合下测量内孔中径。实验结果表明轴向测量的重复精度为  $\pm 17\mu\text{m}$ ;中径测量的重复精度为  $\pm 12\mu\text{m}$ 。它在工业制造领域内具有广阔的应用前景。

**关键词** 光电探测 内窥系统 计算机辅助测试

**中图分类号** TH703, TB92 **文献标识码** A

## 1 引 言

工业上存在许多孔类零件内窥检测的问题,如对细长管孔内径及缺陷检测、内螺纹单项参数测量、深孔内壁凹槽尺寸测量等。由于受内孔结构尺寸限制,通用的检测仪器无法深入其内部进行,即使配上专用测头使其能胜任某一参数的测量,也存在测量环节多,使用操作不便等问题。

本文为此专门设计了一种用于对孔类零件进行参数内窥测量的系统,通过一套特殊的内窥探测及成像光路,将有关被测信息成像到计算机屏幕上,再通过图像测量及计算机辅助手段完成测量的全过程。该装置已能对内螺纹单项参数、内孔及孔壁凹槽、内孔圆柱度进行测量。取得了较为满意的实际测试效果。

## 2 测量依据的原理及方法

光学内窥非接触测量的首要任务是设法将不便直接测量的内孔几何特征成像到便于测量

\* 上海市教委基金资助(96A16)

收稿日期:1999-03-03

修稿日期:1999-07-02

的界面上,我们采用一线光源以一定角度平行于内孔轴线方向投影到内孔表面,然后在法向通过光学系统获取光截轮廓,光截轮廓中包含被测参数信息,如内螺纹螺距及牙型角、凹槽宽度及深度等。

为测量中径,将测头对内孔一侧瞄准,然后沿中径方向反向移动测头,直到对另一侧(180°方向)轮廓瞄准,则被测内孔中径为  $D = a + d$ , 其中  $d$  为测头移动距离,  $a$  为常数(由定标确定)。

再将光截轮廓经光学系统成像到 CCD 光敏面上,由图像卡采集到计算机,通过图像处理提取特征轮廓,在计算机辅助下通过人机交互方式进行参数测量。

上述测量方法可用图 1 所示框图进一步说明。

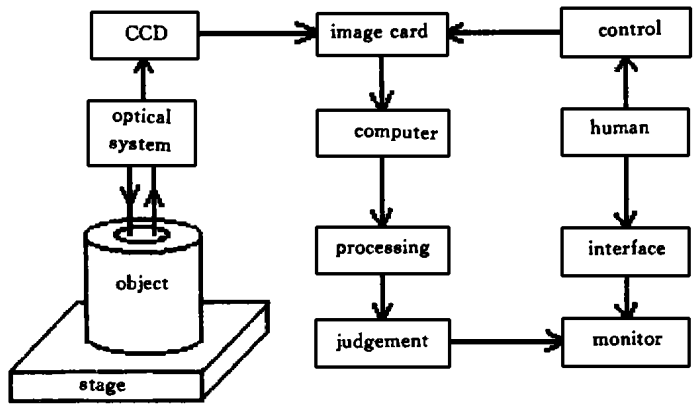


Fig. 1 Basic idea for spy quantitative testing aided by computer

### 3 光学系统设计

基于上述思想,设计了图 2 所示特殊的内窥测量光学系统,它由光截光带发生器,折反棱镜组,成像物镜,CCD 摄像机等几部分组成。各部分简述如下:

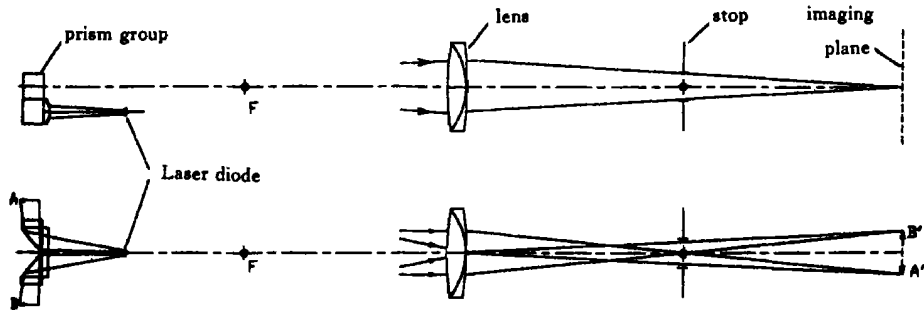


Fig. 2 Optical system of the instrument

#### 3.1 光截光线的产生

它由半导体激光二极管(LD)及柱面透镜组成,依靠柱面透镜将 LD 发出的椭圆高斯光束汇聚成细光带。LD 发出的激光波长  $\lambda = 780\text{nm}$ , 发光面尺寸  $1 \times 10\mu\text{m}$ , 发散角  $\theta = 27^\circ$ ;  $\theta = 11^\circ$ ; 将 LD 安放得使其发出的椭圆高斯光束的长轴方向与柱面透镜的柱面平行,并将 LD 放置在柱面透镜前  $2f$  距离处,则理想情况下汇聚所得的细光带宽度为  $10\mu\text{m}$ 。

3.2 折反棱镜组设计 鉴于被测对象结构上的特殊性,需要一种特殊的折反棱镜将光线沿轴线方向投影到与内孔轴线平行的内壁上,再在法面方向将光截轮廓经该折反棱镜后成像到

CCD 光敏面上。

我们设计的折反棱镜组如图 3 所示, 图中将产生细线光带的柱面透镜与该折反棱镜组胶合在一起。经柱面透镜汇聚的光束在左右两棱镜 45° 反射面上被分成两部分, 分别经左右两棱镜的折射面后出射, 并汇聚成两细线。

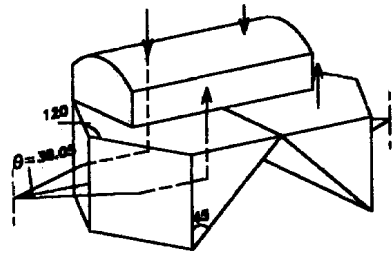


Fig. 3 A reflected-refracted prism group

### 3.3 成像物镜设计

光截所得的轮廓, 经折反棱镜组的折射、反射后, 由一物镜成像到 CCD 光敏面上, 考虑到成像放大倍数越大, 测量的分辨率愈高, 但测量的视场就减小, 为兼顾两者, 选择一倍成像的物镜较为适宜, 具体根据仪器的总体结构, 取物镜焦距大约为 65mm 左右。

对于  $7.95 \times 6.45 \text{mm}^2$  的成像面尺寸, 系统视场角为  $7.95/4f = 1.75^\circ$ ; 取孔径光阑  $\Phi = 2 \text{mm}$ , 光阑置于像方焦面位置, 则孔径角为  $\Phi/25 = 0.88^\circ$ ; 采用双胶合透镜作为成像物镜较为合适。通过专用的光线追迹软件, 进行像差校正。计算结果该双胶物镜的参数为:

$R$	$D$	$Nd$
80.68	6.2	1
-19.588	1	1.6894
-80.17	61.75	1.7229
1E+9		1

$l = -126.25 \text{mm}, \quad y = -3.5 \text{mm}, \quad n \sin u = 0.01169, \quad \beta = 1^\circ$

其中第一片透镜材料为 LaK2; 第二片透镜材料为 ZF4, 系统总的初级像差系数  $S_I = 1.148 \text{E}-3$ ,  $S_{II} = 2.305 \text{E}-3$ ,  $S_{III} = 6.957 \text{E}-3$ ,  $S_{IV} = 1.624 \text{E}-3$ ,  $S_V = 2.934 \text{E}-2$ , 初级像差都很小; 系统的轴外光线的像差也很小, 各像差计算结果都在微米级左右。

### 3.4 物放远心光路

如前所述, 将孔径光阑放置在像放焦点上(如图 2 所示), 即系统采用物放远心光路设计。这样做的目的是使得系统在瞄准时, 即使不严格位于正焦位置, 光截轮廓像的中心位置不变, 保证了测量系统的放大倍率不变。

## 4 正焦判据

在对内孔直径进行测量时依据测量方法, 需将测头沿中径移到另一侧瞄准, 前后两位置的移动距离决定被测内螺纹中径, 因此, 瞄准误差直接与中径测量精度有关。依据光学成像原理, 当细光带所截的内螺纹轮廓离焦时, 成像到 CCD 上的轮廓像线条将变粗; 同时, 由于光截光线是以一定的角度截切内螺纹轮廓, 当螺纹离焦时, 将导致所成轮廓像位置发生偏离。

由于系统的  $D/f$  值较小, 则相应的景深较大。以弥散斑大小为  $\pm e/2$  为依据(其中  $e$  为光敏面上像元大小, 取  $e = 10 \mu\text{m}$ ), 经计算为  $\pm 213.8 \mu\text{m}$ 。

另一方面当测头离焦时,将导致所成轮廓像位置发生偏离。为便于分析,将棱镜反射面展开,等效光路如图 4 所示,图中正焦位置为  $A$  点,离焦位置为  $B$  点。 $A$  点像点  $A'$ ,  $B$  点像点  $B'$ , 位置偏移量  $A'B'$ 。

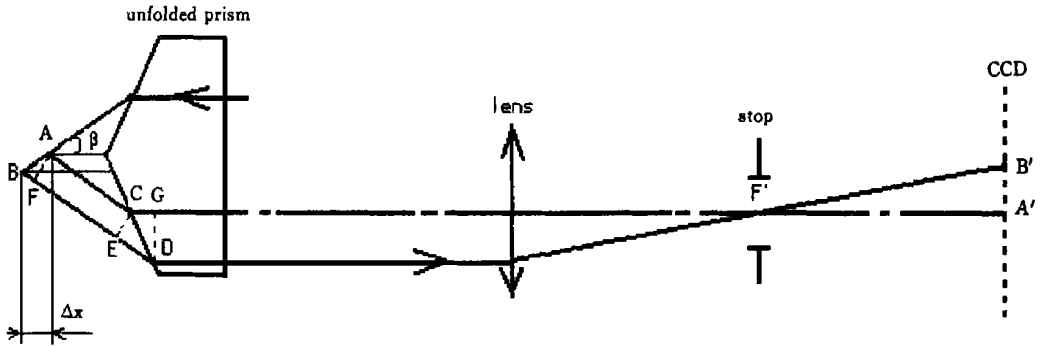


Fig. 4 Position deviation caused by defocusing

由图中几何关系得:

$$CD = DG / \cos 30^\circ \approx AB / \cos 30^\circ$$

$$CE = CD \sin(60^\circ - \beta)$$

$$AB = AF / \sin 2\beta = CE / \sin 2\beta$$

$$\Delta x = AB \cos \beta$$

取  $AB = \pm e/2$ , 则  $\Delta x = \pm 5.8\mu\text{m}$ , 即以位置偏移作为瞄准判据时, 系统瞄准误差为  $\pm 5.8\mu\text{m}$ 。

可见, 选择位置偏离对内孔进行瞄准, 有较高的瞄准精度。

## 5 CCD 摄像机接收及图像测量

采用 MINTON 公司 MTV1881EX CCD 摄像机, 它的光敏面尺寸为  $7.95 \times 6.45\text{mm}^2$ , 像元数目  $795 \times 596$ , 对应  $X$  方向及  $Y$  方向的像元尺寸分别为:  $10\mu\text{m} \times 10.8\mu\text{m}$ 。

图像采集卡采用中科院北京科技嘉公司的 CA-D502, 分辨率  $512 \times 512 \times 8\text{bits}$ 。采集到一幅图像后存入计算机内存, 再作进一步处理及测量。

在一倍成像物镜前提下, 图像上任意两点坐标与被测量的关系为:

$$\Delta X = N_x \times 7.95/512$$

$$\Delta Y = N_y \times 6.45/512$$

其中  $N_x$ 、 $N_y$  为两点之间  $X$  及  $Y$  方向像元数。

## 6 仪器机械及结构

我们以测量显微镜  $X$ - $Y$  移动平台为基础, 光学系统安装在可升降立柱上。采用外圆或端面定位方式将被测工件定位在该平台的中心位置(将原平台上的载物玻璃拿下, 正好有可供夹

具安装的定位基准), 存在的定位误差反映在中径测量上为二阶小量, 即

$$\Delta\Phi = 2 \cdot \Delta^2 / \Phi$$

其中  $\Delta$  为中径定位误差, 若  $\Delta = 0.2\text{mm}$ , 对于  $\Phi = 20\text{mm}$  内孔,  $\Delta\Phi = 4\mu\text{m}$ , 可以忽略不计。

测中径时, 测头沿  $X$  方向的移动距离可在测量显微镜读数手轮上读出, 其格值为  $0.01\text{mm}$ 。仪器结构如图 5 所示。

## 7 实验结果及分析

所建实验装置可以深入到管孔内部作定量定位检测, 图 6 为轴瓦周向油槽及其光截轮廓。目前该装置能应用的最小管孔直径为  $25\text{mm}$ , 并可望改进后—适合更小直径的管孔。表 1 为对轴瓦周向油槽凹槽直径、凹槽宽度作多次重复测量的结果, 从中可以得到它们的均值, 标准差, 并按均匀分布计算极限误差(主要误差源为瞄准误差、CCD 分辨率引起的误差及手轮格值引起的误差, 都是按均匀分布的)。以极限误差表征仪器的测量精度, 则该装置对内径的重复测量精度为  $\pm 12\mu\text{m}$ , 轴向测量重复精度为  $\pm 17\mu\text{m}$ 。

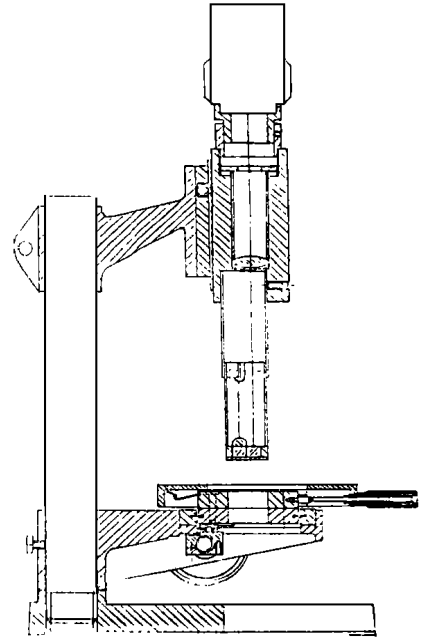


Fig. 5 Mechanical structure of the instrument

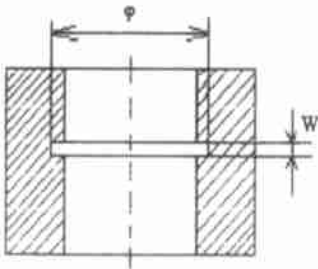
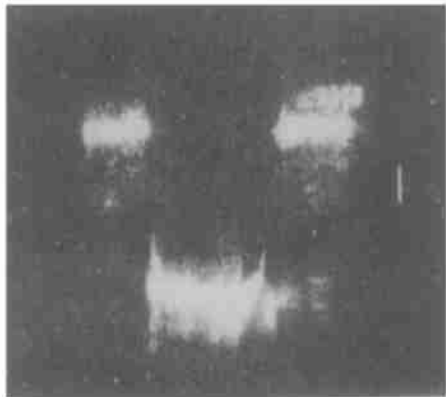


Fig. 6 Oil groove around the axle sleeve and its sectioning image



理论上, 影响中径测量的误差源主要有前后两次瞄准误差  $\delta_1 = \delta_2 = \pm 5.8\mu\text{m}$ ; 前后两次手轮读数误差  $\beta_1 = \beta_2 = \pm 5\mu\text{m}$ , 因此总的误差为它们的方和根, 即  $\Delta_1 = \pm 10.8\mu\text{m}$ 。影响轴向任意两点测量的误差源主要为图像卡在  $X$  方向的分辨率引起, 有  $\delta_5 = \delta_6 = \pm 7.8\mu\text{m}$ , 则总误差为它们两者的方和根, 即  $\Delta_2 = \pm 11\mu\text{m}$ 。可见, 实验结果与理论分析基本吻合。

**Table 1 The results of repeated measurement for 10 times(unit: mm)**

times	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Average	RMS	$\Delta_{lim}$
diameter	48.109	48.124	48.119	48.119	48.115	48.129	48.109	48.119	48.109	48.115	48.117	0.007	$\pm 0.012$
width	1.615	1.615	1.628	1.597	1.628	1.628	1.615	1.628	1.615	1.628	1.620	0.010	$\pm 0.017$

进一步提高测量精度的措施是采用有效的提高图像测量分辨率的亚像元检测算法及减小手轮读数刻线的分度值或采用光栅数显读数头。

该装置还可用于内螺纹单项参数的测量,实验表明螺距测量重复精度  $\pm 11.2\mu\text{m}$ ;中径测量重复精度  $\pm 21\mu\text{m}$ ;牙形半角重复测量精度  $\pm 22^\circ$ 。

有关图像处理及测量方面的研究内容,我们将于另文发表。

### 参 考 文 献

- 1 马宏,白宝兴,沈育志,王锡龙. 管道内壁疵病光电检测装置. 仪器仪表学报, 1996, 17(2): 166 ~ 170
- 2 方宇健. 图像测量系统中的误差分析及提高测量精度的途径. 光学精密工程, 1997, 5(1): 35 ~ 39

## The Equipment for Optoelectronic Spy System for Quantitative Testing

TU Da-Wei, TAO Jing

(School of Mechatronical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

### Abstract

A novel equipment for spy quantitative testing is presented in this paper. A light beam from a semiconductor laser diode converges into a line-shape by a cylindrical lens, projected onto the inner surface in a parallel direction with the pipe axis, and the information to be detected can be got from the deformed line. A special compact reflected-refracted prism group is designed for small pipes, ensuring that the line-shape light beam can be projected and then the deformed line can be imaged by a CCD camera. The image is captured into a computer by a  $512 \times 512$  pixels image card for further processing, but without losing or changing any useful geometrical feature. The parameters such as pitch and depth can be measured on the monitor screen aided by the computer. The pipe diameter can also be measured by moving the stage along the pipe radius until the opposite inner surface is exactly illuminated and focused by the CCD objective lens. The experiment results show that the accuracy of  $\pm 17\mu\text{m}$  of pitch measurement,  $\pm 12\mu\text{m}$  of diameter measurement has been achieved, and it has a good future to application in industry.

**Key words:** Optoelectronic detecting, Spy system, Computer aided testing

屠大维 男, 1965年6月生。1987年毕业于浙江大学光仪系, 1989年、1993年分别在浙大光仪系获硕士及博士学位。上海大学机械电子工程学院, 副教授。从事工业检测、精密机械及仪器、光机电一体化系统的教学及科研工作, 发表论文30篇。