

文章编号: 1001-3806(2009)05-0522-04

## 基于干涉条纹的激光准直技术的检测系统

胡长德<sup>1</sup>, 李咏强<sup>1</sup>, 周欣<sup>2</sup>, 诸葛晶昌<sup>2</sup>, 齐浩<sup>1</sup>

(1. 装备指挥技术学院士官系, 北京 102200; 2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 为了获得被测导轨的直线度误差信息, 采用半导体激光器发出的激光, 经准直扩束后照射到楔形平板上, 利用楔形平板上下表面的反射作用, 将这束激光分解为交角  $2\alpha$  的交叉光束, 在这两条平行激光束交叉的范围内产生干涉条纹。将此干涉光作为准直测量的基准, 用线阵 CCD 作为光电转换器件固定在接收靶上; 检测接收靶处于被测导轨任一测量点时干涉条纹在接收靶上的位置, 得到了该测量点与准直光束的偏移量。进行了重复性实验以及与光电自准直仪的比对实验。在测量长度 842mm 时, 直线度误差 18.96 $\mu$ m, 测量长度最远可达 14m。结果表明, 样机的性能、指标基本达到了预定目标。

**关键词:** 测量与计量; 激光准直; 干涉条纹; 线阵 CCD; 比对实验

**中图分类号:** TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.022

## Laser alignment measuring and testing equipment based on interference fringe

HU Chang-de<sup>1</sup>, LI Yong-qiang<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>2</sup>, ZHUGE Jing-chang<sup>2</sup>, QI Hao<sup>1</sup>

(1. Department of Enlisted Man, the Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 102200, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A laser alignment system based on interference fringe was developed to test the alignment of a rail. After being collimated and broadened, a semiconductor laser was irradiated onto a wedge. Reflecting on the front and back surfaces of the wedge, the laser beam was divided into two cross beams at an angle of  $2\alpha$ , leading to interference fringes in the crossing zone. The interference beam was used to be the measuring reference, and a linear CCD was fixed on the receiving target. The offset distance between the measured point and the measure reference was obtained by detecting the interference position on the receiving target. The stability and repetition of the measuring system was tested. The test results were compared with those obtained with a photoelectricity autocollimator. The alignment error was 18.96 $\mu$ m when the test length was 842mm. The maximum test length was up to 14m. The results indicate that the performance of the sample device met the scheduled target.

**Key words:** measurement and metrology; laser collimation; interference fringe; linear CCD; comparison test

## 引言

准直技术在现代科技和生产中得到了极其广泛的应用<sup>[1]</sup>。在大型机械零部件轴孔同轴度、同心度测量中, 尺寸和形位误差的测量对于提高设备的制造及安装精度、工作效率和延长工作寿命是至关重要的。而高精度测量的技术关键和难点在于需建立长跨距的测量基准线, 利用激光束良好的相干性、高亮度和很好的方向性, 可以用来作准直参考线, 可实现大孔同轴度的高精度测量<sup>[2]</sup>。

直线度误差的定义为被测实际轮廓线对理想直线的变动量。按照定义, 只要选用一条标准直线作为理

想直线, 被测实际轮廓线与之相比, 就可以确定直线度误差的大小。直线度误差常用的测量方法可分成两大类: 一类是与测量基准进行比较的测量方法。如用激光准直仪、激光平面干涉仪、刀口尺、标准平板等方法进行直接测量。另一类无基准的测量方法, 如被检表面互比法, 通过几个面的互相比较来确定工件是否合格。作者介绍的基于干涉条纹的激光准直技术, 使用的是具有 5000 个像元的线阵 CCD, 并且像元尺寸为 7 $\mu$ m  $\times$  7 $\mu$ m, 因此, 可以测量  $x$  轴方向上 30mm 范围内的位移变化。测量长度最远可达 14m, 如果将光源换成性能更加稳定或者功率更高的激光器, 测量距离可以更长。

## 1 工作原理和结构

### 1.1 光学原理

如图 1 的楔形平板干涉中, 从光源  $S$  中心发出经光楔板上下表面反射的两束光交于定域面上某点  $P$ ,

作者简介: 胡长德 (1981-), 男, 讲师, 硕士, 研究方向为纳米测量及现代传感技术。

E-mail: hansenhu@yahoo.cn

收稿日期: 2008-07-23; 收到修改稿日期: 2008-09-16

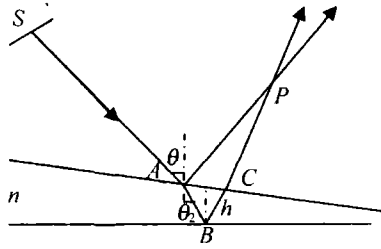


Fig.1 Interference induced by the reflection from both the surfaces of a wedge

这两束相干光在 P 点产生的光程差为:

$$\Delta = n(AB + BC) - n'(AP - CP) \quad (1)$$

式中, n 为楔形平板的折射率; n' 为周围介质的折射率。

在实际应用的干涉系统中, 楔形平板的厚度一般都很小, 且楔角也不大, 可近似用平行平板的光程差公式来代替:

$$\Delta = 2nh\cos\theta_2 + \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

式中, h 是楔形平板 B 点厚度;  $\theta_2$  是入射光在 A 点处的折射角。

对于折射率均匀的楔形平板, 干涉条纹平行于楔棱。由以上分析可知, 只要固定楔形平板的位置, 其产生的等厚干涉条纹间距和位置就不会发生变化, 利用这一干涉光作为准直测量的基准, 通过光电转换器件将光信号转化成电信号, 便可测得接收靶在被测导轨上任意一点时干涉条纹照射在接收靶上的位置。

### 1.2 系统原理

系统工作原理及其组成简图如图 2 所示, 利用楔

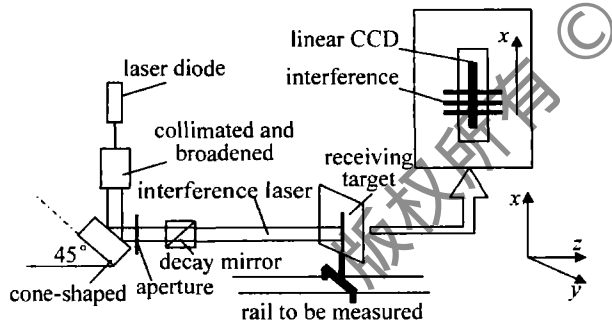


Fig.2 Sketch map of the system

形平板上下两表面的反射作用, 将一束经准直扩束后人射的激光分解为交角  $2\alpha$  的交叉光束<sup>[3]</sup>, 该两束光为可干涉的平行光束。在两束平行激光束交叉的范围内便产生等厚干涉, 在与中心轴垂直的平面上就可以观察到与楔棱平行的干涉条纹。

测量前调整并固定好激光器和楔形平板等激光发射装置的位置, 以保证测量过程中干涉条纹不发生移动。测量时当导轨上某点存在凸起或凹陷时, 接收靶就会在 x 轴方向上发生上下位置变动, 干涉条纹相对于接收靶也会产生位移变化。通过线阵 CCD 可以检测到接收靶在导轨不同测量点处干涉光照射在 CCD 像敏面上的位置, 经过处理所有测量点处干涉条纹在

CCD 像敏面上的位置便可得到导轨的直线度误差。

对于由等厚干涉产生的干涉条纹而言, 位于两束相干光交叉中心的亮条纹在 x 轴上的位置是不受光束发散角<sup>[4]</sup>的影响。因此, 使用 3 条亮条纹作为准直测量的基准, 以中间亮条纹  $n_2$  的位置来确定干涉条纹在 CCD 像敏面上的位置。

图 3 为利用联惠利公司的采集卡采集到的干涉条纹图样。3 条凸起的曲线对应着激光发射系统中所产

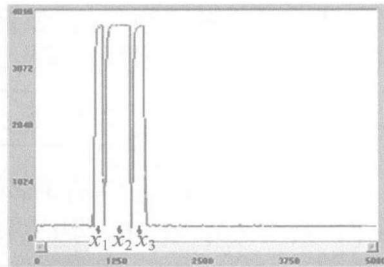


Fig.3 Position of the interference fringe on the CCD

生的 3 条亮条纹, 其在 CCD 上所对应的位置为  $x_1, x_2, x_3$ 。取  $x_1 = x_2$  即为接收靶运动到  $z_i$  位置时干涉条纹在 CCD 像敏面上的位置<sup>[5]</sup>。当测量出接收靶位于导轨上所有测量点处干涉条纹处于 CCD 像敏面上的位置后, 经过数据处理便可以得出导轨上  $z_1 \sim z_n$  点的直线度误差。

## 2 硬件结构

### 2.1 CCD 光电转换模块

CCD 图像传感器既具有光电转换功能<sup>[6]</sup>, 又具有信号电荷的存储转移和读出功能, 只需加上一组时序脉冲进行驱动控制, 就能实现对被测目标的 1 维光电扫描和信号读出。实验中所用的是日本东芝公司生产的 TCD1501D 线阵 CCD<sup>[7]</sup>。采用复杂可编程逻辑器件 (complex programmable logic device, CPLD) 设计 CCD 的驱动电路, 选取复位脉冲来设定基准时钟频率, 复位脉冲的负脉冲宽度作为基准时钟周期。

### 2.2 主电路板的设计

主电路板是整个硬件系统的核心部分, 其设计的合理与否是整个系统能否正常稳定工作的关键。主电路板的电路结构如图 4 所示, 主要由单片机、A/D 转换芯片、外部存储器及外围接口电路组成。

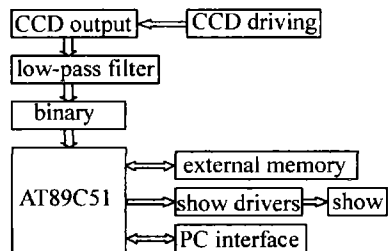


Fig.4 Flowchart of the main circuit

### 3 软件设计

在该系统中,将 CCD 像元的受光信息转换成 1 维位置坐标<sup>[8]</sup>,表示此时干涉条纹在 CCD 上所处的位置。即可得到接收靶在被测导轨上这一点时干涉光在 CCD 上的位置  $x$ 。

将经过整形的 CCD 信号送到单片机的 P3.2 口,帧同步信号 FC 经过反相送给单片机的 P1.3 口,像元输出同步信号 SP 送给单片机的 T/C<sub>0</sub>,波形如图 5 所

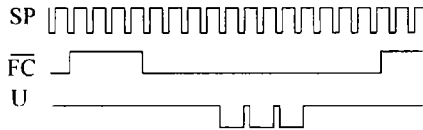


Fig. 5 Logical relation of the input signals of the MCU

示。当 FC 电平由高变低时,置 TR<sub>0</sub> 为 1,启动计数器,开始对 SP 脉冲进行计数。单片机检测到 P3.2 口电平第 2 次由高变低的时候停止计数,并且保存这一数值  $x$ ,则可知第 2 条干涉条纹的边缘在 CCD 像敏面第  $x$  像元的位置上。

当有 CCD 信号输入时,即由 CCD 驱动电路产生的帧同步信号 FC 上升沿到来时,系统进行对像元同步信号 SP 的计数。当单片机查询到 P3.2 口第 2 次由高电平变为低电平时,保存计数器所计的数值,这一数值就是第 2 条亮条纹在 CCD 像敏面上的位置。

### 4 实验

#### 4.1 直线度误差评定

端点连线法是在评定直线度误差时,应用被测表面两端连线为理想直线的位置。各点与理想直线的偏差为  $H_i$ ,直线度误差为最大偏差与最小偏差之差。

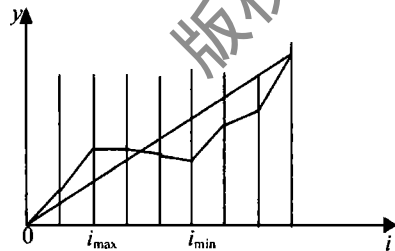


Fig. 6 Sketch map of the endpoint connection evaluation

如图 6 所示,设正向偏离最大点的序号为  $i_{\max}$ ,负向偏离最大点的序号为  $i_{\min}$ ,则用端点连线法评定的直线度误差的计算公式为:

$$\Delta = \left( y_{\max} - \frac{i_{\max}}{n} y_n \right) + \left| y_{\min} - \frac{i_{\min}}{n} y_n \right| \quad (3)$$

#### 4.2 重复性实验

重复性是仪器的重要指标,用以衡量仪器的稳定性。为了检验不同测量环境下仪器的重复性,对仪器进行了两次重复性实验,分别在上午 10 点和凌晨 1 点

进行。实验中,将接收靶固定在导轨上某一测量点上,对该测量点重复测量 10 次。两次重复性实验所得到的数据见表 1 和表 2。

Table 1 Repeation experiment of the first time

number	data measured $x_i/\text{pixel}$	$v_i = (x_i - \bar{x})/\text{pixel}$	$v_i^2$
1	552.5	0.41	0.1681
2	552.5	0.41	0.1681
3	552.4	0.31	0.0961
4	552.5	0.41	0.1681
5	552.5	0.41	0.1681
6	552.5	0.41	0.1681
7	551.5	-0.59	0.3481
8	552.5	0.41	0.1681
9	550.5	-1.59	2.5281
10	551.5	-0.59	0.3481
$\sum$	$\sum x_i = 5520.9, \bar{x} = 552.09$	$\sum v_i = 0$	$\sum v_i^2 = 4.329$

Table 2 Repeation experiment of the second time

number	data measured $x_i/\text{pixel}$	$v_i = (x_i - \bar{x})/\text{pixel}$	$v_i^2$
1	1186.4	0.01	0.0001
2	1186.4	0.01	0.0001
3	1186.4	0.01	0.0001
4	1186.4	0.01	0.0001
5	1186.4	0.01	0.0001
6	1186.3	-0.09	0.0081
7	1186.4	0.01	0.0001
8	1185.9	-0.49	0.2401
9	1186.4	0.01	0.0001
10	1186.9	0.51	0.2601
$\sum$	$\sum x_i = 11863.9, \bar{x} = 1186.39$	$\sum v_i = 0$	$\sum v_i^2 = 0.509$

由表 1 中数据可以得出平均值:  $\bar{x} = 552.09$  (像元);

标准偏差  $\sigma = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{4.329}{9}} = 0.69$  (像元)。

式中,  $v_i$  表示第  $i$  次测量像元数的标准差。

因为使用的 CCD 像元尺寸为  $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$ , 所以将标准偏差转变为长度量可得:  $7\sigma = 4.83\mu\text{m}$ 。用  $3\sigma$  准则判断,  $3\sigma = 2.08\mu\text{m}$ , 所有  $|v_i|$  均小于  $3\sigma$ , 故可知测得值不存在粗大误差。同理表 2 中得到的  $7\sigma = 1.68\mu\text{m}$ 。分析两次重复性实验的结果, 可知本准直仪在夜间的稳定性要比白天高。主要原因是由于白天实验室内人员的走动等因素造成的振动对干涉光束造成了影响, 并且, 白天室内的光线也比夜间强, 虽然滤光片能滤掉大部分干扰光, 但并不能完全杜绝环境光对 CCD 的影响。

#### 4.3 与光电自准直仪的精度比对实验

由于接收靶是固定在长度为  $84.2\text{mm}$  的滑块上的,

因此,对被测导轨按间隔 84.2mm 进行分段测量。用本准直仪对导轨上第 1~10 个测量点进行 4 次重复测量。检测长度:84.2mm × 10 = 842mm。测量数据见表 3。

Table 3 The tested data of tested points 1~10 of the rail

marked $x_i$ point	average measurements	each point of the equation	$\Delta y = (y_i - y_i') / \text{pixel}$
	value of 4 times $y_i / \text{pixel}$	of the straight line $y_i' / \text{pixel}$	
1	832.6	832.6	0
2	808.325	808.7056	-0.3806
3	783.075	784.8112	-1.7362
4	762.68	760.9168	1.7632
5	735.05	737.0224	-1.9724
6	714.375	713.128	1.247
7	688.7	689.2336	-0.5336
8	663.925	665.3392	-1.4142
9	641.975	641.4448	0.5302
10	617.55	617.55	0

采用端点连线法来求直线度误差。将标记  $x_i$  作为自变量,将各标记点对应的测量值  $y_i$  作为因变量,则第 1 点和第 10 点所确定的直线方程为:  $y =$

$$-23.89x + 856.49。$$

根据这一直线方程,可以求得第 2~第 9 点对应在直线方程上的值  $y_i'$ ,并求出  $y_i$  与  $y_i'$  的差  $\Delta y$ ,被测导轨的直线度误差就是:  $\Delta h = (|\Delta y_{\max}| + |\Delta y_{\min}|) \times 7(\mu\text{m})$ 。  $|\Delta y_{\max}| + |\Delta y_{\min}| = 1.7632 + 1.9724 = 3.7356$  (像元),转换成长度量:  $\Delta h_i = 7 \times 3.7356 \approx 26.15\mu\text{m}$ 。

在相同测量条件下,用 TJU2000A 型高精度双坐标自跟踪光电自准直仪对导轨的 1~10 点进行 4 次重复测量,实验数据见表 4。该自准直仪的线性工作范围是  $\pm 150''$ ,敏区范围  $\pm 300''$  以上,仪器分辨率  $0.1''$ ,不准确率  $2.0''$ 。  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = 211.225/10 = 21.1225''$ ,  $a_i$  为自准直仪角度读数。自准直仪每变化  $1''$  角度对应直线度变化:  $0.005 \times 84.2 = 0.421\mu\text{m}/( )$ ; 导轨的直线度误差:  $\Delta h = 0.421 \times (42.005 + 3.03) \approx 18.96\mu\text{m}$ 。

通过与光电自准直仪的比对实验可以看出,该仪器对被测导轨直线度误差的测量结果与自准直仪的测量结果是比较接近的。但是,本准直仪还有很多不完善的地方,系统的测量精度有待于提高。

Table 4 The linear error of the tested points 1~10 of the rail tested with a collimator

point	average value of 4 times $y_i / ( )$	$\sum_{i=1}^n a_i / ( )$	$B_i = a_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i / ( )$	deviation $\sum_{i=1}^n B_i / ( )$
1	58.75	28.75	37.6275	11.3275
2	25.5	84.25	4.3775	42.005
3	7.85	92.1	-13.2725	28.7325
4	8.775	100.875	-12.3475	16.385
5	24.5	125.375	3.3775	19.7625
6	18.1	143.475	-3.0225	16.74
7	17.4	160.875	-3.7225	13.0175
8	5.075	165.95	-16.0475	-3.03
9	28.225	194.175	7.1025	4.0725
10	17.05	211.225	-4.0725	0

### 5 结论

系统是一种基于干涉条纹的激光干涉准直系统,可以测量  $x$  轴方向上 30mm 范围内的位移变化。测量长度最远可达 14m,如果将光源换成性能更加稳定或者功率更高的激光器,测量距离可以更长。通过系统重复性实验以及与光电自准直仪的比对实验和空气扰动实验,在测量长度 842mm 时,直线度误差为  $18.96\mu\text{m}$ 。结果表明,样机性能、指标基本达到预定目标。

#### 参考文献

[1] XU Z F, RUAN A L, HAN W, et al. Research and development for the reference platform based on laser [J]. Metrology & Measurement Technology, 2006, 26(5): 17-18 (in Chinese).  
 [2] YI H Y, YE Y D, XIANG R J, et al. Design and application of lens-

array measurement instrument [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 589-592 (in Chinese).  
 [3] ZHOU X. Research on laser alignment based on interference fringe [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005: 24-28 (in Chinese).  
 [4] DAI C H, YU J L, YU J, et al. Calculation of the equivalent radiation plane for the spherical entrance optics [J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(3): 236-240 (in Chinese).  
 [5] ZENG H, WU F Ch, HU Zh Y. Robot self-location based on laser measurement [J]. Acta Automatic Sinica, 2007, 33(2): 138-144 (in Chinese).  
 [6] LU J G. Study of measuring the plane system based on laser plane [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005: 14-16 (in Chinese).  
 [7] JIANG J P. Semiconductor laser implement [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000: 55-57 (in Chinese).  
 [8] JIAO C H, LI Y L, HU B W. Design of the precision laser alignment system with PSD [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(6): 64-66 (in Chinese).