

doi:10.3788/gzxb20184707.0722001

# 基于 PSD 的单透镜激光三角测头设计

张欣婷<sup>1</sup>, 亢磊<sup>2</sup>, 安志勇<sup>1</sup>, 王润之<sup>1</sup>

(1 长春理工大学 光电信息学院, 长春 130022)

(2 中国中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

**摘 要:** 在传统直射式激光三角测距方法的基础上, 设计了一种基于位置敏感探测器的单透镜激光三角测头. 引入一枚分束镜, 将聚焦透镜和成像透镜合并为一枚, 在空间布局上, 令分束镜、探测器、聚光透镜三者共轴, 使系统的结构更加紧凑, 并推导了满足该结构的 Scheimpflug 条件. 利用 Zemax 光学设计软件仿真光学系统, 系统焦距 20 mm, 入瞳直径 4 mm, 总长 20.5 mm, 可实现测量系统的小型化. 同时, 对位置敏感探测器进行非线性校正以及相关信号处理, 保证在较高测量精度的前提下获得更大的工作范围, 并提高系统对测量环境适应性, 可广泛应用于工业实时在线检测等领域.

**关键词:** 光学设计; 激光三角法; Scheimpflug 条件; 单透镜; 小型化; 位置敏感探测器

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)07-0722001-8

## Design of a Single Lens Laser Triangulation Probe Based on PSD

ZHANG Xin-ting<sup>1</sup>, KANG Lei<sup>2</sup>, AN Zhi-yong<sup>1</sup>, WANG Run-zhi<sup>1</sup>

(1 School of Optical and Electronic Information Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 CRRC Changchun Railway Vehicles Co., LTD, Changchun 130062, China)

**Abstract:** Based on the traditional direct laser triangulation method, a single lens laser triangulation probe based on position sensitive detector was designed. A beam splitter is introduced, and the focus lens and the imaging lens are merged into one. In the spatial layout, making the beam splitter, detector and condensing lens are coaxial. The structure of the system is more compact, and the Scheimpflug condition satisfying the structure is derived. The optical system is simulated by Zemax optical design software, the focal length of the system is 20 mm, the diameter of the pupil is 4 mm, and the total length is 20.5 mm, so that the miniaturization of the measurement system can be realized. At the same time, the nonlinear correction of the position sensitive detector and the related signal processing are carried out to ensure a greater working range on the premise of higher measurement accuracy, and make the system and improve the adaptability of the system to the measurement environment. It can be widely applied to industrial real-time online detection and other fields.

**Key words:** Optical design; Laser triangulation; Scheimpflug condition; Single lens; Miniaturization; Position sensitive detector

**OCIS Codes:** 220.4830; 220.2740; 080.3620; 110.2970; 040.1880

## 0 引言

激光三角测头是一种基于激光三角测距原理的高精度、非接触测量仪器, 可用来测量厚度、位移、三维面型等参量, 广泛用于工业实时在线检测领域<sup>[1-2]</sup>. 与传统的接触式测量方法相比, 利用激光三角测头进行非接

基金项目: 吉林省科技厅重点科技攻关项目(No.20150204044GX)资助

第一作者: 张欣婷(1984—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为光学设计、光学仪器及检测. Email: luoyiwuhens@163.com

收稿日期: 2018-01-28; 录用日期: 2018-03-21

<http://www.photon.ac.cn>

触测量可实现高精度、高效率的快速测量。

激光三角测头是一束激光入射到被测物体表面,其反射光被光电探测器接收,当被测物体移动时,光电探测器上接收到的光斑位置就会发生变化,根据该变化即可求解出被测点的位移.由于入射光线和反射光线构成了一个三角形,因此称为激光三角法,其装置称为激光三角测头.目前国内激光三角测头的生产厂家并不多,且精度不高.国外主要有日本 Keyence、美国 MT 和 MEDAR、法国 Kreon、德国 Micro-Epsilon 等,其中日本 Keyence 的激光三角测头能达到  $1\ \mu\text{m}$  的测量精度,受到检测人员的普遍欢迎。

激光三角测头的光路结构有很多种,按照入射光与被测面法线的关系,可将其分为直射式结构和斜射式结构<sup>[3-6]</sup>.这两种三角测距法中均使用了准直聚焦镜和成像透镜两个光组,这就要求其在空间布局上需要具备一定的角度和距离、占用较大的空间,且系统的测量环境也会受到制约.相较而言,直射式测量法成像光斑小、光强集中、系统体积小,成像光斑不会因被测物体的移动而扩大.本文在直射式三角测距法的基础上,对其光路系统进行改进,在保证较高的测量精度的前提下,可减小系统体积、获得更大的工作范围,并提高系统对测量环境的适应性。

## 1 直射式激光三角法测距原理

由于直射式激光三角测距法<sup>[7-10]</sup>在减小仪器体积方面优于斜射式,因此本文首先研究直射式激光三角测距理论,然后在此基础上进行改进.直射式激光三角测距法的原理如图 1.

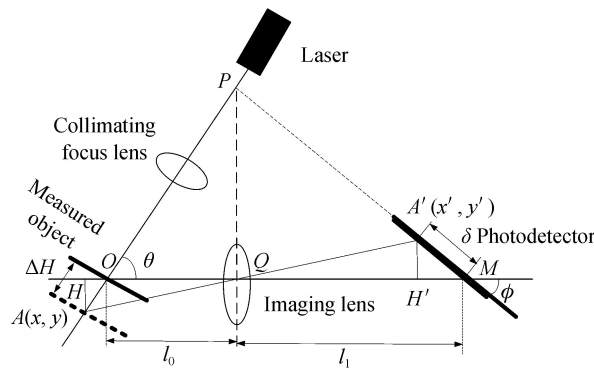


图 1 直射式激光三角法光路  
Fig.1 Direct laser triangulation optical path

激光器发射的光束经准直聚焦透镜垂直入射到被测物体表面,发生反射后,再通过成像透镜汇聚到光电探测器的光敏面.当被测点从基准位置沿着入射光轴方向移动微小距离  $\Delta H$ ,即移动到图中的 A 点时,像点 A' 在 CCD 探测器上移动的距离为  $\delta$ ,可通过探测器上光斑位置的改变量来计算被测物体的微小位移.为了使光电探测器上能接收到清晰的像,系统的光路布局需满足 Scheimpflug 条件,即入射光轴线、成像透镜主面和光电探测器的光敏面三者的延长线交于一点.该测量方法尽管体积方面优于斜射式,但是依旧存在两个光组,且整体光路布局呈现较大的三角形,体积方面并没有做到最佳,因此考虑对该结构进行适当的改进,以实现小型化。

## 2 单透镜激光三角测头设计

### 2.1 探测器的选取

传统的激光三角测头均采用电荷耦合器件 CCD 作为光电探测器件,而位置敏感探测器(Position Sensitive Device, PSD)相比 CCD 而言,具有更快的反应速度、更高的位置分辨率、更低的光输入要求和更简单的处理电路,且对光斑要求不严,只需识别光斑的重心坐标即可,因此本设计选取 PSD 作为系统的光电探测器。

### 2.2 光路设计

对其光路进行改进,在光路中引入一个分束镜,并将聚焦和成像两枚透镜合并为一枚,在空间布局时使分束镜、探测器、聚光透镜三者共轴,这样既可以使系统的结构紧凑、减小系统的体积,又可提高测量的环境适应性、便于携带.其具体的光路如图 2.

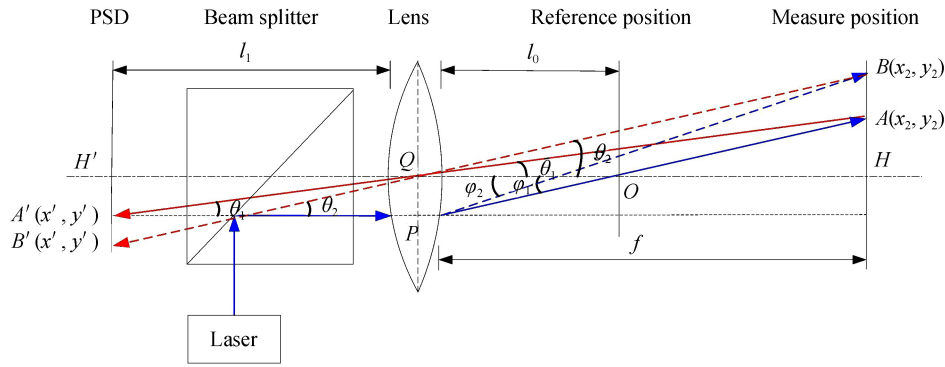


图 2 单透镜激光三角系统光路图  
Fig.2 Single lens laser triangulation system optical path

该光路引入一枚分束镜,将激光器出射的光束平行于凸透镜光轴方向入射到被测物表面,经被测物表面的反射光再次通过凸透镜、分束镜,并被位置敏感探测器 PSD 接收.图 2 中的实线和虚线分别表示被测位置变化前和变化后的光线方向.PSD 将捕捉到的光信号转换为电信号,通过信号采集、数据处理等环节将信号输出,利用上位机进行相关分析、计算,从而实现对被测物微位移量和振动参数的测量.

### 2.3 单透镜激光三角测头 Scheimpflug 条件

为了在位置敏感探测器 PSD 的光敏面上能够接收到每一个光点的清晰像,系统的光路布局应满足沙氏条件,即 Scheimpflug 条件.

本设计选取枕型 PSD 为光电探测器,以图 2 所示的光路布局来推导改进直射式 Scheimpflug 条件.图中实线为一组光线,虚线为另一组光线, $l_0$  为成像透镜前主面到入射激光束轴线与成像透镜光轴交点的距离; $l_1$  是成像透镜后主面到位置敏感探测器 PSD 的距离; $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为两束入射激光束与成像透镜光轴的夹角; $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为两束反射激光束与成像透镜光轴的夹角; $f$  为成像透镜的焦距,其余参数如图中所标示.以图中的 Q 点作为坐标原点,以成像透镜的光轴作为  $x$  轴,建立坐标系.若要使原点处的光最终能够在位置敏感探测器 PSD 上成清晰像,需要考虑几何光学中的近轴光成像条件,有

$$\frac{1}{l_0} + \frac{1}{l_1} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

现以 A 点为例,若被测点从图 2 中所示的参考位置沿着入射光轴方向移动到 A 点,并通过透镜成像在 A' 点,两点的坐标分别为  $A(x_1, y_1)$  和  $A'(x'_1, y'_1)$ .根据高斯公式,A 点经透镜成清晰像应该满足

$$\frac{1}{x-l_0} + \frac{1}{l_0-x'} = \frac{1}{f} \quad (2)$$

由三角形相似,即  $\triangle AHQ \sim \triangle A'H'Q$  可得

$$\frac{y_1}{x_1-l_0} = \frac{y'_1}{l_0-x'_1} \quad (3)$$

同时,在  $\triangle AHQ$  中有

$$y_1 = x_1 \tan \theta_1 \quad (4)$$

联立式(1)~(4),有

$$y'_1 = \left( \frac{l_0-f}{f} \cdot \tan \theta_1 \right) \cdot x'_1 - \frac{l_0^2}{f} \tan \theta_1 \quad (5)$$

从式(5)中可以看出  $y'_1$  与  $x'_1$  呈线性关系,使得被测物体沿入射光方向移动时,在位置敏感探测器 PSD 上接收到的成像光斑的轨迹为一条直线.此时,应该将 PSD 放置在该轨迹上,以便在其上能成清晰的像,B 点同理.

在该系统中,入射光束、成像透镜和位置敏感探测器 PSD 三者的位置及相互关系可由式(6)~(9)确定,如图 2 所示,根据之前所建立的坐标系,在  $\triangle QPO$  中,有

$$\tan \varphi_1 = \frac{\overline{PQ}}{\overline{QO}} \quad (6)$$

在  $\Delta QPA'$  中,有

$$\tan \theta_1 = \frac{\overline{PQ}}{\overline{PA'}} \quad (7)$$

将式(6)、(7)联立,得

$$\tan \varphi_1 = \frac{\overline{PA'}}{\overline{QO}} \tan \theta_1 = \frac{l_1}{l_0} \tan \theta_1 \quad (8)$$

式(8)即为改进直射式 Scheimpflug 条件,可以用来确定激光三角测头中的激光器、成像透镜和 PSD 的相互位置关系.

将式(1)代入式(8),得

$$\tan \theta_1 = \frac{l_0 - f}{f} \tan \varphi_1 \quad (9)$$

通过式(9)即可确定位置敏感探测器 PSD 的位置.

由于系统中引入了分束镜,使得入射激光束和反射激光束先后经过分束镜分光,实验证明,若采用分光比 1:1 的分束镜,光源发出的激光束两次经过分束镜后,到达位置敏感探测器 PSD 上的光能剩余 25% 左右,这就对光源的功率和稳定性提出了一定的要求,需要光功率在 10 mW 以上的激光器,而目前这种功率的激光器很容易购买,尤其是半导体激光器,这也大大增加了该方案的可行性.

## 2.4 设计结果

针对上述理论分析,对单透镜激光三角测头进行设计,其设计结果分别如图 3~图 6 所示.

图 3 为光学系统结构图.由于透镜片数很少,仅有一片单透镜,这就使得在成像质量方面受到限制,因此透镜的第一面采用偶次非球面,选取四项非球面系数.该系统激光波长  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ,焦距  $f' = 20 \text{ mm}$ ,入瞳直径  $D = 4 \text{ mm}$ ,视场角  $2\omega = 4^\circ$ ,系统总长 TOTR 为 20.5 mm,加上分束镜,总体尺寸为 25 mm,可满足整个系统的小型化.

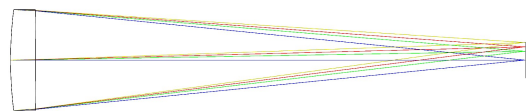


图 3 光学系统结构图  
Fig.3 The structure of optical system

图 4 为光学系统调制函数曲线.在截止频率 310 lp/mm 时,各视场的传递函数 MTF 均接近衍射极限,仅边缘视场的子午传递函数曲线稍微差一些,但实际使用时并不要求奈奎斯特频率达到 310 lp/mm 这么高,因此并不影响整体设计质量,完全满足设计要求.

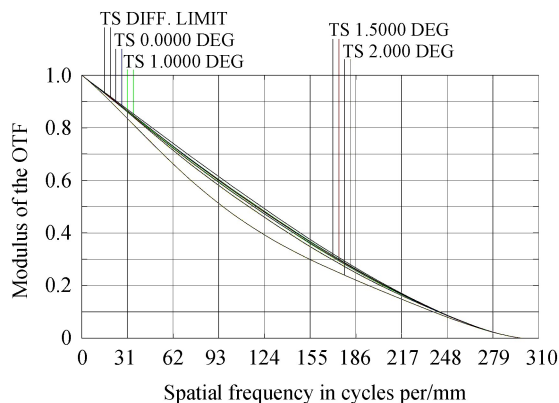


图 4 调制传递函数曲线  
Fig.4 Modulation transfer function curve

图 5 为光学系统点列图.图中四个视场的点列图基本都在艾里斑之内,尽管第三视场和第四视场的点列图稍大,但只是边缘带很少的一部分,均方根半径仍然在艾里斑之内,成像质量较好.

图 6 为光学系统像散、场曲和畸变曲线.从左侧的像散、场曲曲线可见,像散小于 0.02 mm,子午场曲和弧矢场曲均小于 0.04 mm;从右侧的畸变曲线可以看出,其相对畸变小于 0.002%,不会对成像造成影响.

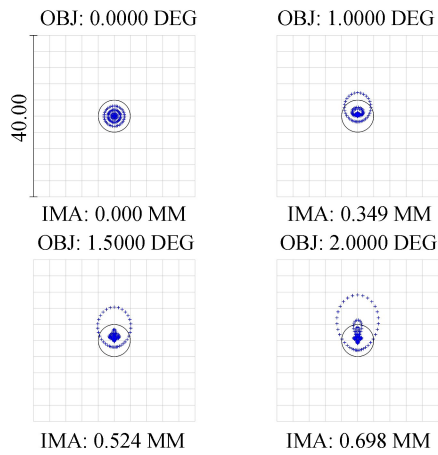


图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

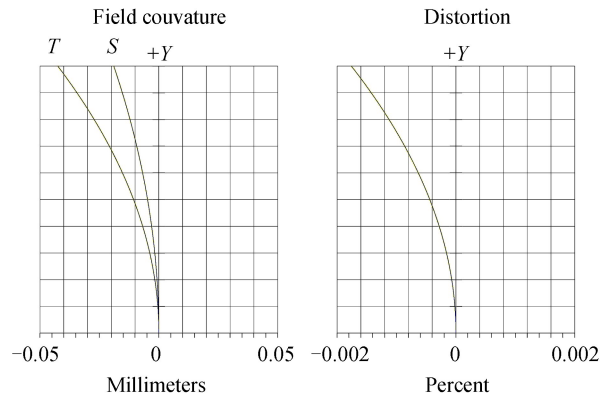


图 6 像散场曲和畸变曲线

Fig.6 Astigmatic field curvature and distortion curve

通过上述设计结果可得,若适当选取激光器和光电探测器,并配以该光学系统,完全可以满足激光三角测头的高探测精度.

### 3 位置敏感探测器 PSD 的相关处理

#### 3.1 PSD 的非线性校正

由于位置敏感探测器 PSD<sup>[11-12]</sup>具有非线性,因此需要对其进行优化校正.采用数字优化技术改进的 BP 算法,将 Trainlm 函数作为网络的训练函数对实验数据训练,BP 网络的训练模型如图 7 所示.

在该模型中,输入层和输出层均采用两个节点,其代表的二维 PSD 坐标分别为  $(x, y)$  和  $(X, Y)$ .中间层选取两个隐层,其神经元数分别为 50 和 40.网络的第一隐层、第二隐层、输出层分别采用 tansig、tansig、purelin 作为激励函数.设定最大训练次数为 500 次,可得网络仿真误差曲线如图 8.

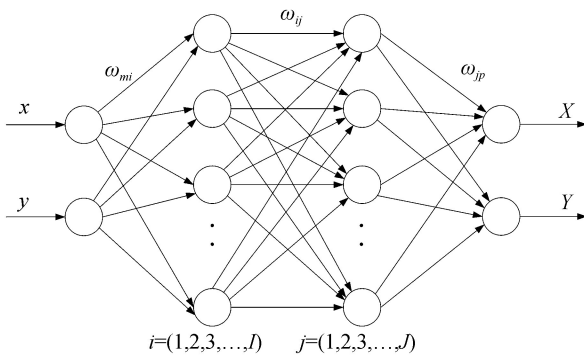


图 7 BP 网络训练模型

Fig.7 BP network training model

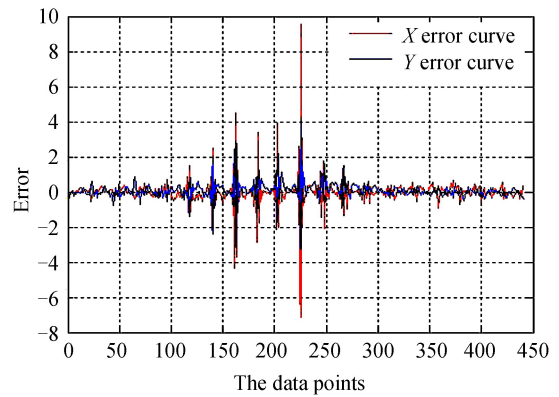


图 8 仿真误差曲线

Fig.8 Emulation error curve

通过图 8 所示的曲线可以看出,网络仿真的输出误差均在  $10^{-7}$  以内,并利用 sim 函数计算得到该网络输出误差均在 0.001 mm 之内,具备较高的精度,实现了 PSD 的非线性校正.

#### 3.2 PSD 驱动电路

本设计采用上海欧光的 100-SPB 型二维 PSD,并自行进行信号处理,其驱动电路流程图及电路板如图 9 所示.该处理电路图完成 PSD 原始信号的放大、差分、乘除法运算、AD 采集处理 16 位 AD 采集分辨率.

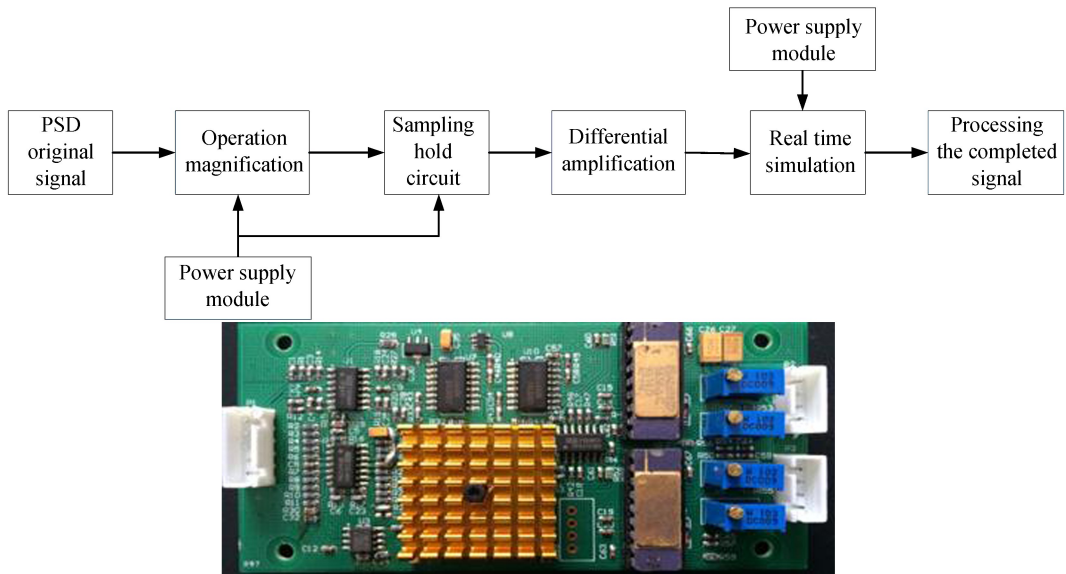


图9 PSD 驱动电路  
Fig.9 PSD drive circuit

### 3.3 PSD 数据采集与处理

PSD 光斑信号的采集与数据处理系统的流程图及电路板如图 10 所示,其主要完成数据处理及无线发送.

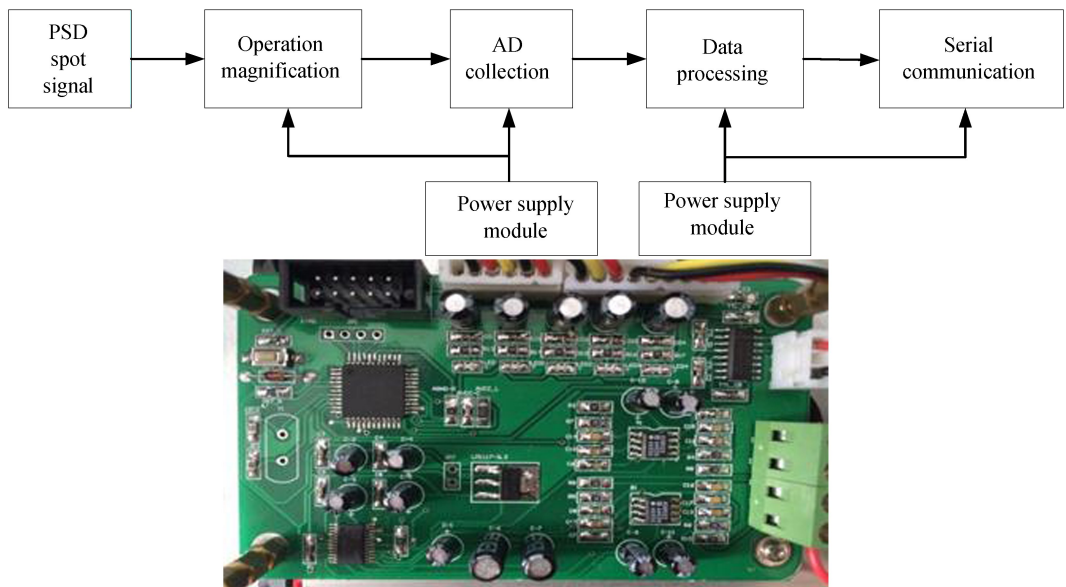


图10 PSD 数据采集与处理  
Fig.10 Data acquisition and processing of PSD

### 3.4 PSD 信号滤波

为了增强 PSD 接收到的光信号,对接收信号进行滤波,如图 11 所示.采用调制信号作为原始信号,抑制了噪声的影响;采用信号的互相关及自相关处理,抗干扰能力强,能够实现高精度测量.

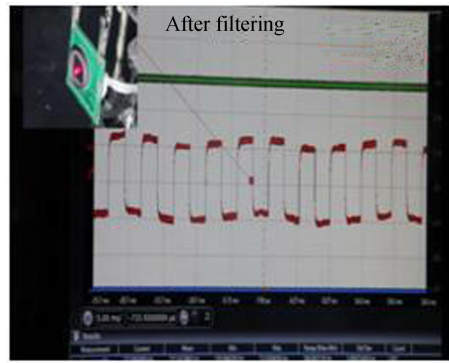


图 11 PSD 信号滤波  
Fig.11 PSD signal filtering

## 4 实验验证

众所周知,日本基恩士的激光三角测头在国际处于领先水平,因此本文以基恩士三角测头的测量数据为真值,对所研制的单透镜激光三角测头进行实验研究,对轴的圆柱度展开测量,其实验装置如图 12.

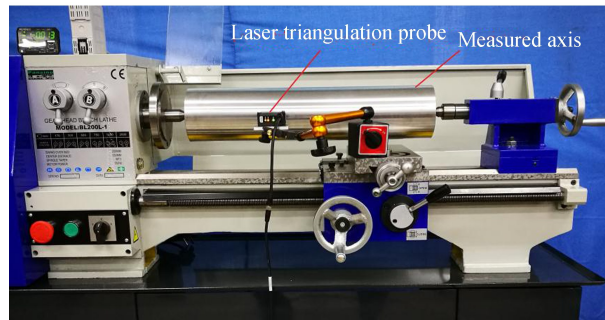


图 12 实验装置  
Fig.12 Test device diagram

在利用激光测头测量前,对已给定长为 500 mm,直径 100 mm 的标准轴进行测量,其圆柱度误差的标准值为 0.05,选择 10 个截面对其测量,以基恩士激光三角测头的测量值为真值,其测量结果如表 1.

表 1 圆柱度误差测量结果(单位:mm)

Table 1 Measurement results of cylindricity error(unit: mm)

Measurement times	Measured value	True value	Average value	Standard value	Standard deviation
1	0.049	0.049			
2	0.051	0.050			
3	0.050	0.050			
4	0.049	0.049			
5	0.050	0.050			
6	0.049	0.049	0.0498	0.050	0.00086
7	0.049	0.050			
8	0.050	0.050			
9	0.051	0.050			
10	0.050	0.050			

通过实验验证,系统的测量精度和分辨力随着测量距离的增加而减小,当测量距离小于 40 mm 时,分辨力可达到  $0.1 \mu\text{m}$ ,测量精度  $1 \mu\text{m}$ ,与基恩士的激光三角测头精度相仿.同时,该系统总体尺寸 25 mm,而基恩士三角测头尺寸均大于 40 mm,本设计在体积上具有一定的优势.

## 5 结论

以传统的直射式激光三角法光学系统为基础,引入一枚分束镜,改变光路布局,采用法线共轴的布局方

式减少一个透射光组,对该结构下的 Scheimpflug 条件进行推导,并运用 Zemax 软件设计了一种单透镜激光三角测量光路系统.该系统焦距 20 mm,入瞳直径 4 mm,总长 20.5 mm,可实现测量系统的小型化.配以合适的激光器和光电探测器件,能够实现 1  $\mu\text{m}$  的测量精度.在保证较高测量精度的前提下获得更大的工作范围、提高系统对测量环境适应性,且安装和使用更加简单,可广泛用于工业实时在线监测等领域.

#### 参考文献

- [1] JOAO L, VILAC A, JAIME C, *et al.* Non-contact 3D acquisition system based on stereo vision and laser triangulation [J]. *Machine Vision and Applications*, 2010, **21**(3): 341-350.
- [2] KOULAKEZIAN A, OHANNESSIAN R, HOVIG D. Wirelesssensor node for real-time thickness measurement and localization of oil spills[C]. Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2008, **7**(2): 631-636.
- [3] CAI Guo-yin, WU Jian, XUE Yong. Oil spill detection from thermal anomaly using aster data in yinggehai of Hainan [C]. IEEE, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007, **7**(23): 898-900.
- [4] LIU Yu-jie. Research on portable short distance laser rangefinder[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2015.  
刘玉杰.便携式短距离激光测距仪的研究[D].西安:西安工业大学, 2015.
- [5] SHAH P, KONOLIGE K, AUGENBRAUN J, *et al.* Distance sensor system and method:US, US8996172[P]. 2015.
- [6] WU Gui, RAN Lin, CHEN Kun. Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface[J]. *Measurement*, 2011, **44**(44): 1-10.
- [7] SU Yu-wei. Study of laser triangulation precision distance measurement system [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013.  
苏煜伟.激光三角法精密测距系统研究[D].西安:西安工业大学, 2013.
- [8] JIANG Lei. Laser triangulation displacement measuring system with compensation of dual symmetrical optical path[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.  
姜蕾.双光路对称补偿的激光三角法位移测量系统[D].杭州:浙江大学, 2017.
- [9] HE Xiao-min. Researches and design of laser triangulation distance measurement system with high accuracy [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.  
何晓敏.高精度激光三角测量距离系统的研究与设计[D].兰州:兰州交通大学, 2015.
- [10] WANG Dan-dan. Study on non-contact measurement system for shape and position errors of large scale rotary body[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.  
王丹丹.大型回转体件形位误差非接触测量系统研究[D].长春:长春理工大学, 2016.
- [11] LI Kuang-ye. Reach on high-precision displacement sensor based on the PSD[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.  
李旷野.基于 PSD 的高精度位移传感器的研究[D].长春:长春理工大学, 2010.
- [12] PU Jin-ya. PSD laser triangulation system design[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008.  
普晋亚. PSD 激光三角测距系统设计[D].武汉:华中科技大学, 2008.

**Foundation item:** Key Science and Technology Project of Jilin Science and Technology Department (No.20150204044GX)

引用格式:ZHANG Xin-ting, KANG Lei, AN Zhi-yong, *et al.* Design of a Single Lens Laser Triangulation Probe Based on PSD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(7): 0722001

张欣婷, 亢磊, 安志勇, 等. 基于 PSD 的单透镜激光三角测头设计[J]. 光子学报, 2018, **47**(7): 0722001