改进型激光三角测头设计

张欣婷[1],亢 磊[2],安志勇[3],王若帆[3]

(1. 长春理工大学 光电信息学院,吉林 长春 130012;
2. 中国中车长春轨道客车股份有限公司,吉林 长春 130062;
3. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘 要:设计了一种改进型激光三角测头,在传统直射式激光三角测距方法的基础上,提出了一种新型单透镜设计理念。以普通直射式激光三角法为基础,对该光路进行改进,在光学系统中使用一个分束镜来取代传统激光三角测头的聚焦透镜和成像透镜,令其与聚光透镜和光电探测器共轴,使系统的结构更加紧凑,并推导了满足该结构的 Scheimpflug 条件。同时利用 Zemax 光学设计软件仿真光学系统,系统入瞳直径 4 mm,焦距 20 mm,总长 20.5 mm,满足测量系统的小型化。当与合适的光源和探测器配合使用时,能够在保证较高测量精度的前提下获得更大的工作范围,提高测量系统的环境适应性,可广泛应用于工业实时在线检测以及军事领域。

关键词:激光三角法; Scheimpflug 条件; 小型化; 分束镜
中图分类号:O439 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.1018002

Improved laser triangulation probe design

Zhang Xinting[1], Kang Lei[2], An Zhiyong[3], Wang Ruofan[3]

(1. School of Optical and Electronic Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;
2. CRRC Changchun Railway Vehicles Co.,Ltd, Changchun 130062, China;
3. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: An improved laser triangulation probe was designed based on the traditional direct laser triangulation method. A new single lens design was proposed based on general direct laser triangulation ranging method. The optical path was improved. In optical systems, a beam splitter was used to replace the focusing lens and imaging lens of traditional laser triangular probe, making it coaxial with concentrator lens and photo detector, which made the system structure more compact, and the Scheimpflug condition was deduced to meet the structure. While taking advantage of Zemax optical design software to simulate the optical system, pupil diameter of 4 mm, focal length of 20 mm, total length of 20.5 mm, can achieve miniaturization of measuring system. Together with the appropriate light source and detector, a larger scope of work can be obtained in ensuring high measurement accuracy of the premise, and improving the environmental adaptability of measurement system. It can be widely used in industrial real time online testing and military fields.

Key words: laser triangulation; Scheimpflug condition; miniaturization; beam splitter

收稿日期:2018-05-07; **修订日期**:2018-06-12
基金项目:吉林省科技厅重点科技攻关项目(20150204044GX)
作者简介:张欣婷(1984-),女,副教授,博士,主要从事光学设计与检测技术方面的研究. Email: luoyiwuhens@163.com

0 引 言

激光三角测头作为一种高精度的非接触测量仪器,广泛用于军事领域和工业实时在线检测领域[1-2]。它是基于激光三角测距原理，较接触式测量而言,具有高精度、高速度、高效率等优点。

激光三角测头的光路形式并不唯一，通常是按照被测面法线与入射光线之间的位置关系来划分，分为直射式激光三角测头和斜射式激光三角测头[3-6]。这两种激光三角测头的光学系统均使用两个光组，分别是聚焦透镜和成像透镜,而且需要以一个三角形的形式进行空间布局，这会使得系统的体积较大,使用条件受到制约。两者相比之下,直射式激光三角测头在体积上略占优势，且其成像光斑小、光能量集中。因此文中以直射式激光三角测头的光路结构为基础,对其进行改进,既能保证系统的高精度,又可实现系统小型化,提高测量系统的环境适应性和工作范围。

1 直射式激光三角法测量原理

通过对直射式激光三角测距法和斜射式激光三角测距法的比较,发现直射式[7-11]在减小仪器体积方面略占优势，因此笔者的设计以直射式激光三角法测距原理为基础展开研究,其测量原理如图 1 所示。

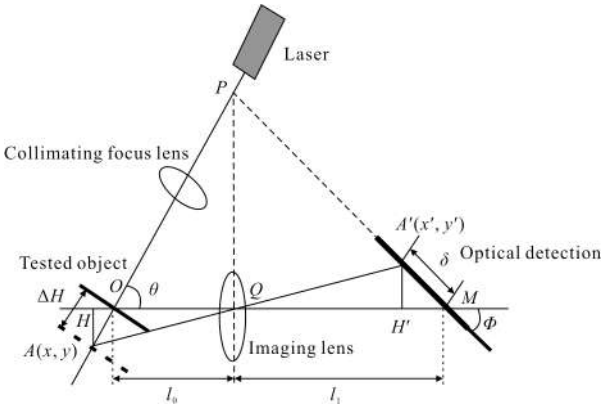

图 1 直射式激光三角法光路

Fig.1 Direct laser triangulation optical path

由激光器发出的激光束经过准直聚焦透镜垂直入射到被测物体表面,在被测物体表面发生反射后,其光线方向发生改变，以一定的角度入射到成像透镜,并被光电探测器接收。当目标位置发生改变时,在光电探测器上的光斑位置也发生改变，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。直射式激光三角法的光路布局在体积上较斜射式小，但依旧存在准直聚焦透镜和成像透镜两个光组,使得光路的整体布局呈现一个较大的三角形,因此考虑在直射式光路布局的基础上进行改进，简化系统结构,实现系统小型化。

2 改进直射式激光三角测距

2.1 改进直射式设计方案

通过对直射式激光三角测距法的研究，对其光路进行如下改进:首先,在光学系统中使用一枚分束镜;其次,考虑将传统激光三角测头中的聚焦透镜和成像透镜合二为一;再次,令光电探测器、聚焦透镜和分束镜在空间上共轴。这样设计的目的是在保证系统各方面性能的前提下,做到结构紧凑,实现系统小型化。其具体的光路如图 2 所示。

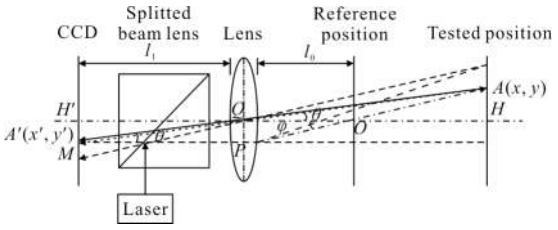

图 2 系统光路图

Fig.2 System optical path

由激光器发出的激光束经分束镜后入射到凸透镜,其出射光入射到被测物体表面,经由被测物体表面反射后,沿着凸透镜和分束镜的方向传播,最终到达光电探测器 CCD。从 CCD 输出的电信号经过信号处理,由上位机进行计算,可计算出被测物的位置变化量。在图 2 中,实线表示被测位置变化前的光线方向,虚线表示被测位置变化后的光线方向。

2.2 改进直射式 Scheimpflug 条件

为了在光电探测器 CCD 的光敏面上各处均能接收到清晰像，激光三角测头的光学系统应满足 Scheimpflug 条件,也称为沙氏条件。该设计也对该光路布局下的 Scheimpflug 条件进行了推导，如图 2 所示。

图 2 中,l_1 是成像透镜像方主面到接收器 CCD 的距离;l_0 为成像透镜物方主面到入射光束轴线与

成像透镜光轴交点的距离；f 为成像透镜的焦距；θ 为反射激光束与成像透镜光轴的夹角；φ 为入射激光束轴线与成像透镜光轴的夹角。现在图 2 中建立坐标系，以图 2 中成像透镜的光轴作为横坐标轴，以 Q 点作为坐标原点。为在 CCD 上能获得清晰像，根据近轴成像条件，有：

$$\frac{1}{l_0}+\frac{1}{l_1}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

在图 2 中，被测点从参考位置沿光轴移动到 A 点，通过透镜成像在 A' 点，令 A 点和 A' 点（即后面公式中提到的 M 点）的坐标分别为 $A\ (x,\ y)$ 和 $A'(x',\ y')$，根据高斯公式，A 点经透镜成清晰像应该满足：

$$\frac{y}{x-l_0}+\frac{1}{l_0-x'}=\frac{1}{f} \tag{2}$$

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

$$\frac{y}{x-l_0}=\frac{y'}{l_0-x'} \tag{3}$$

同时，在 ΔAHQ 中：

$$y=x\tan\theta \tag{4}$$

联立公式(1)~(4)，有：

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

从公式(5)中可以看出 x' 与 y' 呈线性关系，使得被测物体沿入射光方向移动时，在光电探测器件 CCD 上接收到的成像光斑轨迹呈直线状。此时，若要获得 CCD 上的清晰像，只需将 CCD 置于该轨迹上即可。同时，系统中的入射光束、透镜和 CCD 的相对位置可由下述公式确定。

如图 2 所示，在 ΔQPM 中，根据之前建立的坐标系，有：

$$\tan\phi=\overline{PQ}/\overline{QO} \tag{6}$$

在 ΔQPM 中，有：

$$\tan\theta=\overline{PQ}/\overline{PM} \tag{7}$$

联立公式(6)、(7)得：

$$\tan\varphi=\overline{PM}/\overline{QO}\ \tan\theta=(l_1/l_0)\tan\theta \tag{8}$$

公式(8)即为改进式激光三角测头所需满足的 Scheimpflug 条件，可用其确定 CCD、成像透镜和激光器的位置关系。

将公式(1)代入公式(8)得：

$$\tan\theta=\frac{l_0-f}{f}\tan\varphi \tag{9}$$

通过上式即可确定光电探测器 CCD 的具体位置。

此外，通过实验证明，系统需要配合功率 10 mW 以上的激光器使用。因为系统引入了一枚分束镜，当分光比为 1:1 时，入射激光束经过分束镜透射、再反射的过程中会有能量损失，使得到达 CCD 光敏面上的光能仅剩 25%左右，因此光源的功率不能太小。而光功率 10 mW 对于激光器来讲并不困难，特别是半导体激光器，这使得该方案的可行性大大增加。

2.3 设计结果

由于系统将聚焦透镜和成像透镜合成了一枚，使其在像差校正方面有所限制，因此考虑引入非球面解决成像质量的问题，将透镜前表面设置为偶次非球面。此外，系统入瞳直径 4 mm，总长 20.5 mm，焦距 f'=20 mm，若将分束镜尺寸考虑进去，依旧可满足整个系统的小型化。

在成像质量方面，如图 3~6 所示。传递函数 MTF 在整个截止频率范围内接近衍射极限，仅边缘视场的子午传递函数曲线稍微差一些；点列图的均方根半径也基本都在艾里斑之内；相对畸变小于 0.002%，可实现激光三角测头的高精度探测。

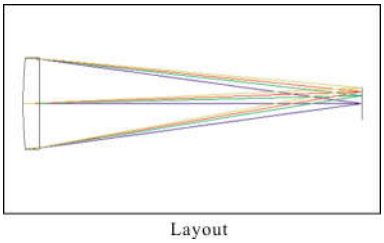

图 3 光学系统结构图

Fig.3 Structure of optical system

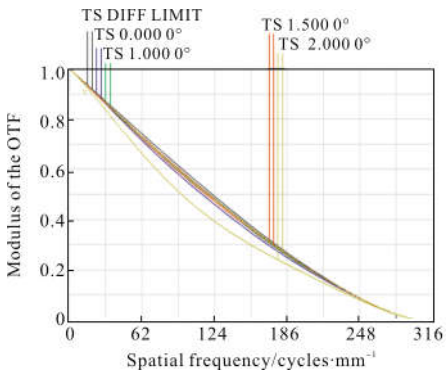

图 4 调制传递函数曲线

Fig.4 Modulation transfer function curve

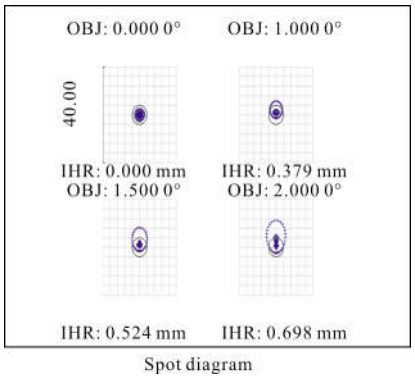

图 5 点列图

Fig.5 Spot diagram

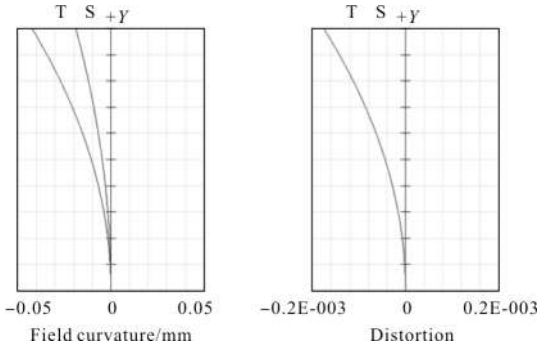

图 6 场曲、畸变曲线

Fig.6 Field curvature, distortion curve

3 实验验证

经过理论研究,该系统的最大测量范围可达 1 800 mm,尽管在实际应用中,由于激光光源功率和环境干扰的限制,无法实现如此大的工作范围,但是仍然大大超出一般直射式激光三角测头 400 mm 的最大测量范围。此外,系统采用了一个偶次非球面,使得在测量距离小于 200 mm 时,该系统和直射式激光三角测头的分辨率近似,但当测量距离小于 40 mm 时,其各方面性能均略优于直射式系统。

为了验证该系统的测量精度,进行了圆度误差测量实验,其测量装置如图 7 所示。

首先选定一个直径 100 mm、长度 500 mm 的轴作为标准轴,其圆度误差的标准值为 0.03,选择 5 个截面对其测量,其测量过程如下:工件通过顶尖孔装夹在测量头架与尾座之间,把激光测头发射的光束对准工件的被测表面的最高母线处,观察测头的显示为零,通过驱动系统,使工件回转一周,得到被测量的最大、最小差,最大差值之半作为单个截面的圆度误差。然后,沿轴线方向间断移动,重复上述步骤,测量若干截面,取其中最大的误差值作为零件的圆度误差。其测量结果如表 1 所示。

图 7 圆度误差测量

Fig.7 Roundness error measurement

表 1 圆度误差测量结果(单位:mm)

Tab.1 Measurement results of roundness error (Unit: mm)

Measuring number	Measuring value	Average value	Standard value	Standard error
1	0.029			
2	0.031			
3	0.029	0.029 8	0.030	0.000 86
4	0.030			
5	0.031			

经过上述实验表明,系统的分辨率和测量精度与测量距离有关,均随着测量距离的减小而增加。一般来讲,若测量距离小于 40 mm,其测量精度能够达到 1 μm,并可实现 0.1 μm 的高分辨率。如对光电探测器 CCD 进行细分处理,则测量精度和分辨率还将有所提高。

4 结 论

激光三角法是一种非常经典的非接触测距方法,在各行各业中得到了广泛的应用,始终占据着一席之地。当今国内外各大高校院所、科研机构均在精度、稳定性方面加以研究,而此文是在上述基础上对如何减小系统体积、提高环境适应性进行探讨。文章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,通过它的半反半透作用来改

变光路布局，将聚焦透镜和成像透镜合为一枚，推导了适用于该结构的 Scheimpflug 条件。在理论基础上，利用 Zemax 光学设计软件对单透镜激光三角测头的光路进行设计和仿真，在保证成像质量的前提下可实现系统的小型化，做到系统总长 20.5 mm，入瞳直径 4 mm。该系统具有较强的环境适应性和较大的工作范围，可广泛应用于工业在线监测和军事领域。

参考文献：

[1] Sun Changku. Optical Measurement Technology [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2001. (in Chinese)
孙长库. 光测量技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2001.

[2] Bostjan Perdan, Drago Bracun, Janez Diaci, et al. Online assessment of power transmission belt geometry by using laser triangulation and profile parameterisation [J]. ***Int J Adv Manuf Technol***, 2010, 49: 177-184.

[3] Joao L Vilaca, Jaime C Fonseca, Antonio M Pinho. Non-contact 3D acquisition system based on stereo vision and laser triangulation [J]. ***Machine Vision and Applications***, 2010, 21(3): 341-350.

[4] Kazuhiko Ishikawa, Hitomi Yamanob, Kiichiro Kagawa, et al. Measurement of thickness of a thin film by means of laser interference at many incident angles [J]. ***Optics and Lasers in Engineering***, 2004, 41: 19-29.

[5] Feng Junyan, Feng Qibo, Kuang Cuifang. High-precision laser triangulation displacement sensor technology[J]. ***Applied Optics***, 2004, 25(3): 33-36. (in Chinese)
冯俊艳, 冯其波, 匡翠方. 高精度激光三角位移传感器的技术[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 33-36.

[6] Li Kuangye. Research on high-precision displacement sensor based on the PSD [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
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.

[7] Zhu Shangming, Ge Yunjian. Design and implementation of laser triangulation distance sensors [J]. ***Automation Instrumentation***, 1998, 19(12): 10-12. (in Chinese)
朱尚明, 葛运建. 激光三角法测距传感器的设计与实现[J]. 自动化仪表, 1998, 19(12): 10-12.

[8] Koulakezian A, Ohannessian R, Hovig Denkikian. Wireless sensor 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: 631-636.

[9] Pu Jinya. PSD laser triangulation system design [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
普晋亚. PSD 激光三角测距系统设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.

[10] Cai Guoyin, Wu Jian, Xue Yong. Oil spill detection from thermal anomaly using aster data in Yinggehai of Hainan, China [C]//Geoscience andRemote Sensing Symposium, 2007, 23-28: 898-900.

[11] Reddyhoff T, Kasolang S, Dwyer-Joyce R, et al. The phase shift of an ultrasonic pulse at an oil layer and determination of film thickness [J]. ***Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology***, 2005, 219(6): 387-400.