

激光位移传感器传感探头微型光学系统设计

张 爽^{1,2} 朱万彬^{1*} 李 健^{1,2} 鲁秀娥³

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2.中国科学院大学,北京 100039;

3.长春相干光学机电技术有限公司)

摘要: 光斑质量直接影响激光位移传感器测量的精度。为了提高激光位移传感器传感探头光学系统的成像质量,设计了传感探头四片式微型光学系统。本文在理想成像基础上,分析光束在光学系统中能量传递的变化规律,对比光电探测器的感光能力,利用光学设计软件(ZEMAX)实现了激光位移传感器传感探头微型光学系统的设计。通过理论计算分析,严格控制传感探头孔径光阑的大小,对光学系统进行优化处理,成像最大弥散斑半径低于 $3.3\ \mu\text{m}$,空间分辨率 120 lp/mm 以下的传递函数 MTF(Modulation Transfer Function) 值大于 0.5,光线扇形图的最大像差小于 $5\ \mu\text{m}$,畸变量低于 0.1859%。该光学系统具有良好的成像效果,可以满足激光位移传感器探测系统对成像系统成像光斑质量的要求,以保证传感器的测量精确度优于 $5\ \mu\text{m}$ 。

关键词: 微型光学系统; ZEMAX; 光斑质量

中图分类号: O439 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20181106.1001

Design of micro-optical system for laser displacement sensor sensing probe

ZHANG Shuang^{1,2}, ZHU Wan-bin^{1*}, LI Jian^{1,2}, LU Xiu-e³

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Chanchun Coherent Optics Electromechanical Technology Co., Ltd)

* Corresponding author, E-mail: ciomplaser@163.com

Abstract: Spot quality can directly affect the measuring accuracy of laser displacement sensor. In order to improve the imaging quality of sensing probe optical system for the laser displacement sensor, a four-piece micro-optical system for sensing probes is designed. Based on the ideal imaging, we analyze the law of energy transfer in the optical system, compare the sensitivity of the photoelectric detector, and use the optical design software ZEMAX to realize the design of the micro-optical system of the laser displacement sensor. Through theoretical

收稿日期: 2018-01-03; 修订日期: 2018-03-01

基金项目: 吉林省科技厅重点科技成果转化项目(No.20150307036G X, No.20150307039G X)

Supported by Jilin Provincial Science and Technology Department Key Science and Technology Transformation Project(No.20150307036G X, No.20150307039G X)

calculation and analysis, the size of the aperture of the sensing probe is strictly controlled, and the optical system is optimized. As a result, the maximum radius of spot is $3.226\text{ }\mu\text{m}$, the value of Modulation Transfer Function (MTF) is over 0.5 when the spatial resolution is confined within the boundary of 120 lp/mm , the error of Ray Fan is $5\text{ }\mu\text{m}$ or less and the maximum distortion is less than 0.185 9%. The optical system has a good imaging effect, so that the laser displacement sensor detection system can meet the imaging spot quality requirements of the imaging system to ensure that the measurement accuracy of the sensor is better than $5\text{ }\mu\text{m}$.

Key words: micro-optical system; ZEMAX; spot quality

1 引言

当今世界已经进入信息时代,信息技术成为推动科学技术高速发展的关键。信息技术包括测量技术、计算机技术和通信技术,测量技术是基础。激光位移传感器作为微位移测量工具,在光电检测领域中具有非常重要的作用。随着工业集成化程度的提高,工业上对位移测量精度的要求也随之提高,激光位移传感器作为微位移测量的重要手段,其精度的提高将促进工业集成化的进步^[1-3]。

目前激光位移传感器系统的设计主要集中在对传感器嵌入式系统的开发及图像探测器数据采集方面^[4-10]。许多设计者通过提高 MCU (Micro Control Unit) 数据采集速率和减小图像探测器的像元尺寸来提高系统整体测量速率和精确度^[11-13]。这种做法在数据处理与采集领域起到了一定的效果,但是还无法在整个光电探测系统达到理想的探测要求。另外,受到整个制造行业加工工艺水平的制约,MCU 采样频率以及探测器的像元尺寸与设计者所提出的性能指标有一定的差异。因此,在探测系统设计中,需要从整体把握各个部分的性能参数,在保证整体系统测量精度的要求下,降低工艺的要求。在激光位移传感器系统中,除了 MCU 数据采集速率和探测器像元尺寸会影响系统的测量精度外,光学系统的成像质量也对传感器测量精度起到了决定性作用^[14-16]。目前激光位移传感器通常采用一片凸透镜或者一个针孔装置作为成像光学系统,然而这种成像系统所成像的散斑略大^[17]。在图像处理过程中,大的散斑增加了图像光斑中心提取的不确定性,很难精确定位成像位置,增加了后期数据处理的难

度,进而影响了位移测量的精确性^[18-20]。因此,急需一种小像差的光学成像系统,来提高激光位移传感器的成像光斑质量,进而提高整个测量系统的精确性。

本文针对激光位移传感器传感探头光学系统成像需求,对经典库克三片镜进行拆分处理。通过合理地控制孔径光阑的大小,优化其结构参数,设计出一种适用于小型传感探头的光学系统。物表面散射光信息经过该光学系统成像后,可将光斑尺寸控制在很小范围内,提高了测量的精确性。

2 激光位移传感器的构成及工作原理

2.1 激光位移传感器的构成

激光位移传感器以激光三角法为基本测量理

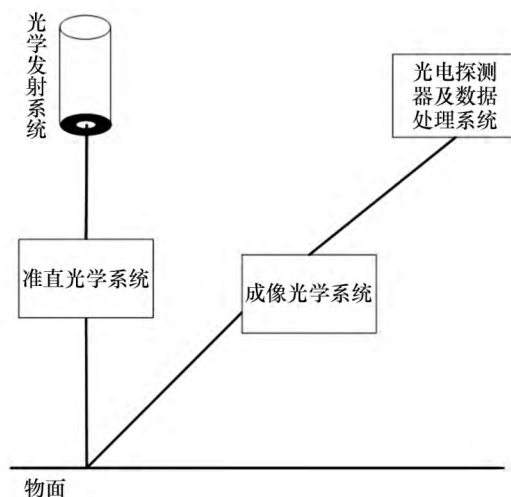


图 1 激光位移传感器结构图

Fig.1 Diagram of the laser displacement sensor structure

论^[21-23]。其主要结构由三部分组成: 光学发射系统、成像系统、光电探测系统, 如图1所示。

本文设计了一种新型激光位移传感器, 其光束发射装置采用 650 nm 半导体激光器^[24], 成像系统采用本文设计的微型光学系统, 光电探测器采用东芝 TCD1707^[25]。

2.2 激光位移传感器工作原理

如图2所示, 激光束经过准直处理后投射于被探测物体表面并在物体表面发生散射。散射光经过成像光学系统后成像于光电探测器。根据探测器上成像光斑的位置, 利用光学三角法可计算出物体表面的位移信息, 然后通过 DSP 对接收到的光信号进行分析处理^[26-28]。另外, 探测器受到其光学灵敏度的制约, 光强太弱时, 探测器感应不到测量物体散射的光信息^[29]; 光强太强时, 探测器接收到的物体散射光信号强度太强, 探测器会出现光饱和现象, 将为后期图像处理增加难度。根据朗伯余弦辐射定律^[30], 散射光的强度 $I(\theta) = I_0 \cos\theta$, 如图3所示, 不同观察方向接收到的光强

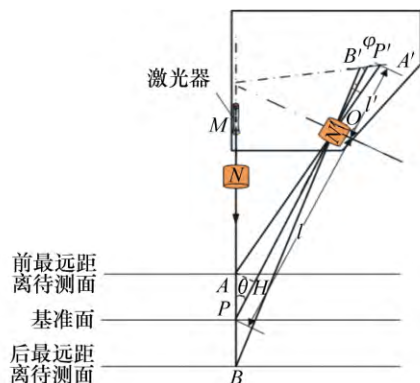


图2 激光位移传感器测量原理示意图

Fig.2 Measuring principle of laser displacement sensor

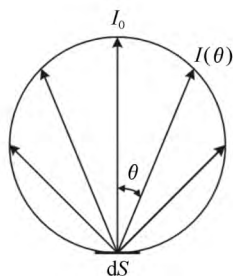


图3 余弦辐射图

Fig.3 Diagram of the cosine radiation

度不同^[31]。另外, 光学系统孔径大小和位置决定

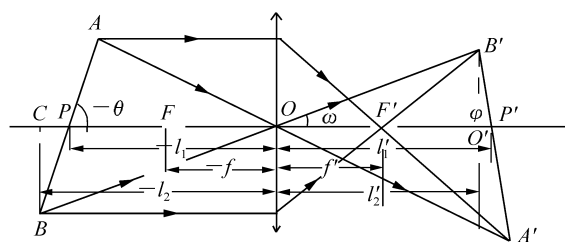


图4 Scheimpflug 成像原理图

Fig.4 Scheimpflug imaging principle

了光学系统成像范围和物体散射光的主观察方向。因此, 孔径光阑的设置成为该光学系统设计的关键^[32]。同时, 为了在探测器上得到清晰成像点, 系统的光路设计、物面、像面、光学系统的主平面应满足 Scheimpflug^[33-38]条件, 光路如图4所示。根据光学系统的符号法则、光学成像定理以及三角法可得:

$$\begin{aligned} -l_2 &= -l_1 + |BC| \cot(-\theta) \\ l_2 &= l_1' - |B'C'| \cot\varphi \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $|BC| = -l_2 \tan\omega$, $|B'C'| = l_2' \tan\varphi$,

将其代入公式(1)中可得:

$$\begin{aligned} l_2 &= \frac{l_1}{1 + \tan\omega \cot\theta} \\ l_2' &= \frac{l_1'}{1 + \tan\omega \cot\varphi} \end{aligned} \quad (2)$$

又由高斯定理有:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (3)$$

结合公式(2)、(3)可得:

$$\frac{l_1'}{l_1} = \frac{\tan\theta}{\tan\varphi} \quad (4)$$

当激光位移传感器探头结构尺寸以及测量范围确定时, 可根据 Scheimpflug 条件确定成像位置, 标定探测器在传感器探头中的结构位置, 确定光学系统焦距大小^[39]。

3 传感探头尺寸的分析设计

由图3可以看出, 激光束经过测量物体表面时, 会从不同方向观察到物体散射光。根据朗伯余弦辐射定律可知, 随着散射角度增大, 散射光强度减小。由图2所示的成像原理并结合余弦定

律,可得:光学系统孔径光阑增大时,小于标准面中心散射角的那部分通光量会大幅度增加,孔径光阑增大到一定值时,探测器会因为光饱和现象而无法分辨出成像点位置;光学系统孔径光阑减小时,小于标准面中心散射角的通光量会大幅度减小,通过光学系统成像后,探测器探测到的光信号变弱。当光学系统孔径小于一定值时,探测器无法感知微弱的光信号,导致无法分辨出成像点位置。因此,需要确定光学系统孔径光阑和所观察标准面中心理想散射角的大小,再结合位移量程、测量距离和 Scheimpflug 条件初步计算出激光位移传感器传感探头尺寸和光学系统工作性能参数。如图 2 所示,激光位移传感器测量范围为 (40 ± 10) mm,中心标准面在 40 mm 位移处,距离标准面最大前后测量范围为 10 mm,激光束作用在标准面上的 P 点到光学系统中心 O 点之间的距离记为 l ,探测器上相应的像点 P' 到 O 点之间的距离记为 l' 。根据表 1 和表 2 所示的参数值,可计算出中心标准面光强适中的散射角值。

表 1 探测器规格参数

Tab.1 Specifications of photodetector

探测器型号	TCD1707D
像元尺寸 $x/\mu\text{m}$	4.7
像元个数 m	7 450
最小曝光量 SE(lx.s)	0.08

表 2 激光器规格参数

Tab.2 Specifications of laser

激光器型号	K650E03SN-0.010W
波长 λ/nm	650
功率 P/mW	10
光束整形后光斑直径 $d/\mu\text{m}$	105

为了使探测器能够识别物面信息,必须使物面散射成像的光强度大于探测器的最小曝光量 SE。记光电探测器单个像元面积为 dS_{IMA} ,像元 dS_{IMA} 距光学系统光学中心 O 之间的距离为 l' ,单个像元面对点 O 所张的空间立体角为:

$$d\omega = dS_{\text{IMA}} \cos\varphi / l'^2, \quad (5)$$

像元面的光通量为:

$$d\phi_{\text{IMA}} = Id\omega, \quad (6)$$

又有像面照度:

$$E_{\text{IMA}} = d\phi_{\text{IMA}} / dS_{\text{IMA}} = I \cos\varphi / l'^2. \quad (7)$$

则从光学系统光学中心出射的光强度为:

$$I = \frac{E_{\text{IMA}} l'^2}{\cos\varphi}. \quad (8)$$

为达到像面成像的能量要求,根据所使用的激光器,通过光强度之间的关系,可以得出设计指标,相应的计算过程如下:

$$\omega_{\text{OBJ}} = \frac{\pi(d/2)^2}{|PM|^2}, \quad (9)$$

$$\phi_{\text{OBJ}} = P \cdot \xi, \quad (10)$$

$$I_{\text{OBJ}} = \frac{\phi_{\text{OBJ}}}{\omega_{\text{OBJ}}}, \quad (11)$$

根据郎伯余弦辐射定律有:

$$I_{\text{OBJ}} \cdot \cos\theta \cdot \tau = I_{\text{IMA}}, \quad (12)$$

其中 ω 为光学中心点 O 的空间立体角, ϕ 为空间立体角所对应的光通量, I 为光强度, IMA 为像面, OBJ 为物面, $\tau = 0.6$ 为光学系统的透过率系数, $\xi = 0.38 \text{ lm/w}$, 为 650 nm 半导体激光器的发光效率。光学系统的横向放大率为 $\beta = \frac{nl'}{n'l} = \frac{y'}{y}$, 空气中物面和像面的折射率可看作 $n' = n = 1$, 则 $\beta = \frac{l'}{l} = \frac{y'}{y} \approx \frac{mx}{|AB|}$ 。像元个数 $m = 7 450$, 像元尺寸为 $x = 4.7 \mu\text{m}$, 则 $\beta = 1.750 75$ 。由于探测器长度已经确定,为了使物面在测量范围内的像点均能成像于探测器,在光学系统设计时,应使系统的横向放大率小于 1.750 75。考虑到光学系统的横向放大率较大时更容易观察成像信息,所以选择光学系统的横向放大率 $\beta = 1.5$ (此处不考虑符号法则,只看大小变化)。

将所取参数值代入公式 (5) ~ (12), 可得:

$$\begin{cases} \cos\theta = 0.896 2 \\ \theta = 26.333 9^\circ \\ l = 44.631 7 \text{ mm} \end{cases}. \quad (13)$$

由公式 (3)、(4) 以及 $\beta = 1.5$ 可得:

$$\begin{cases} |MO| = |MP| \tan\theta = 19.79 \text{ mm} \\ f' = \frac{3}{5}l = 26.779 \text{ mm} \\ \varphi = 18.26^\circ \end{cases}. \quad (14)$$

激光测量的三角形关系如图 5 所示,经计算得: $|MA| = 30 \text{ mm}$, $\theta = 26.33^\circ$, $|OA| =$

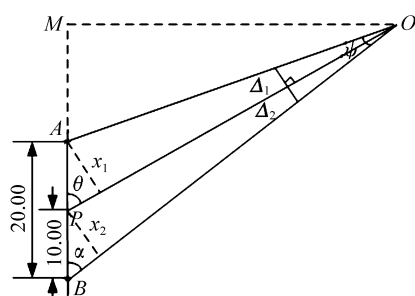


图5 激光测量三角形关系

Fig.5 Triangulation relationship of laser measurement

44.6317mm 根据三角形关系, 可得:

$$\begin{cases} |OB| = 53.77 \text{ mm} \\ \alpha = 21.61^\circ \\ x_1 = 4.436 \text{ mm}, x_2 = 3.683 \text{ mm} \\ \Delta_1 = 1.243 \text{ mm}, \Delta_2 = 1.047 \text{ mm} \\ \Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 2.293 \text{ mm} \end{cases} \quad (15)$$

则孔径的大小为: $\Delta = 2.293 \text{ mm}$, 视场角为 $\psi = 11.8^\circ$ 。

4 传感探头光学系统设计

4.1 结构设计

激光位移传感器具有小型化、测量便捷、使用范围广的特点。复杂的光学结构不仅会导致激光位移传感器光学系统透过率严重减小, 而且增加

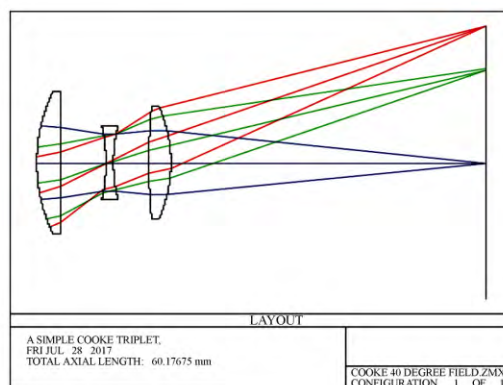


图6 库克三片式光学结构

Fig.6 Cooke Triplet system

了传感器的体积与装调难度。因此, 传感器探头光学系统的设计不宜太复杂, 在设计传感器探头光学系统的时候, 选取3~4片式为最佳的设计结构。

如图6所示, 库克三片组由两片凸透镜(冕牌玻璃)和一片凹透镜(火石玻璃)组成, 其成像性能优良, 光学结构简单、可使用视场大。由于光阑设置在中间, 使得前后元件具有合理的对称度。

为了增大系统的相对孔径, 提高系统的 $F/\#$ (系统焦距与通光孔径的比值), 对库克三片式透镜组进行拆分改进^[40], 将最前面的正透镜拆分成两片正透镜。系统设计初始结构参数如表3所示, 最后设计系统结构如图7所示。输出的性能参数如图8~图12所示。

表3 结构设计参数表

Tab.3 Design data of optical system

Surf: Type(Standard)	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Infinity	Infinity		Infinity
1	Infinity	9.180		4.958
2	6.594	2.052	H-BAK6	3.879
3	-83.870	0.013		3.658
4	7.518	1.080	H-BAK6	3.202
5	12.836	1.083		2.841
6	-20.960	0.689	ZF1	2.370
7	4.259	0.726		1.945
STO		9.525		1.899
9	109.876	2.050	H-BAK6	3.222
10	-11.405	12.058		3.344
IMA	Infinity	-		2.783

由图 8 可以看出: 在最大视场角时, 系统输出的 RMS 值为 $3.226 \mu\text{m}$, 从像面上的光斑与艾里

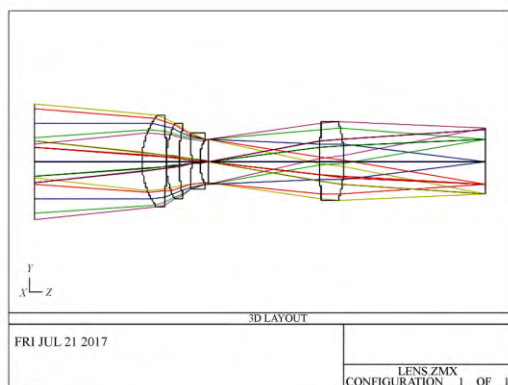


图 7 系统输出结构图

Fig.7 Layout structure of optical system

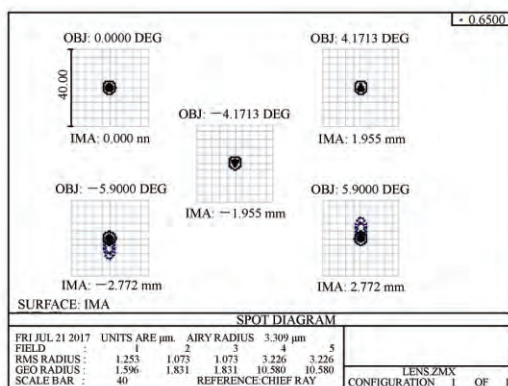


图 8 系统光斑输出图

Fig.8 Output spot diagram of optical system

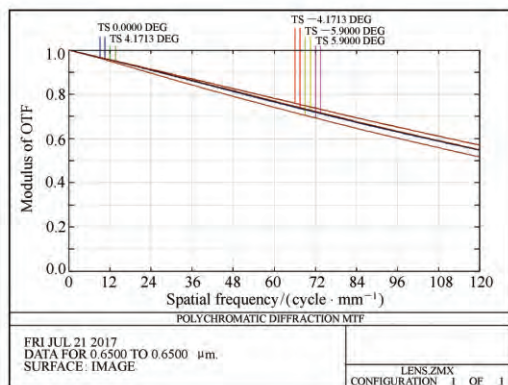


图 9 系统传递函数输出图

Fig.9 Diffraction MTF Layout

斑的分布可以看出成像光斑主要集中在艾里斑区域内, 光斑 RMS 值小于所选 TCD1707 型号的 CCD 像元尺寸。由图 9 中 MTF 传递函数曲线可看出空间频率 120 lp/mm 范围内的 MTF 值高于 0.5 接近衍射极限。成像光学系统的光线扇形图

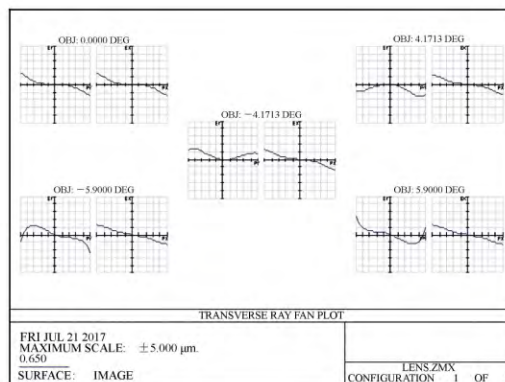


图 10 扇形图

Fig.10 Ray Fan of system

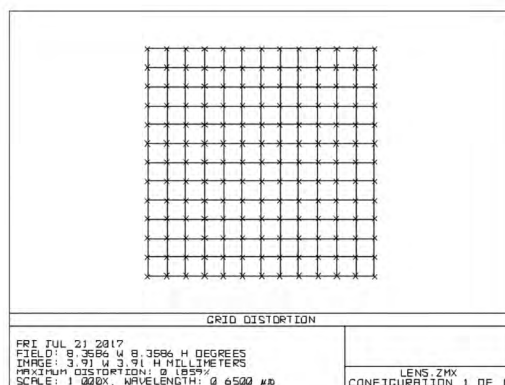


图 11 畸变图

Fig.11 Grid Distortion

如图 10 所示, 像差范围在 $\pm 5 \mu\text{m}$ 之间, 并且扇形曲线波动平缓, 无过多的波浪型线。表明该系统的球差控制在很小范围内, 系统离焦程度小, 高级球差小。由图 11 可以看出, 系统畸变在 0.185 9% 内, 控制在很小范围内。模拟成像如图 12 所示, 表明光学系统能够清晰成像。

综上所述, 这种 4 片式光学系统成像光斑质量好, 能够很好地采集物面位移信息。其结构简单, 也符合激光位移传感器传感探头对微小型尺寸的要求。



图12 模拟图像

Fig.12 Simulation image

4.2 光学系统成像质量对传感器精确度的影响分析

根据图2 激光位移传感器工作原理图和光学三角法理论计算分析可得: 所测量的位移量 y 与探测器上成像光斑移动大小 x 之间的关系为:

$$y = \frac{x(l - f') \sin \varphi}{f' \sin \theta \mp x(1 - \frac{f'}{l}) \sin(\theta + \varphi)} \quad (16)$$

其中, $\mp$ 表示的是测量物体表面方向。由公式(3)、(16) 联合计算可得:

$$y = \frac{x \sin \varphi}{\frac{l'}{l} \sin \theta \mp \frac{x}{l} \sin(\theta + \varphi)} \quad (17)$$

根据分析可知: $\frac{x}{l} < \frac{l'}{l}$ $\beta = \frac{l'}{l}$ 则有:

$$\varepsilon = y \approx \frac{x \sin \varphi}{\beta \sin \theta} \quad (18)$$

θ 即为激光位移传感器的测量精确度。

对传统小孔成像、单透镜及本文设计的光学系统进行精度分析 结果如下:

①采用传统小孔成像方法时, 半导体激光器整形后光束直径 $d = 105 \mu\text{m}$, 物面距离 $l = 44.6317 \text{ mm}$, 像面距离 $l' = 64.9476 \text{ mm}$; 通过三角形法计算可得光斑直径大小 $d' = 0.1575 \text{ mm}$, 大约相当于 TCD1707D 型号的 CCD 探测器 34 个像元的大小, 传感器测量精度 ε_1 为:

$$\varepsilon_1 \approx \frac{4.7 \times 34 \times \sin 18.26^\circ}{1.5 \times \sin 26.3339^\circ} = 75.3 \mu\text{m}.$$

②采用单透镜成像时, 控制镜头的孔径、焦距

与本文设计的光学系统一致。优化后成像质量较差, 最大弥散斑半径为 $7.576 \mu\text{m}$ 。如图13 所示, 光斑直径大小近似等于探测器 4 个像元大小, 传感器测量精度为:

$$\varepsilon_2 \approx \frac{4.7 \times 4 \times \sin 18.26^\circ}{1.5 \times \sin 26.3339^\circ} = 8.9 \mu\text{m}.$$

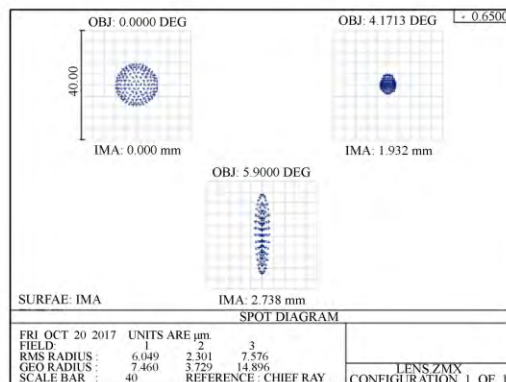


图13 单透镜成像光斑

Fig.13 Spot Diagram of single lens

③采用本文设计的微小型光学系统, 成像光斑半径大小为 $3.226 \mu\text{m}$, 光斑直径大小近似等于探测器 2 个像元的大小, 此时传感器测量精度为:

$$\varepsilon_3 \approx \frac{4.7 \times 2 \times \sin 18.26^\circ}{1.5 \times \sin 26.3339^\circ} = 4.5 \mu\text{m}.$$

通过对①~③三种不同的光学成像系统对传感器测量精确度影响的对比分析可得, 采用本文设计的四片式微小型光学系统, 传感器测量精确度最高, 测量精度为 $4.5 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

本文设计了一种激光位移传感器传感探头微小型光学系统。根据系统的成像需求, 约束了孔径光阑的大小、焦距、成像物距、像差等多个变化参量, 将光学系统像差控制在很小范围内, 完成了光学系统的优化设计。光学系统输出的成像光斑半径低于 $3.3 \mu\text{m}$, 在空间分辨率小于 120 lp/mm 时, 传递函数 MTF 高于 0.5, 系统的畸变量小于 0.186 9%, 光学扇形图的最大波动范围为 $\pm 5 \mu\text{m}$ 。根据设计的光学系统成像指标, 分析其对传感器测量精度的影响可得, 传感器测量精确度优于 $5 \mu\text{m}$, 比传统的小孔成像系统和单透镜成像系统测

量的精度高,满足激光位移传感器测量系统对光学系统成像质量的要求。

参考文献:

- [1] 庄松林,肖中汉.我国仪器仪表与测量控制科技的发展[J].自动化仪表,2009,30(5):1-6.
ZHUANG S L, XIAO ZH H. Development of science and technology in this instrumentation, measurement and control area of China[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 2009, 30(5): 1-6.(in Chinese)
- [2] 李兵,孙彬,陈磊,等.激光位移传感器在自由曲面测量中的应用[J].光学精密工程,2015,23(7):1939-1947.
LI B, SUN B, CHEN L, et al.. Application of laser displacement sensor to free-form surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.* 2015, 23(7): 1939-1947.(in Chinese)
- [3] IBARAKI S, KITAGAWA Y, KIMURA Y, et al.. On the limitation of dual-view triangulation in reducing the measurement error induced by the speckle noise in scanning operations[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017, 88(1-4): 731-737.
- [4] LEE R T, SHIOU F J. Multi-beam laser probe for measuring position and orientation of freeform surface[J]. *Measurement*, 2011, 44(1): 1-10.
- [5] 杨博,张加宏,李敏,等.基于ARM的多通道数据采集系统[J].仪表技术与传感器,2015(2):104-107.
YANG B, ZHANG J H, LI M, et al.. Design of multi-channel data acquisition system based on ARM[J]. *Instrument Technique and Sensor* 2015(2): 104-107.(in Chinese)
- [6] 陈振娇,徐新宇,张猛华.EDMA数据传输方式在视频图像处理系统中的应用[J].电子与封装,2015(4):28-31.
CHEN ZH J, XU X Y, ZHANG M H, et al.. Data transfers by EDMA in video image processing system[J]. *Electronics & Packaging* 2015(4): 28-31.(in Chinese)
- [7] 陈祎平.基于嵌入式操作系统的移动终端图像处理系统[D].南京:南京邮电大学,2016.
CHEN Y P. Image processing system of mobile terminal based on embedded operating system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications 2016.(in Chinese)
- [8] 李豫东,汪波,郭旗,等.CCD与CMOS图像传感器辐射效应测试系统[J].光学精密工程,2013,21(11):2778-2784.
LI Y D, WANG B, GUO Q, et al.. Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors[J]. *Opt. Precision Eng.* 2013, 21(11): 2778-2784.(in Chinese)
- [9] 姚立斌.低照度CMOS图像传感器技术[J].红外技术,2013,35(3):125-132.
YAO L B. Low-light-level CMOS image sensor technique[J]. *Infrared Technology* 2013, 35(3): 125-132.(in Chinese)
- [10] 罗通顶,李斌康,郭明安,等.科学级CCD远程图像采集系统[J].光学精密工程,2013,21(2):496-502.
LUO T D, LI B K, GUO M A, et al.. Remote image acquisition system with scientific grade CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 496-502.(in Chinese)
- [11] 陈骥,王鑫,曹久大,等.高速CCD激光位移传感器[J].光学精密工程,2008,16(4):611-616.
CHEN J, WANG X, CAO J D, et al.. Development of high-speed CCD laser displacement sensor[J]. *Opt. Precision Eng.* 2008, 16(4): 611-616.(in Chinese)
- [12] 郝继贵,陈浩,薛彬.基于位置敏感探测器的激光位移传感器小波优化方法[J].中国激光,2013(3):185-191.
ZHU J G, CHEN H, XUE B. Wavelet optimization method of laser displacement sensor based on position sensitive detector[J]. *Chinese Journal of Lasers* 2013(3): 185-191.(in Chinese)
- [13] 袁江,邱自学,邵建新.集成激光位移传感器和编码器的曲面仿形测头研究[J].仪器仪表学报,2010,31(11):2488-2493.
YUAN J, QIU Z X, SHAO J X. Research on free-form surface measurement system with integrated laser displacement sensor and linear encoder[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 2010, 31(11): 2488-2493.(in Chinese)
- [14] 马明建.数据采集与处理技术[M].第2版.西安:西安交通大学出版社,2005.
MA M J. *Data Sampling and Processing Technology* [M]. The Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University press, 2005.(in Chinese)
- [15] 王庆有.图像传感器应用技术[M].第2版.电子工业出版社,2013.
WANG Q Y. *Image Sensor Application Technology* [J]. The Second Edition. Electronic Industry Press 2013.(in Chinese)
- [16] 莫仁芸,朱万彬,钟俊,等.激光位移传感器的光学系统设计[J].中国光学,2010,3(5):513-517.

- MO R Y, ZHU W B, ZHONG J *et al.*. Optical design of laser displacement [J]. *Chinese Optics* 2010 3(5): 513-517. (in Chinese)
- [17] 孙浩, 薛丹丹, 韩焱. 基于小孔光学系统与面阵 CCD 的激光位移传感器系统设计 [J]. 应用光学, 2012 33(6): 1152-1155.
- SUN H, XUE D D, HAN Y. Laser displacement sensor system based on pinhole optical system and array CCD [J]. *Journal of Applied Optics* 2012 33(6): 1152-1155. (in Chinese)
- [18] 许文海, 吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计 [J]. 光学 精密工程, 2012 20(7): 1603-1610.
- XU W H, WU H D. Design of ultra-high resolution CCD image systems [J]. *Opt. Precision Eng.* 2012 20(7): 1603-1610. (in Chinese)
- [19] 王会峰. 一种成像测量图像径向几何畸变的校正方法 [J]. 应用光学, 2010 31(1): 55-59.
- WANG H F. Radial geometrical distortion correction in image measurement system [J]. *Journal of Applied Optics* 2010, 31(1): 55-59. (in Chinese)
- [20] SUN H, HU M, RONG Q *et al.* High sensitivity optical fiber temperature sensor based on the temperature cross-sensitivity feature of RI-sensitive device [J]. *Optics Communications* 2014 323(14): 28-31.
- [21] 孙彬, 李兵. 一种量化的激光位移传感器倾角误差补偿模型 [J]. 仪器仪表学报, 2015 36(5): 996-1004.
- SUN B, LI B. A quantitative error compensation model of the inclination angle of the laser displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument* 2015 36(5): 996-1004. (in Chinese)
- [22] LOMBARDI V, MARZULLI T, PAPPALLETTERE C *et al.* A time-of-scan laser triangulation technique for distance measurements [J]. *Optics & Lasers in Engineering* 2003 39(2): 247-254.
- [23] 李冬冬, 王永强, 许增朴, 等. 激光三角法在物面倾斜时的测量误差研究 [J]. 传感器与微系统, 2015(2): 28-29.
- LI D D, WANG Y Q, XU Z P *et al.* Research on measurement error while workpiece surface is inclining by laser triangulation [J]. *Transducer and Microsystem Technologies* 2015(2): 28-29. (in Chinese)
- [24] ALARURI S D. Excimer and Nd: YAG laser-based systems incorporating air-cooled fiber-optic probes for turbine engine high-temperature fluorescence intensity imaging and fluorescence decay lifetime thermometry measurements [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 2016 127(1): 246-249.
- [25] 郝明明, 刘云, 王彪, 等. 半导体激光鼓膜造孔术的光学系统设计 [J]. 光学 精密工程, 2012 20(2): 247-255.
- HAO M M, LIU Y, WANG B *et al.* Design of optical system for diode laser myringotomy [J]. *Opt. Precision Eng.* 2012, 20(2): 247-255. (in Chinese)
- [26] 陈国, 赵长明, 纪荣祎, 等. 基于 ZEMAX 的半导体激光准直仿真设计 [J]. 激光技术, 2012 36(3): 318-321.
- CHEN G, ZHAO CH M, JI R W *et al.* Simulation design of semiconductor laser collimation based on ZEMAX [J]. *Laser Technology* 2012 36(3): 318-321. (in Chinese)
- [27] 聂建华, 王峻宁. 基于 ZEMAX 的半导体激光准直镜设计方法研究 [J]. 红外, 2012 33(3): 22-26.
- NIE J H, WANG J N. Research on semiconductor collimator design based on ZEMAX [J]. *Infrared* 2012 33(3): 22-26. (in Chinese)
- [28] 宋延嵩, 安岩, 李欣航, 等. 激光准直系统中的杂散光分析与抑制 [J]. 中国光学, 2016 9(6): 663-670.
- SONG Y S, AN Y, LI X H *et al.* Analyzing and suppressing of stray light in laser collimating system [J]. *Chinese Optics*, 2016 9(6): 663-670. (in Chinese)
- [29] HOEHLER M S, SMITH C M. Application of blue laser triangulation sensors for displacement measurement through fire [J]. *Measurement Science & Technology* 2016 27(11): 115201.
- [30] 王少清, 庄葆华. 基于朗伯定律重建光学三角法测位移原理公式 [J]. 光学学报, 1996(12): 1802-1808.
- WANG Z Q, ZHUANG B H. The principle formula of the optical triangulation method is reconstructed base on lambert's law [J]. *Acta Optica Sinica* 1996(12): 1802-1808. (in Chinese)
- [31] 程强, 王志超, 黄志锋, 等. 余弦粗糙面辐射特性数值模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2011 32(12): 2096-2099.
- CHENG Q, WANG ZH CH, HUANG ZH F *et al.* Numerical simulation of radiation property of cosine rough surface [J]. *Journal of Engineering Thermophysics* 2011 32(12): 2096-2099. (in Chinese)
- [32] 卢小丰, 原遵东. 孔径光阑对辐射源尺寸效应 (SSE) 的影响研究 [J]. 计量技术, 2010(7): 3-5.
- LU X F, YUAN Z D. Study on the size-of-source effect due to the aperture of pyrometers [J]. *Measurement Technique*,

- 2010(7) : 3-5.(in Chinese)
- [33] 欧忠敏,郭海科,金海鹰,等.应用旋转 Scheimpflug 照相系统对角膜参数的研究[J].中华实验眼科杂志,2010,28(5) : 450-453.
OU M ZH, GUO H K, JIN H Y *et al.*. Investigation of corneal parameters using rotating Scheimpflug camera[J]. *Chinese Journal of Experimental Ophthalmology* 2010, 28(5) : 450-453.(in Chinese)
- [34] NADERAN M, SHOAR S, NADERAN M *et al.*. Comparison of corneal measurements in keratoconic eyes using rotating Scheimpflug camera and scanning-slit topography[J]. *International Journal of Ophthalmology* 2015, 8(2) : 275-280.
- [35] PENNA R R, DE S U, CATALANO M *et al.*. Placido disk-based topography versus high-resolution rotating Scheimpflug camera for corneal power measurements in keratoconic and post-LASIK eyes: reliability and agreement[J]. *International Journal of Ophthalmology* 2017, 10(3) : 453-460.
- [36] 丁小昆,刘铁根,宋殿友.激光光斑质量对基于 PSD 的激光三角法长时间连续测量精度的影响[J].中国激光,2012,39(2) : 165-171.
DING X K, LIU T G, SONG D Y *et al.*. Impact of accuracy of laser spot quality in laser triangulation long-term continuous measuring based on PSD[J]. *Chinese Journal of Lasers* 2012, 39(2) : 165-171.(in Chinese)
- [37] 张海庄,姚梅,雷萍,等.远场激光光斑图像处理研究方法研究[J].激光技术,2013,37(4) : 460-463.
ZHANG H ZH, YAO M, LEI P *et al.*. Research of image processing method of far field laser spots[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4) : 460-463.(in Chinese)
- [38] 阎杰,鲁拥华,王沛,等.径向偏振光聚焦光斑研究[J].光学学报,2010,30(12) : 3597-3603.
YAN J, LU Y H, WANG P *et al.*. Study of focal spot of radially polarized beam[J]. *Acta Optica Sinica* 2010, 30(12) : 3597-3603.(in Chinese)
- [39] MEI Q, GAO J, LIN H *et al.*. Structure light telecentric stereoscopic vision 3D measurement system based on Scheimpflug condition[J]. *Optics & Lasers in Engineering* 2016, 86: 83-91.
- [40] ALARURI S D. f/1.6 diffraction-limited air-spaced Cooke triplet photographic lens designs for MWIR and LWIR imaging applications: geometrical optics performance comparison between Ge-ZnSe-Ge and Si-Ge-Si triplet designs using Zemax[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics* 2016, 127(1) : 254-258.

作者简介:



张爽(1990—),女,吉林白城人,硕士研究生,主要从事光学设计、光学测量、激光应用等方面的研究。E-mail: zhangshuang_ciomp@163.com



朱万彬(1963—),男,吉林长春人,本科,副研究员,硕士生导师,1987年于长春理工大学获得学士学位,现为中科院长春光机所应用光学国家重点实验室副研究员,主要从事光学测量方面的研究。E-mail: wanbinzhu@163.com



李健(1991—),男,山西忻州人,硕士研究生,主要从事光学设计、图像处理等方面的研究。E-mail: tuolaji4596@outlook.com



鲁秀娥(1963—),女,吉林长春人,研究员,2010年于长春理工大学获得硕士学位,现为长春相干光学机电技术有限公司研究员,主要从事光机电一体化方面的研究。E-mail: luxie63@163.com