

大量程激光位移传感器的成像系统设计

沈本兰 徐先峰 姚磊 栾守成 王红梅

Design of imaging system for wide-range laser displacement sensor

SHEN Benlan, XU Xianfeng, YAO Lei, LUAN Shoucheng, WANG Hongmei

引用本文:

沈本兰,徐先峰,姚磊,等.大量程激光位移传感器的成像系统设计[J].*应用光学*,2022,43(3):386–391. DOI: 10.5768/JAO202243.0301002

SHEN Benlan, XU Xianfeng, YAO Lei, et al. Design of imaging system for wide-range laser displacement sensor[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(3): 386–391. DOI: 10.5768/JAO202243.0301002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[小型化宽谱段星敏感器光学系统设计](#)

Optical system of star sensor with miniaturization and wide spectral band

应用光学. 2021, 42(5): 782–789 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501004>

[激光三角法中工作角对系统灵敏度的影响](#)

Effect of working angle on system sensitivity in laser triangulation

应用光学. 2017, 38(5): 826–830 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0507001>

[基于曲面传感器的大孔径1300万像素手机镜头设计](#)

Optical design of 13-megapixel mobile phone lens with large aperture based on curved sensor

应用光学. 2018, 39(6): 902–907 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605005>

[用于激光定向红外对抗的光学系统设计](#)

Optical system design for laser directional infrared countermeasure

应用光学. 2021, 42(3): 398–403 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301004>

[基于最小二乘法多项式拟合三角测量模型研究](#)

Laser triangulation measurement model based on least square polynomial fitting method

应用光学. 2019, 40(5): 853–858 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0503003>

[一种双波段成像系统的红外通道杂散光分析](#)

Stray light analysis on infrared channel of dual-band imaging system

应用光学. 2018, 39(2): 262–267 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0206002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号:1002-2082(2022)03-0386-06

大量程激光位移传感器的成像系统设计

沈本兰^{1,2},徐先峰^{2,4},姚 磊³,栾守成³,王红梅³

(1. 山东交通学院 轨道交通学院, 山东 济南 250357; 2. 西安市智慧高速公路信息融合与控制重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 济南重工集团有限公司, 山东 济南 250109; 4. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了解决目前国内自主研发的激光位移传感器基准工作距离短和测量范围小的问题,设计了一种适用于远距离测量的大量程激光位移传感器成像光学系统。基于激光三角测量原理,结合具体使用要求计算了大量程激光位移传感器的性能指标和成像光学系统的设计参数。选择5片式透镜结构作为系统的初始结构,利用光学设计软件对大量程激光位移传感器成像光学系统进行了仿真,完成了系统优化和性能分析,实现了基准工作距离为1 000 mm、量程为±500 mm、分辨率为0.4 mm 的大量程激光位移传感器成像系统设计。结果表明,在测量范围±500 mm 内,系统均可以满足成像质量要求。该激光位移传感器成像系统具有工作距离远、测量量程大、结构简单的特点,可满足1 000 mm 远距离处大量程范围的测量使用要求。

关键词:激光位移传感器;激光三角测量;大量程;成像系统;光学设计

中图分类号:TN249

文献标志码:A

DOI: [10.5768/JAO202243.0301002](https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301002)

Design of imaging system for wide-range laser displacement sensor

SHEN Benlan^{1,2}, XU Xianfeng^{2,4}, YAO Lei³, LUAN Shoucheng³, WANG Hongmei³

(1. School of Rail Transportation, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Intelligent Expressway Information Fusion and Control, Xi'an 710064, China; 3. Jinan Heavy Industries Group Co.,Ltd., Jinan 250109, China; 4. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to solve the problems of short reference working distance and small measuring range of laser displacement sensors developed independently in China at present, an imaging optical system for a wide-range laser displacement sensor was designed, which was suitable for the long distance measurement. Based on the laser triangulation principle, combined with specific application requirements, the performance indicators of a wide-range laser displacement sensor and parameters of an imaging optical system were calculated. The five-piece lens structure was selected as the initial structure of the system, and the imaging optical system of wide-range laser displacement sensor was designed with optical design software. The optimal design and performance analysis of the system were completed, and the system with reference working distance of 1 000 mm, measuring range of ±500 mm and resolution of 0.4 mm was developed. The simulation results show that the system can achieve good imaging quality within the measuring range of ±500 mm. The proposed laser displacement sensor imaging system has the advantages of long working distance, wide measuring range and simple structure, which can meet the requirements of wide-range measurement at 1 000 mm.

Key words: laser displacement sensor; laser triangulation; wide range; imaging system; optical design

收稿日期:2021-11-30; 修回日期:2022-03-30

基金项目:山东省重点研发计划项目(2019JZZY010428);长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102321503, 300102321501)

作者简介:沈本兰(1988—),女,博士,讲师,主要从事光学设计与光电检测、光电子工程与智能感知技术研究工作。

E-mail: shenblwork@163.com

通信作者:徐先峰(1982—),男,博士,副教授,主要从事信号处理、深度学习理论及应用、智能电网研究工作。

E-mail: xxf_chd@163.com

引言

激光位移传感器是一种高可靠性的非接触式精确测量仪器, 可实现对距离、位移、圆径、外形尺寸和表面轮廓等参数^[1-4] 的实时测量, 被广泛地应用于航空航天^[5]、工业生产与制造^[6]、轨道交通^[7-9] 等领域。激光位移传感器的基本原理是激光三角测量原理, 它利用一束入射激光束、图像传感器 (charge-coupled device, CCD 或 complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 或位置敏感器 (position sensitive detector, PSD) 与被测物体表面构成一个三角形光路, 根据三角几何关系可计算得到物体表面位移信息^[10-11]。在实际测量中, 基准工作距离、量程范围、测量精度是衡量激光位移传感器性能的重要指标。为了提高激光位移传感器的测量精度, 张爽等人改进库克 3 片式透镜结构^[12], 设计了一种测量范围在 $40 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ 内测量精度优于 $5 \mu\text{m}$ 的 4 片式传感器微小型光学系统; 周宇等人设计了一种量程为 $\pm 25 \text{ mm}$ 的激光位移传感器成像光学系统^[13], 其工作距离为 100 mm , 测量分辨率为 $20 \mu\text{m}$, 线性度测试结果为 $\pm 0.28\%$; 针对复杂光电噪声干扰下 PSD 的非线性输出特性对 PSD 激光位移传感器测量精度的影响, 崔昊等人提出了一种滤除噪声干扰的多元自适应卡尔曼预处理算法, 并构建了非均匀 B 样条曲线拟合模型^[14], 实现了传感器定位精度为 0.7% 的高精度标定; 基于双目视觉技术, 马浩然等人提出了可同时对机器人末端多个激光位移传感器标定的方法^[15], 实现了标定后传感器测量精度范围为 $0.0386 \text{ mm} \pm 0.0258 \text{ mm}$ 。这些研究都是致力于提高激光位移传感器在较短工作距离范围内的测量精度, 但是这些激光位移传感器无法满足 1 m 级远距离位置处 $\pm 500 \text{ mm}$ 大量程范围的位移测量。

针对远距离位置处大量程使用需求, 本文采用 5 片式球面透镜简单结构, 设计了一种大量程激光位移传感器的成像光学系统。完成了系统的优化设计与成像质量分析, 为用于远距离测量的大量程激光位移传感器的产品化提供了重要的理论依据。

1 激光位移传感器的工作原理

基于激光三角测量原理, 根据入射激光束的方向与被测物体表面法线方向的角度关系, 可将激

光位移传感器分为 2 种类型, 即斜入射式和直入射式^[10]。其中, 斜入射式激光位移传感器的入射激光束方向与被测物体表面法线方向之间会形成一个不为零的夹角, 其成像光学系统所接收的光束为被测物体表面对入射激光束的反射光束; 而直入射式激光位移传感器的入射激光束方向与被测物体表面法线方向之间的夹角则为零, 其成像光学系统所接收的光束为被测物体表面对入射激光束的散射光束; 在 2 种类型的激光位移传感器中, 反射光束和散射光束经由传感器的成像光学系统在图像平面上被图像传感器或 PSD 所接收。在被测物体发生移动或其表面比较复杂的测量应用中, 直入射式激光位移传感器具有更好的环境适应性和测量稳定性。因此, 本文选择直入射式激光位移传感器, 针对远工作距离处大量程范围内的位移测量使用需求, 基于激光三角测量原理, 计算了大量程激光位移传感器的性能指标和成像光学系统的设计参数, 完成了传感器成像光学系统的优化设计和像质分析, 实现了大量程激光位移传感器的仿真设计。

图 1 为直入射式激光位移传感器结构示意图。传感器是由线激光发射系统、成像系统和图像传感器 (CMOS) 组成。线激光发射系统发射出 1 束线激光束, 该线激光束垂直入射到被测物体表面, 形成均匀的线激光, 在物体表面产生的漫反射光束经由成像系统后汇聚在 CMOS 上, 得到被测物体表面激光束入射点的像点。图 1 中线激光发射系统在测量范围 $\pm 500 \text{ mm}$ 内可形成均匀的线激光。图 1 中 D 为基准工作距离, 其大小为沿激光束入射方向成像系统光学中心与基准平面之间的距离, 要求 $D = 1000 \text{ mm}$ 。 y_1 、 y_2 为传感器的测量量程, 以基准平面为原点, 规定激光束入射方向为正, 则有 $y_1 = 500 \text{ mm}$ 、 $y_2 = -500 \text{ mm}$, 即传感器的测量量程范围为 $\pm 500 \text{ mm}$ 。图 1 中成像系统是由滤光片、成像镜组和窗口玻璃组成, 成像镜组采用 5 片球面透镜结构形式, 成像系统的焦距为 f ; θ_1 、 θ_2 分别为成像系统光轴与线激光束入射方向的夹角和成像系统光轴与 CMOS 光敏面的夹角; l 为成像系统中基准平面与入射激光束交点 O_2 的物距; l' 为 l 对应的像距; y'_1 、 y'_2 分别为 y_1 、 y_2 的像高。如图 1 所示, 在激光位移传感器中, θ_1 和 θ_2 的大小要保证量程 $\pm 500 \text{ mm}$ 内被测物体能够准确且清晰地成

像在 CMOS 光敏面上, 即成像系统的物像关系要满足 Scheimpflug^[16-18]定律, 即线激光发射系统的入射激光束、成像系统的镜像对称轴线、CMOS 光敏面上 y_1' 或 y_2' 对应的像所确定的直线三者相交于一点, 其交点为 O_1 。

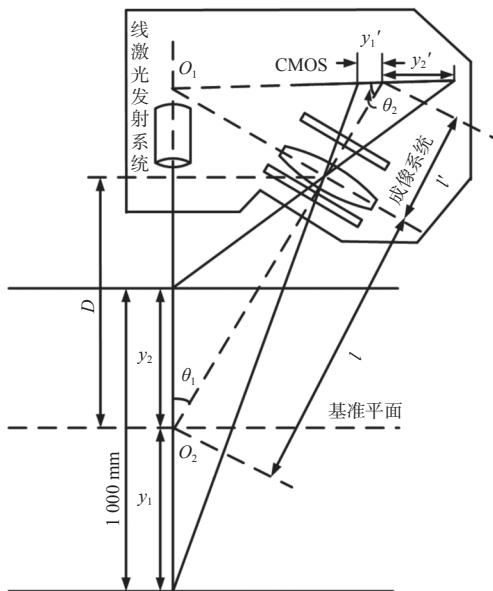


图 1 直入射式激光位移传感器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of direct-incident laser displacement sensor

如图 1 所示, 根据几何关系可得成像系统的物距为

$$l = \frac{D}{\cos \theta_1} \quad (1)$$

根据 Scheimpflug 定律可得几何关系:

$$l \tan \theta_1 = l' \tan \theta_2 \quad (2)$$

在成像系统中, 根据高斯公式^[19]可得:

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

根据(2)式和(3)式可得像距 l' 和夹角 θ_2 分别为

$$l' = \frac{fl}{l-f} \quad (4)$$

$$\theta_2 = \arctan \left(\frac{(l-f) \tan \theta_1}{f} \right) \quad (5)$$

另外, 由三角形相似可得:

$$\frac{y_1 \sin \theta_1}{l+y_1 \cos \theta_1} = \frac{y_1' \sin \theta_2}{l'-y_1' \cos \theta_2} \quad (6)$$

整理得到:

$$y_1 = \frac{l y_1' \sin \theta_2}{l' \sin \theta_1 - y_1' \sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (7)$$

(7)式为激光三角测量原理的物体表面高度 y_1 的理论计算公式。同理可得 y_2 的理论计算公式:

$$y_2 = \frac{l y_2' \sin \theta_2}{l' \sin \theta_1 + y_2' \sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (8)$$

在激光位移传感器中, 根据几何光学理论可知, 成像系统的空间分辨率为图像传感器相邻像元中心之间的间距 p 所对应的被测物体表面最小高度尺寸 σ , 该最小高度尺寸为传感器的分辨率。由成像系统的物像关系(7)式或(8)式可得激光位移传感器的分辨率大小为

$$\sigma = \frac{l p \sin \theta_2}{l' \sin \theta_1 - p \sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (9)$$

式中, p 的数值大小为所选用 CMOS 像元尺寸。根据(9)式可知, 当激光位移传感器的三角测量结构和成像系统光学参数确定后, CMOS 像元尺寸是决定传感器分辨能力的主要因素。将(1)式、(4)式和(5)式代入(9)式可得激光位移传感器的分辨率 σ 。其中, σ 数值越小, 表示激光位移传感器的分辨能力越高。

2 成像光学系统参数的选择

由上述内容可知, 激光位移传感器的基准工作距离为 1 000 mm, 测量范围为 ± 500 mm, 即有 $D = 1 000$ mm、 $y_1 = 500$ mm、 $y_2 = -500$ mm。基于理想漫反射模型, 激光光束垂直入射到被测物体表面产生的散射光分布呈椭球型^[19], 所以成像系统光轴与线激光束入射方向的夹角 θ_1 越小, 由成像系统所接收的光线强度越大; 且根据(1)式可知, 当成像系统确定时, 基准工作距离 D 越大, 要求 θ_1 越小。根据(9)式可知, 当 θ_1 越小时, σ 数值越大, 即传感器的分辨能力越差。为了综合考虑传感器的测量范围和分辨率要求, 选择 $\theta_1 = 9^\circ$, 成像光学系统的物距为 $l = 1 012.5$ mm; 为了保证在基准工作距离 $D = 1 000$ mm 处的分辨率, 选择系统的焦距为 $f = 70.2$ mm, 则系统的像距为 $l' = 75.4$ mm, 系统光轴与 CMOS 光敏面的夹角为 $\theta_2 = 64.8^\circ$ 。

为了满足线激光三角测量要求, 本文选用面阵 CMOS(PYTHON 12K)图像传感器, 像素阵列为 $4 096 \times 3 072$, 像元尺寸为 $4.5 \mu\text{m} \times 4.5 \mu\text{m}$, 即有 $p = 4.5 \mu\text{m}$ 。根据(9)式和上述各参数的数值大小, 计算可得传感器的分辨率近似为 $\sigma = 0.4$ mm。如图 1 所示, 在 CMOS 光敏面上规定与 y_1 对应的成像方向

为正, 根据(8)式和(9)式, 计算可得 CMOS 光敏面上成像范围为 $[-13.53 \text{ mm}, 4.22 \text{ mm}]$ 。为了使量程范围 $\pm 500 \text{ mm}$ 内被测物体表面不同高度位置点经由成像系统后能够清晰地成像于 CMOS 光敏面, 成像光学系统的视场为 $\pm 78.5 \text{ mm}$, 入瞳直径为 12.5 mm , 所选用的激光光源波长为 $650 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ 。

3 成像光学系统设计

3.1 系统光学设计

为了保证全视场 $\pm 78.5 \text{ mm}$ 内成像光学系统的成像效果, 本系统选择在库克 3 片式透镜结构基础上增加 2 片透镜, 即选择 5 片式透镜结构作为系统的初始结构进行系统的优化设计。在光学设计软件中, 按照上述要求设置系统参数, 即成像系统的入瞳直径为 12.5 mm , 视场为 $\pm 78.5 \text{ mm}$, 波长为 $650 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, 系统的物面与光轴之间的倾斜角 θ_1 为 9° , 系统的像面与光轴之间的倾斜角 θ_2 为 64.8° 。

最终优化设计后的系统二维结构如图 2 所示。图 2(a) 为系统二维结构全局图, 由于系统的视场范围和基准物距都较大, 系统从物面到像面整体尺寸较大, 在图 2(a) 中无法清晰地展示系统成像镜组的组成; 图 2(b) 给出了系统二维结构局部图, 系统中第 1 片和第 7 片玻璃分别为滤光片和窗口玻璃, 中间 5 片球面透镜为成像镜组。根据系统二维结构图可知, 在量程范围内不同视场的散射激光束都能较好地汇聚到系统的成像平面上。系统最终的结构参数如表 1 所示。

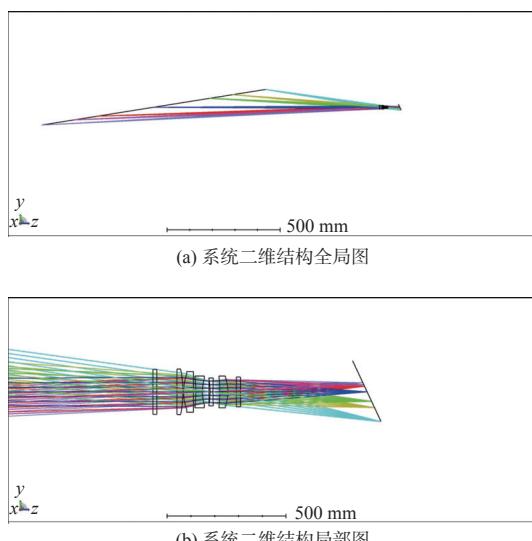


图 2 成像光学系统二维结构图

Fig. 2 2D structure diagram of imaging optical system

表 1 成像光学系统的结构参数

Table 1 Structure parameters of imaging optical system

表面序号	曲率半径/mm	厚度/mm	玻璃材料	倾斜/°
物面	∞	1 000		81
1	∞	1.68	D4531F	0
2	∞	8.45		0
3	∞	2.50	H-LAK51A	0
4	-48.60	0.30		0
5	21.44	4.15	H-LAF50B	0
6	∞	0.95		0
7	-60.73	2.81	H-ZF11	0
8	18.97	2.73		0
光阑	∞	0.50		0
10	-31.20	1.15	H-K9L	0
11	117.20	2.91		0
12	-56.81	3.37	H-ZK9B	0
13	-18.76	3.56		0
14	∞	1.75	H-K9L	0
15	∞	52.42		0
像面		-25.17		

3.2 系统设计结果及分析

为了评价激光位移传感器成像光学系统的成像效果, 分别从 MTF(modulation transfer function)、点列图和畸变 3 个方面对成像光学系统优化设计结果进行分析和评价。图 3 为成像光学系统 MTF 图, 系统部分视场 MTF 曲线接近衍射极限。根据系统所选用 CMOS 像元尺寸大小可知, 其奈奎斯特频率约为 112 lp/mm 。根据图 3 中 MTF 曲线数据可得, 在 112 lp/mm 处, 系统各视场的弧矢方向 MTF 曲线比子午方向 MTF 曲线要高, 即系统各视场成像质量弧矢方向要优于子午方向。系统最大正视场 78.5 mm 的子午方向和弧矢方向的 MTF 数值分别为 0.23 和 0.38 , 最大负视场 -78.5 mm 的子午方向和弧矢方向的 MTF 数值分别为 0.41 和 0.45 。这种成像光学系统的子午方向与弧矢方向的成像

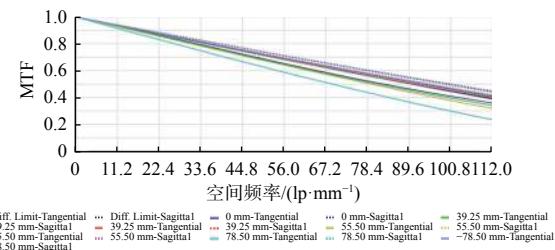


图 3 成像光学系统 MTF

Fig. 3 MTF of imaging optical system

质量差异是由系统的物面和像面与系统光轴不垂直引入的离轴像差所导致的。由图3可知,在112 lp/mm处系统最大正视场子午方向MTF数值最小,其数值为0.23,即系统各视场MTF均大于0.20,系统设计结果可满足成像质量要求。

图4为成像光学系统点列图,系统艾里斑半径尺寸为4.78 μm,图中0、±0.5、−0.707和−1视场的光斑半径均小于系统艾里斑半径,即达到了系统衍射极限。但是0.707和1视场的光斑半径大于系统艾里斑半径,这主要是受轴外像差的影响,例如轴外球差、彗差、像散。

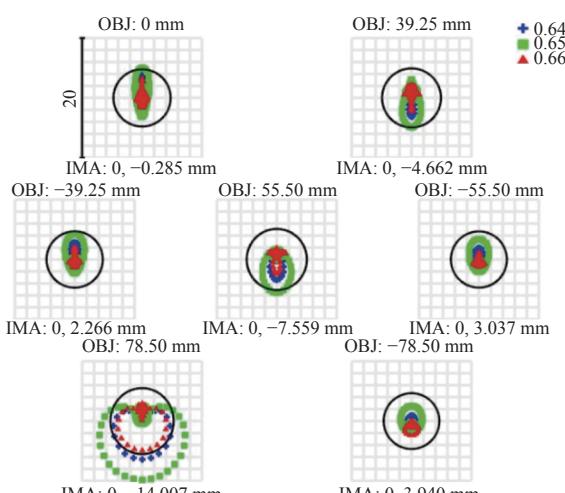


图4 成像光学系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of imaging optical system

图5为成像光学系统畸变网格和图像仿真结果。由图5(a)畸变网格可知系统除图像中心位置处以外其他位置的畸变较大,且图像中心位置上下两侧区域的畸变性质相反,即如图5(a)所示图像中心位置以上区域为正畸变,而图像中心位置以下区域为负畸变。为了分析系统成像效果,图5(b)给出了系统的图像仿真结果。由于系统畸

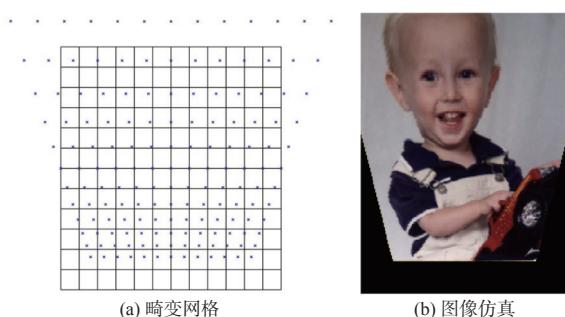


图5 成像光学系统畸变网格和图像仿真

Fig. 5 Distortion grid and image simulation of imaging optical system

变的影响,图像仿真结果中图像发生了畸变,在发生正畸变的边缘区域图像出现了溢出现象。由于所选用的CMOS光敏面大于系统成像平面上的成像区域,因此,在实际应用中,溢出部分仍可以被图像传感器所接收。

由上述成像光学系统设计结果及分析可知,该系统子午方向和弧矢方向的成像质量存在一定的差异,即弧矢方向成像质量优于子午方向。影响系统成像质量的主要像差是轴外像差,且系统的畸变较大导致了图像的畸变。这些影响系统成像效果的主要因素是由系统物平面和像平面与系统光轴之间不垂直所引起的。但根据系统设计结果分析可知,在奈奎斯特频率处,系统各视场MTF可满足系统成像质量要求,而系统畸变所导致的图像畸变则可通过图像畸变校正算法予以校正。因此,该大量程激光位移传感器的成像光学系统可满足激光位移传感器的高精度测量使用需求。

4 结论

本文设计了一种大量程激光位移传感器的成像光学系统,采用5片式球面透镜结构完成了系统的优化设计,实现了激光位移传感器对基准工作距离1 000 mm处测量范围±500 mm内被测物体表面的高度或位移的测量,测量分辨率为0.4 mm。通过对系统设计结果的分析可知,由于系统轴外视场子午方向受到轴外像差的影响,其成像质量下降,但在空间分辨率小于112 lp/mm时,成像光学系统各视场MTF均大于0.20,满足系统成像质量要求。此外,系统的畸变较大,而畸变所导致的图像变形可采用图像校正算法进行校正。随着工业自动化水平的提高,大型自动化设备的应用越来越广泛,对大量程非接触式测量仪器的使用需求越来越大,而大量程激光位移传感器的成像光学系统可有效提高传感器的远距离位置测量范围,且系统结构简单,在测量领域具有较好的应用价值。

参考文献:

- [1] DING Dawei, ZHAO Zhengcui, LI Yao, et al. Calibration and capability assessment of on-machine measurement by integrating a laser displacement sensor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(7/8): 2301-2313.
- [2] DING Dawei, ZHAO Zhengcui, HUANG Rui, et al. Error

- modeling and path planning for freeform surfaces by laser triangulation on-machine measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.
- [3] MA Jinyu, CHEN Xin, DING Guoqing, et al. Research on angle setting error of diameter measurement based on laser displacement sensors[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(5): 194-200.
- [4] 陈金辉. 基于激光位移传感器的零件轮廓曲线重建策略[J]. 南昌大学学报(工科版), 2020, 42(1): 76-80.
CHEN Jinhui. Reconstruction strategy for profile curve of part using a laser displacement sensor[J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2020, 42(1): 76-80.
- [5] 王帆, 吕彦明, 刘泽涛. 基于激光位移传感器的航空叶片测量技术研究[J]. 工具技术, 2019, 53(6): 104-107.
WANG Fan, LYU Yanming, LIU Zetao. Research on aviation blade measurement technology based on laser displacement sensor[J]. Tool Engineering, 2019, 53(6): 104-107.
- [6] YANG Pengcheng, HU Dan, WANG Congyi, et al. Weld surface imperfection detection by 3D reconstruction of laser displacement sensing[C]//2020 5th International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE). December 25-27, 2020, Harbin, China: IEEE, 2020: 2102-2105.
- [7] 吴晓军, 白韶红, 宋韧, 等. 激光位移传感器在轨道交通桥梁监测中的应用[J]. 现代城市轨道交通, 2019(4): 44-48.
WU Xiaojun, BAI Shaohong, SONG Ren, et al. Application of laser displacement sensor in rail transit bridge monitoring[J]. Modern Urban Transit, 2019(4): 44-48.
- [8] 伍川辉, 廖家, 熊仕勇, 等. 基于激光传感器的槽型轨轮廓匹配方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(9): 1607-1614.
WU Chuanhui, LIAO Jia, XIONG Shiyong, et al. Contour matching method of groove track based on laser sensor[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(9): 1607-1614.
- [9] MOLLEDA J, USAMENTIAGA R, MILLARA Á F, et al. A profile measurement system for rail quality assessment during manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(3): 2684-2692.
- [10] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004, 25(3): 33-36.
FENG Junyan, FENG Qibó, KUANG Cuifang. Present status of high precision laser displacement sensor based on triangulation[J]. Journal of Applied Optics, 2004, 25(3): 33-36.
- [11] 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 Hao, XUE Dandan, HAN Yan. Laser displacement sensor system based on pinhole optical system and array CCD[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1152-1155.
- [12] 张爽, 朱万彬, 李健, 等. 激光位移传感器传感探头微小型光学系统设计[J]. 中国光学, 2018, 11(6): 1001-1010.
ZHANG Shuang, ZHU Wanbin, LI Jian, et al. Design of micro-optical system for laser displacement sensor sensing probe[J]. Chinese Optics, 2018, 11(6): 1001-1010.
- [13] 周宇, 李粤, 李维平, 等. 激光位移传感器设计与标定测试[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 92-95.
ZHOU Yu, LI Yue, LI Weiping, et al. Design and calibration test of laser displacement sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11): 92-95.
- [14] 崔昊, 郭锐, 李兴强, 等. 基于非线性拟合的激光三角位移传感器标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 1-10.
CUI Hao, GUO Rui, LI Xingqiang, et al. Calibration of laser triangular displacement sensor based on nonlinear fitting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 1-10.
- [15] 马浩然, 丁雅斌. 基于双目视觉的激光位移传感器标定方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(9): 1634-1642.
MA Haoran, DING Yabin. Calibration method of laser displacement sensor based on binocular vision[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(9): 1634-1642.
- [16] 沃伦J. 史密斯. 现代光学工程[M]. 周海宪, 程云芳, 译. 4版. 北京: 化学工业出版社, 2011: 51-52.
SMITH W J. Modern optical engineering[M]. translated by ZHOU Haixian, CHENG Yunfang. 4th ed. Beijing: Chemical Industrial Press, 2011: 51-52.
- [17] MIKS A, NOVAK J, NOVAK P. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18225-18235.
- [18] MIKS A, NOVAK J. Estimation of accuracy of optical measuring systems with respect to object distance[J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14300-14314.
- [19] 张以谋. 应用光学[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 137-138.
ZHANG Yimo. Applied optics [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 137-138..