

用于三角测量大数值孔径双远心光学系统设计

赵哲承^{1,2,3,4}, 朱嘉诚^{1,2,3}, 刘雪峰⁵, 宋玲玲^{1,2,3}, 陈新华^{1,2,3*}, 沈为民^{1,2,3}

- (1. 苏州大学 光电科学与工程学院, 江苏 苏州 215006;
2. 江苏省先进光学制造技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
3. 教育部现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006;
4. 苏州普立视科技有限公司, 江苏 苏州 215008;
5. 中国人民解放军 63801 部队, 四川 西昌 615000)

摘 要: 测量不确定度是与测量结果紧密相关的重要指标,反映了仪器测量的稳定性。激光三角测量仪器的测量不确定度与成像光学系统数值孔径直接相关,增大数值孔径能够有效降低测量不确定度。为了满足高精度测量需求,应用二维 Q-type 多项式自由曲面,设计用于线激光三角测量仪的大数值孔径双远心 Scheimpflug 成像光学系统。首先基于三角测量原理和线激光三角测量仪指标分析成像光学系统参数,然后结合像差灵敏度分析以及自由曲面像差特性,确定成像光学系统中自由曲面的位置和数量并进行优化设计。设计得到系统的数值孔径为 0.2,成像范围为 10 mm×14 mm,调制传递函数(MTF)优于 0.6,最大畸变为 0.21%,远心度优于 0.3°。该系统具有大孔径、成像质量好、畸变小、双远心的特点,能够满足高精度线激光三角测量仪的应用需求。

关键词: 线激光三角测量仪; 光学设计; 双远心光学系统; 二维 Q-type 自由曲面

中图分类号: O436

文献标志码: A

DOI: 10.3788/IRLA20240100

0 引 言

激光三角测量仪是基于三角测量原理,可对被测表面高度进行非接触式测量的仪器,其凭借小体积、高测量精度以及不易受环境影响等优点被广泛应用于工业检测、机器视觉和航空航天等领域^[1]。根据投射的激光线形,激光三角测量仪可分为点激光型和线激光型。与点激光型相比,线激光三角测量仪具有更高的测量效率,应用前景更加广泛^[2]。

成像光学系统是线激光三角测量仪中的核心部件,用于对线激光光斑照明区域成像,其性能直接决定仪器的性能指标。成像光学系统工作于“Scheimpflug”条件下,其物面和像面均不垂直于光轴,系统中存在非旋转对称像差,影响了成像性能的提高。同时,物像平面的倾斜使得物面不同位置处的轴向放大倍率发生变化,系统具有较大的畸变^[3-5]。

然而,三角测量仪器的不断发展对于成像光学系统提出了高的要求。降低仪器的测量不确定度,要求成像光学系统具有大数值孔径。提高处理速度要求成像光学系统无明显畸变,减小数据插值和处理的工作。为了降低仪器测量过程中操作和对准误差的影响,要求成像光学系统具有远心性。这些要求进一步增加了成像光学系统的设计难度,采用传统球面和非球面元件难以实现满意的性能。

与球面和非球面相比,自由曲面主要指没有旋转对称轴的复杂非常规连续曲面,以及非连续、有面型突变的曲面。受益于自由曲面的非旋转对称结构,自由曲面能够提供更多的校正变量,具有强大的像差校正能力^[6-7]。Q-type 多项式自由曲面由 FORBES 博士于 2007 年提出,解决了干涉测量法难以处理非球面偏离中心的面型问题,同时提高了光学设计的效率^[8]。二维 Q-type 多项式自由曲面是在 Q-type 多项

收稿日期:2024-03-04; 修订日期:2024-05-29

基金项目:江苏高校优势学科建设工程(PAPD);苏州市产业前瞻与关键核心技术项目(SYC2022142)

作者简介:赵哲承,男,工程师,硕士生,主要从事线激光三角测量仪器、光学系统设计方面的研究。

导师(通讯作者)简介:陈新华,男,副研究员,博士,主要从事光谱成像技术、光学系统设计与研制、光电测量技术等方面的研究。

式基础上发展起来的,能够更好地表征带有局部突起或凹陷的曲面,具有更强的面型表征能力和像差校正能力^[9]。

文中设计了用于三角测量仪的大数值孔径双远心成像光学系统,通过引入二维 Q-type 自由曲面,在不增加透镜数量的前提下实现更大的数值孔径和更高的成像质量,满足高精度激光三角测量仪的使用要求。首先介绍线激光三角测量仪的原理,并根据仪器指标分析成像光学系统的参数,然后结合光学系统像差灵敏度分析以及像差特性,确定自由曲面的位置和数量,开展光学系统优化设计,之后给出成像光学系统的设计结果,并对系统的点列图均方根 (RMS) 半径、调制传递函数 (MTF)、畸变以及远心度等进行评价。

1 工作原理及指标分析

1.1 工作原理

线激光三角测量仪主要由照明系统、成像光学系统、光电探测器以及信号处理模块四部分构成,如图 1 所示 (信号处理模块图中未画出)。照明系统由激光器和光束整形组件构成,在被测物表面投射出照度均匀的线光斑。成像光学系统将被测物表面的线光斑成像到光电探测器上。光电探测器将光信号转换为数字信号,并输入信号处理模块,解算被测物体表面信息^[10-12]。在测量范围内,物体的高度与其表面散射光经成像光学系统后成像在探测器上的位置存在单一映射关系,因此可以根据探测器上光斑重心位置解算出被测物体的高度。

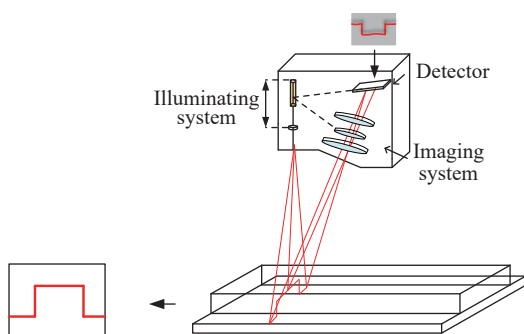


图 1 线激光三角测量仪器组成及工作原理图

Fig.1 Line laser triangulation instrument composition and working principle diagram

1.2 成像光学系统指标分析

三角测量仪的成像光学系统满足 Scheimpflug 定律,其物面延长线、像面延长线与系统主面的延长线交于一点。此时,不同物高对应的垂轴物距不同,导致系统产生较大的畸变。为了解决 Scheimpflug 光学系统的畸变问题,可在成像光学系统的物方和像方均引入远心条件,构成双远心光学系统。双远心系统中不同视场的主光线相互平行,系统放大倍率与物面和像面的位置偏差无关,且像面照度均匀,有利于提高测量精度,降低装调要求^[13]。双远心光路中,前透镜组的后焦面与后透镜组的前焦面重合,孔径光阑位于重合焦面上,本质上为物像距均为有限远的无焦系统。

满足 Scheimpflug 定律的双远心光学系统光路原理图如图 2 所示,其中 F_1 、 F_1' 分别为前透镜组物方和像方焦点; F_2 、 F_2' 分别为后透镜组物方和像方焦点; H_1 、 H_1' 和 H_2 、 H_2' 分别为前透镜组和后透镜组各自的物方和像方主平面; f_1 为前透镜组物方焦距, f_2' 为后透镜组像方焦距; S 为孔径光阑; A 为距离 f_1 轴向距离为 q_{1A} 的点; B 为距离 F_1 轴向距离为 q_{1B} 的点; 点 C 位于物面,且与 F_1 轴向距离为 q_{1B} ; A_2' 、 B_2' 为 A 、 B 经光学系统在像面上所成的像; A_2' 和 F_2' 距离为 q'_{2A} ; B_2' 和 F_2' 轴向距离为 q'_{2B} ; C_2' 为 C 经光学系统所成的像; C_2' 和 F_2' 轴向距离同样为 q'_{2B} ; AC 与光轴夹角为 α ; $A_2'C_2'$ 与光轴夹角为 β ^[14]。

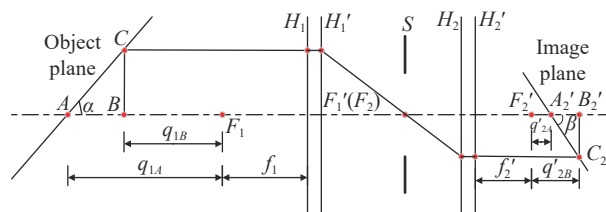


图 2 基于 Scheimpflug 定律的双远心成像光路图

Fig.2 Bitemcentric imaging optical path diagram based on Scheimpflug law

双远心 Scheimpflug 成像光学系统的子午 (纵向) 放大率 m_{ay} 与弧矢 (横向) 放大率 m_{ax} 分别为:

$$m_{ay} = \frac{C_2'A_2'}{CA} = \frac{q'_{2B} - q'_{2A}/\cos\beta}{q_{1A} - q_{1B}/\cos\alpha} = \frac{f_2}{f_1'} \cdot \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} = -\frac{f_2^2}{f_1^2} \quad (1)$$

$$m_{ax} = -\frac{f_2}{f_1} \quad (2)$$

从光学系统角度来看,三角测量仪器的不确定度与成像光学系统的数值孔径、波长、散斑对比度等因素有关,当成像光学系统满足 Scheimpflug 定律时,仪器的测量不确定度为^[3]:

$$\delta z = \frac{C \times \lambda}{2\pi \times \sin u} \quad (3)$$

式中: λ 为波长; C 为散斑对比度; u 为成像光学系统孔径。

由上述分析可知,仪器的测量不确定度与成像光学系统的波长成正比,与成像光学系统的数值孔径成反比。为了降低仪器的不确定性,光源通常选用波长较短的 405 nm 的蓝色激光光源。仪器的横向测量范围取 10 mm,纵向测量范围取 14 mm。探测器采用 CMOS 光电探测器,像元数为 4096×2900,像元尺寸为 3.45 μm 。由探测范围与探测器光敏面尺寸可知,成像光学系统两个方向的放大倍率分别为 1.009 和 1.0045。为了满足仪器的使用需要,测量不确定度期望低于 0.2 μm ,散斑对比度取 0.6,通过公式 (3) 可以得到成像光学系统的数值孔径应优于 0.2。

综上所述,成像光学系统需满足的参数如表 1 所示。

表 1 成像光学系统参数

Tab.1 Optical system parameters

Parameter	Value
Wavelength/nm	405
Measuring range/mm	10×14
Detector pixel size/ μm	3.45
Inclination angle of object plane/(°)	35
Inclination angle of image plane/(°)	25.22
Numerical aperture	0.20
Transverse magnification	1.009
Longitudinal magnification	1.0045

2 成像光学系统设计

2.1 初始结构确定

在设计成像光学系统之前,首先要确定初始结构。双高斯物镜具有对称性的优点,消除了彗差、畸变以及横向色差,能够实现较大的数值孔径和较好的成像性能,因此,选取高斯系统作为初始结构开展光学系统设计。图 3 为设计得到的数值孔径为 0.2 的双远心光学系统。图中透镜各表面命名为 S1~S14(图中仅标出编号为奇数的面),孔径光阑位于 S8 与 S9 之间。系统点列图如图 4 所示,由图可知系统中心视场点列图 RMS 半径较小,边缘视场 RMS 半径较大,且存在较大的像散和彗差,光斑尺寸大于像元尺寸。系统 MTF 图如图 5 所示,边缘视场 MTF 曲线较低。

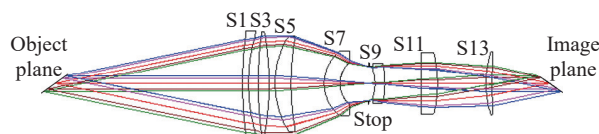


图 3 球面系统设计结果图

Fig.3 Design results of spherical surface system

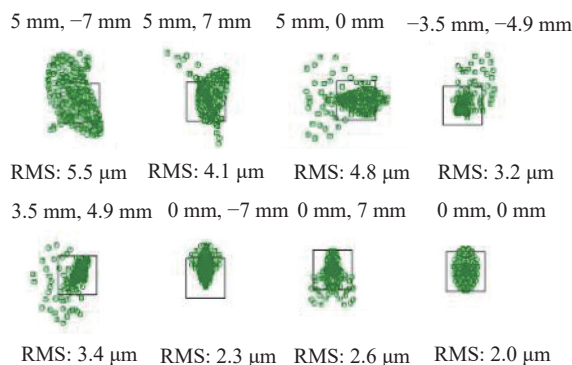


图 4 球面系统点列图

Fig.4 Spot diagram of spherical surface system

由于系统物面与像面均倾斜,只使用球面无法校正两个不同物距的所有像差^[15]。为了进一步提高系统的成像质量,满足成像光学系统的成像要求,在球面优化得到的光学系统中引入二维 Q-type 多项式自由曲面。二维 Q-type 多项式自由曲面对应的径向高度 z 为^[8]:

$$z=f(\rho,\theta)=\frac{c\rho^2}{1+\sqrt{1-c^2\rho^2}}+\frac{1}{1+\sqrt{1-c^2\rho^2}}\left\{u^2(1-u^2)\sum_{n=0}^N a_n^0 Q_n^0(u^2)+\sum_{m=1}^M u^m \sum_{n=0}^N [a_n^m \cos(m\theta)+b_n^m \sin(m\theta) Q_n^m(u^2)]\right\} \quad (4)$$

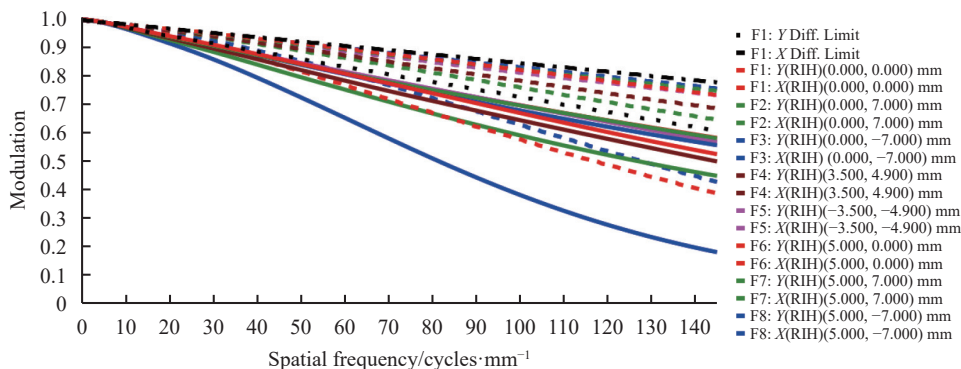


图 5 球面系统 MTF 曲线

Fig.5 MTF curve of spherical surface system

式中: c 为最佳拟合球面的曲率; $\sqrt{1-c^2\rho^2}$ 为 z 轴与最佳拟合球面法线方向的夹角余弦; $u=\rho/\rho_{\max}$; $Q_n^m(x)$ 为正交多项式基底; a_n^m 和 b_n^m 为对应多项式系数。

为了提高优化效率,减少加工、装调的难度,还应在保证成像质量的前提下,尽量减少引入自由曲面的数量和所用的项数。整个系统的设计流程如下:

- 1) 计算各表面像差贡献度;
- 2) 确定自由曲面位置;
- 3) 设置自由曲面多项式系数;
- 4) 对系统进行优化,若优化后的系统满足要求则停止,不满足则增加自由曲面数量,继续进行步骤 1);
- 5) 得到设计结果。

2.2 自由曲面位置的确定

对各表面分别添加二维 Q-type 多项式自由曲面,以系统点列图 RMS 半径作为误差函数,分析各表面对像差的贡献度为:

$$C = \frac{(Q_{\text{before}} - Q_{\text{after}})}{Q_{\text{before}}} \quad (5)$$

式中: C 为像差贡献度; Q_{before} 为优化前误差函数值; Q_{after} 为优化后误差函数值。

具体步骤为:分别将表面 S1~S14 设置为二维 Q-type 多项式自由曲面,阶数选择 1~32 项,进行 50 次循环优化,分别计算各表面的像差贡献度,如图 6 所示。结果表明,表面 S9~S14 对成像光学系统的像差贡献度较高。根据各表面贡献度的不同,选择合适的自由曲面数量及位置。

此外,由光学系统像差贡献规则可知,光瞳附近

的透镜只能校正球差,远离光瞳处的透镜则可以纠正其他与视场相关的像差,为了较好地校正球差,选择光阑附近且对像差贡献较高的透镜五放置自由曲面;为了减小加工的难度,同一透镜只选择一个表面作为自由曲面;远离光瞳的自由表面会产生奇阶像差,与球面透镜产生的像差不同,奇阶像差应由远离光瞳的另一自由曲面所补偿,因此应按照系统对称位置设置自由曲面。此外,两个自由曲面不应该距离太近,否则其产生的奇阶像差与偶阶像差相互补偿,影响像差校正效果^[15]。

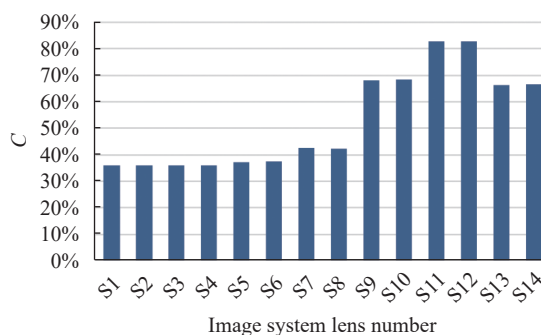


图 6 成像光学系统表面像差贡献度

Fig.6 Aberration contribution of each surface

综上所述,最终选择将表面 S2、S6、S9 以及 S14 设置为二维 Q-type 多项式自由曲面。

确定了自由曲面所在表面后,利用光学系统软件进行优化,并在优化中控制自由曲面表面所用项数,得到最终设计结果^[16]。系统结构参数如表 2 所示,自由曲面多项式对应系数如表 3 所示,系统光路如图 7 所示。

表 2 成像光学系统结构参数

Tab.2 Structural parameters of imaging optical system

Surface number	Radius/mm	Thickness/mm	Nd	Vd
S1	23.35	9.0	1.84	42.73
S2	-102.63	0.2		
S3	51.39	12.2	1.84	42.73
S4	253.58	15.4		
S5	172.80	7.5	1.84	42.73
S6	34.48	11.8		
S7	-54.87	6	1.84	42.73
S8	266.88	1.3		
Stop	∞	12.1	1.84	42.73
S9	-29.71	8.0		
S10	-51.19	28.7	1.84	42.73
S11	-964.27	9.5		
S12	-64.04	1.2	1.84	42.73
S13	72.05	9.0		
S14	-906.60	76.1	1.84	42.73

表 3 自由曲面结构参数

Tab.3 Structural parameters of freeform surfaces

Surface item	S2	S6	S9	S14
5	0.0453	-0.0284	0.0038	0.0005
8	-0.5544	0.1575	0.0027	0.0068
9	-0.6233	0.2326	-0.3457	-0.6243
11	-0.2150	0.0071	-0.0030	-0.0077
12	0.0137	-0.0069	-0.0012	0.0024
15	-0.0596	-0.0016	-0.0028	0.0036
16	0.0195	-0.0134	0.3204	-0.2045
20	-0.0015	0.0005	0.0003	-0.0001
21	0.0015	0	0	0
24	-0.0515	0.4003	0.0002	0.0007
25	0.0004	0.0710	-0.0514	0.0002
31	0.0001	0	0	0
32	0	0	0	0

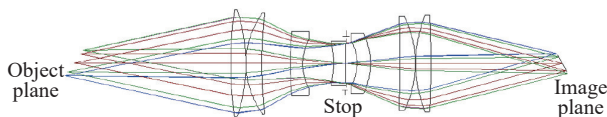


图 7 成像光学系统光路图

Fig.7 Optical layout of the designed system

3 性能评价

为了评价线激光三角测量仪器成像光学系统的成像质量,主要利用点列图 RMS 半径、MTF、畸变及远心度四个指标对本系统的设计结果进行评价。

图 8 为成像光学系统不同视场处的点列图 RMS 半径,系统艾里斑半径为 $4.18 \mu\text{m}$,从图中可见,点列图最大 RMS 半径尺寸为 $2.5 \mu\text{m}$,中心视场处的光斑半径为 $1.1 \mu\text{m}$,系统成像质量较好。

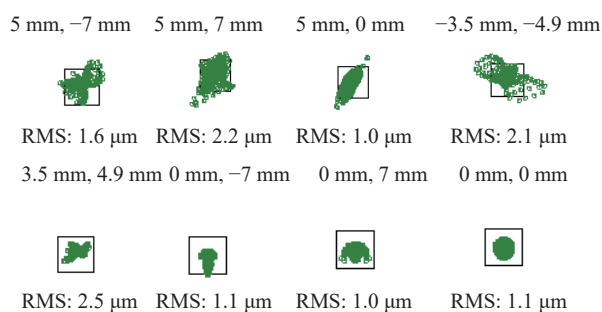


图 8 二维 Q-type 自由曲面系统不同视场点列图

Fig.8 Spot diagram of different field in two-dimentional Q-type freeform surface system

图 9 为成像光学系统 MTF 图,可以看出,系统大部分视场 MTF 曲线接近衍射极限。由于探测器像元尺寸为 $3.45 \mu\text{m}$,奈奎斯特频率约为 145 lp/mm 。根据图 8 中系统 MTF 曲线可以得到,在 145 lp/mm 处,MTF 均优于 0.6,成像质量较好。

表 4 为成像光学系统视场畸变值,图 10 为系统的畸变网格图,最大畸变为 0.21%。

光学系统的远心度是评价双远心光学系统的重要指标,主要用于阐释主光线偏离光轴的程度^[17-18]。表 5 为成像光学系统各视场主光线在物面的出射角度和在像面的入射角度。由表可知,成像光学系统远心度均小于 0.3° ,具有较好的远心度。

文中设计结果如表 6 所示,成像光学系统数值孔径为 0.2,边缘视场点列图 RMS 半径为 $2.2 \mu\text{m}$,中心点列图 RMS 半径为 $1.1 \mu\text{m}$,MTF 优于 0.6,最大畸变为 0.21%,物方远心度为 0.19° ,像方远心度为 0.297° 。

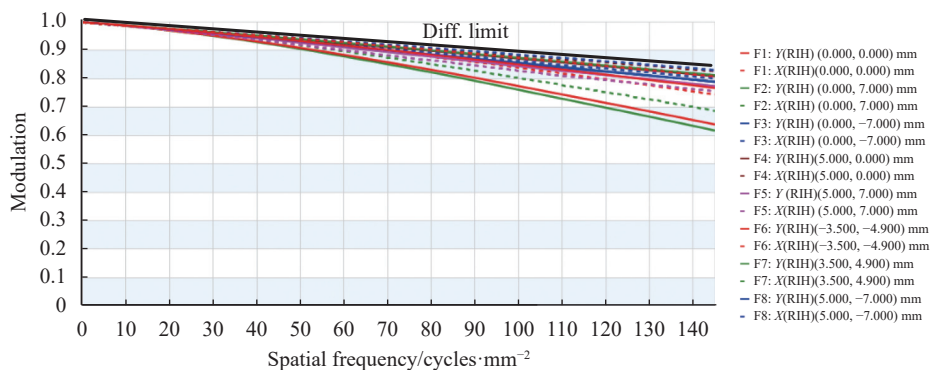


图 9 成像光学系统 MTF 曲线

Fig.9 MTF curve of the deisgned optical system

表 4 成像光学系统各视场畸变

Tab.4 Distortion of each field of view of optical system

Field position/mm	Distortion
(0, 7)	0.00%
(0, -7)	0.00%
(3.5, 4.9)	-0.12%
(-3.5, -4.9)	0.12%
(5, 0)	-0.12%
(5, 7)	-0.19%
(5, -7)	-0.21%

表 6 设计结果

Tab.6 Design results

Parameter	Value
Numerical aperture	0.2
MTF@145 lp/mm	≥0.6
Center field point diagram RMS/μm	1.1
Edge field point diagram RMS/μm	2.2
Max distortion	0.21%
Object side telecentricity/(°)	0.19
Image side telecentricity/(°)	0.297

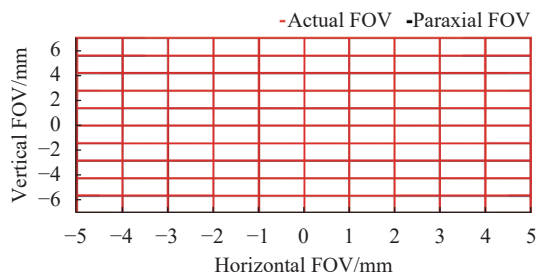


图 10 成像光学系统畸变网格

Fig.10 Distortion grid of optical system

表 5 成像光学系统主光线角度

Tab.5 Chief ray angle of optical system

Field position/mm	Exit angle/(°)	Incidence angle/(°)
(0, 0)	0.093	0.023
(0, 7)	0.169	-0.245
(0, -7)	0.088	0.297
(3.5, 4.9)	0.190	-0.174
(-3.5, -4.9)	0.118	0.225
(5, 0)	0.177	0.025
(5, 7)	0.095	-0.200
(5, -7)	0.095	0.257

4 结 论

文中采用二维 Q-type 多项式自由曲面, 设计了适用于线激光三角测量仪的大孔径远心 Scheimpflug 成像光学系统。成像光学系统点列图 RMS 半径最大为 2.2 μm, 各视场 MTF 在空间频率 145 lp/mm 均优于 0.6, 整个视场内最大畸变仅为 0.21%, 物方远心度为 0.19°, 像方远心度为 0.297°。系统适用于不确定度为 0.2 μm 的线激光三角测量仪指标下的成像光学系统要求, 相比于球面系统, 在不增加透镜数量且不增大系统体积的前提下提高了系统的成像质量。所设计的光学系统具有大孔径、低畸变、双远心、高成像质量的优点, 可以有效提高仪器的测量不确定度, 对于研制高测量精度的三角测量仪器具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] DIZEU F, RIVARD M, BOISVERT J, et al. Comparison of laser triangulation, phase shift triangulation and swept source optical

- coherence tomography for nondestructive inspection of objects with micrometric accuracy [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2102(1): 070004.
- [2] 卢凤凰. 激光三角测量光学系统设计及性能分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [3] DORSCH R G, HÄUSLER G, HERRMANN J M. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(7): 1306-1314.
- [4] HU Y, LIANG Z, CHEN Q, et al. A simplified imaging model of bi-telecentric lenses under Scheimpflug condition and its calibration [C]//International Conference on Photonics and Optical Engineering, 2021, 11761: 117610V.
- [5] GREISUKH G I, EZHOV E G, LEVIN I A, et al. Design of the double-telecentric high-aperture diffractive-refractive objectives [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(19): 3254-3258.
- [6] THOMPSON K P, ROLLAND J P. Freeform optical surfaces: A revolution in imaging optical design [J]. *Optics Photonics News*, 2012, 23(6): 30-35.
- [7] ZHONG Yi, GROSS H. Improvement of Scheimpflug systems with freeform surfaces [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(6): 1482-1491.
- [8] FORBES G W, BROPHY C P. Asphere, O asphere, how shall we describe thee? [C]//Proceedings of SPIE, 2008, 7100: 710002.
- [9] 贾孟. 基于 Q-type 非球面的光学系统关键技术研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [10] FORBES G W. Characterizing the shape of freeform optics [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2483-2499.
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 祁昊. 基于远心镜头的结构光三维成像系统研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2023.
- [14] MIKS A, NOVAK J, NOVAK P. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18225-18235.
- [15] OLESZKO M, GROSS H. Analysis of freeform mirror systems based on the decomposition of the total wave aberration into Zernike surface contributions [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 1998-2006.
- [16] TORRE J, BORNEMANN B, RIZA N A. Smart optical shape sensor using electronically controlled lens and laser line illumination scanning [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4): 1005-1012.
- [17] LI Jing, WU Zhangjiang. Laser double triangulation method measurement for 3-D surface based on image processing [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(2): 87-89. (in Chinese)
- [18] SOICHI I, YOSHITOMO K, YOSHIHIRO K, et al. On the limitation of dual-view triangulation in reducing the measurement error induced by the speckle noise in scanning operations [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 88(1): 731-737.

Optical design of bi-telecentric system with large numerical aperture for the triangulation measurement

ZHAO Zhecheng^{1,2,3,4}, ZHU Jiacheng^{1,2,3}, LIU Xuefeng⁵, SONG Lingling^{1,2,3},
CHEN Xinhua^{1,2,3*}, SHEN Weimin^{1,2,3}

- (1. School of Optoelectronic Science and Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China;
2. Key Lab of Advanced Optical Manufacturing Technologies of Jiangsu Province, Suzhou 215006, China;
3. Key Lab of Modern Optical Technologies of Education Ministry of China, Suzhou 215006, China;
4. Suzhou PLS Technology Co., LTD., Suzhou 215008, China;
5. Unit 63801 of the PLA, Xichang 615000, China)

Abstract:

Objective With the development of technology and the requirement of industrial manufacturing, the automatic measurement of key dimensions of products in the production process has gradually replaced the traditional

manual measurement. As a non-contact measuring instrument, line laser triangulation instrument has the advantages of simple structure, small size and wide application. However, the uncertainty of measurement for this instrument is physically limited by the speckle, which are formed when the measured surface is illuminated by the laser. Fortunately, this uncertainty can be improved by reducing the laser wavelength or increasing the numerical aperture of the optical system. Lasers with a short wavelength of 405 nm are already widely used in triangulation instruments, and increasing the numerical aperture of the optical system is another one method to further reduce the measurement uncertainty. However, the further increase of numerical aperture brings great difficulties to the design of optical systems while keeping the field of view unchanged.

Methods To improve the measurement uncertainty of the line laser triangulation measurement instrument, this paper designs a bi-telecentric system with large numerical aperture with the two-dimensional Q-type polynomial freeform surface. Firstly, the working principle of the triangulation measurement instrument is introduced. Based on the principle and the specifications of the line laser triangulation measurement instrument, the parameters of the imaging optical system are analyzed. Then, the optical system based on double-Gauss optical layout is designed and the optical stop is placed on the focal plane of front group and back group. The position and number of freeform surfaces in the imaging optical system are determined by using the aberration sensitivity analysis and the freeform surface aberration characteristics. Finally, the optical system is optimized with optical design software to achieve the best performance.

Results and Discussions Two-dimensional Q-type polynomial freeform surfaces are set to each surface, and the RMS radius of the system point diagram was used as the error function to determine the contribution degree of each surface to aberration optimization. The final choice is to set the surfaces S2, S6, S9, and S14 as two-dimensional Q-type polynomial free surfaces. After optimization, the optical system is consisted of seven lenses, four of which are based on two-dimensional Q-type polynomial freeform. The designed system has a numerical aperture of 0.2, and an field of view of 10 mm×14 mm. The design results of this system are evaluated using RMS radius of the spot diagram, modulation transfer function (MTF) distortion and telecentricity. The MTF of the system is better than 0.6, the maximum distortion is 0.21%, and the telecentricity is less than 0.3° for the objective and image sides.

Conclusions Line laser triangulation measurement instrument is a high-precision, small-size and widely used measuring instrument. It can meet the demand for high-speed measurement of product dimensions in industrial production. A large numerical aperture telecentric Scheimpflug imaging optical system for line laser triangulation is designed using a two-dimensional Q-type polynomial free-form surface. Compared with the spherical system, the imaging quality of the system is improved without increasing the number of lenses and the system size. The designed optical system has the advantages of large numerical aperture, double telecentricity and high imaging quality, which can effectively improve the measurement uncertainty of the instrument. It has important application in triangulation instruments with high measurement accuracy.

Key words: line laser triangulation measurement instrument; optical design; bi-telecentric optical system; 2D Q-type freeform surface

Funding projects: Jiangsu University Superior Discipline Construction Project (PAPD); Suzhou Industry Foresight and Key Core Technology Project (SYC2022142)