

用于大型阶梯轴直径测量的光学成像系统设计

郑建立 段洁 孙向阳 张宏韬

Design of optical imaging system for large-scale step-shaft diameter measurement

ZHENG Jianli, DUAN Jie, SUN Xiangyang, ZHANG Hongtao

引用本文:

郑建立, 段洁, 孙向阳, 等. 用于大型阶梯轴直径测量的光学成像系统设计[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1353–1360. DOI: 10.5768/JAO202546.0601001

ZHENG Jianli, DUAN Jie, SUN Xiangyang, et al. Design of optical imaging system for large-scale step-shaft diameter measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1353–1360. DOI: 10.5768/JAO202546.0601001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0601001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

EBAPS的调制传递函数测试系统

Modulation transfer function testing system for EBAPS

应用光学. 2024, 45(5): 992–1000 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0503001>

超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006>

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

应用波像差理论计算Kirkpatrick-Baez系统的调制传递函数

Calculating MTF of Kirkpatrick-Baez system by wave aberration theory

应用光学. 2020, 41(5): 904–910 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0501005>

航空光电成像系统像移补偿技术研究

Image motion compensation technology of aerial photoelectric imaging system

应用光学. 2022, 43(3): 424–429 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0302001>

复眼式光学成像系统畸变测量与校正技术研究

Distortion measurement and correction method on compound-eye optical imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 717–722 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403004>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1353-08

引用格式: 郑建立, 段洁, 孙向阳, 等. 用于大型阶梯轴直径测量的光学成像系统设计 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1353-1360.

ZHENG Jianli, DUAN Jie, SUN Xiangyang, et al. Design of optical imaging system for large-scale step-shaft diameter measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1353-1360.



在线阅读

用于大型阶梯轴直径测量的光学成像系统设计

郑建立¹, 段洁¹, 孙向阳², 张宏韬¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对大型阶梯轴直径测量设备的光学成像系统因各透镜装配偏心造成的光轴不重合而导致的测量误差大的问题, 提出一种利用平面反射镜进行误差补偿的对称式双远心光路-双CCD大直径测量方法。该方法的原理是: 设计直径测量范围在 600 mm~800 mm 的对称式双远心光路-双CCD光学成像系统, 在准直扩束系统和光学成像系统之间增加平面反射镜, 以减少光路中的角度误差, 修正系统中光轴的同轴度误差, 改善光束的准直性, 提升系统的成像质量和测量精度。设计结果表明: 当光学成像系统在奈奎斯特频率为 71.4 lp/mm 时, 调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 值高于 0.65, 场曲 ≤ 0.2 mm, 畸变 $< 0.13\%$ 。将设计的光学系统装配某大型阶梯轴直径测量设备后, 实际测量结果表明: 改进后的光学成像系统在原有测量设备基础上, 可提高约 1 倍的测量精度。

关键词: 光学成像系统; 双远心光路-双CCD; 调制传递函数; 大型阶梯轴

中图分类号: TN219

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202546.0601001

Design of optical imaging system for large-scale step-shaft diameter measurement

ZHENG Jianli¹, DUAN Jie¹, SUN Xiangyang², ZHANG Hongtao¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. School of Electronic Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, China)

Abstract: To address the significant measurement errors caused by optical axis misalignment due to eccentric lens assembly in the optical imaging system of large step-shaft diameter measurement equipment, a symmetric dual-telecentric optical path dual-CCD measurement method with error compensation using a plane mirror is proposed. The principle is as follows: a symmetric dual-telecentric optical path dual-CCD optical imaging system is designed with a measurement range for diameters between 600 mm and 800 mm. A plane mirror is introduced between the collimating beam expansion system and the optical imaging system to reduce angular errors in the optical path, thereby correcting the coaxiality error of the system's optical axes, improving beam collimation, and enhancing the system's imaging quality and measurement accuracy. According to the design results, when the Nyquist frequency of the optical imaging system is 71.4 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) value exceeds 0.65, the field curvature is less than or equal to 0.2 mm, and the distortion is less than 0.13%. After the designed optical system is integrated into a large step-shaft diameter measurement device, actual measurement results demonstrate that the improved optical imaging system can achieve approximately double the measurement accuracy compared to the original equipment.

收稿日期: 2024-11-18; 修回日期: 2025-01-28

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (20220201100GX); 吉林省教育厅科研项目 (JKH20240923KJ)

第一作者: 郑建立, E-mail: zhengjl2467@foxmail.com

通信作者: 段洁, E-mail: 2022100371@mails.cust.edu.cn

Key words: optical imaging system; double telecentric optical path-double CCD; modulation transfer function; large step shaft

引言

大型阶梯轴在高速列车、航空航天和船舶制造领域发挥着重要作用,其直径测量是大型轴类安装定位准确的重要保障。现有的测量方法有接触式测量法、超声波测量法、偏振成像测量法^[1-3]和光学成像测量法等,但前3种测量方法存在测量误差大、精度低和易受干扰等缺点,因此,基于光学成像法的高精度测量设备成为大直径测量的首选。光学成像系统是该设备的重要组成部分,且成像质量的好坏直接影响测量精度。但光学成像系统在实际应用中存在光轴不重合,以及准直扩束镜片和光学成像镜片安装偏斜所引起的误差等问题。因此,开展用于大型阶梯轴直径测量的光学成像系统设计,对于校正设备的测量误差,提高测量精度是十分必要的。

目前,类似的光学成像系统技术分析、设计和研究较多,例如:叶文炜等人^[4]设计了一款具有双视野的光学成像系统,该系统同时具有2个放大倍数(-0.275和-0.1375),主要解决了更换镜头复杂、精度易受影响的问题,但与普通双远心系统相比,其结构过于复杂,实际应用时难以实施;蔡达岭等人^[5]设计的双远心光路测量系统,景深为0.5 mm,最大畸变<0.1%,远心度不超过0.007°,矫正了多种像差,提升了测量精度,但在空间频率为208 lp/mm时,镜头的对比度较低,MTF值>0.3;罗春华等人^[6]设计了一种由7片球面透镜构成的低畸变、超宽景深的双远心光学系统,最大畸变<0.1%,最大远心度为0.013°,使用较少镜片,达到工业测量要求的高像质,具有良好的性价比,但此系统物方线视场仅为60 mm,安装难度大,无法满足大型轴类直径测量需求。

针对以上问题,本文采用双远心光学成像原理,设计了利用平面反射镜进行误差补偿的对称式双远心光路-双CCD成像系统,为大型阶梯轴直径测量设备的研制奠定了理论基础。

1 测量原理

1.1 双远心光路成像原理

在光学系统中,物像方双远心光路将物方远心光路和像方远心光路融合在一起,孔径光阑置于物方和像方的共同焦点位置^[7],如图1所示。因

此,物方和像方的主光线都平行于光轴,从而消除或减小视差引起的测量误差,确保系统在物距和像距变化时,成像大小和放大倍率保持不变^[8]。这种设计有效解决了物体位置偏移(即物方调焦不准)和图像传感器位置偏移(即像方调焦不准)所引起的误差,同时不影响系统的成像大小,确保测量结果的精确性,从而提高系统的测量精度^[9]。

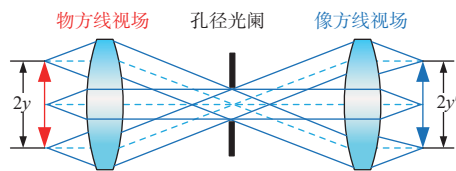


图 1 双远心光路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the dual telecentric optical path

1.2 对称式双远心光路-双CCD测径原理

大型阶梯轴的直径范围为600 mm~800 mm,现有的线阵CCD光敏面尺寸较小,无法满足大尺寸直径测量的要求。因此,采用对称式双远心光路-双CCD测径系统,如图2所示。系统由发射、接收、信号处理及驱动和待测轴4部分组成。系统工作原理是:光源发出的光经过准直扩束系统后形成平行光,投射到被测轴表面,经被测物轴遮挡形成阴影,阴影经过双远心光路成像系统后由2个CCD传感器接收。由于被测轴的尺寸大于CCD传感器的感光面,所以2个CCD传感器只能分别采集到被测轴的2个边缘,经过放大滤波和A/D转换等信号处理后,得到边缘数据,再根据光学系统的放大倍率和像的大小,就可以得到被测轴的实际尺寸。

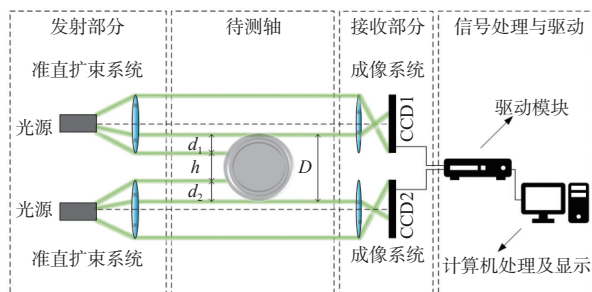


图 2 改进前测量系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of measurement system before improvement

例如, 将直径为 D 的待测轴放在图 2 所示的位置, CCD1 采集待测轴的上部, 记为 d_1 , CCD2 采集待测轴的下部, 记为 d_2 。 h 为两成像系统的间距, h_1 和 h_2 为光束被待测轴遮挡宽度, d_1 和 d_2 为光束被待测轴遮挡后的像的宽度, d_1 和 d_2 可由 CCD 采集得到, h 的值可通过标准块测得。设光学系统的放大倍率为 β , 可由像方视场高度和物方视场高度求得。此时轴径的计算公式为

$$D = h + h_1 + h_2 = h + \frac{d_1}{\beta} + \frac{d_2}{\beta} \quad (1)$$

取一个直径为 D_0 的标准件, 放置在测量位置处进行测量。CCD1 记为 d_1' , CCD2 记为 d_2' , 则可计算出两成像系统之间的距离 h 为

$$h = D_0 - \frac{d_1'}{\beta} - \frac{d_2'}{\beta} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1), 可得:

$$D = D_0 - \frac{d_1'}{\beta} - \frac{d_2'}{\beta} + \frac{d_1}{\beta} + \frac{d_2}{\beta} \quad (3)$$

在对阶梯轴进行直径测量时, 需要采用宽广的平行光束来照射被测轴零件, 因此, 在光源和被测物体之间增加了准直扩束系统^[10]。为了保证准直扩束系统与光学成像系统具有更好的同轴性, 在准直扩束系统和成像系统之间增加了平面反射镜, 如图 3 所示。通过精确调整平面镜的位置, 可以消除由于系统各部分光轴不重合, 以及准直扩束镜片和光学成像镜片安装偏斜所引起的角度误

差。另外, 增加平面反射镜也可以缩短系统的工作距离, 更利于测量设备的小型化生产。因此, 在原有的光学成像系统基础上增加平面反射镜, 可以进一步降低测量系统的测量误差, 提高测量精度, 降低整体体积, 提高适用性和便携性。

1.3 参数计算

由于系统采用对称式双远心-双 CCD 的直径测量方法, 且大型阶梯轴的被测直径范围为 600 mm~800 mm, 为了增加容错率, 选择最大测量直径为 820 mm, 计算物方线视场为

$$2y = (820 - 600) / 2 = 110 \text{ mm} \quad (4)$$

选用 TCD1501D 型 CCD, 光敏接收区域为 35 mm, 像方线视场为

$$2y' = 35 \text{ mm} \quad (5)$$

故放大倍率^[11]为

$$\beta = \frac{2y'}{2y} = -0.32 \quad (6)$$

TCD1501D 型 CCD 像元大小为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$, 由奈奎斯特采样定理^[12]可知, 在每个空间频率周期内取样点数量达到 2 个或 2 个以上时, CCD 才能显示清晰的图像。也就是说, CCD 的最高解析度需要 2 个像素大小, 即:

$$N = \frac{1000}{2d} \text{ lp/mm} \quad (7)$$

式中: d 为像素尺寸。由式(7)可得 CCD 最高解析度的空间频率 N 为 71.4 lp/mm, 为了能够被感光器件所分辨, 设计的双远心系统在 71.4 lp/mm 处的解析力应大于 0.3。根据衍射理论, 艾里斑大小^[13]计算公式为

$$d_{\min} = 1.22 \lambda_0 F/\# \quad (8)$$

式中: λ_0 为激光器波长; $F/\#$ 为 F 数。为了能够完全发挥出 CCD 的分辨能力, 要求艾里斑尺寸应小于 CCD 像元尺寸, 故 $F/\#$ 可取 10。在远心光学系统中, 景深决定成像系统的成像清晰度, 可用景物空间深度表示^[14], 计算公式为

$$\Delta = \frac{F^\# d k}{\beta^2} \quad (9)$$

式中: Δ 为景深; β 为系统的放大倍率; $F^\#$ 为系统的工作光圈数; k 为特定参数, 该参数的取值范围通常在 0.015~0.008 之间。经计算可得, 系统景深为 8.2 mm。物像方双远心系统主要技术指标见表 1 所示。

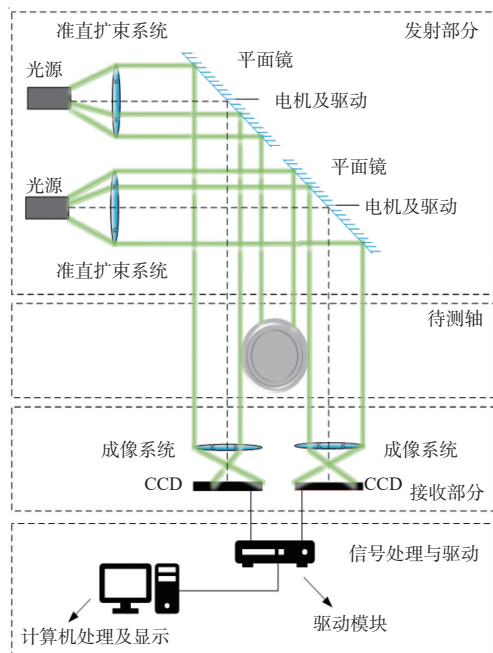


图 3 改进后测量系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of improved measurement system

表 1 物像方双远心系统主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of double telecentric optical system

系统参数	指标
放大倍率	-0.32
检测范围/mm	110
工作距离/mm	60
F 数	10
物方远心度/(°)	0.1
像方远心度/(°)	0.1
畸变/%	0.2
解析度/%(@71.4 lp/mm)	>30

2 光学设计及优化

2.1 物方远心光路设计及优化

根据表 1 中的性能指标, 选择一个初始结构作为设计起点, 并在 Zemax 中通过逼近最优方案进行设计^[15]。

首先, 根据《实用光学技术手册》^[16] 和表 1 选择初始结构, 并根据像面大小进行缩放。然后, 设置优化操作数, 调整物方远心度、瞳距、物距、空气和玻璃的厚度。最后, 使用 Zemax 进行优化, 得到符合要求的物方远心系统。由于该系统使用波长为 525 nm 的激光器, 且无色差干扰, 在确保光学系统各项指标达标情况下, 考虑镜片材料的性能及镜片的加工难度, 调整结构后选择重铟火石玻璃作为镜片材料。该玻璃材料具有较高的折射率、优良的透光性、以及较好的稳定性和加工性等特点, 满足高分辨率和低畸变的应用要求。优化后的系统结构图如图 4(a) 所示, 系统点列图如图 4(b) 所示。

由图 4(b) 可知, 艾里斑半径为 9.605 μm , 均方根 (root mean square, RMS) 半径为 5.104 μm ^[17], RMS 半径小于艾里斑半径, 满足系统设计要求。

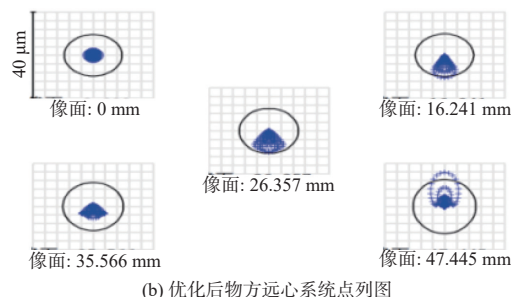
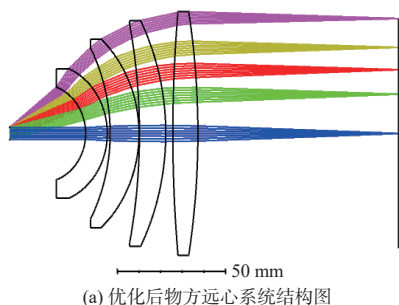


图 4 物方远心光路

Fig. 4 Object-side telecentric beam path

2.2 像方远心光路设计及优化

根据像面尺寸对像方远心系统进行缩放, 利用和物方远心系统相同的操作数进行控制, 并通过设置优化函数优化光学系统, 优化后的像方远心系统结构图如图 5(a) 所示, 系统点列图如图 5(b) 所示。

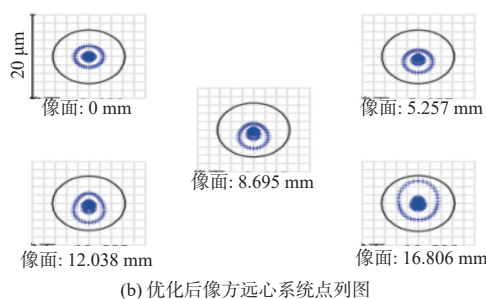
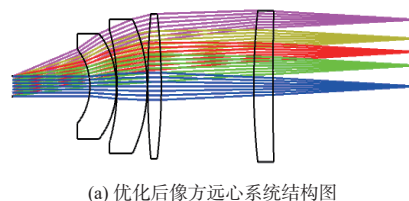


图 5 像方远心光路

Fig. 5 Image-side telecentric beam path

从图 5(b) 可以看出, 艾里斑半径为 6.405 μm , RMS 半径为 2.343 μm , RMS 半径小于艾里斑半径, 在优化过程中, 由 RANG 控制的远心度为 0.000 8°, 满足设计要求。

2.3 物像双远心光路设计及优化

将像方远心系统和物方远心系统进行组合, 得到物像方双远心系统的初始结构, 经过对远心度、MTF 和艾里斑半径等指标进行分析可知, 其无法满足对大型阶梯轴高精度测量的要求, 因此需要对系统进行优化。

对系统中的参数进行设定后, 将镜片的光学面曲率半径、镜片的玻璃厚度以及镜片之间的

空气间隔等作为优化变量, 通过优化过程调整这些参数, 最终得到优化后满足要求的物像双远心光学系统, 如图 6 所示, 系统结构参数见表 2 所示。

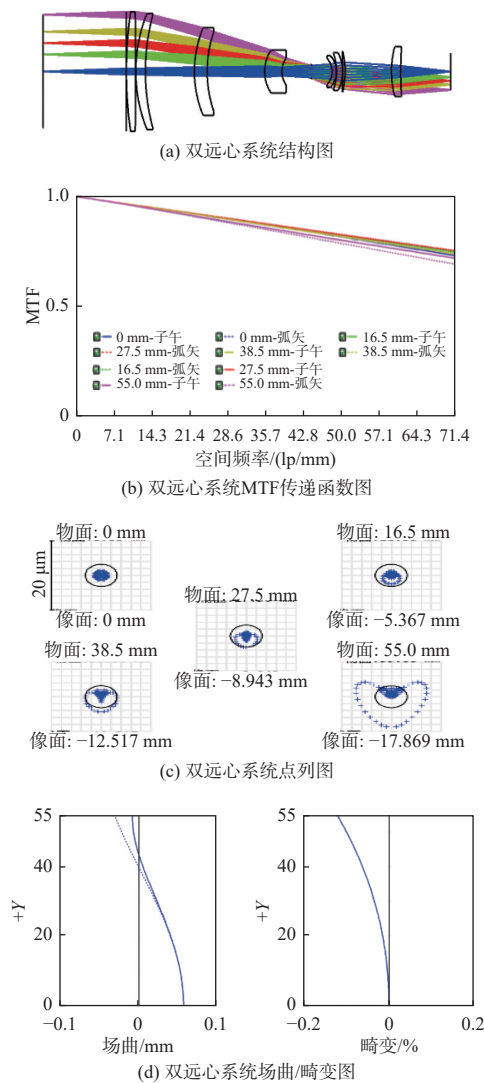


图 6 双远心光学系统

Fig. 6 Dual telecentric optical system

由图 6(b) 可以看出, 在截止频率 71.4 lp/mm 处, 所有视场的 MTF 均超过 0.65, 满足系统设计要求^[18]。由图 6(c) 可以看出, 艾里斑半径为 3.204 μm , RMS 半径为 3.776 μm , 此时大部分激光能量聚集在直径为 0.004 mm 的圆形区域内, 符合物像方双远心系统成像质量的标准; RMS 半径小于艾里斑半径, 物像方双远心系统成像质量满足要求。场曲反映了像面的弯曲程度, 畸变则表现了成像的准确性^[19], 根据图 6(d) 可以看出, 场曲校正范围在 0.2 mm 以内, 畸变控制在 0.13% 以内, 满足设计要求。

表 2 直径测量系统双远心系统结构参数

Table 2 Structural parameters of double telecentric system of diameter detection system

	表面	曲率半径/mm	厚度/mm	材料
0	物面	无限	90.000	
1		无限	0.000	
2		490.438	10.000	1.81, 40.8
3		-7 741.174	0.242	
4		202.545	10.000	1.81, 40.8
5		361.121	57.115	
6		96.900	19.729	1.81, 40.8
7		117.148	67.678	
8		35.580	15.425	1.81, 40.8
9		21.641	25.318	
10	光阑	无限	23.171	
11		-17.389	4.625	1.81, 40.8
12		-21.193	0.769	
13		-45.474	5.719	1.81, 40.8
14		-36.297	0.206	
15		-334.697	2.616	1.81, 40.8
16		-81.277	46.368	
17		108.794	10.000	1.81, 40.8
18		963.628	51.019	
19	像面	无限		

3 仿真结果与分析

在完成对物像双远心光学成像系统优化设计后, 需要考虑在实际光学加工过程中, 制造误差、装配误差等参数可能会对系统的性能产生影响, 因此, 需要对光学成像系统进行公差分析。本次使用灵敏度分析法, 测试波长为 525 nm, 采用 500 个蒙特卡洛样本, 以系统在 71.4 lp/mm 处的 MTF 传递函数为标准, 在 Zemax 软件中模拟偏差对系统性能的影响并分析结果^[20]。首先, 初步设定光学系统中各参数的公差范围, 然后根据在 Zemax 软件中分析的结果, 对公差值进行合理地调整和优化。表 3 为最终设定的系统公差范围。

表 3 光学系统的公差范围

Table 3 Tolerance range of optical system

公差类型	公差范围
曲率半径/mm	± 0.01
厚度/mm	± 0.02
S+A 不规则度	± 0.4
X 偏心/mm	± 0.01
Y 偏心/mm	± 0.01
倾斜 X 轴/(°)	± 0.02
倾斜 Y 轴/(°)	± 0.02
折射率	$\pm 0.000\ 3$
Abbe/%	± 0.5

系统公差分析的最坏偏差类型见表 4 所示。表 4 中 TTHI 为元件的厚度公差, TRAD 为曲率半径的公差, TIRX、TIRY 表示标准面沿 X、Y 轴的倾斜公差。从表 4 可知, 系统的公差最敏感面为第 11 面和第 12 面, 即透镜 Len5。

系统公差分析的 MTF 值见表 5 所示。由表 5

可知, 受公差的影响, 在空间频率 74.1 lp/mm 处系统镜头的对比度略有下降, 但 MTF 值仍高于 0.5, 能保证 CCD 对被测物边缘数据的准确读取, 90% 的系统在 74.1 lp/mm 处 MTF 值高于 0.52, 表明公差分配较为合理, 系统的加工性能相对较好, 满足实际工程的应用要求。

表 4 公差分析最坏偏差类型
Table 4 Tolerance analysis of worst-case deviation types

类型	表面	表面	数值	标准	改变
TTHI	11	12	-0.020 000 00	0.630 853 88	-0.048 040 70
TIRX	11		-0.020 000 00	0.633 503 08	-0.045 391 49
TIRX	11		0.020 000 00	0.633 503 08	-0.045 391 49
TIRY	11		-0.020 000 00	0.633 503 08	-0.045 391 49
TIRY	11		0.020 000 00	0.633 503 08	-0.045 391 49
TRAD	11	0	0.010 000 00	0.637 721 27	-0.041 173 30
TIRX	12		-0.020 000 00	0.644 487 12	-0.034 407 45
TIRX	12		0.020 000 00	0.644 487 12	-0.034 407 45
TIRY	12		-0.020 000 00	0.644 487 12	-0.034 407 45
TIRY	12		0.020 000 00	0.644 487 12	-0.034 407 45

表 5 MTF 与公差分析结果
Table 5 MTF and tolerance analysis results

比例/%	>90	>80	>50	>20	>10
MTF值@71.4 lp/mm	0.529 589 58	0.565 147 40	0.612 270 67	0.643 387 46	0.658 507 83

4 实验

将改进的对称式双远心光路-双 CCD 直径测量光学成像系统装配到大型阶梯轴直径测量实验系统中, 具体实验系统如图 7 所示, 由对称双远心光路-双 CCD 测径系统、被测阶梯轴、CCD 信号处理系统和上位机显示系统等组成。



图 7 包含双远心系统的大型阶梯轴直径测量系统示意图
Fig. 7 Diagram of large step shaft diameter measurement system with dual telecentric system

在应用实验中, 分别在大型阶梯轴直径测量设备中装配了设计的改进后的成像系统和改进前的

成像系统, 对直径为 600 mm、650 mm、700 mm 和 750 mm、800mm 的标准件进行测试, 并将测量结果进行对比, 如图 8 所示。

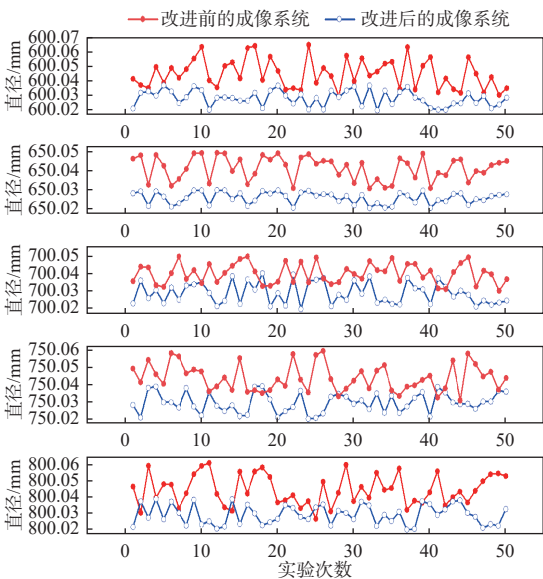


图 8 改进前后标准件测量结果对比图
Fig. 8 Comparison of standard part measurement results before and after improvement

从图8可以看出,改进前系统对标准件的测量误差 ≤ 0.07 mm,增加平面反射镜后,系统对标准件的测量误差 ≤ 0.04 mm。因此,改进后的成像系统在大型阶梯轴直径测量实验中相较于改进前的系统,显著降低了测量误差,提升了测量精度,满足大型阶梯轴直径测量精度 ≤ 0.05 mm的要求。

5 结论

为提升大型阶梯轴直径测量设备的测量精度,设计了一种利用平面反射镜进行误差补偿的对称式双远心光路-双 CCD 直径测量光学成像系统。通过对各镜片优化处理设计,并进行公差分析,以确保在制造和加工误差范围内满足测量精度要求。运用 Zemax 软件对光学成像系统进行仿真与优化。从仿真结果可以看出,在使用 8 片透镜的情况下,光学成像系统的结构总长度为 350 mm,系统景深为 8.2 mm,在空间频率 74.1 lp/mm 处,每个视场的 MTF 值可优化至 >0.65 ,场曲 ≤ 0.2 mm,畸变 $< 0.13\%$ 。通过对改进后的光学成像系统进行设备测试,结果表明,本设计可显著提高大型阶梯轴的直径测量精度。

参考文献:

- [1] 梁建安, 刘斌, 梁美彦, 等. 基于彩色偏振图像的 HSV 空间目标增强方法[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 548-555.
LIANG Jianan, LIU Bin, LIANG Meiyun, et al. HSV space target enhancement method based on color polarization images[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 548-555.
- [2] YANG K, LIU F, LIANG S Y, et al. Data-driven polarimetric imaging: a review[J]. Opto-Electronic Science, 2024, 3(2): 1-44.
- [3] 王赞, 金尚忠, 陈智慧, 等. 基于像素偏振片阵列的实时水下目标成像技术[J]. 半导体光电, 2019, 40(6): 879-885.
WANG Yun, JIN Shangzhong, CHEN Zhihui, et al. Real-time underwater target imaging technology based on pixel polarizer array[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(6): 879-885.
- [4] 叶文炜, 周天福, 黄锦媛, 等. 基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(1): 214-220.
YE Wenwei, ZHOU Tianfu, HUANG Jinxuan, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 214-220.
- [5] 蔡达岭, 范君柳, 吴泉英, 等. 基于机器视觉的小景深高分辨率双远心光学系统的设计[J]. 激光杂志, 2020, 41(4): 24-28.
CAI Daling, Fan Junliu, WU Quanying, et al. Design on bilateral optical system with small depth of field and high resolution of machine vision[J]. Laser Journal, 2020, 41(4): 24-28.
- [6] 罗春华, 侯锐利, 于艇, 等. 工业双远心系统的设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(6): 12-15.
LUO Chunhua, HOU Ruili, YU Ting, et al. The design of double telecentric optical system in industry[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2015, 38(6): 12-15.
- [7] 曹一青. 超大视场折反射全景光学成像系统设计[J]. 应用光学, 2021, 42(4): 608-613.
CAO Yiqing. Design of an ultra-wide field of view catadioptric panoramic optical imaging system[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(4): 608-613.
- [8] 韦晓孝, 李雪宸, 万新军, 等. 基于三维缺陷检测的双光路双远心光学系统设计[J]. 光学技术, 2020, 46(1): 14-19.
WEI Xiaoxiao, LI Xuechen, WAN Xinjun, et al. Design of bitelecentric optical system with two-path configuration for 3-D defect inspections[J]. Optical Technique, 2020, 46(1): 14-19.
- [9] 李明东, 高兴宇, 叶鹏, 等. 机器视觉非球面双远心物镜的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 57(7): 070801-1-9.
LI Mingdong, GAO Xingyu, YE Peng, et al. Design of aspherical double telecentric lens for machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 57(7): 070801-1-9.
- [10] 朱铮涛, 裴炜冬, 李渊, 等. 基于远心镜头的激光三角测距系统研究与实现[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 53(3): 031002-1-6.
ZHU Zhengtao, PEI Weidong, LI Yuan, et al. Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 53(3): 031002-1-6.
- [11] 刘凌鸿, 冯云, 农柳华, 等. 三倍率双远心镜头设计及视场对光学设计影响[J]. 激光与光电子学进展, 2022,

- 59(7): 300-308.
- LIU Linghong, FENG Yun, NONG Liuhua, et al. Design of triple rate double telecentric lens and the influence of field of view on optical design[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 300-308.
- [12] 高兴宇, 陈朋波, 李明枫, 等. 大视场宽景深双远心系统的设计[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 182-186.
- GAO Xingyu, CHEN Pengbo, LI Mingfeng, et al. Design of wide field of view and large depth of field double telecentric system[J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 182-186.
- [13] LI J C, KUN Z, DU J L, et al. Double-sided telecentric zoom optical system using adaptive liquid lenses[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 2508-2522.
- [14] WAN X J, TAO X C. Design of a cell phone lens-based miniature microscope with configurable magnification ratio[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(8): 3392.
- [15] ZHOU T F, HUANG J X, LIN F. Zemax-based compact dual telecentric lens design[J]. *Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications*, 2020, 17: 1-2.
- [16] 王之江, 顾培森. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- WANG Zhijiang, GU Peisen. Practical optical technology manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.
- [17] 伍雁雄, 郭智元, 余苗, 等. 基于非共轴阵列照明的小型化眼底相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2020, 49(8): 19-29.
- WU Yanxiong, GUO Zhiyuan, YU Miao, et al. Optical system design for miniaturized fundus camera based on non-coaxial array illumination[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(8): 19-29.
- [18] 罗锐, 梁秀玲. 大孔径宽光谱变焦镜头设计[J]. *应用光学*, 2022, 43(5): 839-845.
- LUO Rui, LIANG Xiuling. Design of a large aperture wide spectrum zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 839-845.
- [19] 孙丽婷, 张继艳, 秦腾, 等. 用于精密检测的大孔径双远心光学系统设计[J]. *激光与红外*, 2024, 54(7): 1123-1129.
- SUN Liting, ZHANG Jiyan, QIN Teng, et al. Design of a large aperture bitelecentric optical system for precision measurement[J]. *Laser & Infrared*, 2024, 54(7): 1123-1129.
- [20] 朱斐越, 李艳红, 杨扬. 基于 Zemax 仿真的红外光场成像技术[J]. *激光与红外*, 2023, 53(6): 945-953.
- ZHU Feiyue, LI Yanhong, YANG Yang. Infrared light field imaging technology based on Zemax simulation[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(6): 945-953.