

文章编号:1001-5078(2024)07-1123-07

· 光学技术 ·

# 用于精密检测的大孔径双远心光学系统设计

孙丽婷<sup>1</sup>,张继艳<sup>1</sup>,秦腾<sup>1</sup>,林正煜<sup>1</sup>,曹天皓<sup>1</sup>,林忻辉<sup>2</sup>

(1. 厦门理工学院光电与通信工程学院,福建 厦门 361024;2. 福建盈方光电科技有限公司,福建 厦门 361024)

**摘要:**为了满足光通信玻璃管内径检测对机器视觉提出的高精度要求,以及解决照明不均匀对检测精度的影响,本文在四组元结构设计理论基础上,通过像差平衡和优化设计,设计了一种具有同轴照明的大孔径高分辨率双远心光学系统。该系统由球面透镜及分光棱镜组成,放大倍率为 $6\times$ , $F$ 数为8,物方数值孔径为0.3759,适配于6500万像素的大面阵工业相机。设计结果表明,系统的成像质量接近衍射极限,光学调制传递函数在奈奎斯特频率156 lp/mm处大于0.1,最大畸变小于0.1%,物像方远心度均小于 $0.1^\circ$ ,系统分辨率高达 $1\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:**机器视觉;精密检测;同轴照明;大孔径;双远心

中图分类号:TN206;TH74 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.019

## Design of a large-aperture double-sided telecentric optical system for precision detection

SUN Li-ting<sup>1</sup>,ZHANG Ji-yan<sup>1</sup>,QIN Teng<sup>1</sup>,LIN Zheng-yu<sup>1</sup>,CAO Tian-hao<sup>1</sup>,LIN Xin-hui<sup>2</sup>

(1. College of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Fujian Yingfang Optoelectronic Technology Co., Ltd., Xiamen 361024, China)

**Abstract:** In order to meet the high-precision requirements for machine vision for detecting the inner diameter of glass tubes in optical communication, as well as to address the influence of uneven lighting on detection accuracy, a large-aperture, high-resolution double-sided telecentric optical system with coaxial illumination through aberration balancing and optimization design is proposed based on the theory of four-component structural design. The system consists of a spherical lens and a splitter prism, with a magnification of  $6\times$ ,  $F$ -number of 8, and an object numerical aperture of 0.3759, and is suitable for large format industrial cameras with a resolution of 65 million pixels. The design results show that the imaging quality of the system is close to the diffraction limit, the optical modulation transfer function is greater than 0.1 at the Nyquist frequency of 156 lp/mm, the maximum distortion is less than 0.1%, the object-image square telecentricity is less than  $0.1^\circ$  in all cases, and the system resolution is as high as  $1\ \mu\text{m}$ .

**Keywords:** machine vision; precision detection; coaxial illumination; large aperture; double-sided telecentric

### 1 引言

随着工业化水平的不断提高,机器视觉技术得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。机器视觉系统的构成主要包括

光源、光学镜头、工业相机、图像处理部分<sup>[2]</sup>。其中,图像采集部分是机器视觉技术的重要任务,而光学镜头是图像得以采集的核心部件,决定着成

**基金项目:**国家自然科学基金项目(No. 61704142);厦门市科技计划项目产学研项目(No. 2023CXY0402)资助。

**作者简介:**孙丽婷(1999-),女,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail:2122031275@s.xmut.edu.cn

**通讯作者:**张继艳(1977-),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光学设计,信息光学,激光应用,颜色光学等方面的研究。E-mail:jy Zhang@xmut.edu.cn

收稿日期:2023-12-05

像效果的好坏,影响后续的图像处理和产品检测环节,因此光学镜头在机器视觉系统中起着至关重要的作用。目前三维目标物体检测、产品缺陷和尺寸检测常采用非接触式的机器视觉检测,机器视觉检测中普遍采用远心镜头。远心镜头具有远心性和低畸变特点,能够有效减小因调焦不准而造成的测量误差,提高检测精度和效率,增加了工业生产过程中的灵活性。远心镜头分为物方远心、像方远心和双远心三种类型<sup>[3]</sup>,双远心综合了物方远心和像方远心的优点,减小了因物体位置偏移、传感器位置偏移所带来的误差问题,在机器视觉检测领域中备受青睐。

近年来,许多研究人员对双远心系统的设计和应用方面进行了探索,长春理工大学的侯锐利设计了一款7片透镜、 $F$ 数为8、放大倍率为 $-0.18\times$ 的双远心系统<sup>[4]</sup>。桂林电子科技大学的李明东等人,引入了3片非球面镜,设计了一款检测精度为 $0.002\text{ mm}$ 、放大倍率为 $5\times$ 、像方视场为 $20\text{ mm}$ 的低畸变高分辨率双远心物镜,可用于精确检测微小零件<sup>[5]</sup>。上海帆声图像科技有限公司的景磊设计了一款用于工业触摸屏 Driver 位和 Sensor 位缺陷检测的高分辨率物方远心镜头,放大倍率为 $4\times$ 、像方视场为 $11\text{ mm}$ ,具有良好的公差兼容性,并带有同轴光接口<sup>[6]</sup>。浙江大学的黄祺设计了一款包含12片镜片、放大倍率为 $3\times$ 、 $F$ 数为9,可配搭6500万像素传感器的高分辨率大面阵物方远心光学系统<sup>[7]</sup>。

综上,目前双远心镜头设计仍普遍以小孔径、小倍率、小面阵的特点为主,采集到的信息量少,对于细微物体的判断易存在偏差,难以适用高精密检测的特殊应用场景。随着水平的提高,人们对机器视觉精密检测的精度要求越来越高,双远心镜头正朝着拥有更大孔径、大倍率、高分辨率以及适配大面阵工业相机的趋势发展,用于精密检测的大孔径双远心光学系统设计逐渐成为研究热点<sup>[8-9]</sup>。

本文通过分析超高精密光通信玻璃管内径检测的需求,设计了一种物方数值孔径为 $0.3759$ 、 $F$ 数为8,工作波段为可见光范围的双远心光学系统,该系统的大孔径可以实现测量所需 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的分辨率要求,同时具备 $6\times$ 的成像放大倍率,适配于6500万像素大面阵工业相机。此外,双远心系统中还设置了分光棱镜,用于实现同轴光照明。

## 2 双远心光学系统特性分析

传统光学镜头采用透视投影成像,入射主光线并非平行于光轴,当系统调焦不准确时,物体在不同物距处所对应的主光线不一致,容易造成视差问题。远心镜头的使用解决了传统光学镜头的视差和畸变问题,采用平行投影成像,在一定的物距范围内系统的放大倍率不发生改变,有利于广泛应用在机器视觉检测领域。双远心系统成像原理如图1所示,由前镜组 $L_1$ 、孔径光阑、后镜组 $L_2$ 三部分构成,将孔径光阑放置在前镜组像方焦平面和后镜组物方焦平面重合处,构成一个开普勒望远镜结构形式<sup>[10]</sup>,入瞳与出瞳均位于无穷远处,使得物空间入射主光线与像空间出射主光线均为平行光,综合了物方远心光路和像方远心光路的特点,既能解决物体位置偏移即物方调焦不准所带来的误差问题,又能解决图像传感器位置偏移即像方调焦不准所带来的误差问题,不影响系统的成像大小,从而确保了检测结果的精确性,检测精度更高。

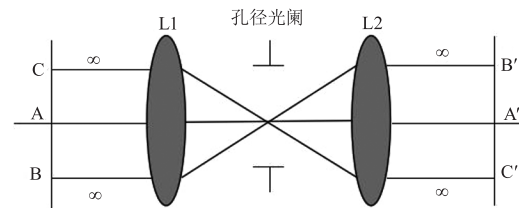


图1 双远心系统成像原理图

Fig. 1 Imaging principle diagram of double-telecentric system

对于大孔径的双远心光学系统而言,为了确保系统远心性,球差的校正往往是关键。基于像差理论,球差是入射高度 $h$ 或孔径角 $U$ 的函数,可以表示为:

$$\delta L' = A_1 h^2 + A_2 h^4 + A_3 h^6 + \dots \quad (1)$$

$$\delta L' = a_1 U^2 + a_2 U^4 + a_3 U^6 + \dots \quad (2)$$

式中, $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 分别为初级球差系数、二级球差系数、三级球差系数。可以看出,球差随着孔径角的增大而增大,并且当孔径较大时,高级球差不可以忽略。

球差的存在会使双远心系统中物方和像方主光线发生一定的偏离,且球差越大,主光线偏离程度越大,远心度也随之增加,影响检测的准确性。因此,在设计的过程中,校正大孔径带来的球差是重点,尤其需要控制难以校正的高级球差。

### 3 设计指标

用于精密检测玻璃管内径的光学系统如图 2 所示,包括待检测玻璃管、远心镜头、同轴光源以及工业相机 CMOS。将待检测的玻璃管放置在镜头的物侧,光源经分光棱镜为玻璃管提供同轴均匀照明,其反射的光沿轴进入工业相机 CMOS 进行图像采集。被测玻璃管的内径为 1.8 mm,系统工作在可见光范围内,分辨率要求为 1  $\mu\text{m}$ 。

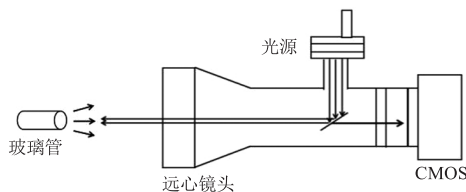


图2 光学检测系统

Fig.2 Optical detection system

玻璃管广泛地应用于光通信领域,其剖面内部结构如图 3 所示,准直镜与光纤需用专门的胶水粘合固定在玻璃管内壁,构成一个整体封装结构,起到光准直的作用。由于高温条件下胶水发生膨胀易造成玻璃管爆裂等情况,故在玻璃管的生产过程中对于玻璃管口径的要求很严格,尤其是内径的尺寸要求。

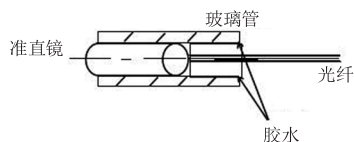


图3 玻璃管内部结构图

Fig.3 Internal structure diagram of glass tube

为了增加采样信息量和确保信噪比,本文双远心光学系统选用 Irayple 公司传感器型号为 GMAX3265 的 6500 万像素大面阵工业相机,其主要参数如表 1 所示。奈奎斯特频率是 CMOS 图像传感器理论上所能分辨的截止频率<sup>[11]</sup>,取决于 CMOS 的像元大小,由像元尺寸为 3.2  $\mu\text{m} \times 3.2 \mu\text{m}$  可得:

$$N = \frac{1000}{2\sigma'} = \frac{1000}{2 \times 3.2} \approx 156 [\text{lp}/\text{mm}] \quad (3)$$

式中, $N$  为奈奎斯特频率, $\sigma'$  为传感器像元尺寸。

表 1 传感器参数

Tab.1 Sensor parameters

系统参数	数值
靶面尺寸/ $\text{mm}^2$	29.9 $\times$ 22.4
分辨率	9344 $\times$ 7000
像元尺寸/ $\mu\text{m}^2$	3.2 $\times$ 3.2
镜头接口	M58 (FBL12)

光学系统的像高应与 CMOS 传感器靶面大小相匹配,由于传感器为矩形靶面,而玻璃管口径为圆形,为了保证采集到完整的图像,像高大小不得超过传感器靶面的短边,故选定系统像方视场为 22.4 mm。根据玻璃管内径的大小,选定检测范围即物方视场为 3.74 mm,系统的放大倍率:

$$\beta = \frac{2y'}{2y} \quad (4)$$

式中, $\beta$  为系统的放大倍率; $2y'$  为像方视场大小; $2y$  为物方视场大小,计算得出放大倍率为 6  $\times$ 。

根据 1  $\mu\text{m}$  的分辨率要求,按瑞利判断<sup>[12]</sup>,物方数值孔径的大小直接决定了物方分辨率,此类有限物距光学测量系统物方分辨率的计算公式为:

$$\sigma = \frac{0.61\lambda}{NA} \leq 1 \mu\text{m} \quad (5)$$

式中, $\sigma$  为物方分辨率; $NA$  为物方数值孔径;波长  $\lambda$  取 0.55  $\mu\text{m}$ 。经计算得出  $NA \geq 0.3355$ ,考虑到系统加工及装配过程中可能造成的误差,为了确保像质的效果,将  $NA$  选取为 0.3759,工作  $F$  数与  $NA$  的关系:

$$NA = \frac{\beta}{2F} \quad (6)$$

综上所述,本文双远心光学系统的设计指标如表 2 所示。

表 2 光学系统设计指标

Tab.2 Optical system design parameters

系统参数	数值
放大倍率	6 $\times$
$F$ 数	8
工作距离/ $\text{mm}$	70.5
物方视场/ $\text{mm}$	3.74
像方视场/ $\text{mm}$	22.4
物方数值孔径	0.3759
分辨率/ $\mu\text{m}$	1
远心度/ $^\circ$	<0.1
畸变/%	<0.1
MTF@156/(lp $\cdot$ mm <sup>-1</sup> )	>0.1

### 4 设计思路

#### 4.1 系统结构优化设计

复杂双远心系统的近轴设计通常采用三组元或四组元结构设计。根据表 2 中相关设计指标的要求,为了更合理地分配系统光焦度,本文综合分析选

用四组元结构设计。四组元光学系统结构如图 4 所示。

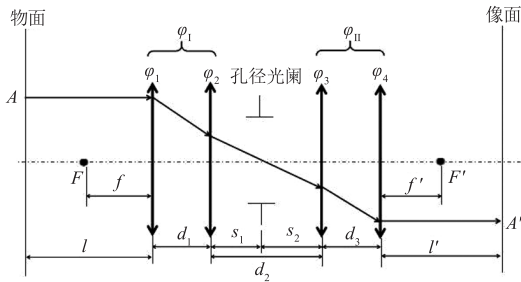


图 4 四组元光学系统结构图

Fig. 4 Structural diagram of four-component optical system

为了实现大数值孔径,从专利库中选取如图 5 所示的结构作为系统的初始结构。前镜组由双凸透镜和胶合透镜构成,便于接收大数值孔径  $NA$  的光线后,逐步压缩边缘光线,使光线平缓集中地进入后镜组,且胶合透镜的使用有利于减少系统的色差。

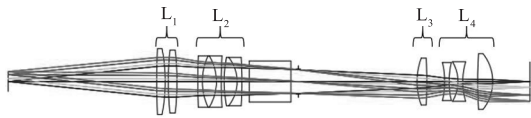


图 5 初始结构图

Fig. 5 Initial structural diagram

本文将初始结构分为四个透镜组进行光焦度的重新分配。图 4 中  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 、 $\phi_4$  分别为镜组  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  的光焦度。

利用几何光学中的关系式<sup>[13]</sup>,可以推导出四组元光学系统的光焦度<sup>[14]</sup>:

$$\phi = \phi_I + \phi_{II} - d_2\phi_I\phi_{II} - d_1\phi_1\phi_{II} - d_3\phi_4\phi_I \quad (7)$$

$$\phi_I = \phi_1 + \phi_2 - d_1\phi_1\phi_2 \quad (8)$$

$$\phi_{II} = \phi_3 + \phi_4 - d_3\phi_3\phi_4 \quad (9)$$

$$\phi_{II} = -\frac{\phi_I}{\beta} \quad (10)$$

式中,  $\phi$  为总光焦度;  $\phi_I$  为前镜组的光焦度;  $\phi_{II}$  为后镜组的光焦度;  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 、 $\phi_4$  为各镜组的光焦度;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  为各镜组间的轴向距离。

结合图 4 中各参数之间的关系,经过推导可得前镜组光焦度  $\phi_I$  的等式:

$$\left[ \left( l - \frac{l'}{\beta^2} \right) s_1 s_2 \right] \phi_I^2 + \left( \frac{s_1 d_3}{\beta} - s_2 d_1 \right) \phi_I + d_2 = 0 \quad (11)$$

式中,  $l$  为物距;  $l'$  为像距;  $s_1$ 、 $s_2$  分别为镜组  $L_2$  与镜组  $L_3$  到孔径光阑之间的距离。

经过上述公式(7)~(11)的理论计算,各镜组光焦度可由以下关系式计算得出:

$$\phi_1 = \frac{1}{d_1} - \frac{\phi_I s_1}{d_1} \quad (12)$$

$$\phi_2 = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{d_1} - \frac{1}{\phi_I s_1 d_1} \quad (13)$$

$$\phi_3 = \frac{1}{s_2} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{\phi_{II} s_2 d_3} \quad (14)$$

$$\phi_4 = \frac{1}{d_3} - \frac{\phi_{II} s_2}{d_3} \quad (15)$$

在系统架构光焦度的重新调整过程中,还需考虑孔径增大所带来的球差、色差。因此,为了校正色差,采用多组双胶合透镜对各组元光焦度进行分配,且主要集中在孔径光阑附近以消除球差。在色差的校正上,胶合镜组的两个玻璃材料色散系数相差越大越有利于校正轴向色差<sup>[15]</sup>,故将高折射率低色散的火石玻璃和低折射率高色散的冕牌玻璃搭配使用。优化后的系统共有四组双胶合透镜,玻璃材料分别选用 H-ZLAF68C + H-FK61、H-FK61 + H-ZF3、H-ZF88 + H-FK61、H-ZF88 + H-ZLAF50E。此外,由于大物方数值孔径使得前组所承担的光焦度较大,镜片排列较为紧凑,为保留装配空间,将镜片间的中心间距控制在 0.2 mm 以上,边缘间距控制在 1 mm 以上,后组分光棱镜与相邻镜片间的间距也需大于 3 mm。

同轴光照明系统与成像系统的光瞳匹配关系满足柯勒照明“瞳对窗,窗对瞳”的特点<sup>[16]</sup>,且照明系统的拉赫不变量应不小于成像系统的拉赫不变量。光源成像于成像系统的孔径光阑处,为了实现充分均匀照明,需控制光源的像高不小于孔径光阑的大小。

通过照明光路和成像光路的匹配设计与优化,最终得到如图 6 所示的系统结构,系统的放大倍率为  $6\times$ , $F$  数为 8,工作距为 70.5 mm,系统总长为 290 mm,物像方远心度均小于  $0.1^\circ$ 。与初始结构相比,物方数值孔径增大到了 0.3759,并将分光棱镜移到了孔径光阑之后。

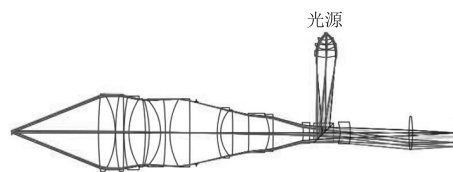


图 6 双远心系统结构图

Fig. 6 Double-sided telecentric system structural diagram

4.2 设计结果及像差分析

光学调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是最能充分反映系统实际成像质量的评价指标。图 7 为系统的 MTF 曲线图, 可看出全视场在奈奎斯特频率 156 lp/mm 处 MTF 值均大于 0.1, 接近衍射极限, 成像质量良好。

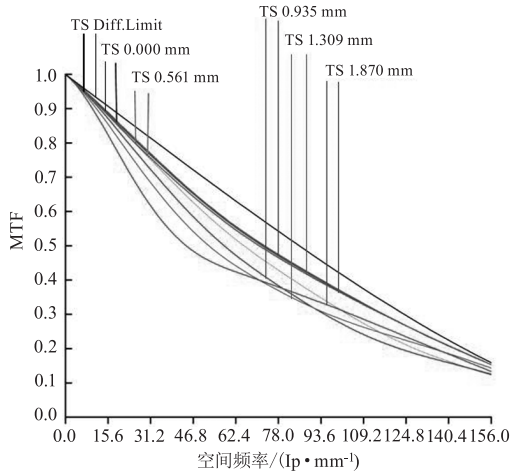


图 7 MTF 曲线  
Fig. 7 MTF curve

在精密检测领域中, 畸变会使物体成像产生变形, 是造成测量误差的重要因素之一。图 8 为系统的畸变图, 系统最大畸变控制在 0.1% 以内, 满足检测要求。图 9 反映了系统的倍率色差情况, 大致控制在艾里斑半径内。

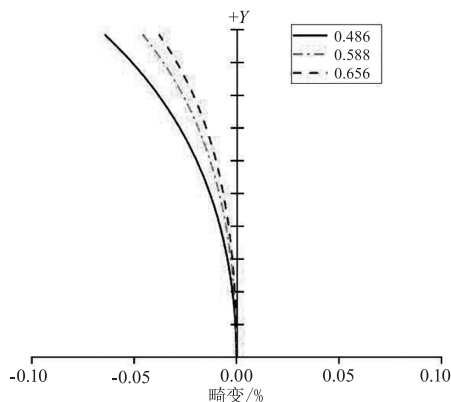


图 8 畸变图  
Fig. 8 Distortion diagram

远心度是评价远心系统的一个重要指标, 远心度越小, 测量精度就越高, 如表 3 所示, 分别列出了物方和像方 0.3 H、0.5 H、0.7 H、1 H 的远心度大小, 从表 3 中可看出系统物方最大远心度为 0.0563°, 像方最大远心度为 0.0381°, 均小于设计指标所要求的 0.1°。

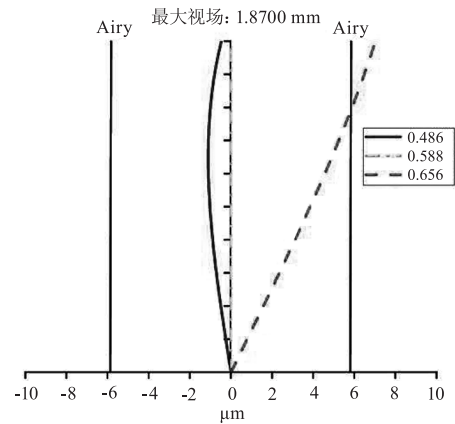


图 9 倍率色差图

Fig. 9 Lateral color diagram

表 3 系统远心度

Tab. 3 System telecentricity

归一化物方高度	物方远心度/(°)	像方远心度/(°)
0.3 H	0.0172	0.0291
0.5 H	0.0286	0.0381
0.7 H	0.0398	0.0312
1 H	0.0563	0.0243

5 公差分析

对于光学成像系统而言, 各项像差以及光学零件加工装配过程中的误差都是影响精度的重要因素。为此对该双远心镜头进行公差分析, 主要选取镜片的曲率半径偏差、厚度偏差以及镜组间的偏心 and 倾斜度偏差等为研究对象, 公差参数设置如表 4 所示, 选择衍射极限下的 MTF 为评价函数, 采用蒙特卡洛分析法, 并将后焦距作为补偿参量。表 5 给出了部分对系统性能影响较大的表面序号和改变值, 可以看出, 第 14 面、第 16 面和第 1 面等为敏感面, 加工和装配过程中需重点控制。

表 4 公差参数值

Tab. 4 Tolerance parameter value

公差类型	公差范围
曲率半径/光圈	3
厚度/mm	±0.02
透镜倾斜度/(°)	±0.0167
镜组偏心/mm	±0.01
镜组倾斜度/(°)	±0.0167
不规则度/光圈	0.3

表5 公差敏感项

Tab. 5 Tolerance sensitive items

公差类型	表面序号	表面序号	数值	标准量	改变量
TTHI	14	16	0.02000000	0.06168131	-0.09168940
TSTY	1		-0.01670000	0.06404646	-0.08932426
TSTY	1		0.01670000	0.06404646	-0.08932426
TSTX	1		-0.01670000	0.06409255	-0.08927816
TTHI	14	16	-0.02000000	0.06441414	-0.08895657
TTHI	2	4	-0.02000000	0.06450486	-0.08886585
TTHI	2	4	0.02000000	0.06955924	-0.08381147

将改变量超过5%的公差指标进一步地收紧(见表6),再次公差分析后的前5项敏感项数据如表7所示,此时各公差指标对系统的改变量均在5%以下,满足实际要求。

表6 个别公差收紧参数值

Tab. 6 Individual tolerance tightening parameter value

公差类型	表面序号	表面序号	数值
TTHI	2	4	±0.01
TTHI	7	10	±0.01
TTHI	14	16	±0.01
TSTX	1		±0.01
TSTY	1		±0.01
TSTX	2		±0.01
TSTY	2		±0.01
TSTX	9		±0.01
TSTY	9		±0.01
TSTX	11		±0.01
TSTY	11		±0.01
TSTY	15		±0.01
TEDX	8	10	±0.005
TEDY	8	10	±0.005
TETX	8	10	±0.01
TETY	8	10	±0.01

表7 公差收紧后前5项敏感项

Tab. 7 Top 5 sensitive items after tolerance tightening

公差类型	表面序号	数值	标准量	改变量
TSTX	15	-0.01670000	0.10654620	-0.04682451
TSTX	15	0.01670000	0.10704114	-0.04632957
TSTX	1	-0.01000000	0.10831965	-0.04505106
TSTY	14	0.01670000	0.10853544	-0.04483527
TSTY	14	-0.01670000	0.10853544	-0.04483527

## 6 结论

本文根据光通信玻璃管内径的检测需要,在四组元结构设计理论基础上,进行像差优化和结构调整,设计了一款具有同轴照明的双远心光学系统。该系统物方数值孔径为0.3759,分辨率为1 μm,最大畸变不超过0.1%,物像方远心度均小于0.1°,全视场在奈奎斯特频率156 lp/mm处MTF值均大于0.1,系统光通量大,分辨率高,成像效果达到了预期要求。对光学系统进行公差分析,进一步收紧对像质影响较大的指标,满足光学零件加工和光学系统装配的实际要求,在机器视觉检测细微精密器件领域有着一定的参考价值。

## 参考文献:

- [1] Fernandes A O, Moreira L F E, Mata J M, et al. Machine vision applications and development aspects [C]//9th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA). New York, USA: IEEE, 2011: 1274 - 1278.
- [2] Zhang Xinting, Kang Lei, Ding Hongchang, et al. Design of aspheric double-sided telecentric industrial lens based on machine vision [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 230 - 234. (in Chinese)  
张欣婷, 亢磊, 丁红昌, 等. 基于机器视觉的非球面双远心工业镜头设计 [J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 230 - 234.
- [3] Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometric optics · aberration · optical design. 3rd ed [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014, 2: 73 - 74. (in Chinese)  
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学 · 像差 · 光学设计. 3版 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014: 73 - 74.
- [4] Hou Ruili. Design of a compact industrial double-sided telecentric system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)  
侯锐利. 紧凑型工业双远心系统的设计 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [5] Li Mingdong, Gao Xingyu, Ye Peng, et al. Design of machine vision aspheric double telecentric objective lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 134 - 142. (in Chinese)  
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, 53(7): 134 - 142.
- [6] Jing Lei. Design of telecentric lens for high magnification and resolution machine vision [J]. Modern Information

- Technology, 2019, 3(12): 141 - 144. (in Chinese)
- 景磊. 大倍率高分辨率机器视觉远心镜头设计[J]. 现代信息科技, 2019, 3(12): 141 - 144.
- [7] Huang Qi. Optimization design of high resolution measurement optical system based on machine vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021. (in Chinese)
- 黄祺. 基于机器视觉的高分辨率测量光学系统的优化设计研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [8] Cao Yiqing. Design of a double-sided telecentric lens for machine vision systems[J]. Infrared Technology, 2022, 44(2): 140 - 144. (in Chinese)
- 曹一青. 一种用于机器视觉系统的双远心镜头设计[J]. 红外技术, 2022, 44(2): 140 - 144.
- [9] 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. (in Chinese)
- 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.
- [10] Laikin M. Lens design[M]. 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 2001: 36 - 38.
- [11] Zhang Jianlong, He Lei, Yang Zhen. Design of high resolution long focus wide angle low distortion optical imaging system[J]. Applied Optics, 2017, 38(5): 725 - 731. (in Chinese)
- 张建隆, 贺磊, 杨振. 高分辨率长焦广角低畸变光学成像系统设计[J]. 应用光学, 2017, 38(5): 725 - 731.
- [12] Gail Overton. Breaking rayleigh's limit: Imaging resolution not defined by the criterion[J]. Laser Focus World, 2016, 52(12): 1 - 5.
- [13] W T Welford. Aberrations of optical systems[M]. Taylor & Francis, 1986.
- [14] A Miks, P Novak. Double-sided telecentric zoom lens consisting of four tunable lenses with fixed distance between object and image plane[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 56(25): 7020 - 7023.
- [15] Ma Jing, Qi Yuejing, Lu Zengxiong, et al. Design of linear dispersion objective lens for spectral confocal displacement sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 62 - 65. (in Chinese)
- 马敬, 齐月静, 卢增雄, 等. 光谱共焦位移传感器线性色散物镜设计[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 62 - 65.
- [16] Attota Ravi Kiran. Step beyond Kohler illumination analysis for far-field quantitative imaging: angular illumination asymmetry (ANILAS) maps[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22616 - 22627.