

# 激光与光电子学进展

## 三倍率双远心镜头设计及视场对光学设计影响

刘凌鸿<sup>1</sup>, 冯云<sup>1\*</sup>, 农柳华<sup>2</sup>, 唐雪辉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>桂林量具刃具有限责任公司研发部, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>桂林优利特医疗电子有限公司研发部, 广西 桂林 541004

**摘要** 双远心镜头具有畸变低、景深大的优点,广泛应用于机器视觉工业的在线检测领域。现在提供一种三倍率双远心光路的设计方案,以半反半透镜为界,将远心镜头分为物镜与目镜两部分,通过更换目镜,在原有物镜系统上同时实现不同的光学倍率,可满足同时观察物体的整体与局部的需求。运用光学设计软件设计出一款三倍率、低畸变、高分辨率的双远心镜头。该镜头的工作距离为 100 mm,物方视场分别为 100 mm 和 25 mm,光学放大倍率分别为  $-0.11\times$ ,  $-0.24\times$  和  $-0.44\times$ ,满足低畸变(最大畸变小于 0.05%)与高分辨率(145 lp/mm 处大于 0.3)等要求。并以此对视场大小与光学系统设计的关系进行研究。

**关键词** 光学设计; 双远心光路; 三放大倍率

中图分类号 TB133

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0722002

## Three-Magnification Double-Telecentric Optical System and Effect of Field on Optical Design

Liu Linghong<sup>1</sup>, Feng Yun<sup>1\*</sup>, Nong Liuhua<sup>2</sup>, Tang Xuehui<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research and Development Department, Guilin Measuring & Cutting Tool Co., Ltd.,

Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup>Research and Development Department, Guilin URIT Medical Electronic Co., Ltd.,

Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** Double-telecentric lenses present the advantages of low distortion and large depth of field. Therefore, they are widely applied in the online detection of the machine vision industry. This study presents an optical design for a three-magnification double-telecentric system based on machine vision. The telecentric system is divided into objective and eyepiece parts by setting a refractive prism as the boundary. Different optical magnification in the original system could be realized by replacing the eyepiece, which ensures the applicability of the telecentric systems in outline and detail. In this study, we designed a three-magnification double-telecentric system with high definition and low distortion using the optics design software. In the proposed system, the working distance is 110 mm and the object fields of view are 100 mm and 25 mm. The optical magnifications are  $-0.11$ ,  $-0.24$ , and  $-0.44$ . The system achieves low distortion ( $<0.05\%$  in each field of view) and high resolution ( $>0.3$  at 145 lp/mm). Additionally, it meets other design requirements. Furthermore, the relationship between fields of view and optical design is investigated.

**Key words** optical design; double-telecentric system; three magnification

### 1 引言

机器视觉应用系统<sup>[1]</sup>的核心部分包括光源系

统、光学镜头、图像处理系统以及执行机构等。相较于人工检测,机器视觉系统在稳定性与适应性上性能更优秀,能在分辨率、响应速度、感知范围等方

收稿日期: 2021-07-28; 修回日期: 2021-08-25; 录用日期: 2021-08-26

通信作者: \*fengyun@sinoshan.com

面弥补人眼的不足<sup>[2]</sup>。其中光学镜头在很大程度上决定系统的整体性能,光学镜头的成像质量直接影响图像处理软件的识别精度与处理速度。远心镜头相较于普通光学镜头,在性能上具有畸变低、放大倍率恒定、景深大的特点,在使用非接触式测量的机器视觉领域中具有广泛应用<sup>[3]</sup>。双远心镜头同时具有物方远心镜头与像方远心镜头的优点,小范围内的物距和像距变化对其成像质量影响极小<sup>[4]</sup>,同时也可以避免传统镜头产生的透视畸变。

随着科技的发展,大孔径、高分辨率的镜头在非接触式测量中有着重要的应用。远心镜头的光学放大倍率由像方视场与物方视场的比值决定,放大倍率与物方视场成反比,与像方视场成正比。通光孔径一定的情况下,物方分辨率与放大倍率成反比,若保持放大倍率不变,增大通光孔径,分辨率提高,其成像弥散光斑的球差也会增加,优化设计难度增大。同时在保持放大倍率不变的情况下,光学系统分辨率的提高,使得光学系统的设计、加工、装配、检测难度以及镜头的体积、成本等迅速增加。

近年来,双远心镜头的理论与实际设计日益增多,福建师范大学的叶文炜等<sup>[5]</sup>设计了一款双视野的双远心镜头,通过增加目镜,在系统上实现不同的放大倍率;此外还使用变倍凸轮的结构设计了一款 $-0.5\times$ 至 $-0.2\times$ 的连续变倍的双远心镜头<sup>[6]</sup>,分辨率在 $77.5\text{ lp/mm}$ 处大于 $0.3$ 。上海理工大学的韦晓孝等<sup>[7]</sup>针对印刷电路板的三维缺陷检测问题,设计了一款双光路双远心系统,通过远心投影物镜由共光路物镜将数字微镜的数字条纹投影到待测物面,同时由成像物镜收集物面的反射条纹光到图像接收器中进行检测。上海理工大学的陈秋白等<sup>[8]</sup>针对激光干涉仪的点光源在使用中出现相干噪声的问题,提出了一种环形透镜产生环形光源的系统,其中包括扩束系统、环形透镜和双远心镜头,双远心镜头可以缩小环形光源直径,并确保光源上每个离轴点的出射光束与光轴平行。

目前的远心检测仪器上通常只有一个光学镜头,只能以一个固定的倍率进行观测,当需要使用不同的倍率测量时,必须更换镜头,重新进行校正,更换镜头的过程繁琐、耗时长,且不能保证更换镜头后的定位重复度,不同倍率间测量的数据难以整合分析。双远心镜头系统使用的镜片数量通常较多,结构比较复杂,因此,本文提供一种三倍率双远心镜头设计方案,在同一个镜头上使用16块镜片实现3个不同的光

学放大倍率,既能实现大视场范围内的轮廓检测,也能对小视场范围的局部特征进行高精度检测,同时对3个不同倍率间光学设计成像效果进行对比分析。

## 2 基本原理

双远心光路原理<sup>[9]</sup>如图1所示,镜头系统由物镜组、目镜组两部分组成,物镜组的后焦点与目镜组的前焦点重合,光阑S正好处于物方焦平面与像方焦平面处,形成一个开普勒式望远镜结构<sup>[10]</sup>。对应的系统的入瞳位置与出瞳位置均为无穷远处,系统的主光线平行于光轴射入或射出,被测物体的尺寸在不同位置都能保持不变,调焦不准或超出景深范围产生的视差也不会影响测量结果,还能消除成像传感器轴向偏移所产生的测量误差<sup>[11]</sup>。

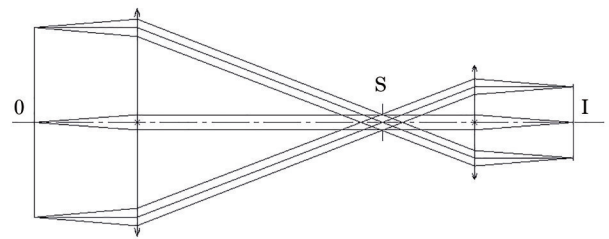


图1 双远心系统示意图

Fig. 1 Sketch map of double-telecentric system

## 3 三倍率双远心系统设计分析

### 3.1 镜头设计指标

在非接触式测量中,双远心镜头具有放大倍率恒定、景深大、畸变低的优势。其最主要的光学参数为放大倍率和视场等。本文的三倍率双远心镜头以510万像素 $2/3''$ 靶面的CCD与120万像素 $1/3''$ 靶面的CCD为图像接收器,其单元元尺寸分别为 $3.45\mu\text{m}\times 3.45\mu\text{m}$ 与 $3.75\mu\text{m}\times 3.75\mu\text{m}$ 。系统在工作距离为100 mm的物面上具有两个视野,分别为100 mm和25 mm。100 mm视野设计使用 $2/3''$ 靶面的CCD;25 mm视野设计了2个目镜,一个使用 $2/3''$ 靶面CCD另一个使用 $1/3''$ 靶面CCD。放大倍率计算公式为

$$\beta = \frac{y'}{y}, \quad (1)$$

式中: $y'$ 为像方的视场高度; $y$ 为物方的视场高度; $\beta$ 为放大倍率。系统的放大倍率分别为 $-0.11\times$ 、 $-0.24\times$ 和 $-0.44\times$ , $-0.11\times$ 与 $-0.44\times$ 的像方视野相同, $-0.24\times$ 与 $-0.44\times$ 的物方视野相同,可以分别对物体的整体外形轮廓与局部细节特征进行检测。

根据奈奎斯特采样定理,物面上的点经过光学系统后需要至少覆盖两个单像元才能分辨,检测精度计算公式为

$$\sigma = \frac{2a}{\beta}, \quad (2)$$

式中: $\sigma$ 为检测精度; $a$ 为 CCD 的单像元尺寸。由此计算出  $-0.11\times$ 、 $-0.24\times$  和  $-0.44\times$  系统的检测精度分别为  $0.063\text{ mm}$ 、 $0.031\text{ mm}$  和  $0.016\text{ mm}$ 。在相机的单像元尺寸一定的情况下,光学放大倍率越大,能够分辨的物面上的点越小,检测精度也就越高;若光学系统的弥散光斑大于单像元尺寸,也会影响检测精度。系统相关设计参数如表 1 所示,其中 MTF 表示调制传递函数。

表 1 远心系统设计指标

Table 1 Technical indexes of the telecentric optical system

System parameter	Technical index
Working distance /mm	110
$F$ -number	6
Field of object /mm	100, 25, 25
Magnification	$-0.11, -0.24, -0.44$
Field of image /mm	11, 6, 11
Distortion /%	$<0.1$
MTF at 145 lp/mm	$>0.3$
Telecentricity /( $^{\circ}$ )	$<0.1$

### 3.2 初始结构的分析与选择

本实例中选取初始结构需要考虑两个方面。其一是选择与设计需求相近的系统为初始结构;其二是需要在工作距离不变的情况下,3个光学放大倍率下均能良好成像。为了满足这两个要求,本文提供了一种方案:将远心镜头分为物镜部分与目镜部分,物镜为系统公共部分,同时匹配不同的目镜,使系统达到同时拥有不同放大倍率的目的。以物镜作为光学系统的公共部分,通过 2 个分光镜将光路平分为 1 个沿光轴的方向与 2 个垂直光轴的方向,在 3 个方向上分别装配不同的目镜组,实现 3 个倍率的同时观测,比较 3 个倍率之间的成像效果,分析视场大小对光学系统优化设计的影响。

因此,在选取初始结构时,首先要保证大视场下的物镜部分口径尺寸足够大,然后需要在物镜与目镜间留出足够的空间放置分光镜。图 2 为系统初始结构示意图。

### 3.3 设计过程及结果

把初始结构输入 ZEMAX 光学设计软件,对其结构与成像进行优化。

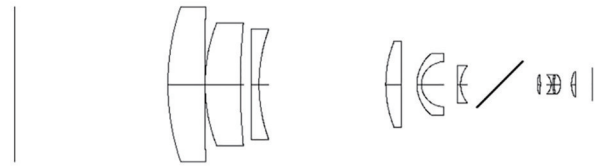


图 2 系统初始结构示意图

Fig. 2 System initial structural diagram

首先在结构上三倍率双远心镜头需要同时装配三组目镜,这里采用在转接处设置分光镜的方法,添加厚度为  $1\text{ mm}$  的 5:5 分光平板中性分光镜,一面镀半透半反膜,另一面镀增透膜。根据像差理论,分光镜的加入会引起一定的像差<sup>[12]</sup>,如球差、色差、像散等,另外透射光束会产生位移,反射光与透射光之间产生光程差,需要将分光镜预先设置在系统中,以便于与镜头其余部分互相抵消。考虑到分光镜的尺寸以及所需要的安装空间,将分光镜设置在系统光阑前方,根据李富强等<sup>[13]</sup>对光学拼接焦平面中反射镜的研究,远心系统中的反射镜可以设计成长方形。其次远心镜头的孔径光阑一般较小,选取的初始结构使用的镜片多达 11 片,会降低光通量,且难以装配调校。通过优化设计,在保证成像的前提下,将物镜数量减少, $F$  数设置为 6,可极大地提高光通量,降低装配难度,节约生产成本。

像差方面,双远心系统不仅要校正球差、色差、彗差等基本像差,还要重点优化系统的畸变大小与远心度,在 ZEMAX 软件中可以在 GEN 对话框内设置物方远心功能,确保系统的物方为绝对物方远心。可以通过控制主光线与像面的角度来控制系统的像方远心度,使用操作数 RANG 可以指定视场光线与  $Z$  轴的角度,本文设定了 5 个视场位置,分别为  $0H$ 、 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.7H$ 、 $1H$ ,  $H$  为归一化视场高度,将目标值设定为 0,使得系统的出射光线与像面垂直,以达到较好的像方远心度。

当系统的像方远心度优化到一定范围内时,畸变值普遍也较小,此时还可以使用 DIMX、DISG 等操作数对畸变进一步约束,以达到设计目标。

在优化设计过程中,首先单独对大视场的系统进行优化。虽然在 ZEMAX 软件中可以设置多重态同时优化 3 个结构,但是前期优化时的变量数目、约束条件、像差过大等因素,导致同时优化难以进行,得到的结果也很差。因此将 3 个倍率分开设计,先将  $-0.11\times$  的系统优化完成后,由于 3 个系统使用共同的物镜,把物镜部分固定,再设置分光镜后的

目镜部分为变量,将系统分别优化设计成 $-0.24\times$ 与 $-0.44\times$ 。当 3 个系统都优化到一定程度后,将其合并成多重态进行同时优化设计,同时需要考虑到镜片材料的性能以及曲率的加工难度,对结构进行调整,材料主要选择重冕玻璃与重火山玻璃。

优化设计后的系统结构如图 3 所示。其中:OBJ 为物面;IMA1、IMA2、IMA3 为 3 个像面;W1 为物镜系统,包括 G1、G2 共 2 片玻璃球面透镜;W2

为目镜组 1,包括 G4~G7 共 4 片玻璃球面透镜;W3 为目镜组 2,包括 G8~G11 共 4 片玻璃球面透镜;W4 为目镜组 3,包括 G12~G15 共 4 片玻璃球面透镜;G3 为 2 块平板分光镜。本设计所用玻璃均为成都光明玻璃厂的环保型材料,不含对环境有害元素,具有良好的可见光透光性,广泛应用于可见光范围的光学器件中。经过优化设计最终得到的光学系统结果图如图 4 所示。

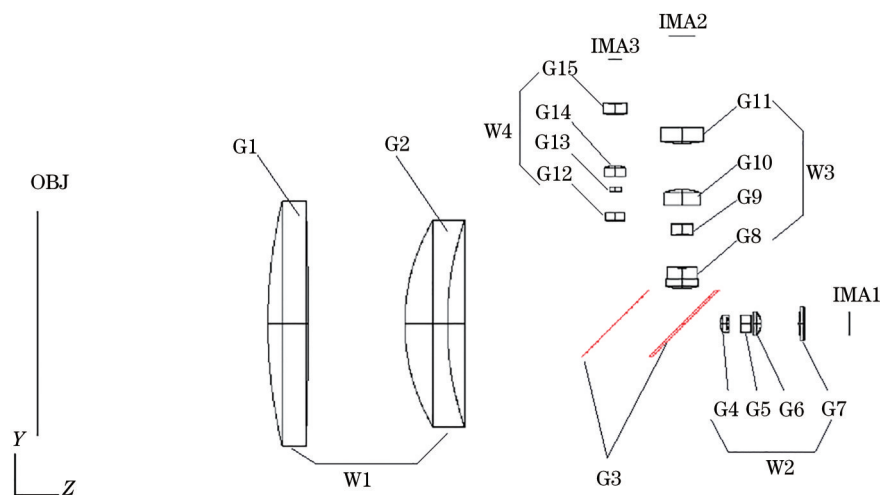


图 3 光学系统外形图

Fig. 3 Outline drawing of optical system

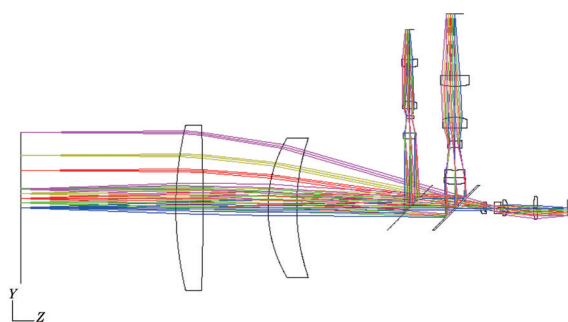


图 4 三倍率双远心系统光路图

Fig. 4 Light path diagram of the three-magnification double-telecentric system

### 3.4 MTF 曲线分析

MTF 曲线图表示镜头在不同频率下传递物体信息的能力,MTF 曲线下包围的面积越大则镜头的综合性能越好。图 5 为系统的传递函数曲线,与本系统镜头匹配的 2/3"CCD 相机的单像元尺寸为  $3.45\ \mu\text{m}\times 3.45\ \mu\text{m}$ ,1/3"CCD 相机的单像元尺寸为  $3.75\ \mu\text{m}\times 3.75\ \mu\text{m}$ ,光学系统的分辨率的截止频率为

$$N_L = 1000/2a, \quad (3)$$

式中: $N_L$ 为镜头的奈奎斯特频率; $a$ 为 CCD 芯片单像

元尺寸,一般要求光学系统的奈奎斯特频率处 MTF 值大于 0.2,则说明成像性能良好。2/3"CCD 相机的  $N_L=144.9\ \text{lp/mm}$ ;1/3"CCD 相机的  $N_L=133.3\ \text{lp/mm}$ 。从图 5 可以看出, $-0.11\times$ 系统相对  $-0.44\times$ 系统在  $145\ \text{lp/mm}$ 处的 MTF 值要高,且均大于 0.3,边缘视场的曲线略低于中心视场,说明边缘成像相比中心成像质量低;从图 7 可以看出  $-0.24\times$ 系统在  $135\ \text{lp/mm}$ 处的边缘视场大于 0.4,且整个视场范围内的 MTF 曲线接近一致,中心视场与边缘视场成像质量基本一致。对比 3 个系统的 MTF 曲线图,在同一个物镜系统下,像面相同时,光学倍率低的光学系统设计更容易接近理想 MTF 曲线;物高相同时,光学倍率低的光学系统设计更容易接近理想 MTF 曲线。在远心光学系统设计时,低光学放大倍率与小成像面的系统设计难度低。

### 3.5 点列图分析

系统匹配的 2/3"CCD 像单元尺寸为  $3.45\ \mu\text{m}\times 3.45\ \mu\text{m}$ ,1/3"CCD 的像单元尺寸为  $3.75\ \mu\text{m}\times 3.75\ \mu\text{m}$ ,当系统的像方点弥散光斑的均方根半径小于像元尺寸,则表示经过光学系统后物方信息能量集中,光学性能良好。从图 6 中可以看出,

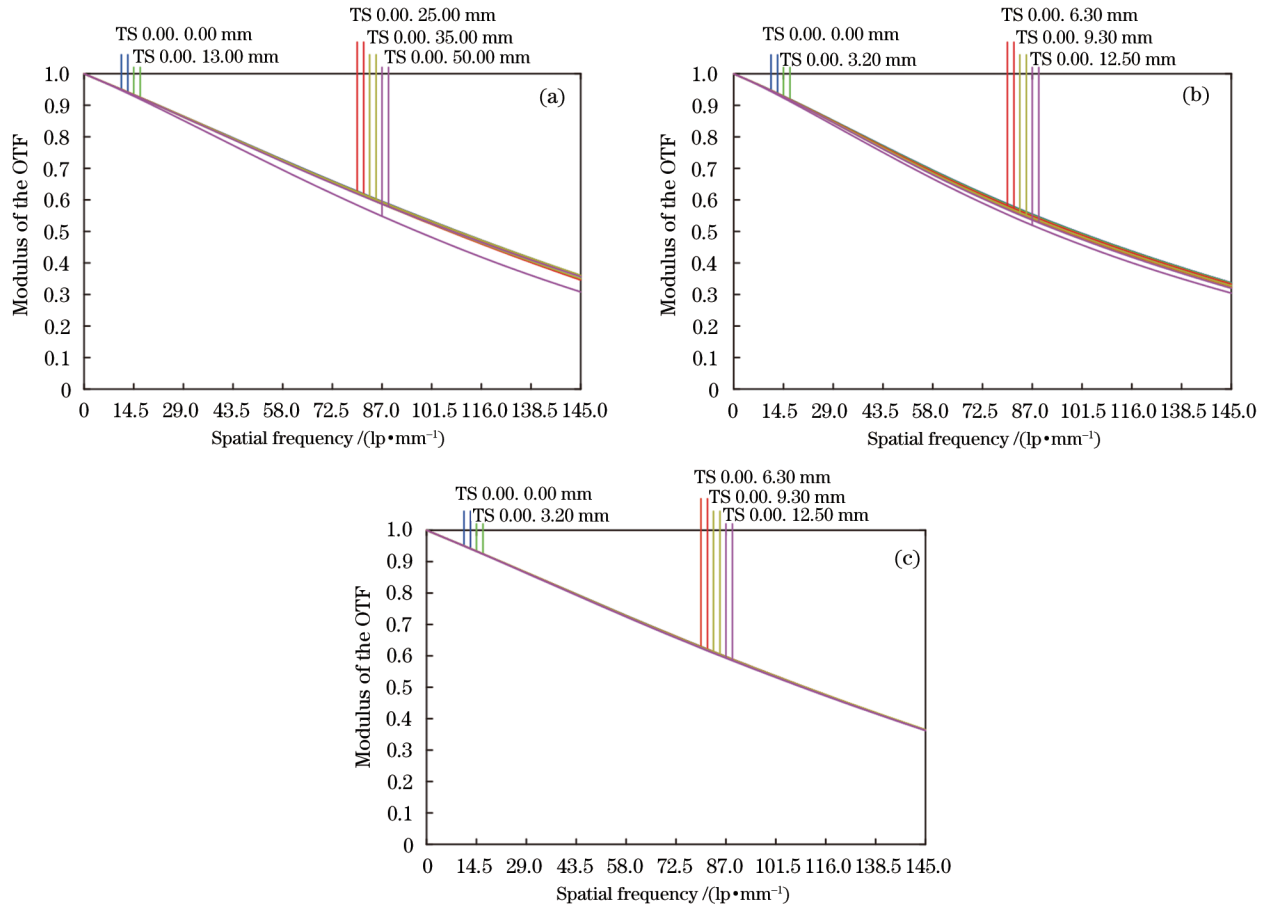


图 5 MTF 曲线图。(a)  $-0.11\times$ ; (b)  $-0.44\times$ ; (c)  $-0.24\times$   
 Fig. 5 MTF plots. (a)  $-0.11\times$ ; (b)  $-0.44\times$ ; (c)  $-0.24\times$

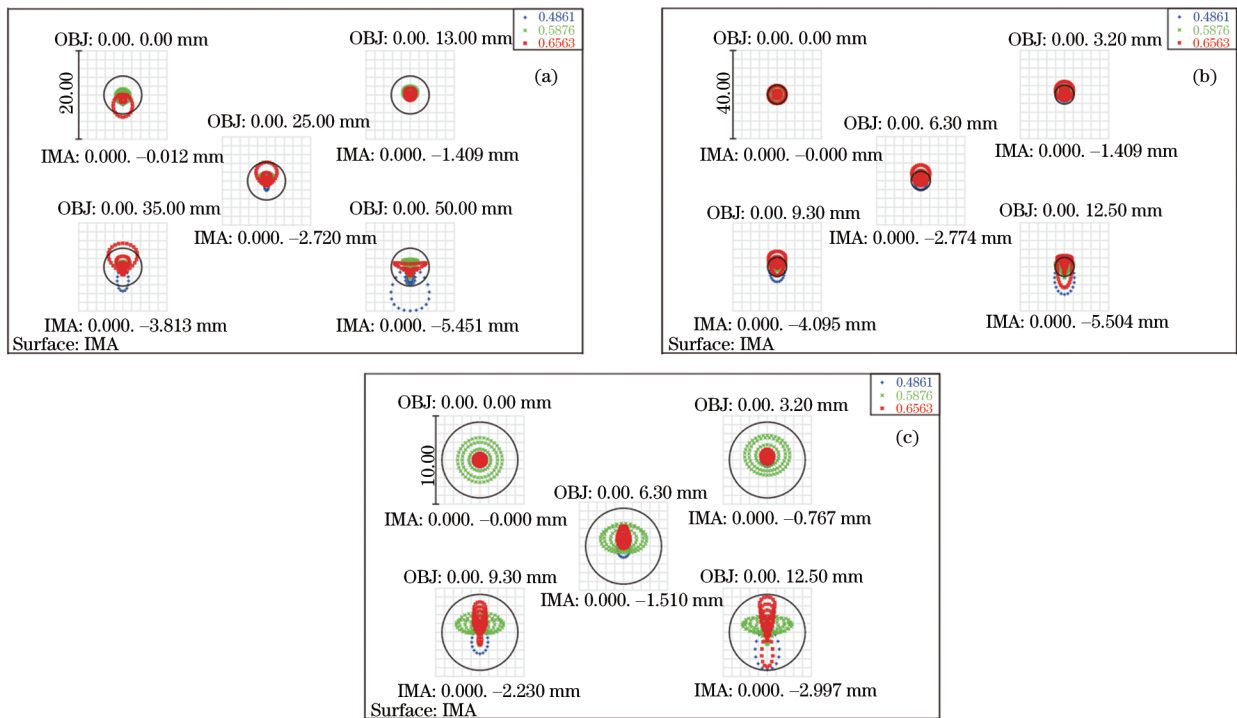


图 6 点列图。(a)  $-0.11\times$ ; (b)  $-0.44\times$ ; (c)  $-0.24\times$   
 Fig. 6 Spot diagrams. (a)  $-0.11\times$ ; (b)  $-0.44\times$ ; (c)  $-0.24\times$

-0.11×系统在视场范围内的弥散光斑最大值为 2.4 μm, -0.44×系统在视场范围内的弥散光斑最大值为 3.3 μm, 均小于 CCD 的单像元尺寸, 边缘视场的存在一定彗差, 与 MTF 曲线吻合; -0.24×系统在视场范围内的弥散光斑最大值为 1.53 μm, 小于 CCD 像单元尺寸, 边缘视场的彗差较小, 与 MTF 曲线相符。说明该系统能有效地将物方信息传递到 CCD 处。对比 3 个光学系统, -0.24×系统与 -0.44×系统相比较, 物面相同时, 彗差与像面大小成正比, 像面越大, 相应地, 边缘与中心视场的弥散光斑尺寸相差越大; -0.11×系统与 -0.44×系统相比较, 像面相同时, 彗差与物面大小成反比, 物面越大, 相应地, 边缘与中心视场的弥散光斑尺寸相差越小。在远心光学系统中, 降低放大倍率或者减小视场有利于消除系统彗差。

### 3.6 畸变图分析

远心系统主要用于精密测量领域, 测量误差产

生的主要原因之一就是镜头畸变, 畸变是放大倍率随视场的增大而发生的变化, 是一种失去物像相似的像差。与其他像差不同, 畸变仅由主光线的光路决定, 虽然对像质没有影响, 但是会造成物体成像的变形<sup>[14]</sup>, 图像的变形会造成测量值的偏大或偏小, 影响测量的精度, 因此在测量上必须把畸变控制在一定的范围内, 通常远心镜头的畸变控制在 0.1% 以内。由图 7~9 可以看出, -0.11×系统的最大畸变小于 0.04%, 网格畸变最大值为 -0.0354%; -0.44×系统的最大畸变小于 0.03%, 网格畸变最大值为 0.0142%; -0.24×系统的最大畸变小于 0.03%, 网格畸变最大值为 0.023%, 符合设计要求。对比 3 个光学系统, 畸变值通常与视场大小有关, 视场越小, 视场内垂轴放大倍率变化越小, 畸变越容易控制。

### 3.7 远心度分析

远心度是评价远心系统的重要指标, 一般远心

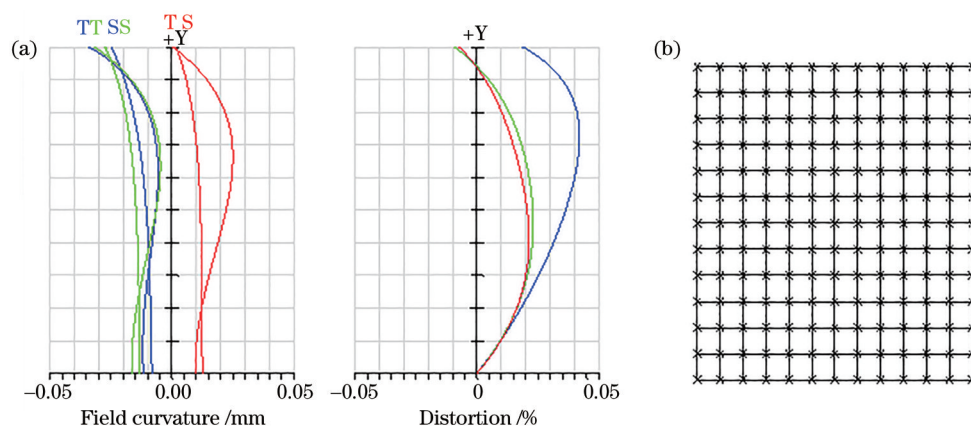


图 7 放大倍率为 -0.11×时的畸变。(a)系统场曲/畸变图;(b)网格畸变

Fig. 7 System distortion when magnification is -0.11. (a) Field curvature /distortion; (b) grid distortion

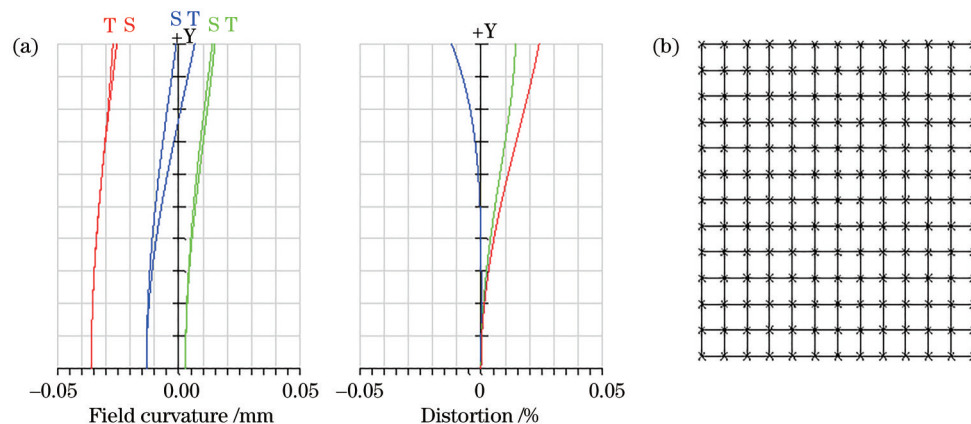


图 8 放大倍率为 -0.44×时的畸变。(a)系统场曲/畸变图;(b)网格畸变

Fig. 8 System distortion when magnification is -0.44. (a) Field curvature /distortion; (b) grid distortion

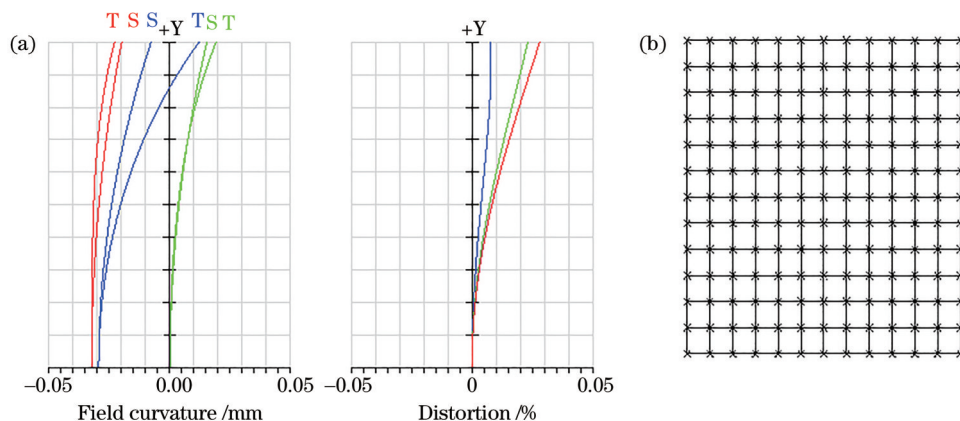


图 9 放大倍率为  $-0.24\times$  时的畸变。(a) 系统场曲/畸变图; (b) 网格畸变

Fig. 9 System distortion when magnification is  $-0.24$ . (a) Field curvature/distortion; (b) grid distortion

镜头的远心度小于  $0.1^\circ$  则可以认为远心性能良好。系统采用的是绝对物方远心设置, 因此还须查看像方各视场的远心度。如表 2 所示, 分别列出  $0H$ 、 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.7H$ 、 $1H$  对应的远心度值。从表 2 中可以看出系统的最大远心度为  $0.0172^\circ$ , 小于设计值, 达到双远心镜头设计的要求。

表 2 系统远心度

Table 2 System telecentricity

Magnification	Telecentricity / ( $^\circ$ )				
	$0H$	$0.3H$	$0.5H$	$0.7H$	$1H$
$-0.11\times$	0.0171	0.0022	0.0125	0.0172	0.0113
$-0.24\times$	0.0038	0.0014	0.0023	0.0029	0.0034
$-0.44\times$	0.0001	0.0017	0.0027	0.0035	0.0042

## 4 系统公差分析

完成光学系统的设计后, 需要对光学元件的公差进行分析<sup>[15]</sup>, 确定其对系统像质的影响, 进而制

定元件的加工公差。在对光学元件的加工和装配调校过程中, 误差难以避免, 每个系统参数的误差对于系统性能的影响力也不同。采用蒙特卡罗分析法对设计的光学系统分别进行公差分析, 最终分析结果如表 3~8 所示, 其中 TEDX、TEDY 表示组件偏移公差, TIRX、TIRY 表示镜片表面倾斜公差, TSDX、TSDY 表示镜片表面的偏心公差。从表 3 中可以看出,  $-0.11\times$  系统的公差最敏感的面主要为第 11 面, 也就是透镜 G5; 从表 4 可以看出, 公差范围内, 90% 的  $-0.11\times$  系统在 145 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.217, 最大畸变值为 0.098%; 从表 5 中可以看出  $-0.44\times$  系统的公差最敏感面主要为第 11 和第 12 面, 也就是透镜 G9; 从表 6 可以看出, 公差范围内, 90% 的  $-0.44\times$  系统在 145 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.252, 最大畸变值为 0.038%; 从表 7 可以看出  $-0.24\times$  系统的公差最敏感面主要为第 10 和第 11 面, 也就是透镜 G13; 从表 8 中可以看出, 公差

表 3 放大倍率为  $-0.11\times$  时表现最差的选项

Table 3 The worst performance when magnification is  $-0.11$

Type	Surface	Surface	Value	Criterion	Change
TIRY	11	11	$-0.012500000$	0.28336434	$-0.07062743$
TIRX	11	11	$0.012500000$	0.29291312	$-0.06107864$
TIRX	11	11	$-0.012500000$	0.29291312	$-0.06107864$
TIRY	11	11	$0.012500000$	0.30447000	$-0.04952176$
TIRY	12	12	$-0.012500000$	0.31281091	$-0.04118085$
TSDY	9	9	$0.012500000$	0.31467464	$-0.03931712$

表 4 放大倍率为  $-0.11\times$  时的 MTF 与公差

Table 4 MTF and tolerance analysis when magnification is  $-0.11$

Ratio	$>90\%$	$>80\%$	$>50\%$	$>20\%$	$>10\%$
MTF at 135 lp/mm	0.21723603	0.22549033	0.28938280	0.30941017	0.32025872
Max distortion / %	0.098	0.077	0.068	0.042	0.031

表 5 放大倍率为  $-0.44\times$  时表现最差的选项  
Table 5 The worst performance when magnification is  $-0.44$

Type	Surface	Surface	Value	Criterion	Change
TIRY	12	12	$-0.012500000$	0.31327321	$-0.02209004$
TIRY	12	12	$0.012500000$	0.31327321	$-0.02209004$
TIRX	12	12	$-0.012500000$	0.31327321	$-0.02209004$
TIRX	12	12	$0.012500000$	0.31327321	$-0.02209004$
TEDX	11	12	$-0.012500000$	0.31896806	$-0.01639519$
TEDX	11	12	$0.012500000$	0.31896806	$-0.01639519$

表 6 放大倍率为  $-0.44\times$  时的 MTF 与公差  
Table 6 MTF and tolerance analysis when magnification is  $-0.44$

Ratio	$>90\%$	$>80\%$	$>50\%$	$>20\%$	$>10\%$
MTF at 145 lp/mm	0.25229633	0.27286651	0.29586536	0.31513817	0.31844695
Max distortion /%	0.038	0.032	0.028	0.022	0.020

表 7 放大倍率为  $-0.24\times$  时表现最差的选项  
Table 7 The worst performance when magnification is  $-0.24$

Type	Surface	Surface	Value	Criterion	Change
TEDX	10	11	$-0.025000000$	0.34125771	$-0.06854529$
TEDX	10	11	$0.025000000$	0.34125771	$-0.06854529$
TEDY	10	11	$-0.025000000$	0.34126254	$-0.06854047$
TEDY	10	11	$0.025000000$	0.34126254	$-0.06854047$
TIRX	11	11	$-0.025000000$	0.35255514	$-0.05724787$
TIRX	11	11	$0.025000000$	0.35255514	$-0.05724787$

表 8 放大倍率为  $-0.24\times$  时的 MTF 与公差  
Table 8 MTF and tolerance analysis when magnification is  $-0.24$

Ratio	$>90\%$	$>80\%$	$>50\%$	$>20\%$	$>10\%$
MTF at 135 lp/mm	0.23743036	0.26237573	0.31907285	0.35148023	0.36730875
Max distortion /%	0.051	0.043	0.032	0.021	0.011

范围内,90%的  $-0.24\times$  系统在 135 lp/mm 处 MTF 值大于 0.2374,最大畸变值为 0.051%。由于公差的影响,MTF 曲线有所下降,但仍保持在 0.2 以上;最大畸变值保持在 0.1% 以内,表明该光学系统的加工性良好。

## 5 结 论

设计了一个三倍率双远心光学系统,同时具有  $-0.11\times$ ,  $-0.24\times$  和  $-0.44\times$  的放大倍率。对 3 个光学系统进行比较分析,倍率低与视场范围小的系统更易于优化设计。设计的光学系统总共由 16 片透镜组成,结构精简、生产成本低、易于装配调校。主要解决目前市场上远心系统因视场与分辨率不可调和的矛盾需要更换不同放大倍率镜头的问题。介绍了设计时的初始结构选择要求以及设计过

程中的优化思路,最后对像差曲线与公差进行对比分析,结果显示,系统的成像性能与加工性良好。

## 参 考 文 献

[1] Zhang W Y, Zhao Q S, Wang D Y. Actualities and developing trend of machine vision[J]. Journal of Zhongyuan University of Technology, 2008, 19(1): 9-12, 15.  
张五一, 赵强松, 王东云. 机器视觉的现状与发展趋势[J]. 中原工学院学报, 2008, 19(1): 9-12, 15.

[2] Yang K. Design of several industrial camera based on machine vision[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013: 1-3.  
杨康. 基于机器视觉的工业镜头的设计[D]. 福州: 福建师范大学, 2013: 1-3.

[3] Chen Z L, Liu Y Z, Fei M M, et al. Design of industrial double telecentric optical lens with large



- field of view[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2018, 38(5): 444-450.
- 陈智利, 刘雨昭, 费芒芒, 等. 大视场双远心工业镜头光学系统设计[J]. 西安工业大学学报, 2018, 38(5): 444-450.
- [4] Xia B, Wang M, Guo Q S, et al. Bilateral telecentric system for image measurement of small parts[J]. Optical Instruments, 2015, 37(4): 314-318.
- 夏兵, 王敏, 郭巧双, 等. 用于小零件图像测量的双远心光学系统[J]. 光学仪器, 2015, 37(4): 314-318.
- [5] Ye W W, Zhou T F, Huang J X, et al. Design of dual-vision double telecentric optical system based on machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 012202.
- 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): 012202.
- [6] Ye W W, Huang J X, Zhou T F, et al. Design of continuous zoom double telecentric system and analysis of cam curve[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 052201.
- 叶文炜, 黄锦媛, 周天福, 等. 可连续变倍双远心系统设计及其凸轮曲线分析[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 052201.
- [7] Wei X X, Li X C, Wan X J, et al. Design of Bi-telecentric optical system with two-path configuration for 3-D defect inspections[J]. Optical Technique, 2020, 46(1): 14-19.
- 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.
- [8] Chen Q B, Zhang Q Y, Wang Y, et al. Design of ring source for Fizeau interferometer based on annular lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 112003.
- 陈秋白, 张齐元, 王艳, 等. 基于环形透镜的菲索干涉仪环形光源设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 112003.
- [9] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy two-dimensional digital image correlation measurement system using a bilateral telecentric lens[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412004.
- 潘兵, 俞立平, 吴大方. 使用双远心镜头的高精度二维数字图像相关测量系统[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412004.
- [10] Laikin M. Lens design[M]. 3rd ed. New York: Marcel Dekker, 2001: 36-38.
- [11] Li M D, Gao X Y, Ye P, et al. Design of aspherical double telecentric lens for machine vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070801.
- 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): 070801.
- [12] Xiao Z X. Design of engineering optical[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2003.
- 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [13] Li F Q, Zhang X H, Cai W J, et al. Parameter calculation of splitting mirrors in optical-butting focal plane[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1308001.
- 李富强, 张孝弘, 蔡伟军, 等. 光学拼接焦平面中拼接反射镜参数的计算[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1308001.
- [14] Gao X Y, Chen P B, Li M F, et al. Design of wide angle wide depth double telecentric system[J]. Laser Technology, 2017, 41(2): 182-186.
- 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.
- [15] Yu Q, Shen Y B, Yang Y Y. Design and testing of optical inspection lens with large-field and high resolution[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(6): 1220-1224.
- 于谦, 沈亦兵, 杨甬英. 大视场高分辨率光学检查镜的设计和检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(6): 1220-1224.