

基于机器视觉的双视野双远心光学系统设计

叶文炜*, 周天福, 黄锦媛, 林峰**

¹ 福建师范大学光电与信息工程学院福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007;

² 福建师范大学光电与信息工程学院医学光电科学与技术教育部重点实验室, 福建 福州 350007

摘要 提供了一种基于机器视觉的双视野双光路远心系统设计方案,以折射棱镜为分界,将远心系统分为物镜部分与目镜部分,通过增加或更换目镜,即可在原有系统中同时实现不同的光学放大率,提高了远心系统在不同场合的适用性。设计了一款具有双视野的双远心系统。该系统工作距离为 130 mm,物方视场分别为 40 mm 与 80 mm,搭配 ON Semiconductor 公司生产的型号为 SN5000A 的成像芯片,光学放大倍率分别为 -0.275 与 -0.1375 ,并且满足低畸变(各视场畸变均小于 0.1%)、高分辨(105 lp/mm 处大于 0.3)、高远心度(小于 0.1°)等设计要求。

关键词 光学设计; 双远心系统; 远心度; 公差分析

中图分类号 TP391 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.012202

Design of Dual-Vision Double Telecentric Optical System Based on Machine Vision

Ye Wenwei*, Zhou Tianfu, Huang Jinxuan, Lin Feng**

¹ Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, College of Optoelectronics and Information Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

² Key Laboratory of Medical Optoelectronic Science and Technology, Ministry of Education, College of Optoelectronics and Information Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract This paper reports a design scheme for a two-vision and two-light-path telecentric system based on machine vision. With a refractive prism as the boundary, the telecentric system is divided into two parts: the objective part and the eyepiece part. By adding and replacing the eyepiece, different optical magnifications are realized in the original system to ensure the applicability of telecentric systems in different situations. A double telecentric system with dual vision is designed. In the proposed system, the working distance is 130 mm, and the object fields of view are 40 mm and 80 mm, respectively. With an imaging chip SN5000A made by ON Semiconductor company, the optical magnifications are -0.275 and -0.1375 , respectively. The system achieves low distortion ($<0.1\%$ in each field of view), high resolution (>0.3 at 105 lp/mm), and high telecentricity ($<0.1^\circ$), and also meets other design requirements.

Key words optical design; double telecentric system; telecentricity; tolerance analysis

OCIS codes 220.3620; 100.4998; 330.7338

1 引言

机器视觉相较于人工检测具有更强的适应性、更高的稳定性,在分辨能力、感光范围、响应速度等方面都能很好地弥补人眼的不足^[1]。在一个机器视觉系统中,成像镜头部分很大程度上决定着系统的

性能,其成像的好坏直接影响后续软件处理部分的处理速度与识别精度。双远心镜头相较于普通镜头,具有低畸变、大景深、消除视差等优势,因此被广泛应用于机器视觉精密测量领域^[2]。

近年来,对双远心镜头的理论研究和实际设计日渐成熟。长春理工大学的张欣婷等^[3]为满足航空航

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-06-18; 录用日期: 2019-06-26

基金项目: 福建省科技厅高校产学研合作重大项目(2018H61010052)

* E-mail: yww_dyx@163.com; ** E-mail: lfeng127@163.com

天等大尺寸零部件精密测量的要求,采用对称式结构,并引入了两个非球面面型,设计了一款大口径、大景深、低畸变的双远心镜头;上海理工大学的王雅楠等^[4]针对自动检测 PCB 板(printed circuit board)缺陷的需求,将双远心系统应用于数字条纹投影系统,整体实现了大面积的均匀照明及高分辨率的投影性能。但目前检测仪器上通常只能配备一个光学镜头,只能实现一个倍数放大,当需要使用不同倍数进行测量时,需要更换另一种倍数的光学镜头,并重新校正,更换镜头的工序十分繁琐,延长了工作时间,影响最大的是不能完全保证更换镜头后的重复定位精度,不能将检测数据与更换镜头前的数据进行整合分析。针对现有的不足,本文提供一种双视野的双远心设计方案,使远心系统的同一颗镜头上具有两个不同的放大倍数,提高了远心系统的适用性。

2 远心系统分析

远心系统因具有大景深、低畸变等优点,被广泛用于机器视觉领域,可分为物方远心、像方远心和双远心系统。物方远心系统与像方远心系统的特殊之处在于系统的孔径光阑正好位于系统的物方焦面或像方焦面,对应的系统的入瞳或者出瞳位于无穷远处^[5]。系统主光线平行光轴入射或出射,因此测量出的待测物体的尺寸不会随着物体位置的变化而变化。这样因调焦不准或者景深不足而产生的视差并不会对测量结果有影响,且其能够消除因成像传感器轴向位置出现偏移而造成的测量误差^[6]。

然而在实际使用中,很难准确找出成像弥散斑的中心并进行量测,因此还是会存在一定的误差。随着现代精密测量精度要求的提高,为了克服影像虚焦带来的测量误差,通常要采用物像双远心成像系统^[7]。当双远心系统的前镜组的像方焦点与后镜组的物方焦点完全重合时,系统光学间隔为零,系统的孔径光阑被定位在两个镜组的公共焦点处,系统的出瞳和入瞳均位于无穷远处。系统主光线始终平行于光轴入射,经过后续镜组后同样平行于光轴出射,就算待测物体或成像传感器在安装使用中存在一定的轴向位置误差,其在传感器上得到的弥散斑仍较为对称,能准确找到弥散斑的中心位置,因此得到的物体高度仍能保持不变^[8],这进一步保证了测量系统的可靠性。

3 双视野双远心系统设计实例分析

3.1 设计指标分析

本双视野双远心光学系统实例拟适配 ON

Semiconductor 公司 230 万像素的 SN5000A 芯片,其主要参数如表 1 所示。

表 1 成像芯片参数

Table 1 Imaging chip parameters

Diagonal length /mm	Total number of pixels	Pixel size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	Effective area / ($\text{mm} \times \text{mm}$)
11	1920×1200	4.8×4.8	9.216×5.76

系统在物方同一工作平面上具有两个不同的视野,分别为 80 mm 与 40 mm,为了简化系统,像方采用同一芯片进行设计,根据放大率公式:

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

可得系统的放大倍率分别为 -0.1375 与 -0.275,即可同时检测零件的外部轮廓与部分细节特征。(1)式中: y' 为像方视场大小; y 为物方视场大小; β 为系统放大倍率

因为采用的互补金属氧化物半导体(CMOS)像元尺寸为 4.8 μm ,根据奈奎斯特采样定理,物点经光学系统后必须覆盖至少两个传感器像元才能被辨别,根据

$$\alpha = 2 \times \sigma' / \beta, \quad (2)$$

可计算出系统的检测精度分别为 0.07 mm 和 0.035 mm。(2)式中: α 为检测精度; σ' 为 CMOS 像元尺寸。其余相关技术指标如表 2 所示。

表 2 系统设计参数

Table 2 System design parameters

Parameter	Index
Magnification	-0.1375, -0.275
Object field of view /mm	80,40
Image field of view /mm	11
Working distance /mm	130
Distortion /%	<0.2
Telecentricity /($^\circ$)	<0.1

3.2 初始结构的分析与选择

本实例中初始结构的选取主要从两个方面考虑。第一,根据表 2 中相关技术指标的要求,寻找性能参数相近的系统作为初始结构;第二,本实例中需要对同一工作距离下两个不同大小的视场进行成像。目前市面上的解决方案如图 1 所示,将两个不同倍率的远心系统进行组装,其体积大,使用不方便,且成本较高。为此本文提供一种新方案(图 2),其整体结构思路为:将远心系统分为物镜部分与目镜部分,通过更换匹配目镜,即可使系统同时具有不同的光学放大率。系统共用一个物镜部分,而不同目镜组件将通过棱镜同物镜部分进行组合,相比之

下,所提远心系统结构更加紧凑、使用方便且成本较低。因此选取初始结构时,首先应优先考虑大视场情况下前物镜部分的尺寸大小,其次在物镜与目镜之间需留有足够的距离,用来放置半透半反棱镜。综上选取了如图3所示的结构作为初始结构,其物方线视场为 $2y = 90\text{ mm}$,系统放大倍率为 -0.15 ,图中CG为保护玻璃,L1~L15均为球面玻璃镜片。

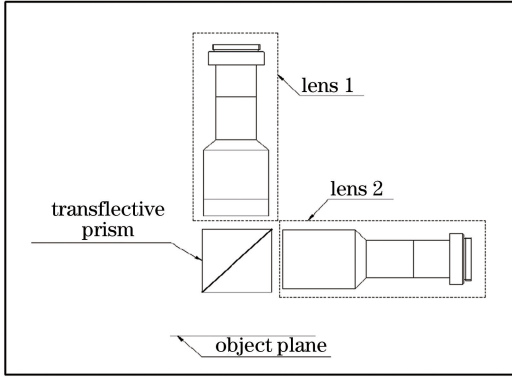


图1 常见解决方案示意图

Fig. 1 Diagram of common solution

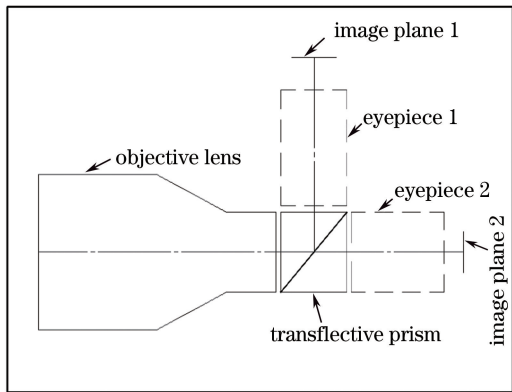


图2 本文解决方案示意图

Fig. 2 Diagram of solution in this paper

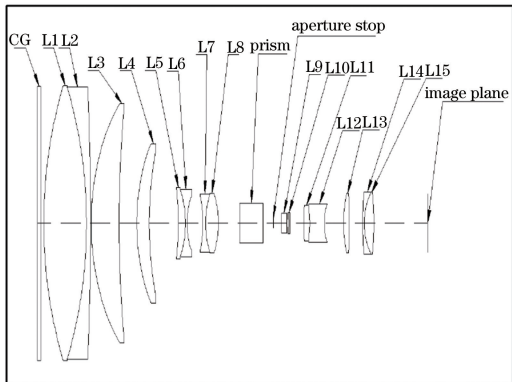


图3 系统初始结构示意图

Fig. 3 System initial structural diagram

3.3 设计过程及结果

将初始结构输入光学设计软件,经分析,该初始

结构需要从结构及像差两方面进行优化。

1) 结构上,首先由于拟设计的双视野双远心系统需要同时装配两个目镜组件,通常的做法是在转接处设置两个截面为等腰直角三角形的三角棱镜,将其组合成一个正方形棱镜,并在两块三角棱镜的贴合面上镀上半透半反膜层。根据像差理论,加入棱镜会引入一定的像差,所以需要预先将棱镜设置于系统中,进行像差校正。考虑到加入棱镜所需的空間以及棱镜的尺寸,将其放置在系统光阑之前。其次,远心系统的孔径光阑通常都较小,而初始结构镜片数量达到15片,容易造成光通量的降低,且增加了系统的成本与装配难度。本文通过合理优化,在保证所需像质的前提下将系统镜片数减到了11片,且设置系统 F 数为8,有利于提高光通量。

2) 像差方面,双远心系统中除了需要校正球差、彗差、色差等基本像差外,还需着重优化系统的远心度以及畸变大小^[9]。设计过程中,ZEMAX软件可以开启物方远心功能,保证系统物方为绝对远心,可以通过设置操作数控制像方远心度大小,方法有两种:

(1) 控制系统出瞳位置。根据远心系统定义,当系统为像方远心时,其出瞳应在无穷远处,因此可以通过操作数 EXPP 获取系统的出瞳位置,通过 ABSO 进行绝对值计算、通过 OPGT 使指定行的值大于目标值,以控制系统的出瞳位置大于一个很大的数值,从而间接控制系统的远心度。

(2) 控制主光线与像面的角度。可以通过操作数直接控制各个不同视场的出射光线与光轴的角度,使用 RANG 操作数指定视场真实光线与 Z 轴的角度,设置多个不同视场位置,目标值设为0,使系统出射光束垂直入射到像面上,以达到较好的远心度。

当系统远心度优化到一定程度时,系统的畸变值也将是一个较小的数值,还可以继续使用 DIST、DIMX、DISC 等操作数进一步对畸变进行约束,以达到设计要求。

使用 ZEMAX 软件优化时,虽然可以使用软件的多重结构功能将这两种结构组合到一起同时进行设计优化。但前期优化时像差过大,变量数、约束条件过多,容易导致优化进程缓慢。因此,本文首先对放大倍率为 -0.1375 的系统进行优化,由于双视野系统共用一个物镜部分,所以当此系统达到较好像质时,将系统棱镜之前所有镜片的曲率、厚度、口径

全部锁定,仅改变棱镜后方镜片的参数与玻璃类型来设计放大倍率为 -0.275 的系统,由于此时设计变量数不足,所以此系统的像质往往不能全部满足设计指标。最后当两个倍率的系统都优化到一定程度时,再使用 ZEMAX 软件中的多重结构将两个系

统组合在一起同时优化。优化后的设计结构如图 4 所示,其中:S1 为系统物镜,包括了 G1~G5 总共 5 片玻璃球面透镜;S2 为目镜 2,包括了 G7~G11 总共 5 片玻璃球面透镜;S3 为目镜 1,包括了 G7'~G11' 总共 5 片玻璃球面透镜。

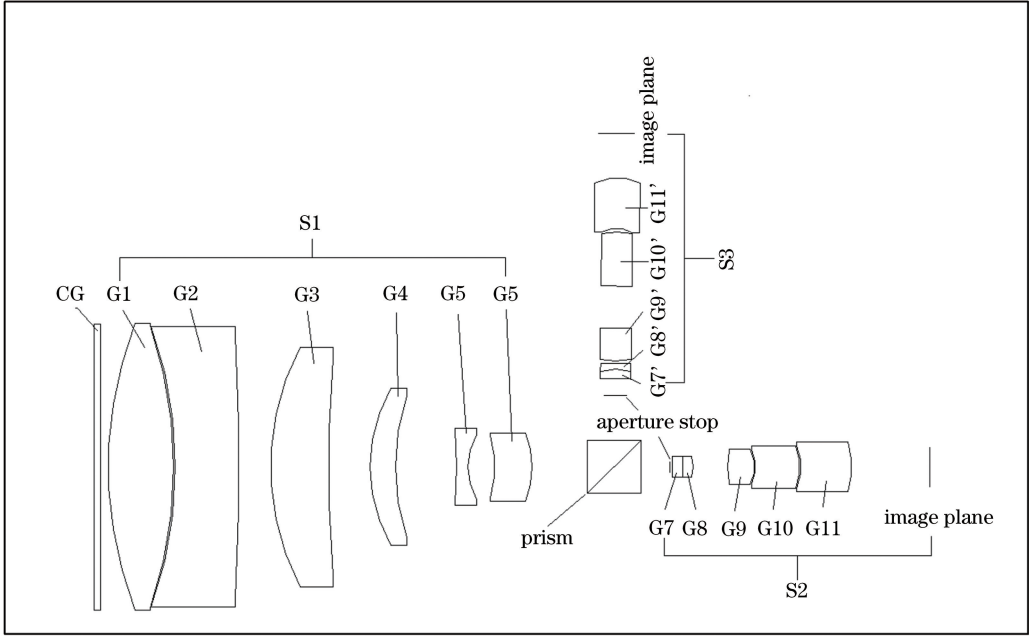


图 4 光学系统外形图

Fig. 4 Outline drawing of optical system

3.4 设计结果分析

3.4.1 调制传递函数曲线分析

调制传递函数(MTF)曲线图反映镜头在不同频率下传递物方信息的能力。优化后系统的传递函数曲线如图 5、图 6 所示,由 3.1 节可知适配的 CMOS 的单像元大小为 $4.8 \mu\text{m}$,由 $N = 1000 / (2\sigma')$ 可知系统的奈奎斯特频率 N 为 105 lp/mm 。

由图 5、6 可以看出该双视野双远心系统在放大倍率为 -0.1375 和 -0.275 时的 MTF 曲线整体都接近衍射极限,在截止频率处都大于 0.3 ,表明其像质良好。

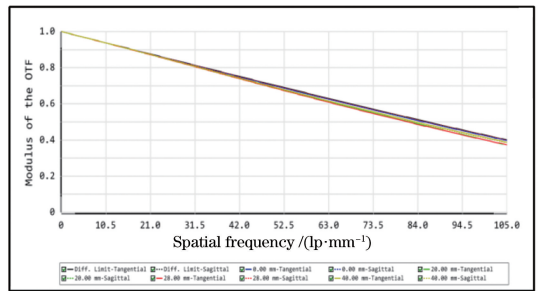


图 6 放大倍率为 -0.275 时的 MTF 曲线图

Fig. 6 MTF plots when magnification is -0.275

3.4.2 畸变图分析

远心系统通常被用于精密测量领域,镜头畸变是造成测量误差的主要原因之一,它不影响系统成像的清晰度,但会使物体成像产生变形^[10]。因此必须将畸变限制在一定范围内,由图 7、8 可以看出该系统在两个倍率下的畸变均小于 0.1% ,符合设计指标。

3.4.3 点列图分析

系统匹配探测器像元尺寸为 $4.8 \mu\text{m}$,若系统的像点光斑均方根半径小于像元尺寸即可认为经光学系统后物方信息能量集中、性能良好。由图 9、10 (图中 OBJ、IMA 代表不同的物体高度及与之相对

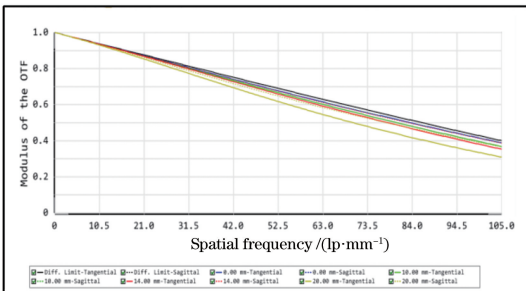


图 5 放大倍率为 -0.1375 时的 MTF 曲线图

Fig. 5 MTF plots when magnification is -0.1375

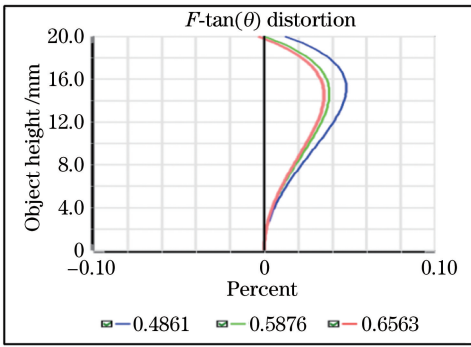


图7 放大倍率为-0.1375时的系统畸变图
Fig. 7 System distortion diagram when magnification is -0.1375

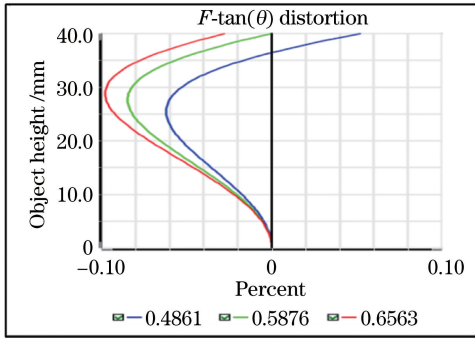


图8 放大倍率为-0.275时的系统畸变图
Fig. 8 System distortion diagram when magnification is -0.275

应的像面高度)可以看出,本系统在两个放大倍率下的成像光斑大小均小于探测器的单像元尺寸,最大值为 $3.158 \mu\text{m}$,表明系统能够有效地将物方信息传递至探测器。

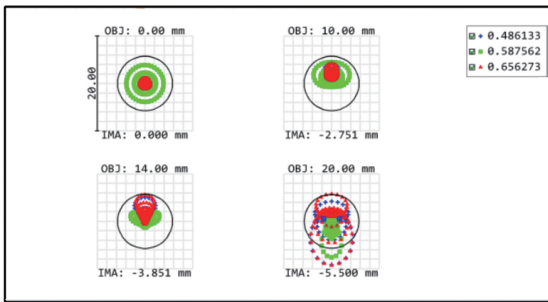


图9 放大倍率为-0.1375时的系统点列图
Fig. 9 Spot diagrams when magnification is -0.1375

3.4.4 远心度分析

系统的远心度是评价一个远心系统的重要指标。本文采用物方绝对远心设计优化完成,因此还需查看系统像方不同放大倍率下各个视场的远心度,其大小如表3所示,列出了 $0.3H$ 、 $0.5H$ 、 $0.8H$ 和 $1H$ 对应的远心度大小,其中 H 代表归一化视场。由表可以看出系统最大远心度为 0.06° ,小于设

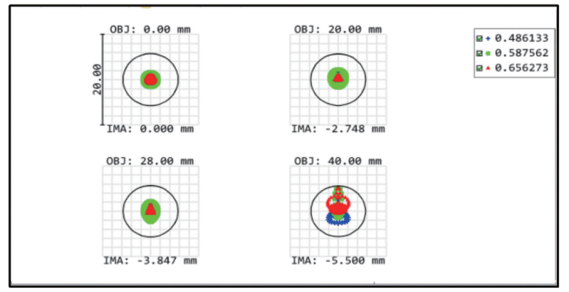


图10 放大倍率为-0.275时的系统点列图
Fig. 10 Spot diagrams when magnification is -0.275

表3 系统远心度

Table 3 System telecentricity

Magnification	Telecentricity / ($^\circ$)			
	$0.3H$	$0.5H$	$0.8H$	$1H$
-0.1375	0.031	0.041	0.024	0.020
-0.375	0.043	0.060	0.040	0.025

计指标 0.1° 。

4 系统公差分析

为了满足光学系统由设计到生产应用的转化,不仅要求系统的像质达到设计要求,还要检测系统加工生产的可行性,因此需要对设计完的光学系统进行公差分析。首先对各个光学参数的公差范围进行初始设定。根据软件给出的分析结果对给定的公差值进行重新设定。在 ZEMAX 软件中,采用蒙特卡罗灵敏度分析法,以 105 线对处的平均 MTF 值作为评价标准。表4所示为最终设置的系统公差分配。

表4 光学系统的公差范围

Table 4 Tolerance range of optical system

Tolerance position	Parameter	Value
Surface	Radius of curvature	3
	Thickness /mm	0.02
	Surface tilt angle / ($^\circ$)	0.013
	Irregularity	0.25
Element	Component tilt angle / ($^\circ$)	0.013
	Refractive index /%	0.03
	Abbe coefficient	0.5

图11为该公差分配下,蒙特卡罗模拟的结果。其中 TTHI 为元件的厚度公差, TIRR 为表面不规则度公差, TFRN 为曲率半径公差, TABB 为玻璃的阿贝数公差。从图中可以看出,对结构1的 MTF 影响最严重的为部分镜片的厚度(第20~24面);对结构2的 MTF 影响最严重的为表面的不规则度误差(第20面)。多次蒙特卡罗模拟后的 MTF 曲线图及畸变图显示,结构1(放大倍率为-0.1375)在

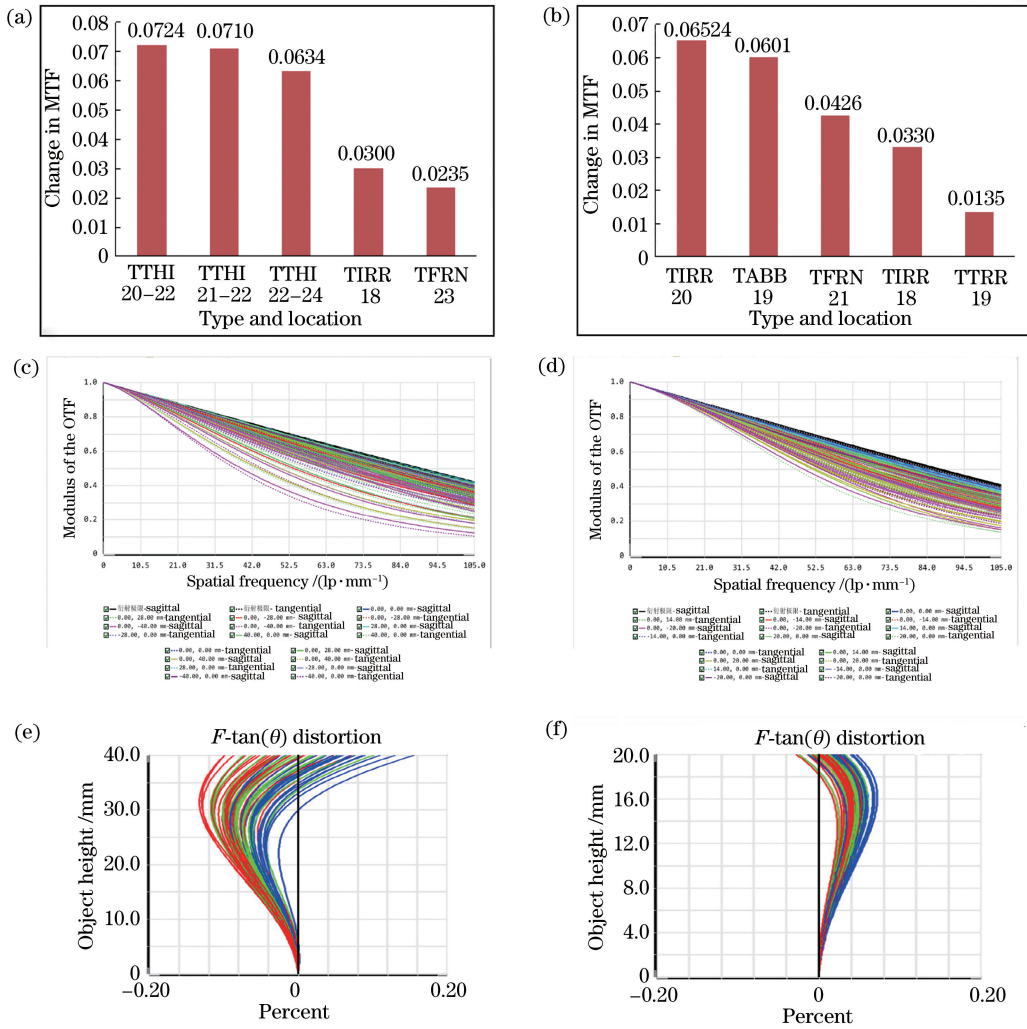


图 11 蒙特卡罗模拟结果。(a)结构 1(放大倍率为-0.1375)中影响最大的公差及其位置;(b)结构 2(放大倍率为-0.275)中影响最大的公差及其位置;(c)结构 1(放大倍率为-0.1375)蒙特卡罗模拟得到的 MTF 曲线图;(d)结构 2(放大倍率为-0.275)蒙特卡罗模拟得到的 MTF 曲线图;(e)结构 1(放大倍率为-0.1375)蒙特卡罗模拟得到的畸变曲线图;(f)结构 2(放大倍率为-0.275)蒙特卡罗模拟得到的畸变曲线图

Fig. 11 Monte Carlo simulation results. (a) Most influential tolerance and its position in structure 1 (magnification is -0.1375); (b) most influential tolerance and its position in structure 2 (magnification is -0.275); (c) MTF curves obtained by Monte Carlo simulation of structure 1 (magnification is -0.1375); (d) MTF curves obtained by Monte Carlo simulation of structure 2 (magnification is -0.275); (e) distortion curves obtained by Monte Carlo simulation of structure 1 (magnification is -0.1375); (f) distortion curves obtained by Monte Carlo simulation of structure 2 (magnification is -0.275)

105 lp/mm处有 90%的 MTF 值都大于 0.26,且畸变均小于 0.15%;结构 2(放大倍率为-0.275)在 105 lp/mm处有 90%的 MTF 值都大于 0.29,畸变均小于 0.1%;表明系统的加工性良好。

5 结 论

设计了一个同时具有两个放大倍数(-0.1375和-0.275)的双远心系统,主要为了解决当前市面上远心系统更换不同倍数镜头时过程繁杂、精度容

易受影响的问题。介绍了不同远心系统的特点。着重介绍了设计前初始结构的选择问题,以及设计过程中对设计指标的把控及软件操作。根据最终对像差曲线、公差等的分析,此系统成像性能、可加工性皆良好。

参 考 文 献

[1] 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.
- [2] 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.
- [3] Zhang X T, Kang L, Ding H C, et al. Industrial lens design of aspheric double telecentric based on machine vision[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 230-234.
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.
- [4] Wang Y N, Wan X J, Wei X X, et al. Design of optical system for bi-telecentric digital fringe projection[J]. Optical Technique, 2018, 44(6): 667-672.
王雅楠, 万新军, 韦晓孝, 等. 双远心数字条纹投影的光学系统设计[J]. 光学技术, 2018, 44(6): 667-672.
- [5] Hou R L. Design of compact double telecentric optical system in industry [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 12-15.
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: 12-15.
- [6] 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.
- [7] Wang X J, Wang F H, Zhou X L. Applications of telecentric gaging image lenses in precision machine vision inspections [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 1998, 12(3): 149-154.
王向军, 王风华, 周鑫玲. 物像远心成像光路在高精度视觉检测中的应用[J]. 测试技术学报, 1998, 12(3): 149-154.
- [8] Zhu Z T, Pei W D, Li Y, et al. Research and implementation of laser triangulation system based on telecentric lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031002.
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, 55(3): 031002.
- [9] Luo D. Study on optimal design of aspheric telecentric system based on ZEMAX [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2018.
罗迪. 基于ZEMAX的非球面远心系统优化设计研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [10] 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.