

文章编号:1001-5078(2024)05-0796-08

· 光学技术 ·

大面阵高分辨率三变倍双远心光学设计

林正煜,张继艳,孙丽婷,秦 腾,曹天皓
(厦门理工学院 光电与通信工程学院,福建 厦门 361024)

摘要:针对芯片在塑封工艺中的表面缺陷检测,设计一款大面阵高分辨率三变倍双远心光学系统。通过远心理想模型分析和像差优化,得到一款大视场、高精度、可变倍、低畸变的双远心光学系统。该系统采用6500 W像素的大面阵工业相机,由13片球形透镜组成,工作波长在可见光范围内, F 数为7,放大倍率为 -0.305^{\times} 、 -0.427^{\times} 和 -0.500^{\times} ,系统总长小于362 mm。设计结果表明,不同倍率下的全视场调制传递函数在奈奎斯特频率156 lp/mm处都大于0.1,最大畸变不超过0.2%,物方远心度小于 0.2° ,该光学系统成像质量良好,在工业表面缺陷检测光学设计领域有着一定的参考价值。

关键词:光学设计;双远心系统;大面阵;检测

中图分类号:TN206;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.020

Large array high-resolution triple-zoom double telecentric optical design

LIN Zheng-yu, ZHANG Ji-yan, SUN Li-ting, QIN Teng, CAO Tian-hao

(School of Optoelectronics and Communication Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In this paper, a large array high-resolution triple-zoom double telecentric large front array high-resolution triplex double telecentric optical system is designed for surface defect detection of chips in the plastic encapsulation. Through the analysis of telecentric model and aberration optimization, a dual telecentric optical system with a large field of view, high precision, variable magnification and low distortion is obtained. The system uses a 6500 W pixel industrial camera consisting of 13 spherical lenses operating in the visible wavelength range with an F-number of 7, and magnification of -0.305^{\times} , -0.427^{\times} and -0.500^{\times} , with an overall length of the system of less than 362 mm. The design results show that the full-field-of-view modulation transfer function under different magnification is greater than 0.1 at the Nyquist frequency of 156 lp/mm, the maximum distortion is no more than 0.2%, and the telecenter of the object is less than 0.2° . The optical system has good imaging quality, which has certain reference value of reference in the field of optical design for the detection of defects on the industrial surface.

Keywords: optical design; double telecentric system; large face array; detection

1 引言

在半导体行业中,芯片塑封的表面划痕和裂纹的

出现,会降低芯片的性能,影响芯片的长期工作可靠性,而表面缺陷检测则是保证芯片质量的关键步骤之

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61704142);厦门理工学院校企合作项目(No. ZK-HX201216; No. ZK-HX22067);
厦门理工学院攀登计划基金项目(No. XPDKT19005)资助。

作者简介:林正煜,男,研究生,研究方向为光学设计。E-mail:2222031273@s.xmut.edu.cn

通讯作者:张继艳,女,博士,讲师,研究方向为信息光学、光学设计等。E-mail:jyzhang@xmut.edu.cn

收稿日期:2023-08-28; **修订日期:**2023-11-07

一^[1]。目前,工业普遍要求缺陷检测具有更高效率与精度,使得被检测物需要呈现更多的细节特征量成像,而大面阵小像元传感器的出现意味着可实现更高分辨率和更大检测视场^[2],可满足缺陷检测更高精度的需求,在精密检测中备受青睐。为了更好地发挥大面阵传感器的优势,光学系统则应具备低畸变、可消视差等特点。由于双远心光学系统具有低畸变、大景深、消除视差等优势,采用大面阵高分辨率双远心光学设计,可进一步解决镜头的畸变导致图像采集精度较差和被检测物在传送时抖动造成的视差等问题。因此,满足芯片表面缺陷检测更高效率和更高分辨率的需求,小像元大面阵相机与双远心光学系统的研究成为大视场工业镜头研发的主流之一^[3]。

近年来,双远心镜头的理论创新研究和设计日渐成熟。2019年,张欣婷等人引入两个非球面设计了一套 F 数为4.3,系统总长为292 mm的双远心工业镜头^[4],但该设计分辨率较低,放大倍率小。2020年,叶文伟等人提供了一套可实现 $-0.20\times\sim-0.50\times$ 连续变倍的双远心镜头设计^[5],但采用传统变倍方式,导致系统总长过大。2022年,刘凌鸿等人实现一种可实现 $-0.11\times$ 、 $-0.24\times$ 和 $-0.44\times$ 放大倍率,由16片透镜组成双远心设计^[6],但并未应用高分辨率传感器,变倍时需要更换目镜,不利于提高检测效率,且结构复杂。2023年, Li Jingchen 等人设计一组 F 数为4,放大倍率为 $-0.8\times$ 和 $-1.6\times$,总长为195 mm的液体透镜双远心光学系统^[7],但液体透镜结构复杂且光轴不稳定易导致图像失真。综上所述,目前双远心光学设计存在大面阵高分辨率光学设计较少、可变倍系统结构复杂和系统较长等问题。

由此,本文通过构建远心光路的理想模型关系,搭配6500 W像素的大面阵工业相机,参考全动型变倍原理^[8],使用13片常规透镜,在有限的空间内,实现 F 数为7,放大倍率为 $-0.305\times$ 、 $-0.427\times$ 和 $-0.500\times$ 的大面阵高分辨变倍双远心光学系统。该设计不仅能提供更精确的细节特征量,也能实现较大范围的表面缺陷检测或局部高精度检测,满足表面缺陷检测设计需求,可有效替代人工检测,为检测设备小型化设计提供思路,在表面缺陷检测领域有着一定的参考价值。

2 远心光学系统

远心光学系统的种类分为三类:物方远心(object space telecentric)、像方远心(image space tele-

centric)和双远心(double telecentric optical)^[9]。

物方远心光学系统是物方主光线平行于主光轴,孔径光阑放置在光学系统的像方焦平面上,被测物的成像大小与物距的变化无关^[10]。物方远心光学系统常用于工业精密测量中,可消视差,小畸变或接近无畸变。像方远心光学系统在投影成像光学系统中应用的较多,其像方主光线平行于光轴,在物方焦平面上放置孔径光阑,该结构的像面位置即使发生改变,但所成像的大小不变,且相对照度均匀。双远心光学系统则同时具备上面两种远心光学系统的优点。

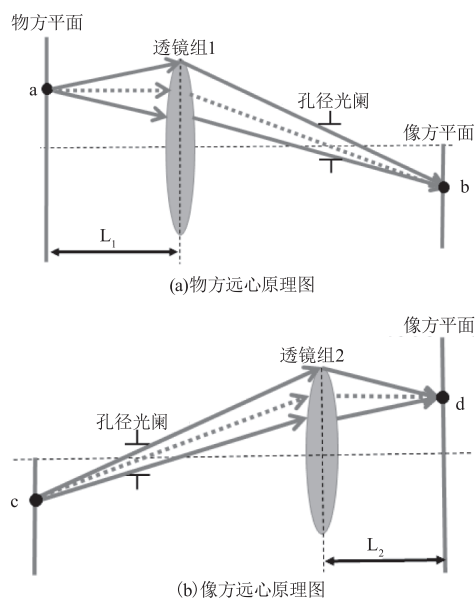


图1 远心系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of telecentric system

双远心光学系统在中间放置光阑,并使镜头的入射光和出射光均为平行光,其结构的大体上是关于光阑对称的,两侧分别是物方远心、像方远心。双远心光学系统具有消视差、低畸变、相对照度均匀和大景深等优点,故在工业的各种测量、定位和识别等领域都有极大的应用研究价值^[11]。

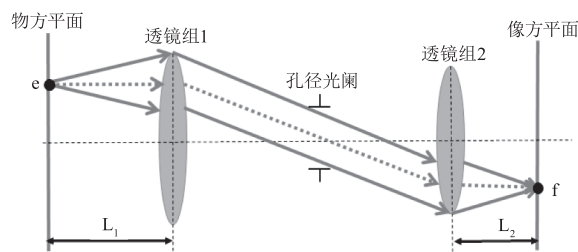


图2 双远心系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of double telecentric system

3 双远心系统设计指标

由于表面缺陷检测对被检测物成像的细节特

征量有着更高标准的要求,本设计选用海康威视公司 MV-CH650-90XM-F-NF 型号的 6500 万像素工业面阵相机可满足设计需求,其主要参数如表 1 所示。

表 1 海康威视 MV-CH650-90XM-F-NF 型号标准
Tab. 1 Hikvision MV-CH650-90XM-F-NF
model standard

系统参数	数值
像元尺寸/ μm	3.2 × 3.2
靶面尺寸/mm	29.9 × 22.4
分辨率	9216 × 7000
镜头接口	F 口

由表 1 可知,本文所设计光学系统半像高约为 18.7 mm;某系列 SSOP 芯片尺寸为 6.4 × 5 mm,要对其进行 4 ~ 7 片的同时检测,可按放大倍率为 -0.305[×]、-0.427[×]和 -0.500[×]进行设计,代入放大率公式中:

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

式中, β 为放大倍率; y' 和 y 分别为像高和物高。可计算出物方半视场分别为 37.5 mm、43.8 mm 和 60.6 mm。根据奈奎斯特采样定理,由公式 (2)^[12] 能计算得到该双远心光学系统的检测精度约分别为 20.98 μm 、14.98 μm 、12.8 μm 。本文设计参考的某芯片表面有常规钝化层,其钝化层的损伤尺度多呈现 30 μm 以上^[13],系统检测精度设置标准合理,可适用于芯片表面缺陷检测:

$$\alpha = 2 \times \frac{\sigma'}{\beta} \quad (2)$$

式中, α 为检测精度; σ' 为传感器的像元尺寸。

由上述所得,本文设计的双远心光学系统的主要设计指标由表 2 所示。

表 2 光学系统结构参数

Tab. 2 Optical system structural parameters

系统参数	数值
工作波长/ μm	486 ~ 656
放大倍率	-0.305 [×] 、-0.427 [×] 、-0.500 [×]
像方视场/mm	18.7
近轴 F 数	7.0
远心度/($^{\circ}$)	<0.3
畸变/%	<0.2
工作距离/mm	110
后焦距/mm	>46.5

4 光学系统设计

4.1 初始结构设计

根据图 2 双远心原理图所示,本文所设计的双远心光学系统可以分为前组场镜、广角主物镜和后组双胶合场镜。

前组场镜和广角主物镜可组成物方远心物镜,前组场镜的焦点和广角主物镜的入瞳位置重合,其作用是使物方主光线与主光轴平行,构成物方远心。通过分析物方远心理想光学模型,可以得到如下关系式^[14]:

前组场镜后焦距为:

$$f_1' = \frac{y}{\omega} \quad (3)$$

物方远心物镜的物距等于前组场镜的前焦距:

$$l = -f_1' = -\frac{y}{\omega} \quad (4)$$

前组场镜的 F 数为:

$$F_1 = \frac{f_1'}{D} = -\frac{F}{\beta + 2F\omega} \quad (5)$$

前组场镜的孔径大小为:

$$D = -2y + 2f_1'(-u) = -2y\left(1 + \frac{\beta}{2\omega F}\right) \quad (6)$$

广角主物镜的焦距为:

$$f_2' = \frac{y'}{\omega} = -\frac{\beta y}{\omega} \quad (7)$$

广角主物镜的 F 数等于整个系统的 F 数:

$$F_2 = F \quad (8)$$

物方远心物镜的总长等于前组场镜和广角主物镜的焦距之和:

$$T = f_1' + f_2' = (1 - \beta)\frac{y}{\omega} \quad (9)$$

故物方远心物镜的共轭距为:

$$L = T - l = (2 - \beta)\frac{y}{\omega} \quad (10)$$

根据公式 (3) ~ (10), 给定像高 y 、 F 数和放大倍率 β , 可以得到一组关于物方远心物镜后视场角 ω 的自变量函数组, 根据设计指标, 选取合适 ω 可搭建物方远心理想光学系统。双高斯镜头是对称系统, 可有效降低垂轴像差^[15], 提供较高光线透过率; 双胶合透镜可实现色散相互补偿, 达到消色差目的。故该物方远心物镜根据上述公式选用单片透镜和双胶合消色差透镜为前组场镜, 双高斯物镜为广角主物镜。

在此基础上,为校正像方光路为远心光路,使用一组由两个平凸镜片组合成的双胶合透镜作为后组双胶合场镜,该透镜组与物方远心物镜的场镜作用一致,可使像方主光线转折并与主光轴平行^[16]。由焦距公式可得到后组双胶合场镜的初始结构:

$$\frac{1}{f_3'} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad (11)$$

式中, f_3' 是前组场镜和广角主物镜组合后的物方远心物镜焦距; r_1 和 r_2 分别是后组双胶合场镜的前后曲率半径; n 是透镜的折射率。最后所得到的初始结构如图3所示。

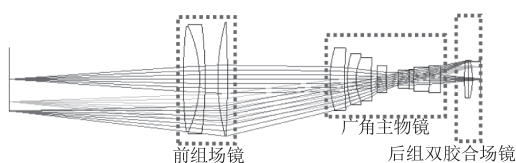


图3 初始结构

Fig.3 The initial constitution

4.2 程序优化

要得到符合设计且成像性能好的光学系统,需要对初始结构反复进行像差校正^[17-19]。按设计指标添加控制空气间隔、玻璃厚度、物像方远心度和放大倍率等限制条件;将光学系统的曲率半径、厚度和材料均设置为变量;应用像差操作数对初始结构进行优化,观察优化后的系统存在各类像差变化情况,针对成像质量的影响较大的像差,进行反复优化。为提高适用范围,在上述双远心设计的基础上,使用多重结构将三种不同倍率一起优化。由于机械补偿和光学补偿的变倍设计有一定的局限性,故采用全自动型变倍设计。将整个光学系统规划为八组元,最大程度地发挥各透镜组的变倍和补偿能力。

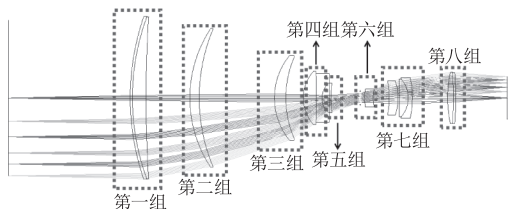


图4 变倍组元

Fig.4 Variable multiplier

在确保光学系统各项指标达标情况下,为了方便生产,采用锤形优化将玻璃材料替换为成都光明

玻璃,并进一步补偿色差。得到符合设计要求的双远心变倍光学系统,如图5所示。

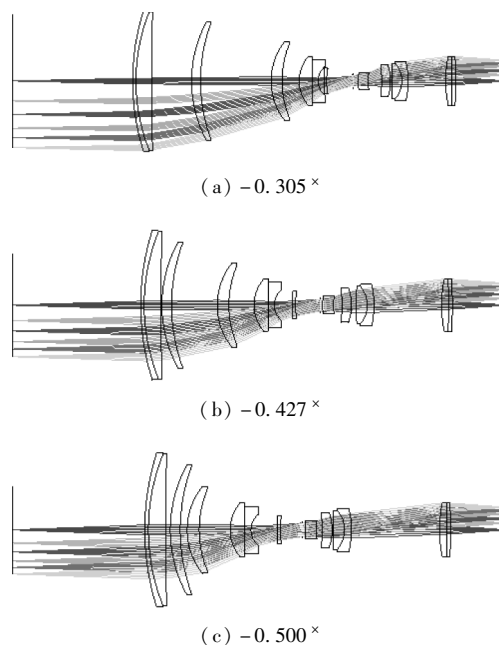


图5 设计结果

Fig.5 Design results

5 系统设计分析

5.1 系统成像质量分析

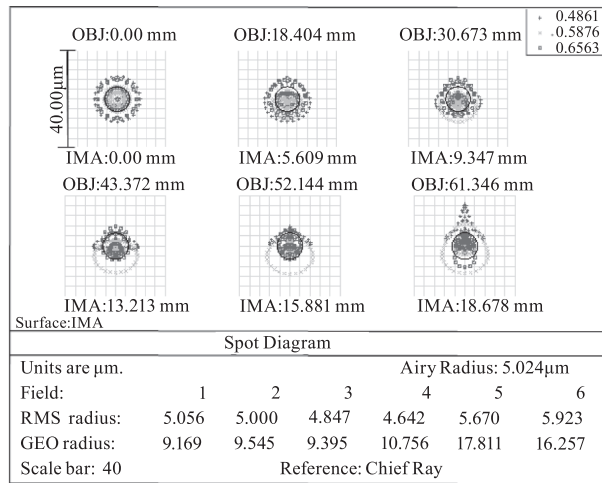
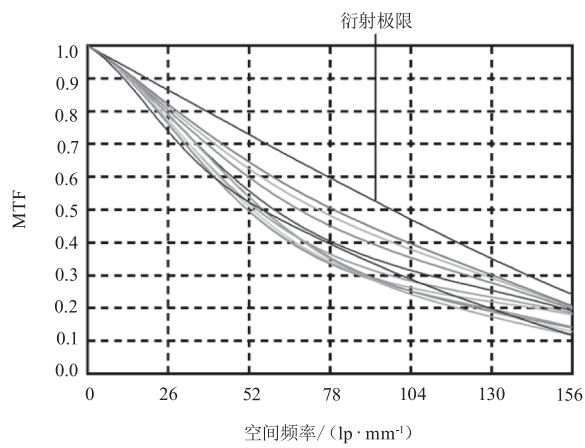
调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 曲线图和点列图是反映光学系统成像质量好坏的重要指标之一。优化后系统的传递函数曲线和点列图如图6所示。

由表1可知适配的工业面阵相机的单像元大小 σ' 为 $3.2 \mu\text{m}$,根据公式^[20]:

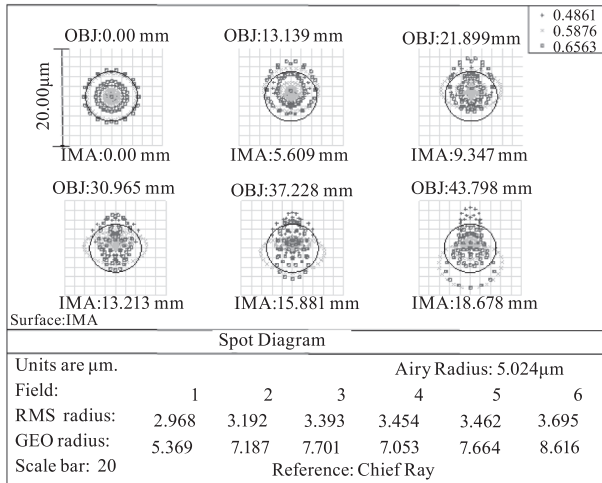
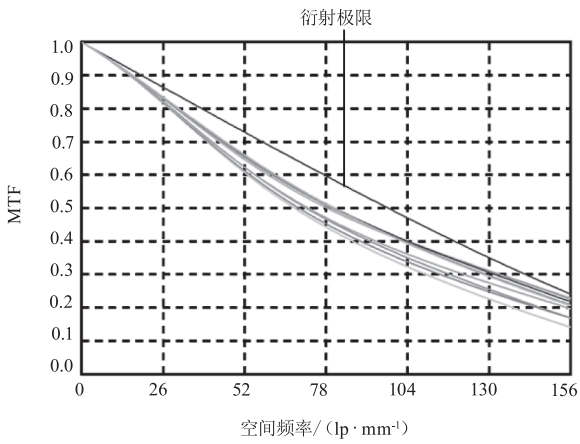
$$N = \frac{1000}{2\sigma'} \quad (12)$$

可知系统的奈奎斯特频率 N 为 156 lp/mm 。由图6中的图(a)、图(b)和图(c)的可以看出本文设计的双远心多重结构系统在放大倍率为 $-0.305\times$ 、 $-0.427\times$ 和 $-0.500\times$ 时的MTF曲线整体在 156 lp/mm 处都大于 0.1 ,接近衍射极限,表明其像质良好。

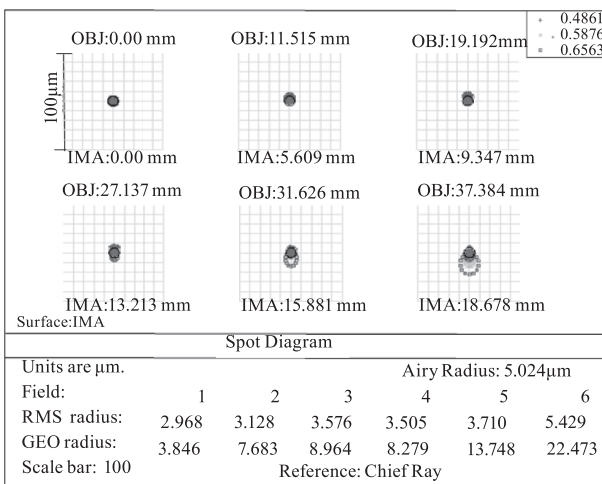
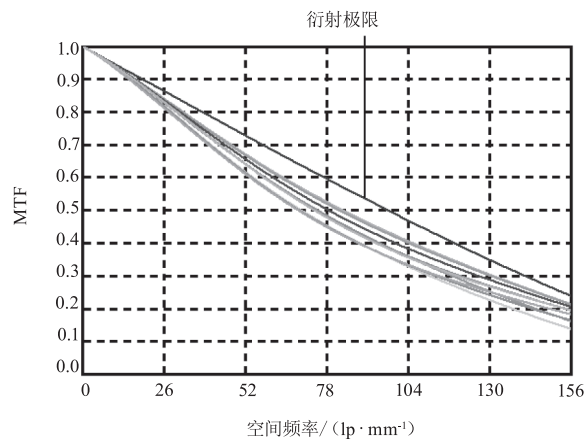
由图6所示不同倍率的点列图可知, $-0.427\times$ 的最大光斑为 $3.695 \mu\text{m}$,六个视场的光斑半径都接近艾里斑半径,总体上成像质量良好; $-0.305\times$ 和 $-0.500\times$ 下的光斑较大,且最大视场的光斑最大,均方根半径分别为 $5.923 \mu\text{m}$ 和 $5.429 \mu\text{m}$,成像质量较好,且中心视场比边缘视场成像质量好。



(a) -0.305 ×



(b) -0.427 ×



(c) -0.500 ×

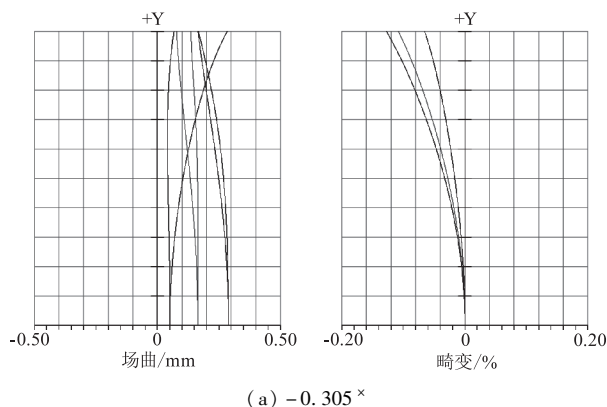
图 6 光学系统 MTF 曲线与点列图

Fig. 6 MTF curve and spot diagram of optical system

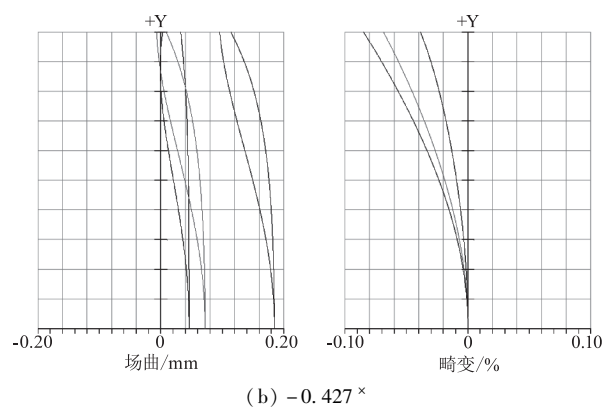
双远心光学系统对畸变的设计要求较高,故需
要将畸变限制在一定范围内。该光学系统的场曲和

畸变由图 7 可知,在 -0.305 × 的场曲小于 0.3 mm,
畸变小于 0.2 %,满足设计需求; -0.427 × 和 -

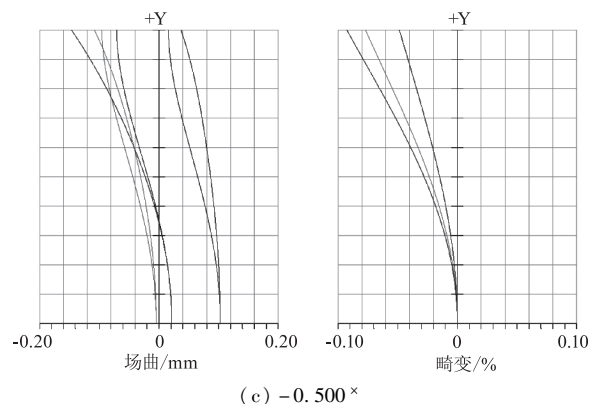
0.500[×]倍率下的场曲则都小于0.2 mm,畸变都小于0.1%,较-0.305[×]有较好的场曲和畸变,符合检测需求。



(a) -0.305[×]



(b) -0.427[×]



(c) -0.500[×]

图7 场曲与畸变图

Fig.7 Field curvature and distortion

双远心光学系统的远心度也是一个重要的评价指标。在大部分情况下,对远心度的标准要求都小于1°。本文设计的光学系统所实现远心度如表3所示,可以看出系统最大远心度为0.2°,小于1°,满足设计指标。

5.2 凸轮曲线拟合

光学系统可以据相关高斯光学理论进行分析计算^[21-22],或者通过多个不同倍率的位移情况进行凸轮曲线模拟^[23]。文中采用多组元全动型实现变倍,其各个组元移动情况比较复杂,在保证系统满足设计要求和成像质量的前提下尽量简化组元移动形式。

表3 系统远心度

Tab.3 System telecentricity

归一化物方高度 <i>H</i>	物方远心度/(°)			像方远心度/(°)		
	-0.305 [×]	-0.427 [×]	-0.500 [×]	-0.305 [×]	-0.427 [×]	-0.500 [×]
1	0.043	0.013	0.147	0.036	0.122	0.193
0.85	0.022	0.010	0.126	0.011	0.003	0.069
0.707	0.007	0.007	0.107	0.182	0.072	0.004
0.5	0.004	0.003	0.077	0.200	0.105	0.051
0.3	0.006	0.001	0.047	0.147	0.084	0.049

图8为各个移动组元移动量拟合出的移动曲线。总体上较为平滑,凸轮曲线接近线性。

5.3 系统公差分析

光学系统的设计需要考虑实际可加工性,以奎奈斯特频率156 lp/mm为评价性能指标,并以后截距作为补偿量,对系统的各个光学元件的公差进行了详细分析。采用灵敏度法进行分析,并根据表4中所列的公差参数进行设定。

表4 公差参数值

Tab.4 Tolerance parameter value

公差类型	公差范围
曲率半径/Fringe	2
厚度/mm	±0.008
透镜偏心/mm	±0.006
透镜倾斜度/(°)	±0.01
镜组偏心/mm	±0.01
镜组倾斜度/(°)	±0.01
不规则度/光圈	±0.1
折射率	±0.0005
阿贝误差/%	±0.3

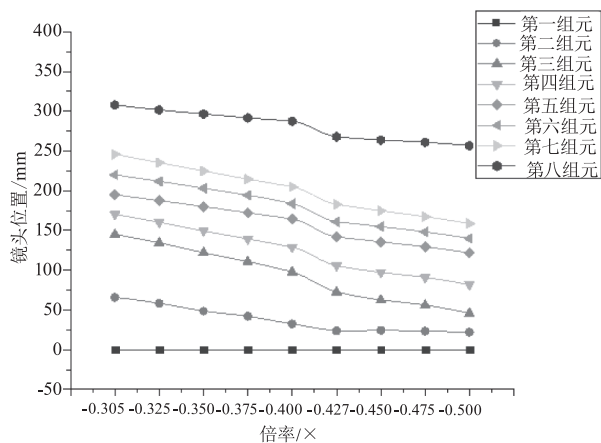


图8 凸轮曲线

Fig. 8 Cam curve

应用上述公差参数于系统中,并进行200次蒙特卡罗分析,可得到该系统在156 lp/mm下的奈奎斯特频率变化,如表5所示。分析表明,系统在156 lp/mm处有90%的概率超过0.16,可满足生产要求。

表5 蒙特卡罗分析结果

Tab. 5 Results of Monte Carlo analysis

概率/%	156 lp/mm 处的 f_{MTF}		
	-0.305 \times	-0.427 \times	-0.500 \times
90	0.158	0.178	0.163
80	0.163	0.187	0.169
50	0.172	0.197	0.181
20	0.179	0.204	0.191

6 结论

本文根据塑封工艺中的封装表面缺陷的检测需求,通过远心理想模型理论分析计算,运用Zemax光学设计软件,设计一款大面阵高分辨三倍双远心光学系统。该系统在362 mm的有限空间下,由13片球形透镜组成,F数为7,放大倍率为-0.305 \times 、-0.427 \times 和-0.500 \times ,最大畸变为0.13%,物方远心度小于0.2°,满足远心系统各项设计指标要求。该设计应用在机器视觉的芯片封装表面缺陷检测中,可有效地代替人工进行芯片表面缺陷的检测,实现芯片塑封表面缺陷高效率检测和多层次精确检测,在一定程度上提高了生产效率、降低了劳动成本,为检测设备的小型化设计提供一定的思路,在表面缺陷检测领域有着一定的参考价值。

参考文献:

[1] Wang Xuliang, Yang Daming, Huang Jiaoying. Research

on defect determination method of plastic sealing device based on ultrasonic scanning [J]. Electronic Devices, 2019, 43(1): 39-45. (in Chinese)

王旭亮,杨达明,黄皎英.基于超声扫描的塑封器件缺陷判定方法研究[J].电子器件,2020,43(1):39-45.

[2] Ye Wenwei, Zhou Tianfu, Huang Jinxuan, et al. Design of dual-field dual-telecentric optical system based on machine vision [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2020, 57(1): 206-212. (in Chinese)

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):206-212.

[3] Huang Qi. Research on optimal 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测量光学系统的优化设计研究[D].杭州:浙江大学,2021.

[4] Zhang Xinting, Kang Lei, Ding Hongchang, et al. Industrial lens design of aspheric double telecentric 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.

[5] Ye Wenwei, Huang Jinsheng, Zhou Tianfu, et al. Design and CAM curve analysis of double telecontrol system with continuous doubling [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(5): 210-216. (in Chinese)

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):210-216.

[6] Liu Linghong, Feng Yun, Nong Lihua, et al. Design and effect of field of view on optical design of triple double telecentric lens [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.

[7] Li J, Zhang K, Du J, et al. Double-sided telecentric zoom optical system using adaptive liquid lenses [J]. Optics Express, 2023, 31(2): 2508-2522.

[8] Huang Yaolin. Optical lens design of 1.4x zoom projector [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2019. (in Chinese)

黄耀林.1.4倍变焦投影仪的光学镜头设计[D].福州:福建师范大学,2019.

- [9] Velzel C H F. A course in lens design [M]. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014.
- [10] Jin Zhao, Gao Xingyu, Xiao Zexin. Design of high-resolution object telecentric objective lens based on machine vision [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2018, 38(3): 194 - 198. (in Chinese)
金钊, 高兴宇, 萧泽新. 基于机器视觉的高分辨率物方远心物镜设计 [J]. 桂林电子科技大学学报, 2018, 38(3): 194 - 198.
- [11] Zhang Yimo. Applied optics (3rd Edition) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. (in Chinese)
张以谟. 应用光学(第3版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [12] Cao Yiqing. Design of double telecentric lens for machine vision system [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.
- [13] Zhang Bo, Li Gongjin, Qin Pei. Failure analysis and improvement of passivation layer damage in thin plastic encapsulation chip [J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(12): 14 - 20. (in Chinese)
张波, 李恭谨, 秦培. 薄型塑封芯片钝化层损伤的失效分析与改进 [J]. 电子与封装, 2022, 22(12): 14 - 20.
- [14] Song Feijun. Introduction to modern optical system design [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
宋菲君. 近代光学系统设计概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [15] Sun Ting, Zhu Haiyan, Yang Zijian, et al. Design of optical system for dual-band common aperture camera [J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(3): 348 - 351. (in Chinese)
孙婷, 朱海燕, 杨子建, 等. 双波段共孔径相机光学系统设计 [J]. 应用光学, 2017, 38(3): 348 - 351.
- [16] Liu Bo, Liu Jun, Gao Ming, et al. Optical design of image telecentric lens for optical field multispectral camera [J]. Journal of Applied Optics, 2021, 41(3): 603 - 610, 617. (in Chinese)
刘博, 刘钧, 高明, 等. 光场多光谱相机像方远心镜头光学设计 [J]. Journal of Applied Optics, 2021, 41(3): 603 - 610, 617.
- [17] Luo Chunhua, Hou Jianli, Yu Dingping, et al. Design of industrial double telecentric system [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2015, (6): 12 - 15. (in Chinese)
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, (6): 12 - 15.
- [18] Chen Chili, Liu Yuzhao, Fei Manmang, et al. Optical system design of large-field dual-telecentric industrial lens [J]. Journal of Xi'an Technological University, 2018, 38(5): 444 - 450. (in Chinese)
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.
- [19] Dong M, Xiang Y, Tong J, et al. The design of double telecentric lens with large aperture based on machine vision [C]//International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2014.
- [20] Guo Jinming, Xiang Yang, Li Qi, et al. Design of variable magnification double telecentric optical system for industrial measurement [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 41(6): 31 - 35. (in Chinese)
郭金明, 向阳, 李琦, 等. 用于工业测量中变倍双远心光学系统设计 [J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2018, 41(6): 31 - 35.
- [21] Wang Xiangyang. Research on a full-motion zoom objective optical system [D]. Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
王向阳. 一种全动型变焦距物镜光学系统研究 [D]. 中国科学院大学, 中国科学院光电技术研究所, 2017.
- [22] Zhong Liujun, An Zhiyong, Gao Duorui, et al. Design of multi-component full-motion zoom objective [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(12): 199 - 204. (in Chinese)
钟刘军, 安志勇, 高铎瑞, 等. 多组元全动型变焦物镜设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(12): 199 - 204.
- [23] Xu Lifeng, Zhang Xin, Cai Wei, et al. Design of full-motion zoom optical system with high zoom ratio [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1748 - 1753. (in Chinese)
许利峰, 张新, 蔡伟, 等. 高变倍比全动型变焦距光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1748 - 1753.