

机器视觉非球面双远心物镜的设计

李明东¹ 高兴宇¹ 叶鹏² 陈朋波¹

¹桂林电子科技大学机电工程学院光机电一体化研究所, 广西 桂林 541004

²桂林电子科技大学电子与自动化工程学院, 广西 桂林 541004

摘要 为了用机器视觉检测技术精确检测微小零件的几何轮廓误差,设计了一套高分辨率非球面双远心物镜。根据检测要求确定系统的光学参数,运用架构分析法对系统进行整体光学初始结构设计。运用 Zemax 光学设计软件对初始结构进行优化,在物镜设计中引入非球面,使结构简化,并有效地平衡系统像差,提高像质。这个结构实现了低畸变(最大畸变小于一个像素)、高分辨率[在奈奎斯特频率 90.91 lp/mm 处调制传递函数(MTF)值优于 0.7,全视场 400 lp/mm 处 MTF 值达到 0.15]和双远心系统的设计要求。

关键词 几何光学; 双远心光学系统; 架构分析法; 非球面

中图分类号 TH702 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.070801

Design of Aspherical Double Telecentric Lens for Machine Vision

Li Mingdong¹ Gao Xingyu¹ Ye Peng² Chen Pengbo¹

¹*Institute of Opto-Mechatronics, College of Electromechanical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

²*College of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China*

Abstract In order to detect the geometric contour errors of small parts using machine vision inspection technology, a high definition double telecentric optical lens is designed. The optical parameters are setup according to the requirements of detection. The structure analysis method for overall structural design is applied to construct the initial optical structure. The optical software Zemax is used to optimize the initial optical structure. The aspherical design is introduced to this lens, which can not only simplify the structure, but also effectively balance the system aberration and greatly improve the image quality. This structure realizes design requirements of low distortion (maximum distortion is less than one pixel), high resolution [modulation transfer function (MTF) at Nyquist frequency of 90.91 lp/mm is greater than 0.7, MTF at full field of 400 lp/mm reaches 0.15] and double telecentric system.

Key words geometric optics; double telecentric optical system; structure analysis method; aspheric

OCIS codes 080.1010 220.3620 350.4600

1 引言

近十几年来,随着机器视觉系统^[1-3]在精密检测领域的应用越来越广泛,对检测镜头的分辨率、色差、畸变等光学性能的要求越来越高,普通工业镜头难以满足要求,因此远心镜头的研发和应用越来越受到重视。远心镜头分为物方远心、像方远心和双远心三种类型^[4],双远心镜头结合物方远心和像方远心的优点,具有

收稿日期: 2016-01-19; **收到修改稿日期:** 2016-03-17; **网络出版日期:** 2016-06-27

基金项目: 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任基金(桂科能 10-046-07_007)、广西自然科学基金(2015jjBA70017)、桂林电子科技大学研究生科研创新项目(YJXCXS201503)

作者简介: 李明东(1987—),男,硕士研究生,主要从事光学设计等方面的研究。E-mail: lmd5300075@163.com

导师简介: 高兴宇(1981—),男,博士,教授,主要从事微纳光子学、机器视觉检测技术等方面的研究。

E-mail: gxy1981@guet.edu.cn(通信联系人)

大景深、低畸变和高分辨等独特的光学性能,但是成本较高。世界知名的镜头厂商美国 Navitar、德国施乃德、意大利 Opto Engineering、日本 Kowa 都有自己的远心镜头品牌,国内处于领先水平的远心镜头为 BTOS 远心镜头。远心镜头的发展虽有十余年,但因其设计和制造难度高使得其价格十分昂贵,因此有必要对远心镜头的优化设计进行研究。

多数双远心镜头的设计都是先设计一个像方远心系统,再对优化好的像方远心光路进行结构的对称变换得到物方远心系统,或者直接重新设计一个物方远心系统,最后将两个光路进行组合形成双远心光路^[5-7]。本文设计运用架构分析法,直接将一个普通系统优化成双远心光路,并引入非球面以提高成像质量。优化后系统像差得到明显改善,分辨率提高,可加工性良好。

2 系统参数的确定

以某企业生产的精密量仪中的小模数齿轮零件为检测对象,针对齿轮的同轴度及渐开线齿形误差的检测,设计一款机器视觉检测双远心镜头。被测零件的直径为 3.8 mm,轴向长度为 2 mm,采用落射照明方式,工作波段为可见光,波长范围为 480~640 nm。要求检测分辨率为 2 μm ,最大畸变小于 0.5%,工作距离大于 18 mm。由于小模数齿轮的渐开线检测精度要求非常高,在本设计中选用 Avt Prosilica 的 GIGE 4/3" (1 inch = 25.4 mm) 的大靶面高分辨率电荷耦合器件 (CCD) 相机,该相机为 F 型接口,靶面尺寸为 18.13 mm \times 13.6 mm,像元尺寸为 5.5 μm \times 5.5 μm 。根据奈奎斯特采样定理,物方一个点至少要覆盖像方两个像元才能被相机分辨,即像方分辨率为 11 μm ,那么放大率至少为 $\beta=11/2.5=4.4\times$,本系统取 $\beta=-5\times$ 。光学系统主要的参数如表 1 所示。

表 1 双远心光学系统技术指标

Table 1 Technical indexes of the double telecentric optical system

Parameter	Value
Magnification	-5
Field of view/mm	4
Field of image/mm	20
Numerical aperture of image	0.15
Conjugate length /mm	240
Working distance/mm	18
Depth of view/mm	0.1
Mount type	F

3 初始结构方案设计

双远心光路原理如图 1 所示,光学系统由前后两组构成,其中,物镜前组的后焦点和后组的前焦点合,形成一个开普勒望远镜结构形式^[8]。光阑位于前组后焦点和后组前焦点处,使得物方主光线和像方主光线均平行于光轴,形成双远心光路。

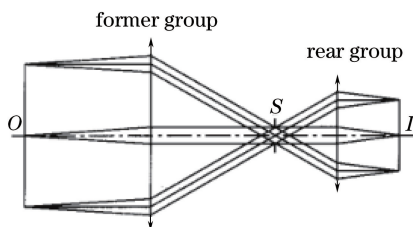


图 1 双远心光路原理图

Fig. 1 Double telecentric optical schematic

简单的镜头设计通常采用 PW 法进行初始结构的设计,但对于复杂系统的光学设计而言,PW 法使得计算繁冗,工作量非常大,所以 PW 法很难完成高效高质的设计。为此采用高国欣^[9]提出的架构分析法对光学

系统进行整体分析。架构分析法给出各镜设计的合理约束机制,在架构中逐一对各组元进行分析,并分别实体化进行设计的。由于光束约束的合理性,使得自动优化给出的初始结构也是合理的。架构分析法使光学设计人员易于从整体上把握系统的特性,编制优化操作集,提高设计的效率。

双远心物镜放大倍率 $\beta = -5\times$, 借鉴显微物镜设计的思路,采用反向设计。根据系统参数要求,共轭距为 240 mm,所用的是 F 接口的 CCD,其后截距为 46 mm,系统的工作距离为 18 mm。通常消色差的双胶合物镜所能负担的偏角小于 0.15 rad,单透镜所能承担的偏角小于 0.20 rad,过大的偏角将使系统产生较高级像差,不利于像差的校正。在架构分析中,根据物方数值孔径为 0.03,在满足共轭距的前提下,前组采用双组元结构,根据双远心光路原理,可知后组透镜的焦距为前组的 1/5,而后组的截距较小,为避免镜片光焦度过大不利加工,采用三组元来增加自由度,以平衡像差。考虑到工作距离为 18 mm,故取后组焦距 $f'_R = 20$ mm,在双远心光学系统中有:

$$\beta = -f'_R/f'_F, \quad f'_R = -f'_F \times \beta. \quad (1)$$

由(1)式可求得 $f'_R = 100$ mm。将结构参数输入到 Zemax 软件中,对放大倍率、焦距、光线入射角及光阑位置进行优化操作集编制,最后得出系统的整体架构如图 2 所示。

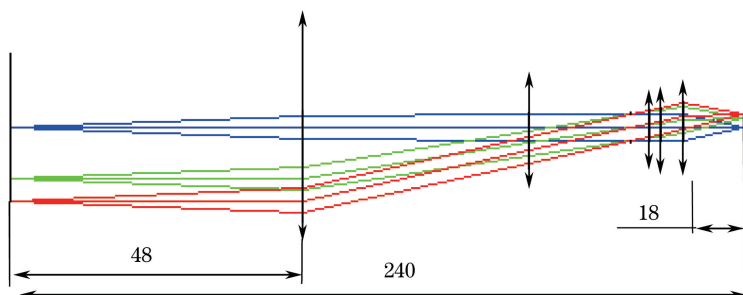


图 2 光学系统架构图(单位: mm)

Fig. 2 Optical system structure(unit: mm)

好的初始结构对光学系统的像差校正具有关键性作用,参照架构分析所得的系统架构图,选取专利库中视场 40° 、 $f/2$ 像方远心物镜作为初始结构。该专利的组元结构与本设计的架构图十分相近,利于后续像差的平衡,其初始结构如图 3 所示。

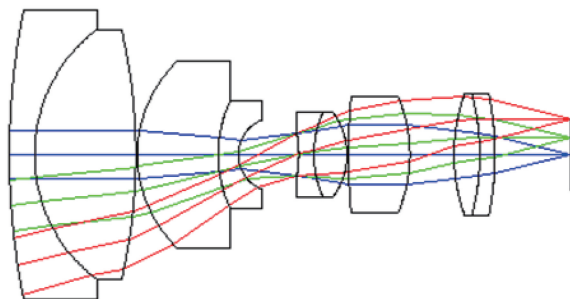


图 3 初始结构

Fig. 3 Initial optical structure

4 镜头的优化设计

4.1 几何像差校正分析

在对镜头优化设计的过程中,通常需要考虑以下几个主要问题^[10]:

1) 一个可进行光线追迹的合理光学系统。

2) 优化变量的设定。将半径、玻璃厚度、空间厚度以及非球面系数设为变量,由于玻璃材料的迭代需要花费很长的时间,所以最初优化时不设为变量,等后期优化时再设为变量,利用锤形优化玻璃材料。

3) 几何像差和传递函数的优化。由于和球面相比非球面能够扩大视场角,在提高光束质量的同时使用

的透镜数比球面透镜少,同时还能更好地消除色差、球差及彗差等,能够更好地提高像质。

利用胶合面使系统复杂化,增加优化的自由度,利于像差的校正;给胶合面两边的玻璃选取具有一定折射率差的玻璃组合,来校正单色像差,尤其使得高级像差得以很好地改善。此外,考虑到同心原则^[11],使系统的多数折射面弯向光阑,这样亦可有效的减小彗差、像散、畸变和轴向色差的产生,利于像差的校正。对 C(红光)光和 F(蓝光)光进行色差的校正,对 D(绿光)光进行单色像差校正。针对不同的像差,采用如下技巧进行校正:

1) 球差的校正:球差作为一种单色像差,主要与孔径大小有关,球差的校正需要正负透镜组合才可消除。主要利用正负透镜的组合、镜片的弯曲和非球面来平衡相互间的球差。其中利用靠近光阑的非球面能很好的校正系统的高级球差。

2) 像散的校正:像散过大会严重影响图片的清晰图,需要严格校正。在对光学系统进行像散校正的过程中,发现 0.7 视场的像散比较严重,由于球差和位置色差对不同入瞳距是不变的^[12],为此在对球差校正后,手动改变光阑的位置,即改变入瞳的位置,使光阑处于像质最佳的位置,此时各视场的像散得以很好地校正。

3) 场曲的校正:利用弯月形厚透镜校正场曲,一般的正薄透镜只能产生正的场曲值,负薄透镜只能产生负的场曲值,而厚透镜的场曲值是可控的,根据场曲值的要求,改变弯月厚透镜的厚度,以校正系统的场曲。本设计中第 2 片、第 7 片采用弯月厚透镜,第 6 片为鼓形透镜,此三片透镜使得像面得以校正场曲。

4) 畸变的校正:在像差校正的过程中,针对大视场、大相对孔径和畸变要求很高的光学系统而言,通常采用对称结构消畸变。被测物的视场属于小视场,其畸变相对较好校正,故不采用对称结构。在优化的过程中主要通过镜片弯曲、光阑位置移动和非球面来对畸变进行校正。

5) 色差的校正:色差主要是因光学材料对不同色光其折射率不同而产生。采用三组胶合透镜,以校正系统的色差。为了互相补偿位置色差,正透镜选用高折射率低色散的玻璃,而负透镜则相应的选用低折射率、高色散的火石玻璃^[11]。在选用弯月厚透镜的时候,采用高折射率、低色散的玻璃,并在厚透镜中加上胶合面,选用折射率相近、色散不同的玻璃组合,前组中的胶合组选用 SF4 和 BAF10 的组合。对后组的两对胶合透镜采用对称式的玻璃组合(SF4 和 SK16),能够很好地平衡色差。

图 4 为光学系统的赛德尔像差图,对比图 4(a)与图 4(b)的赛德系数总和,可见系统的像差得到很好地平衡。除畸变外其他像差都校正得很好,系统最后的畸变赛德尔系数为 0.00316,也在像差要求的范围内。

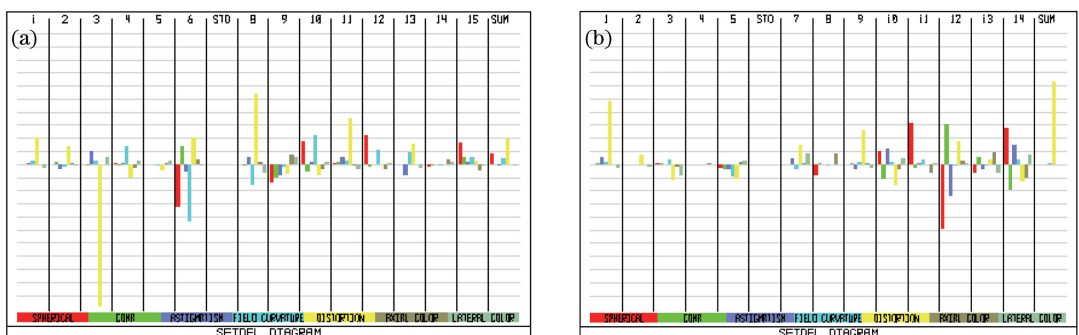


图 4 系统的赛德尔图。(a) 初始结构;(b) 最终结构

Fig. 4 Seidel diagram of the system. (a) Initial structure; (b) final structure

4.2 非球面设计

光学系统中采用非球面元件具有校正系统像差、提高成像质量以及减少系统体积等优点,因此非球面元件越来越多地被应用于各种光学系统^[12]。采用非球面技术设计的光学系统,可消除球差、彗差、像散、畸变,减少光能损失,从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特性^[13]。

单个非球面只能用来校正一种初级像差,非球面不能校正初级场曲^[11]。当在光阑附近采用非球面时可以校正与孔径有关的球差;在光阑之外的适当位置引入非球面,可以校正除场曲外的像差。利用非球面自身产生的高级像差较小,可以产生较大的负像差,可根据非球面应起的校正像差作用确定其位置,非球面最好位于对轴外像差影响较大的面。由图 4(a)可见,初始结构中第 3 面、第 6 面和第 12 面的像差较大,这 3 面对

系统的像差影响较大,为此选取远离光阑的第3面和第12面作为非球面,主要校正像散和畸变;选取光阑附近的第6面,以减小主光线的偏角,利于轴外像差的校正,特别是对高级球差的校正更为明显。

轴对称非球面^[14]可以是高次非球面,也可以是二次曲面。二次曲面方程一般表示为:

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}}, \quad (2)$$

式中: h 为光线与曲面交点的高度, c 为定点曲率, k 为常数,与离心率相关。高次非球面是在二次曲面的基础上加上高次项,由于奇次非球面不易加工,所以使用面型为偶次非球面,偶次非球面的方程为:

$$Z = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2h^2}} + A_1h^2 + A_2h^4 + A_3h^6 + A_4h^8 + A_5h^{10} + \dots, \quad (3)$$

式中 h 、 c 、 k 表示的量与(2)式相同,对于球面 $k=0$; A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_5 为非球面系数。由于高阶非球面不利于加工,故采用4阶的偶次非球面方程,利用光学软件Zemax对非球面3、6、12三面的非球面系数进行优化,在满足像质的情况下,最终所得此三个非球面的系数如表2所示。

表2 非球面系数

Table 2 Coefficients of the aspherical surfaces

Surface No.	K	A_1	A_2
3	-0.155	-0.019	0.00099
6	-0.75	-0.0079	0
12	0.21	-0.028	0.00082

对于非球面设计,必须要考虑其加工性能,非球面度^[15]是衡量非球面加工难易的重要参数,最大非球面度越大,则该非球面加工也就越难。关于检测用非球面度的计算方法有针对二次曲面的精确公式法、最小二乘法^[16]和针对高次非球面的描点法、矢高法、波像差法等^[17]。各种计算方法各有优劣,例如最小二乘法定义较为合理,但是计算复杂,而描点法需要时间较长,且准确度低,效率不高。刘惠兰等^[18]提出的最小最大残差法能够广泛应用于二次与高次非球面的非球面度计算,故采用此方法。根据非球面边缘点的坐标,利用近似法确定最接近球面半径 R ,通过计算机编程,计算出本系统中非球面的最大非球面度 δ_{\max} 。图5为设计的非球面曲线,由图中曲线可以看出非球面的曲线比较平滑,无突变;表3为最大非球面度,其中 h 为非球面边缘点光线的投射高度,3个面的最大非球面度都不大。非球面3、6、12的玻璃材料分别为:SF4(1.76, 27.6)、BAF10(1.67, 47.1)、SK541(1.59, 64.6),玻璃材料并无特别高折射率,是比较常用的玻璃材料,由图5和表3中的数据,可见设计的非球面其加工可行性良好。

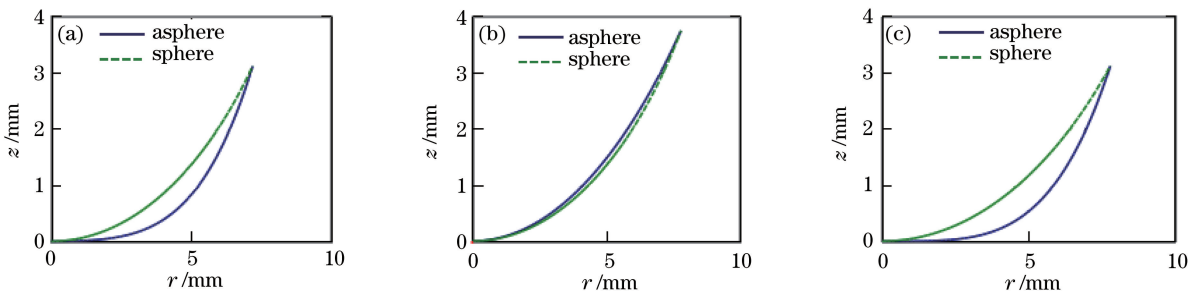


图5 非球面曲线图。(a)第3面、(b)第6面、(c)第12面

Fig. 5 Aspherical curves. (a) Third surface; (b) sixth surface; (c) twelfth surface

表3 最大非球面度

Table 3 Maximum asphericity

Face number and parameters	3($h=14.935, R=9.892$)	6($h=7.015, R=10.009$)	12($h=8.357, R=-11.332$)
Maximum asphericity δ_{\max}	0.532	0.138	0.652

5 设计结果

5.1 像质评价

对初始结构引入非球面并进行像差校正优化后,光学系统在初始结构的基础上减少了一片镜片,使得结构得以简化,所得最终的双远心光路图如图 6 所示。

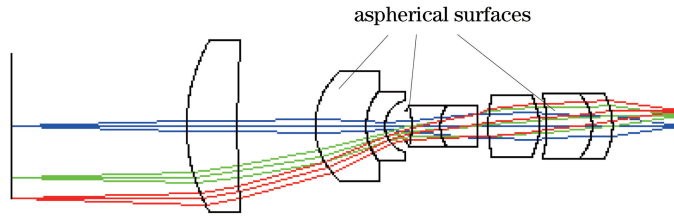


图 6 优化后的双远心物镜光路图

Fig. 6 Optical structure of the optimized double telecentric lens

调制传递函数(MTF)是对镜头的锐度、反差和分辨率进行综合评价的指标。与本物镜匹配的 CCD 相机的像元尺寸为 $5.5 \mu\text{m} \times 5.5 \mu\text{m}$, 则光学系统的奈奎斯特频率^[19] $N_L = 1000/2\delta = 1000/(2 \times 5.5) = 90.91 \text{ lp/mm}$ 。因此理想状态下要求物镜的截止频率至少要达到 90.91 lp/mm , 然而实际的光电成像系统由于设计、制造和使用误差等, MTF 会下降。考虑到上述影响 MTF 的因素, 系统的截止频率处应达到 0.3, 才能保证信号够被 CCD 读取。在对初始结构进行初步像差优化后所得衍射极限下的 MTF 曲线如图 7 所示。可见系统存在较大的像散, 像质并未达到设计要求。当引入非球面后, 再通过像差的平衡优化, 最终所得 MTF 曲线见图 8。对比图 7 可知, 加入非球面后系统的像质提高了很多, 而且系统的 MTF 在各个视场都比较均匀, 接近衍射极限值。各视场的 MTF 值在奈奎斯特频率处优于 0.7, 在 250 lp/mm 处 MTF 值优于 0.35, 边缘视场 MTF 在 400 lp/mm 处达到 0.15, 像质优良。

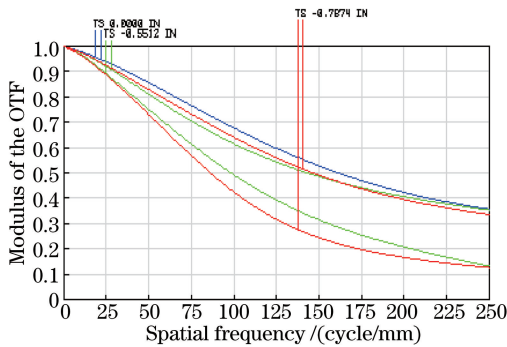


图 7 初始结构优化后的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves after optimizing initial structure

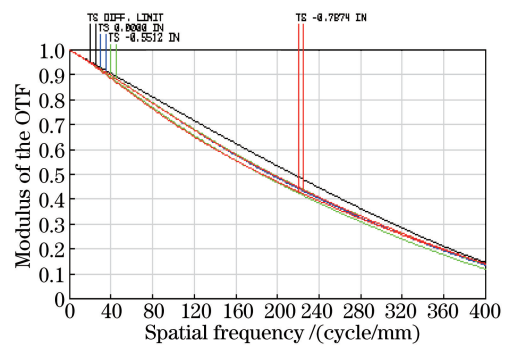


图 8 加入非球面优化后的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves after adding aspheric optimization

图 9 为系统的场曲畸变图, 由此图可以看出, 系统的最大场曲为 0.4 cm , 最大畸变小于 0.1% , 小于检测畸变要求的 0.5% 。图 10 反映了本光学系统的光斑尺寸大小, 由此图可见边缘视场的光斑半径为 $1.452 \mu\text{m}$, 远小于像元尺寸之半的 $5.5 \mu\text{m}$, 而且 0 视场和 0.7 视场的光斑尺寸均在艾里斑大小之内, 边缘视场光斑稍微大于艾里斑。图 11 为系统的色差图, 由图 11(a) 可看出最大垂轴色差发生在 0.7 视场处, 各光谱最大色差值小于 $1 \mu\text{m}$; 图 11(b) 反映了轴向色差的大小, 其中 F 光与 C 光间的最大色差为 $3.02 \mu\text{m}$ 。表 4 为物镜 D 光像方远心度值, 其中像方 0.2 视场出现最大值为 1.685×10^{-4} , 其他视场远心度值均较小, 物方远心则通过参数设置中的 telecentric object space 来控制, 基本实现了物方和像方的平行光路设计。

5.2 公差分析

由于 $-5\times$ 的双远心物镜的采用了非球面设计, 而非球面的加工相对于球面而言要求更高, 因此镜片的偏心对系统的整体像质影响尤为突出。为此针对该物镜的公差分析, 主要针对镜片的曲率半径偏差、沿 X 轴和 Y 轴方向的面偏差以及物镜各面间的间隔偏差为考察对象。选择衍射极限下的 MTF 作为评价函数, 选取奈奎斯特频率 90.91 lp/mm , 采用蒙特卡洛分析法, 利用 Zemax 软件对其进行敏感度分析。公差分析

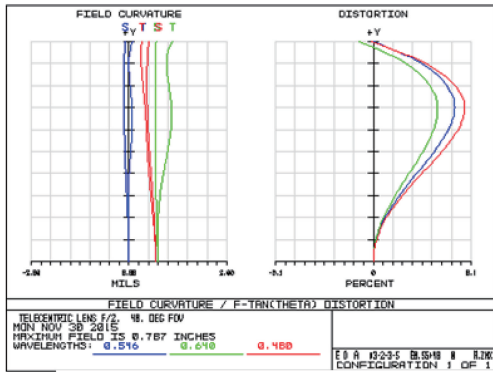


图 9 场曲和畸变图

Fig. 9 Field curvature and distortion diagram

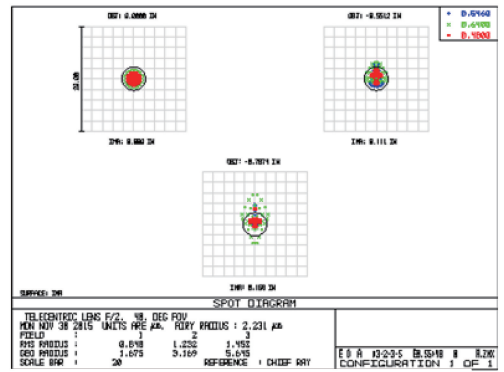


图 10 点列图

Fig. 10 Spot diagram

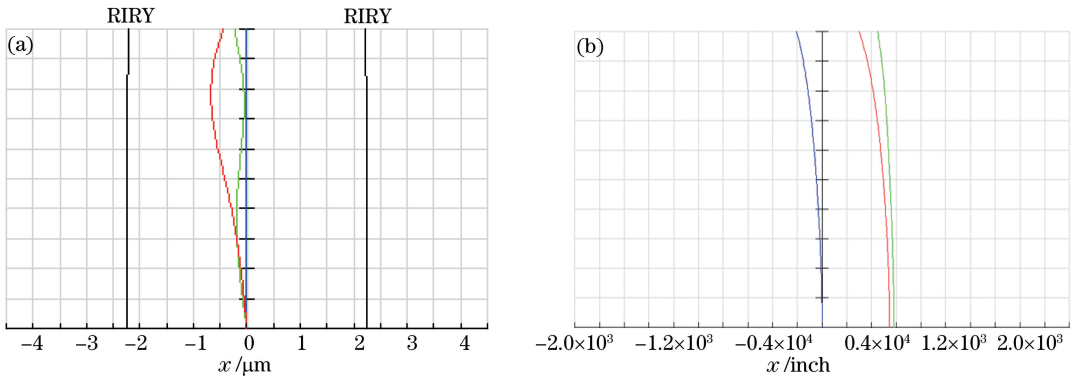


图 11 色差图。(a) 垂轴色差；(b) 轴向色差

Fig. 11 Chromatic aberration diagram. (a) Lateral aberration; (b) longitudinal aberration

表 4 像方远心度

Table 4 Telecentricity of image space

Image field	0.2	0.5	0.707	1
Telecentricity / (°)	1.685×10^{-4}	2.256×10^{-5}	5.056×10^{-5}	4.784×10^{-6}

下的 MTF 曲线图如图 12 所示,由图可见,在奈奎斯特频率处,物镜的 MTF 值依然大于 0.3,利于工业 CCD 相机对检测图像的读取,但是镜头的对比度有所降低。

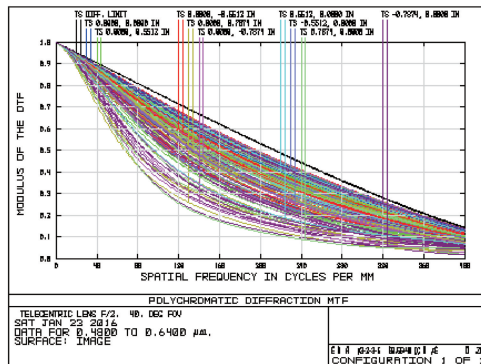


图 12 公差分析下的 MTF

Fig. 12 MTF curves under the tolerance analysis

表 5 给出了影响该物镜的主要面号以及相应的改变量。改变量一列,可看出第 14 面的曲率半径公差对系统像质的改变量为 -0.05840240 ,在所有改变量中最大。其次,第 10 面和第 11 面的沿轴偏差对系统的像质该变量也较大,而第 12 面和第 14 面的沿轴面偏差也都大于 -0.054 。由此可以看出,第 14 面、第 10 面、

第 11 面和第 12 面为本物镜的敏感面,因此在对镜片加工和装配的过程,应该重点控制这些面的公差,以确保镜头的像质优良。表 5 中的公差值均为理论值,在具体的加工和装配过程中还有很多不定因素,表中理论值可为以后的光学加工和装校提供参考,以保证镜头的成像质量。

表 5 表现最差的选项

Table 5 Worst offenders

Type	Surface No.	Tolerance	Criterion	Change
TRAD	14	-0.02000000	0.69756096	-0.05840240
TEDX	10-11	-0.02000000	0.70059447	-0.05536890
TEDX	10-11	0.02000000	0.70059447	-0.05536890
TEDY	10-11	-0.02000000	0.70059447	-0.05536890
TEDY	10-11	0.02000000	0.70059447	-0.05536890
TEDX	12-14	-0.01000000	0.70189267	-0.05407070
TEDX	12-14	0.02000000	0.70189267	-0.05407070
TEDY	12-14	-0.02000000	0.70189267	-0.05407070
TEDY	12-14	0.02000000	0.70189267	-0.05407070
TRAD	14	0.02000000	0.72158895	-0.03437442

6 结 论

根据对精密零件的检测要求设计了一组非球面双远心光学系统。通过运用架构分析法对系统进行整体结构的设计,根据所得系统整体架构图,合理选择初始结构。按照检测要求完成了一款放大倍率为 $-5\times$,最大畸变小于 0.1% 、MTF 值在奈奎斯特频率处优于 0.7 ,在 400 lp/mm 处边缘视场的 MTF 值达到 0.15 ,结构简单、像质优良的双远心光学系统。引入 3 片非球面增加了制造成本,但有效提高了成像质量。重点阐述像质优化的过程和非球面的设计,分析了对象质影响最大的结构因素的公差,为他人设计双远心系统提供参考。

参 考 文 献

- Lai Xianjia, Xu Wendong, Zhao Chengqiang, *et al.*. Influence of sample defocus and large thickness on measurement error in machine vision application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0815002.
来先家, 徐文东, 赵成强, 等. 机器视觉应用中物体离焦及过厚对测量精度的影响[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0815002.
- Tian Yuanyuan, Huang Hecheng, Tan Qingchang. Size measurement of parts based on machine vision[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(1): 011501.
田原嫻, 黄合成, 谭庆昌. 基于机器视觉的零件尺寸测量[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(1): 011501.
- Zhang Wuyi, Zhao Qiangsong, Wang Dongyun. Status quo and development trend of machine vision[J]. *Journal of Zhongyuan Institute of Technology*, 2008, 19(1): 9-12.
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.
- Li Xiaotong, Cen Zhaofeng. Geometrical optics, aberrations and optical design(3ed edition)[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2014, 2: 73-74.
李晓彤, 岑兆丰. 几何光学·像差·光学设计(第三版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2014, 2: 73-74.
- Lin Feng. The design of double telecentric lens with large aperture based on machine vision[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2010, 8(1): 67-71.
林 峰. 基于机器视觉检测的大视场双远心光学系统设计[J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(1): 67-71.
- Pan Bing, Yu Liping, Wu Dafang. 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.
- 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): 12-20.
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*, 2015, 38(6): 12-20.

- 8 Milton L. Lens design(3rd edition)[M]. New York: Marcel Dekker, 2001: 36-38.
- 9 高国欣. 光学设计指引贴 5《架构分析》[Z]. [2012-08-13]. <http://www.opticsky.cn/read-htm-tid-60689.html>.
- 10 Dai Huina. The research of LCOS micro-photography lens design based on Zemax[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2010.
代会娜. 基于 ZEMAX 的 LOCS 微型摄影镜头设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- 11 Zhang Yimo. Applied optics(3rd edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2008: 618-621.
张以谟. 应用光学(第3版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 618-621.
- 12 Xie Feng, Hao Qun, Zhu Qiudong. Best-fit spheric surface definition based on slop asphericity for aspheric surface[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(11): 3197-3202.
谢 枫, 郝 群, 朱秋东. 基于斜率非球面度的非球面最接近比较球面定义[J]. 光学学报, 2010, 30(11): 3197-3202.
- 13 Gou Zhiyong, Wang Jiang, Wang Chu, *et al.*. Summary of aspheric optical design technology[J]. Laser Magazine, 2006, 27(3): 1-2.
勾志勇, 王 江, 王 楚, 等. 非球面光学设计技术综述[J]. 激光杂志, 2006, 27(3): 1-2.
- 14 Ni Lvting, Cheng Ping, Wei Di. Design of aspheric photographic lens based on ZEMAX[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2012, 35(11): 1510-1513.
倪绿汀, 程 萍, 位 迪. 基于 ZEMAX 的非球面摄影镜头的设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, 35(11): 1510-1513.
- 15 Xing Zhenchong, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Design of compensator of convex aspheric surface with small apertures[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1116001.
邢振冲, 张 葆, 洪永丰. 一种小口径凸非球面补偿器的设计[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1116001.
- 16 Du Yujun, Ren Haixia, Liu Zhongben. Aspheric surface calculation method of the optical aspheric element[J]. Journal of Applied Optics, 2002, 23(5): 42-45.
杜玉军, 任海霞, 刘中本. 光学非球面元件非球面度计算方法[J]. 应用光学, 2002, 23(5): 42-45.
- 17 Wei Zihua, Shen Weixing. A new calculation method of aspherical optics[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 730-732.
韦资华, 沈卫星. 一种新的光学非球面度计算方法[J]. 光子学报, 2007, 36(4): 730-732.
- 18 Liu Huilan, Sha Dingguo, Hao Qun, *et al.*. A calculation method of high order optical asphericity[J]. Journal of Optical Engineering, 2004, 31(6): 44-47.
刘惠兰, 沙定国, 郝 群, 等. 一种高次光学非球面度的计算方法[J]. 光电工程, 2004, 31(6): 44-47.
- 19 Wang Xiaokun. Optical design of a high resolution space camera[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122001.
王孝坤. 一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122001.