

运动数码摄像机鱼镜头的设计与实例

刘言¹ 韩敏¹ 居荣兵¹ 康廉洁¹ 朱佳巍² 丁桂林¹

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

²众盈光学有限公司, 广东 中山 528441

摘要 为了满足人们对超广角、大视野的取景需求,运用光学软件 CODE V 和 Zemax 设计了一个结构紧凑的用于运动数码摄像机的鱼镜头光学系统。该镜头由 5 片玻璃镜片和 3 片塑胶非球面镜片组成。设计结果表明,镜头 F 数为 2.2, 视场角为 240° , 系统总长度为 23 mm, 半像高为 2.35 mm, 在 $1/2$ 奈奎斯特频率(178 lp/mm)处所有视场均大于 0.15, 可以实现高清全景监控。投影检测结果显示,该鱼镜头产品的性能满足要求。

关键词 光学设计; 鱼镜头; 广角; 塑胶非球面

中图分类号 TB811

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.082201

Design and Instance of Sport Digital Video Fisheye Lens

Liu Yan¹ Han Min¹ Ju Rongbing¹ Kang Lianjie¹ Zhu Jiawei² Ding Guilin¹

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

²Zenith Optical Co., LTD., Zhongshan, Guangdong 528441, China

Abstract In order to meet the requirement of the ultra-wide angle and large view landscape, a compact structure fisheye lens system for the sport digital video is designed with the optical system design software CODE V and Zemax. The lens comprises 5 pieces of glass lenses and 3 pieces of plastic aspheric lens. The design result shows that the F -number is 2.2, field angle is 240° , the total length of the system is 23 mm, the half image height is 2.35 mm, and all of the field of view at half of Nyquist frequency (178 Lp/mm) are more than 0.15. The lens achieve high-resolution panoramic monitor. The projection detection result shows that the performance of the fisheye lens can meet the requirements.

Key words optical design; fisheye lens; wide angle; plastic aspheric

OCIS codes 220.3620; 220.4840

1 引言

随着光学事业的不断发展和社会的进步,人们对于信息的需求越来越多。鱼镜头比广角镜头有着更大的视场角,属于超广角镜头中的一种特殊镜头^[1-4]。利用鱼镜头构造的成像系统可以凝视体制获得半球甚至超过半球空域的场景图像,实现完全无盲区的实时信息提取。鱼镜头广泛应用于三维重建、运动监测、交通记录、安防监控、行车记录等领域^[1-6]。

目前,关于鱼镜头的专利已有不少,但很多学者对鱼镜头的研究显示:很难获得更大的视场角,同时镜头的成像质量也被忽略,例如一些美国专利^[7-9]中的鱼镜头的视场角均小于 200° 。目前国内市场上鱼镜头的发展不仅追求更大的视场角,而且需要在全视场范围内优质成像。最近几年兴起的运动相机,是为满足极限运动爱好者的需求设计的。比较有代表性的是 SONY 的 AS 系列和其他支持 4K 录制的运动相机。

收稿日期: 2016-03-21; 收到修改稿日期: 2016-05-05; 网络出版日期: 2016-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(11204107)

作者简介: 刘言(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学系统设计等方面的研究。E-mail: 1551706224@qq.com

导师简介: 丁桂林(1957—),男,博士,教授,主要从事光学设计和激光传输与控制等方面的研究。

E-mail: 643130017@qq.com

本文突破目前鱼眼镜头的不足,设计了一款视场角为 240° 的高清鱼眼镜头。该鱼眼镜头的光学系统由 5 片玻璃镜片和 3 片塑胶镜片组成,即 5G3P 的结构,通过使用三片非球面透镜,简化了光学系统的结构,在控制好像差的前提下,提高了成像质量。最后通过对镜头成品进行投影检测,成功制造出鱼眼镜头产品,并且实现大批量生产。

2 镜头结构的设计指标

根据产品的需求,设计了一款 F 数为 2.2,视场角为 240° 的鱼眼镜头光学系统。该系统使用的芯片为 OV16850,互补金属氧化物半导体(CMOS)和鱼眼镜头的设计指标如表 1 和表 2 所示。

表 1 CMOS 主要规格指标
Table 1 Main specifications of CMOS

Project name	Specification
Resolution	5408 pixel \times 3044 pixel
Image area	6092.8 mm \times 3445.12 mm
Pixel size	1.12 μm \times 1.12 μm

表 2 鱼眼镜头的主要技术指标
Table 2 Main specifications of the fisheye lens

Project name	Specification
Wave band visible light	<25 mm (total length)
F number	2.2
Field of view	240°
Back focal length	>1.50 mm
Relative illumination (0.7 field of view)	$>50\%$
Distortion	$<20\%$

3 设计过程

3.1 初始结构设计

根据上述鱼眼镜头的设计指标,确定鱼眼镜头的视场接近或超过 240° ,同时要求 F 数为 2.2,这使得该鱼眼镜头的光学系统要比一般的照相物镜复杂得多。

图 1 为反摄远物镜基本结构,同时也是鱼眼镜头光学系统的基本结构简化图。从图 1 可见,反摄远物镜基本结构的前组为负透镜,后组为正透镜。对于鱼眼镜头而言,前组负透镜是至关重要的组件。入射光线与光轴夹角为 ω ,经前组负透镜发散后,其光线夹角变为 θ ,很明显 $\theta < \omega$ 。故前组负透镜的主要作用是对轴外入射光线进行发散,使大视角光线与光轴的夹角大大减小,从而显著减小后续组元对应的视场角,使像差校正更容易。但是轴上的光线经过负透镜组发散之后,使得后续组元拥有更大的孔径。此外光学系统视场边缘照度与视场中心的照度按 $\cos^4 \omega$ 衰减^[10-16],这样边缘的光照度会迅速降低,因此前组负透镜引入大量的桶形畸变能减小像方半视场角 ω ,保证了边缘照度缓慢下降,从而提高像面照度分布的均匀性。另一方面,前

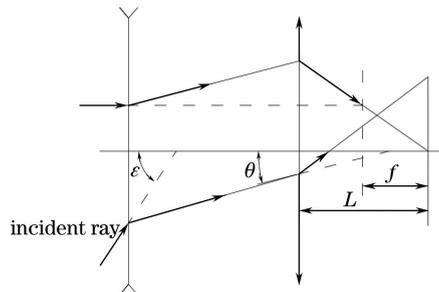


图 1 反摄远物镜基本结构

Fig. 1 Basic structure of inverted telephoto lens

组负透镜能产生足够的桶形畸变,保证物方半视场角大于 90° 时也能成像。

根据光学系统总光焦度的要求和外形尺寸,可以确定前组负透镜的光焦度,后组正透镜的光焦度随之可以确定。另外,由于前组负透镜不可能完全平衡像差,因此后组正透镜需要补偿前组负透镜遗留的部分像差。根据以上思路,选取美国专利 US8873167B2^[10] 中的鱼镜头,该鱼镜头的第 12 个结构的前组负透镜是由两个光焦度为负的透镜组成,后组透镜则是大致采用“正负正”的结构进行像差校正,基本能满足要求。该鱼镜头的视场角不足 180° ,故在此光学系统最前端添加一片负透镜来扩大视场角。至此,确定了本文要设计的鱼镜头的基本结构^[1]。

由于本设计的鱼镜头具有超大视场角,所以系统的像差和畸变的校正成为该技术领域的难点;另外,视场角越大,镜头的结构越复杂,体积也就越大,相应的成本也会增高。所以在保证较好的成像质量的情况下,本设计采用非球面技术,通过使用三片非球面塑胶镜片以及胶合透镜来校正像差,进一步简化结构,降低成本,同时提高成像质量。

由非球面公式:

$$Z = \frac{X^2}{R + \sqrt{R^2 - (1-K)X^2}} + A_4 X^4 + A_6 X^6 + \dots, \quad (1)$$

式中 Z 表示非球面的旋转对称轴, X 表示距离非球面轴的水平距离, R 表示顶点曲率半径, A_4 、 A_6 、 \dots 为高次非球面系数, K 为二次曲面系数。从(1)式可以看出,非球面的面形是由多个参数决定的,参数越多,其校正像差的能力越强,所以非球面在光学系统校正像差中具有显著的优点。将该系统的第 3、第 5、第 8 透镜设置成塑胶透镜,其相应的光学面均为非球面。第 3 非球面透镜的主要作用是校正轴外彗差,该透镜对每个视场的彗差都有相应的校正作用;第 5 透镜靠近光学系统光阑,主要校正球差;第 8 透镜则整体校正像散,将光学系统的光焦度敏感减小。

非球面除了能够很好地校正像差之外,同时也能减弱系统的光学敏感度,阻止像差变大,提高该光学系统的成像质量。非球面的引入使得透镜的数量减少,光学系统总长缩短。

3.2 优化设计

本设计主要利用 CODE V 软件并结合 Zemax 软件进行优化模拟,光学设计中常用的两种最优化方法是适应法和阻尼最小二乘法,选用阻尼最小二乘法优化的关键是评价函数的构造及权重因子和阻尼因子的合理选择。优化过程中涉及的因素越多,其可行性保障越难。通常会出现这样的情况:改变优化指标进入优化的次序、调整权重、重新规定边界条件,都有可能造成优化结果的差异。优化过程中需要合理安排实施优化的步骤、合理选择结构参数自变量及其权重的分配、合理设定评价函数、合理设定边界条件等。主要的优化方法如下:

1) 设置变量,将镜片的中心厚、边厚、半径、空气间隔以及非球面的系数设置成可变量,将最后一面设置为近轴像面解,近轴像面解是根据光线追迹计算的高斯像面距离来自动设置像面的位置,这样设置是为了方便软件找到后像面的距离。

2) 在 CODE V 软件中采用局部优化的方法来优化光学系统,故在优化选项中添加约束。如在特殊约束选项中,用 OAL(overall length)控制光学系统总长的大小,用视场波长畸变(DIY)控制系统中指定视场及波长的畸变。在一般约束选项中,用 MXT(maximum center thickness)、MNT(minimum center thickness)、MNE(minimum edge thickness)控制最大中心厚度、最小中心厚度和最小边缘厚度,其中最大中心厚度为 6 mm,最小中心厚度和最小边缘厚度均为 0.3 mm。在输出控制中对输出进行设置。

3) 在优化过程中,利用操作数 WTX(weight on X)和 WTY(weight on Y)对镜头的综合调制传递函数(MTF)曲线在弧矢和子午方向设置适当的权重,部分重要的限制可用 WTC(weight constraint)操作数对权重进行适当调整。所以,在优化时随着视场和非球面阶数的逐步递增,要根据实际要求以及贡献量灵活地改变权重,使光学系统达到平衡。

4 设计结果

通过光学设计软件设计优化后的鱼镜头光学系统结构图如图 2 所示。系统由 8 片透镜组成,沿着光

线传播方向从左向右来看,第1、第2、第4、第6、第7透镜为玻璃镜片,第3、第5、第8透镜为塑胶镜片,其中第6、第7透镜组合形成胶合透镜。

该光学结构的特征为:第1透镜为球面正透镜,第2透镜为球面正透镜,第3透镜为凸向物方双面非球面塑料负透镜,第4透镜为球面正透镜,第5透镜为凸向像方双面非球面塑料正透镜,第6透镜为球面正透镜,第7透镜为球面负透镜,第8透镜为凸向像方双面非球面塑料正透镜。该镜头光学总长度为23 mm,后工作距离为1.54 mm,视场角为 240° ,像高为4.65 mm,主光线最大出射角(CRA)小于 10° 。

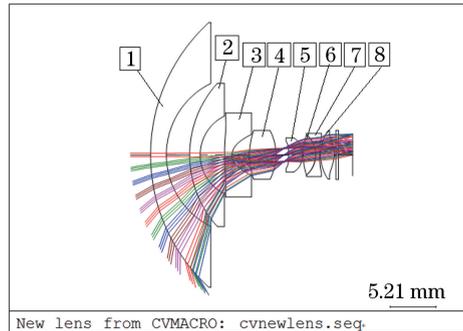


图2 光学系统结构图

Fig. 2 Structure of optical system

MTF 曲线图是评价镜头性能的综合指标,对于鱼镜头来说,主要的成像区域集中在 0.707 视场范围内,对于之外的视场允许性能有一定的下降。该系统的奈奎斯特频率为 357 lp/mm , $1/2$ 奈奎斯特频率为 178 lp/mm 。该系统在奈奎斯特频率处和 $1/2$ 奈奎斯特频率处的 MTF 曲线分别如图3和图4所示。从图3可知,在奈奎斯特频率下,中心视场大于 0.2 , 0.7 视场以内均在 0.1 以上;从图4可知,在 $1/2$ 奈奎斯特频率处,中心视场大于 0.4 ,所有视场均大于 0.15 。以上数据说明该设计在 0.7 视场范围内成像质量较高,全视场范围内的成像质量也能符合实际应用要求。

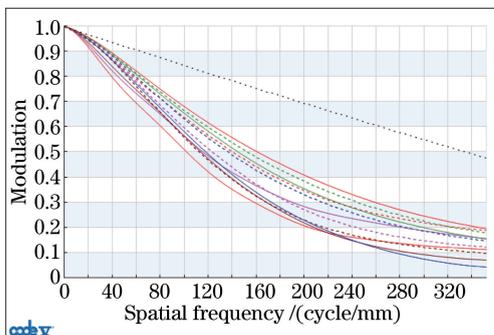


图3 奈奎斯特频率处的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves in Nyquist frequency

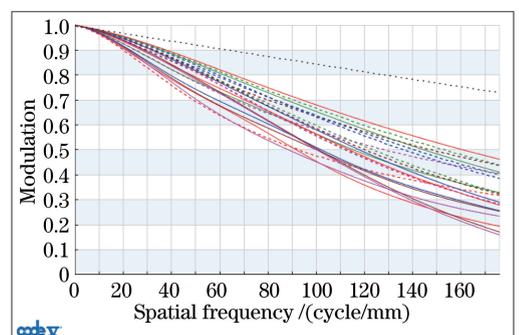


图4 $1/2$ 奈奎斯特频率处的 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curves in $1/2$ Nyquist frequency

本设计鱼镜头的场曲和像散曲线如图5(a)所示。场曲是轴外点光束的像差,当存在场曲时,物体的像变成一个回转的曲面,在任何像平面处都不会得到一个完整的像,故必须控制场曲小于 0.1 mm 。从图5(a)可见,本设计鱼镜头的场曲校正控制在 0.05 mm 以内,完全满足要求。像散是指子午和弧矢方向像点不重合而分开的轴向距离,若子午和弧矢方向像质不在同一点上,会严重影响最后的成像效果,对于鱼镜头,其全视场范围内的像散控制在 0.02 mm 以内比较合适。从图5(a)可见,本设计鱼镜头光学系统的子午和弧矢之间的离焦控制在 0.02 mm 以内,其像散得到很好的控制。

鱼镜头要引入大量的畸变,边缘视场在一定程度上需要压缩量,而压缩量的大小直接影响成像视觉效果,因此在设计鱼镜头时需着重关注畸变特性^[4]。本设计鱼镜头的畸变图如图5(b)所示,该图是按照传统意义的畸变算法得到的畸变曲线图,可以看到在半视场 90° 以上时,其畸变量已趋于无穷,不利于畸变的校正判定。为此,本设计结合 Zemax 软件采用引入畸变量最小的体视型模型,该成像模型遵循 $2 \times f \times \tan(\omega/2)$ 的物像对应关系,体视型模型边缘成像相对压缩量较少,有利于畸变的校正^[1,4]。最终结构镜头的

TV 畸变曲线如图 6 所示,TV 畸变是相对于体视型模型的畸变曲线,横轴表示所设计镜头与使用模型之间畸变的偏差,纵轴表示半视场角^[4]。图 6 显示该镜头的 TV 畸变在 $-18.3\% \sim 5.3\%$ 范围内,其 TV 畸变在 20% 以内,符合镜头成像要求。

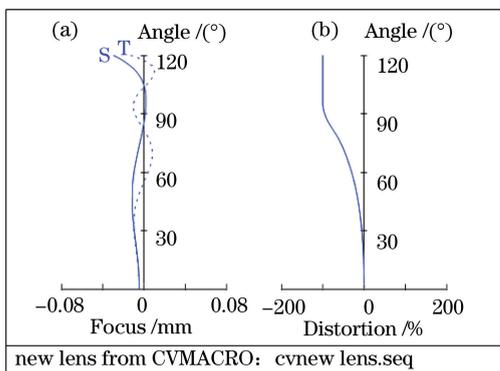


图 5 鱼眼镜头的 (a) 像散、场曲; (b) 畸变
Fig. 5 (a) Astigmatism, field curvature and (b) distortion of the fisheye lens

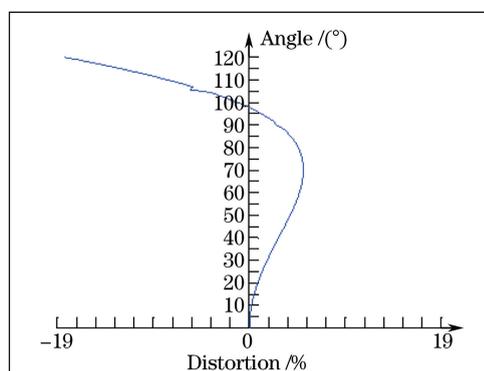


图 6 鱼眼镜头的 TV 畸变
Fig. 6 TV distortion of the fisheye lens

本设计鱼眼镜头的光线像差曲线如图 7 所示,5 个视场的像差都被校正到 0.025 mm 以内,可见镜头的像差得到较好校正。本设计鱼眼镜头的点列图如图 8 所示,可以看到中心视场的均方根(RMS)直径为 0.000655 mm,小于像素元的大小;0.3 视场、0.7 视场和 1.0 视场的 RMS 直径分别为 0.001894、0.003242、0.003451 mm,可见,所有视场均在像素元大小的 3 倍以内,总体来看基本能满足鱼眼镜头对弥散斑直径的要求,由此可知本系统能量分布控制得较好。

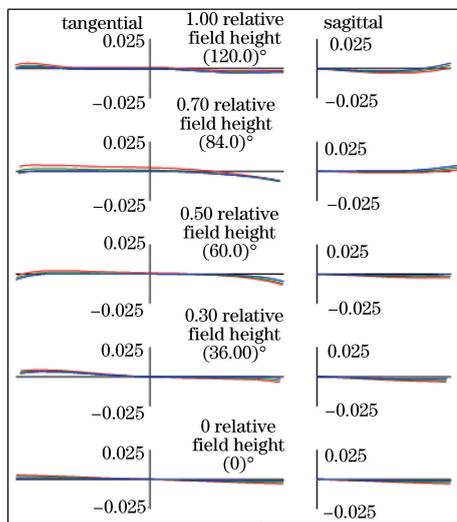


图 7 鱼眼镜头的光线像差曲线

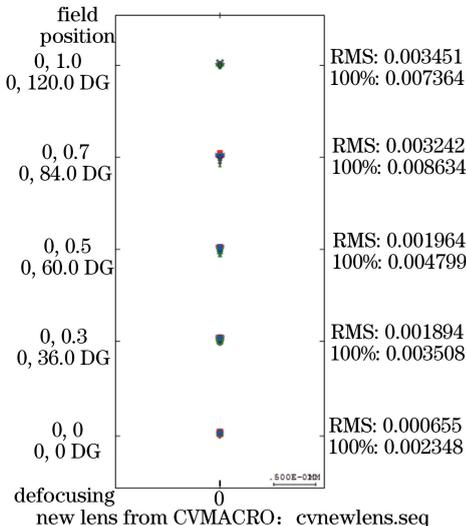


图 8 鱼眼镜头的点列图

Fig. 7 Ray aberration curves of the fisheye lens

Fig. 8 Spot diagram of the fisheye lens

5 公差分析

为了确保该鱼眼镜头设计产品化、工业化的可行性,必须要对设计进行公差分析。公差分析要结合实际,首先对行业内工厂加工设备的精密性、工艺能力等方面进行评估,其次对设计方面进行公差模拟。在 CODE V 软件的公差和补偿编辑器中插入默认公差,然后根据实际加工能力对其进行适当修改。表 3 为该光学系统的部分公差参数设置表,表中 DLR 为半径增量,DLT 为厚度增量,TRX 为 X 总体指示偏差量,TRY 为 Y 总体指示偏差量,BTX、BTY 为镜筒弧度倾斜量。S1~S5 为光学系统中的光学面。S2..3 表示的是第 2 面和第 3 面作为一个透镜整体,例如,DSY S2..3 表示第 2 面和第 3 面作为透镜整体的偏心公差。

在公差分析中输入所计算的 MTF 的频率数值以及相位方向,并使用当前的公差灵敏度进行分析。该光学系统的公差分析曲线如图 9 所示,当输入相应公差参数后,在 80 lp/mm 下,0.7 视场以内的 MTF 数值普遍在 0.5 以上,最外视场也在 0.4 以上,符合设计要求。

表 3 鱼眼镜头的公差参数设置表

Table 3 Tolerance parameters setting of the fisheye lens

Num	Type	Value	Num	Type	Value
1	DLR S1	0.001 V	9	TRX S2	0.0015 V
2	DLR S2	0.001 V	10	BTY S2..3	0.0015 V
3	DLR S4	0.001 V	11	BTX S2..3	0.001 V
4	DLR S5	0.001 V	12	DSY S2..3	0.001 V
5	DLR S6	0.001 V	13	DSX S2..3	0.002 V
6	DLT S1	0.001 V	14	TRY S4	0.002 V
7	DLT S2	0.005 V	15	TRX S4	0.0015 V
8	DLT S3	0.005 V	16	BTY S4..5	0.001 V

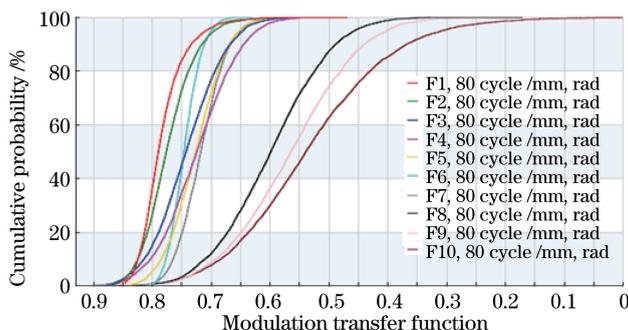


图 9 公差分析曲线

Fig. 9 Tolerance analysis curves

6 产品的检测

借助公司的现有设备和资源,经过一系列模具设计、制作和精密设备的加工,将该镜头生产出来,实际生产出来的鱼镜头产品如图 10 所示。本文设计制造的鱼镜头产品主要通过投影检测,投影检测的理论基础为光的可逆性,投影距离选择为 500 mm。将产品镜头放置于投影测试板平行,调节测试板距离镜头底部的位置,直至投影屏幕中心最清晰。然后对投影屏幕外圈数据进行判断读数。



图 10 鱼镜头产品图

Fig. 10 Production of fisheye lens

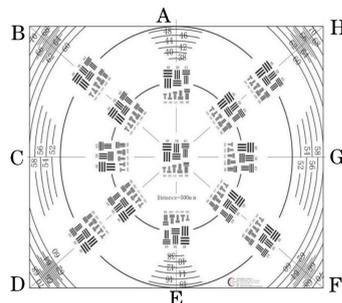


图 11 投影测试板示意图

Fig. 11 Schematic diagram of the projection chart

针对鱼眼镜头的投影检测,行业内的评价一般是监控 0.7 视场范围内的投影分辨率,具体要求为中心视场达到 200 lp/mm,0.3 视场、0.7 视场能达到 100 lp/mm。结合图 11 和表 4 可以看出整个镜头投影中心视场达到 200 lp/mm,0.3 视场、0.7 视场都能达到 100 lp/mm 以上的分辨率要求,说明该鱼眼镜头的成像质量良好,达到了设计的要求。

表 4 投影部分检测数据
Table 4 Partial projection data

Position	Meridional direction / (lp/mm)	Sagittal direction / (lp/mm)
Centre	A	250
	B	250
	C	200
	E	200
	F	200
	G	250
	H	200
	0.3 field of view	A
B		200
C		250
E		200
F		200
G		200
H		200
0.7 field of view		A
	B	125
	C	100
	E	125
	F	125
	G	100
	H	100

7 结 论

本文利用光学设计软件优化出一款全景运动数码摄像机鱼镜头,该镜头由 5 片玻璃镜片和 3 片非球面塑胶镜片组成,非球面塑胶镜片的使用不仅降低了成本和重量,而且使系统的结构简单,成像质量高。该光学系统满足设计要求且结构紧凑、像面均匀、后工作距离大,在保证成像质量的同时使全视场角达到 240° ,更有利于运动数码摄像机拍摄过程中对取景的要求。经过公差分析得出该光学系统的公差宽松,适合工业生产。该镜头产品经过投影分辨率验证,满足各项要求,可以大批量生产。

参 考 文 献

- 1 Wang Yongzhong. Fisheye lens optics[M]. Beijing: Science Press, 2006: 196-197.
王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 196-197.
- 2 Zhang Jiyan, Huang Yuanqing, Xiong Feibing, *et al.* Optical lens design with short-focus and ultra-wide FOV[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 102202.
张继艳, 黄元庆, 熊飞兵, 等. 短焦距超广角镜头的光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 102202.
- 3 Chen Shengcong, Lin Feng. Research and design of super short-focus panoramic fish-eye lens [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(2): 31-32.
陈圣聪, 林 峰. 超短焦全景鱼镜头的研究与设计[J]. 光电工程, 2012, 39(2): 31-32.
- 4 Zhang Baolong, Li Dan, Zhang Shaojing, *et al.* Design of aspheric fisheye lens and study of distortion correction algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1222001.
张宝龙, 李 丹, 张少敬, 等. 非球面鱼镜头设计及畸变校正算法研究[J]. 光学学报, 2014, 34 (12): 1222001.
- 5 Yu Daoyin. Engineering optics[M]. Beijing: Machine Industry Press, 2008: 195-198.
郁道银. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 195-198.
- 6 Chen Shengcong. Design and optimization of fish-eye lens and zoom fish-eye lens[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2012: 1-2.

- 陈圣聪. 鱼镜头与变焦鱼镜头的设计与优化[D]. 福州: 福建师范大学, 2012: 1-2.
- 7 Ning A. Compact fisheye objective lens: US 7869141B2[P]. 2011-1-11.
- 8 Mori M, Otomo R. Wide-angle imaging lens and imaging apparatus: US9182571B2[P]. 2015-7-16.
- 9 Chen P Y. Wide-angle lens: US9256052B2[P]. 2016-2-9.
- 10 Ning A. Wide-angle lenses with reduced ghost reflections: US8873167B2[P]. 2014-10-28.
- 11 Zhang Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- 12 Warren S. Modern optical engineering[M]. New York: Mc Graw-Hill, 2000: 347-392.
- 13 Lu Shuhua, Huang Hongzhi, Zhang Hongzhou, *et al.* Comprehensive performance evaluation for video surveillance cameras[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091102.
卢树华, 黄鸿志, 张鸿洲, 等. 视频监控摄像机性能参数综合评价研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091102.
- 14 Li Yapeng, He Bin. Improving image quality by using CCD subpixel imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0211001.
李亚鹏, 何 斌. 采用 CCD 错位成像技术提高图像质量[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211001.
- 15 Gao Xingyu, Yu Daoyin, Long Yue, *et al.* Optical system design of high definition video telephoto objective and its imaging experiment[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(10): 101101.
高兴宇, 郁道银, 龙 跃, 等. 高分辨率视频摄远物镜光学系统设计及成像实验[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(10): 101101.
- 16 Xue Leitao, Lin Feng. Design of thin and wide-angle lens for 8 mega-pixel mobile phone camera [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102204.
薛雷涛, 林 峰. 800 万像素超薄广角手机镜头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102204.