

## 基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统

刘洪海

### Panoramic fisheye optical system based on freeform surface design

LIU Honghai

引用本文:

刘洪海. 基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统[J]. 应用光学, 2022, 43(3): 392–398. DOI: 10.5768/JAO202243.0301003

LIU Honghai. Panoramic fisheye optical system based on freeform surface design[J]. Journal of Applied Optics, 2022, 43(3): 392–398. DOI: 10.5768/JAO202243.0301003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0301003>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 独立自由曲面LED汽车前雾灯的光学设计

Optical design of independent freeform surface LED automotive front fog lamp

应用光学. 2018, 39(3): 423–428 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305004>

#### 紧凑型自由曲面离轴三反系统设计

Design of compact freeform off-axis three-mirror system

应用光学. 2018, 39(6): 780–784 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0601003>

#### 鱼眼镜头光学系统的非球面优化设计

Aspheric optimization design of fisheye lens optical system

应用光学. 2019, 40(5): 863–870 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505001>

#### 基于自由曲面的光纤照明用耦合透镜设计

Coupling lens design of fiber lighting based on free-form surface

应用光学. 2017, 38(4): 674–678 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0408001>

#### 可见光/红外双视场全景式航空侦查相机光学系统设计

Optical system design of visible/infrared and double-FOV panoramic aerial camera

应用光学. 2017, 38(1): 7–11 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0101002>

#### 超大视场折反射全景光学成像系统设计

Design of catadioptric panoramic optical imaging system with ultra-large field of view

应用光学. 2021, 42(4): 608–613 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2022) 03-0392-07

# 基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统

刘洪海

(广东弘景光电科技股份有限公司 研发中心, 广东 中山 528437)

**摘要:** 全景鱼眼光学系统的成像圆通常为完整的圆形, 小于感光芯片的垂直方向尺寸, 相比长方形芯片, 圆形成像圆面积较小, 芯片有效像素利用率低。结合全景鱼眼光学系统成像圆小于芯片的特点, 介绍一种基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统, 可实现椭圆形成像区域, 大大提高芯片有效像素的利用率。采用光学设计软件, 构建自由曲面模型, 运用玻璃镜片加塑料镜片混合构成的方法, 通过消像差和控制不同温度场下焦点漂移设计非对称全景鱼眼光学系统的成像区域为椭圆, 实现了镜头成像像高 $X$ 方向接近芯片的水平尺寸,  $Y$ 方向接近芯片的垂直尺寸。在不考虑制造公差的理想情况下, 对于4:3芯片, 根据圆和椭圆面积公式可得圆形成像区域的芯片像素有效利用率约为58.9%, 椭圆形成像区域的芯片像素有效利用率约为78.5%。仿真和计算结果表明, 采用椭圆形成像光学设计比圆形成像光学设计的芯片有效像素利用率提升15%左右。

**关键词:** 全景鱼眼光学系统; 自由曲面; 椭圆形成像区域; 有效像素利用率

中图分类号: TN202; TH703

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202243.0301003

## Panoramic fisheye optical system based on freeform surface design

LIU Honghai

(Research and Development Center, Guangdong Hongjing Optoelectronic  
Technology Inc., Zhongshan 528437, China)

**Abstract:** The imaging circle of panoramic fisheye optical system is usually a complete circle, which is smaller than the vertical size of the sensor. Compared with rectangular sensor, the area of circular imaging circle is smaller and the utilization rate of effective pixels of sensor is low. Combined with the characteristic that the imaging circle of panoramic fisheye optical system is smaller than that of sensor, a panoramic fisheye optical system based on freeform surface design was introduced, which could realize elliptical imaging area and greatly improve the utilization rate of effective pixels of sensor. The freeform surface model was built by using the optical design software, which was composed of glass lens and plastic lens. The imaging area of the asymmetric panoramic fisheye optical system was designed to be ellipse by eliminating aberration and controlling the focus shift under different temperature fields. The  $X$  direction of the lens image height was close to the horizontal size of the sensor, and the  $Y$  direction of the lens image height was close to the vertical size of the sensor. Without considering the manufacturing tolerance, according to the circle and ellipse area formula, for sensor of 4:3, the effective utilization rate of sensor pixels in the circular imaging area was about 58.9%, and that in the elliptical imaging area was about 78.5%. Finally, the simulation and calculation results show that the utilization rate of effective pixels of the sensor with elliptical imaging optical design is about 15% higher than that with circular imaging optical design.

**Key words:** panoramic fisheye optical system; freeform surface; elliptical imaging area; utilization rate of effective pixels

收稿日期: 2011-10-24; 修回日期: 2022-01-03

作者简介: 刘洪海 (1986—), 男, 工程师, 主要从事光学设计及光学镜头制造工作。E-mail: 200710078@qq.com

## 引言

全景鱼眼光学系统是一种视场角达到或超过 180° 的光学系统。随着千万像素高清芯片的发展和图像畸变处理算法的成熟, 全景鱼眼光学系统及全景相机的市场化应用越来越多, 如运动相机、安防监控、全景地图、智能驾驶辅助泊车等<sup>[1-4]</sup>。作为全景应用的视觉输入端, 全景鱼眼成像光学系统的成像质量决定着全景应用的有效像素、视场范围、图像处理和算法拼接等关键特性。有效像素是评价光学系统成像质量的关键技术指标, 它综合了不同视场下像素数量占比及畸变软件校正的图像压缩率, 反映的是图像的清晰度和对目标细节的分辨能力。传统全景鱼眼光学系统的成像区域通常设计成略小于芯片垂直方向尺寸的圆形, 有效像素仅为成像圆的面积, 存在有效像素少和芯片有效像素利用率低的缺点。基于自由曲面设计的全景鱼眼光学系统, 采用自由曲面将  $X$ 、 $Y$  2 个方向不同焦距融合到一个光学系统中。根据芯片的长宽比(如 16 : 9 或 4 : 3)分别设计  $X$  向和  $Y$  向不同像高, 可实现成像区域为椭圆。在相同的芯片尺寸下, 可以使更多的有效像素用于成像显示, 提高图像清晰度和芯片的有效像素利用率。基于以上优点, 采用自由曲面设计的全景鱼眼光学系统成为光学成像领域重要的研究课题。

## 1 光学系统结构及设计指标

常用的光学镜片有玻璃球面、塑料非球面和玻璃非球面 3 种。玻璃球面具有冷加工简单、成本低等优点, 但因为球面像差校正较为困难, 通常需要多枚组合才能较好地消像差。塑料非球面具有注塑成型简单、易批量生产及可根据设计需要加工成不同类型的自由曲面等优点, 缺点是耐气候性较差, 仅能满足普通电子消费类产品应用。玻璃非球面因需要高温模压成型, 生产效率低、成本高, 且受模压工艺影响, 其自由曲面类型较少。根据上述光学镜片的优缺点, 本文采用玻璃球面加塑料非球面的混合式结构进行光学设计<sup>[5-8]</sup>。

芯片采用 1/2.33" CMOS(互补金属氧化物半导体), 像素为 4 384×3 288 pixels, 像元尺寸为 1.4 μm×1.4 μm, 光学系统主要指标如表 1 所示。

表 1 光学系统主要设计指标

Table 1 Main design parameters of optical system

参数名称	指标
$X$ 向焦距/mm	<1.55
$Y$ 向焦距/mm	<1.40
光圈	2.8 <sup>*</sup>
$X$ 向视场角/(°)	200
$Y$ 向视场角/(°)	200
光学总长/mm	<40.00

## 2 光学系统设计

### 2.1 结构型式的选择

普通光学系统成像准则为“相似”成像, 而鱼眼镜头是将半球形的物面成像为平面, 不能实现“相似”成像, 只能采用“非相似”成像。根据“非相似”成像, 鱼眼镜头的成像关系一般有以下几种:

$$y' = f \times \sin \theta \quad (1)$$

$$y' = f \times \theta \quad (2)$$

$$y' = 2 \times f \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (3)$$

$$y' = 2 \times f \times \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (4)$$

式中:  $y'$  为理想像高度;  $f$  为光学系统有效焦距;  $\theta$  为物方半视场角。(1) 式为“正射影(orthographic projection)”, 正射影中径向和切线方向的放大率不同, 可以提供更大的桶形畸变量, 有利于视场角扩大, 同时画面相对照度的分布也会更均匀。(2) 式为“等距离射影(equidistant projection)”, 等距射影成像能使大视场范围的场景均匀分布成像, 保证中心视场和周边视场的像素密度比较接近, 本文采用等距离射影方式。(3) 式为“立体射影(stereographic projection)”, 立体射影成像能使边缘视场的像扩大, 使得边缘视场的像素密度比中心视场高, 具有更多的像素数量。(4) 式为“等立体角射影(equisolid angle projection)”, 等立体角射影成像表达的是像面上的面与物方上的立体角之间是正比关系, 物方上相同大小的立体角在像面上投影成同样的面积大小。畸变模型的物像关系示意图如图 1 所示。

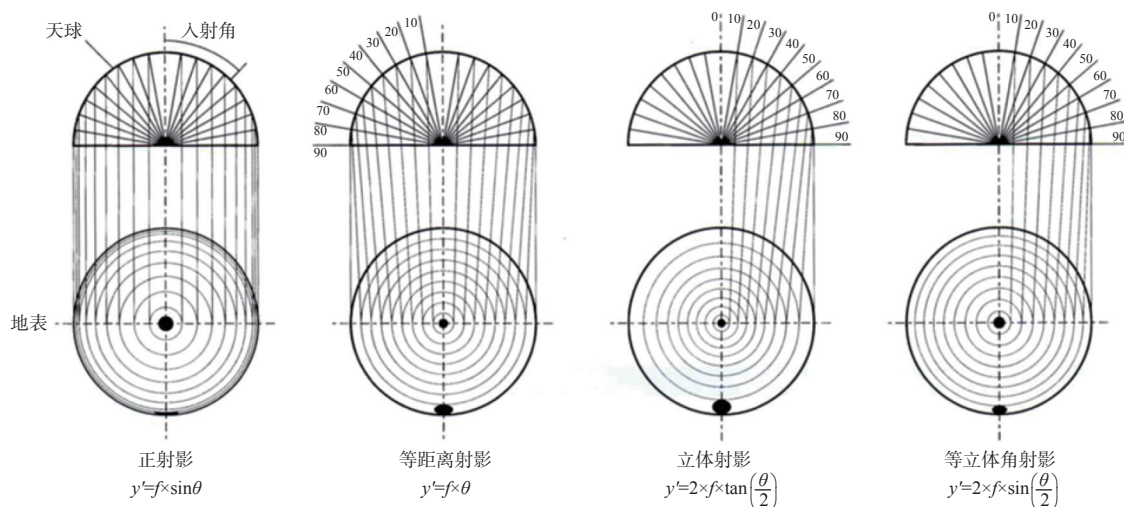


图 1 畸变模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of distortion model

根据全景鱼眼光学系统的视场角超过  $180^\circ$  的要求,第 1 枚透镜具有很大的负光焦度,这决定了光学系统必然具有反摄远型物镜镜头结构,即至少有 2 组结构,前组为负光焦度,后组为正光焦度。根据上述光学指标要求,文中设计了一个 6 组 9 片式全景鱼眼光学系统,相比参考文献中的 7 组 8 片式结构,本文光学系统在后群组中增加了一枚镜片并相互胶合,用于优化色差和像差,光学系统结构如图 2 所示<sup>[9]</sup>。

型,第 1 枚镜片采用弯月型玻璃球面镜片,主要作用是扩大视场角,将大视角光线与光轴的夹角减小,从而减小后面光学系统的视场角,使像差更容易得到校正。第 2 枚采用塑料非球面镜片,物方侧表面采用自由曲面 Toroidal 表面类型,像方侧表面采用对称曲面 Even asphere 表面类型,如图 3(a)所示。第 3 和第 4 枚镜片相互胶合,第 5 和第 6 枚镜片相互胶合,第 7 和第 8 枚镜片相互胶合,胶合的目的是校正色差和平衡像差。第 9 枚镜片采用塑料非球面镜片,物方侧表面采用对称曲面 Even

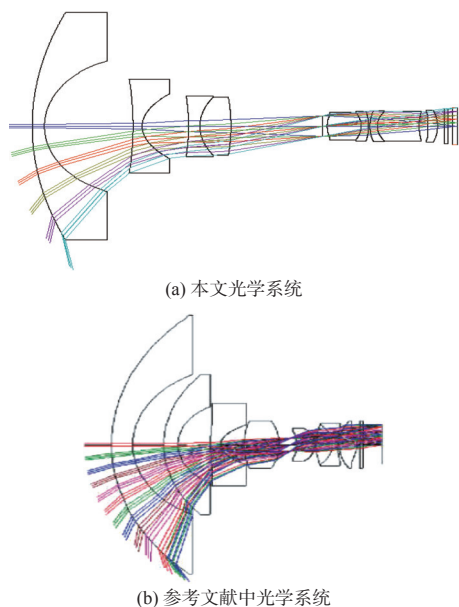


图 2 光学系统结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of optical system

## 2.2 设计过程

本文设计的全景鱼眼光学系统采用前后组构

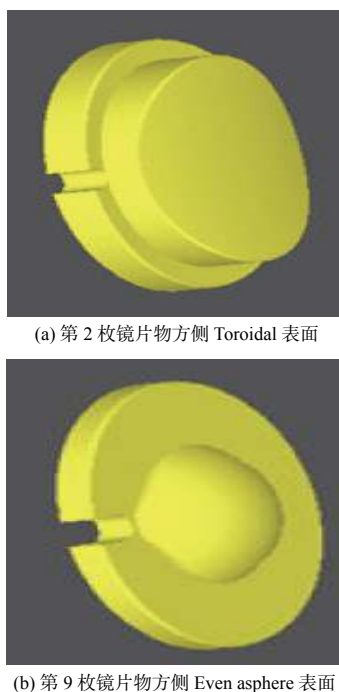


图 3 不同表面类型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of different surface types



asphere 表面类型,像方侧表面采用自由曲面 Toroidal 表面类型<sup>[10]</sup>,如图 3(b)所示。在光学设计软件 Zemax 中,Toroidal 表面类型为自由曲面,可以分别定义  $X$  向和  $Y$  向的曲率半径,其表面公式定义如下<sup>[11-13]</sup>:

$$Z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + a_1y^2 + a_2y^4 + a_3y^6 + a_4y^8 + a_5y^{10} + a_6y^{12} + a_7y^{14}$$

式中: $c$ 为镜片表面的曲率( $c=1/R$ , $R$ 为镜片半径); $k$ 为 Conic 参数, $a_1 \sim a_7$  分别对应 Zemax 软件中 Param-

eter 2-8 数据 (Parameter 1 为 Radius of rotation),如表 2 所示。

Even asphere 表面类型为旋转对称表面类型,其表面公式定义如下:

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2 + a_2r^4 + a_3r^6 + a_4r^8 + a_5r^{10} + a_6r^{12} + a_7r^{14} + a_8r^{16}$$

式中  $a_1 \sim a_8$  分别对应 Zemax 软件中 Parameter 1-8 数据,如表 3 所示。

表 2 自由曲面参数

Table 2 Parameters of free-form surface

Surface	Type	Radius	Conic	Radius of rotation	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
L2R1	Toroidal	-25.764	0.000	-77.350	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L9R2	Toroidal	-4.197	0.000	-5.340	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 3 旋转对称曲面参数

Table 3 Parameters of rotational symmetric surface

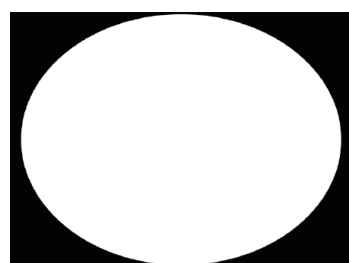
Surface	Type	Radius	Conic	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$
L2R2	Even asphere	3.573	-0.89	0.0	-7.10E-04	9.55E-05	-4.43E-06	1.39E-07	0.0	0.0	0.0
L9R1	Even asphere	-6.579	5.14	0.0	-1.71E-02	2.06E-03	-4.87E-04	2.91E-05	0.0	0.0	0.0

与传统光学系统相比,文中设计采用了 2 个非对称的 Toroidal 表面类型和 2 个对称的 Even asphere 表面类型,通过对 2 个非对称表面设计优化,可使成像区域为椭圆形<sup>[14-15]</sup>。图 4 为椭圆形成像区域

(图 4(a))与圆形成像区域(图 4(b))示意图。从图 4 可以看出,椭圆形成像区域面积明显更大,所占像素点数量更多。

### 2.3 设计结果

文中全景鱼眼成像光学系统采用 14 MP(百万像素)芯片设计,其分辨率由像元大小决定,因此分辨率要求较高。芯片的像元尺寸是  $1.4 \mu\text{m}$ ,截止频率为  $357 \text{ lp/mm}$ ,即为奈奎斯特频率。最终设计的光学系统调制传递函数(MTF)曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出,在  $1/2$  奈奎斯特频率处,  $0.8$  视场以内 MTF 均大于  $0.3$ ;在奈奎斯特频率处,  $X$  向最外视场的 MTF 虽然小于  $0.1$ ,但因为  $X$  向的像高更大,在同样半视场  $100^\circ$  情况下每一度视场所拥有的像素数量更多,所以分辨率仍然可以保证。系统所成像的点列图如图 6 所示。从图 6 可看出,  $X$  向和  $Y$  向视场均达到全视场  $200^\circ$ ,其中  $X$  向像高可达  $2.841 \text{ mm}$ ,  $Y$  向像高可达  $2.276 \text{ mm}$ ,椭圆成像区域面积为  $20.314 \text{ mm}^2$ ,芯片有效像素面积为  $28.253 \text{ mm}^2$ ,芯片有效像素利用率高达  $71.9\%$ 。图 7 为  $f-\theta$  畸变曲线,可看出畸变在  $X$  向和  $Y$  向均



(a) 椭圆形成像圆示意图



(b) 圆形成像圆示意图

图 4 成像圆示意图

Fig. 4 Schematic diagram of imaging circle

小于 15%。图 8 为在 X 向和 Y 向的相对照度曲线，可看出相对照度均大于 50%。图 9 显示出成像区域为椭圆形示意图，图 10 为椭圆形成像实际效果图。

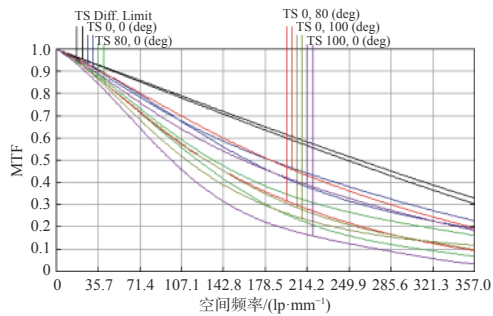


图 5 MTF 图  
Fig. 5 MTF curves

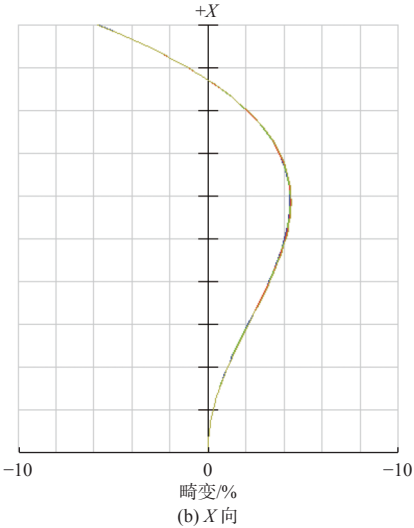


图 7  $f-\theta$  畸变图  
Fig. 7 Distortion diagram of  $f-\theta$

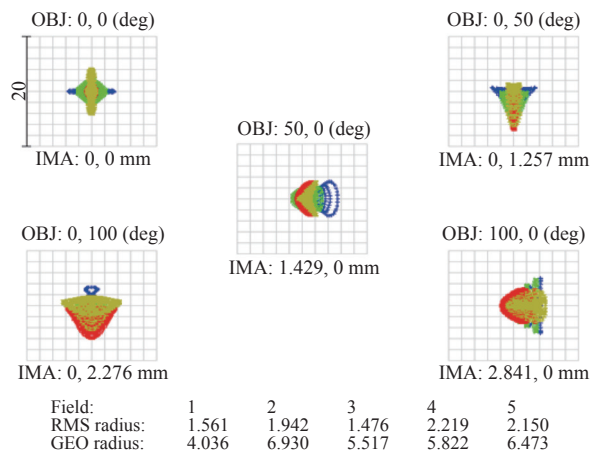


图 6 点列图  
Fig. 6 Spot diagram of imaging

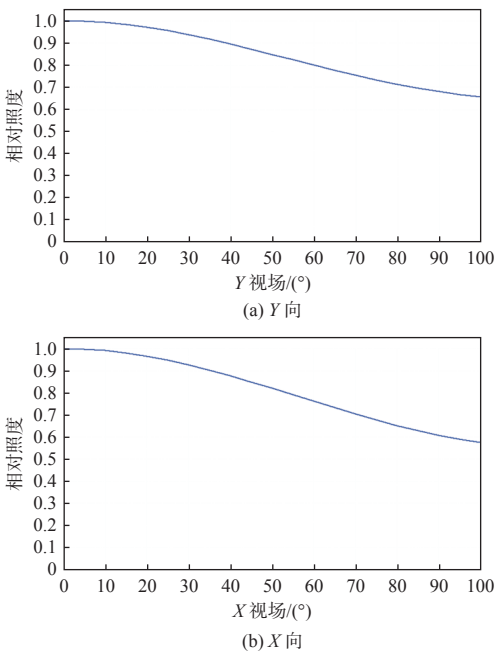


图 8 相对照度图  
Fig. 8 Relative illumination diagram

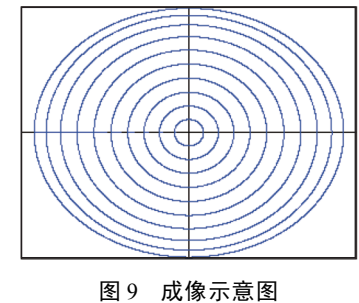
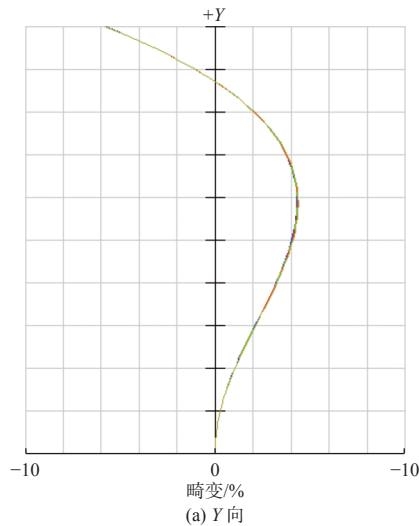


图 9 成像示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of imaging

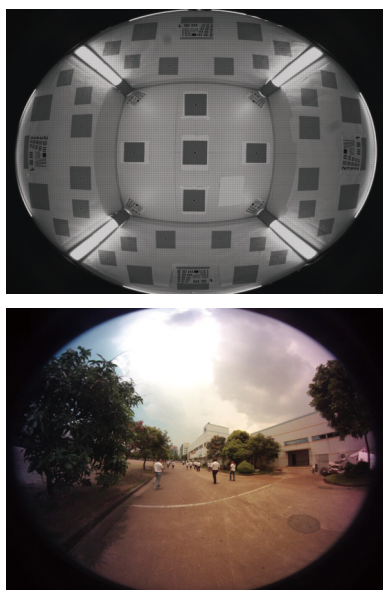


图 10 椭圆形成像实际效果图

Fig. 10 Actual effect picture of elliptical imaging

### 3 结论

提出了一种基于非对称曲面设计的全景鱼眼光学系统,采用2枚自由曲面镜片实现了成像区域为椭圆形。利用Zemax光学设计软件优化 $X$ 向焦距为1.527 mm和 $Y$ 向焦距为1.384 mm, $X$ 向视场角和 $Y$ 向视场角均可达到 $200^\circ$ ,同时 $X$ 向像高可达2.841 mm, $Y$ 向像高可达2.276 mm,实现了成像圆面积更大,有效像素更多,芯片利用率更高的光学系统。本次设计达到了设计指标,对全景鱼眼光学系统的应用有较高的参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 222-238.  
WANG Yongzhong. Fisheye lens optics [M]. Beijing: Science Press, 2006: 222-238.
- [2] 侯国柱, 吕丽军. 基于ZEMAX的超广角照相物镜设计[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 441-445.  
HOU Guozhu, LYU Lijun. Design of ultra wide angle photographic objective based on ZEMAX[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 441-445.
- [3] 张凯. 汽车全景辅助驾驶系统中鱼镜头的设计分析[J]. 电子世界, 2020(8): 159-160.  
ZHANG Kai. Design and analysis of fisheye lens in automobile panoramic driving assistance system[J]. Electronic World, 2020(8): 159-160.
- [4] 李鸿鹏. 基于鱼镜头的全景辅助驾驶系统研究[J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 14-16.  
LI Hongpeng. Research on panoramic assisted driving system based on fisheye lens[J]. Application of Photoelectric Technology, 2018, 33(3): 14-16.
- [5] 高鹤. 玻璃冷加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.  
GAO He. Glass cold working technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [6] 朱佳巍. 光学塑料非球面在光学设计和制造中的应用[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.  
ZHU Jiawei. Application of optical plastic aspheric surface in optical design and manufacturing [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014.
- [7] 张潇, 吕丽军. 鱼镜头光学系统的非球面优化设计[J]. 应用光学, 2019, 40(5): 863-870.  
ZHANG Xiao, LYU Lijun. Aspherical optimization design of fisheye lens optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(5): 863-870.
- [8] 吕建锋. 非球面模造玻璃镜片发展现状[J]. 光连: 光电产业与技术情报, 2007(70): 38-41.  
LYU Jianfeng. Development status of aspheric molded glass lenses[J]. Guanglian: Optoelectronic Industry and Technical Information, 2007(70): 38-41.
- [9] 刘言. 车载全景鱼镜头的设计与制造[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.  
LIU Yan. Design and manufacture of vehicle panoramic fisheye lens [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [10] 王智. 超广角镜头设计与畸变校正算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.  
WANG Zhi. Research on ultra wide angle lens design and distortion correction algorithm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [11] THIBAUT S, ANDRESEN B F, FULOP G F, et al. IR panomorph lens imager and applications[J]. SPIE: International Society for Optics and Photonics, 2008, 6940: 69401A.
- [12] 陈德清, 谢尚玮, 李世文. The design of astigmatic lenses by ZEMAX optical software[J]. 中华科技大学学报, 2011(47): 77-86.  
CHEN Deqing, XIE Shangwei, LI Shiwen. The design of astigmatic lenses by ZEMAX optical software[J]. Journal of Central South University, 2011(47): 77-86.

- 
- al of China University of Science and Technology, 2011(47): 77-86.
- [ 13 ] DAVIS J E , CASTLE K R , TODD M N , et al. Panoramic optics assembly having an initial flat reflective element: EP0766112[P]. 2003-11-19.
- [ 14 ] THIBAUT S. Panoramic lens applications revisited[J]. [SPIE:Optical and Digital Image Processing](#), 2008, 7000: 70000L-1-7.
- [ 15 ] THIBAUT S, PARENT J, ZHANG H, et al. Developments in modern panoramic lenses: lens design, controlled distortion, and characterization[J]. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8197: 81970I-1-10.