

## 入瞳位置前置式双通道全景环带光学系统设计

黄蕴涵,付跃刚,刘智颖

(长春理工大学 测试分析中心,吉林 长春 130022)

**摘要:**全景环带光学系统在机器视觉领域等领域中有广泛的应用,该类系统不断追求小型化、紧凑化,并且在保证系统结构紧凑小巧的同时实现大视场探测。针对上述需求对全景环带成像光学系统开展研究,并在分析全景环带头部单元形式的基础上设计了一款双通道全景环带光学系统。该系统由边缘视场通道以及中心视场通道组成,两个通道分别由入瞳位置前置式全景环带系统以及中心视场系统进行构建。通过合理的搭配,最终系统中心视场通道视场范围为  $0^{\circ}\sim 18.5^{\circ}$ ,边缘视场通道视场范围为  $38^{\circ}\sim 83^{\circ}$ ,在设计过程中,使用 even-ogive 面型对全景环带系统的特定面型进行设计,并对如何使用该面型进行了描述,最终所设计的系统的两个视场通道均可在  $0.486\sim 0.656\ \mu\text{m}$  可见光波段内清晰成像,光学系统结构紧凑,成像质量良好,满足使用需求。

**关键词:** 光学设计; 全景环带光学系统; 双通道; 非球面

**中图分类号:** O435.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0618001

## Design of two channel panoramic annular optical system with entrance pupil preposition

Huang Yunhan, Fu Yuegang, Liu Zhiying

(Optical Testing and Analysis Center, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Panoramic annular optical system have been widely applied in various emerging field like robot sensing. This type system desire a large FOV detection capability while maintaining a small and compact size. According to above requirements a research on the panoramic annular optical system was made, and a two-channel panoramic annular optical system based on the analysis of the panoramic annular lens (PAL) was designed. The system is composed of a marginal FOV channel and a central FOV channel, which correspond to the panoramic annular optical system with entrance pupil preposition and central FOV system respectively. By rational combination, the central FOV of the system is  $0^{\circ}\sim 18.5^{\circ}$ , the marginal FOV of the system is  $38^{\circ}\sim 83^{\circ}$ . In the design process, even-ogive surface was adopted to design the certain surface of the panoramic annular lens of the marginal FOV channel, also an description of how to use the even-ogive surface in the design process was made. Finally both two channels can acquire a good image on the image plane during the working wavelength  $0.486\sim 0.656\ \mu\text{m}$ , the whole structure of the system is relatively compact, satisfying the demand for application.

**Key words:** optical design; panoramic annular optical system; two channel; aspheric surface

收稿日期: 2019-02-05; 修订日期: 2019-03-11

作者简介: 黄蕴涵(1988-),男,博士生,主要从事光学设计方面的研究。Email:purple\_blue@126.com

导师简介: 付跃刚(1972-),男,教授,博士生,主要从事光学工程方面的研究。Email:fuyg@cust.edu.cn

## 0 引言

全景环带成像光学系统是一种结构形式新颖的光学系统,其拥有宽广的视场、紧凑的结构,同时能够对畸变进行控制,并且能够较多地获取图像信息,正因为具备这样的特点与优势,全景环带成像光学系统在军事、生活领域取得了十分广泛的应用。全景环带成像系统的应用领域主要有:侦查、预警报警、检查监控、遥感、导航、森林消防与防护、医药行业、搜救、治安管理、冶金等<sup>[1-2]</sup>,在当代的生产生活中具有广阔的发展前景。

文中对全景环带系统的不同系统形式与工作原理进行分析,其中根据全景环带头部单元光瞳位置的不同,将其分为经典全景环带光学系统以及入瞳前置式头部单元系统,对其优缺点分别进行了分析,在此基础上,采用入瞳前置式头部单元系统作为边缘视场通道的主要构造形式并设计了一款双通道全景环带光学系统,同时对 even-ogive 面型在该类光学系统上的应用进行了讨论与分析。最终设计结果显示:双通道光学系统结构紧凑,同时兼备较大的视场探测范围,光学系统各个视场通道成像质量良好,可以满足小型化、大视场的探测要求。

## 1 光学系统设计思路

全景环带系统探测范围由轴外视场构成,由于其自身特性,该类系统一般难以探测光轴附近的中心视场,需要额外的光学元件组成中心视场通道来探测光轴附近视场信息<sup>[3-5]</sup>。

双视场通道光学系统形式一般如图 1 所示<sup>[6-7]</sup>。

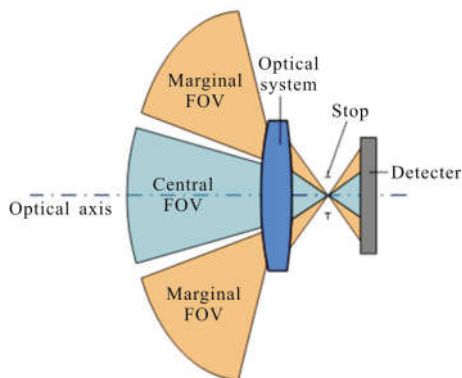


图 1 双通道全景环带光学系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the two channel panoramic annular optical system

这类光学系统的特点是,中心视场通道与边缘视场通道分别用于接收中心视场信息与边缘视场信息,最后中心视场通道与边缘视场通道整合为一个整体的系统,边缘视场与中心视场的信息可以同时被探测器所接收,同时,不同视场通道的信息在像面上不发生重合,最大限度地提高探测器的使用效率。由于全景环带光学系统探测视场范围远离光轴区域,边缘视场信息一般采用全景环带光学系统进行接收。

图 2 所示为经典全景环带光学系统,图中粗实线代表头部单元透射面,阴影线代表头部单元反射面,其中  $f_3$  面靠近光轴空余区域不反射光线。 $f_1$  面与  $f_1'$  面相对于光轴对称,  $f_2$  面与  $f_2'$  面相对于光轴对称,箭头线代表不同视场的主光线。不同视场的光线从  $f_1$  面与  $f_1'$  面入射,光线分别经过  $f_2$  面与  $f_2'$  面反射后到达  $f_3$  面,之后再次经过反射到达  $f_4$  面,经过  $f_4$  面透射后,最后通过光阑与中继透镜组到达像面,正常情况下经典环带系统的  $f_1'$  面、 $f_1$  面与  $f_3$  面之间并不发生重叠,进而保证系统透射面、反射面不出现共用情况,因此系统表面可以不用镀半反半透膜,避免了能量的损失。由于系统的光瞳位置位于光轴上,导致光线在  $f_1'$  面与  $f_1$  面上所占用的透光区域很大,因此在经典环带光学系统基础上利用  $f_3$  面的中心区域合并一个中心视场通道难度比较大。为了保证透射区域与反射区域不发生重叠,需要  $f_3$  面上的通光面积比较小,即  $f_3$  面在靠近光轴部分需要留有很大的空余空间<sup>[8]</sup>。

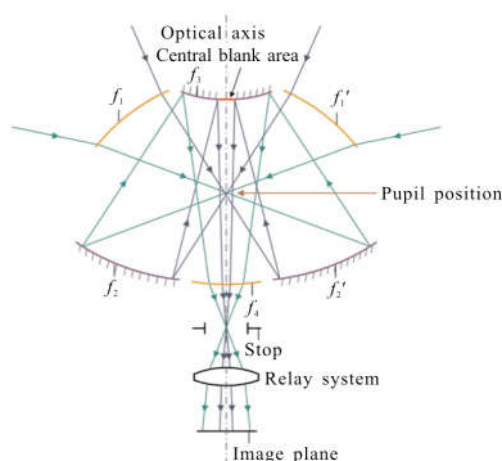


图 2 经典全景环带光学系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the classical panoramic annular optical system

图 3 所示为入瞳位置前置式环带系统,其光路

走向类似于经典的全景环带光学系统，由于光瞳的位置靠近  $f_1$  面与  $f_1'$  面，导致光线在  $f_1'$  面与  $f_1$  面上占用的通光面积很小，保证  $f_3$  面靠近光轴部分可以拥有比较大的空间，进而让  $f_3$  面的口径限制将会大大减小，为系统在靠近光轴部分区域引入一个新的视场通道创造便利条件， $f_3$  面的中心部位不反射光线，相对于传统环带光学系统，入瞳位置前置式光学系统在  $f_3$  面中心空洞区域相对更大。基于以上分析，在设计对应边缘视场通道系统时采用入瞳位置前置式全景光学系统形式<sup>[9]</sup>。

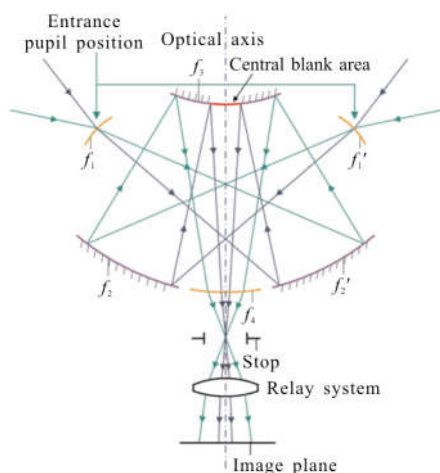


图 3 入瞳位置前置式全景环带光学系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of the panoramic annular optical system with entrance pupil preposition

基于以上分析对双通道全景环带光学系统进行构造，图 4 所示为双通道全景环带光学系统结构形式，各个视场通道不同视场的主光线均用箭头线进行表示。图 4 中粗实线代表头部单元中的透射面，阴影线代表头部单元中的反射面。

中心视场通道透镜组置于全景头部单元前部，中心视场通道的光线经过中心视场通道透镜组进入到全景环带光学系统中，最终光线经过全景环带系统光轴附近区域，进入中继透镜组并成像于像面处。边缘视场通道与中心视场通道共用同一个光阑与中继透镜组。假定边缘视场通道的入瞳位置位于  $P_A$  点处，那么在设计过程中可以通过改变  $P_A$  点的径向距离控制  $f_3$  面的径向直径，如图 4 所示，所有边缘视场光线到达  $f_3$  面的径向位置绝对值最小的点为  $P_B$ ，为了保证  $f_3$  面在靠近光轴附近区域为中心视场通道留有一定的空白区域，应控制  $f_3$  面并得到比较大的  $P_B$

点径向距离，最终确保  $f_3$  面的中心透射部分与边缘反射部分不发生重合。

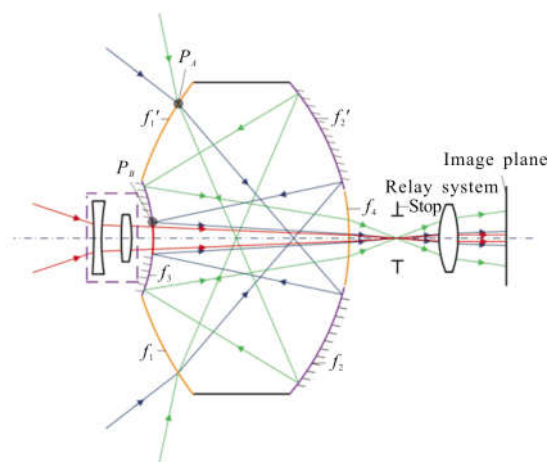


图 4 双通道全景环带光学系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of the two channel panoramic annular optical system

## 2 系统参数及设计

系统的设计指标如表 1 所示。首先设计边缘视场通道系统，设计过程遵循前文所讨论的内容，即重点控制  $P_A$  点与  $P_B$  点的空间位置，在设计中心视场通道时，重点保证  $f_3$  面上的透射面与反射面不发生重叠，避免在  $f_3$  面上使用半反半透镀膜。

表 1 光学系统设计参数

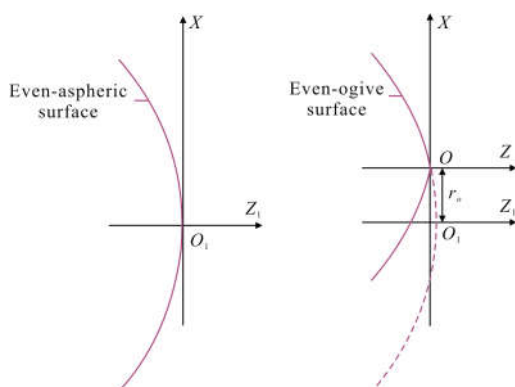
Tab.1 Design parameters of the optical system

	Central FOV channel	Marginal FOV channel
Instantaneous FOV/(°)	0-18.5	38-83
Working wavelength/ $\mu\text{m}$	0.486-0.656	
Focal length/mm	2.6	2.75
System F#	3	3.2

全景环带光学系统  $f_2$  面与  $f_2'$  面采用 even-ogive 面型进行构造，图 5 为 even-ogive 面型示意图。

图 5(a)中实线代表 even-aspheric 面型，其面型中心旋转轴为  $Z_1$  轴，面型顶点为  $O_1$  点。图 5(b)中 even-ogive 面型中心旋转轴为  $Z$  轴，面型顶点为  $O$  点。其旋转轴相对于 even-aspheric 面型有一个值为  $r_o$  的径向平移。在光轴附近区域 even-ogive 面型相对于 even-aspheric 面型拥有更大的面型曲率，因此通过重点控制  $r_o$  值，even-ogive 面型可以在光轴附近具备比

较大的屈光度。



(a) Even-aspheric 面型 (b) Even-ogive 面型  
(a) Even-aspheric surface (b) Even-ogive surface

图 5 面型示意图

Fig.5 Schematic diagram of the surface

even-ogive 面型定义为:

$$z = \frac{cr_g^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r_g^2}} + \sum_{i=1}^4 \alpha_i r_g^{2i} \quad (1)$$

式中:参数  $c$  为面型的曲率; $k$  为系统的 conic 系数; $\alpha_i$  代表非球面系数。

$r_g$  的值定义为:

$$r_g = r_o + \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2)$$

式中: $x, y$  表示面型上某一点的坐标值。

系统头部单元中的其他面型均采用偶次非球面进行构造。

图 6 为光线在全景环带头部单元中的走向示意图,系统以  $f_4$  面顶点为中心建立坐标系。坐标的横纵轴分别为  $X, Z$  轴。不同视场的主光线从入瞳位置点  $P_A(x_A, z_A)$  处进入头部单元中,经过  $f_2$  面的反射到达虚拟像点  $P_C(x_C, z_C)$  处,之后经过  $f_3$  面反射  $f_4$  面透射后到达光阑处。其中,最小视场光线与  $f_2$  面  $f_3$  面的交点依次为  $P_A, P_B$  点,  $P_A, P_B$  点分别与图 4 中的  $P_A, P_B$  点相对应。为保证  $P_B$  点相对于光轴有一定的径向距离,一般可以对  $P_C$  点的轴向距离进行控制,由于  $f_2$  面有两个焦点,  $f_2$  面可以用椭圆方程进行表示,因为两个汇聚点  $P_A(x_A, z_A)$  与  $P_C(x_C, z_C)$  相对于  $Z$  轴并不对称,所以需要特殊定义一个对应于椭圆方程的坐标系。定义一个新的椭圆坐标系,椭圆坐标系原点为  $O_e(x_e, z_e)$ ,椭圆坐标系的横纵坐标轴为  $X_1$  轴与  $Z_1$  轴。定义  $X_1$  轴与  $Z_1$  轴的方向向量分别为  $\vec{X}_1, \vec{Z}_1$ , 方向向

量的标量形式可以表示为:

$$\vec{X}_1 = x \cdot (x_C - x_A) + z \cdot (z_C - z_A) \quad (3)$$

$$\vec{Z}_1 = x \cdot (z_A - z_C) + z \cdot (x_C - x_A) \quad (4)$$

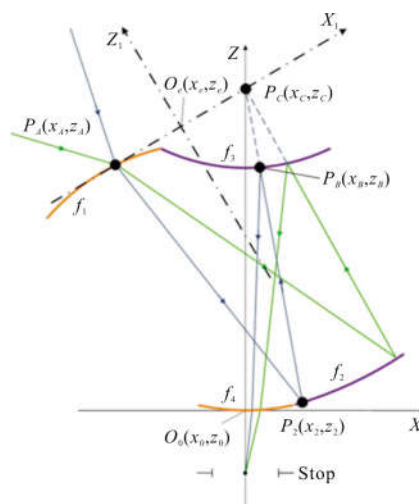


图 6 环带系统头部单元光路走向示意图

Fig.6 Layout of the ray path in the front unit of panoramic annular lens

$f_2$  面的面形公式最终可以表示为:

$$\frac{(x')^2}{a^2} + \frac{(z')^2}{b^2} = 1 \quad (5)$$

式中的  $a, b$  可以用公式(6)与公式(7)进行表示:

$$a = \frac{\text{dis}(P_A, P_2) + \text{dis}(P_C, P_2)}{2} \quad (6)$$

式中:dis 表示两个点之间的距离。

$$b = \sqrt{a^2 - \frac{(z_A - x_A)^2 + (z_1 - x_A)^2}{4}} \quad (7)$$

公式(5)中  $x'$  与  $z'$  代表在椭圆坐标系下的坐标值,其数值与正常坐标系下的  $x, z$  值有所不同,其存在一定的转换关系,根据坐标转换公式有:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + T \quad (8)$$

式中: $M$  代表两个坐标系的旋转关系; $T$  代表平移向量。那么根据公式(3)~(4),  $M, T$  可以分别表示为:

$$M = \begin{pmatrix} \vec{X} \cdot \vec{X}_1 & \vec{Z} \cdot \vec{X}_1 \\ \vec{X} \cdot \vec{Z}_1 & \vec{Z} \cdot \vec{Z}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_C - x_A}{\sqrt{(z_A - z_1)^2 + (x_A - x_1)^2}} & \frac{z_C - z_A}{\sqrt{(z_A - z_1)^2 + (x_C - x_A)^2}} \\ \frac{-(z_C - z_A)}{\sqrt{(z_A - z_1)^2 + (x_A - x_1)^2}} & \frac{x_C - x_A}{\sqrt{(z_A - z_1)^2 + (x_A - x_1)^2}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$T = \begin{pmatrix} x_0 - x_e \\ z_0 - z_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -x_e \\ -z_e \end{pmatrix} \quad (10)$$

依据公式(5)~(10),可以对  $f_2$  面进行取样,如图 7 所示,对椭圆面取样 4 个点。之后在设计  $f_2$  面时, $f_2$  面用粗实线进行表示,通过优化操作数对其面型进行控制,控制取样点与  $f_2$  面重合,保证实现  $f_2$  面的功能。

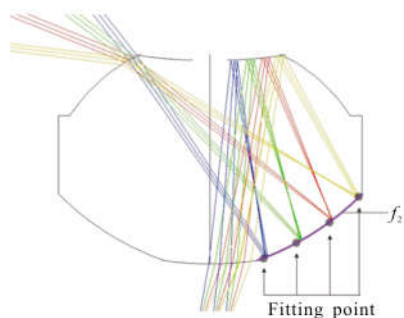


图 7  $f_2$  面的面型拟合示意图

Fig.7 Schematic diagram of the surface fitting of  $f_2$

根据以上讨论,系统的最终设计结果如图 8 所示,边缘视场通道的全景环带头部单元采用相对低色散的 K9L 材料用于减少头部单元引入的色差量,其阿贝系数为 64.2,中心视场通道设计结果如图 9 所示。因为胶合透镜组有利于消除色差,中心视场通道前透镜组采用正负胶合透镜组合的形式即通过组合冕牌火石材料消除色差带来的影响<sup>[10]</sup>。前透镜组最终采用 4 片透镜,材料选择分别为 H-ZF4、H-LAK3、

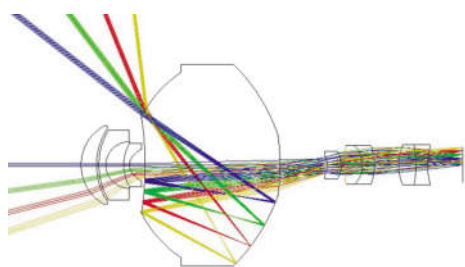


图 8 双视场通道全景环带光学系统示意图

Fig.8 Schematic diagram of the two channel panoramic annular optical system

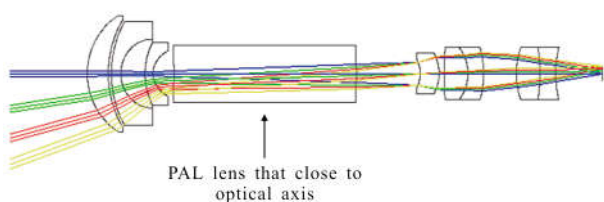


图 9 中心视场通道示意图

Fig.9 Schematic diagram of the central FOV channel

F2 与 H-ZF52,这 4 种材料的阿贝系数各不相同,组合后消除色差效果良好,后部中继透镜组采用 1 片正透镜与两个双胶合透镜组合,材料选择分别为 H-LAK3、ZBAF20A、H-ZF52、H-LAK3 与 ZF7L,系统中面型引入的最高次项非球面系数为  $r^6$  次项<sup>[11]</sup>。系统整体结构如图 8 所示,整体结构形式紧凑。

双通道系统各个视场通道成像质量优良。图 10、图 11 分别为边缘视场通道及中心视场通道的光学调制函数曲线。边缘视场通道传递函数曲线在 60 lp/mm 处轴上均大于 0.55,其中边缘视场通道最大视场的子午与弧矢值分别为 0.592、0.774。中心视场通道传递函数曲线在 60 lp/mm 处轴上均大于 0.50,其中中心视场通道最大视场的子午与弧矢值分别为 0.541、0.702。图 12 为系统像面高度与视场角的对应关系。可以看到不同视场的光线在像面上占有率很大,环形空余区域很小,探测器的使用效率较高。图 13 为系统的畸变曲线图,由于系统视场范围相对较大,采用  $f-\theta$  投影关系对系统畸变值进行计算,可以看到,系统的畸变绝对数值均小于 0.3。系统边缘视场通道以及中心视场通道在像面上分别成正立像及倒立像<sup>[12]</sup>。

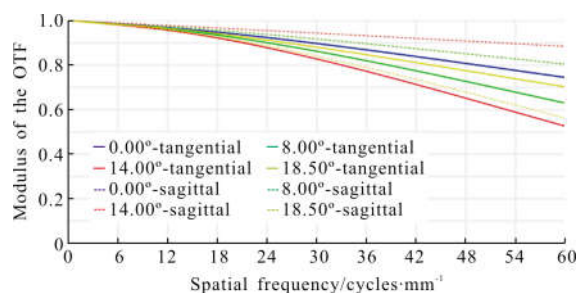


图 10 光学系统中心视场通道的 MTF 值

Fig.10 MTF value of central FOV channel of the optical system

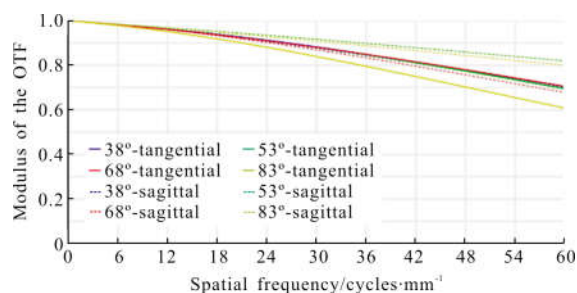


图 11 光学系统边缘视场通道的 MTF 值

Fig.11 MTF value of marginal FOV channel of the optical system

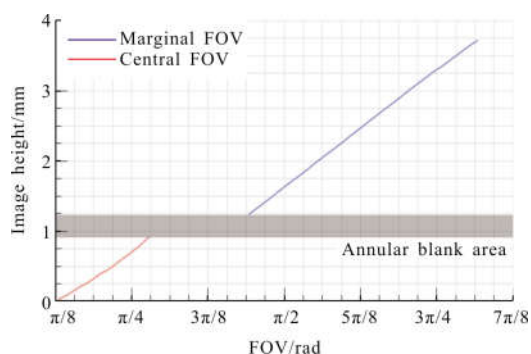


图 12 系统像面高度与视场角的对应关系

Fig.12 Relationship between the system image height and FOV

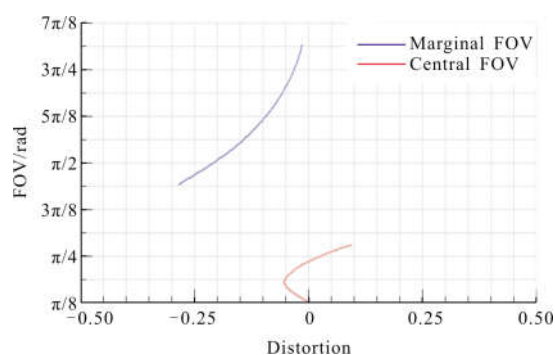


图 13 光学系统畸变

Fig.13 Distortion of the optical system

### 3 结 论

文中结合 even-ogive 面型设计了一款双通道全景环带光学系统, 该型系统由中心视场通道与边缘视场通道组成, 其中边缘视场通道系统采用入瞳前置式全景环带头部单元进行构建, 中心视场通道采用透镜单元结合头部单元的结构形式, 重点分析了这种双通道全光学系统的总体设计方案, 对设计中要把握的关键因素进行了说明。最终设计了一款光学系统对设计思想进行论证, 设计结果显示系统中心半视场范围为  $0^{\circ}\sim 18.5^{\circ}$ , 边缘半视场范围为  $38^{\circ}\sim 83^{\circ}$ , 系统轴向总长度为 98.3 mm, 径向半径为 25.5 mm。系统各个视场通道成像质量良好, 实现了光学系统小型化、紧凑化的要求, 该类

系统适用于导航、探测、搜索等领域。

### 参考文献:

- [1] Stedham M, Banerjee P. The panoramic annular lens attitude determination system (PALADS)[C]//Proceedings of SPIE—International Society for Optics and Photonics, 1995, 2466: 108–118.
- [2] Hiroshi Koyasu, Jun Miura, Yoshiaki Shirai. Mobile robot navigation in dynamic environments using omnidirectional stereo [C]//Proceedings of IEEE Conference on Robotics and Automation, 2003, 1: 893–898.
- [3] Powell I. Panoramic lens [J]. *Applied Optics*, 1994, 313: 7356–7361.
- [4] Powell I. Design study of an infrared panoramic optical system[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(31): 6190.
- [5] Pernechele C. Hyper-hemispheric and bifocal panoramic lenses [C]//Proceedings of SPIE—International Society for Optics and Photonics, 2013, 8896: 889603.
- [6] Huang Zhi, Bai Jian, Hou Xiyun. Design of panoramic stereo imaging with single optical system [J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6085–6096.
- [7] Luo Yujie, Bai Jian, Zhou Xiangdong, et al. Non-blind area PAL system design based on dichroic filter [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4913–4923.
- [8] Greguss P. Panoramic imaging block for three-dimensional space: US, US4566763[P]. 1986.
- [9] Huang Y, Liu Z, Fu Y, et al. Design of a compact two-channel panoramic optical system [J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 27691–27705.
- [10] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)  
郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [11] Tong Yang, Zhu Jun, Hou Wei, et al. Design method of freeform off-axis reflective imaging systems with a direct construction process[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9193–9205.
- [12] Pernechele C. Hyper-hemispheric and bifocal panoramic lenses [C]//SPIE, 2013, 8896: 889603.