

鱼眼镜头初始结构的设计

吕丽军, 吴学伟

上海大学精密机械工程系, 上海 200072

摘要 基于主光线传输方程,研究了鱼眼镜头前光组负弯月形透镜物像空间的视场角压缩比与结构参数之间的关系,并根据视场角压缩比及镜头尺寸的设计限制,初步确定前光组的结构参数。针对前光组具有平面对称光学系统的成像特性,应用平面对称光学系统像差理论计算前光组波像差;然后利用鱼眼镜头前、后光组波像差的平衡条件,求解后光组各透镜的光焦距及光学间隔;并将其作为限制条件,应用 Zemax 软件设计了由三块透镜组成的简单后光组系统。以该简单系统作为初始结构进一步复杂化,得到满足更大视场和孔径要求的鱼眼镜头。研究表明,所述方法为设计鱼眼镜头初始结构提供了一种新的思路,且避免了以往设计者过于依赖经验和参考专利的问题。

关键词 光学设计; 鱼眼镜头; 主光线追迹; 初始结构; 波像差; 平面对称光学系统

中图分类号 O435; TH74 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0208001

Design of Initial Structure of Fisheye Lens

Lü Lijun, Wu Xuewei

Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China

Abstract The transfer equation of the principal ray is used to study the relationship between the compression ratio of the field angle and the optical parameters of the pre-group optics of fisheye lens, and then the design parameters of the pre-group optics of fisheye lens are determined according to the requirement of compression ratio and lens dimension. Since the pre-group optics has the imaging performance of a plane-symmetric optical system, the aberration theory of plane-symmetric optical systems is applied to calculate its wave aberration. The focal power of every component and the gap between them can be solved from the wave aberration balance equations of pre- and back-group optics of fisheye lens. The solution is used as constraints, and Zemax is used to obtain a simple initial design of back-group optics consisting of three lenses. The lens complication and optimization is then performed according to the simple system. A fisheye lens is obtained, which satisfies the requirement of bigger field of view and aperture. The study shows that the method discussed in the paper provides an approach to determine the initial structure design of fisheye lens and enables the designers not to rely heavily on experience and patents.

Key words optical design; fisheye lens; tracing of principal ray; initial structure; wave aberration; plane-symmetric optical systems

OCIS codes 220.3630; 080.3630; 120.3620; 120.4820

1 引 言

鱼眼镜头具有超大视场,因而被广泛应用于场景监视、卫星定位、机器人导航、微小智能系统及工程测量等领域。由于鱼眼镜头能够实现全空域包容和全时域实时信息的获取,特别是符合现代战争对信息获取技术的需求,这是其他光电侦测手段所不能比的,因此鱼眼镜头在国防和军事领域也得到了重要应用^[1-5]。

鱼眼镜头是一种超大视场、大孔径的光学成像系统,一般采用两块或三块负弯月形透镜作为前光组,将物方超大视场压缩至常规镜头要求的视场范围。对于大视场的物点成像,光束以较大的人射角打在前光组的光学面上,经光学系统成像后,子午和弧矢平面内的聚焦位置与波阵面参数可能完全不一致。因此,鱼眼镜头具有平面对称光学系统的成像特性,赛德尔像差理论主要适用于轴对称光学系统像差分析,不适用于此

收稿日期: 2016-08-29; **收到修改稿日期:** 2016-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(11274223)

作者简介: 吕丽军(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事真空紫外、软 X 射线光学及超大视场光学系统方面的研究。

E-mail: lulijun@shu.edu.cn(通信联系人)

类光学系统的像差计算。以上特点使得鱼眼镜头的设计十分复杂。理论和实践表明,确定合理的初始结构是成功设计鱼眼镜头的关键环节,光学系统越复杂,合理的初始结构就越重要。目前,人们通常参考国内外专利设计,根据设计者的经验不断尝试与调整初始结构设计,并应用商业化光学设计软件 Zemax 或 Code V 等对初始结构进行优化^[6-7]。

本文应用主光线传输方程,研究鱼眼镜头前光组负弯月形透镜的结构参数与视场角压缩比之间的关系,讨论如何根据视场角压缩比及镜头尺寸限制确定其初始结构参数。应用平面对称光学系统的波像差理论计算前光组场曲、轴向色差及垂轴色差的波像差,根据前、后光组波像差的平衡条件,求解后光组物镜各透镜的光焦度及光学间隔(即一阶光学参量)。将后光组的一阶光学参量设为限制条件,应用 Zemax 软件设计了一款 F 数为 5、视场角为 160° 的简单鱼眼镜头光学系统,再将该系统作为初始结构,进行透镜复杂化和优化设计,最终按 F 数 2.8、视场角 240° 的设计要求,得到了一款结构相对简单、性能较为理想的鱼眼镜头光学系统。

2 鱼眼镜头前光组初始结构参数的确定

鱼眼镜头的前光组一般由两块或三块负弯月形透镜组成,主要起压缩视场角的作用;后光组是物镜成像系统。图 1 所示为一条初始视场角为 ω_0 的主光线,通过前、后光学面曲率半径分别为 r_1 、 r_2 的负弯月形透镜, ω_1 、 ω_2 分别为前、后光学面的像方视场角, h_1 、 h_2 分别为主光线与前、后光学面的交点到光轴的距离, α_1 、 β_1 分别为光束在前光学面上的入射角和折射角, α_2 、 β_2 分别为光束在后光学面上的入射角和折射角。主光线经过第二光学面与光轴的交点到后光学面顶点的距离为

$$s = \left[1 + \frac{\sin(\theta - \omega_2)}{\sin \omega_2} \right] r_2, \quad (1)$$

式中 θ 为主光线在第二光学面交点处的法线与光轴的夹角,且

$$\sin \theta = \frac{h_2}{r_2} \equiv k. \quad (2)$$

像方空间视场角可以通过追迹主光线得到,主光线传输方程为^[8]

$$\sin \alpha_{i+1} = \frac{r_{i+1} + d_i - r_i}{r_{i+1}} \sin \omega_i + \frac{r_i}{r_{i+1}} \sin \beta_i, \quad (3)$$

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \beta_i - \alpha_i = \omega_0 + \sum_{i=1}^i (\beta_i - \alpha_i), \quad (4)$$

$$\beta_i = \arcsin \left(\frac{n_{i-1}}{n_i} \sin \alpha_i \right), \quad (5)$$

式中参量下标 i 为光学面的序号, n_{i-1} 、 n_i 分别表示第 i 个光学面的物、像方空间折射率, d_i 是第 i 个与第 i

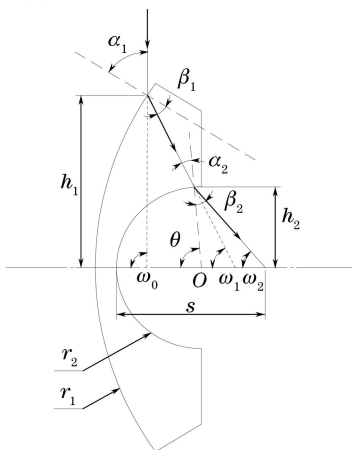


图 1 鱼眼镜头负弯月形透镜主光线示意图

Fig. 1 Optical scheme of a principal ray passing the negative meniscus lens in the fisheye lens

+1 个光学面之间的距离。

根据(3)~(5)式,应用前光组的结构参数,可以依次计算出主光线通过各光学面的参数,从而求得视场角的压缩比 ω_0/ω_2 。但在实际设计中,往往是根据初始视场角和压缩比的设计要求,来确定系统结构参数需要满足的条件。在透镜初始视场角 ω_0 、视场角压缩比 ω_0/ω_2 、由(2)式定义的 k 以及材料折射率 n 一定的条件下,根据(4)、(5)式可得到方程组

$$\begin{cases} \sin \beta_2 = \sin(\theta - \omega_2) \\ \sin \alpha_2 = \sin \beta_2 / n \\ \omega_1 = \omega_2 + \beta_2 - \alpha_2 \\ \beta_1 - \alpha_1 = \omega_0 - \omega_1 \\ \sin \alpha_1 = n \sin \beta_1 \end{cases}, \quad (6)$$

应用该方程组计算主光线参数,再根据(3)式可得到负弯月形透镜前、后光学面曲率半径的比值满足

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\sin \omega_1 - \sin \beta_1}{\sin \alpha_2 + \sin \omega_1}, \quad (7)$$

(7)式中不考虑透镜厚度 d (远小于光学面的曲率半径)。因此,视场角的压缩比 ω_0/ω_2 与透镜光学面曲率半径比 r_2/r_1 之间存在函数关系。图 2(a)和 2(b)分别表示 $n=1.713$, 初始视场角 $2\omega_0=160^\circ$ 和 $2\omega_0=90^\circ$ 时的函数曲线,计算过程中将 k 作为参量。

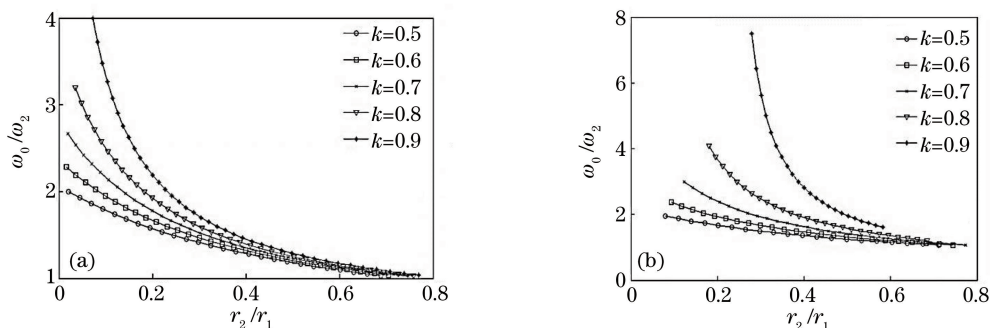


图 2 视场角压缩比(ω_0/ω_2)和透镜前、后光学表面曲率半径比(r_2/r_1)的关系曲线。(a) $2\omega_0=160^\circ$; (b) $2\omega_0=90^\circ$

Fig. 2 Relationship between compression ratio of field angles (ω_0/ω_2) and curvature radius ratio of front and back optical surfaces (r_2/r_1). (a) $2\omega_0=160^\circ$; (b) $2\omega_0=90^\circ$

由图 2 可知,视场角压缩比 ω_0/ω_2 随着 r_2/r_1 的减小而增大;另外,当 r_2/r_1 一定时, ω_0/ω_2 随着 k 值的增大而增大;如果视场角压缩比要求相同,较小的初始视场角 ω_0 应取较小的 k 值。由于前光组第一块透镜比第二块透镜的初始视场角大得多,一般第一块透镜取 $k_1=0.75\sim 0.95$,第二块透镜取 $k_2=0.6\sim 0.8$ 。

根据图 1,鱼镜头的第一块负弯月形透镜的横向尺寸为

$$h_1 = r_1 \sin(\omega_0 - \alpha_1), \quad (8)$$

即

$$\frac{h_1}{r_2} = \frac{\sin(\omega_0 - \alpha_1)}{r_2/r_1}. \quad (9)$$

当 $k_1=0.9, 2\omega_0=160^\circ$ 时,由(9)式可拟合得到 h_1/r_2 与 r_2/r_1 之间的关系曲线,如图 3 所示。 r_2/r_1 一般为 $0.15\sim 0.45$,对应的 h_1/r_2 值在 1.4 左右。

在设计初始结构时,分配两负弯月形透镜视场角压缩比 $\omega_0/\omega_2, \omega_2/\omega_4$,并初步设定 k_1 和 k_2 ,进而可以确定两透镜的前、后光学面的曲率半径比值 $r_2/r_1, r_4/r_3$ 。根据第一块透镜的横向尺寸 h_1 的限制确定 r_2 ,这样 r_1 以及主光线高度也随之确定。

图 4 为主光线从前光组第一块透镜后表面传输到第二块透镜前表面的光路示意图,为避免前光组两块透镜横向尺寸发生干涉,它们之间的光学间隔 d_2 可初选在 $r_2 - \sqrt{r_2^2 - h_2^2}$ 附近。另外,第二块负弯月形透镜前光学面的曲率半径 r_3 以及主光线在该光学面上的高度 h_3 应满足的几何关系为

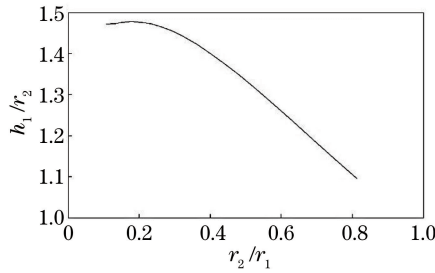


图 3 透镜横向尺寸与其前后光学表面曲率半径比值之间的关系曲线

Fig. 3 Relationship between the transverse size of lens and the curvature radius ratio of its front and back optical surfaces

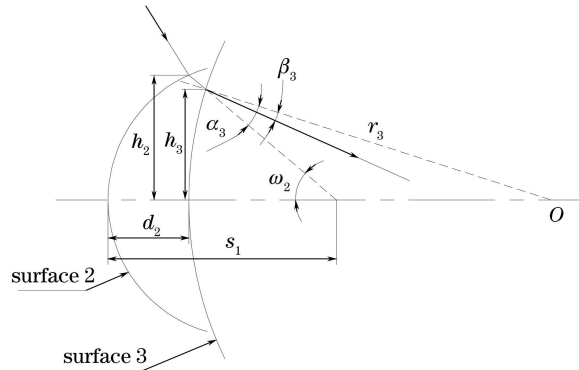


图 4 主光线从前光组第一块透镜后表面传输到第二块透镜前表面的光路示意图

Fig. 4 Optical scheme of propagation of the principal ray from the back surface of the first lens to the front surface of the second lens in pre-group optics

$$h_3 = r_3 \sin(\omega_2 - \alpha_3), \quad (10)$$

$$r_3^2 = (r_3 + d_2 - s_1)^2 + \left(\frac{h_3}{\sin \omega_2}\right)^2 + \frac{2h_3(r_3 + d_2 - s_1)}{\tan \omega_2}, \quad (11)$$

式中 s_1 为主光线经过第一块透镜与光轴的交点到其后光学面顶点的距离,按(1)式计算。由(6)式计算第二块透镜的主光线参数,根据(10)式和(11)式计算 h_3 和 r_3 ,其他初始结构参数也随之确定。同样由(1)式可以求出前光组的出瞳距 s_2 (即后光组入瞳的位置);若求解结果不合理,如 r_4 过小或出瞳距过大(使镜头长度过大),可通过调整前光组两负弯月形透镜的 k 值、视场角压缩比以及 d_2 加以修正。

3 鱼镜头初始结构设计

3.1 后光组物镜各透镜光焦度及光学间隔参数的确定

由于鱼镜头设计比较复杂,考虑先设计一个较简单的后光组物镜系统作为初始结构,满足较低的视场和孔径设计要求(如视场角 160° ,孔径 F 数 5);然后应用 Zemax 将初始结构进一步复杂化,并优化得到满足更大视场和孔径要求的鱼镜头设计(设视场角 240° ,孔径 F 数 2.8)。采取这种策略的另一个理由是下文讨论中应用平面对称光学系统的四阶波像差理论和赛德尔初级像差理论分别计算前、后光组的波像差;在较小孔径条件下,光学系统高阶像差的贡献较小,这种分析方法是可靠的。

在绝大多数鱼镜头设计中,后光组由至少三片透镜组成,本文选择三片透镜作为后光组的初始方案,如果采用更多透镜,可允许更多的约束条件,但会导致求解一阶光学参量的方程组更加复杂。鱼镜头光学系统初始结构示意图如图 5 所示。图中 h_i, h'_i, r_i 和 $d_i (i=1\sim 10)$ 分别为第 i 光学面上的主光线高度、孔径光线高度、曲率半径和光学间隔, $\varphi_i (i=1\sim 5)$ 分别表示五块透镜的光焦度。

前光组具有平面对称光学系统成像特性,不能按近轴光学系统的计算公式处理其波像差。如何计算前光组的场曲、轴向色差、垂轴色差的波像差在文献[9]中有详细讨论,它们的计算表达式分别为

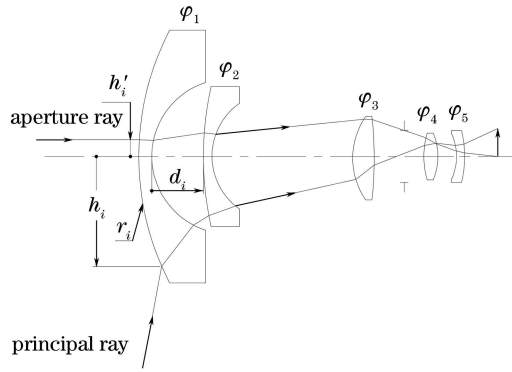


图 5 鱼眼镜头初始结构设计光路示意图

Fig. 5 Optical scheme of initial structure design of fisheye lens

$$W_{S4} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{r'_{mk}} - \frac{1}{r'_{m0}} + \frac{1}{r'_{sk}} - \frac{1}{r'_{s0}} \right) y^2, \quad (12)$$

$$W_{C1} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{r'_{mf}} - \frac{1}{r'_{mc}} + \frac{1}{r'_{sf}} - \frac{1}{r'_{sc}} \right) y^2, \quad (13)$$

$$W_{C2} = (\beta_f - \beta_c) \cos(\beta_d x), \quad (14)$$

式中 x 和 y 分别为最后光学面上孔径光线在子午和弧矢方向的坐标;其余参数都是指前光组的像方空间参量, r'_{m0} 、 r'_{s0} 和 r'_{mk} 、 r'_{sk} 分别表示轴上和某一视场物点关于 D 光的子午和弧矢像距; r'_{mf} 、 r'_{mc} 和 r'_{sf} 、 r'_{sc} 分别表示 F 光、C 光的子午和弧矢像距, β_f 、 β_c 、 β_d 分别表示 F 光、C 光、D 光的主光线在最后光学面上的折射角。

前光组的视场范围很大,其波像差随视场角的变化范围一般很大,且整体上呈单调变化。根据这几种波像差计算结果,选取某视场角所对应的波像差值 W_{S4} 、 W_{C1} 、 W_{C2} ,要求它们尽可能靠近相应波像差分布的中间值。基于前、后光组关于这几种波像差的平衡方程

$$W_{S4} + W'_{S4} = 0, \quad W_{C1} + W'_{C1} = 0, \quad W_{C2} + W'_{C2} = 0, \quad (15)$$

加上鱼眼镜头光学系统的光焦度条件,就可以确定后光组物镜的一阶光学参量(即各透镜的光焦度和光学间隔)。

物方空间超大视场角经前光组压缩后,后光组物镜光学系统满足近轴成像条件,应用近轴系统的像差理论计算后光组场曲、轴向色差及垂轴色差的波像差^[10],

$$-W_{S4} = \frac{1}{4} \bar{y}^2 (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2) S'_4, \quad (16)$$

$$-W_{C1} = \frac{1}{2} (\bar{\eta}^2 + \bar{\xi}^2) C'_1, \quad (17)$$

$$-W_{C2} = \bar{y} \bar{\eta} C'_2, \quad (18)$$

式中 S'_4 、 C'_1 和 C'_2 分别为后光组物镜上述三种像差相应的像差系数, \bar{y} 、 $\bar{\eta}$ 和 $\bar{\xi}$ 分别为后光组归一化物高(或前光组系统的像高)、光线在入瞳面(或前光组系统出瞳面)上子午和弧矢方向的归一化坐标。另外,鱼眼镜头总的光焦度为

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_B - d_2 \varphi_1 (\varphi_2 + \varphi_B) - s \varphi_B (\varphi_1 + \varphi_2) + d_2 s \varphi_1 \varphi_2 \varphi_B, \quad (19)$$

由(12)~(19)式可求解后光组的 S'_4 、 C'_1 、 C'_2 以及光组物镜的光焦度 φ_B 。

图 6 所示为图 5 中光学系统的薄透镜模型示意图。孔径光线的高度依次为 h_{F1} 、 h_{F2} 、 h_{B1} 、 h_{B2} 和 h_{B3} ,主光线的高度依次为 \bar{h}_{F1} 、 \bar{h}_{F2} 、 \bar{h}_{B1} 、 \bar{h}_{B2} 和 \bar{h}_{B3} 。图 6 与图 5 相对应的相关参数有: $d_F \equiv d_2$ 、 $d_4 \cong s - d_B$ 、 $\bar{h}_{F1} \equiv h_1$ 、 $\bar{h}_{F2} \equiv h_3$ 。在归一化条件下 $h_{F1} = 1$,应用正切法过渡公式^[11],有

$$h_{F2} = h_{F1} (1 - d_F \varphi_1), \quad (20)$$

$$h_{B1} = h_{F2} - d_4 (h_{F1} \varphi_1 + h_{F2} \varphi_2). \quad (21)$$

为了简化求解过程,初步假定 $d_{B1} = d_{B2} = d_B$,且孔径光阑设在后光组中间透镜处,则 $\bar{h}_{B2} = 0$,

$$\bar{h}_{B1} = -\bar{h}_{B3} \simeq \frac{\bar{h}_{F2} \cdot d_B}{s} \equiv \bar{h}_B \quad (22)$$

同样可由正切法计算公式求得

$$h_{B2} = h_{B1} - d_B (h_{F2} \varphi_2 + h_{B1} \varphi_3), \quad (23)$$

$$h_{B3} = h_{B2} - d_B (h_{B1} \varphi_3 + h_{B2} \varphi_4). \quad (24)$$

另外,根据后光组物镜场曲、轴向色差、垂轴色差的计算公式及光焦度条件^[12-15]

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_4 = \frac{\varphi_3}{n_3} + \frac{\varphi_4}{n_3} + \frac{\varphi_5}{n_5} \\ C'_1 = h_{B1}^2 \frac{\varphi_3}{\nu_3} + h_{B2}^2 \frac{\varphi_4}{\nu_4} + h_{B3}^2 \frac{\varphi_5}{\nu_5} \\ C'_2 = \bar{h}_B h_{B1} \frac{\varphi_3}{\nu_3} - \bar{h}_B h_{B3} \frac{\varphi_5}{\nu_5} \\ \varphi_B = \varphi_3 + \varphi_4 \frac{h_{B2}}{h_{B1}} + \varphi_5 \frac{h_{B3}}{h_{B1}} \end{array} \right. , \quad (25)$$

式中 $n_i (i=3,5)$ 、 $\nu_i (i=3\sim5)$ 分别指第 i 块透镜的折射率和阿贝数。借助 Maple 软件的 solve 函数,求解由 (22)~(25) 式组成的 7 个方程,方程中参量 h_{F2} 、 h_{B1} 由 (20)、(21) 式计算,可以解得参量 \bar{h}_B 、 h_{B2} 和 h_{B3} 以及四个一阶光学参量 φ_3 、 φ_4 、 φ_5 和 d_B 。

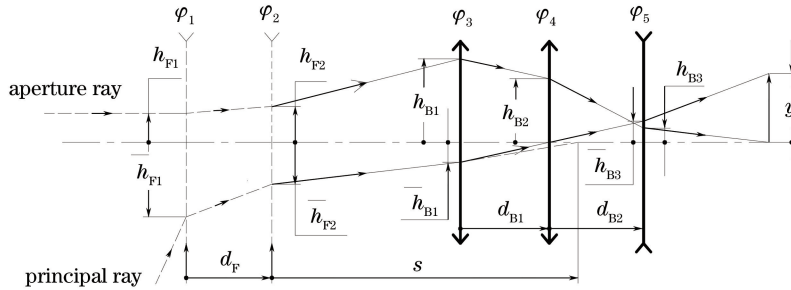


图 6 鱼眼镜头初始结构的薄透镜模型

Fig. 6 Thin-lens model of initial structure of fisheye lens

3.2 初始结构参数的数值计算

鱼眼镜头初始结构的设计要求如表 1 所示。参考文献 [16],初选各元件的玻璃材料依次为 N-LAK8 ($n_1 = 1.713, \nu_1 = 53.832$)、N-LAK8 ($n_2 = 1.713, \nu_2 = 53.832$)、N-SF5 ($n_3 = 1.673, \nu_3 = 32.251$)、N-FK51A ($n_4 = 1.487, \nu_4 = 84.468$) 和 SFL6 ($n_5 = 1.805, \nu_5 = 25.394$)。在优化设计过程中,玻璃材料应用 Zemax 中玻璃替换模板进行锤形优化最终确定。

表 1 鱼眼镜头初始结构的光学设计指标

Table 1 Requirements of initial structure design of fisheye lens

Parameter	Value
Wavelength /nm	380~760
Focal length /mm	15
$F \#$	5
Field of view /($^\circ$)	160
Maximum diameter /mm	<100
Total length /mm	<160
Modulation transfer function (30 lp/mm)	>0.5

初定 $k_1 = 0.9, k_2 = 0.7$;前光组的第一块透镜将最大全视场角由 160° 压缩至 90° ,第二块透镜再将视场角由 90° 压缩至 40° ;由 (4) 式求得前光组的主光线参数,如表 2 所示;第一块透镜横向尺寸 $2h_1$ 限制在 90 mm,初定 $r_2 = 30$ mm。应用表 2 中的主光线参数,根据第 2 节相关计算公式,前光组两块透镜的结构参数如表 3 所示。

表 2 前光组主光线参数

Table 2 Parameters of the principal ray in the pre-group optics

(°)

Lens No. i	ω_{2i-2}	α_{2i-1}	β_{2i-1}	ω_{2i-1}	α_{2i}	β_{2i}	ω_{2i}
1	80	55.73	28.84	53.11	11.05	19.16	45
2	45	33.17	18.63	30.46	13.97	24.43	20

表 3 前光组初始结构参数

Table 3 Initial structure parameters of the pre-group optics

mm

Surface No. i	Radius r_i	Distance d_i	Height h_i
1	106.31	5.00	43.70
2	30.00	16.33	27.00
3	121.93	4.58	25.00
4	27.45	60.65	19.22

根据上述鱼镜头前光组的设计参数,应用(12)~(14)式计算前光组视场角在 60° 时对应的波像差;在(16)~(21)式中, $\bar{y}=0.73, \bar{\eta}=1, \bar{\xi}=0$,先计算前光组的波像差,并求解后光组物镜的像差系数及光焦度,如表 4 所示;最后由(22)~(25)式求出后光组的一阶光学参量,如表 5 所示。

表 4 前光组的波像差和后光组的像差系数

Table 4 Wave aberrations of the pre-group optics and aberration coefficients of the back-group optics

W_{C1}	W_{C2}	W_{S4}	C'_1	C'_2	S'_4	φ_B
0.063	-0.209	0.023	0.126	-0.286	0.172	0.410

表 5 后光组的一阶光学参量

Table 5 First-order optical parameters of the back-group optics

φ_3	φ_4	φ_5	d_{B1}	d_{B2}
0.0198	0.0487	-0.0317	7.05	7.05

使用 Zemax 光学设计软件进行辅助设计。选用光线点列图的均方根值(RMS)作为优化函数,选用质心作为优化参考,光瞳采样选择高斯求积,其他选择默认参数。用玻璃替换模板,经过优化得到鱼镜头的初始结构参数,如表 6 所示。图 7 是该结构关于空间频率 10 lp/mm 和 30 lp/mm 的光学调制传递函数(MTF)曲线,在视场角为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 80° 时,像面上光线点列图 RMS 值分别为 3.9, 7.3, 8.0, 11.0 μm ,成像性能比较理想。

表 6 鱼镜头初始结构参数

Table 6 Initial structure parameters of fisheye lens

mm

Surface No. i	Radius r_i	Distance d_i	Glass type
1	142.284	4.00	N-K5
2	31.930	15.80	
3	137.475	7.50	N-LAK33B
4	23.226	53.72	
5	28.923	3.03	P-SF8
6	111.143	9.22	
STOP	Infinity	4.54	
7	27.451	13.44	N-FK58
8	-12.459	0.50	
9	-12.297	5.34	N-SF57
10	-30.440	38.24	

4 优化设计

以第 3 节得到的初始结构为基础,应用 Zemax 进行复杂化设计,以满足视场角 $2\omega_0 = 240^\circ$, 焦距 $f' = 10 \text{ mm}$, 相对孔径 $D/f' = 2.8$ 的设计要求,复杂化步骤如下:

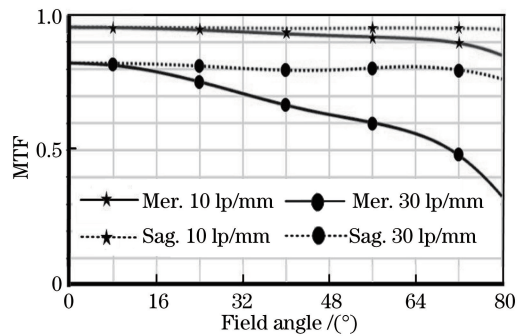


图 7 鱼镜头初始结构的 MTF 曲线

Fig. 7 MTF curves of initial structure of fisheye lens

- 1) 在原前光组前增加一块负弯月形透镜, 三块负弯月形透镜依次将视场角由 240° 压缩到 160° 、 90° 和 40° ;
- 2) 将后光组的前两块透镜调整为双胶合透镜, 其作用是增加 Zemax 优化时的可变量, 同时胶合透镜的引入有利于球差和色差的校正; 初始结构的后光组中第三块透镜在结构上为负场镜形式, 有利于补偿系统的场曲和畸变以及使探测器光敏面上的非均匀光照得以均匀化, 故不作复杂化处理;
- 3) 平板玻璃为可更换滤光片, 起减小色差的作用;
- 4) 添加玻璃替换模板, 并对全部参数进行锤形优化。

对前光组所增加的负弯月形透镜按照第 2 节讨论的思路进行初步设计, 透镜材料初选 N-LAK8 ($n=1.713, v=53.832$), $k=0.9$; 计算得到透镜的曲率半径和厚度的初值分别为 $r_1=151.35$ mm, $r_2=60$ mm, $d=10$ mm。

按照 3.2 节所述应用 Zemax 进行优化, 最终优化设计的结构参数如表 7 所示, 光路如图 8 所示; 图 9 是空间频率 10 lp/mm 和 30 lp/mm 对应的 MTF 曲线。从图 8 和图 9 可以看出, 以初始结构为基础进行优化设计得到的大视场、大孔径鱼镜头具有相对简单的结构, 其 MTF 分布也较为理想。

表 7 优化设计的结构参数

Table 7 Structural parameters of optimized design

Surface No. i	Radius r_i	Distance d_i	Glass type
1	169.573	13.94	N-LAF21
2	95.428	18.58	
3	224.617	4.00	K7
4	26.899	17.57	
5	72.960	4.88	N-LAK34
6	22.0485	41.34	
7	29.189	15.36	SF56A
8	14.209	10.87	N-KZFS8
9	103.878	14.76	
10	Infinity	1.00	K3
11	Infinity	3.49	
STOP	Infinity	2.64	
12	18.830	4.59	N-FK58
13	-9.125	11.80	F2
14	-12.782	1.48	
15	-11.585	2.99	N-SF57
16	-16.543	21.91	

5 结 论

提出了一种不依赖于专利或经验的鱼镜头初始结构的设计思路。首先, 利用主光线传输方程, 根据视

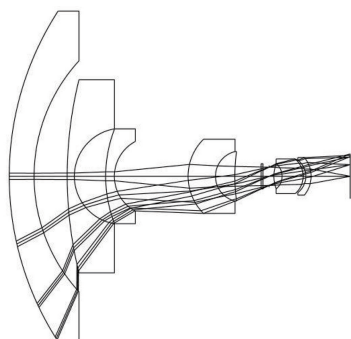


图 8 优化设计的鱼镜头光路图

Fig. 8 Optical scheme of optimized design of fisheye lens

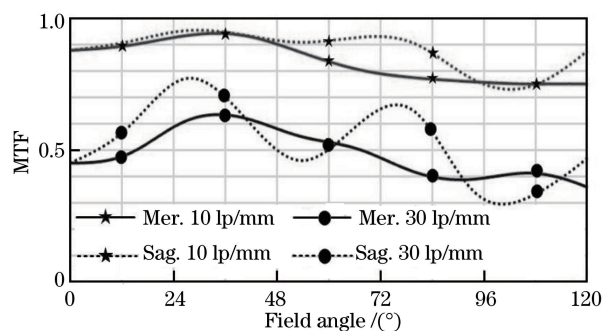


图 9 优化设计的鱼镜头 MTF 曲线

Fig. 9 MTF curves of optimized design of fisheye lens

场角压缩比要求及镜头尺寸限制,求解前光组的初始结构参数。针对前光组具有平面对称光学系统的成像特性,应用平面对称光学系统像差理论计算其波像差,根据前、后光组的波像差平衡条件,求解后光组的一阶光学参量,然后将其作为限制条件,应用 Zemax 设计了一款满足较低设计要求(视场角 $2\omega_0 = 160^\circ$, 孔径 F 数为 5)的简单鱼镜头光学系统。以该简单结构作为初始结构,应用 Zemax 进行透镜复杂化,设计得到满足视场角 $2\omega_0 = 240^\circ$, 焦距 $f' = 10$ mm, F 数为 2.8 要求的鱼镜头。经 Zemax 光学设计软件分析,该镜头的 MTF 曲线性能比较理想,并且结构相对简单。

参 考 文 献

- [1] Wang Yongzhong. Some key problems about the design of IR thermal imaging fish-eye lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34 (7): 1078-1080.
王永仲. 红外热成像鱼镜头设计中若干特殊问题的处理[J]. 光子学报, 2005, 34(7): 1078-1080.
- [2] Wang Yongzhong. Fisheye lens optics[M]. Beijing: Science Press, 2006.
王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong, *et al.* Optical system design of space fisheye camera[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022004.
闫阿奇, 杨建峰, 曹剑中, 等. 航天鱼眼相机光学系统设计的研究[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1022004.
- [4] Zhu Haijiang, Xu Xiaobo, Zhou Jinglin. Fisheye image matching based on rotation matrix under spherical perspective projection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0215001.
祝海江, 徐晓波, 周靖林. 基于球面透视投影旋转矩阵的鱼眼图像匹配[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0215001.
- [5] Liu Yan, Han Min, Ju Rongbing, *et al.* Design and instance of a sport digital video fisheye lens[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 082201.
刘言, 韩敏, 居荣兵, 等. 一款运动 DV 鱼镜头的设计与实例[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 082201.
- [6] Xu Weizheng, Bao Xuecheng, Zheng Quan, *et al.* Discussion on automatic design method of initial structure of optical system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1982, 3(1): 64-68.
徐维铮, 包学诚, 郑权, 等. 光学系统初始结构自动设计方法探讨[J]. 仪器仪表学报, 1982, 3(1): 64-68.
- [7] Tian Tiejun. Solution method and program design for initial structure of complex optical system[J]. Optics and Precision Engineering. 1993, 1(2): 1-8.
田铁印. 复杂光学系统初始结构的求解方法及程序设计[J]. 光学精密工程, 1993, 1(2): 1-8.
- [8] Lu L J, Hu X Y, Sheng C Y. Optimization method for ultra-wide-angle and panoramic optical systems[J]. Applied Optics, 2012, 51(17): 3776-3786.
- [9] Niu Zhiqian. Design of fisheye lens optical system[D]. Shanghai: Shanghai University, 2010.
牛智全. 鱼镜头光学系统的设计[D]. 上海: 上海大学, 2010.
- [10] Wang Zhijiang. Practical optical technical manuals[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
王之江. 实用光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [11] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [12] Miks A, Novak J. Analysis of three-element zoom lens based on refractive variable-focus lenses[J]. Optics Express,

2011, 19(24): 23989-23996.

- [13] Miks A, Novak J. Analysis of two-element zoom systems based on variable power lenses[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 6797-6810.
- [14] Miks A, Novak J, Novak P. Three-element zoom lens with fixed distance between focal points[J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2187-2189.
- [15] Wu Futian, Feng Shuwen. Three separate lens design of infrared imaging[J]. Infrared Technology, 1997, 19(1): 26-28.
吴福田, 冯书文. 红外成像三片分离物镜设计[J]. 红外技术, 1997, 19(1): 26-28.
- [16] Muller R. Fish eye lens system: US4525038[P]. 1985-06-25.