

doi: 10.3788/gzxb20124111.1312

一款宽光谱鱼眼镜头的设计

李宏壮, 张振铎, 刘欣悦, 赵勇志, 李洪文, 王建立

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 讨论了一款用于监控侦查的鱼眼镜头设计. 首先根据使用要求, 选择了可以由图像直接提取出目标方位信息的等距离投影方式; 又由系统对目标分辨率的要求, 选择了焦距相对较长的全帧成像形式. 通过合理布局系统结构及材料选择, 使各种像差得到较好的校正, 并通过加大光阑慧差改善系统照度均匀性. 最终设计出工作波段 486~900 nm, 视场 180°, $F/2.8$ 的宽光谱鱼眼镜头, 设计结果系统全视场在乃奎斯特频率 63 lp/mm 处的调制传递函数大于 0.3, 边缘视场照度大于中心视场照度的 50%, $f-\theta$ 畸变小于 3%, 各项指标满足系统要求.

关键词: 光学设计; 鱼眼镜头; 宽广谱; 等距离投影

中图分类号: TH751

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)11-1312-5

0 引言

大角域范围覆盖、高信息量获取一直是光学传感器研制追求的方向之一, 尤其在安全监视、国防军事领域尤为重要. 为此人们探索了多种实现方式, 例如旋转步进扫描技术、多镜头视场拼接技术等, 但最理想的方式是采用单机超广角凝视成像, 获得半球或超半球空域图像, 实现全方向、实时的信息提取. 实现这种超广角成像的镜头是鱼眼镜头, 它模仿鱼在水下观察水面上景物时视场角可以达到 180° 的情形.

鱼眼镜头的设计面临着轴外像差难以消除、边缘视场照度太低、优化过程中光线频繁溢出等问题, 即使是在计算机自动设计普及的今天, 鱼眼镜头都是最复杂、最难设计的系统之一^[1].

本文设计了一款用于监控侦查的宽广谱鱼眼镜头, 覆盖可见、近红外波段, 为准确定位目标方向, 系统采用等距离投影方式. 详细论述了系统指标、结构选择、像差校正方法以及设计结果.

1 设计指标分析

系统要求能够探测最大 180° 视场范围内 1 km 距离的人体, 并确定其方位, 探测波段为可见到近红外. 采用全画幅 CCD, 靶面尺寸 36 × 24 mm (与 35 mm 胶片尺寸相等), 像素尺寸 8 μm.

首先为了能够由图像信息提取目标方位, 必须

对成像的投影方式进行选择. 理想的成像投影公式为

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

式中 y' 为像高, f' 为系统焦距, θ 为物方半视场角. 但对于鱼眼镜头来说, 视场角达到或超过 180°, 当 $\theta=90^\circ$ 时, 像高将为无穷大, 因此只能采用非相似的投影方式, 通过引入大量的桶形畸变实现将半球视场投影到有限的平面靶面上. 常用的有如下四种投影公式^[1-2]

1) 等距离投影

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

其特点是像点距画面中心的距离与物方视场角成线性关系, 因此可直接从图像提取物空间的角坐标, 不需要复杂的反演计算.

对于等距离投影鱼眼镜头, 各视场像点偏离理论像高将直接影响由图像获取目标方位信息的准确度, 对其评价采用 $f-\theta$ 畸变, 即

$$\text{Dist}_{f-\theta} = \frac{y' - y'_{\text{ref}}}{y'_{\text{ref}}} \times 100 = \frac{y' - f' \cdot \theta}{f' \cdot \theta} \times 100 \quad (3)$$

式中 y' 为实际像高, y'_{ref} 为等距离投影的理论像高.

对于要求精确确定目标方位信息的军用领域, 要求 $f-\theta$ 畸变要小于 3%.

2) 等立体角投影

$$y' = 2f' \times \sin(\theta/2) \quad (4)$$

其特点是物方等立体角对应于像面上相等的面积, 这种投影方式能够产生比等距离投影更大的桶形畸变, 但由图像提取物空间目标角位置信息时需

要经过反三角函数计算,对准确度和实时性有影响.

3) 体视投影

$$y' = 2f' \times \tan(\theta/2) \quad (5)$$

其特点是放大率随视场增大而增大. 这种投影方式很少被采用.

4) 正交投影

$$y' = f' \times \sin(\theta) \quad (6)$$

其特点是径向和圆周方向放大率不相等. 这种方式提供的桶形畸变最大,这不仅易于覆盖更大的物方角空域,而且有利于提高像面照度分布的均匀性,因此仍被少量的鱼镜头所采用.

由于本系统要求能够通过图像确定目标所在方位,因此选择等距离投影方式最为适合.

对于 35 mm 摄影(靶面尺寸为 36×24 mm)的鱼镜头,大致可分为两种形式,一种是全帧成像,将半球 180° 视场成到靶面的对角线上,这种镜头焦距较长,为 $14 \sim 16$ mm,其成像区域如图 1 中的 *a* 所示.

另一种是圆域成像,将 180° 视场成到靶面的短边上,这样在各个方向上视场均可达到 180° ,但这种镜头焦距较短,为 $6 \sim 8$ mm. 其成像区域如图 1 中的 *b*.

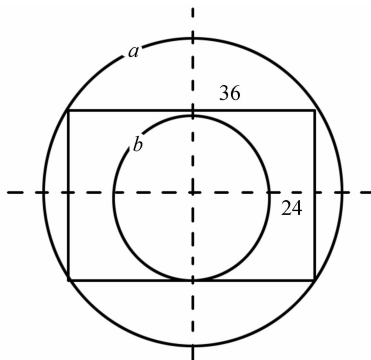


图 1 35 mm 摄影鱼镜头的成像区域

Fig. 1 Imaging area of 35 mm photography fish-eye lens

根据系统在 1 km 距离探测到人体的要求,按照北大西洋条约组织标准化协定规定,探测目标的最低分辨率为 1 线对/目标尺寸,因此人体成像后至少要压 1 对像元,由几何关系,系统焦距应满足

$$f' > R \cdot \frac{2p}{H} \quad (7)$$

式中 H 为人的身高,设 $H = 1.7$ m, R 为探测距离, $R = 1000$ m, p 为像素尺寸, $p = 8 \mu\text{m}$,则 f' 应大于 9.4 mm. 可见由于靶面尺寸的限制,为满足焦距的要求必须采用焦距较长的全帧成像方式,使 180° 视场成像到靶面的对角线上. 再由系统采用等距离投影,像高满足 $y' = f' \times \theta$,令像高为靶面对角线尺寸的一半,即 $y' = 21.63$ mm, $\theta = 90^\circ = 1.57$ rad,得焦

距 $f' = 13.78$ mm,当存在少量的 $f-\theta$ 畸变时,系统焦距可以取 $f' = 14$ mm,此时可使人体成像后占 3 个像元.

为保证探测能力,采用相对孔径为 $1/2.8$,系统波段选择为 $486 \sim 900$ nm 的可见近红外波段.

综上,得出系统的各项光学指标要求,如表 1.

表 1 光学系统指标

Table 1 Parameters of optical system

Parameter	Value
Wavelength/nm	486~900
Focal length/mm	14
$F/\#$	2.8
Field of view/ $^\circ$	180
Image size/mm	36×24
Back focal distance	>18
Relative illumination/%	>50
MTF of all fields (63 lp/mm)	>0.3
$f-\theta$ Distortion	$<3\%$

2 设计结果与像差分析

鱼镜头虽然不是从反远距型广角物镜发展而来的,但在结构上与反远距物镜有相似之处,设计方法也与反远距物镜类似^[3-4],他们之间的区别在于鱼眼物镜大的桶形畸变是固有的,而非像差的一种,为了获得大的桶形畸变,要在前面采用具有较大负光焦度的近乎半球单透镜. 对于鱼镜头,像差校正的着眼点不仅是轴上,轴外视场也同等重要. 另外鱼镜头的视场角高达 180° ,因此除了要满足整个视场的像差得到理想校正外,还要保证整个像面的照度分布.

对于广角镜头,提高照度分布均匀性的方法主要有两种,一种是通过物方远心光路,另一种是通过像差渐晕^[5]. 物方远心是通过使光阑处在后组的焦点附近来减小轴外主光线与光轴夹角从而提高轴外照度的,但对于全帧成像来说,由于焦距较长,如果采用远心光路将使轴向尺寸过大,使前片口径太大,增加实现的难度,因此这种方法在全帧成像鱼镜头中很少使用,但在圆域成像的鱼镜头中常被采用^[6].

像差渐晕是指通过光阑像差来提高轴外视场光束的通光口径,从而改善像面照度均匀性^[7]. 光阑像差中具有这个作用的是光阑慧差,它表示孔径光阑的放大倍率随视场的变化,对于反远距物镜,主要应增加前组的光阑慧差. 由像差理论可知光阑慧差与像面像差有如下关系

$$S_{\text{np}} = S_{\text{v}} + j(U_{\text{pk}}^2 - U_{\text{pl}}^2) \quad (8)$$

式中 S_{IIp} 为光阑慧差, S 为畸变, U'_{pk} 和 U_{pl} 分别是轴外主光线在光阑和入瞳处的孔径角, U_{pl} 也即物方视场角, 如图 2 所示.

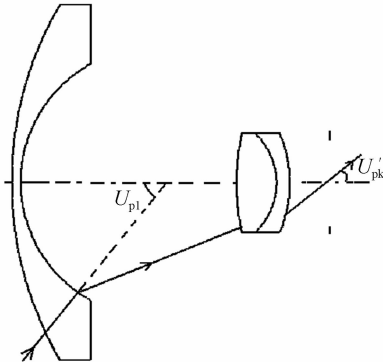


图 2 光阑慧差示意图
Fig. 2 Diagram of pupil coma

可见为了获得大的光阑慧差, 应增大 S , 但对于特定投影方式的鱼镜头畸变为固定的量. 对于反远距型的前组, 其角放大倍率倒数 $1/\gamma_1 = U_{pl}/U'_{pk} > 1$, 因此 $(U'_{pk} - U_{pl}^2)$ 为负值, 要增大 S_{IIp} , 就应减小 $1/\gamma_1$, 使 $(U'_{pk} - U_{pl}^2)$ 的绝对值减小. 减小 $1/\gamma_1$ 的方法是提高正透镜组的折射率. 但 $1/\gamma_1$ 与系统的远距比对应, 减小 $1/\gamma_1$ 将使远距比减小, 从而限制系统的后工作距离, 因此在增加光阑像差与保证后工作距离之间需要折衷设计.

经过以上分析及反复优化, 确定系统最终的光路结构如图 3.

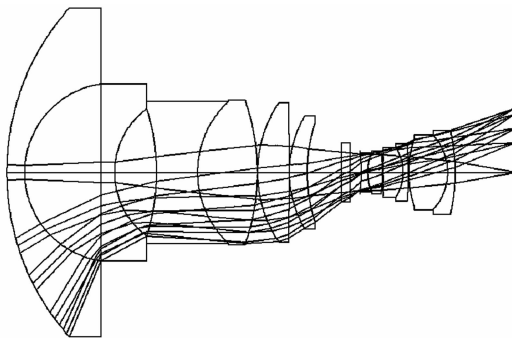


图 3 系统结构
Fig. 3 Layout of system

系统采用 8 组 12 片透镜, 在光阑附件设置滤光片, 总长 170 mm, 前片最大口径 110 mm, 后工作距离 20 mm, 反远比 1.43.

光路中的前两片负透镜主要用于增大视场角, 第一片的前表面将产生系统所需的大部分畸变, 后

表面又为近半球形, 因此光线的行进方向对第一片透镜非常敏感, 在优化过程中常因为光线在后表面上的溢出而不能进行, 可以采取将前后表面曲率半径及其与后面透镜的间隔这 3 个量分步设为变量, 当系统进入较好状态后再全部放开优化的方法, 可以有效地减少光线溢出.

对于前两片透镜的材料要从增大视场和校正像差两个方面考虑^[8]. 前两片的折射率越高, 则光线弯折越多, 轴外光线收敛的速度也越快; 在像差校正方面, 鱼镜头最主要的轴外像差是倍率色差, 对于本系统的宽光谱波段更是如此, 控制倍率色差的方法除了采用多个正常胶合的双胶合或双分离透镜外, 还应尽量减少前面负透镜的倍率色差. 对于 air-to-glass 面, 产生的倍率色差正比于式(9).

$$\frac{\bar{i}(n-1)}{nv} \tag{9}$$

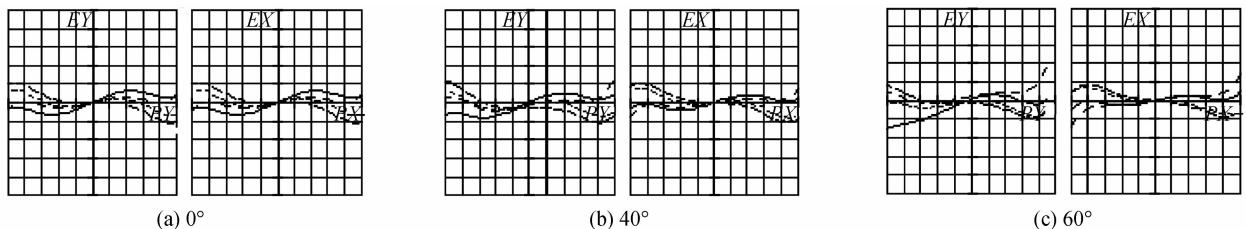
式中 \bar{i} 是主光线在该表面的入射角, n 为材料折射率, v 为 Abbe 数, 可见为减小倍率色差, 应选色散较小的材料, 因此系统中前两片选用 LAF3_CHINA.

为校正色差, 系统中使用了多个双胶合透镜. 第一个双胶合为正光焦度的弯月形厚透镜, 其凹面朝前, 并通过透镜加厚使正光焦度后移, 负光焦度前移, 前后主面距离加大, 轴外主光线更早的收敛, 从而减小前片口径.

后面的单透镜使轴外主光线在光阑处的孔径角增大, 加大系统的光阑慧差. 为降低单个透镜的光焦度, 增加了一个不晕透镜, 更好地校正轴上和轴外球差. 光阑附近的胶合透镜其胶合面背向光阑, 用于校正轴外球差. 后面两个朝向光阑的胶合面用于校正轴上球差. 由于系统波段较宽, 必须考虑对二级光谱的校正, 为此在最后一组双胶合透镜中采用 FK 和 TF 特殊色散玻璃.

对于 $f-\theta$ 畸变, 可通过直接对像高的控制来抑制.

图 4 给出了设计结果的垂轴像差曲线, 可见限制轴上成像质量的是未得到完全校正的二级光谱, 而轴外视场最主要像差为倍率色差. 系统的 $f-\theta$ 畸变小于 3%, 如图 5 所示. 图 6 为相对照度曲线, 可见边缘视场照度为中心视场的 50% 以上. 图 7 给出了系统点列图, 可见 90% 视场以内光斑均方根半径



(a) 0° (b) 40° (c) 60°

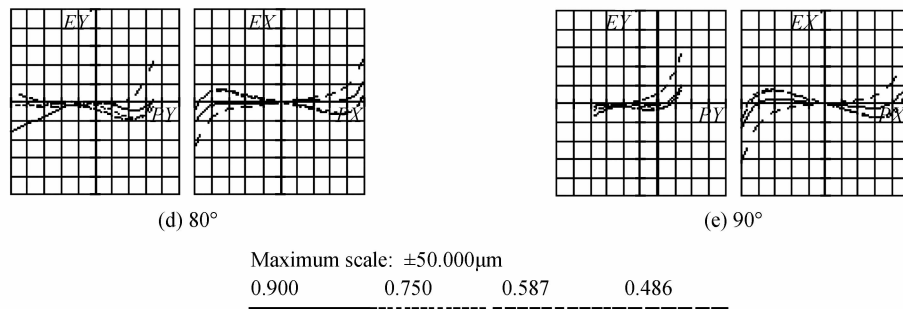


图 4 垂轴像差
Fig. 4 Transverse ray aberration

均小于一个像元尺寸,表明该镜头适合像元尺寸 $\geq 8 \mu\text{m}$ 的相机.系统传递函数曲线如图 8 所示,在相机 Nyquist 频率(63 lp/mm)各视场 MTF 均大于 0.3.

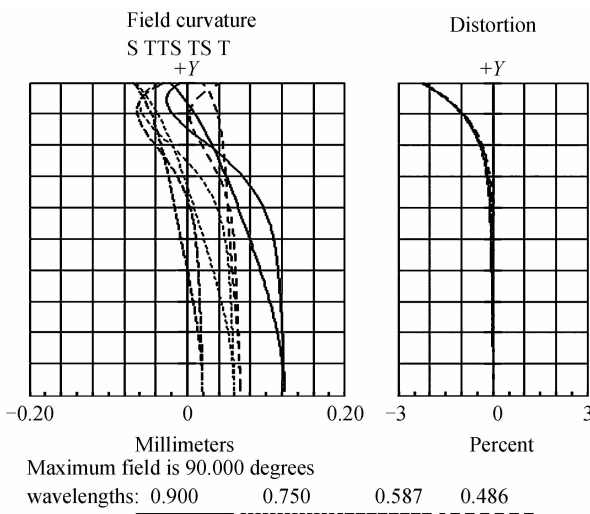


图 5 场曲和 f -theta 畸变
Fig. 5 Field curvature and f -theta distortion

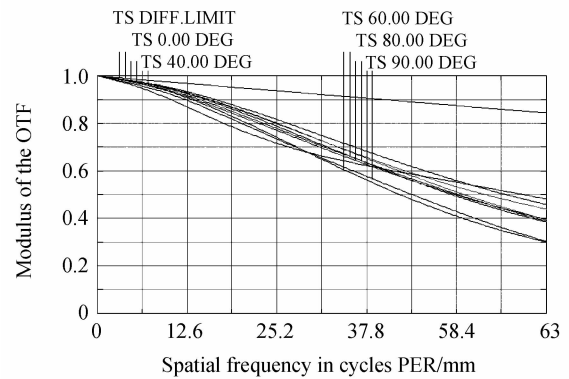


图 8 系统传递函数
Fig. 8 System modulation transfer function

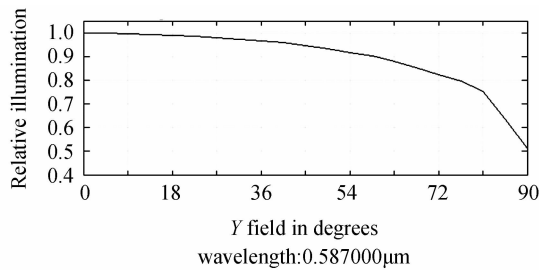


图 6 相对照度图
Fig. 6 Relative illumination

3 结论

本文介绍了一款宽光谱鱼眼镜头的光学系统设计,系统焦距 14 mm, F 数 2.8, 视场 180° , 覆盖可见近红外波段.采用全帧成像,将半球 180° 视场成到靶面的对角线上.并采用等距离投影成像方式,通过控制 f - θ 畸变小于 3% 以下,使系统能够准确地由图像获取目标方位信息.最终系统成像质量为:90% 视场以内光斑均方根半径小于一个像元尺寸,在相机 Nyquist 频率 63 lp/mm 处各视场 MTF 大于 0.3,边缘视场照度为中心视场的 50% 以上,各项指标均满足要求.

参考文献

[1] 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
 [2] CHEN Huang-ming, CHEN Xiang-ying. Fish eye lens optical design[J]. *J Beijing IXST Technol*, 1989, **9** (3):35-42.
 陈晃明,陈向颖. 鱼眼镜头光学设计[J]. 北京理工大学学报, 1989, **9** (3):35-42.
 [3] YAN A-qi, YANG Jian-feng, CAO Jian-zhong, et al. Optical system design of space fisheye camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31** (10):1-4.
 阎阿奇,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):1-4.
 [4] WU Hai-qing, ZHAO Xin-liang, LI Tong-hai, et al. Design of refractive/diffractive IR fish-eye optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39** (8): 1533-1536.

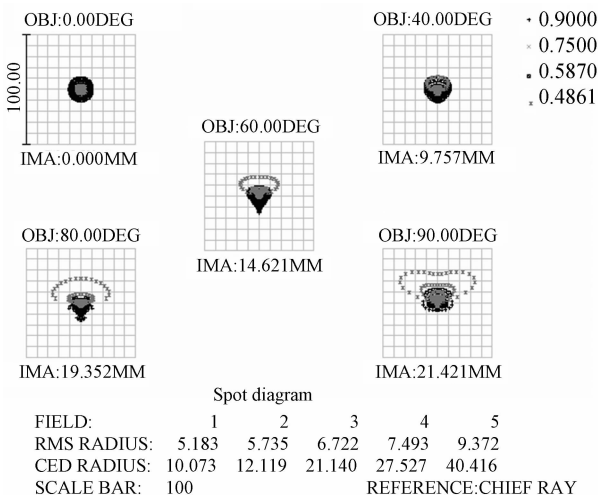


图 7 系统点列图
Fig. 7 Spot diagram

- 吴海清,赵新亮,李同海,等. 折射/衍射红外鱼镜头光学系统设计[J]. 光子学报, 2010, **39** (8):1533-1536.
- [5] XUE Qing-sheng. Optical design of spaceborne low-distortion and super-wide-angle aerosol imager [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41** (1): 15-20.
薛庆生. 星载超广角气溶胶探测仪均匀像面性光学设计[J]. 光子学报, 2012, **41** (1):15-20.
- [6] KUMLER J J, BAUER M. Fisheye lens designs and their relative performance[C]. *SPIE*, 2000; **4093** : 360-369.
- [7] FLLAH H R, MAXWELL J. Higher order pupil aberrations in wide angle and panoramic optical systems[C]. *SPIE*, 2774 : 342-351.
- [8] MARTIN C B. Design issues of a hyper-field fisheye lens[C]. *SPIE*, 2004, **5524** : 84-92.
- [9] LIANG Jiu-wei, LUO Chun-hua, YANG Ming. Optical design of fish-eye lens used for monitoring system [J]. *Optical Technique*, 2011, **37** (6): 691-694.
梁久伟,罗春华,杨铭. 用于监控系统的鱼镜头光学设计[J]. 光学技术, 2011, **37** (6):691-694.
- [10] DOSHI R. Fisheye projection lens for large format film[J]. *SPIE*, 1993, **2000** : 53-61.
- [11] LI Hong-zhuang, HAN Chang-yuan, LIU Xin-yue, *et al.* Optical design of 600 mm diameter telescope based on spheric components[J]. *Optical Technique*, 2010, **36** (4): 509-516.
李宏壮, 韩昌元, 刘欣悦, 等. 基于球面的 600mm 望远镜光学系统设计[J]. 光学技术, 2010, **36** (4):509-516.
- [12] JIANG Lun, HUANG Wei, XU Wei-cai. Panormic lens for full view monitoring[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33** (1): 1-4.
江伦,黄玮,许伟才. 周视监控全景镜头设计[J]. 应用光学, 2012, **33** (1):1-4.

Optical Design of a Wide Spectral Fish-eye Lens

LI Hong-zhuang, ZHANG zhen-duo, LIU Xin-yue, Zhao Yong-zhi, LI Hong-wen, WANG Jian-li
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The optical design of fish-eye lens used for monitoring is discussed. First, based on the system requirment, the equidistance mapping mode in which the directional information of object can be deduced directly from image is selected, then the full frames imaging form is chose for it's relative longer focal length, which can satisfy the resolution demands of system. Through arranging the configuration and choosing materials rationally, the abberations of system are corrected efficiently. And the drop-off of illumination at the full field of view is alleviated by increasing the pupil coma intentiaonally. Finally a wide spectral fish-eye lens is presented, whose operating wavelength range is from 486 nm to 900 nm, field of view is 180°, and F number is 2.8. The design results demonstrate that the MTF at Nyquist frequency 63 lp/mm is higher than 0.3, the illuminance at the edge field of view is higher than 50% of central field of view, and the f -theta distortion is less than 3%. All indexes satisfy the commands of system.

Key words: Optical design; Fisheye lens; Wide spectral; Equidistance mapping