

短焦距超广角镜头的光学设计

张继艳^{1,2} 黄元庆² 熊飞兵¹ 孟宪国¹ 林海峰¹

(¹ 厦门理工学院光电与通信工程学院, 福建 厦门, 361024)
(² 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 厦门 361000)

摘要 介绍了一款用于监控的短焦距超广角镜头的设计, 光学系统采用反远距光学结构, 根据设计要求, 采用等距离投影成像方式。用 Zemax 软件进行优化设计, 合理地解决了边缘视场光照度和轴外视场像差的问题。对该结构特点进行分析评价并给出了各种像差曲线和调制传递函数(MTF)曲线。该镜头采用 7 组 10 片式结构, 全视场角和相对孔径分别为 175°和 1/1.8, 反远比为 2.4。使用 1/3 inch(1 inch=2.54 cm) CCD 成像传感器, 全视场 MTF 值在 100 lp/mm 处达到 0.5, 光学系统结构紧凑, 像质优良。

关键词 光学设计; 超广角; 反远距; 短焦距

中图分类号 O439; TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.102202

Optical Lens Design with Short-Focus and Ultra-Wide FOV

Zhang Jiyan^{1,2} Huang Yuanqing² Xiong Feibing¹ Meng Xianguo¹ Lin Haifeng¹

(¹ Optoelectronics and Communication Engineering Institute, Xiamen University of Technology,
Xiamen, Fujian 361024, China
² Physics and Mechanical and Electrical Engineering Institute, Xiamen University,
Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract The optical design of a short focus and ultra-wide field of view (FOV) lens used for monitoring is discussed. The optical system uses inverted telephoto optical structure. The equidistant projection imaging mode is adopted according to the design requirements. The Zemax software is adopted to optimize and design the system. The marginal FOV illumination and off axis aberration are solved. The structure features of the lens are discussed and the aberration curves and modulation transfer function (MTF) curves are showed. The lens has a structure of 7 groups and 10 pieces. The marginal FOV and relative aperture of the final design is up to 175° and 1/1.8 respectively, and inverted telephoto ratio is 2.4. Using 1/3" CCD imaging device, full FOV MTF value reached 0.5 at 100 lp/mm. Optical system has compact structure, excellent image quality.

Key words optical design; ultra-wide FOV; inverted telephoto; short focus

OCIS codes 120.4820; 220.1010; 220.3620; 220.4610

1 引言

随着传感器技术的不断发展, 市场上越来越倾向于使用电荷耦合组件(CCD), 附加金属氧化物半导体组件(CMOS)作为图像传感器。大角域范围覆盖、高信息量获取也一直是光学传感器研制不断追求的方向之一^[1-3]。由于耦合器件的尺寸受技术与工艺水平的限制, 其尺寸大小是有限的, 所以只有让镜头的焦距很短才能够得到超广角半球域的景象。短焦距超广角镜头的光学设计是目前工业镜头设计的热点之一。短焦距超广角镜头广泛应用于自动化检测、高清安全监控等领域。

设计了一款用于监控的短焦距超广角镜头, 全视场角和相对孔径分别为 175°和 1/1.8, 焦距为 2 mm, 采用等距离投影成像方式, 透镜采用 7 组 10 片结构。系统总长是 34 mm, 设计小巧, 结构紧凑。详细论述了系统参数指标、光学结构、像差分析和设计结果。

收稿日期: 2013-05-15; 收到修改稿日期: 2013-06-14; 网络出版日期: 2013-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(11104234)、校级教改项目(JGZY201234)

作者简介: 张继艳(1977—), 女, 博士, 讲师, 主要从事光学系统设计、大屏幕投影显示和颜色光学等方面的研究。

E-mail: jyzhang@xmut.edu.cn

2 系统结构的选择

普通的照相镜头一般后截距为焦距的 0.6~0.8 倍,有时要求后截距足够长,可以放置其它的光学元件,尤其对于短焦距的结构,需要采用反远距的结构才能满足这样的要求。反远距结构采用负正透镜分离,负光焦度透镜组在前,正光焦度透镜组在后。结构如图 1 所示。

反远距型物镜除了要有长后截距的要求外,还要满足一定的视场角要求^[4],轴外光线通过前组负透镜发散后,使得其与光轴的夹角迅速减小,有利于轴外像差的校正。反远比为 l'_2/f' ,若 f' 越小, l'_2 越大,则反远比越大。

反远距结构除了要求有一定的后截距和视场角,还要求它的结构尽量简单、紧凑。但要缩小体积,则必须减小前后两组之间的距离 d 。

设前组主光线角放大率的倒数为 γ_1 ,经推导有

$$\frac{1}{\gamma_1} = \frac{u_{p_1}}{u_{p_1'}} = 1 - d\varphi_1, \quad (1)$$

由(1)式可知,当 $(1/\gamma_1)$ 确定之后^[5],如果要减小 d ,则必定要增大 φ_1 ,造成前组成像复杂,前组所负担的孔径角也随之增加,与孔径相关的高级像差也会增加,为了降低和孔径相关的高级像差,就要对结构复杂化。可见 $(1/\gamma_1)$ 是起主导作用的,它决定了反远距物镜的后截距和视场角。

如果前组 $(1/\gamma_1)$ 越大,视场角越大,与视场相关的像差也会随之增加,畸变更为严重。通常是前组保留一定的畸变,令后组产生相反符号的畸变加以补偿。但是如果视场非常大,前组的畸变急剧增加^[6],后组根本无法补偿。由于视场较大,造成的轴外像差则较大,尤其是畸变成为其固有像差后,为了实现接近 180° 的视场,超广角镜头不校正畸变,100%的畸变使景物在像面上产生了严重的变形,像面光照度的分布近似地按 $\cos^4\omega$ 的规律降低^[7],这对提高照度分布的均匀性是有好处的。

对于视场角大于 100° 的透镜称其为超广角物镜^[8]。超广角物镜也叫鱼镜头,因其第一片镜片是光焦度为负的镜片,其表面向外弯曲,形状似鱼的眼睛。由于视场角和相对口径均较大,所以鱼眼透镜中存在着轴外像差难以消除,而且还有边缘视场照度太低、优化中光线频繁溢出等问题。

鱼镜头有四种成像投影方式,包括等距离投影成像、等立体角投影成像、等体视投影成像、正交投影成像四种,本设计采用的是等距离投影成像方式^[9]。等距离投影方式像高满足:

$$y' = f'\omega. \quad (2)$$

使用等距离投影方式,物像之间的径向放大率不随视场而变,是线性关系。对于理想光学系统,像高与视场角的关系是 $y' = f'\tan\omega$,但是对于视场接近 180° 的鱼眼透镜,这种关系不再成立,由于存在大量的桶形畸变,鱼镜头的像高与视场角的关系是 $y' = f'\omega$,这使得鱼镜头光学系统具有平面像。在设计过程中可以通过 Zemax 软件里评价函数来设置像高与视场的线性关系。

鱼镜头的短焦距也会使其在摄影时产生很大的景深效果^[10-11],即使不调焦,也能对几乎所有摄入镜头的物体成清晰的像。

运用高斯光学原理对普通照相物镜景深公式的推导:

$$\Delta L = \frac{2l^2 F\delta}{f'^2}, \quad (3)$$

式中 ΔL 是景深, l 是物距, F 是光圈数, δ 表示是光斑直径的大小, f' 是焦距的大小。设计的此款镜头的工作距离要求大于 0.5 m,成像采用 1/3 inch (1 inch=2.54 cm) CCD 作为成像接收器件,像素的尺寸要接近 CCD 像素的大小即 $4.68 \mu\text{m}$,运用景深公式推导,此款镜头的景深大于 1000 m。

3 光学系统的主要性能指标分析

系统要求设计一款短焦超广角监控镜头,要求全视场角和相对孔径分别为 175° 和 $F/1.8$,采用 1/3 inch

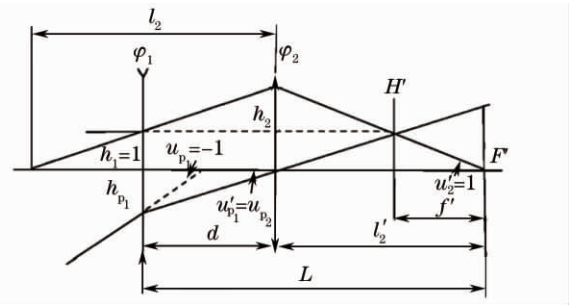


图 1 反远距型光学结构图

Fig. 1 Inverted telephoto optical structure

CCD 作为成像接收器件,选择 Sony 1/3 inch CCD 传感器,XGA 分辨率(1024 pixel×768 pixel),系统的后截距大于 4.8 mm,反远比是为 2.4,1/3 inch CCD 的像面尺寸是 3.6 mm×4.8 mm,采用全帧成像,半像高是 3 mm,像素尺寸是 4.68 μm×4.68 μm。根据等距离投影成像公式,像高需满足 $y' = f'\omega$,像高是视场角的线性函数。确定焦距 f' 是 1.9 mm,考虑到像方会有少量的畸变,取 f' 为 2 mm。根据奈奎斯特频率要求,要想使设计的镜头与 CCD 相匹配,必须满足:成像分辨率反比于 CCD 像素尺寸的 2 倍,通过计算此镜头的分辨率达到了 107 lp/mm,设计要求成像在全视场空间频率 100 lp/mm 处调制传递函数(MTF)值达到 0.3,轴上点空间频率 100 lp/mm 处 MTF 值达到 0.6,边缘视场照度是中心视场照度的 60%以上。将以上性能指标归纳如表 1 所列。设计超广角物镜时需要注意以下问题^[12-14]:

表 1 光学系统参数

Table 1 Optical system parameters

Parameter	Value
Wavelength /nm	486~656
Focal length /mm	2
Field of view /(°)	175
Image size /mm	3.6×4.8
F number	1.8
Relative illumination /%	>0.6
Back focal distance /mm	>4.8
MTF of all fields (100 lp/mm)	>0.6

1) 视场角的增大,会引入光瞳像差,设计过程中要考虑瞳孔像差,不断对各种视场角调整光线的初始数据。Zemax 软件会自动确定瞳孔的飘移,计算程序允许焦距随意变化,不考虑畸变,只保证不同视场角的像高^[12];

2) 由于焦距非常短,一般色差不是设计的主要考虑的像差。大畸变产生的问题是,物镜像差对目标距离的变化较为敏感。一般设计中都是对无限远共轭位置,并在可见光谱范围内进行像差的校正;

3) 在设计中,第二个表面几乎是一个半球面,目前软件中采用约束条件来限制第二个表面优化中出现超半球。约束方法是先形成透镜直径与表面弯曲的乘积,然后对该操作数设置一个限制^[13];

4) 系统沿视场方向的高级像差要尽量小;

5) 为与 CCD 的接口类型匹配,设计要求系统有较长的后截距,使之成为反远距型;

6) 通过合理设置孔径光阑的位置,使入瞳尽量往前移,以获得较小的轴向尺寸,前片的口径尽量小^[14]。

4 设计过程及像差分析

一个完美的设计通常从初始结构的选择开始,初始结构的选择好坏,关系到设计的成功与否。对于光学设计者来说,最好最快的办法是直接从专利中选取一个适当的结构作为初始结构,然后优化,如果靠设计者自己去建立一个初始结构是比较困难的,需要多年的设计经验和丰富的像差理论知识。本设计采用了一个美国专利作为设计的初始结构,此结构的视场和光圈与设计的要求相当,焦距通过缩放镜头的办法可以达到要求。该专利采用 7 组 10 片式结构,初始结构的性能指标 $f' = 5$ mm,相对孔径为 1/2,全视场角为 160°。首先将焦距进行缩放,使 $f' = 2$ mm,然后在优化中注意控制第一片的口径大小,使第一片透镜的口径不致过大,第二个表面的曲率不能超半球,控制像面的半像高为 3 mm,视场角逐渐增加到 175°,控制后截距大于 4.8 mm,设计之后的镜头的外形如图 2 所示。

轴外光线经过第 1、2 片负透镜发散之后,进入第 3 片之后光线倾角明显减小,使其承担较小的视场,有利于后续组元的像差校正,而相应的负透镜组承担较大的视场。轴上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。对于大视场光学系统来说,边缘光照度降低会很严重。因此引入大量的桶形畸变量,能够减小小像方半视场角,从而保证了边缘照度缓慢下降,提高了像面照度的均匀性。使用了三组双胶合结构,用来消球差及位置色差,为了消除全视场及 0.7 视场的彗差,引入适当渐晕,使轴外光束宽度小于轴上光束宽度。同时要考虑边缘光线照度是轴上点光照度的 60%以上。前组的第一片第二片负透镜产生了大量的畸变,后组虽然产生了与其相反符号的畸变,但仍然没法补偿,其产生的桶形畸变接近 100%。

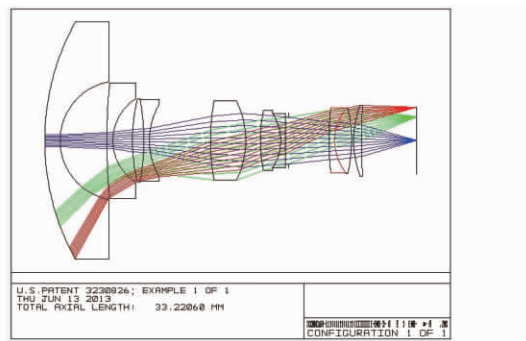


图 2 镜头系统结构

Fig. 2 Layout of the lens system

经设计后各个视场像素的尺寸均小于 CCD 一个像素的尺寸,由图 3 所示,最大成像光斑的均方根尺寸是 $3.338 \mu\text{m}$ 。由图 3 的垂轴像差曲线可以看出,系统还有二级光谱没有校正,由于本系统的焦距不大,而二级光谱和焦距成正比 $\Delta L'_{\text{FCD}} = 0.00052 f'$,故二级光谱的大小对像质不会有太大的影响。

由图 3 的垂轴像差曲线图还可以看出系统还存在少许的场曲和像散,由场曲和畸变曲线可以见看,系统的场曲和像散都不大,均小于 0.05mm ,标准畸变值小于 2% ,超广角镜头的畸变不必控制,畸变只影响像的形状并不影响成像的清晰度。由相对照度图可以看出,边缘视场的照度是轴上点光照度的 63% 。

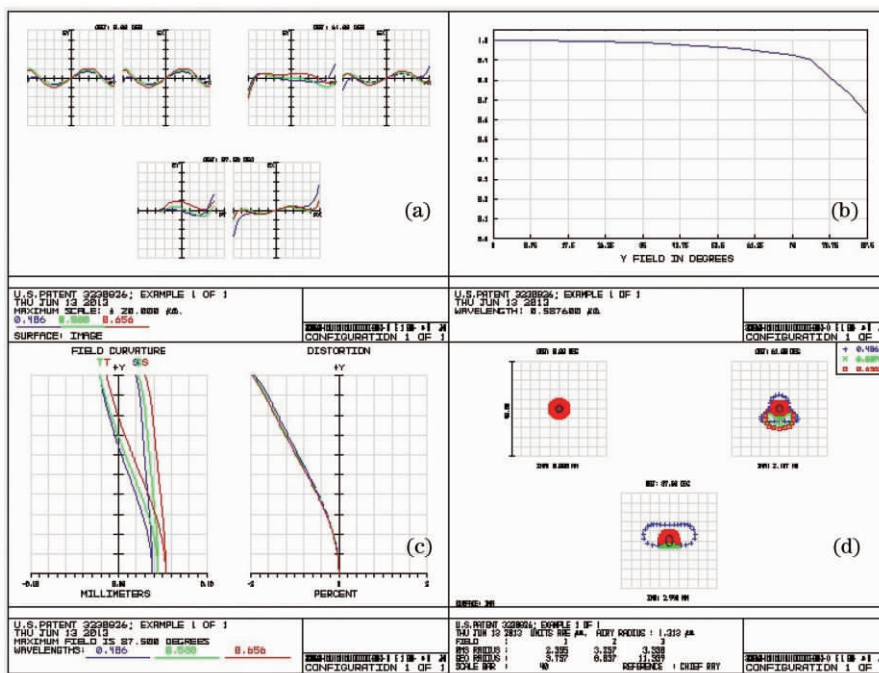


图 3 (a) 垂轴像差; (b) 相对照度; (c) 场曲畸变图; (d) 点列图

Fig. 3 (a) Ray fan; (b) relative illumination; (c) field of curve, $f-\theta$ distortion; (d) spot diagram

设计后光学系统的传递函数如图 4 所示,如图可知轴上点 100 lp/mm 的 MTF 达到 0.6 ,全视场 100 lp/mm 的 MTF 达到 0.5 。以上指标均达到设计的要求。设计透镜的后截距为 4.8 mm ,反远比为 2.4 。

5 公差分析

一个好的设计是要求能够实际制造出来的,设计好的光学系统需要进行公差分析才算真正完成。需要在制造误差的范围之内尽量满足设计要求。公差分析是将各种扰动或像差引入到光学系统中去,看系统在实际制造各种误差范围内的效果。也就是在能满足设计要求的情况下,系统中各个量允许的最大偏差是多少。公差的松和紧决定了产品最终能否装调成功,公差松的结构装调容易,而公差紧的结构通常是超出了当前的工艺加工能力,难以装调成功。结果表明,公差都在常规可加工的公差范围内,工艺性良好。

6 结 论

介绍了一款短焦距超广角物镜的结构设计,系统的焦距是 2 mm ,全视场角是 175° ,相对孔径是 $1/1.8$,轴上点空间频率 100 lp/mm 处的 MTF 值达到 0.6 ,全视场空间频率 100 lp/mm 处的 MTF 值达到 0.5 ,边

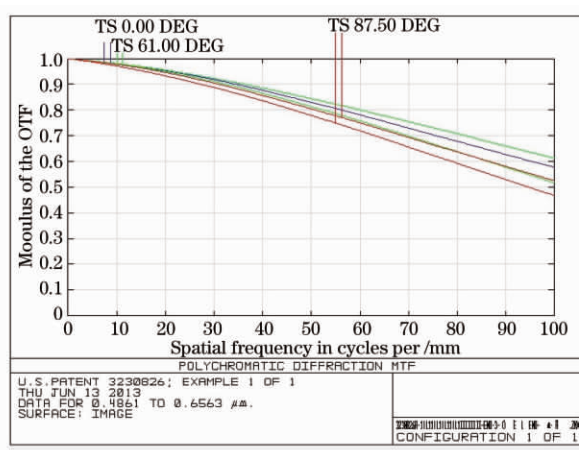


图 4 系统传递函数

Fig. 4 Transfer function curve of the optical system

缘视场相对中心视场的照度达到 0.63, 各个视场像素的尺寸均小于 CCD 一个像素的大小, 此款镜头适用于像素尺寸大于 $4.68 \mu\text{m}$ 的相机。设计的后工作距为 4.8 mm, 总长 34 mm, 此款镜头个头小, 视场大, 像面均匀性好, 可以安装在楼道, 走廊, 汽车等隐蔽处, 具有很大的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhongyong. Fish Eye Lens Optics[M]. Beijing: Science Press, 2006.
王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- 2 Chen Huangming, Chen Xiangying. Fish eye lens optical design[J]. J Beijing Inst 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 Li Hongzhuang, Zhang Zhenyi, Liu Xinyue, *et al.*. Optical design of a wide spectral fish-eye lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(11): 1312-1315.
李宏壮, 张振铎, 刘欣悦, 等. 一款宽光谱鱼眼镜头的设计[J]. 光子学报, 2012, 41(11): 1312-1315.
- 4 Liang Jiuewei, Luo Huachun, Yang Ming. Optical design of fish-eye lens used for monitoring system[J]. Optical Technology, 2011, 37(6): 691-694.
梁久伟, 罗春华, 杨 铭. 用于监控系统的鱼眼镜头光学设计[J]. 光学技术, 2011, 37(6): 691-694.
- 5 Yan Aqi, Yang Jianfeng, Cao Jianzhong, *et al.*. Optical system design of space fisheye camera[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1022004.
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): 1022004.
- 6 Wang Jianjun. The Research of Fish-Eye Imaging Andpreliminary Design [D]. Shanghai: College of Mechatronics Engineering and Automation. Shanghai University, 2010. 1-46.
王健俊. 鱼眼镜头成像研究及初步设计[D]. 上海: 上海大学机电工程与自动化学院, 2010. 1-46.
- 7 Wang Long, Wang Yongzhong, He Xueju. Design of staring laser threat detection system based on Michelson interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0312003.
王 龙, 王永仲, 何学举. 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统设计[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0312003.
- 8 Li Gang, Yan Zongqun, He Yongqiang. Omnidirectional infrared multiple target processing system [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2011, 48(6): 062201.
李 刚, 闫宗群, 何永强. 全向凝视红外多目标处理系统[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 062201.
- 9 Wu Haiqing, Zhao Xinliang, Li Tonghai, *et al.*. Design of refractive/diffractive IR fish-eye optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(8): 1533-1536.
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼眼镜头光学系统设计[J]. 光子学报, 2010, 39(8): 1533-1536.
- 10 Wang Zhijiang. Handbook of Practical Optical Technology[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. Engineering Optics[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
郁道银. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- 12 Zhang Weian, Wang Long, Ren Jianguo. Research on laser threat source localization of omni-directional laser warning system based on scattering laser detection[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0115004.
张维安, 王 龙, 任建国. 针对散射激光的全向激光告警系统激光威胁源定位技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0115004.
- 13 Milton Laikin. Optical System Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
Milton Laikin. 光学系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- 14 Cheng Shengcong, Lin Feng. Research and design of super short-focus panoramic fish-eye lens [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(2): 48-52.
陈圣聪, 林 峰. 超短焦全景鱼眼镜头的研究[J]. 光电工程, 2012, 39(2): 48-52.