

# 用于交通监控系统的光学成像镜头的设计

张善华 陈慧芳 张海艇 田维坚

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要** 设计一种用于交通监控系统的宽波段大孔径光学成像镜头,利用红外光的“大气窗口”,可在黑暗中或能见度不佳的环境中得到清晰的图像。为了对近红外光与可见光成像,采用 CCD 作为图像传感器,选用的 CCD 像元尺寸为  $4.65\ \mu\text{m}$ ,其分辨率极限为  $110\ \text{lp/mm}$ 。镜头的 F 数为 1.6,视场角为  $16.8^\circ$ ,中心波长为  $880\ \text{nm}$  的近红外光,工作波段为  $400\sim 1000\ \text{nm}$ 。通过计算光学镜头的参数,选用松纳型作为镜头初始结构,通过软件优化,在  $110\ \text{lp/mm}$  空间频率处所有视场的调制传递函数(MTF)值超过 0.3,最大畸变小于 0.1%。

**关键词** 成像光学; 光学设计; 优化设计; 调制传递函数

**中图分类号** TB851.1; O439

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP48.022202

## Design of Optical Lens for Traffic Surveillance System

Zhang Shanhua Chen Huifang Zhang Haiting Tian Weijian

(College of Opto-Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

**Abstract** The design of a wide-band and large-aperture optical lens for traffic surveillance system is presented. By utilizing the atmospheric window of infrared light, clear images are achieved in the dark or poor visibility conditions. To use near-infrared and visible light to image, the charge coupled device (CCD) is adopted as the image sensor of the lens with pixel size of  $4.65\ \mu\text{m}$  and limiting resolution of  $110\ \text{lp/mm}$ . F-number of the lens is 1.6, the field of view (FOV) is  $16.8^\circ$ , the center wavelength is  $880\ \text{nm}$  and the operating wavelength range is from  $400\ \text{nm}$  to  $1000\ \text{nm}$ . After calculating the parameters of optical lens, Sunnah type is selected as the initial structure. Through optimization, the lens has an excellent imaging performance. The modulation transfer function (MTF) is more than 0.3 at the spatial frequency of  $110\ \text{lp/mm}$ , and the maximum distortion is less than 0.1%.

**Key words** imaging optics; optical design; optimization; modulation transfer function

**OCIS codes** 220.3620;040.1490;110.3080

## 1 引言

车辆抓拍是交通监控的重要组成部分,而图像抓拍往往受制于环境亮度和能见度,在黑暗中或能见度不佳时,抓拍质量会大幅下降甚至无法实现抓拍功能,采取对红外光成像能使该情况得到有效改善<sup>[1]</sup>。本文设计了一种采用可见光与近红外光宽波段(中心波长  $880\ \text{nm}$ ,工作波段  $400\sim 1000\ \text{nm}$ )成像的光学成像镜头,并取得了良好的效果。

## 2 照相物镜各项参数的确定

### 2.1 基本参数

我国的标准民用车牌高为  $140\ \text{mm}$ ,宽为  $440\ \text{mm}$ ,由 7 个字符组成,第 2 和第 3 个字符之间有一间隔符,宽度为  $10\ \text{mm}$ 。单一字符统一宽度为  $45\ \text{mm}$ ,字符高度为  $90\ \text{mm}$ ,各字符间距为  $12\ \text{mm}$ <sup>[2]</sup>。牌照图像的实

收稿日期: 2010-10-09; 收到修改稿日期: 2010-10-20

基金项目: 浙江省重大科技专项(2008C13078)资助课题。

作者简介: 张善华(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: zhangshanhua303@126.com。

导师简介: 田维坚(1957—),男,博士,研究员,主要从事光电检测及生物医用光学等方面的研究。

E-mail: tianweijian@sina.com(通信联系人)

际大小可能由于 CCD 采集的时机不同而产生一定的缩放,但是总体比例不会发生大的变化。

该照相物镜拍摄的是 4 m 宽的车道,物距为 15~25 m,成像器件采用 ICX205AL 型面阵 CCD,其有效感光尺寸为 6.324 mm×4.762 mm,像元尺寸为 4.65 μm×4.65 μm。为了使设计的照相物镜具有通用性,满足不同的字符识别算法要求,综合考虑 16 pixel×16 pixel<sup>[3]</sup>和 30 pixel×20 pixel<sup>[4]</sup>两种像素大小输入字符识别模块,确定照相物镜的各项参数。照相物镜的光学特性参数主要有焦距( $f'$ )、相对孔径( $D/f'$ )和视场角( $2\omega$ )。

如图 1 所示, $y$  为景物水平宽度; $y'$  为 CCD 靶面上成像水平宽度; $l$  为物距; $f'$  为镜头焦距, $\omega$  为半视场角。根据成像公式可得  $f' = y'l/y$ ,暂取  $l=17$  m,代入后得  $f' = 6.324 \times 17/4 = 26.877$  mm。取  $f' = 27$  mm,经理论计算可知,在 15~25 m 范围内均能满足分辨率的要求。

相对孔径( $D/f'$ )的大小决定照相物镜接收光能量的多少,其倒数称为  $F$  数,记作  $F^\#$ 。根据瑞利判据可知,当艾里斑半径小于 CCD 像元尺寸时,CCD 可以分辨点像。已知艾里斑半径公式: $\epsilon = 1.22\lambda F^\#[5]$ , $\lambda = 0.88 \mu\text{m}$ ,令  $1.22 \times 0.88 \times F^\# < 4.65$ ,得  $F^\# < 4.3$ ,暂取  $F^\# = 2.8$ 。视场角为  $2\omega = 2\arctan[7.959/(2 \times 27)] = 16.8^\circ$ 。为了能够正确辨别出图像内的字符,根据经验,要求设计畸变小于 0.1%。

## 2.2 调制传递函数

调制传递函数(MTF)是所有光学系统性能判据中最全面的判据,特别是对于成像系统。调制传递函数表示由物经过镜头到像的调制度传递与空间频率的关系。空间频率是在像面上每毫米内黑白相间的线对数,以每毫米若干线对表示(lp/mm)。通常,MTF 值随空间频率的上升而下降。一个镜头的 MTF 值越大越好,MTF 曲线包围的面积越大越好,轴外点在子午方向和弧矢方向的 MTF 值越接近越好<sup>[5]</sup>。

由于本文采用的是 1/2 inch (1 inch=25.4 mm)CCD 传感器,像元尺寸 4.65 μm。要想使设计的镜头与该 CCD 相匹配,必须满足:CCD 像元尺寸×镜头的分辨率×2=1<sup>[6]</sup>,即该镜头的分辨率必须达到 110 lp/mm。

## 3 光学设计

### 3.1 设计思路

国内照相机普遍采用天塞和双高斯两种光学结构,前者主要用于中等孔径( $D/f' = 1:2.8$ );而后者则用于大孔径( $D/f' = 1:2$ )中等视场的照相物镜。松纳型物镜是在柯克三片式物镜的基础上发展起来的,经适当选择玻璃可做出较大孔径、中等视场的结果<sup>[7]</sup>,以此结构为原始结构进行设计。图 2 为一个全视场角为 16.8°, $F^\# = 2.8$ , $f' = 27$  mm 的初始结构示意图。

### 3.2 优化过程

初始镜头的成像质量较差,无法满足我们的要求,需要对其进行优化。用 ZEMAX 进行优化的过程如下:

- 1) 首先将各个透镜的厚度、间距、曲率半径设成可变量;
- 2) 用 REAY 操作数对入射到像面的光线进行控制,以减小像差,提高成像质量;
- 3) 用 RAED 操作数对光线的出射角度进行限制,控制在 8.4°。其目的是为了更好地和像面的 CCD 耦合;
- 4) 用 DIMX 操作数控制各个视场的畸变,达到 0.1%;
- 5) 用 FCGT 和 FCGS 分别控制各个视场子午和弧矢方向上的场曲;
- 6) 用 MTFT 和 MTFS 操作数对镜头在子午和弧矢方向的 MTF 进行控制。设定镜头的各个视场在 55 lp/mm 和 110 lp/mm 的 MTF 分别大于 0.7 和 0.3,不断对镜头进行优化<sup>[8]</sup>。

按图 2 所示的初始结构,用 ZEMAX 进行优化后可得一个全视场角为 16.8°, $F^\# = 1.6$ , $f' = 27$  mm 的光学镜头,其结构参数如表 1 所列,调制传递函数和点列图分别如图 3 和图 4 所示。从图 2 中可以看出,当  $F = 1.6$  时,设计的光学系统图像质量较差,无法满足使用要求。从表 1 可知,设计的镜头四片透镜光学材料

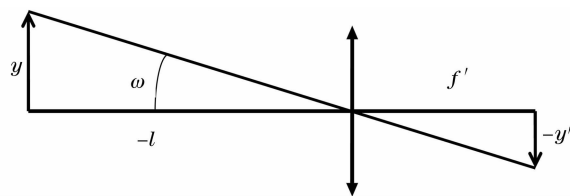


图 1 镜头的光路图

Fig. 1 Optical path layout of lens

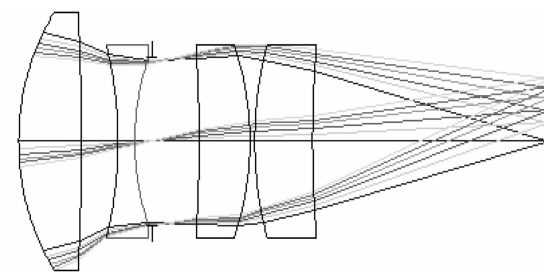


图 2 镜头的初始结构示意图

Fig. 2 Initial structure layout of lens

为:LaK11-ZF10-TK1-LaK12,其中 LaK11 和 LaK12 都是稀土玻璃,虽然具有高折射率、低色散的优良特性,有利于提高镜头质量,但在我国镧冕玻璃价格仍比较昂贵,为普通光学玻璃的数倍之多,所以我们需要更改设计方案,合理选择玻璃材料,降低镜头成本。

表1 初步优化后镜头的结构参数

Table 1 Structure data of lens after primary optimization

Surf: type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm
OBJ Standard	Infinity	$2.5 \times 10^4$		3693.7
1 Standard	19.68	6.3	LaK11	10.9
2 Standard	-74.34	5.0		10.1
3 Standard	-14.05	2.6	ZF10	6.9
4 Standard	17.01	1.5		6.5
STO Standard	Infinity	1.0		6.5
6 Standard	38.24	3.5	TK1	6.8
7 Standard	-12.44	14.3		6.8
8 Standard	8.51	3.4	LaK12	5.9
9 Standard	9.40	5.8		4.9

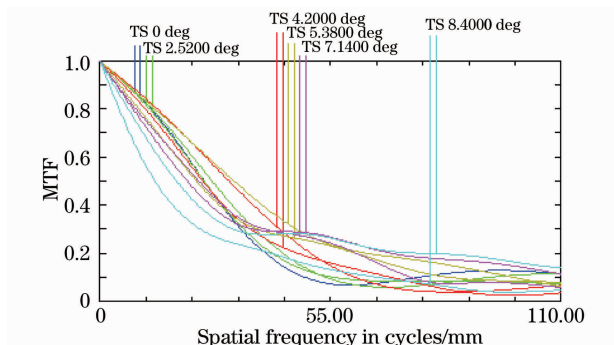


图3 初步优化后的 MTF 曲线

Fig. 3 Layout of MTF after first optimization

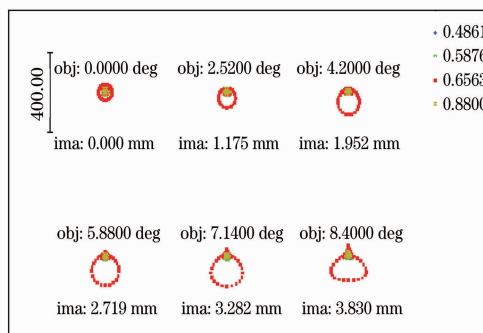


图4 初步优化后的点列图

Fig. 4 Spot diagram of lens after first optimization

从上述设计结构出发,需要用普通光学玻璃来代替镧冕玻璃,但是由于普通光学玻璃的折射率低于镧冕玻璃,色散系数也比较高,这就造成使用普通光学玻璃设计时,镜片的弯曲比较大,光线的入射角也大,因而球差较大,成像质量差。另外第4片透镜由于近似同心,加工困难较大,也需要做出调整。因此,将镧冕玻璃的透镜用普通光学玻璃代替后,将光学镜头的第1片及第4片分别用两片透镜来分解光焦度,减小透镜弯曲。另外希望进一步改善系统的成像质量,经过优化后得到 MTF 和点列图更为理想的光学成像镜头。

## 4 像质评价

光学镜头优化完成后的结构图和参数分别如图5和表2所示。图6为优化后的 MTF 图,可以看出,该镜头在所有视场的分辨率都大于 110 lp/mm,可以和选择的 CCD 相匹配。在 110 lp/mm 处所有视场的 MTF 值均大于 0.30,它们都非常接近衍射极限。在 55 lp/mm 附近,镜头的大部分视场的 MTF 值都大于 0.60,并且 0.7 以内视场的 MTF 值达到了 0.8 左右,0.85 视场的子午和弧矢方向的 MTF 值也都达到了 0.75 左右。可见该镜头有良好的成像质量,可以满足实际的使用要求。

图7为优化后的点列图,各个像差得到了很好的控制,轴上均方根弥散半径为  $4.708 \mu\text{m}$ ,0.7 视场均方根弥散半径为  $4.995 \mu\text{m}$ ,全视场均方根弥散半径为  $6.166 \mu\text{m}$ ,且全视场无渐晕。图8为系统的能量集中度曲线图,在弥散半径  $4.65 \mu\text{m}$  范围内,弥散斑 80% 以上的能量集中在像元以内。图9为畸变图,从图中可以看到,全视场畸变小于 0.05%,符合设计要求。

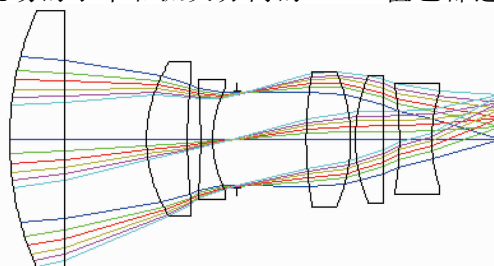


图5 优化完成后镜头的结构图

Fig. 5 Final structure layout of lens

表 2 优化完成后镜头的结构参数

Table 2 Final structure data of lens

Surf: type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Semi-diameter /mm
OBJ	Standard	Infinity		3696.3
1	Standard	29.09	ZK14	12.46
2	Standard	Infinity		11.9
3	Standard	12.80	ZK11	7.5
4	Standard	50.54		6.6
5	Standard	-61.83	ZF4	6.2
6	Standard	9.86		5.1
STO	Standard	Infinity		4.9
8	Standard	32.99	ZK11	6.5
9	Standard	-15.45		6.7
10	Standard	14.46	ZK15	7
11	Standard	Infinity		7
12	Standard	-27.91	BaF5	5.8
13	Standard	13.4		4.5

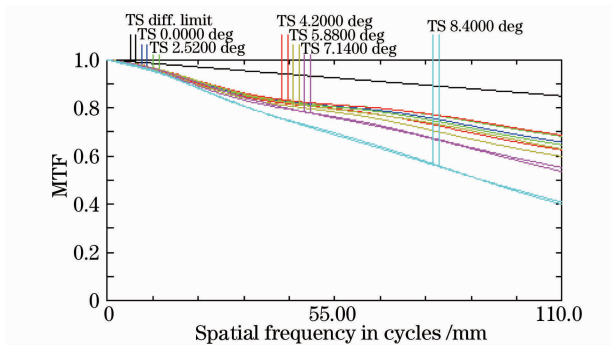


图 6 镜头的 MTF 曲线

Fig. 6 MTF curve of lens

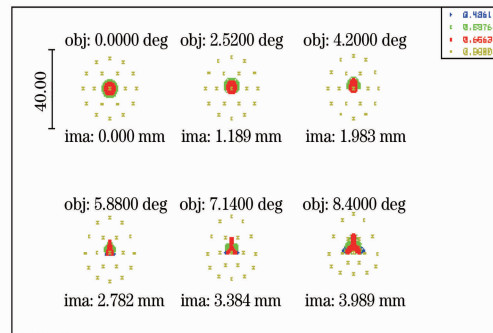


图 7 点列图

Fig. 7 Spot diagram of lens

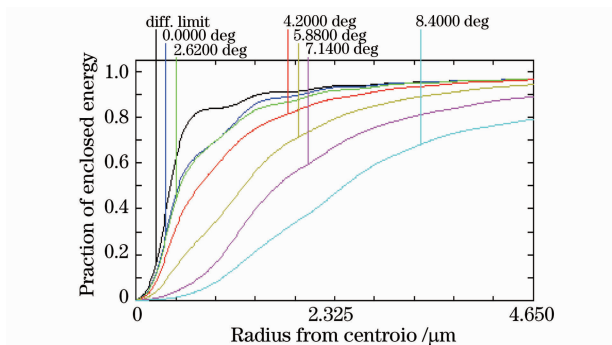


图 8 能量集中度曲线

Fig. 8 Curves of energy distribution

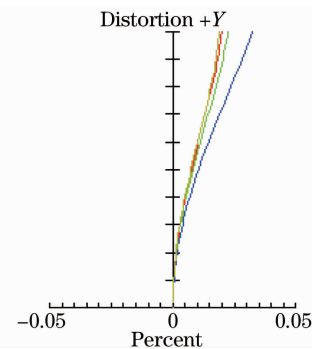


图 9 畸变图

Fig. 9 Layout of distortion

## 5 结 论

根据光学成像镜头的使用要求,采用松纳型作为初始结构,通过理论计算与 ZEMAX 的优化设计达到了技术指标。对成像镜头的像质分析表明,该设计是可行的。从两次优化后镜头的 MTF 曲线与点列图的对比中可以看到镜头的成像质量大大提高。材料替代后既方便了加工,还减少了 30%左右的成本费用。设计的光学成像镜头全部采用常用玻璃,并且没有使用非球面,应用前景好。

## 参 考 文 献

- 1 Bai Ligang, Jia Dongdong. Infrared cameras in the traffic surveillance system[J]. *China ITS Journal*, 2009, (11):89~90

- 白立岗, 贾冬冬. 红外摄像机在交通监控系统中的应用[J]. 中国交通信息产业, 2009, (11): 89~90
- 2 Ministry of Public Security of the People's Republic of China. GA 36-2007, License plates of motor vehicle of the People's Republic of China[S]. 2007
- 中华人民共和国公安部. GA 36-2007, 中华人民共和国机动车号牌[S]. 2007
- 3 Xie Shengjia, Liang Jingmin. Design and realization of license plates recognition system[J]. *Control & Automation*, 2010, **26**(1-1): 165~167
- 谢盛嘉, 梁竞敏. 车牌识别系统的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2010, **26**(1-1): 165~167
- 4 Ye Chenzhou, Yang Jie, Xuan Guorong. Number-plate character recognition[J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2000, **34**(5): 672~675
- 叶晨洲, 杨杰, 宣国荣. 车辆牌照字符识别[J]. 上海交通大学学报, 2000, **34**(5): 672~675
- 5 Xu Jian, Yan Gaoshi. Basic Course on Principle of Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. 169
- 吴健, 严高师. 光学原理教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 169
- 6 Song Jiajun, He Pingan. Design of zoom projection lens for the light engine of LCoS rear projection TV[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(1): 58~62
- 宋家军, 何平安. LCoS背投光学引擎中变焦投影物镜设计[J]. 应用光学, 2007, **28**(1): 58~62
- 7 Xiao Zexin. Engineering Optics Design[M]. 2nd ed., Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 88~96
- 萧泽新. 工程光学设计[M]. 第2版, 北京: 电子工业出版社, 2008. 88~96
- 8 Liu Maochao, Zhang Lei, Liu Peipei *et al.*. Design of lens for 3 mega-pixel mobile phone camera[J]. *J. Applied Optics*, 2008, **29**(6): 944~948
- 刘茂超, 张雷, 刘沛沛等. 300万像素手机镜头设计[J]. 应用光学, 2008, **29**(6): 944~948