

小畸变大视场 CCD 相机光学系统的设计

徐亮¹, 张国玉¹, 徐熙平¹, 高玉军²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022; 2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为提高 CCD 照相机的成像质量, 同时使镜头结构紧凑、小型化, 在大视场光学镜头的设计中, 采用非球面设计。通过理论计算和 ZEMAX 光学设计软件的优化, 给出工作波长为 $0.4 \sim 0.7\mu\text{m}$ 、全视场角为 51.15° 、相对孔径为 $1/3$ 的镜头设计实例。该系统采用“天塞型”结构, 加入两个非球面后, 在 50lp/mm 空间频率处的 MTF 值超过 0.62, 全视场畸变小于 0.1%, 像质优良。

关键词: CCD 照相机; 视场; 光学设计; 非球面

中图分类号: TB851

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2008)02-0004-03

Design of Small Distortion and WFOV Optical Lens for CCD Camera

XU Liang¹, ZHANG Guoyu¹, XU Xiping¹, GAO Yujun²

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;
2. Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

Abstract: To improve the imaging quality of CCD camera and make the lens small in size, compact in structure, the wide field of view (WFOV) optical lens with the aspheric surface was designed. A design example of a lens whose operating wavelength was $0.4 \sim 0.7\mu\text{m}$, full field of view angle was 51.15° and relative aperture was $1/3$ was given on the basis of the theoretical calculation and the optimization of optical design software ZEMAX. The MTF of the lens, which is adopted the Tessar structure and used two aspheric lenses, is better than 0.62 at the spatial frequency of 50lp/mm . The full field of view distortion of the lens is less than 0.1%. The image quality is very good.

Key words: CCD camera; field of view; optical design; aspheric surface

CCD 照相设备在图像传感领域的迅速发展, 已成为现代光电子学和测试技术中最为引人关注的研究热点之一。由于 CCD 具有灵敏度高、噪声低、成本低、小而轻等优点, 已成为研究宏观(如天体)和微观(如生物细胞)现象不可缺少的工具。在国防军事领域, CCD 成像技术在微光、夜视及遥感应用中发挥着巨大的作用。总之, 在各类光电成像领域中, 它已逐步取代了真空摄像管的成像系统^[1]。CCD 照相系统结构如图 1 所示。CCD 照相机通过光学镜头将外界的景物成像在 CCD 光敏面上, 因

此镜头的成像质量是决定 CCD 照相机性能的关键因素之一。在 CCD 照相机某些应用中, 需要采用大视场光学镜头, 在保证成像质量的前提下, 还要将尽可能多的能量集中到 CCD 光敏面上, 以提高系统的探测效率。

1 光学系统技术指标的提出

由于应用的需要, 设计一个固定物距为 380mm 的光学系统, 成像器件采用 AA5610 型面阵 CCD, 其主要参数为: 像感尺寸为 $7.176\text{mm} \times 5.319\text{mm}$ (对

收稿日期: 2007-09-13

作者简介: 徐亮(1984-), 男, 硕士研究生, 主要从事光电测控技术及仪器、光学设计的研究, E-mail: xuliang757@163.com。

通讯作者: 张国玉(1962-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间技术、光仪检测技术研究。

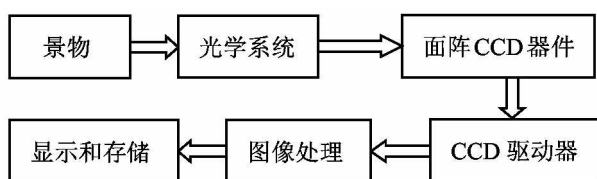


图1 CCD照相系统结构图

Fig.1 The structure layout of CCD camera

角线为8.932mm), 像元尺寸为 $2.8\mu\text{m}\times 2.8\mu\text{m}$ 。该照相物镜拍摄的是一张A4($297\text{mm}\times 210\text{mm}$)纸, 上面是英文五号字体, 为了拍摄出来的图像, 在显示系统上能够分辨出每个字母, 经实际测量可知, 每个字母笔画的最小间隔不超过 $10\mu\text{m}$, 即 100lp/mm ; 而CCD像素尺寸单元仅为 $2.8\mu\text{m}$, 即 357lp/mm , 故采用这种CCD可以满足分辨要求。要把画幅为 $297\text{mm}\times 210\text{mm}$ 的图像成像在像感尺寸为 $7.176\text{mm}\times 5.319\text{mm}$ CCD中, 必须去求出放大倍率 β :

$$\text{水平放大率: } \frac{7.176}{297} = 0.02416;$$

$$\text{垂直放大率: } \frac{5.319}{210} = 0.02533。$$

通过计算发现: 水平放大率 $<$ 垂直放大率; 为了能使景物能完全成像在CCD有效光敏单元内, 所以选择CCD的水平像感尺寸作为整个系统基准, 来计算光学系统的焦距。

(1) 焦距的计算

如图2所示, H 为景物水平高度; h 为CCD靶面上成像水平高度; l 为被摄物体至镜头的距离; f' 为镜头焦距; ω 为半视场角。

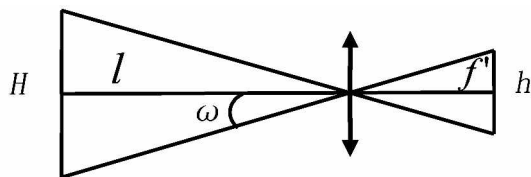


图2 镜头光路图

Fig.2 The optical path layout of lens

根据比例关系公式: $f' = \frac{hl}{H}$; 得 $f' = \frac{7.176 \times 380}{297}$

$9.1814(\text{mm})$; 所以选取焦距 $f' = 9(\text{mm})$ 。

(2) 相对孔径的选择

一般光学加工都是按经验数据选取, 这里为了提高像面照度, 选取 $\frac{D}{f'} = \frac{1}{3}$ 。

(3) 视场角的计算

垂直视场角为:

$$2\arctan \frac{210/2}{l} = 2\arctan \frac{105}{380} = 30.89^\circ;$$

水平视场角为:

$$2\arctan \frac{297/2}{l} = 2\arctan \frac{148.5}{380} = 42.69^\circ;$$

圆视场角为(对角线视场):

$$2\arctan \frac{363.743/2}{l} = 2\arctan \frac{181.8715}{380} = 51.15^\circ;$$

在设计时采用圆视场角, 所以 $2\omega = 51.15^\circ$ 。

(4) 像距的计算

根据高斯公式^[2]: $\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'}$, 则

$$l' = \frac{lf'}{l+f} = \frac{-380 \times 9}{-380+9} = 9.2183(\text{mm})$$

(5) 畸变的要求

为了能够正确辨别出画面内的字母, 根据经验, 要求设计畸变小于 0.1% 。

2 光学设计

CCD照相机常用的大视场光学镜头一般采用“双高斯型”光路结构, 而设计该镜头采用“天塞型”结构^[3]。这种结构的优点在于: 结构简单、紧凑, 外形尺寸小, 总重量轻, 因此很适用于做数码CCD镜头; 并且其光路结构基本对称, 像差相对容易校正, 像面照度比较均匀, 所以选择“天塞型”结构进行设计, 图3为一个全视场角为 40° , $D/f' = \frac{1}{4}$, $f' = 20.3(\text{mm})$ 的初始结构示意图。

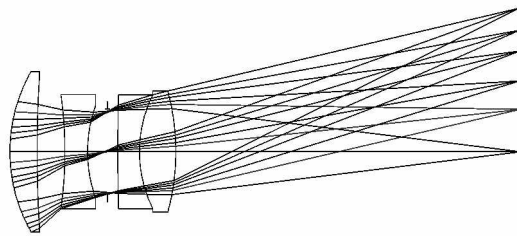


图3 镜头的初始结构示意图

Fig.3 The initial structure layout of lens

需要设计的系统, 工作波长 $0.4 \sim 0.7\mu\text{m}$, $f' = 9(\text{mm})$, $2\omega = 51.15^\circ$ (对角线视场), 系统的通光口径应该尽可能大($D/f' = \frac{1}{3}$)。如果选择如图3所示的结构形式进行优化设计, 全部采用球面, 在畸变小于 0.1% 的前提下, 镜头的F数仅能达到4, 视场也比较小($2\omega = 40^\circ$), 而且 $0.85 \sim 1$ 视场能量的集中度较低, 分别为 76.5% 和 67.5% (弥散半径 $5\mu\text{m}$ 范围内), 能量集中度曲线如图4所示。所以必须用ZEMAX进行缩放, 使其设计的技术指标和要求的一致, 同时再进行优化设计, 以致使像差得到进一步校正, 保证畸变值校正到要求的范围内。

按图3所示的初始结构形式, 用ZEMAX进行了结构参数的缩放设计, 经过优化此初始结构后, 可以得到一个视场角、相对孔径和焦距都满足设计要求的光学镜头。为了校正畸变和其他高级像差,

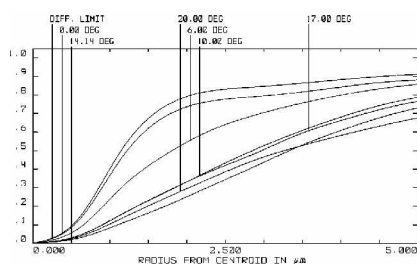


图4 初始结构的能量集中度曲线

Fig.4 The energy distribution curves of initial structure

在系统中的第一个面和第六个面,分别采用非球面来使其进一步校正,其经缩放优化后的结构图如图5所示,图6为最终校正为符合要求的畸变值(畸变的最大值在0.1%以内),表1为优化后的镜头数据。

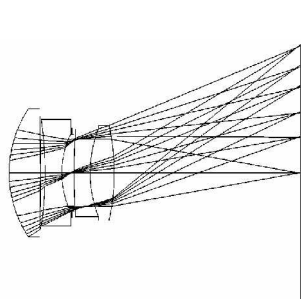


图5 缩放优化后的镜头结构示意图

Fig.5 The structure layout of lens after scaling and optimizing

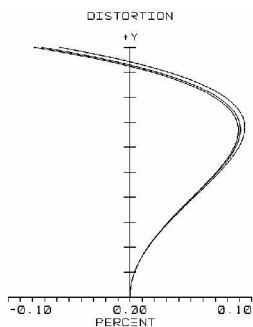


图6 缩放优化后的畸变图

Fig.6 The layout of distortion after scaling and optimizing

表1 优化后的镜头数据结构

Tab.1 The structure data of lens after optimizing

Surf	Type	Radius	Thickness	Glass	Conic
OBJ	Standard	Infinity	370		
1	Standard	3.532	1.11	ZLAF2	-0.313
2	Standard	-524.80	0.13		
3	Standard	-15.668	0.66	LAF4	
4	Standard	2.831	0.38		
STO	Standard	Infinity	0.06		
6	Standard	33.27	0.61	ZF4	478.85
7	Standard	3.565	0.95	ZLAF3	
8	Standard	-8.017	6.916		

3 像质评价

由图5、图6用ZEMAX缩放优化后的结构图和畸变图可以看出,在保证镜头的相对孔径为 $\frac{1}{3}$,视场角 $2\omega=51.15^\circ$,焦距 $f'=9(\text{mm})$ 的情况下,通过计算和ZEMAX光学设计软件的优化,为了使加工装调方便,在设计中对玻璃的光学外径和厚度都增

大,所以采用了两个非球面玻璃,这样也可以进一步校正轴外像散、球差和畸变,使最大畸变值小于0.1%,达到设计要求。图7和图8分别是优化后的能量分布曲线和传递函数。

由图7可以看出,在弥散半径 $5\mu\text{m}$ 范围内,轴上点、0.3视场、0.5视场、0.7视场、0.85视场、1视场的能量集中度分别为82.8%,85.3%,84.6%,80.7%,83.6%,80.1%,弥散斑80%以上的能量集中在像元以内。

从图8可以看出,在50lp/mm空间频率处,MTF值最小等于0.62;在40lp/mm空间频率处,MTF最小值为0.71;在30lp/mm空间频率处MTF最小值为0.79;表明该镜头像质优良,设计达到实际的使用要求[4]。

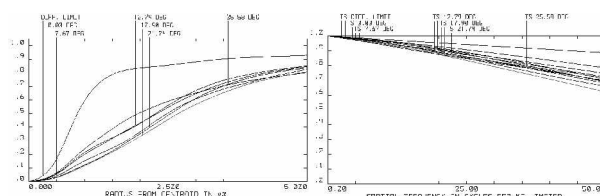


图7 能量集中度曲线

Fig.7 Curves of energy distribution

图8 光学传递函数

Fig.8 Optical transfer function

4 结论

根据光学系统设计指标要求,采用“天塞型”结构进行设计,在不改变指标要求的情况下,加入两个非球面,可以大大提高成像质量,很好的校正了轴外像散、球差和畸变[5]。针对具体的实例,通过理论计算和ZEMAX光学设计软件的优化,进行了结构紧凑、小型化、易于加工装调的CCD照相机大视场光学系统设计。对光学系统成像质量分析表明,该设计是可行的。

参考文献

- [1] 谈新权,梅晓英.高分辨率CCD图像传感器及CCD摄像机的性能评价[J].光学技术,1999,25(1):70-72.
- [2] 安连生.应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [3] 袁旭沧.光学设计[M].北京:科学出版社,1983:495-537.
- [4] 李东源,侯蓝田,周桂耀.CCD摄像机大视场光学镜头的设计[J].应用光学,2006,27(2):106-107.
- [5] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].北京:科学出版社,1994:10-41.
- [6] 陆永贵,杨建东.光学非球面先进制造关键技术的探讨[J].长春理工大学学报,2006,2(29):31-33.