

文章编号:1673-1255(2005)05-0001-03

非球面广角镜头的设计

郑荣山, 李东源, 闫秀生, 谷庆波

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

摘要:为提高 CCD 摄像机的成像质量,同时使镜头结构紧凑、小型化,在广角镜头的设计中,引入标准二次曲面和偶次非球面.根据初级像差理论,分析了非球面的位置、初始结构参数的求解规律.通过理论计算和 ZEMAX 光学设计软件的优化,给出设计实例.

关键词:CCD 摄像机;广角镜头;非球面

中图分类号:TB851.9

文献标识码:A

Design for the Lens of Wide Field of View with Aspheric Surface

ZHENG Rong-shan, LI Dong-yuan, YAN Xiu-sheng, GU Qing-bo

(Northeast Research Institute of Electronic Technology, Jinzhou 121000, China)

Abstract:To improve the imaging quality of CCD camera and make the lens small in size, compact in structure, the wide-angle space lens is designed with the conic, even aspheric surface. According to the primary aberration theory, the method to calculate the initial structure parameter of aspheric surface was presented. The result of design is shown with calculation and optimization of optical design software ZEMAX.

Key words:CCD camera; wide-angle lens; aspheric surface

随着光电子技术、光学技术的发展,CCD 成像设备已经基本取代了真空摄像管的成像系统^[1],成为现代光电子学和光电探测技术中最为关注的研究热点之一.光学镜头作为 CCD 成像设备的光学接收天线,将外界的目标及景物成像在 CCD 光敏面上,以数字化信息形式记录下来,实现大视场或远距离观察、探测.光学镜头的成像质量是决定 CCD 成像设备性能的主要因素之一.随着光学镜头的视场的增大,各种像差的校正也更加困难,如果光学镜头全部采用球面镜,在满足成像质量情况下,必须采用更多的镜片和更加复杂的结构型式,这将导致光学系统体积增大、重量增加和透过率下降.因此,在广角光学镜头设计中,采用了非球面镜头.

1 广角镜头设计分析

1.1 初始结构的选择

目前,常用的成像物镜主要有三种结构型式:三片式物镜(天塞式),双高斯式物镜及其复杂化型、反远距型物镜.“三片式物镜”由正负正分离的三片单透镜组成,如图 1 所示.共有 8 个变数,是能够同时校正 7 种像差的最简单结构.设计时玻璃的选择对结果有一定的影响,一般正透镜宜采用高折射率低色散玻璃.这种物镜的相对孔径

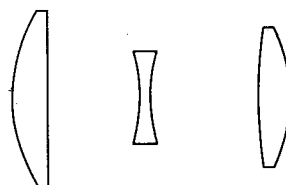


图 1 三片式物镜

收稿日期:2005-07-06

作者简介:郑荣山(1962-),男,河北任丘人,毕业于西安电子科技大学,高级工程师,研究方向为光电工程.

为 $1/4.5 \sim 1/3.5$, 视场约为 50° 左右。

“双高斯式物镜”如图2所示,以厚透镜为基础加上薄透镜而成,可以将球差校正的很好.对称型结构使垂轴像差可以自动校正,并引入一个胶合面来校正色差.所以,这种物镜的视场角约为 $45^\circ \sim 50^\circ$, 相对孔径可以达到 $1/2$. 进一步提高其性能指标,将受到轴外球差和高级像散的限制.如果把最后一块透镜分离成两块,或者把中间两个胶合厚透镜中的一个或两个变成分离透镜,可以适当提高物镜的视场或相对孔径.

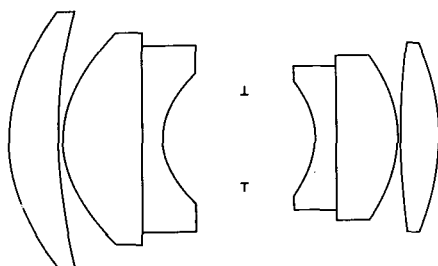


图2 双高斯式物镜

“反远距型”光路结构,如图3所示.由前、后分开的两组透镜构成,而且负光焦度透镜在前,正光焦度透镜在后,组成不对称的光路结构.至于前组和后组的具体结构,种类繁多.这类物镜近年来得到很大发展,它能同时实现大的视场角和相对孔径^[2].“反远距型”照相物镜,除了具有后工作距长的特点外,同“双高斯型”光路结构相比,由于其物方视场角 ω 大于像方视场角 ω' , 像差相对容易校正,像面照度比较均匀.

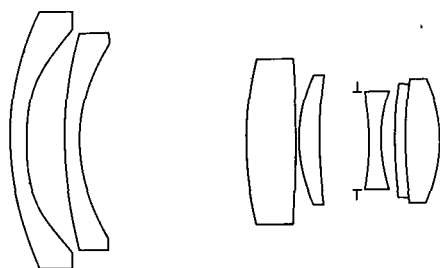


图3 反远距型光路结构

1.2 非球面的引入

如果需提高镜头的集光能力,而保持成像质量不变,必须对光学系统进行复杂化设计,即增加镜头的片数,如果系统的片数增加过多,会影响镜头的透过率,与增加镜头通光口径的想法相抵触.这时,如果适当的引入非球面,尤其是高次非球面,可以在保持镜头的总片数和玻璃总厚

度不变、成像质量不变的情况下,提高镜头的集光能力.

轴对称非球面可以是二次曲面,也可以是高次非球面.二次曲面方程一般表示为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot cr^2}} \quad (1)$$

式中:

r ——光线与曲面交点高度;

c ——顶点曲率;

k ——与二次曲面的离心率有关(对于球面 $k=0$)的常数.

将光学系统中的部分球面改为非球面后,初级像差系数的表示式为^[3]:

$$\Sigma S_I = \Sigma hp + \Sigma h^4 K;$$

$$\Sigma S_{II} = \Sigma h_p P - J \Sigma W + \Sigma h^3 h_p K;$$

$$\Sigma S_{III} = \Sigma \frac{h_p^2}{h} P - 2J \Sigma \frac{h_p}{h} W + J^2 \Sigma \Phi + \Sigma h^2 h_p^2 K;$$

$$\Sigma S_{IV} = J^2 \Sigma \frac{\Phi}{h};$$

$$\Sigma S_V = \frac{h_p^3}{h^2} P - 3J \Sigma \frac{h_p^2}{h} W + J^2 \Sigma \frac{h_p}{h} \Phi \left(3 + \frac{1}{n}\right) + \Sigma h h_p^3 K; \quad (2)$$

式中: h 为第一近轴光线在非球面上的入射高度; h_p 为第二近轴光线在非球面上的入射高度; P 、 W 为基本像差参量; Φ 为光焦度; K 为与非球面像差系数有关的常数.

利用非球面自身的高级像差较小,可以产生较大的负像差的特点,在对光学系统进行校正时,首先应根据非球面的像差校正作用确定其位置,再根据像差的残余量,给定一个初始值^[4],通过式(2)解出 K ,由 K 可求出标准二次曲面的离心率,将该非球面产生的 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_V 代入方程组(2)中相应的像差系数中去,重复上面求解过程,经过几次反复就可得到满意的解.另外,还要注意,如果非球面放置在孔径光阑的位置,主光线的入射高度 $hp=0$,这样只能矫正轴上像差,对轴外像差不起作用.如果非球面放置在视场光阑的位置,孔径光线的入射高度 $h=0$,这样只能矫正轴外像差,对轴上像差不起作用.

常用的偶次非球面可以表示为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \cdot cr^2}} + a_1 r^4 + a_2 r^6 + a_3 r^8 + a_4 r^{10} + \dots \quad (3)$$

由式(3)可以看出,采用高次非球面比二次曲面有更大的自由度.

2 设计实例

光学系统,工作在可见光波段,CCD光敏面尺寸为 $1/3$ in(对角线尺寸6 mm),像元大小为 $6\mu\text{m} \times 6.2\mu\text{m}$, $2\omega = 79^\circ$ (对角线视场),系统的通光口径应该尽可能大^[5].通过计算和ZEMAX光学设计软件的优化,进行镜头设计.

目前国际上有较大影响力的光学设计软件包括:美国ORA公司研制的CODE V和Light Tools, Sinclair Optics公司研制的OSLO, Focus Software公司研制的ZEMAX,英国Kidger Optics公司研制的SIGMA,法国OPTIS公司研制的Solo,俄罗斯圣彼得堡光机学院研制的OPAL等.美国Focus Software公司研制的ZEMAX软件运行于Windows环境下,具有友好的用户界面,使用简单,对于传统的光学设计来说,它提供的功能非常丰富,具有比较高的性能价格比^[5].

最终的设计结果如表1和图4所示,采用了2个非球面,前组负透镜后表面采用二次曲面,光阑后正透镜的前表面采用高次非球面,是8次方非球面,并且背向孔径光阑.镜头的F数达到1.6,全视场畸变小于3%.在弥散半径 $3\mu\text{m}$ 范围内,轴上,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88%,87%,88%,90%,90.5%,86%,弥散斑85%以上的能量集中在像元以内.在40 lp/mm空间频率处,边缘视场的MTF值最小,等于0.8,上述指标表明该镜头像质优良.图5、图6分别是优化后的传递函数和能量分布曲线.

表1 广角镜头的光学参量

焦距/mm	3.6
视场/(°)	80
后工作距离/mm	10
光学长度/mm	79
F数	1.6
光学外径/mm	30

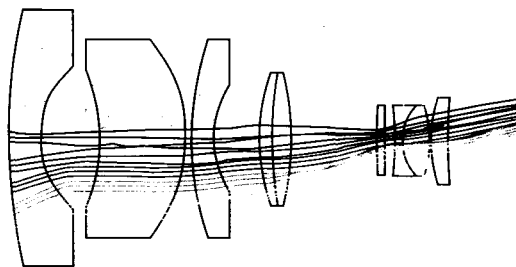


图4 采用非球面的广角镜头示意图

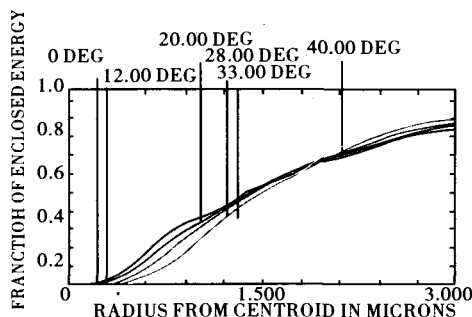


图5 采用非球面镜头的能量集中度曲线

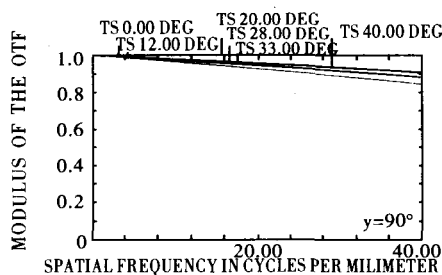


图6 采用非球面镜头的光学传递函数

3 结束语

对非球面镜头初始结构参数的求解方法进行了分析,通过理论计算和ZEMAX光学设计软件的优化,给出了非球面广角镜头的设计实例.

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,(1):70-72
- 2 丁旭明,熊望娥,梁志毅,等.70mm高速摄影机大视场长焦距光学系统研究[J].应用光学,2003,24(1):8-10
- 3 郝沛明.非球面目镜[J].光学学报,1997,17(10):1390-1393
- 4 安连生,应用光学[M].北京:北京理工大学出版社,2002.24-53
- 5 李晓彤,岑兆丰.几何光学.像差.光学设计[M].杭州:浙江大学出版社,2003.64-78