文章编号: 1002-2082(2006)02-0105-03

CCD 摄像机大视场光学镜头的设计

李东源[1,2], 张晓光[2], 闫秀生[2], 侯蓝田[1], 周桂耀[1], 郑荣山[2]
(1. 燕山大学 红外光纤与传感研究所, 河北 秦皇岛 066004; 2. 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, 在大视场光学镜头的设计中, 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, 给出工作波长为0.4~0.7 μm、全视场角为80°、相对孔径为1∶1.5 的镜头设计实例。该镜头由7 块镜片组成, 包括一个标准二次曲面和两个8 次方非球面; 在40 lp/mm 空间频率处的MTF 值超过0.85, 全视场畸变小于3%, 像质优良。

关键词: CCD 摄像机; 大视场; 光学镜头; 非球面
中图分类号: TB851.9 文献标志码: A

Design of WFOV optical lens for CCD camera

LI Dong-Yuan[1,2], ZHANG Xiao-guang[2], YAN Xiu-sheng[2],
HOU Lan-tain[1], ZHOU Gui-yao[1], ZHENG Rong-shan[2]

(1. Infrared Fiber & sensor Institute, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. 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 field of view (WFOV) optical lens with the standard quadric surface and even aspheric surface was designed. According to the primary aberration theory, the position of aspheric surface and the solution law of initial structure parameters were analyzed. A design example of a lens whose operating wavelength was 0.4-0.7 μm, full field-of-view angle was 80° and relative aperture was 1∶1.5 was given on the basis of the theoretical calculation and the optimization of optical design software ZEMAX. The MTF of the lens, which is composed of four spherical lenses and three aspheric lenses, is better than 0.85 at the spatial frequency of 40 lp/mm. The full field-of-view distortion of the lens is less than 3%.

Key words: CCD camera; wide field of view (WFOV); optical lens; aspheric surface

引言

CCD 摄像设备在图像传感领域的迅速发展, 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。在科研领域, 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 摄像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 摄像机性能的关键因素之一。在CCD 摄像机某些应用中, 需要采用大视场光学镜头, 在保证成

收稿日期: 2004-12-27; 修回日期: 2005-12-23
作者简介: 李东源(1971-), 男, 辽宁人, 博士生, 主要从事光电探测系统光学设计研究工作。E-mail: ldy710527@sina.com

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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, 以提高系统的探测距离。考虑到系统体积质量和透过率的限制, 必须在镜头的设计中引入非球面。

1　设计思想

CCD 摄像机常用的大视场光学镜头一般采用"反远距型"光路结构, 即由前后分开的2 组透镜构成, 而且负透镜在前组成不对称的光路结构。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', 因此"反远距型"光路结构的像差相对容易校正, 像面照度比较均匀。因此, 得到了广泛的应用。此类镜头典型的结构形式如图 1 所示, $D/f' \approx 1:2.5 \sim 1:3.5$, $2\omega = 60° \sim 80°$。

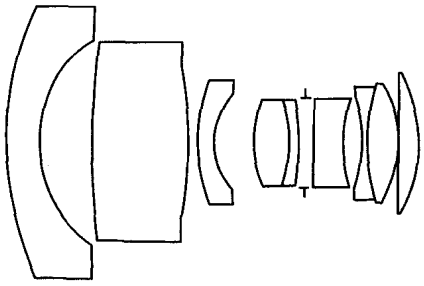


图 1　镜头的初始结构示意图

Fig. 1　The initial structure layout of lens

如果需要提高镜头的集光能力, 而成像质量不变, 必须对系统进行复杂化, 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, 与我们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, 便可在镜头的总片数和玻璃总厚度保持不变、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

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

式中, 坐标原点为曲面顶点; r 为光线与曲面交点的高度; C 为顶点曲率; k 与二次曲面的离心率有关(对于球面 $k=0$)。常用的偶次非球面可以表示为

$$z = \frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(1+k)\cdot c^2r^2}} + \alpha_1 r^4 + \alpha_2 r^6 + \alpha_3 r^8 + \alpha_4 r^{10} + \Lambda\Lambda \tag{2}$$

由(1)、(2) 式可以看出, 如果在光学系统中引入标准二次曲面, 系统就多了一个可以进行像差校正的变量 K, 采用高次非球面比二次曲面有更大的自由度。采用初级像差理论对高次非球面求解, 一般使用下面形式表示偶次非球面

$$z = \frac{1}{2R}r^2 + A_2 r^4 + A_3 r^6 + A_4 r^8 + \Lambda\Lambda \tag{3}$$

式中, A_2, A_3 和 A_4 为非球面像差系数; r^4 项即为产生初级像差项, 高于 r^6 项即为产生高级像差项[2]。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[3]为

$$\begin{aligned}
\sum S_{\mathrm{I}} &= \sum hP + \sum h^4K \\
\sum S_{\mathrm{II}} &= \sum h_pP - J\sum W + \sum h^3h_pK \\
\sum S_{\mathrm{III}} &= \sum \frac{h_p^2}{h}P - 2J\sum \frac{h_p}{h}W + J^2\sum \Phi + \sum h^2h_p^2K \\
\sum S_{\mathrm{IV}} &= J^2\sum \frac{\Phi}{h} \\
\sum S_{\mathrm{V}} &= \sum \frac{h_p^3}{h^2}P - 3J\sum \frac{h_p^2}{h}W + J^2\sum \frac{h_p^2}{h}\Phi\left(3+\frac{1}{n}\right) + \sum hh_p^3K
\end{aligned} \tag{4}$$

式中, h 和 h_p 为第一、第二近轴光线在非球面上的入射高度; P 和 W 为基本像差参量; Φ 为光焦度; K 与非球面像差系数有关。利用非球面自身的高级像差较小, 可以产生较大的负像差特点, 对大视场光学系统进行校正时, 首先根据非球面应起的校正像差作用确定其位置, 而且非球面最好位于对轴外像差影响较大的面, 再根据像差的残余量, 给定一个初始值, 通过公式(4) 解出 K, 由 K 求出标准二次曲面的离心率或高次非球面的非球面像差系数。将该非球面产生的 S_{I}, S_{II}, S_{III} 及 S_{V} 代入方程组(4) 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。

2　设计实例

我们需要设计的系统, 工作波长 0.4～0.7 μm, CCD 光敏面尺寸 4.9 mm × 3.7 mm, 像元 6.2 μm × 6 μm, $f' \approx 3.6$ mm, $2\omega = 80°$(对角线视场), 系统的通光口径应该尽可能大。如果选择如图1 所示的结构形式, 全部采用球面, 在畸变小于4% 的前提下, 镜头的 F 数仅能达到1.8, 而且0.85～1 视场能量的集中度较低, 分别为70% 和50% (弥散半径3 μm 范围内)。图2 和图3 分别是优化后的传递函数和能量分布曲线。

考虑采用非球面, 根据分析, 影响镜头通光口径增加的主要因素是轴外像散、球差和畸变。根据上面讨论的设计思想, 通过计算和 ZEMAX 光学设计软件的优化, 最终在实际设计中采用了3 个非球

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

面, 其中2 个位于凸面上, 易于加工。前组负透镜后表面采用二次曲面, 光阑前后2 个正透镜的前表面采用高次非球面, 都是8 次方非球面, 并且背向孔径光阑。在镜头总片数保持不变、总长度减小、玻璃总厚度、光学外径及质量基本不变的情况下, 镜头的F 数达到1. 5, 全视场畸变小于3%。在弥散半径

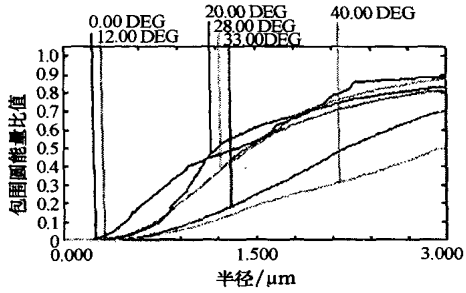


图2　能量集中度曲线

Fig 2　Curves of energy distribution

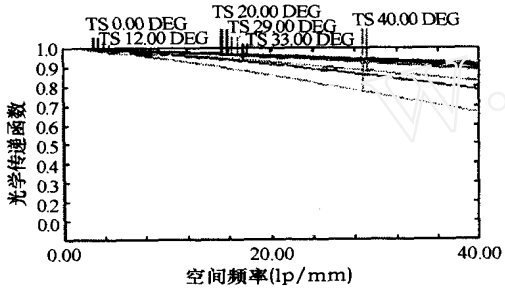


图3　光学传递函数

Fig 3　Optical transfer function

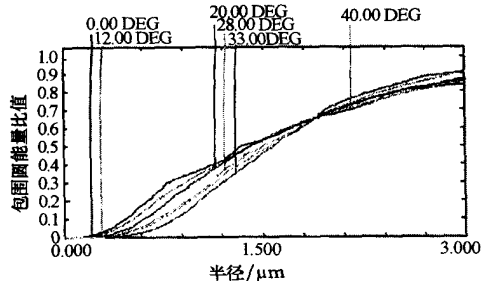


图4　采用非球面镜头的能量集中度曲线

Fig 4　Energy distribution of lens with aspherics

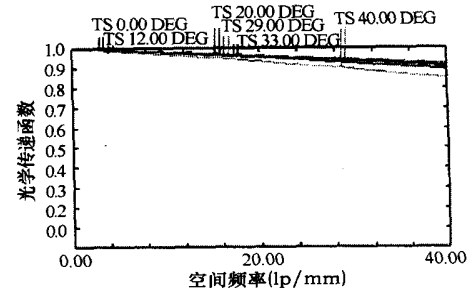


图5　采用非球面镜头的光学传递函数

Fig 5　Optical transfer function of lens with aspheric surface

3 μm 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86. 7%, 87%, 87. 2%, 90%, 91%, 85. 6%, 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. 85, 表明该镜头像质优良。图4 和图5 分别是优化后的传递函数和能量分布曲线。

3　结论

进行CCD 摄像机大视场光学镜头设计时, 适当引入非球面, 可以大大提高成像质量, 并且使光学镜头结构紧凑, 小型化。本文对非球面初始结构参数的求解规律进行了分析, 通过理论计算和ZEMAX 光学设计软件的优化, 给出了具体的设计实例。对设计实例成像质量的分析表明, 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] 史光辉. 含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计[J]. 光学学报, 1998, 18(2): 239-241.

[3] 郝沛明. 非球面目镜[J]. 光学学报, 1997, 17(10): 1390-1393.

[4] 丁旭明, 熊望娥, 梁志毅, 等. 70 mm 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.

[5] 孔祥蕾, 郝沛明. 变焦扩束系统的光学设计[J]. 应用光学, 2001, 22(5): 7-11.

[6] 安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.

[7] 沈为民, 薛鸣球, 余建军. 长波红外广角地平仪镜头的光学设计[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 329-332.

[8] 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.

[9] 张慧娟, 王肇圻, 赵秋玲, 等. 折/衍混合增强现实头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2004, 24(1): 121-124.

[10] 左保军, 张爱红. 成像光谱仪的光学系统设计[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 187-189.

[11] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 10-41.

[12] MILTON LAIKIN. Lens Design[M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2001: 121-132.

[13] 潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2003, 23(12): 1475-1477.

[14] 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 216-218.

[15] 萧泽新. 工程光学设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net