

· 光学设计 ·

小型无人机载高分辨率物镜设计

朱海滨¹, 张远健¹, 朱大略¹, 周亮², 王良²

(1.吉林东光精密机械厂, 长春 130103; 2.中国人民解放军陆军装甲兵军事代表局驻长春地区军事代表室, 长春 130033)

摘要: 首先根据客户提出的要求, 对小型无人机载物镜的光学指标参数进行了计算, 从而得到物镜的光学设计指标, 然后依据指标设计了一款焦距为 52.5 mm、相对孔径为 F/2、视场角为 12°、奈奎斯特频率为 286 lp/mm 的可见光波段折射式小型无人机物镜, 接收器件选用单个像元尺寸为 1.75 μm 的 CMOS 器件, 采用“小像差互补理念”降低了光学系统的公差灵敏度, 然后对设计结果进行了公差分析。公差分析结果表明很好的满足了光学设计指标要求。

关键词: 无人机物镜; 光学设计; 公差分析

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2016)-03-0004-05

Design of High Resolution Objective on Small UAV

ZHU Hai-bin¹, ZHANG Yuan-jian¹, ZHU Da-lue¹, ZHOU Liang², WANG Liang²

(1. Jilin Dongguang Factory of Precision and Machinery, Changchun 130103, China;

2. The Military Representative Office in Changchun of Armoured Force Military Representative Bureau of Chinese People's Liberation Army, Changchun 130033, China)

Abstract: According to the requests of the customers, the optical parameters of the objective on small UAV are calculated at first, and the optical design characteristics of the objective are obtained. And then based on the characteristics, a small refractive objective with 52.5 mm focal length, F/2 relative aperture, 12° field of view and 286 lp/mm Nyquist frequency at visible light waveband on UAV is designed. CMOS devices with 1.75 μm single pixel are chosen as receiving devices and small aberration complementary conception is adopted to reduce the tolerance sensitivity of the optical system. Finally, the tolerance analysis is performed to the design result. The results of tolerance analysis show that optical design characteristic requirement can be better met.

Key words: objective on unmanned aerial vehicle (UAV); optical design; tolerance analysis

小型无人机是指一般飞行速度在 200 km/h 以内, 高度不超过 2 km 的无人机。近年来, 因为小型无人机体积小、隐蔽性好、机动灵活、成本低、无人员伤亡等优点, 它被广泛应用于军事和民用领域。在军事领域, 它适合部队空中侦察、战场损伤评估、搜索和救援行动等。在民用领域, 它主要用于地质勘探, 环境监测以及气象探测等^[1-3]。各国对无人机的研制投入和采购需求正在呈现爆发性增长。而小型无人机载物镜的设计是其关键技术之一, 它成像质量的好坏及体积质量起着至关重要的作用。

首先根据客户提出的需求推导出光学设计的指标, 再根据光学设计指标设计了一款高分辨率的可见光波段折射式无人机物镜, 采用小像差互补理念降低了光学系统的公差灵敏度, 设计结果很好的满足了光学设计指标要求。

1 系统结构及参数确定

客户要求设计一款小型无人机物镜, 实现在晴朗无云的天气下, 太阳高度角-2°以上, 在 1 500 m

的高空飞行能分辨地面0.15 m的目标,体积小和质量轻。从以下几方面对系统进行分析,并进而确定其合理的参数。

1.1 接收器件

用于无人机的接收器件主要有两种:一种是胶片;另一种是图像传感器。胶片型无人机照相分辨率高,但实时性差,后续图像处理工作也比较繁琐,故现在一般都不采用。图像传感器又分为CCD与CMOS两种器件,两种器件相比,CMOS器件具有功耗低、集成能力强、体积小、动态范围宽、单个像元尺寸更小等优点;不足之处是信噪比低、光电灵敏度不高。随着现代工艺水平的不断发展,CMOS器件的性能得到很大地改善和提高,不足之处与CCD器件已经相差不大,而其诸多显著的优点被各大科研院所喜爱,已经有逐步替代CCD器件的趋势,如现在的数码单反,其成像器件基本都已经由CCD器件换为CMOS器件。

综上所述,出于CMOS的单个像元尺寸小可以获得高空间分辨率和图像传感器实时性强的考虑,选用像元尺寸为1.75 μm的2/3 inch CMOS器件,具体参数见表1。

表1 CMOS器件光学参数

光学参数	参数值
有效感光面积	8.8 mm×6.6 mm
像元尺寸	1.75 μm
快门速度	智能自动/人工预置(1" ~ 1/1,600")
感光度	ISO 100 ~ 128 00

1.2 焦距

按地面分辨率对应3个像元计算,有下式

$$\frac{f'}{H} = \frac{\text{单个像元尺寸} \times 3}{\text{地面分辨率}} \quad (1)$$

式中, H 是航高; f' 是物镜焦距。

把单个像元尺寸=1.75 μm、地面分辨率=0.15 m, $H=1\ 500$ m代入式(1)得 f' 为52.5 mm。

1.3 视场

相机的视场角 θ 、焦距 f' 和图像传感器靶面尺寸 B 的关系如式(2)所示。

$$\theta = 2 \arctan \frac{B}{2f'} \quad (2)$$

把焦距 $f'=52.5$ mm、 $B=11$ mm代入式(3)得 $\theta=12^\circ$ 。

1.4 奈奎斯特频率

$$N = \frac{1}{2a} \quad (3)$$

式中, a 是CMOS单个像元尺寸;把 $\alpha=0.001\ 75$ 代入式(3)得 $N=286$ lp/mm。

1.5 相对孔径

物镜的相对孔径的选取需要从光学系统分辨率和光学系统对最小景物照度即能量需求两方面考虑。

1.5.1 相对孔径与光学系统分辨率的关系

由于物镜要与CMOS器件匹配,所以光学系统的分辨率要综合二者一起考虑。由于照相物镜系统属于大像差系统,故物镜的分辨率采用道威判断。

$$N' = \frac{1766}{F} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)知,当 F 数小于6.2时,物镜的分辨率受到CMOS器件的制约,整个光学系统的分辨率为CMOS器件的奈奎斯特频率,反之, F 数大于6.2时,整个光学系统的分辨率为物镜在道威判断下的分辨率。为了全部发挥CMOS器件的作用,则要求 F 数小于6.2,相对孔径大于1:6.2。而从相对孔径与衍射极限传函曲线的高低即反差的匹配情况来看,相对孔径越大,衍射极限传函曲线越高,在光学设计软件ZEMAX可以直观的看到这一点。

图1是相对孔径1:2的调制传递函数图。

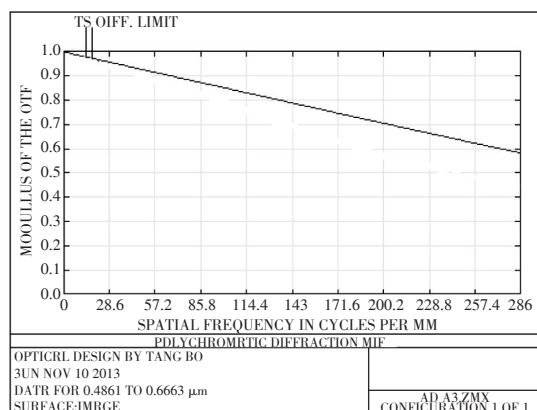


图1 调制传递函数图(相对孔径1:2)

从图1可以看出,相对孔径1:2时,在286 lp/mm下,衍射极限传函值为0.59。图2是相对孔径1:4的调制传递函数图。

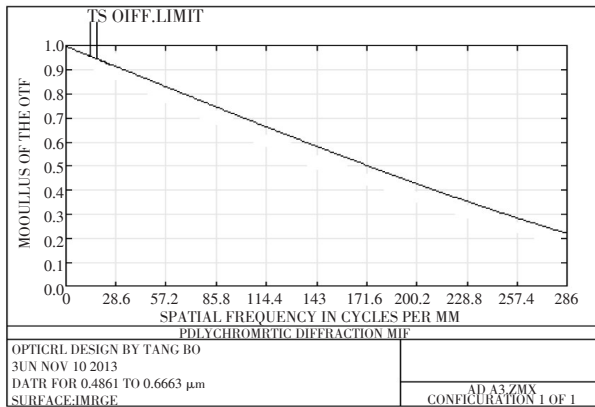


图2 调制传递函数图(相对孔径1:4)

从图2可以看出,相对孔径1:4时,在286 lp/mm下,衍射极限传函值为0.22。受衍射极限的限制,光学设计结果的传函值是不会大于衍射极限传函值的,所以为了提高光学设计结果的传函值,要尽量增大相对孔径。

1.5.2 相对孔径与最小景物照度需求的关系

相对孔径与最小景物照度需求的关系^[4]式为

$$F = \sqrt{\frac{E \cdot S \cdot t}{270}} \quad (5)$$

式中, E 为最小景物照度; F 是相对孔径的倒数; S 与ISO感光度有关,其大小为ISO感光度的四倍; t 为曝光时间。表2是不同太阳高度角、不同天气情况下的地面照度变化表。

表2 不同太阳高度角、不同天气情况下的地面照度变化表

太阳位置	太阳高度角	时间	晴朗无云 /lx	阴天无云 /lx	多云 /lx
地平	10°	白天	9 000	4 000	3 000
线上	5°		4 000	3 000	2 000
地平	0°	黎明		700	240
线下	-1°	黄昏		500	75
	-2°			200	28

从表2知,要想在无云的天气下太阳高度角-2°以上工作, E 取200 LX。

ISO感光度为800时, S 值为3 200,曝光时间 t 取1/600 s。

把 $E=200$ LX、 $S=3\ 200$ 、 $t=1/600$ s代入式(5)得 $F=2$,即相对孔径为1:2。

从上述两方面及对物镜光学系统小型化、结构简单化等方面的综合考虑,取相对孔径为1:2。

综上,得物镜设计指标如表3所示。

表3 物镜设计指标

光学参数	参数值
焦距	52.5 mm
相对孔径	1:2
视场角	12°
波段	486 ~ 656 nm
分辨率	在286 lp/mm, MTF > 0.3

2 物镜光学系统设计

2.1 光学系统选型

在光学设计指标给定后,选择光学系统的结构型式是光学设计的首要工作,这需要综合考虑设计指标、加工、装调难度以及加工成本来作出选择。

光学系统有折射式、折反式、反射式三种结构型式,其中折射式系统具有成像质量高、视场角大等优点,缺点是筒长不易做小。

折反式系统具有筒长短的优点,但存在光学遮拦,视场角较小;反射式系统具有宽谱段、筒长短的优点,但加工装调难度大且视场角较小^[9]。它又分为同轴反射式和离轴反射式两种,其中同轴反射式由于有中心遮拦,所以像质较低,离轴反射式无中心遮拦,成像质量高。

依据设计指标综合考虑,由于物镜成像质量要求很高,所以只能选择折射式或离轴反射式系统。而离轴反射式系统视场角不能做的太大,所以光学结构采用折射式形式,这样也有利于降低装调难度,提高成像质量。

根据焦距、相对孔径和视场选用双高斯作为初始结构再加以复杂化。

2.2 物镜复杂化方案

由于物镜设计^[6-8]属于大相对口径系统,视场角相对而言不大,所以校正轴上像差是像差平衡的重点。在光阑位置附近的透镜采用整体弯曲的方法来校正轴上像差。光阑位置置于光路中间附近以

控制轴外像差。入射角大的面使其弯向光阑来降低高级像差。

因为本设计物镜的奈奎斯特频率要达到 286 lp/mm, 相较常规物镜而言, 如此高的分辨率不仅光学设计难度大, 而且还要保证物镜能够加工、装调, 因此在设计过程中就要重点兼顾加工、装调的公差要求。

对物镜初始像差校正阶段采用“小像差互补理念”^[9], 使得设计与兼顾加工、装调公差可同步进行, 此理念是基于初级像差理论提出的, 分析了初级像差与公差灵敏度的关系, 通过控制初级像差来降低公差灵敏度, 在物镜像差校正阶段控制各元件表面均匀承担初级像差, 并且各元件表面的初级像差值在满足像质设计要求的前提下尽量要以小像差值相互抵消。最后在优化后期放开对初级像差的控制, 用 ZEMAX 光学设计软件中的 TOLR 公差敏感度操作数^[10]来进行二次优化, 此时对前面的“小像差互补理念”起到一个修正作用, 消除由于针对初级像差理论推导得出的结论对于大相对孔径系统的精确度问题, 若像差校正初始阶段就采用 TOLR 公差敏感度操作数, 则软件计算需要花费的时间太长, 所以对于设计开始阶段使用此方法是不可取的。

2.3 物镜设计结果

光学系统如图 3 所示。系统共由 8 片透镜组成, 面型均为普通球面, 没有诸如非球面、衍射面等特殊面型。初级像差分布系数如图 4 所示。各透镜表面承担的初级像差大小均匀。调制传递函数如图 5 所示。在奈奎斯特频率 286 lp/mm 下, 各个视场 MTF 均大于 0.4。

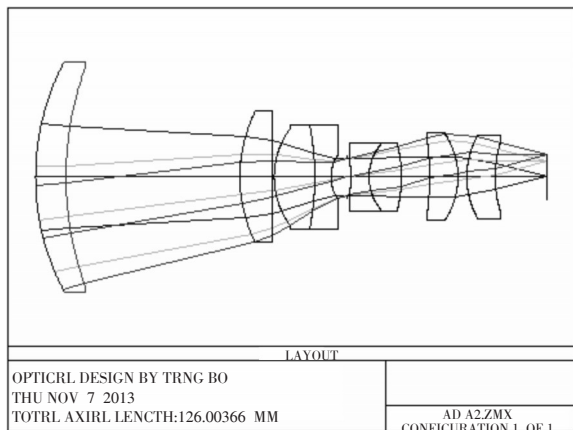


图3 光学系统图

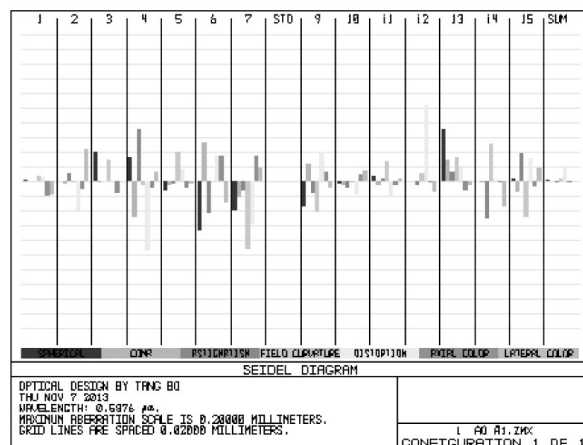


图4 初级像差系数直方图

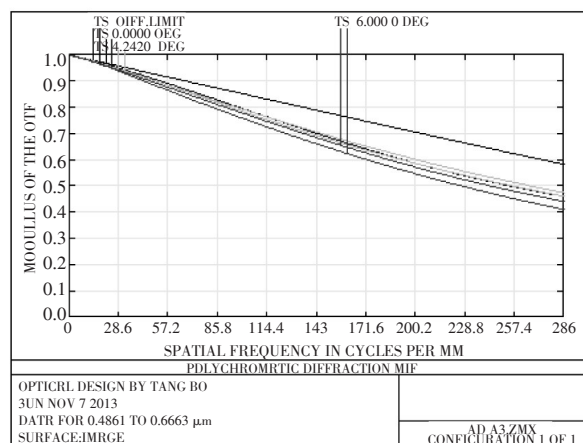


图5 调制传递函数图(286 lp/mm)

2.4 公差分析

在 286 lp/mm 处, 采用 3 个视场传函的平均值作为评价标准, 标准值为 0.456 781 85。根据厂家加工、装调的能力, 在 286 lp/mm 处针对光圈变化 1 个、局部光圈变化 0.2 个、透镜中心厚度变化 0.02 mm、透镜间隔变化 0.02 mm、光学零件表面中心偏 0.01 mm、装调透镜光轴与机械轴偏差 0.01 mm、折射率变化 0.000 5、阿贝数变化 0.5 综合误差作用下, 在 ZEMAX 软件模拟上述变化, 得到如表 4 所示结果。

表4 蒙特卡罗公差分析结果

MTF(286 lp/mm)	
90%>	0.347 119 64
80%>	0.354 628 22
50%>	0.382 821 47
20%>	0.407 267 18
10%>	0.422 888 11

由表4可知,由于加工装调误差引起的下降后的MTF传函值最小为0.347 119 64,满足设计指标中MTF传函大于0.3的要求。

3 结论

设计了一种应用于低空的小型无人机物镜,首先根据客户提出的要求,对小型无人机电物镜的指标参数进行了计算,从而得到物镜的光学设计指标,然后依据指标确定了光学系统的结构型式,在设计物镜的同时兼顾了加工、装调的公差,最后根据厂家的加工、装调实际能力对物镜设计结果进行了公差分析,公差分析结果表明很好的满足了设计指标要求。

参考文献

- [1] IBRAHIM A W N, PANG W C, GERALD S G L, et al. Moving objects detection and tracking framework for UAV-based surveillance[C]//2010 Fourth Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology, Singapore, 2010:456-461.
- [2] CHAO H Y, AUSTIN M J, HAN Y D, et al. AggieAir: To-

wards low-cost cooperative multispectral remote sensing using small unmanned aircraft systems [M]. Advances in geoscience and remote sensing, 2009: 463-490.

- [3] YI L, JUHA H, ANTONI J. Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 426-430.
- [4] 刘仲宇,张涛.超小型无人机相机系统关键技术研究[J].光电工程,2013,40(4):83-84.
- [5] Muller K. Fast and accurate three-dimensional reconstruction from cone-beam projection data using algebraic methods[D]. The Ohio State University, 1998: 32-43.
- [6] ZHOU Hua-peng, CHEN Wei-jian, TANG Shao-fan. Optical system design for lens with relative aperture of 1:1[J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(1): 55-57.
- [7] YANG Li-hua, FAN Xue-wu, ZOU Gang-yi. Design of large-aperture camera lens working in wide spectral range[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(6): 925-928.
- [8] Li Yu-yao, Tang Yong, Lin Zhao-heng, et al. Design of apochromatism objective lens aerial camera based on large frame array CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(11): 3183-3185.
- [9] 张远健,唐勇.光学系统设计中降低公差灵敏度的方法[J].光电工程,2011,38(10):128-133.

(上接第3页)

孔径设计,并通过分束片将中、长波分离;因系统视场较大,在光路中设置了场镜校正了RC系统中的剩余像差;分别设计了中、长波中继镜组,减小杂散辐射,同时对分束片带来的像差进行了校正;最终对组合系统性能进行了整体设计,减少了镜片数量,系统性能良好。

参考文献

- [1] 郭晟男,付跃刚,刘智颖,等.红外搜索跟踪系统中的双波段共孔径光学设计[J].光电技术应用,2013,28(6):35-39.
- [2] 张兴德,李荣刚,刘琳,等.红外双波段成像系统的研究与发展[J].激光与红外,2010,40(8):801-804.
- [3] 刘玉超,张科.基于双色红外探测比较研究[J].计算机仿真,2010,27(2):55-58.

- [4] 郭玮芳,潘玉田,张雷.双波段红外图像融合算法研究[J].弹箭与制导学报,2009,29(4):198-200.
- [5] 蔡占恩,刘朝晖,黄静,等.大视场大相对孔径双波段夜视R-C系统设计[J].应用光学,2010,31(4):525-528.
- [6] 樊学武,马臻.红外双波段卡塞格林光学系统设计[J].光子学报,2003,32(4):463-465.
- [7] 孙赤全,赵侃,孟军合.共孔径红外双色离轴全反射系统[J].红外与激光工程,2012,41(3):729-733.
- [8] 吴凡,王柏林,唐树威.周视扫描成像红外双波段光学系统设计[J].光电技术应用,2010,25(6):27-30.
- [9] 邵帅.多波段共孔径红外系统光机热一体化设计[J].仪器仪表学报,2013,34(2):387-393.
- [10] 潘君骅.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州:苏州大学出版社,2004.
- [11] 杨新军,王肇圻,母国光,等.红外双波段消热差系统设计[J].光电子·激光,2004,15(4):385-389.