

# 机载双波段共口径光电瞄准光学系统设计

陈晓阳, 高明\*

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 针对机载双波段共口径光电瞄准系统反射式成像存在中心遮拦与装配难度大的问题, 设计了一种前置光路折射式成像的共口径光学系统。应用二组元变焦理论对光学系统的初始结构进行了计算。基于最小可分辨温差 (MRTD) 模型分析了红外系统的作用距离, 根据瑞利判据对系统前向像移进行了补偿残差分析。机载双波段共口径光电瞄准光学系统工作在  $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$  的波段内, 实现了  $36\sim 180\ \text{mm}$  的  $5\times$  连续变焦, 工作在  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的波段内, 实现了三视场变换, 三视场三档焦距之比为 3,  $F$  数为 4。设计结果表明, 在  $-40\sim 60\ ^\circ\text{C}$  的工作环境中, 光学系统经过光学被动式无热化处理, 满足系统成像质量要求。

**关键词:** 双波段; 共口径; 消热差; MRTD

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200322

## Design of airborne dual-band common aperture photoelectric aiming optical system

Chen Xiaoyang, Gao Ming\*

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of central obstruction and assembly difficulties in the reflective imaging of the airborne dual-band common-aperture photoelectric sighting system, a common-aperture optical system with front-light path refraction imaging was designed. The initial structure of the optical system was calculated using the two-component zoom theory. Based on the Minimum Resolvable Temperature Difference (MRTD) model, the operating distance of infrared system was analyzed, and the compensation residual error of forward image motion was analyzed according to Rayleigh criterion. When the airborne dual-band common-aperture photoelectric aiming optical system worked in the waveband of  $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$ , it can achieve  $5\times$  continuous zoom from 36 to 180 mm. When it worked in the  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  waveband, it can realize three fields of view transformations, and the ratio of the three focal lengths of the three fields is 3. The working  $F$  number was 4. The design results show that, in the working environment of  $-40\sim 60\ ^\circ\text{C}$ , the optical system undergoes optical passive athermalization treatment, which meets the requirements of system imaging quality.

**Key words:** dual band; co-aperture; athermalization; MRTD

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2020-10-19

基金项目: 陆军装备 XXX 预研项目 (301XXX102); 陕西省重点实验室项目 (17JS052)

作者简介: 陈晓阳, 男, 硕士生, 主要从事光学设计理论及技术方面的研究。

通讯作者: 高明, 男, 教授, 博士, 主要从事光学设计、光电测试技术方面的研究。

## 0 引言

为了适应与满足复杂多变的应用环境需求,无人机电载光电瞄准系统需要多载荷一体化,来提高无人机电对目标的辨别打击能力。目前,机载双波段共口径系统前置光路更多的采用反射式成像,同轴反射存在中心遮拦能量低、离轴反射存在加工装配难度大的问题,折射式成像应用较少。在无人机光电瞄准系统方面的研究,以色列、美国早于其他西方国家,国内起步较晚。以色列最早的“先锋”无人机配备了四种光电传感器,最先做到多载荷一体化,以及美军 MQ-9“捕食者”无人攻击机采用雷神公司研发的 MTS-B 多光谱瞄准转塔,光电传感器采用共口径设计<sup>[1]</sup>。2015 年, Han 等<sup>[2]</sup>设计了一款共口径可见/中波红外/长波红外折反系统,该系统为一种经典的卡塞格林结构,焦距分别为 880、880、220 mm,视场分别为 0.86°、0.8°、3.2°,F 数分别为 4.3、4.3 与 1.3。由于采用卡塞格林结构,存在中心遮拦、能量低的问题。2016 年,Alaaeldin Mahmoud 等<sup>[3]</sup>设计了一款共口径可见/短波红外共折射光学系统,焦距为 150 mm,视场为 10°,F 数为 8.7。满足无人机遥感成像的质量以及体积、重量小的要求。2018 年,电子科技大学曾钦勇<sup>[4]</sup>采用 R-C 卡塞格林结构设计了一款共口径可见/中波制冷红外折反式光学系统,应用于快速空天平台光电远程探测,但该系统存在中心遮拦、能量低等问题。2019 年,长春理工大学尹晓<sup>[5]</sup>设计了一款分孔径可见偏振与长波红外两档变焦成像,应用于特殊案发现场对物证的搜寻,但该系统不能解决两个双波段系统光轴一致性的问题。

文中设计了一款可见/中波制冷型红外共口径折反式成像系统应用于机载光电瞄准系统,前置光路采用折射式成像,该系统可实现大范围对目标的搜索、小范围对目标的识别,同时,该系统能够在昼夜交替、烟雾密集的工作环境下发挥可见/红外成像的优势,实现两波段之间无需切换镜头一起对目标进行搜索,达到高成像性能的技术要求,即对目标实现精确探测与识别。

## 1 机械补偿变焦理论

变焦光学系统是解决大视场搜索、小视场识别的

最佳方案。文中采用机械补偿变焦方式,变倍组作线性移动,补偿组沿光轴作相应的移动,补偿像面位置稳定。

变焦光学系统的变倍比<sup>[6]</sup>:

$$M = \frac{\beta_2^* \beta_3^*}{\beta_2 \beta_3} \quad (1)$$

式中:  $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 和 $\beta_2^*$ 、 $\beta_3^*$ 是变焦前后变倍组与补偿组的垂轴放大率。由物方截距等于物距与物方焦距之和以及像方截距等于像距与像方焦距之和,再结合倍率公式,可推导出变倍组与补偿组的垂轴放大率为:

$$\beta_2 = \frac{f'_2}{f'_2 + f'_1 - d_{S12}} \quad (2)$$

$$\beta_3 = \frac{f'_3}{f'_3 + f'_2(1 - \beta_2) - d_{S23}} \quad (3)$$

式中:  $f'_1$ 、 $f'_2$ 与 $f'_3$ 分别是前固定组、变倍组与补偿组的焦距;  $d_{S12}$ 是前固定组与变倍组之间的间隔;  $d_{S23}$ 是变倍组与补偿组之间的间隔。为了保持像点位置不变,变倍组的物点与补偿组的像点之间的距离  $D$  为常量:

$$D = l_2 - l_2 + l_3 - l_3 \quad (4)$$

式中:  $l_2$ 、 $l'_2$ 与 $l_3$ 、 $l'_3$ 分别是变倍组与补偿组变焦前的物方截距与像方截距。结合理想光学系统的高斯公式,可得变倍组的物点与补偿组的像点之间的距离  $D$  为:

$$D = f'_2 \left( -\beta_2 + 2 - \frac{1}{\beta_2} \right) + f'_3 \left( -\beta_3 + 2 - \frac{1}{\beta_3} \right) \quad (5)$$

同理,可得变焦后变倍组的物点与补偿组的像点之间的距离  $D^*$  为:

$$D^* = f'_2 \left( -\beta_2^* + 2 - \frac{1}{\beta_2^*} \right) + f'_3 \left( -\beta_3^* + 2 - \frac{1}{\beta_3^*} \right) \quad (6)$$

为了保持变焦后像面位置稳定不变,则  $D=D^*$ 。则 $\beta_2^*$ 与 $\beta_3^*$ 之间的关系为:

$$f'_3 \left( \frac{1}{\beta_3^*} + \beta_3^* - \frac{1}{\beta_3} - \beta_3 \right) + f'_2 \left( \frac{1}{\beta_2^*} + \beta_2^* - \frac{1}{\beta_2} - \beta_2 \right) = 0 \quad (7)$$

将上式改写为:

$$\beta_3^{*2} - b\beta_3^* + 1 = 0 \quad (8)$$

公式 (8) 中,  $b$  满足:

$$b = -\frac{f'_2}{f'_3} \left( \frac{1}{\beta_2^*} - \frac{1}{\beta_2} + \beta_2^* - \beta_2 \right) + \left( \frac{1}{\beta_3} + \beta_3 \right) \quad (9)$$

对公式 (6) 求导, 可以得出补偿组的放大率变化曲线极值发生在变倍组的放大率等于-1。设变倍组规范化焦距  $f_2^* = -1$ ,  $\beta_2^* = -1$ , 将公式 (3) 代入公式 (9), 化简可得:

$$\frac{A}{f_3' - A} - \frac{E}{f_3'} = b - 2 \quad (10)$$

式中:  $A = 1 - \beta_2 + d_{S23}$ ;  $E = 3 + \frac{1}{\beta_2} + d_{S23}$ 。

文中采用的是负组变倍正组补偿的变焦方式, 所以补偿组的焦距应满足:

$$f_3' \leq \frac{(3A + E) - \sqrt{(9A - E)(A - E)}}{8} \quad (11)$$

或

$$\frac{(3A + E) + \sqrt{(9A - E)(A - E)}}{8} \leq f_3' < d_{S23} + \frac{f_1'}{f_1' - 1} \quad (12)$$

## 2 系统设计指标

该系统工作在大气能见度大于 10 km、相对湿度小于 60% 的环境中, 对地面目标进行探索与识别。成像系统的焦距和探测距离之间的关系满足:

$$\frac{R}{H} = \frac{f'}{N \times d} \quad (13)$$

式中:  $R$  为光学系统对目标的探测、识别距离;  $H$  为目标尺寸;  $f'$  为光学系统的探测、识别焦距;  $N$  为探测、识别目标的像元数 (由跟踪要求给出, 最小目标跟踪尺寸为:  $3 \times 3$ );  $d$  为探测器的像元尺寸。

根据设计指标, 该双波段可见光成像系统对目标的探测距离大于 12 km、识别距离大于 5 km; 红外成像系统对目标的探测距离大于 5 km、识别距离大于 2.5 km。

由于光学系统应用环境的特殊性, 可见光成像系统选择具有高分辨率的 CMOS 探测器, 像元数为  $2464 \times 2056$ , 像元大小  $3.45 \mu\text{m}$ ; 红外成像系统选择制冷型探测器, 像元数为  $640 \times 512$ , 像元大小  $16 \mu\text{m}$ , 冷光阑距离 19 mm。在不考虑内部因素对分辨率影响的前提下, 可见光系统取 145 lp/mm 作为评价可见光系统的最大空间截止频率; 红外系统取 32 lp/mm 作为评价红外系统的最大空间截止频率。

光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

	Visible	MWIR
Band/ $\mu\text{m}$	0.38-0.76	3-5
$F$ number	4	4
Zoom ratio	5 $\times$	3 $\times$
Field angle/( $^\circ$ )	3.6-17.5	20.5/10.47/6.7
Focal length range/mm	36-180	36/72/108
Detection distance/km	12	5
Identify distance/km	5	2.5

## 3 光学系统设计结果与像质评价

### 3.1 理想光组的计算与搭建

根据系统设计指标要求, 可见光系统的变倍比  $M_1=5$ , 中波红外系统的变倍比  $M_2=3$ 。

设变倍组规范化焦距为-1, 取前固定组焦距为 4, 短焦位置时前固定组与变倍组之间的距离为 0.5 以及变倍组与补偿组之间的距离为 2.5, 则由公式 (2) 可计算出短焦位置时变倍组的放大率为-0.4。此时,  $A=3.9$ ,  $E=3$ 。由公式 (11)、(12) 可计算出补偿组焦距的取值范围为:  $f_3' \leq 1.1656$  或  $2.5094 \leq f_3' < 3.8333$ 。

取补偿组焦距为 1.1656, 由公式 (3) 可计算出补偿组的放大率为-0.4263。取  $b=-2$ , 可得变焦后补偿组的放大率等于-1。则可知该系统放大倍率  $M_1=5.8644$ , 接近实际变焦系统变倍比值 5。则短焦焦距为 0.6821, 按短焦实际要求 36, 放大倍率为 52.7782。将每个参数值放大 52.7782 倍, 可以得到前固定组焦距为 211.1128、变倍组焦距为-52.7782、补偿组焦距为 61.5183、前固定组与变倍组之间的距离为 26.3891 以及变倍组与补偿组之间的距离为 131.9455。

同理, 设中波红外系统变倍组规范化焦距为-1, 取前固定组焦距为 3, 短焦位置时前固定组与变倍组之间的距离为 0.2 以及变倍组与补偿组之间的距离为 2.5, 计算过程同可见光系统一致。则可知该系统放大倍率  $M_2=2.8902$ , 接近实际变焦系统变倍比值 3。则短焦焦距为 1.038, 按短焦实际要求 36, 放大倍率为 34.682。将每个参数值放大 34.682 倍, 可以得到前固定组焦距为 104.046、变倍组焦距为-34.682、补偿组焦距为 53.9825、前固定组与变倍组之间的距离为 6.9364 以及变倍组与补偿组之间的距离为 53.9825。

将计算的各组参数代入光学设计软件, 并用理想透镜组进行模拟, 结果如图 1 所示。

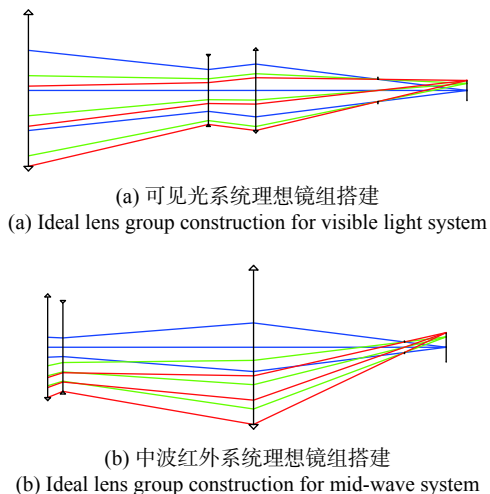


图 1 理想镜组搭建

Fig.1 Ideal lens group construction

### 3.2 光学系统总体设计

根据 3.1 节中理论计算部分, 搭建出可见光成像与红外成像系统的前固定组、变倍组与补偿组。可见光成像系统的前固定组由分光板后的第 1、2、3 透镜组成, 变倍组由第 4、5、6、7 透镜组成, 补偿组由第 8、9、10、11 透镜组成以及后固定组由第 12、13、14 透镜组成。红外成像系统的前固定组由反射镜后的第 1 透镜组成, 材料为硅, 变倍组由第 2 透镜组成, 材料为锗, 补偿组由第 3、4 透镜组成, 材料为硅与硒化锌, 后固定组由第 5、6 透镜组成, 材料为硒化锌与锗。共口径部分采用一片红外材料  $\text{CaF}_2$ , 实现双波段共口径成像, 提高双波段对目标信息观测的一致性。光束到达分光板, 通过截止滤光片, 可见光波段的光束透过分光板进入可见光成像系统, 中波红外波段的光束反射  $90^\circ$  到达反射镜, 然后再反射  $90^\circ$  进入中波红外成像系统。利用光学设计软件优化后, 光学系统的结构图如图 2 所示。

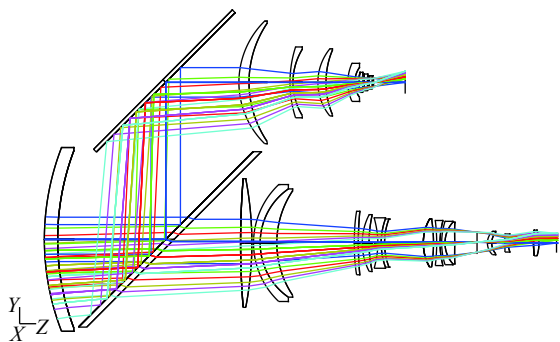


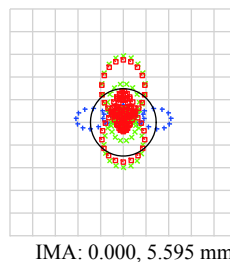
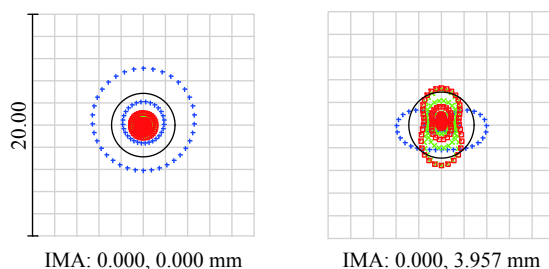
图 2 光学系统结构图

Fig.2 Optical system structure diagram

### 3.3 可见光系统像质评价

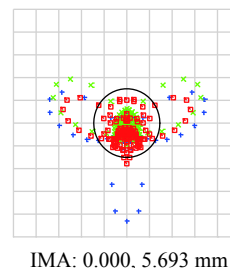
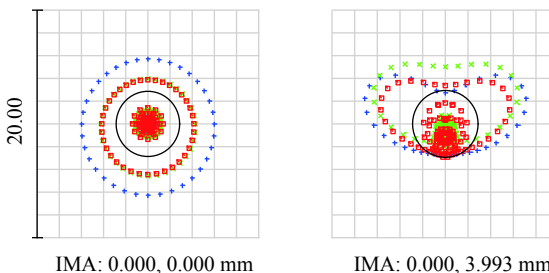
综合使用几何光学与衍射理论两种评价方法来评价成像系统的性能, 判断成像系统是否满足设计指标要求。

可见光成像系统点列图如图 3 所示, 短焦位置处弥散斑的最大均方根半径为  $1.878 \mu\text{m}$ , 长焦位置处弥散斑的最大均方根半径为  $2.702 \mu\text{m}$ , 两个焦距位置处的均方根半径值均小于  $3.45 \mu\text{m}$ , 在一个像元大小以内, 满足成像质量要求。



(a) 焦距 36 mm 处的点列图

(a) Spot diagram at focal length of 36 mm



(b) 焦距 180 mm 处的点列图

(b) Spot diagram at focal length of 180 mm

图 3 可见光成像系统点列图

Fig.3 Spot diagram of visible light imaging system

可见光成像系统调制传递函数如图 4 所示,在奈奎斯特频率 145 lp/mm 处,各焦距处不同视场的 MTF 值大于 0.5, 接近衍射极限, 满足成像质量要求。

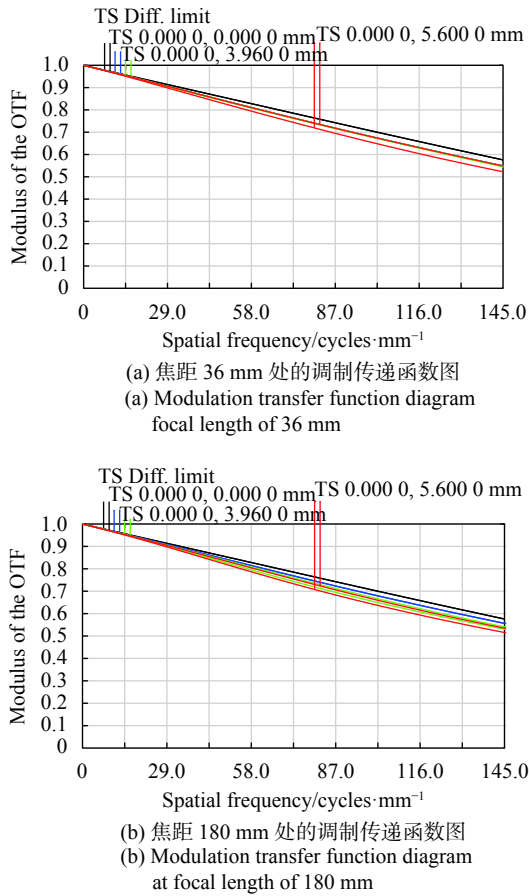


图 4 可见光成像系统调制传递函数图

Fig.4 Modulation transfer function diagram of visible light imaging system

模拟变倍组与补偿组的变焦曲线,结果如图 5 所示。横坐标代表系统焦距,纵坐标代表变倍组与补偿组相对前固定组的距离,两组运动轨迹曲线平滑无拐点,变倍组的最大行程为 57.801 mm,补偿组的最大行程为 20.887 mm。

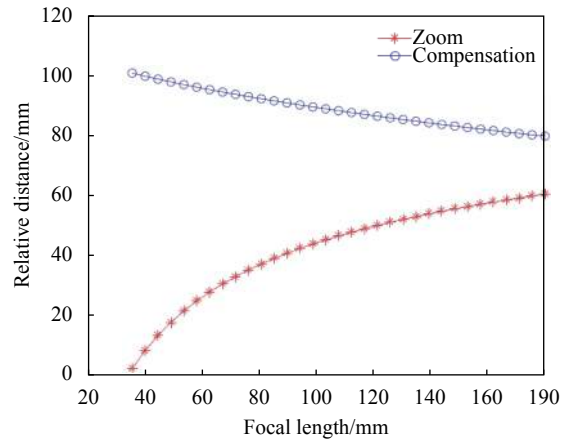


图 5 可见光成像系统变焦曲线

Fig.5 Zoom curve of visible light imaging system

### 3.4 中波红外系统像质评价

中波红外成像系统点列图如图 6 所示,短焦位置处弥散斑的最大均方根半径为 7.210 μm,中焦位置处弥散斑的最大均方根半径为 8.848 μm,长焦位置处弥散斑的最大均方根半径为 10.306 μm,三个焦距位置处的最大均方根半径值在一个像元大小 (16 μm) 以内,满足成像质量要求。

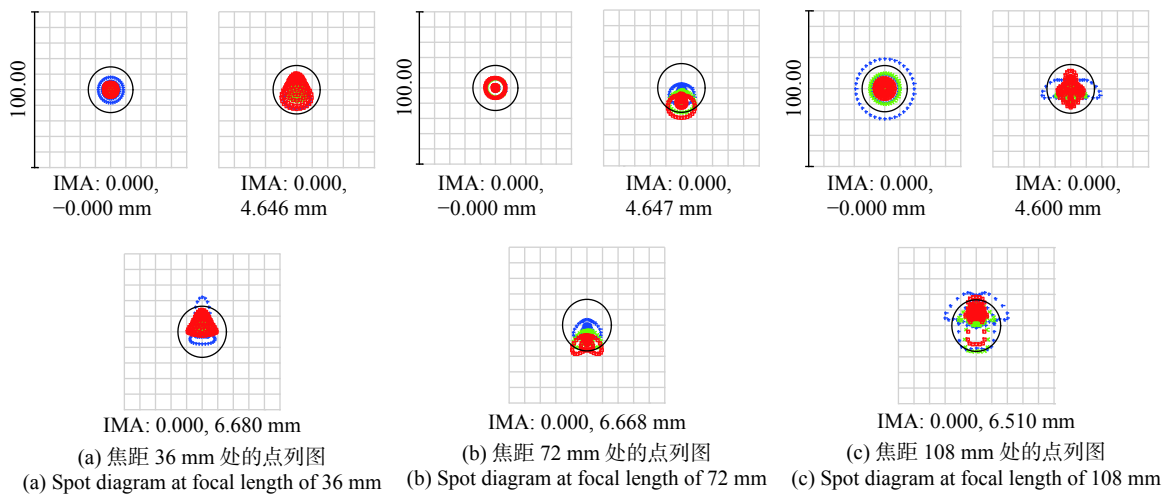
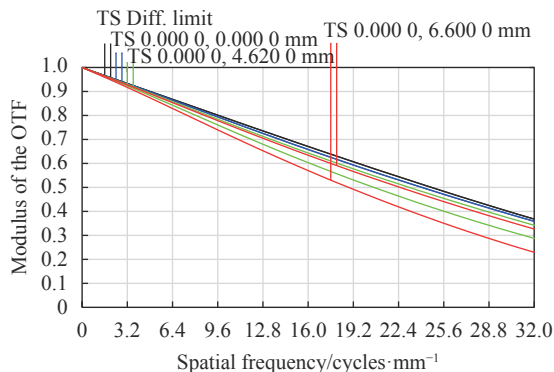


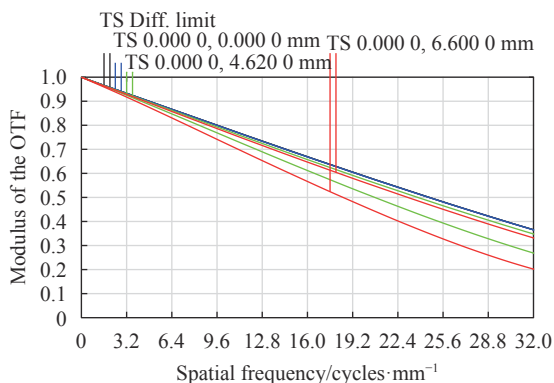
图 6 中波红外成像系统点列图

Fig.6 Spot diagram of mid-wave infrared imaging system

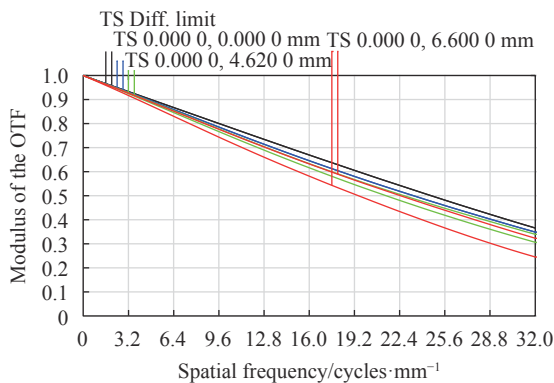
中波红外成像系统调制传递函数如图 7 所示,在奈奎斯特频率 32 lp/mm 处,都达到衍射极限,满足成像质量要求。



(a) 焦距 36 mm 处的调制传递函数图  
(a) Modulation transfer function diagram at focal length of 36 mm



(b) 焦距 72 mm 处的调制传递函数图  
(b) Modulation transfer function diagram at focal length of 72 mm



(c) 焦距 108 mm 处的调制传递函数图  
(c) Modulation transfer function diagram at focal length of 108 mm

图 7 中波红外成像系统调制传递函数图

Fig.7 Modulation transfer function diagram of mid-wave infrared imaging system

## 4 系统分析

### 4.1 无热化处理

光学系统工作环境的不可预知性与复杂性会使得系统在高低温环境中发生离焦现象。因此,为了保证光学系统的成像质量,需对系统在工作环境温度-40~60℃下做高低温处理。目前,无热化的处理方法有机械被动式、机电主动式与光学被动式三种,考虑到系统轻量化,在光学系统中引入特殊面型,采用光学被动式做无热化处理。

表 2 是可见光系统的短焦 36 mm、中焦 108 mm 与长焦 180 mm 在高低温环境中产生的离焦量。

表 2 可见光系统焦距随温度变化值

Tab.2 Visible light system focal length changes with temperature

Temperature/℃	Short focal/mm	Medium focal/mm	Long focal/mm
-40	36.012	107.859	180.229
Visible 20	36.003	108	179.997
60	35.996	108.085	179.622

从表 2 中可知,中焦、长焦部分的离焦量最大。图 8 给出了可见光成像系统在-40~60℃的工作环境中,消热差后的调制传递函数图。从图 8(a)、图 8(b)可以看出,在中焦 108 mm 处消热差后,系统的 MTF 值大于 0.4;在长焦 180 mm 处消热差后,从图 8(c)可以看出系统的 MTF 值大于 0.3,从图 8(d)可以看出系统的 MTF 值大于 0.4,满足系统的成像质量要求。

由焦深公式可算出中波红外系统的焦深值为 0.128 mm。表 3 给出了中波红外系统短焦 36 mm、中焦 72 mm 与长焦 108 mm 处焦距随温度变化的离焦量。

图 9 给出了中波红外成像系统在-40~60℃的工作环境中,消热差后的调制传递函数图。从短焦 36 mm、中焦 72 mm 与长焦 108 mm 的-40℃与 60℃的调制传递函数图可以看出,系统的 MTF 值略有下降,但总体 MTF 值大于 0.2,满足成像质量要求。

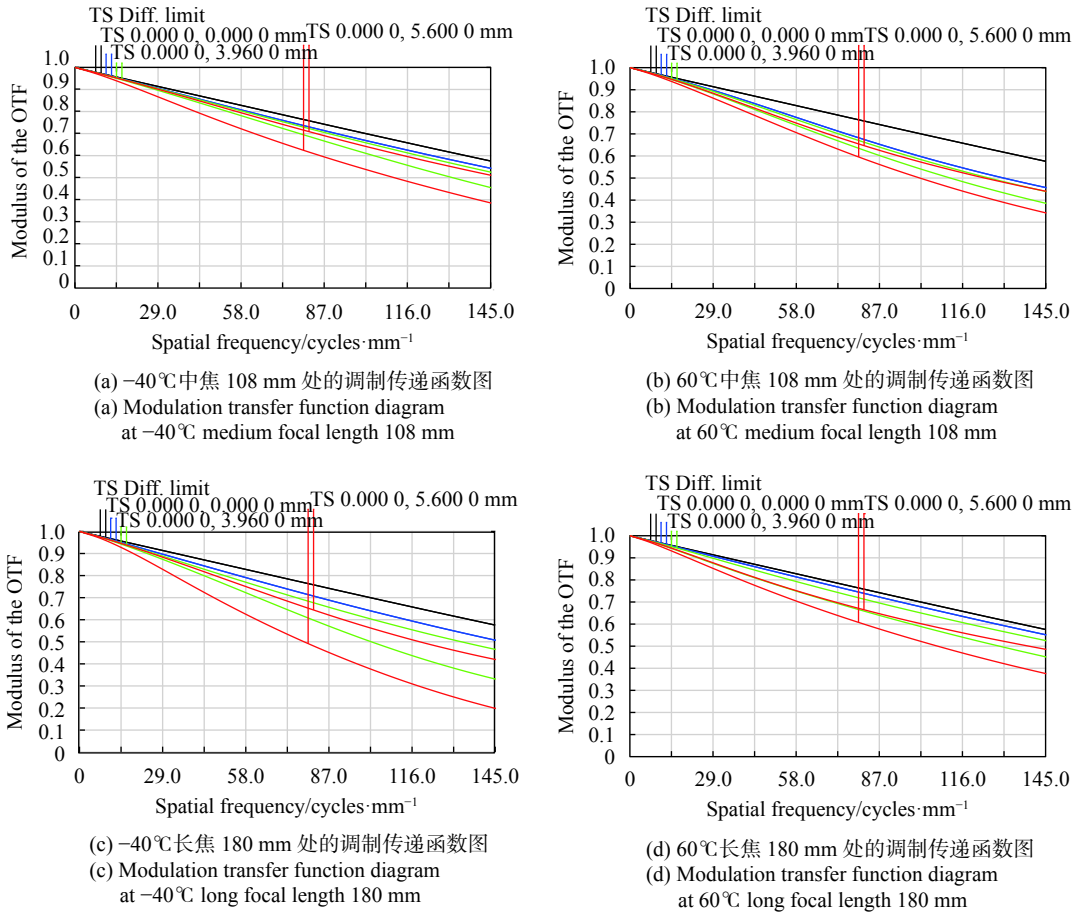


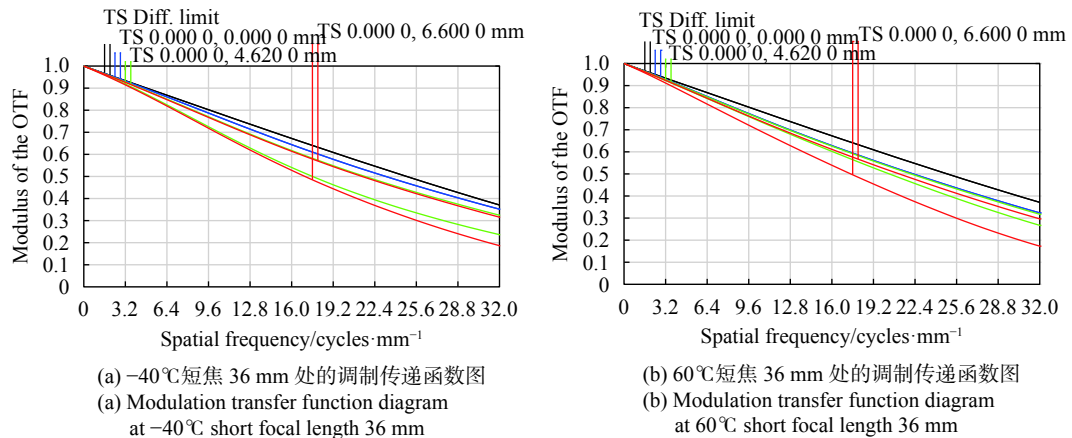
图 8  $-40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$  时可见光成像系统调制传递函数图

Fig.8 Modulation transfer function diagram of visible light imaging system at  $-40^{\circ}\text{C}$  and  $60^{\circ}\text{C}$

表 3 中波红外系统焦距随温度变化值

Tab.3 Mid-wave infrared system focal length changes with temperature

	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Short focal/mm	Medium focal/mm	Long focal/mm
MWIR	$-40$	36.129	71.766	107.185
	20	35.998	72.018	107.997
	60	35.911	72.190	108.540



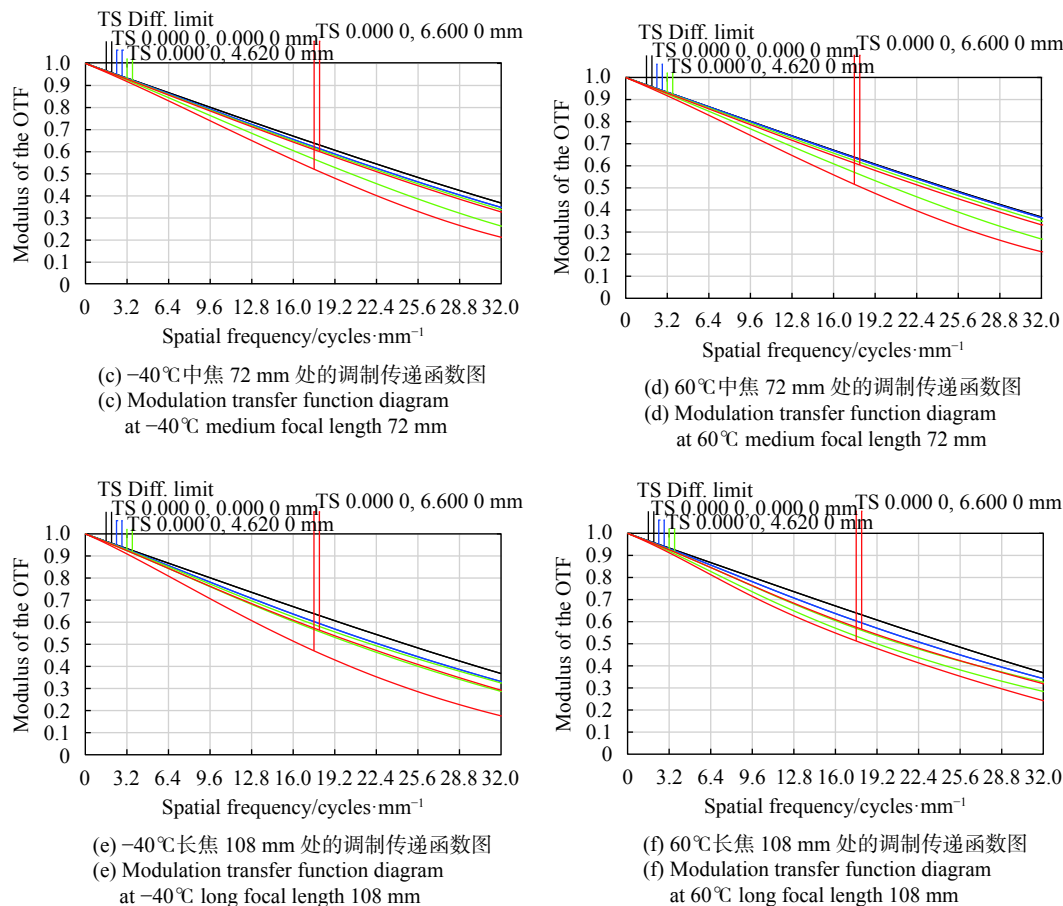


图 9 -40 °C、60 °C 时中波红外成像系统调制传递函数图

Fig.9 Modulation transfer function diagram of mid-wave infrared imaging system at -40 °C and 60 °C

### 4.2 公差分析

为了确保系统的可行性, 根据实际经验, 对系统表面公差要求如下: 曲率半径、厚度以及偏心公差±0.02 mm, 倾斜公差±0.02°, 表面不规则度为 0.2; 对元件公差要求如下: 偏心公差±0.02 mm, 倾斜公差±0.02°; 对材料公差要求如下: 材料折射率公差为±0.001, 阿贝数公差为±0.5。利用蒙特卡洛分析所给定的公差, 结果如表 4 所示。

表 4 公差分析 MTF 值

Tab.4 Tolerance analysis MTF value

Visible		MWIR	
Probability	MTF	Probability	MTF
90%≥	0.213 76904	90%≥	0.223 77023
80%≥	0.245 42885	80%≥	0.249 53061
50%≥	0.288 441 32	50%≥	0.285 50645
20%≥	0.353 945 12	20%≥	0.306 74293
10%≥	0.396 09408	10%≥	0.310 60533

从表 4 可以看出, 对系统进行公差分析后, 可见光系统有 90% 的概率保证 MTF 值在 0.21 以上, 中波红外系统有 90% 的概率保证 MTF 值在 0.22 以上, 满足系统加工装调的要求。

### 4.3 探测距离分析

光学系统的探测距离是设计系统的重要依据, 同时也是系统设计成功与否的一个重要评价指标。可见光系统探测性能与大气传输、目标背景特性、透过光学系统的能量以及探测器性能等有关。可见光光学系统的探测距离为<sup>[7]</sup>:

$$R = \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{E_0 \rho \tau_0 C^2}{4F^2 E_{\min}} \quad (14)$$

式中:  $\varepsilon$  为消光系数, 可根据大气能见距离计算求得,  $\varepsilon=3.912/d_v$  (能见度  $d_v=10$  km);  $E_0$  为景物照度, 取 20 000 lx;  $\rho$  为目标反射率, 取 0.3;  $\tau_0$  为光学系统透过率, 为 74.83%;  $C$  为目标与背景的对比度, 取 0.45;  $F/4$ ;  $E_{\min}$  为探测器的最小靶面照度, 取 0.1 lx。则可见光光学系统的探测距离为 12.67 km。



红外系统的探测能力与大气衰减、目标辐射强度、光学系统的透过能力以及焦平面阵列的性能等有关。依据最小可分辨温差 (MRTD) 和 Johnson 准则可预测红外系统的探测、识别与辨别能力。MRTD 的一般表达式为<sup>[8]</sup>:

$$MRTD(f) = \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} SNR_{DT} \cdot f \cdot \frac{NETD}{MTF(f)} \cdot \left( \frac{\beta\gamma}{t_e f_p \Delta f_n \tau_d} \right)^{1/2} \quad (15)$$

式中:  $SNR_{DT}$  为探测概率 50% 时的阈值信噪比, 取 2.8;  $f$  为系统空间频率;  $NETD$  为噪声等效温差, 取 25 mK;  $MTF(f)$  为系统传递函数;  $\beta$  与  $\gamma$  为光学系统的水平瞬时视场与竖直瞬时视场;  $t_e$  为人眼积分时间, 取 0.2 s;  $f_p$  为帧频, 取 60 Hz;  $\Delta f_n$  为系统噪声等效带宽;  $\tau_d$  为探测器的驻留时间。如图 10 所示, 随着空间频率  $f$  的增大, MRTD 的值越来越大。当 MRTD 的值趋于无穷大, 则空间频率达到了红外系统的截止频率, 也即达到了红外系统的极限频率。

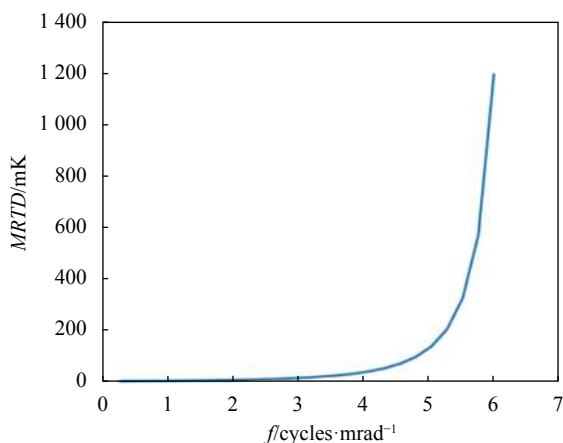


图 10 空间频率与 MRTD 的关系图

Fig.10 Relationship between spatial frequency and MRTD

上述 MRTD 模型是在理想情况下得到的, 实际应用环境还需考虑系统的观察等级 (探测、识别、辨别)、不同探测概率下的阈值信噪比、实际背景温度以及大气分子的吸收散射, 则 MRTD 模型改进为<sup>[9]</sup>:

$$MRTD(\tau, R) = SNR \cdot \frac{R}{2 \cdot H} \cdot \frac{\pi^2 \cdot T_b^2}{MTF(f) \cdot T_m^2} \sqrt{\frac{\beta \cdot \gamma \cdot n_e}{2 \cdot \alpha \cdot t_e \cdot t_i \cdot f_p}} \cdot \frac{1}{F^2} \cdot \tau_0 \cdot \sqrt{A_d \cdot n_s} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, R) \cdot D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda}{\partial T} d\lambda \quad (16)$$

式中:  $SNR$  为实际情况下的阈值信噪比;  $R$  为探测距离;  $H$  为目标高度;  $T_b$  为背景温度;  $T_m$  为目标温度;  $n_e$  为目标等效条纹数;  $\alpha$  为目标的高宽比;  $t_i$  为探测器的积分时间;  $F$  为  $F$  数;  $\tau_0$  为光学系统的透过率, 为 77.07%;  $A_d$  为探测单元面积;  $n_s$  为系统探测器元数;  $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, R) \cdot D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda}{\partial T} d\lambda$  为辐射光束经过大气层的衰减程度评价指标。利用公式 (16) 可建立不同空间频率下, 不同探测距离所对应的最小可分辨温差。

图 11 给出了探测概率为 50%, 不同观察等级 (探测、识别、辨别) 下, 不同的空间频率、不同的传输距离所对应的最小可分辨温差。表 5 给出了对目标的观察等级为探测的情况下, 系统的调制传递函数值等于 0.3 时, 对应空间频率  $f=3.15$ , 不同探测距离下的最小可分辨温差。

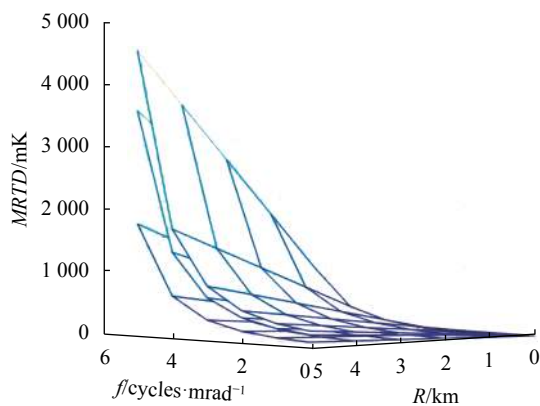


图 11 空间频率、传输距离及 MRTD 关系图

Fig.11 Relationship between spatial frequency, transmission distance and MRTD

表 5 探测距离和 MRTD 数值

Tab.5 Detection distance and MRTD value			
R/km	2	4	5
MRTD/mK	155.6746	311.3492	389.1865

在空间频率  $f$  下, 目标与背景的温差经过大气传输衰减后, 到达红外系统的温差应该大于等于该空间频率下的 MRTD 值<sup>[10]</sup>。

$$\Delta T' = \Delta T \cdot \tau_\alpha(R) \geq MRTD(f) \quad (17)$$

式中:  $\Delta T$  为目标与背景温差, 取 5.25 K;  $\tau_\alpha(R)$  为探测距离为  $R$  时的大气透过率。利用 LOWTRAN 软件, 在 1976 美国标准大气模式下, 边界层气溶胶 (海拔

0~2 km)、气象数据类型为海洋消光系数、 $VIS=10$  km 的情况下,计算得探测距离为 5 km 时,大气透过率为 0.2196,则传播到红外系统的温差为 1.1529 K,大于最小可分辨温差 389.1865 mK,可以满足探测 5 km 的指标要求。

综上分析与计算,机载双波段共口径光电瞄准成像系统的可见光系统探测距离大于 12 km,中波红外系统探测距离大于 5 km,满足设计指标要求。

#### 4.4 像移分析

机载光电瞄准成像系统与地面目标之间存在相对运动,使得相机在成像过程中,相机对目标成的像与成像介质间产生像移<sup>[11]</sup>。像移的存在降低了系统的成像质量,使得图像分辨率下降,所以需要光电瞄准成像系统进行像移补偿残差分析。当成像系统的焦距和探测器的像元尺寸一定时,前向像移补偿残差的大小取决于无人机飞行速度的精度、高度的精度以及相机的最大曝光时间。

像移补偿速度为:

$$V_c = \frac{V}{H} \cdot F \quad (18)$$

对上式两边微分,可以得到像移补偿速度的误差为:

$$\Delta V_c = \frac{F}{H} \cdot \Delta V + \frac{V \cdot F}{H^2} \cdot \Delta H \quad (19)$$

则前向像移补偿残差为:

$$\Delta l = \Delta V_c \cdot T \quad (20)$$

设飞行速度为 100 m/s、探测高度为 2 km、速度精度为 0.2 m/s、高度误差为 5 m,则对于可见光系统,取最大曝光时间为 30 ms,焦距为 180 mm,前向像移补偿残差为 1.215  $\mu\text{m}$ ;对于中波红外系统,取最大曝光时间为 16 ms,焦距为 108 mm,前向像移补偿残差为 0.3888  $\mu\text{m}$ 。经过像移补偿后,像移补偿残差小于 1/2 的像元尺寸。根据瑞利判据可知,光电瞄准成像系统经像移补偿后,可实现系统对目标的有效探测与识别。

## 5 结 论

文中设计了一款机载双波段共口径光电瞄准成像系统。该系统前置光路采用折射式成像,可解决同轴反射成像存在中心遮拦、视场小,以及离轴反射成

像装配难度大、结构复杂的问题。可见系统与红外系统在消热差后满足系统成像质量要求。在大气能见度大于 10 km、相对湿度小于 60% 时,可见光系统的探测距离大于 12 km;根据 Johnson 准则,对红外系统进行 MRTD 分析,系统在探测距离为 5 km 时的最小可分辨温差值满足探测距离大于 5 km 的设计指标要求,同时像移补偿残差分析表明该集成系统可对目标实现高分辨率成像。对系统作公差分析结果表明,满足加工及使用要求。

#### 参考文献:

- [1] Ji Shupeng. Equipment development of airborne electro-optic payload and its key technologies [J]. *Aero Weaponry*, 2017(6): 3-12. (in Chinese)
- [2] Han Kunye, Yang Zijian, Chang Weijun, et al. Optical design of electro-optical UAV-based reconnaissance and surveillance system with shared aperture [C]//SPIE, 2015, 9449: 94492A.
- [3] Mahmoud A, Xu D, Xu L. Optical design of high resolution and shared aperture electro-optical/infrared sensor for UAV remote sensing applications [C]//IEEE, 2016: 2921-2924.
- [4] Zeng Qinyong. Study on the key technology of electro-optical remote fast detection[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)
- [5] Yin Xiao. Research on unmanned airborne dual-band polarization imaging technology in material evidence search[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [6] Zhang Yimo. Applied Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
- [7] Shi Kui, Chen Zhaobing. Detecting capability research of the plane carrying short focus television [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(5): 140-143. (in Chinese)
- [8] Wang Jing, Ji Ming, Li Xudong, et al. Performance of infrared imaging system under perturbation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3176-3180. (in Chinese)
- [9] Gao Huaiping, Wu Ping, Zhang Lishuai. Effect of detection conditions on MRTD of infrared thermal imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(1): 67-71. (in Chinese)
- [10] Zhang Jin, Wang Xia, Li Shujiang, et al. Design of simulation software of IR target camouflage assessment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2625-2630. (in Chinese)
- [11] Wang Zhengxi, Zhang Bao, Li Xiantao, et al. Application of fast steering mirror in image motion compensation [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 95-105. (in Chinese)