

文章编号 1004-924X(2013)03-0561-06

一体式紧凑型折反光学系统设计

虞林瑶*, 魏 群, 张 鑫, 张天翼, 贾宏光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了一种一体式双反射结构以解决导引头前视红外系统中 R-C 双反射系统装调困难以及在导弹飞行过程中次镜支架的稳定性问题。该结构将主次镜集成在一个透镜前后表面,通过对透镜前后表面进行加工并涂敷内反射膜来实现双反射镜一体化。如此配置使系统装调只需针对整个透镜,从而降低了装调难度,提高了结构的稳定性。设计了适用于中波红外的紧凑型二次成像光学系统,该系统像质优良,各视场光学传递函数均大于 0.6,接近衍射极限,并可利用二元衍射光学元件在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 实现光学被动消热差。最后进行了公差分析,并针对该光学系统列举了一些抑制杂散辐射的方法,实验显示系统满足实际加工和应用需求。

关键词:R-C 系统;红外折反系统;二次成像;衍射光学元件

中图分类号:TH703;TN216 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132103.0561

Design of compact integral structure of two-mirror system

YU Lin-yao*, WEI Qun, ZHANG Xin, ZHANG Tian-yi, JIA Hong-guang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yulinyao87@163.com

Abstract: A compact integer structure with two mirrors was presented to solve the problems that the R-C reflect IR system is difficult to be installed into a seeker and the second mirror support is not stable in missile flight. The primary and secondary mirrors were integrated the both surfaces of a lens. Then, the front and rear surfaces of lens were machined and the inner reflect films were coated on two surfaces. The two mirrors were assembled in one lens to allow the installation of the two mirrors to be easier and the structure of the second mirror to be more stable. A compact relay imaging optical system for middle infrared was designed. It has good imaging capability and its Modulation Transfer Function(MTF) for all field of view is more than 0.6(very close to the diffraction limitation). The optics system can implement the athermal between $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ by a Diffractive Optical Element(DOE). Finally, a Ment-Karol simulation was performed to analyze the tolerance and some ways to resist the stray light of this system was given. The design satisfies the need of machining and application.

Key words: R-C system; infrared catadioptric system; relay imaging; Diffractive Optical Element (DOE)

1 引言

近年来,在各种飞行器和导弹的红外搜索与跟踪系统中,光学系统结构的小型化和轻量化是设计的重要标准,R-C 双反射光学系统以其结构尺寸小、质量轻、大口径等优势成为国内外研究人员的主要选择^[1-2]。然而,双反射镜的装调和次镜支架的固定一直是 R-C 系统设计的难点,原因在于:(1)双反射系统公差敏感,装调困难;(2)为了减少支架对光线的遮挡,支架截面积受到限制,导致次镜的结构强度和稳定性降低^[3],并且导弹在行进过程中(加速前进、横滚、转向)的加速度很大,会使次镜的支架发生变形,严重影响成像质量,降低了制导的精确性。

本文提出了一种一体式的双反射结构——主次镜集成在一个透镜前后表面,安装时只需对透镜进行固定即可,无需支架,在极大地简化光学系统结构的同时增加了系统的通光量,增强了成像的稳定性。这种结构中次镜的装调精度要求在加工阶段保证,已引进的单点金刚石车床的加工精度可以满足要求。设计的紧凑型二次成像光学系统的波段为 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$,口径为 $60\ \text{mm}$,能实现消热差和 100% 冷光阑效率,成像质量也达到了衍射极限。

2 折反系统设计

一体式光学系统设计可以先从分离的 R-C 系统设计出发,通过在两反射镜之间增加材料获得初始结构,最终通过光学设计软件优化得到结果。由于分离的 R-C 系统要满足光瞳匹配,为了使系统口径不致太大,通常采用二次成像的方式

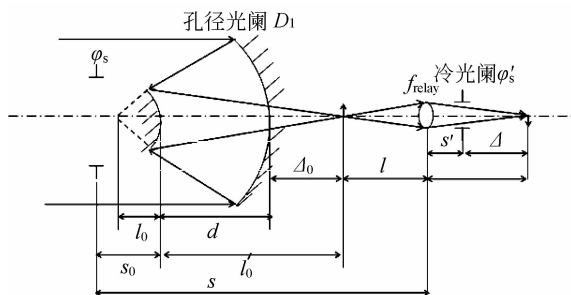


图 1 二次成像折返结构

Fig. 1 Relay imaging system

来实现。对有中继成像的两镜系统,有^[4]:

$$l = \frac{B(1-A)(s_0 - l_0')}{A-B}, \quad (1)$$

$$A = -2D_1 l_0 f / D r_1 l_0', \quad (2)$$

$$B = -d / M s_0, \quad (3)$$

$$M = D_1 / \varphi'_s. \quad (4)$$

其中:长度变量指代如图 1 所示; f 为系统焦距; D 为系统入瞳直径; φ'_s 为系统出瞳直径; D_1 为孔径光阑直径。

式(1)中只要确定了两镜系统的结构以及探测器的参数,就可以算出转像系统的共轭成像位置及焦距。为了满足大视场和消色差的要求,转像系统通常需要 $2\sim 3$ 片透镜组成,逐步增加透镜数目并输入自动优化程序中就可以获得分离的两镜二次成像系统,然后在两镜之间增加光学材料,进一步优化即可得到一体式的光学系统。

3 衍射光学设计

为了使系统在缩小和简化结构的同时能够很好地消单色像差和色差,采用了二元衍射光学元件^[5-7]。普通的光学元件产生的色差是由元件本身选用的材料决定的,而衍射元件的色差是由元件表面的微结构引起的,与基底材料无关,等效为阿贝常数 v^D 和部分色散 p^D 。

衍射光学元件的色散公式表示为^[8]:

$$f = \frac{\lambda_0}{m\lambda} f_0, \quad (5)$$

式中: f_0 为设计波长 λ_0 的焦距, m 为衍射级次(通常取 $m=1$), f 为元件在波长为 λ 下的焦距。

对比普通光学元件的焦距公式,将衍射元件的焦距表示成含有等效折射率的表达式:

$$f = \frac{1}{(n^{\text{eff}} - 1)C_0}, \quad (6)$$

式中: C_0 为表面曲率, n^{eff} 为衍射元件的等效折射率。

由式(5)、式(6)以及阿贝常数和相对色散的定义式,可得衍射元件等效的阿贝常数和相对色散为:

$$v^{\text{eff}} = \frac{n_2^{\text{eff}} - 1}{n_1^{\text{eff}} - n_3^{\text{eff}}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (7)$$

$$p^{\text{eff}} = \frac{n_1^{\text{eff}} - n_2^{\text{eff}}}{n_1^{\text{eff}} - n_3^{\text{eff}}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad (8)$$

式中: λ_1, λ_3 为需要消色差的两个波长, λ_2 为中心

波长。对 $3.7\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 的中波红外,其阿贝常数和部分色散分别为 $v^{\text{eff}} = -4, p^{\text{eff}} = 0.5$,所以衍射元件具有与普通元件相反的较大的色散。常用的正负透镜结合消色差的结构,尤其是对中波红外系统,可选用的光学材料很少;而采用折衍结合的透镜就能够很好地消色差,这大大简化了结构,缩小了体积,减轻了重量,而且目前的加工水平完全可以达到所要求。

4 设计实例与分析

4.1 设计实例

该系统用于导弹导引头前视红外系统,根据系统总体要求,采用 $F/2, 320\ \text{pixel} \times 256\ \text{pixel}$, 像元尺寸为 $30\ \mu\text{m}$ 的中波红外制冷型探测器。光学系统参数如表 1 所示。

表 1 光学系统参数

Tab.1 Parameters of optical system

波段/ μm	焦距/mm	视场 $2\omega/(\circ)$	相对口径
3.7~4.8	120	3.6	0.5

设计时,光学系统结构应当紧凑,其长度小于 68 mm;遮拦比小于 40%;为了最大程度地抑制背景辐射,要实现 100%冷光阑;像质接近衍射极限。

利用 Focus Software 公司的 ZEMAX-EE 软件实现如图 2 所示的光学系统设计。系统主要由 3 块镜片组成,包含主次反射镜 M_1 ,采用的材料是 GASIR2;场镜 M_2 ,采用的材料是 Germanium;成像透镜 M_3 ,采用的材料是 Si。为了充分利用镜片 M_1 表面的各个变量来提高成像质量,对光线入射表面 S_1 和光线出射表面 S_2 进行了变量化处理,最后 S_1 为曲率为零的高次非球面, S_2 为双曲面。主次反射镜都是二次双曲面,场镜 M_2 两表面都是球面,成像透镜 M_3 的前表面为二元衍射面,后表面为高次非球面。 M_4 是制冷探测器的窗口,被设置为出瞳位置,实现了 100%冷光阑效率。

从系统结构上看,通过使用衍射面和将 M_1 的入射表面和出射表面作为变量优化,使得系统更加紧凑,总长只有 64 mm,而从第一个入射表

面到探测器窗口的位置只有 40 mm;另外,只使用 3 片光学元件就实现了二次成像,不仅简化了系统结构,还降低了系统的装调难度。

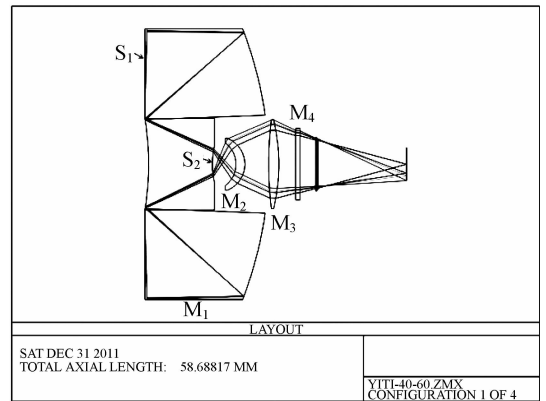


图 2 系统的光路设计

Fig. 2 Layout of optical system

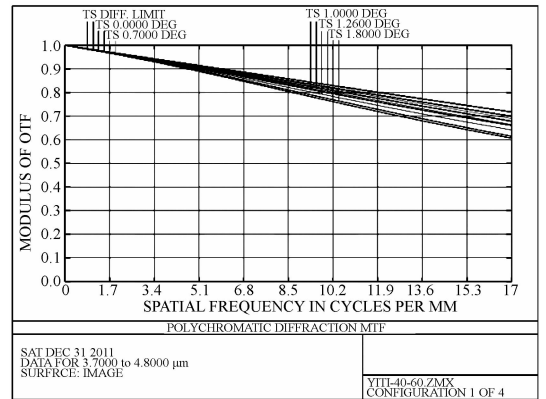


图 3 系统传递函数曲线

Fig. 3 MTF curves of system

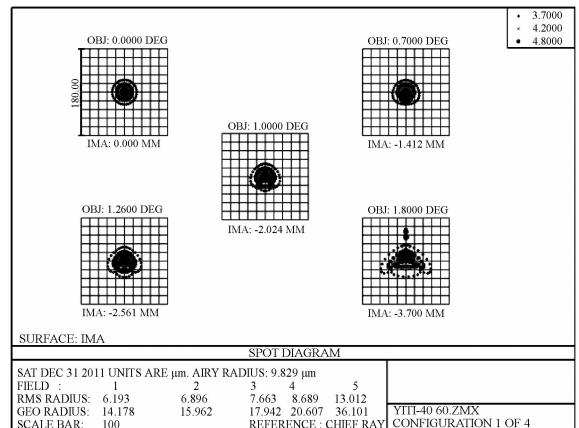


图 4 系统的点列图

Fig. 4 Spot diagram of system

理论上该光学系统的成像质量达到了衍射极限。图 3 为系统的传递函数曲线,不管是轴上点还是轴外点都与衍射极限下的传递函数曲线重合,空间频率在 17 lp/mm 处均大于 0.6。图 4 所示的点列图中,最大的几何点斑直径小于 36 μm ,成像质量较好。图 5 所示的系统像差曲线表明,系统很好地满足了消色差要求。

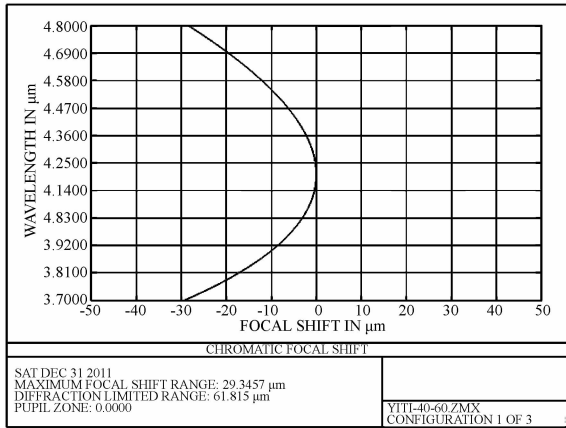


图 5 系统的色差曲线

Fig. 5 Chromatic curve of system

4.2 消热差分析

由于衍射元件具有特殊的色散特性,利用衍射元件可以很好地校正光学系统的单色像差和色差,而且它受温度影响小,因此设计时只需合理地分配各个表面的光焦度就可实现消热差^[9]。其中, -40, 60 $^{\circ}\text{C}$ 的系统传递函数分别如图 6, 7 所示。在各个温度时系统的传递函数均大于 0.4, 消温差效果较好。

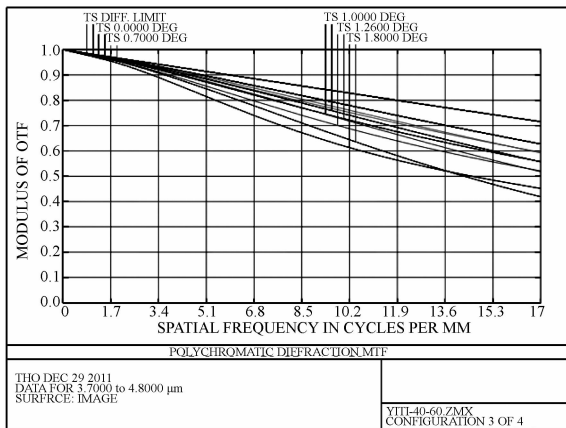


图 6 60 $^{\circ}\text{C}$ 时系统传函曲线

Fig. 6 MTF curves at 60 $^{\circ}\text{C}$

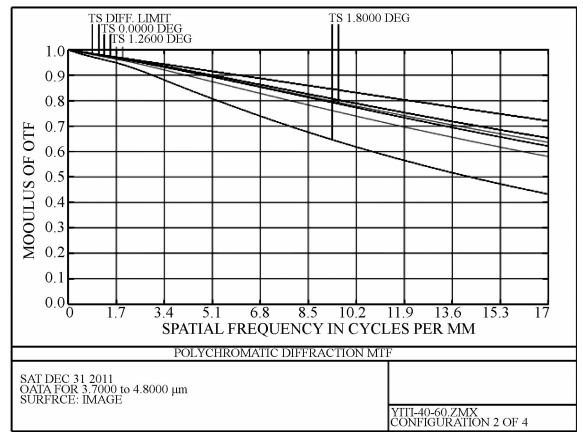


图 7 -40 $^{\circ}\text{C}$ 时系统传递函数曲线

Fig. 7 MTF curves at -40 $^{\circ}\text{C}$

4.3 公差分析

为了验证光学系统的加工实现的可行性,并降低加工成本,需要合理地进行公差分配。使用 Zemax 的蒙特卡罗反复分析,得到如表 2 所示的公差分布,相应的仿真传递函数如图 8 所示。公差分析结果表明,该系统能够满足实际加工装调成像的要求。

表 2 公差分布表

Tab. 2 Tolerance distribution

公差		公差	
面形	3(光圈)	表面偏心 1-4	0.01 mm
面形不均匀	0.3(光圈)	表面偏心 5-6	0.02 mm
厚度 1-4	0.01 mm	表面偏心 7-8	0.02 mm
厚度 4-6	0.02 mm	表面倾斜 1-8	30''
厚度 6-8	0.02 mm		

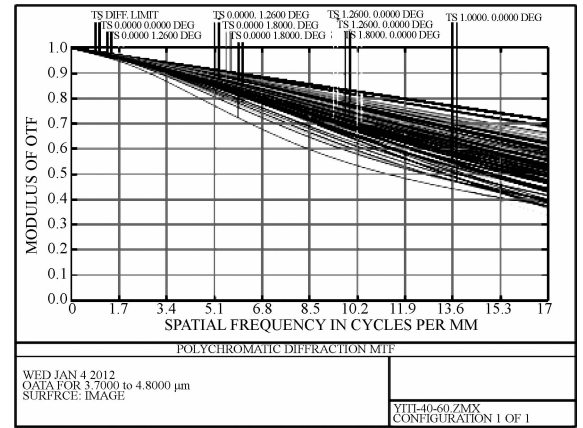


图 8 蒙特卡罗仿真分析后的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves after Monte-Carlo simulation

4.4 杂散光分析

在红外光学系统中,必须要考虑杂散辐射对成像质量的影响。由于一体式结构的特殊性,无法采用常规 R-C 结构的主次镜内遮光罩结构,因此,需要对其消杂散辐射进行分析。

为了减少不经主次镜反射而直接达到转向系统的杂散辐射,可以将透镜 M_1 后表面无光线照射的表面涂上红外吸收材料,相当于主镜内遮光罩的作用;对于太阳背景的杂散辐射,仍可以使用外遮光罩加挡光环结构;视场内不按成像光路行进的杂散光将在探测器上形成鬼像,可以通过在透射面镀增透膜和提高反射面的光洁度来降低鬼像的影响;对于导弹内部产生的杂散辐射,中继转向系统的外筒能够很好地削弱它对成像的影响^[10]。

4.5 一体式结构与分体式结构分析

一体式结构和分体式结构的优缺点对比如表 2 所示。通过对比发现,虽然采用一体式结构会增加系统的质量和成本,但是大大降低了装调难度、提高了系统的成像质量和稳定性,而且使系统

的结构更加简单,体积更小。

表 2 一体式结构与分体式结构优缺点对比

Tab. 2 Comparison of integral and departed structures

	一体式结构	分体式结构
优点	装调简单,次镜结构稳定,抗振动性强,低遮拦	质量轻,对材料要求低
缺点	质量大,对材料要求增加	装调困难,稳定性差,抗振动性低,支架遮拦

5 结 论

本文设计了一种一体式双反射结构的光学系统,该系统具有体积小,结构简单的优点,并且其成像质量优良, $-40 \sim 60$ °C 消温差影响,公差分析结果显示该系统满足加工及装调成像要求。最后提出了一些消杂散光的措施,使得该系统能够有效地抑制太阳背景辐射以及系统内部辐射,提高信噪比。

参考文献:

[1] 薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2383-2386.
XUE H. Optical design of infrared search and trace system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2383-2386. (in Chinese)

[2] 崔继承. 大口径折反射式变焦距物镜的设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2087-2092.
CUI J CH. Design of large aperture refractive-reflective zoom lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2087-2092. (in Chinese)

[3] 傅学农, 陈晓娟, 吴文凯, 等. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 179-184.
FU X N, CHEN X J, WU W K, *et al.*. Design of large aperture mirror support and its stability [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 179-184. (in Chinese)

[4] 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): 1475-1478.
PAN J H. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1475-1478. (in Chinese)

[5] 张慧, 丁雪梅, 谭久彬. 基于折衍混合原理的长焦深成像物镜消色差方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 1810-1815.
ZHANG H, DING X M, TAN J B. Focal depth characteristics of hybrid refractive-diffractive optical element with long focal depth [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 1810-1815. (in Chinese)

[6] 董科研, 潘玉龙, 王学进, 等. 折衍衍射红外双波段双焦光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 764-771.
DONG K Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 764-771. (in Chinese)

[7] 崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差[J]. 光学学报, 1994, 14(8): 877-881.
CUI Q F. Realization of three-color achromats with binary optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(8): 877-881. (in Chinese)

[8] STONE T, GEORGE N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2960-2971.

[9] 白剑, 孙婷, 沈亦兵, 等. 红外折射-衍射混合光学系统

的热差分析[J]. 光学学报, 1999, 19(7): 997-1002.

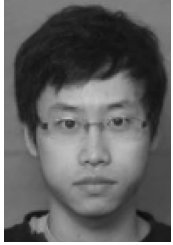
BAI J, SUN T, SHEN Y B, *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid-diffractive optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(7): 997-1002. (in Chinese)

[10] 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, 等. 红外探测系统自身热

辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2267-2271.

NIU J X, ZHOU R K, LIU ZH H, *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2267-2271. (in Chinese)

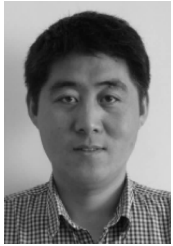
作者简介:



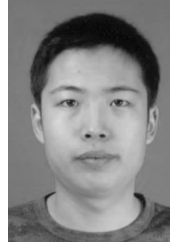
虞林瑶(1987—), 男, 江苏镇江人, 研究实习员, 2011 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 主要从事红外光学系统设计。E-mail: yulinyao87@163.com



魏群(1983—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 2005 年于浙江大学获得学士学位, 2010 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事共形光学及气动光学方面的研究。E-mail: wei.q@hotmail.com



贾宏光(1971—), 男, 黑龙江五常人, 研究员, 博士生导师, 2000 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位, 主要从事光机电系统微小化与精确制导技术的研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn



张鑫(1985—), 男, 吉林人, 助理研究员, 2009 年于天津大学获得硕士学位, 主要从事光学技术、红外系统方面的研究。E-mail: xin_tju@163.com



张天翼(1985—) 男, 辽宁本溪人, 研究实习员, 2011 年于中国科学技术大学获得硕士学位, 主要从事导引头系统结构设计的相关工作。

(版权所有 未经许可 不得转载)