

文章编号:1002-2082 (2021) 03-0398-06

# 用于激光定向红外对抗的光学系统设计

胡 博, 陶 忠, 秦 川, 张璟玥, 孙 武, 李 明

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 依据机载光电武器小型化、轻量化的发展需求, 设计了一套激光红外共光路光学系统。其中红外系统波段为  $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ ,  $F$  数为 2, 采用中波  $640 \times 512$  pixel 的面阵探测器, 像元尺寸为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ , 激光发射与红外光路共用望远系统, 光学系统利用立方棱镜实现方位  $360^\circ$  和俯仰  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围的扫描, 采用共光路设计可减小光路中反射镜和透镜等零件的尺寸, 具有结构紧凑、质量小等特点。重点针对共光路中光学元件引入激光后向散射的问题, 采用 CODE V 和 LightTools 联合优化的方法避免其影响, 保证光学系统成像性能优良。

**关键词:** 共光路; 光电对抗; 光学设计; 红外成像

中图分类号: TN249; TH703

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202142.0301004](https://doi.org/10.5768/JAO202142.0301004)

## Optical system design for laser directional infrared countermeasure

HU Bo, TAO Zhong, QIN Chuan, ZHANG Jingyue, SUN Wu, LI Ming

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** According to the development demand of miniaturization and lightweight for airborne photoelectric weapons, an infrared and laser system was designed with the common optical path. The infrared waveband of the system was  $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ , and the  $F$  number was 2. The surface array detector with a medium wave of  $640 \times 512$  pixels was adopted, and the pixel size was  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ . The laser emission and infrared optical path used the common telescopic system. By using cubic prism, the scanning in the range of azimuth  $360^\circ$  and pitch  $0^\circ \sim 90^\circ$  was realized by optical system. The common optical path design could reduce the size of the mirror and lens in the optical path, which had the characteristics of compact structure and small mass. It was focused on the problem of introducing the laser back scattering by the optical elements in common optical path. The joint optimization method of CODE V and LightTools was adopted to avoid its influence, which could ensure the good imaging performance of optical system.

**Key words:** common optical path; photoelectronic countermeasure; optical design; infrared imaging

### 引言

随着制导技术的迅速发展, 红外成像型导引头由于其具有灵敏度高、探测距离远、全天候工作等特点在现代战争中发挥了重要的作用。成像型探测器在越南战争、海湾战争和科索沃战争中的战绩表明, 红外成像制导导弹对飞机的威胁不断加剧, 如何对抗这种威胁是目前研究的热点<sup>[1]</sup>。激光干扰是对抗红外成像制导导弹的一种理想手段。通过中红外激光束辐照, 使系统的红外探测器饱和或暂时失效, 从而导致目标无法检出, 失去制导能力。

这就促使人们开发出定向红外对抗(DIRCM)技术, 即将红外干扰能量集中在导弹到达角的小立体角内, 瞄准导弹的红外导引头定向发射, 使干扰能量聚焦在红外导引头上, 从而干扰或饱和红外导引头上的探测器和电路, 使导弹丢失靶标<sup>[2]</sup>。

目前, 国际上典型的对抗系统有诺·格公司的通用红外对抗(CIRCM)系统, BAE 系统公司的 Boldstroke 激光定向红外对抗系统以及以色列 ELBIT-ELOP 公司<sup>[3]</sup>的多波段红外对抗系统(MUSIC), 其外形如图 1~图 3 所示。经过多年的发展,

收稿日期: 2020-07-23; 修回日期: 2021-03-01

基金项目: “十三五”陆航预研基金

作者简介: 胡博 (1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事光学系统设计工作。E-mail: [hubo205@163.com](mailto:hubo205@163.com)

各种系统不断改进, 系统的体积、质量、功耗进一步减小, 并朝着通用化、模块化、系列化方向发展<sup>[4-5]</sup>。

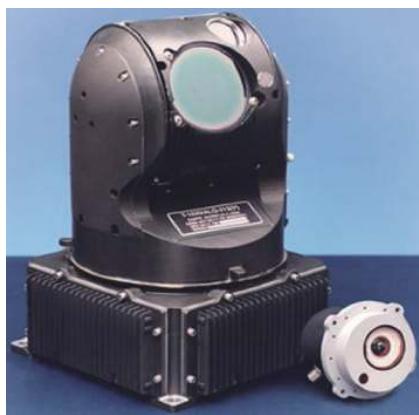


图 1 BAE 系统公司的 ATIRCM

Fig. 1 ATIRCM of BAE system corporation



图 2 诺·格公司的 CIRCM

Fig. 2 CIRCM of Northrop corporation



图 3 ELBIT-ELOP 的 C-MUSIC

Fig. 3 C-MUSIC of ELBIT-ELOP

根据激光定向红外对抗系统的功能特点, 本文设计了可用于激光定向红外对抗的光学系统, 采用共光路设计的方案<sup>[6]</sup>, 由激光干扰光路和红外成像光路两部分组成。激光对来袭导弹进行干扰, 提高自身生存能力; 红外成像光路自动检测来袭导弹目标, 通过跟踪平台对导弹进行精确跟踪和瞄准。光学系统采用立方棱镜实现俯仰和方位扫描, 激光和红外的共光路设计使光学系统具有小型化、轻量化的特点。

## 1 光学系统方案

系统要求具备激光发射和红外成像功能, 同时能够在方位  $360^\circ$  及俯仰  $0^\circ \sim 90^\circ$  扫描, 设计中需要考虑扫描组件的方案以及光学系统总体布局。扫描组件方案有两种: 1) 2 个反射镜实现光路折转和方位俯仰扫描; 2) 采用立方棱镜实现俯仰向和方位向的扫描, 如图 4 所示。

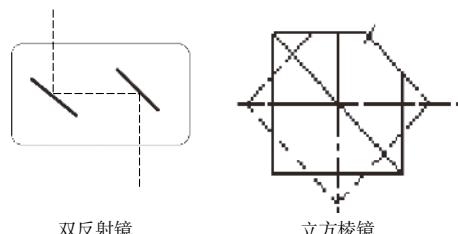


图 4 扫描方案

Fig. 4 Scanning scheme

从图 4 可以看出, 双反射镜转动半径较长, 导致头部的体积增加; 立方棱镜扫描方案可实现方位俯仰扫描功能, 体积空间相对较小, 在实际工程中已有使用。因此本文方案选用立方棱镜<sup>[7-8]</sup>扫描的方式。

为实现激光发射和红外成像光路同步扫描, 可以采用先分光后设计红外和激光光路或者红外和激光共光路设计后再分光的思路, 采用第 2 种方案能兼顾系统功能和压缩扫描棱镜、分光镜和红外透镜等零件口径, 缩小系统体积, 本文采用激光红外共光路的设计方案, 如图 5 所示。光学系统由光学窗口、扫描组件、共用望远系统、分光镜、红外物镜组等组成, 扫描组件实现系统光轴在俯仰及方位向内扫描, 共用望远系统既参与红外光路成像, 也实现激光光路的扩束发射, 共用望远系统和红外物镜组组成红外成像光路。

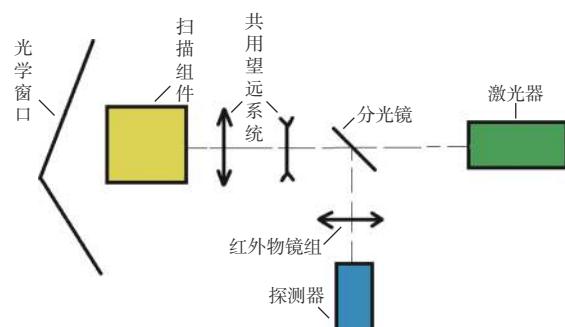


图 5 共光路光学系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of common-path optical system

## 2 光学系统设计

### 2.1 光学设计

光学设计参数如下:

#### 1) 激光光路

激光波段:  $3.7 \mu\text{m}$ ;

激光器输出: 光束口径  $\phi 10 \text{ mm}$ ;

扩束倍率:  $2^{\times}$ 。

#### 2) 红外光路

波段:  $3 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ ;

视场:  $5.5^{\circ} \times 4.4^{\circ}$ ;

探测器: 中波  $640 \times 512 \text{ pixel}$ ;

像元:  $15 \mu\text{m}$ 。

光学系统设计分为两部分, 即共用望远系统和红外物镜组, 共用望远系统兼顾激光扩束, 为无焦系统, 起到激光准直扩束作用。红外光路焦距等于红外物镜组焦距和共用望远系统倍率的乘积:

$$f = \beta \times f' \quad (1)$$

式中:  $\beta$  为共用望远系统倍率;  $f'$  为红外物镜组的焦距;  $f$  为红外光路的总焦距。共用望远系统可采用开普勒和伽利略两种形式, 考虑光学系统中激光的特性及其对能量的要求, 共用望远系统采用伽利略望远镜。

根据红外系统的视场和探测器得到光学系统总焦距为  $99.7 \text{ mm}$ , 共用望远系统倍率为  $2^{\times}$ , 根据(1)式得出红外物镜组焦距  $f'$  为  $49.8 \text{ mm}$ 。选择一个视场和焦距接近的红外光学初始结构进行系统优化, 并将红外镜组参数作为变量进行优化。为提高像质, 在红外镜组中引入了一个高次非球面以校正光学系统像差。在系统优化时, 除对光学系统焦距、透镜间隔、系统长度等参数进行约束外, 针对红外系统还需要对某视场上下边缘光线在冷光栏面上的入射高度也进行约束, 其目的是使上光线产生的正渐晕与下光线产生的负渐晕绝对值接近, 这样轴外点与轴上点的入瞳口径相当, 可使像面照度均匀。此外也避免了系统产生大的过口径(即实际通光口径与轴上光束口径之差), 同时也有利于提高像质。

光学系统优化时预先给定  $1.0$  视场(即以下语句中  $f1$ )上下光线的渐晕, 通过控制光线在冷光栏面上的入射高度及其差别实现上述目的<sup>[9]</sup>。用 CODE V 软件优化的方法如下:

$@DeltaY==((y r2 si f1)+(y r3 si f1));$  ! 假设冷光栏面为第  $i$  面

$@DeltaY=0;$

$@Hy==((y r2 si f1));$

$@Hy=X;$  ! 冷光栏半口径为  $X \text{ mm}$

### 2.2 设计结果

#### 1) 光学系统外形图

根据空间布局要求, 激光器发射的激光通过分光镜和共用望远系统、立方棱镜至光学窗口出射, 红外光路的光则经过光学窗口、立方棱镜, 分光镜和红外镜组后至探测器, 光学系统具体光路如图 6 所示。

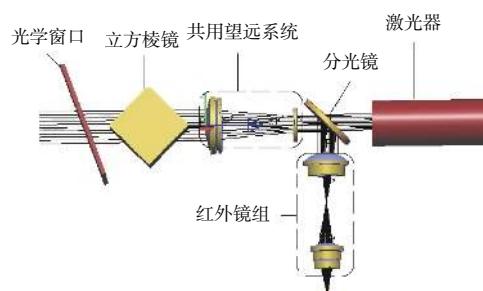


图 6 光学系统结构

Fig. 6 Structure diagram of optical system

#### 2) 像质评价

共用望远系统为  $2^{\times}$  无焦系统, 采用正负透镜组合的伽利略望远镜, 实现  $2^{\times}$  的扩束要求, 具体光路如图 7 所示。

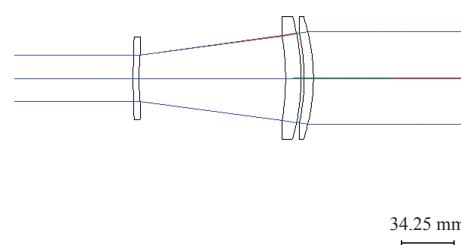


图 7 望远系统光路

Fig. 7 Optical path diagram of telescopic system

红外成像光路设计完成后的光路图如图 8 所示, 点列图和光学传递函数曲线分别如图 9 和图 10 所示。从图 9 中可以看出, 红外光路所有视场的点列图最大值约为  $11 \mu\text{m}$ , 探测器像元为  $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ , 符合探测器要求。从不同视场的子午、弧矢传递函数曲线可看出, 其数值均接近衍射极限。因此, 该设计完全满足系统要求。

## 3 激光散射分析与优化

此类型系统设计时, 由于激光干扰能量较强并

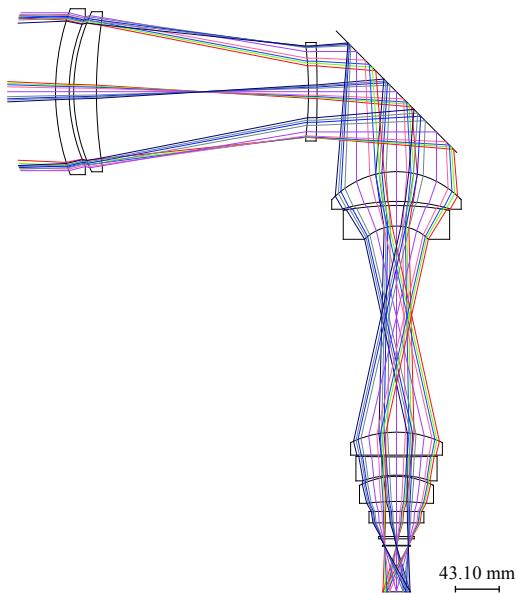


图 8 红外系统光路

Fig. 8 Optical path diagram of infrared system

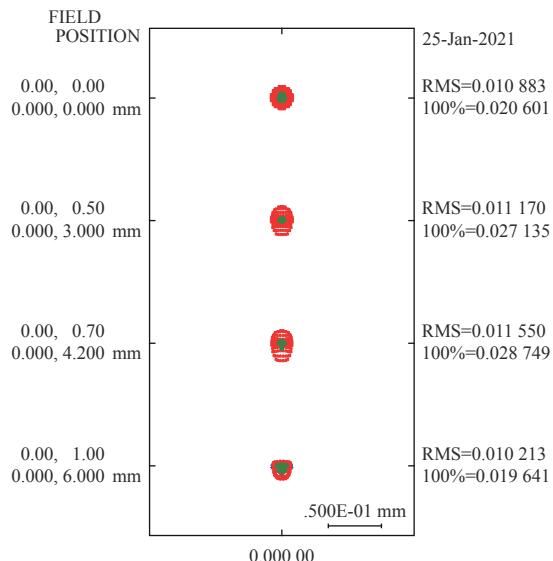


图 9 不同视场点列图

Fig. 9 Spot diagram of different field of view

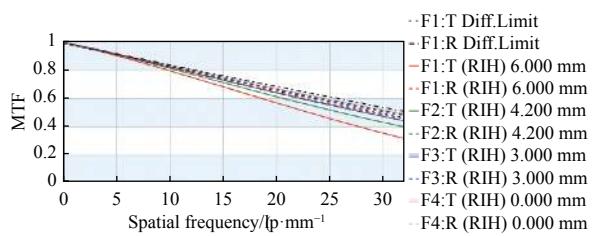


图 10 光学传递函数

Fig. 10 Optical transfer function

处于红外成像光路可接收的波段范围内, 红外激光发射时光学窗口、立方棱镜、共用望远系统的散

射可通过红外物镜组到达探测器靶面<sup>[10-11]</sup>。设计时需重点评估激光对红外光路的影响, 避免出现互相干扰。为保证像质, 优化光路时需满足以下要求:

- 1) 进入到红外探测器靶面的激光能量尽可能少;
- 2) 激光能量均匀分布。

针对以上分析, 设计时可综合利用 CODE V 和 LightTools 软件的分析优化功能, CODE V 用于红外成像性能评估和优化, LightTools 用于评估和优化激光后向散射能量分布<sup>[12-13]</sup>。

由于激光能量主要由共用望远系统透镜的散射引入, 分析时采取如下步骤: 首先优化像质, 利用 LightTools 进行光学元件散射能量评估, 当能量满足使用要求时结束设计, 否则利用 CODE V 和 LightTools 重复进行像质和散射能量优化<sup>[14]</sup>, 最终使两者均满足使用要求。具体优化流程如图 11 所示。

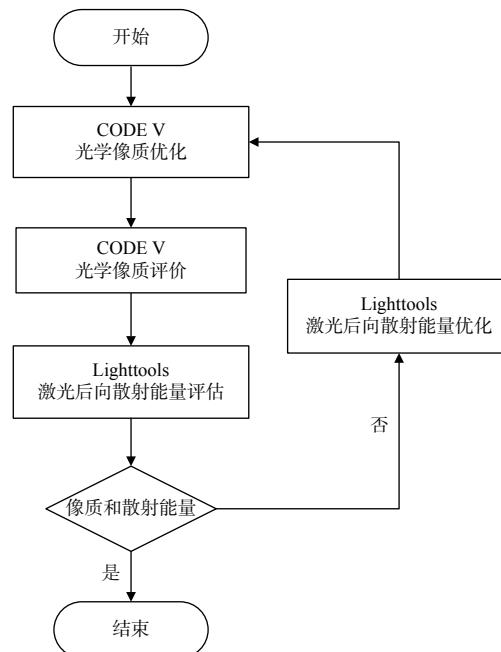


图 11 光学优化流程

Fig. 11 Flow chart of optical optimization

将光学系统模型导入 LightTools 中, 建立激光发射光源、透镜和反射镜模型, 其中散射采用 LightTools 中的反射特性近似模拟。

优化时主要控制对结果贡献较大的透镜半径进行步进式、小量化调整, 逐步调整探测器靶面接收的激光能量<sup>[15]</sup>, 并且保证红外成像性能优良。图 12 为光学系统模型, 图中右侧为模拟激

光发射光源。图 13 和图 14 分别为优化前后探测器靶面接收到的能量, 通过对比能够看出能量有明显的下降。

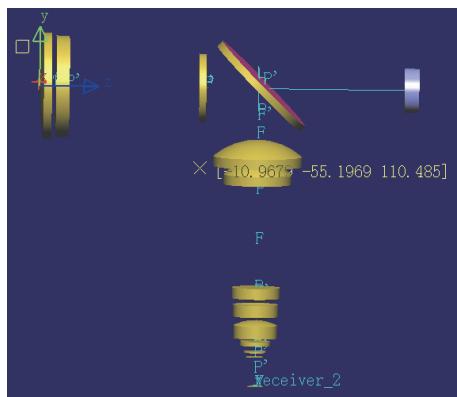


图 12 光学系统模型

Fig. 12 Model of optical system



图 13 优化前数据

Fig. 13 Data before optimization



图 14 优化后数据

Fig. 14 Data after optimization

从图 13 和图 14 可以看出, 适当优化部分透镜的参数, 能够减小进入到红外成像光路的激光能量, 进入到探测器靶面的能量和均值都有所降低, 总功率从  $5.08 \times 10^{-5}$  W 降低至  $3.05 \times 10^{-5}$  W, 平均值从  $7.36 \times 10^{-7}$  W/mm<sup>2</sup> 降低为  $4.39 \times 10^{-7}$  W/mm<sup>2</sup>。利用 CODE V 和 LightTools 2 个设计软件联合优化, CODE V 优化系统成像性能, LightTools 优化光线路

径, 控制到达探测器的激光能量。图 13 和图 14 中的数据为优化示例, 提供一种设计思路, 具体数据可根据实际选用探测器的参数来确定。

## 4 结论

本文基于激光定向红外对抗装备的发展需求, 设计了一套激光红外共光路光学系统。采用激光发射和红外成像共光路的设计方案, 系统前端为光学窗口、扫描棱镜、共用望远系统, 可实现激光发射, 并且有效地压缩了光学零件尺寸, 使光学系统具有体积小、质量轻的特点, 适用于机载装备的使用。此外, 设计中采用 CODE V 和 LightTools 联合优化的方法, 采用小量调整的思路多次优化, 可降低中波激光发射对红外成像光路影响, 保证红外光路成像性能不受影响。

## 参考文献:

- CHU Xuelian, QIU Zhen'an, ZHANG Yuansheng. Experimental research of infrared detecting system disturbed by mid-wave infrared laser[J]. Infrared Technology, 2011, 33(8): 440-443.
- 初学莲, 仇振安, 张元生. 中红外激光对红外探测系统的干扰试验研究[J]. 红外技术, 2011, 33(8): 440-443.
- SONG Bo. Development of the helicopter laser directional infrared anti-missile[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4): 28-31.
- 宋波. 直升机载激光定向红外反导技术的发展[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 28-31.
- CHEN Chen. Development research on directional IR countermeasure technology and equipment[J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(2): 3-4.
- 陈晨. 红外定向对抗技术与装备的发展研究[J]. 光电技术应用, 2015, 30(2): 3-4.
- TITTERTON D H. A review of the development of optical countermeasures[J]. SPIE, 2004, 5615: 1-15.
- CHEN Defu. Development of abroad directional infrared countermeasure technology[J]. Tactical Missile Technology, 2011(2): 123-128.
- 陈德富. 国外定向红外对抗技术的发展[J]. 战术导弹技术, 2011(2): 123-128.
- CHEN Jiao. Optical design of a catadioptric system for both visible and IR spectral[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(6): 36-40.
- 陈姣. 可见与红外双波段折反光学系统设计[J]. 应用光

- 学, 2014, 35(6): 36-40.
- [ 7 ] AN Liansheng. Applied optics[M]. Beijing: BeiJing Institute of Technology Press, 2002: 73.  
安连生. 应用光学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002: 73.
- [ 8 ] PENG Junwang. Making high-precision cemented cubic prism[J]. Optical Technique, 1992(3): 39-40.  
彭军望. 高精度胶合立方棱镜的加工[J]. 光学技术, 1992(3): 39-40.
- [ 9 ] JIAO Mingyin. Optical design of searching system using 480X6 LWIR detector[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1011-1012.  
焦明印. 采用480×6元长波红外探测器的搜索光学系统设计[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1011-1012.
- [ 10 ] HHPT B, JCVD H, FJMV S, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques[J]. SPIE, 2004, 5615: 27-38.
- [ 11 ] LI Haiyan, ZHU Min, LU Hongyi. Off-axis laser disturbing CCD imaging guidance weapons[J]. Infared and Laser Engineering, 2009, 38(1): 66-69.  
李海燕, 朱敏, 卢洪义. 视场外激光对CCD成像制导武器的干扰研究[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 66-69.
- [ 12 ] CHANG Weijun, GENG Haifeng, TENG Guoqi, et al. Primary ghost image analysis of imaging system based on CODE V and LightTools[J]. Journal of Applied Optics, 2017, 38(2): 281-283.  
常伟军, 耿海峰, 腾国奇, 等. 基于CODE V和LightTools的成像系统初级鬼像分析[J]. 应用光学, 2017, 38(2): 281-283.
- [ 13 ] FENG Guoying. Locating the near axial ghosts in the high power laser system[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(5): 632-635.  
冯国英. 高功率激光系统中近轴鬼像点的寻找[J]. 光学学报, 2003, 23(5): 632-635.
- [ 14 ] ORA. LightTools reference manual version 8.4[M]. USA: [S. l.], 2016.
- [ 15 ] ORA. CODE V Reference manual version 10.8[M]. USA: [S. l.], 2016.