

文章编号 2095-1531(2017)06-0777-06

# 美军新型机载光电瞄准系统工作原理分析

陈健\*, 王伟国, 刘廷霞, 张振东

(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:** 光电瞄准系统(EOTS)将前视红外和红外搜索跟踪进行了综合,进而可以获得高分辨率图像,实现自动跟踪、红外搜索跟踪、激光指示、激光测距和激光点跟踪。本文针对美国研制的EOTS的工作原理展开分析和研究,概述了EOTS的概念和技术特点,显示了其作为新一代机载光电瞄准系统的先进性。对EOTS多功能系统、光学元件、红外搜索跟踪、维护和研制规划进行了介绍,着重分析了EOTS的自动视轴校准系统,主要包括自动视轴校准系统的工作原理和工作步骤。最后,本文对EOTS系统的性能进行了总结。

**关键词:** F-35 闪电 II 型;光电瞄准系统;前视红外;红外搜索跟踪

中图分类号:TN976 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20171006.0777

## The operational principle analysis of new airborne Electro-Optical Targeting System(EOTS) of US army

CHEN Jian\*, WANG Wei-guo, LIU Ting-xia, ZHANG Zhen-dong  
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese  
Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: chenjian4500@163.com

**Abstract:** The Electro-Optical Targeting System(EOTS) integrates forward-looking infrared(FLIR) and infrared search and track(IRST) to obtain high-resolution images for automatic tracking, infrared search tracking, laser target designating, laser ranging, and laser spot tracking. In this paper, we analyze and study the operating principle of EOTS developed in the United States. Firstly, we summarize the concept and the technical characteristics of EOTS, and present its advanced nature as a new generation of airborne EOTS. Secondly, the EOTS multi-function system, optical components, IR search, maintenance and development planning are introduced. The operational principle and steps of the automatic bore sight calibration system of EOTS are analyzed emphatically. Finally, the performance of EOTS system is summarized.

**Key words:** F-35 Lighting II; EOTS; FLIR; IRST

收稿日期:2017-07-11;修订日期:2017-09-13

基金项目:长春市科技计划项目(长科技合(2013270)号)

## 1 引言

美国研制的“光电瞄准系统”(Electro Optical Targeting System, EOTS)首次将前视红外和红外搜索跟踪功能集于一体。EOTS 对于空对空和空对地跟踪提供了一种价格较低、高性能、轻量化的多功能系统。通过该系统,飞行员可以获得高分辨率图像、及进行自动跟踪、红外搜索跟踪、激光指示、激光测距和激光点跟踪。EOTS 与 F-35 机身相结合,外部由蓝宝石玻璃保护,内部通过高速视觉光纤和机上计算机连接<sup>[1-4]</sup>。

EOTS 采用了先进的传感器技术,还采用了不引人注意的蓝宝石玻璃设计,先进的算法可以提供远程的目标识别和跟踪。在红外搜索跟踪模式下,EOTS 可以在远程定位和跟踪多飞行器目标,以保证高杀伤性和高生存性<sup>[5-7]</sup>。

EOTS 的模块化设计使得其维修非常方便,确保了二级维护。

EOTS 具有以下特点:(1)结实、不引人注意的、小面玻璃设计,适用于超音速、低观测行动;(2)紧密的单一孔径设计;(3)轻量化设计( $<90.72$  kg),包括玻璃机构;(4)先进的传感器技术;(5)空对地/空对空前视红外跟踪、空对空红外搜索跟踪模式;(6)模块化设计应用于二级维护,减少了生命周期成本;(7)自动视轴校准与飞行器成一条直线;(8)战术上有利于保障人眼安全的二极管泵浦激光器;(9)激光点跟踪;(10)被动与主动搜索;(11)高精度地理坐标生成用以满足精确打击。

本文首先概述了 EOTS 的技术特点,然后着重分析了 EOTS 的系统组成,最后重点研究了 EOTS 的工作原理,并对其主要技术性能和关键技术进行了分析。

## 2 EOTS 系统介绍

导弹和火控方面的专家在瞄准系统设计方面具有丰富的经验和优势,他们设计的系统指标甚至可以超过 F-35 所要求的指标。AN/AAQ-33 狙击手先进瞄准吊舱和 AN/AAS-42 红外搜索跟踪

系统中的设计经验被应用到 AN/AAQ-40 光电瞄准系统(EOTS)的设计中。EOTS 是世界上第一个也是唯一一个将前视红外和红外搜索跟踪功能集于一体的系统。将这两个功能整合到一个传感器是一个巨大的技术挑战<sup>[8-11]</sup>。

### 2.1 多功能系统

作为空对地瞄准吊舱,EOTS 最初用于三分之一的 F-35 战机。但是美国海军成功地论证了 EOTS 可作为绝对不可替代单元来装备每架 F-35 战机。EOTS 为协同作战提供激光指示和激光点跟踪、空对空和空对地红外前视跟踪、数字变焦、广域红外搜索跟踪、地理坐标生成用以支持 GPS 制导武器。后来,F-35 的 3 种型号全部配备 EOTS。

EOTS 的尺寸( $W \times D \times H$ )大约为  $493 \text{ mm} \times 698 \text{ mm} \times 815 \text{ mm}$ ,EOTS 安装于一个不到  $0.11 \text{ m}^3$  的盒子中,重  $91 \text{ kg}$ 。DAS 传感器安装在 EOTS 的左侧和右侧,雷达设备安装在 EOTS 的上方,空间非常紧凑。相比较,狙击手吊舱长  $2.3 \text{ m}$ 、重  $200 \text{ kg}$ 。制冷方式的不同是造成狙击手吊舱和 EOTS 吊舱尺寸差异的一个原因。大多数常规瞄准吊舱,例如狙击手,采用的是风冷方式,其需在吊舱背后携带一个必要的风冷系统,而 EOTS 是液冷系统,使用飞机内部的 PAO(聚  $\alpha$ -烯烃)进行制冷。EOTS 如图 1 所示。

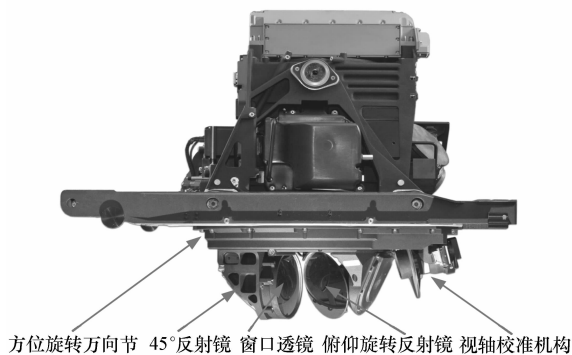


图 1 光电瞄准系统(EOTS)图

Fig. 1 Photo of EOTS

EOTS 位于 F-35 机身前部下方,雷达和座舱舱壁之间。EOTS 安装位置如图 2 所示。EOTS 在 F-35 上的空间紧凑,所以它不具有以往瞄准系统那样像望远镜一样长直的光路。由于空间非常

有限,导致标准瞄准系统的直线光路物理上不可实现。因此 EOTS 的光路通过反射镜折叠,通过棱镜将光线折射到几个不同的焦平面阵列。从入光点到焦平面阵列或者探测器,光线至少被折反射 4 次<sup>[12]</sup>。



图2 EOTS 在 F35 上安装位置

Fig.2 Installation position of EOTS on F35

F-35 之所以如此神奇是因为其具有融合传感器。APG81 雷达针对空中目标具有比红外目标更高的精度,同时 EOTS 的方位精度可以达到一个像素,超过雷达系统。将这两个系统结合使用,F-35 可以实现更小目标的定位。这样,武器系统将会更加有效,同时也可以将高精度的定位信息传递给其他作战单元。

## 2.2 光学元件

EOTS 封装在由 7 块蓝宝石玻璃组成的玻璃机构中。每一块蓝宝石玻璃都是一个单独部分,固定在一个整体框架上,共同组成玻璃机构。根据飞行器雷达标记的需求,EOTS 的玻璃机构首次使用这种设计方式。与此不同的是,AAQ-33 狙击手吊舱仅由 4 块较小的玻璃组成,并且传感器和窗口之间存在一个小角度。在满足光学性能需求的同时需满足雷达标记的要求,这是一个真正的挑战性设计。而 EOTS 玻璃机构的设计,满足了以上的功能需求。EOTS 玻璃机构如图 3 所示。

EOTS 内部对于万向节和主入透镜采用独特的设计,主入透镜(A-focal)称为无焦透镜组或者方位机构,此机构用于提供水平到水平的视场。主入透镜安装在距离保护玻璃 0.635 cm 的右上方。这种复杂的设计是针对低可观测的数字变焦



图3 EOTS 玻璃机构

Fig.3 Glass assembly of EOTS

多视场观察需求而设计的。第二个透镜是俯仰机构,这是一个全新设计的透镜,它被安装在主入透镜对面与主入透镜成  $45^\circ$  角,它的旋转提供垂直方向的视场。俯仰机构使光直线进入光路。系统的上侧是激光器,与狙击手 ATP 使用的激光器相同,但是出光路径不同。激光器下面、万向节机构的上面是两块电路板或者电子控制机构。其中一块电路控制功率伺服,另外一块电路是图像处理电路。通过光导纤维通道将传感器数据直接传输到综合核心处理器。整个 EOTS 机构综合为一个稳定的系统。系统的稳定性可确保在地面上保持一个点指示,这样可以为 GPS 制导武器瞄准提供稳定的地理坐标。

## 2.3 红外搜索跟踪

对于 F-35 战机这样的隐形作战平台,其飞行器标记需要精心管理。由于 F-35 具备红外搜索跟踪系统,其红外传感器是被动探测,不发射任何射线,除非激光系统启动。如果 APG81 雷达超出探测范围,飞行员可以通过使用红外跟踪探测模式将数据发送给 EOTS,进行高精度的被动光电跟踪,这样可以最大限度地减少传输的射频能量和对飞机标记<sup>[13]</sup>。

EOTS 红外搜索跟踪装置使用万向节、惯性测量单元和快速旋转镜提供精确的稳定性。红外搜索跟踪采用被动跟踪方式,具有广域搜索能力,由于其采用了独特的万向节设计,相比于 APG81 雷达具有高速扫描和较高摆率的。

## 2.4 维护

EOTS 是二级维护系统,支持维修人员使用嵌入式测试功能、对独立线性可更换单元(LRC)

进行快速更换。EOTS 可以从 F-35 战机上拆除, 维修人员可以更换其中的 15 个 LRC。

## 2.5 研制规划

EOTS 传感器设计在 2010 年 9 月 F-35 系统发展和演示阶段完成。大多数 EOTS 的飞行测试是在亚利桑那州完成的。2007 年 5 月完成首次飞行测试, 测试人员包括飞行员、副飞行员、传感器操作员和飞行测试主管。

2010 年 5 月, EOTS 悬挂在波音 737 飞机上进行了对地面出租车的测试。配备 DAS、APG81、ESM、CNI、F-35 座舱和工程测试平台, CatBird 可以测试全部的传感器。EOTS 安装在一个与 F-35 相同的玻璃机构中, 将图像传输到测试座舱中。EOTS 测试实验如图 4 所示。



图 4 EOTS 测试实验

Fig. 4 Testing experiment of EOTS

2011 年 3 月, EOTS 开始悬挂在 F-35 战机上进行实验。

## 3 自动视轴校准

每次 EOTS 启动时, 自动视轴校准机构将激光和前视红外校准到一条直线。视轴校准机构是一个安装在万向节后面的单元。当 EOTS 启动时, 传感器旋转进入视轴校准单元, 并且使自己同前视红外和激光成一条直线, 这样它们就可以指向同一个点。具有单一孔径意味着前视红外和激光都通过同一光路<sup>[14]</sup>。

飞机上的所有传感器在空间上都需要通过视轴校准到同一个点, 这样飞行员在雷达显示上看到的地面上的点与在光电系统上看到的是同一个点。

设计人员致力于设计一个更大孔径系统 EOTS, 来提高飞行器更大的探测范围。

EOTS 结构部件示意图如图 5 所示。通过此图片可以看到部分的 EOTS 组件, 其中包括方位旋转万向节、俯仰旋转反射镜、窗口透镜和视轴校准机构。其中, 方位旋转万向节可以提供 360° 方位旋转; 俯仰旋转反射镜可以提供 210° 俯仰旋转; 窗口透镜可以提供光学发射和接收的单一孔径; 视轴校准机构可以提供自动视轴校准。

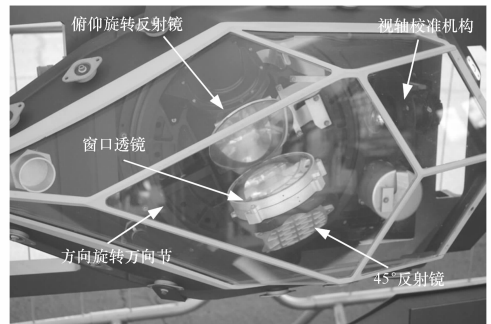


图 5 EOTS 结构部件示意图

Fig. 5 Sketch of EOTS structure assembly

每次 EOTS 上电启动时, 都先将红外视轴和激光发射轴调整到一条直线上<sup>[15]</sup>。

工作步骤如下:

(1) 视轴校准机构工作, 红外光源发光, 经过反射镜, 将光源发射出去;

(2) 俯仰旋转反射镜旋转, 将视轴校准机构光源调整到红外视场中心, 这样保证红外视轴和视轴校准机构的光轴在同一条直线;

(3) 激光发射机构工作, 发射激光, 经过俯仰旋转反射镜入射到视轴校准机构;

(4) 激光经过衰减片减少能量;

(5) 激光经过衰减后, 入射到传感器;

(6) 理论上, 激光点应该在传感器视场中心, 但是实际上激光发射轴和红外视轴间存在一定的偏差, 所以激光点落在视场偏离中心位置;

(7) 调整激光发射轴的慢速反射镜, 直至使激光点落在中心位置;

(8) 至此, 完成红外视轴和激光发射轴调整, 此时 EOTS 系统的红外视轴和激光发射轴在同一条直线上。

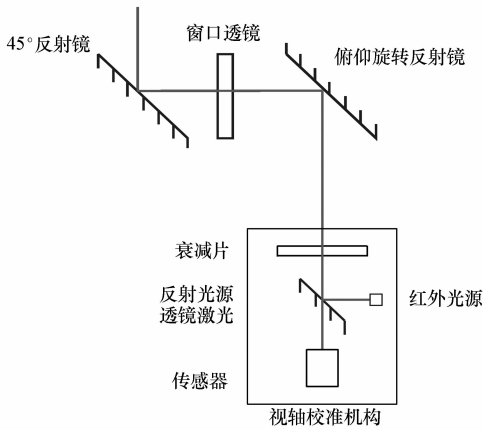


图6 视轴校准机构工作示意图

Fig. 6 Operation diagram of boresight calibration mechanism

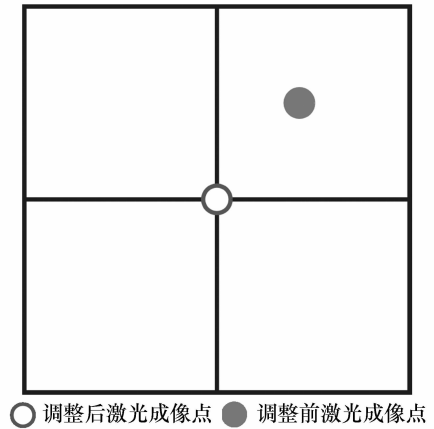


图7 视轴校准机构传感器成像示意图

Fig. 7 Diagram sketch of sensor imaging of boresight calibration mechanism

视轴校准机构工作示意图如图6所示。视轴校准机构传感器成像示意图如图7所示。

## 4 结 论

EOTS 是美国研制的世界上第一个也是唯一的一个整合前视红外和红外搜索跟踪功能于一体的系统。通过 EOTS, 飞行员可以获得高分辨率图

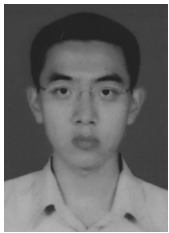
像, 可以进行自动跟踪、红外搜索跟踪、激光指示、激光测距和激光点跟踪。在红外搜索跟踪模式下, EOTS 可以远程定位和跟踪多飞行器目标, 以保证高杀伤性和高生存性。机载光电设备在现代信息化战争中具有独特的优势, 已经成为信息作战体系的重要组成部分。随着 EOTS 的出现, 必将带来机载光电设备的又一次飞跃发展。

## 参考文献:

- [1] 钟坚. 国外光电侦察告警技术的装备与发展[J]. 舰船电子工程, 2008, 28(4): 30-33.  
ZHONG J. Equipment and development tendency of ele-fro-optical warning reconnaissance technology[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2008, 28(4): 30-33. (in Chinese)
- [2] 沈宏海, 黄猛, 李嘉全, 等. 国外先进航空光电载荷的进展与关键技术分析[J]. 中国光学, 2012, 5(1): 20-29.  
SHEN H H, HUANG M, LI J Q, *et al.*. Recent process in aerial electro-optic payloads and their key technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 20-29. (in Chinese)
- [3] 王大鹏, 范惠林, 侯满义, 等. 轰炸光电瞄准系统现状与发展[J]. 激光与红外, 2013, 43(9): 977-981.  
WANG D P, FAN H L, HOU M Y, *et al.*. Status and development of bombing electro-optic targeting system[J]. *Laser and Infrared*, 2013, 43(9): 977-981. (in Chinese)
- [4] 尹传历, 王啸哲. 机载嵌入式图像增强系统设计与实现[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 604-607.  
YIN CH L, WANG X ZH. Design and realization of airborne embedded image enhancement system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2013, 28(4): 604-607. (in Chinese)
- [5] 李刚, 张赫. 机载光电平台实时图像消旋[J]. 液晶与显示, 2014, 29(2): 304-309.  
LI G, ZHANG H. Real-time image rotation - elimination for airborne photoelectric platform[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2014, 29(2): 304-309. (in Chinese)
- [6] 杨权, 刘晶红, 马晓飞. 基于图像处理的机载光电平台自动调焦方法[J]. 液晶与显示, 2011, 26(5): 677-682.  
YANG Q, LIU J H, MA X F. Auto-Focusing method based on image processing for airborne electro-optical imaging platform[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2011, 26(5): 677-682. (in Chinese)

- [7] 杨百剑,万欣. 新一代机载红外搜索跟踪系统技术发展分析[J]. 激光与红外,2011,41(9):961-964.  
YANG B J, WAN X. New generation ofIRST technology in plane development[J]. *Laser and Infrared*,2011,41(9):961-964. (in Chinese)
- [8] 范永杰,金伟其,刘崇亮. 前视红外成像系统的新进展[J]. 红外与激光工程,2010,39(2):189-194.  
FAN Y J, JIN W Q, LIU CH L. New process on FLIR imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2010,39(2):189-194. (in Chinese)
- [9] 张振东,陈健,王伟国,等. 基于SSIM\_NCCDFT的超分辨率复原评价方法研究[J]. 液晶与显示,2015,30(4):713-721.  
ZHANG ZH D, CHEN J, WANG W G, *et al.*. Evaluation method of super-resolution restoration based on SSIM\_NCCDFT [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*,2015,30(4):713-721. (in Chinese)
- [10] 周维虎,韩晓泉,吕大旻,等. 军用光电系统总体技术研究[J]. 红外与激光工程,2006,35:9-14.  
ZHOU W H, HAN X Q, LV D M, *et al.*. Investigation of overall design technology of military opto-electronic systems[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2006,35:9-14. (in Chinese)
- [11] 单海蛟,刘伟宁,王嘉成,等. 多传感器自主跟踪中的数据融合方法[J]. 液晶与显示,2016,31(8):801-809.  
SHAN H J, LIU W N, WANG J CH, *et al.*. Data fusion method in multi-sensors autonomous tracking[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*,2016,31(8):801-809. (in Chinese)
- [12] 彭树萍,陈涛,刘廷霞,等. 激光发射系统快速反射镜的光线反射过程[J]. 光学精密工程,2015,23(2):378-386.  
PENG SH P, CHEN T, LIU T X, *et al.*. Reflection process of fast-steering mirror of laser launching system[J]. *Opt. Precision Eng.*,2015,23(2):378-386. (in Chinese)
- [13] 王颖丽. 第三代红外搜索和跟踪(IRST)系统[J]. 激光与红外,2009,39(10):1017-1021.  
WANG Y L. The third generation infrared search and track(IRST) system[J]. *Laser and Infrared*,2009,39(10):1017-1021. (in Chinese)
- [14] 李艳杰,金光,张元,等. 成像与激光发射系统的共口径设计与实验[J]. 中国光学,2015,8(2):220-226.  
LI Y J, JIN G, ZHANG Y, *et al.*. Co-aperture optical system for imaging and laser transmitting[J]. *Chinese Optics*,2015,8(2):220-226. (in Chinese)
- [15] 韩昌元. 光电成像系统的性能优化[J]. 光学精密工程,2015,23(1):1-9.  
HAN CH Y. Performance optimization of electro-optical imaging systems[J]. *Opt. Precision Eng.*,2015,23(1):1-9. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈健(1981—),吉林长春人,博士,助理研究员,2005年于吉林大学获得学士学位,2007年于吉林大学获得硕士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,主要从事高精度快速数字伺服系统方面的研究。E-mail:chenjian4500@163.com