

文章编号 1004-924X(2024)16-2474-18

国外转塔式光电瞄准吊舱技术发展分析

李 剑, 赵祥杰*, 张大勇*

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对国外转塔式光电瞄准吊舱进行了划代, 介绍了典型第三代吊舱的主要技术特点, 定义了衡量光电吊舱集成度的四个评价标准: 通光孔径与舱体直径之比、通光孔径的立方与系统重量之比, 舱体直径的立方与系统重量之比以及有效载荷重量与系统重量之比, 实现了从宏观层级对性能相近的光电瞄准吊舱功能密度或技术水平的定量评价。介绍了国外典型装备的发展状况, 重点针对美国 MTS-B 吊舱、土耳其 ASEFLIR350 吊舱及之后的 400/500、加拿大 MX-15D 吊舱、法国 EUROFLIR410 吊舱和德国 ARGOS II HDT 等典型产品进行了对比分析, 介绍了各自的技术风格、特点和重要载荷; 通过正向设计评估验证了 MTS-B 前置望远系统的性能指标和 ASEFLIR350 的光学有效载荷; 总结了现代光电瞄准吊舱的几大趋同化技术特点: 多波段共孔径折反式主系统+旁轴小口径次系统的光机架构正取得共识、多种波段的激光探测技术日益倾向主动光学方向、基于多轴多框平台和快反镜相结合的复合轴控制技术正在普及、详查探测更注重目标细节区域增强、多波段图像融合信息处理技术在显控中越发重要。

关键词: 光电瞄准转塔; 多波段共孔径; 前置望远系统; 复合轴控制; 光斑探测

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/OPE. 20243216. 2474

Development analysis of overseas EO targeting turret technology

LI Jian, ZHAO Xiangjie*, ZHANG Dayong*

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: zdywxl874@sohu.com; zxjdouble@163.com

Abstract: The overseas turret-type electro optical (EO) targeting pods have been subdivided into different generations, therefore, the main technical characteristics of typical third-generation pods have been introduced. Four different evaluation criteria for measuring their integration degree have been defined: the ratio of the aperture of the optical aperture to the diameter of the turret, the cube of the aperture of the optical aperture to the weight of the system, the cube of the diameter of the pod to the weight of the system, and the ratio of the weight of the payload to the weight of the system, so as to achieve the quantitative evaluation of the functional density or technological level of the EO targeting pods of similar performances at the macroscopic level. The development status of typical equipment is introduced, focusing on the corporations of typical products such as the American MTS-B pod, Turkish ASEFLIR350 pod and the subsequent ASEFLIR400/500, Canadian MX-15D pod, French EUROFLIR410 pod and German ARGOS II HDT, etc., and their respective technical styles, characteristics and core payloads are introduced. A forward design evaluation verifies the performance of MTS-B front telescope system and ASEFLIR350 turret's optical payload. Several assimilated technical features of modern EO targeting pods are summa-

收稿日期: 2024-04-17; 修订日期: 2024-05-22.

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金 (No. YZJLX2020001)

rized: the optical-mechanical architecture of multi-band common aperture catadioptric main system + side-axis small aperture sub-systems is gaining consensus; the laser detection technology of multiple wavelengths is increasingly inclined to the direction of active optics; composite-axis control technology based on the combination of multi-axis, multi-frame platforms and fast steering mirrors (FSM) is gaining popularity; the enhancement of target detail areas is acquiring more attention, and multi-band image fusion information processing technology is becoming more and more important.

Key words: EO targeting turret; multiband common optical aperture; front telescope system; composite axis control; see spot

1 引 言

随着军事科技的不断发展,航空光电成像探测系统因其信息量大、直观和实时性,逐渐成为情报、监视、侦察(ISR)的重要技术装备和节点,主要用于为情报中心和决策者提供从紫外到长波红外波段/光谱的图片/视频信息,以便从复杂背景下探测、识别、辨认出目标,以“上帝视角”俯瞰战场并随时导引智能弹药发动攻击,日趋成为改变战场局势越来越重要的“力量倍增器”,主要设备包括多功能光电瞄准吊舱、侧视侦察吊舱、广域监视吊舱等。其中多功能光电瞄准吊舱因其多用途多平台和查打一体的实时性和高效性得到重点发展,逐渐成为航空光电载荷的主流发展方向^[1]。

现代多功能光电瞄准吊舱主要分两类:转塔式光电瞄准吊舱,一般半埋于机体,外形粗短,裸露部分为降低气动不平衡力矩对伺服控制系统的影响多为球状,适用于直升机、浮空器、无人机、运输机等亚音速飞行平台,对应英文 EO/IR targeting turret,国内称小吊舱;而大长细比雪茄型外挂于高速飞机的吊舱对应英文 EO/IR targeting pod,国内称大吊舱^[2];本文主要针对小吊舱^[3-5]。

现代小吊舱从结构上可分为载荷舱、跟踪架和电子舱三个舱段,其中载荷舱为最重要的功能舱,通常会配置激光测照器、前视红外相机、可见光/近红外相机、低照度相机、光斑跟踪器、激光标识器和照明器等光电探测装置,由高精度伺服稳定平台(跟踪架)稳像,通过电子舱内的信息处理器对视频图像内的目标进行检测、识别、辨认、

跟踪、瞄准或拍照,并通过激光测距和惯性器件测角测姿计算射击诸元,满足火控发射条件后发射制导弹药,包括给半主动激光制导武器提供激光照射导引或者为图像制导武器提供目标信息和图像模板;或者确定出目标地理坐标召唤地炮火力覆盖^[6]。

本文介绍了不同时代小吊舱的主要特点,并针对国外现役主流的第三代小吊舱,定义了评价其集成度高低的标准,介绍了主要载荷特点,并对具有共性的关键技术进行归纳总结 and 对比分析,以期提炼出规律性的发展方向。

2 国外典型小吊舱的划代

从代次上,国外小吊舱已经发展了三代,正向第四代过渡。每一个代次都有其鲜明的时代特征,基本围绕着那个时代的器件水平、有效载荷和武器系统匹配设计,包括处理电路、探测器、光机系统、激光器、伺服控制系统,以及对应的制导弹药,如表1所示。

各代次的总体架构不同,发展潜力也不尽相同。比如二代的 TADS/PNVS 虽经现代化改进能达到第三代吊舱水平,但也仅限于其载机 AH-64 并未推广;而三代吊舱的典范 MTS-B 却可以发展出 MTS-C/D,在广域侦察、航空搜潜、反导防空领域担当重任,并进一步发展为具有四代吊舱标准的 RIS-HEL 车载高能激光武器。因此,对吊舱进行划代,以及对同代吊舱集成度对比,能够大致把握未来吊舱的发展脉络和技术实现途径。

表 1 光电吊舱技术的代次对比

Tab. 1 Generational contrast of EO turret technology

	1st generation	2nd generation	3rd generation
Typical equipment	M65	TADS/PNVS& TSS	MTS & MX&Euroflir
Weapon system	Direct aiming (DA) wired guidance, 3.75 km range, such as TOW missile	Direct aiming SAL guidance, 8 km range, such as Hellfire missile	SAL/image/multimode composite guidance, direct/ NLOS, 8~16 km or more range, such as Hellfire, JAGM
Servo stabilization system	Low precision gyro stabilized frame platform, stabilization precision $\sim 100 \mu\text{rad}$	Medium precision gyro stabilized frame platform, stabilization precision $\sim 50 \mu\text{rad}$	Medium precision gyro stabilized frame platform+FSM, stabilization precision $\leq 5 \mu\text{rad}$
Payload	EO/IR imaging+lamp pump laser rangefinder	EO/IR imaging +DPL laser rangefinder	Multi-wavelength EO/IR imaging +DPL & OPO laser rangefinder+ laser illumination
Imaging detector	LWIR and TV scanning imaging	320×256 array MWIR or 128×1 LWIR scanning imaging+PAL format TV	$\geq 640 \times 512$ array MWIR+HD TV+LLTV +SWIR imaging
Electronic system	Small scale analog-to digital hybrid circuits	Medium scale analog-to digital hybrid circuits	Large/ultra large scale digital circuits

2.1 第一代小吊舱

第一代小吊舱历经了探索期和成熟期:为提高越南战场上 AH-1G 武装直升机的夜视直瞄攻击能力,美陆军委托研发单位紧急在机鼻上加装了 U 型管状的微光电视观瞄装置 CONFIGS^[7],如所示,通过 T 型台实现方位/俯仰指向并稳像;同期还改装了 AN/AAQ-5 红外被动瞄准系统,如图 2 所示,内置光机扫描的前视红外成像系统。二者都属于昙花一现的尝试,但从某种意义上 AAQ-5 基本具备了现代小吊舱的重要特征:载荷舱、跟踪架和电子舱三位一体。

为提高反坦克能力,美军将陶式反坦克导弹



图 1 CONFIGS 微光电视观瞄装置

Fig. 1 CONFIGS low-light-level television sight device



图 2 AN/AAQ-5 红外被动瞄准系统

Fig. 2 AN/AAQ-5 passive IR targeting turret

的光电探测和火控系统整合进 AH-1Q 机鼻发展为 M65(TSU)吊舱(图 3)^[8],成为最重要改型 AH-1S 攻击直升机的标配,并出口给意大利 A-129 猫鼬攻击直升机,其特点是方位轴外置,俯仰轴内置于载荷舱并由固定窗口密封,并将其一分为二,一侧为前视红外成像系统,另一侧为电视/激光测距系统。这种两轴两框构型的俯仰角不大,但结构简单轻便,能够满足机载陶式导弹约 3.75 km 的射程;M65 吊舱针对坦克类目标探测距离约为 8~10 km,识别距离约为 5~7 km。



图3 AH-1S直升机机鼻上的M65吊舱

Fig. 3 M65 turret installed on the AH-1S nose

2.2 第二代小吊舱

第二代小吊舱主要围绕重型激光半主动制导反坦克导弹提高了探测性能,包括采用 320×256 红外焦平面阵列或 128×1 线阵扫描探测器代替早期二维光机扫描热像仪, 768×576 面阵可见光/近红外探测器代替电视扫描成像系统;用紧凑型二极管泵浦(Diode-Pumped Laser, DPL)激光测照一体机代替功能单一的激光测距机;电子系统从早期模拟电路转为数模混合电路,小型化和多用途能力有显著提高。这一时期代表为AH-64攻击直升机使用的TADS/PNVIS光电吊舱如图4所示,采用奇特的品字形布局两轴稳定,在TADS系统中俯仰轴中置,长波红外成像仪单独一侧,电视和激光测照器置于另一侧,两侧均可独立俯仰;用于驾驶员导航的PNVIS微光夜视导航系统外置于方位轴上方,有独立的方位俯仰轴系;这种奇特且繁琐的布局应该是想嫁接坦克火控系统的猎-歼模式,让驾驶员承担一定的火控任务实现多目标交战,却忽略了飞行环境的复杂性,实现难度极大;而相对独立的轴系让校轴异常繁琐,且这种布局几乎没考虑气动影响,除了利于热管理外几无可取之处。现代化改进时换用了更大面阵高灵敏度探测器,长波红外成像系统分辨率提高到 640×512 规模,可见光相机提高到1K高清,提高了信息处理系统的自动检测能力,通过三十多年电子技术进步才达到猎-歼模式的初衷;但这种隔舱化架构对于搭载定向能

武器需要强弱光分离且有多目标攻击要求的新一代吊舱有一定借鉴意义。



图4 AH-64使用的TADS/PNVIS吊舱

Fig. 4 AH-64's TADS/PNVIS turret

另一个二代吊舱的典型装备是AH-1Z上搭载的TSS光电吊舱(如图5),特征为:经典的球形两轴四框构型,所有光学有效载荷均置于高刚度的光具座上且位于球体内方位/俯仰精稳平台内;载荷舱又置于U形外方位/俯仰粗稳跟踪架上。这种构型简洁可靠,是现代吊舱的主流。但装备TSS吊舱的时代特别强调连续变焦持续跟踪,其主系统为单波段的中波红外连续变焦相机,各通道基本为光学分孔径设计,集成度不高,空间浪费大。该吊舱具备一定的侦察、制导多用途能力,探测距离大于15 km,识别和照射距离大于10 km,现代化改进后除了能发射激光半主动导弹,还能为图像制导武器提供模板,具有一定的第三代小吊舱能力。与TADS相比,其对付多目标的能力不足,但可靠性和维护性更高。



图5 AH-1Z使用的TSS吊舱

Fig. 5 TSS turret mounted on AH-1Z

2.3 第三代小吊舱

第三代小吊舱没有专门针对某一武器系统,而是从前两代单任务的“功能机”升级为多任务多功能多用途的“智能机”,适配的武器系统包括激光半主动/图像/卫星制导甚至多模复合制导等智能化弹药,还能完成情报收集监视侦察、搜救,甚至测绘等多种任务,多用途性能越来越强,功能密度越来越高,大量应用于察打一体无人机、直升机、运输机、飞艇等空中平台,甚至嫁接到车载/舰载环境。典型产品为雷神公司的 MTS-A/B 两型吊舱^[9-10],如图 6 所示,前者较小,广泛运用于 MQ-1 无人机、SH-60 海鹰直升机等平台;后者较大,用在 MQ-9, RQ-4 无人机, C-130 运输机等平台,其特征是光学系统采用多波段共孔径的折反式主系统+旁轴变焦镜头,系统集成度和模块化程度和精度高,作用距离达到第二代小吊舱的两倍以上;多采用 640×512 及以上面阵中波红外探测器, 1080P 及以上近红外/可见光探测器;人眼安全激光器测距机和 $1.064 \mu\text{m}$ 激光照射器;近红外标识/照明激光用于空地协同;伺服稳定系统多采用稳定精度达到 $15 \sim 20 \mu\text{rad}$ 量级的两轴四框平台(某些吊舱还采用三轴五框平台用于机械消像旋)并增加快反镜稳像,综合稳定精度能提高到 $5 \mu\text{rad}$ 甚至 $3 \mu\text{rad}$ 量级以满足成像分辨率要求;电子处理硬件基本全数字化,普遍具备动目标检测多目标跟踪甚至部分人工智能辅助识别能力。



图 6 MTS-A(左)和 MTS-B 吊舱(右)

Fig. 6 MTS-A(left) and MTS-B turret(right)

正在发展的第四代小吊舱将会基本延续第三代小吊舱基础架构, $3 \sim 5 \mu\text{rad}$ 的稳定精度几乎不会再提升,但基于复合轴控制由高频跟踪环

驱动的伺服系统会将跟踪精度提高到小于两个像素分辨率(即 $6 \mu\text{rad}$)量级,通过 FSM 反扫实现像移补偿的快速步进凝视扫描可获得超远距离对空探测和对地广域扫描侦察能力,光学系统将增加共孔径探测波段和视场,并更加强调主动光学,包括定向红外对抗能力和中高能激光硬毁伤能力(见图 7 的 RIS-HEL 激光武器的光束定向器),以及无线光通讯能力。



图 7 基于 MTS-B 吊舱改进的 RIS-HEL 车载激光武器光束定向器

Fig. 7 RIS-HEL Beam director system of vehicle mounted Laser weapon based on MTS-B turret

3 第三代小吊舱的主要技术特点和评价标准

第三代小吊舱具有顽强的生命力,自本世纪初诞生的二十多年,其总体架构、有效载荷、伺服控制系统以及探测手段几乎没有革命性的突破,因此除了用于 RIS-HEL 的光束控制器外,目前层出不穷的新品仍被归入三代吊舱范畴,尽管给其配套的信息技术和电子系统已经发生了翻天覆地的变化。

总体架构上,第三代小吊舱由于搭载平台对重量、体积和功耗的严格要求,将几乎所有光学有效载荷并联布置于载荷舱内,这与美军现役大吊舱如狙击手 XR 和 ATFLIR 常用的串联式布局有本质区别,也造成小吊舱不小,大吊舱不大的尴尬局面,例如狙击手 XR 舱径约 305 mm ,探测系统最大天线口径约 $\varphi 150 \text{ mm}$,而价格类似的小吊舱 MTS-B 舱径却达到 558 mm ,最大通光孔径超过 291 mm 。显然,后者更适合非传统情报监

视与侦察任务(Non-Traditional Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, NTISR),可在 10 km 左右辨认人员类目标,角分辨率 5 μrad 甚至 3 μrad 量级(MX-25D 吊舱)。

三代小吊舱有效载荷的最大特点是采用基于永磁力矩电机直驱高精度编码器测角和中等精度惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)测速测姿的两轴四框平台并将高刚度的载荷光具座作为内框(内方位或俯仰框作为中框)统一布局,便于安排口径最大的多波段共孔径折反主系统占据最好最重要的位置,旁轴布置小口径大视场系统和其他光学天线,通过切换方式共用高端探测器(如制冷型中/长波红外探测器或短波红外探测器),基本摒弃了单波段分孔径大变倍比连续变焦系统(L3 公司 MX-20/25 吊舱因采用有中央球轴承三轴稳定的内减震平台仍坚持采用分孔径),提高了空间利用率并兼顾了光学成像性能和快速变倍的要求;之前强调的连续变焦系统在视场切换时不易丢失目标等优点也随着信息处理系统的进步,如多通道多跟踪器同时工作,跟踪器抗遮挡算法优化等措施不再重要。当然,连续变焦成像模式较为适应人类感官,许多吊舱仍保留了这一功能。

另一特点是采用多种激光光学系统,包括 1.54 μm /1.55 μm /1.57 μm 人眼安全测距激光;用于半主动激光制导武器的 1.064 μm 照射激光;便于用夜视仪的地面部队确认的 0.86 μm 或 0.83 μm 标识激光;以及配合低照度相机使用的照明激光。这种主动光学的发展趋势值得关注。

在使用要求基本接近前提下,由于技术路线、工业基础和研制时代不同,不同口径的吊舱集成度或功能密度很难用统一指标量化比较,为厘清各类产品总体架构和光机技术的水平高低,这里近似用最大通光孔径 d 、舱径 D 、载荷重量 w 与系统总重 W 的函数关系组成四个定量标准:光舱比、光重比、舱重比和载重比进行甄别。

3.1 光舱比

定义的第一个集成度标准为各波段最大通光孔径 d 与吊舱舱径 D 之比即光舱比 K_1 ,即:

$$K_1 = \frac{d}{D}. \quad (1)$$

不同舱径对应不同通光口径,理论上 D 越大 K_1 值也应该越大,因为壳体、结构、光路、框架平

台刚度(对应径向厚度)、测角元件、电机和走线均有最小尺寸限制,而旁轴部分光学系统如激光测距/照射天线的口径相对固定,旁轴变焦系统与主系统的变倍比相对固定,通光口径越小镜筒壳体厚度的相对占比越大,较小口径吊舱的功能密度难以媲美较大口径的产品。典型产品^[10-13]光舱比如表 2 所示:

表 2 典型光电吊舱的光舱比

Tab. 2 Ratio of optical aperture to turret diameter for typical EO turret

	MTS-B	ASELFLIR 350	MX- 15D	EUROFLIR 410
d	291	220	160	130
D	558	427	419	410
$K_1=d/D$	0.521	0.515	0.382	0.317

舱径 D 最大的 MTS-B 光舱比达到了 0.521,但舱径小了 131 mm 的土耳其新品 ASELFLIR350 也达到了 0.515,说明其后发优势明显。对于分孔径的吊舱,由于主系统往往留给了红外成像通道,其余波段的口径较小,光舱比各不一致。更大的光舱比意味着更大的光学接收口径,更高的分辨率和更高的稳定精度,方法包括:共光路(多个光学探测通道共用一个光路但不一定使用相同的口径)或共孔径设计(多个波段共用一部分或所有光路,且有相同孔径);光机控制一体化设计,通过降低镜头、光具座等功能载荷的冗余刚度和重量,更换模量更高的伺服框架平台材料以提高系统刚度;采用类似 PV-LAB 公司四代平台^[14]的颠覆性架构见缝插针布置无中心球轴承由音圈电机驱动的主被动减震装置,代替占空间较大的俯仰内框,可直接实现整体载荷的度级~微弧度级宏微一体化伺服稳定精度;采用小型化轻量化和精度更高的探测器、编码器、高密度永磁电机、小型化的驱动电路等措施。

3.2 光重比

衡量集成度的第二个指标为光重比 K_2 ,即最大通光孔径 d 与重量 W 的函数关系。功能性能近似的吊舱 K_2 基本为立方函数,理论上 d 越大轻量化率越高, K_2 也应该越大,即:

$$K_2 = \frac{d^3}{W}. \quad (2)$$

几款经典吊舱的光重比 K_2 对比如图 3 所示。

表 3 典型光电吊舱的光重比

Tab. 3 Ratio of optical aperture and weight for typical EO turret

	MTS-B	ASELFLIR 350	MX-15D	EUROFLIR 410
d	291	220	160	130
W	116	55	51.4	45
$K_2=d^3/W$	2.1×10^5	1.94×10^5	7.9×10^4	5.4×10^3

表 3 中 MTS-B 的光重比 K_2 又居于首位,但与后起之秀的 ASELFLIR350 差距不大,而年代较早的 MX-15D 仅比通用吊舱 EUROFLIR410 稍好,与光舱比的排名一致。

3.3 舱重比

但载荷侧重点和辅助功能不同也有可能造成评价标准的偏差。比如高空长航时无人机用的察打一体吊舱对分辨率有特殊要求,光舱比 K_1 和光重比 K_2 就比较大,但兼顾多任务的通用吊舱,采用了更多更大的旁轴光学系统,其集成度并不能完全被 K_1, K_2 所代表。因此这里引入了第三个评价标准 舱重比 K_3 , 即吊舱直径 D 与重量 W 的函数关系。 K_3 也基本为立方函数关系,理论上 D 越大轻量化率越高, K_3 也应该越大,即:

$$K_3 = \frac{D^3}{W}. \quad (3)$$

以上经典吊舱的舱重比 K_3 如表 4 所示。

表 4 中通光孔径最大的 MTS-B 仍然居于前列;但 ASELFLIR350 与其对标产品加拿大 MX-

表 4 典型光电吊舱的舱重比

Tab. 4 Ratio of turret diamter to turret weight for typical EO turret

	MTS-B	ASELFLIR 350	MX-15D	EUROFLIR 410
舱径 D	558	427	419	410
总重 W	116	55	51.4	45
$K_3=D^3/W$	1.49×10^6	1.42×10^6	1.43×10^6	1.53×10^6

15D 二者 $\frac{D^3}{W}$ 差不多,而前者的光舱比更大,因此集成度更高;MTS-B 与 EUROFLIR410 相比,后者的 $\frac{D^3}{W}$ 比值更高,虽然光舱比 K_1 和光重比 K_2 较小,但其旁轴次系统性能较高,比如可见光连续变焦相机为 $75 \times$ 大变倍比的高清镜头,还采用了大口径小视场短波红外成像通道用于光斑探测 (See spot)。通过舱重比 K_3 可以发现其中端倪,但 K_3 成立的前提是使用要求、功能接近,且 K_1/K_2 相差不多,否则浪费空间的大舱体小重量也可以造就较大的 K_3 。

3.4 载重比

衡量集成度的第四个指标为载重比 K_4 , 即载荷重量 w 与总重 W 的关系:

$$K_4 = \frac{w}{W}. \quad (4)$$

由于缺乏各产品的详细资料,只能根据有限信息和工程经验推导,运动部分重量与系统总重的比值基本为 $1:(2 \sim 3)$ 。比值太大则容易出现头重脚轻,控制带宽降低的情况,影响跟踪角加速度和跟踪精度;太小则浪费重量;典型案例是 PV-LAB 公司提供的通用 PV-18 伺服稳定平台^[14], 舱径约 $\varphi 460$ mm, 平台重约 32 kg, 其有效载荷范围为 23 kg (典型)~45 kg (最大), 比值范围在 $1:(1.7 \sim 2.4)$ 之间。当然,最大载荷时肯定会影响动态范围和控制带宽,属于特殊用途。另外,舱径越小系统比刚度越高,较小的舱径 (比如 $\varphi 400$ mm 以下) 可适当降低结构重量的占比,而采用高模量碳碳复合材料等措施能提高系统轻量化率,也是新型小吊舱的发展方向。

3.5 汇总对比

四型吊舱的综合对比如表 5 所示,显然,MTS-B 在可获得资料的三个评价标准上占据了两个 No. 1 一个 No. 2, 综合得分最高;ASELFLIR350 则占据了两个 No. 2 一个 No. 4, 综合得分第二;MX-15D 排名第三,EUROFLIR410 排名垫底。除了 ASELFLIR350 是新品外,其他三个产品符合国际市场的份额排序。

表 5 典型光电吊舱集成度的综合对比
Tab. 5 Comprehensive comparison of integration degree of typical EO turret

	MTS-B	ASELFLIR 350	MX-15D	EUROFLIR 410
K_1	0.521@ NO. 1	0.515@ NO. 2	0.382@ NO. 3	0.317@ NO. 4
K_2	2.1×10^5 @ NO. 1	1.94×10^5 @NO. 2	7.9×10^4 @NO. 3	5.4×10^3 @NO. 4
K_3	1.49×10^6 @NO. 2	1.42×10^6 @NO. 4	1.43×10^6 @NO. 3	1.53×10^6 @NO. 1
K_4	—	—	—	—

4 国外主要装备发展状况

4.1 美国 MTS-B 吊舱

MTS-B 之前的 MTS-A 吊舱采用了离轴三反前置望远系统,由于径向尺寸过大,浪费了载荷舱过多迎风面空间导致旁轴光学系统布置困难,其最大光舱比 $K_1=150/460\approx0.326$,光重比 $K_2=150^3/60\approx5.62\times10^4$ 也较小,且离轴三反系统价格昂贵,虽然有无中心遮拦利于杂光抑制和红外系统非均匀性校正等优点,且舱重比 K_3 还有优势,但其旁轴载荷功能有限,因此不再赘述。

MTS-B 有多种状态,这里只介绍标准型配置,其窗口通道如图 8 所示,最大的主窗口后为同轴反射式前置望远系统+出瞳附近的快反镜+分光镜+后置成像系统(中波红外、近红外+可见光)三路成像通道作为主系统(体育场形的 12×前置望远镜如图 9 所示),旁轴配置其他通道,其中激光标识器一般用于协同作战时类似激光笔功能给己方部队标注目标;中红外大视场成像通道用于全天时导航和态势感知;中红外中视场成像通道一般用于战场目标搜索;电视大视场成像通道因其更高分辨率和适合人眼习惯的色彩信息常用于白天导航和态势感知;激光照射器为 1.064 μm 激光,人眼安全激光测距机为 1.064 μm 激光器 OPO 后生成的 1.57 μm 波长激光。MTS-B 的主要参数如表 6 所示。

从表中参数和其他文献分析,MTS-B 应该采用了 F#3 和 F#6 的双 F#中波红外探测通道^[15],前者有较高信噪比,可兼顾对地和对空探测;后者有更高的角分辨率。这种双 F#通道需要切换光路中的镜组配合。虽然 F#6 的镜头艾利斑已经远超探测器像元尺寸,但通过累计积分时间和像素级数字化制冷探测器,仍能在能量充足的场景使用。

从 5 μrad 稳定精度 0.23°×0.31°视场以及同

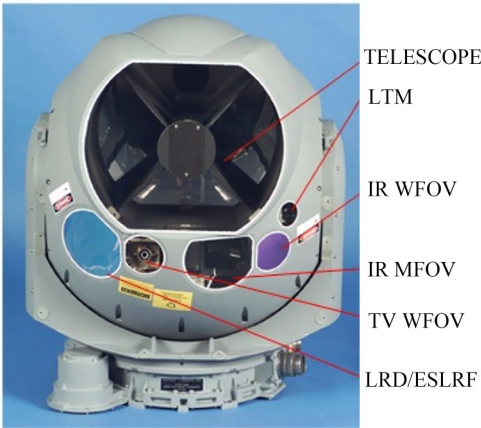


图 8 基本型 MTS-B 搭载的光学系统
Fig. 8 Optical systems carried by the basic MTS-B turret

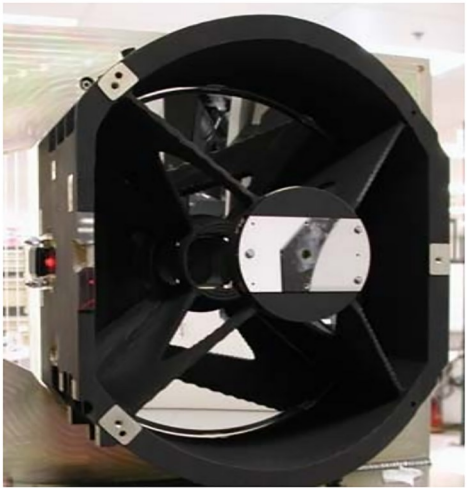


图 9 MTS-B 使用的 12×前置望远镜
Fig. 9 12× front telescope used by MTS-B turret

时代的柯达 1 280×960 面阵 7.4 μm 像元间距 CCD 探测器分析,电视通道 F#5.6,焦距 1 630 mm。从公开资料反推,MTS-B 前置望远系统很可能采用了同轴偏视场三反结构^[16-17],其方位向视场最大可以达到 2°左右,俯仰向视场约 0.7°,像质接近衍射限。之所以没有采用更大面阵更小像元探测器,很可能受制于服役时代探测

表 6 MTS-B 性能参数

Tab. 6 Performance parameters of MTS-B

	Parameter indicators	Notes
Turret diameter/ weight	558 mm/116 kg	
Optical aperture	~ $\varnothing 291$ mm	Max
Wavelength	TV: $1\,280 \times 960 @ 0.4 \sim 0.7\ \mu\text{m} \& 0.6 \sim 0.8\ \mu\text{m}$ MWIR: $640 \times 480 @ 3.7 \sim 4.8\ \mu\text{m}$	TV $4 \times$ e-zoom; MWIR $2 \times$ e-zoom
FOV	宽: $34^\circ \times 45^\circ / 17^\circ \times 22^\circ$ 中: $5.7^\circ \times 7.6^\circ / 2.8^\circ \times 3.7^\circ$ 窄: $0.47^\circ \times 0.63^\circ (\text{IR}) / 0.23^\circ \times 0.31^\circ (\text{TV}) \& 0.08^\circ \times 0.11^\circ (\text{TV})$	MWIR EFL=873 mm@F# 3 & 1746 mm@F#6
Laser system	1.57 μm ESLRF 1.064 μm Designator 0.86 μm LTM/ illuminator	LRF > 30 km Designator > 12 km
Servo system	2 Axis inner & 2 Axis outer	
Line-of-sight stabilization	$\leq 5\ \mu\text{rad}$	
AZ/EL slew	$360^\circ \times N / +40^\circ \sim -135^\circ$	

器技术和数据链带宽限制。反向设计的前置望远镜系统如图 10 所示,放大倍率 $12 \times$,最大通光口径 $\varnothing 291$ mm 时候实际口径最大尺寸约 320 mm

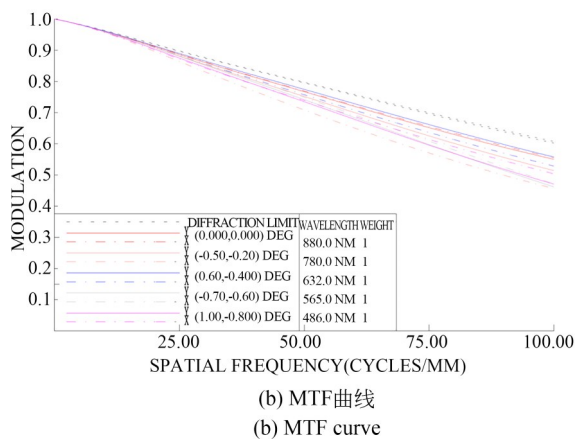
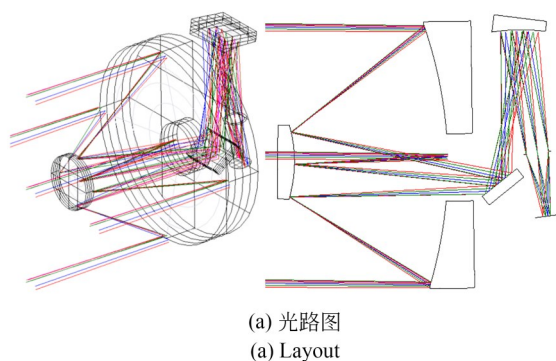


图 10 前置望远镜光路及 MTF 曲线

Fig. 10 Front telescope layout and MTF curve

(弧矢方向)。

标准版的 MTS-B 没有采用更多波段,但之后发展的 MTS-C(如图 11)弥补了这些缺憾,公开报道换用了 $1\,280 \times 1\,024$ 面阵 $10\ \mu\text{m}$ 像元间距的中波红外探测器,增加适合对空的制冷型长波红外探测器;顺理成章应该更换了更大面阵更小像元间距的可见光/近红外探测器,增加透雾能力强量子效率高的短波红外探测器,升级远程激光测距能力,还应该增加基于快反镜大角度反扫补偿的复合轴控制步进凝视扫描功能,毕竟 MTS-C 主要用于弹道导弹预警,需要广域探测。

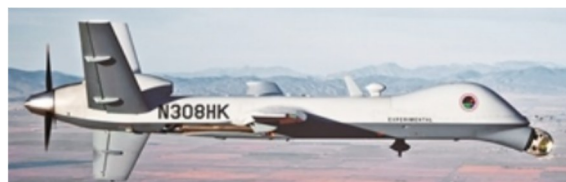


图 11 用于导弹预警的 MTS-C

Fig. 11 MTS-C turret for missile warning

4.2 土耳其 ASELFLIR 350 吊舱

土耳其 TB-2 无人机曾经将加拿大 L3 公司 MX-15D 光电瞄准吊舱作为标配,受到禁运后其国营 ASELSAN 公司发展了自己的系列小吊舱,对标 MX-15D 的 ASELFLIR350 较为典型,特点是在折反式主系统两侧安装了众多的旁轴光学

系统,内部光机系统如图 12 所示,对应指标如表 7 所示。



图 12 ASELFLIR350 吊舱
Fig. 12 ASELFLIR 350 turret

根据参数反推,中波红外成像通道的 0.5°视场角分辨率,按瑞利判据获得的角分辨率为:

$$\rho = 1.22\lambda/D, \tag{5}$$

其中: ρ 为角分辨率, λ 为中心波长(此处为 4 μm), D 为通光孔径(此处为 220 mm),则该系统衍射角分辨率约为 22.2 μrad 。

0.5°视场角对应 640 pixels,则像素角分辨率为 0.5/57.3/640 $\approx$ 13.6 μrad ,几乎为衍射角分辨率的 61%,需要长积分时间才能获得较高信噪比。当采用 15 μm 像元间距探测器时,对应焦距 1 100 mm @F#5.5;

0.9°视场对应角分辨率约为 24.5 μrad ,显然不可能为旁轴次系统而是主系统变倍所致,存在两种可能:固定 F#探测器、通光孔径变小,后置成像系统变焦;变 F#探测器,通光孔径不变,后置成像系统变焦^[18]。笔者认为后者可能性较大,此时的 F#约为 2.78,与衍射角分辨率基本接近,

成像通道有较高的信噪比和温度分辨率,与 MTS-A/B 吊舱的焦距设置相近。土耳其的制冷探测器似乎没有双 F#功能,应该采用了“温阑”设置——可资验证的是 ASELFLIR400,资料公开的水平最小视场只有 1.4°,对应 1 024 $\times$ 768 面阵探测器和 ϕ 220 mm 口径,角分辨率同为 24.5 μrad 。

同理,表 7 中白光相机的 0.5°视场通道如果对应 4 096 pixels,则角分辨率约为 2.13 μrad ,而系统衍射角分辨率按式(5)计算约为 3.05 μrad (中心波长 0.55 μm),像元角分辨率几乎为衍射角分辨率的 70%,需要较好的天气才能获得较高的像质。

白光相机 0.9°视场对应 3.83 μrad 像元角分辨率,与衍射角分辨率 3.05 μrad 匹配,此处应该与中波红外成像通道一样在变 F#的同时变倍。

公开资料中没有该吊舱稳定精度的介绍。要达到 MTS-B 吊舱 5 μrad 或更高的稳定精度需要采用基于 FSM 复合轴控制技术,且对 FSM 的带宽要求极高。其光机控制一体化设计水平很高,达到一个像素的稳定精度仅是时间问题,但要达到 2 个像素的跟踪精度还需要在元器件上获得突破。

受制于数据链带宽,地面显示终端为 1080P,白光相机 4 096 $\times$ 2 880 的面阵规模要有损压缩才能传输,但开窗的电子变倍模式可快速响应详查需求,而像元合并模式可获得较大视场,便于稍纵即逝的空中侦察,也是目前吊舱光学系统发展的一个方向。

根据经验,在 F 数中等(一般为 F#4~5.6)时

表 7 ASELFLIR350 性能参数
Tab. 7 Performance parameters of ASELFLIR350

	Parameter indicators	Notes
Turret diameter/ weight	427 mm/55 kg $\pm$ 5%	
Max optical aperture	ϕ 220 mm	
MWIR	640 $\times$ 512@0.5°/0.9°/3.2°/7.2°/15.2°/30°	6 FOVs
Day TV camera	4 096 $\times$ 2 880@0.5°/0.9°&3.2°~30°	Horizontal
LL-NIR camera	800 $\times$ 600@0.5°/0.9°/3.2°/5.5°/15.2°/30°	6 FOVs
Laser system	1.064 μm LRF/Designator 0.808 μm LTM /illuminator	LRF>35 km
Servo system	2 Axis inner&2 Axis outer	
AZ/EL slew	360° $\times$ N/+57°~−105°	

弱光环境的分辨率比正常光环境要低 3 倍以上。为获得 10 lx 左右弱光环境较高信噪比图像, ASELFLIR350 还采用了 800×600 面阵的大像元低照度相机(约为白光相机分辨率的 $1/5$);按照 0.5° 计算,其像元角分辨率约为 $11 \mu\text{rad}$;按 0.9° 计算,像元角分辨率约为 $19.6 \mu\text{rad}$;从光机设计角度,该通道应该与白光通道基本共光路,通过反射镜切换方式更换探测器。

可能为节省体积或者技术能力原因,该吊舱的测距照射均为 $1.064 \mu\text{m}$ 波段,没有采用主流吊舱采用的人眼安全波段测距;采用的 $0.808 \mu\text{m}$ 标识和照明激光也没有欧美其他吊舱采用的 $0.83 \mu\text{m}$ 或 $0.86 \mu\text{m}$ 波段激光的大气透过率高。土耳其除了 ASELFLIR350 外还发展了类似尺

寸重量的 ASELFLIR 400/500(见图 13),参数对比见表 8 所示。



图 13 ASELFLIR400(左)和 ASELFLIR 500(右)

Fig. 13 ASELFLIR400 (left) and ASELFLIR500 (right)

表 8 ASELFLIR400/500 性能参数

Tab. 8 Main parameters of ASELFLIR400/500

	ASELFLIR 400	ASELFLIR 500
Turret diameter/ weight	437 mm/57 kg	480 mm/52 kg $\pm 5\%$
Max optical aperture	$\varphi 220 \text{ mm}$	
MWIR	$1024 \times 768 @ 1.4^\circ \sim 27.4^\circ$	$1280 \times 1024 @ 0.86^\circ / 1.3^\circ / 4.3^\circ / 8.6^\circ / 15^\circ / 25^\circ$
Day TV camera	$1920 \times 1080 @ 0.7^\circ \sim 14.2^\circ$	$4096 \times 2880 @ 0.5^\circ / 0.9^\circ \sim 3.2^\circ \sim 30^\circ$
SWIR	$640 \times 512 @ 1.6^\circ \sim 29^\circ$	$1280 \times 1024 @ 0.66^\circ \sim 1.1^\circ$
Laser system	$1.064 \mu\text{m}$ Designator $> 30 \text{ km}$;	$1.064 \mu\text{m}$ LRF/Designator $> 30 \text{ km}$
	$1.55 \mu\text{m}$ ESLRF $> 20 \text{ km}$;	
	$0.808 \mu\text{m}$ LTM /illuminator	
Servo system	2 Axis inner & 2 Axis outer	

表 8 值得一提的是 30 km 激光照射能力,超过了土耳其现役配套武器的射程,符合武器系统更远更精确的发展方向。但结合表 7, ASELFLIR 350/400/500 主要参数差距不大但结构形式大相径庭,而且部分指标超高,可能出于宣传需要,产品本身并不成熟。

参照 ASELFLIR350 的结构形式设计了紧凑结构的 optical 有效载荷,其中,主系统采用了折反式前置望远系统(如图 14~图 15 所示),该设计的最大通光口径约为 $\varphi 220 \text{ mm}$,利用镜架材料、反射镜材料的线膨胀系数和透镜材料特性(线膨胀系数、折射率温度系数 dn/dT)相匹配在 $-20 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围进行了 optical 被动消热差,高低温时

的中波红外成像通道($3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 波段)、短波红外成像通道($0.95 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 波段)和可见光/近红外成像通道($0.48 \sim 0.88 \mu\text{m}$ 波段)的传递函数(MTF)曲线与图 14(b)~14(d)所示的常温状态几乎没有变化;更宽温度则需机电离焦补偿消热差。共用探测器的中波红外旁轴变焦系统和短波红外旁轴变焦系统最大通光口径约为 55 mm ,白光/近红外连续变焦系统最大通光口径约 70 mm , $1.064 \mu\text{m} / 1.57 \mu\text{m}$ 双波段激光测照器发射天线最大口径约 65 mm ,光斑跟踪器和标识激光发射器最大口径约 70 mm 。探测系统最大径向尺寸约 295 mm ,可放进 $\varphi 430 \text{ mm}$ 球体内,如图 15 所示。

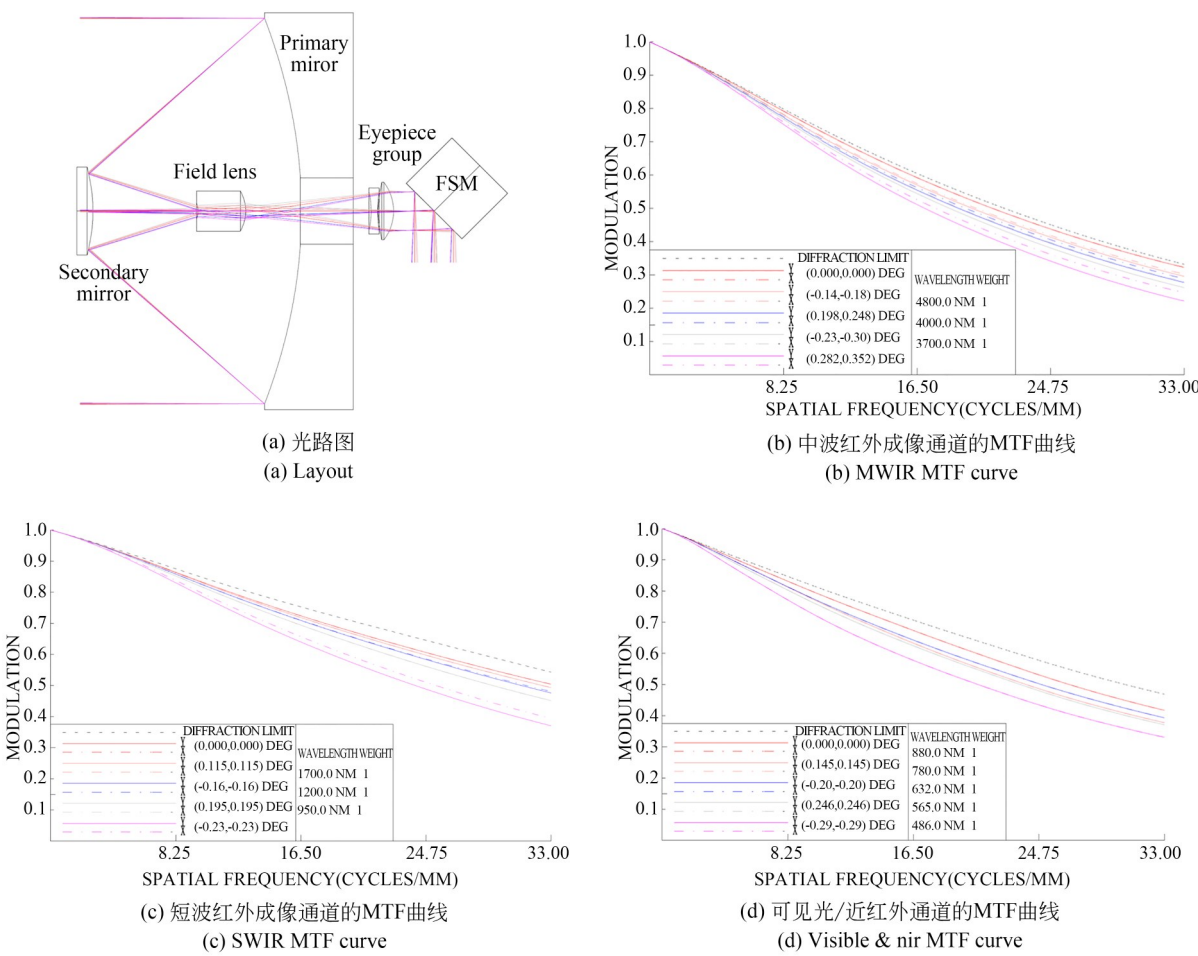


图 14 前置折反式望远系统及 MTF 曲线
Fig. 14 Front catadioptric telescopic system and MTF curves

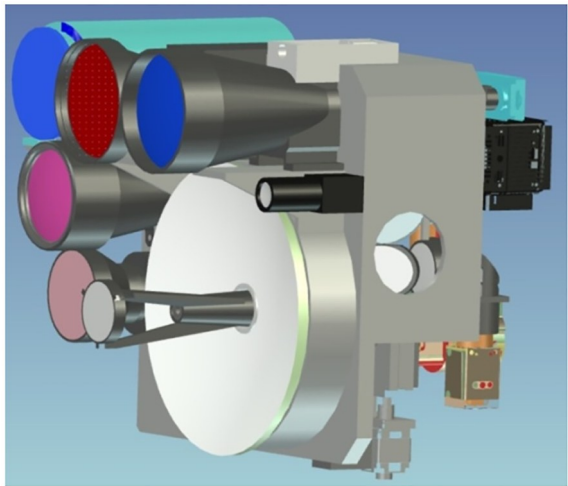


图 15 正向设计的类 ASELFLIR350 光学有效载荷
Fig. 15 Forward designed optical payload similar to ASELFLIR350

4.3 加拿大 MX-15D 吊舱

MX-15D(D 代表数字化)沿用了早期 MX-15 吊舱(外形与图 5 的 TSS 吊舱极为相似)采用分孔径结构的成熟布局^[12],其最大口径为中波折反式光学成像系统,约 $\phi 160\text{ mm}$,采用了 $1\,280\times 1\,024$ 面阵规模中波红外探测器,视场 $1.2^\circ/1.9^\circ/9.4^\circ/35.5^\circ$ 通过次镜和透镜组的切换实现变倍。切换次镜/透镜组的变倍方式对于国内还是一种较为新颖的变焦结构,目前公开报道的只有长春光机所下属的奥普光电和一些专利^[19-20],更进一步采用了中短波红外共孔径结构(如图 16),毕竟次镜定位精度和可靠性要求极高。

MX-15D 的 1.2° 小视场对应纵向视场即 $1\,024\text{ pixels}$ 方向。鉴于数字消像旋以短边为主,

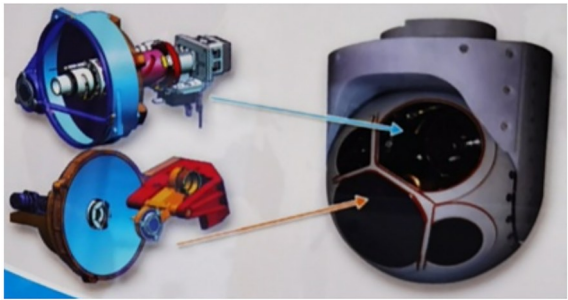


图 16 长春奥普光电展示的类 MX-20 折反式光学系统
Fig. 16 Catadioptric optical system similar to MX-20 turret's payload showed by Changchun Optotech Co., Ltd

这种定义比 ASELFLIR 系列吊舱水平向视场更科学。中波红外成像通道最高像素分辨率为 $20.5 \mu\text{rad}$, 而系统的衍射分辨率 $\rho = 1.22\lambda/D$ 约为 $30.5 \mu\text{rad}$, 几乎为衍射角分辨率的 67%, 需要长积分时间才能获得较高信噪比。当采用 $15 \mu\text{m}$ 像元间距探测器时, 对应焦距约为 731 mm @F# 4.6。MX-15D 内部结构如图 17 所示, 主系统为次镜可切换的折反系统(金黄部分, 彩图见期刊电子版), 正向设计的中波红外四视场成像光路和 MTF 曲线如图 18 所示。

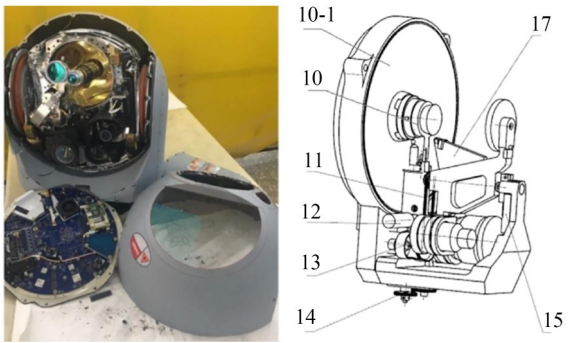
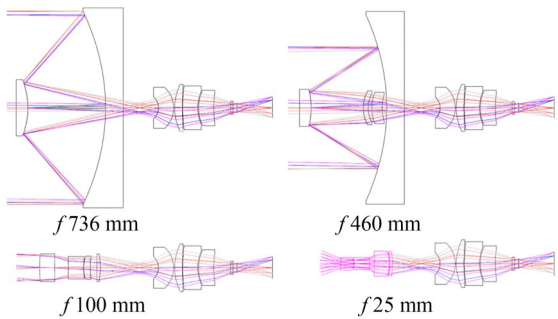


图 17 MX-15D 吊舱
Fig. 17 MX-15D turret

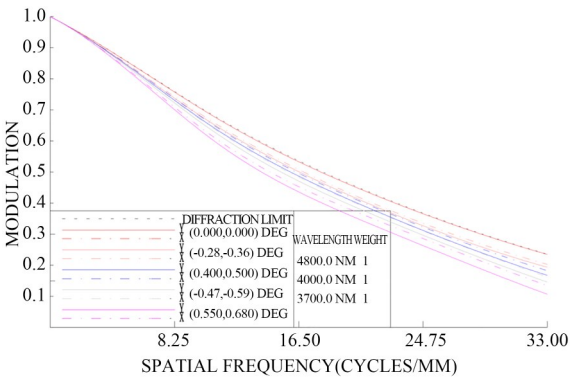
MX-15D 还有一套用于详查的白光/低照度/短波红外(可选)折反式共孔径成像系统, 由于没有固定冷光阑限制, 采用了后组连续变倍方式(同时变 F#)。其他载荷还包括传统透射式高清白光连续变焦相机、低照度连续变焦相机、双波段激光测距/照射器、激光照明及标识器、激光光斑跟踪器共十种载荷, 但有多个通道

共用一个光学系统。MX-15D 的主要性能参数见表 9。

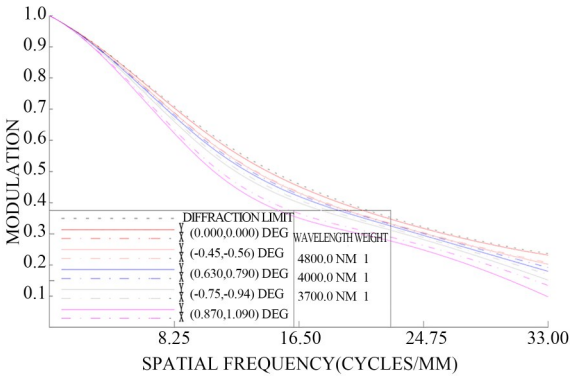
从多种公开渠道分析, MX-15D 吊舱的白光和低照度成像通道也很可能共用连续变焦光学系统并通过切换反射镜导入不同探测器方式成像(MX-15 就只有一个彩色/低照度光学载荷); 而详查相机为一个同轴折反式光学系统, 或者切换反射镜或者分光方式导入白光/低照度/短波红外相机成像(详查相机, 英文为 spotter, 本意为



(a) 光路图
(a) Layout



(b) 焦距 736 mm 时的 MTF 曲线
(b) f736 MTF curve



(c) 焦距 460 mm 时的 MTF 曲线
(c) f460 MTF curve

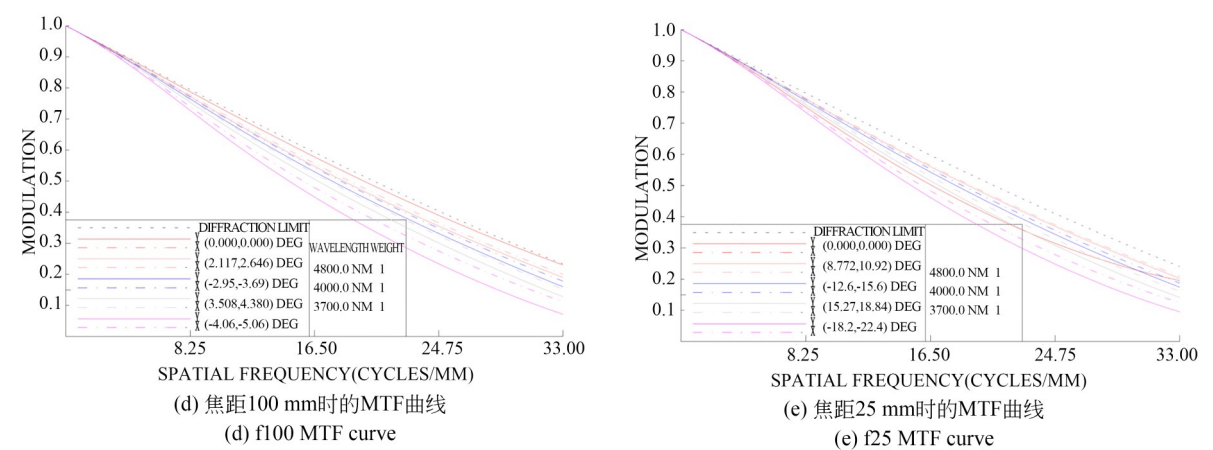


图 18 次镜可切换的中波红外四视场光路及 MTF 曲线

Fig. 18 MWIR quad FOVs' layout and MTF curve with switchable secondary mirror

侦察员,这里将其定义为详细观察用的成像通道,该系统视场极小,可以数字放大到极致,目的是凸显出目标减少无效信息对操作员注意力的干扰,还能够探测照射/标识光斑,即 see spot,实现在线校轴);采用的 0.86 μm 激光标识用于空地协同时给地面部队指示目标,其波段在微光夜视仪观察波段内;该激光指示器有变焦功能,可为详查相机提供照明服务;光斑跟踪器用于他照本投,即其他部队为激光制导弹药提供照射任务时,本机可通过大区搜索,当目标上闪烁的光斑进入光斑跟踪器视场后四象限探测器捕获光斑(一般三个脉冲即可确认),将目标位置引导进成像系统的视场范围,再交班给成像系统确认并瞄准目标,发动攻击。

表 9 MX-15D 性能参数

Tab. 9 Performance parameters of MX-15D

	Parameter indicators	Notes
Turret diameter/ weight	419 mm/51.4 kg	
Max optical aperture	$\varphi 160$ mm	
MWIR	1 280×1 024@1.2°~35.5°	Vertical FOV
Day TV camera	1 080P@1.8°~31.2°	Common aperture optical system
LL-TV camera	2.4°~40.8°	
Day&LL-TV/SWIR spotter	1080P@ 0.43°~1.1°	Common aperture optical system
Laser system	1.064 μm Designator	LRF range ≥ 20 km
	1.57 μm ESLRF	
	0.86 μm LTM/illuminator	
Spot tracker	Detect designator laser spot	Quadrant detector
Servo system	2 Axis inner&2 Axis outer	Stabilization ≤ 5 μrad
AZ/EL slew	360°×N/+90°~-120°	

4.4 法国 EUROFLIR410 和德国 ARGOS II HDT 吊舱

Euroflir410 吊舱和 ARGOS II HDT 吊舱外形如图 19 所示,其中 Euroflir410 更偏向通用吊舱而非瞄准吊舱,其折反式多波段共孔径口径只有 $\phi 130$ mm 左右,但波段包括长波 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 或者中波 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 可选,同时还有 $0.95\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 短波红外、最小视场 0.33° 的 $75\times$ 大变倍比 $0.7\sim 0.95\ \mu\text{m}/0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 近红外/可见光成像通道,旁轴配置的中波红外连续变焦镜头最大视场角为 24° (垂直方向)、高清彩色/低照度电视成像系统,人眼安全激光测距机、 $830\ \text{nm}$ 近红外激光照明和标识器(效果见图 20)。该吊舱也特别强调详查性能,中波红外通道的详查视场角只有 0.16° ,高清电视和低照度相机的详查视场角为 0.15° ,数字变倍的同时采用了非线性插值、图像增强等技术手段使操作员人眼感观更好;更重要的是能够发现本机或他机照射的激光光斑或用于标识的近红外光斑,便于协同作战和打击点确认,也有多光轴在线数字校准的功能;显控上强调多波段图像融合,不同环境可自适应或手动改变主显波段画面,再增加人工智能辅助目标标识,有利于复杂空勤和屏幕受限的机上环境,降低操作负担。



图 19 Euroflir410(左)和 ARGOS II HDT(右)

Fig. 19 Euroflir410(left) and ARGOS II HDT(right)

EUROFLIR 410 之后又发展了 EUROFLIR 510 吊舱用于升级欧洲联合研制的“虎”式攻击直升机,还发展了 EUROFLIR 610 吊舱,如图 21 所示,主要用于欧洲高空长航时察打一体无人机和



图 20 激光主动照明和目标标识

Fig. 20 Active laser illumination and target marker



图 21 Euroflir510(左)和 Euroflir610(右)

Fig. 21 Euroflir510(left) and Euroflir610(right)

其他大型航空平台。后者架构乃至外形都越发与 MTS-B 接近,折反式共孔径主系统口径占比越来越大,旁轴光学系统越来越多。

德国的 ARGOS II HDT 吊舱最大口径为连续变焦的中波红外成像通道^[21],数字变倍的最小视场达到 0.13° ;为提高可见光/近红外成像通道的像质采用了双探测器成像模式,一路白光一路近红外同时成像,再图像融合显示(ARGOS II 甚至通过四色胶合棱镜分光将 RGB 三色和 $700\sim 900\ \text{nm}$ 近红外波段分至四个 CMOS 探测器上成像再融合显示,拥有电影般的像质和色度,颇受中东国家追捧);该相机具有 $0.04\ \text{lux}$ 照度下成像能力,是真正的微光(而不是低照度)相机。该吊舱设有专门的折反式详查成像通道,也为双探测器成像模式,视场角为 0.42° ,可 4 倍电子变倍; 2° 定焦短波红外成像通道和用于态势感知的 40° 白光相机;采用了 $1.064\ \mu\text{m}/1.57\ \mu\text{m}$ 双波段激光器用于照射和测距;其激光主动照明波段有 $0.637\ \mu\text{m}$ 的红光和 $0.808\ \mu\text{m}$ 的近红外两个波段。

EUROFLIR410 和 ARGOS II HDT 吊舱的主要参数如表 10 所示。

表 10 EUROFLIR410和 ARGOS II HDT 吊舱性能参数
Tab. 10 Performance parameters of EUROFLIR410 and ARGOS II HDT parameters

	EUROFLIR 410	ARGOS II HDT
Turret diameter/ weight	410mm/45 kg	449 mm/55 kg±5%
Max optical aperture	~φ130 mm	~φ170@F#4. 6
MWIR	1 280×720@1. 2°~33. 3° 4× E-zoom	1 280×1 024@/1. 1°~36° E-zoom to 0. 13°
Day TV camera	1 920×1 080@0. 33°~25° 4× E-zoom	1080P Visible/ NIR dual cameras @1°~20°; E-zoom to 0. 25°, LL- TV can be used in 40mlux environment
Spotter	1 920×1 080@0. 39° 4× E-zoom	1080P Visible/ NIR dual cameras @0. 42°, E-zoom to 0. 1°
SWIR camera	640×512@0. 55° 4× E-zoom	640×512@<2° E-zoom to 0. 5°
Laser system	1. 064 μm Designator, 1. 54 μm ESLRF;>20 km 0. 83 μm LTM/illuminator	1. 064 μm@100 mJ Designator; 1. 57 μm ESLRF:>30 km 0. 808 μm LTM/ illuminator 0. 637 μm LTM
Servo system	2 Axis inner&2 Axis outer	
Stabilization	~10 μrad	5~10 μrad

5 结 论

第一、二代小吊舱主要用于直升机机载武器制导,具有较严重的时代局限性;第三代吊舱过渡到多用途多任务多功能多平台,并开始从经典的被动成像光学向主动光学迈进,逐步展露出对高功能密度的追求,通过光机伺服控制一体化设计将集成度进一步提高,其架构特征有较明显的趋同化,包括经典的两轴四框平台,框架平台+快反镜宏微复合轴控制稳像,光机伺服一体化设计等;其最重要的光学有效载荷逐渐统一到多波段共孔径主系统+旁轴次系统的结构形式;即便是旁轴次系统也有较多的多波段共孔径/共光路光学通道;从传统的被动光学探测通道为主转为

主被动光学并重,包括主动照明和激光标识以适应空地协同作战;有专门的光学通道针对特定目标实现极小视场锁定详查,强调 see spot,即本机或他机对照射目标和光斑或重点目标的可视化和突出化;通过自适应图像融合让操控界面简单明了快捷高效。

为衡量第三代吊舱硬件集成度制定的四个比值:光舱比 K_1 、光重比 K_2 、舱重比 K_3 和载重比 K_4 需要两到三个指标同时比较才能较为全面地衡量产品性能,可作为指导产品研制的参考标准。通过以上判据和国外典型产品的介绍,可对新吊舱的研制和下一代吊舱的发展趋势做出定性判断和参考。

参考文献:

[1] 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 progress in aerial electro-optic payloads and their key

- technologies[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 20-29. (in Chinese)
- [2] 李剑, 张大勇. 国外光电瞄准吊舱探测系统总体构架的对比分析[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(1): 3788/IRLA20230353.
- LI J, ZHANG D Y. Comparison and analysis of the overall architecture of foreign EO targeting pod detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(1): 3788/IRLA20230353. (in Chinese)
- [3] 王惠林, 宁飞, 刘吉龙. 航空光电侦察技术发展研究[J]. *应用光学*, 2022, 43(5): 825-832.
- WANG H L, NING F, LIU J L. Development of aviation electro-optical reconnaissance technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(5): 825-832. (in Chinese)
- [4] 程刚, 杜言鲁, 齐媛, 等. 新型机载光电平台万向架及其关键技术[J]. *应用光学*, 2022, 43(4): 577-582.
- CHENG G, DU Y L, QI Y, *et al.* New-type gimbal mount of airborne optoelectronic platform and its key technologies[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(4): 577-582. (in Chinese)
- [5] ARTAN G G, TOMBUL S G. The future trends of EO/IR systems for ISR platforms[C]. *Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications IX. April 3-June 13, 2022. Orlando, USA. SPIE*, 2022.
- [6] 张赛, 马会, 温庆荣. 机载光电侦察吊舱发展现状与分析[J]. *红外*, 2022, 43(7): 8-14.
- ZHANG S, MA H, WEN Q R. Development status and analysis of airborne photoelectric reconnaissance pod[J]. *Infrared*, 2022, 43(7): 8-14. (in Chinese)
- [7] GLASS M E, DAVID L K, JOHN P N, *et al.* AH-1G Design and Operational Flight Loads Study[R]. Eustis Directorate, US Army Air Mobility Research and Development Laboratory, 1974.
- [8] CASH D G, NAVAL AIR TEST CENTER PATUXENT RIVER MD. Testing of the TOW missile-configured AH-1 T helicopter[R]. *NASA STI/Recon Technical Report N 78 (1978)*: 30160.
- [9] AMRAES M J G. Raytheon AN/AAS-52 Multi-spectral Targeting System A(MTS-A)[G]. *Jane's Electro-Optic Systems 2008-2009. 14th ed. Virginia: Jame's information Group Inc.*, 2008-2009: 636-637.
- [10] AMRAES M J G. Raytheon AN/DAS-1 Multi-spectral Targeting System B(MTS-B)[G]. *Jane's Electro-Optic Systems 2008-2009. 14th ed. Virginia: Jame's information Group Inc.*, 2008-2009: 637-638.
- [11] https://wwwcdn.aselsan.com/api/file/ASELFLIR-350_ENG.pdf, 2024-3
- [12] https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-07/ims_eo_brochure_wescam_MX-15D-0501AB-Brochure.pdf, 2020-07
- [13] https://www.safran-group.com/sites/default/files/2021-05/EUROFLIR_410_brochure.pdf, 2021-05
- [14] https://www.pv-labs.com/wp-content/uploads/2014/12/XXXXXX_PV-18_ProductDataSheet_2014.pdf, 2014-12
- [15] GAT N, ZHANG J Y, LI M D, *et al.* Variable cold stop for matching IR cameras to multiple f-number optics[C]. *SPIE Proceedings", "Infrared Technology and Applications XXXIII. Orlando, Florida, USA. SPIE*, 2007.
- [16] 赵宇宸, 何欣, 冯文田, 等. 同轴偏视场共孔径面阵成像光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(7): 0718004.
- ZHAO Y C, HE X, FENG W T, *et al.* Design of common aperture coaxial field-bias optical system used in area array imaging sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(7): 0718004. (in Chinese)
- [17] 邓键, 曲锐, 黄建兵. 多波段共孔径光学成像系统的几种实现途径(特约)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 3788/IRLA20201017.
- DENG J, QU R, HUANG J B. Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system(Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 3788/IRLA20201017. (in Chinese)
- [18] VIZGAITIS J N. Dual f/number optics for 3(rd) generation FLIR systems[J]. *Infrared Technology and Applications XXXI, Pts 1 and 2*, 2005, 5783: 875-886.
- [19] 侯旺, 李翀伦, 李涛, 等. 一种基于次镜切换变焦

的光机装置及次镜切换方法: CN116953882A [P]. 2023-10-27.

[20] 齐媛,王涛,宁飞等. 一种大口径共光路多谱段双视场光学系统 [P]. CN 117724236 A. 2024. 03. 19

[21] https://www.hensoldt.net/fileadmin/hensoldt_old/Datenbl%C3%A4tter/ARGOS_II-A2_HDT_8_MAY_2020.pdf, 2020-05

作者简介:



李 剑(1976—),男,河南新乡人,硕士,高级工程师,主要研究方向为光电成像系统。Email:lijsana@126.com

通讯作者:



张大勇(1975—),男,陕西宝鸡人,博士,研究员,主要研究方向为先进激光技术。Email:zdywxl874@sohu.com

通讯作者:



赵祥杰(1984—),男,黑龙江穆棱人,博士,研究员,主要研究方向为新型光束控制技术。Email:zxjdouble@163.com