

文章编号: 1672-8785(2022)07-0008-07

机载光电侦察吊舱发展 现状与分析

张 赛 马 会 温庆荣

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 作为载机获取战场信息、先发制敌的重要任务传感器, 机载光电侦察吊舱现已广泛装备于各种空中武器平台。以多款国外先进机载光电侦察吊舱为典型代表, 归纳了机载光电吊舱的发展现状、主要性能指标及技术特点, 并根据未来作战的需求分析了机载光电吊舱的发展趋势以及需要关注的关键技术。

关键词: 机载光电侦察吊舱; 性能指标; 发展趋势; 关键技术

中图分类号: TN971 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.07.002

Development Status and Analysis of Airborne Photoelectric Reconnaissance Pod

ZHANG Sai, MA Hui, WEN Qing-rong

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group
Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: As an important mission sensor for the carrier to obtain battlefield information and preempt the enemy, the airborne photoelectric reconnaissance pod has been widely equipped on various air weapon platforms. Taking several foreign advanced airborne photoelectric reconnaissance pods as typical representatives, the development status, main performance indicators, and technical characteristics of airborne photoelectric pods are summarized. According to the needs of future operations, the development trend of airborne photoelectric pods and the key technologies that need attention are analyzed.

Key words: airborne photoelectric reconnaissance pod; performance indicator; development trend; key technology

0 引言

机载吊舱是指吊装在固定翼飞机、直升机、无人机等飞行载体外的有效载荷容器。根据内部安置的传感器的功能不同, 机载吊舱可执行导航、瞄准、红外测量、电子干扰及电子

情报收集等单独或综合性任务^[1]。机载光电吊舱近十年来在国外发展很快, 特别是在光电探测与对抗、辅助导航、情报收集、侦察与监视以及搜索跟踪瞄准等方面得到了广泛的关注。

在信息化时代的战争中, 预先获取有效的

收稿日期: 2022-06-21

作者简介: 张赛(1994-), 男, 河北人, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为光电系统设计。

E-mail: zhangsai9527@sina.com

战场信息是先发制人的关键节点。作为空中武器平台的侦察任务载荷, 机载光电侦察吊舱近些年发展迅猛。它依托高精度稳定平台, 集可见光、红外、激光等多种传感器于一体; 采用伺服控制技术和图像处理技术, 能够实现全天候、高精度、远距离的战场情报收集、侦察与监视等功能, 为地表及友机提供攻击指引与战场毁伤评估^[2]。

我国机载光电侦察吊舱的研制起步较晚, 先进技术被掌握在欧美、以色列等军事强国手中。因此, 及时跟踪学习国外先进光电侦察技术, 加强自身的产研能力, 对国防安全具有重要意义。本文主要结合国外多款先进典型产品的发展现状, 对其性能指标与技术特点进行分析, 并对机载光电侦察吊舱的发展趋势及关键技术作进一步探讨, 以期为国内机载光电侦察吊舱的发展提供一定参考。

1 机载光电侦察吊舱的系统组成与典型产品

1.1 系统组成

机载光电侦察吊舱一般通过吊装的形式安装在机腹下。为满足气动和隐身需求, 通常将其外形设计成柱筒状。它主要由光电传感器单元、控制处理单元、供电单元以及环境控制单元等四部分组成^[3]。其中, 光电传感器单元作为核心单元, 又主要包括高精度稳定平台和光电传感器两部分。

高精度稳定平台为光电传感器提供高刚性的安装平台, 用于隔离载机振动, 保证视轴稳定。它一般包括方位、俯仰、横滚等多个轴系, 采用陀螺稳定的方式, 在伺服控制系统的指令驱动下, 实现空间稳定与搜索跟踪等功能。

光电传感器根据载机任务需求会有不同的搭配。目前主流的基础配置是中长波红外热像仪、彩色高清可见光摄像机和激光测距机, 有些产品还会集成惯性测量单元、全球定位系统、低照度摄像机、激光照明装置等。将多种传感器安装在高精度稳定平台上, 并

通过机械结构和软件算法等手段对多传感器光轴进行校准, 以达到使用所需的视轴一致性要求。

1.2 典型产品

1.2.1 CA-295 侦察吊舱

美国 ROI 公司生产的 CA-295 侦察吊舱是一款焦距为 2134 mm (84 in) 的可见光/红外双波段中空光电侦察吊舱(见图 1)。该吊舱的外观尺寸为 1244.6 mm×508 mm×508 mm, 重量为 181.4 kg; 紧凑的尺寸使其成功用作美国海军 F/A-18 E/F 战斗机的共享侦察吊舱 (SHARP)^[4]。

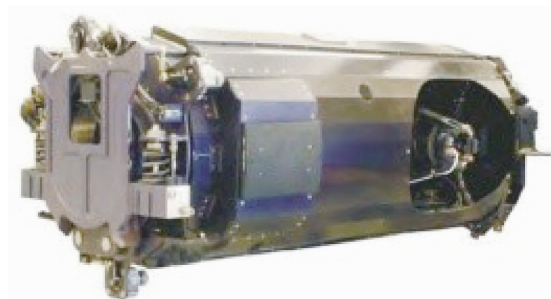


图 1 CA-295 侦察吊舱

为实现高精度的稳像, CA-295 侦察吊舱采用了主动光学稳定技术; 为实现图像配准的精准, 采用了共孔径光学设计技术; 为补偿前向像移, 采用了反射式卡塞格林光学系统; 为补偿扫描像移, 采用了固态电子像移补偿技术; 同时集成了惯性导航定位组件, 可实现目标的高精度定位。

1.2.2 RecceLite 侦察吊舱

RecceLite 侦察吊舱是以色列 Rafael 公司在 Litening 吊舱的基础上, 采用德国 Carl Zeiss 光学系统公司的光学系统, 通过换装头部研制而成的(见图 2)。RecceLite 侦察吊舱是目前世界上最先进的侦察系统之一, 现已装备在荷兰及德国等多国空军的飞机上, 包括 F-16、F-18、AMX、“狂风”、“美洲豹”、“鹰师”、“死神”等战斗机; 其应用场景包括指挥线路监控、爆炸物探测以及作战侦察等, 并可为空中作战部队提供毁伤评估。



图 2 RecceLite 侦察吊舱

RecceLite 侦察吊舱可同时采集高分辨率近红外、短波红外、中波红外以及彩色通道信息,并且便于安装在多种空中武器平台上。在靠近侦察任务受限的地区时,它能够监视自动探测到的移动或静止目标^[5]。

由于采用了模块化设计,RecceLite 侦察吊舱 75% 左右的结构都与 Litening 吊舱一致,其头部装有 4 轴稳定平台、3 视场中波红外焦平面阵列探测器、CCD 电视摄像机和惯性导航系统。通过惯性导航系统,可对每帧图像的数据进行注释。腹部装有图像处理单元、任务计划装置、使用闪存的视频记录仪和数据链以及各种相关的电子单元;尾部为电子控制单元。

1.2.3 RecceLite 侦察吊舱的变化型号

Recce-U 为无人机专用型号(见图 3),其特点是重新对 RecceLite 侦察吊舱进行了模块化设计,采用了分置式结构。飞机尾部装有常平架传感器。惯性导航系统被安装在机身外部,而包括处理器、固态记录器以及 Rafael 公司的 DLV-53 宽带数字化数据链在内的其它组件则位于机身内部。



图 3 Recce-U 型侦察吊舱

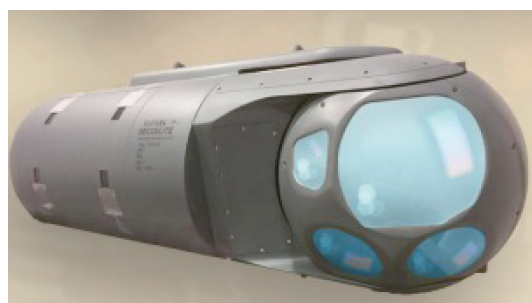


图 4 RecceLite XR 侦察吊舱

RecceLite XR 是一款多光谱多功能侦察吊舱(见图 4),可用于中低空侦察,并能实现远距离防区外成像。该系统能以步进凝视模式运行,其产生的图像可将高清图像拼接成广域覆盖图像,以提供更远的防区外覆盖。除上述运行模式外,RecceLite XR 吊舱还具有平行于飞行方向进行矩形图像扫描的条形模式以及进行线性扫描的一维搜索模式,适用于探测道路、河流及海岸线的变化。该系统重约 200 kg,结构紧凑,不影响飞机的武器携带能力,适用于各类有人和无人飞机。目前,意大利空军已将 RecceLite XR 用于 MQ-9 “收割者” 无人机。

1.2.4 DB-110 侦察吊舱

DB-110 是一款多功能、多波段光电侦察吊舱,由雷神技术公司的子公司——柯林斯空天公司研制。现役的第三代 DB-110 为双波段、三视场侦察系统(见图 5),具有在各种空域进行全天候高性能侦察的能力,目前已在 F-111 战斗机、F-15 战斗机、F-16 战斗机、“旋风”战斗机、“捕食者 B” 无人机上试飞成功^[6]。

DB-110 侦查传感器包括有 6144×128 阵列的 CCD 成像探测器和像元尺寸为 $24 \mu\text{m}$ 的制冷型 640×512 中波 InSb 焦平面阵列探测器,其光学系统位于两轴稳定平台的俯仰框架内,共有 3 个视场:(1)焦距为 2794 mm (110 in) 的可见光/近红外窄视场和焦距为 1397 mm (55 in) 的中波红外窄视场(可见光和红外窄视场共用前端的卡塞格林反射望远光路);(2)焦距为 406 mm (16 in) 的可见光/近红外宽视场和焦距为 356 mm (14 in) 的中波红外宽视场;(3)焦距为 64 mm (2.5 in) 的中波超宽视场。

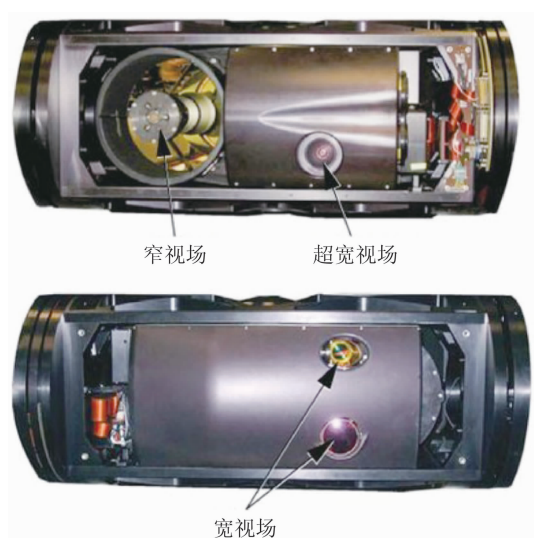


图 5 DB-110 侦察吊舱

为了实现宽覆盖范围(方位 180° 、俯仰 $\pm 20^\circ$)的扫描成像,利用两轴稳定平台的横滚轴与俯仰镜的摆扫运动,并交叉使用广域搜索、点采集和目标跟踪模式,从而对广泛分布的目标进行成像。

1.2.5 MS-110 多光谱机载侦察吊舱

为满足高于双频系统的战术侦察需求,UTC 宇航系统公司将 DB-110 吊舱升级成第四代,即 MS-110 多光谱机载侦察吊舱。该吊舱可与现有的 DB-110 侦察架构无缝集成,并可使用通用的地面保障设备;与 F-15 战斗机、F-16 战斗机、F/A-18 战斗机、“台风”战斗机、“阵风”战斗机、有人情报监视与侦察飞机以及无人机(包括通用原子公司的 MQ-9 “收割者”无人机)均兼容。

MS-110 吊舱具有多光谱成像功能,覆盖 $0.4\sim 5\ \mu\text{m}$ 的可见光、近红外、短波红外、中波红外波段。它可安装在多种空中武器平台上,能沿滚动和前后轴旋转以便于指示系统在倾斜或最小视域下提供 3 个视场;可在多种天气条件下从 $9\sim 185\ \text{km}$ 防区外成像,按需提供多光谱复合数据或单波段数据。

2 发展趋势

通过归纳以上几款国外机载光电侦察吊舱典型产品的性能指标,分析可知目前在役的机

载光电侦察吊舱具有系统集成度高、传感器分辨率高、图像处理能力强、系统稳定精度高等技术特点。未来军事作战是以信息化、网络化为核心的“地、海、空、天”一体化作战,这就对作为情报收集任务节点的机载光电侦察吊舱提出了“看得远、看得清、看得准”的作战需求,并且不能影响载机的武器运载能力,因此机载光电侦察吊舱正向着“远程化、精准化、智能化、小型化”的方向发展。

2.1 探测器性能不断提升

探测器性能是决定图像质量的首要因素。目前,光电传感器单元中的红外探测器主要为 640×512 中波制冷型器件,也有少数采用 1280×1024 阵列的器件。它们的像元尺寸在 $15\ \mu\text{m}$ 上下,像元平均等效噪声温差不高于 $20\ \text{mK}$ 。为提高探测能力,红外探测器一直向多波段、大面阵、高灵敏度的方向发展。目前,碲镉汞、量子阱和 II 类超晶格红外探测器是国内外普遍认可的第三代红外探测器。虽然它们的物理特性和探测能力各有优劣,但长远来看在产业化应用方面三者相辅相成。碲镉汞材料存在的均匀性问题制约了其在高性能大面阵长波红外探测器方面的发展,但它在在中波大面阵以及短波红外探测器方面的产业化发展日益成熟;量子阱红外探测器有望率先实现长波大面阵的实用化;II 类超晶格作为一种新型光电材料,在长波大面阵以及甚长波红外探测器方面已表现出广阔的产业化前景^[7]。

2.2 传感器集成模块化

光电侦察吊舱必须灵活应对复杂的战场环境,并完成多样化的作战任务。因此,吊舱在设计上应保证多种传感器能够自由选配。考虑到快速更换的实时性要求,传感器集成模块化设计显得尤为重要。L3-Wescam 公司的 MX 系列光电吊舱是传感器集成模块化的典型代表,最多可选配约 10 种光电传感器:除常见的可见光摄像机、中波红外热像仪、激光测距机之外,还可选配低照度摄像机、短波红外热像仪等传感器。通过采用图像融合技术,可以实现

多频谱目标探测的功能；同时，MX 系列吊舱统一将惯性测量单元直接安装在光具座上，进而实现目标定位功能；选配激光指示器、激光照明器、激光光斑跟踪器等传感器，使载机实现多机协同作战能力^[8]。在吊舱有限的空间限制下，为满足不同的作战需求，传感器组件采用统一接口，即插即用的模块化设计将成为基本共识。

2.3 先进的图像处理能力

在提高光电侦察系统的远程侦察能力时，除依靠探测器本身的性能不断发展以外，先进的图像处理能力也是提升系统性能的有效途径。近年来，图像增强技术在国外光电系统中得到了广泛应用，并取得了显著效果。比如，FLIR 公司首次采用数字细节增强技术，有效解决了红外图像高动态范围场景中低对比度目标的辨识问题；Lockheed Martin 公司采用基于局部图像增强的增程技术，使 AN/AAQ-30 目标瞄准系统的目标辨识距离提高 60%。随着多频谱传感器成为应用趋势，多光谱图像融合增强技术研究越来越受到重视，而且国内外研究图像增强算法的学者们对人眼视觉特性研究尤为关注。因此，图像增强算法的未来发展将是基于视觉感知的，以实现复杂战场环境下对大动态范围、弱对比度小目标的快速识别。

2.4 智能化

在以信息化、网络化为特点的未来战争中，侦察任务将向光电探测与对抗相结合、多机网络协同作战的模式发展。这使得光电侦察吊舱需要识别的目标种类越来越丰富，其执行的任务也不再局限于侦察监视。光电侦察吊舱将与其他任务载荷（如机载雷达、导航系统、电子战系统等）进行深度信息融合，共同完成战场所需的情报收集、侦察监视、搜索跟踪、定位打击等综合性任务，让战场态势感知和行动决策更加智能化。

2.5 小型化与轻量化

未来的战场环境越来越复杂，对载机的战略需求也更加多元化。这就要求载机能同时装

载更多的任务载荷，而且为提高载机的续航能力，又要求任务载荷为发动机节省出更多空间。因此，光电侦察吊舱同其它任务载荷一样，如何完成小型化、轻量化设计是需要重点考虑的技术难题之一，也是未来发展的必经之路。

3 关键技术

根据国外先进机载光电侦察吊舱的发展现状，从光电系统设计的从业角度出发，试归纳出机载光电侦察吊舱设计过程中需注意的若干关键技术。

3.1 高精度视轴稳定

由于机载光电侦察吊舱搭载在高速飞行的各类飞行器上，载机平台的振动、翻滚等都会使吊舱内部各光电传感器的视轴产生抖动，造成图像模糊、目标定位不准等问题，最终影响整个光电系统的探测性能。因此，光电侦察吊舱最基本、最关键的技术之一就是视轴稳定技术。

视轴稳定技术涉及光轴合一光学系统设计、高精度稳定平台设计与控制以及粗精组合稳定等方面。其中，光轴合一光学系统设计就是在光学设计时只设计一条主光路和一个主镜，通过分光镜和反射镜等分别将光信号引到相应的传感器中，克服了光学系统多孔径的问题。典型代表是美国的狙击手吊舱^[9]。

在高精度稳定平台设计过程中，通过轴系结构优化、合理布局、材料选型、减振器布局与选型等方法，降低轴系摩擦力矩、增强稳定平台结构刚度、隔离系统线振动和角摆动，最终提高稳定平台对抗动力矩的隔离能力；同时应尽可能提高伺服控制系统的带宽和增益。

粗精组合稳定是提高系统稳定精度的有效手段，即在高精度稳定平台粗级稳定的基础上设置快反镜组件，通过压电陶瓷等驱动元件控制反射镜的快速高频转动，实现光束的高精密指向、稳定和跟踪，进而提高系统的稳定精度。采用此种稳定技术，可使光电系统的稳定精度达到微弧级，实现亚像素级稳像^[10]。

3.2 共形光学设计

随着机载雷达等电子对抗技术的发展, 飞行器气动设计与隐身设计的重要性日益凸显, 并且发展趋势是对整机外形结构(包括光学系统)进行共形设计以达到良好的隐身效果。目前, 主流方案是用特殊表面取代传统的平面或球形窗口, 以达到减少飞行器气体流阻和降低雷达波反射的目的。共形光学设计的经典代表是 F-35 战斗机的光电瞄准系统(Electro-Optical Targeting System, EOTS)。如图 6 所示, EOTS 窗口由 7 块表面镀膜的蓝宝石玻璃组成, 可保证 360° 全向视野^[11]。

EOTS 窗口虽然满足了结构共形的要求, 但同时也产生了动态像差。当光束通过不同角度的窗口块间的接合面成像时, 窗口的透射率可能会随入射角变化, 光程也随之改变。而不同窗口之间的光程差会使分波面产生相位差, 进而直接影响整个系统的图像质量。为应对载机在高速飞行中的使用需求, 应优先考虑解决以下问题: (1) 透过不连续窗口分段波前的共相位校正; (2) 消除平板拼接处高速飞行与空气磨擦产生的热梯度; (3) 抑制拼接窗口内部的杂散光; (4) 高超音速高速飞行中的自适应光学设计。



图 6 F-35 战斗机的 EOTS 光学窗口

3.3 多传感器图像融合

为应对多元化的任务需求, 光电吊舱会集成两种或多种光电传感器。基于各传感器探测到的图像数据, 通过多传感器图像融合技术可以更加精准可靠地获取环境及目标的信息。图像融合技术分三级: 一是像素级, 是最低层次

的融合, 主要是对原始数据进行综合处理; 二是特征级, 属于中间层次, 是对已完成预处理和特征抽取之后的信息进行分类、归纳和整理; 三是决策级, 属于最高级的信息融合, 根据相应原则及各个传感器决策级分类的可信性进行协调, 从而得出最佳的结论^[12]。

根据不同的融合层次, 国内外学者提出了多种融合算法(如基于图像金字塔、小波变换、遗传算法、人工神经网络等)。多传感器图像融合技术的发展面临诸多问题, 主要体现在多源图像配准精度差、算法效率低、图像融合策略选择难等方面。多源图像配准对算法稳定性和实时性要求较高: 首先要对各传感器图像进行像素级或区域级对准; 其次, 受体量限制, 机载平台的信息处理能力有限, 因此在设计融合算法时, 应根据图像融合的层次和策略, 针对实际应用环境对串行与并行计算模块进行合理安排, 以提高算法效率^[13]。

3.4 超光谱成像

在战争中, 伪装器材能对军队的作战行动起到隐蔽作用, 给敌军造成疑惑, 有利于增强军队的战场生存率, 因而受到各个军事强国的广泛关注。而如何能将自然环境中人工制造的伪装器材区别开来, 进而判断出严密伪装的军事目标并识别出军事目标的性质, 是光电侦察吊舱未来发展的关键技术之一。随着超光谱技术的不断发展, 通过高精度分光技术、共口径成像技术、高精度数据反演与定标技术, 对采集到的超光谱数据进行分析处理并将其与地物波谱数据库进行参照对比, 可对目标的表面材质作出有效判断, 进而实现对伪装器材的识别。因此, 超光谱成像的发展具有重要的战略意义。

4 结束语

在未来严峻的空战形势下, 只有比敌机“看得清、看得远、看得准”, 才能做到先发制人。机载光电侦察吊舱作为各类空中武器平台的重要任务载荷, 远程化、精准化、智能化、小型化是其未来的发展趋势。根据国外典型先

进产品的研制现状,试归纳出高精度视轴稳定、共形光学设计、多传感器图像融合、超光谱成像等若干关键技术。希望通过借鉴国外相关领域的先进技术,为国内机载光电侦察吊舱设计的发展提供一定的参考价值。

参考文献

- [1] 陈增辉,单庚龙,张培琴,等. MQ-9 系列无人机任务吊舱发展研究 [J]. 飞航导弹, 2021, 44(12): 81-87.
- [2] 兰文博,付义伟,李平坤,等. 小型战术察打一体无人机武器系统作战应用研究 [J]. 飞航导弹, 2013, 36(2): 57-61.
- [3] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术 [J]. 航空兵器, 2017, 30(6): 3-12.
- [4] Lareau A G, Partynski A J. Dual-Band Framing Cameras: Technology and Status [C]. SPIE, 2000, 4127: 148-156.
- [5] Peruzzi L. Leonardo Targets Strike Role with M-346 FA Development [J]. Flight International, 2017, 191(6): 1-2.
- [6] Skyler F. Royal Saudi Air Force Selects Goodrich DB-110 Airborne Reconnaissance Systems [EB/OL]. www.militaryaerospace.com/communications/article/16720248/goodrich-db110-airborne-reconnaissance-systems-selected-by-royal-saudi-air-force, 2012.
- [7] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. 红外技术, 2013, 35(1): 1-8.
- [8] 曹尹琦,齐媛,程刚,等. 军用无人机小型光电吊舱的发展和关键技术 [J]. 飞航导弹, 2019, 42(3): 54-59.
- [9] 梁巍巍,郭正红,陈洁. 美军典型机载光电观瞄设备发展现状及趋势 [J]. 飞航导弹, 2015, 38(3): 57-62.
- [10] 王诚,闾家亮,李江勇,等. 机载光电探测系统二级稳定控制分析 [J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 473-476.
- [11] 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.
- [12] 彭硕玲. 多传感器图像融合技术的应用及发展趋势 [J]. 科技资讯, 2020, 18(8): 6.
- [13] 漆昇翔,刘强,徐国靖,等. 面向机载应用的多传感器图像融合技术综述 [J]. 航空电子技术, 2016, 47(4): 5-11.