

机载光电告警典型装备发展分析

李兴华¹, 孟真², 胡海鹏¹, 郑文鹏¹, 于永生¹, 王斌¹, 吴培根¹, 程翔¹

(1. 甘肃省酒泉市十四支局, 甘肃 酒泉 735000; 2. 国防科技大学, 湖南 长沙 410000)

摘要:机载光电告警装备的运用是在复杂电磁环境下提升飞机平台生存能力的重要措施,是机载平台末端对抗的关键基础。本文分析了国外机载光电告警的典型装备与研制情况,并基于上述的介绍分析,总结了机载光电告警系统的发展趋势及对我国相关领域研究发展的启示。

关键词:机载光电告警技术; 国外机载光电告警典型装备; 发展趋势

中图分类号: TN29; TN97 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.001

Analysis of the development of typical equipments for airborne electro-optical warning

LI Xing-hua¹, MENG Zhen², HU Hai-peng¹, ZHENG Wen-peng¹,
YU Yong-sheng¹, WANG Bin¹, WU Pei-gen¹, CHENG Xiang¹

(1. Forteen Suboffice of Jiuquan City of Gansu Province, Jiuquan 735000, China;

2. National University of Defense Technology, Hunan Province, Changsha 410000, China)

Abstract: The use of airborne electro-optical warning equipments is an important measure to improve the survivability of aircraft platform in complex electromagnetic environments, and is the key basis for end-to-end confrontation of airborne platforms. In this paper, the typical equipments and development of foreign airborne electro-optical warning are analyzed. Based on the above introduction and analysis, the development trend of airborne electro-optical warning equipments and the enlightenment to the research of related fields in China are also summarized.

Keywords: airborne electric-optical warning technology; typical equipments of foreign airborne electric-optical warning; development trend

1 引言

随着精确制导武器的广泛应用,空中飞机平台的生存能力面临着严峻的威胁,尤其是红外型导弹的出现,使得很多飞机平台在毫不知情下被击中坠毁。红外型导弹与雷达型导弹有明显的不同,其中最关键的是红外型导弹属于被动探测,不主动发射电磁波。为了应对这一被动探测攻击武器,机载光电告警技术逐步受到越来越多的国家的重视,众多军事强国相继研制生产了一系列的机载光电告警设备,并普遍装备在多种不同的飞机平台上^[1]。

2 国外机载光电告警典型装备

战场各种不确定威胁因素的出现,使得各国一直非常注重飞机平台自身的生存能力,而机载光电告警系统作为提升飞机生存能力至关重要的一环,其相应的装备研制也始终得到众多军事强国的各方面支持与投入。欧美国家一些军工企业对机载光电告警系统装备的研制最早可追溯到20世纪50年代,经过持续不断的资金、人力、物力等的投入,已经积累了较为丰富的研发经验,并生产列装了一系列较为典型的系统装备^[2-3]。尤其是美国,在相关领

域研制最早、生产的系统装备型号最多、拥有的技术经验最丰富,且至今在该领域仍保持着世界领先的地位。值得注意的是,机载光电告警装备从立项、研发到测试、试验、列装,需要经过较为漫长的时间,装备真正应用到飞机平台上时,其相关技术很有可能已经落后,这也就导致目前我们看到的大部分光电告警装备最早出现的时间距今已经过去几年甚至是十几年。针对这种现象,研发人员一方面创造新的技术缩短研制周期,另一方面对现有的装备不断地进行改进以适应不断发展变化的环境威胁。

2.1 美国机载光电告警典型装备

美国几乎所有的军用电子装备均有统一的命名规范。这套规范最早起源于二战后美国陆军和海军联合引用的一个通用命名系统——“联合通信—电子装备命名系统”,简称为 AN (Army-Navy) 系统。随着 AN 系统的不断扩展完善,美军最终将其列为军规标准,编号 MIL-STD-196,并不断对其进行补充完善。美军的电子设备命名共有六级,如“AN/ALQ-151(V)2”,其中“AN”仅作为命名系统的代指,无具体含义。在非官方的使用中,“AN”不予书写。命名中的其余字母数字均有其特定的含义,具体情况可见文献[4]。在机载光电告警系统领域,美国经过多年的研制积累,生产列装了较多的装备型号,其研发的典型装备型号见图 1 所示。

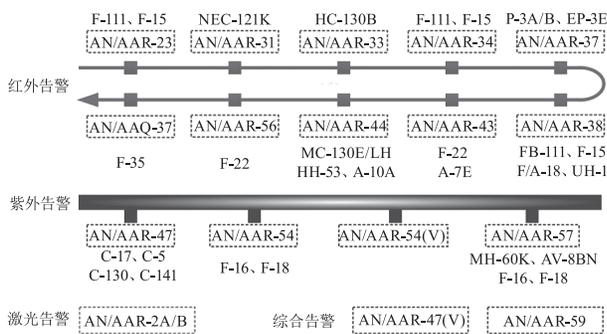


图 1 美国部分典型机载光电告警系统型号

Fig. 1 Part of airborne electro-optical warning systems in the United States

美国典型的分布式红外告警系统装备为诺斯罗普·格鲁曼公司研制的 AN/AAQ-37 分布式孔径红外系统^[5]。对于飞行员而言,特别需要能够在狭窄的座舱中获取周围 4π 空间范围内视野的能力,基于此,光电分布式孔径系统被研发出来。而作为美军光电分布式孔径系统的典型代表,AN/AAQ-37 不仅具备导弹逼近告警的功能,同时还可实施成像、搜

索与跟踪、导航、态势感知和损伤评估等功能,是美军五代战机保持空中优势,进行精准打击的重要机载设备^[6]。该系统由 6 个传感器和 1 个处理器组成,传感器核心部件为 1024×1024 像素、二维大面阵 InSb 红外焦平面阵列。飞机的机头、机背和机腹位置共部署了 6 面红外探测阵面,如图 2 所示。每个阵面视角为 90° ,其视场通过重叠交叉,可监视 360° 的球形空间范围,且分辨率非常高。系统可将每个探测阵面探测到的图像进行无缝拼接,形成一幅完整的感知图像呈现在飞行员头盔上,极大扩展飞行员战场态势感知的能力。据有关报道,雷神公司已经研制了新一代的分布式孔径系统,并计划于 2023 年安装到 F-35 战机上。相比于现有的系统,新一代的分布式孔径系统从研发、运营和维护成本、可靠性、性能等方面实现了较大的飞跃。^[7-8]

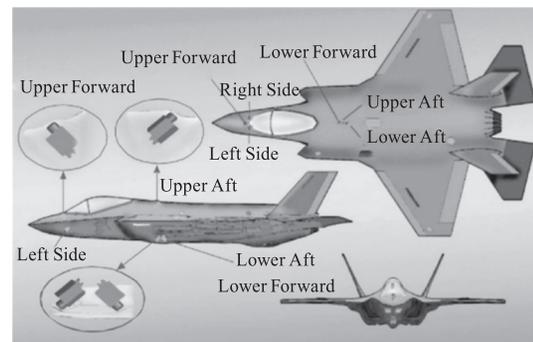


图 2 AN/AAQ-37 分布孔径红外系统

Fig. 2 AN/AAQ-37 distributed aperture infrared system

除了应用在先进的战机上,机载红外告警系统也被广泛应用在了大型运输机和旋翼飞机上,以保护相应的飞机平台免受红外制导导弹的威胁^[9],其中具有代表性的系统是大型飞机平台红外对抗系统 (Large Aircraft Infrared Countermeasures System, LAIRCM),如图 3 所示。LAIRCM 系统将导弹逼近告警系统和红外激光干扰对抗系统进行了结合,大大提高了飞机平台自身的自动防护能力。目前该系统经历了三个阶段的发展。最初一代的 LAIRCM 系统研发于 2005 年,其关键组成部分包括 AN/AAR-54 紫外告警系统、红外对抗处理器和红外激光干扰器,搭载的飞机平台包括 C-17、C-37、C-40、C-130W 和 CV-22 等。第二代系统在第一代系统的基础上,旨在重点提升告警性能,降低虚警率,增强干扰子系统的可靠性。为了实现这个目标,第二代 LAIRCM 系统改用了新的双色红外告警系统,同时其干扰机

采用了“守护者激光炮塔组件”,因而又被成为“守护者”。2019年4月,安装在KC-135飞机上的LAIRCM系统的第三代吊舱完成测试,这标志着第三代的LAIRCM系统将开始生产和部署。系统为大型运输机和旋翼飞机提供了自动保护的功能,这使得飞行员可以将精力完全集中在正常的起飞、降落、战术下降、低空飞行和空中加油过程中,极大减轻了飞行员的压力。



图3 LAIRCM系统

Fig.3 LAIRCM system

AN/AAR-57通用导弹告警系统(Common Missile Warning System, CMWS)是由英国BAE系统公司于1991年开发,随后被美国陆军及盟友部队广泛应用在直升机上用以对抗肩扛式红外导弹的机载紫外告警系统。该系统由五个光电传感器和一个电子控制单元组成(见图4所示),可对来袭的导弹及对方的火力进行实时的探测,快速响应当前不断变化的环境威胁^[10]。表1为该系统中的电子控制单元和光电传感器的规格情况。



图4 AN/AAR-57通用导弹告警系统

Fig.4 AN/AAR-57 common missile warning system

随着战场环境的日益复杂以及新技术、新型武器的出现,现代飞机平台特别需要一个适应性强、可扩展的告警系统以确保其能执行现在和未来的任务。在这种背景下,BAE系统公司提供了一种新的方案,即将AN/AAR-57通用导弹告警系统融入到先进威胁红外对抗系统(Advanced Threat Infrared Countermeasures, ATIRCM)中,这使得装备此种系统的飞机平台具备了世界上最为先进的导弹逼近告警

和对来袭导弹实施对抗的能力,ATIRCM红外对抗设备如图5所示。随着AN/AAR-57通用导弹告警系统最近的一次升级,研发人员将对敌方火力探测与导弹逼近告警功能进行了结合,同时为通用红外对抗系统(Common Infrared Countermeasure system, CIRCM)提供了接口,进一步增强其可扩展性,CIRCM系统如图6所示^[11]。

表1 AN/AAR-57系统的规格参数

Tab.1 Specifications of AN/AAR-57 system

规格	电子控制单元	光电传感器
尺寸/cm	长:23.114	凸起边缘宽:13.462
	高:13.970	其余主体宽:12.065
	宽:27.178	高:10.922
重量/kg	8.618	1.247



图5 ATIRCM红外对抗设备

Fig.5 ATIRCM equipment



图6 CIRCM系统

Fig.6 CIRCM system

为了更好地消除或弥补单一波段的告警系统本身的局限性,美国积极开展了光电综合告警系统装备的研制,其中红外激光告警系统的典型装备为AN/AAR-59系统。

AN/AAR-59系统是由美ATK系统公司和BAE系统公司于2011年联合研制,主要为美国海军和海军陆战队提供威胁感知能力。该系统采用双色红外探测器(工作波段为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 和 $0.7 \sim 1.5 \mu\text{m}$),可对来袭导弹进行更远、更快的探测,同时采用激光探测器对近距离的激光威胁信号进行探测、识别和告警。系统的组成包括5台前端探测传感器和1台综合处理器,如图7所示,总重18.2 kg,传感器尺寸为 $127 \times 203.2 \text{ mm}$,后续将装备在MH-60R、MH-60S、

UH-1Y、CH-53K 和 AH-1Z 等直升机上^[12-13]。

2.2 其他国家机载光电告警典型装备

经过几十年技术经验的积累和战场复杂光电环境的严峻挑战,法国、以色列、俄罗斯、瑞典、德国等国家均研制生产了不同型号的机载光电告警装备,如表 2 所示。

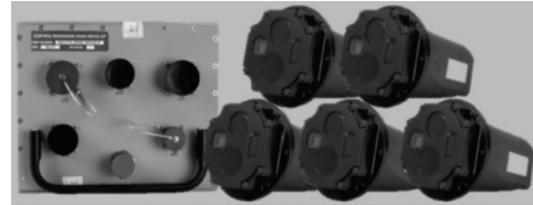


图 7 AN/AAR-59 告警系统

Fig. 7 AN/AAR-59 warning system

表 2 不同国家部分典型机载光电告警装备

Tab. 2 Part of typical electro-optical warning equipments in different countries

型号	告警类型	装机平台	生产厂家
多色红外告警系统(MIRAS)	红外告警	运输机、战斗机	法 Thales 公司
SAM IR(原称 DDM)	红外告警	幻影-2000、阵风	法 Sagem Defence Securite
PAWS 系统(被动机载告警系统)	红外告警	运输机、战斗机、直升机	以色列 Elisra 公司
101KS-U 导弹发射探测系统	紫外告警	苏-57	俄乌拉尔光学仪器生产联合体
Guitar-350	紫外告警	/	以色列 Rafael 公司
AN/AAR-60(MILDS)	紫外告警	NH-90、SH-60J、F-16	德 HENSOLDT
LWS-20V-3 机载激光告警系统	激光告警	攻击、支援直升机和近距支援飞机	以色列 Elisra 公司
DAL	激光告警	阵风	法 Thomson-CSF

法国的主战机型阵风和幻影-2000 飞机都安装了机载红外告警设备-DDM 系统^[14-15],该系统具有红外成像的功能,探测距离较远,可靠性高,较好的提升了飞行员态势感知的能力。随着机载电子战系统的不断发展,DDM 系统的新版本 DDM-NG 系统应运而生,且已装备在了法国军售给印度的阵风战斗机上,是阵风战机“频谱电子自卫系统”的重要组成部分系统,如图 8 所示。在充分借鉴 DDM 系统使用经验的基础上,新一代的告警系统配置了半球形的外罩,内置鱼眼镜头,探测范围可覆盖 360°,且其采用了更为先进的传感器技术和处理算法,探测和告警的性能得到极大提升。



图 8 安装在阵风战机上的 MMD-NG 系统

Fig. 8 The MMD-NG system installed on the Rafale fighter

俄罗斯在其列装的飞机上同样安装了机载光电告警系统^[16],其中主要包括苏-35 上的分布式红外告警系统(Обнаружитель Атакующих Ракет,

OAP)、苏-25、米格-28、卡-31、卡-52 等的 L370-2 紫外告警设备(目前公开的相关详细资料很少)、苏-57 上的 101KS-U 导弹发射探测系统等。

OAP 系统(图 9)是苏-35 战机光电系统的重要组成部分,共有 6 个分布式的红外成像探测传感器,可对战机周围 360°的空间进行实时的探测,其与 OLS-35 红外搜索与跟踪系统的组合,极大的增强了飞行员的态势感知能力^[17-18]。该系统同 F-35 的 AN/AAQ-37 系统类似,都采用了红外焦平面凝视成像技术,可以将分布式的传感器探测到的图像进行无缝组合并传至多功能显示器上。但相比于 AN/AAQ-37 系统,OAP 的阵列的阵元数量较少,探测性能相形见绌,且苏-35 战机并没有配置头显系统,因而苏-35 飞行员的全景态势感知能力相比于 F-35 的也稍逊一筹。

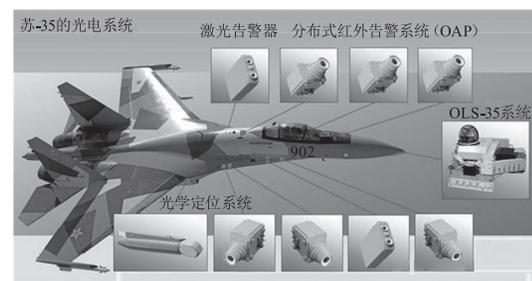


图 9 苏-35 战机的光电系统

Fig. 9 The electro-optical system of the Su-35 fighter

101KS-U 导弹发射探测系统于 2010 年研制,主要安装在了俄罗斯新研制的五代机苏-57 上(图 10)。该系统为紫外告警体制,由 101KS-U/01 和 101KS-U/02 两种传感器组成,其中,101KS-U/01 为单镜头前端探测传感器,安装在机体两侧,101KS-U/02 为双镜头前端探测传感器,一台安装在机鼻下方,另一台安装在两台发动机之间的尾针上方,实现对飞机的全向空间防护,如图 10 所示^[19]。单个前端探测传感器的视场不小于 $90^{\circ} \times 90^{\circ}$,并安装有保形光窗,尽量减小对飞机气动性能的影响^[20-23]。

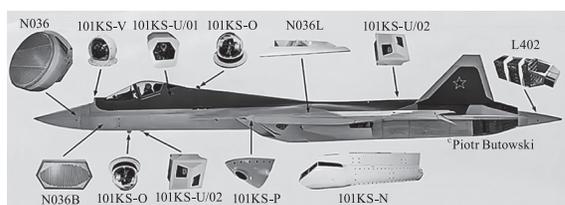


图 10 苏-57 战机的光电系统

Fig. 10 The electro-optical system of the Su-57 fighter

3 机载光电告警装备的发展趋势

3.1 智能化方向发展

当前,随着战场电磁环境的日益复杂,新的光电对抗技术和手段层出不穷,大量的光电数据亟需快速处理,这对机载光电告警系统提出了更高的要求。在光电告警系统中的接收信号处理、微小目标识别、图像数据分析以及数据融合等方面,人工智能算法的合理运用将是未来机载光电告警系统重要且关键的发展方向。值得注意的是,随着人工智能技术与多领域的交叉融合,光电对抗领域出现了认知雷达、认知电子战等概念,隐身材料领域也出现了智能隐身材料(自适应隐身材料)等,可以预见,对于机载光电告警领域,极有可能也会出现类似认知机载光电告警系统的概念。借鉴认知雷达的相关概念,本文认为认知机载光电告警系统的模式形态为:对于单一的飞机平台,在共光路技术的支撑下,红外、紫外、激光、电视探测将形成智能化的分层级的探测视场,通过对周围环境不断的探测交互,智能地选取探测频段,并借助智能算法快速地分析处理识别威胁信号,自动地启动相应的对抗系统对来袭目标进行致盲乃至摧毁。对于体系化的飞机平台,则重点涉及到不同平台间认知光电告警系统的探测组网和数据融合共享,并通过人工智能算法实现系统空间分布的最优化,最终可达成的效果即是单机发现,网络

告警。设想的认知系统如图 11 所示。

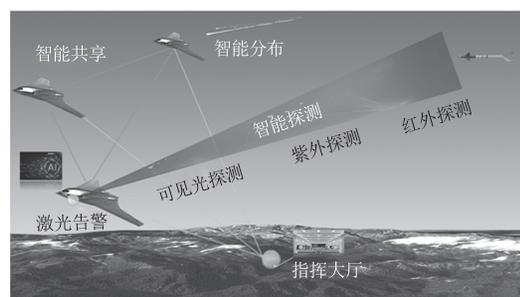


图 11 认知机载光电告警系统概念图

Fig. 11 Conceptual diagram of cognitive airborne electro-optical warning system

3.2 体系化方向发展

现代战争早已不再是过去单一平台之间的对抗,而是体系与体系的抗衡,对于机载光电告警系统而言也是如此。在日益复杂的战场环境中,仅仅依靠单一的机载平台已不能更好的规避未知的风险,将多种类型、功能和用途的平台进行结合,同时利用先进技术,如人工智能等使各个平台的信息进行有效融合,才有可能在现代战争乃至未来战争中实现对战场环境的实时感知和告警^[24]。美军在体系化方向的研究一直走在世界的前列,其作战理念无论是网络中心战、空海一体战还是马赛克战、联和全域作战等,都体现着美军的武器装备发展向体系化、联合化方向靠拢,这值得引起我们的警惕和关注^[25-29]。

3.3 分布式方向发展

很多国家研制了分布式的光电告警系统,但大部分的产品只能算是入门级,有些系统根本无法将各个传感器探测到的图像进行有效融合拼接,并实时传送至飞行员的头盔上,这极大限制了飞行员对周围环境实时感知的能力。美军装备在 F-35 上的分布式光电告警系统相比而言技术较为先进,但也因成本问题,一度更换了系统的承包商。尽管当前分布式光电告警系统存在一些问题,但其相比于光机式告警系统仍有众多的优点,如通过图像融合可轻松实现大视场探测、可将红外搜索跟踪、瞄准、态势感知功能进行综合等,因此,低成本、实用化的分布式光电告警系统仍将成为各国不断追求的目标。当然,分布式也只是个相对的概念,目前,我们认为的分布式大都是相对于单一的飞机平台而言,但随着技术的不断创新发展,分布式也有可能成为相对于集群、体系全要素而言的。

3.4 通用化方向发展

性能建立在成本之上。当前大部分的机载光电告警系统是针对特定的飞机平台设计的,存在研发成本高、保障性差等缺点。平台通用化的设计可以有效降低研发成本、缩短装备的保障时间,整体提高部队的战斗力。一款优秀的机载光电告警系统装备必须要综合考虑研发、维护保障的成本问题。通用化是机载光电告警系统节省成本的较优选择。但值得关注的是,以目前的装备体系来看,各个飞机平台间所承担的任务差别较大,其造价也各有不同,在杀伤网中的地位作用也不尽相同,因而,只能考虑有限的通用化。

3.5 小型化、高分辨率先进探测技术方向发展

装备小型化有利于机动平台的安装,节省空间,同时随着装备的小型化,装备的体积、重量和功耗也会随之下降,有利于缩减装备的造价。当前的探测传感器由于受限于分辨率不足,其探测距离无法取得较大突破。20 世纪 90 年代,微扫描器件得以开发和发展,这主要是因为微扫描器件可在不增加探测元总数的情况下提高系统的分辨率,同时还可使成像系统的作用距离扩大^[30]。因此,微扫描式的光电告警系统有望成为未来发展的热门方向之一。

4 国外典型装备发展对我国的启示

我国机载光电告警系统较国外存在较大差距,但装备的需求日益强烈,在中美关系充满不确定的未来,如何实现我国机载光电告警系统装备研制的自主化、独立性、先进性是一件需要迫切解决的问题。通过研究国外典型光电告警装备的发展,本文总结了六条对我国相关装备发展的启示。

(1) 根据不同的飞机平台研制配置适宜的光电告警体制,避免杀鸡用牛刀,在保证实现目的的前提下节省研发维护成本。

(2) 积极发展红外告警或多功能综合告警系统,尤其是发展多种不同告警体制共光路技术,进一步减少传感器数量,节省飞机平台有限的安装空间,同时发展大阵列的凝视焦平面成像技术,增强探测性能和态势感知能力。

(3) 重视人工智能同光电告警领域的结合发展,积极探索智能识别、智能处理、智能融合、智能探测等的技术,促进该领域的系统装备向智能化方向发展。

(4) 双管齐下,一方面鼓励自主创新能力,大力支持国产自主研发产品,鼓励科研人员对光电系统相关的基础理论和前沿技术的研究,加强对光电系统领域的资金投入和人才培养引进;另一方面,积极通过多渠道引进国外先进装备,但由于美国等西方国家长期在此领域对我国实施技术产品的封锁,目前只能从俄罗斯或法国、德国等国家加强扩展引进渠道。

(5) 发展与光电告警系统紧密联系的定向对抗系统。从美国、法国等国的紫外告警系统发展趋势来看,紫外告警系统和定向对抗干扰系统的组合将进一步增强飞机平台自身的自卫能力,组合后的系统自动地实施对来袭导弹的末端对抗,极大的缓解了大型飞机飞行员的操作压力。近年来,机载激光武器开始进入现实应用阶段,其对于来袭导弹的硬杀伤效果将极大改善飞机平台在战场上的自卫能力^[6,31]。而对于机载激光武器,提前探测到目标并准确的发出告警将是其大展拳脚的前提,在这种背景下,机载光电告警系统的地位作用足以引起人们的重点关注^[32]。

(6) 建立健全实战化条件下的测试、仿真和考核标准以及机制。美国的很多机载光电告警系统大都经历了大量的外场测试,尤其是在多次的局部冲突和反恐行动中接受了检验,俄罗斯的告警系统同样也在叙利亚战争和俄乌冲突中不断地吸取了经验教训。而反观我国,近几十年国家安全局势总体稳定,缺乏相应的实战检验,这就需要选取特定的试验测试场地,设置科学甚至严苛的考核条件,不断去检验研发产品的性能。在没有实战检验的情况下,外场的测试试验对机载光电告警系统而言是必不可少的,但测试试验不可避免的需要大量的人力、物力,直接引起研制总成本的升高,因而研究如何能在有限的空间尽可能的节省试验成本对开展系统的验证是一件较为有意义的事^[33-34]。基于此,本文认为研发精确有效的仿真系统同样也是极为重要的。通过仿真可对系统的各项功能性能进行初步的验证,及早发现问题,及时的进行完善,而通过后续的测试又可进一步检验系统在真实环境中的表现,仿真与测试试验相互印证,可共同保证系统的较高性能。

参考文献:

- [1] Liu Tongyu, Yan Xiusheng, Wang Hengli. Analysis on the

- trend of foreign airborne missile approach warning technology[J]. *Laser & Infrared*, 2022, 52(8): 1107 - 1111. (in Chinese)
- 刘彤宇, 闫秀生, 王恒立. 国外机载导弹逼近告警装备发展趋势分析[J]. *激光与红外*, 2022, 52(8): 1107 - 1111.
- [2] Liu Songtao, Wang Longtao, Liu Zhenxing. Principle of optoelectronic countermeasures[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2019. (in Chinese)
- 刘松涛, 王龙涛, 刘振兴. 光电对抗原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.
- [3] Ren Ning, Jiang Lixin. Development analysis of electro-optical warning technology and foreign typical equipments[J]. *Optoelectronic Technology Application*, 2020, 35(3): 12 - 16. (in Chinese)
- 任宁, 姜丽新. 光电告警技术与国外典型装备发展分析[J]. *光电技术应用*, 2020, 35(3): 12 - 16.
- [4] Gear-illustration. 美军“AN”开头器材类装备编号定义[EB/OL]. <https://www.junpin360.com/html/2016-01-19/4743.html>.
- [5] Yang Yanjie. Research on the development of military photoelectric detection equipment[J]. *Infrared*, 2017, 38(9): 8 - 13. (in Chinese)
- 杨彦杰. 军用光电探测装备发展研究[J]. *红外*, 2017, 38(9): 8 - 13.
- [6] Liu Lihui, Tan Bitao, Zhang Xueyang, et al. The airborne laser project in the united states[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(2): 137 - 142. (in Chinese)
- 刘李辉, 谭碧涛, 张学阳, 等. 美国机载激光武器发展 - ABL 计划[J]. *激光与红外*, 2019, 49(2): 137 - 142.
- [7] AN/AAQ-37[EB/OL]. <https://www.detailedpedia.com/wiki-AN/AAQ-37>.
- [8] AN/AAQ-37 Disributed Aperture Sysem(DAS) for the F-35[EB/OL]. <https://www.north-rpgrumman.com/Capabilities/ANAAQ37F35/Pages/default.aspx>.
- [9] Everstine B. Air Force wants new missile warning system for HH-60 W[J]. *Aerospace Daily & Defense Report*, 2021, (11): 278.
- [10] AAR-57 [EB/OL]. <https://en.citizendium.org/wiki/AAR-57>.
- [11] Development status and prospect of infrared countermeasure system[EB/OL]. <http://www.defence.org.cn/article-13-31538.aspx>. (in Chinese)
- 红外对抗系统发展现状与展望[EB/OL]. <http://www.defence.org.cn/article-13-31538.aspx>.
- [12] Zhu Nian. Analysis of infrared spectral characteristics of high temperature tail flame and research on detection band selection technology [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences), 2018. (in Chinese)
- 祝念. 高温尾焰红外光谱特性分析及探测波段选取技术研究[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
- [13] JATAS-2013[EB/OL]. <http://www.atk.com>.
- [14] A wide range of smart and discrete sensors[EB/OL]. <https://www.dassault-aviation.com/en/defense/rafale/a-wide-range-of-smart-and-discrete-sensors/>.
- [15] DDM-NG[EB/OL]. <https://www.mbdba-systems.com/product/ddm-ng/>.
- [16] Kristin Ven Bruusgaard. Russian nuclear strategy and conventional inferiority. *Journal of Strategic Studies*, 2021(1): 3 - 35.
- [17] Su-35 briefly introduced[EB/OL]. <https://www.bilibili.com/read/cv1949046/>. (in Chinese)
- 苏 35 简单介绍[EB/OL]. <https://www.bilibili.com/read/cv1949046/>.
- [18] OLS-35[EB/OL]. [https://www.deagel.com/Sensor %20Systems/OLS-35/a001926](https://www.deagel.com/Sensor%20Systems/OLS-35/a001926).
- [19] Liu Zhichun, Yuan Wen, Su Zhen. Equipment and development tendency of the electro-optical warning roconnaisance technology [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(7): 629 - 632. (in Chinese)
- 刘志春, 袁文, 苏震. 光电侦察告警技术的装备与发展[J]. *激光与红外*, 2008, 38(7): 629 - 632.
- [20] Sukhoi_PAK_FA[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Sukhoi_PAK_FA.
- [21] Su-57 integrated optoelectronic system[EB/OL]. <https://new.qq.com/rain/a/20201031A01Z6700>. (in Chinese)
- 苏 57 综合光电系统[EB/OL]. <https://new.qq.com/rain/a/20201031A01Z6700>.
- [22] 101KS-U[EB/OL]. [https://www.deagel.com/Protection %20Systems/101KS-U/a002988](https://www.deagel.com/Protection%20Systems/101KS-U/a002988).
- [23] Weapons and Warfare[EB/OL]. <https://weaponsandwarfare.com/2020/12/21/sukhoi-su-57-felon/>.
- [24] Malenic M. Missile warning for the future[J]. *Air Force Magazine*, 2010, 10: 66 - 68.
- [25] Network-centric warfare [EB/OL]. https://www.sohu.com/a/214506801_464088. (in Chinese)
- 网络中心战[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/214506801_464088.

- [26] Air-sea battle-services work together to address anti-access and area denial challenges [EB/OL]. <https://www.cnblogs.com/wmcdstio/p/7554220.html>. (in Chinese)
海空一体战——军种协同应对反介入和区域拒止挑战 [EB/OL]. <https://www.cnblogs.com/wmcdstio/p/7554220.html>.
- [27] Mosaic warfare; promote the development of the experimental identification of the US military's intelligent combat system [EB/OL]. <https://www.secrss.com/articles/13646>. (in Chinese)
马赛克战: 推动美军智能化作战体系试验鉴定发展 [EB/OL]. <https://www.secrss.com/articles/13646>.
- [28] Restoring america's military competitiveness; mosaic warfare [EB/OL]. <https://mitchellaerospacepower.org/restoring-americas-military-competitiveness-mosaic-warfare/>.
- [29] Analysis of the exploration route of the US military's joint all-domain operations [EB/OL]. <https://www.secrss.com/articles/26074>. (in Chinese)
美军联合全域作战探索路线浅析 [EB/OL]. <https://www.secrss.com/articles/26074>.
- [30] Chen Zhaobing, Guo Jin, Jiang Weiwei. Current status and development trend of infrared warning equipment [J]. Opto-Mechanical Telecommunications, 2008, (9): 37 - 41. (in Chinese)
陈兆兵, 郭劲, 姜伟伟. 红外告警设备的应用现状与发展趋势 [J]. 光机电信息, 2008, (9): 37 - 41.
- [31] Du Zibing, Tang Hengren, Liu Kun, et al. Development and flight test characteristics of Israeli's airborne laser weapon [J]. Laser & Infrared, 2021, 51 (12): 1547 - 1553. (in Chinese)
杜梓冰, 汤恒仁, 刘琨, 等. 以色列机载激光武器发展及试飞特点研究 [J]. 激光与红外, 2021, 51 (12): 1547 - 1553.
- [32] Fu Wei. Advanced laser warning technology [J]. Laser & Infrared, 1995, 25 (2): 18 - 20. (in Chinese)
付伟. 先进激光告警技术 [J]. 激光与红外, 1995, 25 (2): 18 - 20.
- [33] Giza R H, Acevedo P A, Bliss J D. Ultraviolet scene simulation for missile approach warning system testing [C]// Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing II. SPIE, 1997, 3084: 282 - 291.
- [34] Luo K P, Li Y J, Jiang W. Research on Modeling Ballistic Missile Early Warning Simulation System Based on UML [J]. Journal of System Simulation, 2010, (4): 845 - 849. (in Chinese)
罗开平, 李一军, 姜维. 基于 UML 的弹道导弹预警仿真系统建模 [J]. 系统仿真学报, 2010, (4): 845 - 849.