

文章编号: 1672-8785(2022)06-0012-08

美军微光夜视头戴系统技术进展

张 勇¹ 马飒飒^{1,2*} 李志伟¹

(1. 中国人民解放军 32181 部队, 陕西 西安 710032;

2. 河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300131)

摘 要: 微光夜视装备隐蔽性好, 成本比红外热像装备低, 是拓展人眼低照度条件下视觉感知的重要手段, 在军事和民用领域都有广泛应用。综述了美军微光夜视头戴系统的发展情况, 分析了美军 AN/AVS 系列、AN/PVS 系列以及微光/红外融合夜视镜、夹式热像仪、陆用全景夜视镜、双筒增强型夜视镜、集成视觉增强系统的特点和发展趋势, 并对微光夜视头戴系统在高性能像管、固体微光夜视技术和微光/红外融合技术等方面的发展前景进行了讨论, 为国内微光夜视头戴系统研制提供了参考。

关键词: 微光夜视; 头戴系统; 超低照度固体成像; 图像融合

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.06.002

Technical Progress of Low-light-level Night Vision Head-mounted System in US Military

ZHANG Yong¹, MA Sa-sa^{1,2*}, LI Zhi-wei¹

(1. Unit 32181 of PLA, Xi'an 710032, China;

2. School of Artificial Intelligence and Data Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

Abstract: Low-light-level night vision equipment has good concealment and lower cost than infrared thermal imaging equipment. It is an important means to expand the visual perception of the human eyes under low illumination conditions and is widely used in military and civilian fields. The development of the low-light-level night vision head-mounted system of the US military is reviewed. Meanwhile, the characteristics and development trends of the US military's AN/AVS series, AN/PVS series, low-light/infrared fusion night vision goggles, clip-on thermal imager, ground panoramic night vision goggle, enhanced night vision goggle-binocular, and integrated visual augmentation system are analyzed. Furthermore, the development prospect of low-light-level night vision head-mounted system in high-performance image intensifiers, solid-state low-light-level night vision technology, and low-light/infrared fusion technology is discussed, which provides a reference for the development of domestic low-light-level night vision head-mounted system.

Key words: low-light-level night vision; head-mounted system; solid imaging in ultra-low illumination; image fusion

收稿日期: 2022-02-15

基金项目: 陆军装备军内科研项目(20212C031781); 河北省军民科技协同创新专项(20355601D)

作者简介: 张勇(1974-), 男, 河北邢台人, 高级工程师, 博士, 主要从事光电装备保障方面的研究。

*通讯作者: E-mail: 13932196453@163.com

0 引言

夜视技术是拓展人眼视觉感知的重要手段, 具有广泛的军事应用价值。主动红外夜视装备发展成熟, 但需红外光源照射, 易被对方探测, 隐蔽性差; 红外热像装备分辨率高, 能有效探测和识别热源目标, 但价格昂贵, 难于大批量推广; 微光夜视装备隐蔽性好, 成本较红外热像装备低, 虽然易受雨、雪、雾等恶劣天气影响, 但价格较低, 目前仍是军用夜视领域的重要手段。本文综述了美军现役微光夜视头戴系统装备的技术特点, 并展望了未来夜视技术的发展趋势。

1 美军微光夜视头戴系统

美军在 20 世纪 90 年代提出了“拥有黑夜”概念, 力求通过不断发展更为先进的微光夜视装备来保持其夜视技术优势^[1]。自第一台夜视镜(Night-Vision Goggles, NVG)在 20 世纪 70 年代初装备美军起, 经历了约三代的发展, 在提高夜视性能的同时大大降低了价格, 也逐步向小型化、智能化与信息感知的综合化方向发展。根据 1998 年颁布的 MIL-STD-196E 版本军用标准——联合电子设备型号设计系统(Joint Electronics Type Designation System, JETDS)^[2], 美军夜视头戴系统主要有 AN/AVS 系列和 AN/PVS 系列。其中, AN/AVS 系列夜视镜主要用于美军固定翼飞机、旋翼机和直升机等机载平台的飞行员, AN/PVS 系列夜视镜主要用于美军地面部队及特种战术小组。

1.1 AN/AVS 系列夜视镜

美军现役飞行员夜视成像系统(Aviator's Night Vision Imaging System, ANVIS)主要有 AVS-6、AVS-7、AVS-9 和 AVS-10 等型号。

AVS-6 早期由贝尔·豪威尔公司研制, 后经“奥米尼巴斯”计划多次采购, 通过迭代更高性能像管、减轻光学系统重量和优化人机工程使得分辨率、光灵敏度、信噪比等夜视性能逐步提高, 承包商也逐步被 ITT 和 L3Harris 公司取代。AVS-7 由美国和以色列联合研制。与 AVS-6 相比, AVS-7 的主要改进是将夜视图像投射至护目镜上, 使飞行员通过护目镜上的叠加图像可同时看到夜间场景和关键飞行数据, 大大降低了低头看仪表的时间。

AVS-9 由 ITT 公司研制, 其性能比 AVS-6 有所提高, 是美空军和海军的标准夜航系统。AVS-10——全景夜视镜(Panoramic Night Vision Goggle, PNVG)由 L3Harris 公司研制, 利用 4 个独立张开的 16 mm 三代像管实现了 $100^{\circ} \times 40^{\circ}$ 广角夜视, 同时也采用了白磷像管以提高细节分辨能力。由于飞行速度和过载需求, AN/AVS 系列夜视镜在人机工程、舒适性设计以及可靠性设计方面有较高要求, 且光谱响应范围逐步向近红外波段延伸^[3]。图 1 为 AVS 系列夜视镜的实物图。

1.2 AN/PVS 系列夜视镜

PVS 系列夜视镜通常用于美军常规地面部队、特种战术小组和警察反恐部队, 主要有 PVS-5、PVS-7、PVS-14、PVS-15、PVS-18、PVS-21、PVS-23、PVS-31 等型号。其中, ITT 公司研制的 PVS-7B/D 和 PVS-14 装备数量较大、性能较高^[5]。PVS-5 双筒双目夜视镜采用二代像管, 20 世纪 80 年代初装备美军, 内置红外光源(可为近距离阅读地图、文件等提供照明), 现已被换装三代像管的夜视装备取代。PVS-7 单筒双目夜视镜有 A、B、C、D 等多个型号, 通过换装三代像管实现了性能的



图 1 AVS 系列夜视镜^[4]

图 2 PVS 系列夜视镜^[6]

大幅提升。PVS-15 双筒双目夜视镜是美国海豹和地面部队的主要微光夜视装备，其视场角为 51° ，也可选用 40° 物镜镜片；采用独立供电方式，配备红外辅助照明，防水性能优良，环境适应性好。PVS-18 单筒夜视镜与 PVS-14 类似，所用三代像管 MX-10160 由 L3Harris 公司研制；使用对象定位于美海军系统，因此很少出现在陆军地面部队中。PVS-21 夜视镜有双红外辅助照明和可变焦望远系统，能搭载热成像武器瞄具的平视显示器 (Head Up Display, HUD)、陀螺仪、电子地图显示系统等，具备基于实时数据的激光全息投影功能。PVS-23 夜视镜是 AVS-9 的地面改装版，增加了辅助红外照明，装备于美陆军特种部队。PVS-31 夜视镜需要外接电池盒供电，镜筒可以独立上翻，如单独抬起一只目镜即可实现夜视瞄准射击，从结构上看基本就是 PVS-14 的双筒双目版本。图 2 为 PVS 系列夜视镜的实物图。

1.3 微光/红外融合夜视镜 (PSQ-20)

美军在大量装备 AVS、PVS 系列夜视镜的同时，还大力发展了多波段融合夜视增强成像系统。比如 ITT 公司研制的 PSQ-20 就是一种增强型夜视镜 (Enhanced Night Vision Goggle, ENVG)，包括了 PSQ-20/20A/20B 等三个型号。作为一种头盔式微光/红外图像融合夜视镜，PSQ-20 可头戴使用，也可作为手持热像仪使用，还可用作轻武器瞄具。图 3 为 PSQ-20 和 PSQ-20B 夜视镜的实物图。图 4 所示为 PSQ-20 微光图像与微光/红外融合图像的效果对比情况。可以看出，融合图像中人员

较微光图像更加清晰可见。PSQ-20 采用 16 mm 三代像管和单目镜观察组件共光轴设计，可实现微光与热成像的光学融合。其中热成像部分采用非制冷 320×240 氧化钒焦平面探测器，4 节 AA 型电池可保证 2.5 h 连续工作，整机重量小于 1000 g。PSQ-20 在 150 m 处能以 80% 概率识别单兵，300 m 处识别单兵的概率也达到了 50%。由于战场环境的复杂性，PSQ-20 对某些场景的融合效果较差，且由于算法复杂和运算量较大，算法实时性也有待提高^[7-8]。

1.4 夹式热像仪

夹式热像仪 (Clip-On Thermal Imager, COTI) 是一种能够快速部署、技术成熟且价格适中的夜视装备，由赛峰集团旗下的 1 号光学

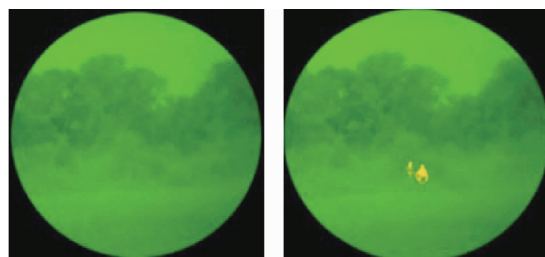
图 3 PSQ-20 和 PSQ-20B 增强型夜视镜^[9]图 4 微光与微光/红外融合图像的对比^[10]

图 5 COTI 安装到 PVS-7 夜视仪上的实物图及效果图^[14]

公司研制, 被美军定型为 PAS-29^[11]。COTI 将红外图像投射到微光夜视仪的物镜上, 从而实现了微光细节分辨与热源目标突出显示的融合夜视效果。COTI 采用 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 非制冷长波红外非晶硅探测器阵列(分辨率为 384×288), 通过环形适配器安装到 PVS-14、PVS-15、PVS-7 等微光夜视装备上。这个金属环可以牢固环绕夜视仪镜筒, 并可根据夜视仪型号进行调节。COTI 重 142 g, 不会对士兵头部造成过多负担。图 5 为 COTI 安装到 PVS-7 夜视仪上的实物图及效果图。与 PSQ-20 类似, 由于战场环境的复杂性, 在使用场景发生骤变时, COTI 需要一定时间重新进行基于无快门 XTi 技术的非均匀性补偿(Non-Uniformity Compensation, NUC)^[12-13], 否则将会大大影响观察效果; 同时 COTI 的环形适配器在夹持物镜时也会影响物镜调节。另外, 由于采用二代像管的微光夜视仪没有自动门控(AUTOGATE)功能, 热融合技术难以发挥其融合效果。

1.5 陆用全景夜视镜

图 6 所示的陆用全景夜视镜(Ground Panoramic Night Vision Goggle 18, GPNVG-18)由 L3 Warrior 公司研制, 目前仅装备美陆军、执法部门及特种部队并出口乌克兰、德国、韩国等。相比于传统夜视镜约 40° 的视场角, GPNVG-18 利用 4 根三代像管实现了水平 $95^\circ\pm 5^\circ$ 、垂直 $38^\circ\pm 2^\circ$ 的大视场角。受重量限制, GPNVG-18 没有红外辅助照明, 但大视场带来了更多的夜视场景信息, 便于士兵快速观察、定位、判定和行动(Observe, Orient, Decide,

图 6 陆用全景夜视镜^[16]

Act, OODA)。GPNVG-18 的体积约为 $143\ \text{mm}$ (长) $\times 216\ \text{mm}$ (宽) $\times 95\ \text{mm}$ (高), 重量约为 765 g; 采用 4 个 3 V CR123A 电池供电, 连续工作时间约为 30 h。由于用白色荧光(White Phosphorus, WP)粉代替绿色荧光(Green Phosphorus, GP)粉, WP GPNVG-18 能够获得更为清晰的图像细节并能产生更好的对比度和景深感, 减少了图像中的“刺目闪光”^[15]。GPNVG-18 的最大特点是近似于裸眼的大视场角, 但 4 根像管导致购置价格昂贵并增加了整机重量, 容易造成佩戴的不舒适感。同时 GPNVG-18 采用的 18 mm MX-10160 三代像管已大批量装备美军夜视系统, 其最小品质因数(Figure of Merit, FOM)也仅为 1792, 并未实现主要夜视性能的突破。另外, 目镜重叠部分有轻微的图像遮挡, 能够轻微看到两个目镜之间的胶合部分以及边缘黑框。

1.6 双筒增强型夜视镜

双筒增强型夜视镜(Enhanced Night Vision Goggle-Binocular, ENVG-B)由 L3Harris 公司与 Elbit Systems 公司共同研发。两家提供的产品在外形结构和主要指标上基本相同, 只是 L3Harris 公司用 WP 像管实现了灰白+橙红的双色显示效果。图 7 为 ENVG-B 及其显示图像。



图 7 ENVG-B 及其显示图像^[18]

ENVG-B 可看作是 PSQ-20 的进一步技术拓展, 两者的相同点在于均是通过光学融合实现微光与红外的“热融合”, 不同点在于 ENVG-B 用双筒双目微光夜视镜集成了一个 $12\ \mu\text{m}$ 红外热成像仪, 使士兵在立体视觉的基础上获得物体每个表面的明亮边缘, 提高了复杂战场条件下快速识别目标的能力。另外, ENVG-B 的信息化水平明显提高。由于采用 AR 算法, 它具备目标快速捕获能力, 通过连接终端系统便可在眼前直接显示出物体方位、时间和夜视仪电量等关键信息, 甚至包括友军位置、导航路标、目标建筑结构等。ENVG-B 还能连接美陆军“未来战士”计划的态势感知系统的各种传感器。比如, 通过连接“武器瞄准镜系列-单兵”来实现拐角安全射击, 保证了士兵在密切观察战场环境的同时无需低头紧盯其他战术数据设备。

因此, ENVG-B 被美陆军士兵项目执行办公室认为是目前最为出色的微光夜视装备^[17]。但光学融合涉及的关键技术尚未完全突破, 如图像配准误差对融合效果造成影响, 融合算法的实时性有待提高等; 同时 ENVG-B 的 AR 功能与飞行员屏显极为类似, 而普通士兵不可能接受与飞行员相同的耗资巨大的模拟训练; 佩戴舒适性以及能否快速熟练使用也有待进一步验证。

1.7 集成视觉增强系统

集成视觉增强系统(Integrated Visual Augmentation System, IVAS)的关键研发工作由 Microsoft 公司承担, 其核心技术主要衍生于该

公司的 HOLOLENS AR 头戴显示器, 旨在进一步增强士兵的战场态势感知能力。IVAS 由头部组件、可背负式单兵计算机、交互系统以及 3 片舒适穿戴电池(Comfortable Wearing Battery, CWB)组成。如图 8 所示, IVAS 头部组件集成了 RGB 镜头、深度镜头、非制冷红外热像组件以及眼球追踪镜头, 从而兼顾了面部防护、立体视觉和夜视功能。IVAS 的计算机、CWB 等重量较大的设备分散在可穿戴组件上, 避免了重量集中于头部所带来的不舒适感。CWB 在高寒等恶劣环境下可保持 8 h 连续工作, 还可配合防弹插板共同插入防弹插板槽中。IVAS 目镜的视场角为 $80^\circ \times 40^\circ$, 可同时把微光夜视仪/热成像仪视野扩大到 180° ; 内建的 HUD 能见到指南针和数字 3D 地图, 在复杂城镇环境以及开阔野战环境下均能正常运作。另外还包含了测距系统的传感器模组, 能让士兵在实时地图上标记敌我位置, 并将其分享给班级、排级甚至连级人员。



图 8 集成视觉增强系统^[20]

IVAS 集成了宽视场昼夜观察、红外/微光融合显示、战场态势感知、敏感目标辅助识别等一系列关键技术, 实现了单兵态势感知能力与作战效能的显著提升^[19]。但具备 AR 功能的 IVAS 需要长期训练才能发挥其效能从而提高作战效能。不稳定的战场互联网以及不同种类设备之间的通信障碍会大大影响 IVAS 效能。此外, HUD 分辨率不高、传感器易被遮挡、控制器易损坏、价格昂贵等也是需要解决的问题。

2 技术特点分析

一是高性能像管研发处于领先地位。高性能像管是微光夜视头戴系统的核心部件。目前美军微光夜视装备已普遍换装了三代像管, 在夜视技术水平和装备规模数量两方面均大幅领先其他国家。微光夜视装备性能的主要评价指标包括光阴极灵敏度、分辨率、信噪比和 FOM。其中, 光阴极灵敏度表征夜视装备亮度; 分辨率表征对物体的分辨能力; 信噪比表征微弱光条件下噪点的多少; FOM 则是分辨率与信噪比的乘积, 是表征微光夜视装备性能的综合性指标。表 1 按照及格、中等和优良三个等级对 4 个指标进行了比较。

以美军 PVS-31A 夜视仪为例, 该夜视仪配备了 18 mm 的 WP 门控 MX-11769 三代像管。它的典型分辨率为 64~72 lp/mm, FOM 可控制在 1600~2376 范围内, 夜视性能优良。

二是标准化程度逐步提高。目前美军采用的三代像管外形已逐步标准化, 分别是 MX10160、MX11769 和 MX10130。其中, MX10160 主要用于 PVS-15、PVS-18、PVS-14、PSQ-20 等; MX11769 主要用于 PVS-14 和 PVS-31; MX10130 用于 PVS-7。MX11769 和 MX10160 的外形尺寸相同, 仅有的区别是

前者多出了一根用于调整像管亮度的控制线。像管标准化程度的提高, 使得微光夜视装备整机研制更具灵活性, 提高了装备的模块化水平和迭代更新速度, 也大大降低了维修保障难度。

三是针对不同应用场景, 研制了不同型号的微光夜视装备。在结构形式上有单筒单目、单筒双目和双筒双目等, 并在保证满足使用要求的前提下, 充分考虑了购置价格和配发数量。在作战使用方面, AVS 系列充分考虑了飞行速度和过载需求, 在尽量减轻重量的前提下, 适当增加了出瞳直径、出瞳距离以及宽视场要求, 确保人机工程、舒适性设计以及可靠性满足需求。PVS 系列则考虑了战场环境的复杂性、信息获取和信息共享的特殊要求。比如, PVS-15 双筒双目夜视镜考虑了两栖作战要求, 防水性能优良; GPNVG-18 约 100°的大视场接近裸眼观察视场, 大幅提升了人眼观察使用的舒适性。

四是微光夜视装备逐步向信息感知综合化方向发展。在不断优化三代像管工艺水平及光电阴极新材料应用的基础上, 持续拓展光谱响应范围并充分挖掘不同波段的成像特点。通过红外与微光融合, 兼顾不同图像特性信息并加以利用, 既确保了图像细节又兼具穿透雨雪的能力; 通过叠加不同战场传感器数据, 向夜视图像综合化、智能化方向发展, 大幅提升了士兵的战场态势感知能力和信息共享水平。

3 发展与展望

夜视技术作为拓展人眼夜间低照度视觉感知的重要手段, 具有广泛的军事应用价值。随着数字图像处理技术的快速发展, 微光夜视装备在高性能像管、固体微光夜视技术、微光/红外融合技术等方面还有巨大的发展空间。

表 1 微光夜视装备评价指标

等级	光阴极灵敏度/($\mu\text{A}/\text{lm}$)	分辨率/(lp/mm)	信噪比	品质因数
较低	500	51	20	1000
普通	2000+	64	25	1600
优良	2000+	72	30+	2100+

超二代和三代微光像管已发展多年。在不断提高像管生产工艺和优化光阴极材料的基础上,电子轰击有源像素传感器(Electron Bombardment Active Pixel Sensor, EBAPS)逐步成为微光夜视研究的重要方向。作为真空-半导体混合型微光探测器件,EBAPS兼顾了真空器件的高增益、高信噪比、快响应和固体器件的小型化、数字化输出,从而在紧凑型、轻量级、低功耗且低成本的封装中实现了最先进的数字夜视性能。由于将图像传感器直接集成在像增强器内部,以背部减薄的 CCD/CMOS/APS 替代像增强器阳极,去除了 MCP 和荧光屏,因而整个增益过程中的噪声明显低于 MCP 电子倍增噪声,几乎可以无噪声地产生高于 3000 的电子增益。更为重要的是,EBAPS 将微光夜视从“模拟”拉入“数字”时代,使得通过数字图像处理进一步提高夜视图像质量成为可能。

随着 CMOS 生产工艺以及数字电路设计的快速发展,超低照度 CMOS 固体成像器件的性能指标不断提升。比如,SONG 公司的 IMX224MQV 型 CMOS 和 PHOTONIS 公司的 NOCTURN 系列超低照度 CMOS 均可在 5×10^{-3} lx 低照度环境下清晰成像;SIONYS 公司的 XQE 系列产品的最低极限工作照度可达 1×10^{-3} lx 夜天光水平。Rochester Precision Optics 公司研制的基于 CMOS 成像技术的 CNOD 夜视仪实现了 5×10^{-3} lx 环境下的正常工作,且整机重量仅为 538 g^[21-22]。受限于较高的购置价格以及真空器件的使用寿命,在大力发展以像增强器为核心部件的微光夜视装备的同时,可在警用及民用领域研发以低照度 CMOS 为核心部件的夜视头戴系统。在做到“高低”搭配的同时,不断拓展新型成像器件在微光夜视领域的应用。

相对于单波段微光图像,微光/红外融合图像可在增强图像细节的基础上,提高热源目标的识别能力并克服雨、雪等恶劣环境的影响;而双波段彩色夜视融合图像则更加有助于

位置判断和场景记忆,能明显提高目标探测速度、降低识别错误率^[23]。然而,多波段低照度灰度图像彩色化存在一些困难。比如,使用彩色滤光片会降低探测器的探测效率并增加随机噪声;相同场景在不同天候下的颜色分布差异增加了重构真彩色的不确定性等。为此,需进一步深化研究彩色融合算法、配准技术、色彩传递以及融合图像效果评价等关键技术,尽可能得到与人眼可见光波段观察景物色彩相吻合的彩色夜视图像;同时研制图像融合处理硬件平台,以提高融合算法的鲁棒性。

参考文献

- [1] 金伟其,陶禹,石峰,等. 微光视频器件及其技术的进展 [J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(11): 3167-3176.
- [2] Joint Electronics Type Designation System [S]. Washington: US DoD, 1998.
- [3] 何晓骁. 美国空军的夜视夜战装备及训练 [J]. *国际航空*, 2020, **32**(7): 61-64.
- [4] Night Vision Systems Category [EB/OL]. www.ownthenight.com, 2022.
- [5] 郭晖,向世明,田民强. 微光夜视技术发展动态评述 [J]. *红外技术*, 2013, **35**(2): 63-68.
- [6] Night Vision [EB/OL]. www.tnvc.com, 2022.
- [7] Gourley S R. AN/PSQ-20 Enhanced Night Vision Goggle [J]. *Army Magazine*, 2011, **8**: 6264-6265.
- [8] Vance G M, Janeczko D J, Crabtree R C. Enhanced Night Vision Goggle: USD431585S [P]. 2000-04-20.
- [9] 美军新一代夜视仪 ENVG (AN/PSQ-20) [EB/OL]. www.junpin360.com/html/2012-11-16/1490.html, 2022.
- [10] 美军微光夜视技术的发展及装备应用 [EB/OL]. https://news.tezhongzhuangbei.com/jszw_date_120.html, 2022.
- [11] Stephen R K, Mathew N R, Paul S C. Shutterless Infrared Imager Algorithm with Drift Correction: US07683321B1 [P]. 2010-07-10.
- [12] Salisbury R S. Next-generation Thermal-IR Cam-

- eras Use Shutterless Imaging [J]. *Laser Focus World*, 2007, **43**(8): 87–91.
- [13] Liu C W, Sui X B, Gu G H, et al. Shutterless Non-uniformity Correction for the Long-term Stability of an Uncooled Long-wave Infrared Camera [J]. *Measurement Science & Technology*, 2018, **29**(2): 025402.
- [14] Products/Defence-Security [EB/OL]. www.thermoteknix.com, 2022.
- [15] Vadim P. Panoramic Night Vision Goggle Having Multi-channel Monocular Assemblies with Modified Eyepiece: US20020114069A1 [P]. 2002–01–14.
- [16] GPNVG–18 [EB/OL]. www.tnvc.com/shop/l3-harris-gpnvg-ruggedized-bridge, 2022.
- [17] Lee C, Mayfield M. Army Updates Night Vision Goggles [J]. *National Defense*, 2019, **104**(790): 14.
- [18] Night-vision [EB/OL]. www.elbitamerica.com, 2022.
- [19] Beinart M. Army to Look For IVAS Data Capability, As Officials See First Headset Prototypes This Month [J]. *Defense Daily*, 2019, **4**: 6–7.
- [20] Integrated Visual Augmentation System Update [EB/OL]. www.directactiongear.com, 2022.
- [21] NOCTURN XL CMOS [EB/OL]. www.photonis.com, 2022.
- [22] XQE (Extended Quantum Efficiency) [EB/OL]. www.laser-infrared.com, 2022.
- [23] 朱进, 李力, 金伟其, 等. 低照度夜视成像的自然感彩色化及增强方法 [J]. *光子学报*, 2018, **47**(4): 0410002.