

车载光电桅杆技术的发展现状及趋势

张坤杰

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 在介绍极限意义上的几何探测距离计算方法的基础上, 介绍了车载光电桅杆的结构, 包括直臂式和曲臂式两种结构。在车载桅杆的应用中引入光电探测系统可增强系统的态势感知能力。随着车载光电桅杆技术日渐发展成熟以及应用领域的不断扩展, 车载光电桅杆需求量有望增加。对国内外目前车载光电桅杆技术的发展现状和应用前景进行了综述。

关键词: 车载光电桅杆; 态势感知; 光电探测; 红外成像; 地面监视雷达

中图分类号: U667.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2020)06-0519-09

Current Status and Trend of Vehicle Photoelectric Mast Technology

ZHANG Kunjie

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Based on introducing a calculation method for the limit of geometric detection range, the structure of vehicle-based photoelectric masts with a straight arm or a crank arm is presented. Photoelectric detection system in the application of vehicle mast can enhance the situation awareness ability of the system. The market demands of the vehicle-based optoelectronic mast are expected to increase with the growing maturity of its technology and continuous expansion of its application. The current status and application prospect of vehicle-based photoelectric mast technology at home and abroad are summarized.

Key words: vehicle based photoelectric mast, situational awareness, photoelectric detection, infrared imaging, ground surveillance panel radar

0 引言

桅杆原本是一种船上悬挂风帆和旗帜的高杆, 桅杆顶端位据船体平台高点位置, 具有登高望远的高度优势。光电探测系统对地面或对海面的观察距离受到地球曲率的影响, 同样性能的探测系统, 安装在高处比安装在低处看得更远。将光电探测系统安装在桅杆顶端即构成光电桅杆^[1], 光电桅杆通过相对简单地提升光电探测系统的位置高度, 额外扩大了光电探测系统的作用距离和观察范围。近年来, 随着光电探测系统的小型化, 光电桅杆的应用范围从水面扩展到地面, 国内外有关单位纷纷涉足光电桅杆的研发^[2]。逐渐形成了一个相对独立、特色明晰的车载光电桅杆技术领域。本文介绍了国内外车载光电桅杆的发展动态。

1 光电探测系统的几何探测距离

作用距离是军用光电探测系统最重要的一个性能参数。这里介绍极限意义上的几何探测距离计算方法^[3]。几何探测距离是光电探测系统的最大作用距离。如同人眼可以向下看、向上看或者等高看出去一样, 光电探测系统的视线具有方向性。如果视线平行投射出去, 如图 1(a)和(b)所示, 这两种情况均无法定义最大距离, 如图 1(a)中所示, 视线可能还未到最大距离即被地势所阻止; 而图 1(b)类似于对空观察, 视线可以无限地向外空间延伸。

在平坦地势上所呈现的视线距离不一定是几何探测距离, 如图 2(a)所示。几何探测距离出现在图 2(b)所示的情况。设光电探测系统所在位置为 B , 其距地面高度为 h 。 C 点为从 B 点投向地球表面的切线与地球表面的切点, 视线 BCD 称为下视线。设目标高度

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-11-04.

作者简介: 张坤杰 (1986-), 女, 硕士, 主要从事科技信息研究、外语翻译等工作。E-mail: kunjie.zhang@aliyun.com.

为 H 。目标先位于 A 点, 然后移动到 M 点, 再移动到 C 点, $AD=MG=CJ=H$ 。 B 与目标顶点所在位置之间的连线称为上视线, 图 2(b)中的 BG 、 BJ 为上视线。 BCD 属于上视线与下视线重合的情况。 BCD 的意义在于给出了一个临界点 D , 在 D 点, 目标顶端刚刚与整机视线相接触、但是目标整体仍在视线以下。

三角形 OCB 和三角形 OCD 分别为直角三角形。根据勾股定理, BD 长度可按下式计算:

$$BD = BC + CD =$$
$$\sqrt{(R+h)^2 - R^2} + \sqrt{(R+H)^2 - R^2}$$

(1)

式中: $R=6378.14\text{ km}$, 为地球半径。

因为 $R \gg h$ 以及 $R \gg H$, 故式(1)展开后可以简化为:

$$BD \approx \sqrt{2R} \cdot \sqrt{h} + \sqrt{2R} \cdot \sqrt{H}$$

(2)

式(2)给出的几何距离只是一个理论意义上的计算公式, 它是一个极限值。光电探测系统的实际作用距离与系统参数密切相关, 但是不可能大于几何距离。

从式(2)可以看到, 当目标高度 H 不变时, 光电探测系统摆得越高, 看得越远。这就是光电桅杆优点的数学基础。

2 国外车载光电桅杆的发展现状

2.1 车载光电桅杆的结构特点

车载光电桅杆一般由可升降/收缩的桅杆结构和光电探测系统组合而成, 前者属于机械结构的范畴, 在经过改装的车辆上安装一个升降机便可实现桅杆的升降; 后者属于光电技术的范畴。

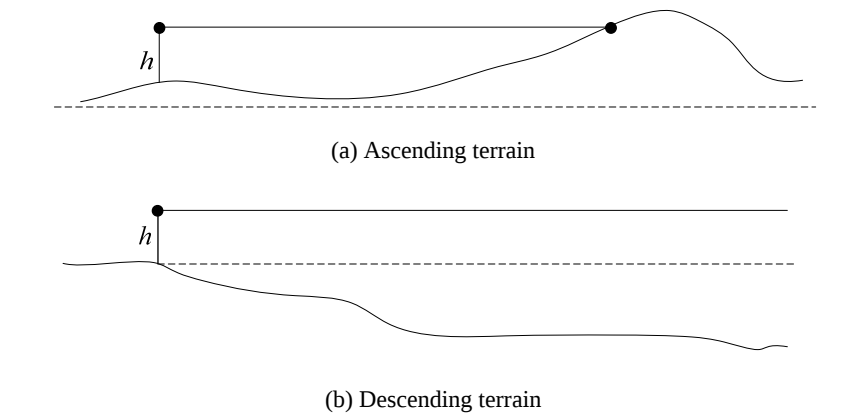


图 1 地势对视线距离的影响 Fig.1 Impact of terrain on line-of-sight distance

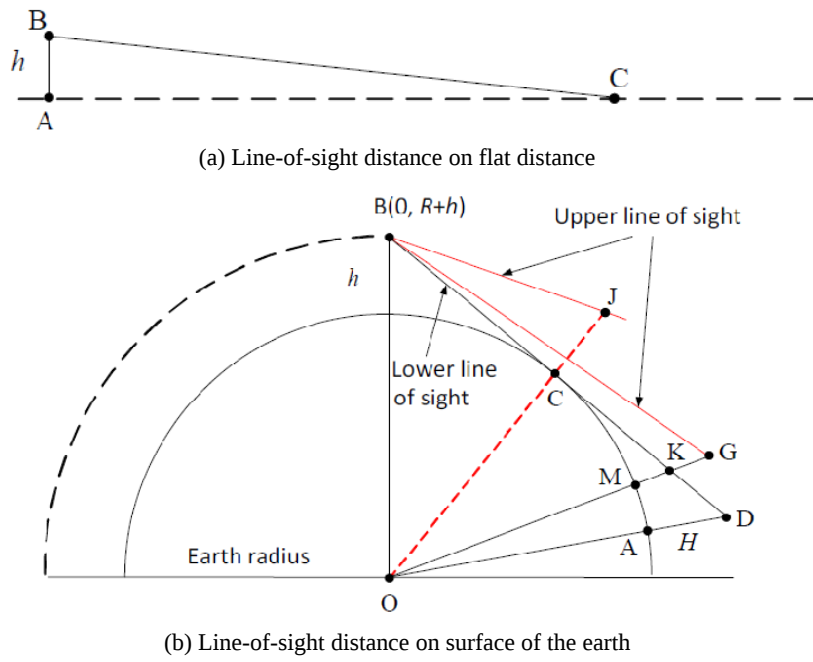


图 2 光电探测系统对地观察时形成的几何关系 Fig.2 Geometrical relationship formed during ground observation by electro-optic detecting system

车载光电桅杆所用车辆可以灵活多样，可以是军用车、警用车或者民用车。升降机主要有直臂式和曲臂式两种，它们的驱动形式包括机械、液压、气压等^[4]。图3是基于改装吉普车的直臂式桅杆结构，桅杆升降的控制与桅杆顶部光电探测系统的控制通过桅杆外部螺旋缠绕的线缆来实现，桅杆整体的部署高度可达4.72 m^[5]。不同于图3的桅杆结构，图4^[6]呈现的是由5段伸缩臂构成的桅杆结构，桅杆升降的控制和图像信号通过桅杆内部的线缆传输，这种直臂式结构可以避免较多地占用车辆驾驶室有限的空间。另外，光电桅杆结构还可以设置在单独的挂车车体上，图5为美国FLIR公司研制的基于挂车的Cerberus直臂式光电桅杆，其桅杆部署高度为5.8 m，可以部署在偏僻地区，实现较长时间的无人值守工作^[7]。

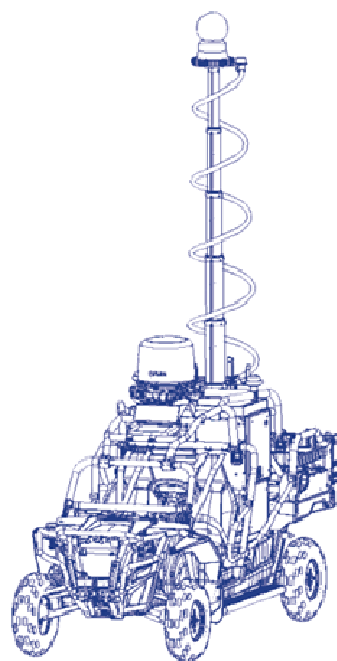


图3 基于改装吉普车的直臂式桅杆结构

Fig.3 Straight arm mast structure based on a modified jeep

此外，光电桅杆还可以用研发中的概念车辆来作为安装平台。图6^[8]是美军基于M2A3/Bradley履带式步兵战车底盘研发的M-SHORAD履带式野战防空系统样车，从图中可见，该车也配有直臂式光电桅杆，与图4相似，为避免过多占用车辆内部操作空间，直臂式桅杆可最大程度地节省车辆驾驶舱内部空间。但基于车辆的作战特点，直臂式桅杆的高度有限，以避免自身目标暴露。



图4 军用车配备的直臂式光电桅杆

Fig.4 Straight arm electro-optic mast mounted on a military vehicle



图5 基于挂车的直臂式FLIR Cerberus光电桅杆

Fig.5 Trailer based straight arm FLIR Cerberus electro-optic mast

曲臂式升降机既能自动保持被举升光电系统的稳定性，又可以实现工作中所需高度，速度控制精确灵敏，微动性能较好，维护方便、维修保养成本较低，目前在车载光电桅杆结构中较为常见。与直臂式升降机相比，曲臂式升降机占用车辆空间较多。曲臂式升降机配备的底盘可根据需求灵活安装在军用、警用、民用车上，或者直接安装于地面。例如，图7是安

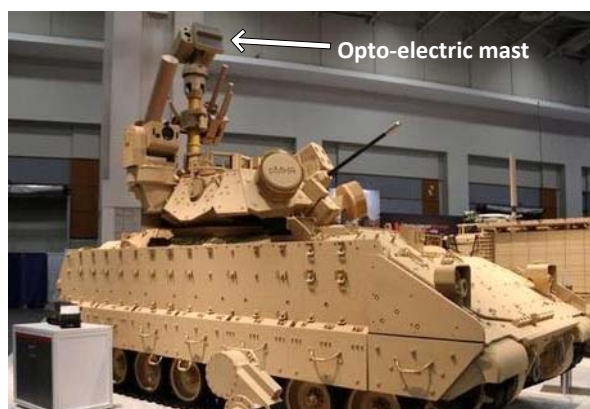


图 6 M-SHORAD 履带式野战防空系统中的光电桅杆
Fig.6 M-SHORAD tracked field air defence system with electro-optic mast deployed



图 7 在越野吉普上安装的 FLIR LTV-X 曲臂式光电桅杆
Fig.7 FLIR LTV-X crank arm electro-optic mast mounted on a jeep

装有曲臂式升降机的 FLIR LTV-X 车载光电桅杆，其桅杆部署高度为 4.04 m^[9]。图 8 是基于改装皮卡和曲臂式升降机实现的 FLIR MVSS 光电桅杆，可在车辆驾驶室内通过触屏显示器来控制桅杆的升降与桅杆顶部的光电探测系统，二者可根据需要灵活调整，互不干预，操作较为便捷，其中光电探测系统所成图像由光纤传输到驾驶室内，桅杆整体的部署高度可达 7.93 m^[10]。



图 8 基于改装皮卡和曲臂式升降机的 FLIR MVSS 光电桅杆
Fig.8 Modified truck and crank arm lift based FLIR MVSS opto-electric mast

2.2 车载光电桅杆的态势感知技术

信息化战争要求具有态势感知能力。态势信息在指挥与作战人员对战场态势的分析交流中尤为关键^[11-12]。国外厂商通过在车载光电桅杆中引入信息融合技术和全周视回转扫描技术来形成态势感知能力。信息融合技术包括红外、可见光、雷达、激光等多波段探测技术的融合。从美国 Lockheed Martin、FLIR、德国莱茵等公司近年研发的产品可以看出，大多数车载光电桅杆采用高清长波红外（Long wavelength infrared, LWIR）、高清中波红外（Middle wavelength Infrared, MWIR）、高清短波红外（Short wavelength infrared, SWIR）、高清彩色摄像机和像增强器的多波段融合技术，其优点在于通过优化多波段光谱信息的利用率、消除多传感器信息之间可能存在的矛盾和冗余来提高分辨率^[13-24]。采用融合技术后的系统观测范围较原来相比可显著增加。例如，图 8 中桅杆顶部的光电探测系统使用了多波段图像融合技术，覆盖可见光、近红外、短波红外和中波红外 4 个工作波段，观测范围从 700 m 可扩展到 30 km^[25]。美国 Lockheed Martin 公司研制的 GYROCAM-15TS 车载光电桅杆实现了红外热像仪、彩色摄像机和自动门控像增强器三者的图像融合。

周视观察对车载平台态势感知能力的影响尤为突出，如美国 Lockheed Martin 公司和 FLIR 公司推出的几款光电桅杆的方位角全部实现连续 360°全周视观察，根据工作任务的不同，它们的俯仰角各有不同，小到-30°，大到+120°。表 1 列出了美国 FLIR 公司车载光电桅杆的主要技术特点和性能参数^[5,7,9-10,24-25]。表 2 列出了美国 Lockheed Martin 公司车载光电桅杆的技术特点和性能参数^[26-28]。

表 1 美国 FLIR 公司的车载光电桅杆的主要技术特点和性能参数

Table 1 Technical features and parameters of vehicle electro-optic mast from the FLIR system

	FLIR LVSS	FLIR LTV-X	FLIR LTV	FLIR MVSS	Cerberus	FLIR KRAKEN
High definition imaging	MWIR, SWIR, HD color zoom	MWIR, SWIR, HD color zoom	MWIR, LWIR, SWIR, HD color zoom & color night vision	MWIR, NIR, SWIR, visible/low light	MWIR, LWIR, SWIR, HD color zoom & color night vision	-
Payload options						
Lasers	Laser rangefinder, laser designator, other sensors	Laser rangefinder, laser designator	Laser designator, laser rangefinder, laser pointer	Laser designator, laser rangefinder, laser pointer	Laser designator, laser rangefinder, laser pointer	-
Illuminators	NIR	NIR	NIR & SWIR	NIR & SWIR	NIR & SWIR	
Simultaneously tracking targets	-	>500	>500	>500	>500	>500
FOV	-	-	0.5°~40°	0.5°~40°	0.5°~40°	-
Focal length	-	-	13~1200 mm	13~1200 mm	13~1200 mm	-
Weight	-	1163kg	-	-	-	4.536 kg (gross weight)

表 2 美国 Lockheed Martin 公司的车载光电桅杆的主要技术特点和性能参数

Table 2 Technical features and parameters of vehicle electro-optic mast from the Lockheed Martin Corporation

	INFIRNO	GYROCAM-15TS	GYROCAM-15DHD
System type	Stabilized gimbal	Four-axis active stabilized SD multi-sensor	Four-axis active stabilized SD multi-sensor
Azimuth	360°	360° continuous	360° continuous
Elevation	+120°/-30°(-90° for stow)	±85°	±85°
Diameter	40.13 cm	-	-
Height	54.1 cm	-	-
Weight	63.5 kg	-	-
Target tracking	Multi-target image and inertial	-	-
Thermal imager			
	High definition (HD)	Standard definition (SD)	Standard definition (SD)
Detector type	-	InSb focal plane	InSb focal plane
Spectral response	3-5 μm (MWIR)	3-5 μm, MWIR (cooled)	3-5 μm, MWIR (cooled)
Array size	1280×1024	640×512	1280×1024
Horizontal FOV (HFOV)	-	36°-1.8°, 18°-0.9° (eZoom 2 ^x , 4 ^x)	38°-1.3°
Video output	1280×720	-	-
Optical zoom	2°-27° continuous, autofocus, electronic zoom, extended range	20:1	30:1

Continued Table 2

	INFIRNO	GYROCAM-15TS	GYROCAM-15DHD
Color Camera			
	High definition (HD)	Standard definition (SD)	Standard definition (SD)
Sensor type	-	Three-chip color camera CCD- TV	-
Spectral response	0.4-0.7 μm	-	-
Detector size	1920×1080	-	-
Video output	1280×720 (HD)	Standard definition	-
HFOV	-	27°-1.4°, optical 2°×0.7°	37.6°-2.0°, optical 3°×0.67°
Optical zoom	1°-7.4° continuous, autofocus, electronic zoom matched FOV, scene aligned with manual or automatic image blending/ overlay	40:1	56:1
Auto-gated night vision			
	-	Image intensifier (2000 ma/lumen sensitivity)	
	-	Common aperture with color camera	
Lasers			
Laser designator	1.06 μm NATO standard	830 nm (Nominal)	
Laser rangefinder	eye-safe/1.54 μm	1535 nm (Nominal)	6.5 km class (standard con- figuration)/ 20 km class
Power	28 V DC, 450 W RMS, 1000 W peak (MIL-STD-704F)	200 mW (Class IIb)	-
Maintainability	2-level maintenance	-	-
Mean time between failures	1000 hours	-	-
Mean time to repair	20 minutes	-	-
Operating temperature	-20℃～+49℃	-32℃～+57℃	-32℃～+57℃
Operating altitude	-60.96 m～+5486.4 m	-	-
Transport	-60.96 m～+8534.4 m		
Gimbal	-	38.1 cm; 35.5 kg	38.1 cm; 35.5 kg
Interface unit	-	4.9 kg	4.9 kg
Hand-held controller	-	1.1 kg	1.1 kg

早期雷达使用晶体管技术，体积和功耗较大，难以实现车载桅杆式安装。随着微电子技术的进步，各种电子元件的体积缩小、功耗降低，逐步实现雷达小型化，衍生了主要用来对重要阵地或者设施周围实施有效监视的地面监视雷达（又称为战场监视雷达）。地面监视雷达的典型产品为面板式结构，其采用模块

化设计，体积较小、重量较轻，可直接安装在车载桅杆上构成远距离地面监视雷达系统。从图 4、图 7、图 8 和图 9(a)^[29]中可以看到安装在车载桅杆顶端的面板式地面监视雷达。在车载光电桅杆中，地面监视雷达主要配合红外、可见光、激光和其他传感器协作使用，可以较大程度地实现对目标的搜索、跟踪和定位。

地面监视雷达还可以车下安装，构成近距离地面监视雷达系统，如图 9(b)所示。表 3 为美国 FLIR 公司研制的多款车载光电桅杆中的地面监视雷达参数^[5,7,9-10,24]。

车载光电桅杆的另一发展趋势是与全球定位系统（GPS）、惯性导航单元（inertial navigation unit, INU）等电子导航设备的结合。光电桅杆通过为 GPS、INU 等电子设备提供支撑平台，可以将工作波段扩

展到雷达波段。这样一方面减少了同时使用桅杆的数量^[30]，另一方面使车辆在有限的时间内尽可能全面、智能地完成任务。此外，在车载光电桅杆中引入网络互联技术可以提高车载作战平台的作战效能。图 10 为德国 Rheinmetall 防务公司的 Vingtaqs II 车载光电桅杆，该系统除了红外、激光和可见光多波段融合以外，还包括 GPS 天线和惯性导航单元^[29]。



图 9 面板式地面监视雷达安装在车载光电桅杆上和车辆附近的三脚架上

Fig.9 Ground Surveillance Panel Radar (GSPR) mounted on vehicle electro-optic mast and tripod away from vehicle

表 3 美国 FLIR 公司光电桅杆中的面板式地面监视雷达参数

Table 3 Parameters of GSPR in vehicle electro-optical mast from the FLIR system

	FLIR LVSS	FLIR LTV-X	FLIR LTV	FLIR MVSS	Cerberus
Radar Options	Option1: R6SS and R8SS mid-range GSPR;	R6SS-FMCW X-band	FMCW and Doppler options, Ka and X band, ranging from 700 m to 60 km	FMCW and Doppler options, Ka and X band, ranging up to 60 km	FMCW and Doppler options, Ka and X band, ranging from 700 m to 60 km
	Option2: R3SS-3D and R8SS-3D drone and GSPR;	R20SSFMCW X-band			
	Option3: R20SS long range GSPR	-			

3 国内车载光电桅杆的研究现状

国内在车载光电桅杆产品的研发方面种类较少，公开报道的车载光电桅杆不多，现有文献主要集中在对车载光电桅杆的整体作战效能、方位方向精度，以及在研制过程中的整体可靠性等问题的分析研究。

文献[31]为了准确评估车载光电桅杆在设计阶段的效能，用专家打分的评估方法对某一车载光电桅杆的搜索跟踪能力、系统可用能力、系统生存能力进行综合化分析，实现对光电桅杆作战效能的评估。专家打分方法适用于存在诸多不确定因素，采用其他方法难以进行定量分析的待评估项目，这种方法简便、直观性强。

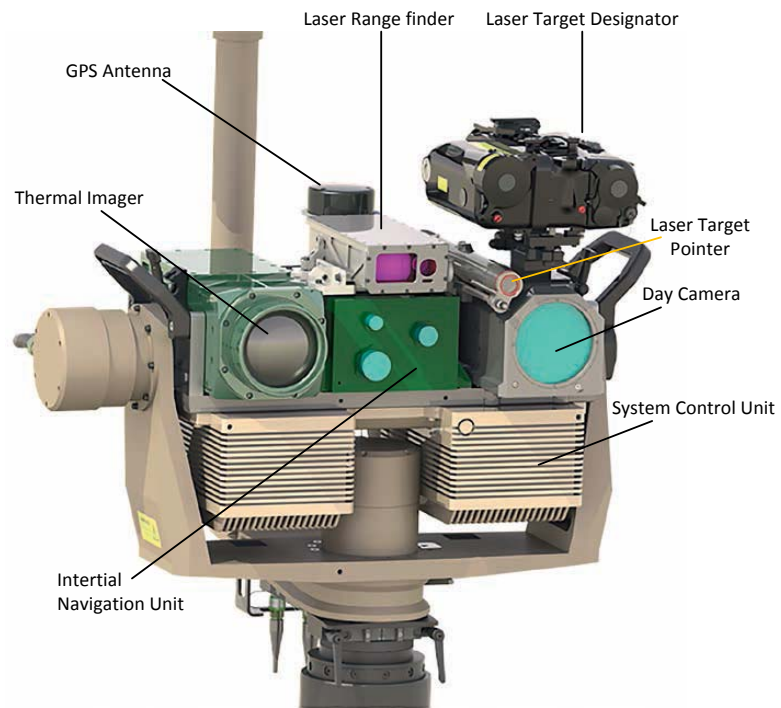


图 10 德国 Rheinmetall 防务公司的 Vingtaqs II 车载光电桅杆
Fig.10 Vingtaqs II vehicle electro-optic mast of Rheinmetall Defence

文献[32]提出车载光电桅杆的方位方向精度分配的合理性主要取决于光电探测系统和桅杆控制系统,通过将误差值按照系统总体指标精度分别分配到光电探测系统和桅杆控制系统,可验证车载光电桅杆方位方向精度分配的合理性。

文献[33]认为车载光电桅杆是目前较为新型的高精度装备,可靠性是该系统研制过程中必须考虑的问题。例如,机械总体可靠性、光电总体可靠性等。通过一定时间段的半实物仿真试验,对车载光电桅杆的总体可靠性的合理分配及校核问题进行研究。

4 结束语

车载光电桅杆是车辆系统、光电探测系统和机械升降系统三者融合的产物。光电探测系统的小型化、模块化和智能化使它可以便捷地安装在车载桅杆的顶部,拆装和操作简便,维护成本较低。目前,国外研制的车载光电桅杆的应用范围已经从军用、警用扩展到民用领域,与水面应用环境相比,它的安装平台更多样化,可以是军用车辆,也可以是警用车辆,甚至是普通的民用皮卡,用途也随之多样化,例如,边防、安防、森林防火、管道安全、战术侦察等。与基于海上平台的光电桅杆相比,车载光电桅杆的制造难度和成本相对较低,潜在市场需求较大,有望实现量产。

参考文献:

[1] 孙成禄. 潜艇光电桅杆[J]. 现代军事, 1996(6): 54-57.
SUN Chenglu. Submarine optronic mast system[J]. Conmilit, 1996(6):

54-57.
[2] 马永龙, 陆炳哲. 国外光电桅杆设计特色分析[J]. 舰船电子工程, 2006(6): 190-194.
MA Yonglong, LU Bingzhe. Analysis of foreign optronics mast design features[J]. Ship Electronic Engineering, 2006(6): 190-194.
[3] 张坤杰, 王忆锋. 近年来国外车载光电桅杆的发展动态[J]. 云光技术, 2018, 50(2): 19-25.
ZHANG Kunjie, WANG Yifeng. The development trends of foreign electro-optic mast system in recent years[J]. Yun Guang Ji Shu, 2018, 50(2): 19-25.
[4] 陈兆兵, 郭劲, 王恒坤. 光电桅杆的应用现状与发展趋势[J]. 光电技术应用, 2012(5): 13-16.
CHEN Zhaobing, GUO Jin, WANG Hengkun. Application actuality and development trend of electro-optic mast[J]. Electro-Optic Technology Application, 2012(5): 13-16.
[5] FLIR System. FLIR LTV [EB/OL]. [2018-10-12]. http://ww4.flir.com/uploadedFiles/flirGS/Integrated_Solutions/Command_Space/Tactical_Systems/LTV-Datasheet.pdf.
[6] Sina Military. The machine gun can also be equipped with radar [EB/OL] [2018-05]. <http://mil.news.sina.com.cn/jssd/2018-09-15/doc-ifxeuwwr4632080.shtml>.
[7] FLIR System. COMMANDSPACE CERBERUS[EB/OL]. [2018-10-12]. <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/cerberus-datasheet.pdf>.
[8] 邓涛. 新型“布雷德利”防空战车[J]. 坦克装甲车辆, 2019(3): 17-21.
DENG Tao. New Bradley air defence vehicle[J]. Tank and Armored Vehicle, 2019(3): 17-21.

- [9] FLIR System. FLIR LTV-X [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. flir. com/globalassets/imported-assets/document/ltv-xdata-sheet. pdf](https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/ltv-xdata-sheet.pdf).
- [10] FLIR System. FLIR MVSS [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. flir. com/globalassets/imported-assets/document/flir-mvss- data- sheet. pdf](https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-mvss-data-sheet.pdf).
- [11] 杨越, 聂辉. 捷联式光学稳定系统在光电桅杆上的应用[J]. 红外技术, 2003, 25(3): 18-26.
- YANG Yue, NIE Hui. Application of strapdown optical stabilization on optronics mast[J]. *Infrared Technology*, 2003, 25(3):18-26.
- [12] 刘彬, 宋庆杰, 徐强. 信息化战场态势感知能力发展及其影响[J]. 国防大学学报, 2012(3): 32-35.
- LIU Bin, SONG Qingjie, XU Qiang. Development and influence of situational awareness in battlefield[J]. *Journal of National Defence University*, 2012(3): 32-35.
- [13] 陈浩, 王延杰. 基于小波变换的图像融合技术研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(5): 39-41.
- CHEN Hao, WANG Yanjie. Study of image fusion technology based on wavelet transform[J]. *Microelectronics and Computer*, 2010, 27(5): 39-41.
- [14] S John Nisha Anita, C John Moses. Survey on pixel level image fusion techniques[C]//2013 IEEE International Conference ON Emerging Trends in Computing, Communication and Nano- technology (ICECCN), 2013: 141-145.
- [15] LI Mingjing, DONG Yubing. Review on technology of pixel-level image fusion[C]//Proceedings of 2013 2nd International Conference on Measurement, Information and Control, 2013(1): 341-344.
- [16] Rishu Garg, Preeti Gupta, Harvinder Kaur. Survey on multi-focus image fusion algorithms[C]//2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS), 2014: Doi: 10.1109/ RAECS. 2014.6799615.
- [17] Altan-Ulzii Moonon, HU Jianwen. Multi-focus image fusion based on NSCT and NSST[J]. *Sensing and Imaging: An International Journal*, 2015, 16(1): 1-16.
- [18] LI Mingjing, DONG Yubing. Review of image fusion algorithm based on multiscale decomposition[C]//Proceedings 2013 International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), 2013: 1422-1425.
- [19] YANG Bo, JING Zhongliang, ZHAO Haitao. Review of pixel-level image fusion[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Science*, 2010, 15(1): 6-12.
- [20] ZHANG Huaxun, CAO Xu. A way of image fusion based on wavelet transform[C]//2013 IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2013: 498-501.
- [21] Mirajkar Pradnya P, Ruikar Sachin D. Wavelet based image fusion techniques[C]//2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP), 2013: 77-81.
- [22] Do M N, Vetterli M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, 14(12): 2091-2106.
- [23] da Cunha A L, ZHOU Jianping, DO M N, et al. The nonsubsampling contourlet transform, theory, design, and applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [24] FLIR System. FLIR LVSS [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. flir. com/globalassets/imported-assets/document/flir-lvss-datasheet.pdf](https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-lvss-datasheet.pdf).
- [25] FLIR System. FLIR KRAKEN[M/OL]. [2018-10-12]. [http:// ww4. flir. com/uploaded Files/flirGS/Integrated Solutions/ Command Space/ Tactical Systems/ FLIR-KRAKEN-Datasheet.pdf](http://www4.flir.com/uploadedFiles/flirGS/IntegratedSolutions/CommandSpace/TacticalSystems/FLIR-KRAKEN-Datasheet.pdf).
- [26] Lockheed Martin. INFIRNO [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. lockheedmartin. com/content/dam/lockheed-martin/mfc/pc/infirno/mfc-in firno-pc.pdf](https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/mfc/pc/infirno/mfc-infirno-pc.pdf).
- [27] Lockheed Martin. GYROCAM 15TS [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. lockheedmartin. com/content/dam/lockheed-martin/mfc/pc/gyroca m/S018-1001-01.pdf](https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/mfc/pc/gyrocam/S018-1001-01.pdf).
- [28] Lockheed Martin. GYROCAM 15DHD [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. lockheedmartin. com/content/dam/lockheed-martin/mfc/pc/gyroca m/S018-1001-02.pdf](https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/mfc/pc/gyrocam/S018-1001-02.pdf).
- [29] Rheinmetall Defence. VINGTAQS II [M/OL]. [2018-10-12]. [https:// www. Rheinmetall-defence. com/media/editor media/ rm defence/ pdfs/ prod uktpdfs/ elektro optischekomponenten/B235e0817 Vinghog Vingtaqs II A4 LR. pdf](https://www.Rheinmetall-defence.com/media/editor-media/rm-defence/pdfs/prod-uktpdfs/elektro-optischekomponenten/B235e0817-Vinghog-Vingtaqs-II-A4-LR.pdf).
- [30] 陈志奇. 基于光纤束传像的复合式光电桅杆技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- CHEN Zhiqi. Study on Composite Optronic Mast Technology that based on the Image Transmission of Optical Fiber Bundle[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [31] 陈兆兵, 郭劲, 王兵, 等. 车载高架式光电探测系统的作战效能评估[J]. 光学精密工程, 2013(1): 77-86.
- CHEN Zhaobing, GUO Jin, WANG Bing, et al. Operational efficiency evaluation of vehicle carrying and high supporting optic-electronic detecting system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013(1): 77-86.
- [32] 陈兆兵, 王兵, 陈宁, 等. 桅杆型光电探测系统总体精度分析[J]. 兵工学报, 2013, 30(4): 507-512.
- CHEN Zhaobing, WANG Bing, CHEN Ning, et al. Analysis of overall accuracy of mast-mounted photodetection system[J]. *Acta Armamentarii*, 2013, 30(4): 507-512.
- [33] 陈兆兵, 王兵, 庄昕宇. 桅杆型光电探测系统总体可靠性分配与校核研究[J]. 长春理工大学学报: 自然科学版, 2012(2): 45-47.
- CHEN Zhaobing, WANG Bing, ZHUANG Xinyu. The reliability distributing and checking research of the whole mast opto-electronic detecting system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2012(2): 45-47.