

圆柱形大尺寸机载吊舱技术分析

庄昕宇, 陈兆兵

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 机载吊舱在军事领域具有重要的应用, 其中大尺寸圆柱形吊舱能够解决小型球头型吊舱无法满足吊舱内多设备、多功能的要求。针对当前国内外该研究与应用领域中已定型吊舱装备与在研吊舱装备在光电测量、光电对抗等方面的应用及其技术特点, 进行了分析与探讨。总结了当前圆柱形大尺寸机载吊舱的特点、应用、技术水平与发展趋势。

关键词: 机载吊舱; 光电测量; 光电对抗

中图分类号: TN977 **文献标识码:** A

DOI: 10.3788/OMEI20112804.0033

Technology Analysis of Big Dimension Column Plane Carrying Airborne Pod

ZHUANG Xin-yu, CHEN Zhao-bing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: The airborne pod is very important in military affairs area. The requests of many equipments and multifunction, which can't be solved by small ball airborne, can be solved by big dimension plane carrying airborne pod. The application and technology of the airborne pod equipments were analyzed and discussed on opto-electronic measure and opto-electronic countermeasure. The characteristics, application, technology level and development direction of big dimension plane carrying airborne pod were summarized.

Keywords: airborne pod; opto-electronic measure; opto-electronic countermeasure

1 引言

球头形小吊舱在激光测距、红外告警等领域具有广泛应用,但在辐射特性测量及光电对抗领域的应用中,由于光机结构较大,因此小型球头型吊舱的狭小空间不能满足要求^[1]。在此情况下,世界各国发展了圆柱形大尺寸机载吊舱,这种吊舱的结构大多为两头为符合气动布局的流线形,而中间部分为圆柱形结构。目前,大尺寸机载吊舱已经实用化,但在吊舱超音速状态下的环境控制、整流罩设计、窗口薄膜研制、头部结构密封等技术方面均存在一些影响吊舱性能的亟待解决的问题^[2]。本文通过对圆柱形大尺寸机载测量吊舱的发展现状分析与技术水平探讨,总结当前该领域的技术发展水平,为我国在该领域的研究提供技术参考。

2 机载吊舱研究技术

机载吊舱在军事大国均有大量的应用,尤其是光电吊舱正走向模块化、通用化与系列化。机载吊舱主要用于辐射测量、光电对抗等领域^[3-5]。机载吊舱设备一般悬挂于机腹或机翼下方,是一种相对独立的光电设备。由于是机载条件且有可能是超音速环境,因此要求吊舱本身具有体积小、重量轻、独立工作、抗振性能好、对载机的要求低等特点。如何实现吊舱,尤其是大尺寸吊舱在上述要求下的光电测量或光电对抗功能是当前研究的重点。圆柱形大尺寸机载吊舱在结构上主要由具有两维运动能力的头部舱和以承载激光器等主体设备的设备舱组成。从国内外文献的分析中可以发现,当前的研究重点为如何压缩吊舱的体积提高载机的整体性能;如何选用合适的材料降低吊舱的重量,同时提高吊舱的整体刚度,从而抵抗吊舱在载机超音速状态下的变形;如何制备透过性更好的窗口材料如中长波红外窗口、激光窗口,从而进一步提高光电系统的作用距离;如何进行合理的镀膜,从而在提高窗口特定波长透过率的同时阻止其他波长光的透过,进而对

抗敌方光电武器在其他波长上对光电系统的破坏;吊舱的密封问题也是当前吊舱研究的关键技术之一。另外,薄膜冷却、共形窗口等技术也是目前该领域研究的热点。

3 国内外机载吊舱的发展与分析

美国的军事超级大国地位使其在光电吊舱领域也处于世界前列,其国内的各大军工企业均有成型实用的光电吊舱,圆柱形大尺寸机载吊舱在所有的吊舱研制中占有重要地位。下面以雷神公司的 AN/ASQ-228 吊舱为例对当前此类吊舱的发展状况进行分析。该吊舱的组成部分主要包括前视 IR 传感器、可视传感器、激光测距设备、激光指示设备以及激光点跟踪设备。从组成内容上,该吊舱具有多功能复合的能力。其红外传感器采用第三代焦平面成像器件,其针对目标的作用距离是同类设备的 3 倍以上,图像分辨率也大大提高。激光指示器采用二极管泵浦激光器,它能够在 1.5 km 高空为激光精确制导武器提供目标指示。该吊舱具有强大的目标探测、识别、定位以及目标指示能力,可为战斗机的近距离作战提供支援,同时还能够提供战机的空中格斗毁伤评估等功能。据称,该吊舱与早期的同类吊舱相比零部件数量有了明显的减少,减少值接近原数量的 2/3,因而能够极大地提高其可靠性,其平均无故障时间可以超过 600 h。在该吊舱的设计过程中,采用了模块化标准化设计方法,以可替换组件取代其中较为复杂与笨重的部件,从而使维修更加简化。2005 年,雷神公司在该吊舱中采用了高速数据链技术,该技术工作于 ku 波段,能够极大地提高系统的数据传输速度,并能够安全地提供全双工双向通信,保证载机与地面部队以及海军部队的实时通信,并将其变为整个战斗主体中的关键网络节点。该吊舱采用的这些技术是当前该领域中的关键技术,各国均在这些技术方面进行了大力研究。另外,美国的 PIRATE 红外吊舱、LITENINGPID 自主式多传感器激光瞄准与导航吊舱、狙击手红外/激光瞄准吊舱等圆柱形大尺

寸机载吊舱, 欧洲的北欧海盗吊舱等成型装备也代表当前该领域的最新成果。当前的吊舱主要用于第三代战机及以前的机型中, 像 F-22 这样的四代机由于隐身性能的要求, 其在战机研制时便考虑将各种光电设备直接复合到战机本身, 而并不是悬挂于战机的某个位置。这种趋势促使我们在现有条件下设计的吊舱应具有更好的共形及隐身性能, 因此, 共形窗口式大尺寸机载吊舱也是目前该领域的技术前沿之一。

国内在大尺寸圆柱形机载吊舱领域目前也有成型的产品投入应用, 如上世纪 90 年代航天 613 所研究的红外/激光吊舱 (LITENING) 在红外搜索跟踪范围为俯仰方向 $+10^{\circ}$, -150° , 方位方向为 $\pm 150^{\circ}$, 红外与激光发现距离均为 15 km, 跟踪精度为 $300\sim 500\mu\text{rad}$ 。航天 607 所生产的 FILAT 前视红外/激光瞄准吊舱主要用于红外辐射特性测量, 悬挂于歼教 7 飞机的腹部副油箱位置, 其设计采用了既可以正向悬挂, 也可以反转 180° 进行反向悬挂的方式, 这样就可以分别用于测量目标飞机在前后半球方向的红外辐射特性, 其设计目标是满足载机 1.5 Ma 速度的飞行要求。该吊舱设计为头部、中段和尾部三大部分。头部内有电视跟踪设备、激光测距设备以及红外测量设备, 其内部采用一个由陀螺实现稳定的小型平台, 在进行辐射特性测量过程中一般先由电视系统进行目标捕获与跟踪, 然后开启红外设备进行实时测量。该吊舱的中段设计为数据采用和记录分析系统、跟踪伺服系统以及主控计算机、电源系统等设备。环控系统安装于吊舱的尾部, 其设计为采用空气惯导将冷空气或热空气导入至吊舱头部与中部控制部分, 保障系统的正常工作。在低空大尺寸吊舱的设计中, 该所在上世纪便开始了研究, 其蓝天系统低空导航吊舱目前已经实用化并装备部队, 该吊舱能够加强空海军的夜视以及低空突防对地攻击能力。本世纪以来, 该所研制了多种型号的光电吊舱, 如 2010 年珠海航展上公布的游隼-E 前视红外/激光目标指示吊舱, 从公布的吊舱外形图上看, 采用了共形式窗口

设计, 大大改善了了吊舱的气动性能。该吊舱长 3 m, 直径约为 0.39 m, 重约 250 kg, 其挂载位置为载机的进气道下方。该吊舱由电视摄像机、激光测距机、目标指示器、激光光斑方位探测器、前视红外搜索/跟踪单元、捷联式惯性导航系统及控制系统组成。该吊舱工作头俯仰角为 $+10^{\circ}\sim -15^{\circ}$, 滚转角 180° , 即使载机做大机动飞行, 仍能保证将目标锁定在视场内, 使载机获得攻击小型机动目标的能力。在该领域的整体或分部研究中, 中科院长春光机所、中科院西安光机所、北京有色金属研究院、昆明物理所等单位也有较强的技术储备与技术实力。

4 机载吊舱的技术现状与分析

圆柱形大尺寸机载吊舱的应用环境不同于地面设备, 因此在设计中其环境适应性存在诸多挑战。下面分别对影响真空高速大尺寸吊舱的内部环境控制技术、整流罩及窗口材料制备技术、镀膜技术等几项关键技术进行探讨。

环控技术的主要内容是温度控制, 而温度控制中的加热问题很容易通过电加热等手段解决, 因此环控的关键内容是环境制冷。在有限空间和有限载荷质量要求下如何实现有效的制冷, 满足吊舱在高速、高真空环境下的使用是吊舱环控研究的重点内容^[6-7]。当前应用于圆柱形大尺寸机载吊舱环控中的制冷系统主要有水蒸发制冷系统、逆升压环控制冷系统、蒸汽循环制冷系统 3 种^[8]。其中水蒸发式制冷系统利用蒸馏水的蒸发物理原理冷却冲压空气, 然后利用冲压空气与发热电子设备的冷热交换降低设备的热载荷。利用此原理研制的制冷系统出现于俄罗斯的某型吊舱环控中。这种原理的制冷系统优点是结构简单、可靠性高, 缺点是所采用的冲压空气对吊舱外的大气温度、飞行高度、速度以及姿态均有较大的敏感性, 且系统采用蒸馏水作为冷却介质, 需要经常进行补充, 这就造成了维护不方便。逆升压式空气制冷系统原理是利用冲压空气进入冷却涡轮中进行物理性质的膨胀而做功, 从而实现降温。

具体方式为冷却冲压空气从涡轮进入电子设备中,采用热交换的方式对电子设备进行冷却,当吊舱外部的温度较低或者飞行速度较低时,则可以采用打开旁路活门的方式利用外部空气直接冷却电子设备。这种控制方式以外部空气作为冷却源,能够独立工作,可以在工作时实现自动环控制冷或以冲压空气进行直接制冷。该方式工作可靠、维护方便、所需电源功率低。这种机械式方式对于环境要求苛刻的吊舱环境具有较高的应用价值,因此,这种制冷方式在吊舱环控中应用最广。蒸汽循环制冷方式的原理是采用制冷剂在蒸发器内进行蒸发从而吸收热量,然后利用冷却液对发热的电子设备进行冷却。美国的 LANTIRN 型吊舱采用的就是此种冷却方式。这种方式的优点是制冷效果好,缺点是结构复杂、功耗较大,因此,这种冷却方式在国内并无应用。

窗口与整流罩技术是吊舱设计中的又一关键技术。主要包括材料选择、形状选择,而这些又与窗口内的光学系统结构相关^[9]。窗口材料类型主要有红外透过窗口材料、激光透过窗口、紫外透过窗口、可见光透过窗口等几种^[10]。其中以红外窗口的制备与设计最为广泛,本节也将以红外窗口的发展为主要研究内容。吊舱的窗口与整流罩位于成像系统的最前端,不但要承受空气动力负载,而且要具有防雨、防尘、防沙粒等功能^[11]。超音速吊舱要求红外窗口及整流罩技术在材料、启动型、辐射效应、制冷等方面具有特定的功能,从而实现其高透过率、高强度、高抗热、高抗冲击性、低发射率、抗高温稳定性等功能特征。在中波红外的整流罩材料方面,有氟化镁、蓝宝石、尖晶石、阿隆、氧化钇等材料,其中的氟化镁则为该波段应用最成熟的材料。长波红外材料主要有氟化钙、硫化锌、锡化锌、锗、金刚石等。硒化锌被认为是综合性能较好的远红外材料,是当前唯一被应用于长波红外窗口的材料,目前该材料制备的红外窗口/整流罩尺寸已超过 300 mm。ZnSe 熔点高、禁带宽度大、热膨胀系数低、硬度高、机械强度好,光学透过波段宽,在 2~12 μm 本征透

率>65%,低吸收率、折射率温度系数低 (nd/dT)、折射率随波长变化而变化的值很小。美国的 CVD 公司和 Ryathon 公司还制造出硫化锌/硒化锌夹层材料,使二者扬长避短,得到了光学性能最好、耐久性最强的红外窗口材料。到 2000 年为止,必须对红外窗口表面进行镀膜处理。Nonon, Fraunhofer 等公司分别用高功率直流等离子体和微波等离子 CVD 法制备出了沉积面积>150 mm,厚度>3 mm 的窗口和头罩。传统的吊舱整流罩为同心的球面罩或一个半球罩,其功能为保护吊舱内部设备的同时,也是成像光学系统的一个组成部分。当前流行的设计方式为共形式整流罩^[12]。采用这种方案需要对其他光学元件进行像差校正,目前较为常用的校正方法有固定校正器、像差发生器、Zernike 光楔等^[13]。2000 年,Raytheon 公司宣称在世界上首次通过共形光学系统实现了光学成像。国内在红外窗口与整流罩方面也有较深入的研究。西安光机所(协助单位:北京晶体研究所、西北光学仪器厂、昆明物理所)1999 年报道能够生产直径为 150 mm 的等厚球冠状红外窗口,厚度为 6 mm。该所 2003 年申请专利“一种超音速机载吊舱的整流罩窗口装置”,具体内容为:包括整流罩和窗口玻璃,该整流罩与窗口玻璃间设置有托座,托座靠近整流罩一侧有可与整流罩做紧密配合的凹面,托座靠近窗口玻璃一侧设置有与窗口玻璃进行配做的斜面。该发明固定可靠、密封性好并可满足超音速机载吊舱的飞行条件。北京有色金属研究总院 2002 年采用泡生法生长出直径为 180 mm 的蓝宝石,当前正采用热交换成型技术生长半球形整流罩。目前,该院可以生长直径为 280 mm 的半球形 ZnSe 整流罩。中非人工晶体所能够生产半球形尖晶石整流罩。长春理工大学能够制备直径为 20 mm,厚度为 2 mm 的红外窗口。据报道,国内目前能够制备直径 360 mm,厚度 15 mm 的平板窗口,直径 300 mm 的半球形整流罩。在窗口材料方面,上海光机所采用温梯法生长成较大尺寸的蓝宝石单晶。浙江巨化光学材料有限公司采用直拉法生长出直径>200 mm 的

蓝宝石单晶。哈尔滨工业大学采用泡生法可生长出直径>200 mm的蓝宝石单晶。

镀膜技术在光电吊舱的研究中也具有重要作用,经过多年的发展针对各波段的特定镀膜技术基本成熟。由于红外吊舱的应用最广,因此红外镀膜技术的研究也最为深入。目前,红外镀膜要求为保证良好透过率的同时提高其环境适应性^[14]。研究表明,DLC膜在机械性能、光学性能、化学性能方面均有较好的效果,因此,当前红外窗口的外表面大多镀制一层DLC膜。金刚石膜在各种吊舱窗口中也有广泛的应用^[15]。在镀膜领域,美国、日本、德国、法国等国家都有较好的研究基础和研究成果。我国在红外窗口的镀膜领域,也有一定的研究基础,从报道上看,国内的镀膜技术也呈现出多家共同发展的格局。华中光电技术研究所2009年报道,能够在Si、Ge红外窗口上利用离子辅助电子蒸发技术和RF-PECVD技术制备具有高透过率的AR/DIC保护薄膜,

在中长波红外方面的透过率达到95%。北京科技大学与河北省科学院合作,在1995年制备出直径为110 mm的金刚石膜。北京航空航天大学、吉林大学、西安交通大学均研究过生产金刚石膜的方法。

在当前的吊舱技术发展,我国在近几年取得了诸多重要成果,但从整体上看,在这些关键技术方面还存在很多亟待解决的问题。这些问题的存在具有深层次的原因,主要包括核心技术少、产研结合能力弱、创新能力低等。因此,今后在该领域的研究需要在这些方面下足功夫。

5 总 结

圆柱形大尺寸机载吊舱具有广泛的应用,文章概述了当前该领域的技术与产品发展现状,并总结了当前该领域中的关键技术,为我国在该领域的研究与应用提供了一定的参考。

参考文献

- [1] 甘至宏. 光电吊舱内框架减振系统设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 2036-2043.
- [2] 阮萍, 胡永明, 孙益善. 超音速机载成像探测设备的窗口设计与分析[J]. 光电子·激光, 2001, 12(7): 701-702.
- [3] 陈洪耀, 张黎明. 基于特征吸收波长板的色散型高光谱传感器光谱定标技术[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(12): 2642-2649.
- [4] 宋江涛, 沈湘衡. 大型地面目标红外辐射亮度外场模拟系统[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(5): 1035-1042.
- [5] 胡秀清, 张里阳, 郑照军, 等. FY-3A 中分辨率光谱成像仪热红外通道的多探元辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 1972-1980.
- [6] 沈宏海, 王国华, 丁金伟, 等. 主动补偿的无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 593-601.
- [7] 黎明, 吴清文, 江帆, 等. 三线阵立体测绘相机热控系统的设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(6): 1367-1373.
- [8] 马洪宇, 黄庆安, 秦明. 谐振式 MEMS 温度传感器设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(9): 2022-2027.
- [9] 李洪生, 李尔龙. 整流罩用红外材料研究进展[J]. 国外建材科技, 2002, 23(3): 70-71, 74.
- [10] Borodin A V, Borodin V A, Frantsev D N. Growth and characterization of large-scale sapphire domes produced from the melt by the local dynamic shaping technique[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2005, 275: e2105-e2111.
- [11] 孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍混合消热差共形光学系统设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(4): 792-797.
- [12] 林旭东, 陈涛, 王建立, 等. 拼接镜主动光学共焦实验[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(3): 563-569.

- [13] 杨兴华, 苑立波, 王丽莉. 桑色素-Al 掺杂的溶胶-凝胶薄膜修饰的 MPOF 光纤氟离子传感探头[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 83-87.
- [14] 朱涛, 柯涛, 饶云江, 等. 微型膜结构全光纤珐珀干涉高温传感器[J]. 光学精密工程, 2010, 18(5): 1054-1059.
- [15] 张立超. 溅射法制备多层膜沉积速率的标定[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2530-2536.

作者简介: 庄昕宇 (1969-), 男, 吉林长春人, 学士, 副研究员, 1992年于武汉测绘科技大学获得学士学位, 主要从事光电对抗技术研究。E-mail: zxy5756221@sina.com

《发 光 学 报》

——EI核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、 电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年480元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国内邮发代号: 12-312

邮 编: 130033

http://www.fgxb.org

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国外发行代号: 4863BM