

光学学报

靶场光电测量设备发展现状及展望

余毅*, 刘震宇, 孙志远, 刘海波

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心, 吉林 长春 130033

摘要 靶场光电测量设备利用光学成像采集飞行目标信息,经误差修正、时空配准、交汇计算等处理可以得到所需的目標参数,是航天器发射回收测控系统中的重要组成部分,也被广泛应用于军事目标的探测中。为了应对复杂测量条件和多样化被测目标带来的挑战,在确保靶场光电测量设备高精度轨迹测量、高分辨成像能力的同时,对其提出了获取信息多元化、测量波段多样化、多平台机动布站等更多任务需求。我国靶场光电测量设备长足发展,整体性能得到了大幅提升。以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心团队近年来在靶场光电测量设备的研制工作为基础,对红外辐射特性测量、结构轻量化设计、光雷一体化测量等多项关键技术的发展历程和现状进行了详细介绍,总结了靶场光电测量设备在多信息获取、探测波段扩展、测量精度提高、设备机动性提升和多平台匹配融合等方面的研究进展,讨论了靶场光电测量设备当前仍然存在的技术难点,并展望了相关技术未来的发展方向。

关键词 测量; 靶场光电测量; 红外辐射特性; 结构轻量化; 光雷一体化测量

中图分类号 T-19 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/AOS221583

1 引言

光电测量设备是航天器发射回收测控系统中的重要组成部分。我国靶场光电测控系统的建设与发展始终坚持独立自主、自力更生的方针,以 20 世纪 60 年代诞生的第一台 150 经纬仪作为起点,经过几十年不断的技术创新,多次更新换代,靶场光测能力得到了大幅提升。现有光测设备规模覆盖几十厘米至米级,探测波段覆盖可见光、紫外、短中长波红外多个波段,作用距离可达数千千米,跟踪精度达到秒级,机动平台工作条件下测角精度和跟踪精度可与固定平台下的精度达到同一量级。通过自适应光电望远镜可实现远距离目标的高分辨成像,跟踪精度和成像分辨率均优于角秒级,可满足多种应用场景下实况记录、高精度测角和高分辨率成像的需求。

随着近年来航天活动覆盖空域范围的逐步拓展和频次的增加,日益频繁的任务和有限的人力之间的矛盾日渐突出,对靶场光测设备的测量能力也提出了新的要求,在确保高精度测量、高分辨成像能力的同时,期望单站设备在图像和角度信息以外能获取更多的目标特征信息,能适应更多类型的测量平台,具有更强的机动性。目前靶场光测设备在单站多元素获取方面,主要体现在提升红外辐射特性测量能力和拓展测量波

段。红外辐射特性测量是获取目标自身特性的重要手段之一,是识别真假目标的重要依据。在实际应用过程中,还存在标定设施复杂、标定过程繁琐、标定时间长和精度不高等不足,提高标定精度、简化定标设施和流程,提高设备在外场的易用性和便捷性是当前急需解决的问题。在拓展测量波段方面,用搭积木或者多光路共用主光学口径系统方法使单站设备具备多个测量波段的方法已在靶场中广泛应用。本团队在此基础上进行了无线电波段与光学波段测量一体化的尝试,对搭积木和共用主光学系统两种技术路线均进行了研究,前者已应用于靶场中,后者完成了整体设计和关键元器件的研制。为了在提高设备机动灵活性的同时,保持其整体性能不劣于固定站,设备轻量化设计是必不可少的一个环节。在降低设备质量的同时依然确保刚度性能是轻量化设计的重点和难点。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心团队作为靶场光测设备研制主力军中的一支力量,一直致力于提升设备的综合能力和效益,重点对红外辐射特性测量、结构轻量化设计和光雷一体化测量等多项关键技术进行了深入的研究和应用,在测量要素多元化、拓展测量波段和提升设备机动能力方面积累了经验,并从测量信息获取、多平台适应性等方面提升了光电望远镜的整体性能。本文以中国

收稿日期: 2022-08-09; 修回日期: 2022-09-29; 录用日期: 2022-10-31; 网络首发日期: 2022-11-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51675506)、吉林省优秀青年人才基金(20190103015JH)、国家重点研发计划(2018YFF01011503)

通信作者: *yuyi@ciomp.ac.cn

科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心团队的相关工作为基础,围绕上述三个方面概括性地介绍了靶场光电设备相关技术的研究现状,并进行了展望。

2 红外辐射特性测量技术

2.1 技术需求

有别于传统的图像特征识别技术,红外辐射特性测量技术在提供目标的外形和轮廓信息之外,还提供了目标的辐射亮度和辐射强度等信息。在信息化作战的需求下,红外辐射特性测量技术可以与计算机数据库技术相结合,建立典型军事目标和场景的辐射特性数据库,并对其红外辐射特性进行规律性分析,有助于扩展红外辐射测量技术在导弹防空预警、目标侦查识别和隐身效果评价等领域中的应用,为其提供基础参考信息数据。近些年,红外辐射特性测量技术在靶场的主要应用如下。

1) 红外导引性能评估

为了判断红外导引设备的性能,可以利用红外伪装靶模拟常用的军事目标,通过对伪装靶标的打击精度来评价红外导引设备的性能。红外辐射特性测量技术可用于对红外伪装靶进行精确的测量和校准。

2) 目标重要段落的红外辐射特性测量

重要段落的红外辐射特性结果可以为武器的研究提供重要的实验数据。对各类目标典型部位红外辐射特性进行测量可以有效评估武器装备的性能,对武器装备设计和研制方案的改进具有重要的指导意义。

3) 红外预警及目标识别

除了形状、轨迹以外,带有红外辐射特性测量功能的红外系统还可以提供目标的红外辐射变化信息,如:导弹弹头在调姿、起旋和自旋过程中都表现出了截然

不同的辐射强度变化;弹体和诱饵之间也表现出了差异化的辐射特性。这些辐射特性信息为目标的精确识别提供了更丰富的信息。

2.2 技术发展现状

美国自 20 世纪 60 年代就开始进行红外辐射测量技术实验研究工作和辐射测量设备的研制工作,由飞机辐射特性的研究到洲际导弹辐射特性的研究,美国正在逐步推进目标红外辐射测量技术的发展,以实现空间监视、反导、红外隐身和武器性能评估等国防任务。据公开资料显示,地基靶场最具代表性的当属位于美国毛伊岛的 1.23 m 口径的地基红外辐射测量系统,对飞机、导弹等军事目标的红外波段辐射测量的不确定度约为 10%,温度测量的不确定度在 2%~3% 之间。该系统设计为卡塞格林式光路,主光学系统可实现多光合一,主要利用短波、中波、长波红外图像反演得到各波段的辐射特性。

我国红外技术的研究应用起步相对较晚,自 20 世纪 80 年代以来,红外辐射特性测量被列为国防科技研究重点项目之一,我国开始红外辐射测量系统的研制。目前,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院上海技术物理研究所和中国航天科工集团第二研究院 207 所等单位研制了一系列地基红外辐射测量设备,对各类目标的红外图像进行采集^[1-6],获得了宝贵的实测数据,对我国国防信息化武器装备辐射特性数据库的建立起到了至关重要的推进作用。上述设备的使用地点包括沙漠、戈壁、海洋和高寒山区等,定标方法涵盖了面源黑体外定标、平行光管+腔型黑体外定标、腔型黑体内定标和各种组合的定标方式,红外探测器波段涵盖了中波、长波和短波,设备工作模式包括车载、舰载、船载机动站和固定站。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的部分红外辐射特性测量设备实物图如图 1 所示。

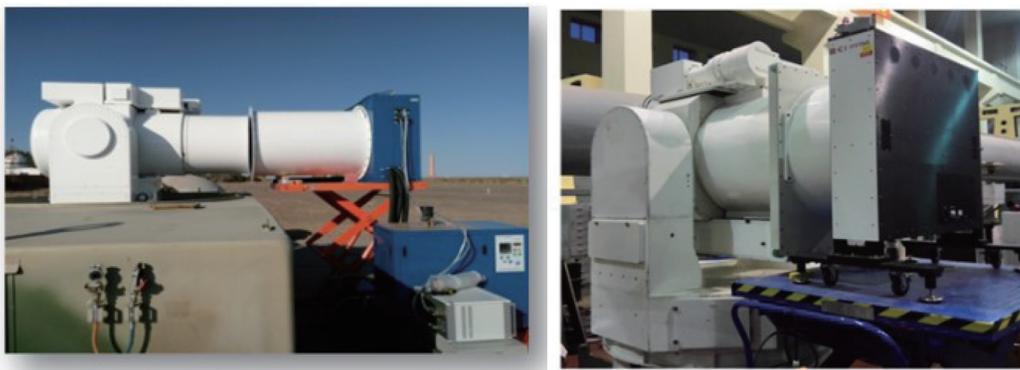


图 1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的部分红外辐射特性测量设备实物图

Fig. 1 Physical view of some infrared radiation characteristic measuring equipment developed by Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences

2.2.1 辐射定标

辐射定标是完成红外辐射特性测量的基础,其目的是获取红外辐射测量系统的入射辐射与输出图像灰

度值间的对应关系,即系统的响应度,从而由灰度图像反演出系统入瞳处的辐射量。目前国内外对靶场地基光测设备进行定标的常用方法有 5 种:近距离外置面

源定标法、琼斯法、直接成像法、平行光管法和红外星定标法。

1) 近距离外置面源定标法

近距离外置面源定标法是将一个已知辐射量的均匀辐射源放在系统的入瞳前,使其充满系统的整个视场,调节入射辐射并得到输出的灰度图像,便可以计算系统的定标响应参数,从而完成定标。

该方法是国内外小口径地基光测设备普遍采用的定标方法,可以有效地消除环境的影响,定标精度和定标效率都较高。该方法也是靶场小口径的光测设备辐射定标的首选,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所基于此方法开发出了许多行之有效的定标技术,包括基于探测器积分时间变量的外置面源快速定标法^[7]、基于环境温度修正的辐射定标法^[8-9]和基于滤光片修正的高效定标法^[10]等,提高了设备标定效率和标定精度。

2) 琼斯法

琼斯法也叫近距离小光源法,将标定光源放在红外经纬仪光学系统的入瞳附近,而标定光源的尺寸要比红外经纬仪的入瞳口径小得多。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所任建伟团队根据琼斯法设计了双波段辐射计,用于野外工作大口径双波段红外经纬仪的外场辐射定标^[11]。

3) 直接成像法

直接成像法将黑体辐射源置于光测设备前较远处,采用直接成像的方式进行定标,就如同测量时目标在探测器靶面处直接成像。目前,国内各研究所和基地光测站在工程任务或外场任务中一般不采用成像定标法。因为目标只能成像在探测器阵列的某一区域,所以无法对整个靶面进行定标。另外,由于目标距离光测设备有一段距离,必须考虑大气对目标辐射能量的衰减,而国内的大气修正算法并不完善,故该定标方法与近距离外置面源定标法相比,精度和重复性略差。美国航空航天局(NASA)研制的地基近红外光测设备MARS (Mobile Aerospace Reconnaissance System)在观测航天飞机 STS 系列时,采用成像定标法进行辐射定标。他们将黑体放置于距离系统 66 m 处进行成像,并利用 MODTRAN 大气修正程序来减少大气对定标的影响,研究系统入射辐射量与灰度的关系,其线性拟合度 R^2 可达到 0.9986。

4) 平行光管法与内定标法

平行光管法本质上也是一种成像定标法,该方法使用红外平行光管对出射面积较小的中高温腔型黑体进行红外辐射扩束,再将其投射到红外辐射特性测量系统的入瞳处进行辐射定标。该方法利用腔型黑体替代大面源黑体实现了较大口径红外测量系统的中高温段辐射定标,使定标动态范围更大。

大口径红外平行光管具有制造周期长、成本高和运输困难等缺点,并且平行光管的透过率和自身辐射

会对定标的精度产生一定的影响。由于平行光管自身存在热辐射,故会在系统探测器上形成杂散辐射噪声,影响定标精度。杨智慧等^[12]建立了平行光管杂散辐射理论模型,定量分析了不同工作温度、不同表面发射率下镜面的杂散辐射,确定了杂散辐射对红外辐射定标的影响并提出了杂散辐射修正措施,提高了红外辐射定标的精度。

为满足大口径光测设备的定标需求,在平行光管法的基础上衍生出平行光管+内定标的定标方法。内定标是在光学系统中通过切换反射镜引出一条光路,在该光路焦面(红外测量系统的一次等效像面)位置集成一个高(中)温腔型黑体,通过红外光学系统的切换反射镜将该腔型黑体发出的辐射亮度引入后红外光学系统中,从而实现对后红外光学系统的辐射定标。因此,在实验室期间可以利用平行光管法对整个系统进行定标,利用内定标对后红外光学系统进行定标,从而得到前红外光学系统的定标修正系数。在外场中,通过内定标便可以得到整个系统的定标系数,极大地提升了系统的机动性。

在实际应用中,靶场目标类型复杂,测量设备的最小动态范围需要达到 30 dB,大面源黑体无法实现较宽温度范围的设定,大口径平行光管机动性差、不方便外场使用,这些切实存在的困难使得平行光管+内定标方法或宽温度范围面源黑体+内定标方法不能满足靶场大口径红外系统的动态范围需求。因此,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出并应用分布基准的级联式红外辐射快速高精度标定技术,采用大口径面源中温黑体和系统内置高温腔型黑体结合的标定系统,实现了大口径红外系统的高动态范围辐射定标,并提出了单次升温快速标定法,通过切换积分时间和一次升温得到整个线性定标区域^[5,13-14]。

分布基准的级联式红外辐射定标系统由外置中温扩展源和内置中高温腔型黑体组成^[15],如图 2 所示。该方法可将外置高温腔型黑体辐射引入红外光学系统中,并对部分光路进行中高温段的内定标,得到后红外光学系统中高温段的定标曲线。利用外置面源黑体对全系统进行中低温段的外定标,得到全系统中低温段的辐射定标曲线。提取公共温度范围的内外定标数据并处理以获取内外定标之间的修正系数,最终可获得红外辐射测量系统在宽动态范围内的辐射定标数据。该技术摒弃了之前大口径红外系统辐射定标使用的大口径平行光管,降低了成本,极大地提高了系统的机动性和可操作性,简化了标定过程,减少了标定时间,对靶场红外辐射特性测量设备研制具有重要意义。

5) 红外星定标法

对于标准的红外恒星,其恒星光谱流量密度不随时间发生周期性或非周期性的变化,故可以作为一个标准的参考源,利用红外标准星标校红外辐射测量系统。在国外,早已建立了高准确度红外标准星目录,采

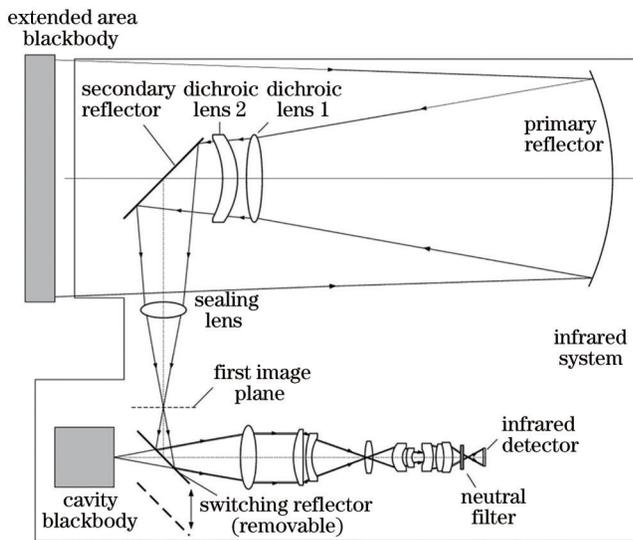


图 2 级联式红外辐射定标系统

Fig. 2 Cascade infrared radiation calibration system

用标准天文测光法评估大气状况,随后这一红外标准星目录及其扩展目录又被用于地基和空基望远镜的绝对辐射标定。国内相关研究人员近年也开始利用恒星测量整层大气透过率并对地基设备进行实时定标。

2.2.2 大气传输修正

国外可以应用到靶场测控领域中的主要大气辐射传输模型有 LOWTRAN 模型和 MODTRAN 模型。国内方面,中国科学院安徽光学精密机械研究所、中国科学院大气物理研究所等单位在大气传输修正软件上也进行了多年的研究^[16-17],在微脉冲激光雷达、太阳辐射计、能见度仪和地面气象站等硬件的基础上,开发出了配备于地基靶场红外系统的大气传输修正系统。然而,由于采用的硬件系统是可见光波段雷达,红外波段的大气透过率是通过理论模型进行外推后得到的,无法验证结果的有效性和计算精度,故会产生较大的红外辐射反演误差。

为了获得更加准确的大气透过率真实数值,很多团队尝试将已知辐射强度的红外星作为大气透过率修正的基准。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王建立团队研究了基于标准红外自然星的大气透过率测量方法,建立了基于 Beer 定律和 Langley-Plot 定标原理的测量实验数学模型^[18]。这种方法面临的问题是:只有红外系统与红外星之间的大气路径透过率相对准确,其他大气路径的透过率仍然未知。杨词银等^[19]提出了通过机上标校黑体进行实时大气修正的新辐射测量方法,该方法通过目标飞机上挂载的标校黑体实现大气透过率的实时测量,并利用实测大气透过率对目标飞机辐射进行大气修正以提高修正精度。这种方法面临的问题是:只有在特定的合作目标上才能搭载黑体,不具有广泛的适用性。

另外,在现阶段的靶场测控领域中,大气透过率是在靶场任务之后计算得到的。为了满足日益紧迫的

外辐射特性实时测量和目标实时识别的需求,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心团队研制了一套大气参数计算程序。该计算程序建立了一个统一的大气廓线模型,该模型最大限度兼容 MODTRAN 中的 6 种经典大气模型,程序可通过输入纬度、海拔高度、年绝对时间和理论温度梯度变化率等参数将统一大气廓线模型配置成以上 6 种大气模型中的任何一种(优先兼容 1976 US Standard)。程序提供了 RURAL、URBAN、MARITIME 三种气溶胶模型(每种模型支持的目标距离为 1~50 km),还考虑了 N_2 、 CO_2 、 N_2O 、 CO 、 CH_4 和 O_3 这 6 种气体对大气参数的影响。程序支持负仰角输入,同时兼顾了地球曲率半径的影响。所有廓线数据均以库表的形式存在,可自由输入。

2.2.3 红外辐射特性测量

地基靶场红外辐射特性测量系统主要包括红外辐射定标子系统、大气传输修正子系统和数据分析与辐射反演子系统三个模块,其工作流程如图 3 所示。

杨词银等^[20]提出了利用某一距离的实测大气透过率和模式计算大气透过率之比得到大气过率校正系数来对其他距离的模式计算大气透过率进行比例校正,实验显示校正后大气透过率的精度优于 8.1%,大大提高了目标辐射的测量精度。

在靶场的实际应用过程中,为了提高辐射特性测量精度,需要根据被观测目标在红外辐射测量系统焦平面上所成的像元数目将其分为点目标和面目标。两种目标在辐射测量和辐射反演处理算法等方面有所差异,通常点目标的测量误差比面目标更大。大气吸收散射、光学系统衍射和像差常常会导致点目标辐射源产生弥散效应,靶面点目标的图像弥散到多个像元中造成能量分散,成像像元数目增多且每个像元的灰度值偏小,形成微扩展源目标。若将目标当作面目标处理,则有较大的误差,目标更多地具有点目标的性质。因此,将扩展弥散的能量重新聚集后,可得到点目标的辐射强度。在靶场测量中,飞行中段的弹道导弹、尾后飞行的飞机和远距离释放的红外诱饵往往都具有类似的特征。为解决这一问题,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所现有的点源目标测量方法的基础上,提出了一种针对红外小目标的辐射特性测量方法^[21],通过去除目标成像区域的背景辐射获得了小目标辐射测量公式,实验结果证明了该方法的有效性。

大气修正也是获得目标真实辐射的必要步骤。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所提出了一种提高远距离目标红外辐射测量精度的非线性大气修正(NLAC)方法^[22]。该方法利用近距离标准参考源测量(NRSRM)来计算实时环境中不同位置的实际大气透过率和程辐射,同步从大气辐射传输软件获得相应条件下的理论大气透过率和程辐射,并对两者之间的非线性关系进行拟合,可以预测远距离的大气透过率和

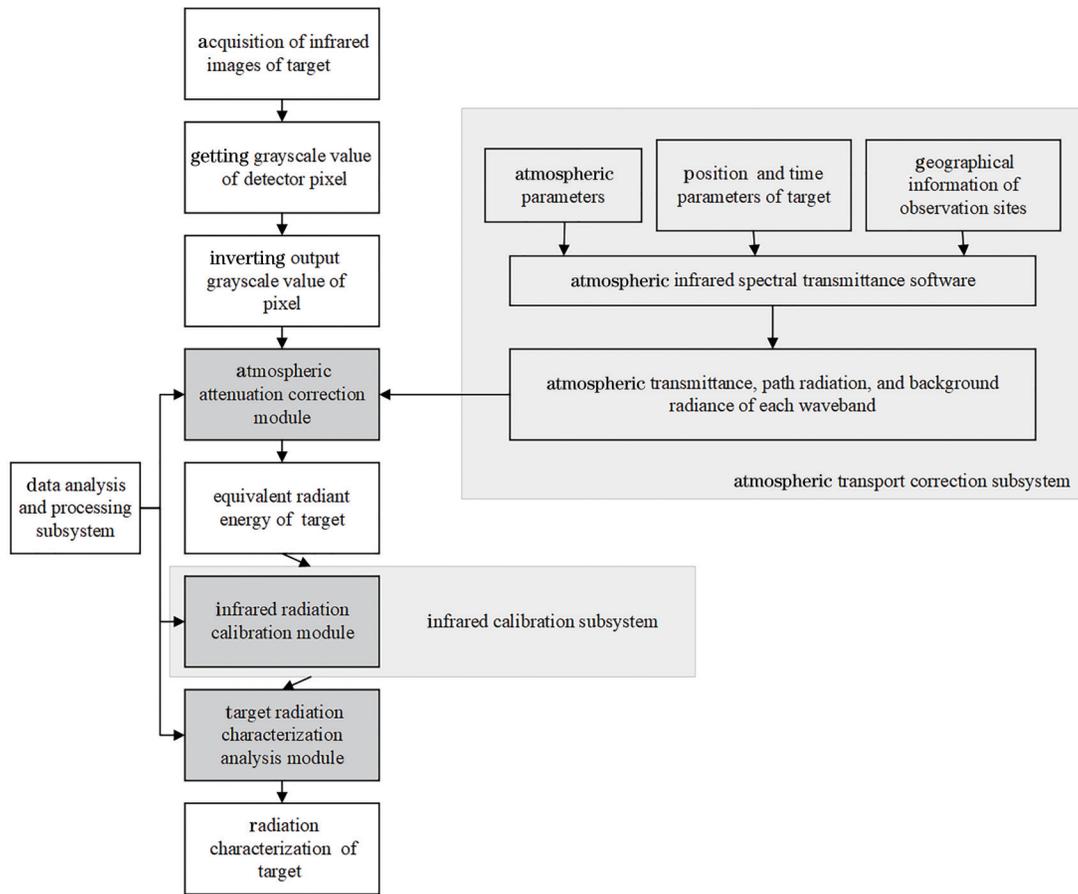


图 3 目标辐射特性测量流程

Fig. 3 Measurement process of target radiation characteristics

程辐射,从而实现大气修正。实验结果表明,该方法的红外辐射测量平均误差为 6.45%,远低于常规方法的平均误差。然而,需要注意的是该实验结果基于较近距离的实验,靶场测控实验中的几十千米至几百千米情况的精度还有待验证。

2.3 面临的问题及发展方向

2.3.1 红外辐射特性测量面临的问题

经过近 20 年的发展,红外辐射特性设备的口径从 0.2 m 逐渐扩展到 1 m 以上,传感器从最初的中波红外波段扩展到了短波红外、中波红外和长波红外波段,被测目标也从最初的静止红外伪装靶变为高速飞行目标。红外辐射特性测量设备获得了大量宝贵的实测数据,对我国国防信息化武器装备辐射特性数据库的建立起到了至关重要的推进作用。然而,以下多种原因制约了红外辐射测量技术在靶场测控领域中更广泛的应用。

1) 定标方法需要进一步优化

目前的定标技术在应用过程中依然存在着一些问题,如:定标周期过长(一般在半个小时以上),环境温度变化致使定标系数不准确;需要在任务前或任务后进行辐射定标,定标与测量环境状态不一致会导致测量产生误差;对于大口径红外系统,需要将超过红外系统口径的黑体放置在红外系统入瞳前进行标定,增加

了外场实验工作量的同时降低了工作效率。

2) 黑体的高成本和复杂的制备工艺

随着用于红外辐射特性测量的红外系统的口径越来越大,也要求作为辐射标定源的黑体的口径越来越大,现阶段的高精度面源黑体主要以以色列和美国的产品为主,主流产品的口径为 500 mm,对于更大口径的黑体就需要定制,这极大地增加了设备的整体成本。然而,国产黑体因工艺的不稳定性,虽然可以实现大口径面源黑体的制备,但是精度和稳定性还有待改善。

3) 大气透过率计算误差较大

现阶段的大气传输修正硬件主要是测量可见光波段的大气廓线参数,并通过外推获得红外波段的方式计算,这就导致大气透过率的计算误差较大。

4) 待测目标真值未知

在红外辐射特性设备的研制过程中,可以进行 1~2 km 的地面实验,通过将大面源黑体作为参考源进行精度验证。然而,在靶场实验过程中,高速飞行的目标没有辐射真值作为辐射特性测量精度的反馈,缺少真值也就无法对辐射反演算法进行修正,在靶场辐射特性测量精度鉴定中也只能采用类比法。

2.3.2 辐射特性测量研究展望

1) 定标技术

定标技术主要从提高实施便捷性和准确性两方面

入手,即无黑体定标技术和实时定标技术。对于无黑体定标技术,地基光测设备可以在实验阶段利用黑体标定,并模拟各种环境条件和设备寿命衰减对定标系数的影响,将多条件下的定标系数存于系统数据库中,进行任务时不需要黑体定标便可以直接测量。对于实时定标技术,地基光测设备在进行目标测量时,利用无人机或空间卫星上放置的黑体或太阳能温控板作为定标辐射源,实现实时的辐射定标技术,不需要事前或事后进行长时间的定标。

2) 大气传输修正

大气传输修正重点解决大气透过率测量精度和实时性问题。从提高大气透过率测量精度而言,由于处在不同地理位置的靶场具有不同的环境特征,即都有其特定的大气模式(海洋气候模式、沙漠气候模式等),故现有的大气传输修正算法使用的历史数据无法涵盖所有的大气模式,这也就间接地导致大气传输精度受到了影响。因此,对靶场气候进行长期的数据采集以建立靶场特定的大气数据库是提高大气传输修正精度的关键。从解决大气透过率处理实时性问题而言,现阶段中国科学院长春光学精密机械与物理研究所自研的大气透过率测量软件可以实现的大气运算能力为中波约 55 Hz、长波约 65 Hz,基本可以实现实时特性处理,后续通过算法改进和硬件优化有望实现可媲美红外探测器帧频相匹配的大气数据运算能力。

3) 辐射特性测量技术

建立完备的图像数据库,提高目标识别概率。现阶段靶场红外辐射特性测量系统可以获取的信息包括反演的目标辐射特性和目标的灰度变化信息,但若没有目标在飞行过程中辐射特性变化的先验信息,就无法对目标进行识别。因此,建立红外辐射特性数据库并对不同种类、不同型号目标的红外辐射特性数据进行积累是目标精确识别的前提条件。

3 轻量化技术

3.1 技术需求

靶场光电测量设备正在逐渐向着大口径、高精度、多功能性、高机动性方向发展:大口径要求反射镜尺寸增大,相应的质量也会增加;多功能性要求搭载更多的光学载荷以获得丰富的测量数据;高机动性对设备整体的质量进行了限制,尤其是目前设备逐渐由固定站向车载式、船载式等不落地测量方向发展,受承载方式的约束,设备的整体质量必须严格限制在一定范围内。另外,为了满足高精度测量的需求,设备在减重的同时必须保证足够的动静刚度。以上因素均对设备的轻量化提出了挑战。传统的经纬仪通常以固定站或落地工作的模式为主,机动性要求不高,故对质量没有进行过多的限制。机械设计人员为了保证结构的刚度足够,常以材料多优于少的原则进行设计,这就导致结构必然存在一定的性能冗余。然而,随着设备逐渐由固

定站向机动式转变,轻量化已成为经纬仪设计中必须考虑的因素。

3.2 技术发展现状

目前针对中大型光电经纬仪的轻量化设计涉及到主反射镜、支撑部件、跟踪架、支撑平台等,其中主反射镜是经纬仪光学成像的核心部件,在对其进行轻量化设计的同时,除了考虑其常规光学性能外,还须进一步保证其面形精度满足要求。跟踪架和支撑平台等在减重过程中不仅要考虑其静态重力载荷作用下的变形,还要求其在经纬仪自身伺服系统激励或运输设备激励下远离共振频率,从而保证设备的工作和运输稳定。

针对经纬仪轻量化的方式有:1)以设备整体在外场的使用效果或者设备零部件在实验室的检测结果为依据评估其性能,设计人员以此为参考,并凭借经验进行减重,但这种方法通常难以获得直观的改进效果,试错成本较高;2)在设计阶段通过仿真分析对结构件的性能进行评估,根据评估结果进行结构改进,通过评估-改进-再评估-再改进的方式实现结构的优化迭代,这种方式迭代效率较高,且成本较低,但分析结果的准确性依赖于仿真分析模型的合理性和有限元网格的疏密等,如无实验的进一步验证,通常难以保证预估性能与真实结构性能完全一致,故更可靠的方式是将仿真与实验进行一定程度的结合,一方面利于降低实验成本,另一方面可保证仿真结果的准确性;3)采用结构优化算法对设备的零部件进行轻量化设计,结构优化算法包括参数优化、形状优化和拓扑优化三类。其中,参数优化和拓扑优化是当前使用较多的方法,拓扑优化可以在无初始设计方案的基础上快速实现从无到有的概念设计,而参数优化则可以针对详细设计方案进行进一步的优化改进。这类方法因目标明确,迭代过程直观,不需人为干预,成为了目前较为流行的轻量化方法。然而,该方法获得的最优结构的可用性和效果通常依赖于所建立的优化模型的合理性,这就要求设计人员具备一定的优化设计理论基础。此外,由于该方法依赖于有限元分析的结果来进行迭代,因此同样要求有限元模型合理且准确。

3.2.1 经纬仪主反射镜及支撑结构的轻量化设计

主反射镜是中大型光电经纬仪的核心光学元件,其面形精度会直接影响成像质量的优劣。因此,镜体和支撑结构的设计一直是光电经纬仪设计的关键。目前针对镜体的轻量化途径主要有两种方式:1)采用轻质材料来制造反射镜;2)通过合理布置减重孔来实现轻量化。

随着光学成像精度需求的提升,地基反射镜口径也在不断增大。传统材料(金属、微晶玻璃等)的材料特性已难以同时满足高刚度和轻量化的需求,碳化硅材料因具有优良的比刚度性能、热物理特性和易于光学加工的特点,已经成为了中大口径反射镜设计的首选材料。目前国内外已有诸多关于碳化硅反射镜的研

究工作和应用。著名的赫歇尔望远镜和盖亚望远镜都是由碳化硅材料制备的。国内科研机构也针对碳化硅反射镜的轻量化技术展开了研究和应用,如中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院光电技术研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所和南京航空航天大学等。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在经过多年的技术积累和迭代后,其生产的搭载 1 m 及以下口径的碳化硅反射镜的设备已经作为成熟产品被应用于诸多项目中。1 m 以上口径的碳化硅反射镜也逐渐突破了技术难题,实现了制备和应用。2018 年研制成功的 4.03 m 反射镜成为了目前

世界上口径最大的单体碳化硅反射镜。

通常在反射镜材料确定后,为进一步实现轻量化,需要对镜体和支撑结构进行优化设计。国内外主流的反射镜轻量化形式多是蜂窝芯形状的,如图 4 所示。轻量化孔的形状包括三角形、扇形、六边形和圆形等,背部可采用开放式、半开放式或者封闭式的结构^[23],这三种结构的弯曲刚度依次提升,但相应的制造难度也在逐渐增大。国内外研究学者已针对这些常见的轻量化形式进行了详细地分析和评估^[24-27],并在工程进行了广泛的应用。

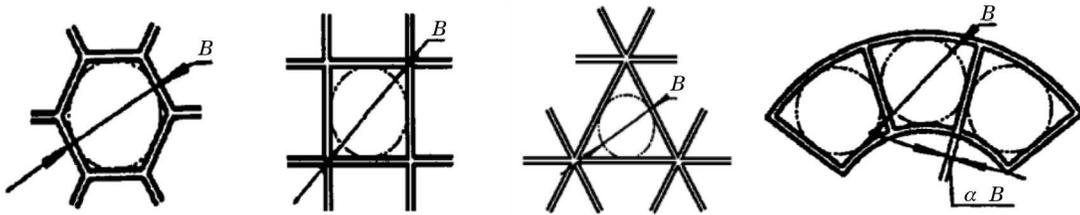


图 4 几种常见的轻量化孔形式

Fig. 4 Several common forms of lightweight holes

有限元仿真分析常用于对反射镜性能进行评估,而仿真结果受模型简化方式、边界条件施加的合理性、网格的精细程度和装配方式的合理性等因素影响,通常存在一定的偏差,如何在极大增加计算复杂度的情况下减少这种偏差是研究者需要重点考虑的问题。刘永明等^[28]提出采用有限元方法来反演反射镜的镜面面形,基于干涉仪对光学元件的检测原理建立了可靠的有限元模型。同时,将该模型的结果和 N 步旋转平均法的面形检测结果进行了比较,发现面形相减后均方根(RMS)残差在 11% 左右,说明了反演模型的准确可靠。谢军等^[29]研究了接触有限元的相关理论,并将其应用于经纬仪主镜和主镜支撑的仿真分析中,力求更接近于真实装配方式。随后,通过 4D 干涉仪对实际主镜的 RMS 值进行了检测,发现该仿真结果和实验结果的 RMS 值的偏差仅为 6.62%。

随着靶场对反射镜轻量化需求的逐渐提升,在传统轻量化构型的基础上,设计人员也在逐渐引入优化算法对结构进行进一步优化改进。目前主要采用的优化方法包括参数优化和拓扑优化。参数优化通常是在给定反射镜背部初始轻量化构型的基础上,确定几个待优化的尺寸参数(筋厚、筋高、壁厚等),通过优化这些参数获得最优的面形精度,该优化方法获得的结果不会改变反射镜的整体构型,故更接近制造的水平,是一种较为精细的优化手段。在进行镜体的参数优化时,为了保证结构的周期对称性,设计者通常将轻量化筋进行分组,在圆周方向上将同种类型的筋作为一组,优化时会同步进行尺寸改变,如图 5 所示。目前,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所、南京航空航天大学等相关

研究团队^[30-34]均针对不同轻量化形式的反射镜进行了参数优化,获得了轻量化率和面形精度较优的结果。中国科学院光电技术研究所实验设计和参数优化为核心,建立了轻量化反射镜结构参数的优化设计平台^[35]。

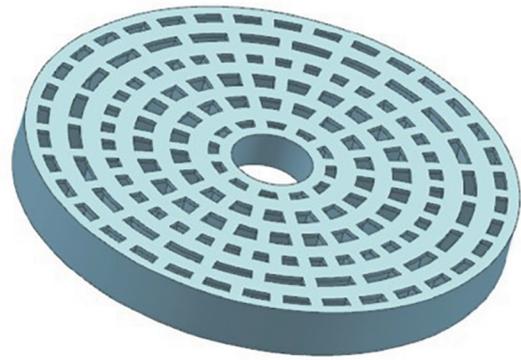


图 5 基于参数优化的 1 m 扇形轻量化主镜

Fig. 5 1-m fan-shaped lightweight primary mirror based on parameter optimization

参数优化是一种针对详细设计方案的优化方法,该方法的优化效果通常依赖初始构型的选择和优化参数的选取,一般难以实现大幅度的性能提升。除此之外,还有一种近些年较为流行的轻量化设计方法,即拓扑优化方法。该方法相比于参数优化是一种优化更彻底的概念式方法,它在没有初始设计的条件下,仅通过给定设计域、优化模型、优化迭代算法等即可实现一种从无到有的设计。优化结果通常会提供一种基本的设计构型,设计者可以根据该构型进行进一步的优化改进,故从设计阶段角度来看,拓扑优化属于前期设计,

参数优化属于详细设计。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用该方法进行反射镜镜体和支撑结构的优化设计。王冲等^[36]通过拓扑优化方法对直径为 210 mm 的铝合金反射镜进行了优化设计,将其面形精度控制在 19 nm 以内,如图 6 所示。谢军等^[37]对主镜轴向支撑部件进行了拓扑优化设计,从而成功将轴向支撑主镜的面形误差 RMS 值由 11.49 nm 提升至 8.38 nm,如图 7 所示。施胤成等^[38]为使拓扑优化技术能够更直接地提升成像质量,未选择常用的面形精度值作为目标,而是基于有限元框架建立 Zernike 系数和拓扑优化设计变量的关系,从而实现以特定像差最小为目标的主镜支撑拓扑优化设计,如图 8 所示。

拓扑优化目前未被广泛用来实现反射镜的轻量化设计,主要原因在于拓扑优化通常设计自由度很高,若不施加额外的加工制造约束,则优化结果难以通过传



图 6 直径为 210 mm 的铝合金反射镜的拓扑优化结果
Fig. 6 Topology optimization result of aluminum alloy mirror with diameter of 210 mm

统的加工制造手段进行制备。然而,加工制造约束的施加存在一定的理论难度,且优化约束的个数和合理性也不易保证,这也阻碍了该方法的进一步应用。

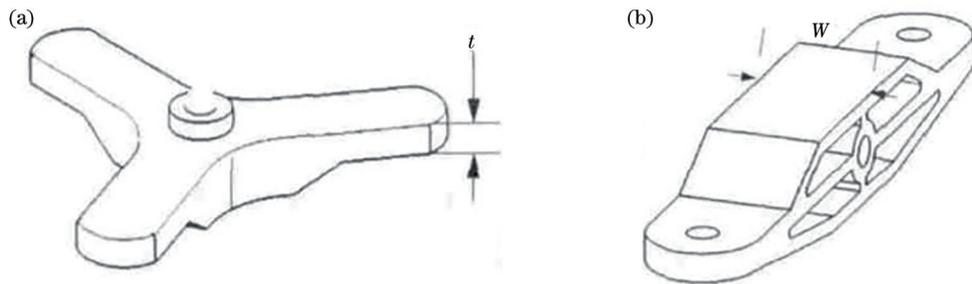


图 7 基于拓扑优化方法设计的三脚架和平衡杆。(a)三脚架;(b)平衡杆
Fig. 7 Tripod and balance bar designed by topology optimization method. (a) Tripod; (b) balance bar

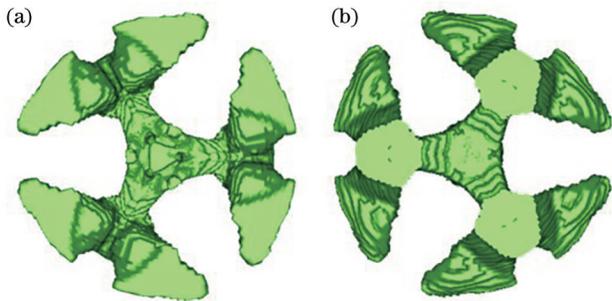


图 8 基于 Zernike 系数最优的主镜支撑拓扑优化结果。(a)顶视图;(b)底视图

Fig. 8 Topology optimization results of primary mirror support based on Zernike coefficient optimization. (a) Top view; (b) bottom view

目前增材制造技术的发展给拓扑优化技术提供了新的机遇。国外针对增材制造金属反射镜的研究已比较成熟,国内的相关研究也在陆续展开。美国康宁公司在 2015 年就通过增材制造技术制备了一个包含六边形蜂窝结构的铝合金反射镜^[39-40]。德国弗劳恩霍夫激光技术研究所分别设计了两种可用于增材制造的轻量化反射镜,一种包含了内部的复杂流道,另外一种则是夹层式的结构,并在侧面加强筋上增加了排粉孔^[41]。

Hilpert 等^[42]将内部加强筋做成了 Voronoi 单胞的形式,并优化了单胞结构来实现结构性能的提升,他们通过此方法将质量降低了 60.5%。王冲等^[36,43]分别采用拓扑优化方法和增材制造对轻量化反射镜进行设计和制备,验证了方案的可行性,如图 9 所示。



图 9 基于增材制造的铝合金反射镜
Fig. 9 Aluminum alloy reflectors based on additive manufacturing

3.2.2 经纬仪跟踪架的轻量化设计

跟踪架是经纬仪中最主要的支撑部件,包括了垂直轴系和水平轴系两个部分,其总体质量占经纬仪总质量的 60% 以上,而内部是由众多零部件构成的,包含复杂的装配关系,要同时实现所有部件的轻量化设

设计难度非常大,因此通常设计人员会针对其中的重点零部件进行轻量化设计。大型跟踪架轻量化部件如图 10 所示。

由于传统的跟踪架设计较少考虑质量限制,为了保证其刚度性能最优,故通常采用铸造的方式进行制备,这就使得早期的跟踪架质量较大,且存在一定的性

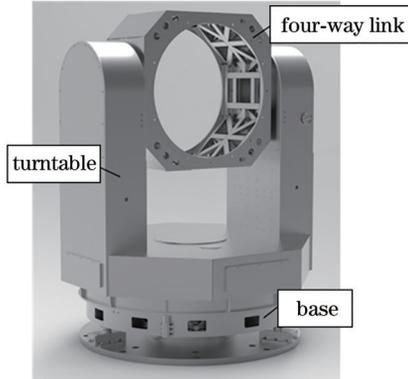


图 10 大型跟踪架轻量化部件

Fig. 10 Lightweight parts of large tracking frame

能冗余。为了进一步提升跟踪架的轻量化率,必须考虑新的结构形式和设计手段。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在这方面进行了一些应用型研究。针对外形方形结构件(四通、转台等),他们提出了采用方钢管焊接成刚架结构,外表用钢板蒙皮的设计方案,并采用离散体拓扑优化方法进行了优化设计。该方法中存在一些需要重点研究的问题,如基结构如何生成和如何避免刚架穿过非设计域等。Gao 等^[44-46]在这一方向进行了一系列理论研究工作。针对需要铸造的结构件,采用连续体拓扑优化方法对其材料分布进行了设计。目前经纬仪主要实现轻量化的部件包括四通、转台和基座等。针对四通,伞晓刚等^[47-48]采用方钢管焊接成刚架结构,外表用钢板蒙皮的方案进行设计和优化,并通过有限元方法对其静态刚度和基频进行了评估,确保了该方案的可行性,如图 11 所示。在设计过程中,他们采用拓扑优化方法对其合理的材料分布进行了求解,并以此为基础设计了刚架的分布形式。

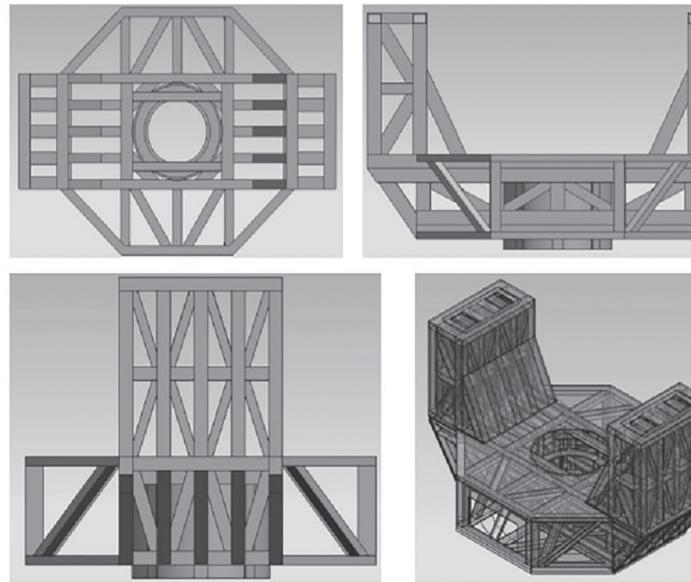


图 11 桁架结构转台三维模型

Fig. 11 Three-dimensional model of truss turntable

在进行转台轻量化设计时,史航^[49]从刚架+蒙皮的设计方案出发,提出了一种刚架和壳体耦合的拓扑优化方法,并成功将其应用于转台的轻量化设计中,如图 12 所示。连续体拓扑优化方法相比于离散体方法虽然无法给出详细的设计方案,但是通过该方法获得的材料分布形式可以给设计人员提供重要的参考。吴迪等^[50]在保证轴向变形的基础上采用多负载模型对基座进行了连续体拓扑优化设计,最终得到的结构相比于现用基座质量减小了 30.7%,如图 13 所示。然而,该设计结果因设计自由度较高,制造性有待进一步检验,未来随着设计方法的更新和制造能力的提升,该方法必然存在巨大的潜力。

3.2.3 支撑平台的轻量化设计

经纬仪支撑平台作为不落地测量经纬仪的主要承力设备,不仅要求自身动静态刚度和稳定性满足使用需求,还要求在承载经纬仪后不会大幅降低系统总体的刚度和稳定性,保证经纬仪在不落地工作状态下不发生较大变形。然而,受越野地盘承载质量的限制,平台自身质量不能过高,因此车载平台的轻量化对于减轻载车负重、保证测量精度和提升机动性能具有重要意义。

铸件通常质量较大,难以满足平台的设计质量要求。因此,设计人员从轻量化角度考虑,通常考虑以焊接的方式进行平台设计。谢军等^[51]提出一种方钢+蒙

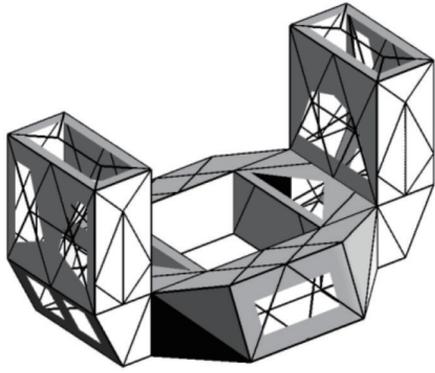


图 12 基于刚架和壳体耦合拓扑优化获得的转台设计方案
Fig. 12 Design scheme of turntable based on coupling topology optimization of rigid frame and shell

皮的平台设计方案,该方案同时包含了安装凸台、平台支腿转接件和平台支腿组件等,如图 14 所示。他们详细论述了该平台的组件和安装方式,并且采用拓扑优

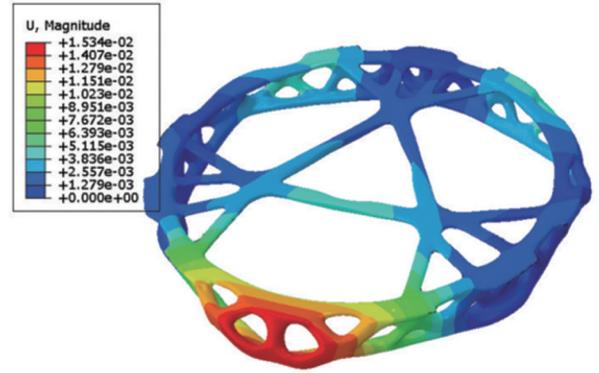


图 13 经纬仪基座拓扑结构的仿真结果^[50]
Fig. 13 Simulation result of topological structure of theodolite base^[50]

化方法对平台的刚架分布形式进行了设计,保证了其静态变形、基频和质量均优于传统平台支撑框架。

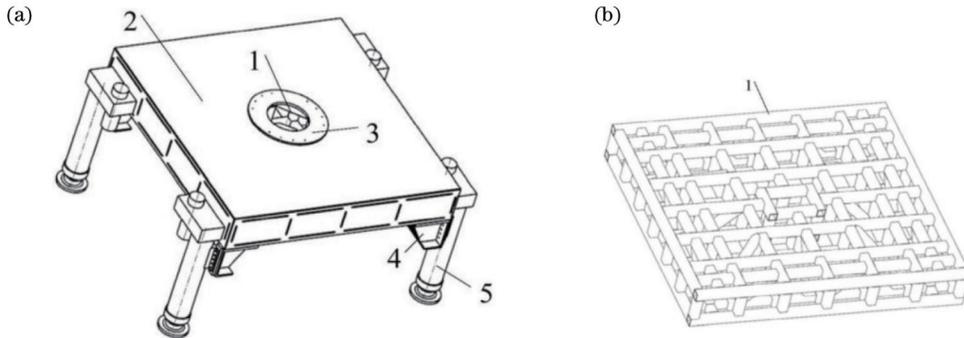


图 14 由方钢和蒙皮构成的车载平台。(a) 外形结构; (b) 内部方钢结构
Fig. 14 Vehicle-mounted platform composed of square steel and skin. (a) External structure; (b) internal square steel structure

3.3 面临问题及发展方向

在反射镜轻量化设计方面,国内常用的反射镜轻量化形式仍以经典的三角形、扇形、六边形或圆形轻量化孔为主,受加工工艺的限制,结构形式仍以开放式或半封闭式结构为主,在材料和支撑形式确定的条件下,进一步实现轻量化或性能提升的空间较为有限。随着增材制造技术的发展,一方面轻量化孔的形式正在逐渐多样化且拓扑优化在其中扮演着越来越重要的作用,另一方面也推动着反射镜向低成本、批量化生产前进,这必将成为大口径反射镜发展的新方向。另外,新型轻质材料(碳纤维、多孔材料等)的出现也为主镜的轻量化提供了更多可能。

随着跟踪架中铸件结构逐渐被焊接件和钢架所替代,其轻量化率也在大幅提升。另外,结构的分析和优化算法也在结构轻量化中发挥了重要作用。然而,仍有问题需要关注,如目前经纬仪跟踪架的型号和零部件数目较多,轻量化设计工作量较大,若能进一步实现跟踪架的统型和内部集成性,则有利于推动轻量化效率的提升。另外,基于仿真分析的轻量化设计须通过

实验结果进行进一步详细验证,以提升设计和分析的可靠性。跟踪架未来的轻量化发展方向有:1)减少机械结构中的非必要环节,提高跟踪架的集成性;2)将非承重件逐渐替换为新型轻质高强度材料(碳纤、金属泡沫材料、点阵材料等);3)进一步探索拓扑优化、增材制造和精密铸造等新型技术,以实现超轻结构设计。

在支撑架轻量化方面,目前支撑平台的设计仍然存在一些挑战,如目前车载平台的外形尺寸通常以立方体为主,受载车底盘尺寸、限高要求等客观因素影响,平台设计尺寸通常被限制在一定范围之内,如何在要求尺寸严苛、承载质量较大或有重量限制的情况下保证其承载性能,从而确保设备运输和工作的稳定性是设计人员必须思考的问题。未来支撑平台可能的发展方向:1)放弃立方体外形,而充分利用载车内可用空间来设计异形方案,从而提升性能;2)灵活选择多种设计元件(钣金件、铸件、方钢等)进行材料的最优分布;3)进一步采用优化方法对材料分布、形状和特征尺寸进行优化设计;4)基于传感器补偿降低系统对平台刚度的要求。

4 光雷一体化测量技术

4.1 技术要求

靶场光电测量系统的基本测量元素有方位、俯仰、目标图像、目标特性(姿态、光度、红外辐射特性等)。雷达的基本测量元素有方位、俯仰、距离、径向速度、切向速度、目标雷达截面积、目标一维像和目标二维像等。上述两种主要测量手段均有其优势和局限性:光学测量受天光和雨雾环境影响严重,并且无法提供距离信息,相比于毫米波雷达探测,光学探测设备具有分辨率高、测角精度高等特点;雷达探测成像分辨率和人眼易读性低,但其受天气环境影响小,高频无线电侦察设备又受跟踪空间目标能力差制约。随着目标探测要求的提高,对探测系统的性能提出了更高的要求。单一的光学或雷达探测模式已经难以满足发展需求,因此有必要实现单一设备同时具备光学与雷达两种测量模式,形成探测体制互补,提升单站设备的目标识别能力与作战效能,并有效提高设备的环境适应性^[52-54]。相比于单一体制的测量设备,光

雷一体化探测系统具有三大优点:1)多源信息融合提升单站设备的目标识别能力;2)光学与雷达探测体制能够优势互补,增强系统的环境适应性;3)便于光学图像与毫米波雷达图像信息高精度融合,从而实现多谱段、高精度、远距离、全天候和全天时图像信息采集。

4.2 技术发展现状

光雷一体化测量有两种技术路线,一种是在光电望远镜的两侧加挂雷达天线,采用搭建积木的方式将两者共同安装在同一精密跟踪平台上,另一种则是光学与雷达共用主光学望远镜的共孔径方式。

1) 积木架构的光雷一体化方案

光雷一体化搭建积木的结构方式是将单个或多个光学镜头布设在经纬仪跟踪架的中间,雷达发射天线和接收天线分布于跟踪架的两侧,光学信息和雷达信息通过各自的接收单元采集信号后送入信号处理单元中,如图 15 所示。采用这种集成方式,对各个信息采集单元的组成几乎没有改变,设备结构简单,在靶场中应用得较多。

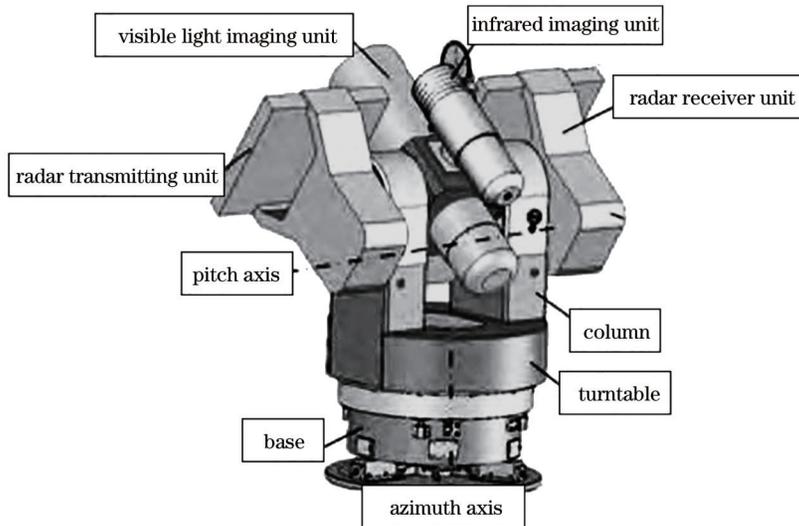


图 15 积木架构的光雷一体设备

Fig. 15 Integrated optical and radar equipment with building blocks

然而,将雷达天线、光电测量设备直接安装在同一跟踪平台上会构成一个复杂的谐振系统,对目标跟踪产生不利的影 响。尤其是,光学视场较小,雷达视场较大,两者视场极不匹配,在利用目标雷达信号进行光学引导的过程中,需要具有更大的控制带宽才能保证目标的跟踪测量。郭同健等^[55]针对光雷一体化测量系统中复杂谐振对伺服单元的不利影响,提出了采用自适应陷波器和观测器滤波反馈组合实现谐振补偿的方法。同时,针对系统存在雷达天线谐振、雷达机体谐振和天线高阶及轴系耦合谐振三类主要谐振模式,求得谐振特性随俯仰角变化的规律,提出了采用自适应陷波器补偿雷达天线和雷达机体谐振,并利用 Kalman 观测器滤波反馈抑制天线高阶及轴系耦合谐振的方法,

在保证闭环控制稳定性的同时满足了系统带宽要求。

2) 共孔径的光雷一体化方案

光雷共孔径复合探测系统与传统的光雷一体化探测系统最大的不同在于其光雷共轴的特点,除了众所周知的共轴可以使设备简化、成本降低之外,也有利于空间目标雷达与光学的指向一致性和图像的融合感知,在利用序列像融合实现空间目标三维形态重构、对重要目标进行动态捕捉、图像层或特征层融合改善目标结构特性等方面具有明显优势。

最早的关于共孔径复合方式光电系统的研究在 20 世纪 70 年代中期,采用红外/紫外双模复合探测。20 世纪 70 年代末期,美国、苏联等国开始研制微波/红外双模系统,该系统可以避免微波雷达探测易受环境

干扰、光电探测易受天气影响的缺点^[56]。21 世纪以来,以美国为首的军事强国先后研制出多种复合模式的光电探测装置,并成功地将其中一部分用到了复合制导领域当中,这对于导弹提高精度且轻巧装载具有决定性意义^[57-60]。在靶场应用中,光学雷达共孔径测量的目的是适应某些机动平台应用环境,空间和载重均有限制,要求设备集成度高、自重轻,且满足单站定位测量的需求,所查资料显示目前国内外大型共口径光学雷达一体化光电探测设备并未有详细报道。

目前对于光学与毫米波雷达共孔径复合探测的研究更多地集中于单项关键技术上的攻关。重点围绕共孔径结构型式、共用主镜天线膜系设计和分光分频元件研制等关键技术开展研究。

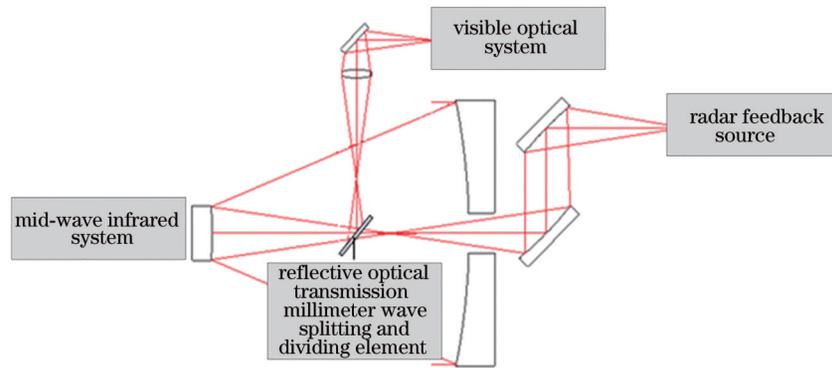


图 16 基于卡塞格林结构的光雷共孔径系统

Fig. 16 Optical-radar common aperture system based on Cassegrain structure

在共用主镜天线的设计方面,膜系的材质和厚度同时影响光学和毫米波雷达的高反射率,这是设计的难点。采用 200 nm 厚度的铝膜可以同时保证光学和毫米波信号的反射效率,可见光反射率大于 90%,中波红外光反射率大于 95%,毫米波反射率大于 99%,如图 17 所示。

在分光分频元件设计方面,通过在低介电常数和低损耗正切材料表面镀宽带介质膜可实现对单频毫米波雷达信号与光学信号的分光分频,如何实现单频毫米波信号高透和光学信号高反是分光分频元件的设计难点。选用低介电常数与低损耗正切的 JGS2 石英玻璃作为基板材料,其介电常数为 $\epsilon=4$ 和损耗正切值为 $\tan \delta=0.0004$,在 45° 的倾斜放置条件下能够计算出 35 GHz 处最佳透过厚度为 $d=4.71 \text{ mm}$ ($m=2$),此时毫米波透过率大于 99%^[61]。对于反射的光学信号而言,此 JGS2 为石英玻璃基底材料,经过对低、中、高三种折射率材料优化设计后得到 77 层的宽带介质反射膜,膜层厚度约为 $9 \mu\text{m}$,在可见光波段的平均反射率大于 95%,且该厚度下介质膜系不会影响毫米波的透过率,如图 18 所示。

4.3 面临的问题及发展方向

光雷一体化测量系统在轻量化、环境适应性和多源信息融合等方面具有明显优势,两种探测体制结合

在共孔径探测系统结构型式方面,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所精密仪器与装备研发中心团队提出了共用主镜天线的卡塞格林结构型式,在次镜处实现了可见光与中波红外分光,在三反镜处实现了可见光与毫米波分光分频,如图 16 所示。考虑大型结构设计、制造、驱动和稳定问题,综合交叉极化分量的影响,将主镜天线 F 数控制在 1~2 之间。通过置于主镜后的两个反射面保证馈源张角大于 20° ,且克服了馈源张角远大于光学系统孔径角 ($5^\circ\sim 10^\circ$) 的不匹配问题。将分光分频元件置于主副反射面之间,故其口径尺寸得以控制,从而降低了分光分频元件的制作难度。保证系统中心遮拦比小于 20%,兼顾了雷达天线副瓣的技术要求和光学系统的遮拦比要求。

可获得新的数据产出,可以提升地面光电测控设备的观测能力,是实现未来靶场目标信息多源化的主要技术途径之一。积木架构的光雷一体化系统结构简单,在靶场中应用较多。光雷共孔径系统仍在概念设计和关键元器件研制阶段,尚未进行工程化应用,后续将在该方向持续发力,发展光学辅助跟踪的宽带毫米波侦测共孔径设备,开展高效率宽带毫米波雷达与光学分光分频技术和光学与毫米波雷达图像融合技术研究,力争在最佳性价比条件下为靶场获得信息量更丰富的光学与雷达图像融合信息。

5 结束语

提高光学测量设备单站的性价比、使用的便捷性和灵活性是当前设备的主要发展趋势之一,红外辐射特性测量、轻量化设计、光雷一体化测量是三个关键技术。

在红外辐射特性测量方面,受大气透过率计算误差的影响,现在设备的辐射特性测量精度通常在 20%~30%,一方面精度不能完全满足要求,另一方面虽然通过采用分布基准的级联式红外辐射定标系统可以降低标定系统成本,简化操作流程,但总体来说标定过程仍然需要花费较长的时间,该过程中还会受到诸多环境因素的影响从而导致标定精度下降。因此,未

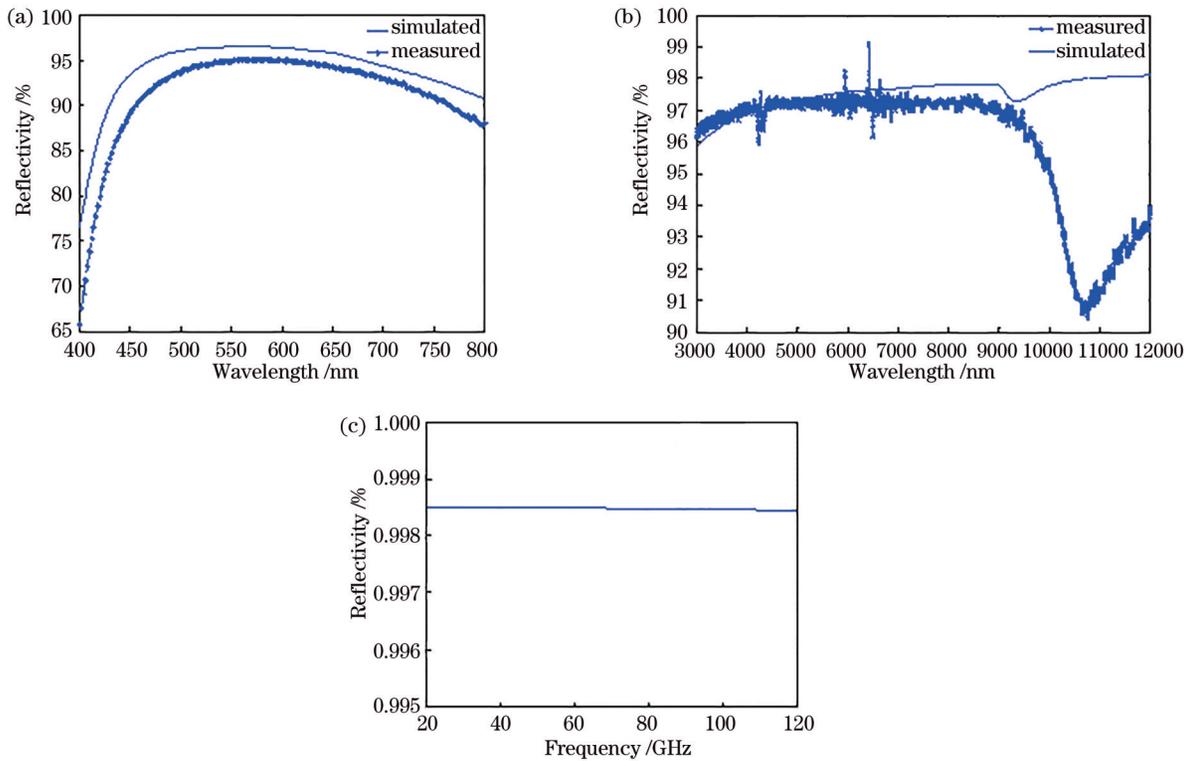


图 17 实测 200 nm 铝膜的可见光、中波红外和毫米波反射率曲线。(a)可见光;(b)中波红外光;(c)毫米波

Fig. 17 Measured reflectivity curves of visible light, mid-wave infrared light and millimeter wave of 200 nm aluminum film. (a) Visible light; (b) mid-wave infrared light; (c) millimeter wave

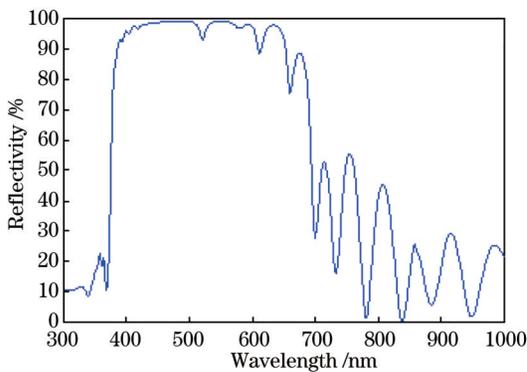


图 18 宽带介质膜在可见光波段中的反射率曲线

Fig. 18 Reflectivity curve of broadband dielectric film in visible light band

来的研究方向主要集中在优化标定方法、提高大气透过率精度和实时性,为建立完备图像数据库提供实时、有效的一手资料。

在现有轻量化技术的推动下,光电测量设备的机动性能有了很大的提升,中大规模设备(包括米级以上望远镜)已经成功实现了机动转移,并在车载、海基等机动平台下可实现对目标的稳定跟踪和实时高精度测量,动平台下的测角精度和跟踪精度与固定平台下的精度可达到同一数量级,未来仍需要在这个领域深耕。轻量化设计的重点包括反射镜、跟踪架和支撑架:反射镜轻量化的主要方向为轻量化孔的拓扑优化设计、低

成本反射镜的批量化生产的可行性、新型轻质材料应用的探索;跟踪架轻量化设计的主要方向为跟踪架统型和内部集成化设计、用新型轻质高强度材料替代非承重件的可能性的探索;支撑架轻量化的主要方向为载车内部空间充分利用的异形方案设计、多种元件外形和材料最优分布的优化设计。

积木架构的光雷一体化系统结构简单,在靶场中应用较多。光雷共孔径系统仍在设计阶段,其主要发展方向为研究高效率宽带毫米波雷达与光学分光分频技术,进一步探索光雷共孔径设备在靶场中实际应用的可行性。

立足靶场现有需求,推动以上技术的进步与发展,可以促进靶场光电测量设备的性能完备、操作便捷、使用可靠,对于提升靶场光测能力具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 卫红,葛军,周起勃.多波段红外目标跟踪与辐射特性测量系统[J].红外技术,2006,28(2):74-76.
Wei H, Ge J, Zhou Q B. Multi-band infrared tracking and measuring system[J]. Infrared Technology, 2006, 28(2): 74-76.
- [2] 李满良,胡小春,甄小龙,等.外场红外辐射标定方法研究[J].遥测遥控,2014,35(6):61-66.
Li M L, Hu X C, Zhen X L, et al. Research on outfield calibration technology of infrared radiation[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2014, 35(6): 61-66.
- [3] 陈卫,汪中贤,马东辉,等.非均匀热气体红外辐射特性计算与仿真[J].红外与激光工程,2010,39(1):17-21.
Chen W, Wang Z X, Ma D H, et al. Calculation and simulation

- of infrared radiation characteristics of non-uniform hot gas[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 17-21.
- [4] 常松涛. 红外经纬仪结构设计及提高其辐射测量精度的关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- Chang S T. Research on infrared theodolite design and key technologies to improve the radiometry precision[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [5] Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Radiometric calibration method for large aperture infrared system with broad dynamic range[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(15): 4659-4666.
- [6] Chang S T, Li Z. Calibration algorithm for cooled mid-infrared systems considering the influences of ambient temperature and integration time[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(29): 8118-8125.
- [7] Chang S T, Zhang Y Y, Sun Z Y, et al. Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [8] 余毅, 王旻, 常松涛, 等. 根据环境温度进行红外成像系统漂移补偿[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1004002.
- Yu Y, Wang M, Chang S T, et al. Drift compensation of infrared imaging system using ambient temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1004002.
- [9] 孙志远, 王旻, 常松涛. 环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正[J]. *激光与红外*, 2014, 44(5): 522-527.
- Sun Z Y, Wang M, Chang S T. Effect and correction of environmental temperature on infrared radiation measurement precision[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(5): 522-527.
- [10] 孙志远, 常松涛, 朱玮. 中波红外探测器辐射定标的简化方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2132-2137.
- Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Simplifying method of radiance calibration for MWIR detector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2132-2137.
- [11] 张钊, 万志, 孙景旭, 等. 琼斯法定标用双波段红外辐射计的研制和校准[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0623002.
- Zhang Z, Wan Z, Sun J X, et al. Development and calibration of dual-waveband infrared radiometer for Jones calibration method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0623002.
- [12] 杨智慧, 郭聚光, 佟惠原, 等. 平行光管杂散辐射对红外辐射定标影响的分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3199-3204.
- Yang Z H, Guo J G, Tong H Y, et al. Analysis of impact on infrared radiation calibration caused by stray radiation of collimator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3199-3204.
- [13] 孙志远, 常松涛, 朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0712006.
- Sun Z Y, Chang S T, Zhu W. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0712006.
- [14] 孙志远, 常松涛, 朱玮, 等. 应用内外定标修正实现红外测量系统辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 356-362.
- Sun Z Y, Chang S T, Zhu W, et al. Radiation calibration of infrared system by amendment of inner and outer calibrations[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 356-362.
- [15] 田棋杰, 常松涛, 乔彦峰, 等. 采用低温面源黑体实现红外系统宽动态范围定标[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 0412003.
- Tian Q J, Chang S T, Qiao Y F, et al. Radiometric calibration based on low-temperature area blackbody for infrared systems with high dynamic range[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0412003.
- [16] 魏合理, 陈秀红, 饶瑞中. 通用大气辐射传输软件 CART 介绍[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(6): 446-450.
- Wei H L, Chen X H, Rao R Z. Introduction to the combined atmospheric radiative transfer software CART[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 446-450.
- [17] 陈秀红, 魏合理, 徐青山. 红外大气透过率的计算模式[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 811-816.
- Chen X H, Wei H L, Xu Q S. Infrared atmospheric transmittance calculation model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 811-816.
- [18] 刘俊池, 李洪文, 王建立, 等. 中波红外整层大气透过率测量及误差分析[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1547-1557.
- Liu J C, Li H W, Wang J L, et al. Measurement of mid-infrared total atmospheric transmittance and its error analysis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1547-1557.
- [19] 杨词银, 曹立华, 张建萍. 基于大气实时修正的飞机辐射特性测量[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1751-1759.
- Yang C Y, Cao L H, Zhang J P. Measurement of infrared radiation for target airplane based on real-time atmospheric correction[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(7): 1751-1759.
- [20] 杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于大气透过率比例校正的目标辐射测量[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7): 1626-1635.
- Yang C Y, Zhang J P, Cao L H. Infrared radiation measurement based on proportional corrected atmospheric transmittance[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1626-1635.
- [21] 田棋杰, 李周, 常松涛, 等. 高温小目标红外辐射特性测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1012004.
- Tian Q J, Li Z, Chang S T, et al. Measurement method of infrared radiometric characteristics for high-temperature small targets[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1012004.
- [22] Yang G Q, Li Z, Zhao C, et al. Nonlinear atmospheric correction based on neural network for infrared target radiometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190413.
- [23] Yoder P, Vukobratovich D. *Opto-mechanical systems design* [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [24] Doyle K B, Genberg V L, Michels G J. *Integrated optomechanical analysis*[M]. Bellingham: SPIE Press, 2002.
- [25] 郭喜庆, 王悦勇. 大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(6): 518-521.
- Guo X Q, Wang Y Y. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy caliber mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 518-521.
- [26] 张莹涛. 轻量化反射镜动态性能分析与支撑结构设计[D]. 成都: 中国科学院研究生院光电技术研究所, 2013.
- Zhang Y T. Dynamic performance analysis and support structure design of light-weight mirror[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [27] 后建敏, 卓仁善, 孙宁. 基于有限元法的光电经纬仪主镜轻量化设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(4): 77-80.
- Hou J M, Zhuo R S, Sun N. Lightweight design and analysis for a theodolite based on finite element method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 31(4): 77-80.
- [28] 刘永明, 谢军, 田伟, 等. 基于有限元法的面形反演模型[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0812001.
- Liu Y M, Xie J, Tian W, et al. Inverse modeling of mirror surface figure based on finite element contact analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0812001.
- [29] 谢军, 何锋赞, 王晶, 等. 经纬仪主镜轴向支撑结构仿真与优化[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(S1): S118001.
- Xie J, He F Y, Wang J, et al. Simulation and optimization of axial supporting structures for theodolite primary mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S118001.
- [30] 包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 中心支撑 $\phi 610$ mm 圆形主镜的超轻量化设计[J]. *光子学报*, 2016, 45(9): 0912007.
- Bao Q H, Sha W, Chen C Z, et al. Ultra-lightweight design of $\phi 610$ mm circular primary mirror supported in Centre[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0912007.
- [31] 王从敬, 王东, 黄鑫, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜的优化与有限元分析[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1122002.

- Wang C J, Wang D, Huang X, et al. Optimization and finite element analysis of large-aperture SiC lightweight primary mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1122002.
- [32] 王肖. 地基大口径反射镜与支撑结构优化设计研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2018.
Wang X. Research on optimized design of large-diameter mirrors and support structures[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [33] 谢杰, 潘风明, 刘近超, 等. 基于有限元法的主镜轻量化结构设计及性能分析[J]. *光电子技术*, 2017, 37(3): 211-215.
Xie J, Pan F M, Liu J C, et al. Lightweight structure design and performance analysis of primary mirror based on finite element method[J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37(3): 211-215.
- [34] 赵宇, 苏成志, 赵贵军, 等. $\Phi 500$ mm 超轻量化 SiC 反射镜结构优化设计[J]. *中国光学*, 2020, 13(6): 1352-1361.
Zhao Y, Su C Z, Zhao G J, et al. Structural optimization for the design of an ultra-lightweight SiC mirror with a diameter of 500 mm[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1352-1361.
- [35] 胡瑞, 陈志强, 张媛媛, 等. $\Phi 1.05$ m 轻量化反射镜设计与制造[J]. *光电工程*, 2020, 47(10): 200317.
Hu R, Chen Z Q, Zhang Y Y, et al. Design and manufacture of $\Phi 1.05$ m lightweight mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(10): 200317.
- [36] 王冲, 王强龙, 陈苒生, 等. 基于拓扑优化的金属反射镜设计及增材制造[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(4): 13-18.
Wang C, Wang Q L, Chen Y S, et al. Design of metal mirror based on topology optimization and additive manufacturing[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 44(4): 13-18.
- [37] 谢军. 基于接触和振动仿真的经纬仪结构设计及轻量化研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
Xie J. Research on structural design and weight reduction of theodolite based on contact and vibration simulation[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [38] 施胤成, 闫怀德, 宫鹏, 等. 基于 Zernike 系数优化模型的光学反射镜支撑结构拓扑优化设计方法[J]. *光子学报*, 2020, 49(6): 0622001.
Shi Y C, Yan H D, Gong P, et al. Topology optimization design method for supporting structures of optical reflective mirrors based on Zernike coefficient optimization model[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6): 0622001.
- [39] Woodard K S, Myrick B H. Progress on high-performance rapid prototype aluminum mirrors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10181: 101810T.
- [40] Woodard K S, Comstock L E, Wamboldt L, et al. Optimum selection of high performance mirror substrates for diamond finishing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9822: 98220C.
- [41] Scheiding S, Gebhardt A, Damm C, et al. Method for manufacturing a mirror comprising at least one cavity and optical mirror: US9599756[P]. 2017-03-21.
- [42] Hilpert E, Hartung J, von Lukowicz H, et al. Design, additive manufacturing, processing, and characterization of metal mirror made of aluminum silicon alloy for space applications[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(9): 092613.
- [43] 刘多, 江昱含, 董得义, 等. 基于增材制造的空间反射镜拓扑优化设计[J]. *机电工程*, 2022, 39(7): 1010-1016.
Liu D, Jiang Y H, Dong D Y, et al. Topological optimization design of space mirror based on additive manufacturing[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2022, 39(7): 1010-1016.
- [44] Gao G, Liu Z Y, Li Y B, et al. A new method to generate the ground structure in truss topology optimization[J]. *Engineering Optimization*, 2017, 49(2): 235-251.
- [45] 史航, 高阁, 谢军, 等. 应用于非凸设计区域桁架拓扑优化的一种基结构生成方法[J]. *计算力学学报*, 2018, 35(5): 540-546.
Shi H, Gao G, Xie J, et al. A ground structure generation method for truss topology optimization on non-convex design domain[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(5): 540-546.
- [46] 高阁. 桁架结构拓扑优化的理论与应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
Gao G. Research on theory and application of topology optimization of truss structures[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [47] 伞晓刚, 王晶, 薛育. 大型光电经纬仪转台的一种轻量化设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 33(4): 31-35.
San X G, Wang J, Xue Y. A method of lightweight design for turntable of large photoelectric theodolite[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 33(4): 31-35.
- [48] 伞晓刚. 1 m 口径光电经纬仪关键部件优化设计与仿真分析研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013.
San X G. Research on optimization design and simulation analysis for the key components of 1 m aperture photoelectric theodolite[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [49] 史航. 基于刚架和壳体耦合结构拓扑优化设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
Shi H. The method for topology optimization of coupling structure of frames and shell[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [50] 吴迪, 王冲, 陈苒生, 等. 多工况下经纬仪基座拓扑优化设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 43(4): 63-66, 111.
Wu D, Wang C, Chen Y S, et al. Topology optimization design of theodolite pedestal under multiple working conditions[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(4): 63-66, 111.
- [51] 谢军, 王小明, 刘震宇, 等. 车载经纬仪支撑平台: CN108482263B[P]. 2020-05-19.
Xie J, Wang X M, Liu Z Y, et al. Vehicle-mounted theodolite supporting platform: CN108482263B[P]. 2020-05-19.
- [52] 段一萍. 靶场光雷测量数据融合定位方法研究及应用[J]. *电子测量技术*, 2014, 37(6): 47-49, 53.
Duan Y P. Research and application on fusion photoelectric theodolite-radar measuring data[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(6): 47-49, 53.
- [53] 马彦敏, 韩燮. 多台雷达-光电经纬仪的优化布站研究[J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21(12): 3399-3401.
Ma Y M, Han X. Optimization of disposition of radar and electro-optic theodolite stations based on genetic algorithm[J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(12): 3399-3401.
- [54] 李华. 基于雷达与光电经纬仪协同工作的外弹道测试方法[J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(4): 134-136.
Li H. The exterior trajectory measuring method based on coordinate operation of radar and electro-optic theodolite[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(4): 134-136.
- [55] 郭同健, 高慧斌, 宋立维, 等. 光雷一体化测量系统的谐振特性及组合补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 926-933.
Guo T J, Gao H B, Song L W, et al. Resonant characteristic and hybrid compensation of OE-radar integrative measuring system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4): 926-933.
- [56] 刘敬海, 林幼娜, 孙志勇. 毫米波/双色红外探测系统共口径技术研究[J]. *光学技术*, 1998, 30(4): 41-43.
Liu J H, Lin Y N, Sun Z Y. Study on the co-aperture technology of millimeter wave/dual waveband infrared detective system[J]. *Optical Technology*, 1998, 30(4): 41-43.

- [57] 陆强, 沈为民, 潘君骅, 等. 同轴微波/红外双模天线的 optics 设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 2229-2232.
Lu Q, Shen W M, Pan J H, et al. Design of a coaxial microwave/IR dual mode antenna[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 2229-2232.
- [58] 张钧. 毫米波雷达/红外复合探测系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
Zhang J. Design and implementation of milli-meter wave sensor and infrared imaging multiplex detection system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [59] 曲兆俊. 双模仿真关键技术分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Qu Z J. Key technology analysis and design of dual-mode simulation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [60] 周飞. 微波/红外双模仿真系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
Zhou F. The research of dual-mode MW/IR simulation system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [61] 刘华松, 余俊宏, 冷健, 等. 毫米波在 SiO₂ 基底材料中的传播特性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1145-1149.
Liu H S, Yu J H, Leng J, et al. Millimeter-wave propagation characteristics in SiO₂ fundus materials[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(4): 1145-1149.

Development Status and Prospect of Photoelectric Measurement Equipment in Range

Yu Yi*, Liu Zhenyu, Sun Zhiyuan, Liu Haibo

Precision Instrument and Equipment R&D Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China

Abstract

Significance Based on optical imaging and photoelectric detection, optical measurement systems in range, which include optical, mechanical, and electronic components, can be used as integrated equipment to measure and record the flight trajectory, attitude, infrared radiation characteristics, and visible light features of targets. Photoelectric measurement equipment, mainly represented by photoelectric theodolites, is the earliest and one of the most basic facilities applied in range for measurement. With the gradual expansion of the spatial area and the increase in the frequency of space activities in recent years, the contradiction between increasingly frequent missions and limited manpower is becoming more and more prominent. There are urgent requirements for measurement capability improvement of photoelectric measurement equipment in range. Under the premise of ensuring high-precision measurement and high-resolution imaging capability, the new generation of single-station measurement equipment prefers to possess the capabilities to acquire more information on target characteristics, adapt to compatible multiple platforms, and have stronger mobility.

As one of the most important teams with a long history and strong capabilities in the development of photoelectric measurement equipment in range in China, the team of Precision Instrument and Equipment R&D Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences has been committed to improving the comprehensive ability and efficiency of photoelectric equipment. Recently, its main research focuses on a number of key technologies, such as infrared radiation characteristics measurement, lightweight structure design, and integrated optical and radar measurement. The overall ability of photoelectric theodolites has been improved in terms of the expansion of the measurement band, measurement information acquisition, and multi-platform adaptability. This paper summarizes the current status and research progress of technologies related to photoelectric measurement equipment in range.

Progress This paper summarizes the research progress of a number of key technologies related to photoelectric measurement equipment, such as infrared radiation characteristics measurement, lightweight structure design, and integrated optical and radar measurement, based on the relevant work of Precision Instrument and Equipment R&D Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. Firstly, an infrared radiation characteristics measurement technique is introduced that is different from the traditional image feature recognition. It includes five infrared radiometric calibration techniques (Fig. 2), atmospheric transmission correction, self-developed atmospheric parameter calculation software, and a new process to measure target infrared characteristics (Fig. 3). The current status of related research and the challenges faced by future development are summarized. Secondly, the lightweight structure design technology of photoelectric measurement equipment in range is described. Three lightweight structure design methods are introduced which are suitable for photoelectric measurement equipment in range, including the main reflector, namely the main component of the optical imaging system (Figs. 5 and 6), and mechanical structures such as support components (Figs. 7-13). In addition to considering the conventional mechanical properties of

the equipment, it is also necessary to ensure minimal surface aberration from the optical design point of view. The dynamic properties of the equipment should be considered for the purpose of transportation. Finally, integrated optical and radar measurement techniques are discussed. Two optical and radar integration schemes of building block architecture (Fig. 15) and common aperture (Fig. 16) are summarized. The optical-radar integrated detection mechanism can obtain new data outputs, enhance the observation capability of ground-based photoelectric equipment, and achieve multiple sources of target information via fusion detection.

Conclusions and Prospects The photoelectric measurement equipment in range uses optical imaging information to obtain flight information of the target. The target parameters can be further analyzed after error correction, space-time alignment, intersection calculation, and corresponding data processing. These are important procedures for the measurement and control systems of spacecraft launch and recovery and the detection of multiple types of military targets. The main development trends of current photoelectric measurement equipment include simplifying usage, enhancing flexibility, lowering the price-quality ratio of single-station equipment, and improving the techniques of infrared radiation characteristic measurement, lightweight structure design, and integrated optical and radar measurement.

To meet the challenges of the complexity of measurement conditions and the diversity of measured targets, photoelectric measurement equipment needs to be able to achieve the diversification of information acquisition, the expansion of the measurement band, and multi-platform mobile station deployment while ensuring high-precision measurement and high-resolution imaging capability. Based on the existing demand for range measurement, boosting the development of the aforementioned technologies can promote the integrity, convenient operation, and reliable use of photoelectric measurement equipment in range. These factors are of great significance for enhancing the capability of photoelectric measurement equipment in range.

Key words measurement; photoelectric measurement in range; infrared radiation characteristics; lightweight structure design; integrated optical and radar measurement