

光学技术在中国月球和深空探测中的应用 (特约)

裴照宇, 侯 军, 王 琼

(探月与航天工程中心, 北京 100086)

摘 要: 光学技术在中国探月工程与首次火星探测工程应用显著: 一半以上的科学载荷属于光学遥感载荷; 在自主导航、测控、监视、交会对接等工程实施上也应用广泛。文中简要回顾了我国探月工程已实施的历次任务、正在实施的探月工程三期和首次火星探测工程, 以及光学技术应用取得的主要成果, 介绍了我国未来对月球、火星、木星和小行星等探测任务的规划, 分析了光学技术在未来月球与深空探测中的发展趋势和潜在应用领域。

关键词: 探月工程; 月球与深空探测; 光学技术; 光学遥感载荷

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20201002

Applications of optical technology in lunar and deep space exploration in China(*Invited*)

Pei Zhaoyu, Hou Jun, Wang Qiong

(Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100086, China)

Abstract: Optical technology is widely applied in the China Lunar Exploration Program (CLEP) and the first China Martian exploration project. More than half of the scientific payloads were optical remote-sensing payload, and it was also widely used in the engineering areas including autonomous navigation, TT&C, monitoring, rendezvous and docking. In this paper, accomplished CLEP missions, on-going Chinese lunar and Martian projects and especially main achievements of optical technology applications were overviewed. Roadmap on China's future lunar, mars, jupiter and asteroids exploration was introduced. Development trends and prospects of optical technology in lunar and deep space exploration were analyzed and proposed.

Key words: lunar exploration program; lunar and deep space exploration; optical technology; optical remote-sensing payload

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-04-15

作者简介: 裴照宇 (1966-), 男, 研究员, 硕士, 中国探月工程三期副总设计师, 主要从事月球与深空探测任务总体设计方面的研究工作。

Email: CLEP2007@126.com

0 引言

月球和深空探测是当今世界航天活动的热点。1959 年苏联成功发射人类第一颗月球探测器“月球 1 号”探测器,揭开了月球与深空探测的序幕。迄今为止,世界各国已先后发射了 240 多个月球与深空探测器,其中月球和火星是两个主要探测目标,月球探测达 130 多次,火星探测达 40 多次。这些探测活动大大地扩展了人类对于目标天体及宇宙的认识。

光学技术是人类认识客观世界的重要手段,其发展大致经历了萌芽时期、几何光学时期、波动光学时期、量子光学时期、现代光学时期等 5 个时期^[1]。现今已经形成了许多新的分支学科和边缘学科,研究对象也从可见光逐渐扩展到红外、紫外波段。光学技术的应用非常广泛,几乎覆盖各个领域,如制造、通讯、测量、医学、农业、环境、地质、天文等。

在月球与深空探测领域,光学技术应用显著。早期的月球探测器,例如首次拍摄月球背面照片的“月球 3 号”探测器,仅仅搭载了 1 台双镜头 35 mm 胶片

相机,40 min 拍摄了 29 幅照片。而 2012 年登陆火星的好奇号火星车搭载了全景相机、导航相机、火星手持透镜成像仪、火星样本分析仪、化学与矿物学分析仪、化学与摄像机仪器、阿尔法粒子 X 射线分光计等十几台光学设备。可以说,应用光学技术的手段越来越丰富,用途越来越广泛,作用越来越重要。

鉴于光学技术在月球与深空探测领域的重要价值,文中简要介绍了中国探月工程发展情况与规划,综述了光学技术在探月工程中的应用情况,总结了当前发展趋势,并结合未来任务需求分析了潜在应用方向和发展展望。

1 中国月球与深空探测发展现状及展望

1.1 已经实施的任务

2004 年,中国正式启动探月工程(命名“嫦娥工程”),分“绕、落、回”三步实施^[2-3]。每步之间,前一步是后一步的基础,后一步是前一步的跨越;每次任务之间承前启后,充分利用前次的技术,尽可能为后次任务多做验证。中国探月工程总体规划路线如图 1 所示。

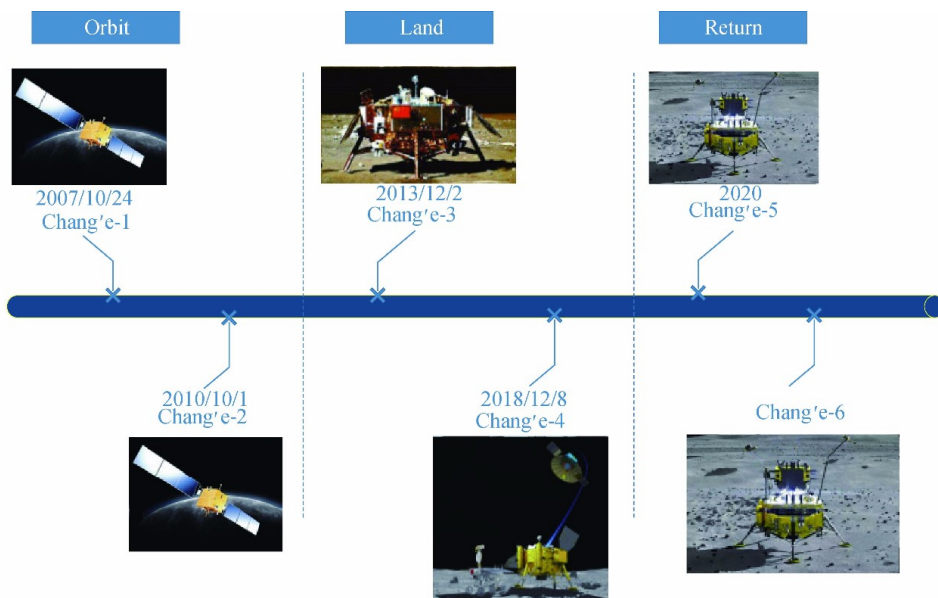


图 1 中国探月工程

Fig.1 China lunar exploration program

1.1.1 “嫦娥一号”任务

“嫦娥一号”是中国首次月球探测任务,技术路线是:采用成熟的技术、可靠的性能和较低的成本,实现原始创新和集成创新。卫星选用成熟的“东方红三

号”卫星平台进行适用性改进,运载采用“长征三号”火箭,新建两副 18 m 测控天线和 50、40 m 数据接收天线以解决地月测控通信能力不足的问题。“嫦娥一号”卫星于 2007 年 10 月 24 日成功发射,于 2009 年 3 月

1 日受控撞月,共获得了约 718 GB 的 2 级科学探测数据。

1.1.2 “嫦娥二号”任务

“嫦娥一号”圆满成功,为降低月面软着陆技术风险,改进“嫦娥一号”备份星,作为二期工程先导星,即“嫦娥二号”卫星。其技术路线是创新设计多目标顶层任务,充分继承成熟技术和产品并进行性能和功能升级,突破相关新技术,提升系统整体能力,形成并验证适用的行星际探测新平台。“嫦娥二号”卫星于 2010 年 10 月 1 日成功发射,先后开展了绕月探测、地月 L2 点探测、图塔蒂斯小行星飞掠探测,共获得了约 2 917 GB 的 2 级科学探测数据。

1.1.3 “嫦娥三号”任务

“嫦娥三号”是我国首次月球软着陆和巡视探测任务。其技术路线是:瞄准当今世界发展水平,高起点地确定功能与性能指标;以航天几十年来积累的技术能力为基础,针对新领域中所遇到的新问题,完全自主地进行技术上的原始创新和集成创新,通过大量的设计分析、关键技术攻关和地面验证试验,以正面攻坚的方式全面突破月球软着陆和月面巡视的核心关键技术。为此,全新研制着陆器和巡视器,新建佳木斯 66 m 和喀什 35 m 两座深空测控站。

“嫦娥三号”于 2013 年 12 月 2 号发射,12 月 14 日精确着陆在月球雨海西北部 44.12°N、19.51°W 区域,12 月 15 日实现两器分离和互拍。此后,巡视器遭遇故障失去移动能力,于 2016 年 7 月停止工作,着陆器至今仍在工作,两器共获取约 2 TB 的 2 级科学探测数据。

1.1.4 “嫦娥四号”任务

“嫦娥三号”任务圆满成功,作为“嫦娥三号”备份的“嫦娥四号”,被赋予新的使命——实施月球背面软着陆。其技术路线是:创新设计顶层任务,充分继承成熟技术和产品并增加必要任务模块,形成月球探测国际合作和开发创新平台,实现人类首次月球背面软着陆和巡视勘察。为此,增加了 1 颗中继星和 1 枚火箭,搭载了 4 台国际载荷和 3 个试验项目。

“鹊桥号”中继星于 2018 年 5 月 21 日发射,6 月 14 日进入环绕地月 L2 点的 Halo 使命轨道。“嫦娥四号”探测器于 12 月 8 日发射,2019 年 1 月 3 日成功着陆在月球背面冯卡门撞击坑内 45.46°S、177.59°E 区域(被命名为天河基地)。目前,着陆器、巡视器、中

继星均工作正常,截止 2020 年 1 月共获得了约 25 GB 的 2 级科学探测数据。

1.1.5 月地高速再入返回飞行试验

为降低月球采样返回工程风险,安排了一次月地再入返回飞行试验,验证半弹道跳跃式再入地球的气动、热防护、制导导航控制等关键技术。其技术路线是:围绕技术验证的核心目标,充分利用成熟的技术、产品来验证新技术,尽可能降低风险、提高工程实施可靠性。为此,服务舱继承了成熟的“嫦娥二号”卫星平台,返回器为新研产品。

“嫦娥五号” T1 飞行器于 2014 年 10 月 24 日发射,返回器于 11 月 1 日着陆在内蒙古四子王旗预定区域,服务舱先后实施了地月 L2 点环绕飞行、环月轨道调相试验、模拟交会对接等一系列拓展任务后,于 2018 年 5 月结束任务。

1.1.6 小结

从“五战五捷”的良好效果来看,中国探月工程做到了起步晚,但起点高;投入少,但产出多;任务次数少但覆盖内容全;整体能力快速发展,迅速晋升为国际先进。

1.2 正在实施的工程

我国目前正在实施的月球与深空探测工程包括探月工程三期“嫦娥五号”任务、“嫦娥六号”任务和首次火星探测工程。

1.2.1 探月工程三期

探月工程三期的主要任务是实现月面采样返回,包括“嫦娥五号”和“嫦娥六号”两次任务。其技术路线是:瞄准世界领先水平,集成我国最高水平航天技术,高起点地确定功能与性能指标,在继承前期工程基础上,完全自主地进行技术上的原始创新和集成创新,以正面攻坚的方式全面突破月面采样、月面起飞、月球轨道交会对接、高速再入返回的核心关键技术。研制全新的轨道器、返回器、着陆器、上升器,新建阿根廷 35 m 站、纳米比亚 18 m 站、再入测量雷达等设施以完善测控能力,新建月球样品实验室以具备样品的制备、储存和分发能力。“嫦娥五号”任务计划于 2020 年底前实施。

“嫦娥六号”作为“嫦娥五号”的备份,将视情进行相应改进,如:重新设计任务目标,更改部分有效载荷,变更采样地点等。

1.2.2 首次火星探测工程

我国首次火星探测工程起点高、跨越大,基于探月工程的基础和我国现有火箭的运载能力,瞄准当前世界先进水平确定任务目标,将在国际上首次通过一次发射任务,实现对火星的“绕、着、巡”^[4],开展火星全球性和综合性探测,对火星表面重点区域高精度、高分辨率的精细调查,实现对火星形貌、土壤、环境、大气等探测。为此,新研环绕器和着陆巡视器;在喀什深空站补充建设 3 副 35 m 口径天线构成天线阵,在天津新建 1 副 70 m 口径数据接收天线,提高测控通信能力。首次火星探测任务计划于 2020 年 7 月实施。

1.3 规划与展望

2020 年底,将实施“嫦娥五号”任务,完成探月工程“绕、落、回”三步走。后续,我国还将开展月球极区探测、月球科研站和月球基地建设,开展火星、木星、小行星探测等多项行星际探测任务。

1.3.1 中国月球探测后续发展路线

2020 年后,中国探月工程的规划包括极区探测任务和月球科研站任务,如图 2 所示。

其中,“嫦娥七号”将在月球南极开展一次综合探测,对月球的地形地貌、物质成分、空间环境进行探测,实现对月球极区及其表面永久阴影坑的就位探测。“嫦娥八号”任务将研制可搭载更多载荷的着陆

器,形成月面科研站运送模块,着陆在“嫦娥七号”任务着陆区附近,与“嫦娥七号”探测器共同构建月面通信网络,形成月球科研站基本型。

掌握空间技术是为了服务于空间科学和空间应用。在 2035 年前后,将建设月球科研站作为实验型月面基础设施。到 2050 年,将建设以规模开发利用为目标的月球基地。

月球科研站是一个能源长期供给、自主运行的月面基础设施。开展月球环境与资源探测、月基对地对天观测、月球原位资源利用等科学活动和技术试验。科研站将采用功能模块化、接口标准化设计,由若干功能区组成,每个功能区包含多个功能模块,可维护、可扩展,同时便于开展国际合作。通过与各合作方联合建设月面及月球轨道基础设施,实现共商、共建、共用。

月球基地是包括实验室、工厂等在内,短期有人参与、长期自主运行的大型月面基础设施,开展月球科学深化研究,开发利用月球资源。可开展月球资源应用开发,长期研究、规模利用,形成月球长期科研和资源应用能力。月球基地将成为研究地月系统演化等科学问题的实验室、开发与利用月球资源的平台、支持航天员短期造访的在轨设施。

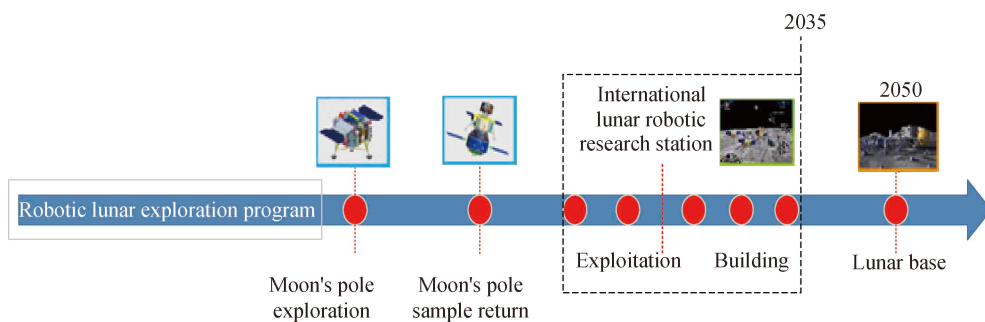


图 2 中国月球探测发展路线图

Fig.2 Roadmap of China lunar exploration

1.3.2 中国深空探测后续发展路线

中国统筹发展月球探测的同时,在 2030 年前还规划了除我国首次火星探测任务外的其他三次深空探测任务,如图 3 所示。

(1) 小行星探测任务:计划 2025 年前实施,通过一次任务完成近地小行星伴飞、附着、采样返回和主带彗星环绕;

(2) 火星采样返回探测任务:计划 2030 年前实施,实现火星取样返回,开展着陆区形貌与地质背景、采样现场相关数据分析、样品实验室精细分析等方面的科学研究;

(3) 木星系探测及行星穿越任务:计划 2030 年左右实施,通过一次任务实现木星、木卫四的环绕探测和行星际穿越探测。

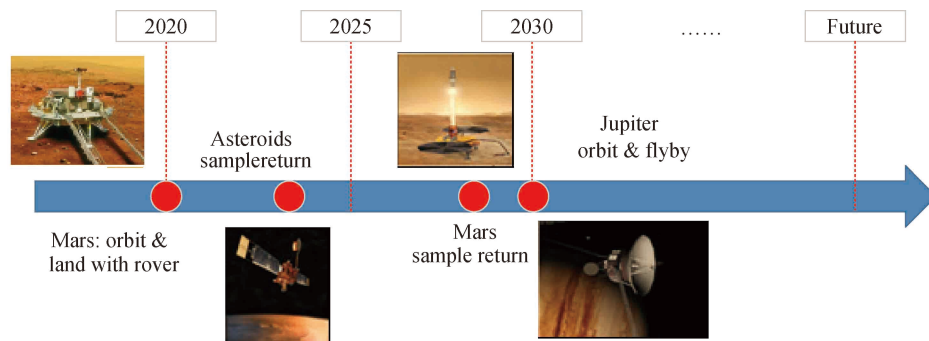


图 3 中国深空探测发展线路图

Fig.3 Roadmap of China deep space exploration

2 光学技术在探月工程和首次火星探测工程中的应用

探月工程已经实施了五次任务，“嫦娥五号”任务和首次火星探测任务也即将实施发射。在这些任务搭载的全部 48 台科学探测载荷中，光学载荷占据一半以上。在探测器平台、运载火箭、测控、地面应用等其他系统中，光学技术也得到了广泛的应用。

2.1 科学探测载荷方面

探月工程和首次火星探测工程一共搭载了 29 台光学载荷^[5]，工作波段范围覆盖了从 γ 射线到红外波段，主要包括两大类-形貌勘察类载荷和物质成分调查类载荷，见表 1~3。截至 2019 年 3 月，已经发射实施的“嫦娥一号、二号、三号、四号”四次任务搭载的光学载荷共获取了超过 5 500 GB 的 2 级数据，占有载荷数据量的 97%。

表 1 探月工程和中国首次火星探测工程光学载荷

Tab.1 Optical payloads of CLEP and China's first Mars exploration project

Mission	Payload
Chang'e-1	CCD stereo camera, interferometer imaging spectrometer, laser altimeter, r , altimeter, γ -ray spectrometer, X-ray spectrometer
Chang'e-2	TDI CCD stereo camera, laser altimeter, γ -ray spectrometer, X-ray spectrometer
Chang'e-3	Lander: landing camera, topography camera, moon-based extreme ultraviolet camera, Moon-based ultraviolet telescope Rover: panoramic cameras, VNIS, APXS
Chang'e-4	Lander: landing camera, topography camera Rover: panoramic cameras, VNIS
Chang'e-5	Lander: landing camera, panoramic cameras, lunar mineral spectrometer
First Mars exploration mission	Orbiter: Medium-resolution camera, high-resolution camera, mars mineral spectrometer Rover: Topography camera(Navigation camera), multispectral camera, Mars surface composition detector

表 2 探月工程光学载荷与科学目标

Tab.2 Optical payloads and scientific objectives of CLEP

Scientific objective	Optical payload	Wavelength
Exploration of geological condition	Chang'e-1 CCD stereo camera, Chang'e-2 TDI CCD stereo camera, Chang'e-3/4/5 panoramic cameras, Chang'e cameras, Chang'e-3/4 topography cameras, 4 topography cameras	Visible
	Chang'e-1/2 laser altimeters	Infrared
Exploration of lunar surface minerals type and composition	Chang'e-1 interferometer imaging spectrometer	Visible
	Chang'e-1/2 γ /X-ray spectrometers, Chang'e-3 APXS	γ /X-ray
Exploration of earth plasmasphere	Chang'e-3/4 VNIS, Chang'e-5 lunar mineral spectrometer	Visible & infrared
	Chang'e-3 moon-based extreme ultraviolet camera	Ultraviolet
Moon-based astronomical observation	Chang'e-3 moon-based ultraviolet telescope	

表 3 中国首次火星探测工程光学载荷与科学目标

Tab.3 Optical payloads and scientific objectives of China's first Mars exploration project

Scientific objective	Optical payload	Wavelengths
Exploration of geological condition	Medium-resolution camera, high-resolution camera, topography camera	Visible
Exploration of soil type distribution and structure	Mars mineral spectrometer	Visible, near-infrared & mid-infrared
Exploration of surface elements, minerals and rock type	Multispectral camera Mars surface composition detector	Visible & near-infrared ultraviolet, visible & near-infrared

2.1.1 形貌勘察类载荷

形貌勘察类载荷主要包括各种分辨率、安装位置不同的相机,通过敏感器接受星球表面反射的可见光信息,获取星球表面影像和形貌特征。包括“嫦娥一号”卫星搭载的三线阵 CCD 立体相机,“嫦娥二号”卫星搭载的 TDI CCD 立体相机,“嫦娥三号、四号”着陆器和巡视器搭载的降落相机、地形地貌相机、全景相机,“嫦娥五号”着陆器搭载的降落相机、全景相机,火星环绕器和火星车搭载的中分辨率相机、高分辨率相机、地形相机。这些相机的成像和设计用途各异。利用嫦娥一号相机数据,获得了 120 m 分辨率的全月三维影像图;利用“嫦娥二号”相机数据,获得了 7 m 分辨率的全月三维影像图以及虹湾区域优于 1.5 m 分辨率的局部影像。这两幅全月图在当时均为世界上分辨率最高的全月图。利用“嫦娥三号”和“四号”相机数据,获得了月球正面、背面着陆巡视区的大量清晰图像,为形貌研究和公众展示提供了丰富资料。

“嫦娥一号”和“二号”卫星搭载的激光高度计也属于形貌探测类载荷,利用激光测距原理,来获取月球表面地形的高程信息。利用激光高度计的探测数据,结合卫星轨道、姿态、仪器几何参数及精密星历,获得了全月 DEM 图。

2.1.2 物质成分调查类载荷

月球表面多数元素会与宇宙射线相互作用产生 γ 射线,还有的元素本身具有天然放射性,也会发出 γ 射线,不同元素所产生的伽马射线具有不同的特征能谱。类似地,月岩或月壤中的某些元素在太阳 X 射线或者主动激发源的激发下,会产生具有特定能谱的 X 射线。通过探测这些 γ 和 X 射线,能够确定元素的种类和丰度信息。“嫦娥一号”和“二号”卫星上搭载的 γ /X 射线谱仪、“嫦娥三号”巡视器上搭载的粒子激

发 X 射线谱仪都是基于这种原理而研制的科学探测载荷,用于调查月球表面所含元素及丰度。利用 γ /X 射线谱仪获取的数据,完成了月表 U、K、Th、Mg、Al、Si 等元素的全球分布图。利用粒子激发 X 射线谱仪的探测数据,实现了对巡视区域 7 种主量元素(镁、铝、硅、钙、钛、铁和钾)和 4 种微量或痕量元素(铬、锶、钇、锆)的高分辨测量。经反演分析和研究,发现“嫦娥三号”着陆区岩石有可能是一种全新的月海玄武岩,由附近的“紫微”撞击坑溅射而出^[6]。

还有一类载荷,通过探测星球表面矿物和岩石反射的可见光到近红外波段的精确光谱信息,来获取物质组成和分布信息。包括“嫦娥三号”和“四号”巡视器搭载的红外成像光谱仪、“嫦娥五号”着陆器搭载的月球矿物光谱分析仪,以及火星环绕器搭载的火星矿物光谱探测仪。利用“嫦娥三号”红外成像光谱仪的探测数据,与巡视器上其他载荷(红外光谱仪、全景相机、测月雷达)观测数据进行综合分析,国际上首次揭示了月球雨海区独特的火山演化历史^[7]。“嫦娥四号”红外成像光谱仪的探测数据证明了“嫦娥四号”落区月壤中存在以橄榄石和低钙辉石为主的月球深部物质^[8]。

“嫦娥一号”卫星搭载的干涉成像光谱仪采用 Sagnac 型横向剪切空间调制干涉成像方式,把照相机的功能与光谱仪的功能合二为一,来获取月球表面的二维光谱序列图,结合 γ /X 射线谱仪的探测数据,分析月球表面矿物类型和分布。

我国首次火星探测任务火星车上搭载了一台多光谱相机和一台火星表面成分探测仪,均用于研究火星表面物质组成。多光谱相机通过运用多种滤光片、分光器、感光元件,使相机能同时接收到同一目标在不同窄带波长下所辐射或者反射的信息,得到火星表

面目标的不同光谱带的照片。火星表面成分探测仪采用激光诱导击穿光谱技术,使探测目标被强脉冲激光高温烧蚀并气化产生等离子体,通过收集、检测等离子体发射光谱,来分析目标的元素成分。

2.1.3 其他载荷

“嫦娥三号”着陆器搭载的极紫外相机利用月球稳定、真空的环境,对地球周围的等离子层产生的 30.4 nm 辐射进行长期成像探测。它在国际上首次实施月面定点、大视场对地球等离子体层的极紫外观测;首次发现地球等离子体层边界在磁层亚暴的影响下发生凸起;确认地球等离子体层的尺度与地磁活动强度反相关,进而认为等离子体层的空间结构受地球

磁场和电场的约束和控制^[9]。

“嫦娥三号”着陆器搭载的月基光学望远镜充分利用月球没有大气干扰和自转缓慢的优势,在近紫外波段对预选天体的光变进行长期连续监测,并开展选区巡天观测。它在国际上首次实现了月基近紫外巡天观测;提出月球外逸层中的羟基(水)密度的上限,是迄今为止这一领域最好结果;在变星研究上发现一系列新的天文现象等^[10]。

2.2 其他方面

除了用于科学探测载荷外,光学技术也广泛应用于探测器(卫星)平台、运载火箭、测控与回收、地面应用等系统,见表 4。

表 4 工程技术方面应用的主要光学设备

Tab.4 Part of optical equipment for engineering applications

System	Function	Equipment
Probe/Satellite	Astronomical navigation	Chang'e-1/2 mid-precision star sensors, Chang'e-1/2 ultraviolet lunar sensors, Chang'e-3/4 APS star sensors
	Landing navigation	Laser 3D imaging sensor coarse hazard-avoiding camera
	Roving navigation	Navigation cameras hazard cameras laser dot-matrix generatorlaser
	Rendezvous & docking	Laser radar optical R&D imaging sensor
Rocket	Motion monitoring	Monitoring cameras
	Navigation	Laser gyroscope LIMU
	Separation monitoring	Monitoring cameras
TT&C and recovery	Aiming, tracking & measurement	Photoelectric theodolite
	Laser communication	Optical telescope
Ground application	Lunar sample analysis	Electron microscope polarization microscope CT scanner

3 光学技术在月球与深空探测领域的发展和展望

3.1 发展趋势

3.1.1 探测性能越来越高

随着科学技术的不断发展,光学载荷的性能也越来越高。对比 21 世纪以来的环月探测任务,“嫦娥一号”搭载了 100 m 的 CCD 立体相机; SMART-1 搭载了 45 m 分辨的微型成像探测仪;“嫦娥二号”搭载了 7 m,局部 1.5 m 的 CCD 立体相机; LRO 搭载了 0.5 m 分辨率的月球轨道勘测相机。勘察月球全球地形地貌的空间分辨率在不断提高。同时,较高的光谱分辨率是准确探测物质组成和矿物类型基础。印度“月船一号”上的近红外光谱仪光谱分辨率达到 6 nm;“嫦娥

三号”的红外成像光谱仪在不同谱段的分辨率也达到了 2 ~ 12 nm。

3.1.2 设备进一步小型化

在月球与深空探测器上,可用空间和重量、能源、数据传输能力等各种资源往往受到严格约束,这对光学设备的尺寸、重量、功耗、数据率等提出了十分严格的要求,探测设备的轻小型化成为发展的必然趋势。随着新材料、新工艺、新技术的发展,轻小型化也能够得以实现。

例如,基于 CMOS 工艺的 APS 星敏传感器,较基于 CCD 工艺的星敏传感器具有集成度高、功耗低、外形尺寸和重量小的优势,在探测器上的安装布局也更为便利,目前已经在“嫦娥三号”和“四号”等探测器上应

用,未来的应用前景更加广泛。

3.1.3 注重多种功能的集成

集成化既包含了设备的集成,也包含探测任务的集成。有的光学载荷进一步拓宽了光谱探测范围,实现了多通道、多功能探测;有的光学载荷在应用时被赋予多种任务,实现一机多用;还有的光学载荷将工作原理各异、科学目标相似的多台仪器集成为一体,在减小资源占用的同时,实现了功能上的有机结合和性能上的相互印证。

“嫦娥五号”上月球光谱矿物分析仪,相比于“嫦娥三号”红外成像光谱仪,将光谱范围从 450~2 400 nm 扩展到了 480~3 200 nm,既能成像也能测光谱。首次火星探测任务中将全景相机将用于形貌探测,也用于火星车导航。“好奇号”火星车的核心载荷——样本分析仪由 3 个独立的仪器构成:质谱仪、气相色谱仪和激光光谱仪,用来寻找和测量构成生命的有机化学物质等。

3.1.4 多种载荷进行协同探测

多载荷协同探测可以利用多源探测数据进行更加全面、立体的协同研究,更好的完成科学目标。如 SMART-1 上搭载的专门用于监测离子推进系统的电力推进诊断包,与安装在水栅上测量等离子体环境的朗缪尔探测器共同研究空间等离子体环境;又如 LCROSS 卫星任务,承载它的“半人马”上面级撞击月球南极、激起尘埃柱后,由 LCROSS 卫星上可见光相机等监测尘埃柱,红外相机测量尘埃柱中水的总量和分布,这些光学载荷共同完成对尘埃柱的探测。

3.2 光学技术潜在应用方向

3.2.1 通信

由于具有大容量、小型化、低功耗、保密性强、高灵敏度、高精度且抗干扰能力强等优点,激光通信技术有望在未来月球和深空探测任务中得到深入应用,实现器地通信和器间通信^[11]。2013 年,美国在月球大气和尘埃环境资源探测器 (LADEE) 上搭载了一台空间激光通信实验载荷,名为“月球激光通讯演示”(LLCD),上行链路数据传输可达 20 Mbps,下行链路数据传输可达 620 Mbps^[12]。我国新一代高轨技术试验卫星实践十三号搭载的激光通信终端,也已经成功进行了国际首次高轨卫星对地高速激光双向通信试验。

以激光通信为基础,科学家们提出了构建星际互

联网络 (Inter Planetary Internet, 简称 IPN) 的设想^[13]。IPN 是一种通用的网络空间架构,定义为 IPN 骨干网,IPN 外部网以及行星网络 (PN) 等之间的互联互通,用以解决深空探测和通信中由于通信距离远所造成的通信路径损耗等问题。光通信技术将在 IPN 中起到至关重要的作用。

3.2.2 能源

太阳能是空间探测应用最为广泛的能源。早在 20 世纪 60 年代就有科学家提出空间太阳能发电站的方案。在地球同步轨道建立巨大的太阳能电池阵,将收集的大量太阳光转化为电能,以微波或激光的形式传输到地球上,供人类使用。同时,也可以实现对可视范围内的地球轨道航天器供电,使航天器不需要巨大太阳能电池翼,从而大大增加功率水平和控制精度,这对于未来的大功率通信卫星、高精度科学卫星等的发展具有重要价值。在深空探测中,建立深空太阳能电站也将作为深空探测能源系统的候选方案。

在将来月球探测以及载人登月任务中,质量轻、效率高的柔性太阳能电池阵有望成为首选^[14]。月球科研站长期工作所需的能源可通过月球轨道上的太阳能收集器向月面无线传输的方式来不间断地给予保障,探测极区永久阴影坑的移动式机器人也可以通过能源中继传输的方式供电。

3.2.3 地外资源就位利用

地外资源的就位利用,也就是太空制造技术将成为月球基地,乃至拓展人类地外生存与活动能力的战略性关键技术^[15]。地外原位材料的制造设备既要具备适应微重力、温度变化、强辐射的能力,又要满足材料成形过程中对温度、压力、光照、成分控制等要求。可利用激光熔融 3D 打印,使用原位资源,制造出房屋、基本生活用品和设备所需的零部件等;还能够生产人类和动植物赖以生存的氧气和水。

世界各主要航天强国都在深入研究地外资源就位利用。目前,我国对在太空中进行制造的研究已经完成了可行性的阶段,未来将更趋向于对更高精度、更快速度、更多样化和设备小型化开展研究。

3.2.4 科学探测

光学设备在当前的月球与深空探测中已经得到了广泛的应用。涉及各种谱段,如红外、紫外、可见光、 γ /X 射线等;涉及各种功能,如相机、光谱仪、测

距仪等;涉及多种科学目标的研究,如地形地貌研究、物质成分研究、天文观测等。未来,随着规模更大的月球与深空探测任务的逐渐实施,瞄准重大科学目标、满足工程化约束的先进光学载荷将成为迫切需求。另一方面,随着基础理论的突破和光学技术的发展,以光学载荷为主提出单一目标化科学探测任务也将成为可能,比如大型空间望远镜、引力波探测等。

4 结 论

中国探月工程已经实现“五战五捷”,即将实施“嫦娥五号”月球样品采样返回任务,完成“绕、落、回”三步走的总目标。我国首次火星探测工程也即将实施,实现火星环绕、着陆和巡视探测。后续还规划了月球南极探测、小行星探测、火星采样返回、月球科研站、木星系探测及行星穿越探测等任务。星空浩瀚无比,探索永无止境。随着月球与深空探测的不断发展,以及半导体技术、探测技术、光学元件技术、材料技术和制造工艺的不断进步,光学设备将在探测性能、轻小型化、多功能集成、多设备协同探测等方面得到进一步发展,光学技术将迎来更广阔的应用前景,有望在通信、能源、原位资源利用、科学探测等方面发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] Cajori F. History of Physics[M]. Dai Nianzu, translated, Beijing: China Renmin University Press, 2011. (in Chinese)
- [2] Luan Enjie. China's lunar exploration program-the third milestone for China's space industry [J]. *Engineering Sciences*, 2006, 8(10): 31-36. (in Chinese)
- [3] Pei Zhaoyu, Wang Qiong, Tian Yaosi. Chang'e program technology development route [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2015, 2(2): 99-110.
- [4] Geng Yan, Zhou Jishi, Li Sha, et al. Review of first Mars exploration mission in China [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(5): 399-405. (in Chinese)
- [5] Sun Huixian, Li Huijun, Zhang Baoming, et al. Achievements and prospect of payloads technology in Chinese lunar and deep space exploration [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(6): 495-509. (in Chinese)
- [6] Ling Zongcheng, Bradley L Jolliff, Alian Wang, et al. Correlated compositional and mineralogical investigations at the Chang'e-3 landing site [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 8880.
- [7] Zhang Jinhai, Yang Wei, Hu Sen, et al. Volcanic history of the imbrium basin: A close-up view from the lunar rover Yutu. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(17): 5342-5347.
- [8] Chunlai Li, Dawei Liu, Bin Liu, et al. Chang'E-4 initial spectroscopic identification of lunar far-side mantle-derived materials [J]. *Nature*, 2019, 569: 378-382.
- [9] He H, Shen C, Wang H, et al. Response of plasmaspheric configuration to substorms revealed by Chang'e 3 [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32362.
- [10] Wang J, Wu C, Qiu Y L, et al. An unprecedented constraint on water content in the sunlit lunar exosphere seen by lunar-based ultraviolet telescope of Chang'e-3 mission [J]. *Planetary & Space Science*, 2015, 109-110: 123-128.
- [11] Ye Peijian, Yu Dengyun, Sun Zezhou, et al. Achievements and prospect of Chinese lunar probes [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, 3(4): 323-333. (in Chinese)
- [12] Robinson B S, Boroson D M, Burianek D A, et al. Overview of the lunar laser communications demonstration[C]// Proceedings of SPIE, 2011, 8610(10): 2.
- [13] Burleigh S, Cerf V, Durst R, et al. The interplanetary internet: A communications infrastructure for Mars exploration [J]. *Acta Astronautica*, 2003, 53(4): 365-373.
- [14] Ma Jijun, He Xiaobin, Qiao Weixin, et al. Research on energy system in manned lunar mission [J]. *Manned Spaceflight*, 2019, 25(2): 4-11. (in Chinese)
- [15] Liu Ming, Tang Weizhe, Duan Wenyan. Digital light processing of lunar regolith structures with high mechanical properties [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(5): 5829-5836.