



吴季,中国科学院国家空间科学中心研究员,中国空间科学学会理事长,国际宇航科学院院士,IEEE会士,中科深链空间科技有限公司创始人。曾任中国科学院国家空间科学中心主任,“地球空间双星探测计划”应用系统总设计师、国家重大科技基础设施——“子午工程”总经理、中俄火星联合探测计划“萤火一号”首席科学家、“嫦娥一号”和“嫦娥三号”探测器有效载荷总指挥、中国科学院空间科学先导专项(一期)负责人。主要研究方向为空间科学探测计划系统设计和干涉式被动微波成像理论与技术。

深空探测的现状、展望与建议

吴季^{1,2}

1. 中国科学院国家空间科学中心,北京 101499
2. 中国科学院大学,北京 100049

摘要 回顾了人类深空探测的历史,探讨了人类深空探测的科学动机、技术挑战和可持续发展的路径,并对中国未来深空探测的发展提出了相关建议。

关键词 深空探测;技术挑战;可持续发展路径

在太阳系所有的岩石类天体中(包括行星和行星的卫星),地球的引力场最大。因此,要达到离开地球所需的加速度也是最大的。100多年前,俄罗斯科学家齐奥尔科夫斯基经过计算,提出了第一、第二和第三宇宙速度的概念^[1-2]。其中,第二宇宙速度为 11.2 km/s,即为克服地球引力,将飞行器送入行星际轨道的速度。

1957年10月4日,苏联发射了第1颗人造卫星,标志着人类进入了太空时代。1年多后,他们又研发出了能够加速到第二宇宙速度的大推力火

箭——月球2号及闪电号,并连续发射了多个月球、金星和火星探测器,开辟了人类进入太阳系深空的新纪元。

在人类发射的近200个深空探测器中,绝大部分都是探测月球和火星的。月球是离我们最近的天体,也是最容易到达的天体。然而,因为月球的活动在数十亿年前已经终止,从其科学内容的丰富性来讲,并不十分吸引人。除月球外,离我们最近的天体是金星,但由于金星被浓密的大气覆盖,表面温度超400℃,足以让铅等金属熔化,因此

收稿日期:2020-12-01;修回日期:2021-02-01

引用格式:吴季. 深空探测的现状、展望与建议[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 80-87; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.03.006

使得探测变得十分困难。在苏联实施了一次金星着陆探测以后,就再也没有实施过金星着陆探测。人类发现距离地球比金星稍远的火星更接近地球的地质条件^[3-4],甚至在某些低海拔的山谷中,在其正午时分,表面温度会上升到零度以上。从此,火星就成为了近40年来深空探测最主要的天体目标。迄今为止,人类发射到火星的探测器已经超过30个,有7次成功的着陆以及3次成功的表面巡视。

然而,人类并没有忘记走向更远的深空。特别是在冷战时期的太空争霸中,美苏两国更是努力将自己的探测器送到更高、更远的地方。1977年,美国发射了旅行者1号和旅行者2号,目前这两个探测器都已经飞到了太阳系边缘,超过120个天文单位AU(1 AU=地球到太阳的距离)。地面上的无线电波到达那里并返回,需要1天多的时间。在旅行者1号和旅行者2号飞向太阳系边缘的时候,美国又发射了伽利略号探测器,探测了木星及其卫星。美国和欧洲联合发射了卡西尼-惠更斯号探测器探测了土星及其卫星,并在土卫六上实现了着陆。此外,伽利略探测器和旅行者号探测器还分别飞越探测了天王星、海王星、冥王星,以及多个小行星。特别是最近10年来,人类对太阳系小天体的兴趣逐渐增加,试图发现地球上难以获得的稀有资源,并将其带回地球。

纵观人类开展深空探测的历史及其发展,可以从科学目标、技术挑战以及可持续发展3个方面进行分析和讨论。

1 深空探测的科学问题与目标

深空探测涉及的最大科学问题是太阳系是如何起源和演化的。行星科学的基本原理和理论认为,太阳系形成于一团其他恒星爆炸毁灭后留下的星际物质。经过长时间的引力作用,中心区域经过碰撞出现了恒星核,并由于压力不断增加出现核聚变反应,这就是太阳。周边的物质在围绕太阳旋转的过程中,不断碰撞,根据其距离太阳的远近,在不同的轨道距离上逐渐形成了较大的行星。在某些距离上,未能完全碰撞与合并的小天体形成了火星

和木星之间的小行星带^[3,5-6]。

然而,这个理论框架还有很多细节未能得到解释,例如:太阳系中水和冰是如何分布的?金属类小天体中的金属是哪里来的?这些问题都和太阳系最初的起源过程相关。特别地,还有些十分困扰人类的问题,例如:地球生命的起源是否唯一?在太阳系内还有其他生命吗?哪怕是曾经有过生命,也可以说明地球生命不是唯一,或者是偶然的。在人类科学发展的历史中,每当人类自认为自己在宇宙中是独特或唯一的,最后科学和观测都一而再、再而三地证明这种观点是错误的。宇宙既不是以地球为中心,也不是以太阳为中心,甚至不是以银河系为中心。太阳系也不是宇宙中唯一具有行星系统的恒星,甚至地球也不是宇宙中唯一的、有液态水的宜居行星。

实际上,对太阳系中的每个天体,都有很多科学问题需要解答。例如:火星表面曾经有水吗?如果有,水是如何流失的?木卫二为什么是一个冰覆盖的行星?厚厚的冰层下面的水中有生命吗?木卫一内部是什么?为什么到现在为止它还在剧烈地活动?对太阳系的探测,首先是对行星的探测,回答那些诱人的科学问题,并由此最终理解和回答太阳系的起源和演化这两个最基本的科学问题。在回答这些科学问题的同时,建立并完善太阳系起源的理论框架以及不同类型行星形成过程的理论框架。

当然,人类需要了解的自然奥秘并不局限于行星。对太阳本身以及对太阳喷射出来的粒子在行星际中的运动规律也是研究的重要目标。特别是,太阳为何以及在何时发生大的物质喷发?其喷出的物质到达地球后对人类生存和活动的活动影响如何?对这些问题的研究称为空间天气研究,是目前最紧迫的科学问题之一。我们已经知道太阳有11年的活动周期,在活动周期的高峰年,会经常喷射出大量的物质,当这些物质运动到地球附近,就会影响人造卫星甚至地面技术设施的正常工作。在人类进入太空的这60多年中,我们仅仅经历了不到6个太阳活动周期。而在这有限的几个周期中,就遇到过几次重大的空间天气事件。显然,这6个周期不能代表太阳活动的基本规律。在历史上,目前已经

发现公元 775 年和 1859 年都曾发生过比这近 60 年来经历过的事件更严重的空间天气事件^[7-9]。如果类似的事件在今天发生,人类在空间的大部分基础设施都将被摧毁。如果时间放的更长一点,甚至超过人类从猿到人这几百万年的时间,也许人类自身将被更大的太阳剧烈活动毁灭。研究太阳的活动并做出准确预报,最好的方式是进入深空,抵近太阳进行观测,或在行星际中,去观测那些几乎每个太阳活动周期都有,但是并没有朝向地球喷发来的巨大物质^[10]。

可见,太阳系中有太多的科学问题值得我们探索,开展深空探测不仅仅是为了了解太阳系、增加人类认识自然的知识,还与人类在太阳系中能否长期生存密切相关。这些科学问题,是驱使我们不断地进入深空开展科学探测最主要的动力。

2 深空探测遇到的主要技术挑战

2.1 脱离地球引力

进入深空的第一个技术挑战是将探测器的速度从起飞时的 0 km/s,加速到 11.2 km/s 的第二宇宙速度。从地球起飞要克服地球 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 的引力加速度。因此,要求探测器具备大于 g 的持续加速能力,直到达到第二宇宙速度顺利离开地球的引力场。齐奥尔科夫斯基在 100 年前就给出了计算加速能力的基本公式,即齐奥尔科夫斯基公式^[2]

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_0}{m_1} \quad (1)$$

$$\text{或} \quad m_0 = m_1 e^{\frac{\Delta v}{v_e}} \quad (2)$$

式中, m_0 是火箭加速前的纯质量总和; m_1 是火箭加速后的纯质量总和; v_e 是火箭排气速度(火箭喷射速度,目前性能最好的液氢液氧推进剂,发动机的喷气速度约为 4.3~4.4 km/s); Δv 是火箭加速后速度与加速前速度的差值。

由式(1)可知,想获得的 Δv 越大,在 v_e 能力一定的情况下,需要消耗掉的燃料就越多,即 m_0/m_1 的值就越大,且成自然对数关系,如式(1)。或者说,在发动机和燃料决定的喷气速度 v_e 及需要运送的有效载荷 m_1 一定的情况下,速度增量 Δv 的增加,对

起飞前燃料的增加是 e 指数的关系,如式(2)。这是人类大规模进入深空最大的障碍。迄今为止,人类研制出的最大运载火箭是美国阿波罗计划时期的土星 5 号,起飞总重量达 3000 t,载荷重量为 45 t。中国目前最大的运载火箭长征 5 号的起飞重量是 800 t,飞往月球的载荷重量是 8.2 t。

2.2 行星际轨道飞行

探测器被加速到第二宇宙速度,就可以脱离地球引力进入行星际。但是,对不同的探测目的地,需要对行星际的飞行轨道进行优化设计。设计的目的一般有两个:一是做到燃料最省,二个是做到尽快到达。为达到这两个目的,需要利用行星际中两个特殊的引力效应。一个是可以利用各天体之间的引力平衡点,探测器在该点受到的引力作用最小^[11]。在此处做变轨,需要的 Δv 达到最小值,从而可以做到最节省燃料。但是为了寻找该点,有时需要增加飞行路径,因为所有的天体围绕太阳旋转的周期不同,因此这些引力平衡点也在随时间变化。这就给轨道设计带来了挑战和创新的机会。另一个可以利用的是特殊的引力效应,即借助天体的引力来加速。特别是太阳系中八大行星,其引力场都可以用来借力。具体的做法是令探测器飞向需要借力的行星,并使其贴近行星飞过。在飞向行星的时候,行星引力将对探测器加速,在其达到与行星距离最近时速度达到最大。探测器会以这个速度飞离行星,尽管行星的引力会使其速度再减下来,但是剩余的速度仍然会高于其在进入行星引力场被加速前的速度。优化设计轨道和在地球上起飞时的发射窗口,可以在飞入太阳系深空的旅途中,经过几次这样的加速,使探测器达到第三宇宙速度,并飞出太阳系。总之,深空探测器在太阳系中飞行的轨道,是受行星位置和其引力场影响的。因此,需要事先优化设计发射窗口和轨道。

2.3 地外天体上着陆和起飞

探测器到达地外天体,比较容易的是进入其引力场,进行环绕探测和遥感成像探测。但是,如果需要着陆探测,甚至在其表面起飞并将样品带回地球,目前人类所掌握的技术并不成熟。

由于地外天体各不相同,分为无大气(如月

球)、有稀薄大气(如火星)和有稠密大气(如金星)3种。人类在地球上着陆和返回的经验,几乎无法在其他天体上直接应用,在地外天体上着陆和起飞非常困难。到目前为止,已经成功在火星上实施着陆的国家只有美国,俄罗斯和欧洲航天机构都只经历过失败。中国的天问1号如果第一次就能够在火星上成功着陆,将是人类航天史上的一次突破。

在没有大气的天体上着陆,无法使用降落伞减速,必须使用反推火箭。这将消耗较多的燃料,增加从地球上起飞时的重量。

从地外天体上起飞,将样品返回地球,将耗费更多的燃料。目前,人类除了从月球和小行星上成功取回了样品外,还没有从火星上取回过样品。

与从行星及其卫星等较大天体着陆与起飞不同,在小天体上着陆与起飞是完全不同的技术。首先,由于小天体引力场非常小,甚至可以忽略,与其说在其上着陆还不如说是与其轨道的交汇。因为无法借助其自身引力的力量,所以需要拥有非常精准的轨道设计和自动控制的能力。其次,着陆时可以说是某种程度的碰撞,如果无法将探测器在相互接触的一刹那相互锚定,探测器将在反作用力的作用下很快弹跳起来。例如,欧洲空间局的菲莱探测器在彗星67p上着陆时就因为锚定装置失效,在其表面跳了好几下,最后落到岩石夹缝中,因无法获得太阳光照补充能源而失败了。一旦着陆成功,从其表面起飞将会非常容易,无需耗费很多燃料就可飞离。

2.4 远距离通信

无线电波在行星际中传播的速度是30万km/s。如果探测器飞离地球,进入太阳系深空,远距离通信将成为最主要的技术困难之一。

首先,通信距离越远,无线电波经过长距离传输,能量将会依据球面的面积与其半径的关系,也即与通信距离的平方成反比扩散和衰减。即使增大发射天线和接收的口面将天线的波束变窄,也无法补偿这个称为自由空间损耗的能量衰减,更何况天线口面的增大是有物理限制的。目前,地面上最大口面的天线是中国贵州的500 m口径球面射电天文望远镜(FAST)。美国航空航天局(NASA)深空测控网的天线口径仅有70 m。探测器上的天线

口径由于火箭发射时整流罩的物理约束,即使在发射后再展开,也只能到米级,这就限制了远距离通信的信号带宽和数据率。为了保证接收电平在信道噪声之上,距离越远信道带宽就需要设计的越窄,因此,能够传输的数据率就越低。激光星际通信一定是未来的发展方向。目前激光星际通信技术瓶颈在于灵敏度极高的单光子接收技术还需要制冷,而制冷设备的重量和制冷工质的消耗又成为瓶颈。

其次,远距离通信带来的时间延迟,使得探测器必须具备自主判断和运行的能力,即高度智能化。以地球和火星之间的通信为例,其单程信号延迟根据地火距离将达5~20 min。如果探测器发回测量参数,再由地面判断并发出如何执行的下一步命令,需要等待10~40 min的时间。这在实际测控中往往是不可接受的,因此,探测器必须具备自主运行的能力。

2.5 核能源的利用

首先,核能源的火箭发动机可以在行星际飞行中对探测器持续加速,大大缩短飞行时间。利用惯性和巧妙的借力轨道设计,探测器从地球出发飞到太阳系边缘,需要大约30年的时间。而采用持续加速的核能源,可以将飞行时间缩短到10年,甚至更短。

其次,探测器在向外行星际飞行时,将逐渐远离太阳。利用太阳能发电的太阳能电池板的面积将逐渐增大。比如,欧洲空间局的罗塞塔探测器最远飞到了木星轨道附近,由于没有采用核能源,维持其基本工作的太阳能帆板长度达到60 m。因此,研发小型核能发电机(而不仅仅是提供热量)是实施外行星际探测的必备技术。

2.6 表面资源利用

变轨、着陆、起飞都需要很多能源,即燃料的支持。最好的办法不是从地球上携带这些能源,而是在行星际中就地获取能源。这项技术将是未来人类能否更有效和大范围开发利用太阳系深空的必备技术。到目前为止,除了太阳能以外,人类还没有实现对任何太空资源的就地利用。然而,从太阳能转化为电力的能力密度比较低,目前无法替代化

石能源,完成着陆、起飞以及大机动、复杂的变轨和加速等高耗能的技术动作。

3 可持续发展

自1959年至今,人类进入太阳系深空已经超过60年,除了阿波罗计划6次成功将人类带到月球表面并安全返回以外,其他任务都是无人探测计划。距离阿波罗11号第一次登上月球已经过去50多年,为什么人类探索和开发太阳系的步伐如此之慢呢?除了上文提到的技术困难以外,最主要的是驱动经费投入的需求问题没有从根本上得到解决。

人类开展深空探测和开发利用的动机和需求主要来自3个方面。

1) 政治需求。

阿波罗计划是典型的政治任务。在冷战时期,发展太空技术成为美苏两个超级大国展示制度和科技优势的主要战场。苏联在太空领域连续取得多个第一的形势下,美国总统肯尼迪毅然决定实施阿波罗计划。当然,这个具有鲜明政治色彩的计划带动了美国科技的发展,对不止一代的美国人产生了教育和激励作用。

中国的嫦娥计划与此类似,在中华民族复兴的道路上,必须做出指标性质的科技成果来体现中华民族的复兴,实施月球探测计划就是其手段之一。在中国具备了绕月、落月等探测月球的技术能力之后,获得科学成果而不是重复实施上述工程任务,就变得更为重要了。

实施任何深空领域的探测任务,只要是人类第一次,甚至是某个国家的第一次,基本是具有很强政治性质的任务。然而,政治任务是不可持续的,就像阿波罗计划成功之后,美国再也没有哪一届政府愿意投入如此多的经费来重复阿波罗时代的辉煌。

2) 科学探索的需求。

科学探索需要回答科学问题,突破科学前沿。而科学前沿的突破是永无止境的。因此,以科学探索目标驱动的深空探测任务是可持续的。但是,由于科学探索任务是政府出资的项目,研发投入取决于政府的财政能力大小和对基础科学发展的支持

力度。

通常政府对基础科学发展的投入可以分配到几个方面。一是无需大量经费投入的自由探索性的基础科学研究,这部分经费往往投向大学或人才。二是投向大科学装置的建设,例如加速器、大型天文望远镜以及其他国家实验室需要的重大科学装置等。再有,就是投向空间科学卫星和深空探测任务。回顾近30年来的诺贝尔物理学奖,其中越来越多的奖项颁发给了地面的大科学装置以及空间科学卫星产出的成果。

空间科学卫星与深空探测任务又稍有不同。空间科学卫星是比较单纯的基础科学研究任务。因为其探索性质极强,因而从来不会重复,具有不断提出新目标、不断突破前沿的性质,具备自我可持续发展的性质。而深空探测任务,因为往往需要不断到达新的目的地,因此同时具有政治和科学两重性质。对政府而言,如果在遴选时,能同时考虑其政治显著性和科学发现性,就能收到双重的回报,同时也就具有了自我的可持续性。太阳系中没有探索过的目的地太多了,完全不需要重复别人的路。不断选择新的目的地,取得新的科学发现,就可以实现可持续的发展。

3) 市场需求。

除了政府投入,商业性质的投入在深空探测领域也开始兴起。这主要是在太阳系资源利用的引导之下。

应该说,地球是太阳系之中独一无二的行星。地球拥有元素周期表中从氢到重金属所有元素,但是并不是所有的金属和资源都那么容易开采或具有足够的数量供给人类未来的应用需求。

然而,到太阳系中的天体中寻找资源也不是一件容易的事情。首先需要建立太阳系内小行星,最好是近地小行星的光谱数据库,并分析寻找可能携带稀有资源的目标。但是,原子量较大的元素,如金、铂等,都是通过高温、高压才能形成,它们或者是太阳系形成之前来自其他恒星爆炸之后留下的尘埃,或者是在太阳系形成之初的大碰撞时期,来自较大行星上碰撞出的碎片,这决定了他们的数量一定是少之又少的。而且,从地球上发射探测器

到达那里,再把它们带回地球需要支付的费用也很多。因此,将太空稀有资源带回地球利用的经济可行性是始终存疑的。

目前,越来越多的人意识到,太阳系资源利用的方向,应该是就地利用。因为无论什么资源,只要是需要在太空使用的,就地生产、就地利用,一定比从地球上带去要经济得多。因此,太空资源的地利用,包括水的提取、燃料的提取、太阳能电池板的地制造、金属材料的冶炼和锻造以及利用就地材料的3D打印等都是非常有经济前景的业务方向。这些方向一旦找到市场,就可进入可持续发展的轨道。此外,对这些资源就地利用的最大需求,来自于本身就具有可持续发展性质的太空旅游^[11]。

4 对近期及未来的展望

中国正在步入快速发展的阶段。到2035年,中国的发展目标是进入世界创新型国家前列。空间科技是一个大国科技创新能力的重要指标。深空探测可以将人类的脚步移出地球,迈向新的天体,具有非常强的政治象征意义和对民众的激励教育作用,可以产生中华民族复兴的标志性科技成果。

在实现政治目标的同时,深空探测必须伴随着新的科学发现,为人类认识自然、认识太阳系和我们自己提供新的知识。这是深空探测任务可持续发展的根本。

以上两个驱动力如果能双轮驱动,就可以使国家在其中投入的产出倍增。相反,如果只顾及取得第一、占领高地,而忽略科学发现和产出,就将失去可持续发展的动力;同样,如果只顾及科学产出,没有发挥出深空探测的政治性和显著性,就浪费了其应有的政治资源。因此,两者需要齐头并进。

此外,记要将眼光放得更加长远。为未来的发展打好基础做好铺垫,应该发挥社会民间资本的作用,在商业航天领域积极鼓励与太阳系资源的开发和利用相关的技术的发展,甚至是商业性质的发射任务。为未来更有效和更方便地进入太阳系深空做好技术储备,并培育市场,比如月球旅游甚至火

星旅游。

在技术方面,各航天大国都在研制更大推力的火箭以及可回收利用的火箭^[12]。进入空间的成本将不断降低,进入太阳系深空的能力也将不断提升。伴随着“嫦娥五号”样品成功返回以及日本和美国小行星上采样任务的成功,人类下一个目标将是火星样品的返回。

然而,与从其他天体上返回土壤或样品不同,火星的样品返回必须注意其对地球反向污染的问题。火星是目前人类探测过的行星中唯一有可能存在生命的地外天体。特别地,如果样品来自于火星地表以下有液态水的地方,存在地外生命的可能性更大。一旦这些样品带回地球,如果不加防护,或者防护出现纰漏,例如探测器返回式坠入大洋,样品中的地外生命、细胞进入地球这样温度与湿度都非常适于生命生存的环境,该生命将会出现快速繁殖并有可能侵入人类体内。这样的科幻电影很多,但都是有一定科学依据的。因此,需要特别加以防范。

正向的污染也是一个必须注意的问题。如果将地球上的生命(细胞、病毒等)无意中带到火星,并在火星上繁殖,这对人类的科学探测将带来干扰,无法分辨今后在那里发现的生命现象是否真正源自当地。如果后续人类第一次发现的“地外生命”其实就是人类数年前带到那里去的,将会是一个巨大的乌龙。

2020年,美国火星科学实验室毅力号探测器与中国的“天问一号”前后发射升空。毅力号携带火星地表钻探设备,很有可能实现人类首次发现地外生命。此外,欧洲空间局和俄罗斯航天局联合实施的火星生命探测计划(ExoMars)将于2022年的发射窗口升空,也搭载了火星地面钻探设备。可见,在2023年之前,人类有可能实现对地球以外生命的首次发现。

此外,随着中国“嫦娥五号”的成功实施,国际上政府月球探测计划的重点也将逐渐转入对进一步发现水冰和水合物的探测,以备未来进一步开发利用。美国则更加关注将此目标与实现载人重返月球相结合,并预计在2025—2028年实现。

商业投资的航天任务将主要集中在月球和小行星资源探索和利用方面。在近期,主要的突破可能发生在月球资源的就地开发,包括从月壤里直接提取火箭燃料和就地生产太阳能电池板的计划。

在深空通信技术方面,由于时延是无法克服的障碍,因此将主要努力集中在提高传输速率方面。具体的技术是将载波的频率提高至毫米波,甚至到激光水平。激光在深空通信方面有很大优势,但是在实际应用之前,将首先突破单光子探测所需的制冷问题,其次是如何在有云的气象条件下,实现激光落地,或者通过同步轨道微波通信卫星中继后再落地。

可以预见,当重型火箭和重复使用火箭技术逐渐走入应用以及有 AI 辅助的自动导航与控制技术逐渐成熟,这些技术可以辅助探测器可靠地在地球外天体着陆和起飞。当就地能源提取和加注技术成熟,以及深空激光宽带通信走向实用之后,人类进入和探测太阳系深空的活动将快速发展。这个高潮可能出现在 2030 年前后。

5 对中国深空探测未来发展的建议

通过回顾人类探索太阳系深空的历史,从深空探测的需求、技术和可持续发展 3 个方面分析了目前的现状和未来的展望。据此,建议中国相关部门在规划未来深空探测任务和制定政策时,考虑如下 3 点建议。

1) 太阳系深空有很多未解的重大科学问题以及许多人类未到达过的天体,深空探测的任务目标应将政治目标和科学目标同等对待。政治目标需要注重工程上的显著性,即要体现创新和技术突破,以达到增强中国人、特别是青年一代的自信心。科学目标应该瞄准重大发现,破解和回答重大科学问题。如果只强调突出工程显著性的政治目标,则会失去可持续发展的动力。美国的阿波罗计划就是一个典型的例子。而如果只强调科学目标,虽然由于科学前沿不断推进,可以持续发展,但是浪费了深空探测在政治上的积极作用,包括对工程技术能力的带动以及对国家和民族自信的更广泛和

更有效的激励。因此,只有将两者紧密的结合起来,才能既发挥了任务的政治优势,又使其能够可持续发展。

2) 必须重视几个深空探测关键技术的研发和投入,包括:大推力运载火箭、回收及可重复使用技术的研发,尽快实现低成本进入深空的能力;地球外天体的进入、着陆与起飞技术的研发,使其能够在不同环境的天体上着陆和起飞,并将样品返回地球;行星际激光通信技术,涉及高温超导单光子探测器、飞秒激光功率放大器等多项技术,提升深空远距离通信的数据带宽和能力;核能源技术也需重视,不能在需要时出现卡脖子的问题。这些技术需要尽早布局研发,尽快进入应用,提升中国在深空探测领域的能力。

3) 为商业性质的航天任务进入深空制定相关政策,鼓励商业航天企业开展深空探测,特别是以月球资源就地利用为目标的商业航天任务,并用政府深空任务作为他们的主要用户,建立和形成稳定的市场需求。

可以预见,在未来 10~20 年,深空探测将成为国际上航天大国竞相角逐的一个重要战场。中国计划在 2035 年进入创新型国家前列,在已经具备优势的航天领域更应该成为领先的国家。因此,从现在开始谋划好未来是十分必要的。

参考文献(References)

- [1] 宋健. 航天纵横: 航天对基础科学的拉动[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [2] 李大耀. 开启航天大门的金钥匙: 齐奥尔科夫斯基公式[M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [3] McFadden L A, Weissman P R, Johnson T V. 太阳系百科全书[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] Barlow N G. 火星——关于其内部、表面和大气的引论[M]. 吴季, 赵华, 等译. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] Blanc M, Herczeg G J, Sterken V, et al. From disk to planets[M]. Berlin: Springer, 2018.
- [6] Encrenaz T, Bibring J P, Blanc M, et al. The solar system [M]. 3rd edition. Berlin: Springer, 2004.
- [7] Arlt R, Weiss N. Solar activity in the past and the chaotic behaviour of the dynamo[J]. Space Science Reviews,

- 2014, 186(1/4): 525–533.
- [8] Zhou D Z, Wang C, Zhang B Q, et al, Super solar particle event around AD775 was found[J]. Chinese Science Bulletin, 2014(22): 2736–2742.
- [9] Clauer C R, Siscoe G. The great historical geomagnetic storm of 1859: A modern look[J]. Advances in Space Research, 2006, 38(2): 117–118.
- [10] Liu Y D, Luhmann J G, Kajdi P, et al. Observations of an extreme storm in interplanetary space caused by successive coronal mass ejections[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3481.
- [11] 吴季. 月球旅店[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [12] Huntress W. The next steps in exploring deep space[M]. New Delhi: University Press, 2007.

Deep space exploration: Status, expectation and suggestion

WU Ji^{1,2}

1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101499, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract 2020 was an important year of deep space exploration for China, during which the first Chinese independent Mars mission Tianwen-1 and the lunar sample return mission Chang'E-5 were successfully launched. Tianwen-1 has combined three important functions: orbiter, lander and rover into one. Chang'E-5 is the first mission for China to return samples from other celestial body. On 17 December, it brought back 1.731 kg lunar sample successfully. 2020 was also a launching window for Mars, which occurs every 26 months. In that window two other missions were also launched, i.e. the UAE's Hope Mars orbiter and the US's Mars Laboratory Perseverance. When deep space exploration became a focus of world attention, it is necessary to review the history and plan the future. This paper briefly reviews the history of human deep space exploration, discusses the scientific motivation and technical challenges. In particular, it discusses the sustainability of deep space exploration, and puts forward some relevant suggestions for the future development of China's deep space exploration.

Keywords deep space exploration; technical challenges; sustainable development path ●



(责任编辑 王丽娜)