

5-20-2024

Technology innovation is the key to future space science missions

Ji WU

National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China, wuji@nssc.ac.cn

Recommended Citation

WU, Ji (2024) "Technology innovation is the key to future space science missions," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 5, Article 11.

DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240409007>

Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss5/11>

This High Ground of Science and Innovation is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



Technology innovation is the key to future space science missions

Abstract

Space science is one of the important space activities of China together with space technology and space application. Although it is a space program aimed at scientific discovery and breakthrough, with the development of technology and the increasing number of achievements received in the past, space science missions require more and more technological innovation to achieve their goals. This study first reviews the development trend of space science missions since their birth, then analyzes the cultivation process of space science mission proposals with technological innovation and the responsibilities of the chief scientist leading such tasks, and finally analyzes and proposes several important fields of technological innovation related to future space science missions. Analysis shows that with more and more competition in science and technology, the decisive factor to get breakthrough and sustainable development, will exist in whether the mission has unique innovative approach in technology that can help to obtain new data, or whether the mission can still reach a unique site in the solar system, creating their own discovery the first time.

Keywords

space science, innovative development, scientific payloads, mission selection and management

引用格式: 吴季. 技术创新是未来空间科学发展的关键因素. 中国科学院院刊, 2024, 39(5): 891-898, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240409007.
Wu J. Technology innovation is the key to future space science missions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(5): 891-898, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240409007. (in Chinese)

技术创新是未来空间科学发展的 关键因素

吴季

中国科学院国家空间科学中心 北京 100190

摘要 空间科学是我国航天活动中的重要组成部分。尽管其是以科学发现为任务目标的航天计划，但是随着技术的发展和所到即所得类型的任务越来越少，空间科学任务对实现其目标的技术创新度的要求也越来越高。文章首先回顾了自空间科学诞生以来科学研究范式的发展趋势，然后分析了具有技术创新的空间科学任务的培育过程，以及领导这类任务的首席科学家的职责，最后分析和讨论了和空间科学相关的几个重要的技术创新领域。分析表明，在科技竞争越来越激烈的当下，未来空间科学任务能否取得科学突破并得到可持续发展的最为关键性的因素，将存在于任务所采用的获取数据的技术手段是否具有独特创新性，以及能否突破已有的探测地点的限制，创造出自己的第1次。

关键词 空间科学，创新发展，科学载荷，任务遴选和管理

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240409007

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240409007

1 空间科学发展的重要趋势

空间科学是依托空间飞行器平台，研究日地空间、行星际空间及至整个宇宙空间中的物理、天文、化学及生命等自然现象及其规律的科学。其所依托的空间飞行器，从早期的探空气球和探空火箭，到现在

已经普遍采用人造地球卫星、深空探测器和各类载人飞行平台。

人类自1957年发射第一颗人造卫星以来，已经发射了数百颗科学卫星和深空探测器，极大地推进了人类对宇宙起源和演化、太阳系及其各天体、地球空间和地球系统，以及物质和生命在地球以外运动规律的

资助项目：中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项（GHJ-ZLZX-2022-17）

修改稿收到日期：2024年5月9日

认识,使人类对自然世界的认识发生了巨大的变化。很难想象,如果没有人造卫星和之后的空间科学研究,人类对宇宙、地球和生命的认识可能还停留在很低的水平,爱因斯坦等伟大科学家的很多理论和设想,还只是停留在纸上,无法得到实验的验证。

回顾1957年以来空间科学的发展,经历了2个明显不同的发展阶段。其大致可分为1958—1990年的大发现阶段,1990年至今的技术创新引领的研究阶段。

大发现阶段(1958—1990年)。1957年苏联发射第一颗人造卫星之后,美国在1958年1月也发射了其第一颗人造卫星,并发现了地球辐射带(被地球磁场限制在一定区域中的高能电子和质子)。其后美国、苏联这两个航天技术先进国家,在太空竞赛的大背景下,又不断做出了很多新的科学发现,包括对地球、月球、金星、火星、太阳本身的认识,以及通过X射线望远镜对宇宙深处的观测,获得了银河系的大量信息及河外其他星系的信息,也包括利用机器人和载人空间活动对月球的初步探测,以及对带回来的月球样品的研究。然而这些,大部分都是到达即发现的科学突破。也就是说,航天飞行器所达到的位置,为科学家提供了大量直接的新信息。例如:对地球辐射带、行星际太阳风中电离粒子的原位探测,在地球轨道上由于居高临下的优势,对地球进行更宏观的系统性的观测(如对完整的台风和其移动过程的观测等);到达月球表面去研究月球等。这有点像在地球上传统的科学探险,必须首先要到达要探险的地点,才能获得新的科学认知。我们把这一阶段称为大发现阶段。在这个阶段,实现科学的突破比较容易,只要把地面上成熟的探测器带到太空中,就可以获得新的发现。

技术创新引导的研究阶段(1990年至今)。由于美国在20世纪60—70年代初实施的“阿波罗计划”耗资巨大,政治影响远大于其科学影响,促使美国科学界开始积极地倡导发射能够有更多科学产出的计

划,推动了之后大量科学卫星的发射。另外,1975年成立的欧洲航天局(ESA)也从一开始就把自己的定位很大程度上放在了空间科学上。这些都促使了1990年以后的空间科学计划更强调其科学探测仪器的先进性。也就是说,即使同样在地球轨道上飞行,通过提升探测仪器的灵敏度和空间分辨率等探测方案的技术创新,来获得新的科学发现和研究成果。具有代表性的科学计划包括美国的哈勃太空望远镜(HST)、斯皮策太空望远镜(SST)、“宇宙背景探测器”(COBE)、“开普勒”(Kepler),以及通过精确测量在同轨道上飞行的前后2颗卫星之间的距离变化反演地球引力场(包括地下水变化)的“引力重建和气候实验计划”(GRACE)等。在欧洲空间局,有通过多点探测方案获取地球空间环境信息的“星簇计划”(Cluster)等。当然在这一时期,到达即发现的任务仍然存在,但是必须选择新的目的地,例如欧洲航天局的“尤利西斯计划”(Ulysses),飞离了黄道面进入到了太阳极轨,以及美国航空航天局(NASA)的帕克太阳探测器(Parker Solar Probe)和欧洲航天局的太阳轨道飞行器(Solar Orbiter)对太阳进行了抵近探测等^[1,2]。

技术创新引导的研究阶段一直延续至今,该阶段最重要的特点是探测技术的不断提升。这是因为空间科学需要新的数据、灵敏度更高的数据和空间分辨率更高的数据,需要在探测技术上不断地提升。这里通常有2个提升途径:一个是延续原来的技术路线,通过材料、工艺的提升,甚至望远镜口径的增大来提高空间分辨率和探测灵敏度;另外一条路径,更像是从“0”到“1”的创新,如采用创新的探测方案——多星编队式的探测理论、干涉式的成像理论等。但无论哪种路径,只要能提高分辨率、灵敏度,就能够获得新的数据,有希望获得新的科学突破。

中国的空间科学起步较晚。2003年第一个真正意义上的科学卫星——“地球空间双星探测计划”的

“探测一号”发射。它与之后发射的“探测二号”组成对地球空间的两点探测，同时双星计划又和欧洲航天局4颗星组成的“星簇计划”(Cluster)联合，开展了对地球空间的六点探测。这是一个创新的多点探测的组合^[3]。2011年中国科学院实施空间科学战略性先导科技专项，其中“悟空号”“墨子号”和“慧眼号”，也都是采用了创新的技术方案^[4]。

由此可见，自第1颗人造地球卫星发射半个多世纪以来，空间科学的研究范式已经从比较简单和显而易见的、所到即所得的大发现阶段，进入到了一个必须依靠创新的技术和方案才能获得新的数据的研究阶段。即使是所到即所得式的任务，那些比较容易到达的目的地也都被前人所覆盖，必须创新性的思考更加具有挑战意义的新的目的地，比如在月球背面着陆，才能做出新的科学发现。

2 具有技术创新的科学任务从哪里来？

由于未来空间科学任务的产出越来越依赖于执行该任务的探测方案、科学载荷的创新度，因此对提出任务的首席科学家在技术领域的创新思想和能力的要求就变得越来越

高。参考国外遴选空间科学任务的经验，所有成功的空间科学任务的起点，都来自早期在任务遴选中对探测方案和科学载荷创新度的要求。所谓早期遴选是指在任务思想刚刚形成的预研阶段。在该阶段，项目管理机构通常不是根据项目的成熟度来遴选，而是根据项目的创新性来遴选，哪怕可行性还达不到100%，只要其思想不违反基本科学原理，哪怕技术上还并不成熟，都有可能获得支持。而提出该项目的首席科学家，在这个早期的预研阶段，也许并不那么出名，但是一旦他们的建议得到支持，就会倾力投入，通过桌面实验、环境实验甚至最后阶段的搭载实验，验证他们的创新想法，最终走到工程立项阶段，成为一项真正的空间科学任务的首席科学家^[5]。

然而，沿用传统技术，并通过更大规模的任务获得新观测数据的空间科学任务，更需要任务管理单位采用建制化的组织来领导。这种情况适用于更大的物理孔径、更大的常规卫星组成的星座规模、更多的常规传感器组合的任务等。这类任务需要任务管理单位任命更具有工程经验的技术科学家或工程师来负责研制，同时任命一位可以充分利用这类任务数据的首席科学家来负责数据的处理、分析和科学应用。这类任务的首席科学家可能在任务进入工程阶段才予以任命，与前面谈到的技术创新类空间科学任务的首席科学家从预研开始就负责有所不同。但是他仍然需要具备充分的技术方面的知识，从而对观测轨道的选择、主要科学载荷技术指标的确定、辅助科学载荷的配置，以及对观测规划提出具体要求。

通常，在我们的高等教育体系中，往往对理科和工程类学科教育进行适度的分离，因此，很多理科的学生缺少工程技术方面的知识。当然个别以观测为主要数据来源的学科，如天文学，也会有观测技术方面的课程。尽管如此，在观测技术方面提出创新思想仍然是较高的要求。此外，对工程类学科的学生，课程配置往往并不提供科学前沿的课程，如果学生在学习阶段不思考、不关注科学前沿在哪里、有哪些科学问题需要通过更创新的技术来突破？他们往往也不会成为未来的首席科学家，或与首席科学家并肩作战的载荷工程师。

总之，未来空间科学的发展已经与技术创新紧密联系在一起。没有新思路、新方案、新载荷甚至新探测原理的突破，几乎无法实现新的科学前沿的突破。而这些技术创新的来源，只能有2个：一个是具有深厚技术背景与技术创新能力的科学家，另一个有可能就是关注科学前沿并思考如何通过技术创新实现突破的工程师。

3 首席科学家的技术创新能力

我们传统认识中的科学家，其科学产出往往以论文的形式为主。然而，在以观测和实验为主要研究手段的科学领域，越来越多的科学家的主要工作开始偏向设计新的实验方法和路径，以期获得新的数据。这是因为，随着现代科技的迅速发展，常规的实验方法已经无法实现科学前沿的突破，或者说低垂的“果实”已经剩得不多。如果想获得新的科学突破，必须创新实验和观测方法，突破原有实验的限制，获取新的实验数据，才能实现科学发现。

空间科学是一个典型的、以实验或观测数据为主要手段的科学领域。如前所述，在空间科学发展的初期，大量的科学发现是依靠所到即所得，也就是只要上了飞行器平台进入了太空，或者飞行器第一次到达了以前人类从来没有到达过的环境，也包括进入到微重力的环境中，任何探测器或观测仪器所获得的数据，都是科学发现。但是，通过几十年的发展，空间科学的重大突破越来越依靠科学仪器的创新。为了确保这些创新技术的实施，各国在科学任务中越来越重视首席科学家所具备的技术创新能力。这样的首席科学家往往既是任务的提出者，又是其主要探测或观测方案的设计者。在科学任务的研制过程中，首席科学家的职责需要跟踪研制过程，确保其提出的设计指标能够满足科学探测任务的需求。在研制中出现不可克服的困难时，首席科学家还需要做出决定，是否终止研制或推迟发射。在任务发射入轨后，首席科学家负责科学探测或观测仪器的开机和测试、标定和定标，以及后续科学数据的应用，直至科学发现。在设计的任务周期结束后，首席科学家还需决定任务是否需要延寿继续运行，直至最后任务结束后的科学产出的评估和总结。可见在以技术创新引领的研究阶段，首席科学家需要具备很高的技术素养和技术创新能力^[6]。

然而在现实中，按照以理论产出为主培养出来的

科学家，并不是都能够在技术领域做出创新，或即使能够提出创新的设计思路，也往往无法关注到那些工程设计和实施中的细节，而确保其想法能够落实到研制中，并确保研制成功。因此，就出现了站在首席科学家背后的那些工程师们，特别是被称为科学载荷的主任设计师的工程师。这个角色就像是军队中的军长、公司中的首席执行官（CEO）。而首席科学家则是政委和董事长，政委负责指方向，军长负责打胜仗；董事长负责定战略，CEO负责具体实施。在具体任务中，这两个角色所承担的职责的分工，根据两个人的能力和特长，可以相互补充。但是，比较理想的情况仍然是首席科学家应该具备更多的技术素养，并在任务的设计过程中能够承担更多的职责，而载荷主任设计师只承担研制中的具体职责。这样的配置比较容易确保首席科学家和工程师之间的沟通和任务的平稳实施，减少矛盾。成功的例子如“阿尔法磁谱仪计划”（AMS）中的首席科学家丁肇中先生、美国的大部分探索（Explore）类计划中的课题负责人（PI），以及中国的暗物质粒子探测卫星“悟空号”的首席科学家常进院士和“墨子号”量子科学实验卫星的首席科学家潘建伟院士等。

4 可预见的部分重大技术创新领域

为了说明技术创新的可行性和重要意义，这里以7个比较重要的技术领域为例，将它们各自的前沿技术列出和突破点举例说明。囿于篇幅，还不能包括这些领域中的所有技术前沿，也还没有覆盖其他具有更多前沿创新技术的领域。

4.1 光学望远镜的孔径极限

众所周知，光学望远镜的物理孔径大小决定了其空间分辨率的高低，越大的孔径对应的空间分辨率越高。而更高的空间分辨率，可以为天文学家提供更精确的对天体的观测和新的发现，是研究宇宙起源与演化、暗物质和暗能量、系外行星等多个重大前沿科学

问题的重要手段。

目前在地面上正在建造的最大的天文望远镜是欧洲极大口径望远镜（E-ELT）^[7]，其物理口径为39米。在地面上建造大口径望远镜的难度不仅在于镜面精度的保持，更在于使用中如何消除大气对其产生的不可避免的扰动。因此，更大口径的望远镜需要在太空中建造，从而在没有大气扰动的环境中实现更高的分辨率。当然，在太空中建造大口径望远镜会引入其他困难，如克服空间环境和在太空中组装的影响。目前在太空中最大口径的天文望远镜是由美国NASA为主建造的、2021年底发射的直径6.5米的詹姆斯·韦伯太空望远镜（JWST），其空间分辨率与即将落成的E-ELT相比哪个更好还需进一步验证。但可以确定的是，地面望远镜因大气阻隔无法在可见光以外的频段进行观测，且即使在可见光频段，观测地点的选择也非常重要，地球上最干燥和最好的观测地点在一年中有效的观测时间也是有限的。还有地面望远镜会受到所在地理位置的限制，无法看到完整的天区。

以上是传统技术目前的极限，要想突破JWST 6.5米的口径，需要人类投入更多的经费和更长的研制时间。中国载人航天工程正在研制的2米口径的巡天望远镜，采取了一些不同的技术突破，包括比哈勃太空望远镜更大的视场及更多的观测频段，力争在一些分项领域里获得科学前沿的突破。

与此同时，一种新兴的突破性技术正在兴起，这就是干涉式成像技术。该技术利用不同的小口径的望远镜观测信号两两之间的相干信号（包含相位信息的乘积）获得目标在傅里叶域中的采样点，并通过算法再反演到目标空间域中的图像。其小口径望远镜之间的最大物理距离（称为干涉基线），决定了最终图像的空间分辨率。然而，由于多个小口径望远镜的所有接收面积加起来的总面积，仍不如一个实口径的望远镜，其探测灵敏度将受到损失。欧洲南方天文台在智利由4个8米口径的地面望远镜（VLT）组成的干涉阵

列已经成功获得了干涉图像^[8]。

4.2 光学望远镜的视场

除了增大口径，包括干涉式综合口径带来的分辨率优势以外，成像视场范围的增大可以提高巡天的效率。为了极大地提高视场范围，传统技术的提升就是使用多个小视场的望远镜来增大视场覆盖，如欧洲空间局的“柏拉图计划”（PLATO）^[2]。此外，在X射线波段出现了突破性的技术——类似于龙虾眼的多孔径宽视场成像技术，极大地突破了巡天视场的范围，如我国不久前发射的“爱因斯坦探针计划”（EP）^[9]。

4.3 低频射电望远镜的口径极限

在低频射电波段，由于受到电离层的阻隔，该波段也是望远镜必须到太空才能开展观测的天文观测波段。由于低频射电的波长比可见光长9—10个数量级，要想得到和光学波段相当的空间分辨率，其物理口径的规模是可想而知且不可能实现。但如果采用上面所说的干涉式成像方法，其可行性则提高了很多。2019年获得诺贝尔物理学奖的第一幅黑洞的射电频段照片，就是采用这个干涉式成像技术，只不过它的观测频段是毫米波段，在地球上观测仍然是可行的。

在更低的射电频段，大气层中的电离部分阻隔了30 MHz以下的电磁波。在地球表面无法有效观测到来自宇宙低于30 MHz频率以下的信号。而这个频段的信号会带来宇宙早期由氢原子中的电子跃迁产生的1.4 GHz的辐射，特别是在出现恒星的第一缕光之前，当宇宙中仅充满着中性氢原子的时候——称为宇宙的黑暗时代，这是宇宙中唯一可以测量的频率。但这个频率在现在的宇宙中已经通过红移退减到30 MHz以下。因此要想了解宇宙早期黑暗时代的信号，就需要到太空中去观测^[10]。

在这个领域，一种利用月球轨道开展小卫星的编队飞行，实现利用干涉式综合口径技术的成像计划就颇为吸引人，有望成为该技术在太空中的重大突破，实现物理口径达到100千米甚至更长的低频射电观测。

由于计划是在月球轨道上飞行，当编队飞到月球背面时进行观测，可以避免来自地球自然（雷电）和人为的电磁干扰，获得来自宇宙深空的低频射电信息。

4.4 高精度的天体测量

精确测量遥远天体之间的距离，被称为是高精度的天体测量。同样，如果在地面上开展天体测量，大气层的湍流和扰动，极大地限制了观测精度。因此，在太空开展高精度的天体测量也是一个技术前沿。除了为宇宙绘制精密的图像以外，高精度天体测量还有一个新应用方向——发现系外行星。其基本原理是利用行星围绕恒星转动时，由于引力作用对其位置产生的扰动。如果能对这颗恒星位置的变化规律进行长期观测，就可以获得围绕其旋转的所有行星的信息，包括它们完整的轨道信息和质量信息。欧洲空间局发射的“盖亚计划”（GAIA）^[2]就是国际上第一个天体测量计划。但由于其精度还不是很高，还不能用于对类地系外行星的普查工作。中国科学家提出的用于系外行星发现、更高精度的天体测量计划——“近邻宜居行星巡天计划”（CHES）目前正在论证之中^[11]。

4.5 对地球空间的多点和成像观测

自人类发射人造地球卫星以来，对地球空间磁场和粒子的探测都是采用原位（*in-situ*）观测的方式，也就是直接测量卫星周围的磁场和粒子。这种观测技术虽然准确并能够直接反映卫星经过地点的空间环境，但是对于随着来袭的太阳风而变化的磁场和粒子环境，单个卫星已经无法区分其观测数据的变化是由于空间位置的变化还是由于输入太阳风的变化。因此采用多点、即卫星编队来探测空间环境成为新的探测方式。然而，由于多颗卫星的成本远高于单颗卫星，新的编队探测也在向采用微小卫星甚至微纳卫星编队方向发展。此外，对粒子空间分布的探测还出现了遥感成像技术，包括在紫外频段对中性原子的成像和在X射线频段对磁层顶中性氢受太阳风粒子激发的X射线辐射的成像。这些新的地球空间探测技术，将进一

步提升人类对地球空间及其变化规律的认识。

4.6 高精度的空间基线测量

前文曾提到过通过2颗卫星之间高精度的距离测量，在地球轨道上可以测量地球重力场的异常并反演地下水随季节的变化的GRACE计划^[12]。这种技术的进一步发展，在激光波段，可以成为在更高的轨道上实现数十万千米到上百万千米长的基线的高精度测量，从而反演空间引力波。这是用电磁波观测宇宙之后的又一种观测手段。如果电磁波信息提供的是宇宙的图像，引力波提供的则是宇宙中的“声音”。

如果将探测器之间的距离测量的精度提高到 μ 米的精度，就可以通过3个探测器形成的3条基线来探测空间引力波。目前这个技术仍然在地面预研之中，欧洲空间局^[2]和中国都有相关计划在推进。相信在不远的将来，激光干涉的高精度空间距离测量就会成为一个新的、重要的天文观测手段。

4.7 观测位置上的新突破

所到即所得的空间科学计划一般比较容易提出。但是经过近70年的发展，大部分重要的空间位置几乎都被访问过了。太阳系中的八大行星及其主要行星也都至少被近距离飞越式地探测过了。然而，仍然存在很多区域可以考虑，例如，几个极端的位置，抵近太阳、太阳极轨和太阳系边界。在这几个位置，已经去过的探测计划均只获得了很初步的信息。例如，太阳极轨，只获得过原位探测的信息，没有对太阳极区进行过成像探测。又如对太阳系边界的探测，也只有极为少量的磁场和高能粒子的探测数据。对太阳的抵近探测，也还没有突破10个太阳半径的距离。此外对金星的着陆仅有1次，由于超过400℃的高温，着陆器只生存了不到1小时获得了极少量的数据就失效了，也并没有开展过巡视探测。

以上的特殊位置或地点的突破，或者是同一地点的、采用新的仪器和更强的能力的拓展探测，就一定会有新的数据和科学突破。

5 结语

爱因斯坦曾经预言：“未来科学的发展，无非是继续向宏观世界和微观世界进军。”空间科学既研究宇宙起源和演化，也研究暗物质粒子和生命的起源，同时覆盖了宏观和微观的科学前沿，因此是实现重大科学突破的重要科学领域。经过近70年的发展，空间科学已经不再是只要能进入太空，就可获得科学发现的阶段，进入到必须靠技术创新才能获得新数据和科学发现的新阶段。

然而无论是探测方案上的创新，还是探测能力上的提升，都需要通过激励和培育；经过从预研到实验验证的研究阶段，才能发展为真正的空间科学卫星计划。因此，任务管理机构需要对这个阶段的项目给予充分的关注并匹配足够的研究经费。而这些任务均需要具有较深技术背景和素养的科学家提出并领导，这些科学家就是未来空间科学卫星任务的首席科学家。

在未来空间科学领域中的技术创新方面，本文也做了一些预测。文中提到的这些相关技术，都是初露头或正在发展的新技术，应该引起我们空间科学任务的管理机构的充分关注甚至是重点培育。然而，更具创新的、特别是突破性的技术是很难预测的，也是光靠喊口号换不出来的，需要我们从激励创新的科研生态的建立，对青年科技人员的关注和支持，以及大量的前期预研经费的投入等方面予以重视。

未来空间科学的发展绝不是轻而易举的，其中技术创新起着最为关键甚至是决定性的作用。只要我们认识到这一点，就一定可以找到办法和工作思路，让我们的空间科学尽快在世界上成为引领的力量，让我们的科学家尽快在科学的宏观和微观前沿作出重大突破，让我们激励出的创新技术不但在空间科学任务中创造奇迹，并在更为广泛的天地场景中得到应用。

参考文献

- 1 The National Aeronautics and Space Administration. NASA Science Missions. [2024-04-15]. <https://science.nasa.gov/science-missions/?pageno=4>.
- 2 European Space Agency. Space Science. [2024-04-15]. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science.
- 3 科普中国. 地球空间双星探测计划. [2024-04-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%9C%B0%E7%90%83%E7%A9%BA%E9%97%B4%E5%8F%8C%E6%98%9F%E6%8E%A2%E6%B5%8B%E8%AE%A1%E5%88%92/10987018>. China Science Communication. Geospace Double Star Exploration Project. [2024-04-15]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%9C%B0%E7%90%83%E7%A9%BA%E9%97%B4%E5%8F%8C%E6%98%9F%E6%8E%A2%E6%B5%8B%E8%AE%A1%E5%88%92/10987018>. (in Chinese)
- 4 吴季, 王赤, 范全林. 中国科学院空间科学战略性先导科技专项实施11年回顾与展望. 中国科学院院刊, 2022, 37(8): 1019-1030.
Wu J, Wang C, Fan Q L. Review on 11 years of implementation of strategic priority program (SPP) on space science and its prospect. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(8): 1019-1030. (in Chinese)
- 5 吴季. 空间科学任务的全价值链管理和产出评估. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 206-213.
Wu J. Full value chain management and science outputs evaluation of space science missions. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(2): 206-213. (in Chinese)
- 6 吴季. 空间科学任务及其特点综述. 空间科学学报, 2018, 38(2): 139-146.
Wu J. Characteristics and managements of space science missions. Chinese Journal of Space Science, 2018, 38(2): 139-146. (in Chinese)
- 7 European Southern Observatory. E-ELT Telescope Design. [2024-04-15]. <https://www.eso.org/sci/facilities/eelt/telescope/index.html>.
- 8 European Southern Observatory. Very Large Telescope: The world's most advanced visible-light astronomical observatory. [2024-04-15]. <https://www.hq.eso.org/public/>

- teles-instr/paranal-observatory/vlt/
- 9 National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences. EP Mission. [2024-04-15]. <http://www.nssc.cas.cn/open/>.
- 10 陈学雷, 阎敬业, 徐怡冬, 等. 宇宙黑暗时代探路者——鸿蒙计划. 空间科学学报, 2023, 43(1): 43-59.
Chen X L, Yan J Y, Xu Y D, et al. Discovering the sky at the longest wavelength mission—A pathfinder for exploring the cosmic dark ages. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(1): 43-59. (in Chinese)
- 11 Ji J H, Li H T, Zhang J B, et al. CHES: A space-borne astrometric mission for the detection of habitable planets of the nearby solar-type stars. Research in Astronomy and Astrophysics, 2022, 22(7): 072003.
- 12 NASA Science. Gravity recovery and climate experiment. [2024-05-06]. <https://science.nasa.gov/mission/grace>.

Technology innovation is the key to future space science missions

WU Ji

(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Space science is one of the important space activities of China together with space technology and space application. Although it is a space program aimed at scientific discovery and breakthrough, with the development of technology and the increasing number of achievements received in the past, space science missions require more and more technological innovation to achieve their goals. This study first reviews the development trend of space science missions since their birth, then analyzes the cultivation process of space science mission proposals with technological innovation and the responsibilities of the chief scientist leading such tasks, and finally analyzes and proposes several important fields of technological innovation related to future space science missions. Analysis shows that with more and more competition in science and technology, the decisive factor to get breakthrough and sustainable development, will exist in whether the mission has unique innovative approach in technology that can help to obtain new data, or whether the mission can still reach a unique site in the solar system, creating their own discovery the first time.

Keywords space science, innovative development, scientific payloads, mission selection and management

吴季 中国科学院国家空间科学中心学术委员会主任、研究员。中国空间科学学会理事长, 俄罗斯科学院外籍院士, 国际宇航科学院院士, 电气和电子工程师协会(IEEE)会士。E-mail: wuji@nssc.ac.cn

WU Ji President of Chinese Society of Space Research, Professor and Chair of the Academic Committee at National Space Science Center (NSSC), Chinese Academy of Sciences (CAS), Foreign Member of Russian Academy of Sciences, Full Member of International Academy of Astronautics (IAA), Fellow of Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
E-mail: wuji@nssc.ac.cn

■责任编辑: 张帆