

空间短时飞行试验工具的应用与展望

姚秀娟, 高翔, 陈志敏

(中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

摘要: 空间短时飞行试验是指以探空火箭、气球、亚轨道重复发射工具等为主要实现手段, 将待试验对象发射到一定高度, 进行科学实验和技术验证的研究方法。对空间短时飞行试验工具的发展历史和应用现状进行综述, 对探空火箭、气球、亚轨道重复发射工具在科学观测、新技术试验中发挥的作用进行总结和概括, 以 NASA 飞行机会计划 FOP 为例, 对其在有效载荷技术成熟度评估中的应用情况进行了重点阐述, 结合我国空间科学探测和空间技术试验的迫切需求, 对空间短时飞行试验工具在我国的应用前景进行了展望和预测。

关键词: 探空火箭; 空间探测; 飞行试验; 短时飞行

中图分类号: V417+.6

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2018) 06-0066-09

Application and Prospect of Short Term Flight Testing Tools

YAO Xiujuan, GAO Xiang, CHEN Zhimin

(National Space Science Center of CAS, Beijing 100190, China)

Abstract: Short-term flight test in space refers to the scientific explorer and technical verification methods with sounding rockets, balloons, sub-orbital reusable launch vehicles and other means launched to a certain height. The development history and application status of space short-term flight testing tools were reviewed, and the role in scientific observation and new technology verification were summarized. Taking NASA FOP (Flight Opportunities Program) as an example, the application in the payloads technical readiness assessment was emphatically described. Combined with the requirements in space science exploration and space technical verification, the application of space short-term flight testing tools in China was prospected and predicted.

Key words: Sounding rocket; Space explore; Flight testing; Short term flight

0 引言

空间短时飞行试验是指以探空火箭、气球、亚轨道重复发射工具等为主要实现手段, 将待试验对象发射到一定高度, 进行科学实验和技术验证的研究方法。空间短时飞行试验既能减弱甚至脱离地球表面客观存在的大气、电磁场、重力场等的作用, 又能够做到响应快、周期短、成本低、见效快, 在空间环境原位探测、新技术试验、技术成熟度评估 TRA (Technology Readiness As-

essment) 等方面发挥了重要作用。在美国、日本和欧洲, 广泛运用空间短时飞行试验工具实现空间科学观测以及新型载荷设备、空间站设备、发动机等技术可行性验证。如美国 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 于 2018 年 1 月 10 日连发 3 枚探空火箭进行空间 X 射线辐射和极地中层云的研究; 日本于 2018 年 2 月 3 日发射了一枚由高空科学观测的探空火箭改造的迷你运载火箭 SS-520, 对微型卫星进行了试验; 波兰空间技术实验室专门研制了 ILR-33 型微重力试验

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-10-09

基金项目: 中国科学院创新基金 (CXJJ14S126); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA04080109)

作者简介: 姚秀娟 (1977-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为空间组网通信及地面测试技术。

E-mail: yaoxj@nssc.ac.cn

火箭，载荷比达到了 32%^[1-3]；俄罗斯与欧空局 (European Space Agency, ESA) 合作，用其专门的 Foton 系列、Bio-系列返回式卫星共同开展微重力科学和生命科学研究^[4]。我国从 20 世纪 50 年代开始了火箭探空事业，90 年代进行了返回式航天器的研究^[5-6]，先后发射了多枚探空火箭和返回式卫星，取得了一系列科学实验和技术验证成果，但总体发射数量和发射频次与 NASA 相比具有一定的差距。

1 空间短时飞行试验工具的应用现状

空间短时飞行试验工具主要指以探空火箭、气球、亚轨道可重复发射工具为主的短时飞行工具，其飞行高度范围一般在 1600km 以下，具有试验成本低、任务部署方便快捷、可重复飞行的特点，主要用于对新研技术进行真实飞行环境下的技术状态验证，以及对感兴趣区域的“悬停”式探测，是微重力、空间物理学、天文学、行星科学、行星地球使命等领域进行原位探测的重要手段。

1.1 探空火箭

探空火箭的名称来源于航海术语“to sound”，具有测量的意思^[7]。自从 1945 年美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 发射第一枚探空火箭以来，火箭探空技术就受到了世界各

国的重视，广泛用于空间研究和地球科学探测领域。其中，以美国的应用最具有代表性。在 1959—1976 年期间，NASA 共发射 1912 枚探空火箭，其后保持每年 20 发左右的发射数量和稳定持续的经费支持。

经过近 60 年的发展，NASA 的探空火箭已形成了系列，按照飞行试验需求的不同分为 16 种类型^[8]，如图 1 所示。飞行高度一般在 100km ~ 1600km，携带载荷质量可达 1600 磅，不同类型的探空火箭的探测能力如图 2 所示。其中 Black Brant IX 火箭的指向精度可达到 0.1”，满足大部分光学载荷的试验要求；Black Brant XII 为高空火箭，能够搭载有效载荷进行空间极光的物理探测^[9-10]。

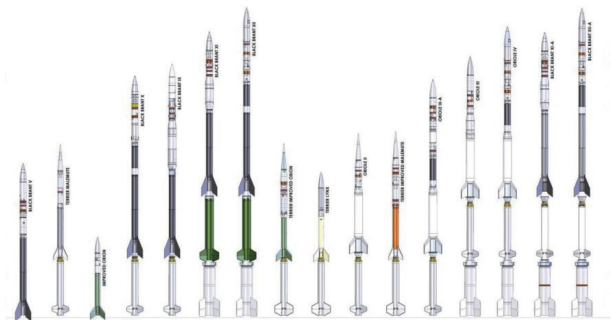


图 1 NASA 不同型号的探空火箭
Fig. 1 NASA sounding rockets

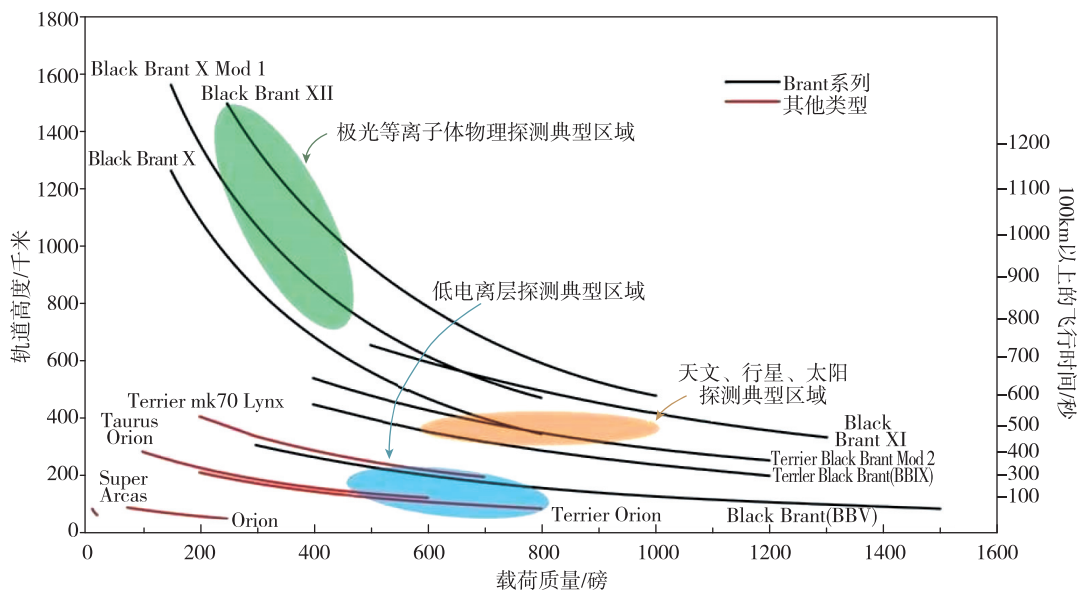


图 2 NASA 探空火箭的飞行能力
Fig. 2 NASA sounding rocket vehicle performance

欧洲多国具有探空火箭计划,如法国、德国、挪威、瑞典、英国等,主要用来进行地球大气探测、微重力试验、生命科学试验等。1962年6月,欧洲多国政府签署了欧洲空间研究组织(European Space Research Organisation, ESRO)公约,将探空火箭计划列入当时新欧洲组织的三类空间实验计划之一。ESRO的第一枚火箭于1964年7月6日和8日在意大利撒丁岛的Salto di Quirra发射,实验有效载荷由比利时和德国的研究人员提供。至1972年,ESRO的官方探空火箭计划结束时,共发射了140余枚探空火箭,探空火箭计划在ESRO的早期活动中发挥了重要作用。

目前,欧空局的探空火箭主要有TEXUS、MASER和MAXUS系列,能够携带500kg有效载荷飞行到750km的高空。TEXUS是德国的微重力环境试验火箭,MASER是瑞典的材料科学实验火箭,MAXUS是德国和瑞典合作研制的长时间微重力试验火箭。

探空火箭一直是欧空局进行科学研究、技术试验的重要工具。2005年12月1日,ESA在欧洲航天发射场发射了一枚TEXUS-EML探空火箭,该项目由ESA和德国宇航研究院(Deutrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)共同投资,在火箭飞行期间,通过遥控指令实现了与试验样本的实时交互操作。2007年11月开始,ESA允许学生研究团队在瑞典北部的基律纳发射探空火箭,进行学生载荷的科学实验。2018年7月6日,在挪威发射了一枚探空火箭,通过将固体推进剂的简单性与液体推进的多功能性和可控性相结合,对混合动力推进器技术进行了试验,为未来的运载火箭开发构建模块,下一步计划将电机、燃料箱和有效载荷集成在一起,为小型运载火箭提供推进解决方案。

瑞典北部基律纳的Esrange探空火箭基地是进行微重力试验、极光观测和地磁实验的重要基地。该基地于1966年11月19日为ESRO组织发射第一枚探空火箭,前身是基律纳地球物理观测站,在ESRO活动结束后,与欧洲多国合作,持续进行高纬度地区火箭探测技术研究。如今,基律纳基地已发射约550枚探空火箭,成为国际科学界用于发射微重力试验和大气研究的探空火箭的重要基地,美国、日本等国的航天机构和欧空局也与之有发射合作项目。

日本ISAS探空火箭一直是日本空间科学研究的重要支柱,主要用于天体物理观测、高层大气研究、空间等离子体物理探测等。主要有7种类型,其中MT-135、S-210、K-9M、K-10为退役火箭,目前使用的探空火箭有S-310、S-520和SS-520。S-310是一种中型单级火箭,直径310mm,可以达到150km的高度。它的前身S-300是为了在南极洲进行观测而开发的,后来由于俯仰滚动共振引起的迎角增加异常导致两次发射故障,经过技术改进后实现稳定飞行。S-520是K-9M和K-10型探空火箭的升级款,也是一款单级火箭,可选配三轴姿态控制和恢复系统,能够将100kg有效载荷发射到300km高空,并提供超过5min的微重力飞行环境。SS-520是一种两级火箭,能够将140kg的有效载荷发射到大约800km的高度。

日本宇宙航空研究开发机构于2014年8月17日在Uchinoura航天中心发射了S-520-29探空火箭,对散射E层空间结构进行立体观测。2016年利用探空火箭对太空微重力环境中的气态铁冷却进行了实验,证明了铁原子在外太空中难以聚集的问题。2017年1月15日,SS-520-2火箭计划将一种质量约为3kg的机载纳米卫星TRICOM-1送入轨道,但由于技术原因,发射失败。2018年2月3日,在Uchinoura航天中心进行了第5次发射,并成功将其装备的微型卫星Tasuki(TRICOM-1R)送入轨道。

探空火箭能够提供高真空、强振动、大过载试验环境,是新型探测技术和空间材料进行飞行验证的首选工具。如NASA 2017年的试验项目包括高分辨率恒星光谱仪原理样机试验,地球植被健康监控技术、空间高能粒子捕获技术的可行性验证试验,火星车技术、镜头舱门防水技术、电子系统回收技术、碳纳米管的试验,以及新降落伞在低密度、超声速环境下的测试验证等^[11-14]。探空火箭上的飞行试验为NASA在空间站任务、深空探测任务、新型有效载荷的发展方面储备了技术,为空间科学探测思想和计划的实施奠定了基础^[15]。

科学探测是探空火箭的另外一项重要任务^[16]。探空火箭型号的配备取决于探测目标对飞行高度、姿态等的具体要求。NASA最近两年主要进行的科学探测飞行试验主要有:高层大气扰动观测、采用试剂喷射制造人造云进行的大气粒子探测、

极光的原位探测、恒星之间的气体和颗粒物质的探测、太阳极紫外光谱的观测、空间暗黑地带探测等^[17-19]。在 2014 年 12 月探空火箭飞行任务中搭载的 FOXSI (Focusing Optics X-ray Solar Imager) 仪器探测到了一些名为 Nanoflares 的小型太阳耀斑的新证据^[20]。2012 年发射的探空火箭上搭载的高分辨率日冕成像仪发现了太阳磁尾抛射现象^[21]。

另外, NASA 曾进行多次探空火箭与 SOHO、TRACE、STEREO 等在轨卫星上的高分辨率光学载荷的比对试验^[22]。并且从 2013—2017 年连续 5 年, 每年发射一枚极紫外光谱标定火箭, 为老化的 SDO (Solar Dynamics Observatory) 卫星标定数据, 借此延长卫星的有效使用寿命。

教育和培训也是探空火箭项目的一项重要任务。在校大学生、兴趣爱好者以及年轻的科技工作者, 可以通过参加探空火箭任务获得实践经验, 成为后备人才^[23]。为此, NASA 启动了专为学生有效载荷试验的 RockSat-X 计划。RockSat-X 分为 3 个阶段: 第一阶段为 RockOn, 参与者接受关于在亚轨道火箭上进行科学有效载荷飞行所需的基础知识培训^[24]; 在 RockOn 阶段完成基础知识学习之后, 进入第二阶段 RockSat-C 阶段, 参与进行载荷和火箭设计并进行飞行试验; RockSat-X 阶段的试验为最高级, 飞行高度比前两个阶段高出约 32km, 能够提供更多的飞行时间^[25-28]。

1.2 科学气球与可重复发射工具

(1) 科学气球

气球是气象探测和科学观测的重要工具, 可飞行于地面、低空、平流层。按照压力的不同, 可分为零压气球 (Zero-pressure Balloon) 和超压气球 (Super-pressure Balloon)^[29]。零压气球的底部是开放的, 侧面悬挂与外部相通的管道, 空间持续飞行时间一般为 2h~3d, 飞行高度可达 38km, 载荷质量可达 200kg。超压气球是完全密封的, 气体不能逸出气球, 随着气体膨胀, 压力也会增加, 持续飞行时间比零压气球长, 最长飞行时间可达 100 天, 飞行高度可达 40km, 载荷质量可达 454kg。为了推进科学观测和研究, NASA 专门设立了科学气球飞行项目, 该项目由弗吉尼亚州的 Wallops 飞行设施机构管理, 在 35 年的运营中已推出了 1700 多种科学气球。

气球也是进行地球大气、地磁活动等探测的

重要手段之一^[30]。2013 年, NASA 在南极发射了 20 个气球组成的阵列, 每个气球携带的有效载荷质量约为 20kg, 飞行高度为 30km~35km, 主要目的是对范·爱伦带以及地磁活动进行观测^[31], 气球阵列与其他航天器在观测方位上共轨, 彼此之间可直接进行观测结果的比较。2017 年 10 月, 采用气球搭载的科学载荷对地球大气中的宇宙射线进行了监测^[32]。

由于气球能够在地球大气层之上进行“悬停”式观测, 并能够通过通信链路向地球直播, 是空间事件实时观测的重要工具。2017 年 8 月 21 日, 美国发生 99 年一遇的日食现象, NASA 为此发射了高空气球, 向全世界进行了日食过程的视频直播。

气球也是进行技术验证的手段之一。如 NASA 的宇宙射线能量和质量研究项目 (Cosmic-Ray Energetics and Mass investigation, CREAM), 将气球作为空间仪器开发的试验平台, 为国际空间站的有效载荷提供飞行验证^[33]。

气球能够搭载几 kg 至上百 kg 的质量, 是对学生载荷进行技术验证的重要方式。如 BalloonSAT 探索计划就是一项于 2004 年开始的学生培训计划, 每年进行一到两次气球发射试验, 携带光和温度传感器、宇宙射线探测器、电场扰动探测仪、气凝胶颗粒物质、种子等试验载荷和相机。Bag Ballon 计划采用学生建造的热气球模型, 研究加热对气体的作用机理等。

(2) 可重复发射工具

Zero-G 公司的抛物线飞机和亚轨道发射工具 Xombie 是 NASA 常用的可重复发射工具^[34], 具有可重复性使用、发射成本低的特点。除了具有空间运输的作用外, 还可以搭载有效载荷进行短时微重力试验, 携带的有效载荷质量可达几百至上千 kg。

2013 年, NASA 选择了 21 种有效载荷在可重复发射工具上进行了 100 多项技术的飞行试验, 包括 cube-sat 技术和行星探索任务中的新型传感器技术。其中包括 14 种新型载荷搭载抛物线飞机进行失重条件下的试验, 2 种载荷搭载亚轨道可重复发射工具进行试验, 3 种载荷在 20km 的高轨气球上进行试验, 1 种载荷分别搭载抛物线飞机和亚轨道可重复发射工具进行对比试验, 另外 1 种载荷分别搭载亚轨道可重复发射工具和高轨气球进行对比

试验, 获得了大量的试验数据。

2 飞行机会计划 (FOP) 与 TRL 评估

20 世纪 90 年代, 美国大量的武器装备和航天项目研制过程中出现了经费严重超支、工期延误、指标降低甚至中途下马的现象。经过大量案例分析后发现, 一些重要技术尚未成熟到一定程度就进入工程研制阶段是导致项目出现严重问题的重要原因^[35]。1999 年, 美国总审计署发布了一份影响深远的报告, 建议美国国防部采用 NASA 的技术成熟度分级 TRL (Technology Readiness Levels) 评价机制^[36]。2005 年, 美国国会对 NASA 重大系统的开发合同进行立法, 明确要求其技术成熟度应达到 TRL6 级^[37-39]。为此, NASA 负责空间技术研究与管理机构-空间技术任务局 STMD (Space Technology Mission Directorate) 专门制定了一系列计划^[40], 用于技术成熟度的提升和验证工作。“飞行机会计划” FOP (Flight Opportunities Program)^[41-42] 是其中之一, 目的是为试验对象提供 TRL4~TRL7 级的空间环境下的短时飞行试验。

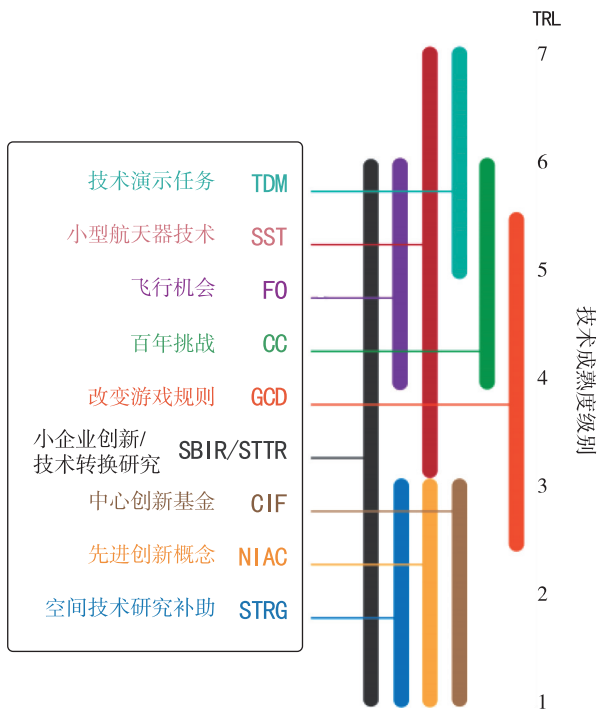


图 3 NASA TRL 验证的相关计划

Fig. 3 NASA TRL ranges of program

由于能够发射到一定高度, 从而减弱甚至脱离地球表面客观存在的大气、电磁场、重力场等的作用, 满足技术成熟度评估中 TRL7 级 (系统

原型在太空环境中获得验证) 对太空环境试验条件的要求, 探空火箭、高空气球、特种飞机等短时飞行试验工具成为 FOP 计划中进行各类新型载荷设备、空间站设备、发动机等技术可行性验证的首选工具。为保证计划的顺利、持续实施, FOP 设置了相对固定的经费支持, 如 2018 年探空火箭项目的财政预算为 5900 万美元, 气球项目的经费预算为 3730 万美元, 后续几年逐年稳定增长。在 FOP 计划的持续稳定支持下, NASA 利用空间短时飞行试验工具进行了高频次的科学探测和技术试验工作。表 1 为最近进行的探空火箭飞行试验任务统计情况, 涵盖了 NASA 空间科学的最新研究领域, 为新概念、新技术的验证提供了大量机会, 为后续探索计划的提出和工程实施储备了技术^[43]。

表 1 NASA 探空火箭飞行任务

Tab. 1 Recent NASA sounding rocket flight missions

任务名称	时间	火箭型号	任务目的
DXL	2018. 1. 10	Black Brant IX	空间 X 射线辐射和极地中层云的研究
ASPIRE	2017. 11. 14	Black Brant IX	火星 2020 首次超声速降落伞试验
DEUCE	2017. 10. 30	Black Brant IX	探索空间的暗黑地带
FOXSI	2017. 10. 13	Black Brant IX	X 射线光学成像仪探测太阳耀斑
ASPIRE	2017. 10. 03	Terrier-Black Brant IX	验证新降落伞在低密度、超声速环境下的特性
WINDY	2017. 09. 11	Terrier-Improved Malemute	高层大气的扰动研究

3 我国空间短时飞行试验工具的发展展望

3.1 研究基础与现状

我国从 20 世纪 50 年代开始进行火箭探空技术的研究^[5], 90 年代开始进行卫星返回技术的研究^[6], 探空火箭、气球、返回式卫星等飞行试验平台在邻近空间环境研究、空间气象探测、材料试验、微重力及生命科学试验等方面发挥了重要作用, 促进了空间环境观测与实验、微重力科学、空间生命科学与技术、有效载荷技术、元器件保障等试验技术的发展。进入 21 世纪以来, 由于任务响应快、可重复使用等特点, 无人机也逐渐成为一种常用的短时飞行试验工具。

至 20 世纪末, 我国已发射了近 300 枚各类型探空火箭。1958—1970 年期间, 中国发射使用的

探空火箭主要有两个系列：以液体发动机做动力装置的 T-7 系列和以固体发动机做动力装置的 HP 系列，使用的发射场是位于安徽省广德县的华东火箭发射基地和位于酒泉卫星发射中心的探空火箭发射场。1988 年 12 月，中科院在海南西海岸建成了中国第一座用于科学研究的探空火箭发射场，该发射场是世界上少数几个靠近赤道的火箭发射基地之一，同年，在此发射了 4 枚“织女一号”火箭，进行了低纬度地区的高空气象探测。1991 年，在此发射了 2 枚“织女三号”探空火箭，分别进行 147km 和 127km 以下空域的大气探测和高空物理探测，获取了宝贵的科学探测数据；在“子午工程”一期项目的支持下，于 2011 年 5 月在海南发射了一枚气象火箭和一枚探空火箭，成功获取了 200km 以下空域的低纬度地区的大气和电离层数据，为进一步研究中高层大气和电离层中的动力学过程，建立地磁活动和太阳活动对无线电、光学等影响的物理模型奠定了基础；2013 年和 2016 年，在海南再次进行了两次探空火箭发射试验任务，对电离层、近地空间高能粒子、磁场强度与结构进行了原位探测，获取了 300km 以下高度的空间环境垂直分布的第一手探测数据，为研究电离层、地磁、宇宙线、太阳紫外线和 X 射线、陨尘等多种日-地物理现象积累了经验。2016 年以来，随着国内商业航天的快速发展，涌现了一批民营火箭公司，为空间短时飞行试验提供了更多的机会。2018 年 4 月在海南发射的“双曲线一号”探空火箭和 5 月在内蒙阿拉善盟发射的“重庆两江之星”探空火箭，发射高度分别达到 108km 和 38.7km，进行了技术验证和空间探测实验。

但总体来看，我国现阶段空间短时飞行试验工具的发射数量和发射频次与 NASA 相比仍然具有一定的差距。

3.2 发展展望

可喜的是，我国的空间科学和空间技术呈现出一种竞相创新的发展形势，新的探测思想层出不穷，新技术、新方法、新原理接踵而至。在这些新思想、新技术、新方法、新原理能够达到实际工程任务应用的要求之前，需要进行一段时间的培育和关键技术攻关。模拟环境或真实空间环境试验条件下的飞行试验是对这些培育项目和技术攻关课题的实际效果进行验证和评估的首选条件。而空间短时飞行试验工具作为一种响应快速

的飞行试验手段，能够按照需求飞行到几百至上千 km 高度，克服地球表面客观存在的大气、电磁场、重力场等的作用，弥补地面模拟试验中存在的不足，在新材料和新技术验证、空间科学事件的机动观测、新型探测载荷的培育等方面具有较强的发展潜力。

因此，我国应抓住空间科学与技术发展的良好机遇，在已有探空火箭、气球、返回式航天器发展的基础上，通过持续稳定的引导和支持，发展一定数量的空间短时飞行试验工具，为新技术和新材料验证、科学观测、教育培训等提供平台和机会，加快成果产出和后备人才培养。

具体可从以下几方面着手：

(1) 新技术、新材料试验与评估

空间短时飞行试验工具的飞行高度可达到几百 km 甚至上千 km，能够克服地球表面大气对光的散射和折射作用，可以为光学及太阳观测类有效载荷提供真实的空间试验环境，为力学、生命科学等微重力探测类有效载荷提供微重力试验条件，为行星着陆器、降落返回装置、通信系统等有效载荷提供高动态飞行试验条件。既能作为新技术、新材料试验验证以及促进技术成熟度从 TRL6 级升级到 TRL7 级的重要平台，还可以作为国产元器件在特定空间环境条件下的飞行试验平台。

(2) 科学探测

空间短时飞行试验工具能够为 1000km 以下高度的垂直飞行式探测和“悬停”式观测提供实验平台，符合太阳观测、空间环境、地磁活动、空间磁场等类型有效载荷的短时探测需求，并且由于发射响应快，非常适合于即时性空间事件的观测，如日食、太阳黑子爆发等。可发展适合于不同科学探测需求的空间短时飞行试验平台，形成系列，实现按需飞行。

(3) 在轨对比试验

随着卫星寿命的延长，由于长期在轨运行工作及器件老化等原因，有效载荷设备可能发生技术状态的偏离，从而影响指标的灵敏度及科学探测数据的准确性和可靠性。可以利用空间短时飞行试验工具将该载荷设备的备份件或等效替代件发射到相应高度，以对在轨飞行件的技术状态进行确认和校准。也可以采取空间共轨或编队飞行的方式，同时发射多发短时飞行试验工具，进行协同式、比对式试验。

(4) 教育和培训

在校大学生、高中生、科技爱好者们提出了很多创新性的概念，通过一些科技创新课题和竞赛项目的支持，完成了模型研究工作。空间短时飞行试验工具可以为学生载荷提供真实的空间飞行试验机会，推动创新思想的发展。在有效载荷培育过程中，成长的年轻科学家们可以通过参与空间短时飞行试验任务，经历实践锻炼和实际项目的管理培训，成为储备人才。

(5) 特殊项目验证

空间短时飞行试验工具由于成本低、见效快、可回收，可以作为一些特殊项目，如发动机、控制系统、推进系统、降落系统、回收系统等的演示、验证工具。

(6) 成本控制和项目管理

在新技术培育过程中，技术成熟度评估把关是确保工程实施阶段顺利进行的重要环节。空间

短时飞行试验工具可以作为技术状态评估把关的手段，辅助成本控制和项目管理，加快工程任务的顺利实施。

3.3 示范案例

结合我国空间短时飞行试验工具的发展基础与目前迫切的应用需求，采用无人机+气球+探空火箭的组合式试验方案不失为一种切实可行的方法，并可实现按照有效载荷的飞行试验对高度和飞行姿态的要求配置飞行试验工具，如图4所示，当飞行高度在10km以下时，可采用无人机作为飞行试验工具，实现垂直飞行、平行飞行、组阵飞行、翻滚飞行等多种飞行状态；当飞行高度在35km以下时，主要采用气球作为飞行试验工具，实现“悬停”式科学观测、抛射试验以及垂直着陆试验等；当飞行高度在35km以上时，主要采用探空火箭等飞行工具，实现空间环境试验、微重力试验等。

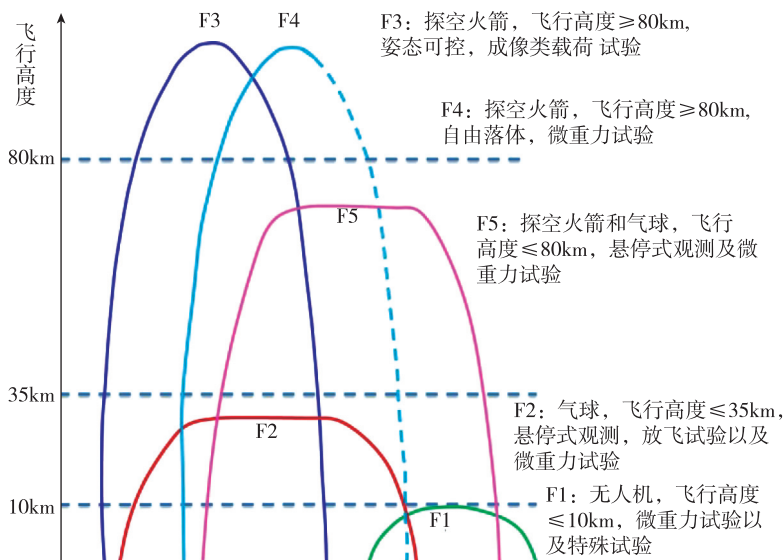


图4 空间科学载荷短时飞行试验方案

Fig. 4 Short Term Flight Plans of Space Science Payloads

通过无人机+气球+探空火箭3种类型的短时飞行试验工具的组合式试验方法，可为有效载荷提供从地面至1000km高空的飞行试验机会，不仅可以突破地球大气环境的影响，而且飞行任务的准备周期较短，飞行成本相对较低。

4 结论

空间短时飞行试验工具具有快响应、低成本、高效率的特点，在美国、日本、欧洲的有效载荷

培育和技术验证过程中发挥了重要作用，为未来探测思想的提出和探测任务的实施储备了技术。我国具有发展空间短时飞行试验工具的良好基础，在目前空间科学和技术快速发展的形势下，加强引导和持续支持，使其成为新技术验证和评估、科学探测、人才培养的综合试验平台，将会在新型探测载荷培育、科学成果产出、技术和人才储备方面发挥重要作用。

参考文献

- [1] Marciniak B, Okninski A, Barkowiak B, et al. Development of the ILR-33 “Amber” sounding rocket for microgravity experimentation [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018 (73): 19-31.
- [2] Nowakowski P, Okninski A, Pakosz M, et al. Development of small solid rocket boosters for the ILR-33 sounding rocket [J]. *Acta Astronautica*, 2017 (138): 374-383.
- [3] Okninski A. Multidisciplinary optimisation of single-stage sounding rockets using solid propulsion [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017 (71): 412-419.
- [4] 康琦, 胡文瑞. 微重力科学实验卫星——“实践十号” [J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31 (5): 574-580.
- [5] 王希季. 中国返回式航天器发展途径探讨 [J]. *中国空间科学技术*, 1995, 15 (6): 1-8.
- [6] 王希季. 返回技术和返回式航天器的发展 [J]. *中国空间科学技术*, 1990, 10 (6): 1-5.
- [7] Marconi E M. What is sounding rockets [EB/OL]. [2018-01-20]. http://www.nasa.gov/missions/research/f_sounding.html.
- [8] Center G S F. NASA sounding rocket science [EB/OL]. [2018-01-20]. <http://rscience.gsfc.nasa.gov/key-docs.html>.
- [9] Pfaff R. Remarkable discoveries from NASA’s sounding rocket program [R]. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2013.
- [10] George C. Heliophysics studying the Earth-Sun system [R]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2014.
- [11] Sarah F. NASA sounding rocket instrument spots signatures of long-sought small solar flares [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-sounding-rocket-instrument-spots-signatures-of-long-sought-small-solar-flares>.
- [12] Keith K. ASPIRE successfully launches from NASA Wallops [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://www.nasa.gov/wallops/2017/feature/aspire-successfully-launches-from-nasa-wallops>.
- [13] Tran L. NASA-Funded CHES mission will check out the space between stars [EB/OL]. [2017-9-20]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-funded-chess-mission-will-check-out-the-space-between-stars>.
- [14] Keith K. NASA mission to study atmospheric disturbances from marshall islands [EB/OL]. [2017-9-20]. <https://www.nasa.gov/Wallops/2017/feature/nasa-mission-to-study-atmospheric-disturbances-from-marshall-islands>.
- [15] Agle D C. NASA’s Mars 2020 mission performs first supersonic parachute test [EB/OL]. [2017-10-08]. <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasas-mars-2020-mission-performs-first-supersonic-parachute-test>.
- [16] Pfaff R. Direct measurement in the cusp from spitzbergen [R]. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2013.
- [17] Johnson G M. A light in the dark: NASA sounding rocket probes the dark regions of space [EB/OL]. [2018-1-20]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/sounding-rocket-probes-the-dark-regions-of-space>.
- [18] Koehler K. NASA Alaskan launched rockets to study space X-ray emissions and create polar mesospheric cloud [EB/OL]. [2018-2-10]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/nasa-alaska-launched-rockets-to-study-space-x-ray-emissions-and-create-polar-mesospheric>.
- [19] Brodell C. Rocksats-X successfully launched on August [J]. *Rocket Reports*, 2017, 8 (3): 1-6.
- [20] Frazier S. NASA funded FOXSI to observe X-Rays from sun [EB/OL]. [2018-02-10]. <http://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-funded-foxsi-to-observe-x-rays-from-sun>.
- [21] Cirtain J W, Golub L G, Winebarger A R, et al. Energy release in the solar corona from spatially resolved magnetic braids [J]. *Nature*, 2013, 493 (7433): 501-503.
- [22] Tran L. NASA-Funded sounding rocket will take 1, 500 images of sun in 5 minutes [EB/OL]. [2017-09-10]. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/nasa-funded-sounding-rocket-will-take-1500-images-of-sun-in-5-minutes>.
- [23] Bryanti I. NASA 2015 student launch [R]. Greenbelt: Jacobs ESSSA Group, 2015.
- [24] Eggers J. RockSat-X successfully launches from NASA Wallops [EB/OL]. [2017-09-10]. <http://www.nasa.gov/content/rocksat-x>.
- [25] Koehler K. NASA Wallops successful launch rocks with student experiments [EB/OL]. [2017-09-10]. <https://www.nasa.gov/Wallops/2017/feature/nasa-wallops-successful-launch-rocks-with-student-experiments>.
- [26] Koehler K. College students sought for suborbital rocket projects [EB/OL]. [2017-08-21]. <https://www.nasa.gov/Wallops/2017/feature/nasa-wallops-college-students-sought-for-suborbital-rocket-projects>.

- nasa.gov/feature/wallops/2017/nasa-opens-opportunities-to-college-students-for-suborbital-rocket-projects.
- [27] Koehler K. Students testing technology and science investigation skills at NASA Wallops with rocket launch August 16 [EB/OL]. [2017-10-08]. <https://www.nasa.gov/feature/students-testing-technology-and-science-investigation-skills-at-nasa-wallops-with-rocket>.
- [28] Koehler K. Students and educators develop their rocket skills at NASA Wallops [EB/OL]. [2017-10-08]. <https://www.nasa.gov/feature/students-and-educators-develop-their-rocket-skills-at-nasa-wallops>.
- [29] Brain D. Super pressure balloon [J]. *Island Access*, 2015 (4): 4-7.
- [30] Eggers J. NASA's balloon program returns to Wanaka, New Zealand [EB/OL]. [2017-10-08]. <https://www.nasa.gov/feature/wallops/2017/nasas-balloon-program-returns-to-wanaka-new-zealand>.
- [31] Fox K C. Twenty NASA balloons studying the radiation belts [EB/OL]. [2017-09-08]. https://www.nasa.gov/mission_pages/rbsp/barrel/20-balloons.html.
- [32] Seo E S. Cosmic ray energetics and mass for the International Space Station [EB/OL] [2018-01-08]. https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1114.html.
- [33] Mcelvery R. NASA's scientific balloon program reaches new heights [EB/OL]. [2017-10-08]. <https://www.nasa.gov/scientificballoons>.
- [34] Ashford D. An aviation approach to space transportation [J]. *The Aeronautical Journal*, 2009 (113): 499-514.
- [35] 马宽, 王崑声, 王婷婷, 等. 设备类技术成熟度评价标准研究 [J]. *科研管理研究*, 2016, 36 (10): 25-29.
- [36] Gao. Best practices: Better management of technology development can improve weapon system outcomes [R]. Washington: United States Government Accountability Office, 1999.
- [37] Gao. Assessments of selected major weapon programs report to congressional committees [R]. Washington: United States Government Accountability Office, 2005.
- [38] 李达, 王崑声, 马宽. 技术成熟度评价方法综述 [J]. *科学决策*, 2012 (11): 85-94.
- [39] Jonc C M. Technology readiness levels [R]. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 1995.
- [40] George C. Technology demonstration missions bridging the technology gap [R]. Huntsville: Marshall Space Flight Center, 2012.
- [41] Kubendran L. Flight opportunities program [R]. Cleveland Ohio: Goddard Space Flight Center, 2012.
- [42] Ord S. NASA Flight Opportunities Program [R]. Cleveland Ohio: NASA's Goddard Space Flight Center, 2016.
- [43] Young R. Flight tests in late 2016 helped mature technologies for future NASA missions [J]. *Flight opportunities*, 2017 (4): 1-6.

引用格式: 姚秀娟, 高翔, 陈志敏. 空间短时飞行试验工具的应用与展望[J]. 宇航总体技术, 2018, 2 (6): 66-74.

Citation: Yao X J, Gao X, Chen Z M. Application and prospect of short term flight testing tools [J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2018, 2 (6): 66-74.