

# 中国空间科学任务有效载荷的管理

李超, 韦飞

中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

**摘要** 空间科学任务有效载荷往往是新原理、新方法和先进技术的集中体现, 在实现任务科学目标过程中发挥关键和核心作用。中国以空间科学工作者为主组成的研制队伍航天工程经验不足, 导致有效载荷技术攻关难度大, 管理日益复杂。阐述了空间科学任务有效载荷的有效管理经验, 包括建立载荷 PI (principle investigator) 制管理模式, 高度重视关键技术攻关和载荷标定试验, 提升载荷管理等级, 并以单位载荷研制为抓手, 全面推进质量管理等。对实施载荷 PI 制和载荷数据 PI 制进行了初步分析和探讨。

**关键词** 空间科学任务; 空间科学卫星; 有效载荷; 项目管理

空间科学是以航天器为主要平台, 研究发生在地球、日地空间、行星际空间乃至整个宇宙空间的物理、天文、化学及生命等自然现象及其规律的科学<sup>[1]</sup>。2011年1月, 空间科学战略性先导科技专项(简称“空间科学先导专项”)作为中国科学院首批启动的先导专项之一正式立项实施, 中国空间科学第一次有了系统性的支持计划<sup>[2]</sup>。空间科学先导专项的总体目标是: 在最具优势和最具重大科学发现潜力的科学热点领域, 通过实施自主和国际合作科学卫星计划, 实现科学上的重大创新突破, 带动相关高技术的跨越式发展, 发挥空间科学在国家发展中的重要战略作用。

“十二五”时期, 空间科学先导专项部署研制、发射了暗物质粒子探测卫星(简称“暗物质卫星”, 在轨命名为“悟空”)、实践十号返回式科学实验卫

星(简称“SJ-10 卫星”)、量子科学实验卫星(简称“量子卫星”, 在轨命名为“墨子”)和硬 X 射线调制望远镜卫星(简称“HXMT 卫星”, 在轨命名为“慧眼”), 已经并将持续产出具有国际影响力的重要成果, 得到了党和国家领导人的高度关注<sup>[3]</sup>。作为专项及其卫星工程的总体依托单位, 中国科学院国家空间科学中心组织实施各卫星工程项目, 积累了宝贵经验。2018年5月31日, 空间科学先导专项二期正式立项启动, 瞄准宇宙和生命起源与演化、太阳系与人类关系两大重要科学前沿, 在引力波电磁对应体、太阳磁场与爆发的关系、时域天文学、太阳风-磁层相互作用规律等方向开展任务研制, 部署实施了微重力技术实验卫星(在轨命名为“太极一号”)、引力波暴高能电磁对应体全天监测器(GE-CAM)、先进天基太阳天文台(ASO-S)、爱因斯坦探

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2020-01-16

基金项目: 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(XDA15000000)

作者简介: 李超, 副研究员, 研究方向为空间科学战略性先导科技专项及科学卫星工程总体管理, 电子信箱: chaoli@nssc.ac.cn

引用格式: 李超, 韦飞. 中国空间科学任务有效载荷的管理[J]. 科技导报, 2020, 38(15): 37-44; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.

针(EP)和太阳风—磁层相互作用全景成像(SMILE)卫星任务<sup>[4]</sup>。

不同于其他卫星任务,空间科学任务是用具有确定性能的仪器探知未知世界,具有很强的科学探索性,其核心特点是科学驱动,在实现科学目标的同时,需要在探测原理、方法和技术上有重大的创新和突破。空间科学任务有效载荷是实现任务科学目标的关键,具有探索性强、指标前沿性强、技术难度大、精度要求高、围绕科学目标的独特设计、工作环境不确定等特点,且以空间科学工作者为主组成的研制队伍航天工程经验不足,导致有效载荷技术攻关难度大,管理日益复杂。因此,有效载荷管理工作是空间科学任务管理的重中之重,一方面要保证载荷的先进性;另一方面要保证载荷的工程化和科学产出的最大化,特别是针对具有重大创新性、突破性的载荷进行有效管理,要求首次飞行即能够验证产品功能性能并满足科学任务探测需求。本文根据空间科学任务及有效载荷的特点,从专项总体的视角对有效载荷管理实践进行总结、初步分析和探索。

## 1 科学任务及有效载荷的特殊性

### 1.1 空间科学任务具有很强的探索性

空间科学任务是用具有确定性能的仪器探知未知世界,具有很强的探索性,其核心特点是科学驱动。每项任务都有明确的科学目标,瞄准重大科学前沿,力争取得重要科学突破,或带动相关学科取得大的发展<sup>[5]</sup>。空间科学实验与探索“只有第一、没有第二”,每项任务都是非重复、非生产性的<sup>[6]</sup>。为了实现新探索和新发现,每项任务都肩负着新的科学使命,或提出新的科学概念,或面对新的空间环境,或突破新的载荷技术,或满足新的工程要求,从任务提出到完成,始终围绕科学目标,以科学发现为标志,以实现科学目标为优先<sup>[5]</sup>。有些任务探索的是诺贝尔奖级别的科学问题,例如暗物质卫星的重大发现,显示中国科学家已经从自然科学前沿重大发现和理论的学习者、继承者、围观者,逐渐走到了舞台中央<sup>[7]</sup>;量子卫星实现  $10^3$  km 级星

地双向量子纠缠分发,是兼具潜在的现实应用和基础科学研究重要性的重大技术突破<sup>[8]</sup>。以上这些“新”,是空间科学先导专项必须正面的问题,也是卫星工程必须重点关注和管理的质量要素和风险。

### 1.2 科学任务有效载荷的重要性和特殊性

有效载荷是科学卫星获取科学数据和实现科学目标的“尖兵”<sup>[9]</sup>,是科学卫星工程中最关键的部分,其配置、设计、研制是确保实现科学目标的关键,但若管理不力也会成为掣肘任务成功的短板,因此是工程管理的焦点。科学任务有效载荷的特殊使命决定了其具有很强的探索性和开创性,需要突破一系列的关键技术,且往往都是全新研制,没有在轨飞行经验,其主要特点如下。

1) 科学目标和探测对象的探索性强。例如,暗物质卫星的主要科学目标是寻找和研究暗物质粒子,其科学目标和探测对象(暗物质粒子)均具有很强的探索性;SJ-10 卫星的有效载荷采用国际首例空间密闭环境中胚胎培养技术、中国首次空间密闭环境干细胞培养技术,开展的科学实验都是全新探索,国内外没有开展过,每项实验都具有创新性和很高的科学研究价值<sup>[10]</sup>。

2) 指标的前沿性强。例如,暗物质卫星是世界上迄今为止观测能段范围( $\sim 1$  万 GeV)最宽、能量分辨率(1%)最优、本底抑制能力( $2 \times 10^5 @ \text{TeV}$ )强的空间探测器,其观测能段是国际空间站阿尔法磁谱仪的 10 倍,能量分辨率比国际同类探测器高 3 倍以上<sup>[11]</sup>。

3) 技术难度极大,设计极端复杂。例如量子卫星,瞄准 2 个地面站的高精度星地光路对准、星载量子纠缠源、星地偏振态保持与基矢校正等工程级关键技术,都是世界级难题。卫星平台复合姿态控制技术、天地链路的单光子接收也都难度极大<sup>[12]</sup>;暗物质卫星锗酸铋(bismuth germanate oxide, BGO)量能器,是探测器最核心的组成部分,其数据读出系统有高达 8 万路电子学信号通道,且须在  $1 \text{ m}^3$  小的范围内布局完成,设计极端复杂,实现难度极大<sup>[11]</sup>。

4) 精度要求极高。例如,量子卫星携带的 2 个激光器飞行中要分别瞄准 2 个相距  $\sim 1000$  km 的

地面站,向左向右同时传输量子密钥,且卫星上的光轴和地面望远镜的光轴要始终精确对准,好比卫星上的“针尖”对地面上的“麦芒”,对准精度达到普通卫星的10倍<sup>[13]</sup>。

5) 需紧密围绕探测目标的系统优化设计。例如,暗物质卫星采用了以载荷为中心的卫星机、电、热一体化设计,极大提高了卫星的功能密度,有效降低了卫星质量和体积,满足了大载荷的科学探测任务,实现了高载荷比、低成本、高可靠性<sup>[14]</sup>;SJ-10卫星为满足科学目标,对载荷的整体方案进行了优化,突破常规外形,整合控制系统,降低重量、体积和功耗,最大限度利用了平台资源。

6) 工作环境的不确定性大。例如HXMT卫星,其高能、中能、低能望远镜3个载荷集成在同一结构安装面,工作温差超过100℃,尤其是低能望远镜低温空间要求为-80~-42℃。天文探测的特点和工作空间环境的未知性和不确定性,为有效载荷热控设计带来巨大挑战<sup>[15]</sup>。

### 1.3 载荷研制单位及队伍的现状

科学任务有效载荷的特殊性对研制单位和队伍提出了极高要求。有效载荷概念的提出者、设计者往往优先承担产品研制任务,或深度参与产品研制过程。出于中国空间科学卫星任务起步晚的特点,现阶段空间科学任务的提出、参与单位和人员有许多是第一次参与航天工程项目。这意味着大量具有丰富科学思想、极高科学素养但航天工程经验非常不足的新生力量加入空间科学任务的实施过程,有些卫星的载荷研制人员既是科学家又是工程师<sup>[16]</sup>,研制过程中不确定因素多,技术状态变化多,必然会遇到难以预计的困难和问题,对风险管控要求高。

## 2 有效载荷管理实践

中国科学院组织实施的空间科学先导专项一期任务,是中国首次系统规划和发展空间科学卫星计划的实践。鉴于空间科学任务强烈的科学探索性,每项任务都设置了首席科学家岗位。首席科学家是科学目标的提出者和后续科学研究的实践者

和组织者,同时在工程研制中对有效载荷性能指标的提出、标定要求和性能评估起到关键指导作用。为了保证工程目标和科学目标的实现,空间科学卫星工程采用了“首席科学家+工程两总”的管理体制,在落实以科学目标为牵引、确保工程任务顺利实施方面积累了宝贵经验。

空间科学先导专项二期实施过程中,在继承一期任务成功经验的基础上,进一步针对空间科学卫星和有效载荷的特殊性以及研制单位和队伍的现状,采取了一系列创新措施。建立载荷科学家制管理模式,更加重视关键技术攻关管理要求和载荷标定试验要求,充分开展地面试验验证,提升载荷管理等级,并以单位载荷研制为抓手,激励科学创新,降低技术风险,促进科学与技术、科学与工程有机融合,全面推进质量管理,确保了工程质量、进度和成本。

### 2.1 建立载荷科学家制管理模式,促进科学与技术的有机融合

#### 2.1.1 采用载荷科学家制管理模式,激励科学创新

空间科学任务的有效载荷基本是全新研制,技术复杂性强、继承性弱,研制队伍航天产品研制经验不足,需要开展多单位、跨部门、跨学科的技术合作才能完成;涉及的科学方法、仪器原理、技术实现、工程实施、数据标定等工作需要既懂科学又有一定工程技术经验的科学家。借鉴美国国家航空航天局(NASA)、欧洲空间局(ESA)和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)等对深空探测任务科学载荷采用的首席专家制,空间科学任务科学载荷采用了科学家(principal investigator, PI)制管理模式。

载荷PI是既懂科学又有一定工程技术经验的科学家,其角色相当于项目首席科学家助理,起到科学家与工程技术人员之间的桥梁纽带作用,在有效载荷设计方面实现科学家的思想,并协调载荷团队开展产品研制。载荷PI需要熟悉科学探测任务,清楚探测仪器原理,熟知技术实现途径。载荷PI人选一般在工程立项论证阶段由拟任首席科学家指定,每台有效载荷可设置一名载荷PI。采用载荷PI制管理模式可激励科学创新,提高有效载荷研制效率,缩短研制周期,促进科学与技术的融合。

### 2.1.2 载荷PI深度参与载荷设计和研制,确保科学与工程有机融合

载荷PI与载荷研制单位共同开展有效载荷系统顶层设计,深度参与载荷研制、测试及在轨运行过程。其职责重点在卫星工程任务的两头,即方案设计阶段和在轨运行阶段。

在方案设计阶段,根据项目科学目标对特定探测任务的需求,载荷PI主要协助首席科学家提出特定的有效载荷配置,负责提出载荷所要实现的科学目标、设计方案,并将科学探测需求转化为载荷的主要功能指标要求和使用需求。

在初样研制和正样研制阶段,载荷PI跟踪和监督有效载荷的研制,确认载荷技术状态,参与载荷研制主要节点的会议,与载荷设计师一起处理研制过程中与载荷功能指标有关的事项;对数据进行模拟,给出有效载荷的标定方法,指导载荷研制单位完成产品的标定工作。

卫星发射入轨后,载荷PI负责对有效载荷进行测试,检查仪器状态,设定各项观测、试验模式的载荷参数,验证载荷各项技术指标是否达到要求。

在运行阶段,载荷PI根据科学探测目标需求制定载荷在轨工作模式,确认载荷工作状态,指导完成载荷标定工作,确保载荷探测数据的质量;协助首席科学家制定载荷在轨探测计划,组织在轨数据分析、处理和应用,开展国际合作与交流,负责成果产出,确保实现任务科学目标。

### 2.1.3 建立科学家团队与工程技术团队的沟通机制,促进科学与工程有机融合

空间科学任务研制队伍中的科学家具有前沿创新思想,但往往缺乏工程理念,工程技术人员具

有一定的工程经验,但往往缺乏科学思想;科学家总有新创意,工程技术人员却追求稳定和低风险。为了相互理解对方的语言,及时、准确地识别和化解风险,空间科学先导专项搭建了科学团队与工程技术团队沟通交流的平台。

在卫星工程早期阶段,科学家通过学术报告及座谈形式,帮助工程技术人员理解任务的科学目标及探测原理;科学家也仔细了解工程技术人员的设计理念和技术难度,听取工程技术人员建议;同时,科学载荷的设计人员与卫星平台的设计人员密切沟通,反复迭代,找到最佳实现方案。通过科学家与工程技术人员之间的反复沟通迭代,确保需求的准确性,以及设计、试验、生产及标定的正确性,将科学目标快速渗透到研制的各个层面和环节,实现科学与技术的有机融合。

## 2.2 高度重视载荷关键技术攻关,降低技术风险

关于关键技术的重要性,习近平总书记多次做出重要指示,并强调“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的。只有把关键核心技术掌握在自己手中,才能从根本上保障国家经济安全、国防安全和其他安全”<sup>[17]</sup>。空间科学任务的前沿性、创新性和探索性,以及其实现重大创新突破的特殊使命,决定了其必须攻克一系列关键核心技术。从预先研究、背景型号研究、立项综合论证至方案设计阶段,关键技术攻关始终是空间科学卫星工程研制中的重要任务;工程研制阶段仍需注意通过充分的地面试验来降低关键技术风险。专项一期各卫星突破了与载荷相关的一系列关键技术(表1),确保了技术见底,降低了技术风险,满足了探测任务对载荷的超高要求。

表1 空间科学先导专项一期科学卫星突破的关键技术

暗物质卫星	SJ-10卫星	量子卫星	HXMT卫星
① 面向载荷的一体化卫星构型技术;② 等温化的温度控制技术;③ 大惯量科学探测卫星姿态控制技术;④ BGO晶体大动态范围读出方案的设计与实现;⑤ 塑闪晶体温度形变适应结构的设计与实现	① 大尺度冷板和回收舱高效热控技术;② 高可靠集成度多载荷实验装置在轨支持和管理技术;③ 突破常规外形、创新方案设计、整合控制系统	① 瞄准2个地面站的高精度星地光路对准;② 星载量子纠缠源;③ 星地偏振态保持与基矢校正	① Si-PIN探测器和读出专用集成电路技术;② 高精度准直器研制;③ 低噪声、高能量分辨率X射线探测技术;④ 透软X射线遮光膜技术

### 2.3 高度重视载荷标定和试验验证,确保结果可靠

空间科学任务有效载荷的准确标定是实现其技术指标和科学目标的必要条件。只有得到准确标定并得到可靠的探测结果,才能得到国际同行认可,使科学研究产出最大化。因此,空间科学任务高度重视有效载荷的标定工作,并充分做好各项地面试验验证。

例如,暗物质卫星 BGO 量能器是实现其核心探测功能的关键分系统。为确认各项性能指标满足设计要求,并为卫星在轨实验数据分析提供标定依据,在方案设计、初样研制及正样研制阶段多次赴欧洲核子研究中心(CERN)开展束流标定试验,利用高能电子束流等验证了量能器探测器、电子学、在线控制装置和相关数据分析软件等组件功能正常,能量分辨率、能量线性等重要指标合格;通过多样化的重离子、质子束流,研究确认了 BGO 量能器的外太空高能离子探测能力等指标<sup>[18]</sup>。HXMT 卫星为充分开展望远镜的环境试验验证,建成了国内首个达到国际水准的 X 射线标定束线,在卫星发射前开展了长达 4~6 个月的标定试验,取得了载荷能量响应函数、探测效率、温度响应等核心技术数据,与卫星在轨实测数据进行比对分析,检测确定产品的基本状态,确保了望远镜观测结果的正确性、有效性和适用性<sup>[15]</sup>。

### 2.4 以单位载荷研制为抓手,全面推进工程质量管理

针对空间科学任务有效载荷研制单位的现实情况,以及在工程实现、质量管理和风险管控方面面临的挑战,始终牢记“质量是航天的生命线”的指导思想,遵循“单位抓体系,型号抓大纲,设计抓质量可靠性”的基本策略<sup>[19]</sup>,通过推动质量管理体系建设,坚持常态化培训,开展专项质量检查和重大风险独立评估等,确保全过程质量可控,提升全员质量意识,确保不带问题转阶段,有效降低研制风险。

#### 2.4.1 推动质量管理体系建设,确保全过程质量可控

质量管理体系是为产品研制构筑的组织保证、资源保证、产品实现保证的质量保证基础平台,通

过有效实施过程管理,在证实提供满足顾客要求和适用的法律法规要求的产品能力、增强顾客满意度方面,起到了显著的推动作用。空间科学先导专项探索并形成了独具特色的质量管理模式<sup>[20]</sup>,制定了《空间科学卫星工程质量管理总要求》等系列顶层管理文件,建立了专项的质量管理体系和产品保证体系。

在管理实践中,针对尚未通过质量体系认证的研制单位,要求其必须按照 GJB 9001B 或 GB/T 19001 建立、健全质量管理体系,确保有效运行,并在产品转入正样研制前通过质量体系认证;对已建立质量管理体系的单位,要求其在实践中不断完善,持续改进。这有力推动了相关单位质量管理体系的科学化、规范化和信息化。通过有效的制度建立、体系管理和持续改进,确保了研制全过程质量可控,确保了产品质量<sup>[20]</sup>。

#### 2.4.2 开展常态化培训,提升全员质量意识

针对科研院所人员队伍新、航天工程经验不足的特点,在工程各阶段,专项总体邀请国内外航天领域专家就工程研制工作重点、风险点及应重点关注的事项等进行培训,同时针对性地组织质量、软件工程化、技术状态管理、风险管理、航天工程理念及系统工程方法等专题培训,并对专项制定的各类顶层文件进行宣贯,为保证队伍技能提升和知识储备提供必要的保障。另外,各级任务承担单位也开展了形式多样的分层分类的培训措施,持续加强队伍技能建设。通过工程实战与培训提高相结合,努力打造一支“严谨细实”敢打硬仗的航天队伍。

#### 2.4.3 开展专项质量检查和重大风险独立评估,降低研制风险

开展专项质量检查,确保不带问题转阶段。在各卫星工程重要里程碑节点前,专项总体充分调研情况,按照精细化管理的要求,组织国内外相关领域专家开展专项质量检查,对工程质量和可靠性等提出意见和建议,为工程转阶段决策提供必要的输入条件,确保有效载荷和卫星不带问题转阶段和出厂、不带疑点上天。例如,暗物质卫星、量子卫星和 SJ-10 卫星在有效载荷初样研制总结及正样出厂

评审前都组织了专项质量检查。

组织重大风险项目独立评估,降低研制风险。针对科学卫星工程项目技术复杂、协作面广、队伍新、风险大、质量与可靠性要求高等特点,为强化过程管理、提高风险控制能力,专项总体策划组织了重大风险项目独立评估工作,组织质量与可靠性、软件工程化等相关领域专家对量子卫星和暗物质卫星初样研制阶段重大风险项目开展了独立评估,有效解决了研制中的难题,降低了技术风险,提升了产品质量。

## 2.5 提升管理等级,工程、卫星和有效载荷三级总体共保载荷质量、进度和成本

### 2.5.1 设立有效载荷总体,统筹管理载荷分系统

针对载荷研制单位普遍缺乏航天经验的实际情况,选择航天经验相对丰富的科学院所作为有效载荷总体是落实科学探测需求、提升载荷研制水平的有效办法。载荷总体负责有效载荷分系统的质量、进度和成本的管理工作。载荷总体便于在载荷层面贯彻航天产品研制质量要求和技术规范,按照产品研制技术流程协调管理和资源统筹,在载荷研制、试验及任务集成中发挥重要作用,为工程成功与科学目标实现提供重要保障。

例如,SJ-10卫星科学载荷多达19台套,载荷研制单位11家、工程经验参差不齐,如何确保载荷研制既满足科学需求又满足工程要求,是研制当初就面临的难题。该工程的载荷总体单位——国家空间科学中心通过精心组织飞行前载荷联试,合理安排载荷工作流程,对发射场、在轨飞行及回收工作进行了周密策划和组织,大大降低了后续整星测试、在轨飞行及回收任务中发生问题的风险。在卫星资源有限的情况下,使每台载荷均成功开展了在轨实验,获得大量有价值的科学数据。再如,量子卫星任务研制的重点和难点是有效载荷,但中国科学技术大学作为科学目标和有效载荷配置的主要提出方,研制人员航天产品研制经验少,且工程立项时尚未建立有效的研制质量体系,鉴于此,在工程立项之初,安排了航天工程经验相对丰富的中国科学院上海技术物理研究所作为有效载荷总体单位,有效保证了工程的质量、进度和成本。

### 2.5.2 工程、卫星和有效载荷三级总体共保质量和进度

为了确保载荷质量和进度,加大对有效载荷分系统的管理力度,工程总体高度关注有效载荷研制进展。工程总体协同卫星系统总体,制定有效载荷分系统年度考核节点,推行对有效载荷分系统的“过程跟踪、节点控制、里程碑考核”项目管理准则,细化监督、检查和考核的流程,重点关注关键计划节点、关键技术指标、质量控制点和技术风险点;加大对有效载荷分系统各阶段研制工作的管理力度,加强研制和生产的现场跟踪,尤其对“短线”项目,深入载荷研制单位和大型试验现场,实时掌握研制进展,密切跟踪问题处理情况和研制人员状态,及时了解、收集和分析质量问题相关信息,遇到问题现场协调、及时处理解决。进入正样研制阶段这一关键时期,要求对质量和进度管理细化到周报、“短线”日报,及时比对每天的工作完成情况,发现进度变化时及时进行控制,确保工程质量和进度。

例如,暗物质卫星自进入初样研制阶段便采取了工程总体、卫星总体和有效载荷总体“三总联席会”的管理模式,工程“两总”深入一线,靠前指挥,对研制过程中出现的重大问题进行现场督办,并协助载荷研制单位调动一切可以调动的力量进行攻关,确保工程目标实现。

## 3 关于载荷PI制及数据PI制的思考

空间科学任务载荷PI制与现行的设计师体系有密切联系,也有显著区别。空间科学先导专项一期和二期科学卫星任务中,只有部分载荷设立了PI。鉴于载荷PI在工程各阶段发挥了重要作用,可考虑在后续卫星任务中全面推广,并进一步规范载荷PI制。关于载荷PI的任命,因每项科学任务情况不同,目前的做法是在工程立项论证阶段由拟任首席科学家指定,在工程立项后由首席科学家所在单位任命。是否需要上升到工程总体统一任命,尚无定论,需要在卫星任务实践中探索。

空间科学先导专项二期ASO-S卫星任务对有效载荷级数据PI制管理模式进行了有益尝试。载

荷数据 PI 主要负责研究载荷数据的格式和应用,在获得数据后,开展分析研究,尽快获得研究成果,与载荷 PI 共同协助首席科学家推进成果产出。但数据 PI 职责如何定位才能更有益于发挥作用、更有益于成果产出最大化,与载荷 PI 的责权如何划分,是否具有推广应用的普适性等,仍需在实践中探索。

## 4 结论

空间科学任务是用具有确定性能的仪器探知未知世界,具有很强的探索性。空间科学任务有效载荷是实现任务科学目标的关键和核心,也是工程管理的焦点。鉴于中国空间科学任务和有效载荷的特殊性以及研制单位和队伍的现状,在载荷研制过程中采取了一系列创新措施,设置载荷 PI,高度重视关键技术攻关和载荷标定试验,充分开展地面试验验证,提升载荷管理等级,并以单位载荷研制为抓手,激励科学创新,促进科学与技术、科学与工程有机融合,全面推进质量管理,确保工程质量、进度和成本,促进了重大成果产出,为中国空间科学的可持续发展积累了宝贵经验。

中国的空间科学任务虽然已经产出重大科学成果,但与世界主要航天国家还有很大差距,需要不断总结经验,探索规律,推动中国空间科学事业的长期可持续发展,为建设科技强国和航天强国贡献智慧和力量。

**致谢** 在撰写过程中得到了暗物质卫星工程总师助理、中国科学院国家空间科学中心陈晓敏研究员的指导。本文主要观点在空间科学任务中经过空间科学先导专项参研参试和管理人员的实践,已得到有效应用。

### 参考文献(References)

- [1] 吴季, 孙丽琳, 尤亮, 等. 2016—2030年中国空间科学发展规划建议[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(6): 707-720.
- [2] 相里斌. 发展空间科学 建设航天强国[N]. 中国科学报, 201-07-06(001).
- [3] 吴季. 空间科学规划及对航天运输系统的需求[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(2): 17-21.
- [4] 空间先导二期启动 五年将发4颗科学卫星[EB/OL]. (2018-07-04)[2019-02-01]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2018/7/415163.shtml>.
- [5] 吴季. 空间科学任务及其特点综述[J]. 空间科学学报, 2018, 38(2): 139-146.
- [6] 吴季. 科学卫星引领原创突破[N]. 光明日报, 2016-06-17(010).
- [7] Nature引以为荣: 17年后中国学者凭悟空真见暗物质?[EB/OL]. (2017-11-30)[2019-05-03]. <http://tech.sina.com.cn/d/s/2017-11-30/doc-ifypceiq8008265.shtml>.
- [8] Castelvechi D. China's quantum satellite clears major hurdle on way to ultrasecure communications[EB/OL]. (2017-07-15)[2019-08-13]. <https://www.nature.xilesou.com/articles/nature.2017.22142.pdf?origin=ppub>.
- [9] 吴季. 空间科学——我国创新驱动发展的重要阵地[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(5): 583-589.
- [10] 孙秋霞. 实践十号: 向空间强国迈进[J]. 中国科技奖励, 2016(5): 10-12.
- [11] 常进, 冯磊, 郭建华, 等. “悟空”玉宇探测暗物质-暗物质粒子探测卫星简介[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 22-25.
- [12] 张志会, 马连轶. “墨子号”量子科学实验卫星大科学工程的历史与管理模式探究[J]. 中国科技论坛, 2018, 271(11): 7-14.
- [13] 唐琳. 空间科学先导专项: 探索中国空间科学发展之路[J]. 科学新闻, 2018, 551(9): 36-43.
- [14] 董磊, 李华旺, 诸成, 等. 以载荷为中心的暗物质探测卫星机电热一体化设计[J]. 空间科学学报, 2017, 37(2): 229-237.
- [15] 宋江波, 尤睿, 李昊, 等. 硬X射线调制望远镜卫星研制特点及项目管理实践[J]. 航天器工程, 2018, 27(5): 50-54.
- [16] 庞丹, 潘晨. 科学实验当先锋: 访实践-10卫星总设计师赵会光[J]. 国际太空, 2016(5): 2-5.
- [17] 杜玉波. 高校要为关键核心技术攻关担当责任[N]. 光明日报, 2019-03-13(06).
- [18] 中国暗物质卫星获重要进展 完成关键标定实验[EB/OL]. (2015-08-28)[2019-02-01]. <http://news.sohu.com/20150828/n420004190.shtml>.
- [19] 郭宝柱. 航天组织管理的系统思维与系统工程方法[J]. 科技导报, 2018, 36(20): 38-42.
- [20] 林柯妍. 空间科学卫星工程质量管理方法探索与实践[J]. 质量与可靠性, 2016(2): 15-18.

## Practice and analysis of payload management for space science missions in China

LI Chao, WEI Fei

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

**Abstract** Space science payloads are instruments with definite performance, utilized to explore the unknown world. Due to lack of engineering experience the payload team, mainly composed of space scientists, is facing significantly increasing difficulty and complexity in solving key technologies of science payloads. China has thus established a management mode of payload principle-investigator (PI) system for space science missions, with emphases on managerial requirements for key technology and payload calibration, fully carried out ground test verification, upgraded payload-management level, and payload development. All science payloads are required to be fully verified by pre-flight experiments. All the measures have significantly stimulated scientific innovation, reduced technical risks, promoted organic integration of science and technology, science and engineering, comprehensively given impetus to quality management, and promoted major achievements. Based on the successful practice of payload-management, this paper puts forward some relevant thoughts on the implementation of payload PI system and data PI system.

**Keywords** space science mission; space science satellite; scientific payload; program management ●



(责任编辑 王志敏)