

特色专题

“墨子号”量子科学实验卫星的工程创新与技术突破

朱燕南, 王安轶*

摘要 基于“墨子号”研发资料,回顾其立项、研制及技术突破过程,总结科学家深度参与所体现的工程思维、团队紧密协作及指标融合的新特点。研究表明,“墨子号”项目是一种新型举国体制下的大科学工程模式,科学家和工程师联合团队围绕科学目标,通过网络式大协作实现技术攻关创新,其中科学是导向,技术是支撑,工程则体现了各系统的统筹与通力合作。

关键词 量子科学实验卫星;量子通信;“墨子号”;大科学工程;科学目标;技术支持

“墨子号”是中国自主研制的全球首颗量子科学实验卫星,于2011年12月14日立项,2016年8月16日发射。“墨子号”科学实验卫星项目(以下简称“墨子号”项目)最终实现了3大科学目标:星地高速量子密钥分发^[1]、星地量子纠缠分发^[2]和地星量子隐形传态^[3],并取得了一系列重大科学成果。“墨子号”的研制不仅促进了量子通信技术工程化的创新和突破,还通过洲际量子密钥分发等拓展实验,推动了2022年诺贝尔物理学奖对量子信息领域的认可^[4]。“墨子号”项目的成功使中国在量子通信领域实现了由“跟随者”向“领跑者”身份的转换^[5],标志着中国在该领域的崛起^[6]。2023年11月,中高轨道量子科学卫星成功立项,中国量子空间科学即将进入多线程开展的时代,面临新考验,也迎来发展的新机遇,在此时间节点,对“墨子号”项目的工程创新历史进行回顾和总结,对于中国量子空间科学具有重要的参考意义。

2016年以来,“墨子号”项目受到科学界和社会的广泛关注,国内外科技期刊和新闻报道积简充栋。

项目主要参与者对“墨子号”项目做出了细致回顾^[7],《Nature》杂志亦对该项工作做出了高度评价^[8]。2018年,张志会等基于对王建宇院士的访谈,总结了“墨子号”项目在大科学工程管理中“首席科学家+工程两总”模式的首创性贡献^[9]。本文通过挖掘史料,并结合对“墨子号”项目成员的口述访谈,从“墨子号”项目立项准备、项目开展和关键技术突破3方面回溯其实施过程,探讨科学家深度参与技术研发的新特点,并讨论在新型举国体制下大科学模式中科学、技术和工程的关系问题。

1 科学先行:“墨子号”项目的立项

诞生于20世纪80年代的量子信息学,是一门在量子物理学基础上不断突破人类对微观世界规律认知与操控极限的实验科学,包括量子通信、量子计算和模拟、量子精密测量等分支。其中,量子通信凭借其在信息传输安全性方面的优势,被世界各国列为未来信息技术发展的重要领域之一。进入21世纪后,中国物理学界抓住发展机遇,在该领域取得了一系

中国科学技术大学人文与社会科学学院,合肥 230026

收稿日期:2024-05-27;修回日期:2024-11-10

基金项目:国家社科基金一般项目(21BZS089)

作者简介:朱燕南,博士研究生,研究方向为量子信息科技史,电子信箱: ynzhu@ustc.edu.cn;王安轶(通信作者),副教授,研究方向为中国近现代科技史、工程史等,电子信箱: anyiwang@ustc.edu.cn

引用格式:朱燕南,王安轶.“墨子号”量子科学实验卫星的工程创新与技术突破[J].科技导报,2025,43(5):89-97;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.05.00578

列国际领先成果。在此契机下,“墨子号”项目应运而生。

1.1 量子通信技术的发展与在中国的起步

20世纪90年代,量子密码理论的诞生和初步试验,以及量子隐形传态实验的成功使量子通信技术获得了飞速发展。1989年,美国IBM公司实验室实现了世界上第一个量子信息传输实验^[10]。2002年,BBN公司、哈佛大学和波士顿大学开始为美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)联合设计搭建世界上首个量子密钥分发保密通信网络。欧洲作为量子物理和量子信息学的发端地也不甘落后,2004年启动 SECOQC (Development of a Global Network for Secure Communication based on Quantum Cryptography)项目并于2008年在维也纳完成。

中国在量子信息学领域起步稍晚,1998年6月中国科学技术大学(以下简称“中国科大”)主办了第98次香山科学会议,以“量子通讯与量子计算”为主题。会上,科学家对国内外最新研究成果展开讨论,最终达成共识,认为“量子信息科学的诞生为我国在信息科学领域赶超国际水平提供了一次难得的机遇”^[11]。此次会议是中国量子信息学发展史上的一个重要的里程碑,增强了国内研究者发展量子信息学的决心和信心。彼时,中国科大已经是全国为数不多的从事量子信息研究的泉源之一,汇集了该领域最重要的科研力量。2001年,郭光灿带领的中国科学院量子信息重点实验室依托中国科学技术大学成立,开展了对光纤量子密码传输研究的尝试。同年,潘建伟回到中国科大组建了国内首个量子调控实验室,招募了副教授杨涛,博士后赵志,博士研究生张安宁、彭承志和张强,以及本科生陈宇翱和印娟等组建团队,部分成员后续成为了“墨子号”项目的中坚力量。实验室通过发展多光子纠缠技术,取得了多项重要进展,逐渐在国际上崭露头角。

1.2 卫星立项论证前的科学和技术准备

中国在自由空间量子通信领域的研究几乎与国际同步。2002年,美国理查德·休斯(Richard J. Hughes)研究组和英国布里斯托尔大学约翰·拉瑞特(John G. Rarity)研究组分别实现了10 km和20 km的量子密钥分发(quantum key distribution, QKD)实验,验证了

利用卫星进行QKD的可行性。而此时中国潘建伟量子团队(以下简称“量子团队”)也已在量子纠缠源技术方面获得了一系列进展^[12-13]。在对该领域研究前景研判基础上,潘建伟决定大胆启用物理电子学专业、当时尚为博士研究生的彭承志作为主力进行关键技术和科学实验探索研究。

2003年,量子团队的杨涛、彭承志和张强等选择中国科大实验室、合肥市大蜀山和郊区一家农户作为3个实验点开始进行外场实验。2年后,团队成功实现了13 km自由空间纠缠光子分发^[14]。该项实验的量子纠缠分发距离不仅远超之前蔡林格小组600 m的纪录^[15],还证明了量子纠缠分发距离超过大气层厚度时光子仍然保持纠缠特性,验证了利用卫星进行量子纠缠分发的科学可行性。此项工作受到了中国载人航天工程(以下简称“921”工程)应用分系统的关注。中国科学院认为,若需完成外太空自由空间量子通信实验,或许依托“921”工程以载荷的形式完成实验是最佳途径。

2005年5月,在中国科学院和中国科大的支持下,量子团队通过了载人航天科学实验系统空地QKD的实验论证。该团队还在中国科学院和中华人民共和国科学技术部、国家自然科学基金委员会的项目支持下进行空间尺度量子实验前期预研,实现了6光子纠缠,发展了Decoy光源技术,在实验室平台演示了百公里光纤信道QKD。

2007年,蔡林格教授牵头的多国科学家团队与欧洲航天局合作^[16],提出了以国际空间站为平台的空间量子通信和大尺度量子力学检验实验计划(QUEST计划)。来自国际竞争的压力让量子团队加快了申请发射科学卫星的步伐。同年9月,潘建伟致信中国科学院相关领导,正式提出了进行星地量子通信研究的建议,希望获得进一步支持从而最终发射独立卫星进行实验。随后,中国科学院召集中国科学院上海微系统与信息技术研究所从事低维半导体物理、材料和器件研究的封松林院士和中国科学院微小卫星工程中心(现为中国科学院微小卫星创新研究院)朱振才研究员与潘建伟、杨涛和彭承志在中国科学院上海分院进行可行性讨论,并最终达成尽快实施项目的共识。

2008年是量子卫星项目进展的关键年,这一年中国科学院拨款7500万元,为量子卫星预研“空间尺度

量子实验关键技术与验证”项目(以下简称 QUESS 项目)提供了经费保障。项目由潘建伟和王建宇共同担任项目负责人,中国科大量子团队、中国科学院上海技术物理研究所(以下简称“技物所”)和中国科学院微小卫星工程中心组成的联合攻关团队(以下简称“联合团队”)负责地面预研,中国科学院上海天文台等作为星地量子信道传输特性试验^[17-18]合作单位进行支持。在中国科学院院内单位整体协作下,QUESS 项目开展了空间尺度量子实验关键技术的研究和实验验证。

2008—2011年, 联合团队主要完成了百公里级量子隐形传态、量子纠缠分发和模拟卫星—地面之间的量子通信等关键性试验, 充分验证了利用卫星实现量子通信的可行性。在高精度高性能纠缠源、星上和地基 ATP(acquisition, tracking, pointing, 空地间通信使用的高精度、跟踪、瞄准系统) 及光机系统等多项重大关键技术上取得了具有自主知识产权的突破, 并研制出卫星原理样机。这一系列科技成果为“墨子号”项目奠定基础, 并在其立项论证过程起到至关重要的作用。该项目还为后续的卫星项目培养了一支基础研究与应用相结合的创新型优秀人才队伍。至此, 量子科学卫星立项论证前的科学验证、技术发展和人才储备均已初步完成。

2011年1月25日,经历8年的科学和技术筹备,量子科学实验卫星正式立项(代号 KX-02),成为中国科学院空间科学先导专项的首批4颗科学实验卫星之一,2016年发射前被正式命名为“墨子号”。“墨子号”作为一项探索性前沿的大科学工程,其成功立项是基于中国在自由空间量子通信领域的领先科研能力以及中国科学院在空间科学技术方面的深厚积累。在预研项目中,联合团队尝试了以解决科学问题为牵引,工程团队协助科学团队实现技术指标的合作模式。卫星立项后,联合团队还将深度合作,进一步围绕科学目标开展卫星工程建设。

2 工程统筹:围绕科学目标的项目开展

2011年12月14日,中国科学院在北京召开会议,审议确定了大系统组织管理机制,由首席科学家和工程总师带领,协调指挥6大系统,明确了工程研

制建设的主要问题、工程的总体计划安排(图 1)。会议还确定了卫星研制的工程大总体初步方案、主要技术指标、研制周期和进度安排以及预算等。

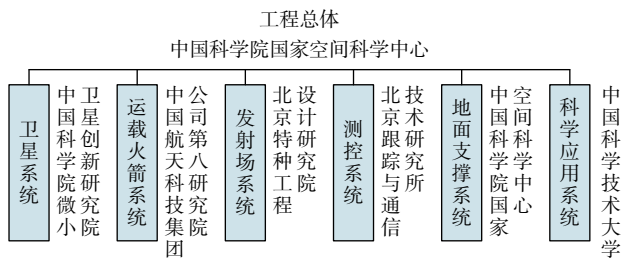


图 1 “墨子号”工程总体及 6 大系统

“墨子号”兼具重大科学价值与广阔应用前景，其成功与否完全取决于科学目标的实现程度。“墨子号”项目团队从项目启动至结束的每一个阶段，都必须坚定不移地确保技术指标的达成与科学问题的有效解决，保持高度的连贯性和专注力。为此，首席科学家和总工程师、总指挥必须对项目开展和工程实施进行具体的安排和领导，保障科学研究与工程研制紧密融合以及各项科学实验顺利完成，最终实现科学目标。

2.1 设立不同层级的科学目标

在“921”工程项目的基础上,为提高卫星的国际科研竞争力,中国科大量子团队设立了3个层级的科学目标:星地高速 QKD、星地量子纠缠分发和地星隐形传态(表 1)。“墨子号”3 个层级的科学目标各有其科学任务及意义。如“在星地之间高速传输量子密钥”这一基本目标,它的达成将使中国成为全球首个成功实施星地量子原理实验的国家。这不仅具有重大的科研价值,还为量子通信产业化发展开辟了道

表 1 “墨子号”不同层级科学目标

目标层级	目标名称	目标特点
基本目标	在星地之间高速传输量子密钥	完成即为项目圆满成功 在科学性和产业化方面都有重要意义
拓展目标	在空间尺度上验证量子纠缠对贝尔不等式的违背以验证量子力学的完备性	对科学目标的进一步追求
探索目标	利用纠缠实现空间尺度的量子隐形传态	技术最困难、指标要求最高

路。相较于基本目标,拓展和探索目标在技术实现上更为复杂,且其科学意义更为深远——旨在通过空间尺度的量子实验,首次在大范围内验证量子力学的完备性和非定域性,这对量子力学乃至整个物理学的发展都起着至关重要的作用。通过设立不同层级的科学目标,科研团队的任务导向更加明确,卫星工程的实施紧密围绕这些目标展开,各系统需严格遵循科学技术指标,并积极协同调整,以确保任务的顺利完成。

2.2 以科学目标为最终追求的工程管理机制

至此,“墨子号”项目已不再是一个仅由单个实验室能够完成的科学项目,而是需要依赖由科学应用系统、卫星系统、火箭系统等多个系统综合参与的大科学工程。因此,在项目实施之初,理顺各个部门的任务、职责和相互协调机制,建立科学的工程管理机制至关重要。

“墨子号”项目采用了“首席科学家+工程两总”的管理模式,首席科学家由潘建伟担任,工程总设计师为徐博明,总指挥为阴和俊。首席科学家负责科学目标的实现,主要职责包括:负责提出和策划整个专项的发展战略规划、科研方向和目标、研究任务分解方案;统筹安排各项目之间的协同创新;批准专项主要研究人员的聘用;提交年度报告和接受评估及专项调节经费的调配使用。工程总设计师负责组织和实施量子通信卫星系统的工程化、领导和指挥关键技术攻关,组织编制系统总体管理规范,批准专项研制流程,提交年度报告和接受评估。总指挥是整个任务的领导核心,负责确保卫星规划、发射、运行和维护的全过程顺利进行。此外,该卫星项目特别设立了项目总体组,专门负责“天地一体化实验”的总体规划与实施。中国科大作为总体组的牵头单位,由潘建伟担任组长,王建宇与朱振才分别担任副组长。总体组的主要职能是在工程大总体和首席科学家的协调和领导下,组织完成包括卫星系统和科学应用系统在内的天地一体化实验的工程研制,并在卫星发射升空后负责组织实施在轨科学实验,确保科学目标的完成。

在确立了科学指标作为核心追求的创新工程管理机制后,联合团队得以全心全意地投入项目工程的推进,尤其是由中国科大主导的科学应用系统及卫星有效载荷系统的研发工作中。

2.3 科学家深度参与的工程创新模式

作为承载科学实验的项目总体之一,“墨子号”卫星的科学应用系统由中国科大牵头,量子团队承担了大部分研制任务(表2)。另一重要的科学目标承载总体——卫星有效载荷系统由技物所牵头,联合团队承担研制。在载荷系统中,ATP与光机热系统、密钥生成与量子分发系统以及量子密钥接收系统这3个关键分系统,由于需要实现地面与卫星载荷之间的紧密联动,因此它们的研制与搭建工作均由专门团队负责执行(图2)。其中,卫星载荷相对地面站系统存在质量和体积限制、光学平台微振动、相对高速运动和转

表2 “墨子号”科学应用系统职务任命

序号	分系统名称	负责人	职务	单位
1	总体集成与科学实验中心分系统	彭承志	主任设计师	中国科大
		姜晓军	副主任设计师	中国科学院国家天文台
		任继刚	副主任设计师	中国科大
		李会民	副主任设计师	中国科大
2	地面站建设和改造分系统	王建峰	主任设计师	中国科学院国家天文台
		马路	副主任设计师	中国科学院新疆天文台
		张晓祥	副主任设计师	中国科学院紫金山天文台
		熊耀恒	副主任设计师	中国科学院云南天文台
		卢晓猛	副主任设计师	中国科学院国家天文台
3	新建望远镜分系统	姜晓军	主任设计师	中国科学院国家天文台
		葛亮	副主任设计师	中国科学院国家天文台
		任继刚	副主任设计师	中国科大
4	地面站量子终端分系统	廖胜凯	主任设计师	中国科大
		任继刚	副主任设计师	中国科大
		印娟	副主任设计师	中国科大
5	量子隐形传态实验分系统	任继刚	主任设计师	中国科大
		雍海林	副主任设计师	中国科大
		徐凭	副主任设计师	中国科大
6	广域量子密钥应用平台分系统	李季	副主任设计师	中国科学院南京天文仪器有限公司
		江晓	主任设计师	中国科大

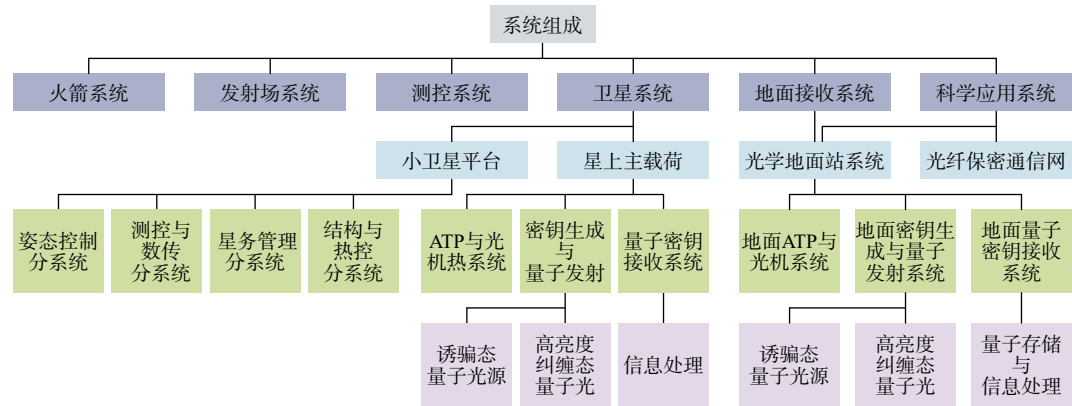


图2 “墨子号”卫星系统及科学应用系统分解

动等问题,需要攻关的科学技术难题更加显著。

联合团队需要将量子光学系统结合传统光学工程,完成星地间高速、有效的 QKD 和纠缠分发等任务需要的技术指标。这项艰巨的研发任务由中国科大和技物所共同承担(表 3)。在缺乏国际量子光学卫星工程化先例的背景下,量子团队肩负起了任务分解与光量子技术工程化的重任,同时,技物所等工程团队也积极承担了包括星地高速 ATP 新系统研发在内

表 3 “墨子号”有效载荷分系统职务任命

序号	载荷名称	负责人	职务	单位
1	有效载荷集成与测试分系统	舒嵘	主任设计师	中国科学院技物所
		彭承志	副主任设计师	中国科大
		姜浩	副主任设计师	中国科学院技物所
		张冰娜	副主任设计师	中国科学院技物所
2	量子密钥通信机分系统	张亮	主任设计师	中国科学院技物所
		袁立银	副主任设计师	中国科学院技物所
		印娟	副主任设计师	中国科大
3	量子纠缠分发机分系统	贾建军	主任设计师	中国科学院技物所
		何志平	副主任设计师	中国科学院技物所
		刘定权	副主任设计师	中国科学院技物所
		廖胜凯	副主任设计师	中国科大
4	量子纠缠源分系统	印娟	主任设计师	中国科大
		姜紫庆	副主任设计师	中国科学院技物所
		曹原	副主任设计师	中国科大
		任继刚	副主任设计师	中国科大
5	量子实验控制与处理机分系统	廖胜凯	主任设计师	中国科大
		蔡文奇	副主任设计师	中国科大
		陈小文	副主任设计师	中国科学院技物所
6	高速相干激光通信机分系统	张亮	主任设计师	中国科学院技物所
		袁立银	副主任设计师	中国科学院技物所
		印娟	副主任设计师	中国科大

的多项工程任务。在研发过程中,科研团队与工程团队紧密协作、无缝对接,实现新技术的即时共享。这种高度协同的合作模式极大加速了科学目标的达成与技术难点的攻克,取得了显著而高效的成果。

与以往启动空间科学工程的传统管理模式不同,“墨子号”等第一批科学实验卫星创造性地由中国科学院以“空间科学先导专项”的形式直接管理。作为一颗对量子通信科技自主创新能力要求极高的科学卫星,“墨子号”无论在前期预研、卫星研发还是后期实验中,首席科学家潘建伟领导的科学团队都深度参与其中,尤其在关键技术攻关的过程中,以中国科大为主力的科学应用系统和有效载荷团队都发挥了重要的作用。

3 技术支撑:科学目标和技术难点联合攻关

星地量子科学实验的本质是实现远距离、高速率的量子态传递,实际操作模式包括且不限于在两个相隔 500 km 以上、高速运动的卫星和 1 个或 2 个地面站发射或接收光子。立项后,联合团队的首要任务是对有效载荷(图 3)进行方案设计与关键技术突破,经深入研究,明确了需要攻克的 3 大核心挑战:(1) 研制高亮度小型化纠缠源;(2) 建立低损耗的量子通信光链路;(3) 进行偏振保持技术的自主研发。

3.1 纠缠光源的方案选择和技术突破

量子纠缠源为纠缠光子对的产生装置,是纠缠分发实验的核心。量子纠缠源分系统由光机子系统和量子力学 2 个功能部分组成。中国科大承担了有效载荷量子纠缠源的量子力学部分;技物所承担了纠缠

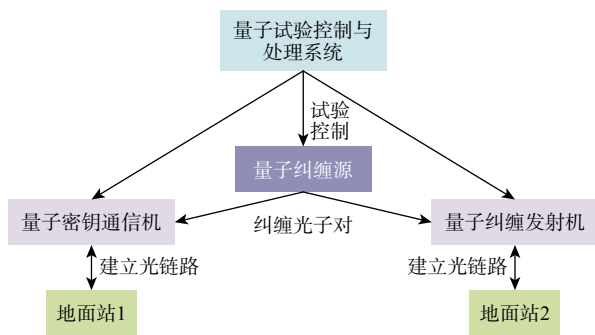


图3 “墨子号”有效载荷配置

源光机部分。印娟担任纠缠源分系统主任设计师，总体负责量子纠缠源载荷的研制工作，副主任设计师是中国科大的曹原、任继刚和技物所的姜紫庆，分别负责光学设计、装调和 Sagnac 环形干涉仪(以下简称“Sagnac 环”)的研制；光学地检和天地一体纠缠分发实验地面设备的研制，以及整个纠缠源的结构设计和工艺实施。

要将纠缠源送上太空，需要达到高亮度、小型化、稳定化的要求。纠缠源分系统团队(以下简称“纠缠源团队”)分别从 Sagnac 结构、离轴凹面反射镜设计、固定方式和纠缠源亮度 4 方面进行研制。

Sagnac 环是纠缠源最核心的模块，是一个由下转换晶体 PPKTP、离轴凹面聚焦系统、双波长极化分束器和双波长半波片组成的 10 cm 三角形模块(图 4)，通过非线性晶体产生频率关联和时间能量关联，再通过 Sagnac 干涉转化，制备出偏振自由度的双光子纠缠态。

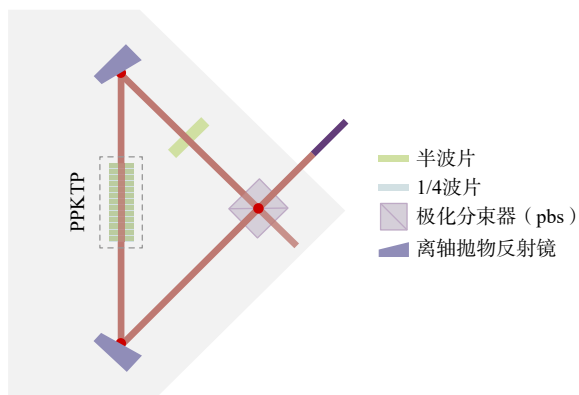


图4 Sagnac 环形干涉仪示意

透镜作为一种极为复杂且要求严苛的光学元件，其特性深受焦距影响，从而在前后位置、倾斜角度等多个维度表现出高度的敏感性。当时国际上通用的

离轴凹面反射镜(以下简称“离轴凹反镜”)方案是在 Sagnac 环的入口和出口处各安装一个透镜，因此聚焦和共焦都在环外。这种平面结构的 Sagnac 环在满足航天级力学和热学等严苛要求方面，为纠缠源的设计与实现带来了相当大的挑战。纠缠源团队进行了方案创新，设计了离轴凹反镜共焦系统，将环外 2 个用于聚焦和共焦的透镜转化为反射镜，反射镜本身存在消色差的优势，避免了透镜对光的颜色的敏感度。纠缠源团队还通过设计将透镜结合到 Sagnac 环中，大大减少了系统设计的复杂度，提高了稳定性。

为达到既定的技术指标，曹原在实验平台上搭建了圆形测试结构，并采购了许多小口径的离轴凹反镜，用以验证其 Sagnac 效应。经过一系列测试，最终发现离轴凹反镜在平动、角度调整及旋转等多个维度上展现出最高的稳定性精度。确定设计方案后由中国科学院南京天文仪器有限公司对离轴凹反镜进行器件加工。纠缠源团队还创造性地采用正反两面布局，将泵浦激光器模块、Sagnac 环模块和单模光纤收集模块安置在光学底板正面，将辅助经典光模块排布于底板反面。这一设计将原本的平面结构转变为立体结构，不仅大幅减小占用面积，还显著增强了系统的稳定性，此创新方案在国际上尚属首例。

在加固设计方面，鉴于 Sagnac 环的光学部分对温度适应性有着严格要求，团队采取了先将 Sagnac 环固定于殷钢底板之上，随后再将整体嵌入到光机部分的光学底板中的策略。在固定工艺方面，科研团队在设计上和工程团队密切合作，成功提升了纠缠源器件的安装精度和稳定精度。最终，离轴凹反镜的稳定精度可达 $\pm 4\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{rad}$ 。

在提高纠缠源亮度指标方面，纠缠源团队从以下 3 方面着手：(1) 为保证纠缠源出光亮度，通过调研和多次实验，寻找到了性能优异的泵浦光；(2) 在方案设计阶段对 PPKTP 晶体的置入空间“留有冗余”，在工程研发阶段保持稳定性的同时，尽量延长了 PPKTP 晶体长度，从而提高了亮度产出率；(3) 通过使用单模光纤收集模块，保证了纠缠源和望远镜之间的光纤传输接收率大于 40%。此外，纠缠源团队还通过可调反射镜 PI，在卫星上天后进行“微调”，以避免微振动对耦合效率的影响。

2011 年底“墨子号”立项时，纠缠源团队对卫星

的科学指标进行分解,其中纠缠源亮度的总体技术指标是 2 MHz。2015 年,纠缠源正样的亮度频率达到 8 MHz, 偏振对比度为 20:1, 满足了所有性能指标要求。在卫星纠缠源的自主研发中,纠缠源团队融合工程思维,在器件稳定性和追求高技术指标之间做出平衡,这种新型模式对中国星载纠缠源技术实现国际领先的突破有重要的推动作用。

3.2 量子通信光链路和保偏技术攻关

高精度量子通信光链路(以下简称“光链路”)是为了进行星地量子通信科学实验,在卫星和地面间建立的高精度 ATP 系统。光链路需配备多波段量子光源、信标光源和同步光源,满足多个发射、接收波段的光轴配准和精确指向,其技术要求极高且非常复杂。此项工作由技物所张亮、贾建军等和中国科大廖胜凯等团队成员共同承担。当时国内尚未有空间光通信 ATP 系统成功实施的先例,而量子光跟瞄系统还需同时确保光子的偏振态保持稳定,这对系统的设计和技术实现都是极大的挑战。在 QUESS 项目中,技物所已经对该项技术进行了预研发,通过浮空和运动目标平台试验,实现了跟瞄精度 3 μrad 的理想水平^[19]。

在卫星项目中,联合团队通过查阅文献、自主设计实验等方式,提出了卫星对站指向和载荷自主寻的相结合的一星两站光链路建立的总体方案。采用了“凝视—凝视”的捕获策略,实现了卫星与两个地面站之间的快速捕获对接。同时,联合团队依托 STAR1000 (CMOS)探测器,运用了一系列先进技术,不仅实现了超前瞄准功能,有效避免了较大误差的产生,还通过星地联合扫描的方式,对光轴残差进行了精确修正。这项由国内自主研发的量子光跟瞄系统在国际上取得了领先地位,并获得了多项相关技术专利。“墨子号”发射后的 1 年半内,星地量子光链路成功建立 600 多次^[20],为快速实现科学目标提供了坚实的保障。此外,由于卫星和地面之间进行着高速且旋转的复杂运动,联合团队需从技术层面保证纠缠源 (quantum entanglement source, QES) 产生的光子分别通过纠缠发射机 (quantum entanglement transmitter, QET) 和量子密钥分发发射机 (quantum key distribution transmitter, QKDT) 后,仍然能从卫星向地面站发射相同偏振的光子。这个重要的技术问题要求纠缠

源偏振好、路径保偏好、地面旋转对准精度高。联合团队分别进行了不同平台、不同对象的保偏技术研发。以纠缠源的保偏为例,团队制作了稳定性优异的光源支架,保证卫星平台对偏振的扰动是稳定值,同时用波片补偿单模光纤的扰动偏振,进行极化控制。通过对卫星技术指标进行综合治理,团队满足了卫星预定的多项技术要求。

“墨子号”项目的成功,离不开中国坚实的航天工程基础以及联合团队、地面保障等多个团队的紧密协作。若非技物所等单位的卓越质量管理体系和先进的平台测试条件作为支撑,仅凭当时的中国科大量子团队是难以独立达成这一任务的。值得一提的是,联合团队不仅满足了卫星设计的基本指标,还额外设定并实现了更为严苛的内控指标,正是这样的努力,使得联合团队在卫星发射后的 1 年内就顺利完成了所有科学目标,并成功开展了多项拓展实验。

4 创新成果与社会意义

“墨子号”量子科学实验卫星在量子通信领域取得的卓越成果,经过严谨的学术评议赢得了科学界高度认可。《华尔街日报》以“1000 年后,中国重回(科技)创新之巅”高度评价了“墨子号”^[21]。“墨子号”的研制促进了相关技术的创新和发展,也为广域量子通信各种关键技术和器件的持续创新以及工程化问题提供了一流的测试和应用平台。高亮度小型化纠缠源、低损耗量子通信光链路及偏振保持等一系列关键技术工程化的突破和应用,为后续“济南号”、中高轨道量子科学卫星等项目提供了经验和保障。“墨子号”实现了千公里密钥分发,结合京沪保密通信干线及后续发射的“济南号”,开启了实用的天地一体化量子保密通信网络建设。

迄今为止,尚无任何其他国家能够成功发射达到“墨子号”同等技术指标的量子科学实验卫星,亦未能取得与其 3 大科学目标同等级的科研成果。这主要归功于中国新型举国体制下实施的大科学工程项目在关键核心技术攻关时所展现出的快速、高效的优势。“墨子号”项目的成功得益于以下 3 方面的工作。首先,作为科学家主导的大科学工程,其管理模式强调创新与效率并重,“首席科学家+工程两总”的

新型管理模式确保了科学团队效能的最大化;其次,中国科学院各单位打破地域与学科壁垒,构建了新型网络协同体系,确保项目能够加速推进,攻关效果事半功倍;最后,联合团队在大科学组织模式下结合科学目标和技术难点进行攻关,培养了一批量子领域的科研工程交叉型人才,从而高质量地实现了纠缠源、量子通信光链路等核心技术的突破。

“墨子号”量子科学实验卫星项目是中国科学家主导下实现科学与工程深度融合的成功典范。该项目开创性地采用了科学指标引领、技术创新与工程突破并重的研发模式,有效整合了全国量子信息领域的优势研究资源。这一创新模式不仅实现了量子通信领域的重大科学突破,更使中国在国际量子信息技术竞争中占据了战略制高点,为前沿科学研究与卫星工程技术的协同创新提供了成功范例。更重要的是,“墨子号”项目的实施为中国科研团队在量子信息学科的持续探索奠定了坚实基础,其成功经验对量子计算、量子模拟、量子精密测量等量子信息学领域的科学研究和工程实践具有深远的指导意义,充分彰显了重大科学工程对国家科技创新的引领作用。

致谢: 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家研究中心潘建伟院士、彭承志、陈宇翱、印娟、曹原、任继刚及廖胜凯等教授接受访谈并提出宝贵意见;合肥微尺度物质科学国家研究中心为本研究提供详实资料。

参考文献 (References)

- [1] Liao S K, Cai W Q, Liu W Y, et al. Satellite-to-ground quantum key distribution[J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 43–47.
- [2] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. *Science*, 2017, 356(6343): 1140–1144.
- [3] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation[J]. *Nature*, 2017, 549(7670): 70–73.
- [4] Nobel Committee. The Nobel Prize in Physics 2022[EB/OL]. (2022-10-04)[2024-05-27]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/>.
- [5] BBC News. China launches quantum-enabled satellite Micius[EB/OL]. (2016-08-16)[2024-05-27]. <https://www.bbc.com/news/world-asia-china-37091833>.
- [6] Jones S. China wins space race to launch world's first 'quantum communication' satellite in fight against hackers[EB/OL]. (2016-05-24) [2024-05-27]. <https://www.mirror.co.uk/news/world-news/china-wins-space-race-launch-8043085>.
- [7] 彭承志, 潘建伟. 量子科学实验卫星——“墨子号”[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1096–1104.
- [8] Merali Z. Data teleportation: The quantum space race[J]. *Nature*, 2012, 492(7427): 22–25.
- [9] 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(11): 1–8.
- [10] Bennett C H, Bessette F, Brassard G, et al. Experimental quantum cryptography[J]. *Journal of Cryptology*, 1992, 5(1): 3–28.
- [11] 香山科学会议会议组. 香山科学会议第98次学术讨论会综述[EB/OL]. (1998-06-20)[2024-05-27]. <https://xssc.ac.cn/waiwangNew/index.html#/xsscNew/meetingdetailsNew/259/jkxq.1998-06-20>.
- [12] Zhao Z, Yang T, Chen Y A, et al. Experimental violation of local realism by four-photon Greenberger-Horne-Zeilinger entanglement[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(18): 180401.
- [13] Yang T, Zhang Q, Zhang J, et al. All-versus-nothing violation of local realism by two-photon, four-dimensional entanglement[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(24): 240406.
- [14] Peng C Z, Yang T, Bao X H, et al. Experimental free-space distribution of entangled photon pairs over 13 km: Towards satellite-based global quantum communication[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(15): 150501.
- [15] Aspelmeyer M, Böhm H R, Glatzer T, et al. Long-distance free-space distribution of quantum entanglement[J]. *Science*, 2003, 301(5633): 621–623.
- [16] Ursin R, Jennewein T, Kofler J, et al. Space-QUEST experiments with quantum entanglement in space[J]. IAC Proceedings, 2008, doi: 10.1051/eppn/2009503.
- [17] Yin J, Cao Y, Liu S B, et al. Experimental quasi-single-photon transmission from satellite to earth[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 20032.
- [18] Wang J Y, Yang B, Liao S K, et al. Direct and full-scale experimental verifications towards ground-satellite quantum key distribution[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 387–393.
- [19] 张亮, 贾建军, 廖胜凯, 等. 星地量子通信光链路的建立与在轨验证[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1183–1197.
- [20] Zhang L, Dai J S, Li C K, et al. Design and in-orbit test of a high accuracy pointing method in satellite-to-ground quantum communication[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8291.
- [21] Dou E. After 1000 year slumber, China vows to invent again[EB/OL]. (2016-12-06)[2024-05-27]. <https://www.wsj.com/articles/after-1-000-year-slumber-china-vows-to-invent-again-1481042748>.

Engineering innovations and technological breakthroughs of *Micius* satellite for quantum science experiments

ZHU Yannan, WANG Anyi*

School of Humanities and Social Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract Based on original materials from the development of the *Micius* satellite, this article reviews its initiation, development, and technological breakthroughs. It summarizes the new characteristics of engineering thinking, close team collaboration, and integration of indicators embodied in scientists' deep involvement. Research has indicated that the *Micius* project represents a new model of large-scale scientific engineering under the national system. In this model, scientists and engineers collaborate in a networked cooperative fashion focused on scientific goals, where science guides, technology supports, and engineering exemplifies coordinated effort across systems for innovative solutions.

Keywords quantum science experimental satellite; quantum communication; *Micius* satellite; large-scale scientific engineering; scientific goals; technological support ●



(责任编辑 傅雪)