

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2018.00408

工程史

我国地球空间双星探测计划的工程史考察

何江波, 王大洲

(中国科学院大学人文学院, 北京 100049)

摘要: 地球空间双星探测计划是我国第一个由科学目标牵引的空间科学卫星计划, 是以我方为主的我国与欧洲航天局合作开展的大科学工程。基于一手档案材料与相关文献资料, 揭示了地球空间双星探测计划提出的历史背景和具体立项过程, 从组织制度、火箭研制、卫星与有效载荷研制、卫星的发射及运行等四个方面描述了其实施过程, 从科学数据的接收与处理、保障运行的技术创新两方面展示了其科技成就。最后, 从国际合作与协同创新两方面尝试总结了若干历史经验。

关键词: 大科学工程; 星簇计划; 地球空间双星探测计划; 中国科学院空间科学与应用研究中心

中图分类号: N09; V11 文献标识码: A 文章编号: 1674-4969(2018)04-0408-11

引言

地球空间双星探测计划(以下简称“双星计划”)是我国第一个由科学目标牵引的空间科学卫星计划, 是以我方为主、我国与欧洲航天局(European Space Agency, 缩写ESA, 简称欧空局)合作开展的大科学工程。“双星计划”由中国科学院空间科学与应用研究中心(以下简称中科院空间中心)的刘振兴院士于1997年初提出, 并由中科院空间中心牵头实施, 其主要科学目标是从宏观尺度对地球磁层进行两点探测, 以跨越极区和赤道区的两颗卫星探测地球空间环境, 研究当前地球空间最具挑战性的科学问题——磁层空间暴驱动和触发机制的全球多时空尺度物理过程。“双星计划”项目的起止时间为2001年2月19日

至2005年11月30日, 后延寿运行至2009年3月。期间, “双星计划”的赤道区卫星于2003年12月30日成功发射升空, 设计寿命18个月, 延寿28个月, 实际在轨运行至2007年10月; 极区卫星于2004年7月25日成功发射升空, 设计寿命12个月, 延寿36个月, 实际在轨运行至2008年7月。

关于“双星计划”的公开资料主要有以下几项: 作为首席科学家, 刘振兴曾描述了“双星计划”的背景、立项、运行、科学应用目标与意义以及国际上对“双星计划”的评价与推荐意见^[1], 并介绍了“双星计划”的国际合作^[2]与科学技术成果^[3]等情况; 作为“双星计划”的重要参与人员, 北京大学濮祖荫教授^[4]、中科院国家空间科学中心主任吴季和“双星计划”总指挥兼总设计

2011年6月, 中国科学院批准成立国家空间科学中心, 为依托空间科学与应用研究中心的院设非法人研究单元, 与空间科学与应用研究中心“一个机构两块牌子”。2015年6月, 中央编办批复同意中国科学院空间科学与应用研究中心更名为中国科学院国家空间科学中心。由于“双星计划”是在中科院空间科学与应用研究中心提出与实施的, 因此本文仍然使用中国科学院空间科学与应用研究中心为负责“双星计划”的机构名称。

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-05-14

基金项目: 中国科学院规划战略局项目“中国近现代工程史研究”

作者简介: 何江波(1986-), 男, 博士研究生, 研究方向为工程史与工程哲学。E-mail: hjbarmy@126.com

王大洲(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为工程史与工程哲学。E-mail: dzwang@ucas.ac.cn

师张永维^[5]、欧洲航天局原副局长 Maurice Bonnet^[6,7]等都分别回忆或评价了“双星计划”的立项、实施以及运行等过程。以上诸项都对研究“双星计划”具有重要的参考价值,但它们都不是历史学著述。董荣从中欧空间科学合作史的角度,分析了中欧空间科学合作关系的建立过程,并评价了“双星计划”在中欧空间科学合作史上的地位^[8],但忽略了大科学工程不同于一般科学研究的特点。本文基于历史学研究方法,依据项目工程档案和对有关科学家的采访记录等一手资料,对“双星计划”进行工程史考察,还原了项目从提出到运行的整个历程,总结了“双星计划”作为大科学工程的科技成就,并据此引出若干历史经验。

1 “双星计划”提出的背景

自1957年苏联发射人造地球卫星以来,国际上提出并实现了一系列空间科学探测计划,如20世纪60年代的普遍探测、70年代的国际磁层研究计划(IMS)、80年代的动力学计划(DE)和 中层大气计划(MAP),以及90年代的国际日地物理计划(ISTP)。^[9]通过这些计划,人类对地球空间的 认识有了质的飞跃,不但更清楚地认识了电离层,还探测到了电离层以外的地球空间,包括辐射带和磁层的边界。地球空间环境直接受太阳活动和行星际扰动的控制,特别是日冕物质的喷发会喷射出大量电磁物质射向地球,经常导致一些爆发性的事件,比如磁层亚暴、磁暴、电离层暴和热层暴等,这些空间暴会引发危害性的空间环境,对卫星系统、宇航员和人类生存有重要影响。

自1980年以后,国际科学界已经发现地球磁层并不是一个稳定的结构,它会随着太阳活动产生动态变化,而其变化规律是世界空间物理界的科学难题之一。^[10]探索地球磁层变化规律的一种方法是通过在日地空间各层次布置多颗卫星来联

合探测磁层的变化,但世界上没有哪个国家能够单独承担起全球性的多星探测任务。20世纪80年代初,国际空间界开始酝酿空前规模的国际合作空间探测计划,由国际空间局协调组组织和协调了“国际日地物理(ISTP)计划”。该计划的主要科学目标是将日地空间作为一个整体系统,在日地空间各层次发射多颗卫星,对日地系统连锁变化的物理过程进行协调探测和研究。该计划在保持各国空间探测计划独立性的同时,强调各个国家间探测计划的相互配合、补充与测量结果的可对比性。

1982年11月,欧洲空间物理学家提出使用极地轨道卫星探测地球磁层的顶区和磁尾区的设想。1983年,欧洲航天局的法国科学家提出“星簇”(Cluster)计划,用四颗完全一样的卫星编队飞行对磁层进行立体的空间探测。1985年,欧洲航天局正式启动“星簇”计划,并以此加入了国际日地物理计划产成为其核心项目。^[11]1990年7月,为了完善Cluster卫星科学数据系统(CSDS)的功能,欧洲航天局向世界各国科研单位发布通告,希望各国科研单位提出方案,参与“星簇”科学数据系统,围绕科学目标开展合作研究。^[12]1990年11月,为推动我国空间物理研究,刘振兴代表中科院空间中心写了一份合作方案送到了欧洲航天局。欧洲航天局科学评议委员会认为中方在基础研究方面有一定优势,于1992年2月通过了该提案,决定与中科院空间中心开展合作。1993年11月24日,中国科学院和欧洲航天局在北京签署了关于“中国科学院空间科学与应用研究中心与欧洲航天局Cluster科学数据系统(CSDS)的合作协议”。根据协议,中方建立了接收Cluster数据的计算机联网系统,中国Cluster数据和研究中心作为欧洲航天局CSDS的正式组成部分,向欧洲航天局CSDS提供与Cluster配合的中低纬区三个台的地面磁场观测数据,双方还合作开展了

国际空间局协调组(IACG),1981年由美国宇航局、欧洲航天局、原苏联和日本的空间局联合成立的空间科学国际机构顾问组。

Cluster 科学问题的研究。^[13]

星簇计划在 1992 至 1996 年间正式实施, 4 颗卫星由欧洲航天局新研制的阿丽亚娜 5 型火箭于 1996 年 6 月 4 日在欧洲航天局的法属圭亚那发射场发射, 刘振兴作为中国方面合作方代表应邀到发射现场观看, 但由于这是阿丽亚娜 5 型火箭第一次发射, 飞行程序软件存在问题而致使火箭发射失败, 四颗卫星化为乌有。1997 年 1 月, 刘振兴提出“双星计划”的初步设想, 并与濮祖荫等科学家讨论后,^[4]在 1997 年 4 月 1 日~4 日的北京香山科学会议上正式提出了“双星计划”, 主要科学目标是从宏观尺度对变化的地球磁层进行两点探测(图 1), 研究地球磁层空间暴驱动和触发机制的全球多时空尺度物理过程。

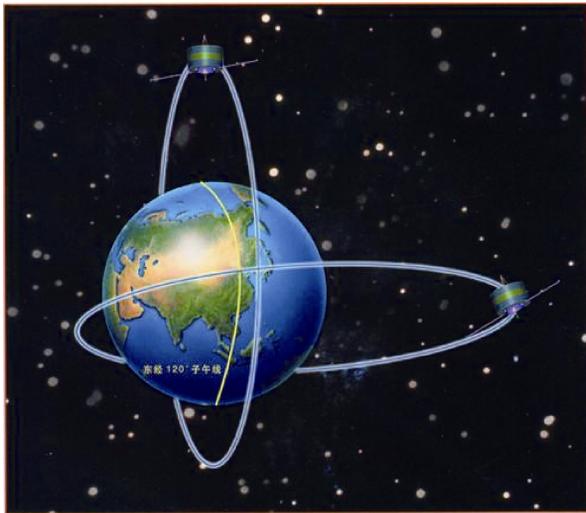


图 1 “双星计划”示意图
(引自文献[3]10。)

2 “双星计划”的立项

2.1 来自欧洲航天局的支持

1997 年 4 月 4 日, 欧洲航天局正式通过新的星簇计划, 称为 Cluster II, 它与此前的 Cluster 计划(现改称为 Cluster I)一样, 包括四颗相同的卫星, 每颗卫星各载有 11 台科学仪器。^[14]

在这种情况下, 1997 年 4 月初正式提出的“双星计划”就得到了国际上的高度关注。“双星计划”以两颗卫星从宏观尺度对变化的地球磁层进行两点探测, 而欧洲航天局的 Cluster 则是以四颗卫星从微观尺度对变化的地球磁层进行四点探测, 两者具有相互补充的关系,^[10]如果两个计划协同实施, 就可以构成对地球磁层宏观与微观相结合的多点探测体系(图 2)。因此, 欧洲航天局认为:“中国科学院提出的‘双星计划’对欧洲空间局 Cluster 水平的提高是至关重要的, 对国际日地关系计划将做出重要贡献”。^[10]

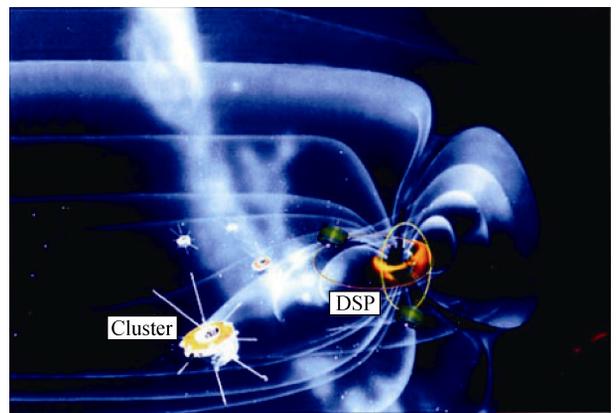


图 2 “双星计划”(DS)与星簇(Cluster)计划的关系示意图
(引自文献[3]12。)

1997 年 11 月 3 日, 欧洲航天局为了推动中国“双星计划”与 Cluster 的合作, 主动派出以欧洲航天局科学项目主任 Maurice Bonnet 教授为团长的代表团访问中科院空间中心。双方讨论了“双星计划”的科学目标、双星轨道和有效载荷, 签署了“双星计划”与 Cluster 合作议定书。欧方还表示, 将在卫星轨道计算、有效载荷研制等方面给予中方积极支持。^[13]1997 年 11 月 21 日~22 日, 欧洲航天局召开第 29 次 Cluster 科学工作会议, 通过了对中国“双星计划”的推荐书, 表示积极参加“双星计划”的合作, 并提供必要的支持。国际空间机构协调组(IACG)也在 1998 年 1

月莫斯科会议上对“双星计划”的科学构想给予了很高评价:“赤道区卫星的探测效能对23周太阳活动峰年期间IACG的战役至关重要,IACG强烈支持并推荐将‘双星计划’包括在23周太阳活动峰年期间IACG的探测任务中,以便与国际上的卫星交换科学数据。”至此,欧洲航天局和国际空间机构协调组(IACG)都通过了对“双星计划”的推荐书。^[15]

1999年9月7日至9日,欧洲航天局代表团一行8人在北京与中科院空间中心的专家们进一步讨论了“双星计划”的科学目标、有效载荷、卫星轨道和平台设计等,并于1999年9月14日正式向中科院和中国国家航天局提出与“双星计划”合作的请求。

2.2 曲折的立项过程

1997年4月在香山会议上提出“双星计划”后,刘振兴与濮祖荫作为“双星计划”的共同发起人分别将“双星计划”向各自所在的单位——中科院空间中心和北京大学申请立项,但濮祖荫所在的北京大学科技处认为北京大学是高校,应该从事科学研究的事情,不应该参与发射卫星的事而拒绝支持:“放卫星?那是人家总装备部的事!”^[4]另一方面,国家科委基础和高新技术司副司长邵立勤在此次香山会议的总结报告中建议支持“双星计划”立项,并于1998年5月9日与中科院基础局局长金铎商议,建议由中科院向国家科技部提出立项申请。

1998年5月中旬,中科院空间中心向中科院基础局呈送“关于地球空间双星探测计划(简称双星计划)有关问题的报告”,认为“目前最为急需的工作是尽快立项开始预研,不然很可能错过一次很好的国际合作的机会”,希望中科院基础局尽快向科技部申请立项。^[16]1998年6月和7月,

刘振兴又分别向中科院副院长与中科院秘书长写信,请求支持“双星计划”。1999年1月,中科院将“双星计划”建议书上报国家发展计划委员会。

凭借与欧洲航天局确立的合作关系,1999年10月,中科院正式启动了“双星计划”可行性论证,并于2000年1月7日召开了科学目标与有效载荷方案评审会。评审专家包括王大珩院士、吕保维院士、陶诗言院士、刘光鼎院士、曾融生院士、陈颀院士、王水院士等十几位科学家,他们分别来自中国科学院、中国空间技术研究院、国家地震局、北京大学、中国科技大学、信息产业部22所等单位。专家们对“双星计划”的科学目标与有效载荷方案给予了高度评价,认为该计划意义重大,主要表现在三个方面:第一,“双星计划”瞄准了当时国际上磁层领域最具挑战性的重大科学问题“磁层空间暴的触发机制”,立论根据充分,研究内容与实现途径的构思有创新;第二,“双星计划”的轨道方案具有显著特色,两颗小卫星既是配合运行、自成系统的地球空间探测计划,又可与Cluster 相互配合,做到优势互补;第三,“双星计划”的有效载荷配置合理,可以满足科学目标的需求。评审专家还认为,“双星计划”的实施,可带动我国空间探测技术的发展,提高我国空间物理研究和空间天气预报的创新能力,为保障航天活动的安全提供科学数据、科学依据和对策;“双星计划”与Cluster 的相互配合可以为我国空间科学发展带来额外收益,特别是有利于扩大我国与欧洲航天局空间科学和技术的合作规模,加强国际交流和数据共享,提升我国在国际空间界的地位。^[17]因此,评审专家建议科学院和有关部门尽快合作完成“双星计划”的大总体方案可行性报告,建议计划研究组进一步完善技术设计并加强与国内“子午工程”及其他卫星探测的合作,并建议在通过大总体方案可行性报告评

国家发展计划委员会是现国家发展和改革委员会的前身,1952~1998年称为国家计划委员会,1998年3月更名为国家发展计划委员会,2003年3月国务院机构调整改组为国家发展和改革委员会并沿用至今。

审后,有关主管机关尽快批准“双星计划”的立项并抓紧实施,与欧洲航天局 Cluster 紧密配合。^[18]

2000年3月9日~10日,中国“双星计划”代表团应邀赴巴黎欧洲航天局本部参加计划A阶段方案论证会,中欧双方在会上签订了进一步合作的协议。会上,中国代表团详细介绍了中科院空间中心提出的“双星计划”A阶段设计方案报告。欧洲航天局对A阶段研究报告非常满意,表示将积极支持“双星计划”以及“双星计划”与Cluster II之间的合作。

紧接着,“双星计划”总体方案可行性论证评审会于2000年5月22日在北京召开,由多位院士组成的评审委员会通过评审并再次建议尽快立项。由于欧洲航天局Cluster II计划的四颗卫星于2000年7月17日与8月7日相继发射成功,欧洲航天局最为关注的利用“双星计划”与Cluster II计划进行联合观测的需求变得更加迫切了。

2000年10月,中科院与中国航天科技集团联合致函国防科工委,认为国家尚未批准立项,没有经费开展仪器研制、订购元器件等工作,希望并恳请国防科工委预拨部分“双星计划”启动经费,中科院与中国航天科技集团再分别匹配适当经费,以维持队伍和研制关键部件。^[8]紧接着,2000年12月,“双星计划”被国务院正式列入“十五”计划,先期启动。2001年2月19日,中方召开了第一次与欧洲提供载荷方的技术接口协调会。7月9日,中国航天局与欧洲航天局正式签署“双星计划”合作协议。8月24日,确定了双星发射日期,订出了总体计划的进度日程节点。^[19]2002年4月,国务院同意“双星计划”立项。^[8]9月20日,国防科工委、国家发展计划委员会与财政部等部门批准了“关于地球空间双星探测工程

研制立项的请示”。2002年10月16日,中国科学院批准了中科院知识创新工程项目“地球空间双星探测计划科学问题研究”。这样,作为中国和发达国家之间的第一次从技术到应用的高层次、实质性对等合作的“双星计划”正式启动。根据预算,我国对“双星计划”的投入约1.1亿人民币,欧洲的投入约6000万人民币。^[16]

3 “双星计划”的实施

3.1 组织制度的建立

3.1.1 工程实施组织机制

“双星计划”工程部分的实施主体包括五个单位,分别是发射与测控系统单位、中科院空间中心、中国航天科技集团公司下属第一研究院、航天东方红卫星有限公司、欧洲航天局及其下属科研机构以及研制载荷仪器的欧方企业。为此,国家航天局任命王希季担任“双星计划”工程总设计师、刘振兴担任首席科学家,并任命了工程各大系统的总师、总指挥以及各级各类设计和指挥系统人员。工程中的各类重大科学问题、技术问题或工程问题都需经过首席科学家与总设计师的协调、研究与决策,并快速而高效地加以解决。2001年9月,国家航天局还正式成立了由国防科工委、中科院、总装备部、中国航天科技集团公司这四个单位的机关领导组成的“双星计划”工程管理组,协助总设计师与首席科学家处理工程大总体工作。工程管理组下设工程管理组办公室,负责协调落实工程管理组的决定,保证工程的顺利实施。^[8]

3.1.2 国际合作组织机制

根据与欧洲航天局的合作协议,成立了双星计划科学工作队,负责协调合作研究的目标、内容与研讨会的举办。科学工作队主席由首席科学

即中国运载火箭技术研究院。

根据合作协议,欧方负责研制8台科学仪器,其中中性原子成像仪由中欧双方合作研制,欧方还负责“双星计划”的欧洲科学运行中心及科学数据中心的运行和管理等。

家刘振兴担任,合作主席由中欧双方各再出一位科学家担任,成员由双方科学家组成。同时,“双星计划”还成立了负责对科学目标、研究内容与研究进展进行讨论、评议和检查的专家委员会,专家委员会下设课题组,课题组按双星和 Cluster 上的探测仪器来分组。科学工作队负责协调每个课题组吸收国外科学家进行合作研究,每个课题组也需要经科学工作队派出科学家加入国外的研究组,与此同时,还定期举办学术研讨会。^[2]

从 2001 年 4 月 5 日至 2006 年 7 月 25 日,中欧就举行了十三次技术讨论会。^[20]2002 年 9 月 14 日至 10 月 14 日,科学工作队派出 6 人组成双星计划赴欧联调试验队,赴伦敦帝国学院,针对欧洲方面研制的 TC-1 星有效载荷联调试验,发现并解决了双方存在的一些理解不一致的问题,达到了预期的实验目的,一方面学习了西方严谨的程序化工作方法,同时向欧方展示了我方的技术实力和管理水平,使欧方对我国的航天技术水平和中科院空间中心的技术能力有了进一步了解。^[21]2002 年 11 月 13 日,我方派出 6 人赴奥地利空间研究所就一级初始数据的时间覆盖问题、数据快速显示的软件问题与高分辨率科学数据的返还问题进行交流。^[22]2003 年 6 月 23 日,科学工作队派人赴瑞典就中欧联合研制的中性原子成像仪的半导体探测器进行粒子加速器定标实验。^[23]

科学工作队定期举行科学工作联席会议和技术讨论会以及相关技术协调的机制,确保了中欧双方能够及时交流与协调,消除了许多误解。

3.2 运载火箭的研制

“双星计划”的科学目标和探测总体思路由中科院空间中心提出,科学探测有效载荷以及应用系统由中科院空间中心主持研制,卫星平台则由航天东方红卫星有限公司主持研制。^[10]

就选择何种运载火箭发射卫星这一问题,中科院空间中心与中国航天科技集团公司下属第一研究院进行了多次讨论,决定近地赤道卫星由我

国发射同步高度卫星的火箭(长征三号 B 型)搭载发射,该同步卫星的过渡轨道(500km~40000km)可以满足赤道卫星的轨道要求。但是,极轨卫星的发射有困难,一种方案是在我国发射极轨卫星的火箭上搭载发射,然后变级调整到预定轨道(远地点 20000km),但相关技术并不成熟,另一种方案是仿效 Cluster 计划也用俄罗斯的联盟号火箭发射。^[17]经过方案设计评审,最终选择进一步改进我国的长征火箭,^[8]2001 年 10 月,“双星计划”的运载火箭进入研制阶段。

由中国航天科技集团公司下属第一研究院为主研制成功的中国长征二号丙/SM 运载火箭,是由两级状态的长征二号丙火箭加上固体上面级 SM 组成的,火箭起飞重量 214 吨,全长 39.9 米,箭体与整流罩的直径为 3.35 米。新研制的上面级由主结构、固体发动机、姿控系统、控制系统、分离系统、遥测系统等组成,采用自旋稳定和三轴稳定相结合的姿态控制方式,用于实现卫星的变轨、调姿和起旋,以满足卫星入轨的要求。长征二号丙/SM 运载火箭的研制成功标志着中国长征二号丙系列火箭的技术上升了一个新的台阶。

3.3 卫星与有效载荷系统的研制

“双星计划”中的两颗小卫星由中国航天东方红卫星有限公司与中科院空间中心合作研制。两颗小卫星设计为偏圆柱形,直径 1 米,高度 0.8 米,每颗卫星总重量约 135 公斤,总功率约 82 瓦,总数据率约 100 千比特/秒,有效载荷重量约 30 公斤,功耗约 30 瓦,卫星姿态是自旋稳定,旋转率为每分钟 15 转。^[17]

“探测一号”赤道区卫星和“探测二号”极区卫星的有效载荷各由 8 台探测器组成,两颗卫星共配置了 16 台科学探测载荷,包括三分量磁通门磁强计、高能粒子探测器(近赤道卫星)和中性粒子成像仪(极轨卫星)等,覆盖了宽能谱粒子、磁场和低频波等空间环境物理参数的测量。“探测一号”主要探测向阳面磁层顶和近磁尾等重要磁

层活动区域, 所搭载的科学仪器包括高能电子探测器、电位主动控制仪、三分量磁通门磁强计、低频电磁波探测器、热离子分析仪、重离子探测器、电子和电流仪、高能质子探测器。“探测二号”主要探测地球两极漏斗区沉降粒子对电离层扰动的作用及其与磁层其他活动区域变化的关系, 所搭载的科学仪器除了将“探测一号”上的热离子分析仪与电位主动控制仪换成了中性原子成像仪与低能离子探测器, 其余仪器不变。

在这些科学仪器中, 能量粒子探测器由德国马普学会高空物理所研制, 三分量磁通门磁强计由奥地利科学院空间物理所和英国帝国学院研制, 中性原子成像仪由我国与爱尔兰联合研制, 离子谱仪则由法国国家等离子体研究中心研制。^[17]为将中外不同数据率和数据格式的探测器集成在一起, 我国还自主研制了高效的有效载荷公用设备。^[24]两颗卫星的探测数据经过联合处理, 可以探明磁层空间与太阳活动的时序关系, 验证目前仍处于理论猜想阶段的磁层空间暴触发电机理论, 以及发现重要的能量粒子输运途径等。^[13]

载荷研制也遇到一些波折。由于欧洲航天局对欧洲载荷研制单位的研制经费未能及时拨付, 使得各载荷研制单位的研制工作遇到经费困难, 影响了进度。另外, 也由于欧洲航天局方面缺乏对各有效载荷工程进度方面的统一管理, 通常是由中方对各有效载荷直接进行协调, 但经常得不到对方回音, 因此对工程进度有一定影响, 特别是法国国家等离子体研究中心负责研制离子谱仪的科学家在 2001 年突然去世,^[8]最终导致 2001 年 12 月应欧方的提议, 从两颗卫星上取消了能量粒子谱仪。^[25]

3.4 双星的发射与运行

第一颗赤道卫星“探测一号”(TC-1)于 2003 年 12 月 30 日凌晨 3 时由长征二号丙/SM 运载火箭从西昌卫星发射中心成功发射升空, 卫星重量

为 335kg, 运行于远地点 78960km、近地点 565km、倾角 28°的大椭圆轨道, 设计寿命 18 个月, 实际在轨运行 46 个月, 用于探测近地磁尾区的磁层空间暴过程及向阳面磁层顶区太阳风能量向磁层中的传输过程。

第二颗极轨卫星“探测二号”(TC-2)于 2004 年 7 月 25 日 15 时 05 分通过长征二号丙/SM 运载火箭从太原卫星发射中心成功升空, 卫星重量为 343kg, 运行于远地点 38216km、近地点 684km、倾角 90°的大椭圆轨道, 设计寿命 12 个月, 实际在轨运行 48 个月, 用于探测太阳风能量和近地磁尾区能量向极区电离层和高层大气的传输以及电离层粒子向磁层中的传输过程。

在“双星计划”延寿运行期间(2005 年 10 月至 2006 年 12 月), 全面实现了与欧洲航天局 Cluster 计划对地球空间的“六点探测”, 达到了最佳配合。据此, 还制定了“双星计划”两颗卫星以及两颗卫星与欧洲航天局 Cluster 计划的四颗卫星联合探测的短期(周)、中期(月)和长期(年)科学运行计划。^[17]

4 “双星计划”的科技成就

4.1 科学数据的接收与处理

双星探测数据的接收由中科院空间中心密云科学卫星数据地面接收站、上海天文台佘山观测站以及欧洲空间局西班牙卫星数据接收站共同完成。作为我国第一个科学卫星计划的业务运行系统, 实现了对科学载荷运行、监视的自动化管理, 编制了 5 个规范, 研制了 3 个原型系统, 并成功投入业务运行。

上述台站接收和处理了大量的科学数据。从 2003 年 12 月 30 日至 2009 年 3 月 11 日, “双星”接收和处理了 174GB 的科学数据, 其中探测一号卫星获得了 90GB 科学探测数据, 探测二号卫星获得了 84GB 科学探测数据。双星计划数据中心网页对科学研究工作者开放, 平均日浏览次数达

到了 1700 次,平均日下载数据达到 20MB。针对这些数据进行的分析,取得了一批原创成果,包括在向阳面磁层顶边界区对磁层空间暴驱动过程有关的磁场重联和通量传输事件研究、磁尾磁层空间暴的触发机制和演化时序研究以及极隙区、极光区和电离层场和粒子耦合过程研究等。^[26]特别是,科学家们在辐射带发现了波-粒相互作用效应,并在磁层顶前发现了大尺度的等离子体空洞。空间科学领域的两个顶级国际期刊 *Annales Geophysicae* 和 *J. Geophysical Research* 各出版了“双星计划”成果专刊一期。2004 年 3 月至 2009 年 3 月间,“双星计划”共发表了 SCI 收录论文 104 篇,被引用了 489 次(他引 130 次),在国际大会上做报告 46 篇,特邀报告 10 篇。^[27]

4.2 保障运行的技术创新

为了保障“双星计划”的两颗卫星有效运行,有四个方面的技术创新发挥了巨大作用。

第一,联合优化的多点探测体系创新。要实现地球空间的多点卫星探测,最大难度是联合的轨道设计和优化。“双星计划”充分利用了大椭圆轨道卫星远地点飞行速度慢的特点,通过优化设计使两颗卫星尽可能多地出现并尽可能长时间停留在需要探测的区域。在确定了双星的轨道关系后,为进一步扩大探测区域,倍增探测产出效益,还与欧洲 Cluster 计划的轨道进行了联合设计,确定了两颗卫星的发射窗口,使两个计划无缝对接,从而构成了宏观和微观相结合的多点探测体系。^[28]

第二,高精度电磁波与粒子探测有效载荷技术创新。中国自主研发的低频电磁波探测器,通过搜索线圈探头的创新设计,探测精度与整体水平达到了国际先进水平,由此获得了 1 项发明专利、4 项实用型专利和 2 项软件著作权。^[28]

第三,高电磁洁净度与高可靠卫星技术创新。中欧合作研制的中性原子成像仪的部分技术指标超过了美国同类仪器,以中性原子成像仪为代表

的其他载荷也有许多创新,实现了中国空间探测仪器研制水平的跨越。高电磁洁净度指的是对磁场和离子的精确探测需要排除卫星本身对被探测对象的干扰,双星通过综合控制与补偿技术使其磁洁净度优于 2nT,采用的 ITO 膜技术使卫星表面任意两点之间的电位小于 1V。双星的轨道均多次穿越辐射带,经受的辐射剂量远超过其他卫星,因此通过屏蔽、“退火”、硬件和软件纠错及冗余技术对卫星进行了抗辐射加固,使得两颗卫星的运行均大大超过了其设计寿命——探测一号设计寿命 18 个月,实际在轨运行了 46 个月,而探测二号设计寿命 12 个月,实际在轨运行了 48 个月。由于在赤道面附近运行的探测一号卫星的轨道椭圆度高,经受了超长地影,通过精确的热控设计和全轨道能量平衡技术,探测一号卫星安全度过了 275 分钟的超长地影。由于大椭圆轨道带来卫星与地面站距离远且变化大,通过对不同测控距离调整速率,实现了多档变速率的测控与数传,提高了信道利用率。^[10]

第四,远程自动科学运行和应用支持技术创新。“双星计划”科学用户有近 60 个,分布于国内外(国内有北京、上海、合肥、武汉等,国外有英国、法国、奥地利等),并且数据多,容量大,因此科学运行与应用支持难度大。为此,开发了远程测试与自动运行技术,通过 VPN 和公共网络,实现了异地设备测试和异地设备的自动运行,还通过统一数据格式并严格标定,实现了国际一流的数据处理与分发,使中国的探测数据得到了全球科学家的认可。另外,数据中心还同时处理和分发了欧洲 Cluster 四颗卫星的数据。^[28]

以上创新之处在随后的航天活动中被推广应用到了其他卫星型号。比如,嫦娥 1 号、嫦娥 2 号和萤火 1 号卫星都应用了“双星计划”的有效载荷技术,萤火 1 号卫星应用了“双星计划”的科学运行和应用系统技术,嫦娥 1 号、萤火 1 号、遥感 9 号和电磁检测试验卫星都应用了“双星计

划”的远距离测控和数传技术、卫星平台创新技术。^[10]

5 结论

“双星计划”是我国科学家在准确把握国际空间科学发展前沿的背景下,为满足我国空间物理探测、研究以及空间环境预报的需求而提出的地球空间探测计划。在“双星计划”之前,几乎所有重大空间探测和发现都是由美国与俄罗斯做出,少部分是由欧洲和日本做出,中国在空间探测上的贡献几乎为零。^[10]“双星计划”的实施,彻底扭转了这一落后局面。其鲜明的创新性、高技术特色和国际合作背景也为我国后续空间科学规划发挥了重要示范作用。鉴于其突出成果,“双星计划”被两院院士评为“2004年中国十大科学进展”,2010年3月,国际宇航科学院授予了“双星计划”和Cluster联合科学团队国际宇航科学院“杰出团队成就奖”,“双星计划”还获得了2010年度国家科学技术进步一等奖。

“双星计划”作为我国第一个以科学目标为牵引的空间科学领域的大科学工程,在国际合作与协同创新这两个彼此密切联系的方面有特别突出的表现,也是其他大科学工程建设可以参考借鉴的地方。

国际合作贯穿于“双星计划”的始终,决定着该计划的立项、执行和成败。“双星计划”的立项得益于欧洲航天局的大力支持。刘振兴1997年4月提出该计划后一直未能获准立项。1999年9月欧洲航天局与中科院就“双星计划”确立合作关系以及2000年7月Cluster顺利升空后,在可能错过合作机会的情况下,经过刘振兴等个人以及中科院空间中心与中科院基础局、中国航天科技集团等部门的共同努力,“双星计划”才得以立项。在计划执行期间,卫星载荷的研制更是通过国际合作吸纳国外高水平研制力量的结果。在卫星数据收集和处理上,同样实现了国内外机构和专家学者之间的实质性合作。不仅如此,“双星

计划”的成功,推动了我国空间科学领域的大科学研究逐步走向一条良性循环之路。2015年6月4日,中科院和欧洲航天局联合宣布,拟在2021年合作发射“太阳风磁层相互作用全景成像卫星”(SMILE),并从项目的设计一直到运行维护等方面进一步发展“双星计划”的合作模式,实现国际合作的可持续发展。

在协同创新方面,“双星计划”的科学目标是解决空间环境问题,但达成这一科学目标却需要众多国内外不同领域科学家、技术专家的通力合作。来自中科院、中国科技大学、北京大学、北京航空航天大学等高校与科研院所的科学家们所处的学科包括了天文学、物理学、化学、计算机科学、系统工程等,参与工程的技术专家则来自中国地震局、信息产业部、航天科技集团等单位。欧空局参与计划的人员来自法国、英国、德国、比利时、奥地利等国家,曾支持与“双星计划”展开合作的国际空间局协调组更有来自美国、加拿大、日本、俄罗斯等世界范围的科学家。为了保证工程顺利实施,“双星计划”采取了科学工作队的国际合作模式,以及首席科学家、总设计师与工程管理组各司其职并通力合作的组织模式来协调各方的诉求与期望。通过科学工作队制度,在中欧每个研究组长期搭配对方科学家,并定期在欧洲和国内召开联席会议与科学研讨会。通过工程管理组制度,定期组织中欧双方的管理技术协调会。通过首席科学家和总设计师制度,及时高效协调工程各分部的进度与中欧相互配合情况。

此外,还需要特别强调的是,大科学工程的成功除了要求有灵活的促进协同的制度安排,更要求首席科学家与工程总师对工程全局性的把握与对重大问题集中力量加以快速的解决。可以说,对于高风险特征的大科学工程,科学家是科学研究的核心力量,而首席科学家则已成为决定工程成败的核心人物。“双星计划”自1997年提出到2002年获得国家立项的5年中,不论是与欧洲及时沟通信息、获得欧空局与国际空间局协调组的

支持,还是与国内各行政部门联系、寻求中科院等部门的支持,首席科学家刘振兴都发挥了不可替代的作用。

参考文献

- [1] 刘振兴. 地球空间双星探测计划[J]. 地球物理学报, 2001(4): 573-580.
- [2] 刘振兴. 地球空间双星探测计划的国际合作[J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 309-312.
- [3] 史建魁, 叶永烜, 刘振兴. 空间物理学进展(第五卷)[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 13-21.
- [4] 丁兆君, 李晓兵. 五秩共赢双星璨——濮祖荫教授访谈录[J]. 中国科技史杂志, 2015(4): 473-487.
- [5] 徐 菁. “双星”计划: 中欧航天合作的标杆——“双星”项目亲历者访谈录[J]. 中国航天, 2015(10): 14-17.
- [6] 张 晓. 为中国空间科学打开国际合作的大门——访2010年中国政府“友谊奖”获得者罗格·博内特教授[J]. 国际人才交流, 2010(12): 32-34.
- [7] 中国空间科学在世界空间研究中的地位——欧空局前副局长 Roger-Maurice Bonnet 专访[J]. 中国科学院院刊, 2015(6): 751-759.
- [8] 董 荣. 中欧空间科学合作的建立与“双星计划”的实施[D]. 中国科技大学, 2017.
- [9] 刘振兴. 地球空间双星探测计划[J]. 科学, 2004(2): 7-9.
- [10] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 2010年度国家科学技术进步奖项目介绍: 地球空间双星探测计划[G]. 档案号: 217-001-130-06.
- [11] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 外事简报第九期[G]. 1999年9月28日, 档案号: 217-001-102-04.
- [12] 太空“弈星”刘振兴[N]. 中国科学报, 2015-04-03(3).
- [13] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 地球空间双星探测计划简介[G]. 1998年4月, 档案号: 217-001-001-07.
- [14] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 地球空间“极区-赤道双星科学探测计划(简称双星计划)”初步设想[G]. 1997年3月, 档案号: 217-001-001-02.
- [15] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 地球空间双星探测计划科学目标和有效载荷方案评审意见[G]. 2000年1月7日, 档案号: 217-001-002-14.
- [16] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 关于地球空间双星探测计划有关问题的报告[G]. 档案号: 217-001-001-06.
- [17] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 地球空间双星探测计划(简称双星计划)进展情况简介[G]. 档案号: 217-001-001-08.
- [18] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 地球空间双星探测计划科学目标和任务需求[G]. 2000年2月, 档案号: 217-001-003-04.
- [19] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 地球空间双星探测计划: 计划工作节点[G]. 档案号: 217-001-025-01.
- [20] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 中欧双星计划技术讨论会[G]. 档案号: 217-001-106.
- [21] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 双星计划赴欧联调工作周报[G]. 2002年9月16日, 档案号: 217-001-104-08.
- [22] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 双星计划赴奥地利联调工作[G]. 2002年11月13日, 档案号: 217-003-003-02.
- [23] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 双星计划赴瑞典联调工作[G]. 2003年6月23日, 档案号: 217-004-008-01.
- [24] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 国家科学技术进步奖推荐书(2010年度)[G]. 2010年6月2日, 档案号: 217-001-130-04.
- [25] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 关于双星计划与欧空局合作方面的工作汇报[G]. 档案号: 217-001-102-14.
- [26] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 关于院知识创新方向性重点项目所级结题验收的函[G]. 2007年5月14日, 档案号: 217-001-112-06.
- [27] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 关于“地球空间双星探测计划科学运行和数据处理与规范研究”项目通过验收的函[G]. 2009年4月10日, 档案号: 217-001-111-10.
- [28] 中国科学院空间科学与应用研究中心档案室. 2010年度国家科学技术进步奖项目情况简介: 地球空间双星探测计划[G]. 档案号: 217-001-130-10.

A Historical Investigation on the Double Star Program in China

He Jiangbo, Wang Dazhou

(School of Humanities and Social Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The double star program is the first satellite program of space science directed by scientific goals in China. It is a large scale research program cooperatively carried out by China and the European space agencies. Based on the archives and research literature, the authors reveal the background and approval process of the program. They also describe the implementation process from four aspects including the organizational system, rocket development, satellite and its payload development, and the satellite's launch and operation. Moreover, they summarize the program's achievements in gathering and processing of scientific data as well as technological innovations. Finally, the author sum up some historical experiences of the program with emphasis on the international cooperation and synergistic innovation.

Keywords: large scale research facility; Double Star Program; Cluster Program; Center for Space Science and Applied research, Chinese academy of sciences