

欧洲守望者号日地 L5 点空间天气卫星布局进展及启示

王赤¹, 李明¹, 魏海燕¹, 时蓬¹, 罗冰显², 范全林^{1*}

1. 中国科学院国家空间科学中心空间科学与深空探测规划论证中心, 北京 100190

2. 中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气重点实验室, 北京 100190

摘要 欧洲空间局在空间安全领域布局守望者号空间天气专用业务卫星, 成为全球空间天气研究预报和服务领域的里程碑事件之一。指出利用日地拉格朗日 L5 点开展空间天气监测预警具有独特优势, 简述了守望者号任务目标和有效载荷配置, 回顾了其漫长的推进历程、未来实施计划及美国积极参与守望者号任务的情况。提出中国须高度重视空间天气对经济社会发展和空间安全的影响, 努力抢占空间科技制高点, 坚持底线思维和极限思维, 积极推进中国自主空间天气天基监测系统的发展。

关键词 空间天气; 太阳爆发; 监测预警; 空间安全

空间天气事业的发展呈现出实现科学突破和满足社会需求双擎驱动的显著特征。与地球天气不同, 空间天气是太阳爆发所致的日地空间环境条件或状态变化。空间天气古已有之, 但直到人类进入空间时代后才引起高度重视。空间天气研究涉及太阳物理、空间物理、等离子物理等多学科前沿, 仍有诸如太阳磁活动周期的起源等众多科学难题

有待破解。与此同时, 极端空间天气事件会直接或间接地导致航天、通信、导航、航空、电网、交通等天基和地基技术系统发生故障或失效, 损坏国家重大基础设施, 危害人类健康与生活, 从而对经济社会和国家安全构成严重威胁。人类社会已经越来越依赖空间基础设施等高技术系统, 要实现可持续发展, 需大量应用包括航天在内的各类高新技术。这使得人

收稿日期: 2023-11-10; 修回日期: 2023-12-06

基金项目: 中国科学院学部重点咨询项目(2022-DX02-B-007); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)综合论证课题(XDA15060102)

作者简介: 王赤, 研究员, 中国科学院院士, 研究方向为空间物理和空间天气学, 电子信箱: cw@nssc.ac.cn; 范全林(通信作者), 正高级工程师, 研究方向为空间科学发展战略、政策和规划论证, 电子信箱: fan@nssc.ac.cn

引用格式: 王赤, 李明, 魏海燕, 等. 欧洲守望者号日地 L5 点空间天气卫星布局进展及启示[J]. 科技导报, 2024, 42(17): 16-27;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.01683

类在灾害性空间天气面前变得很脆弱,但也能让我们更了解空间天气、拥有更多的预警和防护手段^[1]。

及时可靠有效(TRA, 即 timely, reliable and available)的空间天气预报和保障服务日益成为业务需求^[2]。为减缓空间天气影响、规避灾害性空间天气事件这一新型的常态化非传统自然灾害,众多国家、国际组织和地区已作出诸多努力。一方面,纷纷出台系列政策和规划,将应对空间天气上升到事关国家安全的战略高度,如2020年美国总统签署《空间天气法案》,2021年英国发布《极端空间天气应对战略》等^[3];另一方面,加快建立空间天气天地一体化监测体系,发展业务化的空间天气监测预报预警能力,从国家和全球层面应对极端空间天气事件威胁^[4]。

科学卫星对空间天气研究不可或缺,极大提升了对空间天气物理过程和变化规律的认知,但尚不满足空间天气预报的连续、实时、可靠等业务要求。从1958年至今,全球已发射近160个用于空间物理、太阳物理研究的科学卫星任务,运行在地球轨道、行星际空间乃至太阳附近,对于人们科学认知空间天气、开展空间天气保障起到了关键作用。特别是位于日-地连线拉格朗日L1点的系列科学卫星任务,如太阳风探测卫星(WIND, 1994年11月启动)、太阳和日球层观测台(SOHO, 1995年12月启动)、先进成分探测卫星(ACE, 1997年8月启动)等,已被多国空间天气业务部门作为重要数据源。不过,需要指出的是,它们在轨时间都远超设计寿命,现在已不具备可靠业务能力。

在日-地拉格朗日点上开展空间天气监测具有重要的科学和应用意义(图1):L1点正视太阳,距地球较近,对将袭扰地球的太阳风暴能作数十分钟到小时量级的预警;L5点侧视太阳以及日地连线,可提前4~5 d作出预报。继L1点诸多科学任务成功实施后,多国纷纷建议尽快在L5点部署空间天气专用卫星。太阳是空间天气的源,且存在约为27 d的自转周期,致使提前监测预报影响地球的太阳爆发活动(geoeffective solar event)不仅成为可能,而且具有重要的现实意义。早至2000年代,该

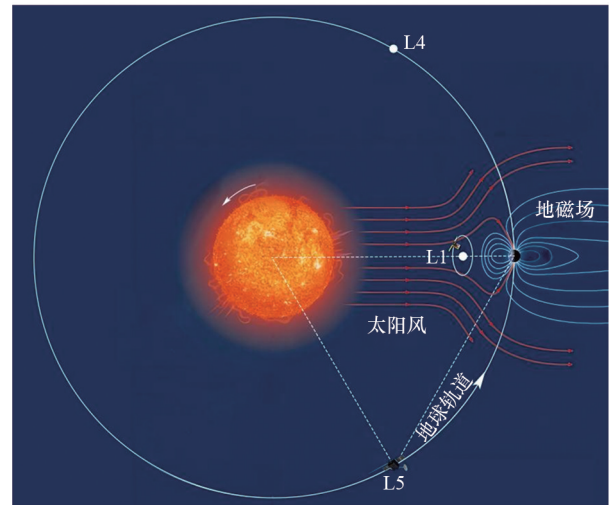


图1 在日-地拉格朗日L1/L5点开展空间天气监测预警可为地球作出规避响应赢得宝贵时间
(注:示意图,L1与地球距离未按比例)

想法就开始成为科学界的梦想,认为L5点是侧视观测影响地球的日冕物质抛射(CME)和高速太阳风的合适位置^[5]。美国提出多个L5任务概念,如国际与日同在计划(ILWS)L5任务“影响地球的太阳爆发诱因观测台(EASCO)”^[6]、利用立方星和太阳帆分步实施的分布式L5空间天气监测台(SWB-L5)^[7];中国科研人员提出日地活动和瞬变事件探测小卫星(INSTANT)^[8]任务概念。也有学者专题研究了L5任务应搭载的有效载荷种类^[9]。2009年第4季度,美国国家航空航天局(NASA)的日地联系观测双星(STEREO)科学任务的B星曾作为探路者短暂驻留L5点,科研人员根据它的观测数据对相关爆发事件开展研究,显著改进了对朝向地球的CME到达时间的估计^[10]。但是限于经费投入、科学研究与业务应用界面等方面的原因,前述L5任务建议大多仍停留在任务概念阶段。

欧洲率先开始研制L5点专用空间天气业务卫星引发各界关注。L5任务在欧洲的推进过程历时近30年,无论是在欧洲空间局(ESA)层面,还是英国欲自主部署,都遭遇了反复。为了获得公众的广泛支持,ESA还为L5任务举行了颇有影响的征名活动,并最终命名为守望者号(Vigil)。本文剖析欧洲守望者号任务的进展、经验以及美国的相关响应情况。

1 守望者号成为 ESA 空间天气业务新里程碑

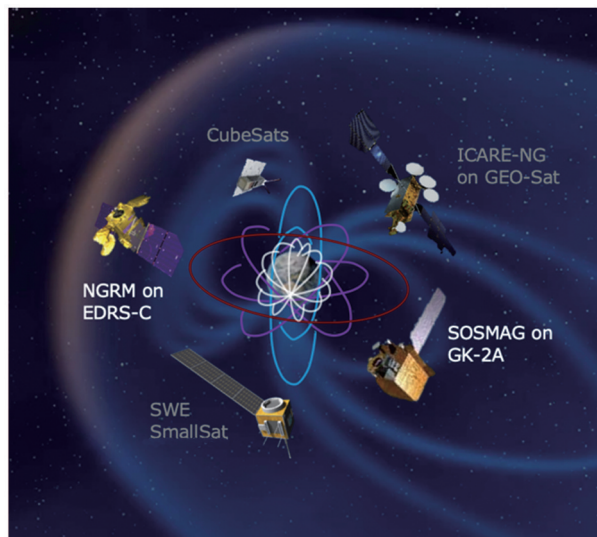
1.1 欧洲重视空间天气业务能力建设

欧洲地处北半球中高纬度地区至北极,深受空间天气影响。欧洲国家现代化程度高,社会倚重卫星、电网等基础设施,是频繁遭遇空间天气扰动的区域,故欧洲及相关国家层面均非常重视空间天气。一方面,ESA在迄今4轮空间科学中长期规划中,连续实施了如星簇计划(Cluster II)、尤利西斯探测器(Ulysses)等多个空间物理和太阳物理科学任务,在空间天气领域积累了高质量的科学观测、原创成果和数值模型;另一方面,欧洲也重视形成空间天气业务能力,建设了包括空间天气协调中心(SSCC)、空间天气专家服务中心(ESCs)和空间天气数据中心(DCs)等在内的空间天气服务网络。

2009年,ESA启动了空间态势感知计划(SSA, 2009—2019年)^[11],并将空间天气作为三大内容之一纳入予以支持,建立空间天气服务网络并于2018年开始“业务试运行”,向用户提供7×24 h的支持和服务信息。2013年,空间天气协调中心(SSCC)成立,是欧洲空间天气发展的里程碑。SSCC总部依托比利时皇家天文台下设的太阳影响数据分析中心(SIDC),是ESA空间天气服务网络的在线服务窗口,可向欧洲的工业、政府和科研机构客户提供逾200种空间天气产品。

2020年以后,ESA用空间安全计划(S2P)^[12]取代SSA。S2P计划在2017年设立,旨在通过科学研究、技术创新和信息共享等,保护航天器免受空间碎片和灾害性空间天气的影响,促进空间活动可持续发展。ESA成立空间天气办公室,继续建设空间天气服务网络,发展增强型天地一体化空间天气监测系统,并将建立空间天气事件预警系统。

ESA提出的增强型天地一体化空间天气监测体系^[13],除利用了欧洲和国际地面台站构成地基监测网络外,还将重点发展:(1)位于地球轨道的分布式空间天气传感器系统(D3S),包括小卫星(含立方星)星座和搭载载荷等(图2),旨在监测地球空间环境效应和状态;(2)位于L1&L5点的太阳和



NGRM为下一代辐射监测仪;ICARE-NG为新一代先进器件空间辐射影响探测仪;SOSMAG为ESA面向服务的星载磁强计

图2 欧洲规划的分布式空间天气传感器系统(D3S)示意
(图片来源:ESA)

太阳风监测业务卫星,旨在负责空间天气现报预报和事件预警。迄今,2009年发射的“星上自主项目”Proba-2技术试验小卫星成为首个SSA任务,它的4个载荷中,2个用于观测太阳,2个用于监测地球空间等离子体环境;2018年,搭载韩国卫星的磁强计成为D3S首个空间天气业务载荷(表1)。当然,ESA主导、欧美联合的太阳与日球层观测台(SOHO)等科学卫星的数据也可支撑空间天气业务,不过被归类为风险能力(capability at risk),在表1中一并列出。

1.2 守望者号任务目标和载荷配置

守望者号任务目标明确,定位专用业务卫星。为满足欧洲日益增长的空间天气研究预报保障服务需求,守望者号将通过偏离日-地连线如同“鹰眼”对太阳的“侧视”进行连续观测(图3),以实现更大提前量的太阳爆发活动监测,是ESA空间安全计划部署的首颗空间天气专用业务卫星。它重点强调空间天气监测和稳健的业务,而不是科学和观测的复杂性或灵活性。业务卫星的定位也对卫星的监测数据提出了明确的实时性/时延性要求,以便将其输入空间天气数值模型,助力预报员预测可能的影响。

表1 欧洲空间天气业务卫星及搭载载荷

监测能力	卫星轨道	专用业务卫星		其他风险能力(Capability at Risk) (科学卫星提供数据支撑)		
		在轨	在研	自主任务	国际数据	
全日面 磁场成像	环日轨道(抵近太阳)	—	—	太阳轨道探测器(Solo)	—	
	拉格朗日点(L1/L5)	—	守望者号 (Vigil)@L5	—	—	
	地球同步轨道(GSO)	—	—	—	太阳动力学 天文台(SDO)***	
日冕 极紫外 成像	环日·抵近	—	—	Solo	—	
	L1/L5	—	Vigil@L5	—	—	
	GSO	—	—	—	SDO	
日冕物质 抛射 白光成像	L1/L5	—	Vigil@L5	太阳和日球层观测台 (SOHO)@L1**	—	
	大椭圆轨道(HEO)	—	PROBA3#	—	—	
	近地轨道(LEO)	星上自主项目-2 (PROBA2)#	—	—	—	
磁场 原位探测	环日·抵近	—	—	Solo	日地联系观测双星A 星(STEREO A)	
	L1/L5	深空气候观测台 (DSCOVR)*@L1	Vigil@L5	—	—	
	大椭圆轨道(HEO)	—	—	星簇计划-II(Cluster II)	—	
	地球静止轨道(GEO)	韩国地球静止多用途卫星- 2A(GEO-KOMPSAT-2A)**	—	—	—	
	LEO	—	—	蜂群星座(Swarm)	—	
太阳风 粒子密 度、速度 和温度	环日·抵近	—	—	Solo	—	
	L1/L5	DSCOVR*@L1	Vigil@L5	—	—	
	环日轨道(~1 AU)	—	—	—	STEREO A	
	HEO	—	—	Cluster II	—	
能量粒子 辐射	环日·抵近	—	—	Solo	—	
	L1/L5	—	—	—	先进成分探测 卫星(ACE)@L1	
	HEO	—	—	Cluster II	—	
	GEO	欧洲通信卫星7C (Eutelsat 7C)**	—	—	—	—
		欧洲数据中继系统C星 (EDRS-C)**	—	—	—	—
		欧洲第三代静止气象卫星 成像卫星1号(MTG-I1)**	—	—	—	—
LEO	PROBA2#	—	—	—	—	
	欧洲海洋卫星贾森-3 (JASON-3)**	—	—	—	—	
	欧美联合哨兵6-MF (S6-MF)**	—	—	—	—	
电离层 状态	LEO	PROBA2#	—	Swarm	—	

注:*表示技术试验卫星;**表示ESA与NASA联合;*表示美国空间天气业务卫星提供国际数据;**表示空间天气业务载荷搭载其他卫星;***表示SOHO全日面磁场成像观测2011年4月停止,并被SDO接替。

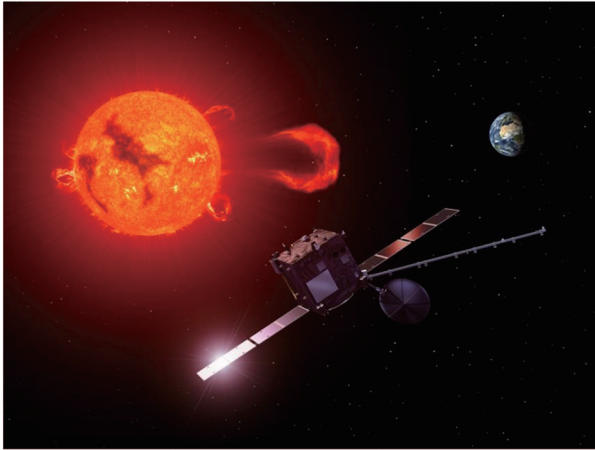


图3 守望者号侧视太阳爆发提前预报地球空间天气
(图片来源:ESA)

具体而言,该任务的目标分主要目标和次要目标^[14]。前者包括3点:改进日冕物质抛射(CME)在日冕大气和日球层中的运动和密度观测结果,改善太阳活动爆发探测结果,监测太阳活动区的演化评估变强的太阳活动。后者涉及2方面:原位测量朝向地球旋转的太阳风特征结构(如太阳风流相互作用区,SIR)的速度、密度和温度,监测行星际矢量磁场(IMF)。

守望者号任务基准有效载荷(Baseline Payload)^[14-15]已确定且具有高可靠性,以满足空间天气业务的连续稳健运行、提供定期数据产品的要求,

能够及时评估近地空间环境和预报可能影响地球的太阳爆发事件。该任务将配置5+1台有效载荷,其中5台属于基准载荷,由ESA负责研制;1台机遇载荷,拟由NASA通过既定目标的机遇任务(FMO)提供,以支撑任务目标,兼顾科学产出收益。这6台载荷分属遥感成像和原位测量类型(表2)。需要强调的是,守望者号的业务卫星定位决定了各载荷需要连续稳定开展空间天气监测,对载荷可靠性的要求非常高,其基准载荷都属于具有良好继承性和经济性的载荷。

守望者号任务创新特色鲜明,有望成为空间天气业务里程碑。该任务在日地关系研究和空间天气预报预警方面具有鲜明特点,突出表现为“三更”。

一是“更提前”。该任务将更早预报太阳爆发活动。它在全日面(Solar Disk)地球可见前数天就开展观测,提前4~5 d观测到即将面向地球的活动区,使人们对太阳爆发的监测得以提前、监测时间更久,为空间天气数值预报模型提供更多新数据,进而更精确预测CME/高速太阳风抵达地球的时间、预测太阳耀斑爆发,比运行在地球(轨道/地面)或日-地拉格朗日L1点的其他任务可提供更早的太阳活动预警和空间天气事件警告。

二是“更连续”。该任务将实现对太阳及日地空间的持续观测。守望者号运行在L5点,可完成

表2 守望者号任务有效载荷配置

有效载荷名称	监测方式	任务需求	继承性
紧凑型日冕仪(CCOR)	白光日冕成像	无缝观测太阳附近(CCOR和HI间)CME	继承SWFO-L1和GOES-U的CCOR相关技术
日球层成像仪(HI)	日球层成像	演化和传播	继承欧几里得空间望远镜及日地联系观测双星(STEREO)的HI相关技术
遥感成像载荷	光球磁像仪(PMI)	太阳光球矢量磁场成像	观测太阳演化的磁场,为太阳风数值模型和活动预报提供输入
	极紫外成像仪(EUVI)	满足ESA提出的业务数据低时延要求,拓展任务科学产出	继承太阳轨道探测器(SoLO)PHI相关技术
原位测量载荷	等离子体分析仪(PLA)	太阳风粒子密度、速度和温度	监测太阳风,探测和表征高速太阳风流
	磁强计(MAG)	行星际矢量磁场	继承SoLO的SWA相关技术
			继承果汁号(JUICE)木星冰卫星探测器三轴磁通门磁强计(JMAG)

对太阳以及日地空间的连续观测,对影响地球的太阳爆发及CME实现从日面、日冕大气到地球传播的全程监测并更精确预报CME的方向和速度,为空间天气现报、预报和太阳爆发事件警报提供连续观测数据,提高空间天气预警的准确性。

三是“更广阔”。该任务可以观测到更广阔的行星际空间。L5点位置使得守望者号任务可侧视监测从太阳表面到地球空间的广袤日球层区域,通过相关载荷的遥感成像和原位测量获取太阳活动、行星际太阳风和磁场的详细信息,不仅使其更好履行空间天气监测业务目标,而且促进对日地全景科学前沿的深入研究和理解。

2 守望者号历程回顾及实施计划

守望者号任务始于21世纪初的科学设想,然而,其从任务概念到技术攻关,直至纳入ESA机构决策,获得初步开工授权(PATP)启动研发,已历时多年,期间得益于ESA和英国等多方发力,既有从科学卫星任务到专用业务卫星的定位转变,也有从空间科学规划落到纳入空间安全计划支持的转机,各种经验值得回眸,未来实施值得预期。

2.1 定位从科学卫星任务变更为专用业务卫星

守望者号的前身是拉格朗日(Lagrange)任务,拟利用日-地系统的引力平衡点(L1/L5等)作为深空港,以较小的燃料消耗成本实现对日益影响人类的太阳爆发及空间天气的持续监测和研究。

根据资料,Lagrange任务建议最早出现于1995年8月ESA发布的“地平线2000+”(Horizon 2000 Plus)空间科学规划^[6],由原德国马克斯·普朗克高层大气科学研究所(现太阳系研究所)的Schmidt提出的太阳系领域科学任务概念建议(mission concept proposal),旨在深入研究大尺度空间天气现象的时空演化、发展机理以及太阳风暴对地球和人类的影响等关键科学问题。不过,直至“地平线2000+”规划周期于2015年结束,Lagrange任务仍然未能通过ESA科学任务建议征集遴选。

转机出现在ESA于2009年启动的空间态势感知计划(SSA,2009—2019年),Lagrange任务作为

ESA专用空间天气业务卫星获得支持,要求其发射后能提供7×24h的空间天气业务服务,维持欧洲在空间天气领域的优势和领先地位,同时在客观上加深人类对太阳磁场的起源和演化、太阳活动的三维结构和物理机制、太阳爆发的行星际传播和对地响应等的科学认知,以期实现一箭双雕、事半功倍的效益。

2015—2016年,在SSA计划第2期支持下,Lagrange任务完成了0阶段(phase 0)可行性研究,确定了初步任务目标,评估了任务所需的就位与遥感观测有效载荷配置。

2017—2019年,在SSA计划第3期支持下,Lagrange任务启动A/B1阶段(phase A/B1)卫星平台和有效载荷关键技术攻关。在2018年前完成了L5任务与作为备份的L1任务的目标整合;2019年9月通过初步系统需求评审(ISRR),B1阶段研究完成。

需要指出的是,参与上述卫星平台和有效载荷预研的4个团队有3个来自英国。空中客车防务与航天(英国)公司(简称空客英国)负责整个任务研发,重点包括任务运行、卫星平台及其与有效载荷的接口。根据任务团队设想,若能在2019年11月的ESA Space19+部长级会议上得到各成员国的批准,从2020年开始,Lagrange任务B2/C/D阶段就将顺次开启。然而,该任务在部长级会议上没有得到足够支持。

2.2 英国持续推动并在关键时刻挽救任务延续

庆幸的是,除ESA渠道外,英国的不懈推动和经费支持使得Lagrange任务劫后余生。

英国在空间天气科学研究和业务应用方面全球领先。2014年10月,英国投资460万英镑成立英国气象局(UK Met Office)空间天气预报中心。2015年6月,英国多家机构联合提出了一项任务概念建议,建议英国实施卡林顿-L5空间天气业务卫星任务(Carrington-L5),该名字源于英国著名天文学家Richard Christopher Carrington,将对灾害性太阳活动作出为期5天的预警。卡林顿-L5任务的概念研究由空客英国负责,与英国气象局、穆拉德空间科学实验室(MSSL)、卢瑟福·阿普尔顿实验室(RAL)以及伦敦帝国理工学院(IC)合作承担。为

降低成本,该任务将继承空客英国既往空间任务研发的系 统;卫星设计寿命即使在极端空间天气条件下也至少能工作 10 年。

2016 年,英国航天局(UKSA)承诺 4 年内投资 2200 万欧元,支持 ESA 的 SSA 计划。卡林顿-L5 任务团队作为核心力量同时承担了 ESA 同期 Lagrange 任务的论证。

当 ESA 的 Lagrange 任务 2019 年险遭不测之际,英国牵头力挽狂澜。2019 年,UKSA 决定向 Lagrange 任务研发投资 6000 万英镑,不但夯实了英国通过 RAL 空间部、伦敦大学学院和空客英国公司的合同在这项任务中的领导地位,空客英国公司成为任务主承包商(卫星总体),而且向外表明,实施 L5 任务会有效满足空间天气业务化预报需求,提高准确预报极端空间天气事件的能力,为采取行之有效措施保护关键基础设施提供所需的关键特需预警时间。

当时,Lagrange 任务未官宣通过遴选(selection)。为了获得各成员国的一致支持,确保不在后续 ESA 部长级会议上重蹈覆辙,2021 年 5—9 月,ESA 开展了声势浩大的公开征名活动(Name the Mission),为其“新”空间天气任务(即 Lagrange L5 任务)征名。活动达到了预期效果,共征集到来自世界各地的 5422 个任务名称建议。ESA 通过专家评审,选中了由生活在加拿大的 Francois Gosselin 提出的“Vigil”——守望者,其入选原因是:Vigil 来自拉丁文 Vigilis Exceptus,意思是“哨兵”,Vigil 本意“守望”“监视”,能够传达本任务“保持警惕,守护地球”的使命和目的,凸显其“监测太阳和地球空间环境的预警和保护作用”,同时也足够独特以引起公众关注。ESA 于 2021 年 12 月 1 日以新闻稿方式,宣布以守望者号(Vigil)作为 L5 任务正式名称,并发布任务徽标(图 4):一只警惕的鸟翱翔在日地空间,始于守望者号轨道位置的翅膀已展开,为蓝色地球遮挡源于太阳的有害辐射。

2.3 获初步开工授权但发射窗口及运行计划待定

虽然空间态势感知计划(SSA)在 2019 年结束,Lagrange 任务自身在 2019 年 ESA 部长级会议上也



图 4 守望者号任务徽标(图片来源:ESA)

遇到了波折,但 Lagrange 任务相关方仍在不懈博弈,并在空间安全计划(S2P)继续支持下取得了积极进展。S2P 计划涉及空间态势感知、小行星防御和空间碎片清扫等领域,目前在官网上宣示了其未来要实施的 3 大基石任务(cornerstone missions),即守望者号(Vigil)、赫拉(Hera)和清洁太空 1 号(ADRIOS/Clear Space-1)。将守望者号任务列入该计划,表明 ESA 认为它将能有效保障欧洲空间安全,在预警及应对灾害性空间天气对人类社会和基础设施的危害方面均发挥重要作用。

过去 3 年,守望者号踟躇前行。ESA 2022 年部长级会议决定将守望者号纳入 S2P 计划序列,英国在该次会议上宣布将在 L5 点运行守望者号任务,并提供从研发到未来任务运控的一揽子支持。ESA 相关报告也公布了守望者号任务未来的里程碑节点计划:(1) 2023—2025 年,取得初步开工授权(PATP),继续完成卫星 B2 阶段(phase B2)研制;(2) 2025—2030 年,转入 C/D 阶段(phase C/D),完成卫星初样、正样研制,具备发射条件;其中,搭载载荷工程模样件(EM)不迟于 2026 年第 3 季度交付卫星总体,结构热控件(S-TM)交付不迟于 2027 年第 4 季度;(3) 2031 年 1 季度完成发射。实际上,在 ESA 对守望者号任务的发射时间窗口有多个提法,如计划 2020 年代中期或 2028 年发射等。考虑到投资强度、技术难度、国际合作等各种影响因素,ESA 认为 2030 年代初是相对更“保险”的发射时间。

守望者号设计寿命不低于7.5年,预期将延寿5年。作为深空任务,它从地球发射到业务运行也需要较长时间,取决于卫星未来是采取地球同步转移轨道入轨(GTO,基准方式)还是直接入轨(待定)。卫星遥测/遥控(TM/TC)及7×24 h空间天气监测业务数据通过ESA的深空站网(ESTRACK)X-波段天线传输,而将用于研究的科学数据拟通过激光通信链路传输(待确认),且不考核科学数据的时延达标性。

守望者号当前的预期发射和运行时段(图5)大致划分为5部分。(1)发射和早期在轨(LEOP):卫星搭载阿丽亚娜6型火箭(Ariane 6)发射至GTO,用14 d左右完成2~3次卫星远地点抬升机动(ARS),脱离地球轨道进入深空。(2)在轨测试(in-space com missioning phase):主要完成卫星平台在轨测试和有效载荷在轨标定。(3)业务试运行(pre-operational phase):从在轨测试结束开始,到卫星变轨至偏离日地连线30°,守望者号将开展空间天气监测,但不做业务要求,因为期间会因卫星主天线重新定向建立数传链路而使观测周期性地中断。(4)业务运行(operational phase):包括从偏离日地连线30°继续漂移至L5点以及在L5长期运行;期间卫星和载荷都将按照设计性能标准,执行7×24 h业务运行。(5)延寿运行及钝化退役(extension & disposal):守望者号预期拓展运行5年,之后钝化退役。

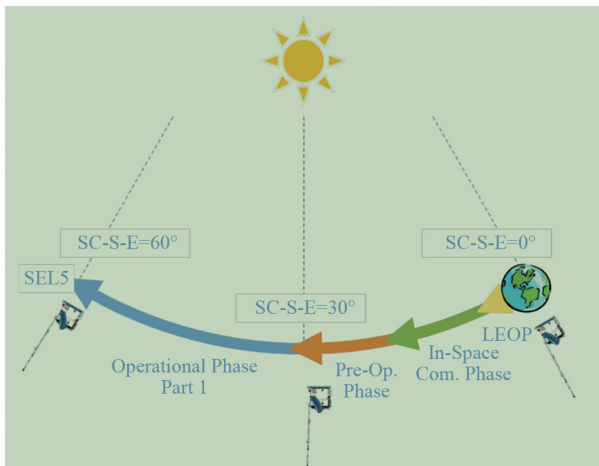


图5 守望者号从发射、转移至业务运行示意
(图片来源:ESA)

3 美国积极参与守望者号任务

1995年,美国在其“国家空间天气战略计划”中定义了空间天气,成为率先认知空间天气并积极开展科学研究和业务应用的国家。NASA科学任务部(SMD)的日球层物理处负责研发和运行数量庞大的空间物理和太阳物理科学卫星任务群。它们几乎都直接或间接支持空间天气前沿研究。迄今帕克号(PSP)正在太阳附近探测日冕大气,另外还有太阳风探测卫星(WIND)等近20个科学卫星任务处于延寿运行阶段,“日升”(SunRISE)立方星座等超过10个大中小型科学卫星任务正在研发。

美国的空間天气业务主要由美国商务部(DOC)国家海洋和大气管理局(NOAA)下属的美国国家气象局(NWS)国家环境预报中心(NCEP)的空间天气预报中心(SWPC)负责,运行位于L1点的深空气候观测台(DSCOVR,2015年2月启动)等专用业务卫星和搭载载荷(表3),开展空间天气监测、数值预报,提供持续的空间天气现报(nowcasting)、预报(forecasting)、预警(warning)和警报(alert)服务。NOAA将NASA的相关科学卫星作为SWPC的重要数据源,但充分认识到它们属于风险能力(capability at risk),正在抓紧研发替代的业务卫星。

3.1 美国加快研发新一代空间天气业务卫星

作为空间天气业务归口责任机构,NOAA正在牵头实施美国空间天气后续计划(Space Weather Follow-On, SWFO),并联合NASA、海军研究实验室(NRL)和ESA开展合作。SWFO计划包括2个任务,分别是日地L1点空间天气监测卫星(SWFO-L1)和地球静止轨道环境业务卫星(GOES-U)上搭载的紧凑型日冕仪(CCOR)。

GOES-U任务计划于2024年发射。NOAA于2019年11月获得了DOC对SWFO-L1的立项批复。SWFO-L1拟于2025年搭载NASA星际测绘和加速探测卫星(IMAP)科学任务发射。

SWFO-L1任务属于小型卫星,设计寿命5年、拓展寿命5年。其卫星平台由美国鲍尔宇航公司(Ball Aerospace)负责,吸取了NOAA-20和“索米”国家极地轨道伙伴气象卫星(Suomi NPP)的成功

表3 美国空间天气业务卫星及搭载载荷

监测能力	卫星轨道	专用业务卫星		其他风险能力(capability at risk) (科学卫星提供数据支撑)
		在轨	在研	在轨
全日面	L1/L5	—	守望者号(Vigil)@L5 [#]	—
磁场成像	GSO	—	—	太阳动力学天文台(SDO)
日冕极紫外 成像	L1/L5	—	Vigil@L5 [#]	—
	环日轨道 (~1AU)	—	—	日地联系观测双星A星 (STEREO A)
	GSO	—	—	SDO
	GEO	地球静止轨道环境业务 卫星(GOES-16、17&18)	GOES-U	—
日冕物质抛 射白光成像	L1/L5	—	空间天气业务后续计划日 地L1点卫星(SWFO-L1) Vigil@L5 [#]	太阳和日球层观测台(SOHO)@L1
	~1 AU	—	—	STEREO A
	GEO	—	GOES-U	—
磁场	L1/L5	深空气候观测台 (DSCOVR)@L1	SWFO-L1	先进成分探测卫星(ACE)@L1
	GEO	GOES-16、17&18	GOES-U	—
太阳风	L1/L5	DSCOVR@L1	SWFO-L1	ACE@L1
	L1/L5	—	SWFO-L1	ACE@L1
能量粒子辐 射	GEO	GOES-16、17&18 欧洲极轨气象业务卫星 B & C星(MetOp-B&C)**	GOES-U	—
	LEO	极轨气象业务卫星 (POES-18&19)	—	—
电离层 状态	LEO	MetOp-B&C**	欧洲第二代极轨气象业务 卫星A & B星(MetOp-SG- A&B)**	—
		电离层与气候星座观测 系统(COSMIC-2) ** [#]	—	—

注：[#]表示空间天气业务卫星提供国际数据；**表示空间天气业务载荷搭载在其他卫星上；COSMIC-2亦称福卫-7/Formosat-7，由NOAA和中国台湾联合研制。

经验，2020年6月研制合同签署，2021年7月通过初步设计评审(PDR)^[17]，2022年6月通过了关键设计评审(CDR)^[18]。SWFO-L1任务有效载荷则分别由NRL、美国西南研究院(SwRI)、加州大学伯克利分校(UC Berkeley)和ESA等研制(表4)。

SWFO-L1是NOAA首颗专用空间天气业务卫星(DSCOVR属于NASA研发的深空全球气候变化观测卫星“改行”)，运行在日地L1点利萨如轨道(Lissajous orbit)，对太阳爆发和行星际太阳风实现

7×24 h监测，为空间天气业务提供至关重要的图像和数据输入。

日冕图像将被用于识别朝向地球的CMEs并预估它们抵达地球的时间；在地球上游L1点原位探测的太阳风速度、密度和磁场将被用于快速预报地磁暴的开始时间、强度以及在太阳风抵达地球数十分钟后产生的其他干扰。SWPC将使用先进的数值空间天气预报(NWP)模型来预测地球磁层和电离层的变化。

表4 SWFO-L1 有效载荷配置

	有效载荷	观测对象	承研单位	备注
遥感成像	紧凑型日冕仪(CCOR)	白光日冕和CMEs	NRL	取代SOHO广角和光谱日冕仪(LASCO)
	太阳风等离子体分析仪(SWiPS)	等离子体密度、速度和温度	SwRI	
原位探测包	磁强计(MAG)	行星际空间矢量磁场	SwRI & 新罕布什尔大学	取代ACE和DSCOVER任务
	超热离子分析仪(STIS)	氢、氦等能量离子的通量	UC Berkeley	
	X射线流量监测仪	太阳X射线通量	ESA	

3.2 NASA征集科学载荷搭载守望者号任务

在守望者号任务有效载荷配置中建议包括一台极紫外成像仪。尽管欧方也有相关基础,但综合欧美航天合作、研制成本分摊以及未来L5和L1任务协同监测等多方面考虑,ESA邀请NASA提供该载荷,并得到明确响应。

但是NASA不负责美国空间天气相关业务。2023年6—9月,NASA的科学任务部(SMD)发布了机遇任务公告(AO)^[9],在日球层物理处具体负责的与日同在空间天气计划(LWS)支持下,面向科研机构 and 行业部门公开征集一台搭载在守望者号任务上的既定目标科学载荷(Vigil FMO):极紫外成像仪。需要说明的是,该任务属于首席科学家领导(PI-led)的空间科学任务,NASA将其定义为资源受限、中等风险、较高回报的D类科学任务。

公告要求入选项目需能实现如下目标:深化对太阳爆发多变性的理解,即磁能释放和能量粒加速;发展对太阳爆发事件和空间天气进行预报、现报的先进方法;能有效利用守望者号其他载荷数据,同时支撑守望者号任务目标、为空间天气业务提供低时延数据。公告强调入选项目须能补充守望者号观测目标,填补光球磁像仪(PMI)和日冕仪(CCOR)的监测空白,识别内日冕结构和日冕瞬变活动。

公告中明确了后续计划安排,即项目建议书提交截止日期为2023年9月27日,2024年1月公布遴选结果;2026年第3季度前需向ESA(卫星总体)交付工程模样件(EM),2027年第4季度前需向ESA交付结构热控件(S-TM)。

根据美欧设想,未来将打造包括L5点、L1点及地球轨道搭载载荷天基监测业务网络,会同地面监

测台站网络,形成天地一体化的空间天气业务监测体系(图6)。

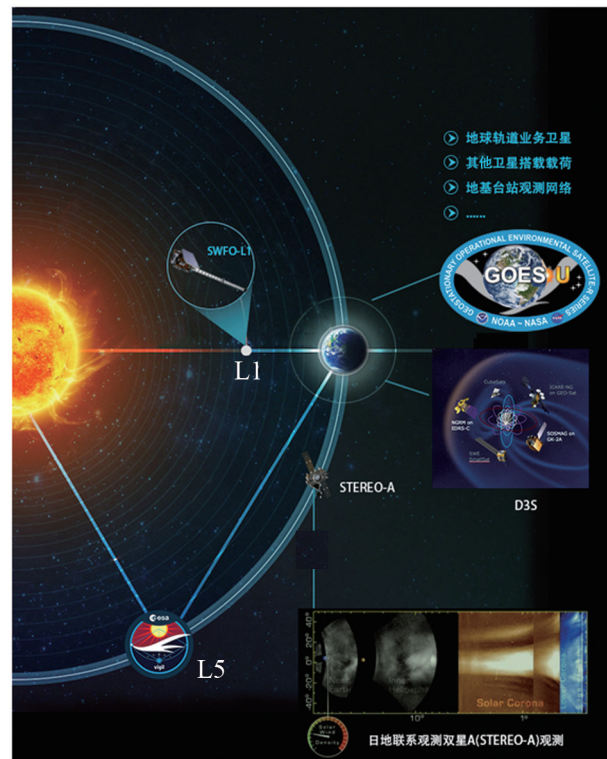


图6 欧美天地一体化的空间天气业务监测体系设想

4 对中国空间天气研发的启示

中国的空间环境服务始于20世纪60年代中国科学院开展的太阳监测和预报服务,目标是保障中国第一颗人造地球卫星“东方红一号”成功。欧美空间天气领域的相关行动与进展提供了一种对照,有助于围绕空间天气预报保障服务和科学前沿突破进行再思考。

一方面,中国高度重视空间天气前沿,建成重大科技基础设施,发射空间物理和太阳观测科学

和试验卫星,产出了一批有重要国际影响力的科技成果。国家自然科学基金委员会长期以来将空间天气预报前沿作为优先发展领域方向予以重点支持。就空间天气地基综合监测而言,子午工程(I+II期)大科学工程已经建成,国际空间天气子午圈大科学计划正加快推进。2022年,太阳活动与空间天气全国重点实验室首批率先完成重组。双星计划、羲和号和夸父一号^[20]等科学和试验卫星为科研人员提供了地球空间环境和太阳活动监测的第一手数据。在中国科学院空间科学先导专项的支持下,对日地L1点^[21]、L5点^[22]以及太阳极区正面成像^[23]等科学探测任务,开展了预先研究和关键技术攻关,中欧联合微笑计划(SMILE)预计于2025年发射,将揭示太阳风-磁层相互作用规律^[24];2023年相关单位启动了L5点“羲和二号”卫星的论证工作^[25],提出了太阳立体探测设想^[26]。这些努力正使中国跻身空间天气领域的先进国家行列。

另一方面,中国亦高度重视空间天气应用,开展了重大航天任务定制空间环境保障服务,发展了空间天气监测预警业务。1992年,中国科学院空间环境研究预报中心(SEPC)成立,加入国际空间环境服务组织(ISES),完成了载人航天工程和探月工程等重大任务和深空探测的空间环境保障。2002年,中国气象局国家空间天气监测预警中心(NCSW)成立。2020年4月,由中国气象局、中国民用航空局、俄罗斯气象水文局共同建设的国际民航组织(ICAO)中俄联合体全球空间天气中心(CRC)成为世界第4个空间天气中心并承担国际值班任务。NCSW利用中国在轨风云气象卫星搭载的太阳X射线极紫外成像仪(X-EUVI@FY-3E)与其他空间环境监测仪器以及地基监测数据,开展了规范化、量化的空间天气监测预报业务,2023年空间天气预警还加入了中国国家突发事件预警发布体系。

空间天气既具有全球性,也与国家利益密切相关,近年来,各国和国际组织日益重视并呼吁加强空间天气服务^[27]。形成自主先进空间天气业务能力是中国空间科技现代化的重要任务,事关筑牢国家安全的空间高地,也是努力抢占空间科技制高点的具体行动。坚持底线思维和极限思维,在日地空

间关键位置前瞻布局相关卫星任务具有提纲挈领的关键作用,是有效规避灾害性空间天气、防范西方极限施压关闭数据的战略对策。

科学发现只有第一没有第二,业务运行强调实时可靠可用。截至2023年11月,中国在轨航天器数量超过700个,居世界第2,是国家重要的空间基础设施、天基资产。我们应该根据国情,统筹空间科学前沿突破和空间天气自主业务,发展专用空间天气业务卫星,科学配置卫星搭载业务载荷,形成中国完备的天地一体化空间天气监测预警体系。一方面,有效满足中国航天、通信、导航定位以及国家空间安全保障等方面日益增长的需求;另一方面,与国际携手应对灾害性空间天气对全球的危害,助力构建外空领域人类命运共同体。

参考文献(References)

- [1] 魏奉思, 万卫星, 曹晋滨, 等. 空间天气科学服务和平利用空间[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略·空间天气预报前沿[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [3] UK severe space weather preparedness strategy[EB/OL]. (2021-09-24)[2023-10-13]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1020551/uk-severe-space-weather-preparedness-strategy.pdf.
- [4] 李明, 汤惟玮, 范全林. 欧洲空间天气一体化行动评述[J]. 科技导报, 2020, 38(22): 86-94.
- [5] Akioka M, Nagatsuma T, Miyake W, et al. The L5 mission for space weather forecasting[J]. *Advances in Space Research*, 2005, 35(1): 65-69.
- [6] Gopalswamy N, Davila J M, Cyr O C S, et al. Earth-affecting solar causes observatory (EASCO): A potential international living with a star mission from Sun-Earth L5[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2011, 73(5/6): 658-663.
- [7] Macdonald M. *Advances in solar sailing*[M]. Berlin: Springer, 2014: 269-288.
- [8] Lavraud B, Liu Y, Segura K, et al. A small mission concept to the Sun-Earth Lagrangian L5 point for innovative solar, heliospheric and space weather science[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2016, 146: 171-185.
- [9] Vourlidas A. Mission to the Sun-Earth L5 Lagrangian Point: An optimal platform for space weather research[J].

- Space Weather, 2015, 13(4): 197–201.
- [10] Rodriguez L, Scolini C, Mierla M, et al. Space weather monitor at the L5 point: A case study of a CME observed with STEREO B[J]. Space Weather, 2020, 18(10): 1–21.
- [11] SSA Programme overview[EB/OL]. [2023–12–04]. https://www.esa.int/Space_Safety/SSA_Programme_overview.
- [12] Space safety[EB/OL]. [2023–12–04]. https://www.esa.int/Space_Safety/Plans_for_the_future.
- [13] Space weather monitoring system[EB/OL]. [2023–07–20]. <https://swe.ssa.esa.int/space-weather-and-space-safety-programme>.
- [14] Vigil mission objectives and payload description[EB/OL]. (2022–05–22)[2023–07–21]. https://lws.larc.nasa.gov/vfmo/pdf_files/ESA-S2P-LGR-MO-0002_i2r0_Vigil_mission_objectives_and_payload_description.pdf.
- [15] Vigil: ESA space weather mission to L5[EB/OL]. (2023–07–13) [2023–12–04]. https://lws.larc.nasa.gov/vfmo/pdf_files/04b_VFMO_PPC_Mandorlo_and_Bramanti_Vigil_Overview.pdf.
- [16] European Space Agency. Horizon 2000 plus, European space science in the 21st century[M]. Netherlands: ESA Publications Division, 1995: 116.
- [17] Ball aerospace completes preliminary design review of NOAA's space weather satellite[EB/OL]. (2021–07–29) [2023–07–21]. <https://www.ball.com/newswire/article/124081/ball-aerospace-completes-preliminary-design-review-of-noaas-space-weather-satellite>.
- [18] Ball aerospace completes critical design review of NOAA's space weather monitoring satellite[EB/OL]. (2022–06–14) [2023–07–21]. <https://investors.ball.com/news-and-presentations/news-releases/news-releases-details/2022/Ball-Aerospace-Completes-Critical-Design-Review-of-NOAAs-Space-Weather-Monitoring-Satellite/default.aspx>.
- [19] Announcement of opportunity 2023 heliophysics space weather Vigil focused mission of opportunity[EB/OL]. (2023–09–22)[2023–10–10]. <https://nspires.nasaprs.com/external/viewrepositorydocument/cmdocumentid=944842/solicitationId=%7B6C875D1E-2A3A-0899-59BA-8C5-F81130A39%7D/viewSolicitationDocument=1/Vigil%20-MO%20AO%20as%20amended%2020230922.pdf>.
- [20] Gan W, Zhu C, Deng Y, et al. Advanced space-based solar observatory(ASO-S): An overview[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2019, 19(11): 5–12.
- [21] 涂传诒, Donovan E, Schwenn R, 等. 夸父日地关联系统与空间天气探测计划介绍[C]//第十一届全国日地空间物理学术讨论会论文摘要集. 北京: 中国空间科学学会空间物理学专业委员会, 2005: 1.
- [22] 甘为群, 常进, 马宇蓓. 中国空间太阳物理40年[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 76–83.
- [23] 邓元勇, 周桂萍, 代树武, 等. 太阳极轨天文台[J]. 科学通报, 2023, 68(4): 298–308.
- [24] 王赤, 李自杰, 孙天然, 等. “太阳风–磁层相互作用全景成像”卫星任务概况[J]. 国际太空, 2017(8): 13–16.
- [25] 我国正在开展“羲和二号”日地 L5 太阳探测工程论证[EB/OL]. (2023–09–15) [2023–10–16]. https://www.gov.cn/govweb/yaowen/liebiao/202309/content_6903984.htm.
- [26] 杨孟飞, 汪景琇, 王赤, 等. 太阳立体探测任务设想[J]. 科学通报, 2023, 68(8): 859–871.
- [27] 李蓉, 全林, 李泠, 等. 空间天气服务现状及发展综述[J/OL]. [2023–10–16]. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.2982.P.20230626.1930.002.html>.

On the ESA Vigil space weather mission

WANG Chi¹, LI Ming¹, WEI Haiyan¹, SHI Peng¹, LUO Bingxian², FAN Quanlin^{1*}

1. Space Science and Deep Space Exploration Study Center, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract European Space Agency decides to develop the space weather mission Vigil as its first dedicated operational satellite in the Space Safety Program, which is a milestone in the field of global space weather research, forecast and services. This paper describes the unique advantages of Vigil mission in monitoring and forecasting space weather at the L5 point of the Sun–Earth system, and briefly addresses its objective and payload. Its long formulation process and future implementation plan are reviewed, as well as the active participation of the United States in the mission. It is pointed out that China must pay more attentions to the negative impacts of space weather on economic and social development and space security, and actively promote the development of an independent national space weather space-based monitoring system.

Keywords space weather; solar eruption; monitoring and warning; space safety ●



(责任编辑 王丽娜)