

从 D1 到“伽利略”

——法国卫星定位与导航系统建设的自主之路

李云逸✉

(中国科学院 自然科学史研究所, 北京 100190)

摘要 目前对法国空间科技史的研究, 因法国强调拥有独立进入太空的能力而被简化为一种“运载火箭史”。但运载火箭只是空间科技的一个环节。要更全面地认识法国空间科技的自主特征, 需考察其他内容。卫星定位与导航系统是 20 世纪 60 年代法国在美国空间项目的影响下产生的新事物, 也成为两国合作的重要方向。与美国的合作促进了法国对相关领域的掌握, 并为之后法国参与“伽利略”项目打下了坚实的基础。对法国卫星定位与导航系统发展的考察将能够更好地理解法国空间政策与科技的自主之路, 同时认识在“伽利略”系统开发中, 法国在政治与技术上的重要角色。

关键词 法国国家空间研究中心; 法美空间合作; 卫星定位与导航; “伽利略”系统

中图分类号 N09

文献标识码 A

文章编号 1000-0224(2025)04-0504-19

国际科技史学界对法国空间探索领域的研究, 基本围绕运载火箭的发展进行, 使得目前的法国空间科技史等同于“运载火箭史”。这种现象有它产生的内在逻辑。法国自戴高乐政府以来, 一直强调决策自主权和拥有独立进入太空的能力。在欧洲层面, 这些概念也被法国大力强调。因此, 掌握在欧洲人自己手里的运载火箭成为法国政府眼中空间科技独立的重要标志。但是, 空间项目的成功实施, 运载火箭只是其中的一个环节, 发射场地的建设与运营、有效载荷的研发、航天器相关功能的选择、运行和监测控制也是必不可少的。尽管目前大部分的文献材料是围绕运载火箭展开的, 但我们需要跳出“运载火箭史”这一框架, 去分析其他空间科技的环节, 这样才能从整体上

收稿日期: 2024-04-14; 修回日期: 2025-01-11。

作者简介: 李云逸, 1988 年, 上海人, 副研究员, 主要研究方向为世界科学技术史、法国当代科技史与中法关系史, Email: liyunyi@ihns.ac.cn。

基金项目: 中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项“中外科技创新重要案例文献整理与解读”(项目编号: E5291S07)。

更好地理解法国在该领域的进展与突破。

法国是世界上较早开展卫星定位与导航技术研究的国家，并取得了较好的成果。其源头来自对美国空间项目的效仿，并在之后积极开展与美国的双边合作，从而促进了法国对该领域的深入理解与掌握。这有别于“运载火箭史”那种极具民族情绪的自主叙事，也影响了由法国主要推动的“伽利略”系统(Galileo)特色服务的开发。此外，尽管对于“伽利略”系统的性能特点国内外均有不少文章和书籍进行了介绍，甚至有的已做出了将它与美国、中国和俄罗斯同类系统的对比。但是，这些研究并未探讨法国在其中的角色问题。因此，本文将利用已经公开的文献资料，尝试跳出法国“运载火箭史”的路径，以卫星定位与导航技术为切入点，探讨法国相关技术因何而起，又经历了什么样的发展，以及法国在“伽利略”系统中起到了何种作用，并进一步分析冷战与后冷战时代法国空间科技自主的特点，同时分析欧洲空间项目在实施上的得失。

1 法国对卫星定位系统的早期探索

1953 年下半年，法国物理学家埃蒂安·瓦希(Etienne Vassy)建议用军方的“维罗妮卡”(Véronique)火箭携带仪器设备在高层大气中进行测量，从而使法国能为 1957 年的国际地球物理年做出贡献。这在很大程度上开创了法国的空间科技。^[1]在国际地球物理年期间，苏联成功发射了人造地球卫星 1 号(Sputnik-1)。这引起了西方阵营的广泛担忧。上述事件带来了两个后果。首先是推动了法国第一种运载火箭“钻石”A 型火箭(Diamond A)的诞生。它以当时法国在研的弹道导弹的各实验体组合而成，并能将约 40 千克的有效载荷送入太空。其次是促进了法国空间研究的体制化。1961 年 12 月 18 日，法国国民议会通过了建立空间研究专门公共机构的提案。1962 年 2 月 27 日，国家空间研究中心(Centre National d'Études Spatiales, CNES)举行了第一次领导层会议，并于 3 月 1 日正式运行。([2], 149-160、225-230 页)它的目标是负责法国所有与空间探索相关的科学和技术。

国家空间研究中心的主要特征是协调组织与科研组织的结合。一方面，国家空间研究中心扮演着计划管理者的角色。譬如，它极其重视法国自身跟踪和遥测网络的建设，而非像英国那样基本依赖美国的站点。实现该计划的相关设施，如跟踪、遥测和远程控制站等均被委托给工业界。国家空间研究中心则管理与协调各参与企业。^[3]①另一方面，法国国家空间研究中心积极争取成为法国卫星的主研单位。他们自行研发了“钻石”A 型火箭所搭载的 A1 卫星的子系统和相关设备，同时也负责卫星的相关应

① 由法国空间探索亲历者参与建设的网站“我们在太空探索的最初几年”(Nos premières années dans l'espace)是一个以回忆录、技术数据和照片资料所组成的网站。该网站曾荣获 2010 年的法国太空史学奖。该网站在 2024 年关停，本文所用到的材料是在它关停前查阅的。

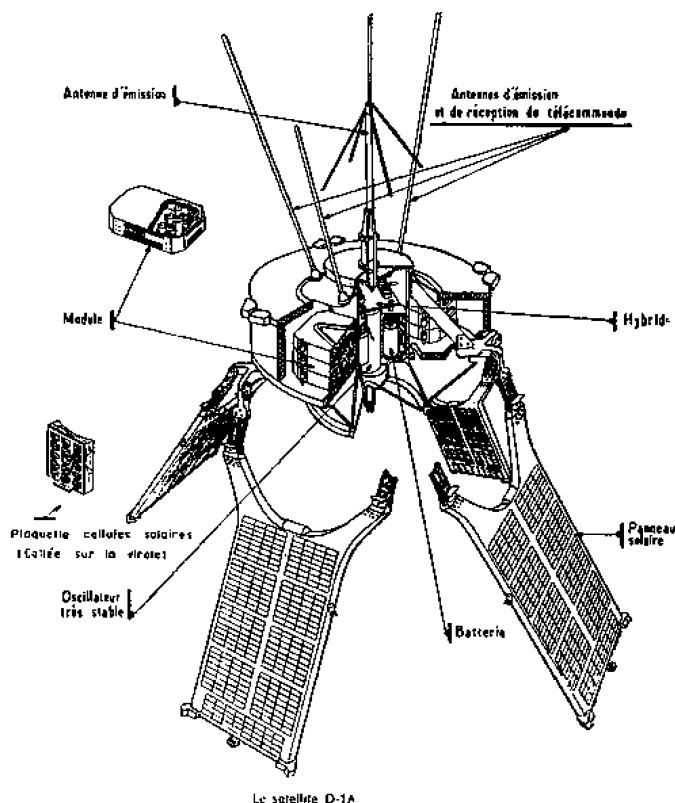


图1 D1A 卫星结构图

用。^[4]因此，卫星部是国家空间研究中心开展科研工作的基石。计算中心的建立则是专门用于通过电子计算机确定卫星轨道。它在确认 A1 卫星的成功入轨过程中起到了关键作用。^[3]

根据美国空间项目的经验，国家空间研究中心在 1962 年底提出在 A1 卫星的任务之外增加新目标：设计制造一个既符合“钻石”A 型火箭实验舱规格的设备舱（约 22 千克）和一个能够在轨运行时间超过 1 个月、配备太阳能发电机的科学卫星。二者总重量小于 45 千克且拥有分离机制。该项目与火箭项目并行，既能充分利用原定的测试计划，又能避免干扰火箭研发的总体进度。设备舱在 1963 年 6 月被交给达索集团开发，并被要求采用成熟技术以便缩短周期。新的人造卫星共计划了 4 颗，其中第二颗被取消，其他 3 颗卫星被分别命名为“音域”（Diapason）（D1A）（图 1）、“王冠 1 号”（Diadème I）（D1C）与“王冠 2 号”（Diadème II）（D1D）。在筛选了科学家们提出的计划之后，D1 系列于 1963 年底被确定为大地测量卫星。它的技术特点是使用两个信号，“通过一个非常稳定的石英振荡器分别以 150 和 400MHz 的频率发射……利用对这些信号的多普勒测量，并在对电离层进行校正后……我们获得的定位精度可达到几米的量级”^[5]。也就是说，这是通过由多普勒效应引起的频率偏移来确定地面站点的位置。

在当时，利用人造卫星进行测量与定位被认为能带来大地测量学的革命。通过人造卫星，学者们可将获得各种参数的精确度提高几个数量级，并可以知道这些参数在时间上的变化，从而可以研究整个地球。^[6]该项目的试验属于位置大地测量学，并被分成两种模式。在同步模式下，人造卫星仅作为一个三角测量点，因此对该点轨迹的任何扰动都不会对测量产生影响。但同步性问题是一大难点。为此，法国人每月都会把两个原子比较钟用飞机运往不同的站点。在轨道模式下，在已知位置的两个站点进行的测量用于确定轨道。对这一轨迹的了解以及在第三个站点进行的测量可用于重建后者的位置。该模式需要人造卫星的轨迹足够稳定，法国人选择了足够高的近地点，以消除大气密度变化造成的不规则现象。^[7]



图2 D1C 与 D1D 卫星

虽然科学用途相同，但是三颗 D1 系列卫星在技术上存在一定差异。与 D1A 相比，D1C 和 D1D 两颗卫星(图 2)多安装了激光反射器用于同步模式。激光反射器是一个三面体。光线从一个面射入，之后其他镀银面会将光线反射到射入方向。D1C 和 D1D 各安装了 144 个激光反射器，从而大大增加了瞄准点的测量精度。^[5] D1D 所装备的石英振荡器的稳定性则是三颗卫星中最高的。^[8]在轨道运行方面，D1A 通过自转来实现稳定，并接受地面遥控。D1C 和 D1D 则通过安装在太阳能电池板上的磁铁与地球磁场的力线保持一致来实现被动磁稳定，并且没有安装遥控设备以节省能源。^[7]

法国为试验设置了 3 个站点，分别位于法国的普罗旺斯、阿尔及利亚的汉马吉尔(Hammaguir)与希腊科林斯附近的斯特凡尼昂(Stéphanion)，以进行多普勒测量与激光测量。前者通过测量卫星发射频率与地面接收频率之间的差值得到卫星的径向速度，从而重建卫星的轨迹，之后通过比较三个站点重建的轨迹，便能解决大地测量问题。对 D1C 与 D1D 的激光测量则相对复杂。这种方法需要一台望远镜，用于确定卫星在天

空中的位置,以便对准来发射激光。之后,激光束被卫星反射而进入激光发射器附近的另一台望远镜。配合原子钟,科研人员可以测算出激光到达反射器再返回站点所需的时间,最终测算出卫星与站点之间以及各站点之间的距离。^[7]

三颗卫星分别在 1966 年 2 月 17 日,1967 年 2 月 8 日与 15 日由“钻石”A 型火箭成功送入轨道。D1A 在与整流罩脱离时发生碰撞,其自转受到影响,但该问题未干扰大地测量试验。D1C 与 D1D 则完全取得成功。^[5]如果说 A1 卫星的入轨只是政治意义上的成功,那么 D1 系列卫星的发射则真正实现了法国空间科技的自立。而在科学研究上,D1 系列为法国的空间利用开启了大地测量与定位技术的新方向。这让国家空间研究中心相信在太空中进行诸如电信和气象探测等应用将大有可为。

2 法美合作的“风神”计划

“风神”(Éole)计划便是在这一背景中产生的法美科研合作项目。20 世纪 60 年代初,美国提出了“全球水平探测技术”(Global Horizontal Sounding Technique, GHOST)的概念,即通过导航卫星(satellite de navigation)对进入大气层的大量气球进行追踪定位,并传递它们的气象测量结果。美国国家航空航天局(NASA)将该概念作为数据收集和定位系统(Recording and Location System, IRLS)进行开发。1962 年,国家空间研究中心人员在美考察期间知晓了该项目,并认为这是抢占世界科技前沿的绝佳机会。数月后,国家空间研究中心向美方展示了能够应答低轨道上的人造卫星并可被精确定位的小型机载转发器。该设备极大提高了建造数据收集和空间定位系统的可行性。^[9]该项目正式被命名为“风神”,成为法美自“法国-1 号”科学卫星后第二项重要的空间科技合作。

在卫星定位技术方面,法方认为需在倾角为 50°、距地面 900 公里的低轨道上放置一颗利用重力梯度(gradient de gravité)稳定的卫星。“风神”卫星(图 3)采用相干往返的多普勒法(la méthode Doppler utilisant un aller-retour cohérent)定位与控制进入到南半球对流层和南极圈之间、海拔高度为 12000 米的 500 只气球。在这一过程中,卫星天线必须保持指向地球。气球上的转发器接收卫星上发射的信号,并将信号发送回卫星上的接收器。选择这种方法的原因首先是它对信号质量的依赖性较小,对频率的稳定性没有任何限制。这最大限度地降低了对气球所载设备的技术要求。其次,该方法提供了对空中安全至关重要的卫星—气球链路。最后,则是来自 D1 系列卫星的经验。国家空间研究中心在处理随机法(la méthode aléatoire)上缺乏能力。^[10]为证明这样的模式能够正常运行,一颗“风神”验证型卫星(Péole)在 1970 年 12 月 12 日通过“钻石”B 型火箭从圭亚那起飞进入轨道。法国人实现了该卫星的重力梯度稳定,并控制它的天线持续对准地球。之后,该卫星与气象气球的连接被确认是可以实现的。^[11-12]“风神”卫星于 1971 年 8 月 16 日由一枚美国的“侦察兵”火箭(Scout)送入预定轨道。卫星装备有一个 400—440 MHz 收发器与数据储存装置,并与部署在南半球的 480 只气象气球建立了联

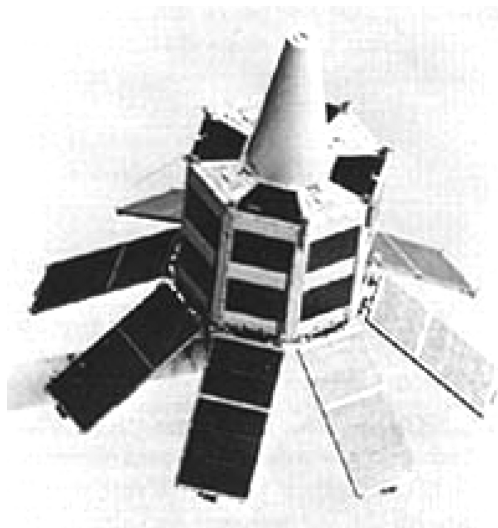


图3 “风神”卫星

系(图4)。卫星按顺序询问所有气球上的转发器,命令气球在给定时间内做出反应,并测量它们的位置参数。同时,卫星解码被传输的数据并将它们存储起来。^[9]该项目于1972年12月结束,基本获得成功。尽管由于人为操作失误导致了部分气球的损失,在科学研究方面出现缺憾,但是,整套卫星定位与信息采集系统的运转是令人满意的。

通过“风神”项目中对卫星定位体系的建设与大量的数据处理,法国增强了在这一

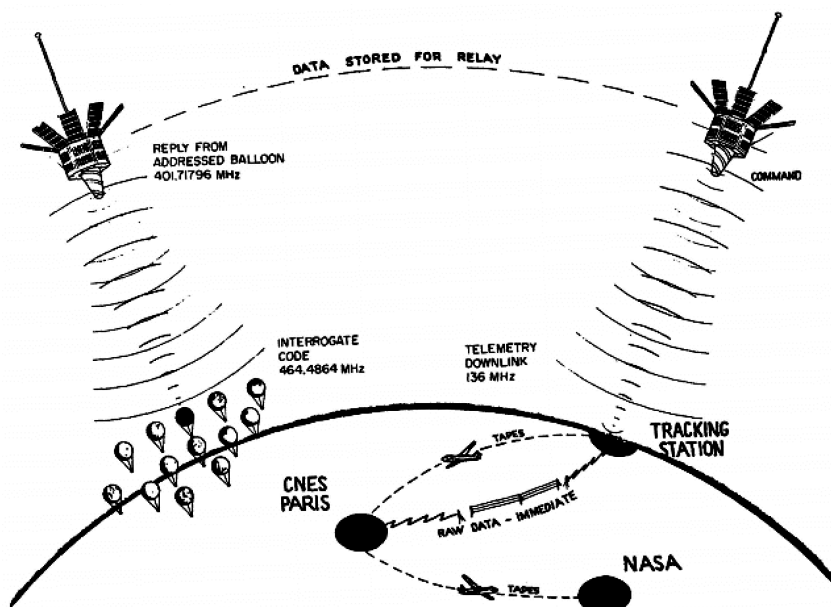


图4 “风神”系统运作示意图

领域的能力。国家空间研究中心开始尝试探索卫星定位与导航的实用与经济价值,并对使用低轨道卫星的信息收集和分配系统的效益进行评估。它实施了两项计划。一是“风神海洋商业”(Éole Marine Marchande)项目,二是“实用性风神”(Éole opérationnel)与“大地测量风神”(Géole)项目。它们的创新性在于提供新型的卫星服务。它们的用户群不再是围绕一个单一的联系点,而是极其多样和分散的。^[13]“风神海洋商业”项目着眼于卫星海上导航,其精度可达到几百米以内。在转发器运转正常的情况下,使用“风神”系统的帆船、救生艇和邮轮均获得了良好的效果。美国国家航空航天局甚至利用该方法实现了人类历史上第一个汽车导航定位实验。^[14]“实用性风神”与“大地测量风神”项目则着眼于将由“风神”项目衍生的定位和收集系统用于新建造的、具有多种功能的卫星上。该项目是一种以卫星导航系统为基础的全球定位系统。其中,一个由 50-60 个地面站组成的网络,用于计算各站点的轨迹和位置,其精确度预计能达到 1 米左右。可惜的是,伴随“阿丽亚娜”(Ariane)火箭项目的展开,国家空间研究中心的资源遇到困难,两个卫星定位项目均遭到波及。原定在 1976 年用以发射“大地测量风神”卫星的“钻石”型火箭被取消,“实用性风神”与“大地测量风神”项目也因此下马。^[6]而“风神海洋商业”项目所取得的成果则以法美合作的形式得到发展。

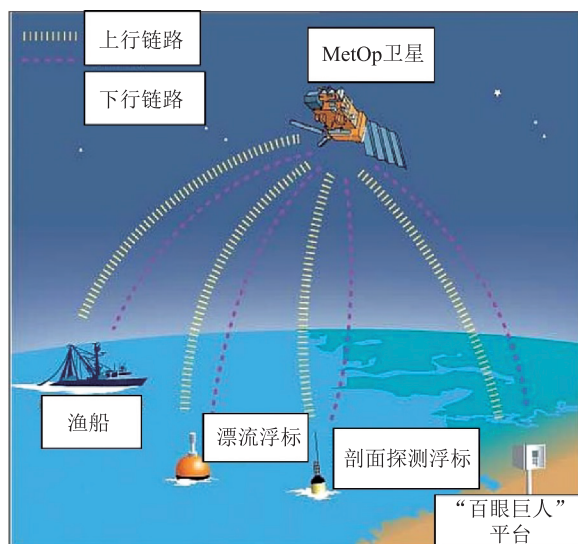


图5 “百眼巨人”系统运作示意图^①

国家空间研究中心希望将“风神海洋商业”项目推广为一种可在全球范围内使用的系统。该系统将由数颗卫星组成空间段。地面数据接收和处理系统与分布在全球各地的数据收集平台作为地面段。卫星将以每分钟 401.650 MHz 的频率发射信号。信标接收

^① 图片来自网站: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/argos-dcs#argos-3-onboard-instrumentation->。本文对图片中的英语做了中文翻译。

和测量来自卫星的多普勒效应。之后，测量结果将被传送到站点进行处理。定位采用两种方式，一种是双向通路，可以确定信标的发射频率、位置和速度；另一种是单向通路，可以确定信标的发射频率和位置。^[15]系统的数据采集平台由一组测量传感器组成，传感器与发射器相连。发射器同样以 401.650 MHz 的频率定期发射信号。^[16]新项目以古希腊神话中的“百眼巨人”(Argos)命名，并在 20 世纪 70 年代中期向美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration)与美国国家航空航天局提出建议，希望将设备搭载在极地轨道上的美国气象卫星上以建立系统。该方案得到了美方的积极回应。1978 年 10 月 13 日，搭载“百眼巨人”空间段设备的美国气象卫星 TIROS-N 进入轨道。^[9]空间段设备主要包括一个接收器，用于接收以卫星为中心、直径为 5 000 公里范围内各平台的所有发射信号。卫星的甚高频和超高频遥测发射机会立即传送这些信息。同时，它们还被储存在一个星载磁性记录器中，当卫星飞越其中一个接收站时，再重新传输到地面。其实时定位的基础是提前确定尽可能精确的卫星轨道，从而提供卫星的坐标和速度。这是通过对轨道记录信标(la balise d'orbitographie)进行多普勒测量后实施轨道推测的结果(图 5)。在系统搭建初期，地面段有两个位于美国的接收站。数据处理中心则位于法国图卢兹，由国家空间研究中心负责运营“百眼巨人”的服务。此外，11 个参考平台组成的网络在全球范围内均匀分布，其大地测量位置精确可知。在用户段，用户所使用的信标的生产需经过法国授权。用户可通过电话、电传或数据传输网络获得所需信息。^[16]“百眼巨人”系统在科学研究领域被广泛应用于海洋学、气象学、冰川学、水文学、地球物理学、生物学，收集所需的各种数据。而在定位导航领域，系统的信标被安装在帆船、海洋学研究船和商船上，其定位精度可达 150 米。^[9]该系统目前依然是重要的全球定位和数据收集系统之一。

可以说，通过从 D1 系列卫星到“风神”系统的探索，再到“百眼巨人”系统的成功运营，使法国从零开始实现了对卫星定位导航技术的掌握，并获得了领先地位。如果说，法国在该方面是一种自主的表现，那么相较于法国科技史学界的重点关注领域——法国在运载火箭上所取得的成就——则存在区别。首先，法国国家空间研究中心在卫星定位导航的系统建设上主要依托国际合作。法国为美国国家航空航天局所提出的概念框架提供了技术上的创新性解决方案。这使得数据收集和空间定位系统能够付诸实施。而且，这是基础科学研究合作。在冷战的大背景下，这种类型的合作没有遇到较多的阻力，甚至跨阵营的沟通也能够展开。数据收集和空间定位系统正是美苏共同推动的全球大气研究计划(Global Atmospheric Research Program, GARP)的一部分。各方均可以为项目做出贡献，并在实践中各取所需。法国正是利用了这一便利建立起自身的特色，即使火箭和卫星等载体均由美国提供。其次，这种基础研究在当时并不是法国空间政策的重点。在运载工具研发作为首要目标的时期，人造卫星及其相关应用事实上沦为一种附属项目。无论是 D1 系列还是“风神”卫星，它们的主要任务是验证法国国产火箭的可靠性。在经费预算收紧的背景下，它们成为最先被考虑中止的项目。

搜索和救援服务(SAR)是“伽利略”系统四大服务之一,也是计划提出时的创新性服务。它整合的是1982年投入使用的SARSAT/COSPAS海上救援系统。^[19]该套体系的来源之一是法国通过国际合作而搭建的“百眼巨人”系统。如上文所述,“百眼巨人”系统主要功能是海上导航定位。通过“百眼巨人”的运用,法国国家空间研究中心提出,伴随轻型飞机和游艇数量的增多,为应对可能的救援需求,可以考虑利用空间科技改进对航空和海上遇险事件的探测和定位。国家空间研究中心认为,尽管在建立无线电联系后,遇险海员一般都有时间发送他们的预估位置,但是,跨大西洋帆船比赛的经验表明,这种预估的位置往往误差相当大。而低空飞行的轻型飞机都处于雷达覆盖范围以下,搜救定位时间往往高达9小时。伴随1976年美国和加拿大提出SARSAT计划(用卫星对北美常用的121.5 MHz和243 MHz信标的多普勒发射进行定位),法国于1977年加入,并在“百眼巨人”系统的基础上提出了406MHz遇险探测和定位系统。这是SARSAT计划中唯一能够实施全球定位的系统。^[20]

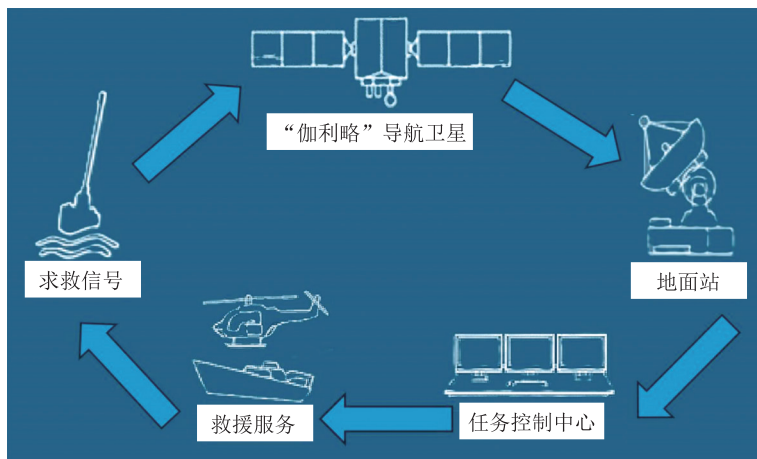


图7 “伽利略”的SARSAT/COSPAS系统的运作原理简图

该系统在空间段上的运作模式是通过卫星上的一部接收器将406 MHz频带转换为第一中频。随后,一部搜索单元会分析F.I.频谱,并通过接收到的频率和电平来检测406 MHz发射的信号。然后,一个控制单元将检测到的信号分配给可用的处理单元。这些处理单元执行多普勒测量、分解数字报文并输出报文。最后,存储器将储存406 MHz任务的预处理数据。其内容可通过1 544MHz链路传送给地面站,使它们能够处理在全球范围内收集的遇险信息(图6)。^[21]与“百眼巨人”相比,它能够处理更多的位置信息,定位计算也更复杂。^[16]全套系统由当时负责“百眼巨人”系统的达索集团生产。在地面段,当时设置了两个地面站专门处理406MHz的数据,并由设在法国图卢兹的控制中心负责。全球覆盖模式的定位计算则在美国飞行任务控制中心进行。用户段的信标和发射器的运行原理与“百眼巨人”的相同,每隔1分钟左右发射1次短脉冲信息。不过,它额外增加了32比特的长格式信息。这被用以传输对救援人员有用的其他信

息。同时,这也是为了确保 406 MHz 信标能与计划中的地球静止卫星系统兼容。地球静止轨道卫星无法使用多普勒定位技术,但能立即探测到遇险信息,因此信标需要传输更多的信息。信标的生产则由国家空间研究中心委托给法国企业。^[20-21]

与“百眼巨人”一样,该系统由美国的气象卫星搭载。随着苏联的加入,COSPAS 系统被整合进来,由美苏各两颗卫星组成的 SARSAT/COSPAS 救援系统在 1982 年正式成形。相比于北美的 121.5 MHz 和 243 MHz 系统,法国的 406MHz 体系在探测概率、定位质量、覆盖范围、所收集信息(编码信息)的质量和实用性,以及系统处理相同时间遇险情况的能力上都有显著提高。^[20]由于 121.5 MHz 服务定位精度低、误报情况多,自 2010 年开始,该频段服务终止,由法国的 406MHz 系统代替。406MHz 信标在“伽利略”系统正式投入使用前已生产了约 100 万个。由于“伽利略”系统的卫星属于中轨卫星,为配合该系统,新的信标配备了专门的导航接收器,可以在海洋、航空和陆地载具上更精确地记录信标的连续位置,然后在遇险信息中传送这些位置信息(图 7)。^[19]因此,在空间段,“伽利略”系统的导航卫星配备了重 15 千克的 406MHz 中继器,能够探测并向救援队转发 SARSAT/COSPAS 系统中的信标信息。在将它们转化为 1 544MHz 频带的信号后,能够传递到地面救援系统。该组件可以最多转发 150 条信息。^[22]每个警报至少由 4 颗导航卫星实时探测到,并在 10 分钟内计算出目标位置。在定位精度上,对于没有“伽利略”系统导航接收器的信标,其定位精度将优于 2.5 公里。装有“伽利略”系统接收器的信标的定位精度则优于 15 米。^[19]此外,“伽利略”系统还能为 SARSAT/COSPAS 系统提供卫星运行轨道参数(如星历、历书、时钟校正)。在地面段,搜索和救援服务由国家空间研究中心下属的图卢兹中心负责。这是系统中唯一与“伽利略”和 SARSAT/COSPAS 系统基础设施相连的机构。这里也是所有搜索和救援服务综合后勤支持(ILS)相关流程的关键。同时,图卢兹中心跟踪协调地面站,进行时间管理、数据管理与归档以及设施性能监测。3 个分别位于西班牙、挪威和塞浦路斯的地面站,能够在被称为“欧洲搜索和救援服务/伽利略覆盖区”的 4 000 万平方公里的区域提供前向链接的增强服务。

“伽利略”系统的创新性功能是使通信链路能够将数据转发回始发信标。这被称为“返回链路”。它可用于通知发送者目前卫星已收到的相关信息,同时可以优化救援功能。例如,一旦探测到警报,其信号的传输周期可根据救援行动的不同阶段进行调整。在不增加系统复杂性的情况下,它能够实现将搜索和救援数据引入卫星向全球发出的导航信号中。因此,人们通过配有“伽利略”系统接收器的信标就可以提取搜救数据,而无需特定的接收设备。该功能依然由图卢兹中心负责。它能同时对接 SARSAT/COSPAS 系统与“伽利略”系统。为实现自动确认功能,“返回链路”系统被设计为在没有人类干预的情况下自主工作,这也确保了服务的高度可用性。^[19,23]

4 法国对“伽利略”项目的其他关键支撑

已有研究一般都指出法国在该项目中扮演了重要角色，但是除了创新性的搜索和救援服务，我们又很难看到法国为“伽利略”系统核心的导航机制、星座卫星等所做出的贡献。利用目前能够掌握的资料，我们可以从政治角度与法国企业的参与来看待这一问题。

从政治角度来说，半个多世纪以来，法国认为太空是一个重要的战略领域。法国是欧洲空间科技合作与独立自主的坚定支持者与领导者，在这一方面进行了大胆的制度创新。1975 年欧空局(ESA)在法国的协调下成立，形成了西欧层面对空间科技研发的一体化领导体制。它使西欧走出了“欧罗巴”系列运载火箭失败的阴霾，并通过“阿丽亚娜”项目实现了在运载火箭上的独立自主。2009 年 12 月，在法国的积极推动下，《里斯本条约》生效。该条约修订了《欧洲联盟条约》(TEU)和《欧洲联盟运作条约》(TFEU)，欧洲联盟从而具有了法律人格，对空间政策具有了完全的直接管辖权。由欧盟负责制定和实施欧洲空间政策具有了合法性和正当性。^[24]法国是欧洲卫星导航项目的坚定支持者与推动者。2007 年初，当“伽利略”项目因公私合作模式(PPP)问题谈判失败后，法国积极敦促欧盟调整项目的融资与成果传播机制，从而缓解了欧空局与欧盟之间的协作问题。这形成了由欧盟负责顶层规划、欧空局作为总承包商并通过 6 个合同进行分包的模式。法国也积极推动设立欧洲全球卫星导航系统管理局(The European Global Navigation Satellite Systems Agency, GSA)来负责总体运营管理与商业开发。^[25]这些举措配合《里斯本条约》，化解了公私合作模式下私营和公共部门之间的风险分担导致合同方案转变为特许权的问题，并能在完全使用公共资金的基础上进行项目部署。([26], 134-139 页)欧盟对 34 亿欧元进行分配，并通过了关于治理和市场的明确规则，为项目的发展和欧洲的空间政策提供了新的动力。法国每年投入的预算约 20 亿欧元，约占欧洲空间领域总预算的 40%。其中，法国承担了“伽利略”系统研制费用的 20%，是仅次于德国和英国的第三大出资国。^[27-28]

然而，尽管在政策搭建与调整上表现亮眼，但在“伽利略”项目核心技术的具体开发中，法国的存在感并不突出。法国空间工业部门在项目的部际工作组中没有代表，可见度十分有限。同时，在经费投入上，大部分的国家级拨款并不集中，导致项目的国内关注度较低。^[27]产生上述问题的原因可能有两个。一方面，法国对欧洲空间政策的引导是希望更加突出欧盟自身的决策与行动能力，而非像“阿丽亚娜”项目时期，看似是西欧共同参与，实则是法国在背后主抓。在作为“伽利略”系统主承包商的欧空局的预算中，法国已降到第二，欧盟成为了最大的资助方。([29], 55-56 页)另一方面，这是冷战时期法国空间科技的自主对当下的影响。法国在项目中主要承担圭亚那宇航中心与“阿丽亚娜”火箭的运作、部分地面段建设以及全球救援系统的匹配。这些基本上

都是法国在冷战时期获得较大突破的技术。

在运载火箭方面,用于发射“伽利略”系统星座卫星的“阿丽亚娜”5号火箭由欧空局12个成员国参与研发。法国出资最多,占到了总预算的46.2%,其次是德国(22%)和意大利(15%)。^[31]在经过了1995年第一次发射失败之后,1997年10月30日,“阿丽亚娜”5号发射成功。^[32]用于“伽利略”导航卫星发射的是“阿丽亚娜”5ES型火箭(图8)。“ES”是“储存进阶”(Evolution Storable)的缩写。这来源于它的技术特征,即使用升级的小型可储存推进剂级(第二级),可进行再点火和长周期飞行。这一能力适合将“伽利略”导航卫星送入预定轨道。火箭适配了中型的有效载荷舱与整流罩。4颗重约715千克的卫星被一起固定在新研发的被称之为“伽利略”FOC分配器A5的结构上。^[33-34]“阿丽亚娜”5ES火箭共执行了3次“伽利略”项目任务,分别在2016年、2017年和2018年将12颗导航卫星送入轨道。在圭亚那宇航中心,法国国家空间研究中心则



图8 “阿丽亚娜”5ES火箭

履行了多项职能。它设计所有基础设施，作为法国政府的代表确保人员和财产的安全，并为“伽利略”导航卫星和所用运载火箭的准备工作提供必要的支持。在测试或发射过程中，法国国家空间研究中心还负责总体协调工作，利用所属台站网络收集和处理数据，以跟踪阿丽亚娜 5 号与俄罗斯“联盟”号火箭的运行轨迹。([29]，87-88 页)由于阿丽亚娜 5 号火箭的结构与之前的 4 型火箭存在较大不同，因此需要在圭亚那宇航中心建设新的发射场。它的代号是 ELA3(Ensemble de Lancement Ariane numéro 3)，即“阿丽亚娜”3 号发射场。^[35]而自 2005 年起，法国出于成本考虑，选择了俄罗斯“联盟”号火箭承担发射“伽利略”系统在轨验证卫星(iov)、在轨验证试验卫星(GIOVE)与大部分导航卫星的任务。在圭亚那发射的“联盟”号使用“阿丽亚娜”4 号火箭的整流罩，并根据任务需求使用由空客公司提供的适配器。^[41]据统计，法国仍然承担圭亚那宇航中心运作费用的 80%，并为“阿丽亚娜”5 号的运行提供 60% 的经费支持。^[37]总体而言，法国在“伽利略”导航卫星成功入轨方面具有决定性作用。

在“伽利略”系统中，法国的主要参与企业是泰勒斯集团(Group Thales)下的泰勒斯-阿莱尼亚宇航公司(Thales Alenia Space)。它是“伽利略”系统地面任务段(GMS)的主承包商。^[42]2005 年 6 月，法国阿尔卡特集团(Group Alcatel)与意大利芬梅卡尼卡集团(Finmeccanica)共建了阿尔卡特-阿莱尼亚宇航公司(Alcatel Alenia Space)，成为当时欧洲最大的卫星系统制造商。其成立可能是应对“伽利略”系统的投标。在“伽利略”项目的公私合作阶段，阿尔卡特集团是私营公司的重要竞争者。([26]，139-148 页)在“伽利略”项目组织模式改进之后，泰勒斯集团对阿尔卡特-阿莱尼亚宇航公司进行了收购，占股 67%，形成了泰勒斯-阿莱尼亚宇航公司，从而使得该集团拥有了欧洲最强的卫星制造力量。其总部坐落于法国加纳。而再往前追溯，目前可知在“伽利略”系统 20 世纪末到 21 世纪初的定义论证阶段，系统的总体结构研究是交由阿尔卡特宇航工业(Alcatel Space Industry)领导的。^[43]

整个系统设计的关键被认为是卫星星座。欧空局倾向于两个方案，一个是使用中地球轨道卫星，另一个是使用中地球轨道+地球静止轨道卫星的组合。重点是能覆盖全球，而在整个欧洲又能提供高质量服务。在分析中，欧空局发现“中地球轨道卫星”和“中地球轨道+地球静止轨道卫星”星座在安全参数上不分伯仲，而在民用市场上则显示出优劣。在故障状态时中地球轨道故障造成的“漏洞”往往会四处移动，因此没有地方会长期受到影响，而地球同步轨道故障造成的“漏洞”则会停留在一个区域内。最终，星座被设计为中地球轨道。星座卫星初始设计重量为 650 千克，并被要求能够通过“阿丽亚娜”5 号火箭发射。所以，卫星被设计为几何型，配合可能是上下安装的分配器，“阿丽亚娜”5 号可以实现一箭六星的发射模式，实现快速部署。

此外，欧空局还对导航波段选择、安全性问题以及地面控制等方面进行了研究。^[44]在泰勒斯集团收购了阿尔卡特的空间业务后，集团以上述研究为基础对“伽利略”系统的设计进行了优化。在“伽利略”系统地面任务段，从目前披露的资料来看，泰勒斯集

团的团队需要对每个系统版本的需求基线、相关的设计定义文件、接口控制文件和系统鉴定文件进行全面控制。地面任务段系统复杂,具有分布式、软件密集、受到严格的性能和安全要求的限制等特点。泰勒斯集团专门设计了系统工作台从而确保需求的可追溯性以及各级设计和接口的一致性。^[45]同时,从2005年年中至2007年底开发了用于支持“伽利略”系统地面任务段的设计和处理算法的工程工具环境(The Engineering Tool Environment, ETE),并在2008年投入使用。它被用以模拟“端到端”的全球导航卫星系统数据测量^[46],相关工作均取得了良好的进展。2018年10月,欧空局授予泰勒斯-阿莱尼亚宇航公司“伽利略”系统地面任务段和“伽利略”系统安全设施(GSF)运营阶段的合同,合称为WP2X。合同价值约3.24亿欧元,包括开发和部署新的基础设施,以便优化“伽利略”系统的服务,特别是开放服务(达到完全运行能力)和公共监管服务(提供初始运行能力)。同年12月,签署新一批合同,价值约1.3亿欧元,其目标是能够提供完整的公共监管服务。泰勒斯-阿莱尼亚宇航公司将通过联络点平台对地面段进行调整以适配“伽利略”系统安全中心(GSMC)和控制接收器访问权限的政府机构接口。^[47]2021年3月,该公司又获得一份价值7.72亿欧元的合同,要求提供6颗卫星作为“伽利略”系统第二代星座。^[48]通过这些发展,法国工业界在“伽利略”系统中的可见度正在逐步提高。

5 结 论

从D1卫星到“伽利略”系统,法国在卫星定位与导航系统建设上走过的自主之路能给予我们不少启示与经验教训。首先,法国采取了基于双边国际合作的空间项目组织机制,实现了对卫星定位与导航技术制高点抢占。这一方面得益于冷战的大环境。“国际地球物理年”的举办及其期间苏联第一颗人造卫星的成功发射,加快了西方阵营内部在空间研究上的国际合作,尤其是美国与欧洲科学家的互动。而对空间的基础科学研究又较少涉及国家战略关切,因此带来了美国为他国开放运载火箭的利好局面。另一方面,法国国家空间研究中心积极开拓新领域,以电离层研究与大地测量为核心,力图抢占制高点。由此产生了D1人造卫星项目、“风神”项目以及“百眼巨人”系统,从而实现了在卫星定位导航功能、材料应用、信息接收与分析等方面的自主与创新,不仅完成了法国科学家团体的目标,还推动了美国在卫星定位导航上的研究工作,以及通过美国国家航空航天局培养法国的空间科技人才。这种法美双边合作取得了良好的效果,表明在国际科技合作中既需要有适当的大环境,也需要积极主动,利用好合作方优势,在实现我方科研目标的同时追求共赢局面。

其次,法国能在空间科技领域取得重大突破,离不开“以我为主”的多边合作模式。戴高乐在1958年重新掌权之后,法国政府坚持独立自主的空间科技路线,仅用7年时间就实现了在人造卫星与运载火箭上的自立。这是由国家引导科研力量服务国家战略

需求的结果。但是，经济状况使得法国对空间科技的大规模投入无法成为现实。法国即使保持独立的运载火箭能力也无法将有效载荷送入更高的地球轨道。在西欧各国均没有能力与美苏两个超级大国在空间科技领域进行竞争的情况下，通过多边联合研发成为必然。法国作为西欧唯一一个拥有完整空间科技能力的国家，成为了欧洲空间科技事务的领导者。通过多边合作，以法国的运载火箭方案为核心，欧洲实现了“阿丽亚娜”系列运载火箭的研制，保证了独立进入太空的能力。“伽利略”系统则使得欧洲在卫星定位导航的科技制高点上占有了一席之地。而法国在相关技术上的积累为“伽利略”系统带来了具有特色的导航救援服务，实现了一大技术创新，这成为法国空间科技独立自主的一个重要特征。它是以自身构建的自主科技为基础，通过多边的科技合作获得符合国家需求的能力与产品，同时又实现了领导欧洲的政治目标，带领欧洲实现了超越国家范畴的空间科技独立自主。

再次，法国对欧洲的空间科技合作进行了重要的工程制度创新。领导欧洲事务是法国对外政策的重要组成部分。在空间科技领域，从 20 世纪 70 年代至今欧洲财政问题伴随多次的经济危机，使得联合研发成为了最适当与稳妥的发展方式。法国为此进行了不少创新。第一个创新是改变了西欧各自为政的松散合作方式，成立了欧空局，以法国为中心，实现了“阿丽亚娜”项目的成功。第二个创新是建立了世界上第一家私营运载火箭公司，为“阿丽亚娜”火箭后续的发展提供了强大的动力。第三个创新是让欧盟这个超国家组织拥有了进入太空的合法性，并调和它与欧空局的关系，实现了真正由欧盟负责的空间科技项目。法国能够提出一个所有人都能接受的愿景，由欧盟负责促进和协调，实现各国空间政策的协同。“伽利略”项目作为世界上第一个面向民用市场的全球卫星导航系统，便是这一体制创新的结晶。同时，伴随新合同的签订，法国工业界也在该项目中承担更多的技术角色。

最后，法国带领欧洲实现空间科技独立自主的历程亦有教训。对空间科技的投入依然是一种长期的高资本低回报型投资。单个国家往往适合利用“举国体制”进行发展，而以经济利益为主导的多边协作则容易受到影响。在冷战期间，大国对空间科技更关心的是国内与国际政治影响而不是盈利能力。尤其是美苏之间的空间科技竞争，其政治意义突显，完成相关目标往往可以不计经济回报。美国的“阿波罗”工程便是重要例证。此后，“后阿波罗”计划尝试利用航天飞机作为新型手段，降低成本，但并不理想。法国则领导欧洲坚持走运载火箭路线，并积极开辟民用市场，成功抢占了美国的份额。欧洲在空间科技上的联合因此很大程度上依赖这种市场回报。“伽利略”项目在某种程度上希望复制这种模式。不过，当前国际民用市场竞争激烈，其空间工业的长期生存能力便因盈利能力不足而受到极大影响，从而进一步导致欧洲的空间科技政策缺乏政治动力。这也是“伽利略”系统所面临的主要难题之一，因而其转向军事和国家安全用途便也在情理之中了。

参 考 文 献

- [1] VARNOTEAUX P. La naissance de la politique spatiale française[J]. *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, 2003, 77: 59-68.
- [2] VARNOTEAUX P. *L'aventure spatiale française, de 1945 à la naissance d'Ariane*[M]. Paris: Nouveau Monde éditions, 2015.
- [3] BLAMONT J. La création d'une Agence spatiale: les Français à Goddard Space Flight Center en 1962—1963 [DB/OL]. [2023-09-21]. <http://nospremieresannees.fr/texteblamont/texte1.html>.
- [4] SAINT-ETIENNE J. Trente années au CNES à Brétigny et à Toulouse. [DB/OL]. [2023-09-21]. https://nospremieresannees.fr/cnes/trente_annees_au_cnes/texte01.html.
- [5] GUINARD J-P. Quelques souvenirs du lancement, il y a 40 ans, des premiers satellites français. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/d1progsite/d1texteguinar/texte01.html>.
- [6] LEFEBVRE M, BARLIER F. En attendant GALILEO ... La Terre mesurée depuis l'Espace; de DIAPASON (1966) à JASON (2001), la contribution française[J]. *Navigation: Revue technique de navigation maritime et aérienne*, 2003, 51: 35-81.
- [7] DESCLAUDE A avec la collaboration de MM. ADAMY A, HUSSON J-C et LEFEBVRE M. Les satellites D1C et D1D [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/d1progsite/d1cetd/descriptiond1cd/texte01.html>.
- [8] CAUSSE J P. Quelques petites remarques. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/d1progsite/d1cetd/texteJPCausse/texte01.html>.
- [9] MOREL P. Note historique sur le projet Eole. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/eolesite/eo-letextemorel/texte1.html>.
- [10] MULLER J (chef du projet). EOLE, un projet à risque. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/eolesite/eolemullertexte/texte01.html>.
- [11] DESCLAUDE A. Le satellite Péole. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/eolesite/peole/satellitepeole.html>.
- [12] RODE M C. Opérations en Orbite. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/eolesite/peole/apreslancement.html>.
- [13] LEBEAU A. Note sur l'Orientation du Programme de Satellites de Collecte de Données et de Localisation dérivés d'Eole. [DB/OL]. [2023-09-21]. https://nospremieresannees.fr/eolesite/PostEole/eoea-1970_Locol/02_texte/texte01.html.
- [14] DE ROFFIGNAC B (CB/OPS/SP). Eole complémentaire. [DB/OL]. [2023-09-21]. https://nospremieresannees.fr/eolesite/PostEole/eoeb-Ephemerides_1972/texte01.html.
- [15] DE LA RUPELLE B. Méthodes de localisation Doppler dans les Systèmes Argos et Sarsat/Cospas [J]. *Navigation: Revue technique de navigation maritime et aérienne*, 1987, 35: 326-337.
- [16] ROSSO R. Le Système ARGOS de localisation et de collecte de données par satellite, caractéristiques et performances[J]. *Navigation: Revue technique de navigation maritime et aérienne*, 1986, 34: 187-195.
- [17] REDON David. Interview d'Hubert Curien, le 14 octobre 2003. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://nospremieresannees.fr/lanceurs/laj-Ariane/laj5-curien/curien.html>.
- [18] 杨子辉, 薛彬. 伽利略卫星导航系统的发展历程及其现代化计划[J]. *导航定位学报*, 2022(3): 1-8.
- [19] Ouvrage coordonné par BARLIER F. *Galileo. Un enjeu stratégique, scientifique et technique* [M]. Paris: L'Harmattan, 2008: 89-91.

- [20] GAL C, GOUDY P, LUDWIG D. Le Programme Sarsat: D'aide à la recherche et au sauvetage par satellite[J]. *Navigation: Revue technique de navigation maritime et aérienne*, 1982, 30: 188-204.
- [21] VERLET G. Le système mondial de détresse et de sécurité en mer principes fondamentaux et description générale [J]. *Navigation: Revue technique de navigation maritime et aérienne*, 1991, 39: 92-109.
- [22] 陈秀, 万方裕, 尹军, 等, 编著. 伽利略导航卫星系统 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 18-20.
- [23] SAR/GALILEO Service Définition Document [EB]. Issue 2.0, January 2020: 9-20.
- [24] Emmanuel S. *Une ambition spatiale pour l'Europe*[R]. Centre d'analyse stratégique, Premier Ministre de la République Française, 2011: 35-40.
- [25] PROCACCIA C, SIDO B. La politique spatiale européenne[R]. Rapport de Sénat n° 192, le 25 novembre 2015: 81.
- [26] MARTIN A, avec la participation de COUSTONET M et RAVILLON L. *GALILEO. Chronique d'une politique spatiale européenne annoncée*[M]. Paris: Editions du Juris-Classeur, 2009: 134-139.
- [27] Le Premier président à Monsieur Manuel Valls Premier ministre. La contribution de la France aux programmes européens Galileo et EGNOS de radionavigation par satellite[R]. Ref. S2015-0508, Cour des comptes, le 19 oct. 2015.
- [28] BRUDIEU P. Le rôle de l'État français dans l'Europe de l'espace[J]. *Annales des Mines-Réalités industrielles*, 2019 (2): 34-37.
- [29] PROCACCIA C et SIDO Bruno. Les enjeux et perspectives de la politique spatiale européenne[R]. Rapport de Sénat n° 114, le 7 novembre 2012.
- [30] BAUDRY P et SOUCHIER A. *Ariane*[M]. Paris: Flammarion, 1986: 166-170.
- [31] Le Développement d'Ariane 5. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/ariane/ariane5/developpement_1979_92.htm.
- [32] Le Développement d'Ariane 5. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/ariane/ariane5/developpement_1995.htm.
- [33] ESA, CNES. VA233, Galileo FOC-M6, SAT 15-16-17-18[R]. Dossier de Presse, Novembre 2016.
- [34] Ariane 5 ES [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://galileognss.eu/ariane-5-es/>.
- [35] Centre Spatial Guyanais E. L. A. 3. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/ariane/index.htm.
- [36] CSG L'Usine Propergol Guyane. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/CSG/ELA3/UPG.htm.
- [37] Le Premier président à Monsieur Jean-Marc Ayrault Premier ministre. La politique de transport spatial de la France [R]. Ref. 65606, Cour des comptes, le 28 Jan. 2013.
- [38] Arianespace Ariangroup. Mission VS26: Arianespace au Service du Système Européen de Navigation par Satellite Galileo[R]. Communiqué de presse 21-40, Evry, France, le 24 novembre 2021.
- [39] Soyuz en Guyane, 2005. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/soyuz_guyane/2005.htm.
- [40] Soyuz en Guyane. l'Ensemble de Lancement Soyuz (ELS) au CSG. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/soyuz_guyane/CSG_ELS.htm.
- [41] Soyuz en Guyane, le lanceur Soyuz. [DB/OL]. [2023-09-21]. http://www.capcomespace.net/dossiers/espace_europeen/soyuz_guyane/lanceur.htm.
- [42] 完整的解决方案. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://www.thalesgroup.com/zh-hans/%E6%88%91%E4%BB%AC%E7%9A%84%E4%B8%9A%E5%8A%A1/%E8%88%AA%E5%A4%A9Space>
- [43] CAREL O, BLACHIER B, DE VRIES M. La nouvelle génération de navigation par satellite EGNOS et GALILEO au

- service des transports [J]. *Navigation: Revue technique de navigation maritime et aérienne*, 2003, 51: 17-38.
- [44] BENEDICTO J, DINWIDDY S E, GATTI G, et al. : Satellite System Design and Technology Developments [R]. European Space Agency. November 2000.
- [45] CHEUTIN S, FABRE J. System Engineering Workbench For Galileo Ground Mission Segment (GMS) [R]. Thales Alenia Space.
- [46] BOYER A, AMIEL B, BAUER F, et al. Galileo Ground Mission Segment: End to End Simulator First Experimentations, Lessons Learned and Perspectives [R]. European Space Agency.
- [47] Thales Alenia Space, A Pivotal Player in the Galileo Program. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/news/thales-alenia-space-pivotal-player-galileo-program>.
- [48] Thales Alenia Space will play a major role on-board Galileo 2nd Generation and will boost performances and Cybersecurity for the Constellation. [DB/OL]. [2023-09-21]. <https://www.thalesgroup.com/en/worldwide/space/press-release/thales-alenia-space-will-play-major-role-board-galileo-2nd-generation>.

From D1 to Galileo: The Road to Self-reliance in the Development of French Satellite-Based Positioning and Navigation Systems

LI Yunyi

(Institute for the History of Natural Sciences, Chinese Academy of sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The current study of the history of French space science and technology has been reduced to a kind of “launch vehicle history” because of France’s policy of emphasizing independent access to space. However, launch vehicles are only one aspect of space science and technology. Other elements need to be examined for a more comprehensive understanding of France’s self-reliance in this field. Under the influence of U. S. space policy, Satellite-based positioning and navigation systems were a novelty in France in the 1960s, becoming an important aspect of bilateral cooperation between the two countries. This cooperation with the United States facilitated France’s mastery of the relevant fields and laid a solid foundation for France’s participation in the Galileo program. An examination of the development of the French satellite positioning and navigation system enable us to better understand the self-reliance of French space policy and science and technology, as well as to recognize the political and technological role of France in the development of the Galileo system.

Keywords CNES; Franco-American space cooperation; satellite positioning and navigation; Galileo system