《自然科学史研究》 第42卷 第3期（2023年）：365—376
Studies in the History of Natural Sciences Vol. 42 No. 3(2023)

北斗卫星导航系统发展与创新

王晶金 李成智✉
（北京航空航天大学 人文与社会科学高等研究院，北京 100191）

摘 要 北斗卫星导航系统是我国自主规划、设计、建设与应用的高技术项目的一面旗帜。2020年6月23日，北斗系统最后一颗组网卫星发射成功。7月31日，总书记习近平出席北斗三号全球卫星导航系统建成暨开通仪式，并宣布正式开通。本文梳理了中国卫星导航的发展历程，分析了自主卫星导航系统决策的背景、北斗系统各阶段建设过程中体现的特点，重点探讨了北斗系统“三步走”发展战略的形成过程及创新之处。在简述北斗系统建设过程后，对北斗系统发展中体现的工程与技术创新进行初步探讨。

关键词 北斗系统；工程创新；科技创新；航天史
中图分类号 N092
文献标识码 A **文章编号** 1000-0224(2023)03-0365-12

中国北斗卫星导航系统（以下简称“北斗系统”）是我国自主研制高技术的一面旗帜，是中国改革开放40余年来取得的重要成就之一，是中华人民共和国成立70年来重大科技与工程成就之一。中国构思发展卫星导航系统至今已有50多年的历史，北斗系统建设从1994年立项到2020年建成应用，历时达26年。北斗系统“三步走”发展战略是根据国际全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite Systems，GNSS）发展的实际、国内对卫星导航系统的需求、国家经济社会发展状况以及国际形势的发展变化，分阶段逐步决策的。北斗系统也是遵循边建边用、边用边改、从区域应用到全球覆盖逐步建设完成的。北斗系统的“三步走”发展战略最终形成于2009年底。2010年伊始，“三步走”战略迅速出现在各类媒体上。之后相关研究文献开始增多，比如谢军等从技术角度谈到了北斗卫星系统创新发展之路[1]，赵耀升等探讨中国卫星导航产业发展之道[2]，然而，学术界尚鲜有文献从技术史、工程史与技术创新的角度系统探讨北斗系统的创新。

北斗系统发展战略与建设过程从一个侧面反映了中国自主的GNSS的发展演变，对了解中国GNSS的整体面貌大有帮助。北斗系统经历了怎样的发展？有哪些因素影响北

收稿日期：2022-12-15；**修回日期**：2023-04-03。
作者简介：王晶金，1987年生，湖南益阳人，助理教授，硕士生导师，主要研究方向为航天史、科学史理论。李成智，1961年生，黑龙江虎林人，教授，博士生导师，主要研究方向为航空航天发展史与发展战略，Email：lichengzhi@263.net。
基金项目：国家社会科学基金项目“新中国70年航天事业独立创新模式及现代意义研究”（项目编号：19BDJ064）；中国科学院自然科学史研究所十四五重大项目“中外科技创新史比较研究——科技自立自强之路”。

斗系统发展？北斗系统为什么经历漫长的“三步走”发展阶段？北斗系统建设过程中取得了哪些宝贵的经验与创新特点？本文根据战略思想的不同，以该系统发展的各历史阶段为主线，对这些问题进行较为深入的探讨，旨在为我国整个自主高技术研发体系的完善提供一些有益的思路。

1 “灯塔一号”卫星导航探索

中国卫星导航研制起步很早。1965 年 1 月 8 日，钱学森向国防科委提交《研制卫星打算》的报告，建议研制卫星导航：“由卫星上发出无线电信标，舰艇可以利用信标的多卜勒频移来测量自己的位置，可以把位置误差降到 160 米，是由潜艇发射弹道式导弹必须的措施。”（[3]，487 页）1968 年钱学森主持制定的《人造卫星、宇航飞船十年发展规划（草案）》就包括研制发射用于潜艇导航的卫星导航，并作为第二优先发展的卫星。（[3]，525 页）当时中国正大力发展导弹潜艇。[4]此前的 1967 年下半年，海军司令部向空间技术研究院筹备处提出研制中国卫星导航系统的建议。1968 年 7 月，海军呈报中央军委《关于研制和建设对潜艇指挥通信、导航系统事》，提出了对卫星通信和导航系统的使用要求。1969 年 1 月 6 日—2 月 11 日，海军司令部主持召开了卫星导航战术使用要求论证会。1969 年 3 月 13 日，国防科工委下达了卫星导航方案论证通知，确定卫星导航代号 691，即 1969 年的第 1 号任务。空间技术研究院 501 部立即投入方案论证的准备工作，提出设计方案采用双频多普勒测速的导航体制，以东方红一号卫星为平台。[5] 1969 年 7 月 29 日—8 月 11 日，中国空间技术研究院主持召开了初步方案论证会，确定采用双频多普勒测速方案，覆盖范围为南北纬 80 度，导航定位精度为 200 米，定位时间 4 小时，卫星连续工作 1.5—2 年，运行轨道的近地点为 1 000 千米，倾角 70 度，卫星质量小于 200 千克，组网 3 颗。（[3]，541 页）这颗卫星后被命名为灯塔一号。1972 年，灯塔一号正式开始设计。到 1977 年，灯塔一号设计、各项试验工作陆续完成，达到可以总装生产的程度。1980 年 12 月 31 日，该卫星研制任务撤销。

灯塔一号总体设计在当时可行，技术能实现。撤销的主要原因：一是技术上不够先进，只能为海军舰艇提供水面二维导航定位，定位间隔时间限制了应用的广泛性，导航精度也低于美国的子午仪（Transit）导航系统，而中国海军在 1967 年美国解密了子午仪后，购买了子午仪接收机；二是运载火箭的协调工作出现问题，卫星导航要求入轨精度高，当时中国的火箭难以达到这种精度。另外，20 世纪 80 年代初中国进行国民经济调整，大量国防项目下马，灯塔一号也是其中的一项。

2 北斗试验导航系统

20 世纪 80 年代，中国航天界和有关科学家再次提出研制中国的卫星导航系统。中国科学家陈芳允等人于 1983 年从可行性角度出发，提出了双星导航设想，主要分系统是 2 颗位于静止轨道的卫星导航，轨道间隔为 60^0。一方面，考虑中国当时的经济状况，导航计算量大大降低，而且 2 颗卫星的覆盖范围可以完全包括中国领土及近海，因而系统的建

设成本较低，维护费用不高；另一方面，国外不断有人研究单星、双星、三星等区域导航定位方案。[7] 总参测绘局在 1986 年批准双星定位系统进行预先研究。[7] 在北斗试验卫星导航系统决策过程中，科学家陈芳允、总参测绘局局长卜庆君、国防科工委副主任沈荣骏等在前期发挥了关键作用。[8]

1986—1994 年的 8 年时间里，陈芳允等科学家一直埋头于理论分析和专项实验。1989 年 9 月 25 日，在陈芳允指导下首次进行“双星快速定位通信系统”功能演示获得成功。在轨的 2 颗通信卫星 1 秒内显示用户的地理位置，实际误差仅 20 米。1993 年，双星定位试验系统被列入国家“九五”计划，列入计划并不意味着正式立项。1994—1995 年间，总参测绘局为立项奔走努力。当将计划上报国务院后，得到的答复是项目很重要，但经费难以保证，建议还是先进行预研。此时双星定位预研工作已经进行了 10 年，各项准备工作成熟，重复预研实无必要。经过协调，决定将另外 2 个卫星计划的备份星指标分给试验卫星导航系统使用。北斗卫星导航计划副总设计师谭述森回忆：“我们和两个卫星计划团队多次商议，如果你们打（指发射卫星）成功了，备份星就不需要了。打不成，你们还得继续找问题呀。所以，就先给我们用好了。”[9] 卫星导航计划的最初立项不再需要单独划拨资金，因而 1994 年得以正式立项。这就是北斗一号试验卫星导航系统计划的由来。

北斗双星定位演示系统（后称北斗一代系统）所用的北斗一号卫星，采用东方红三号卫星平台，上面安装导航专用有效载荷设备。2000 年 10 月 31 日和 12 月 21 日相继成功发射了第 1 颗和第 2 颗北斗一号卫星，中国开始建立自主的第 1 代卫星导航定位系统——北斗一号试验卫星导航系统。2003 年 5 月 25 日发射成功第 3 颗北斗一号（备份卫星）。2007 年 2 月 3 日，第 4 颗北斗一号（北斗 1D）发射升空，北斗一代系统卫星部署完成，开始了初期导航定位服务。北斗一号试验卫星导航系统的研制成功，标志着中国成为继美、俄之后，第 3 个拥有卫星导航系统的国家，也是世界上第 1 个有源卫星导航定位系统。[10] 北斗一号系统建设之初主要为军事应用服务，2003 年起，正式开放民用。2008 年四川省汶川抗震救灾中，成为抗震救灾和指挥保障的重要手段。此外，该系统在工业、农业、林业、渔业、交通和经济等领域发挥了一定的作用。[11-14]

北斗一号系统不仅解决了中国有无自主导航系统的问题，与美国 GPS 等系统比较，有一些自身优势[15]：（1）仅用 2 颗卫星就可以进行导航定位，投资少；（2）由于采用地球静止轨道，卫星可以对大覆盖区内的用户进行连续定位；（3）因导航数据计算完全由中心控制站完成，因而用户设备比较简单；（4）具有通信和短信功能，便于对用户集中指挥、控制和管理；（5）采用数字地图、用户数据修正等技术，提高系统的定位精度。其他一些功能上，也优于 GPS，例如：通信功能、用户识别、位置报告、区域广播、指挥功能、完好信息等。[16]

当然，与 GPS 系统相比，北斗一号导航系统存在着明显的不足[17-18]：（1）用户设备有源工作，隐蔽性差，用户设备的体积和功耗增大；（2）用户数量十分有限：北斗一号每秒只能接纳 150 个左右的用户，在很大程度上限制了军事上的应用；（3）定位数据实时性差：定位时间长，完全不适合高速飞行的战斗机、弹道导弹、巡航导航等，极大地限制了它的应用范围；（4）不能覆盖全球：2 颗卫星均在东亚区赤道上空，卫星信号覆盖的区域相当有

限,而且在较高纬度定位误差将增大;(5)生存能力不强:北斗一号系统过多依赖中心控制站,一旦中心控制站受到攻击或出现故障,系统的工作就会立即瘫痪;(6)对数字地图的依赖性过强,定位精度受到很大限制。从导航定位功能上,安装的有效载荷采用的是有源定位模式,事实上属于定位信号的"透明转发",技术上更接近通信卫星技术。([19],43-44 页)某些核心载荷需要进口,对导航定位自主性极为不利。事实上,由于受中国 GPS 用户爆炸式增长的影响,北斗一号系统存在的问题又进一步强化,诸如终端接受机价格高,一般用户更乐于选择 GPS;接收机还存在体积大、功耗高,使用不便等问题;导航定位的时间延迟明显将一些高速用户(如民航、军方)排除在外;高纬度地区不能有效覆盖,进一步限制了用户;用户入网手续繁杂,令人望而却步等。[20]

北斗一号系统作为 20 世纪提出的概念和试验性系统,有许多不尽如意之处。它的用户数量有限,在民用方面认知程度低;在军用方面则不能满足飞机、导弹等高速运动体的导航制导需要。[21-22]北斗一号系统存在的明显不足,以及国内军民应用领域对卫星导航的巨大需求,成为后来北斗二代上马的主要因素。

3 北斗二代导航系统的立项

早在 1997 年,北斗二代导航系统的论证工作就已开始。直到 2004 年 8 月 30 日,北斗二代才正式被政府批准立项。这期间,中国政府对卫星导航系统的巨大军事意义和经济价值有了新的认识,卫星导航系统建设和产业化政策也发生了很大变化。

首先,科索沃战争与中国使馆被炸事件影响极大。中国驻前南斯拉夫大使馆被炸,美军使用的就是 GPS/INS 制导的联合直接攻击弹药(JDAM)。[23]军方认识到现代战争中高技术武器装备所发挥的巨大作用。自 1999 年以后,中国政府对军费的投入明显增长,新增国防项目增加。其次,中国政府更加强调技术创新,加强了对高科技发展的投入。《关于加强技术创新,发展高科技,实现产业化的决定》等政策文件的出台,对航空航天高技术特别是类似于卫星导航技术等军民两用技术发展产生了很大影响和推动作用。第三,国家中长期科技发展规划开始制定,促进了一些重大科技专项开展论证。第四,中国经济能力提升作为支持。2000 年,国内经济总产值(GDP)翻了两番,年经济增长率都在 8%以上,2004 年以后则持续保持 10%的增幅。经济的快速发展,税收的持续增加,使政府有能力在具有战略意义的高技术领域投入更多的资金。第五,中国经济发展及经济安全迫切需要自主导航定位系统。中国经济在受益于 GPS 时,也存在巨大的经济安全隐患。中国通信专家杨元喜指出:"我们的电力部门用的是 GPS,我们的银行体系、交通体系、电力部门、网络部门、Email 用的全是 GPS,只要美国人稍微做一点手脚,我们的系统就可能全部瘫痪。"[24]第六,航天科技的带动和引导效应。航天科技在中国高科技领域中,是自主性最高的科技之一。中国航天技术发展的成就举世瞩目,起到带动引导效应。第七,中国军方迫切需要发展自主性的卫星导航系统,拥有这种基础性的信息平台。中国对美国研制的 GPS 精确制导武器的威力认识很深,曾利用美国的子午仪和 GPS 信号开展军事演习等活动,但发现常常被动受制于人。"1996 年台湾海峡局势紧张的时候,中国军队的一次大规模军事演习便曾受到过 GPS 信号中断的干扰。"[25]第八,军事用户的特殊需求。与欧

洲联合建设的伽利略导航系统只解决了中国民用用户问题，伽利略计划最初是一个纯民用项目，非常关键的军事用户的特殊需求依然无法得到满足。

上述因素促使中国政府出台并不断强化卫星导航发展与应用新政策。2000 年颁布的第 1 版《中国的航天》白皮书指出："建立自主的卫星导航定位系统。分步建立导航定位卫星系列，开发卫星导航定位应用系统，初步建成中国的卫星导航定位应用产业。"[26] 这份文件突出强调了两方面卫星导航建设的政策：一是分步建设自主的卫星导航定位系统；二是初步实现卫星导航定位应用产业化。

2006 年 10 月（2 版白皮书发表）以前，官方所谈北斗导航系统时都没有涉及是全球性的还是区域性的，是单纯民用还是军用或者军民两用的问题。有学者推测，中国即将立项的北斗系统将是一个扩展的区域系统，主要服务于军事用户；而伽利略系统将作为中国民用用户全面开放使用的平台。[27]

2003 年中欧伽利略合作计划的签署，为中国自主的卫星导航系统建设规划增添了新的因素。当时的媒体广泛予以报道，并将之称为迄今为止"中欧最大的科技合作项目"。[28] 2004 年国家批准北斗二号卫星导航系统立项，建设目标是为中国及周边地区的我国军民用户提供陆、海、空导航定位服务，促进卫星定位、导航、授时服务功能的应用，为航天用户提供定位和轨道测定手段，满足武器制导的需要，满足导航定位信息交换的需要。系统同时提供开放服务和授权服务。其中，授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

上述目标明确指出"军民两用"，但国内专家隐约感到其"先军后民"问题。[29-30] 中国卫星导航定位应用管理中心指出，第 2 代北斗导航系统虽然仍为区域卫星导航系统，但服务区域比北斗导航试验系统扩大了很多，具有连续实时三维定位测速能力。[31] 2008 年 2 月在德国慕尼黑召开的卫星导航峰会上，中国国家遥感中心副主任景贵飞在回答记者提问时说，国家是否批准用于全球卫星导航系统建设的资金，现在还没有任何信息。但现阶段系统建设的资金是有保障的。另外，北斗一代试验导航系统一直受总参谋部测绘局管理；而北斗二代卫星导航建设则由军方背景的总装备部负责；2005 年组建的中国卫星导航系统管理办公室也隶属于军方。GPS 成功地用于美国军方和精确制导武器，中国军方异常重视中国自主卫星导航定位系统的发展。推测北斗二代系统主要用于军事，伽利略系统主要用于民用在逻辑上说得通。

2011 年版《中国的航天》白皮书终于明确了北斗二代的"区域性"（regional）及空间结构问题：自 2006 年以来，"全面实施'北斗'卫星导航区域系统建设。该系统由 5 颗地球静止轨道卫星、5 颗倾斜地球同步轨道卫星和 4 颗中圆地球轨道卫星组成，2007 年 4 月以来已成功发射 10 颗卫星，具备了向服务区（亚太地区）用户提供试运行服务的条件。"[32]

综上分析，北斗二代导航系统的决策受当时国际国内诸多因素的影响做出。GPS 在军事与民用领域的大规模应用，中国日益强调高技术发展与产业化以及重视军事与经济的自主性，共同促成北斗二代卫星导航系统项目的上马。由于已经投入很大资金参加了欧空局的伽利略计划，加快卫星导航产业的发展，完全可以依靠北斗一代、美国的 GPS 系统以及欧洲的伽利略系统。因此北斗二代系统当时的目标是建设一个扩展的区域系统，而且主要以服务军事为主。区域性的、能够覆盖亚太地区的自主卫星导航定位系统符合

中国长期奉行的防御性国防战略。

4 北斗系统发展“三步走”战略的形成

至此,北斗二代系统和伽利略两个导航系统同时并举,一军一民,为什么在 2009 年底政府又决策立项建设北斗全球性导航系统(即后来所称的北斗三号系统)? 2010 年伊始,中国卫星导航系统“三步走”发展战略迅速出现在各类媒体上。北斗全球卫星导航系统“三步走”发展战略究竟是何时以及怎样形成的? 其独特性何在?

促成北斗全球性导航系统立项最直接的原因是中欧伽利略合作项目出现了各种问题,包括伽利略利计划本身进展缓慢、投资与管理模式发生改变、中国有可能被排除在伽利略计划决策层之外。[33] 伽利略计划经历重大变动,中国被排除在伽利略计划的管理机构之外,成为可有可无的角色。[34] 在欧盟各国就投资问题难以达成一致的情况下,伽利略计划联合工作组在 2006 年 12 月 31 日正式解散,取而代之的是卫星导航监管机构(Supervisory Authority)。[35] 2007 年 6 月初,欧盟 27 个成员国达成一致,放弃公私合营投资模式(PPP),改由欧盟公共投资完成伽利略系统建设。这些变故使中国的地位发生了重大变化,伴随而来的是双方合作关系变成了竞争关系。而且,双方多次就所谓频率重叠(frequency overlay)问题展开讨论,但难以达成一致。2008 年 7 月,欧空局发布伽利略计划 2 期招标公告,已经将中国承包商排除在外。[36] 2009 年 3 月,在慕尼黑卫星导航高峰会上,除了频率重叠外,双方还谈到了其他一些担忧。国家遥感中心副主任景贵飞指出:“我们希望在伽利略卫星发射前达成协议,但是我们不能坐等这个系统一直在验证和开发。”国家科技部与会代表则担心,中国企业将很难在伽利略最终部署阶段的采购中赢得合同。这些争端以及其他问题也反映到双方的最高层,2008 年中欧领导人峰会推迟召开;2009 年 5 月和 11 月召开的中欧领导人第 11 次、12 次峰会,联合公报上都没有提及中欧伽利略合作计划。

其次,中欧政治、经济开始呈现不稳定和紧张关系。部分欧洲国家新领导人对中国的态度也发生了很大变化。2006 年 11 月 2 日,中方宣布,中国将建立自主的全球卫星导航系统,“有关部门负责人日前接受新华社记者采访时说,中国已经开始建设拥有自主知识产权的全球卫星导航系统——北斗系统”。中国正在建设的北斗系统空间段由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成,提供 2 种服务方式,即开放服务和授权服务。[37]

再次,2006 年国家中长期科学技术发展规划出台后,相关政府部门发展规划中突出了全球卫星导航系统建设及其应用。2007 年 7 月 10 日,《高技术产业发展‘十一五’规划》提出“发展导航定位应用卫星系统”。2007 年 10 月 18 日,《航天发展‘十一五’规划》指出:“在 2010 年前,通过对北斗导航试验系统进行完善,满足我国及周边地区用户对卫星导航系统的需求,并进行全球系统组网和试验工作,逐步扩展为全球卫星导航系统。”[38] 2007 年 11 月 16 日,《关于促进卫星应用产业发展的若干意见》指出:“加速建立自主卫星定位导航系统,提高卫星导航应用的基础保障能力。”[39]

最后,北斗全球系统不间断开展立项论证工作保证自主性北斗全球卫星导航系统计划得以推行。尽管最高决策者(国务院)仍在伽利略系统与北斗全球导航系统中犹豫,但

北斗系统研制部门、使用部门和主管部门关于北斗全球卫星导航系统建设的规划与论证工作在 2006—2009 年间一直在进行。[40]

正是在上述背景下，2009 年 11 月，国务院常务会议通过《中国第二代卫星导航系统重大专项实施方案》，正式批准建设自主性北斗全球卫星导航系统，北斗 GNSS 发展目标最终确定。

中国卫星导航系统“三步走”发展战略终于在 15 年的论证、部署、使用、扩展以及充分考虑国际国内各种因素的情况下，最终得以形成。第 1 步即北斗一号试验卫星导航系统批准于 1994 年；第 2 步北斗二代区域卫星导航系统批准于 2004 年；第 3 步北斗二代全球卫星导航系统批准于 2009 年。2009 年底，中国第 2 代卫星导航系统专项管理办公室发布“北斗系统发展计划”，首次明确阐述中国北斗系统的“三步走”发展战略。[41]综上分析可以看出，北斗系统“三步走”发展战略是回溯性的。

孙家栋接受采访时，详细介绍了中国北斗系统“三步走”发展思路：第 1 步，用少量的地球同步静止轨道卫星来完成卫星导航试验任务；第 2 步，重点建设一个区域性系统。第 3 步，建设一个全球的导航系统。计划发射 30 颗卫星，时间要到 2020 年。[42]中国第 1 届卫星导航学术年会会议报道指出：北斗系统“三步走”发展路线图已清晰明确。报道特别强调，这是一条适合我国国情的卫星导航发展路线。2011 年 12 月 29 日发布的《中国的航天活动》白皮书正式确认中国卫星导航系统发展的三步走战略：“按照从试验系统，到区域系统，再到全球系统的‘三步走’发展思路，继续构建中国北斗系统。”[43] 2011 年 12 月 27 日，国务院新闻办公室召开新闻发布会，中国卫星导航系统管理办公室主任、新闻发言人冉承其指出，北斗系统按照“三步走”的发展战略稳步推进，区域系统已经开始向中国及周边地区提供连续的导航定位和授时服务。

基于上述介绍和分析，我们可以得出结论，北斗系统“三步走”发展战略不是一步到位制定的，而是根据国际国内形势的发展变化、军民用对卫星导航需要的不断增长、中欧关系的演变等各种复杂的因素一步步促成的。与中国载人航天工程不同，中国卫星导航系统涉及的因素更多，有政治的、经济的、社会的、科技的，还有国际合作以及对外关系。中国载人航天工程完全独立进行，从一开始就制定了“三步走”战略，而北斗系统的“三步走”战略则是渐进形成的，每一步发展决策都是在综合上述各种因素后制定的。

5　北斗系统建设过程概况

北斗系统是分不同阶段立项和建设的，各阶段开始时名称也不够统一。“三步走”战略形成后，各阶段系统名称才得以统一：第 1 步称为北斗一号系统，采用第 1 代北斗一号卫星；第 2 步称为北斗二号系统，采用第 2 代北斗二号卫星；第 3 步称为北斗三号系统，混合使用北斗二号卫星和第 3 代北斗三号卫星。卫星的更新换代和星座卫星数量的增加，是北斗系统逐步升级的关键技术因素。

北斗二号包括 3 种轨道类型卫星：地球静止轨道（GEO）卫星、中地球轨道（MEO）卫星和倾斜地球同步轨道（IGSO）卫星，前者采用东方红三号甲卫星平台，后面 2 种采用东方红三号卫星平台，相应的卫星起飞质量在 2 300 千克—3 060 千克之间。北斗二号卫星

增加了无源导航定位功能,对有效载荷提出了更高要求。星上共有 16 个导航分系统、16 个天线分系统。其中,北斗二号首次安装了国产和进口原子钟,互为备份,提高了卫星导航的时频精度和可靠性。除星载原子钟外,导航任务处理单元也是核心有效载荷之一。2004 年,导航任务处理单元技术团队在电性试验件的研制中经过多方讨论,进行慎重的方案选择,并在后期研制中不断完善。扩频测距接收机是另一个技术难关。经过 8 年奋战,经历了技术攻关、技术突破,逐渐走向技术成熟的全过程,为北斗二号卫星提供了合格产品。向地面覆盖区域播发增强导航信号的由增强天线负责完成。在初样、正样各阶段经过集体攻关、团结协作,终于实现我国空间天线研制历史上的又一重大突破。[19]

北斗二号首次在我国卫星导航上采用了灵活的空间数据管理系统,提高卫星信息管理和自主运行水平。针对卫星轨道、导航信号增强区域变化等要求,设计了融合卫星星历、姿态、增强位置等信息的导航信号功率增强设计方法,采用软硬件协同工作完成对天线波束指向的智能化控制。首次实现在有限空间内强磁源(磁力矩器)与高磁敏部件(铷钟)的磁兼容设计,解决了卫星在弱地磁场条件下使用磁力矩器进行角动量卸载的难题。首次实现了倾斜中、高轨道偏航姿态的连续控制和太阳翼法线实时主动闭环控制。[44]

2007 年 4 月 17 日,北斗二号第 1 颗 MEO 试验卫星发射后,对其在轨运行状态和性能特点进行了较长时期的考核,得到的相关信息用于后续卫星的改进和完善。2009 年 4 月 14 日,第 2 颗北斗二号 GEO 卫星发射。[44]此后,北斗二号建立了“集中设计、流水作业、滚动备份”的卫星组批生产模式。2011 年 12 月 27 日,已经发射的 10 颗北斗二号卫星开始了试运行。到 2012 年 12 月 25 日,北斗二号卫星共计发射了 16 颗。中国独立建设的北斗二号区域卫星导航系统正式完成星座部署,正式投入区域导航、定位和授时服务。[45]此后,北斗二号又发射了多颗替补星。[46]

北斗二号系统和北斗二号卫星带有过渡性质。北斗三号全球卫星导航系统将进一步扩大导航定位服务范围,达到全球覆盖,更重要的是进一步提高导航服务的精度、安全性和与其他系统的兼容性,同时还更加强调自主可控。因此,北斗三号卫星本身进行全面改进研制。北斗三号有效载荷重量大幅增加、功能大大拓展,因此 GEO 卫星和 IGSO 卫星改用东方红三号乙平台,发射质量达 4 700 千克。北斗三号 MEO 卫星采用新研制的卫星导航专用平台,载荷能力最大为 1 100 千克,设计寿命大于 10 年。[47]在北斗三号卫星研制、试验与组网过程中,中国科学院承担了重要的任务,不仅开展了大量有效载荷研制与试验任务,还研制了 12 颗北斗三号 MEO 卫星,其中试验卫星 2 颗,组网卫星 10 颗。这些卫星均由中科院所属上海微小卫星创新研究院抓总研制。卫星采用该院自行研制的卫星导航专用平台。

由于北斗三号近乎重新研制,核心部件产品进行重大改进或重新设计,为了全面考核卫星的性能及运行稳定性,在卫星研制成功后首先进行了发射和轨道运行试验。2015 年 3 月 30 日和 5 月 27 日,北斗第 17 颗、18 颗(编号从第 1 颗北斗二号卫星开始)由长征三号丙和乙火箭发射,分别进入倾斜地球同步轨道和中地球轨道。卫星入轨后主要开展了新型导航信号体制、星间链路等试验与验证工作,并对星上导航系统载荷进行考核。[48]第 17 颗星是北斗三号首颗试验卫星,由中国科学院上海微小卫星创新研究院研制;第 18 颗星由中国空间技术研究院研制。2015 年 7 月 25 日、2015 年 9 月 30 日和 2016 年 2 月 1

日，第 19、20、21 颗北斗三号试验卫星相继发射。它们的主要任务是完成在轨测试，转入在轨试验阶段后，又完成了卫星平台、卫星载荷、国产器部件、搭载试验等 4 类 29 项在轨试验项目。卫星工作正常，各项功能、性能满足要求，标志着卫星系统核心关键技术全面获得突破。[49]

北斗三号卫星的研制与验证工作，明确了研制要求，确定了建设独立自主、开放兼容、技术先进、稳定可靠的发展目标。自此，北斗 GNSS 建设拉开了序幕。系统建成后性能与美国 GPS 相当，将使我国卫星导航系统达到国际先进水平，功能上实现超越。[50]

北斗三号不仅全部使用自主研制的有效载荷，而且许多关键部件得到更新换代，如原子钟采用第 3 代铷钟和第 1 代氢钟。在技术上，它首次实现三频信号和星间链路技术；自主定轨、时间同步等系统方案填补了国内空白。在功能上，它不仅具备北斗二号的导航、定位、授时、短报等服务，而且增加了星基增强、地基增强、全球短报文通信、国际搜救、精密单点定位等功能，超过了 GPS 等主流系统的服务能力。[10,51]

在北斗三号 5 颗试验卫星完成测试与试验任务后，基本固化了卫星的技术状态，正式组网发射工作随即开始。2017 年 11 月 5 日，北斗三号第 1 颗和第 2 颗组网卫星（第 24、25 颗北斗卫星）双星发射取得成功。卫星入轨后，经测试及入网验证，可对外提供服务。从 2018 年 2 月 12 日到 2020 年 6 月 23 日，北斗三号卫星根据运行轨道以一箭一星或双星形式，开展高密度发射。2018 年 11 月 1 日，第 1 颗北斗三号静止轨道卫星发射升空。[52] 2019 年 4 月 20 日、2019 年 6 月 25 日和 2019 年 11 月 5 日，3 颗北斗三号 ISGO 卫星发射成功，使北斗系统服务于我国周边地区的能力显著增强。[53] 2019 年 12 月 16 日，第 52、53 颗北斗三号以“双星”形式发射成功，进入 MEO 轨道。至此，北斗三号 24 颗 MEO 卫星已全部组网成功，标志着全球系统核心星座部署完成，北斗系统已经具备全球覆盖能力。

2020 年 3 月 9 日和 6 月 23 日，最后 2 颗北斗三号组网卫星（第 54、55 颗）发射成功，它们均为地球静止轨道卫星。6 月 30 日，第 55 颗北斗卫星定点于东经 110.5°赤道上空的地球静止轨道。这样，北斗三号卫星全球导航系统组网卫星全部发射成功，标志着北斗系统建设“三步走”发展战略圆满完成。[54]

6　北斗系统建设中的创新及启示

中国北斗系统建设周期长、经费高、技术复杂、工程规模巨大，建设过程中取得了许多宝贵的经验与创新特点。

工程领域主要创新特点是：第一，战略科学家的大力倡导，包括钱学森、陈芳允、孙家栋等科学家在各个时期极力推动中国独立的卫星导航系统立项；其次，用户的极力推动，总参测绘局、总装备部在北斗系统立项和运行过程中始终发挥着关键作用；第三，政府的渐进决策过程，政府的决策充分考虑到应用需要与现实条件，在积极推进国际合作的同时，一直寻求独立自主，并最终以“重大科技专项”的形式予以大力支持；第四，发挥新型举国体制优势，有各机构按市场规则广泛参与，北斗系统的参与部门包括航天两大集团公司、中国科学院、高校、其他企业，这些部门充分发挥各自优势，共同为建设北斗系统做出了重要贡献；第五，中国科学院系统发挥了极大作用，卫星导航的 MEO 卫星平台、氢钟、导

航信号体制、星间链路、卫星自主诊断、行波管放大器、星敏感器等关键技术有许多是中国科学院完成的;第六,在技术或元器件存在短板时,通过各种策略达到工程最优,实现独特的工程创新;第七,吸收国际已有 GNSS 经验,采取边建、边用、边改、边提高的发展策略,强调中国特色;第八,在工程集成创新的同时,特别强调通过“三步走”发展战略逐步达到技术、产品创新与全部自主可控,实现从跟跑到领跑。

技术领域创新特点:第一,全新的卫星导航星座,包括 MEO、ISGO、GEO 3 种轨道卫星,实现了全球覆盖与区域无死角、差异化特殊服务;第二,全新的信号体制,北斗系统是全球第 1 个使用三频信号服务的 GNSS 系统,提供全球无缝隙覆盖,服务更加多样;第三,创新的星间链路设计,能实现全星座精密定轨与时间同步;第四,自主开发出全新的原子钟,高性能氢钟以及新一代铷钟都在北斗三号卫星上得以实用化;第五,开发出 MEO 全新桁架式平台,关键指标达到国际先进水平;第六,北斗三号卫星实现批量化生产,3 年高密度发射 30 颗卫星体现了“中国速度”;第七,在北斗系统从第 2 代向第 3 代卫星发展过程中,解决了以往所不具备或存在问题的技术或部件,高难度的行波管放大器、大功率微波开关等都取得了关键性技术突破,实现关键器件 100%国产化;第八,北斗三号卫星导航系统的卫星搭载了 SAR、PPP 和 SMC 载荷,服务能力超越 GPS;第九,采用了多项可靠性技术措施,使北斗三号卫星寿命达到 12 年的先进水平;第十,在北斗三号系统建设过程中,共计突破了 160 余项关键技术。

通过回顾北斗系统,可以获得以下几点启示:第一,国家意志的体现。我国的政治制度具有集中力量办大事的体制优势,在特定领域组织实施国家科技重大专项发挥积极作用。第二,实施国家重大科技专项。打通上下游各计划之间的关系,突出工程与科技创新的重要性,集中有限人力物力和材料实施重点突破。第三,并行实施产业化。中国政府对卫星导航产业化发展的支持政策则是一贯的、坚决的,采取的措施也是有力的。2020 年是北斗导航系统全面建成之年,推动了我国卫星产业新一轮发展。第四,积极支持预研,加大预研力度,强调中国特色。坚持自主研发、独立创新,在还没有能力全面跨越的情况下,突出重点突破,坚持有所为有所不为。第五,组织管理模式特色。坚持企业为创新主体,整合企业、科研院所、高校资源,有效发挥科学家作用,合理地分配与协调行政官员、科学家以及产业界的权力,使科研院所、高校与企业合作相得益彰,研究开发与产业发展相互促进,科技与经济更加紧密结合,以推动国家科研管理体制创新。这种决策特点和模式也是航天工程特色,值得其他相关领域借鉴。

参 考 文 献

[1] XIE J, ZHANG J. 北斗导航卫星系统创新发展之路[J]. 中国航天:英文版, 2020, 21(4):5-10.

[2] 赵耀升, 宋立丰, 毛基业, 等. “北斗”闪耀——初探中国卫星导航产业发展之道[J]. 管理世界, 2021, 37(12):217-237.

[3] 石磊, 王春河, 张宏显, 等. 钱学森的航天岁月[M]. 北京:中国宇航出版社, 2011:487.

[4] 唐超. 中国常规潜艇发展历程[J]. 舰载武器, 2005(6):24-29.

[5] 中国空间技术研究院. 中国空间技术研究院院史[R]//北京:中国空间技术研究院, 1997:65.

[6] 戴宏发. 北斗导航系统的发展与应用刍议[J]. 科技信息, 2010(19):54-56.

[7] 马京生. 陈芳允[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 2005:533.
[8] 蒙佳. 北斗前传[N]. 中国新闻周刊, 2011-01-04(2).
[9] 杨时. 北斗前传[N]. 中国新闻周刊, 2011-01-04(2).
[10] 庞之浩, 王东. 艰苦卓绝的“北斗”发展历程[J]. 国际太空, 2020(8):13-18.
[11] 葛榜军. 2003 年我国卫星应用进展[J]. 卫星应用, 2004, 12(1):8-17.
[12] 窦长江. 北斗一号民用现状与发展[J]. 卫星应用, 2006(2):1-6.
[13] 谭述森. 卫星导航定位工程[M]. 第一版. 北京:国防工业出版社, 2007:1-14.
[14] 张孟阳. “北斗”卫星导航系统应用发展综述[J]. 国际太空, 2009(11):27-31.
[15] 孙国良, 丁子明. 双星系统工作方式改进的探讨[J]. 导航, 2000, 29(9):1217-1220.
[16] 李树洲, 窦长江. 北斗一号民事应用现状与发展[C]//2004 中国北斗导航系统应用论坛. 2004.
[17] 王厚基. 我国卫星导航系统简介和改进[J]. 舰船导航, 2001(3):1-9.
[18] 戴宏发. 北斗导航系统的发展与应用刍议[J]. 科技信息, 2010(19):54-55.
[19] 王同心. 北斗导航卫星有效载荷研制创新之路[J]. 国防科技工业, 2012(11):43-44.
[20] 吕伟, 朱建军. 北斗系统发展综述[J]. 地矿测绘, 2007, 23(3):29-32.
[21] 唐金元, 于潞, 王思臣. 北斗卫星导航定位系统应用现状分析[J]. 全球定位系统, 2008(2):26-31.
[22] 陈建成. 北斗卫星定位导航系统的发展应用关键在政府政策[J]. 卫星应用, 2007, 15(2):18-25.
[23] 陈晶, 袁书明. GPS 的发展及在精确制导武器中的应用[J]. 全球定位系统, 2005(1):22-27.
[24] 彭辉, 杨时旸. 北斗应用:近千亿元的大蛋糕[N]. 中国新闻周刊, 2011-01-04(3).
[25] 杨时. 北斗记——探秘中国北斗卫星导航定位系统[N]. 中国新闻周刊, 2011-01-04(1).
[26] 国家航天局.《中国的航天》白皮书(2000 年版)[DB/OL]. (2000-12-01)[2023-09-19]. http://www.cnsa.gov.cn/n6758824/n6758845/c6772480/content.html.
[27] PAUL M. China's satellite navigation plans threaten Galileo[DB/OL]. (2006-11-08)[2023-09-19]. http://www.newscientist.com/article/dn10472-chinas-satellite-navigation-plans-threaten-galileo.html.
[28] 中欧“伽利略计划”进展顺利[DB/OL]. (2006-11-16)[2023-09-19]. https://www.airshow.com.cn/Item/8846.aspx.
[29] 魏子卿. 关于发展我国新一代导航卫星系统的两点思考[C]//纪念中国测绘学会成立四十周年论文集. 1999.
[30] 凌云. 第 4 颗北斗卫星升空 中国向全球卫星导航系统迈进[J]. 国际展望, 2007(6):18-21+23-22.
[31] 中国卫星导航定位应用管理中心. 第二代北斗系统简介及应用展望[J]. 卫星与网络, 2008(11):64.
[32] 国家航天局.《2011 年中国的航天》白皮书[DB/OL]. (2011-12-29)[2023-09-19]. http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796175/content.html.
[33] DINERMAN T. Galileo and the Chinese: one thing after another[DB/OL]. (2009-2-9)[2023-09-19]. http://www.thespacereview.com/article/1307/1.
[34] DINERMAN T. Galileo gets a Chinese overlay[DB/OL]. (2006-3-31)[2023-09-19]. http://www.thespacereview.com/article/668/1.
[35] Galileo Joint Undertaking[DB/OL]. (2002-05-24)[2023-09-19]. http://europa.eu/legislation_summaries/other/l24098_en.htm.
[36] CASARINI N. Stars and Dragons: The EU and China[DB/OL]. (2009-04)[2023-09-19]. http://www.publications.parliament.uk/pa/ld200910/ldselect/ldeucom/76/76we03.htm.
[37] 新华社. 中国探索发展拥有自主知识产权卫星导航定位系统[DB/OL]. (2006-11-02)[2023-09-19]. http://www.gov.cn/ztzl/zhhz/content_430510.htm.
[38] 国家航天局. 航天发展十一五规划[DB/OL]. (2007-10-18)[2023-09-19]. http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796189/content.html.
[39] 国防科工委网站. 两部门发布“关于促进卫星应用产业发展若干意见”[DB/OL]. (2007-11-18)[2023-09-19]. https://www.gov.cn/gzdt/2007-11/18/content_808611.htm.
[40] 科学时报. 五大工程支撑“数字中国”建设[DB/OL]. (2008-12-18)[2023-09-19]. http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2008/12/214045.html.

[41] CSNPC. Compass/ Beidou Navigation Satellite System Development[DB/OL]. (2012-05-30)[2023-09-19]. https://www.eoportal.org/satellite-missions/cnss#eop-quick-facts-section.
[42] 北斗网. 北斗系统总设计师孙家栋院士向记者介绍北斗系统[DB/OL]. (2010-01-17)[2023-09-19]. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/lsxw/xwzx2010/201710/t20171010_775.html.
[43] 国家航天局.《2011 年中国的航天》白皮书[DB/OL]. (2011-12-29)[2023-09-19]. http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6796175/content.html.
[44] 谢军, 常进. 北斗二号卫星系统创新成果及展望[J]. 航天器工程, 2017, 26(3):1-8.
[45] 北斗网. 冉承其在北斗系统正式提供区域服务新闻发布会上的发言[DB/OL]. (2012-12-27)[2023-09-19]. http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/zsqyfbh/xw_172/201712/t20171210_9079.html.
[46] 北斗网. 北斗卫星发射列表[DB/OL]. (2020-10-26)[2023-09-19]. http://www.beidou.gov.cn/xt/fsgl/.
[47] 谢军, 王金刚. 北斗-3 卫星的创新和技术特点[J]. 国际太空, 2017(11):4-7.
[48] 崔恩慧, 北斗系统启动全球拓展建设[J]. 太空探索, 2015(5):7-9.
[49] 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 等. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(5):584-594.
[50] 中国空间技术研究院. 耕宇牧星, 中国北斗铸就不凡![DB/OL]. (2020-06-24)[2023-09-19]. https://www.cast.cn/news/6813.
[51] 部英男, 吴巍. 我国新一代氢原子钟、铷原子钟同在北斗三号应用对北斗全球系统建设起到关键作用[J], 中国军转民, 2018(2):34-35.
[52] 中国空间技术研究院. 第四十一颗北斗导航卫星成功发射! 空间技术研究[DB/OL]. (2018-11-12)[2023-09-19]. https://www.cast.cn/news/6441.
[53] 空间技术研究院. 第 49 颗北斗导航卫星发射成功, 北斗全球组网迈出关键一步[DB/OL]. (2019-11-05)[2023-09-19]. https://www.cast.cn/news/6682.
[54] 空间技术研究院. 成功定点! 北斗三号全球卫星导航系统收官之星传来喜报[DB/OL]. (2020-06-30)[2023-09-19]. https://www.cast.cn/news/6818.

The Development and Innovation of the BeiDou Navigation Satellite System

WANG Jingjin, LI Chengzhi

(*Institute for Advanced Studies in Humanities and Social Sciences, Beihang University, Beijing* 100191, *China*)

Abstract The BeiDou Navigation Satellite System (BDS) is a flagship high-tech project of independent planning, design, construction and application in China. On June 23, 2020, the last BDS satellite was successfully launched. This paper reviews the development history of satellite navigation systems in China, analyzes the decision-making background of the autonomous satellite navigation system, analyzes the characteristics reflected in the construction process of the BDS at each stage, and focuses on the formation process and innovation of the "three-step" development strategy of the BDS. After a brief introduction to the BDS construction process, the paper provides a preliminary discussion on the engineering innovation and technological innovation embodied in the development of BDS.

Keywords BeiDou Navigation Satellite System; engineering innovation; science and technology innovation; space history