

# 前沿周刊 / 科技



■ 本报记者 朱承 吴丽燕 丁珊

千帆星座以“一箭18星”完成第六组卫星密集组网,向万星星座布局推进;时空道宇顺利完成吉利星座一期64颗卫星组网,日均支持3.4亿次通信服务;蓝箭航天朱雀三号首次实现入轨级重复使用运载火箭高精度返回导航、制导与控制技术的飞行验证,为中国可重复使用火箭技术奠定了重要基础……

2025年,中国商业航天迎来首个十年里程碑,“技术突破”与“规模爆发”的双重拐点已然显现。从2015年《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015~2025年)》出台,社会资本获准进入航天领域开始,这个曾被视为“高冷”的领域,正通过商业力量打破壁垒,让太空科技从星辰大海走进千家万户。

当导航、气象、救援都离不开卫星支撑时,商业航天究竟是如何让“太空之力”落地的?核心的成本难题又如何破解?卫星上天后还有哪些进阶玩法?

## 藏在日常里的太空科技

提到航天科技,你或许会想到科幻电影里的时空穿梭、未来世界的太空旅游,但这些远非全部。事实上,以航天科技为支撑的通信导航遥感,早已构建起支撑社会运转的“时空基座”,成为你我身边的“隐形基础设施”。不久前南京突发大规模导航失灵,导致外卖、网约车都无法正常运转,就是因为卫星信号受到临时干扰压制。

“卫星就像给地球装了一套‘超级感知系统’。”浙江工业大学地理信息学院院长吴炜的比喻很形象,导航解决“何时何地”的定位问题,相当于在“XYZ轴”给万物定点;通信突破地面基站局限,在海上、野外等无基建区域搭建“天基信号桥”;遥感则是地球的“天眼”,实现全天时全天候观测,摆脱天气和昼夜的束缚。

“有没有更接近日常生活的应用场景呢?”面对记者的好奇,吴炜笑着指了指手机,“平时人们驾驶汽车需要导航,出门要了解天气情况,儿童手表需要随时定位,背后都是卫星技术的支撑。”吴炜打开手机,放大展示一张图片。这是新疆天山某一区域的卫星遥感影像,只见红褐色山脉呈掌状分布,大面积的积雪呈现亮白色,色调较深的是裸露岩石和土壤,伴有冲刷和滑坡痕迹……“靠着几张关键的卫星影像,我们今年成功实现了一次野外救援。”

今年暑假,新疆天山11人驴友队因洪水被困荒野,高山上冰天雪地,驴友们随时有缺氧失温风险。接到新疆合作单位的求助后,浙江工业大学地理信息学院团队对被困驴友进行准确位置判断,最终联动属地救援队实现快速救援。

“奥秘在于‘卫星定位+遥感影像’的双重配合。”吴炜揭秘,一名驴友通过卫星电话传回大致位置后,他们迅速调取该区域高分遥感影像,通过“卫星之眼”,清晰地对山脉、雪地、水源等当地自然条件进行分析,结合历史的常规徒步线路,成功锁定被困点,精准规划救援路线。如今这支团队已用卫星数据监测新疆阿勒泰雪崩、哈萨克斯坦洪水等多个灾害风险,成为应急救援的“太空后盾”。

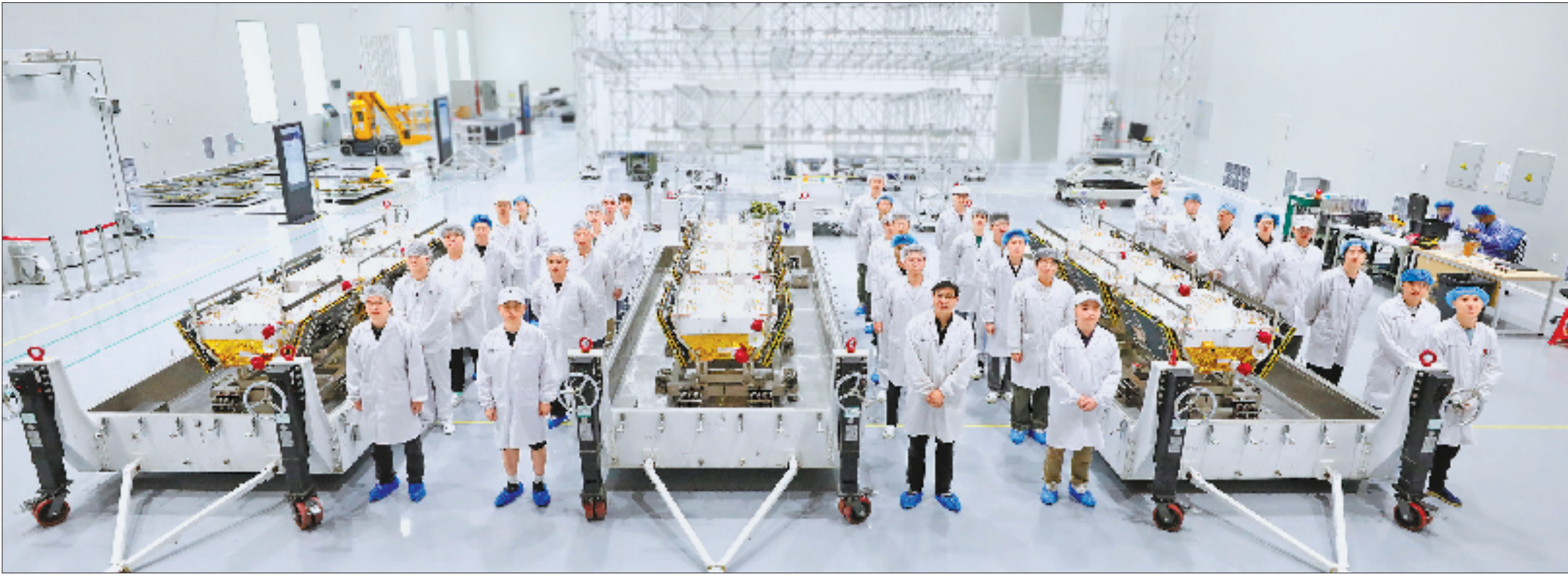
有人也许会问:如果要到城市立体空间进行定位和信息采集,卫星的图像是不是就有局限?莫干山地信实验室实景三维经济研究院想了个妙招,通过卫星与无人机等低空设备协同联动,实现了城市三维立体空间的数字化底座构建。

在实验室大屏幕上,记者看到了德清县城实景三维图。与普通地图不同的是,这份地图不仅能监测地面道路交通拥堵情况,还能规划出无人机的空中导航路线;如果放大某幢写字楼,还能逐层展现每个楼层的企业信息,再也不怕在大楼里迷路了。原来,实验室正在进行“德清低空经济先飞区”试点范围内的低空三维导航地图研发。

“我们把这些设备组合起来,就可以构建出一个‘天一空一地’立体网络。”莫干山地信实验室实景三维经济研究院技术专家韩丰宇介绍,每台无人机都可以看成是一个卫星信号接收器,同时也是一台飞在低空的信息采集器,通过卫星给无人机提供精准定位,无人机一边采集信息,一边精准汇报自己的位置,一个3D立体城市就构建起来了。目前,卫星与各类地面设备互联已

# 中国商业航天十年间 从星辰大海走进千家万户

随着中国商业航天走过首个十年,“技术突破”与“规模爆发”的双重拐点已显现,曾经被视为“高冷”的航天领域,正通过商业力量打破壁垒,让太空科技从星辰大海走进千家万户。



时空道宇卫星超级工厂卫星出厂。

受访者供图

经能实现城市交通巡检、公路病害识别、电网排查、农业植保等自动化作业。可以想象,未来当卫星与无人机、汽车、手机等越来越多的设备互联,将发挥更大的作用,让太空科技真正服务于千行百业。

## 一场“上天入地”的降本革命

要让太空科技普惠百姓,核心是解决“成本高”的难题。“传统航天是‘不惜代价造得出’,商业航天的核心命题是‘精打细算造得值’。”浙江省工业和信息化研究院高级工程师黄东欣告诉记者,降本的关键环节,就在卫星制造和火箭发射两个核心环节。

近年来一场“上天入地”的降本革命已在全球掀起,商业航天的“头号玩家”SpaceX通过规模化生产、一箭多星、火箭回收等技术创新,把每公斤发射成本降至“白菜价”,在全球商业航天领域形成压倒性优势。

在这样的背景下,太空资源的稀缺性与战略重要性也日益显现。国际太空资源遵循“先到先得”的规则,核心是轨道资源和频段资源。轨道资源方面,近地轨道(距离地面高度较低的轨道)仅能容纳五六万颗卫星(技术突破后或达10万颗);频率资源方面,卫星信号传输依赖频段,与手机通信类似,频段资源同样稀缺,需提前抢占。

目前全球商业航天领域的头部玩家,主要是中美两国企业。但与美国相比,我国商业航天的规模差距不小。马斯克的星链计划截至去年年底,已发射近万颗卫星,正快速抢占资源;而我若按传统模式由国家财政包揽几万颗卫星的发射与运营,成本不可承受,因此必须引入市场力量。

中国的众多航天企业也在迎头追赶。在位于台州的时空道宇卫星超级工厂,负责人刘勇带领团队把汽车制造的流水线路理念搬进卫星生产车间。

透过车间玻璃窗,只见自动化机械臂正在精准组装零件,可以“一口气”安装上千颗螺钉,误差小于0.01毫米,相当于头发丝直径的1/10;另一边的AI质检设备则快速扫描排查瑕疵。

“这条柔性化产线能按需调整,实现从50公斤到吨级卫星的并行生产,兼顾不同应用需求,实现多型号的高效率批量化生产。”刘勇介绍,原本需要上百名工程师花费1~2年才能造好的卫星,如今30人团队28天就能完成。量产速度提升了10倍,成本伴随规模效应大幅下降。

这场革命的一大秘诀在于“模块化设计”。刘勇拿起一个卫星组件解释:“我们把卫星拆成两百多个标准模块,就像搭乐高一样组合拼接。”能源系统、姿态轨道控制系统等核心单元都实现标准化,不仅提高了生产效率,更保证了卫星性能的一致性,满足星座组网的协同要求。

卫星造得更便宜了,还要让发射成本也更“接地气”。火箭作为卫星进入太空的唯一载体,长期存在“一次性使用、价格高昂”的痛点。目前国内火箭发射价格约每公斤8~11万元,而SpaceX



引力波宇宙太极实验室实验装置。

受访者供图

猎鹰9号凭借可回收技术,已将成本压至每公斤2.1万元。这也是中国商业航天的重点攻坚方向。去年,航天科技集团和蓝箭航天都完成了可重复使用火箭10公里级垂直起降飞行试验。不过2025年12月的回收试验均未成功,未来仍需继续攻坚。

另一个降本思路是“一箭多星”技术与增设发射场地。海南商业航天发射场2024年成功投用,标志着我国商业航天形成“发射载体—场地—载荷”稳定三角结构,能大幅提升发射效率。但黄东欣也指出当前短板:“国内年发射次数有限,发射排期易延误,这是后续需要补足的环节。”

## 浩瀚宇宙里的进阶赛

把卫星送上天只是第一步,要让卫星真正用起来、发挥好作用,它在太空运行中还有很大的施展空间。令人欣慰的是,在卫星运行中的许多环节,中国与美国算是站在了同一起跑线上。

“你知道卫星是怎么‘排队上岗’的吗?”中国科学院大学杭州高等研究院(以下简称“国科大杭高院”)引力波宇宙太极实验室里,一个不起眼的装置在真空环境中运行,拖着长长的蓝紫色光

线,像一条“尾巴”,这个装置就是卫星“最后一公里”的推手——霍尔推进器。

一颗卫星要在太空中改变位置,离不开霍尔推进器的作用。

比如组网,往往是由火箭把几十颗卫星在短时间内送到同一轨道面,剩下的路就需要靠每颗卫星自己走。每颗卫星自带的霍尔推进器喷出粒子“尾巴”,反向给出一个小小的推力,就能把卫星在太空中进一步推到指定位置,这是组网的关键步骤。

再比如升轨,假设卫星目标轨道500公里,为了一次装载更多卫星上天,火箭的燃料重量就会受限,只能把卫星送到300公里,剩下200公里全靠推进器“慢慢爬”两三个月;离轨则是卫星寿命到期后,需要推进器推动其脱离轨道,回落大气层焚烧,避免成为太空垃圾。

传统推进器采用化学能原理,即通过推进剂燃烧瞬间喷射产生强大推力。化学能推进器的比冲不高——所谓比冲,就是单位质量的推进剂产生的推力可维持的时间。这意味着,卫星带了一大桶燃料上天,几十个小时就烧完了,如果这个时间段内没能推到指定位置开展工作,那就等于白发射了。

霍尔推进器却能工作几千甚至几万个小时。“秘诀在于用电能替代化学能。”空间电推进团队负责人、国科大杭高院高级工程师徐禄祥解释,通过外部

施加电压赋予离子能量,离子在静电场作用下被加速,进而喷出推进器产生推力。在太空真空环境中,一点点力就能轻松让卫星移动。霍尔推进器就是把电离部分和加速部分整合到一起,做到一边电离一边加速。

徐禄祥团队目前主要攻克的就是霍尔推进器的性能提升、工程化应用和整体降本,其中一大突破是替换了推进剂:原先大部分霍尔推进器用氙气作为电离原料,一公斤近万元,而团队成功用氦气替代氙气,成本仅为原来的1%~2%,并完成了针对氦气的设计优化。

他们研发的霍尔推进器已经跟着20多颗卫星进入太空,成功率保持在100%,保障了卫星的大范围爬轨和持续的轨道维持,同时团队还在探索更廉价的氦气推进剂。“技术成熟没有止境。”徐禄祥如此说。

近些年随着AI高速发展,“太空计算”成为商业航天领域的热门方向。有人提出,近地轨道有近乎无限的太阳能,为了应对在轨卫星数量快速增长带来的算力挑战,“我们希望将单颗卫星的算力从T级提升至P级,并像互联网连接不同电脑一样,实现卫星之间的互联互通。”接下来,之江实验室还将联合中国卫星航、地卫二、东方空间、蓝箭航天等众多企业,共同完成超50颗卫星的星座布局。

“无论是政策、技术还是产业生态,中国商业航天都迎来了系统性的春天。”中国航天科工集团副总经理罗喜胜说道。

从百姓日常到未来探索,商业航天正让“上天揽月”的梦想,变成惠及每个人的现实。

### 专家观点

## 商业航天格局和未来方向

■ 王建宇

商业航天的核心逻辑是将航天活动的制造、发射、运行、应用等前端环节推向市场,通过市场竞争优化资源配置、降低成本,实现航天技术从“服务国家”到“服务社会与民生”的延伸。

当前,我国商业航天已形成多元协同的参与格局,主要分为三类主体:第一类是国家主导的央企,以中国星网为代表,肩负国家核心战略任务;第二类是以国家战略为导向、地方主导推进的国企,以上海垣信千帆星座为典型,通过市场化融资、政府股权投资等方式,遵循市场规律开展项目运作;第三类是完全市场化的商业公司,涵盖民营企业及有地方政府支持的创新项目,例如时空道宇的“吉利星座”、之江实验室的“三体计算星座”。

从国际竞争格局来看,美国已实现上万颗商业卫星在轨,按当前发展趋势,到2030年其在轨卫星数量可能达到四五万颗。我国正全力追赶,尽早达到万颗卫星在轨规模,缩小与国际先进水平的数量与规模差距。

当前人们对于太空计算期待很高。卫星本身搭载有计算机,但传统卫星计算机仅承担卫星在轨的常规控制、姿态调整等基础指令任务,不具备大量的数据处理能力。随着卫星组网规模扩大,太空计算已成为必然需求:一方面,对地观测产生的影像数据中,大量的数据因云层遮挡等问题属于无效数据,若能在天上完成数据筛选,仅将有效数据传回地面,可大幅节约传输资源与成本;另一方面,数万颗卫星在轨运行需要实现自主协同调度,必须依靠星上计算完成实时统筹。

当前网络上对太空计算存在两种认知:一种观点认为太空计算前景广阔,太空环境温度低,适合建设数据中心,且运营成本低廉;另一种观点则认为太空计算完全不切实际,核心质疑集中在散热与供电两大瓶颈——太空环境中无法依靠传导、对流散热,仅能通过辐射散热,散热效率低;同时卫星供电依赖太阳能,难以支撑大规模计算的能源需求。

在我看来,这两种观点都过于极端。太空计算是商业航天规模化发展的必然要求,其面临的技术瓶颈并非不可突破。以散热、供电问题为例,未来完全可能通过技术创新找到解决方案:比如采用核能源替代太阳能,既能解决供电不足问题,还能延长卫星在轨运行寿命,甚至可能使太空数据中心的运营成本低于地面。创新创业的核心在于敢想敢试,只有主动探索,才能推动技术突破与行业进步。

(作者系国科大杭高院院长)



莫干山地信实验室的“低空三维导航地图应用服务系统”。

受访者供图