

空天地一体网络

打造低空经济发展的“神经中枢”

□ 武 楠

随着无人机自主飞行技术与5G通信技术的快速发展，开放空域、推动低空经济的发展已成为各国政府和产业界的重要战略方向。低空经济是什么？如何实现低空飞行器的精准管控与可靠连接？它的未来发展趋势是什么？

低空经济：新质生产力典型代表

党的二十届三中全会明确提出，发展通用航空和低空经济。其中，低空经济是依托低空空域资源，以民用有人驾驶和无人驾驶航空器飞行活动为牵引，以各类技术创新融合创新驱动，辐射带动相关领域和产业链融合发展的综合性经济形态。低空经济作为战略性新兴产业，涵盖航空器研发制造、基础设施建设运营、飞行服务保障全链条，是新质生产力的典型代表，具备极大市场价值。

低空经济的发展，将引领交通旅游、农林植保、物流配送、公共安全等诸多领域技术变革。在交通领域，电动垂直起降飞行器的研发与量产使得早晚高峰打“飞的”通勤成为可能，进一步缓解城市交通拥堵的问题。在农业领域，无人机可用于农作物监测、喷洒农药、播种，提升农业生产效率和质量。在应急救援领域，无人机具有快速部署、灵活机动的特点，能够克服山区、森林等复杂地理环境，迅速抵达重大事故现场，缩短响应时间，提高救援保障效率。在能源巡检方面，传统人工巡检效率低，安全风险高，无人机巡检可以迅速精确地获取电力设备运行状态信息，及时发现潜在故障和安全隐患。在城市管理中，利用无人机等低空载运装备搭载光电吊舱，拍摄高分辨城市影像，可以为有关部门提供详尽实时的数据支持，助力高效城市规划与安全保障。

通感融合：助力低空高效智能管控

低空经济的发展离不开低空网络通信能力与感知能力的支撑。一



方面，低空监管平台、无人机机载数据的实时回传均依赖于可靠的通信网络。另一方面，无人机等低慢小目标的“黑飞”使得低空安防面临挑战，亟须建立高精度、低时延的感知网络。相比视觉感知，基于无线信号的感知方式受天气影响小，可以实现全天候的感知。

无线通信与无线感知原本是基于电磁波实现的两种功能，前者侧重利用电磁波承载信息的能力实现文本、音频、图像及视频数据的传输，以1G到5G移动通信系统为典型应用；后者则侧重利用电磁波在不同物体上的散射特性提取环境或目标的物理参数信息，以军用或民用雷达为典型应用。尽管无线通信系统与感知系统实现的功能及性能指标截然不同，二者均对信号的带宽提出越来越高的要求：根据香农信息论与检测估计理论，信息传输速率与参数估计精度均与信号带宽成正比。然而，受限于频谱资源的稀缺性，难以为通信系统和感知系统分配大量带宽。在此背景下，利用同一频段，基于统一信号同时实现通信与感知两种功能（通感融合）成为发展趋势。

尽管通信系统与感知系统的目标功能不同，但二者的硬件组成十分相似。同时，大规模天线技术以及毫米波/太赫兹等频段信号处理技术的发展也为通感融合的落地奠定了基础。随着通感一体信道模型、空口新波形的不断演进与突破，未

来6G移动通信网络将从单一通信功能扩展为通信与感知双功能，实现一网双能，驱动相关产业升级。

通感融合网络的规模化部署将为广域低空智能管控提供关键支撑，保障低空节点能够被“看得见”“呼得着”“管得住”。首先，针对低慢小飞行目标易受遮挡、难分辨的问题，复用蜂窝网络的通感融合技术为多点协作感知提供支撑，通过聚合来自多个视角的感知信息，可以有效减少感知盲区，获得更高的检测概率与感知精度，保障低空节点在复杂恶劣环境和天气条件下可以安全飞行。进一步，基于低空节点位置信息与环境感知信息，通过低空网络拓扑构建、干扰特性分析与资源高效分配，可以有效缓解空域资源竞争，保障稳定可靠连接。最终，基于广域感知与通信上报信息，综合利用人工智能手段，建立低空空域三维数字化信息系统，健全可靠运行识别机制，有效支撑低空飞行的安全监管体系，提升低空空域管理效能。

空天地一体：低空经济的未来趋势

由于传统移动通信网络服务主体为地面用户，基站波束通常为向下倾斜，导致单一基站感知盲区较大。尽管利用多站协作技术可以显著消除盲区，随着低空应用的深入发展与空域范围的不断延伸，仅依

赖地面网络完成低空智联监管将面临挑战。与地面移动网络相比，卫星系统具有覆盖广、成本低、可覆盖所有高度空域等优势，可以为城市、偏远地区、海洋、沙漠等不同场景的低空节点提供泛在连接支持，提升导航定位能力，是补足低空经济技术短板的关键。为实现卫星网络与地面网络的平滑互通与集成，国际标准化组织3GPP在其第17版标准中引入了对非地面网络的支持，从而开启了天地一体网络发展历程。

根据距离地面高度的不同，卫星可分为高轨、中轨、低轨三类。其中，高轨卫星相对地面静止，因此组网简单、信号传输稳定，可以为全球提供精准导航服务。而低轨卫星距离地面更近，具有传输损耗小、传输时延低、传输带宽大等优势，是实现天地一体的重要平台。当前，我国在高轨卫星网络建设方面已建成天通一号卫星移动通信系统，在低轨卫星互联网星座建设方面推出“鸿雁星座”“虹云工程”“星网工程”等计划，并相继发射成功，标志着我国天地一体网络建设的重要进展。

在此背景下，构筑以地面通感一体网络为主、卫星网络与民航专网为辅的低空智联监管网，实现广域可靠通信、智能精准导航、多维立体感知的高效协同，满足低空经济场景下各类飞行器“高密度、高频次、广覆盖、大连接、低时延、高安全”作业需求，可以有效助力低空经济产业发展。

2024年是国内低空经济发展元年，也是5G-Advanced商用元年，以通感融合为代表的新兴技术已展现其在低空经济领域的应用前景，空天地一体网络将成为低空经济发展的“神经中枢”，提供从广域连接到精细感知的全方位支持。展望未来，从便利到安全，从生产到生活，低空经济的发展将深刻改变人们的生活方式，推动社会向智能化迈进。

（作者系北京理工大学信息与电子学院教授）



随着全球科技竞争的焦点日益聚焦于基础研究领域，掌握基础研究的前沿优势已成为决定国家发展主动权的关键因素。党的二十届三中全会强调，鼓励开展高风险、高价值基础研究。基础研究往往伴随着极高的不确定性，但其蕴含的创新潜力与社会经济价值却不可估量，是引领科技跃升、奠定社会经济长远发展的重要基石，一旦研究成功，将会促进原创性、颠覆性科技创新成果的竞相涌现。当前科研实践中，追求低风险、短期收益的项目仍占多数，真正投身于高风险、高价值的基础研究者为数不多，这进一步凸显了鼓励此类研究的迫切性与重要性。

高风险、高价值基础研究是指那些涉及基础未知领域和复杂问题，具有很大的不确定性和挑战性，但一旦取得突破，能够带来颠覆性创新和重大科学发现的研究，国际上一般称为高风险高回报（HRHR）研究。比如，《美国竞争法案》指出，科研机构应支持高风险高回报的基础研究项目来促进美国创新。经济合作与发展组织在2021年5月发布了《促进HRHR研究的有效政策》报告，并归纳了其特点，包括着力理解或支持解决科学、技术或社会挑战，努力变革科学、技术或社会范式，具有高度新颖性，具有无法实现目标的高风险，也具有对科学、技术或社会产生巨大变革性影响的潜力。

基础研究一般具有三个典型特征：原创性，研究成果提出了全新的科学理论或技术方法，甚至能够颠覆或变革现有科学思想和科研范式；不确定性，研究过程以及结果成功与否难以预测，具有较高失败风险，同时也孕育着无限可能性；长期性，通常需要多年的持续探索积累，厚积薄发，越重大的突破，孕育时间可能越长。因此，基础研究常与高风险高收益研究或变革性研究关联起来。这类研究往往能够推动原创性、颠覆性的科技创新，催生重大技术突破和产业变革，具有极高的科学价值和社会经济价值。

如何有效破解支持原创性、颠覆性科技创新是一个世界难题，世界科技强国都试图通过资助高风险、高价值基础研究来孕育原创性、颠覆性科技创新。比如，美国在1953年专门成立了“致力于组织和资助战略性新技术研发”的国防部高级研究计划局。该机构资助变革性技术创新的两个经典案例是全球定位系统（GPS）和互联网（Internet）。其后，又分别于2021年在美国国立卫生研究院新设高级健康研究计划局，2023年在美国国家科学基金会新设技术、创新与合作局，以加强高风险导向型技术研究。除了美国，日本、欧洲等其他国家和地区对原创性、颠覆性科技创新的重视程度也显著提高，纷纷加快了相关资助管理机制的探索，加大对创新性、高风险性、处于研究早期阶段的基础研究项目支持力度，尤其注重跨学科合作和青年人才培养。

我国基础研究总体呈现积极态势。投入持续增长，政府与企业对基础研究的重视程度日益提升。例如，2024年中央本级科技支出预算安排达到3708.28亿元，其中基础研究支出979.8亿元，增长13.1%。竞争力不断提升，《中国基础研究竞争力报告2024》显示，我国基础研究竞争力逐步增强，在农业科学、生态与环境科学、地球科学等多个领域取得显著成果，并在一些重要科研前沿领域实现突破。重大科研成果不断涌现，如集成电路、人工智能、量子通信等领域取得重要进展。科研设施不断完善，比如，包括500米口径球面射电望远镜（FAST）、中微子实验装置、全超导托卡马克核聚变实验装置等在内的世界级大科学设施群，为科学家开展基础研究提供了有力支撑。政策支持不断加强，政府出台了一系列政策措施来支持基础研究，包括加强“从0到1”基础研究工作方案等。还建立了有层次、成体系的基础研究资助制度，在有组织科研、人才评价、科研环境等软环境建设方面也取得了显著进展。

当然，在看到成绩的同时，也不能盲目乐观。对标建设世界科技强国的目标要求，我国基础研究的短板依旧突出。比如，投入方面，对原创性研究的资助力度仍显不足、持续性不够、结构不合理。政府投入占主导，企业参与较少，且长期稳定投入占比低，过多竞争

鼓励开展高风险高价值基础研究

□ 孟庆峰



导向的科研资源分配方式不利于基础研究的深入和持续开展。资助机制上，符合原创性、颠覆性技术特点的项目遴选和资助管理标准有待完善。人才队伍建设方面，有世界影响力的科学家群体还不够多。青年科研人员收入偏低，容易造成人才流失。评价机制上，现行制度偏重量化考核，对原创性研究激励不足，导致科研人员更倾向于选择低风险、易出成果的研究。科研生态上的不足在一定程度上制约了科研工作的自由度和开放性，不利于激发原创性研究的活力。

当前，我国基础研究已经进入高质量发展的关键转型期，正在努力实现从奋力追赶到前沿引领的换挡提质，迫切需要新的科研战略思维、新的科研组织模式。鼓励开展高风险、高价值基础研究，就是鼓励在原创、前沿、颠覆上下功夫，突破跟跑一跑跑一领跑的路径依赖和思维惯性。为此，在国家创新体系的层面，一是坚持守正创新，坚持突出原创的目标导向，持之以恒加强基础研究，建立鼓励原创的科技创新体系和高效率协调的科研组织模式。二是鼓励创新、宽容失败，营造有利于原始创新的科研生态。在资助管理层面，对多数前沿科学家而言，只有少数同行甚至根本没有同行，原创性发现很难被第一时间识别，科学资助机构要制定针对性的评议准则或评审制度来甄别原创性研究，同时采取多样、互补的资助项目和资助方式。完善非共识项目资助机制，探索建立有利于开展高风险、高价值基础研究的新型评议制度或新型资助机构。建立“以人为本”的长周期支持机制，完善科研经费“包干制”，引导社会力量参与基础研究，长期稳定支持一批能够攻坚世界科技难题的基础研究人才。

（作者系国家自然科学基金委员会研究员）



（上接1版）

新征程做好人才工作，必须深化人才发展体制机制改革。破除人才培养、使用、评价、服务、支持、激励等方面的体制机制障碍，破除“四唯”现象，向用人主体授权，为人才松绑，把我国制度优势转化为人才优势、科技竞争优势，加快形成有利于人才成长的培养机制、有利于人尽其才的使用机制、有利于人才各展其能的激励机制、有利于人才脱颖而出的竞争机制，是做好人才工作的治本之策。贯彻落实《决定》要求，实施更加积极、更加开放、更加有效的人才政策，完善人才自主培养机制，加快建设国家高水平人才高地和吸引集聚人才平台。加快建设国家战略人才力量，着力培养造就战略科学家、一流科技领军人才和创新团队，着力培养造就卓越工程师、大国工匠、高技能人才，提高各类人才素质。完善人才有序流动机制，完善青年创新人才发现、选拔、培养机制，健全保障科研人员专心科研制度。强化人才激励机制，建立以创新能力、质量、实效、贡献为

导向的人才评价体系，为各类人才施展才华、竞相成长提供良好环境。

统筹推进教育科技人才体制机制一体改革

教育是民族振兴、科技进步的重要基石，科技是国家强盛之基、安全之要，人才是在百年大变局中赢得竞争主动的战略资源。教育、科技、人才三者内在一致、相互支撑。《决定》强调统筹推进教育科技人才体制机制一体改革，深化了对教育、科技、人才三位一体的规律性认识，是对新时代以来全面深化改革成功实践的深化和发展。新征程上，要更好统筹推进教育、科技、人才一体化发展，以高水平教育培养高素质人才，以高素质人才推动实现高水平科技自立自强，以高水平科技支撑引领经济高质量发展，不断增强我国在人才竞争和科技竞争中的核心竞争力，为推进中

国式现代化提供更加有力的人才支撑、智力支持和创新动力。

统筹推进教育科技人才体制机制一体改革，要坚持系统思维和问题导向。坚持教育、科技、人才三方面体制机制改革有机贯通、深度融合，以一体化思维统筹谋划、一体化举措系统推进教育发展、科技创新、人才培养，形成推进中国式现代化的强大合力。针对教育、科技、人才发展面临的共性问题，一体研究、一体决策、一体部署，打通堵点淤点难点，促进三者协同发力，构建人才培养、科研攻关、成果转化、科学评价的一体化发展格局。

统筹推进教育科技人才体制机制一体改革，要助力提升国家创新体系整体效能。发挥新型举国体制优势，加强战略规划、政策措施、重大任务、科研力量、资源平台、区域创新等方面的统筹，构建协同高效的决策指挥体系 and 组织实施体系，整合社会资源，凝聚推动科技创新的强大合力。坚持创新引领发展，加强科技创新全链条部署、全领域布

局，构建技术创新体系、知识创新体系、国防科学技术创新体系、区域创新体系、科学技术中介服务体系等，提升国家创新体系整体效能。

统筹推进教育科技人才体制机制一体改革，要坚持培育创新文化。崇尚科学、鼓励探索、倡导创新、宽容失败的创新文化，是推动社会发展进步的重要力量。教育科技人才工作的创新发展，离不开创新文化的滋养。创新尤其是科技创新，是一种探索性、创造性实践，必须解放思想，敢于革故鼎新。世界科技史表明，那些深远影响人类社会发展的伟大科学发现发明，都是在怀疑、批判的基础上产生的。《决定》对构建支持全面创新体制机制作出战略部署，充分体现了以改革促创新促发展的鲜明导向。坚持培育创新文化，传承中华优秀传统文化的创新基因，营造鼓励探索、宽容失败的良好环境，使崇尚科学、追求创新在全社会蔚然成风，助力中国式现代化行稳致远。