跟着院士学科技

战机雷达失灵、战舰通信中断、导弹制导系统迷失方向……影视作品中常见的情景，让人窥见了电子战的一角。

如果说银幕上的“失明”“失聪”“失准”只是对电子战威力的形象化呈现，那么现实中的电子战已经超越单一的干扰与反干扰，演变为体系与体系、算法与算法之间的较量。

近年来，电磁空间对抗节奏不断加快、信号样式日趋复杂，传统电子战的局限日益凸显。人工智能与电子战的碰撞，撞出了认知电子战这一耀眼的火花。

从被动响应到主动博弈，从固定程式到智慧进化，认知电子战究竟如何实现对传统电子战的跨越升级？本期“跟着院士学科技”，我们邀请到中国工程院院士、军事科学院正高级工程师王沙飞，为您讲述。

从传统电子战到认知电子战——

电磁空间的智慧博弈

■陈 涛 高莹平 本报记者 贾启龙



认知电子战概念图。 AI生成

从“指纹比对”到“精准画像”

认知电子战的核心在于引入人工智能，赋予系统自主学习和实时适应的“认知”能力。如果说传统电子战的识别过程就像“指纹比对”，依靠预先建立的信号特征库，对截获的辐射源信号进行匹配识别，那么认知电子战的识别过程就是构建动态、立体的“精准画像”，看得更快、辨得更准、应对得更灵活。

这一演进，首先体现在数据获取与处理上。认知电子侦察不再满足于采集孤立的信号参数，而是致力于快速、全面、持续地获取战场电磁数据流，构建并动态更新信号数据库。系统利用无监督学习等技术，对海量信号进行智能分选和初步归类。此时的“画像”已初具轮廓。

真正的“精准画像”，在于深度融合与动态建模。认知电子战系统会对辐射源的频率、波形、防护模式、到达方向等多维信息进行区分，建立统一的信息描述模型架构。这好比不仅记录一个人的指纹，还持续观察其行为习惯、社交网络和反应模式。通过机器学习算法，系统能从这些多维数据中提炼出目标的“认知特征”，识别其工作状态、战术意图甚至可能的弱点。像美国亨廷顿·英格尔斯公司开发的认知电子战解决方案，就是利用机器学习算法对雷达系统进行射频指纹识别，基于独特的信号特征精准辨识个体辐射源。

“画像”的精准性，最终服务于干扰决策的闭环优化。认知干扰模块通过强化学习等技术，建立目标状态与最优干扰样式的对应关系。系统在实施干扰后，会持续评估效果并实时反馈，动态调整干扰策略。这就构成了一个“感知—学习—决策—评估—再学习”的认知对抗闭环。此时的“精准画像”不再是僵硬的标签，而是一个实时更新、可预测、可交互的动态模型。

所以，认知电子战的识别过程，不再只是从预先建立的信号特征库中“对号入座”寻找答案，而是基于实时数据流、利用人工智能进行多维度特征提取、动态建模与闭环优化的“精准画像”。这一演进使得电子战系统能够更智能地理解复杂电磁环境，更精准地刻画对手，并更高效地实施对抗。这也意味着电子战领域从“人工认知”向“机器认知”的重大转变。

如今，这一演进并非只是概念上的构想，相关能力已经开始走向工程化探索。以英国正在开发的新型数字战场系统“数字目标定位网络”为例，其旨在解决传统信号分析耗时长、特征库更新慢导致的识别延迟问题，计划在2027年建成全域传感链，实现“6秒杀伤链”。

从“四处撒网”到“精准打击”

识别精准的终极目的，在于实现有效干扰。

传统电子战的干扰方式，就像在茫茫大海中“四处撒网”，是基于经验预设规则、固定频段与功率实施的“面状覆盖”。认知电子战则致力于“精准打击”，就像一名经验丰富的猎手，在动态变化的电磁丛林中快速识别、追踪并精确干扰目标。

这一飞跃的核心驱动力，来自人工智能。依托大数据分析和机器学习，认知电子战系统能预测敌方电子设备的工作规律，先敌一步采取行动。更重要的是，它使得干扰目标从单一的点状设备，扩展到了网络化的体系。通过智能分析组网系统的结构和关键节点，认知电子战系统能实施精确的“破击体系”作战，瘫痪敌方整个侦察或指挥网络，这是传统“广撒网”式干扰难以企及的。

如今，研究人员已经开发出基于强化学习的智能干扰决策系统。欧洲导弹集团在近年来多项公开演示中，展示了其“灵巧干扰”技术的成熟应用。该技术被应用于部分空射诱饵和电子战载荷中，通过机载处理与实时学习算法，能够在飞行中自主分析来袭雷达的信号特征和波形捷变规律，即时生成最优的干扰策略，而无需依赖预先加载的威胁数据库。在2024年一次北约联合演习中，搭载该技术的无人机群成功应对了由欧洲多国联合构建的、模拟先进有源相控阵雷达的复杂“红方”电磁环境，验证了其对未知、敏捷威胁的自适应压制能力。

总而言之，认知电子战并非简单的技术升级，而是一场从“面覆盖”到“点穴战”的作战理念转变。它将电子对抗从依赖概率的“能量消耗战”，提升为依靠智能的“精确释能战”，标志着电子战进入了自主感知、智能决策、自适应对抗的新时代。

从“滞后响应”到“秒级决胜”

现代战场的对抗，是分秒必争的极速博弈。谁能在速度上占据优势，谁就能掌握主动权。

认知电子战凭借人工智能与大数据技术的深度融合，彻底打破了“人工决策”的速度瓶颈，实现了从“滞后响应”到“秒级决胜”的跨越式升级。

传统电子战决策流程繁琐冗长，严重依赖人力操作与预设程序，面对瞬息万变的电磁态势，容易陷入“决策刚出炉，战场已变天”的困境。认知电子战则依托高性能算法芯片与智能决策模型，将决策流程压缩至秒级完成。感知到战场电磁信号变化的瞬间，系统就能自动完成信号解析、目标研判、方案生成与指令下达的全流程操作，无需人工干预即可快速敲定最优对抗策略。这种极速决策能力，让认知电子战系统能够紧跟敌方电磁设备的动态变化，精准抓住敌方对抗间隙，先于对手完成干扰、压制等行动，实现“敌变我变，变在敌先”。

目前，德法意三国正在协同开发覆盖通信至雷达频段全频谱的自适应干扰平台。该系统聚焦于人工智能驱动的动态频谱感知与抗干扰算法，目标是在500毫秒内完成威胁评估与干扰策略生成，减少对美军电子战体系的依赖，提升欧洲自主电磁作战能力。

从“固定程式”到“迭代进化”

近年来，随着世界新军事变革加速演进，装备更新换代速度越来越快。新型电子战装备的信号样式、频段运用与组网方式日趋复杂，电磁对抗的节奏也随之加快。电子战系统若还靠“固定程式”和人工更新规则运行，升级速度一旦跟不上对手装备演进速度，就会在复杂多变的电磁战场上落于下风。这使得电子战系统必须从“被动执行”转向“主动成长”。

认知电子战系统可以在实战与训练过程中，主动采集各类电磁信号数据，并对对抗效果进行分析复盘，不断优化自身算法模型与对抗策略。即使面对从未见过的新型辐射源信号、未知电磁干扰模式，系统也不会束手无策，而是通过自主学习挖掘信号特征、摸索对抗规律，逐步形成针对性的应对手段。

这种自主迭代的特性，让认知电子战系统可以“越打越聪明、越对抗越强大”。即便敌方不断升级电磁装备、更新对抗策略，认知电子战系统也能通过持续学习快速适应，始终保持对抗的有效性。

电磁空间无硝烟，智慧博弈定输赢。认知电子战是智能化战争的重要组成，是夺取制信息权、制电磁权、制胜权的核心支撑。它以无形之能、决胜之力，重新定义着现代战争规则。面对世界新军事革命浪潮，只有抢占先机、主动作为、自主创新，加快构建具有自身特色的认知电子战体系，提升在复杂电磁环境下的作战能力与战略威慑能力，才能为制胜未来战场增加更多胜算。



寄语青年科技人才

左图：王沙飞近照。 AI修饰生成素描画

心怀家国，勇攀高峰，做科技自立自强的青年先锋。

——

热点追踪

『火箭云』见证中国航天『高密度时代』

■全 静

10月23日18时15分，太原卫星发射中心，长征六号改运载火箭托举遥感五十号03星直刺苍穹，卫星顺利进入预定轨道，发射任务取得圆满成功。

数十秒后，“圆满成功”有了另一种更加具象的表达：华北多地夜空中，一道明亮的光迹疾速延伸，在高空徐徐舒展成一朵轮廓浑圆的云。人们纷纷驻足观看，记录下这一画面。这道云，俗称“火箭云”。气象学上通常将这类现象称为“暮光效应”。

读懂这道云，如同读一份写在苍穹上的“任务简报”。

火箭发射时，发动机喷出的燃气温度高达3000℃，其主要成分是水蒸气、二氧化碳和少量未燃尽的碳颗粒。火箭穿过稠密大气，进入距地面数十公里的高空后，气温和气压骤然下降。高温水蒸气直接凝华为冰晶，骤然泄压的尾气在高空迅速扩散摊开，形成又扁又宽的尾迹。

此时还需要一位“灯光师”——日落后约半小时内，地面已陷入黑暗，但数十公里的高空仍处于阳光照射之下。冰晶散射着斜射的阳光，在暗色天幕映衬下格外醒目。于是便有了人们看到的这一幕：大地沉入夜色，高空却亮着一朵会发光的“云”。

发射时机、大气稳定度、光照角度，三者缺一不可。正因如此，火箭云常常被认为是可遇不可求的“稀缺品”。

说到这里，或许很多人会疑惑：近些年，火箭云似乎频频现身——2019年12月快舟一号甲运载火箭发射后，京冀上空曾出现蜿蜒的“龙状云”；今年5月长征六号改运载火箭发射后，山西、河南、安徽多地夜空又出现类似景象。既然如此，为什么还说火箭云是“稀缺品”呢？

公众之所以频繁邂逅火箭云，根本原因在于我国航天发射已进入高密度、常态化阶段。一套发射流程从数月压缩至数日，一个发射工位一年可执行十余次任务，出现火箭云的概率自然随之增加。火箭云的背后，是运载火箭批量生产能力、测控网络、气象保障和任务指挥体系的整体跃升，也是我国空间基础设施加速组网建设的一个缩影。

火箭云终会散去——十几分钟后，高空的风将它揉碎、抹匀，夜空复归沉寂。但有些东西留了下来：轨道上的卫星开始履职，测控大厅的曲线仍在刷新，下一次任务的星箭正在厂房里总装；而那道尾迹的形态与走向，也为判断火箭飞行状态、残骸落区提供了参考。

从“东方红一号”到今天，中国人仰望星空的姿态没变，仰望的底气更足。50多年前，人们在寒夜里苦苦搜寻那颗会唱歌的星星；今天，孩子们在放学路上不经意一抬头，便与一朵火箭云不期而遇。当仰望成为寻常，恰恰说明攀登已成为习惯。

这道光里还有一层深意：太空早已是新的疆域，今天照亮夜空的尾迹，明天或许就是导航、预警、通信天网中的一环。对身着军装的守望者而言，抬头看见的不只是风景，更是未来的经纬。

云会散，轨道不会；光会灭，火种不熄。下一次夜空中亮起那朵云，不妨从容抬头欣赏——那是一次圆满成功的标志，也是一个民族奔赴星辰大海时留下的壮美航迹。

（杨帆整理）



青岛市民记录下的火箭云照片。 贾纪谦摄

“超碳”正在掀起发电革命

■郭志帅 李元飞

新看点

100多年来，人类获取电力的核心逻辑其实一直没变：把水烧开，用蒸汽推动机器发电。这种“烧开水”的方式，撑起了现代社会的万家灯火。但它的短板也很明显：效率有限，设备庞大复杂，很多场景下不便应用。

如今，这个持续了百余年的技术格局，正在发生变化。而引起这种变化的“主角”，是我们再熟悉不过的二氧化碳。

10月15日，2026世界清洁能源装备大会在四川德阳开幕。中核集团的“超碳一号”入选大会清洁能源装备科技创新十大应用成果。“超碳一号”是全球首台商用超临界二氧化碳发电机组。该机组利用钢铁烧结工序产生的高温烟气余热，以超临界二氧化碳替代传统水蒸气作为循环工质进行发电。去年12月20日，“超碳一号”示范工程在贵州六盘水正式投入运行，标志着该技术首次从实验室走向商业化。

二氧化碳如何变成发电利器？

需要说明的是，二氧化碳并非燃料，而是替代水蒸气的新型“能量搬运工”。把二氧化碳加热到31℃以上，再给它施加约73个标准大气压的压力，它就会进入一种奇特的状态：不像气体那样轻飘，也不像液体那样粘滞，却兼具两者的优点——密度高、黏度低，既能储存更多能量，同时又流动阻力小、响应速度快。用它来驱动发电机组，恰好合适。

与传统“烧开水”的蒸汽轮机相比，这种超临界二氧化碳发电的优势显著：理论发电效率可以突破50%。同等功率下，体积不到蒸汽机组的一半，省地方，安装也灵活，而且更加环保。

除了在工业余热回收领域大显身手，这项新技术还有更大的应用空间。太阳能、风能受天气影响，发电波动性强，有时发的电用不完，用电需求量大时却又供电不足，给电网运行带来很大挑战。针对这一问题，相关示范项目已经启动：利用新能源富余电力加热熔盐储存热量，再通过高温熔盐驱动超临界二氧化碳发电。这套“储能+发电”的组合，相当于给电网配了一个灵活高效的“充电宝”，既能存电，又能快速响应，为电网提供调峰调频手段，使其运行更加平稳。

从“烧开水”到“加热二氧化碳”，这场发电方式的变革，不仅让传统工业变得更节能、更清洁，也为“双碳”目标的实现提供了一条新的技术路径。未来，随着技术不断成熟，它有望走进更多场景，给能源行业带来更深远的改变。