

战场电气化——防务领域的能量系统技术革命

Battlefield Electrification, an Energy System Technology Revolution of Defense

■ 穆作栋 / 中国航空工业发展研究中心

一场以电气化为代表的新一轮能量系统技术革命正在重构全球航空与地面运输产业格局，并将引领防务领域的能量系统革命。

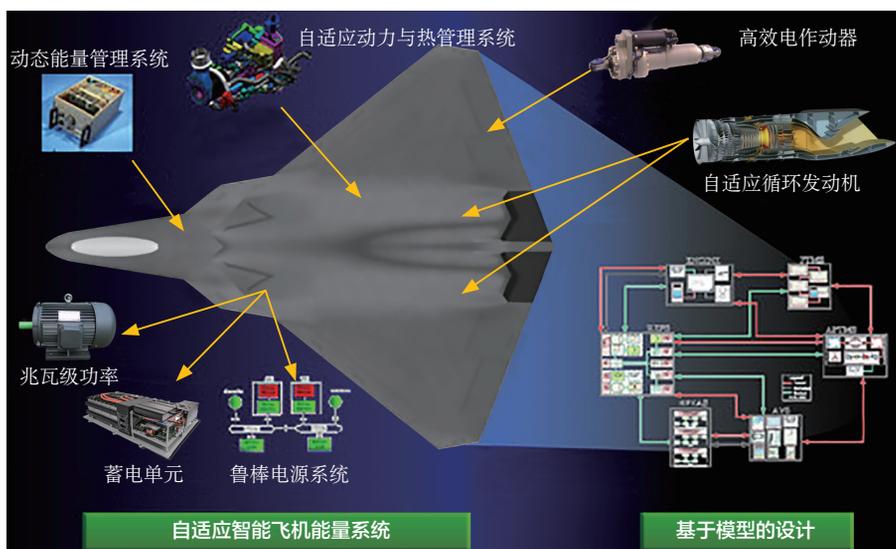
近年来，战场电气化（battlefield electrification）获得了高度关注，美国及欧洲开展了多项武器装备电气化相关研究计划，并尝试在作战行动中采用新型电气化手段。

相比于燃油、液压等传统能源形式，电气化技术能够显著提高能源利用效率、改善维修性能、降低排放和噪声，因而不仅在民用交通运输行业具有广阔的应用空间，在武器装备及作战应用中也有巨大的潜在收益。

电气系统具有典型的军民融合特征，在民用航空及汽车行业的巨大投资与市场驱动下，高能量密度电池、高功率密度发电机/电机、能量综合管理等关键技术的快速发展有力地推进了战场电气化进程。

战场电气化的发展现状 航空装备电气化

美国空军早在第二次世界大战期间就提出了“基于电力的飞机”（Electrically-Based Aircraft）概念，设想未来电气化的飞机架构。随着电力电子等相关基础技术的发展，20世纪70—80年代洛克希德公司率先提出了全电飞机概念，随后相关主要航空制造商开展了多电化技术研究，有



INVENT 计划关注包括兆瓦级发电机在内的电力系统（来源：美国空军研究实验室）

力地推动了航空装备电气化进程。

美国空军于20世纪90年代初，在相关技术和行业发展的推动下，提出了多电飞机发展计划，1992年组织了来自50余家航空制造企业、研究机构、高校及来自多军种的专家，建立了电动飞机联合计划组（MEAJPT），开展多电飞机基础技术研究、原理样机研制和系统集成试验等工作。相关成果已应用于美国多个航空装备型号，例如，F-22战斗机应用了固态配电技术，F-35战斗机应用了固态配电、电静液作动、外装式启动/发电技术等。

为了进一步提高F-35效能、降低研发和工程研制阶段的技术和周期风险，美国空军于1995年实施了“联合攻击机综合子系统演示验证”（J/IST）计划，涵盖了容错式高压直流发电/管理和配电系统（采用270V高压直流电力体制、双通道开关磁组起动/发电机）、热/能量综合管理系统（辅助动力装置APU、应急动力装置EPU、起动/发电机、环控系统的综合）等多项电气化关键技术。

随后美国空军研究实验室（AFRL）开展了为期10年的“飞行器能量综合技术”（INVENT）计划，

自2008年招标启动至2018年年初完成,美国主要航空主机制造商(波音、洛马、诺格)、发动机制造商(GE、普惠、罗罗北美)、机载系统制造商(汉胜、派克宇航、穆格、霍尼韦尔)等均参与了INVENT计划。该计划关注3大子系统,包括鲁棒电源系统、自适应动力与热管理系统、高性能电作动系统,开展了模型开发、仿真分析、系统综合、地面演示验证等研究。

INVENT计划完成后,美国空军进一步提出“下一代热、电力与控制”(NGT-PAC)计划,增进对未来机载电力系统的认识,从主机和发动机两个角度评估其技术可行性,并开展演示验证。该项目被列为“绝密”(Top Secret)级别,项目周期为7年,内容包括电力与热管理架构综合研究、电力系统研究等多个领域,涵盖鲁棒高效电源管理、先进电力控制与分配等技术内容。

在开展多电技术研究的同时,以美国国家航空航天局(NASA)、美国国防预先研究计划局(DARPA)、AFRL为代表的研究机构和以空客、罗罗为代表的企业正在开展电推进技术研究。NASA开展了X-57全电推进演示验证计划,资助开发兆瓦级电机和电力电子设备研究,建设24MW、4.5kV电推进飞机试验台(NEAT)。空客在电动通用飞机研究基础上与罗罗公司合作开展E-Fan X支线级混合电推进演示验证计划,测试2.5MW发电机、2MW电机、3kV高压电网等技术。NASA与波音在“航空推进系统研究与技术”(RTAPS)项目下,共同研究提出了N3-X未来分布式超导涡轮电推进干线飞机概念,由2台涡轴发动机机

出轴功率、利用超导发电机为系统提供电能,驱动15台嵌入机体后部的超导电机产生推力,其配电系统、电缆也将广泛采用高温超导技术,一方面保证极高的能量效率,另一方面可显著减轻系统质量。在民用航空市场的巨大投资驱动下,相关关键技术能够得到快速发展,有望迅速应用于武器装备领域。

2013年,DARPA启动了“垂直起降实验飞机”(VTOL X)计划,由极光飞行科学公司(Aurora Flight Sciences, 现属波音)、罗罗公司和霍尼韦尔公司合作开发名为XV-24的分布式电推进倾转翼垂直起降飞机。XV-24有24个电机驱动的变距涵道风扇,可实现垂直起降并转换为平飞巡航。但由于霍尼韦尔公司在1MW发电机研发过程中遇到了热管理困难,同时没有找到合适的合作方,项目于2018年年初被取消。

2020年美国航空航天学会科技大会(AIAA SciTech Forum and Exposition)上,AFRL展示了一款分布式混合电推进飞机概念模型。这一概念采用分布式电推进布局,驾驶舱上方设

置有前置水平尾翼,同时采用无尾布局。机翼分段,内侧为平直盒状翼,分隔为7组涵道,采用分布式电推进系统提供动力;机翼外侧为常规后掠翼。根据NASA此前公布的类似概念方案推测,内、外翼连接处结构可容纳燃气涡轮发动机驱动的发电机系统,为推进系统提供电力。

地面装备电气化

美国陆军针对战场电气化设定了一个10年发展目标,要求完成全部设备的电气化。美国陆军坦克车辆研究开发工程中心开展了“下一代作战车辆”(NGCV)计划,计划于2022年前完成2辆坦克原型机。

英国国防科学技术实验室(DSTL)于2019年9月11日宣布投资320万英镑,开展未来地面作战车辆研究,核心内容为地面装备电驱动解决方案。该项目由奎奈蒂克(QinetiQ)公司牵头开展,参与研究的机构还包括克兰菲尔德大学、威廉姆斯高级工程学院、霍斯特曼防御系统(军用车辆悬架领域专业公司)等。

英国汽车制造商苏帕凯特



美国空军研究实验室的混合电推进概念模型(来源:航空周刊)

(Supacat) 公司在2019年英国国际防务展上公布了全电驱动的有人驾驶全地形车辆(ATMP)验证机。ATMP基于现有平台进行电气化改装,拆除原有发动机,装配电池组、电机和变速装置,动力输出至轮毂驱动车辆。采用电驱动系统有效提升了车辆的控制性能,允许驾驶员和控制系统更为精确地控制车辆运动状态。

海上装备电气化

随着先进任务系统及武器系统技术的引入,舰艇功率需求激增,对电力系统容量和稳定性的需求也大幅提升。为了保证任务系统及舰艇平台的用电量,美国海军于2007年在计划执行办公室(PEO)下建立了电动舰艇办公室(ESO, PMS 320),负责开发架构简单、经济性良好并且能力先进的电力系统,特别关注定向能(DE)和其他高功率任务系统的能量系统研究及其平台集成,满足海军舰艇的使用需求。

2015年,美国海军海上系统司令部提出了“海军动力与能量系统技术发展路线图”(NPES TDR),梳

理了新一代舰载能量系统的需求与关键技术。2019年1月2日,海上系统司令部发布了“多用途舰载能量库”(Multi-Application Shipboard Energy Magazine)研究计划的信息征求书(RFI),旨在研究面向定向能武器等新型负载的模块化、可扩展的中间电力系统,目的在于为定向能武器等高能任务系统提供电力,同时保护能量系统及平台其他系统不受任务系统产生的脉冲的影响。同时,能量库可以支持舰艇平台的能量管理、负载均衡和应急供电。

后勤保障电气化

美国陆军已经尝试了在战场后勤保障中使用新型电气化手段,从而节约燃油消耗和人力成本,降低燃油运输对后勤供应的压力。美国陆军在阿富汗执行了尼姆罗兹行动(Operation Nimroz),采用电池、太阳能板等新型电气化设备,代替传统内燃机为行动提供能源。按照后勤保障要求,该行动的基地需要使用13台基于燃油的传统内燃机,以驱动发电机、保证任务的能源需要,

但大部分发电机都会处于低容量运行状态。美国陆军引入了2套由电池、太阳能板和发电机组成的混合装置为特定任务提供电能,仅仅使用上述2套混合装置和2台原有发电机就满足了后勤保障任务。这一尝试每周可节省约6060L燃油、30个发电机加油工时和20个发电机维护工时,工程师可将精力集中在更为重要的任务上,同时有效减少了基地运行过程消耗的燃油,降低了后勤保障的压力。

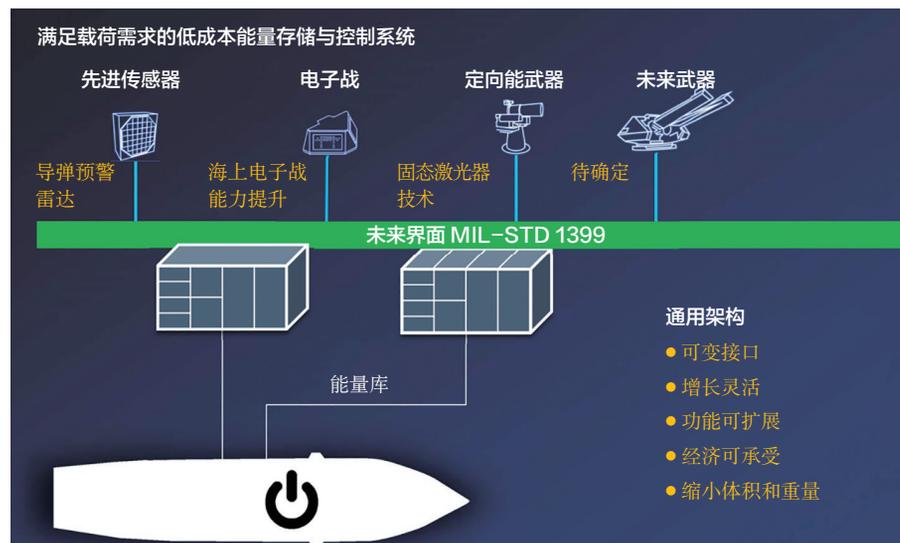
战场电气化的收益

与民用电动飞机类似,目前装备及武器体系距离有效电气化还有一定的距离,同时面临着诸如电池、发电及配电等相关技术挑战,但电气化为武器装备及后勤保障体系带来的种种收益正在吸引军方及工业界的关注。

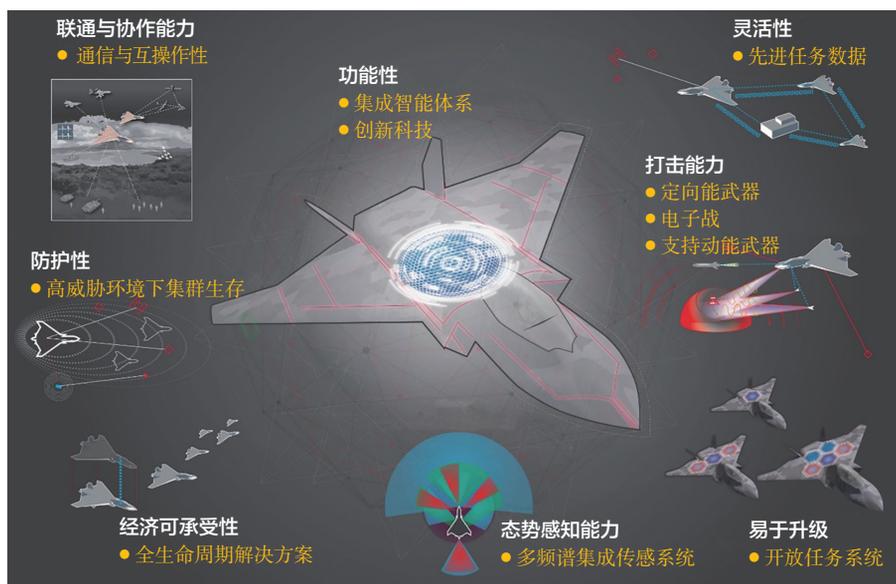
支撑先进任务与武器系统的应用

在现代武器装备发展过程中,先进任务系统和武器系统的应用,对装备电能生成、存储和管理等提出了极高的要求。以航空装备为例,四代机谋求更强的态势感知能力,以及隐身、超声速巡航、超常规机动等性能要求,推动了机载任务系统的快速发展。例如,F-22采用了基于“宝石柱”计划的综合航电系统,F-35进一步开展射频综合并在机上大量装备了大功率电子设备。随着多电技术发展,航空装备电气化水平大幅提升,电网容量、能量转换效率、功率密度、综合控制能力得到了长足进步,有力地保障了任务系统的效能。

下一代航空装备将具备大空域宽速域包线、大范围高机动敏捷飞



美国提出的舰载能量库概念(来源:美国海军海上系统司令部)



英国“暴风”未来战斗机对电力系统提出了更高的要求（来源：英国BAE系统公司）

观。电气化能够大幅提高装备能量使用效率，降低燃油消耗。另一方面，电气化能够有效提高装备的维护保障性能，解决传统液压、引气、燃油系统面临的“跑冒滴漏”问题，减少装备维护带来的后勤负担。采用电驱动或多电技术，能够大幅减轻装备的质量与机械复杂度，由于电机系统结构简单、旋转部件少，可有效提高维护性。

以F-35为例，该机引入了固态配电、电静液作动等多电技术，采用热/能量综合管理系统和开关磁阻起动/发电机，取消了中央液压系统和地面起动、供电保障设备，大幅提高了装备的保障性能。与传统作战飞机相比，该机平均维修间隔提高1倍、同等规模部署时所需的保障人员数量降低33%。

行控制、先进电子攻击、高功率定向能武器等特征。以激光武器为例，美国空军设想的机载激光武器功率达到3MW，远超当前航空装备全机电网容量。美国空军指出，下一代战斗机所需的电网容量是当前的10倍以上，未来先进任务与武器系统的应用与效能发挥都需要电气化技术提供基础性保障。

提高能量效率，应对能源挑战

作战行动会消耗大量能源，随着全球能源供需矛盾日益突出，应对能源挑战是战场电气化的原动力。例如，美国空军是美国国防部能源消耗最大的军种，每年消耗超过75.7亿升航空燃油，花费超过90亿美元。根据NASA的研究结果，电动飞机技术能够实现节能60%的潜在收益，采用超导分布式涡轮电推进的N3-X宽体机燃油消耗可较波音777-200LR降低70%以上；根据加拿大港湾航空公司的分析，其短途商用运输飞机电气化能够降低70%以上的运营成本。相关技术在武器

装备的未来应用能够有效降低燃油消耗，减轻能源供应与保障负担。

缓解后勤保障压力

现代作战行动愈发依赖后勤保障，需要建立并维持通往战区的庞大运输通道，为作战提供燃油、装备的维护服务等。后勤保障需要消耗大量资源，同时也暴露在较大的风险下。以燃油供给为例，作战所需的大量燃油需要大型储罐，储罐难以有效隐蔽、极易遭受袭击，例如也门胡塞武装使用无人机成功袭击沙特石油设施；同时将燃油运输到战区也需要大量军用运输车辆；储存与运输过程本身也需要相应的安全保障、人员配给等。美国陆军环境政策研究所的数据显示，在阿富汗战争中，美国燃油供给的伤亡系数为0.042，意味着每次燃油补给车队任务会产生0.042人伤亡。而作战行动中大量的燃油消耗带来了大量的燃油补给需求，数据显示2007年美国在伊拉克的燃油补给车队任务数量为5133，相应的伤亡数字可

结束语

随着能源供应、后勤保障压力等问题的凸显，同时也伴随着电力系统技术的发展，战场电气化正在逐步引起军方与业界的关注，包括大功率发电机、高能量密度电池、超导发/配电系统、先进能量管理等在内的关键技术，全球各国的研究均处于技术成熟度较低的阶段，需要在超导材料、宽禁带半导体电力电子器件等基础研究领域有所突破。我国在动力电池等相关技术领域具有较强的技术和产业基础，以战场电气化引发的技术革新为契机，应当主动作为、加强基础研究与相关技术演示验证研究，支撑未来跨越发展、抢占先机。

航空动力

（穆作栋，中国航空工业发展研究中心，工程师，主要从事航空机载系统及电动飞机研究）