

航空涡轮喷气发动机技术发展

The Development of Turbo Jet Engine Technology

■ 黄劲东 / 中国航发研究院

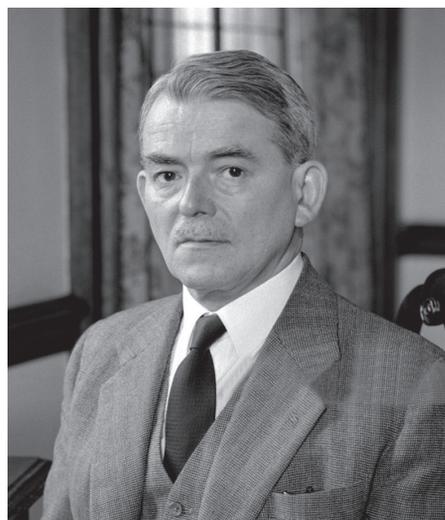
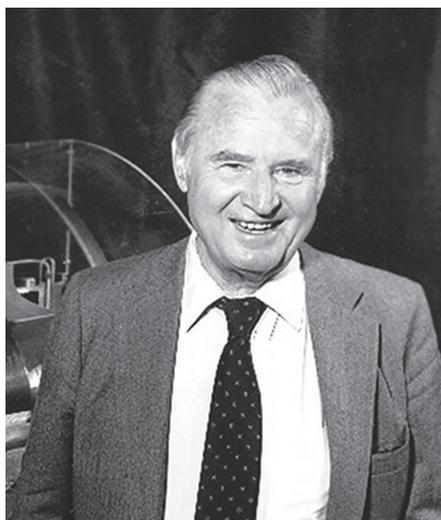
自航空涡轮喷气发动机1937年诞生起，世界主要工业国家就将它作为国防建设和经济发展的战略性支柱产业加以扶持，纷纷投入巨资研发以抢占技术制高点。其技术路线是以布雷顿循环为基本热力循环，通过不断提高循环参数和部件效率，从而牵引发动机设计、材料、工艺、试验等技术持续发展，使性能得到大幅度提升。

历史回顾

美国工程院1991年将第二届德雷珀奖(Charles Stark Draper Prize)授予喷气发动机的发明者德国人汉斯·冯·欧海恩(Hans von Ohain)和英国人弗兰克·惠特尔(Frank Whittle)，以表彰他们对世界交通运输所带来的革命性改变，以及对世界军事和经济发展的巨大贡献。

20世纪40—50年代，涡轮喷气发动机创新技术层出不穷，奠定了涡喷/涡扇发动机发展的重要基础，离心式/轴流式压气机、加力燃烧室、压气机可调导叶、双转子发动机、涡扇发动机等技术都是在这一时期发明的，著名的J57喷气发动机装备F100战斗机首次实现超声速飞行。

20世纪60年代是超声速飞行和大涵道比的时代。西方国家和苏联在超声速客机上展开激烈竞争，最后罗罗和斯奈克玛公司联合研制的奥林帕斯593发动机(174kN)和苏联的HK-144加力涡扇发动机(172kN)分别随“协和”号、图-144超声速客机完成首飞，GE公司涵道比8:1的TF39发动机(183kN)配装C-5A“银河”战略运输机，普惠公司的JT9D大涵道比发动机(222kN)1969年成为波音747首飞动力。



汉斯·冯·欧海恩(左)和弗兰克·惠特尔(右)

20世纪70年代，发动机技术的新突破是罗罗公司的军民两用三转子发动机、垂直短距起降和全权限数字式电子控制(FADEC)，以及艾利逊公司的小推力齿轮传动式风扇(GTF)发动机技术等。在此期间，定向结晶/单晶涡轮叶片、钛合金空心风扇叶片的出现使发动机工艺和材料技术迈上新台阶，涌现出F100、F404、F110和CFM56、JT8D等一代知名发动机。

20世纪80—90年代，GE公司发展出推力超过400kN的GE90民用宽体发动机，并首次使用复合材料风扇叶片、双环腔低污染燃烧室；

罗罗公司继续做精做优三转子发动机，推出了遛达700/800/900系列，在宽体客机发动机市场占有率有重要地位；普惠公司则另辟蹊径，将研发重点转向GTF技术。这一时期军用发动机的研发更是令人瞩目，1991年普惠公司以传统的双转子发动机F119战胜GE公司的F120变循环发动机成为F-22“猛禽”的动力装置，并在此基础上衍生发展出F135发动机用于F-35战斗机。

进入21世纪，LEAP、PW1000G、遛达XWB等新一代民用发动机投入运营，复合材料、金属间材料和超级合金得到广泛应用，还涌现出如增材

制造技术、数字化技术、量子技术等，不断改变、甚至颠覆着航空发动机传统的设计和生模式。

发展现状

自诞生起的80多年，涡轮喷气发动机关键性能指标成倍增加，安全性、可靠性、经济性、环保性持续增长，实现了跨越式发展。

推力

飞机对发动机推力的需求仍在不断增长，推力大意味着能携带更多装备和燃料、运载更多乘客，飞得更快、更高、更远。80多年前的发动机推力大约只有4.5kN，但2004年F135发动机的最大加力推力达到191.3kN，2017年GE9X发动机创造了航空发动机最大推力597kN的吉尼斯世界纪录。大的推力还可以将从前需要三发、四发才能跨洋飞行的宽体客机设计成双发，也可以仅用单发就把F-35战斗机的最大起飞质量提高到32t，接近双发重型战斗机水平。

推重比/单位推力

推重比（推力/重力）和单位推力（推力/空气质量流量）都是航空发动机重要的设计参数，特别是军用战斗机要求尽可能高的最大平飞速度、升限、有效载荷和高机动性，必须提高推重比；单位推力

大意味着小涵道比发动机不加力推力大、流量小、外廓尺寸和质量小，是实现战斗机超声速巡航、隐身的关键指标。第一代涡喷发动机的推重比只有1.2 : 1，第四代军用发动机F119和F135的推重比已达到10 ~ 11 : 1；与第三代战斗机F100基本型相比，F119发动机不加力推力增加了50% ~ 60%，单位推力增加了25% ~ 35%。由于提高涡轮前温度（ T_4 ）可以增加发动机有效循环功，进而增加发动机单位推力和推重比，第四代发动机的 T_4 比第三代增加了300 ~ 400K。

安全性/可靠性/耐久性

在性能提高的同时，现代航空涡轮发动机的安全性、可靠性、耐久性水平不断提升。成熟的民用大涵道比涡扇发动机的空中停车率（IFSR）已达到平均每1000飞行小时0.002次，发动机在翼平均工作时间达到20000h，每1000飞行小时的返厂率（SVR）为0.04；发动机热端设计寿命为17500循环、冷端设计寿命为30000循环。

战斗机发动机的IFSR为每1000飞行小时0.007 ~ 0.1次，每1000飞行小时返厂率约为2.2。20世纪80年代初，普惠公司汲取研发F100-PW-100发动机时重性能轻可靠性的教训，在发展F100-PW-220发动

机时一次性完成4000个总累积循环数（TAC）的加速任务试验（AMT），相当于2000h、9年的外场使用时间；F119发动机于2010年完成AMT试验，总累积循环数达到8650，其SVR仅为上一代发动机的75%。

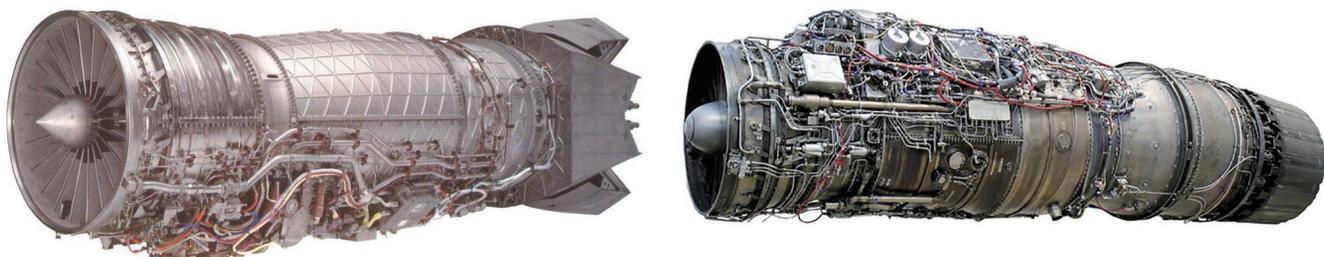
经济性

由于燃油成本占航空公司运营成本的40%以上，因此经济性是运输类发动机最重要的设计指标。为了获取更低的耗油率（SFC），民用发动机循环参数向“三高”方向发展，即高涵道比（ $>12 : 1$ ）、高总压比（ $>50 : 1$ ）、高的涡轮进口温度（ $\approx 2050K$ ），即将取证的GE9X发动机的SFC比GE90-115B降低10%。

虽然战斗机发动机的油耗不是首要考虑的因素，但耗油率是决定其航程/任务半径/有效载荷等作战能力的关键因素之一，而且日常训练时也要高度关注使用成本。F119不开加力超声速巡航时的耗油率远低于F100开加力超声速飞行时的油耗，正在研制的自适应发动机燃油效率可提高25%，航程可增加35%，可将飞机战区留空时间提高50%。

维修性/保障性

现代航空发动机从方案论证开始就全面考虑维修的便捷性、经济性、可达性和人机工程等维修要求，并在取证或定型时加以验证。以



F119与AL-31F外部管路和附件布置对比

F119发动机为例，通过优化发动机外部附件布局，只用6个手动工具就可以在不超过20min的时间内拆除任一外部附件；为了获得美国空军使用和保障阶段“保障系统放行”(SSR)批准，普惠公司历时5年对F119发动机外场服务保障和培训系统进行了广泛深入的测试和验证，覆盖培训、备发和备件调度、工程技术和后勤支援、工装工具、交互式电子出版物等内容，充分体现了发动机与其服务保障系统同时研发的理念。

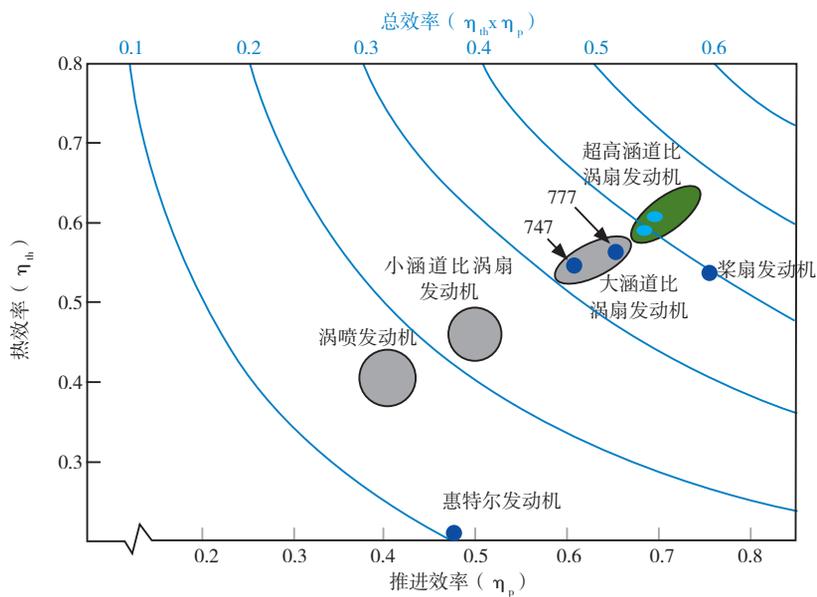
目前，军民用发动机的维修理念都从早期的航后排放、定时维修向以可靠性为中心的维修思想转变，并在发动机研发阶段开展维修工程分析、制订维修保障方案，进入航线后开展视情维修并结合定时维修和发动机状态监控。在深度维修工艺和维修信息系统的支持下，发动机综合保障能力大幅提升，直接维修成本(DMC)进一步下降，而维修业务也成为主要收入来源。

探索领域

技术进步使传统发动机热力循环的热效率、推进效率和总效率(两者乘积)逐步逼近布雷顿循环的理论极限，必须通过创新才能突破限制，有效应对航空运输的快速增长、能源和环境挑战以及新军事变革的需求。在过去的80年，研究人员在以下技术领域开展了深入探索，不断推出新构型、催生新概念。

齿轮传动

普惠公司潜心发展GTF技术用于支线和单通道客机发动机，继完成PW1000G系列发动机取证并投入运营后，正在全力发展第二代GTF技术参与波音“新中间市场飞机”(New



涡喷涡扇发动机热力循环效率变化趋势图

Midmarket Airplane, NMA) 的竞争，并试图重新进入宽体机市场；罗罗则将世界上传输功率最大的齿轮箱嵌入三转子发动机，发展“超扇”(UltraFan)发动机，计划2025年面世。第二代齿轮风扇发动机可以将涵道比提高到15~20:1、总压比60~70:1，油耗和噪声均大幅下降。

构型融合

桨扇发动机是构型融合的经典范例，它将涡桨和涡扇发动机的典型结构相结合，包括有涵道和无涵道(又称为开式转子发动机)两种构型。20世纪80—90年代，GE联合斯奈克玛、普惠联合艾利逊发展了GE36和578-DX无涵道桨扇发动机并完成了试飞；苏联则专注于有涵道桨扇发动机NK-93的研制，共制造了10台原型机、完成了飞行试验，之后研制成功D27无涵道桨扇发动机配装安-70运输机投入运营，这也是迄今唯一在役的桨扇发动机。21世纪初，欧洲启动“清洁天空”(Clean Sky)计划，开始了新一轮桨扇发动

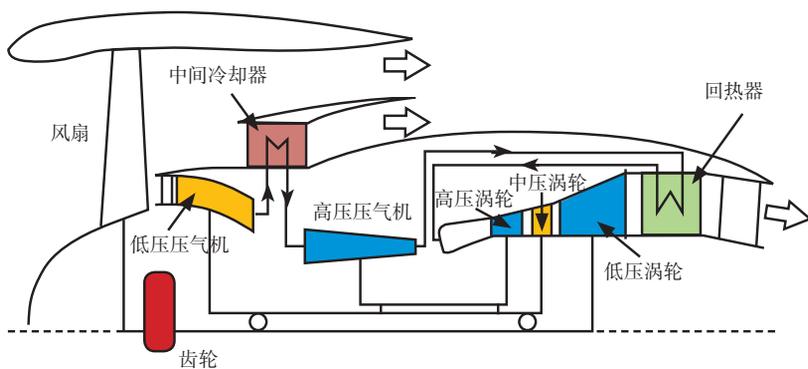
机的研究和验证。

桨扇发动机既发挥涡桨发动机低油耗的优势，又充分利用涡扇发动机高速飞行的特点，集燃油经济性和速度于一身，但由于未能有效解决噪声和包容性问题一直饱受争议，而且桨叶直径过大限制了发动机的推力，因此至今仍未见除D27之外的有涵道和无涵道桨扇发动机启动型号研制，欧洲的几个研究计划也停止了验证。

近年来，研究人员又尝试把涡轴/涡扇发动机融合在一起，提出了轴扇发动机(fan-shaft engine)的新构型。

循环改进

循环改进是指对热力循环的子过程进行局部改变达到超越传统循环限制、大幅提升发动机性能的目的。典型的应用案例有欧盟的“弯刀”(Scimitar)强预冷发动机，在常规压气机前增加以氦作为换热介质的预冷装置，将超高速飞行时进口产生的高温空气快速冷却，并用液态氢作为燃



间冷回热发动机原理图

料、氦驱动涡轮，使强预冷涡轮发动机在常温或高温进气条件下都能连续工作，实现 $Ma5$ 以上的高超声速飞行。

间冷回热技术源于燃气轮机，也是在基本热力循环的基础上，增加压缩空气中间冷却和排气回热两个过程以提高循环效率、减少油耗，减排降噪。

而涡轮级间燃烧室（interstage

turbine burner，ITB）是将高压涡轮和低压涡轮之间的过渡段改造为一个级间燃烧室，来增大推力或者通过降低主燃烧室温度减小 NO_x 排放，节省冷却空气量，两个燃烧室也降低了熄火的风险。

定容燃烧

定容燃烧主要包括脉冲爆震发动机、波转子发动机等，与传统发

动机最大的区别是燃烧过程采用定容燃烧（CVC）而非定压燃烧，也没有涡轮。这类发动机可以单独使用，也可以与传统的涡喷发动机组合使用，替代其核心机、燃烧室或者加力燃烧室，适用于各类超超声速、高超声速飞行器，其最早的应用应该是德国二战时期V1火箭所采用的脉冲爆震发动机。

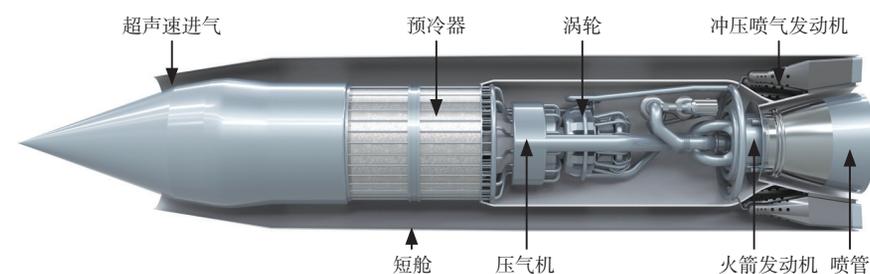
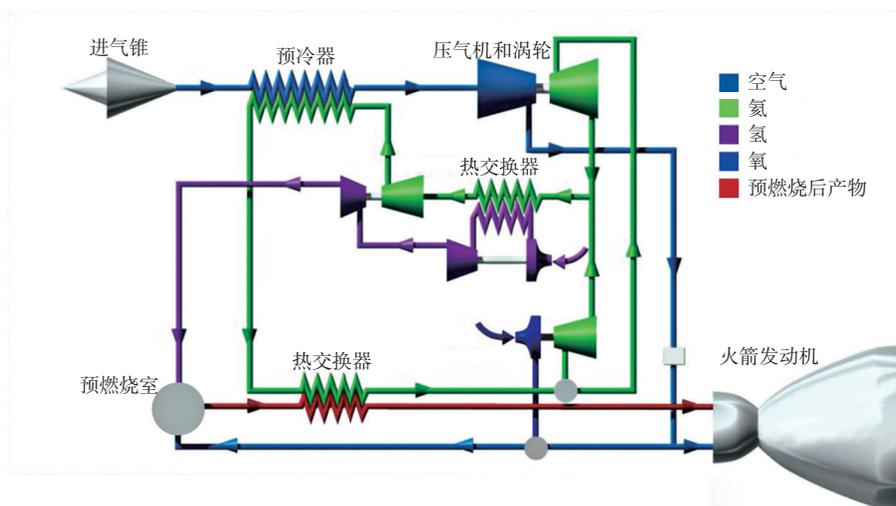
该技术曾经是航空发动机领域的一个研究热点，由于将CVC循环与布雷顿循环结合在一起相当具有挑战性，而且大大增加系统复杂性，因此目前这类探索仍未取得突破性的进展。

组合循环

传统构型的涡喷和涡扇发动机无法同时兼顾低速、高速飞行性能，正常情况下最高飞行速度不超过 $Ma3$ ，无法实现高超声速飞行。为了满足飞行器总体需求，研究人员从20世纪50年代就开始将不同热力循环进行组合来突破极限。

第一类是涡喷和涡扇两种热力循环组合的变循环发动机（VCE）和自适应循环发动机（ACE）。VCE通过改变发动机特定部件的构型使其在单涵涡喷模式和双涵涡扇模式间平稳转换，保持各种工况下性能良好。GE从20世纪70年代开始共验证了四代变循环技术，虽然在F-35项目中惜败于F119，但仍坚持开展第五代ACE技术验证，在传统双涵道变循环基础上增加第三涵道，具有更强的循环调节能力和任务适应性，与普惠公司在美国新一代发动机“自适应发动机转移项目”（AETP）中展开竞争。

第二类是涡喷/涡扇与冲压/火箭发动机循环的组合，目标是实现



“佩刀”发动机原理简图和结构示意图

高超声速飞行器能常规起降、低成本、可重复使用。几种典型的组合方式包括：涡喷与冲压发动机的串并联组合循环，如美国普惠公司在20世纪50—60年代为SR-71高空高速侦察机研发的J58组合循环涡轮冲压发动机，创造了30000m高空Ma3的飞行世界纪录；美、英、俄等国家大量开展的涡扇与冲压发动机的串/并联组合循环（TBCC）；融合火箭、燃气涡轮和冲压发动机热力循环特点的组合空气涡轮火箭发动机（Air Turbo Rocket, ATR）；进口强预冷吸气式发动机/火箭发动机组合循环，如英国的“佩刀”（SABRE），将前述“弯刀”发动机与火箭发动机组合在一起，实现吸气式模式和火箭模式的无缝连接。

智能化

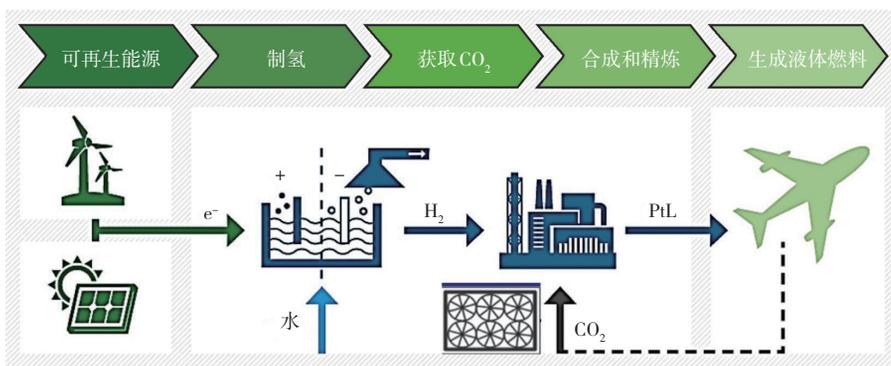
智能化是智能技术与传统航空发动机的深度融合，它通过主动机构调节/间隙控制等手段，采用智能材料和结构，利用数据分析挖掘、人工智能和机器学习等工具，构建发动机智能模型，并与发动机健康管理、飞发一体化和信息技术相结合，实现发动机全飞行包线内性能与飞行任务的实时匹配和综合性能最优，以及安全性、可靠性和使用维护成本最优。2018年，罗罗公司基于产品与服务融合的理念推出了智能发动机愿景，希望借助强大的数字化技术，使发动机具备互联互通、场景感知和理解修正的能力，还专门为此建立了R²数据实验室加速实现发动机智能化目标。

电气化

军、民用航空领域的电气化浪潮正席卷全球，主要发动机制造商纷纷加速布局。自20世纪80年代即开展研究的多电/全电发动机技术，用



太阳能直接生成液体燃料（StL）的过程示意图



风力或太阳能发电制成液体燃料（PtL）的过程示意图

电力系统部分甚至全部取代飞机/发动机的液压、气源和机械系统，取消发动机高压引气，取消或者简化附件传动机匣，从而简化发动机结构设计、减小迎风面积、降低系统质量，改善发动机的可靠性、维修性和经济性。波音787飞机的GE_{nx}发动机和遑达1000发动机都取消了高压压气机引气；F-35由于将电起动机发电机嵌入高压转子而取消了附件机匣；罗罗公司于2014年开始嵌入式电起动机发电机(E2SG)演示验证，并打算将该技术应用用于英国未来战斗机“暴风”中。

开展纯电/混合电推进技术研究正在成为飞机、发动机制造商的创新主战场。纯电动推进系统目前主要为小型飞机提供动力，瞄准个人飞行器和城市空中交通（UAM）；而传统燃气涡轮发动机与机载电池结合形成的混合电推进方案更适用于

有效载荷、速度和航程较大的应用场景。未来，电推进技术继续发展并与分布式推进概念相结合，则会出现颠覆性的新型动力。

替代燃料

替代燃料是未来清洁能源的重点研究领域，主要包括：生物航空燃料，目前已在军、民用飞机上完成试飞，但仍未进入实际使用；氢燃料，燃烧不产生CO₂，但须在极高压环境或低温环境中储存，制造成本较高；合成燃料，一种是将太阳能转化为航空煤油（Sun-to-Liquid, StL），利用太阳能聚集光束产生高温反应环境，使水和CO₂进行氧化还原反应生成H₂和CO，进而合成为类似于煤油的液体燃料（太阳能煤油），预计2025年商业化。另外一种是利用风能或太阳能发电持续将水电解成H₂，同时从大气中收集

CO₂，与H₂反应生成甲醇，或者先转化为CO，再与H₂反应生成液体燃料（Power-to-Liquid, PtL）。

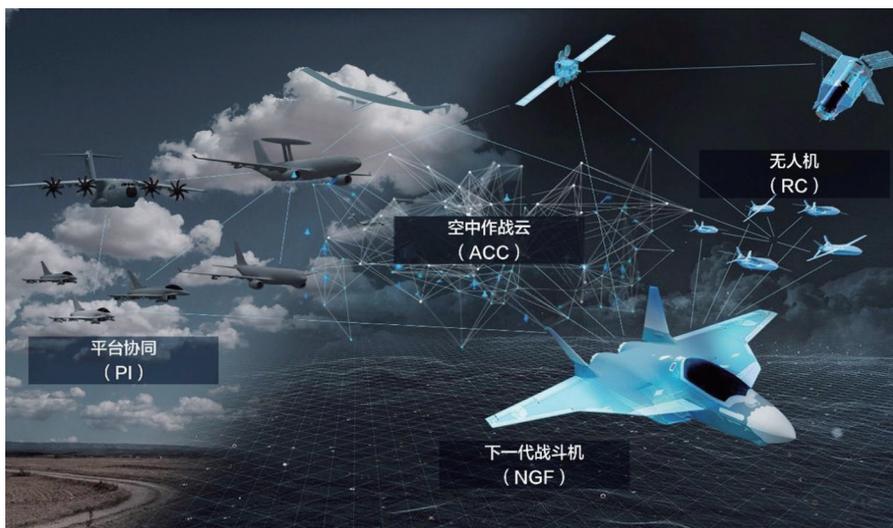
替代能源

燃料电池将燃料的化学能直接转变为电能，通过电动机驱动螺旋桨、涵道桨扇或旋翼飞行。它被认为是电池的轻质替代品，目前已在无人机和低座级飞机上进行验证，而波音、空客正研究用燃料电池替代辅助动力装置（APU）。燃料电池由于高效清洁无污染而广受关注，被奉为新能源的终极解决方案。

核能和太阳能可以作为飞行器动力的替代能源。美国、苏联等在20世纪60年代针对核能发动机开展了大量研究，未投入使用，核安全依然是绕不开的话题；太阳能发动机面临太阳能电池转换效率较低、受飞行环境影响较大等问题，未来进入实用还有大量工作要做。

未来发展

未来，军民、用飞行器对动力装置的需求会出现新的变化，主要体现在以下几个方面：一是顺应未来作战模式向空、天、地一体信息对抗的方向拓展，各类主战机型将根据设定的战略和战术目标，在更广阔的空间、以更高的速度开展体系和体系的对抗，飞行器的速度将成为一种新的“隐身”，但具备高机动、高隐身、超声速巡航的新一代战斗机的制空和对地攻击能力仍然是无可替代的；二是航空业界正面临2050年实现CO₂零排放的巨大环保压力，为此各主要航空企业已经提前布局，为未来30年民用航空发动机的颠覆性改变做准备；三是无论民机还是军机，既要用得好、也要买得起，



欧洲未来作战航空体系

更要用得起，在性能、可靠性已满足需求的前提下，发动机将不再单纯地追求高的推重比，而是综合考虑安全性、可靠性和全生命周期使用维护成本，向跨行业技术融合、全三维仿真、电气化、智能化方向发展。

2030年前的航空发动机技术

民机领域，未来5年内GTF将在宽体发动机市场展开激烈竞争；2030年前，纯电/混合电推进技术将在通用飞机、公务机和支线客机上首先得到应用，具备替代150座级窄体客机传统发动机的能力。

军机领域，自适应循环发动机将在2030年进入服役；高超声速飞行器届时将成为耀眼的明星，TBCC和强预冷涡轮发动机是可选的动力。

2050年的航空发动机技术

对于2050年的军用战斗机，目前仍然无法清晰、准确地描绘，但“快速全球打击、高超声速巡航、太空作战”等特征似乎只有新一代的组合循环发动机能满足要求。

未来30年，颠覆性的智能化分

布式电推进系统将进入民用市场；燃料电池、氢燃料、太阳能煤油等替代能源和替代燃料逐步使用，全球航空业零排放的目标全面实现；超声速客机可能会以更经济、更环保的方式重出江湖，300座级、航程超过20000km、以Ma5巡航，这是一家英国科创公司描述的未来场景，值得期待！

结束语

世界航空涡轮喷气发动机经过80多年的技术发展，已经解决了安全性、可靠性问题。但是，随着全球环保意识的不断增强，适航当局顺应要求对飞机噪声和污染物排放日趋严格；未来空天地一体化作战模式下，陆、海、空、天、电等武器装备和信息网络将以整体作战系统的方式出现，军、民用飞行器对动力装置的需求变化有待进一步的观察。

航空动力

（黄劲东，中国航发研究院副院长，研究员，主要从事航空发动机试验测试、服务保障技术和发展战略研究）