

未来飞机对飞发一体化技术的需求

Integrated Aircraft / Engine Technology Required by Future Aircraft

■ 李俊 杨水锋 但聃 / 航空工业成都所

飞发一体技术广义的含义可以分为体系和平台两个层面。首先由体系对新型航空动力应具备的主要任务能力提出需求，其中包含对能源选型、能量水平、全生命周期、成本等的宏观需求。待这些需求明确后，才能开展飞行平台对适配动力装置的需求研究。不同类型的飞行平台对飞发一体技术也会有不同需求，应分领域多渠道开展关键技术研究。

飞发一体化技术，是一种在满足作战体系对飞机和动力的宏观任务需求前提下，针对飞机与发动机的相互关系进行综合优化设计的技术，目的是获得最优的飞机/发动机匹配性能，进而提高飞机效能。

一般认为，飞发一体化技术是研究飞机与发动机的相互关系、进行综合优化设计的技术，但从更宽的视角看，飞发一体化技术还需要考虑体系对动力的需求。飞机和发动机都是为特定时期、特定环境下的特定作战体系和典型作战任务服务的。不同的体系和任务，决定了不同的设计要求，包括全生命周期的规划和维修保障的设计和和实施等。

航空动力的设计首先要满足体系需求，其次是大系统需求，最后才是飞行平台需求。在平台需求方面，不仅要考虑飞机种类的不同，也要考虑结构、气动、隐身、机载系统等不同技术领域的性能要求，多渠道并行地开展关键技术研究。



图1 F-22的矩形二维推力矢量喷管

飞发一体化技术发展历程和重点

随着喷气发动机的问世，使得飞机在各方面取得了明显的提升，并成功地实现超声速飞行。随着发动机推力的快速提高，发动机所需的空气流量也迅猛增加。大量的空气被

吸入发动机，经过燃烧后排出大量高温气体。因此，发动机前面与后面的流场特性发生了很大的改变，这种流场特性的改变使得飞机的气动性能也发生改变（如阻力、升力以及俯仰力矩等）。同时，飞机气动性能的改变也带来了发动机进气条

件的改变，从而影响发动机本身性能。由于飞机对发动机的需求不断提高，飞机与发动机之间以及发动机各部件之间的匹配问题变得日益突出，飞机性能很大程度上取决于飞发一体化性能。为了解决飞机与发动机相容性问题，飞发一体化综合设计思想的提出成为必然。

早期的飞发一体化，主要考虑的是发动机、进气道、喷管的类型与位置，以及发动机的安装方式、质量和体积对推进系统的安装性能的影响等。20世纪60年代中期，涡扇发动机出现后，飞发一体化设计逐步成为一项重要技术。

美国GE、普惠等公司都曾开展基于涡扇发动机的发动机/进气道/飞机机体一体化设计；美国空军的阿诺德工程发展中心（AEDC）通过对比F-16和F-15缩比试验件在自由射流条件和风洞条件下的试验结果来评估进/发相容性。另外，其多型先进作战飞机均采用了飞发一体化设计技术，有效提高了飞机总体作战效能。



图3 美国B-2轰炸机

例如，F-22作为空中优势战斗机，强调全向隐身和纵向机动性，采用矩形二维推力矢量喷管（如图1所示）；F-35战斗机以短距/垂直起降性能需求为牵引，独创性地采用了轴式驱动升力风扇和可向下旋转90°的推力矢量喷管（如图2所示）；B-2作为高隐身亚声速无人机，在不追求机动性能的前提下，采用了进气道上置布局、

与机体高度融合设计的固定几何进气道和固定几何喷管（如图3所示）。此外，美国还开展了X-43B飞发一体化设计技术的研究，包括“猎鹰”组合循环发动机计划（FaCET）和模态转换项目（MoTr），目标都是实现吸气式高速飞机飞发一体化核心关键技术的研究与演示验证。

俄罗斯的飞发一体化设计技术有其独到之处，特别是对于发动机寿命更是如此。俄罗斯通过对作战需求的综合分析，根据作战飞机不同的生存力、不同的寿命综合确定单台发动机的寿命，而不是一味地追求最长的寿命。

可见，不同任务需求的飞机，适用于不同的作战体系，其飞发一体设计的思路和方案差异很大；对于不同种类的飞机，飞发一体化技术也有很大差异。故而需要有针对性地加以全面研究。

未来体系对飞发一体技术的需求

体系对飞发一体技术的需求主要体现



图2 美国F-35战斗机

在能源形式的选择、能源的可持续性、功率体系分配、发动机维修保障和全生命周期。这些需求，往往和作战需求、战争模式密切相关。如果能明确飞机和发动机未来要适用的作战环境，就能比较清晰地摸清体系对飞发一体化技术的宏观要求。

例如，从未来战争的发展趋势看，体系向高能化发展的趋势越发明显，对抗双方的能量规模能重新成为决定体系对抗成败的关键因素。未来，很可能会涌现出新型能源，或者传统能源的全新应用，因而，在网络中心化体系基础上可能会出现能量中心化的体系，或称能量中心战体系。其中，核能源也许将会普及性地应用于陆海空天等多数平台的动力系统中，相应地，动力系统能源选型和动力方案选型会有典型性变化，抗辐射污染的要求也会提出，这些就是体系对动力和飞机同时提出的需求。

图4为笔者对未来体系中各种平台的能力归纳描述，可以看出，在长航时、大速度区域，还有大量的配装新能源动力的新型飞机种类有待开发。

不同飞机种类对飞发一体化技术具有不同的需求

在综合分析技术发展和未来体系需求的基础上，未来新概念飞机可能有垂直起降飞机、带推力矢量的高机动飞机、高隐身飞机、高超声速飞机、空天飞机、核能飞机等几种典型类型。

不同类型的飞机工作在不同的包线区域（如图5所示）。根据飞机和发动机的工作特点，依据聚类分析的原则，可以按高度、速度将空间域划分为三种典型的优势包线

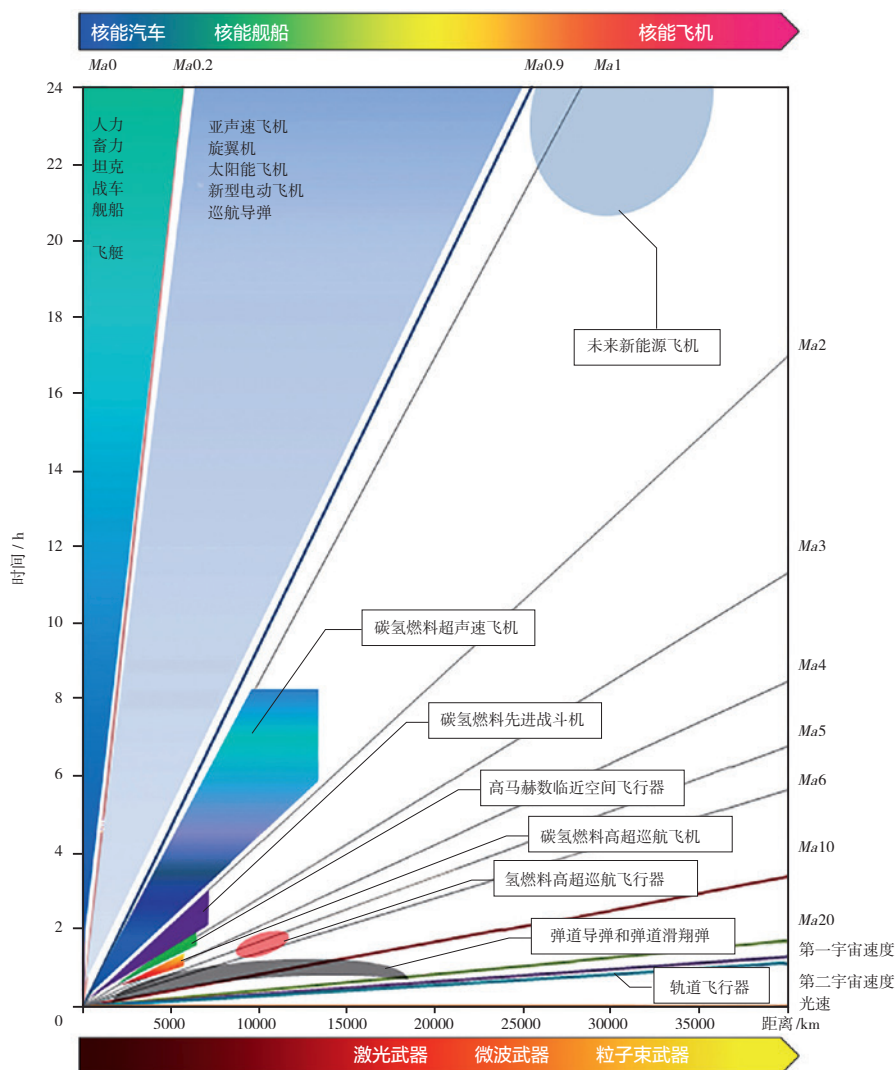


图4 未来体系中各种平台的能力

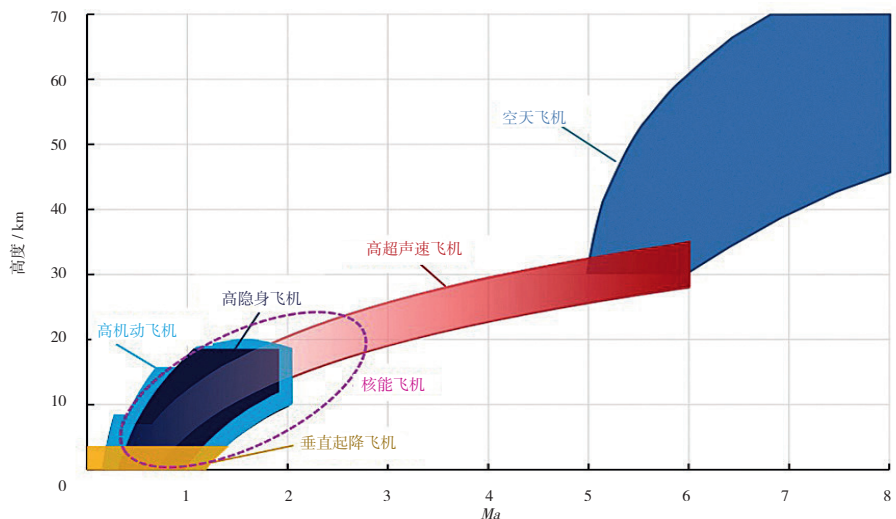


图5 不同类型飞机的工作范围图

表 1 不同类型飞机对发动机选型的典型适配关系表

	垂直起降飞机	高机动飞机	高隐身飞机	高超声速飞机	空天飞机	核能飞机
涡扇(含推力矢量)	●	●	●			
涡喷	●	●	●			
射流预冷涡喷	●	●		●		
串联涡轮基组合循环				●	●	
并联涡轮基组合循环					●	
空气涡轮火箭				●		
亚燃冲压					●	
超燃冲压					●	
核能发动机						●

区域：低空区域、常规包线区域、高空高超声速区域。由于工作区域的区别，不同类型飞机适配发动机的类型不同（见表1），不同类型飞机的飞发一体设计技术也是各有侧重的。

不同技术领域指标对飞发一体化技术具有不同需求

未来新型飞机飞发一体设计耦合程度高、多学科综合复杂，飞发一体设计面临巨大挑战，考虑几个典型的方向，主要应该分为如下几个领域。

一是体系领域对飞发一体化技术的需求。按不同的作战体系和作战任务，分析发动机能源选型、推力规模、发电规模、全生命周期、成本、保障等多方面的宏观要求，形成体系的顶层参数要求。

二是气动领域对飞发一体化技术的需求。飞机升力、阻力、力矩和发动机推力、冲压阻力、力矩高度耦合，飞发内外流场、进排流场、升力环量互相掺混、影响。高水平的一体化设计使得内外流道互相利用，最优化升/阻/推力特性，提供合理的综合操控能力。

三是隐身领域对飞发一体化技术的需求。进气道和发动机压气机一体化设计，取消吸波导流体；环形散热器和发动机进口的一体化设计；后机身和喷管一体化，降低红外特征；有源对消的隐身手段还涉及到射频功率与发动机功率提取的一体化设计。

四是控制领域对飞发一体化技术的需求。飞发一体化可以得到机动性能和包线性能两方面的收益。发动机的风扇、喷管都可作为飞机的控制舵面，和气动舵面共同参与飞机控制，而飞机的前置水平尾翼、后体等控制舵面也可作为发动机进出口流道的调节控制机构。发动机和飞机一体调节降低阻力、提高升阻比和综合推进效率是提升包线性能的重要手段。

五是结构领域对飞发一体化技术的需求。指与飞发一体、主动冷却、结构隐身及结构承载等多功能结构设计、分析、仿真、试验验证及制造有关的一系列关键技术集合。

六是传动领域对飞发一体化技术的需求。目前第三代和第四代发动机功率提取液压驱动、飞发附件

机匣、辅助动力装置（APU）起动等形式，安装传动结构复杂，使用维修性差。未来传动一体化应向全电飞机和发动机内嵌式起动/发电机方向发展，形成发动机和飞机高度一体化设计的传动和功率传输系统。

七是综合热管理领域对飞发一体化技术的需求。随着激光武器、高超声速、复杂任务系统等一系列先进技术发展的需求，飞机和发动机都在产生和利用大量的热量。热管理一体化就是要综合管理飞机和发动机的气、液和元器件等热源与热沉，综合运用散热、防热、隔热等手段，使得全机总热载荷、总热流最优化分布。

八是安全核能机载适配技术。随着安全核能技术的发展，未来小型、清洁的核动力装机是可以预见的，但核动力装机后，带来的一系列防护技术、与飞机的适配兼容技术，将成为重要的飞发一体技术分支，需要及早开展研究。

结束语

未来的作战体系对高速、大推力、高能量、长航时的新型航空动力提出了迫切需求，飞发一体化技术也变得更加重要。开展飞发一体化技术研究，应充分考虑未来作战体系的需求，考虑不同任务种类、不同飞机种类的需求，同时考虑不同技术领域对飞发一体化技术的需求，开展多个领域的飞发一体化技术攻关，才能为未来各种新概念航空动力的诞生打下雄厚的技术基础。

航空动力

（李俊，航空工业成都所，研究员，主要从事作战体系和平台研究。）