

分布式混合电推进的布局设计与优化

Multidisciplinary Design Optimization for Aircraft with Distributed Hybrid Electric Propulsion

■ 杨栋华 唐智礼 / 南京航空航天大学

近年来，随着环保要求的提升，分布式混合电推进系统逐渐成为航空研究的热点。高效率、低能耗、低噪声的优点，使其有望满足下一代飞行器的动力需求。

分布式推进系统是以适当数目的中型或微型的推进器，代替常规布局中的2个或4个集中安装或悬挂在机翼的涡扇发动机，以提升推进效率、安全性、稳定性、经济性及其他飞行性能的系统。分布式混合电推进系统是通过传统的燃气涡轮发动机带动发电机发电，为分布在机翼或机体上的多个电动机提供电力，并由电动机驱动风扇或螺旋桨来提供全部或大部分推力的一种新概念推进系统。

分布式混合电推进系统作为一种航空动力新概念，区别于常规的飞机动力系统及布局，属于创新动力技术范畴，是飞机总体设计、动力系统和机电系统的集成，也是一个复杂的系统工程，涉及发动机和电动机的设计和制造工艺研究，还涉及飞行器气动设计、结构设计等。目前开展的研究工作大部分仍停留在概念设计阶段，验证机不多，分布式混合电推进系统的研究和实现，必须要有飞行器和推进系统的设计、制造、试验等各种相关技术的协同发展。

分布式推进的原理和优点

分布式推进的原理

德国人屈西曼（Kuchemann）曾提出，机翼后缘的喷气注入机翼尾迹，可以提高推进效率，虽然尾流形状仍不完美，但是这种布局往往会使整个系统的推进效率最大化。因此，为实现飞行器推进效率的提高，设计人员将发动机喷管安装于飞机尾部。而将这种填充尾流的方法在飞行器展向分布，即采用分布式的微型发动机，不仅可以提供分布式推力，也使得飞行器整体的推进效率有明显的提高，这就是分布式推进飞行器的原理。

分布式推进的优点

分布式混合电推进飞行器，相较于传统布局的飞行器具有如下优势：大大降低对发动机的性能要求和设计困难；降低飞机噪声；改善飞行性能和提高安全性；提高推进效率；减轻翼载及机翼质量；提高飞机稳定性和控制能力，减少舵面面积和质量；能大大提高推进系统的安全性和可靠性；实现短距起降；发动机边界层吸入可以大大增加航程等。针对高效率、低能耗的要求，

分布式混合或全电推进系统是更好的选择。

分布式推进的布局方式及性能分析

分布式推进主要利用边界层摄取技术和飞发一体化技术等两种方式进行布局，具体又可细分为喷气襟翼、横流风扇、多分立发动机、分布共核多扇发动机、推进式机体等（如图1所示）。

利用边界层摄取技术的分布式推进飞行器布局

所谓边界层摄取就是将机体边界层吸入发动机，这种做法的目的在于减少尾流中消耗的动能从而提高燃油效率。这种布局与典型的翼吊发动机相比，对于给定的推力，发动机入口气流需要较低的速度和较低的功率，这也意味着能够以较小的功率得到相同的推力。典型的飞行器布局方式有风扇推进机体飞行器、共核多扇布局飞行器等。利用机体边界层流量的摄入可使飞行器功耗降低约20%，在相同航程下减少飞行器燃油的携带量。

但是这种布局所需的嵌入式发

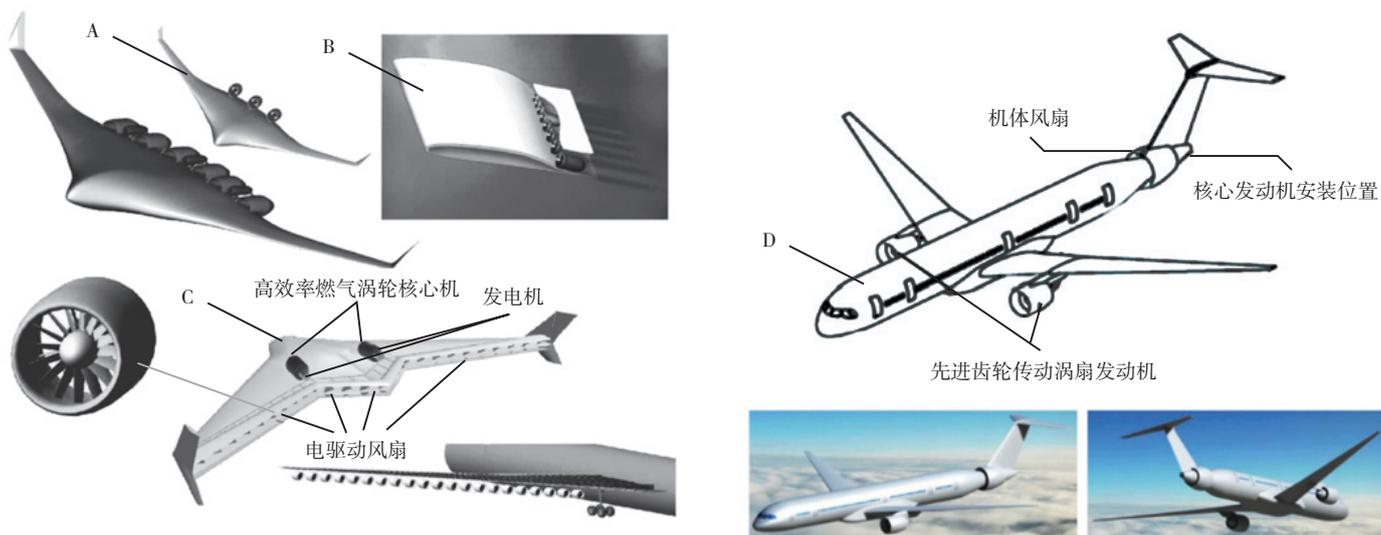


图1 多分立发动机(A)、喷气襟翼(B)、电动风扇(C)及风扇推进机体(D)

动机可能会引入一些不足：一是机身和发动机设计变得更加耦合；二是摄取边界层导致入口处和扇面处的气流畸变，可能会导致飞机的控制性及发动机的性能下降。气流畸变产生的压力梯度会产生二次流，并可能导致边界层分离；而扇面畸变则可能会产生额外的振动和噪声。为减轻这些负面影响，可以通过设计S形进气道和使用主动或被动流动控制以避免气流分离。

利用飞发一体化技术的分布式推进飞行器布局

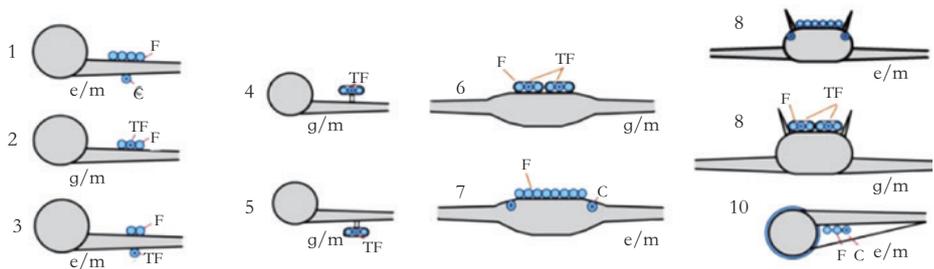
过去，机体设计与推进系统设计之间的精密接合能有效处理航空运输系统设计的强耦合性。推进系统设计和机体设计的脱钩使得特定飞机的发动机可以互换。因此，大多数商用飞机都可以满足不同客户提出由不同发动机制造商提供推进系统的要求。为了利用机体与推进系统组合的附加效率，新型飞机设计中发动机设计的作用正在发生变化。在目前的飞机开发计划中，发动机制造商更多地参与了详细的飞

机设计过程，动力系统是针对特定的飞机产品研发的。

为了从先进和非常规推进系统设计中获得最大的效益，从飞机概念设计的第一步开始，紧密结合推进系统设计将是至关重要的。以常规机体(CAF)、两舱室机体(DBF)、混合翼体(HWB)和支撑翼(SBW)等4种基本飞机布局，结合不同推进器布局，可以推导出20种发动机布局(如图2所示)。

分布式推进翼身融合布局飞行器多学科优化

多学科设计优化(MDO)是一个工程学科，其重点是在涉及多个学科或包含多个子系统的系统设计中使用数值优化方法。使用MDO的主要原因是，多学科系统的性能不仅取决于各个学科，还取决于它们之间的相互作用。在设计初期，通过利用先进的计算分析工具研究MDO问题，设计人员可以同时改进设计方案并减少设计的周期和成本。



- 1 常规机体机翼上侧分布安装风扇，下侧安装核心机
- 2 常规机体机翼上侧分布安装涡扇发动机
- 3 常规机体机翼上侧支架安装风扇，下侧安装涡扇发动机
- 4 常规机体机翼上分布支架安装发动机
- 5 常规机体机翼下侧吊舱安装涡扇发动机
- 6 翼身混合体背负式分布涡扇发动机
- 7 翼身混合体内埋核心机，机身上分布安装风扇
- 8 两舱室机体内埋核心机，机体上分布安装风扇
- 9 两舱室机体背负式分布涡扇发动机
- 10 支撑翼分布安装风扇

注：g—气动，m—机械传动，e—电动，F—风扇，TF—涡扇，C—核心机

图2 布局示意图

本文以分布式推进翼身融合（即混合翼体）飞行器为例，对其进行多学科优化设计。分布式翼身融合飞行器是一种特殊的无尾翼飞行器，其机翼、机体、发动机和控制舵实现了高度一体化。翼身融合布局本身具有高升阻比、低燃油和低噪声的优点。

分布式推进翼身融合飞行器布

局研究主要涉及推进系统设计、飞行器结构设计和飞行器气动设计三个学科。在概念设计及可行性研究阶段，研究人员往往将各学科近似计算模型建立得比较简单，先只考虑该学科具有特征的物理量（如耗油率、飞机起飞总质量、升力、阻力等），结合设计要求得出其他

约束条件（如飞行距离、载客人数、推重比等），然后利用开源软件OpenVSP、升力线理论、涡格法、叶素理论等理论或数值计算工具和研究人员优化策略，构建一个多学科多目标优化的体系结构。

在分布式推进布局可行性研究中，将翼身融合体飞行器的参数化，并结合发动机的参数模型，建立多学科优化模型。应用NSGA-II算法，根据合作对策优化得到Pareto阵面（如图3、图4、图5所示）。

研究中综合考虑推进系统、气动、质量等模块，求解了分布式推进HWB布局飞行器的多学科优化设计问题。优化中以最小起飞总质量、最低耗油率和最大升阻比为目标函数，结合了飞行控制、航程等约束条件。初步优化结果表明分布式推进翼身融合布局飞行器具有明显地提高推进效率、提高飞行安全性，降低诱导阻力、减小机翼载荷等优点。

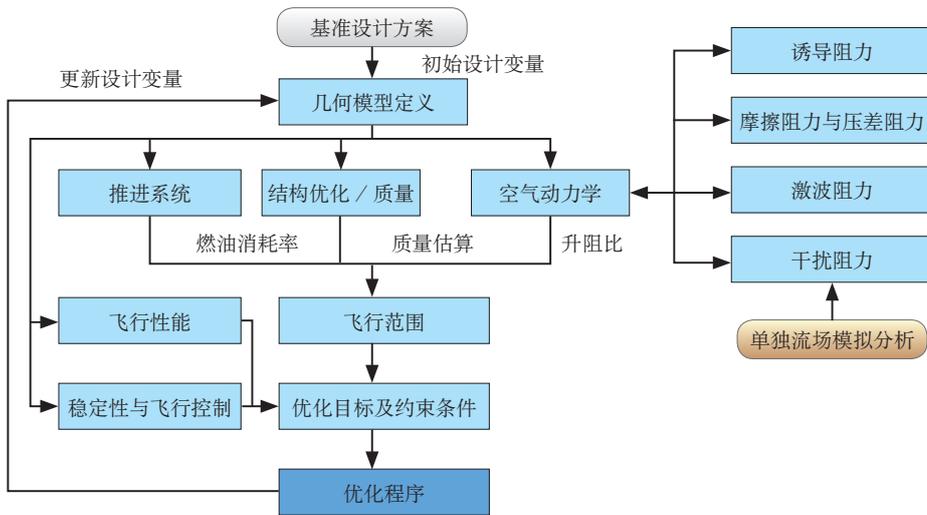


图3 分布式推进布局多学科优化流程

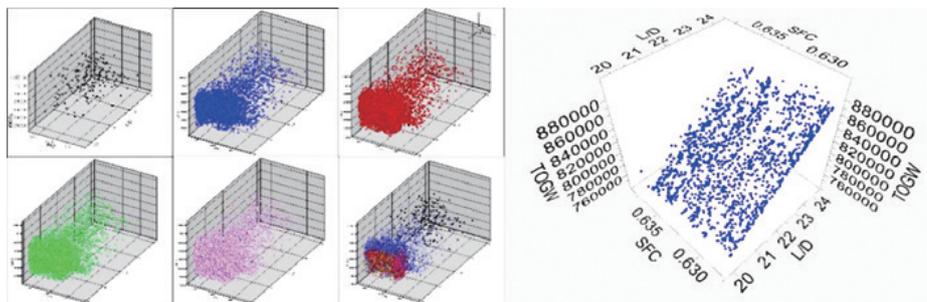


图4 分布式推进翼身融合布局飞行器优化结果

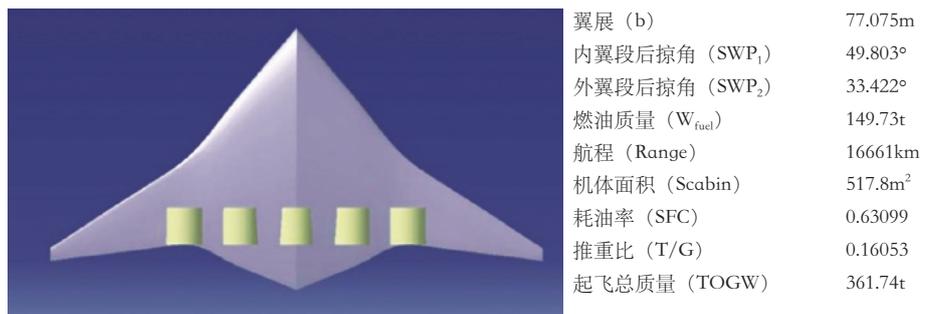


图5 Pareto最优解之一

结束语

分布式推进布局结合混合或全电推进系统有着巨大的应用潜力，如降低噪声、降低能源消耗、提高推进效率和飞行安全性，还能够提高飞行效率，并降低对发动机的设计要求。最新的推进系统概念中，动力系统和机体设计之间存在更强的相互耦合。此外，先进的推进系统概念可能会对最佳系统应用和运行条件产生重大影响。为了从设计中获得最大的效益，从飞机概念设计的第一步开始，紧密结合推进系统设计将是至关重要的。

航空动力

（杨栋华，南京航空航天大学，博士生，从事分布式推进布局飞行器研究）