

NASA混合热效率核心机项目分析

Analysis of NASA Hybrid Thermally Efficient Core Project

■ 李明 / 中国航发研究院

2021年3月29日,美国国家航空航天局(NASA)发布了混合热效率核心机(HyTEC)项目研究公告(NRA),向工业界征集研究方案,旨在将涡扇发动机的燃油效率提高5%~10%,开发适用于下一代单通道客机的发动机技术,以确保美国在发动机领域继续处于领先地位。

针 对小型高功率密度核心机技术,美国国家航空航天局(NASA)格伦研究中心(GRC)在2020年8月发布了混合热效率核心机(HyTEC)项目的信息邀请书(RFI),要求航空发动机制造商提供正在开发的、符合该项目需求的技术信息,以及成本、进度等情况。NASA借此验证项目的合理性和可行性,使项目聚焦到最适合协作开发的技术,确保其投资开发的技术内容是理想的选择,使下一代单通道客机使用新的小型核心机技术能最大程度地减少油耗、提高耐久性,并能尽快地服役,同时也促进业界的相互竞争。

项目概况

项目目标

HyTEC项目意在加速涡扇发动机核心机技术发展,并在2026年前形成先进核心机验证机,验证高热效率、高功率密度的核心机技术,用于本世纪30年代早期服役的单通道客机。在保持涡扇发动机推力、效率、可操作性和耐久性情况下,实现高达20%的功率提取。

计划安排

NASA打算与美国工业界和监管

机构合作开展该项目,采用基于模型的系统分析和工程,管理、集成各项技术的开发与验证。NASA确定了一套针对与工业界合作的技术成熟活动,其中包括利用NASA的资源、试验设施及其专业知识,来加速工业界小型核心机技术开发,主要的技术领域包括高压压气机(HPC)、高压涡轮(HPT)、燃烧室、低压涡轮(LPT),以及涡扇发动机功率提取。

项目的第一阶段侧重于通过子系统或部件的试验,开发这些单项技术,达到技术成熟度(TRL)4~5级。第二阶段转向核心机演示验证,各项技术将集成到一个完整的核心机,来验证高功率密度的小型核心机在2026年达到TRL6级。

项目研究内容

缩小涡扇发动机的核心机可增大涵道

比,提高总体效率。更小的核心机意味着更高的内部温度,需要使用更耐热、抗膨胀的先进材料,当前正在研发陶瓷基复合材料(CMC)、先进涂层、先进冷却技术,确保较小的转子/静子叶片能承受更大应力。

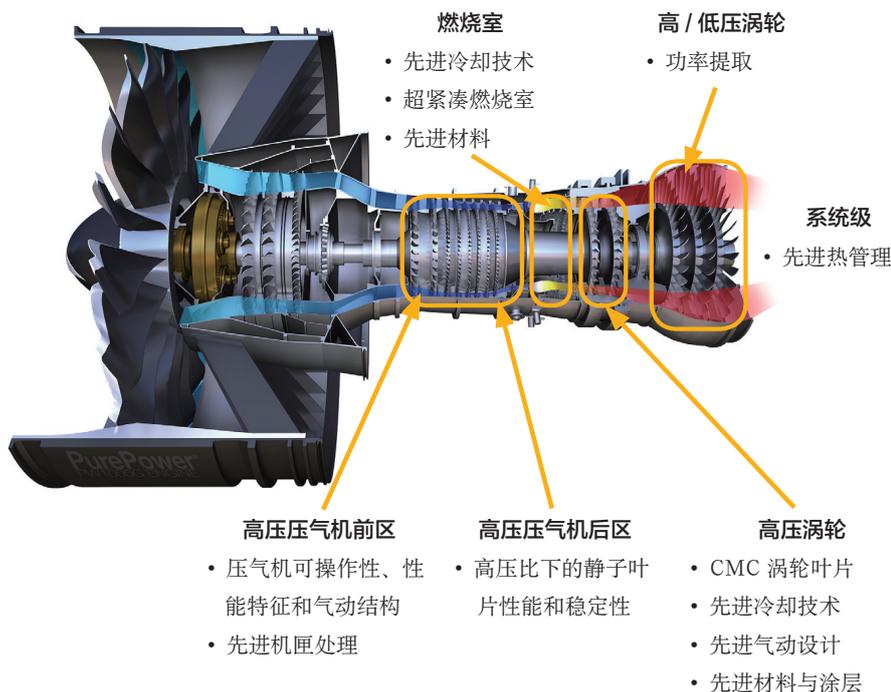
高压压气机(HPC)技术

随着核心机尺寸的缩小,由叶尖间隙、叶片厚度、腔流及漏气引起的损失增加,对压气机前区的可操作性和稳定性也提出了更多限制。

在项目第一阶段,重点开发前区气动优化技术和后区气动优化技术。运用日益提高的气动设计并融合其他先进技术,通过试验前预测和压气机旋转件的试验,验证高总压比发动机的高压压气机性能和可操作性的提高。二者都涉及非常规的结构和设计特征,如机匣处理、先进叶型及相关技术。前区气动优

HyTEC项目与CFM56发动机参数对比

参数	CFM56-7B26	HyTEC	幅度
推力	120kN	110 ~ 156kN	-
总压比	33 : 1	45 ~ 50 : 1	+36% ~ 52%
涵道比	5.1 : 1	12 ~ 15 : 1	+135% ~ 194%
高压压气机出口换算流量	3.18kg/s	1.36 ~ 1.59kg/s	-57% ~ 50%



NASA 向工业界征询的候选技术领域

化技术包括管理高负荷跨声速的前几级，来确保气动机械的稳定性和可操作性；最大限度地减少可变结构，以及更有效的级间匹配。后区气动优化技术包括降低由于相对较大的间隙导致的固有损失；解决妨碍简单几何缩放核心机的设计/制造限制；可操作性管理；高温管理。

高压涡轮 (HPT) 技术

提高小型核心机的热效率通常要增加涡轮前温度，这对高温材料系统和先进冷却技术提出挑战，NASA 的研究重点在 CMC。NASA 通过自身研究和对外合作的方式，一直开展研究来了解带冷却的 CMC 叶片的气动、热和结构性能。

在项目第一阶段，重点开展以下工作。

一是先进气动设计。开发和验证优化的 HPT 气动性能，提高整个热力循环的性能。识别几何结构影响，管理二次流和冷却气流，降低

叶身和叶尖热负荷，优化叶尖特征以最小化叶尖损失和管理热负荷。

二是高温 CMC 涡轮转子叶片。设计 CMC/环境屏蔽涂层 (EBC) 的冷却/非冷却涡轮叶片，对其在旋转工况下对耐温和性能提升的表现进行评估，包括先进的冷却概念，识别影响耐久性的关键材料和设计参数。通过试验和分析这些参数如何优化以增加耐久性，来消除或延迟关键故障的发生。

三是高温 CMC 涡轮导向叶片。设计和评估由 CMC/EBC 制成的涡轮导向叶片，与目前水平相比，这些导向叶片能减少或取消气膜冷却气流。识别增加耐久性的关键设计参数，将失效模式、耐久性的模型预测与试验结果进行对比。

燃烧室技术

小型核心机、高压比的发动机对燃烧室排放和可操作性都提出了巨大挑战，需要发展先进材料和冷

却技术，同时解决排放的问题，其中主要涉及技术包括先进材料冷却技术和紧凑燃烧室设计。

在项目第一阶段，重点开发燃烧室材料技术。设计 CMC/EBC 小型核心机燃烧室火焰筒来提高性能，识别影响性能和耐久性的关键设计特征，通过试验和分析验证如何延迟故障发生。

先进热管理技术

该技术涵盖了发动机的整个系统，增加核心机热效率需要先进的紧凑热管理系统，涉及到先进冷却技术、增材制造技术以及创新设计系统等。

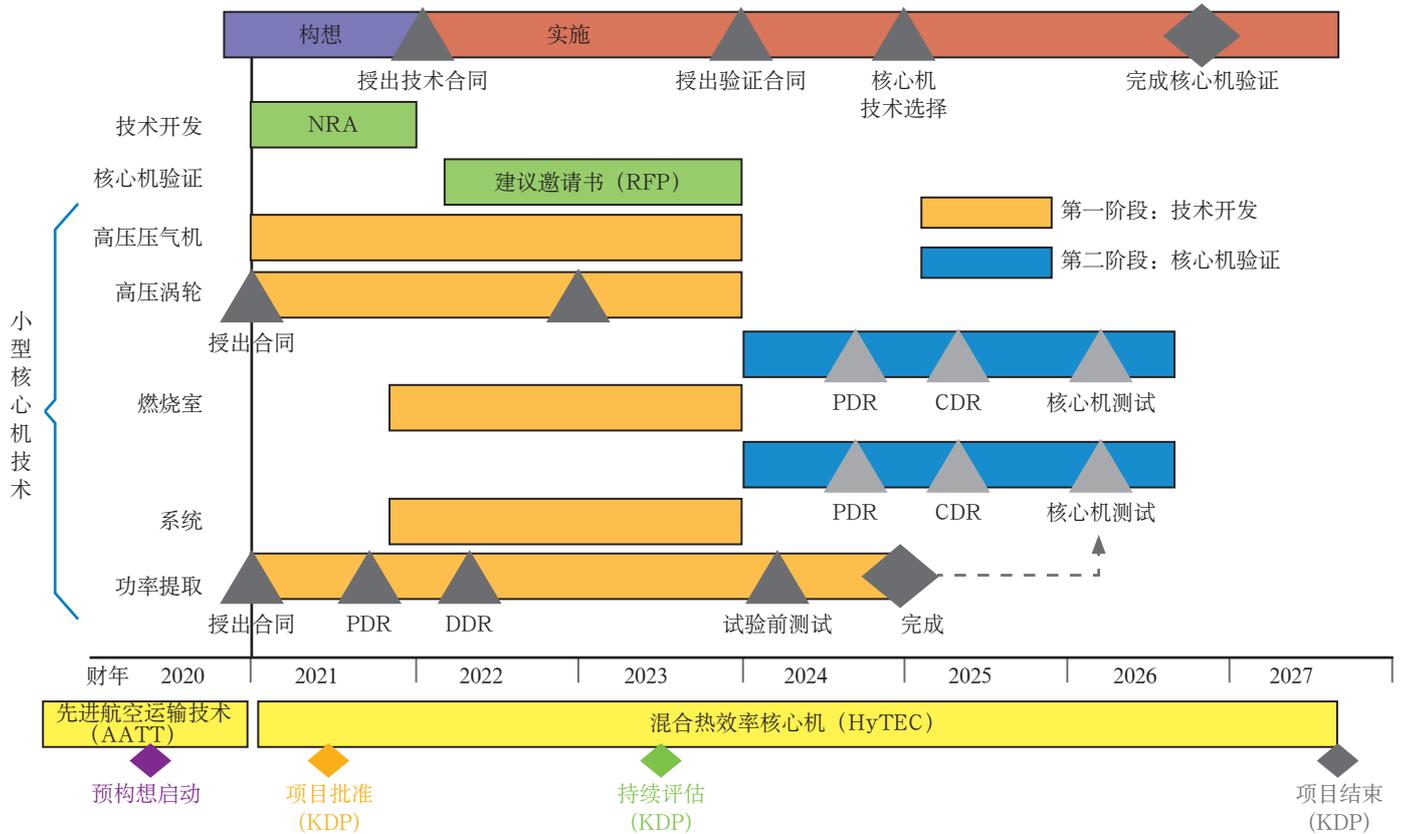
功率提取技术

涡扇发动机的功率提取是 NASA 认定的一项航空技术挑战。早在 1972 年，NASA 的研究表明，在喷气发动机的主轴上集成发电机为所有子系统供电，可能会使客机减轻 10% 的质量，并降低发动机所需的总功率，从而改善燃油效率。

随着技术发展，飞机的电气化程度越来越高，核心机将为飞机的各个子系统，例如客舱温度控制和液压系统，提供更多电力。目前，波音 787 的电气化程度最高，在飞行控制、环境控制、起落架收放和制动等关键领域，电气系统取代了传统的液压和气动系统，其功率提取率为 5%。

HyTEC 的新技术有望将功率提取提高到 10% ~ 20%。一旦功率提取技术得到验证，新发动机将能与电动飞机推进系统的兆瓦级部件集成，结合高效复合材料飞机制造技术 (HiCAM) 和超高效、高展弦比的桁架支撑机翼 (TTBW) 等创新结构，将实现民用飞机的长期可持续性。

在保持当前民用涡扇发动机的



项目发展时间表

推力、质量、效率、可操作性、耐久性等性能条件下，要显著提高功率提取的水平，需要解决的关键技术包括：任务包线内，高低压轴功率的分别提取；机电能量管理控制；确保发动机稳定性；功率提取对涡轮机械部件和发动机总体设计、性能、油耗、质量和耐久性的影响评估。

技术发展规划

HyTEC项目对前述的各项技术发展，明确了研究周期、里程碑等安排，包括初步设计评审（PDR）、详细设计评审（DDR）、关键设计评审（CDR）及关键决策点（KDP）。

项目技术管理

NASA有一套系统的技术衡量指标，来深入了解技术方案制定、技术开发进展情况、相关风险和问题的持

续评估，以及实现利益攸关方关键目标的可能性。经过系统需求论证，明确项目的效能指标（MOE），制定关键性能参数（KPP）。效能指标经过设计推演、迭代和验证，形成性能指标（MOP）。在研制过程中通过技术性能度量（TPM）实现监管和风险监控，确保技术实现。

效能指标（MOE）

用来建立项目利益攸关方的期

望和项目目标，被利益攸关方用来评判其对产品的满意度。

性能指标（MOP）

用来确定项目通过技术开发和混合热效率核心机地面验证来达到的阶段目标，是量化的标准，当达到时，能帮助确保一项MOE达到要求。

关键性能参数（KPP）

用来确定项目技术开发和核心

HyTEC项目的效能指标

条目	效能指标内涵
MOE-1	定义一个可行的方法，来识别高功率密度核心机技术，以加速发展这个政府参与提高的产品
MOE-2	研制一个具有高功率密度核心机的涡扇发动机，实现下一代单通道客机在2035年前开始服役
MOE-3	在保持当前商业涡扇发动机的推力、质量、效率、可操作性、耐久性等性能条件下，验证功率提取

机地面验证的成功标准，是任务成功的核心能力或特征。

技术性能度量 (TPM)

在合同授出后，对构成关键性能参数的关键可度量技术指标进行量化评估，用来跟踪技术进展是否满足性能指标、识别可能妨碍满足性能指标的缺陷。NASA要求竞标者须确定每项建议技术的性能度量，并提供其对相关KPP贡献的评估。

选取的技术性能度量需要反映发动机关键性能，把握研制风险，做到自下而上的技术管控，通过技术性能度量可确保发动机性能指标的实现，进而实现发动机效能指标，最终满足需求。

被跟踪的可度量技术指标的选定是基于成本、风险和该参数是否是系统成功的关键指标，起着衡量和评估技术进展状况的度量作用。

项目进展

2021年2月10日，NASA发布了项目研究公告(NRA)草案；3月29日，针对项目第一阶段(技术开发阶段)发布了正式公告，要求竞标者在5月11日前提交方案。NASA要求竞标者至少要分担一半的成本费用，可以是现金或设备、人力等非现金的形式。NASA后续将从竞标者的以往经验、实施潜力和影响、技术途径和能力、工作计划等方面，对提案进行综合评估，最后将向最能满足公告目标的竞标者授出成本分担合同，周期2年。

NASA计划从2022财年开始，在项目第一阶段的技术研究领域，每年投入1000万美元，但实际金额还要依收到的提案质量和可用资金而

HyTEC项目的性能指标

条目	性能指标内涵
MOP-1	从当前技术水平的涡扇发动机上提取双轴功率，进行地面和高空台试验
MOP-2	通过地面试验，开发和验证先进高功率密度核心机
MOP-3	通过部件试验，提高高功率密度核心技术的成熟度，在2023年达到TRL4 ~ 5
MOP-4	通过地面试验，提高高功率密度核心技术的成熟度，在2026年达到TRL6
MOP-5	通过地面高空台试验，提高涡扇发动机功率提取及嵌入技术的成熟度，在2024年达到TRL5

HyTEC项目的关键性能参数

条目	关键性能参数	单通道客机2035年前	单通道客机2035年前
		服役 完全成功标准	服役 最低成功标准
KPP-1	高功率核心机带来的燃油消耗降低	10%	5%
KPP-2	发动机涵道比	> 15 : 1	> 12 : 1
KPP-3	发动机总压比	> 50 : 1	> 45 : 1
KPP-4	耐久性(通过大修间隔时间衡量)	高出当前水平5%	达到当前水平
KPP-5	混电程度(通过从涡扇发动机的功率提取水平衡量)	20%	10%
KPP-6	高压压气机出口换算流量	< 1.36kg/s	< 1.59kg/s

定，预计将在2021年8月授出合同。

项目的合作伙伴将主要是航空发动机制造商。虽然项目仍处于“制定阶段”，各个方面仍可能进行调整。但NASA已与GE、霍尼韦尔两家公司签订了单独的协议，研究功率提取的技术方法，以实现兆瓦级的电动推进。

NASA与霍尼韦尔公司的合作是致力于低压涡轮技术的开发与试验。试验将于2022年在NASA格伦研究中心进行，根据试验数据，合作团队建立涡扇发动机功率提取基准，同时开发计算预测模型和工具，并推动霍尼韦尔公司高效涡轮技术开发工作，影响其未来的燃气涡轮发动机产品。

NASA与GE公司的合作是开展涡扇发动机功率提取的验证和评估

以及发电机和电动机的集成，解决发动机高功率提取带来的推力、质量、可操作性、效率和耐久性等方面的挑战。

结束语

对NASA而言，在面对国际航空航天竞争威胁日益增加的情况下，HyTEC项目通过与本国工业界合作，能真正加强航空发动机领域的核心能力，对于帮助美国确保航空发动机技术领先地位至关重要。特别是在新冠肺炎疫情肆虐、美国航空困难的时期，该项目被视为美国政府投资制造业，保持长期竞争力的一个良好范例。

航空动力

(李明，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略与科技情报研究)