

英国零碳飞行氢动力技术发展路线图

Analysis to Hydrogen Gas Turbine Roadmap and Thrust Generation of FlyZero

■ 李明 刘金超 / 中国航发研究院

针对未来零碳排放飞行,英国于2021年开展了一项名为“零碳飞行”(FlyZero)的系统性研究,重点关注氢能,内容涉及飞机、发动机、材料制造、基础设施、未来市场等诸多方面,氢动力技术是其中的核心内容,是零碳目标能否实现的决定因素。

英国航空航天技术研究院(ATI)在“零碳飞行”(FlyZero)项目研究成果中,给出了氢能航空可行性报告和13个技术领域的发展路线图,包括氢燃料涡轮发动机及推进器、氢燃料电池、电推进系统、热管理、低温氢燃料系统和储存、空气动力学结构等6项关键技术,以及飞机系统、机场/航线/空域、材料、全生命周期影响、可持续客舱设计、加速设计与验证、制造等7项交叉技术。研究指出,氢能飞机不仅在技术上可行,与常规的航空煤油以及可持续航空燃料(SAF)相比,其运营经济性更高,具备应对100%的短途航线和93%的远程航线的的能力。其中,航空氢动力技术,即“氢燃料涡轮发动机及推进器路线图”,重点涉及氢燃料涡轮发动机、氢燃烧和推进器等3个方面,该技术路线图明确了2050年前的各阶段需要发展的技术内容、技术指标及相关使能要素。

主要技术指标

航空氢动力的主要技术指标包括燃料消耗率、总效率、成本、首翻期、功率密度、氮氧化物(NO_x)排放及飞机噪声等7个方面,详见表1。其中:因为氢燃料具有开发更大风扇和更小核心机的潜能,兼有低温冷却的优势,

燃料消耗率将持续降低;得益于优化的循环温度、低损失和大涵道比,以及额外的喷水和混合电推进技术,总效率会不断提升;凭借智能设计和先进制造技术,单位成本会一直下降;由于氢燃料涡轮发动机的温度比常规航空煤油发动机的低 60°C ,对一些部件而言相当于能提高2~3倍寿命,再结合喷水、混合电推进和低温冷却空气等技术,首翻期将大幅延长;因为更小的核心机和更大的风扇能提高效率,结合减轻风扇和短舱的质量,功率密度将得到提高;考虑到国际民航组织(ICAO)航空环境保护委员会(CAEP)未来可能会提出更高的环保标准,氮氧化物排放、噪声水平

都要进一步降低。

氢燃料涡轮发动机

氢燃料涡轮发动机主要关注涡轮发动机本体的技术,包括6项关键技术及使能要素。

竞争性核心机技术

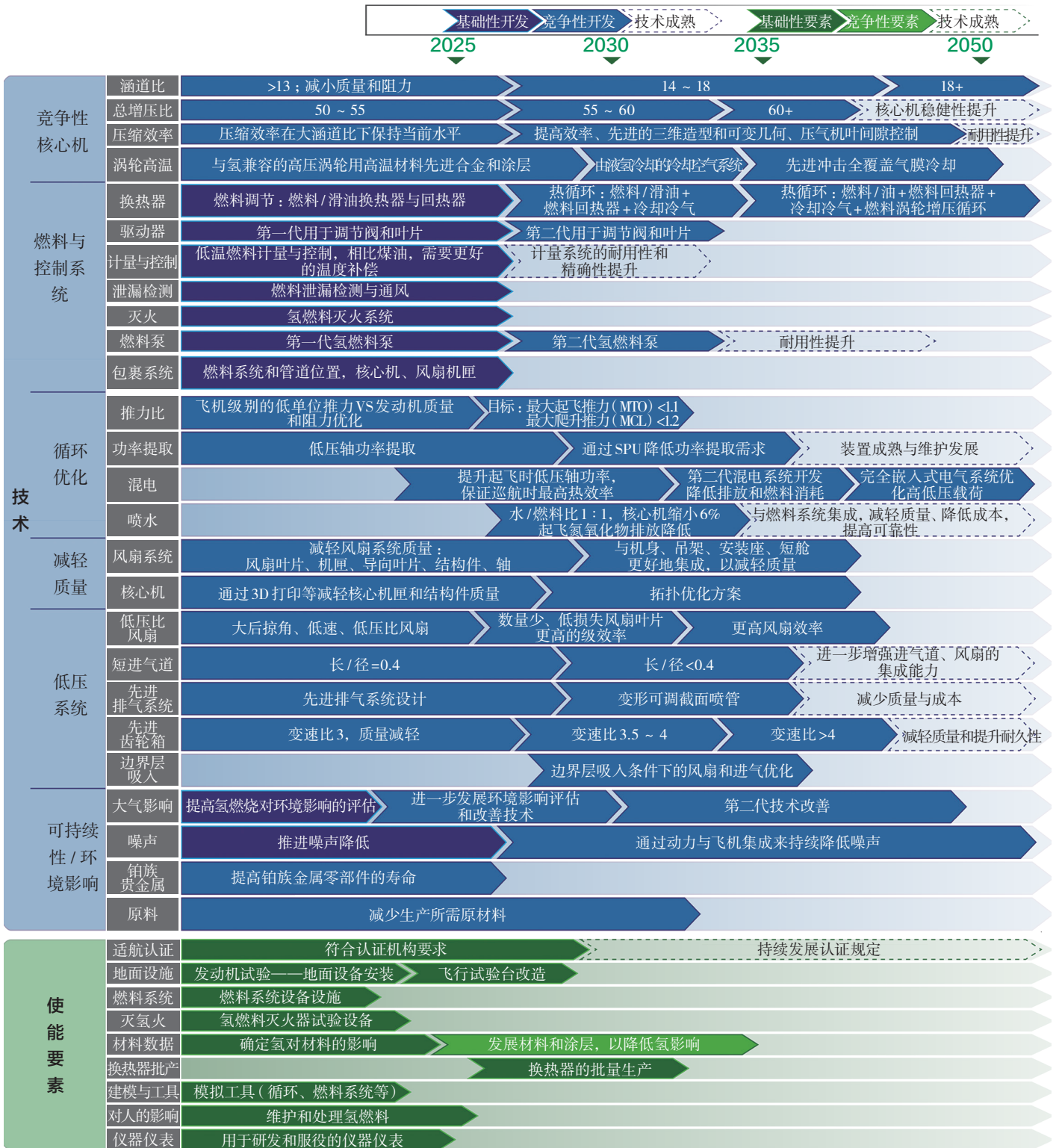
相比航空煤油,氢燃料提供了新的设计可能,轻质高热值属性也改变了涡轮发动机中的一些技术的优先级别,涉及涵道比(BPR)、总增压比(OPR)、压缩效率和涡轮工作温度等方面。

氢燃料涡轮发动机必须采用超大涵道比,以提高推进效率、降低燃料消耗。

表1 氢燃料涡轮发动机关键技术指标

序号	具体指标	2025年	2030年	2035年	2050年
1	燃料消耗率/(MJ/(kN·s))	0.56	0.55	0.54	0.49
2	总效率/%	41	42	43	47
3	单位起飞功率成本/(价格/功率)	140	130	120	100
4	首翻期/h	30000	35000	35000	45000
5	功率密度/(kW/kg)	6.5	6.5	6.8	7.6
6	氮氧化物排放减少(对比CAEP 8规定)	80%	50%	30%	<10%
7	飞机噪声水平(对比第14章噪声)	第14章噪声	10~22dB的裕度	10~22dB的裕度	>22dB的裕度

提高总增压比能提升热效率、降低燃料消耗，氢燃料与煤油相比能提供更低的工作温度和更高的效率，也可以获得更高的总增压比。小核心机意味着叶片尺寸小，但更高的总增压比导致压缩更难、温度更高，对提高压气机效率带来更多挑战。涡轮叶片要在更高温度工作，



氢燃料涡轮发动机关键技术及使能要素

同时要与氢燃料兼容。叶片材料、涂层、制造及冷却技术的进步能促进循环温度提高，实现更高的热效率。如使用液氢作为冷源降低冷却空气温度，能减少冷却空气需求量，但需要更高效的换热器。

燃料与控制系统技术

主要关注燃料与控制系统基础技术发展，包括换热器、驱动器、燃料计量与控制、燃料泄漏检测、灭火、燃料泵和燃料输送技术。

低温燃料系统设计的重要内容是在燃料燃烧前将其加热到合适的温度，加热时会提高压力，利于后续的膨胀和做功。滑油/液氢换热器能提高氢燃料温度并降低滑油温度，但滑油热容量可能不足以将液氢加热到所需的燃烧条件，预计还需要利用回热或者核心机引气到换热器来进一步提高燃料温度。

传统发动机以高压燃油作为驱动和控制系统的工作介质，氢燃料则无法实现该功能，需要开发替代系统。

氢的可压缩性、小流量给精确控制带来难度，同时控制系统还需做好温度补偿。

燃料泄漏检测是氢燃料管理的必要部分，可通过检测实际燃料或检测燃料泄漏引起的变化实现。

传统发动机灭火系统是针对航空煤油设计的，如哈龙（Halon）灭火剂，目前尚不清楚对氢燃料是否有效，需要研究新的灭火系统。

低温燃料泵已广泛应用于航天领域，但针对航空需求，要开发适合、小流量、可靠耐用的低温燃料泵。

燃料从储氢罐到燃烧室还涉及管道的包裹系统，要考虑密封、温度效应、绝缘、压力效应以及可压缩性引发的共振等问题。

循环优化技术

主要包括推力优化、功率提取、混合电推进和喷水等，对提高燃烧效率、降低排放和节省成本等有益。

优化飞机在起飞、爬升和巡航时的推力，有利于改善发动机的燃料消耗、质量和在翼时间等几乎所有性能。氢燃料的轻质属性使该指标能得到很好的优化。

有必要从低压轴提取功率，以保证低推力时的大功率提取，并防止压气机出现喘振等稳定性问题。可通过更多地使用机载辅助动力装置/功率装置（APU/SPU）来降低功率提取需求，减少发动机的设计妥协。

混合电推进的涡轮发动机能在不同飞行阶段优化性能，起飞时借用额外电力，能使涡轮发动机在巡航时以最大效率运行，更优化推力，同时减少巡航时的燃料消耗，降低起飞时的氮氧化物排放和噪声，同时还需发展能完全嵌入发动机的电气系统，以优化高低压系统的载荷分配。

起飞时，喷水能降低核心机的尺寸需求，使发动机能更高效地巡航；也可用来降低起飞温度、氮氧化物排放和噪声。

减轻质量技术

对于常规燃油飞机，高效率的发动机能节省一定燃料，相当于减轻了部分质量，但液氢和储氢罐的质量不大，发动机这种效率换质量的优势不明显，所以将更强调风扇系统和核心机等发动机自身的减轻质量工作。

推进效率高、单位推力低的发动机需要大直径的低压比风扇，但会带来风扇叶片、出口导叶和风扇机匣质量的增加，使燃料消耗升高。

轻质、低转速的复合材料风扇的技术进步，增加了大风扇的可行性，进而能提高推进效率。

增材制造技术的进步，结合更先进的高温复合材料，能制造更大部件及结构件，有助于设计出更轻、更高效的发动机核心机。

低压系统技术

燃料改变带来涡轮发动机的最佳涵道比变化，低压系统的相关技术会有不同的优先级，主要包括低压比风扇、短进气道、先进排气系统、先进齿轮箱和边界层吸入等。

低速、低压比风扇结合大涵道比能产生未来所需的高推进效率，提升其可操作性、稳健性，降低叶片损失则能进一步改进循环性能。

改善压力恢复性能，能减小短舱的质量和阻力，还需在高侧风和迎角的条件下提供可接受的进气畸变。

发动机低单位推力特性与低压系统效率密切相关，先进三维排气系统与机翼集成设计将维持并最大化推进效率。

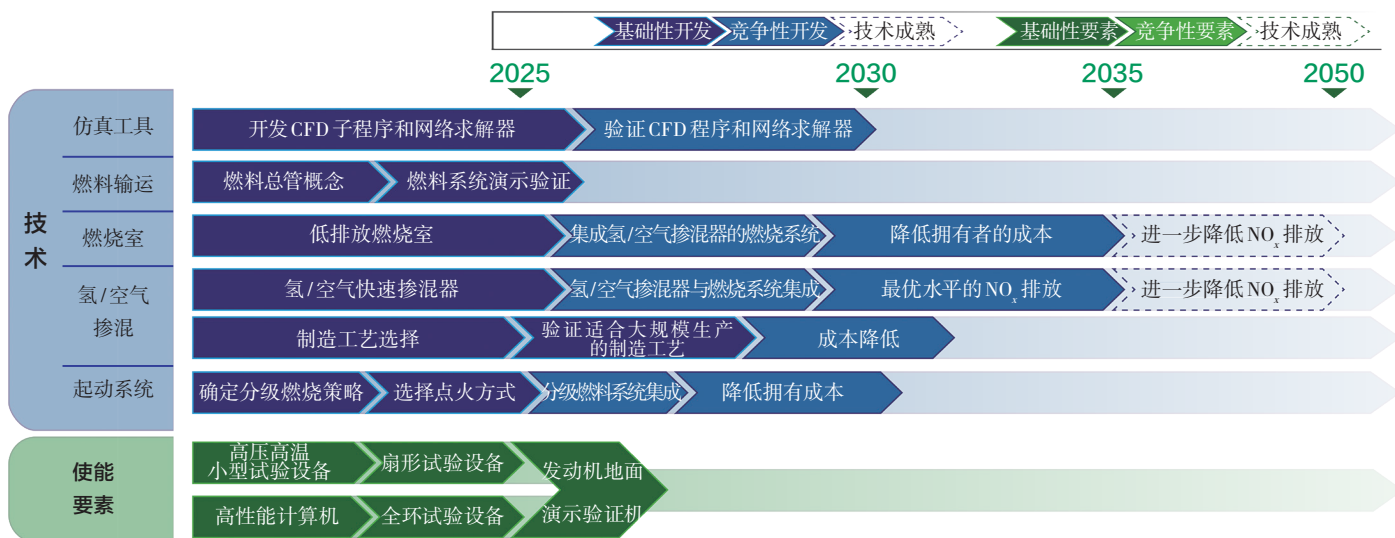
齿轮技术的进步能使动力涡轮和风扇间的转速差更大，为大风扇设计提供了空间。

尾部安装发动机利用边界层吸入，有可能获得5%的推力提升或相当的轴功率需求降低，但需提高这种非均匀进气条件下的先进风扇设计能力。

可持续性/环境影响技术

在开发氢燃料涡轮发动机技术和产品之前，需就可持续性、对环境的影响进行研究，主要包括大气影响、噪声、贵金属、原材料等方面。

大气影响重点关注航迹云的形成及气候影响，需开展模拟、验证。



氢燃烧关键技术及使能要素

降噪技术主要包括降低风扇压比、风扇速度、涡轮机械的速度和排气速度，以及短舱声学内衬、发动机优化安装等。

铂族贵金属被认为能优化性能、延长服役时间，换掉这些材料可能会因燃料消耗增加和循环效率降低而影响可持续性，因此需要进一步的权衡。

在生产中尽可能减少原材料消耗是可持续发展关键措施之一，可利用增材制造和近终成形等技术。

使能要素

使能要素主要是指上述关键技术开发所需的基础工作和设备设施，包括适航认证、发动机地面设施、燃料系统设备设施、灭火测试设备、材料数据、建模与工具、对人的影响、仪器仪表和换热器批量生产等方面。

要遵从适航条例开展相关工作，以通过适航认证，涉及满足现有的要求，并协助制定一些特殊的适航条例。

为测试氢燃料发动机，需开发适合的发动机地面试验设施。

需要开发带液氢罐的燃料系统

设备设施，对燃料泵等诸多部件开展测试，完成装机前的系统级功能验证。

为了解和验证现有的灭火系统是否适用于氢燃料，需开发一个能够容纳发动机、短舱和储氢罐的设备。

在进行发动机概念设计时，需弄清氢和低温对材料特性的影响，如强度、疲劳、渗透性和泄漏及氢损伤等。

常规的发动机数字建模和仿真工具不再适用于氢燃料，需要进行修改并开发新工具。

在研发活动和使用服务中，需从健康和安全的角度，研究考虑液氢对人的影响。

需要发展仪表装置技术，以支持发动机研发活动和使用服务，如使用氢燃料时对涡轮温度和健康的监测。

预计未来能制造轻质紧凑的高效换热器，但要达到所需生产速度，还需开发出批量生产的相关制造技术。

氢燃烧

氢燃烧主要研究氢燃料的输送、燃烧等技术，包括5个关键技术及使能

要素。

燃烧仿真工具

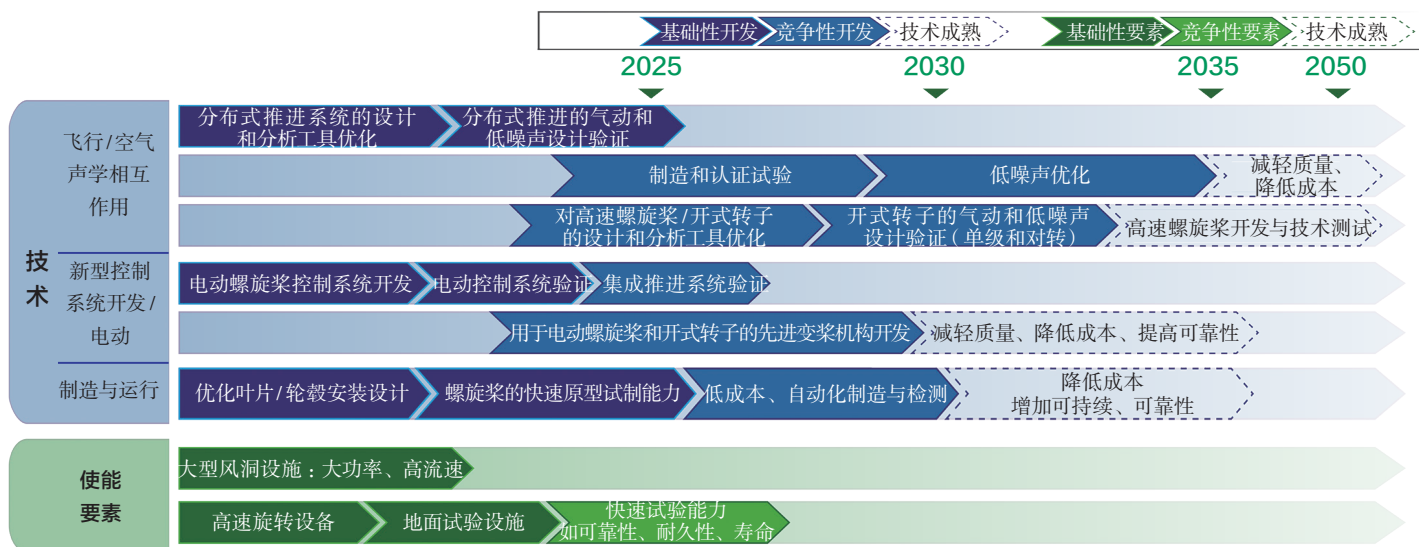
需要开展化学反应的一维仿真、针对化学反应和湍流的掺混及相互作用的三维数值仿真、热声网络模拟传热。仿真的校准和验证要利用广泛的试验数据，包括缩比、全尺寸和整机试验。

燃料输送系统

氢燃料输送具有流体质量低、密度低、温度跨度大和密度变化的特点，将氢燃料均匀分布在燃烧环，对控制污染排放至关重要。需要采用燃料分级燃烧系统，以优化低工况下性能。需通过一维网络分析来探索燃烧放热振荡与燃料系统的潜在相互作用，并在完全集成环境中进行测试。

燃烧室

氢燃料燃烧室的多点喷射技术方案与常规煤油燃烧室明显不同，通过减少主燃区的局部热点，可抑制氮氧化物生成。该方案适合采用增材制造技术，但需提高技术成熟度。燃烧室、燃料系统和氢/空气掺混器的集成会给燃烧室寿命带来挑战，需要用冷却方式来保护结构免



推进器关键技术及使能要素

受高速火焰侵蚀。

氢/空气掺混器

为满足污染物排放和燃料效率要求，要在不到1ms的时间内完全混合燃料与空气，需要通过高温高压试验快速验证概念设计。氢/空气掺混可能会与燃烧不稳定有关，其设计将在很大程度上受制造能力的限制。

起动系统

低温燃料使发动机起动面临截然不同的挑战，应基于火焰稳定性和热声控制的评估，确定分级燃烧方案。氢的易燃性还可能引起爆炸冲击损坏涡轮。这些技术需要与燃料分级燃烧一起进行集成优化以提高可靠性。

使能要素

实现上述技术需要开发部署多种试验设备，以对燃烧室进行全方位的性能评估；污染物排放、回火/自燃和点火可能都需要单独的缩比试验设备；后续还需扇形试验来进行集成评估，最终则要全环试验和整机试验的全面评估。数值模拟是缩短航空创新周期的战略加速器。开发燃烧系统的数字孪生体能提高

设计敏捷性，避免依赖全环试验进行昂贵的迭代。

推进器

推进器主要研究螺旋桨相关的流体力学、控制及制造等技术，包括3项关键技术及使能要素。

飞行/空气声学相互作用技术

通过模拟和试验来加强对分布式推进的空气动力学和空气声学的理解，需要先进模拟工具优化设计，并利用风洞试验验证。

新型控制系统开发/电动技术

电推进螺旋桨的控制系统要符合适航和安全的标准。第一代控制系统的部件级验证，需要高转速旋转设备。第二代控制系统还涉及机电驱动系统。

制造与运行技术

要开发低成本、自动化制造和检测的生产过程，满足潜在的大批量生产需求。通过减少制造废料、增加使用寿命，以降低成本、提高可靠性和确保可持续性。

使能要素

主要是针对上述技术开发所需

要的设备 and 基础设施，包括先进的风洞设施、部件（叶片）和系统（螺旋桨）级别的试验、高速旋转设备等。进一步的开发计划有利于确保发动机在性能、噪声、减轻质量和成本方面的竞争力。

结束语

由于氢在输送、控制和燃烧等方面的新颖性，技术成熟度仅为2级左右，仍处于早期的概念形成和试验阶段，不少国家已将其作为未来清洁能源的一个技术制高点，实施了早期开发和制造验证计划。发展氢燃料涡轮发动机已是清洁航空领域的一个可见技术途径，目前各国的技术差距不大。我国已将氢纳入能源体系，氢能产业链将大幅发展，氢燃料涡轮发动机的发展将具备相应工业基础，其开发要充分利用敏捷开发流程与工具，充分结合数值模拟、数字孪生等数字技术。

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科技情报及发展战略研究）