

美欧航空发动机重大科技专项计划分析

Analysis to Major Scientific and Technological Projects of Aero Engines of USA and Europe

■ 晏武英 / 中国航发研究院

从最初的单项、松散、独立型逐步向综合、集中、持续实施模式迈进，由政府、军方、工业界联合组织实施重大科技专项计划，已经成为美欧航空发动机技术预研工作的主要组织形式。

美国和欧洲从20世纪60年代开始通过预先研究计划推动航空发动机技术进步，到80年代转向以大型国家级预研计划为主要形式，在军民两方面都取得了重要进展，对航空发动机技术进步起到了较为明显的推动作用，这类重大科技专项计划的实施也为后来者提供了重要的参考和借鉴。

航空发动机重大科技专项计划的特征

航空发动机领域实施的重大科技专项计划的典型代表有美国的“综合高性能涡轮发动机技术”（IHPTET）计划、“通用经济可承受先进涡轮发动机”（VAATE）计划、“支持经济可承受任务能力的先进涡轮发动机技术”（ATTAM）计划，欧盟框架计划（FP）中的“清洁天空”（CleanSky）计划等航空研发计划，英国、意大利、德国等国联合实施的“先进核心军用发动机”（ACME）计划和英法联合实施的“先进军用发动机技术”（AMET）计划等。相比一般的航空发动机研发项目，重大科技专项计划具有以下显著特征。

第一，由国家主导且多部门联合实施。一般的航空发动机预研项

目可由单一军种、部门甚至企业实施，但对带动整个航空发动机行业技术进步的重大科技专项计划，单一主体都无法完成，需要政府部门/军种之间、政府/军种与企业之间、甚至国家与国家之间联合实施，并借由政府 and 军方的强力指引，才能实现技术的大幅度跨越。

第二，研究周期长。重大科技专项计划一般都瞄准未来若干年的先进技术和前沿概念的探索，需要进行较长时间持之以恒的研究和验证，逐步提升技术的成熟度，因此其周期一般都在10年以上。在如此长的时间内，需要划分为若干个阶段，每个阶段有明确的技术目标和验证成果，并持续对组织模式和参与主体的能力进行评估，在下一阶段及时进行调整，以确保最终目标的顺利实现。

第三，研究内容覆盖面宽。重大科技专项计划需要推动航空发动机在关键领域取得重大进步，并具有很明显的引领和带动作用。因此，其研究内容一般不局限于某一类发动机或某个技术领域，而是对军用或民用航空动力技术进行统一规划，对制约整个行业发展的关键问题进行集中攻关，其研究内容会涉及相

关的各个领域，覆盖技术产生到成熟的主要过程，远非一般的单项技术计划所能比拟。

航空发动机重大科技专项计划的实施模式

需求的建立

航空发动机重大科技专项计划多是以国家顶层战略需求为输入，由行业科技发展规划作为引领，最终形成综合性专项计划，并通过政府强力引导、巨额投入和广泛动员，组织国内或区域内的研发力量集中开展面向未来的先进技术研究 and 验证，带动创新能力的全面提升。

20世纪80年代，美国依据“联合展望2010”和“国家安全科技战略”，形成“国防科技战略”以及国防技术领域计划、基础研究计划和联合作战科技计划，针对重点领域提出了若干支撑计划，其中就包括IHPTET计划（见图1）。该计划由美国空军研究实验室（AFRL）联合全美6家主要航空涡轮发动机制造商共同发起，陆军、海军、国防预先研究计划局（DARPA）和国家航空航天局（NASA）参与论证，使之成为一个政府牵头、多军种参与、多方合作、涵盖多个基础学科的分阶段、

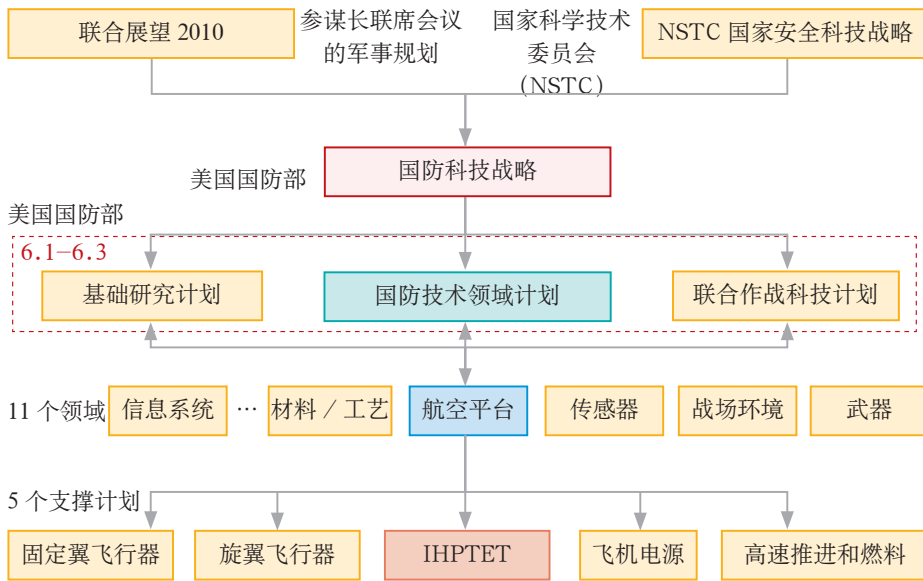


图1 IHPDET计划需求建立过程

具有明确技术研发目标和转移门槛的综合性研发计划。这种由国家安全战略到国防科技战略，再到重点领域需求，最终联合论证形成专项计划的方式，也被后来的VAATE计划、ATTAM计划所沿用。

欧盟委员会于2000年成立了欧洲航空研究与创新咨询委员会 (ACARE)，分别于2001年和2011年发布了“愿景2020”和“航迹2050”，描绘了欧盟2020年和2050年的航空发展愿景，并发布了落实上述愿景的行动计划——战略研究与创新议程 (SRIA)，提出了各个领域的研究与创新需求。欧盟框架计划航空技术研究以此为输入，从第六期框架计划 (FP6) 到“地平线2020” (相当于FP8)，重点实施了以绿色可持续为特色的“清洁天空”等航空技术与验证计划。这种采用战略引领、自上而下方法论证提出的项目始终从欧盟顶层战略出发，将欧洲航空工业和航空运输业统筹考虑，层层分解和落实，以满足社会需求和保障欧洲在全球的领

导地位，对欧盟整体战略目标的实现具有很好的支撑作用。

目标的设定

航空发动机重大科技专项计划一般均设有导向性的量化目标体系，带有明显的跨代特征和很高的技术挑战。在总体指标的牵引下，通过合理的目标分解方法具体化到各类技术载体，并设定分阶段目标逐级提升，在此过程中产生的技术成果可以随时转化到实际的型号中得到应用。

IHPDET计划与当时正在进行的常规预研计划/渠道相比，最大的不同点在于有可测量的飞跃性目标作为牵引。其总体目标是大幅提高涡

轮发动机的性能，包括推重比/功重比提高100%~120%，耗油率下降30%~40%，生产及维护成本降低35%~60%。IHPDET计划的目标设定是在飞行平台的效益、推进系统的目标和部件技术任务之间迭代完成，分别针对涡喷/涡扇发动机、涡轴/涡桨发动机和短寿命发动机提出阶段性目标及2000年达到的水平。

VAATE计划的目标转向涡轮推进系统的经济可承受能力，目标是相比2000年的基准发动机提高10倍，技术成熟度 (TRL) 和制造成熟度 (MRL) 达到6级。其经济可承受性指标为发动机能力 (推重比除以耗油率) 与成本 (研制、生产和维护成本之和) 之比 (见表1)。

作为VAATE计划的后续，ATTAM计划的目标核心是提高综合动力与热管理能力，目标是将不同类型航空发动机的燃油效率提高10%~30%，电力和热管理能力提高2~20倍，推进效率提升的目标为10%~25%，并通过部件、核心机及验证机试验评估和确认达到TRL6级或MRL6级。

欧洲多国联合的ACME计划的核心指标是提升推重比，而且是采取分阶段逐步提高的方式。该计划的总目标是推重比达到20:1，发动机的质量降低50%，耗油率降低30%，制造成本降低30%，全生命

表1 VAATE计划对于不同发动机类型的目标 (以2000年技术水平为基准)

	战斗机用涡扇发动机	运输机用涡扇发动机	小型涡扇发动机	涡轴发动机	一次性使用涡喷发动机
推重比	3.1倍	1.4倍	2.2倍	2.2倍	2.4倍
耗油率	降低25%	降低20%	降低33%	降低40%	降低30%
成本	降低64%	降低32%	降低62%	降低35%	降低65%
经济可承受性	11.5倍	2.6倍	8.9倍	5.5倍	10.0倍

周期成本降低25%。英法联合实施的AMET计划从1995年开始实施，第一阶段是到2001年实现推重比15:1，远期的目标是到2008年达到18:1。

欧盟框架计划瞄准2020年和2050年愿景目标（例如，欧洲内部实现4h门到门运输服务，将航空运输二氧化碳、氮氧化物、噪声相比2000年水平分别降低75%、90%、65%等），论证提出航空研究项目的目标，通过科学、有序地将技术研发项目安排在产品研制前以形成技术积累，图2为“清洁天空”计划的目标。

研究内容的确定

美欧航空发动机重大科技专项计划均聚焦预先研究阶段，通过基础研究、应用研究和先期技术发展对未来先进航空发动机所需的关键技术进行研究和验证，将技术成熟度提高到5~6级，为转入型号应用做好准备。

IHPDET计划成功的一个重要方面是提前确定了关键技术，据此分配资源和分解责任。在确定关键技术的过程中，IHPDET计划采用了GOTChA方法，由目的（Goals）、目

标（Objectives）、技术挑战（Technical Challenges）和技术途径（Approaches）构成，通过对作战能力和平台需求的分解，提取对实现目标有重大影响的关键技术，并确定其技术指标的解决途径。该方法在美国航空发动机预研计划论证中得到了广泛采用，并被其他领域所借鉴。

VAATE计划通过3个重点研究领域的相互配合来实现经济可承受性提高10倍的目标，包括通用核心机、智能发动机和耐久性。每个领域开展若干项关键技术研究，再通过6种先进的概念发动机进行集成验证，包括高效小尺寸推进（ESSP）、小型重油发动机（SHFE）、高速涡轮发动机验证机（HiSTED）、结构紧凑的高效直接升力发动机（CEEDLE）、高效嵌入式涡轮发动机（HEETE）和自适应循环发动机（ACE）。这些概念发动机的验证计划中包括“自适应通用发动机技术”（ADVENT）、“先进经济可承受涡轮发动机”（AATE），已成功转入型号研制。

ATTAM计划的研究内容除先进推进技术外，还首次纳入了完整的综合动力与热管理要素，以满足未来发动机支撑更多电力系统、定向

能武器、功率更大的传感器等需求，同时提高推进效率和飞行器自身的动力水平。除先进涡轮推进、动力与热技术的研发和演示验证外，还首次将材料与制造技术、计算工具等共性技术列为单独研究领域。

欧盟框架计划主要支持技术成熟度1~6级的基础研究、技术开发、技术验证和演示验证类项目，包括了合作研究（CP）和联合技术倡议（JTI）两类项目。前者主要开展单项关键技术和共性技术的研究，后者主要开展在使用环境中对完整系统的最终验证。“清洁天空”计划属于联合技术倡议项目，正在开展的第二期以3类创新飞机验证平台（IADP）为牵引（大型客机、支线客机、高速旋翼机），分别开展机体、发动机和系统的集成技术验证（ITD），同时还开展生态设计（包括材料、工艺、资源）、小型航空运输两项横向活动（TA），以及技术评估（开展独立技术监督和影响评估），共同构成关键技术、集成验证、共性技术、监督评估组成的完整技术创新体系。其中，发动机集成技术验证包括开式转子发动机、极高涵道比大型涡扇发动机、先进齿轮传

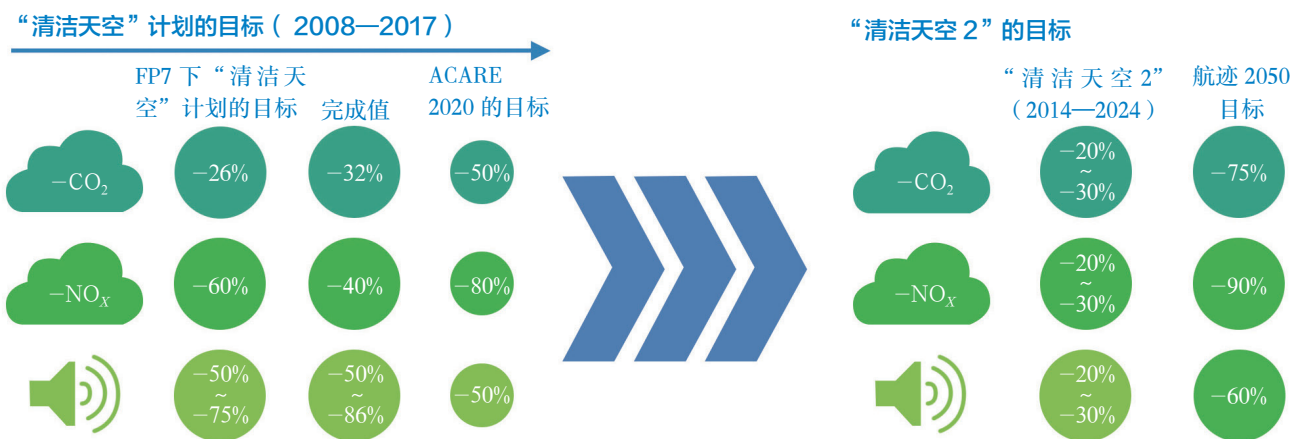


图2 欧盟“清洁天空”计划的具体目标



图3 “清洁天空2”研究内容架构

动发动机、支线涡桨发动机、小型航空发动机等7个验证平台，计划到2023年前达到技术成熟度5~6级。图3为“清洁天空2”研究内容架构。

研究周期的安排

航空发动机重大科技专项计划一般持续时间都在10年以上，分为2~3个阶段，并视情况实施后续阶段计划。各阶段的启动时间和持续时间可以视需要调整，各阶段之间并不要求严格接续，两阶段工作可以有所重叠，甚至两个重大专项计划之间也可以并行开展。

IHPTET计划从1988年正式启动到2005年结束，研究周期长达17年，共分为3个阶段。由于各个阶段的技术目标是逐步提升的，各个企业的技术路径也不尽相同，因此由艾利逊公司等承担的部分第二阶段研究工作紧跟第一阶段启动，以保证按期实现各个阶段的目标和总目标。

VAATE计划原定周期为12年(2005—2017)，同样分为3个阶段。第一阶段按时完成，第二阶段在

2009年启动，但研发工作有所拖延导致第三阶段大部分合同到2015年年年初才启动，最终计划于2023年全部结束，持续时间将长达18年。

ATTAM计划于2017年正式启动，第一阶段将会持续到2026年，最终结束时间尚未明确。该计划与VAATE计划存在6年左右的重合期，且部分研究项目会在两个计划

中同时安排，但二者的指标、应用环境和技术成熟度目标会有所差异。每个承研方都需要制订一份协调VAATE计划和ATTAM计划研究工作的先进涡轮推进规划(ATPP)，获得政府批准后方可提交申请，从而避免重复、提高效率。

欧盟框架计划的周期初期为4年，第三框架(FP3, 1990—1994)扩大为5年，第七框架(FP7, 2007—2013)延长至7年。其中“清洁天空”计划研究时间从2008年持续到2024年(见图4)，横跨多个计划周期，分为两个10年期阶段，且二者之间有3年的重叠期(2014—2017)，用来对一期的技术进行成熟度的确认及遴选。

研究经费的投入

重大科技专项计划的科研经费投入一般都在数十亿美元/欧元，与单个跨代型号的研制费用相当。经费来源一般为政府和企业对等投入，政府投入部分来源于基础研究和应用研究渠道，比例保持在总体研发支出的25%左右。

美国航空发动机预研计划的经

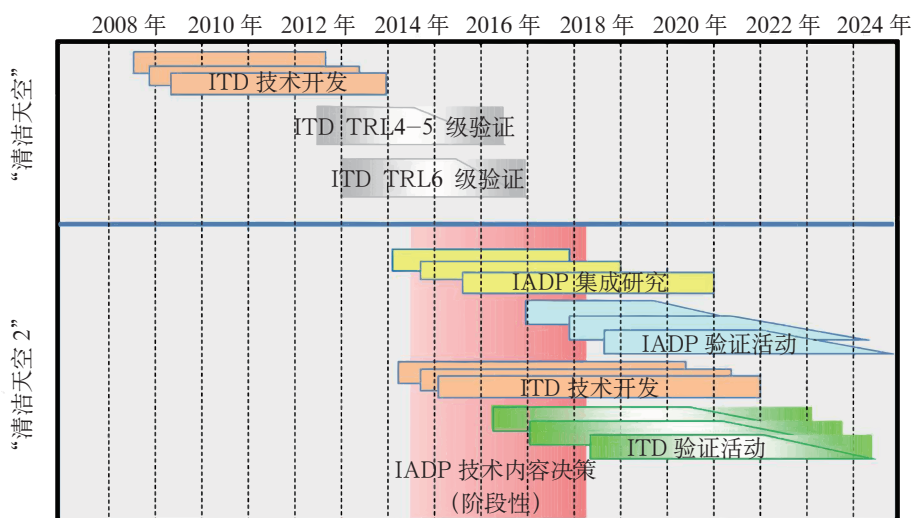


图4 “清洁天空”计划进度安排

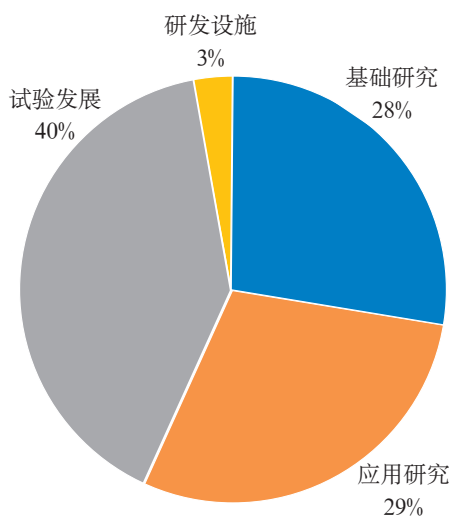


图5 美国政府2021财年研发经费用途分配

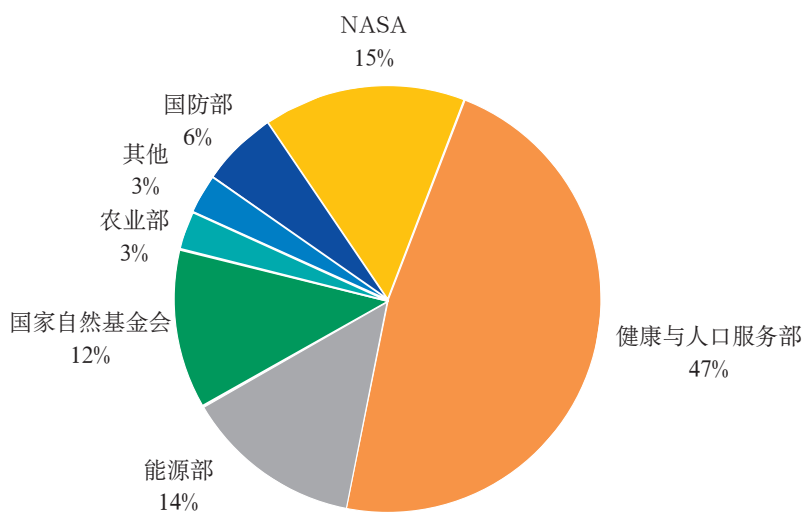


图6 美国政府2021财年研发经费部门分配

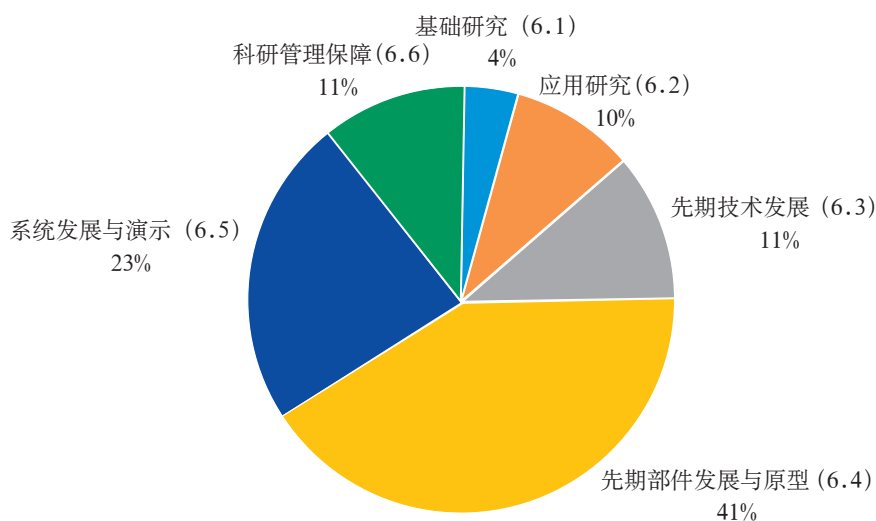


图7 美国国防部2021财年研发经费比例

费比例可以参照政府的科研经费支出。根据美国白宫发布的2021财年预算，在总计1655亿美元的政府研发经费中，基础研究和应用研究分别占28%和29%，针对产品的试验发展费用占40%（见图5）。在基础研究经费中，健康与人口服务部占到近一半，与航空相关的NASA和美国国防部(DoD)合计仅占21%（见图6）。在DoD的研发费用（不包括6.7类作战使用发展和6.8类软件和数字技术试点项目）中，基础研究（6.1

类）、应用研究（6.2类）和先期技术发展(6.3类)合计占25%（见图7）。

IHPDET计划的总经费为50亿美元、平均每年3亿多美元，经费稳定、持续多年的特点是其成功的根本所在。从计划一开始即约定政府拨款和企业投资各占一半，前者主要来自空军、海军、陆军和NASA。IHPDET计划并没有专门的经费渠道，政府各部门仍按原来的预研渠道下拨，企业则按销售额的一定比例提取。VAATE计划的投资为12年

37亿美元，ATTAM计划第一阶段为8年7亿美元。

欧盟框架计划的经费由欧盟统一编列预算和管理，并由欧盟和企业对等投入，累计投入经费近2000亿欧元。从第二框架开始，航空技术研究的投入就不断加大，总投资已经超过80亿欧元。在“地平线2020”中，“清洁天空2”总投资40亿欧元，其中欧盟政府投资17.5亿欧元，其余由企业自筹。此外，在合作项目中还立项了55个航空研发项目，共计经费2.13亿欧元，其中与推进系统相关的项目有10个，约占总数的1/5，经费总额0.44亿欧元，占总经费的21%。

参与主体的类型

美欧的重大科技专项计划参与主体类型和范围很广，除传统的航空发动机企业之外，飞机制造商、科研机构、高等院校和中小企业也广泛参与，并专门设有面向小企业的创新计划，从而为区域内的科技创新能力和工业基础能力提升发挥引导作用，带动创新链和产业链的持续发展。

美国的几个重大专项计划均由

军方或政府科研机构管理，同时这些机构自身也参与研究工作，并负责大型基础设施的运营和服务。计划执行的主体是GE航空集团、普惠公司、霍尼韦尔公司、罗罗北美公司等航空发动机制造商，波音公司、洛克希德-马丁（洛马）公司、诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司等飞机制造商也参与其中。此外，美国还长期实施小企业创新计划（SBIR），各个发动机预研计划也都落实了这方面的要求，如ATTAM计划就鼓励1500人以下的企业参与申请，同时提供政府试验设施供合同商使用。

欧盟框架计划航空研究项目的参与单位数量较多，除了传统的航空企业、科研机构 and 高等院校之外，近年来欧盟对中小企业（少于249人）投资的力度不断加大，并在“地平线2020”中设立企业与中小企业竞争力（COSME）计划。从FP6~FP7，参与的中小企业数量占比从18.1%增加到21.2%，获得欧盟投资金额的占比从10.0%增加到15.8%，在“地平线2020”（FP8）中这一比例进一步上升。在“清洁天空2”计划共计912个参与方中，中小企业达到246家（占26.9%），此外，还包括250家工业企业、232个研究中心和184所大学。

组织与运行机制

美欧航空发动机重大科技专项计划一般均设有专门机构进行管理，并建立涵盖政府、军方、工业界所组成的咨询机构。此外，还设有负责本计划与其他科研项目协调的机构或计划，从而确保研究内容的聚焦和有效。

IHPTET计划的主持单位是DOD，由AFRL负责具体组织和管理，政

府和工业界组成联合执行委员会对计划进行监督和指导。此外，还设立由全美6家发动机企业的代表组成的工业咨询组，负责对执行委员会提供咨询意见。为有效地利用各部门的技术成果，使有限的资源得到合理利用，使投资收益最大化，NASA、DoD、美国能源部和工业部门成立了推进与动力联盟，目的是加强各个技术计划之间的协调和合作，使这些部门的研究工作能够获得更广泛的应用和更快速的转移，以更高效地平衡项目的投资。

欧盟“地平线2020”计划的运行主要包括规划层面和计划层面两个部分，这种由框架计划、行动计划和具体项目构成的体系，为保障欧盟框架计划的组织实施提供了重要的保障。从框架计划航空研究项目的管理来看，欧盟通过科学的立项评审方法、松紧适度的管理流程、信息化的管理手段等提高了项目管理水平。同时，适时对框架计划执行过程中的阶段成果进行评估，对于确保项目整体顺利高效实施也起到了非常重要的作用。在项目管理方面，欧盟政府委托下属的执行机构——创新与网络执行局（INEA）进行航空科研项目的管理，管理过程可谓是松紧适度、手段创新。整体上看，欧盟航空科研项目对研究人员的技术决策权约束较少，仅在必要的财务、知识产权等方面进行了严格限定。

启示

综上，可以看出重大专项的实施，需要有明确的目标和指标、投入和规划以及管理理念和方法。

重大科技专项计划要有明确的

目标和指标。美欧航空发动机重大研究计划均以国家顶层战略为导向，以提供未来先进平台的动力解决方案为目的，设定了可量化的目标，并据此分解出关键技术及其指标。美欧的重大研究计划均聚焦在预先研究阶段，不与型号研制挂钩；更加突出主要目标，也有利于计划的组织和实施；能够用科学的规划论证方法推动技术进步，避免受到平台需求的变化引起研究内容的重大调整。

重大科技专项计划要有长期稳定的投入和计划。美国在军用航空发动机技术研究计划的论证中，一般预计的周期都在12年以上，并划分为2~3个阶段，一方面体现了技术进步的台阶，同时也能保持持续的经费支持。欧盟框架计划不仅持续实施，经费连续上涨，而且研究周期也不断延长，以适应更加具有挑战性的技术研发项目需要。计划的经费投入要保持一定的比例，特别是预先研究要保持在总研发经费的25%左右，这也是长期形成的规律性认识。

重大科技专项计划要采取先进的管理理念和方法。美国在IHPTET计划中采用的GOTChA方法和“专业技术管理机构+联合咨询机构”的组织管理模式对提升计划的有效性发挥了重要作用，其长期规划、分段实施的方式也被后来的计划所继承，并被借鉴用于火箭推进技术的发展中，产生了几乎是其翻版的“综合高性能火箭推进技术”（IHPRPT）计划，对美国火箭发动机技术的发展起到了重要推动作用。

航空动力

（晏武英，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机战略与情报研究）