

航空发动机试验验证体系建设

Construction of Aero Engine Testing System for Verification and Validation

■ 黄劲东 / 中国航发研究院

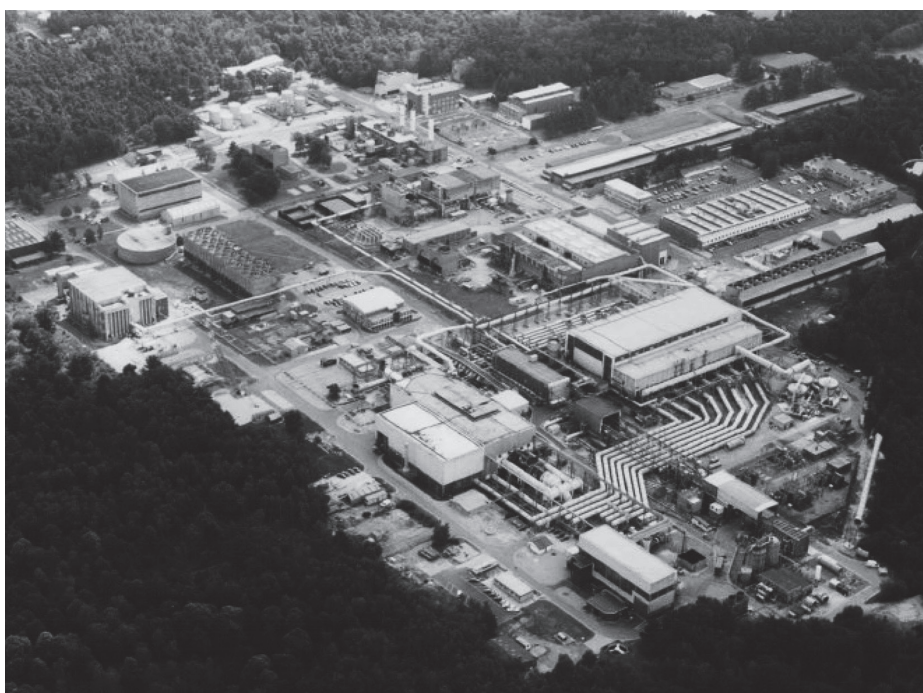
第二次世界大战以后，世界军、民用航空发动机全面进入喷气时代，西方发达国家和苏联都相继投入巨资开展技术研究和大量试验验证，由此引来一轮大规模的以试验设施为核心的试验验证体系建设。

众所周知，航空发动机内部工作环境异常恶劣，外部运行条件复杂多变，气动、热力、结构、材料和控制等多学科相互交织，至今仍无法完全从理论上准确描述其多场耦合特性；而发动机的零件高达数万之多，任何一个出问题都可能引发灾难性后果。因此，在发动机正式投入使用前，必须对其性能、功能、强度以及可靠性进行充分考核，以便安全、有效、合理地使用；对一些计算分析难以精准刻画的机理问题，只能通过大量试验得到经验、半经验关系式来逐步逼近真实、修正计算结果。实践证明，试验验证体系在航空发动机技术和产品发展中起着举足轻重的作用，并不断产生新的需求，将试验测试技术推向新的高度。同时，在大量试验数据的支撑下，其验证设计、校核工具的能力不断提升，对物理机理的认识不断深化，发动机数值仿真能力逐步增强并向实用化、部分替代物理试验的方向发展，最终形成地面试验、虚拟试验和飞行试验互为补充、互相印证的体系格局。

航空发动机试验验证体系建设的历史发展脉络

主要国家用30年时间基本完成大型试验设施建设

从20世纪50年代冷战开始至



NGTE鸟瞰图

20世纪70年代，美英法苏等国家投入巨资抢占航空发动机这一技术制高点，以当时的英国国家燃气涡轮研究院（NGTE）为例，在皮斯托克基地共建成5座高空台，基地的气源、循环水和电力等配套能力在此期间也达到最大状态。此后，中国、日本和韩国也加入航空发动机研发行列。

同时，GE公司、普惠公司、罗罗公司和赛峰集团等著名发动机制造商也开展了大量试验设施建设用

于研发、定型/取证和批产交付，包括飞行试验台、高空试验台、整机室内/露天试验台、主要部件系统性能试验台和结构强度寿命试验器等。典型的公司试验基地有GE公司位于美国辛辛拉提的皮勃斯试验基地，普惠公司位于美国东哈特福德的威尔古斯试验基地（现已关闭），罗罗公司在英国的哈克诺（主要设施已关闭）和达比试验基地，赛峰集团位于法国巴黎维拉罗什的装配/试验基地。

GE 公司露天试车台



世界主要国家大型航空发动机试验设施

国家	基地名称	建设情况
英国	英国国家燃气涡轮研究院 (NGTE)	5座高空台及其他试验设施, 20世纪50年代即建成自由射流式高空台, 2008年关闭
美国	美国国家航空航天局 (NASA) 格伦研究中心	高空台、地面台及部件试验器等
	美国空军阿诺德工程发展中心 (AEDC)	世界上最大的航空航天试验基地, 包括世界上最大的高空台
法国	法国国家航空航天研究院 (ONERA)	欧洲最大的风洞, 发动机部件试验器
	法国航空发动机试验中心 (CEPr)	隶属法国武器装备总署 (DGA) 的航空发动机鉴定与试验中心, 欧洲最大的发动机高空模拟试验台和参数最高的全环燃烧室试验器
德国	德国航空航天研究中心 (DLR)	航空发动机主要部件试验器
	斯图加特大学飞机推进系统学院 (ILA)	1座高空台和1座低压中温涡轮试验器
加拿大	加拿大国家研究委员会 (NRC)	1座高空台、结冰防冰试验器、主要部件试验器等
俄罗斯	俄罗斯中央航空发动机研究院 (CIAM)	大型高空模拟试车台、大型双涵道双转子压气机试验台、全尺寸涡轮试验台等
日本	日本航空航天研究院 (JAXA)	高空台、整机台、风扇压气机试验器等
韩国	韩国航空航天研究院 (KARI)	一座小型高空台
	韩国国防发展研究院 (ADD)	国防部直属装备研究中心, 1座高空台, 用于中等推力军用涡扇发动机试验、核心机试验以及火箭发动机试验
中国	中国航发燃气涡轮研究院等	首座高空台于1995年建成, 整机试车台和部件/系统试验器

政府主导完成试验验证体系建设

在喷气发动机快速发展的20世纪60—70年代, 时任英国首相哈罗德·威尔逊亲自参加了NGTE第四座高空台 (Cell 4) 的竣工仪式。在他看来, 现代化的英国要在白热化的科技创新中铸就, 而航空发动机将在这场技术革命中扮演至关重要的角色。

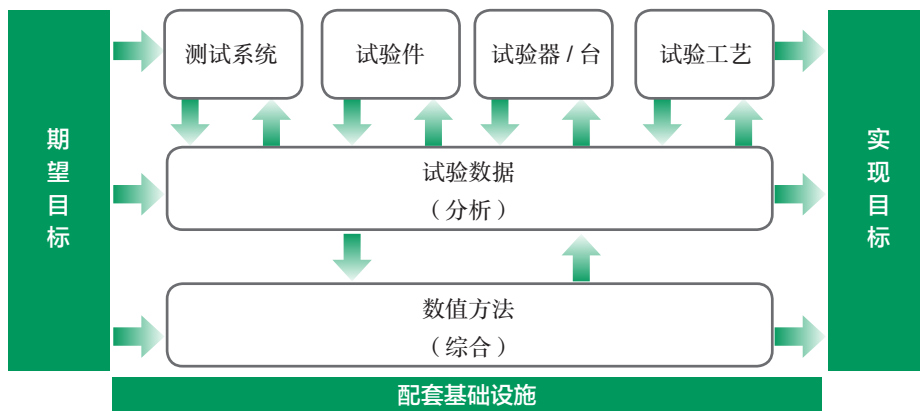
归纳起来, 航空发动机技术研究和试验验证体系, 无一例外都是在国家战略的引领和政府、企业资金的长期支持下完成构建, 历经80多年的发展, 形成政府机构 (包括军方研究机构)、发动机骨干企业、院校3级组织架构, 覆盖基础和预先研究、应用研究、产品研发、状态鉴定或者适航取证、外场综合保障全过程。

进入20世纪90年代, 由于冷战结束后军备竞赛减速及经济全球化的影响, 各国政府不再大规模集中投入发动机试验验证设施建设, 但仍安排专项计划统筹支持设备翻新和技术升级, 如美国国家航空航天局 (NASA) 的航空试验计划 (ATP) 支持喷气推进实验室 (JPL) 改造了可模拟高空冰晶的结冰试验器; 美国空军阿诺德工程发展中心 (AEDC) 扩建了世界上最大的高空试验台。

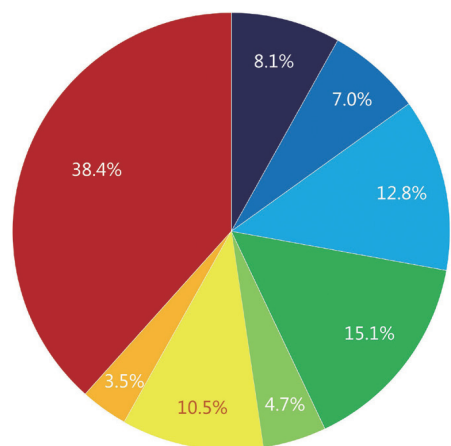
欧美还成立各类委员会协调不同部门和不同国家之间的试验设施, 统一标准、补充完善试验验证体系, 并推动地方政府以增加就业机会的名义资助各大公司的关键设备设施建设。

NASA 与美国国防部试验资源管理中心 (TRMC) 联合建立国家航空试验合作委员会 (NPAT), 站在国

家战略的高度协调政府与军方在各自管理的航空试验设施方面的合作。美国国家科学技术委员会（NTSC）航空科学技术分会（ASTS）组建了一个由NASA、TRMC、美国联邦航空局（FAA）等机构参与的跨组织基础设施工作小组，分别研究制订地面试验、飞行试验、仿真、高端计算设施和网络基础设施建设规划。



试验验证体系内涵



■ 飞行台 ■ 材料 ■ 其他 ■ 推进系统
■ 模拟器 ■ 结构 ■ 风洞 ■ 超级计算机

欧盟86台战略和关键设施分类占比

欧盟通过欧洲运输联合会（AirTN）组织专家专题研究航空行业（含发动机）基础设施建设，制定先进性、独特性等系列判定准则，把欧盟现有的大型风洞、推进系统（含部件）、结构强度、大型仿真能力、飞行平台和空管等6个领域的设备设施分为战略、关键和普通3类，强化对前两类设备的升级改造投入，以继续保持其世界领先水平，并在全欧盟统筹使用，目的是让这些基础设施在实现欧盟“航迹2050”（FlightPath 2050）计划目标中发挥关键作用。

航空发动机试验验证体系

的主要特征

技术成熟度与试验验证体系高度关联

试验验证体系由试验器、试验件、试验工艺、测试系统、试验数据处理分析以及试验结果的数值分析组成，并由配套水、电、气等基础设施和严密的管理来支撑试验器的安全、高效运转，实现从高质量数据采集到获取信息、提炼知识的演进。

在发动机技术成熟度（TRL）分级中，TRL 1 ~ 3为基础研究，指认识自然现象，揭示自然规律，

获取新知识、新原理和新方法的探索性研究活动并开展概念验证试验，大多处于技术发展前沿，不确定性因素多、风险大、失败可能性也大，一旦突破则可能在某一技术领域取得显著进步，甚至给产品发展带来新的变革。TRL 4 ~ 6是指为研究技术可行性和产品适用性而开展的研发活动，是技术成熟过程中最关键、最复杂的阶段，这个过程的技术研发活动包括单项技术和综合技术的试验验证。TRL 7 ~ 8是指为研究产品适用性和效能有效性而开展的技术验证、技术攻关

TRL	阶段说明	关联活动
8	运营使用	运营和售后服务 证后工程
7	取证试验	
6	飞行试验验证 / 整机高空台试验	型号研制 适航取证
5	系统集成试验验证 (核心机地面、高空台 / 整机地面试验)	
4	部件试验验证	集成验证，开始 进入型号研制
3	实验室试验	
2	概念验证试验	零部件级试验， 关键技术研发
1	概念形成	
0	基本原理	概念设计和方案 筛选
		专家建议和分析报告， 一些基础试验

技术成熟度分级

活动，处于产品工程研制阶段。新发动机投入使用初期（TRL 9）会暴露大量性能、结构强度和维修保障等问题，需进行外场信息反馈、设计改进并部分重复验证直至发动机步入成熟期。

将发动机技术成熟度与用于验证的试验设备、试验件和相应测试要求、试验工艺等建立起关联关系，航空发动机试验验证体系的技术架构也就清晰了。

性能和可靠性并重的试验验证流程

发动机标杆企业研发阶段典型的试验验证流程，始于经确认的发动机产品需求，结束于合同要求的性能、可靠性、部/附件等得到充分验证，加工制造、装配分解、试车和

外场保障的工艺标准、作业指导书等体系文件得到一一证实，体现在最终交付产品前，从流程上保障取证/定型要求和用户要求，装配和维修技术，产品的性能和可靠性得以全面验证，并凸显产品全生命周期管理的系统工程思想。

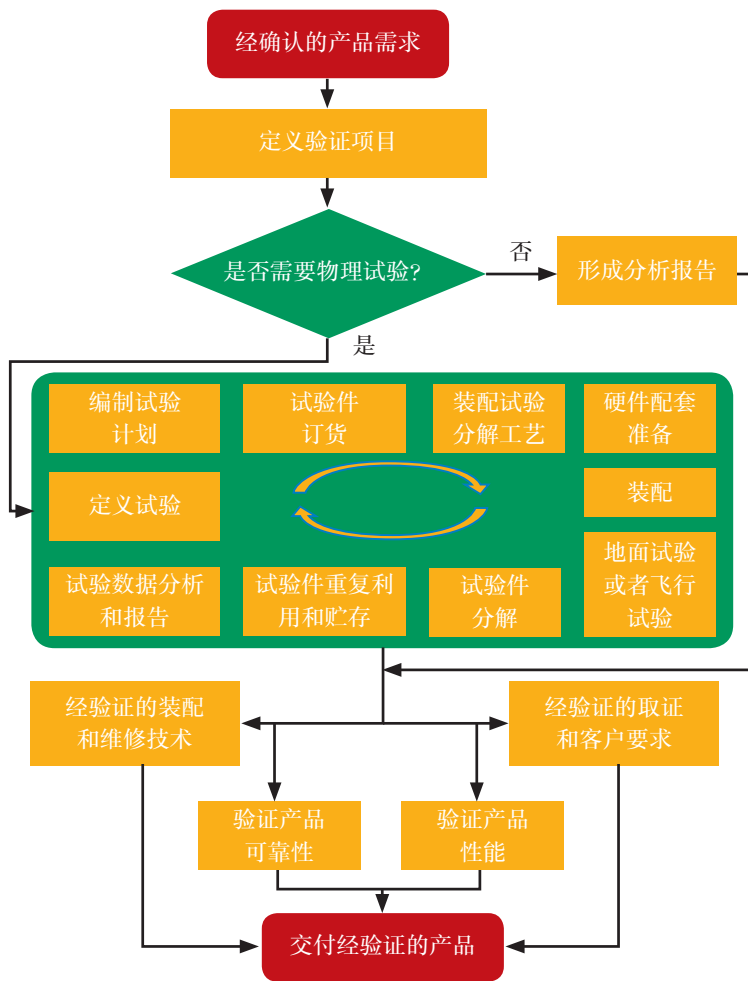
发动机公司与大学建立紧密、互补的合作关系

几家著名发动机公司无论有无自己的技术研究中心，都围绕公司核心能力积极支持建立联合的大学

研究中心（UTC）或者大学战略联盟（USA）开展新技术、新概念的研究和验证工作，谋求在全球范围内控制创新技术研究资源。

GE公司与斯坦福大学、麻省理工学院等十几所高校建立USA；普惠公司与俄亥俄州州立大学建立UTC开展齿轮传动技术的基础研究和应用研究。与这些世界一流院校建立战略联盟，按选定的专业方向进行长期投资，既开展深入的学术研究，同时又面向工程解决实际问题，并为公司培养后备人才，效果非常显著。

安全、环保是现代民用航空发



标杆企业高阶试验验证流程

设备、验证试验件	技术成熟度
ITS Karlsruhe 单头部 / 大气进气 / 冷态	2
BTU Cottbus 3 头部 / 大气进气	2
DLR Cologne EDS 单头部 / 光学测量 / 中压进气	3
DLR Cologne HPSS 单头部 / 高压进气	3
RR UK SARS 双头部 / 负压进气	4
ILA Stuttgart FANN 全环燃烧室 / 负压进气	5
RR UK/DLR Cologne 全环燃烧室 / 高压进气	5
ILA Stuttgart 核心机高空台验证	6

标杆企业贫油低污染燃烧室试验验证体系



普惠公司的飞行台

动机试验设施建设的驱动力

以安全性、可靠性为根本的适航要求拉动设备建设。民机适航取证最显著的特征是不仅关注发动机在稳态、常规飞行条件下的性能，同时考核发动机在瞬态和各种应急飞行条件的表现，在各类失效模式和性能衰退状态下发动机能否安全可靠工作。飞行过程中已经发现甚至引发灾难的案例，如鸟撞、侧风、包容、结冰、吞水和吞冰等，被一一写进适航条款，要求设计方通过试验证实发动机有足够的应对能力。为了满足相关适航条款，各种确保飞行安全的试验方法和特种试验设备层出不穷，为设备建设持续提出新的需求。另外，对发动机进入运营后的日常保障，局方也明确须建立可靠性管理机构和控制系統，加强发动机运行可靠性和性能的监控，及时调整维修计划，恢复和保持发动机的固有可靠性水平。因此，研发阶段民用发动机可靠性验证要求很高。

环保要求也是民机试验设施建

设的重要依据。国际民航组织(ICAO)及其下属的环境保护委员会(CAEP)制定的污染排放规定，是民用航空发动机能否取得适航认证的又一关键。著名的“协和”号超声速客机被停飞的主要原因：一是噪声太大，民众无法接受，许多城市不允许它从社区上空飞过；二是污染物排放很高，没有采用低污染燃烧技术；

三是发动机油耗太高，非常不经济。前两个原因都与环保有关。随着人们环保意识的不断增强，噪声、污染排放适航标准也不断提高，相关的设计和试验验证技术不断推陈出新，试验设备逐渐增多。

面向成本的设计、试验对基础设施建设提出了新的要求

随着航空业进入激烈的市场竞争状态，主要发动机制造商的产品研发理念从单纯追求技术卓越朝着面向成本的设计和试验转变。以结冰试验为例，过去主要在高空台上进行，为了营造低温、结冰的环境，要配备庞大的设备、消耗惊人的能源才能满足试验对供气、制冷、干燥等能力的要求。据介绍，为完成这样一次适航试验将花费千万美元。昂贵的成本迫使发动机制造商另辟蹊径，不约而同地在临近北极的加拿大曼尼托巴省建设专用的结冰试验台，以充分利用当地极端气候和政府优惠条件来节省试验成本。而且，原本是竞争对手的普惠公司和



GE 公司高温高压燃烧室试验器

罗罗公司还合资建了结冰试验台，在省钱上达成高度一致。

长期以来，发动机制造商将退役飞机改造为自主飞行试验平台，也是为了降低发动机特别是大涵道比发动机高空台试验成本。常见的流程是：在高空台上进行充分的核心机试验，在地面室内台和露天台完成整机试验并进行比对，最后上高空台、飞行台进行考核试验，这样可以节省设备和试验费用。当然，随着测控技术和改装技术的提高，在波音747改装的飞行台上可以测试比地面台更多的参数，而且可以在装机条件和真实飞行环境下提前考核发动机的工作稳定性和可靠性，以及瞬态、过渡态等极限工况，切实加快发动机的研制进度。

新概念、新技术引领基础设施建设

NGTE的第四个、第五个高空台分别是为罗罗公司超声速客机用奥林巴斯大推力涡喷发动机和RB211三转子发动机而建；GE公司为了试

验全新的GE9X发动机新建了进口压力超过6000kPa的燃烧室试验器；日本三菱重工（MHI）建成直联/自由射流-吸气式发动机高空台，开展冲压发动机试验研究。

航空发动机试验验证体系的未来发展

未来具备高机动性、隐身、超声速巡航等特征的新一代战斗机的制空和对地攻击能力仍然无可替代，但在空天地一体化作战模式的牵引下，各类主战机种将在更广阔的空间、以更高的速度开展体系和体系的对抗，飞行器的高超声速将成为一种新的隐身；民用航空器将大幅度减少CO₂/NO_x排放和噪声，2050年实现碳中和的目标；制造业数字化转型正在彻底改变企业研发、运营和管理模式。因此，未来军、民用飞行器动力装置将呈现高速化、电气化、数字化和智能化的特点，航空发动机试验验证体系未来发展也将相应地发生如下几个方面的变化。

常规试验测试技术进一步升级换代

完整且不断提升的试验验证体系对航空发动机技术领先和创新产品开发起到了强有力的支撑作用，特别是在计算机和信息化手段并不发达的20世纪60—70年代。历史经验表明，试验验证仍将在航空发动机研发领域发挥重要作用，并在环境试验、隐身试验、非接触测量、高性能智能传感器、动态过程参数同步测量、试验过程智能化/自动化等技术方面再上台阶。罗罗公司投资9000万英镑历时3年建成了目前世界上推力最大的多功能整机试车台（80号台），最大流量为4500kg/h，可试推力达到690kN、采集10000多个发动机参数、配备140000L的燃料箱，并可使用可持续航空燃料（SAF），配备1台功能强大的X射线机每秒拍摄30张图像。强大的数据采集和分析处理能力为研发工程师提供了足够充分的发动机各关键部位稳态、动态信息，直接支撑发动机的优化设计和外场使用维护。

高超声速试验设施有新的需求

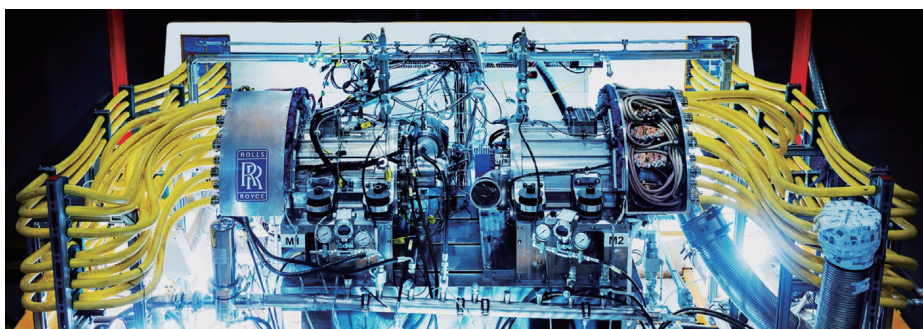
目前，涡轮基组合循环发动机（TBCC）作为常规起降、低成本、可重复使用的装备仍处于演示验证阶段，但飞行器对速度的要求已提升到马赫数（Ma）7~8的水平；还涌现出如“进气强预冷+涡扇/火箭发动机”组合循环等更先进的高超动力概念。因此，相关试验验证技术和设备的更新换代将是未来的发展热点。如高超声速飞行试验平台，由已故亿万富翁保罗·艾伦创立的平流层发射（Stratolaunch）公司研发，一次飞行可支持3具可重复使用的高超声速飞行器Talon-A发射，



罗罗公司建成世界最大的多功能试车台



高超声速飞行试验平台



罗罗公司混合动力系统试验台

计划2023年具备发射能力。

混合动力系统试验平台投入使用

2021年年初，罗罗公司宣布世界上首台兆瓦级混合动力系统（PGS1）已完成总装工作，即将在新改装的TP108试验平台上开展地面试验，为后续飞行试验奠定基础。

虚拟试验技术正在加速发展

在航空发动机设计阶段和定型取证阶段开展虚拟试验，有助于产品多学科优化并大大缩短研发周期、降低成本。因此，开展虚拟试验方法、工具和流程关键技术研究，有望较大幅度地提升虚拟试验的精度和置信度，实现部分替代物理试验的目标。欧盟在“清洁天空2”项目中专

门安排了虚拟试验技术研究，包括虚拟建模、虚拟适航等关键技术；法国武器装备总署（DGA）下属的航空发动机试验中心与法国著名的虚拟样机开发商ESI公司合作，利用后者的SimulationX动态多学科建模仿真平台，开发航空发动机虚拟试验台SIMATMOS，可以模拟真实飞行条件下发动机的运行并预测其性能，还可以用这一平台来培训试验操作技师，预先检查物理试验的可行性。

试验验证数字化转型和试验数据云化

发动机全生命周期实现研发、试验和服务的数字化转型，使区块

链、大数据、云计算、人工智能、机器学习等数字化技术与传统叶轮机技术相结合，形成数字孪生（Digital Twin）的综合数字环境。赛峰集团在法国南部伊斯特尔的整机露天试车台实时采集的发动机试车数据，仅用2s就传送到750km外的设计部门，与设计数据、室内整机和部件试验数据进行对比分析。

罗罗公司80号试车台，强大的数据采集系统每秒钟采集20万个样本，每分钟记录13亿组数据，能以最快的速度将数据直接传送到罗罗公司私有云上，供世界各地的工程师分析。而在云上，由发动机设计、试验和实时运行数据构建的虚拟数字孪生平台可以模拟各种物理试验难以企及的运行场景，监控正在执行飞行任务的发动机健康状态并及时采取返航/备降等措施避免事故，做出准确的在翼修理或者下发返厂维修的决策，实现预测性维修，大幅度提升发动机的可用率和可靠性。

结束语

建设完备的世界一流航空发动机试验验证体系是确保我国航空工业取得决定性竞争优势的关键要素，是实现国防和军队现代化不可或缺的重要组成部分，也是未来节能减排、实现碳中和目标的重要抓手。深入分析研究世界航空发动机试验验证体系建设的历史和未来方向，将有力促进我国航空发动机试验验证体系建设沿着正确的轨道迈向新征程。

航空动力

（黄劲东，中国航发研究院副院长，研究员，主要从事航空发动机试验测试、服务保障技术和发展战略研究）