

航空发动机试验与测试技术发展分析

Test and Measurement Technology for Aero Engines

■ 单晓明 高倩 魏秀利 / 中国航发动研所

对气动性能、总体结构、各部件及系统进行相应的试验验证,能够实现对新型航空发动机性能、安全性、可靠性、耐久性和可操作性的考核。测试则是贯穿发动机试验各个环节的关键技术,只有通过测试才能快速而准确地获取发动机的状态和性能。

航空发动机试验测试技术是集流体力学、热力学、计算机、电子学、控制学、材料学、结构力学等为一体的综合性学科。无论在研制过程中,还是在批产、使用过程中,发动机试验都是一个至关重要的环节,大多数的技术质量问题可以在这个环节暴露。一方面必须要按照相应规范和要求,开展大量考核性验证和试验,满足产品安全性、可靠性和使用寿命要求;另一方面由于实际工作的复杂性、使用状态的差异性、客观现实的不适应性等原因,目前还不能完全通过数值仿真和分析预测来解决发动机全包线范围内的所有问题。因此,在航空发动机技术发展过程中,试验及测试贯穿于研制过程和技术发展的各个环节且占比依然很大。建设满足基础技术、应用技术、产品研制和使用发展等方面要求的、完整且能逼真模拟航空发动机实际使用工况的试验测试能力体系,成为发动机技术进步的重要标志之一。

航空发动机试验与测试技术特点

航空发动机试验特点

航空发动机试验种类很多,试验设备、试验条件和试验环境等也是千差万别。按试验对象,可分为



涡轴发动机试车

零部件试验、系统试验、核心机试验、整机试验。按学科专业,可分为气动、燃烧、换热、控制、机械传动、结构强度、材料、工艺等各类试验。按最终目的,可分为科学研究试验、型号研制考核试验和批生产发动机试验。按试验项目,可分为基本性能试验、基本功能试验、可靠性试验、环境试验、生存能力试验。

由于试验种类多、试验项目多,所以航空发动机试车台也迥然不同,整机试车台主要有性能试车台、启动规律试车台、姿态试车台、高空模拟试车台、电磁兼容试车台、轴功率试车台、螺旋桨试车台等。由于试车台的功能不同,所包含的系

统也千差万别,如台架系统、进气和排气系统、液压加载系统、燃油系统、滑油系统、电气系统、测试系统等不尽相同。

航空发动机测试技术特点

航空发动机测试技术涉及到的技术包括信号传感、信号处理、信号传输、数据采集处理、数据分析、数据存储技术等;涉及到的学科包括流体力学、热力学、计算机技术、光学技术、电子技术、材料技术等综合性多学科技术。

随着发动机性能、可靠性、安全性和经济性等要求的提高,发动机对测试技术的要求也越来越高,主要呈现出以下特点:一是测量参

数种类繁多，涵盖了温度、压力、流量、密度、湿度、推力、扭矩、位移、转速等气动热力参数，还包括振动、噪声、应力、间隙等强度振动参数和电压、电流、频率等电工参数；二是发动机测点数越来越多，整机上测点数动辄几百个，有的多达上千个，因此测试引线复杂困难；三是发动机内部流场环境复杂多变，气流温度达到2000℃，气流速度超过600m/s（不含加力），这些都给发动机测试带来严苛的挑战。因此，测试传感器和系统必须具备准确度高、灵敏度高、通道多、小型化、量程广、抗恶劣环境、非接触、动态响应好等特性才能适应航空发动机研制和使用要求。

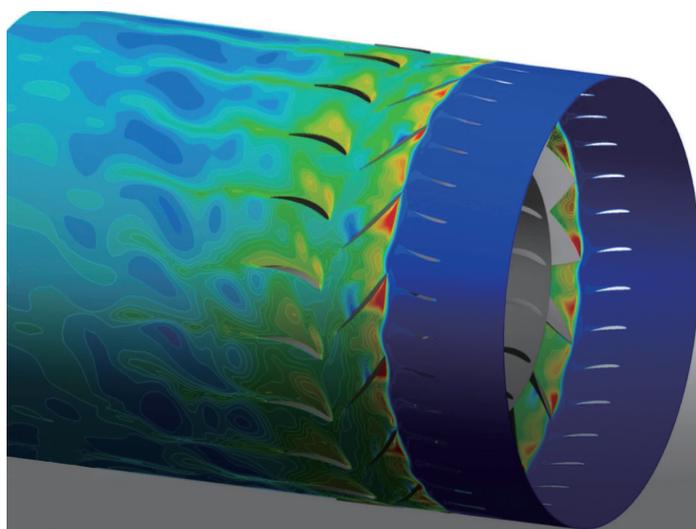
除上述共有的特点外，中小型航空发动机测试工作具有更高的复杂性。中小型航空发动机具有结构紧凑、流道狭小、转速高、尺寸小、负荷大等特点，可实现的测量手段受到很大的限制。在发动机气动参数测量方面，受到堵塞比的限制，要求探针和传感器的尺寸尽可

能小，有些结构空间小到很难布置探针。在三维流场测量方面，激光风速仪和热线风速仪仅能够在特定的场合下使用，三维气动探针与位移机构配合使用的方法仍是目前普遍使用的测量手段，通常要求三维气动探针小型化、微型化（如五孔探针的探头直径仅为2.5mm），尽量减小其对流场的影响。在流量测量方面，由于中小型航空发动机的流量小，压气机放气、发动机级间引气和涡轮叶片冷却气等流量非常小，无法模拟真实工况对流量测量设备进行校准，因此气体小流量的精准测量一直是个难题。在动应力测量方面，由于中小型航空发动机零部件工作环境恶劣，动应力测量面临着高温、高转速、富油、引线空间狭小等难题，如涡轴发动机压气机叶片的多级轴流叶片小而薄，甚至小于剃须刀刀片，叶片上贴片和引线的难度非常大。

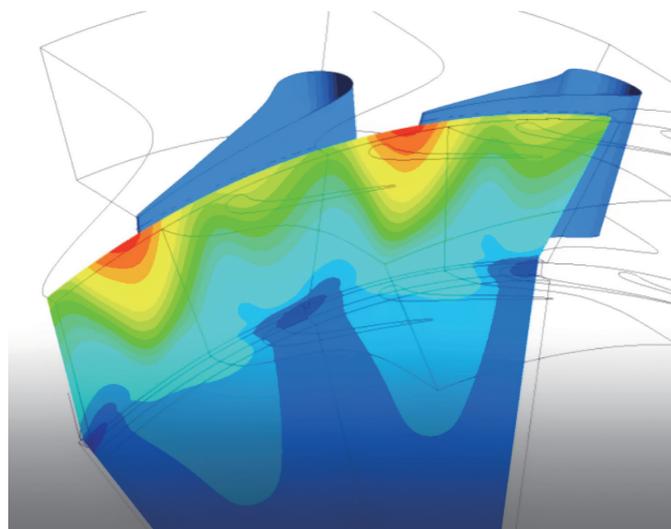
试验发展现状及面临的挑战

为了适应航空发动机技术的发展需

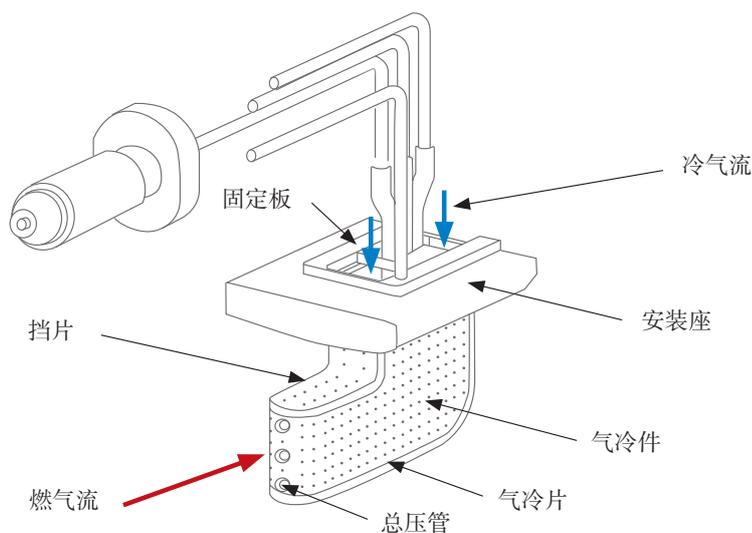
求，需要投入巨额资金建立规模庞大的试验基地和高水平试验设备。在美国，从政府和军方到企业和高校，形成了包括基础研究、应用技术研究、产品研制和考核取证等在内的完整的航空发动机技术发展体系，并建设了大量的试验研究设施。航空发动机试验设备数量和模拟范围能够满足所有型号发动机和先进概念验证的试验需求，涉及气动、热力、高低周疲劳、结冰、吞咽、污染检测等内容，具备综合验证航空发动机及推进系统的气动性能、结构特性、动态特性、环境特性的能力。发动机工作条件试验模拟的逼真程度高，涵盖稳态飞行条件模拟、过渡态飞行轨迹模拟、大气结冰条件模拟等。在试验智能化技术方面，不仅建立起可操作性强、业内统一的成套试验测试技术标准，而且在发动机的验证试验策划、试验设备控制、试验流程组织、试验过程操作、试验数据采集管理、试验结果分析、试验状态在线监控与设备健康管理等多方面实现了自动



三维流场测量



压力场测量



高温测试探针

化、数字化、网络化、智能化，实现多学科综合，多系统协同，虚拟试验与实物试验一体，并随着计算机技术的进步，诞生了数字/试验综合评估技术。随着高速网络、高性能仿真计算能力的出现，实施了推进系统数值仿真试验台。

目前，国内航空发动机已开启了自主研发的新机遇期，发动机试验需要以设计定型或适航取证为牵引，针对不同的试验验证需求开展相应的试验功能研究。航空发动机试验技术方面，国内已掌握了发动机性能调试试验、性能匹配优化试验、节流特性试验、瞬变特性试验、进气压力畸变试验等性能试验技术；掌握了发动机起动试验、引气试验、电机加载试验、液压加载试验、发动机燃/滑油加温试验、进气温度调节试验等功能试验技术；掌握了发动机疲劳试验、振动和应力特性试验、滑油中断试验、电源失效试验、超温/超转/超扭试验等可靠性试验技术；突破了吞鸟和吞冰试验、吸入沙石试验、吞水试验、

吞烟试验、侧风试验、排气污染试验等使用环境试验的部分关键技术；逐步开展了雷达截面测量试验、红外辐射试验、自动化试车控制技术、电磁干扰试验、噪声试验等生存能力试验的关键技术研究，并取得阶段性成果。

我国航空发动机试验技术主要面临以下问题与挑战。

一是试验基础技术薄弱。复杂环境、吞咽、寿命预测等试验基础技术薄弱；发动机生存能力试验及其技术研究开展明显不足；发动机动态气动特性和稳定性试验技术深度不够；虚拟试验和故障诊断能力开展较晚，试验设备故障诊断技术基本处于空白。

二是缺乏特种试车台或试验设备，一些特种试验目前还无法开展，如发动机整机结冰试验、涡桨发动机1P载荷加载模拟试验、整机包容性试验和温度畸变试验等。

三是试车台自动化水平较低。我国航空发动机研制起步较晚，初期发动机寿命都非常有限，国内试

车台普遍存在自动化水平较低的问题。随着航空发动机寿命快速增加，整机试验时间越来越长，人力资源缺乏和试验周期加长的矛盾日益凸显。

四是部分试验设备仍需依赖进口。如高速水力测功器、高精度阀门、高速测扭器等试验设备在一定程度上仍无法实现自主生产。

测试技术发展现状及面临的挑战

对于测试技术，国外目前正着力开发微型化、高精度、复合式的探针以及高精度、高速度、小型化、分布式的测试仪器，并朝综合化、标准化、系列化、规范化的方向发展。在非接触测振技术方面，发动机应力遥测技术应用发展较为成熟，遥测系统应用较为广泛，最高测温达1450℃，精度可达±5℃。在高温测试方面，如欧洲的用于燃气涡轮发动机寿命优化、性能和状态监测的高温气动-热精确测量(HEATTOP)计划，专门研究航空发动机高温燃气和热端部件测量问题；此外，还开发了非接触红外光纤温度计测温系统以及黑体蓝宝石/氧化锆光纤温度计测温系统，并应用激光进行高温燃烧产物温度和浓度的测量技术。总体而言，欧美国家在测试基础研究、先进传感器研究、先进测试方法和设备研究、测试保障体系建设等方面有较为坚实的基础和丰富的经验，虚拟化和数字化试验测试技术已得到充分发展，网络化、智能化测试和诊断技术迅速发展，非接触光学测试技术已有广泛应用，基本解决了航空发动机复杂内流测试、高温环境气动热力参数测试、高速转子叶片动应力测

试、排气污染检测等难题，为发动机重要特性评估提供数据支撑和技术支持。

国内常规的发动机测试技术已比较成熟，建立了相应的测试技术体系，形成了相关规范和标准，实现了发动机研制过程中基本性能参数可测和测得准确，具备了整机和零部件试验的测试保障能力；结构强度参数测试方面，近年发展了非接触测振、高温应变测试、高温叶尖间隙测试技术，但缺少自主研发和极端环境下的准确可靠测量设备；在发动机气动/热力参数测试方面，发展了红外测温、晶体测温、非标高温热电偶测温等高温热端部件测试应用技术；压力敏感涂料（PSP）、温度敏感涂料（TSP）、粒子图像测速PIV等光学测试技术在叶栅风洞、叶轮机低速环境、粒子分离器及燃油喷嘴中开展了较多的工程应用。

经过60多年的努力，我国航空发动机测试能力有了长足发展，但从发动机的发展需求来看仍面临以下问题和挑战。

一是发动机内部复杂流动的精细化测试能力不足。目前，国内中小型航空发动机级间参数测试参数较少，叶型探针设计和加工能力有待提高；转子部件温度实时监测仍存在一定困难，晶体测温技术应用较少；高温测试技术急需突破，热流测试技术、高温动态温度测试仍需开展工程应用研究，复合材料的高温测试技术还有待进一步发展。

二是测试校准体系不健全。国内校准能力不能完全满足实际工作需求，部分校准装置老化严重，技术指标落后于型号需求，如高温气体流量的校准等。

三是早期故障预警能力较差。对于轴承故障、封严装置磨损、齿轮故障的实时监测及故障预判能力较弱；燃烧室、涡轮等高温部件的烧蚀无法开展实时监测；发动机喘振和失速等报警及预警目前仍主要依靠人工判断。

四是试验数据信息化管理与试验数据挖掘技术有待提高。目前，国内对于发动机长期性能衰减、整机试验数据分析等基本依靠人工分析。试验数据的实时智能处理与分析能力不强，对试验过程中的参数异常情况报警能力不足。

五是部分测试设备仍需依赖进口。一些常用的测试设备还需依赖进口，如压力扫描阀、温度扫描阀、高精度动态传感器等，国内相应测试设备的测量精度、稳定性和可靠性仍存在一定差距。

未来发展趋势

试验技术近期发展要以型号需求为牵引，借鉴先进的试验理念，逐步完善发动机整机试验技术体系。一是进一步完善试验技术，如自动化试车控制技术、整机电磁兼容试验技术；二是突破复杂环境模拟、发动机生存能力、智能化试车等试验急需关键技术；三是开发并完善大功率涡轴、涡桨发动机试验设备；四是开展水蒸气模拟试验技术、温度畸变试验技术、整机振动试验技术、涡轴/涡桨发动机陀螺试验技术的深化研究。

试验技术远期发展需按国家相关标准、装备试验鉴定条例和适航条款要求全面考核，建立起支撑未来航空发动机发展需求的试验能力。一是特殊环境下的关键试验技术达

到国际先进水平；二是建成发动机试验故障库和故障诊断知识库、试验设备仿真模型库；三是建成系统性强、规范健全、试验研究与鉴定手段完善的试验技术体系；四是实现智能试验和虚拟试验，建成发动机试验健康管理专家系统。

测试技术近期发展重在实现部分特种测试参数从不能测到可测；常规测试参数从可测到测得更全面、更准确。一是要实现发动机内流场精细化测量；二是要实现转子部件多参数测量，完善发动机健康监测技术；三是要实现燃烧室高温燃气测量；四是要缩小与国际先进测试技术的差距。

测试技术远期发展需探索航空发动机测试技术的新原理和新方法，实现测试技术的智能化、信息化。一是在非接触式与特种测量技术方面，实现与国际先进水平并驾齐驱；二是需建立较完备的发动机特性和故障特征数据库；三是构建完备的网络化数据综合诊断专家系统；四是实现健康管理技术智能化、信息化，实现机载、远程智能监测、诊断及预报。

结束语

目前，发动机型号研制对试验与测试的需求非常迫切，在全流程参数测量、高温部件参数测量、早期故障预测等方面的要求越来越高，对试验与测试的基础技术研究需更加重视，对前沿技术（如虚拟试验、仿真试验等）的探索有待进一步加强。

航空动力

（单晓明，中国航发研研所副总设计师，研究员，主要从事航空发动机设计、试验测试以及适航研究）