

深耕基础技术 助力武器装备发展

——记航空基础技术砥砺奋进的五年

航空基础技术是指飞行器、推力系统等航空武器装备研制、生产和发展中所必需的气动、强度、材料、制造、标准、计量测试等专业技术和适航性、质量工程、科技信息等通用基础技术。

发展航空装备，基础技术先行。航空基础技术在整个航空武器装备研究过程中占据着先行性、基础性地位，直接关系到装备的战术/性能指标的实现。航空基础技术的跨越性和颠覆性创新，为航空武器装备设计和研制提供了全新的思路 and 模式，引领航空武器装备的性能提升和更新换代，推动航空武器装备发展的重大变革，促进飞行器的跨代发展。

党的十八大以来，航空基础技术领域秉持“创新引领发展，协同促进共赢”的理念，树立“强军首责”的责任担当，实施“创新驱动”战略，推进“军民融合”发展，建立了较为完整的技术体系，培养造就了一支德才兼备的人才队伍，开展了广泛深入的国际交流与合作，在航空基础技术领域取得了一批重要创新成果，为国防工业和国民经济发展做出了重要贡献。

聚焦科技创新 比肩世界一流

航空基础技术经过多年的发展，形成了包括空气动力学、结构强度、航空材料、航空制造、通用基础技术等在内的较为完整的航空基础技术体系。同时，紧密围绕航空武器装备的研制和更新换代需求，大力开展基础研究和应用研究，实现“型号牵引、技术推动”的后发式科研模式向“技术推动、型号牵引”的超前式科研模式发展的转变，取得了一大批创新性成果。

在空气动力学领域，开展了飞行器新概念布局、气动力设计、数值模拟和风洞试验等技术研究，掌握了高低速风洞试验、结冰敏感性分析与气动性能评估、大规模大批量气动力数据高性能仿真等关键技术。完成了我国航空工业高可信度气动计算软件2.2版本开发，与中国商飞联合开发的新概念布局支线飞机“灵雀”通过了大尺寸无人飞行验证，促进了相关领域科研工作的顺利开展。采用TPS动力模拟试验方法，首次实现了大型飞机从TPS短舱设计加工、到推力校准、再到模型风洞试验所有环节的完全国内实施。通过增压风洞改变试验雷诺数，获得了不同雷诺数对飞机低速构型气动特性的影响，为增压装置的优化设计以及低速气动力数据修正提供了有力依据。对接国际CFD技术的先进机构，基本实现了CFD与风洞试验的综合分析，使“多轮CFD分析优化”+“风洞定型试验”成为飞机设计的重要模式。

在结构强度领域，研制成功飞机地面强度试验结构健康检测集成系统、冰雹撞击试验系统、飞机复杂结构刚度计算技术与设计系统、飞机起落架滑跑稳定性试验系统、结构抗鸟撞试验的人工鸟弹，形成了具有自主知识产权的航空结构分析系统(HAJIF)等，为我国新机研制和改进型提供了强度设计与分析的关键技术和软件。一体化加载框架等助推全机静力/疲劳试验再上新台阶，顺利突破并完成全尺寸飞行器热耦合试验。集智攻关，实现商发风扇轴高低周复合疲劳加载。活动结构/机构可靠性试验不断完善，陶瓷基复合材料力学性能表征体系逐步建立，低、中、高应变率材料力学性能表征体系逐步完善。

在材料领域，建立了集复合材料基础研究、结构设计研发、构件研制、表征测试、技术推广与服务于一体的技术创新体系。突破了国产T800级碳纤维高韧环氧树脂合成及其复合材料制备、高韧双马树脂合成及其复合材料制备、SiC基体快速致密化和复杂结构的精确成型、纤维织物表面涂层的制备和基体的低温致密化烧结、国产高强度芳纶纤维表面物理/化学形态重构和芳纶复合材料界面性能快速表征、耐高温液态成型聚酰亚胺专用定型织物及其预成型体制备、液态成型聚酰亚胺复合材料成型工艺的模拟与优化、民机机身曲面壁板自动铺丝和长桁自动化成型、民用发动机机风扇叶片制造等多项复杂关键技术，取得了一批基础性研究成果。建立了世界上最先进的、独有的透波材料体系，拥有雷达罩电性能和隐身性能设计与仿真计算等世

界先进技术，掌握了功能结构设计、强度分析与试验、振动冲击分析试验及可靠性等六性设计技术、材料性能试验分析、质量控制及无损检测技术，实现了雷达天线罩宽频、高透波、多模制导、透波/隐身、功能/结构一体化技术的巨大跨越。

在制造技术领域，构建了以数字化制造技术、复合材料构件制造技术、塑性加工技术、焊接技术、特种加工技术、先进制造技术、检测技术、专用装备技术等为代表的先进工艺技术研发体系。突破超塑成形/扩散连接和自适应加工关键技术，在国内率先实现发动机宽弦空心叶片的研制；突破线性摩擦焊工艺和接头缺陷检测技术，实现飞机框架结构和发动机整体叶盘结构的焊接；突破钎焊质量控制技术，实现了大型金属蜂窝壁板结构焊接质量的控制。颠覆了传统的航空结构设计思想，采用电子束熔丝技术实现飞机大型整体钛合金承力结构成形，采用激光选区熔化技术实现超轻点阵结构的制造。形成壁板结构激光焊接应力和变形及质量稳定性控制方法，开发了光纤激光窄间隙埋丝焊接和激光电弧复合焊接技术，实现铝合金中厚板焊接，提升了先进武器装备轻量化制造能力。建立了有自主知识产权的大厚度钛合金电子束焊接结构完整性评价体系，实现了飞机翼身整体结构先进制造技术集成验证。提出的带筋整体壁板预应力喷丸成形方法，有效解决了国产2024铝合金材料机翼带筋整体壁板预应力喷丸成形及精度控制技术难题，全面提升了国内大型机翼带筋整体壁板的国产化水平。突破钛合金材料高精度的轴系加工和装配技术，系统开展了装配工艺、工业机器人、装配工装、编程方法、仿真系统、集成装配系统等技术研究，研制出多个自动对接装配系统，提升了我国飞机数字化柔性装配技术能力。高精度复杂冲击复位技术和长航时高精度导航技术使静电陀螺导航平台的导航精度达到国际先进水平。持续拓展新技术新专业，在仿生材料与结构制造、复合材料自修复、结构功能一体化传感、超材料等领域开展了探索性研究，并取得显著的技术进展。

在通用基础领域，编制了《国防科技工业标准化工作管理办法》等法规文件，积极推进军工行业标准化技术委员会组建，工作体系和工作机制不断优化，军工行业标准化工作得到有序开展。

开展了344项民用飞机产品定义、设计制造、通用基础和研制管理标准规范研究，其中155项已形成航空行业标准，解决了国内军民研制对标准的急需；引进了6800项民机适用的SAE国际标准，解决了我国航空标准的国际接轨问题，为适应全球供应商的民机研制模式奠定了技术基础。以军用电子产品为研究对象，重点突破电路功能可靠性建模技术、典型故障模式注入及故障影响分析方法、电路功能可靠性设计优化等关键技术，成果已应用于航空、核、兵器及家电等领域；突破了大阻尼台面研制技术、平台系统研制技术和基于坐标变换的三轴六自由度振动控制技术等多项关键技术。

在计量测试领域，拥有国防科技工业长、热、力计量一级站，建有国家和国防最高计量标准数量69项，具备6000多项计量检测能力，量值传递覆盖率达到国防系统98%；形成了惯性计量与校准、动态测试与校准、纳米计量、冷原子干涉、光纤传感和飞秒激光等前沿技术新成果；研制出掺镱和掺钕光纤飞秒激光器，攻克飞秒激光器小型化难题；突破RCS隐身几何量参数校准、隐身材料光谱发射率测量等多项关键技术，提升了飞机隐身性能系统综合评价工作能力；攻克了复合材料结构健康监测用的光纤光栅应变传感核心技术；全面掌握了飞机、发动机研制过程中计量测试现状，构建了飞机、发动机两个参数溯源链，填补了飞机专用蓝油流量、噪声等参数计量溯源能力的国内空白；突破了型号工程急需的铁鸟综合试验台、全尺寸静力/疲劳试验台、结构水平冲击试验台、航电综合试验台、整机数字化装配测量基准网等大型复杂试验和制造系统的五项现场校准技术，保证了型号研制试验工作进度和数据准确性。

践行强军首责 推动国防与国民经济建设

强军是航空工业的首要职责，支撑航空武器装备的研制和生产，是航空基础技术的重要使命。近年来，航空武器装备“井喷式”发展，尤其是以歼20、运20、歼15、直10等为代表的新一代航空作战力量相继亮相，并陆续装备部队。国人无不为之动容和激动不已，而每架战机背后都有基础技术的强大支撑，都凝结着基础技术人员的心血和汗水。与此同时，航空基础技术也在国防工业其他领域以及国民经济主战场发挥了重要作用。

国家利益至上，确保型号任务圆满完成。航空基础技术为我国军用飞机的研制提供了重要技术支撑。从航空装备设计阶段的气动试验、气动和结构优化设计，再到飞机研制后的整机强度和疲劳试验，以及贯穿研制全流程的标准、计量、情报、档案、适航性等，均有力支撑了型号研制。作为我国大型试验基地的能力优势，几乎承担了各型航空武器装备的气动力、结构强度、疲劳和环境可靠性试验任务。编制完成的3000多项行业标准被各型号飞机选用，有效地提高了各型飞机的通用化水平和可靠性。完成了多个型号的可靠性鉴定试验剖面确定、极端环境分析与预计等工作，为产品设计和试验验证提供了重要支撑。大吨位级运输类飞机全机静力试验技术、大型多段式机翼强度试验技术、大型开口结构强度/机构可靠性综合试验技术、多轮多支柱起落架强度试验技术、强度支撑数字化技术等一大批关键技术全面应用于型号研制过程中；常规测力试验、载荷试验、动力模拟试验、CTS等风洞试验为众多型号提供了可靠的优化支撑数据；不断完善型号计量师系统为核心的型号计量保障体系，将计量校准服务向航空行业厂所全面推广。

航空材料和制造技术有力保障了型号任务的完成。一方面，在飞机减重、战机性能保证、降低研制成本等方面做出突出贡献。突破了大型复合材料壁板等关键技术，成功实现我国目前投影面积最大的复合材料整体机翼壁板，实现树脂基复合材料等在飞机构件上的大规模使用，成为飞机减重的重要力量。突破了大厚度钛合金电子束焊接、钛合金壁板双光束激光焊接、大面积极蜂窝壁板整体钎焊、大曲率口盖超塑成形/扩散连接、搅拌摩擦焊等关键技术，成功应用于整体壁板、整体框等关键构件的研制，实现了机体结构的轻量化和整体化。结构功能一体化类皮肤传感器的研制为减轻机上传感器的重量和体积突破了基本的原理验证和关键技术，实现了全机最大尺寸格栅的装机应用，极大地提升了飞机隐身性能。运用电子束熔丝成形技术成功研制出飞机弧形框架类结构件，实现电子束快速成形技术在飞机承力结构上的首次应用，无模快速自由成形，减少工装模具，大幅度降低了飞机制造成本。在飞机雷达天线罩设计理论、仿真与试验方法、高精细加工等基础与关键技术方面取得重大突破。掌握电磁场与微波、结构与强度、透波材料与工艺、特种加工与制造、传输与隐身试验等雷达天线罩核心技术，复合材料表面金属化、曲面FSS阵子高精度加工等核心制造能力填补了国内空白，圆满完成了各机型雷达天线罩研制攻关任务，满足了新一代战斗机研制要求。另一方面，为高性能发动机的研制提供了技术支撑。外涵机匣成功研制并首次实现国产复合材料在发动机上的应用，减轻了发动机重量，提升了性能。整体叶盘线性摩擦焊和激光冲击强化等技术突破，为整体叶盘的制造开辟了新的工艺路径，缩短了发动机研制周期，降低了研制成本。电子束和激光制孔中的叶片防护等关键技术的运用，提升了先进发动机整体性能。超塑成形扩散连接技术实现了空心整流叶片

的研制，电子束焊接技术实现了机匣和转子的焊接、TLP扩散焊实现了单晶叶片的焊接、旋压技术实现了高温合金和Ti2AlNb等难加工材料机匣的成形、电解加工技术实现了高温合金和金属化合物等材料整体叶盘和机匣的高效加工、喷嘴的高效检测与高一致性精密制造、机匣变形测量、大通道大容量光电传输、航空发动机轴承强化、叶片进排气边的高效检测、整体叶盘的在线检测、电子束选区熔化技术实现了TiAl叶片的成形、高温复合材料构件实现研制并通过设计性能考核……诸多关键技术突破，为更高性能要求的发动机研制形成了坚实的技术储备。

军民相融相通，支撑民机产业发展。近年来，民用航空装备在国家政策和市场需求的支持下，取得了巨大发展，C919大型客机、ARJ21支线客机、AG600大型水陆两栖飞机等民用航空装备对实现民用航空装备自主保障有着极为重要的意义。军、民用飞机在航空基础技术领域相融相通，在出色完成保军任务的同时，为我国民机事业发展也做出了重要贡献。如在C919飞机研制之初，FL-8低速风洞和FL-9低速增压风洞承担了完成了十余项试验任务，累计试验二百余次；按照结构强度积木式验证体系，开展了三项整机试验、十余项大部件级试验、百余项部件级试验，甚至上万件原件级试验，为型号顺利首飞成功提供强有力的安全保证；雷达罩首次选用泡沫作为夹层结构材料，突破了泡沫芯材的定型、拼接、胶结等成型工艺技术，达到国际先进水平。在承担AG600气动和结构强度试验的同时，利用自身技术优势，参与了飞机总体布局和结构优化工作，将原H尾布局方案改为T尾布局方案，提高了飞机的巡航性能；参与机翼与增压装置设计，改善飞机的起降性能，提高了抗浪性能。

坚持同根同源，服务国民经济建设。按照“产业同根、技术同源”的核心思想，积极将航空基础技术向航天、船舶、兵器等国防领域，深海探测、高铁装备、新能源汽车等国家重大工程领域进行产业拓展，为解决关键技术难题提供了重要的支撑。搅拌摩擦焊技术在新一代运载火箭、探月工程、高铁列车等工程上圆满完成科技任务，引领了我国搅拌摩擦焊技术的发展。采用铝合金旋压、碳纤维缠绕制成的气瓶，是新能源汽车的核心储气部件，被国内大量车企采用，为落实“绿色发展”理念提供了有力支撑。突破了大厚度钛合金电子束焊接技术，实现了4500米载人潜水器载人球壳赤道焊缝的高质量焊接，使我国成为世界第三个能自主研发载人潜水器的国家。在复合材料汽车零部件、复合材料油罐、全复合材料电动客车车身等技术、产品开发方面取得了突破性进展。风洞完成了高铁、汽车、船舶等气动试验任务；服务国家“一带一路”，首次国际中标和签署国外型号风洞试验项目。发挥结构强度领域优势，与吉利汽车全面战略合作，为用户带来更安全、更节能的汽车产品；与长春轨道客车公司合作，开展下一代地铁车辆车体静强度试验，为我国高铁发展再立新功。建成国家质检总局“质量与效益研究基地”，履行国家机械电子产品环境与可靠性质量监督检验中心、国家标准产品质量监督检验中心(北京)职责，支撑国家标准和地方标准化发展。先进计量技术成功保障了天宫一号和天舟一号的空间交会对接；运用自主研发的沉管运动姿态检测系统，成功破解了港珠澳大桥建设难题，保证了工程顺利进行。

加强自主研发 保障技术进步

工欲善其事，必先利其器。专用工艺装备和试验设备是航空基础技术实施的载体，其自主研发能力是发展航空基础技术进步的前提和保障。特别是在国防领域中重大、关键的核心设备大多受制于人的情况下，专用工艺装备和试验设备的自主研发水平在

一定程度上更是反映了国家科技创新的能力，对国防事业发展具有重要的战略意义。

航空基础技术领域代表着行业技术前沿，高度重视航空专用装备、设施设备的自主研制，组织研发出了一批难度堪比型号研制的关键、重大设备和试验设施，许多设施设备属于填补国内空白的首台套设备，有力保障了航空武器装备的科研和生产，为我国国防科技发展的自主保障做出了重要贡献。

在专用工艺装备方面，自主研发的大型复合材料自动铺丝设备、自动铺带设备和相关检测设备，成功解决了飞机复合材料壁板铺叠问题和我国复合材料规模生产的瓶颈难题。自主研发的亚洲最大推力旋压设备、大吨位线性摩擦焊设备、亚洲最大电子束熔丝成形增材制造设备，以及机器人搅拌摩擦焊系统、机器人自动焊接系统、机器人打磨系统、系列化的非球面超精密加工设备等一批特种加工设备，解决了整体叶盘盘片焊接、战略导弹的制造等一系列型号研制中的关键难题，达到国际或国内领先水平。自主研发的龙门式机械主轴五坐标数控铣床(A/B摆角头)实现完全国产化，突破了我国高档数控机床的设计制造瓶颈，填补了国内空白，打破了西方国家对机床关键部件的垄断和制约。研发的并联柔性定位可重构工装、数控多点定位可重构工装、螺旋轨迹制孔执行器等设备在飞机装配过程中应用，实现了飞机柔性装配。

在试验设施研制方面：目前已具备航空风洞、结冰风洞、汽车风洞、列车风洞、风沙风洞、人工积污风洞、汽车散热器风室式试验台等设备设施研制能力，尤其是8米风洞建成标志着我国具备研制世界先进低速风洞的能力，填补了我国回流式大型低速风洞的空白，具备建设结构强度、疲劳、冲击、鸟撞、噪声、气候环境等实验室的设计建造能力。

在仪器设备研制方面：研制的国内首台电动三轴六自由度振动试验系统，满足了高性能多轴复杂振动环境模拟需求；建设的40立方米大型快速温度变化试验箱，为航空武器装备系统级可靠性试验提供了利器。还研制出了表面划痕深度仪、精密自动测角仪、电脑量块测量仪等长度计量仪器；黑体辐射源、B型热电偶鉴定炉、温湿度巡检仪、环境试验传感器等热学计量测试仪器；布氏硬度压痕自动测量系统、声级计校准系统等力学计量测试仪器。

坚持综合施策 助力技术腾飞

航空技术领域始终瞄准国际科技前沿，以国家战略目标和航空工业科研、型号研制需求为导向，从条件建设、人才队伍建设、国内外合作等方面综合施策，持续提升航空基础技术创新发展的保障能力。能力建设成效显著。气候环境实验室和FL-62风洞等建设项目填补了我国试验体系空白，FL-10风洞使我国具备了比肩世界上最先进的德荷低速风洞的基本条件。建设国内规模最大、试验技术国际一流的全机静力/疲劳试验室。加强了航空制造工艺设计仿真、试验检测和装备自主研发能力，引进和自研设备超百余台套，基本具备了解决重点武器装备研发过程中工艺瓶颈问题的能力。拥有微观组织结构分析设备、材料力学性能检测设备、无损检测设备、化学分析设备、几何量测量设备和振动台等检测分析设备，初步具备了材料技术研究的基础条件。大型热压罐的建成并投入使用为大型复材构件研制奠定了条件基础。复合材料顺义园区、综合所怀柔新区、特种所东区、强度所阎良新区和上海基地、气动院沈阳及哈尔滨新区相继开工建设并陆续建成，提升了科研试验能力，保障了长远发展。

人才队伍不断优化。重视专业和学科建设，采用跨学科、跨培养单位以及国际合作的多元化化学术学位研究

生培养新方法，以人才支撑技术发展的能力，对国防事业发展具有重要的战略意义。不断优化的薪酬激励机制，培养造就了一批学术领军人才和行业领袖人才，目前已形成了以关桥院士为代表的工程技术高端人才体系。现有百千万人才工程人选5人，国家“万人计划”人选1人，享受政府特殊津贴专家50余人，航空工业各级技术技能专家80余人。通过邀请国内外航空领域权威专家开展多层次学术交流，针对急待突破的技术瓶颈进行咨询，重大科研项目、重点型号任务锻炼等方式，培育了具有国际影响力和竞争力的航空科技创新团队。

国际开拓成果丰硕。充分利用全球科技资源，多主体、多渠道开展国际合作，构建产、学、研、用相结合的合作平台，与国内外科研机构、高等院校、行业内企业建立了长期稳定的合作关系。与英国帝国理工学院合作的联合研究中心被国家科技部批准认定为国家级国际联合研究中心。与俄罗斯中央空气流体力学研究院就风洞试验技术、大型连续式跨声速风洞气动弹性试验等项目开展合作，与德国亚琛工业大学、乌克兰巴顿焊接研究所、俄罗斯材料研究院等机构开展了多项合作。与英国帝国理工学院签订成立“中航工业结构与制造中心”，与英国焊接研究所签订成立“AVIC材料连接和表面工程中心”，与荷兰宇航院及德荷风洞签署合作协议和项目备忘录，与法国宇航院签署了合作框架协议，与空客集团创新中心和北京航空航天大学中法工程师学院签订了合作意向书(LOI)等，利用国际化平台提高了基础技术科研水平。以港科大先进飞行器噪声技术中心为平台，联合国外专家开展声学技术研究取得新成果。中俄民机标准协调工作组得到国际委高度认可。

目前，新一轮科技与产业革命加快发展育，《中国制造2025》提出了制造强国战略，中央深化军事体制改革、全面实施强军战略，都对国防科技工业创新转型提出了新的要求，航空工业也进入了一个自主创新的新时期。要跻身世界航空基础技术强者之林，就要开展航空科技的“战略性、整体性、前瞻性、基础性、共用性”技术研究，打造国防科技工业航空技术创新中心，聚焦前沿新兴技术、先进飞行器技术、复杂系统工程等研究领域开展工作，致力于成为航空科技发展的引领者；要秉持“科技创新为魂，价值创造为本”的理念，增强自主创新能力、推进智能制造发展、推动科技成果转化，促进研发模式、制造模式、组织模式和产业形态的深刻变革；要瞄准超材料、增材制造、微纳制造、智能结构、物联网、大数据、人工智能等前沿、尖端的先进技术，增强工程化基础研究和工程化应用能力，发展和健全技术体系；要提升试验、制造、测试中智能设备的水平，自主研制和发展更多的关键、重要设备，形成系统解决方案，建设更强的型号支撑能力；要重视国家和国防重点实验室、工程中心、产业基地等科研平台，以及协同创新平台、资源共享平台、科技服务平台、人才培养与交流平台、决策分析与支持平台等各类平台的建设，加强成果转化和技术交流，在行业支持、军民融合等方面大有作为。

(中国航空研究院、中国航空制造院供稿)