

莫让冰花盛开在发动机上

“千里冰封，万里雪飘”是北国特有的美景。然而，冰花一旦盛开在飞机的发动机上，美丽中便暗藏危险。航空发动机结冰是危及飞行安全的严重问题之一，与其相关的飞行事故时有发生。

一旦发动机进气系统结冰，会改变其空气动力特性，增加流动阻力，使进气流分布不均，轻则发生气流畸变，影响发动机的工作稳定性；重则导致熄火停车，造成致命后果。此外，如果发动机进气系统结冰，防冰系统开启滞后，还可能造成脱落的冰块被发动机吸入，导致发动机损伤。

不只是天气原因

航空发动机是飞机结冰部件中最

敏感的部分之一。发动机高速旋转时，进气道空气处于抽吸状态，气流加速，静温下降，使得航空发动机进气系统更容易受到天气变化的影响，更易结冰。

即使不处于冰雪天气，在一定的飞行条件和气象条件下，航空发动机的进气部件也会出现结冰现象。比如云层中含有大量温度低于0摄氏度的液态过冷水滴，它们撞击在发动机短舱进气道前缘，同样会凝结成冰，造成发动机进气量减少，导致发动机性能下降。

防冰是发动机设计的重要内容

进气道防冰系统是保证发动机进气流品质，以及飞机在结冰环境下

安全运行的重要手段。中国民航局颁布的适航条款对民用航空发动机在结冰环境中的运行也提出了安全性要求。CCAR-33部主要针对发动机进气道本体的防冰性能验证提出了要求，CCAR-25部则针对发动机进气道安装之后的防冰系统性能设计及验证提出了要求。

进气道短舱防冰方法主要包括热气流防冰和电加热防冰等。民用航空发动机短舱防冰系统设计大多采用的是热气流防冰系统。例如，波音737NG的CFM56-7B发动机采用热空气加热进行防冰。当系统工作时，进气道防冰活门打开，从发动机引气系统传来的热空气沿着防冰管路，经防冰活门流入进气道前缘整流罩的空腔内，对进气道进行加热。电加热防冰将电能转变为热能从而有效加热防冰表面，但不可避免地要消耗数量可观的能量。

冰风洞试验等必不可少

冰风洞试验是验证数值仿真得到的结冰特性以及防冰系统性能的主要手段之一。冰风洞能够模拟产生云中的过冷水滴，形成适航条款要求的结冰云雾条件，并模拟飞行条件下外部流场，对不同结冰条件下防冰系统进行验证。

为了保证航空发动机及其系统的

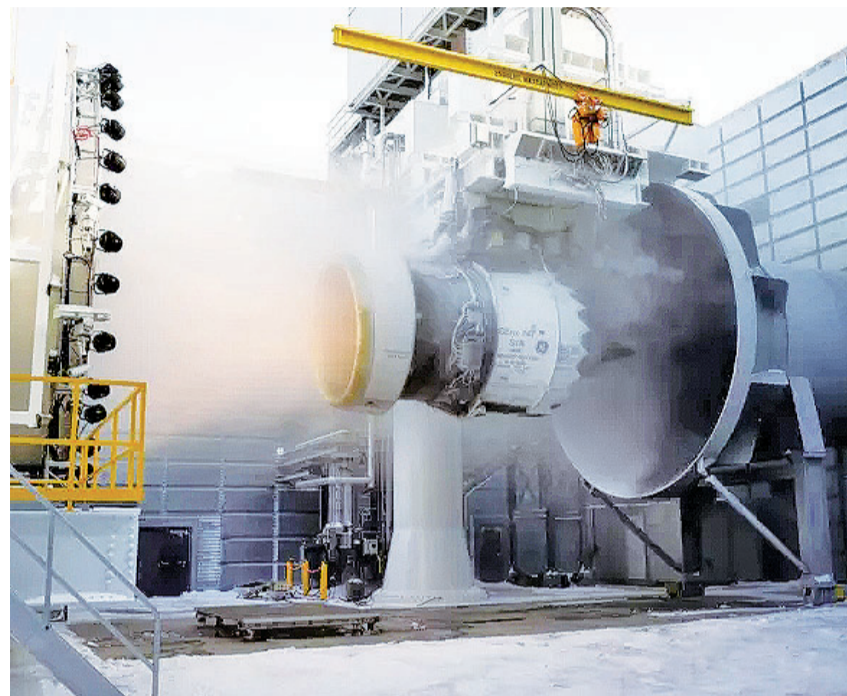


ARJ21-700结冰条件下短舱防冰系统机地上地面试验。

可靠性，各种极端环境的严格试验是必不可缺的，这就包括测试在上万英尺高空或极其严寒的天气，发动机在结冰情况下是否仍能正常工作，比如最近刷屏网络的吞冰试验等。简单地说，就是为了不让发动机不结冰就不结冰，真结冰了咱也不怕冰。

美国、欧洲和俄罗斯等都非常重视发动机结冰问题研究，均发展了自己的防冰系统设计体系，并借助防冰模拟试验器、整机防冰试验风洞等开展了大量针对防冰系统、结冰过程等方面的研究工作，且试验范围、试验段尺寸、测量设备仍在不断完善。

我国首套用于航空动力装置的“地面结冰气象条件模拟系统”于2015年3月8日投入使用，满足了当时ARJ21-700“在冻雾天气环境运营时不会产生不利于发动机安全运行的冰积聚”的试验验证。这对于我国建立气象试验室，提高航空器飞行安全具有重要意义。（陈翰）



Genx发动机防冰试验。

专业引领谋发展 技术创新创实效

——记中国航发黎明数字化制造技术应用



中国航发黎明数字化制造专业始终跟随前沿技术发展，开展数字化制造技术研究，致力于以技术创新谋求发展。凭借多年技术研究的积累沉淀，以务实、创新为主旋律，紧紧围绕航空产品工艺研发主线，充分发挥数字化制造专业优势，引领公司以及行业内的持续发展。

夯实基础——持续探索新思路

随着制造技术向全面数字化方向发展，中国航发黎明始终坚持面向现场用户的工作理念，前瞻性地推进技术储备，在行业内率先提出三维环境下应用MBD（基于模型的定义）方式进行工艺设计，经叶盘、机匣、盘轴等航空发动机典型零件的应用验证，可直接应用于型号研制，成功解决了三维设计数据有效继承并快速进行工艺设计的难题。中国航发黎明数字化制造专业在对工艺源头数据有效控制的基础上，开拓新思路，以工艺创新为引领，继而开展对工艺过程数据的控制研究。

结合航空产品的生产加工特性，在工艺研制过程中反复加工试验和多次修改工艺路线是常规的研发途径，由此产生大量低水平重复操作、试验件消耗，不仅会增加预研产品的试验成本和研制周期，更严重制约了航空发动机研制水平的提高。中国航发黎明数字化制造专业通过对产品工艺过程关键环节的深入研究，从多方因素开展工艺性分析，利用多种数字化仿真技术的集成应用，开展了物理仿真工程化应用研究，充分发挥数字化制造技术在产品各个生产阶段的专业优势。

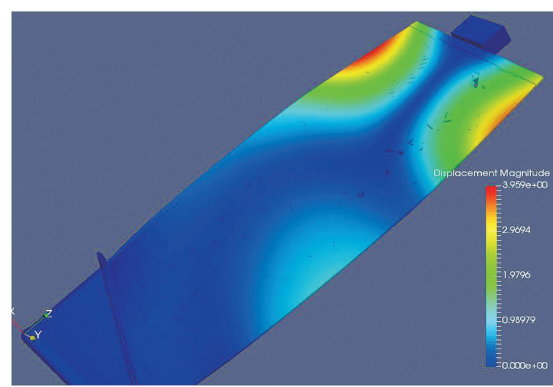
革故鼎新——科学验证新方法

叶片是航空发动机的关键动力部件之一，对发动机的性能起着至关重要的影响，然而叶片的加工变形与精度控制却一直是制约叶片加工效率和加工质量提升的瓶颈。随着公司叶片产能需求的逐年提升及新结构、新材

料、新设备的不断发展，叶片的加工工艺也随之发生适应性改变。如何针对以上问题顺应数字化制造技术和自动化技术的发展趋势，从工艺的合理性、规范性、适应性视角探索出适合叶片高效、优质加工的有效方法是传统机加行业必将面临的转型。

航空发动机叶片制造大多采用精密数控加工技术，一直朝专业化、标准化方向发展。国外的机床厂家、系统集成商、软件系统供应商研发了系列叶片专用数控加工中心、柔性加工单元和数控加工编程软件，并形成了系列化、标准化、专业化配套工艺装备，系列化产品功能和性能不断完善。国外航空企业为争夺市场份额，缩短研制周期，不惜巨额投资，在生产线上配置了一大批高精度数控设备，用于专业化生产线改造，实施计算机辅助设计/制造一体化工程，实现了集成数字化制造。然而国内叶片制造企业的精加工数控设备和编程工具基本被国外供应商所垄断。

中国航发黎明数字化制造专业自2008年起，针对航空发动机轴类静子叶片的精准加工理论、工艺方法、关键技术和工艺装备等关键技术领域，通过整合产学研合作资源，连续多年跟踪、跟进国内外叶片加工领域的先进制造技术、先进工艺装备、加工刀具和工业软件的发展历程，立足型号需求持续开展攻关研究。



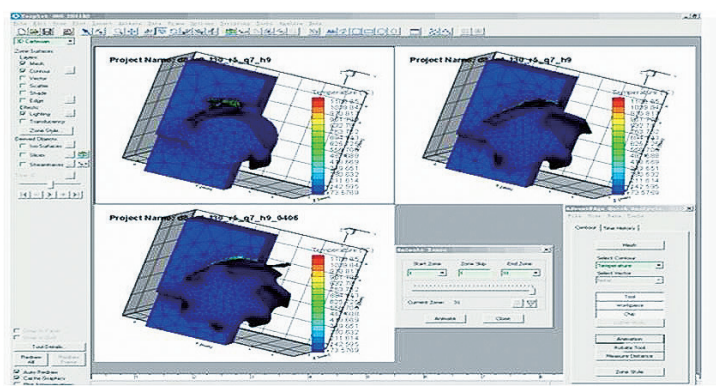
通过现场跟踪调研叶片实际的加工情况，发现某叶片主要面临加工变形、型面扭曲、加工颤振、刀具磨损严重等问题，通过进行深层次的理论分析，确定设备精度、夹具定位精度和装夹变形、工艺系统刚性、零件材料硬度带来的冷作硬化现象、切削温度过高是造成叶片加工问题的主要原因，最终决定借助仿真工具从减少切削加工过程中的切削力、抑制振动、提高刀具耐用度三个方面寻求解决途径，在虚拟环境下借助仿真手段对零件设计制造全生命周期的各个环节实现分析、优化，并进行合理的加工验证。

在虚拟环境下，应用先进的仿真工具对叶片的数控加工程序、刀具、装夹方案进行分析优化，并应用正交试验法确定刀具齿数和进给量是影响切削力的主要因素，通过仿真手段确定对刀具进行优化，选用7齿抑振密齿刀具代替原有的4齿刀具进行叶片加工，解决了弱刚度叶片易产生的加工颤振、加工变形和刀具寿命低等瓶颈问题。工艺参数优化方面，采用了基于均衡切削载荷策略的工艺参数优化方法，有效解决了零件加工变形、加工颤振和刀具磨损等生产瓶颈问题，经过现场实际加工验证，单片叶片精铣加工效率提高约30%，加工质量也大幅提高。

该型叶片的攻关工作都是在软环境中进行，技术分析、工艺验证和技术决策等均在虚拟加工平台完成，技术风险几乎为零。整个分析工作长达3个月，研制工作长达9个月，但实际零件技术验证时间几乎为零，整个验证工作在技术中心进行。技术中心组建的数字化制造专业的青年技术骨干在无需试验件、无需加工调试、无需抢占生产用设备，未对叶片的正常生产进程造成影响的情况下，实现了验证周期的缩短和试验成本有效降低，为航发叶片研发、叶片高效精准加工的新工艺制定提供了技术可能。

聚焦主业——矢志突破新技术

航空发动机朝着轻量化、高可靠



性、长寿命、多构型、快速响应及低成本制造等方向发展，叶片类零件也随之大量采用新材料、新结构、新工艺，仅依靠已有的生产经验与试制验证的传统工艺方式已然无法满足我国航空制造业快速发展的需求，因此虚拟加工、工艺仿真等技术的应用必将成为叶片加工的必然趋势。

工艺仿真技术是以航空发动机关键零部件研制为主线，针对产品关键工艺过程及其研制过程，持续推进加工过程仿真技术、数字化工厂仿真技术和集成工艺仿真技术应用，在虚拟环境中对生产工艺准备、加工过程、工艺参数和加工结果进行仿真分析，并以精确的仿真结果指导实际的生产过程，以提高现有工艺装备利用率，增加产能。近年来，中国航发黎明紧跟前沿技术发展趋势，突破传统叶片加工技术理念，开展工艺仿真、数字化工厂、虚拟制造等关键技术的研究工作，逐渐形成了覆盖产品生产制造全生命周期各个阶段的仿真技术探索，如在生产建设阶段，拟应用工业工程的方法定义生产线需求和功能，借助工厂设计和优化工具，对生产系统和过程进行建模和仿真，对生产线布局及过程运动的合理性进行评估、优化和调整；在生产准备阶段，借助生产线运行仿真环境模拟真实的生产线运行过程，对人机交互、机器人动作及各制造单元工序能力、瓶颈进行分析和评估，实现生产线的生产能力平衡；在零件加工阶段，借助虚拟仿真和验证工具，预先分析、评估、验证产品装配、零件加工等制造过程，提前发现潜在问题，减少研制风险；在产品检验检测阶段，借助于集成工艺仿真环境，基于产品的设计、工艺、制造等信息模拟产品的制造结果，追溯导致产品质量问题的原因，从而提升产品质量。（高阳 马明阳）

叶片进排气边的智能磨削检测一体化技术

航空工业精密所 毕超

在航空领域中，叶片是发动机中的关键零件之一，不仅种类多、数量大，而且形态各异、结构复杂，在发动机制造中占据了相当大的比重。对于叶片来说，进排气边的几何精度和一致性对于发动机的动力性能有着至关重要的影响。为了使发动机获得更好的动力和更高的效率，叶片进排气边的几何尺寸越来越小，精度要求越来越高。这就对叶片的制造和检测方法提出了挑战，也对叶片加工与检测设备的性能提出了更高要求。在我国的航空发动机研制和生产单位，叶片的进排气边需要进行打磨抛光才能够达到设计要求，通常这一过程由操作工人通过手工打磨和抛光来完成，这种方法在加工质量、效率和环保等方面都不能满足现代航空制造的要求，而且会造成进排气边的精度不稳定、形状一致性差，给发动机的气动性能带来了不利影响。

当前，世界制造领域正在经历“工业4.0”变革，我国也相应地制定出了制造业的十年发展战略，即“中国制造2025”。其中，智能制造是“中国制造2025”的主攻方向，必将成为实施制造强国战略的重要推手，从而为助推我国经济发展保持中高速、产业迈向中高端起到关键作用。在这样的背景下，航空工业精密所立足国内航空发动机研制和生产过程中的迫切需求，依托自身在精密、超精密制造技术以及精密测量、测试技术等领域的丰富经验和技能积累，在航空发动机叶片进排气边的智能加工与检测技术方面开展了卓有成效的研究，实现了叶片进排气边智能磨削检测一体化系统的开发，具有重大的现实意义和应用价值。

如图1所示为叶片进排气边智能磨削检测一体化系统的工作原理示意图。在工作过程中，首先应用光学扫描测量机快速测量叶身，并与标准模型对比得出叶片进排气边需要磨削的余量；专家系统作为智能决策中心，能够对每个叶片的检测结果进行数据分析，从而确定最佳的磨削工艺参数和运动轨迹；机器人用于完成叶片的抓取、搬运和磨削运动等操作，从而使该系统更加灵活、快速和敏捷；同时，该系统采用柔性砂轮进行磨削，可以很好地满足自适应加工的要求，再结合各种功能的工装夹具和传感器，使得该系统真正具备了智能功能，其组成部分如图2所示。

该系统综合应用了数字化制造、在线精密检测、工业机器人、自适应磨削、数据库、智能专家系统等多项先进技术，代表了当代叶片磨削智能加工领域的先进水平，其采用的关键技术和解决方案如下：

1. 叶片的快速精密测量与加工余量分析技术

快速精密测量是实现叶片自适应磨削的前提和核心，该系统采用了高效率高精度的光学扫描测量机，实现了叶片进排气边的高效测量和加工余

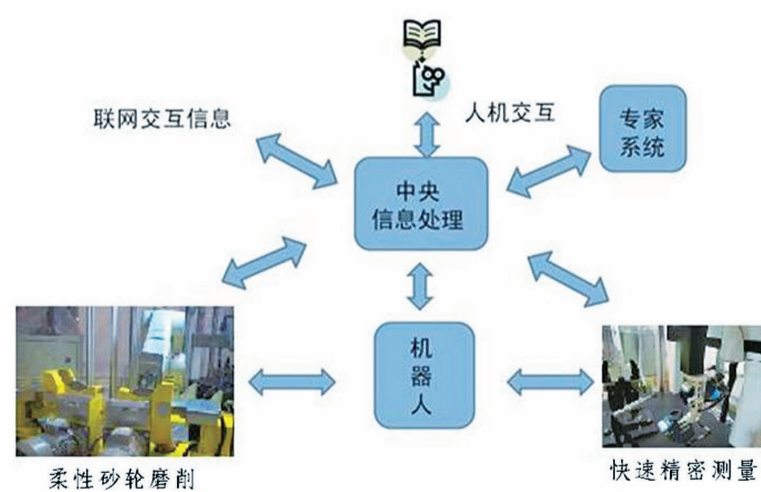


图1 叶片进排气边智能磨削检测一体化系统的工作原理。

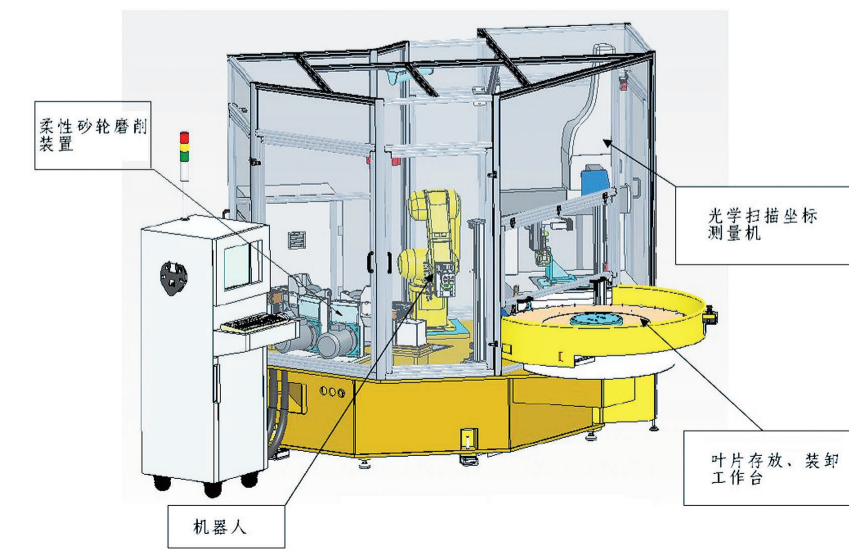


图2 叶片进排气边智能磨削检测一体化系统的组成。