

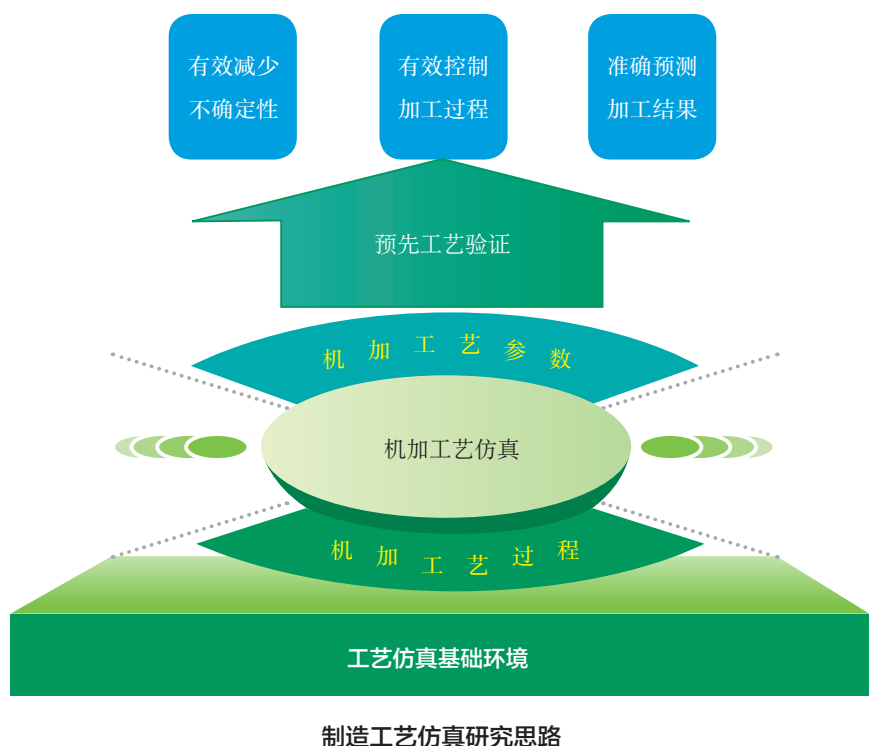
# 航空发动机制造工艺仿真技术实践与启示

## Practice and Enlightenment of Simulation Technology for Aero Engine Manufacturing Process

张森堂 周鑫 赵恒 / 中国航发黎明

新一代航空发动机朝着轻质化、高可靠性、长寿命、快速响应以及低成本制造等方向发展。传统试制研制方式已无法满足重点型号工程的发展需求，持续开展制造工艺仿真技术研究，将助推航空制造企业数字化转型。

工艺仿真技术是指在虚拟环境中真实再现一个具体的工艺过程，允许用户实时操作工艺设备或改变相关参数的一种先进仿真技术。在产品研发及生产阶段对其工艺过程进行仿真和评估，可以辅助产品整个制造周期的工艺改进。传统模式下，机械产品的设计、工艺规程制定、加工、质量验证，以及交货供应的周期长、成本高、效率低，质量精度难以得到有效保证。为提升航空发动机零部件生产制造能力，急需开展制造工艺仿真技术研究，减少加工验证的次数，预判制造过程中的问题，优化制造工艺、加工参数，实现制造工艺短周期快速迭代以及验证产品的可制造性。



### 航空发动机制造工艺仿真发展现状

制造工艺仿真技术始于美国的航空航天、核电等高科技产业。20世纪60年代，为解决航空航天工业结构分析的迫切需求，美国国家航空航天局（NASA）提出了开发世界上第一套有限元分析软件Nastran的计划。同期，NASA、西屋电气公司和美国国防部（DoD）的代码转移和

扶持计划使得美国早期的计算机辅助工程(CAE)软件公司成功地从科研机构进入到市场之中。半个多世纪以来，欧美的CAE软件产业迅速崛起，牢牢占据了工业价值链的高地，并形成了产业化垄断。

自20世纪80年代后期以来，多学科数值仿真技术的作用受到重视，开发了多类工艺仿真分析专用软件，例如，美国第三次浪潮系统（Third

Wave Systems）公司的PM和FEM、比利时GeonX公司的Virfac等。由于这些软件的专业性远优于通用软件，在航空发动机制造企业中得到了普遍的应用。

德国于2006年启动卓越计划项目群框架内的材料制造和加工过程的虚拟加工链项目，开发了加工虚拟平台AixViPMaP，能够对材料加工在不同尺度上进行有效的仿真、优

化和控制。基于该平台，进行了齿轮零件、不锈钢轴承座等5个零件的铸造、机械加工、热处理等全工艺链加工仿真验证。

美国国防预先研究计划局(DARPA)提出的加速引入材料(AIM)计划是实现全流程仿真与集成应用的成功案例。AIM计划以航空发动机叶片、涡轮盘等产品快速研制为应用目标，构建一个数字化集成研制平台，帮助设计与工程人员更加快速、廉价地开发和找到新材料和新工艺，为材料工艺建模仿真、虚拟制造和功能验证提供基础材料数据和物理验证。

中国在制造工艺仿真方面已经开展了大量的研究工作，但是起步较晚，工艺仿真技术仍处于研究探索阶段，技术成熟度不高，缺少相应的技术指导标准和基础资源数据库，主要以跟踪研究和国外通用商业化软件的个性化应用为主，尚未实现工艺仿真集成应用，仿真软件效能未得以有效发挥。目前，只能实现单点工艺分析，未考虑连续工艺实施中应力和变形等对前后工序的影响，尚未实现连续的制造工艺过程仿真。

零件加工问题统计

关键问题	主要原因	改善对策
加工变形	设备精度和装夹定位精度的误差、零件装夹过程中产生的装夹变形，以及切削力的作用均是导致曲面加工发生变形的的主要原因	提高设备精度，控制装夹变形，减小切削力
加工颤振	由于零件材料的难加工性及薄壁零件刚性差等原因，加工过程中容易出现颤振引起的鱼鳞状表面缺陷	抑制切削加工过程中产生的振动
刀具磨损	由材料硬度高、冷作硬化现象突出、切削温度过高等原因带来的切削部位钝化、涂层失效过快等问题，导致切削力变化加剧，刀具磨损严重	提高刀具耐用度，使用高性能刀具

### 航空发动机制造工艺仿真技术实践

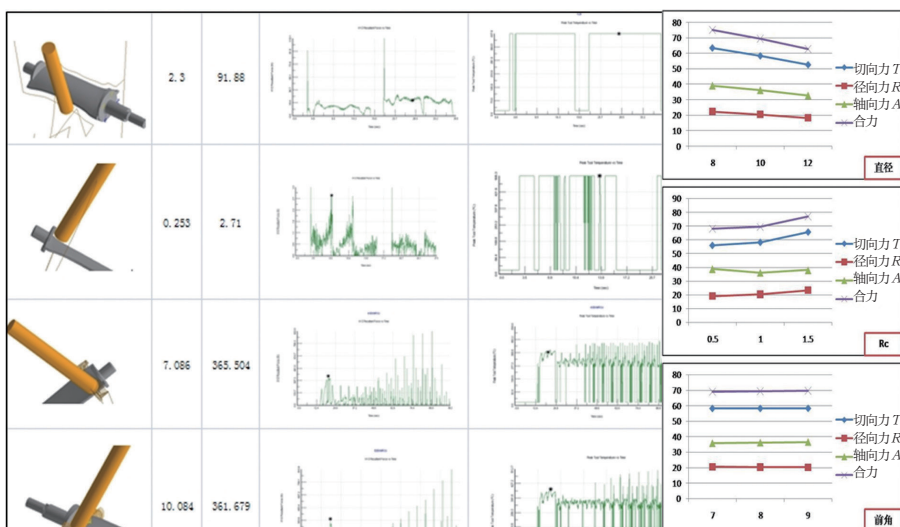
从20世纪70年代起，航空制造业历经了仿真应用研究、虚拟产品试制工具研发和数字化工厂仿真技术探索应用等发展历程。2008—2010年，笔者所在科研团队应用专用物理仿真软件解决了涡轮盘加工变形、技术指标可达性等生产瓶颈问题。10年来，将引进的数值仿真软件应用于工程实践，收到良好的效果。

### 多因素仿真分析助力静子叶片提质增效

在静子叶片的加工过程中，由于其自身结构的复杂性导致加工难度大，加工问题层出不穷，其中对复杂曲面性能影响较严重的加工问题主要有加工变形、加工颤振、刀具磨损等。

科研团队采用先进仿真分析方法对复杂曲面加工过程进行研究，





工艺参数仿真分析

通过加工过程几何仿真和切削参数有限元分析，以控制切削加工过程中切削载荷的大小和波动为优化目标，对数控加工程序的正确性及合理性进行了验证，找出了影响切削力大小的关键因素，并对加工过程进行优化，实现复杂曲面的高效优质加工。具体分析内容包括以下两个方面：加工过程几何仿真主要针对数控程序，对其正确性及合理性进行仿真验证，检查切削加工过程中是否存在碰撞、干涉、过切、欠切等问题；切削参数有限元分析以切削力分析为主要研究内容，对刀具几何参数和加工参数两方面进行切削力仿真试验，找出影响切削力的关键因素。最后，根据仿真分析结果，对复杂曲面切削加工进行优化。

通过对比加工试验可以看出，优化后叶片加工时间明显缩短，由原来的43min缩减至30min；单组刀具加工叶片的数量由17片增加至100片，刀具寿命显著提高；零件加工表面质量得到显著提高。由此可以看出，采用先进分析的优化

方法，既能够提高零件加工效率和加工质量，同时又能减少刀具磨损，增加刀具的使用寿命。

### 基于仿真驱动解决3级盘轴排故问题

在3级盘轴工艺优化过程中，

为了将前、后、内止口粗糙度( $Ra$ )1.6提高为 $Ra0.8$ ，科研团队前期攻关数月，仅后止口 $Ra1.75$ 勉强可以满足更改要求，但过程不稳定、效率较低，且刀具磨损严重，零件表面有明显沟痕和振纹，转接处加工一致性差，很难确认此种方法能够保障内止口的加工效果。

科研团队采取了全新的均衡切削载荷工艺方法，加工过程稳定可靠，所有工艺过程和工艺参数均由程序控制，无须人工干预，连续加工多件结果趋同。

影响表面粗糙度的进给量这一关键指标由理论计算分析获取，既非经验数据，更无须多次试验，实际加工与理论计算结果完全一致。

### 多工序连续仿真解决静子机匣加工变形问题

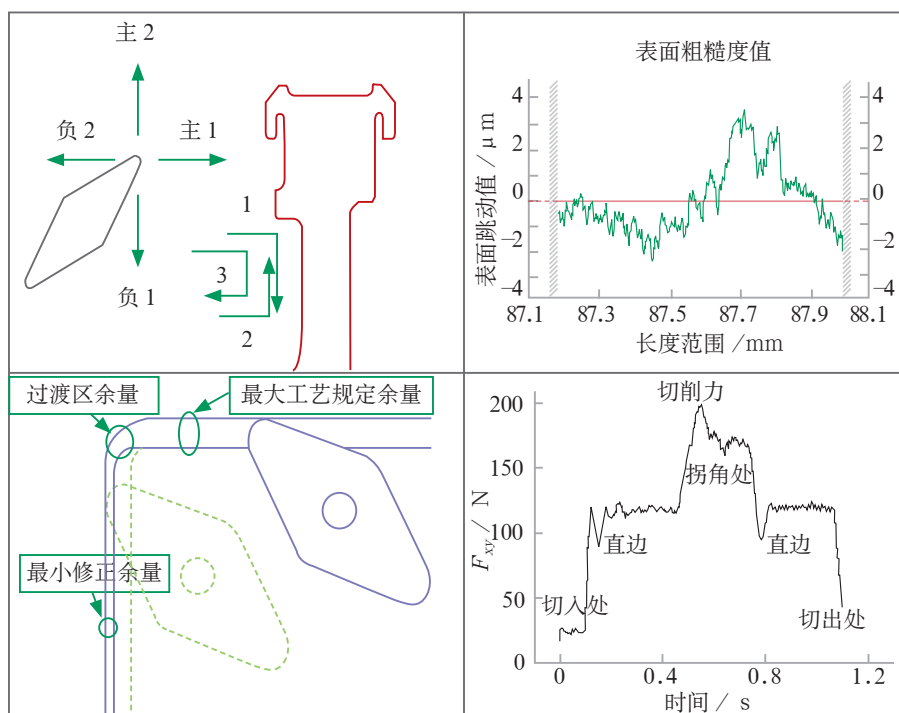
静子内环零件是典型的回转类，对开机匣组合零件，由上下两个环

叶片零件优化前后对比

内容	攻关前	攻关后
工序产能	多次返修	提高50%以上
单叶片加工时间/min	43	30
精品叶片	持续攻关	当年完成4份精品叶片交付
每组刀具加工叶片数/片	17	100+

盘类零件优化前后对比

内容	攻关前	攻关后
加工方式	等余量加工方式，转接部位失控	均衡切削载荷方式，加工过程稳定
加工刀具	不分粗、精加工，使用同一刀片	粗、精加工刀片分开，刀具寿命可控
切削速度	不分粗、精加工，切削速度相同	分粗、精加工进行，精加工提高20%
加工程序	后止口非循环程序，工人上刀补	循环加工程序，一次调试即可
加工缺陷	振纹、毛面、沟痕肉眼可见	振纹、毛面、沟痕不可见
表面粗糙度( $Ra$ )	1.6	0.55 ~ 0.75
加工时间/min	120	70



盘体数控程序仿真分析

件通过螺栓连接组合而成，单件完成加工后通过切断分成两个半环零件，加工工艺以车削工艺和钻孔工

艺为主。零件是不锈钢材料，属于薄壁零件且包含大量轴向孔和镜像孔特征。应用传统工艺先后进行了

4批零件的试制工作，零件圆度超出设计图要求5.25倍，径向孔位置度超出设计要求4.6倍，且从径向孔位置度雷达图分析圆周变化无明显规律。

传统的工艺攻关采用试制方式，根据检测结果判断工艺方案优劣，缺少仿真手段对零件工艺方案的仿真分析。应用多工序连续仿真分析技术，通过仿真分析对比不同工艺方案的优劣，可以提供工艺改进技术支持。科研团队基于应力应变继承的工艺路线仿真分析，对原始工艺、第一次改进工艺、第二次改进工艺分别进行仿真。

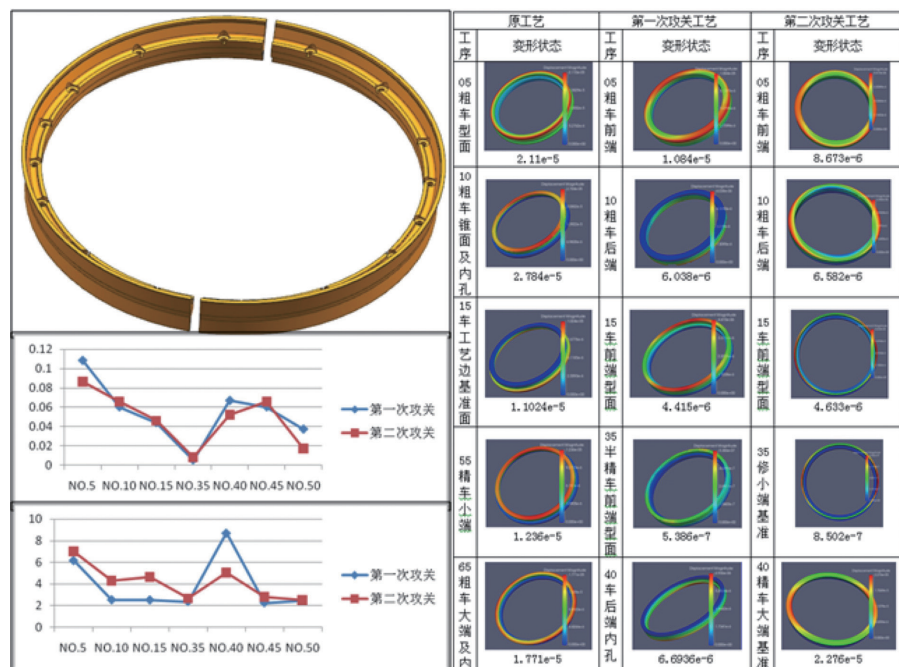
采用优化后的工艺路线进行加工验证，外轮廓表面应力值介于840 ~ 905MPa、端面表面应力值介于620 ~ 705MPa，实现了合格零件小批量交付。

## 启示

目前，传统试制研制方式已无法满足产品提质增效与重点型号工程的发展需求，为应对加速技术产品转化周期、改善产品质量、加大制造符合性和降低制造成本等需求挑战，实现科技成果和生产加工方式的快速转型，中国航发黎明将以重点型号任务需求为引擎，以关键件工艺为载体，发展工艺集成仿真技术，建设以“虚拟制造、虚拟现实、工艺仿真、工厂仿真”四位一体的工艺/技术预先验证机制，未来还将持续发展制造工艺仿真技术研究，助推航空制造企业的数字化转型。

**航空动力**

(张森堂，中国航发黎明，特级主任工程师，主要从事精密加工工艺、高效数控加工技术、数字化制造技术方面的研究)



机匣工艺路线仿真分析