

航空发动机零部件制造全过程工艺仿真

Process Simulation During the Whole Process of Manufacturing for Aero Engine Parts

■ 朱宇/中国航发研究院 张新冬 杨小叁 张婵 陈伟/中国航发西航 吴宝海 卜昆 郭良刚/西北工业大学 孟宝/北京航空航天大学

航空发动机产品研制包含了一条完整的工艺技术链，简单粗放的物理试错加经验判断的传统研制模式，难以满足新型航空发动机自主研制需求。发动机零部件工艺仿真，特别是全工艺链集成仿真的应用，可以提前预判制造缺陷，加速工艺设计迭代。

航空发动机的制造技术难度大，研制周期长，需要深厚的技术储备和很高的技术水平^[1-2]。为缩短研制周期，降低研制成本，仿真技术的应用成为必然的发展趋势，尤其是在试制阶段，采用制造工艺仿真与物理验证相结合的研制模式已经成为行业的共识^[3]。

航空发动机典型零部件从成形制坯到加工制造的全流程一般包含不同的工艺方法，由多个工艺和工序组成，涉及冷成形、热成形、热处理、机械加工等专业，上游工艺和工序对下游工艺和工序产生的影响不可忽略，最终产品质量问题是全工艺周期各阶段、各工序等综合作用的集中体现。

因此，航空发动机零部件制造工艺仿真、特别是制造全过程多工艺联合仿真技术的应用，对于提前预判制造过程中的问题，虚拟验证产品可制造性，对制造全过程的工艺路线和工艺参数实施的全局优化具有重要的意义，有利于缩短工艺研制周期，提高工艺设计水平，是突破传统制造模式，实现虚拟制造的重要手段，如图1所示。

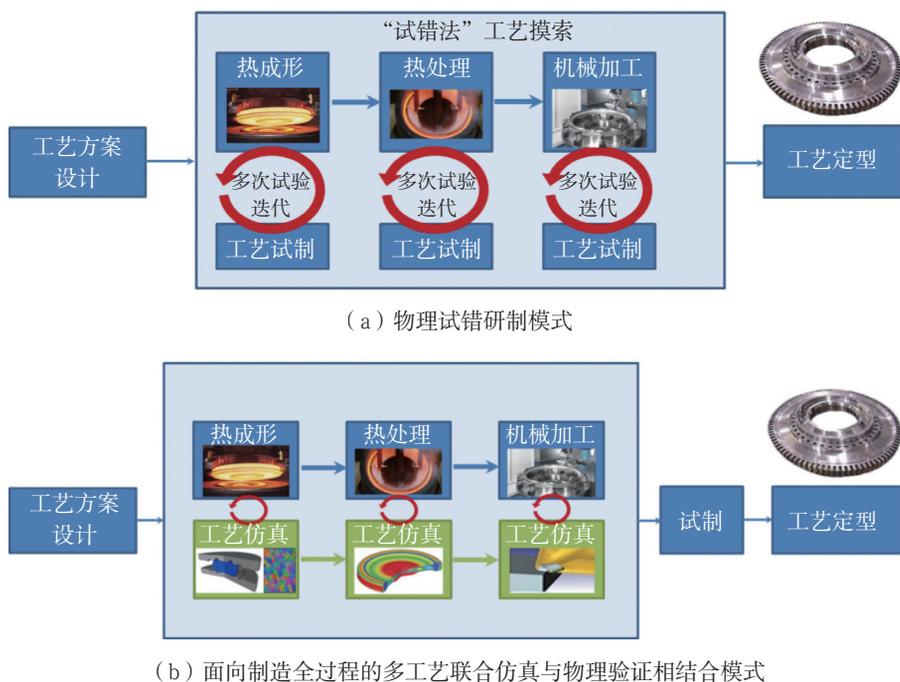


图1 制造全过程多工艺联合仿真

制造工艺仿真发展现状

典型工艺仿真

发动机制造工艺仿真涉及非线性、大变形等仿真领域的难题，已成为当今制造领域的前沿学科之一，受到企业界和学术界的广泛关注，在铸造、锻造、焊接、钣金成形、机械加工、热处理等专业领域开展了大量的学术研究和工程应用工作。随着新一代信息技术与制造技术深

度融合，工艺仿真得到了进一步的发展和應用，美国、欧洲、日本等主导研发了一系列制造领域的工艺仿真软件，涵盖了大部分制造专业领域以及工艺设计、工艺试验、生产制造和服务保障等业务环节，从单一加工过程仿真，逐步向连续工艺过程和全流程工艺仿真发展，并成功应用到航空、航海、汽车等诸多工业领域。

随着航空发动机数字化制造水平得到快速提升,工艺仿真技术得到了迅速发展,高校、科研院所及生产制造单位基于商业化仿真软件对航空发动机铸造、锻造、焊接等典型工艺开展了数理模型构建、工艺分析与优化等方面的研究工作,并取得了一定的进展,已在航空发动机部分零部件制造过程中得到了初步应用。但应认识到,国内航空发动机制造工艺仿真技术成熟度不高,工程化应用不足,在各个主要专业领域从材料模型与数据、仿真方法、仿真精度到仿真应用等方面都存在一定的差距,主要体现在两个方面:一是航空发动机工艺仿真缺乏基础数据库的支撑,没有积累修正仿真模型所需的试验数据,未形成仿真流程及平台,限制了工艺仿真技术在制造中的广泛应用;二是典型工艺仿真缺少对仿真方法、数理建模及模型验证方面的系统研究,数据处理过程较长,分析结果可信度较低,难以发挥仿真对制造工艺过程的分析优化与指导作用。

制造全过程多工艺仿真

美国和欧盟等发达国家在大力发展单一工艺仿真技术、提高成熟度水平的基础上,逐步开展了多工艺联合仿真研究,已取得成功运用的案例^[4]。

欧洲航天局(ESA)领导15个国家150名科学家进行的“与地面和空间凝固相关的金属间化合物材料加工”(IMPRESS)项目,采用伊萨(ESI)公司的ProCAST和SYSWELD软件实现了叶片铸造、热处理等多工序全流程仿真。德国亚琛工业大学开发了材料加工虚拟平台,形成面向应用的仿真链,能够对材料加

工在不同尺度上进行有效仿真、优化和控制,并通过齿轮、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进行了验证。在2005—2010年,沃尔沃公司实施了“集成设计实现稳固制造的虚拟工程”(VERDI)计划,完成了航空发动机零部件制造工艺的全流程仿真技术研究,涉及金属沉积、焊接、热处理、机械加工等多种制造工艺,完成了航空发动机叶片制造工艺的全流程仿真软件的开发,实现了工艺参数和加工路径等的优化,大大减少了航空发动机零部件的研制周期和成本。

我国的制造全过程多工艺仿真处于起步阶段,各科研院所结合制造业需求开展了相关研究工作^[5-6],但对制造全过程多工艺仿真技术仍在探索中,技术成熟度偏低,研究对象单一且结构形式简单,研究成果不具有通用性;已开发的仿真工具应用范围窄,适应加工工艺变化的能力差,精度欠缺,仿真软件效能未得以有效发挥;企业应用的商用软件相互间数据交换仍然存在较大的障碍,没有形成集成的统一平台。

制造全过程工艺仿真技术实现路径初探

我国航空发动机工艺仿真研究尚未实现典型零部件制造工艺全过程的系统性分析,亟须开展全流程多工艺集成仿真研究,深层揭示工艺全过程物理规律,实现基于仿真的工艺虚拟验证、参数优化和问题预判,形成基于仿真的科学可行的工艺规划方法。

按照总体策划、分步实施的原则从两个方面开展航空发动机制造

全过程工艺仿真技术发展策划。一是从中长期考虑,构建统一的全工艺链多学科协同仿真与集成平台,实现制造全流程精准仿真与智能优化,推动由全部依靠物理试错、人为经验的传统研制模式,向工艺仿真与物理验证相结合、基于工艺知识与标准流程的仿真驱动研制模式转变。二是从解决目前的仿真瓶颈问题、填补技术空白出发,选择叶片、机匣、钎焊结构件等典型零部件开展多工序连续工艺仿真技术与验证,实现不同工艺、工序之间数据高保真传递和模型准确映射,提高工艺仿真精度和置信度,达到基于全流程仿真的工艺系统性分析和全局优化。

全工艺链多学科协同仿真与集成平台

进一步夯实多尺度建模、多场耦合等数理建模、仿真方法基础,针对发动机典型零部件及其具体工艺特点自主定制开发典型工艺仿真工具,建立健全航空发动机零部件制造工艺仿真用材料与工艺知识库,在此基础上将模型、方法、数据、软件、知识等进一步封装和集成,构建统一的航空发动机产品制造工艺全流程仿真集成平台,实现成形制造全流程大规模、高效率仿真计算,如图2所示。

高精度/高置信度仿真模型与方法。多尺度模拟是一种新兴的兼顾准确性和效率的模拟研究方法,综合了不同尺度模型的优势,解决了宏观尺度物理模型不精细以及微纳尺度模型不高效的问题。针对发动机常用高温合金、钛合金等金属材料及复合材料宏观力学性能与微观组织跨尺度仿真需求,建立基于实测与仿真的多源数据混合模型,针

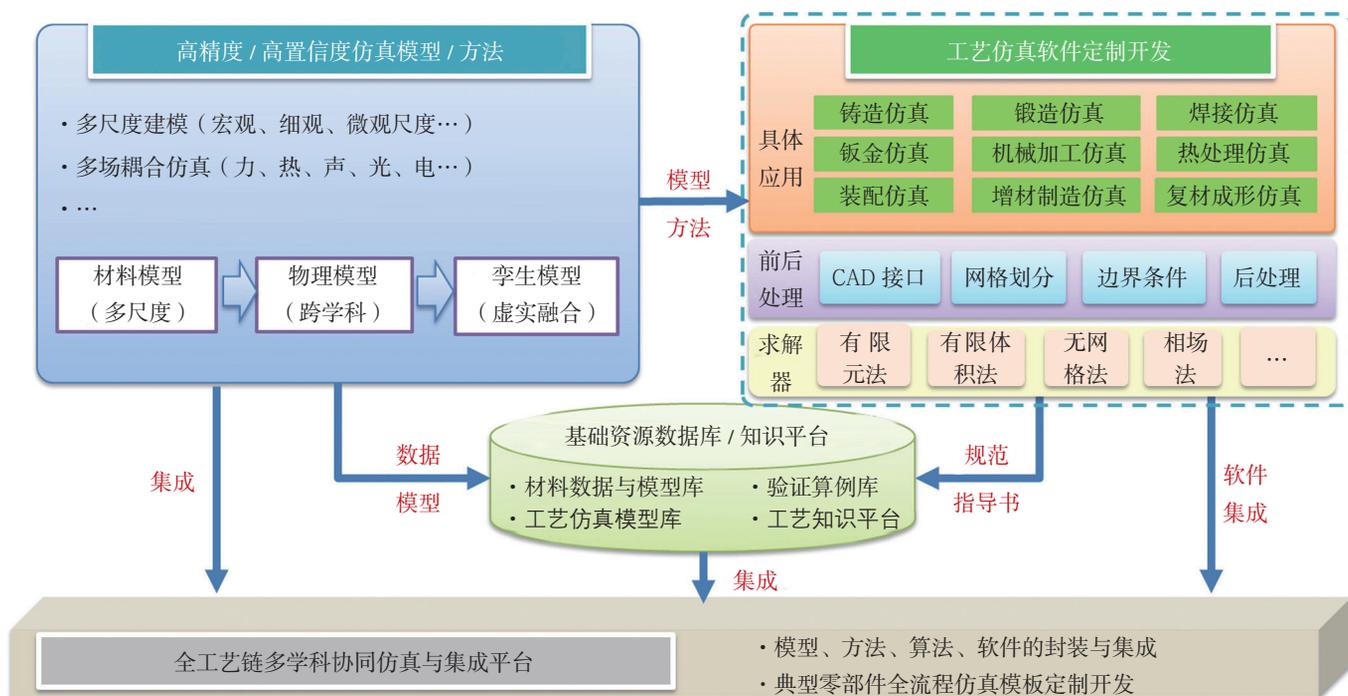


图2 全工艺链多学科协同仿真与集成平台

对成形制造复杂工艺过程，开展多尺度建模方法研究，建立工艺过程仿真物理模型，实现微观组织及宏观性能的多尺度分析。针对发动机复杂工艺方法往往涉及非线性、大变形以及力、热、声、光、电等特殊能场多场耦合问题，开展多物理场耦合规律研究，研究高精度边界条件确定方法，构建多物理场耦合数值计算模型，不断提高仿真精度和置信度。

工艺仿真软件定制开发。以发动机典型材料和复杂关键构件成形制造仿真的需求为牵引，广泛联合国内技术优势单位，吸纳具备自主研发能力和基础的软件企业，建立联合研发团队，基于人工智能、大数据等前沿技术，构建并持续完善包含有限元法、有限体积法、无网格法、元胞自动机（CA）、相场法等方法的统一的求解器，定制适于

相关专业仿真特点和用户使用需求的前后处理及图形界面，定制开发铸造、塑性成形、焊接、增材制造、复合材料成形等典型工艺仿真软件，实现发动机复杂关键构件制造工艺的高精度仿真和成形缺陷、组织演变及性能的准确预测。

工艺仿真基础资源数据库和全工艺链多学科协同仿真与集成平台。归集形成的材料多尺度模型、基础力学性能数据、仿真模型及相关结果数据、工艺试验数据、工程算例等，梳理形成的方法、指导书、标准规范等成果，建立仿真基础资源数据库；将典型工艺仿真工具及相关算法进行封装与集成，搭建基础框架，定制开发典型件的全过程仿真流程模板，研发全工艺链多学科协同仿真与集成平台，并经过工程实例验证，实现零部件基于全流程的制造工艺系统性分析。

典型零部件多工序连续工艺仿真

从当前多工艺仿真数据交换存在障碍、预测精度不足、技术成熟度偏低等亟需解决的问题入手，选择典型零部件和典型工艺，基于现有常用仿真软件，重点攻关多工序连续工艺仿真的数据高保真传递与集成调用等关键技术，搭建集成工艺仿真环境。

多工序连续工艺仿真的高保真数据传递技术。目前各专业所使用商业仿真软件的后处理和结果数据格式并不统一；由于不同工艺对仿真精度要求不同，建模采用单元划分形式、网格密度也有差异。因此，要实现多工序连续工艺仿真，必须打通各专业工艺仿真软件的数据传输障碍，实现仿真结果的转化映射，且保证数据传递精度。通过多工序连续工艺仿真的高保真数据传递技术路线，分析各相邻制造工艺间的

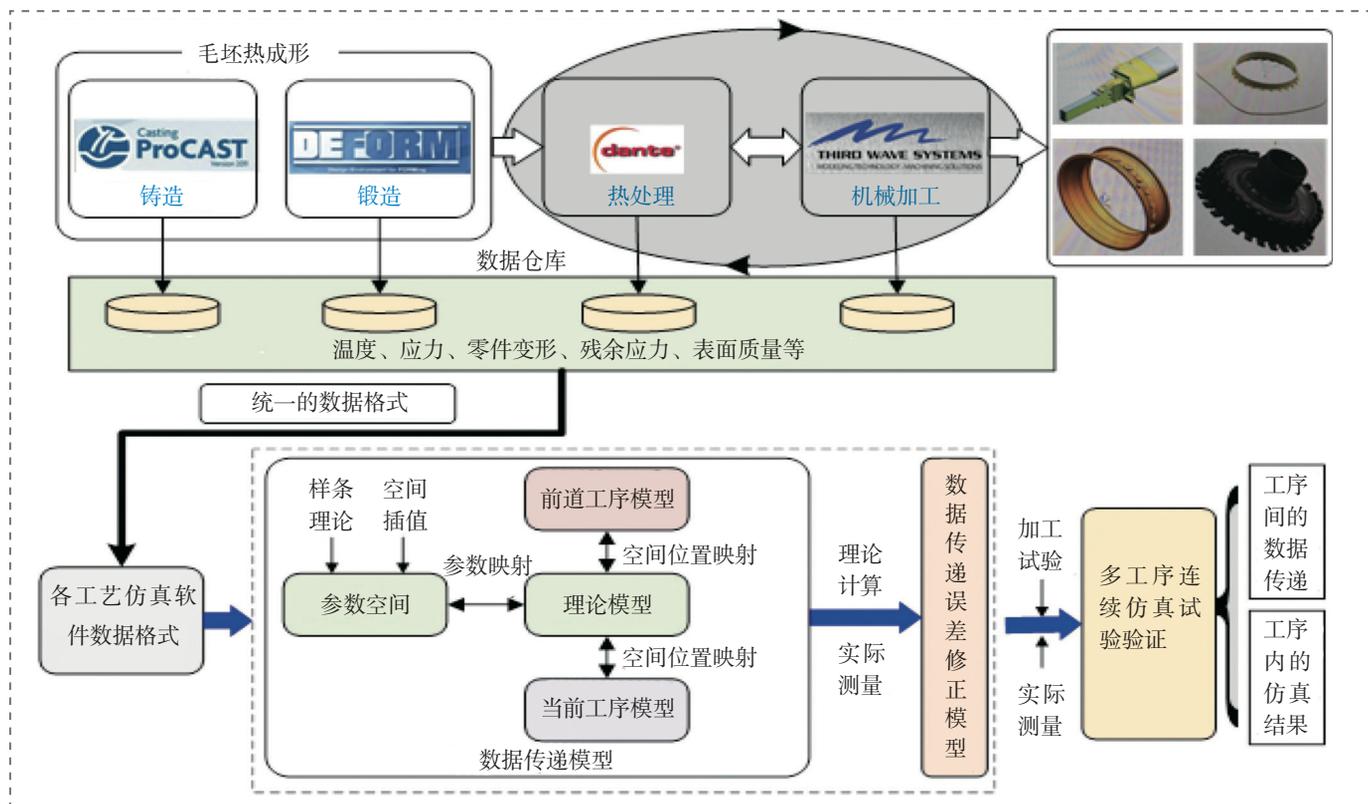


图3 多工序连续工艺仿真的高保真数据传递技术路线

成形特征、逻辑关系及仿真环境不同，研究各工序间仿真模型中网格单元、数据类型及数据格式等差异，确定统一的数据传递格式，建立适用于各专业的数据转换模型，如图3所示。针对典型构件的理论几何模型，构建模型对应的三维参数空间，进一步获得三维参数空间与模型物理空间的映射关系，结合样条理论和空间插值方法，将网格节点及其包含的几何信息、物理信息向仿真模型一一映射，其中包括不同仿真软件间残余应力、变形等仿真参数，实现中间工序模型的传递。

结束语

将仿真技术应用于航空发动机关键零部件的成形制坯和加工制造全过程，短期内迅速突破高精度/高置

信度多工序连续工艺仿真技术，并不断发展完善新的建模方法与求解技术，进一步构建全工艺链多学科协同仿真与集成平台，可实现基于仿真的制造全工艺链的系统性分析和全局优化，对减少物理试验次数，大幅缩短工艺研究周期，实现产品制造短周期、快速迭代验证具有重要的意义，也为实现航空发动机关键零部件形性精确调控和高质量高性能制造提供技术支撑和方法工具支持，从而推动由依赖物理试错、基于人工经验的传统工艺研制模式，向工艺仿真与物理验证相结合、基于知识与标准流程的仿真驱动研制模式转变。

(朱宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机先进工艺与仿真技术研究)

参考文献

- [1] 王增强.先进航空发动机关键制造技术[J].航空制造技术,2015(22): 34-38.
- [2] 朱宇,李海宁,曹志涛,等.数字孪生在航空发动机制造工艺过程的应用探索[J].航空动力,2019(4): 56-60.
- [3] 崔一辉,赵恒,张森堂.航空发动机制造工艺仿真技术体系探索[J].航空制造技术,2019,62(13): 40-44.
- [4] 曹建国.航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J].推进技术,2018,39(5): 961-970.
- [5] 朱宇,万敏,周应科.高温合金复杂薄壁零件多道次充液拉深技术[J].航空学报,2011,31(2): 552-560.
- [6] 胡广旭,孟梅,刘冰.基于后处理再造型的连续制造工艺过程仿真技术[J].计算机辅助工程,2015,24(2): 47-52.