

细长轴智能加工关键技术研究

Key Technology of Slender Shaft's Intelligent Machining

■ 刘杰 帅新国 姜东升 李双全 刘镜琼/中国航发南方

中国航发南方创新团队紧密围绕加强信息化与工业化融合，以“互联网+”思维改变传统的制造模式，逐步解决了航空发动机细长轴加工质量不稳定、加工成本高及工艺成熟期长的问题。

航空发动机的细长轴是核心转动件，长径比达到40~70，壁厚2~5mm，壁厚差 $\leq 0.05\text{mm}$ ，多采用镍基高温合金等难加工材料制成，其制造技术水平和质量直接决定着发动机的性能和可靠性。

航空发动机细长轴主要面临三个方面的加工难题，即加工质量不稳定、加工成本高及工艺成熟期长。具体原因是：细长轴加工变形大，为了减少加工变形，主要采取降低切削用量（切削深度、速度及进给量）、分段切削、预留工艺台等措施，但上述工艺方法效果不明显且大大降低了零件的加工效率；为了解决生产过程中刀具磨损可能带来的质量问题，只能依赖操作者经验决定是否更换刀具，其结果是刀具使用量越来越大，浪费严重；此外，零件的这些特点也导致新机工艺更改频繁，工艺成熟期特别长。

在传统方法难以有效解决细长轴加工中的各种难题的情况下，中国航发南方创新团队紧密围绕加强信息化与工业化融合，以“互联网+”思维改变传统的制造模式，在细长轴切削物理仿真、加工过程在线监控这两项智能加工关键技术上取得

了突破，并通过这两项关键技术的交互应用，逐步解决了细长轴加工质量不稳定、加工成本高及工艺成熟期长的困扰。

航空发动机智能加工关键技术

目前，我国航空发动机制造在工艺稳定性及加工质量一致性方面与国际一流企业存在较大的差距。其中很重要的原因在于，虚拟仿真技术在生产制造中的应用不深入，制造过程中缺乏状态监测与主动调控能力，人为因素影响大。而以感知、计算和操控为核心的制造系统智能化技术是进一步提升航空制造能力的关键，并且国外已经在航空制造领域大力推行仿真、加工过程在线监控等智能制造关键技术。为此，国内航空发动机制造企业急需加强信息化与工业化融合，改变传统的加工制造模式，提高发动机制造能力。

切削物理仿真技术

在高性能计算、过程自动化和软件工具发展的推动下，普惠公司在发动机全生命周期内都运用了仿真技术，大大提高了产品的研制效率和质量，并认为合理运用仿真技术是其保持航空发动机领域技术优

势的重要原因之一。GE公司、普惠公司等联合启动了以航空发动机叶片和盘快速研制为目标的设计-材料-制造等一体化多学科仿真优化集成应用研究，大幅缩短了航空发动机叶片和盘的研制周期。沃尔沃航空发动机公司通过实施航空发动机零部件制造工艺的全流程仿真研究，实现了零件工艺参数和加工路径的优化，缩短了零部件的研制周期并降低了研发成本。

加工过程在线监控技术

美国国防加工制造中心于近年批准了一项军用产品智能加工项目，其核心思想是：通过多种传感器感知零件加工过程中的微小波动，通过融合计算实时修正工艺参数，通过操控加工中心优化工艺参数完成零件加工，从而实现智能化的零件加工。此外，GE公司提出了少无缺陷加工技术；MTU航空发动机公司和罗罗公司提出了基于加工过程智能化监控的自适应切削技术，主要通过实时监测零件、刀具的状态，及时调整加工参数和工具修整、更换，使加工尺寸精度和表面质量始终处于可控状态；普惠加拿大公司已广泛采用自适应切削技术来提高难加工材料的切削效率和刀具使用寿命。

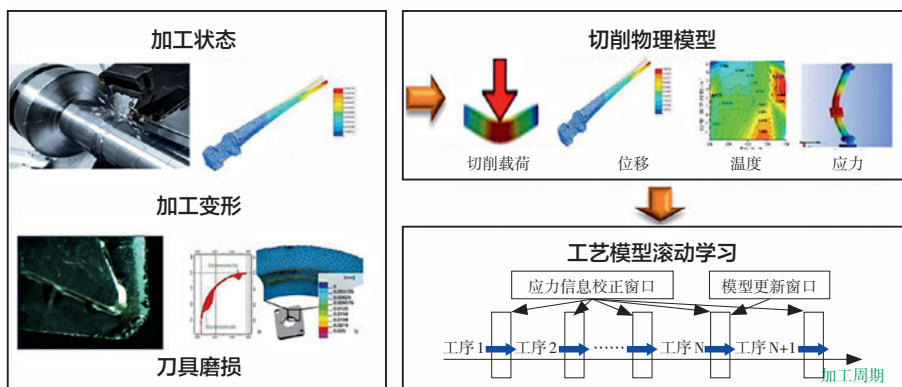


图1 切削物理仿真模型的建立与优化

细长轴智能加工应用探索

在工艺研发环节，主要开展了细长轴切削力、热有限元仿真技术研究。创新团队围绕难加工材料复杂细长轴切削加工中的力、热仿真模型（如图1所示），结合部分试验数据，分析零件加工变形规律和加工振动状态，建立早期加工参数库，优化零件加工路径和工艺参数，提高加工效率和加工质量。

在生产制造环节，开展细长轴振动、切削负荷等状态在线监测与调控研究。通过加工过程状态实时监测，收集切削负荷、振动、刀具磨损状态等信息，形成“加工过程心电图”。通过智能预测算法分析刀具的磨损规律和异常情况，提示合理更换刀具，建立切削负荷与工件

变形量和振动量的关系数据库，优化切削参数和加工方法，提高刀具的使用寿命和零件质量稳定性。

开展切削物理仿真技术与在线监测技术的交互应用研究，实现虚实数据的传递。利用在线获取的加工状态信息，改变切削过程仿真物理模型参数，动态地积累和改进工艺，快速形成成熟的加工工艺。建立基于大数据的特征数据库和工艺知识库，提供实时诊断和工艺决策方法，实现加工工艺过程的智能化以及工艺仿真与制造过程的闭环控制。

阶段性成果

创新团队针对航空发动机细长轴典型工序开展了切削物理仿真技术研究与应用，提高了零件的加工质量，

缩短了零件的研制周期，具体实施方案如下：建立了切削力与加工参数的关联模型，通过研究切削力关于进给的变化规律，提出针对零件变刚度特性的进给量规划方法；采用建模仿真技术比较分析零件加工变形量的大小，得到优化后的加工路径和工艺参数，提高了零件的加工质量。

针对航空发动机细长轴典型工序开展了在线监控技术研究与应用，提高了刀具的使用寿命、零件的加工效率及质量稳定性，具体如下：分析了零件的加工工艺及质量要求，构建了加工监控数据采集系统；开展了传感器测点敏感性分析，确定了传感器的布点方案；分析了面向刀具磨损的电流信号、振动信号的特征敏感性，建立了细长轴加工常用刀具的磨损规律；开发了自适应控制系统，实现了典型工序加工过程切削负荷自适应控制（如图2所示）。

结束语

“中国制造2025”在航空航天装备智能制造业领域重点突出了航空发动机，给航空发动机制造转型带来了重大历史性机遇。中国航发南方创新团队基于航空发动机细长轴零件加工工艺特点，开展智能加工关键技术研究与应用探索，提高了零件的加工效率和质量，缩短了工艺研发周期。通过突破切削物理仿真、加工过程在线监控两项关键技术及交互应用，实现了细长轴工艺与制造的闭环控制，改变了工艺研发与制造模式。

航空动力

（刘杰，中国航发南方，工程师，主要从事航空发动机数字化制造技术研究。）

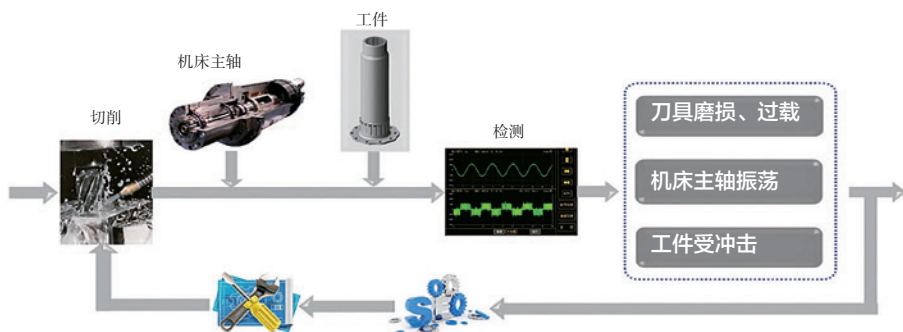


图2 加工过程状态监测与自适应控制