



张小明 ZHANG Xiaoming

优秀青年科学基金获得者

Winner of Outstanding Youth Science Foundation

华中科技大学教授

Professor, Huazhong University of Science and Technology

博士,教授,华中科技大学“华中学者”,国家优秀青年科学基金获得者,德国洪堡学者。2001年获吉林大学工程力学学士学位,2004年获吉林大学固体力学硕士学位,2009年获上海交通大学机械电子工程博士学位。受洪堡基金会资助,2010~2011年在Darmstadt University of Technology从事合作研究,2011年至今任教于华中科技大学机械学院。主要从事数字化制造与数控加工技术研究,在切削过程成像与表面完整性形成机制、加工动力学与工艺优化等方面开展了系统研究。受邀多次担任国际学术会议分会主席,在美国机械工程学会汇刊*J. Manuf. Sci. Eng.-Trans. ASME, Int. J. Mach. Tools Manuf.*等制造领域权威国际期刊上发表论文30余篇,授权国家发明专利20余项。

复杂零件数控加工技术创新探索

——访优秀青年科学基金获得者、华中科技大学张小明教授

Explore & Innovation of CNC Machining Technology for Complex Parts

本刊记者 李丹

☞: 航空发动机叶盘叶片的加工都说难,难在哪里?涉及到哪些关键技术?

张小明: 航空发动机叶盘叶片的制造涉及到多个生产工艺,包括热加工、冷加工、特种加工和检测等,我从事数控加工和切削方向研究工作,

主要谈谈叶盘叶片冷加工工艺问题。

航空轮盘类零件,如叶轮、叶盘、叶片是典型的曲面零件,加工效率和加工精度是永恒的主题,也是工厂里老生常谈的问题,且效率和精度是绑在一起,实际生产中需要在保证精度前提下的高效加工。叶盘叶片加工

的关键技术主要有以下几方面:


(1) 变形控制技术。叶盘叶片扭曲大、刚性弱,以某一型号的外涵道出口导向叶片为例,它是大涵道比涡扇发动机的重要部件,长度大于600mm,宽度大于300mm,最薄处小于2mm,是典型的弱刚性薄壁件,由

于轻量化要求,其设计、选材逐步由实心钛合金结构发展到空心、夹心结构的锻造铝合金材料,有 200 多个形位精度要求,显然,对这类零件来说,加工变形问题非常突出。

(2) 高效路径生成与工艺优化技术。当前还存在叶盘叶片加工效率与国外差距大的问题,以某一型号 $\phi 200\text{mm}$ 镍基高温合金叶盘为例,国外厂商加工时间是我们的 1/4。这个差距的背后固然有机床、夹具、刀具的问题,但不容忽视的是,我们还没有掌握、吃透核心的高效刀具路径生成方法与创新的工艺技术,如国外航空制造界已经成熟应用的侧铣插铣高效刀路规划技术,在我国还没有大规模应用;又如深冷加工技术可以提升加工品质和效率,在美国、欧洲已经应用得非常普遍,我们的工厂里还几乎没有这样的设备和工艺。

(3) 航空新材料高品质切削技术。随着新材料特别是复合材料和陶瓷硬脆材料的大量应用,其切削性能研究越来越重要。有些传统上的不可切削材料,随着刀具技术和切削工艺的发展,也可进行高品质切削。


值得指出的是,关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的,国外航空制造企业对这些关键技术和高端装备严密封锁,因此只能靠我们自己进行工艺机理的探索和成套装备/工艺的开发。

: 团队在加工工艺和加工效率上有哪些改进?

张小明: 我们团队是一支由丁汉院士带领的复杂曲面数字化制造研究队伍,在两期国家 973 项目和多项国家自然科学基金的支持下开展了十几年的基础理论研究和关键技术攻关。团队紧密结合中国航发 331 厂、410 厂、460 厂,航天科工三院 31 所,无锡透平叶片公司生产需求,突破了叶盘叶片类曲面加工技术瓶颈,研发了具有自主知识产权的工艺软件,形成了叶盘叶片高效高品质

加工成套工艺解决方案。


结合叶盘叶片的制造需求及特点,提出了基于复杂曲面特征的侧铣高效路径生成方法、稳定域预报工艺参数优化技术,开发了自主知识产权的 CAM 软件(UltraCAM 软件和 TurboWorks 软件),大幅缩短加工路径、减少刀具磨损、提高制造效率、降低生产成本。研发了高精加工工艺和加工测量一体化自适应变形控制方法,形成了叶盘叶片加工精度提升成套工艺解决方案,推进解决薄壁易变形叶片加工精度低、批量制造一致性差的问题。

: 这几年一直在提数字化制造和智能化制造,您认为在数控加工中应怎样实现?与现在相比,会有哪些优势?

张小明: 这是一个非常热门和前沿的主题。数字化制造的目的是对制造过程的建模与预期,而智能化制造是为了实现制造过程的自主感知与智能调控。在数控加工过程中,产品零件历经毛坯态到成形态的演变,产品的加工效率、几何精度以及物理性能等与加工过程中的轨迹运动、力-热耦合、振动变形等密切相关。对加工运动学及动力学过程的建模仿真,为预期产品的加工质量、优选加工工艺提供了理论支撑,是加工过程数字化的关键;而对加工过程的力-热等中间状态的自主感知,及早甄别诊断出损害加工质量的诱导因子,实现加工过程的跟踪调控,是加工过程智能化的关键。现有的数控加工工艺方案的确定往往基于以往的加工经验,以及大量反复的试切试验,因而产品试制周期长,试制废品率高,而且保守的工艺参数也限制了加工效率。相比之下,数字化的优势在于能根据预期的加工质量快速优选出合理的工艺方案,提高加工效率,缩短产品试制周期;而智能化的优势在于能实时监测加工过程中的工况,并及时调控以避免加工质量

的恶化,从而降低产品的废品率,提升加工品质。

当然,智能制造必然需要数据,但是加工过程的数据规模和多样性无法与现有的商业移动互联网大数据相比,要小得多,直接利用制造过程数据来进行加工物理特征的分类、加工品质模型的拟合,还存在很多困难,需要我们继续深入探索。

: 您主持了多个项目,请为我们介绍一下取得的成果和未来的研究重点?

张小明: 受益于多个国家自然科学基金项目的资助,在复杂曲面零件数字化制造基础理论和创新工艺方法领域开展了一些工作,同时也在企业取得了一定的应用成效。提出了复杂曲面五轴加工切削力计算的切厚解耦法,发展了加工动力学稳定性判别新模型-加速度逼近法和派生节点法,被国际学术界评价为五轴切削力计算的精确模型和铣削稳定性判别预报的一种新颖的时间域方法。发展了基于 Eshelby 等效夹杂理论的加工残余应力预测模型,从物理机制上揭示了加工引起的局部非弹性应变与残余应力之间的映射关系,首次给出了加工振动工况下切削残余应力的解析表达式。发展了切削流场原位测量技术,创新性地通过数字图像自相关的技术手段获取切削区应变应力分布,提供了校验工艺参数-加工表面完整性关联规律试验新方法,引起了国际同行跟踪研究。在基础理论研究的基础上,与团队成员共同开发了侧铣粗加工-循环精加工-变进给优化成套加工工艺,在企业轮盘零件批量生产中得到了推广应用。后续将继续围绕复杂曲面零件数字化制造开展工作,重点包括复合材料切削成像与可加工性、切削表面完整性工艺机理等,在加工表面残余应力与显微硬度调控方面进行深入研究。

(责编 古京)