



朱利民 ZHU Limin

长江学者特聘教授

Chang Jiang Scholar

国家杰出青年科学基金获得者

Winner of the National Science Fund
for Distinguished Young Scientists

上海交通大学教授, 博士生导师, 教育部“长江学者奖励计划”特聘教授、国家“万人计划”领军人才、机械系统与振动国家重点实验室副主任。主要从事数控加工技术与装备、机器人化智能制造装备方向的研究, 担任国际学术期刊 *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics* 和 *IEEE Transactions On Automation Science and Engineering* 副主编、*Proceedings of the IMechE, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 和 *International Journal of Intelligent Robotics and Applications* 编委, 主持国家自然科学基金重点项目、国家 973 计划项目课题、国家科技重大专项课题等科研项目 20 余项。由科学出版基金资助出版专著 1 部, 发表 SCI 论文 120 余篇, 包括 ASME 和 IEEE 会刊论文 30 篇。作为主要完成人获国家自然科学基金二等奖和国家科技进步二等奖各 1 项。

加强核心技术研究 促进数控加工智能化

——访长江学者特聘教授、上海交通大学教授朱利民

Promoting Intelligent CNC Machining by Core Technology Research

本刊记者 玲 犀

玲犀: 您长期从事多轴数控加工技术与装备的研究, 请简要介绍该领域国际发展前沿趋势和热点。

朱利民: 在复杂曲面零件五轴数控加工技术方面, 以线接触和高阶点接触加工为代表的自由曲面宽行加工几何学原理和刀位规划方法取得重要突破, 并正向面向制造的曲面设计方向发展; 以通用五轴数控机

床加工复杂共轭曲面的 CAM 技术获得广泛关注, 正成为一个研究热点; 对于刚性零件, 五轴铣削加工切削力模型已具有较高的精度, 在切削参数(进给率)优化中发挥了重要作用, 但五轴铣削加工动力学研究进展缓慢, 五轴加工中由于时变的切削条件和诸多不确定性因素, 往往难以满足零件在几何精度和物理性能方面的


高要求, 需要根据中间状态零件几何和性能参数的实测结果, 进行加工目标曲面修形或机床参数反调、刀具路径调整, 实现零件性能和几何要求驱动的自适应加工, 这种加工-测量一体化的闭环加工技术是智能制造的重要研究方向。

在大型复杂薄壁零件数控加工技术方面, 航空大型壁板结构复杂,

数控编程时间与在机加工时间之比为 10 : 1,近年来基于特征的数控加工自动工艺决策与编程得到了深入研究,目前已突破传统静态特征仅考虑零件最终几何状态的不足,提出了综合考虑零件加工过程中加工、检测和装夹等交互作用及其演变特性的动态特征模型与识别方法,实现了大型复杂结构件数控加工的工艺知识重用;大型薄壁零件加工时在切削力激励下易产生过大的变形和振动,甚至发生自激颤振,传统加工动力学仅仅关注“刀具-工件”系统动力学,采用牺牲效率的保守切削参数应对加工振动和变形问题,近期研究重点转向“薄壁构件-装夹支撑”系统结构动力学,通过调控“工件-夹具”系统的刚度和阻尼特性获得所期望的工艺系统静、动态特性,从动力学优化角度为解决大型薄壁零件加工的振动和变形难题提供了新的思路和技术方案;对于大型蒙皮类零件,法国杜菲工业公司和空客公司联合研发的镜像铣设备集柔性装夹、随动支撑、壁厚在线测量、加工误差补偿等功能于一体,其刀具和支撑头分别位于蒙皮两侧,沿蒙皮表面镜像对称移动,从本质上提高了加工区域的局部刚度,并且通过在线壁厚测量与微量切深补偿精确控制刀尖点与支撑点之间的间距,实现了加工壁厚的闭环控制,代表了大型蒙皮壁板加工的最新技术和发展趋势。


在数控加工装备技术方面,高速和高刚性、功能复合化、智能化、长寿命、高可靠性以及高节能环保性成为数控机床的主要发展趋势;加工过程力、热、声表面波等信号在线测量与加工过程监测、诊断和控制是智能加工装备的重要标志;智能主轴、智能轴承、智能支承件和智能控制系统、智能夹具等智能化功能部件研究得到高度关注,具有热误差补偿和主动振动补偿功能的智能机床已商业化;三自由度并联动力头、四~五自

由度混联机床等新构型装备在航空大型整体结构件现场轻型加工和数字化装配中已得到一定规模的应用,呈现出机器人化的特点。

: 请简要介绍课题组在数控加工技术与装备方面所做的研究。

朱利民: 课题组长期从事复杂曲面零件高效精密数控加工理论与技术研究,从加工成形几何学原理、动力学判稳方法、几何误差评定模型到成套工艺技术与装备,取得了系统性成果:提出了自由曲面五轴数控宽行加工的几何学原理和刀位规划方法, CIRP Fellow、法国学者 Bernard 教授在综述论文中将其列入该领域“1979~2012 年发展路线图”,评价为“创新和令人振奋”的工作;提出了铣削加工稳定性与动态误差同步预报的高效通用方法——全离散法,半离散法创立者 Insuperger 教授专门撰文评价其“计算效率高、在应用上有优势”;提出了曲面轮廓误差评定的统一模型和高效算法,意大利学者 Moroni 教授评价其“远胜其他方法,计算速度最快、最有前景”;研制了五轴小线段和 NURBS 曲线插补 CNC 系统与叶轮类零件五轴数控加工机床、CAM 软件及成套工艺,在航空发动机等制造企业获得重要应用,大型液体火箭发动机诱导轮批量生产效率提高 4 倍以上。近期课题组的工作重点转向大型薄壁零件数控加工技术与装备,与上海拓璞数控科技有限公司联合研制了国内首台运载火箭贮箱筒段镜像铣削装备,开发了针对三角网格壁板镜像铣削的数控编程和自适应加工软件系统,已实现直径 3.35m 贮箱筒段的小批量加工;在智能制造方面,以并联机构为主运动系统的五自由度混联机器人因兼具关节型机器人运动速度快、任务适应性强和传统机床高刚度、高精度的优点,正逐渐在大型构件现场加工与装配作业中得到规模化应用。我们目前正在这方面进行积极探索,希望能在新型镜像

铣削装备上有所突破。

: 航空领域中大量使用薄壁零件,您认为薄壁件加工振动和变形控制的科学难点在哪儿?解决问题的根本途径是什么?

朱利民: 难点主要体现在:(1) 切削几何与切削响应之间强耦合,耦合关系描述困难。复杂薄壁零件在切削力激励下的变形量和振动幅值可达几百微米。在加工过程中,切削几何(工件-刀具啮合区、切厚)决定切削激励(切削力),进而影响切削响应(变形、振动);反之,切削响应导致切削几何变化,两者呈现强耦合,这一耦合关系的描述非常困难;(2) 加工动力学模型参数强时变、强位变,参数精确获取困难。加工过程中,零件刚度、阻尼等结构参数随着材料去除时变,刀具动力学参数受机床末端姿态的影响且随刀具轴向位置变化,因此复杂薄壁零件五轴铣削加工动力学模型不再是定常周期系统,所需的时变、位变动力学参数很难精确获取;(3) 加工动力学模型维数高,振动响应计算困难。复杂薄壁零件往往呈现多模态、密集模态特性,因此动力学模型的维数很高,如何实现振动响应的高效计算是薄壁零件五轴铣削加工动力学仿真和稳定性判别的一个瓶颈问题。

采用辅助支撑和耗能装置提高工艺系统的刚度和阻尼是解决问题的“主动”方法。固定式或随动式辅助支撑可以提高加工区域的结构刚度,阻尼器等耗能装置可耗散结构振动能量,均可起到降低变形大小和振动响应幅值的作用。辅助支撑和耗能装置增加了工艺系统的机械阻抗,从而削弱了切削几何量与振动、变形之间的耦合关系,弱化了材料去除效应对工艺系统整体刚度和阻尼的影响,使得结构参数强时变动力学系统可以在局部近似为结构参数时不变动力学系统,因而大大降低了加工动力学建模与分析的难度。(责编 古京)