

国产数控机床及其关键技术 发展现状及展望

Current Situation and Prospect of Key Technologies of Domestic NC Machine Tool

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 刘 强
国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心
中国机械工业联合会 李冬茹



刘 强

北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授、博士生导师,国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心主任。主要研究领域为数控加工过程仿真优化及虚拟加工技术、数控装备动态特性分析及优化和高性能运动控制系统。主持国家自然科学基金、国家科技支撑计划等国家级科研项目和国际合作项目 20 余项,曾获国防科学技术奖二等奖 1 项、航空科学技术奖一等奖 1 项、中航工业(部级)科技进步二等奖 2 项,率领的创新团队获工艺创新先进集体称号。

经过数控机床制造行业和航空、航天、船舶、汽车、发电设备等众多用户行业的共同努力,将在满足国家重大需求的主机产品研制、高档数控系统自主开发与应用、掌握关键功能部件核心技术和批量制造技术、基础共性技术支撑等方面取得重大的进展,使国产数控机床的技术水平和竞争能力跨上一个新的台阶。

国产数控机床技术 发展历程概述

我国数控技术研究起步于 1958 年,当时清华大学在国内率先开展了数控机床研究,并与北京第一机床厂研制了我国第一台数控机床。随后,一些高校和企业也开展了相应的研究工作,但由于技术和条件方面的限制,发展较慢。

自我国第 6 个五年计划以来,我国政府在每一个五年计划中,通过技术改造和各类科技攻关计划等,对数控机床关键技术的研究开发与应用给予了重点支持。通过“六五”期间“引进技术”、“七五”期间“消化吸

收”、“八五”期间“自主开发”、“九五”期间“工程化”、“十五”期间“产业化”和“高精尖重点应用”,到“十一五”期间“实施重大科技专项”等,我国数控技术与装备从无到有,从少到多,从低到高,取得了可喜的发展和长足的进步。在数控机床应用方面,越来越多地为航天、航空、汽车和能源等国家重点行业提供数控机床产品,并且开始出口;在数控系统方面,经济型数控系统已普及应用,还开发出了五轴联动以及多通道多轴联动的高档控制系统,应用于国产数控机床,打破了国外的技术封锁和限制,并制约了国外产品的价格。在数控机床品种构成方面,不仅在车、铣、

镗、磨等通用型机床方面已实现数控化,数控技术还在加工中心、超精密机床、混联机床、复合机床、特种加工机床和一些专用机床产品上得到成功应用。2008年,可供市场的国产数控机床已达1500种,年产量已达125000台,约占机床总量的21%。在企业竞争力方面,机床企业的竞争力不断增强,沈阳机床入围中国企业500强,沈阳机床、大连机床等已经进入世界机床企业前10位。

数控加工技术特点、现状及最新进展

1 数控加工技术的特点

由于现代产品在零件材料、结构特点方面对加工过程的质量、效率、成本和环境友好性提出了越来越高的新要求,数控加工作为一种高精度、高柔性和高效率的加工方法,已用于许多产品关键零件的加工,在国内制造业中得到了广泛应用。以数控加工应用最为广泛的航空航天制造业为例,数控加工零件对象呈现出新的特点,从而带来对数控加工技术的新要求。

(1) 高性能——广泛应用新难加工材料。

现代军用机已发展到第四代,要求材料的比强度、比刚度(或比模量)高,具有较好的耐高温和抗低温性能、良好的耐老化和抗腐蚀能力,有足够的韧性和抗疲劳能力等。航天产品要求材料具有高体积质量比、高比刚度和抗蚀性能等。因此,航空航天产品对材料的性能要求越来越高,除大量采用铝合金外,高温合金、钛合金、高强度钢、复合材料、工程陶瓷等新材料和难加工材料的应用越来越多,因此对加工工艺与装备有着特殊的要求。

(2) 轻量化——大量采用整体薄壁结构。

航空航天产品构件多、形状复杂,为了获得更好的机动性能、增大

有效载荷和增加航程、降低使用成本,是航空航天飞行器提出了轻量化设计制造的新要求。为了实现轻量化要求,现代航空航天产品一方面广泛应用新型轻质材料,另一方面,在设计上采用整体薄壁结构件,如导弹和火箭上的筒体结构、飞机上的梁/框/肋/壁板/桁条等以及航空发动机整体叶轮叶盘等,此类构件具有几何尺寸大、结构与面形复杂、薄壁设计多等特点,构件的最小壁厚小,过渡圆角半径也很小。在加工过程中对加工精度、颤振抑制、变形控制和加工效率提出了很高的要求。

(3) 精密化——加工精度不断提高。

在航空航天飞行器产品中,各种控制、导航、机械电子、武器(弹头)等属于机载(弹、箭、星、船)设备或部件,如高精度陀螺、伺服机构、精密偶件、动态马达、探测器、光学器件、控制器等,它们直接影响到飞行器或武器装备导航、控制精度,对保证其综合性能或精确打击能力具有关键性作用,这类设备或部件的特点是种类多、结构复杂、精度高、批量小、试制周期短,由于其结构上多采用精密、薄壁甚至弹、挠性结构等,此类零件在切削加工中,要求尺寸、形状精度达到亚微米级,表面粗糙度达到几十甚至几纳米,对传统制造技术提出了一些极端的挑战。

(4) 高效化——对加工设备的速度与效率要求越来越高。

现代航空航天产品的型号增多、研制周期明显缩短、批量变化也较大,同时,由于采用越来越多的整体结构设计使得切削加工零件数量增加,而且切削加工过程的材料去除量非常大(飞机结构件可达90%以上)。因此,如何在给定的生产周期内提高切削加工设备的利用率,并增加切削过程的单位时间材料去除率,成为航空航天制造企业努力追求的目标之一,提高设备的数控化率、采用高速

加工技术和高速高效加工机床是实现该目标的主要途径。

(5) 可靠性和经济性——加工质量和成本控制越来越严。

对可靠性具有极高要求的航空航天产品,对加工质量和装配质量的要求也越来越高;同时,降低产品生产成本和生命周期费用,已成为提高航空航天产品经济可承受力、竞争能力和可持续发展的重要途径。

2 现状及最新进展

为适应现代复杂产品零件材料和结构工艺特点对数控加工水平和能力要求,制造企业数控机床拥有量快速增长,数控加工覆盖零件范围越来越广,数控加工能力成为制造企业的核心技术能力之一。但是,由于对新型数控机床性能和先进数控加工技术掌握不够,实际数控机床加工应用离“优质、高效、低耗、绿色”的要求尚有差距。概括而言,数控加工工艺与装备技术方面呈现出“三高、三缺一低”的现象。

(1) “三高”——加工设备数控化率高、数控加工零件比例高、数控加工工艺要求高。

· 据对部分行业的调研,加工设备数控化率已从“九五”期间不到5%,增加到“十五”期间的10%以上,部分重点企业达20%~30%。

· 重要产品的关键机加零件80%~100%采用数控加工完成。

· 对零件加工精度、变形控制和加工效率提出了新的要求。

(2) “三缺一低”——缺乏合理优化的切削参数、缺乏工艺数据库和知识库、缺乏数字化制造管理系统。

· 缺乏优化方法工具、合理优化切削参数和工艺,致使数控设备能力不能有效发挥;数控机床和加工过程准备/等待/故障时间较长,影响整体效率,难以满足高效加工的需要。

· 切削加工工艺数据库建设工作比较分散,已有数据库应用范围有

限,缺乏面向制造行业共享的新型数控加工切削数据库系统。

·多数企业数控车间缺乏数字化的制造执行系统(MES)。

(3)“一低”——数控加工综合效率较低。具体表现为:数控机床主轴开功率低、加工过程中主轴功率利用率低、切削过程的单位时间材料去除速率(Material Removal Rate, MRR)低。

针对数控加工需求的特点和应用现状,在“十五”期间,国防科工委在基础科研中安排了高效数控加工工艺系列专项课题,包括高效数控加工技术、大型整体结构件高速数控加工关键技术、基于切削过程仿真的数控加工工艺优化等,在基础科研取得实质成果并得到应用验证后,又于

键功能部件、数控机床与数控系统可靠性增长技术、数控加工用户工艺技术和国产数控机床应用示范工程研究等重点项目,部分项目已完成且取得了进展,这些项目的实施,有力地推动了国产数控机床关键技术的研究开发,提高了企业的研发能力和技术水平。

先进制造工艺 对于数控机床的需求

由于被加工零件对象的材料、结构和工艺特点,对数控机床及相关技术提出了一系列更高的要求,本文仅从高速化与复合化、高刚性与优良的动态响应特性、高可靠性以及装备与工艺的融合性4个方面,讨论对数控机床需求方面的新特点。



2007年5月启动实施“国防科技工业千台数控机床增效工程”,采用基于数控切削过程力学仿真优化的数控机床增效使能技术,提高数控机床切削加工效率,取得了显著成效,并正在向上百家企业进行推广应用。

近年来,通过国家科技攻关(支撑)计划、“863”计划和“高档数控机床与基础制造装备”重大科技专项,重点安排了一大批“高、精、尖”数控机床关键技术、高档数控装备关键技术、高速高效数控加工技术、关

1 高速化与复合化

数控机床的高速化与复合化是实现高效数控加工的主要需求。

高速化主要以提高机床单位时间内有效地切除零件毛坯上多余材料的能力为目标,表现在采用高速主轴、高进给速度和大吃刀深度等,从而获得高的材料去除速率。高速机床首先应用于铝合金类的轻金属材料零件的加工,主轴转速应高于12000r/min,可达42000r/min甚至更高,以获得高的切削线速度(可达

1100~5000m/min甚至更高),MRR指标可达5000cm³/min以上。此外,近年来,对一些模具钢、钛合金等难加工材料进行高速加工对高速机床的发展提出了新要求。

高速化对于数控机床来说,重点要解决的问题包括高速主轴(包括刀具系统)及其动平衡、高速主轴的冷却润滑、进给系统的高动态响应和高速加工时的防护装置等,此外,高速加工的编程方法和走刀策略也是与之相关的关键支持技术。

数控复合加工是指工件在机床上一次装夹后,能自动进行车、铣、钻、镗等切削加工方法的多工序加工,从而能在一台机床上完成工件的全部或大部分加工工序。数控复合加工是一种在多轴联动基础上实现的高效、高柔性、高质量的切削加工方法,可以大大缩短工件定位装夹等辅助工作时间、提高机床加工效率,并且可以有效地解决一些难加工材料特殊零件(如飞机落架零件、航空发动机机匣等)的加工难题,当前应用最多的为车铣(或铣车)复合加工。

数控复合加工机床需要解决的关键技术包括多主轴多刀架系统的设计与控制、机床结构布局与优化和车铣复合编程技术等。

2 高刚性与优良的动态响应特性

为适应不同的零件材料和切削加工要求,尤其是针对钛合金、高温合金、不锈钢、模具钢等难加工材料的加工,机床的主轴系统、进给系统和机床结构必须具有良好的静刚度、动刚度以及热稳定性,以减少由于工件负载和切削力引起的机床变形、动态切削过程产生的振动以及切削热、环境温度变化等作用引起的热变形。机床的动态响应主要表现在进给伺服系统的动态特性上,采用直线电机的进给速度可达30~60m/min或更高,进给加速度可达到1~2g,小型的数控机床可能更高。高性能数控机床采用直线电机驱动的直线轴运动

和力矩电机驱动的摆动轴运动,可大大简化机械传动结构,实现所谓“零传动”,并在轴运动控制器中对速度、加速度和加速度变化率的控制曲线(Profile)进行优化,从而抑制运动过程中的谐振,获得非常高的动态响应特性,实现复杂型面、型腔加工过程中频繁加减速条件下的高速进给。

要获得机床的高刚性与优良的动态响应特性,需要解决的关键技术包括采用新型结构和材料(如人造大理石床身、箱中箱结构、仿生优化结构等)、机床动态性能综合优化(如机电耦合分析、基于“切削过程-伺服控制-机床结构”动态耦合的优化、虚拟机床等)和直线电机双边驱动控制等技术和方法。

3 高可靠性

可靠性指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力,它是产品质量在时间尺度的描述。数控机床可靠性主要以数控机床的平均故障间隔时间(Mean Time Between Failures, MTBF)进行评价,它综合反映了数控机床设计、制造的质量水平。据有关实际跟踪调查统计数据,国内企业从发达国家进口的数控机床大部分产品的MTBF已达到900~1100h。高可靠性是对于数控装备正常运行和使用的重要要求,对于数控生产厂商提高产品技术水平和产品竞争力均有着至关重要的作用。

数控机床可靠性的关键技术包括可靠性设计技术、可靠性增长技术、可靠性试验规范和试验技术、故障模式和分布模型以及可靠性评价体系等。

4 装备与工艺融合性

针对现代产品零件加工工艺的特点和需求,研制开发出在装备中融合或是固化加工工艺关键技术及解决方案的数控机床,已越来越受到国内外企业的关注。所谓装备与工艺融合性,主要表现在3个方面:首先,是为了适应一些材料加工的特殊

需求,在机床装备中增加或融入一些新的功能,或有针对性地提升一些性能,如超硬材料的加工、复合材料、特种材料等的加工;第二是新型数控机床由于采用新的工作原理,提供了一些新的加工工艺方法,如车铣复合、切削-激光复合加工等;第三是满足特殊用户工艺需求的专门化或专用机床,航空工业是其典型应用领域之一,如用于飞机结构件加工的多龙门多主轴机床、翻板式立卧转换大工作台面机床、采用柔性多点工装机床、薄壁板“镜像”铣削(3D Panel Mirror Milling)等。汽车工业是另一个典型代表,要求针对其典型零件加工特点,构建满足一定的生产规模、大批量的刚柔结合生产线。此外,在数控系统及编程工具中嵌入加工工艺策略、加工过程运动和力学仿真、切削参数优化等功能,也成为装备与工艺融合的一种新方式。

装备与工艺的融合性要求数控机床研发生产厂商深入研究、分析和学习、掌握用户典型产品零件工艺,共同探讨从零件加工工艺需求出发研发和改进数控机床产品的途径,并且加强与刀具、工具、制造执行系统等其他技术的相互衔接。

我国数控机床工业亟待加强或需要解决的共性问题

我国数控机床产品研发生产能力和技术水平取得了长足的进步,机床工业已进入世界前列,但面对国外激烈的产品竞争和不断的技术进步,仍存在问题。从技术层面来讲,亟待加强或需要解决的共性问题包括以下几点。

1 深化数控机床基础理论研究

数控机床基础理论是实现产品创新重要技术支撑,涉及到力学、机械工程、控制理论与工程、计算机技术等多个基础学科。在现代数控机床基础理论方面,主要有:机床精度理论;机床动力学与动态分析;功能

部件优化设计方法;热力学分析与热平衡设计方法;机电耦合分析;整机综合动态特性分析与优化;先进伺服控制理论与方法;机床可靠性技术;机床试验测试及检验技术以及相关的标准规范等。

当前,在数控机床基础理论研究方面的人才队伍缺乏,持续性、系统性的深入研究工作和成果积累不多,研究试验测试的基础条件不完善。

针对基础研究薄弱的问题,应该充分发挥高校在数控机床基础理论和共性技术研究方面的优势,以新产品研究开发和应用为牵引,进行“产、学、研、用”合作,联合建立相应的研究和试验基地,带动数控机床基础理论、创新设计方法和关键技术解决方案的深入研究。

2 提升数控机床自主研究开发和创新能力

数控机床是一种集机械、电子、电机、控制和计算机软硬件等多学科多专业知识于一体的高技术装备,当前我国数控机床行业在自主研究开发和创新能力方面仍显不足,在技术方面的表现为:设计模式仍以静态设计为主;设计过程仍以零部件的相对独立设计为主;设计方法仍以基于经验的定性化设计为主;缺乏动态的、系统的、量化的分析设计。

在产品方面表现为:通用型产品多、不同厂家的同类化产品多;针对用户工艺特点快速响应市场需求研发或进行重要改进的产品少;针对细分市场的产品少;成熟的高性能数控机床产品少。

这些不足已成为影响数控机床行业自主创新能力和高端产品竞争力的重要原因。

在现代高性能数控机床设计过程中,要真正掌握高性能数控机床先进设计技术的原理和实现方法,提高机床设计水平和应用水平,促进高性能数控机床的自主创新,需要加

强对高性能数控机床关键技术分析、优化设计方法的研究和应用,实现数控机床设计的以下转变:从以静态设计为主的模式向以动态为主的现代设计模式转变;从零件、部件的相对独立设计向整机结构的综合优化设计转变;从基于经验的定性化设计向基于静动态分析的定量化设计转变;从仅考虑机床结构本身的设计向结构和切削工艺过程耦合的设计转变;从采用传统设计方法向采用以虚拟样机为核心的数字化设计转变。

3 大力提高数控机床的可靠性

数控机床可靠性问题已成为影响国产数控机床应用的一个重要因素,也是当前用户企业反映问题最多的方面。数控机床可靠性可用平均故障间隔时间来评价,实际上,数控机床平均故障间隔时间(MTBF)指标不仅给出了对产品质量的时间度量的量化值,更重要的是它进一步综合反映了数控机床厂家的设计、加工、装配、调试、质量控制和生产管理等多方面的状况。因此,要以提高国产数控机床可靠性为目标,建立数控机床可靠性评价体系,准确客观地评测数控机床的可靠性指标,研究分析数控机床故障模式及影响因素,加强可靠性设计,应用数控机床可靠性增长技术,争取在近几年内,全面提高国产数控机床的可靠性。

4 掌握典型应用行业的加工工艺

装备是工艺技术和工艺方法的载体,掌握典型行业典型产品的加工工艺,对于准确地为产品进行市场定位,研发满足用户的新产品,增强产品的竞争力,具有重要意义。近些年来,国内机床企业已经开始重视这一问题,并着手开展对用户工艺的研究工作。对于机床行业来说,研究、分析和掌握典型行业零件的加工工艺,将最终用户的工艺研究和试验前移,在机床企业开展用户关键加工工艺研究,为最终用户提供整体工艺解

决方案,成为机床用户企业的“工艺师”,将会更好地树立机床企业的品牌形象,形成自己的特色优势,大大提升企业和产品的竞争力。

数控加工新技术及其在航空中的应用

近年来,我们以“国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心”为主要平台,围绕提高数控机床切削加工效率,开展系列化的先进高效数控加工技术的研究。这些研究包括数控加工过程力学仿真与参数优化、数控加工变形快速分析与预测、数控加工切削参数数据库、切削加工用“低温冷却+微量润滑”系统、难加工材料复杂结构数控加工技术、新型传动系统复杂零件加工、复杂曲面高效加工技术等。并且一批研究成果已成功地应用于航空航天企业关键零件的数控加工,取得了良好效果。

1 数控加工过程力学仿真与参数优化技术

切削过程力学仿真与切削参数优化是进行数控加工过程运动(几何)仿真之后的必然发展方向。在向军工行业推出了针对高速铣削加工过程动力学仿真优化系统、数控机床加工动力学特性测试分析系统的基础上,进一步研究开发了“中低速数控铣削加工过程力学仿真与优化系统”和“铣削加工动力学切削参数数据库系统”,形成“X-Cut”系列基于切削过程力学仿真的数控机床增效使能工具,累计已向企业提供了200余套次的上述软硬件系统。并且根据企业需求,开展了车铣复合加工过程力学仿真与优化研究,为越来越多的车铣复合加工应用提供关键工艺和优化参数支持。

2 数控加工变形快速分析与预测技术

针对航空整体结构零件中的弱刚性复杂结构件,通过分析建立实际结构与等效力学模型间的力学特

性映射关系,以通用有限元软件为基础进行二次研究开发,开发了数控加工变形快速分析与预测软件“DeFMCut”,可以快速计算复杂结构件的各阶频率、振型及工件让刀变形等动、静态特性参数。在实际数控加工前,可以快速、准确地分析与计算复杂结构件在不同加工阶段、不同加工位置时的动态特性与加工弹性变形,为切削参数的优化和加工过程进行变形补偿提供了量化依据。

3 绿色切削加工技术与系统

围绕绿色切削加工需求,在数控切削加工的低温冷风、微量润滑及低温微量润滑、微细冰粒冷却润滑等技术及系统方面,开展了机理研究和系列化的开发工作,申请并获得了多项国家发明和国际专利,研制了基于自主专利技术的多个型号工程化的样机,并已在航空航天企业数控加工车间进行小批量试用,加工的零件材料包括铝合金、高强钢、钛合金及高温合金,应用效果表明,采用以上绿色切削加工技术或以上技术的组合,可以获得良好的加工表面质量,降低切削力,同时大量减少切削液用量,实现清洁绿色的切削加工。

结束语

“十二五”是国产数控机床发展的一个新机遇期,全球已经走出金融危机造成的经济最困难时期,国内需求拉动的效果非常明显。“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项已全面启动和实施。可以相信,经过数控机床制造行业和航空、航天、船舶、汽车、发电设备等众多用户行业的共同努力,将在满足国家重大需求的主机产品研制、高档数控系统自主开发与应用、掌握关键功能部件核心技术和批量制造技术、基础共性技术支撑等方面取得重大的进展,使国产数控机床的技术水平和竞争能力跨上一个新的台阶。

(责编 淡蓝)