

# 国产数控机床的技术现状与对策\*

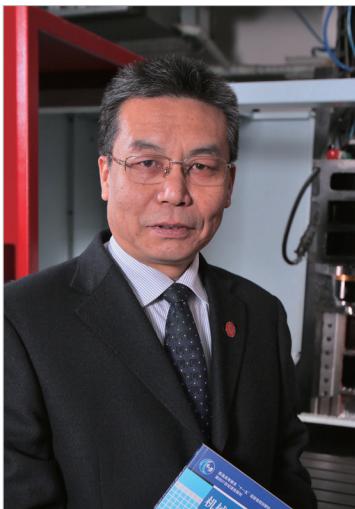
赵万华,张 星,吕 盾,张 俊

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710054)

[摘要] 高档数控机床是国家装备制造业的支柱产业,是实现制造强国战略的重要保障,也是制造业产业升级和国家综合实力的集中体现。国家重大科技专项、装备制造业振兴规划等国家战略性计划的实施为国产高档数控机床发展提供了前所未有的发展机遇。针对国产数控机床,分析了我国机床行业的发展背景,深入解读国产机床的技术现状,重点探讨了高速高精度联动控制,复杂工况高效高精度加工,精度保持性和可靠性等高档数控机床的关键核心技术,提出推动国产数控机床向高端发展的若干对策。

关键词: 高档数控机床; 核心技术; 装备制造业

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.09.016



赵万华

西安交通大学二级教授,博导,“长江学者”特聘教授,享受国务院政府特殊津贴。主要从事高速加工工艺、高速机床动力学和机电耦合方面的研究工作。承担了04重大专项、973课题等众多课题项目,多次获得国家及教育部奖励。获发明专利10余项,发表论文100余篇,其中SCI收录40篇,EI收录50余篇。

## 我国机床行业的发展背景

制造业是立国之本、兴国之器、强国之基。国际金融危机以来,制造业迎来发达国家和发展中国家争相介入的新一轮国际分工争夺战。随着相对优势逐步转化,各国在全球制造体系中的地位将动态调整,并重塑全球制造业版图。近年来,发达国家纷纷制定“再工业化”战略,如德国工业4.0、美国工业互联网、新工业法国等,力图推动中高端制造业回流,并进一步加强全球制造业的布局调整,意图保持其全球制造业核心的领导地位。

装备制造业作为制造业的核心,是工业化之母,是高新技术产业之根。新中国成立特别是改革开放以来,我国装备制造业取得了令人瞩目的成就,规模和总量已经进入世界前列,成为名副其实的全球制造大国。然而,我国装备制造业普遍自主创新能力不强,核心技术和关键部件受制于人,产品质量问题突出,产业结构不尽合理,属于粗放型发展。发达国

家高端制造回流与新兴经济体争夺中低端制造正在同时发生,对我国形成“双向挤压”。面对全球制造业竞争格局的重大调整、资源环境的约束和人力成本的逐渐提高等多方面的严峻挑战,我国未来必须推动装备制造业向高端发展。

为大力提升装备制造业水平,我国提出要走新型工业化道路,于2015年5月颁发了《中国制造2025》,全面部署实施制造强国战略,这是我国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领。围绕实现制造强国的战略目标,《中国制造2025》明确了“高档数控机床和机器人”作为十大重点发展领域之一。高档数控机床作为典型的高端制造装备,是一个国家的战略性产业和大国崛起的标志,也是博弈世界制造业舞台和参与国际竞争的制高点。如何实现国产高档数控机床的快速发展,保障《中国制造2025》目标的顺利实现,不但需要机制和组织的保障,更加需要数控机床核心技术的突破和创新。

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51235009)。

## 国产数控机床的技术现状

高端数控机床是支撑航空航天、船舶、汽车、发电设备等制造领域发展的核心装备。我国数控机床经过数十年的发展,已经取得了不错的成绩,初步掌握了数控系统、伺服驱动、主机研制等基础技术,其中部分技术已经实现了产业化发展<sup>[1]</sup>。在我国连续数年成为世界机床消费第一大国的同时,国产机床的比重逐年提升,并且我国数控技术方面的人才队伍也在不断壮大。但不可否认的是,国产数控机床相关技术还存在不少的问题,如国产数控机床从外观上与进口机床十分类似,功能上基本接近,但性能相差甚远,导致结构相似,实则刚度、动态精度及其保持性等性能相差很远,“形”似而“神”不似。本文主要从以下3个方面剖析国产机床的技术现状。

### 1 过分依赖进口,关键技术难引进

国内机床制造企业在面临高端机床难研制、中低端机床业绩持续下滑的重重压力之下,正在逐渐成为名副其实的“机床组装厂”。极端情况下,国内机床企业只做床身、立柱等结构大件和一些辅助配件,数控系统、伺服驱动、转摆头/转摆台和高速电主轴等核心功能部件几乎全部采用高档进口部件,甚至连轴承、丝杠、导轨等基础传动件也依赖进口,机床企业只是将这些零部件进行组装、调试和销售,机床制造甚至变成了“搭积木”,企业完全被产业价值链“微笑曲线”的低端锁定。更为严峻的是,国外机床厂商已经倾向于将数控系统和伺服驱动、电机、主轴打包销售,部分高精尖产品严禁向我国出口,进口产品的现场调试过程也是保密的,拒绝国内技术人员参与,这更加剧了国产机床的被动局面,使其越来越深陷空有规模、没有实力、难有作为的困境。

当前,诸如 SIEMENS、

HEIDENHAIN 的伺服数控系统、IBAG 的电主轴和 NSK 的轴承正在多家机床企业和用户的加工车间运行,国内这种机床组装的经营模式能在短期内为企业产生一定的经济效益,但对相关行业产生的恶性后果不可忽视,一方面造成了国内资金的大量流失,另一方面还会打击国产功能部件和整机研制的信心,分化机床产业上下游间的关系链。一些国内企业也试图通过与国外先进机床企业和零部件供应商合作,希望引进相关高端技术来提升自身研制能力,但需要清楚认识到,技术是一个企业赖以生存的根本,是企业的核心和生命,真正的技术不可能依靠购买和引进获得,只能依靠自主。

### 2 未掌握整机设计、制造和使用的核心技术,缺乏技术研发和创新能力

机床的生命周期主要包括设计、制造和使用3个阶段,是一个复杂的系统工程。当前,国产机床制造企业存在诸多问题:在设计阶段,机床机械结构多参照展会和技术手册,仿制国外同类型机床,其静、动刚度需通过经验公式估算、反复修正和改进才能达到设计要求,这种被动设计方式周期长、投入大、缺乏主动性。在伺服控制系统方面,国产机床特别是高档数控机床主要选择 SIEMENS、FANUC 及 HEIDENHAIN 等国外进口产品,其选型仍依靠功率、扭矩等几个基本参数,这些国外系统也仅有少量功能和少量参数对国产机床开放和使用,几乎是一个“黑箱子”。在机床制造阶段,机床几何精度由于缺乏主动设计手段,往往需要装配过程的反复调试、矫正予以保证。另外,国产机床机械系统的装配工艺也没有量化的指导原则,批量生产的机床精度一致性得不到保障,其动态特性差异很大,无法准确预知。对于伺服控制系统,国内企业只能参考国外提供的调试手册,对对象本身的运

行机理并不十分清楚,一些高级功能模块不知如何使用,总是处在被动境地。在机床使用阶段,由于国内机床制造企业缺乏对用户工艺的了解研究,而数控机床用户也仅仅关注加工生产,缺乏对机床特性和加工性能的认识,在加工工艺的制定和参数选择上,多凭工艺人员的习惯和经验,缺乏理论性、量化的指导原则,造成机床加工效率很低、人力和物力资源的严重浪费。目前,这种国产数控机床与用户加工工艺没有深入结合的局面造成好机床用不好、也造不出好机床的困境,没有形成“工艺牵引装备,装备支撑工艺”的良性循环。

国内机床制造企业长期处于这种被动局面,究其原因,是没有掌握机床整机设计、制造和使用的核心技术,其根本是缺乏技术研发和创新能力。在国外,SIEMENS 在全球招揽成千上万的工程师、研发人员为其工作,日本 NSK 公司的实验室面积与生产面积达到 1:1,美国 GE 公司的实验室环绕巨大的装配车间,数倍于生产面积,形成一个实验城……这些国际化公司从关键技术攻关、产品开发、市场销售到最终树立国际品牌,非常注重各个环节密切协作、紧密配合,遵循只有做好基础知识储备和人才保障,才能拥有源源不断的技术创新的规律,也才有今日国际舞台上的主导地位。反观国内机床制造企业,政策上过分追求效益和业绩,口号上时时不忘创新,而在人才培养和技术积累这些重要环节上政策不凸显,持续性不足:相关技术资料严重稀缺;大部分厂房都用于一线制造和装配,而用于设计研发的实验室、研发室却是少之又少;高端人才更是凤毛麟角,技术人员忙于应付项目报告,专注技术研发和产品试制的寥寥无几。同时,在为数不多的企业实验室中,相关研发人员完全被商用软件束缚了思维和手脚,一台机床的设计与分析全部依赖进口商用软件,尽

管软件操作十分娴熟,但对软件背后的力学、电磁学、控制论等基础理论知识缺乏深究,最终也无法研制出一台好的数控机床。当前,需清醒地认识到,仅仅熟练掌握商用软件的使用根本无法帮助掌握机床设计、制造的核心技术。另外,创新不是一蹴而就的,而是对知识、技术长期积累的必然结果,这在数控机床这种技术密集型产品上更是如此。对比之下,机床企业缺少知识积累、人才储备和技术研发,就谈不上技术突破和创新。现在,机床产业正处在国家实施制造强国战略布局的前沿,科研院所需发挥基础研究的能力,尽快取得核心关键技术的突破,并与企业紧密合作,大力推进高档数控机床的设计、制造以及使用中相关核心技术的研发,这样才能看到国产机床实现“弯道超车”的希望。

### 3 机床精度保持性、可靠性相关技术积累不足

机床精度保持性和可靠性是数控机床的重要性能指标。机床精度保持性是指机床在正常的使用条件下,各项精度能够长时间保持在精度要求范围内的能力;可靠性是指机床在规定的特有条件下及规定的时间内,完成规定功能的能力。精度保持性和可靠性对机床的加工质量和效率都有至关重要的影响。经过国家重大专项的科技攻关,国内机床企业的精度保持性和可靠性相关技术取得了一定进展,但与国外先进水平相比还是差距甚远。

机床精度保持性问题在设计、制造和使用 3 个阶段会因机床类型、结构形式、性能要求和工况特点的不同而不同。根据前期对国产数控机床精度保持性的调研,发现国产机床精度保持性较差,其研究还存在精度保证、精度稳定、精度保持和精度寿命等概念不清晰,或者未定义的问题,导致目前国内还没有一个比较系统的精度保持性研究体系。国外数控

机床精度保持性的主要影响因素在于运动部件之间的磨损,相比较而言,国内机床影响精度保持还有更多因素,如铸件铸造应力、装配应力等。在实际调研中发现,国产机床装配过程中,铸件在刮研好精度一段时间之后会发生变形;在工作过程中,装配预紧的螺栓等连接件会在较短时间内出现预紧力下降、连接松动,这都使机床精度及性能发生变化。目前,国产机床应加强对精度保持性机理的基础研究,以及对设计、制造环节中精度保持性关键技术的攻关。

机床可靠性直接影响数控机床的使用,更影响用户对机床的使用信心。近年来的市场情况表明,国外数控机床在可靠性方面占有的优势愈发明显,这也促使国产机床价格优势正在逐渐丧失殆尽。尽管通过近年来国家技术攻关,数控机床的可靠性指标 MTBF 从原来的 200h 提高到 1000h,但是国产数控机床的故障率还是居高不下。由于机床制造企业缺乏对机床可靠性的深入研究,技术积累比较少,缺少有关数据参考资料,导致数控机床在加工过程中一旦出现故障后,没有明确的数据参考依据,不能及时处理故障,严重影响机床加工效率。国产机床无论功能、性

能如何优良,如果使用过程中故障频发,致使加工不能正常进行,就无法体现其使用价值,这也是导致用户对国产机床缺乏信心的主要原因。

## 高档数控机床的核心技术

目前,数控机床正向高速、高加速方向发展,部分场合已实现进给速度 40m/min,加速度 1.5g 的工程应用。与此同时,极端工况对机床服役性能要求也越来越高,例如,某航空发动机叶片进出气边大曲率拐角处要求轮廓度亚微米级,某大型整体航空薄壁结构件最薄壁厚小于 1mm,加工时要求不能变形。数控机床作为一个运行机理复杂、具备联动功能的机电集成系统,在极端工况下长时间运行,其工作机理和性能会发生变异,从而引发更多的使用问题。显然,此时机床企业若还是依靠静态指标、被动设计和机械式组装模式,就很难满足复杂工况和苛刻精度的使用要求。目前,高档国产数控机床在研制与使用阶段对高速高精度联动控制、复杂工况高效高精度加工、精度保持性和可靠性等方面的核心技术(图 1)还没有真正掌握,这也导致机床企业所生产的机床性能上不去,高端用户的市场份额占比很小。

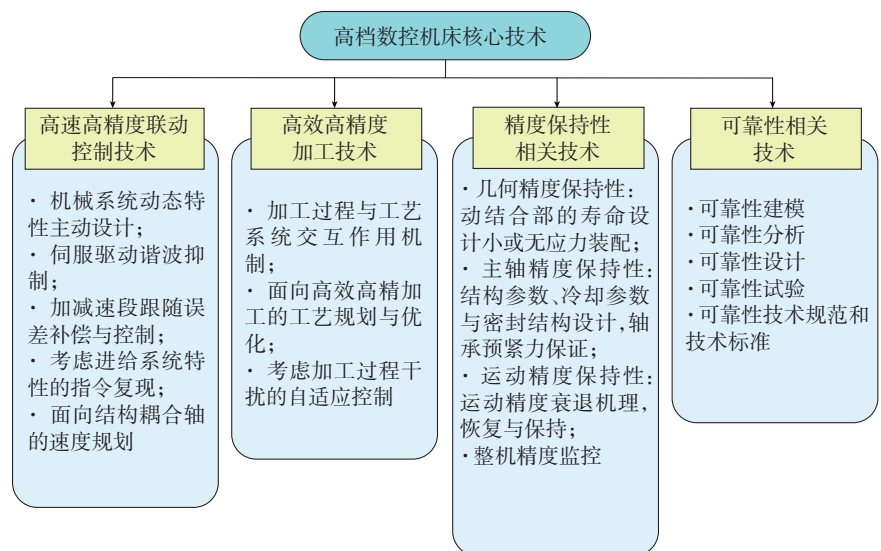


图1 高档数控机床核心技术

Fig.1 Core technology of advanced CNC machine tool

## 1 高速高精度联动控制技术

多轴联动是数控机床与普通机床的本质区别。在多轴联动高速加工过程中,各进给轴绝大多数时间处在频繁加减速运动状态下,匀速运动所占比例很小,而且各轴之间的运动状态和运动性能又各不相同,这就导致对多轴联动过程的目标轨迹精确控制变得十分困难<sup>[2-3]</sup>。因此,在高速高加速运动下实现高精度联动控制是高档数控机床面临的主要挑战,下面主要从机械系统、伺服驱动系统和数控系统3个方面阐述其联动的核心技术问题。

机械系统是联动的对象,作为机床传动、支撑和导向的主体,在结构上主要有单直线轴、转摆台、转摆头、结构耦合多直线轴等多种形式,组成上主要包括基础大件、移动部件和各类动静结合部,其系统动态特性取决于各种组成零部件动态特性及各类动静结合部的物理特性,而其特性好坏又直接决定了伺服进给系统的控制性能。在高速高加速条件下,机械系统结构形式的分布位置变化、移动部件的速度和加速度变化和所受负载的变化,都会造成机械系统动态特性较准静态发生改变<sup>[4-9]</sup>。因此,机械环节面临的核心问题是要分析系统零部件和动静结合部在不同位移/姿态和运动状态(速度、加速度)下所受到的移动部件重力、加工切削力、预紧力、摩擦力和惯性力等多源力以及其物理行为特性,实现系统全工作状态下的动力学性能定量计算与分析,进而对机械系统结构形式、零部件布局和尺寸参数以及装配过程参数等进行主动设计。

伺服驱动系统是进给系统的能量输入环节,是实现进给系统运动的动力源。由于电机结构非线性和驱动电路非线性,直线电机及旋转伺服电机输出的力矩并不是名义指令力矩,而是存在多阶干扰谐波成分。在高速高加速场合,进给轴处于不断加

减速或频繁换向状态,此时伺服进给系统的跟随误差受到数控指令频宽、伺服系统带宽以及伺服参数的共同影响,仅靠调整伺服参数无法有效减小跟随误差和保证其运动性能。此外,在多轴联动加工场合,由于各轴的伺服特性、机械特性各不相同,数控系统分配给各轴的指令也不相同,导致各轴跟随误差不协调,造成联动精度下降<sup>[10-13]</sup>。因此,伺服驱动系统面临的核心问题是研究电机结构非线性(磁链谐波、三相绕组不对称、绕组匝间短路故障、齿槽效应及直线电机特有的端部效应等)和驱动电路存在非线性(三相驱动电压不对称、寄生电容、死区效应以及电流传感器反馈误差等)因素对电机力/力矩特性的影响机制,提出基于谐波特征的先进补偿策略,实现中间解耦,并根据位移波动的允差设计出先进控制策略。另外,需研究加减速段伺服进给系统跟随误差的形成机制,提出相应的伺服控制方法,提高单轴控制精度和多轴联动精度。

数控系统是数控机床的控制核心,是实现前瞻、加减速和插补、规划进给速度以及输出控制指令的中枢。传统插补器是基于恒进给速度设计,加速度不连续,易对伺服进给系统产生冲击,引起系统振动。为了生成平滑的指令速度和加速度,以样条插补技术和小线段连续插补技术为代表的加速度连续或限制插补技术得到了发展和应用<sup>[14-18]</sup>。但是,这些方法没有考虑到伺服进给系统的特性和机械惯性作用,在高速高精场合下,伺服系统和机械系统无法准确及时复现指令输入。因此,数控技术的核心问题是考虑伺服驱动、进给系统机械特性的速度规划和联动控制策略,此外还需考虑结构耦合对各轴运动的影响,通过分析加速度、惯性力与目标点轨迹偏差之间的关系,将加速度作为优化目标,提出先进的速度规划方法。

## 2 复杂工况高效高精度加工技术

高效高精度加工是机床用户追求的永恒目标,加工工艺作为获取优质零件的必要环节,其优劣对零件加工质量和效率有直接影响。当前,机床用户在切削加工编程阶段由于缺乏对机床本体性能的认识,仅考虑刀具与工件的几何约束关系进行工艺编程,工艺制定和参数选择多凭人员的习惯和经验。此外,在加工复杂型面零件时,强时变、参变的切削负载将激发工艺系统的复杂响应,易导致加工过程失稳、零件报废。目前提高加工质量的常用方法是采用“加工-分析-测量-修正-再加工”的思路,生产周期长,成本高。随着对高效高精度加工的不断追求,这种传统的被动式工艺制定流程难以充分发挥机床的使用效率。

实际上,加工过程与工艺系统之间存在交互机制,想要实现高效高精度加工,首先需研究切削过程与工艺系统之间的动态交互作用机理<sup>[19-20]</sup>,针对不同机床性能、刀具性能和零件加工要求,综合工艺系统特性和工艺过程,考虑物理性能约束,提出面向高效高精度加工的刀具路径规划与工艺参数优化方法,实现工艺系统与加工过程的最优匹配。其次,研究考虑加工过程影响的机床自适应控制技术,在伺服驱动环节和数控环节开发先进控制策略,实现多源物理量在线测量、加工误差分析与补偿,提高加工效率和质量。

## 3 精度保持性相关技术

精度保持性是评价数控机床性能的重要指标之一,也是影响国产数控机床性能的主要瓶颈。当前,国内还没有一个比较系统的精度保持性研究体系。另外,通过对国产数控机床精度衰退的调研,发现造成国产数控机床精度保持性差的原因主要是非正常磨损。

因此,为提高国产机床的精度保持性,需针对国产数控机床的设

计、制造过程和使用环境,建立精度保持性理论体系,研究相应的改善措施<sup>[21-22]</sup>。在几何精度保持性方面,设计阶段应考虑导轨滑块、丝杠螺母等动结合部的寿命设计,考虑重力影响的大型结合面的精度设计;在制造阶段实现内应力的合理控制,动、静结合面的小或无应力装配,最终减小移动部件质心位置变化造成的基础件变形、基础件内应力释放变形、装配应力造成的螺栓蠕变等引起的导轨滑块非正常磨损。在主轴精度保持性方面,重点研究主轴轴承间隙(配合)、轴承预紧力等装配参数,以及主轴密封与润滑方式,设计阶段考虑服役状态合理选择轴承与主轴配合、冷却参数以及密封结构等。制造阶段关注服役态下轴承预紧力保证措施,以减小轴承非正常磨损。在运动精度保持性方面,研究运动部件非正常磨损造成的机械参数变化,电器参数老化造成的电器参数变化,以及两者间的机电参数不匹配而引起的运动精度保持性衰退机理,研究机械参数、电器参数的辨识方法及自适应控制算法,实现运动精度的恢复与保持。在整机精度监控方面,实时监控机床使用阶段的工作环境和运行状态,选择合适的监控参数以及参数阈值,保证机床在正常条件下使用,也是延长精度保持性的有效措施。

#### 4 可靠性相关技术

机床可靠性技术已成为机床行业最主要的关键技术之一,也是一直影响国产数控机床市场信誉和竞争力的主要问题。经过数十年的发展和积累,国产数控机床可靠性技术研究虽然在可靠性建模、故障分析、可靠性设计、可靠性试验和可靠性增长等方面取得了明显进展,但与国外机床相比还处于落后状态。数控机床是一个故障模式多样、故障机理复杂、故障可修复的复杂系统,其可靠性研究在技术上多学科相互交叉、时间上贯穿机床全生命周期、空间上涉

及多部门协同,是一项复杂的系统工程。国产机床可靠性所面临的核心技术问题是,需针对机床全生命周期强化可靠性试验、建模、分析、设计等方面的基础研究,深入开展机床制造可靠性、装配可靠性、早期故障排除可靠性、使用可靠性、维修性设计和预防性维修策略等可靠性技术研究,提高可靠性数据积累能力,提出数控机床整机、功能部件和关键零件的可靠性概率设计方法,深入研究故障产生的物理本质、故障相关性、故障模式及规律,重视维修性和可用性,实现数控机床设计、制造和使用全生命周期内的可靠性增长,加快凝练出国产机床可靠性技术体系,制定可靠性技术规范和 standards,提高国产机床可靠性<sup>[23-24]</sup>。

### 推动技术发展的相关对策

#### 1 产学研用深度融合

高档数控机床作为制造业的核心装备,其设计、制造和使用涉及多学科多领域的基础理论和关键技术,整个生命周期需科研院所、机床制造企业、功能部件厂商和底层用户等多个层面的共同参与,分工合作,这样才能把高档数控机床的核心技术掌握在自己的手中。高档数控机床的技术需求来源于制造企业,技术应用也在制造企业,但相应的基础研究却在高校和科研院所。因此,高校和院

所应当面向企业和用户需求,发挥自身在基础理论研究方面的深厚功底,在机理研究透彻的基础上,形成一批国产机床设计、制造及使用所亟需的关键核心技术,即应是支撑设计、制造和应用的工具软件和工艺规范,支撑企业开发新产品或实现改造和升级,努力使关键核心技术在机床企业发挥作用。同时,国内机床制造企业应该摒弃传统机床组装思维,实施全面性、持续性、长期性的规划与布局,与科研院所深度融合,走国产机床自主创新的道路。另外,国内机床用户也要发挥其对工艺熟悉的优势,积极反馈一线需求与信息,规划好整机研制技术需求。此外,机床产业发展需建立关键技术的有效促进、突破与评估机制,以及真正技术人才的合理评价、培育和激励机制,努力形成科研院所、制造企业和用户相互依存的健康产业生态,实现各自在整个产业链上的协同与集成,避免重复性研究,通过优势互补,深度融合,共同促进核心技术和共性技术的掌握与自主创新,促进国产数控机床向高端发展(图2)。

#### 2 关注数控机床整机集成设计技术

高档数控机床是典型的复杂机电集成系统,内容上涵盖机、电、控制等多个学科领域,从组成上可划分为数控、伺服、机械和加工工艺4个部分,整个生命周期又可分为设计、制

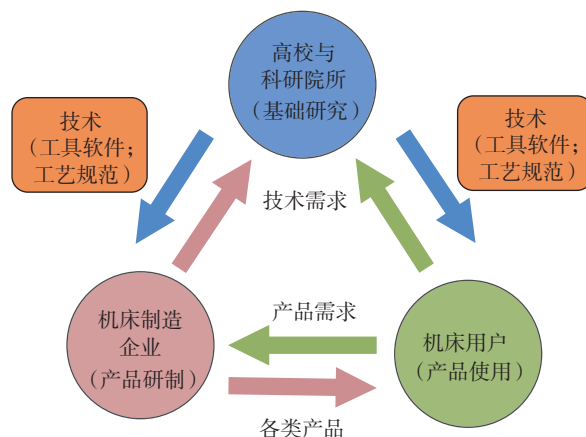


图2 高档数控机床产学研用深度融合

Fig.2 Deep integration of industry-university-institute-user of advanced CNC machine tool

造和使用3个阶段。随着制造业的不断发展,对数控机床的使用要求越来越高,其使用工况往往复杂多变,造成每个组成环节表现出不同的特点,而各个环节的性能好坏对最终零件的加工效率和质量都有直接影响。此时,传统的数控、伺服、机械环节之间的割裂设计,机床与工艺缺乏统筹考虑的机床研制流程很难满足用户的高标准和高要求,因而需要从加工工艺研究出发,面向高精度高效率的加工目标,实现数控机床整机的集成设计。综合考虑机床的复杂运行工况,尤其是多轴联动高速、高加速条件下的机械系统、伺服驱动系统和数控系统物理特性的变异与演变,实现机械系统动态特性主动设计、伺服控制系统先进控制与补偿、机电耦合系统高精度联动控制,以及在使用阶段的考虑工艺系统特性的高效高精度加工工艺规划,实现数控机床服役时机床工艺系统与工艺过程的最佳匹配。

### 3 加快技术突破与适度自主创新

数控机床关键技术的突破与自主创新是推进数控机床研制水平不断提升的源头,也是推动其向高端发展的重要保障。但是必须清醒认识到,任何技术的突破和创新必须尊重其发展的必然规律,是要在长期的积累基础上才能实现的,是量变到质变的过程。针对数控机床这样一种涉及多学科知识,同时必须产学研用融合才能做好的机电装备,要想实现真正的创新还有很长的路要走。根据我国目前数控机床单元技术以及整机技术的现状,以及基础研究方面的积累,机床行业在加快技术突破与自主创新时,应重点关注以下3个方面:第一,应注重单元技术的突破与创新,根据目前我国所掌握的机床相关技术现状,欲想实现机床的整机或全方位创新,应该是很困难的,但是如果某些单元技术层面有所突破应该是可能的。第二,应注重与新技术相

结合来提高机床的性能或扩展其功能,例如借助互联网平台在设备的远程诊断或远程维护等方面是大有作为的,还可借助手机APP等软件为用户的使用提供方便。第三,应注重对用户工艺的研究,在此基础上,开发专用机床或增加机床的专用功能等方面均有比较大的创新或突破空间。

### 4 瞄准机床智能化发展趋势

智能化是当前数控机床发展的主要趋势,在加快国产数控机床核心技术研究的同时,抓住机床智能化发展方向对提升数控机床整体性能和促进制造业向高端发展具有重要意义。当前,需重点从数控机床单机智能化着手,重点研究:加工前单机的智能预测,优化加工工艺,减小工艺辅助时间;加工过程中的单机运行状态实时监控、感知、智能诊断与调整,复杂工况的工艺自学习、逻辑推理、优化决策与自适应控制功能;加工后的在机智能检测与在线评估。在单机智能技术掌握的基础上,向智能生产线、智能工厂发展。由于企业大数据具有巨大的隐形价值,其中包括诸多有益的工艺信息与知识,可通过生产线与大数据、互联网、云计算等现代化技术的有机结合,积极提升机床制造企业和用户的智能制造水平,实现真正的“中国智造”。

### 结束语

国产数控机床经历数十年的发展与积累,已经取得了长足进步,但与国外机床相比,虽然外形上相似,功能上基本接近,但性能差距还很大。为此,国内机床产业应当清醒认识自主能力薄弱,核心技术、关键功能部件受制于人的现状,抓住信息化与智能化的结合契机与发展方向,加快推动产学研用深度融合,专心致力于基础研究的积累、核心技术的突破,注意适度创新,努力实现国产数控机床性能“质”的提升。

### 参考文献

- [1] 张曙,朱志浩,樊留群.中国机床工业的过去、现在与将来[J].制造技术与机床,2011(11):21-31.
- [2] 卢秉恒,赵万华,张俊,等.高速高加速度下的进给系统机电耦合[J].机械工程学报,2013,49(6):2-11.
- [3] 赵万华,张俊,刘辉,等.数控机床精度评价新方法[J].中国工程科学,2013,15(1):93-98.
- [4] ZHANG H J, ZHAO W H, ZHANG J. Dynamic modeling and analysis of the high-speed ball screw feed system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2014, 229(5): 870-877.
- [5] 张会杰.滚珠丝杠进给系统变动态特性及主动设计研究[D].西安:西安交通大学,2014.
- [6] ZHANG Huijie. Research on variable dynamic characteristic and active design for a ball screw feed system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2014.
- [7] WEI W M, ZHANG J, LÜ D, et al. Effect of tilting angle on the dynamics of tilting table driven by worm and worm wheel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2014, 229(10): 1782-1791.
- [8] 刘辉,黄莹,赵万华,等.数控机床进给系统传动刚度变化对运动精度稳定性的影响规律[J].机械工程学报,2014,50(23):128-133.
- [9] LIU Hui, HUANG Ying, ZHAO Wanhua, et al. Effects of transmission stiffness variations on the dynamic accuracy consistency of CNC feed drive systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(23): 128-133.
- [10] 赵万华,杜超,张俊,等.主轴转子

系统动力学解析建模方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 44-51.

ZHAO Wanhua, DU Chao, ZHANG Jun, et al. Analytical modeling method of dynamics for the spindle rotor system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6): 44-51.

[9] WANG L, LIU H, YANG L, et al. The effect of axis coupling on machine tool dynamics determined by tool deviation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88: 71-81.

[10] LIANG T, LU D, ZHAO W H, et al. Feed fluctuation of ball screw feed systems and its effects on part surface quality[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 101: 1-9.

[11] YANG X J, LU D, ZHAO W H, et al. Dynamic electromechanical coupling resulting from the air-gap fluctuation of the linear motor in machine tools[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 2015, 94: 100-108.

[12] 马成方, 杨晓君, 赵万华, 等. 面向运动平稳性的直线电机推力的频谱特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(8): 45-51.

MA Chengfang, YANG Xiaojun, ZHAO Wanhua, et al. Spectrum characteristics of thrust in linear motor oriented to motion stability[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(8): 45-51.

[13] 王磊, 刘海涛, 赵万华, 等. 低频伺服力激励下进给系统建模与动态响应分析[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 18-28.

WANG Lei, LIU Haitao, ZHAO Wanhua,

et al. Modeling and analysis of dynamic response of servo feed system under low frequency excitation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 18-28.

[14] ALTINTAS Y, VERL A, BRECHER C, et al. Machine tool feed drives[J]. CIRP-Manufacturing Technology, 2011, 60: 779-796.

[15] GUO S J. Study on NURBS curve interpolation based on before acceleration/ deceleration with linear jerk[J]. Engineering Solutions for Manufacturing Processes, 2013, 655-657: 1200-1203.

[16] BEUDAERT X, PECHARD P Y, TOURNIER C. 5-axis tool path smoothing based on drive constraints[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51: 958-965.

[17] DONG J C, WANG T Y, LI B, et al. Smooth feedrate planning for continuous short line tool path with contour error constraint[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 76: 1-12.

[18] ALTINTAS Y, OKWUDIRE C E. Dynamic stiffness enhancement of direct-driven machine tools using sliding mode control with disturbance recovery[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58: 335-338.

[19] ZHANG X, ZHANG J, ZHAO W H, et al. An accurate prediction method of cutting forces in 5-axis flank milling of sculptured surface[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 104: 26-36.

[20] ZHANG X, ZHANG J, ZHAO W H. A new method for cutting force prediction

in peripheral milling of complex curved surface[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. DOI 10.1007/s00170-015-8123-x.

[21] MA J X, LU D, ZHAO W H. Assembly errors analysis of linear axis of CNC machine tool considering component deformation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015. DOI:10.1007/s00170-015-8027-9.

[22] 马军旭, 赵万华, 张根保. 国产数控机床精度保持性分析及研究现状[J]. 中国机械工程, 2015, 26(22): 3108-3115.

MA Junxu, ZHAO Wanhua, ZHANG Genbao. Research status and analysis on accuracy retentivity of domestic CNC machine tools[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(22): 3108-3115.

[23] 杨兆军, 陈传海, 陈菲. 数控机床可靠性技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2013, 49(20): 130-139.

YANG Zhaojun, CHEN Chuanhai, CHEN Fei. Progress in the research of reliability technology of machine tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(20): 130-139.

[24] 张根保, 刘佳, 葛红玉. 装配可靠性的动态贝叶斯网络建模与分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(2): 211-216.

ZHANG Genbao, LIU Jia, GE Hongyu. Modeling and analysis for assembly reliability based on dynamic bayesian networks[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(2): 211-216.

## Technical Status and Strategies for Domestic CNC Machine Tools

ZHAO Wanhua, ZHANG Xing, LÜ Dun, ZHANG Jun

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

**[ABSTRACT]** Advanced CNC machine tool is the pillar industry of national equipment manufacturing, and the important guarantee to realize the manufacturing power strategy. It is also the concentrated embodiment for manufacturing industry upgrading and national comprehensive strength. The implementation of national strategy, such as key state science and technology project and the revitalization plan of equipment manufacturing industry, provides unprecedented opportunities for the development of domestic advanced CNC machine tool industry. For domestic CNC machine tool, this paper analyzes its development background, deeply explains the current technical state of domestic machine tool industry, and emphatically focuses on some key core technologies of advanced CNC machine tool, such as high speed and high precision linkage control, high efficiency and high precision machining, accuracy preservation and reliability, then proposes some countermeasures for promoting the high-end development of domestic CNC machine tool.

**Keywords:** Advanced CNC machine tool; Core technology; Equipment manufacturing industry

(责编 谷雨)