

数控机床先进技术浅谈

Advanced Technology of NC Machine Tool

清华大学精密仪器与机械学系 王立平



王立平

清华大学精仪系教授、博士生导师,研究方向为先进制造装备及其控制、并联机器人机构学理论及其控制和机械制造新工艺等。作为项目负责人主持过多项国家重点项目。在国内外学术刊物上发表学术论文 116 篇,其中 SCI 收录 18 篇, EI 收录 37 篇, ISTP 收录 11 篇,获著作权及发明专利 9 项,中国机械工业科学技术发明一等奖 1 项,黑龙江省优秀新产品一等奖 1 项,北京市科学技术三等奖 1 项,清华大学学术新人奖 1 项,教书育人奖 1 项。

可重构技术

为了满足更多不同零件的加工工艺要求,数控机床的功能正在不断增加,但在实际批量生产中,通用数

为了促进我国机床工业的发展,本研究分析了我国中高档数控机床开发取得的较大进展、关键功能部件技术水平以及制造质量逐年稳步提高等现状。同时,进一步与国外先进水平进行对比,指出我国数控机床与国外先进水平相比存在的高档数控机床国内供应不足、自主创新能力差及功能部件发展滞后等差距,为发展我国数控机床发展提供了突破口。最后,基于我国数控机床现状及与国外先进水平的差距,提出了数控机床发展策略,以期为我国数控机床的发展提供参考。

控机床的功能利用率相当低。一味采用复合加工功能的办法来提高机床设备生产的柔性和生产效率并不一定经济合理,因此提出了可重构机床的概念。

可重构机床的核心是其使用过程中的可重构性,也就是用户可以根据所生产产品的变化对机床的结构、布局 and 加工功能进行改变,而且每次重构都要力求做到基本上无冗余功能。机床重构需要通过改变某些功能部件才能实现,因此要求可重构机床一定是模块化机床,而且应当是以用户为中心的模块化机床,即组成机床的软、硬件模块必须遵守国家或行业标准,特别是各模块之间要具有标

准化的接口,与制造系统的接口也应是标准化的。

从技术上看,可重构的制造系统可以通过重新安排或添加(去除)设备部件来达到快速调整制造能力和制造功能的目的。设备部件包括整个生产线上的所有器件,如机床、控制器、传感器和软件等。为保证制造系统应具有可重构性,新的生产线自设计一开始就必须从可重构模块化的角度出发。为实现重构目标,可重构制造系统应具有模块化、集成化、定制化、可转换性和可诊断性等关键特性。

模块化、定制化及可转换性是可重构制造系统的最重要特征,并且这

些特征也是走向大规模定制生产的基础,可见开展可重构制造系统技术研究对推动企业向大规模定制生产及客户参与设计生产模式具有重要意义。

在大批量生产条件下,例如汽车生产线,当加工的产品由于市场需求的变化需要作较大的调整时,往往既浪费时间又耗费资金。在可重构制造技术的支持下,构建具有适应大批量高效生产的柔性化制造系统已成为现实,即可根据加工对象的变化方便地进行结构的调整。为了构建这种批量生产条件下使用的可重构生产线,需要配置一些可重构机床。目前,欧洲一些机床制造厂已研制出几种既高效又具有柔性更换结构功能的新型机床。

自适应技术

自适应技术已经逐渐用于数控机床,从而使得数控机床具备一定的智能性。具体表现为当切削余量大时,进给速度会自动减慢;当切削余量小时,进给速度会自动增快。自适应部件应具有能够优化地、自主地去适应不同外部条件的特点。这对制造装备、工艺范围和精度的要求也日益提高,但它们同时受到加工过程和外界环境的巨大影响,这正是开

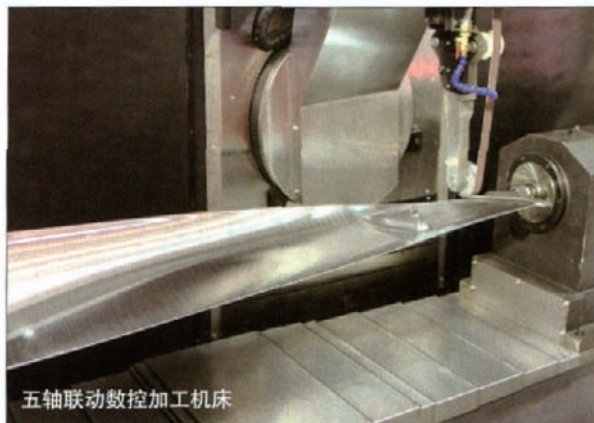


发和使用自适应部件的目的。借助实时的高动态控制技术,加工过程是可以自动控制的。采用自适应技术可以获得很大的利益。在许多情况下,它能够实时有效地消除振动、变形和噪声等外部和内部干扰,使鲁棒的、稳定的、最终经济的加工成为可能。自适应部件反应更快、更精确、更坚实、更灵活。

例如,德国克姆尼茨大学机床与锻压研究所正在开发基于压电的自适应主轴座,它能在传统机械系统很难实现的领域中改善切削过程。通过压电执行元件进行精确定位,主要用于纠正和调整主轴位置,这个系统在一定范围内也可用于抑制主轴的振动和颤振。德国亚琛工业大学机床实验室研制了一种自适应镗杆,镗杆上的刀具和导向块都可借助压电作用进行调节。借助该镗杆,可使孔加工的几何精度达到微米级范围。

全数字交流伺服系统

数字伺服系统指伺服系统中的控制信息用数字量来处理,随着数字信号微处理器速度的大幅度提高,伺服系统的信息处理可完全用软件来完成,这就是当前所说的“数字伺服”。伺服驱动系统全数字化主要包括伺服驱动内部控制的数字化,伺服驱动到数控系统接口的数字化和测量单元的数字化。伺服驱动所有的控制运算都是由内部的数字信号处理器 DSP 完成的。DSP 是一种独特的微处理器,是以数字信号来处理大量信息的器件。随着 DSP 技术的发展,运算速度迅速上升。伺服驱动内部的 3 环高速 DSP 的控制下,充分实现了伺服环路高响应、高性能、高可靠性和高速实时控制的要求。



全数字控制伺服系统可以采用以下新技术,通过计算机软件实现最优控制,达到同时满足高速度和高精度的要求。

(1) 前馈控制。

引入前馈控制,实际上构成了具有反馈和前馈复合控制的系统结构。这种控制在理论上可以实现完全的“无差调节”,即同时消除系统的静态位置误差、速度与加速度误差以及外界扰动引起的误差。

(2) 预测控制。

这是用来减小伺服系统跟踪误差的另一种方法。它通过预测机床伺服系统的传递函数来调节输入控制量,以产生符合要求的输出。

(3) 学习控制或重复控制。

这种控制方法适合于周期性重复操作控制指令情况的加工,可以获得高速和高精度的效果。学习控制是一种智能型的伺服控制。全数字控制伺服系统可以采用现代控制理论,通过计算机控制,具有更高的动态控制精度。

采用现场总线的数字化控制接口是伺服驱动装置实现高速和高精度控制的必要条件。现场总线连接接口的数字化转变使得信号传输更为精准且传输距离更长又不易受外部信号的干扰,如德国西门子公司和力施乐推出的 Profibus-DP 和 SERCOS 总线,日本发那科公司和三菱公司推出的串行伺服总线 FSSB 和 CC-Link 总线都是针对现场总线

的连接接口的数字化协议。

新的数控标准

以计算机为基础的数控系统软硬件平台充分共享计算机资源,使得数控系统的开放、网络和智能化成为可能,其性能得到了飞速发展。但是,从基于产品全生命周期的生产链来看,作为数控系统加工信息输入文件的标准——ISO6893 协议,以面向运动和开关控制的原则进行,采用 G、M 代码,传递的信息是“怎么做”,数控系统严格执行每个细节动作。这样,不仅造成与加工对象有关的大量有用信息(如几何信息、加工特征信息、刀具信息等)在 CAM 系统利用 CAD 模型转换成加工代码文件的过



程中流失,使数控系统不知道在“做什么”;而且,在 CAD 模型转换成加工代码文件的过程中,CAM 系统无法直接获得数控系统的运动状态参数(如最佳加工方式、最佳切削参数、机床运动轴配置及其结构参数等),使 CAM 系统不知道“怎么做最好”。因此,ISO6893 协议的内容与形式已经远远落后于先进制造技术的发展,限制了数控系统的智能化和网络化发展,成为数控系统智能化、集成化和网络化发展的瓶颈。

为此,国际上正在研究制定新的 CNC 系统标准 ISO14649 (STEP - NC),其目的是提供一种不依赖于具体系统的中性机制,能够描述产品整个生命周期内的统一数据

模型,从而实现整个制造过程,乃至各个工业领域产品信息的标准化。STEP - NC 是为现代计算机数控系统制订的一种与 STEP 兼容的数据接口,其基本思想是将基于 STEP 的 CAD 模型和工艺数据直接用于数控机床的编程,取代传统的 G 代码编程。STEP - NC 将产品数据交换标准 STEP 扩展到数控领域,重新定义了 CAD/CAM 与 CNC 之间的接口。它要求数控系统直接使用符合 STEP 标准的 CAD 三维产品数据模型,加上工艺的信息和刀具信息,直接产生加工程序来控制机床,解决了现行数控程序缺乏通用性及一致性的问题。目前,STEP - NC 已成为世界工业化国家研究的热点,其中较具代表

性的研究项目有欧洲的 STEP - NC 项目、美国的 Super Modal 项目和日本的 Digital Master 项目等。

混合加工方法

混合加工方法表现出很大的优点,特别是超声波作为辅助能源用于干铣削和磨削过程,可以大幅度降低切削力,提高了进给速度,从而提高产品质量。用超声波技术来支持切削加工的进一步发展

与机床的技术进步有密切关系。DMG 公司推出的 Ultrasonic 35/50 是混合加工机床的代表。

超声波发射系统以新开发的 HSK 63 S 刀柄为基础,实现了在 1 台机床上进行超声振动加工和传统切削加工。在主轴头下部安装有感应线圈,同时在 HSK 63 S 刀柄上有作为接收器的线圈架,感应线圈发出超声波传给刀柄。这种高频激励

使刀具产生有效的振动,使金刚石刀具以每秒高达 30000 次的频率冲击工件表面,从而获得了良好的加工效果。这种 HSK 63 S 刀柄与传统刀柄一样是可更换的,使在数控编程中除了使用超声波加工外,还可以使用标准刀具进行切削加工。

新材料在机床中的应用

机床的高速化和精密化要求机床结构的简化和轻量化,以减少机床部件运动惯量对加工精度的负面影响,大幅度提高机床的动态性能。例如,借助有限元分析对机床构件进行拓扑优化,设计箱中箱结构,以及采用空心焊接结构或铝合金材料已经开始从实验室走向实际应用。

目前机床结构设计和控制方面的发展虽然很快,但其主要机械功能部件仍主要采用传统结构材料(铸铁和钢)制成,而这些材料应用在机床上体现出一些弱点。传统材料的特性达到极限,已经很难满足未来数控机床发展的要求。为了满足数控机床的高精度、高速度和高效率要求,应采用性能突出的新型材料来改变机床的性能。如机床制造业开始采用纤维增加聚合物基材料和泡沫金属等轻质材料,在减重、阻尼和精度方面具有积极意义。如韩国 Mynx400/ACE-TC320D 加工中心的移动部件限制了



DMG ULTRASONIC 10

其空移速度,只能在 0.2~0.8m/s 的范围变化,加速度也仅为 0.2~2.1m/s²,远达不到高速和高加工速度的要求。采用高模量的纤维增强复合材料为芯体的夹层结构应用于高速数控铣床的垂直和水平导轨后,分别比传统钢质材料减重 34% 和 26%。

冗余驱动技术

作为新型数控加工装备,并联机床自问世以来就受到广泛关注,并经历了一个快速发展时期。但是作业空间小和奇异位形多等缺点限制了并联机床的发展。冗余驱动是克服这些缺陷的一种有效方案,逐渐被引入到并联机床中,而成为并联机床领域研究的前沿。并联机床采用冗余驱动方式,可以提高机床的运动学和动力学性能,尤其是有助于消除作业空间中的奇异位形,还可以使复杂的运动学正解变得简单,便于获得封闭式正解。其次,采用冗余驱动的方式对于实现并联机床的精确运动学标定极其有利,可以更方便、准确地辨识机床的结构参数。

清华大学基于 1 台非冗余并联机床开发了四自由度驱动冗余并联机床,并应用于切削汽轮机叶片,取得了较好的效果。韩国首尔国立大

学建造了 1 台可进行 5 面快速加工的六自由度并联机床 Eclipse,通过使用冗余驱动器,消除了作业空间中的部分奇异位形,增强了系统刚度。北京航空航天大学开发了具有两转动和一平动自由度的冗余并联机床。

结束语

机床产业是国民经济发展的基础产业,是装备制造发展的重中之重。我国机床工业正在走向世界,面临巨大的机遇和严峻的挑战。虽然机床拥有量已居世界前列,但是我国数控机床与国外先进水平相比,仍有一定的差距。

为了促进我国机床工业的发展,本研究分析了我国中高档数控机床开发取得的较大进展、关键功能部件技术水平以及制造质量逐年稳步提高等现状。同时,进一步与国外先进水平进行对比,指出我国数控机床与国外先进水平相比存在的高档数控机床国内供应不足、自主创新能力差及功能部件发展滞后等差距,为发展



四自由度驱动冗余并联机床

我国数控机床发展提供了突破口。最后,基于我国数控机床现状及与国外先进水平的差距,提出了数控机床发展策略,以期为我国数控机床的发展提供参考。

参考文献

- [1] Heisel U, Stehle T. 德国机床工业的创新和趋势. 航空制造技术, 2009(5): 26-33.
- [2] Kim J, Hwang J C, Kim J S, et al. Eclipse II: a new parallel mechanism enabling continuous 360-degree spinning plus three-axis translational motions//IEEE Transactions on robotics and Automation, 2002, 18 (3): 367-373.
- [3] Wu Jun, Wang Jinsong, Wang Liping. Optimal kinematic design and application of a redundantly actuated 3DOF planar parallel manipulator. Journal of Mechanical Design, 2008, 130 (5): 0545031-0545035.
- [4] 张承瑞,刘日良. STEP-NC 及机床数控系统的发展趋势. 中国制造业信息化, 2006 (6): 54-55.
- [5] 闵惠芬,蒋伟. 伺服系统在数控中的应用. 机械制造与研究,2007,36 (2):10-13.
- [6] 邵明涛. 伺服驱动系统的技术发展趋势分析. 机械工程师,2008 (4):5-7.
- [7] 卢天健. 轻质材料和结构在机床上的应用. 力学与实践,2007,29 (6): 1-9.

(责编 良辰)



北京第一机床厂的世界跨度最大超重型数控机床