

# 高性能数控机床几项关键设计技术的研究应用进展

## Research and Application of Key Design Technologies of High Performance CNC Machine Tools

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心 刘 强 陈 静 吴文镜 袁松梅



刘 强

工学博士, 现任北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授和博士生导师、国防科技工业高效数控加工技术研究应用中心主任、国防科技工业“511 人才工程”学术带头人、“泰山学者”特聘专家、中国自动化学会制造技术专委会主任、《机械工程学报》和《中国机械工程》编委。现主要从事数控加工仿真优化与虚拟加工、现代数控装备动态分析与优化设计、高性能运动系统设计与控制及微机电系统制造技术等方面的科研与开发工作。曾先后获省部级科技进步二等奖 3 次、美国联合技术公司容闳科技教育奖等科技成果奖。发表学术论文 60 余篇、专利 16 项、软件著作权 5 项。

先进的设计理念和设计技术是新一代数控机床获得高性能、节约产品开发成本的关键。近年来,重心驱动、箱中箱、直接驱动、热平衡设计、基于“结构-伺服-切削”耦合分析的虚拟机床设计等关键技术得到学者和工程师们的普遍关注。

为了不断满足数控加工过程中工件材料、零件几何形状、加工精度和表面质量等方面的新要求,同时提高数控机床产品自身的竞争力,从 20 世纪 90 年代中期开始,综合高速、高精度的高性能数控机床受到了高度重视,并且已成为数控机床发展的一个新趋势。先进的设计理念和设计技术是新一代数控机床获得高性能、节约产品开发成本的关键。近年来,重心驱动、箱中箱、直接驱动、热平衡设计、基于“结构-伺服-切削”耦合分析的虚拟机床设计等关键技术得到学者和工程师们的普遍关注。人们针对这些关键技术,从理论方法到实际应用,开展了大量深入的研究探讨和实践,取得了非常有价值的应用成果,对高性能数控机床的发展产生了

重要作用。

### 重心驱动技术

为了减小高速、高精度数控机床在加、减速过程中的振动,保证加工精度和加工表面的质量,日本森精机 (Mori Seiki) 公司最早提出了机床重心驱动 (Drive at Center of Gravity, DCG) 设计技术。DCG 技术提高了机床运动的速度和加速度,缩短了加工时间,改善了表面加工质量和轮廓加工精度,延长了刀具的使用寿命,优点十分突出。

#### 1 重心驱动基本原理

重心驱动是一项由机械系统动力学理论发展而来的技术。其基本原理是:当作用在直线运动物体上的驱动力偏离物体质心时,将会产生

一个附加力矩,从而使得该运动物体除了做直线运动外,还会产生附加的扭转振动;当驱动力作用在物体质心上时,运动物体只沿导轨作直线运动而不会产生附加的扭转振动。以数控机床的 $XY$ 工作台为例, $X$ 轴为单驱动结构, $Y$ 轴为双驱动结构。相对于 $Y$ 轴平台, $X$ 轴平台质量较小且驱动力作用在中心位置,因此运动较平稳;而在运动过程中 $Y$ 轴需承载 $X$ 轴的重量,故其重心随 $X$ 轴的运动而不断地变化;若 $Y$ 轴为单驱动结构,在驱动力的作用下将会产生俯仰力矩和偏转力矩,在这两个力矩作用下,工作台在运动过程中将会出现不可预知的变形和振动。为了减小这种不确定的振动对加工的影响,基于重心驱动理论,提出了双边驱动结构。双边驱动的特点是在工作台的两侧对称施加驱动力,以便尽可能地减少驱动力臂产生的影响。

## 2 重心驱动技术对机床性能改善

基于重心驱动技术的数控机床,可以有效地抑制坐标轴运动过程中的附加振动。图1为森精机进行对比测试的结果:在旋转电机+丝杠驱动方式下,采用DCG后, $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 轴位移振动幅值分别减小到非DCG驱动时的0.7%、19%和5%;在直线电机直接驱动方式下,也获得了相似的结果。因此,DCG可以大幅度降低进给传动过程中各轴的振动,相应地将使加工表面振纹减少,加工精度明显提高,并且由于运动加速度的提高,也缩短了加工时间。

## 3 重心驱动驱动性能的进一步分析

北京航空航天大学刘强、齐畅等人在国家自然科学基金及国际合作项目的支持下,对采用DCG时运动系统的理论模型和频率特性开展了进一步的分析研究,提出了一种宽频多模态运动耦合建模分析方法。针对一种IC封装设备中直线电机驱动的高加速度 $XY$ 工作台,可分析计算出包括作用力偏心值在内的

工作台关键参数对其频率特性的影响。图2给出了当直线电机推力在水平面上沿 $Y$ 方向与运动平台质心偏离值 $dety=\pm 20\text{mm}$ ,以及DCG驱动(偏离值 $dety=0\text{mm}$ )情况下加速度对电机推力响应的Bode图。可

## 直接驱动技术

直接驱动技术(Direct Drive Technology, DDT)简称直驱技术,它取消了伺服执行机构的滚珠丝杠、齿条、齿轮、传动皮带、皮带轮等机械

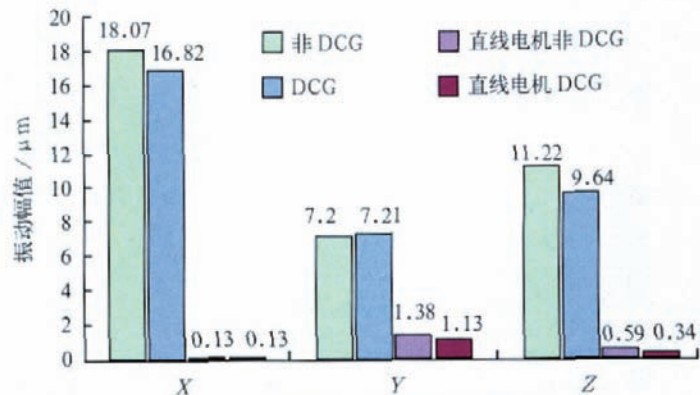


图1 不同驱动方式的振动幅值比较

以看到,不采用DCG时,幅频曲线在400Hz附近多了一个谐振峰。另外,在700Hz附近的谐振峰值明显高于DCG,即相对于非DCG设计来说DCG设计减少了工作台运动过程中谐振峰的数量和峰值,振动倾向明显减弱,从而改善了工作台的动态特性。宽频多模态运动耦合建模分析和DCG设计提供新的思路和量化依据。

传动环节,将伺服电机直接连接或固定在从动负载上,从而实现“零传动”方式。直接驱动方式可以有效地消除传统进给驱动方式下中间传动环节的多种误差(由弹性变形、反向间隙、摩擦振动、响应滞后等引起)。经过不断完善和发展,DDT技术日趋成熟,在高性能数控机床设计制造中得到越来越广泛的应用。

直接驱动一般可分为直线电机驱动的直线运动和力矩电机驱动的

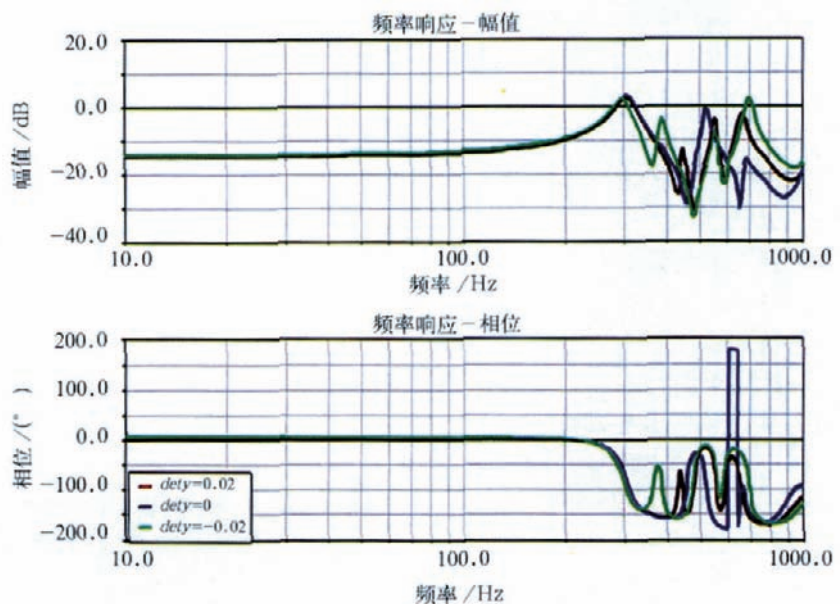


图2 工作台频率特性Bode图

表1 直线电机驱动与传统驱动性能对比

性能指标	旋转电机 + 滚珠丝杠	直线电机直接驱动
最大速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	90 ~ 120	60 ~ 300
最大加速度 /g	1.5	2 ~ 10
静刚度 / (N·μm <sup>-1</sup> )	90 ~ 180	70 ~ 270
动刚度 / (N·μm <sup>-1</sup> )	90 ~ 180	160 ~ 210
精度 / (μm·300mm <sup>-1</sup> )	2 ~ 5	0.5
重复精度 / μm	2	0.1
平稳性(%速度)	10	1
工作寿命/h	6000 ~ 10000	50000
调整时间/ms	100	10 ~ 20
行程	受丝杠限制	不受限制

旋转运动 2 种基本驱动方式。

### 1 直线电机驱动

直线电机驱动进给伺服系统是当前国际上公认的最有前途的高速、高精度机床高性能进给系统,采用直线电机和智能化数字式伺服控制的高速加工中心,已成为当前主要机床制造商竞相研究和开发的关键技术和产品。同旋转电机 + 滚珠丝杠驱动方式相比,直线电机直接驱动具有速度快、加速度大、定位精度高、接长方便等明显的优势。此外,由于没有中间的机械传动环节,系统刚度得到明显提高。表 1 给出了直线电机驱动方式与传统驱动方式的性能比较。

鉴于直线电机直接驱动方式的诸多优点,各种高性能数控机床已越来越多地采用直线电机驱动技术,其中德国 DMG 和日本 MAZAK 最具代表性,他们已大量采用直线电机伺服进给系统。

### 2 力矩电机驱动

直接驱动旋转轴(A、B 或 C)的伺服电机称为直接驱动旋转电机,简称为力矩电机。力矩电机直接驱动技术在数控机床中的应用形式主要有双摆头主轴、高精度电转台和电主轴,图 3 给出了一种 AC 双摆头主轴直驱结构。就“零传动”概念而言,

内装式电主轴亦可归入直接驱动旋转电机范畴。电主轴的特点是将机床主轴和主轴电机集成在一起,机械结构更紧凑,对精度和可靠性的要求更高;但电主轴性能指标的侧重点与力矩电机有所不同,前者偏重于恒功率宽范围调速性能,后者则要求低速大扭矩性能。当前,随着力矩电机的广泛应用,具有复合加工功能的数控机床结构更加简单、紧凑,系统刚性、可靠性和精度更高,动态响应更快。

### 3 直接驱动设计中需注意的问题

(1) 结构形式。在直接驱动进给单元中,直线电机的布置形式会直接影响系统的结构刚度,因此需合理设计工作台结构并合理选择导轨。此外,对于完全采用直驱技术的立式加工中心而言,主轴(Z 轴)直线电机直接驱动的进给系统设计非常关键,竖直布置的直线电机驱动系统必须设计有配重自锁和紧急制动功能。

(2) 散热。各种直驱电机本身都是高发热元件,且处于机床的腹部位置(直线电机一般安装在工作台与床身和导轨之间,力矩电机则安装在回转台基座或机壳内),如果散热效果不好,极易形成热量累积,导致自身和关联部件的温升,引起机床热变形。因此必须采取强制冷却的措施,否则会直接影响机床的加工精度、电机推力,甚至还会烧毁电机。

(3) 防护。设计直线电机直接驱动系统时,必须得考虑直线电机的布置和相应机械部件的结构刚性,尽量用巧妙的结构设计来抵消电磁吸力;同时,选用合适的隔磁材料制作防护罩屏蔽强磁场,并防止切屑吸入直线电机的气隙间,同时防止冷却液溅入电机内部。

(4) 控制。对于直驱系统来说,

数控机床加工过程中切削负载是在控制闭环之中的,而且负载的变化不经过任何中间环节便直接作用于驱动电机上。因此,直接驱动系统的控制难度较大,系统控制器需具有良好的稳定性和较强的鲁棒性。目前,大部分数控系统均能实现直驱系统的控制(国外的如 Siemens 840D、GE Fanuc 数控系统等,国内的如北京航空航天大学自主研发的 CH-2010 开放式数控系统等)。

### 4 国内直驱技术研究应用进展

自 2003 年北京市机电院研制出国内第一台实际应用的直线电机驱动加工中心 VS1250 以来,直驱技术已得到国内多家重点机床企业的认可和应用(如沈阳机床的直线电机驱动车削中心、北京机电院的直线电机驱动大型龙门加工中心 LinMC6000 等)。

针对直驱应用中的关键技术问题研究,作者课题组在国家科技支撑计划支持下,研制了一台全部采用直线电机驱动的车铣复合加工机床试验样机。该样机采用 3 台 Siemens 大推力平板式直线电机直接驱动实现 X、Z 和 B 轴的运动(其中 X 和 B 轴的运动由 X 方向的 2 台直线电机并联驱动实现),可进行数控机床直线电机直接驱动和复合加工等关键技术的试验研究,为 DDT 技术的基



图 3 力矩电机直接驱动双摆头主轴

础理论和工程应用研究提供了良好的试验研究平台。

### 热平衡设计技术

热误差是数控机床最重要的误

差源,约占机床总误差的70%。因此,改善机床的热态特性以提高其加工精度,在现代数控机床设计中尤为重要。在加工过程中,机床系统在各种热源(摩擦热、切削热、环境温度、热辐射等)的作用下产生温度场,致使机床各部件产生热变形,其中主轴和滚珠丝杠最易受到热变形影响。

### 1 滚珠丝杠

滚珠丝杠起到精密传动和定位的作用,是数控机床及加工中心的关键部件。目前,高速、高精度数控机床对滚珠丝杠的传动精度提出了更高的要求,因此研究滚珠丝杠的温升和热特性规律对提高机床的加工精度具有重要意义。

在滚珠丝杠进给系统中,可能导致热变形误差的热源主要有:(1) 驱动电机功率损耗发热,(2) 丝杠两端轴承摩擦发热,(3) 丝杠与丝杠螺母摩擦发热,(4) 直线导轨副摩擦发热。

目前,对高速高精度滚珠丝杠的热特性分析主要通过建立其三维稳态温度场有限元分析模型,利用热分析求解器仿真,得到各部件热平衡时的温度场分布和温升,再根据分析结果对滚珠丝杠传动系统进行热平衡补偿设计。

### 2 主轴

高速加工时,机床主轴热变形已成为影响其加工精度的主要因素。主轴部件的热源主要来自主轴电机和轴承,由于发热,主轴和主轴箱产生非均匀温度场,导致主轴轴线的抬升和倾斜,从而影响机床的加工精度。

目前主要采用有限元方法分析机床主轴热特性,利用有限元模型模拟实际加工过程中主轴的温度场分布,从而实施热补偿措施。作者课题组利用有限元模型对1台龙门加工中心的主轴进行了热特性分析,确定了不同条件下主轴的温度场分布和由于温升所产生的轴面热伸长,为热变形误差动态补偿提供了量化依据。

此外,热容量平衡设计也可减少

机床的热变形:根据机床各部件热容量的不同,对局部热容量大的部件采取一定的措施来控制并减少其温升,使其与热容量小的部件不会产生较大温差,尽量达到它们之间的热平衡,使机床整体的热变形减少。

## 虚拟机床设计技术

### 1 基于机电耦合建模的虚拟机床

虚拟机床是虚拟样机技术和虚拟制造技术相结合而形成的一个新的研究领域,它的最终目标是为虚拟制造建立一个加工环境,用于仿真和评估各加工过程对产品质量的影响。在虚拟机床环境下,需要建立机床模型(机床几何参数、运动关系、伺服系统、刚度和热特性等)和加工过程模型(切削力、刀具的磨损、加工表面形状、公差等)。利用虚拟机床环境,用户输入NC代码、工艺参数和刀具模型,要求得到关于工件特性、刀具状况和加工效率等信息,以便对虚拟制造中产品的可制造性和机床的整机动态特性做出评价。目前,国外已将该技术成功应用于新一代机床产品的开发,如Siemens公司Mechatronic Support将机床结构动力学模型、控制模型、伺服驱动模型综合在一起,建立了数控机床的机电耦合模型。

### 2 考虑切削动力学的数控机床整机动态建模与分析

目前,对于高性能数控机床整机动态特性分析及优化研究,大多数从机床结构建模与分析入手,对整机进行优化。但实际加工时切削过程对机床整机动态特性会产生重要影响。考虑切削过程动力学的影响,作者课题组提出一种“机床结构-切削过程”耦合动态建模与分析的方法,对机床整机动态性能进行分析和优化。

该方法的原理是:由于数控机床的最终性能表现在切削刀具切除工件材料时的几何特性和力学特性(包括热特性)上,因此机床整机的动

态特性分析与设计应该考虑“主轴+刀具”组合对不同材料零件切削过程动力学的耦合影响。因此,一方面,通过对机床零件、结合面和整机的建模获得机床结构的动力学特性;另一方面,对“主轴+刀具+工件”构成的动力学系统建模,将两者耦合,可以获得反映机床整机结构和切削加工特性的刀尖点处的动态特性(如刀尖频响函数、位移响应、稳定性曲线等),从而预测机床的加工性能,进而优化机床整机性能。

## 结束语

数控机床关键设计技术是现代机床研究开发的基础技术,对于满足高速度、高加速度、高精度和变(重)切削负载的工作性能要求,获得优良的动态响应特性方面,具有重要的指导意义和基础性作用。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本质和实现方法,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,就要通过加强对高性能数控机床的分析、设计技术研究和应用,实现数控机床设计的如下转变:(1) 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;(2) 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;(3) 从基于经验的定性化设计向基于静态分析的定量化设计转变;(4) 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;(5) 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。

(责编 小颖)

致谢: 本文涉及作者课题组的研究工作得到了国家科技支撑计划(No. 2006BAF01B09)和“863计划”(No. 2005AA424222)的支持,另限于篇幅参考文献未能一一列出,在此一并谨致谢意!