

数控机床耦合建模与分析技术 研究进展

Research Progress of Coupled Modeling and Analysis Technology of NC Machine Tools

北京航空航天大学 刘 强 吴文镜



刘 强

工学博士,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、高效数控加工技术研究应用中心主任。主要研究方向为数控加工过程仿真优化、先进数控及运动控制、机床动力学。1983 年在中南矿冶学院获学士学位,1989 年在北京航空航天大学获工学硕士学位,1996~1998 年留学加拿大 The University of British Columbia,2000 年在北京航空航天大学获工学博士学位。

现代数控机床是一个复杂的机电系统,其工作性能、加工能力与加工效率取决于机床的结构设计、静动

态特性、数控算法、控制系统和加工工艺系统等诸多方面。高性能数控加工尤其要求数控机床满足如下要求:机床结构方面,具有高的静动态刚度以避免或减小机床变形和加工过程振动;伺服控制系统方面,具有高的伺服刚度以获得高动态的位置和速度响应;切削过程方面,应选择合理的刀具/夹具和走刀路径及切削参数以尽可能地减小零件切削升温、变形和加工误差。

实际在加工过程中,数控机床的结构、伺服控制和切削过程 3 方面是相互作用的,如图 1 所示。Beckemer 等给出了考虑机床的控制、驱动、结构以及切削过程相互作用的耦合建模原理示意图^[1],一台数控机床“结

构-控制-切削”三者的耦合作用决定了该机床的整机综合性能以及最终零件加工精度和效率。因此,近年来一些学者在数控机床耦合建模与分析技术方面开展了大量研究工

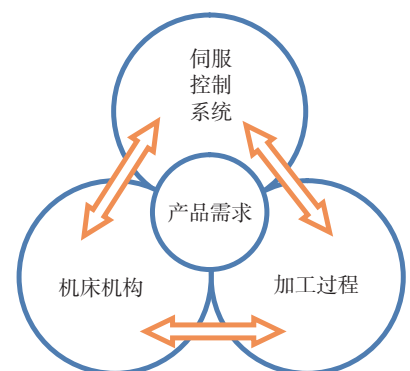


图1 “机床结构-伺服控制系统-加工过程”的耦合

作,本文简要综述以数控机床为对象进行耦合建模的原理、方法和技术,包括耦合多刚体建模与仿真、耦合有限元仿真、耦合柔性多体系统仿真、控制系统的耦合等,并结合课题组的相关研究给出一个“机床-刀具-切削”耦合建模应用的实例。

耦合多刚体建模与仿真

耦合多刚体建模与仿真可以用来分析机床加载了控制系统的运动学特性。机械系统中的零件都被假设为刚体,在外力作用下不发生变形,并且通过理想的运动副连接。仿真在工作空间中的任何可能位置都是有效的。因此这种方法可以用来仿真和分析机床各部分的运动状态、运动轨迹以及工作空间可操作性等,特别是用于并联机床的仿真。

图2是一个耦合多刚体仿真环境,该仿真环境用于并联机床(PKM)的多刚体模型与控制系统的联合仿真^[2]。

机床的多刚体模型是从CAD系统到MBS环境的一个重要接口。该方法可以随着不同设计阶段而不断地更新模型,如果机床进入了详细设计阶段,零件的更新可以很方便地在MBS环境中实现。通过这种方法得到的模型与各轴的伺服控制系统相耦合。模型中的位移、速度检测系统及其电机的驱动力通过接口程序在MBS环境与计算机辅助控制工程环

境通信交互。而且控制系统模型是一个基于PC的数字控制系统,为各个驱动轴产生期望进给率。该方法特别适用于并联机床的分析,可以很方便地数字控制仿真,解决如轨迹生成、碰撞干涉检查、坐标变换等问题,很好地避免了机床研发过程中的物理损坏。

高速切削中往往会产生很大的加速度负载,Rehsteiner等^[3]应用多刚体仿真法对此作了仿真优化,提高了机床的精度。Neugebauer等^[4]开发了液压成形机床中描述机械系统与液压驱动系统的耦合模型,应用了液压系统的数字仿真。

耦合有限元仿真

机电耦合仿真的另一条途径是耦合有限元仿真,就是将简化的驱动控制模型应用于有限元模型中进行仿真。在这个过程中,借助数字模块仿真工具可以得到驱动系统的简化刚度、阻尼和质量模型,并将该模型用有限元软件中的特殊单元进行建模。有些FEM软件提供特殊的线性控制单元来描述控制系统中的等效数学模型。这时只需要对有限元模型中的控制系统单元的参数进行适当设置即可。这种特殊类型的单元在有限元软件中可以像其他常规有限元单元一样进行处理。

例如,为了分析直线电机驱动的刀具中心点进给的位置误差,仿真时

可以把一个给定的参考轨迹作为控制器单元的信号输入。在实际系统中安装测量系统(光栅尺)的2个零件上分别取2个节点,通过测量这2个节点的距离,并把它作为附加信号输入。在每一步动力学仿真过程中,控制器单元计算出电机的驱动力,并把这对力(作用力与反作用力)分别加载在电机初级和次级上。这种方法可以分析直线电机驱动系统中位置测量系统对进给误差的影响及其不同方向上的进给误差。设计者在设计早期就可以对X轴进给系统进行优化,以减小切削过程的轨迹误差。

耦合有限元仿真中,最终的耦合模型一般在FEM软件中实现,将控制环的模型借助线形控制单元添加到FEM环境中,所以控制环模型的建立往往会受到FEM软件的限制,不容易实现一些先进的伺服算法、大型复杂伺服算法及非线性控制。另外,该方法因为是集成在FEM环境中,零件都已柔性化,仿真结果可以体现零件的弹性变形及结构动态特性。

耦合柔性多体系统仿真

耦合柔性多体系统仿真用于机床的机电耦合的动态特性仿真,是目前应用最广的一种耦合仿真方法。耦合柔性多体模型中机床的每一个零件均可描述其静态特性,而且零件之间采用柔性连接。实际上,导轨、轴承等在机床中以运动副的形式出现,在耦合多刚体仿真中是将实际的运动副作为理想约束来分析,这种假设和近似在低速、低载荷情况下是可行的,但在高速、高加速度的高动态运动情况上则会产生较大误差。在耦合柔性多体系统仿真中,这些运动副在柔性多体系统仿真中则以各种弹簧阻尼器进行简化和等效,如两结构件之间的联接一般用一个沿X、Y、Z方向的弹簧阻尼单元来近似。所

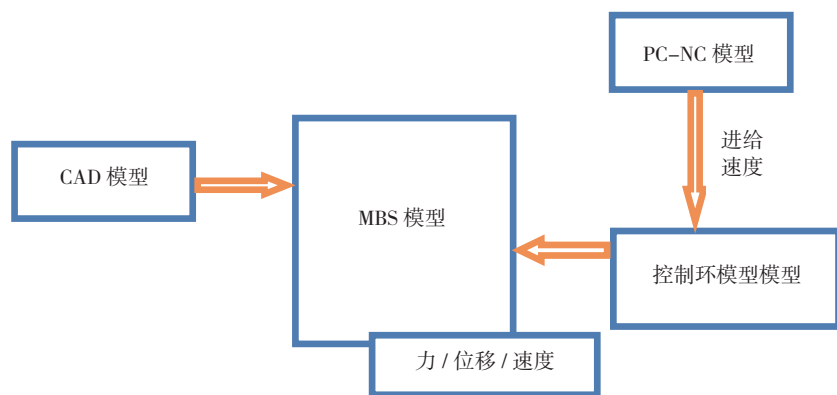


图2 PKM机床的多刚体模型与控制系统的联合仿真

以耦合柔性多体模型充分考虑了结合面及运动副的动态特性。此外,为了考察每个驱动控制系统对机床动态特性的影响,柔性多体系统模型还可以进一步与来自控制环的模型相耦合。

近些年,关于柔性多体系统仿真方面的相关研究学者还包括 Reinhart、Weck、Großmann、Denkena、Turna 等^[2]。

1 模型建立

首先,机床中每个零件都以一种所谓的柔性体建模。各种不同的单元用来连接不同的零件,如导向系统、机床安装面、滚珠丝杆等均是柔性连接和一种基于运动副的建模与配置。这些柔性连接件的选择都是根据实际零件的受力形式的不同来选择,如一维或三维元件。一些机床中常用的部件的建模方法如下所述。

(1) 机床安装面。

在大多数的应用中,机床是采用特定的安装器件如地脚螺钉等安装在地基上的。这些器件3个方向上的刚度阻尼对机床的动态特性往往有很大的影响,所以这些器件的建模常常采用三维的弹簧阻尼器元件。

(2) 导向系统。

导向系统在机床中是用来确定一个零件相对于其他零件的运动关系的,如机床的导轨。导向系统同样也是以三维的弹簧阻尼单元来建模的,这些元件的参数是定义2个垂直于运动方向的刚度值,沿着运动方向上的刚度值接近于0,而导向系统的阻尼值则是定义3个方向的数值。

(3) 滚珠丝杆进给单元。

滚珠丝杆单元是用来实现机床床轴的直线进给,该系统的建模用到了不同的元件。轴承和丝杠的滚珠螺母用三维的弹簧阻尼器单元建模并设定3个方向的刚度阻尼值。丝杠本身则是以一个柔性梁单元建模,该柔性梁单元可绕其俯仰方向旋转。而丝杠在进给方向上伺服驱动控制

的旋转则是通过一个螺母单元等效,将其旋转运动转变成直线运动。这样一来就可以对该类系统进行动态性能仿真了。

2 柔性多体系统的生成

为了考虑机床零件在多体系统中仿真的弹性,将在进行单个零件分析时计算得到的固有振动和变形数据,也就是所谓的超单元,通过一个多体系统仿真软件与通用有限元软件之间的接口程序转换到多体系统模型之中^[4]。

用超单元应用有限元模型来定义一个复杂的零件,并定义连接处的节点自由度,该连接处是与其他零件相连接的地方,也就是零件之间力作用的地方。软件可以计算出固定自然模态和静态约束模态来近似描述零件在连接节点处的特性。固定自然模态包含超单元在所有连接自由度都被约束时的动态响应。静态约束模态是指当接触面节点中一个节点自由,其他节点固定,并在该自由节点加载一个单位变形时零件的静态相应。求解器在处理超单元时与模态分析中的 Lanczos 法类似,然后采用(C-B)法产生超单元 Craig-Bampton^[5]。超单元不同模态的构建如图3所示。

C-B 法中缩减的质量刚度矩阵、

固定固有模态和静态约束模态存储在一个文件中并输出,该文件通过接口程序导入到多体仿真软件中。

3 与控制系统的耦合及动态响应

为了分析机床控制系统的动态特性,需将商业的计算机辅助控制工程(CACE)软件与通用多体系统仿真软件相结合^[6]。目前最常用的 CACE 软件是 Matlab/Simulink,它是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的功能强大的软件包,可支持连续、离散及两者混合的线性和非线性系统,也支持多种采样速率系统。Simulink 仿真软件提供了一种图形化的交互环境,只需用鼠标拖动的方法便能测量地建立起系统框图模型。它和 Matlab 的无缝结合使得用户可以利用 Matlab 丰富的资源,建立仿真模型监控仿真过程,分析仿真结果。Matlab/Simulink 用于建模、分析和仿真各种动态系统(包括连续系统、离散系统和混合系统),非常方便快捷。

当机床中有直线电动机驱动的直线运动单元或力矩电动机直接驱动的回转台时,由于没有中间的机械传动环节,机械运动部件必然包含在控制闭环内,所以将柔性多体系统与控制环的耦合进行建模和分析对于确定位置伺服驱动系统的伺服刚度

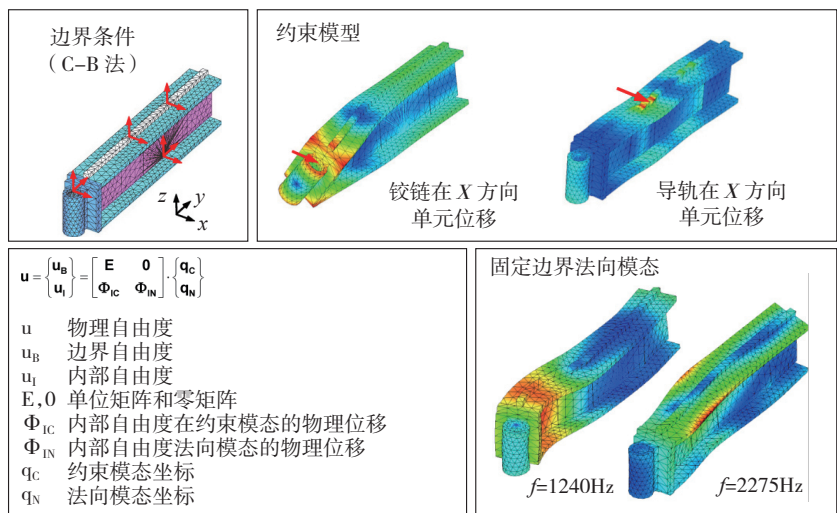


图3 Craig-Bampton理论应用于柔性多体系统仿真

和谐振频率具有重要意义,在 CACE 环境中生成的控制系统模型可以与多体系统中的整机模型进行通信。

图 4 描述了耦合柔性多体系统及控制系统的机床仿真,该仿真考虑了主轴结构、X/Y 轴直线电动机伺服直接驱动位置控制回路、Z 轴旋转电动机伺服和滚珠丝杠传动位置控制回路等的动态耦合模型,输出的结果有刀具中心点(TCP)在外加激励力作用下的动态位移响应^[4]。

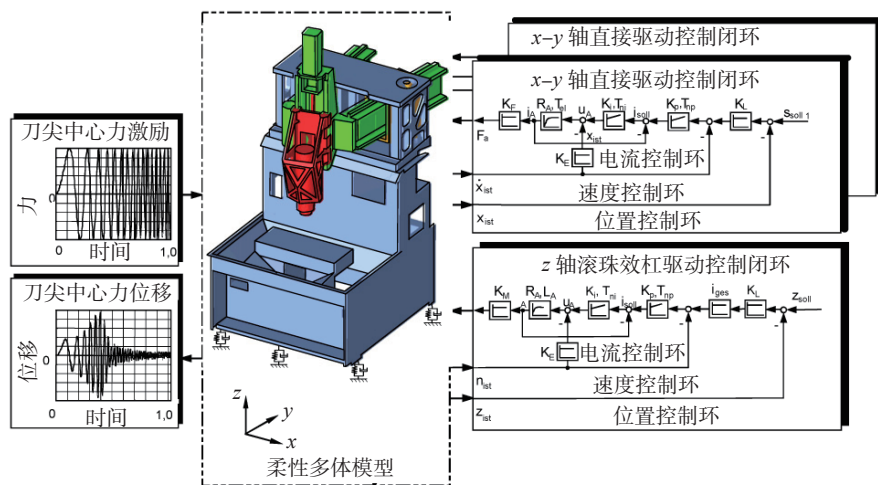


图4 耦合柔性多体模型与控制环的机床仿真

“机床 - 刀具 - 切削”耦合建模

高速切削过程的动态特性主要受“主轴 - 刀具 - 工件(包括装夹)”工艺系统特性的影响,其中,“主轴 - 刀柄 - 刀具”结构动力学特性起重要作用,由于这些部件相对于机床结构一般会具有更高的谐振频率,对其刚度及其动态特性的分析对于提高机床设计和预测颤振稳定域具有重要的意义。

到目前为止,获取刀尖点处的动力学特性参数频响函数(FRF)最常用的方法是进行模态锤击试验,即用力锤对刀尖测试点进行激励,使用加速度计拾取刀尖点的振动信号,通过对输入、输出信号进行分析得到被测系统的频响函数或模态参数。但是,

模态锤击试验中机床、刀具、刀柄和主轴的组合量非常多,即使对于相同机床和刀具、刀柄和主轴组合时,如果铣刀的安装悬伸长度不同,那么刀尖点处的动力学特性参数也会随之改变。如果每次加工前对每种机床以及主轴、刀具都进行测试,那么测试时间会非常长,也不可避免占用机床大量的加工时间,大大影响机床的加工效率。因此,采用有限元和数值计算方法在机床设计阶段得到机床

刀尖点处的动力学特性参数 FRF,应用软件获得了系统颤振稳定域图形,从而预测机床的加工性能,同时为选取工艺参数也提供了参考。

本课题组对某型国产数控机床动态特性的建模、仿真与分析进行了研究(机床:MC600 龙门加工中心;刀具: $\phi 40\text{mm}$ 高速钢圆柱螺旋立铣刀,4 齿;工件:7075 铝合金,切宽选择 20mm)。该研究以响应耦合子结构分析(Receptance Coupling Substructure Analysis, RCSA)为基础,通过有限元谐响应分析获得加工中心整机的端点响应,借鉴结构动力学原理用解析方法获得简化铣刀模型端部的原点响应和跨点响应,从而分析得到“主轴 - 铣刀”之间的耦合响应,即获得在刀尖点处的频响函数。

在获得刀尖点处频响函数之

后,可以通过切削加工动力学仿真软件(如 Cutpro、MachPRO SimuCut、e-Cutting 等)进行铣削颤振分析,得到颤振稳定性叶瓣图,即把切削稳定区和颤振区表示为给定径向切深下主轴转速与临界轴向切深之间曲线。最后,将 3 向铣削力作为动态激励力作用于系统中,获得刀尖点处的位移频域响应,可对给定加工条件下机床性能进行预测和分析。

结束语

数控机床是耦合了机械结构、伺服系统、切削过程的复杂机电产品,进行耦合建模与分析对于提高机床动态性能具有重要意义。耦合多刚体仿真、耦合有限元仿真、耦合柔性多体系统仿真、结构 - 刀具系统 - 加工过程耦合建模等技术是实现机床优化分析和设计,从而提高机床静动态性能的强有力工具。

参考文献

- [1] Berkemer J, Knorr M. A roadmap to machine tool optimization, CIRP-2nd International High Performance Cutting(HPC), Vancouver, 2006.
- [2] Altintas Y, Brecher C, Weck M, et al. Virtual machine tool. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(1):81-84
- [3] Rehsteiner F, Weikert S, Rak Z. Accuracy optimization of machine tools under acceleration loads for the demands of high-speed-machining. Proceedings of the ASPE 1998 Annual Meeting, 1998.
- [4] Neugebauer R, Noack S, Klug D. Simulation of energy flow in hydraulic drives of forming machines. 1st International Conference on computational Methods in Fluid Power Technology, Melbourne, 2003.
- [5] Craig R R, Bampton M C C. Coupling of substructures for dynamics analyses. AIAA Journal, 1968, 6(7): 1313-1319.
- [6] Denkena B, Rehling S, Tracht K. Application of ADAMS/SDK as part of a comprehensive machine tool simulation system. Proceedings 1st MSC.ADAMS European User Conference, London, 2002.

(责编 杰一)