

# 关键部件对数控机床动态特性的影响\*

赵海霞, 罗卫平

(金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169)

**摘要:** 运用三维建模软件 Pro/E, 建立了虚拟样机模型; 考虑柔性的影响, 利用有限元分析软件 ANSYS, 分别将关键部件立柱和横梁视为柔性体, 建立数控机床刚-柔耦合虚拟样机模型; 分析讨论关键部位的柔性效应对机床运行稳定性的影响; 对关键部位结构进行改进, 提高了数控机床的动态特性。结果表明, 基于刚-柔耦合模型的仿真分析更为准确地反映了机床的动力学特征, 实现了无物理样机环境下机床整体动力学性能预测和综合评价的目的, 为机械系统刚-柔耦合模型的构建与研究提供了一种可行的方法。

**关键词:** 数控机床; 刚-柔耦合; 立柱; 横梁

**中图分类号:** TG502; TH122      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1008-5300(2012)06-0061-03

## Effect of Key Parts on Dynamic Performance of CNC Machine Tools

ZHAO Hai-xia, LUO Wei-ping

(Department of Electromechanical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

**Abstract:** A virtual prototype model has been established by 3D modeling software Pro/E. On condition that the column and the beam as key parts are set to flexible, a rigid-flexible virtual prototype model has been established by the finite element software ANSYS. The paper discusses the flexible effect of the key parts on stability of the machine tool. Improvement of the key part structure can effectively improve the dynamic characteristics of CNC machine tools. The result shows that the dynamic characteristics of the machine tools can be more accurately reflected by simulation analysis based on the rigid-flexible coupling model. The overall dynamics performance of the machine tools can be predicted and evaluated comprehensively in the environment without physical prototype. This work has offered a feasible approach to establishment and research of the rigid-flexible virtual prototype.

**Key words:** CNC machine tools; rigid-flexible coupling; column; beam

## 引言

近年来,随着数控机床的快速发展,对机床的动态性能提出了越来越高的要求。建立机床结构准确的动力学模型,研究其动态特性,对于了解机床的薄弱环节、进行结构优化、提高机床的加工精度和稳定性具有重要意义<sup>[1]</sup>。对机床动态性能的优化设计研究已有40多年的历史,国内外许多学者为此做了大量的基础性研究,开发研制了一批具有实用价值的理论、方法、测试手段和分析软件等,在高端数控机床的研发中,起到了很明显的作

用。但目前在国内实际机床研发中,还较少有意识地将已设计的工程方案进行动态优化<sup>[2]</sup>。改革开放30多年来,中国机床工业在学习、仿制、自主创新的道路上发展迅速,但机床技术与国外先进技术的差距还很大<sup>[3]</sup>。

当前,数控机床朝着高速度、高精度、高性能、高柔性化和模块化方向发展,机床中某些零部件的弹性变形在运行中不容忽视。因此,要求将机床多体动力学的研究重点由多刚体系统转至多柔体系统的结构特征<sup>[4]</sup>。在对虚拟样机技术的研究中,有学者在提出的动力学仿真建模方法中,为了提高仿真模型的准确度和可靠性,考虑刚体运动和弹性变形的耦合,并通过实

\* 收稿日期:2012-09-05

验证了该方法的有效性<sup>[5]</sup>。文献[6]以 ADAMS 为主要仿真软件,通过 ADAMS 建立了传动系统的刚-柔耦合虚拟样机模型,研究了在空转工况和切削激励作用下主轴的动态响应。

文中以五轴数控机床为对象,建立其刚-柔耦合系统模型,探讨关键部位的结构形式对动态特性的影响,并对此模型进行数值仿真分析,从而掌握了机床主要部件对整机动态特性的影响,实现了无物理样机环境下机床整体动力学性能预测,为机械系统刚-柔耦合模型的构建与研究提供了一种可行的方法。

## 1 多体系统动力学研究的理论基础

在机械加工制造领域,因不断提高主轴转速和进给速度以及最大限度地降低加工误差等要求,在高速高精度机床的动态特性分析中必须考虑某些部件的弹性变形,从多柔体系统动力学角度进行分析。与刚体不同,柔性体是变形体,体内各点的相对位置时时刻刻都在变化,只靠动坐标系不能准确描述该柔性体在惯性坐标系中的位置,因此需引入“浮动坐标系”<sup>[7-9]</sup>。

柔性体的运动方程从下列拉格朗日方程导出:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \xi} + \frac{\partial \Gamma}{\partial \dot{\xi}} + \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right] \lambda - Q &= 0 \\ \psi &= 0 \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: $L$ 为拉格朗日函数, $L=T-V$ , $T$ 和 $V$ 分别表示动能和势能; $\Gamma$ 为能量耗散项; $\psi$ 为约束方程; $\lambda$ 为约束的拉格朗日乘子; $\xi$ 为广义坐标; $Q$ 为施加的力在 $\xi$ 上的投影。

将 $T$ 、 $V$ 、 $\Gamma$ 的计算公式代入式(1)得到柔性体的运动微分方程<sup>[10]</sup>:

$$\begin{aligned} M\ddot{\xi} + M\dot{\xi} - \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial M}{\partial \dot{\xi}} \right]^T \dot{\xi} + K\xi + \\ f_g + D\dot{\xi} + \left[ \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right]^T \lambda - Q &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $M$ 为柔性体的质量矩阵; $K$ 为对应于模态坐标 $q$ 的结构部件的广义刚度矩阵; $f_g$ 为重力; $D$ 为由阻尼系数构成的常对称矩阵。

## 2 数控机床动力学模型的建立

五轴龙门数控机床是一个复杂的机械结构,在建模过程中,根据其结构特点,可以将整机分为立柱组件、滑座、滑台、横梁、箱体、拖板、轴、电主轴架、电主轴、电主轴套等。每种零部件模块又可根据不同的研究要求进行细化。其三维实体模型如图1所示。

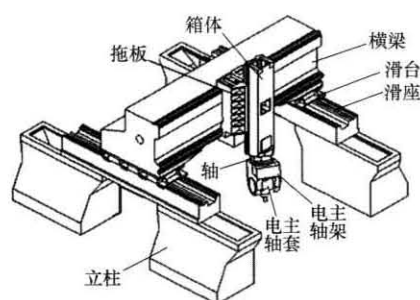


图1 五轴数控机床整机装配模型

## 3 关键部位刚-柔耦合系统动态特性分析

### 3.1 立柱对机床动态特性的影响

由于机床中的立柱组件是整个机床的重要支撑件,其结构动态特性是影响机床性能的关键因素之一。因此,有必要将立柱柔性化,用其柔性体模型替换原机床模型中的刚性体部件,建立刚-柔耦合动力学模型。

下面将分别视立柱为刚体和柔体,分析比较其对机床精度的影响,再有针对性地对其进行结构优化设计,并与刚性系统进行对比,分析讨论立柱的柔性效应对机床的运行稳定性以及加工精度的影响<sup>[11]</sup>。

图2所示为运动过程中工件中心的加速度在 $z$ 向进给系统阶跃输入下的响应曲线的傅立叶变换(FFT)曲线。其中,虚线代表立柱处于刚性状态下的变化曲线,实线代表立柱处在柔性状态下的变化曲线。通过两曲线的比较可知:当把立柱作为刚体和柔体时,两者频域的变化规律在0~65 Hz范围内大致相同,峰值频率大约为40 Hz,频率大于65 Hz时就有所不同;当把立柱作为刚体时,FFT曲线显示在高频段未出现波动现象;当把立柱作为柔体时,在75~140 Hz范围内也出现了波动现象,但幅值相对前段较小,峰值频率大约为102 Hz。

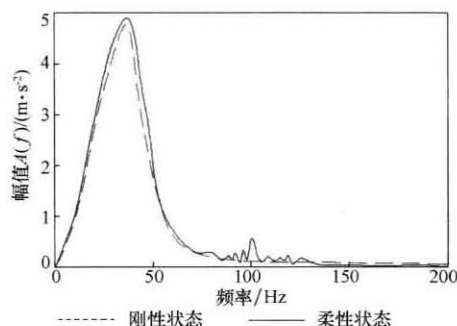


图2 改进前的 FFT 变换曲线

为了减少立柱的柔性效应对系统动态特性的影响,有必要对原立柱结构进行改进。为了解原立柱结构的动态特性,对其有限元模型进行自由模态分析,从

模态分析的结果得出其第一、二阶振型分别是整体弯曲和前后板弯曲,且固有频率较低。从原立柱内部筋板可以看出:整个结构没有贯穿前后板的筋板,布置不合理,因此,需在立柱外形尺寸不变的条件下,对立柱内部筋板结构和布局作相应修改,以提高立柱的动态特性。为提高立柱刚度,将立柱内部的筋板改为整体式,并在立柱内部设计了斜支撑形式的筋板。图3为优化前后的立柱纵向筋板结构示意图。

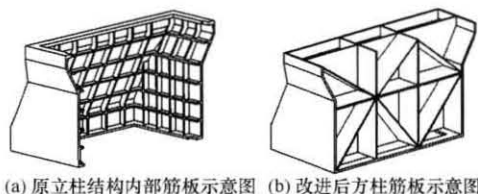


图3 优化前后立柱筋板示意图

图4为改进后工件中心的加速度在 $z$ 向进给系统阶跃输入下的响应曲线的傅立叶变换(FFT)曲线。从图4可知,改进后,因立柱柔性而引起的振动频率由原来的75~140 Hz变为150~175 Hz,显然,频带宽度显著下降,主频由102 Hz变为160 Hz。从上面分析的结果可以看出,改进后立柱的结构使整机动态性能有了一定的提高,效果十分明显。

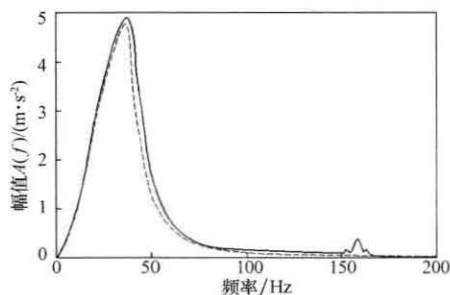


图4 立柱改进后的FFT变换曲线

### 3.2 横梁对机床动态特性的影响

横梁是整个机床的重要支撑件,因此,还有必要将横梁柔性化,建立其刚-柔耦合动力学模型。为了减少横梁的柔性效应对系统动态特性的影响,需对原横梁结构进行改进。通过对其有限元模型进行自由模态分析,得出其第一、二阶振型分别是 $xy$ 平面的弯曲变形和横梁的扭曲变形<sup>[12]</sup>。因此,需在横梁外形尺寸不变和自重基本不变的条件下,对横梁内部筋板结构和布局作相应修改,以提高横梁的动态特性。为提高横梁抗扭刚度,采用对角筋板抗扭理论,将横梁内部的纵向筋板改为双X型,筋板布置角度应尽量与水平面成45°和135°;另外,为加强 $xy$ 平面方向上的弯曲刚度,在横梁内部设计了一对斜支撑形式的筋板。图5为优化前后的横梁纵向筋板结构示意图。

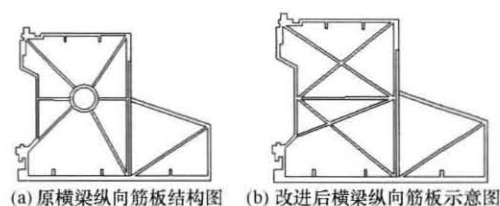


图5 优化前后横梁纵向筋板结构示意图

图6为横梁改进后工件中心的加速度在 $z$ 向进给系统阶跃输入下的响应曲线的傅立叶变换(FFT)曲线。从图6可知,改进后,因横梁柔性而引起的振动频率变为140~160 Hz,显然,频带宽度显著下降,主频有了较大的提高。从上面分析的结果可以看出,改进后横梁的结构使整机动态性能有了一定的提高,效果十分明显。

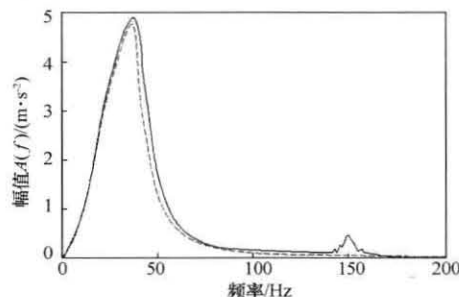


图6 横梁改进后的FFT变换曲线

## 4 结束语

在机械加工制造领域,对于高速高精度机床,单纯用多刚体系统动力学理论来研究已满足不了市场要求,必须引入多柔体系统动力学理论。文中建立了机床主要部件的刚-柔耦合多体动力学模型,分析比较其动态性能,从而有目的地对结构进行优化设计,保证了机床良好的动态特性,对提高其加工精度具有非常重要的意义。

### 参考文献

- [1] 李奎,汪惠芬,刘婷婷. 数控机床动态特性优化[J]. 机械设计, 2011, 28(5): 75-78.
- [2] 张曙,张炳生,卫美红. 机床的动态优化设计:“机床产品创新与设计”专题(八)[J]. 制造技术与机床, 2012(4): 9-13.
- [3] 陈循介. 世界机床工业现状及今后发展[J]. 制造技术与机床, 2010(10): 35-39.
- [4] 陆佑方. 柔性多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [5] HE Z X, LIU G, WU L Y, et al. Dynamics simulation of flexible-rigid mechanism based on virtual prototyping technology [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19):

5328-5331.

- [6] 钱士才,高宏力,李文涛. 基于 ADAMS 的机床主轴系统建立及性能分析[J]. 四川兵工学报,2012,33(6):69-70.
- [7] HUSTON R L. Multibody dynamics model and analysis methods[J]. Applied Mechanics Reviews, 1991, 44(3): 109-117.
- [8] GARCIA V D, SUGIYAMA H, SHABANA A A. Finite element analysis of the geometric stiffening effect. Part 1: A correction in the floating frame of reference of formulation[J]. Multi-body Dynamics, 2005, 219(K):187-202.
- [9] 洪嘉振,刘铸永. 动力学的建模方法[J]. 上海交通大学

学报, 2008, 42(11):1922-1926.

- [10] 刘言松,曹巨江,张元莹. 机械系统动力学仿真[J]. 陕西科技大学学报,2006(3):74-76.
- [11] 吴南星. 高速高精度数控机床结构动力学特性与仿真技术研究[D]. 南京:东南大学,2006.
- [12] 倪向阳,张建润. 高架桥式高速五坐标龙门加工中心动态仿真与结构优化[J]. 机械强度, 2006, 28(增刊1):1-4.

赵海霞(1972-),女,讲师,硕士,主要从事机电一体化方面的研究。

(上接第 39 页)



图 5 显控台结构示意图

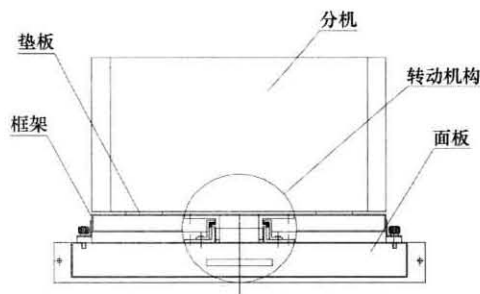


图 6 终端分机安装示意图

修不便。为了解决这一问题,本方舱采用了分机转动机构。转动机构详细结构如图 7 所示。

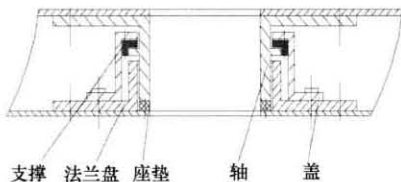


图 7 转动机构结构图

维修人员可以先将终端分机通过导轨拉出,然后通过转动机构将分机在水平方向旋转 90°。这样维修人员可以在显控台前方的侧面对分机进行维修,维修

空间宽敞,极大地方便了终端分机的维护。需要指出的是,由于转动机构的转动需要一定的空间,所以终端分机一定要置于中间的显控台,保证左右都有一定的操作空间。

## 5 结束语

本文介绍了某型号雷达电子设备方舱的研制过程。为提高方舱屏蔽性能,采用铍铜指形簧片和金属丝网结合的方式填充门板与门框之间的缝隙,同时安装电源滤波器阻断干扰源对舱内设备的干扰。合理制定散热方案解决舱内设备散热问题,设置分机转动机构解决显控台内置分机的维修性问题。经过产品的使用验证,此方舱的结构设计完全满足指标要求。

电子方舱的结构设计是一项综合性的设计工作,除了设备布局、电磁屏蔽、设备散热、维修性等问题,还需要在美观和舒适度上进行进一步研究,在方舱设计中引入工业设计思想,提高方舱设计的总体水平。

## 参考文献

- [1] 邱成梯,赵惇旻,蒋全兴. 电子设备结构设计原理[M]. 南京:东南大学出版社,2002.
- [2] 杨会越,程辉明. 高机动雷达 T 型方舱和机柜滑架的设计考虑[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(3): 166-169.
- [3] 朱静,尹妍. 电磁兼容设计在机式指控系统方舱中的应用[J]. 电子机械工程, 2010, 26(2): 5-8.
- [4] 李雨,魏强. 方舱舱内热环境仿真分析[J]. 电子机械工程, 2010, 26(4): 8-9, 21.
- [5] 赵静. 某雷达高频舱的结构总体设计[J]. 电子机械工程, 2011, 27(2): 33-36.

卢德辉(1976-),硕士,高级工程师,主要从事电子设备结构设计工作。