

# 高速数控机床关键控制技术研究

## Study of Key Control Method in High-Speed Machine Tool

中航工业北京航空制造工程研究所 李毅 石敏

**[摘要]** 高速机床具有坐标快速运行、主轴高速旋转、高动态性能等特点,如何实现高速机床的可靠性控制并达到高加工精度变得极为关键。为保证机床高速、稳定、可靠性能,机床电气控制重点着眼于高速电主轴的保护、主轴基于工艺的控制需求以及坐标驱动的高动态性能控制,文中详细论述了主轴温度、振动、功率保护以及驱动控制优化方面的关键技术及实施技巧,通过对高速铣床驱动控制的速度环、位置环以及坐标插补进行分析和优化后,机床再次进行切削加工,之前加工表面的过切及刀纹均不再出现,并且圆周换向时无刀痕,完成的工件质量明显优于优化前切削质量。

**关键词:** 高速机床 可靠性 动态响应 驱动控制

**[ABSTRACT]** There are several characteristics in high-speed machine tools, such as high-speed of axes and spindle, good dynamic performance, good reliability and high accuracy during milling process. In order to achieve these specifications, electrical controlling should focus on high-speed spindle protection, axes dynamic performance and drive optimization. Spindle displacement compensation, spindle status monitoring and drive optimization are introduced in this paper. Machining test indicates that the work-piece surface quality achieved by this method is better than ever.

**Keywords:** High-speed machine tool Reliability Dynamic performance Drive control

随着国际航空航天业竞争的加剧,高档数控机床与基础制造装备得到了国家的高度重视。近年来我国机床工业发展迅猛,通过不断技术创新,高精尖机床与国外先进水平相比已经大幅度缩小差距,在某些方面甚至已经处于国际先进水平。技术创新主要体现在机床结构设计优化和电气控制参数优化两方面,结构优化从设计角度保证机床的静态性能,一旦产品定型生产,电气控制参数的匹配与优化将发挥极其关键的作用,通过控制参数优化可将机床性能达到最佳运行状态<sup>[1]</sup>。目前高速数控机床以其高效、高精度、高动态性能的加工特点,逐渐在航空、航天领域得到应用。为了满足航空

航天工厂各种复杂型面零件的高速高效加工的需求,高速机床具有坐标运行速度快、主轴旋转速度快、机床动态性能高等特点,如何实现高速机床的可靠控制并达到高加工精度变得极为关键。本文以一台桥式高速数控铣床为例介绍高速机床的功能控制。该机床配置西门子 840D 数控系统、611D 伺服驱动系统,机床 X 坐标行程为 9000mm, Y 坐标行程为 3200mm,各坐标进给速度为 0~20000mm/min,主轴采用电主轴,最高转速为 24000r/min,机床电气控制系统为全闭环控制。机床坐标行程长,横梁跨距大,坐标运动速度快,由于加工对象为复杂航空零件,因此对机床电气系统控制的可靠性、动态响应性和加工精度提出了很高要求。

## 1 高速机床关键控制技术

为了保证机床主轴及坐标的高性能、高稳定性、高可靠性,机床电气控制重点应着眼于高速电主轴的保护、主轴基于工艺的控制需求以及坐标驱动的高动态性能控制,其关键控制技术体现在以下方面:

### (1) 高速电主轴控制。

由于机床电主轴的高速旋转特性,需要在旋转过程中对主轴的温度、振动、功率、润滑状况、刀具夹紧状况进行实时监控与调节。其中对主轴温度、振动、功率的监控和保护最为关键。

### (2) 驱动控制及优化。

数控机床在调试初期,其驱动系统参数大都采用基本配置参数,使用这些参数可以满足一般精度的加工要求,但针对高速数控机床的高效、高速加工,使用基本参数常会造成过切、加工表面有刀纹、插补坐标换向有接痕等问题,因此对高速铣床驱动控制系统的动态响应应进行动态匹配变得十分重要。

### (3) 安全保护。

高速铣进行高速切削加工时,主轴转速高(最高为 24000r/min),机床进给速度快(最快为 20000mm/min),切削速度快,切削排屑量小,切削深度小,但切削线速度很大(为传统的 3~5 倍),切削产生的热量大部分被高速流出的切屑所带走,在提高了加工质量和精度,获得较好工件表面质量的同时,安全性问题成为高速数控铣床

研制中一个必须引起足够重视的问题。根据机床结构保护方式各异,本文不再赘述。

## 2 关键技术解决方案

### 2.1 高速电主轴控制

#### 2.1.1 主轴温度保护

主轴在高速旋转时,轴承温度会升高。因此在高速数控铣床的设计中为主轴配备专用的冷却系统对主轴进行冷却。主轴内部有前端、中间、后端3个轴承,根据主轴转速及功率大小在轴承附近安装温度传感器用来实时检测主轴轴承的温度。

温度传感器信号由 PLC 模拟输入模块进行采集,根据所选传感器的类型不同,信号分为 4~20mA 和 PT100 2 种。在机床控制程序设计中,根据传感器信号计算出温度大小并进行标定,同时在程序中设置了 2 档门槛限制值对轴承的升温进行保护,当轴承温升过高时相应停止坐标及主轴的运行,有效保护了主轴轴承。

#### 2.1.2 主轴振动保护

在高速数控铣床的高速旋转过程中,要求主轴在一定平衡范围内,若主轴不平衡严重,则会产生较大振动,直接影响加工表面精度,因此在电主轴内安装了一个振动检测装置,用以检测电主轴的振动量。电主轴在从静止到规定转速,需要一个加速过程,在加速过程中,振动量比主轴在正常加工时要大,所以对主轴的振动检测和保护的也设置了 2 个限制值,分别监控主轴加速过程和正常加工过程中的振动,振动监控和保护是使用振动监控模块和机床控制程序共同完成的。

坐标在加速过程中,如果振动值大于加速限定值,则系统报警,在加速过程如果振动量过大会导致刀具损坏。因此,一旦振动超限就停止主轴旋转。在恒速(正常加工)过程,振动检测值超过恒速加工限制值时,系统

报警,停止坐标运行;如果此故障被操作员人为删除并重新开始切削后继续出现超过恒速加工限制值的现象,此时系统报警,机床控制程序停止坐标及主轴的运转,需要进行检查,机床正常后才能重新开始切削。

#### 2.1.3 主轴功率保护

在加工切削过程中,在启动切削过程或者切削量太大时,由于主轴负载太大可能出现达到主轴额定功率现象,此时能否使主轴得到保护,是维持高速电主轴高效稳定运行的关键问题之一<sup>[2]</sup>。这台高速铣床电主轴的功率可达到 60kW,因此对主轴达到功率时进行保护,由于电压值一定,在系统中实际是对主轴电流的检测和保护。针对这一点,在主轴的控制中需要对电流进行监测并实时控制。

当电流超出限定值(通过主轴功率测试试验得出)时,NCK 通知 PLC 的 DB 接口,并触发计时器,进行相应的主轴及坐标运行停止控制,这样在保证主轴安全使用的前提下,最大限度提高了主轴的利用率。

### 2.2 驱动控制及优化

数控机床驱动闭环控制由内到外分为电流环、速度环、位置环 3 个环路控制,控制系统如图 1 所示,驱动控制系统的 3 个环路中,内环的参数变化会影响外环的特性,改变外环不影响内环,即电流环影响速度环,速度环影响位置环,机床速度、加速度对位置增益有影响。在驱动控制系统优化中应逐级进行,由内至外。电流环反映电流变化情况,动态带负载的能力,是电机本身特性的表现,在数控机床的驱动优化中一般不做更改,只作为电机性能的测试。位置环是一个比例调节器,调节起来比较简单,速度环和电流环是由比例积分调节器组成,是驱动的核心部分,因此速度环是驱动优化的调整重点。驱动优化的关键是提高速度环的动态特性,而提高动态特性的关键又在于提高速度环比例环节的增益,

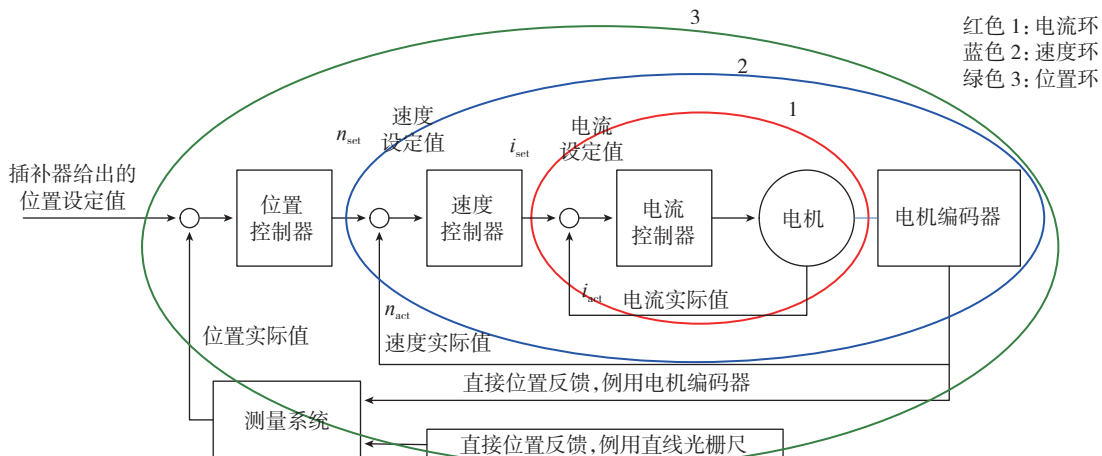


图1 数控机床驱动的闭环控制系统  
Fig.1 Control-loops of NC system

减小积分环节时间常数<sup>[3]</sup>。找出驱动部分的共振频率是提高系统动态特性的首要条件。

针对该机床在优化调整前切削铝件中出现的加工表面的刀纹、过切、圆周换向时有刀痕等现象,经分析,主要是由于机床具备大跨度、长行程、坐标运动高速的特点,机床的动态性能和机械特性没有很好匹配,而速度环和位置环的增益及积分响应时间等参数没有根据机械特性进行较好的调节导致。因此,需要测试机床的速度环及位置环性能并调整参数,使机床最终达到较好的动态特性。

### 2.2.1 驱动参数优化

由于加工过程中在过象限处存在刀痕,需要利用坐标插补圆周测试进行参数优化,通过这项测试及参数优化,可以获得更好的加工表面的轮廓精度。 $XY$ 坐标以速度  $1000\text{ mm/min}$ 、半径  $10\text{ mm}$  进行圆周运动,测试如图 2 所示。

从图 2 中可以明显看出,在  $Y$  坐标换向时存在较大的换向误差、激活动态匹配以及摩擦误差补偿功能,大的尖峰可以通过修改摩擦误差补偿参数削弱,对于小的鼓包,可以利用参数摩擦误差补偿时间来进行调节。调整后测试图形如图 3 所示。经过参数调整,图 3 中可以看出鼓包与尖峰明显减小,仍较大。继续调整,调整后测试,  $\Delta R$  为  $11.57618\text{ }\mu\text{m}$ ,  $XY$  插补特性较好,通过不断测试并优化相关参数,最终得出较好的圆周曲线,如图 4 所示。圆周测试中如果经过参数调节和调整润滑质量均没明显效果时应考虑检查机械部件的装配,因为

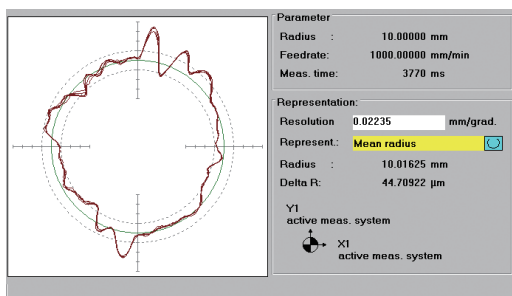


图2 XY圆周测试图  
Fig.2 Axis XY circuit test

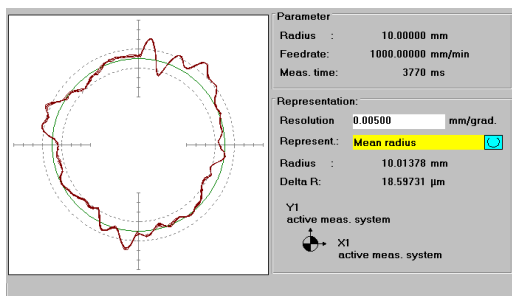


图3 调整参数后测试图  
Fig.3 Circuit test after parameters adjustment

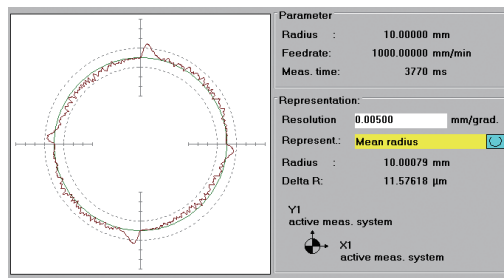


图4 较好的圆周测试图  
Fig.4 Good circuit test

这样表明存在较大的摩擦无法进行补偿需要重新进行机械调整。

### 2.2.2 优化效果检验

通过前面的分析以及对该高速铣床驱动控制的速度环、位置环以及坐标插补进行参数优化后,机床再次进行切削加工,之前加工表面的过切及刀纹现象均不再出现,并且圆周换向时无刀痕,完成的工件质量明显优于优化前切削质量,如图 5 所示。

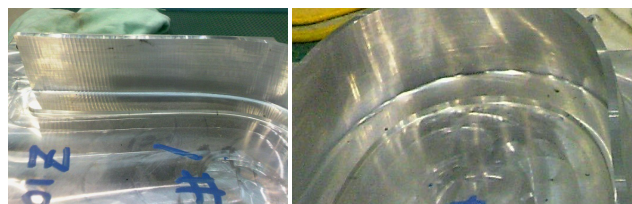


图5 优化效果对比图  
Fig.5 Milling comparison after optimization

## 3 结束语

一台高速数控机床若要发挥其高速高效等优于其他数控机床的特点,必须在设计制造中充分考虑到各方面的功能控制,解决关键技术,才能最大限度地发挥高速数控加工的优势。该高速铣床通过对主轴电流、振动等保护以及对坐标的伺服驱动系统参数优化设置等关键技术的解决和应用,实现了机床高速、高效、高动态响应和高可靠性控制,达到高精度加工技术对高速数控铣床的要求,为今后大型航空专用设备的高性能控制打下坚实基础。

## 参考文献

- [1] 张曙.高性能数控加工中心.机械工人·冷加工, 2006(8): 33-35.
- [2] 吴景华.数控机床主轴优化设计技术的研究.机械设计与制造, 2005(9): 14-15.
- [3] 高峰,王清标.SINUMERIK 840D 数字驱动伺服 611D 参数分析与优化.机床电器, 2006(5): 16-17, 20.

(责编 夏宛)