

高速数控车床切削的动态特性测试与分析

廖平, 邓方平

(中南大学机电工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要:以高速数控车床 CK7516GS 为研究对象, 对其动态特性进行了多工况的振动测试并采用 Matlab 软件对数据进行了处理。通过数据分析得到了各个工况的振动主频范围, 并把各个工况对应的主频进行了对比, 同时对振源进行了分析。测试结果表明: 高速数控车床不同工况下振动主频大部分都集中在 100 Hz 附近, 其振动主要由切削力、电主轴旋转不平衡以及电磁力不平衡引起的。该分析为高速数控机床的系统动态设计和振动抑制提供了参考依据。

关键词: 高速数控车床; 振动; 动态特性; Matlab

中图分类号: TH69 **文献标志码:** A

0 引言

20 世纪 90 年代以来, 以高切削速度、高进给速度和高加工精度为主要特征的高速切削技术已经成为现代数控加工技术的重要发展方向之一。航空航天、汽车、模具制造等对高速切削的认同与高需求, 推动着高速切削技术在国际上的迅猛发展。目前, 高速切削加工已成为国内外先进制造技术领域的重要科研项目之一^[1]。笔者采用了大功率内装式电主轴、弹筒式主轴、直联结构的伺服电机和高刚性大导程滚珠丝杠等先进技术测试数控车床 CK7516GS。在数控车床 CK7516GS 高速车削加工过程中, 振动是制约其加工精度的一个重要因素^[2], 对工件的加工质量具有重要的影响。为了研究高速车床工作时的振动动态特性, 笔者针对主轴空运转、 x 和 z 空载进给运动和切削工件 3 种工况分别进行了现场测试和分析。该测试方法为同类机床的动态设计提供了依据^[3]。

1 测试方案及内容

1.1 测试目的

在高速车床 CK7516GS 运行的不同工况下, 通过加速度传感器采集机座、刀架和电主轴的振动数据, 对数据进行处理和分析, 从而得出其机械加工时的振动动态特性, 并把各个工况对应的主

频进行了对比, 对振源进行了分析。通过测试的方法来检验高速数控车床 CK7516GS 是否达到指定的技术要求。

1.2 测试仪器

TS1102 压电式加速度传感器; TS5863 电荷放大器; 自行设计的数据采集分析软件和台式计算机。

1.3 测试系统框图

测试过程中, 在选取的测试点的 x, y, z 方向上各安装一个压电式加速度传感器, 通过自行设计的数据采集分析软件采集其对应的振动数据, 其数据保存在台式 PC 机上。测试系统示意框图见图 1 所示。

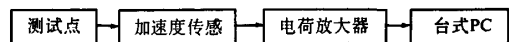


图 1 测试系统示意框图

Fig. 1 Simplified block diagram of the test system

2 电主轴空运转测试数据及结果分析

电主轴的运转是影响高速车床动态特性的重要因素, 通过测试电主轴旋转时所引起的机床振动, 可以获得空载时机床动态特性参数^[4]。高速数控车床最高转速能达到 8 000 r/min, 实际工作的最高速度一般都小于 6 000 r/min, 因此实际测试取主轴转速 $n = 6\,000$ r/min。因为电主轴是在 x

收稿日期: 2011-01-05; 修订日期: 2011-03-02

基金项目: 国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项资助项目(2009ZX04001-065)

作者简介: 廖平(1964-), 男, 江西樟树人, 中南大学机电工程学院教授, 主要研究方向为机电一体化和计算机测控,

E-mail: liaoping0@163.com.

和 y 平面内旋转的,旋转所引起的 x 和 y 方向的振动是基本对称的,所以只列出 y 方向的测试结果. 测试点分别选择在刀架、电主轴座、机座上. 电主轴在不同转速工况下的采样频率均为 $f_s = 3\,000\text{ Hz}$,采样点数均为 $4\,096$ 个. 由于分析方法具有共性,这里以刀架测试数据分析为例,说明分析过程. 刀架的测点数据如图 2 所示.

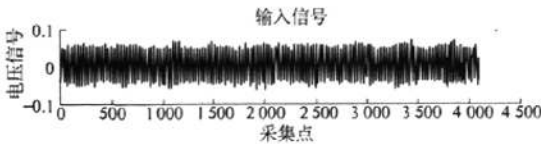


图 2 电主轴空运转测试的时域图

Fig.2 Time-domain chart of the unload-spindle running test

由于现场采集数据会受到干扰信号的影响,需对原始数据进行数值滤波处理. 采用海明窗函数^[5]设置低通滤波器,其结果如图 3. 为了获得刀架的动态特性,需对测点数据进行频谱分析,选择

Matlab 处理,然后进行 FFT^[5]变换,得到幅频谱如图 3 所示.

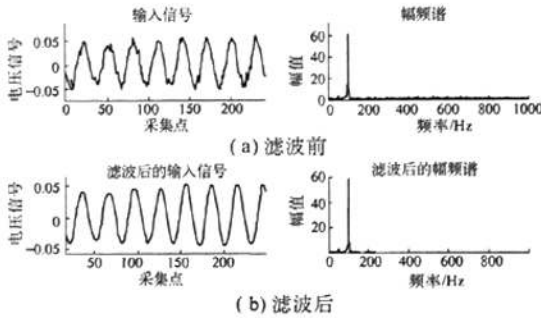


图 3 过滤前后输入信号的时域与幅频谱图

Fig.3 Time-domain and Amplitude spectrum chart of the input signal filtered

由幅频谱可以看出,刀架振动的主振频率为 100 Hz 左右. 对于机座、电主轴的测试和数据分析方法与刀架是一样的. 最后得到电主轴空运转测试分析结果如表 1 所示.

表 1 电主轴空运转测试

Tab.1 Test of the unload - spindle running

测点	主轴转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	方向	振动能量最大的五阶主频/Hz				
			第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
机座	3 000	y	152	200	248	285	347
		z	88	141	212	286	330
	4 000	y	200	234	304	367	400
		z	180	302	370	447	533
	5 000	y	250	292	350	438	500
		z	72	110	214	251	291
	6 000	y	200	300	400	483	570
		z	110	155	199	275	375
	3 000	y	50	107	156	233	297
		z	50	107	154	232	362
	4 000	y	68	107	213	235	298
		z	67	107	180	234	300
刀架	5 000	y	83	155	213	298	395
		z	84	233	320	427	488
	6 000	y	100	200	300	400	528
		z	100	200	300	400	500
	3 000	y	100	150	200	255	300
		z	424	523	652	750	800
	4 000	y	235	272	333	368	435
		z	400	500	600	683	725
	5 000	y	500	563	625	670	752
		z	500	563	625	670	752
	6 000	y	112	200	275	375	475
		z	200	242	297	374	438

电主轴空运转测试时,高速车床仅电主轴旋转,不考虑外界干扰,其振动的激励仅由电主轴旋转产生. 通过上表 1 的数据对比分析得出:在同一测试点上,不同方向的主振频率是不相同的;机

转产生. 通过上表 1 的数据对比分析得出:在同一测试点上,不同方向的主振频率是不相同的;机

座、刀架与电主轴座的主振频率基本上都在电主轴旋转频率的倍频附近,电主轴座的主频明显比机座和刀架所对应的主频要大.由此可得出电主轴空载运转所引起的高速车床振动主要是由电主轴旋转不平衡以及电磁力不平衡引起的振动.

3 x 和 z 空载进给平稳性测试数据及结果分析

在高速数控车床加工过程中,进给平稳性是影响加工精度的重要因素. x 和 z 空载进给平稳性测试时,车床仅进给系统工作,通过测试空载进给时所引起的机床振动,可以获得机床进给系统的动态特性参数.测试点选择在刀架上, x 和 z 空载进给运动在不同进给速度工况下的采样频率均为 $f_s = 30\,030$ Hz,采样点数均为 262 144 个,最大进给速度 42 m/min,由于 x 和 z 空载进给运动分析方法一样,这里以 Z 方向为例,阐述其分析过程.

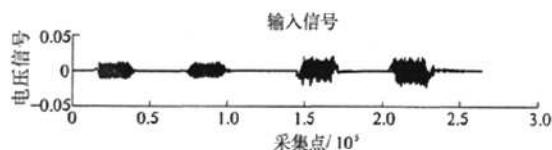


图4 进给测试的时域图

Fig.4 Time-domain chart of the feeding motion test

z 方向测点数据时域图如图4所示.时域图中包含了多次进给往复运动的数据,为了便于观察分析只取一个进给往复运动的数据进行分析.一个进给往复运动包括两个不同的工况,振幅能量小的是进给满行程后的快退过程,而振动能量大的是 x 和 z 进给的过程,为了更直观的观察分析,把两个过程分开来进行处理并且做适当的图形放大如图5和图6所示.

能量主要集中在频率 300, 380, 500 和 660 Hz 左右;在快速退刀的过程中刀架 z 向振动的能量

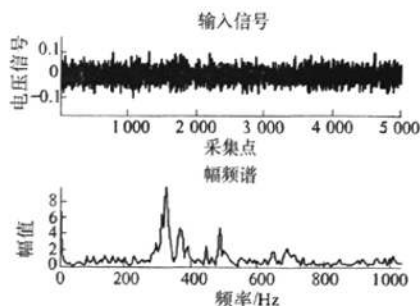


图5 x 和 z 方向进给的时域和幅频谱图

Fig.5 Time-domain and Amplitude spectrum chart of the feeding motion in x and z direction

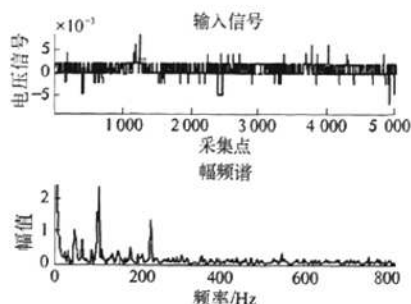


图6 快速退刀过程的时域与幅频谱图

Fig.6 Time-domain and Amplitude spectrum chart of the fast retracting process

主要集中在频率 100, 220 和 300 Hz 左右.由于高频部分振动能量衰减很快,所以只考虑前三阶振动主频,最后得到 x 和 z 进给平稳性测试结果如下表2所示.

表2 x 和 z 进给平稳性测试

Tab.2 Stationarity test of the feeding motion in x and z direction

进给 加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	进给 速度/ ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	振动 方向	振动能量最大的三阶主频/Hz		
			第一阶	第二阶	第三阶
5	5	x	104	178	230
		y	105	180	228
		z	100	180	230
5	10	x	105	210	310
		y	105	208	295
		z	100	208	295
5	20	x	100	155	325
		y	105	208	320
		z	105	225	320
5	30	x	105	230	322
		y	104	232	340
		z	105	208	320
5	35	x	300	393	492
		y	105	220	400
		z	105	210	270
6	42	x	105	210	330
		y	218	330	440
		z	215	320	425

在进给运动的过程中,刀架的启停过程振动稳定,没有出现抖动爬行^[7]的现象; x 和 z 空载进给运动在不同进给速度工况下,其振动主频主要集中在 100, 200, 300 和 400 Hz 低频附近,高频部分振动能量衰减的非常快,表明了空载进给的动态特性比较稳定. x 和 z 空载进给所引起的振动主要是由进给伺服电动机的旋转以及进给丝杠的往复运动所产生的.

4 切削测试数据及结果分析

在主轴空运转、 x 和 z 空载进给运动测试的基础上,通过切削测试来获得机床加工过程时的动态特性。切削测试包括两个试验,①不装夹工件,让其空切的振动测试;②装夹材料 $\Phi 45$, $\Phi 45$, $l=100$ 的工件,进行加工。测试点选择在刀架上,切削测试在不同工况下采样频率均为 30 030 Hz,采样点数均为 524 288 个。以转速 $n=6\ 000$ r/min、进给速度 $v=1\ 500$ mm/min 为样本进行分析,其测点数据如图 7 所示。

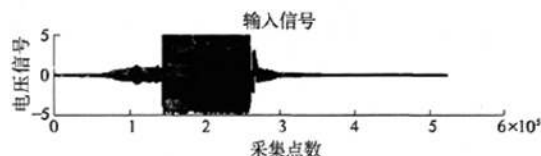


图7 切削测试的时域图

Fig.7 Time-domain chart of the cutting test

图7中包括了多种不同工况的数据,切削测试中分析切削的动态特性,因此只取空切过程和切削过程的数据进行对比分析。通过傅里叶变换后,由于高频部分相对于低频部分的振动非常的小,所以只截取和放大频率为1 000 Hz左右的频谱图。

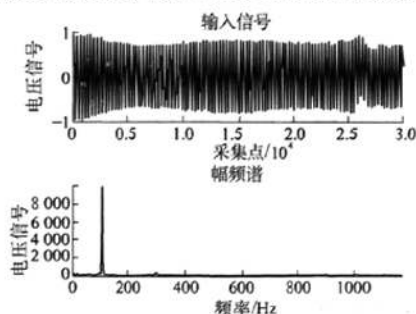


图8 空切过程的时域与幅频谱图

Fig.8 Time-domain and Amplitude spectrum chart of the unload-cutting process

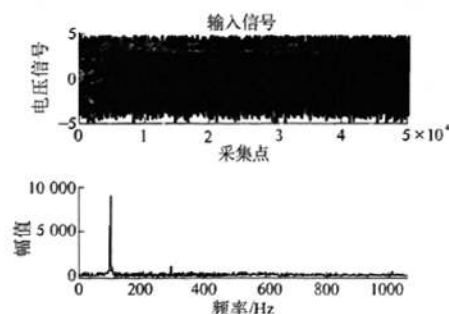


图9 切削过程的时域与幅频谱图

Fig.9 Time-domain and Amplitude spectrum chart of the cutting process

通过比较图8和图9,高速车床在切削工作的过程中其振动能量主要集中在频率100,200,300 Hz,在切削工件的过程中,由于刀具与工件的相互作用,振动的能量明显大于空切的时候,但其振动主频仍然集中在同一频率附近,不同工况下的测试结果如表3和表4所示,其测试点选在刀架上。

通过表3和表4可以看出,振动能量大的所对应的频率主要集中在100,200,300 Hz。通过本试验的各个对比试验可以发现,大部分频率信号都接近100的倍频,因此可以认为,机床的主振频率为100 Hz。车床振动主要是因为车床上电主轴的振动,包括电主轴转子旋转不平衡以及电磁力不平衡引起的振动、直线运动构件往复运动所产生的抖动(如 x 和 z 方向的进给运动)、切削时的冲击振动等等。

表3 空切过程的振动测试

Tab.3 Vibration test of the unload-cutting process

进给速度 (mm · min ⁻¹)	主轴转 速/(r · min ⁻¹)	振动 方向	振动能量最大的三阶主频/Hz		
			第一阶	第二阶	第三阶
500	2 000	x	50	100	150
		y	100	200	260
		z	100	166	260
1 000	4 000	x	66	133	200
		y	68	133	200
		z	67	133	200
1 500	6 000	x	100	200	300
		y	100	200	300
		z	100	200	300

表4 切削过程的振动测试

Tab.4 Vibration test of the cutting process

进给速度 (mm · min ⁻¹)	主轴转 速/(r · min ⁻¹)	振动 方向	振动能量最大的三阶主频/Hz		
			第一阶	第二阶	第三阶
500	2 000	x	35	70	103
		y	100	200	260
		z	100	166	260
1 000	4 000	x	67	135	194
		y	68	133	192
		z	67	133	205
1 500	6 000	x	100	200	300
		y	100	200	300
		z	100	300	400

5 高速车床进给停止产生的冲击分析

当高速车床从42 m/min高速进给速度,以加

速度 5 m/s^2 停止时,由于惯性使得刀架产生了一定的冲击,现场测得冲击如图 10 所示。

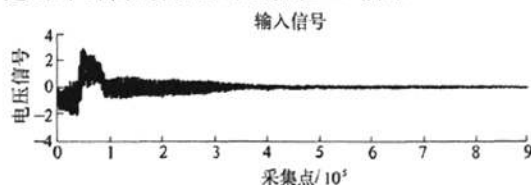


图 10 高速车床进给停止产生的冲击时域图

Fig. 10 Time-domain chart of the impact caused by the High-speed lathe feeding system stop

从图 10 中可以看出,冲击对车床的刚度和产品加工质量具有重要的影响,因此,在高速车床的结构设计中必须引起重视。为了减小冲击,根据高速车床的工况,适当提高高速车床各部件的静刚度(如刀架、机座、 x 和 z 进给平台等)、加强基座与地基联接处的刚度以及改善高速车床的固有频率和阻尼特性^[8]。

6 结论

笔者针对主轴空运转、 x 和 z 空载进给运动和切削工件 3 种工况分别进行了现场测试和分析,得到了高速车床工作时的动态特性。从所测得的数据可以看出,高速数控车床工作时所引起的振动主要集中在低频部分,高频部分衰减比较快,表明了车床的动态特性较好,达到技术要求。随着

机床进给速度的提高,机床不同部件的振动会对机床整体动态特性和加工质量产生重要影响,笔者以测试的方法为同类机床的动态设计提供了一定的参考依据。

参考文献:

- [1] 杨凯. 高速机床进给系统动态特性分析[D]. 北京: 北京机械工业学院机械制造及其自动化, 2006.
- [2] 闵惠芳, 陈凌云, 严道发. 切削颤振抑制的实验研究[J]. 机械制造与研究, 2007, 1(02): 48-49.
- [3] 杨凯, 杨庆东. 高速机床进给系统动态特性研究[C]//2005 年中国工程机械学会年会议论文集, 重庆: 中国机械工业出版社, 2005.
- [4] 张彩芬. CK7815 型数控车床主轴部件动态特性分析及改进[D]. 西安: 西安理工大学机械工程学院, 2007.
- [5] 刘波, 文忠, 曾涯. MATLAB 信号处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 2-42.
- [6] 求是科技. MATLAB7.0 从入门到精通[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 186-244.
- [7] 李宝明. 机床爬行问题与消除方法[J]. 煤矿机械, 2007, 28(4): 185-186.
- [8] 杨传启. XK717 数控铣床动态特性的实验研究[D]. 浙江: 浙江工业大学机械制造及其自动化, 2006.

Tests and Analysis of Dynamic Characteristics of the High-speed CNC Lathe Cutting

LIAO Ping, DENG Fang-ping

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The CK7516GS CNC lathe was used as an object of the study in this paper. The vibration testing of dynamic characteristics was carried out under different working situations, and then the data was processed by using Matlab. According to analysis of the data, vibration frequency range was gained and compared with the corresponding working situation, and then the sources of the vibration were detected and analyzed. The results show that the main frequency under different conditions of CNC lathes concentrates largely in the vicinity of 100 Hz, which is mainly caused by cutting force, the imbalance spindle rotation and the unbalanced electromagnetic force. this paper provides references for the dynamic designing and vibration controlling of the High-speed CNC machine tool.

Key words: high-speed CNC lathe; vibration; dynamic characteristic; matlab