

超声波振动车削抑制颤振的实验装置及其时变特征*

于 劲 刘乃庆 王立江

(吉林工业大学)

摘要: 超声波振动切削是一种新的精密加工方法, 它是否确有抑制切削颤振的特性一直是悬而未决的技术难题。本文设计出一种可供研究这种特性用的实验装置, 并对它的主振模态进行了参数识别。车削实验结果表明, 超声波振动车削可有效地锐减普通车削的颤振振幅。

一、引 言

超声波振动切削是五十年代中叶发展起来的一种新的加工方法^[1], 最近的研究表明, 超声波振动切削除了已被公认的诸项优点外, 还存在一个重要现象, 即在切削过程中, 对原工艺系统不采取任何其它的减振措施, 只要振动参数选择合适, 就能有效地消除或减轻工艺系统的振动, 从而获得稳定切削的良好工艺效果。然而, 这种现象是在偶然的振动切削过程中得到的^[2], 它是否具有普遍意义迄今还不为人们所知。究其原因, 有以下两个方面: 其一, 以往的学者并没有注意到这种消振现象的实际背景, 它产生于普通切削发生颤振的情况(例如普通车削细长轴或超细长轴), 而刀具一旦加上超声波, 颤振立即消除或减弱。如果在普通切削不产生颤振的情况下去观察, 当然不会看到这种神奇的现象; 其二, 还没有一个较理想的实验装置可供研究这种减振现象。基于以上两点考虑, 我们设计出了一个实验用的超声波减振细长轴, 并对它的主振模态进行了参数识别, 进一步研究了超声波振动车削抑制颤振的时变特征。

二、实验装置的设计

这种超声波振动车削消减颤振实验装置的设计应满足以下几点要求: 第一, 必须具有较鲜明的实际背景; 第二, 在精加工范畴内(例如速度较低, 切深较小, 进给量较小的情况下)普通切削产生颤振; 第三, 容易保证实验条件的稳定性, 如每次实验的试件刚度应保持一致等; 第四, 应便于测试(减振的大小应有量值上的度量)。基于以上的设计思想, 本文作者设计出一个超声波减振细长轴, 如图1所示。

实验用的试件套是可拆换的, 并且均在同一位置安装, 保证了实验条件的稳定性, 给正常进行实验带来了很大的方便。颤振大小的测试是通过安装在自制框架上的电容传感器进行

* 国家自然科学基金资助项目的部分内容

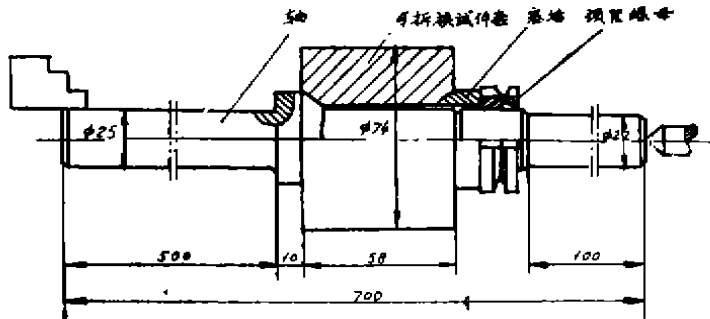


图1 超声波减振细长轴

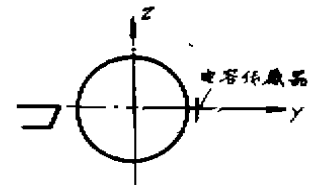


图2 电容位移传感器的布置

的,如图2所示。这个细长轴的长径比 $l/d > 28$,很显然,这个实验系统的主振模态就是机床主轴——细长轴——尾架系统,相对于这个主振模态而言,机床的床身、刀具均具有较好的动力特性,也就是说,我们人为地将机床主轴——细长轴——尾架系统设计成薄弱环节,经实验测定,这个实验用细长轴,当切削速度 $v = 10\text{m/min}$,进给量 $f = 0.08\text{mm/rpm}$,切深 $a_p = 0.025\text{mm}$ 时,普通车削45#钢即出现颤振振纹。然而,切削细长轴的不同位置,其动态响应有很大差别,理论分析^[3]和实验结果均表明,最容易发生颤振的位置常常发生在靠近尾架顶尖处。所以,可拆换的试件套设计在距离顶尖161mm处(指试件套的中心,细长轴全长为700mm)。

三、主振模态的参数识别

本文作者所设计的超声波减振细长轴装夹在机床上之后,可以把机床系统结构简化成一个单自由度系统来处理,也即该装置在振动方向上的模态离开机床系统其它各阶模态很远,以至于其它模态对该自由度模态的影响可以忽略不计(例如相近两个模态的固有频率分别是106Hz和195Hz)。

众所周知,机床模态参数识别的目的在于得到频率特性 $G(f\omega)$,从而确定各阶模态的固有频率和阻尼比。识别实验中激励点的位置和方向不同会得到不同的参数,它体现了动柔度的方向和位置的差异及交叉动柔度的影响。然而,根据超声波减振实验的需要,只需识别沿主振方向(Y方向)的主振模态参数固有频率 ω_n 和阻尼比 ξ 。近几年来对于机床系统结构的模态参数识别在国际范围内发展了所谓再线识别法。此方法的优点在于运转加工中的机床特性比非工作机床动态特性更逼近实际(运转机械的动柔度与静止机械动柔度有差别)。但是,正如文献^[4]中所述,不对闭环识别开环系统所带来的误差进行校正和补偿是不行的,其结果是大大降低识别精度。因此本文作者仅用一般通用仪器组成了模态参数识别系统,见图3所示。

有两点予以说明:

1. 考虑到目前广为应用的非接触式激振器与自配的电容位移传感器相对于试件的正确位置的调整非常困难,测试效率很低,因此激振振幅的测量并没有采用激振器自配的传感器,而是在模拟工件上安装了一个加速度计进行振幅的测量。当然这种测量是要经过预先

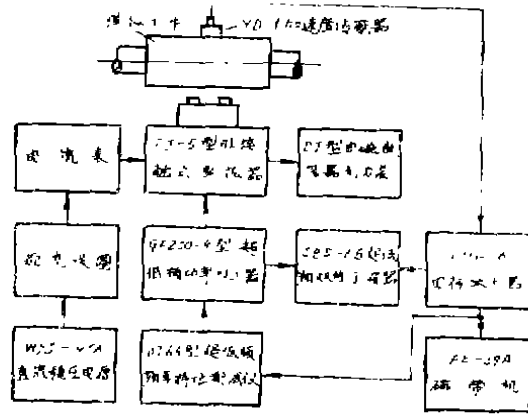


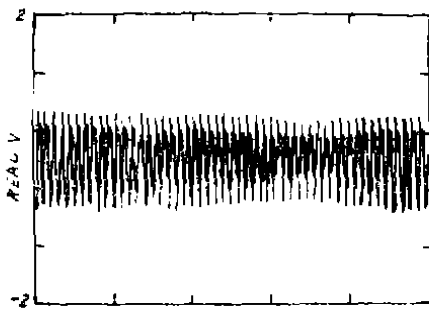
图3 主振模态参数的测试仪器框图

到主振模态的固有频率 $\omega_n = 106.8\text{Hz}$, 阻尼比 $\zeta = 0.01$ 。

四、基于实验装置的减振时变特征

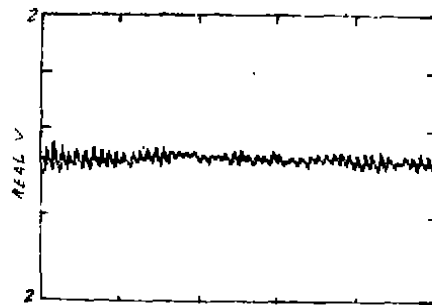
在充分地证明了颤振位移信号（由图2的电容传感器测得）的各态历经性以后^[5]，这一随机过程的所有特性可以用单个样本函数上的时间平均来描述，也即可以用单个观察到的时间历程记录来测定平稳随机现象的总体特征。

图4中的(a)和(b)分别给出了在本实验装置上测得的普通车削和超声波振动车削的时间历程记录曲线，由图可看出，超声波振动车削明显地改变了普通车削的时域特征（包括幅域特征），它有效地锐减了普通车削的颤振振幅。实验过程中所获得的振动信号还可以经采样和模数转换离散化后，送入微机进行统计分析和频谱分析，得到信号的统计参数或频域参数如均值、均方根值、方差、自相关函数、功率谱密度等。也可将振动数据送入计算机，运用时间序列法进行建模，以分析切削过程的稳定性等。所有这些（包括实验装置及相应的测试手段）都将为进一步研究超声波振动切削抑制颤振的机理扫除了障碍。



TIME A LIN 0.4 SEC.
x: 360.55ms y: 1.3779V

图4(a) 普通车削时间历程记录



TIME A LIN 0.4 SEC.
x: 12.89ms y: 4238 V

图4(b) 超声波振动车削时间历程记录

391 · A = 10 μm $v_0 = 20\text{m/min}$ $a_r = 0.05\text{mm}$, $f_s = 0.08\text{mm/rpm}$
1 kHz A: AC/2V B: AC/2V S, SUM 32/32 DUAL 1k

标定的。

2. 对于以上的测试系统，由于是稳态简谐激振，在频率域上对应单一谱线，测振能量集中在单一频率上，属于单频激振。故优点是激振功率大，因而信噪比高，能保证低频响应的测试精度。只要扫描足够慢或频率步长足够小，可以得到很高的频率分辨率。

根据实测的幅频特性曲线和 Nyquist 曲线，可得

超声波振动切削抑制颤振的切削实验,也从另一个侧面证明了本实验装置的实用价值,它不但深刻地反映了超声波减振技术的实际背景,而且也探索了这一减振技术的规律性提供了一个切实可行的实验装备。

参 考 文 献

- [1] 隈部淳一郎著,精密加工振动切削基础与应用,机械工业出版社,北京,1979年
- [2] Janet Devine, SAMPE Quarterly, 1979, 10, No. 3
- [3] 丁建国等,细长工件的特征频率及极限切削宽度,中国兵工学会论文选编,1986年,第3期
- [4] 蔡礼君、顾崇衔,应用力学学报,1987年,第3期。
- [5] 应怀樵编著,波形和频谱分析与随机数据处理,人民铁道出版社,北京,1983年。

A Test Equipment of Chatter Suppressing for Ultrasonic Vibration Cutting

Yu Jin Liu Naiqing Wang Lijiang

Abstract

Ultrasonic Vibration Cutting (UVC) is a new finish machining method but it is not certain if UVC is able to suppress the cutting chatter. This paper presents a special test equipment which can be used to study the characteristics in suppressing chatter and also presents the results of parameter identifying in the direction of chief vibrating modality. The turning test results show that it is able to reduce the amplitude of cutting chatter effectively.