

# 计算机辅助监控机床颤振的研究

周晓勤 于骏一 高品忱

(吉林工业大学)

**摘要:** 本文主要讨论机床颤振的计算机辅助监控问题。文中提出以特征量 $\xi$ 做为机床颤振的监测参数,当 $\xi$ 值超过预先设定的控制门限值时,计算机监测单元即向控制单元发出警报并采用一种特殊的变速控制策略抑制颤振于孕育之中。

**关键词:** 计算机辅助制造, 机床颤振, 监控, 变速切削。

## 一、前 言

机床颤振的监控是提高机械加工表面质量,提高生产效率,发展机床适应控制,特别是发展计算机集成制造系统中不可避免的一个重要问题。国内外众多学者对此进行了研究<sup>[1,2,3]</sup>,但大多数方法正如著名学者 H.K.Toenshoff 所说:“几乎都停留在实验室阶段,远未达到真正实用的地步”<sup>[4]</sup>。主要存在三个方面的问题:(1) 颤振监测的准确性和适应性;(2) 颤振监测的快速性;(3) 颤振控制的有效性和实用性。

本文在前人工作的基础上,对机床颤振的监控问题进行了更为深入地探讨,提出了一种新的,实用有效的计算机辅助监控机床颤振的策略。

## 二、计算机辅助监控试验系统和试验条件

试验在普通车床上进行。车刀装在一根细长型刀杆上,刀杆系统是整个加工系统的主振系统。选取动态切削力信号做为在线监测信号并由装在刀杆左端上部的力传感器 1 拾取。力信号经电荷放大器 2 放大后,由磁带机 4 同步记录以做离线处理。图 1 是计算机辅助监控机床颤振的试验系统框图。

机床颤振的监控由微型计算机 7 执行。一旦切削过程趋于失稳,微机即向控制单元发出警报,并通过可控硅直流调速装置 10 变换直流电机 11 的转速。

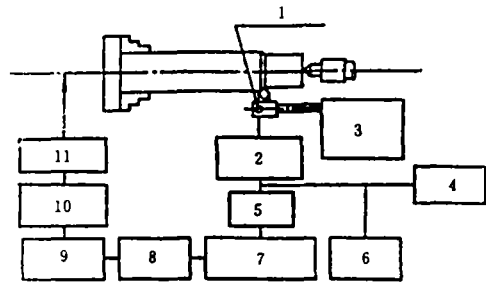


图 1 计算机辅助监控试验系统

1—力传感器, 2—电荷放大器, 3—刀架,  
4—磁带机, 5—A/D, 6—示波器, 7—微机,  
8—D/A, 9—光电耦合器, 10—可控硅,  
11—电机

本试验中，工件直径80mm 长度400mm，刀具为不重磨硬质合金车刀，其几何角度  $\gamma = 10^\circ$ ， $\alpha = 8^\circ$ ， $k_r = k_r' = 45^\circ$ ，主轴转速  $n = 320, 640 \text{rpm}$ ，进给量  $f = 0.1, 0.2 \text{mm/r}$ ，切削深度  $a_p = 0.4, 0.8 \text{mm}$ 。

### 三、机床颤振的在线监测

对监测机床颤振的动态切削力信号进行分析可以发现，在切削过程由平稳到失稳的过渡过程中，动态切削力信号将有以下的特征变化。(1) 在平稳切削阶段，频域呈宽带分布，没有哪一个频率成分能占据主导地位，时域信号随机变化且幅值较小，如图2(a)所示；(2) 在颤振成长阶段，频带收敛并占据主导地位，时域信号的周期性加强，幅值增长，如图2(b)所示；(3) 在完全颤振阶段，变为单一频率成分，时域信号呈典型的周期性，幅值比平稳切削时大数十倍，如图2(c)所示。因此，在切削过程中若能提取出信号的频域分布由宽带趋于窄带即时域信号逐渐呈现较强周期性的变化特征，就可确知机床颤振即将发生的征兆。

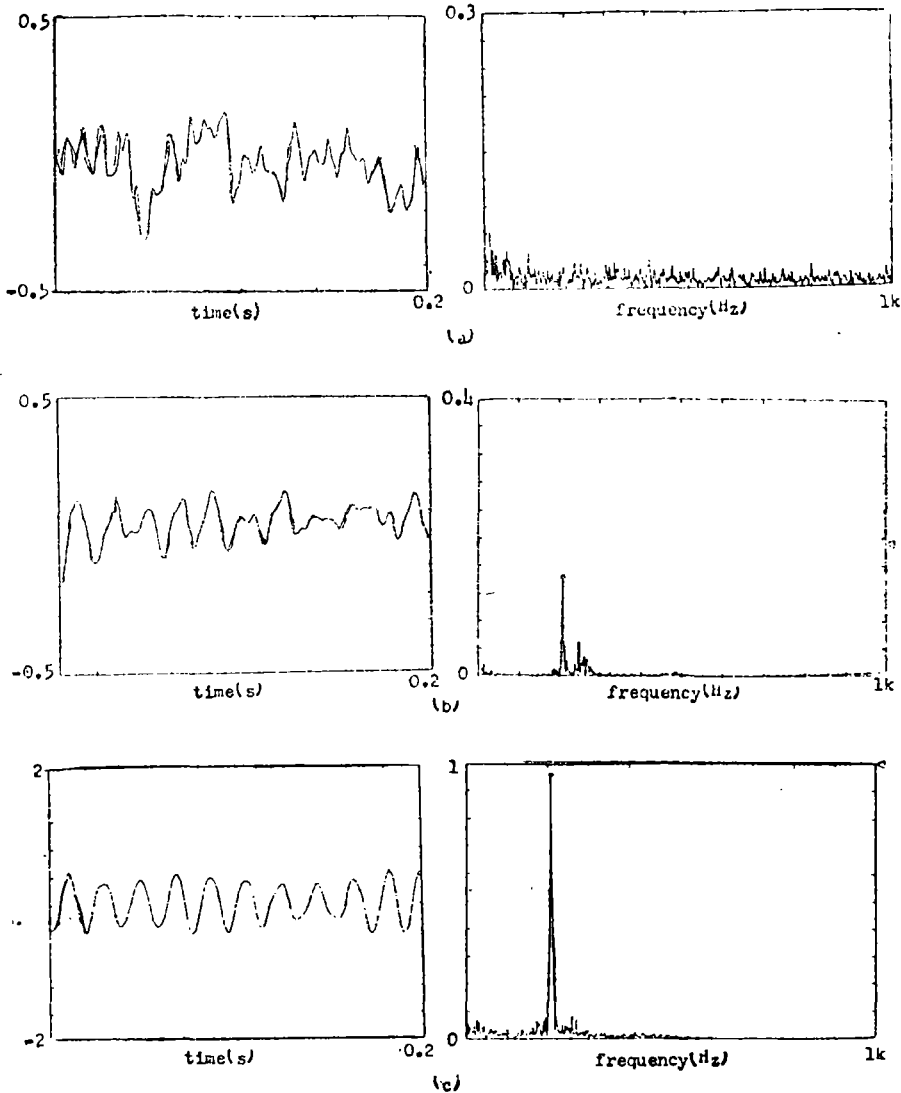


图2 颤振建立的时间历程及频谱图

为提取这一变化特征, 本文引入特征量  $\xi$ , 其定义为

$$\xi = R_n(k) / R_n(1) \quad (1)$$

式中,  $n$  为计算机实时采集信号的点数,  $R_n(1)$  为序列  $\{w(t_i)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 中“1”轮次的总个数, 这里  $\{w(t_i)\}$  为信号  $\{x(t_i)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 在均值  $\mu$  水平下的 0—1 时间序列, 它可通过对  $\{x(t_i)\}$  进行硬判决得到, 即

$$w(t_i) = \begin{cases} 1, & x(t_i) \geq \mu \\ 0, & x(t_i) < \mu \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,  $\{x(t_i)\}$  为对连续的动态切削力信号  $x(t)$  采样得到的平稳时间序列, 且  $E[x(t_i)] = \mu$ 。在 0—1 时间序列  $\{w(t_i)\}$  中, 称由“1”连续组成的不能再长的子序列为“1”轮次, 由  $k$  个以上“1”连续组成的不能再长的子序列为“ $k$ ”轮次。因此, 相应地称  $R_n(k)$  为 0—1 序列  $\{w(t_i)\}$  中“ $k$ ”轮次的总个数。这里  $k$  取决于采样频率  $f$  和振动系统的固有频率  $f_n$ , 并可由下式给出

$$k = \text{int}[f_s / 2 \cdot f_n] \quad (3)$$

式中, “int[ ]”意指对括号内的数对去尾整数, 在本研究中  $k = 4$ 。

根据上述定义可知, “1”轮次数  $R_n(1)$  实际上是信号  $x(t)$  的零线正穿越次数, 它体现了信号中以各种不同频率振动的情况; 而“ $k$ ”轮次数  $R_n(k)$  则体现了信号中以固有频率  $f_n$  振动的情况。对于包含各种频率成分的随机信号,  $R_n(k)$  远远小于  $R_n(1)$ , 因而  $\xi$  值较小趋于 0; 当信号  $x(t)$  呈现明显的周期性时,  $R_n(k)$  接近  $R_n(1)$ , 因而  $\xi$  值较大并趋于 1。因此, 本研究中采用特征量  $\xi$  来描述切削过程从平稳到失稳的过渡变化特征。实际加工中并以特征量  $\xi$  做为在线监测参数, 一旦  $\xi$  值超过预先设定的控制门限值  $\xi_{lim}$ , 计算机监测单元就立即发出警报。

图 3 是在切削试验中录制的机床颤振成长的时域波形图及相应的计算机实时计算出的  $\xi$  值时变历程。由图可见, 未发生颤振时,  $\xi$  值较小, 至多也不超过 0.5; 当切削过程趋于失稳时,  $\xi$  值迅速增大并趋于极限值 1。图 3(a) 中颤振的起振时刻大体在 0.48 秒位置, 对应应在图 3(b) 中,  $\xi$  值已达到 0.90, 若设定控制门限值  $\xi_{lim} = 0.85$ , 则计算机监测单元可在颤振起振的瞬间及时发出警报。

试验结果表明, 本文提出的颤振监测参数  $\xi$  与前人提出的监测参数相比有以下优点

1. 计算  $\xi$  值时, 计算机仅需清点 0—1 序列中“1”轮次和“ $k$ ”轮次的个数即可按公式 (1) 计算。所需时间极短, 无须添置计算机硬件就可满足颤振监测的快速性要求。
2.  $\xi$  值总在 0 和 1 之间变化, 无量纲。对于不同加工条件的颤振监测其控制门限值都易确定, 因而具有好的适应性。
3.  $\xi$  值对机床颤振反应敏感, 能准确地对机床颤振进行监测。

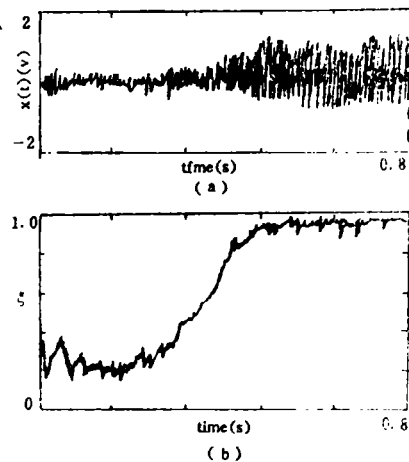


图 3 颤振成长的时域波形图及相应的  $\xi$  值时变历程

#### 四、机床颤振的在线控制

本文采用一种特殊的变化机床主轴转速的策略控制颤振,如图4所示。图中 $n_0$ 为切削加工所选用的基本转速,转速变动范围为 $n_0 \pm \Delta n$ 。切削一开始,计算机辅助监控系统即进入监视状态。当切削过程出现了即将发生颤振的征兆时,监测单元便发出警报并向控制单元发出控制信号,使主轴转速由 $n_0$ 沿 $ab$ 线下降到 $n_0 - \Delta n$ ,然后沿 $bc$ 线进行短暂的恒速切削。当规定的延时一到,微机就自动发出控制信号,使转速由 $n_0 - \Delta n$ 沿 $cd$ 线升速至 $n_0 + \Delta n$ 并沿 $de$ 线进行恒速切削,直到切削过程又有发生颤振的征兆时,转速再次沿 $ef$ 线降至 $n_0 - \Delta n$ ,如此往复循环按图4方式变换机床主轴转速,就可对切削加工中发生的颤振进行有效的控制。原因有二:一是通过变换主轴转速有可能使切削过程从不稳定区转移到条件稳定区或稳定区;二是按图4方式变换转速时,在相当一部分时间内是以变速切削的方式进行的,只要变速幅度取得合适,变速切削的减振作用是非常明显的<sup>[5,6]</sup>。

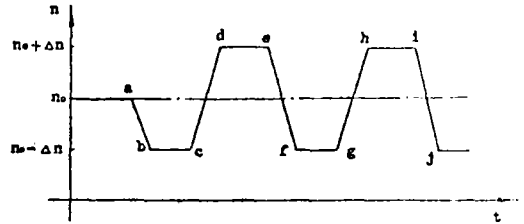


图4 转速控制策略

图5是在切削试验中录制的机床颤振在线监控的时域波形图及计算机实时计算参数 $\xi$ 值的时变历程。图5中 $a-a$ 处的波形变动趋势表明切削过程已有产生不稳定的趋势,对应的 $\xi$ 值已超过控制门限值,微机即发出控制信号,控制单元按图4所示控制策略变换机床主轴转速,切削过程随即进入稳定状态。上述状态持续一段时间后,切削过程在 $b-b$ 处又出现了不稳定的倾向, $\xi$ 值再次超过控制门限值,微机又发出颤振控制信号,经变速控制后切削过程再次进入稳定状态。在 $c-c$ 处的情况类同,此后切削过程保持稳定切削状态直至走刀过程结束。

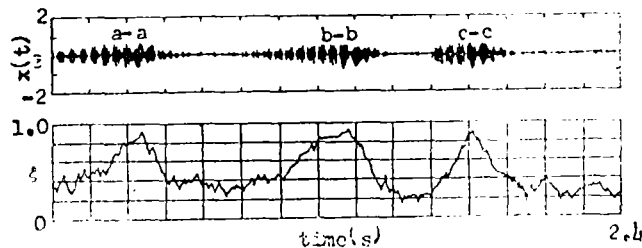


图5 颤振在线监控的时域波形图及相应的 $\xi$ 值时变历程

试验表明,本文提出的在线监控方案,成本低,易于实现,对机床颤振有非常明显的控制效果。

#### 参 考 文 献

- [1] Eman K., Wu S.M., ASME Trans. Series B, 102, No. 4, 315—321 (1980)
- [2] Nakazawa H., Miyoshi Y., Shigemura K., Bull JSPE, 18, No. 3, 243—248 (1984)
- [3] 杨叔子等,华中工学院学报, No. 5, 79—86 (1985)

- [ 4 ] Toenshoff H.K., et al., *Annals of the CIRP*, 37, No. 2, (1988) .321—336.
- [ 5 ] 于骏一等, *振动工程学报*, 1990, 3, No. 1, 72—78
- [ 6 ] 于骏一等, *机械工程学报*, 1988, 24, No. 4, 59—63

## An Investigation into the Computer Aided Monitored Control of Machine Tool Chatter

Zhou Xiaoqin Yu Junyi Gao Pinchen

### Abstract

This paper deals with the computer aided monitored control of machine tool chatter. The characteristic variable  $\xi$  is proposed as a monitoring parameter to predict the chatter. Once the value of  $\xi$  has exceeded the predetermined control threshold, an alarm signal may be sent from monitoring unit to control unit. In this paper, a special control strategy with a time-varying spindle speed of machine tool is applied to controlling the chatter in its early stage.

Key words: Computer aided manufacturing, Machine tool chatter, Monitored control, Vari-speed cutting