

# 动态车削过程及其非线性特征\*

张琳娜

(郑州工学院机械工程系)

**摘 要:** 本文在对三维动态车削过程适应性建模方向及非线性数学模型进行分析的基础上<sup>〔1〕</sup>, 进一步以微机数值模拟的方式研究了金属车削颤振过程的机理及动态特性, 从理论上证明了动态车削过程具有明显的非线性特征, 颤振的产生不但与切削用量有关, 而且与机床工艺系统的模态参数、刀具几何参数等均有密切的关系, 合理地选择和调整切削用量, 工艺系统及刀具的有关参数可以有效地改善三维车削的动态稳定性。本文模型的数值分析结论与车削颤振实验结果取得了良好的一致性, 为阐明车削颤振过程的动态特性及其在线监控提供了理论依据。

**关键词:** 动态车削、数值模拟、颤振

**中图分类号:** TG50

## 1 动态车削过程的数学模型

动态车削过程的稳定性是近年来中、外学者十分关注的问题, 而动态车削过程的理论描述及机理研究尚未得到很好地解决。

文献〔1〕分析结果表明: 三维车削过程是一个多因素综合影响的物理过程, 其动态稳定性主要取决于以下诸因素的影响, 如: 1) 切削截面动态变化及再生效应的影响; 2) 进给速率的影响; 3) 由于刀具几何参数及摩擦力下降特性等因素引起的速度效应的影响等等。上述的因素影响, 将使车削过程的切削力发生交变, 交变的切削力与机床结构的动态特性相互作用、相互制约势必会产生和维持一定幅值的颤振, 这其中动态切削力的作用是颤振产生和维持的必要条件。由此而建立的三维动态车削过程的理论模型如下式<sup>〔1〕</sup>:

---

\* 收稿日期: 1992-10-20

$$\begin{cases} \ddot{h}(t) + 2\omega_n \xi \dot{h}(t) + \omega_n^2 h(t) = \frac{\omega_n^2}{k} \Delta P(t) \cdot \cos\alpha \cos(\alpha - \beta) \\ \Delta P(t) = C_p \{ [A_{p0} - h(t) \cos K_r + Z_B \cos K_r]^{J_1} \cdot [S_o - h(t) \sin K_r + Z_B \sin K_r]^{J_2} \\ - A_o^{J_1} \cdot S_o^{J_2} + C_r \cdot J_2 \cdot A_o^{J_1} \cdot S_o^{J_2-1} \cdot \sin K_r \cdot h(t) / N \} + C_v \cdot h(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\omega_n$ 、 $\xi$ 、 $k$  分别为系统失稳模态的固有频率, 相对阻尼率及刚度;  $h(t)$ 、 $\dot{h}(t)$ 、 $\ddot{h}(t)$  分别为车削表面法线方向的振动位移、速度、加速度;  $\Delta P(t)$  为动态车削力;  $\alpha$ 、 $\beta$  为方向角;  $A_{p0}$ 、 $S_o$ 、 $N$  为切削用量;  $K_r$  为刀具主偏角;  $Z_B$  为切削表面的波痕度;  $C_p$ 、 $C_r$ 、 $C_v$  为切削力系数;  $J_1$ 、 $J_2$  为切削力指数。

## 2 动态车削过程非特性研究:

动态车削过程的数学模型式 (1) 为非线性微分方程, 采用常规的解法求其严格的解析解有一定的困难, 为了比较准确地揭示三维车削过程的动态特性, 从理论上研究车削颤振与切削用量、机床工艺系统模态参数、刀具几何角度及其它一些因素之间的非线性依赖关系, 本文根据数值分析理论, 利用微机仿真的方法对式 (1) 求其数值解, 对动态车削过程进行模拟分析。初始条件为:

$$h(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ h_o(t) & t = 0 \end{cases} \quad \dot{h}(t) = \begin{cases} 0 & t > 0 \\ \dot{h}_o(t) & t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

实际车削颤振实验是在 CA6140 型普通车床上进行的, 模型中有关参数则根据实验测定及对照参考进行赋值, 比如:  $\omega_n = 690(1/s)$ ;  $\xi = 0.025$ ;  $k = 3160(N/mm)$ ;  $J_1 = 1$ ;  $J_2 = 0.75$  等等。在模拟分析中, 除以不同切削用量、刀具角度、工件表面情况及不同模态参数代入式 (1), 进行模拟外, 并在此过程中加入少量白噪声激励信号, 以便模拟动态车削过程中由于材质不均或其它因素所造成的各种随机扰动。

### 2.1 切削用量与车削动态特性的关系:

在车削加工过程中, 切削用量的合理与否是影响车削过程动态稳定性的重要因素。

本文通过对切削深度、进给量以及转速的数值模拟, 揭示出动态车削过程的一些本质特征。

图 1 是切削深度变化的模拟分析, 可见, 随着切削深度的变化, 其动态车削系统的起振动深  $A_{p2}$  与消振动深  $A_{p1}$  具有明显地分离特性, 这是非线性系统的典型特征。由于车削颤振系统存在有这样的非线性特征, 所以就决定了整个切削深度变化过程具有以下特点: 1) 当  $A_p < A_{p1}$  时, 系统稳定, 任何扰动都不致使系统失稳; 2) 当  $A_p > A_{p2}$  时, 小扰动即可使系统失稳, 而且振幅在充分增长后会逐渐稳定在一定的水平上; 3) 而

当  $A_{p1} \leq A_p \leq A_{p2}$  时, 系统的稳定与否是不确定的, 即系统对大扰动会作出颤振响应, 而小扰动则无妨于系统的稳定性 (图 2 示)。

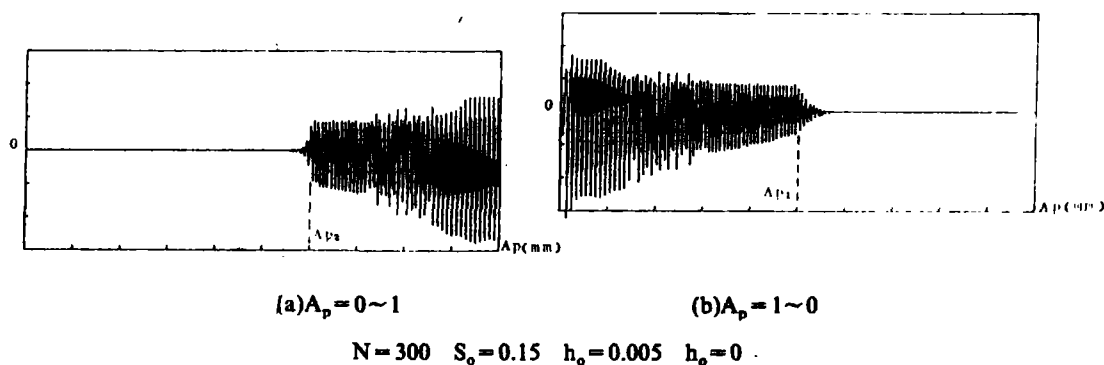


图 1

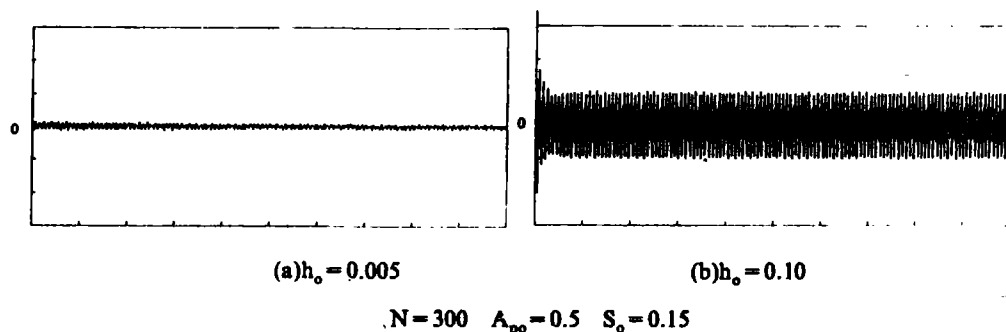
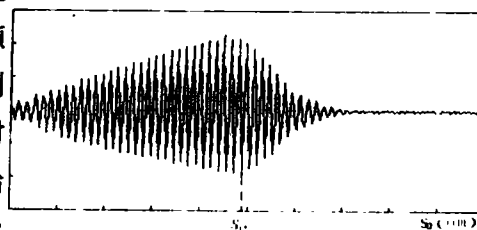
图 2  $A_{p1} \leq A_p \leq A_{p2}$ 

图 3 是模拟进给量逐渐变化所得到的系统响应情况, 图示可见, 随着进给量的逐渐增加, 车削颤振振幅的变化是非线性的, 这主要是由于动态车削过程的动态切削力与进给量呈非线性依赖关系, 对于此过程中振幅变化的转折点  $S_0$ , 称其为临界进给量。通过进一步的模拟分析发现, 随着切削深度及转速的变化, 其振幅大小、抑振点的位置以及抑振梯度均会发生相应的变化 (图 4 示), 这说明动态车削过程确是一个多因素综合影响的物理过程, 该过程的动态特性与进给量呈非线性依赖关系, 而这种关系势必要受到其它因素的影响与制约。

图 3  $S_0 = 90 \sim 0.3$ 图 3  $S_0 = 90 \sim 0.3$ 

主轴转速的变化对动态车削过程的稳定性影响很大, 由模拟分析可知, 在一定的转速变化范围内, 转速  $N$  的微小变化, 都会使系统振幅有较大幅度的变化。一般讲来, 随着转速的升高, 振幅会随之增加, 而当转速升高到一定程度后 (图 5  $N=N_c$ )。随着  $N$  的继

续增加, 颤振振幅渐趋稳定, 不再随之有明显的变化 (图  $5N < N_c$ )。出现上述现象, 其因主要是当主轴转速处于较低范围时, 由于屑瘤及其它动态因素的影响会使切削力有较大幅度的动态变化, 所以动态切削过程自然会对此作出相应地响应; 而当主轴转速升高到某一临界值以后, 随着转速的继续升高, 切削力会随之下降, 但离心力会增大, 这样一来系统的颤振仍会趋于严重, 即振幅增加。而当振幅增加到一定数值时, 刀刃轨迹的一部分会超出工件材料之外, 从而使得激振的能量锐减, 颤振振幅也因此而逐渐稳定在一定的水平上 (图  $5N > N_c$ )。由此可以得到一个有实际意义的启示, 即在一定转速范围内, 主轴转速与动态车削过程的稳定性关系密切, 通过改变主轴转速来抑制颤振不失为一种经济有效地抑振措施 (图 6 示)。

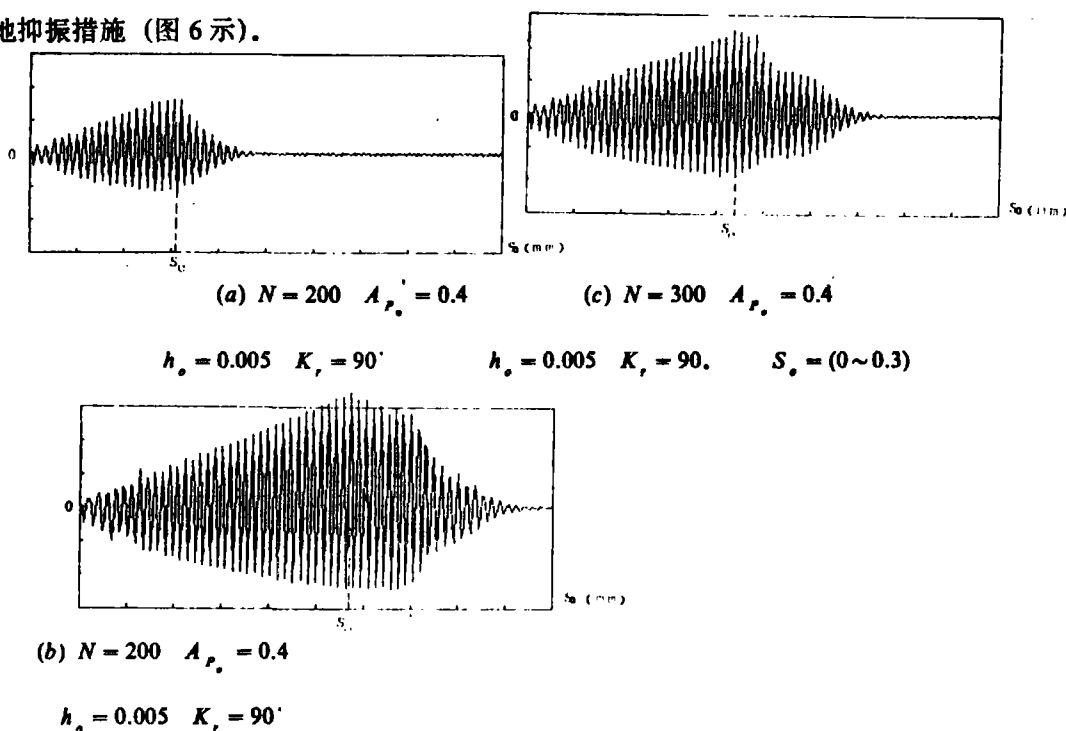


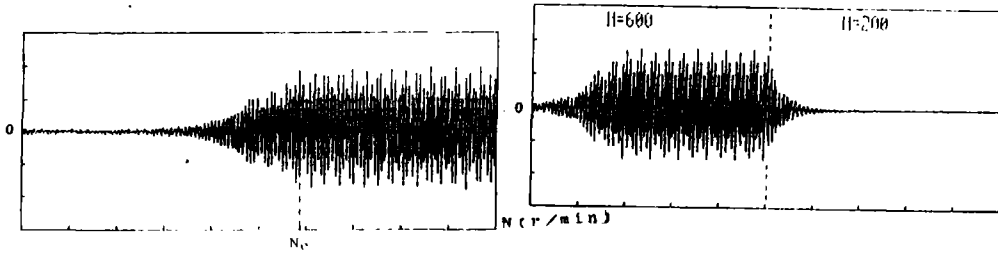
图 4  $S_0 = (0 \sim 0.3)$

## 2.2 刀具几何参数与车削动态特性的关系:

动态车削过程的动态稳定性与刀具几何参数有关, 本文从理论上对二者之间的关系进行了数值分析, 发现在刀具众多的几何参数中, 刀具主偏角对车削过程的动态特性影响极大, 这是由于刀具的主偏角  $K_r$  与动态切削力中的径向分量关系所致。随着  $K_r$  的增加, 径向分力为  $\Delta P_y \propto \cos K_r$  是减小的, 而就弱刚性工作的加工稳定性来讲, 径向刚度弱是主要矛盾, 所以车削颤振系统必然对  $\Delta P_y$  的变化反应比较敏感, 加之  $K_r$  的变化还可抑制再生效应的影响, 因此说,  $K_r$  的增加, 有利于改善动态车削过程的稳定。图 7 给出了不同

主偏角时, 颤振系统的响应情况, 图 3 与图 4a 的比较可以发现  $K_r$  的增大, 对于进给量增大抑制颤振的效果也十分有利。对  $K_r$  的模拟分析从理论上提供了主偏角与切削颤振之间的关系的依据, 为弱刚性工件的车削加工实践提供了理论指导。

除了对上述诸因素进行分析之外, 作者还对系统的模态参数 (如刚度等)、工件表面情况及其它因素对动态车削过程的影响进行了数值模拟分析, 其分析结论均与实际颤振实验结果取得了一致。

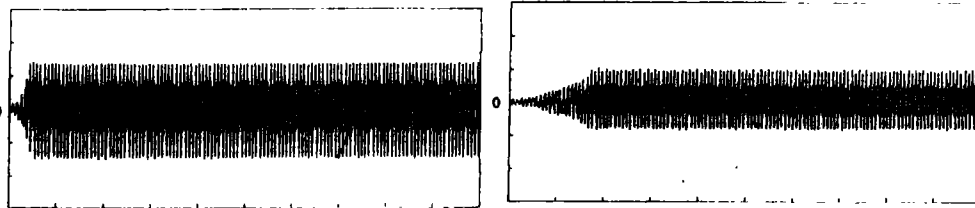


$$A_{po}=0.4 \quad S_o=0.15 \quad h_o=0.005$$

图 5  $N=(200-1000)$ 

$$A_{po}=0.4 \quad S_o=0.15 \quad h_o=0.005$$

图 6

(a)  $K_r=0.75^\circ$ (b)  $K_r=90^\circ$ 

$$N=300 \quad A_{po}=0.6 \quad S_o=0.15 \quad h_o=0.005$$

图 7

### 3 结论:

通过本文的研究, 可得出以下结论:

- 3.1 动态车削过程的非线性理论模型式 (1) 用于分析车削颤振过程是合理的, 微机数值模拟技术用于车削颤振动态特性的分析是行之有效的;
- 3.2 动态车削过程具有明显地非线性特征;
- 3.3 动态车削过程确是多因素综合影响的物理过程, 其动态特性与切削用量、刀具几何参数、系统模态参数等有着密切的关系;
- 3.4 减小切削深度、降低主轴转速可以抑制颤振, 而在一定条件下, 进给量的增加也会

抑制颤振、改善系统的动态稳定性, 值得注意的是以进给量增大抑振的效果及抑振梯度将受切深、转速以及刀具角度影响极大;

3.5 采用较大主偏角的刀具对于改善动态车削过程的稳定性是行之有效的。

### 参 考 文 献

- (1) 张琳娜等. 描述车削颤振过程的数学模型. 郑州工学院学报. 1990. 12
- (2) S.A. Tobias. 机床振动学. 机械工业出版社. 1975
- (3) S. A. Tobias and H. M. Shi. Theory of Finite Amplitude Machine Tool Instability. Int. J. Mach. Tool Des. Res. Vol. 24 No. 1. pp.45—69. 1984

## Dynamic Tuning Process and Non-linear Characteristics

Zhang Linna

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** The paper researches into the chatter mechanism and dynamic characteristics by means of numerical analogue based on the analysis of the adapting modelling direction and non-linear mathematical model for three-dimensional dynamic turning process. It is proved theoretically that dynamic turning process has obvious non-linear characteristic in the process and the formation of turning chatter has much to do not only with cutting regime, but also with the modality parameters of the technological system of the lathe and cutter geometric parameters. It provides the theoretical basis for expounding turning chatter mechanism and studying dynamic characteristics as well as monitoring and controlling three-dimensional turning process on-line.

**Keywords:** dynamic turning, numerical analogue, chatter