

描述车削颤振过程的数学模型*

张琳娜 沈沛如

(郑州工学院机械系)

摘 要: 本文从车削的特点出发, 根据颤振理论, 分析了三维动态车削中影响颤振的主要因素, 提出了描述车削颤振的适应性建模方向并建立了动态车削过程的非线性数学模型。本文所建模型反映出的有关车削颤振的规律性与车削颤振实验结果取得了良好的一致性, 为阐明车削颤振机理及其在线监控提供了理论依据。

关键词: 车削颤振, 数学模型

金属切削过程的颤振是影响切削过程稳定性、限制机床加工性能的重要因素之一, 它不但影响加工精度和生产率、降低刀具寿命和机床精度, 而且成为现代化制造系统发展中迫切需要解决的问题。目前对于车削颤振过程的理论研究尚不十分深入, 而车削加工属于应用普遍且又具有一定代表性的加工方式, 很有必要以其为研究对象, 深入探讨车削颤振的机理及内在规律性。

1 车削颤振的适应性建模方向

在动态车削过程中, 工件所受的三向动态切削力 (ΔP_x , ΔP_y , ΔP_z) 可以合成简化为动态径向合力 ΔP_{yz} (图 1 示) 及动态轴向力 ΔP_x , 在其作用下, 工件会产生不同方向、不同平面的径向颤振及轴向颤振。可见, 车削过程中, 动态切削力与颤振过程之间的关系是极为密切的。

实际车削过程的颤振情况是十分复杂的, 就车削工艺系统的稳定性而言, 动态径向合力 ΔP_{yz} 作用下的径向颤振是主要的, 这是由于弱刚性工件的车削中径向刚度弱, 但在许多情况下, ΔP_x 作用下的轴向颤振也不容忽视, 因此, 欲考虑车削过程中三向动态切削力的综合作用, 较确切地描述车削颤振的规律性, 车削颤振的建模方向就不能简单地选为切削深度方向或者进给方向, 而应当选择切削表面的法线方向见图 2, 其相应的车削过程的动力学简化模型见图 3。

* 收稿日期: 1990.02.07

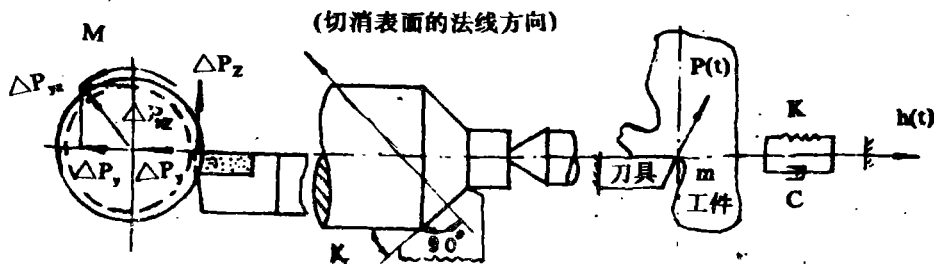


图 1

图 2

图 3

2 车削颤振的机理分析

车削颤振过程是一个多因素综合影响的物理过程, 而维持颤振的动态切削力将主要取决于以下几个方面。

2.1 切削截面动态变化及再生效应的影响:

当切削加工在无振痕的切削表面上进行时, 偶然扰动将使系统产生切削表面法线方向的振动 $h(t)$, 其影响将使切削深度及进给量产生相应地变化, 即切削截面产生动态变化:

$$\begin{cases} A_p(t) = A_{p0} - h(t)\cos\kappa_r \\ S(t) = S_0 - h(t)\sin\kappa_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A_p(t)$, $S(t)$ — 分别为瞬时切深及进给量;

A_{p0} , S_0 — 分别为名义切深及进给量;

κ_r — 刀具的主偏角。

考虑到切削力与切削用量间的非线性依赖关系, 可以得到由于切削截面动态变化情况下的瞬时切削力为:

$$\begin{aligned} P_1(t) &= C_p \cdot A_p^{J_1}(t) \cdot S^{J_2}(t) \\ &= C_p [A_{p0} - h(t)\cos\kappa_r]^{J_1} \cdot [S_0 - h(t)\sin\kappa_r]^{J_2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $P_1(t)$ — 瞬时切削力;

C_p — 切削力系数;

J_1, J_2 — 切削力指数。

而当切削表面有波痕:

$$Z_B = A\sin(\omega t + B) \quad (3)$$

见图4, 式 (1) 所示的瞬时切削用量将随之有如下变化:

$$\begin{cases} A_p(t) = A_{p0} - h(t)\cos\kappa_r + Z_B\cos\kappa_r \\ S(t) = S_0 - h(t)\sin\kappa_r + Z_B\sin\kappa_r \end{cases} \quad (4)$$

瞬时切削力也将有相应地变化:

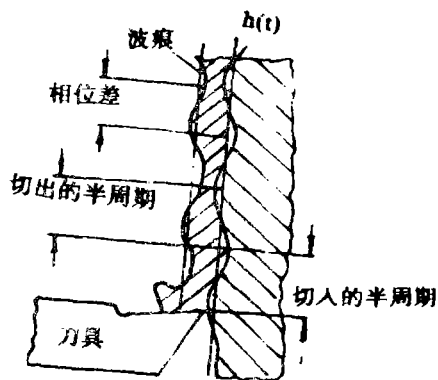


图 4

$$P_2(t) = C_p [A_{p0} - h(t)\cos\kappa_r + Z_B \cos\kappa_r]^{J_1} \cdot [S_0 - h(t)\sin\kappa_r + Z_B \sin\kappa_r]^{J_2} \quad (5)$$

显然由于切削截面动态变化及工件表面波痕再生效应的影响而引起切削力的动态变化量为:

$$\begin{aligned} \Delta P_2(t) &= P_2(t) - P_0 \\ &= C_p \{ [A_{p0} - h(t)\cos\kappa_r + Z_B \cos\kappa_r]^{J_1} \cdot [S_0 - h(t)\sin\kappa_r + Z_B \sin\kappa_r]^{J_2} \\ &\quad - A_{p0}^{J_1} S_0^{J_2} \} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $P_2(t)$ 为瞬时切削力; P_0 为平均切削力。

还应该注意到, 在实际车削过程中若颤振振幅足够大时, 刀刃运动轨迹将会部分地超出工件材料之外, 当出现这种情况时, 车削抗力瞬时为零, 应令 $C_p = 0$ 。

2.2 进给率的影响:

稳态切削的情况下, 进给速率 $r = S \cdot N$ 保持常数, 而对于动态切削过程, 由于振动的影响, 将会使进给速率产生周期性的变化, 致使切削力在刀具切入、切出的过程中产生相应地周期变化, 由此而引起的切削力变化量为:

$$\Delta P_r(t) = \frac{\partial P_r(t)}{\partial r} \Big|_{r=S_0 N, A_p=A_{p0}} \cdot dr \quad (7)$$

$$\begin{aligned} &= C_{pr} \cdot A_{p0}^{J_1} \cdot J_2 \cdot S_0^{J_2-1} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{dh(t)}{dt} \sin\kappa_r \\ &= C_{pr} \cdot J_2 \cdot A_{p0}^{J_1} \cdot S_0^{J_2-1} \sin\kappa_r \cdot h(t) / N \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $C_{pr} = C_p \cdot C_r$, C_r 表示切入率系数 (即进给速率系数); N 为名义转速。

2.3 速度效应的影响:

在切削过程中, 由于振动速度的影响, 将会使刀具的工作前角获得周期性的正增量或负增量, 从而引起切削速度的变化 (\dot{h}_{qr} 或 \dot{h}_{oc}) 见图 5, 使切削力随之产生周期性的增减变化。根据切削力与切削用量之间的非线性依赖关系, 前角动态变化引起的切削速度变化的微分关系, 可以求得刀具前角动态变化所引起的瞬时切削力的动态变化量为:

$$\Delta P_v(t) = C_v \cdot \dot{h}(t) \quad (9)$$

$$\text{式中: } C_v = C_{pv} \cdot A_{p0}^{J_1} \cdot S_0^{J_2} \cdot N^{J_3-1} \quad (10)$$

C_{pv} 为考虑前角动态变化的切削力系数; J_3 为切削力指数。

此外, 车削过程中的摩擦力下降特性以及切削力的时滞效应会引起瞬时切削力的变化, 经过分析推导, 由此而引起的瞬时切削力的变化量均与式 (9) 有相同的表达形式, 故此, 称式 (9) 中的 C_v 为等效的速度影响系数。

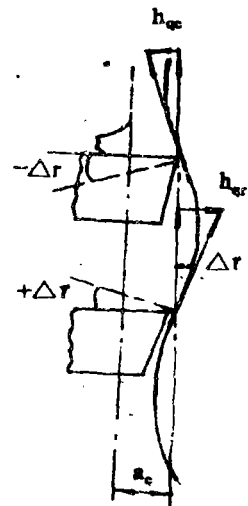


图 5

另外,在车削过程中、刀具后角的动态变化对颤振振幅有一定的限制作用。

总之,由于上述诸因素的影响,切削力将发生突变,突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与维持的必要条件。

3 车削颤振过程的数学模型

为了描述动态切削与振动之间的关系,基于上述分析,本文视刀具为刚性体,刀具与工件之间的相对振动由工件的振动来表示,同时考虑到实际切削过程的复杂性,需对图3所示的动力学简化模型稍加改进,引入两个方向角 α 、 β ,以便使车削过程的动力学模型更具有一般性(见图6)。

图6动力学模型的振动规律可近似地用集中参数的非线性微分方程来描述。注意到图6中的几何关系,其切削表面法线方向的振动微分方程为:

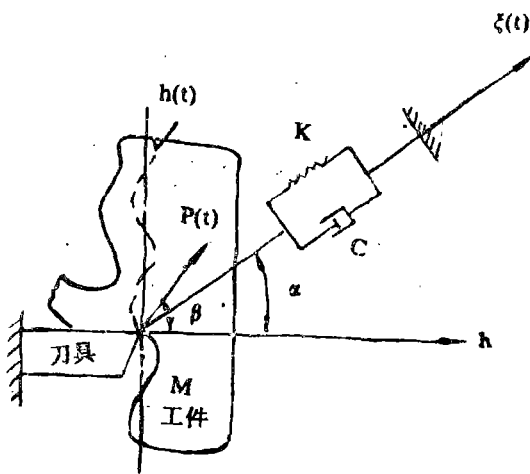


图 6

$$\begin{cases} \ddot{h}(t) + 2\omega_n \zeta \dot{h}(t) + \omega_n^2 h(t) = \frac{\omega_n^2}{k} \Delta P(t) \cos \alpha \cos(\alpha - \beta) \\ \Delta P(t) = C_p \{ [A_p \phi_0 - h(t) \cos \kappa_r + Z_b \cos \kappa_r]^{J_1} \cdot [S_0 - h(t) \sin \kappa_r + Z_b \sin \kappa_r]^{J_2} - A_p^{J_1} S_0^{J_2} \\ + C_r J_2 A_p^{J_1} S_0^{J_2-1} \sin \kappa_r \cdot \dot{h}(t) / N \} + C_v \cdot \dot{h}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $h(t)$ 、 $\dot{h}(t)$ 、 $\ddot{h}(t)$ 分别表示切削表面法线方向的振动位移、速度及加速度; ω_n 、 ζ 、 k 分别表示系统失稳模态的固有频率、相对阻尼率及刚度。

本文模型是在外圆车削颤振分析的基础上建立起来的,若改变模型中的有关部分,即可使模型适用于不同的切削加工情况。

通过对本文所建模型的数值分析,揭示了车削颤振过程的内在规律性,例如:车削颤振系统具有明显的非线性特征,如起振阈、消振阈具有明显的分离性;再如车削颤振与切削用量关系密切等,总之,数值模拟分析结果表明,数学模型(11)用以描述车削颤振过程是合理的。

4 结 论

- 4.1 描述三维车削颤振规律的适应性建模方向在切削表面的法线方向;
- 4.2 车削过程中,动态切削力的作用是颤振产生与维持的必要条件;

4.3 车削颤振过程是多因素综合影响的物理过程,它不但受再生效应、切入率的影响,而且不能忽视等效速度的影响,亦即要充分考虑阻尼动态力的影响;

4.4 刀具主偏角 κ_r 是影响实际车削颤振过程的主要因素之一,本文从理论上阐明了车削颤振与 κ_r 之间的非线性依赖关系;

4.5 车削颤振系统实属非线性系统,其数学模型 (11) 为非线性微分方程。

参 考 文 献

- (1) S·A·Tobias. 机床振动学. 机械工业出版社, 1975
- (2) 师汉民. 影响机床颤振的几个非线性因素及其数学模型. 华中工学院学报, 1984, 12(6)
- (3) 蔡礼君, 袁哲俊. 切削动力学模型的统一. 第三届全国振动理论及应用学术会议论文集(中册), 哈尔滨 1987
- (4) 张琳娜. 车削颤振过程的数值模拟及其预兆特征的研究. 郑州工学院硕士学位论文, 1989

The Mathematical Model of Describing Turning Chatter Porocess

Zhang Linna Shen Peiru
(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, the adapting model direction of drawing turning chatter is suggested and the non-linear mathematiconcal model of three-dimensional dynamic turning process is put based on analysis of the main factor about turning chatter. The regularitu depicted by the model consist with the results of actual cutting experiments. It provides the theoretical basis for expounding turning chatter machanism and on-line monitored control.

Keywords: turning chatter, mathematical