

# 数控车削过程再生型颤振稳定性建模与仿真

李金华, 谢华龙, 盛忠起, 刘永贤

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 考虑瞬态切屑厚度变化和刀具角度变化对颤振的影响, 基于再生型颤振机理建立了精确实用的数控外圆车削动力学模型. 在此基础上应用数字仿真技术开发了车削颤振分析专用软件包, 并结合相关试验数据进行了仿真分析. 仿真结果表明, 极限切宽和主轴转速之间具有明显的非线性关系, 且主轴转速对颤振影响最为明显; 切削稳定性随主振系统的等效刚度或阻尼比增加而增大, 但当方向系数、切削重叠率或切削刚度增加时, 稳定性反而降低, 同时叶瓣曲线的形状也随之改变; 但主振系统固有频率未影响曲线形状, 它的增大使曲线整体右移. 这为相应抑振措施提供了必要的理论依据.

**关 键 词:** 再生型颤振; 数控车削; 动态建模; 数字化仿真; 稳定性分析

中图分类号: TG 502.14

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2013)01-0118-05

## Modeling and Simulation of Regenerative Chatter Stability in CNC Lathing Process

LI Jin-hua, XIE Hua-long, SHENG Zhong-qi, LIU Yong-xian

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: LI Jin-hua, E-mail: lijinhua@gmail.com)

**Abstract:** Taken into account of the variation of the transient chip and cutting angle, a dynamic model was proposed for the ex-circle computerized numerical control (CNC) lathing based on the regenerative chatter theory. By applying digital simulation technique, a software package was developed to do simulations for available experimental data. The simulation results clearly showed the nonlinear relation between the limited cutting width and the spindle speed, and the spindle speed has more effect on the chatter than other factors. The stability increases with increase of the equivalent stiffness or the damping ratio in vibrating system, but it will decline when the directional coefficient, cutting overlapping coefficient or cutting stiffness increases. And the shapes of the lobes are simultaneously changed. However, the natural frequency of the vibrating system has no effect on the shapes of the stability lobes, and the lobes integrally move to the right with its increase. These results provide theoretical basis for chatter suppression.

**Key words:** regenerative chatter; CNC (computerized numerical control) lathing; dynamic modeling; digital simulation; stability analysis

半个多世纪以来, 金属切削颤振一直是影响机床性能提升的最重要因素之一, 它不仅严重影响切削加工效率, 降低工件的表面质量和尺寸精度, 还加剧了刀具磨损, 并产生噪音和缩短了机床寿命. 因此, 对于金属切削加工, 尤其是对低刚度工件精加工和超精加工, 颤振预测和抑制显得越来越重要. 国内外对切削颤振及其预测控制进行

了大量的研究, 主要以再生颤振研究为主进行了建模和仿真及相关实验<sup>[1-4]</sup>. 在颤振稳定性建模方面: Altintas 等<sup>[2]</sup>研究了钻削加工再生型颤振中切削力与切削宽度的线性关系, 建立了极限切削宽度与主轴转速的稳定性极限图; Thevenot 等<sup>[5]</sup>研究了薄壁零件铣削加工的三维稳定性, 建立了主轴转速、轴向切深和切削位置对切削颤振影响

收稿日期: 2012-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105070); 国家科技支撑计划项目(2012BAF10B11, 2012BAF12B08-4).

作者简介: 李金华(1978-), 男, 辽宁锦州人, 东北大学博士研究生; 刘永贤(1945-), 男, 辽宁台安人, 东北大学教授, 博士生导师.



$$G(i\omega) = \frac{u}{k} \cdot \frac{1}{\left(\frac{i\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta \cdot \left(\frac{i\omega}{\omega_n}\right) + 1}, \quad (4)$$

主轴转速计算如式(5)所示,极限切宽计算如式(6)所示。

$$b_{lim} = \frac{k [(\lambda^2 - 1)^2 + (2\zeta\lambda)^2]}{k_c u (\lambda^2 - 1)} \times \frac{\left(1 - \mu \cos \left(2j\pi + \arcsin \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\zeta\lambda}\right)^2}} - \arctan \left(\frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}\right)\right)\right)}{\left(1 + \mu^2 - \mu \cos \left(2j\pi + \arcsin \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\zeta\lambda}\right)^2}} - \arctan \left(\frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}\right)\right)\right)}. \quad (6)$$

式中:  $\lambda = \omega/\omega_n$ ,  $j = 0, 1, 2, \dots, J$ . 当已知机床系统动力学参数( $k, \zeta, \omega_n, \mu, k_c$ )已知时,  $b_{lim}$ 和  $n$  是  $j$  和  $\lambda$  的函数. 当  $j$  和  $\lambda$  取不同值时, 由式(5)和式(6)可求得相应的  $b_{lim}$  和  $n$  值. 就可以得到以  $b_{lim}$  为纵坐标, 主轴转速  $n$  为横坐标的切削稳定性叶瓣图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颤振稳定性分析软件包

基于上述再生型切削颤振理论, 开发了车削颤振稳定性分析软件包. 通过输入测得的加工系统动力学参数, 就能在该软件包预测出其颤振稳定性曲线(主轴转速-极限切宽), 分析并显示在主界面上。

如图2所示, 在该软件中, 可根据实际情况在合理范围内调整各项机床动力学参数和切削动力学参数. 当调整完毕, 即可计算并绘制出其颤振稳定性叶瓣曲线, 预测稳定性变化趋势, 进行后续改进。

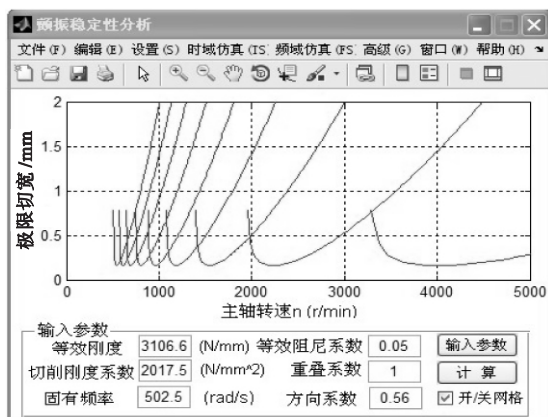


图2 再生型颤振稳定性分析软件系统

Fig. 2 Software system for regenerative chatter stability analysis

### 2.2 车削颤振稳定性分析

在该软件上对车削颤振进行了稳定性分析. 如图2所示, 当动力学参数都相同时, 极限切宽会随主轴转速的变化而变化, 且转速越大, 极限切宽的变化也越大; 在整个工作转速范围内, 通过增减

$$n = \frac{60\omega}{2j\pi + \arcsin \frac{1}{\sqrt{\mu^2 + \left(\frac{\lambda^2 - 1}{2\zeta\lambda}\right)^2}} - \arctan \left(\frac{2\zeta\lambda}{1 - \lambda^2}\right)}, \quad (5)$$

转速方法在保证切深不变的情况下, 能够较好地避免颤振发生。

当机床动力学参数( $\zeta, \omega_n$ )和切削动力学参数( $\mu, k_c$ )都相同时, 变化主振系统刚度  $k$  获得图3上的三组稳定性叶瓣曲线. 可得, 当机床主振系统刚度  $k$  增大时, 叶瓣曲线整体向上移, 曲线愈发陡峭, 稳定性区域增大, 稳定性增强。

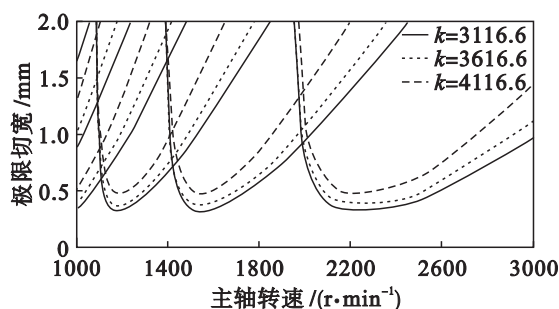


图3 机床主振系统刚度  $k$  对颤振稳定性的影响

Fig. 3 Impact of system stiffness  $k$  on chatter stability

如图4所示, 其他参数不变, 只调整主振系统阻尼比  $\zeta$ , 获得三组稳定性叶瓣曲线. 可得, 当阻尼比  $\zeta$  增大, 叶瓣曲线整体向上移, 叶瓣曲线变平缓, 极限切宽随之增大, 稳定性逐步增强。

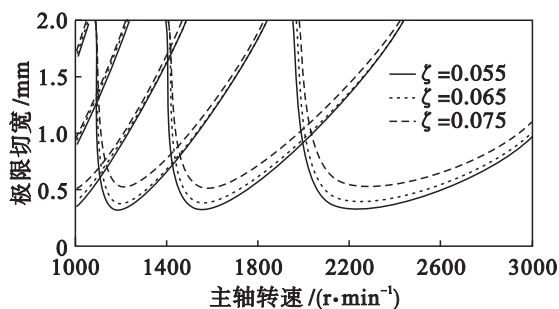


图4 机床主振系统阻尼比  $\zeta$  对颤振稳定性的影响

Fig. 4 Impact of damping ratio  $\zeta$  on chatter stability

由式(6)可知, 当频率比  $\lambda$  和其他动力学参数相同的条件下, 极限切宽  $b_{lim}$  值是相同的. 由于频率比  $\lambda = \omega/\omega_n$ , 所以当频率比  $\lambda$  相同时, 固有频率  $\omega_n$  增大,  $\omega$  也随着增大, 由式(5)得主轴转

速  $n$  也随着增大. 图5是在除固有频率  $\omega_n$  以外的其他动力学参数相同的情况下, 绘制的三组叶瓣曲线, 观察可得其随着固有频率  $\omega_n$  的增大向右平移, 并随主轴转速增大, 移动的距离亦增大.

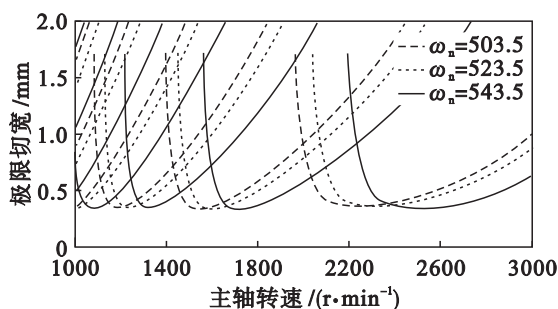


图5 机床主振系统固有频率  $\omega_n$  对颤振稳定性的影响  
Fig. 5 Impact of natural frequency  $\omega_n$  on chatter stability

根据文献[8], 切削重叠系数  $\mu$  对切削稳定性产生直接影响.  $\mu$  不仅与车刀的主偏角和副偏角直接相关, 而且与切削进给量和背吃刀量都有直接关系.  $\mu$  的取值范围在 0 和 1 之间, 当取值为 1 时, 再生型颤振最强. 图6是在除  $\mu$  以外的其他参数相同的情况下绘制的, 当  $\mu$  增大时, 叶瓣曲线向下平移, 且较为平缓, 稳定区域减小, 稳定性降低.

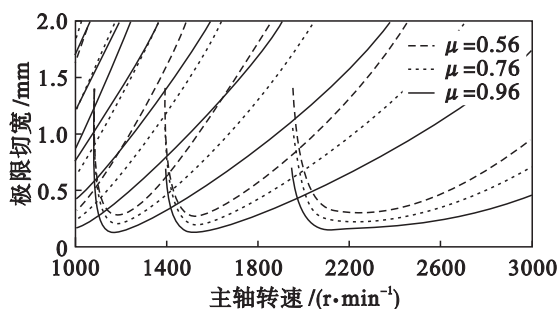


图6 切削重叠系数  $\mu$  对颤振稳定性的影响  
Fig. 6 Impact of cutting overlapping  $\mu$  on chatter stability

图7是当其他动力学参数相同时, 调整方向系数  $u$  所得曲线, 由图可看出, 当  $u$  增加时, 曲线下移, 且较为平缓, 稳定区域减小, 稳定性降低.

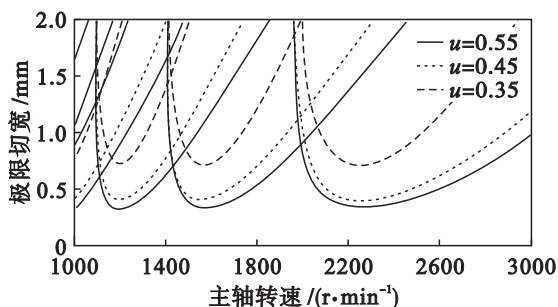


图7 方向系数  $u$  对颤振稳定性的影响  
Fig. 7 Impact directional coefficient  $u$  on chatter stability

图8是当其他动力学参数不变, 切削刚度系数  $k_c$  变化时绘制的三组稳定性极限曲线. 由图可得, 随着切削刚度系数的增大, 曲线反而下移, 且较为平缓, 稳定区域减小, 稳定性降低, 这为采用变切削刚度的方法进行颤振抑制提供了相应理论依据.

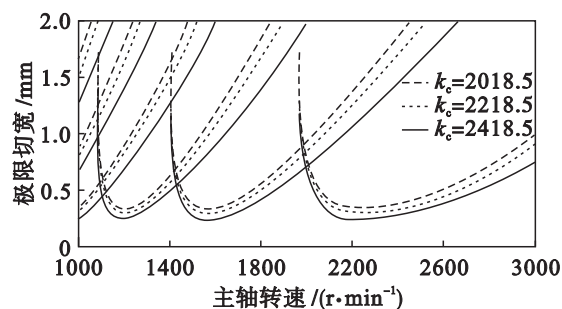


图8 切削刚度系数  $k_c$  对颤振稳定性的影响  
Fig. 8 Impact of cutting stiffness  $k_c$  on chatter stability

### 3 结 语

在动力学仿真技术研究的基础上, 系统地介绍了一种基于车削过程的切削颤振仿真系统的主要功能与分析过程. 研究了再生型切削颤振与机床动力学和切削动力学参数之间的关系, 获得了机床主轴转速与极限切宽之间的非线性关系, 经分析得主轴转速对稳定性影响最明显, 其次为切削重叠系数、主振系统阻尼比、切削刚度系数、主振系统刚度系数和方向系数.

该仿真系统在再生型车削颤振动力学仿真、参数选择和优化方面, 弥补了很多 CAE 软件在颤振分析方面的不足. 该系统能在设计和使用机床时预测其稳定性加工范围, 对于实际生产具有一定指导意义.

#### 参考文献:

- [1] Siddhpura M, Paurobally R. A review of chatter vibration research in turning [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2012 61: 27-47.
- [2] Roukema C J, Altintas Y. Generalized modeling of drilling vibrations. part I: time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 2007 47: 1455-1473.
- [3] Mei C, Cherg J G, Wang Y. Active control of regenerative chatter during metal cutting process [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2006, 128: 346-349.
- [4] Altintas Y, Stepan G, Mordol D, et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain [J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2008, 1(1): 35-44.

- [5] Thevenot V, Arnaud L, Dessein G, et al. Integration of dynamic behavior variations in the stability lobes method: 3D lobes construction and application to thin-walled structure milling [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2005 27(7/8): 638–644.
- [6] Turkes E, Orak S, Neseli S, et al. Linear analysis of chatter vibration and stability for orthogonal cutting in turning [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 2011 29(2): 163–169.
- [7] Sekar M, Srinivas J, Kotaiah K R, et al. Stability analysis of turning process with tailstock-supported workpiece [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2009 43(9/10): 862–871.
- [8] 王晓军. 车削加工系统稳定性极限预测的研究[D]. 长春: 吉林大学 2005.  
(Wang Xiao-jun. Study on the prediction of stability limits in turning [J]. Changchun: Jilin University 2005.)
- [9] 黄强, 张根保, 张新玉, 等. 对再生型切削颤振模型的试验分析[J]. 振动工程学报 2008 21(6): 547–552.  
(Huang Qiang, Zhang Gen-bao, Zhang Xin-yu, et al. Experimental analysis on regenerative chatter model [J]. *Journal of Vibration Engineering* 2008 21(6): 547–552.)
- [10] 李忠群. 复杂切削条件高速铣削加工动力学建模、仿真与切削参数优化研究[D]. 北京: 北京航空航天大学 2008.  
(Li Zhong-qun. Dynamic modeling, simulation and optimization of high speed milling under complicated cutting conditions [J]. Beijing: Beihang University 2008.)

(上接第113页)

杨德尔方程描述,其表观反应活化能为  $(220 \pm 20)$  kJ/mol.

#### 参考文献:

- [1] 王维邦. 耐火材料工艺学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 151–156.  
(Wang Wei-bang. Refractory technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2006: 151–156.)
- [2] 刘吉辉, 李静, 汪琦. 铁尾矿合成镁橄榄石质耐火材料的反应机理[J]. 辽宁科技大学学报 2009 32(1): 1–5.  
(Liu Ji-hui, Li Jing, Wang Qi. Reaction mechanism of synthesis process of forsterite refractory with iron ore tailings [J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning* 2009 32(1): 1–5.)
- [3] Cheng T W, Ding Y C, Chiu J P. A study of synthetic forsterite refractory materials using waste serpentine cutting [J]. *Minerals Engineering* 2002 15(4): 271–275.
- [4] Saberi A, Alinejad B, Negahdari Z, et al. A novel method to low temperature synthesis of nanocrystalline forsterite [J]. *Materials Research Bulletin* 2007 42(2): 666–673.
- [5] Saberi A, Negahdari Z, Alinejad B, et al. Synthesis and characterization of nanocrystalline forsterite through citrate-nitrate route [J]. *Ceramics International* 2009 35(4): 1705–1708.
- [6] Tsai M T. Preparation and crystallization of forsterite [J]. *Journal of the European Ceramic Society* 2003(8): 1283–1291.
- [7] Mitchell M B D, Jackson D, James P F. Preparation and characterization of forsterite ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) xerogels [J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology* 1998 13(1/2/3): 359–364.
- [8] Kingsley J J, Suresha K, Patil K C. Combustion synthesis of fine-particle metal aluminates [J]. *Journal of Materials Science* 1990 25(2): 1305–1312.
- [9] Tavangarian F, Emadi R, Shafyei A. Influence of mechanical activation and thermal treatment time on nanoparticle forsterite formation mechanism [J]. *Powder Technology*, 2010 198(3): 412–416.
- [10] Fathi M H, Kharaziha M. The effect of fluorine ion on fabrication of nanostructure forsterite during mechanochemical synthesis [J]. *Journal of Alloys and Compounds* 2009 472(1/2): 540–545.
- [11] 丘利, 胡玉和. X射线衍射技术及设备 [M]. 冶金工业出版社 2001: 100–102.  
(Qiu Li, Hu Yu-he. X-ray diffraction techniques and equipment [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2001: 100–102.)
- [12] 罗世永, 张家芸, 周士平. 固相反应合成  $\text{SrTiO}_3$  的反应动力学 [J]. 硅酸盐学报 2000 28(5): 458–461.  
(Luo Shi-yong, Zhang Jia-yun, Zhou Shi-ping. Solid state reaction kinetics of  $\text{SrTiO}_3$  [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* 2000 28(5): 458–461.)