

# 垂直平面内二维超声振动铣削系统稳定性研究<sup>\*</sup>

赵 波, 赵斌斌, 范凯洋, 张跃敏

(河南理工大学机械与动力工程学院 焦作, 454000)

**摘要** 为研究垂直平面内二维超声振动铣削系统的稳定性,建立了垂直平面内二维超声振动铣削稳定性模型,采用全离散法对二维超声振动铣削稳定性进行了研究,利用 Matlab 软件进行了数值仿真,获得了系统的稳定性叶瓣图。铣削钛合金材料颤振实验结果表明,主轴转速在 1 000~3 500 r/min 范围内,数值仿真结果与实验结果吻合较好,验证了垂直平面内二维超声振动铣削稳定性模型的正确性。在垂直平面内施加二维超声振动能提高系统的稳定性,轴向切深极限最大提高了约 13.6%。

**关键词** 二维超声振动铣削;全离散法;稳定性;叶瓣图

**中图分类号** TB115; TB552; TH113

## 引 言

钛合金是一种具有强度高、密度小、耐腐蚀性好及耐热性高等特点的金属,被广泛应用于航空航天等领域。虽然钛合金具有上述优点,但其存在工艺性能差、切削加工困难等缺点。为了解决钛合金等难加工材料的加工问题,业内普遍采用的做法是合理选择合适的加工设备和加工参数,来提高难加工材料的加工质量和加工效率。

高速铣削具有高精度、高效率等优点,但在加工过程中,如果加工参数选择不当,则存在切削颤振。切削颤振不仅严重影响着零件的加工质量,还可能会破坏机床设备及刀具。因此,许多学者都对切削颤振进行了研究。Budak 等<sup>[1-2]</sup>运用频率法预测铣削稳定性。Altintas 等<sup>[3]</sup>考虑了用时域周期系数矩阵的时滞微分方程组描述再生效应的动态铣削过程,利用频率法得出铣削系统稳定性。Insperger<sup>[4]</sup>提出在时域内运用半离散法,并对一自由度和两自由度铣削模型进行了铣削稳定性分析。Ding 等<sup>[5]</sup>提出了能有效提升计算效率的全离散法,并分析了铣削系统稳定性。姜燕等<sup>[6]</sup>提出了一种时间有限元预测法预测铣削系统的稳定性。上述都是基于 Floquet 理论,将无穷维时滞系统离散为有限维系统,利用系统传递矩阵特征值的模小于 1 时系统稳定性的原理,但都需要大量实验验证其理论的正确

性,因此存在经济性差的问题。

超声振动加工是一种能够提高加工系统稳定性的方法<sup>[7]</sup>,被广泛应用在精密加工领域中。速度系数  $k$  是超声振动加工的重要参数之一,其将超声振动加工分为分离型( $k < 1$ )和不分离型( $k \geq 1$ )。文献[8-9]研究了不分离型超声椭圆振动切削力,研究表明,超声椭圆振动切削在不分离区仍然能够有效降低切削力。唐军等<sup>[10]</sup>研究了分离型超声纵扭复合铣削系统稳定性的影响,并通过铣削加工碳纤维复合材料(C/C)进行实验验证。超声振动加工具有经济效益好、装置简单等优点,但目前对不分离型超声振动铣削系统稳定性的研究还不是很多。

考虑到目前还没有利用全离散法对二维超声振动铣削系统稳定性进行研究,因此,笔者综合利用全离散法和超声振动加工法,提出垂直平面内二维超声振动铣削模型,建立垂直平面内二维超声振动铣削系统的稳定性模型。利用全离散法分析二维超声振动铣削稳定性,应用 Matlab 软件进行数值分析并得出二维超声铣削稳定性叶瓣图。最后,通过二维超声振动铣削钛合金实验验证二维超声复合铣削稳定性模型的正确性。

## 1 二维超声振动铣削稳定性模型

考虑到超声振动分别施加在工件和刀具上,如图 1(a)所,在  $xOy$  平面上由于超声振动的存在,因

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51475148)  
收稿日期:2016-06-29;修回日期:2016-11-05

此当速度系数  $k \geq 1$  时,属于不分离型超声振动加工; $k < 1$  时,则属于分离型超声振动加工。速度系数表示为

$$k = \frac{v}{v_c} = \frac{v}{2\pi Af} \tag{1}$$

其中: $v$  为刀尖相对于工件的瞬时线速度; $v_c$  为临界切削速度; $A$  为超声振幅; $f$  为超声振动频率。

但分离型振动加工还要满足必要条件<sup>[11]</sup>: $\lambda$  为奇数, $A > f_z$ ,其中  $\lambda$  为  $\omega_c/\omega_z$ , $\omega_c$  和  $\omega_z$  分别表示周转转角速度和超声波发生器角频率, $f_z$  为超声铣削系统进给量。根据图 1,若不考虑刀具齿位角的变化和沿轴向超声振动切削厚度的影响,则考虑再生效应的二维超声振动切削的切厚表达式为

$$\mathbf{h}_j(t) = g(t)[s\ c]^T(\mathbf{h}_{js}(t) + \mathbf{h}_{jd}(t)) \tag{2}$$

其中: $g(t)$  为超声振动切削分离判定系数,当铣刀在切削工件时且满足分离型振动加工的必要条件时, $g(t) = 1$ ,否则为零; $s = \sin(\Phi_j(t))$ ;  $c = \cos(\Phi_j(t))$ ;  $\Phi_j$  为刀尖转角; $\mathbf{h}_{js}(t)$  为静态切厚, $\mathbf{h}_{js}(t) = [f_z + A\sin(2\pi f_1 t + \varphi_1)\ 0]^T$ ;  $f_1$  为进给方向上超声振动频率; $\varphi_1$  为初始相位; $\mathbf{h}_{jd}(t)$  为动态切厚, $\mathbf{h}_{jd}(t) = [x(t) - x(t - \tau)\ y(t) - y(t - \tau)]^T$ ;  $\tau = 2\pi/(z\omega_c)$ 。

根据式(2),采用指数型的二维超声振动铣削力学模型<sup>[12-13]</sup>可简化表示为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) = (\alpha_p + B\sin(2\pi f_2 t + \varphi_2))K_j h_j^u(t) \tag{3}$$

其中: $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{K}$  分别为模态质量、模态阻尼和模态刚度; $\mathbf{q}(t) = [x(t)\ y(t)]^T$  为刀齿的动态位移; $B$ 、 $f_1$  和  $\varphi_2$  分别为轴向超声振动的振幅、超声振动频率和初始相位。

$$K_j = \sum_{j=0}^{z-1} h(t)_{js}^{u-1} u\omega(\varphi_j(t)) \times \begin{bmatrix} s(K_{ic} + K_{rs}) & c(K_{ic} + K_{rs}) \\ s(K_{ic} - K_{rs}) & c(K_{ic} - K_{rs}) \end{bmatrix}$$

当  $\Phi_d(t) < \Phi_j(t) < \Phi_d(t)$  时,  $\omega(\Phi_j(t)) = 1$ ; 否则  $\omega(\Phi_j(t)) = 0$ 。 $\Phi_d(t)$  和  $\Phi_d(t)$  分别为刀具切入角和切出角。

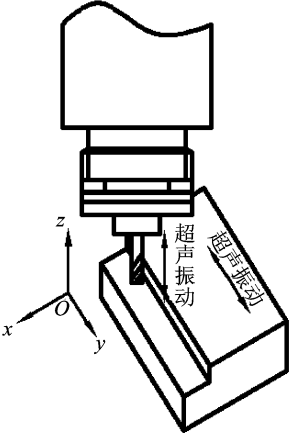
若令  $u(t) = \mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}(t) + \frac{1}{2}\mathbf{C}\mathbf{q}(t)$ ,  $\mathbf{v}(t) = [\mathbf{q}(t)\ u(t)]^T$ , 则可将式(3)<sup>[5]</sup>表示为

$$d\mathbf{v}/dt = \mathbf{A}_0\mathbf{v}(t) + \mathbf{A}(t)\mathbf{v}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{v}(t - T) \tag{4}$$

其中: $\mathbf{A}_0$  为常数矩阵; $\mathbf{A}(t)$  和  $\mathbf{B}(t)$  分别代表周期函数矩阵,且  $\mathbf{A}(t) = -\mathbf{B}(t)$ ;  $T = 60/(Z\Omega)$ ,  $\Omega$  为主轴转速。

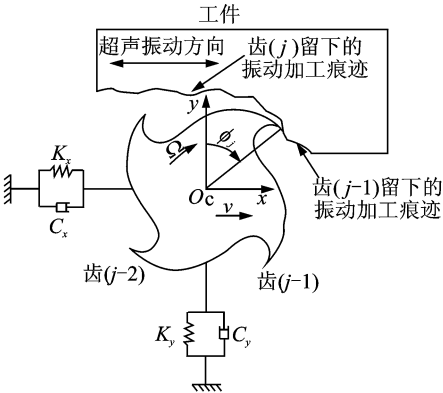
在主轴旋转的一个刀齿周期  $T$  内,把  $T$  离散为

$m$  等分,把矩阵  $\mathbf{A}(t)$ ,  $\mathbf{v}(t)$  和  $\mathbf{v}(t - T)$  分别在每个离散的小区间上进行拉格朗日插值法代替,根据 Floquet 理论,使传递函数特征值的模小于 1,则可得到二维超声铣削系统的稳定性叶瓣图。由于笔者研究的是超声不分离型振动铣削,即此时  $g(t) = 1$ 。



(a) 二维超声振动铣削模型

(a) The ultrasonic vibration milling model of two dimensional



(b) 二维超声振动铣削动力学模型

(b) The dynamic model of two dimensional ultrasonic vibration Milling

图 1 二维超声振动铣削

Fig. 1 The ultrasonic vibration milling of two dimensional

## 2 稳定性模型实验验证

### 2.1 二维超声振动铣削系统稳定性预测图

为对该理论的稳定性进行验证,进行了二维超声振动铣削系统稳定性实验。本实验所选用工件材料为钛合金(Ti6Al4V),弹性模量  $E = 110\text{ GPa}$ ,密度  $\rho = 4\,505\text{ kg/m}^3$ ,直径为  $\varnothing 6\text{ mm}$ ,螺旋角为  $35^\circ$  的 4 齿钨钢合金立铣刀。设备包括 VMC850E 型数控加工中心、NI PCI9205 数据采集分析仪、kilster5070 电荷放大器、kistler9257B 测力仪和基恩士 VHX-2000 型超景深显微镜等。实验装置如图 2 所

示,其中声学设备为自行研制装备。二维超声振动铣削系统的模态参数通过系统辨识理论以及模态分析的方法获得, $\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}0.063\ 82 & 0 \\ 0 & 0.064\ 85\end{bmatrix}\text{ kg},\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}1.686 & 0 \\ 0 & 1.583\end{bmatrix}(\text{N}\cdot\text{s})/\text{m},\boldsymbol{K}=\begin{bmatrix}2.26 & 0 \\ 0 & 1.86\end{bmatrix}\text{ NM}/\text{m}$ 。切削力参数则通过正交实验的方法得到, $K_r=1\ 268\ \text{MPa},K_t=623\ \text{MPa}$ 。该实验分别采用轴向 35 k 超声振动和刀具进给方向上 20 k 超声振动,声学参数  $A=3\ \mu\text{m},B=5\ \mu\text{m}$ ,径向切深  $a_e=1\ \text{mm}$ ,与全离散法相结合,再利用 Floquet 理论,从而可以得到超声振动铣削稳定性叶瓣图,如图 3 所示。

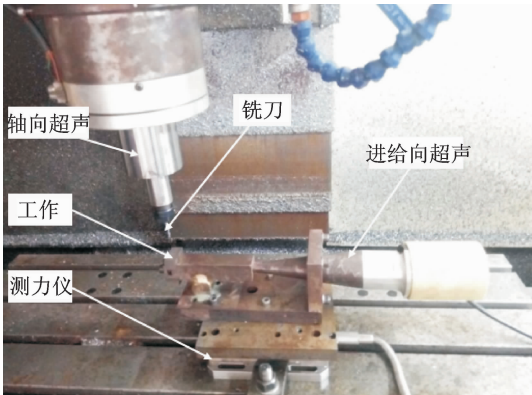


图 2 实验装置  
Fig. 2 The devices of experiment

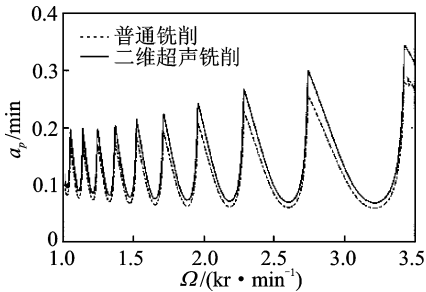


图 3 稳定性叶瓣图  
Fig. 3 The diagram of the stability lobes

图 3 表明,与普通铣削相比,垂直平面内的二维超声振动铣削系统,其最大提高铣削系统切削深度的极限值约为 13.6%,同时也增大了稳定性的区域,即采用全离散法分析的二维超声振动铣削系统不仅可以预测铣削系统的稳定性,同时还可以提高铣削系统的稳定性。这是因为在铣削过程中,由于刀具沿主轴方向和工件沿刀具进给方向的高频振动(两个方向的超声振动频率远大于主轴转速),破坏了前后刀齿留下的加工振纹,从而降低了颤振的几

率。此外,在两个方向超声振动的作用下,刀具与工件为不分离切削,同时刀尖在工件上呈现多维运动,这就使得加工区域更能充分地接触到切削液,从而改善了工况,更有利于切削加工。由于刀具在主轴方向上具有超声振动,造成加工表面形成点状的超声振动凹坑,这些凹坑的存在影响着零件加工表面的应力分布。

2.2 稳定性实验验证

在不同主轴转速下验证垂直平面内的二维超声振动铣削稳定性叶瓣图,如图 4 所示,其中“○”,“□”和“⊠”等分别表示系统稳定点、颤振点和无法判断铣削稳定性的点。图 4 中 A,B 和 D 点在普通铣削中为不稳定铣削点;而在二维超声振动型铣削下 A 点转为临界点,B 和 D 点则变成稳定铣削点;C 点在两种加工条件下均为稳定性点。

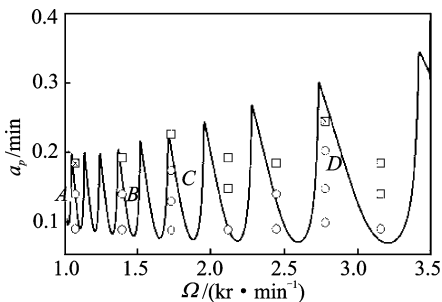


图 4 铣削稳定性预测图及实验验证参数点  
Fig. 4 The milling stability prediction diagram and experimental verification parameters

为了比较二维超声振动铣削与普通铣削的区别,从图 4 中选择 C(1 750r/min,0.15 mm)点进行研究,由于 y 方向没有施加超声振动,因此只有普通铣削和二维超声振动铣削条件下的  $x,z$  向切削力时域信号、频谱图以及加工后的零件形貌图,如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看到,普通铣削下的切削力和二维超声振动铣削下的切削力大小基本相等。但从频谱图中可以明显看出,二维超声振动铣削下的谐波分量明显被抑制,因此提高了铣削系统的稳定性,验证了笔者所提出的不分离型超声复合铣削稳定性模型的正确性。

3 结束语

笔者利用全离散法和超声振动加工法,提出垂

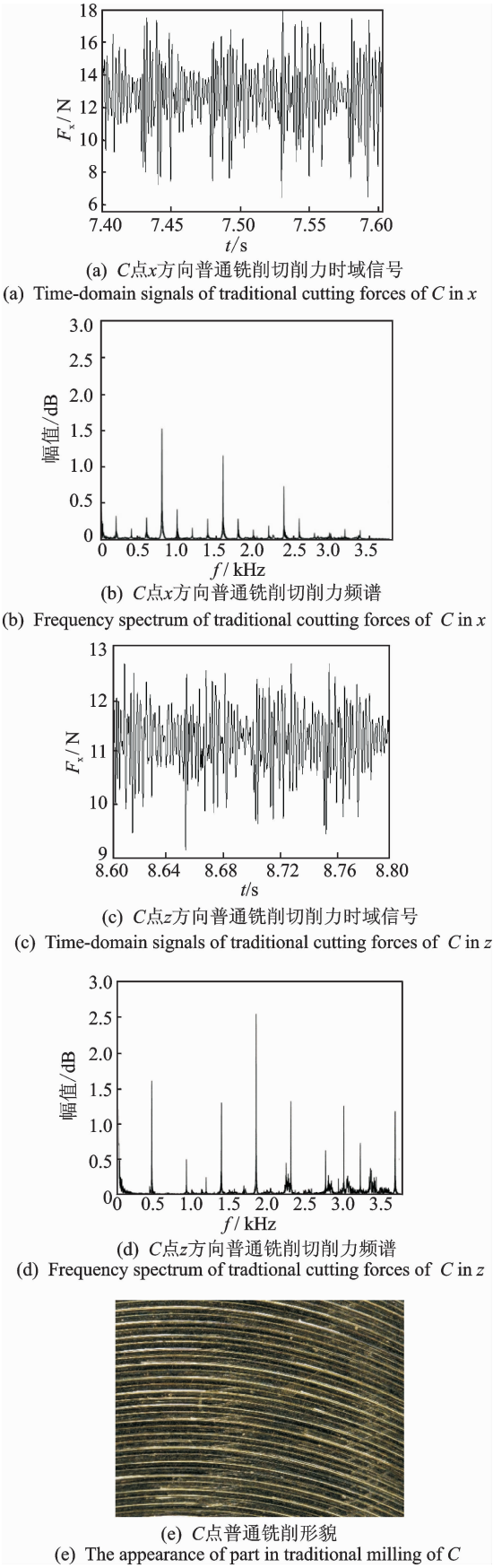


图 5  $C$ 点普通铣削力信号及工件表面形貌

Fig. 5 The signals of traditional milling forces and the workpiece appearance of  $C$

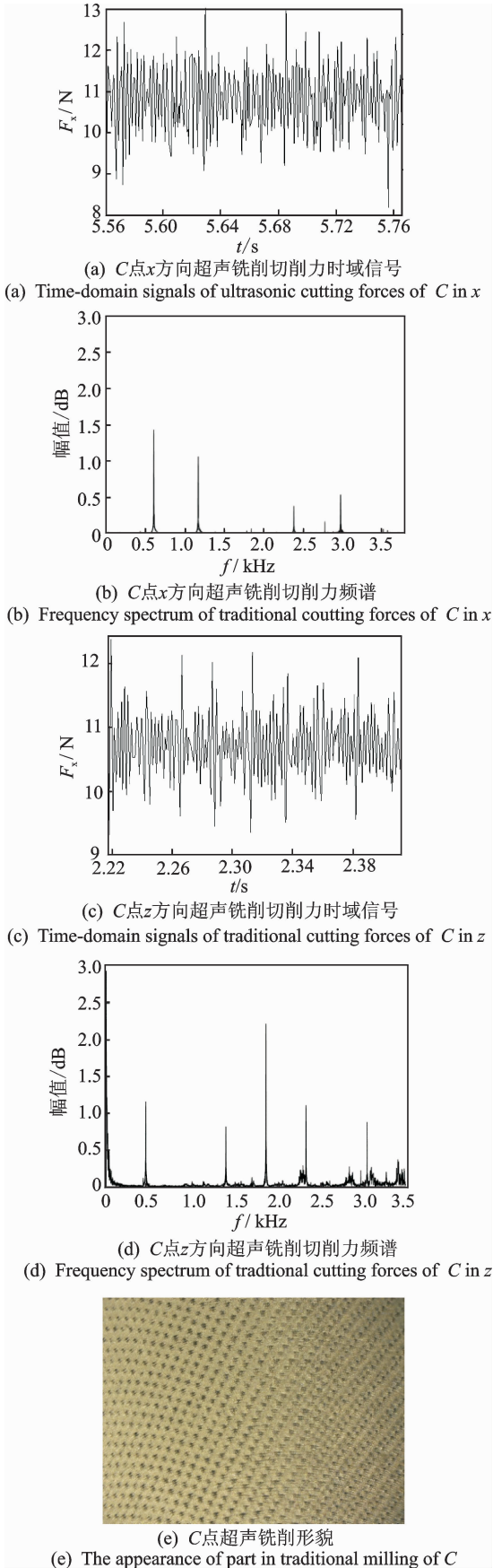


图 6  $C$ 点二维超声铣削力信号及工件表面形貌

Fig. 6 The signals of two-dimension ultrasonic milling forces and the workpiece appearance of  $C$

直平面内二维超声振动铣削模型,建立了垂直平面内二维超声振动铣削稳定性模型。运用全离散法分析的垂直平面内二维超声振动铣削系统能够准确地预测铣削系统稳定性叶瓣图,通过在数控加工中心VMC850E铣削钛合金实验,验证了垂直平面内二维超声振动铣削稳定性模型和稳定性叶瓣图的正确性,同时还能够提高普通铣削系统的稳定性。该实验装置是在自行研制的声学设备的基础上改造而来,因此,大大提高了设备的利用率和加工的经济效益。

### 参 考 文 献

- [1] Budak E, Altintas Y. Analytical prediction of chatter stability in milling—part I: general formulation[J]. Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, 1988,120:22-30.
- [2] Budak E. An analytical design method for milling cutters with nonconstant pitch to increase stability, part 2: application[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, 125:35-38.
- [3] 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.
- [4] Insperger T. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equation with discrete delay[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004, 61: 117-141.
- [5] Ding Ye, Zhu Limin, Zhang Xiaojian, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50: 502-509.
- [6] 姜燕,郭强,赵波. 铣削稳定性预测的时间有限元法[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2016, 35(5): 672-676.  
Jiang Yan, Guo Qiang, Zhao Bo. The method on the stability limit prediction for milling process based on time-finite-element theory [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2016, 35(5): 672-676. (in Chinese)
- [7] 于劲,周小勤. 基于高频变速特征的不分离型超声波振动车削抑制颤振机理[J]. 兵工学报, 1993, 14(1): 52-57.  
Yu Jin, Zhou Xiaoqin. On the mechanism of chatter suppression with high frequency and vari-speed unseparated type ultrasonic vibration turning[J]. Acta Armamentarii, 1993, 14(1): 52-57. (in Chinese)
- [8] 李勋,张德远. 不分离型超声椭圆振动切削实验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(19): 177-182.  
Li Xun, Zhang Deyuan. Experimental study on the unseparated ultrasonic elliptical vibration cutting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(19): 177-182. (in Chinese)
- [9] 李文,尹礁,吕垒平,等. 不分离型超声椭圆振动切削力特性研究[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2241-2248.  
Li Wen, Yin Jiao, Lü Leiping, et al. Study on the unseparated ultrasonic elliptical vibration cutting force [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2241-2248. (in Chinese)
- [10] 唐军,赵波. 分离型纵-扭复合超声铣削的稳定性分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(7): 1318-1325.  
Tang Jun, Zhao Bo. Stability analysis of the separated longitudinal-torsional composite ultrasonic milling [J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(7): 1318-1325. (in Chinese)
- [11] 张建华. 超声振动辅助微细铣削运动学分析[EB/OL]. (2012-12-28) [2016-09-10]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201212-1173>.
- [12] Faassen R P H, van de Wouw N, Oosterling J A J, et al. Prediction of regenerative chatter by modeling and analysis of high-speed milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43: 1437-1446.
- [13] 宋清华,艾兴,万熠,等. 小径向切深下的进给量对铣削稳定性的影响[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1148-1152.  
Song Qinghua, Ai Xing, Wan Yi, et al. Stability prediction for high-speed milling including feed rate in low radial immersion [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 19(10): 1148-1152. (in Chinese)



**第一作者简介:**赵波,男,1956年8月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为先进制造技术、硬脆材料精密加工理论与装备等。曾发表《分离型纵-扭复合超声铣削的稳定性分析》(《兵工学报》2015年第36卷第7期)等论文。  
E-mail: zhaob@hpu.edu.cn

