文章编号 1004-924X(2014)11-3061-06

光栅机械刻划摩擦型颤振机理

石广丰[1*],吕杨杨[1],史国权[1],吉日嘎兰图[2],肖 为[1]
(1. 长春理工大学,吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:研究了光栅机械刻划过程中弹性刀架和金刚石刻刀系统的摩擦型颤振机理。建立了光栅机械刻划摩擦型颤振动力学模型,并对颤振系统进行了稳定性分析,提出了系统的稳定性条件和"稳定性阈"。从能量角度对颤振进行了分析,获得了相同的稳定性条件。在刻划工艺试验装置上单一改变刻划速度进行了光栅刻划试验,通过对刻划力的测量和分析,验证了竖直方向刻划力相对于刻划速度具有下降特性,即满足了摩擦型颤振的前提条件。最后,通过对 2、6、10 和 13 mm/s 4 组不同刻划速度下所刻光栅槽形轮廓的检测,验证了该系统在超过临界刻划速度(在6～10 mm/s)的情况下会有颤振发生。验证实验证明了该摩擦型颤振动力学模型的有效性和稳定性阈的存在性,为深入量化分析并抑制颤振的发生奠定了理论基础。

关 键 词:光栅;机械刻划;摩擦型颤振;稳定性分析
中图分类号:TH113.1;O436.1 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20142211.3061

Mechanism of frictional chatter during mechanical ruling grating

SHI Guang-feng[1*], LÜ Yang-yang[1], SHI Guo-quan[1], JIRI Galantu[2], XIAO Wei[1]

(1. *Changchun University of Science and Technology, Changchun* 130022, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: shiguangfeng@cust.edu.cn*

Abstract: The mechanisms of frictional chatter of a diamond rulling system and a elastic tool post were researched in mechanical ruling grating processing, and a dynamic model for a mechanical ruling grating was established. Then, the stability of the chatter system was analyzed, and its stability condition and stability threshold were presented. Furthermore, the chatter was researched and analyzed from the energy point of view, and the same stability condition was obtained. A mechanical ruling test were performed with a test device for grating ruling only by changing the ruling speed. After measuring and analyzing the ruling forces, the characteristics of the ruling forces in the vertical direction dropping with the ruling speed were verified, and it satisfied with the precondition for the establishment of frictional chatter. Finally, the surfaces of grooves under four different ruling speeds:

收稿日期:2013-11-26;**修订日期**:2014-01-17.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51405031, No. 51075042);国家重大科研装备研制项目(No. ZDYZ2008-1);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20080534);长春理工大学青年科学基金资助项目(No. 202/000488)

2 mm/s, 6 mm/s, 10 mm/s and 13 mm/s, were measured, which verifies that the chatter will occur when the ruling speed exceeds the critical value (6-10 mm/s). The experiments confirm the effectiveness of the dynamic model of chatter and the existence of the stability threshold. It provides the theoretical foundation for restraining the chatter during grating mechanical ruling process and deep quantitative analysis.

Key words: grating; mechanical ruling; frictional chatter; stability analysis

1 引　言

机械加工过程中的振动主要分为强迫振动与自激振动(颤振)。对于强迫振动只要追根求源，消除其“激振源”，就不难控制，而颤振是一种很常见的刀具和工件之间的自激振动，并无外界的交变激振源，其振动是由内在反馈引起的，这就使得颤振机理的揭示以及对它的控制要比强迫振动困难得多。对颤振的研究始于对颤振产生机理的探索及其理论模型的建立[1]。目前对切削颤振的研究较为广泛，按产生机理其可划分为[2]：再生型颤振、耦合型颤振、摩擦型颤振以及滞后型颤振。

机械刻划法是制作原刻母版光栅的主要方法，它在低刻线密度、大面积的光栅制作中具有不可替代的优势[3]，对其研究具有重要价值。光栅机械刻划是由光栅刻划机带动金刚石刻刀对光栅铝膜进行挤压抛光，使其发生形变而成槽。在这个过程中不产生切屑，因此光栅机械刻划是一种复杂的三维挤压成型工艺[4]，涉及的工艺参数较多。机械刻划光栅的槽形质量受众多因素的影响，其中包括刻划工艺所产生的振动[5-6]。光栅机械刻划过程中颤振会加剧金刚石刻刀的磨损，严重影响光栅质量，甚至使光栅作废。目前，在光栅金刚石刻刀、刻划刀架、刀桥及驱动系统等方面的研究文献[5-8]中均有过颤振现象的相关报道，但都只是简单提及，对于相关机理并无深入研究。

实验显示刻刀垂直于光栅表面方向的振动明显，在该方向上的颤振会使刻槽深度发生周期性变化[8]，从而降低光栅刻槽质量。因此，本文从形成系统不稳定性的着眼点——载荷与刻速出发，针对弹性刀架[9]和常用的金刚石尖劈式刻刀[3]系统，结合理论和试验研究了光栅机械刻划过程中的摩擦型颤振机理，该项研究对于抑制颤振的发生并提高机械刻划光栅的质量具有重要意义。

2 光栅机械刻划摩擦型颤振建模

依据金属切削时的摩擦型颤振原理[10]可知，对于塑性金属材料切削，在无积屑瘤产生的切削速度范围内，刀具和材料之间的摩擦系数会随着材料流速的增加呈下降趋势，背吃刀力也会随切削速度的增加而减小。此时变剪切应力以及材料与刀具之间的相对运动会使切削力发生动态变化，而动态切削力所引起的负阻尼会使得切削系统总阻尼值为负，进而引起摩擦型颤振。依此假设，在机械刻划光栅的过程中，竖直刻划力随刻划速度增加而下降，由此引起的摩擦型颤振为光栅机械刻划颤振的主要形态。

假定刻划刀的定向角和非定向角相等，值为 δ。刻划时的方位角为 0°。如图 1 所示，在光栅机械刻划过程中，刻划刀的定向面和非定向面受到铝膜材料的挤压力和摩擦力作用。由于定向角和非定向角相等，且方位角为 0°，则刻划刀定向面和非定向面的受力大小也相等，其中挤压力 F_n 垂直于定向面，摩擦力 F_f 的作用方向为铝膜材料沿定向面的流动方向 γ。

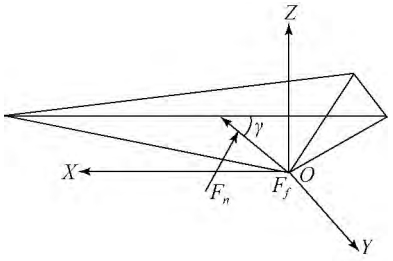


图 1　刻划刀受力示意图

Fig. 1　Force diagram of ruling tool

切削时的干摩擦特性曲线如图 2 所示，当工件材料沿前刀面流出时，流动材料对刀具前刀面的干摩擦力为[11]：

$$f_{\text{cut}}=q[p_0+r(v_0-|v|)^2]\text{sgn}v, \qquad (1)$$

其中：q 为切削深度方程；p_0 为相对于最小摩擦力的常数；r 为非线性等级；v_0 是名义切削速度；v 是刀具与工件之间的相对速度。

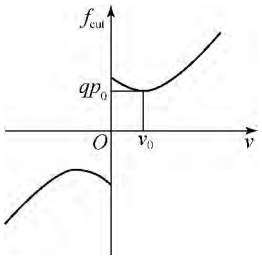


图 2　干摩擦特性曲线

Fig. 2　Dry friction force between tool and workpiece

本文考虑动态刻划力主要是由刻划刀与铝膜材料之间的摩擦力引起的。将 F_f 投影至 YOZ 面，再取其 Z 向分量即为刻划刀的 Z 向分力：

$$F_z=2h[p_0+r(v_0-|v|)^2]\mathrm{sgn}v\cos\delta\sin\gamma, \quad (2)$$

其中：$v=v_*-\dot{z}$，v_* 是铝膜材料在刻划过程中的流动速度；h 为刻划深度方程，有：

$$h=h_0(z_*-z)H(z_*-z), \quad (3)$$

其中：z_* 是初始刻划深度。

将式(3)代入式(2)得到：

$$F_z=2h_0(z_*-z)H(z_*-z)\cdot[p_0+r(v_0-|v|)^2]\mathrm{sgn}v\cos\delta\sin\gamma. \quad (4)$$

如果平衡点附近的振动不是很集中，且满足 $\dot{z}<v_*$，$z<z_*$，则 $H(z_*-z)=1$，$\mathrm{sgn}v=1$，进而式(4)可简化成式(5)：

$$F_z=2h_0(z_*-z)[p_0+r(u+\dot{z})^2]\cos\delta\sin\gamma, \quad (5)$$

其中：$u=v_0-v_*$。

下面对 Z 向单自由度进行动力学建模及稳定性分析。

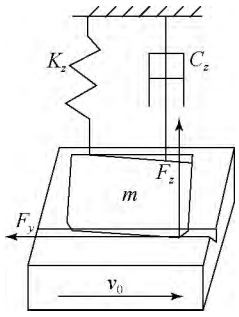


图 3　摩擦型颤振系统动力学模型

Fig. 3　Dynamic model of frictional chatter system

图 3 所示的摩擦型颤振系统动力学模型的运动微分方程可用式(6)表示：

$$m\ddot{z}+c_z\dot{z}+k_zz=F_z. \quad (6)$$

将式(6)两边同除 m，并代入式(5)可以得到：

$$\ddot{z}+2\xi\dot{z}+\omega^2z=c_o(z_*-z)\cdot[p_o+r(u+\dot{z})^2]\sin\gamma\cos\delta, \quad (7)$$

其中：$\xi=\dfrac{c_z}{2m}$，$\omega^2=\dfrac{k_z}{m}$，$c_0=\dfrac{2h_0}{m}$；m 为刀具-刀架振动系统等效质量；c_z 为刀具-刀架振动系统在 z 方向上的等效阻尼；k_z 为刀具-刀架振动系统在 z 方向上的等效刚度；ξ 为刀具-刀架振动系统在 z 方向上的黏性阻尼系数；ω 为刀具-刀架振动系统在 z 方向上的固有频率。

3　颤振系统的稳定性分析

令 $c_1=c_0\sin\gamma\cos\delta$，由于 $0\leqslant\sin\gamma\cos\delta\leqslant1$，不失一般性可以假设 $c_1\equiv1$，对式(7)进行归纳得到：

$$\ddot{z}+\alpha(z,\dot{z})\dot{z}+\omega_1^2z=\omega_1^2z_1, \quad (8)$$

其中：

$$\alpha(z,\dot{z})=2\xi-r(z_*-z)(2u+\dot{z})=2\xi_1+r(2uz-z_*\dot{z}+z\dot{z}),$$

$$\xi_1=\xi-ruz_*,\ \omega_1^2=\omega^2+p_0+ru^2,$$

$$\omega_1^2z_1=(p_0+ru^2)z_*=(\omega_1^2-\omega^2)z_*.$$

由式(8)可知系统的固有频率已经发生了改变，由于非线性摩擦力中 p_0，r，u 的作用，新系统的固有频率 ω_1 要高于原来的固有频率 ω。此外，非线性摩擦力使得平衡点的位置也发生了改变，即 $z=z_1$，$0<z_1<z_*$。改变变量 $x=z-z_1$ 使平衡点返回零点位置。则式(8)可转化为：

$$\ddot{x}+\beta(x,\dot{x})\dot{x}+\omega_1^2x=0, \quad (9)$$

其中：

$$\beta(x,\dot{x})=2\xi-r(x_*-x)(2u+\dot{x})=2\xi_2+r(2ux-x_*\dot{x}+x\dot{x});$$

而 $x_*=z_*-z_1=\left(\dfrac{\omega^2}{\omega_1^2}\right)z_*$，$\xi_2=\xi-rux_*$；$\omega_1^2=\omega^2+p_0+ru^2$。

由于 $y<y_*$，则有 $z<z_*$，考虑式(9)中非线性阻尼系数 $\beta(x,\dot{x})$ 在平衡点 $x=0$，$\dot{x}=0$ 时，$\beta(0,0)=2\xi_2$，$u=v_0-v_*$。此外有：

$$x_*=z_*-z_1=\left(\frac{\omega^2}{\omega_1^2}\right)z_*. \quad (10)$$

当 $\beta(0,0)>0$ 时，平衡点稳定，无颤振发生；当 $\beta(0,0)<0$ 时，平衡点不稳定，形成极限环时就会发生颤振。由于 $\beta(0,0)=2\xi_2=\xi-rux_*$，且 $\xi>0$，$r>0$，$z_*>0$。所以刻划过程稳定的充要条

件是 $2\xi_2=\xi-rux_*>0$，当摩擦力相对较小时，有 $z_*\approx x_*$，由 $\xi-rux_*=\xi-r(v_0-v_*)z_*>0$ 推得稳定性条件为：

$$v_0<v_*+\frac{\xi}{rz_x}. \tag{11}$$

由式(11)可知，增大刻划深度 z_*、刻划速度 v_0 和干摩擦非线性等级 r 会降低系统稳定性，增大黏性阻尼系数 ξ 以及材料流动速度 v_* 会提高系统的稳定性。系统处于稳定与不稳定之间的临界状态时，系统总的阻尼系数 $\beta(0,0)=0$，对应的临界刻划速度为：

$$v_c=v_*+\frac{\xi}{rz_x}. \tag{12}$$

当 $v_0>v_c$ 时，系统总的阻尼系数变为负值，将会发生颤振。因此，v_c 即为该系统“稳定性阈”。

4 光栅机械刻划过程的能量机制

也可以从能量角度对颤振进行研究分析。当光栅刻划机工作在刻划力的下降特性区域时，刻划力将对振动系统做净的正功，即对振动系统输入能量；而当光栅刻划机工作在刻划力的上升特性区域时，刻划力将对振动系统做净的负功，即振动系统的能量将被刻划过程消耗掉。刻划机结构的阻尼力只会对振动系统做负功，使振动能量耗散。当刻划力所形成的等效阻尼力和原有刻划机结构阻尼力对系统所做的总功大于零时，刻划力的下降特性就可能使刻划过程失稳，从而引起颤振，将式(9)乘以 $\dot{x}$ 就转变为能量机制：

$$\dot{\varepsilon}=-\beta(x,\dot{x})\dot{x}^2,$$
$$\varepsilon=\frac{1}{2}(\dot{x}^2+\omega_1^2x^2), \tag{13}$$

其中：ε 与振动系统的能量成比例，设 T 为颤振周期，那么在颤振极限环上满足条件 $\varepsilon(t+T)-\varepsilon(t)=0$，一个振动周期中系统总的阻尼力对振动系统所做的功为：

$$W=-\int_0^T\beta(x,\dot{x})\dot{x}^2\mathrm{d}t=\varepsilon(T)-\varepsilon(0). \tag{14}$$

显然在颤振极限环上 $W\equiv0$，如果摩擦力很小，则振动形式大致为简谐振动：$x(t)=A\sin\omega_1t$，则式(14)化为：

$$W=-A^2\omega_1\int_0^{2\pi}\beta(A\sin\tau,\omega_1A\cos\tau)\cos^2\tau\mathrm{d}\tau, \tag{15}$$

其中：$\tau=\omega_1t$，$\beta(x,\dot{x})=2\xi_2+2\gamma ux-\gamma x_*\dot{x}+\gamma x\dot{x}$。

将 $\beta(x,\dot{x})$ 代入式(15)，积分后得到：

$$W=-2\pi\omega_1\xi_2A^2. \tag{16}$$

式(16)中 W 与 ξ_2 异号，当 $\xi_2<0$ 时，刻划系统总的阻尼力对振动系统所做的功 $W>0$，即对振动系统输入能量，刻划过程处于失稳状态，进而引起颤振。

5 光栅机械刻划试验

如前所述的摩擦型颤振动力学模型是在刻划力相对于刻划速度具有下降特性的前提下提出，所以需要对这个前提条件进行验证，此外还需对系统的稳定性条件进行验证。

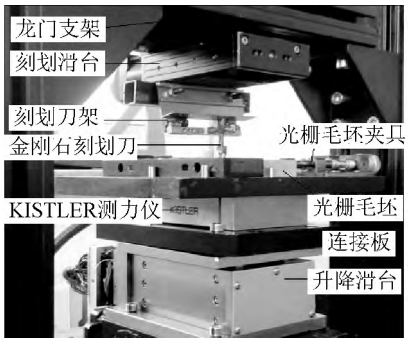


图 4　光栅机械刻划工艺试验装置

Fig. 4　Test device for grating ruling

本试验是在如图 4 所示的光栅机械刻划工艺试验装置[12]上进行的。实验通过 IKO 电动升降滑台对刀并精确调整刻划深度；通过专用夹具来固定光栅毛坯；由 MICOS VT-80 电动滑台带动刀架-刀具系统实现刻槽的直线刻划，刀架以十字弹簧铰链为轴来完成刀具的起落，金刚石刻划刀采用尖劈刀；将 KISTLER 9256CQ2 测力仪安装在夹具下，通过测量光栅毛坯受力间接获得刻划刀的受力情况。

表 1　三向刻划力

Tab. 1　Three-dimensional ruling forces

v/(mm·s^{-1})	F_x/N	F_y/N	F_z/N
2	−0.222 60	−0.685 97	−2.806 70
6	−0.496 24	0.136 39	−2.752 09
10	−0.178 49	−1.690 79	−1.278 69
13	0.074 79	0.131 42	−0.519 90

保持其他刻划工艺参数不变的情况下，逐步改变刻划速度进行刻划试验，对刻划力进行测量分析。本试验中刻划深度 $h=2$ μm，刻划速度分别取为 2，6，10 和13 mm/s。经过显微观察对刀后，确定刻划深度，随即开始刻划，刻划力测量与刻划同步进行。KISTLER 9256CQ2 测力仪的 F_x、F_y、F_z 为 −250～250N，灵敏度：F_x，F_z 为 −26 pC/N，F_y 为−13 pC/N，配套数据处理软件 DynoWare 可以精确读取所测得的三向力值。经测力仪获得的三向刻划力信号经电荷放大器、数据采集卡连入工控机，在软件 DynoWare 中将所测得的 F_x，F_y 和 F_z 数据进行零漂补偿，然后分别进行三向采集数据的读取和平均值求取（软件自带功能）。所测得的刻划力平均值（保留小数点后 5 位）如表 1 所示。

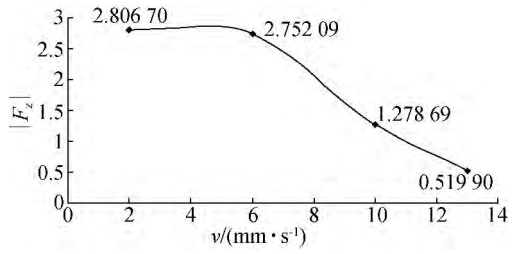
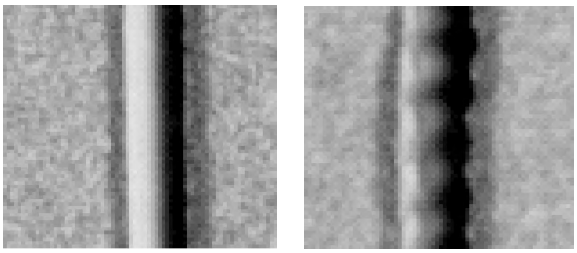


图 5　刻划速度 v 对 F_z 的影响

Fig. 5　Influence of ruling speed on F_z

刻划速度 v 对 F_z 的影响如图 5 所示，由图 5 可知竖直方向上的刻划力 F_z 相对于刻划速度 v 具有较明显的非线性下降特性，说明该刻划测试速度范围内刻划过程存在颤振现象。

采用 KEYENCE VH-Z450 三维显微系统在放大 500 倍条件下对所刻的光栅槽形轮廓表面进行微观检测。图 6(a)和 6(b)分别为 2 mm/s 和 10 mm/s 刻划速度下光栅刻槽轮廓表面。通过对比可知，该刀架-刀具系统在 2 mm/s 和6 mm/s 刻划速度下较为平稳，刻槽表面较为平滑，刀架-刀具系统在 10 mm/s 和 13 mm/s 刻划速度下出现颤振，刻槽表面呈现波纹状。上述现象证明了刻划过程中存在“稳定性阈”值，即当刻划速度超过临界刻划速度(6 mm/s～10 mm/s)时，刻划系统会发生颤振，具体的阈值和刻划工艺参数、刻划装置等有关。



(a)无颤振表面　　(b)颤振表面

(a) Surface without chatter　　(b) Surface with chatter

图 6　不同刻划速度下的光栅刻槽轮廓表面

Fig. 6　Surface of groove under different ruling speeds

6　结　论

本文首次研究了光栅机械刻划过程中弹性刀架和金刚石刻刀系统的摩擦型颤振机理。建立了光栅机械刻划摩擦型颤振动力学模型，通过稳定性分析，得出了光栅机械刻划系统的稳定性条件及“稳定性阈”；从能量角度对颤振进行了研究，获得了相同的稳定性条件。最后通过 4 组不同刻速：2，6，10 和13 mm/s的光栅刻划试验和刻划力检测，分析了竖直作用力对刻划速度的下降曲线特性，从而验证了光栅机械刻划中摩擦型颤振的产生。当刻划速度超过临界刻划速度时刻划系统会有颤振的发生，即验证了“稳定性阈”的存在。同时表明该试验系统的临界刻划速度介于 6 mm/s和 10 mm/s 之间。该研究为深入量化分析并抑制颤振的发生奠定了理论基础，对提升刻划工艺水平，减少刀具磨损，进而提高机械刻划光栅的质量具有重要意义。

参考文献：

[1] TAYLOR F W. *On the Art of Cutting Metals*[M]. US: ASME, 1907.

[2] 于骏一，勾治践. 滞后型切削颤振诊断技术的研究[J]. 振动工程学报，1995，8(2)：138-143.
YU J Y, GOU ZH J. Studies on differential diagnosis of chatter caused by phase-delay of dynamic cutting force[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 1995, 8(2): 136-143. (in Chinese)

[3] SHI G F, SHI G Q, SONG L S. Reverse design of the roof diamond tool for echelle grating [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 552: 180-185.

[4] 张宝庆，史国权，石广丰，等. 衍射光栅机械刻划成

槽的预控试验[J]. 光学 精密工程,2013,21(7):1666-1675.
ZHANG B Q,SHI G Q, SHI G F, *et al*.. Pre-control of mechanical scratching diffractive grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(7):1666-1675. (in Chinese)

[5] 陈科位,于宏柱,张善文,等.**大型衍射光栅刻划机刀架系统的设计**[J].光学 精密工程,2013,21(11):2900-2905.
CHEN K W, YU H ZH, ZHANG SH W, *et al*. Design of diamond carriage system for large diffraction grating ruling engine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(11):2900-2905. (in Chinese)

[6] KITA T, HARADA T. Ruling engine using a piezoelectric device for large and high-groove density gratings [J]. *Applied Optics*, 1992, 101(31): 1399-1400.

[7] 申远.**大面积高精度衍射光栅刻划机机构优化与控制研究**[D].合肥:中国科学技术大学,2012.
SHEN Y. *Structure optimization and control of large area and high precision diffraction grating ruling engine*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese)

[8] HARRISON G R. The production of diffraction gratings I. development of the ruling art [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1949, 39(6):413-426.

[9] 巴音贺希格,高键翔,齐向东.**机械刻划长焦距凹面金属光栅的研制**[J]. 光学 精密工程,2006,14(3):391-395.
BAYANHESHIG, GAO J X, QI X D. Manufacturing for ruling concave metal grating with a long focal length[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):391-395. (in Chinese)

[10] JIA G F, WU B, HU Y M, *et al*.. A synthetic criterion for early recognition of cutting chatter [J]. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(11): 2870-2876.

[11] MARIAN W, ANTON M K. Frictional chatter in orthogonal metal cutting[J]. *The Royal Society*, 2001,359:713-738.

[12] 石广丰,史国权,宋林森.**光栅机械刻划工艺试验装置,中国**:201310305382.4[P]..
SHI G F, SHI G Q, SONG L S. *Test device for grating ruling, China*:201310305382.4[P].

作者简介:

石广丰(1981—),**男,辽宁葫芦岛人,博士,副教授,硕士生导师,2010 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,研究方向为精密、超精密加工技术**。E-mail:shiguangfeng@cust.edu.cn

吕杨杨(1989—),**男,北京人,硕士研究生,2011 年于北方工业大学获得学士学位,研究方向为精密、超精密加工技术**。Email:303429403@qq.com