

文章编号 1004-924X(2006)01-0094-06

二自由度微定位平台的研制

田延岭¹, 张大卫¹, 闫兵²

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津工程师范学院 机械工程系, 天津 300222)

摘要:研制了一台压电陶瓷驱动和弹性铰链导向的一体化微定位平台,该微定位平台具有高刚度、高响应速度和高分辨率等优点。为了克服压电陶瓷驱动器伸长量较小的不足,采用杠杆放大机构增加微定位平台的位移输出。考虑驱动电路的影响,建立了微定位平台的机电耦合模型。通过试验研究了微定位平台的静动态特性,试验结果表明微定位平台的分辨率为5 nm,固有频率分别为143 Hz和180 Hz。该微定位平台可应用于纳米级的微定位。

关键词:微定位平台;压电陶瓷驱动器;动态性能

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Development of a 2-DOF micropositioning table

TIAN Yan-ling¹, ZHANG Da-wei¹, YAN Bing²

(1. *School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*
2. *Department of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China*)

Abstract: A piezoelectrically driven micropositioning table with high stiffness and resolution was presented. A flexure hinge mechanism was utilized to guide the moving part and to provide preload for the piezoelectric actuators. The lever amplifiers were used to enlarge the working range of the moving platform. The static and dynamic characteristics of the micropositioning table was investigated and its dynamic model was established for consideration of the driving circuit. From the experimental data, it is shows that the piezoelectrically driven micro-positioning table has a resolution of 5 nm and natural frequencies up to 143 Hz and 180 Hz, respectively, which indicates that the table is useful for nanometer level positioning applications.

Key words: micropositioning table; piezoelectric actuator; dynamic performance

1 引言

超精密加工技术在航空航天和微电子领域具有重要的地位并有广泛的应用前景^[1-2]。微纳米加工和定位技术已成为超精密加工的重要研究内

容之一。由于压电陶瓷驱动器具有高刚度、高分辨率、无摩擦和磨损以及响应速度快等优点,因而在纳米级的微定位装置中得到广泛应用。弹性铰链导轨利用中间弹性元件的变形提供导向功能,避免了运动部件之间的摩擦^[3],因此利用弹性铰链导轨作为微定位平台的导向机构,能够克服动

收稿日期:2005-09-21;修订日期:2005-11-18.

基金项目:国家自然科学基金(No. 50275104),天津市自然科学基金项目(No. 013605311)。

平台运动过程中的爬行、反向间隙和磨损等缺点,达到提高微定位平台运动精度的目的^[4]。但是弹性铰链运动方向上的刚度使压电陶瓷驱动器的实际伸长量小于名义伸长量,若使微定位平台的工作行程达到使用要求,需要增加压电陶瓷驱动器的长度,然而压电陶瓷驱动器的长度又受到微定位平台结构紧凑性的限制。为了解决这个问题,在微定位平台的设计中采用了杠杆原理来增加微定位平台的工作行程^[5-7],可是杠杆机构中弹性铰链的运动刚度会影响压电陶瓷驱动器的输出位移,同时非对称杠杆机构还将导致微定位平台在运动过程中的偏移误差。

鉴于上述微定位平台设计中的问题,本文详细阐述一类新型二维纳米级微定位平台的结构设计和工作原理,建立了微定位平台的刚体动力学模型,并试验研究了微定位平台的静、动态性能和所建模型的正确性。

2 结构设计与工作原理

二自由度微定位平台的结构如图 1 所示。该微定位平台的材料采用 65 Mn 高性能弹簧钢,外形尺寸为:300 mm×300 mm×40 mm。为了提高制造和装配的精度,将微定位平台设计成整体式结构并采用线切割技术加工制造。因弹性铰链导轨是保证动平台运动精度的关键部件,为了防止微定位平台在运动过程中发生偏斜现象,采用了对称平行四杆机构来提高动平台的运动精度。同时在加工过程中严格控制每组弹性铰链的尺寸和形状精度,并控制线切割的进给速度避免产生过大的残余应力。在 x 和 y 运动方向上,采用德国 PI 公司生产的 P-844.10 低压压电陶瓷驱动器。该驱动器的名义伸长量为 15 μm ,分辨率小于 1 nm,最大推力 3 000 N。因压电陶瓷为脆性材料,其抵抗扭矩和弯矩的能力较差。为了防止压电陶瓷在使用过程中受到弯矩和扭矩的作用,在压电陶瓷驱动器的顶部和驱动点之间加入了一个球形接头环节,这样就形成了赫兹接触形式,但由此微定位平台在运动过程中易发生压电陶瓷驱动器和作用点的分离现象而降低微定位平台的动态性能。为了克服分离现象的发生,需要对压电陶瓷驱动器进行预紧。预紧力的大小通过压电陶

瓷驱动器后面的垫片来调整。另外,为了消除压电陶瓷驱动器非线性对微定位平台特性的影响,采用高精度的电容式位移传感器测量动平台的输出并形成闭环反馈回路,通过数字 PID 控制算法提高微定位平台的动态性能。

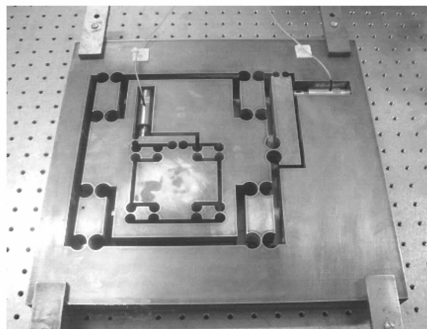


图 1 微定位平台样机

Fig. 1 Prototype of the positioning table

利用数字计算机产生控制信号,通过 16 bit 的数模转换器将数字信号转换成 0~10 V 的控制电压。经过 PI E-505 驱动放大模块产生 0~100 V 的驱动电压直接驱动压电陶瓷产生运动。驱动放大模块的最大输出电流为 2 000 mA,均值输出电流为 300 mA。借助于预紧力,微定位平台可以跟随控制信号运动。微定位平台的位移通过 PI D-050 高精度电容式位移传感器测量,并经过采集装置 UA 604 输送到计算机进行闭环控制。

3 动力学建模

由于压电陶瓷驱动器是多层陶瓷片粘接而成,因此压电陶瓷驱动器在电路上可以看成是一个容性负载。建模中考虑其在充放电过程中对微定位平台动态特性的影响,同时考虑压电陶瓷驱动器在伸长的过程中表现出弹性的特点以及杠杆的影响,将其等效为刚度为 k_{pzt} 的弹簧和阻尼系数为 c_{in} 的阻尼器,弹性铰链机构可以等效为刚度为 k_{in} 的弹簧和阻尼系数为 c_{pzt} 的阻尼器。根据二维微定位平台 x 、 y 向结构的相似性,仅建立 x 向的机电耦合模型如图 2 所示。图中 $V_d(t)$ 为控制信号电压, k_{amp} 为驱动放大模块的放大系数, R 为驱动电路的等效电阻, $V_{\text{pzt}}(t)$ 为压电陶瓷驱动器上的电压, $x_{\text{pzt}}(t)$ 为压电陶瓷驱动器的伸长量, m_i 为动平台的等效质量。

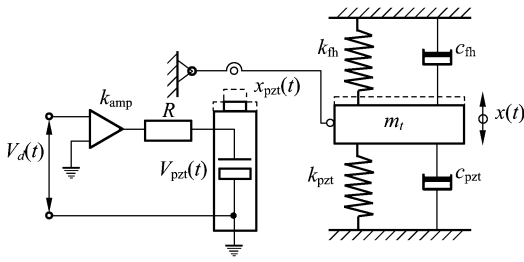


图 2 微定位平台机电耦合模型

Fig. 2 Electromechanical model of the table

根据克希荷夫电流定律和牛顿运动定律,可

得到微定位平台的机电耦合系统控制方程组为:

$$\begin{cases} m_t \ddot{x}(t) + (c_{pzt} + c_{fh}) \dot{x}(t) + (k_{pzt} + k_{fh}) x(t) = AV_{pzt}(t) \\ RC \dot{V}_{pzt}(t) + V_{pzt}(t) = V_d(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $A = nd_{33} k_{amp} k_{pzt}$, n 为压电陶瓷驱动器的层数, d_{33} 为压电陶瓷的压电常数, C 为压电陶瓷驱动器的等效电容。

利用拉普拉斯变换,式(1)可表示为:

$$X(s)s^2 + 2\xi_x \omega_{nx} X(s)s + \omega_{nx}^2 = B \frac{V_d(s)}{RCs + 1}, \quad (2)$$

式中: ξ_x 为 x 向阻尼比, ω_{nx} 为 x 向固有频率,

$$2\xi_x \omega_{nx} = \frac{c_{pzt} + c_{fh}}{m_t}, \omega_{nx}^2 = \frac{k_{pzt} + k_{fh}}{m_t}, B = \frac{A}{m_t}.$$

将式(2)进行拉普拉斯反变换,可得微定位平台阶跃控制信号响应的解析表达式为:

$$\begin{aligned} x(t) = & \frac{E}{\omega_{nx}^2} \left(1 - \frac{e^{-\xi_x \omega_{nx} t}}{\sqrt{1 - \xi_x^2}} \sin(\omega_{nx} \sqrt{1 - \xi_x^2} t + \varphi) \right) + \\ & EF \frac{e^{-\xi_x \omega_{nx} t}}{\sqrt{1 - \xi_x^2}} \sin(\omega_{nx} \sqrt{1 - \xi_x^2} t - \varphi) - \\ & \frac{EG e^{-\xi_x \omega_{nx} t}}{\omega_{nx} \sqrt{1 - \xi_x^2}} \sin(\omega_{nx} \sqrt{1 - \xi_x^2} t) - EHe^{-\frac{t}{RC}}, \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{式中: } E = Bv_0, F = -\frac{RC}{2\xi_x \omega_{nx} - \omega_{nx} RC - 1/RC},$$

$$H = -F, G = \frac{2RC\xi_x \omega_{nx} - 1}{2\xi_x \omega_{nx} - \omega_{nx} RC - 1/RC}, v_0 \text{ 为阶跃控制信号的幅值。}$$

由式(3)可知,微定位平台的阶跃响应由稳态和瞬态两部分组成。其稳态输出为:

$$x = \frac{E}{\omega_{nx}^2}, \quad (4)$$

微定位平台的瞬态输出主要由四部分组成,每部分均按照指数衰减。瞬态响应的结束时间由时间常数 RC 和 $1/\xi_x \omega_{nx}$ 的最小值决定。因此为了提高微定位平台的动态响应特性,应尽量减小

驱动电路阻抗或增加机械系统的阻尼和固有频率。

4 试验研究

为了检验微定位平台的静动态性能和所建模型的正确性,通过试验方法对微定位平台的特性进行研究,试验装置如图 3 所示。试验中,将微定位平台固定在 Newport RS-4000 气浮光学平台上,以便消除外界振动干扰对测试的影响。利用 Renishaw ML10/EC10 双频激光干涉仪测量微定位平台的位移输出。该激光干涉仪的动态测量范围高达 5 kHz,最大位移分辨率为 1 nm。图 4 为测试系统的环境噪声水平,由图可知通过气浮平台的隔振,测量噪声可以控制在 2.5 nm 以内。利用 ALGOL NK-200 推拉力计对微定位平台施加外力,并测量相应方向上的位移,通过虎克定律可以得到微定位平台的静态刚度。利用 LMS Test. Lab 动态测试仪对微定位平台进行动态性能的测试,动态试验中,利用冲击法测试微定位平台的频响特性和振动模态。采用 Dytran 5850A 力锤施加冲击力,分别通过力传感器和加速度传感器测量冲击力的大小和相应点的加速度。经过电荷放大器 B&K 2635 输入到 LMS SC305,然后利用 LMS Test. Lab 软件进行模态分析。

为了测量微定位平台的分辨率曲线,利用计算机产生 3 mV 大小的阶梯形控制电压,通过电压放大模块输送到压电陶瓷驱动器,进而推动平台输出位移。阶梯电压每个稳定值的持续时间为 1 s。试验测得微定位平台的分辨率如图 5 所示。由图可知,微定位平台的 x 向分辨率为 4.8 nm,而 y 向的分辨率为 5.2 nm。如果能够进一步降低试验测试中的噪声水平,则该微定位平台的最小分辨率将进一步提高。

因压电陶瓷驱动器的非线性将影响微定位平台位移输出特性,为了测量微定位平台的迟滞特性曲线,利用计算机给微定位平台施加控制电压由 0 V 线性增长到 10 V,然后线性减小到 0 V。利用激光干涉仪测量动平台的位移输出,得到微定位平台的迟滞特性曲线如图 6 所示。图中下面的虚线为升压过程,上面的虚线为降压过程,实线为微定位平台的闭环位移输出特性。由图可知,当 10 V 的控制电压作用在压电陶瓷驱动器上时,微定位平台的输出位移可以达到 50 μm ,并且开

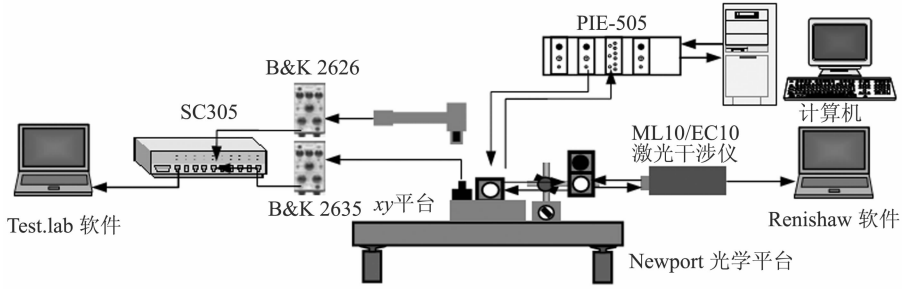


图 3 试验配置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental tests

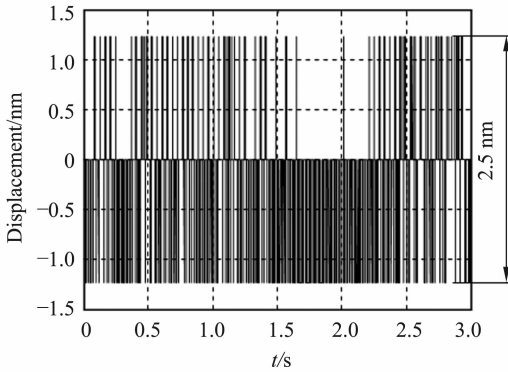


图 4 试验噪声水平

Fig. 4 Experimental noise level

环的升压和降压曲线最大相差约为 $6 \mu\text{m}$ 。利用闭环控制可以消除微定位平台输出位移的迟滞特性,使微定位平台的位移输出和控制电压成线性。

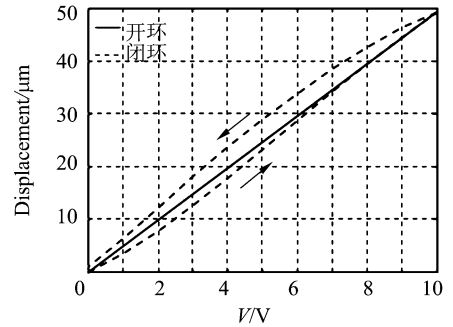
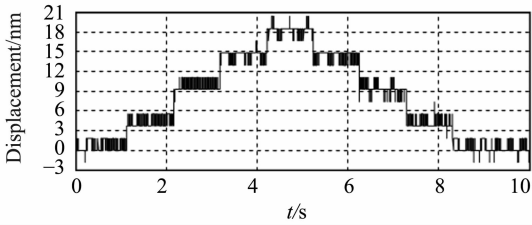


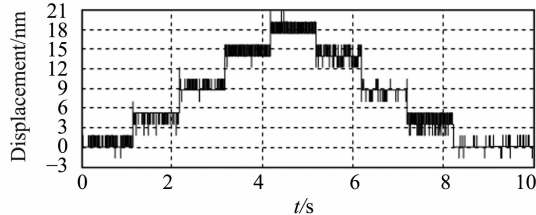
图 6 微定位平台的迟滞特性曲线

Fig. 6 Hysteresis of the micropositioning table



(a) x 向

(a) Direction x



(b) y 向

(b) Direction y

图 5 微定位平台的分辨率曲线

Fig. 5 Resolutions of the micropositioning table

微定位平台的开环和闭环阶跃响应曲线如图 7 所示。图中阶跃响应的控制电压为 10 V 。由图可知, x 向稳定时间约为 0.4 s , 而 y 向的稳定时间约为 0.6 s 。分析原因为两个方向上运动部件的质量不同而使得响应频率不同。另外, 在开环控制下微定位平台的响应都有很大的超调量, 主要原因为微定位平台的加速度高达 20 g 且阻尼较小。通过闭环控制方法可消除超调量, 并能缩短稳定时间。

根据微定位平台的开环阶跃响应曲线, 可以得到系统的阻尼比 ξ_x 和 ξ_y 分别为 0.023 和 0.02 , 固有频率 ω_{nx} 和 ω_{ny} 分别 28.6 rad/s 和 22.8 rad/s 。由压电陶瓷驱动器的技术参数可知, 压电常数 $d_{33} = 650 \times 10^{12} \text{ m/V}$, 电容 $C = 5.4 \mu\text{F}$, 放大系数 $k_{amp} = 10$, 时间常数 $RC = 0.2 \text{ ms}$, 压电陶瓷驱动器的刚度 $k_{pzt} = 60 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。将所得参数和微定位平台运动部件的质量 $mt = 1.6 \text{ g}$ 代入所建方程并考虑微定位平台的开环迟滞特性, 可

得微定位平台 10 V 控制电压下的阶跃响应仿真曲线如图 8 所示。比较图 7 和图 8 可知,试验结果和仿真结果基本一致,从而验证了所建模型的正确性。

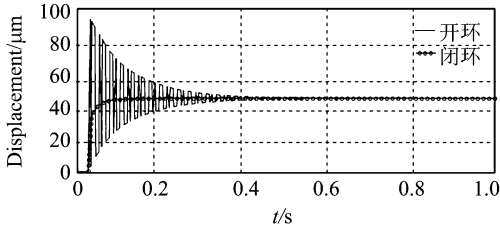
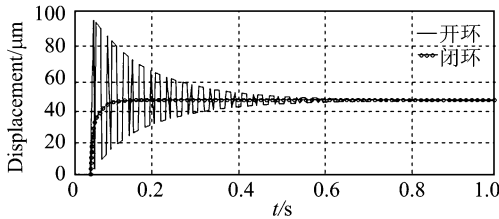
(a) x 向(a) Direction x (b) y 向(b) Direction y

图 7 微定位平台的阶跃响应试验曲线

Fig. 7 Experimental step responses of the table

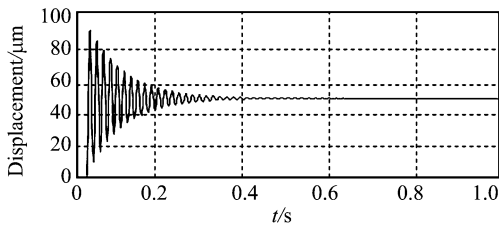
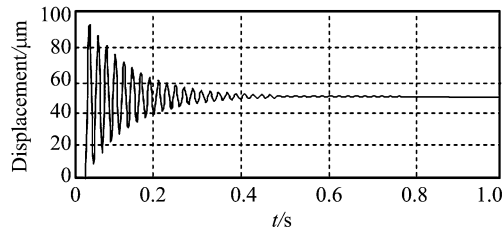
(a) x 向(a) Direction x (b) y 向(b) Direction y

图 8 微定位平台的阶跃响应理论曲线

Fig. 8 Theoretical step responses of the table

为了测试微定位平台的静态刚度,利用推拉力计在动平台的运动方向上施加 50 N 的外力,同时通过 Renishaw 激光干涉仪测量相应的位移输出,根据虎克定律可以得到微定位平台的静态刚度。试验测得微定位平台的 x 、 y 向开环静态刚度分别为 $76 \text{ N}/\mu\text{m}$ 和 $68 \text{ N}/\mu\text{m}$,而 x 、 y 向闭环静态刚度均可以提高到 $300 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。

利用比利时 LMS Test. Lab 动态测试系统对微定位平台进行冲击法模态试验,分别测量微定位平台 x 、 y 向的原点传递函数,得到微定位平台 x 、 y 向的频响曲线如图 9 所示。由图可知,微定位平台 x 向的固有频率约为 180 Hz,而 y 向的固有频率约为 143 Hz,该数值与开环阶跃响应所得固有频率的数值基本一致。

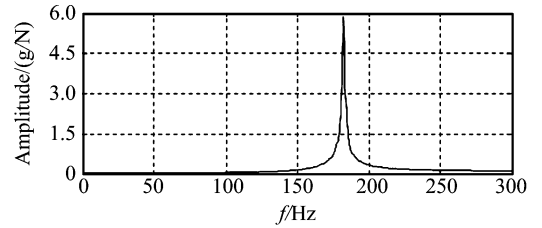
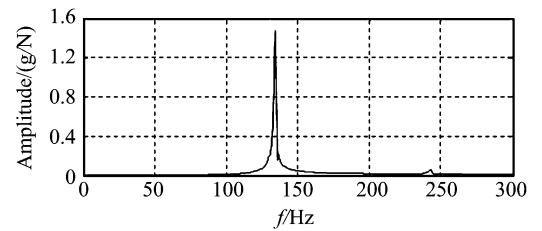
(a) x 向(a) Direction x (b) y 向(b) Direction y

图 9 微定位平台的频响曲线

Fig. 9 Frequency response curves of the table

为了测量微定位平台的耦合特性,控制微定位平台在 x 、 y 向上运动,利用激光干涉仪测量正交方向上的位移,得到微定位平台的耦合曲线如图 10 所示。由图可以看出,当微定位平台沿 x 向运动时,动平台的 y 向偏移最大值为 $1.3 \mu\text{m}$;而当微定位平台沿 y 向运动时,动平台的 x 向偏移最大值仅为 40 nm 。分析原因为动平台受到杠杆转动的影响,在运动的正交方向上产生了定位误

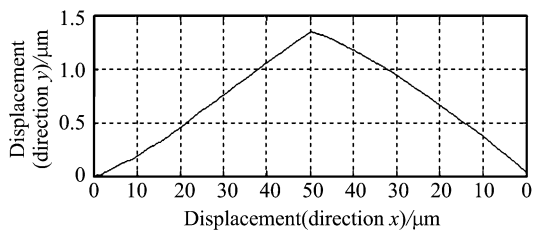
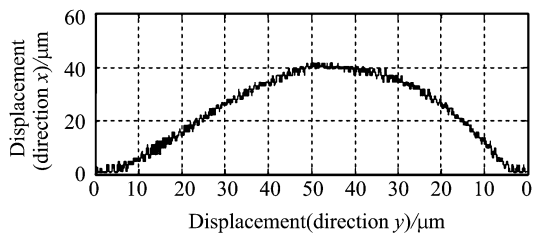
(a) x 向运动时 y 向定位误差(a) Positioning error (direction y) when moving to direction x (b) y 向运动时 x 向定位误差(b) Positioning error (direction x) when moving to direction y

图 10 微定位平台运动耦合误差

Fig. 10 Coupling error of the micropositioning table

差。由于 y 向杠杆长度大,因此 y 向运动的偏移量小于 x 向的偏移量。由此可见,为了减小微定位平台在运动过程中的偏移现象,应尽量增加杠杆的总体长度。上述耦合误差可通过控制程序进行补偿。

5 结 论

利用压电陶瓷驱动器和弹性铰链导轨设计了一台二维纳米级微定位平台,建立了微定位平台的机电耦合动力学模型,通过试验研究了微定位平台的静动态特性。由试验结果可知,微定位平台的最大输出位移可以达到 $50 \mu\text{m}$, x 、 y 向的位移分辨率分别为 4.8 nm 和 5.2 nm ,固有频率分别为 180 Hz 和 143 Hz ,开环静态刚度 $76 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。闭环控制有效地消除了微定位平台位移输出的非线性,并提高了进给方向的静态刚度。由于采用非对称杠杆机构,动平台在运动时发生偏移现象。

参考文献:

- [1] ZHANG D W, TIAN Y L, GAO Y S. Development of a 3-DOF micropositioning workpiece table [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 17(1): 46-50.
- [2] KIM J D, NAM S R. A piezoelectrically driven micropositioning system for the ductile mode grinding of grinding materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 61(3): 310-319.
- [3] GAO Y S, ZHANG D W, YU C W. Dynamic modeling of a novel workpiece table for active surface grinding control [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(4): 609-624.
- [4] 贾宏光, 吴一辉, 于振雷, 等. 压电驱动微位移工作台动态特性分析[J]. 光学精密工程, 2000, 8(5): 440-443. JIA H G, WU Y H, YU ZH L, *et al.* Dynamic characteristic analysis of the micropositioning system driven by PZT actuator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(5): 440-443. (in Chinese)
- [5] CHANG S H, TSENG C K, CHIEN H C. An ultra-precision $XY\theta z$ piezo-micropositioner part I: design and analysis [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1999, 46(4): 897-905.
- [6] CHANG S H, TSENG C K, CHIEN H C. An ultra-precision $XY\theta z$ piezo-micropositioner part II: experiment and performance [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 1999, 46(4): 906-912.
- [7] 刘品宽, 孙立宁, 曲东升, 等. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 143-147. LIU P K, SUN L N, QU D SH, *et al.* Dynamic analysis on a novel nanopositioning stage driven by PZT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2): 143-147. (in Chinese)

作者简介:田延岭(1974—),男,河北故城人,博士后,研究方向为精密工程与微纳米技术,机械动力学等。