

文章编号 1004-924X(2008)01-0035-07

基于 HHT 的微晶玻璃超光滑表面抛光

杨志甫¹, 杨 辉¹, 李成贵², 刘 祎¹, 房建国¹

(1. 北京航空精密机械研究所 精密制造技术航空科技重点实验室, 北京 100076;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对激光陀螺反射镜常用材料微晶玻璃的加工技术, 介绍了一种较为成熟的超光滑表面加工方法—偏心浸液式抛光。分析了微晶玻璃的性能和微观结构, 得出实现其超光滑表面加工所必须的技术条件。系统论述了提出的超光滑表面抛光方法的基本原理及其他抛光工艺过程。通过多次工艺实验, 稳定地获得了埃量级的超光滑表面。最后, 采用 Hilbert-Huang 变换(HHT)非线性平稳信号的时域分析法, 通过超光滑表面粗糙度分布曲线到 Hilbert 谱的一系列数学变换, 得出主要抛光工艺参数与表面粗糙度之间的影响关系, 对实际加工工艺过程与抛光结果进行有效反馈和指导。基于 HHT 的超光滑表面抛光方法可以稳定地获得 Ra 优于 0.35 nm 的微晶玻璃超光滑表面, 目前最好结果为 Ra=0.3 nm。

关键词: 微晶玻璃; 超光滑表面; 粗糙度; 定偏心浸液式抛光; Hilbert-Huang 变换(HHT)

中图分类号: TQ171.684 **文献标识码:** A

Supersmooth polishing of Zerodur based on HHT

YANG Zhi-fu¹, YANG Hui¹, LI Cheng-gui², LIU Yi¹, FANG Jian-guo¹

(1. *Aeronautical Key Laboratory of Precision Machining Technology, China Precision Engineering Institute for Aircraft Industry, Beijing 100076, China;*

2. College of Instrumental Science & Optical-electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aimed at the polishing technology of common material(Zerodur) used in reflecting mirror of laser gyro, a sophisticated supersmooth surface polishing method, stable eccentric immersed polishing method, was introduced. The property and micro structure of Zerodur were analyzed and the technical condition was proposed. Then, the principle and technical process of the polishing method were discussed. By multiple experiments, the sub-nano supersmooth surface was successfully and stably obtained. Finally, Hilbert-Huang Transform(HHT), a nonlinear signal time domain disposal method was used to obtain the effects of polishing technological parameters on the surface roughness through the transform from surface roughness to Hilbert spectrum, which could give a effective feedback and a direction to the practical polishing process. By the supersmooth polishing technology based on HHT, the supersmooth surface Ra of Zerodur is better than 0.35 nm, the best result can be up to 0.3 nm.

收稿日期:2007-06-05; 修订日期:2007-08-20.

基金项目:航空科学基金资助项目(No. 05H43001)

Key words: Zerodur; supersmooth surface; roughness; stable eccentric immersed polishing; Hilbert-Huang Transform(HHT)

1 引言

微晶玻璃是一种应用广泛的光学材料,除了具有良好的光学性能外,还具有许多宝贵的性能,如调节其组成成分及热处理方法可使膨胀系数在 $(-12\sim 200)\times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 范围内变化,机械强度高,化学稳定性和电性能好,使用温度高及坚硬耐磨等,在许多领域得到广泛应用。它既可制作大型光学仪器、天文望远镜重达几十吨的主镜,也可制作质量只有几克的激光陀螺反射镜片,还可用来制作超精密机床的主轴、大容量的计算机硬盘的基板等。目前,微晶玻璃在光学应用中最为常见的,如上述的激光陀螺反射镜基片和硬盘基板等,其精度要求非常高,达到埃量级的表面粗糙度和极高的面形精度,即超光滑表面^[1-2]。

我国在超光滑表面加工技术领域的研究开展较晚,与美国、日本等发达国家相比,还有很大的差距,主要表现在:我国的超光滑表面目前很大一部分还是通过传统、古典式的加工方法,由经验丰富的技师工人通过手工作业来获得,效率不高,而且重复性差;较为先进的超光滑表面加工方法主要还局限于科研院所的实验室内,由于工艺复杂以及检测费用昂贵等原因,还很难推广到市场应用。此外,超光滑表面的检测和分析还处于一个不断研究和深入的阶段,HHT(Hilbert-Huang Transform)^[3]就是近年来兴起的一种非线性信号时域分析方法,将其用于超光滑表面加工技术是一种创新和尝试。

2 微晶玻璃的特性和微观结构^[4]

微晶玻璃是 60 年代发展起来的新型光学材料,它是按制作 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统玻璃所采用的方法进行熔炼和成型后,进行高温热处理得到的。热处理时,玻璃经历了两个阶段,第一阶段是在玻璃内部各处形成晶核;第二阶段是形成晶核的玻璃在晶体生长过程中,逐渐转变为陶瓷,故又称为玻璃陶瓷。微晶玻璃与普通玻璃的主要区别是其具有结晶结构,而与陶瓷的主要区别是它

的结晶结构要比陶瓷细得多。由于玻璃陶瓷是在均匀的玻璃基体内通过晶体生长来制造的,所以最后制得的材料是非常均匀而致密的。微晶玻璃在热处理中析出大量负膨胀系数的微小晶相颗粒,使微晶玻璃的整体在某一温度区域的膨胀系数达到或接近于零,故又称微晶玻璃为零膨胀玻璃。

微晶玻璃由结晶相和玻璃相组成,其结晶相是多晶结构,晶粒细小,比一般固体材料的晶粒粒度要小得多,空间分布取向,在晶体之间分布着稳定的玻璃相,把数量巨大、晶粒微细的结晶体结合起来。微晶玻璃的三维立体微观结构用美国 DI 公司的原子力显微镜(NanoScopeIIIa, Dimension3100)在 $500\text{ nm}\times 500\text{ nm}$ 范围内观察如图 1 所示,中科院长春光机所韩荣久等人的研究表明,微晶玻璃的晶粒尺寸大约为 $30\sim 40\text{ nm}$ 。因此,要实现其原子量级的去除,获得超光滑表面,必须采用纳米级的抛光磨料。微晶玻璃表面原子在磨料微粒的撞击作用下脱离工件主体,从而被去除。原子的去除过程,是磨料与工件在原子水平的碰撞、扩散和填补过程。

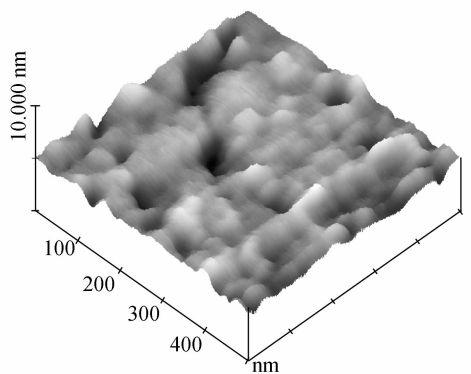


图 1 微晶玻璃的三维微观结构

Fig. 1 3D Micro-structure of Zerodur

3 定偏心浸液式抛光方法的原理

定偏心浸液式抛光方法和浮法抛光较为相似,其原理如图 2。浮法抛光是上世纪 70 年代出

现于日本的一种超光滑表面抛光技术^[5],是一种非接触式抛光;定偏心浸液式抛光是一种准接触式抛光。

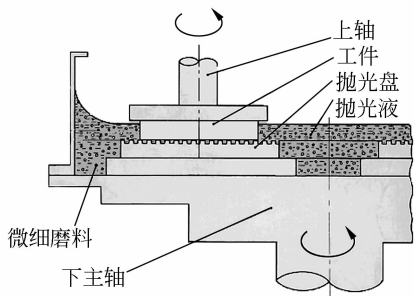


图 2 定偏心浸液式抛光的原理示意图

Fig. 2 Principle of stable eccentric immersed polishing

微晶玻璃定偏心浸液式抛光实质上是一种化学机械抛光 (Chemical-Mechanical Polishing, CMP),是目前提供全局平面化的一种理想技术,在超光滑表面加工领域得到了广泛应用^[6]。一般认为,CMP 中材料的去除是机械磨削和化学腐蚀的组合,材料的去除首先源于化学腐蚀作用^[7]。一方面,在抛光过程中,工件表面局部接触点产生高温高压,导致一系列复杂的摩擦化学反应;抛光液中的碱性组分和纳米磨料颗粒作用下,工件表面形成腐蚀软质层,再通过抛光布和抛光磨料的机械作用去除腐蚀产生的生成物,这样再对暴露出的新鲜表面进行腐蚀,提高抛光效率和抛光表面质量。另一方面,根据 Preston 公式: k 为工艺系数; p 为工件表面上某一点在 t 瞬时与抛光盘之间的压力; V 为单个磨料所去除材料的体积(包括被去除的工件基体的体积 V_1 和软质层的体积 V_2),软质层的形成导致 V 增大(即化学腐蚀作用可促进机械磨削作用)。 V_1 减小,有利于减小切削深度、增强塑性磨削和提高抛光表面质量。因此,在抛光液质量浓度相同的条件下,采用纳米磨料抛光不仅有利于减小切削深度、提高抛光表面质量,同时由于有效磨粒数的急剧增多,还有利于提高抛光效率。

4 工艺实验

工艺实验在精密制造技术航空科技重点实验室自行研制的 CJY-500 型超精密研磨机上进行,如图 3 所示。该设备具有上、下两个抛光盘,均采

用液体静压主轴支承,运动精度很高,其上抛光盘轴向、径向精度优于 $0.2 \mu\text{m}$;其下抛光盘径向跳动 $0.2 \mu\text{m}$,轴向窜动 $0.2 \mu\text{m}$,偏摆 $0.7''$ 。抛光盘采用锡盘,锡较软,具有良好的嵌砂性,精车后可达到较低的表面粗糙度。CJY-500 具有超精密车削与超精密研抛两大基本功能。首先由超精密车削实现抛光盘的高平面度修整,车削后的锡盘面形精度可达 $1 \mu\text{m}/\Phi 500 \text{ mm}$,然后在抛光盘上对工件进行超光滑抛光。



图 3 CJY-500 超精密研磨机

Fig. 3 CJY-500 ultra-precision grinding & polishing machine

4.1 辅助工艺

4.1.1 抛光盘

实验中的抛光盘由纯锡铸成,与沥青盘等传统抛光盘相比,锡盘具有良好的嵌砂性和耐磨性,刚性也较高。抛光过程实际上是一种面形复映过程,因此抛光盘的面形精度等也是影响抛光质量的关键因素。抛光前,用研磨机自带的车削功能将锡盘车成平面度优于 $1 \mu\text{m}/\Phi 500 \text{ mm}$ 的镜面;然后在锡盘表面车出槽深为 $0.02 \sim 0.05 \text{ mm}$ 、螺距为 $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ 的精细螺纹,使工件表面更好地与抛光盘表面吻合,同时也使工件与抛光液充分接触。

4.1.2 工件的粘结方式

抛光过程中需要将工件粘结在平模垫板上,传统的光学加工中一般使用热熔型粘结材料(如石蜡和松香等),先把工件和平模垫板加热到适当温度,然后把粘结胶熔化并均匀地涂在垫板上,再把工件压紧粘结在垫板上。这种粘结法的最大缺陷是工件粘结过程中受热产生较大的热应力,抛光结束后由于应力释放,工件的面形精度变化较大。因此,这里采用一种新的粘结方法:工件

和垫板都不用加热,工件直接托在垫板上,然后将熔化后的粘结胶滴在工件和垫板的接缝处,大大减少了工件的热变形,利于保持工件下盘后的面形精度。

4.2 工艺参数

4.2.1 抛光液

超光滑表面抛光中所用抛光液主要是纳米粒度的 SiO_2 抛光液,中科院长春光机所也尝试用过金刚石抛光液^[8],考虑到浸液式抛光方法抛光液用量较大,金刚石抛光液代价太高,实验中选用的是抛光液粒度为纳米级的国产 SiO_2 溶胶。这种抛光液在抛光过程中能保持一种稳定状态,不易分散。作为一种软质抛光材料,易于得到较低的表面粗糙度和加工变质层,其平均粒径约为 20~50 nm(粒度越小越易于工件表面原子级的去除,越易于达到更低的表面粗糙度);质量浓度约为 5%(浓度的高低与工件的去除率相关,浓度太高,去除率大,容易造成工件塌边,影响工件的面形精度);抛光液偏碱性,利于在工件表面形成腐蚀软质层,提高抛光质量。

4.2.2 转速

抛光中,工件和抛光盘的转速与工件的去除率基本成正比,转速过高,工件去除过快,同样会造成塌边等缺陷。由平面成形理论知,工件与抛光盘转速相同时,工件表面的材料去除均匀,工件表面各点的去除量一致,工件面形向理想平面收敛。实验中,工件转速一般在 20~30 r/min,若工件比抛光盘的转速稍小一些,有助于降低工件运动轨迹的重复性,也利于提高抛光效果。

4.2.3 温度

随着抛光的进行,由于抛光液挥发致使温度降低,有必要对其进行补偿控制。可以在抛光液中加一热源,周期加热,使液温恒定。尽管微晶玻璃的膨胀系数很小,对液温的变化不是很敏感,但由于锡盘面形受液温影响较大,因此对液温的控制是非常必要的。

4.2.4 抛光时间

抛光过程中,工件面形和表面粗糙度在一定时间范围内会随抛光时间的延长而降低。但实验也发现,工件的表面质量从时间上来说有一个控制点,在这个时间点之外,由于抛光过程中的去除

材料可能参与抛光,影响了抛光液的质量,工件的表面质量有可能变坏,因此抛光时间点的控制尤为关键。

4.3 抛光结果检测

微晶玻璃有国产微晶玻璃、美国 CORNING 的产品、俄罗斯的 CO115M 和德国 SCHOTT 的 Zerodur 等,实验中选用的是 Zerodur。

就目前的检测手段来讲,用于超光滑表面粗糙度的检测主要有原子力显微镜、表面轮廓仪等非接触式检测方法^[9-10],但考虑到原子力显微镜的取样区域较小,因此本文所有实验结果检测均基于美国 WYKO 公司的 NT1100 表面轮廓仪。该仪器具有极高的精密度和准确度,可以定性及定量地测量表面粗糙度、台阶、CD 值及其它的表面形态特性。在高速扫描状态下测量轮廓范围可以从 1 nm 到 15 000 μm 。无论怎样的表面形态、放大倍数及台阶特性,只需一次扫描即可达到 0.1 nm 的垂直分辨率,并获得所有的被测参数。其主要参数:水平分辨率为 0.1 nm;垂直分辨率为 0.01 nm。

工件抛光前表面粗糙度 R_a 为 1.5 nm;5 h 后表面粗糙度 R_a 最好可以达到 0.3 nm,检测结果如图 4 所示。

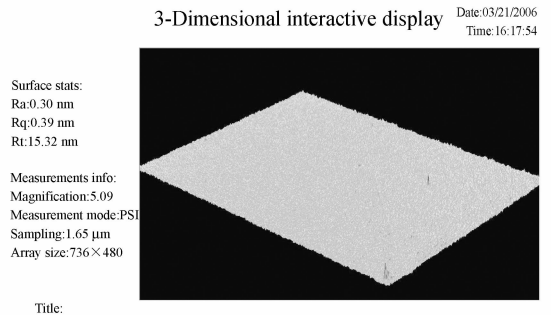


图 4 微晶玻璃的最终抛光粗糙度

Fig. 4 Final polished roughness of Zerodur

5 基于 HHT 的超光滑表面粗糙度结果分析

5.1 HHT 的优点及其数学原理

对于图 4 所示的微晶玻璃超光滑表面粗糙度检测结果来说,作为抛光结果的一种量度,只是超

光滑表面抛光技术的一种检测手段;更重要的是,该检测结果中所包含的丰富的超光滑表面三维形貌信息,经过适当的信号分析处理,即可反映抛光过程中各工艺参数对最终抛光结果的影响频度,对实际加工过程有重要的反馈指导意义。

相对于 Fourier 变换和小波分析等表面粗糙度信号分析方法, HHT 是一种新的谱分析方法^[11-12],它不受 Fourier 分析的局限, Hilbert 谱分析的谱振幅既是频率的函数,又是时间的函数。它能描绘出信号的时频图、时频谱和幅值谱,是一种更具适应性的时频分析方法。由于 HHT 可从时、频两方面同时对信号进行分析,从而增加了处理信号的灵活性和有效性。该方法认为任何复杂的时间序列都是由一些相互不同的、简单而非正弦函数的固有振型函数组成,一步步将较高频率成份从一时间序列中分离出来。

原始连续信号 $x(t)$ 的 HHT 过程如下:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) \times \frac{1}{\pi t}$$

$x(t)$ 的解析信号定义为:

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t),$$

将其表示为极坐标的形式

$$z(t) = a(t)e^{i\theta(t)},$$

根据上式可以得到 $x(t)$ 的瞬时幅值、瞬时相位、瞬时频率:

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)},$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{\hat{x}(t)}{x(t)},$$

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt},$$

从而将原始信号 $x(t)$ 表示为下式:

$$x(t) = \text{Re}[a(t)e^{j\int \omega(t) dt}],$$

根据上式,将信号 $x(t)$ 表示在一个三位图中,也就是说,在联合的时间-频率平面上将瞬时幅值 $a(t)$ 的轮廓勾画出来。信号 $x(t)$ 的这种时频表示即是其 Hilbert 谱, $H(t, m)$ 的定义为:

$$H(t, \omega) = \begin{cases} a(t), & \omega = \omega(t) \\ 0, & \omega \neq \omega(t) \end{cases}$$

5.2 HHT 的程序实现

由于 HHT 需要处理的数学运算量非常庞

大,而且测试结果非常繁杂,为更好地展示测量以及分析结果,本文在 VB 平台下,实现了 Matlab 与 VB 接口程序^[13-14],设计了基于 HHT 的超光滑表面测试分析系统,如图 5 所示。

分析过程中,将 WYKO NT1100 的检测数据导入分析系统,即可快速实现表面粗糙度结果曲线到 HHT,如图 6 所示。



图 5 分析系统操作界面

Fig. 5 GUI of analysis system

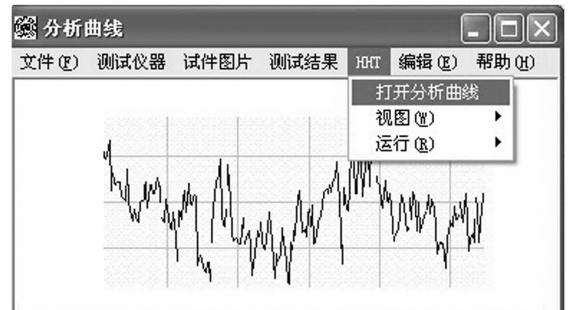


图 6 分析过程操作界面

Fig. 6 GUI of analysis process

Hilbert 谱就是需要的最终结果,如图 7 所示。在 Hilbert 谱上,可以看到粗糙度随时间和频率的变化情况,这对分析超光滑表面粗糙度随时间和频率的分布有重要的作用。

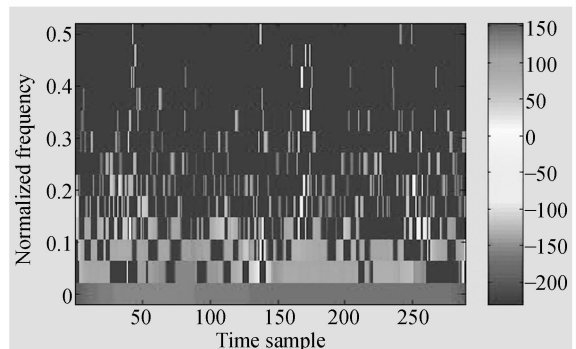


图 7 Hilbert 谱

Fig. 7 Hilbert spectrum

5.3 Hilbert 谱对超光滑表面抛光工艺的反馈指导

由 Hilbert 谱可以看出,振幅即能量随时间和频率分布的特征,与时间—频率谱有相同的作用,这对研究粗糙度的特征有重要的意义。从图 7 可以看出能量主要集中在 1 Hz 之内,而且,在频率越小的地方能量越大,证明了平面的粗糙度很小,从时间轴上来看,起伏不是特别大,平面度很好。由 Hilbert 谱可以看出,粗糙度呈现有规律的波动,特别是在 0.5 Hz 处,非常明显,说明上盘的转速与粗糙度的影响起主要的作用,而在很小频率处粗糙度值最大,说明抛光盘的形状以及抛光液对粗糙度的影响最大,因为其没有周期性,所以在 Hilbert 谱上能够得到很好的辨识。

根据以上结论,本文重点优化了了锡盘的转速、切槽参数和抛光液浓度及酸碱度等工艺参数,经多次实验,在 $\Phi 60$ mm 微晶玻璃抛光平面上,可以较稳定地获得优于 $0.05 \mu\text{m PV}$ 的平面度

(WYKO RTI6100 检测)和优于 R_a 为 0.35 nm 的表面粗糙度(WYKO NT1100 检测)。

6 结 论

基于 HHT 的微晶玻璃定偏心浸液式抛光,可以成功地获得亚纳米量级的超光滑表面,表面粗糙度 R_a 达 0.3 nm 。工艺试验中,平均 $20\sim 50 \text{ nm}$ 粒径抛光剂的国产 SiO_2 抛光液质量还有待于进一步提高,采用更均匀、更细粒度的进口抛光液将有助于获得更高精度的超光滑表面。

将 HHT 引入超光滑表面加工是很好的创新和尝试,通过将表面粗糙度曲线分解成不同频率范围的分量,把影响加工表面粗糙度的各种因素加以区分,得到全面的 Hilbert 谱,便于分析出影响加工表面粗糙度的各种因素,从而对超光滑表面加工过程提出有效的反馈指导意见,稳定地获得优于 R_a 为 0.35 nm 的微晶玻璃超光滑表面。

参考文献:

- [1] 金林,陈明. 激光陀螺超光滑反射镜基片的光学加工和检测技术[J]. 航空精密制造技术,2003,39(2):5-9.
JIN L, CHEN M. Manufacture and measurement technology of supersmooth substrates for laser-gyro applications [J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2003,39(2): 5-9. (in Chinese)
- [2] 韩荣久,孙恒德,高洪刚,等. 超光滑表面加工技术[J]. 光学 精密工程,1995,5(1):7-13.
HAN R J, SUN H D, GAO H G, *et al.*. Fabricating technology for supersmooth surfaces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 5(1): 7-13. (in Chinese)
- [3] HUANG N E. *The Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectrum For Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis* [C]. Proc R Soc London,1998.
- [4] 韩荣久,裴舒,王淑荣,等. 微晶玻璃及其抛光[J]. 航空精密制造技术,2000,36(1):8-10.
HAN R J, PEI SH, WANG SH R, *et al.*. Crystalline mass and its polishing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2000, 36(1): 8-10. (in Chinese)
- [5] 高宏刚,曹健林,陈星旦,等. 浮法抛光亚纳米级光滑表面[J]. 光学学报,1995,15(6):824-825.
GAO H G, CAO J L, CHEN X D, *et al.*. Float polishing subnanometer-smooth surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(6): 824-825. (in Chinese)
- [6] OKUMU O D. Characterization and modeling of oxide chemical-mechanical polishing using planarization length and density concepts[J]. *Trans. Semicond. Manufa.*, 2002,15(2): 232-234.
- [7] KUIDE Q, BRIJ M. A chemical mechanical polishing model incorporating both the chemical and mechanical effects [J]. *Wear*, 2004, V446(2): 277-286.
- [8] 高宏刚,王健明. 应用纳米级金刚石抛光亚纳米级光滑表面[J]. 光学 精密工程,1999,7(5):81-83.

- GAO H G, WANG J M. Application of UFD on polishing surfaces with sub-nanometer scale roughness[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(5): 81-83. (in Chinese)
- [9] WANGNER P, GERBER H A, GRF D, *et al.*. Morphology of silicon wafer surface: A comparative study with atomic force microscope and other techniques[J]. *SPIE*, 1996, 2862: 18-27.
- [10] 吴瑾昱,杨甬英. 大口径超光滑表面粗糙度非接触检测系统[J]. *光学仪器*, 2004,26(5):7-10.
WU C G, YANG Y Y. Large diameter ultra-precision surface roughness noncontact measurement system[J]. *Optics Instrument*, 2004, 26(5): 7-10. (in Chinese)
- [11] CHUNG H C. Optical heterodyne roughness measurement system, United States[P]. 1989.
- [12] LOH C H. Application of the Empirical Mode Decomposition Hilbert spectrum method to identify near fault-ground-motion characteristics and structural responses[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, 91(5): 1339-1357.
- [13] 朱志松. VB与Matlab混合编程探讨[J]. *电子技术应用*, 2003,(1):17-27.
ZHU ZH S. Discussion on hybrid programming of VB and Matlab[J]. *Application of Electronic Technology*, 2003,(1): 17-27. (in Chinese)
- [14] 姚晖,汪明磊. Visual Basic与Matlab的接口技术[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2003,3:262-264.
YAO H, WANG M L. Interface technology of Visual Basic and Matlab[J]. *Journal of Ji Nan University(Natural Science Edition)*, 2003, 3: 262-264. (in Chinese)

作者简介:杨志甫(1981—),男,河南邓州人,工程师,主要从事精密、超精密加工技术和微细制造技术的研究。E-mail: yangzhifu@163.com

下期预告

基于温度轨迹控制的塞曼稳频激光器预热方法

胡鹏程,谭久彬,闫磊,付海金

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所,黑龙江哈尔滨150080)

摘要:提出了一种基于预热温度轨迹规划和轨迹跟踪的预热控制新方法。根据纵向塞曼激光器稳频控制过程的特点,规划了预热过程中谐振腔的一阶指数温度轨迹,它可在不同温度环境下兼顾预热效率和稳频效果。然后,采用预测函数控制(PFC)算法,通过预测输出的滚动优化和反馈校正,使激光器谐振腔温度精确跟踪规划轨迹上升直至逼近预设温度阈值 T_{set} 。最后,建立纵向塞曼激光器预热及稳频控制系统,在不同环境温度下对此方法进行实验验证。实验结果表明:在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,基于本文控制方法的稳频系统可在16 min内完成预热和激光频率锁定,而且在不同环境温度下的锁定温度变化范围 $<0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,相应的中心频率环境温度漂移 $<0.25\text{ MHz}$ (相对漂移 0.5×10^{-9})。该方法为提高稳频系统的预热效率和稳频效果提供了一种新的技术途径。

关键词:温度轨迹控制;预热;热稳频;塞曼激光器