

## 晶圆扫描光刻系统的有效非因果学习控制

陈兴林<sup>1</sup>, 姜晓明<sup>1†</sup>, 王程<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 上海机电工程研究所, 上海 200233)

**摘要:** 本文提出一种有效非因果学习控制方法, 用于晶圆扫描光刻系统. 该方法不依赖于精确的系统建模, 通过引入时间延迟因子对迭代控制系统的收敛条件进行初步整形. 然后选取零相位滤波器来进行二次整形, 得到收敛的非因果迭代学习控制律. 根据系统的闭环特性, 进一步给出延迟因子的参考设计方法和滤波器的选取原则, 并对收敛性进行了分析. 此外, 为提高系统的扫描性能, 引入有效学习函数来克服传统学习控制方法的学习盲目性, 增强对关键性能指标的学习能力. 最后采用模拟的晶圆扫描光刻系统来进行仿真和实验, 以验证方法的有效性.

**关键词:** 晶圆扫描光刻系统; 学习控制; 扫描; 时间延迟; 有效学习函数

中图分类号: TP273 文献标识码: A

## Effective non-causal learning control for wafer scanner systems

CHEN Xing-lin<sup>1</sup>, JIANG Xiao-ming<sup>1†</sup>, WANG Cheng<sup>2</sup>

(1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;  
2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** This paper presents an effective non-causal learning control method which is applied to the wafer scan and lithography system. It is independent of the precise model of the system and introduces a time delay factor to shape the convergence condition of the iterative control system. A zero-phase filter is developed to make a second shaping for the convergence condition; thus, a convergent non-causal iterative learning control law is determined. According to the characteristics of the closed-loop system, we put forward the referential methods for selecting the delay factor as well as the filter, and verify the convergence of the built-up closed-loop system. In addition, an effective learning function is introduced to avoid the blind learning in the traditional method for improving the scanning performance and enhancing the learning abilities of the key performance. Finally, a simulated wafer scan and lithography system is employed to implement simulations and experiments for validating the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** wafer scan and lithography system; learning control; scanning; time delay; effective learning function

### 1 引言(Introduction)

在精密运动控制领域, 通常要求精密设备或仪器按照特定的轨迹进行加工和生产. 例如在半导体制造过程中, 晶圆台和掩模台子系统<sup>[1]</sup>需要在光学系统的配合下, 按照特定的轨迹进行重复性曝光. 而随着对芯片品质和成本的要求越来越高, 光刻系统对扫描曝光的精度和调节时间的要求也越来越高, 传统的控制方法难以满足不断提高的性能需求.

迭代学习控制<sup>[2-3]</sup>对重复性运动轨迹有好的跟踪性能, 已有研究者针对工业控制系统进行了广泛的研究<sup>[4-8]</sup>, 旨在充分发挥迭代学习控制全时间段内完全跟踪的特性. 由于非因果学习律可以更好地逼近系统的逆描述, 因此各种非因果律被提出. 文献[9-10]以优化性能指标为基础, 设计了单调收敛的优化迭代学习控制策略, 并将其分别应用于机器人和过程控制领

域. 文献[11]引入基于伪逆的迭代学习控制, 可用于非最小相位系统; 文献[12]在该方法的基础上, 引入一个关于误差的非线性函数, 将其应用于扫描光刻机. 此外, 文献[13-16]都采用了基于对象逆的不同形式的学习控制方法. 文献[17-18]根据噪声和残留振动的影响采用了分段学习的控制方法, 其中采用的学习控制也是基于对象逆的方法.

上述学习控制方法和应用主要有以下3个问题: 一是优化迭代学习律或者基于对象逆的迭代学习律都是基于模型的迭代学习控制律, 要取得好的控制性能通常要求系统有较为精确的数学描述; 二是采用全时间段的学习控制对系统的性能指标缺少针对性, 会出现学习性能好而时域性能差的缺点; 三是对系统的参考输入有严格一致性的要求. 前面的参考文献都没有同时解决这3个方面问题, 本文给出一种不依赖于对

象数学模型的有效非因果迭代学习控制,旨在减小系统精确辨识时的工作量,并根据扫描光刻性能指标设计有效学习函数,提高系统的时域跟踪性能,并使其对一定特性下的可变输入具有适用性.

## 2 问题描述(Problem description)

### 2.1 晶圆扫描光刻系统(Wafer scanner system)

在步进光刻系统的基础上,针对半导体制造中不断提高的曝光精度和产能要求,提出了扫描光刻系统的设计结构<sup>[1]</sup>.它不同于前者,扫描光刻系统要求在匀速段进行动态曝光,而非传统的静态曝光.因此对扫描光刻系统而言,最主要的性能指标是匀速段的跟踪性能.如图1所示,给出了晶圆台扫描曝光方向的运动轨迹,它由两段运动方向相反的S曲线组成,运动方向与掩模台的结构设计相关.其中 $t_1 \sim t_3$ 段、 $t_4 \sim t_6$ 段是系统的匀速运动阶段,在匀速段,以下两个衡量指标:

$$SMA(t) = \frac{1}{T_e} \int_{t-T_e/2}^{t+T_e/2} e(t)dt, \quad (1)$$

$$SMSD(t) = \sqrt{\frac{1}{T_e} \int_{t-T_e/2}^{t+T_e/2} (e(t) - SMA(t))^2 dt}, \quad (2)$$

要满足曝光要求,其中 $e(t)$ 为 $t$ 时刻的误差, $T_e$ 为扫描一个曝光狭缝所需的时间.通常系统在 $t_1$ 和 $t_4$ 两个时刻无法达到精度要求,需要经过一定的调节时间才能达到曝光所需要的性能要求,即 $t_1 \sim t_2$ 段和 $t_4 \sim t_5$ 段.这两段时间很大程度上决定了系统的工作效率,需要采用相应的技术手段减小这两段调节时间,有效学习控制被应用.

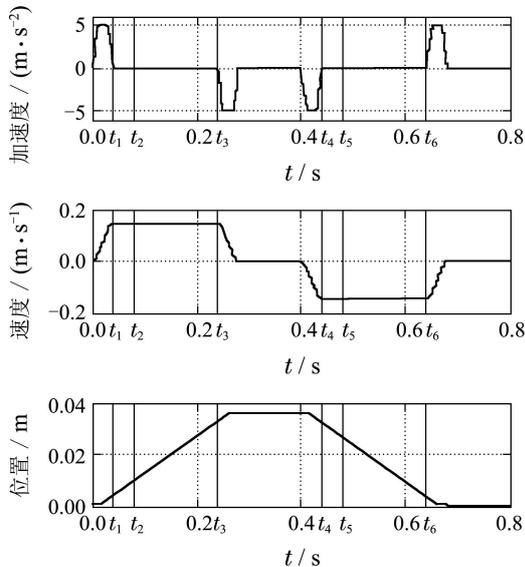


图 1 扫描轨迹

Fig. 1 Scanning trajectory

### 2.2 迭代学习控制(Iterative learning control)

迭代学习控制适用于一类具有重复性运动轨迹的对象,具有完全跟踪的潜力,最近十几年开始在工程

领域得到应用.在机器人控制和工业过程控制领域,系统的控制精度要求并不高,所以施加传统的迭代学习控制可以满足系统的性能要求.而在高精运动控制领域,如果采用传统的迭代学习控制方式,将使系统产生难以接受的有效性能衰减.一方面系统的控制精度要求越高,则对系统的数学描述需要更准确,这样才能得到好的学习控制策略;另一方面迭代学习控制要应用于实际,工程人员需要简单有效的实施方法.本文给出的设计框架,如图2所示,旨在减小学习控制律对被控对象的依赖,并能产生有效的性能改善.

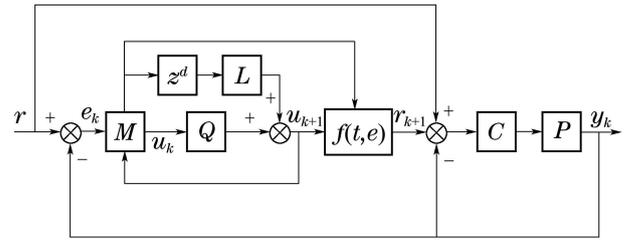


图 2 控制框架

Fig. 2 Control diagram

如图2所示, $P$ 为光刻系统沿扫描方向的对象特性, $C$ 为反馈控制器,有效非因果学习控制律由时间延迟因子 $z^d$ 、因果学习律 $L$ 、滤波器 $Q$ 和有效学习函数 $f(t,e)$ 组成, $f(t,e)$ 是一个与误差 $e$ 相关的时变因子, $M$ 为存储过程变量的存储器.此外,图中 $r$ 为参考输入, $y_k$ 为第 $k$ 步迭代的输出,有效非因果学习律的数学描述如式(3)所示:

$$r_{k+1} = f(t,e)(Q \cdot u_k + L \cdot z^d \cdot e_k), \quad (3)$$

式中: $u_k$ 和 $e_k$ 分别表示第 $k$ 步迭代的学习控制量和误差, $r_{k+1}$ 为第 $k+1$ 步的有效控制量,有效学习函数 $f(t,e)$ 的选取与第2.1节描述的关键性能指标相关.上述学习控制系统的收敛条件如定理1.

**定理 1** 如图2所示的系统, $T$ 用来描述反馈控制部分,如果满足 $\|Q - f(t,e) \cdot T \cdot L \cdot z^d\| < 1$ ,则学习控制系统是单调收敛的.

**证** 若如图2所示的反馈控制系统描述为 $T = PC(1 + PC)^{-1}$ ,由 $e_{k+1} = r - y_{k+1}$ 可以得到

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= r - T(r_{k+1} + r) = \\ &= (Q - f(t,e) \cdot T \cdot L \cdot z^d)e_k + \\ &= (1 - Q)r + (Q - 1)T \cdot r. \end{aligned} \quad (4)$$

令

$$\begin{aligned} e_\infty &= \lim_{k \rightarrow \infty} e_k = \\ &= (1 - Q + f(t,e) \cdot T \cdot L \cdot z^d)^{-1}(1 - Q)(1 - T)r, \end{aligned} \quad (5)$$

则

$$e_{k+1} - e_\infty = (Q - f(t,e) \cdot T \cdot L \cdot z^d)(e_k - e_\infty). \quad (6)$$

最终有

$$\|e_{k+1} - e_\infty\|_2 = \|Q - f(t, e) \cdot T \cdot L \cdot z^d\|_\infty \cdot \|e_k - e_\infty\|_2. \quad (7)$$

当 $\|Q - f(t, e) \cdot T \cdot L \cdot z^d\|_\infty < 1$ 时, 存在 $\alpha < 1$ , 使得 $\|e_{k+1} - e_\infty\|_2 < \alpha \|e_k - e_\infty\|_2$ , 学习控制系统是单调收敛的. 证毕.

由于 $\|(1 - Q + f(t, e) \cdot T \cdot L \cdot z^d)^{-1}\|_\infty$ 是有界的, 选取合适的零相位衰减的滤波器 $Q$ , 则当滤波器带宽远大于 $r$ 的频带时, 定理一中的 $e_\infty$ 趋于0. 定理一中的设计参数对学习控制系统会产生不同的影响, 它们相互制约, 下一节将讨论如何确定上述设计参数和学习函数来得到满足收敛性要求的有效非因果学习控制律.

### 3 有效非因果迭代学习控制(Effective non-causal iterative learning control)

迭代学习控制律的非因果性是由系统中加入的时间延迟因子 $z^d$ 所致, 由于学习控制方法的计算是离线的, 所以在实际应用中可以实现. 现在来考察延迟因子对系统收敛性的影响, 例如采样频率为5 kHz下 $z^2$ 的频率特性如图3所示, 若只考虑系统的正频率, 起始位置为(1, 0), 当频率为625 Hz时, 位置坐标为(0, j1), 此时相角超前90°; 当频率为1250 Hz时, 位置坐标为(-1, 0), 此时相角超前180°. 那么对于时间延迟因子 $z^d$ , 相角超前90°时, 频率为(2500/4d) Hz; 相角超前180°时, 频率为(2500/2d) Hz.

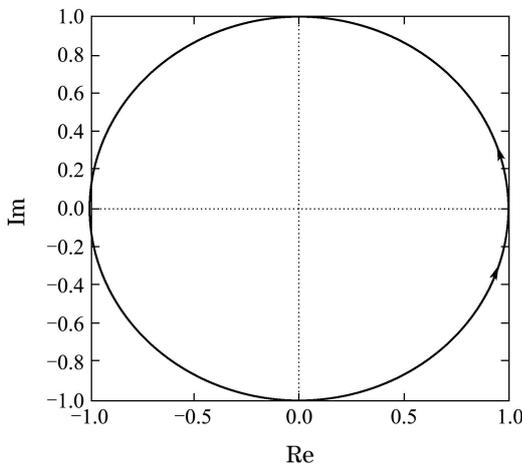


图3  $z^2$ 的奈奎斯特曲线  
Fig. 3 Nyquist curve of  $z^2$

另一方面, 闭环控制系统恰好在带宽处有90°左右的相位滞后, 所以上述延迟因子的作用可以对闭环系统 $T$ 进行初步的整形. 恰当地选取延迟因子, 可以使 $z^d \cdot T$ 的低频段特性位于以(1, 0)为圆心的单位圆内, 该单位圆可以用于描述一定条件下的收敛域; 高频段位于原点为圆心的足够小的区域内, 用半径为

$\delta$ 的小圆描述. 这里给出延迟因子 $d$ 的一个参考选取原则:

$$d = \frac{f_s}{4\omega_c}, \quad (8)$$

其中:  $f_s$ 为系统的奈奎斯特频率,  $\omega_c$ 为闭环控制系统 $T$ 的带宽.

现在讨论非因果学习控制律的存在性, 为方便分析, 定义如下因子:

$$H_{\omega_c} : H_{\omega_c}(T) = \sup_{0 < \omega < \omega_c} \bar{\sigma}(T),$$

$$\tilde{H}_{\omega_c} : \tilde{H}_{\omega_c}(T) = \sup_{\omega > \omega_c} \bar{\sigma}(T),$$

则

$$\|T\|_\infty = \max(H_{\omega_c}(T), \tilde{H}_{\omega_c}(T)). \quad (9)$$

若令 $L = \beta \cdot Q$ ,  $f(t, e) = 1$ , 则学习控制系统的收敛条件为

$$\|Q(1 - \beta z^d T)\|_\infty < 1. \quad (10)$$

分析 $H_{\omega_c}(Q(1 - \beta z^d T))$ 的性质, 当 $\|Q\|_\infty < 1$ 时, 基于前面的分析, 必然可以找到恰当的参数 $\beta$ , 使得 $H_{\omega_c}(Q(1 - \beta z^d T)) < 1$ . 而对于 $\tilde{H}_{\omega_c}(Q(1 - \beta z^d T))$ 而言, 有如下关系:

$$\tilde{H}_{\omega_c}(Q(1 - \beta z^d T)) \leq \tilde{H}_{\omega_c}(Q) \cdot \tilde{H}_{\omega_c}(1 - \beta z^d T) \leq \tilde{H}_{\omega_c}(Q) \cdot (1 + \delta). \quad (11)$$

只要令 $\tilde{H}_{\omega_c}(Q) < 1/(1 + \delta)$ , 则满足学习控制系统的收敛条件, 这样的低通滤波器 $Q$ 是存在的. 根据上述描述, 发现 $d$ 和 $Q$ 是密切相关的, 首先随着 $d$ 的增大, 延迟因子可以对闭环系统的相位特性进行充分补偿, 位于收敛域内的低频段范围逐渐增大; 而当 $d$ 产生的超前相位远远大于系统带宽时, 位于收敛域内的低频段范围又逐渐减小. 与之对应的,  $Q$ 的带宽随着收敛域内低频段范围而变化, 低频段范围越窄,  $\delta$ 越大,  $Q$ 的带宽越小, 系统的收敛性能越差, 即如式(5)所示的 $e_\infty$ 越大. 考虑有效学习函数 $f(t, e)$ 对学习控制系统收敛性的影响. 有效学习函数是根据误差变化而确定的一个时变函数, 相当于一个时变的学习因子, 通过它可以确定一个有效学习区域. 令有效学习函数是有界的, 取最坏的学习因子 $f_0 = \max f(t, e)$ , 则只要 $f_0$ 使学习系统收敛, 那么有效学习函数 $f(t, e)$ 也使系统收敛. 这里, 若不含有有效学习函数的学习控制系统是收敛的, 则当 $f_0 \leq 1$ 时, 有效学习控制系统也是收敛的. 虽然系统可以满足收敛性条件, 但与此同时“破坏”了原来学习控制系统的初始条件. 由于学习律的时变性, 考虑系统在时域上的性能指标, 可以近似将原系统分解为 $N$ 段(与时变学习律的变化有关)不同的学习控制子系统来分析. 这样会出现每段子系统在不同迭代步时的初始误差不同, 导致系统的跟踪性能受

到影响. 因而通常希望有效学习函数尽可能平滑, 若有效学习控制是分段学习的, 则期望有尽可能少的分段, 以减小系统性能的衰减. 文中根据系统的工作情况, 选取有效学习函数

$$f(t, e) = \begin{cases} 1, & t_{11} < t < t_{12} \text{ 或 } t_{13} < t < t_{14}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $t_{11} \in [t_1, t_2]$ ,  $t_{12} \in [t_2, t_3]$ ,  $t_{13} \in [t_4, t_5]$ ,  $t_{14} \in [t_5, t_6]$ , 即  $t_{11}$  和  $t_{13}$  位于加速结束后的动态调节阶段, 可以通过上述时间范围来选择合适的学习域, 目的是为了改善动态调节过程; 而  $t_{12}$  和  $t_{14}$  位于匀速过程的稳态工作阶段, 既可以减小学习律切换造成的影响, 又可以减小非因果学习对匀速段性能的影响. 此外, 上述设计对具有相同加减速特性、不同扫描长度的可变参考输入仍然是适用的.

最终, 学习的有效区间主要集中在匀速段内, 一方面可以有效减小系统调节时间, 另一方面可以有效地减小系统减速过程对匀速性能的影响, 不会使匀速段的性能变差, 而且对于具有相同加减速特性、不同扫描长度的可变参考输入仍然具有适用性. 此时已将学习控制的指标  $\|e_k\|_2$  与扫描光刻系统的指标 SMSD 有效地结合起来, 这样学习的好处将在下一节的实例中得到体现.

#### 4 仿真与实验(Simulation and experiment)

##### 4.1 仿真结果(Simulation results)

对上述方法加以验证, 首先进行仿真研究. 用精密直线运动平台来模拟晶圆台扫描光刻方向的运动, 采用最小二乘法对系统进行辨识, 得到从电流到位置输出的系统频率特性为

$$P = \frac{2.678}{s(s + 3.64)}, \quad (13)$$

系统反馈部分采用 PID 控制器, 速度环比例系数为 350, 积分系数为 30.772, 位置环比例系数为 150, 积分系数为 2.826, 采样周期为 5 kHz, 经过参数整定, 得到的闭环反馈控制系统为

$$T = \frac{0.0027345(z + 0.9732)(z - 0.9813)}{(z^2 - 1.969z + 0.9698)} \cdot \frac{(z - 0.9158)}{(z^2 - 1.839z + 0.8543)}. \quad (14)$$

此时, 系统的带宽约为 43.3 Hz, 下面观察时间延迟因子  $z^d$  对系统的影响, 采用文献 [19] 的频域分析方法,  $z^d T$  的奈奎斯特曲线如图 4 所示.

在图 4 中, 若无滤波器  $Q$ , 学习控制系统的收敛域位于以 (1, 0) 为圆心的单位圆内,  $z^d T$  的低频段位于单位圆内, 随着  $d$  的增大呈现出收敛域范围先增大后减小的趋势. 在开始阶段随着延迟因子  $d$  的增大, 位于收敛域内的低频段范围逐渐变大; 然后  $d$  继续增大, 低频

段范围又开始减小. 在图 4 选取的延迟因子中, 当  $d = 10$  时, 位于收敛域内的低频范围最大.

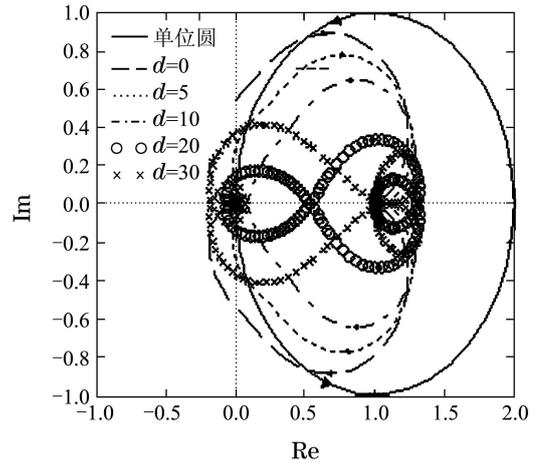


图 4 初步整定的收敛特性

Fig. 4 Convergence characteristics after first shaping

根据第 3 节的结论, 当  $d = 10$  时, 在超前相角为  $90^\circ$  时的角频率为 62.5 Hz, 非常接近闭环反馈系统的带宽, 可以保证系统尽可能宽的低频范围位于收敛域内. 尽管如此, 系统在高频段仍然无法满足收敛要求, 需要进一步设计  $L$  和  $Q$ . 这里选择零相位低通滤波器和学习律分别为

$$Q = Q_1(z)Q_1(z^{-1}) = \frac{0.011023(z + 1)^2}{z^2 - 1.143z + 0.4128} \cdot \frac{(z + 1)^2}{z^2 - 2.769z + 2.422}, \quad (15)$$

$$L = \beta \cdot Q, \quad (16)$$

其中:  $Q_1(z)$  为 500 Hz 的巴特沃斯低通滤波器,  $\beta$  为 [0, 1] 区间内的常数. 令  $\beta = 1$  时, 经过修正的系统收敛特性如图 5 所示, 此时收敛域位于以原点为圆心的单位圆内, 经过校正后的学习控制系统是收敛的.

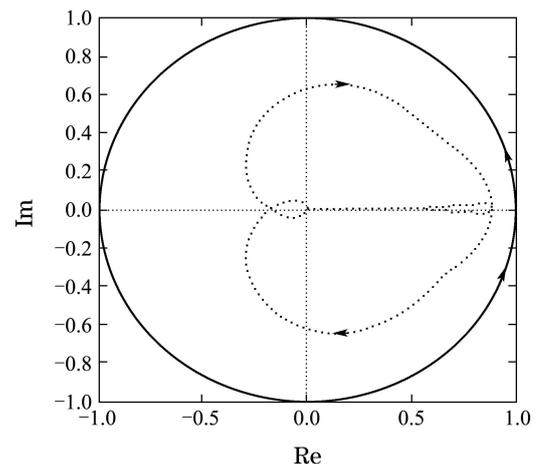


图 5 最终的系统收敛特性

Fig. 5 Final convergence characteristics of the system

根据第3节中的方法和结论,引入有效学习函数并不影响系统的收敛性.其形式如式(12)所示,这里令  $t_{l1} = 0.047, t_{l2} = 0.16, t_{l3} = 0.447, t_{l4} = 0.56$ ,分别采用传统学习控制方法(传统ILC法)和有效学习控制方法(有效ILC法),得到系统经过10步迭代后的跟踪误差曲线,如图6所示.从图6中可以发现有效学习控制方法在加速到匀速的动态过程段,以及匀速到减速的动态过程段,性能要优于传统迭代学习控制方法和无迭代学习控制(无ILC)的情况.通过有效学习函数可以避免非因果学习对不必要误差量的学习,从而提高系统的性能.

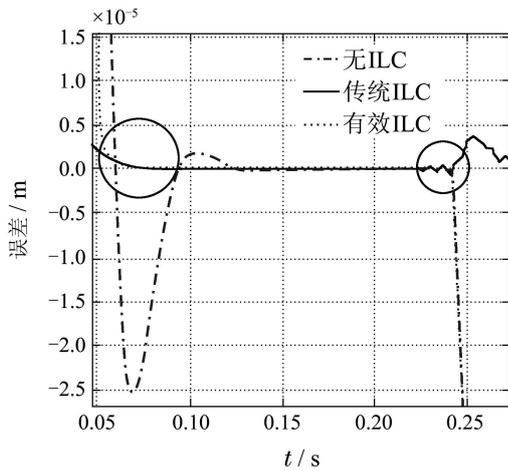


图6 系统的跟踪误差

Fig. 6 Tracking errors of the system

若系统曝光狭缝的宽度为10.5 mm,根据扫描速度得到扫描一个狭缝所需的时间  $T_e = 10.5/150 = 0.07$  s.进而考察系统所需的调节时间,式(1)–(2)所示的最大性能指标SMA和SMSD达到10 nm所需的稳定时间如表1所示,本文方法优于不加有效学习函数的迭代学习控制方法.

表1 调节时间(仿真)

Table 1 Settling time (simulation)

性能指标	无ILC	传统ILC法	有效ILC法
SMA(10 nm)	—	0.087 s	0.064 s
SMSD(10 nm)	—	0.106 s	0.093 s

注:“—”表示无稳定的扫描阶段.

### 4.2 实验结果(Experiment results)

将上述方法应用于精密气浮试验平台,进行相关实验,来验证方法的有效性.实验装置如图7所示,气浮平台的工作气压为0.5 Mpa,采用无铁心直线电机作为执行结构,并采用高精度光栅尺作为测量元件,其信号周期为4  $\mu$ m,经过海德汉计数卡的4096细分,分辨率约为1 nm,运动部分质量约为5.5 kg.试验在常温常压下进行,受噪声、气膜和线缆扰动等影响,这里的性能指标要求是:最大的SMA和SMSD为20 nm.

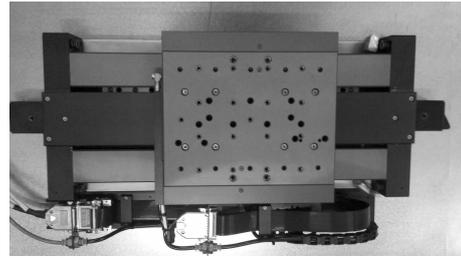


图7 模拟实验平台

Fig. 7 Simulated test bench

在实际应用过程中,并不需要对系统进行精确的数学建模,反馈部分可以通过传统方法进行整定,学习控制方法可以根据4.1节所述的设计思路进行整定,最终得到系统的有效迭代学习控制律.传统学习控制律下得到的迭代域设计结果如图8所示,表明系统的误差2范数随着迭代步的增加而逐渐收敛.图9给出了有效学习控制律在有效学习段内的性能变化,说明有效学习控制律也是收敛的.

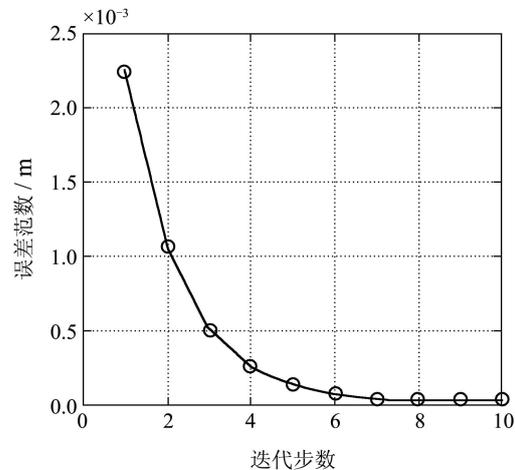


图8 误差2范数

Fig. 8 2-norm of errors

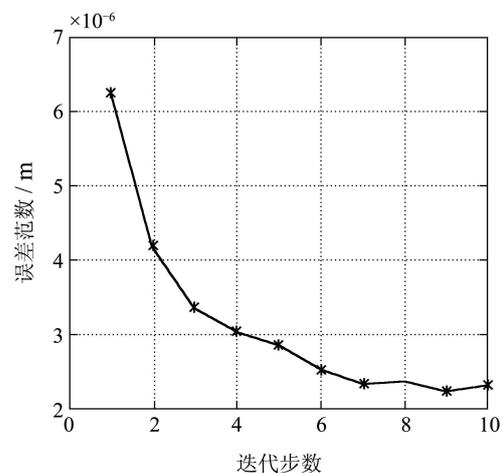


图9 有效误差的2范数

Fig. 9 2-norm of key errors

系统在时域下的跟踪特性如图10所示,分别描述了系统在第10步迭代时不含学习控制律、传统学习控

制律, 以及有效学习控制律下的误差曲线. 整体来看, 传统学习控制律下的跟踪性能更好, 它要优于另外两种方法. 然而进一步观察光刻系统所关心的指标, 即调节时间和匀速段系统性能, 结论与整体性能并不一致, 传统迭代学习控制方法注重系统在整个时间轴上的性能, 而有效学习控制更为关心的是光刻系统所关心的性能要求, 对其他性能不做过分要求.

图11是图10中圆内部分的误差放大图, 从中可以发现有效学习控制律有更好的动态跟踪性能, 优于不含学习控制律和传统学习控制律的情况, 这与仿真的结果是相同的.

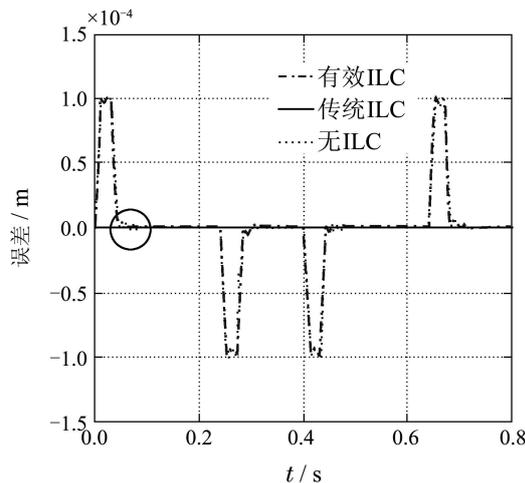


图 10 实验跟踪误差

Fig. 10 Experiment tracking errors

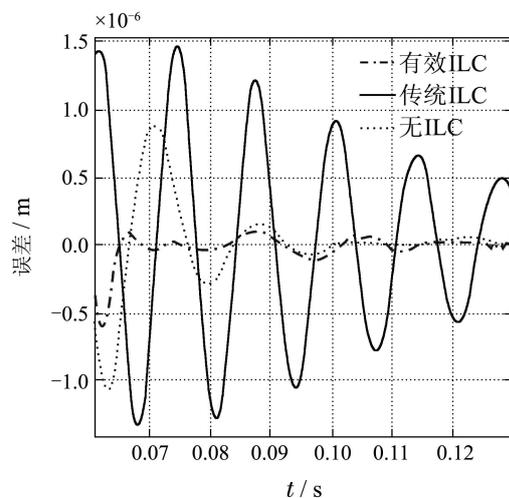


图 11 误差局部放大图

Fig. 11 Enlarged plot of errors

传统迭代学习控制方法在匀速段的性能比不含学习控制律时的情况更差, 传统学习控制的盲目学习造成了迭代轴学习性能好而所关注的时域性能差的情形. 限于篇幅, 这里没有给出可变参考输入下的响应曲线. 表2给出了试验得到的系统调节时间, 无论从

SMA还是SMSD指标来看, 有效学习控制所需的调节时间更短.

表 2 调节时间(实验)

Table 2 Settling time (experiment)

性能指标	无ILC	传统ILC法	有效ILC法
SMA(20 nm)	0.0886 s	0.0982 s	0.0617 s
SMSD(20 nm)	0.1 s	—	0.099 s

注: “—”表示无稳定的扫描阶段.

## 5 结论(Conclusions)

本文给出了一种有效非因果学习控制的设计方法, 通过引入的时间延迟因子和非因果滤波器可以得到具有良好收敛性能的非因果学习控制律, 它不依赖于精确的系统描述, 进而易于在实际应用中安装实施. 引入的有效学习函数可以很好地反映了扫描光刻系统的性能指标, 增强了学习的针对性, 提高了系统的关键性能, 且该方法可以应用于具有相同加减速特性的可变参考输入, 增强了学习控制在扫描光刻中的适用性.

## 参考文献(References):

- [1] BUTLER H. Position control in lithographic equipment: an enabler for current-day chip manufacturing [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2011, 31(5): 28 – 47.
- [2] ARIMOTO S, KAWAMURA S, MIYAZAKI F. Bettering operation of robots by learning [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1984, 1(2): 123 – 140.
- [3] BRISTOW D A, THARAYIL M, ALLEYNE A G. A survey of Iterative learning control [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, 26(3): 96 – 114.
- [4] XU J X, PANDA S K, LEE T H. *Real-time Iterative Learning Control: Design and Applications* [M]. London: Springer-Verlag, 2009.
- [5] LONGMAN R W. Iterative learning control and repetitive control for engineering practice [J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(10): 930 – 954.
- [6] 阮小娥, 朴光贤, 卞增男. 迭代学习控制技术回顾与长期学习控制展望 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(8): 966 – 973. (RUAN Xiaoe, PARK Kuangxian, BIEN Zengnan. Retrospective review of some iterative learning control techniques with a comment on prospective long-term learning [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(8): 966 – 973.)
- [7] DE ROOVER D, BOSQRA O H. Synthesis of robust multivariable iterative learning controllers with application to a wafer stage motion system [J]. *International Journal of Control*, 2000, 73(10): 968 – 979.
- [8] MISHRA S, TOPCU U, TOMIZUKA M. Optimization-based constrained iterative learning control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(6): 1613 – 1621.
- [9] LEE J H, LEE K S, KIM W C. Model-based iterative learning control with a quadratic criterion for time-varying linear systems [J]. *Automatica*, 2000, 36(5): 641 – 657.
- [10] GUNNARSSON S, NORRLOF M. On the design of ILC algorithms using optimization [J]. *Automatica*, 2001, 37(12): 2011 – 2016.
- [11] GHOSH J, PADEN B. A pseudoinverse-based iterative learning control [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(5): 831 – 837.

- [12] HEERTJES M, TSO T. Nonlinear iterative learning control with applications to lithographic machinery [J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(12): 1545 – 1555.
- [13] BRISTOW D A, ALLEYNE A G. Monotonic convergence of iterative learning control for uncertain systems using a time-varying filter [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(2): 582 – 585.
- [14] BRISTOW D A, DONG J Y, ALLEYNE A G, et al. High bandwidth control of precision motion instrumentation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(10): 103704-1 – 103704-14.
- [15] HELFRICH B E, LEE C, BRISTOW D A, et al. Combined  $H_\infty$ -feedback control and iterative learning control design with application to nanopositioning systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, 18(2): 336 – 351.
- [16] ROTARIU I, STEINBUCH M, ELLENBROEK R. Adaptive iterative learning control for high precision motion systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5): 1075 – 1082.
- [17] MISHRA S, COAPLEN J, TOMIZUKA M. Precision positioning of wafer scanners: segmented iterative learning control for nonrepetitive disturbances [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2007, 27(4): 20 – 25.
- [18] VAN OOSTEN C L, BOSGRA O H. Reducing residual vibrations through iterative learning control, with application to a wafer stage [C] // *The 2004 American Control Conference*. Boston, MA: IEEE, 2004: 5150 – 5155.
- [19] NORRLÖF M, GUNNARSSON S. A note on causal and CITE iterative learning control algorithms [J]. *Automatica*, 2005, 41(2): 345 – 350.

#### 作者简介:

**陈兴林** (1963–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能控制、精密运动控制, E-mail: chenxl@hit.edu.cn;

**姜晓明** (1985–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为迭代学习控制及应用、精密运动控制, E-mail: jiangxm@hit.edu.cn;

**王程** (1986–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为导航、制导与控制、导弹控制系统设计, E-mail: wangchit@163.com.