

# 扫描光刻系统的分段迭代学习控制策略

陈兴林, 姜晓明, 王 岩

(哈尔滨工业大学 航天学院, 150001 哈尔滨)

**摘要:** 结合扫描光刻系统的曝光特点, 提出一种分段迭代学习控制方法. 该方法继承了非因果迭代学习律充分学习的特点. 为改善动态跟踪性能, 在加速过程段对前一迭代周期的误差信息进行非因果学习, 以保证其沿迭代轴的快速收敛性. 为克服非因果迭代学习律盲目学习的缺点, 在匀速曝光段不对误差信息进行非因果学习, 以保证系统的曝光性能不发生恶化, 并改善系统在时间轴的瞬态性能. 此外, 对该方法的收敛性进行了分析和证明, 并结合实例, 验证了方法的有效性.

**关键词:** 迭代学习控制; 扫描曝光; 分段学习; 非因果学习

**中图分类号:** TP273      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2013)07-0018-06

## Segmented iterative learning control strategy for wafer scanner systems

CHEN Xinglin, JIANG Xiaoming, WANG Yan

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

**Abstract:** Based on exposure characteristics of the wafer scanner, a segmented iterative learning control strategy is presented. The proposed method inherits the advantage of non-causal iterative learning control, which is full learning of errors. In order to improve the dynamic tracking performance, non-causal learning of errors in the last iteration is implemented during the acceleration phase, which guarantees the fast convergence of the system versus iteration domain. For the purpose of overcoming the weakness of blind learning for non-causal iterative learning control methods, errors are not learnt fully during the constant velocity so that exposure performance does not go bad. It improves the transient performance versus time. In addition, the convergence of the proposed method is analyzed and proved. Combining the numerical example, effectiveness of the method is testified.

**Key words:** iterative learning control; scan and exposure; segmented learning; non-causal learning

如今, 步进扫描式光刻机已成为集成电路制造的主要生产设备<sup>[1]</sup>, 承载硅片的精密工作台称为硅片台, 是其主要组成部分. 它决定了硅片的曝光精度和曝光稳定时间, 影响到芯片的品质和产量. 在扫描曝光过程中, 硅片台沿着特定的轨迹在硅片的每一个曝光小块 (Die) 内完成曝光, 然后对生产线上的硅片进行逐批次的曝光. 文中将迭代学习控制应用于 Die to Die 的曝光过程中, 来提

高扫描光刻系统的曝光性能.

迭代学习控制由日本学者 S. Arimoto<sup>[2]</sup> 提出, 早期被广泛应用于工业机器人控制领域<sup>[3-4]</sup>. 而随着研究的深入, 它开始在过程控制<sup>[5-6]</sup> 和精密运动控制领域<sup>[7-8]</sup> 得到应用, 后者最典型的例子就是以精密工作台为核心的测试仪器或生产设备. 例如, 文献[9]将迭代学习控制应用于步进式光刻机, 以改善步进过程的性能. 文献[10]将分段迭代学习控制应用于步进式光刻机, 旨在减小定位稳定时间和机械残留振动. 然而步进扫描式光刻系统采用动态扫描曝光的方式, 无法直接应用步进式光刻机的结论. 文献[11]采用的分段 D 型迭代学习控制律来消除非重复性扰动, 然而过

收稿日期: 2012-05-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174037); 国家科技重大专项资助项目(2009ZX02207).

作者简介: 陈兴林(1963—), 男, 教授, 博士生导师;  
王 岩(1972—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 姜晓明, jiangxm@hit.edu.cn.

渡过程的动态性能提升有限. 由于非因果学习控制律<sup>[12-13]</sup>可以有效提高系统性能, 文献[14]采用该方法来提高系统的扫描性能, 但是它忽略了扫描光刻系统的工作特点, 出现了所关心的匀速曝光段性能无法显著提高甚至部分恶化的情况.

本文从步进扫描式光刻系统的性能要求着手, 根据系统扫描曝光轨迹的特点, 提出一种分段迭代学习控制策略. 对非因果迭代学习控制律进行改善, 对跟踪误差进行分段学习, 以期提高系统的扫描曝光性能(即匀速段性能).

## 1 问题背景

迭代学习控制的衡量指标往往选取最大跟踪误差或跟踪误差的二范数, 然而在一些情况下, 整个时间段内的误差信息并非设计者都关心的. 下面将结合步进扫描光刻系统的运动特点来进行说明.

### 1.1 步进扫描运动

以硅片台为例来说明步进扫描光刻机的工作特点, 如图1所示. 在硅片的曝光过程中, 首先要完成对每一个 Die 的曝光, 称为 Die to Die 的过程, 然后进行下一个硅片的曝光, 称为 Wafer to Wafer 的过程. 目前的研究多集中在 Die to Die 的学习控制.

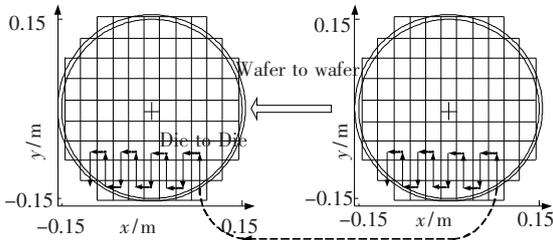


图1 步进扫描运动

硅片台系统的运动包括沿  $x$  轴的步进运动和沿  $y$  轴的扫描运动, 此外调焦和对准的过程还涉及到了其他自由度的运动, 其中最重要的曝光过程发生在扫描运动阶段. 虽然系统较为复杂, 但在实际应用中, 通常采用解耦运算来实现单自由度的控制. 由于无法精确解耦, 可以将其他自由度对扫描运动的残留影响视作扫描方向的扰动, 因此这里只研究扫描方向上的运动. 为减小加速过程对系统的冲击, 要求系统从加速到匀速的过程是一个平滑的运动过程, 并对加速度的导数有约束. 如图2所示, 给出了系统在1个周期内的运动轨迹, 从0时刻经过加速过程到达  $t_0$  时刻;  $t_0 \sim t_1$  时刻为加速结束后的动态调整过程, 这段时间称为稳定时间;  $t_1 \sim t_2$  时刻为曝光的匀速阶段, 此时

对硅片进行匀速曝光;  $t_2$  时刻后进入减速运动, 此时一个 Die 曝光结束. 图2后半部分与前半部分是对称的, 由于光刻机掩模台的往复运动特点, 硅片台也进行往复运动以提高工作效率.

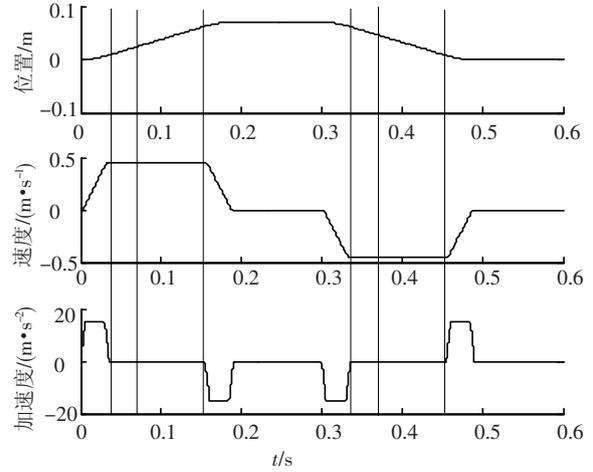


图2 扫描轨迹

硅片台系统跟踪性能的衡量指标不同于一般的伺服系统, 主要包括系统的动态调整时间  $t_s(t_1 - t_0)$ , 以及曝光段( $t_1 \sim t_2, t_4 \sim t_5$ )跟踪误差的移动平均值  $R_{MA}$  和移动标准差  $R_{MSD}$ :

$$R_{MA} = \frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} e(t) dt. \quad (1)$$

$$R_{MSD} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{-T_s/2}^{T_s/2} (e(t) - R_{MA})^2 dt}. \quad (2)$$

其中:  $T_s$  表示硅片在狭缝中的有效曝光时间, 例如曝光狭缝宽度为  $S_{slot}$ , 匀速段速度为  $\bar{v}$ , 则  $T_s = S_{slot}/\bar{v}$ . 迭代学习控制适用于步进扫描光刻系统, 可以通过 Die to Die 的学习控制对重复性运动轨迹进行学习, 以提高系统的跟踪性能.

### 1.2 迭代学习控制

迭代学习控制律主要用于对系统理想控制量的逼近, 频域下的表达形式为

$$u_{i+1} = Q(z)(u_i + L(z)e).$$

其中:  $u_{i+1}$  为第  $i+1$  步迭代的控制量;  $u_i$  为第  $i$  步迭代的控制量;  $e$  为误差;  $Q(z)$  为滤波器;  $L(z)$  为学习控制律. 如果第一步迭代的控制量  $u_1 = 0$ , 则对于开环学习控制律而言, 系统的初始误差将很大, 这是难以接受的, 而且由于存在非重复性扰动和噪声, 所以引入反馈是必要的. 将迭代学习控制与反馈控制相结合, 构成了闭环迭代学习控制结构, 本文采用参考轨迹整形的闭环迭代学习控制框架, 如图3所示. 图中,  $P$  为硅片台系统,  $K$  为反馈控制器,  $M$  为存储器,  $L$  和  $Q$  分别为  $L(z)$  和  $Q(z)$  的简化描述. 由补灵敏度  $T = PK(1 +$

$(PK)^{-1}, e = y - T(r + u_{i+1})$  得系统的收敛条件为  $\|Q(1 - LT)\|_{\infty} < 1$ .

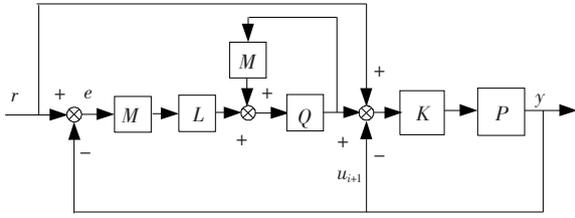


图 3 系统控制框图

当  $L = T^{-1}$  时,系统将在一步内收敛.然而由于系统的未建模动态难以描述,考虑到系统的鲁棒收敛性,引入滤波器  $Q$  是必要的.此时,误差将不会收敛到 0,得到的最终误差为

$$e_{\infty} = [1 - Q(1 - T \cdot L)]^{-1}(1 - Q)(y - T \cdot r).$$

为提高系统的收敛性能,非因果滤波器<sup>[13]</sup>被引入,构成了基于对象逆和非因果滤波器相结合的方法,这在离线运算中是可实现的.当系统存在不确定性时,基于对象的逆只能对系统低频段进行有效的描述.为提高系统对高频特性的学习能力,非因果的学习控制律<sup>[12]</sup>被引入,此时,学习控制律为

$$L = (\alpha + T^* T)^{-1} T^* \quad (3)$$

其中  $\alpha$  为可调节参数,  $T^*$  为系统  $T$  的伴随系统,它可以用于处理非最小相位系统.此时可以构成非因果学习律和因果滤波器相结合的方法.

进一步考察上述非因果迭代学习控制律.它们可以保证系统在有限时间段内的误差二范数收敛,然而这一性能指标不能直接体现扫描光刻机的性能(如式(1)和式(2)所示).应用上述全时间段内的学习控制虽然可以使系统在整个时间段内的范数性能得到改善,但可能使其局部(例如匀速段)性能恶化,这些性能衰减将影响扫描光刻机的曝光性能.下一节将围绕这一问题展开.

$$L = \begin{bmatrix} A - B(D^T D + \alpha)^{-1} D^T C & -B(D^T D + \alpha)^{-1} B^T & B(D^T D + \alpha)^{-1} B^T & B(D^T D + \alpha)^{-1} D^T \\ -C^T C + C^T D(D^T D + \alpha)^{-1} D^T C & -A^T + C^T D(D^T D + \alpha)^{-1} B^T & -C^T D(D^T D + \alpha)^{-1} B^T & -C^T D(D^T D + \alpha)^{-1} D^T \\ 0 & 0 & -A^T & -C^T \\ -(D^T D + \alpha)^{-1} D^T C & -(D^T D + \alpha)^{-1} B^T & (D^T D + \alpha)^{-1} B^T & (D^T D + \alpha)^{-1} D^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

从式(5)描述的非因果迭代学习控制律看,学习控制律存在不稳定的特征值,实施过程需要将  $L$  分为稳定和不稳定的部分,对稳定部分进行因果求解,对不稳定部分进行反因果求解,最终可以得到稳定的解.对上述学习控制律进行时域描述,非因果迭代学习控制律  $L$  将写成 Markov 矩阵表达形式

## 2 分段迭代学习控制

基于前一节中的设计框架,首先给出反馈控制器的设计,然后在非因果迭代学习控制律的基础上设计与参考轨迹相关的分段迭代学习控制律,并对其稳定性进行分析.

### 2.1 鲁棒反馈控制律设计

由于迭代学习控制是一种开环设计,它的缺点是系统的初始性能较差,设计反馈控制器是必要的.通过反馈控制器的设计可以保证系统在初始学习过程有较好的跟踪性能,而且对非重复性扰动具有一定的抑制作用.虽然反馈控制系统的设计带宽有限,但迭代学习控制可以有效提高系统的跟踪性能.本文采用回路成形法设计反馈控制器,使系统具备足够大的鲁棒稳定裕度,具体设计步骤参见文献[15-16].

### 2.2 非因果的迭代学习控制律

由于迭代学习控制律可以沿迭代轴进行离线运算,所以可以对系统施加非因果的迭代学习控制律.非因果迭代学习控制律既包含基于对象逆和非因果滤波器相结合的迭代学习控制律,也包含基于对象伪逆和因果滤波器的迭代学习控制律.下面围绕后者展开,给出基于伪逆的非因果学习律的描述.设闭环连续系统  $T$  (即补灵敏度)的数学描述为

$$T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $A, B, C, D$  为系统阵,则其伴随系统  $T^*$  为

$$T^* = \begin{bmatrix} -A^T & -C^T \\ B^T & D^T \end{bmatrix}$$

若系统  $T$  是稳定的,则伴随系统的极点是不稳定极点,可以通过文献[17]的方法得到非因果系统的稳定解.式(3)描述的非因果学习律进一步展开为

$$L_m = \begin{bmatrix} a_0 & a_{-1} & a_{-2} & \cdots & a_{-(N-1)} \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & \cdots & a_{-(N-2)} \\ a_2 & a_1 & a_0 & \cdots & a_{-(N-3)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N-1} & a_{N-2} & a_{N-3} & \cdots & a_0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

此时,学习控制律  $L_m$  是 Toeplitz 矩阵表达形

式,矩阵中的系数  $a_i$  与闭环控制系统  $T$  的脉冲响应有关,矩阵维数  $N$  与扫描周期有关.对于稳定非因果学习律的实现,其沿正时间轴和负时间轴的脉冲响应都是收敛的.通过式(6)的表达形式容易看出学习控制律的非因果学习特点,即当前迭代周期  $t_k$  时刻的控制量与前一迭代周期  $t_k$  时刻前后的误差都有关系.

### 2.3 分段迭代学习控制

非因果迭代学习控制律使系统对跟踪性能的动态变化有“预知”作用,可以得到更好的收敛性能.若系统对前一个迭代周期的完整时间段内的误差进行学习,则如图2所示,在当前迭代周期的  $t_0, t_2, t_3, t_5$  时刻前后都会发生剧烈的变化.上述几个时刻是加速度变化最剧烈的时刻,是跟踪误差变化最大的部分.在  $t_0$  和  $t_3$  时刻,学习控制中的因果部分起主要作用,结合对稳定时间段残留误差的学习可以提高系统的跟踪性能,减小稳定时间.而  $t_2, t_5$  时刻的学习作用与  $t_0, t_3$  时刻是对称的,此时学习控制中的非因果部分起主要作用.由于系统的反馈作用,在  $t_2, t_5$  时刻以前的匀速阶段,即  $t_1 \sim t_2$  和  $t_4 \sim t_5$  段,跟踪误差已达到曝光段所需要的误差范围内,所以在这些区间内,不期望发生对减速过程跟踪误差的非因果学习控制作用.因此引入分段迭代学习控制律,将系统的学习控制作用分为三段,第 I 段为  $0 \sim t_2$  时刻,第 II 段为  $t_2 \sim t_5$  时刻,第 III 段为  $t_5 \sim 0.6$  s 时刻.分段迭代学习控制律的表达形式为

$$L_1 = L_1^1 + L_1^2 + L_1^3 = W_1 \cdot L_m \cdot W_1 + W_2 \cdot L_m \cdot W_2 + W_3 \cdot L_m \cdot W_3.$$

其中  $W_1, W_2, W_3$  分别为

$$W_1 = \begin{bmatrix} I_{n_1 \times n_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_{n_2 \times n_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{n_3 \times n_3} \end{bmatrix}.$$

上述加权阵中  $n_1, n_2, n_3$  与分段时间值有关.

下面将对上述学习控制律的收敛性进行分析,在此之前先给出如下引理.

**引理 1** 频域下迭代学习控制律  $L(z)$  使迭代学习控制系统收敛,则有限时间段内迭代学习控制律  $L_m$  使系统收敛.

上述引理可以用于分析分段迭代学习控制律的收敛性.以  $L_1^1$  为例,若不考虑分段因素影响,容易得知频域下描述的学习律  $L(z)$  使系统收敛,则

$L_1^1$  也使系统收敛.加入低通滤波器  $Q$  不会影响系统的收敛性分析,因此当忽略滤波器而考虑分段影响时,可以得到分段迭代学习控制律的收敛性条件,如定理 1 所述.

**定理 1** 对线性系统而言,若迭代学习控制律  $L$  使系统收敛,则分段迭代学习控制律  $L_1$  也使系统收敛.

**证明** 若线性系统描述为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \cdot u(k); \\ y(k) = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}(k) + \mathbf{D} \cdot u(k). \end{cases}$$

式中  $\mathbf{x}$  为状态变量,  $u$  为控制输入,  $y$  为系统输出,其他变量同式(4).

按照图2的分段情况,在第 I 段内,由引理 1 可知,迭代学习控制系统是收敛的.在  $t_2$  时刻,系统误差不为 0,因此在第 II 段,迭代控制系统等效为含初始误差的系统,即  $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \neq 0$ ,则由  $e_i = r - y_i$  和  $y_i = T \cdot u_i + y_0$  得到系统在这一时间段内有如下关系

$$u_{i+1} = u_i + L \cdot [r - (T \cdot u_i + y_0)] = (1 - L \cdot T)u_i + L(r - y_0).$$

由于  $x_0$  是有界的,闭环系统  $T$  是稳定的,则系统收敛的条件是

$$\|1 - L \cdot T\|_{\infty} < 1. \quad (7)$$

当系统收敛时,  $u_{\infty} = (L \cdot T)^{-1}L \cdot (r - y_0)$ .

同理,可以得到,第 III 段迭代学习控制系统的收敛条件同式(7).

由引理 1 和线性系统的性质可知,若全时间段内的迭代学习控制律使系统收敛,则分段迭代学习控制律  $L_1$  也使系统收敛.

实质上,有限时间段内的迭代学习控制律是对频域内迭代学习控制律的有效截短.对于稳定的学习控制律而言,其脉冲响应在有限时间段内收敛到很小的值,这意味着具有 Markov 矩阵表达形式的迭代学习控制律在远离主对角线的元素都很小.而分段迭代学习控制律是对有效时间段内的迭代学习控制的截短,这样的处理不仅不会影响系统的收敛性,而且会改善系统在有效时间段的性能.下面将通过仿真加以验证.

## 3 仿真研究

利用直线运动平台来模拟扫描光刻硅片台在扫描方向的运动,并对上述方法加以验证.首先通过实验得到系统的开环对象模型,给定不同的驱动电流输入,得到系统的实际位置输出,利用输入输出数据得到系统的频率特性.如图4所示,实线是通过实验得到的实际系统频率特性,虚线是拟

合得到的系统频率特性. 根据拟合曲线得到系统模型的离散表达形式为

$$P(z) = \frac{1.117(z + 0.08818)(z^2 - 1.874z + 0.9778)}{10^7(z - 1)^2(z^2 - 1.781z + 0.9273)}$$

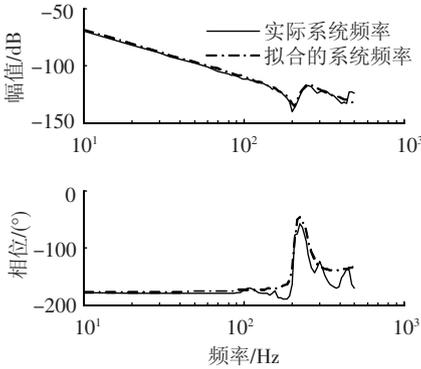


图 4 对象频率特性

通过回路成形法设计的反馈控制器的离散表达形式为

$$K = [314\ 605.9(z^2 - 1.952z + 0.9529)(z^2 - 1.784z + 0.9335)] / [(z - 1)(z - 0.7698)(z - 1.805z + 0.9446)]$$

此时反映系统允许摄动水平的因子  $\gamma = 0.319$ , 符合回路成形法的设计要求. 采用文献 [18] 中定理 1 的方法对迭代学习控制系统的稳定性进行判断, 为了不分散分段学习的主要研究目的, 此处未考虑系统的摄动. 图 5 反映出系统在各个频段的奇异值都小于 1, 满足系统的收敛性要求. 由定理 1 可知, 分段迭代学习控制系统也是收敛的. 对迭代学习控制系统的迭代域性能进行考察, 将全时间段内的迭代学习控制和分段迭代学习控制分别应用于上述系统, 参考轨迹如图 2 所示, 跟踪误差的二范数特性如图 6 所示, 系统满足单调收敛特性, 两种方法的整体收敛效果相当. 然而进一步考察时间域内的误差特性, 如图 7 ~ 图 8 所示, 分别给出了第 1、3、5 个扫描周期的误差曲线, 从中可以发现在扫描光刻系统所关心的匀速曝光段, 例如在 0.06 s ~ 0.155 s, 分段迭代学习控制的性能更好. 与之对应的是, 在匀速后的减速过程内, 全时间段迭代学习控制性能更好, 但是这并不会影响系统的扫描曝光性能.

进一步将系统的性能用式 (1)、式 (2) 的  $R_{MA}$  和  $R_{MSD}$  来描述, 如图 9 ~ 图 10 所示, 分别给出了两种方法在第 15 个迭代周期得到的  $R_{MA}$  和  $R_{MSD}$  特性. 系统扫描曝光满足的条件为:  $R_{MA}$  在 -2 ~ 2 nm 之间, 且  $R_{MSD}$  小于 5 nm. 此时全时间段迭代学习控制允许的曝光时间段为 0.058 ~ 0.147 s, 0.358 ~ 0.447 s, 分段迭代学习控制允许的曝光时间段为 0.058 ~ 0.156 s, 0.358 ~ 0.457 s, 后

者比前者长约 10 ms. 这说明采用分段迭代学习控制的曝光效率更高, 即在相同的曝光要求下, 有效曝光段所占的比例更大, 因此所需的整体曝光时间更短. 从曝光段内的性能看, 分段迭代学习控制的效果优于全时间段迭代学习控制.

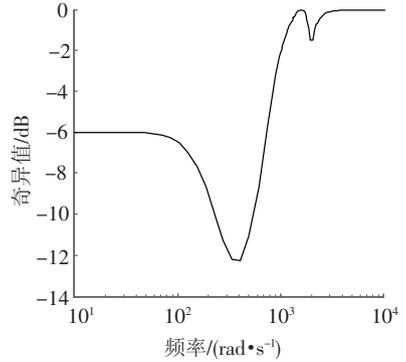


图 5 学习控制系统的收敛性

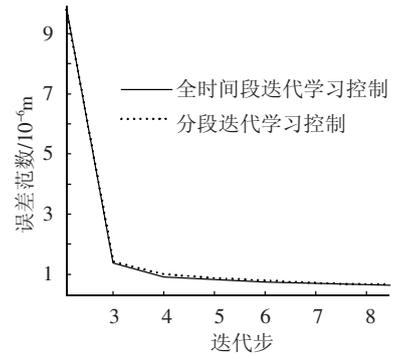


图 6 沿迭代轴的误差二范数

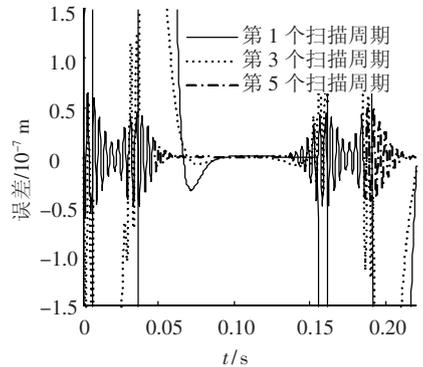


图 7 全时间段迭代学习控制

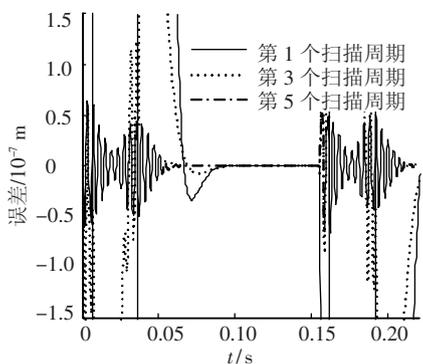
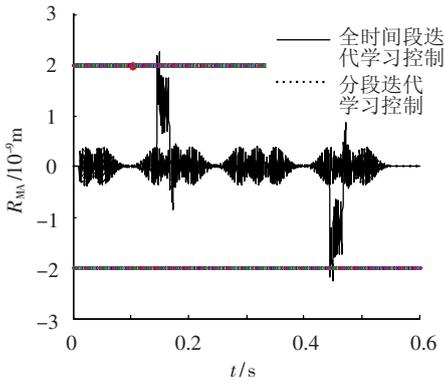
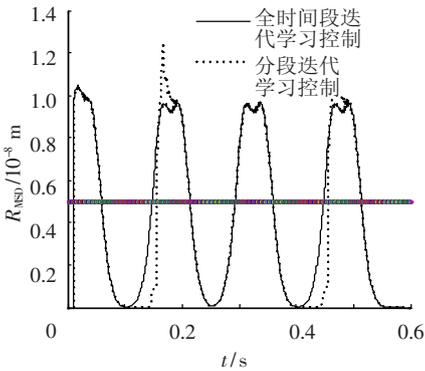


图 8 分段迭代学习控制

图9 第15步迭代的 $R_{MA}$ 指标图10 第15步迭代的 $R_{MSD}$ 指标

## 4 结论

本文根据扫描光刻系统的特点提出了 Die to Die 的分段迭代学习控制. 结合步进扫描光刻系统所关心的指标, 对一类非因果迭代学习控制律进行分段学习的改进, 得到了一种按轨迹规划的分段迭代学习控制律. 该方法有效地改善了传统非因果迭代学习控制律在匀速段的性能, 有利于提高步进扫描光刻系统的曝光性能, 具备广泛应用的潜力.

## 参考文献

[1] BUTLER H. Position control in lithographic equipment [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] TAYEBI A, ABDULS, ZAREMBA M B, *et al.* Robust iterative learning control design: application to a robot manipulator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2008, 13(5): 608-613.

[4] TAYEBI A. Adaptive iterative learning control for robot manipulators [J]. Automatica, 2004, 40(7): 1195-1203.

[5] 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.

[6] GORINEVSKY D. Loop shaping for iterative control for batch processes [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(6): 55-65.

[7] BUTCHER M, KARIMI A. Linear parameter-varying iterative learning control with application to a linear motor system [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(3): 412-420.

[8] BRISTOW D A, ALLEYNE A G. A high precision motion control system with application to microscale robotic deposition [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(6): 1008-1020.

[9] de ROOVER D, BOSGRA 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.

[10] van OOSTEN C L, BOSGRA O H, DIJKSTRA B G. Reducing residual vibrations through iterative learning control with application to a wafer stage [C]// Proceedings of the 2004 American Control Conference. Piscataway: IEEE, 2004: 5151-5155.

[11] 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.

[12] GHOSH J, PADEN B. A pseudoinverse-based iterative learning control [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(5): 831-837.

[13] 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): 1-14.

[14] MISHRA S, TOMIZUKA M. Projection-based iterative learning control for wafer scanner systems [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2009, 14(3): 388-393.

[15] 何朕, 姜晓明, 孟范伟, 等.  $H_\infty$  回路成形中的  $\mu$  综合法 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 347-352.

[16] 王广雄, 何朕. 应用  $H_\infty$  控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2010.

[17] DEVASIA S, CHEN D, PADEN B. Nonlinear inversion-based output tracking [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1996, 41(7): 930-942.

[18] 姜晓明, 王岩, 陈兴林. 鲁棒迭代学习控制律的优化设计方法 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(3): 110-116.