

特定分布硅片曝光场的复合 S 型轨迹规划算法研究^{*}李 越¹ 李兰兰¹ 胡 松² 赵立新²

(1. 西安工业大学光电工程学院 西安 710021; 2. 中国科学院光电技术研究所 成都 610209)

摘 要:为减小光刻机硅片台在步进扫描运动中的冲击和振荡,研究了一种 S 型轨迹规划算法。采用 S 型轨迹规划方法中的复合法,引入可调节的权重系数,兼顾时间和冲击两个因素,分别对步进运动、扫描运动加速段和扫描运动减速段进行研究。在对步进运动和扫描运动进行仿真分析的基础上,针对一种特定分布的曝光场进行“步进+扫描”综合仿真。仿真结果表明,相较于传统 3 阶轨迹规划,所研究的 S 型轨迹规划的加速度曲线更加平滑,不易激励柔性环节产生残余振动,可有效地减小冲击和振荡,保证光刻机硅片台在扫描曝光过程中的稳定性。

关键词:光刻机硅片台;轨迹规划;S 曲线

中图分类号: TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Research on S-curve trajectory planning algorithm for wafer exposure field with specific distribution

Li Yue¹ Li Lanlan¹ Hu Song² Zhao Lixin²

(1. School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: To reduce the shock and oscillation of the wafer stage of lithography during step and scan movement, an algorithm of S-curve trajectory was researched in this paper. The compound method of the S-curve trajectory planning method which introduced adjustable weighting factors to consider both time and shock factors were used to research the step movement, acceleration of scan movement, and deceleration of scan movement. Based on the simulation of step and scan movement, a simulation of "step + scan" was conducted for a specific distribution exposure field. The simulation results showed that compared with the conventional 3rd order trajectory planning, the acceleration profile of the researched S-curve trajectory was smoother and less likely to excite residual vibration in the flexible link, which could effectively reduce shocks and oscillations and ensure the stability of wafer stage of lithography during scanning.

Keywords: wafer stage; trajectory planning; S-curve

0 引 言

步进扫描投影光刻机解决了大曝光场与高分辨率之间的矛盾,将光刻机的发展带入了一个崭新的阶段,逐渐成为集成电路制造的主力机型,目前最先进的 EUV 光刻机采用的同样是步进扫描投影的曝光方式^[1]。步进扫描投影光刻机在 7 nm 技术节点集成电路制造中发挥着关键作用,并将支撑集成电路制造向 5 nm 及以下技术节点迈进^[2]。在步进扫描投影光刻机的工作过程中,硅片台要反复进行进给、加速、步进、扫描、减速等不同运动,为保证整

机生产率,对硅片台加速度、步进速度和扫描速度有很高的要求,同时要保证硅片台运动轨迹的平滑和稳定,因此,需要对硅片台进行轨迹规划算法研究^[3]。

常见的运动轨迹规划算法主要有两种,一种为梯形加速度轨迹规划算法,另一种为 S 型加速度轨迹规划算法。梯形加速度轨迹规划算法具有计算量小、轨迹简单、易于实现等优点,但其加速度曲线不够光滑,存在较大冲击和振荡。S 型加速度轨迹规划算法的加速度曲线是连续的,因而在加减速过程中对系统的冲击小,不会激起系统的冲击和震荡^[4]。目前常用的 S 型轨迹规划方法是^[5]确定一

收稿日期:2022-12-01

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61704134)项目资助

个设计准则,给定边界条件,在满足边界条件的基础下,找到一个使准则达到最优的解。常见的设计准则有时间最优、最小力、最小能量、最小冲击和复合法^[6-7]。文献[8]研究了3阶轨迹规划算法,并提高了算法的执行速度,但3阶轨迹执行过程中加速度曲线不连续,存在较大冲击。文献[9]对扫描运动的加速段进行了研究,提出了一种时间最优和冲击最小的5阶S型曲线,但未对扫描运动实现全过程分析。文献[10]对步进运动和扫描运动进行了研究,针对步进运动设计了兼顾时间和冲击的S型轨迹,但其针对扫描运动,仍采用传统5阶轨迹规划算法,通过将加速度的3阶导数分为31段,逐段进行积分,最终得到扫描运动轨迹曲线,此举计算量过大,时间成本很高。近年来,国内外的研究学者尝试使用复杂函数构造S型曲线轨迹,文献[11]利用双曲正切函数、文献[12]利用余弦函数、文献[13]利用贝塞尔函数,但这些算法的实现难度较大,目前仅处于理论研究阶段。此外,在精密运动控制领域,智能算法已被应用在轨迹规划算法研究中^[14-15],有望进一步提高轨迹执行效率。以上文献的研究内容,大多基于单个曝光场进行分析,鲜有研究步进扫描投影光刻机实际工作中多个曝光场的情况。

本文针对步进扫描投影光刻机实际工作过程中的特点,采用S型轨迹规划方法中的复合法,引入可调节的权重系数,兼顾时间和冲击两个因素,分别对步进运动、扫描运动加速段和扫描运动减速段进行研究。对步进运动和扫描运动进行仿真分析,并以此为基础,针对一种特定分布的曝光场进行“步进+扫描”综合仿真。

1 硅片台步进扫描运动

步进扫描投影光刻机的工作原理示意图如图1所示,场内扫描和场间步进路径示意图如图2所示。步进扫描投影光刻机在扫描曝光的过程中,曝光狭缝位置保持不变,在曝光当前场时,承载硅片的硅片台和承载掩模的掩模台反向同步运动,实现整个场的扫描曝光。当前曝光场曝光结束后,硅片台步进到下一个曝光场重复扫描曝光过

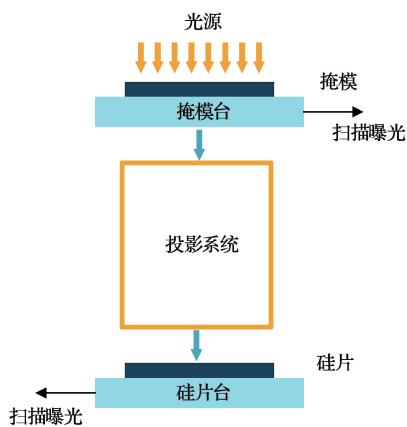


图1 步进扫描投影光刻机工作原理

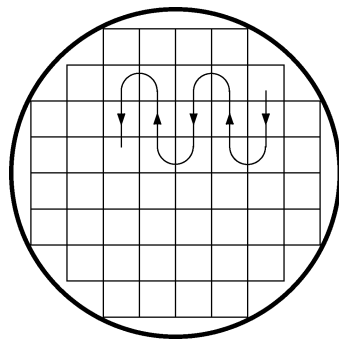


图2 硅片台的场内扫描和场间步进路径

程,直至完成整个硅片的曝光。

步进扫描投影光刻机工作时,采用逐场曝光的方式,硅片台的运动方式有步进运动和扫描运动两种,如图3所示。其中,步进运动负责硅片台在硅片表面不同曝光场之间的切换,扫描运动负责芯片在扫描曝光过程中硅片台的移动。步进运动具有极高的位置时间精度,而扫描运动除了这点要求外,同时还要求要保证扫描曝光阶段运动的稳定性,两者都要求运动过程平滑而稳定。步进运动和扫描运动两者相互配合,共同完成硅片表面多个曝光场的扫描曝光加工。那么步进扫描投影光刻机硅片台的轨迹规划可简化为硅片台步进运动的轨迹规划和硅片台扫描运动的轨迹规划。

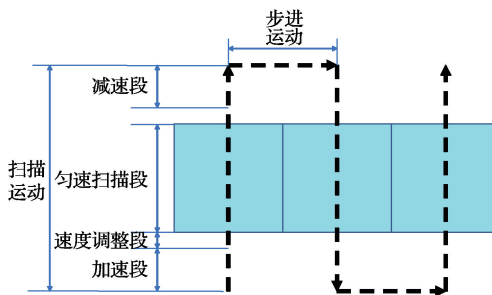


图3 硅片台的步进运动和扫描运动过程

2 步进运动轨迹规划

2.1 步进运动轨迹规划算法

在步进扫描投影光刻机实际工作的过程中,步进运动负责硅片台在硅片表面不同曝光场之间的切换,在保证不超系统动力学约束的前提下,要求步进运动执行时间较短且轨迹平滑。本文兼顾步进运动所用时间和步进运动中的冲击,采用S型轨迹规划方法中的复合法,参考文献[7,10]的规划方法,对步进运动轨迹进行规划研究。确定设计准则 J 为:

$$J = \int_0^{T_p} \left(1 + \frac{1}{2} q_1 \ddot{s}^2 \right) dt \quad (1)$$

式中: T_p 为步进运动所用时间; q_1 为权重系数; $s(t)$ 为步进运动轨迹。使泛函 $J[s(t)]$ 取得极值,并且满足边界条

件 $s(0) = 0, \dot{s}(0) = 0, \ddot{s}(0) = 0, s(T_p) = l_p, \dot{s}(T_p) = 0, \ddot{s}(T_p) = 0$ 。其中 l_p 为步进运动位移, T_p 自由。

泛函 $J[s(t)]$ 的标量函数 F 为:

$$F = 1 + \frac{1}{2} q_1 \ddot{s}^2 \quad (2)$$

根据欧拉—泊松方程可知,若曲线 $s = s(t)$ 为极值曲线,则必满足微分方程:

$$F_s - \frac{d}{dt} F_{\dot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} - \frac{d^3}{dt^3} F_{\ddot{s}} = 0 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$\frac{d^6 s}{dt^6} = 0 \quad (4)$$

则 $s(t)$ 为:

$$s(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f \quad (5)$$

式中: a, b, c, d, e, f 为待求参数。将边界条件代入式(5),得:

$$\begin{cases} a = \frac{6l_p}{T_p^5}, b = -\frac{15l_p}{T_p^4}, c = \frac{10l_p}{T_p^3} \\ d = e = f = 0 \end{cases} \quad (6)$$

当泛函 $J[s(t)]$ 取极值时,应有一阶变分 $\delta J = 0$,由于泛函 $J[s(t)]$ 的积分限未定,引入泛函的横截条件,有:

$$\begin{aligned} \delta J = & \left[F - \dot{s} \left(F_{\dot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} \left(F_{\ddot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} F_{\ddot{s}} \right] \Big|_{t=T_p} \delta T_p + \left[F_{\dot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} \right] \Big|_{t=T_p} \delta s(T_p) + \\ & \left[F_{\ddot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} \right] \Big|_{t=T_p} \delta \dot{s}(T_p) + \ddot{s} \Big|_{t=T_p} \delta \ddot{s}(T_p) = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $s(T_p), \dot{s}(T_p), \ddot{s}(T_p)$ 均为常数,则 $\delta s(T_p) = \dot{s}(T_p) = \delta \dot{s}(T_p) = 0$ 。则式(7)化简为:

$$F - \dot{s} \left(F_{\dot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} \left(F_{\ddot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} F_{\ddot{s}} \Big|_{t=T_p} = 0 \quad (8)$$

代入边界条件化简可得:

$$\ddot{s}(T_p) = \sqrt{\frac{2}{q_1}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5),化简可得:

$$T_p = \sqrt[3]{30l_p \sqrt{2q_1}} \quad (10)$$

则步进运动轨迹表达式为:

$$s(t) = \frac{6l_p}{T_p^5} t^5 - \frac{15l_p}{T_p^4} t^4 + \frac{10l_p}{T_p^3} t^3 \quad (11)$$

在 l_p 固定的情况下, q_1 越大,轨迹更加平滑,但完成轨迹所用时间会变大, q_1 越小,完成轨迹所用时间会变小,但冲击会增大。

2.2 步进运动仿真分析

设定步进运动中加加速度最大值 $j_{\max} = 1\,000 \text{ m/s}^3$, 加速度最大值 $a_{\max} = 6 \text{ m/s}^2$, 速度最大值 $v_{\max} = 0.6 \text{ m/s}$, 步进运动位移 $l_p = 0.033 \text{ m}$ 。通过步进运动权重系数 q_1 的大小,可改变完成步进运动所花费的时间, q_1 越大,轨迹更加平滑,但完成轨迹所用时间会变大, q_1 越小,完成轨迹所用时间会变小,但冲击会增大,速度、加速度和加加速度也有可能超过系统约束。图4所示为不同权重系数 q_1 对应的S型曲线和3阶轨迹曲线。当 $q_1 = 0.000\,018$ 时,S型曲线在满足系统动力学约束的条件下,用时 $0.182\,1 \text{ s}$,3阶轨迹曲线用时 $0.192\,1 \text{ s}$,用时减少了 5.73% ,并且加速段曲线和加加速度曲线更加平滑,整体冲击更小。

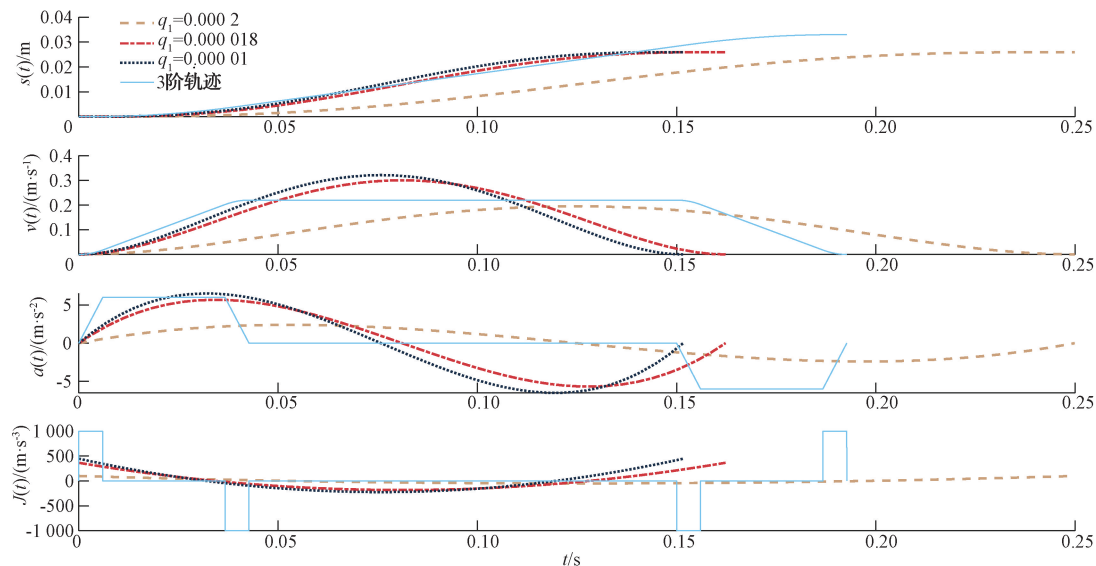


图4 步进运动仿真分析

3 扫描运动轨迹规划

在步进扫描投影光刻机实际工作过程中,扫描运动负责芯片扫描曝光期间硅片台的移动。保证系统动力学约束的前提下,不但要求扫描运动轨迹具有极高的位置时间精度,还要求要保证扫描曝光阶段运动的稳定性。

扫描运动的速度轨迹含有3个阶段,分别是加速段、匀速扫描段、减速段,运动特点可知其整体应具有对称性。本文将扫描运动3个阶段分开处理,针对加速段和减速段分别进行轨迹规划研究。

3.1 加速段轨迹规划算法

兼顾加速段所用时间和加速段的冲击,采用S型轨迹规划方法中的复合法,对扫描运动加速段轨迹进行规划研究。设计准则为:

$$J = \int_0^{T_{s1}} \left(1 + \frac{1}{2} q_2 \ddot{s}^2\right) dt \quad (12)$$

式中: T_{s1} 为扫描运动加速段所用时间; q_2 为扫描运动加速段权重系数; $s(t)$ 为扫描运动加速段轨迹。使泛函 $J[s(t)]$ 取得极值,并且满足边界条件 $s(0) = 0, \dot{s}(0) = 0, \ddot{s}(0) = 0, s(T_{s1}) = l_s, \dot{s}(T_{s1}) = v_s, \ddot{s}(T_p) = 0$ 。其中 l_s 为扫描运动加速段位移, T_{s1} 自由。

泛函 $J[s(t)]$ 的标量函数 F 为:

$$F = 1 + \frac{1}{2} q_2 \ddot{s}^2 \quad (13)$$

根据欧拉—泊松方程可知,若曲线 $s = s(t)$ 为极值曲线,则必满足微分方程:

$$F_s - \frac{d}{dt} F_{\dot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} - \frac{d^3}{dt^3} F_{\ddot{s}} = 0 \quad (14)$$

将式(13)代入式(14)可得:

$$\frac{d^6 s}{dt^6} = 0 \quad (15)$$

则 $s(t)$ 为:

$$s(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f \quad (16)$$

式中: a, b, c, d, e, f 为待求参数。

将边界条件代入式(16),得:

$$\begin{cases} a = \frac{6l_s - 3v_s T_{s1}}{T_{s1}^5} \\ b = -\frac{15l_p - 7v_s T_{s1}}{T_{s1}^4} \\ c = \frac{10l_p - 4v_s T_{s1}}{T_{s1}^3} \\ d = e = f = 0 \end{cases} \quad (17)$$

当泛函 $J[s(t)]$ 取极值时,应有一阶变分 $\delta J = 0$,由于泛函 $J[s(t)]$ 的积分限 T_{s1} 未定,则引入泛函的横截条件,有:

$$\delta J = \left[F - \dot{s} \left(F_{\dot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} \left(F_{\ddot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} F_{\ddot{s}} \right] \Big|_{t=T_p} \delta T_{s1} + \left[F_{\dot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} \right] \Big|_{t=T_p} \delta s(T_{s1}) +$$

$$\left[F_{\ddot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} \right] \Big|_{t=T_p} \delta \dot{s}(T_{s1}) + \ddot{s} \Big|_{t=T_p} \delta \ddot{s}(T_{s1}) = 0 \quad (18)$$

由于 $s(T_{s1}), \dot{s}(T_{s1}), \ddot{s}(T_{s1})$ 均为常数,则 $\delta s(T_{s1}) = \delta \dot{s}(T_{s1}) = \delta \ddot{s}(T_{s1}) = 0$ 。则式(6)化简为:

$$F - \dot{s} \left(F_{\dot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} \left(F_{\ddot{s}} - \frac{d}{dt} F_{\ddot{s}} \right) - \ddot{s} F_{\ddot{s}} \Big|_{t=T_p} = 0 \quad (19)$$

将边界条件代入式(19)化简得:

$$\ddot{s}(T_{s1}) = \sqrt{\frac{2(1 - 120aq_2v_s)}{q_2}} \quad (20)$$

将式(20)代入式(16),得:

$$60l_s - 36v_s T_{s1} = \sqrt{\frac{2(1 - 120aq_2v_s)}{q_2}} T_{s1}^3 \quad (21)$$

化简得:

$$T_{s1}^6 - 288q_2v_s^2T_{s1}^2 + 1440q_2v_sl_sT_{s1} - 1800q_2v_sl_s = 0 \quad (22)$$

其中, T_{s1} 由式(22)确定,且为该一元六次方程根中的最小正根。则扫描运动加速段表达式为:

$$s(t) = \frac{6l_s - 3v_s T_{s1}}{T_{s1}^5} t^5 - \frac{15l_s - 7v_s T_{s1}}{T_{s1}^4} t^4 + \frac{10l_s - 4v_s T_{s1}}{T_{s1}^3} t^3 \quad (23)$$

在 l_s 和 v_s 固定的情况下, q_2 越大,轨迹更加平滑,但完成轨迹所用时间会变大, q_2 越小,完成轨迹所用时间会变小,但冲击会增大。

3.2 减速段轨迹规划算法

减速段轨迹规划选择和加速段相同的方法,设定设计准则为:

$$J = \int_0^{T_{s2}} \left(1 + \frac{1}{2} q_3 \ddot{s}^2\right) dt \quad (24)$$

式中: T_{s2} 为扫描运动减速段所用时间; q_3 为扫描运动减速段权重系数; $s(t)$ 为扫描运动减速段轨迹。使泛函 $J[s(t)]$ 取得极值,并且满足边界条件 $s(0) = 0, \dot{s}(0) = v_s, \ddot{s}(0) = 0, s(T_{s2}) = l_s, \dot{s}(T_{s2}) = 0, \ddot{s}(T_p) = 0$ 。其中 l_s 为扫描运动减速段位移, T_{s2} 自由。

泛函 $J[s(t)]$ 的标量函数 F 为:

$$F = 1 + \frac{1}{2} q_3 \ddot{s}^2 \quad (25)$$

根据欧拉—泊松方程可知,若曲线 $s = s(t)$ 为极值曲线,则必满足微分方程:

$$F_s - \frac{d}{dt} F_{\dot{s}} + \frac{d^2}{dt^2} F_{\ddot{s}} - \frac{d^3}{dt^3} F_{\ddot{s}} = 0 \quad (26)$$

将式(2)代入式(3)可得:

$$\frac{d^6 s}{dt^6} = 0 \quad (27)$$

则 $s(t)$ 为:

$$s(t) = at^5 + bt^4 + ct^3 + dt^2 + et + f \quad (28)$$

式中: a, b, c, d, e, f 为待求参数。

将边界条件代入式(16),得:

$$\begin{cases} a = \frac{6l_s - 3v_s T_{s2}}{T_{s2}^5} \\ b = -\frac{15l_p - 8v_s T_{s2}}{T_{s2}^4} \\ c = \frac{10l_p - 6v_s T_{s2}}{T_{s2}^3} \\ d = f = 0 \\ e = v_s \end{cases} \quad (29)$$

因扫描运动轨迹具有对称性,则取 $q_3 = q_2, T_{s2} = T_{s1}$ 。

扫描运动减速段表达式为:

$$s(t) = \frac{6l_s - 3v_s T_{s1}}{T_{s2}^5} t^5 - \frac{15l_s - 8v_s T_{s1}}{T_{s2}^4} t^4 + \frac{10l_s - 6v_s T_{s1}}{T_{s2}^3} t^3 + v_s t \quad (30)$$

3.3 扫描运动仿真分析

设定扫描运动中加加速度最大值 $j_{\max} = 1\,000\text{ m/s}^3$, 加速度最大值 $a_{\max} = 8\text{ m/s}^2$, 速度最大值 $v_{\max} = 0.48\text{ m/s}$, 扫描速度 $v_s = 0.12\text{ m/s}$, 扫描运动加减速段位移 $l_s = 0.002\,07\text{ m}$ 。通过调节扫描运动中权重系数 q_2 和权重系数 q_3 的大小,可改变完成扫描运动所花费的时间,权重系数越大,轨迹更加平滑,但完成轨迹所用时间会变大,权重系数越小,完成轨迹所用时间会变小,但冲击会增大,速度、加速度和加加速度也有可能超过系统约束。图5所示为权重系数 q_2 取不同值的扫描运动加速段轨迹曲线,图6所示为权重系数 q_3 取不同值的扫描运动减速段轨迹曲线。

图7所示为设定权重系数 $q_2 = q_3 = 0.000\,002$ 时,扫描运动中S型曲线和3阶轨迹曲线。在满足系统动力学

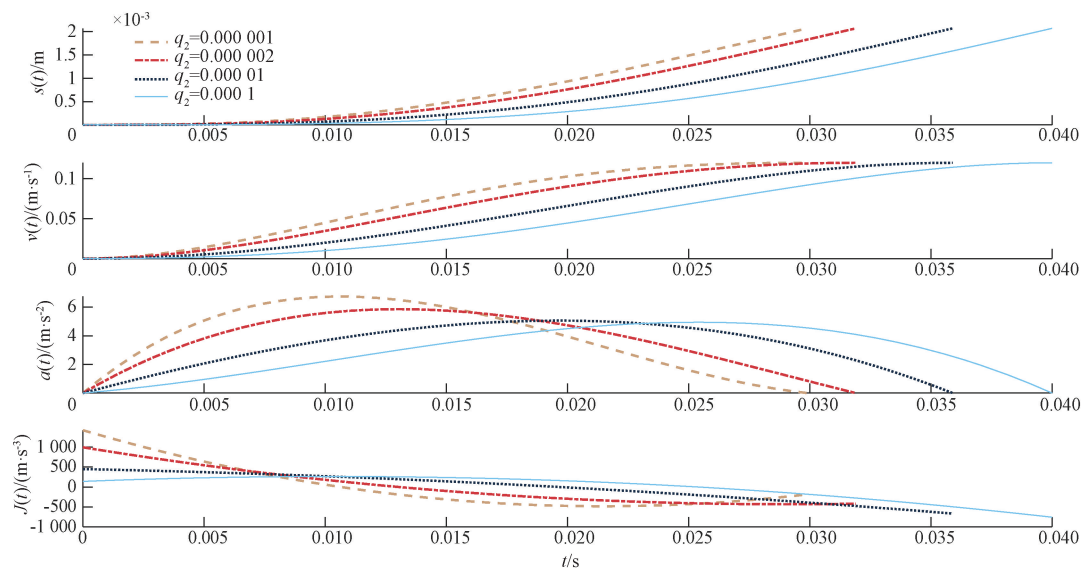


图5 扫描运动加速段仿真分析

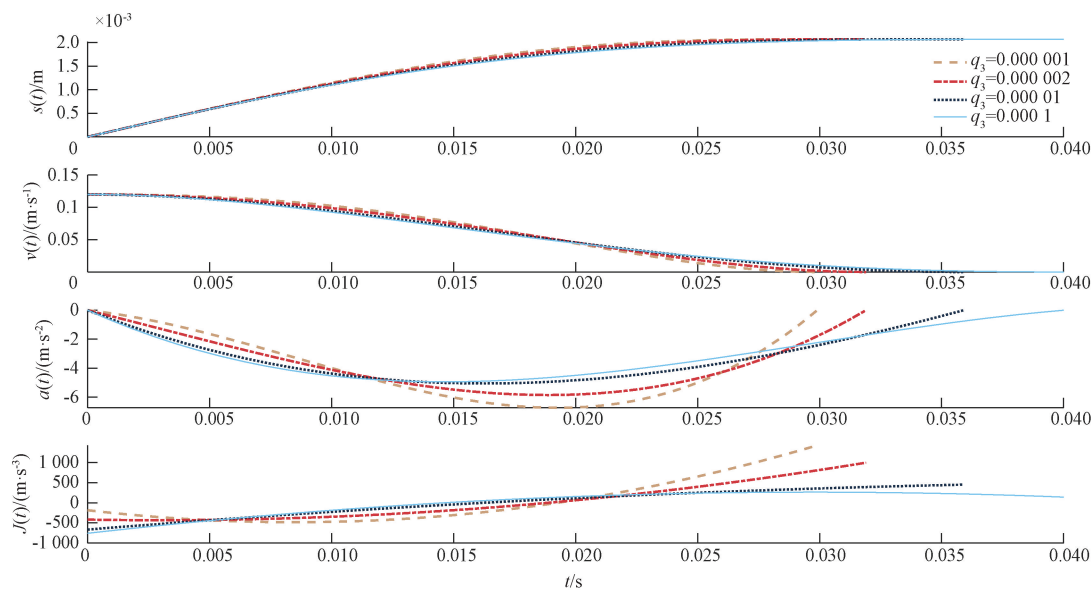


图6 扫描运动减速段仿真分析

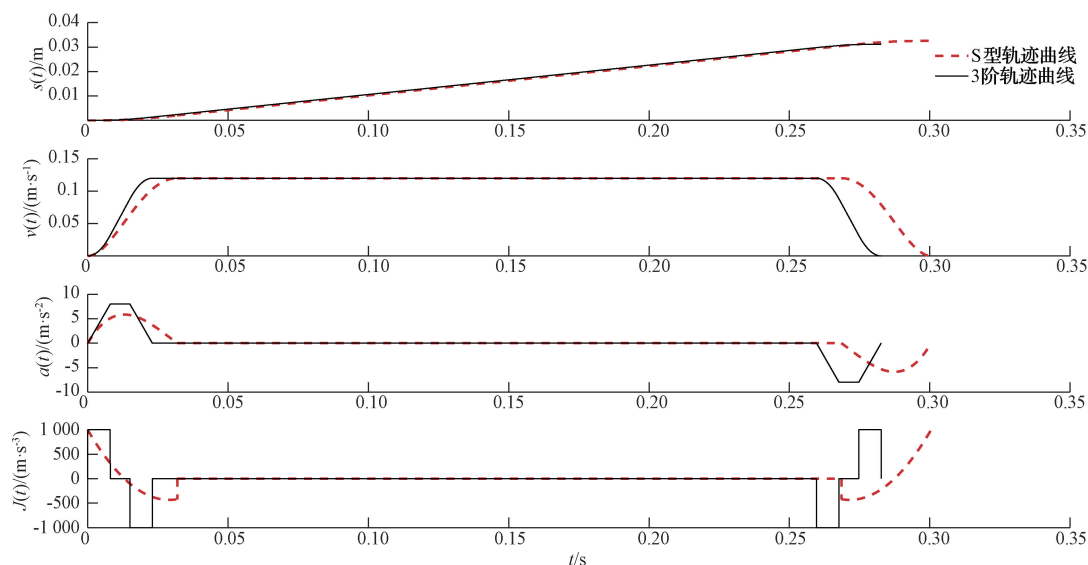


图7 扫描运动仿真分析

约束的条件下,S型曲线用时 0.0319 s ,3阶轨迹曲线用时 0.02905 s ,用时增加 6.12% ,但扫描运动加减速过程中加速度曲线全程无间断点,较大幅度减小冲击,保证扫描曝光过程中的平稳性。

4 特定曝光场仿真分析

ASML公司的TWINSCAN NXE:3600D光刻机是目前性能领先的EUV光刻机,支持 3 nm 工艺节点的集成电路制造,可曝光直径 300 mm 晶圆,最大曝光场尺寸为 $26\text{ mm}\times 33\text{ mm}$ ^[16]。本文参考其实际工作情况,在步进运

动仿真和扫描运动仿真的基础上,针对一种特定分布的硅片曝光场进行“步进+扫描”综合仿真,曝光场分布如图8所示^[17]。单个曝光场长 33 mm ,宽 26 mm ,完成全部芯片的扫描曝光(U1~U4),需要4次扫描运动(①,③,⑤,⑦)和3次步进移动(②,④,⑥),步进运动的移动方向和扫描运动的移动方向可能是相同的、相反的、垂直的或对角线的,这包括了步进扫描投影光刻机硅片台在实际工作中的所有可能的运动情况,并且扫描运动在步进运动之后,这是符合实际的。此外,设定第1次扫描运动开始位置为0,设定X、Y正方向如图8所示。

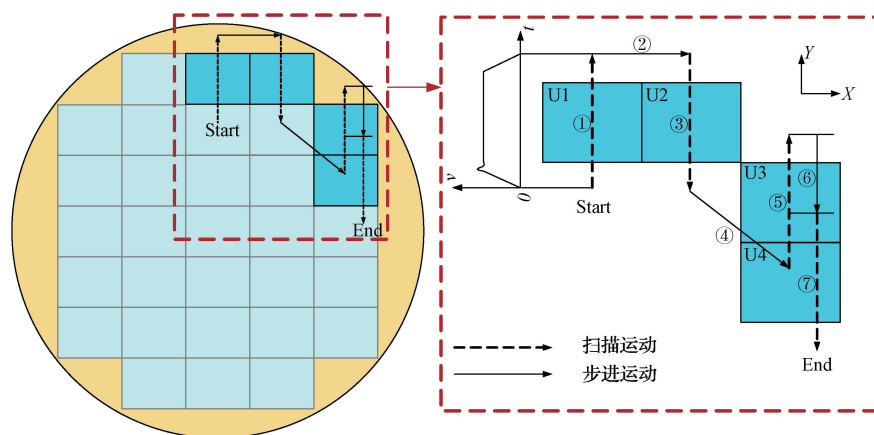


图8 一种特定硅片曝光场的分布

设定系统动力学约束如下,步进运动中加加速度最大值 $j_{\max}=1000\text{ m/s}^3$,加速度最大值 $a_{\max}=6\text{ m/s}^2$,速度最大值 $v_{\max}=0.6\text{ m/s}$,X方向步进运动位移 $l_p=0.033\text{ m}$,Y方向步进运动位移 $l_p=0.026\text{ m}$ 。扫描运动中加加速度最大值 $j_{\max}=1000\text{ m/s}^3$,加速度最大值 $a_{\max}=8\text{ m/s}^2$,速度最大值 $v_{\max}=0.48\text{ m/s}$,扫描运动速度 $v_s=0.12\text{ m/s}$,

速度调整时间 $t_s=0.01\text{ s}$,加减速段位移 $l_s=0.00207\text{ m}$,扫描曝光位移 $s_{\text{scan}}=0.026\text{ m}$ 。取调整系数 $q_1=0.000018$, $q_2=q_3=0.000002$ 进行仿真分析,最终轨迹规划算法仿真曲线如图9所示。可以看出,当硅片台步进运动和扫描运动均采用S曲线轨迹规划算法之后,完成全部芯片的扫描曝光用时 1.726 s ,最大加速度 5.919 m/s^2 ,最大加加速

度 995.9 m/s^3 , 满足系统动力学约束, 并且整体的运动轨迹更加平滑, 在整个扫描曝光的过程中, 加速度曲线不会

出现突变, 可有效地减小硅片台在运动过程中的冲击和振荡。

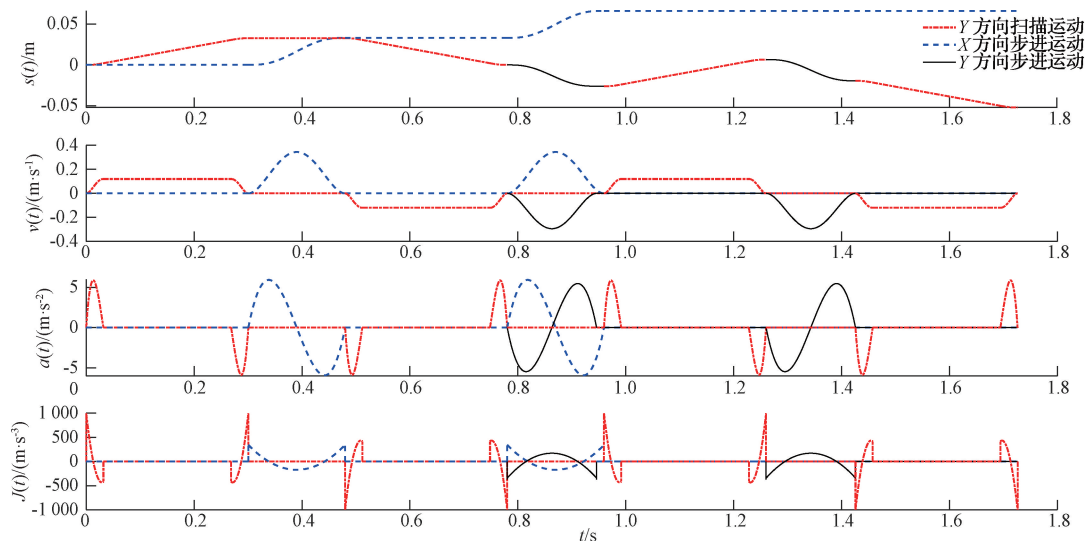


图9 针对特定曝光场的仿真结果

5 结论

本文采用S型轨迹规划方法中的复合法, 根据步进扫描投影光刻机工作中的特点, 对硅片台步进运动和扫描运动中加减速段进行轨迹规划算法研究。引入了权重系数 q , 同时考虑时间较短和冲击较小两个因素, 在满足系统的动力学约束的条件下, 实现了轨迹曲线的连续和平滑, 显著减小轨迹完成过程中的冲击和震荡。相较于引入复杂函数的轨迹规划算法, 本文所研究的S型轨迹规划算法具有明确表达式, 计算量小, 时间成本低, 更易于实现。同时本文对步进运动和扫描运动进行仿真分析, 得到了不同权重系数 q 所对应的轨迹曲线, 并在此基础上, 研究步进扫描投影光刻机实际工作中多个曝光场的情况, 参考光刻机的实际工作情况, 针对一种特定分布的曝光场进行全过程的综合仿真, 验证了轨迹规划算法的有效性。但该算法在实际实现过程中, 由于硅片台执行机构的约束, 还应考虑轨迹精度的控制策略, 轨迹计算过程中的多次浮点数求导运算容易造成精度损失, 下一步应对轨迹规划的离散实现过程进行研究。

参考文献

- [1] 王向朝, 戴凤钊. 集成电路与光刻机[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 42-45.
- [2] 姜龙滨, 丁润泽, 丁晨阳, 等. 光刻机运动台控制方法研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 1-13.
- [3] 刘杨, 李理, 陈思文, 等. 面向IC光刻的超精密运动台控制技术[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 1-21.
- [4] ZANG Q, HUANG J, LIANG Z. Slosh suppression for infinite modes in a moving liquid container[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(1): 217-225.
- [5] HADDAD M, KHALIL W, LEHTIHET H E. Trajectory planning of unicycle mobile robots with a trapezoidal-velocity constraint[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 954-962.
- [6] HUANG M S, HSU Y L, FUNG R F. Minimum-energy point-to-point trajectory planning of a simple mechatronic system [C]. 8th Asian Control Conference (ASCC). IEEE, 2011: 647-652.
- [7] 李聪. 光刻机双硅片台轨迹规划算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 李纯军, 尹周平, 熊涛, 等. 一种点位运动快速轨迹规划算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(3): 61-65.
- [9] 武志鹏, 陈兴林, 郝中洋. 步进扫描光刻机加速时间段的S曲线规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(9): 49-55.
- [10] 武志鹏, 陈兴林. 精密硅片台步进扫描运动的5阶S曲线规划[J]. 光电工程, 2012, 39(8): 99-104.
- [11] 肖友刚, 朱钺臻, 李蔚, 等. 一种新型高阶连续的点对点运动轨迹规划算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(9): 135-143.
- [12] LEE A Y, CHOI Y. Smooth trajectory planning methods using physical limits[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2015, 229(12): 2127-2143.
- [13] 张良, 秦祖军, 张志钢, 等. 光刻机多项式扫描运动

- 轨迹规划算法[J]. 仪器仪表用户, 2017, 24(6): 24-27.
- [14] 胡嘉阳, 韦巍. 基于五次 NURBS 曲线的六轴机器人多目标轨迹优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 198-203.
- [15] 王延年, 向秋丽. 基于改进粒子群优化算法的六自由度机器人轨迹优化算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1): 49-53.
- [16] BRANDT D C, FOMENKOV I V, GRAHAM M. Performance and availability of EUV sources in high volume manufacturing on multiple nodes in the field and advances in source power[C]. Proceedings of SPIE, 2021.
- [17] LUO F, YIN J. An optimal scheduling algorithm for

the motion control of step and scan lithography[C]. 2008 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. IEEE, 2009: 1702-1707.

作者简介

李越, 硕士研究生, 主要研究方向为高精度运动平台控制。

E-mail: liyue@st.xatu.edu.cn

李兰兰(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为微电子专用设备运动平台控制。

E-mail: lilanlan@xatu.edu.cn