

曲面激光直写中的光焦点定位控制

王俊茹, 罗剑波, 赵新龙, 王惠姣

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

摘要: 探讨了曲面激光直写系统中的光焦点定位控制方法。曲面激光直写中光焦点的定位控制要求定位范围毫米级,而定位精度则在亚微米级,因此选用了宏/微双驱动系统。对宏/微双驱动系统进行了动力学建模,并进行了分析。探讨宏/微双驱动系统在直写光刻中的控制方法,对所设计的宏/微双驱动系统进行了实际的测试实验。结果表明:所设计的宏/微双驱动系统在曲面激光直写系统中是可行且有效的。

关键词: 曲面激光直写; 定位控制; 宏/微双驱动系统

中图分类号: TH-39 **文献标志码:** A

0 引言

曲面激光直写是激光直写的一个重要发展方向,也是实现曲面微器件制作的一个重要技术手段。曲面激光直写系统一般主要由光焦点检测、光焦点控制、曝光系统、工作台定位控制等部分组成。基本原理是,利用光焦点检测与控制系统将曝光光束聚焦至涂覆有对光束敏感的光刻胶进行曝光,通过曝光光束的扫描形成微结构图形潜像,最后可通过显影、蚀刻等手段将图形转移至曲面基底^[1]。显然在这过程中,光焦点的检测与控制是整个曲面激光直写系统的核心和关键。

曲面激光直写系统的研究目前尚处于起步阶段,而对于曲面上焦点控制方面的研究则更少。比较有代表性的研究包括通过旋转曲面基片及光路使光束相对基片垂直,在此基础上进行焦点检测及控制^[2];以及通过三维笛卡尔轴利用直线编码器进行焦点的定位控制^[3]。前者控制复杂且实时性差,而后者则未能反映基片实际形貌,本质上应是一种开环。本文提出了一种光焦点曲面基片上的定位控制方法,旨在解决上述问题。曲面激光直写系统在曲面基片上曝光光刻的过程中,直写系统的调焦机构

需要根据所检测的焦点误差(FES)信号,对光刻物镜或光焦点进行定位控制,使光焦点与曲面基片曝光区域表面之间的距离处于系统焦深(DOF)之内。一般对于曲面光刻而言,该DOF值约在 $1\ \mu\text{m}$ 以下^[4]。此外在曲面基片光刻过程中,不同曝光工作点深度方向上最大误差可以达几毫米。因此在曲面激光直写系统中,光刻物镜或光焦点的定位范围要求在毫米级,而定位分辨率和精度则需要在亚微米级。

1 光焦点定位系统及其动力学模型

1.1 光焦点定位系统

根据上述要求,在此设计了一种宏/微双驱动系统来实现光焦点在曲面基片上的定位控制,如图1所示。图1中,检测用激光光束(红光,波长 $671\ \text{nm}$)经分束器1、分束器2后入射至光刻物镜(奥林巴斯UplanFI 40x/0.75,数值孔径 $\text{NA}=0.75$),光刻物镜将光束聚焦至曲面基片上的光刻胶涂层表面。调焦机构根据FES信号利用宏/微双驱动系统(也即图中的Z向宏动以及Z向微动)控制光刻物镜来实现光焦点的Z向定位。

收稿日期: 2013-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273184);浙江省自然科学基金资助项目(Y1080690);浙江省公益技术研究项目(2012C21012)

作者简介: 王俊茹(1974—),女,河北沧州人,硕士,讲师,主要从事精密检测技术的研究。

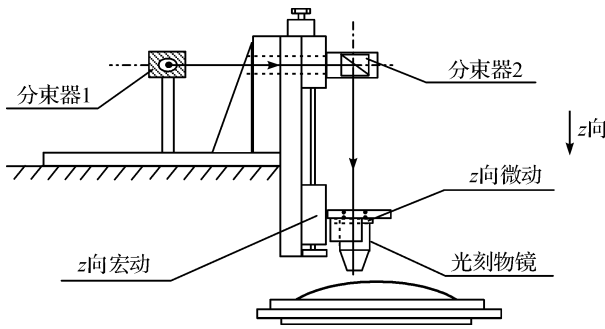


图1 宏/微双驱动系统组成

所使用的宏动系统为卓立汉光仪器公司生产的TSA30-C型一维精密电动平移台^[5],以此来实现Z方向上毫米级的定位。该平台主要参数包括行程30 mm,重复定位精度小于5 μm ,以及分辨率0.625 μm 。所使用的微动系统为德国Physik仪器公司的P721.0LQ压电微定位器^[6],以此来实现Z方向上亚微米级的定位。该微动平台主要参数包括定位行程90 μm ,重复定位精度 ± 5 nm,以及分辨率21 nm。

1.2 光焦点定位系统动力学模型

光焦点定位系统对光焦点的检测与控制有着重要的影响,此处通过建立定位系统的动力学模型来分析该系统的静动态特性。

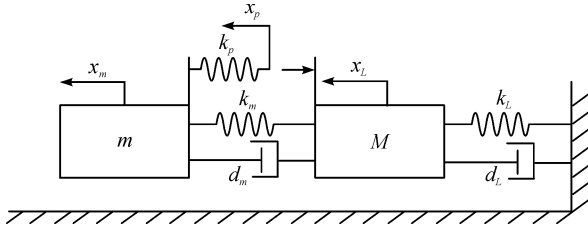


图2 光焦点定位系统动力学模型

图2为光焦点定位系统的动力学模型。图2中, m 为系统微动平台, M 为系统宏动平台。 k_L 、 k_m 分别为宏动和微动平台刚度; d_L 、 d_m 分别为宏动和微动平台阻尼系数; k_p 为压电陶瓷刚度; x_L 、 x_m 分别为宏动平台和微动平台位移; x_p 为压电陶瓷位移,其值等于压电陶瓷电压 U 下自由形变量 Δx_p 与宏动平台位移之和,也即 $\Delta x_p + x_L$; F_p 为压电陶瓷对宏动平台的反作用力。考察微动平台 m ,可以在图2基础上建立如下动力学方程:

$$m \frac{d^2 x_m}{dt^2} + d_m \left(\frac{dx_m}{dt} - \frac{dx_L}{dt} \right) + k_m (x_m - x_L) + k_p x_m = k_p (\Delta x_p + x_L) \quad (1)$$

式(1)中,当 $x_L = 0$ 时,即为宏动平台静止而由压电陶瓷驱动微动平台(物镜)。结合压电陶瓷形变公式,并做拉普拉斯变换,可得此时微动平台的传递函数:

$$G_m(s) = \frac{X_m(s)}{U(s)} = \frac{k_p d_{33}}{ms^2 + d_m s + k_p + k_m} \quad (2)$$

式(2)中, U 为压电陶瓷充电电压, d_{33} 为压电陶瓷极化方向上的压电系数。从式(2)可知,该微动平台为一个典型的二阶系统,且可以进一步求出此平台阶跃响应表达式:

$$x(t) = \frac{k_p d_{33} U}{k_p + k_m} \left[1 - \frac{e^{-\xi \omega_n t}}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin \left(\omega_n t + \arctan \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi} \right) \right] \quad (3)$$

式(3)中, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{k_p + k_m}{m}}$, $\xi =$

$\frac{d_m}{2\sqrt{m(k_p + k_m)}}$ 。显然在满足 $0 < \xi < 1$ 情况下,微动平台中物镜所输出的位移是确定的,同时也是稳定的且动态响应性能较好的。

式(1)中,当 $\Delta x_p = 0$ 时,即为压电陶瓷静止而由宏动平台驱动物镜。由此可以导出物镜位移与宏动平台位移之间的表达式 $G_M(s)$:

$$G_M(s) = \frac{X_m(s)}{X_L(s)} = \frac{d_m s + k_m + k_p}{ms^2 + d_m s + k_m + k_p} \quad (4)$$

此处宏动平台中电机使用了两相混合式步进电机,可以进一步得到电机轴和宏动平台位移之间的表达式。利用电机的动力学方程,并经线性化等处理后,可以表示为:

$$J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + D_m \frac{d\theta_m}{dt} + (2p^2 \varphi_m I_0 + K_{mL}) \theta_m = 2p^2 \varphi_m I_0 \theta_i + K_{mL} \theta_L \quad (5)$$

$$T_L = K_{mL} (\theta_m - \theta_L) = J_L \frac{d^2 \theta_L}{dt^2} + D_L \frac{d\theta_L}{dt} \quad (6)$$

式(5)~(6)中, J_m 、 J_L 分别为电机轴、负载转动惯量; D_m 、 D_L 分别为电机轴、负载的粘性阻尼系数; θ_i 、 θ_m 分别为电机轴目标值和当前值; θ_L 为负载转角; I_0 为电机绕组恒定电流; φ_m 为磁通; p 为转子齿数; K_{mL} 为电机与负载的连接轴刚度。进行拉普拉斯变换后,可得:

$$G_L(s) = \frac{X_L(s)}{X_i(s)} = \frac{K_s \theta_L}{K_s \theta_i} = \frac{K_p K_{mL}}{(J_m s^2 + D_m s + K_p + K_{mL})(J_L s^2 + D_L s + K_{mL}) - K_{mL}^2} \quad (7)$$

式中, K_s 为位移系数, $K_p = 2p^2 \varphi_m I_0$; $X_L(s)$ 为宏动平台位移; $X_i(s)$ 为电机轴目标位移。

由式(7)可知,该宏动系统为高阶系统。根据劳斯-赫尔维茨稳定判据,可得到在满足式

$$\frac{D_m J_L K_{mL}}{D_L} + \frac{D_L^2 J_m}{J_L} + D_L D_m + D_m^2 + J_L K_{mL} > 4 J_m p^2 \varphi_m I_0 \quad (8)$$

条件下,物镜经宏动平台驱动所输出的位移是稳定且确定的。此时系统阶跃响应如下图3所示。图3中, $K_p = 31.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, $K_{mL} = 100 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$, $J_m = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $D_m = 0.01 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $J_L = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $D_L = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$ 。由图3可知,此时系统阶跃响应中存在着微小振荡,该振荡幅度主要取决于连接轴刚度 K_{mL} 。显然该振荡的存在将影响物镜的定位精度,因此电机与负载之间应采用刚度较高的连接。

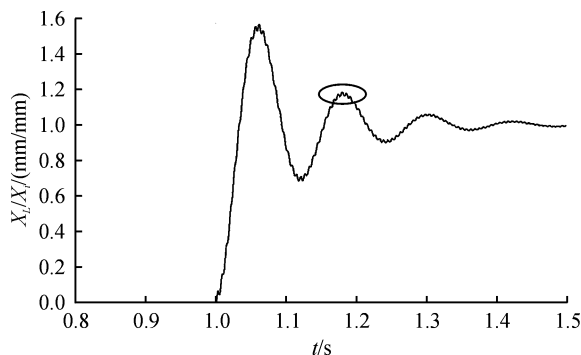


图3 物镜宏动平台驱动下的阶跃响应

2 光焦点定位控制实现

光焦点的定位通过对宏/微双驱动系统的控制来实现。其控制框图如图4所示。图4包括宏动控制和微动控制两部分。

与通常意义上的定位不同的是^[7-8],直写光刻中很难直接得到物镜和基片曝光点之间的距离误差,更不能据此对各控制子系统进行误差分配。本文选用反映焦点误差的FES信号作为微动平台的误差反馈信号。微动平台据此控制物镜使之处于焦深DOF之内,控制选用了带积分分离的PID算法,使系统在大离焦量时有较快的响应速度,同时在小离焦量时通过保持积分作用来保证精度。

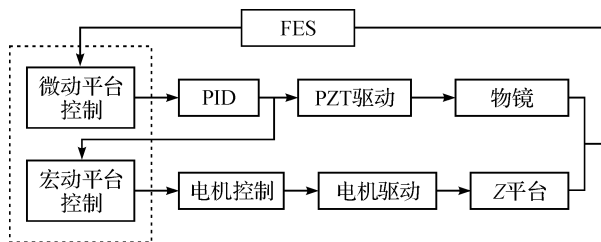


图4 光焦点定位控制框图

宏动平台控制微动平台,使微动平台中的物镜始终处于FES检测范围之内。宏动平台的误差反馈信号在直写光刻中较难得到,此处选用了压电陶瓷控制量作为反馈信号。图5为曲面基片运动时压电陶瓷的控制量变化曲线。随着基片扫描点的移动,

压电陶瓷平均控制量将逐步下降并趋向下限控制量。当接近下限时(实际为下阈值,两者有一裕量),需要控制宏动平台(电机)驱动(带动)压电陶瓷生长方向产生一位移量,使压电陶瓷控制量回至零点附近。

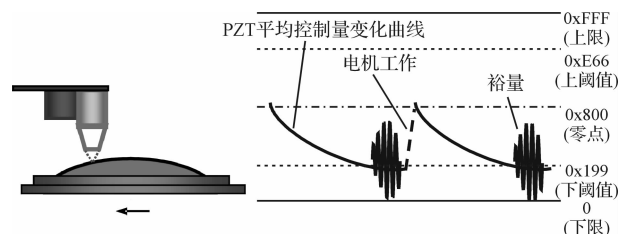


图5 曲面基片运动时压电陶瓷控制量变化曲线

3 实验研究

对所设计的宏/微双驱动系统进行了实际测试试验。

首先对宏/微双驱动系统阶跃响应进行了测试,测试结果如图6所示。图6的宏/微动控制系统的阶跃响应,该响应为离焦量 $-7.7 \mu\text{m}$ 下所测,且电机动作。由图6可知,经过调节时间 t_s 约在1.06 s以后,系统稳态误差 δ 控制在约 $\pm 0.22 \mu\text{m}$ 。

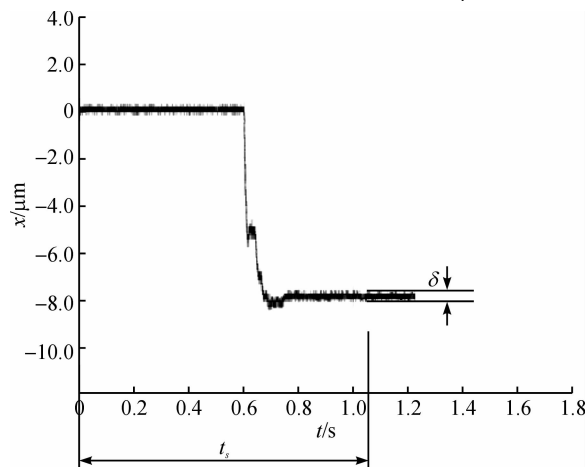


图6 宏/微动控制系统阶跃响应

此外,实验中选择了以倾斜的平面基片为实际对象对宏/微动双驱动系统联合控制性能进行了测试。图7为平面基片在倾斜 10° 情况下,且以 $0.7 \text{ mm}/\text{s}$ 的移动速度下的宏/微动双驱动系统跟踪基片表面的曲线。测试表明,系统最大控制误差 ϵ 约在 $\pm 1.16 \mu\text{m}$ 以内。显然,该误差是整个调焦系统的综合误差,也即包含了FES的检测误差。

上述控制误差将以离焦量形式最终体现在基片所刻线条的宽度偏差上。事实上,基片上最终线条宽度主要取决于物镜光焦点位置以及曝光量。而光焦点位置对线条影响的大小则与系统焦深DOF以

及离焦量有关。具体到本系统中,所使用的光刻物镜数值孔径 $N.A. = 0.75$, 曝光光束波长 $\lambda = 405 \text{ nm}$, 可以得到焦深 DOF 约 $0.72 \text{ }\mu\text{m}$ ($\text{DOF} = k\lambda/NA^2$, 式中 k 为工艺系数, 此处取 1)。上述最大 $1.16 \text{ }\mu\text{m}$ 的离焦量(控制误差)在利用本系统光刻曝光时通过选取合适的曝光量, 可以使得最终线条宽度偏差保持在 10% 之内。也即, 上述系统控制误差是可以接受的^[9], 控制系统是可行的。

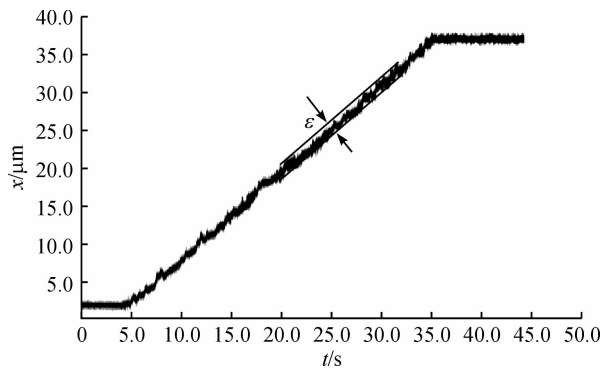


图7 宏/微动双驱动系统跟踪控制曲线

4 结 语

介绍了用于曲面激光直写的光焦点定位控制系统。该控制系统选用了宏/微双驱动系统, 用于满足直写光刻中定位范围大, 定位精度高的要求。由于直写光刻的特殊性, 文中所选用的宏/微系统和通常定位意义上的系统不同。实验测试表明, 所设计的宏/微系统在曲面激光直写中是可行的。

Optical Focus Positioning Control in Curved Surface Laser Direct-writing

WANG Jun-ru, LUO Jian-bo, ZHAO Xin-long, WANG Hui-jiao

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018, China)

Abstract: This paper discusses the optical focus positioning control method in curved surface laser direct-writing system. As optical focus positioning control in curved surface laser direct-writing requires millimeter-sized positioning range and submicron positioning accuracy, macro/micro dual-drive system is selected. This paper conducts dynamics modeling and analysis on macro/micro dual-drive system; introduces the control method of macro/micro dual-drive system in direct-writing photoetching and conducts a practical test on macro/micro dual drive system designed. The result shows that the macro/micro dual drive system designed is feasible and effective in curved surface laser direct-writing system.

Key words: curved surface laser direct-writing; positioning control; macro/micro dual-drive system

(责任编辑: 张祖尧)

参考文献:

- [1] Levinson H J. Principles of Lithography[M]. Washington: SPIE, 2005: 7-10.
- [2] Radtke D, Zeitner U D. Laser-lithography on non-planar surfaces[J]. Optics Express, 2007, 15(3): 1167-1174.
- [3] Xie Yongjun, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Lithographic fabrication of large curved hologram by laser writer[J]. Optics Express, 2004, 12(9): 1810-1814.
- [4] Mack C A. Understanding focus effects in submicrometer optical lithography: a review[J]. Optical Engineering, 1993, 32(10): 2350-2362.
- [5] 卓立汉光. 超薄型电控平移台: TSAx-C 系列[EB/OL]. [2008-01-01], http://www.zolix.com.cn/templates/channel/index_81_80.html.
- [6] Physik Instrumente. P-721 PIFOC high-speed piezo nano-focussing device with direct metrology feedback[EB/OL]. [2008-03-01], <http://www.pi.ws>.
- [7] 徐从裕. 大行程纳米定位驱动控制方法与系统研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008: 1-7.
- [8] Liu Hongzhong, Lu Bingheng, Ding Yucheng, et al. A motor-piezo actuator for nano-scale positioning based on dual servo loop and nonlinearity compensation[J]. J Micromech. Microeng, 2003, 13(2): 295-299.
- [9] Rhee H G, Kim D K, Lee Y W. Realization and performance evaluation of high speed autofocus for direct laser lithography[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80: 073103-1.