

文章编号: 1003-501X(2008)12-0122-04

凹球面网栅光刻控制算法零点误差分析

梁凤超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为分析并避免参考零点误差对凹球面光刻恒定曝光量控制算法的影响, 建立了零点误差与扫描线速度、扫描弧长关系的数学模型并给出了关系曲线。分析得出: 参考零点俯仰定位误差会造成部分线条宽于理想值, 其余线条窄于理想值, 且线宽呈单调变化; 参考零点水平定位误差会造成实际扫描弧长短于或长于所需值, 造成凹球面部分边缘无线条以致网栅缺失。凹球面网栅光刻设备俯仰轴和方位轴采用光电轴角编码器作为反馈元件, 采取速度、位置双闭环控制, 实现了参考零点的精确定位, 确保了恒定的扫描线速度和精确的扫描弧长, 制作出了合格的凹球面网栅。

关键词: 凹球面; 网栅; 光刻; 控制; 误差分析

中图分类号: TP273, TN305.7

文献标志码: A

Analysis of Zero Position Error Influencing on Control Algorithm for Fabricating Mesh on the Concave Spherical Substrate by Photolithography Technology

LIANG Feng-chao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For analyzing and avoiding the influences resulting from zero position error of control algorithm for controlling the exposure dose invariably on the Concave Spherical Substrate (CSS) via photolithography technology, the mathematical models and relation curves of zero position error versus scanning linear velocity and arc length are deduced and given respectively. After analyzing the relation curves, the influences resulting from zero position error are obtained as follows: vertical zero position error causes that line width of parts of lines are wider or narrower than ideal value and line width change monotonically, and the level zero position error causes that actual scanning arc length is longer or shorter than required value, which results in parts of edge of the CSS lacking of lines even grids. The opto-electronic encoders are adopted as feedback sensor of vertical and level axes, and the velocity and position dual closed-loop control method is taken, which realizes the zero positioning precisely and guarantees the exposure dose invariably, as well as scanning arc length accurately. Several eligible concave spherical meshes have been fabricated.

Key words: concave spherical substrate; mesh; photolithography; control; error analysis

1 引言

激光直写光刻是计算机控制与微细加工技术相结合、精度可以达到亚微米量级的一种高新技术^[1-3]。光刻线条轮廓是由胶层内曝光量的空间分布决定的, 控制曝光量恒定是凹球面光刻的关键技术之一。凹球面网栅光刻设备采用四轴同心的系统结构和同心扫描光学系统, 确保了写入光束始终在径向聚焦于凹球面, 不会因为写入物镜纬度的变化而使写入焦斑变成不同大小的椭圆形; 采用周期纬线与周期纬线正交方法在凹球面内形成网栅图形。写入焦斑的大小、形状和光强不随其纬度位置的变化而变, 这是确保不同纬度的

收稿日期: 2008-06-05; 收到修改稿日期: 2008-07-02

基金项目: 国防科技预研基金资助项目

作者简介: 梁凤超(1978-), 男(汉族), 吉林松原人, 助研, 博士, 主要研究先进机电控制、计算机仿真技术。E-mail: liangxfile@yahoo.com.cn

写入光斑具有一致的曝光光强的前提^[4]。用激光功率控制器对激光束进行稳光控制,使写入激光功率可调控且具较高的稳定精度(0.05% rms),与前述同心结构相结合确保了写入焦斑的光强恒定。同心结构和稳光控制保证了写入焦斑在不同纬度时光强一致。由于曝光量是光强和曝光时间的乘积,所以光强恒定时,曝光量的恒定取决于曝光时间即扫描线速度的恒定。

凹球面网栅光刻设备伺服控制系统应用恒定曝光量的实时控制算法,使写入焦斑在不同的纬度以不同的角速度扫描,确保扫描线速度恒定,从而使曝光量恒定,确保线条质量^[5-6]。而控制算法保持曝光量恒定的一个重要前提是精确定位写入焦斑起点即控制算法的参考零点。本文着重对参考零点误差对控制算法恒定曝光量作用的影响进行分析,并给出绝对光电轴角编码器作为位置速度反馈元件的闭环控制方法,实现了参考零点的精确定位、确保了算法的精确调速和稳速作用,最终制备了合格的凹球面网栅。

2 零点误差引起速度和弧长误差

恒定曝光量控制算法是以凹球面的底端点为参考零点,如果开始光刻前写入焦斑不能精确定位到参考零点,那么光刻时恒定曝光量控制算法是以一个与实际参考零点存在误差的位置为零点,这将对算法的调速作用及扫描弧长的准确性造成影响。

图 1 为参考零点只存在俯仰误差时的对比投影示意。实线凹球面为实际凹球面基底的位置,其上的实线周期纬线是恒定曝光量控制算法中纬线的写入位置。如果写入焦斑精确定位在参考零点 A ,则恒定曝光量控制算法会以恒定线速度在凹球面基底上写入图中实线所示的周期纬线,因此能够确保光刻线条的质量。图 1 中虚线凹球面及虚线周期纬线是参考零点存在俯仰定位误差时所实际写入的周期纬线,即写入焦斑的实际起点位置为 A' ,应用控制算法会在凹球面上写入虚线所示的周期纬线。图 1 中纬线编号定义为: S'_i/Ω_i 表示以参考零点 A 为算法参考零点时,在凹球面上写入的第 i 条纬线弧长为 S'_i ,扫描角速度为 Ω_i ; S_i/ω_i 表示以存在俯仰误差的参考零点 A' 为起点时,在凹球面上写入的第 i 条纬线实际所需扫描弧长为 S_i ,实际所需的扫描角速度为 ω_i 。而在扫描 S_i/ω_i 时的实际扫描弧长为 S'_i ,实际扫描角速度为 Ω_i , S_i 与 S'_i 纬度差异即为参考零点的纬度误差,不同纬度的纬线弧长、扫描角速度不同,即 S_i 不等于 S'_i , ω_i 不等于 Ω_i ,这就是参考零点误差造成的弧长和角速度误差。角速度误差直接造成线速度误差,使曝光时间偏离恒定曝光量算法的理论值而不能确保曝光量的恒定,从而影响光刻线条质量。下面通过建立参考零点误差与扫描线速度、纬线弧长之间的数学模型来分析零点误差对光刻线条质量的影响。

3 速度和弧长误差数学模型的建立

如图 2 所示,凹球面半径为 R ,通光孔径为 D ,网格周期为 g ,网格周期对应的圆心角为 θ ,写入线速度为 V ,凹球面球心为 O ,过纬线小圆的圆心为 O'_i ,参考零点俯仰误差为 $\Delta\theta$,则原写入纬线 S'_i 的角速度 Ω_i 、弧长 S'_i 用来实际扫描写入纬线 S_i 。建立参考零点误差与线速度误差、弧长误差之间的数学模型,关键是推导出 S'_i 、 Ω_i 、 S_i 、 ω_i 的表达式,并分别求出 S'_i 与 S_i 、 Ω_i 与 ω_i 之差。 S'_i 与 S_i 之差即弧长误差,用 ΔS_i 表示; Ω_i 与 ω_i 之差即角速度误差,用 $\Delta\omega_i$ 表示; $\Delta\omega_i$ 与第 i 个小圆的半径之积即为线速度误差 ΔV_i 。

结合图 2 及上述定义可以推导出,恒定曝光量算法写入纬线 S'_i 的角速度为

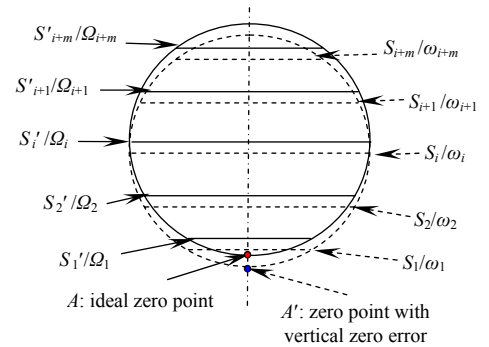


图 1 参考零点误差示意

Fig.1 Sketch map of reference zero location error

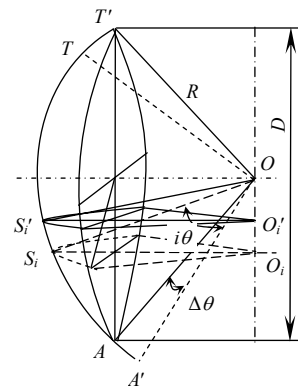


图 2 光刻写入凹球面第 i 条纬线的状态

Fig.2 State of writing No. i latitude line on the CCS via photolithography technology

$$\Omega_i = \frac{V}{R \times \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]} \quad (1)$$

纬线 S'_i 的弧长为

$$S'_i = 2R \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}] \times \arcsin\left\{ \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - R^2 \sin^2[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]}}{R \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]} \right\} \quad (2)$$

设参考零点俯仰误差 $\Delta\theta$ 造成写入焦斑在凹球面外写入纬线数为 J , 则 J 可表示为

$$J = \left\lceil \frac{\Delta\theta}{\theta} \right\rceil = \left\lceil \frac{\Delta\theta \cdot R}{g} \right\rceil \quad (3)$$

式(3)中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整运算。

按照恒定曝光量控制算法, 参考零点存在俯仰误差 $\Delta\theta$ 时, 第 i 条纬线所需角速度 ω_i 可表示为

$$\omega_i = \frac{V}{R \cos(\arcsin \frac{D}{2R} - \frac{ig}{R} + \Delta\theta)} \quad (4)$$

第 i 条纬线所需扫描弧长 S_i 为

$$S_i = 2R \cos(\arcsin \frac{D}{2R} - \frac{ig}{R} + \Delta\theta) \times \arcsin \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - R^2 \sin^2(\arcsin \frac{D}{2R} - \frac{ig}{R} + \Delta\theta)}}{R \cos(\arcsin \frac{D}{2R} - \frac{ig}{R} + \Delta\theta)} \quad (5)$$

而角速度误差 $\Delta\omega_i$ 的表达式为

$$\Delta\omega_i = \Omega_i - \omega_i \quad (6)$$

弧长误差 ΔS_i 的表达式为

$$\Delta S_i = S'_i - S_i \quad (7)$$

综上可以推导出第 i 条纬线实际写入线速度与所需线速度之差即线速度误差 ΔV_i 为

$$\Delta V_i = V \times \frac{\cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R} + \Delta\theta] - \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]}{\cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]} \quad (8)$$

第 i 条纬线实际扫描弧长与所需弧长之差即弧长误差 ΔS_i 为

$$\Delta S_i = 2R \left\{ \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}] \times \arcsin \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - R^2 \sin^2[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]}}{R \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R}]} - \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R} + \Delta\theta] \times \arcsin \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - R^2 \sin^2[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R} + \Delta\theta]}}{R \cos[\arcsin(\frac{D}{2R}) - \frac{ig}{R} + \Delta\theta]} \right\} \quad (9)$$

至此便建立了参考零点误差 $\Delta\theta$ 与线速度误差 ΔV_i 、弧长误差 ΔS_i 之间关系的数学模型, 如式(8)、(9)。

4 零点误差对光刻质量的影响分析

下面利用数学模型结合光刻工艺参数来分析零点误差对光刻线条质量的影响。凹球面半径 $R=150.0$ mm, 通光孔径 $D=100.0$ mm, 网格间距 $g=600$ μm , 设定的扫描线速度 $V=10.0$ mm/s。计算得每个方向的周期纬线条数为 $N=168$ 。设参考零点存在俯仰误差 $\Delta\theta=1.0^\circ$, 则由式(3)可得有 $J=4$ 条纬线在凹球面外扫描, 其线速度误差变化趋势如图 3(a)所示。线速度之差为负时, 实际扫描线速度慢于所需线速度, 曝光时间长于所需时间, 造成曝光量过大, 线条加宽; 线速度之差为正时, 实际扫描速度快于所需线速度, 曝光时间短于所需时间, 造成曝光不足, 线条变细, 严重时会有线条。线速度的误差由负到正呈单调变化, 最终会造成大约一半的凹球面周期纬线线宽宽于理想值, 其余的凹球面周期纬线线宽比理想线宽细, 甚至

部分线条缺失。与此同时, 扫描纬线弧长也会出现误差, 纬线弧长误差与纬线序号的对应关系如图 3(b)。当弧长误差为正时, 实际写入的弧长长于所需弧长, 造成写入焦斑在凹球面外冗余扫描; 当弧长误差为负时, 实际写入的弧长短于所需弧长, 造成写入焦斑在凹球面内起停, 凹球面部分边缘线条缺失以致网格缺失。可见, 线速度误差造成线条线宽误差, 弧长误差造成凹球面部分边缘网格缺失, 这都将影响凹球面网栅的性能。

上述分析了恒定曝光量控制算法参考零点俯仰误差对光刻的影响, 实际上参考零点也会出现方位误差。方位误差会造成凹球面网栅的水平偏移, 使凹球面的水平方向的部分边缘未曝光而不能形成线条, 造成部分网栅而影响凹球面网栅的性能, 因此同样应该避免方位误差。

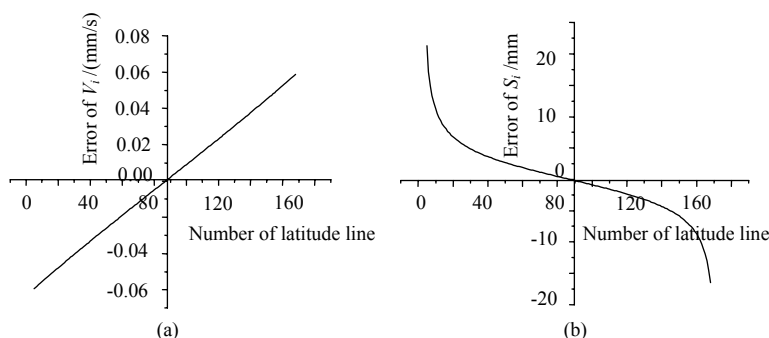


图 3 零点误差造成的线速度误差(a)和纬线弧长误差(b)

Fig.3 Linear velocity error (a) and arc length error of latitude lines (b) resulting from zero position error

结束语

综上, 在利用光刻技术在凹球面上写入网栅图形时, 将写入焦斑精确定位在恒定曝光量控制算法参考零点是保证曝光量恒定的重要前提。凹球面网栅光刻伺服控制系统中, 方位轴和俯仰轴各安装 21 位绝对式光电轴角编码器作为反馈元件, 采用速度、位置双闭环控制, 实现了参考零点的精确定位, 定位精度优于 $10''$, 保证了恒定曝光量算法的精确调速作用, 确保了凹球面网栅光刻线条的质量, 并已经制备了多件合格的凹球面网栅^[7]。

参考文献:

- [1] 李凤有. 激光直写光刻技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2002.
LI Feng-you. Study on technology of laser direct writing photolithography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [2] Maiden A, McWilliam R, Purvis A, *et al.* Nonplanar photolithography with computer-generated holograms [J]. **Optics Letters**, 2005, **30**(11): 1300-1301.
- [3] 马宏. 精密刻划工艺[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.
MA Hong. **Technology of precision scoring** [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1994.
- [4] 梁凤超, 胡君, 续志军. 激光直写凹球面网栅的电控实现[J]. 光学 精密工程, 2006, **14**(5): 792-796.
LIANG Feng-chao, HU Jun, XU Zhi-jun. The realization of electric control of laser direct writing mesh on the concave spherical substrate [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2006, **14**(5): 792-796.
- [5] 胡君, 梁凤超, 熊木地, 等. 影响球面激光直写线宽均匀度的关键技术[J]. 光电工程, 2006, **33**(3): 1-4.
HU Jun, LIANG Feng-chao, XIONG Mu-di, *et al.* Key techniques influencing the linewidth evenness grade with laser direct writing on the spherical surface [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2006, **33**(3): 1-4.
- [6] LIANG Fengchao, HU Jun. Key techniques of laser direct writing of fine lines on the spherical surface [J]. **SPIE**, 2006, **6034**: 60340G-1-60340G-7.
- [7] 梁凤超, 胡君, 续志军. 凹球面网栅激光直写实时控制方法[J]. 光电工程, 2007, **34**(4): 128-131.
LIANG Feng-chao, HU Jun, XU Zhi-jun. Real-time control method for laser direct writing mesh on the concave spherical substrate [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2007, **34**(4): 128-131.