

凸球面网栅激光直写技术

胡内彬¹, 白 剑¹, 墨洪磊², 朱蓓蓓², 兰 洁², 梁宜勇¹

- (1. 浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;
2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200233)

摘 要: 为了满足凹球面光刻所需的曲面网栅掩模的需求, 建立了凸球面激光直接写入系统用于制作曲面网栅掩模。该系统目前支持最高 $\pm 20^\circ$ 的基片倾斜, 结合加工时的曝光量修正算法, 在口径为 50 mm、曲率半径为 51.64 mm 的凸球面基底上制作了矩形网栅图案, 并结合双摆台联动在凸面上制作同心圆环图案。实验结果表明, 现有凸球面直写系统初步具备加工凸面网栅掩模的能力, 为后续的曲面掩模光刻打下坚实基础。

关键词: 曲面技术网栅; 电磁屏蔽; 凸曲面光刻; 曲面掩模

中图分类号: TN305.7 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0120002

Laser direct writing technology for printing mesh on convex surface

Hu Neibin¹, Bai Jian¹, Mo Honglei², Zhu Beibei², Lan Jie², Liang Yiyong¹

- (1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200233, China)

Abstract: In order to meet the requirement of convex surface mask in concave surface lithography, convex surface laser direct writing system was set up to fabricate the mask. This apparatus supported up to $\pm 20^\circ$ tilt angle. With the exposure correction algorithm in the process, the system accomplished writing rectangular grid pattern on a spherical substrate with 50 mm caliber and 51.64 mm radius. It was able to draw circular ring pattern on the surface by result of simultaneous motion of two tilting tables. The experiment shows that this setup has the capacity to fabricate the convex mesh lithographic mask and lay a solid base for convex surface lithography technology.

Key words: convex surface metallic mesh; electromagnetic shielding; convex surface lithography; convex surface mask

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-06-09

作者简介: 胡内彬(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光直写方面的研究。Email: adndcn@163.com

导师简介: 梁宜勇(1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电检测与微光学方面的研究。Email: liangyy@zju.edu.cn

0 引言

透明导电金属网栅结构具有屏蔽电磁波的能力,飞行器的透明光学窗口上常常制作该结构用于屏蔽外界电磁波干扰,同时又使必要的红外光和可见光高效地通过^[1]。由于涉及到国防领域,国外很少报道在曲面光学窗上制作金属网栅的方法。较早出现用于曲面光刻系统是由德国夫琅禾费光学技术研究所开发的,主要用于制作菲涅耳透镜,在透镜上制作微结构,该系统光点尺寸能够达到约 $1\ \mu\text{m}$,定位精度达到 $150\ \text{nm}$,具有 $\pm 10^\circ$ 的倾斜角度^[2]。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在这方面做了很多研究工作;2002 年研制了用于制作衍射光学元件(DOE)的凹面激光直写系统^[3];2006 年研制了同心扫描系统主要用于凹球面金属网栅制作^[4-5],制作线宽达到约 $3\ \mu\text{m}$,线宽均匀度达到 10%,但是直写加工耗时时间长,加工效率低。而利用凸面掩模接触曝光,能够在短时间内将掩模图案映射在凹球面基底上,节省了直写激光在凹球面扫描图案所需的大量时间,是一种提高制作效率的方式。

在进行凸面掩模接触光刻时,提前制作一个质量很好的凸面掩模是非常必要的。德国夫琅禾费研究所的光刻系统虽然适用于凸面光刻,但是倾斜角度有限,只有 $\pm 10^\circ$,所以文中搭建了一套凸球面加工直写系统用于制作凸面掩膜接触光刻时所需的高质量凸面掩膜,载有基片的平台倾斜角度达到 $\pm 20^\circ$,利用该系统在口径为 $50\ \text{mm}$ 、曲率半径 $51.64\ \text{mm}$ 的凸球面上制作了周期为 $400\ \mu\text{m}$ 、线宽为 $10\ \mu\text{m}$ 的矩形网栅图案以及圆环形图案,用于验证该系统有较复杂图形的加工能力。

1 凸球面直写系统

该系统结构如图 1 所示,两个摆台正交层叠安装,共同绕着一个球心摆动,摆台台面倾斜角最大为 $\pm 20^\circ$ 。示意图中省略了摆台上的 Z 轴升降台和 XY 轴微调平移台以及光学窗口夹具。球面的光学窗口固定在上摆台上,光学窗口对应的球心经过调整后与正交摆台的绕动球心重合。物镜在 Z 轴上经过调整后,将激光聚焦入射至光学窗口上。激光路径的延长线过光学窗口球心。这样的结构使得上面的光学

系统不需要移动,通过下面的正交摆台两个方向的摆动即可完成在球面光学窗口上刻画各类图形。与此同时,平台在光刻过程中,入射激光始终垂直于光学窗口表面,杜绝了因激光倾斜于表面而导致曝光线宽展宽或者是因大数值孔径 NA 光刻物镜的焦距较小而在直写时容易触碰大曲率基片等不良情况。

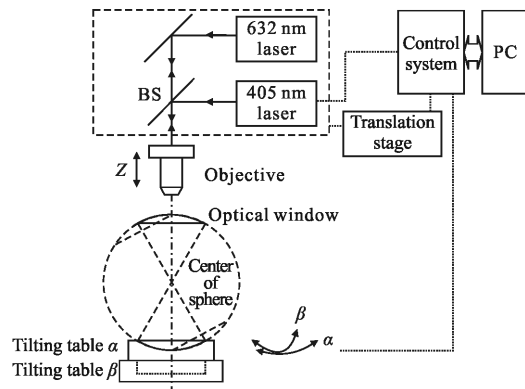


图 1 凸球面直写系统

Fig.1 Convex surface laser direct writing system

系统的工作原理是:PC 端首先对需要刻画的图形进行建模,通过建模得到图形的离散点处理成摆台的控制信息,发送到下位机。下位机经过处理控制信息,产生相应的频率的 PWM 波形和脉冲数目驱动上下摆台运动。上下摆台、光刻激光的相互配合,将 PC 端建模形成的图刻画在曲面上。

2 摆台运动分析

由于系统结构原因,上摆台 α 放置在下摆台 β 并随之摆动,所以上、下摆台运动并不是相互独立的,存在一些关系。

如图 2 所示, α 为上摆台, β 为下摆台,上摆台 α

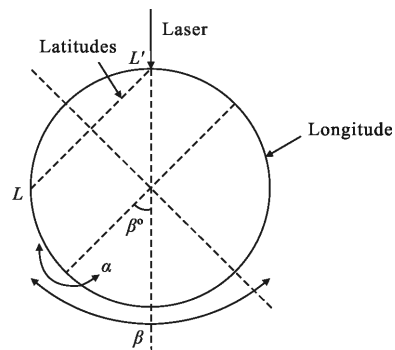


图 2 摆台运动分析

Fig.2 Analysis of the motion of the tilting table

位于下摆台 β 上,随着下摆台 β 摆动,可以得到:

(1) 当 α 摆台保持不动, β 摆台倾斜摆动,直写激光在球面上扫过的轨迹是一条经线(如图 2 所示“经线”)。

(2) 当 β 摆台倾斜 β° 后,保持不动, α 摆台倾斜摆动,直写激光在球面上扫过的轨迹是一条纬线 LL' (如图 2 所示“纬线”)。

通过上述 α 和 β 两个自由度组成的系统形成了经纬体系,在直写系统的 PC 端建模时采用的是直角坐标系,需要将直角坐标系下的建模数据转换成两个摆台 α 、 β 角度数据,转换关系式如下:

$$\begin{cases} \sin\beta = \frac{y}{R} \\ \sin\alpha = \frac{x}{\sqrt{R^2 - y^2}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = R\cos\beta\sin\alpha \\ y = R\sin\beta \\ z = R\cos\beta\cos\alpha \end{cases} \quad (2)$$

3 矩形网栅制作

3.1 网栅建模

在凸面上制作矩形网栅首先需要在 PC 端进行建模,利用双摆台的运动特征将网栅分解成一系列经线和一系列纬线交叉组合,如图 3 所示。

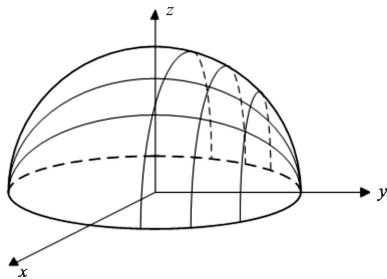


图 3 网栅形在坐标系中的位置

Fig.3 Location of grid in the coordinate system

经线和纬线由两组解析方程分别计算得到。

纬线的解析方程如下:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \\ x^2 + z^2 = r^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为纬线所在圆的半径; R 为曲面基底的半径。

经线的解析方程如下:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = R^2 \\ \tan\varphi = \frac{x}{z} \end{cases} \quad (4)$$

式中: φ 为经线所在平面与 z 轴的夹角; R 为曲面基底的半径。

由于网栅密度较小,恰当的写入方式是矢量式,即系统沿需光刻图形的线条移动,激光连续工作直接光刻图形。矢量式画出的线条比较平滑,连续性非常好。

路径规划如图 4 所示。

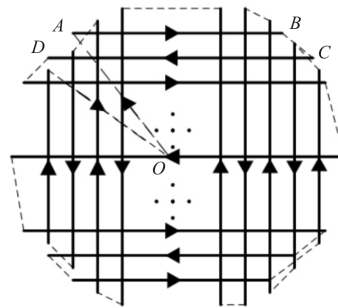


图 4 加工网栅形的路径规划图

Fig.4 Planning path of grid pattern

图 4 中虚线部分时激光器未开启,实线部分时激光器开启。

第一步:控制系统将摆台从 O 点移动至 A 点,期间激光器未开启。

第二步:激光器开启后,摆台沿着图中向右的箭头从 A 点移动到 B 点。

第三步:激光器关闭,摆台从 B 点移动到 C 点后,重复第二步从 C 点移动到 D 点,直到完成所有的线条后回到原点 O 。

3.2 网栅实验结果

实验中采用口径为 50mm、曲率半径为 51.64mm 的平凸透镜作为基底。采用光刻胶:稀释剂 $\approx 1:1.1$ 的光刻胶试剂进行滴胶,甩胶,前烘 30 min 后用于曝光实验。使用系统对基片进行曝光后,经过显影等过程后得到凸面光刻样本。

图 5 中,网栅图形规整,线宽均匀。

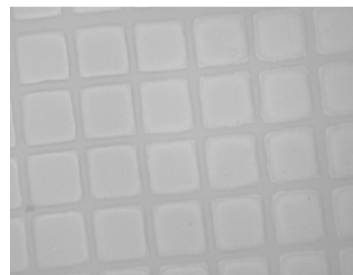
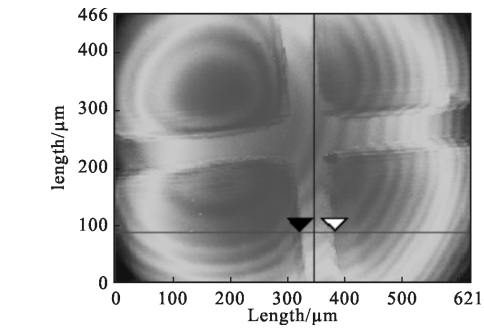


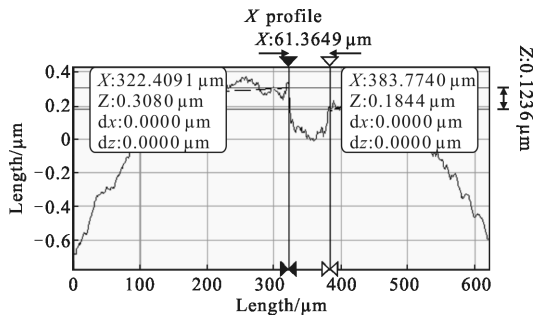
图 5 曲面网栅形

Fig.5 Grid pattern on the convex surface

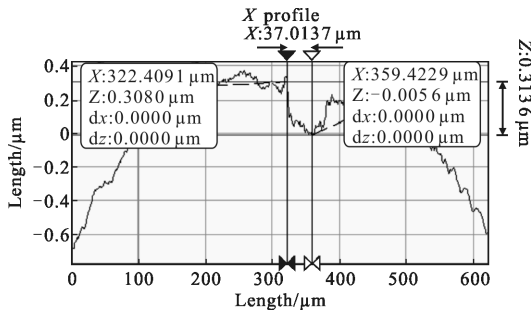
使用白光干涉仪对样本进行测量，结果如图 6 所示。



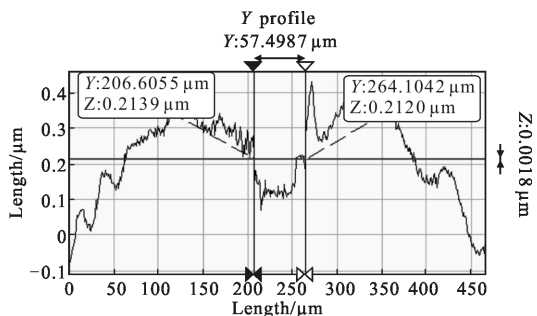
(a) 样本测量图
(a) Sample under test



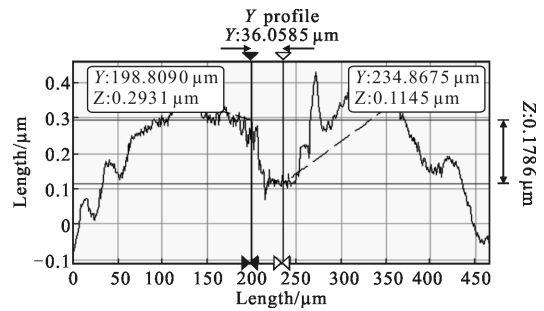
(b) X 方向的线宽
(b) Line width in the X direction



(c) X 方向的胶厚
(c) Coating thickness in the X direction



(d) Y 方向线宽
(d) Line width in the Y direction



(e) Y 方向胶厚

(e) Coating thickness in the Y direction

图 6 实验样本的测试结果

Fig.6 Test results of the sample

由于是曲面甩胶,曲面上胶厚分布会存在不均,测量样本 X 和 Y 方向胶厚分别为 $0.313 \mu\text{m}$ 、 $0.178 \mu\text{m}$ 。但是可以看出样本在 X 和 Y 方向上的线宽分别为 $61.36 \mu\text{m}$ 、 $57.49 \mu\text{m}$,线宽相差不大。测量结果证明直写系统具有加工凸面矩形网栅的能力。

4 圆环网栅制作

4.1 圆环建模

圆环形是比较复杂的加工图案,不同于矩形网栅制作时的单摆台运动,而需要上下两个摆台配合联动才能完成加工任务。在以曲面为基底上光刻出由一系列同心圆组成的环形,其模型建立如图 7 所示。

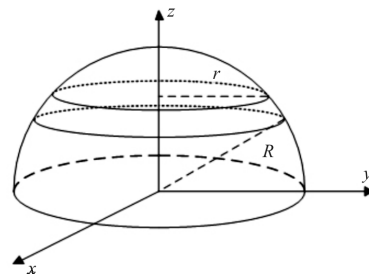


图 7 环形在坐标系中的位置

Fig.7 Location of ring in the coordinate system

由于是一系列同心圆,可以逐个分解成计算其中圆的的数据。

其中一个圆形的方程解析式:

$$\begin{cases} x^2+y^2+z^2=R^2 \\ x^2+z^2=r^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: r 为光刻的环形的半径; R 为曲面基底的半径。再计算圆环形,计算步长需要合理规划,太长的步长会造成光刻出的环形线条不均匀,成多边形,而太短的步长

造成计算资源的浪费,增加了整个建模数据量。

路径规划如图 8 所示。

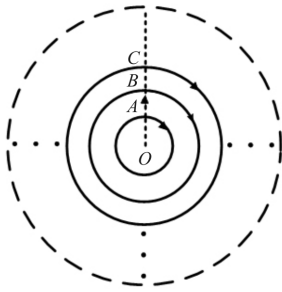


图 8 加工环形路径规划图

Fig.8 Planning path of ring pattern

图中虚线部分时激光器未开启,实线部分时激光器开启。

第一步:控制系统将倾斜台从 O 点移动至 A 点,期间激光器未开启。

第二步:激光器开启后从 A 点沿着右边的圆弧箭头画出一个圆,最后回到 A 点。

第三步:激光器关闭后控制系统将倾斜台从 A 点移动到 B 点,重复第二步的动作直到完成绘制出所有的圆回到原点 O。

4.2 圆环实验结果

利用所建立的直写系统进行了凸面圆环图案制作,得到实验结果如图 9 所示。

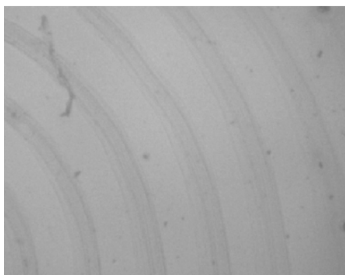


图 9 曲面圆环形

Fig.9 Ring pattern on the convex surface

建模时,步长选择的较小,所以图 9 中光刻出来线条圆滑,均匀性好。由于平台的结构特性,在光刻过程中,曲面基片切面始终垂直于入射激光,所以避

免了其他系统出现的线宽展宽的情况,保持线宽一致性。

该实验证明所建立的系统具有一定复杂图案的加工能力。

5 结论

该系统能够支持凸面上简单的矩形网栅图案以及较复杂的圆环形图案的写入,目前支持最高 $\pm 20^\circ$ 的基片倾斜,通过简单地更换相关设备,能够加工更高倾斜角度的凸球面光学器件,应用前景广阔。

后续的工作是增加自动对焦系统,在保证线条均匀度的情况下提高写入线宽的精细度以及研究图案写入算法,使系统能够写入更复杂的图案。

参考文献:

- [1] Feng Xiaoguo, Fang Liang, Sun Lianchun. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(1): 59-64. (in Chinese) 冯晓国,方梁,孙连春.金属网栅结构参数设计与制作[J].光学精密工程,2005,13(1):59-64.
- [2] Radtke D, Zeitner U D. Laser-lithography on non-planar surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 1167-1174.
- [3] Xie Y, Lu Z, Li F, et al. Lithographic fabrication of large diffractive optical elements on a concave lens surface [J]. *Optics Express*, 2002, 10(20): 1043-1047.
- [4] Feng Xiaoguo, Lu Jun, Xu Fenglin, et al. Error analysis of fabricating isometric mesh on the concave of a spherical substrate by concentric optical scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, 14(2): 251-255. (in Chinese) 冯晓国,卢俊,徐峰林,等.同心扫描法制作凹球面等距网栅的误差分析[J].光学精密工程,2006,14(2):251-255.
- [5] Liang Fengchao, Hu Jun, Xu Zhijun. Real-time control method for laser direct writing mesh on the concave spherical substrate[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(4): 128-131. (in Chinese) 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.