

文章编号 : 1003-501X(2006)03-0001-04

影响球面激光直写线宽均匀度的关键技术

胡 君¹, 梁凤超^{1,2}, 熊木地³, 邹振书¹, 杜温锡¹, 陈世辉¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为提高球面激光直写图形线宽均匀度, 提出了球面激光直写四轴同心结构和同心扫描光学系统的方案。这种方案使得激光束经水平轴、垂直轴、光轴和工件中心轴相交于球心, 经球心反射镜反射到球面工件表面上, 形成激光曝光光斑。采用微小离焦探测和复合闭环控制的自动调焦技术与计算机并行工作的控制方法, 确保了球面工件以垂直轴为轴心沿水平方向精密匀速旋转; 激光笔绕水平轴以俯仰弧形轨迹移动且精准定位; 激光束经写入物镜和调焦系统始终以圆形光点聚焦在球面上, 实现了对球面任意纬度连续激光直写线条精度的可靠控制。原子力显微镜检测分析结果表明, 在球面上激光直写出约 3 μm 宽线条, 线宽均匀度 10% 左右。

关键词: 球面; 激光直写; 线宽; 自动调焦; 反馈控制

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

Key techniques influencing the linewidth evenness grade with laser direct writing on the spherical surface

HU Jun¹, LIANG Feng-chao^{1,2}, XIONG Mu-di³, ZOU Zhen-shu¹, DU Wen-xi¹, CHEN Shi-hui¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Machines and Physics, the Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039,

China; 3. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: For improving the evenness grade of the line width of the laser direct writing figures on the spherical surface, the scheme of the four axes mutually intersecting at the center of the spherical surface and concentrically scanning optical system is proposed, which ensure that four axes including transverse axis, normal axis, optical axis and the center axis of work piece mutually intersect at the center of the spherical surface. As a result, the laser beam reflected from the center-mirror perpendicular focuses on the spherical surface with circular focus during the period of laser direct writing. In the course of laser direct writing, the work piece spins around the normal axis along the level direction while the object lens spins around the transverse axis precisely. The control method of photo-electricity detection, automatic focusing and high-speed computer working in double harness is applied too, which realize the dependable control of the precision of laser direct writing line width on random latitude of the spherical surface. The section analysis of lines by the atomic force microscope proves that the evenness of lines with about 3 μm line width has exceeded the request of the original design.

Key words: Spherical surface; Laser direct writing; Line width; Autofocusing; Feedback control

收稿日期: 2005-02-16; 收到修改稿日期: 2005-08-15

基金项目: 国防科工委预研项目

作者简介: 胡君(1952-), 男(汉族), 吉林蛟河人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向: 智能控制与信息处理、光机电一体化和 CAD 技术应用。E-mail: huj@ciomp.ac.cn

引言

激光直写技术属于现代科技的高新技术领域，它以激光光束经物镜聚焦成微小光斑为“光刀”，计算机精密控制“光刀”在涂覆光刻胶层的基片上直接扫描曝光形成所需图形，再经显影、坚膜、沉积和刻蚀等工序最终将图形转移到基片上。目前，平面基片的激光直写技术日趋成熟，而球面基片的激光直写技术还处于实验摸索阶段。由于球面工件个别点的缺陷及涂覆光刻胶的不均匀性使得感光胶表面与理想的球面有一定差距，造成激光写入过程中离焦。这就需要设备具有实时检测离焦量并快速补偿调焦伺服系统。另外，如果不采取特殊的系统结构保证写入过程中激光光轴与球面法线方向一致，随着激光直写物镜由中心向外径的扫描，聚焦光斑在球面上由圆形渐变为越来越大的椭圆形，线条逐渐展宽，造成了激光直写线条的不均匀而影响工件的加工质量。因此如何在激光直写动态过程中保持线宽的均匀性并在球面内写出微米级的均匀线条，已成为当前的技术难点，也是目前急需解决的关键技术。为提高球面激光直写线宽均匀度，对系统机械结构、同心扫描光学系统和调焦伺服系统的设计方法进行探讨。

1 四轴同心的系统结构

以球面工件的球心为基点，水平光轴 $H-H'$ 、垂直轴 $V-V'$ 、激光笔光轴 $C-C'$ 和工件中心轴 $D-D'$ 相交于球心 O 的系统结构设计方法，是保证球面激光直写设备写出均匀线条的基本条件，如图 1。采用这种四轴同心的系统结构后，激光沿 $H-H'$ 到达绕 $H-H'$ 旋转的 $C-C'$ 并经物镜在径向聚焦在球面上获得圆形光斑。球面工件安装在以 $V-V'$ 为旋转轴的工作台上，当激光笔稳定在某一纬度时，工件绕 $V-V'$ 在水平方向转动，如此便在球面上直写出线条。如果激光笔的移动与工件的旋转相配合，可在球面内直接写出所需的各种图形。

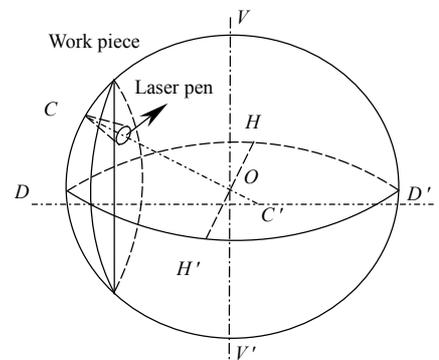


图 1 球面激光直写系统结构

Fig.1 Configuration of the laser direct writing system for spherical surface

2 同心扫描光学系统

光学系统采用了高精度对焦系统补偿同心误差的同心扫描光学系统，如图 2。激光束经过变倍扩束器、球心反射镜、写入物镜聚焦在球面上形成激光直写光斑，变倍扩束器倍率变化可改变激光直写光斑尺寸，当需要不同光点尺寸时不必更换写入物镜。写入物镜绕(球心)水平轴按计算机控制程序转动，同时球面工件绕(球心)垂直轴按计算机程序连续转动扫描写出线条。

同心扫描光学系统的核心也是解决球面工件激光直写线宽均匀性问题，它涉及到光斑尺寸、焦深两个重要内容。

a) 线宽与艾里斑直径接近。球面激光直写线宽与光斑尺寸、光刻胶曝光特性、光强、光斑扫描速度(曝光量=光强×曝光时间)等有关。激光聚焦光点即高斯束腰的相对照度分布形成典型高斯曲线，在有限尺寸内，相对照度不能为零。所以，通常用相对照度为 $1/e^2$ 光斑直径表示激光光点尺寸

$$d_z = 4M^2 \lambda F^\# / \pi \quad (1)$$

其中 M^2 为激光束质量因子，取决于激光质量， $F^\#$ 为 F 数—相对孔径的倒数。光学系统的艾里斑尺寸为

$$d_A = 2.44 \lambda F^\# \quad (2)$$

两种光斑尺寸相差 $d_A/d_z = 1.6(M^2=1.2)$ 。艾里斑对应的激光束相对照度为

$$\bar{E} = \exp[-2(d_A/d_z)^2] \quad (3)$$

当 $M^2=1.2$ 时，可得照度为 0.006，这么低的相对照度产生的感光密度近于一般感光介质底灰。所以，

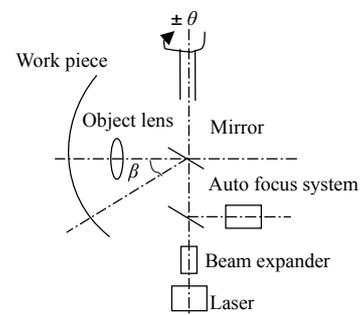


图 2 同心扫描光学系统

Fig.2 Concentrically scanning optical system

艾里斑直径近于实际线宽。

b) 焦深的确定。常规光学系统焦深是由轴向离焦产生 $\lambda/4$ 波差确定，即

$$\Delta Z = \pm \lambda / (2NA^2) \quad (4)$$

激光束还有特殊的焦深，它是激光束不大于束腰尺寸 $2^{1/2}$ 倍区域，在近场区即

$$Z_n = \pm \pi \bar{\omega}_0^2 / \lambda \quad (5)$$

按上述公式列出写入物镜 $F^\#$ 与光斑尺寸、焦深的参数，如表 1。理论上分析，由于同心扫描光学系统所有旋转中心都是在球面球心，光斑始终聚焦于球面上而不会产生离焦。

表 1 写入物镜 $F^\#$ 与光斑尺寸、焦深 ($M^2=1.2$) (单位: μm)

Table 1 Relation of $F^\#$ size of laser spot and depth of focus when M^2 is equal to 1.2

$F^\#$	d_A	d_Z	$M^2 d_Z$	$M^2 d_A$	ΔZ	$M^2 Z_n$
1.2	1.3	0.7	0.8	1.6	1.3	1.2
1.85	2.0	1.0	1.2	2.4	3.0	2.8

3 自动调焦伺服控制系统

球面工件的加工缺陷、光刻胶层的不均匀性、装调精度和轴系误差等因素会造成离焦，影响激光直写线宽的均匀性。为提高球面激光直写线宽均匀性，增加了实时动态调焦功能，即通过微弱信号探测技术检测出离焦量并进行 DSP 处理，驱动纳米级微位移执行器调整物镜位置实时修正离焦偏差。

3.1 微小离焦量探测技术

在高精度激光直写系统中激光离焦误差检测的方法很多，常见的有临界角法、刀口法、像散法、斜光束法、光度法^[1]等。其中临界角法由于其分辨率高且较易实现，原理可简述为：当光从一种媒质向另一种媒质传播时，光在界面上产生反射和折射，其反射系数由 Fresnel 公式^[2]给出

$$R_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad R_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (6)$$

其中 n_2 、 n_1 是两种介质的折射率， θ_i 、 θ_t 分别是入射角和折射角。当 $n_2 > n_1$ 时，即从光密媒质向光疏媒质传播，若入射角 θ_i 等于和大于某一角 θ_c 时

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_1/n_2) \quad (7)$$

将产生全反射， θ_c 称为临界角。当入射角小于 θ_c 时，其反射系数陡峭下降。临界角法离焦误差检测原理图见文献 1 和文献 2。

3.2 自动调焦的控制方法

自动调焦属高精密纳米定位技术，采用压电陶瓷致动器作为微位移执行器。压电陶瓷致动器具有分辨率高、机电耦合效率高、响应快、功耗小、无噪声等优点；同时也存在非线性、迟滞和蠕变等不足，从而降低了它的定位精度。

改善或消除压电陶瓷致动器非线性、迟滞和蠕变的方法较多，在控制方式上，可采用开环控制或闭环控制；在驱动方式上，可采用电压驱动或电荷驱动方式；在控制算法上，可采用前馈控制与 PID 反馈控制相结合复合控制算法^[3]。

自动调焦伺服控制系统采用电压前馈控制与 PID 反馈控制相结合的复合控制方法^[4-7]。通过实验得出压电陶瓷致动器的实际“电压-位移”曲线作为数学模型，依据此模型设计控制器对压电陶瓷致动器进行控制，如图 3。采用复合控制算法，能增加系统通频带；改善了系统稳定性，且这种控制算法比较简单可行，使调焦精度有很大的提高。

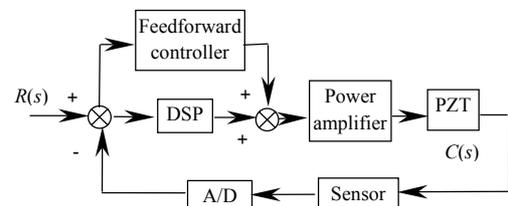


图 3 复合控制方法原理

Fig.3 Principle of compounded control method

4 计算机高速协调并行工作实现

系统采用多机主从并行的工作方式，主控计算机承担与各分系统的信息通讯、数据处理和状态跟踪等任务。各分系统除激光功率控制器外均采用 DSP 作为其控制中心，如图 4。其中激光功率控制器在主控计

算机的控制下,达到调光和稳光的作用;伺服运动控制系统通过 PMAC 控制器,应用球面激光直写算法,承担整个激光直写运动控制任务;离焦信号探测系统在 DSP 的控制下,完成光电信号的提取、放大和处理等;激光直写微调控制系统根据离焦信号探测与信息处理系统提供的信息,动态实时对激光直写物镜进行偏移调整。

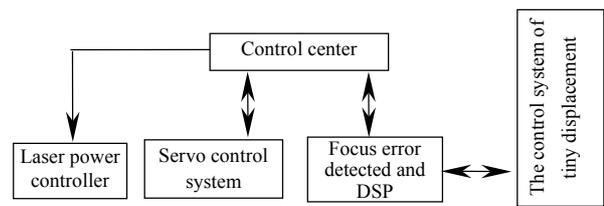


图 4 计算机系统控制逻辑

Fig.4 Block diagram of computer control system

5 结论与结果

微米级等线宽的激光直写技术目前是球面激光直写研究内容的重点,基于国家高科技预研项目的基础条件,对球面激光直写等线宽技术进行研究。已完成四轴同心系统结构、同心扫描光学系统、调焦伺服系统、精密运动控制系统、激光直写算法等内容的设计。应用四轴同心系统结构、同心扫描光学系统结构,已完成对完整的球面工件的激光直写试验,通过对球面工件电磁屏蔽效率等技术检测与分析,证明球面工件线宽精度已达到理想的设计要求,完全满足结果需要。经原子力显微镜检测分析结果表明,在球面上激光直写出约 $3\mu\text{m}$ 宽线条,线宽均匀度达到 10% 左右,线宽与精度均已超过原设计要求,如图 5。

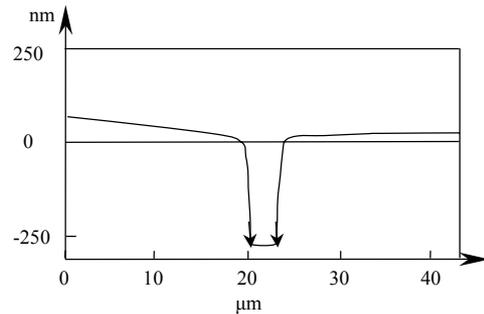


图 5 球面激光直写出的约 $3.0\mu\text{m}$ 宽线条

Fig.5 AFM of line about $3.0\mu\text{m}$ line width on spherical surface

参考文献:

- [1] 熊木地,肖文礼,邢忠宝. 激光直写设备调焦伺服控制系统的研究[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(1): 79-82.
XIONG Mu-di, XIAO Wen-li, XING Zhong-bao. Focusing-servo system of laser direct writing device [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2000, 8(1): 79-82.
- [2] 陈海清,常洋燕,阮玉. 关于临界角法菲涅耳公式简化理论处理的新方法[J]. 光子学报, 1995, 24(6): 551-555.
CHEN Hai-qing, CHANG Yang-yan, RUAN Yu. The new method of a simplified processes of Fresnel formula for the method of critical angle [J]. **ACTA Photonica Sinica**, 1995, 24(6): 551-555.
- [3] 崔玉国,孙宝元,董维杰,等. 基于纳米定位的压电陶瓷执行器控制方法的研究进展[J]. 中国机械工程, 2003, 14(2): 164-168.
CUI Yu-guo, SUN Bao-yuan, DONG Wei-jie, et al. The control method research of PZT performer based on nanometer orientation [J]. **Chinese mechanical engineering**, 2003, 14(2): 164-168.
- [4] 高钟毓. 机电控制工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
GAO Zhong-yu. **Mechanical and electrical control engineering**[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [5] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社, 2001.
HU Shou-song. **Automatic Control Theory** [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [6] 刘廷霞. 电影经纬仪外转台随动系统的改造[J]. 光电工程, 2004, 31(12): 24-26.
LIU Ting-xia. Reconstruction of the outer turret slave tracking system for a film theodolite [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2004, 31(12): 24-26.
- [7] 熊木地,张慧敏,肖文礼,等. 二元光学元件激光直写设备主轴速度调节的一种新方法[J]. 光电工程, 2001, 28(2): 4-6.
XIONG Mu-di, ZHANG Hui-min, XIAO Wen-li, et al. A New Method Adjusting Spindle Velocity of Binary Optical Element Laser Direct-Writing Device [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2001, 28(2): 4-6.