

## 深凹球面网栅恒定曝光量激光直写控制实现

梁凤超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室,  
吉林 长春 130033)

**摘要:** 为在深凹球面内激光直写高质量网栅图形,必须实现写入过程恒定曝光量控制。首先介绍了深凹球面网栅激光直写设备原理,然后分析了任意纬线扫描运动状态,推导了工件尺寸、网栅参数、扫描速度间数学关系,最后建立了恒定曝光量扫描运动数学模型,开发了伺服控制软、硬件系统,确保了扫描角速度随纬度自动精确调整来保持线速度不变,实现了深凹球面网栅激光直写恒定曝光量控制,提高了写入线条质量。在矢跨比为 0.31 的深凹球面内制备了周期 500  $\mu\text{m}$  的网栅,显影后测得线条线宽均匀,侧壁陡直,线宽误差  $\leq \pm 1\%$ ,网格周期误差  $\leq \pm 5\%$ 。

**关键词:** 恒定曝光量; 凹球面; 网栅; 激光直写; 伺服控制

**中图分类号:** TP275 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)02-0381-06

## Constant exposure dose control for laser direct writing of mesh in a deep concave spherical substrate

Liang Fengchao

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** For the purpose of fabricating high-quality mesh in a deep concave spherical substrate by laser direct writing technique, the constant exposure dose control must be realized during the whole scanning process. Firstly, the principle of the equipment for fabricating mesh in a deep concave spherical substrate via laser direct writing technique was introduced. Then scanning motion states for writing arbitrary line of latitude were analyzed, and the formulas that expresses the mathematical relationships between the dimensions of the substrate, parameters of mesh and the scanning velocity were deduced. The mathematical model of scanning with constant exposure dose was built, and the servo control system including software and hardware was developed according to the mathematical model. The servo control system could tune the scanning angular velocity precisely according to the latitude of lines to maintain the linear velocity invariantly, so as to keep the exposure dose constant and improve the quality of lines. So far, constant exposure dose control was realized finally. Mesh with 500  $\mu\text{m}$  gridding period was fabricated in a deep concave spherical substrate with a rise-span ratio of 0.31. Lines on the substrate have good uniformity, steep and straight side walls parallel to each other after development, and errors of line width

收稿日期: 2012-06-15; 修订日期: 2012-07-30

基金项目: 国防科技预研基金(10.4.2.ZK1001)

作者简介: 梁凤超(1978-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事计算机控制、光电仪器精密伺服控制方面的研究。Email: fcliang@yahoo.cn

and gridding period are within  $\pm 1\%$  and  $\pm 5\%$ , respectively.

Key words: constant exposure; concave spherical substrate; mesh; laser direct writing; servo control

## 0 引言

激光直写技术是一种微细加工技术,它通过计算机控制激光直写设备,实现激光束聚焦光斑在涂覆光刻胶的基底上,精确定位直接扫描曝光写入图形,从而在胶层上产生所需图形潜影,再经显影、定影、坚膜、镀膜和腐蚀等后续处理工序将图形转移到基底上<sup>[1-3]</sup>。激光直写技术的应用范围很广,如制备衍射光学元件、光盘母板、波带板、连续位相浮雕闪耀光学元件等。

红外隐身技术通过降低或改变目标的红外辐射特征,实现对目标的低可探测性<sup>[4]</sup>。飞行器红外隐身技术是随红外探测和武器制导及对目标的攻击能力不断提高发展起来的<sup>[5]</sup>。随着红外技术与光电对抗技术的不断发展,对红外窗口的雷达隐身性能提出了很高的要求<sup>[6]</sup>。利用激光直写技术在飞行器光学窗口上制备一层既能高效透过红外光,又能屏蔽雷达波的金属网栅,能够在不影响自身对目标红外识别的同时,有效缩减 RCS,实现飞行器的雷达隐身。

凹球面网栅激光直写设备能够在内表面均匀涂覆光刻胶的凹球面上扫描曝光写入网栅图形,再经显影、镀膜、去胶等,在凹球面内表面制备金属网栅<sup>[7]</sup>。但此设备要求凹球面工件的曲率半径、口径及矢跨比处于一定范围内。矢跨比为矢高与跨径之比,又称作矢度,是衡量弧面坦陡程度的参数。一般矢跨比小于 0.2 称为坦拱,高于 0.2 称为陡拱。文中将矢跨比大于 0.2 的凹球面称为深凹球面。应用此设备在某飞行兵器的深凹球面光学窗口内写入网栅图形时,窗口中部网栅线条扫描角度过大,窗口与俯仰轴支撑结构发生空间冲突,无法在其内表面制备金属网栅。

如果重新设计俯仰轴模块使其小型化来解决上述问题,机械、光路及驱动系统的设计、加工、调试不仅会耗费较多的人力、物力,并且无法满足一个月的任务周期。因此,文中提出将深凹球面绕球心上旋一定角度,相对于水平面非对称的俯仰支撑结构,解决了空间冲突问题,避免了俯仰轴模块的重新设计,只需设计工件的非对称支撑专用夹具。然而,原适用于

对称支撑结构的扫描运动数学模型不适用于新的支撑结构<sup>[8]</sup>。建立新的恒定曝光量扫描运动数学模型,开发软件及硬件控制系统,实现深凹球面的恒定曝光量激光直写是文中研究的核心内容。

## 1 深凹球面网栅激光直写原理

凹球面激光直写设备如图 1 所示,凹球面工件通过专用夹具安装在转台上,工件的旋转中心为方位轴、俯仰轴、工件中心轴和光笔光轴的交点,此即四轴同心结构和同心扫描光学系统,这保证了写入激光始终径向聚焦于工件内表面<sup>[9]</sup>。写入光斑初始定位于凹球面顶端点或底端点,激光快门处于关状态,转台带动工件水平旋转、俯仰轴模块驱动写入光笔旋转网格周期对应的角度,将写入光斑定位到第一条纬线起点;打开激光快门,转台带动工件以设定线速度水平扫描第一条纬线弧长,立即关闭激光快门,写入第一条纬线完成;转台与俯仰轴模块配合将写入光斑定位于第二条纬线起点,开激光快门,以恒定线速度反方向扫描完成第二条纬线曝光,关快门;……,依此类推,完成一个方向的周期纬线扫描。然后将凹球面工件旋转  $90^\circ$ ,按同样方法激光直写另一个方向的周期纬线。两个方向上的周期纬线相交便形成了如图 2 所示的凹球面网栅,凹球面中部的网格最接近正方弧形,而边缘网格为菱形。

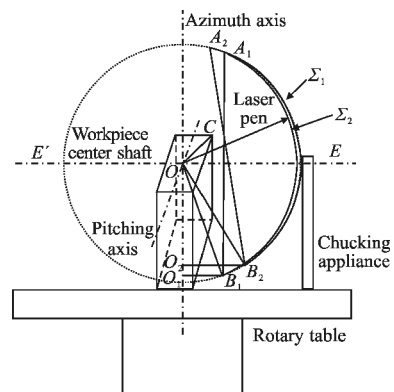


图 1 深凹球面激光直写设备

Fig.1 Sketch of the equipment of laser direct writing mesh on a deep concave spherical substrate

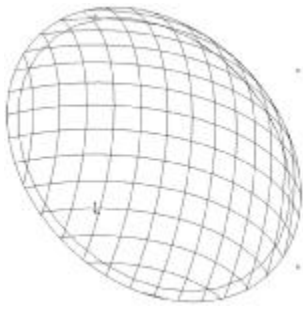


图 2 凹球面网栅

Fig.2 Sketch of mesh on a concave spherical substrate

图 1 中  $\Sigma_1$  表示相对于水平面上下对称支撑的深凹球面。在写入  $\Sigma_1$  赤道附近长纬线时,其扫描角度过大, $\Sigma_1$  下半部分与俯仰轴模块发生空间冲突,但  $\Sigma_1$  上半部分不发生冲突。俯仰轴模块关于方位轴对称,其边沿与方位轴的距离  $\overline{OC}$  决定了  $\Sigma_1$  下半部分产生空间冲突的临界距离,即光笔在  $\Sigma_1$  下半部分扫描的小圆半径最小值等于  $\overline{OC}$ ,  $\Sigma_1$  下半部分任一点与方位轴垂直距离小于等于  $\overline{OC}$  就会发生空间冲突,无法完成扫描曝光运动。

为解决  $\Sigma_1$  下半部分的空间冲突问题,文中提出了  $\Sigma_1$  上旋非对称支撑,利用俯仰轴顶部空间来避免空间冲突的方案。如图 1 所示,  $\Sigma_2$  为  $\Sigma_1$  绕球心  $O$  上旋一定角度后的状态。为了便于区分,图 1 中  $\Sigma_1$  与  $\Sigma_2$  重合部分留有一定空隙。  $\Sigma_1$  的上、下端点分别为  $A_1$ 、 $B_1$ ,  $\Sigma_2$  的上、下端点分别为  $A_2$ 、 $B_2$ 。  $\Sigma_1$  上旋前,  $\overline{O_1B_1} < \overline{OC}$ , 表明俯仰轴模块会与  $\Sigma_1$  发生空间冲突。将  $\Sigma_1$  以球心  $O$  为圆心,绕俯仰轴向上旋转一定角度后,  $\Sigma_1$  底端点  $B_1$  与方位轴距离  $\overline{O_1B_1}$  增加,当  $\Sigma_1$  上旋至  $\Sigma_2$ ,  $\overline{O_1B_1}$  增加为  $\overline{O_2B_2}$ , 满足  $\overline{O_2B_2} > \overline{OC}$ , 至此解决了空间冲突问题。

下面结合图 1 计算临界上旋角度。  $\Sigma_1$  口径  $\overline{A_1B_1} = D$ , 曲率半径为  $R$ ,  $\Sigma_1$  的通光孔径角为:

$$\alpha = 2\arcsin\left(\frac{D/2}{R}\right) \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  决定了光笔俯仰运动的角度范围。  $\Sigma_1$  对称支撑时,其底端点  $B_1$  距方位轴垂直距离为:

$$\overline{O_1B_1} = R \times \cos\left[\arcsin\left(\frac{D/2}{R}\right)\right] \quad (2)$$

由公式(2)可得,如果  $\overline{O_1B_1} < \overline{OC}$ , 可以通过将  $\Sigma_1$  上旋减小  $\angle EOB_1$  来增大  $\overline{O_1B_1}$ , 使  $\overline{O_1B_1} > \overline{OC}$  来解决  $\Sigma_1$  与俯仰轴模块的空间冲突问题。

设  $\Sigma_1$  上旋角度  $\gamma$  后,  $\Sigma_2$  底端点  $B_2$  与方位轴垂直距离为  $\overline{O_2B_2}$ , 其表达式为:

$$\overline{O_2B_2} = R \times \cos\left[\arcsin\left(\frac{D/2}{R}\right) - \gamma\right] \quad (3)$$

当  $\overline{O_2B_2} = \overline{OC}$  时,  $\Sigma_2$  底端点  $B_2$  恰好处于空间冲突的临界点。将  $\overline{O_2B_2} = \overline{OC}$  代入公式(3)即可求出避免空间冲突的临界上旋角度:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{D/2}{R}\right) - \arccos\left(\frac{\overline{OC}}{R}\right) \quad (4)$$

实际上旋角度要略大于  $\gamma$ 。

## 2 恒定曝光量扫描运动数学模型

激光直写线条轮廓是由胶层内曝光量的空间分布决定的,保持曝光量的恒定是提高线条质量的首要途径。凹球面激光直写设备采用同心机械结构和同心扫描光学系统,保证写入光斑始终聚焦在凹球面上。激光功率控制器的稳光控制使激光功率稳定,功率波动均方根值小于 0.05%。同心结构和稳光控制保证了写入光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,所以曝光量的恒定取决于曝光时间即扫描线速度的恒定。

如图 3 所示,上旋非对称支撑使深凹球面上、下部分的纬线弧长、扫描角速度非对称,控制算法要能够根据纬线纬度实时调整扫描曝光角速度以保持线速

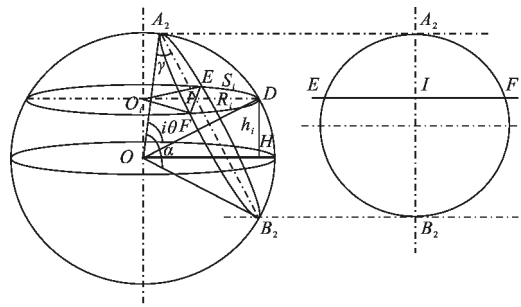


图 3 深凹球面激光直写第 i 条纬线状态

Fig.3 State of laser direct writing of no.i latitude line in a deep concave spherical substrate

度不变,精确定位写入光斑于每条纬线的起点、终点,实现高效、恒定曝光量激光直写。已知深凹球面的口径为  $D$ ,半径为  $R$ 。网栅周期为弧长  $g$ ,扫描线速度为  $V$ 。激光直写伺服运动控制参数包括每个方向的周期纬线总数  $N$ ,网格周期  $g$  对应的圆心角  $\theta$ ,扫描过程中任意第  $i$  条纬线的弧长  $S_i$ ,保持第  $i$  条纬线线速度

$V$  恒定的角速度  $\omega_1$ 。建立恒定曝光量扫描运动数学模型的核心任务就是建立已知深凹球面工件尺寸、网栅网格参数、扫描线速度等参数间的数学关系,推导出激光直写过程中的伺服运动控制参量,如  $N$ 、 $\theta$ 、 $S_i$ 、 $\omega_1$  等。

写入光斑以深凹球面顶点  $A_2$  为起点,每次向下旋转  $\theta$ ,纬度递减,每个纬度扫描写入一条纬线。 $S_i$  (弧 EDF)为写入第  $i$  条纬线时的扫描轨迹。下面结合图 3 中线段和角度的定义建立恒定曝光量扫描运动的数学模型。

网格周期  $g$  对应的圆心角为:

$$\delta_i = 2\arcsin \frac{\sqrt{\frac{D^2}{4} - \left[ \frac{D}{2} - R\sin\left(\arcsin\frac{D}{2R} + \gamma\right) + r\sin\left(\arcsin\frac{D}{2R} + \gamma - \frac{ig}{R}\right) \right]^2}}{R \times \cos\left(\arcsin\frac{D}{2R} + \gamma - \frac{ig}{R}\right)} \quad (8)$$

第  $i$  条纬线扫描弧长为:

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

为保持曝光量的恒定,需保持曝光时间的恒定,也即保持扫描线速度不变,而扫描每一条纬线时的扫描半径  $R_i$  不同,为了保持线速度恒定,必须根据不同纬度的扫描半径  $R_i$  实时调整扫描角速度  $\omega_1$ ,第  $i$  条纬线扫描角速度为:

$$\omega_1 = \frac{V}{R \times \cos\left(\arcsin\frac{D}{2R} + \gamma - \frac{ig}{R}\right)} \quad (10)$$

式中: $\omega_1$  确保不同纬度的扫描线速度(曝光时间)相等,从而确保曝光量恒定; $S_i$  关于水平面非对称,写入光斑精确定位于  $S_i$  的起点开始扫描,扫描弧长  $S_i$  后停止,开始下一条纬线的扫描,确保无冗余扫描;网格周期  $\theta$  确定定位下一条纬线的纬度变化步长; $N$  决定一个方向上写入纬线的条数,写入纬线数达到  $N$  时,深凹球面旋转  $90^\circ$ ,写入光斑归零位,按相同方法写入另一方向的  $N$  条周期纬线,周期纬线经纬相交得到网栅图形。 $\omega_1$ 、 $S_i$ 、 $\theta$ 、 $N$  是实现深凹球面网栅激光直写恒定曝光量控制的核心参数,公式(5)、(6)、(9)、(10)即为深凹球面网栅恒定曝光量扫描运动控制的数学模型。

### 3 伺服控制的实现

深凹球面网栅激光直写设备四轴伺服控制系由

$$\theta = \frac{g}{R} \quad (5)$$

每个方向上的纬线总数为

$$N = \left\lceil \frac{2\arcsin\left(\frac{D/2}{R}\right)}{g/R} \right\rceil \quad (6)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整运算。第  $i$  条纬线所在小圆圆心为  $O_i$ ,半径为  $R_i = \overline{O_i D}$ , $i$  为从 0 到  $N$  的纬线序号,第  $i$  条纬线所在小圆的半径为:

$$R_i = R \times \cos\left(\arcsin\frac{D/2}{R} + \gamma - \frac{ig}{R}\right) \quad (7)$$

$S_i$  在小圆上的圆心角,即扫描角度为:

工业计算机、PMAC 可编程多轴运动控制器、ACC-8S 两轴信号输出板、方位电机、俯仰电机、2 个  $90^\circ$  分度电机组成,完成速度、位置控制。PMAC 运动控制器是整个伺服控制系统的核心部件,它以脉冲频率调制方式通过调节脉冲频率控制扫描速度、脉冲个数控制扫描弧长。工业计算机运行人机操作界面,监控运动状态并实时传送控制参数到 PMAC 运动程序,应用激光功率控制器稳定激光功率,通过西门子 S7-200 PLC 控制激光快门实现激光束的通断。

深凹球面网栅激光直写控制程序包括上位机主程序、下位机运动程序和 PLC 程序,三程序并行并通过 DPRAM 进行数据信息的实时交换。人机界面采用 VC++ 语言编制,其功能包括凹球面工件参数、网栅参数及扫描运动参数的录入及运动控制参数的计算、运动程序生成、运动状态实时监测、激光功率控制与快门控制等。控制程序流程如图 4 所示。系统自检正常后,输入深凹球面几何参数、网栅参数和设定扫描线速度,运用恒定曝光量扫描运动数学模型(5)~(10)计算出每个方向上总纬线数  $N$ 、纬线扫描角速度  $\omega_1$ 、弧长  $S_i$  和网格周期  $\theta$ ,并将之转化成 PMAC 可识别的控制参量; $i$  为刻划纬线序号,初始值为 0, $j$  为  $90^\circ$  分度计数,初始值为 0;控

制软件启动下位机 PMAC 运动程序, PMAC 接收上位机控制参数, 执行运动程序完成伺服输出, 控制光斑以周期  $\theta$  变换纬度并精确定位于纬线的起点, 控制方位转台以角速度  $\omega_i$  即恒定线速度  $V$  旋转, 精确控制当扫描轨迹弧长为  $S_i$  时立即关闭激光快门, 完成本条纬线的扫描曝光; 判断  $i$  是否小于  $N$ , 如果  $i=N$ , 则一个方向纬线写入完成; 再判断是否已转  $90^\circ$ ,  $j=0$  时表明未转, 控制分度轴转  $90^\circ$ , 继续写入另一方向周期纬线,  $j=1$  时表明两方向周期纬线写入结束, 停止运动程序, 深凹球面网栅写入结束。

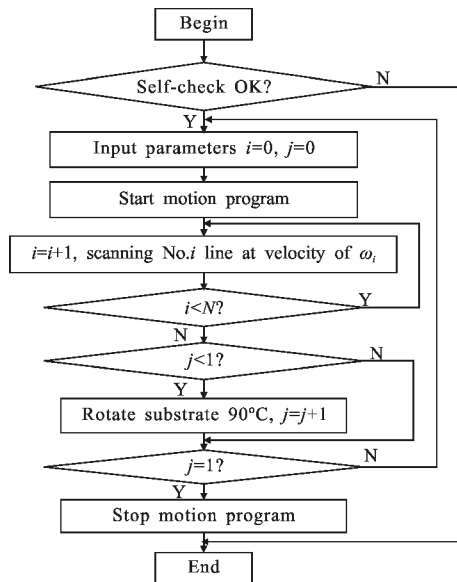


图 4 控制程序流程

Fig.4 Flow chart of control program

## 4 实验

在矢跨比为 0.31 的深凹球面基底上均匀涂覆正定型感光胶, 由专用卡具将工件非对称支撑于激光直写设备水平转台上。在人机界面中输入工件口径、半径、网格周期  $500 \mu\text{m}$ 、设定扫描线速度  $25 \text{ mm/s}$ , 开始执行程序。设备稳定运行 5 h 完成激光直写, 在凹球面胶层上形成了网栅图形潜影。显影后用日本三丰高倍光学测量显微镜测量网栅图形, 由于工件矢跨比大, 显微镜视场小, 测得图片如图 5 所示, 为凹球面中部最接近平面、接近正方形网格区域。测量数据表明: 线条线宽均匀, 边沿陡直, 线宽误差  $\leq \pm 1\%$ , 网格周期误差  $\leq \pm 5\%$ , 满足设计指标。

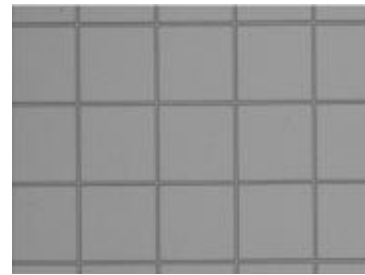


图 5 显影后的深凹球面网栅

Fig.5 Mesh of the deep concave spherical substrate

## 5 结论

文中提出了上旋非对称支撑结构, 解决了深凹球面与俯仰轴模块的空间冲突, 建立了适合非对称支撑结构的深凹球面网栅恒定曝光量扫描运动数学模型, 开发了主从控制软件、硬件系统。上位机软件系统根据数学模型计算控制参数并高速实时传送给 PMAC, 运动控制程序控制方位轴精确调整角速度保持扫描线速度不变, 控制俯仰轴精确定位写入光斑位置, 方位轴、俯仰轴、分度轴精密联动完成深凹球面网栅图形的恒定曝光量写入运动。

实验制作的深凹球面网栅线条均匀, 线宽误差小于  $\pm 1\%$ , 从实验角度证明了激光直写过程中曝光量恒定, 所建立的深凹球面网栅恒定曝光量扫描运动数学模型正确。文中解决了利用现有凹球面激光直写设备制造高矢跨比深凹球面金属网栅的关键难题, 最终在一个月内制作了满足设计指标的深凹球面网栅。

## 参考文献:

- [1] Chao Wang, Yuen Chuen Chan, Yee Loy Lam. Fabrication of diffractive optical elements with arbitrary surface-relief profile by direct laser writing[J]. Optical Engineering, 2002, 41(6): 1240-1245.
- [2] Xie Yongjun, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Fabrication of large diffractive optical elements in thick film on a concave lens surface[J]. Optics Express, 2003, 11: 992-995.
- [3] Yang Guoguang, Shen Yibing. Research on laser direct writing system and its lithography properties[C]//SPIE, 1998, 3550: 409-418.
- [4] Fu Wei. Principle and application technology of IR stealth [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(1): 88-93. (in Chinese)

- 付伟. 红外隐身原理及其应用技术 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(1): 88-93.
- [5] Tan Xianyu. The technical approach of infrared stealth for aircraft [J]. Infrared and Laser Engineering, 1997, 26(3): 62-63. (in Chinese)  
谭显裕. 飞行器红外隐身的技术途径 [J]. 红外与激光工程, 1997, 26(3): 62-63.
- [6] Fan Youyu, Yang Yi, Jiang Xiongwei, et al. New mid-infrared material and its radar stealth function [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 12-16. (in Chinese)  
范有余, 羊毅, 姜雄伟, 等. 一种新型中红外材料及其隐身功能研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 12-16.
- [7] Liang Fengchao, Hu Jun, Xu Zhijun. 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. (in Chinese)  
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.
- [8] 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.
- [9] Liang Fengchao. Analysis of zero position error influencing on control algorithm for fabricating mesh on the concave spherical substrate by photolithography technology [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(12): 122-125. (in Chinese)  
梁凤超. 凹球面网栅光刻控制算法零点误差分析[J]. 光电工程, 2008, 35(12): 122-125.

## 下期预览

# 基于 DSP 的光栅衍射型激光告警系统设计与实现

苏平<sup>1</sup>, 牛燕雄<sup>1</sup>, 李大乾<sup>1</sup>, 赵建君<sup>2</sup>, 李易难<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 牛海莎<sup>1</sup>, 阎石<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

2. 解放军军械工程学院 基础部, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 激光告警系统是一种可对来袭激光性能参数进行实时探测的光电对抗设备。基于光栅衍射效应以及 DSP 信号采集及处理系统, 设计并实现了激光告警系统, 可对激光的波长、方位进行探测、告警。对激光告警系统的硬件和软件的设计与实现进行了研究, 建立了入射激光波长以及方位的数学模型, 推导了激光波长以及方位角与激光衍射点的数学表达式, 并对激光告警系统进行了实验研究。实验结果表明: 该系统能有效探测来袭激光波长及其方位, 可测波长范围为 500~1 100 nm, 方位角为  $\pm 13^\circ$ , 波长最大偏差 10 nm, 方位角最大误差  $1^\circ$ 。