

文章编号 1004-924X(2006)02-0251-05

同心扫描法制作凹球面等距网栅的误差分析

冯晓国^{1,2}, 卢俊³, 徐峰林¹, 孙连春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 100049; 3. 长春理工大学 理学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 纬线与纬线相交可形成球面等距网栅, 而采用“同心扫描”的运动方式可在凹球面上生成纬线。“同心扫描”要求直写物镜光轴、直写物镜水平转轴、工件回转轴和工件分度轴四轴交于工件凹面球心。采用两两相交误差几何分析的方法, 得到了同心误差与离焦量和栅距误差的变化关系: 随着同心误差增加, 系统离焦量和栅距误差也增加, 且二者的变化趋势基本一致。因为网栅线宽一般要求达到微米量级, 与之匹配的栅距则往往为几百微米, 所以栅距误差与栅距相比可以忽略, 系统离焦量对网栅线宽的影响却必须认真考虑。采用几何光学基本公式对物镜系统的进一步分析表明, 为了制作细且均匀的网栅线条, 必须采用小光斑, 而小光斑对应的焦深也小, 从而要求离焦量小, 对同心误差要求严格; 反之, 则可放宽对同心误差的要求。

关键词: 滤波器; 电磁屏蔽; 光刻; 金属网栅; 球面

中图分类号: TN761 **文献标识码:** A

Error analysis of fabricating isometric mesh on the concave of a spherical substrate by concentric optical scanning

FENG Xiaoguo^{1,2}, LU Jun³, XU Feng-lin¹, SUN Lian-chun¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

Abstract: An isometric mesh on the concave of a spherical substrate was formed by latitude line intersection each other, in which latitude lines was generated by a concentric optical scanning method. An optical axis, erection turning spindle, horizontal dividing spindle and a pitching dividing spindle were positioned on the concave center of the spherical substrate in concentric scanning. The concentric error between these spindles with the concave center may bring on the defocus of optical system and the error of the mesh period, but because the ratio of the period error to the period is very small, the latter may be ignored. The theoretical analytical result shows that the line width of mesh is restricted by the dimension of focal spot and the defocus of optical system determines the smallest dimension of focal spot, so the line width of mesh is restricted by the concentric error, i. e. the smaller the concentric er-

收稿日期: 2005-10-22; 修订日期: 2006-01-16.

基金项目: 国防科技预研基金项目 (No. 10. 4. 2ZK1001)

ror is, the smaller the line width is also.

Key words: filter; electromagnetic shield; lithography; metallic mesh; sphere surface

1 引言

网栅是频率选择表面(FSS)的一种,它主要通过改变结构、材料参数来实现一定的滤波功能。它一般分为两种,一种是电感性网栅;另一种是它的互补结构,称为电容性网栅^[1]。因网栅多采用导电率及导磁率高的材料来制作,一般也称为金属网栅。在透红外波且屏蔽雷达波方面,电感性网栅具有特定的应用价值^[2]。在国外,自从德国学者 R. Ulrich. 于 1967 年发表第一篇关于网栅的经典文献以来^[3],各种报道层出不穷。到目前,国外关于二维平面网栅的理论及实验研究已颇为成熟^[4-6]。在国内,对金属网栅深入的理论与实验研究工作刚刚开展,相关文献还很少,且多集中在理论研究方面^[7-9],而曲面网栅因涉及敏感军用领域,尚未见国内外报道。

球面观通器件已广泛用于飞行兵器制导窗口上,在凹球面上制作等宽等间距的电感性网栅,既可在特定条件下,将平面金属网栅的理论移植到球面上去,又充分利用了球壳对内部网栅线条的保护作用,有独特的工程价值。曲面上制作网栅可以采用柔性膜转移、掩模投影曝光、激光直写曝光等方法。柔性膜转移法可用于各种曲面,方法简便,但制作的线条精度低,误差可达数十微米^[10];掩模投影曝光法受狭缝衍射限制,母版与工件面形必须严格吻合,不适合较大曲面^[11];激光直写法利用光刻胶的曝光显影特性,将曝光量的空间分布转化为胶表面的三维浮雕轮廓,其工艺过程除了用激光直写曝光取代掩模投影曝光之外,工艺流程与超大规模集成电路制作工艺基本相同,可直接在曲面工件上“刻划”出所需要的图形,不需制作母版,其精度只受设备精度和光学系统焦深的限制,可在曲面制作线宽小于 $5\ \mu\text{m}$ 的网栅^[12],它的主要缺点是生产率低,成本高。

纬线与纬线相交才能生成球面等距网栅。在凹球面上激光直写纬线,必须采用特定的运动形式,这里称之为“同心扫描”。“同心”即直写物镜光轴、直写物镜转轴、凹球面工件回转轴和凹球面工件分度轴四轴交于工件球心,“扫描”指激光直写。

2 同心扫描原理

如图 1 所示,装在分度轴上的凹球面工件侧立在回转工作台上,并绕竖直轴匀速旋转,光刻物镜的转轴位于工作台的回转中心及工件的球心上。工作台带着工件匀速旋转一圈,激光束经光刻物镜会聚在工件凹球面的光刻胶上直写出一条纬线。然后,光刻物镜绕其转轴转动一个固定角度 α ,工作台带着工件又匀速旋转一圈,激光焦斑在工件凹球面的光刻胶上又形成另一条纬线。如此循环,在工件凹球面的光刻胶上就直写出一组纬线。最后,凹球面工件分度轴旋转 90° ,重复上述运动过程,便可得到另一组纬线。经显影、镀膜、去胶,在工件的凹球面上就得到了等间隔的金属网栅。

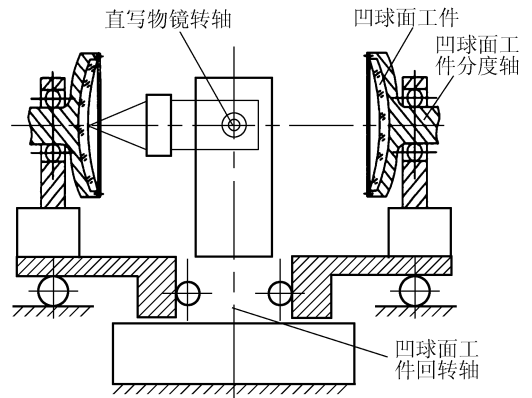


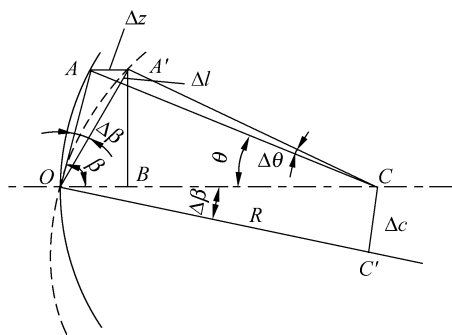
图 1 同心扫描系统结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of concentric optical scanning

3 同心扫描误差分析

根据同心扫描原理,凹球面工件球心与回转轴、凹球面工件球心与直写物镜转轴、凹球面工件球心与工件分度轴、直写物镜转轴与工件回转轴的不同心误差均可根据图 2 来进行分析。这是因为,虽然在每一种不同心情况下,图 2 中各参数代表的物理量将有所不同,但得到的结果基本一致。

这里假定图 2 为凹球面工件球心与回转轴的不同心误差示意图。其中, C 点是系统无同心误

图 2 同心误差 Δc 与离焦量 Δz 、栅距误差 Δl 的关系Fig. 2 Relationship of the concentric error Δc , defocusing value Δz and mesh period error Δl

差时凹球面球心位置, C' 点是系统有同心误差时的位置, OC 为回转轴的轴线, 球面 OA 为无同心误差时凹球面位置, 球面 OA' 为球面工件的球心位置不在直写物镜转轴的轴线上时凹球面的位置。设 C' 点与 C 点存在不同心误差 Δc , 假设物镜扫描半径 R 仍为理想球面半径(实际中可根据检焦系统观察结果调节镜筒长度逐渐逼近假设状态), θ 为工件半口径对应的中心角(已知量), 扫描圆弧为 OA' , 这将引起光学离焦 Δz 及栅距误差 Δl 。显然, 图 2 中其余量为几何量。

由图 2 可知

$$\Delta\beta \approx \frac{\Delta c}{R}, \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\pi - \theta}{2}, \quad (2)$$

则

$$OA = \frac{R \sin \theta}{\sin \beta} = 2 \times R \times \sin \frac{\theta}{2}, \quad (3)$$

又

$$\Delta z \approx OA \times \Delta\beta, \quad (4)$$

根据公式(1)、(3)、(4), 有

$$\Delta z \approx 2 \times \Delta c \times \sin \frac{\theta}{2}, \quad (5)$$

又

$$OA' \approx OA, \quad (6)$$

$$A'B = OA' \times \sin(\beta - \Delta\beta), \quad (7)$$

$$\Delta\theta = \arctan \frac{AB}{R - OA' \times \cos(\beta - \Delta\beta)} - \theta, \quad (8)$$

$$\Delta l \approx R \times \Delta\theta, \quad (9)$$

根据公式(1)、(2)、(3)、(6)、(7)、(8)、(9), 有

$$\Delta l \approx R \cdot \left[\arctan \frac{2 \sin \frac{\theta}{2} \times \cos \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Delta c}{R} \right)}{1 - 2 \sin \frac{\theta}{2} \times \sin \left(\frac{\theta}{2} + \frac{\Delta c}{R} \right)} - \theta \right], \quad (10)$$

显然, 当 $\frac{\Delta c}{R} \approx 0$ 时, $\Delta l \approx 0$ 。

如工件 $SR = 154 \text{ mm}$, $\theta = 40.5^\circ$, 按公式(5)和(10), 可得出同心误差 Δc 与离焦量 Δz 、栅距误差 Δl 关系表(如表 1)。

表 1 Δc 与 Δz 、 Δl 的关系 ($R = 154 \text{ mm}$, $\theta = 40.5^\circ$)Tab. 1 Relationship of the Δc , Δz and Δl

同心误差 Δc (μm)	离焦量 Δz (μm)	栅距误差 Δl (μm)
2	1.4	0.5
4	2.8	1.0
6	4.2	1.4
8	5.5	1.9
10	6.9	2.4

从表 1 可看出, 随着同心误差变大, 离焦量的变化与栅距误差的变化趋势基本一致。然而, 根据参考文献[9], 金属网栅的线宽一般为微米量级, 与之匹配的栅距往往为亚毫米量级, 根据金属网栅的光电特性公式, 表 1 中由同心误差引起的栅距误差对网栅性能的影响可以忽略, 而同心误差引起的离焦量所导致的网栅线宽的变化却必须认真考虑。

一般情况下光束半径与通光孔径半径比值为 1, 激光直写系统的写入焦斑的强度分布与衍射极限的艾里分布接近, 焦斑直径可近似描述为^[13-14]:

$$d_0 = 2.44 \lambda F_e^\# = \frac{1.22 \lambda}{NA}, \quad (11)$$

式(11)中, λ 为激光波长, $F_e^\#$ 为有效菲涅耳数, NA 为直写物镜的数值孔径。

根据瑞利判据, 得到焦深公式^[15]

$$z_0 = \frac{\lambda}{2NA^2}, \quad (12)$$

激光焦斑直径的变化可由下式求出^[16]

$$d(z) = d_0 \sqrt{1 + (z/z_0)^2}, \quad (13)$$

式(13)中, z 为离焦量。

由式(11)、(12)、(13), 并参照表 1, 可以得到表 2 的结果(取 $\lambda = 0.442 \mu\text{m}$)。

表 2 离焦与同心误差的关系(物镜 NA=0.27~0.20)

Tab.2 Relationship of the defocusing value and concentric error(NA=0.27~0.20)

同心误差 $\Delta c(\mu\text{m})$	2	4	6	8	10
光斑尺寸 $d_0(\mu\text{m})$	1.3	2	3	4	5
焦深 $z_0(\mu\text{m})$	1.0	2.8	6.4	11	15.7
离焦量 $\Delta z(\mu\text{m})$	1.4	2.8	4.2	5.5	6.9

从表 2 可以看出,当焦斑小时(对应细线条),焦深也小,对同心误差要求极其严格(光斑尺寸 $1.3 \mu\text{m}$,焦深为 $1.0 \mu\text{m}$,如同心误差为 $2 \mu\text{m}$,离焦量已不能满足要求);当焦斑大时(对应粗线条),焦深较大,对同心误差要求放宽(当光斑尺寸 $5 \mu\text{m}$,焦深为 $15.7 \mu\text{m}$,如同心误差为 $10 \mu\text{m}$,离焦量也能满足要求)。因此,系统对同心误差的要求取决于要制作网栅的线宽,要求的线宽越小,对同心误差要求越严格。

参考文献:

- [1] MUNK B A. *Frequency selective surface; theory and design*[M]. A Wiley-Interscience Publication. 2000.
- [2] 高劲松, 孙连春, 郑宣明, 等. 红外透明导电金属网栅薄膜[J]. 光学技术, 2001, 27(6): 558-559.
GAO J S, SUN L CH, ZHENG X M, et al. IR transparent conductive metallic mesh film[J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 558-559. (in Chinese)
- [3] ULRICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure[J]. *Infrared Physics*, 1967, 7:37-57.
- [4] KOHIN M. Analysis and design of transparent conductive coatings and filters[J]. *Opt. Eng.*, 1993, 35(5): 911-925.
- [5] NOLL R J. Some trade issues for EMI windows[J]. *SPIE*, 1994, 2286: 403-410.
- [6] MIAS C, TSOKONAS C, OSWALD C. *An investigation into the feasibility of designing frequency selective windows employing periodic structures*[C]. Technical Reports AY3922, The Nottingham Trent University, Burton Street, Nottingham, NG1 4BU, U. K., 2002.
- [7] 洪伟, 章文勋. 分析无限平面金属栅电磁散射问题的一种新方法[J]. 电子学报, 1992, 20(3): 47-51.
HONG W, ZHANG W X. A new method for the analysis of electromagnetic wave scattering by an infinite plane metallic grating[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1992, 20(3): 47-51. (in Chinese)
- [8] 徐则川, 李义兵. 一维周期金属栅的电磁特性[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(1): 60-62.
XU Z CH, LI Y B. The electromagnetic characteristics of one-dimensional periodic metal grid[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 1997, 25(1): 60-62. (in Chinese)
- [9] 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.
FENG X G, FANG L, SUN L C. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Optics and Precision Engineering*. 2005, 13(1): 59-64. (in Chinese)
- [10] GEBART B R. Permeability of unidirectional reinforcements for RTM[J]. *Journal of Composite Materials*, 1992, 26(8): 1100-1133.
- [11] 余国彬, 姚汉民, 罗先刚, 等. 超微细光刻中偏振光成像研究[J]. 光电工程, 2003, 30(5): 1-3.

4 结 论

凹球面上制作金属网栅,有特定的学术价值和工程价值。本文描述了凹球面等距网栅的生成原理,并细致分析了同心误差对离焦的影响,得到以下几点结论:

(1) 纬线与纬线相交才能形成球面等距网栅,凹球面上等距网栅的生成,必须采用同心扫描的运动形式。

(2) 同心误差引起的离焦量的变化与栅距误差的变化趋势基本一致。但根据金属网栅的光电特性公式,同心误差引起的栅距误差对网栅性能的影响可以忽略,而同心误差引起的网栅线宽变化对网栅性能的影响则必须认真考虑。

(3) 对系统同心误差的要求取决于所制作网栅的线宽:线宽越小,对同心误差要求越高;反之,则低。

- YU G B, YAO H M, LUO X G, *et al.* A study on polarized light imaging in super-microlithography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(5): 1-3. (in Chinese)
- [12] GALE M T, ROSSI M, PEDERSEN J. Fabrication of continues-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresist[J]. *Opt. Eng.*, 1994, 33: 3556-3566.
- [13] MALLENDER I H. Resolution, intensity and power in diffraction limited laser systems[J]. *SPIE*, 1976, 84: 132-137.
- [14] ROBERT E. *Fischer and Biljana Tadic-galeb. optical system design*[M]. McGraw-Hill, 2000: 205-212.
- [15] 李凤有. 激光直写光刻工艺研究[D]. 中国科学院研究生院, 2002: 26-28.
LI F Y. *Study on technology of laser direct writing photography*[D]. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2002: 26-28. (in Chinese)
- [16] 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 98-102.
LV B D. *Laser optics: beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 98-102. (in Chinese)

作者简介:冯晓国(1974—),男,吉林长春人,1998年7月毕业于吉林工业大学,现为中科院长春光机所助理研究员,博士研究生,主要研究方向为光刻设备及光刻工艺。E-mail:fxg74@163.com