

采用正弦微窗光栅的位移传感器

王春海 张国雄 郭尚旗 马新辉

(天津大学精密仪器工程系, 天津 300072)

摘 要 研制了一种新型的光栅位移传感器, 它采用了一种被作者称为正弦微窗光栅的新元件作为指示光栅, 用于消除光栅信号中的高次谐波。所谓正弦微窗光栅是一种由许多微小的正弦窗孔排列组成的光栅。介绍了采用光学图形发生器和刻蚀镀膜工艺制造这种光栅的方法, 并将制成的正弦微窗光栅用于光栅位移传感器的设计。实验表明, 新型传感器能够很好地抑制光栅信号中的高次谐波, 可将高次谐波总量降至基波的 2% 以下。

关键词 正弦微窗光栅, 位移传感器, 谐波。

1 引 言

光栅是高精度位移测量中常用的传感器之一, 随着制造业的发展, 人们对光栅传感器的精度要求也越来越高, 高次谐波对光栅传感器的影响已不容忽视。传统的光栅传感器通常采用两片黑白光栅形成莫尔条纹, 其光栅信号一般不是标准的正弦波, 往往含有 10% 左右的高次谐波。由于光栅传感器通常需要借助于电子细分达到较高的精度和分辨力, 而细分是建立在光栅信号是正弦波的基础上, 高次谐波破坏了信号的准确性, 从而影响到传感器的细分精度。国外很早就开始了有关消除高次谐波方面的研究^[1], 但不尽满意, 应用很少。作者曾研制过一种采用正弦光栅作为指示光栅的传感器^[2, 3], 很好地抑制了信号的高次谐波, 但是这种正弦光栅采用感光照相技术制作, 其乳胶衬底易吸湿变形, 难以适应潮湿的工作环境。本文将介绍另一种采用微窗模拟正弦指示光栅的新方法, 同样可以消除光栅信号的高次谐波。与前者不同之处在于这种光栅能够用金属镀膜工艺制造, 可以满足潮湿环境下的使用要求, 并保持其长期工作稳定性。

2 正弦微窗光栅

所谓正弦微窗光栅是指光栅是由许许多多微小的窗口排列而成。本文所采用的微窗单元如图 1 所示, 微窗单元为一长方形, 中间有一透光孔, 透光孔内光强透过率为一常数 C , 孔以外区域光强透过率为 0 或接近于 0, 透光孔的内边缘沿 y 方向的跨度 Δ_y 是一个变量:

$$\Delta_y = \frac{h}{2} + \frac{h}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{W}\right) \quad (1)$$

式中, W 为微窗单元的宽度, h 为微窗单元的高度, x 是垂直于 y 轴的坐标, $0 < x < W$ 。本文

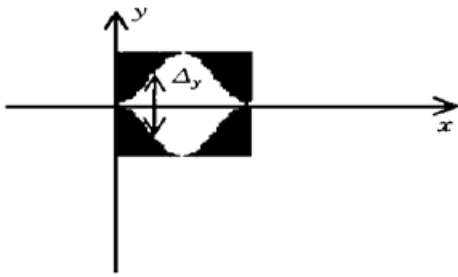


Fig. 1 Sine micro-window element

称满足式(1)的微窗为正弦微窗单元。

正弦微窗单元孔的两条边缘可以有多种设计形式,图1所示的单元由两条正弦曲线组成,也可以改为由一条直线和一条正弦曲线组成或者其他形式,只要满足(1)式即可。将许许多多的微窗单元按一定规则在平面上排列起来,形成的图案称作正弦微窗光栅,如图2所示。光栅的“刻线”是由微窗单元沿y向衔接排列而成,许多“刻线”沿x方向复制形成微窗光栅。

由于正弦微窗光栅具有精细的结构,常规的光栅刻划机无法满足其制作要求。借鉴集成电路制造技术中的光学图形发生器来产生正弦微窗光栅的原始图形,然后采用刻蚀镀膜制作工艺进行复制,成功地完成了50 l/mm的光栅的研制,图3为用扫描电镜观察到的该光栅的显微图像,该光栅采用的微窗单元为长方形,其中 $W = 20 \mu\text{m}$, $h = 100 \mu\text{m}$ 。 h 取值的依据遵循两条原则:一方面, h 应尽可能得大,这样同样大小的光栅所需的微窗数目将会减少,从而节省图形发生器在复制微窗单元上的耗时;另一方面, h 应远远小于光电接受元件的尺寸(其原理将在本文的下一部分论述)。综合考虑,本文选取 $h = 100 \mu\text{m}$ 。需要说明得是,由于正弦微窗光栅为黑白图案,在制得第一块光栅后,可以用它作母版,以后复制也就不再需要图形发生器了。

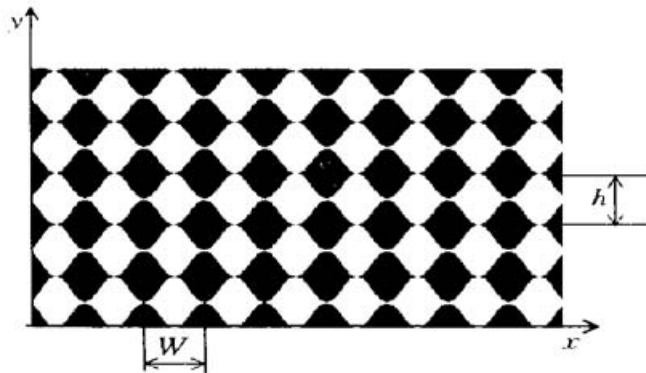


Fig. 2 Sine micro-window grating

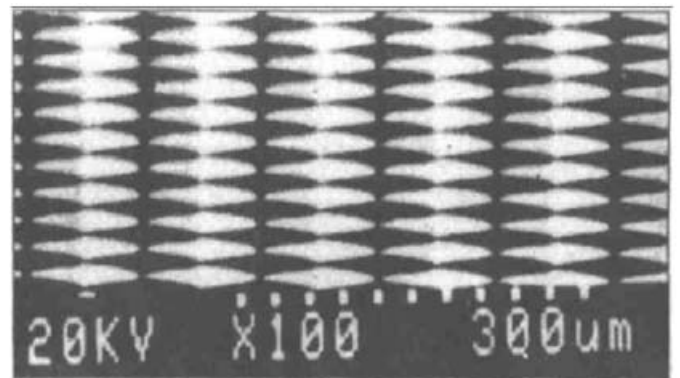


Fig. 3 Microscopic picture of sine micro-window grating

3 采用正弦微窗光栅的光栅位移传感器

由于图形发生器本身受布点速度的限制,正弦微窗光栅目前难以做得很长,通常仅用作指示光栅。图4为采用微窗光栅的传感器的示意图。光源1位于聚光镜2的焦面上,光线经聚光镜2变为准直光,准直光依次通过彼此相邻的标尺光栅3和指示光栅4(标尺光栅3为一普通的黑白光栅,指示光栅4为一正弦微窗光栅,并具有与标尺光栅3相同的光栅常数 W),标尺光栅3和指示光栅4的栅线相互平行或者稍微倾斜。照明光经过两光栅后为光电接收元件5所接收,由于正弦微窗光栅的作用,光电元件的输出信号将不含有高次谐波。

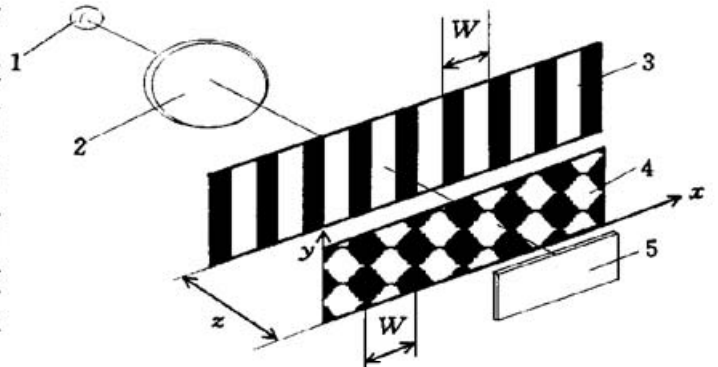


Fig. 4 Displacement sensor using sine micro-window grating

下面以两光栅栅线相互平行为例来解释该装置的原理。

在如图 4 所示的传感器中, 标尺光栅为黑白光栅, 其光强透过率可以表示为傅里叶级数的形式^[4],

$$g(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_k \exp\left(\frac{j2\pi kx}{W}\right) \quad (2)$$

式中, C_k ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 为傅里叶系数, 其值取决于刻线的结构; x 为在光栅平面内沿与刻线垂直方向的坐标; W 为光栅常数。

标尺光栅 3 在准直光照射下, 根据傅里叶光学, 光栅的近衍射场的光强也呈周期分布, 数学上可以表示为^[5]

$$I(x) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} I_l(z) \exp\left(\frac{j2\pi xl}{W}\right) \quad (3)$$

式中, l 为谐波次数; x 为在光栅平面内沿与刻线垂直方向的坐标; z 为衍射场平面与光栅平面的距离; $I_l(z)$ 为衍射场各次谐波的幅值。

如果设计上保障微窗单元的尺寸远远小于光电元件的敏感区域, 这样光电元件就能够同时接收几百个甚至上千个微窗单元的透射光, 如果忽略光电元件边缘部分覆盖的微窗单元, 设光电元件覆盖着整数 n 个微窗光单元, 这 n 个微窗单元的透光函数则可以表示为

$$t(x, y) = \sum_{i=1}^n t_i(x - x_i, y - y_i) \quad (4)$$

式中, (x_i, y_i) 为第 i 个微窗单元对应标志点的坐标; $t_i(x - x_i, y - y_i)$ 为第 i 个单元的透光函数, 若点位于第 i 个透光单元的透光孔内, $t_i(x - x_i, y - y_i) = C$, 否则 $t_i(x - x_i, y - y_i) = 0$ 。

根据傅里叶光学, 光电元件接收到的光强 E 应为标尺光栅在 z 处的衍射场与指示光栅光强透过率的卷积, 由式(3)、(4)式得

$$\begin{aligned} E &= \iint I(x_0 - x) t(x, y) dx dy = \\ &= \iint \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l(z) \exp\left(\frac{j2\pi l(x_0 - x)}{W}\right) \sum_{i=1}^n t_i(x - x_i, y - y_i) dx dy = \\ &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l(z) \exp\left(\frac{j2\pi lx_0}{W}\right) \sum_{i=1}^n \iint \exp\left(\frac{-j2\pi lx}{W}\right) t_i(x - x_i, y - y_i) dx dy = \\ &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} I_l(z) \exp\left(\frac{j2\pi lx_0}{W}\right) \sum_{i=1}^n C \int_{x_i - W/2}^{x_i + W/2} \exp\left(\frac{-j2\pi lx}{W}\right) \left[\frac{h}{2} + \frac{h}{2} \sin \frac{2\pi(x - x_i)}{W}\right] dx \quad (5) \end{aligned}$$

当 $l = 0$ 时,

$$E_{l=0} = \frac{1}{2} I_0(z) nChW$$

当 $l = -1$ 时,

$$E_{l=-1} = \exp\left(\frac{-j2\pi x_0}{W}\right) I_{-1}(z) \frac{ChW}{4} \sum_{i=1}^n \left(-\sin \frac{2\pi x_i}{W} + j \cos \frac{2\pi x_i}{W}\right)$$

当 $l = 1$ 时,

$$E_{l=1} = \exp\left(\frac{j2\pi x_0}{W}\right) I_1(z) \frac{ChW}{4} \sum_{i=1}^n \left(-\sin \frac{2\pi x_i}{W} - j \cos \frac{2\pi x_i}{W}\right)$$

当 $l \neq 0, \pm 1$ 时,

$$E_{l \neq 0, \pm 1} = 0$$

考虑到光栅衍射场的光强分布是实函数, 因此 $I_1(z) = I_{-1}(z)$ 。综合上面的讨论, 可以得到以下的表达式

$$E = \frac{1}{2} I_0(z) nChW + \frac{1}{2} I_1(z) ChW \sum_{i=1}^n \sin \frac{2\pi(x_0 - x_i)}{W} \quad (6)$$

由(6)式不难看出, 光电元件的接收的光强 E 是两光栅相对位移 x_0 一次正弦函数, 二次以上高次谐波均为 0。这样就实现了抑制光栅高次谐波的目的。

4 谐波含量测试

基于上述理论和方法, 作者成功地研制了一 50 l/mm 的正弦微窗光栅, 光栅采用 $20 \mu\text{m}$

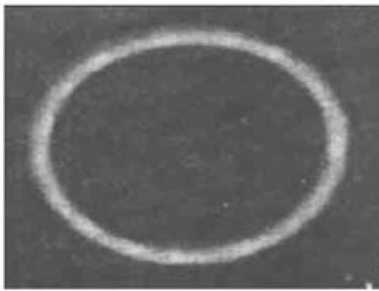


Fig. 5 Lissajous figure of the optical encoder using sine micro-window grating

$\times 100 \mu\text{m}$ 的微窗单元, 总面积为 $12 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 共用 48000 微窗单元个。微窗光栅与一普通的黑白光栅尺组成位移测量系统, 很好地抑制了光栅信号的高次谐波, 其单读数头信号的李萨如(Lissajous)图形如图 5 所示。为了对高次谐波进行定量测试, 通常情况下, 需要借助于长度基准仪器对光栅信号波形进行评估, 由于新的光栅系统高次谐波量本来已经很小, 通过这种方法对其评估非常困难, 例如, 环境震动要求小于 $0.03 \mu\text{m}$, 目前实验室尚难以达到要求。为了避免使用长度基准仪器, 本文采用了一种新的评定方法, 它的基本思想是: 无谐波光栅信号的李萨如图形理论上为一个标准圆, 由于谐波的存在, 李萨如图形将由圆变为多棱圆。其中, 多

棱圆偏离标准圆的最大偏移量实际上就代表了光栅信号的高次谐波总量, 它是各次谐波综合合成的结果。关于这种方法详尽的理论推导可参见文献[6], 这里不再赘述。该理论的实现方法也不复杂: 首先将两路光栅信号通过模/数转换器采入计算机, 然后, 通过数据处理即可求出李萨如图形的最大偏移量。对李萨如圆的评定表明, 由于采用了正弦微窗光栅, 光栅信号的高次谐波的总量降至基波的 2% 以下, 这个精度可满足 300 以上电子细分对谐波的要求。

结 论 采用光学图形发生器制作正弦微窗光栅的原始图形的工艺是可行的, 金属镀膜复制工艺保障了光栅的表面质量, 可满足恶劣工作条件的要求。采用普通黑白光栅与正弦微窗光栅组成的位移传感器很好地抑制了光栅信号的高次谐波。将普通黑白光栅用作标尺光栅, 可以充分发挥黑白光栅制造技术成熟的优点, 容易保障标尺光栅的精度; 正弦微窗光栅用作指示光栅, 由于面积可以做得比较小, 因而容易复制, 不会引起批量生产成本的提高。

参 考 文 献

- [1] Weyrauch A. Means for measuring position changes of two relatively movable members. *U. S. Patent*, 1972, 3674372
- [2] Zhang G, Wang C. Improving the accuracy of angle measurement system with optical gratings. *Annals of the CIRP*, 1994, 43(1): 457~ 460
- [3] Wang Chunhai, Zhang Guoxiong, Guo Shangqi et al.. Auto correction of interpolation error in optical encoders. *Proc. SPIE*, 1996, 2718: 439~ 447

- [4] 吕乃光. 傅立叶光学. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- [5] Wronkowski L. Fresnel images of a binary diffraction grating with open ratio 0.5. *J. Mod. Opt.*, 1988, **35**(8): 1417~ 1422
- [6] 王春海, 张国雄, 景芳盛. 不依赖于长度基准的光栅细分精度的评定方法. 计量学报, 1995, **16**(1): 6~ 11

A Displacement Encoder Using Sine Micro-Window Grating

Wang Chunhai Zhang Guoxiong Guo Shangqi Ma Xinhui
(*Department of Precision Institute Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*)

(Received 13 May 1998; revised 10 July 1998)

Abstract A novel displacement encoder employing a sine micro-window grating is developed. It features high quality signals free from harmonic errors. The sine micro-window grating is a special component composed of arrays of micro-elements with a sine window at the center of each element. The prototype is successfully manufactured by employing optical pattern generator and lithography technology and practically used in the design of an optical encoder. Experiments show that the harmonic errors of encoder signals is reduced to less than 2% of the fundamental wave.

Key words sine micro-window grating, displacement encoder, harmonics.