

# 使用对称闪耀光栅的 光学四倍频微位移传感器

刘春光

**摘要:**介绍了使用对称闪耀光栅的光学四倍频微位移传感器的原理、结构和其实验研究的结果。

## 一、引言

光栅微位移传感器(光栅读数头)是利用莫尔条纹技术,对相对线位移进行精密测量的装置,它具有结构简单、灵敏度高、测量精度高等优点。半个多世纪以来,许多人对它进行了研究,设计出了多种光栅微位移传感器<sup>[1][2][3][4]</sup>,它们都存在着各自的特点。

为了提高光栅微位移传感器的分辨率和克服有些高分辨率传感器对机器运动直线性要求太高的缺点,我们在国内外现有的基础上,采用对称闪耀光栅和-1倍成像光学系统构成光学四倍频微位移传感器,得到满意的结果。实验证明,这种结构的光栅传感器可以实现光学四倍频,具有光程自动补偿作用,因而它对机器运动的直线性要求可大大降低,并具有良好的稳定性。

## 二、工作原理

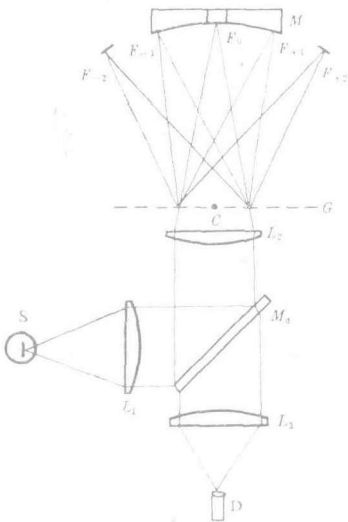


图1

图1为文献<sup>[1]</sup>给出的光学系统。在这个光学系统中,凹面反射镜反射镜 $M$ 的曲率中心在光栅 $G$ 的表面上,透镜 $L_2$ 的焦点位于凹面反射镜的几何中心 $F_0$ 点,白炽灯灯丝 $S$ 的长度方向与光栅刻线垂直,来自 $S$ 的光经准直透镜 $L_1$ 、半反半透镜 $M_1$ 和透镜 $L_2$ 后,照射到光栅表面上,由于光栅的衍射作用,光不仅射到 $F_0$ 点,而且 $\pm 1$ 级衍射光还分别射到凹面镜的 $F_{+1}$ 、 $F_{-1}$ 点上,其它级次的衍射光落到凹面镜的外面,如果在 $F_0$ 处打一小孔,把零级衍射光滤掉,这样,仅 $\pm 1$ 级衍射光反射回到光栅表面,它们分别再一次发生衍射,  $(+1, +1)$ 、 $(-1, -1)$ 两束衍射光经透镜 $L_3$ ,在探测器 $D$ 处相遇,在这里发生干涉,形成了莫尔条

纹。设所用光栅的振幅透射比为：

$$t = \sum_n a_n \exp(i2\pi\lambda f x) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

其中， $f$ 为光栅的空间频率， $a_n$ 为相应衍射级次确定的常系数（在这里设为实数）， $x$ 轴在光栅 $G$ 的平面内，且与刻线方向垂直。设入射光的复振幅为 $\tilde{u}_0$ ，则该光束的 $+1$ 级衍射光的复振幅为：

$$\tilde{u}_{+1}(x) = \tilde{u}_0 \cdot a_{+1} \exp(i2\pi f x)$$

若光栅沿 $x$ 轴的正方向移动的距离为 $x_0$ ，则有：

$$\tilde{u}_{+1}(x, x_0) = a_{+1} \tilde{u}_0 \exp[i2\pi f (x - x_0)]$$

这束光照射到凹面镜上后，反射回到光栅表面的反射光的复振幅为，

$$\tilde{u}_{+1}(x, x_0) = a_{+1} \tilde{u}_0 \exp[i2\pi(-x - x_0)]$$

这束光再一次经光栅衍射，得到的 $(+1, +1)$ 衍射光的复振幅为：

$$\begin{aligned} \tilde{u}_{+1, +1}(x_0) &= a_{+1} \tilde{u}_0 \exp[i2\pi f (-x - x_0)] \cdot a_{+1} \exp[i2\pi f (x - x_0)] \\ &= a_{+1}^2 \tilde{u}_0 \exp(-i4\pi f x_0) \end{aligned}$$

同理可得 $(-1, -1)$ 衍射光的复振幅为：

$$\tilde{u}_{-1, -1}(x_0) = a_{-1}^2 \tilde{u}_0 \exp(i4\pi f x_0)$$

$(+1, +1)$ 、 $(-1, -1)$ 两束光发生干涉后得到的莫尔条纹信号的复振幅为：

$$\begin{aligned} \tilde{u}(x_0) &= \tilde{u}_{+1, +1}(x_0) + \tilde{u}_{-1, -1}(x_0) \\ &= a_{+1}^2 \tilde{u}_0 \exp(-i4\pi f x_0) + a_{-1}^2 \tilde{u}_0 \exp(i4\pi f x_0) \end{aligned}$$

如果光栅的 $\pm 1$ 级衍射光能量对称，则 $a_{+1} = a_{-1} = a$

$$\begin{aligned} \text{此时, } \tilde{u}(x_0) &= a^2 \tilde{u}_0 [\exp(-i4\pi f x_0) + \exp(i4\pi f x_0)] \\ &= 2a^2 \tilde{u}_0 \cos(4\pi f x_0) \end{aligned}$$

所以，莫尔条纹的光强分布为：

$$\begin{aligned} I &= \tilde{u}(x_0) \cdot \tilde{u}^*(x_0) \\ &= 2a^2 \tilde{u}_0 \cos(4\pi f x_0) \cdot 2a^2 \tilde{u}_0^* \cos(4\pi f x_0) \\ &= 4a^4 I_0 \cos^2(4\pi f x_0) \\ &= 2a^4 I_0 [1 + \cos(8\pi f x_0)] \end{aligned}$$

由上式可以看到，当光栅沿 $x$ 轴方向移动的距离为一个栅距时，莫尔条纹信号就变化了四个周期，可见该光学系统实现了光学四倍频。

### 三、光栅传感器的结构

上面我们介绍了光栅传感器的工作原理，我们用反射式的对称闪耀光栅代替图1中的透射光栅，采用上海激光技术研究所沈冠群、黄宣劭设计的 $-1$ 倍成像光学系统<sup>[2]</sup>，并为其设计了合适的外围光路元件，构成的光栅微位移传感器结构如图2所示。 $-1$ 倍成像光学系统是由一个中心带有小孔的凹面反射镜和一个双胶合凸透镜构成，整个系统的各球面的曲率中

心都恰好重合于光栅表面的  $C$  点，双胶合物镜的焦点位于凹面反射镜的中心小孔上，凹面反

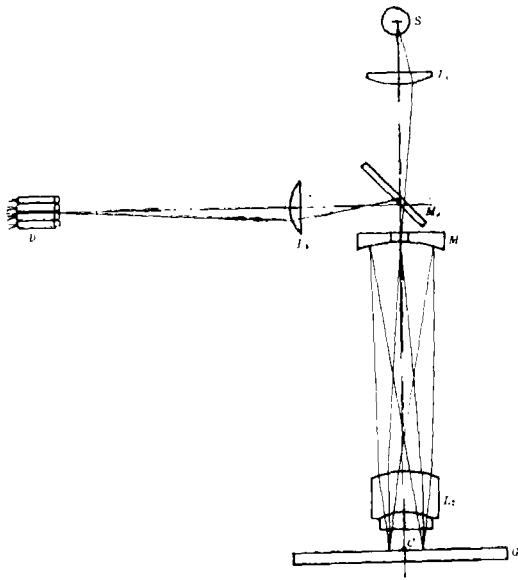


图 2



图 3

射镜的曲率半径  $R$  和胶合物镜的凸面的曲率半径  $r$  由下式联系起来<sup>[5]</sup>。

$$R/r = \mu / (\mu - 1)$$

其中， $\mu$  是双胶合物镜玻璃的折射率，这样设计的光学系统，对于公共曲率中心的物点不存在球差。

该传感器使用的光栅是专门为其设计的 125 线/mm 对称闪耀光栅，其槽形如图 3 所示，闪耀波长为  $0.9\mu\text{m}$ ，能量闪耀在  $\pm 1$  级衍射光上。根据公式  $a \sin 2\varphi = m\sigma$  可求得，该光栅的闪耀角为  $\varphi = 3^\circ 14'$  我所 18 室的师傅们帮助解决了这种光栅的刀具磨制及刻划等技术问题，刻划出了满足实验要求的对称闪耀光栅。我们使用这种光栅，由于零级和  $\pm 2$  级以上的高级衍射光能量极低，实际上，它也起到了光学滤波器的作用，经仔细调整，我们消除了高次谐波，得到了质量比较好的莫尔条纹信号。

由于该光栅传感器的光路具有对称性，所以， $(+1, +1)$ 、 $(-1, -1)$  两束光总是具有相同的光程，当光栅以通过  $C$  点且与光栅刻线方向平行的直线为轴转动一个角度时，并没有影响这两束光的光程差，这样，对莫尔条纹也就没有影响，所以说该光路具有光程补偿作用，正是由于这种光程补偿作用，使它对机器运动的直线性要求比其它光栅传感器的要求大大降低。

该系统的成像过程与图 2 所示光学系统成像过程相似，这里不再赘述。

## 四、实验结果

按照设计要求，把各部件安装好后，能否调整出质量较好的莫尔条纹，是实验中很关键的问题。调整时，首先要使光栅表面与机器的运动方向平行，然后使灯丝成像在凹面反射镜的中心小孔上，再反复调整光栅表面与胶合物镜平面之间的距离，直到出现质量较好的莫尔

条纹,最后,用透镜把莫尔条纹清晰地成像在并排放置的四个光电三极管上,仔细调整光电三极管的位置,我们得到了位相依次相差 $90^\circ$ 的四相光电信号。我们把这四相信号输入差分放大器,经差分放大器放大合成后,再输入到示波器,得到圆形的李莎育图形,说明可以进行可逆计数和方向判别。该系统配上40细分的电子学细分系统,分辨率可以达到 $0.05\mu\text{m}$ 。实验结果表明,该光学系统实现了光学四细分,读数当量达到了 $0.05\mu\text{m}$ 。

另外,我们还对系统的稳定性和系统对工件台运动的直线性要求做了定性的实验研究。实验中我们看到,无论是工件台来回运动时,还是经过连续几个24小时后观察,李莎育图形的位置、形状和直径都基本不变,说明该系统由于具有光程补偿作用,它对工件台运动的直线性要求比较低,系统的稳定性比较好。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] H·De·Lang, E.T.Ferguson, and Schoenaker, G.: Philips Technical Rev., 1969, 30, 149
- [ 2 ] 沈冠群、黄宣劬等; LSI制造与测试, No.2, 25, (1982)
- [ 3 ] 顾去岳、杨厚民; 吉林计量测试, 1, 12, (1980)
- [ 4 ] D.Post; Appl.Opt., 10, No.4, 901, (1971)
- [ 5 ] J.Dyson; J.Opt.Soc.Amer., No.7, 713, (1959)

## Fourfold Frequency Optic Sensor with a Symmetrical Blazed Grating for Micro-displacement

Liu Chunguang

### Abstract

In this paper, the theory and structure of fourfold frequency optic sensor with a symmetrical blazed grating for micro-displacement are introduced. The experimental results are given.