

衍射光栅自刻法

梁浩明 郝德阜

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

本文介绍以被刻光栅本身作为分度基准刻划长衍射光栅的新方法:以原基准信号控制机器,在一个长毛坯的前端刻出一段光栅,借此构成新的干涉仪以产生“自刻信号”,然后再以此信号控制机器,接着刻划光栅后面的部分。分析了转接误差对自刻光栅的影响,得出刻划长度和误差累积的关系。介绍了实验方案、装置、实验结果等。所刻样品光栅的衍射波阵面干涉条纹在转接处看不出错开和弯曲,实测分辨本领达到理论值的90%(半宽法)。

一、引 言

衍射光栅不仅用于光谱仪器,还用于高精度计量方面,对长光栅的需要日益增多。刻制长光栅要有相应长度的精密分度系统作为基准,但是建立这种系统是极为困难的。我们已有两台用基准光栅控制分度的刻划机^[1],使用情况表明此种刻划机具有对环境条件要求不太高,精度较高等优点。但是这种方法的可控制长度受基准光栅长度的限制。为了解决这个问题,本文提出了衍射光栅自刻法。

自刻法与传统的刻划方法不同,以往的衍射光栅刻划机的分度系统都独立于被刻光栅,而自刻法却用被刻光栅本身作为基准引导分度运动,因此原则上可以刻划任意长的光栅。

二、自刻法原理及转接误差分析

1. 自刻法的设想

先以原来的基准光栅信号控制刻划机,在一块大的毛坯前端先刻划出一段光栅,用这段光栅作为新的分光光栅干涉仪中的基准光栅,并产生“自刻信号”(图1),比较两路信号的相位,使其尽可能相同。这时切断原信号,立刻转接入自刻信号。这样就形成了用已刻出的光栅作为分度元件控制机器,继续刻制此光栅后面部分的“自刻”系统。

在两路信号转换时,由于相位不可能完全相同,在光栅上将产生一个“转接误差”,至于它怎样影响自刻光栅的精度,将在下面分析讨论。

2. 自刻光栅的形成及误差

分光光栅干涉仪中基准光栅的误差和半波相位差面的关系,在《衍射光栅的半波相位差面及其与光栅误差的关系》(郝德阜)一文中有详细讨论,从而得知该干涉仪对基准光栅的周期误差、小局部误差等起平均作用,能大幅度地消减。这里仅用其中的某些结论和公式来分

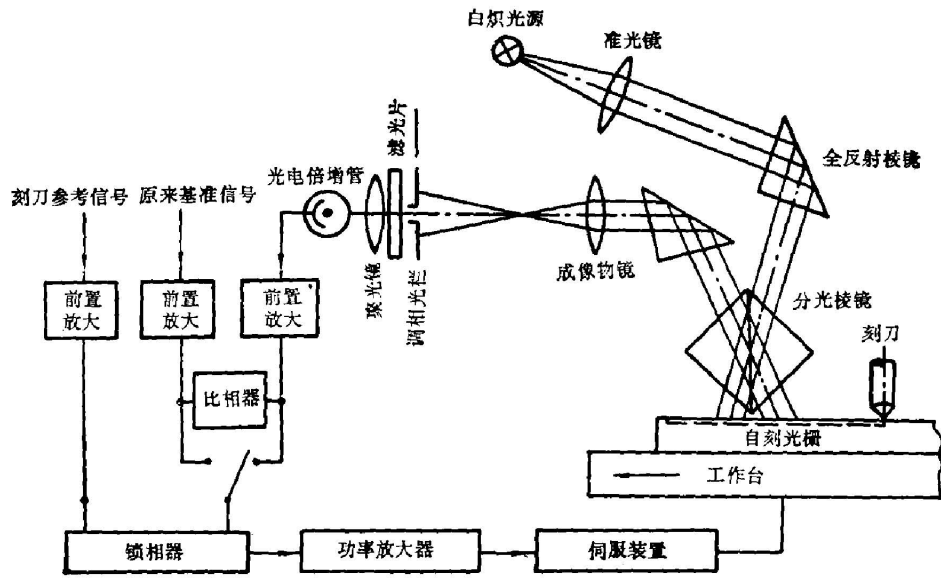


图 1 衍射光栅自刻法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of self-guiding method for ruling diffraction grating

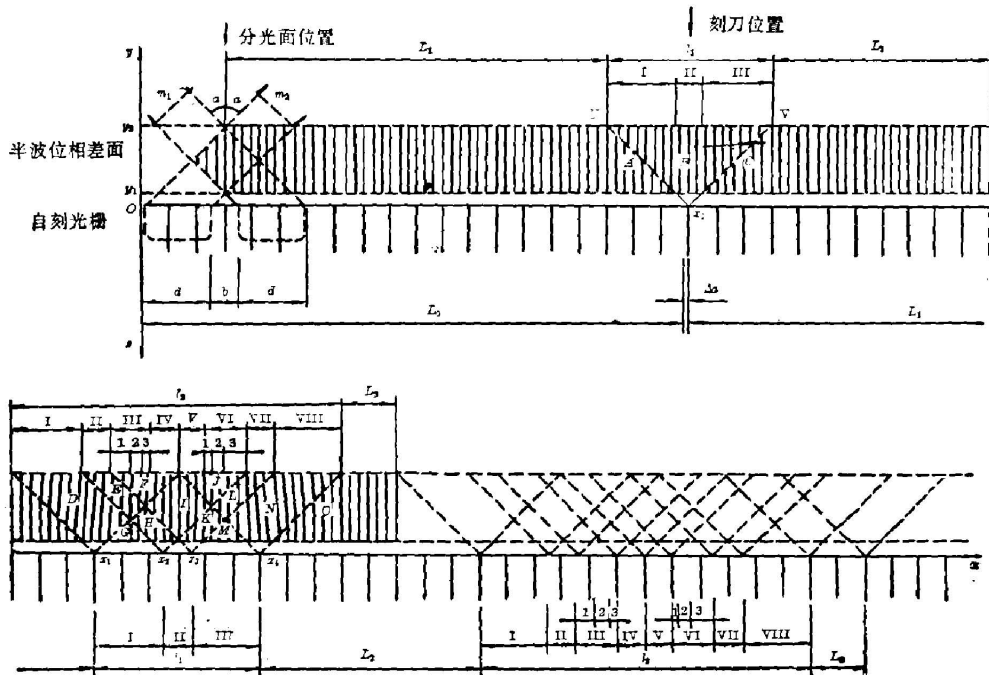


图 2 “半波相位差面”和自刻法的误差传递

Fig. 2 “Half-wave phase difference plane” and error transfer of self-guiding method

析转接误差对自刻光栅的影响。

在自刻干涉仪中, 光栅的两束衍射光(图 2 中的 m_1 和 m_2) 相干涉形成半波相位差面。在自刻法中前段光栅的半波相位差面成为刻划后面光栅的控制信号。图 2 是按自刻光栅形成过程画出的转接误差传递示意图。坐标 xOz 面表示自刻光栅, xOy 面表示半波相位差面, d 为光束覆盖长度, b 为两光束间距。对自刻光栅各段的情况简要说明如下。

① L_0 段是在原信号控制下刻出的自刻光栅的开始段, 线距为 a , 假设无误差。

② Δa 是两路信号转换后第一条刻线的误差, 即转接误差; Δ 是误差系数。

③ L_1 段是在 L_0 段光栅所产生的半波相位差面的信号控制下刻出的。 L_0 段是无误差段, 由两束衍射光干涉后在 $P(x, y)$ 点的相位差方程

$$\Delta\phi_p = 2\pi \frac{m_1 - m_2}{a} x + \frac{2\pi}{\lambda} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) y^{[2]}$$

可推出

$$x_k = \frac{a}{2m} \left(k + \frac{1}{2} \right), \quad (1)$$

其中 m 为衍射级次, k 为整数, β_1 和 β_2 为衍射角。相邻二半波相位差面间距为

$$\delta x = \frac{a}{2m}, \quad (2)$$

对应的新线距为

$$\bar{a} = 2m \cdot \delta x = a, \quad (3)$$

所以 L_1 段也是正常段。

④ l_1 段是干涉仪两束光越过转接误差 Δa 时形成的过渡段, x_0U 和 x_0V 是过渡线, 把半波相位差面分成 A 、 B 、 C 三个区。考虑到如某刻线的误差系数为 f 时引起衍射波阵面的相位变化为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2fa \sin \alpha^{[3]},$$

可推出适用于各区的半波相位差面公式

$$x_k(x, y) = \frac{a}{2m} \left(k + \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} \int_0^{x_k - y \tan \alpha} f_2(x) dx + \frac{1}{2} \int_0^{x_k + y \tan \alpha} f_1(x) dx, \quad (4)$$

其中 α 为自准衍射角, $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 分别为两束衍射光所对应的光栅线距误差系数。然后再参照下式近似求出平均半波相位差面的位置

$$\bar{x}_{k1} = \frac{1}{y_2 - y_1} \left[\int_{y_1}^{y_2 - (x_2 - x_0) \tan \alpha} x_{Ak}(y) dy + \int_{y_2 - (x_2 - x_0) \tan \alpha}^{y_2} x_{Bk}(y) dy \right]. \quad (5)$$

按 \bar{x}_k 的不同可分作 I、II、III 段, 最后得到对应各段的新线距

$$\bar{a}_{I,1} = a \left(1 + \frac{a}{2d} \Delta \right),$$

$$\bar{a}_{II,1} = a,$$

$$\bar{a}_{III,1} = a \left(1 + \frac{a}{2d} \Delta \right).$$

新的误差系数为

$$\bar{\Delta} = \frac{a}{2d} \Delta. \quad (6)$$

因为从 x_1 到 x_2 的累积误差可表示为

$$\int_{x_1}^{x_2} f(x) dx, \quad (7)$$

l_1 段内的累积误差为

$$\int_{x_1 - \frac{b}{2} - d}^{x_0 - \frac{b}{2}} \bar{\Delta} dx + \int_{x_0 + \frac{b}{2}}^{x_0 + \frac{b}{2} + d} \bar{\Delta} dx = \Delta a,$$

其中 x_0 为转接误差位置。此式表明转接误差 Δa 被分散到 l_{II} 和 l_{III} 段中, 总的累积误差为 Δa 。

⑤ L_2 段和正常的 L_1 段的半波相位差面对应, 仍是正常段。

⑥ l_2 段是干涉仪的两束光逐渐扫过 l_1 段时形成的, 过 l_1 段三分点的分界点的八条过渡线把半波相位差面分成 C, D, \dots, O 等十三个区和 I, II, \dots , VIII 八个段。各区段的情况可参照 (4), (5) 式分析计算。下面仅列出各段对应新光栅的线距:

$$\begin{aligned} \bar{a}_{i,II} &= a \left[1 + \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left(x - x_1 + d + \frac{b}{2} \right) \right], \\ \bar{a}_{i,III} &= a \left[1 - \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left(x - x_1 - d + \frac{b}{2} \right) \right], \\ \bar{a}_{i,IV} &= a \left[1 + \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left(x - x_1 + d - \frac{3}{2} b \right) \right], \\ \bar{a}_{i,V} &= a \left[1 + \frac{\bar{\Delta}}{d} \left(x - x_1 - \frac{b}{2} \right) \right], \\ \bar{a}_{i,VI} &= a \left[1 - \frac{\bar{\Delta}}{d} \left(x - x_1 - 2d - \frac{b}{2} \right) \right], \\ \bar{a}_{i,VII} &= a \left[1 - \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left(x - x_1 - 3d + \frac{b}{2} \right) \right], \\ \bar{a}_{i,VIII} &= a \left[1 + \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left(x - x_1 - d - \frac{3}{2} b \right) \right], \\ \bar{a}_{i,IX} &= a \left[1 - \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left(x - x_1 - 3d - \frac{3}{2} b \right) \right], \end{aligned}$$

其中 x_1 为 l_1 段的起点。

各分段中的累积误差可按 (7) 式求出, l_2 中总的累积误差仍为 Δa 。

⑦ L_3 段和正常的 L_2 段的半波相位差面对应, 也是正常段。

因为 L_3 段小于 $(2d+b)$, 后面不再出现正常段, 过渡线将越来越密, 误差将更为复杂, 但更趋向平均, 并且均可按以上公式算出。

显然, 自刻光栅最大的线距误差就是转接处的 Δa , 其次是 l_1 段中的 $\frac{a}{2d} \Delta a$, 后面更加微小。因 $2d \gg a$, 所以 $\frac{a}{2d} \Delta a$ 一般可忽略不计。当比相精度为 s 时

$$\Delta a = \frac{s}{360} \delta x = \frac{sa}{720m}, \quad (8)$$

因此只要 $s < 7.2 \times m$, 就可使 $\Delta a < \frac{1}{100} a$, 实际上比相仪器可使 $s < 1^\circ$ 。

3. 自刻光栅的长度与误差累积关系

由自刻光栅的形成过程可知,正常段的长度依次缩短 $(2d+b)$;有误差段的长度依次增长 $(2d+b)$ 。

① 当 $n(2d+b) \leq L_0$ 时, n 为转接误差累积倍数,正常段和有误差段在转接后交替出现 n 次。自刻光栅的总长度可表示为

$$L_{x1} = (n+1)L_0 - n(2d+b) + n\Delta a. \quad (9)$$

② 当 $(n+t)(2d+b) > L_0$ 时, t 为转接误差累积倍数,在无误差段和有误差段交替出现 n 次后,不再出现正常段。如只考虑自刻光栅的长度和累积误差关系时,可表示为

$$L_{x2} = t \left[L_0 - \frac{1}{2}(2d+b) \right] + t\Delta a. \quad (10)$$

前 n 段和后 t 段的总长度为

$$L_s = (n+t+1)L_0 - \left(n + \frac{t}{2} \right) (2d+b) + (n+t)\Delta a. \quad (11)$$

自刻光栅的累积误差为

$$(n+t)\Delta a = (n+t) \frac{sa}{720m}. \quad (12)$$

只要 $(n+t)s < 72m$,就可使累积误差小于 $\frac{a}{10}$,得到优良光栅。

如果已知原基准光栅累积误差的方向,可适当选取正的或负的转接误差,使其和原累积误差相减,这样可以得到累积误差更小的自刻光栅。

当有略长一些的基准光栅时,可用公式(9)计算自刻光栅的长度。例如 $L_0 = 120 \text{ mm}$, $(2d+b) = 25 \text{ mm}$, $n = 4$,则

$$L_{x1} = 500 + 4\Delta a,$$

即可得到 500 mm 的长光栅,而累积误差仅为 $4\Delta a$ 。如果比相精度为 $s = 1^\circ$, $a = \frac{1}{600} \text{ mm}$, $m = 2$,则

$$4\Delta a = \frac{a}{180m} \approx 0.005 \text{ } (\mu\text{m}),$$

符合优良光栅的要求。

当原基准光栅较短时,可按(11)式计算。例如 $L_0 = 60 \text{ mm}$, $n = 2$, $t = 8$,其它同上,则

$$L_s = 510 + 10\Delta a,$$

即可得到长为 510 mm 长光栅,累积误差为

$$10\Delta a = \frac{a}{72m} \approx 0.01 \text{ } (\mu\text{m}),$$

仍属于优良光栅。

反过来计算,如果要求光栅的累积误差 $(n+t)\Delta a \leq \frac{1}{10} a$,且 $L_0 = 120 \text{ mm}$, $(2d+b) = 25 \text{ mm}$, $n = 4$,当 $s = 10^\circ$ 时,有

$$L_s = 1618 \text{ (mm)},$$

当 $s = 1^\circ$ 时,可算出

$$L_s = 15550 \text{ (mm)},$$

可见能刻出很长的优良光栅来。

三、自刻法实验设计

本实验是在一台连续运动刻划机上进行的。图 1 是实验示意图,图 3 是实验装置照片。

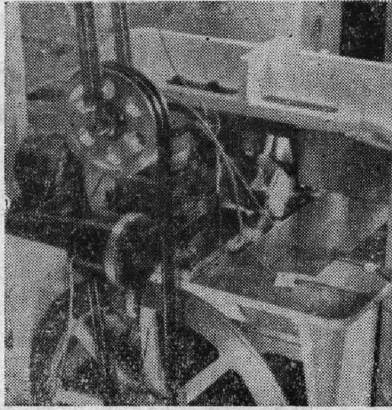


图 3 实验装置照片

Fig. 3 Experimental device

自刻信号是用分光光栅干涉仪在线距为 $a = \frac{1}{600}$ mm 的自刻光栅上,衍射级次为 $m=2$ 时取得的。干涉条纹用宽度 $e=10$ mm 的水平条纹。

1. 自刻分光光栅干涉仪

对自刻分光光栅干涉仪的主要要求是整个系统长时间稳定可靠。如要求信号精度在 1° 以内,那么分光面的位置应稳定在 $0.0012 \mu\text{m}$ 以内,这是极难做到的。为此在设计上和工艺上采取了许多增加稳定性的措施,以保证实验成功。

为了得到所需的干涉条纹,分光棱镜应能上下移动(图 1);绕垂直方向微转动;以及绕水平方向微转动。两个全反射棱镜应能在一定范围内移动和转动。成像透镜

应能在水平和垂直方向移动。平行光源不仅本身可以调焦,还应能整体移动和转动。所有这些运动都由适当的调节机构实现。

2. 信号接收和调相位装置

由于在一个条纹宽度之内包含信号的 360° 相位,移动接收狭缝可改变接收到的自刻信号的相位,使和原来信号的相位一致。

接收狭缝开在一个能沿导轨移动的小滑台上,通过下列减速传动系统实现微调:

可变速微电机 \rightarrow 皮带减速器 \rightarrow 蜗轮蜗杆减速器 \rightarrow 丝杠螺母副 \rightarrow 小滑台。

此系统传动平稳、细腻,长期稳定,其信号精度小于 1° ,满足设计要求。

四、实验结果

实验中刻出的第一块自刻光栅的尺寸是 $20 \times 110 \text{ mm}^2$,线距为 $\frac{1}{600}$ mm,对称槽形,二级闪耀。对此光栅做了衍射波阵面干涉检验。图 4 和图 5 分别是一、二级衍射波阵面干涉条纹照片。在转接处(图中记号 \blacktriangledown 所指处)条纹没有错开和弯曲,如同没有转接过的一样。

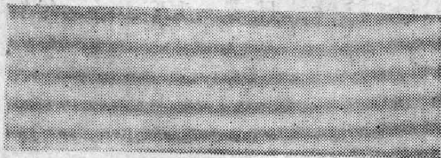


图 4 一级衍射波阵面干涉图

Fig. 4 The 1st order interference fringes

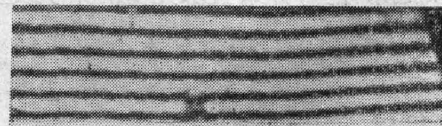


图 5 二级衍射波阵面干涉图

Fig. 5 The 2nd order interference fringes

对转接前后各 25 mm 这段光栅做了分辨本领测定。在 4 m 光谱仪上,用低压汞灯的 5461 Å 光实测二级分辨本领为 5.4×10^4 , 达到理论值的 90% (半宽法)。这个结果相当于这台机器所刻出的未经转接的中上等水平光栅。图 6 是实测谱线轮廓照片。

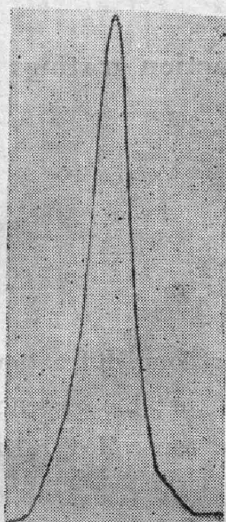


图 6 实测谱线轮廓照片
Fig. 6 Photo of the actually measured profile

本次实验是用示波器比较两路信号相位的,图 7 是比相波形照片。比相误差小于 10° , 按公式(8)计算转接误差应小于

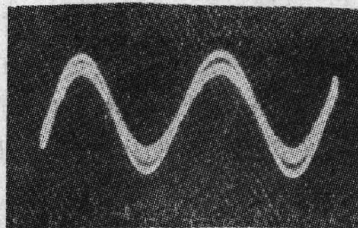


图 7 比相波形照片
Fig. 7 Waveform photo for comparing phases

$$\Delta\alpha = \frac{sa}{720m} = \frac{a}{144}^\circ$$

由于误差很小,所以才有那样好的干涉条纹和分辨本领。

后来又进行了两次自刻实验。所刻光栅和第一块类似。一、二级衍射波阵面干涉条纹在转接处看不出任何弯曲和错开。几次实验结果和理论分析符合,说明衍射光栅自刻法的原理是正确的,实验方案、装置和方法是成功的。只要有长行程的刻划机,用自刻法将能刻出很长的优良衍射光栅来。

本文得到王大珩所长和唐九华副所长的关怀。在实验过程中得到张庆英、杨厚民以及有关同志的帮助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 梁浩明,庄夔,张庆英,杨厚民;《光学学报》,1981, 1, No. 1 (Jan), 51.
- [2] Г. Н. Рассудова и Ф. М. Герасимов; *Оптика и Спектроскопия*, 1963, 14, No. 3 (Mar), 406.
- [3] G. W. Stroke; *Handbuch Der Physik*, 19, 534. (Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1967).

Self-guiding method for ruling diffraction gratings

LIANG HAOMING AND HAO DEFU

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 5 October 1982)

Abstract

A new method, "self-guiding method", for ruling long diffraction gratings is advanced in this paper. The key point of this method is that the grating being ruled plays a role as a datum grating to lead a photoelectric controlled ruling engine to continue its ruling.

The two main parts of this method, i. e. precision analysis and experiment devices are described in details.

We have ruled several self-guiding samples of grating with one switch. The spectrum quality of them is as good as a general one, the actual resolution power of them with 50 mm width is about 90% of the theoretical value.

If the travel of the engine is long enough, a very long diffraction grating can be ruled by this method.