

# 衍射光栅自刻法

梁浩明 郝德阜

**摘要：**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：先用原基准信号控制机器，在一个长毛坯的前端刻出一段光栅，用这段光栅构成新的干涉仪以产生“自刻信号”，然后再以自刻信号控制机器接着刻划光栅后面的部分。还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。简单介绍了实验方案、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）。

## 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，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<sup>[1]</sup>，使用情况表明用基准光栅控制分度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，曾做过光电信号转换试验<sup>[2]</sup>。在此基础上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。

## 一、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），比较两路信号的位相，使两路信号的位相尽可能相同。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，由于位相不可能完全相同，在光栅上将造成一个

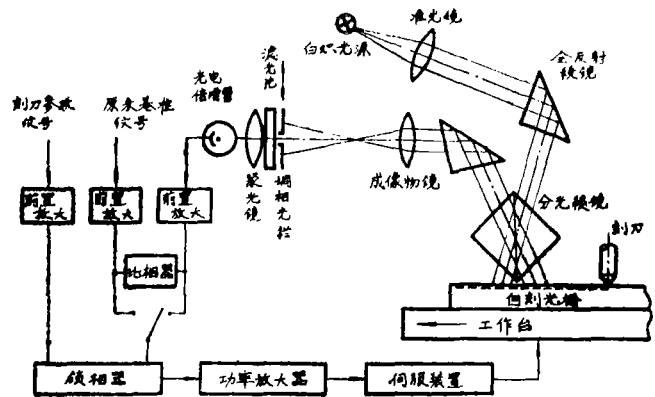


图1 衍射光栅自刻法示意图

“转接误差”，它怎样影响自刻光栅的精度，将在下面分析讨论。

## 2. 自刻光栅的形成及其误差

分光光栅干涉仪中基准光栅的误差和半波位相差面的关系已在另一篇文章中详细讨论\*，这里仅用其中的某些结论和公式来分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  $m_2$ ）相干涉形成半波位相差面。在自刻法中前段光栅的半波位相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， $xOy$  面表示半波位相差面。 $d$  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。

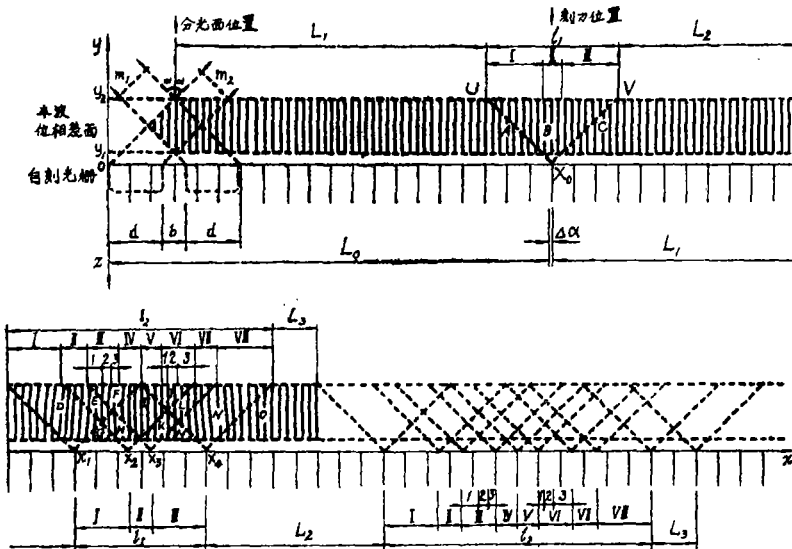


图2 “半波位相差面”和自刻光栅的误差传递

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 $a$ ，无误差。

②  $\Delta a$ 是两路信号转换后第一条刻线的误差，即转接误差。 $\Delta$ 是误差系数。

③  $L_1$ 段是在  $L_0$ 段光栅所产生的半波位相差面的信号控制下刻出的。 $L_0$ 段是无误差段，它的半波位相差面方程为

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

其中  $m$  为衍射级次， $k$  为整数。相邻二半波位相差面间距为

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

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  $\Delta a$  时形成的过渡段。 $x_0U$  和  $x_0V$  是过渡线，把半波位相差面分成  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三个区，各区中半波位相差面可按下式求出

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

\* 郝德阜，衍射光栅的半波位相差面及其与光栅误差的关系。

其中  $\alpha$  为衍射角,  $f_1(x)$  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位相差面的位置

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

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

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

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

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

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

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

其中  $x_0$  为转接误差位置。此式表明转接误差  $\Delta a$  被分散到  $l_{1I}$  和  $l_{1III}$  段中, 总的累积误差为  $\Delta a$ 。

⑤  $L_2$  段和正常的  $L_1$  段的半波位相差面对应, 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  $l_1$  段三分之一的分界点的八条过渡线把半波位相差面分成 C, D, ..., O 等十三个区和 I, II, ..., 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:

$$\bar{a}_{l_{2I}} = a \left[ 1 + \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left( x - x_1 + d + \frac{b}{2} \right) \right]$$

$$\bar{a}_{l_{2II}} = a \left[ 1 - \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left( x - x_1 - d + \frac{b}{2} \right) \right]$$

$$\bar{a}_{l_{2III}} = a \left[ 1 + \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left( x - x_1 + d - \frac{3}{2} b \right) \right]$$

$$\bar{a}_{l_{2IV}} = a \left[ 1 + \frac{\bar{\Delta}}{d} \left( x - x_1 - \frac{b}{2} \right) \right]$$

$$\bar{a}_{l_{2V}} = a \left[ 1 - \frac{\bar{\Delta}}{d} \left( x - x_1 - 2d - \frac{b}{2} \right) \right]$$

$$\bar{a}_{l_{2VI}} = a \left[ 1 - \frac{\bar{\Delta}}{2d} \left( x - x_1 - 3d + \frac{b}{2} \right) \right]$$

$$\overline{a_{i_2, \text{H}}} = a \left[ 1 + \frac{\Delta}{2d} \left( x - x_1 - d - \frac{3}{2} b \right) \right]$$

$$\overline{a_{i_2, \text{H}}} = a \left[ 1 - \frac{\Delta}{2d} \left( x - x_1 - 3d - \frac{3}{2} b \right) \right]$$

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  $\Delta a$ 。

⑦  $L_3$  段和正常的  $L_2$  段的半波位相差面对应, 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, 但更趋平均, 并且均可按以上公式算出来。

显然, 自刻光栅最大的线距误差就是转接处的  $\Delta a$ , 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  $s^\circ$  时

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

因此只要  $s < 7.2m$  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,  $n$  为整数, 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

$$L_{s1} = (n + 1)L_0 - n(2d + b) + n\Delta a \quad (9)$$

② 当  $(n + t)(2d + b) > L_0$ ,  $t$  为整数, 在有误差段和无误差段交替出现  $n$  次之后, 不再出现正常段。当只考虑自刻光栅的长度和累积误差关系时, 可近似认为是把  $\frac{1}{2}(2d + b) + l_{n-1} + L_n$  这个组合段重复  $t$  次, 这时自刻光栅的长为

$$L_{s2} = t \left[ L_0 - \frac{1}{2}(2d + b) \right] + t\Delta a \quad (10)$$

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可由 (8) 和 (11) 式写出

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

只要  $(n + t)s < 72m$  就可使累积误差小于  $\frac{1}{10} a$ , 满足优良光栅的要求。

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, 可以得到累积误差更小的自刻光栅。

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

$$L_{s1} = 500 + 4 \cdot 1a$$

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

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

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  $L_0 = 60$  毫米， $n = 2$ ， $t = 8$ ，其它同上，则

$$L_x = 510 + 10\Delta a$$

即可得到长为 510 毫米长光栅，累积误差为

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

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  $L_0 = 120$  毫米， $(2d+b) = 25$  毫米， $n = 4$ ，当  $s = 10^\circ$  时，有

$$L_x = 1618 \text{ (毫米)}$$

当  $s = 1^\circ$  时，可算出

$$L_x = 15550 \text{ (毫米)}$$

可见能刻出很长的优良光栅来。

## 二、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 是装在刻划机上的实验装置照片。自刻信号是用分光光栅干涉仪在线距为  $a = \frac{1}{600}$  毫米的自刻光栅上，衍射级次为  $m = 2$  时取得的。干涉条纹用宽度  $c = 10$  毫米的水平条纹。

### 1. 调节信号位相的方案

① 调节干涉仪分光面的位置。实质上就是改变分光面和半波位相差面的相对位置。如果要求两路信号的比相精度为  $1^\circ$ ，则分光面的微调位置准确度应为

$$\begin{aligned} \frac{1}{360}\delta x &= \frac{1}{360} \frac{a}{2m} \\ &\approx 0.0012 \text{ (微米)} \end{aligned}$$

② 调节信号接收狭缝的位置。由于在一个条纹宽度之内包含信号的  $360^\circ$  位相，移动狭缝可改变接收到的自刻信号的位相，使和原来信号的位相一致。为保证  $1^\circ$  的比相精度，狭缝的位置准确度应为



图 3 实验装置

$$\frac{1}{360} e \approx 30 \text{ (微米)}$$

这个要求远低于前面方案，本实验采用此方案。

## 2. 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 $1^\circ$ 以内，那么分光面的位置应稳定在 $0.0012$ 微米以内，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、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。成象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。

## 3. 信号接收和调位相装置

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→皮带减速器→蜗轮蜗杆减速器→丝杠螺母付→小滑台

此系统传动平稳、细腻，长期稳定，超过信号精度为 $1^\circ$ 的要求。

# 三、实验结果

因为在刻划过程中不能打开机罩，所以有些调整必须在开机前做好，有些调节必须在机罩外电控。

为了调整干涉仪，在自刻光栅毛坯前端先刻出长度稍大于 $(2d+b)$ 的一段光栅，以此为基础调整干涉仪，使输出合用的信号。当刻划到需要转接的长度时，调节接收狭缝位置，观察比相器，当两路信号位相尽可能相同时，选择在刻刀刚离开表面的瞬时完成转接工作。转接后继续刻划，直到刻出所需长度的光栅。

由于机器行程的限制，实验中未能刻出很长的光栅，光栅表面的质量也有待于进一步提高。但是自刻法的各环节都得到了验证。

实验中刻出的第一块自刻光栅的

尺寸是 $20 \times 110$ 毫米<sup>2</sup>，线距为 $\frac{1}{600}$

毫米，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▼所指

处)条纹没有错开和弯曲，就如同没有转接过的一样。对转接前后各25毫米这段光栅做了分

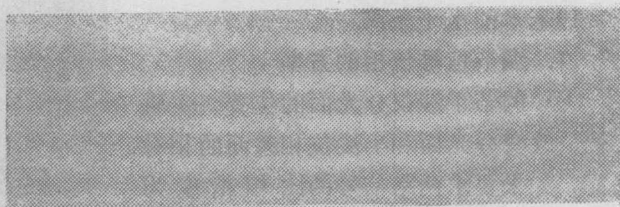


图4 一级衍射波阵面干涉图

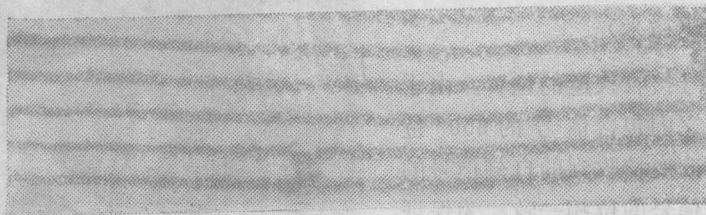


图5 二级衍射波阵面干涉图

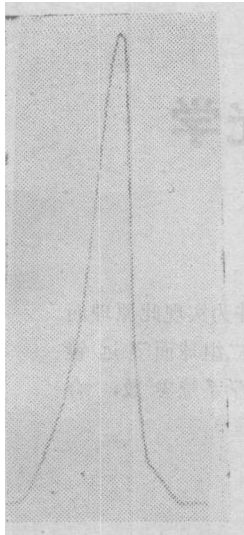


图6 实测谱线轮廓照片

辨本领测定。在4米光谱仪上，用低压汞灯的5461埃光实测二级分辨本领为 $5.4 \times 10^4$ ，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没经转接的中上等水平光栅。图6是实测谱线轮廓照片。

本次实验是用示波器比较两路信号位相的，图7是比相波形照片。比相误差小于 $10^\circ$ ，按公式（8）计算转接误差应小于

$$\Delta a = \frac{s\alpha}{720} = \frac{a}{144}$$

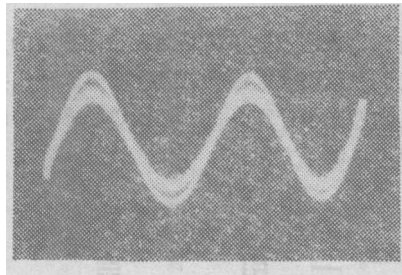


图7 比相波形照片

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。所刻光栅和第一块光栅类似，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。

## 四、讨 论

1. 本次刻划的是对称槽形光栅，最适合用作计量线位移的基准光栅。用自刻法刻出足够长的这种光栅可用来控制长行程的光栅刻划机或其它长行程的精密机器。

2. 只要适当配置光路，用自刻法也可直接刻出非对称槽形的大尺寸闪耀光栅，供光谱仪器使用。

本课题在实验过程中得到张庆英、杨厚民等同志的热心帮助，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，1981，1，51.
- [2] 梁浩明，光学机械，1980，4，20.