

光栅干涉仪的运动误差原理

郝 德 阜

摘要：本文应用衍射光栅干涉仪的半波相位差面原理模型，说明光栅摆动误差引起的干涉条纹变化情况，进而分析得出光栅干涉仪运动误差公式。可作为设计和应用此种干涉仪的依据之一。

一、光栅干涉仪及半波相位差面简介

本文所述的光栅干涉仪是一种精密直线位移计量仪器，其原理最初是由苏联学者提出的^[1]，后经我所专家改进^[2]，如图1所示。它由平面衍射光栅，分光束棱镜，平行光源，接收器等构成。

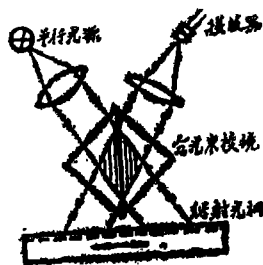


图1 光栅干涉仪

笔者为了分析光栅刻线误差对干涉仪计量精度的影响，从光栅两束衍射光相干涉的基本原理出发，引出了“半波相位差面”概念，建立了解释此种干涉仪原理的新模型。^{[3]、[4]、[5]}

在两束衍射光的干涉场中会形成一组等相位差面，当两束光的相位差为半波长的奇数倍时，即形成一组半波相位差面。它们平行于光栅的刻线和法线，如图2，并随光栅一起移动，构成计量条纹的基本单位，其间距为

$$\delta x = \frac{a}{2m} \tag{1}$$

式中 a 为光栅刻线间距， m 为衍射光的级次。当光栅相对于分光束棱镜运动时，分束面掠过一个半波相位差面，即计数着一个干涉条纹。

二、干涉条纹的方向和宽度的确定

光栅干涉仪干涉条纹的方向和宽度完全取决于分束面和半波相位差面的相对位置，它们之间的交线即为暗条纹位置。以下分几种情况说明。

1. 无限宽条纹

当分束面与半波相位差面平行时，视场“条纹无限宽”。即当光栅移动时，整个视场同时均匀变明或变暗。如图2所示。

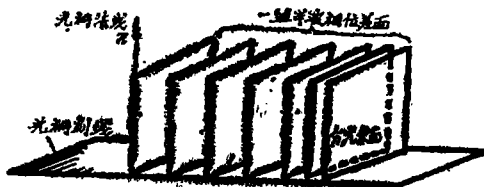


图2 无限宽条纹

2. 平行于光栅刻线的条纹

当分束面调整成平行于光栅刻线，但与光栅法线成 γ_1 角时，形成平行于刻线的条纹。如

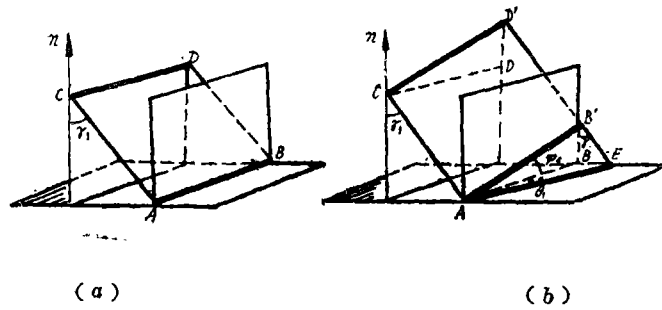


图3 平行于刻线条纹及摆角影响

图3 (a) 所示。图中 AB 和 CD 为二条纹。

在接收视场中条纹的宽度可表为

$$b = \frac{\delta x}{\text{tg}\gamma_1} \sin\alpha \approx \frac{\delta x}{\gamma_1} \sin\alpha \quad (2)$$

式中 α 为衍射角， γ_1 角很小约为几秒。

3. 垂直于光栅平面的条纹

当分束面调整成平行于光栅法线，但与刻线成 γ_2 角时，形成垂直于光栅平面的条纹。如

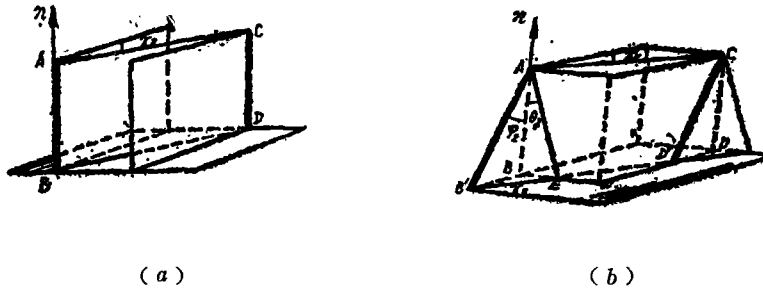


图4 垂直于光栅平面条纹及摆角影响

图4 (a) 所示， AB 和 CD 为二条纹。条纹的宽度可表为

$$b = \frac{\delta x}{\text{tg}\gamma_2} \approx \frac{\delta x}{\gamma_2} \quad (3)$$

4. 倾斜条纹

当分束面与光栅刻线及法线都有倾角时，形成倾斜条纹。

在图3 (b) 中，分束面与光栅法线夹角为 γ_1 ；与刻线夹角为 θ_1 ；条纹与刻线倾角为 φ_1 。

在图4 (b) 中，分束面与刻线夹角为 γ_2 ；与法线夹角为 θ_2 ；条纹与法线倾角为 φ_2 。

对上述两种情况，用几何关系都可求出条纹倾角公式

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \frac{\text{tg}\theta}{\text{tg}\gamma} \quad (4)$$

三、光栅摆动引起的计量误差

光栅干涉仪用于直线位移计量时，常把光栅置于工件台上。当工件台严格沿计量方向作直线运动时，不会产生运动误差。当工件台运动中有微小摆角 θ 时，对于一般计量可产生余弦误差，常可忽略。但对于用干涉仪精密计量却不能忽略。

因为光栅在直线运动中有附加摆动时，改变了半波相位差面与分束面的相对位置关系，从而使条纹的宽度或方向也改变了。这样使处于条纹像场的光电接收元件相对于条纹的位置改变了，输出的电信号的相位关系可能发生变化，从而引起信号的相位误差，导致计量误差。

以下分几种情况讨论。

1. 如果光栅有平行于光栅法面的微小摆动，设摆角为 θ 。

(a) 如干涉仪采用平行于刻线的条纹，则条纹的宽度会发生变化。因为 θ 直接改变着图 3 (a) 中的 γ_1 角，这时条纹宽度由 b 变为 b_1 。由式 (2) 可得

$$b_1 = \frac{\delta x}{\gamma_1 + \theta} \sin \alpha$$

如果在条纹接收场内，取一个条纹宽 b 为 360° 相位，则引起的相位误差为

$$\Delta \varphi = 360 \frac{b - b_1}{b} = 360 \frac{\theta}{\gamma_1 + \theta} \quad (5)$$

引起的计量误差为

$$\Delta x = \frac{\Delta \varphi}{360} \delta x = \frac{\theta}{\gamma_1 + \theta} \frac{a}{2m} \quad (6)$$

例如光栅线距 $a = 1/625\text{mm}$ ，使用 $0.9\mu\text{m}$ 一级衍射光，当取条纹宽 $b = 10\text{mm}$ 时，可以算出 $\gamma_1 = 4.6$ 角秒。如果摆角误差 $\theta_1 = 1$ 角秒，则引起的信号相位误差为 $\Delta \varphi = 64$ 度，引起的计量误差为 $\Delta x = 0.14\mu\text{m}$ 。

(b) 如果干涉仪采用垂直于光栅平面的条纹，当光栅摆动 θ_2 角时，将引起条纹的倾斜。参见图 4 (b)，条纹从原来的 AB, CD 分别变为 AB' 和 CD' 。

按照光电元件在条纹像场中的不同布置位置，分以下三种情况讨论。

(1) 两个光电元件恰布置在条纹像的 AC 线上，如图 5 示。当条纹倾斜为 AB', CD' 时，接收信号的相位不受影响，不产生误差。

(2) 如两个光电元件布置在平行于 AC 线的某处，如图 6 示。输出二信号的相位同步变化，相位差保持不变。

(3) 如两个光电元件布置得不平行于 AC 线，如图 7 示。则输出二信号的相位差亦发生变化。

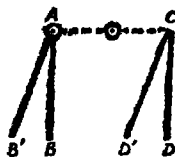


图 5 光电元件在 AC 线上

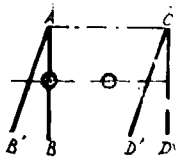


图6 光电元件在平行于AC的线上

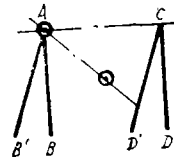


图7 光电元件不在平行于AC的线上

2. 如光栅有平行于光栅平面的微小摆动, 设摆角为 θ 。

(a) 如果干涉仪采用垂直于光栅平面的条纹, 则光栅的上述摆动, 直接改变着图4(a)中的 γ_2 角, 这时角纹宽度由 b 变为 b_1 , 它对相位和计量精度的影响类同于在1(a)中所述的情况, 计算公式同(5)、(6)。

(b) 如干涉仪采用平行于刻线的条纹, 则光栅的上述摆动, 将引起条纹的倾斜, 参见图3(b)。条纹从原来的 AB, CD 分别变为 AB' 和 CD' 。

按照光电元件在条纹像场中的不同布置位置也可分三种情况讨论, 其情况类同于在上述1(b)中的(1)、(2)、(3)讨论的情况。

四、讨 论

1. 光栅干涉仪的运动误差原理为设计光栅干涉仪和以此种干涉仪作为计量基准的工件台提供了定量分析误差的理论依据。例如对工件台导轨直线性的精度要求可以分为水平和垂直摆动两个指标, 可以根据干涉仪的设计和条纹取向, 重点保证一个指标, 而适当放宽另一个指标, 这样既可满足精度要求又可以降低加工成本。如对已有的工件台配置光栅干涉仪, 可实测导轨的两个摆动指标, 取其好的一个适当设计干涉仪和配置条纹方向。

2. 由于工件台带动光栅摆动, 引起干涉仪条纹宽度和方向的变化, 从而使光电元件输出的信号相位发生变化。如测出两个光电元件输出信号相位差的变化, 也即间接测出了工件台的摆动转角。

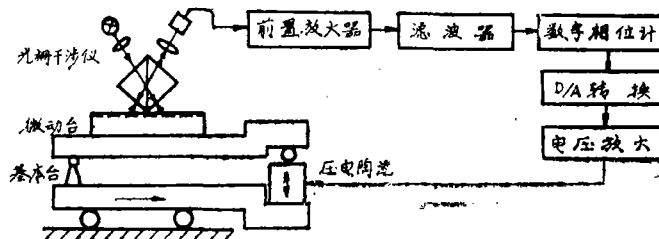


图8 摆动误差校正示意图

如果以相位差的变化作为信号, 通过控制电路驱动压电陶瓷微动, 来校正工件台的摆角误差, 如图8所示, 这样构成的闭环系统可以达到极高的运动精度和计量精度。

已做过如下实验,用数字相位计测相位差,用手动调节压电陶瓷电压,可以保证相位误差在10度以内。干涉仪是用线距为 $1/625\text{mm}$ 光栅, $0.9\mu\text{m}$ 一级衍射光相干涉,这时的计量误差为 $\Delta x = 0.02\mu\text{m}$ 。如用电控系统,把相位误差控制在5度以内,即可达到 $0.01\mu\text{m}$ 级精度。

参 考 文 献

- [1] Г.Н.Рассубова,Ф.М.Герасцов;Оптика и Спектроскопия,14,406 (1963)
- [2] 顾去吾,杨厚民;吉林计量测试,1,12 (1980)
- [3] 梁浩明,郝德阜;SPIE,369,666 (1982)
- [4] 郝德阜;光学机械5,54 (1983)
- [5] 郝德阜;ICO-13 Conference Digest 562 (1984)

Moving Error Principle for Grating Interferometers

Hao Defu

Abstract

The moving error in the grating interferometer can change interference fringes according to the principle of half-wave phase difference plane. In this paper the moving error formula for grating interferometer is derived. It may provide a basis for designing and using the grating interferometer.