

衍射光栅分度误差的检测

王晓琳 杨厚民

摘要 提出了光栅分度误差的检测方法，指出了它在光栅检验中的应用。

一、前言

衍射光栅作为研究光谱的一个重要工具，在化工分析、工业控制、天文学以及军事等等各个领域中得到越来越广泛的应用，因此，刻划高质量的光栅一直倍受重视。随着科学技术的发展，人们对光栅质量的要求日益提高，这就对光栅的刻划与检测提出了更高的要求，但是由于条件的限制，以往对光栅的检测一直停留在对其作用效果的检验上。

过去，要逐条刻线测出光栅的分度误差几乎是不可能的。1990年在我所首次研制成功国内第一台微机控制连续运动的光栅刻划机，这就为我们直接测量光栅分度误差，研究提高光栅的刻划精度提供了条件。本文提出的光栅分度误差的检测方法就是在此基础上完成的。

二、光栅分度误差的测量方法

1. 机器的基本原理

微机控制连续运动的光栅刻划机的基本原理如图1。它主要由刻划系统和分度系统两大部分组成。刻划系统控制着装有钻石刀具的刀桥的运动，其平稳性由刀桥位置的测量信号与晶振分频信号进行锁定来控制，锁定精度为0.12%，满足光栅刻划的要求。分度系统控制着

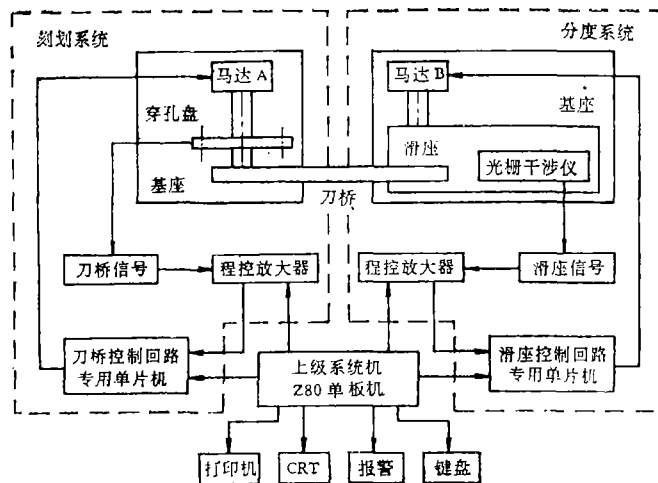


图1 机器原理框图

载有光栅毛坯的滑座的运动，它的平稳性由滑座位置的测量信号与稳定后的刀桥位置信号的分频信号进行锁定来控制。上级系统机及其它部分则起到监督管理的作用。整台机器控制的最终目的是使滑座的运动与刀桥的运动同步。

2. 测量原理

机器刻划当中滑座运动平稳与否是光栅分度误差产生的直接原因。

进行刻划时，当机器运行平稳之后，分度系统中光栅干涉仪测得的滑座位置信号与稳定的刀桥位置信号分频得到的参考信号锁定，两信号的相位差应该是恒定的，但是由于各种随机因素的存在，滑座信号的沿总是在参考信号沿的左右摆动，这就使得每次落刀刻划时的位置与理论位置有一定的误差，因此这个摆动量就代表分度误差。文中采用脉冲填充法来测量这个差值，如图 2，填充脉冲的稳定精度为 0.14%。

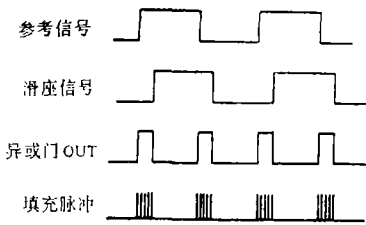


图 2 脉冲填充原理图

所谓脉冲填充法就是将参考信号和被测信号同时经异或门输出得到二者的相位差，用此信号去启动计数器计数，其前沿使计数脉冲门打开，计数脉冲通过此门送入计数器，其后沿关闭计数脉冲门，停止计数。所记的数值是动态误差，即为分度误差。

3. 硬、软件设计

根据实际情况设计了专用测量电路，其结构如图 3。专用单片机为 51 系列的 8031，程序存储器存贮读数及数据处理程序，数据存储器则实时地将计数器的

值存贮起来；计数器采用 8253 可编程计数器，选择工作方式 2，这样 CPU 可以随时将计数器当前数读入内存，而无需中断计数器的时钟输入，也不影响计数器的计数，本文中信号的频率较低，读数是在计数结束后，此时门控端已变为低电平了；文中的掉电保护电路尤为重要，因每次测量完毕电路才和 PC 机相连进行数据处理，所以必须保证关掉电源后测得的数据不会丢失；显示电路实时地将测量值显示出来，供操作人员直观地看到滑座是否锁定以及锁定的情况，并根据测量值调整机器的控制参数，使之达到满意的刻划结果。

测量的软件流程图如图 4。其中 A 代表滑座的参考信号，B 代表滑座的位置信号。

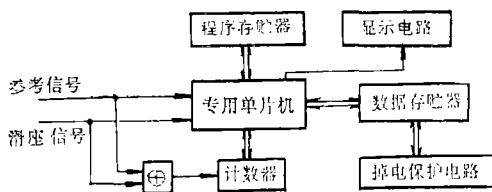


图 3 测量电路结构框图

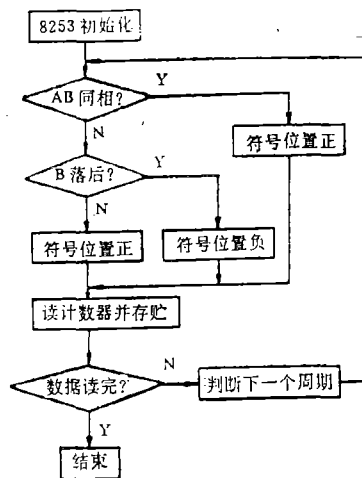


图 4 测量软件流程图

三、数据测量及分析

实际测量时，以刻划1200线/mm和800线/mm的光栅为例，分别抽样采集了5268个数据进行研究。

1. 机器的刻划精度

在测量1200线/mm光栅的数据中，取480个数据画于图5中。图中纵坐标为刻线的分度值，横坐标为刻划的距离，横线是一个周期信号滑座应前进的距离，散开的点反映了实际分度偏离理论值的情况。

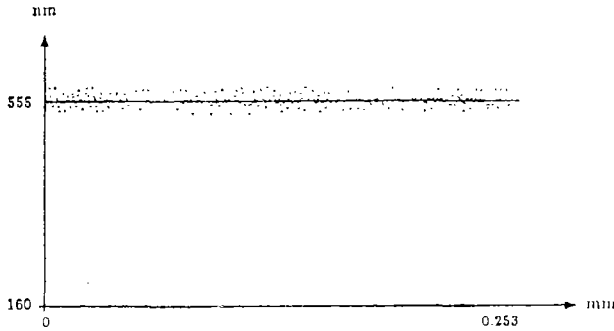


图5 部分误差的分布

误差的分布符合正态分布的条件，本文以单次测量标准差描述机器的分度精度。根据Bessel公式：

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N V_i^2 / (N - 1)}$$

其中 V_i 为剩余误差： $V_i = \Delta a_i - \bar{\Delta a}$

Δa_i 是测量的误差值

$\bar{\Delta a}$ 是测量值的算术平均值

将所测5268个数据代入上式得 $\sigma \approx 13\text{nm}$ ，因此机器在此次刻划1200线/mm光栅时的分度精度为 $\sigma \approx 13\text{nm}$ 。同理可得机器在此次刻划800线/mm光栅时的分度精度为 $\sigma \approx 3.1\text{nm}$ 。

由于剩余误差和偶然误差具有相同的特征，因此它也符合正态分布，两组数据的分布密度曲线如图6。可以看出刻800线/mm光栅较刻1200线/mm光栅时的相对误差小得多。

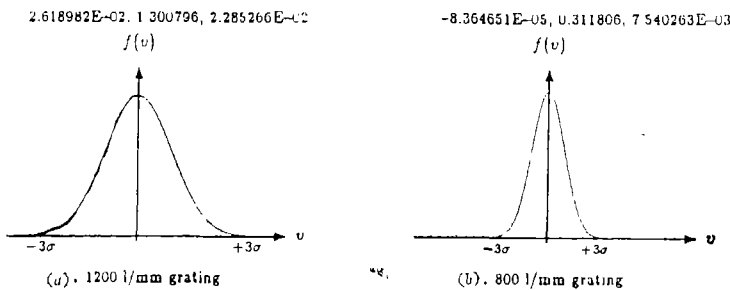


图6 分布密度曲线

2. 分度误差对光栅谱线的影响

(1) 理论根据

如图7(a), 当光栅自准直使用时, $i = i'$, 衍射波振面平行于光栅刻线面与主光栅面成 i' 角, 若刻线间隔沿主光栅面有偏移量 Δa , 则在衍射波振面的方向上有 $\Delta a \sin i'$ 的变化量, 此时衍射波振面上产生的相位差为:

$$\varphi(\eta) = \frac{2\pi}{\lambda} 2\Delta a \sin i' \quad (1)$$

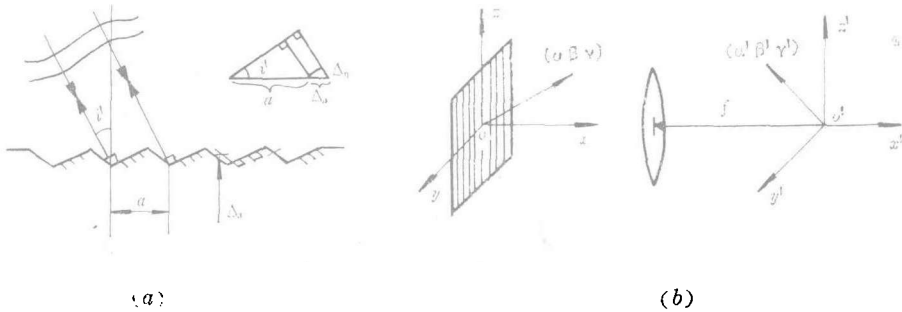


图 7

根据Stoke理论: 光经衍射光栅形成的衍射图样上的复振幅的分布是衍射波振面上复振幅分布的Fourier变换形式。衍射图样中能量的分布正比于衍射图样复振幅与其共轭复数的乘积。如图7(b), 其一维的归一化表达式为:

$$A(\beta) = \int_{-1}^{+1} g(\eta) e^{i\beta\eta} d\eta \quad (2)$$

$A(\beta)$ —— 衍射图样中的复振幅

$g(\eta)$ —— 衍射波振面复振幅

β —— 角坐标。 $\beta = 0$ 对应给定衍射级次谱线的中心。

Stoke给出的衍射波振面的复振幅表达式为: $g(\eta) = A(\eta) e^{i\varphi(\eta)}$, 在光栅均匀闪耀均匀照明的情况下, $A(\eta)$ 可以认为是常数, 不加考虑, 则分度误差就直接反映在衍射波振面相位的变化上。(2)式可写为:

$$A(\beta) = \int_{-1}^{+1} e^{i(\varphi(\eta) + \beta(\eta))} \cdot d\eta \quad (3)$$

(2) 实际测量结果

将自准直方程 $2d \sin i' = m\lambda$ 代入(1)式得: $\varphi(\eta) = (2\pi m \cdot \Delta a)/d$, 将此式代入(3)式中, 由于利用微机进行Fourier变换时运算不是连续的, 需将(3)式离散化。因 β 是谱面上 x 的函数, 所以离散形式的衍射图样复振幅表达式为:

$$A(x_k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\cos\left(\frac{2\pi m}{d} \Delta a + \frac{\pi B}{\lambda f N} n k\right) + i \sin\left(\frac{2\pi m}{d} \Delta a + \frac{\pi B}{\lambda f N} n k\right) \right]$$

其中 f 是透镜的焦距, B 是光瞳宽度。在实验当中取 $B = 3\text{mm}$, $\lambda = 546.1\text{nm}$, $f = 1\text{m}$, 对刻1200线/mm的光栅, $d = \frac{1}{1200}\text{mm}$, 取衍射级次 $m = 1$, 将测量值的单位统一, 经变换后得到的能量分布如图8(a), 图中谱线存在着许多假线, 文中采集的这组数据只是作为研究分度误差的例子, 而实际刻划当中, 通过调整控制参数, 这些假线是能够缩小或消除的。

图8(c)是该光栅用光谱法得到的一级谱线的能量分布的照片,可以看出运算所得谱线与实际谱线基本符合。图8(b)是应用同样方法得到的测量800线/mm光栅一组数据的能量分布图,8(d)是其相应的实际谱线,可以看出假谱线的能量减小或消失,这也说明精细调整机器的控制参数完全可以控制刻划的精度。

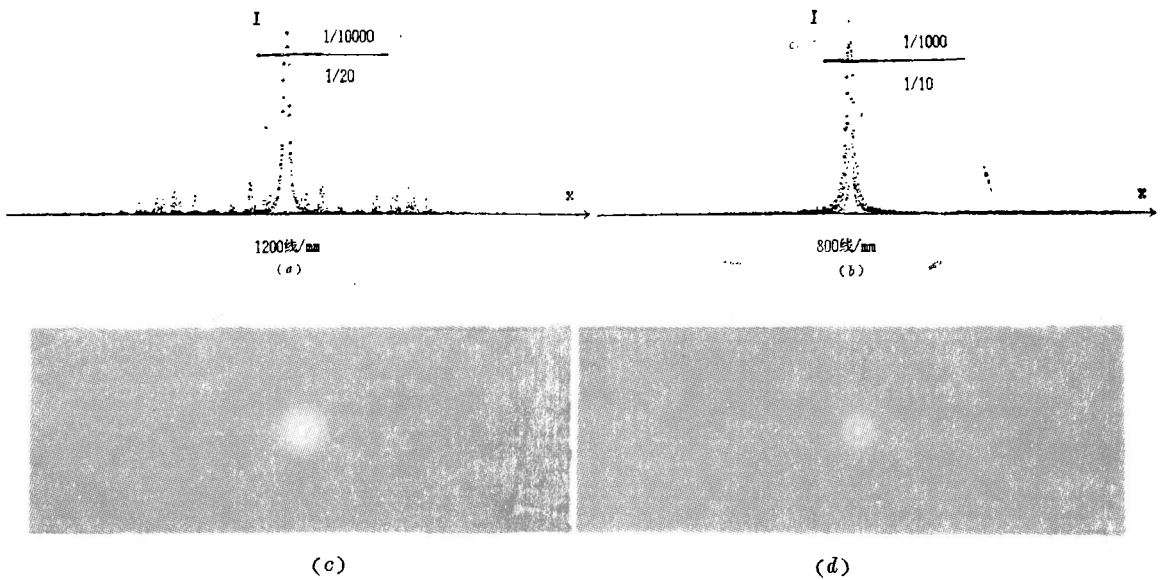


图8 谱线轮廓

(3) 计算谱线轮廓的意义

由运算法与由光谱法得到的谱线轮廓基本是一致的,因此可以通过对运算得到的谱线的研究得出光栅的光谱特性,而省去了光谱法中的一系列实验装置。例如常用的检测光栅分辨率的方法是半宽度法,即根据光电探测装置记录的谱线强度分布,求出半宽度值,作为待测光栅的分辨极限,根据此方法,对运算得到的谱线求半宽度值,不仅方法简便,而且剔除了探测仪器对谱线的影响。

四、结 束 语

1. 分度误差的实时测量,可以作为调整机器控制参数的依据,以提高光栅的刻划精度。操作人员可以通过观察测量值,发现异常立即停机检查,这就节约了时间,改变了以往无论光栅刻的好坏,只有刻完再检查的被动局面。

2. 分度误差的测量,对于某些特定的刻划都能给出机器的分度精度,使得操作人员能够了解机器在某一特定时期的运行情况。

3. 分度误差的测量,解决了传统测量方法无法解决的问题,成功地实现了刻划误差与毛坯误差的分离,为进一步研究光栅特性,分析各种误差,提高光栅质量提供了新的手段。

参 考 文 献

[1] G.W.Stroke; «Encyclopedia of Physics» Vol. XX I X 1967

- [2] 杨厚民: 光学机械, 1980.2
- [3] 张荫先: 光学机械, 1990.1
- [4] 费业泰: 《误差理论与数据处理》, 机械工业出版社, 1983

Ruling Error Measurement of the Diffraction Gratings

Wang Xiaolin, Yang Houmin

Abstract

This paper presents a new method to measure the ruling error of diffraction gratings, and indicates its application in diffraction grating testing.