

光学图样光电探测的动态仿真*

吕海宝

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

摘要 以圆孔夫琅和弗衍射图样的光电探测为例,介绍了对光学图样的光电探测进行动态仿真的方法。

关键词 光学图样;光电探测;动态仿真

分类号 TH741

在光电检测领域中,常会遇到光学图样尺寸的测量问题。这种测量一般是用光电探测器探测并确定被测光学图样的尺寸特征点,然后配置数字式测长机构,以这些特征点为开关门点进行计数测长^{[1][2]}。由于光电探测器或其附加的接收光阑的有效接收面积不可能是一个点,因此往往造成特征点位置的探测误差^{[1][2]},这种误差有时候会大到不能容许的地步。过去我们曾经报道过采用曲线拟合的方法来修正这种误差^[3],但在高精度测量中,拟合法并不是一种令人满意的方法。本文以圆孔夫琅和弗衍射图样的光电探测为例,着重介绍了对光学图样光电探测过程进行动态仿真的方法。这种方法直接模拟对图样光强光电探测的动态过程,可以很精确地得到全量程内探测误差的分布规律。仿真结果可直接用于探测误差的修正,修正精度比拟合法要高很多,而且这种动态仿真方法可以在类似的光学图样或光电信号变化过程的探测中推广使用^{[4][5]}。

1 光电探测模型与探测误差

下面我们以圆孔夫琅和弗衍射图样的光电探测为例,来建立光学探测模型并讨论探测误差的成因。

1.1 光电探测模型

图1示出了带有半径为 e ,接收面积为 S 的接收光阑的光电探测器配置在圆孔夫琅和弗衍射图样直径方向上的情况。光电探测器沿图样径向按一定步长进行扫描,判别并确定一定级次衍射环的光强极值点。若以该级次衍射环直径上两个端点为开关门点,用计数测长的方法测出衍射环尺寸,即可求得圆孔孔径。

根据衍射理论,图样半径为 X_k 的衍射环线上任一点的光强表达式为

$$I(x_k) = I_0 \left\{ \frac{2J_1[u(x_k)]}{u(x_k)} \right\}^2 \quad (1)$$

* 1994年1月5日收稿

式中 I_0 是爱里斑中心点的光强; $J_1[u(x_K)]$ 是一阶贝塞尔函数, $u(x_K) = k a \operatorname{tg} \varphi$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是波数, a 是圆孔半径, φ 是衍射角, $\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_K}{L}$, L 是夫琅和弗衍射距离。

取落在探测面积 S 内且半径为 x_K 的衍射环线所在的面元 dS (见图 1), 则 dS 上的衍射光强为

$$dI(x_K) = I(x_K) \cdot dS \quad (2) \quad \text{图 1 圆孔夫琅和弗衍射图样的光电探测模型}$$

由此可写出光电探测器接收面积 S 上接收到的衍射光强表达式为

$$I_S = \int_{r_K^-}^{r_K^+} 2I(x_K) \cdot \alpha(x_K) \cdot x_K dx_K \quad (3)$$

由边角关系可知

$$\alpha(x_K) = \cos^{-1} \frac{r_K'^2 + x_K^2 - e^2}{2r_K' x_K} \quad (4)$$

式中 r_K' 是探测器中心 O_S 到爱里斑中心的距离。

在扫描过程中, 当探测面积 S 上的接收光强达到极值时, 则此位置探测面积 S 的中心到爱里斑中心的距离 r_K' 就是通过光电探测得到的衍射图样第 K 级衍射环的半径。显然, 这时应满足条件

$$dI_S/dr_K' = 0 \quad (5)$$

且根据拐点的性质可判别出此时探测的衍射环是亮环还是暗环。

1.2 探测误差

式(1)表示的贝塞尔函数平方型光强分布, 除了爱里斑中心外, 其它任何极值环点左右的径向光强分布都是不对称的。因此, 正如图 2 所表示的那样, 当实际探测光强为极值时, 探测面积 S 中心 O_S 的位置与图样极值点 O_P 的理论位置并不重合, 由此将造成光电探测误差 Δr_K , 即

$$\Delta r_K = r_K' - r_K \quad (6)$$

式中 r_K 是衍射图样第 K 级光强极值环的理论半径。我们常常将 Δr_K 称为光电面探测误差。由分析可知, 探测暗环时 Δr_K 为正差, 探测亮环时 Δr_K 为负差。

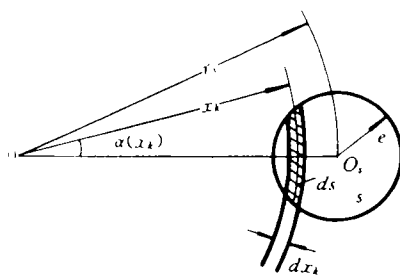


图 1 圆孔夫琅和弗衍射图样的光电探测模型

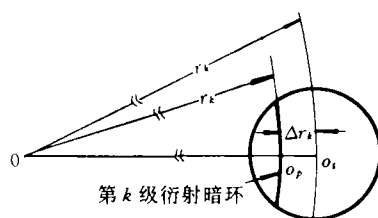


图 2 光电面探测误差

2 光电探测的动态仿真及探测误差修正

2.1 光电探测的动态仿真

根据上述衍射图样的光电探测模型, 可利用计算机对这一探测过程进行动态仿真。

首先按(3)式计算扫描过程中不同 r_K' 时的光电探测光强 I_S , 仿真计算的起始点可选在第 K 级理论极值环上, 即赋初值 $r_K' = r_K$, r_K 可由下式求得

$$r_K = mL\lambda/a \quad (7)$$

式中, $m = \frac{u}{2\pi}$, m 是与衍射级次 K 和该级次时贝塞尔函数的零点值 u 有关的常数, 测暗环时 u 是一阶贝塞尔函数 $J_1(u)$ 的零点值, 测亮环时 u 是二阶贝塞尔函数 $J_2(u)$ 的零点值。

计算(3)式时, 积分步长取得越小, 仿真精度越高。探测面积 S 上的取样次数 N 可由下式决定

$$N = \frac{2e}{\Delta e} \quad (8)$$

式中, Δe 为积分步长。接着模拟扫描探测的过程。先赋值

$$r'_K = r_K \pm \Delta r'_K \quad (9)$$

式中, $\Delta r'_K$ 是扫描步长, 且暗环探测仿真时取 $+\Delta r'_K$, 亮环探测仿真时取 $-\Delta r'_K$ 。

然后按(3)式计算扫描一步后探测器的接收光强 I_s , 并比较 I_s 和 I , 则暗环探测时应有 $I_s < I$, 亮环探测时应有 $I_s > I$ 。此后每增加一个扫描步长 $\pm \Delta r'_K$, 就计算出一个新的探测光强 $I_{S(i+1)}$, 并将此 $I_{S(i+1)}$ 与前一个探测光强 I_s 作比较, 直到出现

$$I_{S(i+1)} > I_s \quad (\text{暗环探测}) \quad (10)$$

$$I_{S(i+1)} < I_s \quad (\text{亮环探测}) \quad (11)$$

时为止。这时(10)式中的 I_s 和(11)式中的 I_s 就分别是仿真得到的满足(5)式所示极值条件的衍射暗环和亮环的探测光强。从而同一 K 级次衍射极值环的探测半径可表示为

$$r'_K = r_K + (i-1)\Delta r'_K \quad (\text{暗环探测}) \quad (12)$$

$$r'_K = r_K - (i-1)\Delta r'_K \quad (\text{亮环探测}) \quad (13)$$

上两式中的 r'_K 分别是仿真得到的第 K 级衍射暗环和亮环的探测半径。

对整个量程内不同尺寸圆孔的衍射图样的探测仿真, 可从量程下限孔径 a_{\min} 起算, 逐次增加孔径步长 Δa 重复进行运算, 直到 a 等于上限孔径值 a_{\max} 时为止。

显然, 与积分步长 Δe 一样, 扫描步长 $\Delta r'_K$ 和孔径步长 Δa 取得越小, 仿真精度越高, 但运算量也越大。

顺便指出, 当光电探测器由步进电机带动扫描图样时, 扫描步长 $\Delta r'_K$ 最好取步进电机的步距值。

2.2 光电面探测误差的修正

上述动态仿真的结果可直接用于光电面探测误差的修正。衍射环径修正系数 C_r 和孔径修正系数 C_a 可分别表示为

$$C_r = r_K/r'_K \quad (14)$$

$$C_a = a/a' \quad (15)$$

式中 a' 是由探测仿真求得的圆孔半径, 也就是实际光电探测求出的圆孔半径, 且 $a' = \frac{mL\lambda}{r'_K}$ 。

整个量程内所有实测衍射环径 r'_K 和实测孔径 a' 的修正系数 C_r 和 C_a 可在动态仿真后按(14)、(15)两式计算并列表给出。同时还可给出修正前光电面探测误差 $\frac{a'-a}{a}(\%)$ 的

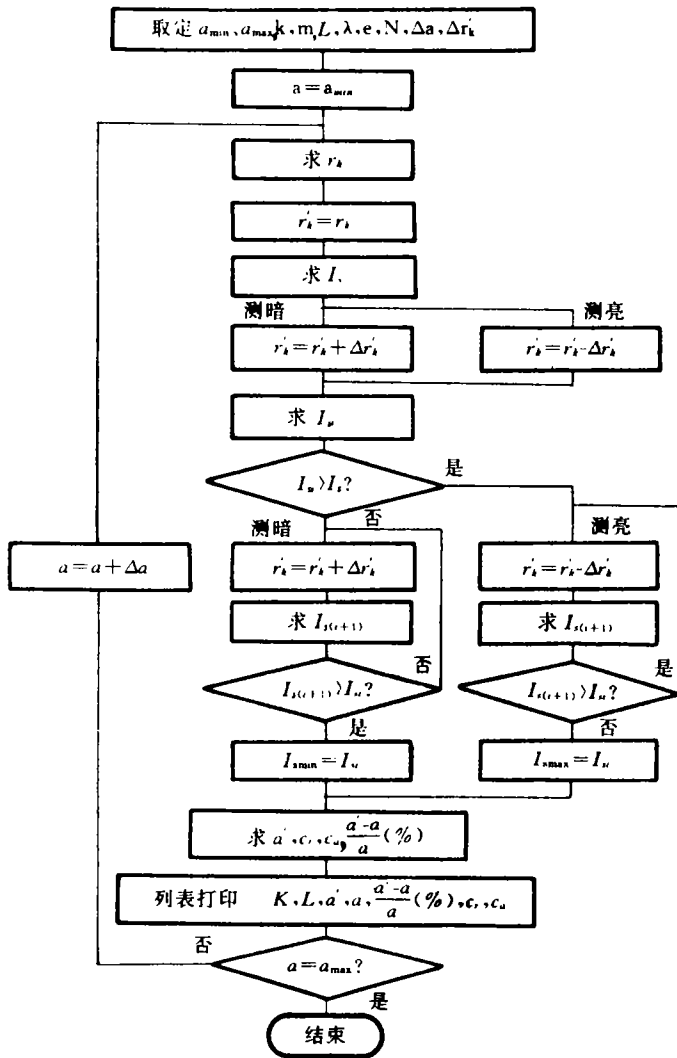


图3 圆孔衍射图样光电探测动态仿真流程图

大小，由此可清楚看出全量程内光电面探测误差的分布规律。其中整个量程内的孔径修正系数可存入测量系数的 EPROM 中，实测时根据光电探测求出的孔径值 a' 从 EPROM 中查表，就可直接得到修正孔径值 a 。

3 仿真流程

图 3 示出了圆孔夫琅和弗衍射图样光电探测的动态仿真流程。

在量程较宽时，往往要分档设定不同的衍射距离 L 和测量不同 K 级次衍射极值环的尺寸，这时可在 a 赋值前先判断孔径 a 落在那一档，并由此取定该档相应的 K 、 m 和 L

值,然后再进入图3所示的流程进行动态仿真。

4 结束语

在光学图样尺寸的光电探测中,光电探测器的有效接收面积往往造成特征点位置的探测误差。通过光电探测过程的动态仿真可以预先计算出整个量程内这种误差的大小。由于仿真计算时几个步长参数可以取得很小,因此这种仿真方法可以达到极高的精度。仿真结果可直接用于光学图样尺寸光电面探测误差的修正。与拟合法相比,修正精度一般要高出两个数量级以上。这种仿真和修正的方法已在我们的光电测微研究中成功地使用了多年,取得了令人满意的结果。本文介绍的动态仿真法不仅仅适用于对光学衍射图样尺寸的光电探测,其原理也可以推广应用于诸如激光半峰值边缘检出等光电信号变化的过程探测等许多方面。

参 考 文 献

- 1 吕海宝等.微机控制的微孔径激光检测装置的研究.仪器仪表学报,1988,9(1):72~76
- 2 吕海宝等.纤维直径激光检测系统.宇航学报,1991,13(2):64~69
- 3 吕海宝等.小孔孔径激光衍射测量的拟合修正.应用激光联刊,1986,6(1-2):30~34
- 4 吕海宝.单缝缩放测量的修正因子及其计算机解法.光学工程,1989,(3):43~47
- 5 吕海宝.小孔缩放测量的修正因子及其计算机解法.计量学报,1992,13(2):105~109

Dynamic Simulation for Photodetection of an Optical Pattern

Lü Haibao

(Department of Mechantronics Engineering and Instrumentation,
NUDT, Changsha, 410073)

Abstract

Since the detecting area of any photodetector can't be zero, in reality the photodetection for an optical pattern is always an area-detection. If the intensity distribution to the left and the right of the characteristic point of the edge in the detected optical pattern is unsymmetrical then a mistake will arise from this kind area-detection for the point position lead in detormining the position of the edge, and thus will produce the edge check-out error. But by means of the dynamic simulation for the photodetection of the optical pattern, the edge checkuout error may be previously calculated. The results of the simulation may be immediately used for the correction of the error. In this paper we take the photodetection of the Fraunhofer diffraction pattern from a circular aperture for example, introduce the method of the dynamic simulation for the photodetection of the optical pattern.

Key words optical pattern; photodetection; dynamic simulation