

# 一种衍射测量新方法的研究

吕海宝

(国防科技大学)

衍射孔径线度与衍射光强存在一定的缩放关系,这一关系可以应用于微小尺寸的工程测量。本文对衍射缩放定理进行了开发,给出了用于单缝和小孔的测量公式以及光电面接收修正因子的表达式。文中还给出了以细丝为例进行的测量实验的结果。

## A new method for diffraction measurement

Lu Haibao

(National Defense University of Science and Technology)

### Abstract

There is a reducing-enlarging relation between the dimension and the diffracting intensity for an aperture. This relation may be used for the engineering measurement of tiny dimension. In this paper the reducing-enlarging theorem is developed. The measuring formulas used for slits and apertures, and the expressions of the correcting factor for the photoelectric receiving with an area are given. In the paper the results of measuring experiment to take filaments for example are also given.

### 一、引言

在常见的激光衍射测量中,人们大多采用检测衍射图样的方法来测量单缝、细丝及微孔等微小尺寸。这样的测量系统一般都包含一个测长装置,因此不仅结构比较复杂,而且操作判读也往往比较麻烦。本文介绍了一种我们称之为衍射缩放法的通过光强比较来测量微尺寸的新方法。这种方法无需进行图样尺寸的测量,因此不仅测量系统十分简单,而且测量操作也快速简便。由于该方法简易可行,预计将有较好的发展前景。

### 二、衍射缩放定理的开发

当衍射孔径的线度沿某方向均匀拉伸 $\mu$ 倍时,则其夫琅和费衍射图样的线度将在同方向上缩小 $\mu$ 倍,且衍射图样上各点的光强为原衍射图样上各同级点光强的 $\mu^2$ 倍。这就是光学中的衍射缩放定理<sup>[1]</sup>。

我们从单缝衍射缩放定理的证明可得到

$$I_{k2} = \mu^2 I_{k1} \quad (1)$$

式中,  $\mu = \frac{d_2}{d_1}$ ,  $d_1$ 、 $d_2$ 分别为单缝缩放前后的缝宽;  $I_{k1}$ 、 $I_{k2}$ 分别为单缝缩放前后第 $k$ 级衍射亮点的光强。由此, 立即可得到单缝缝度与衍射光强的缩放关系

$$d_2 = \sqrt{\frac{I_{k2}}{I_{k1}}} \cdot d_1 \quad (2)$$

根据巴俾涅原理, 除了 $k=0$ 点以外, 测量公式(2)也适用于细丝。

对于圆孔, 可求得光强缩放关系为

$$I_{k2} = \mu^4 I_{k1} \quad (3)$$

则圆孔半径与衍射光强的缩放关系为

$$r_2 = \sqrt[4]{\frac{I_{k2}}{I_{k1}}} \cdot r_1 \quad (4)$$

(3)式中 $\mu = r_2/r_1$ ,  $r_1$ 、 $r_2$ 分别为圆孔缩放前后的半径;  $I_{k1}$ 、 $I_{k2}$ 分别为圆孔缩放前后第 $k$ 级衍射亮环的光强。

由测量公式(2)和(4)可见, 若能标定某个衍射孔径, 则通过测定衍射图样同级衍射点的光强比, 就可以得出待测孔径的尺寸。

### 三、光电面接收修正因子

测量公式(2)和(4)中的光强, 都是第 $k$ 级衍射亮点的点光强。但在实际测量中, 不管接收光栏如何窄, 总有一定的接收宽度。因此, 光电接收器件不可能实现点光强接收。光电器件的这种面接收将造成测量误差。不过这种误差是系统误差, 可以进行修正。

对于光电面接收, 测量公式(2)应改写为

$$d_2 = \beta \sqrt{\frac{I_{k2}'}{I_{k1}'}} \cdot d_1 \quad (5)$$

式中,  $I_{k1}'$ 、 $I_{k2}'$ 分别是丝径为 $d_1$ 、 $d_2$ 时同级衍射亮纹的面接收光强;  $\beta$ 为光电面接收误差的修正因子。对比(2)式和(5)式可得到

$$\beta = \sqrt{\frac{I_{k2}}{I_{k1}}} / \sqrt{\frac{I_{k2}'}{I_{k1}'}} \quad (6)$$

若接收光栏宽度为 $a$ , 第 $k$ 级亮点到图样中心的距离为 $x_k$ , 到光栏左边的距离为 $e$ (见图1), 则光电接收器接收到的第 $k$ 级亮纹的面光强应为

$$I_k' = \int_{x_k - e}^{x_k - e + a} I(x) dx \quad (7)$$

式中,  $I(x) = I_0 \left( \frac{\sin u}{u} \right)^2$ ,  $I_0 = C \cdot I_k$ ,

$C$ 为比例常数,  $I_k$ 为第 $k$ 级亮点的点光强,

$$u = \frac{\pi d x_k}{\lambda \sqrt{x_k^2 + L^2}}, \quad d \text{ 为丝径, } \lambda \text{ 为激光波}$$

长,  $L$ 为衍射距离。从(7)式得到 $I_{k1}'$ 和

$I_{k2}'$ 代入(6)式, 经运算整理可得到

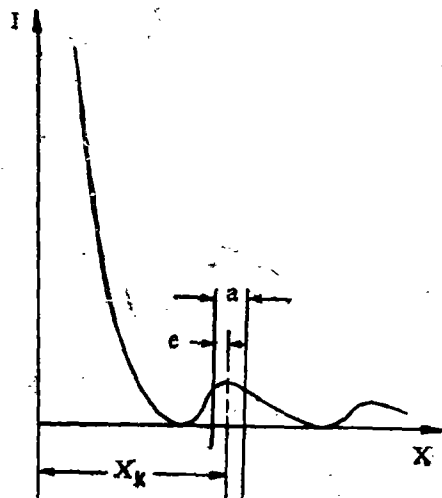


图1 光栏接收位置

$$\beta = \sqrt{\int_{x_{k1}-e_1}^{x_{k1}-e_1+a} \left( \frac{\sin u_1}{u_1} \right)^2 dx} \bigg/ \sqrt{\int_{x_{k2}-e_2}^{x_{k2}-e_2+a} \left( \frac{\sin u_2}{u_2} \right)^2 dx} \quad (8)$$

(8)式就是衍射缩放法测量单缝和细丝用的光电面接收修正因子的表达式。各种不同的丝径的修正因子 $\beta$ 值, 可事先用计算机计算后贮存备用。

对于圆孔, 光电面接收时的测量公式应改写为

$$r_2 = \beta \sqrt{\frac{I_{k2}'}{I_{k1}'}} \cdot r_1 \quad (9)$$

式中,  $I_{k1}'$ 、 $I_{k2}'$ 分别是孔径为 $r_1$ 、 $r_2$ 时同级衍射亮环的面接收光强,  $\beta$ 为光电面接收修正因子。对比(4)式和(9)式可得到

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{I_{k2}'}{I_{k1}'}} \bigg/ \sqrt[4]{\frac{I_{k2}'}{I_{k1}'}} \quad (10)$$

由于小孔衍射的图样为同心圆环, 因此采用圆形接收光栏。设光栏接收面积为 $S$ , 则光电接收器接收到的第 $k$ 级亮环的面光强应为

$$I_k' = \iint_S I(\rho) ds \quad (11)$$

式中,  $I(\rho) = I_0 \left[ \frac{2J_1(u)}{u} \right]^2$ ,  $J_1(u)$ 为一阶贝塞尔函数,  $I_0 = C \cdot I_k$ ,  $C$ 为比例常数,

$I_k$ 为第 $k$ 级亮环点光强,  $u = \frac{2\pi r \cdot x_k}{\lambda L}$ ,  $r$ 为圆孔半径,  $x_k$ 为第 $k$ 级亮环半径,  $L$ 为衍射距离, 由此可得到衍射缩放法测圆孔用的光电面接收修正因子表达式为

$$\beta = \sqrt{\frac{\iint_s \left[ \frac{2J_1(u_1)}{u_1} \right]^2 ds}{\iint_s \left[ \frac{2J_1(u_2)}{u_2} \right]^2 ds}} \quad (12)$$

实践证明, 如果测量分辨率要求较高(例如 $0.01\mu\text{m}$ ), 则即便使用计算机, 修正因子 $\beta$ 值的计算量也是很大的。不过这种计算是一次性的, 一经算定, 计算结果便可供长期使用。

#### 四、测量应用的实验研究

实施这种衍射缩放法测量的实验装置极其简单。我们采用氦氖激光器作衍射光源, 在运动方向垂直于光轴的拖板上放置硅光电池来探测夫琅和费衍射图样上各级极大点的光强。为了保持接收光强与输出电信号的线性关系, 采用了电流电压转换器。显然, 激光器输出功率的波动将影响测量结果, 为此, 实验装置中采用了激光功率稳定器。实验证明, 采用5%稳定度的激光功率稳定器以后, 可以得到良好的测量重复性。

表1 衍射距离 $L = 752\text{mm}$ ;  $d_1 = 47.05 \mu\text{m}$

亮点级次 k		1	2	3
光电压 $\bar{V}^*$ (V)	$V_1$	0.5002	0.1746	0.0890
	$V_2$	1.4712	0.1528	0.2636
	$V_3$	2.1240	0.7385	0.3753
$d_2 = \sqrt{\frac{V_2}{V_1}} d_1 (\mu\text{m})$		80.69	80.63	80.97
$d_2$ 修正值 ( $\mu\text{m}$ )		83.48	83.41	83.80
$d_3 = \sqrt{\frac{V_3}{V_1}} d_1 (\mu\text{m})$		96.95	96.76	96.62
$d_3$ 修正值 ( $\mu\text{m}$ )		102.89	102.65	102.47

\*  $\bar{V}$  为对左右同级亮点五次测得的光电压的平均值。下同。

表2 衍射距离 $L = 314\text{mm}$ ;  $d_1 = 47.05 \mu\text{m}$

亮点级次 k		1	2	3
光电压 (V)	$V_1$ (V)	0.8925	0.3335	0.1665
	$V_1$ (mV)	75.715	28.340	14.035
$d_4 = \sqrt{\frac{V_4}{V_1}} \cdot d_1 (\mu\text{m})$		13.70	13.72	13.66
$d_4$ 修正值 ( $\mu\text{m}$ )		13.59	13.60	13.54

实验研究中我们对几种规格的细丝进行了测量。由于目前对细丝尺寸无法进行更高精度的标定,因此我们先采用一般激光衍射测丝径的方法测出其中一根细丝的直径 $d_1$ ,并将它作为标准丝来测量其它细丝。表1、表2列出了测量数据以及光电面接收修正前后的结果。

从表列数据可见,对 $k=1, 2, 3$ 三个级次所得到的测量结果都十分接近。这表明,只要保证激光输出功率足够稳定,就可以用缩放法实现微尺寸的高精度测量。

## 五、结 束 语

本文介绍的衍射缩放法测量是我们近年开发的一个测量研究新课题。这种方法只须设置一个尺寸标准的衍射孔径,通过缩放前后同级极大衍射光强的比较,就可以求出待测衍射孔径的尺寸。实践证明,只要采用足够稳定度的激光功率稳定器,缩放法可以实现快速简便的高精度测量。由于目前国产的稳定度为0.5%的激光功率稳定器〔2〕已经有售,因此缩放法测量具有良好的发展前景。

## 参 考 文 献

(1) M. 玻恩, E. 沃耳夫, 《光学原理》(上册), 科学出版社, 1985年。

(2) 《激光杂志》, 1986年, 第7卷, 第5期。

\* 作者简介: 吕海宝, 男, 1941年出生。副教授。现从事激光光电检测教学与科研。

收稿日期: 1988年8月8日。

· 简 讯 ·

## 企业家介绍150W CO<sub>2</sub>激光器

美国加州圣克利门蒂一家崛起的Laser Physics公司准备向用户推出新研制的高功率封离型CO<sub>2</sub>激光器。据公司副总裁及创办人C. Tantalò说,该系统是第一台“实用的150W功率封离型CO<sub>2</sub>激光器”。

这种小型器件售价30000美元。它是通过四折叠式波导管而获得此高输出功率的。光束质量为:接近TEM<sub>00</sub>模,光束直径8mm,发散度3mrad。激光头总尺寸38×5×5(in),总重仅40lb。

Tantalò预言,激光器运转寿命将近4000h。今后,他希望研制开发更高功率的折叠封离系统。他说:“我确信明年(1989年)我们能实现1kW的技术指标。”目前他打算在加州阿拉海姆的CLEO会上展出300W的样机。

译自L.F./E.-O., 1988, Vol.24, No.4, P.12.

卢中尧 译 封鸿渊 校