

## 激光半焦斑边缘检出技术研究\*

吕海宝 谌廷政 周卫红 王跃科 颜树华 黄锐 楚兴春

(国防科技大学机械电子工程与仪器系 长沙 410073)

**摘要** 本文介绍了一种新的边缘定位方法——激光半焦斑边缘检出法。这种方法综合运用了多种技术,如自适应跟踪补偿技术、激光调制和调制幅值补偿技术、微分定点采样技术以及步进电机步距细分技术等,从而达到了较高的边缘检出精度。文章还给出了激光半焦斑边缘检出的理论模型和计算机仿真结果,并介绍了一个采用激光半焦斑边缘检出技术的测径系统。

**关键词** 激光,半焦斑,边缘检出,计算机仿真,测径

**分类号** TN 247

## Research of the Technology for Edge Checkout Using Laser Half-focus

Lu Haibao Shen Tingzheng Zhou Weihong Wang Yueke

Yan Shuhua Huang Rui Chu Xingchun

(Department of Mechatronics Engineering and Instruments, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** In this paper, a new method for edge checkout —— Laser Half-focus locating method is introduced. Many comprehensive techniques have been used to ensure high precision of edge checkout, such as self adaptive tracking technique for compensation, laser modulating and modulated amplitude compensating technique, fixed point sampling technique through differential and fine dividing technique for step motor. A theoretical model for edge checkout using laser half-focus and its result of computer simulating are also given. In the end, a system of measuring diameter adopting this technology is described.

**Key Words** laser, half-focus, edge checkout, computer simulating, measuring diameter

长期以来,测量界开发出了多种边缘检出技术,研究总结了多种边缘检出算法。在光电检测领域中,采用平行光入射<sup>[1]</sup>的半光强边缘检出法是一种传统的测量方法。这种方法的优点是简单易行、成本不高。但因半光强点的准确定位难度很大,所以,采用半光强边缘

\* 国防科研试验技术基金资助

1996 年 12 月 5 日收稿

检出的测量系统始终在低精度徘徊。我们通过理论建模和计算机仿真<sup>[2,3]</sup>,找到了提高半光强边缘定位灵敏度的关键,同时在总体实施上采用多种技术的综合,来保证其检出精度,从而成功地开发出一种新的边缘检出技术——激光半焦斑边缘检出技术。利用这种技术构成的测径系统,稳定可靠且性价比高。

## 1 建模与仿真

### 1.1 建模

利用激光束沿待测工件径向扫描的过程如图 1 所示。图中,阴影部分为挡光面积,  $D$  为工件直径,  $x$  为光斑中心的横向坐标量,  $a$  为激光光斑的半径。设四个图中阴影部分的光强大小分别为  $I_a, I_b, I_c, I_d$ 。图 1(a) 为  $0 < x < a$  的情况,现导出  $I_a$  的表达式。设光斑的总光强为  $I_0$ , 光斑的任一点  $p(x, y)$  的光强为  $I_p$ 。如图 2 所示,取中心半径为  $r$ , 宽度为  $dr$  的小环带面元, 其阴影内的小面元面积  $d\sigma$  可近似表达为

$$d\sigma = 2\theta r dr = 2r \arccos \frac{x}{r} dr \quad (1)$$

则  $d\sigma$  上的光强可写成

$$dI\sigma = I_p d\sigma = 2r I_p \arccos \frac{x}{r} dr$$

所以阴影部分的挡光光强  $I_a$  为

$$I_a = \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} I_p dr \quad (2)$$

同理可以推得

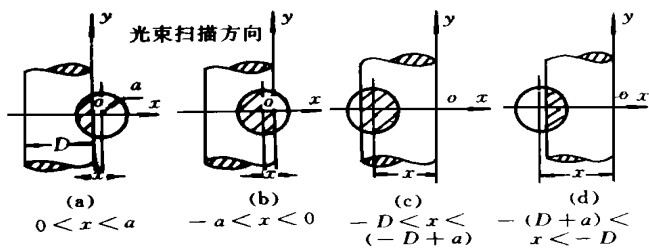


图 1 激光光束扫描工件过程示意图

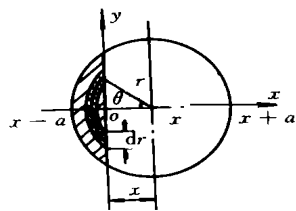


图 2 小面元  $d\sigma$

$$I_b = I_0 - \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} I_p dr \quad (3)$$

$$I_c = I_0 - \int_{D+x}^a 2r \arccos \frac{D+x}{r} I_p dr \quad (4)$$

$$I_d = \int_{x+D}^a 2r \arccos \frac{x+D}{r} I_p dr \quad (5)$$

由此可以写出光电接收器接收到的光强表达式为

$$I_0 = \begin{cases} I_0 & x > a \text{ 或 } x < -(D + a) \\ I_0 - I_a & 0 < x < a \\ I_0/2 & x = 0 \text{ 或 } x = -D \\ 0 & -D + a < x < -a \\ I_0 - I_b & -a < x < 0 \\ I_0 - I_c & -D < x < -D + a \\ I_0 - I_d & -(D + a) < x < -D \end{cases} \quad (6)$$

## 1.2 仿真

用计算机求解式(6),即可对边缘检出过程进行计算机仿真。仿真时扫描步长应取步进电机的细分步距,仿真得到的扫描曲线如图3所示。改变激光光斑的尺寸,可以得到不同的扫描曲线。由图3可知,边缘检出灵敏度受激光光斑尺寸影响很大,光斑尺寸越小,边缘检出灵敏度越高。由激光理论可知,高斯光束要得到小的光斑尺寸,可以用透镜聚集,聚集后得到的焦斑尺寸就是新的束腰尺寸。正是根据这个仿真结果,我们率先构思并提出了激光半焦斑边缘检出方法。

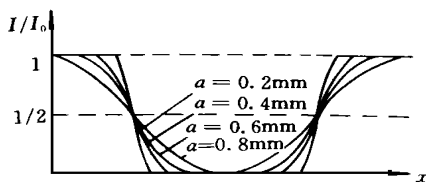


图3 仿真曲线图

## 2 激光半焦斑边缘检出系统

图4给出了用于测径的激光半焦斑边缘检出系统的框图。其中边缘检出系统分为四大部分:(1)光路,包括激光器、调制器、空间滤波器、透镜和光电探测器等。(2)电机驱动,

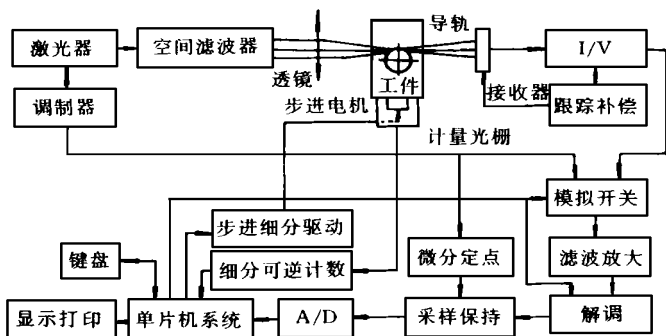


图4 激光半焦斑边缘检出测径系统框图

包括步进电机、平移导轨及细分驱动电路等。(3)信号检出,包括I/V转换、自适应跟踪补偿、滤波、放大、解调及A/D转换等。(4)智能控制,主要是单片机系统及测控软件。

在具体实施中,系统采用多种技术综合的手段,来保证实现高精度的边缘检出。其中

关键技术有:自适应跟踪补偿;激光调制与调制幅值补偿;微分定点采样以及步进电机步距细分等。

## 2.1 激光调制与调制幅值补偿

测量中,为了避开低频段杂散光的干扰,系统采用了激光调制技术,调制频率为6kHz。由于调制光经I/V转换后得到的电压在被采样前经过了高倍放大,因而调制幅值的波动将严重影响边缘检出的精度。为此,本系统设置了调制信号参考通道,用调制幅值补偿法来消除调制幅值波动的影响。下面介绍其原理。

任取图1中四种挡光情况中的一种,如取图1(a)的情况,光斑中任一点的光强 $I_p$ 应包含两部分,一部分是非调制光强 $I_{nM}$ ,另一部分是由调制引起的调制光强 $I_M$ ,即

$$I_p = I_{nM} + I_M \quad (7)$$

则

$$I_a = \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} I_{nM} dr + \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} I_M dr \quad (8)$$

(8)式中,第一项是接收到的非调制光强,经I/V转换后,其频率远低于调制频率,在自适应跟踪补偿中已被滤掉,只剩下第二项,经I/V转换后得到测量信号的转换电压 $V_m$ ,则

$$V_m = K_1 \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} I_M dr \quad (9)$$

其中 $K_1$ 为转换系数。又因为 $I_M$ 是由调制信号产生的,所以其大小应与调制信号电压的幅值成正比,即

$$I_M = K_2 V_M \cos(\omega t) \quad (10)$$

其中 $V_M$ 是调制电压幅值, $K_2$ 是常数,故

$$V_m = K_1 K_2 V_M \cos(\omega t) \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} dr \quad (11)$$

而参考信号(即调制取样信号)又是直接从调制部分取得的,因此参考电压 $V_r$ 的大小应为

$$V_r = K_3 V_M \cos(\omega t) \quad (12)$$

其中 $K_3$ 为常数。若用 $V_r$ 去除 $V_m$ ,可得

$$\frac{V_m}{V_r} = \frac{K_1 K_2}{K_3} \int_x^a 2r \arccos \frac{x}{r} dr \quad (13)$$

即测量信号电压与参考信号电压相比正好消去了调制幅值项,使对调制幅值变化的判断实际上转化为对无量纲的光斑大小变化的判断,从而有效地消除了调制幅值的波动对边缘检出精度的影响。

## 2.2 微分定点采样

在信号检出部分,系统采用了双路信号单通道处理的办法,即双路信号用同一电路分时处理,来减小后级电路(滤波、放大和解调等)对测量信号和参考信号分别处理时引起的不对称性,如图4所示。但前面介绍的调制幅值补偿法要求两路信号尽可能是在同一时刻采样的结果,因此,单通道处理电路中的模拟开关切换的速度和解调的速度要足够快。而解调速度的加快容易导致解调不彻底,幅值解调线上有明显的调制残留纹波。为消除这种残留纹波,我们设计了一个微分定点采样控制电路,与快速不完全解调电路相结合,实现

了高纹波抑制比的快速解调。

### 2.3 其它技术

为了实现比较精确的边缘定位,我们除了采用以上几种技术外,还采用了步进电机步距细分技术。通过对两相四拍步进电机驱动电流的恒频脉宽四细分<sup>[4,5]</sup>,实现了步距的八细分,使步进电机的步距由原来的每一步前进  $2.5\mu\text{m}$ , 细分成现在的每一步只前进  $0.3125\mu\text{m}$ , 大大提高了边缘检出的分辨率。

在光电探测和 I/V 转换部分,采用了一个自适应跟踪补偿电路,此举不仅可以有效地消除激光功率波动对测量精度的影响,而且可以为光电探测器提供反偏压,扩大光电探测器的线性输出范围,同时还可消除光电探测器及后续有关电路的直流漂移和低频干扰。与双光路补偿技术相比,该技术具有信噪比高、稳定性好、结构简单、成本低廉等显著优点。此外,在光路上还采用了空间二次滤波,提高了定位光电信号的信噪比。在扫描过程中,采用趋势判断和精细判断相结合的方法,克服了步进电机步距细分影响边缘检出速度的问题。

## 3 采用半焦斑边缘检出技术的测径系统

由于综合运用了以上一系列较先进的技术,激光半焦斑边缘检出系统的边缘检出精度可以达到优于  $1\mu\text{m}$  的水平,因此,它具有非常诱人的应用前景。利用这种技术,我们首先开发出一个测径系统——激光半焦斑边缘检出测径系统。

### 3.1 测径系统的构成

如图 4 所示,测径系统由单片微机为核心的激光半焦斑边缘检出单元和测位移用的计量光栅两大部分构成。其中,计量光栅的动杆连接在由步进电机驱动的拖板上。电机转动时,拖板带动工件沿径向切割激光束,同时也带动光栅动杆一起移动,测量工件走过的位移。在切割过程中,利用半焦斑边缘检出单元产生两个边缘定位信号去控制可逆计数器,对计量光栅的输出信号进行二十细分可逆计数,从而测出工件直径的大小。测得的直径值经自动修正后可直接显示或打印出来。系统实现了较高度度的自动化和智能化测量。

### 3.2 测控软件设计

为了保证整个测径系统运行可靠,在软件设计中,设置了自检,状态监控,操作提示等功能以及一些相应的保护子程序,并通过趋势判断和精细判断来提高测量速度。同时,可根据预先烧入 EPROM 的不同材料、不同加工方法以及不同表面处理的工件的修正曲线,进行测值的自动修正。

由于自适应跟踪补偿等技术的采用,系统具有开机即测的功能,激光器无需预热。因此,在软件的设计中,系统经初始化后,随即检测激光器打开后光强是否升到测量允许值,当光强满足条件后,由键盘输入修正曲线代号和电机转动方向代号,系统即开始测量。在确定两个边缘点时,先进行光强变化的趋势判断,在接近半焦斑时进行精细判断。这两个边缘点信号即是光栅测长计数器的开关门信号。

## 4 结束语

本文介绍的激光半焦斑边缘检法是一种新的边缘定位方法,它的边缘检出分辨率

可达  $0.32\mu\text{m}$ , 边缘检出精度优于  $1\mu\text{m}$ 。由于实施这种技术的系统具有较高的性能价格比, 因此具有非常诱人的应用前景。目前利用这种技术开发出的测径系统, 量程为  $1.5\sim 50\text{mm}$ (上限还可作较大扩展), 测量不确定度  $2\sigma$  在  $3\mu\text{m}$  以内。若采用性能更好的平移导轨, 测量误差可望进一步减小。值得指出的是, 本文介绍的半焦斑边缘检出法中用到的一些单项技术, 也适用于其它许多光电检测系统。

## 参考文献

- 1 吕海宝等. 工件直径光电检测的研究. 量子电子学, 1991, 8(1)
- 2 吕海宝等. 激光半焦斑边缘检出技术及其在测径中的应用. 光电工程, 1995, 22(5)
- 3 阎贵军, 吕海宝等. 半光强定位的计算机仿真及应用. 光学仪器, 1994, 16(2)
- 4 阎贵军, 吕海宝等. 步进电机细分及其在光电测径系统中的应用. 光电工程, 1994, 21(3)
- 5 阎贵军, 吕海宝等. 提高步进电机步距精度的研究. 国防科技大学学报, 1994, 16(2)

(责任编辑 张静)