

# 检测复杂内轮廓中圆弧面的 新型光纤传感器特性研究

陆述田<sup>1</sup>, 赵勇<sup>2</sup>, 邹丽敏<sup>2</sup>

(1. 潍坊高等专科学校, 山东 潍坊 261500;

2. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**介绍了一种用于对复杂内轮廓检测的强度调制型光纤传感器,该传感器轮辐式的光纤排列结构,有利于补偿表面反射率不同和光源波动等给测量带来的影响。给出并分析了检测圆弧形内轮廓时传感器的特性。从仿真结果可见,这种传感器能较好地实现圆弧形轮廓的检测问题,具有结构简单、非接触、抗电磁干扰及适合于现场使用等优点。本文为强度调制型光纤传感器用于圆弧形曲线面及复杂柱状内轮廓表面工件的非接触检测提供了必要的理论基础和设计依据。

**关键词:**内轮廓; 光纤传感器; 非接触检测

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## 1 引言

纳米技术、超精加工技术的出现以及对产品质量和可靠性要求的不断提高,使得表面轮廓形貌及尺寸检测仪器显得越来越重要。对复杂内轮廓(如斜面、沟槽、螺旋线、来复线、圆弧面等)的非接触检测问题,一直没有得到很好的解决。原因是复杂内轮廓内部空间有限、轮廓线形不规则,要求传感器同时具有较高的横向分辨力和较大的动态测量范围、体积小、精度高、测量速度快等优点<sup>[1-3]</sup>。

反射型强度调制光纤传感器的特性不仅与被测轮廓的倾斜度<sup>[4]</sup>、曲率半径、反射率有关,而且与传感器自身的结构参数有关。本文提出了一种具有补偿功能的新型光纤传感器,从理论上分析了检测圆弧形内轮廓的特性,并讨论了一些因素对传感器特性的影响及应用前景。

## 2 测量的基本原理

图1给出了光纤传感器对复杂内轮廓检测的结构原理图。为了提高传感器的横向分辨力,选用单模光纤作为发射光纤,因为单模光纤不仅芯径很小(只有多模光纤的十分之一左右),而且具有

很小的数值孔径 NA, 这样容易获得较小的光斑尺寸,以获得较高的横向分辨力。而接收光纤则选用数值孔径较大的多模光纤,目的在于提高接收光功率,以提高传感器的灵敏度。

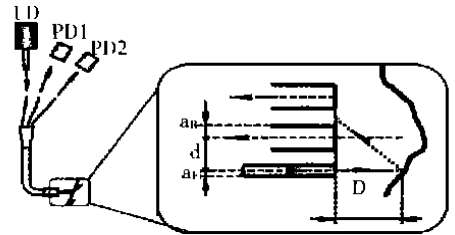


Fig. 1 Structure of the optical fiber sensor

在以往对光纤传感器特性分析,大多采用镜面反射定律或 Lambertian(郎伯)定律<sup>[4,5]</sup>,即假定被测表面是理想的镜面或是理想的郎伯表面,如图2所示。但实际工程中工件的表面介于两者之间,即光照射到被测面上,由于微观轮廓的随机性将导致在入射点处发生散射效应,如图3所示。由光的散射理论可知:一束光线以 $\theta_0$ 角度照射到粗糙表面时,在光线的反射场中形成散射光强分布,当入射光波长大于表面轮廓的高度均方根值 $R_q$ 时,反射场光强分布按空间角度为变量成高斯分布:

$$I(\theta) = \frac{1}{[2\pi\sigma^2]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中,  $\sigma^2$  为光强分布的方差;  $\theta$  为反射场中光线与表面法线的夹角;  $\theta_0$  为按镜面反射定律的光束反射方向。

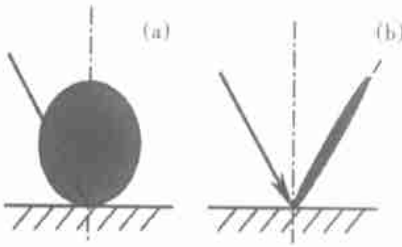


Fig. 2 (a) Reflection characteristics of Lambertian (b) Reflection characteristics of specular reflector

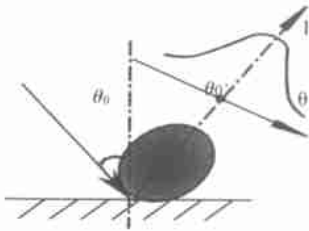


Fig. 3 Reflection characteristics of scattering reflector

由散射理论可以证明, 镜面反射方向  $\theta_0$  上的光强与表面粗糙度  $R_q$  有以下关系:

$$I(\theta_0) = k \exp[-(4\pi R_q \cos\theta_0 / \lambda)^2] \quad (2)$$

式中,  $k$  为与入射光强及表面材料反射系数有关的常数;  $\lambda$  为入射光波长。

### 3 检测圆弧面时光纤传感器特性

图 4 中给出了光纤传感器在对圆弧面进行非接触检测时的原理。为了实现同时对左右两段圆弧面进行检测, 分别在发射光纤两侧放置两根多模接收光纤。在光纤传感器中, 以接收光纤  $R_2$  为例, 接收光纤接收到的光通量  $\Phi_2$  是反射场中一定立体角  $[\theta_1, \theta_2]$  区域内的光通量, (如图 4(b)), 可通过式(1)在  $[\theta_1, \theta_2]$  空间立体角内的积分进行计算:

$$\Phi_2 = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{1}{2\pi\sigma} \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_0)^2}{2\sigma^2}\right] d\theta \quad (3)$$

由图 4(a) 可知, 被测距离  $D = D_0 + D_1$ 。在对圆弧面进行横向扫描检测时,  $D_0$  大小是固定不变的, 而  $D_1$  的大小沿扫描方向在增加, 导致入射光线与圆弧面法线之间夹角  $\theta_0$  不断减小。由图 4 可知:

$$\theta_0 = \theta_0 = \arccos\left(\frac{D_1}{R}\right) = \arccos\left(\frac{D - D_0}{R}\right) \quad (4)$$

另外, 当被测距离  $D$  由小变大时, 式(4) 中的积分区域  $[\theta_1, \theta_2]$  由大变小, 将使光纤接收到的光通量下降。由图 4 可得:

$$\theta_1 = \arctan\left[\frac{d_1 + d_2 - a}{D}\right], \theta_2 = \arctan\left[\frac{d_1 + d_2 + a}{D}\right] \quad (5)$$

式中,  $d_1$  和  $d_2$  为两根接收光纤与入射光之间的中心距;  $a$  为接收光纤的芯径。

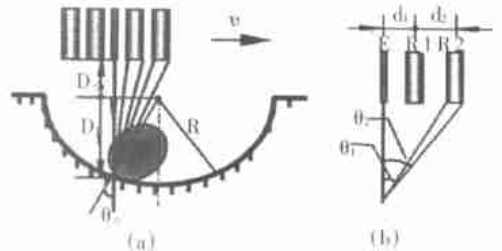


Fig. 4 Curved surface measurement principle  
综合式(2), (3), (4), (5), 即可求得接收光纤  $R_2$  中的光通量。用同样的方法可求得接收光纤  $R_1$  中的光通量  $\Phi_1$ 。

如果取  $d_1 = 150\mu\text{m}$ ,  $d_2 = 400\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.3\mu\text{m}$ ,  $a_1 = 25\mu\text{m}$ ,  $a_2 = 50\mu\text{m}$ ,  $D_0 = 800\mu\text{m}$ 。图 5 中给出了在被测圆弧面曲率半径  $R = 500\mu\text{m}$ , 表面粗糙度  $R_q = 0.1$  时, 两接收光纤所接收到的光通量的计算结果。由图可见, 接收光纤接收到的光通量由小变大, 再由大变小。这可以解释为: 在传感器从左至右横向扫描检测的过程中, 接收光通量的大小主要由两个因素决定, 其一是被测距离  $D$ , 距离增加, 积分区域  $[\theta_1, \theta_2]$  变小, 接收光通量减少; 其二是在被测点处微面元的法线方向与入射光线的夹角  $\theta_0$ , 夹角减小, 接收光通量增多。这样, 当距离增大使光通量的减少不如夹角减小使光通量的增多作用强时, 特性曲线表现为上升趋势; 反之, 当距离增大使光通量的减少超过夹角减小使光通量的增多作用时, 特性曲线开始下降。

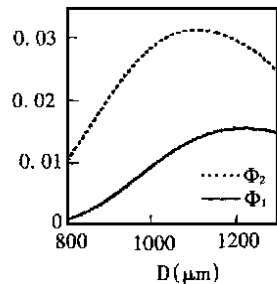


Fig. 5 Relation between measured distance and received light flux

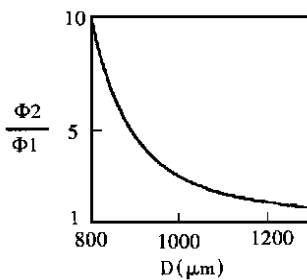


Fig. 6 Relation between measured distance and two received light flux

由于传感器接收光通量的特性曲线不是被测距离  $D$  的单调函数, 所以无法直接从测量信号来判断被测距离  $D$  的大小(因为同样大小的光强信号可能对应两个距离值)。这里, 我们将两路信号的比值作为传感器的测量特性曲线, 如图 6 所示。由图 6 可看出, 将两路信号作除法后, 不仅解决了

#### 参考文献:

- [1] Aziz David J. Interferometric measurement of surface roughness in engine cylinder walls[J]. Opt. Eng., 1998, 37(5): 1429- 1434.
- [2] Pfeifer Tilo, Eikelmann Eckard. Fiber-optic reflex sensors for industrial applications[J]. Measurement, 1994, 12: 291- 304.
- [3] Bowe Brian, Toal Vincent. White light interferometric surface profiler[J]. Opt. Eng., 1998, 37(6): 1796- 1799.
- [4] Wang H. Reflective fiber optical displacement sensors for the inspection of tilted objects[J]. Optical and Quantum Electronics, 1996, 28: 1655- 1668.
- [5] Wang H. Analysis of modulation functions for fiber-optic proximity sensors based on the principle of collimated beam reflective intensity modulation[J]. Optik, 1997, 105(1): 7- 12.

特性曲线的单调性问题, 同时, 在很大程度上也提高了测量的灵敏度。

## 4 结 论

本文依据入射光束照射到被测表面上将发生的散射理论, 主要用于复杂内轮廓检测的光纤传感器对圆弧面的检测原理进行了分析, 并计算了传感器特性曲线。该方法可实现对微小的圆弧面进行非接触检测。由于在半圆弧内, 包含了斜率为 0, 和  $(0, \quad)$  之间的任意斜率的座标点, 所以, 只要适当选取光纤传感器的结构参数, 该传感器还有可能实现对与传感头成任意倾斜角度的斜面的检测。此外, 上述传感器还可应用于圆柱形工件的内外尺寸及形状误差的测量。

## Characteristics of a novel optical-fiber sensor used for curved surface inspection

LU Shu-tian<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>, ZOU Li-min<sup>2</sup>

(1. Weifang Academic Institute, Weifang 261500, China; 2. Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A novel optical-fiber sensor used for inspecting the complex internal contours is presented. Based on the spoke-like arrangement of the fibers, the sensor of this kind can compensate the impacts caused by the variation of the surface reflectivity and the fluctuation of the light source. The characteristics of the sensor used for inspecting the curved surface are analyzed. And the simulation results prove the feasibility of the sensor. It has the performance of compact structure, non-contact measure, antijamming to electromagnetism. The results can provide an essential theoretical basis and design basis for measuring the curved surface and workpiece with reflective optical-fiber sensor.

**Key words:** internal contour; optical-fiber sensor; noncontact measurement

作者简介: 陆述田(1965- ), 男, 山东潍坊人, 讲师; 主要从事机械量检测技术的研究。

赵 勇(1973- ), 男, 辽宁沈阳人, 博士; 主要从事激光光纤传感测试技术及应用研究, 在国内外学术刊物上发表论文十余篇。