

文章编号 1004-924X(2001)02-0139-03

# 一种新型光纤传感器在精密产品加工中的应用研究

曾毅, 侯国章

(哈尔滨工业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 利用所研制的新型反射式光纤传感器对精密产品加工中的小台阶、沟槽等进行了测试研究。测试系统充分发挥了激光光纤传感测量方法的突出优点, 实现对精密产品的非接触、快速地检测。传感器的高度分辨力可达  $0.4\mu\text{m}$ , 定位精度可达  $\pm 2\mu\text{m}$ 。

关键词: 光纤传感器; 精密加工; 激光; 非接触检测

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## 1 引言

计算机技术、传感技术、集成电路等现代工业技术的进步, 促进了一门新兴学科——精密工程 (Precision Engineering) 的产生和发展。精密工程是以精密加工技术、精密测试技术、微电子技术和现代光学技术为基础, 同时结合其它领域最新成就的综合性学科。其中, 精密加工技术和精密测试技术的有机结合, 已经形成了自动化程度很高的计算机集成制造系统 (CIMS) 和柔性制造系统 (FMS)。

在精密测试领域中, 对产品质量的检测问题一直是国内外研究的一个热点问题。在众多的研究方法中, 光学非接触检测方法以其采集速度快、无需进行测头半径修正、可测软质及易划伤物体表面等诸多优点而受到研究者的青睐。本文以激光光纤传感技术为手段, 对精密产品中的狭小台阶、沟槽等进行了测试研究。与其他方法相比, 本文研制的测量系统发挥了光纤传感器体积小、易柔性弯曲等优点。原理样机的试验装置及测试结果表明, 基于激光光纤传感技术, 容易实现一个便携式的高精度测试仪器。

## 2 基本原理

最早的基于反射原理的光纤位移传感器结构

如图 1。对于这类光纤传感器, 其光强响应特性曲线是传感器结构设计的主要依据。设入射光纤端部出光光场的场强分布函数为

$$\Phi(x, y, d) = \frac{I_0}{\pi \sigma^2 a^2 [1 + \zeta(d/a)^{3/2}]^2} \cdot \exp\left\{-\frac{(x^2 + y^2)}{\sigma^2 a^2 [1 + \zeta(d/a)^{3/2}]^2}\right\} \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为由 LD 耦合进入到入射光纤中的光强;  $\sigma$  为表征光纤折射率的参数, 对于阶跃折射率光纤,  $\sigma = 1$ ;  $a$  为光纤纤芯半径;  $\zeta$  为与光源种类、光纤数值孔径及光源与光纤耦合情况相关的综合参数。如果接收光纤与入射光纤具有相同的结构参数, 则所接收到的光强可表示为

$$I(x, y, d) = \int_S \Phi(x, y, d) ds \quad (2)$$

这里,  $S$  为接收光面积, 即纤芯面。积分的结果得到位移值与接收光强的关系。传统的测头结构由两根多模光纤组成, 其主要缺点是测量存在死区, 而且测量范围较小。为改善这种类型传感器的性能, 国内外专家做出了大量的工作<sup>[1-3]</sup>, 使强度型光纤传感器具有了更高的可靠性和实用性。目前, 这种传感器测量位移范围最大可达 10mm 左右, 测量分辨力最好为  $0.05\mu\text{m}$ , 精度最高  $0.1\mu\text{m}$  左右。

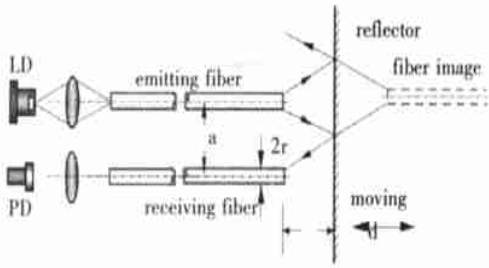


Fig. 1 Principle of the reflective intensity-modulated sensor

本文所设计研制的光纤传感器探头结构如图 2 所示。在发射光纤的端部粘结一个自聚焦透镜 (GRIN Lens), 目的是为了减小光点尺寸, 提高横向分辨率。外圈采用大芯径、大数值孔径的多模光纤作为接收光纤, 目的是为了增大传感器的测量灵敏度和高度分辨率。

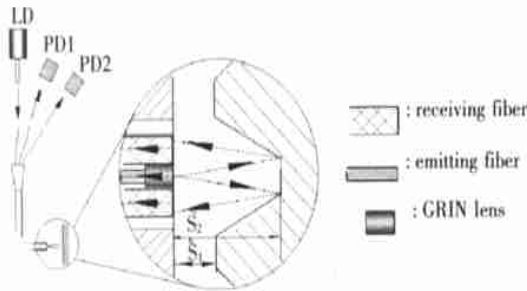


Fig. 2 Detection principle and the structure of the probe

### 3 实验研究与结论

为了正确地测量系统的高度分辨率, 应该根据采样速率, 监测系统的短期稳定性 (监测时间略大于一个采样点的采样时间)。实验每  $10\text{s}$  进行一次, 每次采集 100 个数据。大量的实验数据表明, 在短期内, 系统在同一位移下的稳定性数据的最大输出差值都在  $0.2\text{mV}$  之内, 不确定度好于  $0.06\text{mV}$ 。这样, 可以认为只要输入变化量引起输出变化  $0.2\text{mV}$ , 即可认为此时的位移变化量即为最小分辨率。在此基础上, 对光纤位移传感器最小位移分辨率实验, 选取合适的工作区段, 由微位移进给装置 (本实验采用步进电机及精密丝杠驱动的微动导轨平台  $0.8\mu\text{m}$ ) 实现工件的微位移变化值, 同时用 HP5528 双频激光器监测。实验共进行

5 次, 其中一组测试实验数据如表 1。测量结果表明, 平均每有  $0.8\mu\text{m}$  的位移输入, 引起  $0.44\text{mV}$  的输出变化量, 则系统的最小分辨力可以达到  $0.4\mu\text{m}$ 。

对于定位测量精度的实验, 在测量范围内每隔  $0.1\text{mm}$  选择一个预定点, 一共选择 10 个预定点, 由计算机输出每个定位点处相应位移的电压信号, 在根据标定曲线求得对应的位移值。利用 HP5528A 双频激光器监测预定位移, 同时记录光纤位移传感器系统的稳定输出值。本实验一共进行 9 次, 其中的一次实验数据如图 3 所示。由实验数据可以得出, 光纤位移传感器系统的最大极限误差为  $2.7\mu\text{m}$ , 因而具有较高的定位重复性, 定位重复性优于  $\pm 2\mu\text{m}$ 。

Table 1 Resolution experiment of the minimal displacement

Displacement mm	Output voltage mV	Displacement mm	Output voltage mV
1.2003	359.11	1.2062	362.56
1.2011	359.78	1.2070	363.10
1.2019	360.07	1.2078	363.57
1.2028	360.45	1.2086	364.06
1.2037	361.01	1.2095	364.54
1.2045	361.45	1.2104	364.99
1.2054	362.09	1.2113	365.34
1.2121	365.88	1.2179	368.98
1.2130	366.48	1.2187	369.40
1.2138	366.84	1.2196	369.83
1.2147	367.31	1.2204	370.22
1.2155	367.79	1.2213	370.61
1.2163	368.25	1.2222	371.06
1.2171	368.58	1.2231	371.55

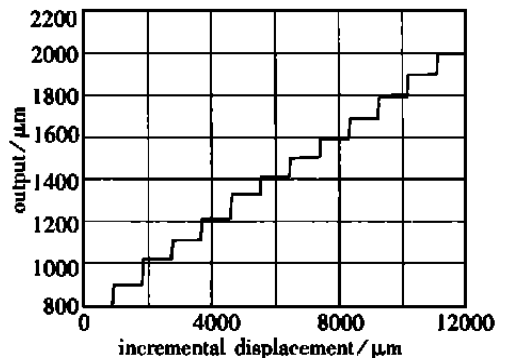


Fig. 3 Positioning accuracy measurement results

最后, 实验对精密加工中零件的沟槽深度与宽度进行了测量。图 4 和图 5 分别为线扫描输出

结果和沟槽表面的三维重构结果。

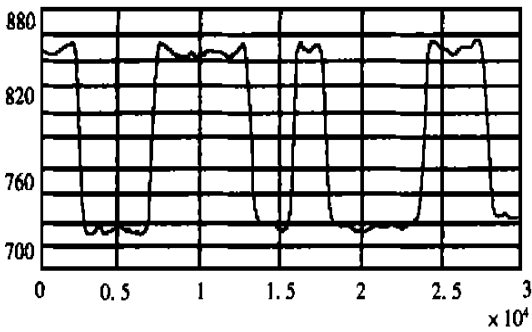


Fig. 4 Line scanning measurement result of the groove

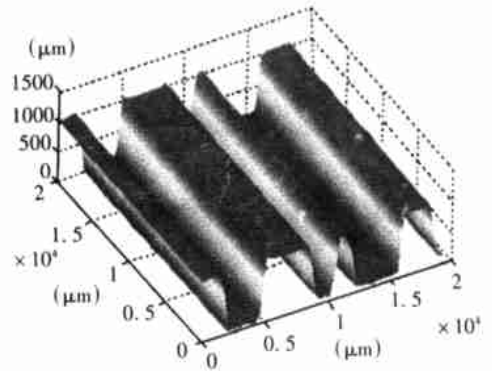


Fig. 5 3D reconstruction of the groove

从以上实验结果可以看出,本文所提出的激光光纤传感器能很好地实现精密微小台阶沟槽等的测量。根据线扫描结果重构出工件表面的三维图形,因此经进一步的开发与应用研究,系统还可以应用于逆向工程中的产品表面的数字化与三维重构。

#### 参考文献:

- [1] Steven C F, Richard F K. Use of a fiber optic displacement probe as a surface finish sensor[J]. Sensors & Actuators A, 1990, 24: 5- 11.
- [2] Peifer T, Eikermann E. Fiber-optic reflex sensors for industrial application[J]. Measurement, 1994, 12: 291- 296.
- [3] Li Pengsheng, Zhang Hua, Zhao Yong. A new compensation method of an optical fiber reflective displacement sensor[C]. Proc. SPIE, 1997, 3241: 474- 476.
- [4] 陆述田,赵勇,邹丽敏. 检测复杂内轮廓中圆弧面的新型光纤传感器特性研究[J]. 光学精密精密, 2000, 8(5): 437 - 439.

## Applications of novel optical fiber sensors in manufacturing precision products

ZENG Yi, HOU Guo-zhang

(Harbin Institute of Technology, School of  
Electromechanical Engineering, Harbin, 150001, China)

**Abstract:** Based on the newly developed laser optical fiber sensor, the small step products and grooves machined by precision processing were experimentally measured according to the laser reflex principle. By making full use of the outstanding merits of the laser optical fiber sensing technology, a non-contact, high-speed inspection for the precision products is realized. The longitudinal resolution of the sensor can reach  $0.4\mu\text{m}$ , and the positioning accuracy is better than  $\pm 2\mu\text{m}$ .

**Key words:** optical fiber sensors; precision finishing; laser; non-contact inspection

作者简介: 曾毅(1966-),男,四川安岳县人,工程师,现于哈尔滨工业大学攻读硕士学位,研究方向为测量与传感技术。