

# 光学针描法的理论与实验研究\*

鲍振武 刘剑飞 霍洪涛 刘 钊

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘 要** 在光纤探针扫描使表面轮廓对光产生调制原理的基础上提出了光学针描法的粗糙度测量技术。对光学针描法的理论基础, 如表面轮廓调制原理和光耦合区理论进行了较为深入的分析。对单模光纤探针式轮廓仪的实验系统进行了介绍, 最后给出了实验结果和误差分析。

**关键词** 粗糙度测量, 光学针描法, 光纤探针, 表面轮廓调制。

## 1 引 言

金属加工表面粗糙度测量的传统技术是以针描法为基础的触针式轮廓仪。它在一定的压力作用下, 利用机械触针在被测表面上滑动, 来感知被测表面的微观轮廓, 并计算出各种粗糙度参数。尽管这种方法存在着某些固有缺点(如触针磨损、被测表面上留有划痕、触针曲率半径影响测量精度等), 但由于其操作简便, 测量迅速数据可靠, 当前仍是粗糙度测量技术的主要手段。为了克服触针式轮廓仪的缺点, 虽然出现了光切法、光学干涉法、光学散射法、光学散斑法、光纤法等一些光学测量仪器, 但它们都不是以针描法为基础的, 故不能与触针式轮廓仪相匹敌。

目前虽然有扫描电子显微镜(SEM)和扫描微探针技术(SPM)为非接触高分辨力表面粗糙度测量提供了某些途径, 但由于测试条件苛刻、扫描范围小、价格昂贵等问题, 应用受到很大限制。80年代后期, 在 Mirau 干涉显微镜的基础上出现了干涉型光学轮廓仪<sup>[1]</sup>, 但也由于类似的问题使应用受到限制。本文提出的光学针描法与机械方式的针描法从形式上极为近似, 但又有重大区别。其中最主要的区别是非接触测量, 使机械针描法的固有缺点得到克服。与电子显微镜、扫描微探针技术或干涉型光学轮廓仪相比, 又有结构简单、便于调整、测量迅速、使用方便、测试条件相对宽松、价格大幅度降低等优点。

## 2 基本理论

### 2.1 表面轮廓调制原理

光学针描法的基本理论是通过光纤探针的扫描, 表面轮廓信号对光进行调制的原理。它利用一根纤细的光纤探针代替机械触针。光纤探针射出的光照射在被测表面上, 通过被测表面的反射, 一部分反射光重新进入光纤, 即光纤探针与被测表面之间产生了光的耦合。当光

\* 国家自然科学基金资助课题(No. 59875065)。

收稿日期: 1998-04-27; 收到修改稿日期: 1998-09-07

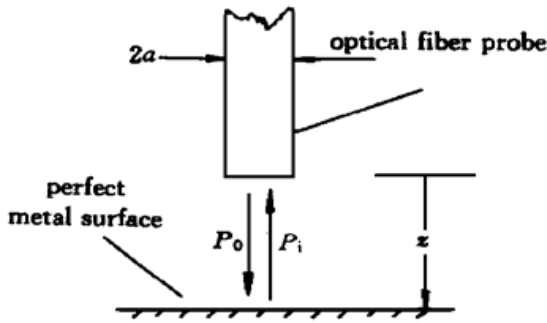


Fig. 1 Coupling between the optical fiber probe and a perfect metal surface

纤探针沿被测表面扫描时，光的耦合效率随表面轮廓的凹凸相应变化，即返回光纤的光受到了表面轮廓的调制。其理论分析可通过图 1 至图 4 及有关公式来说明。

图 1 表明光纤探针照射到理想金属表面时光的耦合状态。设光纤纤芯直径为  $2a$ ，光纤端面到被测表面的距离为  $z$ ，光纤照射到被测表面的功率为  $P_0$ ，经表面反射后重新进入光纤的功率为  $P_i$ ，光纤探针与理想金属表面的耦合效率为  $\eta$ ，且有：

$$\eta = P_i/P_0$$

我们曾利用镜像法原理导出了单模及多模光纤探针与理想金属表面的耦合效率公式<sup>[2, 3, 5]</sup>，对单模光纤：

$$\eta_{\text{single}} = 1/(1 + s^2) \tag{1}$$

式中， $s = \lambda z / (\pi n_2 w^2)$ ， $w = (0.65 + 1.619/\nu^{3/2} + 2.89/\nu^6) a$ ， $\nu = (2\pi a n_1 / \lambda) \sqrt{2\Delta}$  对阶跃型多模光纤，在均衡激励下，耦合效率为：

$$\eta_{\text{step}} = 1 - 0.4s^2 \tag{2}$$

式中，

$$s = 2z \text{NA} / a n_0 \tag{3}$$

上述两式中的原始参数为， $a$ ：光纤芯半径， $n_1$ ：光纤芯折射率， $n_2$ ：光纤包层折射率， $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$ ：相对折射率， $w$ ：光斑尺寸， $\nu$ ：光纤结构参量， $\lambda$ ：光的波长， $n_0$ ：间隙折射率，NA：光纤的数值孔径。

使用的光纤参数如表 1 所示。利用表 1 和(2)式、(3)式可得到耦合效率  $\eta$  与距离  $z$  的关系曲线，如图 2 所示。它表明随着  $z$  的增加，耦合效率将下降，改变  $z$  即可改变耦合效率。

Table 1. Parameters of the fibers

	$2a / \mu\text{m}$	$n_1$	$\Delta$	$\lambda / \mu\text{m}$	NA	$\nu$	$w / \mu\text{m}$
single-mode fiber	9	1.47	0.2%	1.3000	-	2.02	5.65
multimode fiber	50	1.47	1%	0.6328	0.21	-	-

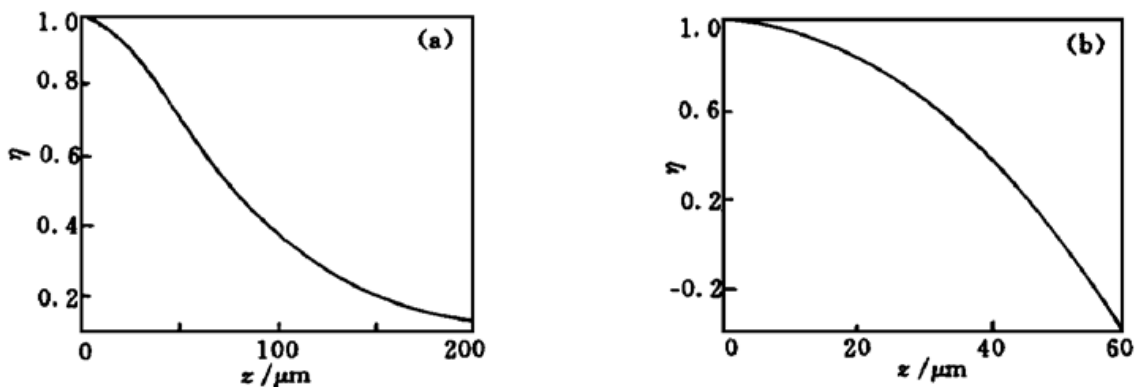


Fig. 2 Dependence of coupling coefficient  $\eta$  for  $z$ . (a) Single-mode fiber, (b) Multimode fiber

图 3 表示被测表面是凹凸不平的非理想表面。当光纤探针沿被测表面 ( $x$  方向) 扫描时， $z$  为  $x$  的随机变量  $z(x)$ ，它代表了被测表面的轮廓。该轮廓将对光纤探针的耦合效率产生调制。图 4 表示当光纤探针扫描到轮廓的顶部时， $z(x)$  较小，耦合效率较高。当扫描到谷底时，

$z(x)$  较大, 耦合效率就较低。当扫描到轮廓的斜面时, 由于不满足光纤的入射条件, 耦合效率等于零, 光纤探针接收的光功率等于零。因此当光纤探针沿被测表面扫描时, 就形成图 4 所示的调制光脉冲。高脉冲代表轮廓的峰顶, 两个高脉冲之间的低脉冲代表轮廓的谷底, 脉冲的间隔代表峰谷间的距离。这说明通过光纤探针的扫描, 光纤的接收功率为一串幅度不等、间隔不等的随机光脉冲序列。该脉冲序列的包络就代表了被测表面的轮廓, 它是通过光纤探针的扫描, 表面轮廓对光进行调制的产物。

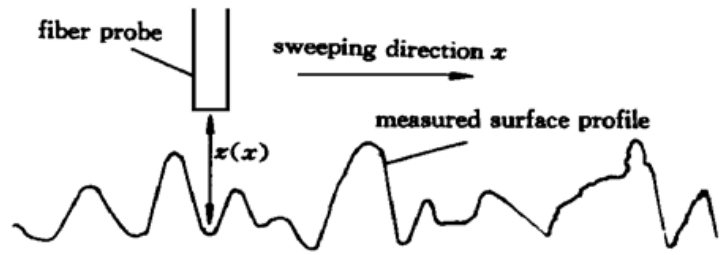


Fig. 3 Sweeping about the fiber probe along a measured surface

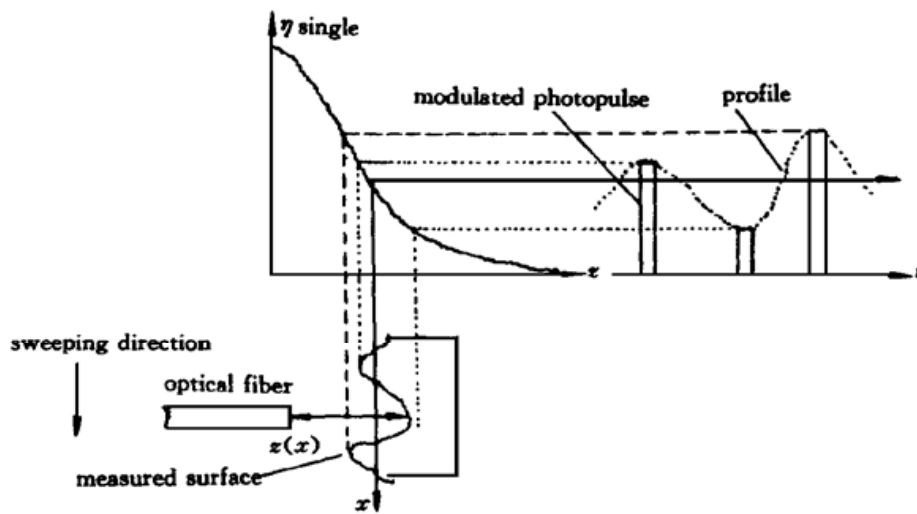


Fig. 4 Modulation principle about the surface profile for coupling coefficient

### 2.2 光耦合区的理论分析与计算

光耦合区的大小及功率分布与光纤的尺寸及种类有直接关系, 并直接关系到测量精度。很明显, 对于多模光纤探针, 由于直径较粗, 光强均匀分布, 耦合区就较大。而对于单模光纤, 直径较细, 光强按高斯分布, 耦合区就很小。因此, 其测试精度远高于多模光纤探针。光耦合区可以认为是光学针描法的光探针, 光探针的形状尺寸与光耦合区耦合效率分布有直接关系。它的分析与计算是本文要解决的另一个理论问题。

为了便于分析, 仍考虑光纤探针与理想金属表面的耦合。图 5 表示光纤探针在理想表面照射的区域是以 0 为中心、 $x_0$  为半径的圆面。但是能与光纤相耦合的只是中心附近极小的区域。下面来求耦合区域的大小。为此设  $M$  为光照区域内任意一点, 它偏离中心的距离为  $d$ , 求  $M$  点与光纤探针的耦合。由于直接求解很困难, 故采用图 6 所示的镜像法。光纤  $F_1$  为光纤  $F$  关于  $M$  点的镜像, 二者轴间距离为  $2d$ 。  $F_1$  与  $F$  的耦合就代表了光照区域内  $M$  点与光纤探针的耦合。根据光纤连接理论, 对于端面距离为  $2z$ 、轴心距离为  $2d$  的两根光纤的耦合效率为:

对于单模光纤<sup>[4]</sup>,

$$\eta_{\text{single}} = \exp [ - (2d/w)^2 ] / (1 + s^2) \tag{4}$$

对于阶跃型多模光纤<sup>[5, 6]</sup>,

$$\eta_{\text{step}} = [ \frac{2}{\pi} \cos^{-1} (\frac{|d|}{a}) - \frac{2|d|}{\pi a} \sqrt{1 - (d/a)^2} ] (1 - 0.4s^2) \tag{5}$$

式中,  $s$  的定义见(3) 式, 并设  $s$  为常数(对理想表面扫描过程中  $z$  为常数), 则有:

$$\eta_{\text{single}} \propto \exp [ - (2d/w)^2 ], \quad \eta_{\text{step}} \propto \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{|d|}{a} \right) - \frac{2|d|}{\pi a} \sqrt{1 - (d/a)^2} \quad (6)$$

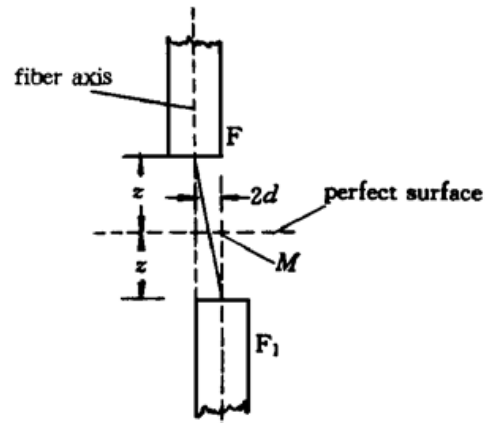
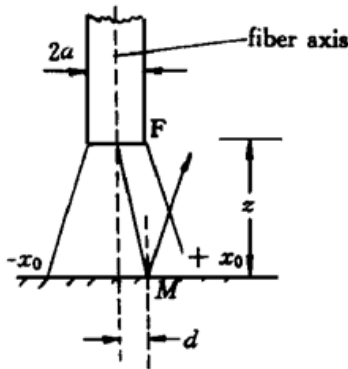


Fig. 5 Coupling between a point  $M$  and the fiber probe

Fig. 6 Coupling between the mirror image fiber and the fiber probe

利用表 1 中的参数及(6) 式算出耦合效率曲线如图 7 所示。图 7(a) 为单模光纤探针的耦合效率曲线, 耦合效率类似高斯分布, 耦合区域是半径约为  $6 \mu\text{m}$  的圆面。其中心效率最高,  $\eta > 0.9$  的区域为半径  $d_0 = 0.92 \mu\text{m}$  的微小圆面, 它相当于光探针的“针尖”, 比机械探针的针尖圆角半径小很多, 因此测试精度要高。另外光射线是无穷细的, 可以照射到被测表面非常细小的凹谷, 因此不存在机械触针圆角半径那样的问题, 而且它既不会“磨损”和“折断”, 也不会划伤被测表面。图 7(b) 为多模光纤探针的耦合效率曲线, 耦合效率类似三角形分布, 耦合区半径为  $25 \mu\text{m}$ , 针尖半径  $d_0 = 2 \mu\text{m}$ 。很明显, 它的分辨力低于单模光纤探针。

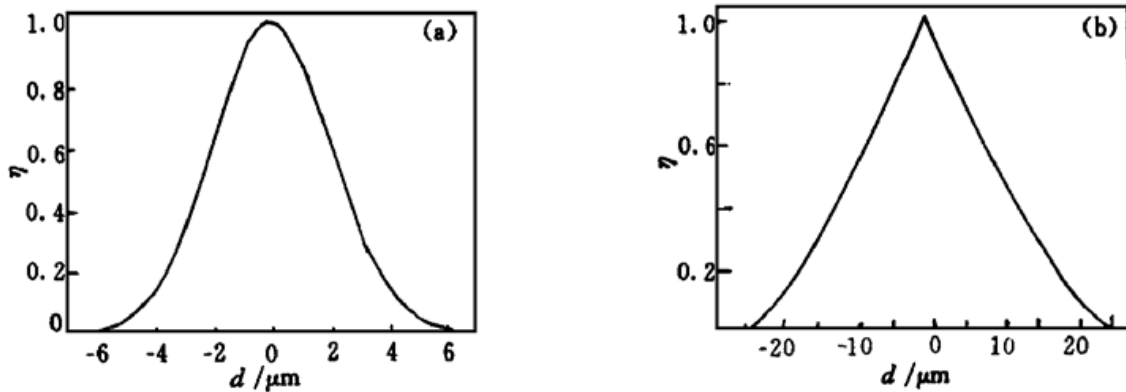


Fig. 7 Analysis about the coupling coefficient of fibers. (a) Single-mode fiber, (b) Multimode fiber

### 3 实验系统

实验是在单模光纤探针的基础上完成的, 实验系统如图 8 所示。它由光路系统、信号处理电路、测量工作平台与计算机系统等四部分组成。我们把整个实验系统称之为光纤探针式轮廓仪。由于采用计算机控制, 使测试实现了自动化, 系统实现了智能化。

光路系统由光源、方向耦合器、单模光纤探头、光电转换等部分组成。光源采用  $1.3 \mu\text{m}$  半导体激光器, 温度控制和功率控制的作用是确保激光器输出功率的稳定。1:1 单模光纤方向耦合器将激光器的输出的光功率耦合到光纤探头, 并把光纤探头接收到的轮廓调制光脉冲耦合到信号光路的光电变换器。单模光纤探头由单模光纤探针和 InGaAs 光探测器组成, 如

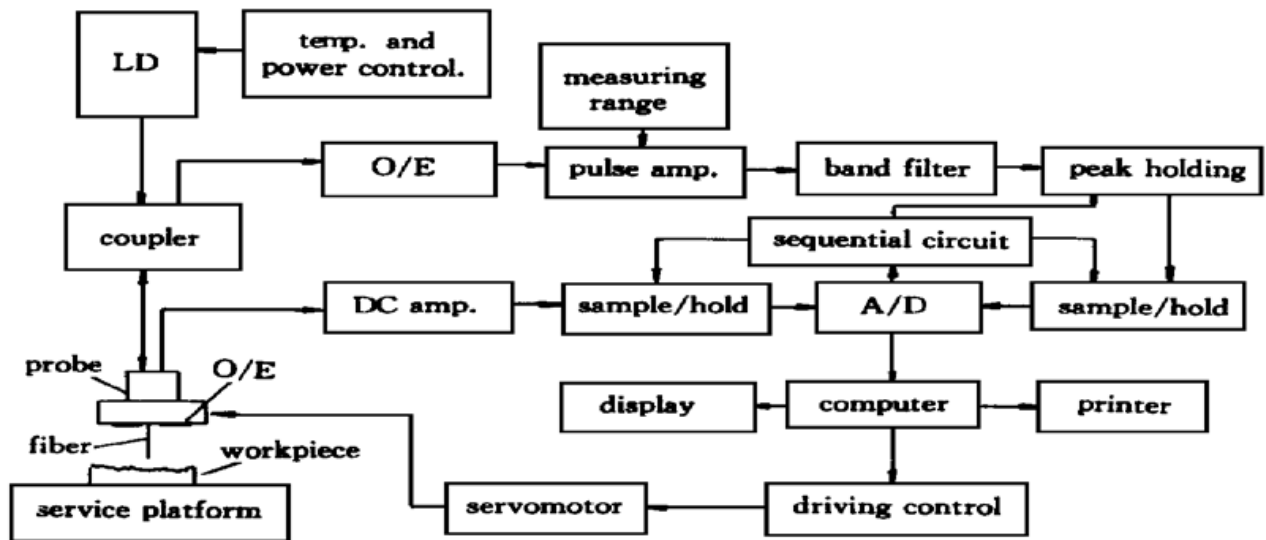


Fig. 8 Experimental system

图 9 所示。单模光纤探针位于探头的中心，其功能是发射光功率  $P_0$  和接收被测表面调制的反射功率  $P_i$ ， $P_i$  包含有被测表面轮廓的信息。探头底端的光探测器由环绕在探针周围的 4 只 InGaAs 光电池并联而成。其作用是接收被测表面的杂散光  $P_s$  并转换成参考光电流。由于光电池的光敏面较大，从探针周围各个方向接收杂散光，因此  $P_s$  与探针扫描位置无关，得到的参考光电流为直流电流。参考光的作用是消除光源功率残留的微小不稳定和因被测表面材料不同对测量的影响。

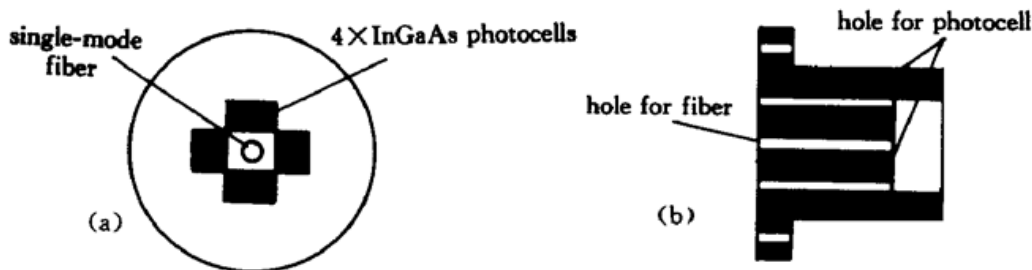


Fig. 9 Structure of the probe. (a) Bottom view of the probe, (b) Sleeve structure

测量工作台装有光纤探头导轨，探头照射安放在平台上的被测工件。在导轨的制导下，光纤探头沿被测表面平行移动，对表面轮廓逐点进行扫描传感。扫描驱动是在计算机控制下由伺服电机执行，数据测量是自动完成的。信号处理电路由信号电路和参考电路组成。信号电路包括量程可变的脉冲放大器、带通滤波器、峰值保持与清零、采样保持电路等。被采样的信号由 A/D 变换器变成数字量后存入计算机数组  $A$  中。参考电路包括直流放大、采样保持电路等。被采样的参考电压由 A/D 变成数字量后存放在计算机中的数组  $B$  中。计算机系统对数组  $A$ 、 $B$  做除法运算，得到数组  $C$ 。 $C$  中的数据已消除了光源微小波动和被测表面材料不同造成的影响。数组  $C$  中的每个数值  $c_i$  就代表了  $x_i$  处的轮廓信息  $y_i$ 。计算机将自动绘出由  $x_i$ 、 $y_i$  表达的曲面轮廓曲线，按有关定义和公式计算粗糙度参数，并由打印机给出测量结果。计算机系统通过 A/D 转换接口卡采样驱动程序、测量平台行程自动控制程序、菜单式测量工作界面程序和数据处理、结果显示与打印等 4 个程序的运行使光纤式轮廓仪具备了智能化的功能，数据测量与处理是自动完成的。

### 4 实验结果

利用单模光纤探针式轮廓仪实验系统对车、铣、平磨、研磨等各种表面粗糙度标准样块进行了实验测试, 实验结果如表 2 所示。其中,  $R_a$  为轮廓算术平均偏差;  $R_y$  为轮廓最大高度;  $R_z$  为轮廓微观不平度十点高度;  $S_m$  为轮廓微观不平度的平均间距;  $S$  为轮廓和单峰平均间距;  $T_p$  为轮廓支承长度率。此外还得到了各种粗糙度标准样块的各种轮廓曲线, 现给出  $\nabla 7$  和  $\nabla 9$  标准样块轮廓曲线的打印结果如图 10 所示。

Table 2. The experiment result

roughness sample	experiment results					
	$R_a / \mu\text{m}$	$R_y / \mu\text{m}$	$R_z / \mu\text{m}$	$S_m / \mu\text{m}$	$S / \mu\text{m}$	$T_p / (10\%)$
$\nabla 6$ (turning)	2.66	11.70	11.00	97	91	7%
$\nabla 7$ (milling)	1.21	7.67	6.65	145	65	3%
$\nabla 8$ (grinding)	0.91	5.60	5.00	83	17	4%
$\nabla 9$ (grinding)	0.27	3.15	2.60	19	10	4%
$\nabla 10$ (abrading)	0.12	0.51	0.47	3.9	3.6	10%

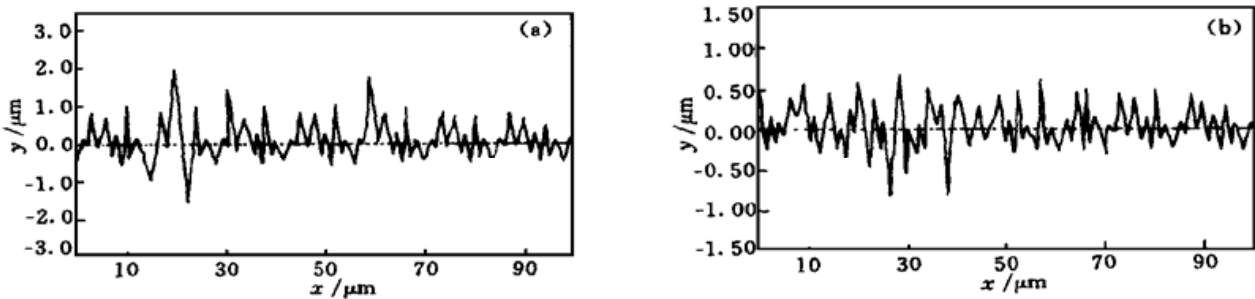


Fig. 10 Measurement of surface profile by single mode fiber probe. (a) Measurement of surface profile for  $\nabla 7$ , (b) Measurement of surface profile for  $\nabla 9$

为了便于比较, 图 11 给出了利用多模光纤探针式轮廓仪实验装置对平磨  $\nabla 9$  粗糙度标准样块轮廓曲线的测试结果。与单模光纤探针式轮廓仪相比, 后者的测试精度比前者约高一个数量级。这与理论分析的结果是一致的。另外, 为了与触针式轮廓仪相比较, 表 3 为当前最好的 Taylor-6 型触针式轮廓仪对  $\nabla 7$  和  $\nabla 9$  样块的测试结果, 图 12 为  $\nabla 9$  样块的表面轮廓的测试结果。比较表 2 与表 3 可知, 利用 Taylor-6 测出的粗糙度参数  $R_a$  及  $R_y$  较小, 而用单模光纤探针式轮廓仪测出的数值较大。这与理论分析是一致的<sup>[2, 3]</sup>。这是由于单模光纤探针

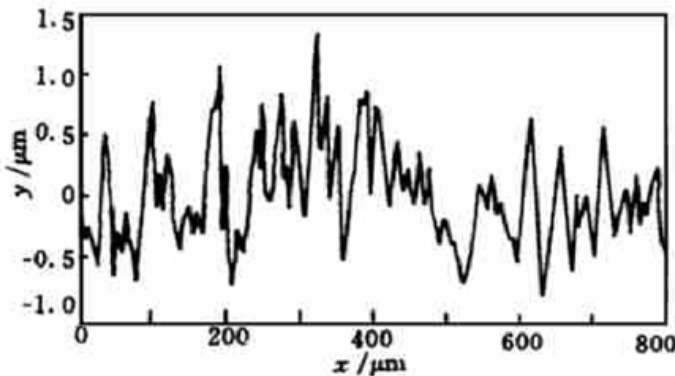


Fig. 11 Measurement of surface profile for  $\nabla 9$  by multimode fiber probe

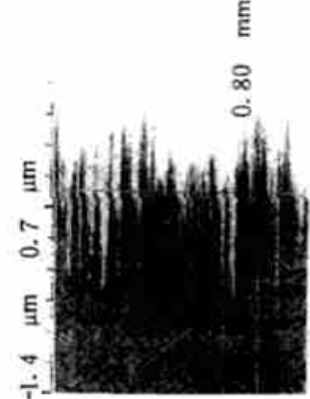


Fig. 12 Measurement of surface profile for  $\nabla 9$  by Talysurf-5

式轮廓仪的光斑可直接照射到表面轮廓的谷底, 而触针式轮廓仪由于触针半径的影响, 触针不能真正触到谷底, 因此后者测出的  $R_a$  及  $R_y$  的值必然偏小。再将图 10 与图 12 进行比较发现, 对  $\nabla 9$  样块的测试, 单模光纤探针式轮廓仪的横向分辨力是 Taylor-6 型轮廓仪的 5~6 倍。

Table 3. Experiment results by Taylor-6\*

	$R_a / \mu\text{m}$	$R_q / \mu\text{m}$	$R_y / \mu\text{m}$	$R_{tm} / \mu\text{m}$	$R_{pm} / \mu\text{m}$
$\nabla 7$	0.92	1.14	5.7	4.9	2.4
$\nabla 9$	0.23	0.30	2.0	1.6	0.6

\* The surface roughness parameters belong to the national standard of Germany in the Table.

本文的实验结果与粗糙度标准样块基本相符, 但也有一定误差。主要是所用的实验系统尚未经过计量部门的严格校准, 测试平台不是理想平面, 目前采用的 A/D 接口卡转换精度较低(8 位), 伺服电机的微小震动对测量的影响等。另外, 本文的分析是建立在几何光学的基础之上的, 尚未考虑衍射效应的影响。这些都是今后研究需要进一步解决的问题。

**结 论** 本文提出的光学针描法是以光纤探针的扫描使被测表面轮廓对光产生调制为基础的, 并从理论上和实践上证明了它的可行性。由于它以光触针取代了机械触针, 实现了表面轮廓的非接触测量, 将有效地克服传统轮廓仪机械触针所带来的固有缺点, 并保持了针描法的全部优点。另外与电子显微镜、扫描微探针或干涉型轮廓仪相比, 由于光学针描法不需要复杂的光学聚焦系统和光学干涉头, 因而探头结构非常简单, 小巧轻便, 操作简便, 使用条件宽松, 相对成本很低, 在工业应用上更有推广与使用价值。

### 参 考 文 献

- [1] Bhushan B, Wyant J C, Koliopoulos C L. Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometry. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(10): 1489~ 1497
- [2] Sun Junqing, Bao Zhenwu. The study of surface roughness measurement method by fiber optic probe. *OFSET '95*, Tianjin: Tianjin science and technology press, 1995, **1 of 2**: 216~ 221
- [3] 霍洪涛. 光纤探针式表面粗糙度测试仪的理论探讨与制作. 天津大学硕士学位论文, 1998. 21~ 23
- [4] Marcuse D. Loss analysis of single mode fiber splices, *Bell Syst. Tech. J.*, 1977, **56**(5): 703~ 706
- [5] 柳井久義. 光ファイバ接壳. 光通信ハンドブック, 日本朝仓书店出版, 1982. 441~ 447
- [6] Thiel F L, Hawk R M. Optical waveguide cable connection. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(11): 2785~ 2789

## Theory and Experiments about Optical Stylus Method

Bao Zhenwu      Liu Jianfei      Huo Hongtao      Liu Zhao

(Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 27 April 1998; revised 7 September 1998)

**Abstract** A new roughness measurement technique, optical stylus method is presented. The principle of the new method is based on the phenomenon of light modulated by surface profile. The modulation principle, the theory of light coupled area, a optical profilometer with a single mode fiber probe and experiment results are detailed.

**Key words** roughness measurement, optical stylographic method, fiber probe, surface profile modulation.