

文章编号: 1001-5078 (2007) 06-0498-05

# 非接触式表面粗糙度测量研究新进展

李粉兰<sup>1,2</sup>, 唐文彦<sup>1</sup>, 段海峰<sup>2</sup>, 郝建国<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 北京时代集团公司, 北京 100085)

**摘要:**文中综述了各类非接触式测量方法及其研究现状, 并对其未来的研究发展方向进行了展望, 以进一步推动理论和应用研究的工作。

**关键词:**非接触; 粗糙度; 全场; 在线; 实时

**中图分类号:** TH741. 3 **文献标识码:** A

## New Development in Research of Non-contact Surface Roughness Measurement

LI Fen-lan<sup>1,2</sup>, TANG Wen-yan<sup>1</sup>, DUAN Hai-feng<sup>2</sup>, HAO Jian-guo<sup>2</sup>

(1. College of Electric Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;

2. Time Group Inc, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In this paper, non-contact surface roughness measurement methods and their current research status are synthetically reviewed, and advance direction of the research is prospected to promote the research in theory and application in the future.

**Key words:** non-contact; roughness; full-field; on-line; real-time

### 1 引言

表面粗糙度是用于描述表面微观形貌最常用的参数, 它反映了机械零件表面的微观几何形状误差。在精密加工和制造行业, 随着对加工零件表面质量的要求越来越高, 零件表面粗糙度的精确测量显得尤其的重要。

表面粗糙度测量大致可以分为接触式和非接触式两种。接触式测量中最常用的是触针法。它将一个半径达到微米量级的金刚石针尖垂直放置在被测表面并作横向的移动, 触针随着被测表面的轮廓形状作垂直起伏运动, 将这微小位移转换成电信号并加以放大和处理, 由此可得到表面粗糙度参数值。这种方法灵敏度和横向分辨力较高, 但又有其无法克服的问题:

1) 所测出的表面轮廓信息及触针圆心的移动轨迹, 从理论上分析, 只有当触针的尖端圆半径等于零时, 触针的运动才能正确的反映被测表面的实际轮廓曲线, 无法达到实时在线的测量;

2) 因为存在运动和信号的同步问题, 只能对静止的表面进行测量;

3) 测量力的大小需要严格控制, 既要保证触针与表面始终保持接触, 同时又应尽可能小的划伤表面和磨损触针;

4) 只能实现表面一维线的测量, 无法实现全场粗糙度的测量。

相比较而言, 非接触式测量具有无损、全场、实时在线测量等优点而倍受关注, 成为粗糙度测量的主要方法。根据实现手段的不同, 非接触式测量方法大致可分为激光散斑法、光散射法、干涉法、聚焦法、激光衍射法和超声法。下面对各类方法及其研究进展分别加以介绍。

### 2 非接触式表面粗糙度测量方法

#### 2.1 激光散斑法

散斑的形成主要归于干涉效应。当一束相干光照射到被测表面时, 表面不同部位的反射光发生干涉形成强度分布为粒状的散斑。同时, 光在粗糙表面发生反射时还会发生散射, 因而在观察屏上所观

作者简介: 李粉兰 (1978 - ), 女, 博士后, 现主要从事图像处理, 模式识别, 激光测量等方面的研究。E-mail: orchidli@126.com  
收稿日期: 2006-10-12; 修订日期: 2006-12-14

察到的散斑图样是由反射散斑和散射光带共同组成的。散斑是由反射光的相位差受表面微观形貌的调制而产生,因而其亮度分布、对比度等都与表面粗糙度密切相关,图 1 是  $R_a$  (平均表面粗糙度)分别为  $0.2\mu\text{m}$  和  $0.4\mu\text{m}$  的散斑图像,可以看出,它们的亮度分布是截然不同的。散斑法主要有散斑对比测量法和散斑相关测量法两种。

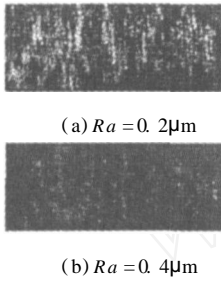


图 1 散斑图像

### 2.1.1 散斑对比测量法

散斑对比测量法是将表面粗糙

度与散斑图像的平均对比度联系起来,测量系统如图 2 所示。激光从表面反射出来后,经过显微镜在 CCD 摄像机上成像,实验证明:当表面粗糙度达到一定程度,对比度将趋于一固定值,表面起伏在  $0.02 \sim 0.3$  倍波长范围内变化时,可观察到对比度的变化,因此若采用 He - Ne 激光器 (波长为  $632.8\text{nm}$ ) 作为光源,只能检测到  $15 \sim 200\text{nm}$  范围内粗糙度的变化,该方法的测量范围较小,且比较适用于光滑表面的粗糙度测量。

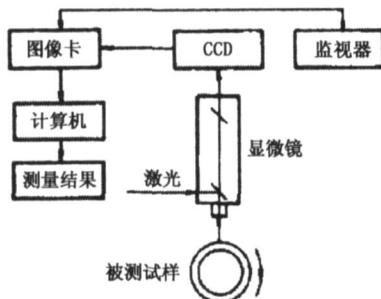


图 2 测量系统图

相关研究表明:若增加入射光波长和入射角度,可测量粗糙度值与入射光波长相当的表面。L. C. Leonard<sup>[1]</sup>以 He - Ne 激光器为光源,入射角等于  $30^\circ$  的情况下,对分别采用研磨、精研和毛砂加工而成,  $R_a$  分别为  $0.078\mu\text{m}$ ,  $0.106\mu\text{m}$ ,  $0.2\mu\text{m}$  的 9 个样本进行了实验,结果表明当  $R_a < 0.1\mu\text{m}$  时,  $R_a$  与散斑对比度存在一种线性关系,而  $R_a > 0.1\mu\text{m}$  后,则将会产生饱和现象,如图 3 所示。而当入射角增至  $80^\circ$  时,精研和毛砂加工样本的测量范围提高到  $0.4\mu\text{m}$ ,也就是说在  $R_a = 0.4\mu\text{m}$  时,  $R_a$  与对比度的

线性关系依然存在。由于可用的研磨样本最大的粗糙度也只有  $0.2\mu\text{m}$ ,而在  $R_a = 0.2\mu\text{m}$  时,  $R_a$  与对比度之间的线性关系也依然存在,如图 4 所示。

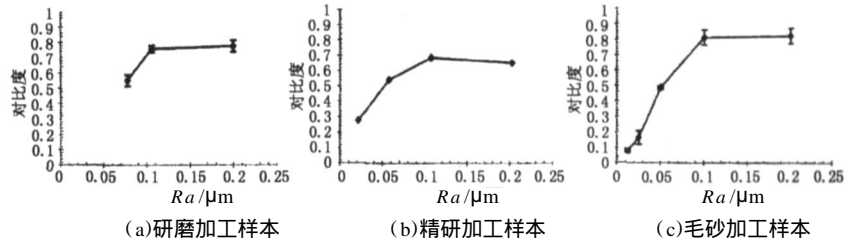


图 3 不同加工方法的样本  $R_a$  和对比度的关系 (入射角为  $30^\circ$ )

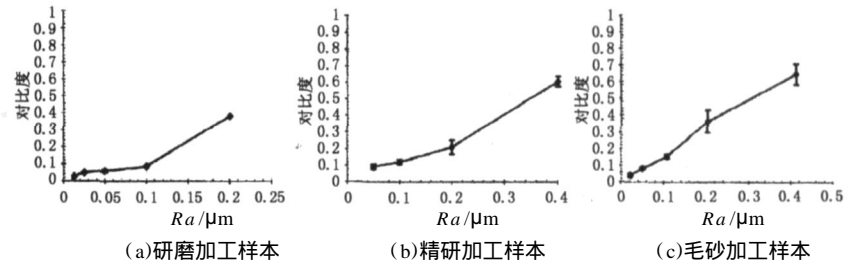


图 4 不同加工方法的样本  $R_a$  和对比度的关系 (入射角为  $80^\circ$ )

### 2.1.2 散斑相关测量法

散斑相关测量法是将表面粗糙度与表面在两种不同条件下产生的散斑图样间的相关度建立联系,其测量范围较大,适用于  $R_a$  在  $0.5 \sim 50\mu\text{m}$  范围的粗糙表面测量。散斑相关测量法大致可以分为角度散斑相关法和光谱散斑相关法。

S. L. Toh<sup>[2]</sup>采用角度散斑相关法,通过旋转被测表面来实现  $1.6\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$  表面的全场粗糙度测量。当入射角 分别为  $6^\circ$  和  $45^\circ$  时,对标准端铣削样本进行实验,结果表明:入射角变化  $\leq 8^\circ$  时, 越大,则  $R_a$  的测量范围也就越大,且测得的  $R_a$  值与标准  $R_a$  值也就越接近。他还指出:不同 , 入射角变化 后的两幅散斑图样的相关度  $R_c$   $0.1$  时,表面  $R_a$  值与 是密切相关的,这就为针对不同  $R_a$  表面,如何选择合适的 提供了可靠的依据。最后通过对系统不确定度进行分析,得出  $R_a = 50\mu\text{m}$ ,  $\theta = 45^\circ$  时,系统的测量最大不确定度仅为  $\pm 1.94\mu\text{m}$ 。Persson<sup>[3]</sup>采用了光谱散斑相关法来实现表面粗糙度的测量,指出该方法的测量范围为  $0.5 \sim 5\mu\text{m}$ ,合理选用两波长的差值,可以获得最优的测量灵敏度。

另外, P. L. Wong<sup>[4]</sup>采用散斑图中黑或亮区域的尺寸来表述  $R_a$ 。选择不同的黑点 ( $D$ ) 和亮点阈值 ( $B$ ) 进行实验,得出入射光强  $I = 220$ ,  $D = 70$ ,  $B = 160$  时,在  $0.05\mu\text{m} \sim 0.8\mu\text{m}$  范围内,  $D$  或  $B$  与  $R_a$  都有很好的线性关系;固定  $I = 220$ , 当  $R_a < 0.3\mu\text{m}$ , 选用亮区比 (亮像素点与观测区域上的总像素点之比), 当  $R_a > 0.3\mu\text{m}$  时, 选用黑区比 (黑像素

点与观测区域上的总像素点之比)来表述  $R_a$ ,可以获得更高的灵敏度。为了进一步量化该方法的有效性,在磨削速度分别为 0 rpm, 10 rpm, 30 rpm 和 60 rpm 下,对  $R_a = 0.05\mu\text{m}, 0.2\mu\text{m}, 0.4\mu\text{m}$  和  $0.8\mu\text{m}$  的 4 个样本分别进行实验,其结果与样本静止时采用触针法的测量结果非常吻合,标准偏差小于 5%。

2.2 光散射法

当一束光照射到粗糙表面时,在发生反射的同时也将在各个方向发生散射。研究表明:反射和散射光强的大小都与表面轮廓均方根偏差  $R_q$  有关。根据探测器放置位置的不同,散射法可以分为镜面反射法、积分散射法、漫反射比法和角度分布法<sup>[5]</sup>。不同的测量方法具有不同的测量范围,而且得到的表面特征也有所不同。

张秋佳<sup>[6]</sup>以散射光束的散射程度  $S$  来描述  $R_a$ ,  $S$  定义为:

$$S = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) (\cos\theta)^2 d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) d\theta} \quad (1)$$

其中,  $\bar{\theta} = \frac{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) d\theta}{\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} P(\theta) d\theta}$  是光散射角平均值;  $P(\theta) = I(\theta) / \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} I(\theta) d\theta$  是散射光强的概率分布密度函数;  $I(\theta)$  是角度  $\theta$  方向上的散射光强。通过对口径在 100~203mm,  $R_a$  在 0.2~1.6 $\mu\text{m}$  的炮管内膛表面进行测量,得出最大相对误差仅为 4.3%。C. J. Tay<sup>[7]</sup>设计了一个由激光二极管、透镜和线性光电二极管阵列组成的探头,在实现发射激光的同时,也用于捕获镜面反射方向,立体角为 28 范围内的所有散射光。以散射光强分布  $S_d$  作为评定表面  $R_a$  的标准。对 26 个 0.005 $\mu\text{m}$   $R_a$  6 $\mu\text{m}$ ,不同加工方法加工而成的工件表面进行实验,得出  $S_d$  与  $R_a$  存在很好的线性关系,相关系数达到 0.999,如图 5 所示。当对工件引入振动干扰、改变周围温度和光照时,测量结果基本没有发生变化,这充分说明了该系统对外界环境变化具有较强的鲁棒性。为了进一步论证该系统应用于在线测量的可能性,对安装在运转车床上的 5 个工件进行在线实验,测量结果相对于工件静止时采用触针法的测量结果,最大偏差仅为 9.1%,通过对系统不确定度进行分析,得出总体不确定度仅为  $\pm 0.002\mu\text{m}$ 。H. Y. Kim<sup>[8]</sup>在反射方向放置一接收屏,反射及散射光投射到接收屏上后,经

CCD 拍摄形成图像,以图像主方向光强分布的标准偏差来表述  $R_a$ 。为了减少背景光及噪声对测量结果的影响,以图像平均强度对各个像素点的强度进行修正,并采用中间滤波器进行滤波。通过对  $0.1\mu\text{m}$   $R_a$  1 $\mu\text{m}$  的 6 个样本进行实验,其测量结果相对于触针法的测量结果,误差小于 10%。

全积分散射 (total integrated scattering, TIS) 模型根据全部漫散射光强与入射光强的比值来确定表面的  $R_q$  值。最近, C. J. Tay<sup>[9]</sup>提出了一种改进的 TIS 模型,以镜面反射光强来表述  $R_q$ ,选用 10mm  $R_q$  18mm 的半导体晶片作为实验样本,将该方法与触针法和传统 TIS 模型进行实验对比,得出三者的测量结果相对于标准值的最大偏差分别为 15%, 30% 和 37%,充分证实了改进的 TIS 模型的有效性。

散射法中通常采用可见光光源。Persson<sup>[10]</sup>以波长为 10.6 $\mu\text{m}$  的红外光作为光源,使测量范围得到了一定的提高。对 0.4 $\mu\text{m}$   $R_a$  6.4 $\mu\text{m}$  的加工表面进行测量,并根据测得的粗糙度值对加工表面进行分类,得出其分类结果与采用触针式测量仪的分类结果完全一致。

光纤也逐步应用到表面粗糙度测量上。B. Cahill<sup>[11]</sup>以波长为 850nm 的 LED 为光源,光耦合进入光纤后照射到被测表面上,再由出射光纤接收漫散射光。以被测表面法向为轴,夹角为 60 度对称放置入射、出射光纤,且两光纤距表面的距离相等。通过实验得出:当 0.1 $\mu\text{m}$   $R_a$  0.8 $\mu\text{m}$  时,  $R_a$  与漫散射光经光电转换后输出的峰值电压有很好的线性关系。为了进一步简化实验装置,金杰<sup>[12]</sup>设计了一集入射光纤与出射光纤于一体的光纤探头。探头由中心的单模光纤、四周的多模光纤束组成。光纤探头垂直放置在样本上方,单模光纤在发射光的同时还接收镜面反射光,多模光纤束主要接收漫散射光,探头以 1mm/s 的速度垂直匀速扫描被测表面。通过对标准样块的测量,并将测量结果与表面粗糙度参数评定对照表中的参数范围进行对照,得出  $R_a$  和  $R_z$  (轮廓微观不平度十点高度) 的值全部在给定的参数范围内。Z. Yilbas<sup>[13]</sup>以 He-Ne 激光器作为光源,以 45 度角方向入射到被测表面上,在对称位置放置光纤探头以收集反射光。假定反射光强为高斯分布,在  $R_a$  和高斯曲线的标准偏差  $B$  之间建立了数

学模型。通过对 0.1 $\mu\text{m}$   $R_a$  0.6 $\mu\text{m}$  的样本进行实验,结果表明:  $R_a$  和  $B$  有很好的线性关系,相关系数达到 0.992,且测量误差小于 5%。另外,最近不少研究者将神经网络的概念也引入到粗糙度测量的领域,如 Z. Yilbas<sup>[14]</sup>将光纤的输出

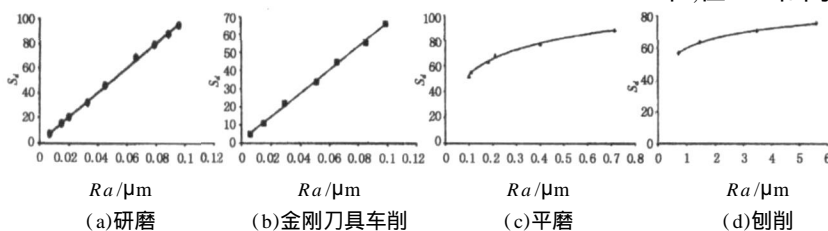


图 5 不同加工方法加工而成的样本  $R_a$  与  $S_d$  的关系

输入一后向传播的神经网络,以便对表面粗糙度值进行估计。

### 2.3 干涉法

干涉法是测量粗糙度和高质量光学表面轮廓的重要技术。目前干涉法的研究重点是如何消除外界因素对测量结果的影响,梁嵘<sup>[15]</sup>在其研制的激光外差干涉仪中采用了激光共光路共模抑制技术,克服了空气扰动、导轨误差和在线测量中震动等不利因素的影响,使在线表面测量成为可能,并以计大数和测小数相结合的方法对外差信号进行处理,实现了大的动态测量范围和高的测量分辨力。该仪器的横向和纵向分辨力分别达到了  $0.73\mu\text{m}$  和  $0.39\mu\text{m}$ 。在双光束干涉仪中,若采用非相干宽带光源,且两臂光程差大于相干长度时,是无法看到任何空间条纹的,但通过观察观测屏上的光谱可以看出:当在测量镜处放置不同粗糙度值的工件时,重叠光谱区光谱的调制将发生变化。H. C. Kandpal<sup>[16]</sup>则是根据重叠光谱区光谱调制的变化来实现表面粗糙度测量的。他以  $0.01\mu\text{m}$   $R_a$   $0.1\mu\text{m}$  的 5 个样本为实验样本,通过实验验证了两臂光程差、测量准确度和光谱相对可见度三者之间的关系:光程差越大,则光谱的相对可见度就越大,表面粗糙度测量的准确度也就越高。

### 2.4 聚焦法

聚焦法又称光学探针法,其本质都是以一个聚焦光点入射到被测表面上以模拟机械触针进行测量,焦点即相当于探针。聚焦法大致可分为:激光三角法和聚焦误差法,聚焦误差法又可分为临界角聚焦法、像散聚焦法、Foucault 聚焦法等。

杨春兰<sup>[17]</sup>提出了一种基于光驱聚焦检测技术的光触针式表面粗糙度测量系统,如图 6 所示。从半导体激光器发出的光经分光镜、 $1/4$  波片和透镜聚焦到被测表面,一般聚焦光斑直径在  $1 \sim 2\mu\text{m}$ 。反射光按原路返回到分光镜,并通过透镜  $L_4$  会聚,一刀刃放在反射光束最细的部位。当入射光准确聚焦在表面时,刀刃不会阻挡光束,光电池的两象限输出差为零。若被测表面高度变化,偏离焦点,刀刃则会遮挡部分反射光束,光电池的输出给出了聚焦误差信号 (FES):

$$\text{FES} = (A - B) / (A + B) \quad (2)$$

这个误差信号反馈回音圈电机,以驱动悬置于音圈中的物镜  $L_1$  移动,促使光线聚焦在表面上,同时使聚焦误差信号减小到零。音圈电机的位移量通过一电感传感器检出,经 A/D 转换和计算处理,即可得出表面粗糙度的参数值。该系统示值范围为  $\pm 15\mu\text{m}$ ,分辨力达到  $0.01\mu\text{m}$ ,测量准确度能达到国标第二系列误差。另外,日本三井公之等人研制的

基于像散聚焦的粗糙度测量系统,测量范围达到  $0.01 \sim 1\mu\text{m}$ ,测量分辨力达  $2\text{nm}$ 。

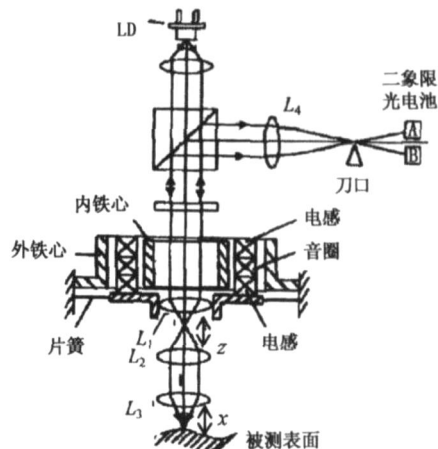


图 6 测量系统原理图

### 2.5 激光衍射法

激光衍射法是新近发展的,适用于超精加工表面粗糙度测量的一种新技术。表面凹凸不平(粗糙度)可以认为是具有重复阵列的不透明凹槽的衍射体,当一束平行激光照射到该表面时,则在傅里叶变换透镜的焦平面上会观察到由该表面产生的远场衍射图样——夫琅和费衍射图。由傅里叶变换及其推导可知:夫琅和费衍射图上各级衍射的光强分布是随表面粗糙度大小而改变的,因而可依据这种变化来测量表面粗糙度。衍射法的测量范围大致在  $1\text{nm} \leq R_q \leq 200\text{nm}$ ,当  $R_q$  在  $150\text{nm}$  内时,测量误差  $1.3\%$  左右,而当  $R_q$  为  $200\text{nm}$  时,测量误差小于  $10\%$ 。

### 2.6 超声法

超声法是依据声波在粗糙表面发生反射和散射时,声波的频率或幅值的变化来实现表面粗糙度的测量。

S. J. Oh<sup>[18]</sup>以正弦调制的高斯脉冲为声源,采用聚焦型  $10\text{MHz}$  宽带超声探头作为声波探测器,将工件和探测器置于水中,以水作为耦合介质对工件表面进行粗糙度及轮廓测量。通过实验证实声波入射角对反射声波的幅值有很大的影响:随着增加,反射声波的幅值会逐渐降低,而当  $10^\circ \sim 12^\circ$  时,测量灵敏度达到最大,最后得出超声法相对于触针法,同一点的测量误差在  $5\%$  之内。J. R. Gatabi<sup>[19]</sup>设计了一个基于多普勒效应的超声探头用于表面粗糙度的测量,测量原理如图 7 所示。待测表面在  $x$  轴方向以  $v_x$  移动,振荡器产生的频率为  $F_0$  的声波经放大器放大后,由声波发射器以角度  $\theta$  入射到表面上,声波在表面发生漫反射,其中有一小部分声波被置于角度  $\theta$  方向的声波接收器接收,多普勒效应使得声波频率发生平移,假定多普勒平移为  $F_d$ ,那么接收到的声波频率为  $F_0 + F_d$ 。声波信号经

放大后,在混频器内与频率为  $F_1 = F_d / F_0$  ( $F_1 < F_0$ ) 的信号混合以产生差频信号,再经过低通、高通滤波器,整流器后输出电压  $V_0$ 。 $V_0$  与表面粗糙度斜率是密切相关的。通过对球形和平面样本,0.02m/s 旋转速度下进行实验,得出粗糙度斜率在  $0^\circ \sim 1.2^\circ$  范围内,系统的测量灵敏度为  $18(\text{mV}/\text{deg})$ 。

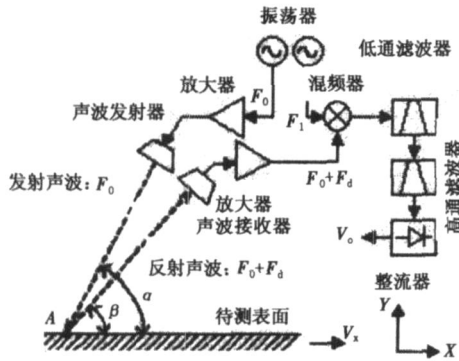


图 7 测量原理图

概括之,散射法、散斑法和衍射法易实现高速和自动化测量,但它们只能作为比较测量。如果想得到定量的表面参数,需要用与被测表面相同材料、相同加工工艺获得的试样,仔细矫正后,才能用作粗糙度的测量;干涉法、聚焦法和超声法在获得定量的表面参数的同时,还可以得到表面的轮廓,测量准确度相对较高,但因其测量速度慢,对振动较敏感,很难应用于在线测量。总而言之,各个方法各有利弊,需要结合实际应用要求加以选择。

### 3 研究展望

随着产品质量的要求和精密加工技术的提高,表面粗糙度达到纳米级的零件越来越多,如半导体掩膜、磁盘等等,测量已逐渐进入纳米时代,另外,复杂立体形状加工技术的发展对三维表面粗糙度测量也提出了要求,因此超高精加工表面的快速、高精度、在线和自动化测量、三维表面粗糙度测量是非接触式测量今后发展的主要方向。

### 参考文献:

- [1] Leonard L C, Toal V. Roughness measurement of metallic surfaces based on the laser speckle contrast method[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1998, 30: 433 - 440.
- [2] Toh S L, Quan C, Woo K C, et al Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique[J]. Optics&Laser Technology, 2001, 33: 427 - 434.
- [3] Persson U. In - process measurement of surface roughness using light scattering[J]. Wear, 1998, 215: 54 - 58.
- [4] Wong P L, Li K Y. In - process roughness measurement on moving surface[J]. Optics&Laser Technology, 1999, 31: 543 - 548.
- [5] Zhou L L, Zhao X Z. In - process measurement of surface roughness using laser and other techniques [J]. Laser Journal, 2004, 25 (3): 4 - 8 (in Chinese)
- [6] Zhang Q J, Fan J Y, Zhao Y H. The design on measuring the surface roughness of artillery inside chamber [J]. Journal Harbin University of Science & Technology, 2004, 9(4): 13 - 16 (in Chinese)
- [7] Tay C J, Wang S H, Quan C, et al In situ surface roughness measurement using a laser scattering method [J]. Optics Communications, 2003, 218: 1 - 10.
- [8] Kim H Y, Shen Y F, Ahn J H. Development of a surface roughness measurement system using reflected laser beam [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130 - 131: 662 - 667.
- [9] Tay C J, Wang S H, Quan C, et al Surface roughness measurement of semi-conductor wafers using a modified total integrated scattering model[J]. Journal for Light and Electron Optics, 2002, 113 (7): 317 - 321.
- [10] Persson U. Measurement of surface roughness using infrared scattering [J]. Measurement, 1996, 18 (2): 109 - 116.
- [11] Cahill B, El Baradie M A. LED-based fibre-optic sensor for measurement of surface roughness[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119: 299 - 306.
- [12] Jin J, Li Y, Zeng X Y. Experiment and research on instrument for measurement of surface roughness by fiber probe[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2005, 38 (D): 54 - 58 (in Chinese)
- [13] Yilbas Z, Hasni M S J. Surface roughness measurement using an optical system [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88: 10 - 22.
- [14] Yilbas Z, Hasni M S J. An optical method and neural network for surface roughness measurement [J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 28: 395 - 409.
- [15] Liang R, Li D C, Cao M, et al Common path laser heterodyne interferometer for on - line measuring surface roughness[J]. Acta Optica Sinica, 1999, 19 (7): 958 - 961. (in Chinese)
- [16] Kandpal H C, Mehta D S, Vaishya J S Simple method for measurement of surface roughness using spectral interferometry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34: 139 - 148.
- [17] Yang C L, Pu Z B, Ye H Y, et al A new surface roughness measuring system by optical stylus [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 1999, 19 (5): 55 - 58 (in Chinese)
- [18] Oh S J, Shin Y C, Furgason E S Surface roughness evaluation via ultrasonic scanning [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1994, 41 (6): 863 - 871.
- [19] Gatabi J R, Gatabi R. A novel Doppler based ultrasonic surface roughness measurement [J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2005, 3: 1460 - 1463.