

文章编号 1004-924X(2019)01-0078-16

## 三维表面粗糙度测量方法综述

何宝凤\*, 丁思源, 魏翠娥, 刘柄显, 石照耀

(北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124)

**摘要:** 表面粗糙度测量是评估零件表面特性的重要手段。经过二十多年的发展, 三维表面粗糙度逐渐成为反映工件表面特性的重要指标。本文总结并比较了接触式测量法、非接触式测量法和纳米表面粗糙度分析法中常用三维表面粗糙度的测量原理及特点。针对每种测量方法的发展现状, 本文讨论了其适用范围及局限性, 并指出了未来的发展方向。

**关键词:** 三维表面粗糙度; 测量方法; 接触式测量; 非接触式测量; 纳米表面粗糙度分析

**中图分类号:** TH71 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0078

### Review of measurement methods for areal surface roughness

HE Bao-feng\*, DING Si-yuan, WEI Cui-e, LIU Bing-xian, SHI Zhao-yao

(Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

\* Corresponding author, E-mail: baofenghe@bjut.edu.cn

**Abstract:** The measurement of surface roughness is a crucial tool for characterizing engineering surfaces. After more than 20 years of development, areal surface roughness has become a key factor that reflects the characteristics of engineering surfaces. This study includes summaries and comparisons of the characteristics of areal surface roughness, contact and non-contact measurement methods, and nanometer-scale surface roughness analysis methods. The applications and limitations of existing methods are also analyzed, and the direction for future development is presented.

**Key words:** areal surface roughness; measurement methods; contact measurement; non-contact measurement; nanometer-scale surface roughness analysis

## 1 引言

在实际加工过程中, 摩擦、金属撕裂、机械振动和温度变化等原因会给加工零件表面留下微观峰谷等不平整痕迹, 这些峰谷的幅度和密集程度的几何形状特性称为表面粗糙度。表面粗糙度对零件的耐磨性、配合性质稳定性、疲劳强度、抗腐

蚀性、密封性和表面光学性能等有重要的影响<sup>[1]</sup>。随着科技的发展, 零部件表面性能的要求越来越高, 表面粗糙度测量技术在微机电系统 (MEMS)、精密光学系统和半导体等领域发挥着重要作用<sup>[2]</sup>。在用粗糙度表征表面形貌方面, 相比于传统的二维粗糙度参数, 三维表面粗糙度参数能够更全面地提供被测工件表面的空间形貌特征, 具备更好的统计学意义<sup>[3]</sup>。工件表面的二维

收稿日期: 2018-04-16; 修订日期: 2018-04-26.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项 (No. 2013YQ590395)

粗糙度应用与研究已经发展了半个多世纪,但是工件二维轮廓的测量与评定难以得到被测工件表面的全面信息。工件表面三维粗糙度测量是获取工件微观表面形貌特征的一种重要手段,也是重构、记录和比较工件表面形貌特征的基础。二维和三维表面粗糙度的区别在于选用的滤波器不同。从三维表面形貌中提取三维表面轮廓度、波纹度和粗糙度等微观信息可以通过滤波器 S-filter、L-filter 和 F-operator 来实现<sup>[4]</sup>。三维表面形貌测量可以提取工件表面形貌的各种参数和信息,以对它进行综合性的评定和研究。因此,研究三维表面粗糙度测量方法具有重要的理论意义与实际应用价值。

三维表面粗糙度的测量最早可以追溯到 1970 年,Grieve 等人基于 Talysurf III 建立了记录平行轮廓曲线的操作系统,通过该系统测得一些参数并描绘出表面的等高线图<sup>[5]</sup>。直到 20 世纪 80 年代末,个人计算机的出现才使得三维表面粗糙度的分析成为可能<sup>[6]</sup>。1988 年,美国国家标准学会(ANSI)举办了第四届工程表面特性和表面计量国际会议<sup>[7]</sup>,会议指出表面形貌的本质是三维的,三维测量及其量化计算得到的表面粗糙度更具完整性和真实性。1993 年,著名的伯明翰 14 参数为三维表面的评定提供了一套基本的粗糙度标准<sup>[8]</sup>。2002 年,国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)技术委员会 TC213 建立 WG16 小组,开始着手于空间产品几何技术规范的认证,并对三维表面的测量方法展开研究<sup>[9]</sup>。2005 年,粗糙度标准草案 ISO/TC 213N756 将三维粗糙度参数增至 23 个<sup>[10]</sup>。目前,国际上已经开展了三维表面粗糙度参数及其测量标准化的基础性研究工作。例如,2010 年颁布的国际标准 ISO 25178 系列,第二部分(Term, Definitions and Surface Texture Parameters)中包含了超过 30 个三维表面粗糙度参数;ISO 25178 第 6 部分(Classification of Methods For Measuring Surface Texture)总结了表面结构的测量方法<sup>[11]</sup>。基于 ISO 25178 系列标准,我国于 2017 年颁布了产品几何技术规范 GB/T 33523 系列。技术规范包括了通用术语、定义及表面结构参数,规范操作集,现有表面结构测量方法的分

类以及相应的软件标准<sup>[12]</sup>。虽然近年来三维表面粗糙度测量得到了快速发展,但相关的标准规范还在不断完善的过程中。

本文系统地介绍了三维表面粗糙度测量方法的研究现状,简述了常用方法的测量原理,比较其适用范围、优势及局限性,并对三维表面粗糙度的测量进行了展望。

## 2 测量方法分类

先进仪器技术的发展推动了粗糙度测量行业的发展,逐渐形成了三类主要的三维表面粗糙度测量方法:接触式测量法、非接触式测量法以及纳米表面粗糙度分析法,具体分类情况如图 1 所示。

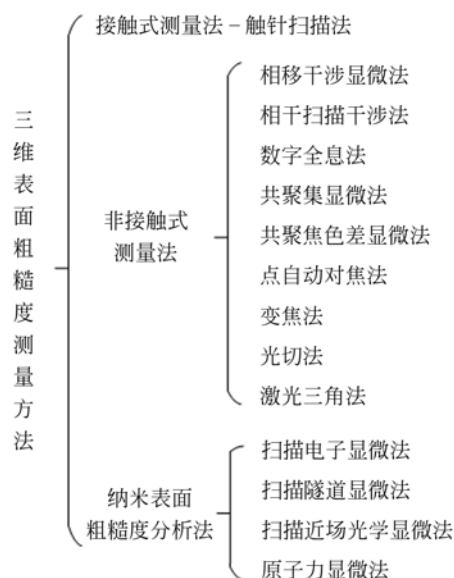


图 1 现有三维表面粗糙度测量方法

Fig. 1 Existing methods for areal surface roughness measurement

接触式测量法以触针扫描法为代表。非接触式测量法主要分为通过扫描光束或使用视场(区域形貌法)的测量方法和通过分析散射光的分布(区域积分法)测量表面的统计参数测量方法。由于区域积分法只能进行定性测量或者得到有限的三维粗糙度参数,因此本文主要介绍区域形貌法。纳米表面粗糙度分析法是横向和垂直分辨率都可达到纳米级的表面粗糙度测量方法。

## 2.1 接触式测量法

接触式测量法是测量仪器与被测工件直接接触以获得被测表面信息的方法。接触式测量法通常具有较大的可测量范围,使用时无需考虑被测工件表面的光学性质,但须考虑被测工件的材料性质。

### 2.1.1 触针扫描法

触针扫描法测表面粗糙度时,触针与被测表面相接触并沿着垂直于加工纹理的方向滑动,如图 2 所示。在测量过程中,触针不仅随驱动箱沿  $x$  轴位移,而且随微观表面的峰和谷沿  $z$  轴上下移动,触针在  $z$  轴的垂直位移量就反映了表面的微观高度值。触针的位移信号通常通过压电式或者电感式传感器转变成电信号,然后通过模拟电路模数转换为数字信号,导入计算机通过相应的软件处理得到表面粗糙度参数。不同于二维触针轮廓仪的测量,测量三维表面粗糙度需要在二维轮廓仪基础上沿加工纹路方向新增加微小的进给量,在触针完成垂直加工纹路方向上的扫描后,使工作台带动被测工件沿  $y$  方向进给,以此获得整个被测区域的数据<sup>[13]</sup>。

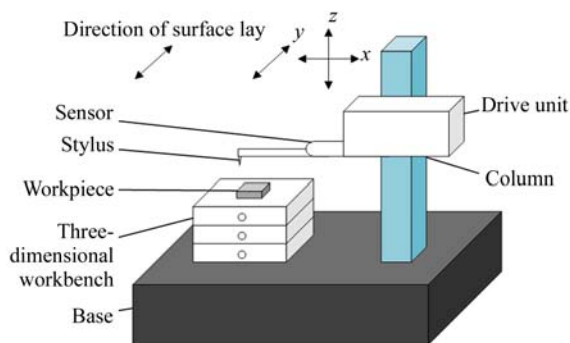


图 2 三维粗糙度测量触针式轮廓仪结构简图

Fig. 2 Schematic diagram of stylus profilometer for areal roughness measurement

触针扫描法是在 1927 年后开始应用于表面粗糙度测量的<sup>[14]</sup>。1936 年,美国 Abbott 研制出第一台车间用表面粗糙度轮廓仪<sup>[15]</sup>。1940 年,英国 Taylor-Hobson 公司研制出 Talysurf 表面粗糙度测量仪<sup>[16]</sup>,自此商业化触针式轮廓仪进入蓬勃发展时期。目前,国外一些著名的粗糙度测量生产商如德国 Hommel 公司、英国 Taylor-Hobson 公司等,都拥有成熟的三维粗糙度轮廓仪产

品,而国内触针式三维粗糙度测量仪器的测量分辨率、测量结果重复性以及粗糙度测量的三维评价体系以及软件开发方面距国外还有一定差距。

触针扫描法测量表面粗糙度历经近百年,其良好的测量结果重复性和溯源性使之成为光学测量方法的参考标准<sup>[17]</sup>。此外,该方法还具有较大的测量量程、较低的测量环境要求等优势,但是受仪器结构等因素的影响,触针扫描法的测量效率较低,受振动影响较大。对触针施加的力以及针尖的尺寸会对测量结果造成较大影响。接触力过大会导致测量过程中触针划伤表面,接触力过小又会导致触针针尖无法到达被测谷底部。另外,触针针尖的尺寸限制了触针式轮廓仪的分辨率,针尖磨损可能会严重影响测量精度<sup>[18]</sup>。

触针扫描法适用于炼钢行业等多种工业场合,对及时发现表面缺陷,降低废品率起着重要的作用<sup>[19]</sup>。未来测量触针可装配智能信号发射与接收装置以限制测量臂的下放速度来减小刮伤几率,或者改装双向力触针运用在自动化工厂零件内孔测量中,也可通过取样形式的改变(如螺纹取样)来提高测量效率。

## 2.2 非接触式测量法

非接触式测量法是在测量过程中获取间接反映被测表面信息的方法。该方法具有无损检测的特性,能够避免仪器与被测工件相接触产生的误差。软金属材料、光学存储元件、光学纤维以及半导体薄片等不能进行接触测量,因此对特殊材料和高精密元件需要非接触无损检测。非接触式测量法中的各类方法主要应用了干涉原理和光学探针原理。光学类测量仪具有高分辨率和高效率的特点,但是使用非接触式测量法测量时需要考虑被测工件的光学性质。

### 2.2.1 相移干涉显微法

在测量三维表面粗糙度的过程中,相移干涉显微法(Phase-shifting Interferometric microscopy, PSI)是由已知波长的光源发射光束至被测样品表面,通过精准控制被测光与参考光的相移使干涉条纹发生变化,由电子相机采集多幅顺序排列的干涉条纹变化图像并导入计算机,进而将微观表面高度与干涉相移量建立起联系的方法。相移干涉显微法测量原理如图 3 所示。

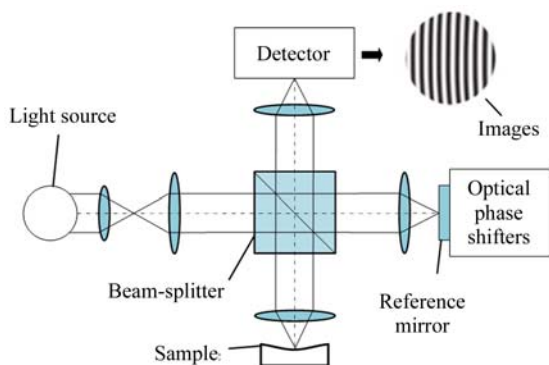


图 3 相移干涉显微法测量样品表面示意图

Fig. 3 Schematic of phase-shifting interferometric microscopy for areal roughness measurement

相移干涉类仪器测得的光强与双光束干涉光强和引入的相移量的关系为:

$$I(x, y, t) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)}\cos[\varphi(x, y) + \delta_i], \quad (1)$$

式中:  $I_1$ ,  $I_2$  分别为双光束的光强,  $\varphi(x, y)$  为被测面与参考面的相位差, 这 3 个变量在测量表面上任意一点的微观高度的过程中都为未知量。  $\delta_i$  为引入的相移量,  $\delta_i = i2\pi/N$ , 其中  $N$  为采样帧数。为了得到光强与相位差的关系, 要求采样帧数  $N$  至少取  $3^{[20]}$ 。测得的样本点光强可通过引入相移量  $\delta_i$  计算出该点包含三维表面微观高度信息的相位差, 通过软件对整个被测表面像素点数据进行计算可得出该表面的三维表面粗糙度。

相移干涉显微法是在对光学透镜和显微镜测试的背景下发展起来的。1974 年, Bruning 等人<sup>[21]</sup>为了提高激光干涉仪的灵敏度, 解决 Twyman-Green 干涉仪透镜表面条纹图像间距  $\lambda/2$  的局限, 提出了相移干涉法。20 世纪 80 年代, Balasubramanian<sup>[22]</sup>第一个提出了基于白光相移干涉技术的表面三维测量系统。80 年代到 90 年代, 相移干涉显微法在三维表面粗糙度测量领域进入迅速发展阶段<sup>[23-25]</sup>。目前, 基于相移干涉原理的光学测量仪器在市场上种类丰富, 功能齐全。美国 ZYGO 公司和德国 Mahr 公司都有系列的相移干涉类产品。单色光或白光光源的相移干涉仪可以分别测量无分层或分层微观表面, 由此商业相移干涉类仪器可分为单色光源相移干涉仪和多波长相移干涉仪。其中, 单色光相移干涉存在“相位模糊”现象, 限制了可获得连续条纹的范围;

而白光相移干涉法增加了动态测量范围并保持了分辨率的恒定。

相移干涉类仪器为非接触无损测量, 其垂直分辨率达到纳米级, 测量精度高达光源波长的千分之一。相移干涉显微镜采用共光路结构, 因此该结构对外界振动并不敏感。另外相移干涉法相位计算简单, 扫描方式为面扫描式。由于不同的材料能够展现出不同的反射光相移变化量, 因此相移干涉显微法仅限于测量高精度、超光滑样品<sup>[26]</sup>。随着激光、光电检测、电子与计算机等技术在光干涉计量测试领域的应用, 相移干涉技术还在飞速发展的过程中。相移干涉法由于高精度和高灵敏度等特点, 已经成为一些精密元件三维表面粗糙度测量的主要方法之一。

### 2.2.2 相干扫描干涉法

相干扫描干涉法 (Coherence Scanning Interferometry, CSD) 基于相长和相消干涉原理, 如图 4 所示。通过对被测表面的垂直扫描使干涉条纹发生变化, 而干涉条纹信号的最大值对应表面微观形貌的高度值。测量过程中, 相干扫描干涉法完整地垂直扫描被测表面并重构出三维表面形貌, 由相应算法可计算得出三维表面的粗糙度。

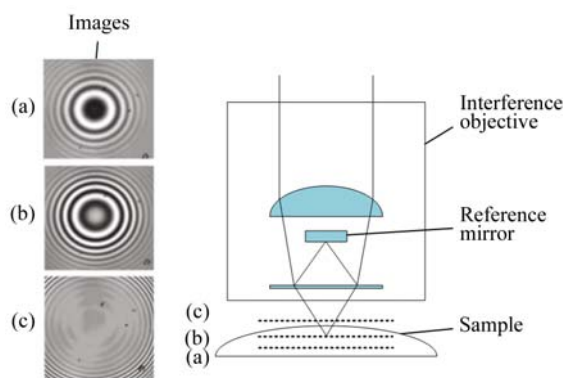


图 4 相干扫描干涉法测量样品表面示意图

Fig. 4 Schematic of coherent scanning interferometry for areal roughness measurement

1990 年, 美国斯坦福大学 Kino 等人<sup>[27]</sup>基于白光干涉垂直扫描原理, 研制出可测微观形貌的 Miral 干涉显微镜。1992 年, Dresel 等人<sup>[28]</sup>提出干涉雷达测量法, 该方法能够在较小数值孔径情况下提供较高的深度测量精度。1993 年, Hausler 和 Neumann<sup>[29]</sup>以及 Caber<sup>[30]</sup>均使用相干干涉法对三维表面粗糙度进行测量并取得了良好的效果。

目前, 基于相干扫描干涉原理的商业干涉仪

有相干相关干涉仪 (Coherence Correlation Interferometer, CCI) 或白光干涉仪 (White Light Interferometer, WLI) 和结合 PSI 和 CSI 的白光干涉仪等。这种类型的干涉仪可测量半导体硅片及器件、MEMS 装置表面、平面液晶显示器、陶瓷基板表面等精密元件的三维微观表面形貌。英国 Taylor-Hobson 公司研制的 CCI 结合相移干涉技术, 可对三维表面粗糙度完成快速测量; 美国 Zygo Nexview 系列光学表面轮廓仪结合相干扫描干涉技术和相移扫描干涉技术, 能够对三维表面粗糙度进行高精度测量, 其垂直分辨率高达 0.08 nm。

CSI 应用于测量三维表面粗糙度 ( $S_z$ ) 小于 50 nm 的情况<sup>[31]</sup>。CCI 能够对可视领域内的每一个像素点实行自动对焦并且能够抑制散射光的干扰。由于 CSI 以整个视场为分析对象, 因此该方法拥有较大的测量范围。而 CCI 通过一次垂直扫描就能够得到被测样品的三维表面形貌, 具有很高的测量效率。

白光干涉的特性决定了白光干涉技术在高度方向上不会出现相位模糊现象, 但深度的测量精度会受到数值孔径的限制。由于成本问题, 相干扫描干涉类表面粗糙度测量仪目前主要应用于实验室研究; 另外, 有限的物镜或工作台垂直位移限制了仪器的垂直量程, 且干涉仪校准较为困难, 测量环境要求较高, 也限制了 CSI 在实际生产中的应用。

### 2.2.3 数字全息法

数字全息法 (Digital Holography Microscopy, DHM) 在测量三维表面粗糙度时, 使用数字全息显微镜结合干涉测量技术, 通过电荷耦合器件 (Charge Coupled Device, CCD) 图像传感器在几微秒时间内记录含有被测样品表面波前信息的全息图, 然后通过计算机对所记录的图像进行数值重建获得被测物体的相位和光强信息, 以此重新构造出被测样品表面的三维数字图形, 进而计算得出三维表面粗糙度<sup>[32]</sup>。DHM 原理如图 5 所示。

DHM 的基本原理早在 1948 年就由 Dennis Gabor<sup>[33]</sup> 发现并提出。传统的全息法和干涉法使用双曝光比较方式测量表面粗糙度, 但该方式不具备动态特性, 并且对测量环境的要求较为严格<sup>[34]</sup>。仪器的单光源对测量范围有一定的限制性, 而全息法应用双波长或多波长技术, 扩大了仪器的垂直量程<sup>[35]</sup>。目前, 生产数字全息类测量仪

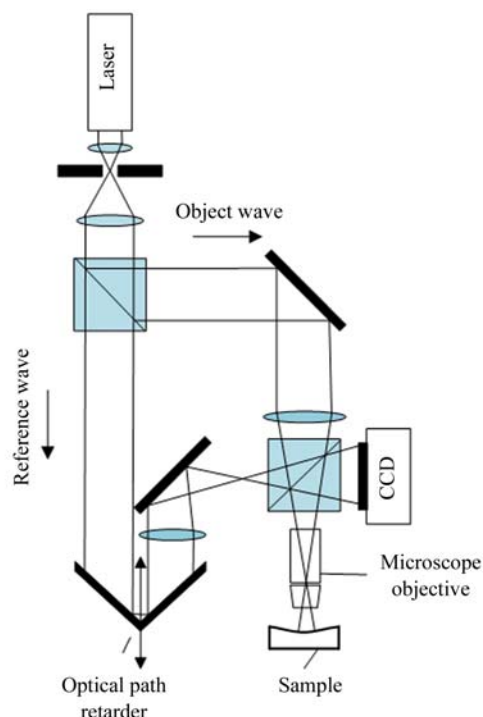


图 5 数字全息法测量三维表面粗糙度示意图

Fig. 5 Schematic of digital holography microscopy for areal surface roughness measurement

的公司并不多, 具有代表性的是瑞士 LynceeTec 公司。商业化的数字全息显微镜主要有反射型和透射型两种类型, 在干涉显微测量领域, 透射型仪器只在数字全息类仪器中出现。两种类型的垂直测量范围是不同的, 重构相位以  $2\pi$  为模定义, 反射模式的最大高度测量范围为半个光源波长, 透射模式的最大高度测量范围为 1 个光源波长。

DHM 与 PSI 类似, 同样使用参考光测量相位, 但两者的主要差别在于 DHM 在获得三维表面形貌图形时只需通过单张的全息图像来达到重构目的。DHM 测量三维表面粗糙度不需要物镜的移动扫描, 图像采集通过 CCD 来完成, 垂直测量校准取决于光源波长, 而相移类仪器则可能存在漂移, 因此 DHM 具有测量稳定性和校准稳定性。实时、非接触、波长垂直校准和数字聚焦的特性使得 DHM 成为认证计量和快速成像测量的理想选择。但是该方法不能完全避免寄生干扰和诸如散射噪声等统计噪声, 另外对被测样品表面的散射性以及材料性质有较高的要求。例如对散射表面如非抛光的零件表面来说, 反射或透射的波前相位受到较大的干扰, 重构三维表面较为困难; 对复合材料表面来说, 使用 DHM 测得的数据无

法通过三维形貌与相位的线性关系进行转换<sup>[36]</sup>。

数字全息类测量仪可进行实时测量,测量速度主要受到后期摄像机采集率的限制,横向分辨率受衍射极限的限制,垂直分辨率能够达到亚纳米级。单张全息图的采集、独立计算机的计算以及软件优化使得 DHM 能够重构出多像素点的像素全息图。未来数字全息技术可应用于工厂车间零件表面粗糙度的实时质量控制。

#### 2.2.4 共聚焦显微法

共聚焦显微法测量三维表面粗糙度的原理为当共焦仪器的物镜与被测样品表面处于共焦位置时,从被测样品表面反射回的光束能够通过探测孔进入光检测器(如图 6 所示),光检测器由此能够检测出光强,从而提取被测表面相同高度点的信息。对被测表面进行面式扫描以产生完整的光学截面图像,所得的数据经软件处理便可得到三维表面粗糙度。

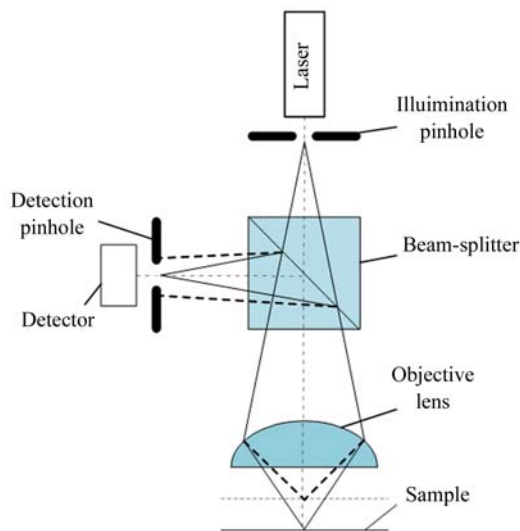


图 6 共聚焦显微法测量样品表面示意图

Fig. 6 Schematic of confocal microscopy for areal roughness measurement

激光扫描共聚焦显微法的概念是由 Marvin Minsky 在 1957 年首次提出的<sup>[37]</sup>。1971 年,Paul Davidovits 和 M. David Egger 设计了第一台激光扫描共聚焦显微镜<sup>[38]</sup>。1998 年,德国 Robert Windecker 等人<sup>[39]</sup>将光纤技术应用于低相干性共聚焦显微镜中,实现了共聚焦对三维表面形貌的测量。2000 年,上海光机所的杨莉松等人<sup>[40]</sup>利用差动共聚焦显微镜对镀有测试条的高密度光盘表面进行了三维形貌测量,取得了满意的效果。商

业共聚焦显微镜主要分为三种类型:激光扫描式、圆盘扫描式和可编程序阵列扫描式<sup>[41]</sup>。激光扫描模式下,显微镜的光源单孔和检测单孔位于光学共轭平面内,光源发出的光束通过光源孔,由光栅扫描整个被测表面从而重构出共焦图像;圆盘扫描模式下,平行光束入射至 Nipkow 盘<sup>[42]</sup>,圆盘作为照明和检测孔光阑的光学测量仪器,高速旋转以辨别整个被测表面的微观高度;可编程序阵列扫描模式下,位于显微镜光阑位置处的微投影机可用于产生光源或者检测模式,三维表面粗糙度的测量就可以通过光源模式或者光源和检测两种模式的结合来完成。PSI 仅限于测量光滑表面,WLI 和共聚焦类仪器有更大的垂直测量范围。德国 Mahr 公司 MarSurf CWM 100 光学测量仪包含共聚焦显微和白光干涉两种模式,其中共聚焦垂直测量范围最高可达  $800\ \mu\text{m}$ ,而相移干涉原理类测量仪的垂直测量范围一般不超过  $1\ \mu\text{m}$ 。

由于非散射光表面的局部可测斜率主要是由物镜的数值孔径决定的,而共聚焦显微镜拥有较大的数值孔径,因此共聚焦显微法可用于测量表面局部斜率的物件。共聚焦显微镜检测孔的独特空间滤波作用使得该方法具有一定的抗散射光干扰能力,另外共聚焦类仪器具有较高的横向分辨率,优秀的纵向层析成像能力使它能够进行多种纵向距离扫描。共聚焦显微法的垂直分辨率主要受物镜的数值孔径限制,垂直分辨率在纳米级,垂直量程限制主要由驱动电机的垂直移动范围决定。多年的发展已使共聚焦显微镜成为精确描述三维表面微观复杂结构的一种强大的工具<sup>[43]</sup>。

#### 2.2.5 共聚焦色差显微法

共聚焦系统测量微观表面高度,需要移动物镜或者工作台垂直扫描被测表面。共聚焦色差显微法的提出改变了三维测量扫描的方式。共聚焦色差显微镜的测量部分主要包括共聚焦色差探头和横向扫描系统。共聚焦色差探头以点扫描的方式测量被测样品表面,表面上不同高度共焦点反射的光束波长也是不同的<sup>[44]</sup>,测得波长与被测表面测量点的微观高度值具有对应关系。横向扫描系统则允许测量沿平面横向方向进行。

共聚焦色差显微法测量表面形貌是通过检测反射光束波长实现的,仪器的检测系统使用的是分光仪并非 CCD。作为一个单点测量技术,共聚焦色差轮廓仪的工作过程相似于触针式轮廓仪,

所以可以对它建立横向扫描轮廓的长度。

1984 年, Molesini 等人<sup>[45]</sup>首次提出共聚焦色差显微法。1992 年, Browne 等人<sup>[46]</sup>将这种方法应用到共焦显微镜中。目前, 共焦显微镜色差探头已经与光学表面测量轮廓仪一体化超过 10 年。美国 NANOVEA 公司的共聚焦色差测量仪使用 Motifs 评定方法, 能够测量多种三维表面粗糙度参数。英国 Taylor-Hobson 公司 CLI 系列轮廓仪可装配多种色差传感器。

共聚焦物镜敏感于周围的干扰光和从被测表面反射过来的散射光, 而共聚焦色差显微镜较之传统共聚焦显微镜的不同在于将物镜替换为色差探头, 以创造出色散。色差探头在获得表面微观高度信息的过程中无需垂直扫描, 从而减少了机械振动造成的误差, 增加了光学探头的稳定性。但共聚焦色差显微法由于单点测量的方式, 测量效率并不高。当被测表面含有局部球形形貌时, 探头可能会得到错误的共焦点。总之, 共聚焦色差显微法由于不受样品反射率和周围环境干扰光的影响, 并且可测高坡度高曲折度的三维表面的特性, 在三维粗糙度测量领域的优势性愈突出。

#### 2.2.6 点自动对焦法

点自动对焦法测量表面粗糙度时, 由激光源发出的激光束自动聚焦于被测表面上一点<sup>[47]</sup>, 承载被测物件的高精度工作台进行平面两个坐标轴的移动, 使仪器完成对被测区域的完整扫描从而得到焦点处的微观表面高度信息。

20 世纪 80 年代开始, 专家学者对共焦原理的位移传感器及其误差进行了详细的实验分析<sup>[48-50]</sup>。2005 年, Fukatsu 和 Yanagi 为了减少散斑噪声对光学触针仪器测量结果的影响, 使用点自动对焦法中的刃边法开发了新的光学触针轮廓系统<sup>[51]</sup>。实验过程中, 使用触针扫描法和点自动对焦法测量样品的三维粗糙度参数  $S_a$ , 并进行了比较。2011 年, Miurahe 和 Nose 对点自动对焦法的现有类型做了详细总结, 并介绍了它在三维粗糙度测量领域的应用<sup>[52]</sup>。

传统光学显微轮廓仪的垂直分辨率主要是由物镜景深决定的, 但是点自动对焦类仪器的垂直分辨率取决于自动对焦装置和线性标尺分辨率的重复性。点自动对焦法保留了共焦法可测量陡峭表面的优势, 且对表面反射率无严格的要求。点自动对焦法和触针式仪器的测量范围相近, 因此

该方法可对较大面积的被测表面进行微观高度的测量。另外, 点自动对焦法具有陡峭表面测量能力以及颜色提取能力, 同时具有较高的精确度。但是点自动对焦法为点扫描式测量, 测量速度并不快, 这与成像式的共焦法存在差异。

目前, 点自动对焦法主要应用在超精密机械加工领域, 另外可对触针式仪器进行校准。但是该方法受机械振动及温度的影响较大, 因此未来为了提高点自动对焦法的精度, 需要对振动隔离系统和温度漂移进行深入研究。

#### 2.2.7 变焦法

变焦法测量三维表面粗糙度的原理如图 7 所示, 它利用探头测量被测样本表面, 对比传输到 CCD 的共焦信号的强弱, 在表面等高位置处形成最佳焦点, 由仪器记录整个被测表面的最佳焦点数据, 以此得到表面微观高度信息。

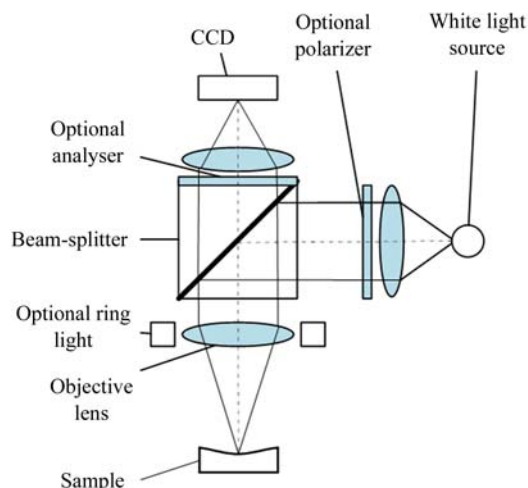


图 7 变焦法测量样品表面示意图

Fig. 7 Schematic of focus variation method for areal roughness measurement

变焦法的基本理论早在 1924 年就由 Helmholtz 等人<sup>[53]</sup>提出, 但是目前基于变焦法原理的粗糙度测量仪器并不多。奥地利 alicona 公司旗下 InfiniteFocus 系列自动变焦测量仪的垂直分辨率可达 10 nm, 测得的最小三维粗糙度参数  $S_a$  为  $0.015 \mu\text{m}$ , 最大可测侧壁倾角为  $87^\circ$ 。

作为一种使用有限景深进行垂直扫描的光学测量方法, 变焦法的焦点测量曲线与共焦法相比在扫描方向上具有更大的宽度, 扫描轴能够获得更多的样本点, 因此变焦法的垂直分辨率较高, 计

算结果更准确。在实际生产过程中,由于振动频谱通常呈高斯分布,因此变焦法受振动强度和扫描轴高频误差的影响较小。共聚焦仪器同轴照明的单一性会限制最大可测倾斜角度,而使用变焦法测量陡峭表面无需考虑这一因素<sup>[54]</sup>。点自动对焦法的扫描方式为点扫描式,样本需要横向移动,仪器追踪表面高度以获得完整的表面形貌图,而变焦法为面扫描式测量,因此变焦法的测量效率要明显高于点自动对焦法。另外,变焦法和点自动对焦法具有颜色信息提取能力,当测量要求包含样品颜色时,变焦法和点自动对焦法是较为理想的选择。

2.2.8 光切法

光切法是利用光切原理<sup>[55]</sup>对三维表面形貌进行测量的,这种方法结合光切显微镜和计算机视觉系统来达到三维表面粗糙度测量的目的。测量过程中,光源发出平行光以一定角度(一般为45°)入射到被测表面,光切显微镜用来观察被测样品的表面形貌轮廓,计算机视觉系统捕捉连续的轮廓图像并记录反映微观表面截断轮廓的弯曲光带,最后由相应的软件计算出三维表面粗糙度值或者描绘出三维表面形貌图<sup>[56]</sup>。光切法原理示意图如图 8 所示。

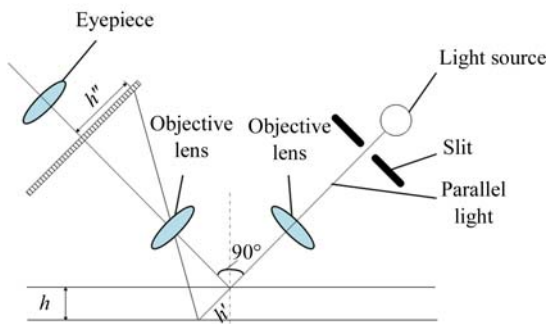


图 8 光切法测量样品表面示意图

Fig. 8 Schematic of light sectioning method for areal roughness measurement

图中光切显微镜所成像的波峰和波谷分别为  $h''$  和  $h'$ , 则物镜放大倍数  $\beta$  为  $\beta = h''/h'$ 。所以根据图中几何关系可得被测表面微观峰谷距离为:

$$h = h' \cos 45^\circ = \frac{h''}{\beta} \cos 45^\circ. \quad (2)$$

1936 年, Schmalz 首次提出光切法的理论<sup>[57]</sup>。2010 年, Ossama 利用光切显微镜结合计算机视觉系统测量了不同类型机械加工得到的样

品表面,并将三维粗糙度参数测量系统的误差控制在  $\pm 4.8\%$ <sup>[58]</sup>。

光切法的测量方式为面扫描式,其测量速度较快。另外光切法的成本并不高,具有动态特性,能实现在线检测<sup>[59]</sup>。但是受物镜景深的限制,光切法适合车、刨、铣等加工表面的粗糙度检测;受物镜分辨率的影响,光切法的垂直分辨率最高只能达到微米级,因此无法应用于高精度磨削、抛光表面的检测。光切法通常在工厂车间中用于零件的表面质量检测,但是该方法实时、快速和非接触测量的特点使它有希望应用于零件表面的三维粗糙度测量中。

2.2.9 激光三角法

结构光投影测量是将已知结构或图案的光图像投影至被测表面,通过分析反射光图案和入射光的结构信息来获得表面形貌轮廓的过程。光切法使用的是平行光,若结构光是一个单独的聚焦光点或一条直线时,该方法被称为三角法。激光三角法通过分析经过样品三维表面形貌调制的光场来获得样品表面的三维表面粗糙度。测量过程中,激光器及其发出的光束,成像物镜及其透过的光束和 CCD 线阵三者位于同一平面。光源激光器发出光束,经聚焦透镜后转变为点光斑入射至被测表面,光斑在表面微观高度的位置与物镜成像在 CCD 线阵的位置相互对应,利用几何光学通过逐点扫描便可得到三维表面的微观形貌高度<sup>[60]</sup>。根据激光器投射光束与被测表面的位置关系可将激光三角法的测量类型分为直射式和斜射式两种形式,如图 9 所示。

基于斯凯姆普夫拉格 (Scheimpflug) 条件和高斯定理,根据几何光学可计算出被测表面的位移量  $y, y'$  与像点位移  $\Delta x, \Delta x'$  的关系<sup>[61]</sup>。直射式

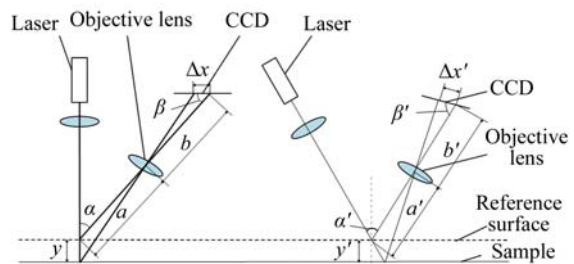


图 9 直射式和斜射式激光三角法原理图

Fig. 9 Schematic of direct and oblique laser triangulation methods

关系方程为:

$$y = \frac{a\Delta x \sin \beta}{b \sin \beta - \Delta x \sin(\alpha + \beta)}. \quad (3)$$

若斜射式激光三角法为对称式时,关系方程为:

$$y' = \frac{a'\Delta x' \sin \beta'}{b' \sin \alpha' - \Delta x' \sin(\alpha' + \beta')} \cos(\alpha'/2). \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 和 $\alpha'$ 是工作角, $\beta$ 和 $\beta'$ 为 CCD 与物镜光轴的夹角, $a, a'$ 与 $b, b'$ 分别是物距和像距。

激光三角法测量三维表面粗糙度具有无损、实时、材料适应性较广等优势。直射式三角法仪器结构紧凑,量程较大且易于实现,但是由于成像物镜尺寸的限制,该方法分辨率较低,受干扰光影响较大。斜射式三角法分辨率高,但是测量范围小,仪器体积大,安装校准困难。激光三角法结构简单,拥有较大的测量范围以及偏置距离。其中,

直射式和斜射式两种结构可对调使用以适应不同的表面状况。但由于激光三角法为逐点扫描式测量,其测量效率不及光切法。目前,激光三角法在复杂曲面快速测量领域有着广泛的应用。人们针对激光三角法的精度提升进行了详细的研究<sup>[62-63]</sup>。由于激光三角法可结合数字图像处理系统提升测量精度,未来结合计算机技术,该方法在复杂曲面三维粗糙度测量方向有较好的发展前景。

#### 2.2.10 非接触式测量法总结

非接触式测量法适用于被测工件表面连续、斜率适度的情况,因为入射光到达表面深谷会引起多重散射,进而影响测量结果的准确性。不同方法适用的测量范围有所区别,如共聚焦色差显微法可以测量透明材料,而其他共焦原理的测量方法却很难做到。表 1 总结了现有的三维表面粗糙度光学测量法的测量特性<sup>[64-67]</sup>。

表 1 三维表面粗糙度非接触式测量法比较

Tab. 1 Comparison of non-contact measurement methods for areal surface roughness measurement

	白光干涉法	数字全息法	共聚焦显微法	共聚焦色差显微法	点自动对焦法	变焦法	光切法	激光三角法
仪器最高垂直分辨率/nm	0.05	0.1	1	10	1	10	935	100
仪器最高横向分辨率/nm	50	300	50	1 000	10	NA	1 316	100
仪器最大垂直测量范围	8 mm	200 $\mu\text{m}$	1 mm	300 $\mu\text{m}$	10 mm	6.54 mm	120 $\mu\text{m}$	5 mm
扫描模式	面扫描式	CCD 记录全息图	面扫描式	逐点扫描式	逐点扫描式	面扫描式	面扫描式	逐点扫描式
扫描方向	垂直扫描	无	垂直扫描	横向扫描	横向扫描	垂直扫描	横向扫描	横向扫描
被测样品要求	样品表面高精度、超光滑	表面非散射特性	非透明或半透明材料	样品表面非球形形貌	非透明或半透明材料	非高精度表面、非透明材料	非高精度、非较粗糙表面	非高精度、非较粗糙表面
陡峭表面测量能力	弱	弱	强	强	强	强	弱	强
测量特性	高垂直分辨率、高测量效率	高垂直分辨率、高测量效率、实时测量	高测量效率、抗散射光干扰	抗散射光干扰、受被测材料影响较小	高精度、颜色信息提取	高测量效率、抗震能力强、颜色信息提取	高测量效率、实时测量、低测量成本	较强测量适应能力、实时测量
适用范围	超精密机械加工领域、实验研究	抛光表面、认证计量、复杂或间断表面测量	超精密机械加工领域、实验研究、表面高反射率样品	循环轮廓测量、自由曲面、MEMS	超精密机械加工领域、大面积样品、触针仪器校准	高速测量、颜色信息提取、磨损检测	工厂车间车、刨、铣等低精度要求加工样品表面	工厂车间车、刨、铣等低精度要求加工样品表面、复杂曲面

### 2.3 纳米表面粗糙度分析法

1971年,Young<sup>[68]</sup>设计了"Topographer",仪器达到了纳米级的分辨率,之后扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)开始运用到高精度的表面粗糙度测量过程。纳米表面粗糙度分析法中,扫描电子显微法的测量方式为反射式。扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope, SPM)是根据探针与被测表面相互作用所表现出的不同特性来实现三维粗糙度测量的。依据相应的物理原理,SPM已经延伸了包括原子力显微镜(AFM)、扫描隧道显微镜(STM)和扫描近场光学显微镜(SNOM)等扫描显微镜。

#### 2.3.1 扫描电子显微法

在SEM测量粗糙度的过程中,电子经电镜发射腔内的高压加速,形成的电子束在光栅扫描中撞击被测样品表面产生二级电子,通过检测二级电子强度,使扫描得到的信号在阴极射线管生成表面微观图像以提取表面的微观信息。

1985年,Suganuma<sup>[69]</sup>使用装有两个二级电子检测器的SEM仪器测量表面形貌,在垂直方向上得到了2 nm的分辨率。而对于三维表面粗糙度的测量,则至少需要3个二级电子检测器。

与触针式仪器的成像轮廓相比,SEM仪器与真实轮廓的关联性更好。由于SEM仪器发射的电子束的数值孔径非常小,等效波长小,因此SEM仪器可以获得较大的成像深度,但是其较深的景深可能会导致成像模糊。另外,SEM仪器的横向和垂直分辨率与SPM仪器相比较低。仪器在测量物体的尖锐边缘时存在图像变形的可能,这个特性会造成校准困难。不同撞击粒子用于被测样本表面测量得到的结果会有所不同,未来SEM可基于这一特点增加测量样品的种类。

#### 2.3.2 扫描隧道显微法

1982年,Gerd Binnig和他的导师Heinrich Rohrer等发明了扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, STM)<sup>[70]</sup>,其基本原理为量子力学原理中的隧道效应,即基于粒子波动性,一个势垒中的粒子越过势垒出现在另一边的几率不为零。STM测量过程中,仪器的金属针尖根据两种工作模式(恒电流模式和恒高度模式)接近被测表面,金属针尖与被测导体表面之间通入偏置电压,金属触针与被测导体间产生隧道电流。根据工作模式的不同,通过测量针尖的垂直位移或者电压的变化可以得到表面形貌的微观高度信息。STM工作过程中,隧道电流极敏感于测量间

距,探针与样品形成的隧道电流密度 $j$ 与两者之间距离 $s$ 的关系为:

$$j = (e^2/h) \cdot (k_0/4\pi^2) \cdot V_b \cdot e^{-2k_0 s}, \quad (5)$$

式中: $V_b$ 为金属探针与被测零件之间的偏置电压; $k_0 = 0.5 \times 1.025 \times 0.5(\varphi_1 + \varphi_2)$ , $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ 分别为探针和被测零件的功函数(eV); $e$ 为电子常量; $h$ 为普朗克常数。

目前,STM仪器的市场价格相比于光学干涉类粗糙度测量仪并不算高,国内有广州市本原纳米仪器有限公司NanoVisual教学型STM等,这些仪器主要用于实验研究阶段。

STM方法的恒高度测量模式适用于测量平坦表面,而恒电流模式测得的图像更加全面,应用更为广泛。STM仪器可在常温或者真空的环境下工作,适用于测量导体或半导体材料。而不导电的被测物则需要进行金属镀膜处理,但是镀膜处理可能会掩盖被测表面的真实表面形貌。虽然使用STM方法测量三维粗糙度要求苛刻,但是该方法是近些年国内外三维粗糙度测量分辨率最高的方法之一。

#### 2.3.3 扫描近场光学显微法

近场“依附”于物体表面,是距物体表面几个波长距离之内的区域。近场中包含隐失波成分,其强度随距离的增加呈指数衰减,而隐失波中包含物体表面结构的高频成分信息。扫描近场光学显微镜(Scanning Near-field Optical Microscopy, SNOM)通过检测隐失场来获得被测物体表面的粗糙度信息<sup>[71]</sup>。SNOM测量时,使用光学探针测量被测样品表面的辐射,其中光学探针受孔阑限制,而被测样品表面的光学性质的量度由检测得到的辐射强度表征。SNOM的成像模式主要分为等高模式、等光强模式和剪切力模式3种。剪切力模式由于仪器操作方便和信噪比大等优点,是目前SNOM最常用的工作模式。

1983年,BIM苏黎世研究中心在被镀有金属膜的石英探针针尖处成功制备了纳米尺寸的透光孔,然后将探针结合隧道电流得到了 $\lambda/2$ 光学分辨率的图像<sup>[72]</sup>。SNOM仪器的分辨率与光学探针透光孔径具有相同的量级,因此显微镜的光学探针透光孔径通常小于波长。测量时,光学探针与被测样品的间距通常被控制在5~10 nm。

SNOM方法打破了传统光学显微镜理论分辨率的阿贝衍射极限,仪器的垂直分辨率可达2 nm,横向分辨率高达20 nm,但是SNOM仪器价格昂贵且光学探针在测量时易碰撞损坏。因

此,目前 SNOM 在三维表面粗糙度测量领域中并不多见,未来可通过使用新型探针来增加该方法在三维粗糙度测量中的应用。

#### 2.3.4 原子力显微镜法

由于扫描电子显微镜和扫描隧道显微镜仅限于测量导体和半导体,为解决这一问题,1986 年 STM 的发明者 Bining 和斯坦福大学的 Quate 等人<sup>[73]</sup>研制出原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)。AFM 基于原子间的范德华力进行测量。如图 8 所示,仪器的弹性微悬臂装配了微触针,测量时可根据微触针的作用力选择多种测试方式(接触、非接触、敲击),通过控制微悬臂或者工作台的位移对被测样品表面进行扫描,受范德华力影响的微触针描绘出的轮廓代表了表面微观形貌。其中,微悬臂的垂直移动量可用非接触式测量法来确定。

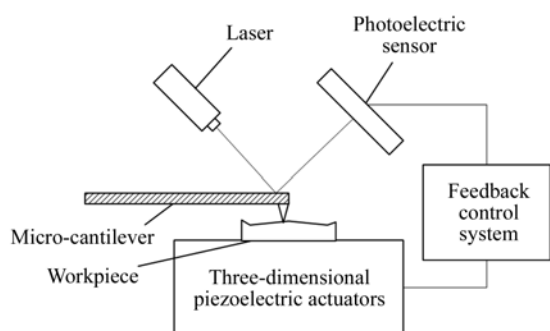


图 10 光反射原子力显微镜测表面形貌原理图

Fig. 10 Schematic of atomic force microscopy with light reflection for surface metrology

AFM 仪器触针的半径一般小于 10 nm,触针与表面的距离一般在 0.2~10 nm<sup>[74]</sup>,分辨率可

达原子级别。目前,国内外 AFM 生产商有苏州飞时曼精密仪器有限公司、美国 Bruker 公司、Veeco 公司等。

AFM 适用于测量用于实验研究的高精度光滑表面。与触针式仪器的工作方式相似,AFM 方法也是通过机械接触的排斥力来获得表面信息,但是 AFM 仪器的传感器拥有高灵敏度的力反馈一体化系统。虽然触针尺寸会影响 AFM 仪器和触针式仪器的横向分辨率;但是 AFM 镜受到的影响会小很多,因为相对于触针式仪器,AFM 的触针针尖尺寸和接触力明显更小。在纳米表面粗糙度分析法中,原子力显微法的测量环境较为宽松,并且可以测量非导电样品,但是其测量效率较低、测量范围小,并且一定程度的针尖磨损会导致测量结果的偏差较大。当被测表面较为陡峭时,AFM 方法很难完成测量。未来 AFM 仪器在三维表面粗糙度测量领域的发展包括更好的测量效率以及更高的成像稳定性,这也对数据处理软件提出了更高的要求。

#### 2.3.5 纳米表面粗糙度分析法总结

纳米表面粗糙度分析法适用于纳米尺度粗糙度的测量。该类方法中,SEM 通常比 SPM 有更大的视场,数据处理更为容易。而 SPM 则具有优异的空间分辨能力,STM 和 AFM 仪器的分辨率均可达原子级别。另外,SPM 的测量环境不局限于真空,可在大气甚至液体环境中实现测量。目前,SPM 已经是三维粗糙度分析类仪器的主流<sup>[75]</sup>,并且随着其他基于电学、磁学和力学等物理原理在 SPM 仪器中的使用,SPM 方法的应用范围仍在不断拓展。表 2 总结了现有纳米尺度分析类仪器在三维表面粗糙度测量领域的测量特性<sup>[76-77]</sup>。

表 2 SEM,STM,SNOM 和 AFM 的测量特性比较

Tab. 2 Comparison of measuring characteristics of SEM, STM, SNOM and AFM

	分辨率	测量速度	测量要求	测量特性
SEM	横向分辨率:10 nm 纵向分辨率:2 nm (原子级)	适中	测量环境真空、被测样品导电	测量范围较大
STM	横向分辨率:0.01 nm 纵向分辨率:0.1 nm	较慢	被测样品导电、装配减震装置、被测表面光滑	优异的空间分辨能力
SNOM	横向分辨率:20 nm 纵向分辨率:2 nm (原子级)	较慢	被测表面光滑、极小工作距离	动态测量
AFM	横向分辨率:0.01 nm 纵向分辨率:0.1 nm	较慢	被测表面光滑	应用范围广泛

### 3 结论与展望

本文详细阐述了现有的三维表面粗糙度测量方法,通过对其原理适用性的分析与对比,可以看出三维表面粗糙度测量仪器的发展逐渐成熟并商业化,而仪器基于的不同测量方法的优势主要取决于待测样品的性质和测量要求<sup>[78-79]</sup>。

接触式测量法具有测量范围大、精度高和重复性好的优势,但是其测量过程需要考虑测量方向和取样长度等因素。为了获得完整的微观表面高度数据,需要采集较多的数据,因此该方法的测量效率较低,并且存在损伤被测工件的可能性。

非接触式测量法具有非接触、高精度和高效率的特点。但是非接触式测量法对三维微观表面高度是非线性测量,测得的三维图像会因为表面污渍、缺陷或者倾斜边缘而丢失数据点,因此,测量后要根据需要进行数据点补偿。此外,非接触式测量法包含的测量误差种类较多,校准较为困难。

相对于接触式测量法的测量分辨率主要受触针半径的限制和非接触式测量法的横向分辨率通常与垂直分辨率差 3 个数量级<sup>[80]</sup>,纳米表面粗糙度分析法的测量精度较高,SPM 仪器的原子级分辨率能够真实还原被测样品的三维形貌,使得纳米级三维形貌分析技术的研究不断深入。但是电镜类仪器成本高、结构复杂、测量范围小,并且对测量环境有较高的要求。

#### 参考文献:

- [1] WHITEHOUSE D J. Surface metrology [J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8 (9): 955-972.
- [2] 刘斌,冯其波,匡萃方. 表面粗糙度测量方法综述 [J]. *光学仪器*, 2004, 26(5): 54-58.  
LIU B, FENG Q B, KUANG C F. Survey of measurement methods for surface roughness [J]. *Optical Instruments*, 2004, 26(5): 54-58. (in Chinese)
- [3] 蒋向前, Blunt L. 三维表面测量的发展 [J]. *工程设计*, 2000, 7(4): 98-100.  
JIANG X Q, BLUNT L. Advance in the three-dimensional surface metrology [J]. *Engineering Design*, 2000, 7(4): 98-100. (in Chinese)
- [4] ISO 25178-2 (2010). Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters. International Organization of Standardization [S].
- [5] DE GRIEVE D J, KALISZER H, ROWE G W. A normal wear process examined by measurements of surface topography [J]. *Ann. CIRP*, 1970, 18(4): 585-592.
- [6] CHIFFRE L D, NIELSEN H S. A digital system for surface roughness analysis of plane and cylindrical parts [J]. *Precision engineering*, 1987, 9(2): 59-64.
- [7] SHERRINGTON I, SMITH E H. Modern measurement techniques in surface metrology: part II; optical instruments [J]. *Wear*, 1988, 125 (3): 289-308.
- [8] DONG W P, SULLIVAN P J, STOUT K J. Com-

尽管三维表面粗糙度测量得到了广泛应用和快速发展,但现有方法仍存在较大的局限性:(1)鉴于测量成本、测量结果稳定性等因素的影响,高精度的三维表面粗糙度测量方法目前难以应用到在线检测中;(2)现有国际标准只对触针扫描仪器的三维测量及校准标准进行规定,其他三维粗糙度测量方法的计量特性标准还不完善;(3)现有测量方法很难实现对精密复杂立体形状的工件或者复杂曲面的三维粗糙度测量。

随着现代科学技术的发展,表面质量检测的要求越来越高,三维表面粗糙度参数的普及甚至代替二维表面粗糙度参数是表面计量行业发展的整体趋势。未来随着相关学科和仪器技术的进一步发展,三维表面粗糙度测量技术会得到进一步完善。非接触式测量法尤其是相移干涉法、相关扫描干涉法和共聚焦法仍具有较高的研究价值<sup>[81]</sup>。多种测量方法的组合例如触针扫描法结合非接触式测量法,可达纳米级的垂直分辨率,因此具有广阔的应用前景。

目前,我国三维粗糙度测量行业与国际相比还处于跟跑阶段,且国内的相关商业软件系统几乎空白。随着计算机技术及检测技术的发展,国内三维测量技术将会得到进一步发展,并走向成熟。工业 4.0 和中国制造 2025 的出台推进了智能化技术在生产过程中的应用,因此,在线实时、无损、定量、高精度、高效率 and 智能一体化检测是未来三维粗糙度测量的发展方向。

- prehensive study of parameters for characterizing three-dimensional surface topography II: Statistical properties of parameter variation [J]. *Wear*, 1993, 167(1): 9-21.
- [9] LEARCH R, GIUSCA C, HENNING A, *et al.*. *ISO Definition of Resolution for Surface Topography Measuring Instruments* [M]// OSTEN W. Berlin: Springer, 2014:405-410.
- [10] NGUYEN A T, LEE BUTLER D. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterization [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208(1-3):14-23.
- [11] ISO. ISO 25178-6: 2010. Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 6: Classification of methods for measuring surface texture. International Organization of Standardization [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 33523. 6-2017 产品几何技术规范(GPS) 表面结构 区域法 第 6 部分: 表面结构测量方法的分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. *Standardization Administration of China*. GB/T 33523. 6-2017 *Geometrical Product Specifications (GPS)-surface texture: areal-part 6: Classification of methods for measuring surface texture* [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [13] 李伯奎. 触针式三维粗糙度测量仪的开发及应用[J]. *润滑与密封*, 2006(4):140-142.
- LI B K. Development and application of the roughness measuring instrument of stylus and three-dimensional [J]. *Lubrication Engineering*, 2006 (4):140-142. (in Chinese)
- [14] 李成贵, 董申. 3D 表面粗糙度的测量方法分析[J]. *航空精密制造技术*, 1999, 32(2): 36-40.
- LI CH G, DONG SH. Length calculation method of welded rod blanks roughness[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 1999, 32(2): 36-40. (in Chinese)
- [15] ABBOTT E J, FIRESTONE F A. Apparatus for determining roughness of surfaces: U. S. Patent 2,048,154 [P]. 1936-7-21.
- [16] 唐文彦, 张军, 李慧鹏. 触针法测量表面粗糙度的发展及现状[C]// 中国机械工程学会先进制造技术与齿轮学术会议, 2000.
- TANG W Y, ZHANG J, LI H P. The development and current situation of surface roughness measured by contact method [C]// *The Academic conference of Advanced Manufacturing Technology and gear of China Mechanical Engineering Society*, 2000. (in Chinese)
- [17] WHITEHOUSE D J. Comparison between stylus and optical methods for measuring surfaces [J]. *CIRP Annals*, 1988, 37(2): 649-653.
- [18] STEDMAN M, LINDSEY K. Limits of surface measurement by stylus instruments [J]. *SPIE*, 1989, 1009: 56-62.
- [19] 杨杰, 卢静, 王俊, 等. 触针式三维粗糙度仪的设计[J]. *机械设计与制造*, 2013(5): 29-31.
- YANG J, LU J, WANG J, *et al.*. The design of three-dimensional roughmeter [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2013(5): 29-31. (in Chinese)
- [20] 张也晗, 崔彤, 张扬, 等. 表面粗糙度三维测量和评定的研究[J]. *计量与测试技术*, 2012, 39(11): 31-32, 34.
- ZHANG Y H, CUI T, ZHANG Y, *et al.*. Research of surface roughness three-dimensional measurement and evaluation [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2012, 39(11): 31-32, 34. (in Chinese)
- [21] BRUNING J H, HERRIOTT D R, GALLAGHER J E, *et al.*. Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Applied optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [22] 常素萍. 基于白光干涉轮廓尺寸与形貌非接触测量方法和系统[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- CHANG S P. *The Surface Shape and Profile Dimension Measurement Method and System Based on White-light Interferometric Technology* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [23] WYANT J C, KOLIOPOULOS C L, BHUSHAN B, *et al.*. Development of a three-dimensional noncontact digital optical profiler [J]. *Journal of Tribology*, 1986, 108(1): 1-8.
- [24] KOLIOPOULOS C L. *Interferometric Optical Phase Measurement Techniques* [D]. Tucson:

- The University of Arizona, 1981.
- [25] WYANT J C, KOLIOPOULOS C L, BHUSHAN B, *et al.*. An optical profilometer for surface characterization of magnetic media [J]. *ASLE transactions*, 1984, 27(2): 101-113.
- [26] 童晓蕾, 李玉和, 林浩山, 等. 超精表面三维形貌相移干涉检测实验研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2009, 23(12): 65-69.
- TONG X L, LI Y H, LIN H SH, *et al.*. Research on phase-shifting interferometry contrast three-dimensional topography of ultra precision surface [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2009, 23(12): 65-69. (in Chinese)
- [27] KINO G S, CHIM S S C. Mirau correlation microscope [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(26): 3775-3783.
- [28] DRESEL T, HÄUSLER G, VENZKE H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(7): 919-925.
- [29] HAEUSLER G, NEUMANN J. Coherence radar: an accurate 3D sensor for rough surfaces [J]. *SPIE*, 1993, 1822: 200-205.
- [30] CABER P J. Interferometric profiler for rough surfaces [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(19): 3438-3441.
- [31] LEACH R K, BROWN L, JIANG X, *et al.*. Guide to the measurement of smooth surface topography using coherence scanning interferometry [R]. *Measurement good Practice Guide No. 108*. Hampton Road, Teddington, Middlesex: National Physical Laboratory, 2008: 17.
- [32] 陈竹, 姜宏振, 刘旭, 等. 数字全息术用于光学元件表面缺陷形貌测量[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 576-583.
- CHEN ZH, JIANG H ZH, LIU X, *et al.*. Measurement of surface defects of optical elements using digital holography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 576-583. (in Chinese)
- [33] GABOR D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [34] 陈刚, 周文静, 胡祯, 等. 表面粗糙度数字全息检测[J]. *应用光学*, 2014, 35(6): 1040-1047.
- CHEN G, ZHOU W J, HU ZH, *et al.*. Surface roughness measurement based on digital holography [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(6): 1040-1047. (in Chinese)
- [35] COLOMB T, KÜHN J, DEPEURSINGE C, *et al.*. Several micron-range measurements with sub-nanometric resolution by the use of dual-wavelength digital holography and vertical scanning [J]. *SPIE*, 2009, 7389: 73891H.
- [36] KIM M K. *Digital Holographic Microscopy* [M]. New York: Springer, 2011: 209-235.
- [37] MINSKY M. Confocal patent focal scanning microscope: US, 3013467[P]. 1957.
- [38] DAVIDOVITS P, EGGER M D. Scanning laser microscope for biological investigations [J]. *Applied optics*, 1971, 10(7): 1615-1619.
- [39] WINDECKER R, FLEISCHER M, TIZIANI H J. Low-coherence fiber-optic sensor with a large numerical aperture for topographic measurements [J]. *Applied optics*, 1998, 37(19): 4080-4083.
- [40] YANG L S, WANG G Y, WANG J G, *et al.*. Surface profilometry with a fibre optical confocal scanning microscope [J]. *Measurement Science and Technology*, 2000, 11(12): 1786-1791.
- [41] ARTIGAS R. *Imaging confocal microscopy* [M]// LEACH R. *Optical Measurement of Surface Topography*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011: 237-286.
- [42] XIAO G Q, CORLE T R, KINO G S. Real-time confocal scanning optical microscope [J]. *Applied physics letters*, 1988, 53(8): 716-718.
- [43] JORDAN H J, BRODMANN R, GRIGAT M, *et al.*. Quality assurance of HARMS and MOEMS surface structures using confocal white light microscopy [J]. *SPIE*, 2001, 4440: 51-58.
- [44] COHEN-SABBAN J, GAILLARD-GROLEAS J, CREPIN P J. Quasi-confocal extended field surface sensing [J]. *SPIE*, 2001, 4449: 178-183.
- [45] MOLESINI G, PEDRINI G, POGGI P, *et al.*. Focus-wavelength encoded optical profilometer [J]. *Optics Communications*, 1984, 49(4): 229-233.
- [46] BROWNE M A, AKINYEMI O, BOYDE A. Confocal surface profiling utilizing chromatic aberration [J]. *Scanning*, 1992, 14(3): 145-153.
- [47] MIURA K, OKADA M, TAMAKI J. Three-dimensional measurement of wheel surface topography with a laser beam probe [J]. *Advances in Abrasive Technology*, 2000, 3: 303-308.
- [48] MITSUI K. In-process sensors for surface roughness and their applications [J]. *Precision Engineering*, 1986, 8(4): 212-220.

- [49] MASHIMO K, KITABAYASHI S, TANIMURA Y. Optical & noncontact measuring instrument for 3-D shape [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1993, 59(7):1091-1096.
- [50] YANG CH L, PU ZH B, ZHAO H J. Diffraction analysis and evaluation of a focus-error detection scheme for an optical profilometer [J]. *SPIE*, 2000;180-184.
- [51] FUKATSU H, YANAGI K. Development of an optical stylus displacement sensor for surface profiling instruments [J]. *Microsystem Technologies*, 2005, 11(8-10):582-589.
- [52] MIURA K, NOSE A. Point Autofocus Instruments [M]// LEACH R. *Optical Measurement of Surface Topography*. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [53] VON HELMHOLTZ H. *Mechanism of Accommodation*[M]// SOUTHALL J P C. *Helmholtz's Treatise on Physiological Optics*, New York: Optical Society of America, 1924.
- [54] DANZL R, HELMLI F, SCHERER S. Focus variation—a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology [J]. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 57(3): 245-256.
- [55] HÄUSLER G, HECKEL W. Light sectioning with large depth and high resolution [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(24): 5165-5169.
- [56] 陈晓荣, 蔡萍, 施文康. 光学非接触三维形貌测量技术新进展[J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(5): 528-532.  
CHEN X R, CAI P, SHI W K. The latest development of optical non-contact 3D profile measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(5): 528-532. (in Chinese)
- [57] SCHMALTZ G. *Technische Oberflächenkunde* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 1936.
- [58] ABOUELATTA O B. 3D surface roughness measurement using a light sectioning vision system [C]. *Proceedings of World Congress on Engineering, International Association of Engineers*, 2010: 698-703.
- [59] 金守峰, 陈蓉, 范荻, 等. 机加工表面粗糙度的光切显微成像测量方法与试验研究[J]. *制造业自动化*, 2016, 38(4): 15-19.  
JIN SH F, CHEN R, FAN D, *et al.*. Measurement and experiment of light-section microscope images on machined surface roughness [J]. *Manufacturing Automation*, 2016, 38(4): 15-19. (in Chinese)
- [60] 崔凤奎, 宋战波, 王晓强, 等. 三维表面粗糙度激光三角法测量原理研究[J]. *矿山机械*, 2010, 38(14): 30-33.  
CUI F K, SONG ZH B, WANG X Q, *et al.*. Study on principle of laser triangulation used for measurement of 3D surface roughness [J]. *Mining & Processing Equipment*, 2010, 38(14): 30-33. (in Chinese)
- [61] 卢晋人, 黄元庆. 激光三角法测量表面形貌[J]. *厦门大学学报:自然科学版*, 2004, 43(1):50-53.  
LU J R, HUANG Y Q. Laser triangulation method for surface measurement [J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*, 2004, 43(1): 50-53. (in Chinese)
- [62] 吴剑锋, 王文, 陈子辰. 激光三角法测量误差分析与精度提高研究[J]. *机电工程*, 2003, 20(5): 89-91.  
WU J F, WANG W, CHEN Z CH. Study on the analysis for error in triangular laser measurement and the method of improving accuracy [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Magazine*, 2003, 20(5): 89-91. (in Chinese)
- [63] 常城, 张志峰. 激光三角法测量的误差研究[J]. *中国科技信息*, 2006 (23): 61-62,64.  
CHANG CH, ZHANG ZH F. Study on the error in triangular laser measurement [J]. *China Science and Technology Information*, 2006 (23): 61-62, 64. (in Chinese)
- [64] LONARDO P M, TRUMPOLD H, DE CHIFFRE L. Progress in 3D surface microtopography characterization [J]. *CIRP Annals*, 1996, 45(2): 589-598.
- [65] COLOMB T, KRIVÉC S, HUTTER H, *et al.*. Digital holographic reflectometry [J]. *Optics Express*, 2010, 18(4):3719-3731.
- [66] MYSHKIN N K, GRIGORIEV A Y, CHIZHIKS A, *et al.*. Surface roughness and texture analysis in microscale [J]. *Wear*, 2003, 254(10): 1001-1009.
- [67] THIAN S C H, FENG W, WONG Y S, *et al.*. Dimensional measurement of 3D microstructure based on white light interferometer [C]// *Proceedings of the 4th International Symposium on Instrumentation and Science and Technology*,

- Chinese Society for Measurement, CIS, 2006: 1435.
- [68] YOUNG R D. Surface microtopography [J]. *Physics Today*, 1971, 24(11): 42.
- [69] SUGANUMA T. Measurement of surface topography using SEM with two secondary electron detectors [J]. *Journal of Electron Microscopy*, 1985, 34(4): 328-337.
- [70] BINNIG G, ROHRER H, GERBER C, *et al.*. Tunneling through a controllable vacuum gap [J]. *Applied Physics Letters*, 1982, 40(2): 178-180.
- [71] 朱星. 扫描近场光学显微镜[J]. *现代科学仪器*, 1996(4):7-9.  
ZHU X. Scanning near-field optical microscopy [J]. *Modern Scientific Instruments*, 1996(4):7-9, (in Chinese)
- [72] DÜRIG U, POHL D W, ROHNER F. Near-field optical-scanning microscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 59(10):3318 - 3327.
- [73] BINNIG G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope [J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(9): 930-933.
- [74] DE OLIVEIRA R R L, ALBUQUERQUE D A C, CRUZ T G S, *et al.*. *Measurement of the nanoscale roughness by atomic force microscopy: basic principles and applications* [M]// BELLITTO V. *Atomic Force Microscopy-Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. InTech, 2012.
- [75] MATHIA T G, PAWLUS P, WIECZOROWSKI M. Recent trends in surface metrology [J]. *Wear*, 2011, 271(3-4): 494-508.
- [76] 周明宝, 林大键, 郭履容, 等. 微结构表面形貌的测量[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(3):7-13.  
ZHOU M B, LIN D J, GUO L R, *et al.*. Measurement of microstructures topography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(3):7-13. (in Chinese)
- [77] HAIDAR Y, DE FORNEL F, ZEROUKI C, *et al.*. Study of the roughness and optical near field of mass surface by using a SNOM with shear-force regulation [J]. *SPIE*, 2004, 5458:171-182.
- [78] NEMOTO K, YANAGI K, AKETAGAWA M, *et al.*. Development of a roughness measurement standard with irregular surface topography for improving 3D surface texture measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(8): 084023.
- [79] CONROY M, ARMSTRONG J. A comparison of surface metrology techniques [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2005, 13(3): 458.
- [80] 李剑白, 李达成, 李小芸, 等. 原子力显微镜测试光学超光滑表面微轮廓的研究[J]. *光学学报*, 2000, 20(11):1533-1537.  
LI J B, LI D CH, LI X Y, *et al.*. Study on testing method for microprofile of optical supersmooth surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, 20(11): 1533-1537. (in Chinese)
- [81] STOUT K J, SULLIVAN P J, DONG W P, *et al.*. *The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions* [M]. Birmingham: ECSC-EEC-EAEC, 1993.

#### 作者简介:



何宝凤(1983—),女,吉林白城人,博士,讲师,2006年、2009年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,2012年于英国拉夫堡大学获得博士学位,主要研究方向为精密测试技术与仪器。  
E-mail: baofenghe@bjut.edu.cn



石照耀(1964—),男,湖南岳阳人,博士,教育部长江学者特聘教授,1984年于合肥工业大学获得学士学位,1988年于陕西机械学院获得硕士学位,2001年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为精密测试技术及仪器。  
E-mail: shizhaoyao@bjut.edu.cn