

文章编号 1004-924X(2000)04-0309-07

表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法

王富生, 谭久彬

(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:较全面地介绍了用于表面微观轮廓测量的几种分辨率甚至可达亚纳米的光学测量方法及其最新进展。文中重点描述了以扫描共焦显微检测法、离焦误差检测法为代表的共焦针法,以 TOPO 轮廓仪、Nomarski 显微镜、外差干涉轮廓仪、双焦干涉轮廓仪和同轴干涉轮廓仪为代表的干涉测量法和以扫描近场光学显微镜及光子扫描隧道显微镜为代表的近场光学法三种适用于表面微观轮廓测量的光学测量方法,分别介绍了其工作原理、特性、发展现状及存在问题,通过对这些方法的对比和总结,阐述了表面微观轮廓纳米级光学测量的发展趋势。

关键词:表面微观轮廓; 光学测量方法; 高分辨率

中图分类号: TB92 **文献标识码:** A

1 引言

由于表面微观轮廓是保证和提高机械、电子及光学系统性能和质量的关键因素,在最近二十

年内,随着微电子技术、计算机技术、光学技术、传感技术、信号分析和处理技术等飞速发展,在表面测量领域出现了许多新技术和新方法,测量精度也不断提高,已从微米尺度进入到纳米甚至亚纳米尺度^[1]。

Table 1 Technical parameters and characteristics of typical optical measurement methods for surface profile

Method	Principle	Vertical resolution	Lateral resolution	Vertical range	Characteristics		
Optical probe	Scanning confocal microscopy	10nm	0.35 μ m		Higher vertical and lateral resolution; higher suppression of scattered light; Larger measurable inclination angle; But the resolution limited by the pinhole's size		
	Defocus error detection	Astigmatic	1nm		1 μ m	Higher vertical resolution; Higher stability; But smaller linear range	
		Critical angle	< 1nm	0.65 μ m		3 μ m	Higher resolution; Higher stability; But smaller linear range; Difficult adjustable
		Foucault knife	1nm	1 μ m			High vertical resolution; But small linear range; But smaller measurable inclination angle
	Skew beam				Simpler configuration; Larger work distance; But resolution limited by surface quality; Larger nonlinear error		
Interferometric	Dividual path	TOPO	0.1nm	0.35 μ m		Higher resolution; No mechanical scanner; But sensitive to exterior disturbance	
		Nomarski	0.1nm	1 μ m		4 μ m	Higher resolution; No mechanical scanner; insensitive to exterior disturbance; But result affected by surface inclination angle and position of prism
	Common path	Heterodyne	0.39nm	0.73 μ m		± 0.5 mm	Higher resolution; insensitive to exterior disturbance; But larger nonlinear error
		Double focus	0.1nm	1 μ m			Common-mode rejection; Insensitive to vibration and environment; Higher resolution; But error from the size of the reference optical pattern
Projection	Light-section	300nm	2 μ m			Simple structure, but lower vertical resolution	
Scatter meter	Light beam scatter	0.6nm	0.6 μ m			No mechanical scanner; But micro-surface variety expressed by statistic characteristic	
Near-field optics	Scanning near-field optical microscopy	20nm	20nm			High resolution; But larger area irradiation and more rigid requirement for the size and quality of the probe tip	
	Photon scanning tunnelling microscopy	1nm	10nm			Higher resolution; But larger area irradiation; Signal influenced by scattering light of attenuation field	

按传统的分类方式,表面测量可大致分为接触式测量和非接触式测量。机械触针式轮廓仪是典型的接触式测量仪器,虽然机械触针式测量方法具有较高的分辨率和可信度,且技术已发展得相当完善,但它存在有一定的触测力,测量时间长,需要进行测头半径补偿以及测头容易划伤被测表面或被硬质表面划伤等局限性。非接触式表面微观轮廓测量的方法有多种,如电容法、光学法、扫描电子显微镜法和扫描探针显微镜法等。由于这些方法在溯源到米定义的时候,仍需要利用激光干涉仪等光学方法进行标定和校正,因而光学测量方法的研究在世界上倍受重视^[2]。光学测量法中,尤以光触针法和干涉测量法最为常见和发展最快,其他常见的光学方法有:投影法、光散射法和扫描近场光学显微镜法等。

为了对表面微观轮廓的光学测量技术现状有一个较全面的了解,表 1 给出了几种常见光学测量方法的特征和技术参数^[3-11]。

2 光触针式测量方法

光触针式微观轮廓测量方法在原理上类似于机械触针式测量方法,只不过触针是聚光光束,然后利用不同的光学原理来检测被测表面轮廓相对于聚焦光学系统的微小间距变化。其垂直分辨率可以达到纳米级,水平分辨率受照亮点的尺寸限制,即受衍射极限的限制。按照几何光学划分,光触针式可分为扫描共焦显微镜检测法和离焦误差检测两种。

2.1 扫描共焦显微镜检测法

扫描共焦显微镜的基本思想是实现光源、被照物点和探测器三点处于彼此对应的共轭位置,其工作原理如图 1 所示。光源经过物镜在样品表面聚焦成衍射极限的光点,其反射光沿原路返回,再通过分光镜将来自样品的光信号导入作空间滤波器的共焦针孔内,通过扫描聚焦点在样品上的位置对样品进行三维成像。由于其关键技术共焦针孔的引入,探测器只接收来自物镜焦点处的光信号,而焦点以外的光将被针孔屏蔽,因而共焦显微镜比常规显微镜的分辨能力要高得多,这样就可以利用光电探测器探测光强信号弱的变化来获得表面微观轮廓信息。

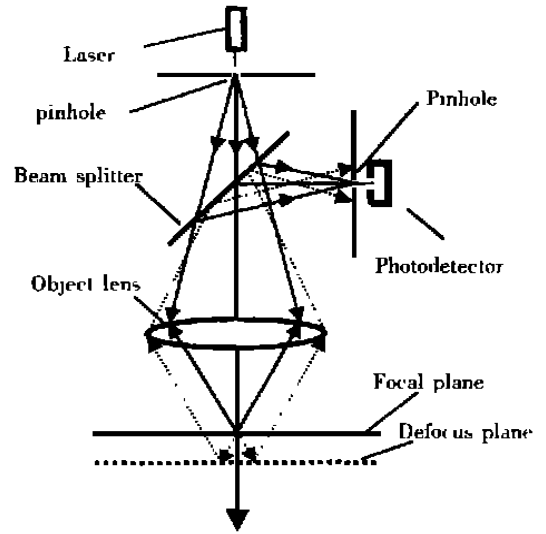


Fig. 1 The principle of confocal microscopy

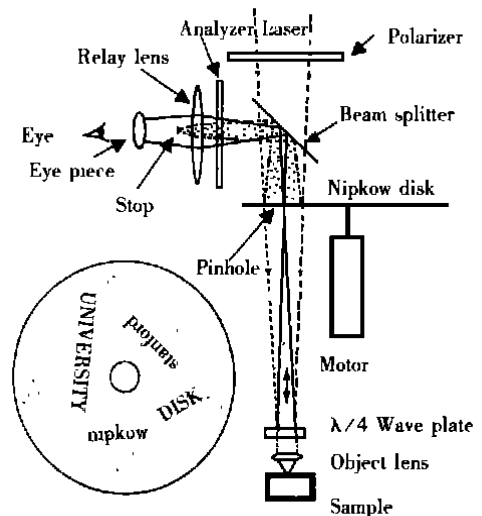


Fig. 2 Real-time confocal microscopy and Nipkow disk

共焦显微镜的思想由 M. Minsky 在 1957 年首次提出,随后许多学者(如 T. Wilson, C. J. R. Sheppard 和 K. Carlsson 等)对共焦系统作了进一步研究^[12-13]。目前,扫描共焦显微镜已被广泛应用于半导体、微电子器件、信息存储、工程表面测量、医学检测、化学分析以及生命科学研究等领域。特别是在工程表面微观轮廓测量中, D. K. Hamilton、K. Carlsson、H. J. Tiziani 以及 H. J. Jordan 等分别采用不同的光路及处理方法,使扫描共焦显微镜在垂直和水平分辨率不断提高。1998 年,德国学者 H. J. Jordan 研制了一种实时共焦显微镜,它采用旋转的 Nipkow 盘完成对工件的 X-Y 向扫描,用压电陶瓷驱动完成 Z 向扫

描,当使用 160×0.95 的物镜时,在工作距离为 $70 \mu\text{m}$ 的范围内,得到 10nm 的垂直分辨率和 $0.35 \mu\text{m}$ 的水平分辨率,可测最大倾角为 35.9° ^[3],其基本工作原理如图 2 所示。扫描共焦显微镜不仅具有良好的垂直和水平分辨率,可测倾角大等特点,而且由于其具有很好的深度响应特性,所以光强对比度强,抗杂散光能力强;但同时它也存在对针孔的尺寸和位置要求严格以及测量范围较小等不足。

2.2 离焦法

离焦误差检测法的基本原理是用光电检测器测量被测表面的微观起伏偏离显微物镜焦点的微小偏离量。利用离焦误差检测原理进行表面微观轮廓测量的方法有多种,较常见的主要由像散法、临界角法、傅科(Foucault)刀口法和偏心光束法等^[5],图 3 为这四种离焦误差检测法的光学原理。

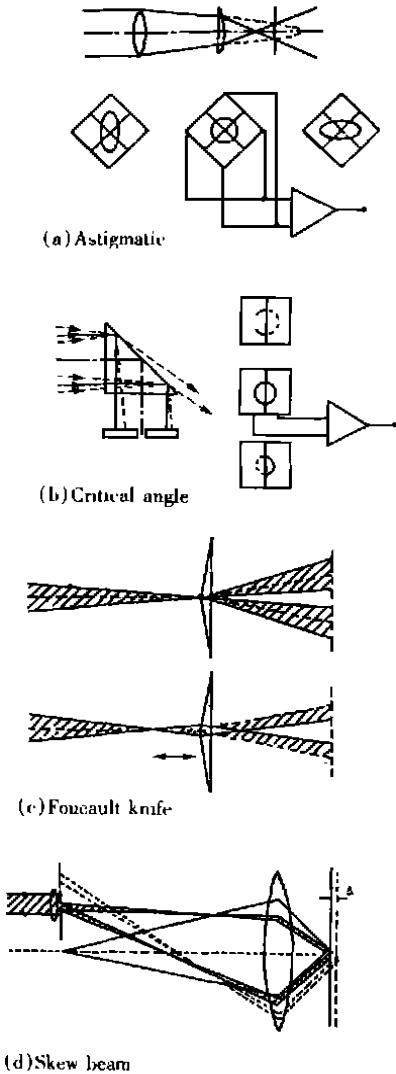


Fig. 3 Four types of optical defocus error detection techniques

在像散法的光学系统中,把一个柱面透镜放在物镜后以便像散成像,像的形状随目标表面位置的变化而变化,借助于四象限二极管,检测对应两象限间的光强差来反映表面高度的变化,如图 3(a)所示。日本的 K. Mitsui 研制出了基于像散法的表面粗糙度检测仪,其线性范围和灵敏度可随光路参数的改变而改变,线性范围为 $1 \mu\text{m}$,分辨率可达 1nm ^[5]。

临界角法利用在全反射临界角附近反射的陡变特性,当被测面在焦平面时,反射到两检测器的入射光通量是相等的;当被测面偏离焦平面时,由于部分光通量的损失,因此两检测器的入射光通量的差值即反映被测面的位移,如图 3(b)所示。日本的 T. Kohno 等人研制出了基于临界角法的高精度表面探测器(HIPOSS),为了避免光源及表面的反射率变化对测量的影响,HIPOSS 采用了双光路,利用差动技术消去信号的畸变分量。其垂直分辨率小于 1nm ,水平分辨率为 $0.65 \mu\text{m}$,测量范围为 $3 \mu\text{m}$ ^[4]。

在傅科刀口法中,从被测表面反射回来的光束经过透镜入射到棱镜上,会聚光束被棱镜“刀口”分成两束,每一光束,给出了作为离焦函数的傅科强度分布特性,如图 3(c)所示。华中理工大学研制的基于傅科刀口法的光针式轮廓仪,最大测量范围为 $500 \mu\text{m}$,最小分辨率可达 10nm ^[14]。

在偏心光束法中,一束偏离光轴的细辅助光束“b”经过透镜投射到被测表面上,探测器 D_1 和 D_2 检测反射光束“b”,则在 $z=0$ 附近的像信号差与离焦信号成线性比例,其工作原理如图 3(d)所示。

3 干涉测量法

根据干涉光路的结构,干涉测量法可分为分光路和共光路两种类型。分光路型干涉轮廓仪中以 WYKO 公司生产的 TOPO 轮廓仪应用最广;共光路型干涉轮廓仪按其干涉原理可分为 Nomarski(微分干涉)、外差干涉和差动干涉三种类型。

3.1 分光路

WYKO 公司于 1986 年在 Mirau 干涉显微镜基础上研制的 TOPO 轮廓仪,其光路原理如图 4 所示,这也是目前世界上应用最广泛的一种表面形貌非接触测量系统^①。将 Mirau 干涉显微镜中的参考板固定在一块筒状压电陶瓷上,通过控制参考板沿光轴做匀速运动,使参考光与测量光之间的相位随时间作线性变化。由于被测表面上各点的微观高度差异,使干涉场上相应点的干涉相

^① WYKO Corporation. Non-contact microsurface measurement system. 1986

位不同,用面阵 CCD 探测干涉场上各点的光强,并用计算机处理而获得被测表面的微观轮廓。由于这一原理只用了一个显微物镜,其对测量光束和参考光束的影响相同,因而不会引入附加光程差。而其使用的相移干涉技术与传统的条纹分析技术相比更具有以下优点:可直接测得干涉场上各点相位;具有高达 $N1000$ 的分辨率;测量迅速实时;对照明系统要求不高;光电探测器非线性对

测量结果影响小。如 TOPO-2D 型轮廓仪的垂直分辨率为 0.1nm ,水平分辨率为 $0.35\mu\text{m}$,测量时间为 75ms 。但 TOPO 轮廓仪仍存在以下不足:由于采用分光路干涉体系,因而对机械振动等外界环境干扰敏感;参考反射镜的粗糙度会影响测量结果,且由于被测表面材料的透入深度不同,易产生光程差。

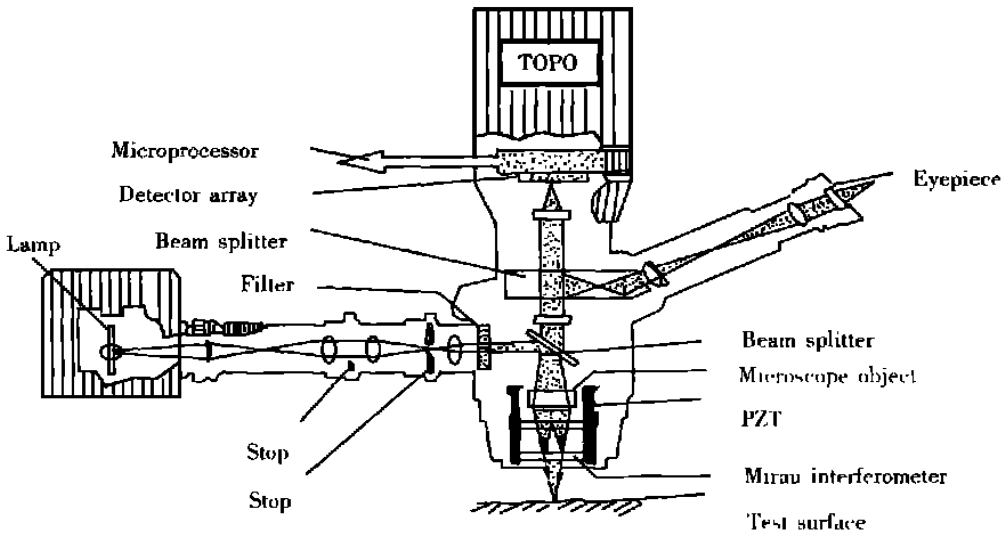


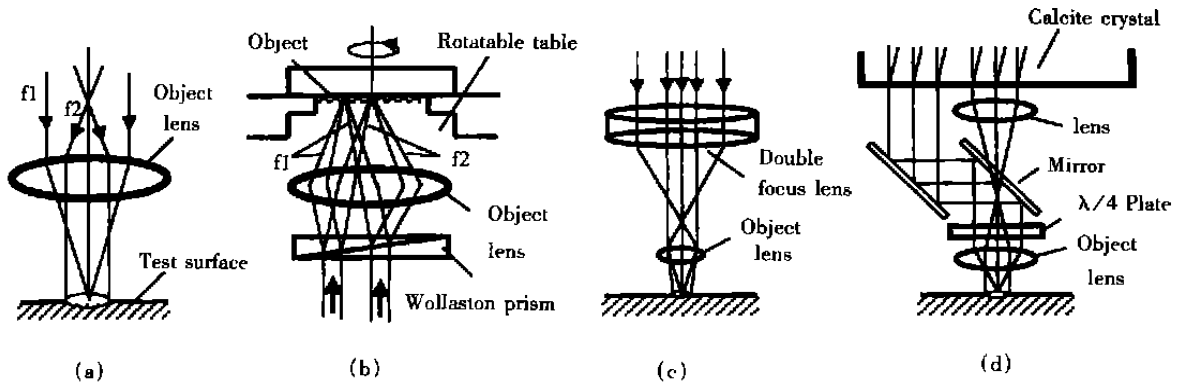
Fig. 4 Schematic of TOPO interferometric microscopy

3.2 共光路

Nomarski 显微镜也称微分干涉相衬显微镜或微分干涉显微镜。1955 年,法国的 Nomarski 改进了 Wollaston 棱镜,并建立了可用于表面微观轮廓测量的反射式系统。在 Nomarski 显微镜中,参考光和测量光是由 Nomarski 棱镜分开的,两者之间夹角很小,所以这是一个共光路系统。这一系统具有分辨率高、抗干扰能力强等优点,但是被测表面的倾斜、棱镜位置、光源的强度分布都影响微分干涉图,相位信息提取有较大难度。清华大学高宏博士成功地将相移干涉技术用于 Nomarski 显微镜中^[5],使其干涉相位差不仅与被测表面的斜率有关,而且显微镜中检偏器的方位角呈线性关系,通过控制检偏器旋转,对干涉图像进行相位调制,从而测得表面三维微观轮廓。这种改进后的微分干涉显微镜的垂直分辨率优于 1nm ,水平分辨率可达 $0.4\mu\text{m}$,表面轮廓高度重复测量精度为 0.2nm 。该轮廓仪不仅实现了定量测量,而且对离焦不敏感,不受空间粗糙度及表面材料的影响,对

被测件的反射率要求不高。

外差干涉轮廓仪按聚焦光斑的分布可分为同轴和不同轴两种类型。1993 年,中科院长春光学精密机械研究所的韩元昌等在美国 C. C. Huang 研制的大小焦点同轴外差干涉仪和瑞典皇家理工学院的 D. Pantzer 等研制的亚纳米尺度的外差干涉仪的基础上,研制出共光路外差干涉系统,其对机械振动、温度漂移极不敏感,纵向分辨率可达 0.1nm ^[6]。图 5(a)为该方法的测量原理。随后清华大学的梁嵘等又在其基础上研制出了在线测量表面粗糙度的共光路外差干涉仪,采用了计大数和测小数周期相结合的外差信号处理方法,实现了大动态测量范围和高分辨率,其纵向和横向分辨率分别为 0.39nm 和 $0.73\mu\text{m}$,自动聚焦范围为 $\pm 0.5\text{mm}$ ^[6]。以上外差干涉轮廓仪,由于在测量表面上形成的两大小不同的光斑(一般小光斑作测量光斑,而大光斑作参考光斑)的中心重合,因此属于同轴型。



(a) Coaxial optical heterodyne profilometer (b) Non-coaxial optical heterodyne profilometer
(c) Double focus interference profilometer (d) Differential coaxial interference profilometer

Fig. 5 The schematic of various common optical path interferometry

还有一种外差干涉轮廓仪, 由于在被测表面上形成的是两个大小相同但分开一段距离的光斑, 所以我们把这种轮廓仪归结为不同轴型。如 G. E. Som margren 等人研制的光外差法表面轮廓测量仪即属于该类型, 其与被测表面的分光原理如图 5(b) 所示, 垂直分辨率为 0.1nm , 水平分辨率为 $2\mu\text{m}$ ^[17]。1998 年哈尔滨工业大学基于这一原理, 研制出的非接触式表面微观轮廓检测装置, 其轮廓高度分辨率为 0.5nm , 轮廓高度测量范围为 $6\text{nm} \sim 0.2\mu\text{m}$, 轮廓高度测量精度为 $\pm 2\text{nm}$ ^[18]。

差动干涉轮廓仪按其分光特性的不同, 有双焦干涉轮廓仪和同轴式轮廓仪。图 5(c) 是英国国家物理实验室(NPL)的 M. J. Downs 采用双折射晶体和普通光学玻璃做成双胶合物镜研制的双焦轮廓仪原理。该物镜对偏振面相互垂直的寻常光线(O 光)和非寻常光线(E 光)具有不同的焦距, 当激光束从双胶合物镜入射时, 出射的焦距较长的 E 光作为参考臂, 它在被测表面上形成一个大光斑作参考光斑, O 光则正好聚焦于被测表面形成测量光斑, 该双焦轮廓仪的垂直分辨率为 0.1nm 。浙江大学卓永模教授等基于这一原理, 利用共模抑制技术, 研制出了双焦干涉表面微观轮廓仪和球面微观轮廓仪, 其纵向分辨率可达 0.1nm , 横向分辨率小于 $1\mu\text{m}$ ^[19]。成都科技大学周肇飞教授等研制的同轴式高分辨率激光轮廓仪, 其工作原理如图 6(d) 所示^[20]。它是在差动干涉仪的基础上, 利用双折射晶体把双纵模激光束的两相互正交的线偏振光束分开, 其中 O 光会聚于正透镜 L_1 的后焦面上, 再通过物镜 L 变为平行光, 投射于工件表面作参考光斑; 而 E 光则偏向双折射晶体左边, 并聚焦于工件表面形成测量

光斑, 在高度方向的分辨率优于 0.1nm , 且具有良好的抗干扰性能。

4 近场光学法

近年来, 人们在充分利用光学观察的快速、无损、可靠、多种衬度观察等优点的基础上, 将光学观察的尺度拓展到前所未有的亚波长范围, 并实现了纳米区域的光谱观察, 形成一门有光学、扫描探针显微学和光谱学结合的新型交叉学科——近场光学。近场是指用作物理观察物的探头尺度及探头与被观察物的距离均小于用于观测的辐射波长 λ 。

基于近场光学, E. H. Syng e 和 J. A. O'Keefe 分别在 1928 年和 1956 年先后提出扫描近场光学显微镜(SNOM)的概念, 用小于衍射极限的小孔径代替显微物镜, 限制扫描显微成像探测光束, 让孔径在离物体表面很近处(远小于波长)作二维扫描成像。1995 年, F. Aenhausern 研制了一种扫描干涉无孔径近场光学显微镜, 将透光样品紧贴在很平整的基板上, 样品折射率及其厚度变化引起相位变化, 通过检测样品的相位差来反映样品的表面微观轮廓, 其横向空间分辨率已达 1nm ^[21]。在国内, 清华大学、北京大学也开展了扫描近场光学显微镜及其相关研究^[22]。

1989 年出现的光子扫描隧道显微镜(PSTM)作为一种特殊形式的扫描近场光学显微镜, 其机理和实验手段与扫描隧道显微镜(STM)相似, 利用光子隧道效应, 用极细的光探针探测样品表面的全内反射的瞬逝波, 以获得表面结构信息。1993 年, 大连理工大学用氦氛激光做光源研

制的光子扫描隧道显微镜, 图像最大幅面达 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, 横向空间分辨率优于 10nm , 纵向空间分辨率优于 1nm ^[23]。

5 发展趋势

综合表面微观轮廓测量中的各种光学方法及其最新进展, 对分辨率达到纳米甚至亚纳米的表面微观轮廓测量领域, 其总的发展趋势可归结为以下几点:

(1) 满足纳米测量精度要求的新规律、新原则的探索与研究。发展对机械振动和温度、机械、电气漂移等不稳定因素阻隔、抑制或补偿的新方法、新技术, 研究建立合理的光路设计原则, 整个测量系统的误差补偿和修正原则等;

(2) 新的测量原理和技术的应用。当测量精度达到纳米尺度时, 宏观测量中的许多原则和性质已不再适用, 一些新的原理和技术, 如扫描隧道显微镜、原子力显微镜、扫描近场光学显微镜、软 X 射线显微成像等分析手段, 按照测量的要求进行更新设计或移用, 产生了一批新的纳米精度测量技术和仪器。

(3) 多学科领域的相互交叉。多种学科的相互交叉应用把表面微观轮廓测量带入了一个全新的领域, 如微电子技术、控制技术、计算机技术、精密机械技术、光学技术、新材料技术、信号处理技术等相邻学科技术的引入, 促使一些新的测量原理和技术的诞生和发展, 小波分析和分形几何在图像处理和特征提取中的应用可以更有效地实现表面轮廓的形状误差和表面粗糙度的分离。

参考文献:

- [1] Whitehouse D J. Surface measurement fidelity[A]. 1st International Symposium on Instrumentation Science and Technology[C]. Luoyang, China, 1999, Aug. 1- 9.
- [2] 程晓辉, 赵洋, 等. 光学纳米测量方法及发展趋势[J]. 光学技术, 1999, 5(3): 73- 77.
- [3] Jordan H J, Wegner M, Tiziani H. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy[J]. Meas. Sci. Technol., 1998, 9: 1142- 1151.
- [4] Kohno T, et al. High precision optical surface sensor[J]. Appl. Opt., 1988, 27(1): 103- 108.
- [5] Mitsui K. In-process sensors for surface roughness and their applications[J]. Precision Engineering, 1986, 8(4): 212- 220.
- [6] 梁嵘, 李达成, 等. 在线测量表面粗糙度的共光路激光外差干涉仪. 光学学报[J], 1999, 19(7): 958- 961.
- [7] Lonardo P M, Trumpold H, Chiffre L De. Progress in 3D surface microtopography characterization[J]. Annals of the CIRP, 1996, 45(2): 589- 598.
- [8] 杨甬英, 卓永模. 超光滑表面无损检测轮廓仪[J]. 光子学报, 1999, 28(4): 371- 373.
- [9] 张鄂. 几何量测量仪器的新进展[J]. 航空计量技术, 1995, 15(1): 3- 9.
- [10] Lee C H, Wang J P. Noninterferometric differential confocal microscopy with 2-nm depth resolution[J]. Optics. Communications, 1997, 135: 233- 237.
- [11] Mathia T, Zahouani H, et al. Functional significant of different techniques for surface morphology measurements[J]. Int. J. Mach. Tools. Manufact, 1995, 35(2): 195- 202.
- [12] Wilson T. Confocal Microscopy[M]. London: Academic Press, 1990.
- [13] Tiziani H J, et al. Three-dimensional analysis by a microlens-array confocal arrangement[J]. Appl. Opt., 1994, 33(4): 567- 572.
- [14] 谢峰, 李健林, 等. 光针式轮廓仪的研制[J]. 现代计量测试, 1999, (2): 10- 14.
- [15] 高宏, 李庆祥, 等. 高分辨率光学轮廓仪[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(2): 135- 139.
- [16] 韩昌元, 等. 共光外差表面轮廓仪[J]. 光学学报, 1993, 13(7): 670- 672.
- [17] Sommargren G E. Optical Heterodyne profilometry[J]. Appl. Opt., 1981, 20(4): 610- 618.
- [18] 于赢洁. 激光外差干涉技术用于表面形貌检测的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 1998.
- [19] 卓永模, 杨甬英, 等. 双焦干涉球面微观轮廓检测[J]. 仪器仪表学报, 1995, 16(3): 254- 259.
- [20] 周肇飞, 王世华, 等. 同轴式高分辨率激光轮廓仪[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(3): 250- 254.
- [21] Zenhausern F, Matin Y, et al. Scanning interferometric apertureless microscopy: Optical imaging at 10 Angstrom resolution[J]. Science, 1995, 269: 1083- 1085.
- [22] Liu X M, Wang J, Li D C. Simple device and reproducible approach for producing high efficiency optical fiber tips for a scanning near-field optical microscope[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 9: 3439- 3440.

[23] 郭宁,吴世法,等. 光子扫描隧道显微镜的光电成像系统的研究[J]. 光电技术, 1994,(3): 21- 27.

Methods of high resolution optical measurement for surface profile

WANG Fu-sheng, TAN Jiu-bin

*(Department of Automated Test Measurement and Control,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

Abstract: The methods of optical measurement for surface profiles with high resolution even sub-nanometer are presented generally. In the paper, three optical methods for measuring surface profile, optical probe, interferometric method and near-field optics method, are mainly described. Optical probes include scanning confocal microscopy and defocus error detection. Interferometric methods include TOPO interferometric profilometer, Nomarski microscope, Heterodyne profilometry, double focus profilometer and coaxial profilometer. Near-field optics methods include scanning near-field optical microscopy and photo scanning optical microscopy. By reviewing and contrasting the principles, characteristics and problems with these methods, the trends of high resolution optical measurement for surface profiles are described.

Key words: surface profile; optical measurement methods; high resolution

作者简介: 王富生(1970-)男, 山东无棣人, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士生。分别于1994和1997年在哈尔滨理工大学自动化仪表及装置专业获学士和硕士学位。主要从事非接触三维轮廓测量技术和高精度电容传感器等方面的研究。