纳米级位移测量技术综述

杨晓红1,杨 圣2

(1.盐城工学院 机械工程系, 江苏 盐城 224003; 2. 南京航空航天大学 506 教研室, 江苏 南京 210016)

摘 要:综述了当今国内外纳米级位移测量技术的研究状况和最新成果,重点介绍其工作原 理和性能。探讨了纳米级位移测量的关键技术,并展望纳米级位移测量技术的发展方向及在 超精、微细加工领域的应用前景。

关键词:精密测量;超精密测量;纳米级测量;位移测量

分类号:TG806 文献标识码:A

文章编号:1008-5092(2000)03-0005-06

随着精密、超精密及微细加工技术的迅猛发展,零件尺寸的下界越来越小,加工精度要求越来 越高。超精密加工和微细加工之间有许多相似之 处,如它们都需要达到极微细的位移精度。而测 量是对加工的支持,无论多么精密的加工,都必须 用更为精密的测量技术作保障。因此在超精密加 工中,作为超精加工的重要基础,位移量的精密测 量、超精密测量将成为整个加工体系中一项至为 关键的技术。

目前,超精加工和超微加工在国际上已进入 了纳米技术的新时代,对微小位移量及微小物体 几何形状测量的要求已不再局限于微米、亚微米 量级,而是达到了纳米、亚纳米量级。传统的机械 法、光学法、电学法、气动法等,一般设计时只考虑 微米级测量的需要,不加改进,已很难适应纳米级 测量的需要。另一方面,现代精密加工要求位移 测量技术能在比较宽的量程上有极高的分辨率和 很高的精度,迅速研究开发全新的纳米级位移测 量技术已成为众多尖端科技的迫切要求。

纳米级位移测量技术至今尚没有明确的定义。经过研究,我们认为测量精度在0.1~100 nm (1 nm = 10⁻⁹ m)之间的位移测量技术统称为纳米 级位移测量技术。

在 20 世纪内,由于超精加工的迫切需求,人 们已花了很大的力气在这方面做了大量的工作。 另外也由于在测量中,位移测量技术的每一进展, 都将推动其它测量技术的提高。故人们将研究的 重点首先放在了这一分支。在纳米尺度内,位移 测量技术与其传统的技术相比,其性质将会发生 根本而彻底的变化。纳米级位移测量技术的研究 与进展,将确保超精加工的精度极限得以实现。

1 纳米级位移测量技术

纵观当今国内外的研究状况和最新成果,纳 米级位移测量技术可以分为三大类,一是显微镜 技术,二是光学测量技术,三是电学测量技术。其 中,光学测量技术的发展最为引人注目。因为,实 现纳米测量首先必须建立纳米精度尺度测量基 准,常用的高精度标准尺度主要是光学尺度。

1.1 显微镜技术

1.1.1 扫描隧道显微镜(STM)

1981年,国际商用机器公司(IBM)苏黎世实 验室的 Binnig 和 Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope,STM),并首次得到 了硅晶体表面清晰的原子图像,这一发明于 1986 年获诺贝尔物理学奖。

扫描隧道显微镜(STM)的原理是应用量子理 论中的隧道效应^[1]。即对于总能量 E 低于势垒 U_0 的粒子,按照经典的概念,它们只能在 x < 0 的 范围内运动,不可能进入 x > 0 的区域。对于如

^{*} 收稿日期:2000-02-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(59875038) 作者简介:杨晓红(1966-),女,江苏东台市人,盐城工学院实验师。

图 1 所示的势全,势能 $U = U_0$ 的区域有一定的宽 度。总能量 $E < U_0$ 原来在 x < 0 区域的粒子,经 典力学认为它是不能越过 $U = U_0$ 的高势垒的。 但是量子力学指出,即使在这种情况下,粒子的波 函数 $\phi(x)$ 在势垒外侧也有一定的值,表示原来 在 x < 0 区域的粒子也有可能出现在势垒外侧。 这种现象,形象地被称为隧道效应。



图 1 一定宽度的势垒

Fig.1 Certain width of potential barrier

STM 的特点是不用光源也不用透镜,它的显 微部件是枚细而尖的金属探针。将原子线度的极 细探针和被研究物质的表面作为两个电极,当样 品与针尖的距离非常接近时(通常小于1 nm),在 外加电场(2 mv~2 v)的作用下,电子会穿过两个 电极之间的势垒流向另一电极,形成隧道电流。 隧道电流与电极间的间隙成负指数关系,即隧道 电流对针尖与表面间的距离极端敏感。例如,距 离改变一个原子的直径(如零点几个纳米),隧道 电流会改变1000倍。由隧道电流随距离变化的 特性,可测出探针与样品间的距离变化,从而判断 位移大小的范围是否在预设的范围内^[2]。

1.1.2 原子力显微镜(AFM)

基于这种表面效应测量技术的仪器还有原子 力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM),其原理 是利用物质表面间的原子间力效应。可用于非导 体。

扫描隧道显微镜(STM)和原子力显微镜 (AFM)的发明开辟了微观尺寸测量的新的研究领域。在 STM 的基础上,已发展了各类扫描探针显 微镜,如 PSTM、SNOM、MFM 等。

1.1.3 光子扫描隧道显微镜(Photo Scanning Tunneling Microscope, PSTM)

是用光探针探测样品表面附近被内全反射光 所激励的瞬衰场,其分辨率远小于入射光的半波 长,突破了光学显微镜半波长极限的限制。

1.1.4 扫描近场光学显微镜(Scanning Near-Field Optical Microscope, SNOM)

这是另一种具有亚波长分辨率的光学显微

镜,它使用一个孔阑限制的光纤探针去探测样品 附近的辐射,辐射的强度是样品表面光学性质的 量度。与长度尺寸有关的分辨率与光源的波长无 关,它是由光探针口径和探针与样品之间的间隙 大小决定的。

基于近场光学和光子隧道效应的 SNOM 和 PSTM 是近年发展起来的非接触光学微探针,其分 辨率可达 1 nm。

目前,扫描探针显微镜(SPM)仪器已经广泛 用于各个研究领域和许多工业行业的表面分析、 微观现象和理论的研究中。从纳米计量角度来 看,与合适的位移测量技术相结合的 SPM 纳米级 测量仪器有可能成为微观尺寸的计量系统,从而 实现微观尺寸的计量溯源性,为科学研究和工业 生产服务。

1.1.5 扫描电子显微镜(SEM)

它在实现观测物体表面微观形态时,也能达 到测量精度为几个埃的水平。普通型的扫描电子 显微镜的扫描范围较大,具有 10 nm 左右的分辨 率和 10~10⁵的放大倍数,并易于进行选区扫描, 且有很长的工作距离和很大的景深。如将扫描 电子显微镜与扫描隧道显微镜结合起来,就可使 普通的扫描电子显微镜升级改造为超高分辨率的 扫描电子显微镜。中国科学院半导体研究所与化 学研究所已在这方面做了大量的工作,他们在国 产的 KYKY-1000B 型扫描电子显微镜上开发了一 种袖珍型扫描隧道显微镜,其分辨率约为 1nm^[3]。 以 SEM 为基础的各类电子显微镜,如透射电子显 微镜(TEM)、反射电子显微镜(REM)等亦已出现。

1.2 光学测量技术

1.2.1 X射线干涉术

为了提高测长的分辨力,作为基准的波长越 短越好。高压汞灯的 *i* 线(365 nm)或 *g* 线(436 nm)以及准分子激光(164~558 nm)已开始用于大 规模集成电路微细图形的印制。这些波长比氢-氛激光的 633 nm 波长要短,但至多也不过短到其 1/3 左右的程度,可以说相差并不大。纳米级的计 量希望使用纳米级的波长,而 X 射线的波长为 0.4 nm左右,是适用的^[4]。可见光和紫外线的干 涉条纹间距为数百纳米,这种间距不易测量,而利 用 X 射线的超短波长干涉测量技术可以实现 0. 01 nm 分辨率的位移测量。测量范围可达 200 μm。

1.2.2 激光频率法

通过测量激光频率也可测出微小位移。通过 测频率测位移精度已达 1 nm,进一步激光稳频可 达 0.01 nm。它的基本原理是基于激光的光谱特 性:激光输出的光谱取决于谐振频率和谐振腔长 度。这就表明,当激光器中一个反射镜位置固定 时,可以根据激光频率与谐振腔长度的关系确定 另一个可动发射镜的位置。所以若能通过另一个 稳频激光器用相频测量或根据一个固有稳频鉴频 器测出频率,就可以实现位置和位移的测量。

由于测量激光器在未稳频时的频移约为几兆 赫,频率变化的准确度为几千赫,因此微位移测量 的准确度大约在几纳米量级,分辨率约在百分之 一量级。可见,这种方法对于微米至纳米范围的 微位移测量极为有利^[5]。

1.2.3 频率跟踪 Fabry-Perot 标准具

频率跟踪 F-P 标准具由 1 个频率标准激光器,1 个 F-P 标准具和跟随激光器组成,跟随激光器频率随标准具而改变。频率标准激光器和跟随激光器的频率差即代表了标准具动镜的位移。由于腔长的变长 *&L* 引起透射值频率率 *&f* 变化,有如下关系式

 $\delta f/FSR = - \delta L/(\lambda_0/2\mu),$

其中 FSR 为自由光谱区,对于平行平面镜的 F-P 标准具, FSR = $C/(2\mu L)$, L 为光学腔长, 1 个 1 cm 长的 F-P 标准具, 自由光谱区约为 15 GHz, 对应于 δL = 316 nm, 使用 He-Ne 激光, 腔长 1 cm, 每 nm 频 率变化 $\delta f \approx 47$ MHz。基于 F-P 标准具的测量技术 具有极高的灵敏度和准确度, 其精度可达 10⁻³ nm, 但测量范围仅为 0.1 μ m, 其受限于激光器的 调频范围^[6]。

1.2.4 全息光栅

是指利用干涉方法制作的光栅。与计量光栅 相比全息光栅具有很高的空间频率,目前最高可 达6000 l/mm,一般的全息光栅也具有 1500 l/mm 左右的空间分辨力,正是利用全息光栅这样高的 空间分辨力作为长度测量基准来实现位移的精密 测量。

如图 2 所示,当一束平面单色波垂直入射全 息光栅时,将发生衍射。让对称的两级衍射波叠 加形成干涉场。当光栅作 X 方向位移时,衍射波 的位相将发生变化,干涉条纹将对应移动,条纹的 移动量与光栅的位移是严格对应的。

从三个不同的出发点---物理光学,傅里叶

D 干涉场 反射 销 衍射波1 衍射波2

图 2 全息光栅测位移原理

Fig. 2 Principle of measuring displacement by using holographic grang

光学,多普勒效应推导光栅的位移测量公式,得到 了完全一致的结论,即位移 $X = \pm \frac{N}{2} \frac{d}{m}$,式中, N—条纹的移动数;d—光栅常数;m—衍射波级 次^[7]。

从分辨率上看,俄罗斯的全息光栅系统达 10 nm,北京光电量仪研究中心的光栅系统分辨率可 达 0.1 nm;从测量长度看,LIP382 型光栅尺测量 范围 70 nm,分辨率为 5 nm 的 LIP401 型测量长度 可达 220 nm;精度上,俄罗斯的全息光栅精度是 ± 0.1 μ m,LG100 光栅系统分辨率可达 0.1 nm,测 量范围 100 nm,精度 ± 0.01 nm。光栅技术对环 境的要求相对较低,可以满足纳米精度的使用要 求。

1.2.5 光学干涉仪

对于纳米级位移测量而言,激光干涉技术仍 然是最主要的测量方法之一^[8]。光波干涉分为双 光束干涉和多光束干涉^[5],测距光学干涉仪可分 为2大类:

1.2.5.1 双光束光学干涉仪,如迈克尔逊干涉仪 和马赫尔德干涉仪,一般分辨率达 λ/10 ~ λ/20。 在双光束干涉测量微位移法中,还有一种激光锁 相干涉法,它是基于迈克尔逊干涉仪的微位移测 量方法,以锁定分光光波的相位,而由反馈伺服系 统检测出微小位移。该法的分辨率达纳米量级, 可用来测量记录长周期的慢变位移及突变位移。 1.2.5.2 多光束干涉仪,如上述的 Fabry-Perot 标

1.2.5.2 多光束十涉仪,如上还的 Fabry-Perot 杨 准具,其位移量为

$\Delta L = \Delta m \lambda_0 / (2\mu \cos \theta),$

光学干涉仪测量位移不确定性,来自干涉级次变 化量不确定性;光学波长的不确定性;沿光路介质 折射率的不确定性;入射光方向与反射面法线夹 角的不确定性。

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由于光学干涉所得的干涉条纹,与1个条纹 相应的反射镜移动量约为0.3 µm,所以即使干涉 仪的光路采取多路形式,纳米级的计量仍需读取 干涉条纹的条数。通常利用干涉条纹图的测量方 法进行纳米级测量有其很大的局限性,而利用外 差干涉测量技术可得到0.1 nm的空间分辨率,测 量范惜可达50 mm。

光学外差干涉仪,多采用高频拍频或调制,如 Zeeman 双频干涉仪,频差为1.8~2 MHz,精度可 达5 nm,而声光调制方法,可得到40 MHz 的频率, 避免了低频噪声(<10 kHz)的影响,清华大学已 发展了数字相位检测技术和整数检测方法,分辨 率提高到 λ/1r000~λ/2000。当λ=633 nm 时,分 辨率为0.3~0.6 nm,最高可达0.1 nm。并突破 了λ/2量程不确定性的限制,扩大了测量范围,达 50 nm,如果运用光学倍频精度还可进一步提高。 该技术解决了高精度大动态范围位移测量问题, 无论是高精度外差干涉仪,还是差动式干涉仪均 应遵循结构对称原则,光路设计采用共光路系统。 美国 WYKO 的 TOPO-2D 和 TOPO-3D 非接触测量 系统,以及 ZYGO 公司的 Maxim30 激光干涉显微 镜均遵循这一原则,其分辨率均优于1 nm。

由于 Fabry-Perot 光纤干涉仪的光路系统简 单,参考光束和信号光束都在同一根光纤中传输, 不必采用温度及其它补偿措施,已成为一种非常 实用的高灵敏度的光纤传感器。燕山大学采用高 稳定的单频 He-Ne 激光器作光源,采用 F-P 干涉 仪,并把激光与计算机等技术结合在一起,使小位 移测量的分辨率达到 10⁻¹² m,并能进行在线检 测,这对精密机械加工,微电子加工,高密度磁盘 表面的不平度检测,材料热膨胀系数,压电材料及 磁致伸缩材料性能测定等技术水平的提高有很大 的促进作用^[9]。

为解决电感、电容、光栅、容栅、涡流等传感器 的检测标定,特别是分辨率优于 0.01 µm 传感器 检测,上海市计量技术研究所应用双频激光偏振 干涉的原理,研制出位移测量仪。该仪器由于解 决了高分辨率的光学干涉系统、纳米级灵敏度、准 确度、稳定度的机械运动系统以及微驱动系统等 关键技术,而把微位移的测量范围从微米量级扩 展到厘米量级,而仪器的准确度达到了纳米量级, 为科研尖端技术解决微小位移量测试奠定了基 础^[10]。 1.3 **电学测量方法**

电容传感器是近年来发展最快的用以测量微 位移的方法之一,早在 1910 年就有用电容器原理 测量微位移的。到 1920 年,超测微计问世,它已 能分辨电极间距 1 埃的变化。目前,用三端电容 传感器已可测出 5×10⁻⁵ μm 的微位移,最好的稳 定性为每天漂移几个 10⁻⁹ mm,其线性优于 0.5%。

电容式测量微位移的原理较简单,如图 3 所 示,设 x 为两极板间距,s 为极板有效面积, ϵ 为 空间介质的电导率,则有 $c = \epsilon s/x$ 。



图 3 电容法测量微位移原理

Fig. 3 Prinicple of measuring micro-displacement by the way of capacitance

当极板间距 x(上下相对位移)变化,或两极 间面积 s 变化(左右相对位移)时,则电容 c 就变 化,此变化与 s 成正比,与 x 成反比,所以根据电 容的变化量就可确知微位移量的大小。

电容式位移传感器的基本类型有三种:可变 间距型、可变面积型和可变介质型。目前在实际 应用中,可变间距型和可变面积型用得较多。根 据上述原理,面积的变化与电容的变化成线性关 系,而间距的改变与电容的变化是双曲线关系。 为减少非线性误差,使之具有近似线性关系,位移 量大致选为 $\Delta x/x_0 < 0.10$ 。但在精密测量时,需 在后续电路中作非线性补偿,以提高测量准确 度^[5]。由北京机床研究所研制,江苏泰兴机床测 试仪器厂生产的 DWS 型超精密振动-位移测量仪 用电容不接触法测量机械振动和机械位移,具有 不接触、高灵敏度、宽频响等优点。其主要技术指 标为:最高分辨率 2 nm,最大测量范围 ± 300 μ m; 该仪器特别适用于超精密、动态和在线测量方 面^[11]。

2 纳米级位移测量的关键技术

2.1 定位技术

在纳米级位移测量中,需要纳米级的三维定 位与控制。目前用一个执行元件来实现大范围的 纳米级定位是比较困难的。因此,实际的定位机 构多采用大位移用的执行元件和纳米级定位用的 执行元件相结合方式来实现。实现三维定位与控 制,目前普遍采用压电陶瓷致动器件。此外,利用 静电致动材料、静电或磁轴承式结构,以及静电致 动的高精度定位控制技术也向纳米级精度发展, 也可采用摩擦驱动装置和丝杠定位元件通过特殊 的方法进行纳米级的定位。

美国 LLNL 实验室研制成功的 LODTM 大型 超精密机床采用精密数字伺服方式,控制部分为 内装式 CNC 系统和激光干涉测量系统。在进给 装置内装有压电式微位移机构,可以实现纳米级 定位。国内在这一领域的重要成果有:华中理工 大学在成功地研制了能实现超精密定位的 STM 检测仪器后,又研制了 AFM 检测仪,它采用螺旋 机构、弹性元件和叠层压电陶瓷微位移器使检测 仪器的测头和试件实现纳米定位。哈尔滨工业大 学研制出微动工作台和微动刀架,采用压电陶瓷 驱动的弹性机构,利用系统的弹性变形来实现超 精密定位,并用闭环反馈控制,使定位分辨率达到 10 nm。天津大学研制了用于扫描探针显微技术 的空间超精密定位系统,该系统的定位精度达到 10 nm,定位分辨率已达 2 nm^[12]。

2.2 驱动技术

2.2.1 用于纳米长度测量的超微直线驱动技术-压电微驱动

超微位移技术是纳米长度测量的基础。由于 压电陶瓷或压电晶体具有线性调节性能,可利用 压电逆效应,在压电材料上加电荷时,材料产生一 定量的微变形带动传动结构线性超微动。

该技术选用的压电材料为锆钛酸铅多晶陶瓷 材料(PZT 材料)。该材料具有性能稳定,介电常 数高、耦合系数高和居里温度高的特点^[13]。

纳米级驱动装置是纳米测量技术的关键器件,目前广泛采用 PZT 压电陶瓷制作微位移驱动器实现超微直线位移^[14]。天津大学已应用该技术在实验室条件下实现了 1.6 nm 的位移^[13]。

2.2.2 电磁冲击式纳米级进给驱动技术

电磁冲击式微进给驱动技术是通过对励磁线 圈驱动信号频率、大小以及信号前后沿的改变,来 控制和改变冲击块对移动体冲击能量的大小,以 实现装置精确的步距控制,并使装置获得足够的 驱动速度。南京航空航天大学基于这一原理,研 制了微步距驱动装置,其试验结果表明:装置的每 一次冲击能将质量为 0.325 kg 的物块移动 39 mm^[15]。

2.3 探针制作技术

微探针是 SPM 的核心元件之一,对于 SPM 的 测量和加工精度,重复性及可靠性有重要的影响, 评价微探针性能的主要参数有针尖曲率半径、针 尖部纵横比以及针尖部几何形状的平滑性。在显 微镜位移测量技术中,我们不需要观测样品表面 的微观几何形貌,而仅仅要测得针尖与样品间的 距离,故微探针不需作横向移动。所以微探针的 制作要求虽不象观测原子图像那样精密,但至少 必须满足两方面要求:一是要能在测量中产生隧 道电流;二是必须有足够的强度。

目前制作微探针的方法主要有电化学腐蚀法 和机械成型法。其中电化学腐蚀法较经济、方便 和高效,并且有利于综合控制各个性能参数。在 腐蚀法中所用材料主要是钨或钼。天津大学已在 微探针制作研究方向取得了相应的成果。

电化学腐蚀加工微探针的原理如图 4 所示。 微探针针体钨丝为阳极(A),碳棒为阴极(B)、氢 氧化钠溶液为电解液(C),电化学反应方程式为

 $W + 20H^{-} + 2H_2O \longrightarrow WO_4^{2-} + 3H_2 \uparrow$

 $E^{0} = -1.43 \text{ V}_{\circ}$



Fig.4 Principle of electrochemical etching microtip

研究表明,电化学腐蚀性加工微探针过程中, 初始时起主导作用的是电化学腐蚀,电流密度在 液面处最大,钨丝在该处变细变快,该处所受应力 也最为集中。当腐蚀进行到一定程度时,钨丝自 重的下拉作用占主导地位,钨丝在液面处被拉断 而形成针尖。其后残余电流的腐蚀作用占主导地 位,它在极短的时间内使针尖钝化。利用电化学 反应自身的特性电参数进行实时反馈控制技术, 可有效控制残余电流的作用,加工出不同曲率半 径的微探针^[16]。

2.4 探针微调装置

中国科学院半导体研究所和化学研究所已加 以研制:①采用最常用的压电陶瓷管,直径为 6.35 mm,长 12.7 mm,壁厚 0.5 mm。陶瓷管外部 的电极分割成面积相等的4份,管子内部为一整 体电极。在其中的一个上施加电压,管子的这一 部分就会伸展或收缩,导致陶瓷管向垂直于管轴 的方向弯曲,通过在相邻的两个电极上按一定顺 序施加电压,就可以实现在 X-Y 方向扫描。在 Z 方向的运动是通过在管子内壁施加电压,使管子 整体收缩实现的。在压电陶瓷管的轴线上固定一 个针管,用以放置隧道针尖,当针尖与针管前端的 距离约3 mm 时,它的最大扫描范围为1 μm×1 um。②在一般的 STM 中,针尖向着样品的逼近都 采用步进马达,但因体积较大,不宜置于 STM 与 SEM 的联用中,故采用商广义等人发明的专利产 品"一种推挽式-维微移动装置"(专利号:ZL952 25291.0),作为针尖逼近装置。该微动装置由两 个驱动单元(即压电堆)D1、D2和3个箝位体 M1、 M_2 、 M_3 所组成,如图 5 所示^[3]。



图 5 推挽式隧道探针微动装置

Fig.5 Schematic diagram of piezoelectric push-pull micropositioner

3 结束语

参考文献:

随着现代科学技术的发展,机械加工的精度 越来越高。目前超精密加工已经能稳定地达到亚 微米和纳米级的精度,这是衡量一个国家工业实 力的重要标志。作为超精密加工的重要基础,位 移量的精密测试技术一直被人们所研究和重视, 这不仅因为在超精加工中经常要求在线精确地测 量零部件的位移或位置,而且也因为力、压力、扭 矩、速度、加速度、温度、流量等参数的许多测量方 法都是以位移测量作为基础的。在微细加工中, 为了高容量的信息储存和通讯,要求工作系统(或 装置)小型化,致使元件几何尺寸也随之变小,目 前集成电路中点阵单元已小于1µm,同时还出现 了具有多层结构的微电子器件,各层的厚度以及 电极尺寸都只有亚微米级,甚至是亚纳米级。随 着大规模集成电路中元件的数目继续增长,元件 中电极做到几个纳米粗细,几十个纳米长,就可以 把芯片的运行速度和内存都提高几万倍。因此, 上述的 X 射线光学技术,光波干涉技术等超精密 位移测量技术将在应用中得到新的发展,从这个 意义上说,纳米级位移测量乃是体现精密测量、超 精密测量的一个主要方面。

本文所述的纳米级位移测量技术不少是在实 验室条件下取得的。如何降低这些技术的成本, 使之在工程实际中得到广泛的应用,并降低对环 境和操作水平的要求,是目前及今后一段时间的 研究方向。在新世纪内,超精加工的发展必将进 入物质内部,涉及微观世界,达到量子级加工水 平。因此,纳米级位移测量技术将随之发展,并越 来越广泛地应用于航天、军事、生物技术等尖端领 域。

- [1] 白春礼,扫描隧道显微技术及其应用[M].上海;上海科学技术出版社,1991.
- [2] 黄俊钦.微量超微量测量的几个问题[J].测控技术,1997,16(3):1~4.
- [3] 李成基,李韫言,商广义.扫描电子显微镜与扫描隧道显微镜联用装置.分析测试技术与仪器,1997,5(1):5~8.
- [4] [日]大石忠尚.纳米级几何量的计量[J].国外计量,1989(2):6~8.
- [5] 杨自本,安国振,蔡敦和.小尺寸测量[M].北京:中国计量出版社,1996.
- [6] 杨辉,吴明根.现代超精密加工技术[J].航空精密制造技术,1997,33(1):1~8.
- [7] 邾继贵,吕海宝,漆新民.位移精密测量技术的研究[J].国防科技大学学报,1994,16(2):43~48.
- [8] Sommargren G E.精密测量中用的新激光测量系统[J].国外计量,1989(4):19~22.
- [9] 王桂荣,常丹华.超精密位移传感[J].工业仪表与自动化装置,1996(2):8~11.
- [10] 张仪如,祝逸庆.厘米量程纳米准确度位移测量仪及误差分析[M].激光与光电子学进展,1995(7):8~16.
- [11] 孙维盛.超精密振动一位移测量仪及其应用[J].机械与电子,1992(1):9~12.
- [12] 徐盛林,陈耿.精密超精密定位技术与其应用[J].中国机械工程,1997,8(4):73~75.
- [13] 曲兴华,贾果欣,陆伯印.用于纳米长度测量的超微直线驱动原理和装置[J].电子测量与仪器学报,1998,12(3):24
 ~27.
 (下转第 20 页)

Research of Fabric's Water Proofness Agent of Property-Changing Acrylic Ester Emulsion

FAN Da-he¹, LIU Fang², CAO Shu-hong²

(1. Department of Education Administration of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC; 2. Department of Chemical Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC)

Abstract: The synthetic process and design of fabric's water-proofness agent of ACR emulsion are advanced. The emulsion's waterproofness and textile cohesive are improved by adding 1 percent of N-MAM when the emulsion polymerization. The emulsion's waterproofness is improved apparently by adding modifying agent.

Keywords: ACS emulsion; Water-proofness agent; modifying agent N-MAM

(上接第 10 页)

- [14] Blackford B L. High Stability Scanning Tunnelin Microscope [J]. Rev Sci Instru, 1987, 50(8): 17 ~ 19.
- [15] 颜国正,赵国光,余承业.微小型任意行程电磁冲击或纳米级步距驱动装置及其控制技术的研究[J].仪器仪表学报,1996,17(4):391~395.
- [16] 胡小唐,郭育,刘安伟,等.微探针电化学加工机理及针尖尺寸控制技术[J].化工学报,1995,46(5):557~561.

A Survey of Nanometer Displacement-measuring Technolgy

YANG Xiao-hong¹, YANG Sheng²

(1. Department of Mechanical Engineering of Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224003, PRC; 2.506 Division of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Jiangsu Nanjing 210016, PRC)

Abstract: This paper makes a survey of the current research situation and the recent achievements of nanometer displacement-measuring technology domestically and abroad, focuses on the introduction of operational principles and properties. The authors also discuss the key technology, forecast its edvelopment tendency and the future application in ultra-precision and micro manufacturing fields. **Keywords**: precision measurement; ultra-precision measurement; nanometer measurement; displacement measurement