

纳米表面相互作用及振动测头模型

陈丽娟 陈晓怀 刘芳芳 王景凡

Nano surface interaction and model of vibrating probe

Chen Li-Juan Chen Xiao-Huai Liu Fang-Fang Wang Jing-Fan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 080603 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.080603

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.080603>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于相关光子多模式相关性的 InSb 模拟探测器定标方法

Absolute calibration of an analog InSb detector based on multimode spatial correlation of correlated photons

物理学报.2015, 64(24): 240601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.240601>

基于 X 射线掠射法的纳米薄膜厚度计量与量值溯源研究

Nanometer film thickness metrology and traceability based on grazing incidence X-ray reflectometry

物理学报.2014, 63(6): 060601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.060601>

机器视觉在激光干涉测量 d_{31} 中的应用

Application of machine vision to the measurement of the effective d_{31} coefficient in laser interferometry

物理学报.2013, 62(18): 184207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.184207>

一种内腔式 He-Ne 激光器频率稳定方法的实验研究

Experimental study on frequency stabilization method of internal-mirror He-Ne laser

物理学报.2013, 62(1): 010601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.010601>

大幅提高视觉密度国家基准测量水平的方法研究

Greatly enhanced visual density measurement level of the national standard densitometer

物理学报.2012, 61(23): 230601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.230601>

纳米表面相互作用及振动测头模型^{*}

陈丽娟[†] 陈晓怀 刘芳芳 王景凡

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

(2015年12月31日收到; 2016年1月15日收到修改稿)

如何实现高精度的测量是现代制造业及微电子技术领域的热点问题之一. 基于微纳米测头的三坐标测量机是当前实现高精度测量的重要手段. 随着测量尺寸的减小, 常用的纳米/微纳尺度的测头与待测表面之间形成静态接触, 其表面相互作用成为了影响其测量精度和可靠性的关键因素之一. 本文基于一种触发式振动测头, 研究了其动力学模型, 并通过对测头纳米尺度表面相互作用的理论分析及数值模拟, 确立了测头振动参数与表面相互作用之间的关联. 实验研究表明, 参数优化后的谐振微纳测头能有效抑制表面作用带来的干扰, 提高测量精度.

关键词: 纳米表面作用力, 简谐振动, 接触式测量, 三维振动测头

PACS: 06.30.-k, 42.62.Eh, 06.20.-f, 03.65.Ta

DOI: 10.7498/aps.65.080603

1 引言

随着现代制造业的需要和微电子技术快速发展, 出现了各种微器件, 这些微器件的几何特征尺寸多为微纳米数量级. 传统的坐标测量机的精度只能达到微米量级, 满足不了纳米测量的要求; 原子力显微镜 (AFM) 测量范围小、探针短, 也无法满足这些微器件几何尺寸的三维测量需求^[1,2]. 因此, 纳米级三坐标测量机 (Nano-CMM) 的研制是当前高精度测量技术的发展趋势. 而作为 Nano-CMM 核心部件的三维纳米测头逐渐成为纳米测量研究领域的热点问题. 目前一些著名的研究机构和大学都在开发纳米级分辨力的三维微纳测头系统, 如英国的联邦物理研究所 (NPL)^[3]、荷兰 Eindhoven 大学^[4]、德国计量院^[5]、日本的东京大学等^[6] 研制了各种机械接触式和光学非接触式的测头. 这些研究多集中于测头系统的传感原理和测量方式上, 而对于测头探针和微器件表面相互作用的力学研究则相对较少.

从文献^[7]和^[8]的对 AFM 的研究可以看出, 当测量接触面发生在微小区域时会产生微尺度效

应、表面效应等新问题, 且表现出了宏观尺度接触下不同或不具备的特性, 严重影响测量精度. 而随着测头探针和微器件的尺寸减小至微纳量级, 探针与测量面的静态接触形成的相互作用力同样不可忽略. 如若微球半径在 150 μm 以下, 测量时除了会产生黏滞效应外, 探针与被测体两个微观面之间存在的表面作用力还会使球头被反向吸引至工件, 导致测量信号产生折返点, 从而引起触发误判影响系统的测量精度和可靠性. 因此当前纳米接触式测头存在的共同问题之一是: 如何解决测头几何尺寸微型化后微观作用力对测量精度的影响. 为解决上述问题, NPL 开展了基于压阻式的振动式探头的研究工作, 但由于使用 MEMS 技术, 其加工和装配都相当复杂^[9].

本文基于一种以布拉格光纤光栅 (FBG) 为传感元件的触发式测头, 通过对测头以及被测物表面相互作用的动力学模型的分析, 提出利用谐振来抵消纳米尺度表面相互作用对测量精度影响的测量模式; 在该动力学模型的理论分析和数值模拟基础上, 确立了表面相互作用和测头谐振参数之间的约束关系; 并进一步开展了相关的实验研究, 验证

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 51275148, 51205103) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: shawiu2000@163.com

了该约束关系的可靠性.

2 模型与理论分析

2.1 触发式振动测头的测量原理与动力学模型

基于FBG的振动式触发测头如图1所示, 悬浮机构由4片L形高弹性簧片以45°角与支架相连, 四根FBG传感器连接于支架各边缘点, FBG的另一端固定在固板的一面, 固板的另一面与压电陶瓷(PZT)相连. 在PZT驱动器的驱动下, 探针以一个恒定的频率和幅度做振动. 当探针与工件接触时, 其振动的幅度将改变, 这个变化量由支架传递给FBG, 通过对FBG输出信号的处理实现触发式测量的功能. 在这个过程中, 微球型探针此时可简化为弹簧振子的受迫振动模型, 如图2所示. 探针在PZT的外力驱动下会产生振动, 其动力学模型可由二阶微分方程描述为

$$m \frac{d^2 D}{dt^2} + b \frac{dD}{dt} + kD = F_{\text{drive}} \cos(\omega t) + F_{\text{sum}} + G, \quad (1)$$

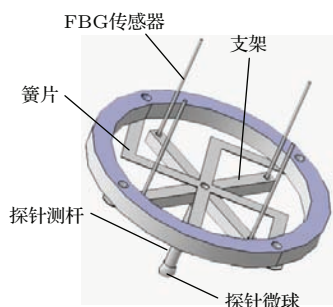


图1 三维振动测头

Fig. 1. Schematic of the three-dimensional.

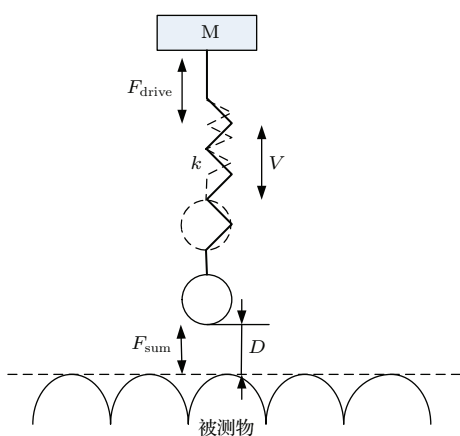


图2 测头的等效微观动力学模型

Fig. 2. Dynamically equivalent model of the probe vibrating trigger probe.

其中, m 是探针的质量, b 是阻尼系数, k 是测头的弹性系数, D 是探针到测量面的距离, ω 是测头探针的振动频率, F_{drive} 为驱动测头探针振动的外加作用力, F_{sum} 为测头探针与被测体表面之间存在的表面作用力, G 为测头探针所受重力. 由方程(1)可知, 当探针与被测表面的距离确定并实施测量时, 若外加驱动力 F_{drive} 与探针受到的表面作用力 F_{sum} 与 G 合力大小相等且方向相反, 即 $F_{\text{drive}} = -(F_{\text{sum}} + G)$, 则此时探针的振动将不被所受到的表面作用力影响, 并能保持初始的准简谐振动状态, 进而能够实现可靠的高精度测量. 为了合理地选取测头振动参数, 精确地实现 $F_{\text{drive}} = -(F_{\text{sum}} + G)$, 必须系统地分析探针所受表面作用随距离变化的演化规律.

2.2 表面作用力的理论模型与数值分析

测头探针与测量面的微尺度接触中, 产生的微观作用力主要包括毛细力、范德瓦耳斯力、静电力和卡西米尔力. 当测头探针的半径远远大于其到平面的距离时, 毛细力用方程可近似表示如下^[10,11]:

$$F_1 = \frac{4\pi R \gamma_L \cos \theta}{1 + \frac{h_m - D}{D}}, \quad (2)$$

其中, γ_L 是液体的表面张力, D 是探针和测量面之间的距离, R 是探针测球的半径, θ 是探针与水膜的接触角.

范德瓦耳斯力是由连在一起的分子或原子的极化造成的, 当探针与测量面相接近时, 范德瓦耳斯力可近似为^[12]

$$F_2 = \left(\frac{2D}{2D + r} \right)^2 \frac{HR}{6D^2}, \quad (3)$$

其中, r 为两个表面的平均粗糙度, H 为表征物质之间范德瓦耳斯吸引能大小的哈梅克常数.

探针与测量面静电接近时的静电力可近似为^[13]

$$F_3 = \frac{\varepsilon_0 U^2 \pi R^2}{D^2}, \quad (4)$$

其中 ε_0 是自由空间常数, U 是表面间的电位差.

探针和测量平面之间卡西米尔作用力可用下式表示^[14]:

$$F_4 = \frac{R\pi^3 \hbar c}{360D^3}, \quad (5)$$

其中, $\hbar$ 为普朗克常数除以 2π , c 为真空中的光速.

以上方程可以看出, 表面作用力的大小依赖于系统的属性. 这些属性包括探针和测量表面的材料

密度、Hamaker 常数、表面缺陷最大深度以及与接触面的角度等. 为了提高该模型的普适性, 我们在仿真计算的物理参数选取中充分考虑了温度对表面作用力的影响. 本文中的待测件 K 级碳化钨标准量块表面粗糙度取其最大值; 微球直接接触测量面, 本设计中采用了硬度和耐磨性均较好的测球和测杆一体化的钨探针, 探针微球直径为 $240\text{ }\mu\text{m}$. 测头和量块的相关物理参数如表 1 所示^[10–14].

表 1 测头和量块的相关物理参数

Table 1. Physical attributes of the probe and the gauge block.

物理参数	参数值
钨钢的密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	15700
测球的密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	19250
钨钢量块表面粗糙度 r/nm	100
水与测量面的接触角 $\theta/(\text{^\circ})$	85
水的表面张力 $\gamma/\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$	0.07275

基于 (2)—(5) 式, 利用数值模拟, 我们可以得到测头和量块之间总的表面作用力, 如图 3 所示. 由图 3 中可以看出, 毛细力在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 附近时接近为 0, 但随着测量面距离的减小, 在表面作用力中的比重迅速增大, 当距离小于 10 nm 后占据了主导地位; 探针在距测量面 $1\text{ }\mu\text{m}$ 附近时, 起主导作用力的是静电力, 但由于全部作用力的合力在 nN 级, 非常微弱, 可以忽略; 卡西米尔力和静电力随着表面间距离的减小逐渐占主导地位, 特别在 1 nm 附近时, 其作用力之和达到 mN 级; 范德瓦耳斯力最高在 nN 级, 所占比重较小, 当测球直径在 μm 量级时, 可以忽略其影响. 总体上看, 探针和量块之间总的表面作用力随着距离的减小单调递增, 并在纳米尺度上达到 mN 量级, 将对探针的运动状态产生显著影响.

另一方面, 当测球尺寸进入微米量级, 其所受的表面作用力可达到测球重力 G 的几十甚至几百倍, 这时测球会受到较大的黏滞力, 最坏的情况是甚至被反向吸住, 这将会严重影响测头触发定位的精度, 从而影响坐标测量机的测量精度. 如图 4 所示, 在距离 5 nm 处, 探针所受的表面作用力是重力的 20 倍, 而且随着距离的减小, 二者之比急剧增加, 在 1 nm 处的比值达到 540. 由此可见, 当测头探针与被测体之间的距离进入纳米尺度后, 其表面相互作用将起主导作用, 并对测量的精度和可靠性产生显著影响.

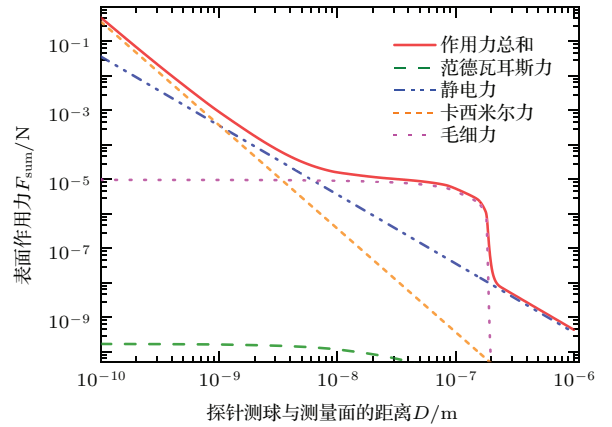


图 3 (网刊彩色) 探针与测量面间表面作用力与距离之间的关系

Fig. 3. (color online) Theoretical surface forces with respect to separation distance.

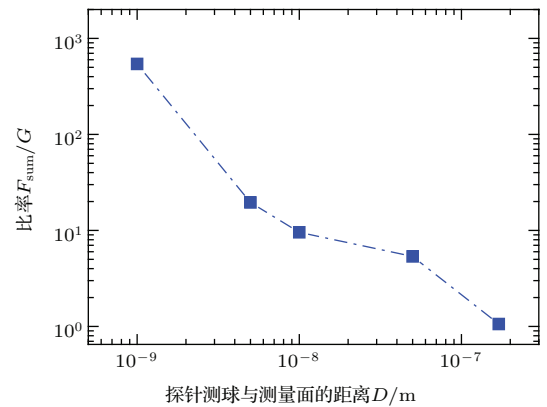


图 4 表面作用力与测球重力比

Fig. 4. The ratio of the theoretical surface force and gravity of the stylus.

3 仿真计算与实验验证

由上述分析可知, 当探针远离被测表面时, 探针的运动可以看作完全由外加作用力驱动, 而探头的振幅也由外加驱动力的大小决定; 但随着探针向被测表面靠近, 表面作用力 F_{sum} 变得不可忽略, 探头的振动状态将受到 F_{sum} 的影响. 当探针与被测表面的距离确定并实施测量时, 若我们能够实现 $F_{\text{drive}} = -F_{\text{sum}}$, 则此时探针的振动将不被所受到的表面作用力影响, 并能保持初始的准简谐振动状态, 进而能够实现可靠的高精度测量. 基于以上理论模型与分析, 我们将利用仿真模拟研究不同测量条件下的表面作用力及其与探针理论最小振动幅度、速度和频率之间的约束关系, 并通过相关的实验研究验证这一关系的可靠性.

3.1 表面作用力对测头最小振动幅度的影响

根据探头的动力学模型, 由图 2 及 (1) 式可知, 当探针在垂直方向振动时, 表面作用力的标量和 F_{sum} 即为探针测量状态时所需要克服的最大阻力 (接近时表面力是重力的 10^2 倍, 重力可以忽略), 要实现相应的外加驱动力 $F_{\text{drive}} = F_{\text{sum}}$, 该探针最小的理论振动幅值 A_{min} 如下式所示:

$$A_{\text{min}} = \frac{F_{\text{drive}}}{k} = \frac{F_{\text{sum}}}{k}. \quad (6)$$

由此可见, 测头探针的最小振幅由探针所受的表面作用力之和与系统的弹性系数共同决定. 因此, 当测头的结构一定, 即弹性系数 k 不变的情况下, 半径不同的微球, 为了抵消表面作用力, 测头所需的最小振幅也不同. 利用仿真模拟, 我们给出了在两种不同测量环境下, 测头最小振幅与其测球尺寸之间的关系, 如图 5 所示.

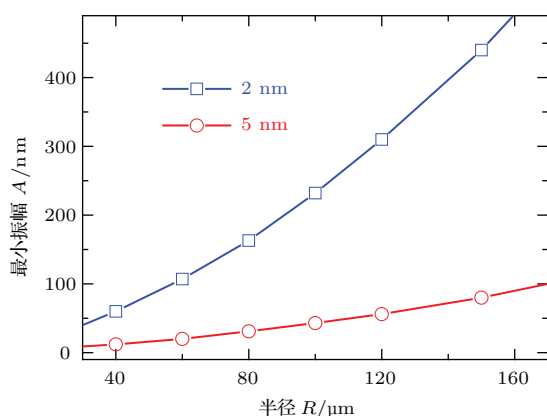


图 5 距测量面 2 和 5 nm 时为抵消作用力测头所需最小振幅

Fig. 5. The minimum amplitude required to counteract the surface forces when 2 and 5 nm distance from surface.

3.2 表面作用力对测头振动速度和频率的影响

测球与被测体表面以相对速度 v_0 碰在一起的瞬间, 测球与被测工件之间的碰撞力 F_{imp} 的大小为 [15]

$$F_{\text{imp}} = \sqrt[5]{\frac{125}{36} m_q^3 v_0^6 E_r^2 r}, \quad (7)$$

其中, r 为测球半径, E_r 为弹性模量, m_q 为等效质量, 且 $m_q = m_1 m_2 / (m_1 + m_2)$, m_1 为测球和运动部分的质量, m_2 为被测工件的质量, 当 m_2 远大于

m_1 时, $m_q \approx m_1$. 测头在 PZT 的驱动力下稳定状态时振动速度幅值 $v_m = \omega A$, 同时为了防止相对碰撞速度太大而引起测球或者被测件的塑性变形, 可以求得最大触碰速度

$$v_{\text{max}} = 41 \left(\frac{3\sigma_Y^5}{4\rho\pi E_r^4} \right)^{1/2}. \quad (8)$$

由 (6) 和 (8) 式即可得测头的最大振动频率为

$$f_{\text{max}} = \frac{41 E_r^2 k \sqrt{3\sigma_Y^5}}{2\pi F_{\text{sum}} \sqrt{4\rho\pi}}, \quad (9)$$

其中, ρ 为测球的密度, σ_Y 为被测工件的屈服应力极限, F_{sum} 为探针所受的表面作用力之和. 测头最小振幅与测球尺寸之间的关系, 如图 6 所示. 由 (8) 和 (9) 式可以看出, 振动测头的振动速度和频率除了受到测球材料、待测量物材料属性的约束, 还受表面作用力的约束, 这是本文设计的测头不同于一般静态测头之处.

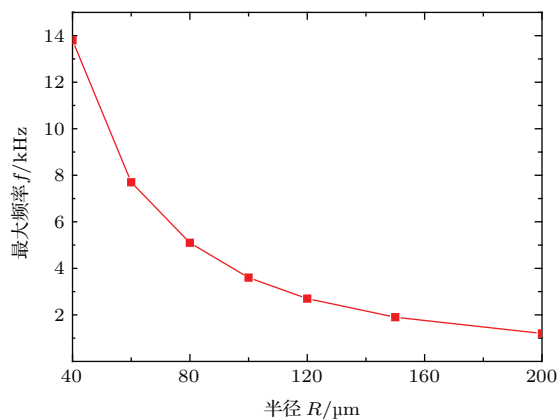


图 6 测头最大允许振动频率

Fig. 6. The maximum frequency with respect to separation distance.

3.3 实验与讨论

基于上述约束关系, 根据具体的测量条件 ($D = 2$ nm) 及本设计的振动测头的物理参数 ($R = 120$ μm), 可以得到为抵消表面作用力的影响, 测头所需的理论振动参数为最小振动幅度 310 nm, 最大振动速度 5.2 mm/s, 最高振动频率 2.7 kHz. 将测头安装在精密固定机台上, 同时架设 SIOS 单光束反射式激光干涉仪、PI 闭环精密微动控制台、压电陶瓷驱动器以及信号发生器等设备, 搭建的测量表面作用力的实验系统如图 7 所示.

我们分别测量了测头在 z 方向上静态和振动状态下, 探针微球和量块由相互接触到相距 5 nm 过程中, 传感器端所得到的输出电压随距离增加而

产生的变化. 采集卡速率为5 k/s, 采集时间为0.5 s左右, 测量结果如图8所示. 图8(a)为不加振动时, 探针微球和量块接触然后脱离的振荡输出, 其中虚线中噪声干扰最大峰峰值电压0.8 mV. 图8(b)是测头以100 Hz的频率和600 nm的振幅振动时, 探针在脱离测量面过程中传感器端的输出, 由环境、电路等引起的噪声干扰的振荡峰峰值为0.4 mV, 约为静态测头的50%. 两次测量的环境、测头系统相同, 故可以认为噪声水平的降低是振动测头有效减小了表面作用力所引起的“突跳”干扰所致.

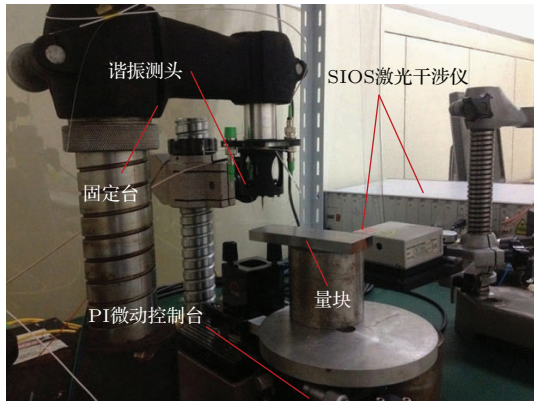


图7 主要实验装置

Fig. 7. Main experimental apparatus.

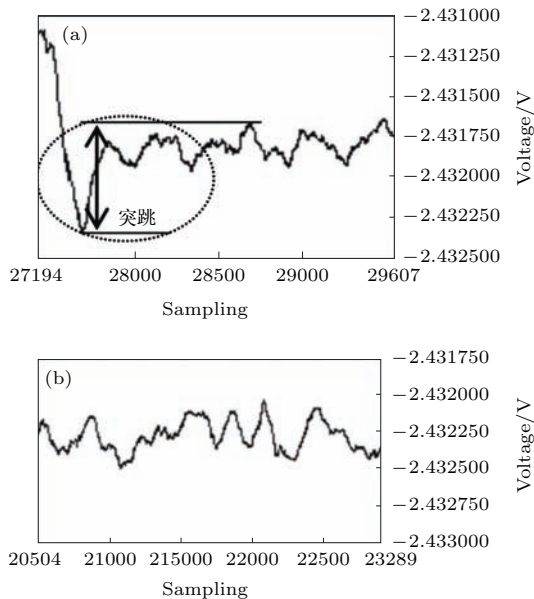


图8 (a) 静态测头脱离测量面过程中的输出; (b) 振动测头脱离测量面过程中的输出

Fig. 8. (a) The output of the non-vibrating probe when separating from the gauge block; (b) the output of the vibrating probe when separating from gauge block.

测头的灵敏度是指单位位移的电压变化量, 与噪声水平一起决定了系统的分辨力. 测头和量块

接触触发后, 控制台以固定的步进驱动量块, 同时记录测头的输出电压, 得到灵敏度曲线如图9所示, 拟合后得到 z 向灵敏度为 $1.66 \text{ V}/\mu\text{m}$. 根据上文系统的噪声水平, 可计算出振动测头的最优触发分辨力为0.3 nm, 比静态测头提高了近一倍.

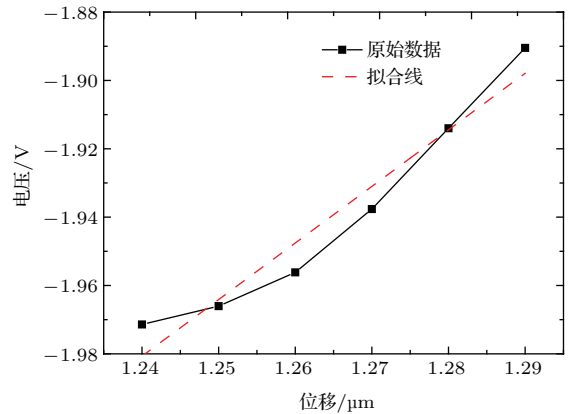
图9 测头 z 向灵敏度曲线

Fig. 9. The vertical direction sensitivity of probe.

4 结 论

为了减小纳米尺度测量时表面作用力对三维振动微纳CMM测量精度及可靠性的影响, 建立了测头和测量面间的作用力模型. 通过系统地分析表面作用力的大小和构成, 给出表面作用力与探针和测量面间距之间的关系, 并确立探针抵消表面力影响所需的理想振动参数: 最小振动幅度和最大允许频率. 该方法已成功应用于基于FBG的纳米三坐标振动式测头的参数设计中. 相关实验数据表明给测头施以合适的振动频率和幅度可以减小表面作用力的影响, 测头 z 向灵敏度为 $1.66 \text{ V}/\mu\text{m}$, 分辨力可达0.3 nm. 随着测头和实验系统的继续优化, 性能指标还将进一步完善和提高.

参考文献

- [1] Huang Q X, Yu H J, Huang S, Qian J Z 2013 *China Mechanical Engineering* **24** 1264 (in Chinese) [黄强先, 余慧娟, 黄帅, 钱剑钊 2013 中国机械工程 **24** 1264]
- [2] Zhang X J, Meng Y G, Wen S Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 728 (in Chinese) [张向军, 孟勇刚, 温诗铸 2004 物理学报 **53** 728]
- [3] Richard K L, James C, Claudiu G, Christopher W J, Lakshmi N, Sun W J, Matthew T, Andrew Y 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 074002
- [4] Bos E J C 2011 *Precision Engineering* **35** 228

- [5] Danzebrink H U, Dai G, Pohlenz F, Dziomba T, Bütelfisch S, Flügge J, Bosse H 2012 *IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference* Graz, Austria, May 13–16, 2012 p898
- [6] Michihatam, Takayay, Hayashi T 2008 *Annals of the CIRP* **57** 493
- [7] Guo S, Xiong X M, Xu Z L, Sheng P, Tong P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 116802
- [8] Duan F L, Wang G J, Qiu H B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 046801 (in Chinese) [段芳莉, 王光建, 仇和兵 2012 物理学报 **61** 046801]
- [9] James D C, Richard K L 2013 *Precision Engineering* **37** 491
- [10] Sergio S, Ibert V, Tewfics, Neil H T, Matteo C 2011 *Nanotechnology* **22** 465705
- [11] Liu S S, Zhang C H, Liu J M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6902 (in Chinese) [刘思思, 张朝辉, 刘俊铭 2010 物理学报 **59** 6902]
- [12] Lambert, Pierre 2007 *Capillary Forces in Microassembly* (New York: Springer) pp163–174
- [13] Jacob N, Israelachvili 2011 *Intermolecular and Surface Forces Third Edition* (California: Academic Press) pp107–132
- [14] Sitti M, Hashimoto H 1999 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics* Atlanta, USA, September 19–23, 1999 p13
- [15] Pril W O 2002 *Ph. D. Dissertation* (Eindhoven: Eindhoven University of Technology)

Nano surface interaction and model of vibrating probe*

Chen Li-Juan[†] Chen Xiao-Huai Liu Fang-Fang Wang Jing-Fan

(School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(Received 31 December 2015; revised manuscript received 15 January 2016)

Abstract

The high precision measurement has been a focus in the field of manufacturing and microelectronics in this year. The micro/nano probe for coordinate measuring machine (CMM) acts as a key characteristic because it can measure the high-aspect-ratio components with high precision. Various micro/nano-CMM probes with different principles and different structures have been developed in the last decade. However, most of these studies focused on the sensing principle and measurement methods. There is little research on the behavior of the surface interaction between the probe tip and the workpiece. And the measurement accuracy and reliability of the current probe, especially those of the low stiffness probe, are limited by interaction forces including capillary force, van der Waals force, electrostatic force and Casimir force. Therefore, it becomes a challenge to reduce the effect of the surface interaction forces for the Micro/nano CMM probe. A new trigger probe based on the vibrating principle is analyzed and an optimal method for the appropriate vibrating parameters is presented in this paper.

The structure and principle of the probe are briefly described in the first part. In this system, a tungsten stylus with a tip-ball is fixed to the floating plate, which is supported by four L-shape high-elasticity leaf springs. The fiber Bragg grating (FBG) sensors are used in the probe for micro-CMM due to their superiority in t of small size, high sensitivity, large linear measuring range, immunity to electromagnetic interference, and low cost. One end of FBG is attached to a floating plate, and the other end to a retention plate which is connected with the piezoelectric ceramic actuator (PZT). The probe is driven by the PZT vibrating. Assuming that the driving forces can offset the surface interaction forces, then the probe can be described as a forced vibration model of the spring oscillator. Therefore, the equivalent model of the probe is set up.

In the second part, a relationship between the vibration parameters of the probe and the surface interaction can be confirmed. Through theoretical analysis and numerical simulation, the appropriate vibrating parameters including resonance amplitude, velocity and frequency of the probe are designed, which can offset the surface interaction forces.

In the third part, a probe is designed based on the above theories and an experimental system is set up to verify its rationality. The results show that the resonant micro/nano probe after optimizing its parameters can effectively reduce the influence of surface forces and improve the measurement accuracy.

Keywords: nano surface interaction forces, harmonic vibration, contact measurement, three-dimensional vibrating probe

PACS: 06.30.-k, 42.62.Eh, 06.20.-f, 03.65.Ta

DOI: 10.7498/aps.65.080603

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51275148, 51205103).

[†] Corresponding author. E-mail: shawiu2000@163.com