

基于静电力的可溯源微悬臂梁刚度标定方法^{*}

韩亚倩¹, 赵美蓉¹, 刘 明², 孙培元¹, 宋 乐¹

(1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072; 2. 天津市计量监督检测科学研究院 天津 300192)

摘 要:许多研究机构都建立了微纳力值测量系统,并达到了非常高的测量精度。但是,对微纳力值的传递却很少研究。采用无源悬臂梁作为微纳力值传递标准,提出基于静电力原理的“类参考梁法”悬臂梁刚度测量方法。该方法可准确且便捷地测量悬臂梁刚度,并将其溯源至长度、电压、电容等国际单位(SI)。应用类参考梁法,对刚度范围在1.45 ~ 91 N/m的悬臂梁刚度进行测试,相对方差均小于0.6%,结果表明,类参考梁法具有很好的稳定性。许多因素将影响测量结果,对导致测量误差的因素进行逐一分析。类参考梁法悬臂梁刚度测量合成不确定度低于5%,表明该方法具有可行性。类参考梁法有效改善了悬臂梁刚度测试的不确定度,在AFM高精度微纳力值测量中具有重要的意义。

关键词:微纳力值;微悬臂梁;刚度标定;不确定度

中图分类号: TH82 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Traceable calibration method of cantilever stiffness based on the principle of electrostatic force

Han Yaqian¹, Zhao Meirong¹, Liu Ming², Sun Peiyuan¹, Song Le¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Metrological Supervision and Detection Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300192, China)

Abstract: Lot of micro-nano force measurement systems are set up and very high measurement accuracy is obtained. However, transferring of micro-nano force value is rarely studied. Using the passive cantilever as a transferred standard of micro-nano force value, ‘analogous reference cantilever method’ is presented on the basis of the principle of electrostatic force. The cantilever stiffness can be accurately and conveniently measured and be traced to the international unit (SI) such as displacement, voltage and capacitance. Utilized ‘analogous reference cantilever method’, the cantilever with normal stiffness 1.45 ~ 91 N/m is test, the relative variance is less than 0.6%, the results show that the analogous reference cantilever method has good stability. The factors affected the measured results are analyzed experimentally or theoretically. Combined measurement uncertainty of ‘analogous reference cantilever method’ to measure the stiffness of cantilever is less than 5%, which shows the feasibility of the proposed method. ‘Analogous reference cantilever method’ effectively improves the uncertainty of cantilever stiffness test, and indicates significance in the high-precision micro-nano force value measurement of AFM.

Keywords: micro-nano tiny force; microcantilever beam; stiffness calibration; uncertainty

1 引 言

在微纳计量领域,微小力值的测试技术广泛应用于生物医药、新材料、微电子等多个领域。建立高准确度的微纳计量基标准可以保证微纳计量领域快速可持续发展。许多研究机构都建立了微纳力值测量系统,并取得

了非常高的测量精度^[1-7]。但是,如何将微纳力值进行传递以满足生产生活中涉及的微小力的测量却很少研究。对于中小力值或者大力值可以利用标准质量块来进行力值标准的传递,但是对于微小力值,不能将其溯源至质量,因为当力值级别在 10^{-5} (重力对应质量约1 mg)以下时,受制造工艺的限制,标准质量块自身不确定度较高,无法作为力值传递标准。

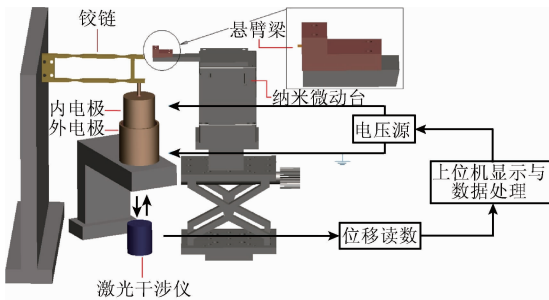
本文提出一种基于原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 悬臂梁刚度测量的微纳力值传递方法。通过静电力原理测量悬臂梁刚度的方式进行微纳力值传递。微悬臂梁由于其低成本、小体积、高性能等优点而被广泛应用于生产制造、科学研究、生物医疗等方面,可以被用来作为微纳力值传递标准。但是由于悬臂梁加工过程中尺寸的限制,使得悬臂梁的刚度难以被准确的测定,使用之前应重新进行标定。常用的悬臂梁刚度标定方法主要有3类,分别是几何尺寸法、动态测量法(振动法)、静态测量法(弯曲法),但是这些方法的不确定度非常大,都大于10%^[8-9]。采用基于静电力原理的类参考梁法测量悬臂梁刚度不仅可溯源至长度、电压、电容等国际单位制,而且可重复性好。

在类参考梁法测量悬臂梁刚度中,首先测定铰链刚度,然后将铰链作为参考悬臂梁,标定未知刚度悬臂梁。

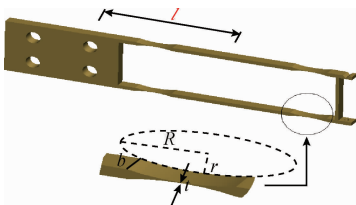
2 悬臂梁刚度标定

2.1 类参考梁法悬臂梁刚度标定系统装置介绍

本课题的基于静电力原理的类参考梁法悬臂梁刚度标定系统的结构如图1(a)所示。AFM悬臂梁^[10]与弹性支撑相接触,并且可以通过纳米微动台 P-621.1CD(1 nm 分辨率)产生竖直方向的运动,位移量的大小通过激光干涉仪 SIOS2000(1 nm 分辨率)测量。根据受力相等原则,通过计算参考梁上的作用力就可以计算出待测梁上的力值大小。



(a) 类参考梁法悬臂梁刚度标定系统装置
(a) Cantilever beam stiffness calibration system device of 'analogous reference cantilever method'



(b) 铰链结构与尺寸
(b) Structure and size of hinge

图1 悬臂梁刚度标定系统

Fig. 1 Cantilever beam stiffness calibration system

本系统采用同轴圆柱型电容作为传感装置,平行四边形铰链机构作为传动装置,当在铰链上施加微小力时,电容传感器内电极会向下移动,并被置于外电极下方的激光干涉仪检测到,通过外接的控制单元,将内电极的位移变化转化为施加于内外电极间的电压变化 ΔU ,使内电极回到初始平衡位置,此时电容传感器产生的静电力等于作用于铰链上的微小力 ΔF_z ,用公式可以表达为:

$$\Delta F_z = \frac{1}{2} \frac{dc}{dz} (\Delta U)^2 \quad (1)$$

式中: $\frac{dc}{dz}$ 为内外电极的电容梯度,其理论计算可由式(2)表示。

$$\frac{dc}{dz} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln R_2/R_1} \quad (2)$$

式中: R_2 为外电极内径, R_1 为内电极外径。根据参考文献[11-13]可知,只要电容传感器内外电极同轴且无倾角此值为一定值,其值只与内外电极的半径以及介电常数有关。

本实验中采用平行四边形柔性铰链作为弹性支撑,其结构与尺寸参数如图1(b)所示。图中, l 为平行四边形机构的有效长度, t 为铰链最薄处的厚度, b 为铰链的宽度, R 为铰链椭圆的长轴半径, r 为铰链椭圆的短轴半径。

单个椭圆形柔性铰链刚度与上述尺寸参数的关系如下:

$$k_\theta = \frac{Ebr^2}{12Rf(r/t)} \quad (3)$$

式中: $f(x) = \frac{12x^4(2x+1)}{(4x+1)^{5/2}} \times \tan^{-1} \sqrt{4x+1} + \frac{2x^3(16x^2+4x+1)}{(4x+1)^2(2x+1)}$ 。则平行四边形柔性铰链的刚度可以表示为:

$$k = \frac{4k_\theta}{l^2} = \frac{Ebr^3}{3Rf(r/t)l^2} \quad (4)$$

由以上公式可以看出,只要铰链的各项尺寸确定,铰链的刚度理论上为一定值,可保证输入力值与输出位移量具有良好的线性关系。但是,悬臂梁刚度测试过程为一个极其精密的测量过程,铰链的加工过程不能保证尺寸没有误差,因此需通过实验对铰链刚度进行测试,并将测试结果作为铰链的实际刚度来标定悬臂梁刚度。通过实验测试得到柔性铰链的刚度测量值为15.44 N/m,过程见3.1节。

2.2 类参考梁法悬臂梁刚度测量原理

参考梁法进行悬臂梁刚度标定采用已知刚度的悬臂梁来进行,但是作为参考的悬臂梁的刚度并不是准确的,且不能溯源至国际单位,因此会对待测悬臂梁的刚度标定产生误差。

本文采用类参考梁法对悬臂梁的刚度进行标定。用柔性铰链代替参考悬臂梁,其刚度可溯源至国际单位。用纳米微动台带动待测悬臂梁运动。其实验原理如图2所示。

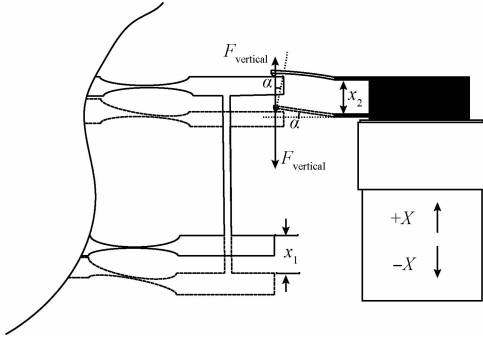


图2 类参考梁法实验原理

Fig. 2 The experimental principle diagram of analogous reference cantilever method

待测悬臂梁通过夹持装置固定于精密纳米微动台上,同时纳米微动台固定于其他位移台之上,使其具有 x 、 y 、 z 3个方向的自由度。实验起初需调整平移台使待测悬臂梁与铰链接触,这一步由光学相机来完成,本实验中采用20倍放大镜头,500万像素的工业相机($2\,448 \times 2\,050$ pix)来进行粗调,并通过观察激光干涉仪上有无振动信号的出现来判断悬臂梁与铰链是否接触上。假设悬臂梁与铰链接触点的相互作用力为 F ,则根据胡克定律,可得:

$$F = k_{\text{铰链}} x_1 = k_{\text{悬臂梁}} (x_2 - x_1) \quad (5)$$

式中: x_1 代表铰链的竖直位移, x_2 为纳米微动台的步进值,则悬臂梁弯曲近似为 $x_2 - x_1$ 。

应用参考悬臂梁法进行悬臂梁刚度标定时,往往忽略了由于悬臂梁自身弯曲而产生的与参考悬臂梁表面的夹角对作用力的影响。同样的,作为参考梁的铰链与悬臂梁接触时,悬臂梁的针尖与铰链平面也并不总是处于垂直状态,夹角的产生使得悬臂梁不仅产生竖直方向的分力,也存在转矩,有必要对其进行修正。根据参考文献[14-16]可知,悬臂梁受到的垂直于作用平面的力 N 以及转矩 T 可以表示为:

$$\begin{cases} N = F_{\text{vertical}} \\ T = -F_{\text{vertical}} H \sin \alpha \end{cases} \quad (6)$$

式中: N 代表悬臂梁所受的法向应力, T 代表悬臂梁所受转矩力, F_{vertical} 为悬臂梁竖直方向受力, H 代表针尖长度, α 代表由于悬臂梁弯曲而引起的角度。

根据文献[14]所述:

$$\begin{pmatrix} \Delta z_{\text{vertical}} \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_z^{-1} & k_{z\theta}^{-1} \\ k_{z\theta}^{-1} & k_\theta^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N \\ T \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中: k_z 表示由于垂直于悬臂梁作用平面的力 N 而引起

悬臂梁弯曲的刚度值, $k_{z\theta}$ 表示由于转矩 T 而引起悬臂梁弯曲的刚度值。将式(6)所导出关系代入,得到悬臂梁在竖直方向弯曲量的变化量为:

$$\Delta Z_{\text{vertical}} = \frac{N}{k_z} + \frac{T}{k_{z\theta}} = \frac{F_{\text{vertical}}}{k_z} [1 - H \sin \alpha (k_z / k_{z\theta})] \quad (8)$$

由于对于矩形悬臂梁:

$$k_z = \frac{D_0 c}{4L^3} \quad (9)$$

$$k_{z\theta} = \frac{D_0 c}{6L^2} \quad (10)$$

式中: $D_0 = Et_c^3$, E 是悬臂梁的杨氏模量, t_c 是悬臂梁的厚度, L 为悬臂梁的长度,由此可得两者之间存在关系 $\rho_z = \frac{k_z}{k_{z\theta}} = \frac{3}{2L}$,所以可得:

$$\Delta Z_{\text{vertical}} = \frac{F_{\text{vertical}}}{k_z} \left[1 - \frac{3}{2} H \sin \alpha \frac{1}{L} \right] \quad (11)$$

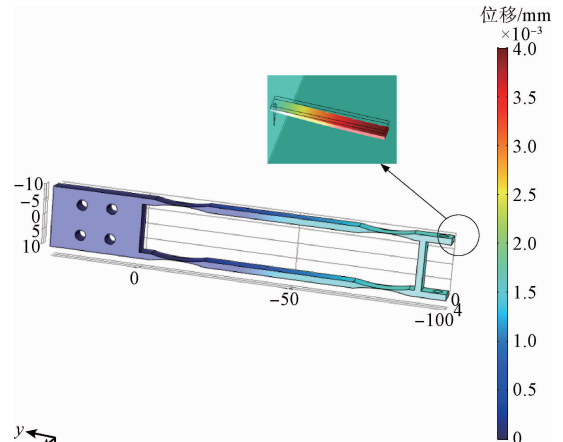
$\Delta Z_{\text{vertical}}$ 可以通过 $x_2 - x_1$ 计算得到。将式(11)结合式(5)可得到悬臂梁的刚度计算式如(12)所示:

$$(x_2 - x_1) = \frac{k_{\text{铰链}} x_1}{k_{\text{悬臂梁}}} \left[1 - \frac{3}{2} H \sin \alpha \frac{1}{L} \right] \quad (12)$$

并且,悬臂梁与柔性铰链作用时产生的角度 α 满足:

$\sin \alpha \approx \frac{x_2 - x_1}{L}$ 。式(12)即为悬臂梁的刚度表达式^[17-21]。

对铰链与悬臂梁作用过程在COMSOL Multiphysical中进行仿真研究,建立模型如图3(a)所示。当微悬臂梁右端位移从 $0 \sim 6 \mu\text{m}$ 每隔 $1 \mu\text{m}$ 变化时,可以得到铰链位移值如图3(b)所示。仿真发现,铰链位移 x_1 与驱动位移 x_2 具有良好的线性关系。最后将 $1 \sim 6 \mu\text{m}$ 相应的驱动位移与铰链位移值代入式(12),计算得出悬臂梁刚度值,结果如图3(c)所示,可以发现4种刚度悬臂梁各自的6组结果均保持在实际值附近,误差较小,原因可能是由于悬臂梁与铰链接触点位置的微小变化引起的,本文暂不予以考虑,通过此仿真也验证了公式的正确性。



(a) 铰链与悬臂梁作用过程仿真

(a) Interaction process simulation of hinge and cantilever beam

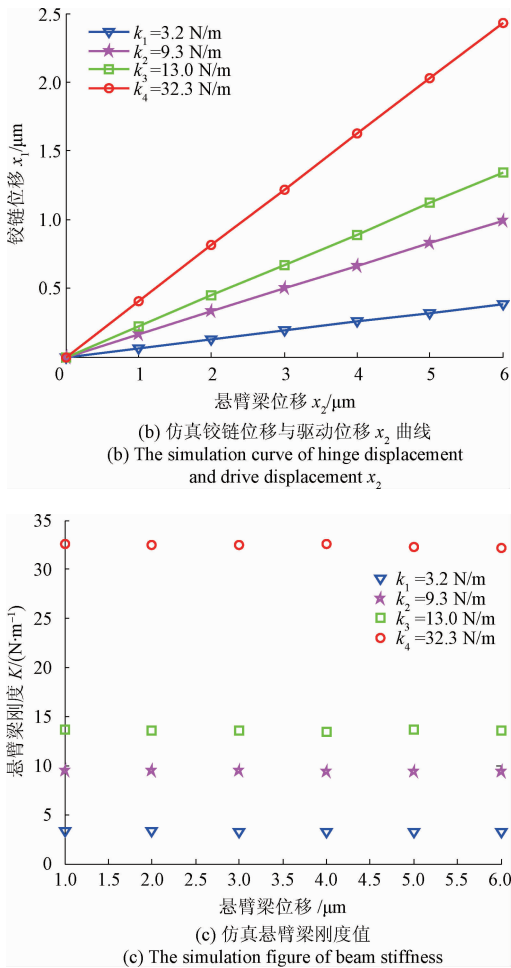


图3 仿真与结果

Fig. 3 Simulation and simulated result

2.3 悬臂梁刚度标定过程

悬臂梁刚度标定具体过程如下:

1) 将柔性铰链及内电极安装于五维调整平台上,用水平尺和本实验设备的同轴度测量与调整装置将电容传感器轴线调整到竖直方向,采用激光干涉仪记录内电极位置,待数值稳定后,记录为零点。

2) 选用 E2 级别标准砝码,分别将 2.5 和 10 mg 的砝码加载到柔性铰链的挂钩处,采用激光干涉仪记录其相应位移,根据力与位移关系得到柔性铰链的刚度。并采用施加静电力的方式进行铰链刚度测量,测量过程与文献[22]一致。

3) 重新将铰链调整至水平状态,并配合相机与激光干涉仪使铰链与悬臂梁相接触。

4) 控制纳米微动台,使其每隔 5 s 步进 1~6 μm 不等连续步进 3 次,并记录相应的激光干涉仪的位移值。当完成最大位移点的测量后,在逐级退回到初始位移点。

5) 通过计算每次步进之后的 $\sin\alpha$,对数据进行补偿

校正,通过多次测量的结果取平均得到悬臂梁的刚度。

3 实验标定过程与结果分析

3.1 铰链刚度测试

将质量为 2、5 和 10 mg 的标准砝码依次自动加载到平行四边形机构的挂钩处并通过激光干涉仪记录相应位移,得到的位移与外加质量块的关系曲线如图 4 所示。

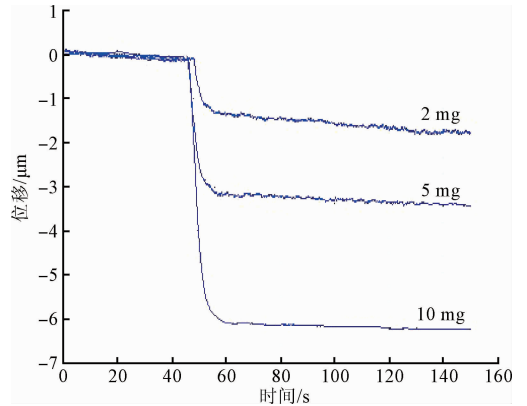


图4 平行四边形铰链刚度测试曲线

Fig. 4 The test curve of parallelogram hinge stiffness

由胡克定律即 $F = k/x = mg$, 分别取 3 个标准质量块的 5 次测量结果进行曲线拟合,得到力-位移曲线,如图 5 所示,曲线斜率的倒数即代表刚度值,数据处理中取实验室所在地区的重力加速度 g 为 9.801 1 N/kg。

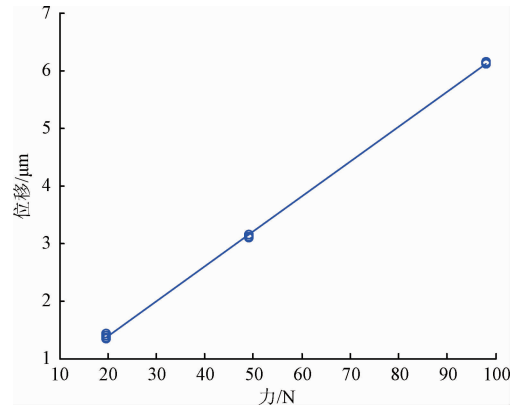


图5 铰链刚度测试力-位移曲线

Fig. 5 The force-displacement curve of hinge stiffness test

由图 5 可得,柔性铰链的刚度测量值为 15.44 N/m,与理论值 14.72 相近,铰链刚度测试的标准偏差为 0.75 N/m,相对误差为 4.86%,铰链刚度测量的不确定度主要来自于位移测量。位移检测的限制因素为激光干涉仪的分辨力以及铰链的热噪声。为了减小测量结果的

分散性,采用加载卸载加载(load-unload-load, LNL)模式即将质量块多次加载/卸载/加载的方式进行测量,以减小误差。

3.2 悬臂梁加载试验

将图 1(a)所示装置放入真空罐内进行悬臂梁加载

步进实验,利用激光干涉仪连续记录内电极也就是铰链的竖直位移值,结合式(9)计算得到悬臂梁的刚度平均值。实验中,对 NSG01、NSG10、NSG20 以及 TESP4 种类型悬臂梁进行了刚度测试,现将 4 种悬臂梁的尺寸参数与特征如表 1 所示。

表 1 四种悬臂梁尺寸信息
Table 1 Geometry of four cantilevers

型号	长度 $L \pm 5/\mu\text{m}$	宽度 $a \pm 5/\mu\text{m}$	厚度 $t_c/\mu\text{m}$	针尖高/ μm	刚度标称值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	刚度典型值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
NSG01	125	30	1.5 ~ 2.5	14 ~ 16	1.45 ~ 15.1	5.1
NSG10	95	30	1.5 ~ 2.5	14 ~ 16	3.1 ~ 37.6	11.8
NSG20	90	60	1.7 ~ 2.3	10 ~ 15	28 ~ 91	48
TESP	125	40	4	12.5	-	42

以 NSG10 为例,设定纳米微动台每次步进 2 μm ,步进间隔时间为 5 s,步进周期为 3 次,采样频率为 6 Hz,通过激光干涉仪记录得到 3 个周期的位移曲线如图 6(a)所示,铰链位移 x_1 以及驱动位移 x_2 的相对关系曲线如图 6(b)所示,发现与仿真结果吻合。

从图 6(a)中可以看出,位移有很大的波动,原因可能是环境扰动造成的,若要减少空气扰动造成的影响,可以将整个测量装置放置于真空罐内,同时从图中可以发现铰链蠕变现象并不明显。对图中位移值进行提取,通过式(9)即可得到待测微悬臂梁的刚度值。

采用相同的方法,测量其他刚度的悬臂梁,得到相应的铰链位移随时间的变化关系曲线,并按相同过程对数据进行处理,得到对应悬臂梁的刚度,结果如表 2 所示。

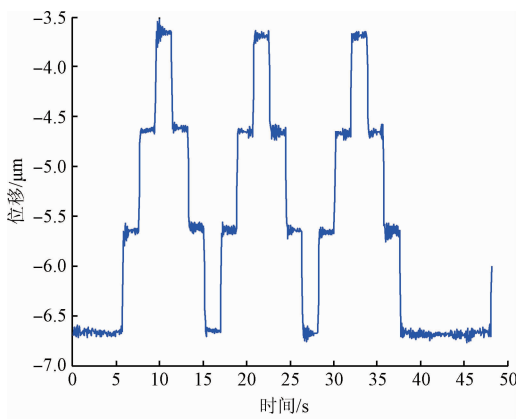
表 2 悬臂梁刚度数据表
Table 2 Stiffness of cantilevers

型号	刚度标称值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	刚度典型值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	测量值/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	标准偏差/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	相对 误差/%
NSG01	1.45 ~ 15.1	5.1	1.43	0.006 1	0.43
NSG10	3.1 ~ 37.6	11.8	15.27	0.062 0	0.40
NSG20	28 ~ 91	48	26.47	0.053 0	0.20
TESP	-	42	12.84	0.074 0	0.57

利用类参考梁法测量悬臂梁刚度的实验结果可以看出,当被测悬臂梁刚度与柔性铰链刚度接近时(两者比值在 0.1 ~ 3 时),其标准偏差均不超过 0.08,相对误差均不超过 0.6%,满足高准确度微纳力值测量的要求。由此可知利用此方法进行悬臂梁刚度测试,可以有很好的重复性,但是由于环境以及原理本身的限制,使得测量值与准确值存在一定偏差。

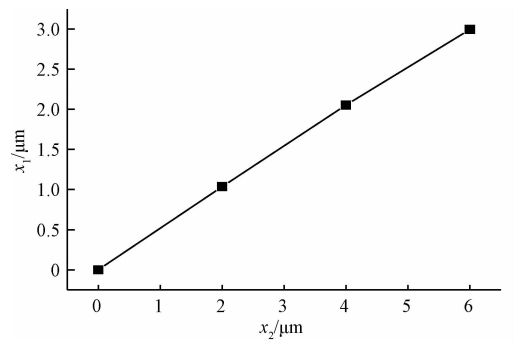
4 不确定度分析

本论文提出的测量悬臂梁刚度的方法中,许多因素都会影响测量结果并导致测量误差,比如地面振动、空气扰动,激光干涉仪位移误差、纳米微动台位移误差,铰链



(a) 铰链与悬臂梁作用过程实验

(a) Interaction process experiment of hinge and cantilever



(b) 铰链位移与驱动位移 x_2 曲线

(b) The curve of hinge displacement and drive displacement x_2

图 6 悬臂梁加载试验与结果

Fig. 6 Cantilever load experiments and the results

刚度以及悬臂梁自身制造误差^[23-25]等,下面将对导致测量误差的因素进行逐一分析。

4.1 A类不确定度

地面振动及空气扰动对悬臂梁刚度测量带来的影响称为A类不确定度。A类不确定度用实验标准偏差来表征,由表2可以看出,相对方差均小于0.6%,因此,A类不确定度即重复误差为0.6%。

4.2 B类不确定度

1) 激光干涉仪引起的不确定度

本实验采用分辨力为1nm的差动式SIOS激光干涉仪,此激光干涉仪进行位移测量主要是依靠准确而稳定的内部HeNe激光波长。根据3σ方式估算,可得不确定度 $d(x_1)$ 为 3.0×10^{-9} m。激光干涉仪对悬臂梁刚度引起的不确定度 $u(x_1)$,主要由干涉仪的分辨率决定,其可以表达为:

$$u(x_1) = \frac{\partial k_{\text{悬臂梁}}}{\partial x_1} \frac{d(x_1)}{k_{\text{悬臂梁}}} = \left[\frac{k_{\text{铰链}} x_1}{(x_1 - x_2)^2} - \frac{k_{\text{铰链}}}{x_1 - x_2} - \frac{3Hk_{\text{铰链}}}{2L^2} \right] d(x_1) / k_{\text{悬臂梁}} \quad (13)$$

代入值计算可得激光干涉仪引起的不确定度为0.20%。

2) 纳米微动台引起的不确定度

本实验使用PI公司P622x系列纳米微动台,此微动台线性度、分辨率以及重复性较好,分辨力为1 nm,根据3σ方式估算,误差 $d(x_2)$ 约为3.0 nm,由纳米微动台造成的悬臂梁刚度的不确定度 $u(x_2)$ 表示为:

$$u(x_2) = \frac{\partial k_{\text{悬臂梁}}}{\partial x_2} d(x_2) / k_{\text{悬臂梁}} = - \frac{k_{\text{铰链}} x_1}{(x_1 - x_2)^2} d(x_2) / k_{\text{悬臂梁}} \quad (14)$$

代入值计算可得纳米微动台引起的不确定度为0.10%。

3) 悬臂梁长度引起的不确定度

悬臂梁的长度直接利用思特-梦迪特(NT-MDT)以及布鲁克公司提供的长度,其长度值的不确定度为 $d(L)$ 为 5.0×10^{-6} m。悬臂梁的长度值对其刚度引起的不确定度 $u(L)$ 可表示为:

$$u(L) = \frac{\partial k_{\text{悬臂梁}}}{\partial L} d(L) / k_{\text{悬臂梁}} = \frac{3Hk_{\text{铰链}} x_1}{L^3} d(L) / k_{\text{悬臂梁}} \quad (15)$$

代入值计算可得悬臂梁长度引起的不确定度为0.035%。

4) 悬臂梁针尖高度引起的不确定度

悬臂梁针尖的高度 H 的测量不确定性也引起刚度测量的误差。数据处理中也是直接利用的公司提供的数值,因此也会对悬臂梁刚度的测量带来一定的影响。经

分析可得针尖高度的不确定度为 2.0×10^{-6} m,因此由于针尖高度 H 而引起的不确定度可以表示为:

$$u(H) = \frac{\partial k_{\text{悬臂梁}}}{\partial H} d(H) / k_{\text{悬臂梁}} = - \frac{3k_{\text{铰链}} x_1}{2L^2} d(H) / k_{\text{悬臂梁}} \quad (16)$$

代入值计算可得悬臂梁针尖高度引起的不确定度为0.058%。

5) 铰链刚度引起的不确定度

铰链的刚度是标定过程中的主要成分,为了分析铰链刚度对悬臂梁刚度的影响,将悬臂梁刚度的不确定度 $u(k_{\text{铰链}})$ 作为 $k_{\text{铰链}}$ 的函数进行讨论,根据式(14)可得铰链刚度带来的不确定度,其中 $d(k_{\text{铰链}})$ 即为图5中所计算的0.75 N/m。

$$u(k_{\text{铰链}}) = \frac{\partial k_{\text{悬臂梁}}}{\partial k_{\text{铰链}}} d(k_{\text{铰链}}) / k_{\text{悬臂梁}} = \frac{x_1}{x_2 - x_1} \left[1 - \frac{3}{2} H \sin \alpha \frac{1}{L} \right] d(k_{\text{铰链}}) / k_{\text{悬臂梁}} \quad (17)$$

代入值计算可得铰链刚度引起的不确定度4.42%。

4.3 合成不确定度

将以上不确定度采用式(18)进行合成,标准不确定度以及相关数值如表3所示,其中 $k_{\text{悬臂梁}}$ 的A类不确定度是由一系列的测量数据的标准差得到的。

$$u = \sqrt{u(g)^2 + u(x_1)^2 + u(x_2)^2 + u(L)^2 + u(H)^2 + u(k_{\text{铰链}})^2} \quad (18)$$

表3 $k_{\text{悬臂梁}}$ 的合成不确定度
Table 3 Combined uncertainty of $k_{\text{cantilever}}$

不确定来源	对总不确定度贡献/%
x_1	0.20
x_2	0.10
L	0.035
H	0.058
$k_{\text{铰链}}$	4.42
重复性	0.60
合成	4.46

由表3可以看出, $k_{\text{悬臂梁}}$ 的相对不确定度小于5%,并且可以看出,测量结果的不确定度主要由铰链的刚度 $k_{\text{铰链}}$ 的不确定度决定,激光干涉仪、纳米微动台、悬臂梁本身以及环境对其影响较小。铰链刚度测量越准确,得到的悬臂梁刚度不确定度越小,结果越可靠。

5 结 论

本文提出了一种基于静电力原理的类参考悬臂梁法

的 AFM 微悬臂梁刚度标定方法,该方法可准确而便捷地测量悬臂梁刚度,并且将其溯源至长度、电压、电容等国际单位(SI)。对 4 种不同刚度的悬臂梁进行标定,实验表明此方法标定悬臂梁的刚度具有高度的重复性,且操作简单方便,可作为微悬臂梁弹性常数标定的重要参考供其他方法比对。类参考梁法有效改善了悬臂梁刚度测试的不确定度,在 AFM 高精度微纳力值测量中具有重要的意义。

参考文献

- [1] DONG C L, YUAN C Q, WANG L, et al. Tribological properties of water-lubricated rubber materials after modification by MoS₂ nanoparticles [R]. Scientific Reports, 2016: 35023.
- [2] DONG C L, YUAN C Q, BAI X Q, et al. Tribological properties of aged nitrile butadiene rubber under dry sliding conditions [J]. Wear, 2015, 322-323 (1): 226-237.
- [3] ZHENG X, GAO L, YAO Q, et al. Robust ultra-low-friction state of graphene via moiré superlattice confinement [J]. Nature Communications, 2016, 7: 13204.
- [4] GAO L, LIU Y, MA T, et al. Effects of interfacial alignments on the stability of graphene on Ru (0001) substrate [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(26): 261601.
- [5] LIU C X, ZHANG J, DENG S, et al. Direct preparation of La₂Zr₂O₇ microspheres by cathodic plasma electrolysis [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2016, 474(7): 146-150.
- [6] JIN J, LIU F B, CHENG Y B, et al. Surface carbon chemical states of ion implanted AISI 440C martensitic stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 22(6): 513-518.
- [7] ZHENG Y L, LU H Y, YIN W, et al. Elegant shadow making tiny force visible for water walking arthropod and updated archimedes' principle [J]. Langmuir, 2016, 32(410): 10522-10528.
- [8] 刘权,郭迎福,张越雷,等. 基于 LabVIEW 的悬臂梁固有频率测试研究 [J]. 电子测量技术, 2009, 32(9): 85-88.
LIU Q, GUO Y F, ZHANG Y L, et al. Research on natural frequency of cantilever beam based on LabVIEW [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(9): 85-88.
- [9] 宋云鹏,吴森,傅星,等. AFM 微悬臂梁探针弹性常数各种标定方法的比较与分析 [J]. 传感技术学报, 2015, 28(8): 1161-1168.
- SONG Y P, WU S, FU X, et al. The comparison and analysis of AFM microcantilever beam probe's elastic constants calibration methods [J]. Journal of Sensing Technology, 2015, 28(8): 1161-1168.
- [10] 孙浩明,王志红,曾慧中,等. 扫描探针显微镜针尖电容的测量与应用 [J]. 电子测量技术, 2009, 32(2): 163-165, 169.
SUN H M, WANG ZH H, ZENG H ZH, et al. Application of measuring the capacitance of the tip in SPM [J]. Electronic Measurement Technology, 2009, 32(2): 163-165, 169.
- [11] 蔡雪,赵美蓉,郑叶龙,等. 用于 10^{-6} N ~ 10^{-5} N 微力测量的柔性铰链机构设计 [J], 传感技术学报, 2014, 27(11): 1451-1456
CAI X, ZHAO M R, ZHENG Y L, et al. Design of flexure hinge mechanism for 10^{-6} N ~ 10^{-5} N micro force measurement [J]. Journal of Sensing Technology, 2014, 27(11): 1451-1456.
- [12] 张国强,赵美蓉,蔡雪,等. 电容法微力测量中轴偏对电容梯度的影响 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 14-20.
ZHANG G Q, ZHAO M R, CAI X, et al. Effect of electrode offset on the capacitance gradient in micro force measurement based on capacitive sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29(1): 14-20.
- [13] 齐永岳,刘明,林玉池,等. 可溯源至质量的静电力复现与测量技术 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1063-1068.
QI Y Y, LIU M, LIN Y CH, et al. Electrostatic force reproducing and measurement technology traceable to mass [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument. 2011, 32(5): 1063-1068.
- [14] EDWARDS S A, DUCKER W A, SADER J E, et al. Influence of atomic force microscope cantilever tilt and induced torque on force measurements [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 103 (6): 103-108.
- [15] WANG F. Comment on influence of atomic force microscope cantilever tilt and induced torque on force measurements [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(3): 096103.
- [16] 李全祥,殷海涛,姜金辉. 复合材料悬臂梁的宽频带振动控制试验系统 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(2): 61-65.
LI Q X, YIN H T, JIANG J H. Wide-band vibration control test system for composite material cantilever beam [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2012, 31(2): 61-65.

- [17] XING F . Editorial: Special issue on smart optical instruments and systems for space applications [J]. Instrumentation, 2015, 2(1):1-2.
- [18] HUTTER J L. Comment on tilt of atomic force microscope cantilevers: Effect on spring constant and adhesion measurements [J]. Langmuir, 2005, 21 (6): 2630 -2632.
- [19] 黄强先,张蕤,张连生,等. 动态原子力显微镜悬臂高阶谐振相位特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,30(9):1411-1417.
- HUANG Q X, ZHANG R, ZHANG L SH, et al. Research on phase characteristic of higher-order resonance cantilever in dynamic AFM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2016, 30 (9): 1411-1417.
- [20] KIM M S, CHOI J H, KIM J H, et al. Accurate determination of spring constant of atomic force microscope cantilevers and comparison with other methods[J]. Elsevier Ltd, 2010 ,43(4):520-526.
- [21] HAN G, AHN H S. Calibration of effective spring constants of colloidal probes using reference cantilever method[J]. Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016 ,489(20):86-94.
- [22] ZHENG Y L, SONG L, HU G, et al. The multi-position calibration of the stiffness for atomic-force microscope cantilevers based on vibration [J]. Measurement Science&Technology, 2015, 26(5): 055001.
- [23] ZHENG Y L, SONG L, HU G, et al. Improving environmental noise suppression for micronewton force sensing based on electrostatic by injecting air damping[J]. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(5): 055002-055002-7.

- [24] SONG L, ZHENG Y L, HU G, et al. Highly sensitive, precise, and traceable measurement of force [J]. Instrumentation Science & Technology, 2016, 44 (4): 386-400.
- [25] ZHENG Y L, YANG X, ZHAO M, et al. Adaptive control algorithm improving the stability of micro force measurement system [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 246(1): 1183-1191.

作者简介



韩亚倩, 2015 年于中国石油大学(华东)获得学士学位,现为天津大学硕士研究生,主要研究方向为微纳力值测量与溯源研究。

E-mail:450908247@qq.com

Han Yaqian received her B. Sc. from China University of petroleum (East China) in 2015. Now she is a master candidate in Tianjin University . Her main research interest includes micro-nano force testing and traceability study.



宋乐(通讯作者),分别在2002年、2005年、2008年于天津大学获得学士、硕士、博士学位,现为天津大学副教授、研究生导师,主要研究方向为精密机械系统设计及应用、力值计量与溯源方法、智能传感技术与系统。

E-mail:songle@tju.edu.cn

Song Le (Corresponding author) received his B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. degrees all from Tianjin University in 2002, 2005, 2008, respectively. Now he is a associate professor, graduate student mentor in Tianjin University. His main research interest includes the design and application of precision machinery, force measurement and traceability, the intelligent sensor technology and system.