

文章编号 1004-924X(2019)02-0402-08

## 新型悬丝约束支撑微纳测头的变刚度特性分析

李保坤, 刘向阳, 杨洪涛\*, 吴耀东

(安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘要:**针对传统微纳测量装置在测量过程中测头支撑机构刚度不可变化的问题,设计了一种基于悬丝约束支撑的变刚度微纳测头。利用压电装置驱动柔顺导向机构产生位移,以改变悬丝所受的轴向张紧力。基于应力刚化原理改变悬丝的横向刚度,进而改变测头支撑机构的整体刚度,以获得具有变刚度性能的新型微纳测头。根据测头支撑机构在测量过程中刚度的变化,分别建立刚性和柔性模式下微纳测头 Z 向和横向的刚度理论模型。根据有限元仿真和刚度理论模型,分别得到测头刚度随悬丝端面受力的变化曲线。对比测头刚度的仿真值和理论值,得到测头 Z 向和横向刚度的平均相对误差分别为 2.41% 和 4.72%,结果表明理论模型具有较高的准确性。研究成果为该类型测头的变刚度控制奠定了前期理论基础。

**关键词:**变刚度;悬丝支撑;柔顺机构;应力刚化;刚度模型

**中图分类号:**TH721 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192702.0402

## Variable stiffness characteristic analysis of a novel micro-nano probe with wire constraint suspension

LI Bao-kun, LIU Xiang-yang, YANG Hong-tao\*, WU Yao-dong

(School of Mechanical Engineering,

Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

\* Corresponding author, E-mail: lloyd@163.com

**Abstract:** To address the problem that the stiffness of the probe support mechanism cannot be changed during the measurement process using a traditional micro-nano measuring device, a micro-nano probe with variable stiffness was designed based on the constraint support of the suspension wire. A piezoelectric device was employed to drive the compliant guide mechanism, which produces a displacement. Thus, the axial tension of the suspension wire changed. Based on the principle of stress stiffening, the transverse stiffness of the suspension wire was changed, and the overall stiffness of the probe support mechanism was varied to obtain a novel micro-nano probe with variable stiffness performance. Depending on the stiffness variation of the probe support mechanism during the measurement process, the theoretical model of the Z-direction and the transverse stiffness of the micro-nano probe were established in the rigid and flexible modes, respectively. Based on the finite element simulation and the established theoretical stiffness model, the curve of the stiffness change of

**收稿日期:**2018-07-26; **修订日期:**2018-09-16.

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(No. 51605006, No. 51675004);安徽省高等学校自然科学基金重点资助项目(No. KJ2015A121);广西省制造系统与先进制造技术重点实验室开放课题资助项目(No. 17-259-05-013K)

the probe versus the terminal force applied on the suspension wire was obtained. Comparing the simulated and theoretical values of the probe stiffness, the average relative errors of the Z-direction and transverse stiffness of the probe were observed to be 2.41% and 4.72%, respectively. This indicates that the theoretical model had high accuracy. The research results laid a preliminary theoretical foundation for variable stiffness control of this type of probe.

**Key words:** variable stiffness; suspending wire support; compliant mechanism; stress stiffening; stiffness model

## 1 引 言

微纳测量装置的性能直接影响微纳器件的表面质量,在某种程度上已成为衡量一个国家科技发展水平的重要标志<sup>[1]</sup>。测头组件是微纳测量装置的关键部件,其性能决定着微纳测量装置的精度、灵敏度等各项性能<sup>[2]</sup>。测头约束支撑机构又是测头组件的核心部件,对于接触式测头而言,其刚度特性直接影响测头的动态性能、稳定性、灵敏度和测量精度<sup>[3]</sup>。由于微纳测量装置所测器件尺寸较小,为避免测头测量时对待测器件的破坏,需要支撑机构具有较低的刚度,但当测头主轴运动过程中,为保证测头系统的稳定性,又要求测头支撑具有较高的刚度,即根据测量过程不同,测头需要不同的刚度约束<sup>[4-6]</sup>。因此,研究并开发出变刚度性能的测头约束支撑机构具有重要的理论和现实意义。

Bonello 等<sup>[7]</sup>提出通过改变约束支撑梁的有效长度来改变刚度。Challa 等<sup>[8]</sup>提出在悬臂梁末端施加外部载荷,达到变刚度效果。以上两人提出的结构虽然满足变刚度条件,但增加了其结构的复杂性。范光照等<sup>[9]</sup>提出一种将悬丝作为支撑机构的微纳测头,在安装测头结构时给定悬丝特定的预紧力,研究表明基于悬丝约束支撑的测头在测量时具有较好的灵敏度和复位性,但在测量过程中并不能满足变刚度要求。Alblalaih 等<sup>[10]</sup>基于压杆失稳原理,提出了一种可变刚度悬臂梁约束支撑的微纳测头,但并未能建立刚度模型。

柔顺机构是利用构件的弹性变形来传递运动和力的新型机构<sup>[11]</sup>,相对于传统机构而言,柔顺

机构具有无摩擦、运动精度高、响应速度快、易于微型化等优点<sup>[12-13]</sup>,已被广泛用于微机电系统中,通过与压电装置配合可提供亚微米分辨率的动作,使整个机械结构完成超精密的运动和定位需求<sup>[14-15]</sup>。

本文结合柔顺机构的特点,基于应力刚化原理,利用压电装置驱动柔顺导向机构产生位移以改变悬丝张紧力及横向刚度,获得变刚度四悬丝约束支撑的新型微纳测头。根据测头支撑机构在测量过程中刚度的变化,分别建立刚性和柔性模式下测头 Z 向和横向的刚度理论模型,并利用有限元工具验证所建理论模型的正确性,为该类型微纳测头的变刚度控制提供了理论依据。

## 2 测头的整体结构设计

该新型变刚度微纳测头如图 1 所示。测头结构主要由测头主体、约束支撑机构等部分组成。其中,测头主体包括测球、测杆、中间体;约束支撑机构主要由悬丝、柔顺导向机构、压电装置等部分组成。测球材料选用红宝石,测杆采用碳化钨,中间体材料选用钛合金,悬丝选用高强度的钼丝,其相关材料属性如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

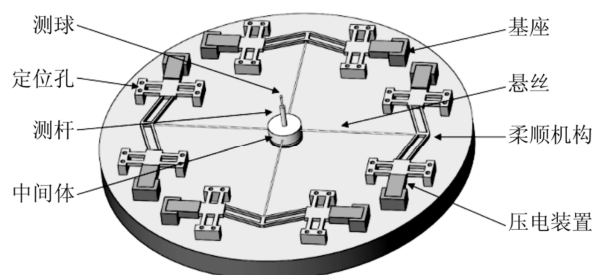


图 1 变刚度测头结构

Fig. 1 Structure of variable stiffness probe

表 1 相关材料参数

Tab. 1 Related material parameters

材料	弹性模量/ GPa	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比
钛合金	113.8	4 430	0.342
红宝石	375	3 890	0.22
碳化钨	345	19 300	0.31
钨丝	340	10 200	0.30

### 3 测头的变刚度原理

测头在测量过程中变刚度的过程阐述如下:

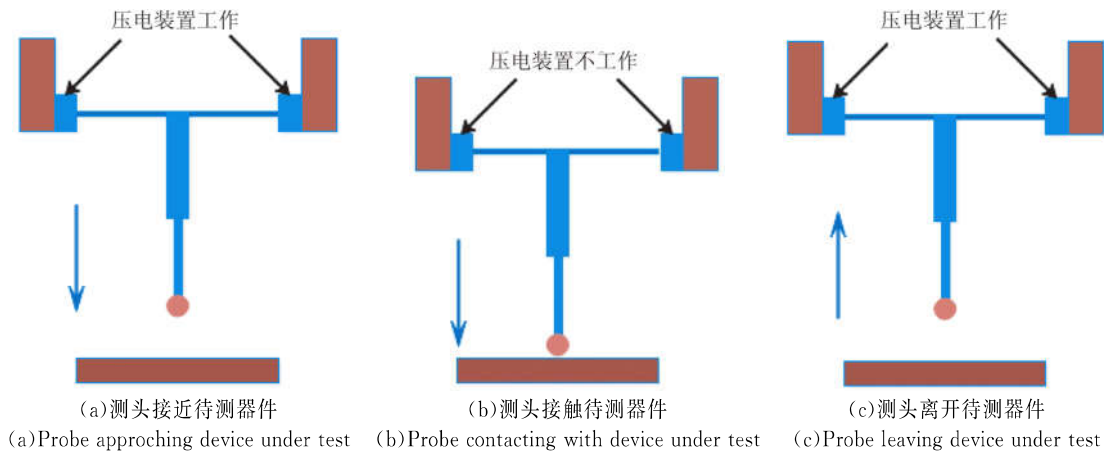


图 2 测头变刚度过程

Fig. 2 Variable stiffness process of probe

### 4 变刚度特性分析

测头在测量过程中,主要发生  $Z$  向与横向位移,为避免测头在测量过程中对被测器件的破坏,要求接触的测量力小于  $1 \text{ mN}$ <sup>[4]</sup>。由于悬丝末端均为固定约束,在进行力学分析时,每根悬丝可近似当作均值细长的圆形截面杆。基于上述假定,建立测头刚度理论模型。

#### 4.1 $Z$ 向刚度分析

微纳测头在受到  $Z$  向力时,根据压电装置不同的工作状态,即测头支撑机构刚性-柔性模式的变化,建立测头的  $Z$  向刚度理论模型。

##### 4.1.1 柔性模式下 $Z$ 向刚度理论模型

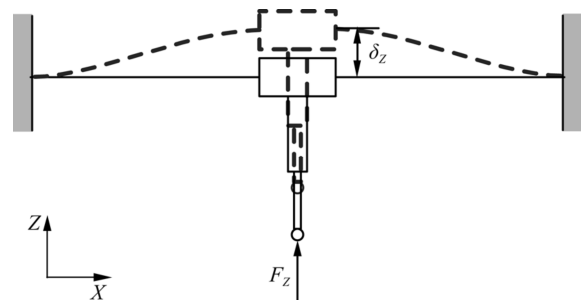
测头在受到  $Z$  向力  $F_z$  作用时,如图 3 所示。由于四根悬丝对称布置,故每根悬丝受力情况相

如图 2(a),当测头趋向于待测器件时,为保证测头系统的稳定性以避免误触发,此时测头支撑机构处于“刚性模式”<sup>[5]</sup>,即压电装置驱动柔顺导向机构产生位移,以改变悬丝所受的轴向张紧力及横向刚度,进而增加测头支撑机构的刚度。

如图 2(b),当测头与待测器件接触时,为避免测量时测头对待测器件的破坏,保证较小的测量力,此时压电装置不提供作用力,柔顺导向机构位于初始位置,此时悬丝张紧力较小,处于“柔性模式”。

如图 2(c),当测头离开待测器件表面时,为克服测头与被测器件之间的范德华力<sup>[17]</sup>,测头悬丝支撑处于与图 2(a)相同的“刚性模式”。

同,且每段受力  $P = F_z/4$ 。分别对测杆和悬丝受力分析,如图 4 所示,其中  $\delta_z$  为测头在  $Z$  向力  $F_z$  作用下的位移,  $M$  为中间体作用在悬丝移动端的力矩;设悬丝长度为  $L$ ,直径为  $d$ ,测杆长度为  $l$ ,中间体半径为  $r$ ,悬丝的弹性模量为  $E$ ,悬丝的惯性矩为  $I_z$ 。

图 3 测头  $Z$  向受力示意图Fig. 3 Schematic diagram of  $Z$ -direction force of probe

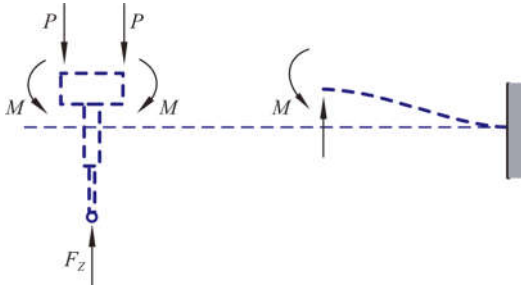


图 4 测头 Z 向受力分解图  
Fig. 4 Decomposition of Z-direction force of probe

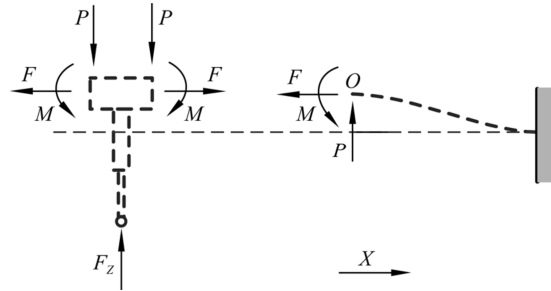


图 5 在 F 作用下测头 Z 向受力示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of Z-direction force of the probe under force of F

悬丝的惯性矩为:

$$I_z = \frac{\pi}{64} d^4. \quad (1)$$

悬丝在受到 P, M 作用下产生的挠度和转角分别为<sup>[11]</sup>:

$$\delta_P = \frac{PL^3}{3EI_z}, \theta_P = \frac{PL^2}{2EI_z}, \quad (2)$$

$$\delta_M = \frac{ML^2}{2EI_z}, \theta_M = \frac{ML}{EI_z}. \quad (3)$$

由边界条件知  $\theta_P = \theta_M$  得:

$$M = \frac{1}{2} PL. \quad (4)$$

故悬丝产生的位移  $\delta_z$  为:

$$\delta_z = \delta_P - \delta_M. \quad (5)$$

联立式(1)~式(5),得到测头在轴向力  $F_z$  作用下的位移  $\delta_z$  为:

$$\delta_z = \frac{16PL^3}{3\pi Ed^4}. \quad (6)$$

测头 Z 向刚度  $K_z$  为:

$$K_z = \frac{F_z}{\delta_z} = \frac{3\pi Ed^4}{4L^3}. \quad (7)$$

#### 4.1.2 刚性模式下 Z 向刚度理论模型

在刚性模式下,压电装置驱动柔顺机构产生位移,悬丝张紧力增加,设此时悬丝受力为 F,分别对测杆和悬丝受力分析,如图 5 所示。以 O 点为坐标原点,图示 X 方向为正方向,设距离 O 点 x 处位移方向的弯矩为  $M(x)$ ,则:

$$M(x) = Px - F(\delta_z - w) - M, \quad (8)$$

由挠曲线微分方程知:

$$EI_z w'' = M(x) = Px + Fw - F\delta_z - M, \quad (9)$$

二阶常微分方程:

$$EI_z w'' - Fw = 0$$

的通解为:

$$\hat{w}(x) = C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx}, \quad (10)$$

其中  $k = \sqrt{\frac{F}{EI_z}}$ 。

设式(9)的特解为:

$$w^* = ax + b,$$

则其通解为:

$$w(x) = \hat{w}(x) + w^* = C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx} + ax + b. \quad (11)$$

将特解  $w^*$  带入式(9)得:

$$a = -\frac{P}{F}, b = \frac{M}{F} + \delta_z. \quad (12)$$

由边界条件  $w(0) = \delta_z, w'(0) = 0$  得:

$$C_1 = -\frac{M}{2F} + \frac{P}{2kF}, C_2 = -\frac{M}{2F} - \frac{P}{2kF}. \quad (13)$$

又由边界条件  $w(L) = 0, w'(L) = 0$  得:

$$M = \frac{P(e^{kL} + e^{-kL} - 2)}{k(e^{kL} - e^{-kL})}, \quad (14)$$

$$\delta_z = \frac{P[(kL - 2)e^{kL} - (kL + 2)e^{-kL} + 4]}{kF(e^{kL} - e^{-kL})}. \quad (15)$$

测头 Z 向刚度  $K_z$  为:

$$K_z = \frac{F_z}{\delta_z} = \frac{4kF(e^{kL} - e^{-kL})}{(kL - 2)e^{kL} - (kL + 2)e^{-kL} + 4}. \quad (16)$$

## 4.2 横向刚度分析

微纳测头在受到横向力作用时,根据测头支撑机构刚度性能变化,分别建立刚性和柔性模式下测头的横向刚度理论模型。

### 4.2.1 柔性模式下横向刚度理论模型

测头受到横向测量力  $F_{xy}$  作用时,变形示意图如图 6 所示。测杆和中间体绕中间体中心位置转动,其中负载方向上的两根悬丝会发生相应的弯曲,与其正交方向的两根悬丝发生扭转,设每根悬丝产生的扭矩为 T,分别对测杆和悬丝受力分析,如图 7 所示。

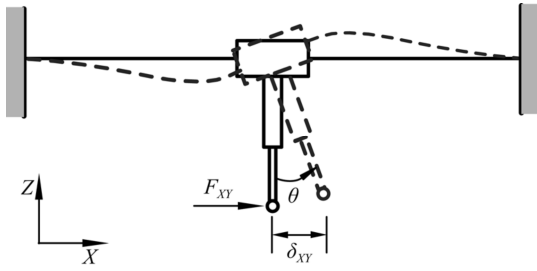


图 6 测头横向受力示意图

Fig. 6 Schematic diagram of transverse-direction force of the probe

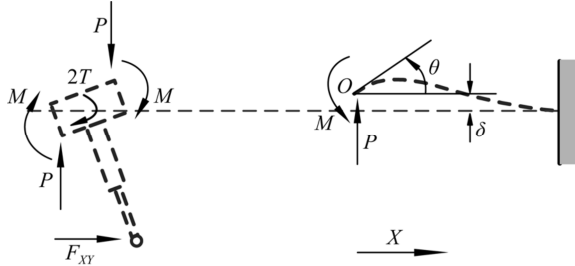


图 7 测头横向受力分解图

Fig. 7 Decomposition of transverse-direction force of the probe

图 7 中  $\theta$  为测杆和悬丝转动角度,  $\delta$  为中间体与悬丝接触点沿  $Z$  向的位移,  $\delta_{XY}$  为测头在横向力  $F_{XY}$  作用下的横向位移。

如图 7 所示, 以  $O$  点为坐标原点, 图示  $X$  方向为正方向, 设距离  $O$  点  $x$  处弯矩为  $M(x)$ , 则:

$$M(x) = Px - M. \quad (17)$$

由挠曲线方程知:

$$EI_z w'' = M(x) = Px - M, \quad (18)$$

$$EI_z w' = \frac{1}{2} Px^2 - Mx + C_1, \quad (19)$$

$$EI_z w = \frac{1}{6} Px^3 - \frac{1}{2} Mx^2 + C_1 x + C_2, \quad (20)$$

其中  $C_1, C_2$  为待定系数。

由边界条件  $w(0) = \delta, w'(0) = \theta$  得:

$$C_1 = EI_z \theta, C_2 = EI_z \delta, \quad (21)$$

又由边界条件知  $w(L) = 0, w'(L) = 0$  得:

$$\begin{cases} M = \frac{6EI_z \delta + 4EI_z L \theta}{L^2} \\ P = \frac{12EI_z \delta + 6EI_z L \theta}{L^3} \end{cases} \quad (22)$$

由几何关系知:

$$\delta_{XY} = l\theta, \delta = r \sin \theta. \quad (23)$$

由于转动角度较小, 略去高阶无穷小得:

$$\sin \theta \approx \theta. \quad (24)$$

由平衡条件得:

$$F_{XY} l = 2M + 2rP + 2T. \quad (25)$$

悬丝的扭矩  $T$  为:

$$T = \frac{GI_P}{L}. \quad (26)$$

悬丝的极惯性矩  $I_P$  为:

$$I_P = \frac{\pi d^4}{32}, \quad (27)$$

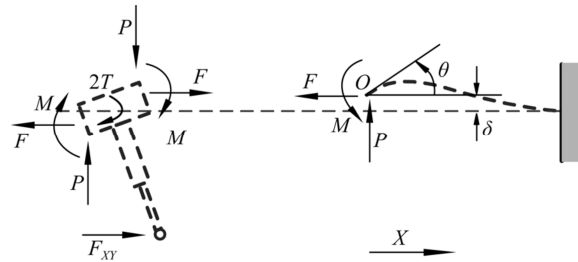
其中  $G$  为悬丝的切变模量, 且  $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$ , 泊松比  $\mu = 0.3$ 。

联立式(18)~式(27), 得测头在横向的刚度公式为:

$$K_{XY} = \frac{\pi E d^4}{32 L^2} \left[ \frac{12r^2 + 12rL + 4L^2}{L^3} + \frac{1}{(1+\mu)L} \right]. \quad (28)$$

#### 4.2.2 刚性模式下横向刚度理论模型

在刚性模式下, 压电装置驱动柔顺结构发生位移, 增加悬丝的张紧力, 设此时悬丝受力为  $F$ , 发生扭转的两根悬丝的扭矩均为  $T$ , 分别对测杆和悬丝受力分析, 如图 8 所示。

图 8 在  $F$  作用下测头横向受力示意图Fig. 8 Schematic diagram of transverse-direction force of probe under force of  $F$ 

以  $O$  点为坐标原点, 图示  $X$  方向为正方向, 设距离  $O$  点  $x$  处的弯矩为  $M(x)$ , 则:

$$M(x) = Px + Fw - F\delta - M. \quad (29)$$

由挠曲线微分方程知:

$$EI_z w'' = M(x) = Px + Fw - F\delta - M. \quad (30)$$

二阶常微分方程:

$$EI_z w'' - Fw = 0$$

的通解为:

$$\hat{w}(x) = C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx},$$

其中  $k = \sqrt{\frac{F}{EI_z}}$ 。

设式(30)的特解为:

$$w^* = ax + b,$$

则其通解为:

$$w(x) = \hat{w}(x) + w^* = C_1 e^{kx} + C_2 e^{-kx} + ax + b.$$

将特解  $\omega^*$  带入式(30)得:

$$a = -\frac{P}{F}, b = \frac{M}{F} + \delta. \quad (31)$$

由边界条件  $\omega(0) = \delta, \omega'(0) = \theta$  得:

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{M}{2F} + \frac{\theta}{2k} + \frac{P}{2kF} \\ C_2 = -\frac{M}{2F} - \frac{\theta}{2k} - \frac{P}{2kF} \end{cases} \quad (32)$$

又由边界条件知  $\omega(L) = 0, \omega'(L) = 0$  得:

$$\begin{cases} P = \frac{F[(k\delta + \theta)e^{kL} + (\theta - k\delta)e^{-kL} - 2\theta]}{4 + (kL - 2)e^{kL} - (kL + 2)e^{-kL}} \\ M = \frac{F[(k\delta + kL\theta - \theta)e^{kL} + (k\delta + kL\theta + \theta)e^{-kL}]}{k[4 + (kL - 2)e^{kL} - (kL + 2)e^{-kL}]} \end{cases} \quad (33)$$

由平衡条件得:

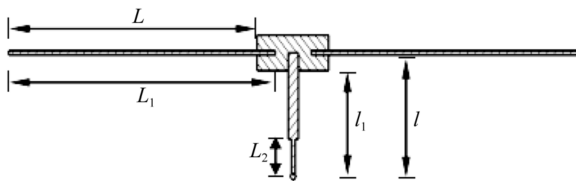
$$F_{xy}l = 2M + 2rP + 2T + 2F\delta. \quad (34)$$

联立式(23)~式(24)、式(30)~式(34),得测头在横向的刚度公式为:

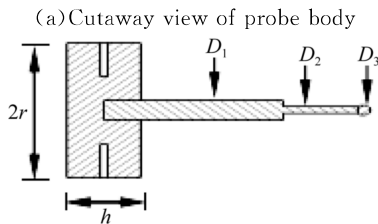
$$K_{xy} = \frac{2F[(kr + kL - 1)e^{kL} + (kr + kL + 1)e^{-kL}]}{kl^2[4 + (kL - 2)e^{kL} - (kL + 2)e^{-kL}]} + \frac{2Fr[(kr + 1)e^{kL} + (1 - kr)e^{-kL} - 2]}{l^2[4 + (kL - 2)e^{kL} - (kL + 2)e^{-kL}]} + \frac{\pi Ed^4}{32(1 + \mu)Ll^2} + \frac{2Fr}{l^2}. \quad (35)$$

### 5 数值验证

此处给定测头的具体结构参数基础上,利用有限元工具对上述理论模型加以验证。对于选定的测头结构,悬丝直径为 0.15 mm,其剖视图如图 9 所示,相关尺寸参数如表 2 所示。



(a)测头主体剖视图



(b)测杆和中间体的主要几何参数  
(b) Main geometric parameters of measuring rod and intermediate body

图 9 测头结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of probe

表 2 测头结构尺寸参数

Tab. 2 Structure dimensional parameters of probe (mm)

L	L <sub>1</sub>	l	l <sub>1</sub>	l <sub>2</sub>	r	h	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>
14	15	5.25	4.5	1.5	2	1.5	0.6	0.2	0.3

根据表 2 中测头结构的相关尺寸参数,建立测头的三维模型,并利用有限元软件进行静力学分析,在悬丝末端面施加全约束,分别在 Z 向和横向对测球施加  $P' = 1$  mN 的测量力,得到测头在 Z 向和横向位移分别如图 10 和图 11 所示。

由图 10 和图 11 可知,在压电装置不工作即柔性模式下,此时  $F = 0$  N,测头 Z 向和横向的仿真位移分别为  $6.950 \mu\text{m}$  和  $3.341 \mu\text{m}$ 。

刚度公式如下:

$$K = \frac{P'}{D}, \quad (36)$$

式中:  $P'$  表示施加的测量力,  $D$  表示测头的位移。

由式(36)计算得测头 Z 向和横向的仿真刚度分别为  $143.885 \text{ N/m}$  和  $299.312 \text{ N/m}$ 。根据文献[18]可知,为保证测头在测量时达到较好的测量效果,且对待测器件不至于造成破坏,要求  $K_Z < 200 \text{ N/m}$ ,  $0.1 < K_{XY}/K_Z < 10$ ,故所选测头结构尺寸满足测量要求。

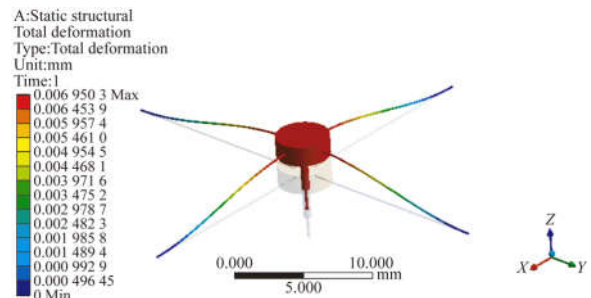


图 10 测头 Z 向变形图

Fig. 10 Z-direction deformation of probe

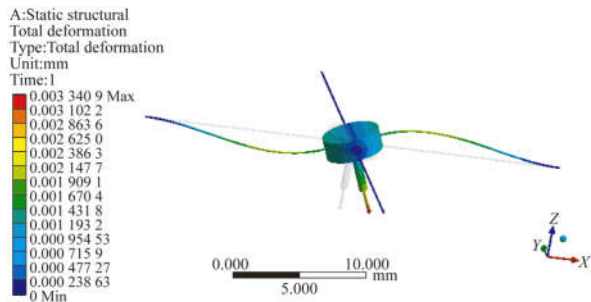


图 11 测头横向变形图

Fig. 11 Transverse-direction deformation of probe

改变  $F$  大小,根据式(7)、式(16)、式(28)、式(35)、式(36)和有限元仿真得到测头  $Z$  向刚度和横向刚度随悬丝端面施加的力  $F$  的变化曲线,如图 12 所示。

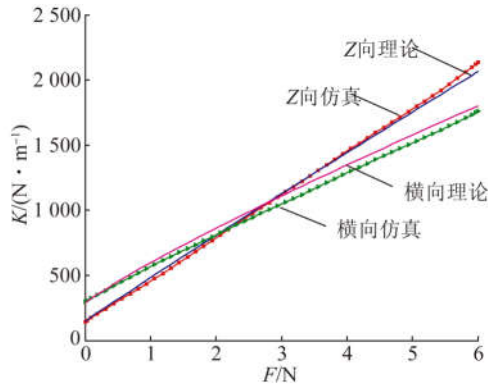


图 12 测头刚度随  $F$  的变化曲线

Fig. 12 Curve of stiffness of probe with  $F$

根据图 12 测头刚度随  $F$  的变化曲线和式(36),计算得到测头  $Z$  向和横向位移随悬丝末端受力  $F$  的变化曲线,如图 13 和图 14 所示。

根据平均相对误差公式:

$$S_i = \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \times 100\%, \quad (37)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i, \quad (38)$$

其中:  $S_i$  为相对误差,  $x_i$  为仿真值,  $y_i$  为理论值,  $\bar{S}$  为平均相对偏差。

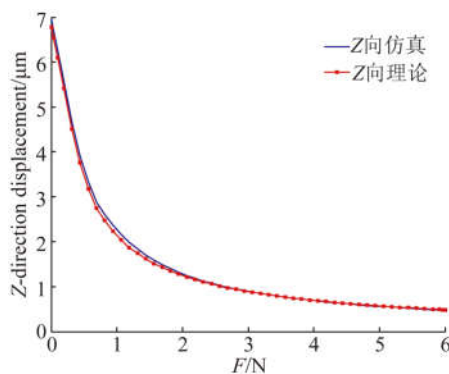


图 13 测头  $Z$  向位移随  $F$  的变化曲线

Fig. 13 Curve of  $Z$ -direction displacement of probe with  $F$

#### 参考文献:

- [1] HUANG Q, WU K, WANG C, *et al.*. Development of an abbe error free micro coordinate measuring machine [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(4): 97.
- [2] 陈贺, 陈晓怀, 王珊, 等. 微纳测量机测头结构的参

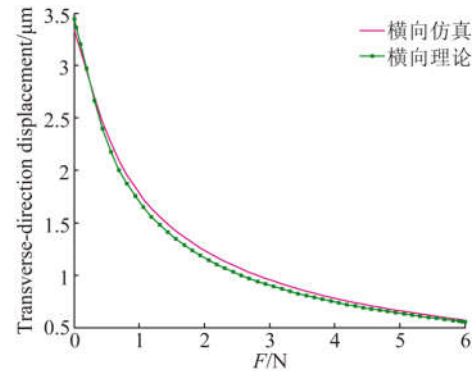


图 14 测头横向位移随  $F$  的变化曲线

Fig. 14 Curve of transverse-direction displacement of probe with  $F$

根据式(37)和式(38),计算得到  $Z$  向和横向的仿真刚度和理论刚度的平均相对误差分别为 2.41%, 4.72%。表明理论结果和仿真结果较为符合,提出的变刚度模型具有较高的准确性。

## 6 结论

基于应力刚化原理,利用压电装置驱动柔顺导向机构产生位移,改变悬丝所受的轴向张紧力及横向刚度,进而改变测头支撑机构的刚度,获得变刚度四悬丝约束支撑的新型微纳测头。根据测头支撑机构在测量过程中刚度的变化,分别建立了刚性和柔性模式下测头  $Z$  向和横向的刚度理论模型。基于所建的刚度理论模型,与有限元仿真分析结果相比较,分析结果表明,在悬丝末端受力 6 N 范围内,测头  $Z$  向和横向的平均相对误差分别为 2.41%, 4.72%, 即误差均控制在 5% 以内,验证了所建理论模型具有较高的准确性。提出的悬丝约束支撑的变刚度微纳测头丰富了现有测头的结构形式,通过建立测头刚度的理论模型,为该类型测头的变刚度控制奠定了前期理论基础。

数设计及分析 [J]. *计量学报*, 2013, 34(5): 401-405.

CHEN H, CHEN X H, WANG SH, *et al.*. The parameters design and analysis of micro-nano CMM Probe [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2013, 34(5): 401-405. (in Chinese)

- [3] 陈晓怀, 陈贺, 王珊, 等. 微纳测量机测头弹性结

- 构的参数设计 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2587-2593.
- CHEN X H, CHEN H, WANG SH, *et al.*. Design of elastic structure parameters of probe in micro-nano CMM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2587-2593. (in Chinese)
- [4] WECKENMANN A, PEGGS G, HOFFMANN J. Probing systems for dimensional micro-and nanometrology [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17(3): 504-509.
- [5] KHALID A, PETER K, SIMON L. *et al.*. Performance assesment of a new variable stiffness probing system for micro-CMMs [J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 492.
- [6] HE M, LIU R, LI Y, *et al.*. Tactile probing system based on micro-fabricated capacitive sensor [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 194: 128-134.
- [7] BONELLO P, BRENNAN M J, ELLIOTT S J, *et al.*. Designs for an adaptive tuned vibration absorber with variable shape stiffness element [J]. *Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 2005, 461(2064): 3955-3976.
- [8] CHALLA V R, PRASAD M, SHI Y, *et al.*. A vibration energy harvesting device with bidirectional resonance frequency tunability [J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(1): 15010-15035.
- [9] FAN K C, CHENG F, PAN W T, *et al.*. Analysis of the contact probe mechanism for micro-coordinate measuring machines [J]. *Optoelectronics Instrumentation & Data Processing*, 2010, 46(4): 340-346.
- [10] ALBLALAIHID K, KINNELL P, LAWES S. Fabrication and characterisation of a novel smart suspension for micro-CMM probes [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2015, 232: 368-375.
- [11] 胡俊峰, 陈星星. 具有零刚度特性的微动平台优化设计 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(6): 1430-1440.
- HU J F, CHEN X X. Optimized design of a micro-motion stage with zero stiffness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1430-1440. (in Chinese)
- [12] HOWELL L L, MAGLEBY S P, OLSEN B M. *Handbook of Compliant Mechanisms* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2013.
- [13] 胡俊峰, 徐贵阳, 郝亚洲. 基于响应面法的微操作平台多目标优化 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1096-1104.
- HU J F, XU G Y, HAO Y ZH. Multi-objective-optimization of micro-manipulation stage based on response surface method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1096-1104. (in Chinese)
- [14] 孙玉琼. 面向压电驱动纳米定位平台的自抗扰运动控制 [D]. 济南: 山东大学, 2016.
- SUN Y Q. *Active Disturbance Rejection Control for Piezo-driven Nanopositioning Stage* [D]. Jinan: Shandong University, 2016. (in Chinese)
- [15] 卢倩, 黄卫清, 孙梦馨. 基于柔度比优化设计杠杆式柔性铰链放大机构 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 102-111.
- LU Q, HUANG W Q, SUN M X. Optimization-design of amplification mechanism for level flexure hinge based on compliance ratio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1): 102-111. (in Chinese)
- [16] ALBLALAIHID K, LAWES S, KINNELL P. Variable stiffness probing systems for micro-coordinate measuring machines [J]. *Precision Engineering*, 2016, 43: 262-269.
- [17] 余惠娟. 基于谐振模式的三维纳米测头触发方法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- YU H J. *Research on the Trigger Mechanism of a 3D Resonant Nano Probe* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] PRIL W. Development of high precision mechanical probes for coordinate measuring machines [J]. *Technische Universiteitindhoven*, 2002, 25: 100-102.

#### 作者简介:



李保坤(1982—),男,安徽舒城人,博士,副教授,硕士生导师,2004年、2007年于安徽理工大学获得学士、硕士学位,2014年于江南大学获得博士学位,主要从事机构学与精密机械设计等领域研究。E-mail:libkmail@126.com



杨洪涛(1972—),男,福建莆田人,博士,教授,博士生导师,1993年、2001年于安徽理工大学获得学士、硕士学位,2007年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事精密测试技术、现代精度理论及应用等领域研究。E-mail:lloid@163.com