



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101373156 B

(45) 授权公告日 2010.06.23

(21) 申请号 200710012544. X

(22) 申请日 2007.08.22

(73) 专利权人 中国科学院沈阳自动化研究所
地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街 114 号

(72) 发明人 于鹏 董再励 缪磊 王越超
刘连庆 刘意杨 王光宏

(74) 专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限公司 21002
代理人 许宗富 周秀梅

(51) Int. Cl.
G01L 1/16 (2006.01)
B81B 7/02 (2006.01)

(56) 对比文件
JP 特开平 10-209517 A, 1998.08.07, 全文.
CN 2524233 Y, 2002.12.04, 全文.
CN 201096557 Y, 2008.08.06, 权利要求

1-4.
CN 1752734 A, 2006.03.29, 全文.
蔡建华等. 一种集成微力检测的压电式微夹钳. 机器人 28 1. 2006, 28(1), 59-64.
审查员 孙世新

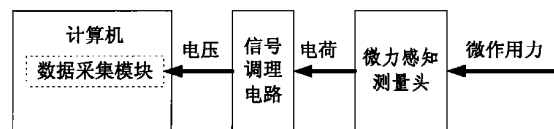
权利要求书 1 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

一种亚微牛顿级力测量系统

(57) 摘要

本发明涉及基于 PVDF 压电材料的微牛顿力测量技术。具体地说是亚微牛顿级力的测量系统,它由微力感知测量头,信号调理电路和数据采集模块构成,其中微力感知测量头接受来自探针的微作用力,将力信号变为电荷后送至信号调理电路,信号调理电路将其转换成合适大小并能检测的电压信号输出至数据采集模块,数据采集模块把获得的电压信号经过 A/D 转换后利用已标定好的微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系,将所述电压值换算为微力数值。采用本发明解决了微装配过程中的亚微牛顿接触力测量问题,主要用于微纳米尺度加工、装配等技术领域。



1. 一种亚微牛顿力测量系统,其特征在于:由微力感知测量头,信号调理电路和数据采集模块构成,其中微力感知测量头接受来自探针的微作用力,将力信号变为电荷后送至信号调理电路,信号调理电路将其转换成合适大小并能检测的电压信号输出至数据采集模块,数据采集模块把获得的电压信号经过 A/D 转换后利用已标定好的微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系,将所述电压值换算为微力数值;

所述微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系的标定指:通过建立微作用力模型来获得预定的微作用力标定值,并建立测量系统理论数学模型来验证标定结果的正确性;

所述微作用力模型的建立:先用悬臂梁探针末端与纳米位移平台接触,再利用纳米位移平台实现预定步长瞬时移动,从而带动悬臂梁产生相应形变,利用材料力学建立如下模型:

$$F = \frac{6EI_z v_t}{L^2(2L+3L_0)}$$

其中,F为悬臂梁末端探针所受y向作用力, v_t 为测量头探针末端的形变挠度,E为PVDF悬臂梁的杨氏模量,其中L为悬臂梁的长, L_0 为探针长度, I_z 是悬臂梁截面对z轴的惯性矩;

所述测量系统理论数学模型根据材料力学特性计算悬臂梁截面所受的平均应力,再根据压电方程计算悬臂梁在此应力下所产生的总电荷量,再由信号调理电路输入电荷总量与输出电压的关系模型得出悬臂梁受力与输出电压之间的关系,建立如下测量系统的理论数学模型:

$$F = \frac{2h^2}{3d_{31}L(L+2L_0)KC_f} V_{out}$$

其中h为悬臂梁厚度, V_{out} 为信号调理电路的输出电压, d_{31} 为PVDF材料的压电常数, C_f 为信号处理电路中电荷放大器的反馈电容,K为信号调理电路的放大倍数。

2. 按权利要求1所述亚微牛顿力测量系统,其特征在于:所述微力感知测量头采用基于PVDF压电材料的微力感知测量头,为末端连接有探针的悬臂梁结构。

3. 按权利要求2所述亚微牛顿力测量系统,其特征在于:所述悬臂梁为具有压电效应的PVDF材料。

4. 按权利要求1所述亚微牛顿力测量系统,其特征在于:所述信号调理电路包括电荷放大器(2),滤波器(U2),放大器(U3),所述电荷放大器(2)把测量头(1)产生的电荷信号转换成电压信号,并经滤波器(U2)去除噪声和放大器(U3)进行信号放大。

一种亚微牛顿级力测量系统

技术领域

[0001] 本发明涉及基于 PVDF (Polyvinylidene fluoride, 聚偏二氟乙烯) 压电材料的微牛顿力测量技术。具体地说是亚微牛顿级力的测量系统, 主要用于微纳米尺度加工、装配等技术领域。

[0002] 技术背景

[0003] 微纳米操作是机器人 / 自动化领域新兴的研究方向, 它为物理、化学、生物、机构与微机电系统、先进制造等领域提供了新的加工制造控制与实验研究方法。研究表明, 随着操作尺度的微小化, 操作工具与加工对象的越来越微小化, 任何微小作用力的变化都会引起工具、对象等状态的较大变化, 因而传统宏观条件下位置 / 力反馈加工制造技术受到了制约。典型如 WMD 光通讯网系统采用的 MEMS 光学开关部件, 其主要功能部件微镜片在微牛顿力作用下即可破碎。由于目前无法实现微镜片的微力控制操作, 因而装配效率很低; 基于纳米材料的纳米器件制造是微加工装配涉及的一个重要应用领域, 纳米材料如 CNT 在微电极阵列上的定量、定向、定位装配已成为目前 CNT 基纳米器件亟待解决的关键问题, 这需要微接触力的感知与反馈控制来实现纳米器件的自动化装配; 再者, 目前基于 MEMS 和 LIGA 技术研制的微纳米部件, 也亟需采用基于力反馈控制的微镊装配方法来实现微机电系统装配操作。随着微纳操控技术的发展, 宽动态微牛级力传感检测技术正在成为新的科研与应用的热点, 因而研究高灵敏度的微力传感检测技术对实现微纳器件的高效率自动化制造, 促进微纳科学技术发展和应用具有重要意义。亚微牛顿接触力的测量目前尚未见报道。

发明内容

[0004] 为解决微装配过程中的亚微牛顿接触力测量问题, 本发明的目的在于提供一种亚微牛顿力测量系统。

[0005] 本发明技术方案包括如下: 由微力感知测量头, 信号调理电路和数据采集模块构成, 其中微力感知测量头接受来自探针的微作用力, 将力信号变为电荷后送至信号调理电路, 信号调理电路将其转换成合适大小并能检测的电压信号输出至数据采集模块, 数据采集模块把获得的电压信号经过 A/D 转换后, 利用已标定微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系, 将所述电压值换算为微力数值。

[0006] 所述微力感知测量头采用基于 PVDF 压电材料的微力感知测量头, 为末端连接有探针的悬臂梁结构; 所述悬臂梁为具有压电效应的 PVDF 材料;

[0007] 所述信号调理电路包括电荷放大器, 滤波器, 放大器, 所述电荷放大器把测量头产生的电荷信号转换成电压信号, 并经滤波器去除噪声和放大器进行信号放大;

[0008] 所述对微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系标定指: 通过建立微作用力模型来获得预定的微作用力标定值, 建立测量系统理论数学模型来验证标定结果的正确性;

[0009] 所述微作用力模型的建立: 先用悬臂梁探针末端与纳米位移平台接触, 再利用纳米位移平台实现预定步长瞬时移动, 从而带动悬臂梁产生相应形变, 利用材料力学建立如

下模型：

$$[0010] \quad F = \frac{6EI_z v_t}{L^2(2L+3L_0)}$$

[0011] 其中, F 为悬臂梁末端探针所受 y 向作用力, v_t 为测量头探针末端的形变挠度, E 为 PVDF 悬臂梁的杨氏模量, 其中 L 为悬臂梁的长, L_0 为探针长度, I_z 是悬臂梁截面对 z 轴的惯性矩；

[0012] 所述数学模型根据材料力学特性计算悬臂梁截面所受的平均应力, 再根据压电方程计算悬臂梁在此应力下所产生的总电荷量, 再由信号调理电路输入电荷总量与输出电压的关系模型得出悬臂梁受力与输出电压之间的关系, 建立如下测量系统的理论数学模型：

$$[0013] \quad F = \frac{2h^2}{3d_{31}L(L+2L_0)KC_f} V_{out}$$

[0014] 其中 h 为悬臂梁厚度, v_{out} 为信号调理电路的输出电压, d_{31} 为 PVDF 材料的压电常数, C_f 为信号处理电路中电荷放大器的反馈电容, K 为信号调理电路的放大倍数。

[0015] 本发明微力检测基本原理：具有一定规则形状的 PVDF 材料在力的作用下产生形变, 其表面会聚集等量的正电荷和负电荷, 受力越大, 形变越大, 聚集电荷越多。因而可设计一种电荷采集电路, 将电荷形成的电势转换成电压信号输出, 通过对该电压信号的检测, 以及 PVDF 材料结构形变特性, 可以计算出受力大小。

[0016] 本发明具有如下优点：本发明采用 PVDF 压电材料及信号处理单元构成微力传感器测量微牛顿级的作用力, 与压阻 / 电容等敏感元件不同, 所采用的 PVDF 压电材料敏感元件不需要外加激励信号, 本身就可以产生一个可测量的电信号。所设计的微力感知测量头结构简单, 量程小 ($0-3 \mu\text{N}$), 灵敏度高 (最高可达 $0.2 \mu\text{N}$)。本发明的亚微牛顿力标定方法解决了力源问题, 因为目前还没有具有精确数值微牛顿级以下作用力力源用于标定传感器, 本发明的标定方法简单, 经过实验和理论分析验证表明方法可靠, 为微力检测提供了一种可行的标定方法。另外, 此微力检测系统为微米尺度基于微力反馈控制的加工制造提供一种可行的技术途径。可以促进精密加工、装配制造的自动化加工技术水平, 实现微型装备的可靠、高产量的批量制造。

附图说明

[0017] 图 1 亚微牛顿力测量系统结构示意图。

[0018] 图 2 图 1 中感知测量头结构示意图。

[0019] 图 3 图 1 中信号调理电路结构图。

[0020] 图 4 本发明一个实施例悬臂梁受力形变挠度曲线。

[0021] 图 5 本发明一个实施例 PVDF 悬臂梁受力与输出电压的关系标定曲线与理论模型曲线。

具体实施方式

[0022] 本发明亚微牛顿力测量系统由微力感知测量头、信号调理电路 (Conditioning Circuit) 和安装在计算机内的数据采集模块构成, 其中微力感知测量头接受来自探针的微作用力, 将力信号变为电荷后送至信号调理电路, 信号调理电路将其转换成合适大小并能

检测的电压。数据采集模块把获得的电压信号经过 A/D 转换后,利用已标定好的微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系,将所述电压值换算为操作时所受到的微力数值。

[0023] 1. 所述微力感知测量头采用基于 PVDF 压电材料的微力感知测量头,此微力感知测量头采用简单实用的悬臂梁结构(如图 2 所示),悬臂梁 P 由具有压电效应的 PVDF 材料构成。悬臂梁末端连接一探针 T,用于与被操作物体直接接触并受力。悬臂梁 P 与信号调理电路中的电荷放大器电连接(悬臂梁 P 的上表面电极 C 与下表面电极 D 分别接至电荷放大器中运算放大器 U1 的负相输入端和信号地;参见图 3,虚线框 1 即 PVDF 材料悬臂梁内的 Q 相当于悬臂梁 P 的电荷源, C_p 相当于悬臂梁 P 的等效电容, R_p 相当于悬臂梁 P 的等效电阻)。

[0024] 2. 信号调理电路(如图 2 所示),把悬臂梁形变电势转换成电压信号。主要功能:一是实现压电元件的高输入阻抗变换为低阻抗输出的阻抗变换;二是去除噪声干扰;三是实现信号的放大。

[0025] 信号调理电路包括电荷放大器 2,滤波器 U2,放大器 U3 组成,所述电荷放大器 2 接收作为传感元件的悬臂梁 1 的微力信号,输出电压信号经滤波器 U2 至放大器 U3;在滤波器 U2 与悬臂梁 1 之间设反馈电路;电荷放大器 2 的输入端,即运算放大器 U1 的信号输入端(-),通过导线连接到悬臂梁 1 其中一个电极上(上表面电极 C),悬臂梁 1 的另一个电极(下表面电极 D)与电路的信号地连接。

[0026] 其中,所述电荷放大器 2 中的运算放大器 U1 可采用具有 $10^{12} \Omega$ 高输入阻抗和 25pA 低偏置电流的稳定运算放大器(AD544)。

[0027] 所述电荷放大器 2 中的反馈电路由反馈电容 C_f 构成, C_f 这里取 1000pF。为了提高放大器的工作稳定性,在所述反馈电路中,反馈电容的两端可并联一个大的反馈电阻 R_f (宜采用大电阻,本设计采用 $10^8 \Omega$),以提供直流反馈。因为 PVDF 材料的内阻很高,系统的低频下限主要由电荷放大器的反馈电容和反馈电阻决定,其截止频率为 $f_c = \frac{1}{2\pi C_f R_f}$,其中 f_c 为系统的低频下限,这里为 0.005Hz,可以对准静态的作用力进行测量。

[0028] 由于振动和热噪声是传感器信号的主要高频干扰源,本发明所述低通滤波器 U2 采用截止频率为 120Hz 的有源低通滤波器来抑制高频噪声。

[0029] 数据采集模块采用凌华科技的 PCI9111HR 数据采集卡,并利用计算机进行处理得出具体微力大小数值。

[0030] 工作原理:当利用悬臂梁结构测量头前端的探针进行微装配操作时,悬臂梁由于受力形变产生电荷,并由信号调理电路转换成合适大小并能检测的电压,数据采集模块获得的电压信号经过 A/D 转换后送给计算机,换算成微力数值。

[0031] 所述对微作用力与信号调理电路输出电压之间的关系标定指:通过建立微作用力模型来获得预定的微作用力标定值,建立测量系统理论数学模型来验证标定结果的正确性。

[0032] 所述微作用力模型的建立:先用悬臂梁探针末端与纳米位移平台接触,再利用纳米位移平台实现预定步长瞬时移动,从而带动悬臂梁产生相应形变,利用材料力学建立如下模型:

$$[0033] \quad F = \frac{6EI_z v_t}{L^2(2L + 3L_0)}$$

[0034] 其中, v_t 为测量头探针末端的形变挠度,E 为 PVDF 悬臂梁的杨氏模量,其中 L 为悬

臂梁的长, L_0 为探针长度, I_z 是悬臂梁截面对 z 轴的惯性矩。

[0035] 所述数学模型根据材料力学特性计算悬臂梁截面所受的平均应力, 再根据压电方程计算悬臂梁在此应力下所产生的总电荷量, 再由信号调理电路输入电荷总量与输出电压的关系模型得出悬臂梁受力与输出电压之间的关系, 建立如下测量系统的理论数学模型:

$$[0036] \quad F = \frac{2h^2}{3d_{31}L(L+2L_0)KC_f} V_{out}$$

[0037] 其中 F 为悬臂梁末端探针所受 y 向作用力, h 为悬臂梁厚度, kV_{out} 为信号调理电路的输出电压, d_{31} 为 PVDF 材料的压电常数, C_f 为信号处理电路中电荷放大器的反馈电容, K 为信号调理电路的放大倍数。

[0038] 具体标定过程为: 把测量头探针末端置于纳米位移平台上, 这里纳米位移平台采用 New Focus 公司 3-D 精密电动平台 (9062-XYZ-PPP-M, 步长精度: 30nm)。每次使位移平台以不同的步长在瞬间内移动, PVDF 悬臂梁会因受力而产生不同大小的形变, 同时测量信号调理电路的相应电压输出。利用位移平台每次移动的步长, 和所建立的悬臂梁材料力学模型, 得到每次所施加的不同大小的微作用力; 然后采用最小二乘法对所得到的数据进行回归分析, 建立作用力与信号调理电路输出电压之间的关系, 并绘出标定曲线; 最后同测量系统理论数学模型绘出的理论曲线进行比较, 验证此标定方法的有效性。

[0039] 测量系统数学模型的具体建立过程:

[0040] 如图 2 所示, 根据受力分析得到悬臂梁沿坐标系 x 方向上任一点所受的弯矩:

$$[0041] \quad M = F(L-x+L_0) \quad (1)$$

[0042] M 为悬臂梁弯矩, F 为悬臂梁末端探针所受 y 向作用力, 其中 L 为悬臂梁的长, L_0 为探针长度。

[0043] 根据悬臂梁的材料力学特性, 可以得到横截面上的平均应力。

$$[0044] \quad \sigma = \frac{2}{Wh} \int_0^h \sigma_1 dB = \frac{2}{Wh} \int_0^h \frac{M}{I_z} y \cdot W dy = \frac{1}{4} \frac{Mh}{I_z} = \frac{3M}{Wh^2} \quad (2)$$

[0045] σ 是悬臂梁截面应力, W 、 h 分别为悬臂梁的宽和厚度, B 为悬臂梁横截面面积 ($W \times h$), I_z 是悬臂梁截面对 z 轴的惯性矩。

[0046] 当 PVDF 压电材料悬臂梁作为传感元件使用时, 外加电场为零, 压电方程可表示为 $D = d_{31} \sigma$, D 是电位移, d_{31} 为 PVDF 材料的压电常数。则在悬臂梁上下表面所产生的电荷总量 Q 为:

$$[0047] \quad Q = \int D dA = \int_0^L d_{31} \sigma dA = \frac{3d_{31}}{Wh^2} \int_0^L F(L-x+L_0) W dx = \frac{3d_{31}L(L+2L_0)}{2h^2} F \quad (3)$$

[0048] 其中 A 为悬臂梁上下表面积 ($L \times W$)。

[0049] 悬臂梁传感单元因形变产生的电荷经信号调理电路滤波、放大处理后得到输出电压, 信号调理电路输入电荷总量与输出电压的关系模型如下式所示:

[0050]

$$V_{out} \xleftarrow[\text{放大}]{\text{滤波}} V_{pvd} = -\frac{Q}{C_f} \quad (4)$$

$$[0051] \quad V_{out} = K \frac{Q}{C_f} \quad (5)$$

[0052] V_{out} 为信号调理电路的输出电压, V_{pvdF} 为电荷放大器的输出电压, K 为信号调理电路的放大倍数。

[0053] 由 (3) 和 (5) 得出悬臂梁受力与输出电压之间的关系模型, 即此测量系统的数学模型:

$$[0054] \quad F = \frac{2h^2}{3d_{31}L(L+2L_0)KC_f} V_{out} \quad (6)$$

[0055] 所述微作用力模型的建立具体过程: 当电动纳米位移平台以步长 v_t 瞬时运动一次后, 测量头探针末端的形变挠度也即为 v_t , 如图 4 所示 PVDF 悬臂梁受力形变挠度曲线。根据挠曲线近似微分方程式得到下式:

$$[0056] \quad \frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI_z} = \frac{F(L+L_0-x)}{EI_z} \quad (7)$$

[0057] v 为 PVDF 悬臂梁形变后的挠度, E 为 PVDF 悬臂梁的杨氏模量 ($2.5 \times 10^9 \text{Pa}$)。

[0058] 上式积分后得到

$$[0059] \quad v = \iint \frac{F(L+L_0-x)}{EI_z} dx dx = \frac{FL^2(2L+3L_0)}{6EI_z} \quad (8)$$

$$[0060] \quad F = \frac{6EI_z v}{L^2(2L+3L_0)} \quad (9)$$

[0061] 当探针末端偏转角 θ 非常小时有 $v = v_t - L_0 \tan \theta \approx v_t$ 。于是得到微作用力模型:

$$[0062] \quad F = \frac{6EI_z v_t}{L^2(2L+3L_0)} \quad (10)$$

[0063] 通过计算式 (10) 便可到对 PVDF 悬臂梁所施加的实际作用力。让纳米移动平台每次以不同的步长 v_t 运动, 并算出每次施加不同的作用力, 同时记录信号调理电路的输出电压, 绘出实际测量得到的传感器末端受力与输出电压标定曲线 C_a , 此实施例得到的数据结果经最小二乘法拟合得到: $v = 0.1089F + 0.0033$, 与所建立的理论模型 (6) 代入各项参数所得到的曲线: $v = 0.11198F$ 相比是非常接近的。从图 5 也可以看出, 实际测量得到的曲线 C_a 与建立的理论模型曲线 T_e 非常接近, 这说明所建立的测量系统模型是正确的, 此标定方法是科学可行的。

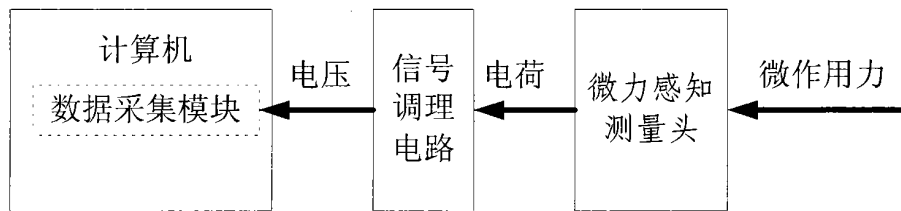


图 1

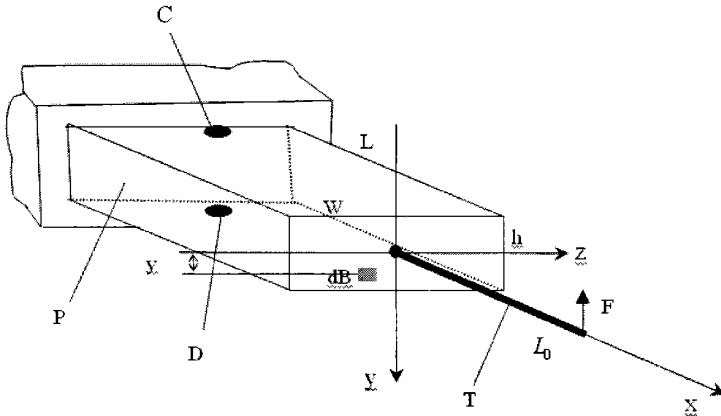


图 2

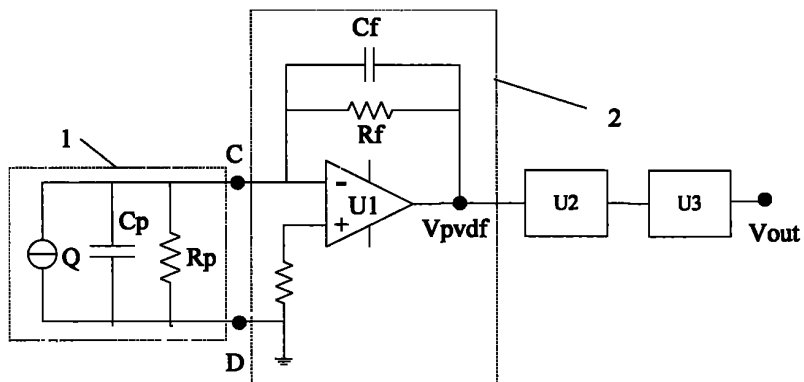


图 3

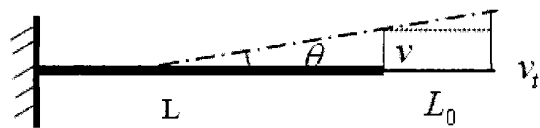


图 4

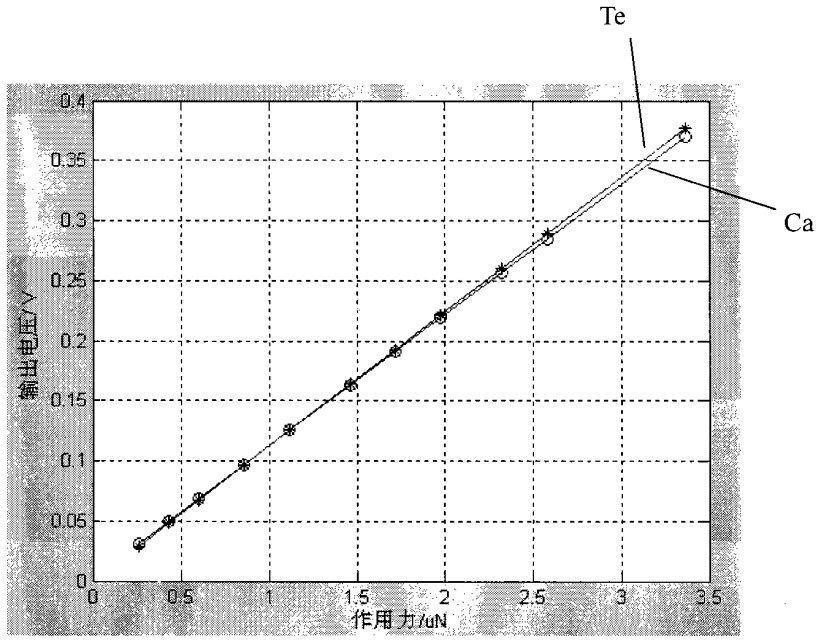


图 5