



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101949804 B

(45) 授权公告日 2013. 07. 10

(21) 申请号 201010268634. 7

(22) 申请日 2010. 08. 31

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15 号

准. 《GB/T16825. 1-2002 静力单轴试验机的检验 第 1 部分:拉力和(和)压力试验机测力系统的检验与校准》. 2002,

审查员 罗程

(72) 发明人 彭光健 郇勇 张泰华

(74) 专利代理机构 北京中创阳光知识产权代理有限公司 11003  
代理人 尹振启 马知非

(51) Int. Cl.  
G01N 3/62 (2006. 01)

(56) 对比文件  
CN 2434666 Y, 2001. 06. 13, 全文.  
JP 8271395 A, 1996. 10. 18, 全文.  
长春试验机研究所. 6 试验机测力系统的校

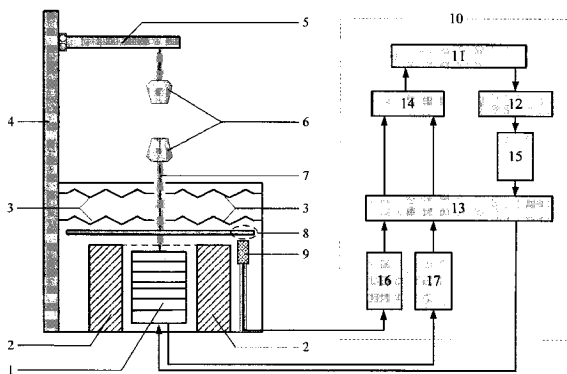
权利要求书2页 说明书9页 附图7页

(54) 发明名称

一种基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的检验方法

(57) 摘要

一种基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的检验方法,该方法用于检测所述电磁式微力试验机的准静态性能,该方法包括:对所述试验机位移灵敏度及其线性度、位移的量程、分辨力、噪声水平的检测;对所述试验机载荷灵敏度及其线性度、载荷的热稳定性、量程、分辨力、噪声水平;对所述试验机的磁缸的磁场非均匀性;对所述试验机的机架刚度和支撑弹簧垂直刚度及其线性度等性能的检测;确定各项性能检验顺序为:位移检验→载荷检验→支撑弹簧垂直刚度检验;考虑所述试验机的几个自身因素在检验过程中带来的影响,并通过合理手段排除影响,以及通过自我修正来提高检验的准确度。



1. 一种基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的检验方法,用于检验基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的准静态性能,其特征在于,所述检验方法包括:位移检验,载荷检验,试验机所用支撑弹簧的垂直刚度检验,试验机机架刚度检验,噪声水平检验,其中,

所述位移检验步骤包括:

1) 将已校准的高精度位移传感器的目标板与所述试验机的传动轴固接,使所述目标板与传动轴有相同的垂直位移,

2) 调节所述目标板与待检验位移传感器的探头的相对位置,使目标板接触到所述探头后稍稍离开,以此为位移下限,再向上移动接触到上限位块后稍稍离开,以此为位移上限,

3) 调节所述试验机的夹具的位置,连续向上移动到位移上限,再向下移动到位移下限,重复两次,

4) 采集所述高精度位移传感器测量的位移值和待检验位移传感器的探头输出的位移电压信号,以所述位移电压信号为纵坐标,所述位移值为横坐标作曲线图,

5) 根据其拟合曲线得到所述试验机的位移灵敏度和线性度,位移量程取决于位移上限一位移下限的差值,能准确计量的位移量程和待检验位移传感器的线性工作段范围三者中的最小值,位移分辨力=信号采集卡的量程/(位移灵敏度×信号采集卡的精度),其中,能准确计量的位移量程=信号采集卡的量程/位移灵敏度,

6) 保持环境稳定,使所述试验机在低载荷水平下空载保载一段时间,以原始位移为纵坐标,时间为横坐标作曲线图,通过原始位移随机波动的最大值与最小值之间的差值或所述随机波动的标准偏差表示所述试验机的位移噪声水平;

所述载荷检验步骤包括:

1) 将已校准的高精度位移传感器的目标板与所述试验机的传动轴固接,在位移量程内等间距选择一系列载荷检验点,将传动轴固定不动,

2) 所述试验机缓慢预加载,确定所述试验机能输出的最大载荷值  $F_m$ ,在每个检验点处从零正向加载至  $F_m$ ,接着从  $F_m$  反向加载至  $-F_m$ ,再从  $-F_m$  正向加载至  $F_m$ ,

3) 连续采集高精度载荷传感器测量的载荷值和所述信号采集卡采集的载荷电压信号,以所述载荷输出电压为纵坐标,所述载荷值为横坐标作曲线图,

4) 根据其拟合曲线得到所述试验机的载荷灵敏度和线性度,不同检验点处载荷灵敏度的差异反映了所加磁场的非均匀性,载荷量程取决于所述试验机能输出的载荷量程和能准确计量的载荷量程的较小值,载荷分辨力=所述载荷量程/信号采集卡的精度,其中,能准确计量的载荷量程=信号采集卡的量程/载荷灵敏度,

5) 在某个检验点处固定住传动轴,让所述试验机在不同载荷下长时间保载,记录载荷随时间变化的关系,以此表示所述试验机的载荷热稳定性,

6) 保持环境稳定,使所述试验机在低载荷水平下空载保载一段时间,以原始载荷为纵坐标,以时间为横坐标作曲线图,通过原始载荷随机波动的最大值与最小值之间的差值或所述随机波动的标准偏差表示所述试验机的载荷噪声水平;

所述支撑弹簧的垂直刚度检验步骤包括:

所述试验机在位移量程内空载运行,记录原始载荷-原始位移曲线,其拟合直线的斜率为支撑弹簧的垂直刚度;

所述机架刚度的检验步骤包括:

用刚性连接件将所述试验机的上下夹具连接,在载荷量程内施加线性增大的载荷,记录原始载荷-原始位移曲线,其拟合直线的斜率为所述试验机机架的刚度;

在整个检验过程中,应当进行拉压双向检验;在载荷灵敏度检验中,应当在每个检验点处保持线圈和磁缸的相对位置不变;当所述试验机施加载荷较大时,应当通过修正测量的载荷来修正载荷灵敏度和支撑弹簧的垂直刚度。

2. 根据权利要求1中所述的检验方法,其特征在于,所述基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的位移传感器为非接触式位移传感器。

3. 根据权利要求2中所述的检验方法,其特征在于,所述非接触式位移传感器为电容式位移传感器、电涡流位移传感器或光纤位移传感器。

4. 根据权利要求1中所述的检验方法,其特征在于,利用已测得的位移灵敏度和支撑弹簧垂直刚度修正高精度载荷传感器测量的载荷值,通过迭代计算来修正载荷灵敏度和支撑弹簧垂直刚度。

## 一种基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的检验方法

### 技术领域

[0001] 本发明专利涉及一类材料力学试验机的检验方法,特别是一种检验基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机准静态工作性能的方法。

### 背景技术

[0002] 在材料性能的测试中,为了能够精确测量出所需的材料参数,除了对被测材料特性有一定了解外,还需要清楚知道所用材料试验机在工作状态下的各项性能,如量程、分辨力等是否满足测试需求。因此,在每一台材料试验机出厂或投入使用之前,都必须对其工作性能进行检验。

[0003] 基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机是一类新型材料试验机,具有小量程、高分辨力、高精度等优点,其核心技术是电磁驱动和柔性支撑,往往在准静态条件下使用,因此,需要检验试验机的准静态性能:位移灵敏度及其线性度、位移的量程、分辨力、噪声水平;载荷灵敏度及其线性度、载荷的量程、分辨力、噪声水平等。但对于该类试验机的检验,目前暂无相关的检验标准可以参照。

### 发明内容

[0004] 为填补现有技术中关于如何对基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机进行检测的空白,本发明提供一种基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的检验方法,该方法用于检测基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的准静态性能,该方法包括:对所述试验机的位移灵敏度及其线性度、位移的量程、分辨力、噪声水平的检测;对所述试验机的载荷灵敏度及其线性度、载荷的量程、分辨力、噪声水平和载荷的热稳定性;对所述试验机的磁缸的磁场非均匀性;对所述试验机的机架刚度和支撑弹簧垂直刚度及其线性度的检测;由于在载荷检验之前需要知道位移的量程,在检验支撑弹簧垂直刚度之前需要知道位移灵敏度和载荷灵敏度,因此,所述检验方法中对所述试验机的各项性能检验顺序为:位移检验→载荷检验→支撑弹簧垂直刚度检验;由于磁缸的磁场非均匀性及支撑弹簧的影响,在检验载荷灵敏度过程中每个检验点处应保持线圈与磁缸的相对位置不变;由于试验机工作时存在一定的磁滞,在检验过程中需进行拉压双向检验;由于检验所用的高精度载荷传感器存在一定柔度,当所述试验机施加载荷较大时,线圈与磁缸的相对位置会发生微小变化,导致所述试验机输出载荷的测量不准,因此需要通过修正高精度载荷传感器测量到的载荷来修正载荷灵敏度和支撑弹簧垂直刚度。

[0005] 进一步,利用已校准的高精度位移传感器检验所述基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机所用位移传感器的灵敏度和线性度;根据信号采集卡的量程、位移灵敏度和位移传感器的线性工作段共同确定所述位移量程;根据位移量程和信号采集卡精度确定所述位移分辨力;保持环境稳定,低载荷水平下空载保载一段时间,检验所述位移噪声水平。

[0006] 进一步,所述基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机所用位移传感器为非接触式位移传感器:电容式位移传感器、电涡流位移传感器或光纤位移传感器。

[0007] 进一步,利用已校准的高精度载荷传感器检验所述基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的载荷灵敏度和线性度;不同载荷水平下保载长时间,检验所述载荷的热稳定性;根据所述试验机所能提供的最大载荷、信号采集卡的量程和载荷灵敏度共同确定所述载荷量程;根据载荷量程和信号采集卡精度确定所述载荷分辨力;保持环境稳定,低载荷水平下保载一段时间,检验所述载荷噪声水平。

[0008] 进一步,通过检验线圈与磁缸不同相对位置处载荷灵敏度来检验所述磁缸的磁场非均匀性。

[0009] 进一步,通过刚性件将所述试验机上下夹具连接,直接加载,记录原始载荷-原始位移曲线,检验所述机架刚度。

[0010] 进一步,令所述试验机空载运行,通过原始载荷-原始位移曲线检验支撑弹簧的垂直刚度和线性度。

[0011] 进一步,利用已检验得到的位移灵敏度和支撑弹簧垂直刚度修正高精度载荷传感器测量的载荷值,通过迭代计算来修正载荷灵敏度和支撑弹簧垂直刚度。

[0012] 此检验方法在长期实验观察的基础上,结合所述基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机的实际使用工况,提出了磁缸的磁场非均匀性、载荷的热稳定性和支撑弹簧垂直刚度及其线性度几个重要的检验性能。考虑了所述试验机几个固有因素在检验过程中的影响,并通过合理的检验手段排除影响,提高检验准确度。所述检验方法具有连续采集检验数据,自动化程度高,通过自我修正提高检验准确度的优点。

[0013] 下面介绍本发明中所要涉及的几个概念的定义。

[0014] 1) 灵敏度

[0015] 灵敏度是测量系统输出量的增量  $\Delta y$  对输入量的增量  $\Delta x$  的比值,通常的传感器属于线性传感器,此时,灵敏度可由式 (1-1):

$$[0016] \quad s = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (1-1)$$

[0017] 图 1a 中所表示的为通过线性拟合特性直线的斜率得出灵敏度图。

[0018] 定义灵敏度系数  $S$  为灵敏度  $s$  的倒数,这样,就可以直接将传感器的输出量乘以灵敏系数得到被测量。

[0019] 2) 线性度

[0020] 线性度是指测量系统的输出与输入之间数量关系的线性程度。如图 1b 所示,通常用选定的拟合直线与检验曲线间的最大偏差  $\Delta L_{\max}$  与测量系统满量程输出值  $Y_{FS}$  之间比值的百分数表示:

$$[0021] \quad r_L = \left( 1 - \left| \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \right| \right) \times 100\% \quad (1-2)$$

[0022] 3) 噪声

[0023] 噪声指对被测量的随机干扰,由振动、电磁、热等因素引起,这种干扰损害所需信号的质量并降低实际测量的可靠性,如图 1c 中所示错误!未找到引用源。。可以用式 (1-3) 给出的被测量随机波动的最大值与最小值间的差值表示:

$$[0024] \quad r_N = y_{\max} - y_{\min} \quad (1-3)$$

[0025] 也可以用式 (1-4) 所给出的随机变量标准偏差表示:

$$[0026] \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (1-4)$$

[0027] 4) 磁滞

[0028] 磁滞表示在正（输入量增大）反（输入量减小）行程期间输出-输入特性曲线不重合的现象。如图 1d 中所示，在数值上用同一输入量下所得滞后偏差的最大值与系统满量程输出值之间的比值表示：

$$[0029] \quad r_H = \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \quad (1-5)$$

[0030] 5) 稳定性

[0031] 在这里，稳定性是指测量量随时间不变化的能力，如图 1e 中所示，可用测量量的降幅与测量量初始值的比值表示：

$$[0032] \quad r_H = \left(1 - \left|\frac{\Delta Y}{Y_{\max}}\right|\right) \times 100\% \quad (1-6)$$

#### 附图说明

[0033] 图 1a 为灵敏度的定义；

[0034] 图 1b 为线性度的定义；

[0035] 图 1c 为噪声的定义；

[0036] 图 1d 为磁滞的定义；

[0037] 图 1e 为稳定性的定义；

[0038] 图 2 为基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机整体结构示意图；

[0039] 图 3 为位移传感器灵敏度系数的检验结果；

[0040] 图 4 为位移传感器线 / 非线性度的检验结果；

[0041] 图 5 为载荷灵敏度系数的检验结果；

[0042] 图 6 为载荷线 / 非线性度的检验结果；

[0043] 图 7 为载荷灵敏度系数随位置变化关系；

[0044] 图 8 为磁场非均匀性的检验结果；

[0045] 图 9 为载荷的热稳定性的检验结果；

[0046] 图 10 支撑弹簧垂直刚度的检验结果；

[0047] 图 11 机架刚度的检验结果；

[0048] 图 12 载荷噪声水平的检验结果；

[0049] 图 13 位移噪声水平的检验结果。

#### 具体实施方式

[0050] 本发明所采用的试验机为基于柔性支撑技术的电磁式微力试验机，该试验机包括线圈 1、磁缸 2、支撑弹簧 3、电控平移台 4、上定位台 5、夹具 6、传动轴 7、位移传感器目标板 8、位移传感器探头 9 和计算机处理系统 10；计算机处理系统具体包括计算机 11、信号发生卡 12、功率放大器 13 和信号采集卡 14。计算机 11 发送指令给发生卡 12，发生卡 12 按计算

机指令产生相应的载荷驱动电压信号 15,再经功率放大器 13 放大后传递给线圈 1。由位移传感器探头 9 探测到的位移电压信号 16 和由流过线圈 1 的电流转化成的载荷电压信号 17 经功率放大器 13 放大后传递给信号采集卡 14,并通过信号采集卡 14 输入计算机 11。

#### [0051] 1、位移检验

##### [0052] 1.1 位移灵敏度和线性度检验

[0053] 参见图 2,卸掉上定位台 5 和夹具 6,将已校准的高精度位移传感器 A 与传动轴 7 固接在一起,用于测量传动轴 7 的上下垂直位移。由于传动轴 7 与位移传感器目标板 8 固接在一起,因此,位移传感器目标板 8 与传动轴 7 有相同的垂直位移。使传动轴 7 缓慢向上移动,直到位移超过位移传感器 9 的量程或线圈 1 碰到上限位块,以确定位移上限  $h_{up}$ ;或缓慢向下移动,直到线圈 1 碰到下限位块,以确定位移下限  $h_{low}$ 。然后,使传动轴 7 缓慢产生向上的位移从  $h_{low}$  到  $h_{up}$ ,再产生向下的位移从  $h_{up}$  到  $h_{low}$ ,同时采集高精度位移传感器 A 测量的位移值和待检验位移传感器 9 输出的位移电压信号。以位移传感器 9 的输出电压值为纵坐标,高精度位移传感器 A 测量的位移值为横坐标作曲线图,参见上文中对灵敏度和线性度的定义,可以得到试验机位移传感器 9 的灵敏度和线性度。

##### [0054] 1.2 位移量程和分辨力检验

[0055] 所述试验机能准确计量的位移量程由信号采集卡的量程和位移灵敏度共同确定,计算公式为:能准确计量的位移量程=信号采集卡的量程/位移灵敏度。所述试验机采用的是非接触式位移传感器,而非接触式位移传感器,例如:电容式位移传感器、电涡流位移传感器或光纤位移传感器等的线性工作段范围有限。因此,所述试验机的位移量程除了受到线圈 1 的位移行程  $h_{up}-h_{low}$  和能准确计量的位移量程的限制外,还受到位移传感器线性工作段范围的限制,所述试验机的位移量程将取决于以上三个限制中的最小值。一般情况下,线圈 1 的位移行程  $h_{up}-h_{low}$  > 能准确计量的位移量程 > 位移传感器线性工作段范围。

[0056] 位移分辨力可通过以下公式进行计算:位移分辨力=信号采集卡的量程/(位移灵敏度 × 信号采集卡精度)。

[0057] 例如,所述试验机线圈 1 的位移行程为 3mm;信号采集卡的量程是 10V,采样精度是  $2^{16}$ ,位移灵敏度是 5.0V/mm,计算出位移传感器的量程 =  $10V/(5.0V/mm) = 2.0mm$ ;但是位移传感器的线性工作段只有 1.5mm,那么所述试验机的位移量程为 1.5mm。位移分辨力 =  $10V/(5.0V/mm \times 2^{16}) = 0.031 \mu m$ 。

##### [0058] 1.3 位移噪声水平检验

[0059] 保持环境稳定,使试验机在低载荷水平下(一般取载荷量程的 1%)空载保载一段时间,记录原始位移随时间的变化,以原始位移为纵坐标,时间为横坐标作曲线图,参见上文中对噪声的定义可得位移噪声水平。在低载荷水平下保载是为了避免线圈 1 发热带来的影响。

#### [0060] 2 载荷检验

##### [0061] 2.1 载荷灵敏度和线性度检验

[0062] 参见图 2,卸掉上定位台 5 和夹具 6,将已校准的高精度载荷传感器 C 与传动轴 7 固接在一起,用于测量传动轴 7 传递的载荷。在位移量程内等间距选择一系列的载荷检验点,不同的检验点实际上表示的是线圈 1 与磁缸 2 的不同相对位置,分别在每个检验点处对载荷的灵敏度和线性度进行检验。检验过程中,首先用连接有高精度载荷传感器 C 的夹具 6

将传动轴 7 固定在某个检验点处,使线圈 1 与磁缸 2 的相对位置尽量不发生变化。试验机进行缓慢预加载,直到信号采集卡采集到的载荷信号电压超出信号采集卡的量程,记录高精度载荷传感器 C 测得的载荷值  $F_m$ ,确定检验中需要施加的载荷最大值  $F_m$ 。然后,试验机缓慢从  $-F_m$  正向加载至  $F_m$ ,再从  $F_m$  反向加载至  $-F_m$ ,同时采集载荷传感器 C 测得的载荷值  $F_c(t)$ 、信号采集卡采集到的载荷电压信号以及位移传感器 9 计量的位移  $\Delta u(t)$ 。以载荷传感器 C 测得的载荷值  $F_c(t)$  为横坐标,采集卡采集到的载荷电压信号为纵坐标作曲线图,参见上文中对灵敏度和线性度的定义,得到载荷灵敏度和线性度。在每个检验点处重复上述检验步骤,可得到线圈 1 在磁场中不同位置处的载荷灵敏度和线性度。将不同检验点处测得的载荷灵敏度取算术平均值作为试验机的名义载荷灵敏度。

#### [0063] 2.2 磁缸 2 的磁场非均匀性检验

[0064] 线圈 1 在磁缸 2 中不同位置处检验得到的载荷灵敏度之间的差异正是反映了磁缸 2 的磁场非均匀性。因此,磁缸 2 的磁场非均匀性为不同检验点处的载荷灵敏度与所述试验机名义载荷灵敏度之间的最大相对误差。

#### [0065] 2.3 载荷的热稳定性检验

[0066] 由于所述试验机采用的是电磁驱动方式,对外输出的载荷为  $F = BIL$ ,其中 B 为磁缸 2 的磁感应强度,I 流过线圈 1 的电流,L 为线圈 1 长度。电流流过线圈 1 会发热,时间越长,产生的热量越多,导致磁缸 2 内温度升高,温度升高又会使线圈 1 电阻增大、磁缸 2 的磁感应强度降低,从而影响试验机输出载荷的稳定性。载荷的热稳定性可表示为在相同检验点,由于线圈 1 发热而引起的载荷随时间变化的关系。

[0067] 在某个检验点处固定住传动轴 7,使线圈 1 与磁缸 2 的相对位置不变,让所述试验机在不同载荷水平下长时间保载,记录载荷随时间变化的关系。以载荷为纵坐标,时间为横坐标作曲线图,分析不同载荷水平下载荷随时间的降幅,参见上文中稳定性的定义,得到不同载荷水平下载荷的热稳定性。

#### [0068] 2.4 载荷量程和分辨力检验

[0069] 所述试验机能输出的载荷量程为  $F_1$ ,能准确计量的载荷量程  $F_2 = \text{信号采集卡的量程} / \text{载荷灵敏度}$ 。因此,载荷的量程取决于  $F_1$  和  $F_2$  中的较小值。总是可以通过调节发生信号的放大倍数使所述试验机能够提供的载荷量程  $F_1$  大于可计量的载荷量程  $F_2$ ,故所述试验机的载荷量程取  $F_2$ 。

[0070] 载荷分辨率通常可以通过以下公式进行计算:载荷分辨力 = 载荷量程 / 信号采集卡精度。

[0071] 例如,所述试验机所能输出的最大载荷为 10N;信号采集卡的量程是 10V,采样精度是  $2^{16}$ ,载荷灵敏度是 1.25V/N,则可计量的载荷量程 =  $10V / (1.25V/N) = 8N$ ,那么该试验机的载荷量程为 8N,载荷分辨力 =  $8N / 2^{16} = 0.122mN$ 。

#### [0072] 2.5 载荷噪声检验

[0073] 保持环境稳定,在低载荷水平下(一般取载荷量程的 1%)空载保载一段时间,记录原始载荷随时间的变化,以原始载荷为纵坐标,时间为横坐标作曲线图,参见上文中关于噪声的定义可得载荷噪声水平。在低载荷水平下保载是为了避免线圈 1 发热带来的影响。

### [0074] 3 机架和支撑弹簧性能的检验

#### [0075] 3.1 机架刚度检验



[0076] 参见附图 2,利用刚性件将所述试验机的上下夹具 6 连接,使位移传感器目标板 8 处于位移量程的中间以确保机架有变形时位移传感器目标板 8 能自由移动。所述试验机在载荷量程内先缓慢加载至最大拉力,缓慢卸载至零紧接着反向加载到最大压力,缓慢卸载至零再加载到最大拉力,同时记录试验机的原始载荷和原始位移。以原始载荷为纵坐标,原始位移为横坐标作曲线图,对实验曲线作直线拟合,所得的直线斜率就是所述试验机机架刚度。

[0077] 3.2 支撑弹簧垂直刚度和线性度检验

[0078] 参见附图 2,令所述试验机在空载状态下运行,试验机缓慢加载使下夹具从位移下限缓慢移动到位移上限,再缓慢卸载到零,记录试验机的原始载荷和原始位移。以原始载荷为纵坐标,原始位移为横坐标作曲线图,对曲线作直线拟合,所得的直线斜率就是支撑弹簧的垂直刚度  $K_s$ 。参见上文中关于线性度的定义,可得支撑弹簧垂直方向的线性度。

[0079] 3.3 载荷灵敏度和支撑弹簧垂直刚度的修正

[0080] 载荷灵敏度检验过程中,在某个检验点处,测试所用的高精度载荷传感器 C 测得的载荷值为  $F_c(t)$ ,线圈 1 与磁缸 2 的相对位置在试验机加载过程中变化  $\Delta u(t)$ ,其中  $\Delta u(t)$  是由检验后的位移传感器 9 计量的位移值,它的正负号根据检验中规定的正方向而定。步骤 3.2 中检验已得支撑弹簧垂直刚度  $K_s$ ,则修正后的试验机输出载荷为  $F_{re}(t) = F_c(t) - (K_s \times \Delta u(t))$ 。

[0081] 用修正后的试验机的输出载荷  $F_{re}(t)$  代替步骤 2.1 载荷灵敏度和线性度检验中载荷传感器 C 测得的载荷值  $F_c(t)$ ,重新计算载荷灵敏度和检验步骤 2.1 到 3.2 中检验的性能指标,得到修正后的性能指标。

[0082] 考虑到载荷灵敏度与支撑弹簧垂直刚度之间相互影响,迭代计算可得收敛的载荷灵敏度和支撑弹簧垂直刚度。一般迭代修正 1-2 次即可。

[0083] 检验的具体实施例

[0084] 1 位移检验

[0085] 检验目的:检验位移传感器的灵敏度系数、线性度,确定位移量程和分辨力。

[0086] 检验设备:使用 Instron 5848MicroTester 作为位移检验的参考设备,利用其直线光栅尺作为高精度位移传感器使用。测试速度小于 200mm/min 时,分辨力为 20nm;当  $250 \mu m \leq \text{测试位移} \leq 10\text{mm}$  时,精度为  $\pm 0.5 \mu m$ 。

[0087] 检验步骤:

[0088] 1) 将被检验的微力试验机主机固定在 Instron 5848 载物台上,用 Instron 5848 的上夹具夹紧微力试验机传动轴。由于位移传感器目标板固定在微力试验机传动轴上,此时,通过调节 Instron 5848 的上夹具的位置就能调节位移传感器目标板 8 与位移传感器探头 9 的相对位置。

[0089] 2) 调节 Instron 5848 上夹具的位置,使位移传感器目标板接触到位移传感器探头,然后稍稍离开,以此作为位移下限;再向上移动接触到上限位块后稍稍离开,以此作为位移上限。

[0090] 3) 确定好位移下限和上限后,调节 Instron 5848 上夹具的位置,连续向上移动到位移上限,接着回到位移下限,如此重复两次。连续采集直线光栅尺测量的位移读数和待测位移传感器的位移电压信号。

[0091] 检验结果：

[0092] 1) 位移灵敏度系数：以直线光栅尺测量的位移作为参考值，与位移传感器输出电压关系参见图 3，其斜率即为位移灵敏度系数。对试验数据进行直线拟合，得到直线的斜率为 100.91，则位移灵敏度系数  $100.91 \mu\text{m}/\text{V}$ 。

[0093] 2) 位移线 / 非线性度：图 4 为不同位置处的线性度，反映的是不同位置处拟合值与实测值接近的程度，应选择其中线性度最好的一段作为工作段。在  $-1000 \sim +800 \mu\text{m}$  范围内，位移传感器的线性度达到 99.33%，此工作段长度为 1.8mm。

[0094] 3) 位移量程和分辨力：从以上检验结果可知，位移量程能够达到 1.9mm，但为了保证位移传感器的线性度优于 99.33%，应选择  $-1000 \sim +800 \mu\text{m}$  的工作范围，由此确定位移量程为 1.8mm。本系统采用精度为 16 位的信号采集卡，信号采集卡选用  $-10 \sim +10\text{V}$  的工作范围，乘上位移灵敏度系数即得到对应的位移范围为  $-1009.1 \sim +1009.1 \mu\text{m}$ ，则位移分辨力为  $1009.1 \mu\text{m}/2^{16} = 0.15\text{nm}$ 。

[0095] 2 载荷检验

[0096] 检验目的：检验载荷的灵敏度系数、线性度、磁缸的磁场非均匀性、载荷热稳定性，确定载荷量程和分辨力。

[0097] 检验设备：使用 Instron 5848MicroTester 作为检验的参考设备，并用 F2 等级砝码校准其载荷传感器。采用 250N 载荷传感器，载荷大于量程的 1/500 时，精度为  $\pm 0.5\%$ 。

[0098] 检验步骤：

[0099] 1) 将被检验微力试验机主机固定在 Instron 5848 的载物台上，用 Instron 5848 的上夹具夹紧微力试验机传动轴。此时，通过调节 Instron5848 上夹具的位置来调节电涡流位移传感器目标板与位移传感器探头的相对位置。

[0100] 2) 调节 Instron 5848 上夹具的位置，使电涡流位移传感器目标板接触到探头，然后稍稍离开，以此作为位移下限。通过调节 Instron 5848 上夹具，以 0.1mm 为间距，连续向上移动 1.8mm（通过位移检验得到的位移量程），以此确定 19 个检验点。

[0101] 3) 试验机先进行预加载，确定试验机能输出的最大载荷值为  $F_m$ 。

[0102] 4) 每个检验点处，用 Instron 5848 上夹具夹持住微力试验机传动轴固定不动，从而使线圈与磁场的相对位置不变。试验机缓慢从零正向加载至  $F_m$ ，接着从  $F_m$  反向加载至  $-F_m$ ，再从  $-F_m$  正向加载至  $F_m$ ，连续采集微力试验机的载荷电压信号和 Instron 5848 载荷传感器测量的载荷值。

[0103] 检验结果：

[0104] 1) 载荷灵敏度系数：通过检验试验得到载荷 - 输出电压关系，参见图 5，对实测数据进行直线拟合，所得直线的斜率即为载荷灵敏度系数。如图 7 所示，载荷灵敏度系数在  $-1000 \sim +800 \mu\text{m}$  工作段内的波动很小，取该段内所有检验点处载荷灵敏度系数的平均值  $1.1975\text{N}/\text{V}$  作为整个量程的名义载荷灵敏度系数。

[0105] 2) 载荷线 / 非线性度：如图 6 所示，与拟合直线相比，实际测试数据存在一定的非线性度，经过计算得到电磁驱动载荷的线性度为 99.28%。

[0106] 3) 磁场非均匀性：图 5 只给出检验点中零位置处的载荷 - 输出电压关系，不同位置处的载荷 - 输出电压关系略有差异，即不同位置处的载荷灵敏度系数略有不同，这反映的就是磁缸的磁场非均匀性。磁场非均匀性的计算结果参见图 8，在  $-1000 \sim +800 \mu\text{m}$  的工

作段内,磁场的非均匀性不超过 0.80%。

[0107] 4) 载荷的热稳定性:实验保载时间设为 180s,载荷水平分别为 1N、5N、10N,结果参见图 9。载荷不超过 1N 时,驱动载荷的热稳定性可达到 99.84%,载荷不超过 5N 时,驱动载荷的热稳定性可达到 99.50%,载荷不超过 10N 时,驱动载荷的热稳定性为 98.27%。

[0108] 5) 载荷量程与分辨力:由实验数据和图 5 可知,载荷的标称范围为 -11 ~ +11N,则载荷量程为 22N。本系统采用精度为 16 位的信号采集卡,当信号采集卡选用 -10 ~ +10V 的工作范围时,乘上载荷灵敏度系数即得到对应的载荷范围为 -11.975 ~ +11.975N,则载荷分辨力为  $11.975\text{N}/2^{16} = 0.2\text{mN}$ 。

[0109] 3 支撑弹簧的垂直刚度检验

[0110] 检验目的:检验支撑弹簧的垂直刚度及其线性度。

[0111] 检验步骤:给微力试验机施加线性驱动载荷,使线圈在位移量程范围内空载运行,同时采集原始载荷和原始位移信号。

[0112] 检验结果:图 10 给出了线圈在空载情况下的原始载荷 - 原始位移关系,对整个工作段实验数据进行线性拟合可以近似得到支撑弹簧在整个位移量程内的垂直刚度  $K_s = 132.20\text{N/m}$ 。从图中可以看出支撑弹簧的线性度较差,其非线性度达到 5%。

[0113] 4 机架刚度检验

[0114] 检验目的:检验机架刚度。

[0115] 检验步骤:通过刚性连接件将微力试验机上下夹具连接,从而使微力试验机传动轴与上定位台连接,在载荷量程范围内施加线性增大的载荷,同时采集原始载荷和原始位移信号。

[0116] 检验结果:图 11 给出了微力试验机传动轴与上定位台连接时的原始载荷 - 原始位移关系,其斜率即为机架刚度,通过线性拟合可以近似得到机架刚度为:  $K_f = 211\text{kN/m}$ 。

[0117] 5 噪声水平检验

[0118] 检验目的:检验微力试验机的载荷噪声水平及位移噪声水平。

[0119] 检验步骤:保持试验环境稳定,施加约 100mN 的微小载荷并保载一段时间,直接采集原始载荷和原始位移信号。

[0120] 检验结果:通过作原始载荷 - 时间关系图与原始位移 - 时间关系图:分别参见图 12 和图 13,可得载荷噪声水平约为 1.14mN,位移噪声水平约为 0.05  $\mu\text{m}$ 。

[0121] 技术指标

[0122] 参照中华人民共和国国家计量技术规范 JJF 1001-1998 《通用计量术语及定义》,结合实际使用工况,经过检验,给出微力试验机性能指标见表 1。

[0123] 表 1 微力试验机性能指标

	检验内容	合同要求指标	实际完成指标
[0124]	载荷		
	标称范围	-10□ +10N	-11□ +11N
	量程	20N	22N
	分辨力	10mN	0.2mN
	噪声水平	/	1.14 mN
[0124]	位移		
	标称范围	-500□ +500μm	-1000□ +800μm
	量程	1mm	1.8mm
	分辨力	0.2μm	0.015μm
	噪声水平	/	0.05μm
	机架		
	刚度	/	211kN/m
	支撑弹簧		
	垂直刚度	/	132.20N/m

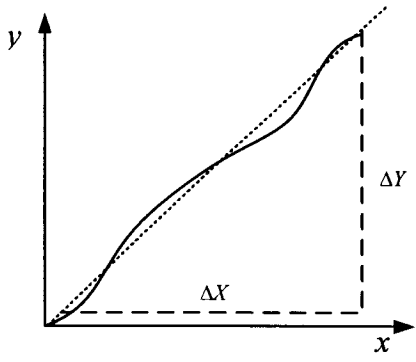


图 1a

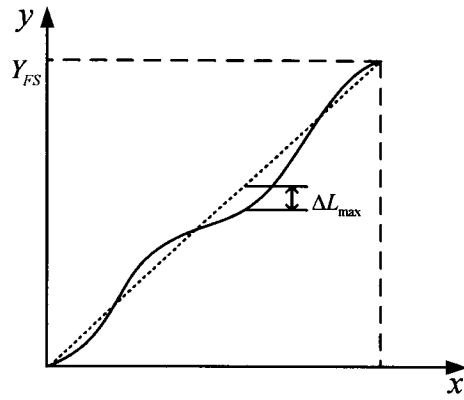


图 1b

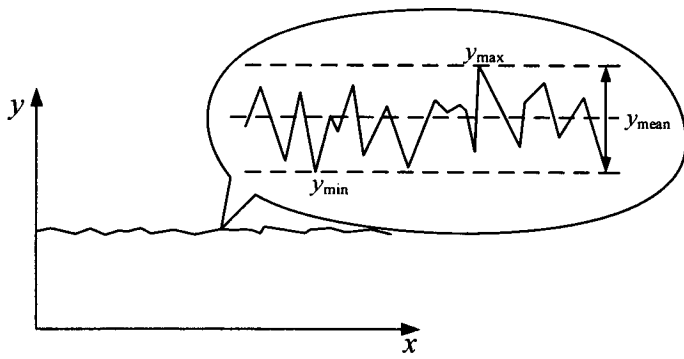


图 1c

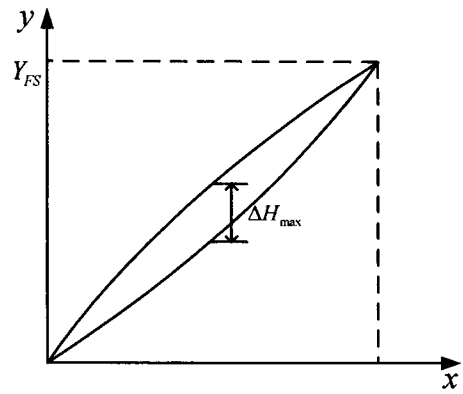


图 1d

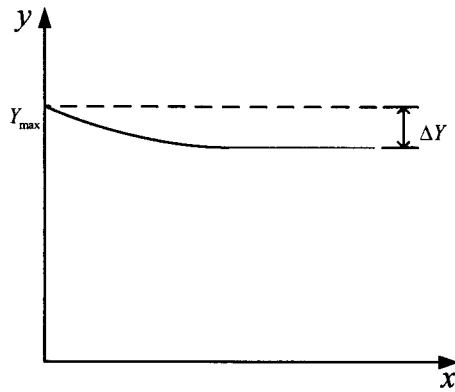


图 1e

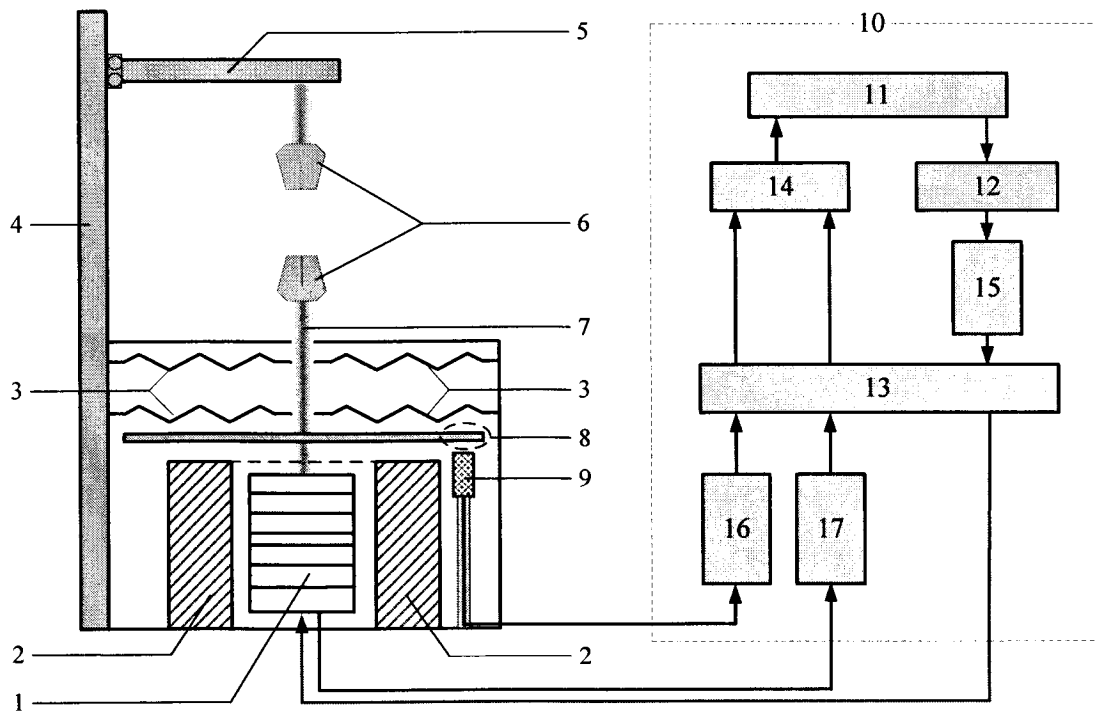


图 2

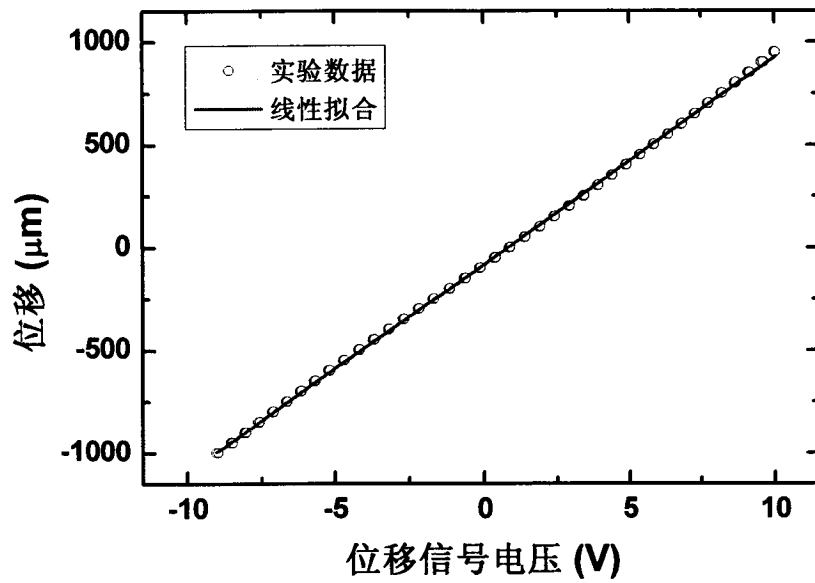


图 3

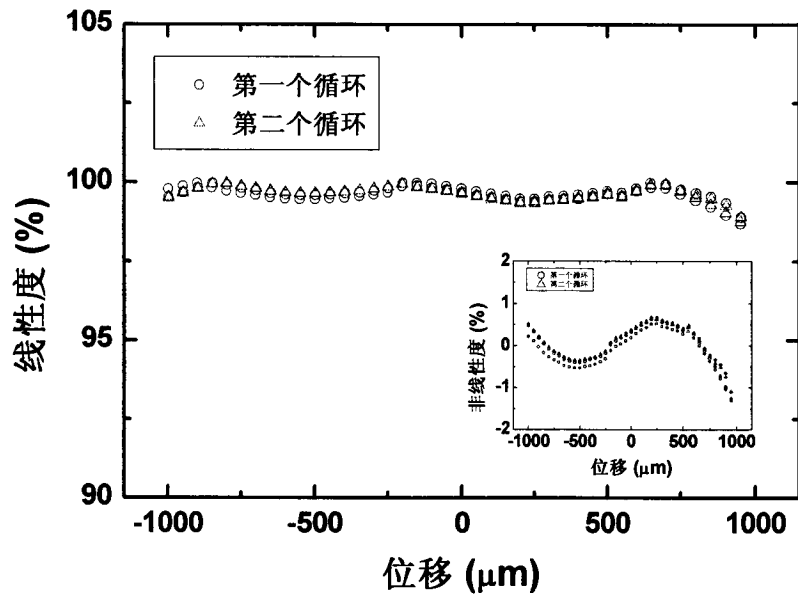


图 4

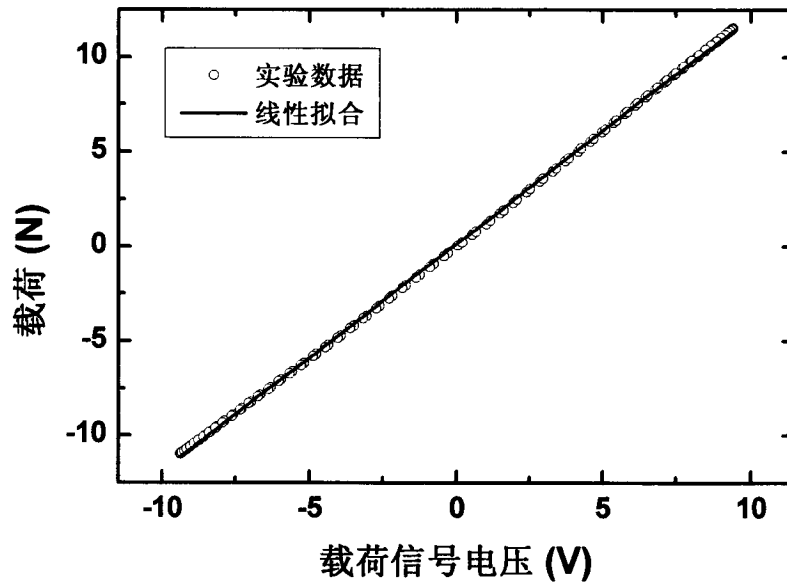


图 5

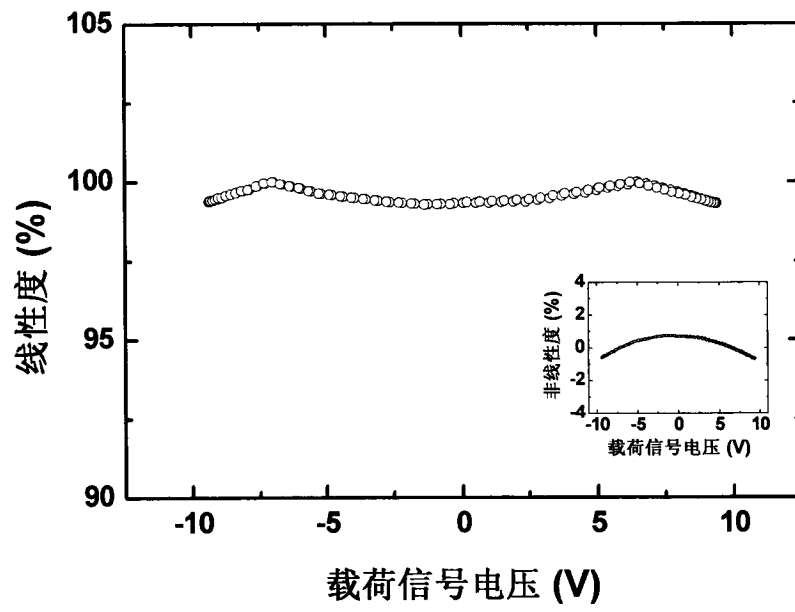


图 6

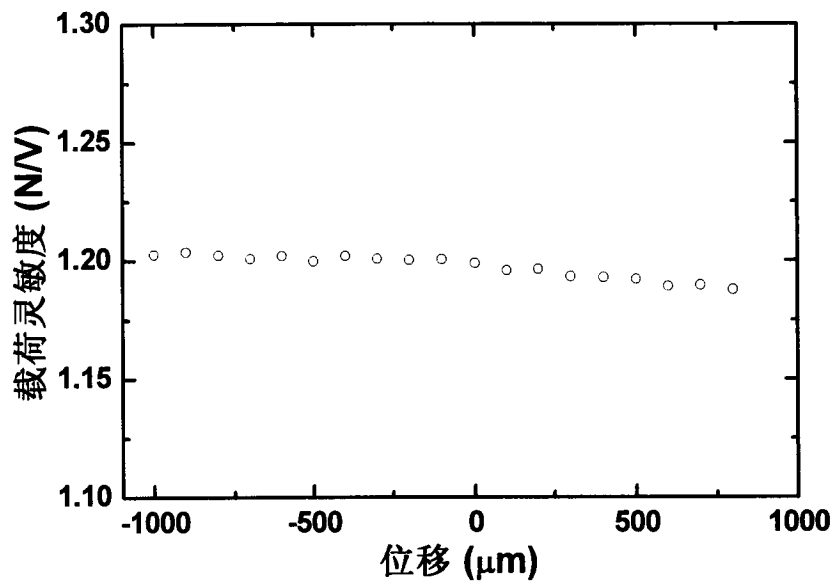


图 7



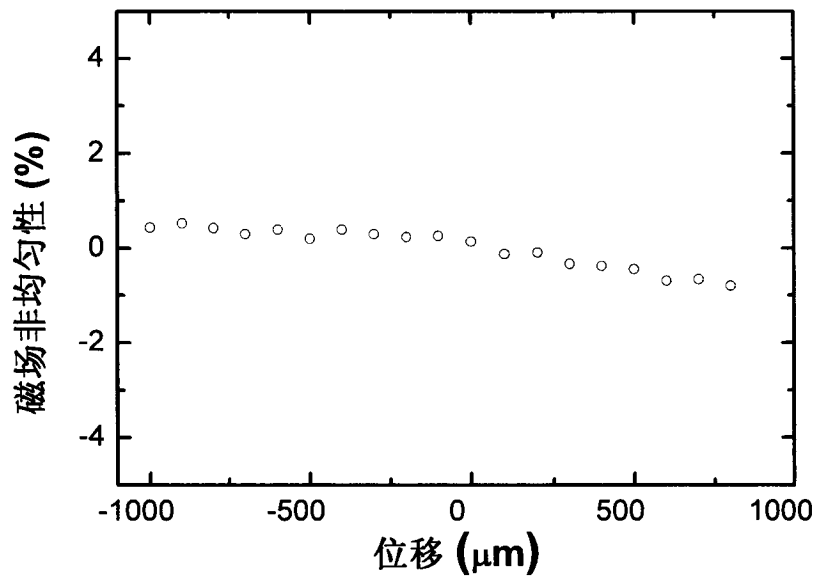


图 8

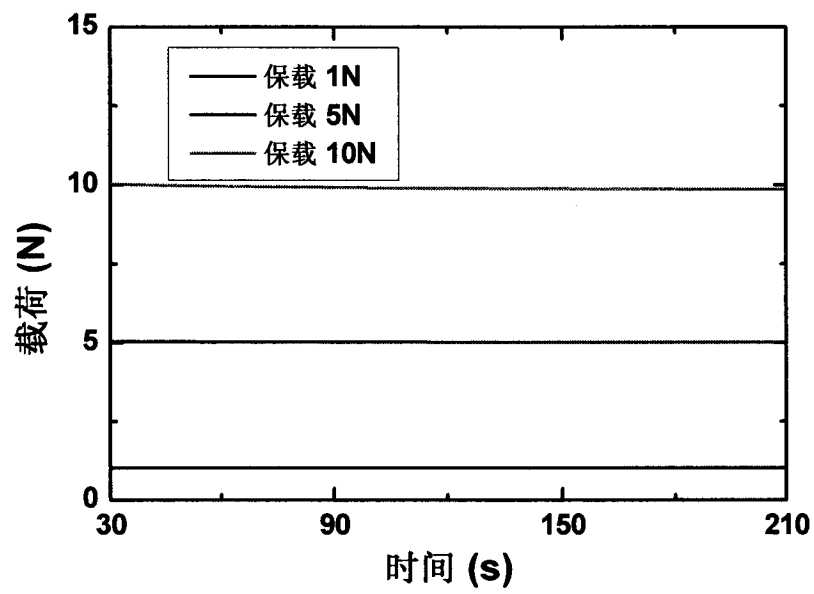


图 9

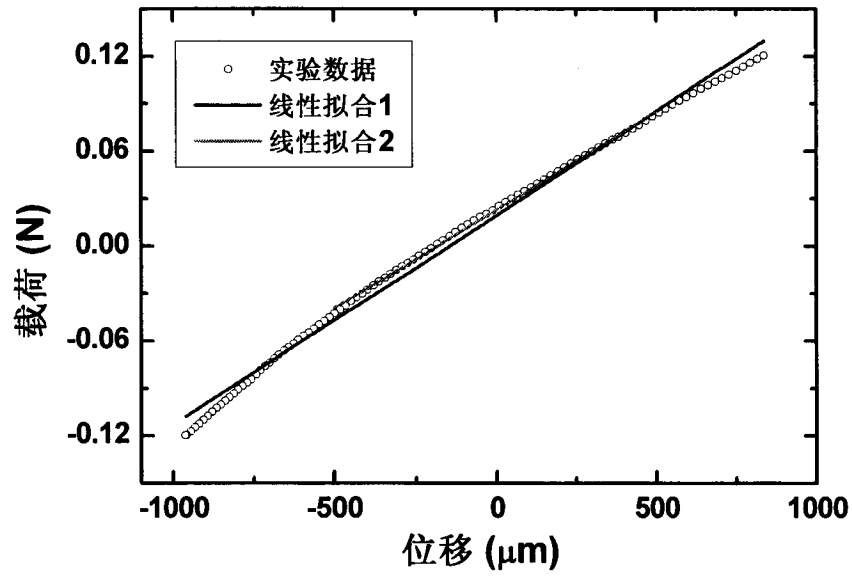


图 10

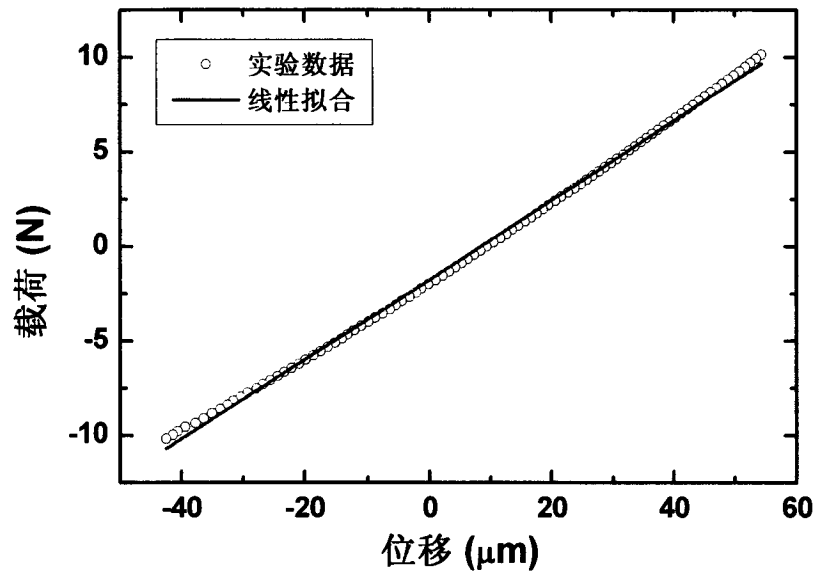


图 11

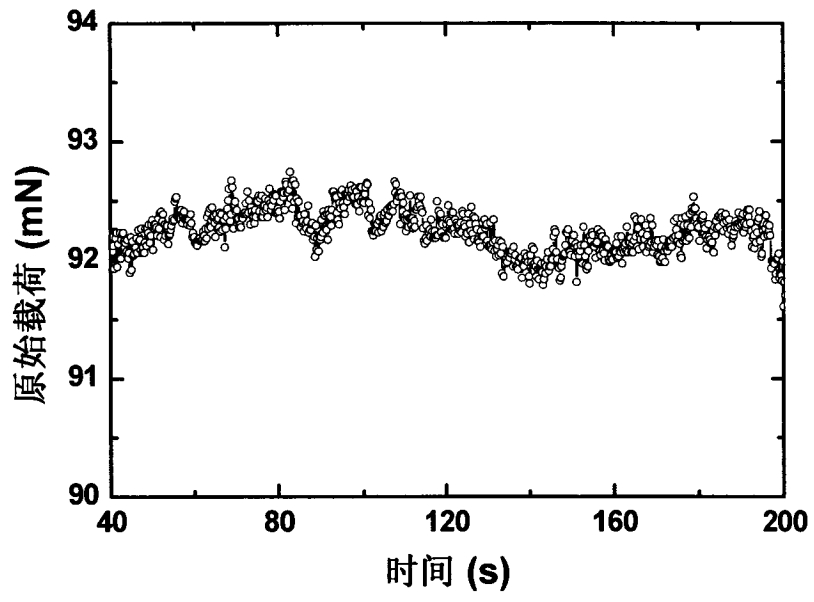


图 12

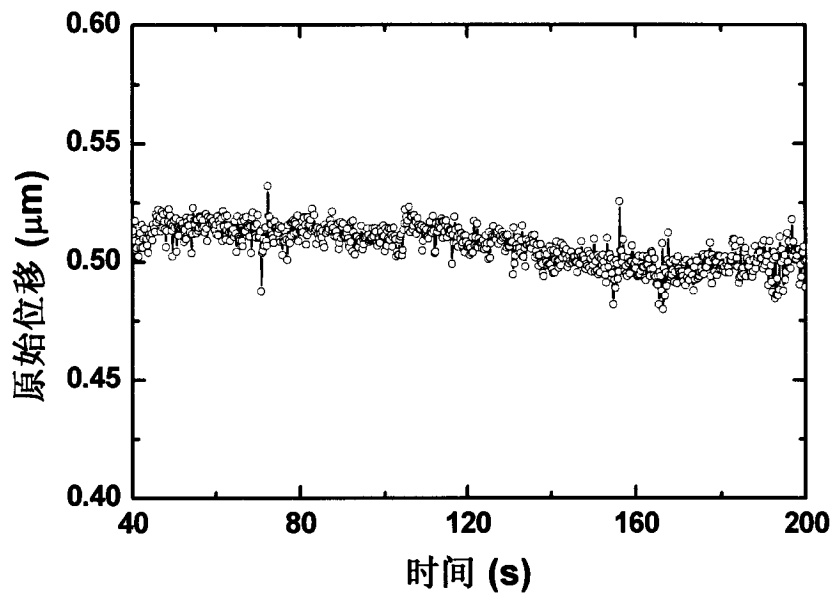


图 13