doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.051

# 纳米级 Z 轴坐标测量系统设计与实验

冯旭刚[1]　冯同磊[1]　章家岩[1]　徐　驰[1]　费业泰[2]　张　鹏[3]

(1. 安徽工业大学电气与信息工程学院, 马鞍山 243032; 2. 合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009;
3. 安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243032)

**摘要**: 基于最小化阿贝误差的理念,设计了带有重力补偿器的整体结构对称的 Z 轴测量平台,其次,使用扫面静电力显微镜组成配套的探针系统,最后,对设计的核心内容分两组进行分离测试以验证设计的合理性与有效性。测试首先验证了测量系统分别在静态和动态下重力补偿器的可行性,然后验证经过双高度法补偿后的扫描静电力显微镜探针系统的有效性,实验结果表明,设计的纳米级 Z 轴坐标测量系统可实现超高精度空间分辨率,具有 50 mm 的有效行程范围,同时具有对部分非导体的测量能力,使得微纳米测量机的适用范围得到延伸,具有较高的应用价值。

**关键词**: 微纳米测量; 重力补偿器; 扫描静电力显微镜探针系统; 双高度法

**中图分类号**: TH721　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2017)11-0417-06

# Design and Experiment of Nano-resolution *Z*-axis Coordinate Measuring System

FENG Xugang[1]　FENG Tonglei[1]　ZHANG Jiayan[1]　XU Chi[1]　FEI Yetai[2]　ZHANG Peng[3]

(1. *School of Electrical and Information Engineering*, *Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243032, *China*
2. *School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering*, *Hefei University of Technology*, *Hefei* 230009, *China*
3. *School of Mechanical Engineering*, *Anhui University of Technology*, *Ma'anshan* 243032, *China*)

**Abstract**: The accuracy of the *Z*-axis in the vertical direction of the machine determines the overall performance of the three-dimensional measurement of the micro-nano coordinate measuring machine to a large extent. In order to improve the measurement accuracy of the coordinate measuring machine, it is necessary to study the *Z*-axis measuring system of the coordinate measuring machine. Firstly, based on the idea of minimizing Abbe error, a *Z*-axis measurement platform with symmetrical structure of gravity compensator was designed. Secondly, the probe system was composed of scanning electrostatic force microscope. Finally, two separate tests were carried out to verify the rationality and effectiveness of the design. The feasibility of the measurement system with gravity compensator in the static and dynamic was verified separately by the experiment, and then the validity of the scanning electrostatic force microscope probe system compensated with the double height method was verified. The experimental results showed that the novel *Z*-axis coordinate measuring system had a spatial resolution of 0.6 nm with an effective stroke range of 50 mm, and had a measurement capability for some non-conductors. The research extended the applicable range of micro-nano coordinate measuring machine and had high application value.

**Key words**: micro-nano measurement; gravity compensator; scanning electrostatic force microscopy; double height method

## 引言

测量测试技术在制造行业中的地位越来越重要,微细加工技术的快速发展使得产品的导向趋于微型化,出现了各种微型机械、超精密光学器件和微电子机械系统(Micro-electro-mechanical systems, MEMS)器件[1-2]。这些微型机械的几何特征尺寸在数十微米至数毫米之间,这些尺寸的测量不确定

收稿日期: 2017-08-14　修回日期: 2017-09-03

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(51405003)和安徽省教育厅自然科学基金重点项目(KJ2015A058)

**作者简介**: 冯旭刚(1977—),男,副教授,博士,主要从事精密测量及机械研究,E-mail: fxg773@ahut.edu.cn

度要求达到数十纳米至数百纳米。受限于测球尺寸和测头系统性能等因素,传统三坐标测量机无法满足这些器件的三维精密测量要求。近代干涉仪和扫描探针显微镜等虽然分辨力在向着纳米和皮米量级发展[3-6],但测量范围小、探针短,也不能满足这些器件的三维测量要求,且扫描探针显微镜在垂直方向上的量程很小,不是真正意义上的三维测量仪器。因此发展体积小、精度高的微纳米三坐标测量机技术成为当务之急。

国内外许多大学或研究机构在进行微纳米接触式探头的研究[7-17],设计的测量系统不确定度较高、分辨力较弱或结构复杂。现有的接触式探头均达到了纳米级的测量分辨力,但都需要采用 2 个以上的传感器进行感测,存在结构复杂、体积大、成本高、装调困难等不足。为此,有必要对纳米三坐标测量机进行进一步研究,以便于超精密仪器设备的测量。

本文提出一种纳米级 $Z$ 轴坐标测量系统,配备扫描静电力显微镜,针对微纳米三坐标测量机的 $Z$ 轴测量平台的行程范围和空间分辨率进行一系列的实验,以验证系统的有效性。

## 1 竖直纳米动力平台

### 1.1 平台设计原理

微纳米三维工作台是微纳米测量机的重要组成部分,工作台的静态特性和动态特性对测量机的测量稳定性、重复性和测量精度有重要影响[18]。而微纳米三坐标测量机中 $Z$ 轴平台的性能是整机精度控制的关键,为保证测量机平台有较小的静态变形与较强的抗外界干扰能力,从而设计出具备重力补偿器的竖直运动平台,其基本设计概念图如图 1 所示。

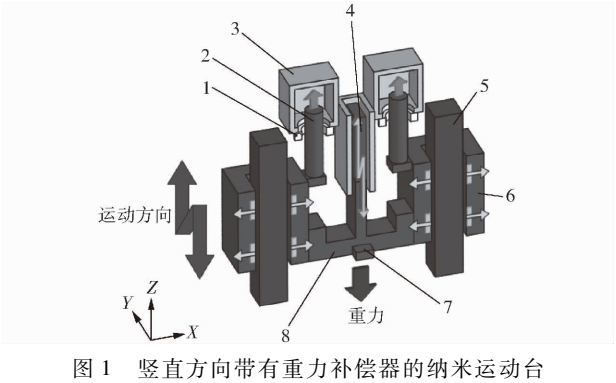


图 1 竖直方向带有重力补偿器的纳米运动台

Fig. 1 A nano table with a gravity compensator in vertical direction

1. 非接触式密封圈 2. 活塞 3. 真空缸 4. 音圈电机 5. 静压导轨 6. 滑动架 7. 镜面 8. 运动台

由图 1 可知,平台包括一个运动平台、一个音圈驱动器、一对静压导轨和一对真空气缸。设计的平台用作三坐标测量机的 $Z$ 轴运动系统,为减小测量中阿贝误差,整个平台结构上采用对称式设计,为最小化角度误差同时减小重力的影响,音圈驱动器安装在 2 个平行分布的导轨之间。另外,此系统可以大大减少热变形,从而最小化水平定位误差。激光干涉仪和反射镜面安装在运动台的中间用来测量并减少竖直方向的阿贝误差,整个运动台由一对真空缸实现完全无接触式的支撑,并通过一对静压导轨带动平台的运动。此 $Z$ 轴坐标测量系统实物图如图 2 所示。

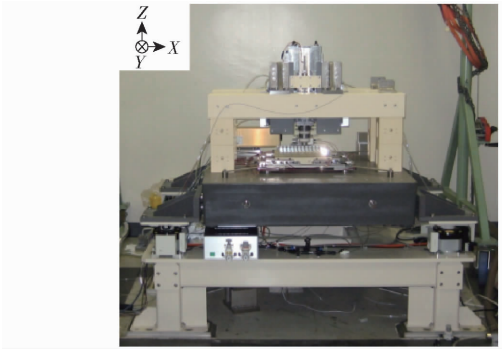


图 2 纳米级 $Z$ 轴坐标测量系统

Fig. 2 Nano-resolution $Z$-axis coordinate measurement system

### 1.2 重力补偿器设计

滑轮、弹簧和气动执行器等在平衡重力上已被广泛应用[19-23],但是,使用以上方法时常常因为摩擦力和各种力的波动带来较大误差。在本文中,非接触式真空缸用作重力补偿器,其结构如图 3 所示。

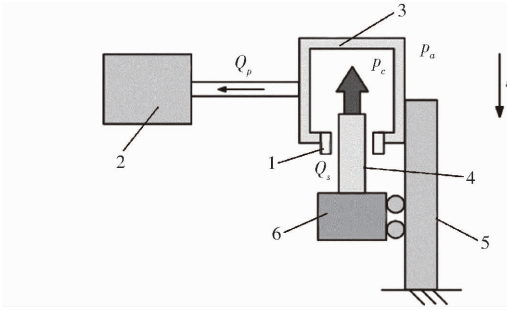


图 3 重力补偿器结构图

Fig. 3 Structure diagram of gravity compensator

1. 非接触式密封圈 2. 真空泵 3. 真空缸 4. 活塞 5. 连接柱 6. 承载部件

运动部分的质量由真空引力支撑,因此,真空缸内压力的波动比传统使用气动缸小很多,另外,由于使用非接触式密封从而能够抑制振动并且能够抑制热能传导到运动部分,减小误差。

非接触式真空缸内压力的变化为

$$\frac{\mathrm{d}p_c}{\mathrm{d}t} = -\frac{p_c}{V_c}\frac{\mathrm{d}V_c}{\mathrm{d}t} + \frac{Q_s - Q_p}{V_c} \tag{1}$$

其中

$$Q_s = \frac{\pi D a^3}{12\mu L}(p_a^2 - p_c^2) \tag{2}$$

$$Q_p = \frac{\pi d^4}{256\mu l}(p_c^2 - p_p^2) \tag{3}$$

式中　$a$——非接触密封间隙长度，m

$L$——封装长度，m　　$D$——活塞直径，m

$l$——排气管长度，m

$d$——排气管直径，m

$p_a$——大气压力，Pa

$p_c$——缸内压力，Pa

$p_p$——真空泵入口压力，Pa

$V_c$——缸内总容积，$m^3$

$Q_s$——非接触密封泄漏率，$Pa\cdot m^3/s$

$Q_p$——真空泵排气率，$Pa\cdot m^3/s$

$\mu$——粘度系数，Pa·s

基于上述方程的压力变化模拟结果，为减小真空缸内力的波动，对重力补偿器进行了优化设计。

## 2　扫描静电力显微镜探针系统设计

### 2.1　静电力原理

通过记录扫描过程中探针的轨迹能获取被测物的轮廓信息，为了正确显示出被测物的轮廓特征就必须确保探针与被测物之间的距离为常数。但是，扫描静电力显微镜在测量物体过程中，探针与被测物之间的距离会伴随被测物表面静电的强度分布不均而波动，为了弥补由于此波动导致测量过程中的不精确性，本文提出了一种双高度法的算法，此算法根据静电相互作用的性质计算探针与被测物之间的距离。探针与被测物之间静电力的相互作用如图 4 所示。

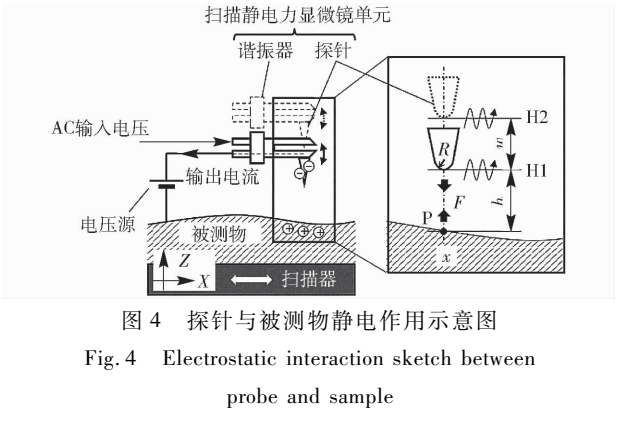


图 4　探针与被测物静电作用示意图

Fig. 4　Electrostatic interaction sketch between probe and sample

通过给探针和被测物连接恒定电压源，假设的探针和被测物之间电压差保持恒定，静电力 $F$ 为存储在探针与被测物之间电容中的能量 $W$ 在 $Z$ 方向的导数

$$F = W' = \frac{1}{2}C'(V_{dc} + V_{cpd})^2 \tag{4}$$

其中　$W' = \partial W/\partial Z$　　$C' = \partial C/\partial Z$

式中　$V_{dc}$——探针与被测物之间的压差，V

$C$——探针与被测物之间的电容，F

$V_{cpd}$——接触电位差，V

半径为 $R$ 探针头作用力 $F$ 为

$$F = \pi\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{dc} + V_{cpd})^2\frac{R}{h} \tag{5}$$

式中　$\varepsilon_0$——真空介电常数，F/m

$\varepsilon_r$——相对静电介电常数，F/m

$h$——探针与被测物之间的距离，m

扫描静电力显微镜探针单元由谐振器和针头组成，探针单元有效谐振频率为

$$f_{eff} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k - F'}{m}} \tag{6}$$

式中　$k$——谐振器的弹簧弹性系数，N/m

$m$——振荡系统的等效质量，kg

$F'$——尖端上的作用力在 $Z$ 轴方向上的导数

采用一阶泰勒近似，共振的频移 $\Delta f$ 为

$$\Delta f = f_{eff} - f_0 \approx \frac{f_0}{2k}F' \tag{7}$$

其中

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{8}$$

根据式(5)～(8)可得到静电力引起的频移为

$$\Delta f \approx -\frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R f_0}{2k}(V_{dc} + V_{cpd})^2\frac{1}{h^2} \tag{9}$$

因此，静电力和探针与被测物之间的距离成反比，由静电力引起的探头的频移与探头和被测物之间的距离平方成反比。

### 2.2　双高度法原理

本文引入双高度法用来测量探针与被测物之间的距离，根据图 5 所示，双高度法需要采样不同位置的探针与被测物之间的静电力。设在位置 H1 时获取的频移信号如式(9)所示，则在位置 H2 的频移为

$$\Delta f_w = -\frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R f_0}{2k}V_{dc}^2\frac{1}{(h + w)^2} \tag{10}$$

其中

$$w = d_b - d_a \tag{11}$$

式中　$d_a$——针尖在竖直位置 H1 处高度，m

$d_b$——针尖在竖直位置 H2 处高度，m

根据等式(9)、(10)可得探针与被测物之间的距离为

$$h = w\frac{\sqrt{\dfrac{\Delta f_w}{\Delta f}}}{1 - \sqrt{\dfrac{\Delta f_w}{\Delta f}}} \tag{12}$$

式(12)中包括电位在内的参数全被约去了，因

此,可以精确地消除静电的强度分布对测量的影响,从而计算出探针与被测物之间距离的绝对值。

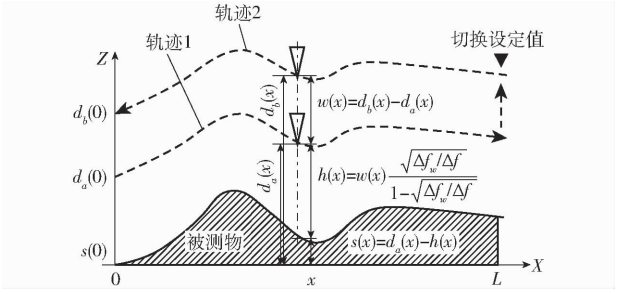


图 5 双高度法测量原理图

Fig. 5 Measuring schematics of double height method

扫描静电力显微镜在探针与被测物之间距离不变的模式下扫描被测物表面,此时探针的位置作为反馈控制频移为常数,在每扫描线进行两次扫描,反馈的设定值在所有转折点的两个值之间切换,这样,不同距离的两个频移信号就可以在 $X$ 轴上采样得到,此时探针与被测物的距离即为式(12),并且被测物的高度即为

$$s(x)=d_a(x)-h(x) \tag{13}$$

因此双高度法可以补偿探针与被测物之间距离的动荡,即使是 $Z$ 方向的反馈误差、在 $XY$ 平面的静电力分布、探针与被测物之间存在波动,扫描静电力显微镜都可以得到正确且精确的物体表面信息。

### 2.3 扫描静电力探针系统

扫描静电力显微镜探针系统如图 6 所示。扫描静电力显微镜系统由振动控制器、$Z$ 轴扫描器、探针单元、$XY$ 平面扫描器、电流-电压转换器和带有电极夹的恒压源组成。

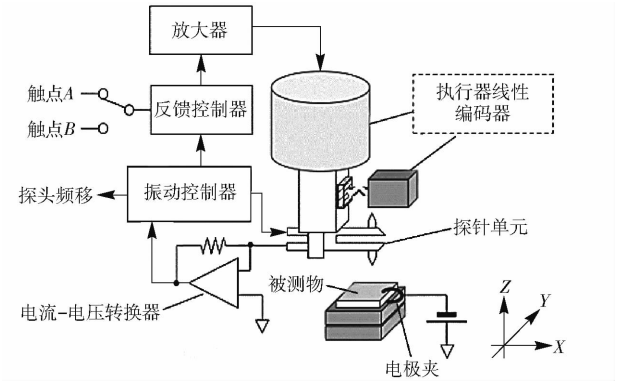


图 6 扫描静电力探针系统图

Fig. 6 Scanning electrostatic force probe system diagram

其中振动控制器有 2 种功能:①自震荡电路:使探针单元以实际谐振频率振荡。②锁相环电路:使振荡频率解调为 DC 信号。

这 2 个功能的组合应用使谐振器的谐振频移转换成 DC 信号,其对应于在测头上作用力在 $Z$ 方向梯度。$Z$ 轴扫描仪由一个线性编码器和一个长行程压电陶瓷驱动器组成,以实现 0.5 nm 的测量分辨率以及在 $Z$ 轴方向上 50 μm 行程中 5 nm 的测量精度。该扫描静电力探针系统的探头单元由音叉石英晶体谐振器和 2 个电抛光钨针组成,下部针头用于对物体的测量,上部的针头是在谐振器上力的平衡以保证更高的 $Q$ 因子,测量单元的谐振频率和 $Q$ 分别约为 29 kHz 和 6 000,针尖通过导电环氧树脂与音叉石英晶体谐振器的表面电极电连接,以便通过在电流-电压转换器中使用的运算放大器的虚拟短路来将尖端的电压电势置为约 0 V。

## 3 系统性能测试

### 3.1 重力补偿器性能测试

在对重力补偿器性能进行评估时,由于运动台上下移动时会对真空缸产生波动,因此首先需气缸静压调整以补偿每个有效载荷质量,以 50 mm/s 的速度测试重力补偿器,其波动如图 7 所示。

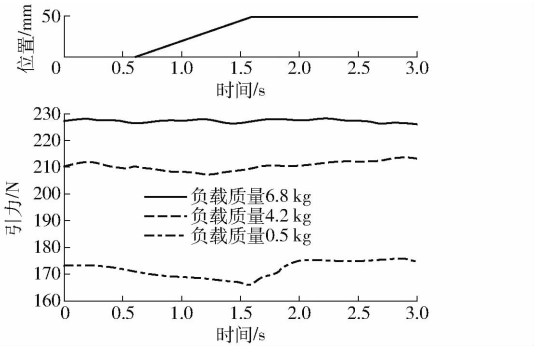


图 7 重力补偿器的引力波动

Fig. 7 Gravitational displacement of gravity compensator

经测量,真空缸内的引力最大变化都小于 1.5 N,当负载质量为 6.8 kg 时,相比静态时的引力变化小于 0.64%,因此,此重力补偿器对物体测量是有实用性的。

### 3.2 探针系统性能测试

扫描静电力显微镜可调节电极电压得到不同模式,当调节电极电压为 0 V 时就变为原子力显微镜,其在不同模式下对玻璃表面测量探针轨迹如图 8 所示,由图 8 可知,使用双高度法可以有效地对玻璃表面进行测量。

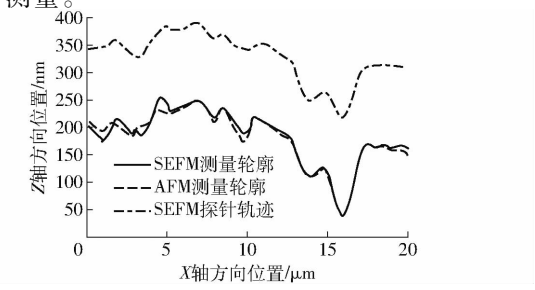


图 8 不同模式的探针轨迹

Fig. 8 Different patterns of probe trajectories

同时对系统的空间分辨率进行了测试，在垂直方向上的 0.6 nm 逐步响应的结果如图 9 所示。

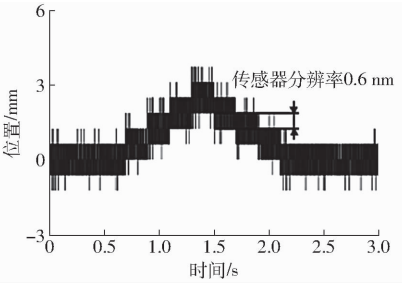


图 9　0.6 nm 逐步响应的结果

Fig. 9　Response results of 0.6 nm stepwise

由图 9 可知本系统在消除非线性因素的情况下可实现 0.6 nm 的定位精度，在此系统平台设计中，在稳定状态下系统对外部冲击和振动的鲁棒性可以通过平台的快速响应、直接驱动和使用音圈电动机驱动平台重心实现。

对系统测量范围进行了测试，图 10 为系统在速度为 10 mm/s 下行程为 50 mm 的跟踪误差。

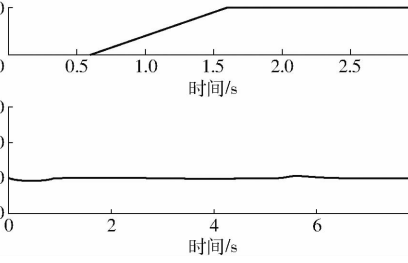


图 10　50 mm 行程测量时跟踪误差

Fig. 10　Tracking errors in 50 mm stroke measurement

不同负载误差也会变化，根据测试，行程误差为 11 nm，因此，此系统同时具有 50 mm 的测量范围。

## 4　结论

（1）设计了基于三坐标测量机的 Z 轴测量平台，为了最大化减小阿贝误差，此平台整体构架采用对称式设计，针对重力对竖直方向测量系统的影响，Z 轴测量平台使用真空缸作为重力补偿器，利用音圈电动机驱动实现了在非接触情况下的良好支撑，克服了传统重力补偿器引入的摩擦力和各种力的波动对平台整体测量精度的影响。

（2）设计的 Z 轴测量平台使用扫描静电力显微镜作为探针测量系统，针对此测量系统测量时针头与被测物之间距离的不停波动对测量精度的影响，引入双高度法对此波动进行补偿，通过针头对被测物轮廓信息的不断测量，双高度法可得到针头的运动轨迹和频移信号，最终形成针头与被测物的位置信息。结果表明，经过双高度法补偿后的扫描静电力显微镜测量系统的探针与被测物之间的距离超过 100 nm，是传统扫描探针显微镜 10 倍以上，因此对环境的干扰有较强的鲁棒性。

（3）Z 轴测量平台与扫描静电力显微镜测量系统的结合，实现了 50 mm 的行程范围，可实现超高精度的空间分辨率，为实现 0.6 mm 的空间分辨率，实验设备在持续改进。

## 参　考　文　献


1　袁巨龙，张飞虎，戴一帆，等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报，2010，46(15)：161－177.
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161－177. (in Chinese)

2　房建国，胡成海，庞长涛，等. 精密坐标测量技术的发展及应用[J]. 航空制造技术，2015(7)：38－41.
FANG Jianguo, HU Chenghai, PANG Changtao, et al. Development and application of precision coordinate measuring technology [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(7): 38－41. (in Chinese)

3　徐毅，高思田，王春艳，等. 微机械及纳米计量科学[J]. 中国机械工程，2000，11(3)：272－274.

4　黄强先，余慧娟，黄帅，等. 微纳米三坐标测量机测头的研究进展[J]. 中国机械工程，2013，24(9)：1264－1272.
HUANG Qiangxian, YU Huijuan, HUANG Shuai, et al. Advances in probes of micro-nano coordinating measuring machine[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(9): 1264－1272. (in Chinese)

5　TAKAMASU K, FURUTANI K R, OZONO S. Development of nano-CMM (coordinate measuring machine with nanometer resolution) [C]// Proceedings of the XIV IMEKO World Congress (Finland), 1997: 34－39.

6　HUANG Qiangxian, JIAN Mei, GUO Qiang, et al. Calibration of a contact probe for micro-nano CMM [C]// 2016 10th International Conference on Sensing Technology (ICST), 2016: 1－5.

7　CHU C L, CHIU C Y. Development of a low-cost nanoscale touch trigger probe based on two commercial DVD pick-up heads [J]. Measurement Science & Technology (S0957－0233), 2007, 18(7): 1831－1842.

8　CUI Jiwen, LI Lei, TAN Jiubin. Optical fiber probe based on spherical coupling of light energy for inner-dimension measurement of microstructures with high aspect ratios [J]. Optics Letters (S0146－9592), 2011, 36(23): 4689－4691.

9　CUI Jiwen, FENG Kunpeng, LI Junying, et al. Development of a double fiber probe with a single fiber Bragg grating for dimensional measurement of microholes with high aspect ratios [J]. Optics Letters (S0146－9592), 2014, 39(10): 2868－2871.

10　LIEBRICH T, KNAPP W. New concept of a 3D-probing system for micro-components [J]. Annals of the CIRP (S0007－8506), 2010, 59(1): 513－516.

11 MICHIHATA M, TAKAYA Y, HAYASHI T. Nano position sensing based on laser trapping technique for flat surfaces [J]. Measurement Science & Technology(S0957 - 0233),2008,19(8):817 - 822.

12 HUGHES E B, WILSON A, PEGGS G N. Design of high accuracy CMM based on multilateration techniques [J]. Annals of the CIRP(S0007 - 8506),2000,49(1):391 - 394.

13 MURALIKRISHNAN B, STONE J A, STOUP J R. Fiber deflection probe for small hole metrology [J]. Precision Engineering (S0141 - 6359),2006,30(2):154 - 164.

14 KÜNG A, MELI F, THALMANN R. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe [J]. Measurement Science & Technology(S0957 - 0233),2007,18(2):319 - 327.

15 BOS E J C. Aspects of tactile probing on the micro scale [J]. Precision Engineering(S0141 - 6359),2011,35(2):228 - 240.

16 DAI Gaoliang, BÜTEFISH S, POHLENZ F, et al. A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes [J]. Measurement Science & Technology(S0957 - 0233),2009,20(8):1118 - 1121.

17 PEINER E, BALKE M, DOERING L, et al. Tactile probes for dimensional metrology with micro components at nano meter resolution [J]. Measurement Science & Technology(S0957 - 0233),2008,19(19):579 - 588.

18 张国雄. 三坐标测量机[M]. 天津:天津大学出版社,1999.

19 齐芊枫,方洁,吴立伟,等. 一种小型重力补偿器的研究[J]. 电子工业专用设备,2012,41(6):20 - 23.
QI Qianfeng, FANG Jie, WU Liwei, et al. Study on a mini-gravity compensator[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2012,41(6):20 - 23. (in Chinese)

20 KIMA S, CHO C. Design of gravity compensators using the Stephenson and Watt mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2016,102:68 - 85.

21 CHO C, KANG S. Design of a static balancing mechanism for a serial manipulator with an unconstrained joint space using one-DOF gravity compensators[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2014,30(2):421 - 431.

22 钱鹏飞,任旭东,张连仁,等. 气动伺服系统全局稳定快速收敛负载独立压力观测器[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(4):399 - 405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20170453&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.053.
QIAN Pengfei, REN Xudong, ZHANG Lianren, et al. Globally stabel, fast convergent and load-independent pressure observer for pneumatic servo system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(4):399 - 405. (in Chinese)

23 沈文臣,胡宇辉,余天啸,等. 气动换挡执行机构压力特性仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(2):338 - 348. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160245&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/i.issn.1000-1298.2016.02.045.
SHEN Wenchen, HU Yuhui, YU Tianxiao, et al. Simulation and experiment of pressure characteristics for pneumatic shifting actuator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2):338 - 348. (in Chinese)