

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.03.04

三坐标测量机微纳探头的设计与验证

范光照^{1,2}, 李瑞君²

(1. 台湾大学 机械工程学系, 台湾 台北 10617; 2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 介绍了国内外测量探头的研究现状; 设计了基于簧线和簧片的弹性机构, 建立了典型结构: 弹性机构的刚度模型, 对不同形状的弹性机构进行了仿真验证; 介绍了作者团队研制的几种光学传感器及八款三坐标测量机微纳探头, 对探头的性能进行了实验验证与测试; 对三坐标测量机微纳测量探头的研究和发展趋势进行了总结和展望。

关键词: 计量学; 微纳米三坐标测量机; 探头

中图分类号: TB92

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)03-0060-22

Design and Verification of Micro/nano-probes for Coordinate Measuring Machine

FAN Guangchao^{1,2}, LI Ruijun¹

(1. Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei 10617, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electric Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The recent progress of probes for coordinate measuring machine (CMM) was reviewed. The elastic mechanisms for the probes based on elastic strings and leaf springs have been designed. A typical structure, the stiffness model of the elastic mechanisms was established. The elastic mechanisms with different shapes have been verified by simulation using ANSYS software. Eight probes based on different optical sensors were introduced. The performance and practicality of these probes were verified by experiment and tested. Finally, the research and development trends of the micro/nano probes for CMMs were summarized and prospected.

Key words: metrology; micro/nano CMM; probe

0 引言

随着微加工技术的不断发展, 在航空、航天、汽车、生物医学、环境监测、军事等领域出现了许多微型器件, 如微传感器、微执行器、微型构件、微光学器件、微电力电子器件等^[1-3], 这些器件的几何特征尺寸介于数微米到数毫米之间, 需要有亚微米级甚至纳米级精度的三维形貌测量设备才能测量。传统的坐标测量机因精度低、测球直径及测力太大而无法满足要求; 原子力显微镜(AFM)、扫描隧道显微镜(STM)等纳米精度测量仪器比较适合微米级范围内的二维形貌连续扫描测量, 但不易测量微器件的三维特征; 共焦显微镜、白光干涉仪等高精度非接触式测量仪器难以测量大斜度表面、侧面及内腔等高深宽/径比特征尺寸。因而, 客观上需要有具备微纳米级精度的三坐标测量机, 其中的探头技术是关键和难点。

1 微纳米接触式探头类别

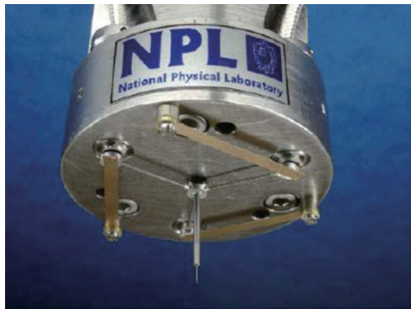
国内外许多著名大学或研究机构都在研究微纳米

接触式探头, 按照感测原理可以将其分为电容式、压阻式、电感式、影像式、光电式和共振式等几类。

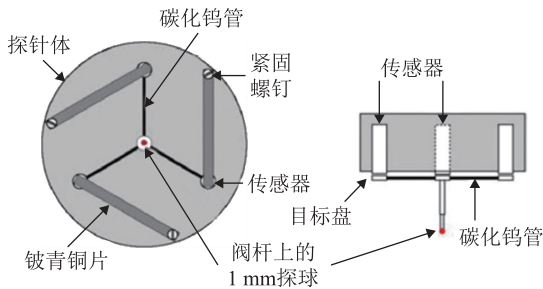
1.1 电容式探头

1) 英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, 简称NPL)^[4-5]小型三坐标测量机(CMM)的探头如图1所示, 利用三个铝盘(直径3 mm、厚度1 mm)、三根碳化钨管、三个铍青铜片与三个电容传感器组成三组呈120°的接触式测量探头, 该探头的重量为370 g, 测球直径为1 mm, 量程为±20 mm, 分辨力为3 nm, 10 mm量程对应的探头接触力小于0.1 mN。在加工和组装时难以保证设计的对称性要求, 因此在测量时会有交叉耦合现象。另外, 当沿水平方向触碰测球时, 三个感测点会有渐增倾角, 导致电容传感器的两个极板不平行, 进而会影响测量准确度。

2) 荷兰Eindhoven大学也研制出了以电容为感测器件的探头^[6]。探头主要由三层极板组成, 极板间用弹簧支撑, 将感测区域分成四块, 故可测量中间极板的二维转角和沿竖直方向上的位移。探头中间极板与探



(a) 实物图



(b) 探头系统示意图

图 1 英国 NPL 小型 CMM 的探头系统

针相连，当测球受到触碰产生位移时，中间极板上上下移动或者倾斜，导致电容输出发生变化，如图 2 所示。该探头可达到 XY 方向 5.3 nm 、 Z 方向 1.6 nm 的不确定度。

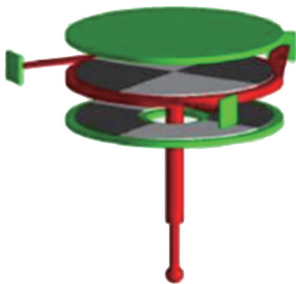


图 2 荷兰 Eindhoven 大学的电容式探头

3) 哈尔滨工业大学谭久彬等提出了一种电容式触发探头，测球直径约为 3 mm ，如图 3 所示^[7]。测球与被测物(金属)之间会形成一个电容，该电容的大小与测球与被测物之间的距离呈一一对应关系，可以达到 5 nm 的分辨力。

1.2 电阻式探头

1) 德国计量院 (Physikalisch – Technische Bundesanstalt, 简称 PTB) 研制的探头以压敏电阻 (Piezoresistor) 为感测元件^[8]。用微细加工技术制造出的硅薄膜 (membrane) 和框架 (frame) 以及安装的探针

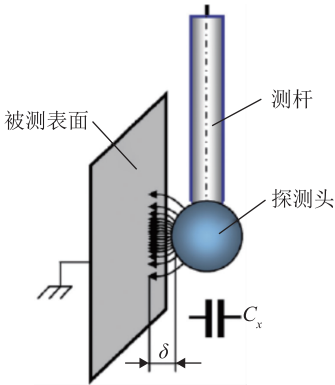


图 3 哈尔滨工业大学的电容式探头

组成弹性机构，如图 4 所示。当测球受力时会造成薄膜变形，变形量可由贴在薄膜上的压敏电阻感测并最终转换为测球的三维位移值。该探头在 X, Y, Z 方向上的测量重复性分别为 $4.4, 4.4, 1.3\text{ nm}$ 。

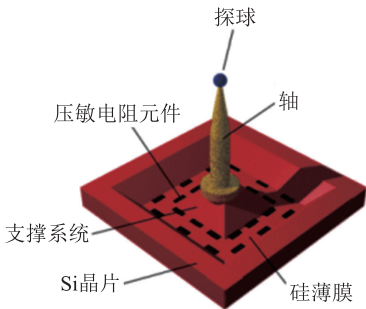


图 4 PTB 的压阻式探头系统

2) 荷兰 Eindhoven 大学也开发了以应变规 (strain gauge) 作为感测器件的探头^[9]。该探头由 Pril 等人提出，利用 MEMS 技术将应变规集成在支撑杆内，测球直径为 $300\text{ }\mu\text{m}$ ，测杆长度大于 4 mm ，探头接触力小于 1 mN ，测量范围为 25 mm ，分辨力为 1 nm ，探头整体重量为 20 mg ，如图 5 所示。

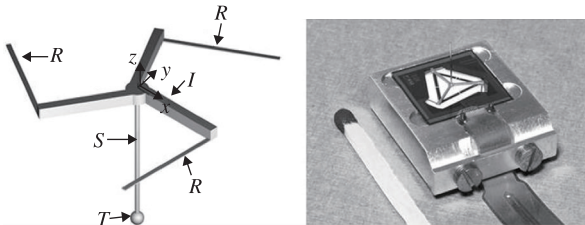


图 5 Eindhoven 大学开发的应变式探头

3) 德国 Braunschweig 工业大学的 Peiner 等人利用蚀刻的方式在微小的悬臂上制造出一个尖端作为探针，在悬臂的上方利用硅材料蚀刻出电阻，当探针受

力造成悬臂变化时可由电阻的变化和惠斯通电桥原理感测出探针的位移,如图 6 所示^[10]。该探头系统可应用于深宽比较大工件的测量,测量范围达到 40 μm ,分辨力 1 nm,重复性 5 nm。探头的刚性约为 9.7 N/km,最小可分辨到 1 nN,最大接触力为 400 mN。德国 Braunschweig 工业大学的 Tibrewala 等人也制造出了类似的压阻式触发探头^[11]。

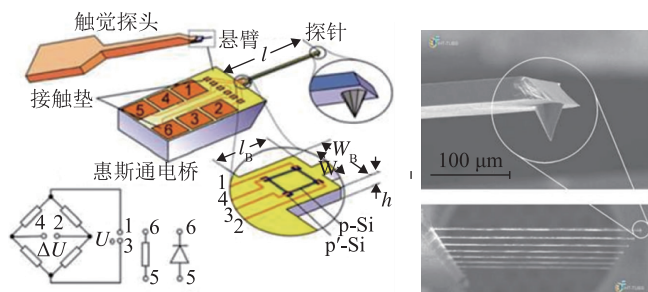


图 6 德国 Braunschweig 大学的探头系统

4) 天津大学也研制出了压阻式三维微触觉探头,感测元件和弹性元件用 MEMS 技术制成,如图 7 所示^[12]。沿竖直方向对 2 mm 阶高测量的重复性为 42 nm,沿水平方向对 1 mm 阶高测量的重复性为 566 nm。

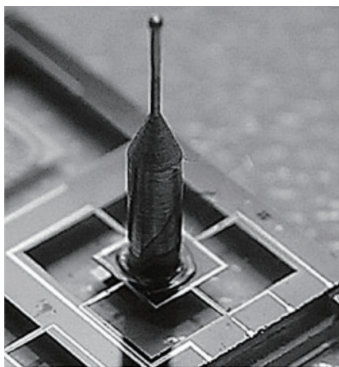


图 7 天津大学的三维微触觉探头

1.3 电感式探头

瑞士 Mecartex 公司和 METAS(瑞士联邦计量及认证局)联合研制了一种三维接触式探头,如图 8 所

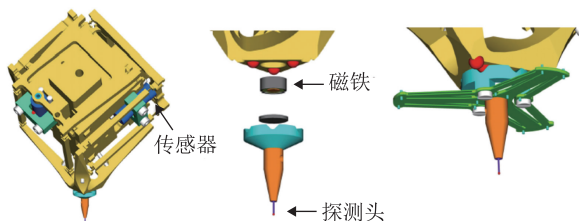


图 8 METAS 的三维接触式探头

示^[13-14]。该探头采用了一种新型的机械机构,该机构限制了自身的旋转运动,并将其平移运动分为 x , y , z 三个方向,使得探头具有完全的三自由度。每个方向的移动都可由电感传感器测得。由于该机构中所有的坐标轴和探头有相同的夹角,故重力对各个轴的影响相同,从而使得探头在三个方向上测力相同。在低速测量时,触测力为 0.5 mN。整台三坐标测量机的量程为 90 mm $\times$ 90 mm $\times$ 38 mm,各轴重复性误差小于 5 nm,总体精度优于 30 nm。

1.4 影像式探头

1) 德国 PTB 的影像式探头原理如图 9 所示^[15-17]。在光纤测杆上设置两个探测圆球,其中一个位于光纤测杆末端作为接触测量探球,另一个位于光纤探针的中部作为 Z 向运动标志,圆球直径约为 25 μm ,光纤测杆直径为 15 μm 。以电荷耦合器件(CCD)作为传感器,搭配测量用显微镜头,分别对两个圆球进行取像,从测杆末端测球图像可以解算出该测球在水平方向的位移,从标志测球的图像可以解算出测杆末端测球在竖直方向上的位移,从而实现三维测量。测量时,测球与工件之间的接触力大小等于变形后的光纤测杆的反力,因此该探头的触测力极小。再配上取像系统与路径规划软件,可以根据测球与工件间的距离实时调整测量速度,所以可节省测量时间并提高稳定性。该探头具有 0.1 μm 的测量不确定度和小于 1 μN 的探头接触力。

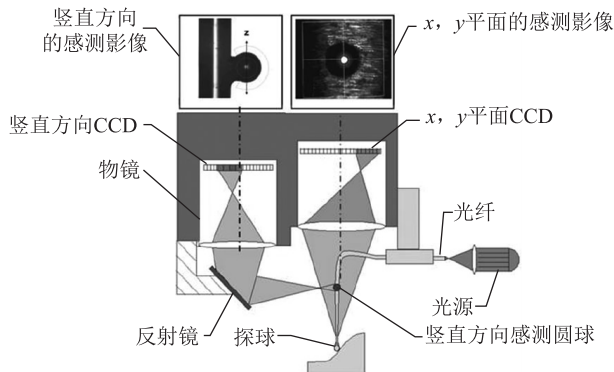
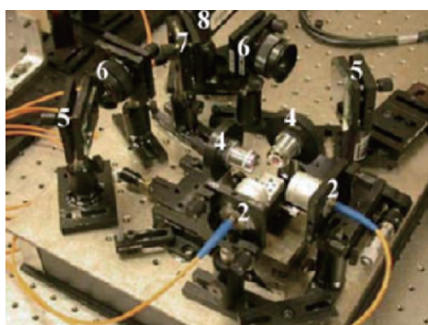
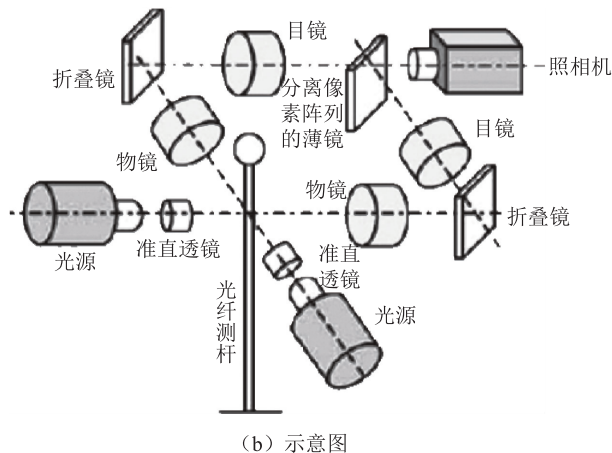


图 9 德国 PTB 光学式三维探头原理图

2) 美国国家标准与技术局(NIST)与北卡大学(UNC)共同研发的探头,采用图像测量的办法感测光纤测杆受力后的变形量,从而实现对物体轮廓形状的测量,如图 10 所示^[18]。经光学系统后,将光纤测杆成像在 CCD 上,当探头接触物体使光纤测杆产生变形时,光纤测杆在 CCD 上的图像位置也会跟着改变,经图像处理,可以判断测球是否已经与工件接触。该



(a) 实物图



(b) 示意图

图 10 NIST 光纤测杆变形的探头

探头的光纤测杆长为 20 mm，光纤测球直径为 75 μm ，具有深宽比高的特性，主要用来进行内孔形状量测。由于光纤的质量极小，使得测量接触力达到微牛顿等级，对直径为 100 μm 的圆孔测量的不确定度为 0.07 μm 。

3) 韩国 Advanced Institute of Science and Technology 的 Kim 等人制成的基于体积测定干涉仪的三维探头原理如图 11 所示。将两根纤芯粗约 2 ~ 3 μm 的单模光纤的出光端对齐并列放在一起，并且固定在探针上，从两根光纤出来的光会发生干涉，干涉图像通过 CCD 来探测。当探针被触碰时，CCD 摄取到图像的相位也不同。为了通过相位解算出探针前段小球的空间坐标，采用了相移法技术。控制缠绕光纤的压电陶瓷可以对光纤进行拉伸，从而实现相移。利用该探头和自己研制的机台，实现了 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 300 mm 的量程、1 nm 的分辨力和 30 nm 的测量不确定度^[19]。

4) 哈尔滨工业大学的崔继文等人提出的光纤探头如图 12 所示^[20]。在光纤测球上并排装有两根光纤杆，激光器中的光通过其中一根光纤耦合射入光纤球，光纤球反射回来的部分光经另一根光纤聚焦到 CCD 摄像

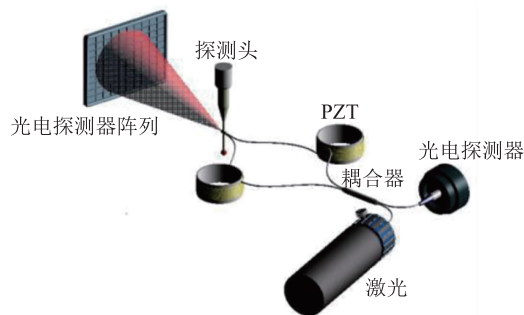


图 11 韩国接触式光学触发探头

机上面，当光纤球受到触碰时，CCD 上的光斑位置会发生变化，以此来作为探头触发与否的判断依据。该探头的测力小于 1 μN ，分辨力为 50 nm，触发重复性为 60 nm，长径比大于 15。

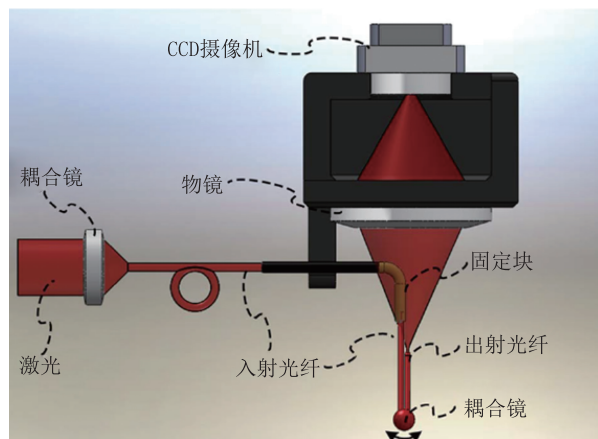
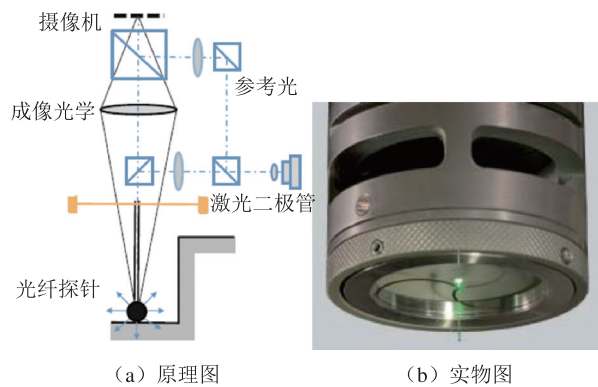


图 12 哈尔滨工业大学光纤探头原理

5) 瑞士 NTB Interstate 大学提出的探头如图 13 所示，其中图 13(a) 为原理，图 13(b) 为实物^[21]。光纤探针被固定在一个悬浮机构上面，位于探针正上方的视觉系统可以实时采集光纤测球的图像，通过分析光



(a) 原理图 (b) 实物图

图 13 瑞士 NTB Interstate 大学的探头

纤测球在图像中的位置可以解算出其在水平方向的移动量。激光器发出的光被分成两路：一路被耦合到光纤探针中，经光纤球头反射后射入视觉系统；另外一路直接射入视觉系统。这两路光会发生干涉，从而可以解算出测球在竖直方向的移动量。

1.5 光电式探头

1) 荷兰 Eindhoven 大学提出的高速扫描探头如图 14 所示^[22]。在固定探针的立方块上布置有平面反射镜，激光器发出的光照射到平面镜上，经平面镜反射后由光电探测器接收。三组同样的装置可以测量探针的六个自由度。在 70 mm/s 的速度下，可以达到 1 μm 的不确定度。

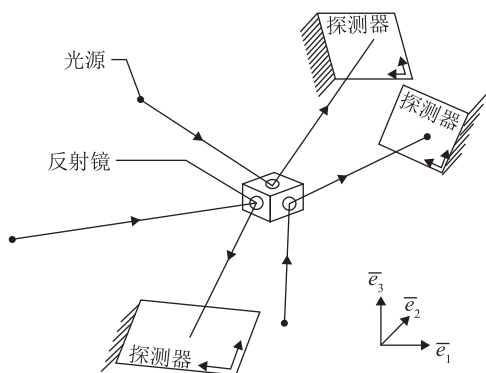


图 14 荷兰 Eindhoven 大学的高速探头

2) 东京大学的 Enami 等人将准直激光束经过一个中空测杆后聚焦在金属测球上，利用四象限光电探测器 (QPD) 收集其反射光，如图 15 所示^[23-25]。当测球与工件接触并位移时，QPD 上接收到的信号亦将发生变化，进而产生触发信号。该探头系统的探测球直径为 3 mm，分辨力为 10 nm。

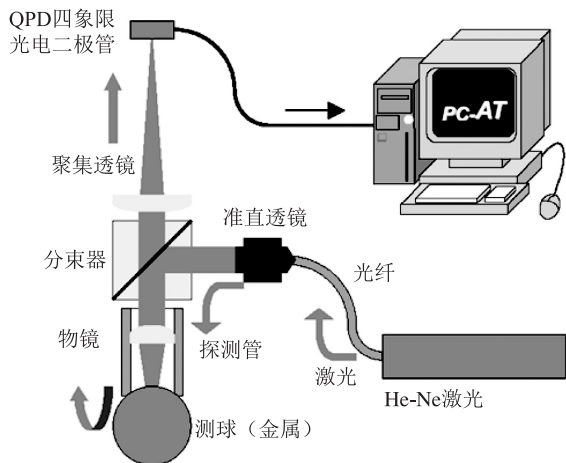


图 15 日本东京大学的光电式探头系统

16 所示^[26]。将探针固定在一个十字架的中心处，十字架的四个悬臂分别与四根钢带相连，钢带的两端固定在一个方形框上。在十字架的反面贴有两片平面反射镜。测球的位移被转化成平面反射镜沿竖直方向的平移和偏转。平面镜的平移和偏转分别通过一个利用 DVD 光学读取头改装的位移传感器和二维角度传感器进行感测。该测头预行程变化范围小于 96 nm，单方向重复性为 46 nm，测量力小于 0.1 mN。

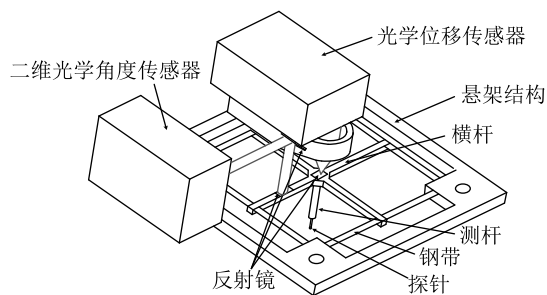


图 16 台南科技大学的接触式测头

4) 合肥工业大学刘芳芳等提出了一种基于布拉格光栅传感器的微纳测量探头，如图 17 所示^[27]。在悬浮片的端部布置了三个沿竖直方向的布拉格光栅传感器，用来感测因探针受到触碰而导致的悬浮片位移量。该探头可达到纳米级分辨力和测量重复性。

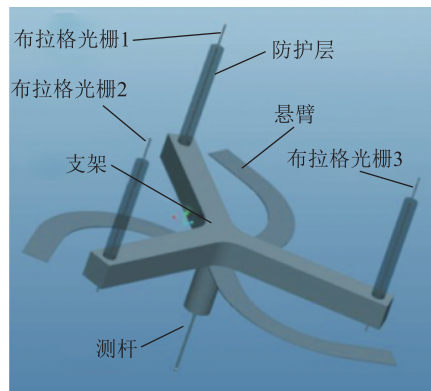


图 17 合肥工业大学的布拉格光栅探头

5) 瑞士机床与制造研究所 (Institute of Machine Tools and Manufacturing) 提出了一种基于斐索干涉仪 (Fizeau interferometer) 的探头，如图 18 所示^[28]。探针装在一个悬浮机构上面，悬浮机构的变化通过斐索干涉仪来感测。水平方向的理论分辨力为 100 nm，竖直方向的理论分辨力为 40 nm。

6) 日本松下公司的超高精度三维测量仪所用探头如图 19 所示^[29]，其中图 19(a) 为 UA3P-300 的原理，

3) 我国台南科技大学提出的接触触发式探头如图

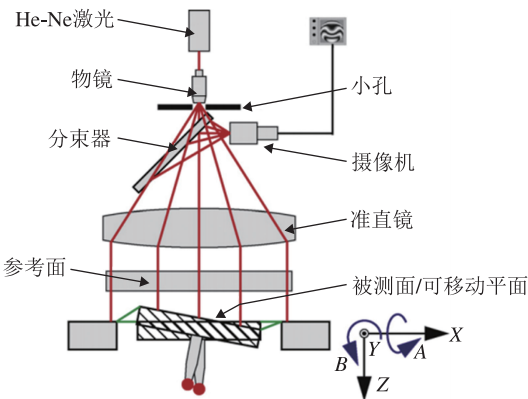
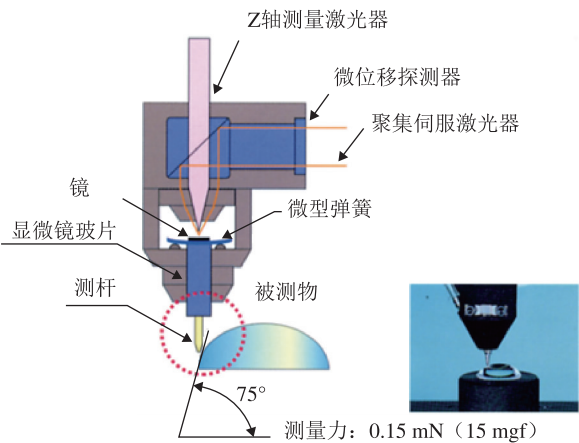
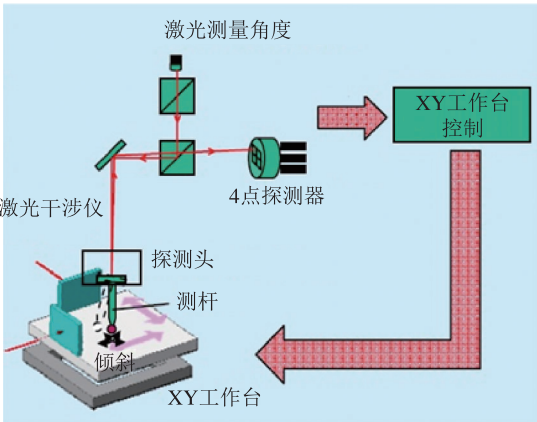


图 18 瑞士机床与制造研究所的接触式测头

采用自动聚焦的方式测量探头竖直方向的位移；图 19 (b) 为 UA3P-L 的原理，采用自准直仪原理来感测探头在水平方向的位移。这两台设备均采用直径为 0.5 mm 的宝石球，性能指标相同，测力约为 0.15 ~ 0.3 mN，测量重复性小于 50 nm。



(a) UA3P-300 原理



(b) UA3P-L 原理

图 19 日本松下公司超高精度三维测量仪探头原理

7) 德国伊尔梅瑙 (Ilmenau) 大学的 Balzer 等人将探针固定在悬浮机构上，悬浮片中央布置一块平面反射镜，并用单一激光束测量悬浮片纵向位移与横向的两个偏摆角，经分光处理后，纵向位移由参考镜与测量镜构成的干涉仪来测量，达到 1.6 nm 以下之分辨力；横向则是通过四象限传感器测量沿 X 轴和 Y 轴的旋转角度，横向分辨力为 2.7 nm。横向重复性达 3.4 nm ($k=2$)，如图 20 所示^[30]。

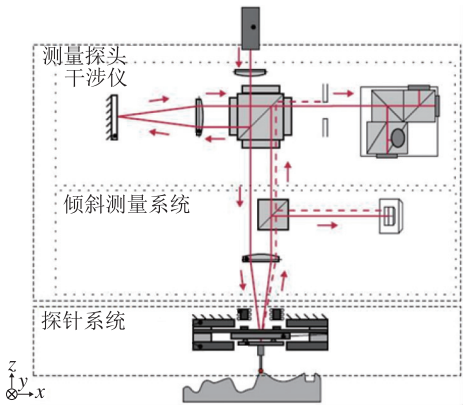
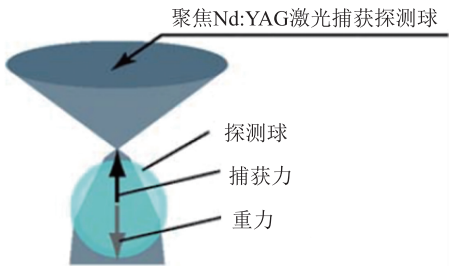
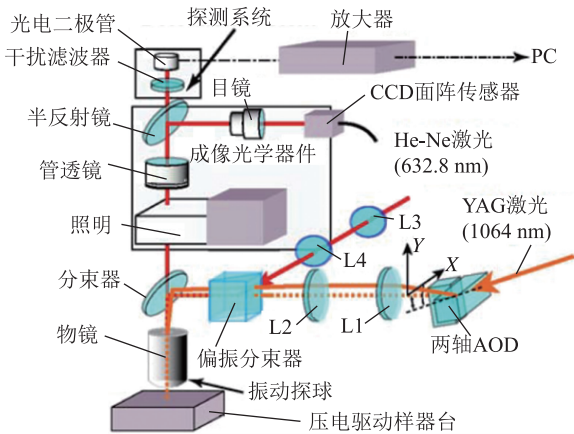


图 20 德国 Ilmenau 大学的光电式探头

8) 东京大学的 Yasuhiro Takaya 等开发了一种基于激光捕获技术和 Mirau 干涉仪的探头系统，如图 21 所示^[31 - 32]。



(a) 激光捕获



(b) Mirau 干涉仪的探头系统

图 21 基于激光捕获和 Mirau 干涉仪的探头系统

微小的电解质小球在自身重力和光辐射力的作用下处于平衡状态,位于激光聚焦透镜的焦点处。当受到外力时,小球原有的平衡被破坏并发生位置移动。此时光辐射力的大小和方向会跟着变化,使的小球处于新的平衡状态。当外力被撤去时,小球可以准确回到原位置。处于平衡状态下的激光捕获小球对外力作用非常敏感,利用这个原理可以测量探头和被测物体之间的微小力的作用。小球的位移再通过 Mirau 激光干涉仪测出。该探头最大的优点是测球受到的力无需通过弹性元件和悬浮机构进行传递,因此使得测量极其微小的力成为可能。

1.6 共振式探头

1) 日本 Mitutoyo 公司提出以震动扫描的方法研制测量探头,如图 22 所示^[33-34]。利用压电材料在测量探针上施加微小振动,当探针与待测物表面接触时,其振幅将缩小。通过感测振动用压电材料输出的信号可以知道测球是否和工件接触,这种感测方式已成功地商业化成 Mitutoyo UMAP Vision System。此系统探针的直径为 $30\text{ }\mu\text{m}$,杆长 2 mm ,故深宽比高达 66.6,分辨力为 $0.01\text{ }\mu\text{m}$,重复性小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。

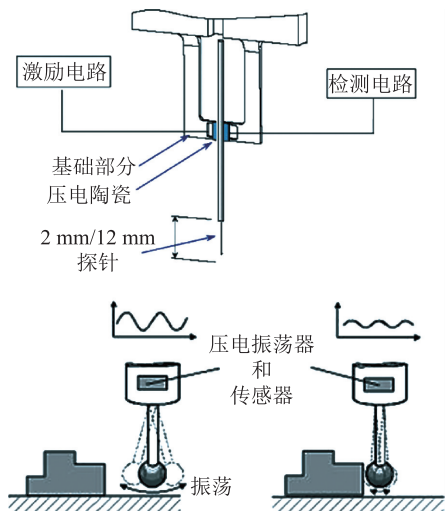
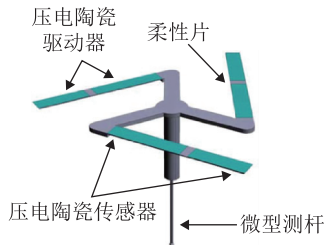


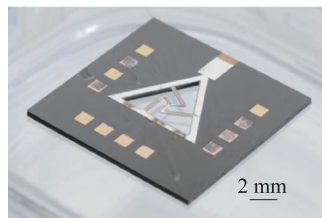
图 22 日本 Mitutoyo 研制的 UMAP 130

2) 英国 NPL 也提出了基于共振原理的探头,如图 23 所示^[35-36]。该探头采用三曲枝弹性机构,在每个曲枝上装有两个压电驱动器,用来产生振动;在每个曲枝上装有一个压电感测器,用来感测探针的振动幅度。未见有该探头的相关指标公布。

3) 合肥工业大学黄强先等提出了一种基于石英音叉的共振式探头,如图 24 所示^[37]。在石英音叉的端部装有一个球形探针,该音叉的共振参数对测球受到的作



(a) 示意图



(b) 实物图

图 23 英国 NPL 提出的共振式探头

用力非常敏感。测量分辨力可以达到亚纳米级别,同时测量力极小,三维方向的触发测量重复性约为 40 nm 。

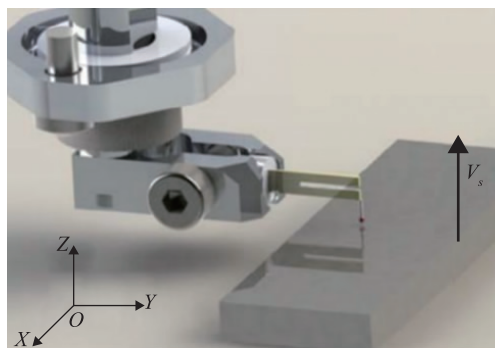


图 24 基于石英音叉的共振式探头

1.7 其他探头

1) 在美国国家标准和技术研究院 (NIST) 提出的分子测量机上以扫描隧道显微镜 (STM) 的探针作为触发探头,可获得亚纳米级分辨力,如图 25 所示^[38]。

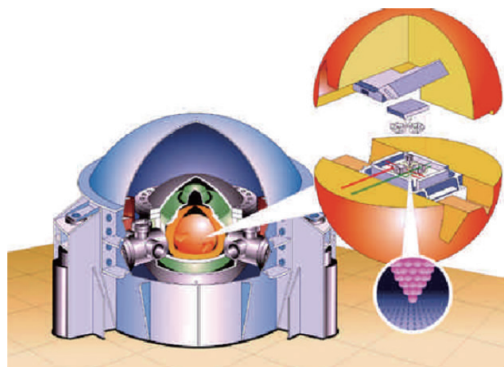


图 25 美国 NIST 分子测量机示意图

2) 德国 PTB 的戴高良等人了解决微小工件侧面检测的问题,提出了一种由原子力显微镜 (AFM) 探针、弹性悬臂和光学位置感测系统组成的探头,如图 26 所示^[39]。原子力显微镜探针起瞄准作用,当针尖遇到被测表面时,弹性悬臂会发生变形,其变形量由激光位

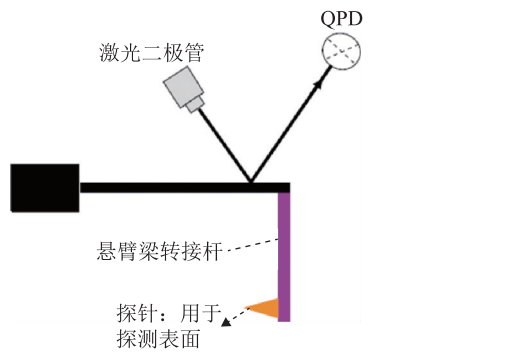


图 26 德国 PTB 基于 AFM 探针的探头原理图

置感测系统来感测。该探头继承了原子力显微镜灵敏度高、分辨力高、测力小等优点，同时克服了原子力显微镜存在的针尖与悬臂距离太近的缺点。与激光干涉仪对比测量的偏差小于 3 nm。

综上可知：①微纳测量探头一直是世界各国研究的热点；②起位移传递作用的弹性机构和测量传感器是探头研制的关键所在；③探头的发展方向是高精度、小测力、大量程等；④现有探头各具特点，但同时具备高精度、小测力、大量程等几个要素的探头极少。作者团队一直关注微纳测量探头的研究进展，并持续地开展相关研究，至今已有超过 15 年的时间。后文将分别就作者团队设计的各种弹性机构、研制的各种光学传感器以及开发的几种微纳测量探头进行详细介绍。

2 弹性机构设计

2.1 弹性机构设计需要考虑的几个问题

弹性机构的作用是把测球在三维方向上的位移转化成方便传感器测量的物理量。在设计弹性机构之前，我们需要考虑几个基本问题。第一，当探头工作在最大测量力的情况下，应保证测球和被测件均不发生塑性变形。换句话说，扫描探头工作在最大行程时的测力大小应该同时小于测球和被测件刚好发生塑性变形时的测力大小(称两者中较小的那个力为探头的最大允许测量力)。第二，测球与被测件的相对触碰速度应该有一个上限，否则会导致触碰力大于探头的最大允许测量力，进而损坏探头或者被测件。第三，探头的固有振动频率不应该太低，起码应该避开探头工作环境的常见低频振动干扰。第四，当探头工作在最大行程时，弹性机构中的弹性元件不会发生塑性变形。

2.1.1 探头最大允许触测力计算

测球与被测件的接触应力必须小于被测件或测球

的屈服应力，由赫兹弹性接触理论可知，测球与被测件之间容许的最大接触力 F_y 计算公式为^[22,40]

$$F_y \approx 21 \frac{r^2 \sigma_y^3}{E_r^2}$$
(1)

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$
(2)

式中： r 为测球半径； σ_y 为被测工件的屈服应力极限； E_r 为弹性模量； E_1 、 E_2 、 ν_1 、 ν_2 分别为测球与被测工件的杨氏模量和泊松系数。

从式(1)和式(2)可以看出，探头允许的最大触测力与测球的半径以及测球和被测件的材料有关。考虑到在实践过程中，存在不同材料的测球和被测件，而且测球的半径也有所不同，方便起见，在此列出测球和被测件常见材料及其参数(见表 1 和表 2)，并且计算出不同组合情况下的探头最大允许测力值(见表 3)。

表 1 常见测球的材料参数^[41]

材料	弹性模量 /GPa	泊松系数	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	应力屈服极限/MPa
光纤	68.9	0.183	2.06 ~ 2.18	800 ~ 1000
红宝石	375	0.22	3.98 ~ 4.1	2100
钨	345	0.28	19.35	800

表 2 常见被测件的材料参数

材料	弹性模量 /GPa	泊松系数	应力屈服极限 /MPa
合金铝 (6061)	73	0.31	255
合金铝 (7075)	71	0.11	455
45 号钢	209	0.31	353
合金钢	210	0.25	700 ~ 900, 取 800 计算

表 3 最大允许测力的计算结果

测球材料	测球直径 /mm	最大允许测力/mN			
		合金铝(6061)	合金铝(7075)	45 号钢	合金钢
光纤	0.3	5.5	34.8	7.1	82.7
	0.5	15.3	96.7	19.7	230.0
	1.0	61.1	387.0	78.9	919.0
红宝石	0.3	1.7	12.1	1.0	11.9
	0.5	4.8	33.6	2.8	33.1
	1.0	19.3	134.0	11.1	132.0
钨	0.3	1.8	12.0	1.0	12.3
	0.5	5.0	33.0	2.8	34.2
	1.0	20.0	133.0	11.1	136.7

2.1.2 探头允许的最大触碰速度

当测球与被测工件以相对速度 v_0 碰在一起的瞬间, 测球与被测工件之间的碰撞力 F_{imp} 的大小如式(3)所示^[9]。

$$F_{imp} = \sqrt{\frac{125}{36} m_q^3 v_0^6 E_r^2 r} \quad (3)$$

式中: r 为测球半径; m_q 为等效质量, 且 $m_q = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$; m_1 和 m_2 分别为测球和被测工件的质量, 当 $m_2 \gg m_1$ 时, $m_q \approx m_1$ 。从式(3)可以看出, 测球与被测工件之间的触碰力的大小不仅与测球和被测工件的材料、尺寸和质量有关, 而且与两者之间的相对速度有关, 且相对触碰速度越大, 触碰力也越大。为了不至于因为相对触碰速度太大而引起测球或者被测件的塑性变形, 当触碰力 F_{imp} 达到容许的最大触碰力 F_Y 时, 可以求得允许的最大相对触碰速度。

$$v_{max} = 41 \left(\frac{r^3 \sigma_Y^5}{m_q E_r^4} \right)^{1/2} \quad (4)$$

当 $m_q \approx m_1$ 时, $v_{max} \approx 41 \left(\frac{3\sigma_Y^5}{4\rho\pi E_r^4} \right)^{1/2}$, ρ 为测球的密度。

以表1中所列红宝石为测球, 以表2中所列6061合金铝为被测件, 画出不同等效质量情况下最大允许触测速度随测球半径的变化, 如图27所示。

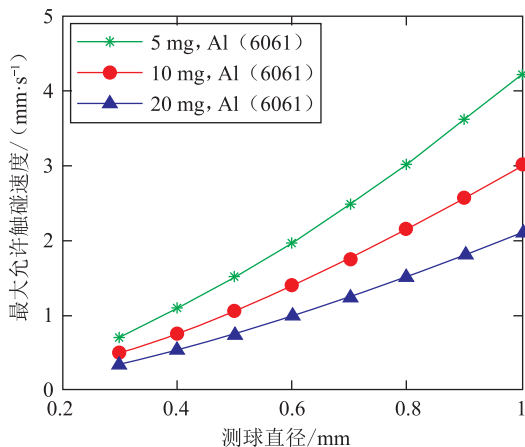


图27 最大允许触碰速度与测球半径和等效质量的关系

从图27可以明显看出, 在被测件已经确定的情况下, 增大测球直径和减小探头等效质量均可提高最大允许触碰速度, 但是这两个参数相互关联, 无法独立改变其中的一个。当等效质量接近测球质量的情况下, 减小测球密度是提高最大允许触测速度的一个有效方法。

2.1.3 探头的固有振动频率

提高最大允许触碰速度, 有利于提高三坐标测量机整体的测量速度, 缩短测量时间。但是, 当测球与被测工件以一定的相对速度发生碰撞时, 测球获得一定的能量, 致使测球不会马上和被测工件紧贴在一起, 而是在被测工件表面发生连续的弹性碰撞, 直到碰撞初始获得的能量衰减掉为止, 发生连续弹性碰撞的过程中探头的示值会不稳定, 包含有动态误差。测球与被测件的相对触碰速度越大, 弹性碰撞持续的时间就越长, 探头的动态稳定性也就越差。

既然测球与被测件连续的弹性碰撞无法避免, 那我们只能设法减小他带来的影响。如果测球获得的能量能在测球和被测件相对静止前衰减掉, 那么对测量就没有影响。弹性机构的固有振动频率越高, 测球能量衰减的就越快。因此, 弹性机构的固有振动频率不能太低, 起码要达到上百赫兹, 至于这个固有振动频率至少应该达到多少赫兹, 需要根据测球的材料和尺寸、三坐标测量机的动态响应特性以及具体的测量和控制策略而定。另外, 探头固有频率高还有几个好处: 第一, 有助于削弱测球自由振荡的幅度; 第二, 有助于缩短测球与被测件的接触反映时间, 从而有利于实现快速测量; 第三, 有助于避免探头与周围环境中的一些低频振动发生共振, 可以提高探头的抗干扰能力。

2.2 弹性机构方案设计

弹性机构主要包括三个部分, 即弹性元件、悬浮机构和探针。如果采用光电传感器感测悬浮片的变化, 通常在悬浮片上设置平面反射镜。弹性元件是弹性机构的关键, 因其直接决定探头的性能。为了确保探头的高灵敏度, 作者团队最初采用簧线作为弹性元件, 分别设计了如图28(a)和(b)所示的三簧线和四簧线方案, 在这个两个方案中, 簧线都是分别拉紧的, 存在的问题是几根簧线的张紧力很难做到相同, 从而影响弹性机构的各向同性。为了克服这个问题, 作者提出了如图28(c)所示的一根线张紧方案。在固定环上面沿径向打6个直径与悬线直径相当的光孔(孔1~6),

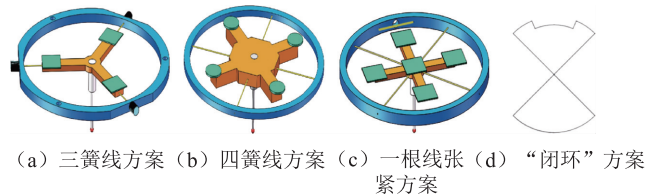


图28 基于簧线的弹性机构示意图

并经过抛光和倒角处理；在固定环上沿径向打一个 M 2 的螺纹孔，其中孔 1, 2, 3, 4 在圆周上对称分布，孔 5, 6 和 M 2 螺纹孔在孔 3 和孔 4 之间等间隔布置。在悬浮片的径向也打两个同样直径的孔，然后采用一根较长的簧线，按照图 28(d) 所示的那样以一定的顺序将悬浮片和固定环穿绕起来，并将悬线的两头扎在一起，这样就形成了一个“闭环”，然后通过旋转位于固定环上的 M2 螺钉去顶悬线的方式，将一根封闭的悬线张紧，每根线的张紧力自然是一样的。

簧线方案的优点是灵敏度高、探头的测力小，不足之处是长时间稳定性较差。为了解决这个问题，作者用弹性簧片代替了簧线，并设计了两簧片、三簧片和四簧片方案，如图 29 所示。不同的方案、不同的簧片参数，探头的刚度也不同。同时为了获得更好的对称性和稳定性，作者还设计了如图 30 所示的各种弹性元件方案。

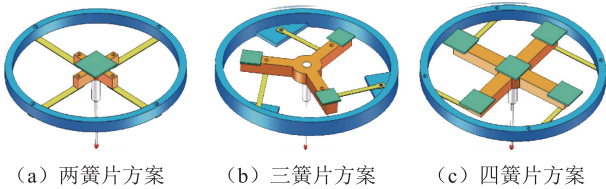


图 29 基于簧片的弹性机构示意图

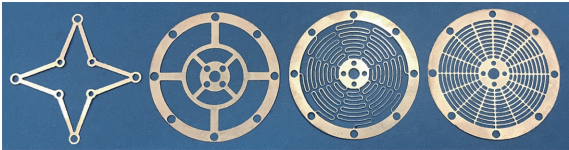


图 30 四种不同形状的弹性簧片

2.3 弹性机构的力学建模^[42]

探头的刚度决定了探头的测量力和固有频率。为了准确控制探头的测量力，通常需要建立探头的刚度模型。在此以常用的四簧片弹性机构为例(如图 31 所示)，介绍其力学分析和建模的详细过程。

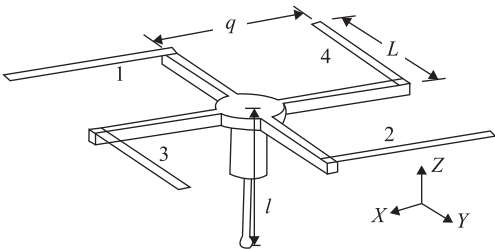


图 31 四簧片机构示意图

2.3.1 竖直方向的刚性模型

当测球受到竖直方向的测力时，四片簧片的变形相同，如图 32 所示。此时，每片簧片可以被看作一个悬臂梁，受力分析如图 33 所示，图中 P 为剪力， M 为弯矩，剪力 P 和弯矩 M 是悬浮片对簧线的反作用。

根据弹性力学的原理，在剪力和弯矩的作用下，簧片自由端的挠度和转角见表 4。

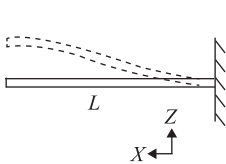


图 32 簧片在竖直方向作用力下的变形

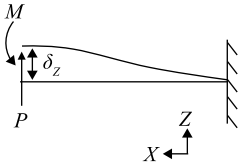


图 33 簧片的受力分析

表 4 在剪力和弯矩的作用下簧片自由端的挠度和转角

载荷	挠度	转角
P	$\delta_1 = \frac{PL^3}{3EI}$	$\theta_1 = \frac{PL^2}{2EI}$
M	$\delta_2 = \frac{ML^2}{2EI}$	$\theta_2 = \frac{ML}{EI}$
T	—	$\phi = \frac{TL}{GJ}$

根据边界条件，簧片与悬浮片相接的一端的转角为零，即 $\theta_1 = \theta_2$ 。所以，可求出弯矩 M 为

$$M = (PL)/2 \tag{5}$$

由于悬浮片可以被看作一个刚体，故簧片与悬浮片相接一端的位移(δ_z)与测球的位移大小相等。

$$\delta_{b,z} = \delta_1 - \delta_2 \tag{6}$$

分别将 δ_1 , δ_2 和 M 代入式(6)，即可算出在竖直方向力 F_z 的作用线测球的位移。考虑到是对称分布的四个簧片共同支撑悬浮片，所以有 $P = F_z/4$ ，进而可得簧片弹性机构竖直方向的刚度模型为

$$K_z = \frac{F_{b,z}}{\delta_{b,z}} = \frac{48EI}{L^3} \tag{7}$$

该分析方法同样适用于对称分布的 N 个簧片支撑的情况。支撑的簧片数量越多，探头在竖直方向的刚度越大。

2.3.2 水平方向的刚性模型

当测球受到沿 Y 方向的力的作用时，弹性机构的受力如图 34 所示。每一个簧片均和与之相接的悬臂垂直，均可被看作是一个弹性悬臂梁。在这种情况下，作用在悬臂上的弯矩的反作用对簧片来说是扭矩，作

用在悬臂上的扭矩的反作用对簧片来说是弯矩,在竖直方向上作用在悬臂和簧片上的力大小相等,方向相反。因为悬臂和簧片是紧固在一起的,所以在他们相接的地方,两者的位移和转角均相同。从图 34 可以看出,当测球受到沿 Y 方向的作用力时,悬臂 1 和 2 有竖直方向上的位移,悬臂 3 和 4 只有转角。此时,簧片 4 和簧片 1 的变形分别如图 35 所示。基于对称原理,簧片 1 与簧片 2 以及簧片 3 与簧片 4 的变形大小相同、方向相反。考虑到簧片的宽厚比大于 10,故簧片自由端在水平方向上的位移可以忽略。

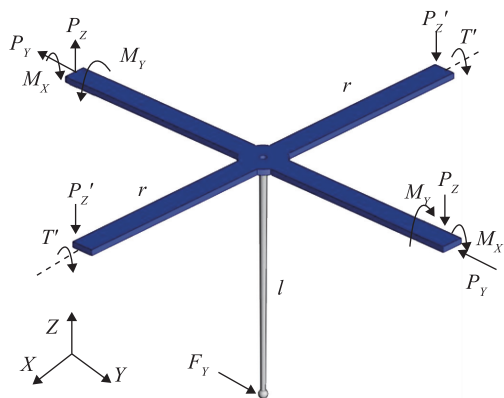
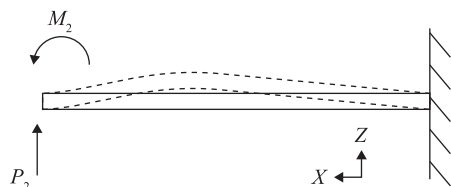
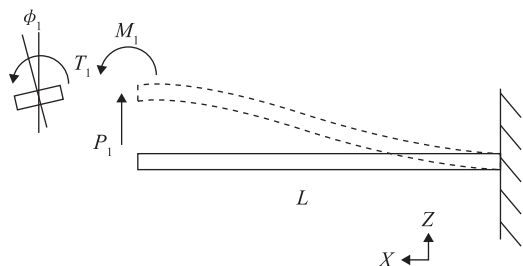


图 34 悬浮片的受力图



(a) 簧片 4 的变形图



(b) 簧片 1 的变形图

图 35 簧片 4 和簧片 1 的变形图

由于受到扭矩的作用,在簧片 1 的端部会产生一个扭转角

$$\phi_1 = \frac{T_1 L}{GJ}$$

矩形截面悬臂梁的极惯性矩公式为

$$J = \frac{wt^3}{16} \left[\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \left(1 - \frac{t^4}{12w^4} \right) \right]$$

式中: w 为悬簧片截面的宽度; t 为簧片横截面的厚度。当 w/t 大于 10 时, J 可以简化为

$$J = \frac{wt^3}{16} \left(\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \right)$$

考虑到簧片 1 被紧固在悬浮片的悬臂上,那么簧片 1 的扭转角就等于悬臂的转角,故

$$\phi_1 = \frac{T_1 L}{GJ} = \frac{\delta_{b,y}}{l}$$

所以,有

$$T_1 = \frac{\delta_{b,y} GJ}{Ll} \quad (8)$$

其中,

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

式中: ν 为簧片材料的泊松比。

从图 34 可以看出, F_Y 的作用与 $2rP_Z$, M_X 和 T' 三者的叠加作用效果平衡。作用在悬臂上的弯矩 M_X 与作用在簧片上的扭矩 T_1 大小相等,作用在悬臂上的扭矩 (M_Y) 与作用在簧片上的弯矩 M_1 大小相等。对于簧片 1 来说,其在与悬臂相接点处沿竖直方向的挠度和转角大小分别等于悬臂在该点沿竖直方向的挠度和转角的大小,分别表示为

$$\delta_z = \delta_1 - \delta_2 = \frac{P_1 L^3}{3EI} - \frac{M_1 L^2}{2EI} = \frac{r\delta_{b,y}}{l} \quad (10)$$

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{P_1 L^2}{2EI} - \frac{M_1 L}{EI} = 0 \quad (11)$$

从式 (11) 可得 $M_1 = \frac{P_1 L}{2}$ 。将 M_1 代入式 (10) 可得

$$P_1 = \frac{12EI\delta_{b,y}r}{Ll^3} \quad (12)$$

由于作用在簧片 4 末端的弯矩 M_2 是悬臂 4 所受扭矩 T' 的反作用,所以簧片 4 末端的转角大小等于悬浮片的转角。另外,该点沿竖直方向上的挠度为零。因此,此处必定有一个反作用力 P_2 。从表 4 可知,转角的大小为

$$\theta = \frac{M_2 L}{EI} - \frac{P_2 L^2}{2EI} = \frac{\delta_{b,y}}{l} \quad (13)$$

簧片 1 末端在竖直方向上的挠度可以表示为

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 = \frac{P_2 L^3}{3EI} - \frac{M_2 L^2}{2EI} = 0 \quad (14)$$

联立式 (13) 和式 (14), 可得 $T' (=M_2)$, 则

$$T' = \frac{4\delta_{b,y}EI}{Ll}$$

(15)

由于 $M_x = T$ 及 $P_z = P_1$ ，所以可以列出图 34 所示悬浮片的平衡方程为

$$\begin{aligned} F_Y l &= 2T + 2rP_z + 2T' \\ &= \frac{2\delta_{b,y}GJ}{lL} + \frac{24EI\delta_{b,y}r^2}{lL^3} + \frac{8\delta_{b,y}EI}{lL} \end{aligned}$$

(16)

将式(9)代入式(16)可得

$$\frac{F_Y}{\delta_{b,y}} = \frac{EJ}{l^2L(1+\nu)} + \frac{24EIr^2}{l^2L^3} + \frac{8EI}{lL^2}$$

(17)

代入 J 和 $I = wt^3/12$ 后，式(17)可以写成：

$$\frac{F_Y}{\delta_{b,y}} = \frac{Ewt^3}{16l^2L(1+\nu)} \left(\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \right) + \frac{2Er^2wt^3}{l^2L^3} + \frac{2Ewt^3}{3l^2L}$$

(18)

故在 Y 方向上的刚度为

$$K_Y = \frac{F_Y}{\delta_{b,y}} = \frac{Etw}{48l^2L} \left[\frac{3t^2}{1+\nu} \left(\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \right) + \frac{96r^2t^2}{L^2} + 32t^2 \right]$$

(19)

由于弹性机构的结构在水平方向上是对称的，所以其在水平方向各角度的刚度也是一样的。

2.4 参数优化及仿真验证

2.4.1 参数优化

先结合实际设定表 5 中所示的弹性机构参数，并将这些参数分别代入式(7)和式(19)即可算出，探头竖直方向的刚度为 0.473 N/m，20 mm 位移对应的测力为 9.5 mN，探头水平方向的刚度为 0.583 N/m，20 mm 位移对应的测力为 11.7 mN，水平方向的硬度要稍大于竖直方向。

表 5 探头的主要结构参数

项目	材料	弹性模量 E/Pa	参数
簧片	铍青铜	130×10^9	尺寸：0.1 mm × 2 mm × 13 mm
悬浮片	铝合金	7.1×10^9	厚度：2 mm；臂长：13 mm 臂宽：2 mm
探针	不锈钢针管	1.93×10^{11}	长度：10 mm，直径：0.5 mm

为了实现探头在各个方向的等刚性，可以调整探针的长度 l 。令式(7)等于式(19)可得

$$\frac{4Ewt^3}{L^3} = \frac{Etw}{48l^2L} \left[\frac{3t^2}{1+\nu} \left(\frac{16}{3} - 3.36 \frac{t}{w} \right) + \frac{96r^2t^2}{L^2} + 32t^2 \right] \quad (20)$$

将表 5 中除测杆长度 l 之外的参数全部代入式(20)可以解出 l 的值为 11.097 mm，此时 K_Y 等于 K_Z

(0.473 N/mm)。从而实现了探头弹性机构参数的优化。

2.4.2 仿真验证

为了验证理论分析结果的正确性，对表 5 所示参数的探头进行了 ANSYS 仿真。当测杆 l 长为 11 mm 时，沿水平方向施加 9.5 mN 力时测球的位移为 22.2 μm，如图 36(a) 所示；沿竖直方向施加 9.6 mN 力，测球的位移为 20.7 μm，如图 36(b) 所示。表 6 分别列出了测杆长为 10 mm 和 11 mm 时的理论计算和仿真的数据。从表 6 可以看出，仿真的结果与理论计算结果一致，偏差小于 1%。

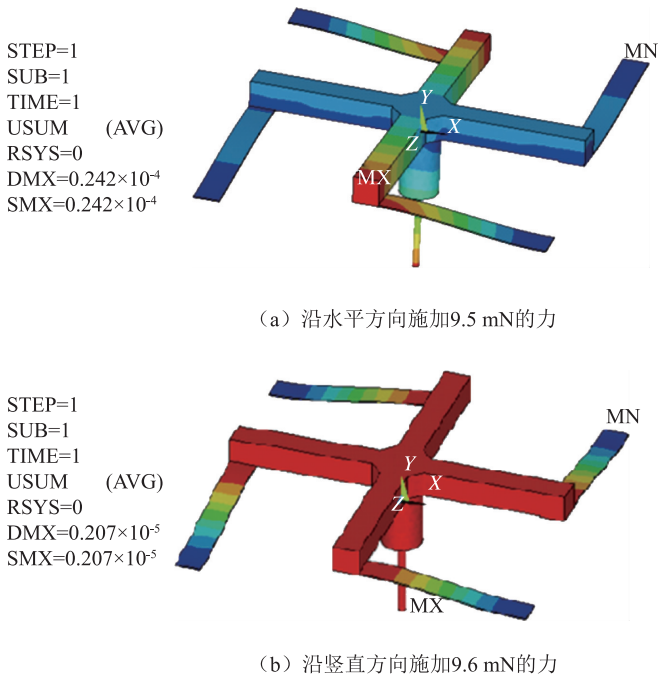


图 36 基于 Z 形簧片弹性机构的刚性仿真结果

表 6 理论分析和仿真结果(单位：N/mm)对比

测杆长/mm	理论分析 $K_h:K_v$	仿真 $K_h:K_v$
10	0.583:0.473	0.546:0.464
11	0.473:0.473	0.427:0.464

模态分析效果如图 37 所示。该弹性机构的模态分析结果见表 7。考虑到探头用于准静态测量，因此 75 Hz 的一阶固有频率是可以的。

3 传感器原理

3.1 共焦位移传感器

DVD 光学读取头是一个高度集成的产品，价格非

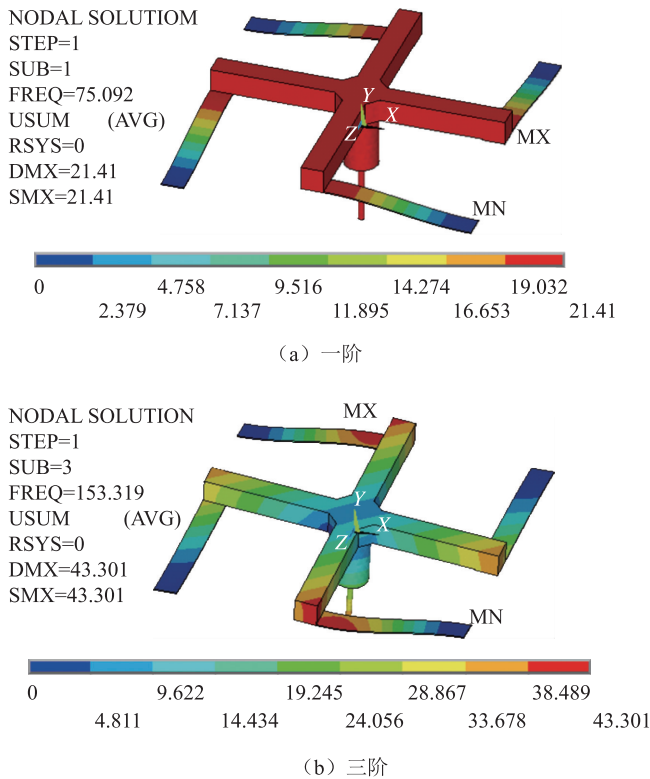


图 37 基于 Z 形簧片的弹性机构的模态分析效果

表 7 基于 Z 形簧片的弹性机构的模态分析结果

阶数	固有频率/Hz
1	75
2	153
3	153
4	2362
5	2372

常便宜,但是精度非常高,其原理如图 38 所示。发光二极管产生的光经光栅后被分成三束光,这三束光经过一个四分之一波片后打在偏振分光棱镜的分界面上, p 光透射, s 光被反射, s 光经过四分之一波片后通过准直透镜变成平行光,再经过一个全息物镜后聚焦在 DVD 盘面上。聚焦光束经 DVD 盘面反射后沿原路返回,再次经过四分之一波片后变成 p 光, p 光透过偏振分光棱镜,避免了从光盘反射回来的光束回到发光二极管,从而使光强更加稳定。透过偏振分光棱镜的光束经过一个象散透镜后打在四象限传感器 (four-quadrant photo detector) A, B, C, D 上。根据象散原理,光盘反射面在全息物镜焦点附近移动会导致打在四象限传感器上的光斑的形状发生变化,四象限传感

器会根据光斑在四个象限上的分布,计算并输出聚焦误差电压信号 FES (Focus Error Signal)。这个聚焦误差信号经过运算放大、补偿处理,驱动音圈电机 VCM (Voice Coil Motor) 并带动聚焦透镜一起沿光轴方向运动,直到聚焦点恰好与反射面重合,从而达到自动锁焦的目的。

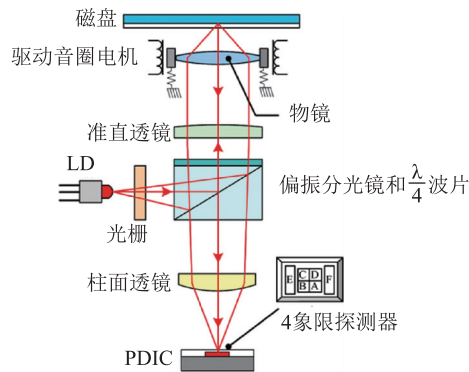


图 38 DVD 光学读取头的原理

若将音圈电机去掉,使聚焦透镜固定不动,则系统输出的聚焦误差信号与聚焦点偏离反射面的距离在一定范围内呈线性关系(如图 39 所示),由于聚焦误差信号具有高分辨力与高精度的特性,适合用来发展纳米级的位移感测系统。

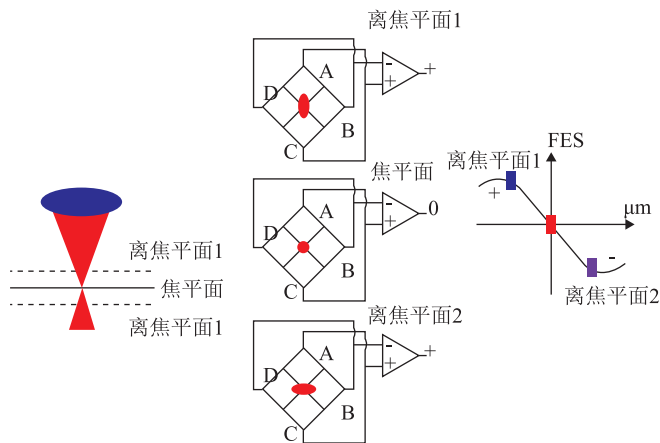


图 39 聚焦误差信号的 S 曲线

去掉 DVD 光学读取头上的音圈电机,用一个专门设计的镜筒将聚集透镜固定(保持光轴重合),为了减小整个系统的体积,用一个直角棱镜对光路进行了转折,改造后的共焦位移传感器结构如图 40 所示。

3.2 二维角度传感器

如果去掉 DVD 光学读取头中的聚焦透镜和音圈电

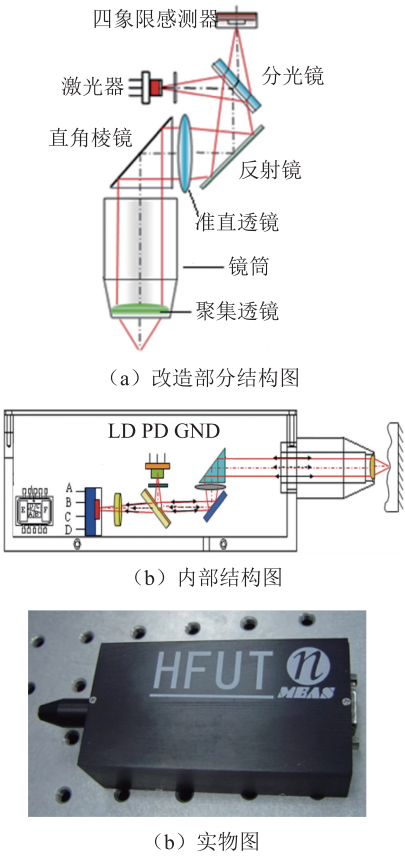


图 40 基于 DVD 光学读取头的共焦位移传感器

机，让 DVD 角度传感器出来的准直光束直接投射在一个平面反射镜上，经平面反射镜反射后的准直光束也会回到四象限传感器，四象限感测器上光点形状和位置的变化就反映了平面反射镜角度的变化，如图 41 所示。根据式(21)和(22)，通过相应的处理电路可以将四象限传感器上光点形状和位置的变化转化为不同的

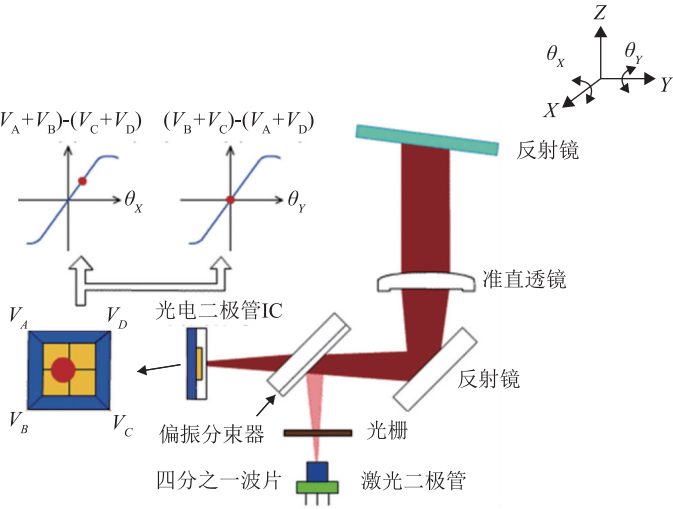


图 41 基于 DVD 光学读取头的二维角度传感器原理

电压信号输出，水平二维方向角度 θ_x 、 θ_y 分别与两路输出电压信号 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D 对应，并且在一定范围内呈线性关系，从而可实现对角度的测量。

$$\theta_x = K[(V_A + V_B) - (V_C + V_D)] \quad (21)$$

$$\theta_y = K[(V_B + V_C) - (V_A + V_D)] \quad (22)$$

式中： K 数值与簧片长度 L 有关。

由去掉聚焦透镜和音圈电机的 Hitachi HOP - 1000 型 DVD 光学读取头、直角棱镜和内径为 6 mm 的套筒三部分组成的二维角度传感器如图 42 所示。直角棱镜的作用是对光路进行转折，以减小探头的整体体积；增加套筒是为了方便调整，可以辅助判断反射光有无沿原光路返回。实验测得的 S 曲线如图 43 所示。

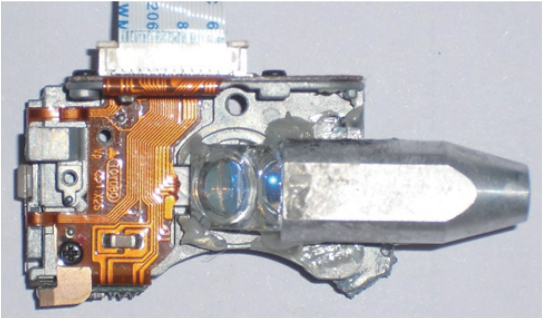


图 42 基于 DVD 读取头的二维角度传感器的实物图

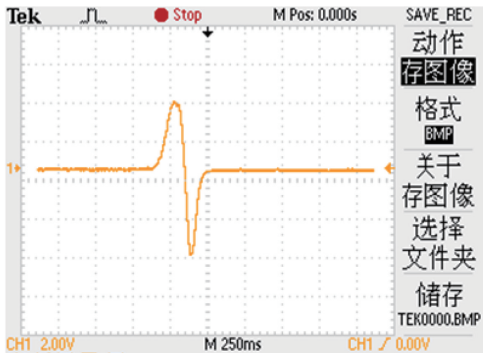


图 43 DVD 角度传感器的 S 曲线

为了克服 DVD 光学读取头外形尺寸及其内部光学元件参数的限制，开发了基于自准直仪原理的二维角度传感器，原理如图 44 所示。激光器(LD)发出的平行光束(NPBS)，经过分光棱镜，打在平面反射镜(测量镜 OM)上并被反射，反射回来的光束再次经过分光棱镜，部分光束会经过透镜(FL)，聚焦在四象限感测器上(QPD)。当测量镜有角度变化时，聚焦在四象限传感器上的光点的位置就会有相应的变化，从而能感测平面反射镜二维方向的偏角。

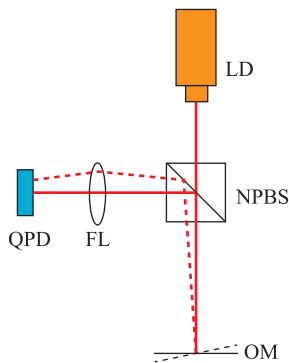


图 44 基于自准直仪原理的二维角度传感器原理图

3.3 迈克尔逊干涉仪

Michelson 干涉仪的光路原理如图 45(a) 所示。激光器发出的准直光束通过分光棱镜后分为两路，透射光到测量镜，反射光到静止的参考镜。从测量镜和参考镜反射回来的光再次经过棱镜后会合产生干涉。

通常根据 Michelson 原理设计的干涉仪使用相干长度很长的 He-Ne 激光，体积较大，不适合在探头内集成。为此，本研究采用半导体激光器为光源，制成了一种适合小位移测量的小型 Michelson 干涉仪，量程大约为 1 mm，并且还有防止反射光回授到激光器造成干扰的功能，原理如图 45(b) 所示。

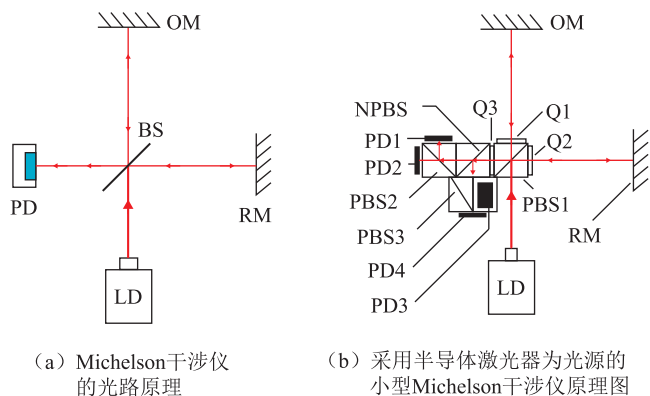


图 45 迈克尔逊干涉仪的光路原理图

从激光器发出的激光束被偏振分光棱镜 PBS1 分成透射的 P 光和反射的 S 光。S 光和 P 光分别被测量镜和参考镜反射，两次穿过 1/4 波片，原先的 S 光被转化为 P 光，P 光被转化为 S 光，则反射光线不会回授到激光器，而是会合后一起射入 Q3，从 Q3 射出的两路光分别为右旋和左旋偏振光，叠加后不会产生干涉条纹。NPBS 分别将右旋和左旋偏振光分成光强相等的两束光，并射入 PBS2 和 PBS3。PBS2 将来自于 NPBS 的右旋和左旋偏振光转换成两束相干涉的 P 光和两束

相干涉的 S 光。PBS3 与 NPBS 呈 45° 夹角布置 (PBS3 的快轴为 45° 方向)，也会将来自于 NPBS 的右旋和左旋偏振光转换成两束相干涉的 P 光和两束相干涉的 S 光。因此，从 PBS2 和 PBS3 出来的四对干涉光的相位分别为 0°、90°、180° 和 270°，四对干涉光分别由四个光电探测器 (PD1, PD2, PD3 和 PD4) 来探测。通过琼斯矩阵推导，可得出四个光电探测器上的信号分别为

$$I_{PD1} = A[1 + \cos(2\Delta\omega \cdot t)] \quad (23)$$

$$I_{PD2} = A[1 - \cos(2\Delta\omega \cdot t)] \quad (24)$$

$$I_{PD3} = A[1 - \sin(2\Delta\omega \cdot t)] \quad (25)$$

$$I_{PD4} = A[1 + \sin(2\Delta\omega \cdot t)] \quad (26)$$

由于在测量过程中，测量光和参考光之间的光程差几乎不可能恰好等于半波长的整数倍，所以存在初相位 $\Delta\omega$ ，其大小为

$$\Delta\omega = \pi \cdot \frac{2n\Delta l}{\lambda} \quad (27)$$

式中： Δl 为参考光和测量光之间的光程差； λ 为激光波长； n 为介质的折射率。

对四路信号进行运算 [即 $(I_{PD1} - I_{PD2})$ 和 $(I_{PD4} - I_{PD3})$]，可得到两路相位差为 90° 的正交信号，分别记为 $\cos \varphi$ 和 $\sin \varphi$ ，由两路正交信号合成的李萨裕圆如图 46 所示。

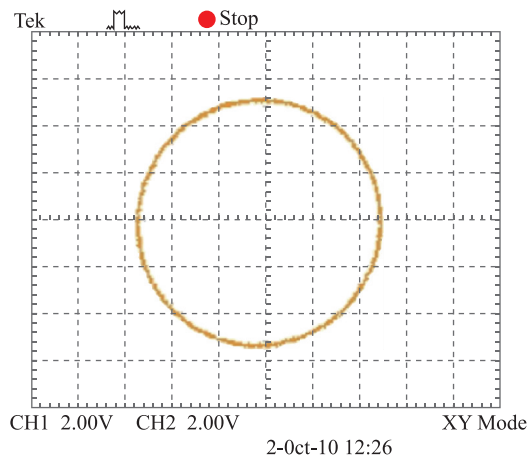


图 46 两路相位差为 90° 的正交信号

利用脉冲计数技术可以将半波长整数倍部分的光程差算出，即 $(k-1)\lambda/2$ ，其中， k 为脉冲数；利用辨向和相位细分技术，可以解算出测量开始和结束时的相位角 $\arctan \varphi$ ，进而可以算出非半波长整数倍的光程差，即 $\Delta l = \frac{\lambda \cdot \arctan \varphi}{4k\pi}$ 。

4 探头设计及验证

微纳三坐标测量机探头通常由三个部分组成,即传感器、弹性机构和测球测杆。当测球与被测件接触后,作用在测球上的力经过测杆传递给弹性机构,弹性机构同时会发生弹性变形,从而将测球在三维空间上的位移分别转化成弹性机构的位移或者角度变化,弹性机构的位移或角度变化则由传感器测出。在十多年的研究过程中,作者团队研制了多个微纳测量探头,下文将根据感测原理不同进行分类介绍。

4.1 基于四个 DVD 光学读取头的探头^[43]

图 47 所示为基于四个 DVD 光学读取头的接触扫描式探头结构。四个由 DVD 光学读取头改装成的共焦位移传感器间隔 90° 竖直安装在探头的固定壳体内,探头前端的弹性机构由四根金属簧线和一个悬浮片组成,如图 48 所示。悬浮片上均匀分布的延伸悬臂用于固定共焦位移传感器所需的反射镜,悬浮片中心固定扫描探针。非接触状态下共焦位移传感器输出的聚焦误差信号(FES)为零。当探针前端的测球受到水平方向的测力时,探针带动悬浮片绕固定簧线转动;当测球受到竖直方向的测力时,探针带动悬浮片一起产生 Z 向的运动。悬浮片位置的变化导致反射镜偏离共焦位移传感器的焦平面,共焦位移传感器中四象限光电传感器的输出从而发生改变,同样根据 FES - 位移曲线,可以计算出探针的位移变化量。

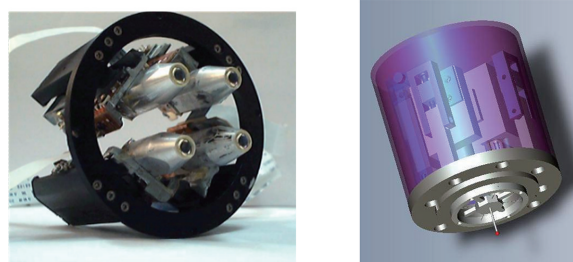


图 47 基于四个 DVD 光学读取头的探头结构与外观示意图

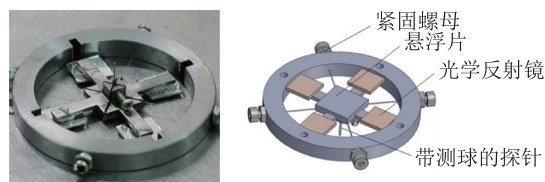


图 48 探头前端弹性机构照片

四个 DVD 接触扫描式探头实现了高精度和微小测力的实验效果。该探头触发重复性可达 10 nm, 预行程

变化量在水平方向上小于 15 nm, 水平方向测量力平均值为 109 mN, 竖直方向测量力平均值仅为 59 mN。但是采用簧线方式固定弹性机构, 簧线的张力大小无法精确控制, 张力大小随时间的延续而变化, 探头的测量重复性会变差。同时, DVD 激光读取头作为集成在播放光驱中的感测元件, 其纵向尺寸小, 横向尺寸大, 集成使用四个 DVD 读取头使得探头的横向尺寸偏大。

4.2 基于两个 DVD 光学读取头的探头

探头系统的重量和体积决定了三坐标测量机的动态特性和静态载荷。对于高精度的测量系统来说, 小巧的探头结构有利于探针与被测工件表面的接触, 特别是一些具有复杂结构的工件。为了减小四个 DVD 探头横向尺寸偏大的不足, 设计了基于两个 DVD 光学读取头的探头^[44], 其感测如图 49 所示。基于 DVD 光学读取头的二维角度传感器用于感测安装于悬浮片上的反射镜在水平方向的角度变化, 另一基于 DVD 光学读取头的共焦位移传感器用于感测悬浮片中心反射镜在竖直方向的位移变化。探头前端的悬浮结构如图 50 所示。

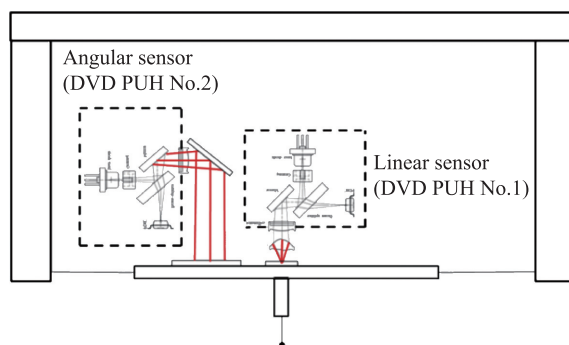


图 49 基于两个 DVD 光学读取头的探头结构示意图

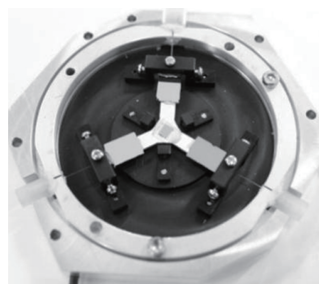


图 50 探头前端悬浮结构示意图

实际测量中, 当测量范围在 $0.5 \mu\text{m}$ 内时, 该探头的三轴测量重复性在 10 nm 以内。基于双 DVD 光学读取头结构的探头体积上占有较大优势, 尽管 DVD 读取头在纵向有着极高的分辨力, 但是基于 DVD 光学读取头的共焦位移传感器的量程只有不到 $5 \mu\text{m}$, 因此限制

了探头的测量范围。

4.3 基于 DVD 光学读取头和迈克尔逊干涉仪的探头

为了增加探头的量程,以迈克尔逊干涉仪替换图 49 中的共焦位移传感器,水平方向依然利用基于 DVD 光学读取头的二维角度传感器^[45-46],但是为了扩大角度测量范围,用一个感光面积更大的四象限感测器(QPD)替换 DVD 光学读取头中原来集成的 QPD,弹性机构采用如图 29(c)所示的四簧片方案,探头结构示意图和照片如图 51 所示。当固定于悬浮片中心的探针受到碰触时,四片铍青铜簧片产生受力形变,导致悬浮片上固定的平面反射镜发生角度的偏转或者位移,布置在探头中的迈克尔逊干涉仪负责感测测球沿竖直方向的运动,基于 DVD 光学读取头的二维角度传感器负责感测测球沿水平方向的位移,由此实现对被测物体三维形貌的感测。

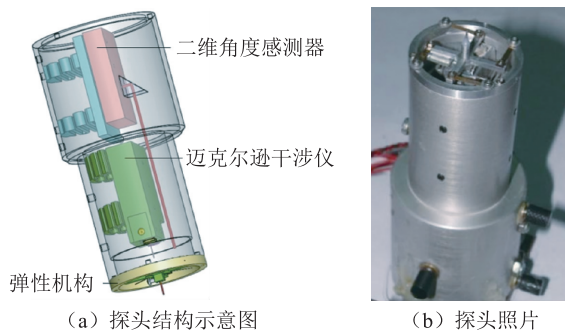


图 51 基于 DVD 光学读取头和迈克尔逊干涉仪的探头结构示意图

该接触扫描式探头的横向尺寸只有三十多毫米,该探头的水平方向的量程为 $\pm 10 \mu\text{m}$, 竖直方向的量程为 $20 \mu\text{m}$, 单方向测量重复性为 40 nm , 刚度约为小于 $0.5 \text{ N}/\mu\text{m}$ 。不足之处包括: 封闭的圆筒结构导致探头初始信号的调零比较困难(调整时看不到四象限光电感测器上的光点); 采用商用的 DVD 读取头, 固定起来不太方便; 探头的长时间稳定性还不够好。

4.4 基于共光路原理的探头

为克服图 51 所示探头存在的不足,在继续保留基于 DVD 光学读取头的二维角度传感器基本原理(自准直仪原理)的基础上,放弃了 DVD 光学读取头的具体形态,选用激光器、四象限传感器、准直透镜等光电器件,按照自准直仪原理组成了一套新的二维角度传感器。同时为了减少器件、节约空间、减少悬浮机构平面反射镜的数量,使得新组建的二维角度传感器与迈克尔逊干涉仪共用一个激光器,采用共光路的形式将迈克尔

逊干涉仪和自准直仪角度传感器融合在一起,共用一个激光器,共用一块测量镜,这样就组成一个共光路测量系统,可以同时感测测量镜的位移和二维偏转角度^[47],具体原理如图 52 所示。在迈克尔逊干涉仪测量光路中间加一个非偏振分光棱镜,将测量镜反射回的光部分转折到自准直仪中,这样测量镜的位移可以由迈克尔逊干涉仪感测,测量镜的二维角度由自准直仪角度传感器感测,由此构成了三自由度光学传感器。弹性机构采用图 30 中的 V 自行簧片,只需要在悬浮片的中心位置布置一片平面反射镜即可,其实物照片如图 53 所示。

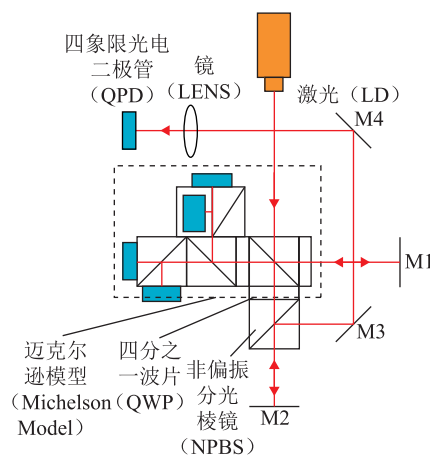


图 52 光路测量原理示意图



图 53 基于共光路原理探头实物图

共光路结构探头的测量力小于 $1 \text{ N}/\text{mm}$, 水平方向的测量量程为 $\pm 10 \mu\text{m}$, 竖直方向 $20 \mu\text{m}$, 探头刚度小于 $1 \text{ N}/\text{mm}$ 。三轴测量重复性为 30 nm 。在温度变化小于 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 的情况下,探头在 3 h 内的最大漂移量为: 水平方向 80 nm , 竖直方向 125 nm 。

4.5 基于并联光路原理的探头

对于共光路结构探头来说,当测球因受力而沿竖直方向移动时,贴在悬浮机构上的平面反射镜以平动为主,测量不存在问题,探头三个方向的输出数据均正常;而当测球因受力而沿水平方向移动时,贴在悬浮机构上的平面反射镜以转动为主,此时二维角度传感器可以将反射镜的偏转角度感测出来没有问题,但是反射镜的偏转会造成迈克尔逊干涉仪测量光束与参考光束相互分离,分离程度与反射镜的转角和反射镜到光电池之间的光程成正比,分离到一定程度时迈克尔逊干涉仪的输出就会发生计数错误,进而会导致不能正常测量。

为提高迈克尔逊干涉仪的抗反射偏摆能力,在迈克尔逊干涉仪测量镜前布置一个焦距为 f 的透镜,并使

测量镜位于聚焦透镜的焦点位置。当测量镜转过 θ 角后,转动前后的反射光束之间产生的偏移量 Δ_{shift} 确定,大小为 $2f \cdot \theta$,如图 54 图所示。从这个角度来说,聚焦透镜的焦距越小,迈克尔逊干涉光路的抗偏摆能力就越强;但是对于一定大小口径的透镜来说,焦距越短,竖直孔径就越大,景深就越小,在反射镜离开焦点同样距离的情况下,景深越小反射光束的光强越弱,干涉信号越差。因此,应该根据探头的结构尺寸和量程要求综合选用合适的聚焦透镜。

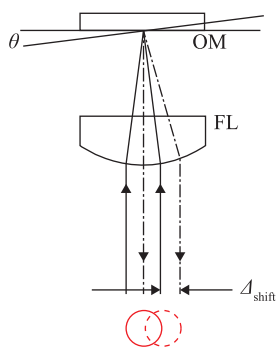


图 54 测量镜偏摆时反射光束的变化情况

通过增加聚焦透镜的方式,可以显著提高迈克尔逊干涉仪的抗偏摆性能,但是经聚焦透镜表面反射的光在四象限传感器上会产生寄生影响。如果要在在此基础上消除这种寄生影响又会使得系统变得非常复杂,调整更加困难。在权衡利弊之后,作者团队决定选择两个激光器的并联光路方案,即迈克尔逊干涉仪负责测量布置在悬浮片中央反射镜沿竖直方向上的位移,自准直仪角度传感器负责感测布置在悬浮片边缘平面反射镜的角度。在迈克尔逊干涉仪下方增加一个聚焦透镜,以克服探头 B 存在的量程问题;自准直仪角度传感器采用与迈克尔逊干涉仪独立的光路以避免寄生影响的问题,并联光路原理探头的结构示意图如图 55 所示^[48]。

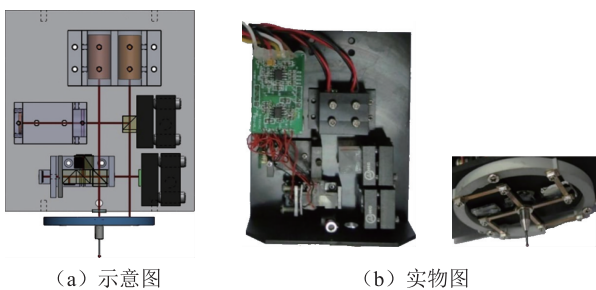


图 55 并联光路原理探头结构示意图

并联光路探头设计相比于共光路结构探头有了较大

进步,探头分辨力为 1 nm,刚度约为小于 0.5 N/mm,水平方向测量量程为 $\pm 20 \mu\text{m}$, 竖直方向 $20 \mu\text{m}$ 。测量重复性精度小于 30 nm, 恒温环境下 ($20^\circ\text{C} \pm 0.05^\circ\text{C}$), 探头 1 h 内的测量漂移小于 30 nm。

4.6 基于三个迈克尔逊干涉仪的扫描探头

采用三个迈克尔逊干涉仪作为测量传感器可以大幅度提高水平方向的测量分辨力,图 56 所示为基于三个迈克尔逊干涉仪的扫描探头结构示意图^[49]。在测量时,悬浮片上的三个反射镜的偏转,分别被所对应的迈克尔逊干涉感测,原理如图 57 所示。该探头在 XYZ 三个方向上的触发重复性分别为 5, 3 nm 以及 11 nm, 测量行程为 $20 \mu\text{m}$, 不足之处是探头的横向尺寸较大。

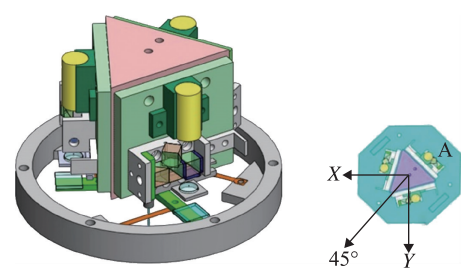


图 56 基于三个迈克尔逊干涉仪的扫描探头结构示意图

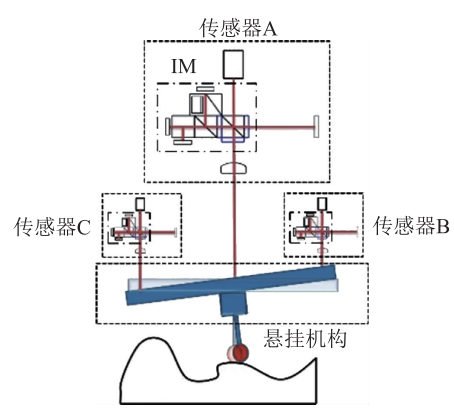


图 57 探头测量示意图

4.7 基于单个光学传感器的触发测量探头

迈克尔逊干涉仪虽然保证了探头竖直向测量的高重复性精度,但是多镜组的成本使得探头的造价较高,体积也大;干涉仪对测量环境要求较高,对温度、震动、湿度、空气折射率等外界条件敏感。考虑到实际应用的多数情况下,只需要探头有触发功能即可。于是在扫描探头研制的基础上,通过简化结构、降低成本研制出了基于单个光学传感器的触发测量探头,示意图如图 58 所示^[50]。

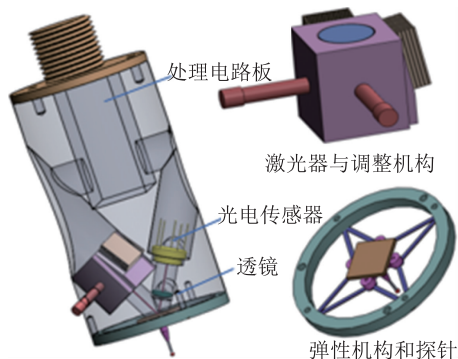


图 58 基于单个光学传感器探头的结构示意图

该探头由弹性机构、基于自准直原理的光学传感器以及探头筒体组成。光学传感器是由激光器及其调整装置、平面反射镜、聚焦透镜、QPD 四个部分组成并嵌入于探头中。激光器发射约为 0.5 mW 的激光光束，在探针没有受到触碰时，光束经过平面反射镜后，反射光束经聚焦透镜聚焦，最后投射到 QPD 的中心处，由 QPD 的原理可知对应输出的电压信号为零。当探针受到竖直或水平方向触碰产生位移 δ 时，V 型铍青铜簧片发生变形，则固定于簧片上的悬浮片会有位移和偏角，同时平面反射镜亦发生位移或偏角，投射到 QPD 上的光点则产生偏移，对应的输出电压信号即会发生变化。

该探头竖直方向感测原理如图 59 所示。当探针竖直方向产生位移 δ_v 时，簧片发生变形，则悬浮片在竖直方向位移为 δ_v ，即平面反射镜发生竖直位移 δ_v ，则激光光束通过平面反射镜后，反射光经聚焦透镜投射到 QPD 上，对应的输出电压信号反应此时探针发生的竖直位移。

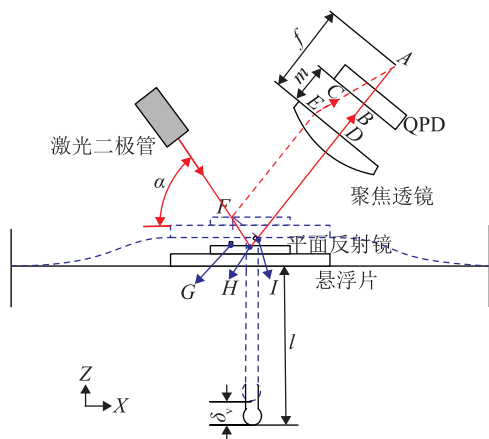


图 59 竖直方向触发情况的分析

水平方向感测原理同竖直方向相似，如图 60 所示。当测球在水平方向受到触碰而产生位移 δ_h 时，即探针偏转 θ 角。因探针和悬浮片被看作一个刚体，故悬浮片和平面反射镜同时偏转 θ 角，由反射原理可知反射光线偏转了 2θ 角。即当平面反射镜有角度变化时，聚焦在 QPD 上的光点的位置就会有相应的变化，从而能感测水平方向偏移的角度。对应输出的电压信号就反应了此时探针发生的角度偏移。

该探头允许触碰范围超过 12 μm ；灵敏度大于 0.5 V/mm；在恒温环境 ($20^\circ\text{C} \pm 0.025^\circ\text{C}$) 下，1.3 h 内的位移漂移量约为 20 nm；触发测量重复性小于 4 nm。

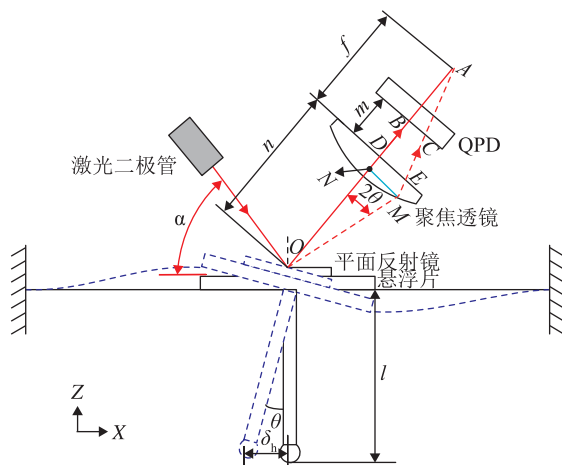


图 60 水平方向触发情况的分析

4.8 基于双层弹性机构的扫描探头

采用单个四象限光电传感器的设计在成本上占有很大的优势，不足之处是通过输出信号无法区分测球竖直方向上的位移和水平方向上的位移。为了能够分辨探针在不同自由度上的位置变化，在单传感器探头基础上改进设计了双层弹性机构的接触扫描式探头^[51]。探头下层簧片及对应的角度传感器负责感测测球水平方向的位移，并通过上下两层弹性机构之间的连杆，将下层簧片沿竖直方向上的位移传递到上层簧片上，使得上层悬浮片 Z 向产生联动，再利用刀口原理感测测球竖直方向上的位移，利用两个互不干扰的四象限光电传感器对水平方向与竖直方向的触发位移分别感测计数。

图 61 所示为双层探头的结构示意图。由激光器发射出的激光光束，经偏振分光棱镜 PBS 后，P 偏振光经过三次反射后最终投射到 QPD2 上，S 偏振光则直接投射到 QPD1 上。

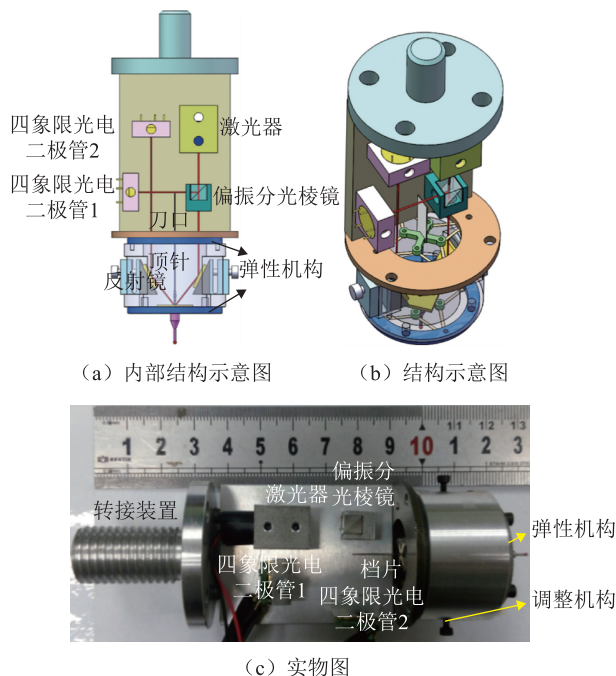


图 61 探头结构示意图及实物图

该探头的体积也比较小，具有扫描功能，进一步的性能测试还在进行中。

5 总结与讨论

介绍了国内外三坐标测量微纳测量探头的发展情况，介绍了作者团队研制的基于不同光学传感原理的三坐标微纳测量探头。从实验角度看，已经突破了一些技术瓶颈，但离成熟的商业化实际应用还有一些关键技术需要解决。微纳探头作为三坐标测量机的重点与难点一直备受国内外研究机构的广泛关注，针对目前的研究成果，在今后的微纳探头研制中，还应注意以下几点：

1) 小测球

市面上商用的测球尺寸较大，一般在数十微米至数百微米。为了满足更小沟槽的测量，制备直径更小的测球以满足微小尺寸器件的量测是不可缺少的一个研究方向。

2) 小测力

对于接触式探头，测球越小，由测力引起的测球和试样表面的变形或磨损越大；同时，测球越小，测杆要求越细，由测力引起的测杆变形越大。因此，要求接触式测头的测力要尽量小。但当测力小到与原子间作用力相当时，会出现测球与试样间的粘连现象。

3) 高速与高效

在保证探头测量精度的同时，量程越大，测量效

率越高。同时探头触发速度要尽可能的高，提高使用的效率。探头在使用过程中，要能够根据不同的测试环境与被测对象及时更换探针，方便快捷的安装，要能保证探头的输出信号能够被各类三坐标测量机识别。

4) 高精度与高稳定性

探头的分辨力要能达到纳米级别，重复性在 10 nm 以下。并且在保持高分辨力的情况下，针对不同测量场合，稳定性要好。工厂或企业不可能像实验室或研究机构那样有着稳定的测量环境，如何保证探头的测量稳定性，是迈向实际应用的一个关键步骤。

参考文献

- [1] Alshehri A, Kraft M, Gardonio P. Two-Mass MEMS Velocity Sensor: Internal Feedback Loop Design [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(3): 1003 - 1011.
- [2] 栾桂冬. 电容 MEMS 超声换能器研究进展[J]. 应用声学, 2012, 31(4): 241 - 248.
- [3] 于翻, 张强, 乔大勇, 等. 电液动力微泵微电极的不同制作工艺的比较[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1635 - 1639.
- [4] Leach R K, Murphy J. The design of co-ordinate measuring probe for characterising truly three-dimensional micro-structures [C]// 4th EUSPEN International Conference. Glasgow, 2004: 230 - 231.
- [5] Peggs G N, Lewis A J, Oldfield S, et al. Design for a Compact High-Accuracy CMM [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1999, 48(1): 417 - 420.
- [6] Haitjema H, Pril W O, Schellekens P H J. Development of a Silicon-based Nanoprobe System for 3-D Measurements [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 365 - 368.
- [7] Tan J B, Cui J N. Ultraprecision 3D probing system based on spherical capacitive plate[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2010, 159(1): 1 - 6.
- [8] Dai G, Büttefisch S, Pohlentz F, et al. A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(8): 084001 - 084009.
- [9] Pril W. Development of high precision mechanical probes for coordinate measuring machines [J]. Technische Universiteit Eindhoven, 2002, 25(2): 100 - 102.
- [10] Peiner E, Balke M, Doering L, et al. Tactile probes for dimensional metrology with microcomponents at nanometre resolution [J]. Measurement Science and Technology, 2008, 19(6): 064001.
- [11] Tibrewala A, Phataralaoha A, Büttgenbach S. Development, fabrication and characterization of a 3D tactile sensor [J].

- Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19 (12): 125005.
- [12] 李源. MEMS 压阻式三维微触觉测头及其在纳米测量机上的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [13] Meili F, Fracheboud M, Bottinelli S, etc. High precision, Low force 3D touch probe for measurements on small objects[R]. Achend; European International Topical Conference on Precision Engineering, Micro Technology, Measurement Techniques and Equipment, 2003.
- [14] AKüng, F Meli and R Thalmann. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18: 319 – 327.
- [15] Brand U, Kleine-Besten T, Schwenke H. Development of a special CMM for dimensional metrology on microsystem components[C]// Proceedings of the 2000 Annual Meeting of ASPE. Scottsdale, 2000: 361 – 364.
- [16] 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.
- [17] Uwe Brand. Metrology for Microsystems [M]. Braunschweig: Physikalisch – Technische Bundesanstalt, 1998.
- [18] Muralikrishnan B, Stone J A, Stoup J R. Fiber deflection probe for small hole metrology [J]. Precision Engineering, 2006, 30(2): 154 – 164.
- [19] Kim S W, Yang D Y. New Design of Precision CMM based upon Volumetric Phase-Measuring Interferometry [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2001, 50(1): 357 – 360.
- [20] Cui J, Li L, Tan J. Optical fiber probe based on spherical coupling of light energy for inner-dimension measurement of microstructures with high aspect ratios [J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4689 – 4691.
- [21] Ettemeyer A. New three-dimensional fiber probe for multisensor coordinate measurement[J]. Optical Engineering, 2012, 51 (8): 1502.
- [22] Vliet W P V, Schellekens P H J. Development of a fast mechanical probe for coordinate measuring machines [J]. Precision Engineering, 1998, 22(3): 141 – 152.
- [23] Enami K, Kuo C C, Nogami T, et al. Development of nano-Probe System Using Optical Sensing[C]//. IMEKO-XV World Congress, 1999: 189 – 192.
- [24] Takamasu K, Hiraki M, Enami K, et al. Development of Nano-CMM and Parallel-CMM; CMM in the 21th Century [R]. Tennessee: International Dimensional Metrology Workshop, 1999.
- [25] Takamasu K, Ozawa S, Asano T, et al. Basic Concepts of Nano-CMM [C]//The Japan-China Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering, 1996.
- [26] 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, 2007, 18 (7): 1831 – 1842.
- [27] Liu F, Chen L, Wang J, et al. Modeling and prototyping of a fiber Bragg grating-based dynamic micro-coordinate measuring machine probe [J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(2): 025016.
- [28] Liebrich T, Knapp W. New Concept of a 3D-Probing System for Micro-Components [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 513 – 516.
- [29] [EB/OL]. <http://panasonic.net/pfsc/>.
- [30] Balzer F G, Hausotte T, Dorzhovets N, et al. Tactile 3D microprobe system with exchangeable styli [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(9): 094018.
- [31] Takaya Y, Shimizu H, Takahashi S, et al. Fundamental study on the new probe technique for the nano-CMM based on the laser trapping and Mirau interferometer [J]. Measurement, 1999, 25(1): 9 – 18.
- [32] Michihata M, Takaya Y, Hayashi T. Nano position sensing based on laser trapping technique for flat surfaces [J]. Measurement Science & Technology, 2008, 19 (8): 084013.
- [33] Masuzawa T, Hamasaki Y, Fujino M. Vibroscanning Method for Nondestructive Measurement of Small Holes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1993, 42(1): 589 – 592.
- [34] Kim B, Masuzawa T, Bourouina T. The vibroscanning method for the measurement of micro-hole profiles [J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(8): 697 – 705.
- [35] Claverley J D, Leach R K. A vibrating micro-scale CMM probe for measuring high aspect ratio structures [J]. Microsystem Technologies, 2010, 16(8): 1507 – 1512.
- [36] Claverley J D, Georgi A, Leach R K. Modelling the interaction forces between an ideal measurement surface and the stylus tip of a novel vibrating micro-scale CMM probe [R]. Chamonix: International Precision Assembly Seminar (IPAS), 2010.
- [37] Huang Q, Chen C, Wu K, et al. A Three-Dimensional Resonant Triggering Probe for Micro-CMM [J]. Applied Sciences, 2017, 7(4): 403.
- [38] Kramar J A. Nanometre resolution metrology with the Molecular Measuring Machine [J]. Measurement Science & Technology, 2005, 16(11): 2121 – 2128.
- [39] Dai G, Wolff H, Weimann T, et al. Nanoscale surface measurements at sidewalls of nano-and micro-structures [J]. Measurement Science & Technology, 2007, 18(2): 334 – 341.

- [40] A Küng, F Meli, R Thalmann. Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touchprobe [J]. Meas. Sci. Technol. 2007, 18: 319–327.
- [41] Meli F, Thalmann R. Ultra precision micro-CMM using a low force 3D touch probe [J]. Measurement Science & Technology, 2005, 18(2): 58790S–58790S–8.
- [42] [EB/OL]. <http://www.matweb.com/glass fiber>
- [43] 李瑞君. 纳米三坐标测量机三维大量程接触扫描探头系统的研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [44] Fan K C, Cheng F, Wang W, et al. A scanning contact probe for a micro-coordinate measuring machine (CMM) [J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21(5): 054002.
- [45] 潘韦廷. 具影像观察功能之纳米级三次元接触式扫描探头研制[D]. 台北: 台湾大学, 2010.
- [46] Li R J, Fan K C, Tao S, et al. Design of an analogue contact probe for nano-coordinate measurement machines (CMM) [J]. Proc SPIE, 2011, 8321(8): 151–158.
- [47] Li R J, Fan K C. Design of a large-scanning-range contact probe for nano-coordinate measurement machines [J]. Optical Engineering, 2012, 51(8): 1503.
- [48] Li R J, Fan K C, Huang Q X, et al. A long-stroke 3D contact scanning probe for micro/nano coordinate measuring machine [J]. Precision Engineering, 2016, 43: 220–229.
- [49] Li R J, Fan K C, Miao J W, et al. An analogue contact probe using a compact 3D optical sensor for micro/nano coordinate measuring machines [J]. Measurement Science & Technology, 2014, 25(9): 094008.
- [50] 黄兆明. 三次元量测仪之微奈米级接触式扫描探头之研制[D]. 台北: 台湾大学, 2012.
- [51] Li R J, Xiang M, He Y X, et al. Development of a High-Precision Touch-Trigger Probe Using a Single Sensor [J]. Applied Sciences, 2016, 6(3): 86.
- [52] 向萌. 微纳米三坐标接触式探头优化设计[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51675157)

作者简介



范光照, 现为大连理工大学教授, 合肥工业大学特聘教授, 台湾大学名誉教授。英国曼彻斯特大学机械工程博士(PhD, 1984; DEng, 2014)。曾担任职务有: 台湾大学工业工程研究所所长、工学院副院长、孵化中心主任。外界兼职包括: 计量工程学会理事、自动化学会理事长、国际制造工程学会(SME)台湾分会理事长、机械工程学会理事; 2012–2013 年担任亚洲精密工程学会理事长; 国际制造工程师学会会士(SME Fellow)、国际纳米制造学会会士。

研究领域为: ①精密量测: 几何形状误差理论、逆向工程、光学显微测量、微纳测量技术; ②机床学: 热误差、阿贝误差等补偿技术, 精度衰减理论, 并联式机床精度校正; ③精密机械: 微纳三坐标测量机研

制、精密机械精度理论。

已发表期刊论文 160 多篇, 会议论文 250 多篇, Scopus h-index: 26(至 2018 年 06 月)。在台湾曾获得东元科技奖、国科会杰出研究奖、工程师学会杰出工程教授奖及工程论文奖、经济部大学产业贡献奖; 在大陆获得长江学者奖励及光华工程奖。



李瑞君, 副教授, 分别于 2001, 2005, 2013 年在合肥工业大学获得学士、硕士和博士学位。2015 年 3~4 月, 应邀到台湾大学进行学术访问。现任合肥工业大学副教授。现主持国家自然科学基金面上项目、国家重大研发计划子课题和企业委托项目。曾参与国家 863 计划重点项目 1 项、重大国际合作项目 1 项、国家自然科学基金面上项目 3 项。

主要研究方向为: 微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统、精密控制技术与系统。共发表学术论文 40 余篇, 其中 SCI/EI 检索近 30 篇; 共申请国内外发明专利近 30 项, 已授权 10 项。