

现代固体力学实验技术

透射电镜原位力学实验报告

学院： 航空航天大学

班级： 工程力学（强基）2101

姓名： 黄于翀

学号： 3210105423

2024年4月15日

实验报告正文

一、实验目的与任务

- 1、了解原位纳米力学实验平台的基本结构。
- 2、了解压电驱动的方式及规律。
- 3、根据微悬臂梁的变形，计算载荷。
- 4、X方向粘滑运动步长与电压关系。
- 5、压电陶瓷管 d_{31} 计算。
- 6、拓展：扩展阅读，加深了解精密运动实现方法及其在仪器中的应用。

二、原位纳米力学实验平台结构

实验仪器：XNano 原位透射电子显微镜四自由度纳米操纵系统

XNano 系统包括原位样品杆、控制箱、XNano 软件三部分，如图 1.1 所示。
各部分之间通过接线连接，实现纳米操纵功能。

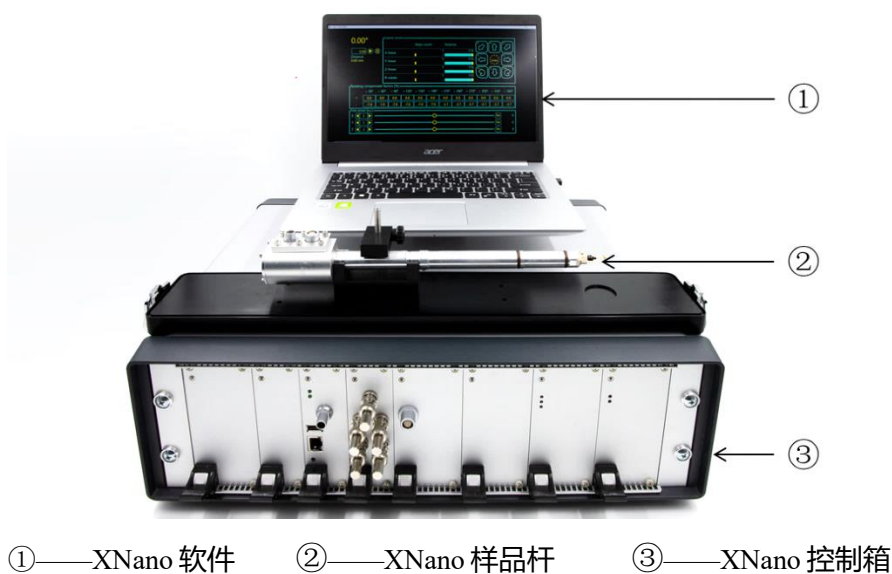


图 1.1 XNano 系统实物图

XNano 样品杆

样品杆左侧为接线基座，用来连接控制箱，为压电操纵模块供电。右侧为样品杆前端，用来装载样品和 AFM 芯片；



图 1.2 XNano 力学样品杆实物图

可动端由抓板和陶瓷小球组成。两个抓板通过三个螺丝和弹簧固定在陶瓷小球上，抓板可以绕陶瓷小球进行一定角度的旋转。样品基座为内径 1.5mm，深 4.5mm 的圆柱形套筒，可装载符合尺寸的样品，并用固定螺丝固定。

固定端为压缩测力框架，框架前端固定 AFM 探针基座，通过端头的两颗螺丝与盖板紧固，AFM 探针使用银胶固定在基座上，AFM 探针上有粘接有金刚石压头，基座的高度可以进行微调。

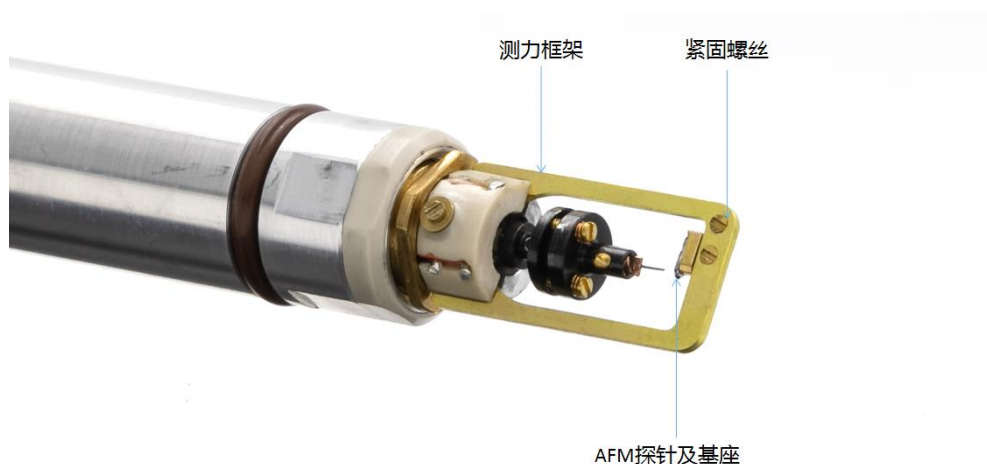


图 1.3 XNano 力学样品杆前端放大图

控制箱

XNano 控制箱，采用 19 寸 3U 机箱标准，由高压电源模块、低压电源模块和驱动模块组成，为 XNano 纳米操纵系统提供驱动。如图 1.4 所示。

网线通讯接口与计算机相连接，通过操纵软件控制机箱。

接口 A 和接口 B 与样品杆的样品基座相连接，为样品杆压电操纵模块提供电源和驱动信号。

通电接口与直流电源相连接，通过通电陶瓷基板为样品杆固定端样品供电。

控制箱电源打开后，高压模块指示灯和低压模块指示灯点亮，表示控制箱供电正常。



- | | |
|--------------|--------------|
| ①——网线通讯接口 | ②——接口 A |
| ③——通电接口 | ④——接口 B |
| ⑤——高压电源模块指示灯 | ⑥——低压电源模块指示灯 |
| ⑦——控制箱电源接口 | ⑧——控制箱电源开关 |

图 1.4 XNano 控制箱

注：XNano 纳米操纵系统工作时，控制箱会产生最高 120V 的电压，禁止未经培训的人员拆卸样品杆与控制箱，否则可能造成本产品的损坏，甚至造成人身伤害。

操纵软件



- ①——实时旋转角度 ②——实时前后位置
 ③——自动旋转操作区 ④——粗调操作区
 ⑤——位移补偿设置区 ⑥——精调操作区

图 1.5 XNano 软件界面

XNano 软件界面由信息显示区、自动旋转操作区、粗调操作区、精调操作区和位移补偿设置区。

信息显示区实时显示样品杆可动端前后位置信息和旋转角度信息。

自动旋转操作区可以使样品杆可动端自动旋转到目标角度。

粗调操作区可以使样品杆可动端在四个自由度上(X/Y/Z 轴和绕 X 轴旋转)进行较大步长的运动，步长通过步数和步幅确定，且连续可调。

精调操作区可以使样品杆可动端在三个自由度上(X/Y/Z 轴)进行极小步长的运动，步长连续可调。

位移补偿设置区采用分段补偿的方法，使样品杆可动端在自动旋转过程中，沿 X 轴方向前后偏移距离最小。

三、压电驱动

压电效应：某些电介质在沿一定方向上受到外力的作用而变形时，其内部会产生极化现象，同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷。当外力去掉后，它又会恢复到不带电的状态，这种现象称为正压电效应。当作用力的方向改变时，电荷的极性也随之改变。相反，当在电介质的极化方向上施加电场，这些电介质也会发生变形，电场去掉后，电介质的变形随之消失，这种现象称为逆压电效应。

压电驱动器原理

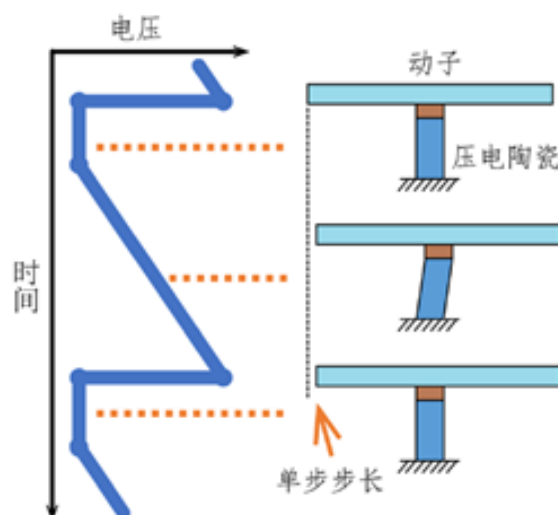
压电驱动器利用压电元件的逆压电效应，将电能转换为机械能的新型驱动装置。

压电驱动器特点

压电驱动器压电体对电信号响应快、分辨率高、推力大，无磁场干扰同时也不受外界磁场干扰，且体积小；若在马达应用中，压电驱动器主要是依靠摩擦驱动，又具有低速、大力矩和高分辨率；同时无信号输入时，依靠静摩擦力又可使马达输出轴保持自锁，又由于其具有单位体积输出能量大、结构紧凑、形式多样、可控性好，在精密机械和自动控制领域中展现了良好的应用前景。

粘滑驱动是以摩擦理论为基础的典型驱动方式。摩擦力是一种基本的耗散力，存在于所有相对滑动的机器和结构中，在以往对粘滑机理的研究仅仅是停留在如何避免其在精密伺服系统中由于摩擦存在而引起的失稳和损耗。由于压电材料的出现和良好的响应特性，才把粘滑原理应用到驱动工作当中。粘滑驱动的机理本质是利用最大静摩擦力和滑动摩擦力之间的差异控制被驱动物体产生位移。

基于压电陶瓷的粘滑驱动方式是利用 PZT 压电陶瓷快速形变产生的加速度，即惯性冲击，使得动摩擦力无法提供运动物体的加速度，从而保持在原来位置，接着控制 PZT 压电陶瓷以较小的速度返回，从而实现静摩擦力带动物体运动来实现微位移，因此也被称为惯性粘滑驱动。



该原理的工作过程可以分为三个阶段：初始阶段，在没有驱动电压信号的情况下，压电陶瓷和被驱动的滑块保持静止；第二阶段，随着一个缓慢上升的电信号的到来，压电陶瓷和滑块共同运动，即粘滞阶段，此时静摩擦力作为驱动力，二者“粘”在一起运动；第三阶段，电压信号急速下降，压电陶瓷由于其良好的响应特性，立即发生了快速的收缩，由于惯性力的存在，即摩擦力无法提供大的加速度动力，滑块不会及时随压电陶瓷同步运动，滑块与压电陶瓷产生相对滑动，保持原来位置，即滑动阶段。重复这个周期将使滑块连续向前运动，对于反向运动，使用反向驱动电压模式即可。

粘滑驱动实质上就是以摩擦力为驱动源，达到被驱动体的微小移动。利用粘滑效应的压电精密运动机构，依靠锯齿形电压激励下压电陶瓷运动造成的动静摩擦力之差异致动，可以工作在步进运动和静态扫描两种模式下，且快速运动模式下可以忽略压电陶瓷的非线性影响。粘滑驱动原理实现方便、控制简单，具有运动范围大、分辨率高、结构简单、易于微小和精确定位等优点。结合压电陶瓷特殊的性能，许多基于该原理的驱动器都得以应用。

四、实验步骤

样品和操纵系统信息

样品信息：氮化硅纳米柱、AFM 探针：Force Constant: 4000 N/m。

系统信息：XElectrics-3D-JEOLS-0012 样品杆、电脑(预装最新版软件)

控制箱 XNano-3D-CtrlA-0010、其它连接线等。

电镜外演示

介绍样品杆的基本结构和功能以及操作系统，X-Nano 软件用户界面介绍，以样品杆 XMechanics-3D-JEOLS-0012 进行样品制备及装载演示，

电镜内演示

实验内容 1：载荷计算；

原位压缩功能，以 XElectrics-3D-JEOLS-0012 样品杆为例，提前装好样品插入电镜。电镜光路调整完成，20K 下将 AFM 针尖调整至正焦，将氮化硅纳米柱向 AFM 针尖位置移动，保持一定距离，并逐步放大倍数，在 20K 下将移动端样品与针尖调至同一高度，通过精准的位移控制，对氮化硅纳米柱进行缓慢的压缩变形，变形到一定程度后，卸掉载荷。

观察记录

(1) 现场实验照片，包括：原位纳米力学实验平台境外和上镜操纵；

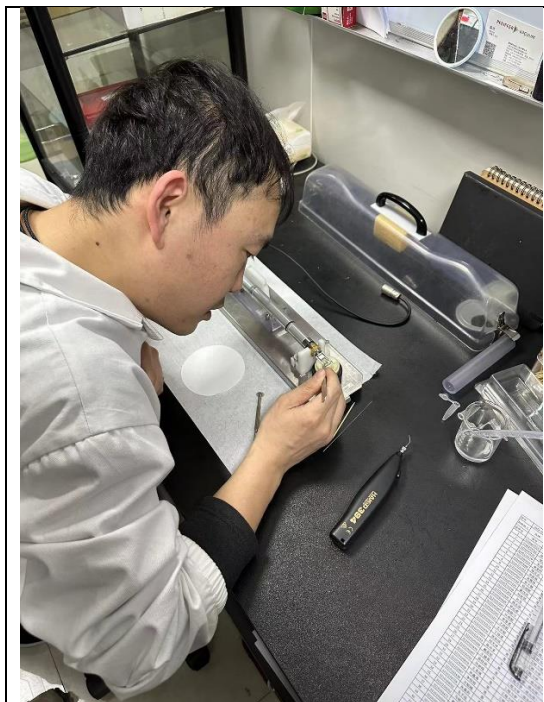


图 4.1 镜外操作



图 4.2 上镜操作

(2) 原位纳米力学实验平台设备照片，并标注各部分名称；



图 4.3 XNano 系统

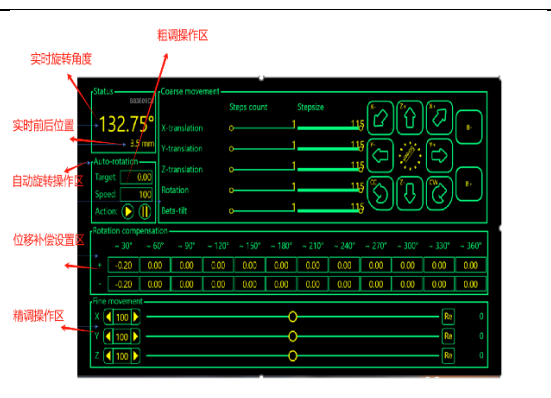


图 4.4 XNano 软件

实验内容 2：X 方向粘滑运动步长与电压关系

X 方向的粗调操纵：

分别设置不同 Steps count，step size 的组合，记录 X 的运动步长；并计算对应电压下的步长平均值；

Step size/V Step count	20		40		60		80		100		115	
	步长 / μm	平均值	步长 / μm	平均值	步长 / μm	平均值	步长 / μm	平均值	步长 / μm	平均值	步长 / μm	平均值
1	0	0	0.007	0.007	0.029	0.029	0.062	0.062	0.120	0.120	0.176	0.176
5	0	0	0.046	0.009	0.156	0.031	0.390	0.078	0.620	0.124	0.890	0.178
10	0	0	0.078	0.008	0.340	0.034	0.560	0.056	1.530	0.153	1.860	0.186
20	0	0	0.124	0.006	0.514	0.026	1.330	0.067	2.410	0.121	3.230	0.162
50	0	0	0.178	0.004	1.164	0.023	3.320	0.066	5.460	0.110	7.110	0.142
对应电压步 长 平均值	0		0.007		0.029		0.066		0.126		0.169	

实验内容 3：压电陶瓷管 d_{31} 计算

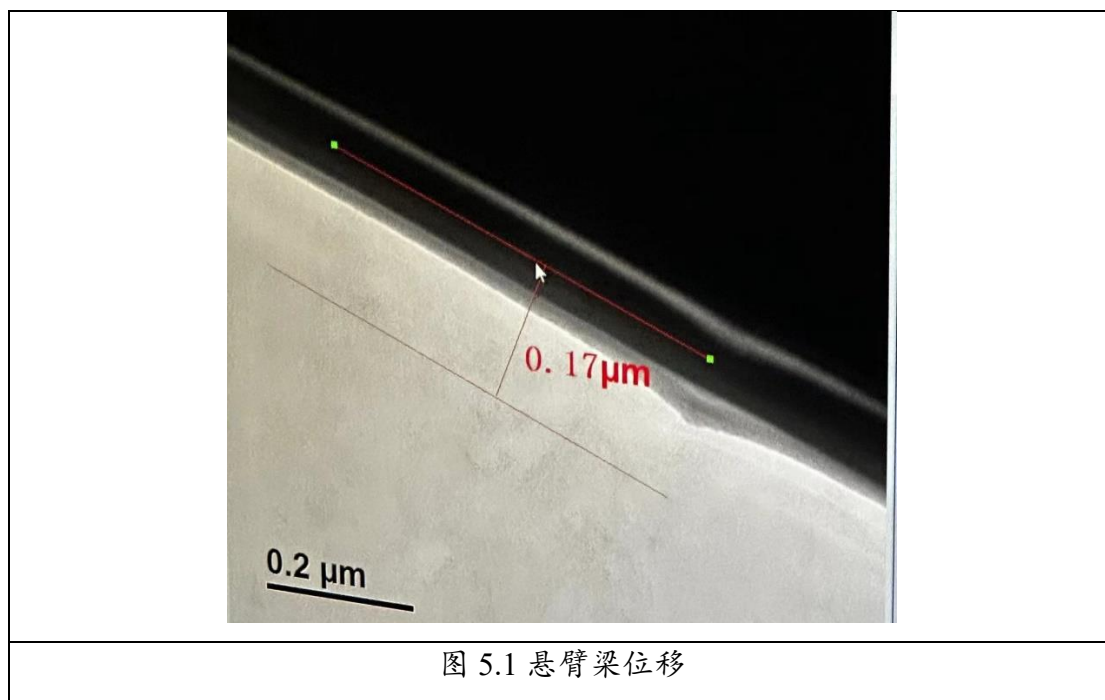
x,y,z 方向的精调操纵； x,y,z 方向的精调参数为-115V-115V，记录相应电压下的运动位移；

电压/V	-115	-50	50	115
电压对应参数	-25122	-10922	10922	25122
X 精调位移	0.46	0.12	-0.15	-0.37
Y 精调位移	3.50	1.93	-1.82	-3.53

五、实验结果与分析（80分）

1 根据金刚石原位压缩过程视频，测量悬臂梁的位移距离，根据 AFM 悬臂梁的力常数，计算载荷；

根据金刚石原位压缩过程视频，能够得到悬臂梁的位移截图，经过测量可知，其位移为 $0.17\mu\text{m}$ 。AFM 探针的力常数 $k = 37\text{N/m}$ 。故可以直接计算其载荷： $F = kx = 6.29\mu\text{N}$ 。



2 根据 X 粗调操纵视频中相对应 Steps count，Step size 的 X 运动步长，计算对应驱动电压下的平均步长，绘制驱动电压与运动步长之间的曲线图；

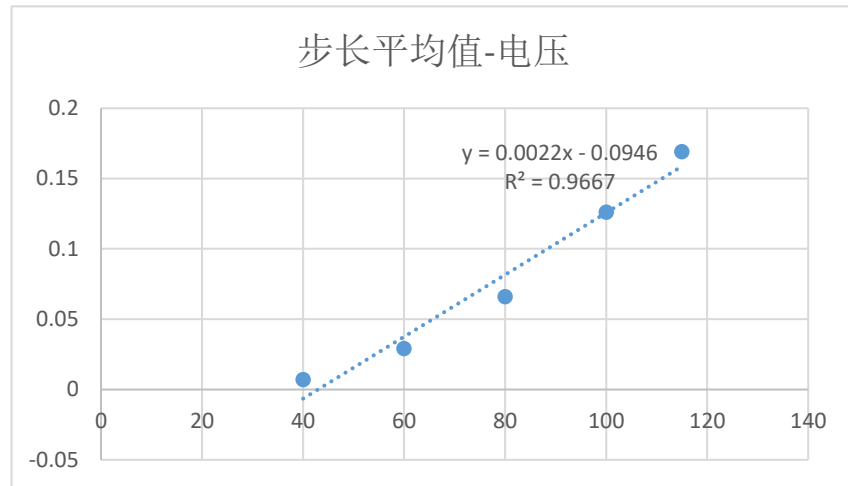


图 5.2 电压与运动步长拟合曲线

在实验过程中，当电压为 20V 时，悬臂梁没有位移，因此将这一组数据去掉，不使其影响最后线性拟合的结果。最后得到的拟合曲线方程为 $y = 0.0022x - 0.0946$ ，其中 $R^2 = 0.9667$ 。

3 根据 x,y 精调操纵视频中相对应 x,y 运动步长，计算 d_{31} ；

已知管长 $L = 7.5\text{mm}$ ，内径 $ID = 2.2\text{mm}$ ，壁厚 $t = 0.5\text{mm}$ 。

我们有 $\Delta L_{axial} = d_{31(GS)} \frac{L}{t} V$ ，根据实验三的四组数据，计算后取平均值。

最终可以得到 $d_{31(GS)} = -210.3\text{pm/V}$ 。

同样地由 $\Delta L_{lateral} = 0.9d_{31(GS)} \frac{L^2}{(ID+t)t} V$ ，经过计算与取平均值后可以得到

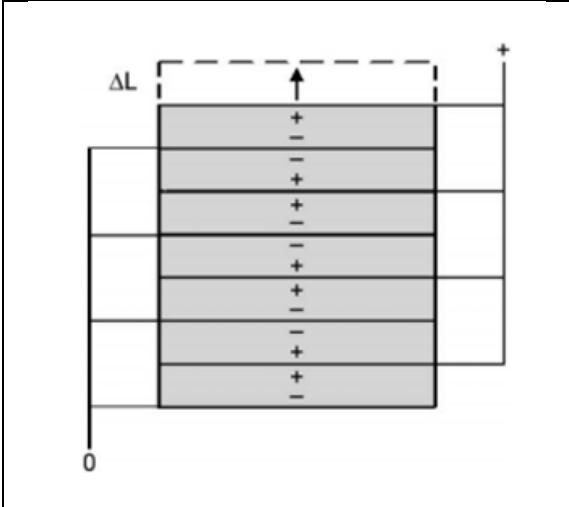
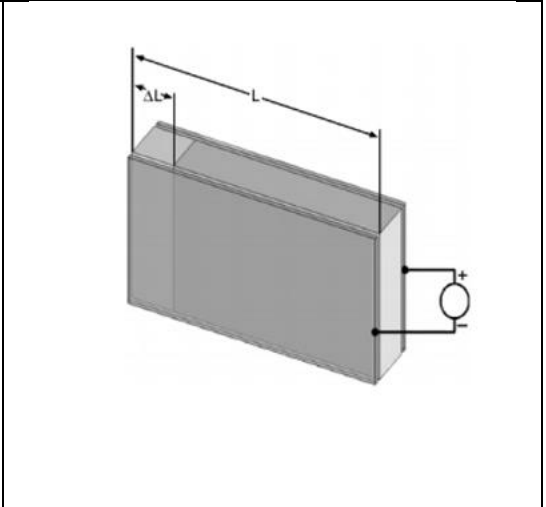
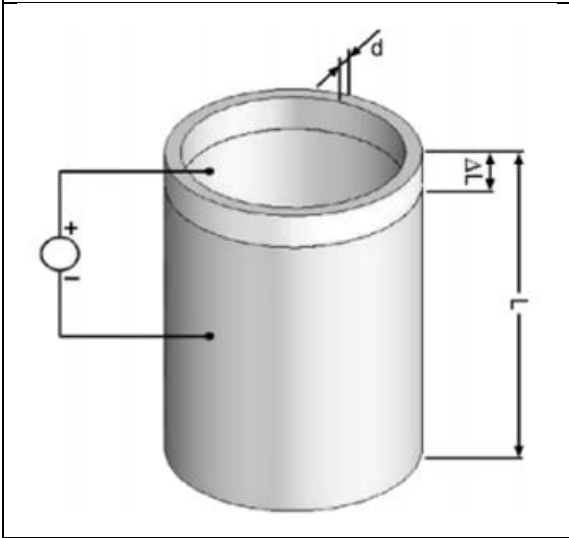
$$d_{31(GS)} = -896.8\text{pm/V}$$

六、 拓展问题（20 分）

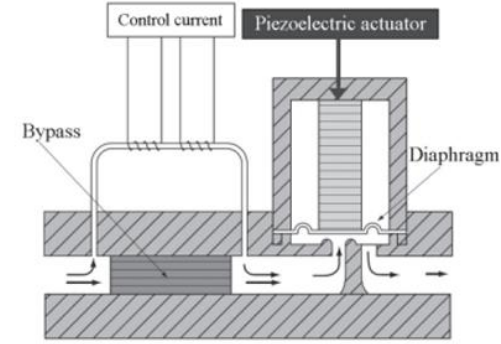
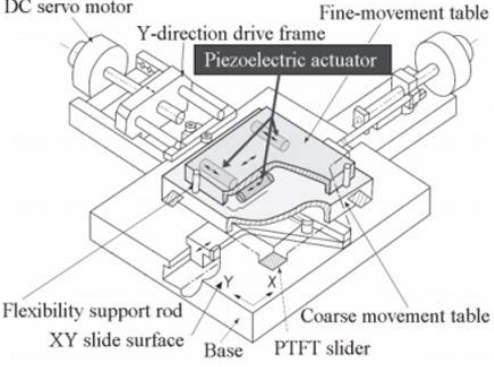
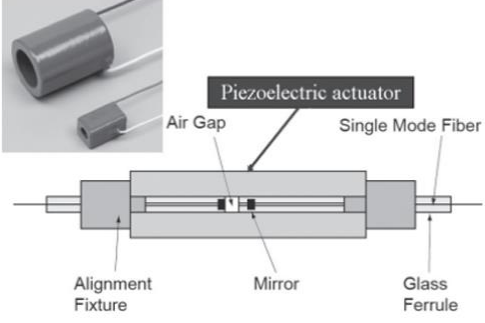
1、请查阅相关文献，扩展阅读，加深了解精密运动实现方法及其在仪器中的应用（20 分）

在微纳米级系统领域，压电驱动器(PA)由于其能够实现高精度位移、快高响应速度和在广泛应用中实现的通用性，已成为最受欢迎的精密驱动器。

压电驱动器有几种常见的配置类型：堆栈式设计、层状设计和管式设计。

	
图 6.1 压电驱动器堆栈式设计	图 6.2 压电驱动器层状设计
	
图 6.3 压电驱动器管式设计	

压电驱动器往往可以用于质量流量控制器以及应用与精细运动的控制，又因为其纳米级的位移精度，也可以用于光纤光轴的对准。

	
图 6.4 质量流量控制器	图 6.5 曝光系统精细运动控制
	
图 6.6 光纤光轴对准	

总的来说，压电驱动器的优良特性，使其广泛地应用于生产和生活中的许多地方，对现代生活提供了非常多的帮助。