

新型强力压电马达及其在恶劣条件下原子成像中的应用*

陆轻铀^{1,2,3,†}

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 中国科学院强磁场科学中心 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学 合肥微尺度物质科学国家实验室(筹) 合肥 230026)

(3 南京大学 人工微结构科学与技术协同创新中心 南京 210093)

New large-force piezoelectric motors and their applications in atomic resolution imaging under harsh conditions

LU Qing-You^{1,2,3,†}

(1 High Magnetic Field Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(3 Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2016-10-31收到

† email: qxl@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20170304

摘要 该文针对现有压电马达应用于扫描探针显微镜时, 难以在恶劣条件下获得高品质原子分辨率图像的问题, 介绍了文章作者近年研制的新型小尺寸大推力压电马达, 其中包括: 壁虎马达、熊猫马达、金枪鱼马达和蜘蛛马达以及它们的一些压电片叠堆型设计, 给出了它们的结构图、实物照片和工作原理。文章还讨论了如何利用它们制成高质量的扫描隧道显微镜(STM)和磁力显微镜(MFM), 并特别展示了用这种STM在无隔音、无减震条件下, 甚至在强振动干扰的恶劣条件下测得的高清晰原子分辨率图像。虽然这些高品质原子分辨率成像主要是由壁虎马达制成的STM给出的, 但金枪鱼马达具有更强的输出推力, 具有在更恶劣条件下的应用潜力。蜘蛛马达是一种惯性马达, 但能够比传统惯性马达输出更强的推力, 所以也具有在恶劣条件下应用的潜力。

关键词 压电马达, 壁虎马达, 熊猫马达, 金枪鱼马达, 蜘蛛马达, 扫描隧道显微镜, 磁力显微镜, 水冷磁体

Abstract It is difficult to obtain high quality atomic resolution images under harsh conditions when using current piezoelectric motors to build a scanning probe microscope. This article introduces several new types of compact piezoelectric motors with high output force that we developed recently, including GeckoDrive, PandaDrive, TunaDrive, SpiderDrive, and their variations, implemented using piezo plate stacks. Their structures, photographs, operation principles, and how they are adopted to build high quality scanning tunneling and magnetic force microscopes are presented. Of particular note are the high clarity, atomically resolved, scanning tunneling microscope (STM) images obtained without using any sound or vibration isolation, even in the extremely strong vibration environment inside a water-cooled magnet. Although these

* 国家自然科学基金(批准号: U1232210, 51627901, 11374278)资助项目; 稳态强磁场实验装置组合显微测试系统项目; 国家重点研发计划项目(批准号: 2016YFA0401003)

STM images were mainly taken using GeckoDrive, the TunaDrive can actually output bigger force, thus showing better promise in harsh condition applications. The SpiderDrive is a type of inertial piezoelectric motor, but it can output stronger force than traditional inertial motors so it also has good potential for imaging under harsh conditions.

Keywords piezoelectric motor, GeckoDrive, PandaDrive, TunaDrive, SpiderDrive, STM, MFM, water-cooled magnet

1 恶劣条件下原子分辨率成像遇到的问题

压电形变是指对一些如石英、锆钛酸铅(PZT)等压电材料薄片的正反面施加电压时所导致的其长度的变化(长度形变)或其正反面之间的平行滑移(剪切形变)。这些形变通常很微小,即使电压加到几百伏也只有微米量级,肉眼很难看得见。但如果所加电压小到毫伏、微伏时,形变就可能只有亚原子尺度($<0.1\text{ nm}$),压电材料的这一特性可用来制成原子分辨率的显微镜。以扫描隧道显微镜(STM)为例:先利用压电形变制成可三维(x, y, z)形变的压电扫描管(简称PTS,见图1)。PTS的工作原理为:当 E_x 电位相对于 E_z 电位增加 ΔV 时, E_x 对应的左侧1/4圆弧片收缩(也可能伸长,取决于PTS的径向预极化方向,本文统一设为收缩),这导致PTS向左倾斜。若同时 E_x 电位相对于 E_z 电位减小 ΔV ,则 E_x 对应的右侧1/4圆弧片伸长,从而PTS向左进一步倾斜。这称为向左推挽(push-pull)。 ΔV 由正变负时可实现向右推挽。周期性改变 ΔV 的大小与极性可实现PTS的左右(x 方向)扫描。同理也可实现前后(y 方向)扫描。若只改变 E_z 电位(或 E_z 电位不变但4个外电极电位同步变化),则PTS将在其长度方向(z 方向)扫描。接下来,STM再利用PTS控制一纳米尺度尖锐的探针(tip),在被测样品表面进行原子级范围的两维(xy)扫描,其中PTS的 z 形变可用于调节探针尖与样品表面间距 d 。STM所成的图像就是由 x 方向和 y 方向的扫描电压(V_{x-}, V_{x+})、(V_{y-}, V_{y+}) (对应于某一扫描到的位置 $\langle x, y \rangle$)和该位置处测量到的探针-样品间的隧道电流 I_{xy} 值(对应于位置 $\langle x,$

$y \rangle$ 处的像素颜色)构成(注:探针与样品间是施加有偏压 V_{TS} 的,且针尖是不碰到样品的,否则针尖就会损毁,不能成像,而这种“隔空”产生的电流称为隧道电流,是一种重要的量子现象)。由于扫描位置 $\langle x, y \rangle$ 的控制精度可达亚原子大小,且 I_{xy} 在探针处于样品表面原子的正上方和偏离正上方时是不同的,故STM具有原子分辨率。

此处有两点需要指出:(1) d 必须小到原子尺度才能产生不为零的 I_{xy} 。PTS的 z 调节是不能直接把针尖送到距离样品表面近至原子尺度的,因为 z 调节的范围小到微米大小,肉眼看不见,而针尖与样品间的初始距离通常是 $d_0 \sim 1\text{ mm}$ 才能方便

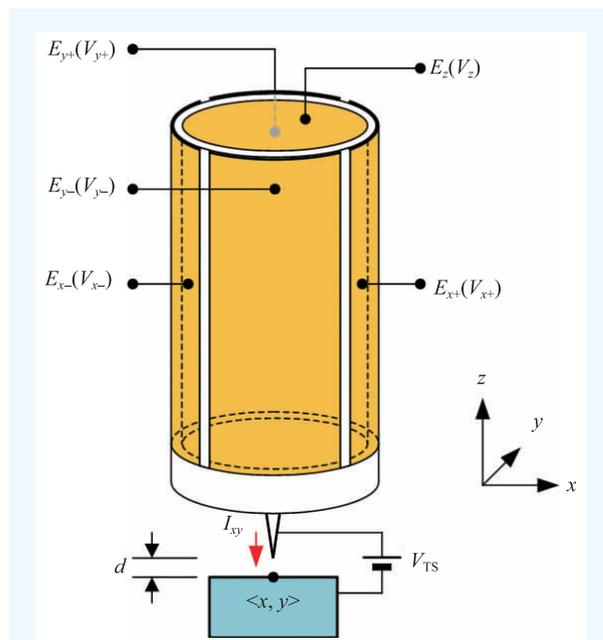


图1 PTS带动探针在样品上扫描。 E_{x-} 、 E_{x+} 、 E_{y-} 和 E_{y+} 为PTS的4个外电极, E_z 为其内电极; V_{x-} 、 V_{x+} 、 V_{y-} 、 V_{y+} 、 V_z 分别为这些电极上的电压信号; V_{TS} 为探针-样品间的偏压, d 为探针-样品间距, $\langle x, y \rangle$ 为样品表面当前扫描到的位置, I_{xy} 是该位置处测得的隧道电流值

探针与样品的安装。所以,需要有一个马达,先把 d 从 $d_0 \sim 1 \text{ mm}$ 推进到 $1 \mu\text{m}$ 以内(此过程称为“粗逼近”,该马达称为“粗逼近马达”),才能再由PTS的 z 调节把 d 进一步缩小到成像时的 d_s (原子级别)。这要求粗逼近马达的定位精度和稳定性很高。现代STM的粗逼近马达一般都为压电马达(PM):它是利用重复的压电形变(微观大小)输出一个累加的、宏观的大位移(毫米以上行程);(2)扫描成像时,哪怕微小的振动、声音、温度变化等都可能破坏 d_s 的稳定性,导致成像质量变差或针尖与样品触碰损毁。通常,0.1 nm的 d_s 变化可导致10倍的 I_{t}^{v} 变化。所以,STM一般需要置于很好的隔音、减震环境中。在恶劣条件中进行原子分辨率成像是很困难的。

要想实现恶劣条件原子分辨率成像,通常要求成像时PTS、针尖、样品处于一个牢固、紧凑、小尺度并尽量对称的机械支撑回路中,以实现抗振动和抗温度漂移的要求。但是,固定得太牢会使得压电马达难以推动针尖和样品实现粗逼近。这对压电马达提出了新要求,即在保持高精度与高稳定(压电马达自身尺寸不能大)的同时,输出大推力。这本身就是一种矛盾,实现起来不容易。本文将介绍几款我们研制的新型压电马达来解决这一矛盾,最终实现恶劣条件下的高品质原子分辨率成像。

2 壁虎马达与熊猫马达

压电马达诞生于1972年(见美国专利号3,902,084和3,902,085),并被命名为尺蠖马达(Inchworm)。它主要由一字排列的3个压电体A—B—C构成,内套一轴杆。两头的A与C压电体可对轴杆进行握紧、松开操作,而中间的B压电体则可对A与C进行拉近(B缩短时)、推远(B伸长时)操作。这样,若对轴杆进行如下操作:A松开而C握紧 \rightarrow B伸长 \rightarrow A握紧而C松开 \rightarrow B缩短操作,则轴杆相对于A—B—C就向C这头移动了一步。如此重复,轴杆就一步步行走起来。类似地,我们也能控制轴杆进行反向步进。尺蠖马达的优点是推力

大,因为A与C的抓握与B的推出都由压电形变直接完成,而阻止压电形变的阻止力(F_B)通常是很大的。但尺蠖马达也有以下严重缺点:A与C是通过其自身的压电形变来对轴杆进行握紧和松开操作的,这种压电形变通常小到微米量级,这就要求机械加工的精度特别高(微米量级)才能实现可控的松与握。即使各部件的加工精度符合要求,可以和谐工作,它们之间的热胀冷缩不匹配也会导致马达在温度变化较大时不工作。这对于需要从室温至液氮或液氦低温的宽温区应用是个严重问题。此外,由于握紧和松开动作的复杂性较高,难以紧凑化,所以尺蠖马达的尺寸一般较大,不利于制成高稳定STM。这些都使得尺蠖马达直接应用于STM的例子较少。

1993年出现的潘氏马达(Pan-style PM,由潘庶亨发明,见文献[1,2])则很好地解决了上述问题。其轴杆是通过一弹簧片被多个剪切压电体弹性地夹持住。由于夹持是由弹簧片的弹力(长程力)产生的,在机械加工精度不高或温度变化范围较大时也能保持有效夹持,所以被广泛地应用于各种STM中。其工作原理如下:先让各压电体一个个先后沿轴杆长度方向进行同方向的剪切形变,在这个过程中,每个压电体单独的形变都不能撼动其他多个压电体和弹簧片对轴杆的共同夹持,所以每个压电体的剪切形变只能让自己在轴杆上产生滑移 Δs ;之后,大家再同时反向形变,这时轴杆受到诸压电体的齐力推动,就能够克服弹簧片的摩擦阻力 f_s 而移动一步 Δs ;如此重复可使轴杆步进起来。潘氏马达也有不足之处:剪切形变的阻止力 F_B 较小,因而输出的推力不大。此外,众多压电体(通常在4个以上)的独立控制和分散分布也增加了复杂度,降低了紧凑性,对抵抗恶劣条件不利。

我们于2009年发表了一篇介绍一种新压电马达的研制文章^[3],后来将其命名为壁虎马达^[4]。这也是用弹力夹持的,因而适用于大温度范围,但结构要简单和紧凑得多,且用的是长度形变(而非剪切形变)驱动,因而推力更大。如图2(a),(b)所示,壁虎马达由压电管(简称PT,它与PTS的差别在于:前者的内外表面都是完整电极,只能进

行 z 调节；后者的外表面被分隔成4个相同的1/4圆弧片电极，见图1，可进行 xyz 调节)和滑管组成。PT两端粘有蓝宝石环做绝缘。蓝宝石环内径略小于PT内径。沿PT中轴线从一端将蓝宝石环和PT切开，切至PT长度还剩10%时停止，保留剩余部分完整，但沿割缝方向把剩余PT的外电极的电极膜刮开，形成电极绝缘缝(见图2(a))。这就把PT分割成了两个独立可控的半管压电体。将圆管或方管形滑管置于PT内，滑管的之字形切缝面同PT切缝面平行。调整滑管中弹簧的位置(见图2(c))，使滑管同基底蓝宝石环(未被切开)之间的最大静摩擦力(记为 f_1 ，为叙述方便，后面在不引起歧义时将把最大静摩擦力简称为摩擦力)和滑管同两个蓝宝石半环之间的摩擦力(分别记为 f_2, f_3)大致相等，即 $f_1 \approx f_2 \approx f_3$ 。

工作时(见图2(d))，将初态设置为两压电体皆为伸长状态(状态①)，接着，让两压电体之一收缩，这导致其自由端在滑管上滑动(状态②)，因为该处的摩擦力 f_2 虽企图拉动滑管，但克服不了其他摩擦力($f_1 + f_3$)对滑管的夹持。接下来让另一压电体收缩，这导致其自由端也在滑管上滑动(状态③)。最后，让两压电体同时伸长，这导致滑管左移一步而两压电体回到初态(状态④)，因为两个自由端同时用 f_2 和 f_3 去拉滑管时，就能够克服基底环对滑管的摩擦阻力 f_1 。重复上述步骤，可实现滑管的向左步进。类似原理也能让滑管向右步进，因为从左右看去，受力情况不变。可以看出， f_1, f_2 和 f_3 只要满足任两者之和大于第三者，马达就能行走，这可称为“可工作条件”。 $f_1 \approx f_2 \approx f_3$ 则是“最佳条件”，可产生最大推力。

当然，这一设计只是证明了原理可行，但实际做时则有缺陷：(1)行程有限，各摩擦力随着滑管的步进会改变，理论最大行程是PT长度的一半^[3]；(2)PT可能会沿切割缝裂开，导致马达损毁。为此，我们进行了实质性改进，不仅滑管可以是无弹性的刚性杆且行程不受限制，PT也不会裂开，甚至

PT根本就不用被切割。先看图3(a)，拱形弹簧片平行地插在扁六边形刚性滑杆(可以是实心的)和PT内壁之间，并将前者的两条最靠外的平行长棱与固定在PT两端的基环和动环的内测相压。此处动环是不割开的完整环，基环和动环可以是金属的。弹簧片的位置要靠近动环一些。这可保证滑杆与动环两接触点的摩擦力 f_2, f_3 以及滑杆与整个基环的总摩擦力 f_1 满足任意两者之和大于第三者的“可工作条件”。最佳条件是三者相等，对应于弹簧片距动环三分之一PT长度处，这是很容易通过调节弹簧片的位置来实现的。

当然，此设计中的PT依然是有割缝的，但其两端的环都是完整环，可防止PT从割缝处开裂。我们称之为“完整环壁虎马达”。其各摩擦力不

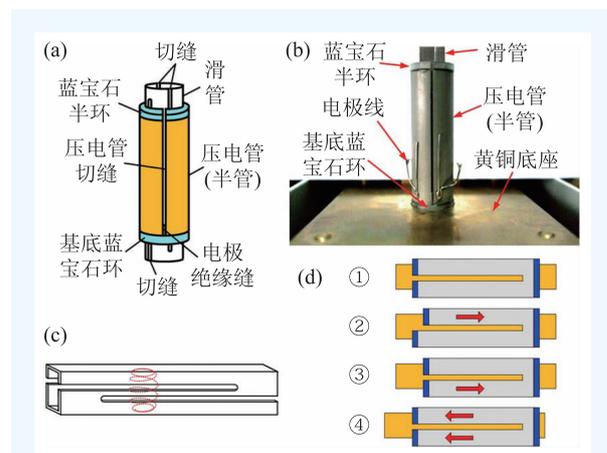


图2 (a)壁虎马达示意图，内置的滑管是圆管形，也可为方管形(c)；(b)壁虎马达实物照片，其滑管已改为方管形；(c)方管滑管示意图；(d)壁虎马达步进一步时序分解(引自文献[3])

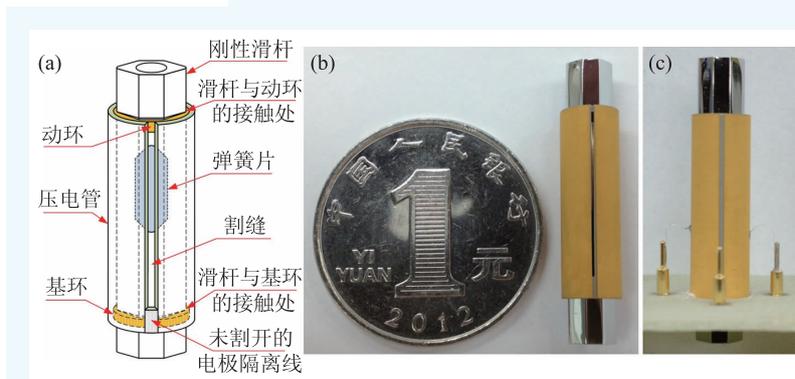


图3 (a)完整环壁虎马达示意图；(b)其实物照片；(c)完整压电管壁虎马达实物照片(引自文献[4])

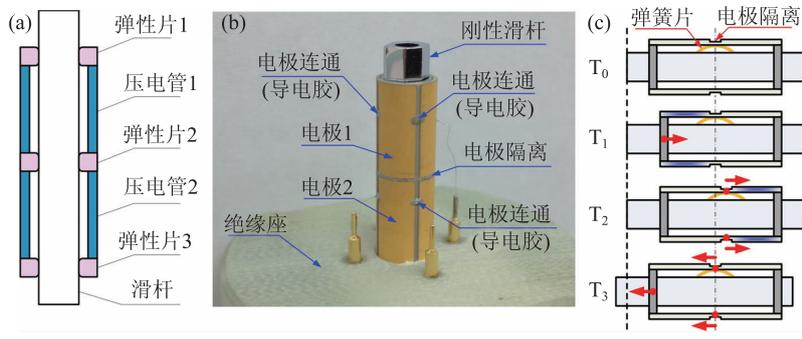


图4 (a) 三簧片熊猫马达结构示意图; (b) 单簧片熊猫马达的实物照片; (c) 单簧片熊猫马达的结构与步进一步的时序分解图(引自文献[4])

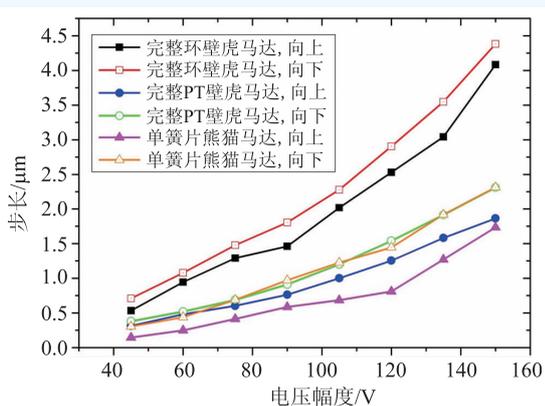


图5 三种压电马达的性能测试数据对比(引自文献[4])

随滑杆的步进而改变, 所以行程仅受限于滑杆的设计长度, 理论上可任意长。这里滑杆与动环的两个接触点(压力点)要尽量分开, 这样当两个半管压电体伸缩时, 动环与滑杆接触点的移动距离(步长)较大, 步进更顺畅。

可以看出, PT的切割不是必要的, 因为当完整PT的两侧一个伸长, 另一个收缩时, PT会左右摇摆(做扫描动作), 这也会产生动环与滑杆两接触点的交替移动, 马达可照常工作。我们称之为“完整PT壁虎马达”, 见图3(c)。至此, 我们已得到了高刚性、超紧凑的壁虎马达。这对于其在极端条件(低温、强磁场等)和恶劣条件(强振动环境)中的精密定位应用是非常有利的。

在上述各种壁虎马达的设计中, 两个独立可控的压电体都是并排的。它们也可为串联设置^[5], 我们称之为“熊猫马达”。如图4(a)所示, 将两个PT一字形首尾固定, 并在两端和中间连接处分别

固定弹性片来压住套在两PT内的滑杆。如果对应的3个摩擦力满足两者之和大于第三者的可工作条件, 即可通过: 一个PT伸长→另一个PT收缩→两者同时反向形变, 实现滑杆的行走。缺点是: 最佳摩擦力条件(三摩擦力相等)的实现对加工精度要求较高, 因为这要求三个弹性片不仅要处于同一直线上, 而且要有相同的弯曲度, 这只能以很高的加工精度来实现, 不能像壁虎马达那样只需调节唯一一个弹性片的位置就能实现。为此, 我们又设计出了“单簧片熊猫马达”:

如图4(b), (c)所示, 一根完整的压电扫描管正中间的外电极金属层被刮掉一圈, 形成串联的两段, 二者各自4个外电极都被用导电胶连接起来(见图4(b)), 分别形成两个PT段, 它们合在一起称为PT。在该PT内, 弹性片从侧面将扁六边形刚性滑杆最分开的两条长棱同PT两端的端环(完整环, 可以是金属的)相压(见图4(c))。弹性片距PT两端距离相等, 所以滑杆两端受到的压力相等, 分别为中间压力的一半。这里, 一个拱形的弹性片就能在PT的两端和中间这3个位置对滑杆产生摩擦力, 分别标记为 f_{end1} , f_{end2} 和 f_{mid} 。虽不能保证它们满足“三者相等”的最佳摩擦力条件, 但满足“任意两者之和大于第三者”的可工作条件还是相对容易的, 只要 f_{mid} 小于两倍的 f_{end1} 即可(设 $f_{end1} \approx f_{end2}$)。这可通过选择弹性片、滑杆和端环的材料、形状和抛光性, 使得弹性片和滑杆间的摩擦系数 μ_{mid} 小于滑杆和各端环间的摩擦系数 μ_{end} 来实现。如果让 μ_{mid} 等于 μ_{end} 的一半, 就可满足最佳摩擦力条件。工作原理如图4(c)所示, 设初态为串联的两个PT段均呈伸长状态(T_0); 第一步让左段收缩(T_1); 接着两段反向形变(左伸长同时右收缩, 见 T_2); 最后右段伸长(T_3 , 为了与 T_0 比较, 整体左移了), 这时左右两段均回到了初态的伸长状态(所以又可重复上述形变过程), 而滑杆

已相对于PT向左行走了一步。如此重复就可步进。当然也可反向步进。

我们对以相同尺寸的PT、滑杆和端环制成的完整环壁虎马达(见图3(b))、完整PT壁虎马达(见图3(c))和单簧片熊猫马达(见图4(b))作了测试对比,结果如图5。随着驱动电压幅值的增加,所有压电马达的步长都增加。这是因为压电体每一步的形变量增加了。完整环壁虎马达因PT有割缝,压电伸缩更加自由,所以步长曲线处于最上方,步长最大,行走效果最好。令人惊奇的是,完整PT壁虎马达虽然其PT没有割缝,却也表现不俗,步长比单簧片熊猫马达要大,表明PT的摇摆确实能够较好地转化为动环与滑杆两接触点的移动。单簧片熊猫马达的步长曲线最低,有待进一步优化。

上述壁虎马达的两独立可控压电体也可采用压电片叠堆(piezo stack)的形式,以增加压电材料的密度,提高推力。图6(a)为其示意图,图6(b)为用其制成的STM的实物照片,其中增加了小压电扫描管、探针、样品台等。后文以及图8还将讨论其超强的恶劣条件原子分辨率成像性能。

作为壁虎马达的应用和优越性能展示,我们用上述完整环壁虎马达制成了一台高品质STM(示意图见图7(a), (b), 实物照片见图7(c)),不仅在有隔

音减震的条件下获得了石墨的高清晰原子分辨率图像(见图7(f), (g), (h)),而且在没有任何悬吊减震(见图7(c), (d))也没有隔音(见图7(d))的条件下,原子分辨率图像的质量并没有任何可分辨的降低(见图7(i))。其中STM镜体本身是全刚性组装(图7(a), (b), (c)),没有一处用到了悬吊、减震弹簧和橡胶或海绵之类的减震或吸震材料。在这种情况下,有隔音减震与无隔音减震的振动干

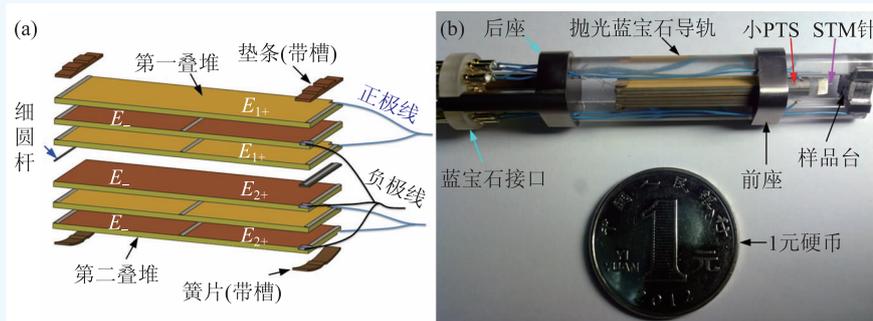


图6 (a)叠堆型壁虎马达的三维示意图;(b)用其制成的STM的实物照片(含小压电扫描管、探针、样品台等)^[6]

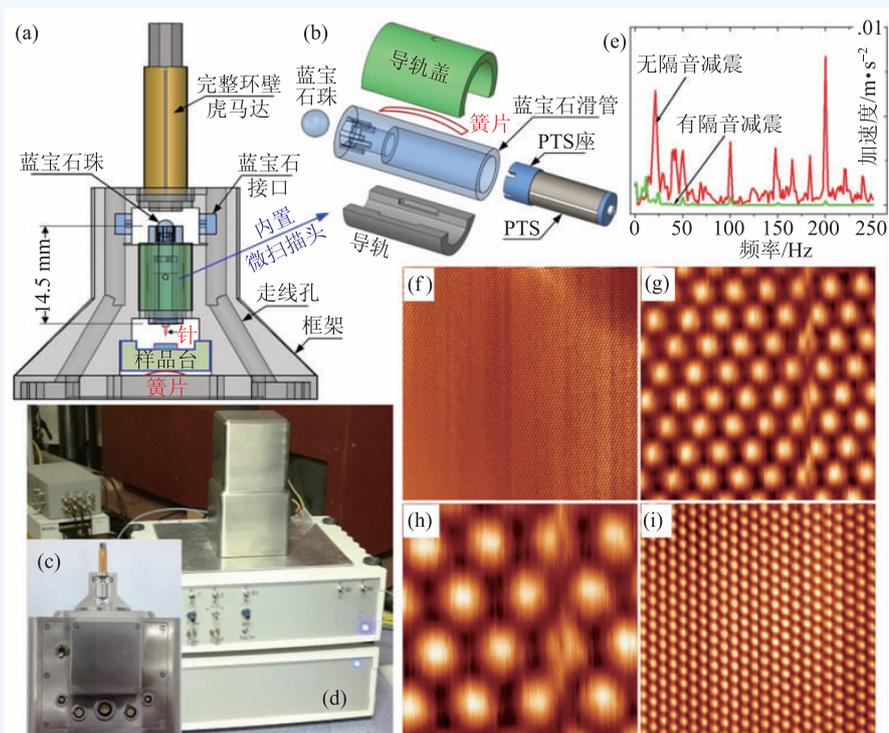


图7 用完整环壁虎马达制成的STM(图(a), (b), (c)),不仅在有隔音减震条件下能够给出石墨的高清晰原子分辨率图像(图(f), (g), (h)),更在无隔音减震条件((c), (d))下也能给出同样质量的图像(图(i)),虽然这两种条件下的振动干扰相差巨大(图(e))^[7]。图(f)一(i)均为未做处理的原始数据

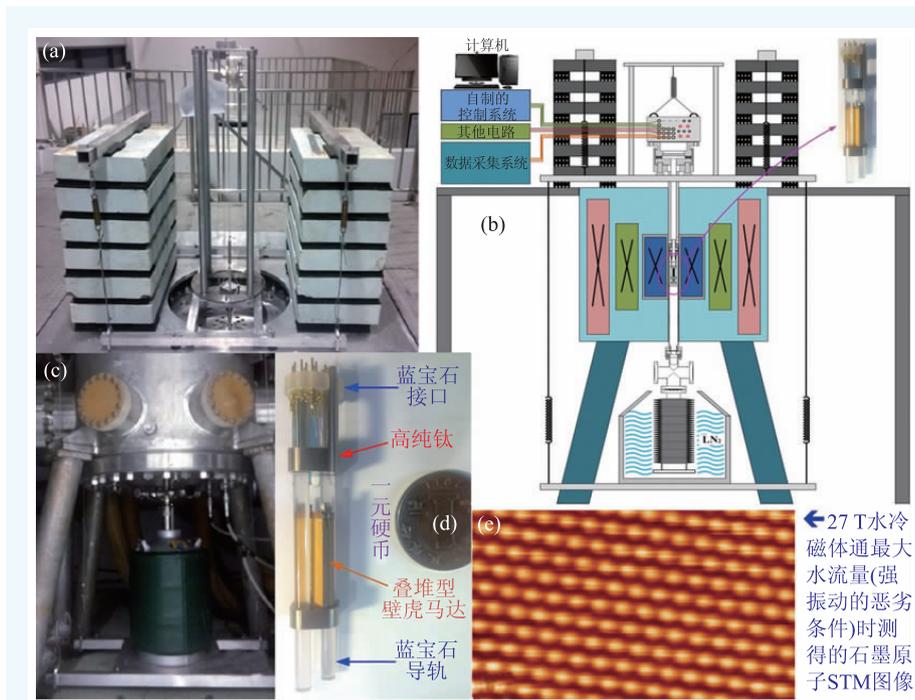


图8 在振动极强、噪声极高并通以最大水流量的水冷强磁体中(图(a), (b), (c)), 用叠堆型壁虎马达制成的STM(图(d))依然能够给出高清晰的原子分辨率图像(图(e)), 是一台出色的抗恶劣条件的STM

扰情况是相差很大的：我们用测振仪在这两种条件下进行测量，测得的振动干扰强度如图7(e)所示，可以看出，它们有量级上的差别。

在该STM中，完整环壁虎马达凭借其较大的推力，推动被紧压在导轨上(通过簧片)的蓝宝石滑管(内固定着外径3.2 mm、内径2.2 mm、长7 mm的小压电扫描管)来实现探针(未画，处于压电扫描管自由端)与样品的粗逼近。粗逼近完成后，马达滑杆可回撤(与蓝宝石珠分离，见图7(a))，压电扫描管(PTS)将独自扫描成像。需要指出的是，虽然马达回撤后就不是成像结构的一部分，不会引入额外的干扰，但如果马达的推力不强，就不能推动已被紧压住的PTS，也就实现不了粗逼近；而如果减小压住PTS的弹力，以便让小推力的马达推动，则抗恶劣条件的能力就下降。如果通过增加马达的尺寸来提高其推力，则马达的定位精度就会下降(有较大的后冲、回差之类问题)，就不能对小尺寸的PTS进行粗逼近后的马达回撤操作，因为小尺寸PTS的伸长范围很小，完全可能小于马达的回差，导致马达退一步则PTS的伸长不能

让探针抵达样品，进一步则探针与样品相撞的尴尬情况。虽然增加PTS的尺寸或提高PTS的控制电压，可以增加PTS的伸长范围，从而避免这一尴尬，但这些都降低PTS的定位精度与稳定性，导致成像质量变差。

总之，壁虎马达很好地解决了紧凑性(尺寸小、精度高、回差小)和大推力(抗震)之间的矛盾，实现了让小PTS在低电压下($<10\text{ V}$)进行独立扫描成像(马达脱离)的“最佳成像条件”，从而使得STM实现了在隔音减

震箱内(图7(f), (g), (h))、外(图7(i))都能给出同样优越的原子分辨率图像的“壮举”。如果采用推力更强的叠堆型壁虎马达来制作STM(见图6(b)和图8(d))，其抗恶劣条件的能力应该更强。事实也确实如此。图8(e)显示了我们用叠堆型壁虎马达制成的STM，它甚至可以在振动干扰超强的通有最大水流量的水冷强磁铁中得到高清晰原子分辨率图像(石墨样品)，是出色的恶劣条件下的STM。但说到推力之强，还要数下面出场的金枪鱼马达。

3 金枪鱼马达及其超强推力

在不增加尺寸的情况下产生最大的推力是压电马达的终极目标，它能够带来性能全面提升和抗更恶劣的条件，具有更大的工作温区，能进行更精密的定位，可承受更大的负载，总之，它有更广泛的应用。为此，我们发明了超大推力的金枪鱼马达。这也是弹力夹持的，因而工作温区很广，加工精度要求低。我们最初于2012年提出并实现了PTS型金枪鱼马达^[8]，后又于2014年制成

了叠堆型金枪鱼马达^[9]，进一步提高了推力。这里主要介绍性能更优越的后者。如图9(a), (b), (c)所示，5个压电叠堆(两个前肢堆、两个后肢堆、一个体叠堆)被4个弹簧片压于抛光的蓝宝石圆柱平行导轨之间，形成一个总叠堆(图9(b), (c))。总叠堆中的两个前肢堆被导线连接，并由一个信号(V_{arm})控制，两个后肢堆被导线连接，并由另一个信号(V_{leg})控制，体叠堆由第三个信号(V_{body})控制。所以，5个叠堆实际上是3个独立叠堆，控制并不复杂。

工作时，可先让前肢堆以较高的频率 ω_{hi} 做周期性伸缩(伸缩振动)，这会大大减少整个前肢堆与导轨间的摩擦力 f_{vib} (因为前肢堆内部各摩擦力相互抵消)，同时体叠堆缓慢收缩，这导致整个前肢堆被向后肢堆拉近，因为后肢堆不做伸缩振动，其受到的最大静摩擦力(f_{still})远大于 f_{vib} ；接着，让前肢堆静止而后肢堆以 ω_{hi} 做伸缩振动，同时体叠堆缓慢伸长(体叠堆从上一步的收缩到这一步的伸长的快慢程度用频率 ω_{body} 表示)，这导致整个后肢堆被推离前肢堆。如此重复可实现步进。控制信号的波形见图9(d)。通常要求 ω_{hi} 至少5倍于 ω_{body} ，否则，马达行走不顺，甚至不走。

设后肢堆是静止的而前肢堆做快速伸缩振动，满足 $\omega_{hi} > 5\omega_{body}$ ，则金枪鱼马达的最大输出推力为

$$\begin{aligned} F_{out} &= F_{leg,still} - F_{arm,vib} \\ &= F_{leg,still} (1 - F_{arm,vib}/F_{leg,still}) \\ &= F_{leg,still} (1 - \eta), \end{aligned}$$

其中 $F_{leg,still}$ 是后肢堆受到的

最大静摩擦力(即支撑力，越大越好)， $F_{arm,vib}$ 是前肢堆受到的抵消了的摩擦力(即阻力，越小越好)。这里已假设了体叠堆的压电变形阻止力 F_B 远大于 $F_{leg,still}$ 。在最后一项中，我们定义了一个衡量压电马达好坏的量：阻撑比 $\eta = F_{arm,vib}/F_{leg,still}$ ，该值越小越好。

$F_{arm,vib}$ 可通过如下方法测得：将马达竖立，在体叠堆上悬挂重量为 W 的重块，并让前、后肢堆都做快速伸缩振动；增加 W 直到体叠堆恰好开始

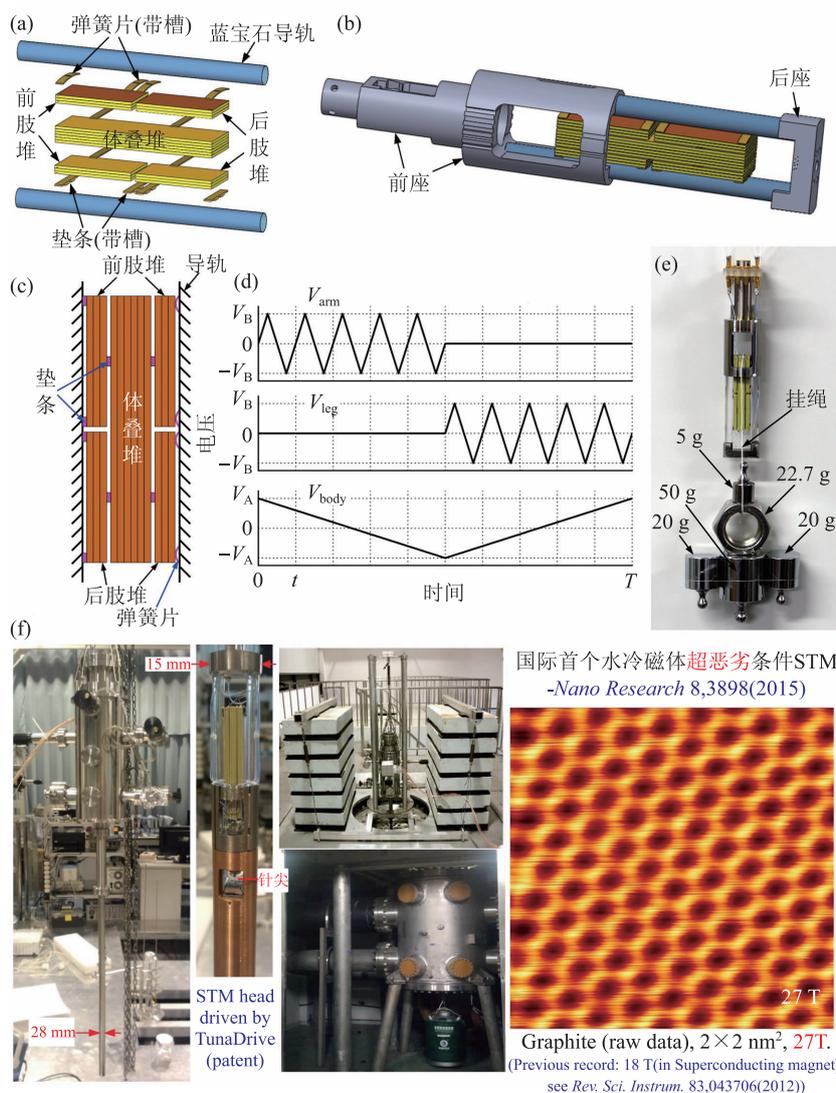


图9 (a)金枪鱼马达的结构示意图；(b)金枪鱼马达的组装图，其中的前座被设计成能够容纳下一个小压电扫描管，以构成STM；(c)金枪鱼马达的平面图；(d)金枪鱼马达行走一步的控制信号；(e)金枪鱼马达的实物照片及其能够推动的最大负载(117.7 g)^[9]；(f)由金枪鱼马达制成的国际首个水冷强磁体STM，及其在27 T强磁场下得到的原子分辨率图像。它把原子成像的最高磁场纪录从原来的18 T(由低振动的超导磁体产生)大幅提升到27 T

下滑, 这时 $F_{\text{arm,vib}}=W/2$ 。 $F_{\text{leg,still}}$ 也可类似地测得: 在体叠堆上悬挂重量为 W' 的重块, 并让前、后肢堆都保持静止; 增加 W' 直至体叠堆恰好开始下滑, 这时 $F_{\text{leg,still}}=W'/2$ 。由此可得 $\eta=W/W'$ 。我们的实测结果是: $\eta=37.7 \text{ g}/428 \text{ g}=8.8\%$ 。这是一个非常低的值, 表明金枪鱼马达的后肢堆支撑力远远大于前肢堆阻力, 这是极其有利的(壁虎马达在满足最佳条件 $f_1=f_2=f_3$ 时, 其中有两个是支撑力, 一个是阻力, 即 $\eta=50\%$, 远高于金枪鱼马达的 8.8%)。由此得到理论最大输出推力为: $F_{\text{out}}=(428\text{g}/2)\times(1-8.8\%)=1.9 \text{ N}$ 。当然我们也能对最大输出推力进行实际测量(见图 9(e)): 让金枪鱼马达正常上行, 并逐渐增加挂在其体叠堆上的重物重量, 直到马达不能上行为止, 这时测得的重物重量为 1.2 N (即 117.7 g)。我们是用 150 V 驱动马达的。增加驱动电压可以带动更重的负载, 但驱动电压超过 200 V 会使压电材料退极化和损毁。这与 1.9 N 的理论最大输出推力(绝对上限)是符合的。

初看起来, 金枪鱼马达有点像尺蠖马达: 一端

松手, 另一端握紧, 中间收缩, 再全部反过来。但它们是完全不同类型的压电马达: 金枪鱼马达是靠弹力夹持的, 弹力的行程通常较大(毫米量级), 所以加工精度要求不高, 在很大的温度范围内, 夹持力变化不大, 可正常工作; 而尺蠖马达是靠压电形变进行松与握, 行程小(微米量级), 对加工精度要求高, 工作温区很窄, 且抓握结构也更复杂。

由于金枪鱼马达比壁虎马达的输出推力大得多, 所以, 它更加适合于恶劣条件下的原子分辨率成像。事实也正是如此, 图 9(f) 显示的是利用简化型金枪鱼马达(只用三个独立的压电片叠堆驱动)去推动图 7(b)型的独立扫描管进行粗逼近的 STM, 及其在图 8 所示水冷磁体升场至 27 T 强磁场时的超恶劣条件下得到的石墨样品原子分辨率图像。这不仅国际首个水冷磁体原子分辨 STM, 它也把原子成像的最高磁场纪录从原来的 18 T (由安静的超导磁体产生)一下子提升到 27 T (必须由水冷磁体提供, 单纯的超导磁体产生不了这么强的磁场)。

4 蜘蛛马达及其高效驱动

惯性压电马达是利用压电体的突然形变来产生足够大的惯性力, 从而克服阻力(如摩擦阻力)并实现步进的。其优点是结构极其简单, 在很多情况下只需一个压电体、一个导轨和一个控制信号就能够工作, 是最简单的压电马达, 但缺点也很明显: 驱动力很小, 有时候甚至连克服自身的重力而向上行走也很困难。为了增加惯性马达的驱动能力, 我们设计了“蜘蛛马达”^[10], 可以在液氮温度下实现竖直向上的步进, 同时保留了惯性压电马达的简洁性, 甚至还包括了三维微调和扫描成像功能。这些都对制作扫描探针显微镜非常适合。

如图 10(a)所示, 压电扫描管(PTS)的一端为固定端, 被树脂胶牢固地固定于基座上。另一端为自由端, 其内壁用树脂胶与导向管一端的外壁相固定。导向管另一端深入 PTS 内部, 但不与 PTS 内壁触碰。方滑杆插入到导向管内部, 两者之间被弹簧片的侧向弹力压住。导向管内壁是抛光的, 这使得方滑杆与导向管内壁之间的滑动保持顺畅。在控制该惯性马达步进时, PTS 的 4 个

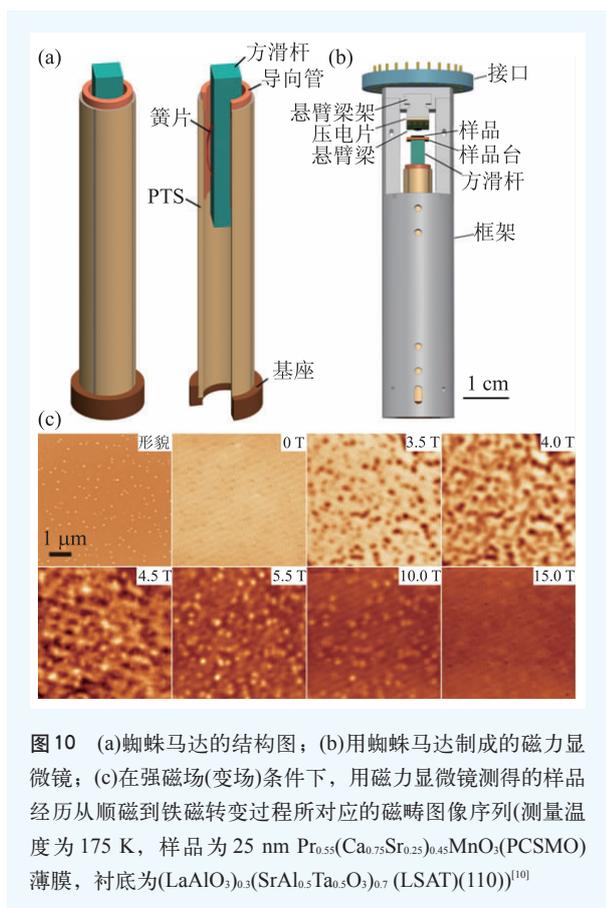


图 10 (a)蜘蛛马达的结构图; (b)用蜘蛛马达制成的磁力显微镜; (c)在强磁场(变场)条件下, 用磁力显微镜测得的样品经历从顺磁到铁磁转变过程所对应的磁畴图像序列(测量温度为 175 K , 样品为 $25 \text{ nm Pr}_{0.55}(\text{Ca}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})_{0.45}\text{MnO}_3(\text{PCSMO})$ 薄膜, 衬底为 $(\text{LaAlO}_3)_{0.3}(\text{SrAl}_2\text{Ta}_2\text{O}_7)_{0.7}(\text{LSAT})(110)$)^[10]

外电极和内电极之间同时施加惯性甩动信号，这将大大增加甩动时的惯性力。为了实现这一增强效果，PTS的4个外电极和内电极必须用独立的驱动电路驱动。

这一马达的优势是不仅能够产生更大的输出力，而且能够在不增加复杂性的同时，实现扫描成像功能，所以特别适合制作各种极端条件或窄空间中的扫描探针显微镜。我们就是利用蜘蛛马达制成了液氦低温—强磁场(20 T)磁力显微镜(MFM)。如图10(b)所示，我们仅需在蜘蛛马达外套一个圆管形框架，并将样品和探针(悬臂梁)分别固定在PTS自由端和框架上靠近此自由端的地方即可。这样制成的MFM由于惯性力大，完全可在液氦低温和强磁场下工作。图10(c)就是我们用该MFM在175 K和15 T的变磁场条件下测得的25 nm厚 $\text{Pr}_{0.55}(\text{Ca}_{0.75}\text{Sr}_{0.25})_{0.45}\text{MnO}_3$ (PCSMO)单晶薄膜在 $(\text{LaAlO}_3)_{0.3}(\text{SrAl}_{0.5}\text{Ta}_{0.5}\text{O}_3)_{0.7}$ (LSAT) (110)衬底上的MFM图像序列。样品从0场时的顺磁绝缘体转变成15 T时的饱和铁磁体，整个过程中的磁畴变化情况得到清晰的展示。

当然，MFM的PTS一般较大(此处为6.35 mm外径，5.35 mm内径，52.8 mm长)，是否能够将蜘蛛马达做成小到能适用于超清晰原子分辨率(通常需要PTS的长度在15 mm以内)的STM或原子力显微镜(AFM)，且能够工作于液氦低温，是一个值得探索的问题。可以预见，当PTS的尺寸变小时，虽然压电形变量会线性地变小，但压电响应速度会增加，即特征频率 ω_0 会增加。设频率为 ω_0 时还能够有压电响应，此时的惯性加速度 $\propto d^2(\sin(\mu_0 t))/dt^2$ ，也即最大惯性力($\propto \omega_0^2$)并不一定随PTS尺寸的减小而减小。超小蜘蛛马达及其

低温STM并不一定制作不出来。特别是，如果蜘蛛马达的每一路独立驱动电路输出的控制信号波形都使用我们提出的“前延迟”和“后延迟”波形^[11]，蜘蛛马达的推动力将还可进一步增强，更加有利于其在恶劣条件下，在具有原子分辨率的STM/AFM中的应用。

实际上，即使暂时不能用短于15 mm的小PTS来制作既能粗逼近又能扫描成像的STM，也完全可按图7(a)，(b)的方法，先用一个大PTS(例如，外径8 mm，内径7 mm，长30 mm)制成蜘蛛马达，再驱动其滑杆去顶一个内置小PTS的蓝宝石滑管进行粗逼近，等粗逼近完成后再使马达滑杆回撤，从而让小PTS独自扫描成像。我们已成功制成了这一“小PTS与大蜘蛛马达可分离的STM”，并在液氦温度下实现了小PTS的独自扫描成像，获得了极清晰的原子分辨率图像。出于篇幅限制，就不在这里展示了，但非常确定的是，蜘蛛马达完全能够胜任恶劣条件下的高清晰原子分辨率成像。

5 结束语

本文主要讨论了新型压电马达在恶劣或极端条件下原子成像中的应用，但这主要是为了展示它们的大推力、小尺寸、高紧凑和高定位精度的抗恶劣条件优势。它们当然也完全可以应用于普通压电马达的应用领域，如数码相机调焦、现代光学、微电子制造、航空航天、超精密机械制造、微机器人、地震测量、生物、医学与遗传工程等^[12]，而当它们作为普通压电马达使用时，应比市场上现流行的压电马达更具优势。

参考文献

- [1] Pan S H. International Patent WO 93/19494
- [2] Pan S H, Hudson E W, Davis J C. Rev. Sci. Instrum., 1999, 70: 1459
- [3] Wang Q, Lu Q Y. Rev. Sci. Instrum., 2009, 80: 085104
- [4] Wang Q, Hou Y B, Lu Q Y. Rev. Sci. Instrum., 2013, 84: 056106
- [5] 陆轻轴, 侯玉斌. 国家发明专利授权号: ZL200610161477.3
- [6] Guo Y, Hou Y B, Lu Q Y. Scanning, 2014, 36: 554
- [7] Wang Q, Hou Y B, Wang J T *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2013, 84:

113703

- [8] Liu X L, Lu Q Y. Rev. Sci. Instrum., 2012, 83: 115111
- [9] Guo Y, Hou Y B, Lu Q Y. Rev. Sci. Instrum., 2014, 85: 056108; Meng W J, Guo Y, Hou Y B *et al.* Nano Research, 2015, 8: 3898
- [10] Zhou H B, Wang Z, Hou Y B *et al.* Ultramicroscopy, 2014, 147: 133
- [11] Wang J T, Lu Q Y. Rev. Sci. Instrum., 2012, 83: 093701
- [12] 杨志刚. 中国电机工程学报, 2004, 24: 102