

扫描隧道显微镜（STM）测试杆操作规程

1. 扫描隧道显微镜简介

1981年,世界上第一台扫描隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope, 简写 STM)在 IBM 苏黎世实验室研制成功。它的问世标志着人类从此进入直接观测原子和操纵原子的时代,其发明人宾尼格(G. Binning)和罗雷尔(H. Rohrer)也因此获得了 1986 年的诺贝尔物理学奖。

这种新型显微镜具有很高的分辨率(横向分辨率达 0.1 nm,纵向分辨率达 0.01 nm),帮助人类第一次在实空间观测到样品表面的原子排布状态,一举解决了关于 Si(111)- 7×7 表面重构长达数十年的争论,对表面科学、纳米科学、生物医学等科学技术的研究和发展具有里程碑式的意义,是国际科学界公认的上世纪八十年代世界十大科技成就之一。

在 STM 的基础上,科研人员又相继发展了原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, 简称 AFM)、磁力显微镜(Magnetic Force Microscope, 简称 MFM)、自旋极化扫描隧道显微镜(Spin-polarized Scanning Tunneling Microscope, 简称 SP-STM)、近场光学显微镜(Scanning Near-field Optical Microscope, 简称 SNOM)、扫描热显微镜(Scanning Thermal Microscope, 简称 SThM)等等。尽管这些显微镜功能各异,但都是利用探针和样品表面之间相互作用而成像,所以统称为扫描探针显微镜(Scanning Probe Microscope, 简称 SPM)。它们极大地提高了人类对微观世界的认知能力,现已被广泛应用于科学研究和工业制造的各个领域。

2. 扫描隧道显微镜测试原理与构造

2.1 STM 测试原理: 量子隧穿效应

在经典力学中，电子不可能穿过比自身能量还要高的势垒。在量子力学中，电子具有波动性，即使能量小于势垒高度，也存在一定的几率穿过势垒。这种低能的微观粒子贯穿势垒的现象称为隧穿效应。扫描隧道显微镜正是基于这一原理发明的：当针尖到样品表面的距离非常接近（通常小于 1 nm）时，它们可以看作两个电极，在外加电场的作用下，电子就有一定的几率穿过两者中间的势垒达到另一极，形成隧道电流。

按照简单的一维隧穿模型，电子的波函数满足薛定谔方程：

$$-\frac{\hbar}{2m} \frac{d^2}{dz^2} \psi(z) + U(z)\psi(z) = E\psi(z)$$

其中， \hbar 表示普朗克常数（ $\hbar = h/2\pi$ ）， m 表示电子的质量， $\psi(z)$ 表示电子的波函数， $U(z)$ 表示势垒的高度， E 表示电子的能量。当 $E > U$ 时， $\psi(z) = \psi(0)e^{\pm ikz}$ ，电子波矢为 $k = \frac{\sqrt{2m(E-U)}}{\hbar}$ 。计算结果表明，电子可以在 $\pm z$ 方向自由运动。当 $E < U$ 时， $\psi(z) = \psi(0)e^{-kz}$ ，电子衰减因子为 $k = \frac{\sqrt{2m(U-E)}}{\hbar}$ 。结果表明，电子波函数在势垒区指数衰减。只要势垒足够窄，电子就一定有概率穿过势垒。

扫描隧道显微镜利用量子隧穿原理，将原子尺度探针和样品表面作为两个电极，当样品与针尖的距离非常接近（通常小于 1 nm）时，在外加电场的作用下，电子会穿过两个电极之间的势垒流向另一电极形成隧道电流，通过电流大小的变化来描述样品表面的形貌。量子隧道效应引起隧道电流与间隙大小呈指数关系，可以获得原子级样品表面形貌特征图象。

2.2 STM 的构造要素

一个基本的扫描隧道显微镜系统应当包括粗步进马达、扫描头、前置放大器以及相关的电子学控制单元和配套的控制软件（如图 1 所示）。其中粗步进

马达主要负责把探针逼近到隧道区（纳米范围内），同时不能和样品表面发生碰撞，因此粗步进马达需要有很高的定位精度，现在主流的粗步进装置都采用的是压电步进马达。扫描头有两个作用：一是用来细逼近，二是控制探针在样品表面进行扫描。前置放大器主要作用是把微弱的隧道电流信号（纳安量级）转换成宏观的电压信号进行测量。电子学控制单元主要用来输出马达和扫描头控制信号，以及采集从前置放大器出来的隧道电流信号，同时也包含一些反馈电路，用来保持探针到样品的距离。最后，一套功能完善的控制软件是必不可少的。

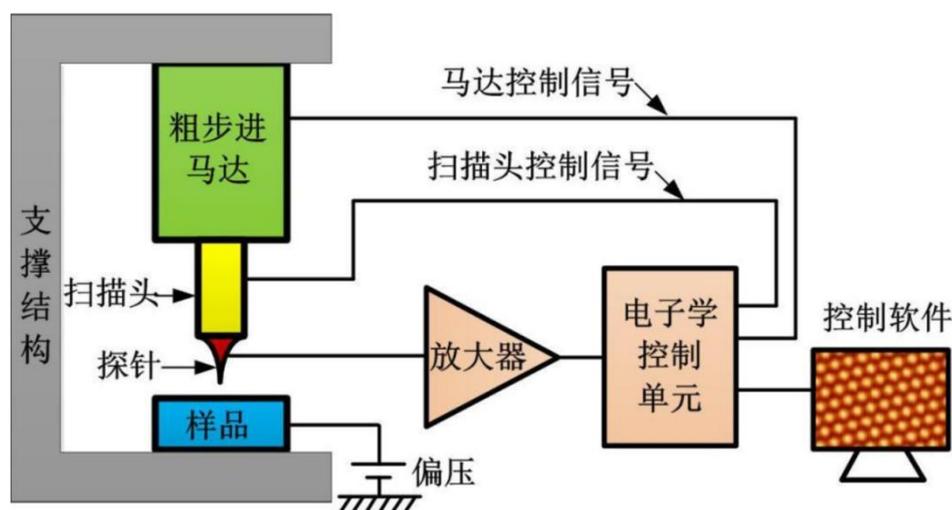


图 1 STM 结构示意图

3. STM 的工作模式

根据针尖与样品间相对运动方式的不同，STM 有两种工作模式（如图 2 所示）：恒高模式（a）和恒电流模式（b）。

恒电流模式扫描时，在偏压不变的情况下，始终保持隧道电流恒定。恒高模式则始终控制针尖在样品表面某一水平高度上扫描，随样品表面高低起伏，隧道电流不断变化。

恒电流模式是扫描隧道显微镜最常用的一种工作模式。以恒电流模式工作时，由于 STM 的针尖是随着样品表面的起伏而上下运动，因此不会因表面起伏太大而碰撞到样品表面，所以恒电流模式适于观察表面起伏较大的样品。

恒高模式工作时，由于针尖的高度恒定不变，所以仅适用于观察表面起伏不大的样品。但在恒高模式下工作，获取 STM 图像快，且能有效地减少噪音和热漂移对隧道电流的干扰，提高分辨率。

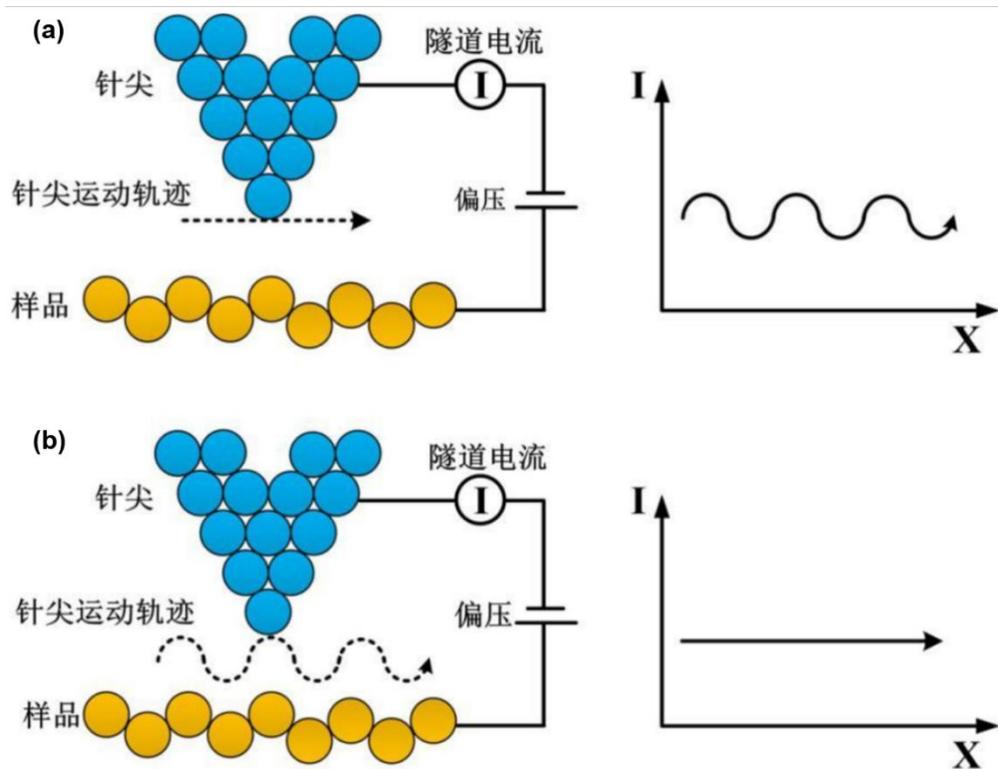


图 2 STM 扫描方式示意图(a)为恒高模式，(b)为恒流模式。

4. STM 的特点及其与其他同类设备比较

扫描隧道显微镜具有极高的实空间分辨率，其在水平和垂直分辨率可以分别达到 0.1nm 和 0.01nm，能够实现样品的原子级分辨率观测。因此可直接观察到材料表面的单个原子和原子在材料表面上的三维结构图像。在观测材料表面结构的同时，可得到材料表面的扫描隧道谱（STS），从而可以研究材料表面

化学结构和电子状态。因此利用扫描隧道显微镜可直接观测材料表面原子是否具有周期性的表面结构特征，表面的重构和结构缺陷等。

与同样能够提供高分辨成像的透射电镜和扫描电镜相比，扫描隧道显微镜的工作环境十分广泛，既可以在真空中工作，也可以在大气环境下和液体中观测样品，同时其工作温度范围广（mK 到 1000K）。因此扫描隧道显微镜被广泛应用在物理学，化学，材料学，生物学等诸多学科。

表 1 STM、TEM 和 SEM 三种测试方法对比

测试方法	分辨率	工作环境	检测深度
STM	横向：0.1nm 纵向：0.01nm	大气、溶液、真空均可	1-2 个原子层
TEM	横向点分辨：0.3-0.5nm 横向晶格分辨：0.1-0.2nm 纵向：无	高真空	<100nm
SEM	横向：1-3nm; 纵向：低	高真空	1 μ m

5. STM 插杆构造图

STM 插杆是中科微力公司与牛津仪器科技有限公司联合推出的一款用于牛津仪器科技有限公司生产的 TeslatronPT 系列干式超导磁体的插杆式扫描隧道显微镜。系统主要包括 STM 插杆（STM-ST3），SPM 控制器（SPMC-SC3）。其中，插杆顶部 STM 前级放大器可拆卸并更换反馈电阻以获得不同放大倍数，前置放大器采用氧化铝单晶（蓝宝石）作为电路基板，可以获得优于 50fA 的电流分辨率，如图 3 所示。图 4 所示为电接口示意图。

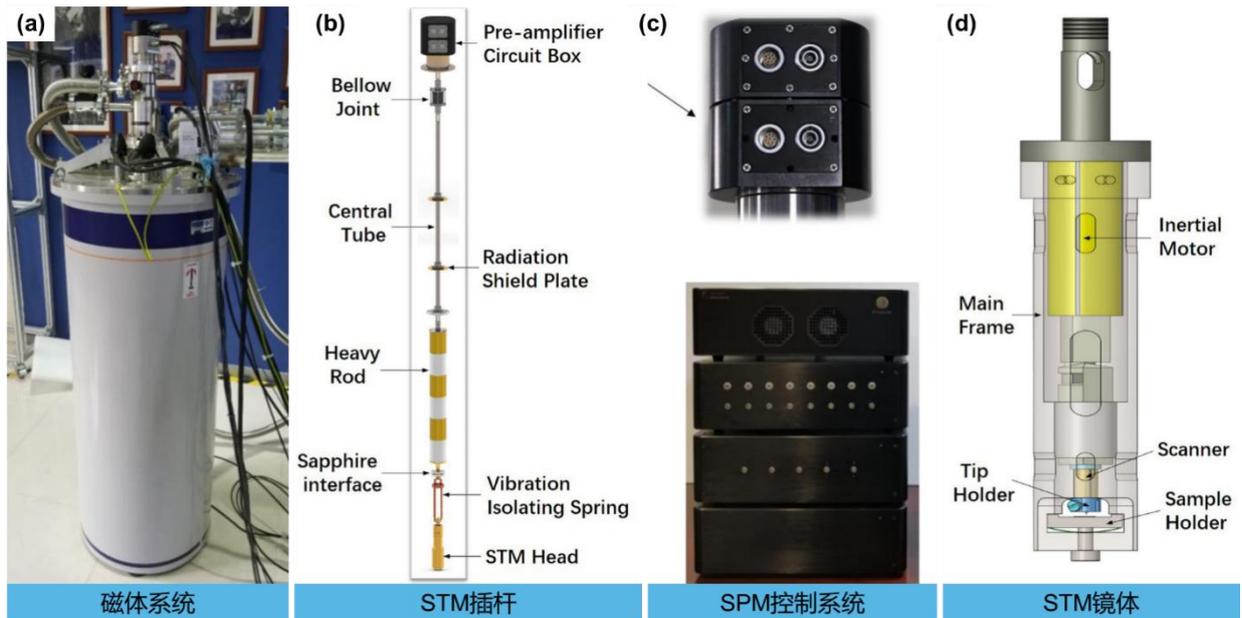


图 3 磁体系统、STM 插杆构造、控制系统以及 STM 镜体结构示意图

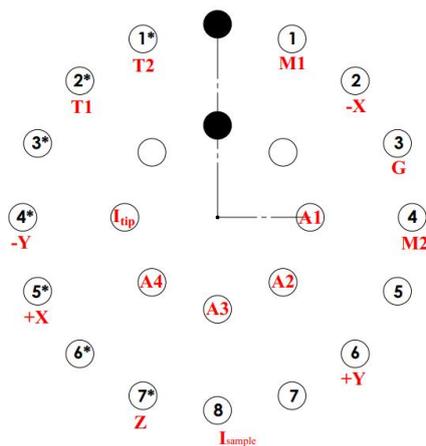


图 4 STM 插杆电接口示意图

6. 前置放大器切换

插杆顶部 STM 前级放大器可拆卸并更换为用户的放大器。具体更换步骤如下。

使用中科微力的前置放大器接线，如图 5a 所示：粉色线接插在蓝宝石电路板上；M3 接地；M4 空载；

注意，一定要佩戴防静电的丁腈手套操作。开电路盒时，要防止其他信号线脱落。

更换为客户的前置放大器接线：粉色线接插在 M4 上；M3 不接地，即拔出图 5b 中 M3 的短接线。此时，M3 连接 STM 探针信号，M4 连接样品信号。

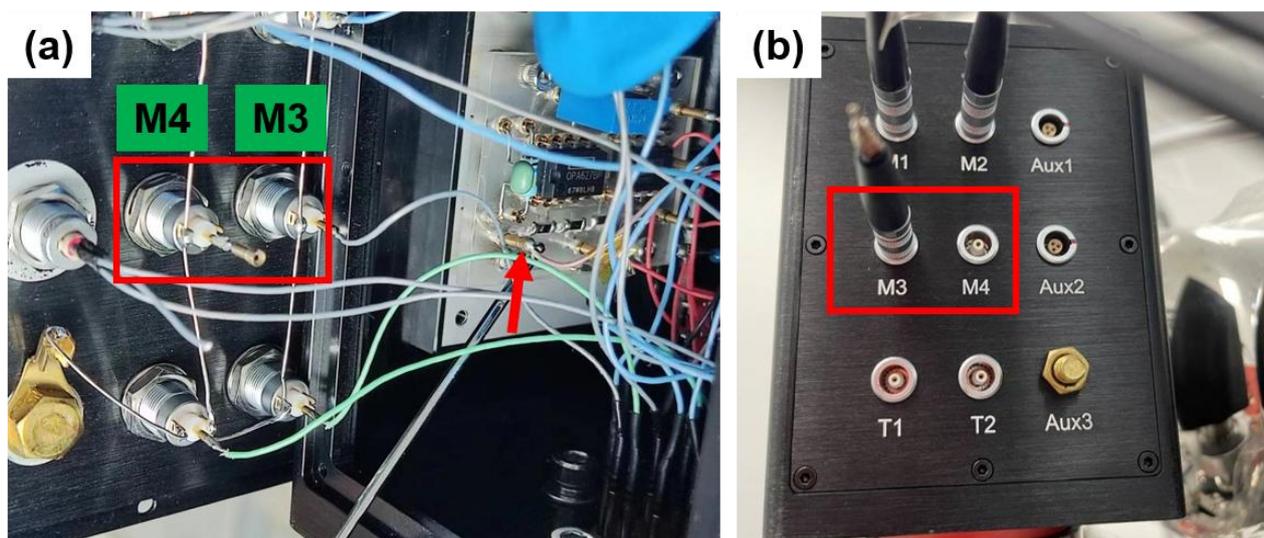


图 5 前置放大器接线盒(a)内部构造(b)外部结构

7. STM 插杆操作指南

7.1 镜体操作步骤分解

(1) 卸载 STM Head。见图 6a，固定镜头单元，使用螺丝刀轻旋取下 M1.6 螺钉，分离顶部的蓝宝石插针接口件，完成 STM Head 卸载操作。

(2) 旋下镜体外隔音罩，便可看到探针和样品所在位置，通过松开底部螺丝，取下样品台，如图 6bc。

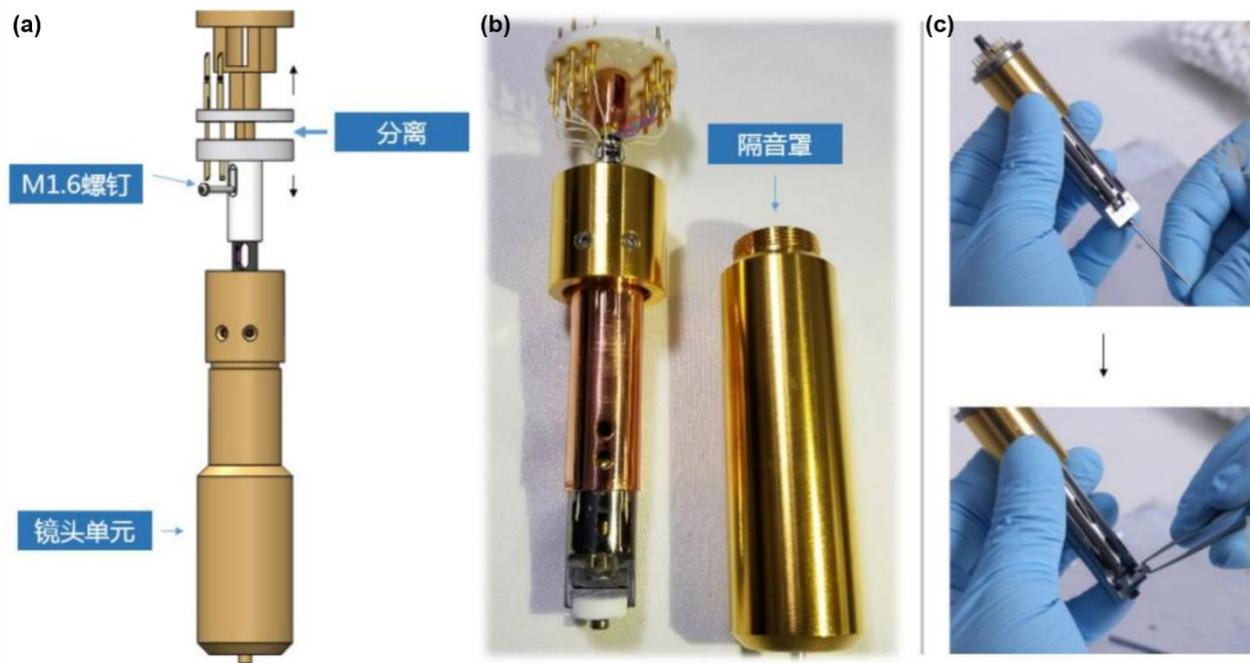


图 6 STM 镜体拆卸步骤

(3) 松开探针台上的螺丝，用镊子夹住针尖顶端，将探针连同套管一并取出，这样便完成了针样的卸载工作，如图 7。装上隔音罩，放置于安全位置，开始制备针尖。



图 7 拆卸探针步骤

(4) 探针制作：镊子夹持退火处理后的铂铱合金丝，剪刀与金属丝成 30 度左右角度，剪切并拉制处针尖，置于盒子备用。

取一段紫铜管，将一端在沙盘上研磨从而获得圆形平整的端面，这时将之前制备的探针插入其中，只留约 0.5 mm 的探针尖端在紫铜管外面，将多余紫铜管减去留下约 3.5 mm 长度，并使用斜口钳加紧铜管，镊子夹住探针尖端从

探针台侧方横向滑移进入，调整进入深度，保证铜管端面与探针台端面平行，旋紧螺丝，固定探针。或者与现有的小铜管比对，剪差不多长度（4 mm）的铜管。把探针剪至比铜管略长一些（5-5.3 mm），塞到铜管内。如果探针过长，则再剪断一些。探针放好后，用斜口钳夹两次，通过铜管壁压缩，夹紧探针。不能太用力，以免夹断铜管。用镊子尝试拔探针，如果探针还会动，再夹几次，直到探针夹紧不动为止。如图 8 所示。

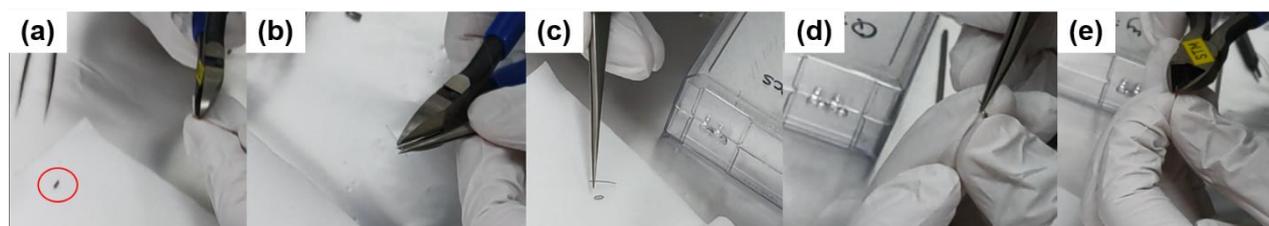


图 8 探针制作步骤

(5) 拆装探针：镜体横放，用小螺丝刀，轻轻拧送螺丝，即可从侧面取放探针。锁紧探针时，轻轻拧螺丝，以免损坏压电管，只要碰到有点阻力，稍微拧紧一下就行。如图 9 所示。

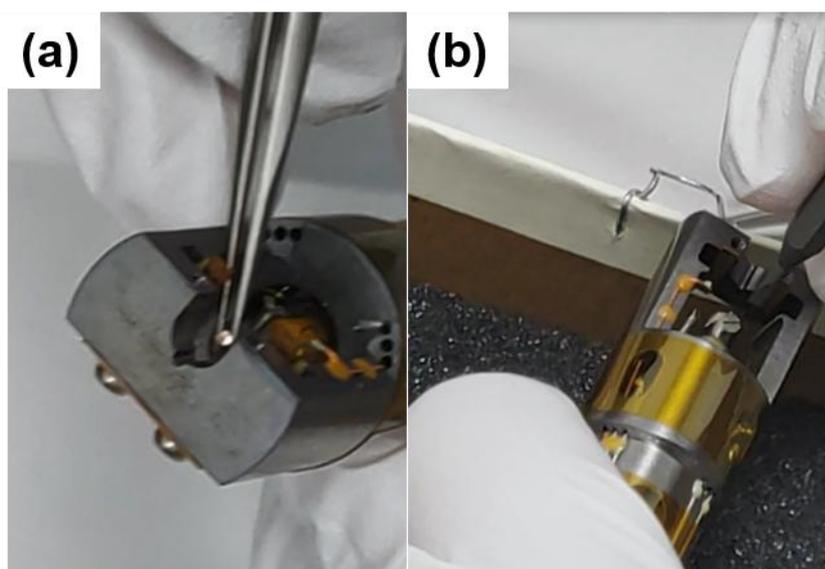


图 9 探针安装步骤

(6) 样品安装：将已经装载样品的样平台插入 STM Head，旋转底部螺丝固定样品台。盖上隔音罩，完成针尖和样品的更换操作。

(7) 与步骤(1)相反，装载镜头单元，并使用螺丝刀安装 M1.6 螺钉锁定连接。

(8) 泵清洗 VTI 腔室 3 遍后，通氦气至磁体 VTI 腔正压后，打开磁体顶部法兰，缓慢将 Probe 放入磁体中，锁定顶部 KF50 法兰后，打开机械泵对 VTI 腔室进行抽气三分钟，配合高纯氦气清洗 VTI 三遍后维持 VTI 气压为-0.2 bar 左右即可进行系统降温等操作。

7.2 测试前检查

(1) 马达电容检测：室温时，电路盒子外壳地与 M1、M2 端口之间的电容 33nF，两个电容值对称。

(2) 扫描头电容检测：室温时，Z 与+X、-X、+Y、-Y，数值在 1.5nF 左右，四个电容值对称。

(3) 控制器端口与电路盒连接

A01-A04：扫描端口；A07：偏压；

HV1-HV2：马达控制端口（马达步进到后，成像前拔掉 HV1, HV2 两根线，减小马达的高压信号干扰）；

HV5：针尖-样品距离调节控制；

AI1：原子成像采集端口；

AI8：谱学采集端口；

+9V 放大电路供电电压；

A01	——	+X	HV1	——	M1	AI1	——	Preout 成像
A02	——	-X	HV2	——	M2	AI8	——	Preout (1分2) 谱
A03	——	+Y	HV5	——	Z	+9V	——	Power

A04 —— -Y

A07 —— Bias

(4) 待系统稳定到设定的温度后，设置马达步进参数，隧道结偏压以及 Setpoint 等参数，开始粗逼近以及扫描。

7.3 控制器软件操作

(1) 启动软件：打开 NI 软件，选择打开 STM.lvproj 项目文件，连接控制器，打开主程序 main.vi，如图 10 所示。程序界面如图 11 所示。

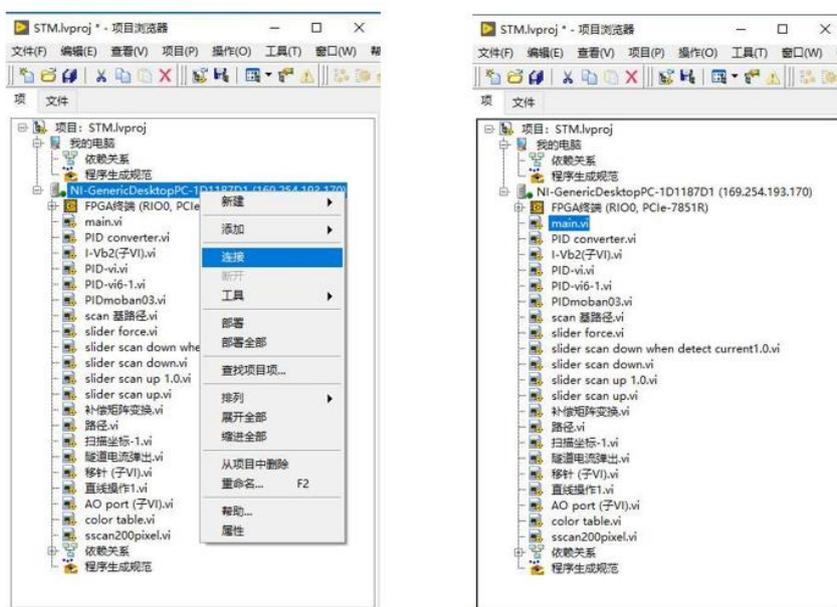


图 10 STM 测试软件打开步骤截图

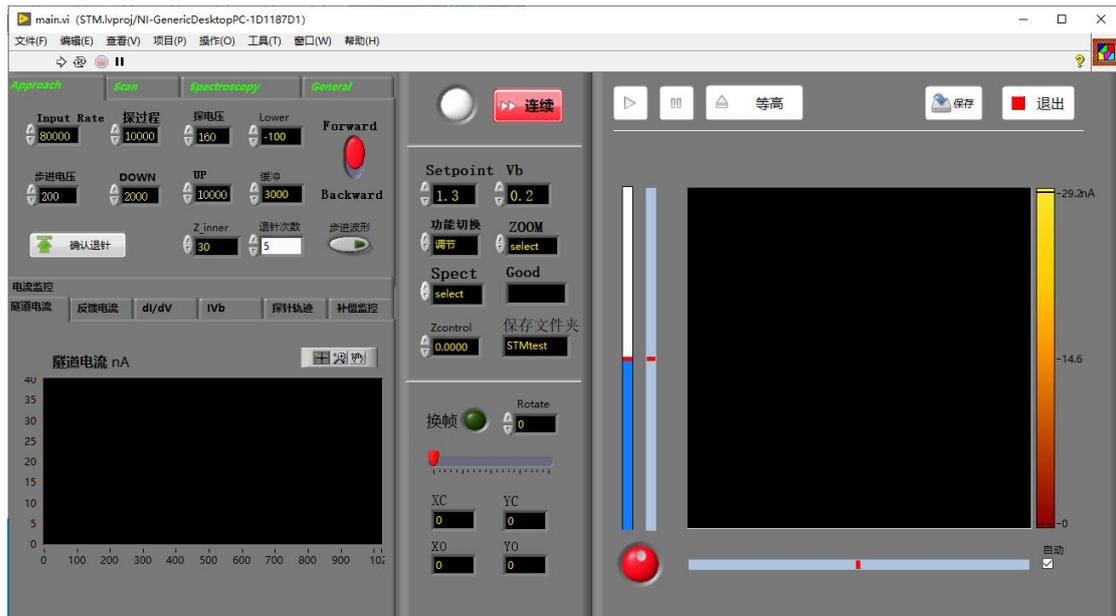


图 11 STM 测试软件界面图

(2) 测试软件界面参数介绍

Approach 面板：

Input Rate: 上位机（操作电脑）读取下位机（控制器）数据的频率，1 秒钟读取 80000 个数据点。

探过程: 在扫描管上加载 Zinner 电压的过程。10000 个计时单位。计时单位就是前文中的 Input Rate, $1/80000$ s。

探电压 (V): 加在压电马达上的电压，进行粗步进的探过程。压电马达在此电压的驱动下，推动滑块，带动扫描压电管及探针缓慢逼近样品。达到电压峰值（如 85V）后，如果针尖没有感应到隧道电流，则释放探电压，使得压电马达返回到原始位置，扫描压电管和探针留在当前位置。

Lower (V): 低温下用，将基线从 0 到相应位置（如图+160V）增加压电管上施加电压的范围。因为相同电压在低温下获得的压电管型变量要比常温下减少 8 倍，所以必须增加压电管上的电压，必须扩宽电压范围。

步进电压 (V): 加在压电马达上的电压脉冲，电压快速加载和释放的过

程，使得压电马达快速到达最大形变又快速回到零点。前端的滑块由于惯性，来不及缩回，保留在步进电压对应的形变位置上，实现探针的逼近。

DOWN 过程：是探过程中，加在压电马达上电压释放的过程。一般设为 2000 个计时单位。

Up 过程：是探过程中，在压电马达上缓慢加载电压的过程。一般设为 10000 个计时单位。

缓冲过程：是一个探过程结束后到下一个脉冲步进过程之间的稳定过程，一般设为 3000 个计时单位。

Z_{inner} 电压 (V)：加在扫描压电管上的电压，起保护探头的作用。步进时，加在扫描压电管上，使得压电管有一定的伸长量。如果步进过程，检测到隧道电流，则马上释放该电压，使探针缩回以保护探针，避免撞针。

Setpoint：探针逼近程度判断电压。当隧道电流值= $\text{setpoint} \times 5$ (nA) 时，停止探过程。输出电流为其数值的 5 倍，比如 1.3V，则对应输出电流为 6.5nA。设置范围 0.5-8 之间，根据干扰信号大小可适当增加赋值，避免误判断阻止马达步进。

Vb：偏置电压。Vb/2 为加载在针尖的真实偏压。偏压值可根据样品测试需要作出修改。

功能切换：可以在调节（进针）、退针、Zoom、谱等功能上进行切换。

ZOOM：select area、zoom in、initialize 等进行切换。

Spect：select dot、dI/dV、mapping、IV、initialize 等进行切换更改。

Good：文本输入框，保存数据的标记信息填写框。

Zcontrol：控制扫描压电管逼近针尖的距离。修改的同时，Scan 面板的 Z

电压会随之发生变化。

保存文件夹：选择保存文件夹。

Scan 面板：

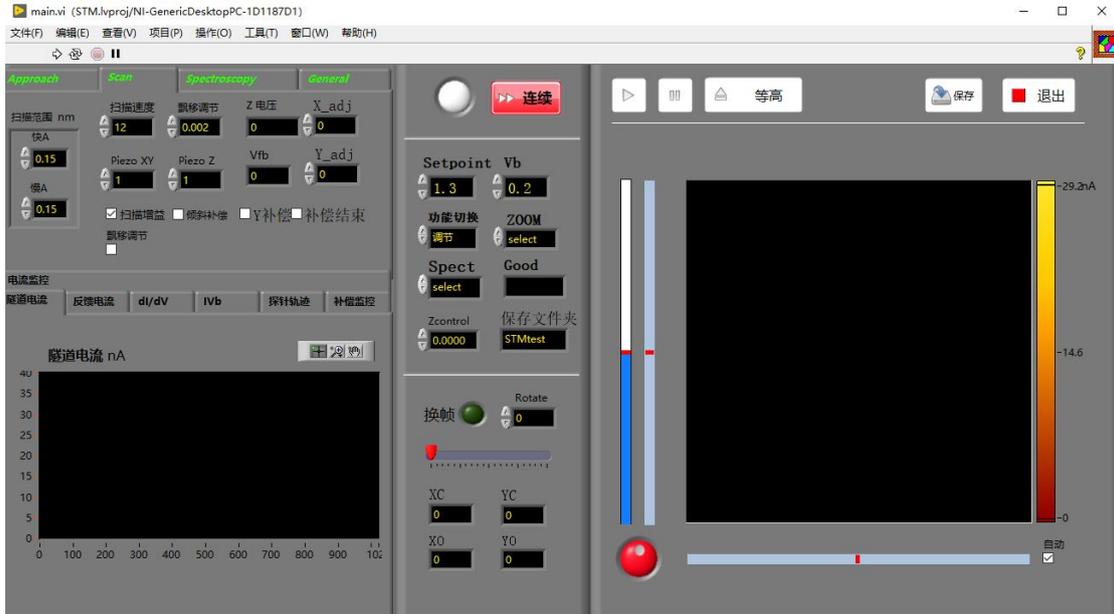


图 12 Scan 界面示意图

扫描速度：单位是行/秒。

漂移调节：恒高模式下调整。

Z 电压：加在扫描管上的电压，面板最大值为 10。控制器有 20 倍的放大，因而加在扫描管上的实际值是：面板数值 \times 20V。比如说面板数值为 3，实际加在扫描管上电压为 60 V。

扫描范围 (V)：快 A，慢 A。以电压来表示的扫描范围，对应的扫描范围，可以用石墨进行校准。快扫（快轴）指的是横向，慢扫（慢轴）指的是纵向。

X_adj：开启 X 方向倾斜调节后，在扫描管上加载一个偏置电压，使 X 方向采集信号水平。

Y_adj：开启 Y 方向倾斜调节后，在扫描管上加载一个偏置电压，使 Y 方向采集信号水平。

Piezo XY: XY 方向标定的压电系数。

Piezo Z: Z 方向标定的压电系数。

Vfb: PID 工作时，反馈到 Z 电极的电压参数。

扫描增益: 此版本中无实际意义参数。

倾斜补偿: 样品倾斜时，点击白框后开始 X 方向倾斜调节。

Y 补偿: 样品倾斜时，点击白框后开始 Y 方向倾斜调节。

补偿结束: 倾斜补偿结束后，点击白框设置补偿系数，加载在扫描管 X 和 Y 方向的偏置电压在整个扫图过程中会一直维持。

漂移调节: 扫描过程中，每扫描一行，调节一次 Z 方向高度，保证隧道电流维持在设定值。

General 面板:

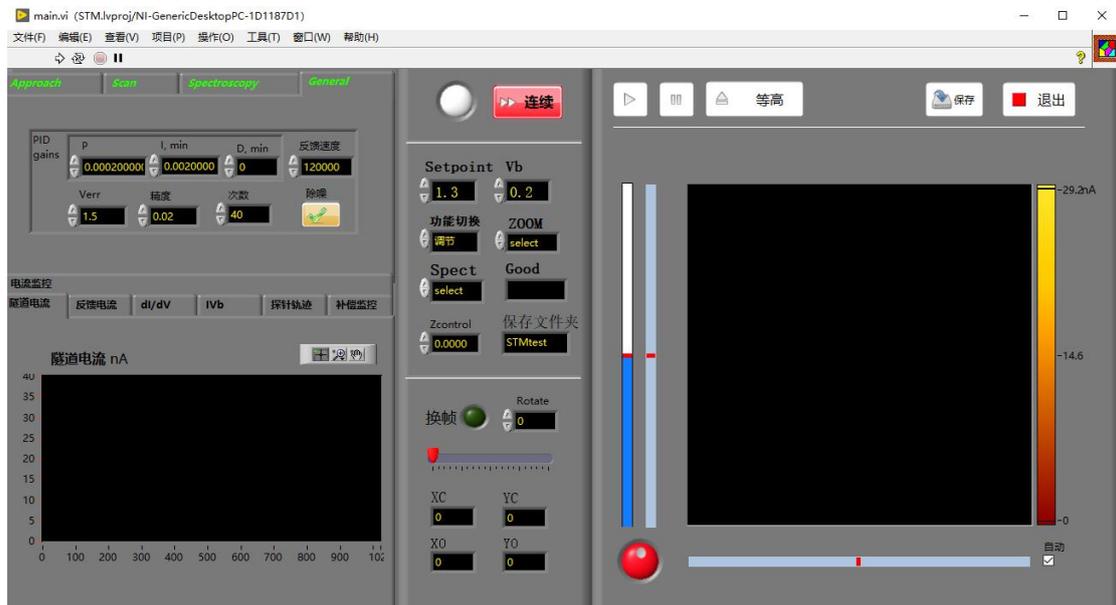


图 13 软件 General 界面示意图

P. I. D. : 即比例-积分-微分控制器，将隧道电流大小作为调节 Z 值大小的反馈量。P 即比例参数，I 为积分参数，D 为微分参数。

反馈速度: PID 控制器工作时反馈的速度，1 秒钟更新 12000 个数据点。

Verr: 隧道电流参考值。实际检测到电流值为 $Verr \times 5$ (nA)。

精度: PID 控制器调节隧道电流值的精度, 0.02 为偏差 Verr 值的 2%, 达到此值, 即完成 PID 调节。

次数: PID 控制器内部参数, 累计 40 次后完成 PID 调节。

Spectroscopy 面板:

Vb-Amp (V): IV 或 dI/dV 扫谱时, 施加在针尖-样品间的偏压。例如, 设置 0.02V, 谱线面板上横坐标显示 -0.01V 连续变化到 0.01V。(实际作用到隧道结的电压信号为从 -0.005V 连续变化到 0.005V, 原理和步进时偏压 Vb 的设置相同)

采集次数: 可以单次谱采集测试, 也可以连续多次谱采集测试。

测点数: 通过对感兴趣的成像区域进行划直线, 沿着该直线等间距设置的测量点数。

Start mapping: mapping 启动按钮。

幅值_调制: 同步叠加在偏压上的正弦波信号幅值。设置在 0.002V-0.01V 之间, 建议 0.003V。

调制频率: 上述正弦波信号的频率, 建议 200-500 之间的质数, 例如 371Hz。

r: 锁相放大器内部参数, 模值输出; 不需要用户设置。

phase: 锁相放大器内部参数, 相位输出; 不需要用户设置。

7.4 操作步骤

(1) 粗步进

如图 14 所示为粗步进的示意图。压电马达在探电压的驱动下, 推动滑块, 带动扫描压电管及探针缓慢逼近样品。达到电压峰值 (探电压如 85V) 后, 如

果针尖没有感应到隧道电流，则释放探电压，使得压电马达返回到原始位置。缓冲 3000 个计时单位之后，开始步进过程。即通过在压电马达上加步进电压脉冲，电压快速加载和释放的过程，使压电马达快速到达最大形变又快速回到零点。前端的滑块和扫描压电管由于惯性，来不及缩回，保留在步进电压对应的形变位置上，实现探针的逼近。经过缓冲时间后，重复进行探过程。当探的过程中，隧道电流触发 setpoint 判断，则加在扫描压电管上的 Z-inner 电压迅速撤回，同时停止继续加载探电压，完成粗步进。低温时，压电管对电压的响应减少~8 倍，所以需要增加驱动电压。又受到控制器可加电压 200V 的限制，测试时增加 lower 控件，提升电压零点位置，从而实现加载超过 200V 电压的能力。

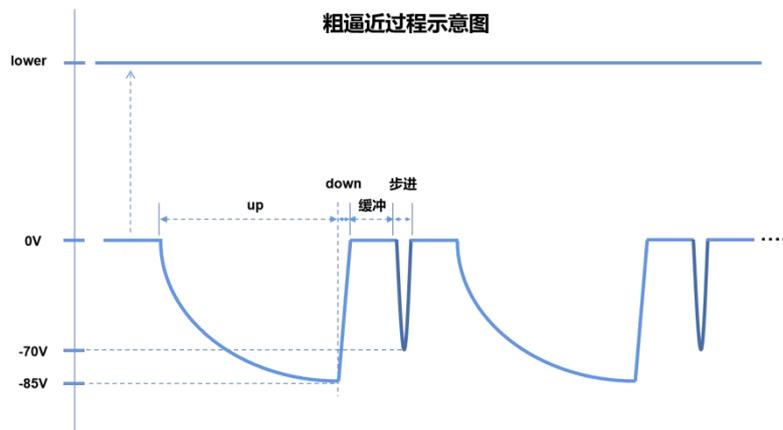


图 14 粗步进过程示意图

马达电机步进与退针参数：

表 2 进退针的参数设置

温度 (K)	方向	探电压 (V)	步进电压 (V)	Z inner (V)	Lower 电压 (V)	z 电压 (V)	退针步数
300	进针	85	70	60	\	0	\

	退针	0	70	0	\	~-5	200 0
2	进针	180	320	80-100	-160	0	\
	退针	0	320	0	-160	~-5	300 0

设置其他操作参数请咨询专业技术人员，否则可能造成 STM 镜体损毁。

如图 15 开始界面（截图仅作为操作示意，测试参数使用最新建议参数如表 2），室温 300K 马达步进电压设置如下：步进电压 80V，探电压 95V， Z_{inner} 60V，其他参数如下图默认值所示。setpoint 设置为 1.3V（前放电路输出电压值 1.3V，对应电流为 6.5nA）； $V_b/2$ 为加在针尖上的真实偏置电压。其中 setpoint 设置范围 1.0-8 之间，根据干扰信号大小可适增加赋值，避免误判断阻止马达步进；偏压值可根据样品测试需要作出修改。完成上述设置后，可开始运行程序，即执行马达推动针尖逼近样品。

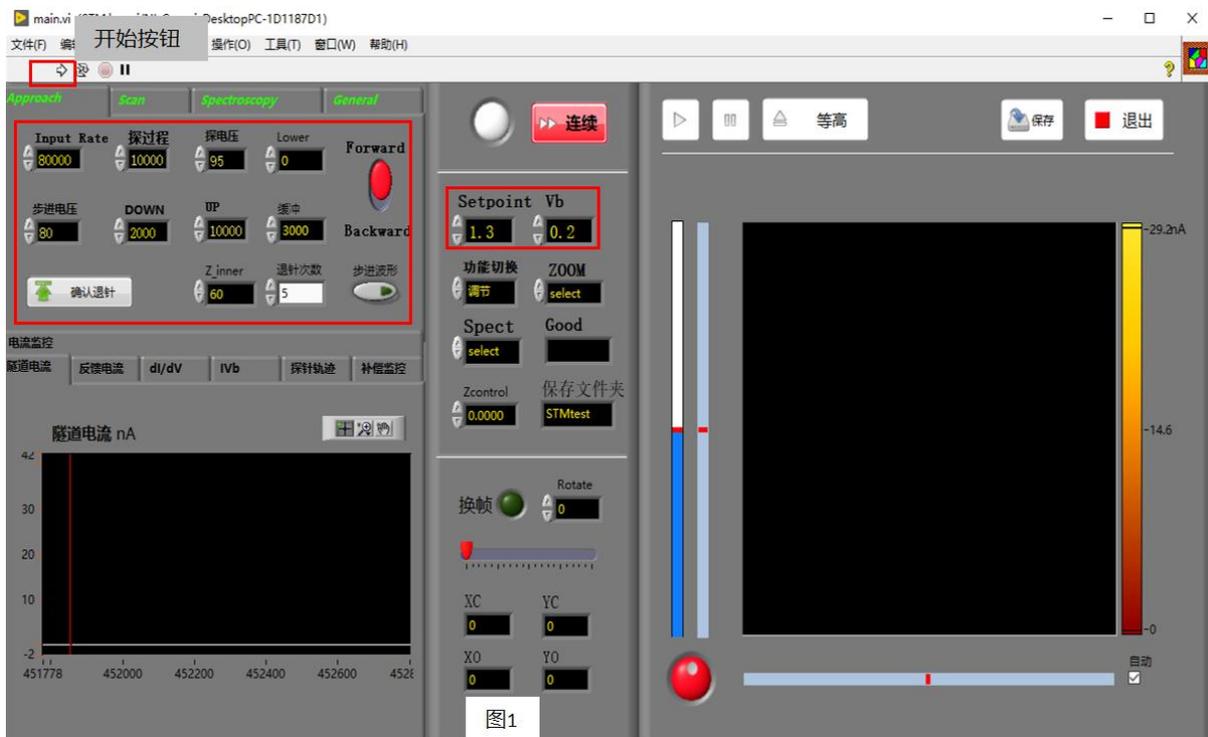


图 15 粗步进软件参数设置

(2) 细逼近

针尖逼近到可成像区域时，电流会指数增大触发 setpoint 判断，马达完成粗步进；下面进行细逼近过程，如图 16 所示，先在 General 面板下设置 Verr 电压值（0-8 之间，乘 5 即为设定的成像电流值），然后点击等高左下角热区，变为红色恒流模式；此模式下针尖受扫描头 Z 电压控制会自动精细的逼近样品（图 17 中 Scan 面板，Z 电压值从 0 连续变大，直到针尖样品间电流值达到 Verr X5 的电流设定值）；等待一段时间（1min 左右），电流稳定在设定值，待执行下一步操作。也可以选择手动调节 Zcontrol 值实现细逼近过程，Zcontrol 值可更改，Z 电压值为显示值不可更改。

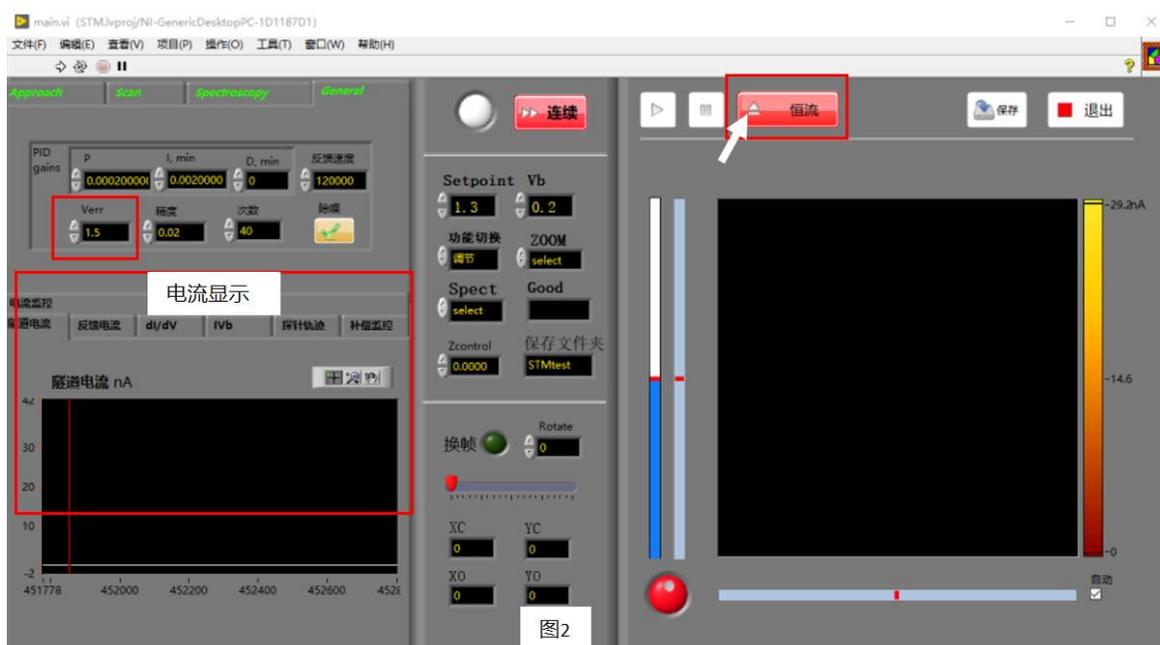


图 16 细逼近软件参数设置

(3) 扫描成像

电流到达设定值后，观察 Z 电压数值的稳定性（小数点第三位的数值变化认为是稳定情况，第二位算是近稳定，第一位开始的跳动是为不稳定，不能进行下一步的成像）。待电流稳定后，可设置扫描范围参数，扫描速度参数（室温时不要超过 12line/s，建议 8 左右调节），点击红色恒流切换回等高，最后

点击开始扫描按钮，扫完一幅图后停止，点击连续按钮变红后，可实现连续循环成像。如果图像质量不高，可以尝试从控制器端拔掉马达信号线 HV1、HV2，为了防止信号冲击，拔线前必须手动调节 Z 电压至-5 左右。



图 17 扫描参数设置

如需结束图像扫描，返回待扫描状态，需点灭连续按钮，等待当前图像扫描结束。在待扫描状态下可执行 (di\dv 谱测量, zoom 选区成像) 等其他功能，功能使用完成后，点击 initialize 回到操作前状态，如图 18 所示。

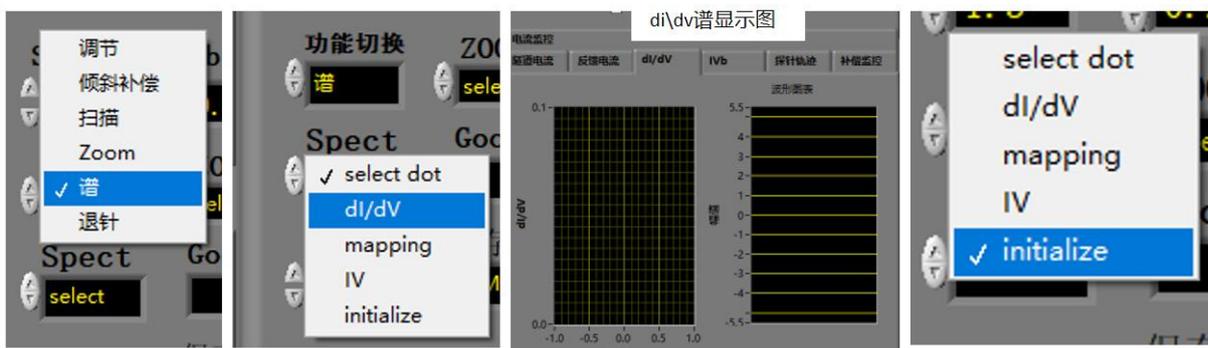


图 18 STS 谱采集参数设置



图 19 调节扫描区域设置

(4) 完成测试退针

结束测试或扫描后，先手动调节（减小）Z-control 值，使加在扫描器上的伸长电压 Z 电压的显示值调小到-7.5V 左右，然后在功能切换中选择退针，回到 approach 面板，点击“确认退针”按钮，开始退针程序。退针电压与步进时一样，不做修改。有时镜体长期不测试，常用驱动电压不能完成退针流程。为了避免此种情况，每次完成退针操作可以再次尝试细逼近过程：如果 z 电压到达 10 仍旧不能探到隧道电流，证明退针成功，手动调节 z 电压到 0（撤掉扫描管上近 200V 的高电压），然后可以安全退出程序；如退针不成功，可以适当加大驱动电压，再次执行退针流程，室温时驱动电压建议从 70V 增大到 85V。

(5) 存储数据

打开桌面 NI MAX 软件，找到连接上的 STM 控制器设备，找到目标文件夹，

拖到电脑桌面即可。如图 20

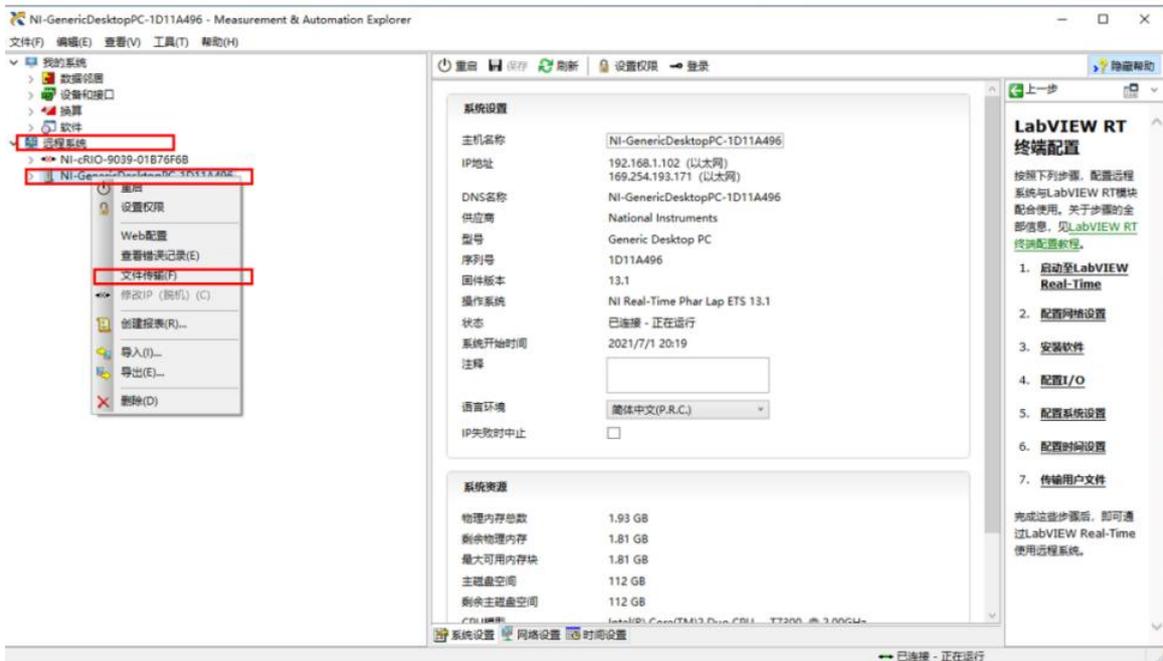


图 20 数据存储操作示意图

8. STM 测试杆维护要点

为了安全使用本系统，充分发挥其机能，请务必在理解的基础上予以遵守。否则，有可能引发系统故障，甚至使操作者遇到危险。

- (1) 请勿让本仪器淋雨或受潮，注意保持仪器清洁。
- (2) 请勿在本仪器的控制器上放置其他物品。
- (3) 进行各部件安装、更换、维修时，请务必事先切断电源。
- (4) 仪器工作时，不可移动或者碰触，包括信号线、波纹管等。
- (5) 除非接受了产品厂商的指示外，不可自行维修本仪器。
- (6) 除非接受了产品厂商的事先应允外，不可自行改造本仪器。
- (7) VTI 完全从低温回到室温 300K 后，需再等待至少 6 个小时再从样品腔中取出插杆，决不可在 VTI 显示温度达到 300k 时，立刻取出。
- (8) 插杆长期不用时，妥善保存，防止落灰。插杆波纹管锁住，防止变形、

漏气甚至断裂。

- (9) 新手进行换针换样操作之前，请仔细阅读产品相关文件，并接受系统的操作培训。

注意：

- (1) 仪器工作时不可触碰或移动；
- (2) 请勿在靠近会产生强大无线电波或射线的环境下工作；
- (3) 本仪器需要有良好接地连接；
- (4) 特定频率的电磁场可能会影响扫描的图像。