

Keithley

Series 2600B | Model 2602B

双通道 SourceMeter® SMU

源表使用指南

仪器概述 · 接线方法 · 双通道操作 · 精度规格 · TSP 编程 · 典型应用 · 故障排查

适用型号: 2601B / 2602B / 2604B | Series 2600B | Firmware Rev. 3.x 及以上
参考资料: 2600B Series System SourceMeter SMU Datasheet / User Manual / SPEC-2602B
文档生成日期: 2025 年 | 内部技术参考文档



第一章 仪器概述

1.1 产品定位与核心特点

Keithley Model 2602B 是 Tektronix 旗下 Series 2600B 系统级 SourceMeter SMU（源测量单元）系列中的双通道旗舰型号之一，代表第三代 SMU 架构。相比 2450 的单通道触摸屏设计，2602B 专为自动化产测（ATE）和多器件并行测试优化，具备两个完全独立、浮置隔离的测量通道（Channel A / Channel B），可同时独立控制。

2602B 集成以下功能于一体：

- **精密电源：**每通道独立四象限电压/电流源（source and sink）
- **精密电流表：**最小量程 100 pA，可检测微弱泄漏电流
- **6½ 位数字万用表：**电压、电流、电阻高精度测量
- **脉冲源：**最高 10 A 脉冲输出能力（每通道），可测 MOSFET Rds(on) 等低阻参数
- **TSP® 脚本处理器：**内置 Lua 脚本引擎，支持在仪器本地执行完整测试程序，无需持续 PC 通信
- **TSP-Link® 扩展总线：**可级联最多 32 台 SMU，实现无主机框架的 SMU-per-pin 并行测试

1.2 与 2450 的主要区别

在同一测试系统中，2602B 与 2450 常被一同使用，但定位有所不同：

- **显示界面：**2602B 仅配备 2 行字符型 VFD 显示屏（无触摸屏），主要面向程控操作；2450 具备 5 英寸彩色触摸屏，适合手动操作
- **通道数：**2602B 为双通道（smua / smub），2450 为单通道，双通道能力是 2602B 最核心的差异化特性
- **接口：**2602B 后面板为螺丝端子接口，2450 前面板为香蕉插孔、后面板为三同轴（Triax）
- **RS-232：**2602B 支持 RS-232，2450 不支持
- **电压范围：**2602B 最高 ±40 V DC；2450/2612B/2636B 可达 ±200 V，需要高压测试时请选 2612B/2636B
- **编程模式：**2602B 主要使用 TSP（Lua）编程，亦支持 SCPI（通过 2400 仿真模式）

1.3 Series 2600B 系列型号对比

参数	2601B	2602B	2612B	2636B
通道数	1 通道	2 通道	2 通道	2 通道
最大电压	±40 V DC	±40 V DC	±200 V DC	±200 V DC
最大电流	3 A DC / 10 A 脉冲	3 A DC / 10 A 脉冲	1.5 A DC / 10 A 脉冲	1.5 A DC / 10 A 脉冲
最小电流量程	100 pA	100 pA	100 fA	0.1 fA
最大功率/通道	30.3 W	30.3 W	30.3 W	30.3 W

参数	2601B	2602B	2612B	2636B
接口类型	螺丝端子	螺丝端子	螺丝端子	三同轴 (Triax)
TSP-Link	支持	支持	支持	支持

注意：2602B 加粗列为本文档重点说明型号。2636B 相比 2602B，最小电流分辨率提升约 1000 倍（0.1 fA vs 100 pA），适用于极低漏电流器件；2612B 提升了电压上限至 ±200 V，适合高压器件测试。



1.4 前面板布局

2602B 前面板相对简洁，以程控操作为主：

1. VFD 显示屏（2 行 × 20 字符）：显示当前输出值、测量值和状态信息
2. CHANNEL 按键：切换当前显示/操作的通道（A 或 B）
3. OUTPUT A / OUTPUT B 按键（带 LED 指示）：独立控制两通道输出开关
4. 方向键和数字小键盘：用于手动调整源值、浏览菜单
5. MENU 键：进入系统配置、通信、校准等高级设置
6. LOCAL 键：从远程控制模式返回本地面板操作

提示：前面板所有操作均可通过远程命令实现，2602B 在实际使用中大多数情况下直接通过程序控制，前面板主要用于状态确认和快速验证。

1.5 后面板布局

后面板承载所有信号接口和通信接口：

7. 螺丝端子（Channel A / Channel B）：每通道 4 个端子—FHIGH（Force HI）、SHIGH（Sense HI）、SLOW（Sense LO）、FLOW（Force LO）
8. GPIB（IEEE-488, 24 针）：传统总线，用于仪器自动化系统
9. USB 2.0 Device（Type-B）：PC 直连，USBTMC 协议
10. Ethernet（RJ-45）：LXI-C 认证，支持 Web 控制界面
11. RS-232（DB9）：串口通信，波特率最高 115200
12. TSP-Link（RJ-45 × 2）：仪器级联扩展，最多 32 台

13. Digital I/O (DB15) : 14 路数字触发/Handler 控制接口

14. Interlock: 安全联锁端子

提示： 螺丝端子需使用专用螺丝刀旋紧，推荐使用 Keithley 2600-ALG-2 低噪声三同轴转鳄鱼夹线缆，或 2600-KIT 螺丝端子连接套件。

第二章 接线方式

2.1 螺丝端子说明

2602B 每个通道后面板螺丝端子共有 4 个连接点（以通道 A 为例）：

- **FHIGH (Force HI)**：电流输出正极，输出电流/电压的主力线
- **SHIGH (Sense HI)**：电压感测正极，高阻抗采样，接近 DUT 正端
- **SLOW (Sense LO)**：电压感测负极，高阻抗采样，接近 DUT 负端
- **FLOW (Force LO)**：电流返回负极，与 FHIGH 构成电流回路

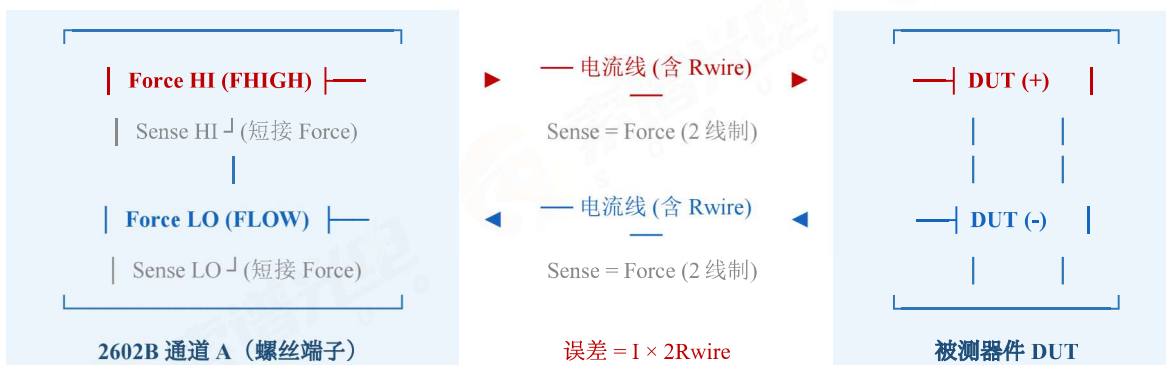
警告： 2602B 螺丝端子上方印有端子标签（FHIGH / SHIGH / SLOW / FLOW），请务必核对标签后再接线，接反可能导致仪器或 DUT 损坏。

2.2 2 线制接线 (Local Sense / 2-Wire)

Sense 线与 Force 线共用，仪器在端子处采集电压，导线电阻 R_{wire} 叠加进测量结果：

$$V_{measured} = V_{DUT} + I \times 2R_{wire}$$

接线示意图（2 线制，通道 A）：



操作步骤

15. 将 FHIGH 端子接 DUT 正端（使用螺丝端子连接线或鳄鱼夹）
16. 将 FLOW 端子接 DUT 负端
17. 用短路线将 SHIGH 与 FHIGH 短接，SLOW 与 FLOW 短接（或使用仪器内部短接设置）
18. TSP 命令设置：smua.measure.sense = smua.SENSE_LOCAL
19. SCPI 命令设置：:SYST:RSEN OFF（通道 A 为 SYST:RSEN，通道 B 为 SYST2:RSEN）

适用场景：

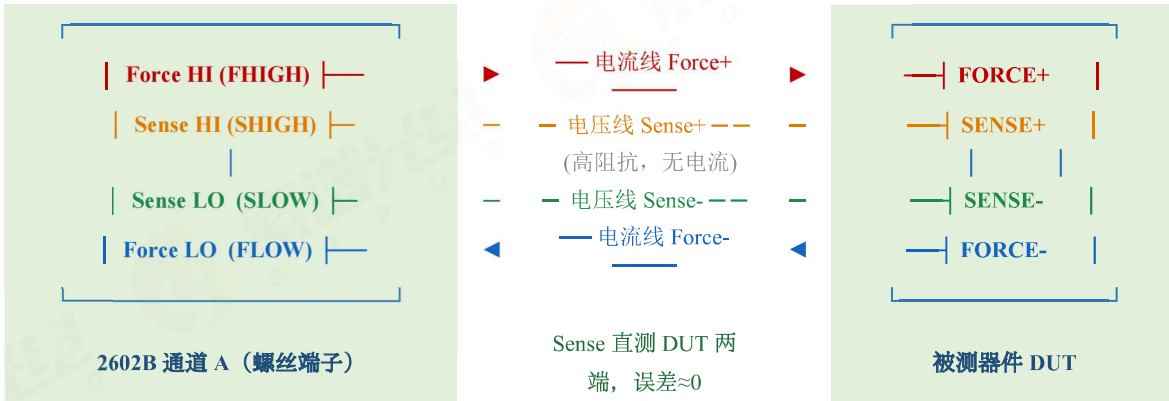
- DUT 阻值 $\geq 1 \text{ k}\Omega$ （线阻误差占比 $< 0.1\%$ ，可接受）
- 快速原理验证和器件筛查
- 高阻绝缘测试、漏电流测量（DUT 阻值远大于导线电阻）

2.3 4 线制接线 (Remote Sense / 4-Wire / Kelvin)

Force 线承载主电流，独立 Sense 线直接在 DUT 两端采样电压，消除导线电阻误差：

$$V_{\text{measured}} \approx V_{\text{DUT}} \quad (\text{误差} < 1 \mu\text{V}, \text{与 } R_{\text{wire}} \text{ 无关})$$

接线示意图（4 线制，通道 A）：



操作步骤

20. FHIGH / FLOW：接较粗导线，承载主电流路径
21. SHIGH / SLOW：接细线，连接点尽量靠近 DUT 本体（不要接在 Force 线末端）
22. TSP 命令：`smua.measure.sense = smua.SENSE_REMOTE`
23. SCPI 命令：`:SYST:RSEN ON`

提示： 推荐使用开尔文夹（Kelvin Clip）或四线探针，确保 Force 与 Sense 在 DUT 端物理接触点分离。接触点合并将导致残余接触电阻被计入测量结果。

适用场景：

- DUT 阻值 $< 100 \Omega$ （电感 DCR、MOSFET $R_{\text{ds(on)}}$ 、PCB 走线、金属薄膜）
- 大电流测试（ $> 50 \text{ mA}$ ）导线压降不可忽视的场合
- 需发挥 2602B 最高精度（0.02% 基本精度）的任何测试

2.4 选用规则（同 2450）

- $\text{DUT} < 100 \Omega \rightarrow$ 默认使用 4 线制
- $\text{DUT} > 1 \text{ k}\Omega \rightarrow$ 2 线制通常足够
- $\text{DUT } 100 \Omega \sim 1 \text{ k}\Omega \rightarrow$ 视电流大小和精度需求决定

第三章 双通道操作

3.1 通道命名规则

2602B 的两个通道在 TSP 中分别称为 smua (通道 A) 和 smub (通道 B)，对应面板标注 CH A / CH B。在 SCPI 模式下，通道 A 的命令使用标准 SOUR/SENS 前缀，通道 B 命令在末尾加 "2" (如 SOUR2、SENS2、OUTP2)。

注意： 两通道完全对等，规格参数相同，可独立编程，彼此完全电气隔离。理论上任意一个通道均可作为主测量通道使用。

3.2 双通道连接模式

连接模式	说明	典型应用
浮置独立模式	两通道 LO 端分别连接不同节点，通道间无共同地	三端器件 (BJT/FET) 同时偏置 B-E 与 C-E；四端网络测试
共地模式	两通道 LO 端短接，共用同一地参考点	两端口器件对比测量；差分电压测量；同时输出正负电源
串联模式	通道 A 的 LO 端接通道 B 的 HI 端，串联扩展电压	最大电压扩展至 $\pm 80\text{ V}$ (仅限特定测试，需注意绝缘)
并联模式	两通道并联，Force 端接 Force 端，Sense 端接 Sense	扩展最大输出电流至 6 A DC (需先确认通道匹配精度)

警告： 串联和并联模式需谨慎使用，并联前必须确认两通道输出值精确匹配 (避免通道间环流)。Keithley 官方手册 Section 3 提供了详细的并联校准步骤。

3.3 典型双通道接线：三端器件 (FET / BJT)

测量 MOSFET 或 BJT 的转移特性，需要双通道分别控制栅极/基极偏置和漏极/集电极偏置：



FET 转移特性 (I_d - V_{gs}) 测试步骤

24. 通道 A (smua)：电压源模式，扫描 V_{gs} (如 $-5\text{ V} \sim +5\text{ V}$ ，步长 100 mV)，限流 1 mA
25. 通道 B (smub)：电压源模式，输出固定 V_{ds} (如 1 V)，测量 I_d ，限流 100 mA

26. 两通道 FLOW 端短接（共地），连接 Source 极
27. smua Force HI 接 Gate，smub Force HI 接 Drain
28. 启动扫描：smua 触发扫描，smub 同步读取电流

注意：对于 P 沟道 MOSFET，注意 V_{gs} 的极性方向；对于 BJT，通道 A 控制 I_b ，通道 B 测量 I_c ，需相应调整电流/电压角色。

第四章 精度规格

4.1 电压规格（源 / 测，1 PLC，23°C±5°C，1 年校准）

量程	分辨率	源精度 (23°C±5°C)	测量精度 (23°C±5°C)	输入阻抗
100 nV	1 nV	0.02% + 375 μ V	0.015% + 350 μ V	> 1 G Ω
1 V	10 nV	0.02% + 1.5 mV	0.015% + 1 mV	> 1 G Ω
6 V	100 nV	0.02% + 5 mV	0.015% + 3.5 mV	> 1 G Ω
40 V	1 μ V	0.02% + 12 mV	0.015% + 10 mV	> 1 G Ω

注意：2602B 最高电压量程为 40 V (DC)，不支持 200 V 量程。如需高压测试 (> 40 V)，请使用 2612B 或 2636B。100 nV 量程（最小量程）对应最高分辨率 1 nV，适合精密低压测量。

4.2 电流规格（源 / 测，1 PLC，23°C±5°C，1 年校准）

量程	分辨率	源精度 (23°C±5°C)	测量精度 (23°C±5°C)	电压负担
100 pA	100 fA	0.05% + 100 pA	0.05% + 50 pA	< 1 mV
1 nA	1 fA	0.05% + 100 pA	0.05% + 500 fA	< 1 mV
10 nA	10 fA	0.05% + 200 pA	0.05% + 1.5 nA	< 1 mV
100 nA	100 fA	0.05% + 200 pA	0.05% + 15 nA	< 1 mV
1 μ A	1 pA	0.025% + 2 nA	0.025% + 200 pA	< 1 mV
10 μ A	10 pA	0.025% + 2 nA	0.025% + 2 nA	< 1 mV
100 μ A	100 pA	0.02% + 20 nA	0.02% + 20 nA	< 1 mV
1 mA	1 nA	0.02% + 200 nA	0.02% + 200 nA	< 1 mV
10 mA	10 nA	0.02% + 2 μ A	0.02% + 2 μ A	< 1 mV
100 mA	100 nA	0.02% + 20 μ A	0.02% + 20 μ A	< 1 mV
1 A	1 μ A	0.03% + 1.5 mA	0.03% + 1.5 mA	< 1 mV
3 A (DC)	10 μ A	0.05% + 3.5 mA	0.05% + 3.5 mA	< 1 mV

注意：2602B 电流最小量程为 100 pA（分辨率 100 fA），相比 2636B（0.1 fA）低约 1000 倍。如需 fA 级电流测量，请使用 2636B（配 Triax 接口）。3 A DC 量程仅在电压 \leq 6 V 时可用（受功率包络 30.3 W 限制）。

4.3 电流-电压功率包络

2602B 每通道最大输出功率为 30.3 W (DC)，仪器会自动限制在功率包络内，以下为各代表点：

- **± 40 V @ ± 0.75 A:** 30 W 操作点 (DC 模式)
- **± 6 V @ ± 3 A:** 18 W 操作点 (DC 模式，3 A 最大电流时限压 6 V)
- **± 40 V @ ± 10 A:** 脉冲模式 (占空比 < 10%，脉宽 < 1 ms)
- **± 6 V @ ± 10 A:** 脉冲模式最大电流操作点

警告：脉冲模式下最大电流可达 10 A，但必须遵守占空比 (< 10%) 和脉宽 (< 1 ms) 限制，否则内部热保护将触发，仪器自动降额。

4.4 精度规格说明

规格格式：±(% 读数 + 偏置)。例如 40 V 量程电压测量精度 0.015% + 10 mV，测量 20 V 时误差：

$$\leq 0.015\% \times 20 \text{ V} + 10 \text{ mV} = 3 \text{ mV} + 10 \text{ mV} = 13 \text{ mV} \approx 0.065\%$$

- 温度系数：偏离 23°C 每 1°C，误差额外增加精度规格的 0.15 倍
- 规格保证条件：输出 ON、Autozero（自动调零）开启、预热 ≥ 1 小时
- 两通道同时工作时，精度规格独立成立，互不影响

第五章 远程通信接口

5.1 接口总览

接口	位置	说明
GPIB (IEEE-488)	后面板 24 针 D 型	支持 IEEE 488.1/488.2, 适合大型自动化测试系统
USB 2.0 Device	后面板 Type-B	USBTMC 协议, 即插即用, 支持 PC 直连调试
Ethernet (LXI-C)	后面板 RJ-45	10/100Base-T, 支持 DHCP/静态 IP, 内置 Web 控制界面
RS-232	后面板 DB9	9600~115200 baud, 适合老旧系统集成 (2450 无此接口)
TSP-Link	后面板 RJ-45×2	仪器间高速扩展总线, 最多 32 台 SMU 联网同步测试
Digital I/O	后面板 DB15	14 路数字 I/O (2601B/2602B), 用于触发/Handler 控制

5.2 USB 连接 (推荐新用户首选)

29. 使用 USB Type-A 转 Type-B 数据线连接 PC 与 2602B 后面板 USB Device 口
30. 安装 NI-VISA (≥ 19.5) 或 Keithley I/O Layer (KI-IO) 驱动
31. VISA 资源地址格式: USB0::0x05E6::0x2602::xxxxxxx::INSTR
32. 可通过 NI-MAX、Python (PyVISA) 或 Test Script Builder (TSB) 直接发送命令

5.3 Ethernet / LXI 连接

33. 直连 PC 或接入局域网, 设置静态 IP 或使用 DHCP
34. 配置路径: 前面板 MENU → Communication → LAN
35. 浏览器访问 <http://<仪器 IP>> 打开内置 Web 控制界面
36. VISA 资源地址: TCPIP0::<IP>::inst0::INSTR

5.4 TSP-Link 多机联网

TSP-Link 是 2600B 系列的专有扩展总线 (100Base-T Ethernet 物理层), 将多台仪器连接为一个统一的、同步精度 < 500 ns 的测试系统:

37. 用标准网线 (直连线) 连接各仪器的 TSP-Link 端口 (菊花链拓扑)
38. 在 Master 仪器中设置: `tsplink.reset()` 检测拓扑, `node[N]` 访问从机通道
39. 最多支持 32 台仪器 (64 个通道)
40. 典型应用: 晶圆级探针测试、多器件并行 ATE 测试

注意: TSP-Link 网络中所有仪器的 TSP 版本需兼容; 混用不同型号 (2600B/2450/3700A) 时需注意 API 差异。

第六章 编程控制

6.1 编程语言选择

- **TSP (推荐)** : 2600B 系列原生 Lua 脚本语言, smua/smub 对象直接对应硬件通道, 执行效率最高, 支持本地脚本独立运行 (无需 PC 持续在线)
- **SCPI (2400 仿真模式)** : 通过 MENU → Communication → Command Set → 2400 切换, 可复用 2400 时代的 SCPI 测试代码, 适合迁移老旧系统

提示: SCPI 2400 仿真模式下, 每条命令只能操作一个通道 (默认通道 A), 双通道操作需在命令中显式指定 "2" 后缀。强烈建议新项目使用 TSP, 性能提升最高 80%。

6.2 SCPI 常用命令参考

SCPI 命令	功能说明
:SOUR:FUNC VOLT	设置通道 A 输出功能为电压源
:SOUR:VOLT:LEV 5	设置输出电压为 5 V
:SOUR:VOLT:RANG 40	设置电压量程为 40 V 档
:SENS:FUNC "CURR"	设置测量功能为电流
:SENS:CURR:RANG:AUTO ON	开启电流自动量程
:SENS:CURR:PROT 0.1	设置电流保护 (Compliance) 100 mA
:OUTP ON	开启通道 A 输出
:MEAS:CURR?	触发一次测量并读取电流值
:OUTP OFF	关闭通道 A 输出
:SENS:CURR:NPLC 1	设置积分时间为 1 PLC
SOUR2:FUNC CURR	设置通道 B 输出为电流源 (双通道操作)
SOUR2:CURR:LEV 0.01	通道 B 输出 10 mA
OUTP2 ON	开启通道 B 输出
*RST	复位仪器至出厂默认
*IDN?	查询仪器型号/序列号/固件版本

6.3 TSP 常用命令参考

TSP 命令	功能说明
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS	通道 A 设为直流电压源

TSP 命令	功能说明
<code>smua.source.levelv = 5</code>	通道 A 输出 5 V
<code>smua.source.rangev = 40</code>	电压量程 40 V
<code>smua.measure.func = smua.MEASURE_DCAMPS</code>	通道 A 测量直流电流
<code>smua.measure.autorangei = smua.AUTORANGE_ON</code>	开启电流自动量程
<code>smua.source.limiti = 0.1</code>	电流保护上限 100 mA
<code>smua.measure.nplc = 1</code>	积分时间 1 PLC
<code>smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO</code>	自动调零模式
<code>smua.output = smua.OUTPUT_ON</code>	开启通道 A 输出
<code>print(smua.measure.i())</code>	读取通道 A 电流值
<code>smua.output = smua.OUTPUT_OFF</code>	关闭通道 A 输出
<code>smub.source.func = smub.OUTPUT_DCAMPS</code>	通道 B 设为电流源
<code>smub.source.leveli = 0.01</code>	通道 B 输出 10 mA
<code>smub.source.limitv = 5</code>	通道 B 电压保护 5 V
<code>smub.output = smub.OUTPUT_ON</code>	开启通道 B 输出
<code>print(smub.measure.v())</code>	读取通道 B 电压值
<code>reset()</code>	复位仪器
<code>print(errorqueue.next())</code>	读取错误队列（调试用）

TSP 双通道 I-V 扫描示例

```

-- 初始化两个通道
reset()
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS
smua.source.rangev = 40
smua.source.limiti = 0.1 -- 100 mA 保护
smua.measure.nplc = 1
smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO

smub.source.func = smub.OUTPUT_DCAMPS
smub.source.rangei = 0.01 -- 10 mA 量程
smub.source.limitv = 5 -- 5 V 保护
smub.source.leveli = 0.001 -- 1 mA

-- 创建缓冲区
local bufA = smua.makebuffer(101)
local bufB = smub.makebuffer(101)

smua.output = smua.OUTPUT_ON
smub.output = smub.OUTPUT_ON

```

```
-- 通道 A 扫描 0 ~ 5 V, 通道 B 同步读电压
for i = 0, 100 do
    smua.source.levelv = i * 0.05 -- 0 ~ 5 V
    smua.measure.i(bufA)
    smub.measure.v(bufB)
end

smua.output = smua.OUTPUT_OFF
smub.output = smub.OUTPUT_OFF

-- 输出数据
printbuffer(1, 101, bufA.readings, bufB.readings)
```

6.4 Python 连接示例 (PyVISA + TSP)

```
import pyvisa

rm = pyvisa.ResourceManager()
smu = rm.open_resource('USB0::0x05E6::0x2602::xxxxxxxx::INSTR')
smu.timeout = 10000 # 10 s

# 发送 TSP 命令
smu.write('reset()')
smu.write('smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS')
smu.write('smua.source.levelv = 3.3')
smu.write('smua.source.limiti = 0.1')
smu.write('smua.output = smua.OUTPUT_ON')
smu.write('print(smua.measure.i())')
current = float(smu.read())
print(f'Channel A Current = {current*1e3:.3f} mA')
smu.write('smua.output = smua.OUTPUT_OFF')
smu.close()
```

6.5 TSP 脚本本地运行 (无 PC 模式)

2602B 支持将测试脚本存入仪器非易失性内存，断电后保留，重启后自动执行或手动触发：

41. 在 Test Script Builder (TSB) 中编写脚本，通过 USB/LAN 上传至仪器
42. 存储脚本：script.factory.name = "myScript"; script.factory.save()
43. 设置开机自动运行：autoexec = script.factory.load("myScript")
44. 手动触发：MENU → Script → Run

提示：本地脚本模式是 2602B 在无人值守产线测试中的核心优势。配合 Digital I/O 触发信号，可完全脱离 PC 独立运行高速测试。

第七章 典型测试应用

7.1 MOSFET I-V 特性全测（双通道）

利用双通道同时测量 MOSFET 的转移特性 (I_d - V_{gs}) 和输出特性 (I_d - V_{ds})。

转移特性 I_d - V_{gs} (固定 V_{ds} , 扫描 V_{gs})

45. CH-A (smua) : 电压源, 扫描 V_{gs} (-5 V ~ +10 V), 限流 10 mA
46. CH-B (smub) : 电压源, 固定 $V_{ds} = 2$ V, 测量 I_d
47. 两通道 FLOW 共地, 连接 Source 极
48. 典型输出: 阈值电压 V_{th} 、跨导 $g_m = \Delta I_d / \Delta V_{gs}$

输出特性 I_d - V_{ds} (固定 V_{gs} , 扫描 V_{ds} , 多条曲线)

49. 外层循环 (Python/TSP) : 设置 V_{gs} 步进 (如 0, 1, 2, 3, 4, 5 V)
50. 内层扫描: CH-B (smub) 扫描 V_{ds} (0 ~ 20 V), CH-A 固定 V_{gs}
51. 每个 V_{gs} 值获取一条 I_d - V_{ds} 曲线, 最终形成输出特性族

7.2 大电流器件脉冲测试

对于需要大电流 (3~10 A) 但 DUT 无法长时间承受的器件 (如 LED 阵列、大功率 MOSFET), 脉冲模式可在短时间内提供高电流而不使器件过热。

- TSP 设置: `smua.trigger.source.linearv(0, 5, 10)` — 构建脉冲扫描列表
- 脉冲宽度: `smua.source.delay = 0.001` (1 ms)
- 使用 Digital I/O 触发外部信号同步测量
- 推荐使用 4 线制连接, 消除大电流下导线电阻的误差

警告: 脉冲电流 10 A 时, 必须确保连接导线截面积 ≥ 2.5 mm², 并使用低感量连接 (越短越好), 避免导线电感在脉冲上升/下降沿产生电压尖峰。

7.3 BJT 电流增益 (h_{FE}) 测试

利用双通道分别控制基极电流 I_B 和测量集电极电流 I_C , 计算 $h_{FE} = I_C / I_B$:

52. CH-A (smua) : 电流源, 输出固定 I_B (如 10 μ A, 50 μ A, 100 μ A)
53. CH-B (smub) : 电压源, 输出固定 V_{CE} (如 5 V), 测量 I_C
54. 计算: $h_{FE} = I_C / I_B$ (由 TSP 脚本直接计算并输出)
55. 两通道 FLOW (发射极 E) 共地

7.4 太阳能电池 I-V 曲线

测量光照下太阳能电池的 I-V 特性, 提取 V_{oc} 、 I_{sc} 、 P_{max} 、FF 填充因子:

56. CH-A (smua) : 电压扫描模式, 从 V_{oc} (开路电压, 典型 0.5~0.7 V) 扫至 0 V

- 57.4 线制接法（开尔文），消除导线电阻对低压区精度的影响
- 58. 扫描点数：建议 100 点以上，步进 5 mV 左右
- 59. TSP 脚本实时计算功率 $P = V \times I$ ，找出 Pmax 点

7.5 Contact Check（接触检测）

2602B 配备专用接触检测功能（Contact Check），在正式测量前自动检测 4 线制连接中的接触电阻是否在可接受范围内，避免因接触不良导致测量误差：

- 60. TSP 命令：`smua.contact.enable = smua.ENABLE`
- 61. 设置阈值：`smua.contact.threshold = 50 -- 50 Ω 阈值`
- 62. 执行检测：`status = smua.contact.check()`
- 63. 返回 true 表示接触良好，false 表示接触电阻超过阈值

提示： Contact Check 功能是 2602B/2612B/2636B 的特有功能，2604B/2614B/2634B（台式版）不具备此功能。在高速生产测试中，此功能可有效发现探针磨损或接触不良问题，避免假性不良品。

7.6 并联扩展电流（双通道 6 A）

通过将两通道并联，可将最大连续电流扩展至 6 A DC：

- 64. 两通道电压值需精确校准一致（误差 < 1 mV），否则产生通道间环流
- 65. 并联后两通道的 Force HI 相连、Force LO 相连（4 线制时 Sense 也并联）
- 66. TSP 参考示例：`smua.source.levelv = smub.source.levelv = 3.0` — 确保一致
- 67. 监控两通道电流之和：`total_i = smua.measure.i() + smub.measure.i()`

警告： 官方建议使用配套的并联校准程序（见 2600B User Manual Section 4）确认通道匹配后再进行并联操作，否则存在仪器损坏风险。

第八章 故障排查

8.1 常见故障与解决方法

故障现象	可能原因	排查/解决方法
测量值不稳定/跳动	接线松动或接地不良；EMI 干扰	检查接线；增大 NPLC；启用数字滤波器；使用屏蔽电缆
立即进入 Compliance	保护值过小；DUT 短路或低阻	检查 Compliance 设置；确认 DUT 阻值；先以小电压/电流测试
双通道串扰	通道间未正确浮置或共用地	确认两通道 LO 端连接方式；检查 DUT 接地拓扑
GPIB 无法识别	地址冲突；驱动未安装	检查 GPIB 地址唯一性；安装 NI-VISA 或 Keithley I/O Layer
RS-232 无响应	波特率/校验位不匹配	确认双方波特率（默认 9600）、8N1 格式，使用直连线而非交叉线
TSP 脚本执行异常	语法错误；smua/smub 对象混用	用 Test Script Builder 调试； print(errorqueue.next()) 查错误
扫描数据丢失	缓冲区溢出；通信超时	增大缓冲区（最大 250,000 点）；用 TSP 本地存储后批量读取
大电流下精度变差	DUT 发热导致阻值变化；接触电阻	用 4 线制接法；检查夹具接触电阻；控制占空比或使用脉冲模式
输出无法达到最大电流	超出功率包络限制	核对 V-I 功率包络；3 A DC 仅在 ± 6 V 以内可用，高压下电流受限

8.2 错误代码查询

当发生错误时，面板显示 ERR 指示。查询方法：

68. 前面板：MENU → Error Queue，查看最近错误信息
69. TSP 命令：print(errorqueue.next()) — 逐条读取错误队列
70. SCPI 命令：:SYST:ERR? 或 :STAT:QUES:EVEN?

常见错误代码：

- -113：SCPI 命令语法错误（检查拼写，注意 smua/smub 大小写）
- -222：参数超出范围（量程或电平设置超过仪器极限）
- +800 系列：Compliance / Overload 事件（输出被限流保护）
- +801：接触检测失败（Contact Check 发现接触电阻过高）

8.3 校准与维护

- 建议每 12 个月进行一次工厂校准，确保精度规格有效
- 自校准 (smua.cal.run()) 可在两次送校之间补偿温度漂移，建议充分预热后执行
- 定期清洁后面板螺丝端子，防止氧化增加接触电阻（可用无水乙醇轻擦）
- 存储环境：-25°C ~ 65°C，避免潮湿、强磁场和腐蚀性气体

第九章 使用注意事项与安全规范

9.1 安全注意事项

警告： 2602B 最大输出电压 ± 40 V，虽低于 42 V（危险电压标准），但大电流（3 A DC / 10 A 脉冲）仍存在严重触电和灼伤风险。必须在断电状态下连接 DUT，严禁带电操作接线。

- 最大输出电压： ± 40 V（每通道，DC）
- 最大输出电流： ± 3 A DC / ± 10 A 脉冲（每通道）
- 最大功率：30.3 W/通道（DC）；脉冲功率可更高，但受占空比限制
- 两通道相互浮置隔离（最大浮置电压 ± 250 V 距机壳地），跨通道操作时注意绝缘等级
- 连接高感性负载（如电感/变压器）时，断开输出瞬间可能产生高压尖峰，建议并联续流二极管或 TVS 保护

9.2 测量最佳实践

- **先设保护、后开输出：** 每次测试前确认 `limiti`（电流保护）或 `limitv`（电压保护）设置合理
- **从小电平开始：** 不熟悉 DUT 时，从小电压/电流逐步增大，避免器件过压损坏
- **使用 4 线制：** 低阻（ $< 100 \Omega$ ）和大电流（ > 50 mA）场景下默认使用 4 线制
- **脉冲模式：** 对热敏器件或需要大电流但功率受限的场景，优先使用脉冲模式
- **TSP 本地脚本：** 高速产线测试应将脚本存入仪器本地内存，避免通信延迟影响节拍时间
- **数据及时导出：** 测试完成后立即通过 `printbuffer` 读取数据并保存，避免下次 `reset()` 丢失

9.3 2602B 与 2450 的选用建议

在设计测试系统时，以下场景推荐选用 2602B：

- 需要同时对同一 DUT 施加两路独立偏置（如三端/四端器件特性测试）
- 高速自动化产测，需要 TSP 本地脚本和 TSP-Link 多机同步
- 测试电压不超过 ± 40 V，但需要较大电流（最大 3 A DC）
- 系统中已有 RS-232 通信基础设施（2450 不支持 RS-232）

以下场景建议选用其他型号：

- 需要触摸屏手动操作和直观图形界面 → 选 2450
- 测试电压需要 > 40 V（高压击穿测试） → 选 2612B 或 2636B
- 需要 fA 级极低漏电流测量（光电器件、高阻材料） → 选 2636B

附录 参考资料与资源

A. 官方技术文档

- Series 2600B System SourceMeter SMU Instruments User Manual (部件号 2600B-901-01)
- SPEC-2600B (官方完整精度规格书, 可在 tek.com/keithley 下载)
- 2600B Series Datasheet (1KW-XXXX, Tektronix 官网)
- 2600B Series TSP/TSP-Link Programming Reference

B. 软件资源

- NI-VISA: <https://www.ni.com/visa> (USB/GPIB/Ethernet 驱动)
- Test Script Builder (TSB): 随仪器 CD 或官网下载, TSP 脚本开发/调试 IDE
- PyVISA: `pip install pyvisa` (Python VISA 封装库)
- ACS Basic Edition: 可选购, 适合封装器件特性化的高级测试软件
- KickStart: tek.com, 适合非编程用户快速 I-V 测试 (需 2600B 固件 ≥ 3.0)

C. 精度规格补充说明

- 所有精度规格在 1 PLC 积分时间、Autozero (自动调零) 开启、输出 ON 状态下成立
- 温度系数: 偏离 23°C 每 1°C, 误差额外增加基本精度的 0.15 倍
- 规格校准周期: 1 年; 超期后精度不作保证, 请送厂校准
- 脉冲模式精度与 DC 模式有所不同, 具体参见官方规格书脉冲部分

本文档综合整理自 Keithley/Tektronix 官方手册及规格书, 仅供技术参考。最终规格以 tek.com 官方发布文档为准。