

Keithley

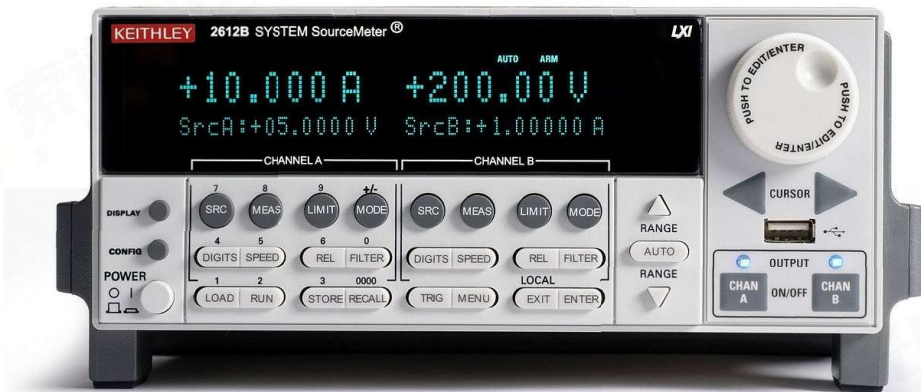
Series 2600B | Model 2612B

双通道高压 SourceMeter® SMU

源表使用指南

仪器概述 · 高压安全 · 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: 2611B / 2612B / 2614B | Series 2600B | Firmware Rev. 3.x 及以上
参考资料: 2600B Series System SourceMeter SMU Datasheet / User Manual / SPEC-2612B
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 2612B 是 Series 2600B 系统级 SourceMeter® SMU 系列中的双通道高压型号，在继承 2602B 全部双通道测试能力的基础上，将最大电压量程从 ± 40 V 提升至 ± 200 V，是半导体器件高压击穿（BV_{dss}/BV_{ces}）、功率 MOSFET/IGBT 特性、薄膜电容耐压、绝缘材料耐压等需要高精度同时高电压测试场景的首选仪器。

2612B 的核心能力：

- **高压源测一体：**最高 ± 200 V DC，每通道 10 A 脉冲，30.3 W 最大功率；同时保持业界领先的 100 fA 电流分辨率
- **双通道完全独立：**两通道（Channel A / Channel B）彼此浮置隔离，最大浮置电压 ± 250 V（对机壳地），可独立编程、独立输出、独立测量
- **TSP® 本地执行：**内置 Lua 脚本处理器，在仪器内部运行完整测试程序，彻底消除 PC 通信延迟，产测速率提升最高 80%
- **TSP-Link® 扩展：**无主机框架的多仪器同步总线，最多级联 32 台 SMU，适合多引脚并行高压器件测试
- **速度：**最高约 20,000 次读数/秒（TSP 本地模式，0.01 NPLC）

1.2 与 2602B 的主要区别

- **电压范围：**2612B 最高 ± 200 V；2602B 仅 ± 40 V——这是两者最关键的差异
- **最大 DC 电流：**2612B 为 1.5 A DC（受功率包络限制，200 V 时约 150 mA）；2602B 为 3 A DC
- **最小电流量程：**2612B 最小 100 fA（比 2602B 的 100 pA 低三个数量级）
- **应用场景：**2612B 更适合高压击穿、功率器件特性、薄膜/绝缘耐压；2602B 更适合低压大电流（如大电流 LED、电机驱动器）

注意：接口方面，2612B 与 2602B 相同，均为后面板螺丝端子；2636B 使用三同轴（Triax）接口，更适合 fA 以下极低漏电流场合。如需亚 fA 测量，应选 2636B。

1.3 Series 2600B 系列型号对比

参数	2601B	2602B	2612B★	2636B
通道数	1	2	2	2
最大电压	± 40 V	± 40 V	± 200 V	± 200 V
最大电流(DC)	3 A	3 A	1.5 A	1.5 A
脉冲电流	10 A	10 A	10 A	10 A

参数	2601B	2602B	2612B★	2636B
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
接口类型	螺丝端子	螺丝端子	螺丝端子	三同轴 Triax
200V 高压	✗	✗	✓	✓
TSP-Link	✓	✓	✓	✓

注意：★ 2612B 为本文档重点型号。表中「100 fA」最小电流量程是 2612B 相比 2602B 最重要的提升，可检测高压器件在高电压下的极微弱漏电流。

1.4 前面板布局

2612B 前面板布局与 2602B 完全一致（2 行 VFD 显示屏），以程控操作为主：

1. VFD 显示屏（2 行 × 20 字符）：显示当前通道输出值、测量值和状态
2. CHANNEL 键：切换当前显示/操作通道（A 或 B）
3. OUTPUT A / OUTPUT B 键（带 LED）：独立控制两通道输出开关
4. 方向键 + 数字键盘：手动调整源值、浏览菜单
5. MENU 键：系统配置、通信、校准等高级设置
6. LOCAL 键：从远程控制返回本地面板操作

警告：2612B 输出电压可达 200 V，远超触电危险阈值（42 V）。面板操作时，务必确认 DUT 已正确连接、保护措施到位后再按 OUTPUT 键。

1.5 后面板布局

后面板承载所有信号与通信接口：

7. 螺丝端子（Channel A / Channel B）：每通道 4 端子——FHIGH、SHIGH、SLOW、FLOW
8. GPIB（IEEE-488）：传统自动化总线
9. USB 2.0 Device（Type-B）：PC 直连，USBTMC
10. Ethernet（RJ-45, LXI-C）：远程控制与 Web 界面
11. RS-232（DB9）：串口通信
12. TSP-Link（RJ-45 × 2）：多仪器级联扩展
13. Digital I/O（DB15）：14 路触发/Handler 控制
14. Interlock 端子：安全连锁，高压输出时必须接入有效 Interlock 信号

警告：2612B 输出 ≥ 42 V 时，Interlock 端子必须连接有效闭合回路，否则仪器将拒绝输出。这是重要的安全强制措施，请勿旁路。

第二章 高压安全操作规范

2612B 最高输出 $\pm 200\text{ V}$ ，属于危险电压范围，必须在以下安全规范框架内操作：

2.1 高压危险等级与安全措施

电压范围	危险等级	安全措施
< 42 V	低压区	常规操作，无需特殊防护措施
42 V ~ 120 V	中压区	佩戴绝缘手套；严禁带电操作；确认 Interlock 接入
120 V ~ 200 V	高压区	必须使用绝缘防护设备；测试台需设安全围栏或锁控柜；操作前断开所有 DUT 后再开输出
> 100 V 瞬态	放电残压	DUT 断开后请等待 ≥ 1 分钟，再用绝缘工具放电；电容性 DUT 尤其危险

2.2 Interlock 安全联锁

2612B 后面板 Interlock 端子为双针接口。仪器出厂时 Interlock 处于断开状态——若未接入有效短路信号，超过 42 V 的输出将被硬件强制禁止。

15. 实验室环境：用 Interlock 短路跳线（随机附件）短接两端，即可允许高压输出
16. 安全柜/测试治具：将 Interlock 回路接入安全门开关，门开则断路，自动切断高压输出
17. 检验方法：smua.source.levelv = 50；smua.output = smua.OUTPUT_ON，若无响应则检查 Interlock 连接

警告：在无人值守的自动化测试中，Interlock 回路应连接防护盖板的微动开关，确保操作人员接触 DUT 时高压自动切断。这是一项不可省略的安全设计要求。

2.3 DUT 放电规程

高压测试结束后，容性 DUT（电容器、功率器件结电容、绝缘薄膜等）可能残留危险电荷：

18. 关闭 OUTPUT 后，等待至少 1 分钟再接触 DUT 端子
19. 使用绝缘放电棒（10 k Ω 以上限流电阻串联）对 DUT 进行人工放电确认
20. 用电压表确认残压 < 1 V 后再徒手操作

警告：100 nF 电容充电至 200 V 后，储能 $E = \frac{1}{2}CV^2 = 2\text{ mJ}$ 。虽然能量不大，但仍可产生引起灼伤的火花。大容量 DUT（如 μF 级）能量更高，务必放电后再操作。

第三章 接线方式

3.1 螺丝端子说明

2612B 每通道后面板螺丝端子（以通道 A 为例）：

- **FHIGH (Force HI)**：电流输出正极，承载主力电流，200 V 高压从此端子输出
- **SHIGH (Sense HI)**：电压感测正极，高阻抗采样端，靠近 DUT 正端
- **SLOW (Sense LO)**：电压感测负极，高阻抗采样端，靠近 DUT 负端
- **FLOW (Force LO)**：电流返回负极，构成电流回路

警告： 高压操作时，务必使用额定 ≥ 300 V 的绝缘测试线连接螺丝端子，不得使用普通香蕉线。Keithley 推荐使用 2600-ALG-2 型高压低噪声专用连接线。

3.2 2 线制接线 (Local Sense / 2-Wire)

Sense 与 Force 共用导线，导线电阻 R_{wire} 直接叠加进测量结果：

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

接线示意图（2 线制，通道 A）：



操作步骤

21. FHIGH 接 DUT 正端，FLOW 接 DUT 负端（使用额定 ≥ 300 V 的测试线）
22. SHIGH 与 FHIGH 短接，SLOW 与 FLOW 短接
23. TSP 命令：`smua.measure.sense = smua.SENSE_LOCAL`
24. SCPI 命令：`:SYST:RSEN OFF`

适用场景：

- DUT 阻值 ≥ 1 k Ω （高压下漏电流 < 200 μ A，线阻误差可忽略）
- 快速耐压筛查（通过/不通过，不需要精确测量 I 值）
- 200 V 高压击穿测试（关注击穿点，对精度要求不高）

3.3 4 线制接线 (Remote Sense / 4-Wire)

Force 线走电流，独立 Sense 线在 DUT 两端精确采样电压，消除导线电阻误差：

$$V_{\text{measured}} \approx V_{\text{DUT}} \quad (\text{与 } R_{\text{wire}} \text{ 无关})$$

接线示意图（4 线制，通道 A）：



操作步骤

- 25. FHIGH / FLOW：接大截面高压绝缘导线，承载主电流
- 26. SHIGH / SLOW：接细线，连接点尽量靠近 DUT 本体（非导线末端）
- 27. TSP 命令：smua.measure.sense = smua.SENSE_REMOTE
- 28. SCPI 命令：:SYST:RSEN ON

提示： 高压 4 线制接线时，Sense 线与 Force 线需保持物理分离，避免高压 Force 线与低阻抗 Sense 线之间产生感应耦合电流影响精度。

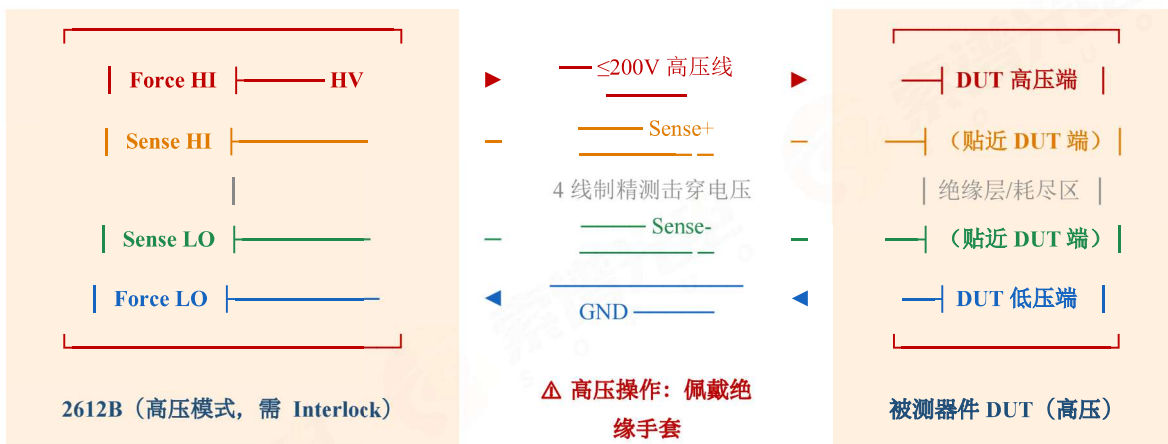
适用场景：

- 精密 I-V 特性测量（高压下 DUT 阻值 < 1 MΩ，需精确测量微弱电流）
- 高压下的低阻测量（如功率器件 Rds(on) 在高 Vds 下的特性）
- 需发挥 2612B 最高精度（0.02% 电压）的高压精密测试

3.4 高压击穿测试专用接线

击穿电压测试（BV 测试）通常采用渐进阶梯扫描法，需配合 4 线制精确监测漏电流：

高压击穿测试接线示意图（4 线制）：



29. Force HI 接 DUT 高压端，Force LO 接 DUT 低压端（通常为 GND/衬底）
30. Sense 线贴近 DUT 端夹紧，确保精确采样 DUT 两端电压
31. Compliance 电流设置为 DUT 规格中允许的最大漏电流（如 $1\ \mu\text{A} \sim 1\ \text{mA}$ ）
32. 使用阶梯扫描：smua.source.levelv 从 0 V 步进至最大测试电压，步进 1~5 V
33. 监测 Compliance 触发：若电流突增超过 Compliance 值，记录当前电压为击穿电压

警告： 击穿测试中，Compliance 电流必须严格限制。硬击穿发生后，如果 Compliance 设置过大，可能在极短时间内烧毁 DUT 内部结构，使击穿判断失效。建议 Compliance 设置为器件手册规定的最大漏电流的 2~5 倍。

第四章 双通道操作

4.1 通道命名与独立性

2612B 两个通道在 TSP 中分别称为 smua (通道 A) 和 smub (通道 B)。两通道规格完全相同, 均支持 ± 200 V / 10 A 脉冲 / 30.3 W, 彼此完全浮置隔离, 最大通道间浮置电压 ± 250 V (相对机壳地)。

注意: 两通道同时工作时, 精度规格独立成立, 互不影响。但在高压大功率情况下, 两通道的热效应可能影响仪器总功率预算, 请参阅 User Manual 中的降额曲线。

4.2 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 端各自独立, 无共地	三端/四端器件同时高压偏置; 双端口网络测试
共地模式	两通道 LO 端短接共地	差分高压源; 正负高压同时输出 (± 200 V); 对比测量
串联扩展	CH-A LO 接 CH-B HI, 扩展至 ± 400 V (理论)	仅限严格绝缘环境, 需专业评估, 通常不推荐

警告: 串联扩展模式 (理论 ± 400 V) 在实际操作中存在较大安全风险, 且超出两通道间最大浮置电压规格 (± 250 V), Keithley 官方不推荐此配置, 如有此需求请联系 Tektronix 应用工程师评估。

4.3 典型双通道应用: 功率 MOSFET 全特性测试

利用双通道同时测量功率 MOSFET 的高压输出特性 (I_d - V_{ds}) 和栅极驱动特性 (V_{gs} 控制):

34. CH-A (smua): 电压源, 控制 V_{gs} (如 $0 \sim 15$ V, 步进 1 V)
35. CH-B (smub): 电压源, 扫描 V_{ds} ($0 \sim 200$ V, 步进 5 V), 限流 1 A, 测量 I_d
36. 两通道 FLOW (Source 极) 共地短接
37. 外层循环设置 V_{gs} , 内层扫描 V_{ds} , 形成 I_d - V_{ds} 输出特性族 (16 条曲线)

注意: V_{ds} 扫描至高压区时, MOSFET 在线性区和饱和区之间转换, I_d 可能急剧变化。注意 Compliance 设置不能过大, 以免器件过热损坏。建议每次脉冲测试后让器件冷却。

第五章 精度规格

5.1 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
200 V	10 μ V	0.02% + 50 mV	0.02% + 50 mV	> 1 G Ω

注意：200 V 量程为 2612B 的最高电压档，源精度 0.02% + 50 mV，测量精度相同。在 200 V 全满量程下，绝对误差约 ± 90 mV。如需更高精度高压测量，应在低量程（如 40 V）内操作。

5.2 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 fA	100 aF	0.1% + 100 fA	0.1% + 50 fA	< 1 mV
1 nA	1 fA	0.1% + 500 fA	0.1% + 250 fA	< 1 mV
10 nA	10 fA	0.05% + 1.5 nA	0.05% + 500 fA	< 1 mV
100 nA	100 fA	0.05% + 1.5 nA	0.05% + 5 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% + 900 μ A	0.03% + 900 μ A	< 1 mV
1.5 A (DC)	10 μ A	0.05% + 2.5 mA	0.05% + 2.5 mA	< 1 mV

注意：最小电流量程 100 fA（分辨率 100 aF）是 2612B 相比 2602B（最小 100 pA）最重要的性能提升。在高压状态下测量极微弱漏电流（如 MOSFET 亚阈值区），此量程至关重要。注意：1.5 A DC 量程在高电压时受功率包络（30.3 W）限制，200 V 时最大电流约 150 mA。

5.3 功率包络

2612B 每通道最大 DC 功率 30.3 W，各操作区间的代表点：

- **± 200 V @ ± 150 mA：**30 W 操作点（高压最大电流区，200 V \times 150 mA = 30 W）
- **± 40 V @ ± 0.75 A：**30 W 操作点（中压最大电流）

- $\pm 6\text{ V} @ \pm 1.5\text{ A}$: 9 W 操作点 (低压最大电流)
- $\pm 200\text{ V} @ \pm 10\text{ A}$: 脉冲模式 (占空比 < 10%, 脉宽 < 1 ms)

警告: 与 2602B (3 A DC) 不同, 2612B 在高压 (> 40 V) 区间电流受功率包络限制更严格。在 100 V 时最大 DC 电流约 300 mA, 在 200 V 时约 150 mA。务必在编程前核对功率包络图 (见 User Manual Section 2)。

5.4 精度规格说明

规格格式: $\pm (\% \text{ 读数} + \text{偏置})$ 。以 200 V 量程测量 150 V 为例:

$$\text{误差} \leq 0.02\% \times 150\text{ V} + 50\text{ mV} = 30\text{ mV} + 50\text{ mV} = 80\text{ mV} \approx 0.053\%$$

- 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
- 保证条件: 输出 ON、Autozero 开启、预热 ≥ 1 小时
- 高压量程 (200 V) 精度相对较低, 若需精确低压测量请切换至 40 V 或更小量程

第六章 远程通信接口

6.1 接口总览

接口	位置	说明
GPIB (IEEE-488)	后面板 24 针	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, PC 直连调试首选
Ethernet (LXI-C)	后面板 RJ-45	10/100Base-T, DHCP/静态 IP, 内置 Web 控制界面
RS-232	后面板 DB9	9600~115200 baud, 8N1; 兼容旧系统集成
TSP-Link	后面板 RJ-45×2	仪器间扩展总线, 最多 32 台 SMU 同步
Digital I/O	后面板 DB15	14 路数字 I/O, 用于触发/Handler 控制

6.2 USB 连接 (推荐新用户首选)

38. 使用 USB Type-A 转 Type-B 数据线连接 PC 与 2612B 后面板 USB Device 口
39. 安装 NI-VISA (≥ 19.5) 或 Keithley I/O Layer (KI-IO)
40. VISA 资源地址格式: USB0::0x05E6::0x2612::xxxxxxxx::INSTR
41. 推荐工具: NI-MAX 验证连接、Test Script Builder (TSB) 编写 TSP 脚本

6.3 Ethernet / LXI 连接

42. 配置静态 IP (推荐): MENU → Communication → LAN → IP Address
43. 浏览器访问 <http://<仪器 IP>> 查看仪器状态与发送命令
44. VISA 地址: TCPIP0::::inst0::INSTR

6.4 TSP-Link 高压多机同步

在高压多引脚测试中 (如功率模块多 IGBT 同时测试), TSP-Link 可将多台 2612B 同步至 < 500 ns 精度:

45. 菊花链连接各仪器 TSP-Link 端口, 在主机上执行 `tsplink.reset()` 识别拓扑
46. `node[N].smua` 访问第 N 台从机的通道 A
47. 所有仪器使用 trigger 同步机制, 实现高压源的精确同步输出

注意: 多台 2612B 组成高压测试阵列时, 应特别注意各机壳接地与浮置隔离规划, 避免地回路引起测量误差或安全隐患。

第七章 编程控制

7.1 编程语言选择

- **TSP (推荐)** : smua/smub 直接对应硬件通道, smua.source.rangev = 200 即可选 200 V 量程, 语义直观
- **SCPI (2400 仿真模式)** : 切换方法: MENU → Communication → Command Set → 2400;
用 :SOUR:VOLT:RANG 200 选高压量程

提示: 使用 SCPI 2400 模式时, 注意 2400 的最高电压规格为 200 V, 命令完全兼容, 但通道 B 的命令需在末尾加 "2" 后缀 (如 :SOUR2:VOLT:RANG 200)。

7.2 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:RANG 200	设置电压量程为 200 V 档 (2612B 专有高压档)
:SOUR:VOLT:LEV 100	设置输出电压为 100 V
: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 0.01	设置电流保护 (Compliance) 10 mA
:SENS:CURR:NPLC 1	设置积分时间 1 PLC
:OUTP ON	开启通道 A 输出
:MEAS:CURR?	读取一次电流测量值
:OUTP OFF	关闭通道 A 输出
SOUR2:FUNC VOLT	通道 B 电压源模式
SOUR2:VOLT:LEV 50	通道 B 输出 50 V
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

7.3 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.rangev = 200</code>	电压量程 200 V (2612B 特有)
<code>smua.source.levelv = 100</code>	输出 100 V
<code>smua.source.limiti = 0.01</code>	电流保护上限 10 mA
<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.measure.nplc = 1</code>	积分时间 1 PLC
<code>smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO</code>	自动调零
<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_DCVOLTS</code>	通道 B 设为电压源
<code>smub.source.levelv = 50</code>	通道 B 输出 50 V
<code>smub.source.limiti = 0.005</code>	通道 B 电流保护 5 mA
<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
<code>reset()</code>	复位仪器
<code>print(errorqueue.next())</code>	读取错误队列

TSP 高压击穿扫描示例 (单通道 BV 测试)

```

-- 高压击穿测试：渐进阶梯扫描
reset()
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS
smua.source.rangev = 200    -- 200 V 量程
smua.source.limiti = 0.001  -- 1 mA 严格限流 (保护 DUT)
smua.measure.func = smua.MEASURE_DCAMPS
smua.measure.nplc = 1
smua.measure.rangei = 100e-9  -- 100 nA 量程, 精测漏电流
smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO

-- 注意: 输出高压前确认 Interlock 已接入
smua.output = smua.OUTPUT_ON

local bv_detected = false
for v = 0, 200, 5 do    -- 0 ~ 200 V, 每步 5 V
    smua.source.levelv = v
    delay(0.1)         -- 等待稳定 100 ms
    local i = smua.measure.i()
    print(v, i)
    -- 检测 Compliance 触发 (击穿判断)

```

```

if smua.source.compliance then
    print('BV detected at:', v, 'V')
    bv_detected = true
    break
end
end
end

smua.output = smua.OUTPUT_OFF
if not bv_detected then
    print('No breakdown within 200V range')
end
end

```

TSP 双通道功率 MOSFET 输出特性族

```

-- 功率 MOSFET Id-Vds 输出特性族 (双通道)
reset()
-- 通道 A: 控制 Vgs
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS
smua.source.rangev = 40
smua.source.limiti = 0.01      -- Gate 限流 10 mA
-- 通道 B: 扫描 Vds, 测 Id
smub.source.func = smub.OUTPUT_DCVOLTS
smub.source.rangev = 200
smub.source.limiti = 1.0      -- Drain 限流 1 A
smub.measure.nplc = 0.1

local Vgs_list = {0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15}
local buf = smub.makebuffer(201)

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

for _, vgs in ipairs(Vgs_list) do
    smua.source.levelv = vgs
    delay(0.05)
    buf.clear()
    for vds = 0, 200, 1 do
        smub.source.levelv = vds
        smub.measure.i(buf)
    end
    print('Vgs =', vgs, 'V :')
    printbuffer(1, 201, buf.readings)
end

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

```

7.4 Python 连接示例 (PyVISA + TSP)

```

import pyvisa, time

rm = pyvisa.ResourceManager()
smu = rm.open_resource('USB0::0x05E6::0x2612::xxxxxxxx::INSTR')
smu.timeout = 30000 # 30 s (高压测试需更长超时)

# 初始化
smu.write('reset()')
smu.write('smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS')
smu.write('smua.source.rangev = 200')
smu.write('smua.source.limiti = 0.001') # 1 mA 保护
smu.write('smua.measure.nplc = 1')

# 高压测试 (确认 Interlock 已接入)
smu.write('smua.output = smua.OUTPUT_ON')

for v in range(0, 205, 5): # 0~200V, step 5V

```

```
smu.write(f'smua.source.levelv = {v}')
time.sleep(0.1)
smu.write('print(smua.measure.i())')
i_val = float(smu.read())
print(f'V={v:>5}V I={i_val*1e9:>10.3f} nA')

smu.write('smua.output = smua.OUTPUT_OFF')
smu.close()
```

第八章 典型测试应用

8.1 击穿电压 (BV) 测试

BV 测试是功率器件最基础的高压参数，适用于 MOSFET BV_{dss} 、二极管 BVR、BJT BV_{ceo} 等：

BV_{dss} 测试 (MOSFET 漏源击穿电压)

48. 接线：2612B 通道 A 的 Force HI 接 Drain，Force LO 接 Source，Gate 短接 Source
49. Compliance：设置为器件规格允许的最大漏电流（典型值 250 μA ）
50. 扫描：电压从 0 V 步进至额定 BV_{dss} ，每步 5 V，延时 100 ms
51. 判断：电流超过 Compliance 时的电压即为 BV_{dss}
52. 标准参考：JEDEC JESD24-6A（漏电流到达 250 μA 时的电压）

注意： BV_{dss} 测试中，若器件已发生软击穿（电流缓慢上升），而非硬击穿（电流突然跳变），需要根据 I-V 曲线斜率和实际漏电流判断，不能仅靠 Compliance 触发来判断。

8.2 绝缘耐压测试 (Hi-pot / Withstanding Voltage)

用于评估绝缘层、PCB 绝缘、光耦隔离等绝缘介质的耐压能力：

53. 通道 A (smua)：直流高压源，从低压缓慢升至测试电压（如 1500 V DC——注意：2612B 最高仅 200 V，更高电压需专用 Hi-pot 测试仪）
54. 2612B 可覆盖 200 V DC 以内的绝缘测试，如光耦 PC817（额定绝缘 5000 V AC，但低压 DC 漏电流测试可用 200 V）
55. 测试方法：施加 200 V，保持 60 秒，测量稳态漏电流 $< 10 \mu\text{A}$ （通常为合格标准）

警告： 超过 200 V 的绝缘耐压测试请勿使用 2612B，需使用专用耐压测试仪 (Hi-pot Tester)。2612B 超量程操作可能损坏仪器。

8.3 功率 MOSFET $R_{ds(on)}$ 测试

$R_{ds(on)}$ 是功率 MOSFET 导通电阻，通常为 $\text{m}\Omega$ 量级，需要 4 线制大电流精密测量：

56. CH-A (smua)：电压源，提供 V_{gs} （如 10 V ~ 15 V，确保 MOSFET 完全导通）
57. CH-B (smub)：电流源，输出 1 A（或器件规格要求的测试电流），4 线制接法测 V_{ds}
58. 计算： $R_{ds(on)} = V_{ds} / I_d$ ，典型范围 1 $\text{m}\Omega$ ~ 数 Ω
59. 推荐 NPLC = 1 或更高，确保充分滤波

注意： 大电流 ($\geq 500 \text{ mA}$) 测试中，DUT 自热效应会使 $R_{ds(on)}$ 随时间增大（温度系数为正）。建议使用短脉冲 ($< 1 \text{ ms}$) 测试以消除自热，或在测量前等待热稳定。

8.4 高压薄膜电容 I-V 特性

用于测量薄膜电容、陶瓷电容的漏电流与电压的关系（绝缘电阻谱）：

60. 接线：4 线制，smua Force HI 接电容正极，Force LO 接负极

61. 充电协议：从 0 V 阶梯升至 200 V，每步 10 V，保持 30 秒等待极化稳定
62. 读取稳态电流（30 秒末的测量值），计算绝缘电阻 $R = V / I$
63. 典型结果：优质薄膜电容在 200 V 下绝缘电阻 $> 10 \text{ G}\Omega$ （漏电流 $< 20 \text{ nA}$ ）

注意： 电容性 DUT 充电过程中，初始充电电流会很大。设置 Compliance 时需允许峰值充电电流通过，否则会在上升过程中触发保护，无法达到目标电压。建议设 Compliance = 10 mA，观察充电过程。

8.5 IGBT 饱和电压 $V_{ce(sat)}$ 测试

$V_{ce(sat)}$ 是 IGBT 在饱和区的集射极电压，反映通态损耗，通常在高电流脉冲条件下测试：

64. CH-A (smua)：电流源，提供 Gate 驱动电流（或电压源提供 V_{ge} ，如 15 V）
65. CH-B (smub)：脉冲电流源模式，输出测试电流（如 10 A 脉冲），测量 V_{ce}
66. 脉冲宽度： $< 1 \text{ ms}$ ，占空比 $< 10\%$ ，避免器件过热
67. 计算： $V_{ce(sat)} = \text{smub.measure.v}()$ （4 线制测量）
68. 典型结果：硅 IGBT $V_{ce(sat)}$ 约 1.5 ~ 3.5 V，SiC MOSFET 约 1 ~ 2.5 V

警告： IGBT 脉冲测试中，10 A 脉冲电流要求导线截面积 $\geq 2.5 \text{ mm}^2$ ，连接尽量短。Keithley 推荐使用专用高电流测试夹具，以降低导线电感引起的电压尖峰。

8.6 Contact Check（接触检测）

2612B 配备 Contact Check 功能，在正式高压测试前验证 4 线制连接的接触电阻：

69. 启用：`smua.contact.enable = smua.ENABLE`
70. 设置阈值：`smua.contact.threshold = 50 -- 50 Ω` 阈值
71. 执行检测：`status = smua.contact.check()` -- true 表示接触良好
72. 高压测试前接触不良，可能导致电弧放电，损坏仪器和 DUT，此功能尤为重要

警告： 高压器件测试中，Contact Check 发现接触电阻过高（如探针磨损、氧化层）时，必须停止测试并处理接触问题。带接触缺陷进行高压测试可能引发电弧，造成人身伤害。

第九章 故障排查

9.1 常见故障与解决方法

故障现象	可能原因	排查/解决方法
高压输出噪声大	电源线干扰；接线过长	$NPLC \geq 1$ ；使用屏蔽线缆；减短导线长度；检查接地质量
立即进入 Compliance	保护值设置过小；DUT 短路	检查 <code>limiti</code> 设置值；先用小电压测量 DUT 阻值确认
击穿测试电流突增	DUT 已发生软击穿或硬击穿	降低电压步进；Compliance 设置小于破坏性电流值
双通道串扰	通道间浮置电位差超过规格	检查两通道 LO 端连接；浮置电位差不得超过 ± 250 V
高压量程精度差	未充分预热；环境温度变化大	预热 ≥ 1 小时；避免风扇直吹仪器；NPLC 调至 10
RS-232 无响应	波特率/格式不匹配	确认 9600 baud、8N1、直连线（非交叉线）
TSP 脚本执行中断	<code>smua/smub</code> 命令混用或对象错误	检查通道对象名称； <code>print(errorqueue.next())</code> 查错误
扫描数据不完整	Compliance 被触发未记录	扫描后检查状态位；适当调高 Compliance 值
仪器无法输出 200 V	量程未设为 200 V 档	<code>smua.source.rangev = 200</code> 或 <code>:SOUR:VOLT:RANG 200</code>

9.2 错误代码查询

查询方法：

73. 前面板：MENU → Error Queue

74. TSP 命令：`print(errorqueue.next())`

75. SCPI 命令：`:SYST:ERR?`

常见错误：

- -113：SCPI 命令语法错误
- -222：参数超出范围（如电压量程未切换至 200 V 就输出 100 V）
- +800：Compliance/Overload 事件
- +802：Interlock 开路（未接 Interlock，超过 42 V 被拒绝）
- +801：Contact Check 失败

9.3 校准与维护

- 建议每 12 个月送厂校准一次，确保 200 V 高压量程精度有效

- 高压量程（200 V）校准要求更高，普通第三方校准机构需确认有 200 V 高压校准能力
- 定期检查螺丝端子是否氧化或松动（高压下接触不良危险性更高）
- 存储环境：-25°C ~ 65°C，避免潮湿和腐蚀性气体
- 高压 Triax 连接线需定期检查绝缘层，发现裂纹或磨损立即更换

第十章 使用注意事项与安全规范

10.1 安全注意事项总结

警告： 2612B 最高输出 ± 200 V，属于危险电压（高于 42 V 即为危险级）。所有高压操作必须：① 接入 Interlock；② 佩戴绝缘手套；③ 严禁带电接线；④ 高压测试结束后等待 DUT 放电后再触碰。

- 最大输出电压： ± 200 V DC / 1 kV 峰值脉冲（脉冲模式，短时）
- 最大输出电流： ± 1.5 A DC / ± 10 A 脉冲（每通道）
- 最大功率：30.3 W/通道（DC）
- 两通道最大浮置电压： ± 250 V（相对机壳地）
- 高压导线额定电压：必须 ≥ 300 V（推荐使用 Keithley 原厂专用线缆）
- 容性 DUT ($> 1 \mu\text{F}$) 测试后，需等待 ≥ 1 分钟并用限流电阻放电后再操作

10.2 测量最佳实践

- **先设 Compliance, 后开输出：** 每次测试前设置合理的 limit（电流保护），特别是高压下防止 DUT 过流损坏
- **从低压逐步升高：** 不熟悉 DUT 特性时，电压从 0 V 开始步进，观察电流变化后再继续升压
- **4 线制优先：** 精密高压测量和任何低阻测量 ($< 1 \text{ k}\Omega$) 均应使用 4 线制
- **预热 ≥ 1 小时：** 高压量程精度规格在预热后才能保证，精密高压测量尤其关键
- **TSP 本地脚本：** 高速高压产线测试应将脚本存入仪器本地，避免 PC 通信延迟
- **导线质量：** 高压测试使用额定 ≥ 300 V 的屏蔽低噪声测试线，不可使用普通跳线

10.3 型号选用建议

在以下场景推荐选用 2612B：

- 需要 ± 200 V 高压源与精密电流测量（100 fA 量程）的组合——这是 2612B 的核心差异化价值
- 功率 MOSFET / IGBT / SiC 器件的全面 I-V 特性表征（包括高压击穿 BV 测试）
- 薄膜电容、PCB 绝缘、光耦隔离等 200 V 以内的绝缘电阻测试
- 需要双通道同时高压偏置的三端/四端器件测试

以下场景建议选用其他型号：

- 电压 ≤ 40 V 但需要 3 A DC 大电流 → 选 2602B
- 需要极低漏电流（fA ~ aF 级），且电压 ≤ 200 V → 选 2636B（Triax 接口）
- 需要触摸屏交互操作，单通道 → 选 2450
- 电压 > 200 V（如 SiC 器件 $\text{BV}_{\text{dss}} > 600$ V） → 需要高压 SMU 或专用测试仪

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 精度规格书 (tek.com/keithley 下载)
- 2600B Series Datasheet (Tektronix 官网)
- 2600B Series TSP/TSP-Link Programming Reference Manual
- Application Note: High Voltage Breakdown Testing with Series 2600B (Keithley AN-2602)

B. 软件资源

- NI-VISA: <https://www.ni.com/visa>
- Test Script Builder (TSB): TSP 脚本开发 IDE, 随仪器 CD 或官网下载
- PyVISA: `pip install pyvisa`
- ACS Basic Edition: 可选购, 高压器件特性化测试软件

C. 精度规格补充

- 所有精度规格在 1 PLC、Autozero 开启、输出 ON、预热 ≥ 1 小时条件下成立
- 温度系数: 每偏离 23°C 1°C , 误差额外增加基本精度的 0.15 倍
- 200 V 量程的精度相对较低, 精密测量请选择合适的低电压量程
- 规格校准周期: 1 年; 超期后精度不作保证

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。