

Keithley

Model 2450 SourceMeter® SMU

源表使用指南

仪器认识 · 接线方法 · 前面板操作 · 精度规格 · 编程控制 · 典型应用 · 故障排查

适用版本: 2450 | Firmware Rev. 1.7.x 及以上

参考资料: SPEC-2450 Rev.C / 2450 User Manual / Tektronix Official Datasheet

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 产品定位与核心功能

Keithley Model 2450 是 Tektronix 旗下第四代 SourceMeter SMU (Source Measure Unit, 源测量单元) 仪器, 集精密电源、电子负载、6½ 位数字万用表、脉冲源于一体, 工作于四象限模式 (既可输出能量, 也可吸收能量), 是半导体器件、纳米材料、有机电子、光伏/LED、功率器件等领域 I-V 特性表征的行业标准工具。

相比上一代 Model 2400, 2450 的主要提升包括:

- **触摸屏操作:** 5 英寸全彩电容触摸屏, 图形化菜单, 操作效率提升 50%
- **更低量程:** 新增 20 mV 电压量程和 10 nA 电流量程 (需后面板 Triax 接口), 覆盖更小信号
- **更大缓冲区:** 读数缓冲区扩展至 250,000 点 (2400 仅 5,000 点)
- **更快速度:** 典型读取速率 > 3,000 次/秒 (TSP 本地模式)
- **双编程模式:** 同时支持 SCPI (含 2400 兼容模式) 和 TSP® 脚本编程

1.2 主要技术规格摘要

- **最大输出功率:** 20 W (电压 × 电流, 四象限均等)
- **电压范围:** ±20 mV ~ ±200 V (源/测均支持, 20 mV 档需 Triax)
- **电流范围:** ±10 nA ~ ±1 A (10 nA/100 nA 档需 Triax)
- **基本测量精度:** 电压 0.012%, 电流 0.025% (典型最优量程)
- **分辨率:** 6½ 位 (约 2,000,000 计数)
- **接口:** GPIB、USB 2.0 (Device/Host)、Ethernet (LXI-C)、TSP-Link、Digital I/O
- **前面板:** 香蕉插孔 (Force HI/LO + Sense HI/LO); 后面板: 三同轴 (Triax)

1.3 前面板布局

从左至右, 2450 前面板主要区域如下:

1. 5 英寸电容触摸屏: 显示测量值、扫描曲线、菜单设置; 支持手势滑动与多点触控
2. OUTPUT 按键 (带 LED 指示): 单按切换输出开/关; LED 亮起表示输出已激活
3. 旋转编码旋钮 (Navigation Knob): 用于数值调整和菜单导航, 按下可确认

4. MENU 键：进入系统设置、校准、接口配置等高级菜单
5. HELP 键：上下文敏感帮助，随时查阅当前设置含义
6. FRONT / REAR 切换键：选择使用前面板香蕉插孔还是后面板三同轴接口
7. USB Host 端口（Type-A）：插入 U 盘存储/读取数据与脚本
8. 香蕉插孔（4 个）：Force HI / Force LO / Sense HI / Sense LO

警告： 前面板香蕉插孔最高耐压 ± 200 V，最大电流 1 A；切勿超量程使用以免损坏仪器。

1.4 后面板布局

后面板提供低噪声高精度接口和远程通信接口：

9. 三同轴接口（Triax，4 个）：对应 Force HI / Force LO / Sense HI / Sense LO，用于低漏电流（pA/fA 级）或 4 线制精密测试
10. GPIB（24-pin IEEE-488）：用于传统仪器自动化测试系统
11. USB 2.0 Device（Type-B）：PC 直连，USBTMC 协议
12. Ethernet（RJ-45）：远程控制及 Web 界面访问
13. TSP-Link（RJ-45 \times 2）：仪器级联扩展，最多 32 台同步
14. Digital I/O（9-pin D-sub）：6 路触发/handler 控制
15. Interlock 端子：安全联锁，防止意外输出

提示： 后面板 Triax 接口是实现最优精度（尤其是小电流）的推荐接入点，因其具备内置屏蔽层和 Guard 端，可大幅降低漏电流和噪声。

第二章 接线方式

2.1 2 线制接线 (Local Sense / 2-Wire)

2 线制只用到 Force HI / Force LO 两个孔，Sense 孔在前面板模式下出厂已内部短接，不需要额外接线。

Force 线和 Sense 线共用同一对导线。仪器在自身端子处采集电压，导线电阻 R_{wire} 会直接叠加进测量结果，产生系统误差：

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

接线示意图 (2 线制)：



操作步骤

16. 将 Force HI 香蕉线连接 DUT 正端
17. 将 Force LO 香蕉线连接 DUT 负端
18. Sense HI / Sense LO 插孔保持短接至对应 Force 插孔 (出厂默认)
19. 仪器设置: MENU → Measure → Sense → 2-Wire

⚠ 警告： 2 线制误差约等于 $I \times 2R_{wire}$ 。以 100 mA 电流、0.5 Ω 导线为例，误差达 100 mV，远超 2450 自身 mV 级精度。高电流 / 低阻场景请务必使用 4 线制。

适用场景：

- DUT 阻值 $\geq 1 \text{ k}\Omega$ (导线误差占比 $< 0.1\%$)
- 快速筛查、原理验证，对精度要求不高
- 高阻绝缘测试、漏电流测量 (nA 级，DUT 阻值远大于线阻)

2.2 4 线制接线 (Remote Sense / 4-Wire / Kelvin)

Force 线走电流，独立的 Sense 线直接在 DUT 两端采样电压。由于 Sense 端输入阻抗 $> 10 \text{ G}\Omega$ ，几乎不通电流，导线压降不影响测量结果：

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

接线示意图（4线制）：



操作步骤

20. Force HI / Force LO：接大截面导线，承载主电流路径
21. Sense HI / Sense LO：接细线，连接点尽量靠近 DUT 本体（非导线末端）
22. 按下前面板 FRONT/REAR 键，选择 REAR（后面板 Triax 接口）
23. 仪器设置：MENU → Measure → Sense → 4-Wire

✓ **提示：** 推荐使用开尔文夹（Kelvin Clip）或四线探针，确保 Force 与 Sense 的接触点在 DUT 端物理分离。

注意： 20 mV 电压量程和 10 nA / 100 nA 电流量程仅在后面板 Triax 接口有效，前面板香蕉插孔不支持这两个最小量程。

适用场景：

- DUT 阻值 $< 100 \Omega$ （电感 DCR、MOSFET $R_{ds(on)}$ 、PCB 铜箔、金属薄膜电阻）
- 任何需要发挥 2450 最高精度（0.012% 基本精度）的场合
- 大电流测试（50 mA 以上），导线压降不可忽视

2.3 2线制 vs 4线制 快速选用参考

经验规则：当 DUT 阻值 $< 10 \times$ 导线电阻 时，必须使用 4 线制。通常：

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

第三章 前面板操作

3.1 开机与预热

24. 按下后面板电源开关，仪器启动后进入开机自检（约 15 秒）
25. 默认输出为 OFF 状态，安全起见，建议在确认接线正确后再打开 OUTPUT
26. 精密测试前需预热至少 1 小时（达到热稳定后精度规格方可保证）

注意：首次使用或长期断电后，必须预热 ≥ 1 小时，否则测量值可能偏离规格。

3.2 Quickset 模式快速配置

触摸屏主界面上方有 4 个 Quickset 快捷模式按钮，单次点击即可切换工作模式：

Quickset 模式	中文含义	典型用途
V Source / I Meas	电压源 / 测电流	最常用模式：施加电压，测量流过 DUT 的电流（I-V 特性）
I Source / V Meas	电流源 / 测电压	施加恒定电流，测量 DUT 两端电压（如 LED 正向电压测试）
V Source / V Meas	电压源 / 测电压	内部 Sense 测压，可验证源输出精度或测量高阻分压
I Source / I Meas	电流源 / 测电流	精密电流输出监控，用于电流复制、稳流验证

以最常用的「V Source / I Meas」为例，典型操作流程：

27. 点击触摸屏上的 V Source / I Meas 按钮
28. 点击电压值区域，用旋钮或键盘输入目标电压（如 3.3 V）
29. 设置电流保护（Compliance）：MENU \rightarrow Source \rightarrow I Limit，输入限流值（如 100 mA）
30. 点击 LIMIT 确认，OUTPUT 指示灯未亮时接好 DUT
31. 按下 OUTPUT 键开启输出，屏幕实时显示电流测量值
32. 测试完成后再次按 OUTPUT 关闭输出

3.3 量程与积分时间设置

量程设置路径：MENU \rightarrow Measure \rightarrow Range \rightarrow 选择量程（或 AUTO 自动量程）

积分时间（NPLC, Number of Power Line Cycles）设置：MENU \rightarrow Measure \rightarrow NPLC

- NPLC = 0.01：最快速度（约 3,000 次/秒），适合快速扫描
- NPLC = 1：标准精度（约 55 次/秒），抑制 50/60 Hz 电源干扰
- NPLC = 10：最高精度（约 5 次/秒），适合慢速精密直流测量

提示：NPLC 越高，测量噪声越小，精度越高，但速度越慢。实验室精密测试推荐 NPLC = 1 或更高。

3.4 数字滤波器

路径：MENU → Measure → Filter

- 移动平均滤波（Moving Average）：对最近 N 次读数取均值，适合消除随机噪声
- 重复平均滤波（Repeat Average）：每次输出均为完整 N 次均值，适合稳态精测
- 滤波点数建议：噪声环境下取 10~100 点；高速扫描时关闭滤波

3.5 扫描（Sweep）设置

路径：MENU → Source → Sweep，支持以下扫描类型：

- 线性扫描（Linear）：起点、终点、步数等间距
- 对数扫描（Log）：适合宽动态范围（如 10 nA ~ 1 A 的 I-V 曲线）
- 双向扫描（Dual Linear / Dual Log）：来回扫，观察迟滞特性
- 自定义列表扫描（Custom / List）：最多 100 个自定义电平点

扫描数据可直接在触摸屏绘制 X-Y 图，也可导出为 CSV 至前面板 USB 存储器。

注意：扫描期间若 DUT 进入 Compliance，仪器不会停止扫描，但该数据点会被标记。建议扫描结束后检查状态位。

3.6 读数缓冲区

2450 内置最大 250,000 点读数缓冲区，每条记录可同时保存：测量值、时间戳、源值、状态位。

路径：MENU → Buffer → 配置缓冲区名称和容量；或通过 SCPI/TSP 命令操作。

- 触摸屏可直接查看缓冲区内的图形趋势和数值列表
- 数据可导出为 .csv 格式，存至前面板 USB 存储器，在 Excel 中进一步分析

第四章 精度规格

4.1 电压规格（源 / 测，1 PLC，23°C±5°C，1 年校准周期）

量程	分辨率	源精度 (23°C±5°C)	测量精度 (23°C±5°C)	输入阻抗
20 mV	500 nV	0.100% + 200 μV	0.100% + 150 μV	> 10 GΩ
200 mV	5 μV	0.015% + 200 μV	0.012% + 200 μV	> 10 GΩ
2 V	50 μV	0.020% + 300 μV	0.012% + 300 μV	> 10 GΩ
20 V	500 μV	0.015% + 2.4 mV	0.015% + 1 mV	> 10 GΩ
200 V	5 mV	0.015% + 24 mV	0.015% + 10 mV	> 10 GΩ

注意： 20 mV 量程仅限后面板三同轴接口使用；前面板香蕉插孔最小电压量程为 200 mV。

4.2 电流规格（源 / 测，1 PLC，23°C±5°C，1 年校准周期）

量程	分辨率	源精度 (23°C±5°C)	测量精度 (23°C±5°C)	电压负担
10 nA*	500 fA	0.100% + 100 pA	0.10% + 50 pA	< 100 μV
100 nA*	5 pA	0.060% + 150 pA	0.060% + 100 pA	< 100 μV
1 μA	50 pA	0.025% + 400 pA	0.025% + 300 pA	< 100 μV
10 μA	500 pA	0.025% + 1.5 nA	0.025% + 700 pA	< 100 μV
100 μA	5 nA	0.020% + 15 nA	0.02% + 6 nA	< 100 μV
1 mA	50 nA	0.020% + 150 nA	0.02% + 60 nA	< 100 μV
10 mA	500 nA	0.020% + 1.5 μA	0.02% + 600 nA	< 100 μV
100 mA	5 μA	0.025% + 15 μA	0.025% + 6 μA	< 100 μV
1 A	50 μA	0.067% + 900 μA	0.03% + 500 μA	< 100 μV

注意： 标注 * 的 10 nA 和 100 nA 量程仅限后面板 Triax 接口使用。漏电流测试强烈建议使用后面板 Triax + Guard 配置，否则环境漏电流可能超过测量信号本身。

4.3 精度规格使用说明

精度格式为：±(读数百分比 + 偏置)。例如，200 mV 量程电压测量精度为 0.012% + 200 μV，若测量 100 mV 信号：

$$\text{误差} \leq 0.012\% \times 100 \text{ mV} + 200 \mu\text{V} = 12 \mu\text{V} + 200 \mu\text{V} = 212 \mu\text{V} \approx 0.21\%$$

- 温度系数：0°C~18°C 及 28°C~50°C 范围内，每偏离 23°C 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、A/D 自动调零（Autozero）开启、预热 ≥ 1 小时
- Sink 模式（吸收电流）：1 μA ~ 100 mA 量程精度额外增加 4 倍偏置；1 A 量程增加 8 倍

第五章 远程通信接口

5.1 接口总览

接口类型	位置	说明
GPIB (IEEE-488)	后面板 24 针 D 型	支持 IEEE 488.1/488.2, 传统仪器总线, 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, 适合 PC 直连调试
Ethernet (LXI-C)	后面板 RJ-45	10/100Base-T, 支持 DHCP/静态 IP, 远程控制与 Web 界面
RS-232	— (2450 不配备)	2450 无此接口; 2600B 系列有提供
USB Host	前面板 Type-A	用于存储数据、加载脚本、系统升级 (FAT32 U 盘)
TSP-Link	后面板 RJ-45×2	仪器间高速扩展总线, 最多 32 台联网同步测试
Digital I/O	后面板 9-pin D 型	6 路数字 I/O, 用于触发、Handler 控制

注意: 2450 不配备 RS-232 接口, 这与 2600B 系列不同, 请注意。LXI-C 认证版本支持 LAN 触发和 Web 控制界面, 无需额外软件即可通过浏览器访问。

5.2 USB 连接 (推荐新用户首选)

33. 使用 USB Type-A 转 Type-B 数据线连接 PC 与 2450 后面板 USB Device 口
34. Windows 系统需安装 NI-VISA (推荐 ≥ 19.5) 或 Keithley I/O Layer (KI-IO)
35. 设备管理器中会出现 USBTMC 设备, 仪器资源地址格式为: USB0::0x05E6::0x2450::xxxxxxx::INSTR
36. 可通过 NI-MAX、KickStart 或 Python/MATLAB 脚本直接发送 SCPI/TSP 命令

5.3 Ethernet / LXI 连接

37. 用网线直连 PC 或接入局域网交换机
38. 配置 IP: MENU → System → Communication → Ethernet → Static IP 或 DHCP
39. 浏览器访问 <http://<仪器 IP>> 可打开内置 Web 控制界面, 无需安装软件
40. VISA 资源地址格式: TCPIP0::<IP 地址>::inst0::INSTR

提示: 局域网部署时, 建议为 2450 配置静态 IP, 避免 DHCP 地址变化导致程序连接失败。

第六章 编程控制

6.1 编程语言选择

2450 支持两套独立编程语言体系，可在 MENU → System → Comm → Command Set 中切换：

- **SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments)**：工业标准命令集，与 Model 2400 高度兼容，推荐用于跨平台系统集成（Python、LabVIEW、MATLAB 均广泛支持）
- **TSP (Test Script Processor)**：Keithley 专有 Lua 脚本语言，支持在仪器内部运行完整测试程序，无需持续 PC 通信，适合高速本地执行（吞吐量可提升 80%）

✓ 提示：SCPI 的 2400 兼容模式 (:SOUR2400: 前缀命令) 允许直接复用旧有 2400 测试代码，无需修改即可迁移。

6.2 SCPI 常用命令参考

SCPI 命令	功能说明
:SOUR:FUNC VOLT	设置输出功能为电压源
:SOUR:VOLT:LEV 5	设置输出电压为 5 V
:SOUR:VOLT:RANG 20	设置电压量程为 20 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) 为 100 mA
:OUTP ON	开启输出
:MEAS:CURR?	触发一次测量并读取电流值
:OUTP OFF	关闭输出
:SOUR:SWE:VOLT:LIN 0,5,51,0.1	线性扫描：0 V 到 5 V，51 点，0.1 A 保护
:TRIG:LOAD "SimpleLoop"	加载简单循环触发模型
:INIT	启动测量序列
:FETC?	读取缓冲区数据
*RST	复位仪器至出厂默认
*IDN?	查询仪器型号/序列号

SCPI 完整 I-V 扫描示例

```

*RST           ' 复位
:SOUR:FUNC VOLT      ' 电压源模式
:SOUR:VOLT:RANG 20   ' 20 V 量程
:SENS:FUNC "CURR"    ' 测电流
:SENS:CURR:RANG:AUTO ON  ' 自动量程
:SENS:CURR:PROT 0.1  ' 100 mA 保护
:SENS:CURR:NPLC 1    ' 1 PLC 积分时间
:SOUR:SWE:VOLT:LIN 0,5,51,0.1 ' 0~5V, 51 点, 100mA 限流
:TRIG:LOAD "SimpleLoop" ' 简单循环触发
:OUTP ON           ' 开启输出
:INIT              ' 启动扫描
:OUTP OFF          ' 关闭输出
:FETC?            ' 读取所有数据

```

6.3 TSP 常用命令参考

TSP 命令	功能说明
smu.source.func = smu.FUNC_DC_VOLTAGE	设置输出功能为直流电压源
smu.source.level = 5	设置输出电压为 5 V
smu.source.range = 20	设置电压量程 20 V
smu.measure.func = smu.FUNC_DC_CURRENT	设置测量功能为直流电流
smu.measure.autorange = smu.ON	开启电流自动量程
smu.source.ilimit.level = 0.1	设置电流保护上限为 100 mA
smu.measure.sense = smu.SENSE_4WIRE	切换至 4 线制 (Remote Sense)
smu.output = smu.ON	开启输出
print(smυ.measure.read())	读取一次电流测量值
smu.output = smu.OFF	关闭输出
reset()	复位仪器
errorqueue.next()	读取错误队列 (调试用)

TSP 完整 I-V 扫描示例 (本地执行, 高速)

```
reset()
smu.source.func = smu.FUNC_DC_VOLTAGE
smu.source.range = 20
smu.source.ilimit.level = 0.1
smu.measure.func = smu.FUNC_DC_CURRENT
smu.measure.autorange = smu.ON
smu.measure.nplc = 1
smu.measure.sense = smu.SENSE_4WIRE -- 4线制

local buf = buffer.make(100)
smu.output = smu.ON
for v = 0, 5, 0.1 do
    smu.source.level = v
    smu.measure.read(buf)
end
smu.output = smu.OFF
printbuffer(1, buf.n, buf.readings, buf.sourcevalues)
```

6.4 Python 连接示例 (PyVISA)

```
import pyvisa
rm = pyvisa.ResourceManager()
smu = rm.open_resource('USB0::0x05E6::0x2450::xxxxxxxx::INSTR')
smu.write('*RST')
smu.write(':SOUR:FUNC VOLT')
smu.write(':SOUR:VOLT:LEV 3.3')
smu.write(':SENS:FUNC "CURR"')
smu.write(':SENS:CURR:PROT 0.1')
smu.write(':OUTP ON')
current = float(smu.query(':MEAS:CURR?'))
print(f'Current = {current*1e3:.3f} mA')
smu.write(':OUTP OFF')
smu.close()
```

注意：PyVISA 需配合 NI-VISA 后端（pip install pyvisa pyvisa-py）。若使用 pyvisa-py 纯 Python 后端，需额外安装 pyusb / pyserial 等依赖。

第七章 典型测试应用

7.1 半导体器件 I-V 特性测试

I-V 特性曲线是器件研究最基础的测量，2450 可直接在触摸屏绘制并导出。

二极管正向 I-V 测试

41. **接线:** V Source / I Meas, 2 线制, 前面板香蕉插孔
42. **设置:** 电压扫描范围 0 ~ 1.0 V, 步长 10 mV, 电流保护 200 mA
43. **注意:** 正向电压通常在 0.6~0.8 V (硅管), 超过 V_f 后电流急剧上升, 确保限流设置合理

MOSFET 转移特性 (I_d - V_{gs})

44. **接线:** Gate 接 Force HI, Source 接 Force LO (Drain 另接偏置), 4 线制
45. **设置:** 电压扫描 -5 V ~ +5 V, 电流保护 1 mA (弱反型区), 观察阈值电压

太阳能电池 I-V 测试

46. **接线:** 4 线制开尔文接法, 接光照下的电池两端
47. **设置:** 电压从 V_{oc} (开路电压, 约 0.5~0.7 V) 扫至 0 V, 取点 100 点
48. **关键参数:** V_{oc} 、 I_{sc} 、 P_{max} 、FF (填充因子) = $P_{max} / (V_{oc} \times I_{sc})$

7.2 LED 测试

LED 测试核心是在特定驱动电流下测量正向电压 (V_f) 和光输出 (需配合光电探测器)。

- 模式: I Source / V Meas (电流源驱动 LED, 测正向电压)
- 设置: 电流 1 mA ~ 50 mA, 电压保护 5 V (防止过压损坏)
- V_f 典型范围: 红光 1.8~2.2 V, 绿光 2.0~3.4 V, 蓝光/白光 2.8~3.5 V

⚠ 警告: 测试 LED 时务必设置电压保护 (Compliance)! 以电流源模式驱动时, 若 LED 开路, 电压可能飙升损坏仪器。

7.3 低阻测量 (四线法 DCR)

电感线圈、变压器绕组、PCB 走线、接插件接触电阻等低阻测量, 必须使用 4 线制。

49. **接线:** Force HI/LO 走大电流, Sense HI/LO 靠近 DUT 两端夹紧
50. **设置:** I Source 100 mA (典型), V Meas 4-Wire, 量程 Auto
51. **读取方式:** 屏幕直接显示电阻值, 或通过 $R = V / I$ 换算
52. **典型范围:** PCB 走线几 $m\Omega$ ~ 几百 $m\Omega$, 电感 DCR 几十 $m\Omega$ ~ 几 Ω

7.4 绝缘电阻 / 高阻测试

绝缘材料、高阻薄膜、ESD 保护器件等 $M\Omega$ ~ $G\Omega$ 量级电阻测量。

53. **接线:** 后面板 Triax, 必要时使用 Guard 端子 (2450 支持 Guard 输出)

54. 设置：V Source 模式，测量电流；NPLC = 10 或更高；开启 200 V 量程
55. Guard 使用：对同轴电缆外层驱动 Guard 电位，消除接线漏电流（可减少 1000 倍噪声）
56. 充电时间：高容性绝缘体需等待几秒至几十秒方可读数稳定

警告： 高压 (> 100 V) 测试时，必须连接 Interlock 端子并确认安全防护措施到位，防止人身安全事故。

7.5 功率器件 Rds(on) 测试

MOSFET 导通电阻是功率器件关键参数，通常在 $m\Omega$ ~ 数 Ω 范围内。

- 接线：4 线制，开尔文夹夹住 Drain-Source 两端
- 设置：I Source 1 A（确保导通，Vgs 需另行偏置至导通状态），V Meas 4-Wire
- 计算： $R_{ds(on)} = V_{DS} / I_D$ ，2450 可直接在电阻测量模式下读出

注意： 大电流 (≥ 500 mA) 测试时需注意 DUT 散热，避免结温升高导致 Rds(on) 偏高影响测量准确性。

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/抖动	接线松动、接地不良、电磁干扰	检查接线；使用屏蔽电缆；开启积分时间（ $NPLC \geq 1$ ）；启用数字滤波器
输出立刻进入 Compliance	保护值设置过小；DUT 短路或低阻	检查 Compliance 设置；确认 DUT 阻值；先用限流模式测试
测量值偏高（2 线制）	导线电阻引入压降误差	改用 4 线制（Remote Sense）；或补偿导线电阻
GPIB/USB 无法识别	驱动未安装；地址冲突	安装 NI-VISA 或 Keithley IO Layer；确认 GPIB 地址唯一
漏电流测量噪声大	未使用 Guarding；环境干扰	启用 Guard 输出；使用低噪声三同轴电缆；Triax 后面板接口
扫描数据丢失/截断	缓冲区溢出；通信超时	增大缓冲区大小（最大 250,000 点）；用 TSP 本地存储再读取
前面板触摸无响应	触摸屏校准偏移	MENU → System → Touchscreen Calibration 重新校准
温漂导致精度下降	未充分预热	通电预热至少 1 小时后再进行精密测试

8.2 错误代码查询

当仪器发生错误时，状态栏会显示错误图标。查询方法：

57. 前面板：MENU → System → Error Queue，查看最近发生的错误信息

58. SCPI 命令：:SYST:ERR? 或 :STAT:QUES:EVEN?

59. TSP 命令：print(errorqueue.next())

常见错误代码：

- -113：命令语法错误（检查 SCPI 命令拼写）
- -222：超出数据范围（量程设置超过仪器极限）
- +800 系列：Compliance / Overload 事件（输出被限制）
- +101：校准数据丢失（需重新校准）

8.3 校准周期

Keithley 建议 2450 每 12 个月进行一次工厂校准，以确保精度规格有效。自校准（ACAL）不能替代工厂校准，但可在两次送校之间补偿温度漂移：

60. 自校准路径：MENU → Calibration → Self-Calibration

61. 建议在每次精密测量前，先进行 1 次自校准（仪器需充分预热后执行）

第九章 使用注意事项与安全规范

9.1 安全注意事项

⚠ 警告： 输出电压 $> 42\text{ V}$ 时属于危险电压，必须确认绝缘、防护措施到位，并连接 Interlock 端子。严禁在通电状态下触摸输出端子。

- 最大输出电压： $\pm 200\text{ V}$ （前后面板均适用）
- 最大输出电流： $\pm 1\text{ A}$ （前面板香蕉插孔限制）
- 最大功率： 20 W （任意量程组合下均不超过）
- 不可超量程使用，否则可能触发内部保护或永久损坏输入通道
- 输出关闭（OUTPUT OFF）时，端子仍有可能残留电荷，操作前先确认电压为零

9.2 测量最佳实践

- **先设保护、后开输出：** 每次测试前设置合适的 Compliance（电流或电压保护），再按 OUTPUT
- **从安全量程开始：** 不熟悉 DUT 特性时，从较小电压/电流开始扫描，逐步扩大范围
- **使用后面板 Triax：** fA~pA 级电流测试务必使用后面板三同轴接口，前面板漏电流约为后面板的 100~1000 倍
- **导线选择：** 高电流 ($> 100\text{ mA}$) 使用截面 $\geq 0.5\text{ mm}^2$ 导线；低电流 ($< 1\text{ }\mu\text{A}$) 使用屏蔽低噪声同轴线
- **屏蔽与接地：** 在低电流测试中，使用屏蔽盒（Faraday Cage）可将噪声再降低 10~100 倍
- **数据导出：** 重要测试完成后立即将数据导出至 U 盘，避免掉电丢失缓冲区数据

9.3 维护建议

- 定期清洁前面板触摸屏（柔软棉布轻擦，勿使用化学溶剂）
- 定期检查 Triax 连接头的清洁度，氧化或污染会增加接触电阻
- 每年送厂校准一次，维持精度追溯性
- 存储环境： $-25^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ ，避免潮湿和强磁场

附录 参考资料与资源

A. 官方技术文档

- Model 2450 SourceMeter SMU Instrument User's Manual (部件号 2450-900-01)
- SPEC-2450 Rev.C — 官方完整精度规格书 (August 2020)
- 2450 Datasheet — 1KW-60904-0 (Tektronix 官网 tek.com 可下载)
- KickStart 软件用户手册 (免费数据采集软件, 适合非编程用户)

B. 软件资源

- NI-VISA: <https://www.ni.com/visa> (USB/GPIB/Ethernet 驱动)
- PyVISA: `pip install pyvisa` (Python VISA 封装库)
- KickStart: tek.com/keithley/products/kickstart (免费, 无需编程的 I-V 测试软件)
- Test Script Builder (TSB): 免费 TSP 脚本开发调试工具 (随仪器提供 CD 或官网下载)
- ACS Basic Edition: 可选购, 适合封装器件特性化的高级测试软件

C. 精度规格补充说明

- 所有精度规格在 1 PLC 积分时间、A/D 自动调零开启、输出 ON 状态下有效
- 温度系数: 偏离 23°C 每 1°C, 额外误差 = $0.15 \times$ 基本精度
- 4 线制 (Remote Sense) 可消除导线电阻误差, 使测量精度达到规格上限
- 规格校准周期: 1 年; 超出校准周期后精度不作保证, 请送厂重新校准

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