

4200A-SCS-SMU

用户手册

4200A-SMU-900-01 Rev. A 2020 年 12 月



4200A-SMU-900-01A

4200A-SCS-SMU

用户手册

Keithley 半导体参数分析仪 4200A：助力科研与产业界的新一代测试利器

在电子工程、材料科学和物理等领域，高精度的电信号激励和采集是科学研究与产业应用的关键。Keithley 半导体参数分析仪 4200A 是一款专为材料、器件的电参数与输运特性表征而设计的仪器。它提供了 pA 级电流、nV 级电压以及亚 fF 量级电容等非常高精度的电信号激励和采集功能，帮助科学家和工程师们准确测量和分析各种材料与器件的电学性能。

在后摩尔时代，随着微电子技术的不断发展，Keithley 半导体参数分析仪 4200A 的应用领域也在不断拓展。在传统的材料和器件测试方面，4200A 继续发挥着重要作用。同时，仪器还被广泛应用于新兴的微纳电子器件、柔性电子器件、二维材料、生物电子器件等领域的电学性能测试和分析。通过与探针台、原位测试技术等结合，4200A 可以帮助科研人员深入探究新型材料和器件的电学特性及工作机制。

随着微电子器件的多样化及复杂化，测试环境也变得越来越复杂。Keithley 半导体参数分析仪 4200A 通过强大的操作系统支持，可以在多种复杂测试环境下进行准确的测量。例如，在研究新型光电器件时，4200A 可以配合高速光电探测器、光谱分析仪等设备，实现对光电器件性能的高精度测量和分析。此外，通过与外加磁场、环境温度和光照等控制设备的结合使用，4200A 还可以在各种复杂环境下进行电学性能的精确测量。

在后摩尔时代，微电子产业的发展趋势是向着更高性能、更低能耗、更小尺寸的方向前进。为了满足产业界的需求，Keithley 半导体参数分析仪 4200A 提供了定制化开发的服务。通过与 Tek 的工程师团队合作，用户可以根据自身需求对仪器进行定制化开发，实现更高效、更精准的测试。此外，4200A 在产业界的应用还涉及半导体生产线的质量检测、新能源材料性能评估等方面。

在多年的工作中，我们发现很多用户在如何更充分地利用仪表的精度和功能方面存在困扰。为此，我们特别出版了 Keithley 半导体参数分析仪 4200A 合集，旨在帮助广大用户、科研工作者更好地理解和掌握该仪器的使用方法和应用场景。

合集中提供了大量的测试案例和操作指南，展示了如何通过仪器进行各种测试和分析，以及如何解读测试结果。此外，我们还强调了高保真测试数据的重要性，并介绍了如何保证测试数据的准确性和可靠性。

通过这份合集，我们希望能够帮助用户更好地理解 and 掌握 Keithley 半导体参数分析仪 4200A 的使用方法和技巧，提高测试效率和精度。从而将有限的资源用在更加重要的事情上面，更加高效快速的完成科研工作。

“他山之石、可以攻玉”同时这份合集也汇总了全球先进的材料研究、器件表征、可靠性等一些经典案例，可以为我国的科研和产业工作者提供参考，希望能够起到抛砖引玉的作用。

从整理文集的想法开始到最后集结成册时间非常紧张，文集的选编、整理、翻译和传作都是在 Tektronix 应用工程师团队八小时工作时间之外完成。我们对这边文集能起到的作用充满的信心，憧憬着文集某一个“知识点”被某一位正在一线科研战线上的老师、或者某一位苦于对实验数据测试数据异常的研究生所看到，而猛然出现“Eureka moment”而激励着……然而对于很多专业的知识和认识我们还是存在很大的差距，可能在文中出现一些谬误还请各位读者多多批评指正！

张欣
Tektronix 应用技术总监
2023.11
于北京

中文姓名：薄嘉鑫

简介：泰克科技（中国）有限公司的技术部工程师。主要负责客户的售前售后的技术服务。擅长 Keithley 及 Tektronix 的产品的开发和应用。

中文姓名：杨雅文

简介：泰克科技（中国）有限公司的技术部工程师。主要负责客户售前售后的技术支持，擅长 Keithley 和 Tektronix 产品的基础应用，以及仪器自动化程序编写。

中文姓名：鲍婧杰

简介：泰克科技（中国）有限公司的技术部工程师。主要负责客户售前售后的技术支持，擅长 Keithley 和 Tektronix 产品的基础应用。

中文姓名：林彩霞

简介：泰克科技（中国）有限公司的资深现场应用工程师。主要负责客户售前售后技术服务和市场开拓以及新客户拓展。多年以来一直在从事测试测量相关工作，积累了丰富的测试经验。目前主攻方向包括：低电平信号测试、射频 / 射频元器件测试以及宽带信号产生与分析、自动化测试系统等。

中文姓名：穆菁

简介：应用工程师，近 10 年相关从业经验。主要负责 Keithley 和 Tektronix 的分销类产品，第一次参与此类翻译工作，希望可以帮助大家更加理解微小信号测试中的难点和操作注意事项，更好的完成相关测试。

1. 简介	7
1.1. 简介	7
1.2. 源测量单元 (SMU).....	7
1.3. 前置放大器.....	8
1.4. 地面单元 (GNDU).....	8
2. 连接和配置	9
2.1. 基本的源测量连接.....	9
2.1.1. SMU 连接.....	10
2.1.2. 前置放大器本地感应连接.....	19
2.1.3. 使用地面单元.....	20
2.1.4. 基本 SMU 电路配置	24
2.2. 测试夹具和被测试器件 (DUT) 连接	28
2.2.1. 使用 SMUs 进行小于 $\pm 20\text{ V}$ 的测试.....	28
2.2.2. 使用大于 $\pm 20\text{ V}$ 进行测试	29
2.2.3. 建议使用的连接电缆.....	29
3. 在 Clarius 中设置 SMU	31
3.1. 简介.....	31
3.2. 设置简单项目:	31
3.2.1. 选择项目组件:	31
3.2.2. 添加设备并测试项目	32
3.3. 配置简单测试	33
3.3.1. 设置关键参数.....	35
3.3.2. 设置测试参数.....	36
3.4. 运行简单测试	38
3.5. 操作模式 (SMU)	39
3.5.1. 开放式操作模式 - SMU.....	40
3.5.2. 电压偏置操作模式.....	40
3.5.3. 电压线性扫描操作模式 - SMU.....	40
3.5.4. 电压段扫描操作模式.....	41
3.5.5. 电压列表扫描操作模式	42
3.5.6. 电压对数扫描操作模式	42
3.5.7. 电压步进操作模式.....	43
3.5.8. 电流偏置操作模式.....	43
3.5.9. 电流线性扫描操作模式 - SMU.....	43
3.5.10. 电流段扫描操作模式 - SMU	44
3.5.11. 电流列表扫描操作模式 - SMU.....	44
3.5.12. 电流对数扫描操作模式 - SMU.....	45
3.5.13. 当前步骤操作模式.....	46
3.5.14. 常规操作模式 - SMU	46
3.6. SMU- 所有端口参数	46
3.6.1. 基础电流	46
3.6.2. 基础电压	46
3.6.3. 偏置	46
3.6.4. 列名 (测量电流)	47
3.6.5. 列名 (测量电压)	47

3.6.6. 合规	47
3.6.7. 双重扫描	48
3.6.8. 力量范围 (源范围)	49
3.6.9. 列表值	49
3.6.10. 低范围	49
3.6.11. 测量电流	49
3.6.12. 关机时间	49
3.6.13. 开启时间	50
3.6.14. 过压保护	50
3.6.15. 点数 (列表或段扫描)	50
3.6.16. 点数 (对数扫描)	50
3.6.17. 点数	51
3.6.18. 上电延迟	51
3.6.19. 脉冲模式	51
3.6.20. 范围 (测量电流)	53
3.6.21. 报告状态 (SMU)	54
3.6.22. 报告值 (测量电流或报告电流)	54
3.6.23. 报告值 (报告电压或测量电压)	54
3.6.24. 分段	54
3.6.25. 开始 (步进)	55
3.6.26. 开始 (扫描)	55
3.6.27. 步长 (步进)	55
3.6.28. 步骤 (电压扫描)	56
3.6.29. 步骤 (电压扫描)	56
3.6.30. 停止 (步进)	57
3.6.31. 停止 (扫描)	57
3.6.32. 电压 (报告电压)	57
3.6.33. 电压范围	57
3.7. SMU 测试设置	57
3.7.1. 速度	57
3.7.2. 报告时间戳	58
3.7.3. 延迟因子	59
3.7.4. 滤波器系数	60
3.7.5. 自动 A/D 光圈	61
3.7.6. A/D 光圈时间	61
3.7.7. 测试模式	61
3.7.8. 扫描延迟	62
3.7.9. 间隔	62
3.7.10. 样本数	62
3.7.11. 保持时间 - SMU	62
3.7.12. SMU 上电顺序	62
3.7.13. 完成后禁用输出 - SMU	63
3.7.14. 输出值	63
3.7.15. 合规退出条件选项	64
4. 源测量硬件	65
4.1. 源测量单元	65
4.2. 源测量硬件概述	65
4.3. 基本 SMU 电路配置	66
4.4. SMU 终端和连接器	67
4.4.1. SENSE LO 终端	68
4.4.2. SENSE 端口	69
4.4.3. FORCE 端口	69
4.4.4. PA CNTRL 连接器	69
4.5. 4200-PA 源量测单元 (SMU) 概述	69
4.5.1. 基本 SMU/ 前置放大器电路配置	70

4.5.2. 4200-PA SMU 的合规限制	70
4.5.3. 使用最小合规性	71
4.5.4. 工作范围	71
4.5.5. 前置放大器终端和连接器	72
4.5.6. FORCE 端子	74
4.5.7. SENSE 端子	75
4.5.8. 前置放大器控制连接器	75
4.5.9. SMU 电路公共连接	75
4.6. 接地单元 (GNDU) 概述	76
4.6.1. 基本特征	76
4.6.2. 接地单元连接	77
4.6.3. 接地单元 DUT 连接	78
4.6.4. 接地单元端口和连接器	79
4.6.5. FORCE 端口	79
4.6.6. SENSE 端口	80
4.6.7. COMMON 端口	80
5. 源 - 测量的概念	81
5.1. 源 - 测量概念	81
5.2. 屏蔽	81
5.2.1. 屏蔽连接	82
5.2.2. 屏蔽概念	83
5.2.3. 测试夹具屏蔽	84
5.3. 本地感测和远程感测	85
5.3.1. 本地感测	87
5.3.2. 远端感测	88
5.4. 源或汲	88
5.4.1. 4200-SMU 和 4201-SMU 源或汲取	89
5.4.2. 4210-SMU 或 4211-SMU 源或汲取	90
5.4.3. 4200-SMU 和 4201-SMU 汲取边界	91
5.4.4. 4210-SMU 和 4211-SMU 汲取边界	92
5.5. 源测量考虑因素	92
5.5.1. 源 I, 测量 V 或 I	92
5.5.2. 源 V, 测量 I 或 V	93
5.5.3. 仅测量 (V 或 I)	94
5.5.4. I-Source 操作界限	95
5.5.5. I-Source 操作示例	96
5.5.6. V-Source 操作边界	97
5.5.7. V-Source 操作示例	98
5.5.8. 源 I 测量 I 和源 V 测量 V	99
5.6. 扫描概念	99
5.6.1. 源 - 延迟 - 测量周期	100
5.6.2. 扫描波形	100
5.7. 操作模式的时序	102
5.7.1. 采样模式的时序	103
6. 优化 SMU 测量	105
6.1. 介绍	105
6.2. 使用 SMUs 进行稳定的测量	105
6.2.1. 单个 SMU 的稳定性考虑因素	105
6.2.2. 多个 SMU 的稳定性考虑因素	106

6.2.3. 消除振荡.....	107
6.3. 低电流测量.....	108
6.3.1. 泄漏电流.....	109
6.3.2. 产生的电流.....	109
6.3.3. 电压负担.....	112
6.3.4. 噪声和源阻抗.....	113
6.3.5. 电缆电容.....	114
6.3.6. 测试系统性能.....	114
6.4. 干扰.....	115
6.4.1. 静电干扰.....	115
6.4.2. 无线电频率干扰.....	115
6.4.3. 接地环和其他 SMU 接地注意事项.....	116
7. 太阳能电池的 I-V 测量.....	117
7.1. 简介.....	117
7.2. 所需设备.....	117
7.3. 设备连接.....	118
7.3.1. 设备连接原理图.....	118
7.3.2. 将 4200A-SCS 连接到 DUT.....	119
7.4. 在 Clarius 软件中设置测量.....	120
7.4.1. 创建一个新项目.....	120
7.4.2. 搜索并选择测试.....	121
7.4.3. 配置测试.....	122
7.4.4. 运行测试.....	124
7.4.5. 分析测试结果.....	125
7.4.6. 其他测试.....	126

1.1. 简介

本文档提供了有关 4200-SMU、4201-SMU、4210-SMU 和 4211-SMU 源测量单元及相关仪器的信息，包括：

- [连接和配置](#)：有关连接源 - 测量单元 (SMU)、前置放大器和接地单元到待测器件 (DUTs) 的接线、控制和数据传输的基本信息。
- [在 Clarius 中设置 SMU](#)：描述 SMU 操作模式、每种模式可用选项以及 SMU 测试设置。
- [源 - 测量硬件](#)：提供有关 SMUs 和相关仪器（包括 4200-PAs 和接地单元）的信息。
- [源 - 测量概念](#)：提供有关保护、远端测量、灌电流操作和扫描的信息。
- [优化 SMU 测量](#)：包含改善测量稳定性、进行低电流测量和减少干扰的信息。

1.2. 源测量单元 (SMU)

4200A-SCS 使用的基本仪器模块是源 - 测量单元 (SMU)。SMU 的基本功能是执行以下一种源 - 测量操作：

- 发送电压并测量电流或电压
- 发送电流并测量电压或电流

SMU 的源可以配置为扫描或步进的电压 / 电流，或输出恒定的偏置电压 / 电流。

有中功率和高功率的源测量单元可选。2W 中功率 SMUs 型号为 4200-SMU 和 4201-SMU。20W 高功率 SMUs 型号为 4210-SMU 和 4211-SMU。以下表格列出了 SMUs 输出最大电压、电流和功率的限制。

Source-measure units

Model	Maximum voltage	Maximum current	Maximum power
4200-SMU 4201-SMU	210 V	105 mA	2.2 W
4210-SMU 4211-SMU	210 V	1.05 A	22 W

1.3. 前置放大器

4200-PA 前置放大器为 SMU 扩展了五个低电流源 - 测量量程。如果没有前置放大器，则 100 nA 量程 (100 fA 分辨率) 是 SMU 的最低电流源 - 测量量程。安装了前置放大器后，会添加 10 nA、1 nA、100 pA、10 pA 和 1 pA 档位。

如果订购了前置放大器，那么 4200A-SCS 出厂时，前置放大器安装在主机的后面板上。。

1.4. 接地单元 (GNDU)

4200A-SCS 后面板上的接地单元提供了一个简单的方式来进行与大地间的连接。这使得 DUT 接地时不需要使用 SMU 模块进行该操作。

2.1. 基本的源测量连接

本节描述了将源 - 测量单元 (SMUs)、前置放大器和接地模块连接到待测器件 (DUTs) 的基本信息。

警告

4200A-SCS 配有一个互锁电路，必须开启互锁模块才能输出高电压。互锁有助于测试系统中设备的安全操作。绕过互锁可能会使操作员暴露在危险电压下，这可能导致个人受伤或死亡。

警告

断开互锁将使 SMU 和前置放大器输出高压，使用户暴露于可能导致个人受伤或死亡的电击风险中。即使输出被设置为低电压，SMU 和前置放大器端口也应被视为危险的。必须采取预防措施，通过使用额定电压为 250 V、分类为 0 的双重绝缘材料包围测试设备和任何未保护的引线 (电线) 来防止电击危险。

注意

电路 Common 端与机箱地之间允许的最大电压为 $\pm 32 \text{ V DC}$ 。前置放大器信号之间允许的最大电压为:

Common 端到机箱地: $32 \text{ V}_{\text{PEAK}}$

Guard 到 Common 端: $250 \text{ V}_{\text{PEAK}}$

Sence 端或 force 端到 guard: $40 \text{ V}_{\text{PEAK}}$

2.1.1. SMU 连接

以下内容解释了如何将源 - 测量单元 (SMUs) 连接到被测设备 (DUT) 。

使用三同轴电缆，可以直接将 SMU 连接到被测设备 (DUT)，并使用本地或远端测量，如下面内容所述。当电流超过 1 mA 且 FORCE 路径电阻较大 (约为 1Ω) 时，通常使用远端测量。在这种情况下，由于 FORCE 路径电阻会产生高达 1 mV ($= 1 \text{ mA} \times 1 \Omega$) 的测量误差。远端测量可以消除所产生误差。

注意

当使用多个 SMU 时，请使用接地单元进行电路公共点连接，而不是 SMU 端口的外层屏蔽层。请参阅[使用接地单元](#)。

警告

在启动 4200A-SCS 之前，不要触摸测试电缆或连接器。仪器可能会瞬间输出危险电压，造成安全隐患，导致个人受伤或死亡。

在查看“4200A-SCS 的安全上电程序” (Model 4200A-SCS Setup and Maintenance 中) 之前，请勿打开 4200A-SCS 电源。

注意

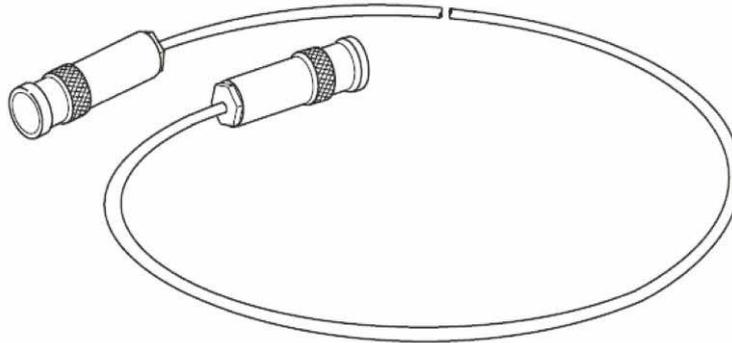
在接通电源之前，请勿将 DUT 连接到 4200A-SCS，因为在上电瞬间仪器可能输出危险电压，损坏 DUT。

如果您的 4200A-SCS 包含前置放大器，则应使用前置放大器执行所有测试，因为出厂时安装的 SMU 已经针对它们进行了优化。

三同轴电缆

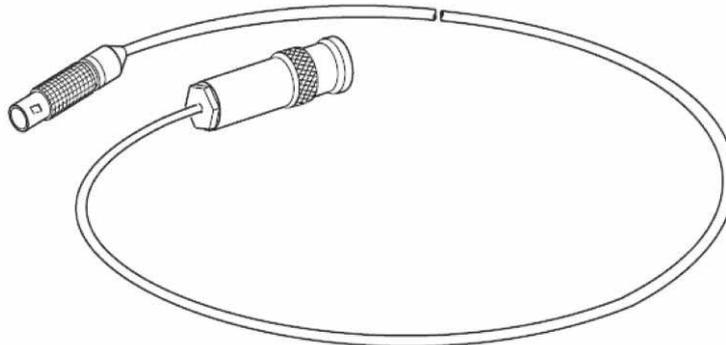
三同轴电缆用于连接被测器件（DUT）。如果安装了前置放大器，则使用低噪声的三同轴电缆，这些电缆两端都采用 3 槽三同轴连接器终端。其中一端连接到前置放大器，另一端连接到 DUT 测试夹具或探针台。

图 1: 三同轴电缆 4200-TRX-X



如果您的系统没有安装前置放大器，则使用一端带有迷你三轴连接器，另一端带有标准 3 槽三同轴连接器的电缆。带有迷你连接器的电缆端直接连接到 SMU，而另一端连接到测试夹具或探针台。

图 2: 三同轴电缆 4200-MTRX-X



注意

安装前置放大器后，不要直接连接任何 SMU 模块上的迷你三同轴连接器，否则可能会损坏 SMU 或 DUT，或产生错误数据。

SMU 本地测量（2 线）连接

连接测试设备（DUT）最简单的方法是使用一个 SMU 连接一个设备端口。在设置测试时，SMU 的 FORCE 端口（芯线）用于向设备施加电压或电流。FORCE 端口或接地单元也可以用于将设备端口连接到 COMMON 回路。

下图显示了使用本地测量的典型 SMU 连接方式。请使用三同轴电缆（例如 4200-MTRX-X）进行以下连接：

- 将 SMU FORCE（FORCE 端口的芯线）连接到 DUT HI。
- 将电路 COMMON（FORCE 端口的外屏蔽）连接到 DUT LO。

图 3: SMU 本地测量（2 线）连接

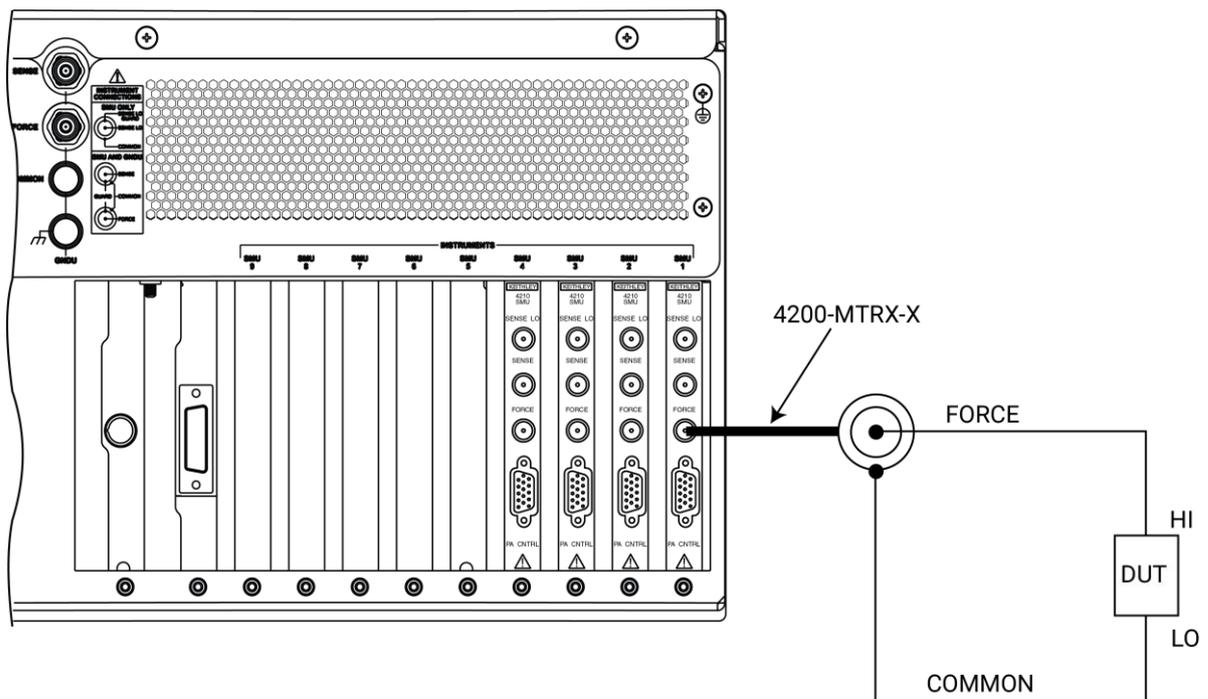
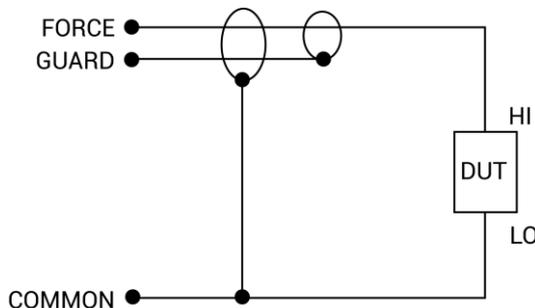


图 4: SMU 本地测量（2 线）连接 - 等效电路



SMUs 的基本设备连接方式

以下图示显示了 2 端、3 端和 4 端待测件的基本连接方式。请注意，每个 SMU 仅将 FORCE HI 端口连接到待测件引脚。FORCE HI 是三同轴电缆的芯线。

注意

如果不使用 FORCE 端口连接 SMU 或接地单元的 SENSE 端口，则可能会损坏仪器并返回错误结果。

图 5: 2 端待测件连接到 SMU 和前置放大器

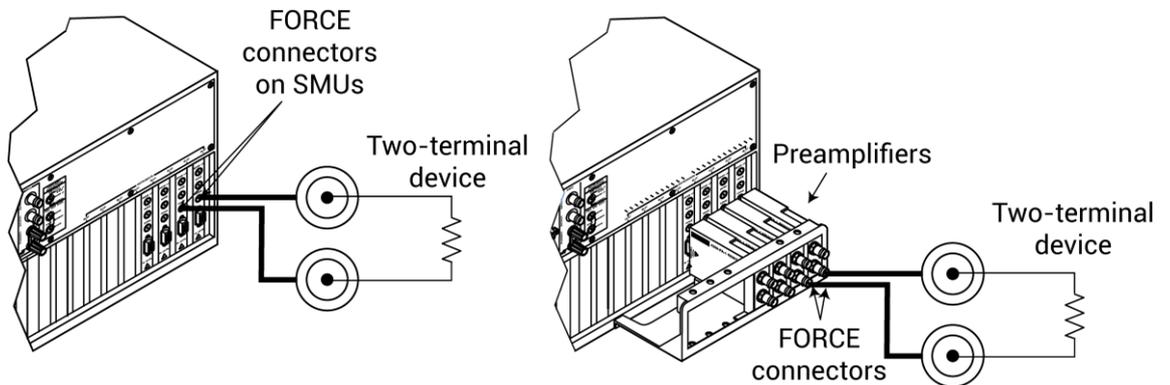


图 6: 3 端待测件连接到 SMU 和前置放大器

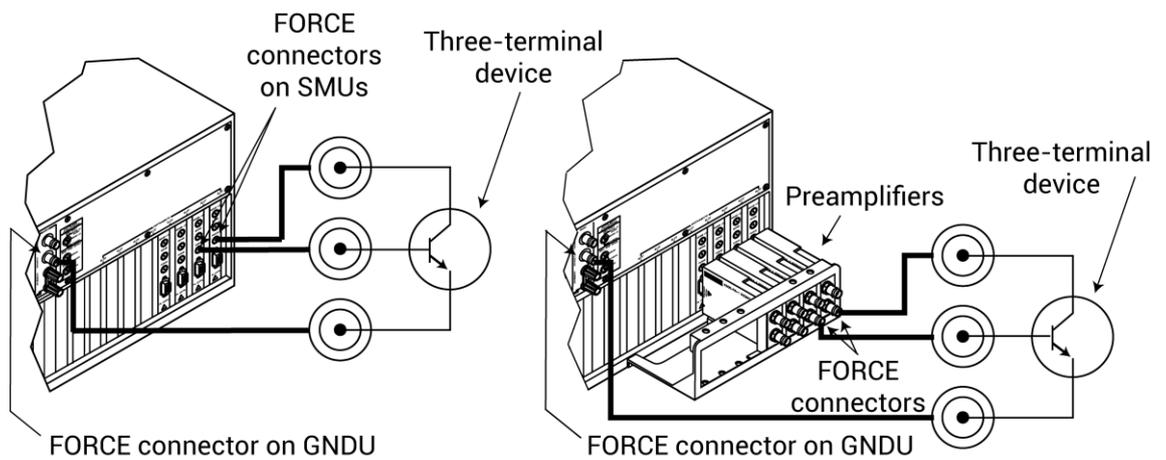
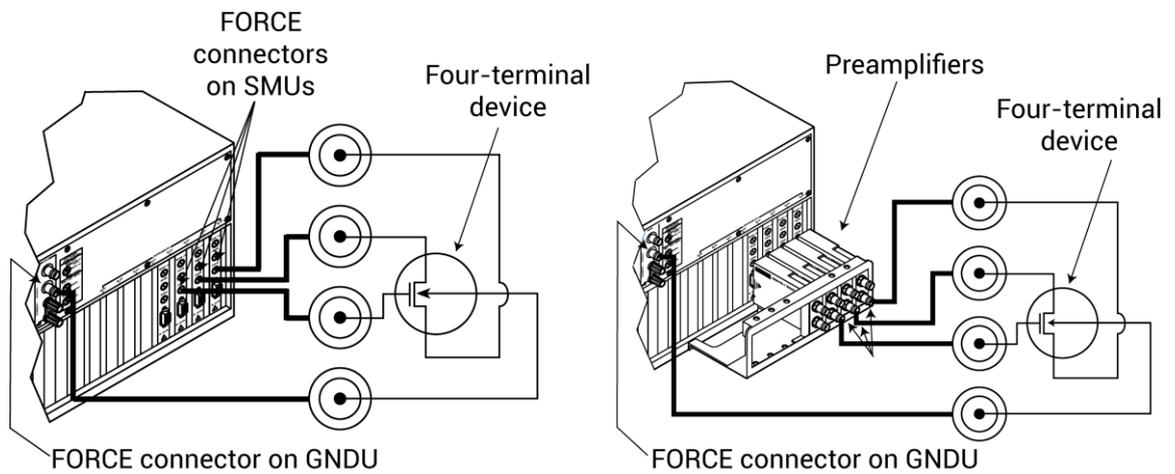


图 7: 4 端待测件连接到 SMU 和前置放大器



屏蔽和保护

许多测试情况要求对测试设备 (DUT) 进行屏蔽或保护 (或两者都需要), 以避免静电干扰、寄生电容、系统泄漏电流等不利影响。

有关保护原理和优点的详细信息, 请参见“[保护](#)”。

警告

当测试电路中存在危险电压 ($> 30 \text{ VRMS}$, 42 VPEAK) 时, 必须使用安全屏蔽。为防止可能导致伤害或死亡的电击, 请勿在测试电路中使用未正确安装和配置的安全屏蔽的 4200A-SCS。

要对设备进行屏蔽但不保护, 请按以下图示将 DUT 屏蔽连接到 COMMON。

图 8：器件屏蔽

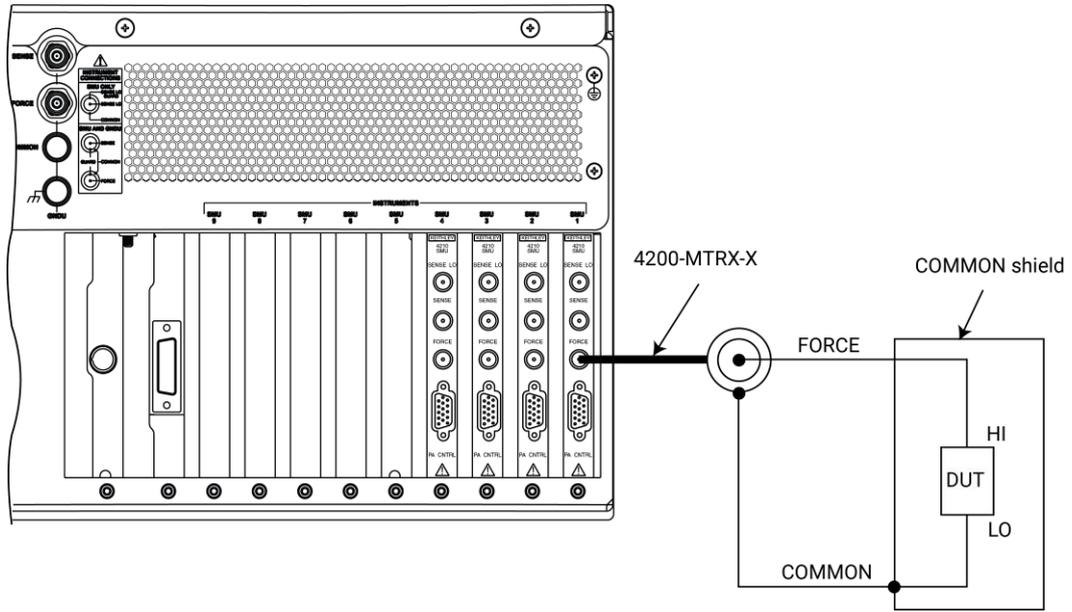
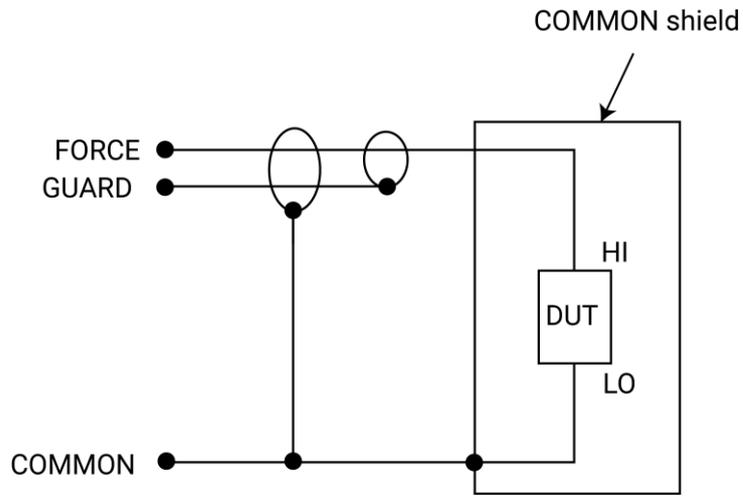


图 9：器件屏蔽基本电路



为了保护设备，请将待测器件屏蔽与 "GUARD" 连接。"GUARD" 是三轴电缆的内屏蔽，如下图所示。

图 10: 器件保护

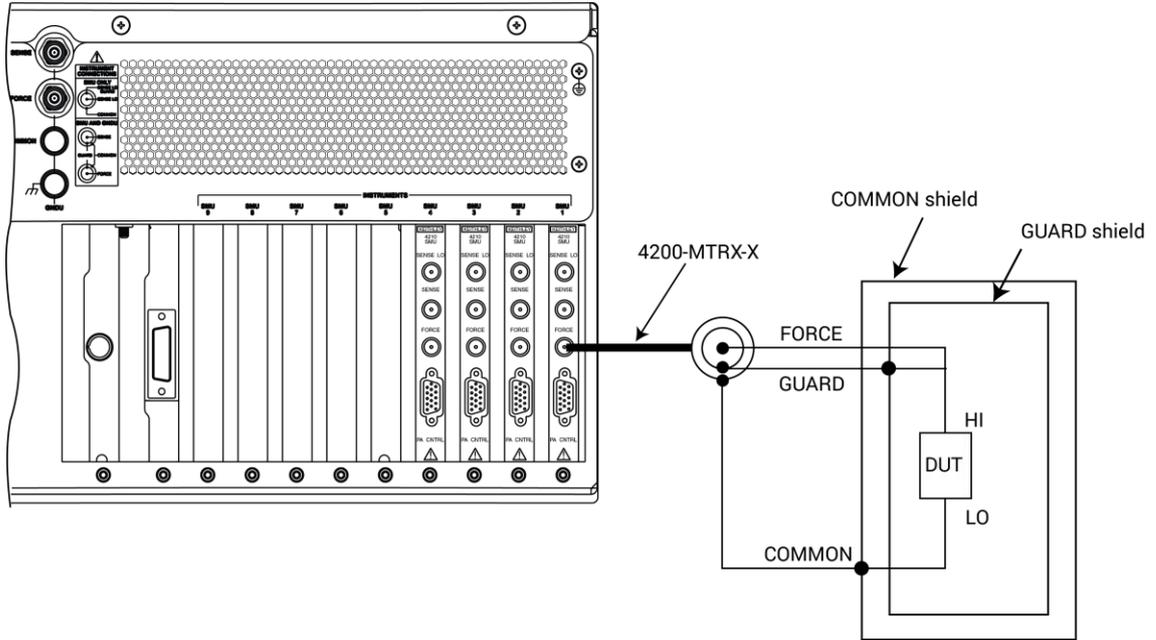
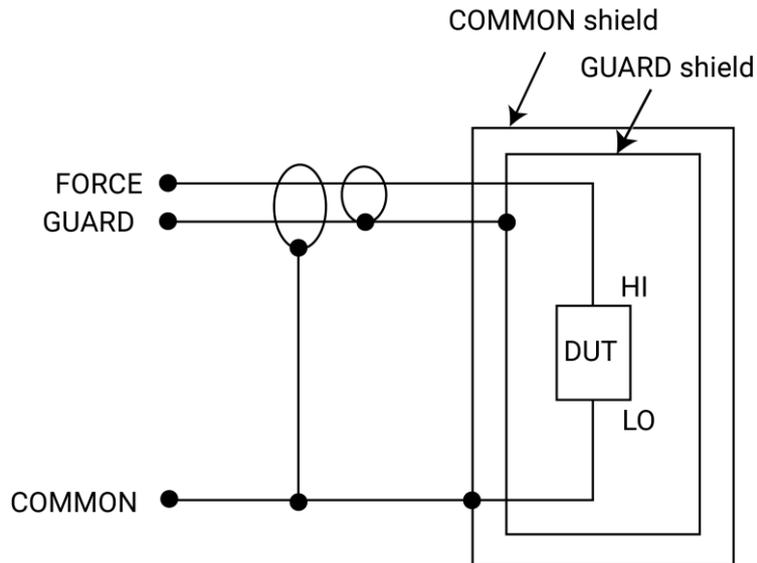


图 11: 器件保护基本电路



信号完整性

为了保证信号完整性，特别是在小电流情况下，请在 4200A-SCS 仪器与待测试器件（DUT）之间进行连接时考虑以下事项：

- 仅使用低噪声三同轴电缆，例如 SMU（4200-MTRX-X）和前置放大器（4200-TRX-X）提供的电缆。
- 尽可能使连接电缆短。
- 在进行测量时避免弯曲或振动连接电缆。
- 不要触摸连接器绝缘体。确保所有连接器绝缘体清洁，以最小化污染导致的漏电流。
- 避免电缆产生应力。以及避免测试线悬空。尽可能将线缆放置在桌子或平坦表面上。避免电缆过度弯曲。

有关测量完整性的更多信息，请参阅《Model 4200A-SCS 设置和维护》或《Keithley 低电平测量手册》中的“维护”部分。

使用超过两个 SMU 的接地单元

当使用超过两个 SMU 时，在使用基本连接的同时，请使用接地单元进行电路 COMMON 连接。确保将所有 DUT LO 端口连接到 GNDU FORCE 端口。如果使用远端测量，请将 DUT LO 端口也连接到 SENSE 端口。

SMU 电路 COMMON 连接

某些测试需要将 SMU 连接到每个 DUT 引脚。在这些测试中，电路 COMMON 未通过硬件连接到任何 DUT 引脚。当测试需要将 DUT 引脚连接到 COMMON 时，需要确保每个 SMU 的 FORCE 端在仪器内部与 COMMON 短接形成回路。

下图显示了使用三个 SMU 测试晶体管的典型 SMU 连接。您可以使用其中任何一个 SMU 通过编程来提供对电路 COMMON 的访问。有关配置 SMU 提供 COMMON 连接的详细说明，请参见 Model 4200A-SCS Clarius 用户手册。

图 12: SMU 典型连接

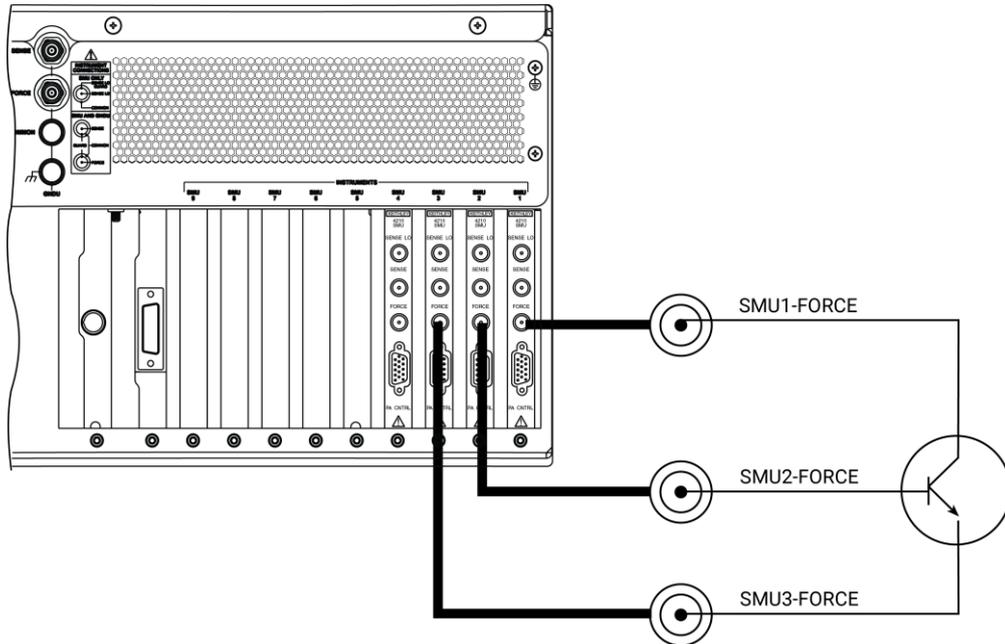
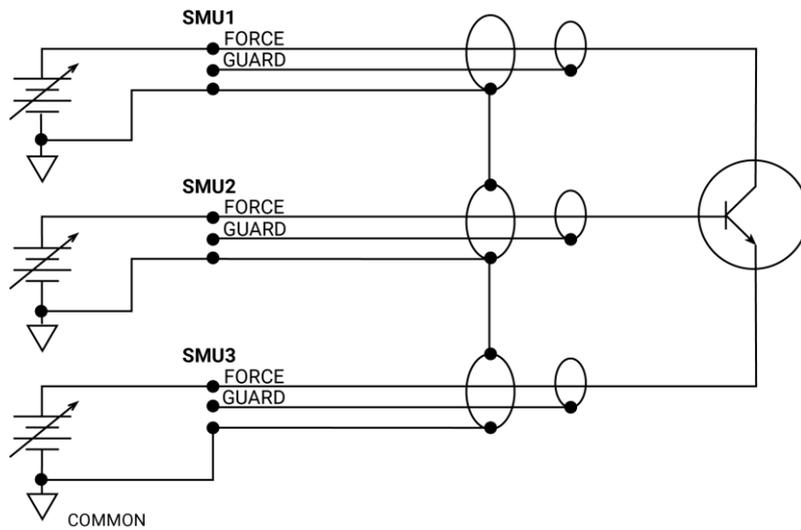


图 13: SMU COMMON 端连接示意图



2.1.2. 前置放大器本地测量（2 线）连接

下图展示了使用本地测量（2 线）的典型前置放大器连接方式。请使用三同轴进行连接，具体步骤如下：

- 将前置放大器 FORCE（FORCE 端芯线）连接到 DUT HI。
- 将信号公共端（FORCE 端外屏蔽）连接到 DUT LO。

注意

若使用多个前置放大器，请使用接地单元进行电路 COMMON 连接，而非前置放大器端子的外层屏蔽（参见“使用接地单元”）。

图 14: 前置放大器本地测量（2 线）连接

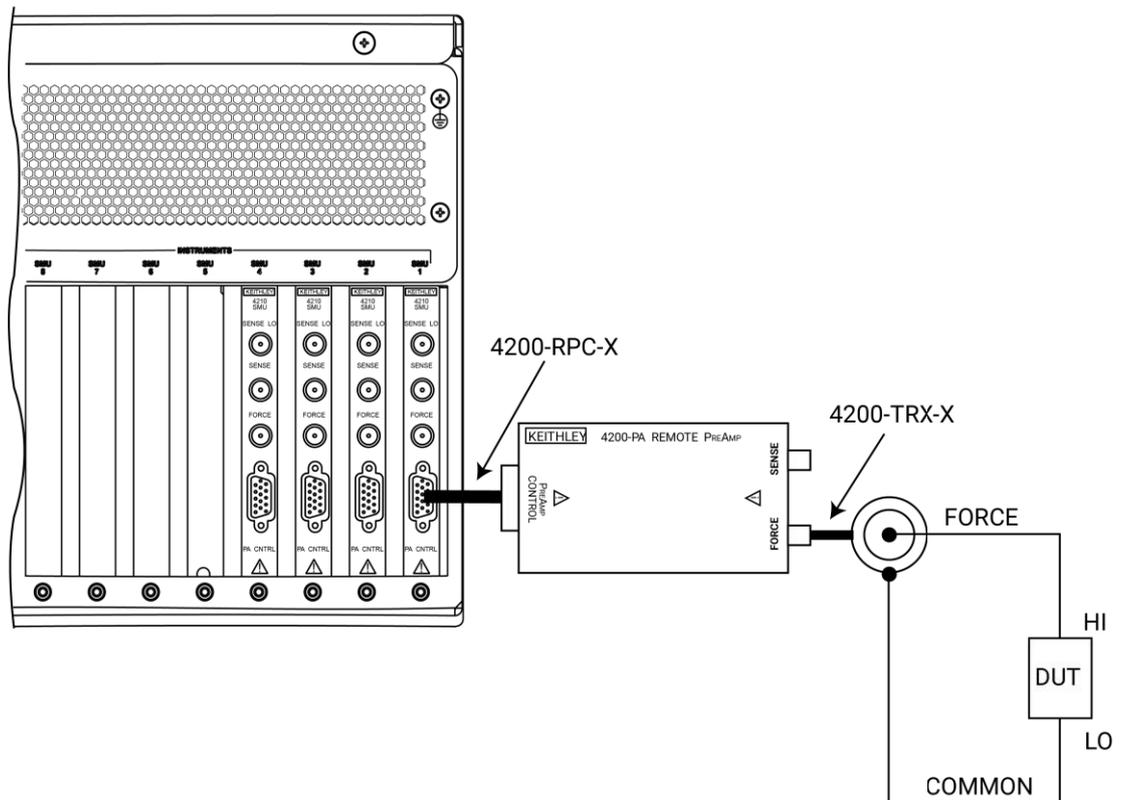
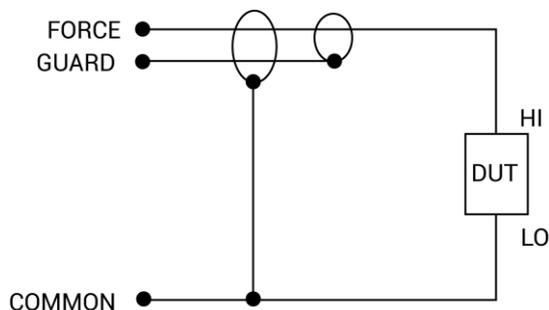


图 15: 基本的前置放大器本地测量（2 线）连接



2.1.3. 使用接地单元

接地单元（GNDU）通过 GNDU FORCE 端子或 GNDU COMMON 绑定端子提供方便连接的电路公共接口。GNDU 还有一个 SENSE 端子，4200A-SCS 中每个仪器的 SENSE LO 信号都连接到 GNDU SENSE 端子。因此，所有 SMU 测量都是相对于 GNDU SENSE 进行的，该信号默认连接到 COMMON。

注意

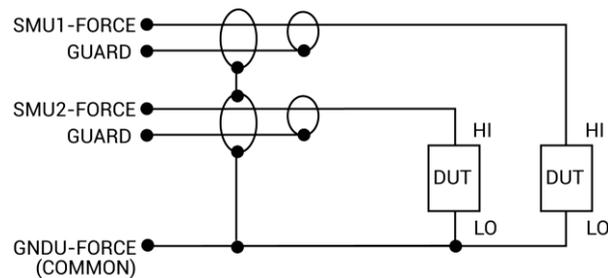
虽然接地单元旨在用于多个 SMU 时的电路公共连接，但在仅使用一个 SMU 时也可以用于电路 COMMON 连接。

接地单元和 SMU 本地测量（2 线）连接

以下图示显示了使用两个 SMU、两个 DUT 和接地单元的典型本地测量连接。请按以下步骤进行连接：

- 将两个 SMU FORCE 端子连接到两个 DUT HI 端子。
- 将两个 DUT LO 端子连接在一起，并将 GNDU FORCE 连接到公共的 DUT LO 连接点。

图 16: 接地单元和 SMU 本地测量连接示意图

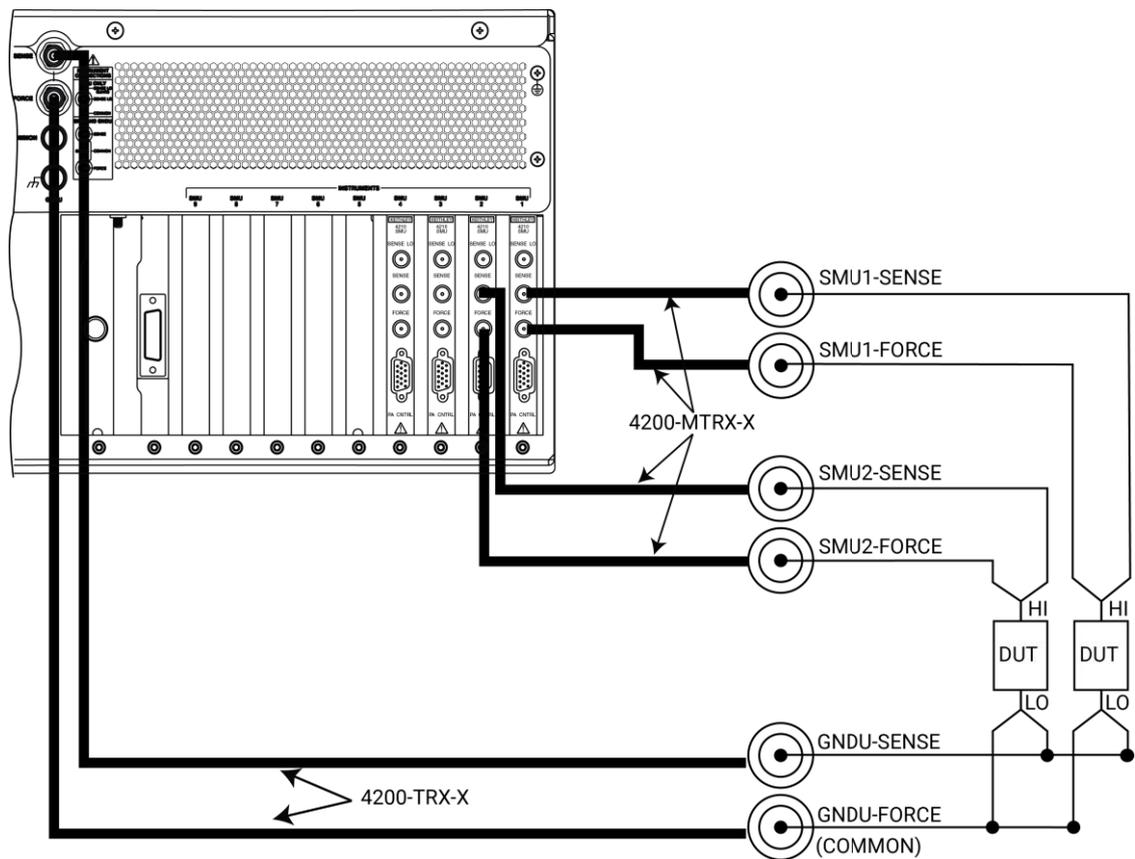


接地单元和 SMU 远端测量（4 线）连接

以下图示显示了使用两个 SMU、两个 DUT 和接地单元的典型远端测量（4 线）连接。请按以下步骤进行连接：

- 将 SMU FORCE 和 SENSE 信号连接到两个 DUT HI 端子。
- 将两个 DUT LO 端子连接在一起，将 GNDU SENSE 和 FORCE 连接到公共的 DUT LO 连接点。

图 17: 接地单元和 SMU 远端测量连接



接地单元和前置放大器的本地测量（2线）连接

下图展示了使用两个前置放大器、两个被测件和接地单元典型的本地检测连接方式。请按照以下方式进行连接：

- 将两个前置放大器 FORCE 信号连接到两个被测件的 HI 端。
- 将两个被测件的 LO 端连接在一起，并将 GNDU FORCE 信号连接到公共 DUT LO 连接点。

图 18: 接地单元和前置放大器本地测量连接

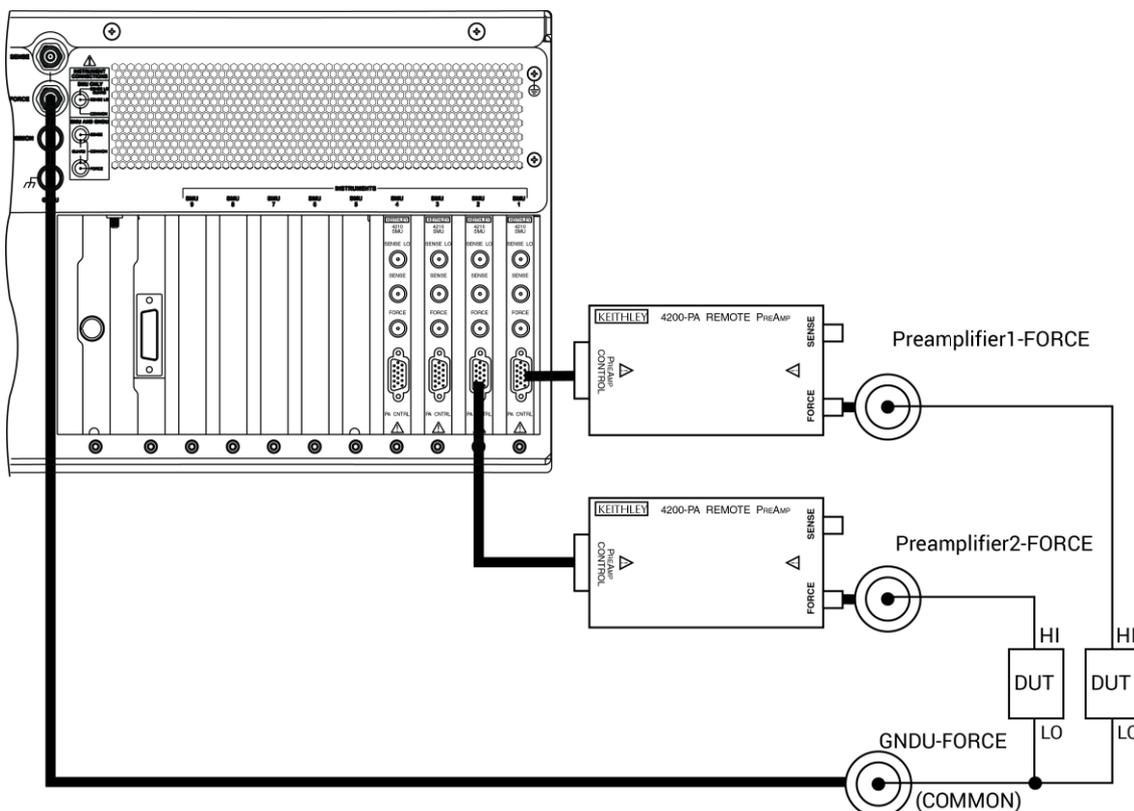
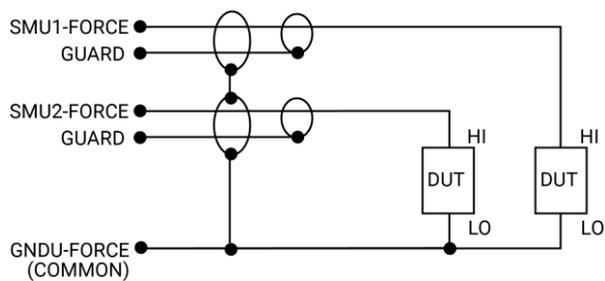


图 19: 接地单元和前置放大器本地测量连接示意图



接地单元和前置放大器的远端测量（4 线）连接

下图展示了使用两个前置放大器、两个被测件和接地单元典型的远端测量连接方式。请按照以下方式进行连接：

- 将前置放大器 FORCE 和 SENSE 信号连接到两个被测件的 HI 端。
- 将两个被测件的 LO 端连接在一起，并将 GNDU SENSE 和 FORCE 信号连接到公共 DUT LO 连接点。

图 20: 接地单元和前置放大器远端测量连接

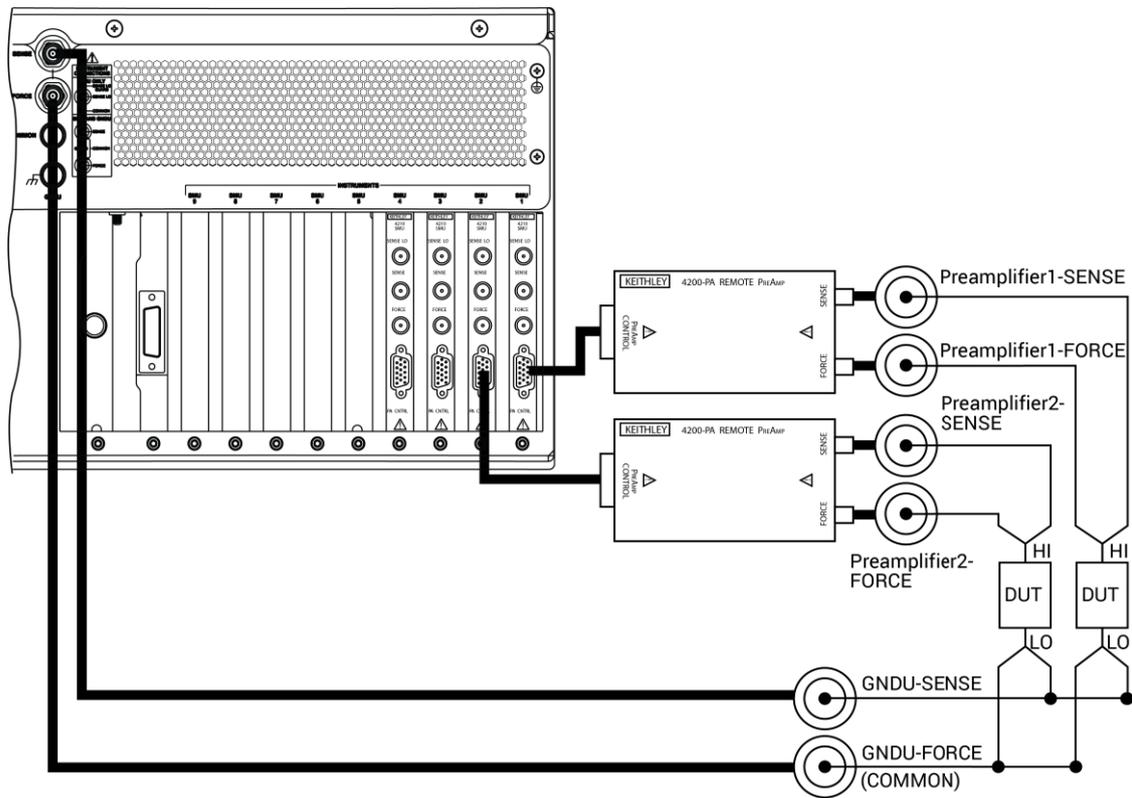
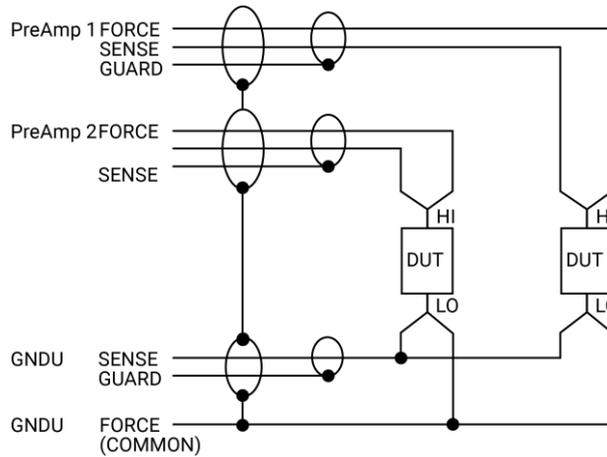


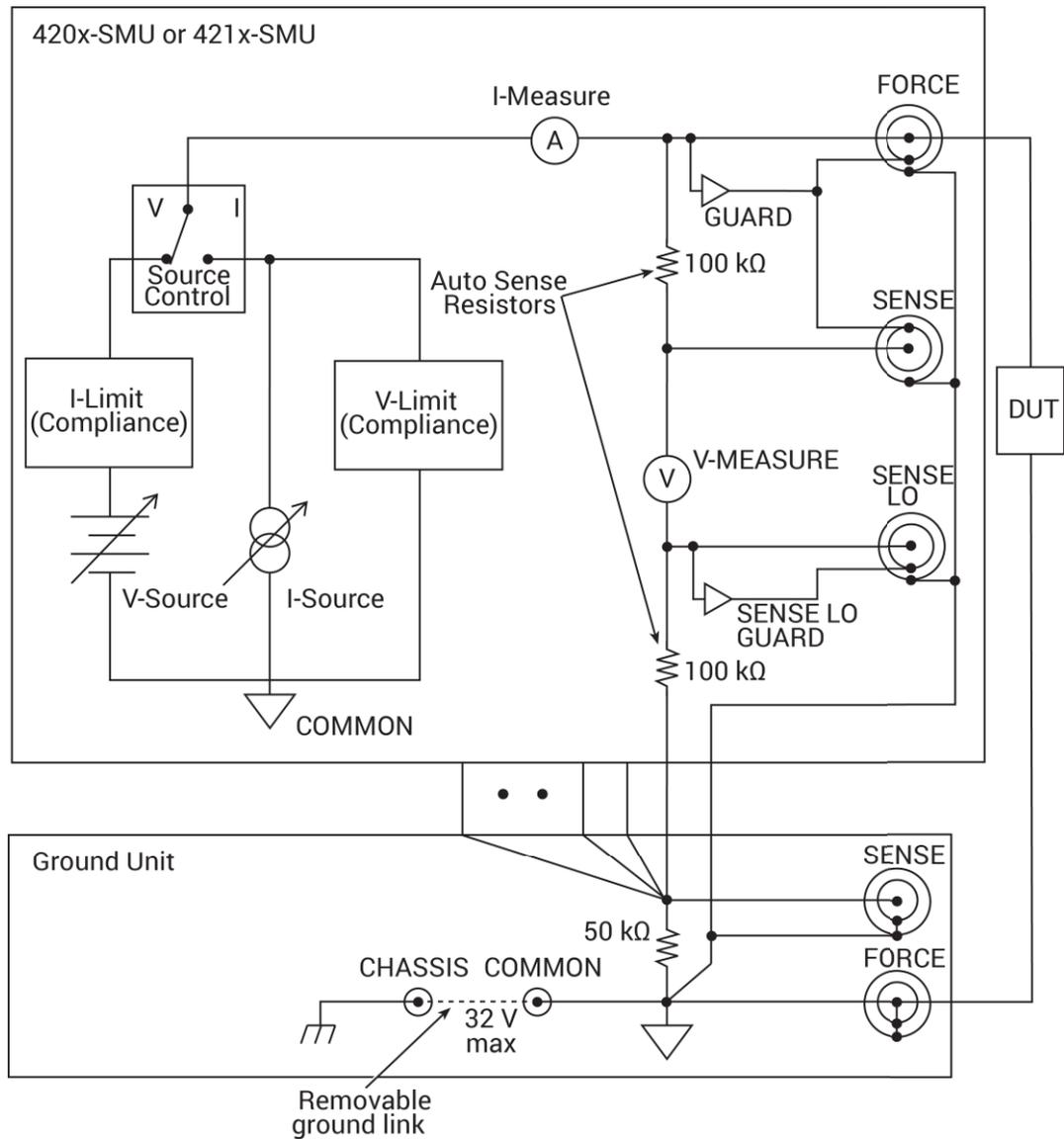
图 21: 接地单元和前置放大器远端测量连接示意图



2.1.4. 基本 SMU 电路配置

基本的 SMU 电路配置如下图所示。SMU 实际上是一个电压或电流源，与一个电流表串联，与一个电压表并联。电压限制 (V-limit) 和电流限制 (I-limit) 电路将电压或电流限制为编程的合规值。在这个本地测试 (2 线) 的例子中，SMU FORCE 终端连接到 DUT HI，而 DUT LO 连接到 COMMON。有关更详细的信息，请参阅[基本源测量连接](#)。

图 22: SMU 源 - 测量基本配置



SMU 接线端子和连接器

以下图表显示了 SMU 接线端子的位置和配置。这些终端的基本信息如下：

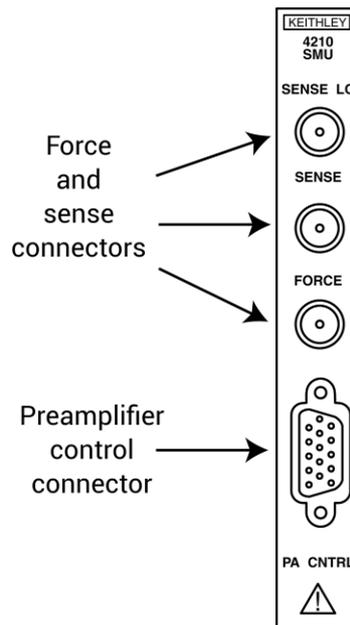
警告

当断开联锁装置时，SMU 和前置放大器终端可能会变得危险，使用户暴露于可能导致个人受伤或死亡的电击风险中。即使将输出设置为低电压，SMU 和前置放大器终端也应被视为危险的。必须采取预防措施，通过使用额定电压为 250V，类别 O 的双重绝缘来包围测试设备和任何未保护的引线（布线）以防止电击危险。

注意

COMMON 和机壳地之间允许的最大直流电压为 $\pm 32V$ 。

图 23: 4200-SMU 和 4210-SMU 接口



SENSE LO 端

SENSE LO 端是一种微型三轴连接器，用于在 full-Kelvin（远端测量）应用中将 SMU SENSE LO 信号应用于 DUT。

- 芯线是 SENSE LO
- 内屏蔽是 SENSE GUARD
- 外屏蔽是电路的 COMMON

在 SENSE LO GUARD 和 COMMON 之间存在内部自感应电阻。

注意

使用接地单元的远端测量方式而不是 SMU 的 SENSE LO。如果需要使用 SMU 的 SENSE LO 终端，请将所有用于单个 4200A-SCS 的 SMU 的 SENSE LO 终端连接到 DUT。

SENSE 端

SENSE 端是一种微型三轴连接器，在不使用前置放大器时，远端测量应用中将 SMU SENSE 信号连接到 DUT。

- 芯线是 SENSE
- 内屏蔽是 GUARD
- 外屏蔽是电路的 COMMON

在 SENSE 和 FORCE 之间存在内部自感应电阻。

注意

为了使 SMU 正常工作，不需要将 SENSE 终端连接到 DUT。远端测量（4 线）是自动的。如果连接了 SENSE 到 DUT，则可以消除由于 SMU 和 DUT 之间的 FORCE 路径中的电压降导致的误差，并且 SMU 进行本地感应。

FORCE 端

FORCE 端是一种微型三轴连接器，用于在不使用前置放大器时将 SMU FORCE 信号连接到 DUT。

- 芯线是 FORCE
- 内屏蔽是 GUARD
- 外屏蔽是电路的 COMMON

PA CNTRL 连接器

PA CNTRL（前置放大器控制）端口是一个 15 针 D-sub 连接器，提供 4200-PA 远程前置放大器的电源和信号连接。前置放大器可以直接安装和连接到 SMU，也可以使用电缆（4200-RPC-X）在远程安装时连接到 SMU。有关前置放大器的更多信息，请参阅“带有 4200-PA 概述”的源测量单元（SMU）（第 4-5 页）。

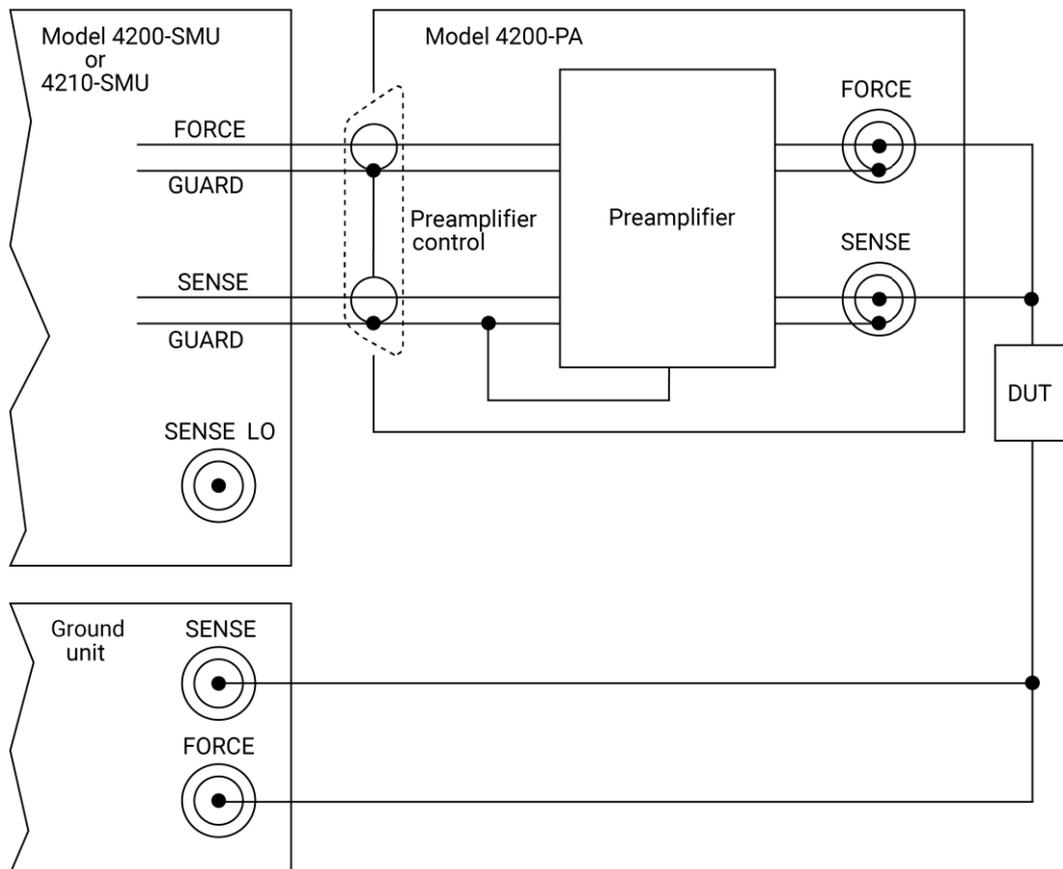
基本的 SMU 和前置放大器电路配置

下图显示了基本的 SMU 和前置放大器电路配置。

注意

前置放大器 FORCE 端口连接到 DUT HI。DUT LO 连接到地面。

图 24: SMU 和前置放大器源测量基本配置



2.2. 测试夹具和被测试器件（DUT）连接

建议与 4200A-SCS 一起使用的 Keithley Instruments 测试夹具是 Model 8101-PIV。

适用于 4200A-SCS 的测试夹具包括：

- 低电压夹具（小于 $\pm 20\text{ V}$ ）。
- 高电压夹具（大于 $\pm 20\text{ V}$ ），需要额外的预防措施以确保没有触电危险。

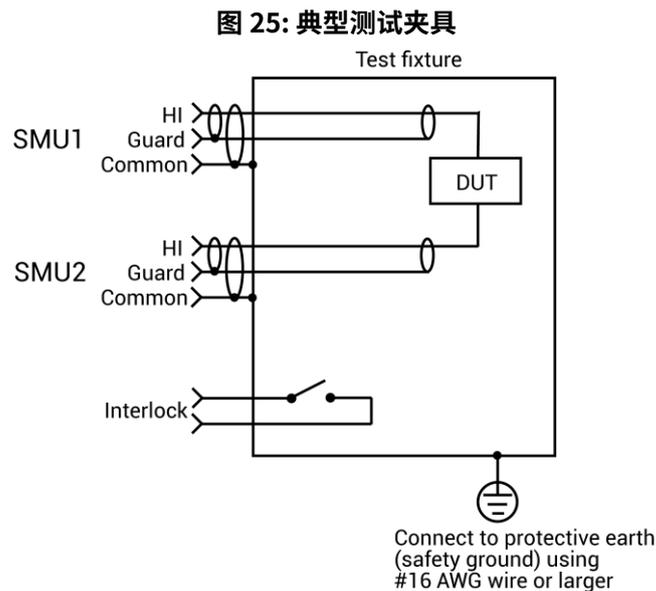
警告

为了避免高电压暴露可能导致人身伤害或死亡，无论是否断开 4200A-SCS 的联锁，SMU 和前置放大器的 FORCE 和 GUARD 端口都应被视为高电压，即使它们设置的电压电为安全值。

2.2.1. 使用 SMUs 进行小于 $\pm 20\text{ V}$ 的测试

对于测试离散器件，您需要一个配备三同轴连接器的测试夹具。这样可以将 4200A-SCS 连接到离散器件上。

下图显示了测试两端子器件的基本测试夹具。



在小于 $\pm 20\text{ V}$ 的情况下进行测试时，为获得最佳性能，请遵循以下标准行业惯例：

- 使用金属测试夹具
- 将金属夹具连接到 COMMON 端口
- 将 DUT 安装在高电阻终端（例如 Teflon™）上
- 使用 Guarding 来减小影响测量质量的泄露和寄生电容。

Keithley Instruments 的《低水平测量手册》提供了有关 Guarding 和其他用于构建高质量测试夹具的技术的深入讨论。在您的 4200A-SCS 的学习中心中获取该手册的副本。

注意

在未断开联锁的情况下，4200A-SCS 可在所有电流范围内工作并达到 ± 20 V。

2.2.2. 使用大于 ± 20 V 进行测试

警告

如果不触发联锁，SMU 和前置放大器终端可能会变得危险，因此用户可能会面临电击的风险，这可能导致人身伤害或死亡。即使将输出设置为低电压，也应视 SMU 和前置放大器终端为危险的。必须采取预防措施，通过用额定电压为 250 V、O 类的双重绝缘材料包围测试设备和任何未保护的引线（布线）来防止电击危险。

如果需要进行大于 ± 20 V 的测试，请遵循以下做法：

- 在测试装置上添加联锁开关，以确保在测试装置外壳打开时不存在危险电压。
-

注意

当测试装置外壳关闭时，4200A-SCS 电压输出更高。

- 使用 #16 AWG 或更粗的线连接外壳与公共地或安全地。
 - 确保装置内部的布线（FORCE、GUARD 和 SENSE）不会与外壳发生电接触。
-

2.2.3. 建议使用的连接电缆

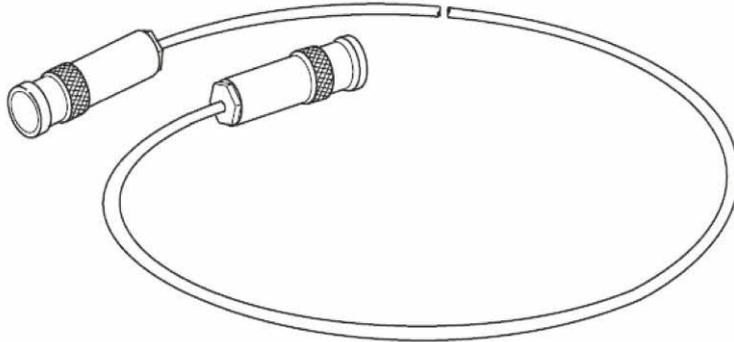
为了确保准确可靠的连接，请仅使用质量良好、低噪声的三芯电缆，例如供应给 SMU (4200-MTRX-X) 和前置放大器 (4200-TRX-X) 的电缆，用于所有源测量信号连接。

注意

为了获得最佳的测量精度、噪声抗扰度和稳定时间，请将电缆保持尽可能短。

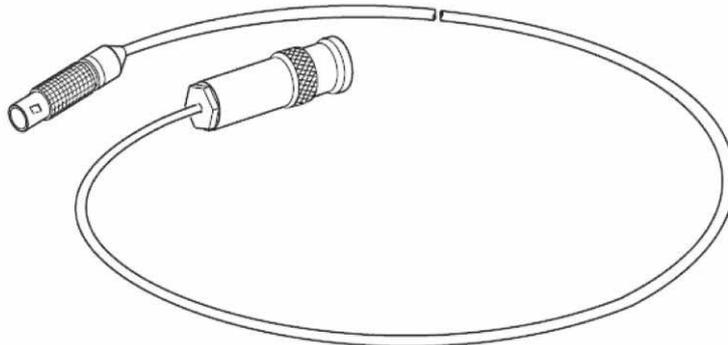
三同轴电缆用于连接待测设备（DUT）。在安装前置放大器时，请使用低噪声的三同轴电缆，其两端均带有三槽的三同轴连接器。电缆的一端连接到前置放大器，另一端连接到 DUT 测试装置或探针台。

图 26: 三同轴测试线 4200-TRX-X



如果系统未安装前置放大器，请使用一端带有迷你三芯连接器，另一端带有标准 3 槽三同轴连接器的电缆。带小型连接器的电缆末端直接连接到 SMU，另一端连接到测试装置或探针台。

图 27: 三同轴线缆 4200-MTRX-X



注意

在安装前置放大器时，永远不要直接连接到 SMU 模块上的任何迷你三芯连接器。这可能会导致 SMU 或 DUT 损坏，并且可能产生错误数据。

在 Clarius 中设置 SMU

3.1. 简介

以下主题描述了在 Clarius 中设置 SMUs 的基本测试和终端设置。它还提供了有关 SMUs 可用选项的描述。

有关使用 Clarius 的更详细信息，请参阅 Model 4200A-SCS Clarius 用户手册。

3.2. 设置简单项目：

要开始测试，可以从新项目开始或使用现有项目。一个项目包括设备和测试等项目。

测试的操作顺序由项目树中项目的选择和顺序决定。

以下主题描述了如何使用来自项目库的现有项目设置和运行简单项目。

3.2.1. 选择项目组件：

使用“Select”窗格向项目树添加项目。当选择 Select 后，中心窗格包含测试、设备、操作、晶片计划和项目的库。您可以使用过滤器和搜索选项帮助您找到所需的测试项目。

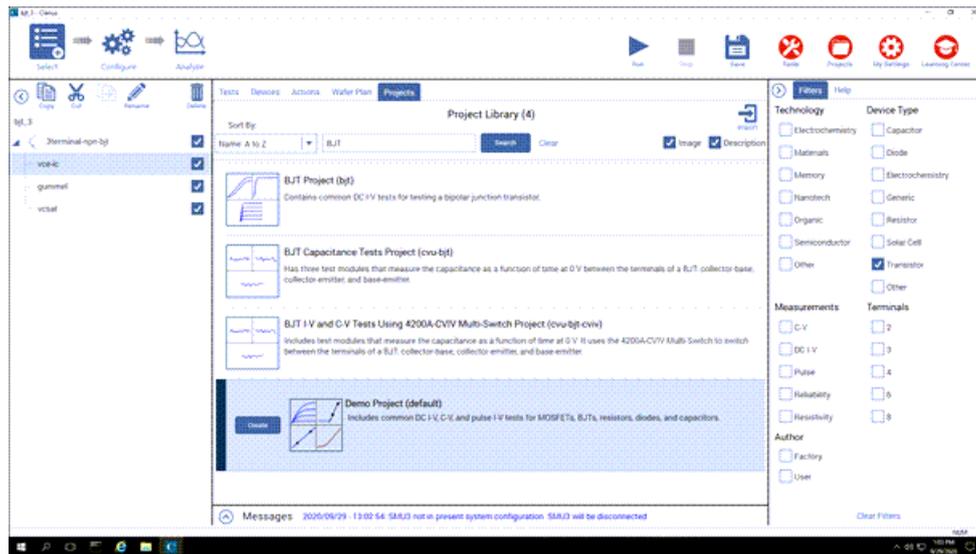
要清除过滤器，请选择“Filter”窗格底部的“Clear Filters”。要清除搜索，请选择搜索按钮旁边的“Clear”。

以下示例向您展示如何为双极晶体管（BJT）选择测试。

为设置 BJT 测试：

1. 选择 **“Save”** 以保存现有项目。
2. 选择 **“Select”**。
3. 选择 **“Projects”** 选项卡。
4. 在 **“Filters”** 窗格中，选择 **“Transistor”**。
5. 在搜索框中输入 **“BJT”**，然后选择 **“Search”**。项目库将显示用于 BJT 晶体管测试的项目。
6. 选择要打开的项目的 **“Create”**。该项目将替换项目树中的先前项目。

图 28: bjt 项目中滤波和搜索



3.2.2. 添加器件并测试项目

您可以向项目添加其他项。将库中的项目添加到项目树时，会从库中的项目复制。您所做的任何更改都不会影响原始项目。项目树中的新项目会自动存储在 **“Project”** 文件夹中。

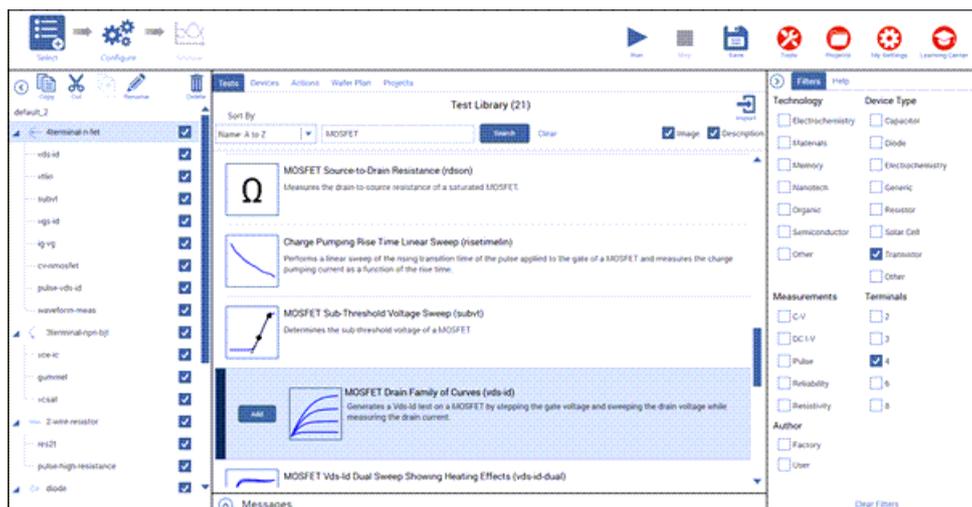
此示例向您展示如何向项目添加预定义的测试。预定义测试配置了常用的参数设置和一组典型数据。一旦它们被添加到项目中，您可以根据需要更改参数。这种方式可以向项目中添加测试。

您可以使用此处描述的基本过程来查找库中的任何项。

向项目添加四端器件 MOSFET 设备和测试：

1. 在中心窗格中选择 **Test**。
2. 在窗口中，选择 **Transistor** 和 **4 Terminals**。
3. 在搜索框中输入 **MOSFET** 并选择 **Search**。
4. 滚动到 **MOSFET Drain Family of Curves (vds-id)** 测试。
5. 选择 **Add**。所选测试和设备将添加到项目树中之前被选中的一个项目下方。
6. 要移动器件和测试，请将设备拖到新位置。
7. 选择 **Save**。

图 29: 将 MOSFET 器件和测试添加到项目中



注意

如果测试所需的器件不在项目树中，则在向项目树添加测试时，Clarius 会添加相应的器件类型。您也可以分别添加器件和测试。

3.3. 配置简单测试

使用 Configure 窗格设置测试。对于交互式测试模块 (ITM)，“Configure”窗格显示测试设备的原理图。原理图连接到一个对象，该对象显示操作模式和连接到末端的仪器类型。

注意

以下主题讨论了交互式测试模块 (ITM) 的测试设置窗格。对于基于用户模块 (UTM) 的测试，您可以使用测试设置窗格中的选项选择测试所需的用户库和用户模块。有关 UTM 可用设置的信息，请参阅“Model 4200A-SCS Clarius 用户手册”中的“创建自定义测试”部分。

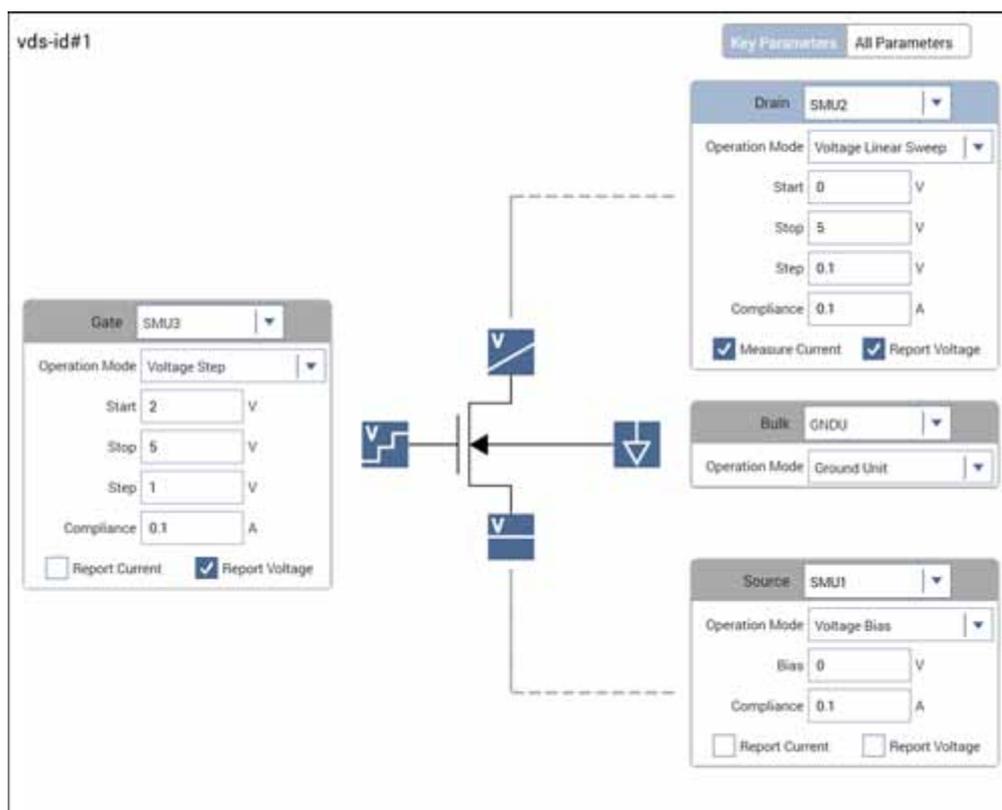
注意

在执行测试时，Clarius 软件中选择的连接必须准确反映物理硬件连接。不正确的终端配置可能导致异常测试结果和设备损坏。

待测件每个端子的关键参数显示在终端附近。关键参数包括：

- 终端类型：例如栅极、漏极、源极或集电极。
- 连接到仪器的端子：在测试过程中，您分配与待测件引脚物理连接的仪器、接地单元或开路。
- 操作模式和基本设置：例如，如果选择扫描操作模式，则会显示起始值和停止值。

图 30: 设置界面



注意

对于用户测试模块（UTM），显示取决于 UTM 所基于的用户模块的设置。

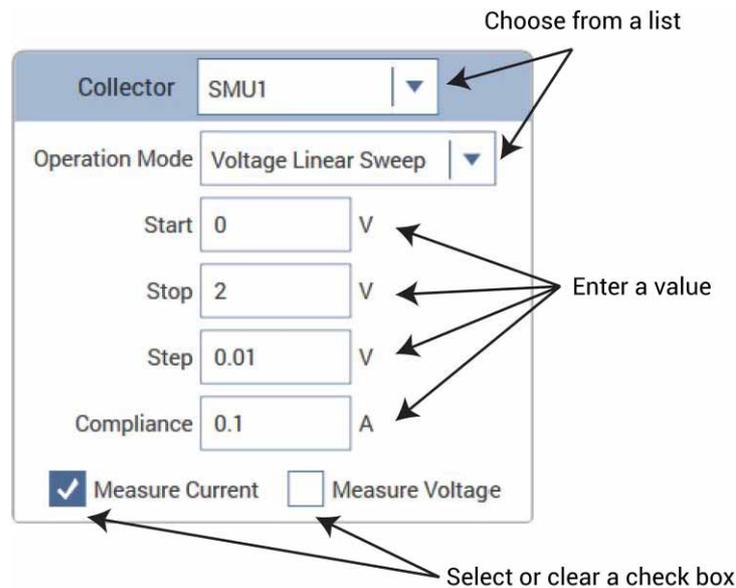
3.3.1. 设置关键参数

关键参数是终端最常用的参数。

设置关键参数：

1. 选择要更改的字段。
2. 如果字段右侧有：
 - **向下箭头**：从列表中选择一个值。
 - **字段**：输入值。如果输入超出范围的值，则会显示错误消息。
 - **复选框**：选择或取消选择复选框以启用或禁用选项。

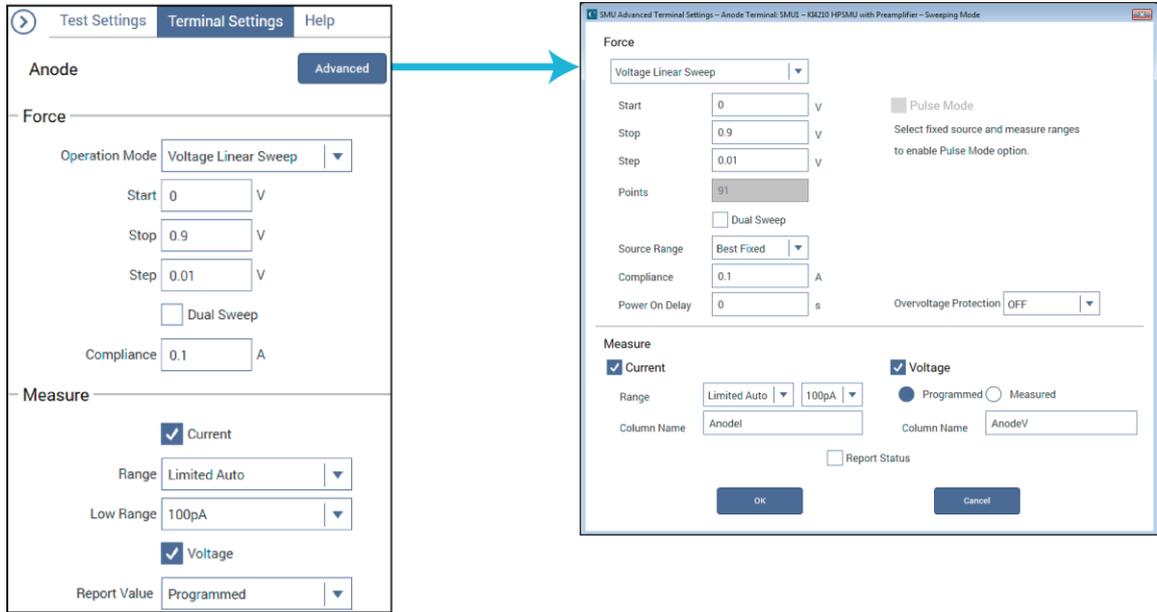
图 31: Clarius 选择选项



3. 选择 Save。

附加终端设置可从右侧窗格终端设置选项卡中获得，如下图所示。有关选项的描述，请参阅 [SMU-所有终端参数](#)。

图 32: 终端设置选项卡和终端设置高级对话框



3.3.2. 设置测试参数

在“测试设置”窗格中，您可以设置以下内容：

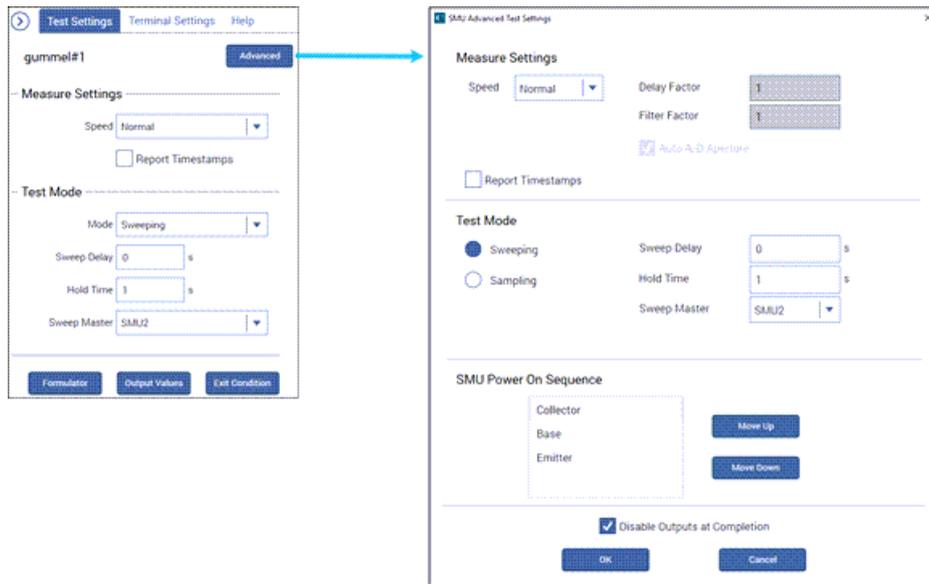
- 测试速度。
- 时间戳报告。
- 延迟。
- 保持时间。
- 使用 Formulator 进行测试内和测试后数据计算。有关使用 Formulator 的详细信息，请参阅“Model 4200A-SCS Clarius 用户手册”的“Formulator”部分。
- 符合退出条件。

注意

您可以在 Test Setting 选项卡上配置多个测量延迟。但是，如果您使用 Auto 量程，这些延迟不包括 Auto 量程切换的延迟。

设置测试参数：

1. 在项目树中选择测试。
2. 选择 **“Configure.”**。
3. 在右窗格中选择 **“Test Settings”**。

图 33: SMU 测试相关设置

4. 根据需要调整设置。
5. 如果需要，选择 **“Advanced”** 以访问其他设置。

有关测试选项的说明，请参见 [“SMU 测试设置”](#)。

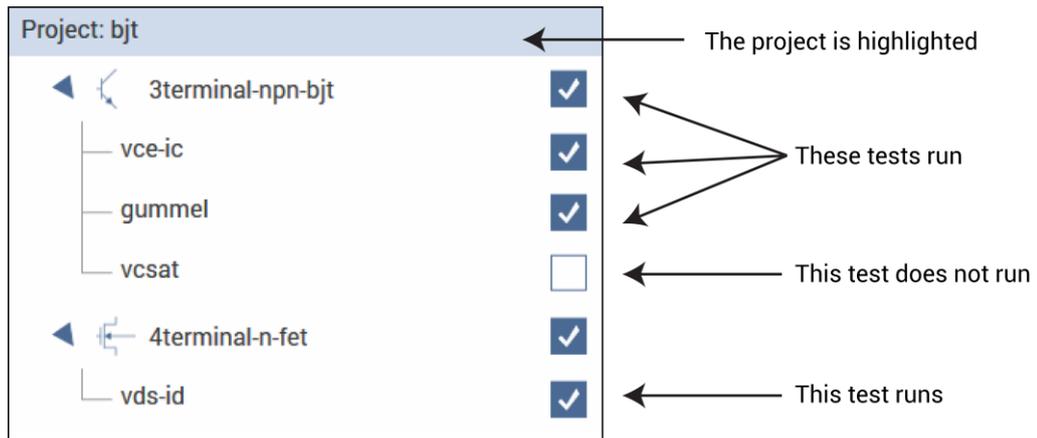
3.4. 运行简单测试

当您选择运行 (Run) 时，项目树中被选中项下一级菜单中的已选测试和操作将按照项目树由顶部到底部的顺序执行。如果要运行整个项目，请确保项目名称已被选中。运行项目将保存项目的配置和现有运行记录。

在下面的示例中，当您选择运行时，会发生以下情况：

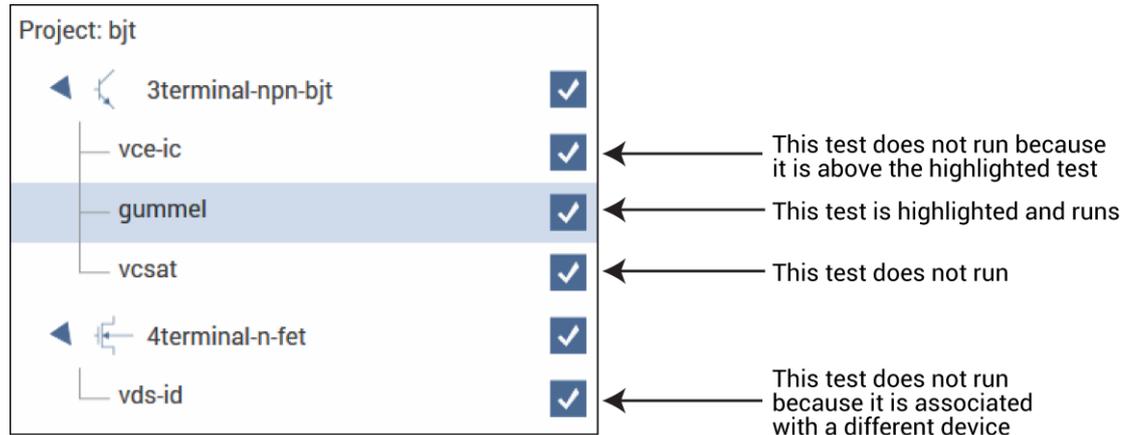
- 运行 **vce-ic** 测试。
- 运行 **gummel** 测试。
- 跳过 **vcsat** 测试。
- 运行 **vds-id** 测试。

图 34: 在项目中运行测试



在下面的示例中，仅运行 gummel 测试。即使选择了其他测试，它们的在层级结构中并不低于 gummel 测试。

图 35: 运行特定测试



在 Clarius 中运行测试：

1. 在项目树中选择要运行或执行的测试和操作。
2. 选中您想要测试的项目。例如，如果要运行整个项目，请选中项目名。
3. 选择 **Run**。
4. 选择 **Analyze** 以查看结果。

注意

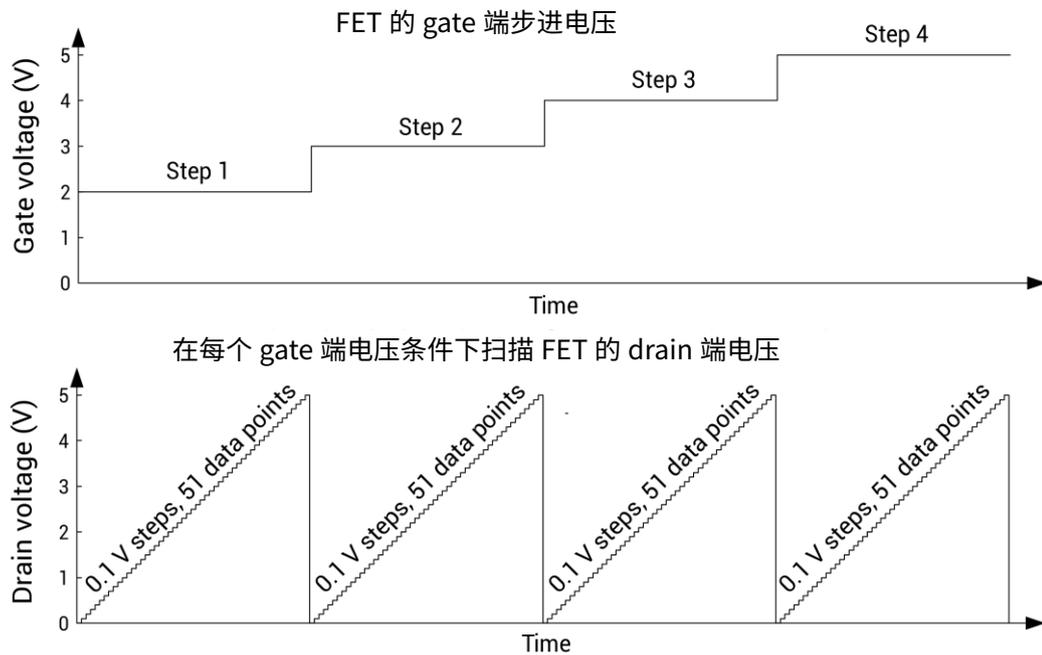
要中止测试，请选择停止。所有测试和操作立即停止执行。

3.5. 操作模式 (SMU)

操作模式确定对待测运行何种类型的测试。选择适当的模式设置该操作的最常见设置，从而简化了终端和测试配置。下列主题描述了在选择 SMU 作为测试仪器时可用的操作模式。有关可设置的操作模式参数的说明，请参阅 SMU 所有终端参数。

一些操作模式允许扫描或步进。下图说明了步进和扫描之间的区别。

图 36: 步进和扫描示例



3.5.1. 开路操作模式 - SMU

在选择开路操作模式时，终端会保持零电流状态，但对于连接的 SMU 的最大电压限制有所影响。

在选择开路操作模式时，您无法设置任何参数。

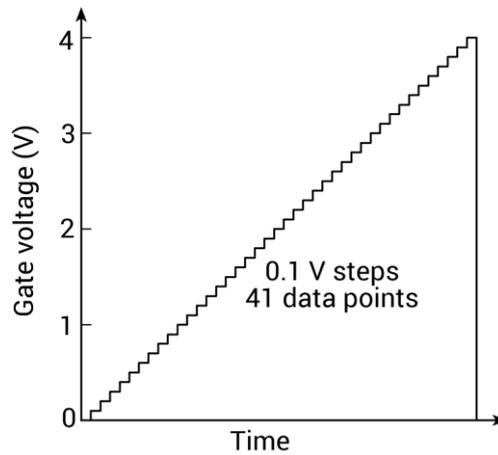
3.5.2. 电压偏置操作模式

电压偏置操作模式会在终端上保持选定的恒定电压状态，但同时取决于所用 SMU 设置的电流限制值。

3.5.3. 电压线性扫描操作模式 - SMU

当您选择电压线性扫描操作模式时，测试会通过一系列恒定电压步进递增。您需要定义起始和结束电压以及每个步进之间的电压大小。下面的图为一个示例。

图 37: 线性扫描示例



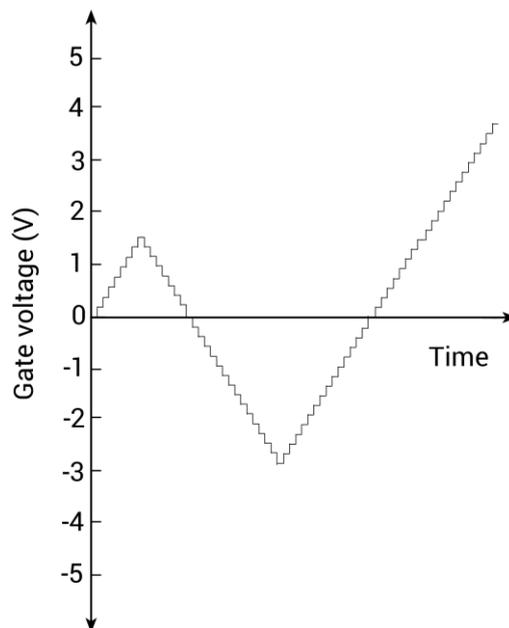
电压扫描的参数曲线数据记录在 Analyze 窗口中。

3.5.4. 电压分段扫描操作模式

当您选择电压分段扫描操作模式时，测试会通过一系列恒定电压步骤进行递增。您可以定义起始电压和最多四个停止电压点和四个步进电压点。

下图为三段电压扫描的示例。

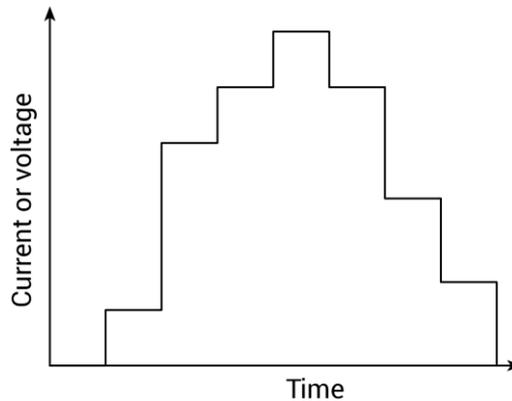
图 38: 多段电压扫描示例



3.5.5. 电压列表扫描操作模式

电压列表扫描操作模式允许您自定义扫描过程中每个步进的电压值。列表扫描允许您仅在选择的电压和电流下进行测量。例如，它们允许您跳过不重要的测量点或合成基于特殊数学方程的自定义扫描。您还可以使用列表扫描来进行脉冲测量，以避免灵敏的待测件因长时间被施加电压而产生的过热现象。下图为列表扫描示例。

图 39: 列表扫描示例



电压扫描产生的参数曲线数据记录在 Analyze 窗口中。

3.5.6. 电压对数扫描操作模式

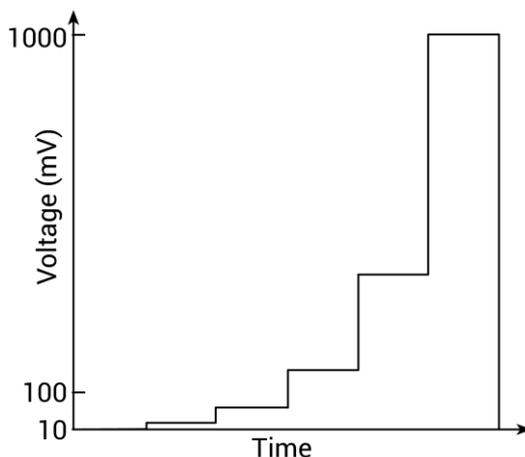
电压对数扫描操作模式允许您在大范围内进行扫描，并以对数比例绘制测量结果。

对于这种应用，线性扫描通常是不理想的，因为第一个增量可能会错过几个较低电压。例如，从 0.001 V 到 10 V 的 101 点线性扫描中的第一个近 0.1 V 的步骤会错过 0.001 V 到 0.1 V 之间的十倍程参数 (0.01)。

相比之下，对数扫描在指定范围内对步长以对数的方式递增，以便所有是被程参数均匀地被表征。

下图示展示了对数扫描的示例。

图 40: 对数扫描示例

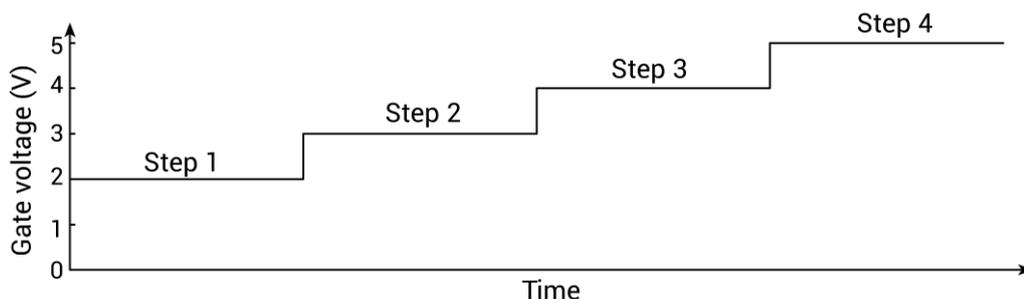


3.5.7. 电压步进操作模式

电压步进操作模式通过您指定的范围均匀增加恒定电压步长。每个步骤的时间间隔由完成一次扫描所需的时间自动确定。

对于每个步进，生成参数曲线数据，并记录在 Analyze 面板中。

图 41 FET 的 gate 端步进电压



3.5.8. 电流偏置操作模式

电流偏置操作模式在终端输出恒定的设置电流，同时输出电流受该 SMU 的最大电压参数影响。

3.5.9. 电流线性扫描操作模式 -SMU

当您选择电流线性扫描操作模式时，测试通过一系列恒定电流步进递增。您可以定义每个步进之间的起始电流、停止电流和电流大小。

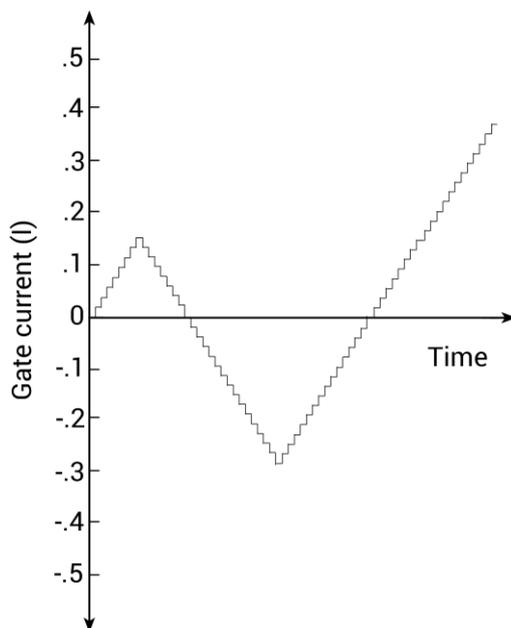
电流扫描生成参数曲线数据，记录在 Analyze 面板中。

3.5.10. 电流分段扫描操作模式 -SMU

当您选择电流段扫描操作模式时，测试会逐个增加一系列恒定电流步进。您可以定义起始电流、最多四个停止电流点和四个步进电流点。

以下图示例展示了一个三段电流扫描。

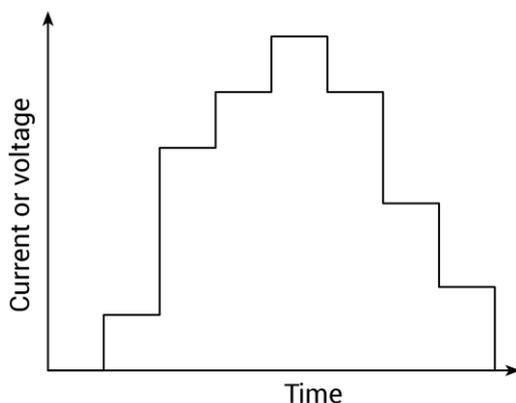
图 42: 分段电流扫描示例



3.5.11. 电流列表扫描操作模式 -SMU

电流列表扫描操作模式允许您自定义扫描每个步进的电流值。列表扫描只允许在选定的强制电压和电流下进行测量。例如，它们允许您跳过不重要的测量点或合成基于特殊数学方程的自定义扫描。您还可以使用列表扫描进行脉冲测量，以避免灵敏的待测件因长时间被施加电流而产生的过热现象。下图为列表扫描示例。

图 43: 列表扫描示例



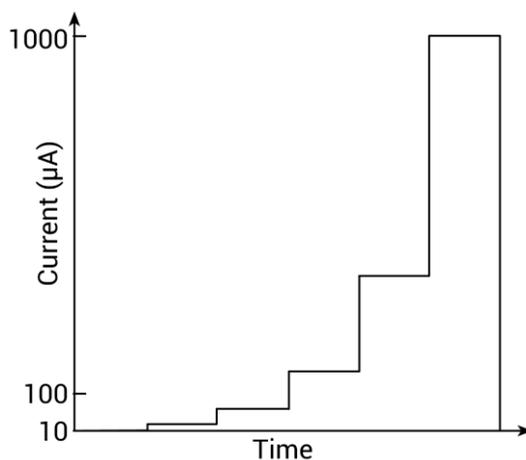
电流扫描在 Analyze 窗格中记录生成的参数曲线数据。

3.5.12. 电流对数扫描操作模式 -SMU

电流对数扫描操作模式允许您在大范围内进行扫描，并以对数比例绘制测量结果。

以下图示例展示了一个对数扫描。

图 44: 对数扫描示例

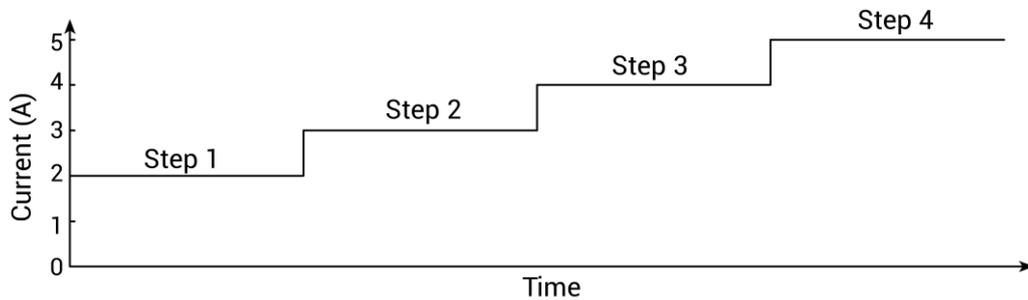


电流对数扫描生成的参数曲线数据记录在 Analyze 窗格中。

3.5.13. 电流步进操作模式

电流步进操作模式按照您指定的范围逐步增加均匀间隔的恒定电流步进。每个步进的时间间隔由完成扫描所需的时间自动确定。

图 45 二极管步进电流



对于每个步进，会生成参数曲线数据，并记录在 Analyze 窗格中。

3.5.14. 常规操作模式 -SMU

常规操作模式使 SMU 端子保持在零电压状态，并调节电流符合当前状态。4200-SMU 和 4201-SMU 的合规电流为 105mA。4210-SMU 和 4211-SMU 的合规电流为 1.05A。

您不能为常规操作模式设置任何参数。

3.6. SMU- 所有端口参数

当选择 All Parameters 时，Configure 窗口显示所选项目树中端口的所有可调参数。

参数将在以下内容中进行说明。

3.6.1. 基础电流

在选择脉冲模式时可用。仪器关断脉冲输出时输入的电流大小。您可以设置的电流值取决于当前的源量程。

3.6.2. 基础电压

在选择脉冲模式时可用。仪器关断脉冲输出时输出的电压大小。您可以设置的电压值取决于当前的源量程。

3.6.3. 偏置

偏置是恒定的电压或电流量。

3.6.4. 列名（测量电流）

当前测量的名称。这是 Clarius 在 Analyze 电子表格列中显示该测量的名称。

如果您没有定义名称，则 Clarius 会分配一个名称。分配的名称是终端标签和 I 的组合。例如，基极终端被分配名称 Basel。该值不能为空。如果为空，Clarius 会使用先前的值。

当运行测试时，名称将更新。通过 Run History 可用的较早测试结果不会更改为新名称。

3.6.5. 列名（测量电压）

电压测量的名称。这是 Clarius 在 Analyze 电子表格列中显示该测量的名称。

如果您没有定义名称，则 Clarius 会分配一个名称。分配的名称是终端标签和 V 的组合。例如，漏极终端被分配名称 DrainV。该值不能为空。如果为空，Clarius 会使用先前的值。

当运行测试时，名称将更新。通过 Run History 可用的先前测试结果不会更改为新名称。

3.6.6. 合规

您可以设置限制，防止 SMU 源电流或电压超过该限制。此限制称为合规，并有助于防止测试设备 (DUT) 受损。SMU 不会超出规定的最大限制。当 SMU 用作电流源时，电压将在规从值处被钳位；相反，当 SMU 用作电压源时，电流将在规从值处被钳位。

当 SMU 达到合规设置时，它将继续进行测量。但是，测量结果将保持在达到限制值时的数据。例如，如果您选择源为电压，且 limit 设置为 100 mA，则在达到合规值后，它将继续测量 100 mA。而电压并不会随设置增加。

如果源达到合规值，您可以停止测试。有关详细信息，请参见[合规退出条件选项](#)。

如果设置特定的测量范围，则合规值也可以受到该范围的限制。设置合规值必须大于测量范围的 11%。否则，会生成警告，并自动将合规值设置为所选量程的最大合规值。例如，如果合规值设置为 1 V，测量量程为 200 mV，则输出电压将被钳位在 210 mV。如果尝试将合规值更改为不适合的值，则合规限制不会被更改，并生成警告。您必须在设置新的合规值之前更改量程。如果将测量量程设置为自动选择，则测量量程不会影响合规性的设置。

最低允许的合规性基于负载和源值。例如，如果您向 1 k Ω 电阻器提供 1 V，则最低允许的电流合规值为 1 mA ($1\text{ V} / 1\text{ k}\Omega = 1\text{ mA}$)。将合规值设置为低于 1 mA 时会限制源的输出。

另一个例子是假设以下条件：

- 电流合规性：10 mA
- 仪器发出的电压：10 V
- DUT 电阻：10 Ω

在电压源为 10 V 且 DUT 电阻为 10 Ω 的情况下，通过 DUT 的电流应为 $10\text{ V} / 10\ \Omega = 1\text{ A}$ 。但是，由于合规性设置为 10 mA，因此电流不能超过 10 mA，并将电阻上的电压限制为 100 mV。实际上，10 V 电压源被转换为 10 mA 电流源。

在稳态条件下，除非有快速的瞬态负载，否则设定的合规值会限制仪器的输出。

当不使用自动量程时，最大和最小的合规值不能低于最小值。当启用自动量程时，在源为电压源时无法将合规值设置低于 10 nA，在源为电流源时无法将电压合规值设置低于 20 mV。

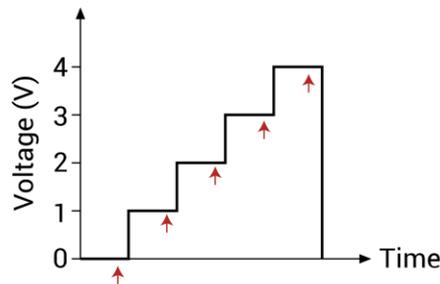
3.6.7. 双重扫描

当您选择双重扫描时，仪器从起点到终点扫描，然后从终点到起点扫描。当您取消双重扫描时，仪器只从起点到终点扫描。

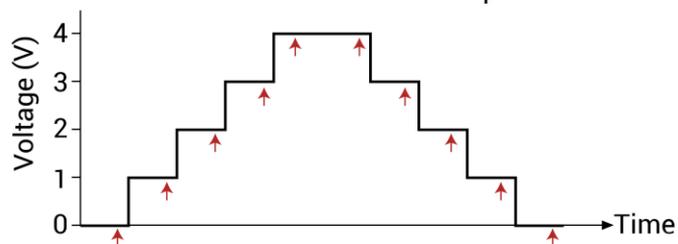
下图比较了单次扫描和双重扫描。

图 46: 单次和双次扫描示例（线性电压扫描，0~4V 步进为 1V）

**Dual sweep disabled
(single sweep)**
Five data points



Dual sweep enabled
Ten data points



3.6.8. 源量程

当施加电压或电流时使用的 SMU 量程。

你可以选择：

- **Best Fixed**：仪器选择一个满足测试中所有源电平的单个固定源范围。
- **Auto**：仪器为测试中的每个源电平选择最灵敏的源范围。此选项在扫描或步进多个数量级时提供最佳分辨率和控制。但是，量程变化可能会降低测量速度。
- **Specific range**：选择一个量程。源保持当前设置的范围。如果你正在进行扫描并且扫描点数值超过设定的量程，则源会输出该量程允许的最大电平。此量程必须等于或大于扫描中的最大值。

3.6.9. 列表值

选择输入值以打开对话框，在其中可以为扫描的每个步进输入电流或电压值。你可以输入任何有效的电流或电压值。

你可以选择列表中的一个或多个值，并将它们复制、剪切或删除。使用粘贴将你复制或剪切的值添加到列表中的新位置。

请注意，不能在值之间留空行。

你可以使用 Ctrl 键和鼠标选择来选择所选定行，然后使用按钮复制、剪切或删除这些行。请注意，当你粘贴行时，任何跳过的行都将被忽略（不会有空行）。

你可以使用 Shift 键加鼠标选择来选择一系列行。当你粘贴行时，任何空行都将被忽略。

3.6.10. 最低量程

仅当测量范围设置为有限自动时可用。它设置仪器使用的最小范围。

3.6.11. 测量电流

选择 Measure Current 后，仪器测量电流。电流值记录在分析表中，并显示在图表中。

3.6.12. 关断时间

仅当选择脉冲模式时可用。关断脉冲的时间（5ms 至 20s）。

3.6.13. 开启时间

只有在选择脉冲模式时才可用。脉冲开启的时间长度（5 ms 到 20 s）。

3.6.14. 过压保护

过压保护限制仪器所能输出的最大电压水平。无论是电流源还是电压源，该功能都会生效。

此保护功能对正负输出电压均有效。

警告

在测试序列中使用该属性时，应在打开源之前设置它。即使将过压保护设置为最低值，当仪器开启时，永远不要触摸连接到 4200A-SCS 终端的任何东西。始终假定仪器开启时存在危险电压（大于 30 VRMS）。为了防止对待测设备或外部电路的损坏，不要将电压源设置为超过过压保护设置值的电压级别。

警告

断开联锁允许 SMU 和前置放大器终端变得危险，从而使用户暴露于可能导致人身伤害或死亡的电击风险中。即使输出被编程为低电压，也应将 SMU 和前置放大器终端视为危险。必须采取预防措施来避免触电风险，方法是使用额定为 250 V、0 类别的双重绝缘材料包裹测试设备和任何未保护的引线（电线）。

3.6.15. 点数（列表或段扫描）

在列表值或段列表中定义的扫描点数。此数字会自动生成。

3.6.16. 点数（对数扫描）

扫描生成的点数。Clarius 使用起始点、结束点和点数来根据以下公式计算步长和输出值：

$$\text{step size} = \frac{(\log_{10} |\text{stop}| - \log_{10} |\text{start}|)}{\text{data points} - 1}$$

$$\text{forcing value for data point } n = 10(\log_{10} |\text{start}| + (n-1)(\text{step size}))$$

3.6.17. 点数

测量的点数。Clarius 使用输入的起始、停止和步进参数计算该值，计算公式如下：

$$points = \frac{(stop - start)}{step} + 1$$

3.6.18. 上电延迟

当测试运行时，SMU 以特定顺序上电。您可以更改 SMU 之间上电延迟的时间。

序列中的第一个 SMU 总是立即上电。在延迟后，后续的 SMU 依次上电。

例如，假设测试中有三个 SMU，其上电顺序为 SMU1、SMU2 和 SMU3。SMU1 的上电延迟设置为 50 毫秒，SMU2 的延迟设置为 100 毫秒。当测试开始时，SMU 的上电顺序如下：

- 1.SMU1 上电。
2. 延迟 50 毫秒。
- 3.SMU2 上电。
4. 延迟 100 毫秒。
- 5.SMU3 上电。

您可以将延迟设置为 0 到 1.0 秒。

要了解如何更改顺序，请参阅 [“SMU 上电顺序”](#)。

3.6.19. 脉冲模式

脉冲模式允许您在长时间间隔中的某一小短时间内向设备施加电压或电流。这避免了某些测试中设备过热的情况。只有当源的量程和测量的量程设置为固定量程或最佳量程时，才可选择脉冲模式。选择此选项以启用脉冲模式。

当选择脉冲模式时，您可以设置脉冲开关时间和脉冲基准电压或电流。脉冲输出在脉冲开启时达到指定的电压或电流值。当脉冲关闭时，脉冲输出返回指定的基准电压或基准电流值。

脉冲开关时间确定脉冲周期和脉冲宽度，计算公式如下：

$$\text{脉冲周期} = \text{开启时间} + \text{关闭时间} + \text{累积测量时间（如果设置为测量）}$$

$$\text{脉冲宽度} = \text{开启时间}$$

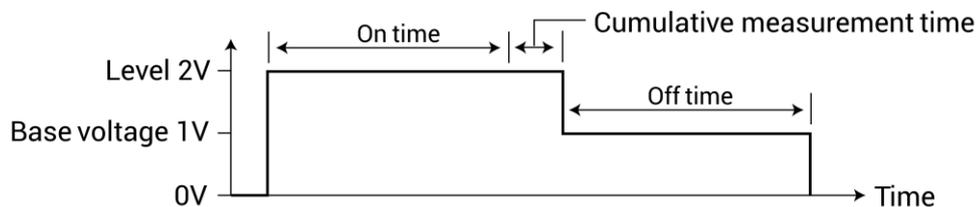
脉冲开关时间可以设置为 5ms 至 20s。可以设置的基础电压（或电流）取决于当前源的量程。

注意

测试中可以使多个 SMU 进行脉冲测试。如果不同的 SMU 的脉冲开关时间不同，则较长的开关时间优先，以便 SMUs 同步运行并以相同速度运行。

下图显示了电压偏置操作模式的单扫描脉冲输出示例。脉冲输出在脉冲开启时间期间达到指定的脉冲电平。如果仪器设置为测量，则测量会在开启时间过期之后、并在转换到关闭时间之前进行。在脉冲关闭时间期间，脉冲输出返回到指定的基准电压值。关闭时间过后，输出返回到 0V。

图 47: 脉冲模式示例：输出电压 2V 且基准电压为 1V



当进行测量时，它明显增加了整体测量所需的时间。

为了最大程度地减少这种额外的时间：

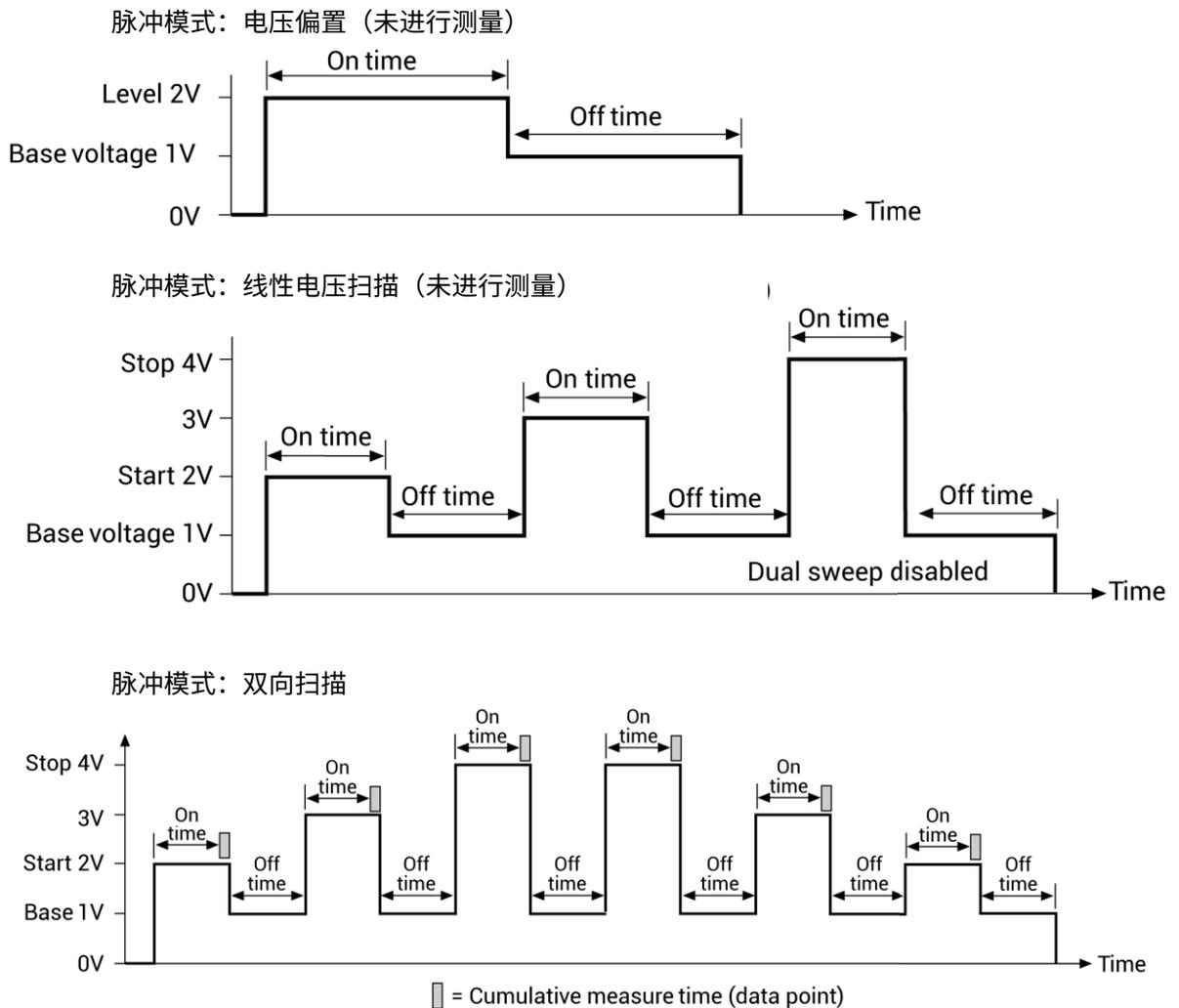
1. 选择 **Test Settings**。
2. 选择 **Advanced**。
3. 对于速度，选择 **Customer**。
4. 将 Delay Factor 设置为 **0**。
5. 将 Delay Factor 设置为 **0**。
6. 将 A / D 间隙时间设置为 **0.01**。

这是能够实现的最短测量时间，但会降低精度。

对于扫描操作模式，脉冲输出在脉冲开时间内到达扫描步进电平。在关闭时间期间，脉冲输出返回到指定的基准电压（或基准电流）值。如果设置为测量，则测量会在每个开时间之后且在脉冲转换到关闭时间之前进行。

下图显示了一些脉冲模式示例。

图 48: 脉冲模式示例



3.6.20. 量程（测量电流）

测量量程确定应用于信号的满量程测量跨度。它影响测量的精度和最大可测量信号。

电流范围选项包括：

- **Auto**：仪器会随着测试过程自动优化测量范围。当测量范围跨越多个数量级时，此选项提供最佳分辨率。但是，范围更改可能会导致时间延迟，限制测量速度。
- **Limit Auto**：介于自动和固定范围选项之间的折中方案。它允许您指定 SMU 在自动优化电流测量时所使用的最小范围。当您不需要在最小电流下获得最大分辨率时，此选项可以缩短测试时间。
- **Best Fixed**：仪器根据电流或电压合规值自动选择单个测量范围。
- **Specific ranges**：可以选择固定的测量范围。

3.6.21. 报告状态 (SMU)

当选择此选项时，Clarius 在测试执行时记录测量状态信息。Analyze 电子表格的一列显示此信息。将鼠标悬停在单元格上以查看信息。下图显示了状态信息的示例。

图 49: SMU 在 Analyze 表格中返回的状态列

	A	B	C	D
1	Time	AV	SMU1_S	SMU2_S
2	174.6265E-3	173.5735E-3	00240251	00900080
3	215.1949E-3	180.1555E-3	00240251	00900080
4	256.2046E-3	186.7446E-3	Status:	00900080
5	297.2239E-3	193.3215E-3	Source Current	00900080
6	338.2374E-3	199.8583E-3	Measure Voltage	00900080
7	379.2452E-3	206.4212E-3	100nA Current Range	00900080
8	420.2530E-3	213.0000E-3	20V Voltage Range	00900080
9	461.2608E-3	219.5788E-3	Interlock open	00900080

3.6.22. 报告值 (测量电流或报告电流)

报告值设置确定记录在 Analyze 电子表格中的哪些电流值。您可以选择：

- **Programmed**: 记录请求的电流值。例如，如果您指定了 10 mA 的电流，则报告的值为 10 mA，即使测量值是 9.9982 mA。
- **Measured**: 记录的电压值是实际测量的值。例如，如果您指定 10 mA 的电流，则会记录实际测量值，例如 9.9982 mA。测量模式会增加测量时间，因为它需要额外的模数转换 (A/D)。

3.6.23. 报告值 (报告电压或测量电压)

如果选择电压，则报告值确定在 Analyz 电子表格中记录哪些电压值。您可以选择：

- **Programmed**: 记录请求的电压值。例如，如果您指定 2.5 V 的电压，则报告的值为 2.5 V，即使测量值为 2.4997 V。
- **Measured**: 记录的电压值是实际测量的值。例如，如果您指定 2.5 V 的电压，则实际测量值，例如 2.4997 V，则被记录。测量模式会增加测量时间，因为它需要额外的模数转换 (A/D)。

3.6.24. 分段

在分段扫描操作模式下进行源扫描的次数。您可以定义多达四个具有不同起始、结束和步进点的分段。

3.6.25. 开始（步进）

开始参数是强制施加的第一个步骤值的电流或电压。

3.6.26. 开始（扫描）

扫描开始的电流或电压源级别。对于对数扫描，起始值不能为 0。

3.6.27. 步长（步进）

指定步进的电流或电压增量。

即使你指定的步进值大于停止值，Clarius 也不会将所施加的电压步进超过停止参数指定的值。

使用不会产生小数点的步进值。如果该点为小数，则步进值被强制为整数值。

计算点数：

$$points = \frac{(stop - start)}{step} + 1$$

点数四舍五入到最近的值。

例如，如果 Start = 0 V，Stop = 5 V，而 Step = 0.6 V：

$$points = \frac{(5 - 0)}{0.6} + 1$$

在这种情况下，步进值被强制为 0.625 V，其结果是点值为 9.333，四舍五入为 9。仪器在 0 V、0.625 V、1.25 V、1.875 V、2.5 V、3.125 V、3.75 V、4.375 V 和 5 V 处施加了九个电压。

如果 Start = 0 A，Stop = 0.005 A，而 Step = 0.0015 A：

$$points = \frac{(0.005 - 0)}{0.0015} + 1$$

计算所得为 4.333，它被四舍五入为 4。仪器在 0 A、0.001666 A、0.0033326 A 和 0.0049992 A 处施加了四个值。

3.6.28. 步进（电压扫描）

该扫描中每个步进的电流大小。从起始电平到停止电平，电流值以相同的步长更改。在每个源步骤（包括起始和停止电平）进行测量。

即使您指定的步长值大于停止值，Clarius 也不会将电流步进超过停止参数指定的值。

请使用不会导致小数数据点的步进值。如果数据点是小数，则强制步进值为整数数据点的值。计算数据点：

$$points = \frac{(stop - start)}{step} + 1$$

例如，如果起始电流为 0 A，停止电流为 0.005 A，步进为 0.0015 A：

$$points = \frac{(0.005 - 0)}{0.0015} + 1$$

这将导致数据点值为 4.333。在这种情况下，步长值被强制为 0.001 A，使电流输出为 0 A，0.0015 A，0.0030 A 和 0.0045 A 四个值。

3.6.29. 步进（电压扫描）

该扫描中每个步进的电压大小。源的值以相同的步长从起始电平到停止电平更改。在每个源步进（包括起始和停止电平）进行测量。

即使您指定的步长值大于停止值，Clarius 也不会将电压步进超过停止参数指定的值。

请使用不会导致小数点的步进值。如果点是小数，则将步长值强制为导致整数点的值。计算点数：

$$points = \frac{(stop - start)}{step} + 1$$

将点数四舍五入到最接近的值。

例如，如果起始电压为 0 V，停止电压为 5 V，步骤为 0.6 V：

$$points = \frac{(5 - 0)}{0.6} + 1$$

在这种情况下，步进值被强制为 0.625 V，这将导致一个点值为 9.333，四舍五入为 9。该仪器在 0 V、0.625 V、1.25 V、1.875 V、2.5 V、3.125 V、3.75 V、4.375 V 和 5 V 处输出九个电压。

3.6.30. 停止（步进）

最后一步值设置的电流或电压。

3.6.31. 停止（扫描）

扫描停止时的电压或电流源电平。对于对数扫描，停止值不能为 0 或与起始值极性相反。

3.6.32. 电压（报告电压）

当选中此框时，仪器测量电压。电压记录在分析表中，并显示在图表中。

3.6.33. 电压量程

测量量程确定应用于信号的满量程测量跨度。它影响测量精度和可测量的最大信号。

测量量程选项包括：

- **Auto**：仪器在测试进行过程中自动优化测量范围。该选项在测量跨越几个数量级时提供最佳分辨率。然而，范围变换时间延迟限制了测量速度。
- **Best Fixed**：仪器根据电流或电压合规值自动选择单个测量范围。
- **Specific ranges**：您可以从列表中选择一个固定的测量范围。

3.7. SMU 测试设置

SMU 测试可用的设置在以下主题中描述。

3.7.1. 速度

SMU 自动考虑稳定时间和噪声问题。它提供允许您选择速度和噪声之间的折中方案的测量速度。您可以选择：

- **Fast**：以牺牲噪声性能为代价优化 SMU 的速度。它是不考虑噪声和稳定时间的测量的良好选择。
- **Normal**：默认和最常用的设置。它提供了速度和低噪声的良好组合，并且是大多数情况下的最佳设置。
- **Quiet**：牺牲速度以优化 SMU 的低噪声测量。如果速度不是关键因素，则在需要最低噪声和最准确的测量时是一个不错的选择。
- **Customer**：允许您微调时序参数。使用自定义，您可以配置 A/D 间隙时间和单个延迟和滤波因子来生成比 Fast 设置更快、比 Quiet 设置更低噪声或任何中间值的复合设置。

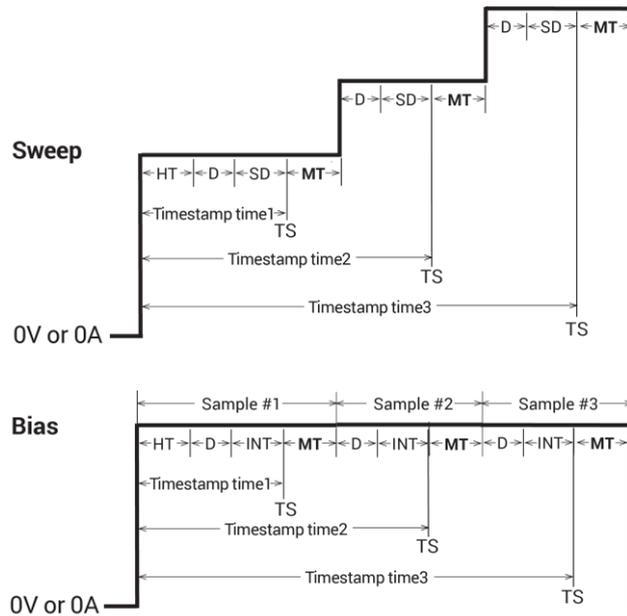
3.7.2. 报告时间戳

当选择此选项时，分析表中的每个测量都包括时间戳。当清除此选项时，时间戳不包括在内。

时间戳记录了每个测量的经过时间。每个经过时间值都放置在与测量相同的行中。

每个经过时间是相对于测试开始时首次应用电压或电流到设备的时间来测量的。如果 Clarius 仅需要每个测量的一个读数，则 Clarius 会在此读数开始时记录时间戳，如下图所示。

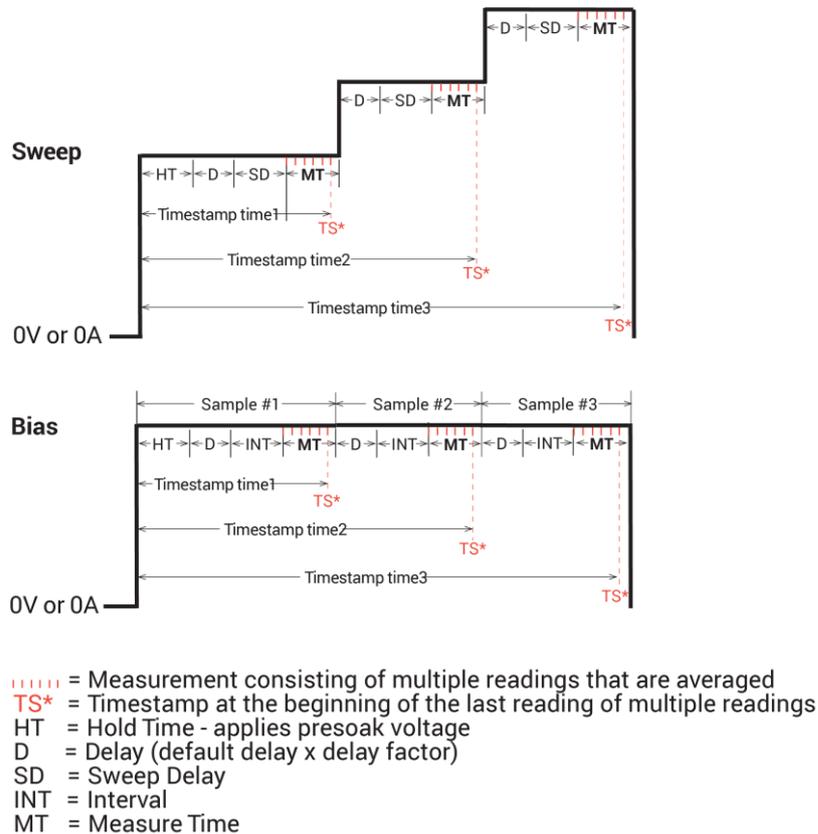
图 50: Clarius 只进行一次测量时的时间戳



- TS = Timestamp at the start of the reading when one reading is made
- HT = Hold Time - applies presoak voltage
- D = Delay (default delay x delay factor)
- SD = Sweep Delay
- INT = Interval
- MT = Measure Time

如果 Clarius 对一个测量进行多次读取和平均，那么 Clarius 会在最后一次读取时记录时间戳，如下图所示。

图 51: 当 Clarius 需要多个读数进行测量时的时间戳



您可以为任何测量速度启用时间戳。

3.7.3. 延迟因子

在应用电压或电流后，仪器会等待一个延迟时间再进行测量。延迟时间允许源进行调整。延迟因子调整所选速度的延迟时间。Fast、Normal 和 Quite 速度的延迟时间是固定的。如果选择自定义速度，则可以输入 0 到 100 之间的因子。

应用的延迟时间是默认延迟时间的倍数。延迟因子指定了这个倍数。也就是说：

$$\text{应用的延迟时间} = (\text{默认延迟时间}) \times (\text{延迟因子})$$

例如，如果默认延迟时间为 1 毫秒，延迟因子为 0.7，则实际应用的延迟时间为 0.7 毫秒 (1 毫秒 × 0.7)。

下表总结了延迟因子设置。

Speed Mode	Delay Factor
Fast	0.7
Normal	1.0
Quiet	1.3
Custom	0 to 100

在输入自定义的延迟因子设置时，请考虑以下几点：

- 延迟因子为 1 允许在模数转换器（A/D）触发进行测量之前进行稳定。
- 每个延迟因子的加倍会使稳定时间加倍。
- 延迟因子为 0 将默认延迟乘以零，导致没有延迟。

注意

如果将 Filter Factor 和 Delay Factor 设置为 0，则会忽略内部预编程值。

一般来说，电缆和矩阵会增加稳定时间。您可能需要进行实验以找到理想时间。但是，对于质量良好的开关，例如 Keithley 7174A 高速低漏电流矩阵，您应该不需要将 Delay Factor 增加超过两倍。

3.7.4. 滤波器系数

为了降低测量噪声，每个 4200A-SCS 都应用滤波器，这些滤波器平均多次读数以进行一次测量。对于 Fast、Normal 和 Quiet 速度，Filter Factor 是固定的。如果选择 Custom Speed 模式，则可以输入 0 到 100 的 Filter Factor。默认的 Filter Factor 设置如下表所示。

Speed Mode	Filter Factor
Fast	0.2
Normal	1
Quiet	3
Custom	0 to 100

在输入自定义 Filter Factor 时，请考虑以下几点：

- Filter Factor 为 1 提供适合大多数应用的过滤。
- 增加 Filter Factor 以平均多个读数以减少噪声。一般规则是将 Filter Factor 加倍，可以将测量噪声减半。
- 测量时间增加到 Filter Factor 的平方。
- Filter Factor 为 0 使内部滤波失效。

注意

当 Filter Factor 和 Delay Factor 设置为 0 时，预编程的值被忽略。

3.7.5. 自动 A/D 间隙

当 Speed 设置为 Custom 且选择了 Auto A/D Aperture 时，仪器会选择大多数正常测量的最佳模数转换器 (A/D) 转换时间。

3.7.6.A/D 间隙时间

如果选择 Custom Speed 并清除了 Auto A/D Aperture，则可以指定用于测量信号的模数转换器 (A/D) 积分时间。每个测量读数都是一个或多个 A/D 转换的结果。每个 A/D 转换的短积分时间会导致相对较快的测量速度，但噪声会增加。长积分时间会导致相对较慢的测量速度和相对低噪声。

积分时间设置基于电源线周期数 (NPLCs)。对于 60 Hz 供电系统，1.0 PLC = 16.67 毫秒 (1/60)。对于 50 Hz 供电系统，1.0 PLC = 20 毫秒 (1/50)。

应用的 A/D 转换时间还取决于 Filter Factor 设置：

- 如果 Filter Factor 不为 0，则 SMU 应用基于 Filter Factor 设置的最佳 A/D 转换器时间。应用的 A/D 转换器时间值不会小于指定的 A/D 间隙时间。
- 如果 Filter Factor 设置为零，则 SMU 应用一个固定的 A/D 转换器时间，等于指定的 A/D 间隙时间。

以下表格显示了每个 Speed Mode 的 Auto A/D Aperture 和 A/D Aperture Time 设置。

Speed Mode	A/D Aperture Time
Fast	Auto
Normal	Auto
Quiet	Auto
Custom	0.01 to 10 PLC

3.7.7. 测试模式

您可以将测试设置为扫描或采样测试模式。

扫描测试模式用于电压、电流或频率随时间变化的测试。

采样模式允许您在保持恒定电压或电流的情况下，根据时间测量电压或电流。采样测试模式用于恒定电压和频率静态的测试，并在定时间隔内进行测量。例如，您可以使用采样模式来对充电电容器的电压进行分析，同时恒定电流。以仪器施加电压或电流的时间为基准（在从 0.0 V 或 0.0 A 到施加的电压或电流的步进更改时 t = 0）进行测量。

选择采样模式时，所有设备端口都被设置为静态操作模式，例如开路或电压偏置。

3.7.8. 扫描延迟

如果您正在使用扫描操作模式并需要在每次测量之前延迟一定的时间，则可以使用扫描延迟设置指定延迟。扫描延迟与延迟因子无关。您可以将扫描延迟值设置为 0 秒到 999 秒。默认扫描延迟值为 0 秒。

3.7.9. 间隔

仅采样模式。测量之间（点）的时间。间隔可以从 0 秒设置为 1000 秒。

3.7.10. 样本数

指定要获取的点数。将样本数设置为 1 到 4096 的值。

3.7.11. 保持时间 - SMU

扫描的起始电压或电流可能大于扫描的电压或电流增量。这意味着达到扫描的起始电压或电流所需的源设置时间可能大于所需的增量稳定时间。为了进行补偿，您可以指定一个 Hold Time，它在每次扫描开始时应用延迟。您可以将 Hold Time 设置为 0 秒到 1000 秒。

3.7.12. SMU 上电顺序

运行测试时，给定测试的 SMUs 以特定的顺序上电。您可以调整此顺序。

调整 SMU 的上电顺序：

1. 选择要进行的测试。
2. 选择 **Configure**。
3. 在右窗格中，选择 **Test Settings** 选项卡。
4. 选择 **Advanced**。
5. 在 SMU 上电顺序下，使用 **Move Up** 和 **Move Down** 移动按钮更改顺序。
6. 选择 **OK**。

3.7.13. 完成后禁用输出 - SMU

警告

如果“Disable Outputs at Completion”未选中，则当测试完成时，SMU 输出将保持其最后一个编程电平。为了防止可能导致伤害或死亡的电击，永远不要在输出开启时连接或断开与 4200A-SCS 的连接。

测试完成后，您可以禁用输出或使其保持启用状态。如果您启用输出，则 SMU 从上一个测试结束时的状态开始进行下一个测试。如果下一个测试不使用 SMU，则 SMU 保持在该状态下。

设置完成后的输出操作：

1. 选择相应的测试。
2. 选择 **Configure**。
3. 在右侧窗格中，选择 **Test Settings** 选项卡。
4. 选择 **Advanced**。
5. 选择 **Disable Outputs at Completion** 或取消选择。

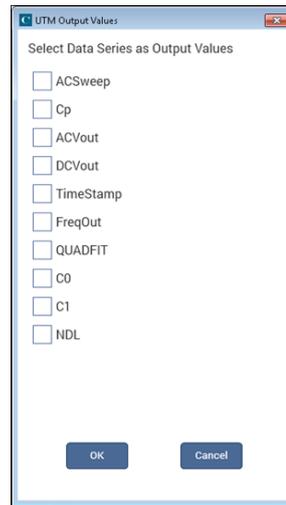
3.7.14. 输出值

如果您正在使用 subsite，在每次循环 subsite 时，已启用的输出值的测量结果将放置在 subsite 的 Analyze 表格中。例如，如果 subsite 循环五次，则测试将有五个测量读数（输出值）。有关详细信息，请参见《Model 4200A-SCS Clarius 用户手册》中的“subsite 循环”一节。

选择输出值：

1. 在项目树中选择测试。
2. 选择 **Configure**。
3. 在右侧窗格中，选择测试 **Test Settings**。
4. 选择 **Output Values**。输出值对话框将显示。
5. 选择要发送到 Analyze 表格的数据系列。
6. 选择 **OK**。

图 52: 选择输出电压值



3.7.15. 合规退出条件选项

当您选择 Exit Condition 时，合规退出条件选项可从测试设置窗格中使用。

当源进入合规状态时，可以选择系统采取的动作。

您可以选择以下退出条件选项之一：

- **None**：运行继续。这是默认设置。
- **Test**：4200A-SCS 退出当前正在运行的测试。如果还有其他测试，则操作继续到下一个测试。
- **Device**：4200A-SCS 退出当前正在运行的设备。如果还有其他设备，则操作继续到下一个设备。
- **Subsite**：4200A-SCS 退出当前正在运行的 subsite。如果还有其他 subsite，则操作继续到下一个 subsite。
- **Site**：4200A-SCS 退出 site。如果有多个 site，则操作继续到下一个 site。
- **Project**：4200A-SCS 退出项目。所有测试都会停止。

要在合规发生时设置退出条件：

1. 在项目树中选择相应测试。
2. 选择 **Configure**。
3. 选择 **Test Settings**。
4. 选择 **Exit Condition**。
5. 选择您的测试选项。
6. 选择 **OK**。

4.1. 源测量单元

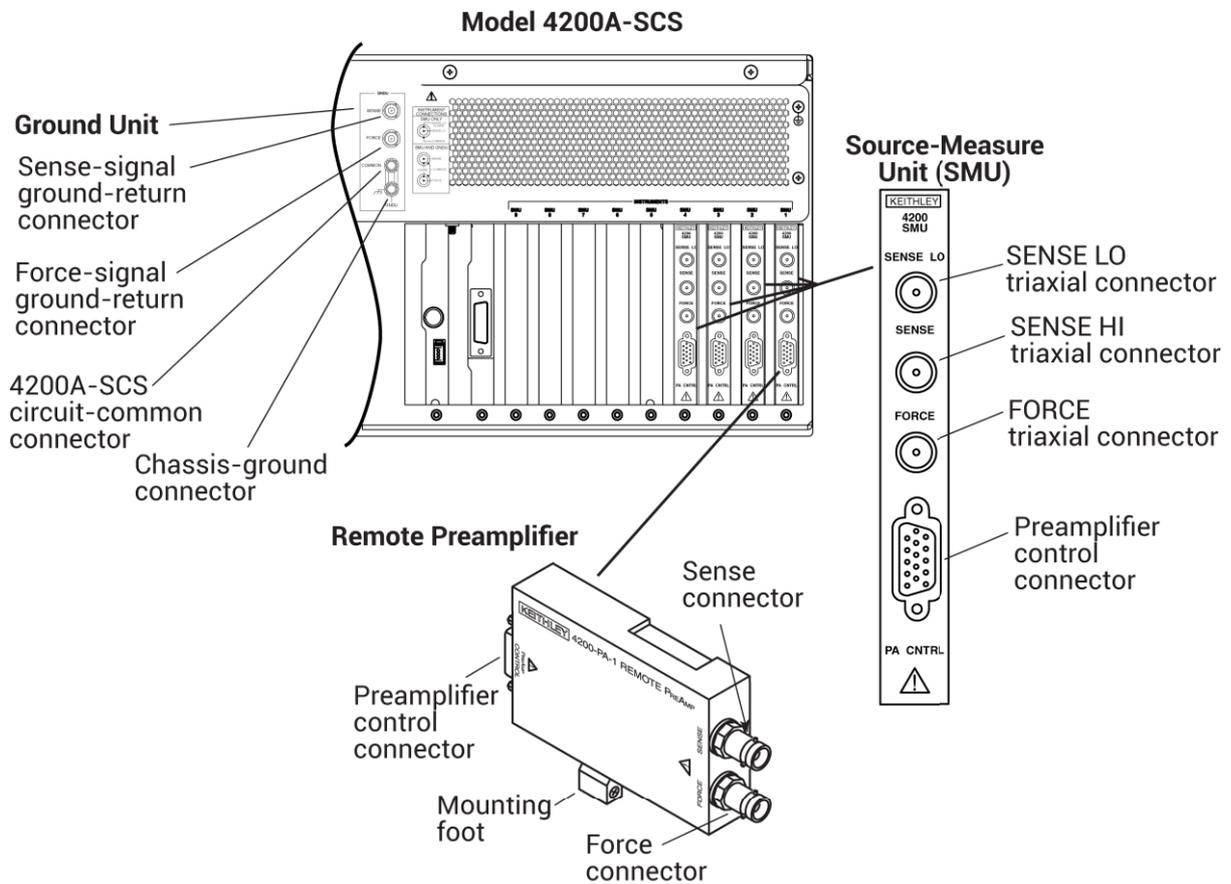
本节提供有关 4200-SMU、4201-SMU、4210-SMU 和 4211-SMU 源测量单元及相关仪器的硬件和连接信息，包括：

- [源测量硬件概述](#) (第 4-1 页)：讨论 SMU 的基本电路配置、操作边界和连接器。
- [带 4200-PA 的源测量单元 \(SMU\) 概述](#) (第 4-5 页)：详细介绍了 4200-PA 如何扩展 SMU 的动态范围。还描述了基本电路配置、操作边界和连接器。
- [接地单元 \(GNDU\) 概述](#) (第 4-12 页)：提供有关使用接地单元的基本信息。

4.2. 源测量硬件概述

4200A-SCS 主机可接受最多八个 SMU，每个 SMU 可以使用或不使用前置放大器。其中四个 SMU 可以是高功率的 4210-SMU 或 4211-SMU 型号。

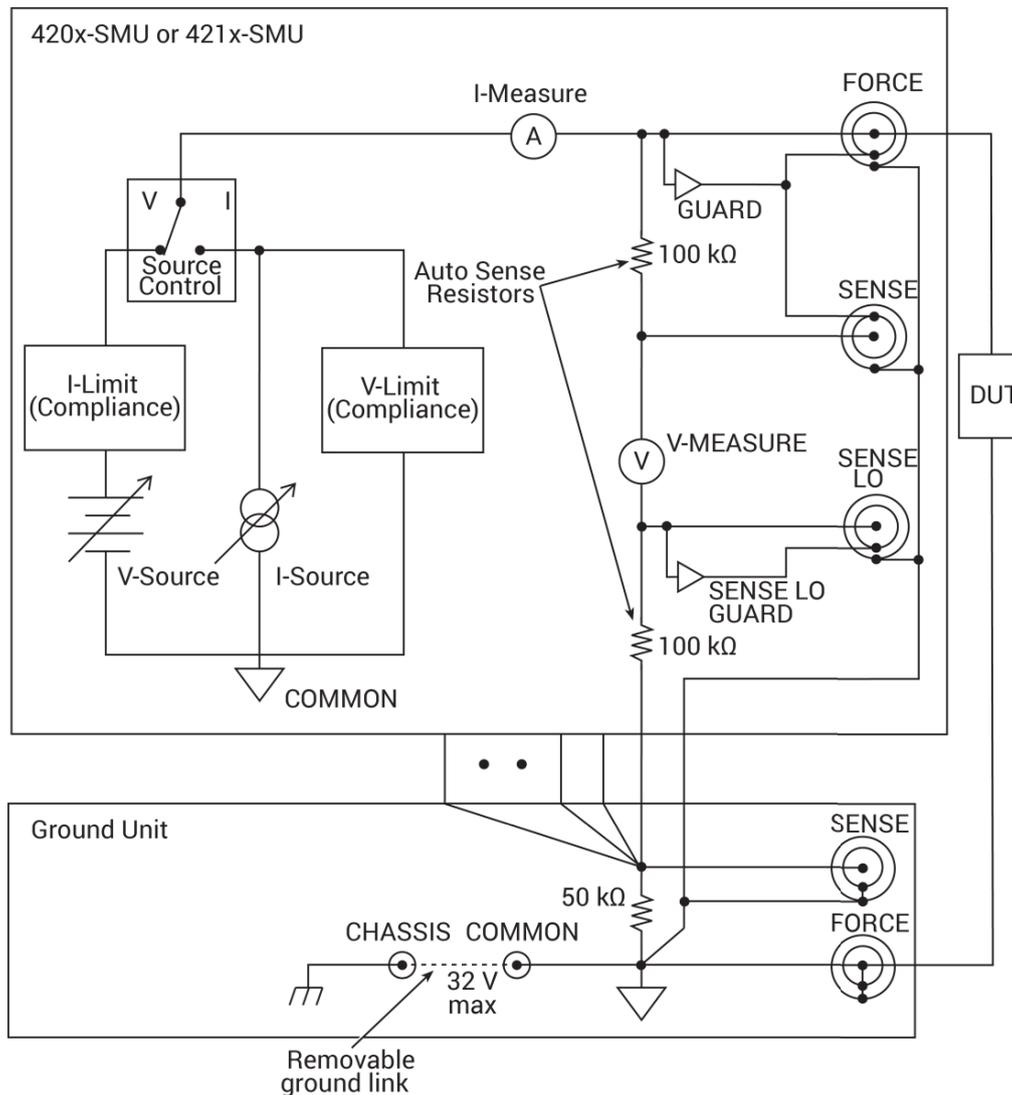
图 53: 源测量硬件概览



4.3. 基本 SMU 电路配置

基本的 SMU 电路配置如下图所示。SMU 本质上是一个电压或电流源，串联一个电流计，并与一个电压计并联。电压限制 (V-limit) 和电流限制 (I-limit) 电路将电压或电流限制为编程的钳位值。在这个本地测试的例子中，SMU FORCE 端口连接到 DUT HI，而 DUT LO 连接到 COMMON。有关更详细的信息，请参见[基本源测量连接](#) (第 2-1 页)。

图 54: 基本 SMU 源测试配置



4.4. SMU 终端和连接器

以下图表显示了 SMU 终端的位置和配置。有关这些终端的基本信息总结如下。

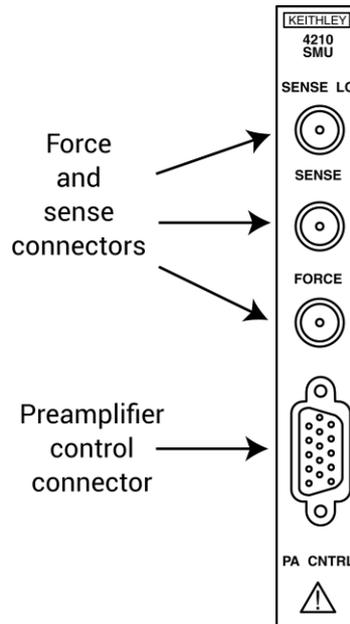
警告

断开互锁允许 SMU 和前置放大器终端具有危险性，可能会使用户暴露于导致人身伤害或死亡的电击之中。即使输出被编程为低电压，SMU 和前置放大器终端也应被视为有危险性。必须采取预防措施，通过使用额定为 250 V、0 类别的双重绝缘材料来包裹测试设备和任何未受保护的引线（布线）以防止电击风险。

注意

COMMON 和机壳地之间允许的最大电压为 $\pm 32\text{ V dc}$ 。

图 55: 4200-SMU 和 4210-SMU 连接器



4.4.1. SENSE LO 终端

SENSE LO 终端是一种微型三轴连接器，将 SMU SENSE LO 信号应用于全开尔文（远端感测）应用中的 DUT。

- 中心 pin 脚为 SENSE LO
- 内部屏蔽层为 SENSE GUARD
- 外层屏蔽层为电路 COMMON

在 SENSE LO GUARD 和 COMMON 之间出现名义内部自动感应电阻。

注意

使用地面单元的远程感测功能代替 SMU 的 SENSE LO。如果需要使用 SMU 的 SENSE LO 终端，将单个 4200A-SCS 中使用的所有 SMU 的 SENSE LO 终端连接到 DUT 上。

4.4.2. SENSE 端口

SENSE 端口是一种微型三轴连接器，用于在未使用前置放大器时，在远端测量应用中向 DUT 提供 SMU SENSE 信号。

- 中心 pin 脚为 SENSE
- 内层屏蔽层为 GUARD

外层屏蔽层为电路公共接地

在 SENSE 和 FORCE 之间存在额定内部自动感测电阻。

注意

SMU 不需要将 SENSE 端口连接到 DUT 上以正确运行。远程感测是自动的。如果 SENSE 连接到 DUT，那么由于 SMU 和 DUT 之间的 FORCE 路径电压下降而导致的误差将被消除，同时 SMU 进行本地感测。

4.4.3. FORCE 端口

FORCE 端口是一种微型三轴连接器，用于在未使用前置放大器时向 DUT 施加 SMU FORCE 信号。

- 中心 pin 脚为 FORCE
- 内层屏蔽层为 GUARD
- 外层屏蔽层为电路公共接地

4.4.4. PA CNTRL 连接器

PA CNTRL（前置放大器控制）端口是一种 15 引脚 D-sub 连接器，可提供电源和信号连接至 4200-PA 远程前置放大器。前置放大器可以直接安装和连接到 SMU，也可以通过电缆（4200-RPC-X）连接到 SMU 上，以实现远端安装。有关前置放大器的更多信息，请参见[带 4200-PA 的源量测单元 \(SMU\) 概述](#)。

4.5. 4200-PA 源量测单元 (SMU) 概述

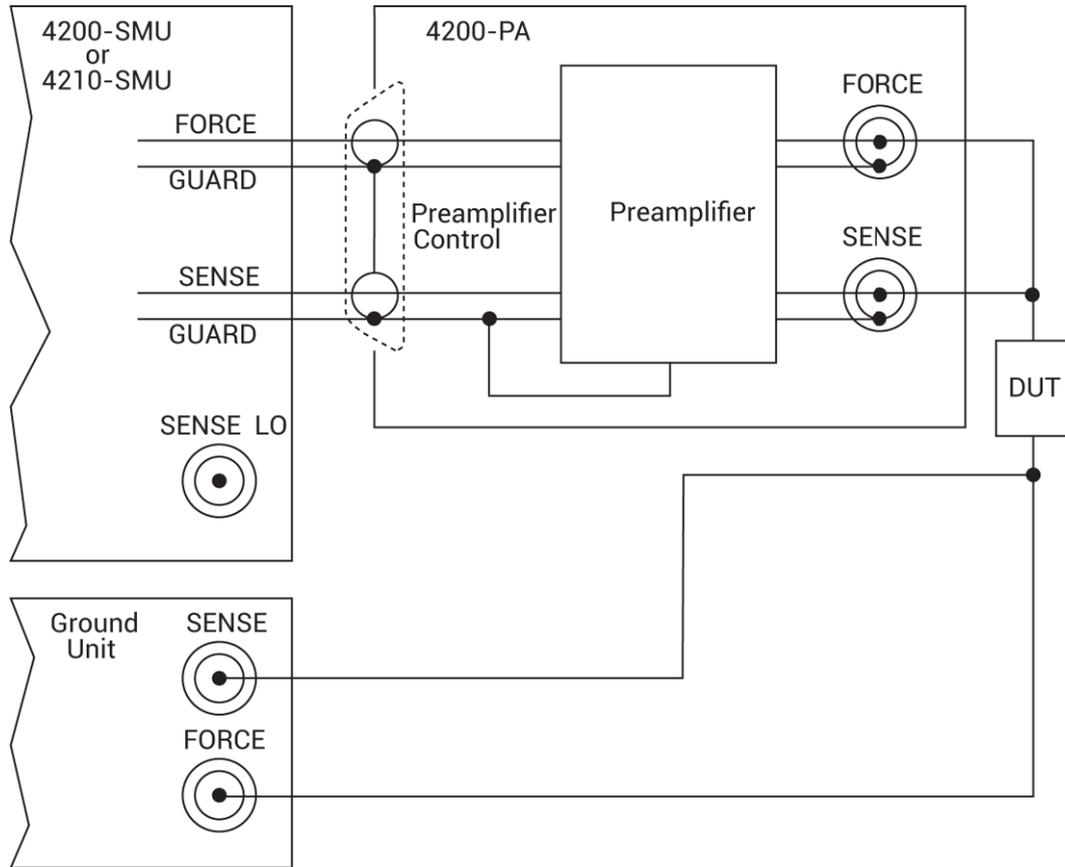
以下段落讨论了 4200-PA 远程前置放大器的以下方面：

- 基本电路配置
- 钳位限制
- 工作范围
- 连接器
- 前置放大器安装

4.5.1. 基本 SMU/ 前置放大器电路配置

基本的 SMU 和前置放大器电路配置如下图所示。此配置与先前讨论的 SMU 配置类似，唯一的区别在于前置放大器，它增加了低电流源测量功能。前置放大器 FORCE 端连接到 DUT HI，DUT LO 连接到 COMMON。有关更详细的信息，请参见[基本源测试连接](#)。

图 56: 基本 SMU 和前置放大器源测量配置



4.5.2. 4200-PA SMU 的钳位限制

在 4200-PA 进行电压源时，可以编程电流限制。但是，在进行电流源时，可以编程电压限制。4200-PA 的钳位限制与单独的 SMU 相同。

4.5.3. 使用最小钳位

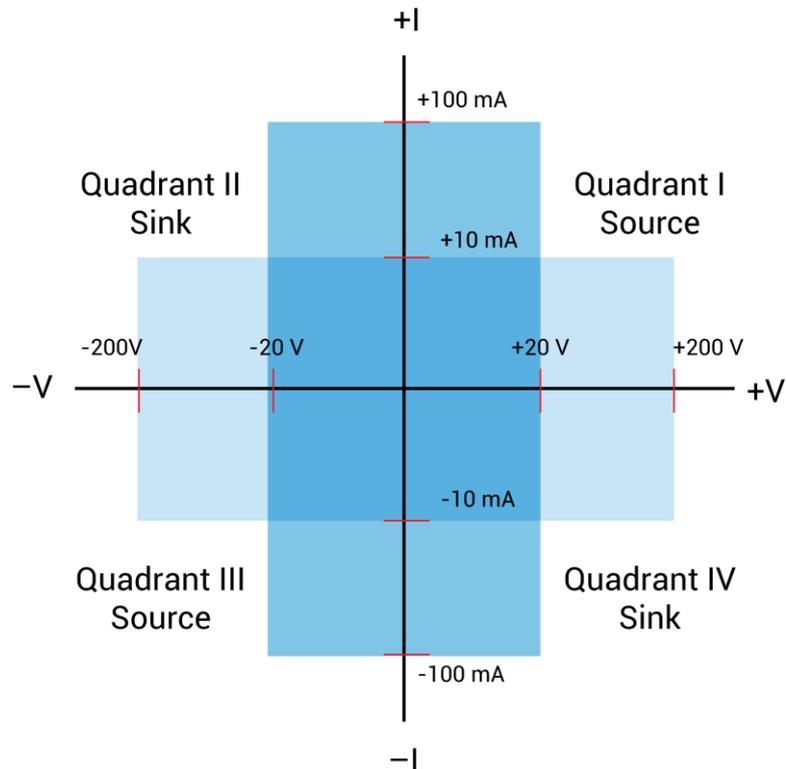
当禁用测量自动量程调节时，最小的钳位值尤其适用。当禁用测量自动量程调节时，钳位值不能低于前面表示 4200-PA 钳位限制的表格中规定的最小值。当启用自动量程调节时，编程的钳位值不能低于 100 fA（电压源）或 20 mV（电流源）。

4.5.4. 工作范围

下图显示了带有 SMU 的 4200-PA 的四个操作象限。

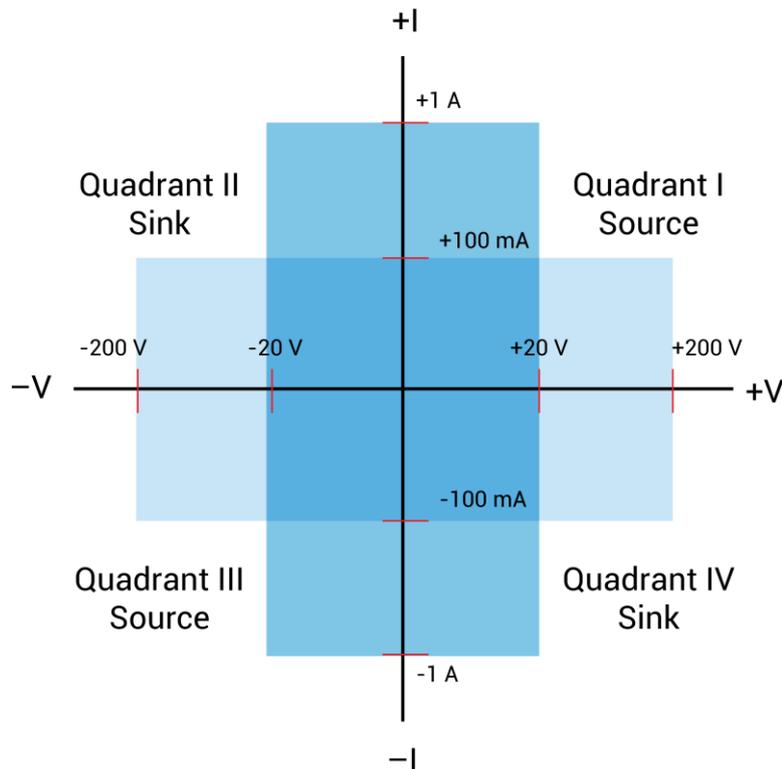
4200-SMU 或 4201-SMU 与 4200-PA：在以下图像中的一般工作范围中，100 mA，20 V 和 10 mA，200 V 的幅值为标称值。4200-SMU 或 4201-SMU 和 4200-PA 的实际最大输出幅值为 105 mA，21 V 和 10.5 mA，210 V。

图 57: 带 4200-PA 的 4200-SMU 或 4201-SMU 的工作范围



带 4200-PA 的 4210-SMU 或 4211-SMU：在下图中，1A，20V 和 100mA，200V 的幅值为正常值。
带 4200-PA 的 4210-SMU 或 4211-SMU 的实际最大输出幅值为 1.05A，21V 和 105mA，210V。

图 58: 带 4200-PA 的 4210-SMU 或 4211-SMU 的工作范围



4.5.5. 前置放大器终端和连接器

以下图显示了 4200-PA 端子的位置和配置。有关这些端子的基本信息总结如下。有关进行前置放大器信号连接的详细信息，请参阅[基本源测试连接](#)。

警告

接触电击可能导致人身伤害或死亡。必须采取预防措施以通过使用额定 250 V，0 级别类双重绝缘将测试设备及任何未受保护的引线（布线）包围来防止电击危险。有关详细信息，请参见 IEC 61010-1 安全标准。连接到 4200A-SCS SMU 输出时，请确保使用具有所需电压评级的设备和电缆。评级不正确的电缆将不能正确地绝缘仪器的外部连接，并可能构成电击危险。即使输出被编程为低电压，SMU 和前置放大器终端也应被视为危险。

注意

在连接或断开前置放大器之前，请关闭系统并拔下电源线。否则可能会导致 SMU 或前置放大器受损，可能使保修失效。

注意

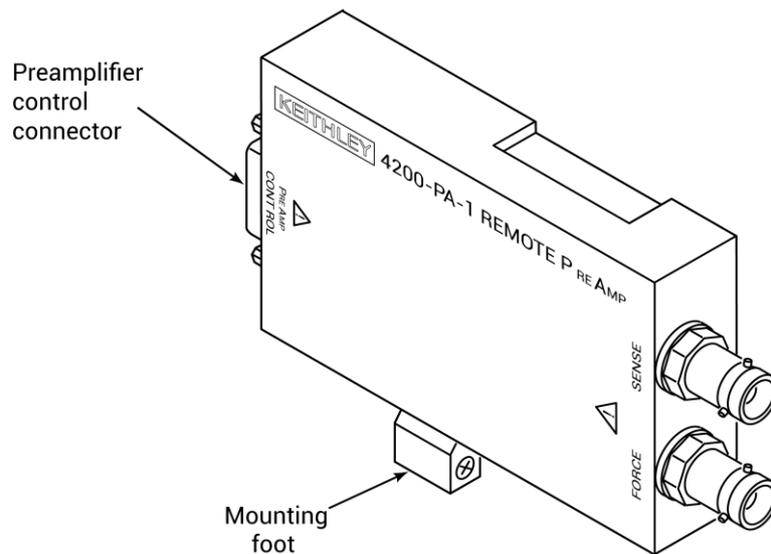
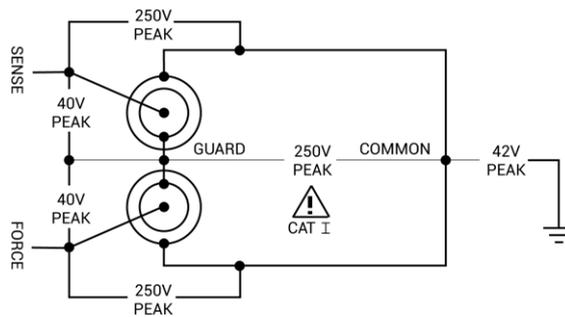
各种前置放大器信号之间允许的最大电压如下：

公共到机箱接地：32 V_{PEAK}

守卫到公共：250 V_{PEAK}

感应或驱动到卫兵：40 V_{PEAK}

图 59: 4200-PA 接线



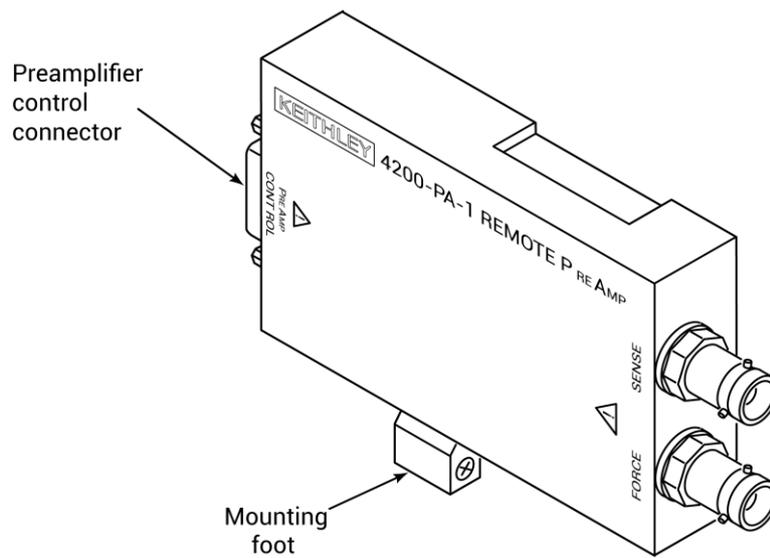
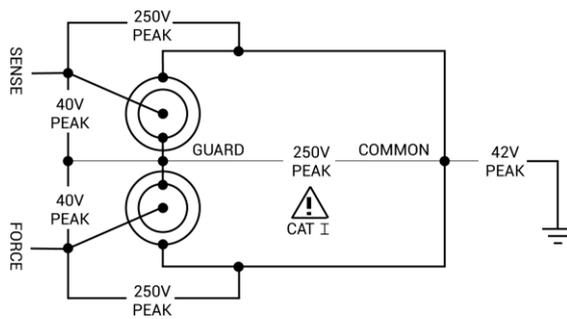
4.5.6. FORCE 端子

FORCE 端子是一种标准的三轴连接器，用作 SMU 或前置放大器 FORCE 电流的回路。中心引脚是 FORCE，内部屏蔽是 GUARD，外部屏蔽是电路公共地。

注意

地线单元的 FORCE 和 GUARD 信号端子连接到电路公共地。

图 60: 4200-PA 连接器



4.5.7. SENSE 端子

SENSE 端子是一种标准的三轴连接器，用于将地线单元的 SENSE 信号应用于远程感测应用中的 DUT。中心引脚是 SENSE，内部屏蔽是 GUARD，外部屏蔽是电路公共地。当地线单元的 SENSE 信号连接到 DUT 时，所有的 SMU/ 前置放大器测量都是相对于这个 DUT 连接进行的。

注意

SMU 不需要将 SENSE 端子连接到 DUT 上才能正常操作。远端感测是自动的。如果 SENSE 连接到 DUT 上，可以消除 SMU 和 DUT 之间 FORCE 路径电压降引起的误差；否则，SMU 会进行本地测试。

4.5.8. 前置放大器控制连接器

前置放大器控制连接器连接到 SMU PA CNTRL 连接器，并为 4200-PA 前置放大器提供电源和信号连接。

4.5.9. SMU 电路公共连接

某些测试需要将 SMU 连接到每个 DUT 端子。在这些测试中，电路公共地没有硬连接到任何 DUT 端子。每个 SMU 必须能够在需要将 DUT 端子连接到公共地时内部连接电路公共地和 FORCE 信号。

以下图示展示了使用三个 SMU 测试晶体管的典型 SMU 连接方式。您可以使用任何一个 SMU 通过编程使其提供对电路公共地的访问。请参阅 Model 4200A-SCS Clarius 用户手册，了解如何配置 SMU 以提供公共连接的详细说明。

图 61: 典型的 SMU 连接

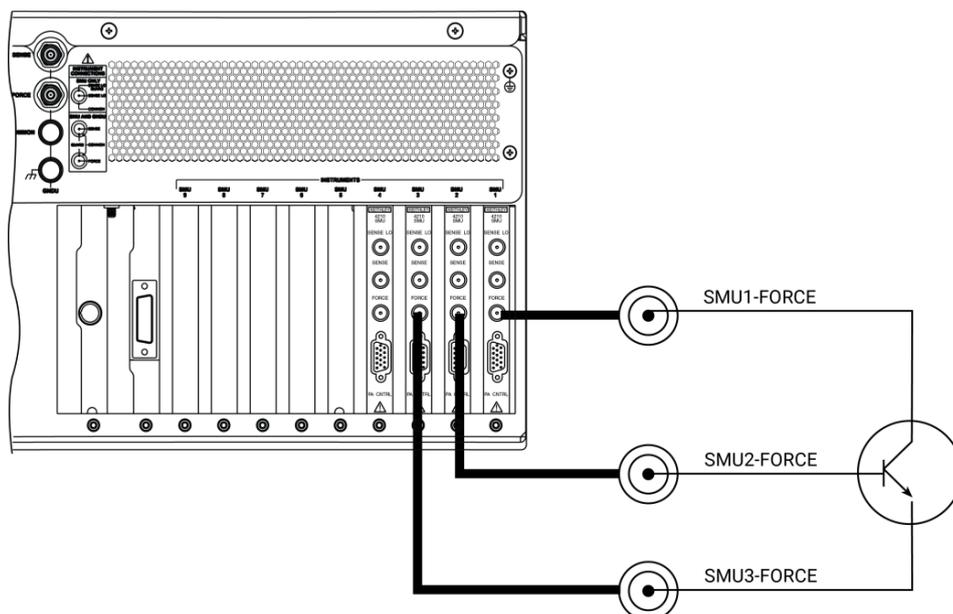
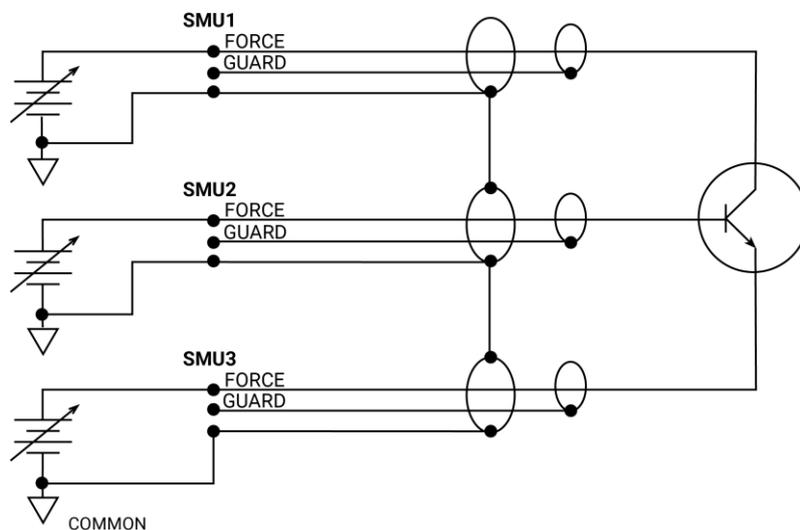


图 62: 典型的 SMU 公共端连接图



4.6. 接地单元 (GNDU) 概述

以下主题描述了：

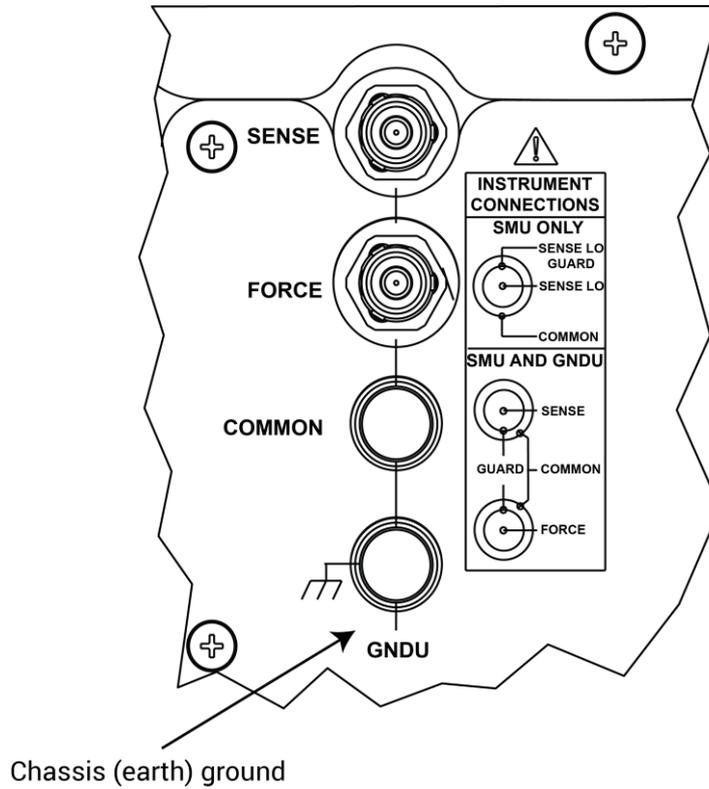
- 基本电路配置
- 连接器

4.6.1. 基本特征

如下图所示，接地单元提供方便的接入到电路 COMMON，该信号是所有安装的 4200A-SCS 仪器共享的测量地信号。COMMON 提供一个方便连接点，用于将测试夹具屏蔽接地到系统机箱接地。

GNDU SENSE 端子可接入 SMU SENSE LO 信号。

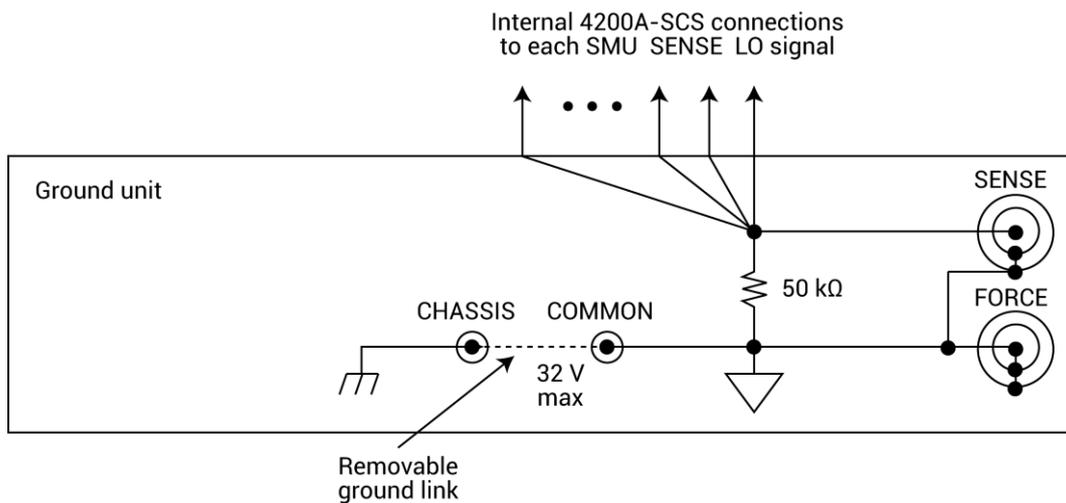
图 63: 接地单元 (GNDU)



4.6.2. 接地单元连接

以下图显示了各种 GNDU 信号与 SMU 信号的关系。GNDU FORCE 信号是电路 COMMON。GNDU SENSE 终端通过自动感应电阻器连接到每个 SMU SENSE LO 信号。当 GNDU SENSE 信号连接到 DUT 上时，所有测量都相对于此 DUT 连接进行。

图 64: 接地单元接线图



4.6.3. 接地单元 DUT 连接

以下图显示了使用 GNDU 与 SMU 进行开尔文远端感测测量所需的连接。同样，以下图包括前置放大器。如这些图所示，GNDU FORCE 信号为 SMU 或前置放大器 FORCE 电流的回路。有关接地单元、SMU 和前置放大器连接的详细信息，请参见[基本源测连接](#)。

图 65: GNDU 与 SMU 进行开尔文远端感测测量

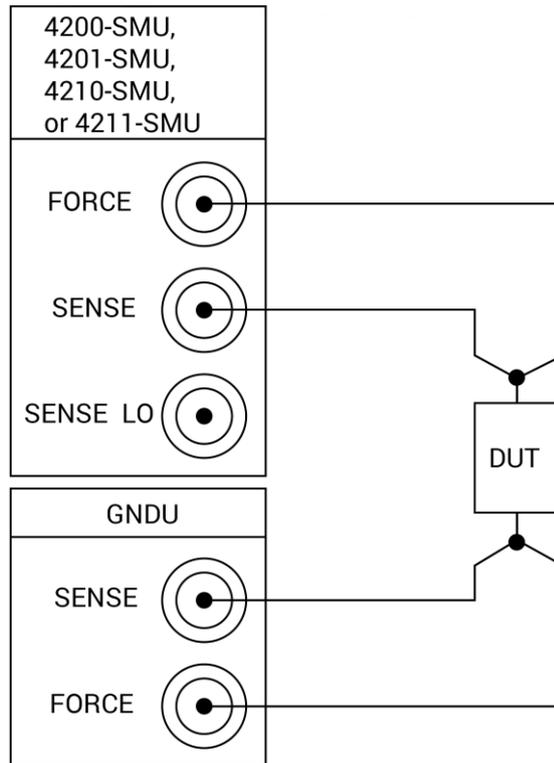
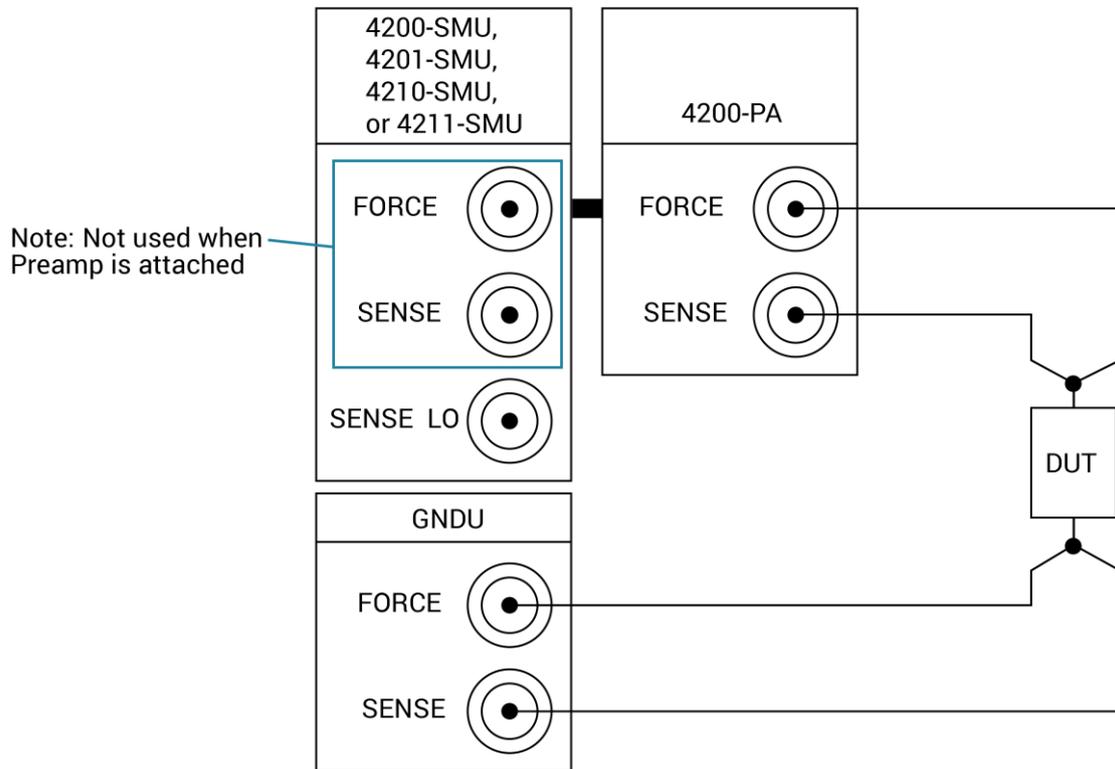


图 66: 开尔文前置放大器与接地单元的连接



4.6.4. 接地单元端口和连接器

有关 GNDU 端口的位置和配置，请参见[使用接地单元](#)。以下是有关这些连接器的基本信息。有关接地单元的信号连接的其他信息，请参见[基本源测量连接](#)。

注意

电路公共与机壳地之间允许的最大电压为 ± 32 V 直流。

4.6.5.FORCE 端口

FORCE 端口是一种标准三轴连接器，用作 SMU 或前置放大器 FORCE 电流的回路。中心引脚为 FORCE，内层屏蔽层为 GUARD，外层屏蔽层为 COMMON。

注意

接地单元 FORCE 和 GUARD 信号端口连接至 COMMON。

4.6.6. SENSE 端口

SENSE 端口是一种标准三轴连接器，用于在远端感测应用中向 DUT 应用接地单元 SENSE 信号。中心引脚为 SENSE，内层屏蔽层为 GUARD，外层屏蔽层为 COMMON。当接地单元 SENSE 信号连接到 DUT 时，所有 SMU/ 前置放大器测量都是相对于此 DUT 连接进行的。

4.6.7.COMMON 端口

COMMON 端子是一个接线柱，用于连接 COMMON 电路。

注意

通常，一个链接连接接地单元 COMMON 和机壳地，但可能需要移除链接以避免由接地环或电气干扰引起的测量问题。

5.1. 源 - 测量概念

- [屏蔽](#)：概述屏蔽，屏蔽概念，屏蔽连接和测试夹具防护。
- [本地和远端感应](#)：描述感应，感应概念和感应选择。
- [源或汲取](#)：描述源和汲取操作并总结操作边界。
- [源 - 测量注意事项](#)：详细介绍各种源测量电路配置，包括输出电压，测量电压和仅测量。
- [扫描概念](#)：涵盖源延迟度量周期并提供扫描波形的概述。

5.2. 屏蔽

屏蔽的目的是消除 FORCE 和 COMMON 之间或 SENSE 和 COMMON 之间存在的漏电流（和电容）的影响。驱动的 GUARD 始终处于启用状态，并提供一个缓冲电压，其电平与 FORCE 或 SENSE HI 电压相同（SOURCE 和 SENSE 的 GUARD 和在 FORCE 中的 GUARD 信号相同）。在没有驱动屏蔽的情况下，外部测试电路中的泄漏可能会足够高，这对 SMU 或前置放大器的性能产生不利影响。

泄漏电流可能发生在寄生或非寄生泄漏路径中。寄生电阻的一个例子是三轴电缆绝缘间的泄漏路径。非寄生电阻的一个例子是通过连接到待测器件（DUT）并行的电阻器的泄漏路径。

警告

为避免可能导致人身伤害或死亡的高电压暴露，每当 4200A-SCS 的联锁被断言时，应将 SMU 和前置放大器的 FORCE 和 GUARD 端口视为高电压状态，即使它们被编程为非危险电流电压。

5.2.1. 屏蔽连接

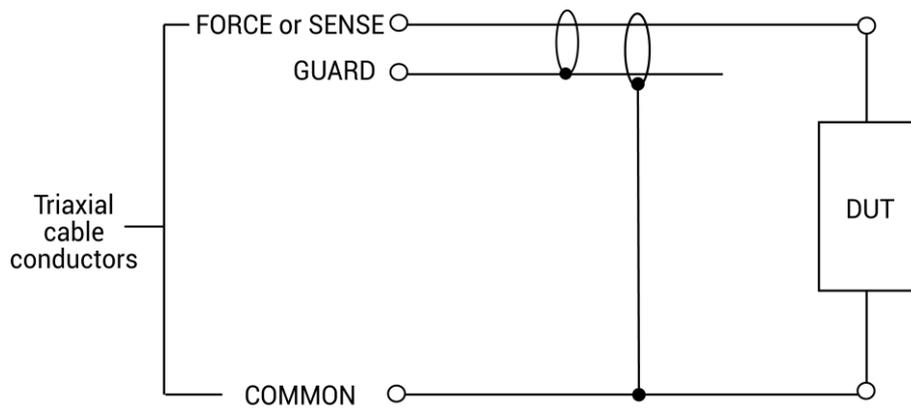
如下图所示，GUARD 在 SMU 和前置放大器的 FORCE 和 SENSE 三轴连接器的内部屏蔽处可用。

图 67: SMU 和前置放大器的三同轴接口



以下图显示了三轴电缆连接到待测器件 (DUT)。在此示例中未连接 GUARD，但可以将其内部路由到测试夹具，如 Test fixture guarding 中所述。

图 68: 屏蔽接线

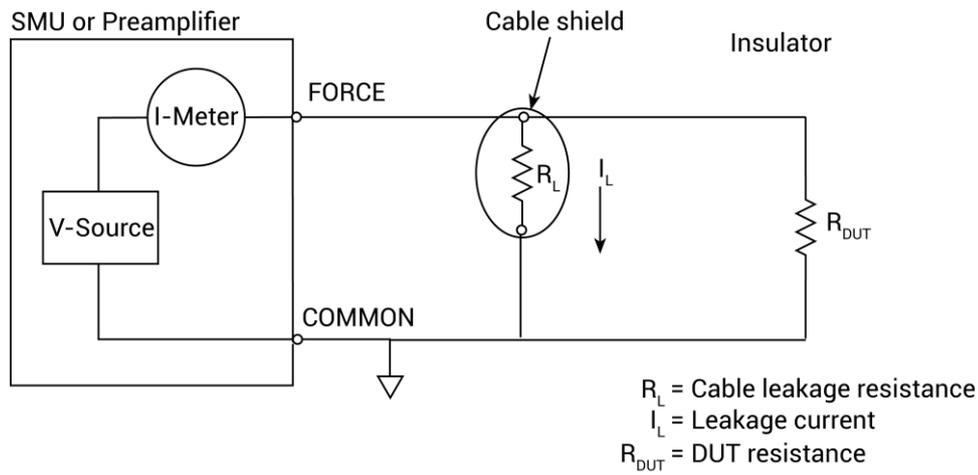


5.2.2. 屏蔽概念

在高阻抗电路中，屏蔽非常重要。考虑以下图中未屏蔽和屏蔽电路的比较。在两种情况下，驱动被连接到 DUT HI，公共被连接到 DUT LO。

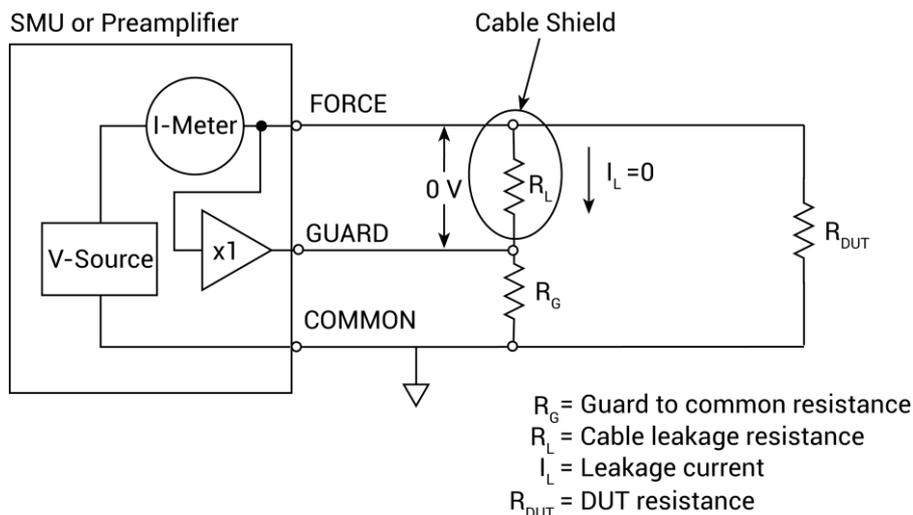
在以下图中的未守卫电路中，电缆泄漏电阻 R_L 有效地与 DUT 并联，产生不需要的泄漏电流 I_L 。这种泄漏电流可能会在低电流测试时严重影响读数。

图 69: 没有接屏蔽的电路



在下图中的保护电路中，电缆屏蔽由一个单位增益、低阻抗放大器（守卫）驱动。由于 R_L 的电压几乎为 0 V，泄漏电流被有效消除。通过屏蔽层和 COMMON 之间的漏电阻 (R_G) 的电流可能相当大，但影响不大，因为它是由单增益放大器提供的，而不是由 SMU 或前置放大器的 FORCE 端子提供的。

图 70: 屏蔽电路



5.2.3. 测试夹具屏蔽

用于驱动三轴连接电缆内屏蔽层的 GUARD 可在测试夹具内布线。在测试夹具内，可使用三轴电缆将防护罩延伸到 DUT 附近，防护罩可连接到环绕 DUT 的防护板或屏蔽罩上。电缆的中心导体用于 FORCE 或 SENSE，内部屏蔽用于 GUARD，外部屏蔽用于 COMMON。

警告

为了防止触电危险，应提供一个围绕所有带电部件的外壳。

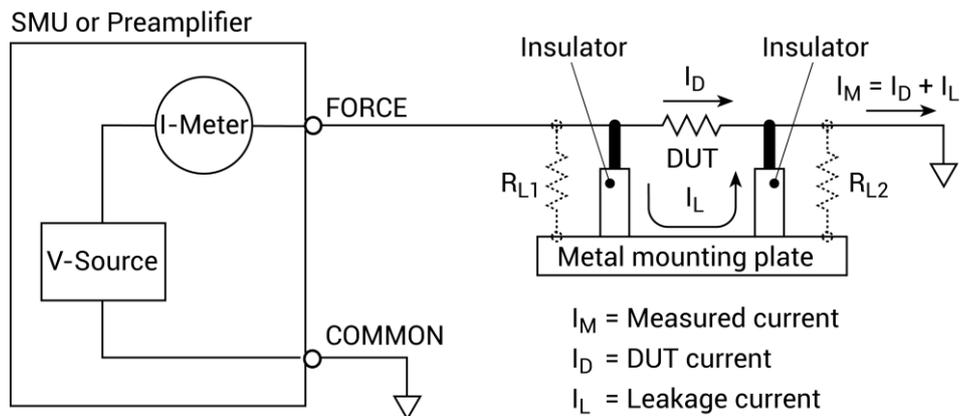
非导电外壳必须由适当评级的材料构建，以满足测试电路的燃烧性和电压温度要求。将所有金属测试夹具的外壳连接到保护地（安全地线）。请参阅特定测试夹具以获取信息。非导电测试夹具的额定值必须是系统中测试设备最大能力的两倍。

对于金属外壳，测试夹具底座必须正确连接到保护地（安全地线）。接地线（16 AWG 或更大）必须牢固地附在设计为安全接地的螺钉端子上的测试夹具上。接地线的另一端必须连接到已知的保护地（安全地线）。

以下图显示了屏蔽如何消除测试夹具中绝缘体中的泄漏电流。

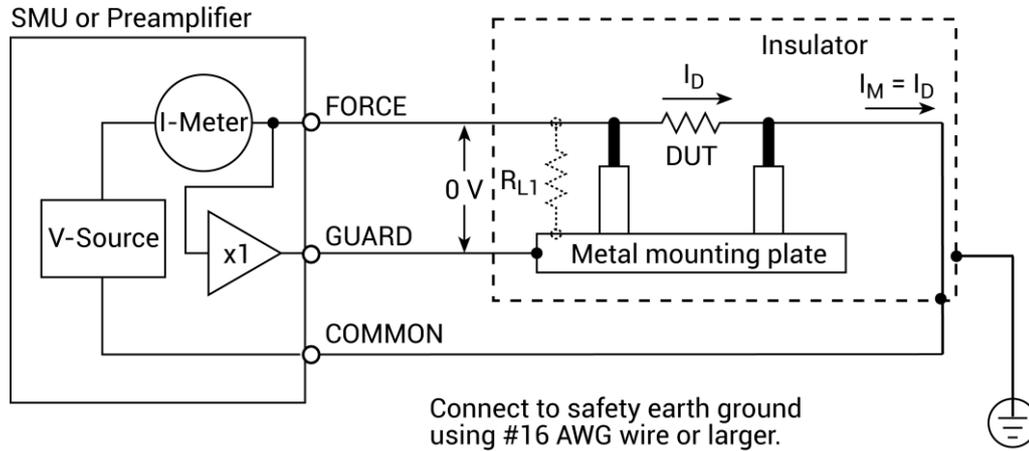
在下图中，泄漏电流 (I_L) 通过绝缘体 (R_{L1} 和 R_{L2}) 流向公共，从而对 DUT 的低电流（或高电阻）测量产生不利影响。

图 71: 测试夹具 (未做屏蔽)



在下图中，驱动的 GUARD 连接到绝缘体的金属屏蔽板上。由于 R_{L1} 两端的电压相同 (0 V)，意味着没有电流通过泄漏电阻路径。因此，SMU 或前置放大器只测量通过 DUT 的电流。

图 72: 测试夹具 (做了屏蔽)



注意

Guard 信号的输出阻抗为 100 k Ω ，只有在连接高阻抗负载时才有效。

5.3. 本地感测和远程感测

根据连接方式自动选择感测类型，本地感测或远程感测。对于许多测试和测量情况，本地感测足够了。但是，在以下源测条件下，为了获得最大精度，应使用远程感测：

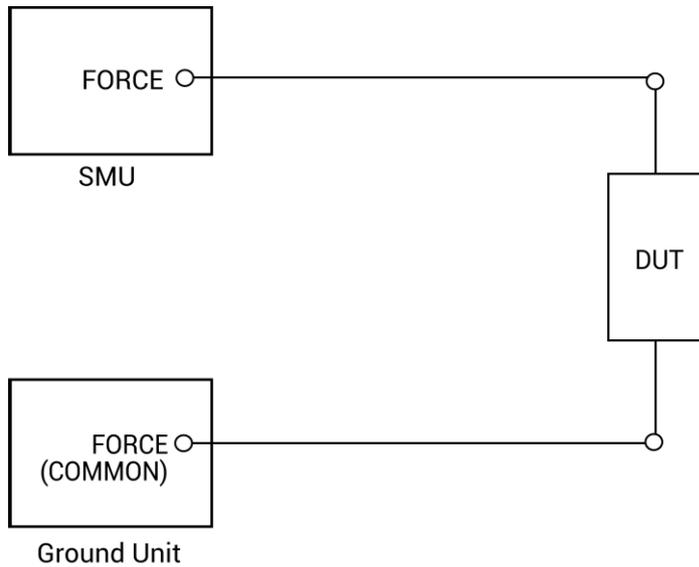
- 测试电路阻抗 <math>< 1\text{ k}\Omega</math>
- 需要最大电压源或电压测量精度

注意

使用远程感测可以实现指定的源和测量精度。

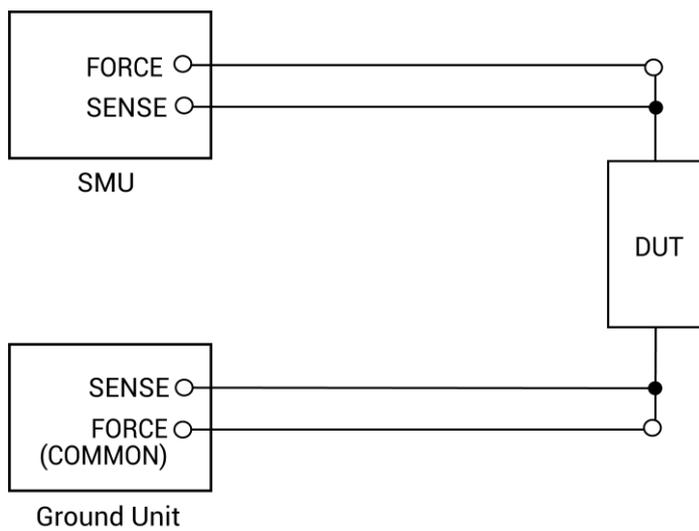
要使用本地感测，只需将 SMU FORCE 和地线单元 FORCE (COMMON) 连接到 DUT，如下图所示。

图 73: 本地感测概览



要使用远端感测，请将 SENSE 和 FORCE 终端均连接到 DUT，如下图所示。

图 74: 远端感测概览



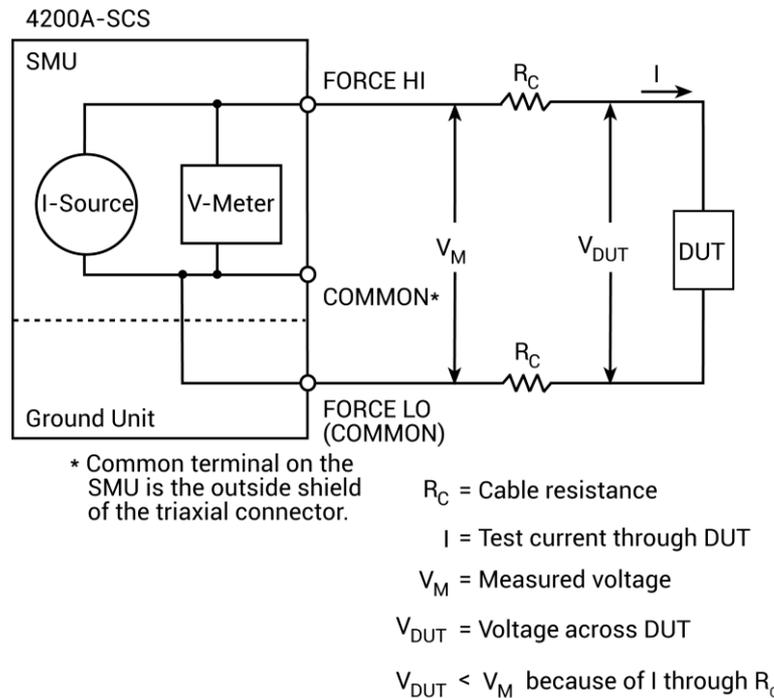
注意

有关各种连接方法的详细信息，请参见“[基本源测连接](#)”。为简化图示，Guard 连接未显示。

5.3.1. 本地感测

对于阻抗大约在 1 k Ω 以上的器件进行的测量通常使用本地感测方法，如下图所示。SMU 测试电流强制通过测试引线 and 被测 DUT，在器件上产生电压 (VDUT)。然后，SMU 通过同一组测试引线测量 DUT 上的电压 (VM)。

图 75: 本地感测

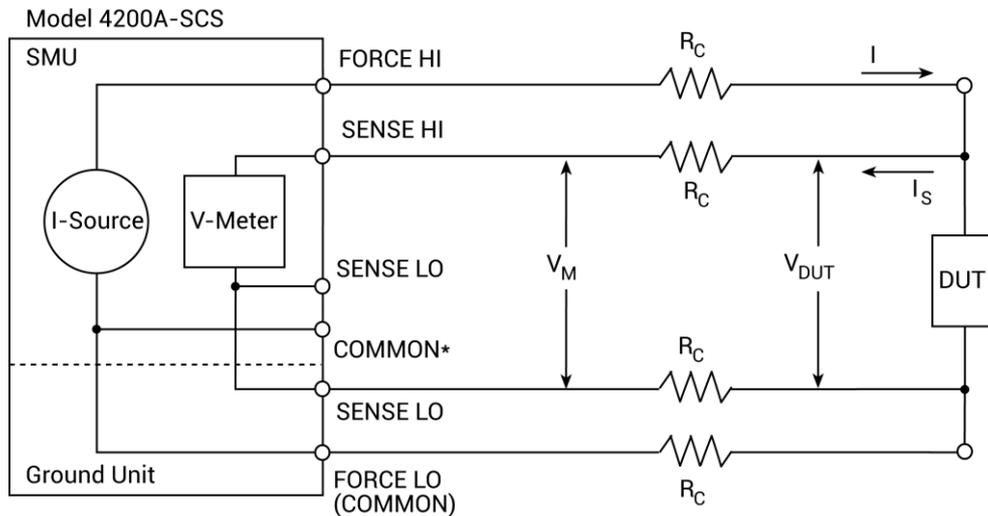


如果您正在测量低阻抗 DUT，则本地感测的方法可能会给出不准确的结果。电缆电阻 (R_C) 和连接电阻（例如矩阵交点电阻或探针到 IC 垫片电阻）可以高达 1 Ω 。由于测试电流 (I) 导致电缆电阻中有小但显著的电压的压降，因此 SMU 测量的电压 (V_M) 将不完全等于直接跨 DUT 的电压 (V_{DUT})，可能会产生相当大的误差。典型的电缆电阻在 1 m Ω 至 100 m Ω 范围内，因此，根据电缆电阻和接触电阻的大小，可能难以获得低于 100 Ω 至 1 k Ω 的 DUT 电阻的准确本地感测测量。在这种情况下，您可能需要使用远端感测。

5.3.2. 远端感测

在下图所示的远端感测方法通常适用于对低阻抗 DUT 的测量。在这种配置下，测试电流 I 通过一组测试电缆强制流过被测设备，而被测设备上的电压则通过第二组感应电缆进行测量。虽然可能会有一些小电流 (I_S) 流过这些检测电缆 (一般为 pA 或更小)，但通常可以忽略不计。由于感应电缆上的电压降很小，因此 SMU 实际测量的电压 (V_M) 基本上与跨 DUT 的电压 (V_{DUT}) 相同。

图 76: 远端感测



* Common terminal on the SMU is the outside shield of the triaxial connector.

- R_C = Cable resistance
- I = Test current through DUT
- I_S = Sense current (negligible)
- V_M = Measured voltage
- V_{DUT} = Voltage across DUT
- $V_{DUT} = V_M$ because of negligible I_S

5.4. 源或汲

根据编程方式以及输出所连接的内容 (负载或源)，SMUs 可以在操作的任何四个象限中工作，如下图所示。当在第一 (I) 或第三 (III) 象限中操作时，SMUs 作为源 (电压和电流具有相同的极性) 工作。作为源，SMUs 向负载提供功率。

当在第二 (II) 或第四 (IV) 象限中操作时，SMUs 作为汲 (电压和电流具有相反的极性) 工作。作为汲，他们消耗能量而不是提供能量。外部源 (例如另一个 SMU) 或储能设备 (例如电容器) 可以强制将操作转移到汲区域。

例如，如果将一个输出 +12V 的第二个源计量单元 (SMU) 连接到被编程为 +10V 的第一个 SMU 上，则第一个 SMU 的汲取操作会发生在第二象限 (源 +V 和测量 -I)。

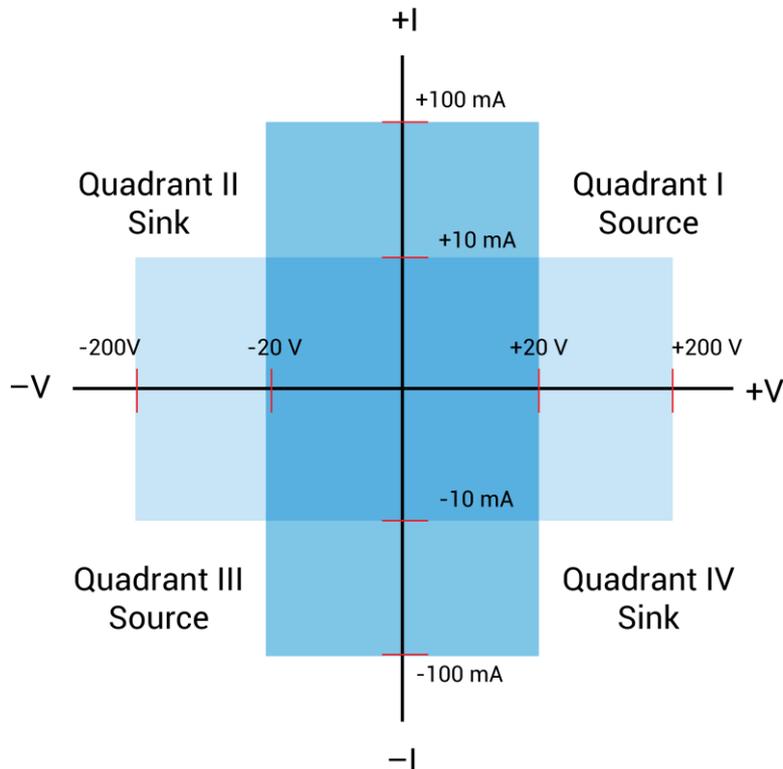
注意

当使用电流源作为汲取器时，始终将电压合规级别设置为高于外部电压级别的水平。否则，可能会因过高的电流流入单元而损坏 SMU 或前置放大器。

5.4.1. 4200-SMU 和 4201-SMU 源或汲取

在以下图中的一般操作边界中，100 mA、20 V 和 10 mA、200 V 的数量是标称值。4200-SMU 和 4201-SMU 的实际最大输出大小为 105 mA、21 V 和 10.5 mA、210 V。请注意，边界未按比例绘制。

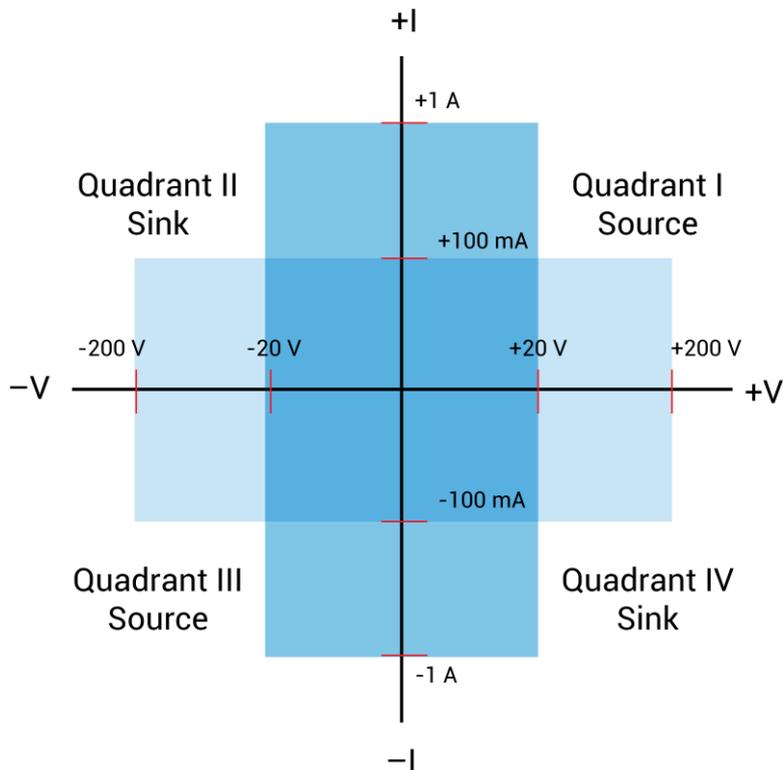
图 77: 4200-SMU 或 4201-SMU 配有 4200-PA 的操作边界



5.4.2. 4210-SMU 或 4211-SMU 源或汲取

在以下图中，1A、20 V 和 100 mA、200 V 的数量是标称值。4210-SMU 和 4211-SMU 的实际最大输出大小为 1.05 A、21 V 和 105 mA、210 V。该边界未按比例绘制。

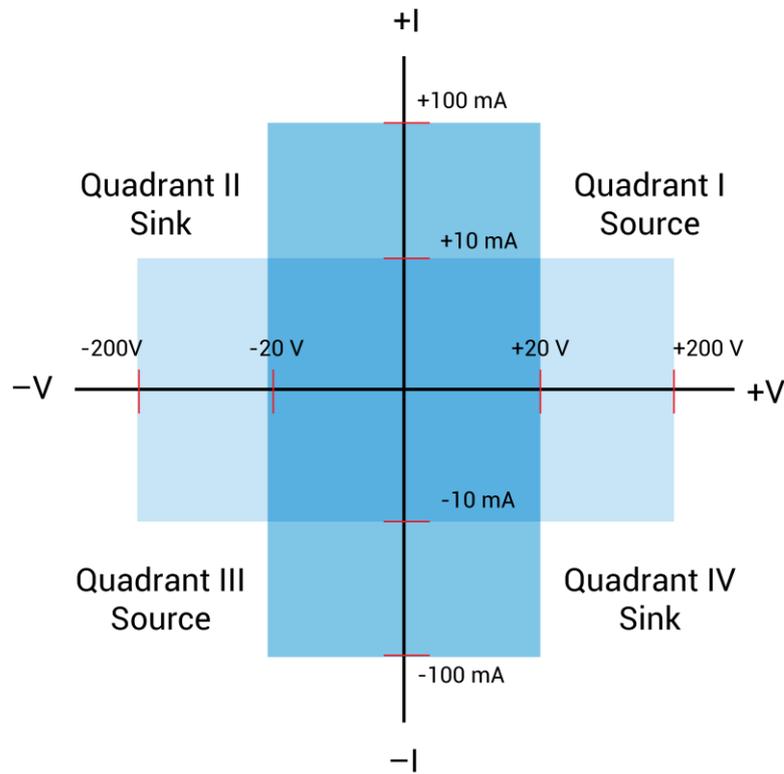
图 78: 4210-SMU 或 4211-SMU 配有 4200-PA 的操作边界



5.4.3. 4200-SMU 和 4201-SMU 汲取边界

以下图显示了标称的 4200-SMU 和 4201-SMU 边界。请注意，实际边界为 10.5mA 时的 210V 或 105mA 时的 21V。

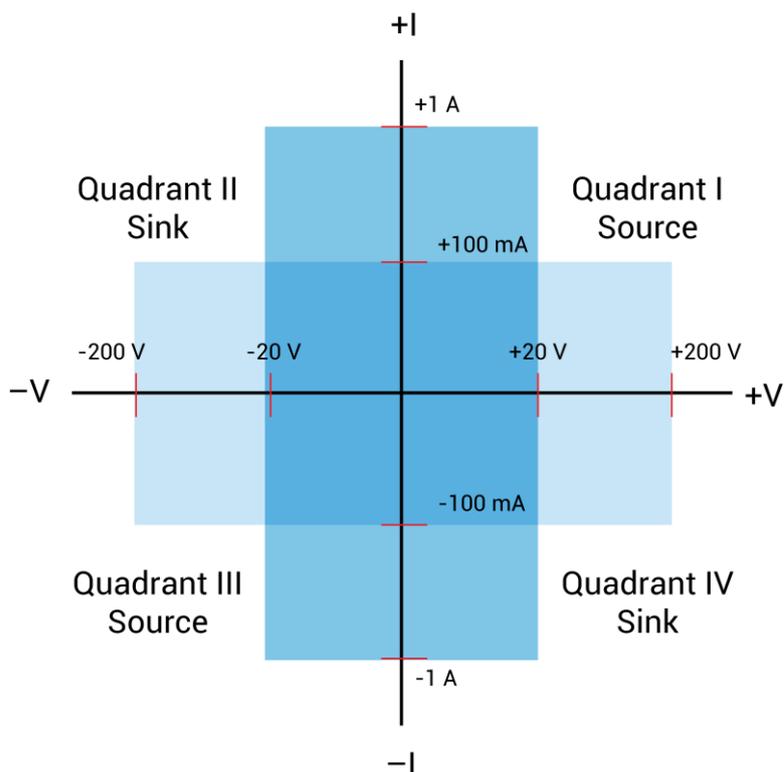
图 79: 4200-SMU 或 4201-SMU 配有 4200-PA 的操作边界



5.4.4.4210-SMU 和 4211-SMU 汲取边界

以下图显示了标称的 4210-SMU 和 4211-SMU 汲取边界。实际边界为 105mA 时的 210V 或 1.05A 时的 21V。

图 80: 4210-SMU 或 4211-SMU 配有 4200-PA 的操作边界



5.5. 源测量考虑因素

当配置为电流源 (I-Source) 时，SMU 作为高阻抗电流源运行，具备电压限制的能力，可测量电流 (I-Meter) 或电压 (V-Meter)。钳位电路将电压限制在编程值范围内。

5.5.1. 源 I，测量 V 或 I

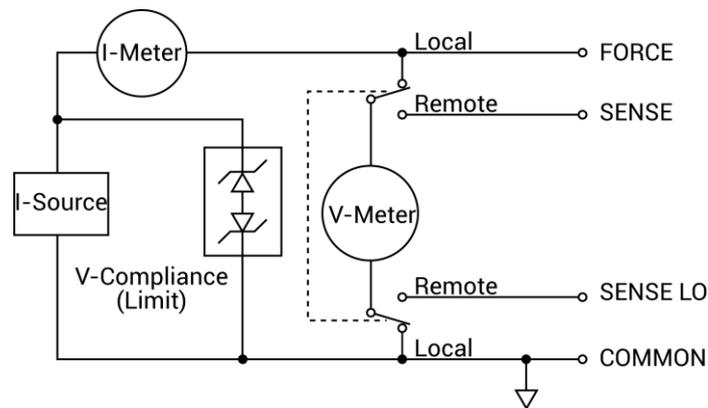
对于电压测量，SENSE 选择 (本地或远程) 决定了测量位置。在本地 SENSE 中，电压在 FORCE 和 COMMON 端口处测量。

在远端 SENSE 中，电压可以直接在 DUT 上使用 SENSE 和 SENSE LO 端口进行测量。这种方法消除了可能存在于测试电缆或连接 SMU 或前置放大器和 DUT 之间的电压降。

注意

电流源不需要使用 SENSE 引线来提高电流源精度。

图 81: 电流源, 测试电压配置

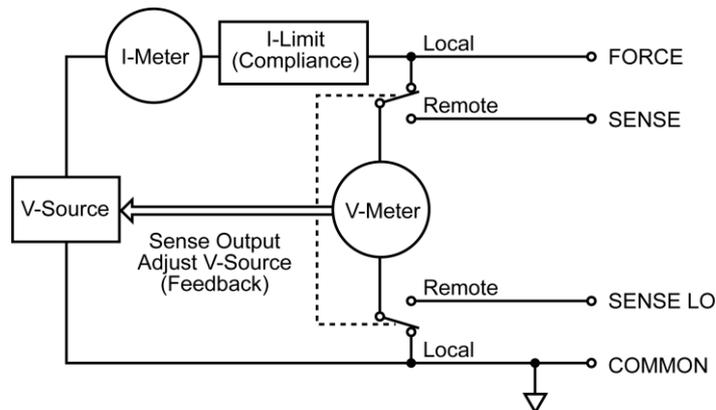


5.5.2. 源 V, 测量 I 或 V

当配置为源电压 (V-Source) 时, 如下图所示, SMU 作为低阻抗电压源运行, 具备电流限制能力, 并且可以测量电流 (I-Meter) 或电压 (V-Meter)。钳位电路将电流限制在编程值范围内。

Sense 电路用于持续监测输出电压并根据需要调整 V-Source。V-Meter 在 FORCE 和 COMMON 端口 (本地 SENSE) 或在 DUT 上 (使用 SENSE 和 SENSE LO 端口的远程 SENSE) 感测电压, 然后将其与编程的电压水平进行比较。如果感测电平和编程值不同, 则相应地调整 V-Source。远端 SENSE 消除了测试电缆中的电压降效应, 确保准确的编程电压出现在 DUT 上。

图 82: 电压源, 测量电流配置



5.5.3. 仅测量 (V 或 I)

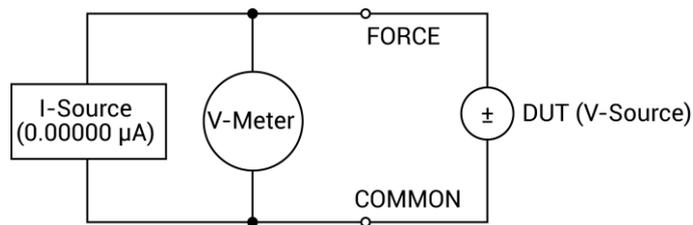
下图显示了仅使用 SMU 作为电压计或电流表的配置。对于这两种配置，使用本地感应。

注意

对于测量电压，请将电压符合设置得高于测量电压。对于测量电流，请将电流符合设置得高于测量电流。

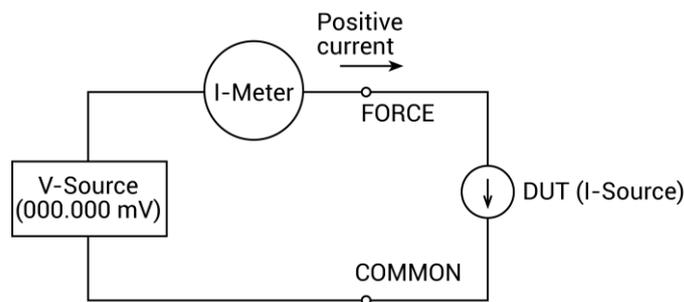
在以下图中，通过将其设置为源 0 A 并测量电压来使 SMU 仅配置为测量电压。

图 83: 只测试电压



在下图中，通过将 SMU 设置为源 0V 并测量电流来配置它仅测量电流。请注意，要获得正 (+) 读数，传统电流必须从 FORCE 流向 COMMON。

图 84: 只测试电流



NOTE: Positive current flowing out of FORCE results in positive (+) measurements.

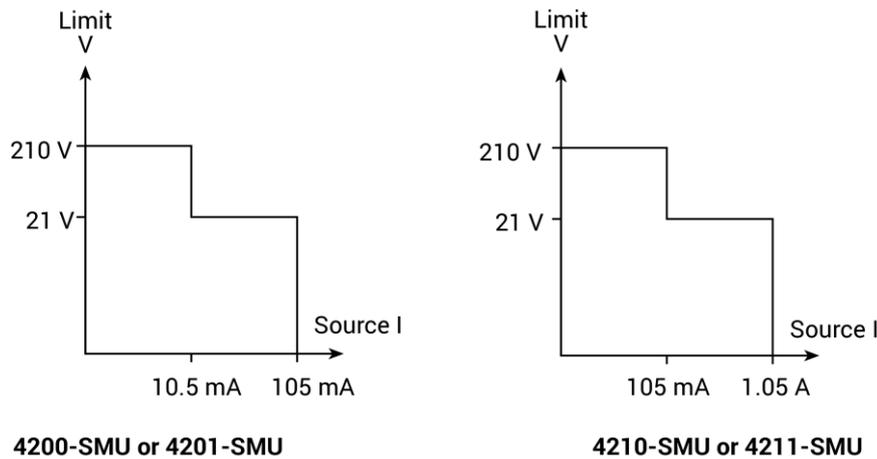
5.5.4. I-Source 操作界限

限制线是代表 SMU 在某个操作象限内的操作限制的边界。操作点可以在这些限制线的任何地方（或上面）。其他象限的限制线边界类似。

以下两个图显示了 I-Source 的操作界限。仅覆盖操作的第一象限；在另外三个象限的操作类似。

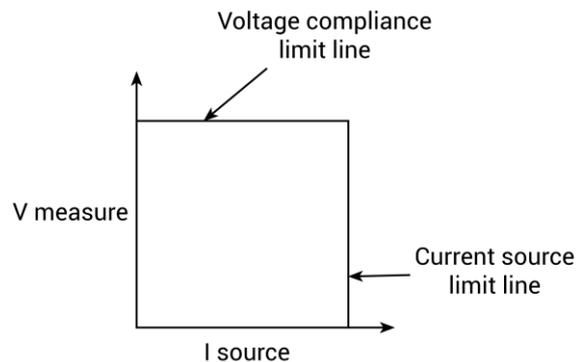
如下图所示，4200-SMU 或 4201-SMU 最多可输出 21V 时 105mA，或 210V 时 10.5mA。4210-SMU 或 4211-SMU 可输出 21V 时最多 1.05A，或 210V 时 105mA。

图 85: SMU 电流源输出特性



以下图显示了 I-Source 的极限线。电流源限制线代表所选电流源范围可能的最大源值。例如，在 100 mA 电流源范围上，电流源限制线为 105 mA。电压规从限制线表示实际有效的合规性。

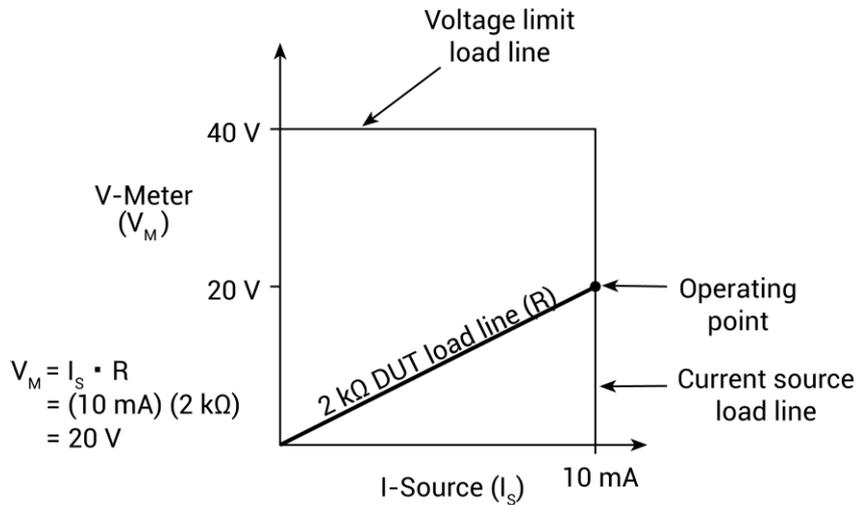
图 86: SMU 电流源限制线



5.5.5. I-Source 操作示例

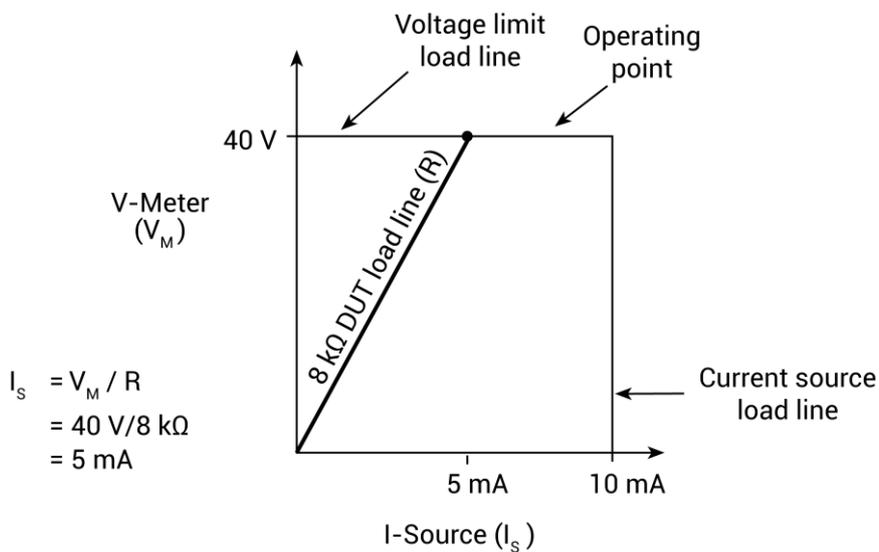
以下图显示了分别为 2 kΩ 和 8 kΩ 的电阻负载的操作示例。在这些示例中，SMU 被编程为输出 10 mA 并限制（钳位）40 V。SMU 向 2 kΩ 负载输出 10 mA，随后测量 20 V。如图所示，2 kΩ 的负载线与 10 mA 电流源线相交于 20 V，低于设定的电压限值。

图 87: 电流源正常运行



以下图示显示了当负载的阻值增加到 8kΩ 时会发生什么。对于 8kΩ 的 DUT 负载线与 40V 电压极限线相交，将 SMU 置于钳位状态。在钳位状态下，SMU 不能输出其编程电流 (10mA)。对于 8 kΩ 的 DUT，SMU 仅输出 5 mA(在 40 V 极限下)。

图 88: 在钳位中的电流源



请注意，随着电阻的增加，DUT 负载线的斜率也增加。当电阻接近无穷大（开路输出）时，在 40 V 下 SMU 几乎不出源电流。然而，随着电阻的降低，DUT 负载线的斜率也降低。在零电阻（短路输出）处，SMU 在几乎 0 V 的情况下源是 10 mA。

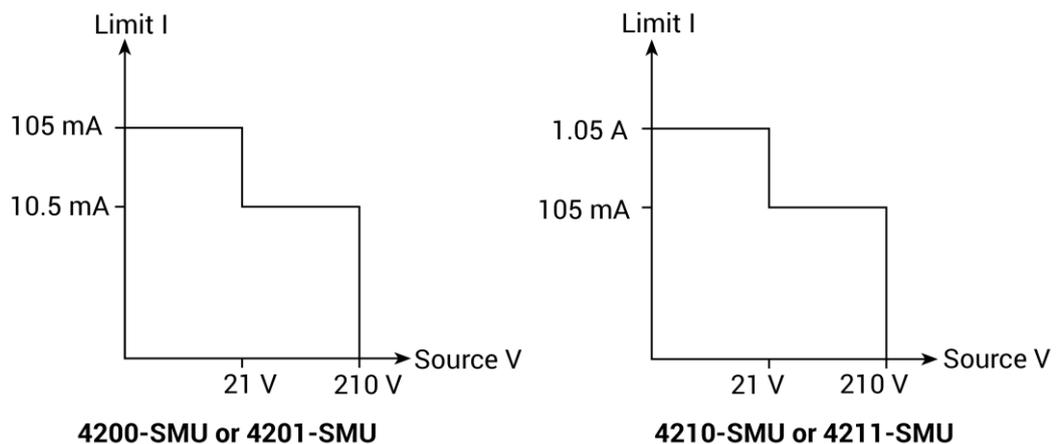
无论负载如何，电压都不会超过 40V 的编程极限。

5.5.6. V-Source 操作边界

以下图示显示了电压源的操作边界。只涵盖操作的第一象限；在其他三个象限中的操作方式类似。

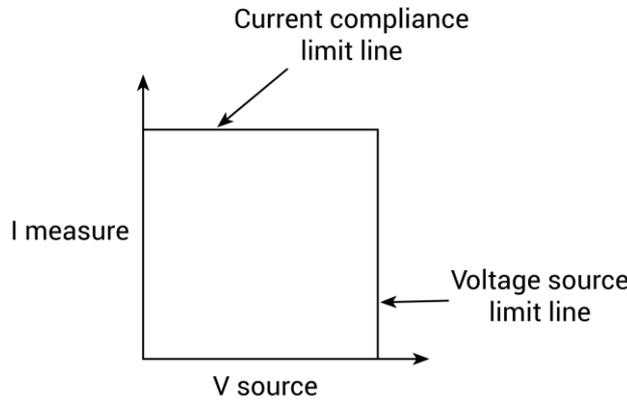
如下图所示，4200-SMU 或 4201-SMU 可以输出高达 21 V 的 105 mA，或 210 V 的 10.5 mA。4210-SMU 或 4211-SMU 可以输出高达 21 V 的 1.05 mA，或 210 V 的 1.5 mA。

图 89: 电压源的操作边界



以下图示显示了电压源的极限线。电压源极限线表示所选电压源范围内可能的最大源值。例如，20 V 源范围的电压源极限线为 21 V。电流合规极限线表示实际生效的合规性。这些极限线是代表 SMU 在此操作象限中的运行限制的边界。操作点可以位于这些限制线内部（或上方）。其他象限的限制线边界类似。

图 90：电压源限制线

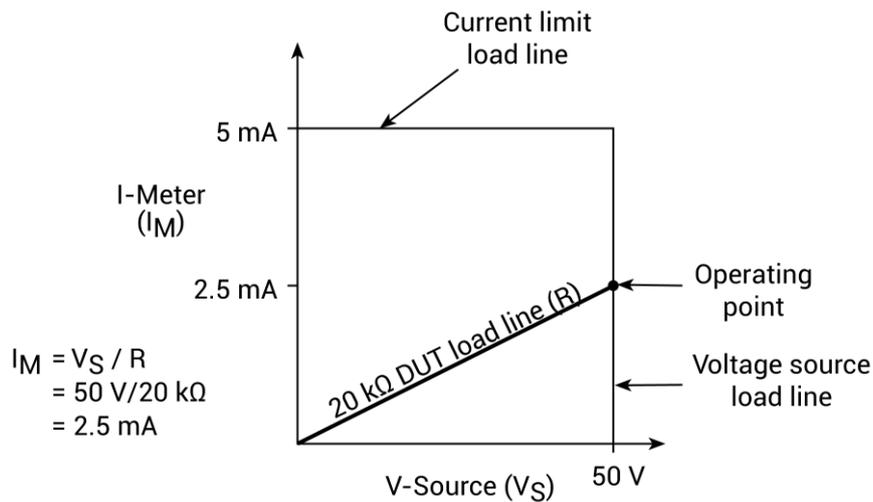


5.5.7. V-Source 操作示例

以下图示显示了分别为 20 kΩ 和 8 kΩ 的阻性负载的操作示例。对于这些示例，SMU 已编程为源 50 V 和限制 5 mA。SMU 向 20 kΩ 负载输出 50 V，随后测量 2.5 mA，该值在 5 mA 编程电流限制内。

如下图所示，20 kΩ 的负载线与 50 V 的电压源线相交于 2.5 mA 处。

图 91：正常电压源操作

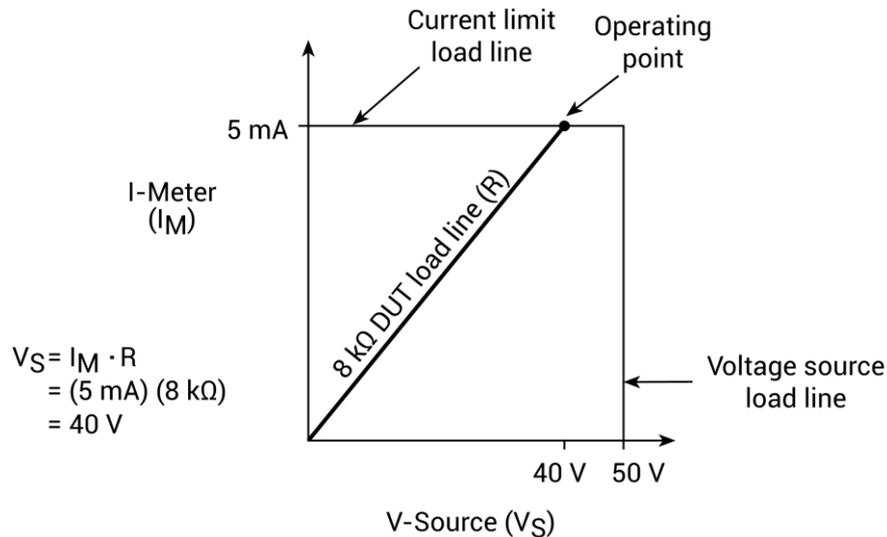


下图展示了当负载电阻降至 8 kΩ 时会发生什么。8 kΩ 的 DUT 负载线与电流限制线相交，将 SMU 置于合规状态。在合规状态下，SMU 无法提供其编程电压 (50 V)。对于 8 kΩ 的 DUT，SMU 只会输出 40 V(在 5 mA 限制下)。

请注意，随着电阻的减小，DUT 负载线的斜率增加。当电阻趋近于无穷大（开路输出）时，SMU 会在 0 mA 处提供大约 50 V。但是，随着电阻的减小，DUT 负载线的斜率将增加。在零电阻（短接输出）时，SMU 将在 5 mA 处提供几乎 0 V。

无论负载如何，电流都不会超过编程的 5 mA 钳位限制。

图 92: 在钳位中的电压源



5.5.8. 源 I 测量 I 和源 V 测量 V

SMU 可以测量它正在输出的功能。当源电压时，您也可以测量电压。但是，如果您正在源电流，您还可以测量输出电流。对于这些测量源操作，测量范围始终与源范围相同。

当在钳位的情况下操作输出源，或需要更高的总体精度时，该功能非常重要。当符合要求时，不会达到编程的源值。因此，测量信号源可以测量实际输出电压。

5.6. 扫描概念

虽然 SMU 可以用于静态源或测量操作，但 SMU 操作通常包括一系列源 - 延迟 - 测量 (SDM) 周期 (参见下图)，作为扫描的一部分 (请参阅[扫描波形](#) (第 5-20 页))。

5.6.1. 源 - 延迟 - 测量周期

在每个源 - 延迟 - 测量周期中，会发生以下情况：

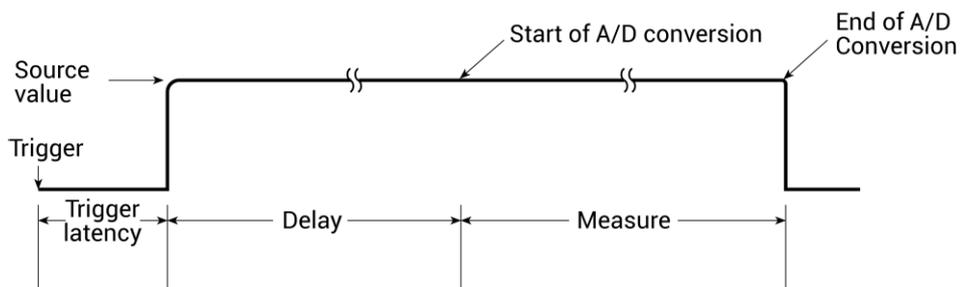
1. 设置源输出电平。
2. 等待源延迟。
3. 进行测量。

周期的延迟阶段由软件编程，可让源和外部电路在测量前稳定下来。如果装置不符合标准，源会很快稳定下来，但由于 DUT 和 SMU 之间的相互作用，外部电压或电流的稳定可能需要更长的时间。

当输出端具有更多电容时，需要更多的稳定时间来稳定源信号。所需的实际延迟可以通过计算或试错确定。对于纯电阻性负载和更高的电流水平，扫描延迟可以设置为最小值。

测量时间取决于选择的积分周期，并且可以通过自动范围进行延长。

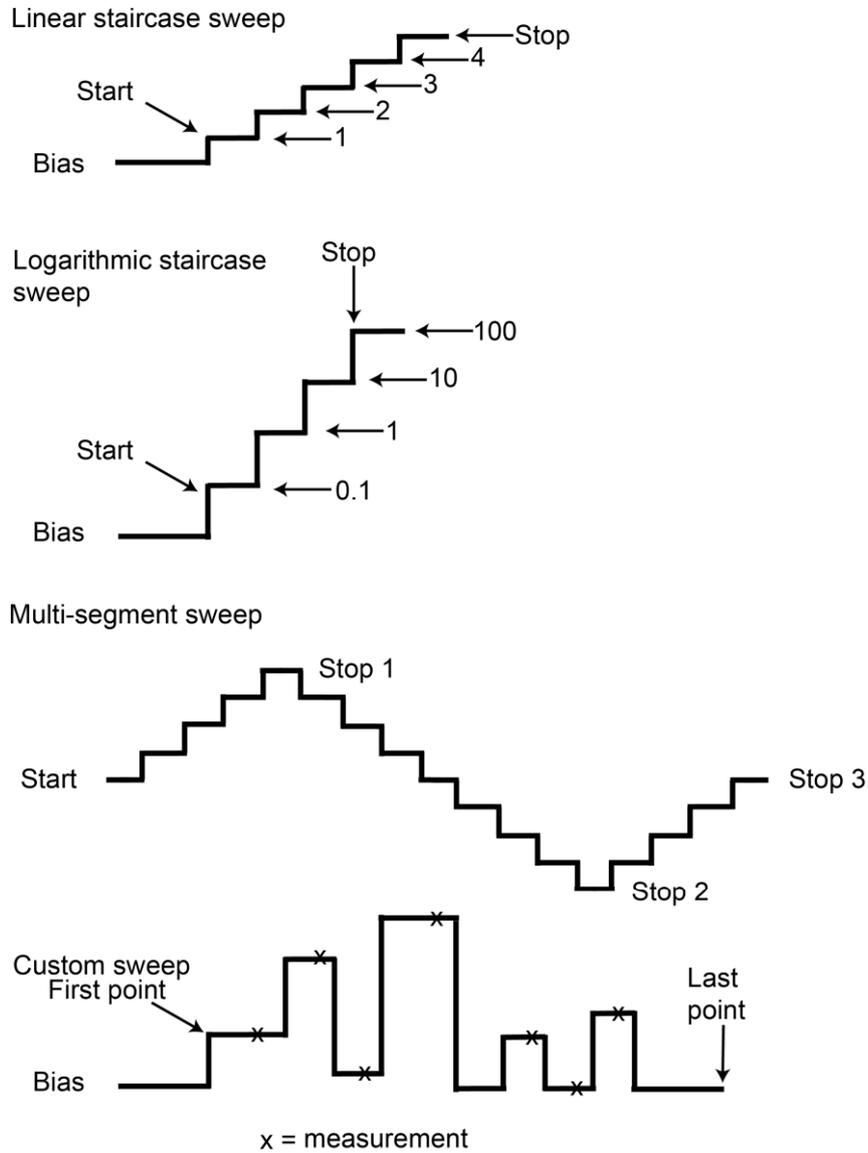
图 93：源 - 测量 - 延迟周期



5.6.2. 扫描波形

常见的扫描类型包括线性阶梯、对数阶梯、多段式和自定义式，如下图所示。线性阶梯扫描以等间隔线性步长从起始电平到停止电平进行扫描。对数阶梯扫描类似，但是在对数刻度上进行，每隔 10 倍有指定数量的步骤。多段式扫描通过一系列具有可变电压或电流步长的片段递增。自定义扫描允许您通过指定每个点的测量点数和源电平来构建自己的扫描。

图 94：扫描波形



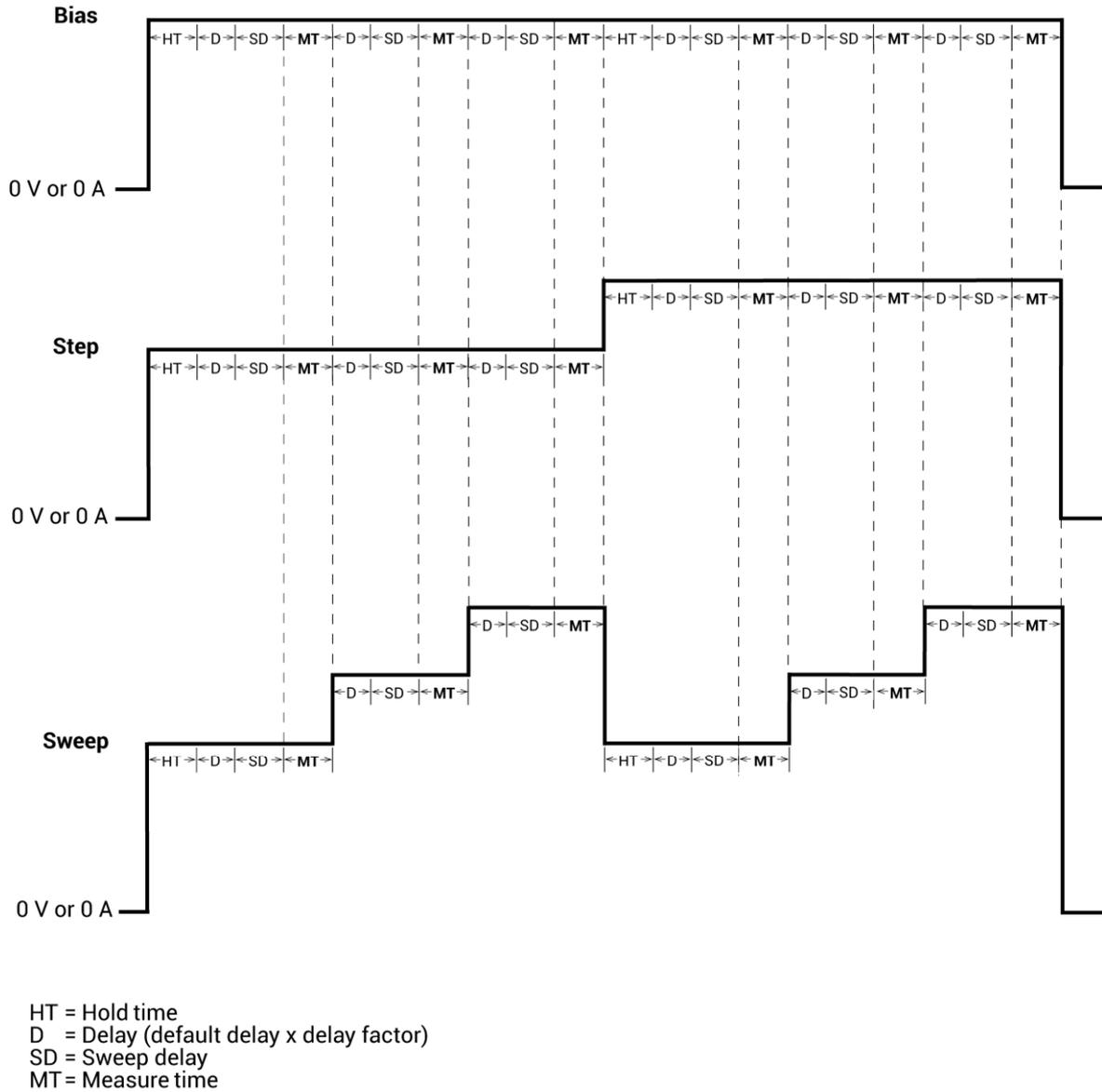
在扫描的每个步骤（或点）上执行源 - 延迟 - 测量周期。每个步骤都进行一次测量。在每个步骤上花费的时间取决于如何配置源 - 延迟 - 测量周期，例如扫描延迟设置。

阶梯扫描的典型应用包括两端和三端半导体器件的 I-V 曲线、漏电与电压特性的表征以及半导体击穿。

5.7. 操作模式的时序

下图显示了使用三个 SMU 的测试系统的源 - 测量时序。它显示扫描、步进和偏置操作模式之间的基本时序。

图 95：扫描模式的时序图



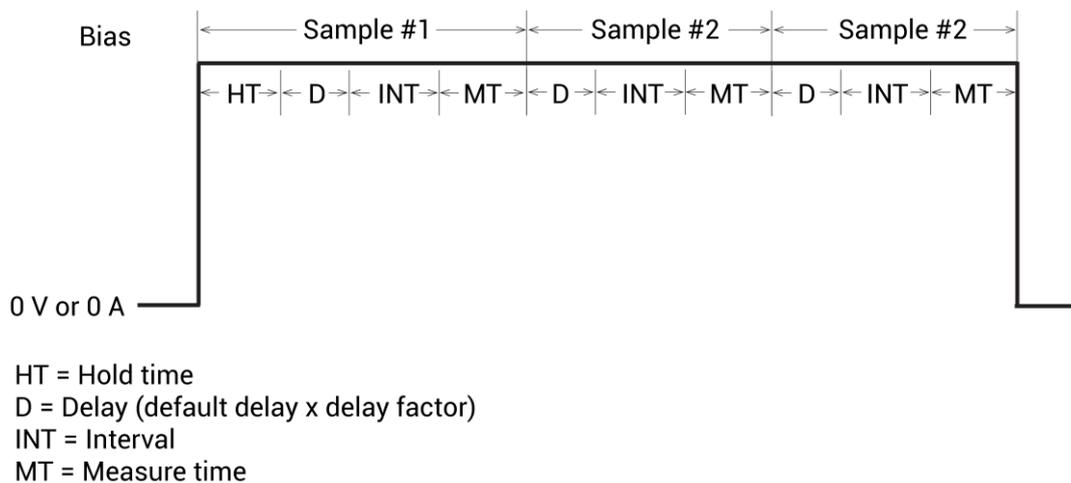
时序元素的作用如下：

- **保持时间 (HT)**：扫描图显示了两个扫描，对应于步进图中直接上面显示的两个步骤。每个扫描开始时都有一个保持时间。保持时间是全局设置，因此在测试系统中所有 SMU 的保持时间都相同。
- **延迟 (D)**：延迟时间允许源稳定，并取决于测量范围。测试系统中的所有 SMU 都是同步的，因此最长延迟的 SMU 应用的延迟时间将应用于所有 SMU。
- **扫描延迟 (SD)**：扫描延迟为扫描中的每个步骤提供额外的稳定时间。它是全局设置，适用于测试系统中所有的 SMU。
- **测量时间 (MT)**：测量时间由滤波器因子和 A/D 光圈时间确定。测试系统中的所有 SMU 都是同步的，因此需要最长测量时间的 SMU 的测量时间对于测试系统中的所有 SMU 都是相同的。

5.7.1. 采样模式的时序

下图显示了采样测试模式的时序图。

图 96：采样测试模式的时序



在每次测量之前，SMU 会自动应用一种与信号范围相关的延迟 (D) 以允许源稳定。测试系统中的所有 SMU 都是同步的。因此，最大延迟的 SMU 应用的延迟时间也是所有 SMU 应用的延迟时间。

在采样模式下，所有设备端口都设置为静态操作模式 (Open、Common、Voltage Bias 或 Current Bias)。可能不需要使用与信号范围相关的延迟，因为在初始应用电流或电压后不需要源稳定时间。您可以将 Delay Factor 设置为 0。

测量时间 (MT) 由 Filter Factor 和 A/D 孔径时间确定。测试系统中的所有 SMU 都是同步的，因此需要最长测量时间的 SMU 的测量时间对于测试系统中的所有 SMU 都是相同的。

6.1. 介绍

本节包括有关提高测量稳定性、进行低电流测量和减少干扰的信息。

6.2. 使用 SMUs 进行稳定的测量

以下主题讨论了进行稳定测量时需要考虑的各种因素，包括单个 SMU 的稳定性、多个 SMU 的稳定性以及避免振荡等问题。

6.2.1. 单个 SMU 的稳定性考虑因素

驱动电感负载会导致电流源不稳定。半导体应用中几乎从未出现过电流源不稳定性。

当 SMU 输出电压并驱动容性负载高达 10nF 时，它是稳定的。但是，在较低的电流测量范围内，大的容性负载可能会增加稳定时间，并可能导致过冲和振荡。为了减少这种影响，您可以在电容负载上串联一个小电阻。选择一个提供 1ms 到 10ms 的 RC 时间常数的电阻。您可以增加测量延迟因子以减少这种影响。

要增加测量延迟因子：

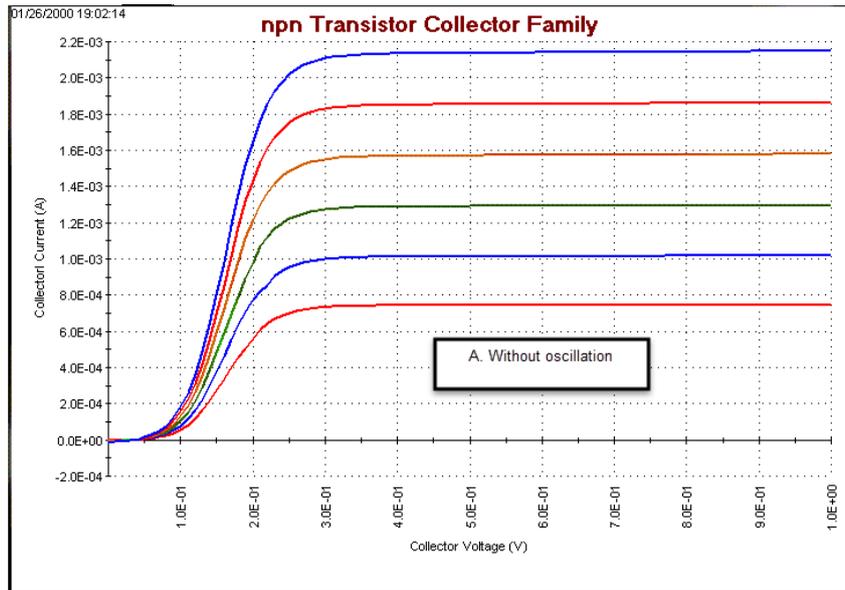
1. 在 Clarius 中选择测试。
2. 选择 Configure。
3. 在右窗格中选择 Test Settings。
4. 选择 Advanced。
5. 将速度设置为 Costom。
6. 增加 Delay Factor。

有关更多信息，请参阅“[延迟因子](#)”（第 3-29 页）。

6.2.2. 多个 SMU 的稳定性考虑因素

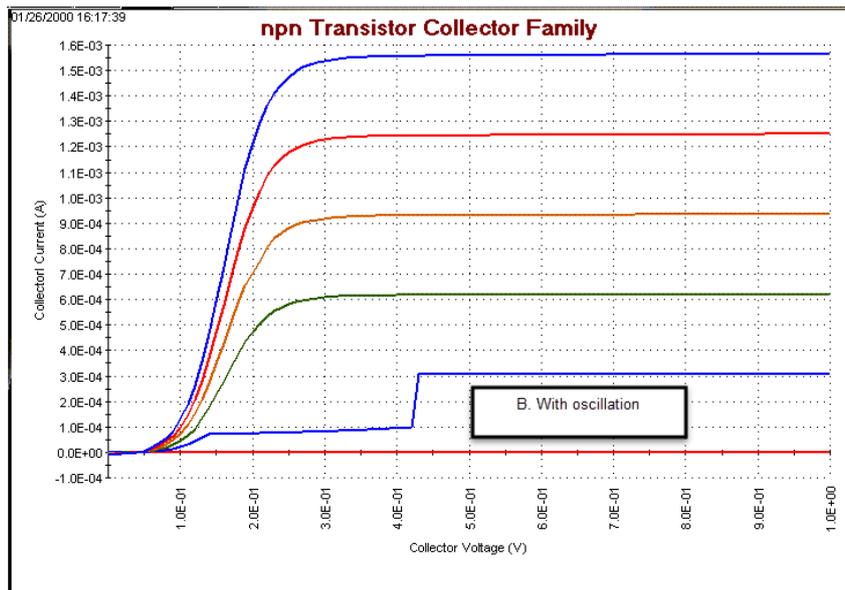
使用两个或更多个 SMU 来测试有源器件 (例如场效应晶体管 (FET) 或双极型晶体管 (BJT)) 可能会增加系统不稳定性。下图示了在稳定条件下测量 BJT 特性曲线的示例。

图 97：振荡对测试数据的影响：无震荡



下图显示了系统振荡时 BJT 特性曲线可能会发生的情况。

图 98：振荡对测试数据的影响：有震荡



6.2.3. 消除振荡

一般来说，振荡可以分为高频（100 kHz 至 200 MHz）或低频（低于 100 kHz）。消除振荡所需的措施取决于正在发生的振荡类型。

消除高频振荡

以下一种或多种补救措施可能有助于消除高频振荡；这些措施按优先顺序列出：

- 将前置放大器尽可能靠近待测物件。
- 在 DUT 处将所有电缆的 COMMON（外层屏蔽）连接在一起。
- 使用有损铁氧体磁珠或 100 Ω 电阻器与 DUT 导线串联。
- 在主机后面板 GNDU COMMON 和机箱地之间断开接地连接。将电缆屏蔽连接到测试夹具机箱上。
- 在双极晶体管 (BJT) 基极和发射极之间或场效应晶体管 (FET) 栅极和源极之间加入高质量电容。使用 100 pF 至 1000 pF 电容。

消除低频振荡

当待测晶体管的增益与连接的 SMU 的输出阻抗相互作用时，低频（直流至 100 kHz）振荡会发生。以下阻抗 (Z) 比率确定晶体管的增益：

- 对于 FET：ZDrain SMU / ZSource SMU
- 对于 BJT：ZCollector SMU / ZEmitter SMU

SMU 通过连接到 DUT 串联电阻的电压降测量电流。对于低电流范围，该串联电阻较高；对于高电流范围，该串联电阻较低。当两个 SMU 分别连接到 BJT 集电极和发射极或 FET 源极和漏极时，会出现大的电流范围差异或振荡。这种振荡导致：

- 大的串联电阻差异
- 连接到晶体的两个串联电阻之间的大阻抗比
- 大的电路增益（潜在地，最大的本征晶体管增益）
- 可能不稳定的电路

为避免场效应晶体管 (FET) 产生震荡，请尝试执行以下操作：

- 设置 (漏极 SMU 电流测量范围) = (源极 SMU 电流测量范围)。
- 如有必要，将两个 SMU 都设置为自动量程。
- 将源 SMU 配置为电压偏置运行模式，并将其设置为 0 伏特。这使您能够配置电流测量范围。

对于源 SMU，请勿选择通用操作模式。此模式会阻止您为源 SMU 配置电流测量范围。这会导致比漏极 SMU 更低的阻抗、潜在的高增益和低频震荡的可能性增加。

为避免双极晶体管 (BJT) 产生震荡，请尝试执行以下操作：

- 设置 (集电极 SMU 电流测量范围) = (发射极 SMU 电流测量范围)。
- 如有必要，将两个 SMU 都设置为自动量程。
- 将发射极 SMU 配置为电压偏置运行模式，并将其设置为 0 伏特。这使您能够配置电流测量范围。

对于发射极 SMU，请勿选择通用操作模式。此模式会阻止您为发射极 SMU 配置电流测量范围。这会导致比集电极 SMU 更低的阻抗、潜在的高增益和低频震荡的可能性增加。

注意

如果将 SMU 设置为自动量程，则漏极 / 集电极和源极 / 发射极都必须设置为测量电流。

6.3. 低电流测量

使用 SMU 或前置放大器进行的低电流测量受到误差源的影响，这可能会对测量精度产生严重影响。以下主题讨论了低电流测量的注意事项，包括泄漏电流、产生的电流、噪声和源阻抗以及电压负载等。有关更多信息，请参考 Keithley Instruments Low Level Measurements 手册。该手册可在 Learning Center 中获得。

6.3.1. 泄漏电流

泄漏电流是由测量电路和附近电压源之间的高电阻路径产生的。这些电流可能会严重降低低电流测量的准确性。

电缆泄漏电流是一个常见的泄漏来源。通常，SMU 和前置放大器提供的三轴电缆中导体之间的绝缘电阻约为 $1 \text{ P}\Omega$ ($10^{15} \Omega$)。如果电缆在未保护的配置下使用，则泄漏电流将流经电缆绝缘层，影响测量。正确地连接三轴电缆到 SMU 或前置放大器会自动将内部电缆屏蔽驱动到屏蔽电位，最小化电缆泄漏电流的影响。

减少泄漏电流的方法包括：

- 在测试夹具中使用优质绝缘材料，例如聚四氟乙烯或聚乙烯。
- 减少测试环境的湿度。绝缘体和测试电路可能会吸收水分，导致产生虚假电流。
- 在测试夹具中使用保护来隔离由于电压源而引起的高阻抗节点的泄漏电流。有关详细信息，请参见 [测试夹具保护](#)（第 5-4 页）。

6.3.2. 产生的电流

测试系统中任何外来产生的电流会增加预期的电流，从而可能导致误差。电流可以是内部产生的，例如前置放大器输入偏移电流，也可以来自于外部来源，例如绝缘体和电缆。以下段落讨论了各种类型的产生电流。下表总结了一些产生电流的典型范围。

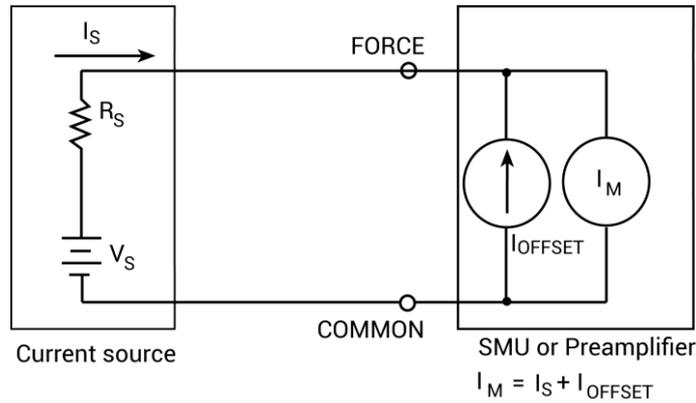
Typical generated currents

Effect	Generated current range
Triboelectric	1 fA to 10 nA
Mechanical stress (Teflon)	1 fA to 1 pA
Mechanical stress (ceramics)	100 aA to 100 fA
Clean epoxy circuit board	100 fA
Dirty epoxy circuit board	100 pA

偏置电流

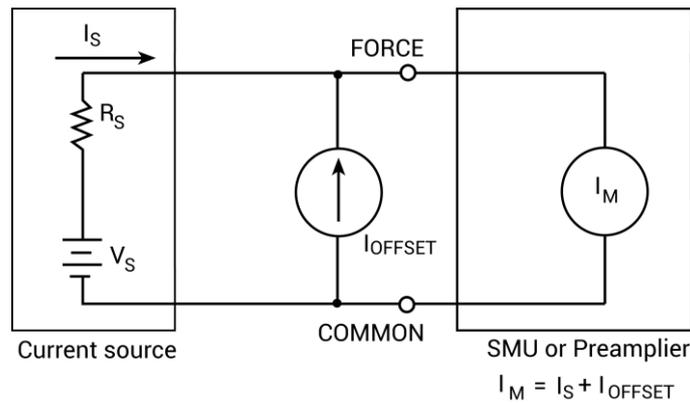
前置放大器始终存在一小电流，称为输入偏置电流。如下图所示，输入偏置电流会加到测量电流上，使 SMU 测量两个电流之和。请注意，通过校准系统可以将输入偏置电流控制在规格范围内。请参阅“校准系统”中的 Model 4200A-SCS 安装和维护。

图 99：输入偏置电流



偏置电流也可以由外部源产生，例如[静电摩擦效应](#) (请参见第 6-7 页) 和[压电效应](#) (请参见第 6-7 页)。如下图所示，外部偏置电流也会加到源电流上，然后 SMU 再次测量两者之和。这些外部偏置电流可以通过使用 Formulator 手动减去来抑制。有关更多信息，请参阅 Model 4200A-SCS Clarius 用户手册中的“[The Formulator](#)”和“[使用 Run 选项卡分析数据](#)”。

图 100：外部偏置电流



摩擦电效应

通过导体和绝缘体之间的摩擦所产生的电荷会生成摩擦电流。自由电子从导体上脱落，形成电荷不平衡，引起电流流动。

随 SMU 和前置放大器提供的三轴电缆在外屏蔽层下使用了石墨浸渍绝缘，从而大大减少了这种影响。石墨提供润滑和导电圆柱体，以平衡和尽量减少电缆运动摩擦效应产生的电荷。然而，即使是这种类型的三轴电缆在振动和膨胀或收缩时也会产生一些噪音。因此，所有连接点都应尽量短，并远离温度的变化（可能会产生热膨胀力），并通过胶带或布线将电缆固定在墙壁、工作台或刚性结构等不会振动的表面上。

其他解决运动和振动问题的方案包括：

- 移除或从机械上消除振动源，如电机、泵和其他电机设备。
- 安全地安装或绑定电子元件、电线和电缆。
- 将前置放大器尽可能靠近被测器件。

注意

连接三轴电缆时，会产生暂时的摩擦电流。这种电流通常为数十到数百飞托安培，并可持续 5 至 10 分钟。

压电效应和储存电荷效应

当机械应力施加在用于绝缘端子和互连硬件的某些晶体材料上时，会产生压电电流。在某些塑料中，储存电荷的区域会导致该材料表现出类似于压电材料的行为。

为尽量减少这种效应产生的电流，应消除绝缘体上的机械应力。还可使用压电效应和储存电荷效应最小的绝缘材料，如聚乙烯。

注意

为防止压电电流和储存电荷效应，请勿弯曲电缆以使角落变紧，并且不要让长电缆悬挂。将所有电缆放置在平坦的表面上。

污染和湿度

当离子化学物质在电路板上的两个导体之间形成弱电池时，电化学效应可能会导致误差电流产生。例如，如果环氧印制电路板没有彻底清洗蚀刻液、助焊剂或其他污染物，则这些污染物可能在导体之间产生几纳安的电流。

高湿度和离子污染会极大地降低绝缘电阻。高湿度条件发生在冷凝或吸水时。离子污染可能是身体油、盐或焊接助剂的结果。

为避免受到污染和湿度的影响，请选择耐水吸收的绝缘材料（如聚四氟乙烯），并将相对湿度保持在 50% 以下。还要确保所有绝缘材料都保持干净且不受污染。如果绝缘材料变得污染，请使用纯溶剂（如甲醇）彻底清洗它们。要清除离子污染，请使用去离子（DI）水清洗。

介质吸收

当绝缘体上的电压导致绝缘体中的正负电荷极化时，绝缘体中就会产生介电吸收。当电压移除时，分离的电荷通过与绝缘体相连的电路产生衰减电流，因为它们会重新结合。

为尽量减少介质吸收对电流测量的影响，应避免对用于敏感电流测量的绝缘体施加超过几伏的电压。在这种情况下，介质吸收造成的电流可能需要数分钟甚至数小时才能消散。介质吸收造成的电流消散。

6.3.3. 电压负载

如下图所示，SMU 或前置放大器电流表可以表示为带有零内部电阻的理想电流表 (IM)，与一个电阻 (RM) 串联。当电流源连接到电流表的输入时，电流将从理想电阻表 (RM = 0Ω) 的值降低。这种降低是由 RM 引起的，它产生了一个附加的电压降，称为电压负载 (VBURDEN)，从而使测量电流从其理论值降低，计算公式如下：

$$I_M = \frac{V_S - V_{BURDEN}}{R_S}$$

由于电压负载导致的测量读数的百分比误差 (E) 为：

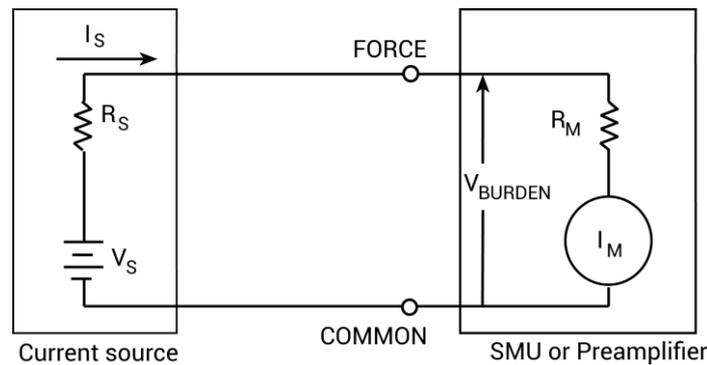
$$E = \frac{V_{BURDEN}}{R_S} \times 100$$

如果电压负载为 0 V，则百分比误差为 0。

注意

SMU 的电压负载小于或等于源电压的偏移规格。

图 101：电压负载的影响



6.3.4. 噪声和源阻抗

噪声会严重影响敏感电流测量。以下段落讨论了源电阻和源电容如何影响噪声性能。

源电阻

DUT 的源电阻会影响 SMU 或前置放大器的噪声性能。随着源电阻减小，电流噪声增加。因为降低源电阻可能对噪声性能产生不利影响，所以通常有基于测量范围的最小推荐源电阻值。下表总结了各种测量范围的最小推荐源电阻值。

Minimum recommended source resistance values

Range	Minimum recommended source resistance
1 pA to 100 pA	1 G Ω to 100 G Ω
1 nA to 100 nA	1 M Ω to 100 M Ω
1 μ A to 100 μ A	k Ω to 100 k Ω
1 mA to 100 mA	1 Ω to 100 Ω

源电容

DUT 的源电容也会影响前置放大器的噪声性能。通常情况下，随着源电容增加，噪声增益也会增加。虽然存在最大源电容值的限制，但通常可以通过在源上串联电阻器来使用更高的源电容值进行测量。但是，这会增加电压负担。例如，先前表中列出的源电阻值会导致 1 mV 至 1 V 之间的电压负载。

6.3.5. 电缆电容

如果没有屏蔽装置，电缆电容的影响将对源极电流的稳定时间产生不利影响。源极的上升时间取决于其输出端的总并联电容。对于高阻抗负载，即使很小的电缆电容也会导致较长的上升时间。例如，电缆电容为 100 pF，负载电阻为 1 G Ω 时，RC 时间常数约为 100 ms。保护装置可大幅降低电缆电容，从而大大加快上升时间。当 FORCE 和 GUARD 处于几乎相同的电位时，电缆电容无法充电、上升时间不受影响。

在源电压时，由于电缆电容所导致的上升时间通常可以忽略不计。因为电压源是低阻抗 (<1 Ω)，所以 10^{-10} 秒 $1 \Omega \times 100 \text{ pF}$ 的 RC 时间常数可以忽略不计。

6.3.6. 测试系统性能

在进行半导体 I-V 测量时，总是要在速度和噪声之间做出妥协。即使使用固定的测量设置，系统配置的更改（例如电缆长度或添加矩阵开关）也会改变测量结果。4200A-SCS 具有允许优化 I-V 测量的设置。设置了快速 (fast)、正常 (normal) 和安静 (quiet) 三个固定的值。您也可以设置自定义值。

为了实现低噪声测量，建议使用安静设置。这种权衡是比较慢的测量速度与快速和正常设置相比，而噪声会更高。为了进行快速测量，可以选择快速设置，但是噪声会更高。通常，正常设置用于平衡速度和低噪声要求。为了进一步微调测量，可以使用自定义设置。

固定设置是根据连接到 DUT 的标准电缆长度对 4200A-SCS 进行调整。通常情况下，这应该足以进行良好的测量。但是，当在系统中使用超长电缆或开关矩阵时，这些设置可能不足。一个典型的现象是出现故障或偏移误差。如果使用快速设置进行测量，则会增加误差，这是由于系统稳定时间不足造成的。如果增加负载或电容（电缆或矩阵继电器），则需要更长的时间来消除瞬态效应。如果只使用针对短电缆优化的测量参数，可能会产生错误的测量结果。

最小化这种影响的最佳方法是增加额外的稳定时间。正常或安静设置应该可以提高测量结果。您还可以使用自定义设置微调测量设置。这可能是一个试错过程。可以使用各种参数组合来实现最佳结果。通常情况下，较长的电缆或开关继电器的较慢稳定需要更大的延迟因子。

6.4. 干扰

可能会影响测量准确性的干扰形式包括静电干扰、无线电频率干扰和接地环路。

6.4.1. 静电干扰

当一个带电物体靠近一个未带电的物体时，就会产生静电干扰，从而在以前未带电的物体上引入电荷。通常这种静电作用的影响不明显，因为低阻抗水平可以使感应电荷快速消散。然而，许多 SMU 或前置放大器测量的高阻抗水平不允许这些电荷快速消散，并且可能通过以下方式引起错误或不稳定的读数：

- 直流静电场可以造成读数中的未检测到的误差或噪声。
- 交流静电场可以通过将放大器推入饱和状态或通过整流产生直流误差来引起错误。

静电干扰是在手或身体在 DUT 附近运动时导致读数波动时首先可识别的。通过观察示波器输出也可以检测到来自交流场的拾取。

为了最小化静电干扰，您可以使用：

- **屏蔽：**可能包括屏蔽房间、屏蔽展台、屏蔽敏感电路（测试夹具）和使用屏蔽电缆。该屏蔽通常应连接到连接信号公共的实心连接器。屏蔽会增加电容，可能会减慢响应时间，除非在测试夹具内使用保护措施。
- **减少静电场：**将电源线或其他源远离 DUT 可以减少引入测试电路中的静电干扰量。

6.4.2. 无线电频率干扰

无线电频率干扰（RFI）是一个通用术语，经常用于描述跨频谱范围的电磁干扰。RFI 在低信号水平下特别麻烦，但在极端情况下也可能影响较高水平的测量。RFI 可能由稳态源（如电视或广播信号）或脉冲源（如高压环境中的弧光）引起。无论哪种情况，如果存在足够多的不需要的信号，对测量性能的影响可能相当大。RFI 的影响通常可见为异常大的偏移，或者在脉冲源的情况下，读数的突然、不稳定的变化。

为了最小化 RFI 的影响：

- 尽可能将 DUT 远离 RFI 源。
- 屏蔽测试设备、DUT 和测试电缆。
- 在极端情况下，使用专门构建的屏蔽房间来衰减麻烦信号。

6.4.3. 接地环和其他 SMU 接地注意事项

当测试系统中的一个以上电路与安全接地点（大地）相连接时，会产生接地环，可能会创建错误信号，导致不稳定或错误的性能。下图所示的配置显示了通过将 4200A-SCS 信号 COMMON 和 DUT LO 连接到安全（大地）接地而创建的接地环。在这个环路中流动的大地电流将遇到小电阻，无论是在导体上还是连接点上。这种小电阻会导致电压降，影响性能。

为了防止接地环，将测试系统连接到单个接地点。如果无法移除被测器件的接地，请移除 GNDU COMMON 端子与机箱接地之间的接地链接，如下图所示。

注意

移除 COMMON-to-chassis 链接可能会导致振荡 (参见 [Making stable measurements](#)(第 6-1 页))。

图 102：接地环

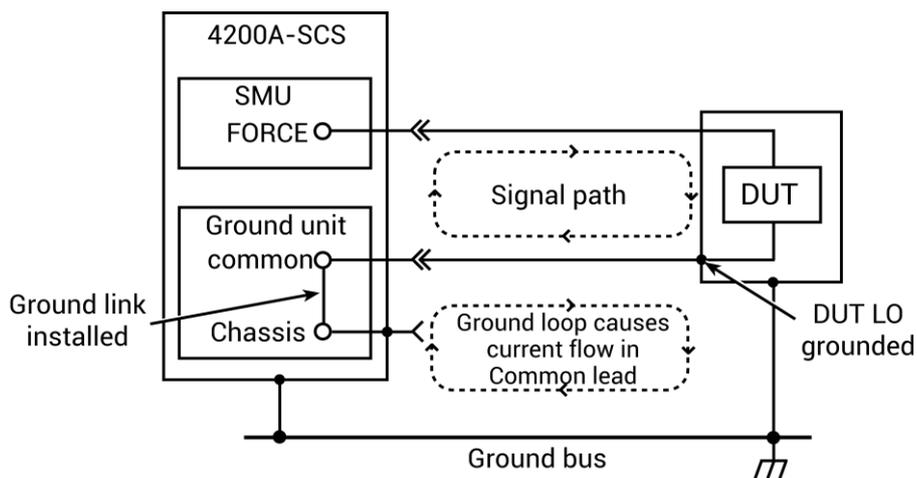
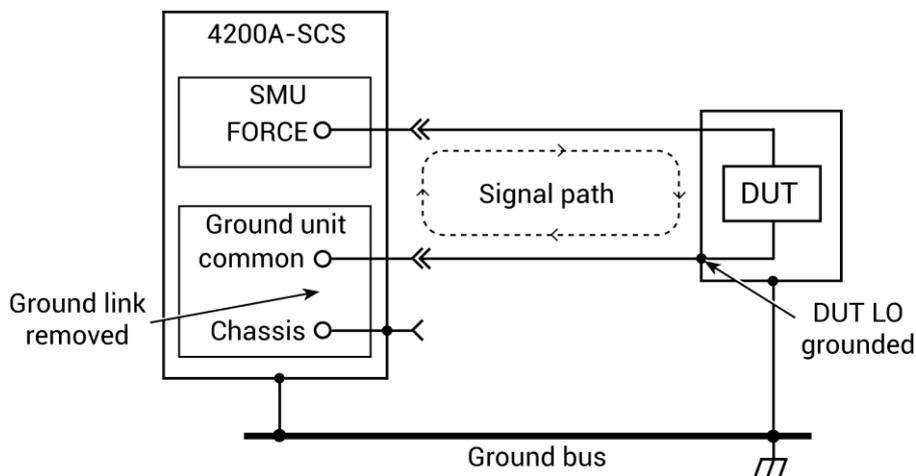


图 103：消除接地环路



太阳能电池的 I-V 测量

7.1. 简介

本示例演示如何使用 4200-SMU、4201-SMU、4210-SMU 或 4211-SMU 仪器对 4 线连接的太阳能电池进行正向偏压电压扫描。在扫描的每个步骤中测量电流，并从收集到的数据生成 I-V 图形。Formulator 计算电池的常见电学特性。

这些说明展示了如何从 SMU 连接到太阳能电池，并将正向偏压 I-V 测试添加到新项目中并自动化测量。

通过 4200A-SCS 测量的 I-V 特性，您可以确定关于太阳能电池的重要参数，包括：

- 最大电流 (IMAX) 和电压 (VMAX)
- 最大功率 (PMAX)
- 开路电压 (VOC)
- 短路电流 (ISC)

7.2. 所需设备

- 一个带有一个 4200-SMU、4201-SMU、4210-SMU 或 4211-SMU 的 4200A-SCS
- 四根三芯电缆 (4200-TRX-2 或 4200-MTRX-2)
- 一个太阳能电池
- 一个光源

7.3. 设备连接

以 4 线配置将前置放大器或 SMU 的输出端子连接到太阳能电池上。这提供了最佳的测量精度，并消除了测试引线电阻和不必要的电压降的影响。

警告

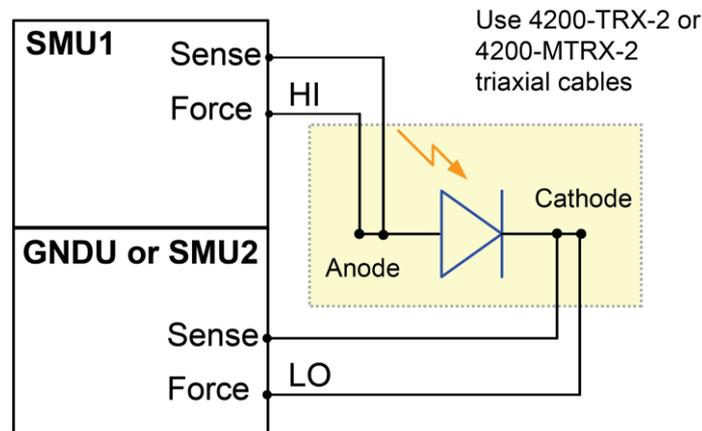
所有输出和保护终端可能存在危险电压。为防止可能导致人身伤害或死亡的电击，请勿在输出打开时连接或断开 4200A-SCS。

为防止触电，测试连接必须配置为用户不能接触测试引线、导体或任何与导体接触的待测设备 (DUT)。在启动仪器之前，将 DUT 从仪器中断开是一个好习惯。安全安装需要适当的屏蔽、障碍物和接地，以防止接触测试引线和导体。

7.3.1. 设备连接原理图

可以使用两个 SMU 或一个 SMU 和地面单元 (GNDU) 连接到太阳能电池。下图显示了应用的连接原理图。

图 104：太阳能电池装置连接示意图



7.3.2. 将 4200A-SCS 连接到 DUT

以下图示显示了 4200A-SCS 后面板连接方法，可使用 [Device connection schematic](#)(第 7-2 页) 主题中提到的方法进行连接。您可以使用四根 4200-TRX-2 或 4200-MTRX-2 三轴电缆进行如下图所示的连接。

图 105：使用两个 SMU 的后面板连接

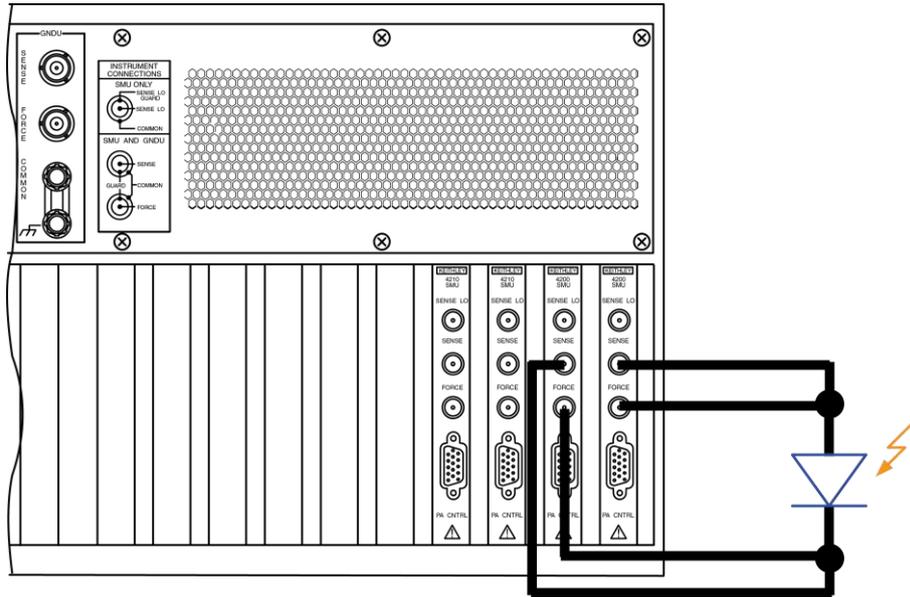
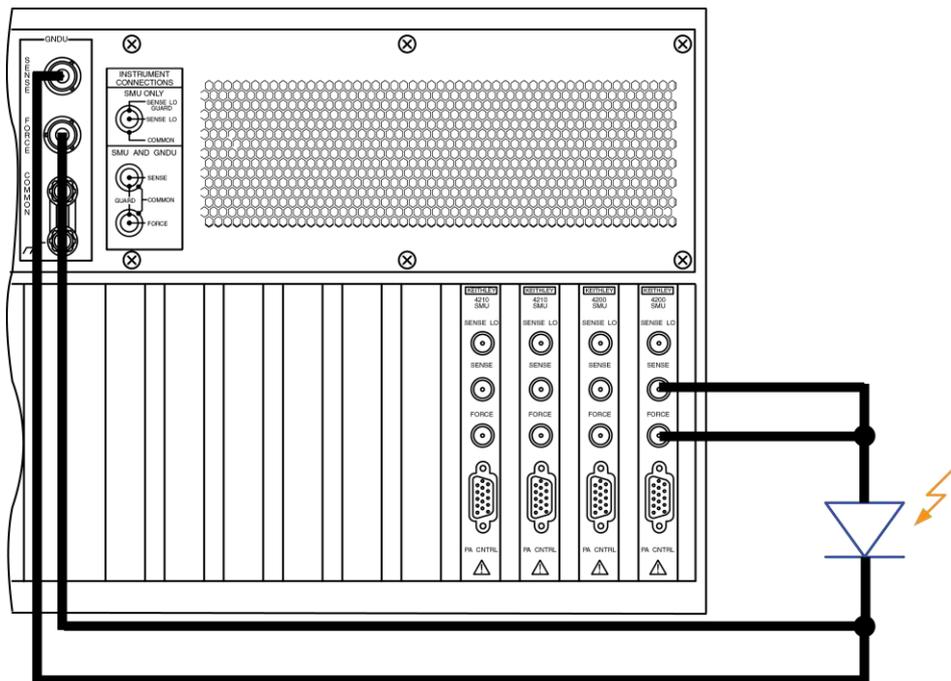


图 106：使用一个 SMU 和 GNDU 进行后面板连接



7.4. 在 Clarius 软件中设置测量

本节演示了如何设置 4200A-SCS 以对太阳能电池进行 I-V 扫描。fwd-ivsweep 测试在用户配置的电压扫描的每个步骤中测量电流。通过获取的数据生成 I-V 曲线，并在 Formulator 中计算器件参数。

对于本示例，使用 Clarius 应用程序：

- 创建一个新项目
- 搜索并选择测试
- 配置测试
- 运行测试
- 查看和分析测试结果

7.4.1. 创建一个新项目

要创建一个新项目：

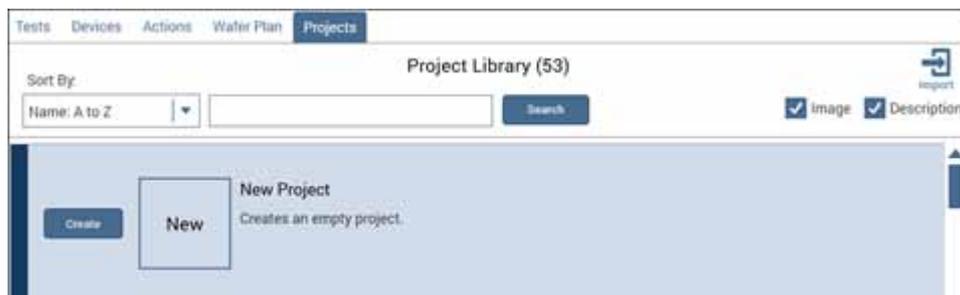
1. 选择“Select”。

Figure 107: Select highlighted



2. 在库中选择“Projects”。
3. 选择“New Project”。
4. 选择“Create”。

图 108：从 Project 库中新建一个新的 Project



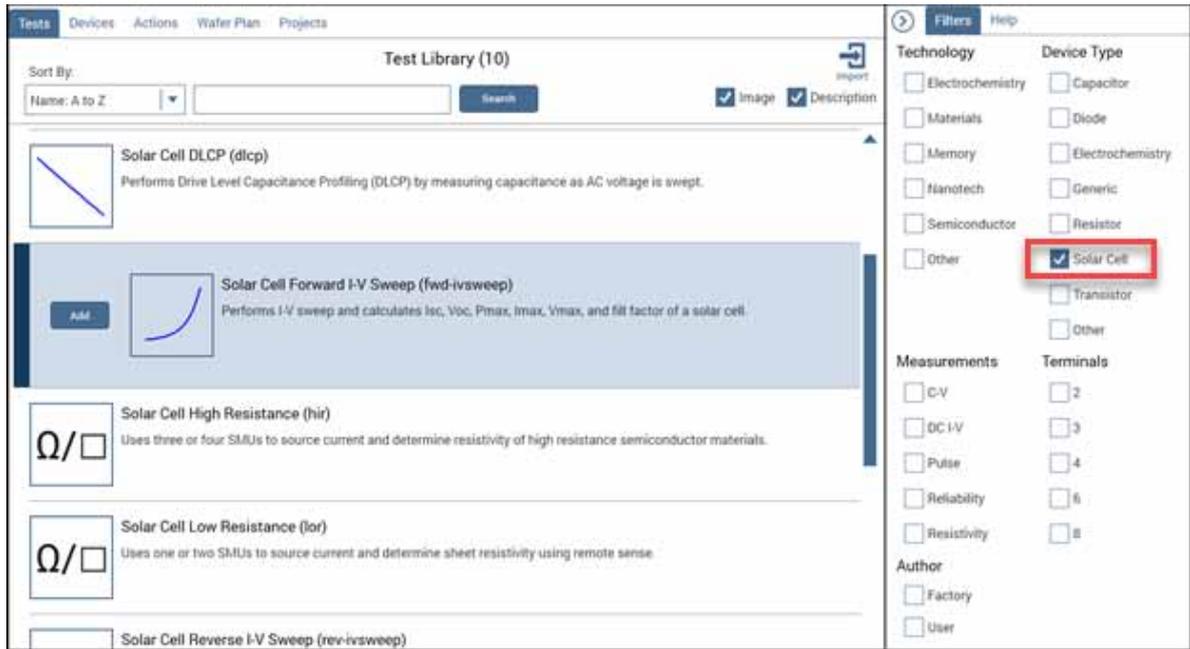
5. 在提示是否替换现有项目时选择“是”。

7.4.2. 搜索并选择测试

要搜索并选择测试，请执行以下步骤：

1. 选择“Tests”。
2. 在筛选器窗格中，选择“Solar Cell”。

图 109：在“Filter”菜单下选择“fwd-ivsweep”测试



3. 选择“Solar Cell Forward I-V Sweep (fwd-ivsweep)”测试。
4. 选择“Add”。

测试将显示在项目树中。

图 110：将测试添加到项目树中

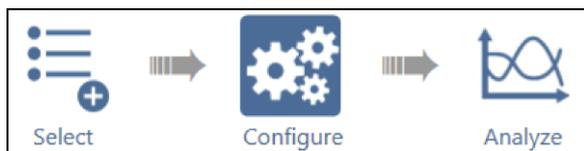


7.4.3. 配置测试

要配置测试，请执行以下步骤：

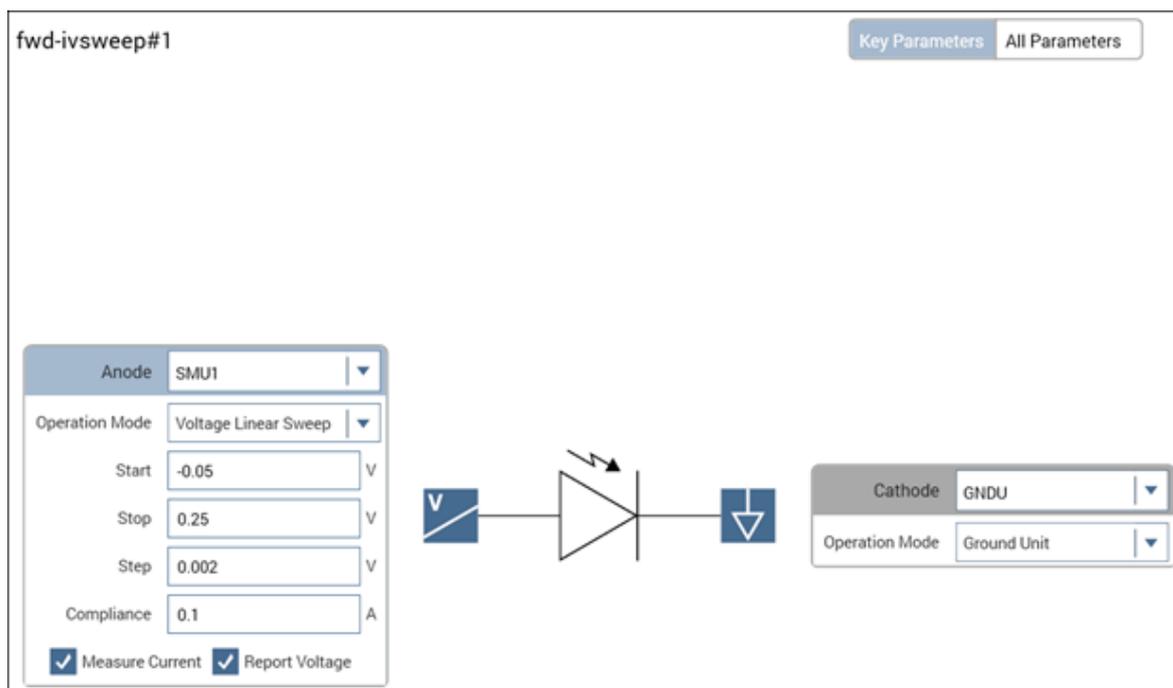
1. 在项目树中，选择项目树中的“fwd-ivsweep solar cell I-V”测试。
2. 选择“Configure”。

图 111: 选择” Confugure”



3. 根据需要调整“Anode”设置。

图 112: 太阳能电池 I-V 扫频的关键参数面板



4. 在测试设置窗格中，根据需要调整测量设置和测试模式。

图 113：测试设置面板

Test Settings Terminal Settings Help

fwd-iv-sweep#1 Advanced

Measure Settings

Speed Normal

Report Timestamps

Test Mode

Mode Sweeping

Sweep Delay 0.1 s

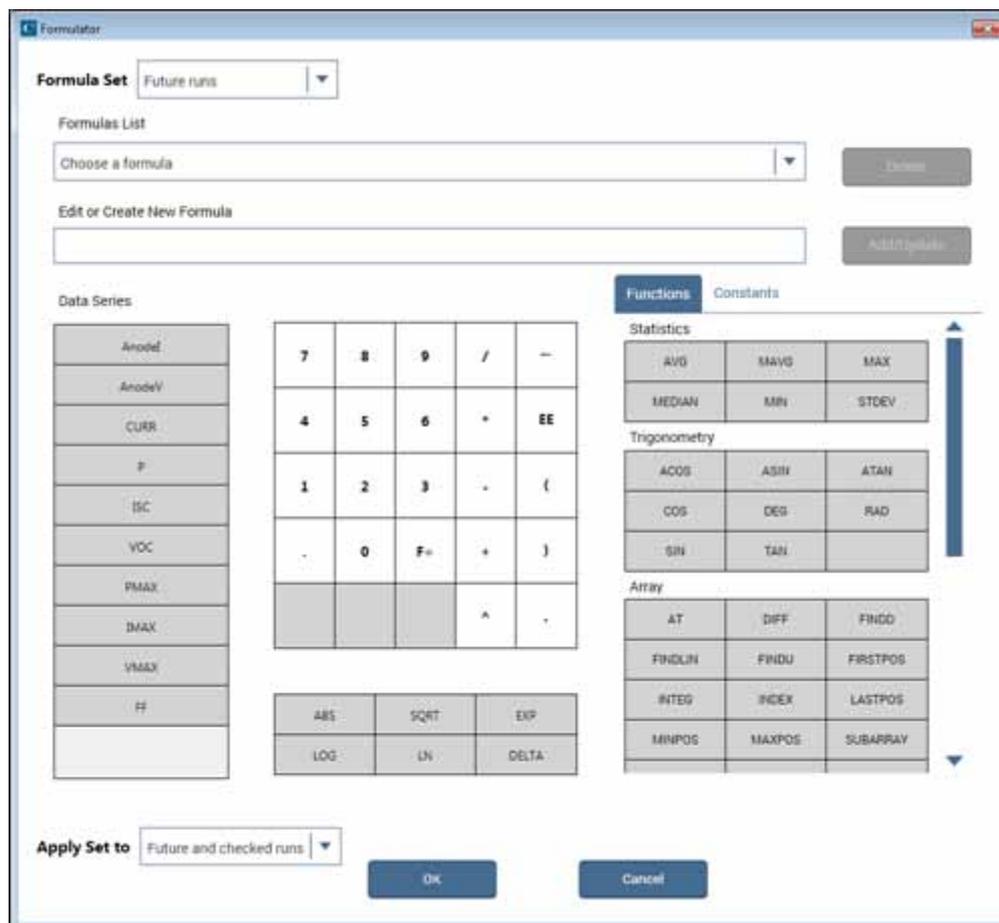
Hold Time 0 s

Formulator Output Values Exit Condition

注意

Formulator 也在测试设置窗格中。如果您在测试设置窗格中选择 Formulator，则会显示 Formulator 对话框，如下图所示。

图 114: Formulator 对话框设置



此测试计算 Voc、Isc、Pmax 和其他器件参数。有关 Formulator 计算的详细信息，请参见“使用 4200A-SCS 参数分析仪进行光伏材料和太阳能电池的电气表征”的应用指南。您还可以添加新公式或编辑现有公式。请参见《Model 4200A-SCS Clarius User's Manual》中的“Formulator”。

7.4.4. 运行测试

1. 在项目树中突出显示“fwd-ivswEEP”测试。
2. 选择“Run”以执行测试。

图 115: Run 运行测试



7.4.5. 分析测试结果

您可以在运行项目时选择“Analyze”以实时查看测试结果。

图 116：选择“Analyze”



您还可以使用中心窗格右上角的视图图标显示表格、图形或表格和图形。以下图示为例，仅显示表格视图。

图 117：分析表

fwd-ivsweep#1 View: Save Data

Run1 Formulas List Formulator

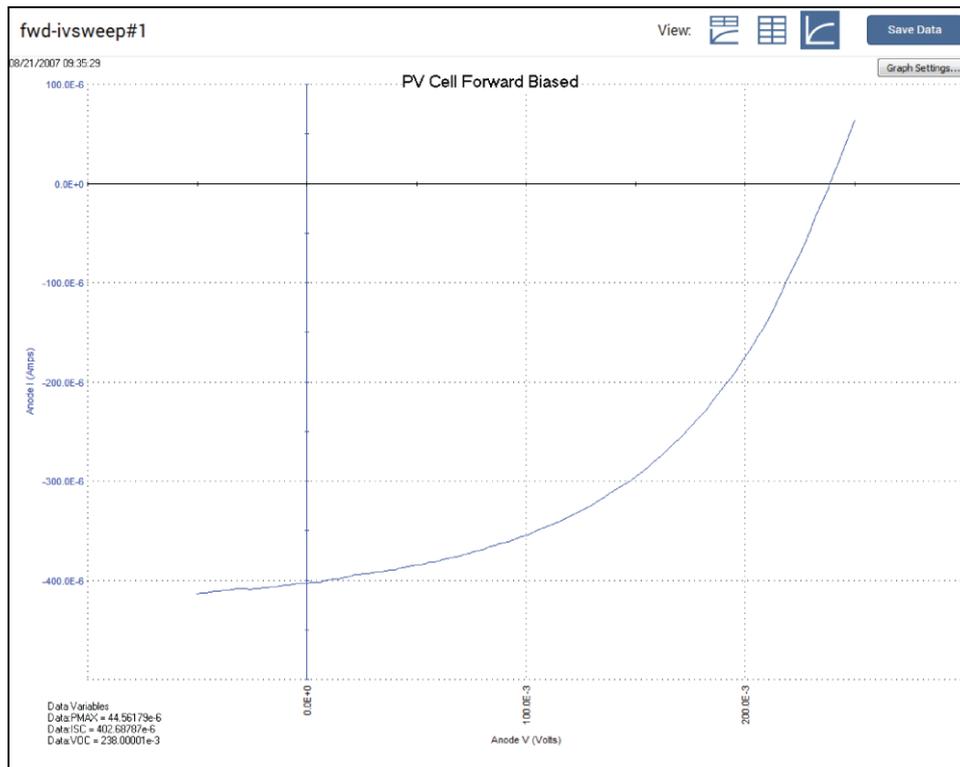
	AnodeI	AnodeV	CURR	P	ISC	VOC	PMAX	IMAX	VMAX	FF
1	-413.3802E-6	-50.0000E-3	413.3802E-6	-20.6690E-6	402.6879E-6	238.0000E-3	44.5617E-6	289.3623E-6	154.0000E-3	464.9616E-3
2	-412.7658E-6	-48.0000E-3	412.7658E-6	-19.8127E-6						
3	-412.6070E-6	-46.0000E-3	412.6070E-6	-18.9799E-6						
4	-412.0101E-6	-44.0000E-3	412.0101E-6	-18.1284E-6						
5	-411.1007E-6	-42.0000E-3	411.1007E-6	-17.2662E-6						
6	-410.6701E-6	-40.0000E-3	410.6701E-6	-16.4268E-6						
7	-409.9707E-6	-38.0000E-3	409.9707E-6	-15.5788E-6						
8	-409.8355E-6	-36.0000E-3	409.8355E-6	-14.7540E-6						
9	-409.3015E-6	-34.0000E-3	409.3015E-6	-13.9162E-6						
10	-408.8281E-6	-32.0000E-3	408.8281E-6	-13.0825E-6						
11	-408.1941E-6	-30.0000E-3	408.1941E-6	-12.2458E-6						
12	-408.7257E-6	-28.0000E-3	408.7257E-6	-11.4443E-6						
13	-409.3095E-6	-26.0000E-3	409.3095E-6	-10.6420E-6						
14	-408.6217E-6	-24.0000E-3	408.6217E-6	-9.8069E-6						
15	-408.2313E-6	-22.0000E-3	408.2313E-6	-8.9810E-6						
16	-407.6464E-6	-20.0000E-3	407.6464E-6	-8.1529E-6						
17	-407.6886E-6	-18.0000E-3	407.6886E-6	-7.3383E-6						
18	-407.0621E-6	-16.0000E-3	407.0621E-6	-6.5129E-6						
19	-406.6541E-6	-14.0000E-3	406.6541E-6	-5.6931E-6						
20	-406.1934E-6	-12.0000E-3	406.1934E-6	-4.8743E-6						
21	-404.7976E-6	-10.0000E-3	404.7976E-6	-4.0479E-6						
22	-405.2458E-6	-8.0000E-3	405.2458E-6	-3.2419E-6						
23	-404.3831E-6	-6.0000E-3	404.3831E-6	-2.4262E-6						

Run1 Run Settings

表格显示带有标签阳极电压和阳极电流数据的结果，分别标记为 AnodeV 和 AnodeI。在 Formulator 中计算的公式显示在最右列中。它们包括最大功率 (P_{MAX})、开路电压 (VOC)、短路电流 (ISC) 和填充因子 (FF)。有关 Formulator 的更多信息，请参阅“Model 4200A-SCS Clarius User's Manual”中的“Formulator”一章。

要查看图形化的测试结果，请选择图形视图进行扩展。下图显示由 SMU 生成的照明硅光伏电池的扫描曲线。

图 118：测试结果显示照明太阳能电池的 I-V 图



由于系统 SMU 可以吸收电流，所以曲线可以通过第四象限并允许从器件中提取电力 (I⁻, V⁺)。如果您想在第一象限中显示数据，请使用 Formulator 将电流乘以 -1，并绘制此计算结果。

您还可以在运行历史记录选项卡下选择以前的测试运行，在图形窗口中显示它们。选中要显示的测试旁边的复选框，测试曲线将显示在图形窗口中。如果选择多个运行历史记录，则图形会叠加显示。

7.4.6. 其他测试

您可以向项目中添加其他太阳能电池测试。在 Tests 库中搜索“太阳能电池”以查找其他测试。

Specifications are subject to change without notice.
All Keithley trademarks and trade names are the property of Keithley Instruments.
All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.

Keithley Instruments
Corporate Headquarters • 28775 Aurora Road • Cleveland, Ohio 44139 • 440-248-0400 • 1-800-833-9200 • tek.com/keithley

