

# 有机 FET 的 DC I-V 和 AC 阻抗测试

应用指南



**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

**Tektronix**<sup>®</sup>

## 引言

有机半导体器件是为替代传统半导体器件而开发的，因为它们采用的材料成本更低，制造成本更低，可以印刷到纸和玻璃等物体的表面，可以用于柔性印刷电路设计中。这些器件用在各种各样的应用中，包括显示器、医疗器械、照明、传感器、内存器件、电池和太阳能电池。有机场效应晶体管 (OFET) 就是最常见的有机半导体器件之一。

OFET 研究一般力求优化器件性能，如载流子迁移率和开 / 关电流比。DC I-V 技术用来确定输出和转移特点、滞后效应、偏压、栅极泄漏电流等。AC 阻抗技术可以揭示与器件相关的关键信息，如载流子迁移率、阈值电压、平带电压和电荷效应。

本应用指南概括介绍如何使用 4200A-SCS 参数分析仪优化 OFET 的 DC I-V 和 AC 阻抗测量。我们将讨论时间参数、降噪、屏蔽、正确布线及实现最佳效果的其他重要测量考虑因素。

## 有机场效应晶体管 (OFET)

OFET 是一种场效应晶体管，采用有机半导体材料作为器件源极端子和漏极端子之间的通道。有机薄膜晶体管 (OTFT) 是 OFET 中的一种，在本应用指南中，我们将这两种 FET 作为同义词使用。**图 1** 是一个栅极位于底部的 OFET。有机半导体放在电介质上方，电介质做在栅极端子上方。两个金属触点位于有机半导体顶部，作为源极端子和漏极端子。这三个器件端子连接起来，执行电学测量。

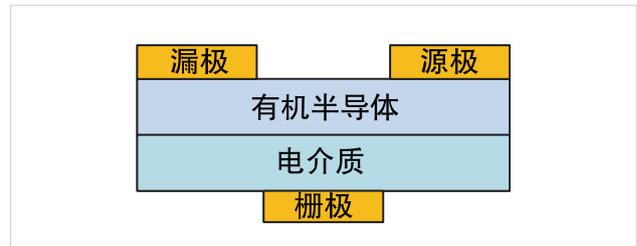


图 1. 底部栅极有机场效应晶体管。

## 使用 4200A-SCS 进行电气测量

4200A-SCS 系统包括多项测试，在有机 FET 上进行最常用的电学测量。我们可以在 Test Library 测试库中找到进行 DC I-V、超低频率 C-V 和高频 C-V 测量的这些测试，具体方式是：进入 Clarius 软件 Select 视图，搜索关键字“ofet”或“organic”；也可以在 Search 字段中使用关键字“ofet”或“organic”，在 Project Library 项目库的 Organic FET Characterization Project (ofet) 中找到所有这些测试。**图 2** 是这个项目的截屏。除系统提供的测试外，用户还可以根据自己的应用和测量要求，简便地创建自己的测试和项目。

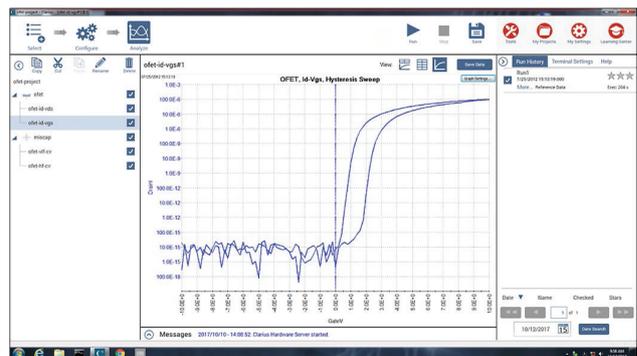


图 2. 有机 FET 表征项目截屏。

### 电流 – 电压测量

有机器件的 I-V 特点可以用来提取器件的许多参数，研究制造工艺的效应，确定触点的质量。Test Library 测试库和 Organic FET Characterization 有机 FET 表征项目包括多项测试，可以测量 OFET 的输出特点 (ID-VDS) 和传递特点 (ID-VGS)。

**图 3** 是使用两台 SMU(4200-SMU、4201-SMU、4210-SMU 或 4211-SMU) 并选配 4200-PA 前置放大器，测量 OFET 的转移特点的 DC I-V 测试配置。这些 SMU 能够同时提供和测量电流和电压。它们拥有皮安灵敏度，可以限流，防止损坏器件。在这个图中，SMU1 连接到 OFET 的栅极上，SMU2 连接到漏极端子上。源极端子连接到接地单元 (GNDU) 上，如果必需从 OFET 这三个端子供电和测量的话，源极端子也可以连接到第三台 SMU 上。

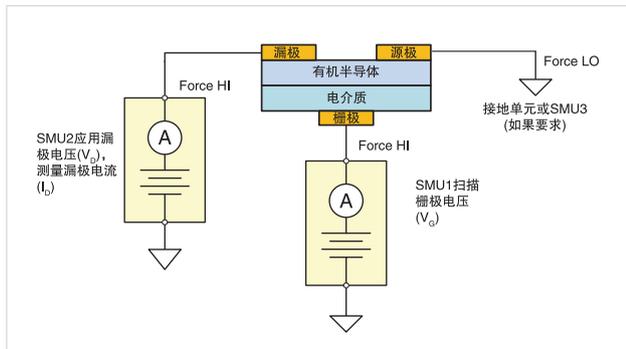


图 3. 测量 OFET 的 DC I-V 特点的电路图。

一旦 SMU 连接到 OFET 上，我们可以使用 Test Library 测试库中的 Organic FET Drain Current vs. Gate Voltage (ofet-id-vgs) 测试生成转移特性。在这项测试中，SMU2 应用恒定的漏极电压 (VD)，测量漏极电流 (ID)；SMU1 扫描栅极电压 (VG)。**图 4** 显示了漏极电流测量结果，它与 OFET 的栅极电压相关。我们使用软件中的 Dual Sweep 双扫描功能执行滞后扫描。注意，配有前置放大器的 SMU 可以执行从飞安 fA 到毫安的几十种电流测量。

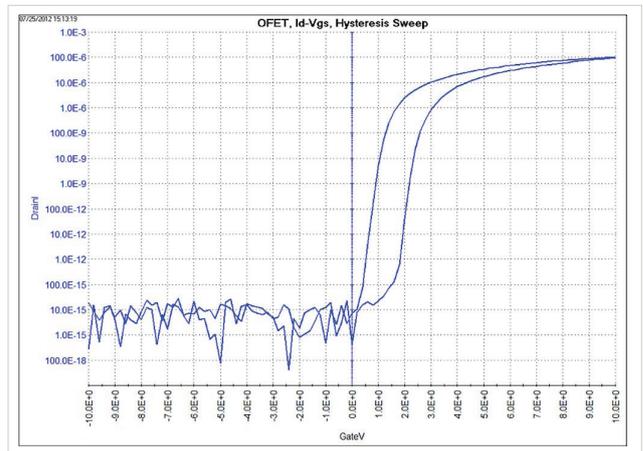


图 4. OFET 的 ID-VGS 曲线。

在 Clarius 软件中，可以简便地重新配置连接到 OFET 每个端子的 SMU，来执行其他测试。通过在软件中改变 SMU 参数，还可以测量输出特点 ID vs. VD。我们也可以使用 Test Library 测试库中预先配置好的 Organic FET Output Characteristics (ofet-id-vds) 测试。通过步进提高栅极电压，测量相对于漏极电压的漏极电流，可以生成漏极家族曲线。图 5 显示了使用 ofet-id-vds 测试测量 p 型 OFET 的 ID-VDS 曲线的结果。

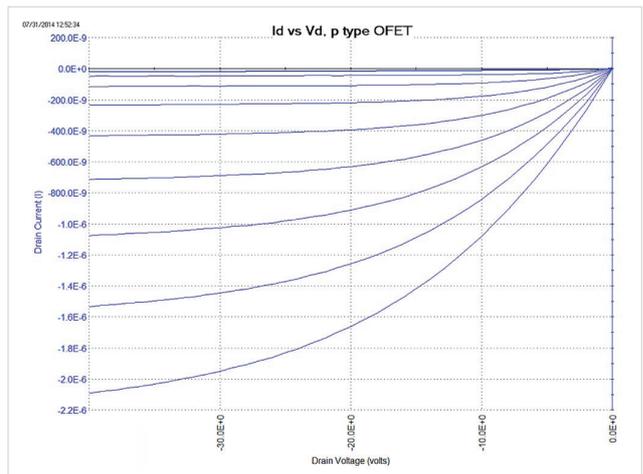


图 5. p 型 OFET 的输出特点。

### 优化 DC I-V 测量

在使用 4200A-SCS 对有机 FET 进行 DC 测量时，下面的技术将改善测量质量。

**消除引线 and 接触电阻：** 在使用电缆把 SMU 连接到器件上时，电缆的串联电阻可能会导致测量误差。在使用长连接电缆和高电流时，电缆电阻的效应尤其有害，因为与实测电压相比会出现明显压降。

如图 6 所示，在进行 2 线或本地传感连接时，电缆电阻引起的压降被增加到 DUT 的电压测量中。在这种情况下，电流流经两条电缆及 DUT，导致三次压降，SMU 电压表都测到了。为了从测量中消除电缆电阻，我们对器件采用 4 线或远程传感连接，如图 6 右半部分所示。在这种情况下，SMU 电压表只测得 DUT 的压降。

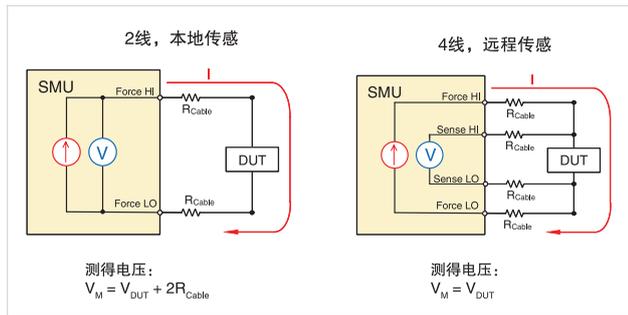


图 6. 本地传感与远程传感比较。

**使测量中的噪声达到最小：** 各种来源都可能会产生噪声，包括 AC 抽取和静电干扰。当噪声源叠加在被测量的 DC 信号上时，测量结果就会有噪声，进而会导致测量不准确或波动。

最常见的外部噪声抽取形式是 60 Hz (或 50 Hz) 工频周期抽取，在靠近荧光灯时经常会发生这种情况。几毫伏的噪声并不少见。吉时利采用一种技术，称为 Line-Cycle Integration 工频周期积分，来最大限度地

降低 60 Hz (或 50 Hz) 工频捡拾的效应。在积分时间或测量窗口等于工频周期的整数倍时，工频周期噪声会平均化。我们可以使用 Test Settings 测试设置窗格中的 Speed 速度设置，来调整这个模数转换间隙时间 (测量窗口)。

在测量低电流时，静电干扰是导致测量噪声的另一个原因。在带电物体接近被测电路时，会发生这种耦合。在高阻抗电路中，这种电荷不会迅速衰减，可能会导致测量不稳定。读数错误既可能是 DC 静电场引起的，也可能是 AC 静电场引起的，因此静电屏蔽有助于使这些场效应达到最小。

静电屏蔽可能只是一个简单的金属盒，从外面把测试电路包起来。但在实验室杂物箱内处理时，这会很难，其通常与有机器件一起使用。探针台通常包括一个静电 /EMI 屏蔽装置或选配的黑匣子。如图 7 所示，屏蔽装置包着器件，连接到测量电路 LO 上，也就是 SMU 的 Force LO 端子。Force LO 端子是 SMU 三同轴电缆的外部屏蔽层，也位于接地单元 (GNDU) 中 4200A-SCS 的后面板上。所有电缆都必需是低噪声且屏蔽的。每台 SMU 带有两条低噪声三同轴电缆。

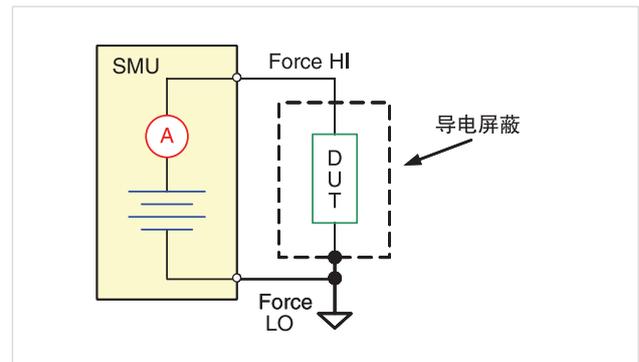


图 7. 导电屏蔽包着被测器件。

**提供充足的稳定时间：** 由于器件泄漏电流通常要测量非常低的电流 (<1 nA)，所以必需允许充足的稳定时间，以保证在应用电压偏置后测量能够稳定。影响测量电路稳定时间的部分因素包括：电缆，测试夹具，开关，探针，DUT 电阻和电容，SMU 的电流范围。

为了保证读数稳定，在测量前可以在电压步长里增加额外的延时。在 Clarius 软件的 Test Settings 测试设置窗格中，可以简便地调节这个延时。

### 超低频率电容 – 电压技术

除测量非常小的电流外，可以使用带两台前置放大器的 SMU，来测量超低频率 C-V (VLF C-V)。可以在 10 mHz ~ 10 Hz 的测试频率中进行 C-V 扫描和 C-t 测量。**图 8** 是用来生成低频阻抗测量的两台 SMU 配置的简化示意图。这种配置要求一台 4200A-SCS 参数分析仪，带有两台 SMU 和两个 4200-PA 前置放大器，被测器件连接各一。SMU1 输出 DC 偏置及叠加的 AC 信号，测量电压；SMU2 测量得到的 AC 电流，同时提供 0V DC。

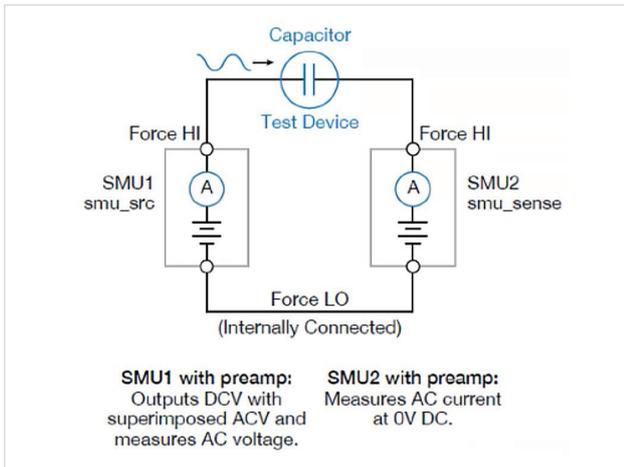


图 8. 超低频率 C-V 测量连接图。

在强加电压时，我们会在多个周期上同时获得电压和电流测量。从得到的电压和电流正弦曲线之比的离散傅立叶变换 (DFT) 中，可以提取 DUT 阻抗的幅度和相位。可以在变化的频率 (10 mHz ~ 10 Hz) 上采集窄带信息，测量 DUT 的复合阻抗。得到的输出参数包括：

阻抗 (Z)，相位角 ( $\theta$ )，电容 (C)，电感 (G)，电阻 (R)，电抗 (X)，消耗因数 (D)。

由于超低频率方法只适用于有限的频率范围，因此被测器件 (DUT) 的电容应位于 1 pF ~ 10 nF 范围内。表 1 汇总了 VLF C-V 指标。如需了解完整的技术指标及与这一技术有关的更详细的信息，请参阅吉时利应用指南：“[使用 4200A-SCS 参数分析仪对高阻抗器件执行超低频率电容 – 电压测量](#)”。

表 1. 典型的测量准确度<sup>2</sup>

频率	测得电容	C 准确度 @ 300 mV rms <sup>1</sup>	C 准确度 @ 30 mV rms <sup>1</sup>
10 Hz	1 pF	10%	13%
	10 pF	10%	10%
	100 pF	5%	5%
	1 nF	5%	9%
1 Hz	10 nF	5%	5%
	1 pF	2%	2%
	10 pF	1%	2%
	100 pF	2%	1%
100 mHz	1 nF	2%	1%
	10 nF	2%	2%
	1 pF	2%	3%
	10 pF	2%	2%
10 mHz	100 pF	2%	2%
	1 nF	1%	2%
	10 nF	2%	1%
	1 pF	5%	10%
10 mHz	10 pF	1%	2%
	100 pF	1%	1%
	1 nF	1%	1%
	10 nF	2%	2%

#### 备注

- ±20V 最大值包括 DC 偏置 AC 测试信号峰值电压。最大负偏置电压 = -20 + (AC 电压 \* )。最大正偏置电压 = 20 - (AC 电压 \* )。
- 测试器件的消耗因数必须 DX < 0.1。显示的所有数据适用于 DC 偏置电压 = 0V。

所有技术指标适用于：23°C ± 5°C，校准后一年内，相对湿度 5%~60%，预热 30 分钟后。

### 有机 FET 的 VLF C-V 表征

可以在不同类型的器件上使用执行 VLF C-V 测量的内置软件，包括有机 FET 和 MIS 电容器件。**图 9** 显示了在 OFET 上在栅极端子和漏极端子之间执行 C-V 扫描的结果，测试频率为 0.25 Hz，我们使用了 Test Library 测试库中的 Organic FET Very Low Frequency C-V Sweep (ofet-vlf-cv) 测试。

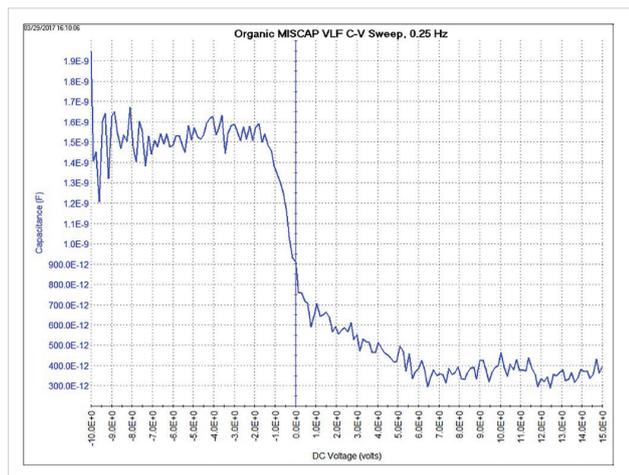


图 9. OFET 超低频率 C-V 扫描，测试频率为 0.25 Hz。

### 高频率电容 – 电压测量

除 DC I-V 和 VLF C-V 测量外，测量 OFET 的电容可以提供与器件相关的信息，包括栅极电容和载流子迁移率。**图 10** 显示了 4210-CVU 或 4215-CVU 电容电压单元与 OFET 的连接。在这种配置中，栅极到漏极电容是相对于栅极电压测量的。

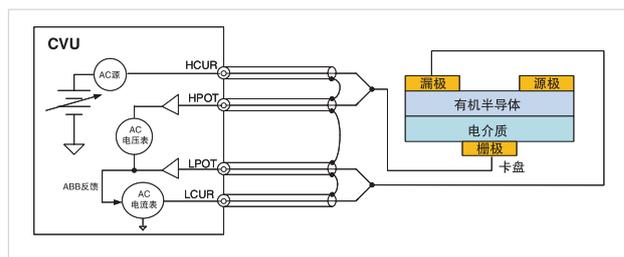


图 10. CVU 与 OFET 连接图。

我们使用 Test Library 测试库中的 Organic FET C-V Sweep (ofet-hf-cv) 测试，在 OFET 的栅极端子和漏极端子之间生成一个 -10 V 到 10 V 的 C-V 扫描。C-V 扫描结果如**图 11** 所示。

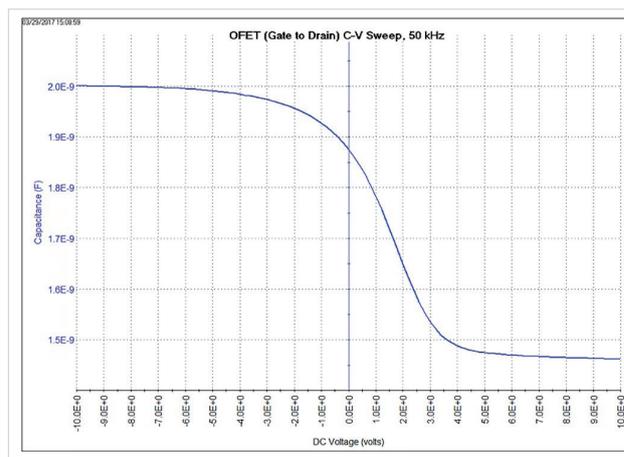


图 11. OFET 高频 C-V 扫描。

## 优化电容测量

以下指引有助于改善使用 4200A-SCS 进行电容测量的质量：

**执行开路补偿 (适用于 <10 pF 的测量)：** 开路校正功能补偿线缆和连接中的电容偏置。执行校正分两步完成：先执行校正，然后在测试内部启用。

在 Clarius 软件中执行校正时，先选择屏幕顶部的 Tools 工具，然后选择 CVU Connection Compensation 连接补偿。对开路校正，选择 Measure Open 测量开路。探头必须抬起，或者从测试夹具中移出 DUT。一旦从 Tools 工具菜单中采集了校正数据，那么在 Terminal Settings 测试设置窗格中选择 Open Compensation 开路补偿，启用校正。

**选择适当的保持和扫描延时：** 在应用电压步长后所有内部电容完全充满时的器件状态称为“均衡”。如果电容测量是在器件处于均衡状态前进行的，那么这些测量的结果可能会不准确。

为选择适当的延时，使用 Sampling Test Mode 采样测试对器件应用 DC 电压，绘制电容随时间变化图。从图中观察稳定时间。观察到的这个均衡时间可以作为保持时间，也就是预加压电压在扫描开始或采样模

式开始前输出的时间。观察到的时间还可以作为扫描延时，应用到扫描的每一步中。扫描延时可能不需要像保持时间那么长。用户需要试验或检验特定测试在 Test Settings 窗格中使用的时间是否适当。

**使用正确的屏蔽连接：** 在 1 MHz 以上的测试频率测量 AC 阻抗时，在连接同轴电缆的屏蔽层时要尽可能靠近器件。这可以减少屏蔽层的环路面积，最大限度地降低电感。这还有助于保持传输线效应。如果屏蔽层没有连接在一起，那么可能会发生偏差。

**在 Test Settings 窗口中选择适当的 Speed Mode 速度模式：** Speed Mode 速度模式功能可以调节稳定时间，测出测量的窗口 (模数转换间隙)。对小的电容，可以使用 Quiet 静默模式或 Custom Speed 自定义速度模式，效果会最好。

## 总结

适当的仪器和测量技术可以最优化地对有机 FET 进行电气表征。4200A-SCS 为执行 OFET 电气表征提供了理想的工具，因为其拥有集成硬件、交互软件和各种分析功能。测试系统包括多种内置工具，如开路校正、参考视频、帮助功能、时序控制，帮助科研人员最大限度地缩短设置时间，尽快实现最佳测量结果。



泰克官方微信

**如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！**

**或登录泰克公司中文网站：[www.tek.com.cn](http://www.tek.com.cn)**

**泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835**

**泰克科技(中国)有限公司**

上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编：201206  
电话：(86 21) 5031 2000  
传真：(86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**

北京市朝阳区酒仙桥路6号院  
电子城·国际电子总部二期  
七号楼2层203单元  
邮编：100015  
电话：(86 10) 5795 0700  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**

上海市长宁区福泉北路518号  
9座5楼  
邮编：200335  
电话：(86 21) 3397 0800  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**

深圳市深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦3001-3002室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**

成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编：610063  
电话：(86 28) 6530 4900  
传真：(86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**

西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层L座  
邮编：710065  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**

武汉市洪山区珞喻路726号  
华美达大酒店702室  
邮编：430074  
电话：(86 27) 8781 2760

**泰克香港办事处**

香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话：(852) 3168 6695  
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：[WWW.TEK.COM.CN](http://WWW.TEK.COM.CN)

© 泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

040320 SBG 1KC-61313-0

