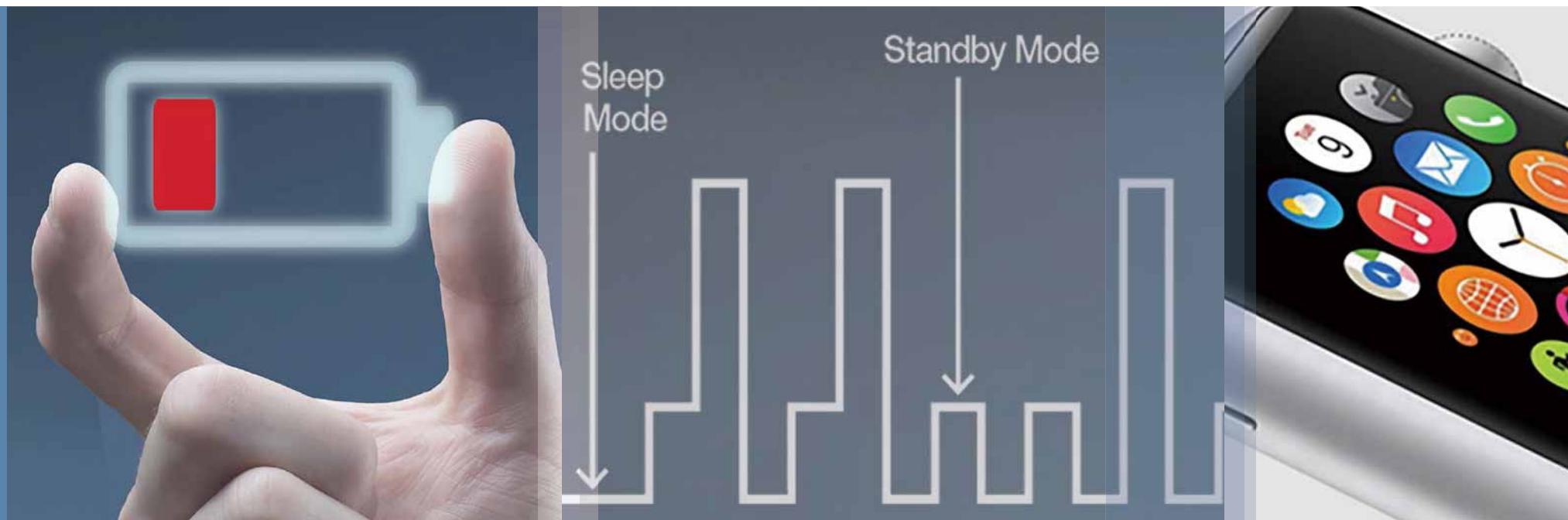


# 11 种功耗测量技术

使物联网设备的电池续航时间达到最大



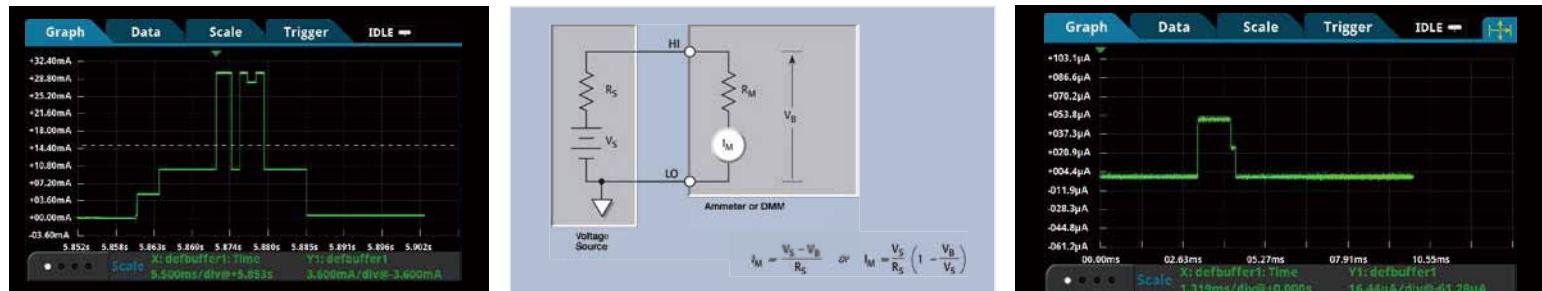
# 11 种功耗测量技术

## 使物联网设备的电池续航时间达到最大

物联网 (IoT) 是由各种不同应用中相互操作的物理电子设备组成的网络，覆盖医疗和健康应用到工控和自动化应用，其目的是以减少人为错误，提高效率。典型的物联网设备包含至少一个传感器、一个处理器和一个射频芯片，它运行在不同状态下，在几十微秒内消耗几纳安到几百毫安的电流。

功耗管理是物联网设备设计的一个主要问题。这些设备中的电池续航时间可能短到几天，如可穿戴消费电子设备中；也可能长达二三十年，比如位于边远地方、很难更换电池的传感器节点中。以超低功率运行的元器件的引入使这些设备成为可能，但如何准确描述每台设备的功耗及系统级整体运行时的功耗情况，对降低能耗及优化电池续航时间方面发挥着至关重要的作用。

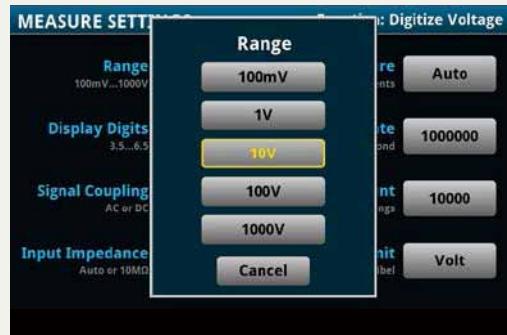
本电子指引介绍了您在设计、验证或测试物联网设备时可能会面临的 11 个功率管理挑战，并提供了一些小贴士，介绍了怎样简化流程，最终成功地实现物联网设备。



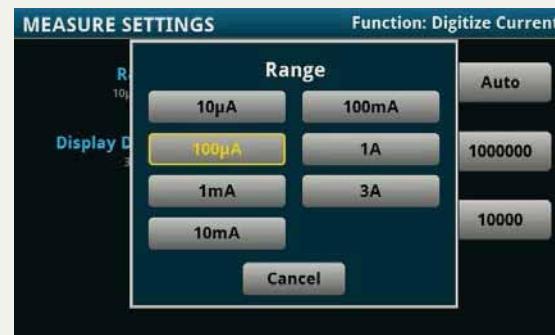
# 索引

1. 测量宽动态范围的电流 .....	3
2. 确定超低深度睡眠电流 .....	4
3. 测量发送电流和接收电流 .....	5
4. 捕获短瞬态事件和快速跳变 .....	6
5. 保证为采样率提供充足的测量带宽 .....	7
6. 触发隔离特定事件 .....	8
7. 在延长的时间间隔上记录设备操作 .....	9
8. 从复杂波形中分析功耗 .....	10
9. 为设备提供准确的供电 .....	11
10. 为各种工作条件提供稳定的电压 .....	12
11. 准确复现电池输出特性 .....	13

# 1



数字化电压量程



数字化电流量程

## 测量宽动态范围的电流

对所有物联网应用，设备必须执行各种不同操作，包括：

- 深度睡眠 ■ 数据处理
- 数据采集 ■ 数据显示
- 用户交互 ■ 数据传送到网关

鉴于被测设备具有多种不同的工作状态有，一眨眼的工夫内消耗的电流可能在几百纳安到几百毫安之间快速跳变。传统仪器可能会满足小电流测试需求，如皮安表，也可能会满足大电流测试要求，如电流探头，但一般不能同时满足两种测试需求。重新配置仪器设置、甚至配置测试设置既容易出错，本身也不可行。大多数安培表和数字万用表 (DMMS) 能够通过自动量程功能提供多种测量范围。但是，在硬件和固件中实现的自动量程功能，可能会给测量引入毛刺和时延，产生不准确、甚至不正确的测量结果。

**小贴士：** 使用单一配置设置的 DMM，捕获宽动态测量范围的电压和电流。



设备在宽动态范围内工作

# 2

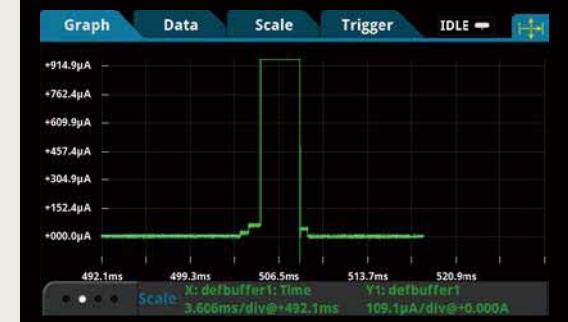
## 确定超低深度睡眠电流

在许多物联网应用中，设备会空闲很长一段时间，然后唤醒执行任务，这给在系统设计中节电创造了许多机会。随着功率管理技术的最新发展，推出了各种超低功率睡眠模式，提供了更精细的分类，而不只是运行模式或空闲模式，另外给限定功耗引入了更加完善的策略。这些模式，如待机模式、休眠模式、睡眠模式和深度睡眠模式，消耗着从几十微安到最低几十纳安的电流。准确测量几百或几十纳安的电流并不是一件易事。大多数电流测量技术，如电流探头，并不能实现这些超低电流所需的灵敏度。

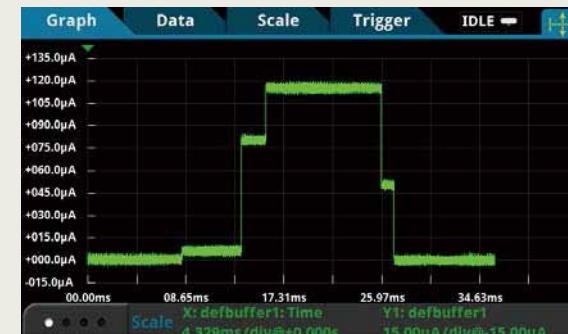
在使用电流表时，低电流测量精度可能会受到各种误差来源的巨大影响：

- 设备与仪器之间的连接
- 电压表输入偏置电流
- 来自内部串联电阻的负担电压，可能会高达 500mV
- 被测设备的源电阻
- 来自电缆和夹具的漏电流
- 静电效应或压电效应产生的电流

在安培表中，选择较小的分流电阻值可以降低输入时间常数，加快仪器响应时间。但是，由于降低线路电阻和负担电压，这会恶化信噪比。在测量小电流信号时，小信号会劣化信噪比，明显影响测量准确度和灵敏度。



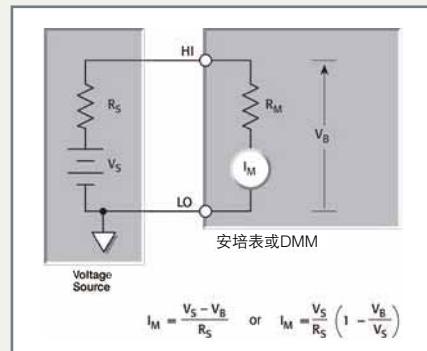
各种睡眠模式



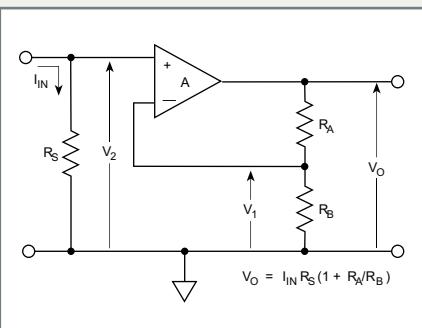
超低睡眠耗电量

**小贴士：**选择采用有源分流电阻技术的 DMM，在测量中同时实现高信噪比和快速响应时间。

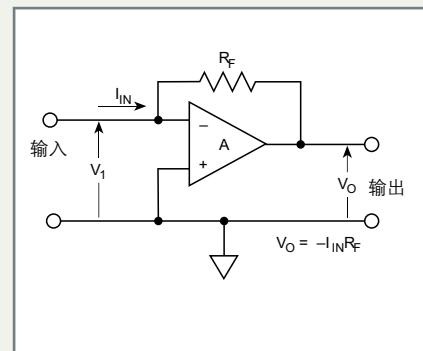
# 3



电压负担对电流测量精度的影响



分流安培表



反馈安培表

## 测量发送电流和接收电流

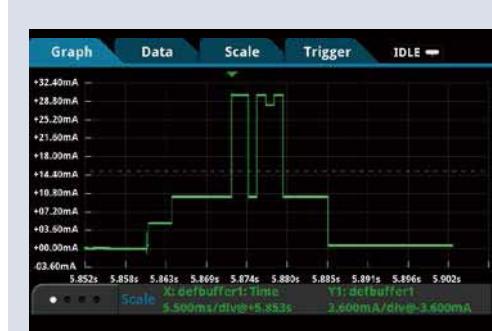
物联网设备上的发送和接收 (Tx/Rx) 事件消耗的功率数最大。视应用选择的 RF 协议，Tx/Rx 电流变化范围从不到几十毫安到几百毫安以上。安培表、DMMs、电流探头或传感电阻器和示波器电压探头都是用来测量这个范围的电流的传统仪器。

尽管电流探测不需要“破坏”电流环路（大多数安培表有这种要求），但仍要考虑额外的偏置补偿和测量一致性问题。

采用分流技术或反馈技术的安培表中，分流安培表的主要问题之一是电压负担，也就是安培表输入端子间的电压降。它通过分流电阻把输入电流转换成电压信号，类似于在电压探头中使用传感电阻器，来测量电流。分流安培表的电压负担要高于反馈安培表，灵敏度要低于反馈安培表。

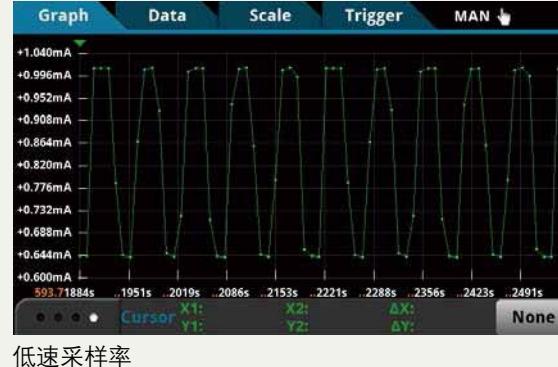
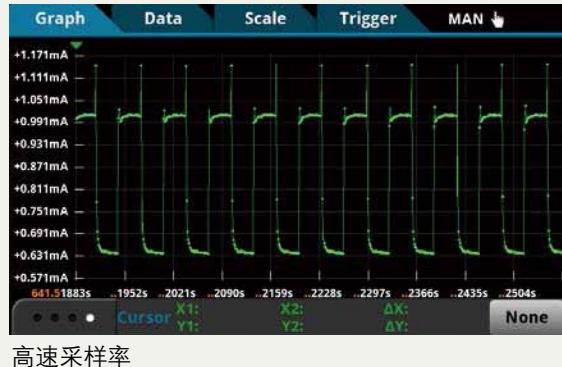
低值分流电阻器的准确度、时间和温度稳定性及电压系数都要好于高值分流电阻器。此外，较低的电阻器值会降低输入时间常数，加快仪器响应时间。但是，电压负担直接影响物联网设备操作，并且会降低加载在设备上的实际电压。

反馈安培表对被测设备电容及其与仪器的连接更加敏感，更容易产生振荡，发生读数不稳定的现象。



发送和接收状态下的电流波形

## 4



## 捕获短瞬态事件和快速跳变

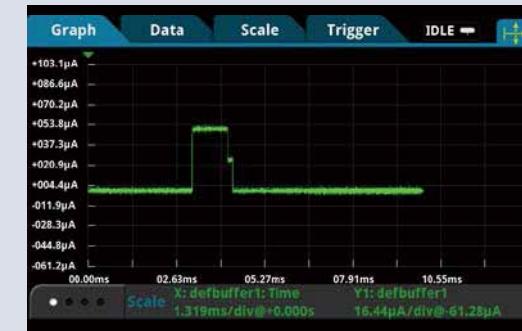
有源物联网设备操作通常时间很短，不定时发生，而且非常复杂，涉及多种运行模式。例如，在设备从睡眠模式唤醒到活动模式时，通常要用几微秒的时间从睡眠转到待机，然后才会进入活动模式，使用传统安培表很难捕获唤醒过程。

大多数安培表或基本 DMMs 都是读取速度非常慢的 DC 仪器。尽管许多 DMM 可以通过指定工频周期的数量 (NPLC)，设置捕获数据的时间窗口宽度，但并没有包括数据处理的开销时间。整体时间决定着仪器对下一个读数是否准备就绪。遗憾的是，快速瞬变很容易会丢失在处理开销的时间中。

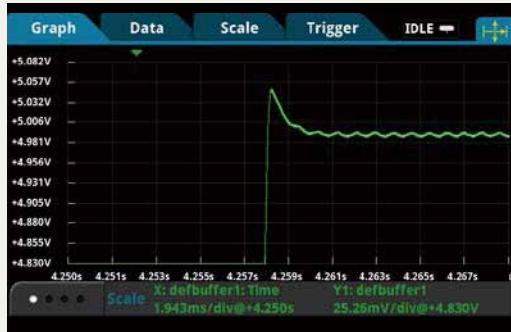
采样率指仪器能够以多快的频率采样电压或电流，决定着可以捕获多少波形细节。采样率越快，丢失的信息越少，可以实现的被测原始波形重建效果越好。根据内奎斯特或采样定理，信号采样率必须是其最高频率成分的两倍，才能准确重新信号，避免混叠（采样率过低）。

但是，内奎斯特是绝对最小值，只适用于正弦波，且假设信号是连续信号。对物联网设备操作中的快速瞬态事件，最高频率成分的两倍肯定是不够的。某些 DMM 指定 50k 样点 / 秒的采样率。但在 50k 样点 / 秒或每个样点 20 μs 的采样率时，很容易会漏掉持续几十微秒的小瞬态事件。

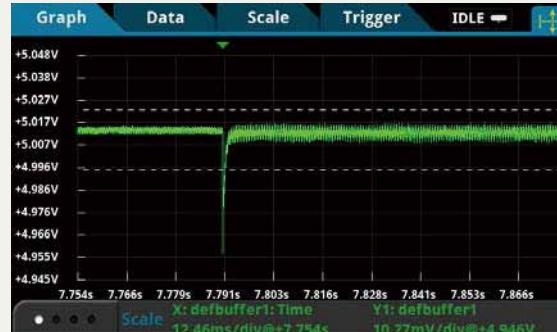
**小贴士：**应选择高速采样 DMM，能够以 1M 样点 / 秒采样电压和电流，捕获波形中的每个细节。



# 5



模拟测量带宽



负载瞬态响应

## 保证为采样率提供足够的测量带宽

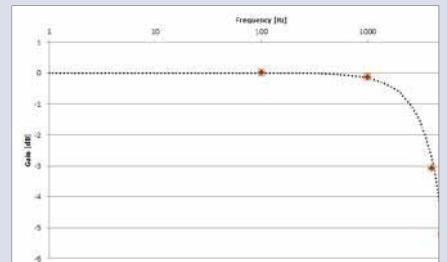
仅根据采样率选择仪器捕获短瞬态事件（如“唤醒”廓线）是不够的。仪器带宽也限制着被采样的模拟信号。如果带宽太低，仪器将不能分辨模数转换发生前的高频变化，幅度将失真，边沿将变慢，细节将丢失。

示波器特别适合捕获快速瞬态事件，但电流探头没有许多物联网应用的整个动态范围所需的灵敏度。显示的波形将只有示波器和探头的本底噪底，无法反应设备操作时的电流变化。

大多数安培表、DMM 或能够采样或数字化的专用仪器都受到仪器的模拟带宽限制。由于 10kHz 带宽限制而丢失的细节即使在 200k 样点 / 秒采样率时也不能被恢复。

仪器带宽与采样率相结合，决定着能够捕获物联网设备的最快瞬态变化时间。

**小贴士：**应考虑为波形提供足够高的模拟测量带宽的高速采样 DMM。

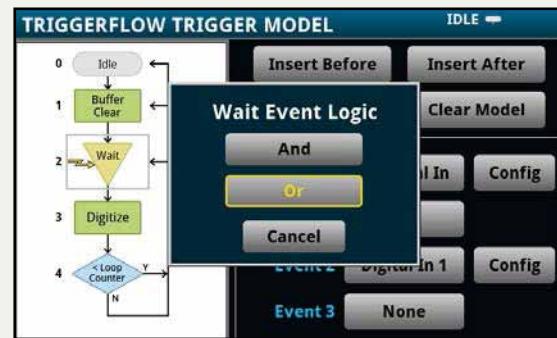


设备操作，显示过冲

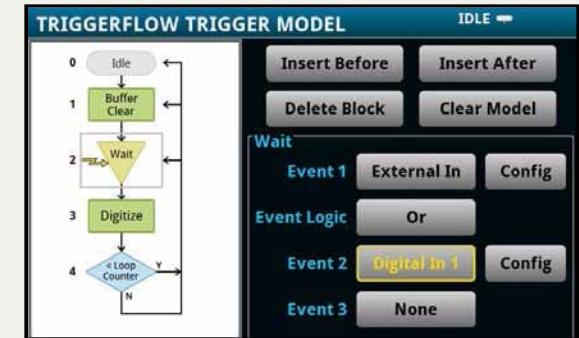
## 6



内置触发选项



触发流程图实现逻辑触发



高级触发

## 触发技术捕获特定事件

视具体应用，物联网设备操作可能会涉及长间隔内异常短的事件突发，或涉及包括多个事件的复杂状态操作。为分析这些细节，需要配合触发功能，以便彻查复杂的扩展波形中某一个具体部分。

传统电流测量仪器并不能根据细节捕获特定事件。略微完善的仪器可能只能提供基本示波器触发机制，如边沿触发或电平触发。在许多场景中，由于触发精度、触发时延、触发偏移和抖动，面向波形的边沿触发或电平触发是不够的。此外，微安级或更低的低电平波形会明显影响触发精度，具体视仪器中实现的触发采集方式而定。

信号和触发采集通常在不同的路径上。触发精度依赖触发采集的灵敏度，如果仪器不能对触发事件精确地做出反应，可能会导致触发错误。触发时延是指从触发事件被检测到与信号开始采集时之间的固有延迟。触发时延长会导致错误地指明触发事件发生时间。

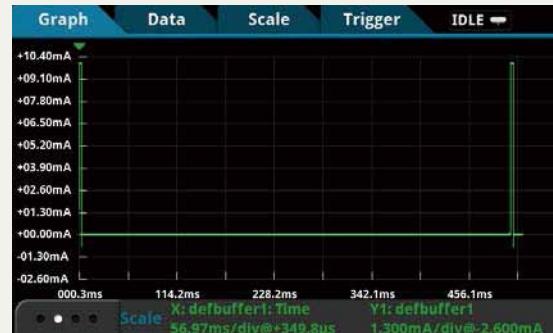
对更具挑战性的波形，最好使用高级触发，如脉宽触发、逻辑触发、A-B 顺序触发和同步外触发。专用触发可以对特定条件做出反应，简便地检测到难检事件。即使示波器拥有这么多的触发选项，但如果电流探头没有足够的精度和灵敏度，这些触发选项仍不会有什效果。

**小贴士：**应选择高速采样 DMM，要能够创建与普通示波器类似的高级触发机制。

## 7



在长时间内重复的设备操作



测量期间不定时发生的设备操作

## 在更长的时间间隔内记录设备操作

在功耗测试中监测长周期内的设备操作是一个重要的、必不可少的项目。您可能需要仪器记录几秒、几小时、甚至几天内的电流。

大多数通用 DMM 仪器没有配备足够大的能够支持这些测试的内部数据存储器。某些专用电压和电流测量仪器可以存储多达 256k 个读数，在采样率较高时容量会迅速耗尽。示波器支持每秒几百兆到几千兆样点的采样率，可以检查异常短、异常复杂的活动。由于波形的复杂性，这些仪器对确定数据趋势并不是非常理想。

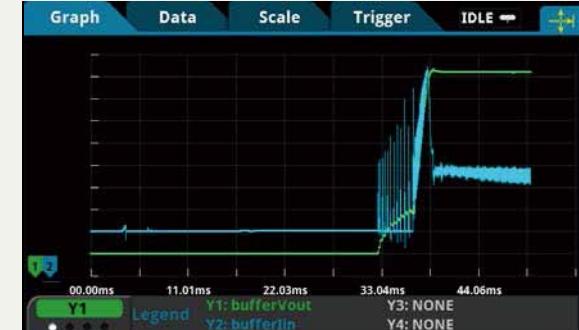
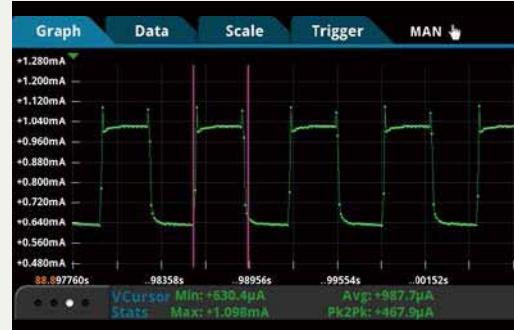
如果您面临着由于电源中断导致的数据丢失，或只想记录超出内部存储极限的数据，实时传送数据或在采集后把数据传送到外部存储设备可以带来巨大的优势。保留发生非预计外部因素之后的数据可以节省时间和工作量。

**小贴士：**应使用配备了可存储 2700 万个读数的内部数据缓存器的高速采样 DMM。

**小贴士：**应使用支持把数据实时传送到外部设备或计算机的高速采样 DMM。



## 8



## 从复杂波形中分析功耗

功率管理是物联网设计的核心。但是，为执行准确的功耗分析，测量仪器不仅要进行测量，还要根据设计要求自动评估波形。

但是，传统仪器并不是面向解决方案的。许多安培表只能采集电流读数。许多 DMM 只能存储一套电流或电压读数。某些专用仪器可以提供基本统计，如最小值、最大值和平均值。示波器使用的电流探头提供了更加完善的数值计算工具，如 RMS 计算、占空比和其他数学运算。

为适应波形快速变化特点，带有图形显示器的仪器特别适合捕获物联网设备操作，并有机会立即“查看”设备操作。测量“选通”可以把测量限定在屏幕区域，光标可以实现额外控制，这些高级功能可以更迅速、更深入地了解物联网设备操作。

由于用户界面在“获得答案所需时间”计算中占有很重的份量，因此用户界面应直观，响应快，可以迅速对事件变化做出反应。即使是偶尔使用仪器的用户，也应该让他们感到舒适放心，全职用户则能够简便地使用高级功能。

**小贴士：**应考虑能够同时捕获和显示设备操作，并能在复杂波形上执行自动计算的图形采用 DMM。

# 9

## 为设备提供准确的电压

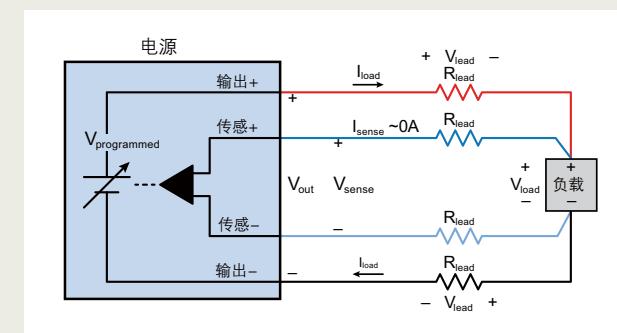
低功率物联网设备，如可穿戴设备、其他类型的便携式产品以及必须放在远端位置的工业监控设备，一般都在 3V~4V 范围的电池上运行。电池放电周期的某个点上，由于电池输出电压不足，设备将自动关闭。为使产品的运行时间达到最大，必需准确分析这种低电压关闭门限特点。由于设备在很窄的小电压范围上运行，因此用于测试及供电的电源必需有良好的准确度，这在确定低压关闭门限时尤为重要。

为保证对负载准确地加载电压，应使用拥有远程传感功能的电源，如侧栏中的图形所示。尽管在大多数时间吸收的电流非常低，但在供电电压低时，电源测试引线中非常小的损耗就可能会引起错误。此外，在设备发射信号时，它可能会吸收几安培的电流，导致测试线电压下降几毫伏。

**小贴士：**由于这些设备在低电压上运行，用来供电和测试的电源不能给设备带来负面影响。来自电源的噪声可能在应用到设备的 3V~4V 电压中占很大比重。应使用精密测量的低噪声电源。



Series 2280S 使用后面输出连接器及远程传感功能



保证编程电压准确传  
送到负载

不管电源输出的精度如何，您都不能保证编程电压与 DUT 端子上的电压相同。没有传感引线的电源会调节输出端的电压。但是，您所需要的电压位于 DUT 的功率输入端上。电源和负载通过引线隔开，引线的电阻为 RLead，因此负载处的电压是： $V_{Load} = V_{Out} - 2 \times V_{Lead} = V_{Out} - 2 \times I_{Load} \times R_{Lead}$  远程传感技术使用两条传感线，通过把电源反馈环路扩展到负载，来自动补偿引线中的电压降。负载处的电压通过传感引线反馈到电源，保证  $V_{Load} = V_{Programmed}$ 。

# 10

## 为所有设备工作条件提供稳定的电压

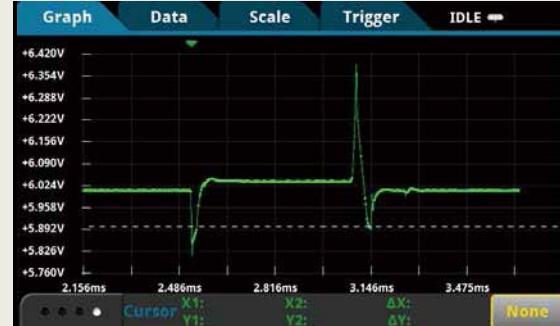
为全面测试便携式低功率物联网设备，您需要能够控制的电源。由于电池不能控制或保持任何特定电压，因此必须使用电源测试设备。

但是，在物联网设备从睡眠模式或待机模式转换到发射模式时，负载电流可能会从几毫安变成几安，负载变化 1000%，而且只在几微秒内！

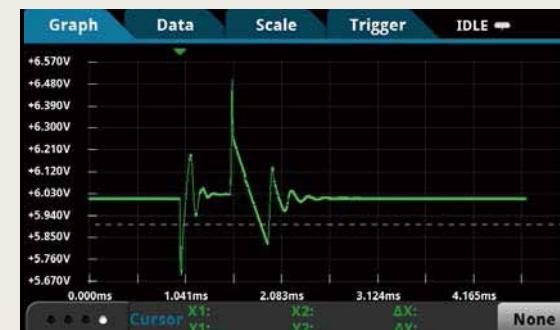
快速的大负载变化会给电源及物联网设备测试带来以下问题：

- 在反馈电路检测到新的负载电流，并调节电源以保持编程输出电压时，电压将下跌。
- 在电压低时，不能在设备上进行正确测量。
- 如果电压下降到低于设备的低电量关闭门限，并且低于门限保持足够长的时间，使得设备能够检测到低电量，那么设备将关闭。
- 电压上升过冲时，可能会对被测设备造成损坏

为避免这种不想要的情况，应使用能够对  $100 \mu\text{s}$  以下的负载变化做出快速响应的电源，在设备所有工作状态下获得稳定的输出。



对大的负载变化作出快速响应

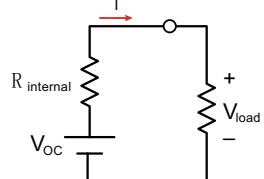


对大的负载变化响应差

瞬态响应指标规定了电源对负载变化的响应速度。电源制造商早在便携式无线产品市场迅猛发展前，就定义了瞬态响应指标。瞬态响应一般定义为负载变化 50% 时电源恢复到接近原始电压所需的时间。便携式无线设备的负载变化会高达 1000% 或以上。电源没有为这类困难条件指定瞬态响应。

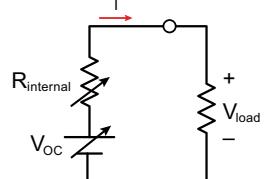
**小贴士：**在测试便携式无线设备时，应使用拥有快速瞬态响应的电源评估，确保不会导致被测设备运行状况差或在设备发射信号时关断。

# 11



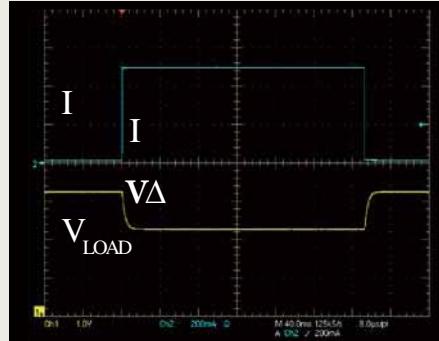
电池模型

简化的电池模型：拥有内部电阻的理想电源。



电池模拟器模型

电池模拟器建立拥有可变电压和可变内阻的电池模型。



电池模拟器仿真在负载电流变化瞬时接近 $\Delta I$ 时，电池由于内部电阻导致的电压暂降 $\Delta V$ 。

**小贴士：**使用的电池模拟器应不是仅仅仿真电池在一个时间点上的内部电阻。在理想情况下，应选择能够在整个放电周期上动态建立电池模型的电池模拟器，并使用包括充电状态和安时容量及内部电阻的电池模型。



使用电池模拟器监测充电状态、安培时、等效串联电阻、开路电压、端子电压和负载电流。

## 准确复现电池输出特点

评估电池续航时间的其中一种方式是使用实际电池测试物联网设备，确定设备保持供电的时间。这会导致两个问题：

- 等待电池耗尽花费的时间非常长，可能会耽误开发工作。
- 这种测试方法不精确，很难复现具体测试条件。

在大多数现实条件下，比较理想的物联网设备测试解决方案是使用电源仿真电池。这种解决方案可以从电池充满电到接近完全耗尽，在各种条件下测试设计。如果您需要选择电池类型，那么能够仿真不同类型的电池至关重要。

**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

**泰克北京办事处**  
北京市海淀区花园路4号  
通恒大厦1楼101室  
邮编: 100088  
电话: (86 10) 5795 0700  
传真: (86 10) 6235 1236

**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C座  
邮编: 710065  
电话: (86 29) 8723 1794  
传真: (86 29) 8721 8549

**泰克上海办事处**  
上海市徐汇区宜山路900号  
科技大楼C座7楼  
邮编: 200233  
电话: (86 21) 3397 0800  
传真: (86 21) 6289 7267

**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

**泰克深圳办事处**  
深圳市福田区南园路68号  
上步大厦21层G/H/I/J室  
邮编: 518031  
电话: (86 755) 8246 0909  
传真: (86 755) 8246 1539

**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) 2585 6688  
传真: (852) 2598 6260

**如需进一步信息。**泰克维护着完善的、且不断扩大的资料库，其中包括各种应用指南、技术简介和其它资源，帮助工程师开发尖端技术。详情请访问: [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com) 和 [www.keithley.com](http://www.keithley.com)。

© 泰克公司 2015 年版权所有，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。

090215

KI

1KC-60223-0

**Tektronix®**