

如何针对因零线断开而导致的篡改来检测电表并提高电表安全性



Mekre Mesganaw

德州仪器 (TI)
电网基础设施
系统工程师

窃电为公用事业行业带来了巨大的挑战，并且可能对公用事业公司和最终消费者产生财务影响

要准确地向用户收取电费，就需要电表在正常运行的情况下测量消耗的电能并发现可能的篡改，以帮助防止窃电。

窃电可通过不同的电表篡改技术来实现，以阻止电表准确地显示消耗的电能。一种技术是将零线从仪表上断开并将用户的负载接地。针对这种技术提高电表的安全性是一种减少篡改的积极方法，可帮助防止窃电。电表必须能够发现零线断开和其他类型的篡改，或者提高安全性以防止窃电。

在考察零线移除篡改技术之前，必须了解智能电表的工作原理和连接方式。图 1 显示了单相电表的示例连接。电表主要由市电供电，市电通过连接火线和零线进行提供。在该配置中，通过 Line_In 和 Neutral_In 之间的电压以及在 Line_In 和 Line_Out 之间连接的分流器上感应到的电流来计算消耗的电能。

电压电流乘积之和有助于计算有功功率。有功功率也等于均方根 (RMS) 电压和 RMS 电流之积乘以电压和电流之间角度的余弦。电表会随着时间的推移累积有功功率以生成有功电能读数，这些读数成为消费者需要付费的电量。

消费者可以通过断开零线来改变单相电表中的有功电能读数，如下一页中的图 2 所示。如果断开零线，则测得的电压将为 0V，这将导致有功功率的测量值为 0W。由于缺少零线，则主交流/直流电不再起作用，因此电表需要备用电源，例如纽扣电池。尽管由于 0V 电压读数而导致有功功率读数为 0W，但仍然有电流流过火线并可以被感应到。该火线电流的存在可帮助识别所断开电表的火线中的断电情况。

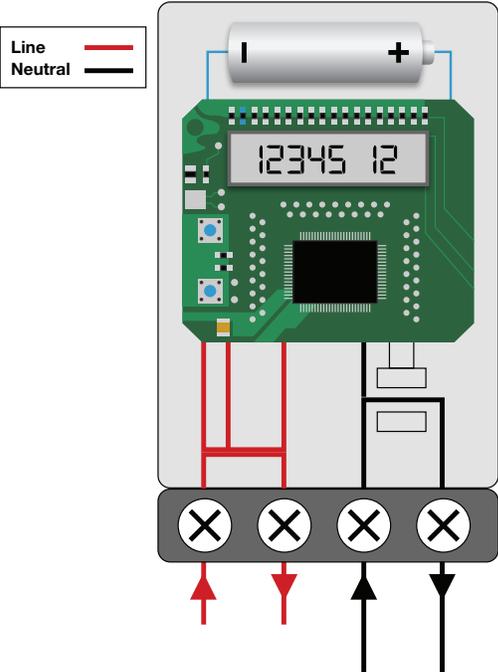


图 1. 正常运行情况下的示例电表配置

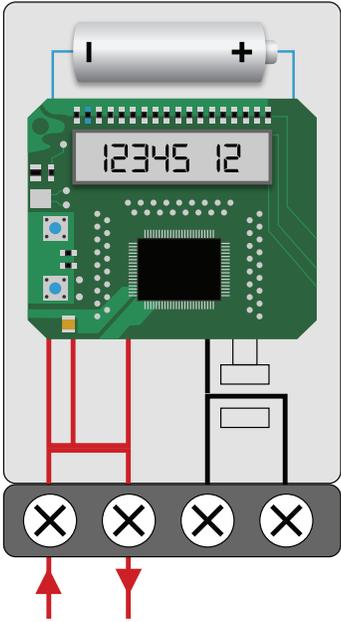


图 2. 零线断开情况下的示例电表配置。

单相电表为零线缺失的电源注意事项

如果发生单相电表零线断开情况，则电表的电源应具有自动从主交流/直流电源切换到备用电源的机制。该机制应在断电或零线断开时开始生效。实现从主电源到备用电源自动切换的一种常见方法是使用二极管将交流/直流输出与备用电源进行“或”运算，以便将电压较高的电源用作系统的电源。由于来自备用电源的电压会随着时间的推移而逐渐降低，直到降至低于为电表供电所需的最低电压，因此所选二极管应具有尽可能低的正向压降，从而延长备用电源的寿命。[LM66100](#) 等理想二极管器件可提供该低压降，以最大程度地延长备用电源的寿命。[LM66100](#) 的低压降和低电流消耗使备用电源的寿命比其他类型的二极管（例如肖特基二极管）更长。

电表除了能够自动从交流/直流电源切换到备用电源之外，还应检测出交流/直流电是否即将发生故障。它可以通过测量与交流/直流电稳压器相关的输入电压来发现潜在的故障，该输入电压会由于断电或有人断开零线而降低。电表的微控制器借助这种对交流/直流电故障的早期发现来完成进入低功耗模式之前的所有最后关头任务，从而延长仪表将切换到的备用电源的寿命。低功耗电压检测器电路和外部分压器可以共同监视电压稳压器的输入电压，以实现此类早期发现。

早期发现交流/直流故障的第二种方法是使用 [TPS7A78](#) 等电源器件，此类器件具有电源故障引脚，以提供该指示。[TPS7A78](#) 还具有电源正常 (PG) 引脚，用于指示断电后输出电压何时重新上升到正常电平。该指示使电表的微控制器能够触发系统退出低功耗模式，因为系统最终将切换回至使用主交流/直流电来代替备用电源。

零线移除防篡改技术：估算有功功率

解决零线缺失问题的一种方法是计算有功功率的估算值，即用 RMS 电流（通过火线通道进行测量）乘以地区的标称 RMS 电压值（例如，印度和欧洲许多地区的标称电压为 230V）。如前所述，实际有功功率等于 RMS 电压和 RMS 电流之积乘以电压和

电流之间角度的余弦。基于该有功功率公式，估算的有功功率包括以下假设：

- 施加到客户负载上的实际 RMS 电压与地区的标称 RMS 相差不大。
- 电压和电流之间的角度为 0 度，这对应于理想的阻性消费者负载，是给定 RMS 电流和标称 RMS 电压下可能的最大有功功率读数。

如果零线缺失，则电表将由备用电源（例如电池）供电。因此，电表务必进入最小电流消耗状态，从而延长备用电池的寿命。如果通过估算有功功率来处理零线缺失情况，则应通过降低用于感应电流的 ADC 的采样率来降低系统电流消耗。此外，应将计量微控制器和 ADC 从正常工作模式配置为低功耗模式，该模式仍会使 ADC 能够感应火线电流。

例如，在连续转换模式下，[ADS131M04](#) 独立 ADC 具有三种功耗模式：高分辨率模式、低功耗模式和超低功耗模式。高分辨率模式可提供最高的精度，而极低功耗模式可提供最低的电流消耗。基于这两种模式，可以将 [ADS131M04](#) 配置为在连接零线且系统由电表的主电源供电时处于高分辨率模式。零线断开后，[ADS131M04](#) 允许系统从高分辨率模式切换到极低功耗模式，以降低 [ADS131M04](#) 的电流消耗。

零线移除防篡改技术：电流检测模式

解决零线缺失问题的另一种方法是仅检测火线上是否存在电流。与估算有功功率相比，这种处理零线缺失的方法消耗的电流更少。这种防篡改技术可降低电流消耗，从而延长备用电源的寿命，该寿命应至少等于电表的预期寿命。

某些 ADC 具有特殊的低功耗模式，该模式可检测火线通道上的电流，同时进一步降低系统的电流消耗。用于感应火线电流的该低功耗模式的一个示例是 [ADS131M04](#) 独立 ADC 的电流检测模式，这是一种特殊模式，在该模式下，如果一定数量的样本高于用户定义的阈值，则 [ADS131M04](#) 将其 (\overline{DRDY}) 引脚置位。通过在用于测量火线电流的通道上执行该电流检测模式， (\overline{DRDY}) 通知将指示已检测到火线电流，这样便可将断电与火线断开区分开。下一页

中的图 3 显示了电流检测模式下的 ADS131M04 具体遵循的过程。

要进入电流检测模式，应向 ADS131M04 发送一条命令以进入待机模式，该模式是一种低功耗模式，在该模式下器件不对样本进行转换。在 ADS131M04 进入待机模式之后，SYNC 引脚上的负脉冲将使器件进入电流检测模式。微控制器计时器可以产生该负脉冲，以便在微控制器处于睡眠模式时不必唤醒。微控制器无需输出外部时钟就可以在电流检测模式下进行采样（与连续转换模式相同）；因此，微控制器可以进入低功耗睡眠模式。处于电流检测模式时，ADS131M04 依靠内部振荡器运行，这样 ADC 就可以独立于计量微控制器工作，从而使微控制器进入睡眠模式并降低系统电流消耗。

在电流检测模式下，ADS131M04 以 2.7ksps 的速率收集可配置数量的样本 (CD_LEN)，并将结果的绝对值与可编程阈值 (CD_THRSHLD) 进行比较。如果采样窗口 (CD_LEN) 中可配置的样本数量 (CD_NUM) 超过阈值 (CD_THRSHLD)，则 ADC 的 (\overline{DRDY}) 引脚置位将通知主机计量微控制器。ADC 在 (\overline{DRDY}) 引脚置位后立即返回至待机模式，如下一页中的图 4 所示。如果采样窗口中可配置的样本数量未超过阈值，则 ADS131M04 在 ADS131M04 收集完整的采样窗口之后返回至待机模式。

在 TI 的“[使用独立 ADC 的单相并联电表参考设计](#)”中，ADS131M04 的电流检测模式通过执行下一页图 5 中显示的事件序列，将零线缺失与断电情况区分开。该参考设计使用 TPS7A78 电容降压交流/直流电源，可监视其 PFD 引脚上的电压。当发生断电或零线断开情况时，该引脚的电压将下降。一旦 PFD 上的电压降至阈值以下，PF 引脚就会在由于断电或零线移除而导致电源故障时提供指示，从而触发微控制器以将 ADS131M04 置于待机模式，并启动计时器输出以定期触发从待机模式到电流检测模式的转换。当处于电流检测模式时，如果检测到火线电流，则 ADS131M04 会将其 (\overline{DRDY}) 引脚置位，从而指示发生电源故障的原因是移除了零线，而不是断电。在发生电源故障后的某个时间，交流/直流电的输出将下降，直到其触发系统耗尽备用电源为止。

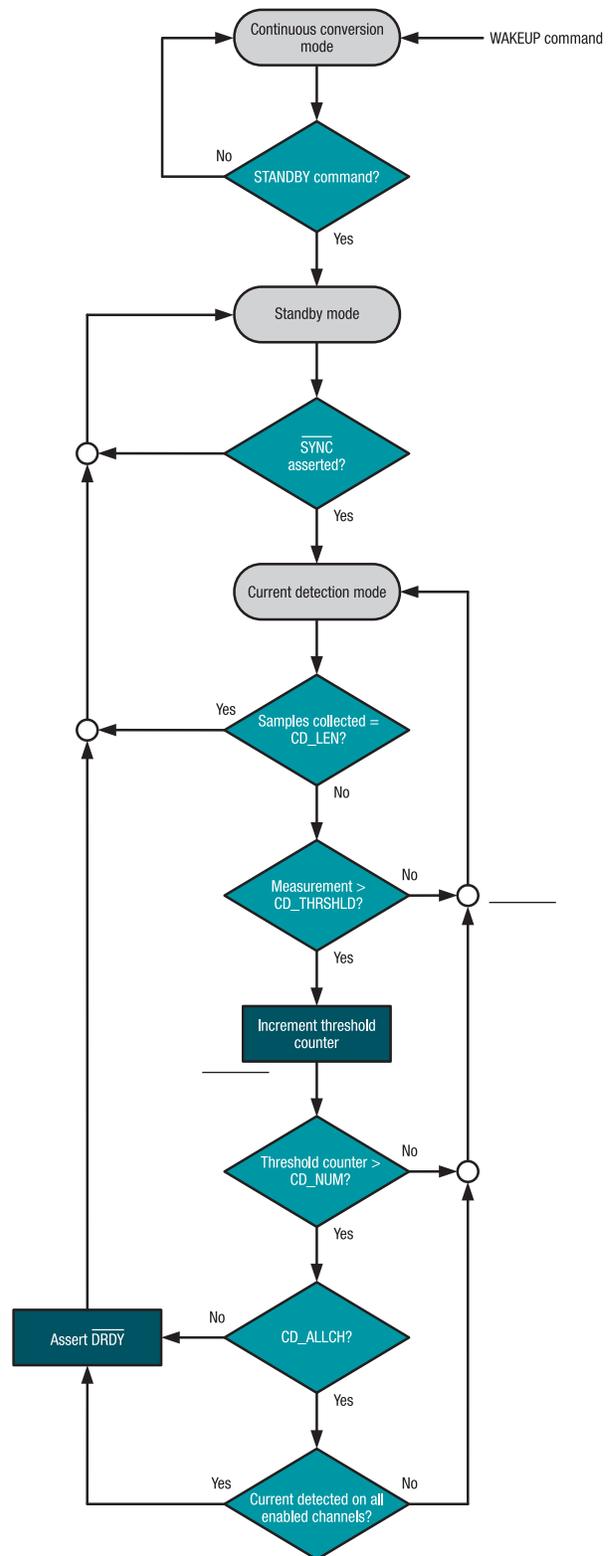


图 3. ADS131M04 电流检测模式流程图。

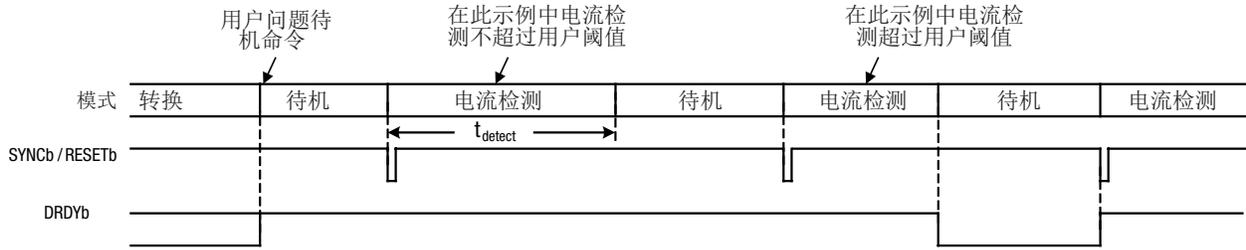


图 4. ADS131M04 电流检测模式示例。

如果发生电源故障的原因是断电，则系统应在电源恢复后重新进行配置，从而恢复正常运行。在单相并联参考设计中，TPS7A78 的 PG 引脚会在电源恢复后发出提示。当 PG 引脚置位后，设计的微控制器将反向执行进入电流检测模式的操作，以返回至正常运行状态。下一页中的图 6 显示了电源恢复后的事件序列。

借助该参考设计，我在使用以下测试设置启用电流检测模式的情况下测量了 ADS131M04 的平均电流消耗：

- 启用电流检测模式的通道 = 通道 1（带电流互感器的零线电流通道）和通道 2（带分流器的

火线电流通道)。在这两个启用的通道上减去 ADC 失调电压；禁用通道 0 和 3。

- 阈值 (CD_THRSHLD) = 80,000 个 ADC 单位。
- 采样窗口 (CD_LEN) = 256。
- 要求绝对值大于使 (\overline{DRDY}) 置位的阈值的样本数量 (CD_NUM) = 8。

图 7 显示了每 10 秒触发一次 ($t_{CD_mode_period} = 10\text{ s}$) 和每 64 秒触发一次 ($t_{CD_mode_period} = 64\text{ s}$)。电流检测模式时测量的 ADS131M04 电流消耗。每秒触发一次电流检测模式时，该 10 秒持续时间内的平均电流消耗为 $7.51\mu\text{A}$ 。每 64 秒触发一次电流检测模式时，该 64 秒持续时间内的平均电流消耗

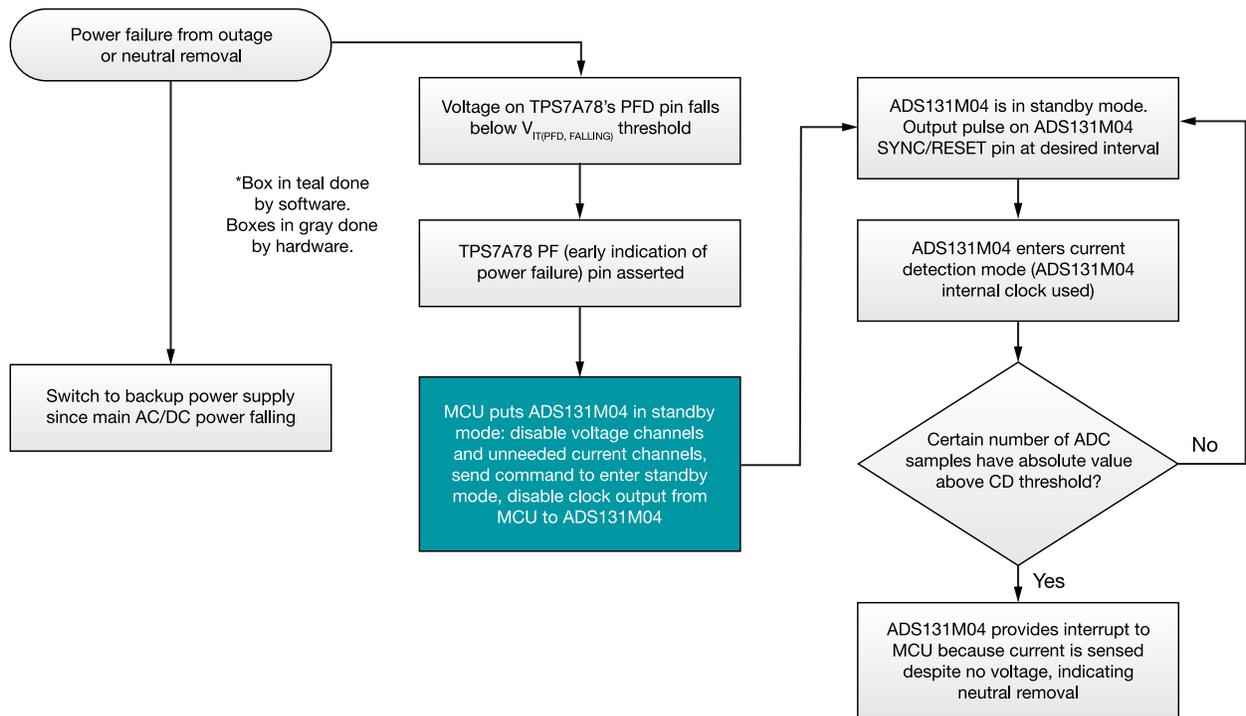


图 5. 发生电源故障后的事件序列。

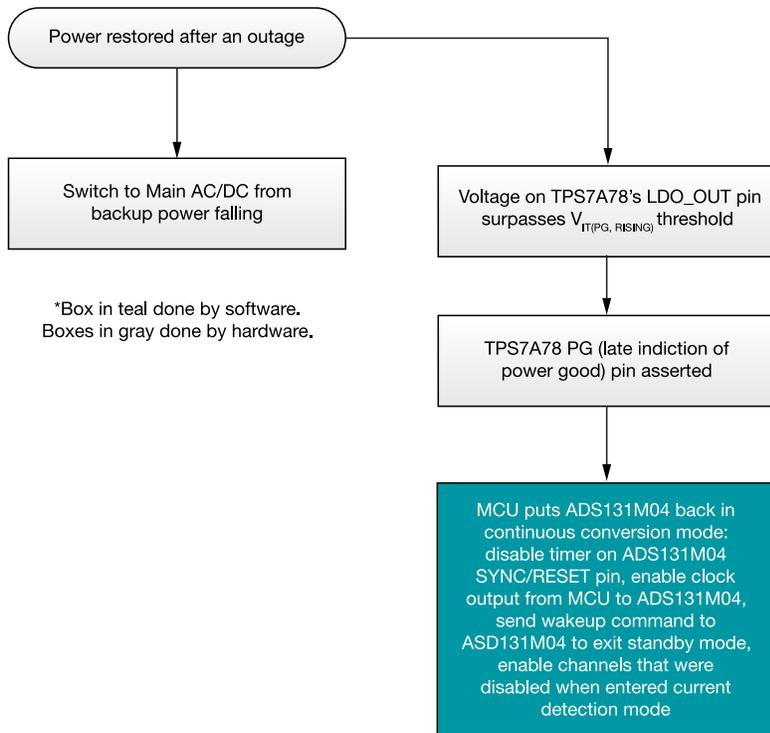


图 6. 电源恢复后的事件序列。

为 2.399 μ A。对于这两种触发速率，系统处于电流检测模式的最大时间仅为 95.453ms。在其余时间，ADS131M04 处于待机模式。

对于图 7 中的结果，同时在火线电流和零线电流通道上进入电流检测模式。在电流检测模式下使用的通道数量会影响电流检测模式下器件的电流消耗。

	电流消耗	持续时间估算
待机模式	1.452 μ A	$t_{CD_mode_period} - 95.453$ ms
电流检测 (CD) 模式	636.155 μ A	95.453 ms
$t_{CD_mode_period} = 10$ s 时的平均电流消耗	7.510 μ A	待机持续时间 = 9,904.548 ms CD 持续时间 = 95.453 ms
$t_{CD_mode_period} = 64$ s 时的平均电流消耗	2.399 μ A	待机持续时间 = 63,904.548 ms CD 持续时间 = 95.453 ms

图 7. 电流检测模式下的平均电流消耗。

重要声明：本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

平台标识是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产。

如果仅在一个 ADC 通道（具体是指火线电流通道）上启用电流检测模式，则图 7 中的平均电流消耗可能会进一步降低（如下一页中的图 8 所示）。此外，图 7 中的采样窗口设置为 256，对于 50Hz 的市电频率，这对应于 4 个以上的市电周期数据。如果采样窗口长度从 256 个样本更改为最小值 128 个样本，则在电流检测模式下花费的时间也将减少，从而也降低了平均电流消耗。

图 7 和图 8 中的结果表明，ADS131M04 的电流检测模式具有低功耗，这可以区分断电和零线移除，而不会显著消耗备用电源。通过使用该模式，电表可以检测出一种形式的篡改，并向公用事业公司发出有关篡改攻击的警报，以便准确地对客户收

费。

有关如何处理其他篡改技术或单相并联参考设计上电流检测实现的更多详细信息，请观看以下培训视频：

- “[用于阻止对智能电表的攻击的防篡改技术。](#)”
- “[如何使用独立计量 ADC 设计单相并联电表。](#)”

电流检测模式：电流消耗与启用的通道数间的关系

启用的通道数	电流检测模式 电流	$t_{CD_mode_period} = 10$ 时的平均电流 估算	$t_{CD_mode_period} = 64$ 时的平均电流 估算
2 (通道 1 和 2)	626.822 μ A	7.421 μ A	2.385 μ A
2 (通道 0 和 1)	565.645 μ A	6.837 μ A	2.293 μ A
1 (通道 2)	386.59 μ A	5.128 μ A	2.026 μ A
1 (通道 1)	397.716 μ A	5.234 μ A	2.043 μ A
1 (通道 0)	391.505 μ A	5.175 μ A	2.034 μ A

图 8. 电流检测模式下的电流消耗与启用的通道数间的关系。

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性及其可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的TI 产品；(2) 设计、验证并测试您的应用；(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及ti.com.cn上或随附TI产品提供的其他可适用条款的约束。TI提供所述资源并不扩展或以其他方式更改TI 针对TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122

Copyright © 2020 德州仪器半导体技术（上海）有限公司