

Application Note

在智能电表中使用电子保险丝驱动锁存继电器



Sailendra, Harmeet Singh, Rakesh Panguloori

摘要

监测实时功耗以及远程连接或断开客户供电服务是智能电表的一项基本功能。公用事业运营商可远程控制智能电表中的锁存继电器以连接或断开供电服务，原因包括紧急情况或迫在眉睫的安全隐患、未缴纳电费，甚至可在预付费智能电表中为充值后的预付费账户恢复供电服务。本应用手册讨论了如何使用电子保险丝在继电器运行期间从电源获取可用功率，从而减少保持能量需求，进而减小保持电容器的尺寸。本文档还提供了设计和测量结果，展示了使用电子保险丝带来的性能优势。

内容

1 简介.....	2
2 基于 RC 电路的传统设计.....	4
3 采用电子保险丝的建议设计.....	6
4 比较总结与结语.....	10
5 参考资料.....	11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

智能电表的技术进步实现了高级计量、需求电价和客户显示等管理功能。这些技术进步必须在保持智能电表外形尺寸不变的同时，以更低的公用电网功耗实现。

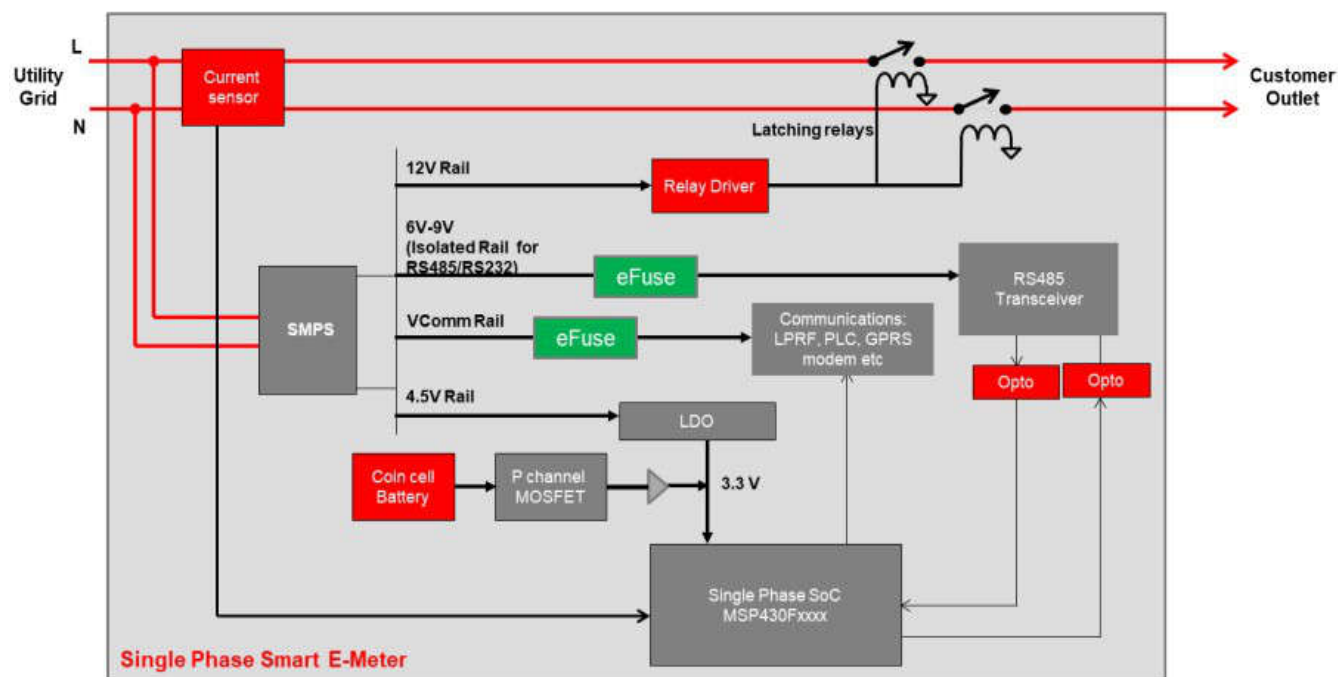


图 1-1. 单相智能电表方框图

智能电表运行多个内部模块，包括计量核心、中央处理器、通信调制解调器和锁存继电器，如图 1-1 所示。虽然标准运行仅需极小的持续功率，但电表在无线数据传输和继电器机械锁存期间需要较大的功率。在量化智能电表的功率要求之前，了解锁存继电器的运行情况非常有用。锁存继电器运行及其相关电源要求如下所述。

电力公用事业运营商可使用锁存继电器远程连接/断开供电服务，原因包括紧急情况或迫在眉睫的安全隐患、未缴纳电费，甚至可为充值后的预付费账户恢复供电服务（预付费电表）。继电器需要使用电流脉冲来连接和断开供电服务。在此期间，继电器在连接和断开事件时会消耗峰值功率。详细的功耗分析如下。

- 智能电表通常采用 12V 线圈锁存继电器。
- 在单相智能电表中，此类继电器的功率要求为 3W 至 6W，持续时间为 100ms；在三相智能电表中，功率要求为 4.5W 至 9W，持续时间为 100ms。
- 脉冲持续时间要求在 50ms 至 100ms 之间变化，具体视继电器制造商而定。

表 1-1 中提供了 Ivy Metering IM901 继电器的规格。

表 1-1. IVY Metering IM901 继电器规格

标称线圈工作电压 (V)	最小工作电压 (V)	单线圈电阻 (Ω)
6V	0.2V	24 Ω
9V	6.3V	54 Ω
12V	8.4V	96 Ω
24V	16.8V	384 Ω
48V	33.6V	1536 Ω

在典型智能电表中，通信调制解调器和锁存继电器是关键功耗元件。典型通信调制解调器和锁存继电器消耗的峰值功率分别为 8W 和 6W。因此，这些负载的总峰值功率要求为 14W。

有两种方法可以满足这一峰值功率要求，如下所述：

1. 选项 1：定制 15W SMPS 设计

在这种方法中，电源的设计旨在直接满足全部峰值功率要求。客户必须采用 15W 开关模式电源设计，通常包括基于 EE22 的变压器、两个串联的 68 μ F 400V 大容量电容器以及更大的 EMI 滤波器，从而导致 PCB 尺寸和成本增加。

2. 选项 2：标准 11W SMPS 设计

在这种方法中，电源的尺寸适合平均负载，而峰值继电器能量由保持电容器提供。

制造商更倾向于采用选项 2，因为其尺寸更小且更具成本效益，下一节将对此进行讨论。

2 基于 RC 电路的传统设计

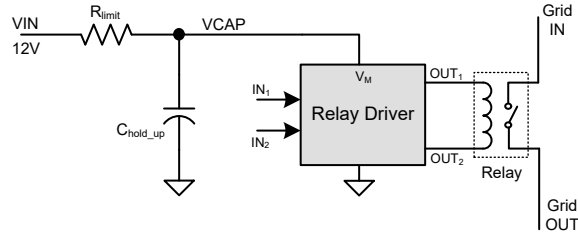


图 2-1. 基于 RC 电路的传统设计方框图

在这种基于 RC 的传统实现方案中，锁存继电器峰值功率要求由保持电容器 “C_{hold_up}” 和电源共同提供。

“C_{hold_up}” 电容器通过串联电阻器 “R_{limit}” (22 Ω 至约 100 Ω) 连接到电源 (如图 2-1 所示) 以限制浪涌电流。

在典型单相智能电表表中：

- 标称电源电压 = 12V
- 继电器线圈电阻 = $96/2 = 48\Omega$
- 脉冲持续时间 = 50ms
- 继电器工作电压范围 = 12V 至 8.4V
- R_{limit} = 100Ω，用于将浪涌电流限制为 120mA

在 50ms 的锁存期间，电容器为继电器提供所需的能量，同时该电容器两端的电压会下降。继电器两端的电压 (等于电容器两端的电压) 必须在工作电压范围内才能成功锁存。保持电容器不仅需要支持继电器消耗的峰值能量，还需要将继电器电压保持在工作范围内，才能成功锁存。成功锁存所需的最小保持电容可使用 [方程式 1](#) 计算：

$$C_{\text{hold_up}} = \frac{t_{\text{pulse}}}{\left(\frac{R_C \times R_{\text{limit}}}{R_C + R_{\text{limit}}} \right) \times \ln \left(\frac{V_{\text{in}} \times R_{\text{limit}}}{[V_{\text{min}} \times R_{\text{limit}}] - [V_{\text{in}} - V_{\text{min}}] \times R_C} \right)} \quad (1)$$

在上述典型情况下，我们需要安装一个 3.3mF 电容器 (使用 [方程式 1](#) 计算得出)，才能成功锁存。由于电源提供的功率在 RC 配置中受 RLIM 电阻器的限制，因此锁存期间需要使用一个 3.3mF 电容器 (通常直径为 16mm，高度为 25mm) 为继电器提供能量。这种大电容器会在空间受限的智能电表表中占用很大的空间。采用 3.3mF 保持电容器的传统 RC 电路测试结果如 [图 2-2](#) 所示。

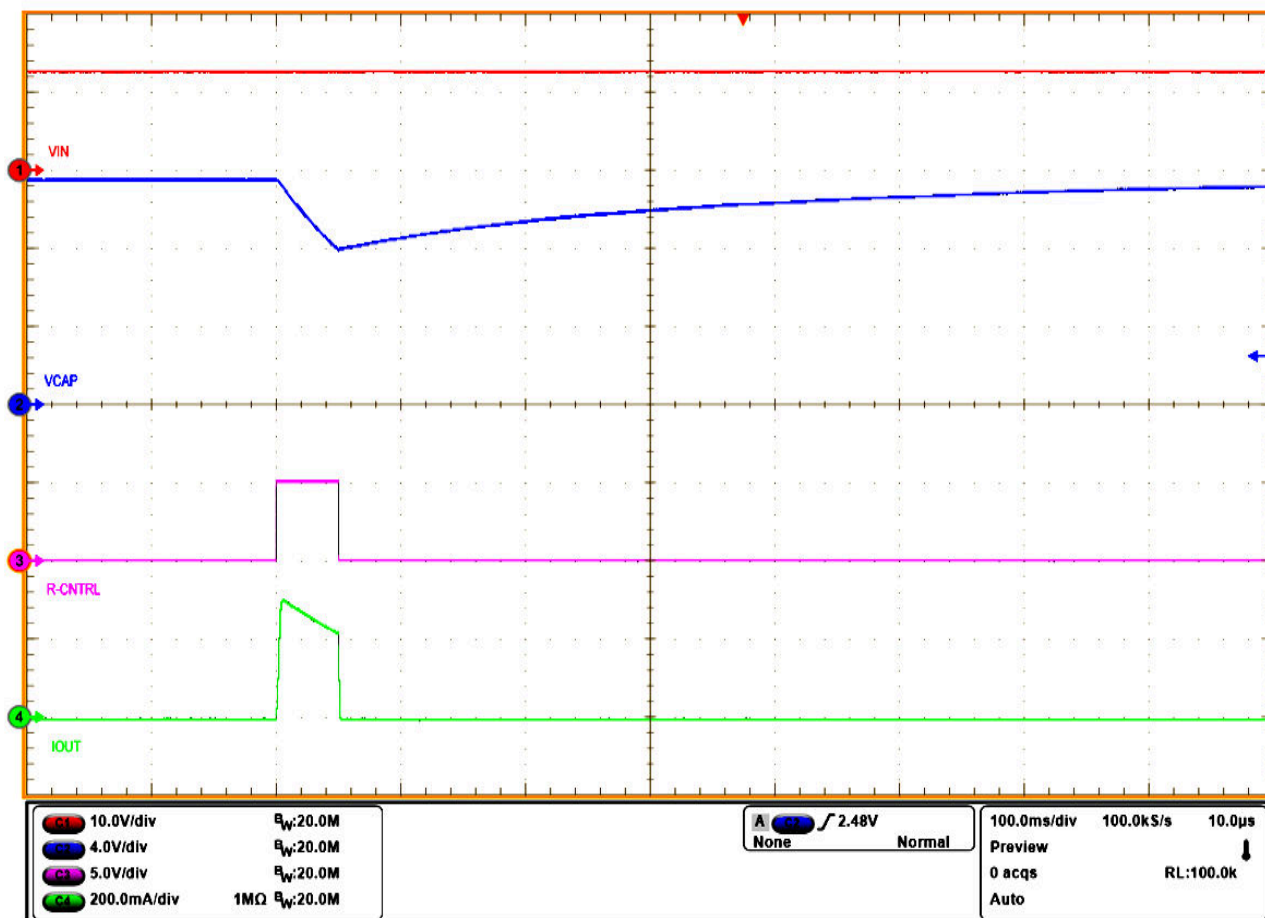


图 2-2. 采用 3.3mF 保持电容器的传统 RC 电路测试结果

因此，客户需要满足以下条件的设计：

- 减小电容器尺寸，因为在满足继电器能量要求的同时，电容器尺寸已成为尺寸受限电表中的瓶颈
- 能够利用 SMPS 提供的能量
- 为向这些继电器供电的 12V 电压轨提供过载和短路保护
- 接通市电后，电表必须在五秒钟内完全恢复正常运行。因此，保持电容器的充电时间必须小于 5 秒

3 采用电子保险丝的建议设计

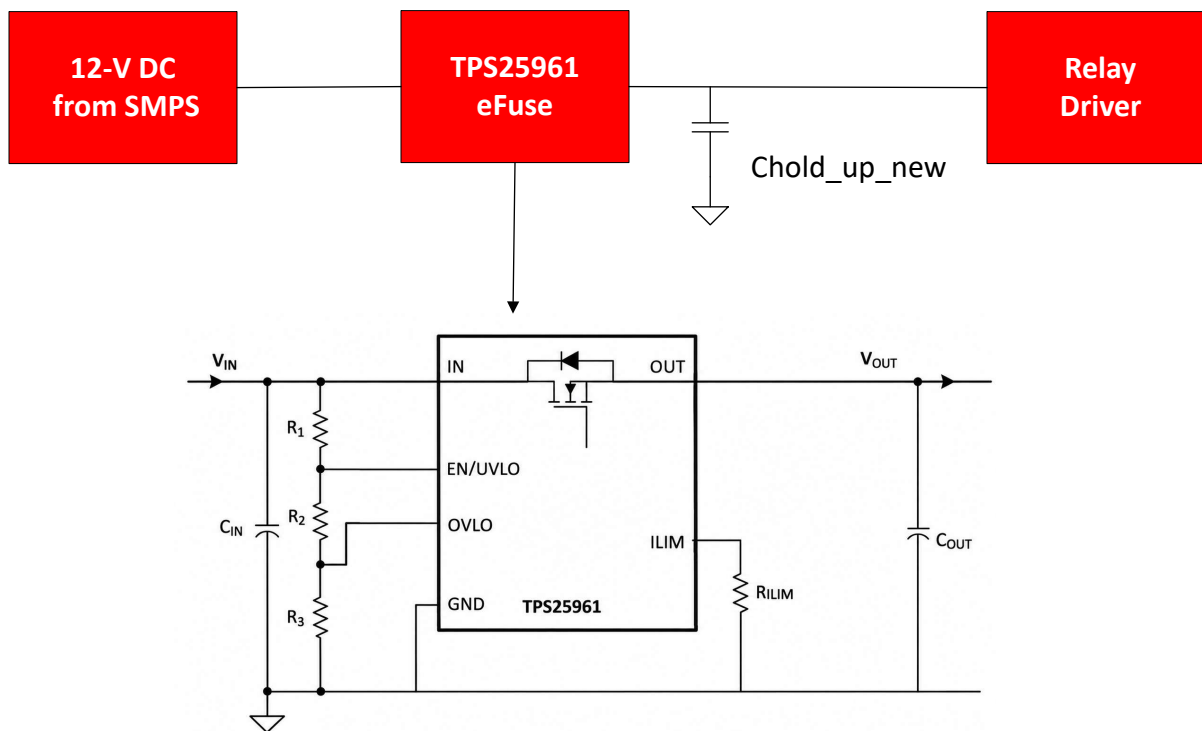


图 3-1. 基于电子保险丝的设计方框图

如图 3-1 所示，建议的设计用电子保险丝取代了 R_{LIM} 电阻器。与电源电流受 R_{LIM} 限制的、基于 RC 的传统设计不同，电子保险丝可以通过 $ILIM$ 引脚对电流限值进行编程。较高的电流限值使电源能够在锁存期间提供更多的能量，从而减小所需的保持电容。

可使用方程式 2 计算所需的保持电容：

$$C_{hold_up_new} = \frac{t_{pulse}}{R_C \times \ln\left(\frac{V_{in} - i_{lim} \times R_C}{V_{min} - i_{lim} \times R_C}\right)} \quad (2)$$

在典型单相智能电表表中：

- 标称电源电压 = 12V
- 继电器线圈电阻 = $96/2 = 48\Omega$
- 脉冲持续时间 = 50ms
- 继电器工作电压范围 = 12V 至 8.4V

根据方程式 2 计算得出，要在上述典型运行条件下成功锁存，需要使用 1.5mF 保持电容器。

该公式计算了在各种电子保险丝电流限制设置下所需的最小保持电容，相应的测试结果如图 3-2 至图 3-4 所示。

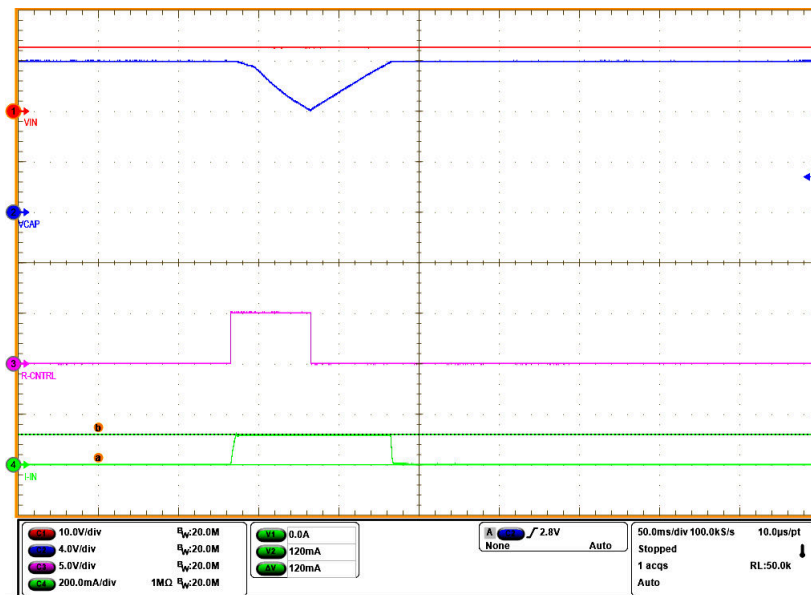


图 3-2. 固定 $ILIM = 120mA$ 、采用 $1.48mF$ 保持电容器时的测试结果

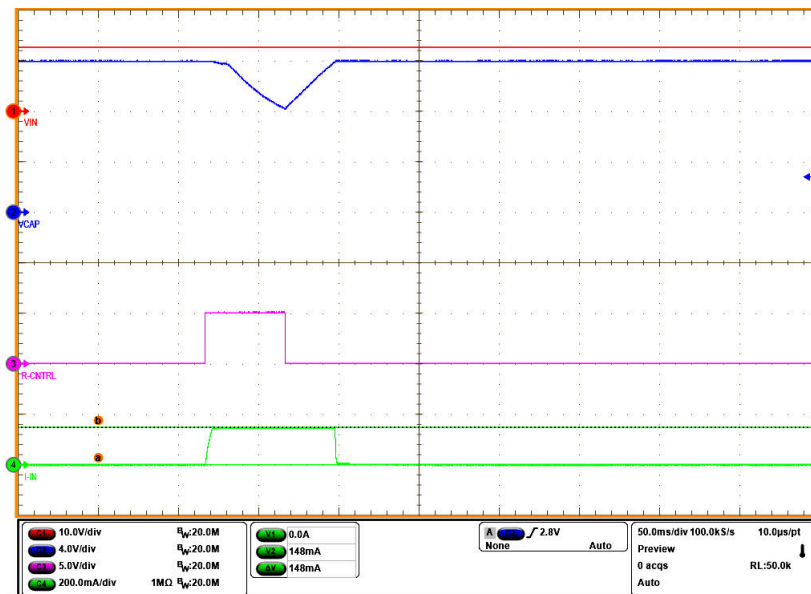
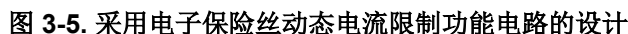


图 3-3. 固定 $ILIM = 150mA$ 、采用 $1.16mF$ 保持电容器时的测试结果



通过在锁存期间配置较高的电流限值和和在稳态运行期间配置较低的电流限值，动态电流限制方法可以进一步优化电容器尺寸和功耗。这样 **SMPS** 便可在锁存期间提供最大的可用能量，同时降低稳态期间的稳定电流。动态电流实现如下所述，并如图 3-5 所示。

- **电流限制配置：**ILIM 引脚连接到 RILIM_startup 和 RILIM_pulse，使用 N 沟道 MOSFET 在两种电流限制设置之间切换。
- **锁存期间：**接收到继电器锁存命令后，微控制器会开启 N 沟道 MOSFET，从而使能 RILIM_pulse 并将电子保险丝设置为较高的电流限值。
- **锁存后：**微控制器会关闭 MOSFET，从而禁用 RILIM_pulse 并使电子保险丝恢复为由 RILIM_startup 设置的较低电流限值。



执行动态电流限制测试时，将较低电流限值固定为 120mA，并采用不同的较高电流限制值。向 N 沟道 MOSFET 施加 5V 直流栅极信号持续 50ms，以实现较高的电流限值。50ms 后，该电流限值每次测试时恢复为 120mA。相应的测试结果如图 3-6 和图 3-7 所示。

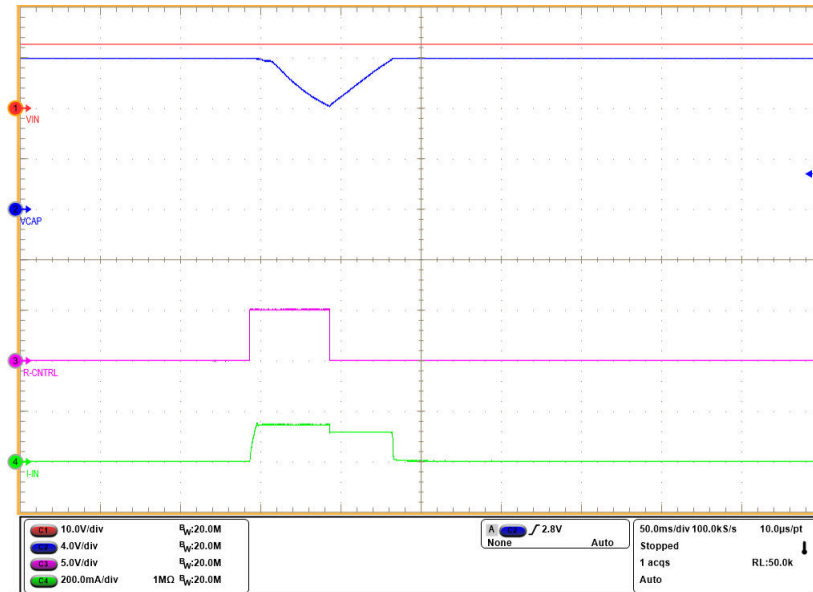


图 3-6. 动态 $ILIM = 150mA$ 、采用 1.16mF 保持电容器时的测试结果

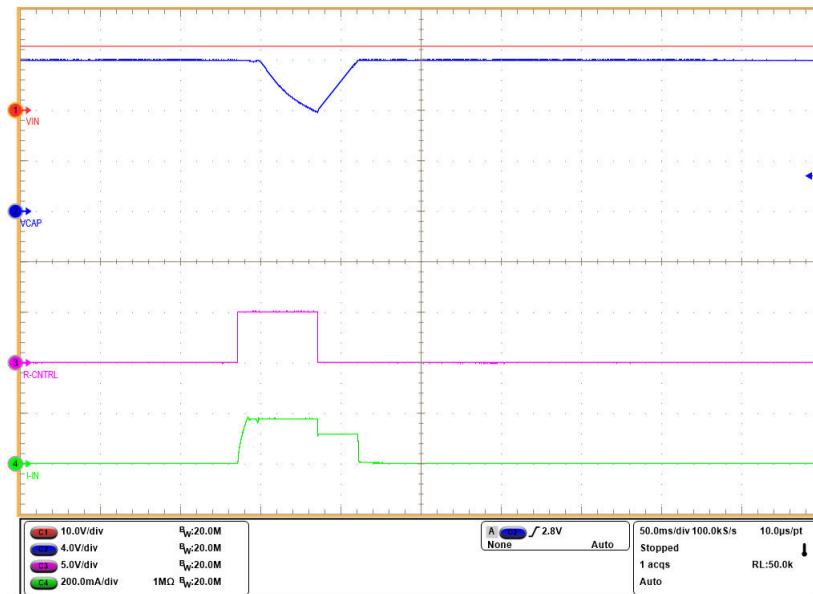


图 3-7. 动态 $ILIM = 180mA$ 、采用 0.69mF 保持电容器时的测试结果

考虑对应图 3-7 中所示测试结果的实现电路。浪涌电流限值设置为 120mA，而锁存相电流限值设置为 180mA。采用动态电流限制时，所需的保持电容器为 0.69mF，而传统的非电子保险丝设计中使用的是 3.3mF。

4 比较总结与结语

表 4-1. 电容器尺寸比较：基于 RC 的传统设计与基于电子保险丝的设计

锁存阶段的电流限值 (mA)	基于 RC 的传统设计		基于电子保险丝的设计	
	安装的电容器 (μF)	电容器尺寸 (mm ²)	安装的电容器 (μF)	电容器尺寸 (mm ²)
120	3300	400	1500	225
150	2200	313	1000	200
180	2200	313	470	125

表 4-1 比较了基于 RC 的传统设计和基于电子保险丝的设计在不同锁存电流限制下的电容器要求。基于电子保险丝的设计显著减小了所需的电容器尺寸，而电容器尺寸的减小可以抵消额外的电子保险丝成本，从而降低整体设计成本。

电子保险丝利用在脉冲负载期间可用的电源功率作为保持电容器的补充，从而在给定的备用时间内减小所需的电容器尺寸。凭借动态电流限制，电子保险丝在锁存期间以较低的电流限值运行，而在正常运行期间则采用较高的电流限值。这样可以更大程度地利用可用的电源功率，并进一步降低保持电容器要求。**TPS25961** 还提供过压保护、过载保护和短路保护，从而提升整体系统保护能力。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [TPS25961](#) 具有可调节电流限值和短路保护功能的 2.7V 至 19V、106m Ω 电子保险丝, 数据表
- 德州仪器 (TI), [TPS25961](#) 设计计算器

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（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，不保证没有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、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(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、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月