

Flat-Clamp surge protection technology for efficient system protection 译本

作者：Zhao Fang, Padmanabhan Gopalakrishnan [GP], Cameron Phillips

译者：周始勇

1. 译者序

本文翻译来自 TI 的 *Application Report*: 《**Flat-Clamp surge protection technology for efficient system protection**》。是译者学习 TVS 的参考文献。由于原文的格式限制，固不能够在保留原文样式下进行翻译，只能新建一个文件进行记录。

由于译者水平有限，只能结合翻译软件以及作者自我理解在保留原文思路的背景下进行翻译，译本仅供学习交流使用，所有权归 TI 公司所有，涉及侵权请联系译者。

2. ABSTRACT

瞬态电压抑制 (TVS) 二极管是浪涌保护的常用选择。虽然 TVS 二极管成本低廉、简单易用，但其固有的几个缺点也给系统设计带来了挑战。TVS 二极管的温度变化大、箝位效率低，再加上封装基底面大，往往需要过度设计保护电路。

德州仪器 (TI) 设计了一种新型箝位技术，用于防止瞬态浪涌事件。这种 Flat-Clamp 技术为消散瞬态浪涌提供了一种强大的解决方案，同时还能提供精确、平坦且与温度无关的箝位电压，从而最大限度地减少受保护系统的残余电压。Flat-Clamp 器件的封装面积比行业标准的超小型 A 版 (SMA)/ 超小型 B 版 (SMB) 封装小 90%，电容更低，漏电比传统的 TVS 解决方案低 50%。本文简要概述了浪涌保护标准，解释了 flat-clamp 技术，并通过实例说明了该技术如何优化系统设计。

3. 浪涌保护的必要性

随着越来越多的工业设备采用先进的集成电路 (IC)，对更坚固耐用、空间利用率更高的电路保护的需求也随之增加。集成电路技术的发展使更多的功能被集成到更小的半导体元件中，积木式晶体管的尺寸已经缩小到了纳米级。虽然这些集成电路为工业设备提供了前所未有的强劲动力，但较小的几何尺寸对工业环境中常见的瞬态应力的抵御能力却天生较弱。与消费类电子设备不同，大多数工业系统必须满足抗浪涌的国际标准，如国际电工委员会 (IEC) 61000-4-5 浪涌保护和 IEC 61000-4-2 静电放电 (ESD) 保护。此外，工业系统的产品寿命更长，而且工作环境恶劣。强大的浪涌保护解决方案是工业设备的必需品。多年来，分立 TVS 二极管一直是工业浪涌保护的主要选择（图 1）。虽然 TVS 二极管坚固耐用、成本低廉，但其温度变化大、箝位效率低，会导致系统总体成本和体积增大。为了克服这些缺点，同时确保系统的稳健性和可靠性，设计人员通常会使用耐压性更高的元件。这些元件成本较高，功耗较高，占用的电路板空间也更大。

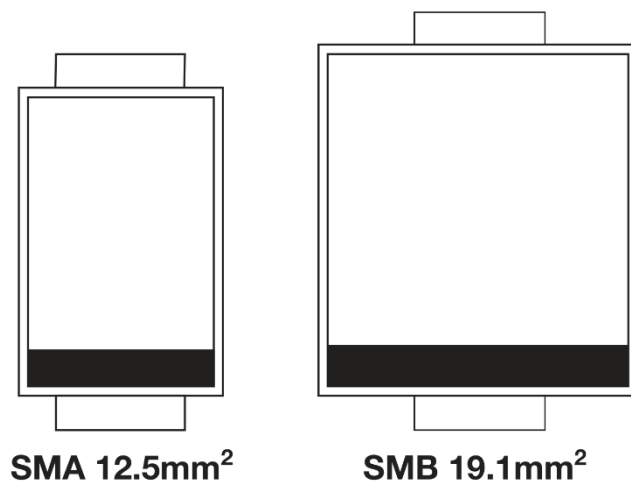


图 1 分立 TVS 浪涌保护二极管的标准封装

4. 浪涌抗扰标准

工程师在设计系统时要通过 IEC 61000-4-5，这是一项严格的系统级浪涌抗扰度标准。该标准规定了浪涌抗扰度测试的测试设置和程序。与 IEC 61000-4-2 标准涵盖的 ESD 事件不同，浪涌事件（通常发生在电力系统开关瞬态或闪电放电情况下）的脉冲持续时间更长，能量更高。IEC 61000-4-5 标准根据设备的安装位置规定了不同的等级或分类。例如，1 级适用于部分受保护的环境，而 3 级适用于电缆并联运行的环境。浪涌电压等级以及浪涌冲击的等效阻抗 (R_{eq}) 决定了保护装置需要处理的浪涌电流大小(图 2)

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
	500 V	1kV	2 kV	4 kV
$R_{eq} = 42 \Omega$	12 A	24 A	48 A	96 A
$R_{eq} = 12 \Omega$	42 A	84 A	167 A	334 A
$R_{eq} = 2 \Omega$	250 A	500 A	1000 A	2000 A

图 2 最大峰值电流值取决于电压等级和 R_{eq}

为了提供一种一致的测试方法来衡量浪涌稳健性，IEC 61000-4-5 标准定义了一种组合波形发生器 (CWG) 来产生浪涌脉冲。图 3 显示了一个简化的组合波形发生器，该组合波形发生器有一个为耦合电容器 (CC) 充电的电源。关闭开关 S_1 后，CC 通过 R_{s1} 、 R_m 、 L_r 和 R_{s2} 组成的脉冲整形网络放电。调整这些元件的值可产生符合 IEC 61000-4-5 标准规定的短路和开路条件下的合规波形。

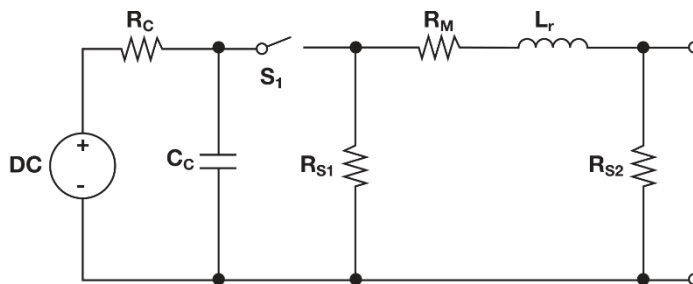


图 3 简化的 CWG 电路图

参照图 2， 2Ω 等效阻抗是 CWG 固有的源阻抗，它本身就是低压电源源阻抗的良好模型。 12Ω 等效阻抗（ 2Ω 来自 CWG 源， 10Ω 来自耦合网络）是电源和接地网络阻抗的模型，用于电源和接地之间发生浪涌时。 42Ω 等效阻抗（ 2Ω 来自 CWG 源， 40Ω 来自耦合网络）模拟所有其他线路和地线之间的阻抗。数据线或信号线使用此阻抗电平。

IEC 61000-4-5 标准根据 CWG 放电短路时的波形形状定义浪涌脉冲。图 4 所示，短路波形的前沿时间为 $8\mu s$ （类似于上升时间），脉冲波形的半值时间为 $20\mu s$ 。与 $8/20\mu s$ 浪涌相关的峰值脉冲电流 (I_{PP}) 值大于与 $10/1,000\mu s$ 标准相关的峰值脉冲电流 (I_{PP}) 值，后者用于指定许多 TVS 二极管，因为其脉冲持续时间更短。在较短的浪涌期间，保护装置必须能够承受更大的峰值功率而不会损坏。

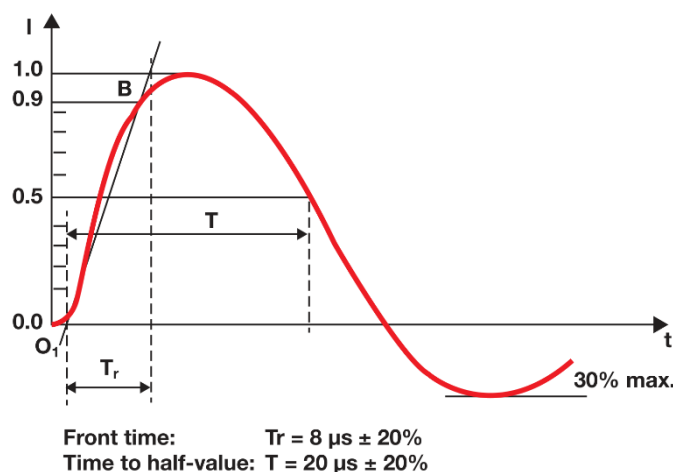


图 4CWG 输出端的短路电流波形

5. 使用传统 TVS 二极管的浪涌保护设计

传统的 TVS 二极管被广泛应用于浪涌钳位。图 5 显示了正象限 TVS 的 I-V 特性。反向工作电压 (V_{RWM})，也称为隔离电压，描述了 TVS 对受保护电路（除器件的寄生电容、漏电等）不产生显著影响的电压电平。在系统设计中， V_{RWM} 应处于或高于系统工作电压的上限，因为任何更高的电压都会导致 TVS 二极管钳位产生不必要的漏电流。

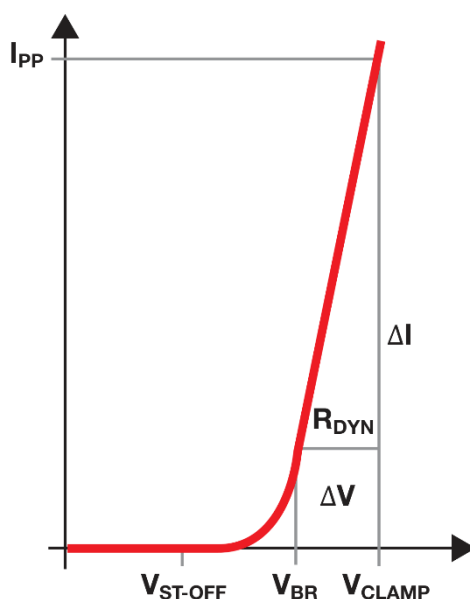


图 5 隔离电压、击穿电压和钳位电压

击穿电压 (V_{BR}) 定义了 TVS 二极管开始主动导通电流以钳制瞬态事件的反向电压。当更多电流流过二极管时，二极管两端的电压将根据其动态电阻 (R_{DYN}) 而上升。在瞬态事件期间，多安培范围内的电流被迫流过保护装置。通过二极管 R_{DYN} 的瞬态电流将导致额外的电压上升，超过 TVS 的 V_{BR} 。

在额定浪涌电流 (I_{PP}) 下，TVS 二极管两端的组合电压被定义为 TVS 的箝位电压 (V_{CLAMP})。对于传统 TVS 二极管， R_{DYN} 是固定的， V_{CLAMP} 直接取决于电流水平（图 6）。指定瞬态浪涌电流水平下的 V_{CLAMP} 必须足够低，以保护所有下游元件。

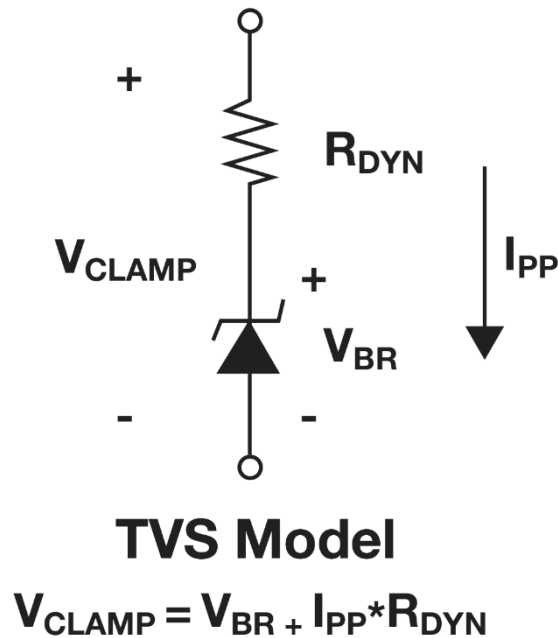


图 6 传统 TVS 钳位的电气模型

硅的物理特性和二极管的结区限制了 TVS 二极管的 R_{DYN} 。即使二极管面积非常大，8/20 μ s 浪涌 R_{DYN} 也可能达到数百毫欧。因此，相对于其 V_{RWM} ，TVS 二极管通常具有较高的 V_{CLAMP} ，设计人员必须采取额外措施来设计稳健的系统。为了防止系统在浪涌事件中发生故障，一种方法是过度设计下游电路，使其采用能够承受高浪涌钳位电压的器件。虽然这种方法可以产生稳健的系统，但会导致系统成本增加、功耗增加和集成电路基底面尺寸增大。第二种方法是选择 R_{DYN} 低得多的 TVS 二极管，但这会导致较高的输入/输出 (I/O) 电容、较高的 I/O 漏电和较大的 TVS 封装尺寸等难以权衡的问题。

6. TI 的 Flat-Clamp 技术

德州仪器的 Flat-Clamp 系列浪涌箝位器为设计人员提供了一种器件，消除了使用传统 TVS 二极管进行设计时所遇到的困难。图 7 是 TI Flat-Clamp 系列浪涌钳的功能框图，它集成了一个电压感应电路、一个栅极驱动电路和一个功率场效应晶体管 (FET)，后者充当有源箝位。电压感应电路决定箝位的触发电压 (V_{BR})。当箝位的输入电压低于触发电压时，栅极驱动器和功率场效应晶体管关闭，箝位中无有功电流流动。一旦输入电压 (V_{IN}) 高于触发电压，栅极驱动器和功率场效应管就会开启，以箝位输入引脚的电压。栅极驱动电路的设计使调节环路能够使 IN 引脚 V_{CLAMP} 非常接近 V_{BR} ，即使更多的瞬态浪涌电流从受保护引脚流过该器件。

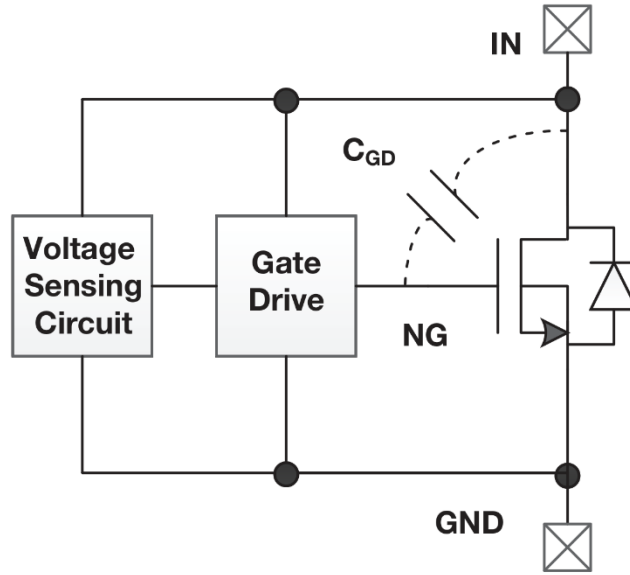


图 7 Flat-Clamp 技术功能框图

从浪涌钳功能的更多细节来看，IN 引脚上的微小电压变化（ ΔV_{IN} ）会通过电压感应电路和栅极驱动器引起 NG 节点上的电压变化（ ΔV_{NG} ）。

公式 1 定义了增益（ A_G ）：

$$A_G = \frac{dV_{NG}}{dV_{IN}}$$

等式 2 表示从 IN 引脚的增益：

$$g = \frac{dI_{IN}}{dV_{IN}} = g_m \times A_G$$

其中 $g_m = \frac{dI_{IN}}{dV_{NG}}$ 是功率场效应晶体管的增益，由于主功率场效应晶体管尺寸较大，因此增益值较高。

由于 A_G 和 g_m 的值较高，因此整体增益（ g ）较高，触发后 IN 引脚上的 ΔV_{IN} 将导致较大的电流变化（ ΔI_{IN} ）。这样，反馈机制就能将浪涌钳的动态电阻控制在一个非常低的值。与传统的 TVS 二极管相比，flat-clamp 位电路的行为实现了一种具有独特优势的瞬态浪涌保护解决方案[1]。

7. Flat-clamp 保护与传统 TVS 二极管的比较：关键参数

R_{DYN} 和 V_{clamp}

回顾一下，瞬态箝位的 R_{DYN} 定义为触发后 I-V 曲线的斜率。图 8 和图 9 比较了 flat-clamp 二极管与传统 TVS 二极管的 R_{DYN} 和箝位行为。如上一节所述，由于 flat-clamp 实现的 A_G 和 g_m 增益值较高，等式 3 表明 R_{DYN} 可以接近零：

$$R_{DYN} = \frac{dV_{IN}}{dI_{IN}} = \frac{I}{g_m \times A_G}$$

接近零的 R_{DYN} 可在浪涌事件期间提供精确、平坦的 V_{CLAMP} 。此外，与 TVS 二极管不同， V_{CLAMP} 可以根据温度和工艺进行补偿。

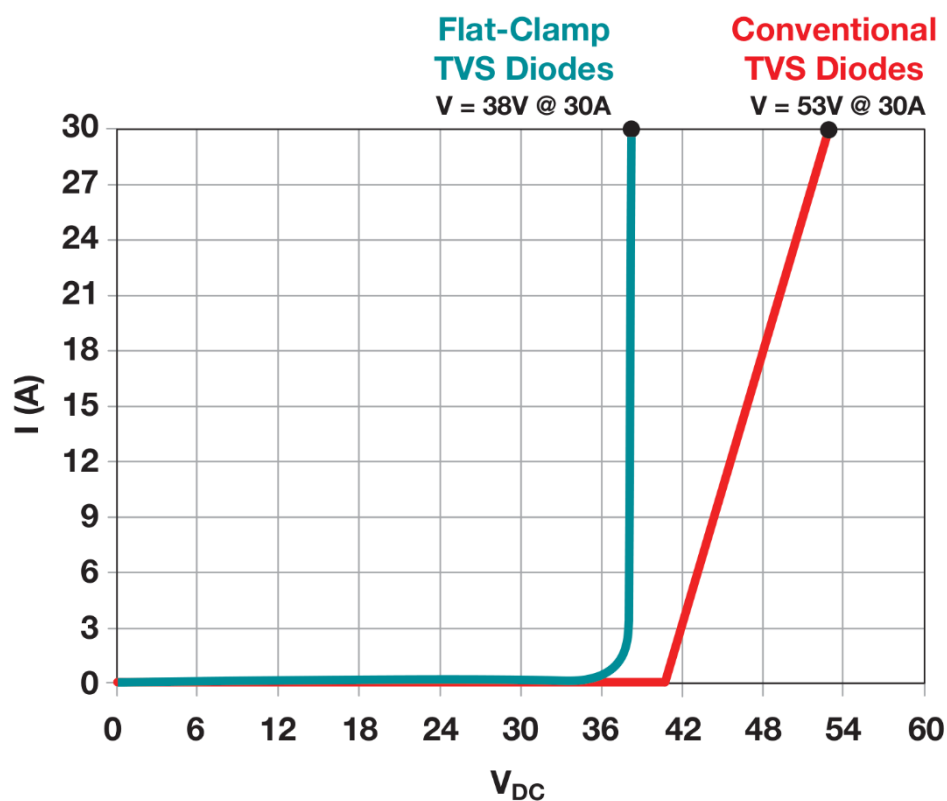


图 8 flat-clamp 型二极管与传统 TVS 二极管的直流 IIN-VIN 曲线对比

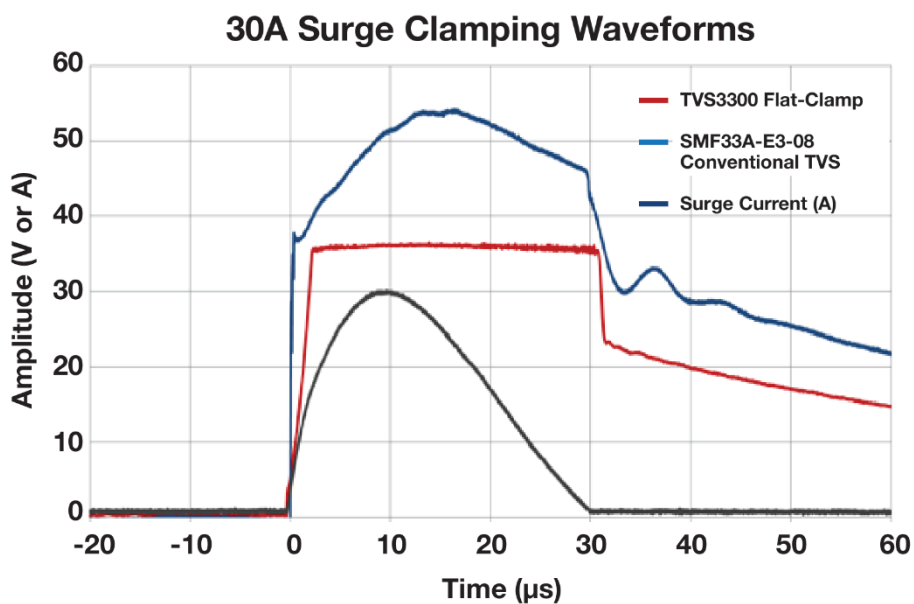


图 9 flat-clamp 二极管与传统 TVS 二极管的 8/20 μs 浪涌箝位对比

电容

为防止不必要的信号失真，保护解决方案应尽可能不影响受保护系统。二极管和保护电路都有影响系统性能的固有电容，因此电容越小，保护解决方案对信号完整性产生负面影响的可能性就越小。图 10 显示了扁平管系列与传统 TVS 二极管在不同工作电压下的电容值对比。分立 TVS 二极管会增加大量电容，尤其是在较低工作电压下。flat-clamp 型 TVS 二极管引入的电容明显低于传统的 TVS 二极管解决

方案。

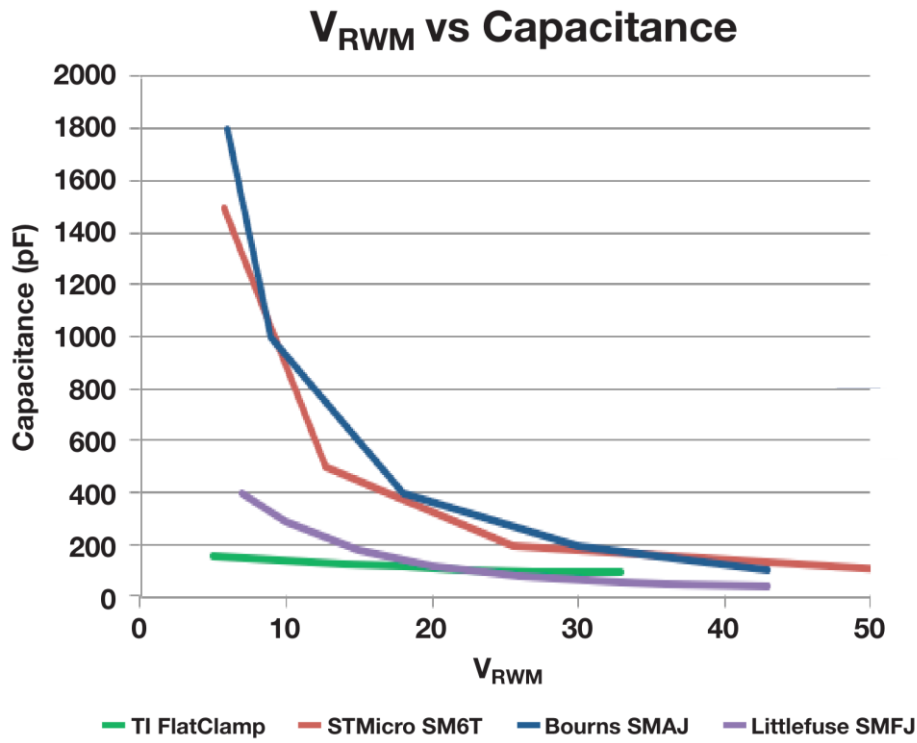


图 10 TI flat-clamp 系列与传统 TVS 二极管的电容对比

漏电流

典型的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 放大器输入级的输入偏置电流在皮安培 (pA) 范围内，而双极放大器则在纳安培 (nA) 范围内。传统的 TVS 二极管具有微安培 (μA) 的反向漏电流。当电流流经输入保护电阻或源阻抗时，这种漏电流会产生重大误差。flat-clamp 技术具有极低的静态漏电流，与传统 TVS 二极管相比，在漏电流会影响精度的工业 4-20mA 环路网络等应用中具有显著优势。图 11 比较了传统 TVS 二极管与 TI FlatClamp 系列的 V_{RWM} 与最大泄漏电流。TI 的 Flat-Clamp 器件可以保证低漏电流，因为其工艺变化极小，而传统 TVS 二极管则无法保证低于 $1\mu A$ 的漏电流。在低工作电压下，传统 TVS 二极管的漏电流可能接近 1mA，这会严重影响信号完整性，并降低低功率系统的效率。

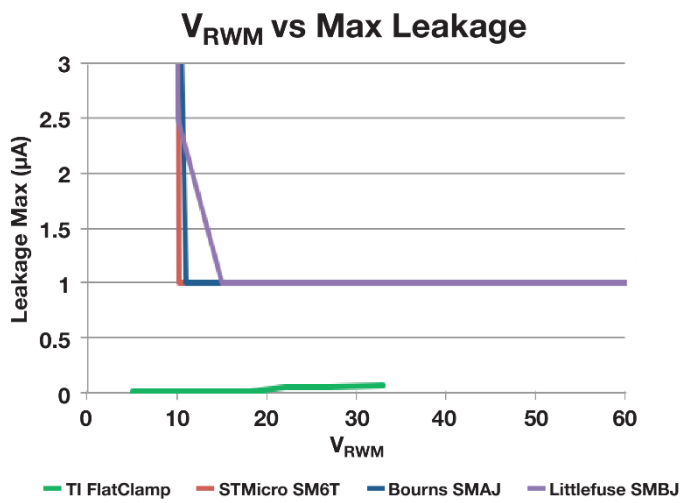


图 11 TI FlatClamp 系列与传统 TVS 二极管的 V_{RWM} 与最大漏电流对比。

flat-clamp 型二极管是有源器件，因此在系统设计中必须考虑第二种形式的漏电。第二种漏电是动态漏电，由受保护引脚上的快速信号引起。flat-clamp 型二极管数据表中的推荐工作表描述了受保护引脚的可接受压摆率。当交流信号的压摆率较低时，由于浪涌钳的寄生电容，位移电流会主导静态漏电流（就像标准 TVS 二极管一样）。一旦压摆率超过建议水平，由于 I/O 引脚与箝位 FET 栅极的耦合，主箝位 FET 可能会导通，从而导致高动态漏电流和不必要的信号失真。

功率与温度降额

传统 TVS 二极管的设计（和预期工作）温度范围很宽。在温度较高的情况下，您需要考虑 TVS 二极管的最大允许结温，以确保在浪涌事件中不超过该结温。随着环境温度的升高，功率耗散能力会降低。数据表中的功率降额曲线通常会显示这种性能限制。在 TI flat-clamp 位二极管中，钳位电压的闭环调节确保了跨温度的固定电压。这意味着与传统的 TVS 二极管相比，温度下的降额极小，从而提高了整个系统的稳健性。图 12 显示了 TVS3300 和 SMAJ33A 的 8/20 μ s PPP 在环境温度下的降额曲线。

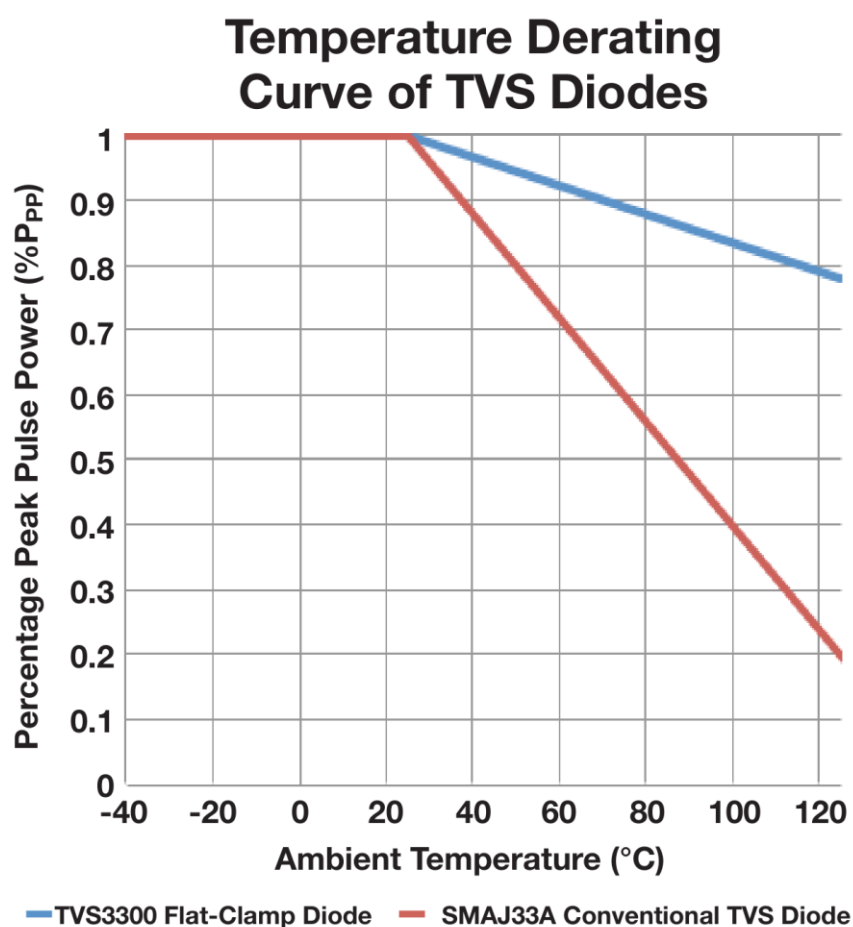


图 12 TI flat-clamp 系列的温度降额曲线

可靠性

任何新技术取代浪涌保护领域的主力技术，都有一个令人担忧的问题，那就是可靠性。对于如此小的封装，多次撞击 flat-clamp 型二极管似乎会使器件发热，从而导致故障。为了测试这种情况，TI 在 125° C 的环境温度下对 TVS3300 进行了 4,000 次重复的 30A 8/20 μ s 浪涌脉冲测试，两次脉冲之间的间隔时间不到 15 秒。图 13 显示了 VCLAMP、IPP 和漏电流。TVS3300 8/20 μ s 浪涌脉冲 4000 次。请注意，即使经过完整的耐久性测试，VCLAMP 或 I_{leak} 也没有发生变化。

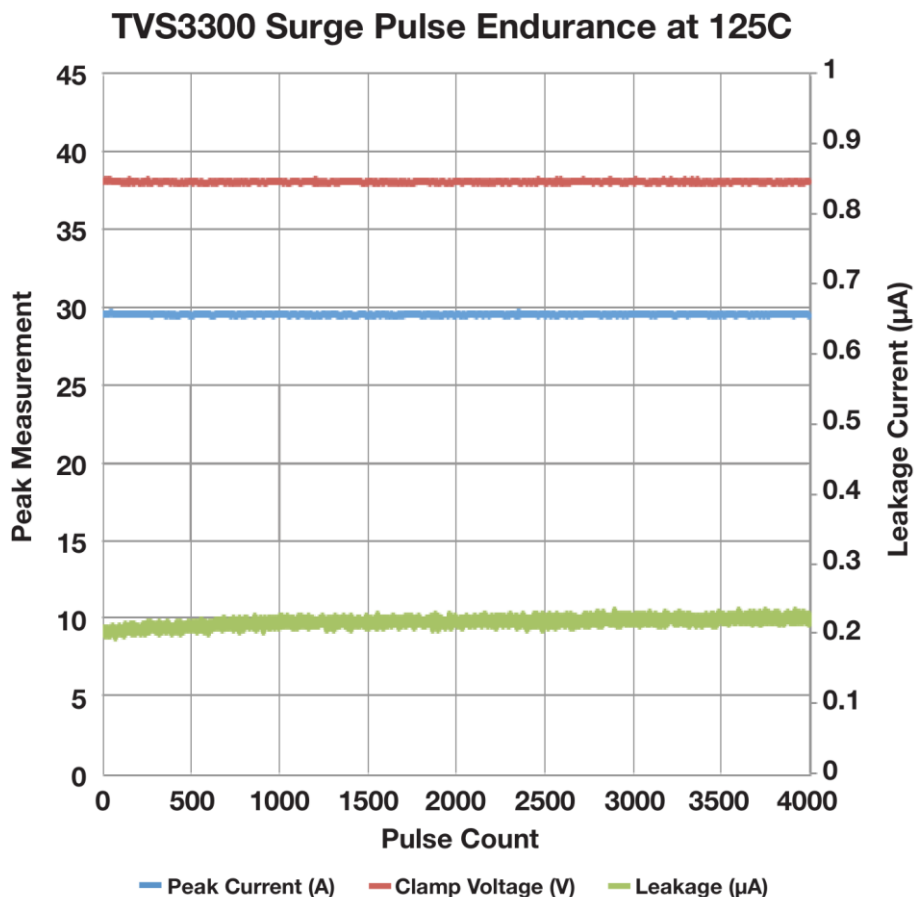


图 13

8. 设计示例 1——40V 与 60V 系统设计对比

作为 flat-clamp 二极管如何改进系统设计的一个例子，让我们来看看在一般工业系统中，传统 TVS 二极管的箝位性能较差，在设计上存在哪些困难。假设系统需要支持 33V 的正常工作电压。要使用标准 TVS 二极管保护该系统，必须选择跨温度的 V_{RWM} 大于 33V 的器件，以考虑各种变化。许多标准 TVS 二极管仅规定了 25°C 时的 V_{BR} ，这可能会给选择带来困难，因为 V_{BR} 通常在 -40°C 时最低。要在 -40°C 时支持 33V，就需要选择 V_{BR} 接近 39V 的 TVS。典型的 SMF 系列 TVS 在 $IPP = 30A$ 时的浪涌 V_{CLAMP} 为 -55V。浪涌保护二极管下游元件的额定电压必须高于 V_{CLAMP} ($> 55V$)，以避免在浪涌事件中造成任何损坏，从而增加系统成本和复杂性。现在考虑使用 TI TVS3300 flat-clamp 型二极管的相同 33V 系统设计。当 $IPP = 30A$ 时，TVS3300 将把受保护总线箝位到 38V。钳位电压的闭环调节可确保跨工艺和温度的电压变化最小。您可以按照更低的电压容差设计受保护元件，这意味着器件变化更小，元件尺寸更小。表 2 比较了 60V 容差低压差 (LDO) 稳压器和 40V 容差 LDO 的性能和成本。显然，40V LDO 成本更低，性能更好。LDO 还具有相关的外部元件和更高的系统电压，因此需要更大的外部元件（见表 3）。

表 4 和表 5 显示了常见系统元件、双极结晶体管 (BJT) 和串联保护肖特基二极管的其他性能和成本比较。您必须对所有其他下游元件（多路复用器、继电器等）进行类似的性能和成本权衡。作为系统设计人员，如果能选择耐压较低的元件，系统就会更加坚固可靠（工作也会更加轻松）。FlatClamp 二极管除了能减少浪涌事件对系统造成的压力外，还能让您在成本、元件尺寸和性能方面获益。必须评估的不仅仅是传统 TVS 二极管的成本，还有它对整个系统成本的影响。设计人员在评估保护解决方案的总系统成本时，往往会忽略这一因素。

9. 设计示例 2——4-20mA 工业网络节点

第二个例子是 4-20mA 回路工业网络中的应用。工厂自动化端点或变送器节点需要为多个下游组件提供保护，包括多路复用器、模数转换器 (ADC)、4-20mA 收发器和 LDO 稳压器。遗憾的是，大多数集成电路的数据表通常不提供瞬态电压抗扰度额定值，这使得选择合适的元件来为系统提供稳健保护变得十分困难。为了了解 TI 扁平钳器件在系统保护方面的技术优势，请参考 4-20mA 电流回路变送器参考设计。让我们比较一下分立 TVS 二极管和扁平钳器件的浪涌保护实施情况。

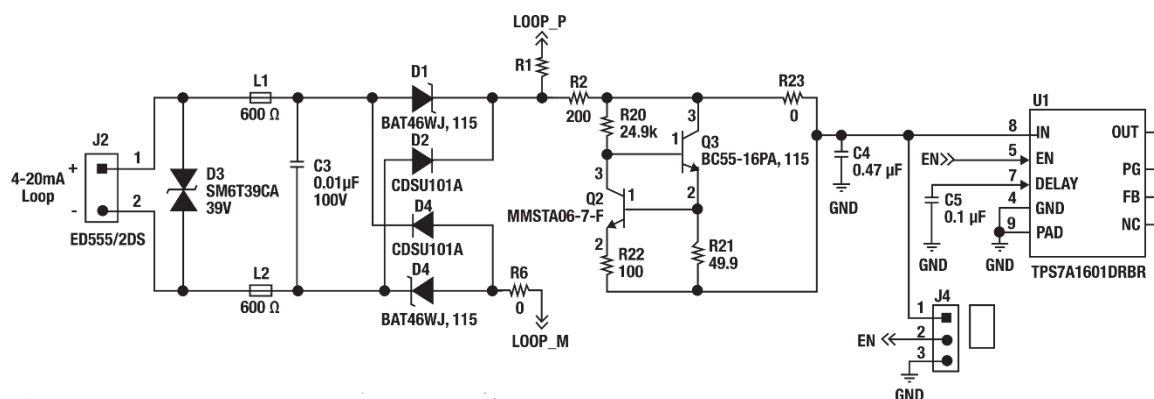


图 14 4-20mA 电流回路变送器原理图

图 14 是参考设计的原理图，该设计目前使用 SM6T39CA 进行浪涌保护。在这个传统 TVS 二极管的输出端，有一个附加二极管和一个 BJT，以保护 LDO 不受更高电压的影响。TVS 下游的受保护部件包括 LDO (TPS7A1601-U1)、由 4-20mA 控制的 BJT、数模转换器 (DAC)、反向极性保护二极管和输入电容器 (C3)。这些元件的额定值都必须高于浪涌保护 TVS 二极管的最大箝位电压，以防止系统损坏。对于 $I_{PP} = 35A\ 8/20\mu s$ 的浪涌事件，SM6T39CA 的箝位电压预计约为 50V。在相同的应用中，TVS3300 的箝位电压为 38V，可以实现更小、更便宜的系统解决方案。

10. 设计实例 3——小型系统设计

尽管小尺寸系统的趋势对于手机或可穿戴设备等个人电子产品来说并不新鲜，但越来越多的工业和汽车系统也在推动更小尺寸的解决方案。工业网络和过程控制系统使用的传感器和现场变送器可能比铅笔还小。这种集成度迫使设计人员将更多的电路压缩到更小的空间内。传统的分立 TVS 二极管采用 12-19 平方毫米的工业标准封装（如 SMA 或 SMB 封装）。TI Flat-Clamp 系列的有源电路实现了在更小的空间内实现信号线浪涌保护的能力。

例如，TI TVS3300 采用 1.1mm x 1.1mm 晶圆芯片级 (WCSP) 封装，可支持 1.3kW 的 PPP，占用空间比传统 TVS 二极管的 SMA 封装小 90%。TI TVS3300 还采用 2mm x 2mm 小外形无引线 (SON) 封装，可支持 1.3kW 的 PPP，占用空间比分立 TVS 二极管常用的典型 SMA 封装小近 70%。这对于空间非常有限的系统（如工业传感器和变送器）来说是一个巨大的优势。

图 15 显示了一个典型的工业传感器。可以看到，输入端的两个传统 TVS 二极管占据了系统电路板的大部分空间。行业标准的 SMA 封装占用 12.5 平方毫米的电路板空间，而较大的 SMB 封装将占用多达 19.1 平方毫米的电路板空间。

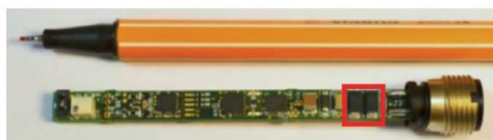


图 15 传感器发射器参考设计板

采用小尺寸扁平钳型二极管可节省电路板空间，使浪涌保护器更靠近连接器，这也有助于减少电路中潜在的电磁干扰（EMI）（图 16）。

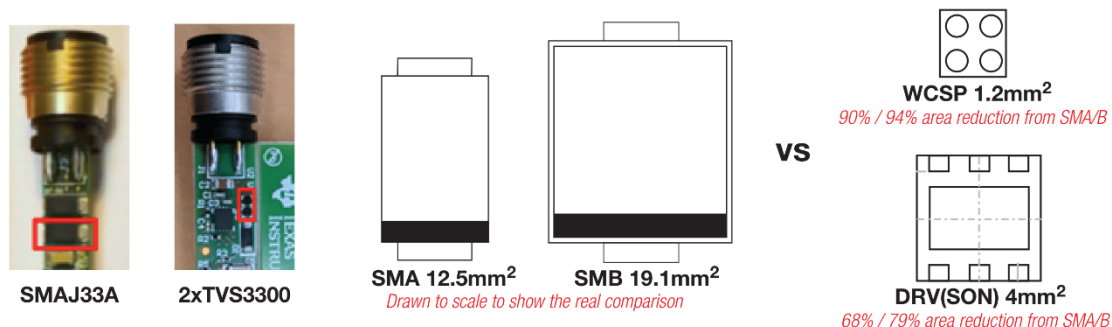


图 16 采用 SMA 和 SMB 封装的传统 TVS 二极管与为精密浪涌钳位器件提供的 TI 封装之间的元件基底面尺寸比较

11. 总结

TI Flat-Clamp 系列保护二极管为设计人员提供了优化系统电压、尺寸和成本的新选择，同时不会降低浪涌抗扰度。该技术能够消散浪涌瞬态，同时提供精确、平坦且与温度无关的箝位电压，最大限度地减少受保护系统的残余电压。这使得受保护下游元件的电压容限预算更为严格，从而节省了大量空间和成本。此外，由于该保护解决方案的尺寸仅为传统 TVS 二极管的一小部分，电容和漏电流更小，因此可以实现外形尺寸更小的新应用。

12. 译者

译者

周始勇/Joe Zhou[zhou_shiyong@163.com]

个人博客[[github: zhoushiyong010718](https://github.com/zhoushiyong010718)]

耐星科技有限公司 助理工程师

嵌入式硬件爱好者

