

How to select a Surge Diode 译本

作者: Alec Forbes

译者: 周始勇

1. 译者序

本文翻译来自 TI 的 *Application Report*: 《How to select a Surge Diode》。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。

<i>How to select a Surge Diode 译本</i>	1
1. 译者序	1
2. ABSTRACT	1
3. 瞬态抑制元件类型	2
4. TVS 二极管规格.....	3
VRWM	4
VBR	4
IPP	4
RDYN 和 VCLAMP	5
极性	5
ILEAK 和电容.....	6
5. 示例: 为 PLC 4/20 mA 输入选择 TVS.....	6
VRWM	6
VBR	6
RDYN 和 VCLAMP	6
IPP	7
极性	7
ILEAK 和电容.....	7
最后的选择	8
6. 总计	8
7. Reference	8
8. 译者	8

2. ABSTRACT

对于恶劣工业环境中的系统, 系统保护最重要的部分之一是输入 TVS 二极管的选型。输入 TVS 二极管用于保护易损系统输入免受附近机械、雷击或电涌引起的瞬态尖峰的影响。IEC 61000-4-5 对这些尖峰进行了建模和规范, 该标准规定了系统必须满足的保护要求, 以确保系统在受到这些瞬态影响时不会发生故障。然而, 通过这些标准并非易事, 特别是对于不熟悉保护二极管和规格的设计师而言。本文档将介绍 TVS 二极管, 将其与其他瞬态保护解决方案进行比较, 讨论一些关键规格, 然后提供一个系统示例。了解这些规格后, 设计师就能对如何选择 TVS 二极管进行浪涌保护有更扎实的基础理解, 从而构建更强大的系统。

3. 瞬态抑制元件类型

虽然有许多被动和主动元件能够保护系统输入端的浪涌，但最常见的是使用瞬态电压抑制(TVS)来耗散故障能量，分流浪涌电流，同时将浪涌电压钳制到安全水平。除了 TVS 二极管，还可以使用金属氧化物压敏电阻(MOV)、气体放电管(GDT)、火花间隙甚至 RC 滤波器来实现分流，但每种方法都有缺点，如表格 1 所示。虽然 TVS 二极管不是完美的解决方案，但它们通常是 2A-250A 浪涌电流的最有效选择。GDT、MOV 和晶闸管通常用于更高水平的浪涌耗散，而滤波器则适用于较低水平的浪涌耗散。

表格 1 瞬变抑制元件类型

浪涌保护装置类型	描述	优势	劣势
气体放电管(GDT)	在电压峰值期间，两块板之间的气体被电离以携带电流	功率耗散密度最高，电容极低	长时间开启，光敏特性，占地面积大，电压调节性能差
金属氧化物压敏电阻(MOV)	金属颗粒的质量，产生二极管式击穿	高功率耗散密度	电压调节性能差，使用寿命有限，故障机制灾难性，散热性能差
晶闸管	二极管式行为，但具有突跳特性，以限制功率耗散	高功率耗散密度，源于回弹特性	可能发生闩锁故障
瞬态电压抑制二极管(TVS)	雪崩击穿二极管行为，将电流分流至地面	功率耗散密度适中、使用寿命长、电压调节性能良好	在高电流(>250A)耗散下不经济
滤波器	被动元件，用于过滤高频瞬变	最经济的解决方案	功率耗散密度极低

从根本上说，TVS 二极管在系统输入端的目的是在正常工作期间不产生影响，然后在瞬态过压期间立即将电流传导并分流到地面，使系统电压保持在安全、低水平。实际上，TVS 二极管总是存在非理想特性，需要考虑这些特性，以确保提供可靠的保护，同时将对系统的影响降到最低。这些非理想特性与 ESD 二极管类似，但由于浪涌二极管对系统可靠性更为关键，因此在选择时需要格外注意。

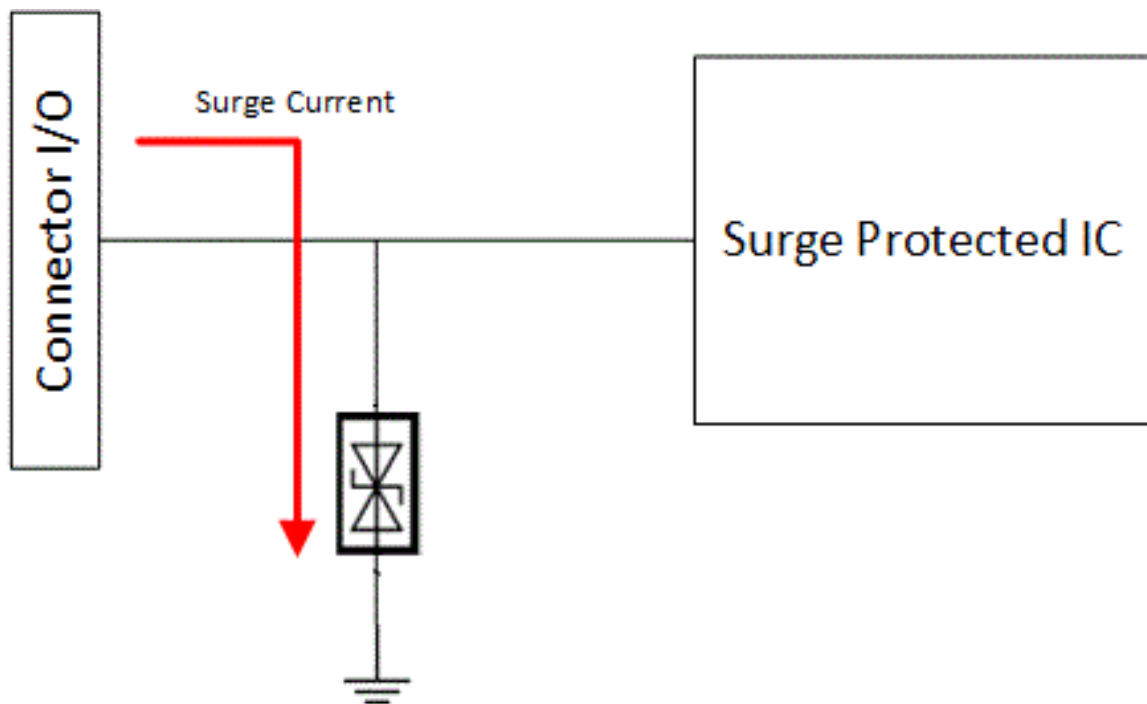


图 1.TVS 二极管的特性

4. TVS 二极管规格

阅读 TVS 二极管数据表时，一些关键规格可能会让没有经验的设计师感到困惑。表格 2 和图 2 重点介绍了这些关键参数，本节剩余部分将更深入地讨论这些参数对于保护设计的重要性。

表格 2.关键参数

参数	描述
V_{RWM}	TVS 漏电流极低时的施加电压，通常为个位数纳安培。
V_{BR}	TVS 漏电流为 1 mA 并开始分流电流时的施加电压。
I_{PP}	TVS 二极管在失效前可承受的指定波形最大电流。
V_{CLAMP}	TVS 二极管在瞬态电流作用下将调节到的电压。
R_{DYN}	TVS 二极管中的电阻，当其暴露于瞬态电流时，会导致 V_{CLAMP} 上升。
Polarity	TVS 二极管能否承受 $+/-V_{CLAMP}$ 或仅承受正极性 V_{CLAMP} ，而不会出现漏电流。
I_{LEAK}	施加电压时(通常为 V_{RWM})的漏电流。
Capacitance	TVS 二极管中的寄生电容会影响系统运行。

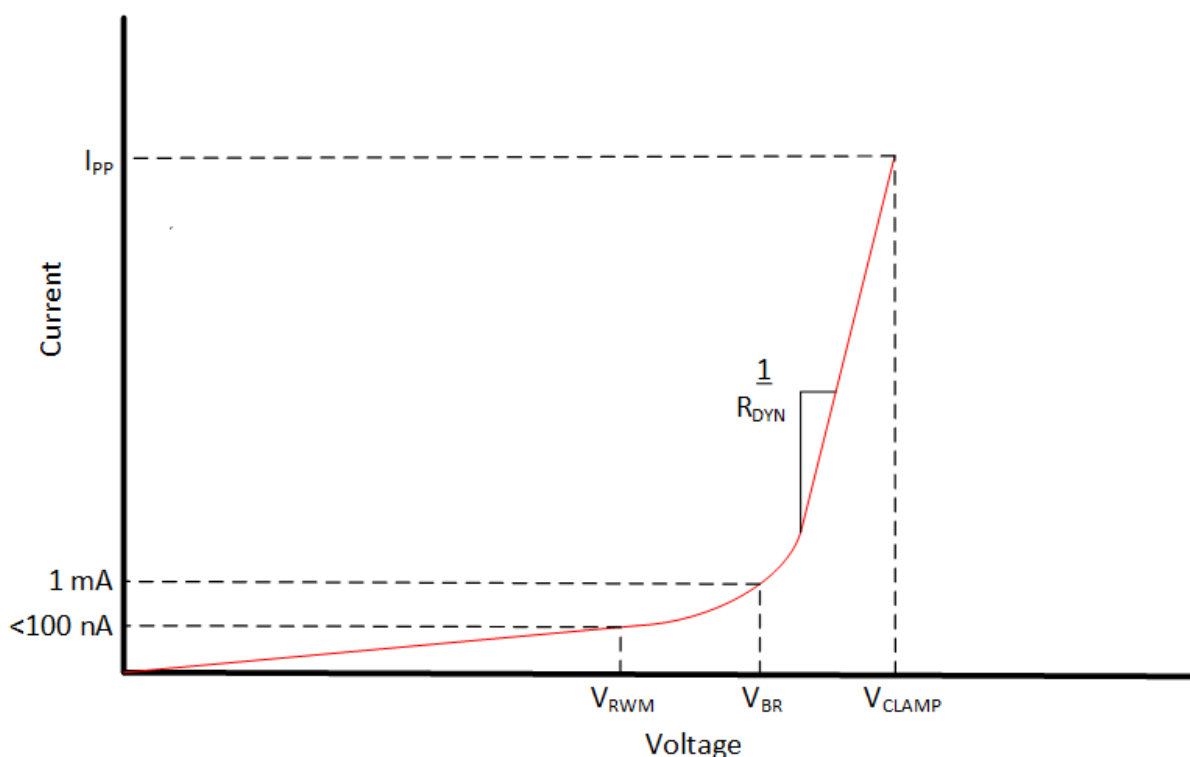


图 2.TVS 二极管安负特性

V_{RWM}

反向工作最大电压(V_{RWM})是指施加在 TVS 二极管上的电压，确保二极管不会因工艺或温度过高而传导大量电流。“大量电流”的定义取决于 TVS 制造商，但通常小于 100 nA。 V_{RWM} 规格使设计人员能够选择一种在所有工作条件下漏电流最小的器件。在设计中，应选择 V_{RWM} 以确保其高于预期的最大工作电压。如果施加的电压高于 V_{RWM} ，则二极管漏电流可能会显著增加。例如，如果受保护线路在 5 V 额定电压下运行，最大变化可达 7 V，则应确保 V_{RWM} 为 7 V 或更高。

V_{BR}

击穿电压(V_{BR})是指 TVS 二极管开始传导电流时的电压，通常定义为 1 mA 的漏电流。 V_{BR} 定义了二极管曲线上漏电流开始呈指数级增长的拐点，通常被称为二极管“开启”。与 V_{RWM} 不同， V_{BR} 是一个直流值，在工艺和温度变化下会有显著变化，因此需要定义一个最小值和一个最大值。

一个常见的错误是，人们认为既然 V_{BR} 是二极管开始显著传导的电压，那么低于 V_{BR} 的额定系统电压就能确保低漏电。事实并非如此，因为 V_{BR} 会发生变化，并且在 1 mA 时具有相对较高的漏电。要确保系统漏电非常低，应确保额定电压低于 V_{RWM} ，而不是 V_{BR} 。

V_{BR} 始终高于 V_{RWM} ，因此当二极管具有正确设置的 V_{RWM} 时， V_{BR} 不会导致严重漏电。在浪涌事件中， V_{BR} 是二极管开始钳制的电压，因此，在比较两个具有相同 R_{DYN} (将在下一节讨论的规格)的 TVS 时，较低的 V_{BR} 意味着较低的钳制和更好的保护。

I_{PP}

峰值脉冲电流(I_{PP})是指在二极管本身过热和失效之前可以分流的最大浪涌电流。回想一下，浪涌事件可以用最大电流来定义—— I_{PP} 是一个临界值，因为它决定了给定的二极管是否可以吸收最大电流而不会造成任何损坏。确保 TVS 二极管的 I_{PP} 大于峰值浪涌电流，这样就不会发生 TVS 故障。请注意，TVS 二极管因电流过大而非电压过高而失效，因此在选择 TVS 二极管 I_{PP} 时，浪涌电流的大小决定了要求。选择 TVS 二极管时，请务必考虑 I_{PP} 的温度降额，因为许多 TVS 二极管在温度升高到105°C或

125°C 时，其额定值会大幅降低(最高可达其额定值的 80%)。所有 TVS 二极管的数据表都应包含一个显示峰值功率耗散随温度变化的图表，可用于计算 I_{PP} 。

TVS 二极管可承受的 I_{PP} 取决于脉冲的长度，因此总是相对于波形来定义。在 TVS 数据表中，规格几乎总是相对于 1 ms 脉冲长度（IEC61643-123 中定义的 10/1000 μs 波形）来定义的，但有些数据表也提供了参考 IEC 61000-4-5 8/20 μs 波形的规格。参考波形脉冲越短， I_{PP} 就越高，因此必须确保 I_{PP} 值参考的波形与测试条件相同。如果数据表没有定义与特定波形相关的 I_{PP} ，通常会有一条数据表曲线显示脉冲长度的峰值脉冲功率（计算公式为 $I_{PP} \times V_{CLAMP}$ ），这样就可以大致确定给定脉冲长度的 I_{PP} ；但这并不是一种精确的方法。建议的最佳做法是使用 I_{PP} 以精确波形为参照的二极管。

R_{DYN} 和 V_{CLAMP}

之所以将动态电阻 (R_{DYN}) 和箝位电压 (V_{CLAMP}) 放在一起讨论，是因为 R_{DYN} 是二极管的固有特性，而 V_{CLAMP} 则是系统中的重要规格。所有二极管都有一定的内阻，定义为 R_{DYN} 。当电流流过二极管时，导线上测得的电压定义为 V_{CLAMP} ，其计算公式为 $V_{CLAMP} = V_{BR} + I_{SURGE} \times R_{DYN}$ 。

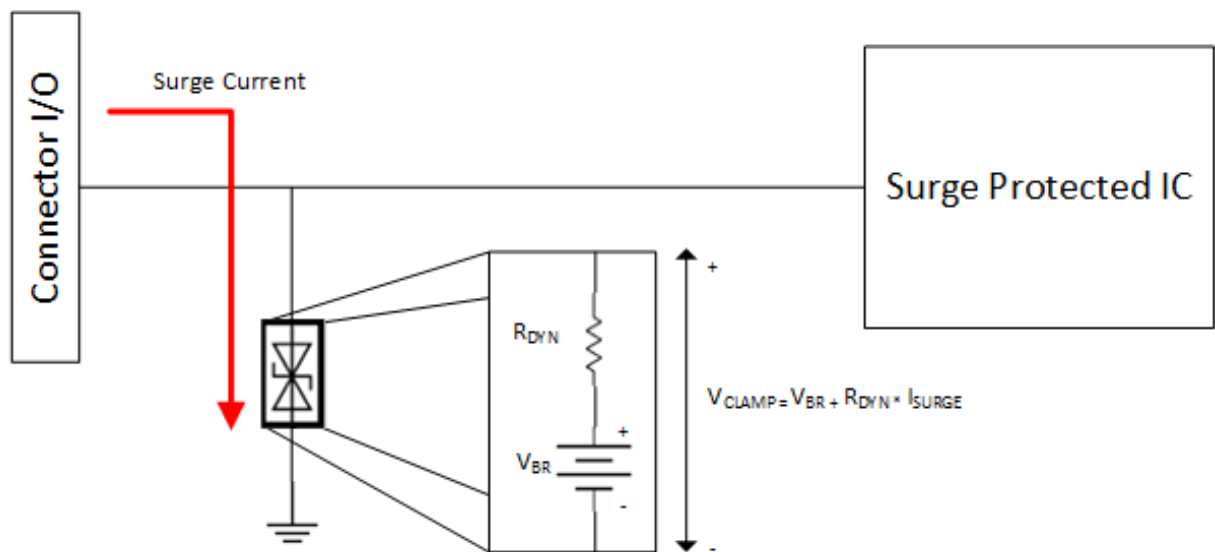


图 3. TVS 二极管模型

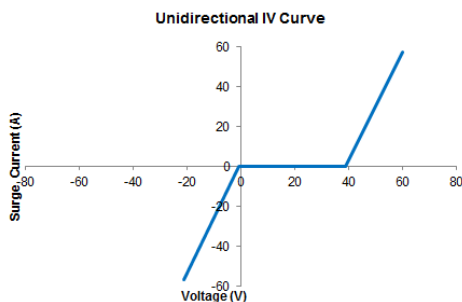
V_{CLAMP} 决定了系统在浪涌期间所承受的电压—— V_{CLAMP} 越低，受保护系统因电气过应力 (EOS) 而发生故障的几率就越小。在一个系统中，如果 V_{CLAMP} 超过了输入电路系统的绝对最大电压，即使 TVS 二极管在分流，也会发生故障。高效的保护设计意味着要选择 V_{CLAMP} 足够低的 TVS 二极管，这样就不需要高耐压元件，而高耐压元件通常成本更高、性能更差。由于 V_{CLAMP} 主要由 R_{DYN} 决定，这通常意味着要选择 R_{DYN} 较低的二极管。

在 TVS 二极管的数据表中， V_{CLAMP} 总是相对于 I_{SURGE} 和参考波形（类似于 I_{PP} ）来指定的。请注意将数据表中的测试条件与您自己的测试条件相匹配，因为 V_{CLAMP} 会因测试条件的不同而有很大差异。TVS 数据表有时会指定 R_{DYN} ，但并非总是如此。如果没有指定，则可以使用公式 $R_{DYN} = (V_{CLAMP} - V_{BR}) / I_{SURGE}$ 根据给定的 V_{CLAMP} 大致计算出 R_{DYN} 。计算出 R_{DYN} 后，您就可以计算出任何测试电流的 V_{CLAMP} ，前提是要参考相同的波形。如果需要参照不同的波形计算 R_{DYN} 或 V_{CLAMP} ，则无法轻松计算这些值。在这种情况下，最好的做法是找到一个能根据给定波形指定这些量的二极管。

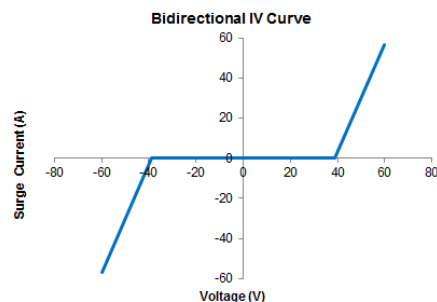
传统 TVS 二极管的箝位性能通常很差。为了获得精确的箝位性能，TI 的扁平钳位浪涌二极管具有非常低的 R_{DYN} ，从而导致较低的箝位电压。如需了解更多信息，请参阅“[用于高效系统保护的扁平钳型浪涌保护技术](#)”白皮书。

极性

TVS 二极管有单向和双向两种配置。从器件的 I/V 曲线可以看出这种差异。



Used in applications where the where voltage is always positive. Provides more robust protection from negative surge pulses



Used in applications where the where voltage can be positive or negative. Provides more flexibility for input voltages

正如 I/V 曲线所示，单向 TVS 二极管的击穿电压为负，刚好低于 0 V，而双向 TVS 二极管的击穿电压在正负方向之间对称。这意味着，如果信号名义上始终为正，则可以使用单向 TVS 二极管，但如果信号名义上可能为负，则需要使用双向 TVS 二极管。这样做的好处是，由于 V_{BR} 较低，单向 TVS 二极管的负 V_{CLAMP} 比双向 TVS 二极管的 V_{CLAMP} 要好得多。请注意系统的工作范围，以选择合适的二极管极性。

I_{LEAK} 和电容

TVS 二极管与所有模拟元件一样，具有漏电流 (I_{LEAK}) 和寄生电容。理想的二极管在低于 V_{RWM} 时不会对系统产生影响，但实际 TVS 二极管的漏电流和电容可能出奇地高，如果不加以考虑，就会对系统产生影响。特别是对于低电压 TVS 二极管，漏电流可升至接近 1 mA，电容通常超过 1000 pF。对于某些系统来说，这并不重要，但对于其他系统来说，这可能是至关重要的。例如，在电池供电系统中，始终保持接通的 1 mA 漏电流会消耗大量电能，而对于精确输入的保护，高电容则会降低系统信噪比。在设计保护级时，应确保考虑到这些寄生元件，并确保它们是可接受的。

了解这些规格后，设计人员就能为系统快速选择合适的 TVS 二极管，从而确保可靠运行并将对系统的影响降至最低。

5. 示例： 为 PLC 4/20 mA 输入选择 TVS

让我们以选择 PLC 4/20 mA 模拟输出的 TVS 为例进行说明。根据 IEC 60601 标准，PLC 输入需要防止通过 $40\ \Omega$ 外部耦合电阻间接耦合的 $\pm 1\text{ kV}$ IEC 61000-4-5 8/20 μs 浪涌。这意味着必须防止的浪涌电流为 $1000\text{ V} / (40\ \Omega + 2\ \Omega) = 23.9\text{ A}$ 的浪涌电流。预计系统将暴露在 85°C 的温度下，受保护 IC 的输入容差为 60 V。让我们根据上述规格，选择一个能够可靠保护此类输入的 TVS 二极管。

V_{RWM}

通常情况下，4/20 mA 输入端子的标称电压为 24 V，最大直流电压容差为 33 V。为实现这一操作，所选 TVS 二极管的 V_{RWM} 必须达到或超过 33 V。满足这一要求的 TVS 二极管有很多选择。让我们来看看具有 33 V V_{RWM} 的几种常见选择：SMAJ33A、SMBJ33A 和 TI TVS3300。

V_{BR}

一旦选择了 V_{RWM} ， V_{BR} 将始终比 V_{RWM} 高几伏。上述所有 TVS 二极管的 V_{BR} 都差不多，大约在 36 V 至 38 V 之间。

R_{DYN} 和 V_{CLAMP}

确定这一步需要了解输入电路的绝对最大电压容限。如果我们使用额定电压为 60 V 的输入电路，则必须确保 $V_{CLAMP} < 60\text{ V}$ ，以可靠地保护该输入。但是，许多 TVS 二极管不会指定 8/20 μs 波形的

R_{DYN} 和 V_{CLAMP} 数字。在这种情况下，必须进行假设或测试。这不是设计系统的理想方法，为了简化设计，TI 将始终指定 8/20 μ s 波形的值。SMAJ33A 或 SMBJ33A 数据表中是否包含这些数字取决于供应商，但总是可以通过测试或外推法来估算。

SMAJ33A 的 R_{DYN} 为 884 m Ω ，因此标称 $V_{CLAMP} = 38.6 V + (24 A \times 0.884 \Omega) = 59.8 V$ 。这是标称箝位，非常接近箝位电压要求，但我们希望确保在温度过高时不会出现浪涌问题。数据表没有说明温度下的箝位或击穿电压，但提供了一个温度系数，我们可以用它来计算。温度系数为 $10 \times 10^{-4}/^{\circ}C$ ，因此我们可以计算出 85 $^{\circ}C$ 时的 $V_{CLAMP} = 25^{\circ}C$ 时的 $V_{CLAMP} \times (1 + 10 \times 10^{-4}/^{\circ}C \times (TJ - TA)) = 59.8 V + (1 + 10 \times 10^{-4}/^{\circ}C \times (85^{\circ}C - 25^{\circ}C)) = 63.4 V$ 。这个箝位电压违反了输入电路 60 V 的绝对最大值。

在这种情况下，最好选择 R_{DYN} 更低的 TVS 器件，这样 V_{CLAMP} 也会更低。SMBJ33A 的 R_{DYN} 为 0.504 Ω ，标称 V_{CLAMP} 为 51.1 V，最大 V_{CLAMP} 为 54.2 V，可以满足要求。

如果输入电路需要更低的电压容差（40 V 或更低），TI 的扁平钳型器件具有超低 R_{DYN} ，可实现更严格的电压调节。例如，TVS3300 的最大 R_{DYN} 为 60 m Ω ，最大箝位电压为 39 V，比 SMBJ33A 二极管低 15 V，从而大大提高了系统灵活性。扁平箝位器件还具有更好的温度调节能力，因此在温度变化导致 SMA 或 SMB 型 TVS 二极管失效的情况下，扁平箝位器件仍能保持性能。TI 在[高温环境下的 TVS 浪涌保护](#)应用说明中对此进行了进一步探讨。

I_{PP}

下一步是确保 TVS 二极管能够承受预期的测试浪涌。在本例中，浪涌电流 I_{PP} 为 24 A，因此二极管必须能够在高温下承受 24 A 的电流脉冲。

SMAJ33A 数据表标称可以承受 400 W 10/1000 μ s 的瞬态电流，根据数据表曲线，我们可以将其转换为 2300 W 8/20 μ s 的功率。温度下的功率降额因制造商而异，但在 85 $^{\circ}C$ 时，根据数据表曲线，器件通常会降额至额定功率的 50% 左右。这意味着该器件可以安全地吸收 $2300 W \times 50\% = 1150 W$ 。所需的功率耗散为 $IPP \times V_{CLAMP} = 24 A \times 63.4 V = 1543 W$ 。

对 SMBJ33A 进行同样的分析，可得到 4000 W 的 8/20 μ s 功率，在温度下降至 2000 W，要求 $IPP \times V_{CLAMP} = 24 A \times 54.2 V = 1299 W$ 。

第三种方案是使用德州仪器的 TVS3300。TVS3300 数据表保证了在此测试情况下的存活率，甚至还规定了在 125 $^{\circ}C$ 时 4000 次 30 A 浪涌冲击，因此不存在故障风险，也不需要计算，但为了完整起见，还是将其包括在内。数据表在曲线中说明了浪涌电流随温度的变化，因此可以看到器件在 85 $^{\circ}C$ 时可以吸收 32 A 的浪涌电流，以 50% 的余量通过 24 A 的测试。在计算能量时，可以看到由于器件的 R_{DYN} 较低，因此在相同脉冲下所需的功率耗散较小，如 $IPP \times V_{CLAMP} = 24 A \times 39 V = 936 W$ 。这相当于 SMAJ33A 二极管所需功率的 60%，并且通过减少通过系统的电流来提高可靠性。

极性

下一步是决定需要单向还是双向二极管。这取决于系统——名义上，信号应始终高于零，因此如果没有其他要求，可以使用单向 TVS 二极管。但是，如果系统需要防止错误接线，则必须使用双向 TVS。大多数 TVS 系列都包括单向和双向选项。

I_{LEAK} 和电容

漏电和电容预算也取决于系统。在这种情况下，SMAJ33A、SMBJ33A 和 TVS3300 在 100 pF 至 200 pF 时的电容值相似。不过，SMAJ33A 和 SMBJ33A 在 25 $^{\circ}C$ 时的漏电流为 1 μ A，而 TVS3300 在 25 $^{\circ}C$ 时的漏电流要低得多，小于 30 nA。

如果需要低漏电流解决方案，TVS3300 是更好的选择。由于没有高速信号，本系统可以接受任何器件的电容，但要注意某些 TVS 二极管的电容极高，因此必须检查这一步。漏电情况也是如此，低电压 TVS 二极管的漏电电流通常高于 1 mA，这会对系统的功率预算造成损害。

最后的选择

通过上述分析，我们了解到在此测试案例中，SMAJ33A 并不适合可靠地保护输入。如果输入耐压为 60 V，SMBJ33A 或 TVS3300 都能提供保护，但如果输入耐压较低，TVS3300 则是更好的选择。不过，要获得最可靠的保护，TVS3300 可提供最低的箝位电压和最低的功率耗散，同时仍具有最低的漏电流和最小的封装。要获得精确可靠的保护，TVS3300 是最佳选择。

6. 总计

确保产品坚固耐用是设计人员要完成的最关键也是最困难的任务之一。保护中最重要的部分是确保防止瞬态浪涌，因为瞬态浪涌会破坏设备并造成故障，从而导致更高的退货率和客户不满。虽然浪涌保护看起来很神秘，但只要仔细了解 TVS 规格，就能有效地防范浪涌。

考虑到能量大小、距离和耦合方法，对暴露在高功率瞬态下的风险进行预先评估，可使设计人员预测系统可能出现的浪涌。了解 TVS 二极管的功能、规格含义以及对系统的影响至关重要。通过花时间了解这些步骤，设计人员可以确保设计出坚固耐用的产品，无论在何种恶劣环境下，都能经受住终生运行的考验。

7. Reference

- [1] ESD protection and TVS surge diodes.
- [2] TVS3300.
- [3] TVS3301.
- [4] Flat-Clamp surge protection technology for efficient system protection.
- [5] TVS Surge Protection in High-Temperature Environments.

8. 译者

译者

周始勇/Joe Zhou[zhou_shiyong@163.com]

个人博客[github: zhoushiyong010718]

耐星科技有限公司 助理工程师

嵌入式硬件爱好者

