

John Wallace

摘要

功率 MOSFET 数据表包含带有一系列曲线的安全工作区 (SOA) 图，可确保器件在应用中的电流和电压条件下运行而不会损坏。正确使用 SOA 数据是确保系统可靠运行的关键设计元素。

内容

1 在设计中使用 MOSFET 安全工作区曲线.....	2
2 查看 SOA 图.....	2
3 SOA 很重要的应用.....	3
4 使用数据表 SOA 图.....	4
5 SOA 的温度降额.....	4
6 估算不同脉冲宽度的 SOA.....	5
7 估算非方波的 SOA.....	6
8 总结.....	8
9 参考文献.....	8

插图清单

图 2-1. CSD19536KTT SOA 图.....	2
图 3-1. MOSFET 输出特性.....	3
图 3-2. 开关模式和线性模式工作点.....	3
图 4-1. CSD17570Q5B 安全工作区.....	4
图 6-1. $V_{DS} = 12V$ 时 CSD17570Q5B SOA 电流与脉冲宽度间的关系.....	5
图 7-1. 典型 SOA 测试波形.....	6
图 7-2. 热插拔浪涌示例波形.....	6
图 7-3. SOA 浪涌示例.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 在设计中使用 MOSFET 安全工作区曲线

功率 MOSFET 用于电压和电流应力可能超出其能力、从而导致长期可靠性问题和/或灾难性故障的应用。本文将回顾 MOSFET 数据表中的 SOA 图，并展示如何使用它来确保 FET 在应用中安全运行而不会造成损坏。

2 查看 SOA 图

CSD19536KTT 100V N 沟道 MOSFET 的 SOA 图如图 2-1 所示。如之前的文章[了解 MOSFET 数据表，第 2 部分 - 安全工作区 \(SOA\) 图](#)中所述，SOA 曲线有五个局限性： $R_{DS(on)}$ 、电流、最大功率、热不稳定性和 BV_{DSS} 。请参阅本文，详细了解每个局限性，以及 TI 用于在 MOSFET 数据表中生成 SOA 图的测试方法。

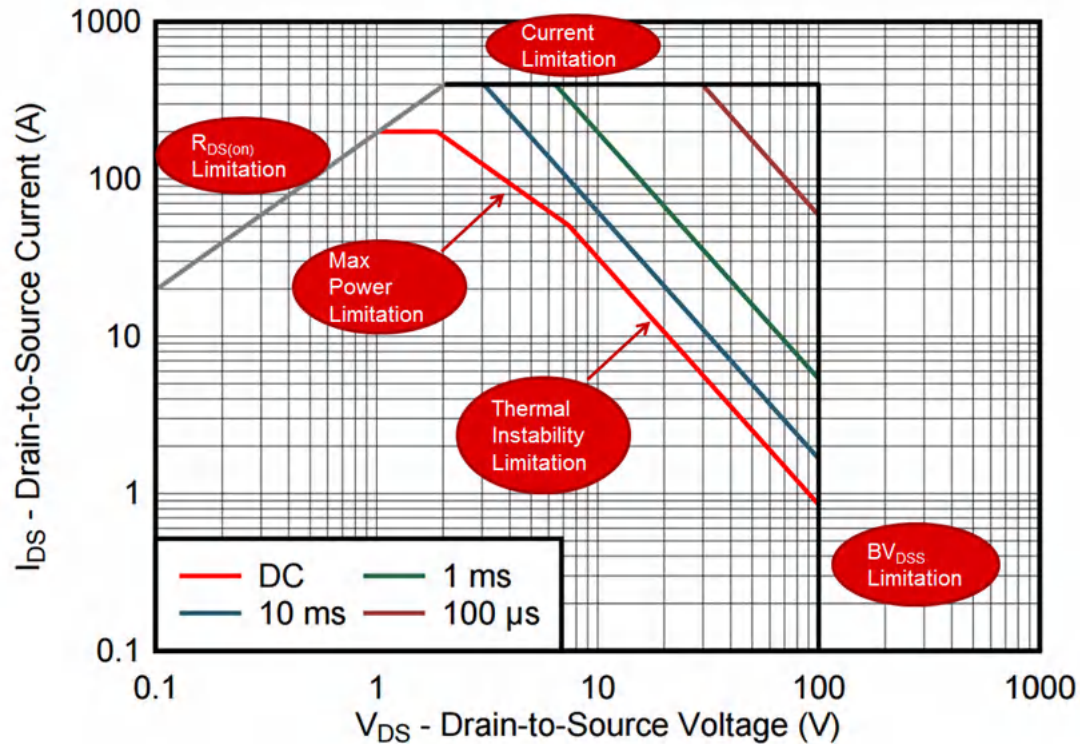


图 2-1. CSD19536KTT SOA 图

3 SOA 很重要的应用

功率 MOSFET 应用广泛，但通常分为两类：开关模式和线性模式。开关模式应用的一些示例包括直流/直流转换器、D 级音频放大器和电机驱动器。用于热插拔、负载开关以及作为线性稳压器旁路元件的浪涌控制是常见的线性模式应用。

首先，快速回顾 MOSFET 输出特性，如图 3-1 所示。此图中所示不同 V_{GS} 值时的 I_{DS} 与 V_{DS} 曲线系列可分为两个区域：一个是线性，其中 $V_{DS} \ll V_{GS} - V_{GS(th)}$ ；另一个是饱和，其中 $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$ 。在线性区域中，输出是欧姆值，增大 V_{DS} 会按比例增加 I_{DS} 。在饱和区域中，输出是平坦或饱和， I_{DS} 只会随着 V_{DS} 的增大而略有增加。

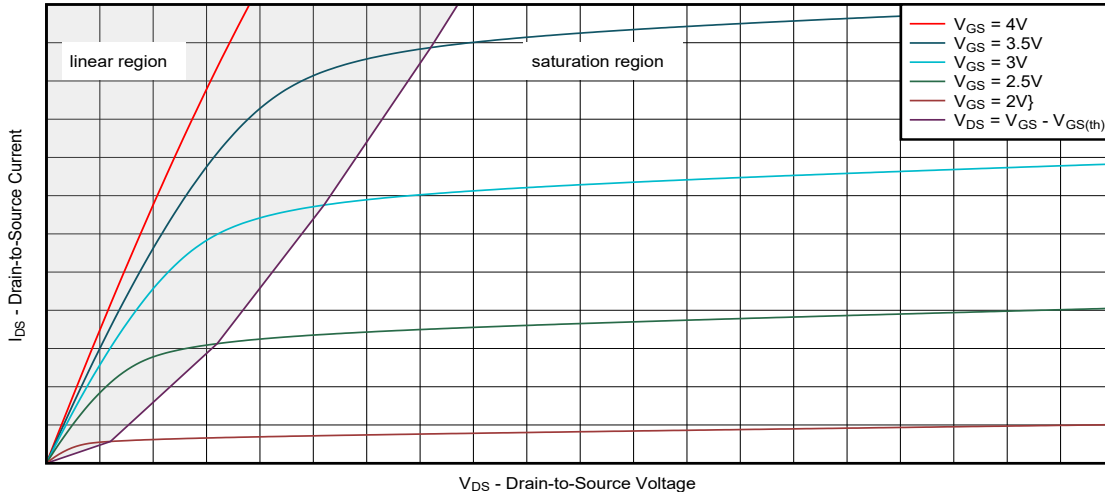


图 3-1. MOSFET 输出特性

图 3-2 展示了开关模式 (蓝色圆圈) 和线性模式 (橙色三角形) 工作点。在开关模式应用中，FET 在关断状态 ($V_{GS} \ll V_{GS(th)}$ 且 $I_{DS} = 0A$) 和线性区域之间转换。在开关转换期间，FET 快速通过饱和区域，如蓝色虚线所示。由于饱和区域的持续时间较短，FET 不会产生过多的功率损耗，因此对 SOA 几乎没什么影响。在线性模式应用中，FET 在饱和区域长时间运行，其中器件两端会有电压，同时会有电流通过器件，导致高功率损耗和结温升高。本文重点介绍了线性模式运行，以及如何使用数据表 SOA 曲线来确保 FET 在安全范围内运行而不会造成损坏。

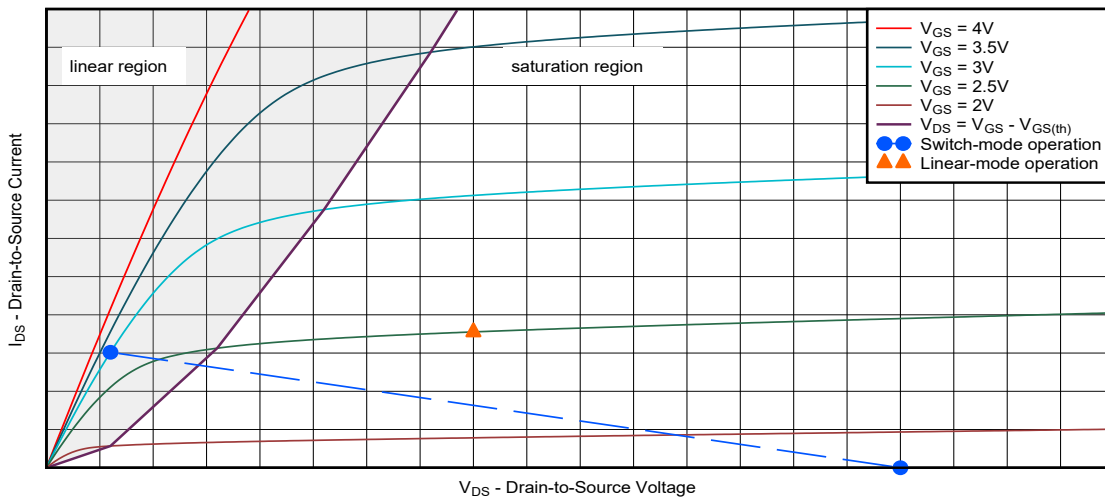


图 3-2. 开关模式和线性模式工作点

4 使用数据表 SOA 图

请考虑这个在通用设计中使用 **CSD17570Q5B** 的简单示例，该设计在故障条件下必须支持 12V 电压并持续 10ms。在这些条件下，FET 可以安全传导多少电流？使用图 4-1 中数据表里的 SOA 图，从 x 轴上的 $V_{DS} = 12V$ 到与 10ms SOA 线相交处绘制一条垂直线。接下来，从交点到 y 轴绘制一条水平线。这对应于 $I_{DS} = 7.3A$ 。这表明 CSD17570Q5B 可在 $V_{DS} = 12V$ 且 $I_{DS} = 7.3A$ 的条件下安全运行 10ms (25°C 时)。

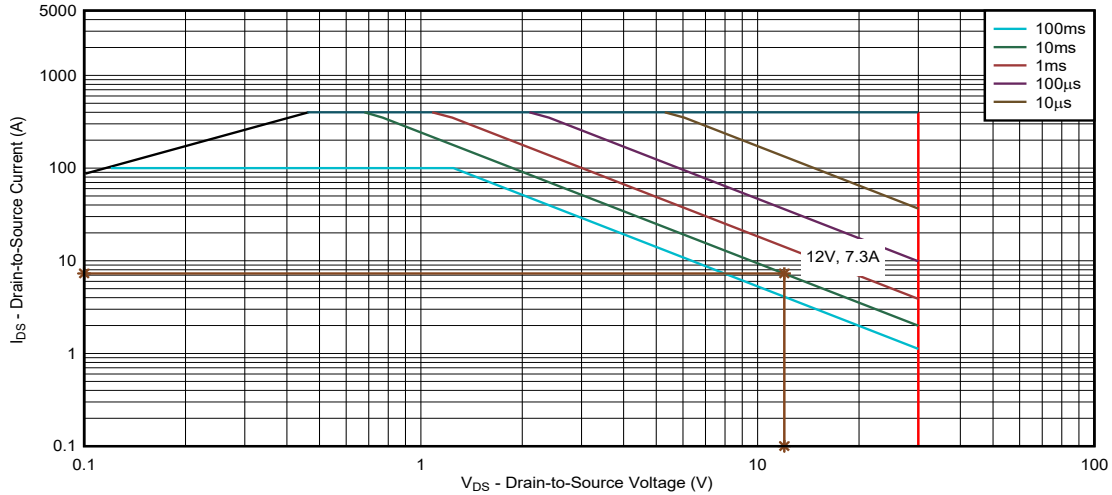


图 4-1. CSD17570Q5B 安全工作区

5 SOA 的温度降额

在外壳温度升高的情况下，SOA 电流能力会降低多少？较简单的方法是线性降额系数，如下所示：

$$I_{DS}(T_C) = I_{DS}(25^\circ\text{C}) \times \frac{T_{J(\text{max})} - T_C}{T_{J(\text{max})} - 25^\circ\text{C}} \quad (1)$$

在上一个示例的基础上，如果外壳温度升高至 $T_C = 100^\circ\text{C}$ ，安全工作电流是多少？CSD17570Q5B 数据表中指定的最高结温为 $T_{J(\text{max})} = 150^\circ\text{C}$ ，安全工作电流的计算公式如下：

$$I_{DS}(100^\circ\text{C}) = 7.3 \text{ A} \times \frac{150^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}}{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}} = 2.9 \text{ A} \quad (2)$$

因此，该器件在 $T_C = 100^\circ\text{C}$ 时支持 2.9A 电流，并且脉冲宽度为 10ms， $V_{DS} = 12V$ 。

6 估算不同脉冲宽度的 SOA

如果脉冲宽度与 SOA 图中显示的脉冲宽度不同，该怎么办？通常，TI MOSFET 数据表中 SOA 曲线的脉冲宽度为十分位数（例如，10 μ s、100 μ s、1ms、10ms、100ms），但应用可能需要介于这些曲线之间的脉冲宽度。图 6-1 展示了 CSD17570Q5B 数据表 SOA 曲线中的 I_{DS} 与 t_{PW} 值的双对数坐标图。

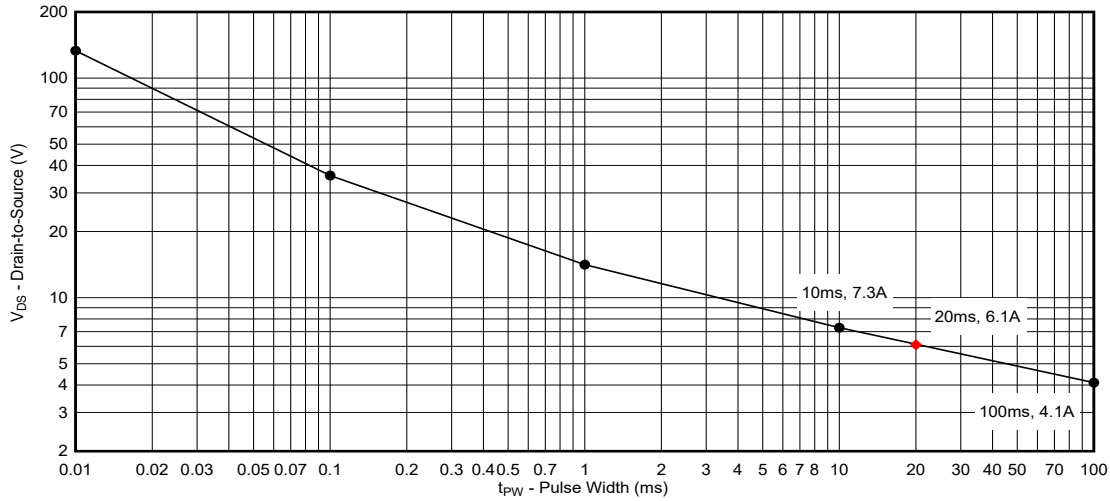


图 6-1. $V_{DS} = 12V$ 时 CSD17570Q5B SOA 电流与脉冲宽度间的关系

如 TI 应用报告 [可靠的热插拔设计](#) 第 2.3.2 节所述，可以使用高于和低于所需脉冲宽度的 SOA 电流来估算不同脉冲宽度下的 SOA 电流能力，如下所示：

$$I_{DS}(t_{PW}) = a \times (t_{PW})^m \quad (3)$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{I_{DS}(t_{PW1})}{I_{DS}(t_{PW2})}\right)}{\ln\left(\frac{t_{PW1}}{t_{PW2}}\right)} \quad (4)$$

$$a = \frac{I_{DS}(t_{PW1})}{(t_{PW1})^m} \quad (5)$$

从原来的例子来看，如果脉冲宽度增加到 20ms，则电流能力会降低，估算如下：

$$I_{DS}(10 \text{ ms}) = 7.3 \text{ A} \quad (6)$$

$$I_{DS}(100 \text{ ms}) = 4.1 \text{ A} \quad (7)$$

$$m = \frac{\ln\left(\frac{7.3 \text{ A}}{4.1 \text{ A}}\right)}{\ln\left(\frac{10 \text{ ms}}{100 \text{ ms}}\right)} = -0.25 \quad (8)$$

$$a = \frac{7.3 \text{ A}}{(10 \text{ ms})^{-0.25}} = 12.9 \quad (9)$$

$$I_{DS}(20 \text{ ms}) = 12.9 \times (20 \text{ ms})^{-0.25} = 6.1 \text{ A} \quad (10)$$

对于 $V_{DS} = 12V$ 时的 20ms 脉冲，能力为 $T_C = 25^\circ\text{C}$ 时 $I_{DS} = 6.1A$ 。 $T_C = 100^\circ\text{C}$ 时，额定值降低至 $I_{DS} = 2.4A$ 。

7 估算非方波的 SOA

如果波形不是方波，该怎么办？TI 使用方波执行 SOA 测试以达到破坏目的，如图 7-1 所示。

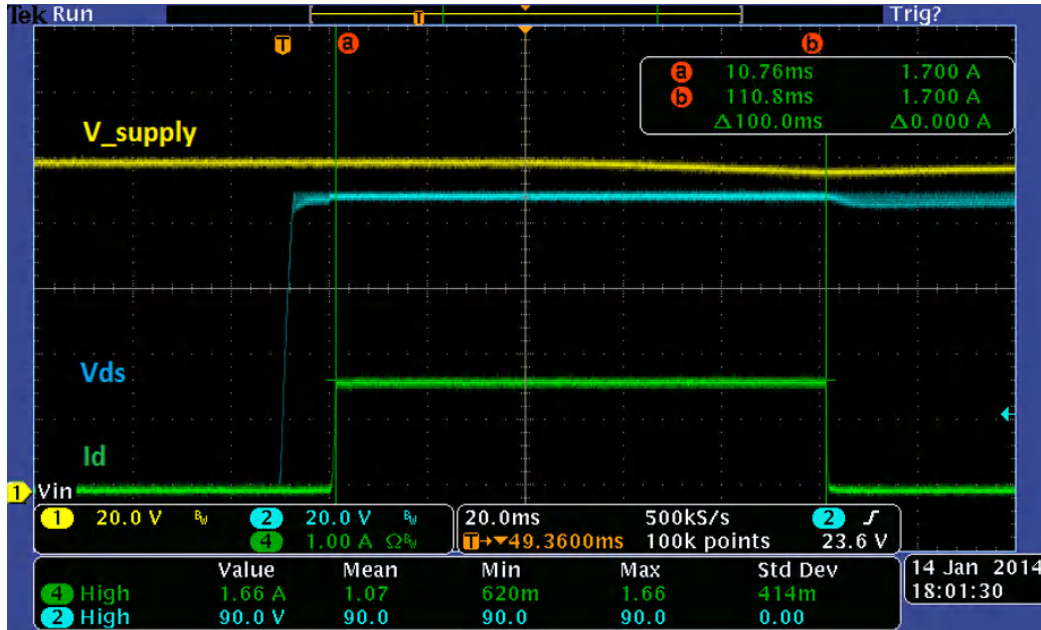


图 7-1. 典型 SOA 测试波形

在上述应用报告 [可靠的热插拔设计](#) 的第 2.3.3 节中，介绍了一种将 MOSFET 应力近似为具有等效能量和脉冲宽度的方波脉冲的方法，如下所示：

$$E_1 = E_2 = \int_0^{t_1} V_{DS}(t) \times i_{DS}(t) dt \quad (11)$$

$$t_2 = \frac{E_2}{P_{MAX}} \quad (12)$$

在许多应用中，其中一种波形是线性斜坡，而另一种波形保持恒定。例如，在浪涌期间的热插拔电路中， V_{DS} 斜降，而 I_{DS} 保持恒定，如图 7-2 所示。

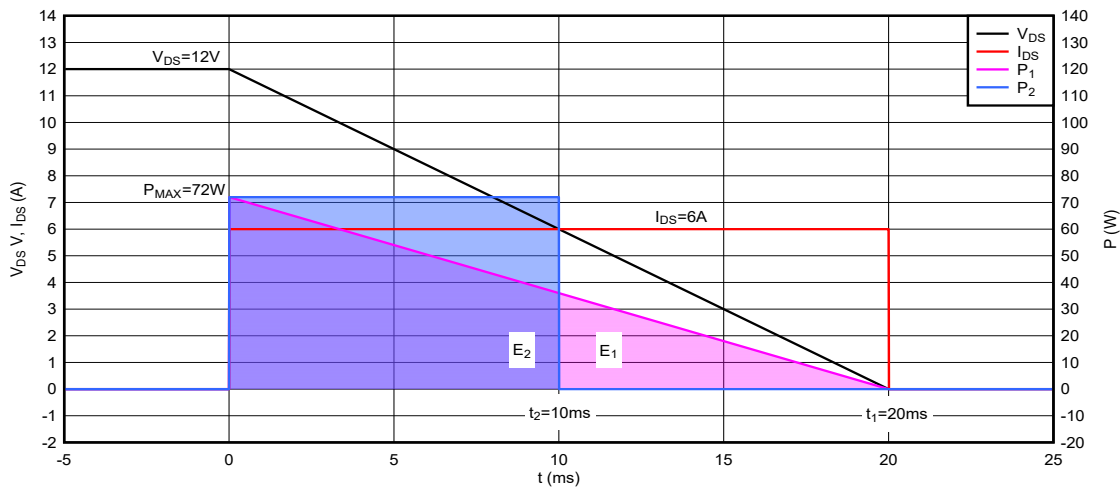


图 7-2. 热插拔浪涌示例波形

在本示例中，假设 V_{DS} 在 $I_{DS} = 6A$ 时在 20ms 内以线性方式从 12V 降至 0V。功率曲线下方粉色阴影区域中的能量 E_1 的计算公式如下：

$$E_1 = \int_0^{t_1} v_{DS}(t) \times i_{DS}(t) dt \quad (13)$$

$$v_{DS}(t) = V_{DS} \times \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \quad (14)$$

$$i_{DS}(t) = I_{DS} \quad (15)$$

$$E_1 = V_{DS} \times I_{DS} \int_0^{t_1} \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) dt = \frac{V_{DS} \times I_{DS} \times t_1}{2} \quad (16)$$

对于等效方波脉冲，假设蓝色阴影区域中的能量相等，并且功率 P_2 与非方波脉冲中的最大功率相同。

$$E_1 = E_2 = P_{MAX} \times t_2 \quad (17)$$

$$t_2 = \frac{E_2}{P_{MAX}} = \frac{\frac{V_{DS} \times I_{DS} \times t_1}{2}}{V_{DS} \times I_{DS}} = \frac{t_1}{2} \quad (18)$$

插入示例中的值：

$$V_{DS} = 12 \text{ V} \quad (19)$$

$$I_{DS} = 6 \text{ A} \quad (20)$$

$$t_1 = 20 \text{ ms} \quad (21)$$

$$P_{MAX} = V_{DS} \times I_{DS} = 12 \text{ V} \times 6 \text{ A} = 72 \text{ W} \quad (22)$$

$$t_2 = \frac{t_1}{2} = \frac{20 \text{ ms}}{2} = 10 \text{ ms} \quad (23)$$

接下来，返回并确认等效方波脉冲 $V_{DS} = 12\text{V}$ 且 $I_{DS} = 6\text{A}$ 低于 CSD17570Q5B SOA 曲线上的 10ms 曲线，如图 7-3 所示。

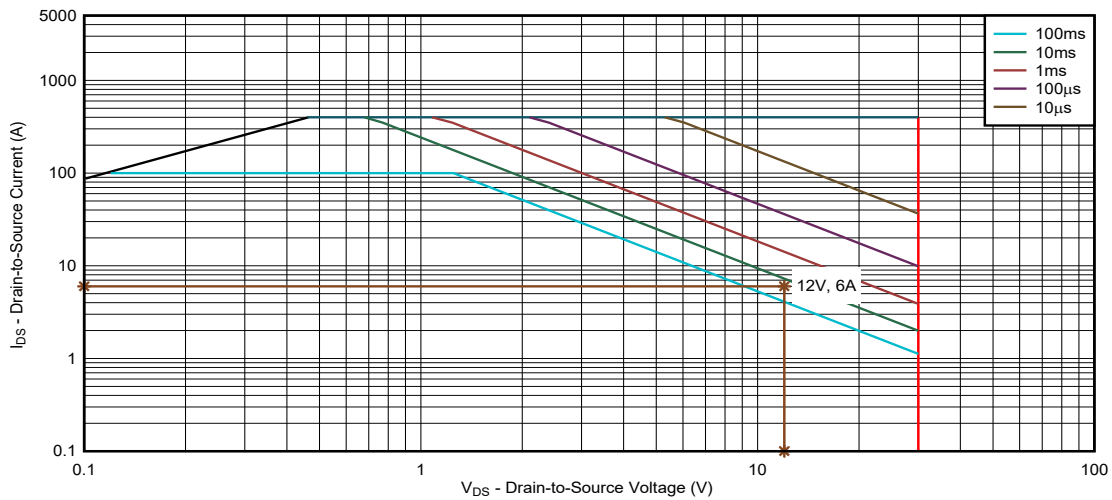


图 7-3. SOA 浪涌示例

这种方法可以扩展用于其他类型的脉冲，包括非单调、指数、恒定功率脉冲等。

8 总结

本应用手册回顾了 MOSFET 数据表 SOA 图，并演示了如何使用该图确保 FET 可在应用中运行而不会造成损坏。里面提供了当条件与数据表中指定条件不同时的实际示例。

9 参考文献

- 德州仪器 (TI), [E2E™ 论坛：了解 MOSFET 数据表，第 2 部分 - 安全工作区 \(SOA\) 图](#)
- 德州仪器 (TI), [可靠的热插拔设计](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [E2E™ 论坛：分立式 FET 与电源块 - 如何为您的设计选择合适的 SOA](#)

重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司