

## 理解功率 MOSFET 数据表参数

---

### 文档信息

信息	内容
关键词	MOSFET。
摘要	本应用笔记描述了功率 MOSFET 数据手册参数的内容

## 目录

<b>1</b>	<b>前言</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>数据手册技术部分</b> .....	<b>3</b>
2.1	产品简介 .....	3
2.2	引脚配置信息 .....	4
2.3	订购信息 .....	4
2.4	限值 .....	4
2.4.1	降额曲线 .....	6
2.4.1.1	连续漏极电流 .....	6
2.4.2	功耗 .....	7
2.4.3	雪崩耐受性 .....	8
2.4.4	安全工作区域 (SOA) .....	9
2.5	热特性 .....	9
2.6	电气特性 .....	10
2.6.1	静态特性 .....	10
2.6.2	动态特性 .....	14
2.6.2.1	栅极电荷 .....	14
2.6.2.2	电容 .....	16
2.6.2.3	开关时间 .....	17
2.6.3	二极管特性 .....	17
2.7	封装尺寸 .....	17
<b>3</b>	<b>附录</b> .....	<b>18</b>
3.1	安全工作区域 (SOA) 曲线 .....	18
311	温度高于 25 °C 时的安全工作区域 .....	20
3.1.1.1	计算示例 .....	20
312	使用 SOA 曲线和热特性的示例 .....	21
3.1.2.1	计算步骤 .....	21
3.1.2.2	针对较高的初始温度进行降额 .....	21

## 1. 前言

本用户手册解释海思迈半导体公司的功率 MOSFET 数据手册中提供的参数和图表。其目标是帮助工程师确定针对特定应用的最佳器件。

必须注意所列参数的使用条件，因为它们会随器件供应商的不同而有所不同。这些条件可能会影响参数值，使得难以在不同供应商之间作出选择。整篇文档以 HSM8N12-55B 数据手册举例说明。HSM8N12-55B 是一款符合汽车工业标准的器件，采用 SOT669 (LFPAK56) 封装，额定电压为 55 V。

该数据手册的布局代表了海思迈功率 MOSFET 数据手册的一般布局情况。

海思迈功率 MOSFET 针对特定应用而设计。例如，当主要考虑开关损耗时，便尽可能减少开关电荷；而主要考虑导通损耗时，则尽可能降低导通电阻。

## 2. 数据手册技术部分

### 2.1 产品简介

本节提供器件概览，为设计人员提供器件适用性的关键信息。简介部分描述了所用的技术，列出了关键特性和示例应用。

快速参考数据表包含目标应用的更多详细信息和关键参数。

**表 1. 快速参考数据**

符号	参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{DS}$	漏极-源极电压	$T_j \geq 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; $T_j \leq 175\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	55	V
$I_D$	漏极电流	$V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; <a href="#">图 1</a>	-	-	61.8	A
$P_{tot}$	总功耗	$T_{mb} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; <a href="#">表 3</a>	-	-	105	W
<b>静态特性</b>						
$R_{DS(on)}$	漏极-源极导通电阻	$V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $I_D = 20\text{ A}$ ; $T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ;	-	8.2	12	m $\Lambda$
<b>动态特性</b>						
$Q_{GD}$	栅极-漏极电荷	$I_D = 20\text{ A}$ ; $V_{DS} = 44\text{ V}$ ; $V_{GS} = 10\text{ V}$ ;	-	14.8	-	nC
<b>雪崩耐受性</b>						
$E_{DS(AL)S}$	非重复漏极-源极雪崩能量	$I_D = 61.8\text{ A}$ ; $V_{sup} \leq 55\text{ V}$ ; $R_{GS} = 50\text{ }\Lambda$ ; $V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $T_{j(init)} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ; 未箝位	-	-	129	mJ

描述参数的一般格式是给出正式符号，然后给出正确参数名称。所有相关条件和信息均在参数名称后列出。参数值和数值的单位在最后两列中输入。所有条目均符合 IEC60747-8 标准。

有关快速参考数据参数的详细描述，参见数据手册的特性部分。以下列表介绍并解释了某些关键问题：

$V_{DS}$  - 器件在关断状态下，保证阻隔的漏极和源极之间的最大电压。本节数据手册涉及最常用的温度范围，而非器件的全温度范围。

$I_D$  - 器件能承受的最大连续电流；底座持续保持在 25 °C，器件完全导通。在表 1 的示例中， $I_D$  要求  $V_{GS}$  为 10 V。

$P_{tot}$  - 器件可消耗的最大连续功率；底座持续保持在 25 °C。

$R_{DS(on)}$  (漏极 - 源极导通电阻) - 在所描述条件下，器件处于导通状态的典型和最大电阻。 $R_{DS(on)}$  会随结温 ( $T_j$ ) 和栅极 - 源极电压 ( $V_{GS}$ ) 的变化而大幅改变。数据手册提供图表，帮助确定不同条件下的  $R_{DS(on)}$  值。

$Q_{GD}$  (栅极 - 漏极电荷) - 与开关损耗有关的重要开关参数；其他重要参数还有  $Q_{GS}$  和  $Q_{G(tot)}$ 。 $Q_{GD}$  与  $R_{DS(on)}$  成反比，因此在  $R_{DS(on)}$  和  $Q_{GD}$  之间作出适当权衡对实现最佳电路性能而言非常关键。

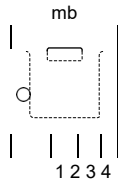
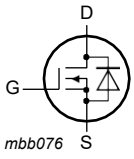
$Q_{OSS}$  (输出电荷) - 一个在现代 MOSFET 中越来越重要的开关参数；其他开关参数已经优化。

$E_{DS(AL)S}$  (非重复漏极 - 源极雪崩能量) - 描述了超过器件额定  $V_{DS}$  值的任意电压峰值或脉冲允许的最大电能。超过该额定值则可能导致器件损坏。该参数描述了通常称为“耐受性”的特性，表示器件耐受过压事件的能力。

## 2.2 引脚配置信息

本节描述了器件的内部连接和一般布局。请注意，符号代表增强型 N 沟道 MOSFET，其源极与本体相连，并且在源极和漏极之间并联一个二极管。并联二极管称为“本体二极管”，为功率 MOSFET 本身所固有。N 沟道功率 MOSFET 在漏极和源极之间存在本体二极管，如表 2 所示。

表 2. 引脚配置

引脚	符号	说明	外形简图	图形符号
1	S	源极		
2	S	源极		
3	S	源极		
4	G	栅极		
mb	D	底座：与漏极相连		

## 2.3 订购信息

订购部分提供如何订购器件的信息。

## 2.4 限值

限值表提供允许用于 MOSFET 的操作条件范围。条件根据“绝对最大额定值体系 (IEC60134)”定义。这些条件以外的工作性能得不到保证，因此建议不要超出这些数值，否则可能导致器件立即产生故障或缩短 MOSFET 使用寿命。给定的雪崩耐受性条件描述了可超出  $V_{DS}$  额定值的限制条件。

若要计算限值如何随温度而改变，则需随所提供的降额曲线一同读取。

HSM8N12-55B 的限值表作为标准限值表的示例供参考，参见[表 3](#)。

**表 3. 限值**

据“绝对最大额定值体系 IEC 60134”

符号	参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{DS}$	漏极-源极电压	$T_j \geq 25\text{ °C}$ ; $T_j \leq 175\text{ °C}$	-	-	55	V
$V_{DGR}$	漏极-栅极电压	$R_{GS} = 20\text{ k}\Omega$	-	-	55	V
$V_{GS}$	栅极-源极电压		-20	-	+20	V
$I_D$	漏极电流	$V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $T_{mb} = 25\text{ °C}$ ; <a href="#">表 1</a> ; <a href="#">图 1</a>	-	-	61.8	A
		$V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $T_{mb} = 100\text{ °C}$ ; <a href="#">表 1</a>	-	-	43.7	A
$I_{DM}$	峰值漏极电流	$V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $T_{mb} = 25\text{ °C}$ ; 脉冲; <a href="#">图 1</a>	-	-	247	A
$P_{tot}$	总功耗	$T_{mb} = 25\text{ °C}$	-	-	105	W
$T_{stg}$	存储温度		-55	-	+175	°C
$T_j$	结点温度		-55	-	+175	°C
<b>源极-漏极二极管</b>						
$I_S$	源极电流	$T_{mb} = 25\text{ °C}$	-	-	61.8	A
$I_{SM}$	峰值源极电流	$t_p \leq 10\text{ }\mu\text{s}$ ; 脉冲; $T_{mb} = 25\text{ °C}$	-	-	247	A
<b>雪崩耐受性</b>						
$E_{DS(AL)S}$	非重复漏极-源极雪崩能量	$I_D = 61.8\text{ A}$ ; $V_{sup} \leq 55\text{ V}$ ; $R_{GS} = 50\text{ }\Omega$ ; $V_{GS} = 10\text{ V}$ ; $T_{j(init)} = 25\text{ °C}$ : 未箝位	-	-	129	mJ
$E_{DS(AL)R}$	重复漏极-源极雪崩能量	参见 <a href="#">图 3</a>	<a href="#">[1][2][3]</a>	-	-	mJ

[1] 单脉冲雪崩额定值受限于 175 °C 的最大结点温度

[2] 重复雪崩额定值受限于 170 °C 的平均结点温度

[3] 更多信息，请参见应用笔记 [AN10273](#)

**$V_{DS}$** （漏极 - 源极电压）- 在指定温度范围内，保证器件在关断状态下阻隔的漏极和源极之间的最大电压。对于 HSM8N12-55B 而言，其温度范围为 +25 °C 至 +175 °C。对于低于 25 °C 下的工作，由于雪崩击穿温度系数为正， $V_{DS}$  额定值下降。本文档的[章节 2.4.1](#) 论述了此内容。

**$V_{GS}$** （栅极 - 源极电压）- 指定器件阻断的栅极和源极之间的最大电压。某些海思迈数据手册指定不同的直流和脉冲  $V_{GS}$  值。此时，在最大  $T_j$  情况下，直流值在器件使用寿命期限内保持恒定的栅极电压值，而较高的脉冲额定值则针对最大指定  $T_j$  下持续时间较短的指定累积脉冲。

栅极氧化层的寿命随温度的增加和/或栅极电压的增加而降低。这表示较低结点温度下引述的  $V_{GS}$  寿命或额定值远高于较高温度下的指定值。比较不同制造商的数据手册数值时，这一点很重要。

**$V_{DGR}$** （漏极 - 栅极电压）通常与  $V_{DS}$  额定值相等。

$I_D$ （漏极电流）- 器件在所述条件下允许承受的最大连续电流。该值可能与封装结构或导致最大  $T_j$  的最大电流有关。因此，它取决于一个假设的底座温度 ( $T_{mb}$ )、器件的热阻 ( $R_{th}$ ) 和最大  $T_j$  下的  $R_{DS(on)}$ 。

请注意，某些供应商引述了“理论”硅片限值，但在特性曲线中标示此理论限值需受封装限制。

$I_{DM}$ （峰值漏极电流）- 针对 10  $\mu s$  或持续时间更短的脉冲，器件所运行承受的最大漏极电流。

$P_{tot}$ （总功耗）表示器件底座为 25 °C 时，所允许的最大连续功耗。功耗在器件达到允许的最大结点温度，同时底座保持在 25 °C 的情况下计算得到。现实中，底座难以在提供 HSM8N12-55B 经计算得到的 105W 功耗的情况下仍保持在该温度值。换言之， $P_{tot}$  表示器件导热能力的优良程度，及其允许的最大结点温度。

请注意，某些其他半导体供应商在器件安装在铜片 PCB 上（面积通常为 1 英寸）的情况下引述性能。该信息通常没有现实意义，因为半导体供应商无法控制器件的降温。参见 AN10874 - LFPK MOSFET 热设计指南。AN10874 描述了设计阶段运用的各种技术，确保 PCB 的布局能使其达到最佳热性能。

$T_{stg}$ （存储温度）表示器件可在不影响可靠性的情况下进行保存的温度范围。长期保存应将器件放置在惰性气体中，以防器件老化，如金属引脚锈蚀。

$T_j$ （结点温度）表示器件的工作温度范围。一般而言， $T_j$  与存储温度相同。超出该范围，则器件参数会超出数据手册中的指定范围，缩短器件的使用寿命。

$I_S$ （源极电流）- MOSFET 本体二极管的最大连续电流，在[章节 2.2](#)中进行了简要说明。同样考虑因素也适用于  $I_D$ 。

$I_{SM}$ （峰值源极电流）- MOSFET 本体二极管保证承受的最大电流脉冲。同样考虑因素也适用于  $I_{DM}$ 。

$E_{DS(AL)S}$ （非重复漏极 - 源极雪崩能量）- 指定条件下允许的最大单次过压电能脉冲。本例中，条件为底座温度 25 °C 时，允许的最大连续漏极电流。允许的雪崩能量为可将器件从 25 °C 升温到允许的最大  $T_j$  温度，同时底座温度保持在 25 °C 的电能脉冲。

雪崩能量针对最大连续漏极电流指定。某些供应商针对不同电流和较高电感性负载指定雪崩能量，这可能在降低性能表现的情况下增加表面上的雪崩能量值。给出的示例以及降额曲线如本文件的[章节 2.4.3](#)所述。

$E_{DS(AL)R}$ （重复漏极 - 源极雪崩能量）- 当存在多个雪崩事件时，任意单次雪崩事件所允许的最大电能。本文件的 2.4.3 节给出了多次雪崩操作的热性能约束条件。对于重复雪崩事件，除电能要求外，还有标准热性能要求。这些要求采用热特性曲线进行评估。

本参数仅在评估了重复雪崩能力的海思迈数据手册中才列出。

## 2.4.1 降额曲线

在限值数据表之后即提供降额曲线，帮助设计人员计算随温度而改变的限值。

### 2.4.1.1 连续漏极电流

下列步骤是计算 HSM8N12-55B 最大连续漏极电流的示例。假定该应用的底座温度  $T_{mb}$  为 75 °C。

请参考图 1 中的图形；该图表示连续漏极电流与底座温度成函数关系。

图 1 显示，对于  $T_{mb}$  为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  而言，最大连续漏极电流从  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时列出的  $61.8\text{ A}$  降低至  $50\text{ A}$ 。

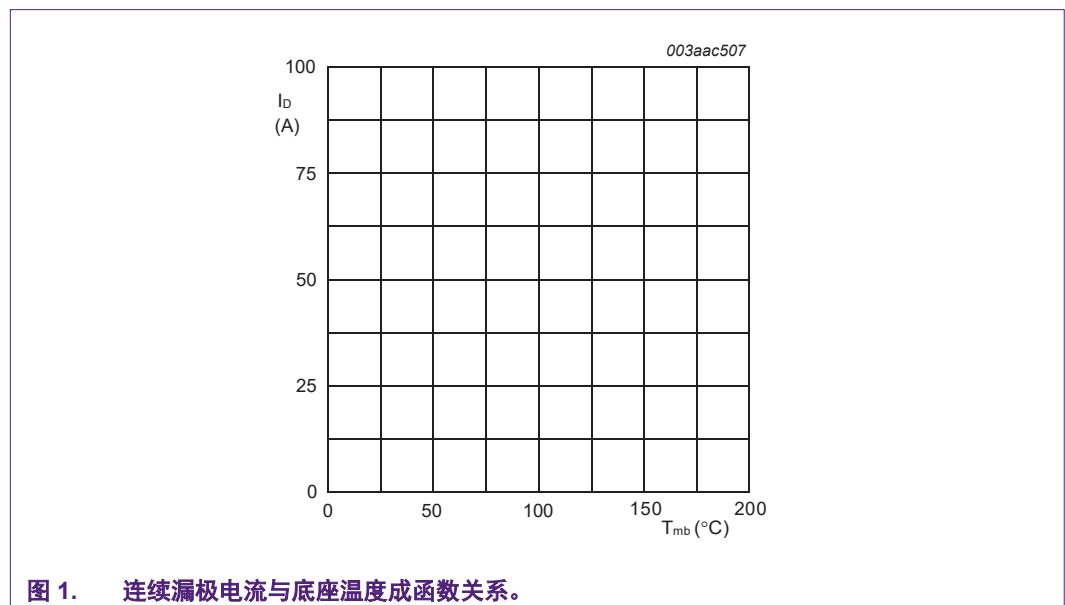
任意  $T_{mb}$  下的最大电流均为使  $T_j$  增加到允许的最大温度 ( $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 时的电流。  $P = I^2 \times R_{DS(on)}$  表示在此  $T_j$  时的功耗，此时的  $R_{DS(on)}$  为最大值 ( $T_j$  亦为最大值)。因此，允许的电流值与允许的功耗值平方根成比例。

若给定  $T_{mb}$ ，则允许的功耗与允许的温度增量成比例。这意味着所示降额曲线基于下列公式获得：

$$I^2(T_{mb}) \propto \frac{T_j - T_{mb}}{T_j - 25\text{ }^{\circ}\text{C}} \quad (1)$$

$$I^2(T_{mb}) = I_D(25\text{ }^{\circ}\text{C}) \times \sqrt{\frac{T_j - T_{mb}}{T_j - 25\text{ }^{\circ}\text{C}}} \quad (2)$$

$175\text{ }^{\circ}\text{C}$  最大允许结点温度下，此电流降至零。



## 2.4.2 功耗

功耗随不同的温度而变化。但在这种情况下，功耗曲线为标准化曲线。允许的功耗为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  下允许功耗的某个百分比，而非绝对值。

示例：

通过观察图 2 中的曲线，  $T_{mb}$  为  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的允许功耗约为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  下允许功耗的  $66\%$ 。

图 2 中的图形数据显示  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  下的最大连续功耗 ( $P_{tot}$ ) 为  $105\text{ W}$ 。

这表示  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$  下允许的最大功耗为  $105\text{ W}$  的  $66\%$ ，即  $70\text{ W}$ 。

方程 3 是计算功耗的公式：

$$P_{tot}(T_{mb}) = P_{tot}(25\text{ }^{\circ}\text{C}) \times \frac{T_j - T_{mb}}{T_j - 25\text{ }^{\circ}\text{C}} \tag{3}$$

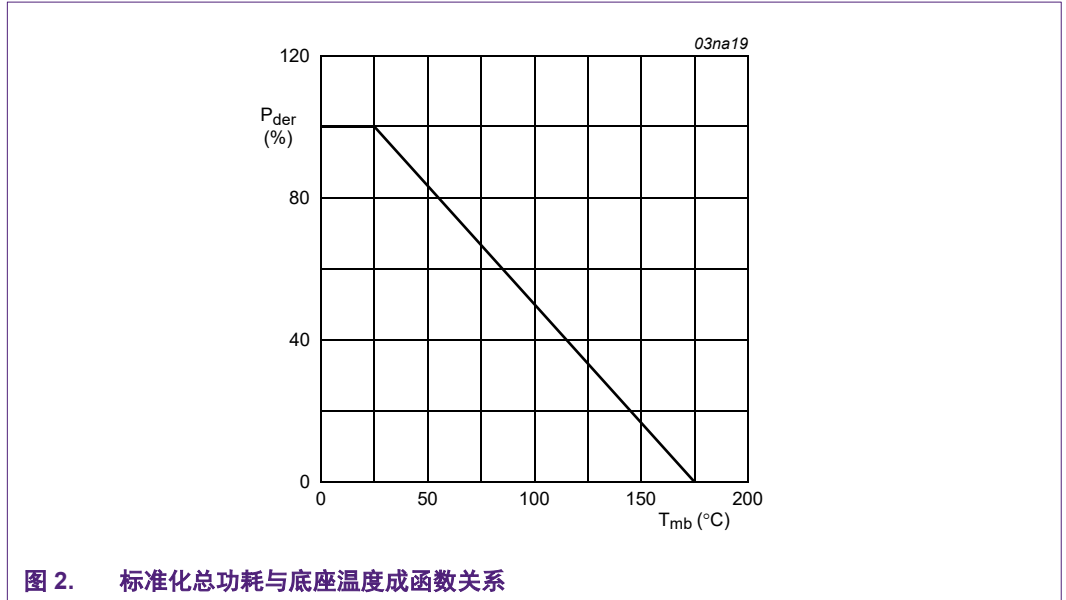
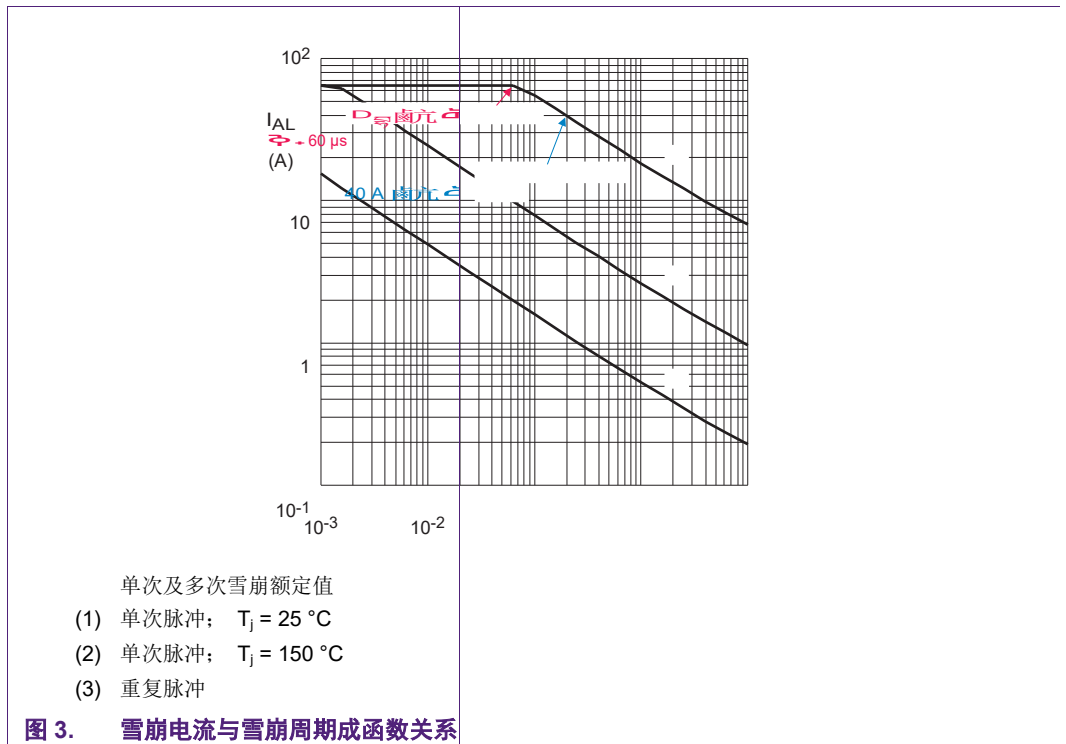


图 1 和图 2 中提供的曲线与限值表一同读取。提取的信息有助于计算与温度有关的最大允许电流和功耗。

### 2.4.3 雪崩耐受性

有关雪崩耐受性的详细信息，参见 AN10273。





采用 AN10273 中的信息，从限值表表 3 中提取有关 HSM8N12-55B 的简单示例：

$I_D = 61.8 \text{ A}$ ,  $V_{sup} \leq 55 \text{ V}$ ,  $R_{GS} = 50 \text{ } \Omega$ ,  $V_{GS} = 10 \text{ V}$  和  $T_{j(\text{init})} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  (未箝位),  $E_{DS(\text{AL})S}$  最大值为 129 mJ。

雪崩事件具有三角脉冲波形，因此平均功耗可采用下式计算： $(0.5 \times V_{DS} \times I_{DS})$ 。

AN10273 假定击穿电压为额定电压的 130% ( $55\text{V} \times 1.3$ )。

图 3 显示 25 °C 下的最大电流略高于 60 A (限值表 3 显示它实际上为 61.8 A)。

从图 3 中可读取最大雪崩能量持续时间为 60  $\mu\text{s}$ 。

这意味着允许的最大雪崩能量为： $0.5 \times (55 \text{ V} \times 1.3) \times 61.8 \text{ A} \times 60 \mu\text{s} = 133 \text{ mJ}$ 。

该值约等于限值表 3 中的引述值 129 mJ。

若某个竞争对手引述 40 A 下的雪崩能量，则图表显示此时雪崩时间为 200  $\mu\text{s}$ ，雪崩能量为  $0.5 \times (55 \text{ V} \times 1.3) \times 40 \text{ A} \times 200 \mu\text{s} = 286 \text{ mJ}$ 。

耐受性事件超出安全工作区域 (SOA) 范围。

#### 2.4.4 安全工作区域(SOA)

安全工作区域 (SOA) 曲线属于数据手册中最重要的内容之一。

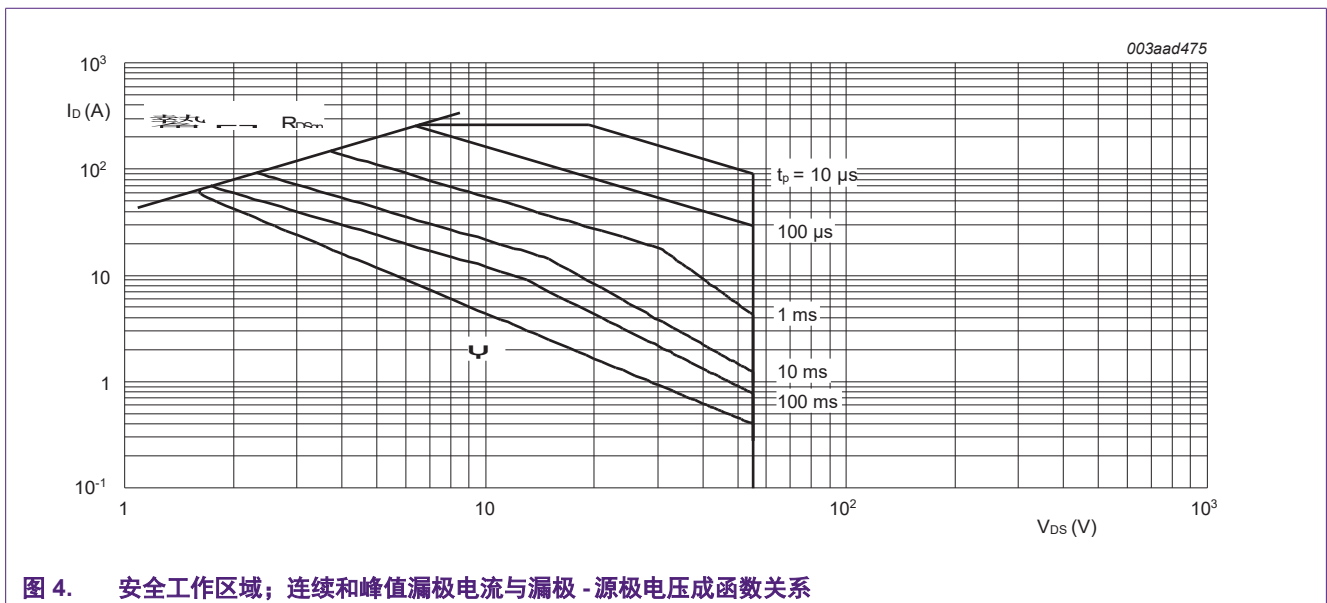


图 4. 安全工作区域；连续和峰值漏极电流与漏极 - 源极电压成函数关系

SOA 曲线显示 MOSFET 工作允许的电压、电流和时间包络线。这些数值针对 25 °C 的初始  $T_{mb}$  和单次电流脉冲。这是一个复杂的问题，将在附录中进一步讨论 (章节 3.1)。

#### 2.5 热特性

本节描述了不同占空比下与脉冲持续时间成函数关系的热阻抗。该信息用于决定硅片在特定工作条件下达到的温度，以及该温度是否位于保证工作性能的包络线之内。

热特性见图 5。由于 MOSFET 以不同的材料制造，因此热阻抗随脉冲长度的变化而改变。若持续时间较短，则热容量更为重要；若脉冲持续时间较长，则热电阻更为重要。

热特性用于检查超过直流限值的特定功率负载脉冲是否会使得  $T_j$  超过其最大安全限值。对于重复雪崩脉冲，还必须考虑雪崩的特定约束条件和重复的雪崩项目数。

表 4. 特性表

符号	参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
$R_{th(j-mb)}$	从结点到底座的热阻	参见 图 5	-	-	1.42	K/W

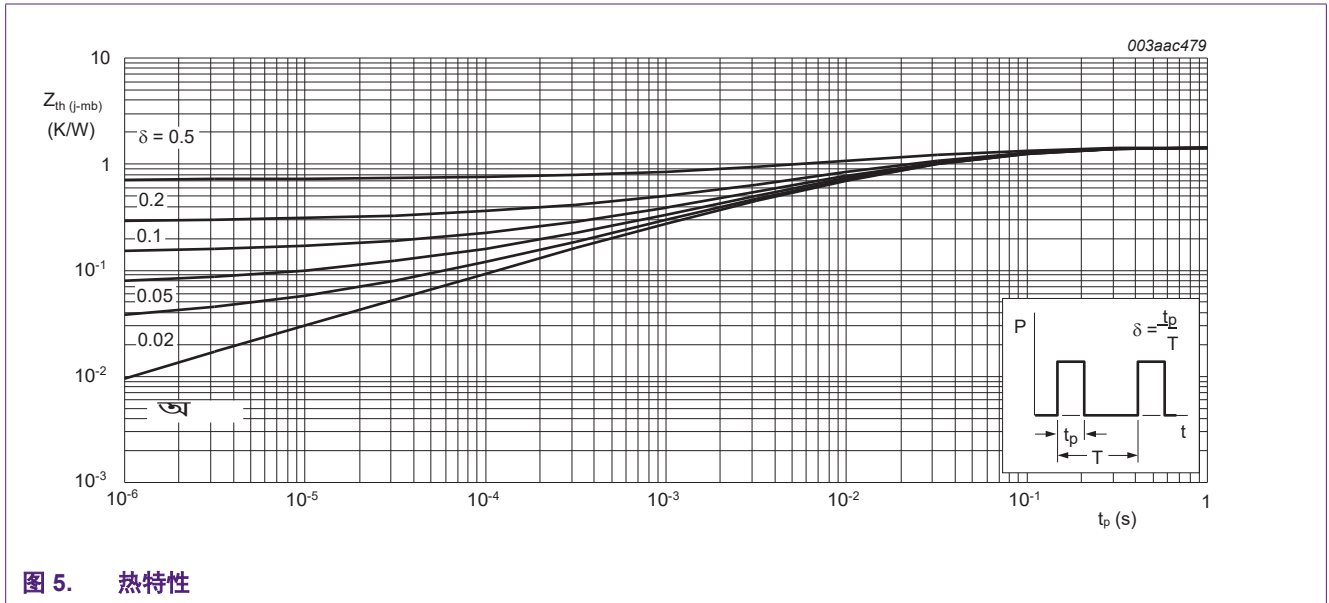


图 5. 热特性

热阻 ( $R_{th}$ ) 与热阻抗 ( $Z_{th}$ ) 有关，因为热阻是对器件如何阻碍热流的稳态测量。热阻抗表示器件如何响应瞬态热事件。它涉及器件各部分的不同热容量和这些部分之间的热阻。在直流情况下， $Z_{th}$  等于  $R_{th}$ 。方程 4 计算特定功耗下的温度上升量：

$$\otimes T_j = |Z_{th(j-mb)}| \times Power \tag{4}$$

附录中讨论了一个可行的示例（[章节 3.1.2](#)）。

## 2.6 电气特性

本节用于确定 MOSFET 是否适合特定应用。本节与前两节不同；前两节用于确定 MOSFET 能否在应用中正常工作。除非另有说明，本节中的示例摘自 *HSM8N12-55B* 数据手册。

### 2.6.1 静态特性

静态特性采用本节中列出的第一组参数；[表 5](#) 显示了一个示例：

表 5. 静态特性

与表格有关的恒定值和限值列表，例如电压、电流和温度

符号	参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(BR)DSS}$	漏极-源极击穿电压	$I_D = 250 \mu A ; V_{GS} = 0 V ; T_j = 25 \text{ }^\circ C$	55	-	-	V
		$I_D = 250 \mu A ; V_{GS} = 0 V ; T_j = -55 \text{ }^\circ C$	50	-	-	V

表 5. 静态特性 (续)

与表格有关的恒定值和限值列表, 例如电压、电流和温度

符号	参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{GS(th)}$	栅极 - 源极阈值电压	$I_D = 1 \text{ mA}; V_{DS} = V_{GS}; T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	2	3	4	V
		$I_D = 250 \text{ mA}; V_{DS} = V_{GS}; T_j = -55 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-	4.4	V
		$I_D = 1 \text{ mA}; V_{DS} = V_{GS}; T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C}$	1	-	-	V
$I_{DSS}$	漏极泄漏电流	$V_{DS} = 55 \text{ V}; V_{GS} = 0 \text{ V}; T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	0.02	1	$\mu\text{A}$
		$V_{DS} = 55 \text{ V}; V_{GS} = 0 \text{ V}; T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C}$	-	-	500	$\mu\text{A}$
$I_{GSS}$	栅极泄漏电流	$V_{DS} = 0 \text{ V}; V_{GS} = 20 \text{ V}; T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	2	100	nA
		$V_{DS} = 0 \text{ V}; V_{GS} = -20 \text{ V}; T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	-	2	100	nA
$R_{DS(on)}$	漏极 - 源极导通电阻	$V_{GS} = 10 \text{ V}; I_D = 20 \text{ A}; T_j = 175 \text{ }^\circ\text{C};$	-	-	27.6	$\text{m}\Omega$
		$V_{GS} = 10 \text{ V}; I_D = 20 \text{ A}; T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C};$	-	8.2	12	$\text{m}\Omega$

$V_{BR(DSS)}$  (漏极 - 源极击穿电压) - 有关扩展参数的列表与解释, 参见 [章节 2.4](#)。本节列出了在整个 MOSFET 温度范围内, 保证器件在关断状态下阻隔的漏极和源极之间的最大电压。温度范围为  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  至  $+175 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在电压和温度范围内, HSM8N12-55B 漏极和源极之间的电流保证低于  $250 \text{ }\mu\text{A}$ 。若器件温度低于  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 则该范围为小于等于  $50 \text{ V}$ ; 若器件温度为  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$  至  $+175 \text{ }^\circ\text{C}$ , 则该范围为小于等于  $55 \text{ V}$ 。

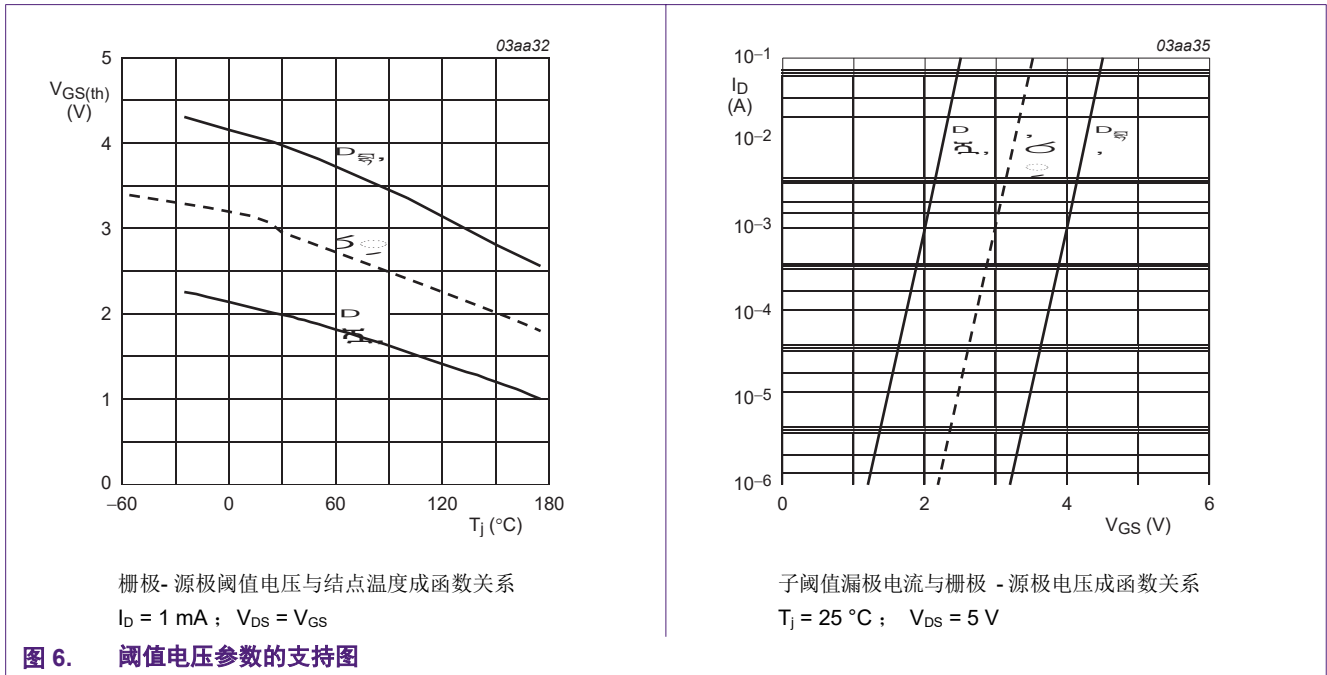
关断状态下温度对特性的影响有两方面。泄漏电流随温度升高而增大, 可导通器件。与泄漏电流增大相适应, 击穿电压也随温度升高而上升。

$V_{GS(th)}$  (栅极 - 源极阈值电压) 对决定 MOSFET 的导通和关断状态而言非常重要。 $V_{GS(th)}$

在  $V_{DS} = V_{GS}$  时定义, 虽然有时候会针对固定的  $V_{DS}$  值 (例如  $10 \text{ V}$ ) 进行引述。

请注意, 当栅极和漏极短接在一起时, 针对特定电流的阈值电压定义与教科书中的示例有所不同。教科书中的参数描述了 MOSFET 的物理状态变化, 与 MOSFET 芯片尺寸无关。而数据手册中使用的参数针对指定电流值, 与芯片尺寸有关, 因为电流与芯片面积成比例。

数据手册中的阈值电压以最适合常规测量的方式定义, 而非以实际器件的通常使用方式为 准。因此, [图 6](#) 中提供的图形支持该参数。



第一张图显示了典型和限值器件在额定温度范围内的阈值电压变化。所有 MOSFET 都保证在两条线之间存在阈值电压。

因此，就  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下的 HSM8N12-55B 而言，若  $V_{DS}$  和  $V_{GS}$  同时低于  $2 \text{ V}$ ，则所有同型号器件承受的电流均低于  $1 \text{ mA}$ 。此外，若  $V_{DS}$  和  $V_{GS}$  均大于  $4 \text{ V}$ ，则所有器件承受的电流都超过  $1 \text{ mA}$ 。 $175 \text{ }^\circ\text{C}$  时，器件下限下降至  $1 \text{ V}$ ，上限下降至  $2.5 \text{ V}$ 。下限值通常更为重要，因为它决定器件何时应保证关断，以及相关应用需要具有多少噪声裕量。

第二张图显示了器件如何在此阈值电压附近导通。对于 HSM8N12-55B 而言，若栅极电压增加不到  $1 \text{ V}$ ，则电流增加  $100,000$  倍。示例表示漏极 - 源极电压固定为  $5 \text{ V}$  的情况。

$I_{BSS}$ （漏极泄漏电流）保证器件在其关断状态下的最大额定漏极 - 源极电压时可传输的最大泄漏电流。务必要注意高温时的  $I_{BSS}$  高出多少，这是最坏的情况。

$I_{GSS}$ （栅极泄漏电流）保证最大泄漏电流通过 MOSFET 的栅极。计算保持器件导通所需的电流时， $I_{GSS}$  是非常重要的参数。由于该电流是通过绝缘体的泄漏电流，因此与  $I_{BSS}$  不同的是，它与温度无关。

$R_{DS(on)}$ （漏极 - 源极导通电阻）是最重要的参数之一。之前的参数确保器件关断时如何工作、器件如何关断以及预期有多少泄漏电流。当电池容量在应用中存在问题时，这些因素都很重要。

$R_{DS(on)}$  是 MOSFET 导通时，其闭合开关的性能量度。它是决定含有 MOSFET 的电路功耗和效率的关键因素。导通电阻  $R_{DS(on)} \times I_D^2$  表示 MOSFET 在完全导通情况下的功耗。功率 MOSFET 在导通状态下可承受几十甚至几百安培的电流。

MOSFET 中消耗的功率使芯片温度上升至超过底座温度。此外，当 MOSFET 芯片温度升高时，其  $R_{DS(on)}$  也成比例地上升。建议的最大结点温度为  $175 \text{ }^\circ\text{C}$ （针对所有海思迈封装的 MOSFET 而言）。

以 HSM8N12-55B 数据手册为例：

结点（芯片）和底座之间每瓦的  $R_{th(j-mb)}$  温度上升值 = 1.42 K/W (1.42 °C/W)。温度上升 150 K (T<sub>mb</sub> = 25 °C, T<sub>j</sub> = 175 °C) 的最大功耗 =  $150/1.42 = 105.63$  W。芯片温度 (T<sub>j</sub>) 为 175 °C 时的最大 R<sub>DS(on)</sub> = 27.6 mΩ。

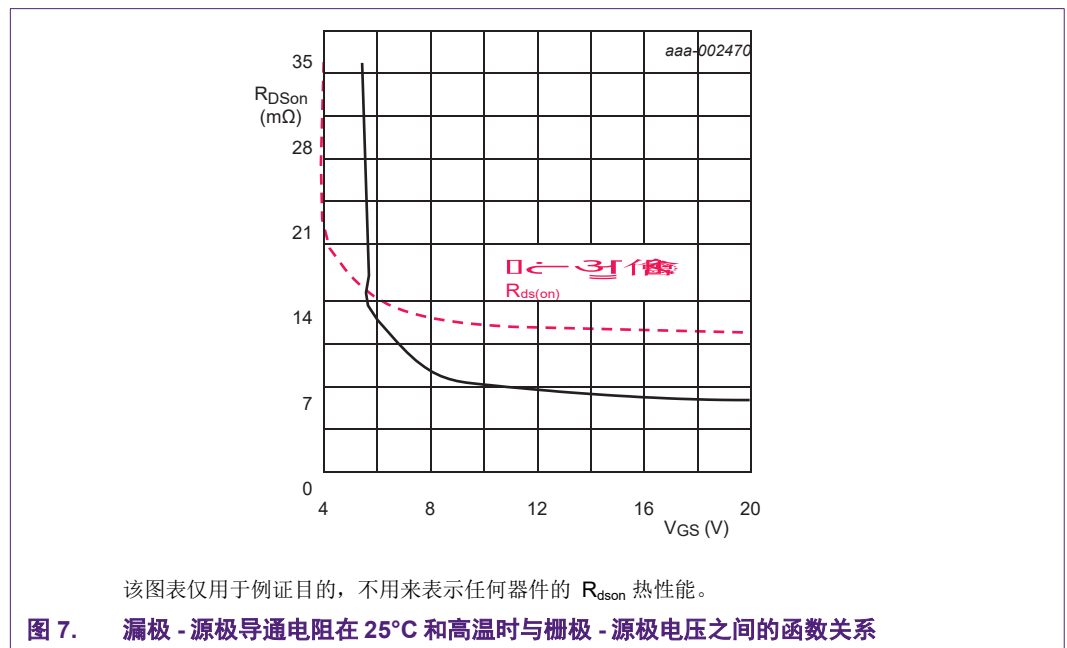
因此，当处于 T<sub>mb</sub> = 25 °C 且 T<sub>j</sub> = 175 °C 的稳态时， $P = 105.63$  W = I<sub>max</sub><sup>2</sup> × R<sub>DS(on)</sub>(175 °C)。

因此：

$$I_{max} = \sqrt{\frac{P_{(max)175^{\circ}C}}{R_{DS(on)175^{\circ}C}}} = \sqrt{\frac{105.63\text{ W}}{0.0276\ \Omega}} \tag{5}$$

= 61.86 A（数据手册中舍去最后一位，为 61.8 A）。

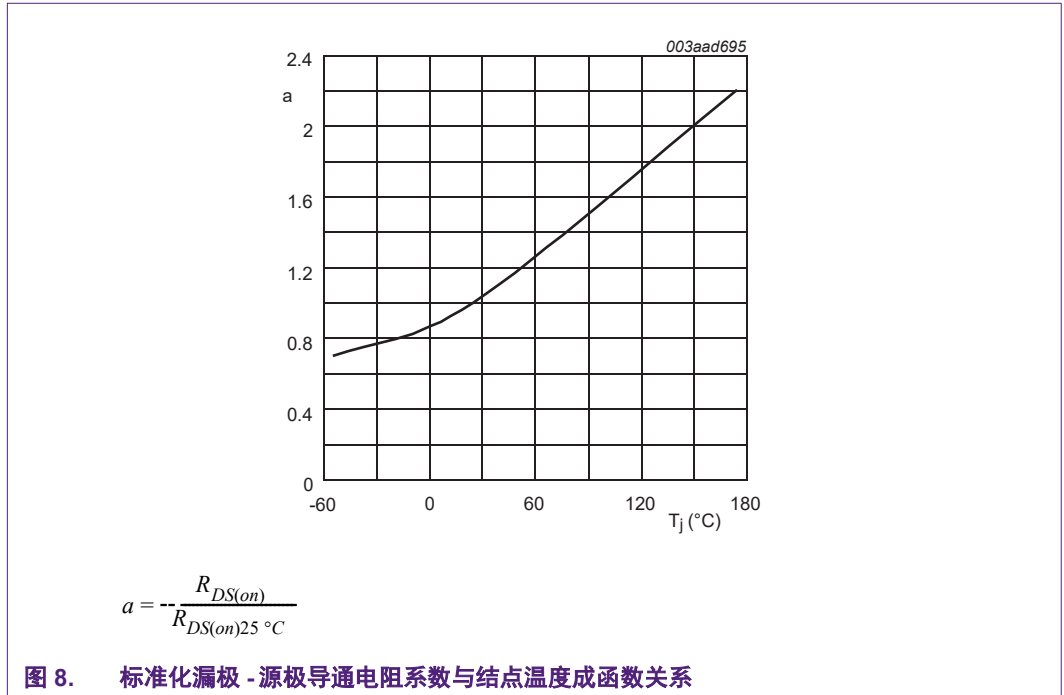
MOSFET 的 R<sub>DS(on)</sub> 取决于栅极 - 源极电压，并且存在一个较低的值，低于该值则该参数急剧上升。针对不同的栅极驱动器，R<sub>DS(on)</sub> 随温度上升的比例也不同。[图 7](#) 中的红色虚线表示较高温度的曲线，以此体现不同之处。



该图表仅用于例证目的，不用来表示任何器件的 R<sub>dson</sub> 热性能。

若相关应用要求具有良好的 R<sub>DS(on)</sub> 性能以便降低栅极 - 源极电压，则 MOSFET 应具有较低的阈值电压，如 HSM9Y12-55B。然而，这类器件较低的阈值电压同时意味着高温关断状态的裕量也较小。较低的裕量通常表示需要较高阈值电压的器件。

有关电阻如何随温度而上升的典型曲线，参见[图 8](#)。



**2.6.2 动态特性**

动态特性决定器件的开关性能。某些这类参数高度依赖测量条件。因此，比较具有不同标准条件的供应商数据手册之前，需理解动态特性。表 6 为示例动态特性表。

**表 6. 动态特性**

与表格有关的恒定值和限值列表，例如电压、电流和温度

符号	参数	条件	最小值	典型值	最大值	单位
Q <sub>G(tot)</sub>	总栅极电荷	I <sub>D</sub> = 20 A ; V <sub>DS</sub> = 44 V ; V <sub>GS</sub> = 10 V	-	35.2	-	nC
Q <sub>GS</sub>	栅极 - 源极电荷		-	9.24	-	nC
Q <sub>GD</sub>	栅极 - 漏极电荷		-	14.8	-	nC
C <sub>iss</sub>	输入电容	V <sub>DS</sub> = 25 V ; V <sub>GS</sub> = 0 V ;	-	1550	2067	pF
C <sub>oss</sub>	输出电容	f = 1 MHz ; T <sub>j</sub> = 25 °C	-	328	394	pF
C <sub>rss</sub>	反向传输电容		-	153	210	pF
t <sub>d(on)</sub>	导通延迟时间	V <sub>DS</sub> = 30 V ; V <sub>GS</sub> = 10 V ;	-	19.3	-	ns
t <sub>r</sub>	上升时间	R <sub>L</sub> = 1.5 Ω ; R <sub>G(ext)</sub> = 10 Ω	-	29.4	-	ns
t <sub>d(off)</sub>	关断延迟时间		-	43.2	-	ns
t <sub>f</sub>	下降时间		-	22	-	ns

**2.6.2.1 栅极电荷**

Q<sub>G(tot)</sub>、Q<sub>GS</sub> 和 Q<sub>GD</sub> 均为同一个栅极电荷曲线上的参数。它们描述了某些条件下，MOSFET 需要多少栅极电荷才能开关。这在高频开关应用中特别重要。很多功耗损失发生在开关过程中，此时漏极、栅极和源极之间的电压和电流会有极大的变化。在关断状态下，电压很大，但电流可忽略不计。在完全导通状态下，电流极大，电压很小。

栅极电荷参数取决于阈值电压和开关动态特性以及开关负载。电阻性负载与电感性负载有所不同。

有关栅极电荷曲线示例，参见图 9：

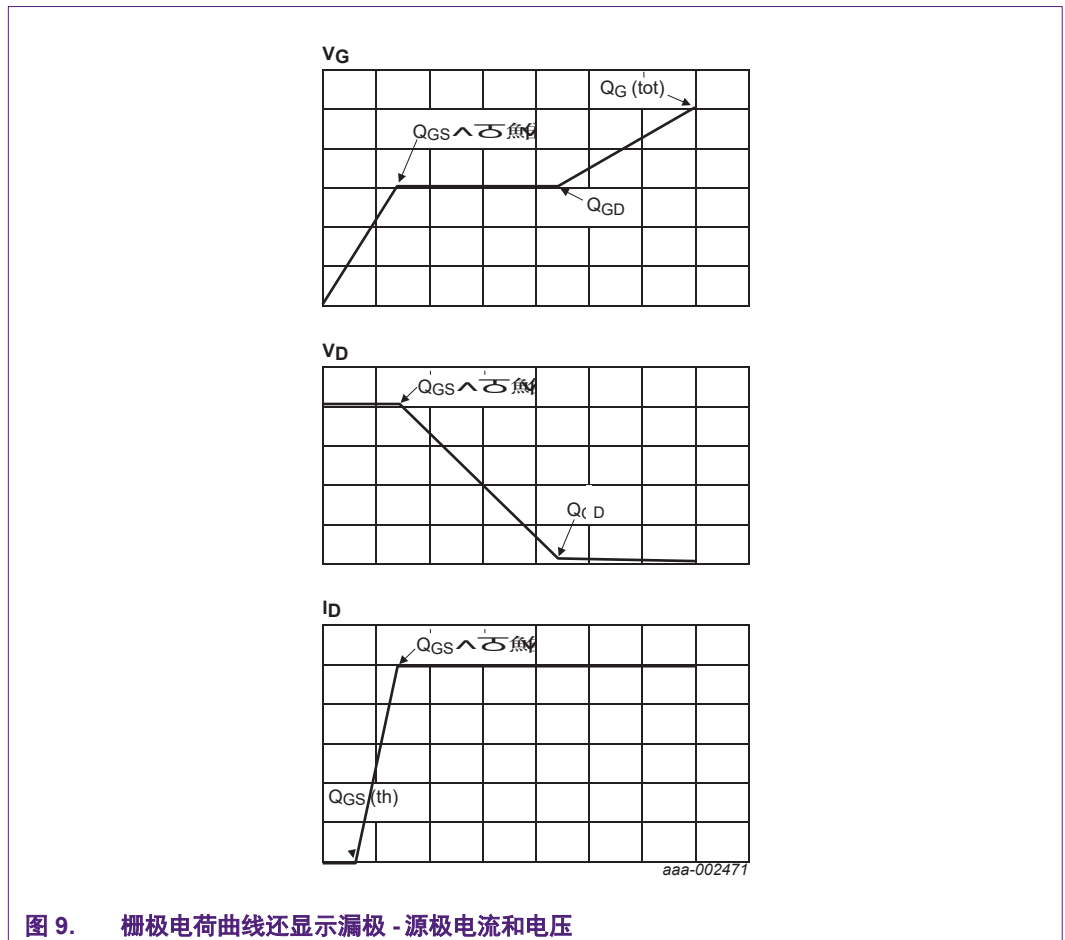


图 9. 栅极电荷曲线还显示漏极 - 源极电流和电压

由于电容随电压和电流的变化而改变，因此最好通过栅极电荷数据，而非电容数据决定开关性能。这尤其适用于 MOSFET 的栅极驱动器电路受限于特定电流，并且要求高开关速度的情况。

当 MOSFET 漏极电源受限于特定电流和电压时，栅极电荷曲线可描述该 MOSFET 的情况。测试电路的运转意味着在栅极电荷曲线内，MOSFET 工作在恒定电压，或者恒定电流区间。

在这段时间内，漏极 - 源极电压开始下降，因为 MOSFET 中增加的电荷能让导通更轻松。因此，虽然栅极 - 源极电压恒定，但漏极 - 栅极电压下降。

最终容量停止上升，并且栅极电荷的进一步增加将导致栅极 - 源极电压的上升。该特性有时也称为“米勒台阶”，因为它表示所谓的“米勒电容”正在上升。米勒台阶亦称为栅极 - 漏极电荷 ( $Q_{GD}$ )。

在该阶段，漏极和源极之间有大量电流和电压，因此决定开关损耗时， $Q_{GD}$  极为重要。

一旦结束米勒台阶阶段，栅极 - 源极电压再次升高，但容量比之前  $Q_{GS}$  更大。栅极电荷曲线梯度在米勒台阶以上有所下降。

栅极电荷参数高度依赖测量条件。不同供应商经常在不同条件下引述栅极电荷参数，比较不同来源的栅极电荷参数时需谨慎。

较高的电流导致较高的栅极 - 源极电荷值，因为台阶电压也较高。较高的漏极 - 源极电压导致较高的栅极 - 漏极电荷和较高的总栅极电荷，因为台阶延长。

栅极电荷开关阶段的漏极 - 源极电流和电压可参考图 10

若 MOSFET 始于关断状态 ( $V_{GS} = 0\text{ V}$ )，则栅极的电荷增加将首先导致栅极 - 源极电压的增加。在该模式下，施加恒定电压 ( $V_{DS}$ ) 于源极和漏极之间。

针对该漏极 - 源极电压的限值电流，当栅极 - 源极电压达到阈值电压时，MOSFET 的电容上升，栅极电压保持恒定。这称之为台阶电压，并且起作用的电荷值以  $Q_{GS}$  表示。电流越大，台阶电压越高（参见图 10）。

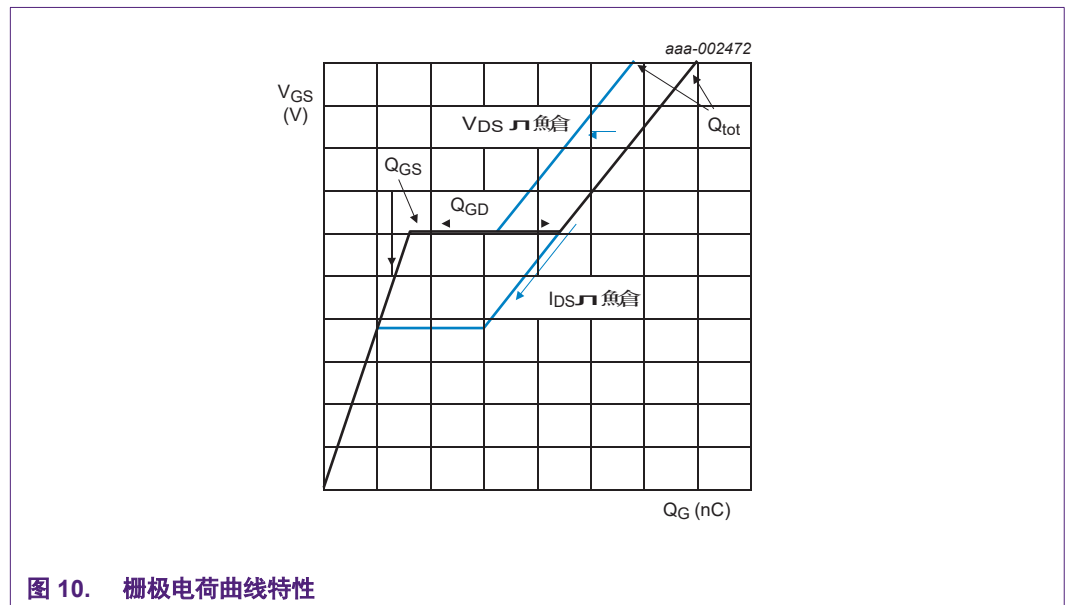


图 10. 栅极电荷曲线特性

### 2.6.2.2 电容

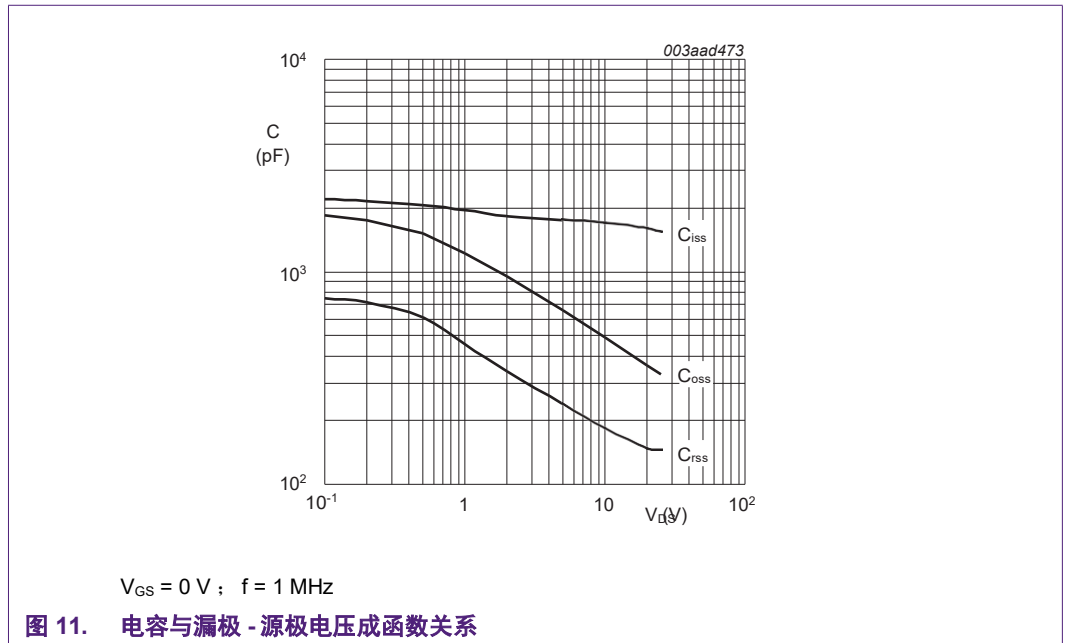
电容特性通常不如栅极电荷参数有用，理由如前文所述。但数据手册依然会列出这些特性。通常所列的三个电容特性为：

- $C_{ISS}$ （输入电容）表示栅极和其他两端（源极和漏极）之间的电容值。
- $C_{OSS}$ （输出电容）表示漏极和其他两端（栅极和源极）之间的电容值。
- $C_{RSS}$ （反向传输电容）表示漏极和栅极之间的电容值。

半导体电容通常同时取决于测量电容的电压和频率。虽然比较不同条件下的测量电容较为困难，但许多供应商指定测量频率为 1 MHz。因此，电容值随漏极 - 源极电压的变化而改变（参见图 11）。然而，电容值还随栅极 - 源极电压的变化而改变，这就是为什么不同电压下栅极电荷曲线的梯度不同的原因（参见图 9）。

栅极电荷曲线中电荷、电压和电容的关系可表达为  $\otimes Q = \otimes C \times \otimes V$ 。对于不同栅极电压下的不同梯度，电容可随不同的栅极 - 源极电压而发生极大的改变。





### 2.6.2.3 开关时间

大部分制造商引述电阻性负载开关时间。但比较不同制造商的数据时需十分仔细，因为它们高度依赖于用于测试的栅极驱动电路的电阻。在用于快速开关应用的器件中，MOSFET 的栅极电阻经常作为容性时间常数引述，它们同样取决于电阻和电容。

### 2.6.3 二极管特性

若 MOSFET 用于所谓的“第三象限”中，则二极管特性非常重要。以 MOSFET 代替二极管以便减少压降（来源于二极管固有的正向压降）时，通常采用第三象限法。在这种情况下，当 MOSFET 寄生二极管在 MOSFET 开启之前导通时，将始终存在一个短暂的时间间隔。对于这种应用，二极管开关参数便很重要。此外，二极管的反向恢复会导致功耗损失以及振荡，产生 EMC 问题。

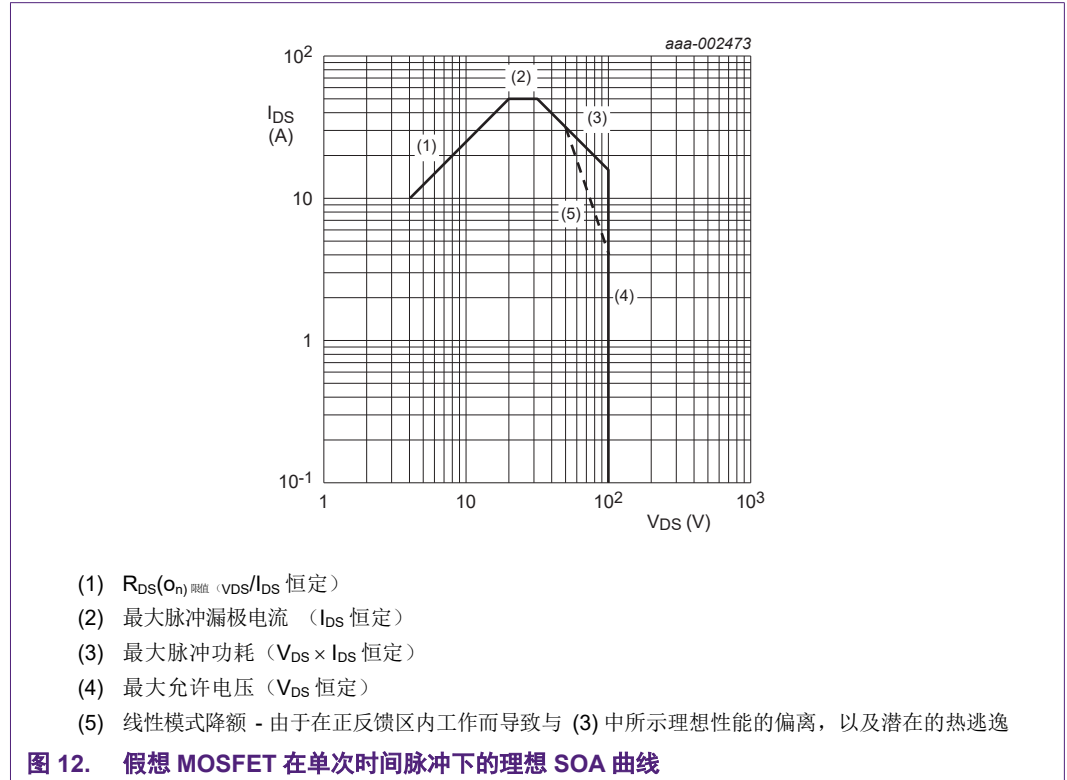
## 2.7 封装尺寸

本节描述了封装尺寸和容差。

### 3. 附录

#### 3.1 安全工作区域 (SOA) 曲线

为突出关键特性，图 12 针对一个假想的 MOSFET 提供理想的 SOA 曲线。显示了假想 MOSFET 单次脉冲长度数据，以突出其与理想曲线偏离的区域。



虚线 (5) 强调实际曲线与理想曲线的偏离。在实际情况中，存在梯度变化的单一曲线，此时线性模式降额变得很重要。

#### $R_{DS(on)}$ 限值

$R_{DS(on)}$  为图中的区域 (1)，并且方程 6 表示限值直线：

$$\frac{V_{DS}}{I_{DS}} \leq R_{DS(on)} \quad (175^\circ C) \quad (6)$$

当 MOSFET 完全导通并且用作闭合开关（电阻不超过高温  $R_{DS(on)}$  值）时，存在限值。

#### 恒流区

恒流区为图中的区域 (2)。它表示最大脉冲漏极电流，受限于器件制造商（例如封装内的焊线）。

#### 最大功耗（线性模式）限值

该区域中，MOSFET 用作（栅极）电压受控型电流源。这表示同时施加了大量电压和电流，导致极大的功耗。直线 (3) 表示理想曲线，而虚线 (5) 表示与理想值的偏离。

区域 (5) 中 SOA 曲线的限制因素是矩形电流和电压脉冲期间施加的热量。甚至在理想情况下，该曲线也要依靠 MOSFET 的瞬态热阻抗（参见[章节 2.5](#)）。

瞬态热阻抗随脉冲长度变化而改变。这是因为 MOSFET 中的不同材料具有不同的热阻和电容值。这种材料的不同造成的热性能等效于从结点（产生热量的地方）到底座的一个 RC 网络。[方程 7](#) 用于计算该区域中的理想曲线。

$$P = I_D \times V_{DS} = \frac{T_{j(max)} - T_{mb}}{Z_{th(j-mb)}} = \text{Constant} \quad (7)$$

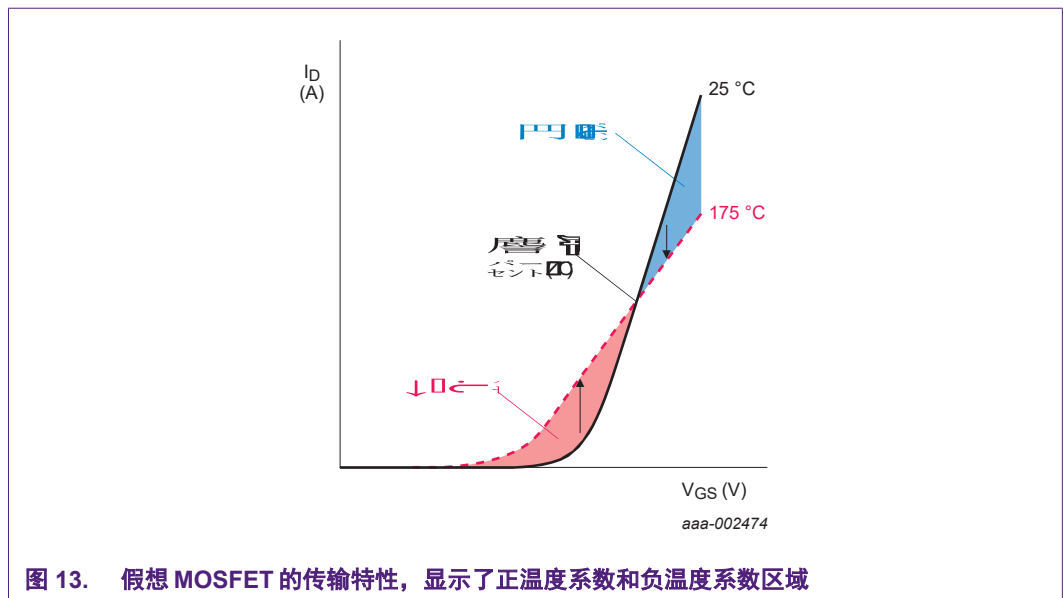
理想情况精确地描述了电流密度足够高的情况。但是，它对于低电流密度（即区域 (3) 的右下方）过于乐观。低电流密度和高电压可导致线性模式工作下的热逃逸。下一节讨论热逃逸。

### 线性模式下的热逃逸

由于其电阻存在温度系数（即温度上升，电流下降），通常认为功率 MOSFET 不存在热逃逸问题。

这种说法仅当 MOSFET 完全导通时（即区域 1 中）才有效，但情况并非总是如此。

当 MOSFET 导通时，存在两种相互竞争的效应，决定其电流随温度上升的性能。随着温度上升，阈值电压下降。MOSFET 将更有效地导通，因此导致电流上升。相反，硅片的电阻随温度上升而上升，因此导致电流下降。在恒定漏极 - 源极电压情况下，所产生的效应如[图 13](#) 所示。当 MOSFET 的栅极 - 源极电压用于控制电流，或者当 MOSFET 开关非常缓慢时，就会发生这种情况。



高电流情况下，电阻上升将占主导地位，即局部热量导致电流下降。低电流情况下，阈值电压下降将占主导地位，即局部热量降低阈值电压。这种情况将更有效地导通器件，从而导致电流升高，存在热逃逸风险。

因此，对于给定的  $V_{DS}$ ，存在一个临界电流值，低于该值则存在正反馈区域，并伴随热逃逸风险。高于该临界电流值则存在负反馈，具有热稳定性。这个临界电流称为零点温度系数 (ZTC)。

该效应降低了 SOA 性能，具有低电流和高漏极 - 源极电压特性。必须降低恒定功耗直线，如区域 (5) 所示。对于持续时间短的开关事件，该效应不明显。但是，随着开关事件的持续时间变长，例如为了降低电磁干扰，该效应变得更为重要，甚至具有潜在的危害性。

### 电压受限区域

器件受限于其击穿电压  $V_{DS}$ ，如区域 (4) 所示。快速参考数据提供温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  或以上的  $V_{DS}$  值。在图 13 所示假想 MOSFET 中，额定值为  $100\text{ V}$ 。对于 HSM8N12-55B 而言，其电压为  $55\text{ V}$ 。

### 3.1.1 温度高于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的安全工作区域

根据 SOA 曲线进行测量时，有两个主要假设：

1. 工作温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$
2. 矩形脉冲

然而，某些脉冲并非矩形，并且不在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  时产生。遇到这些情况，可使用方程 8。

$$T_{j(\text{rise})\text{最大值}} = T_{j(\text{max})} - T_{j(\text{amb})} = \frac{2}{3} P_{av} \cdot Z_{th\left(\frac{t_{\text{on}}}{2}\right)} \quad (8)$$

其中， $T_{j(\text{max})}$  表示  $175\text{ }^{\circ}\text{C}$  的最大芯片温度； $T_{j(\text{amb})}$  表示系统的环境温度。例如，在汽车应用中，主要使用两个环境温度：车舱内  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ （驾驶舱内），以及引擎盖下  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ （围绕引擎附近区域）。

使用环境温度进行最差情况分析的计算没有任何意义，并且存在误导性。之所以具有误导性，是因为在 MOSFET 开关打开之前，底座温度可能更高。例如，某个设计使用 10 个 MOSFET，其中 9 个已上电。第 10 个 MOSFET（处于关断状态）的底座温度很有可能与其他 9 个导通 MOSFET 的温度近似。因此，如果环境温度为  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，并且 9 个导通 MOSFET 的底座温度为  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，则第 10 个 MOSFET 的  $T_{j(\text{amb})}$  为  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而非  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这些条件下的计算较为保守，更适合用于最差情况分析（方程 9）。

$$T_{j(\text{rise})\text{最大值}} = T_{j(\text{max})} - T_{j(\text{amb})} = P_{av} \cdot Z_{th(t)_{av}} \quad (9)$$

**注：**直流应用中（非脉冲），使用  $R_{th(j-mb)}$  而非  $Z_{th(j-mb)}$ 。高于约  $100\text{ ms}$ ，则  $Z_{th}$  与  $R_{th}$  几乎相等。

#### 3.1.1.1 计算示例

计算 HSM9277-55A 的最大直流  $I_{DS}$  值（ $V_{DS} = 40\text{ V}$ ， $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）

改写方程 10，使  $I_{DS}$  成为主要对象（ $P_{av}$  表示平均功率，直流情况下等于  $I_{DS} \times V_{DS}$ ）。由于是直流情况，以  $R_{th}$  代替  $Z_{th}$ 。

$$T_{j(\text{rise})} = I_{DS} \times V_{DS} \times Z_{th(av)} \quad (10)$$

$$\frac{T_{j(\text{rise})}}{V_{DS} \times R_{th}} = I_{DS} \quad (11)$$

$$\frac{175\text{ }^{\circ}\text{C} - 25\text{ }^{\circ}\text{C}}{40\text{ V} \times 2.93\text{ K/W}} = 1.28\text{ A} \quad (12)$$

因此，这些条件下的最大直流电流额定值为 1.28 A。

### 3.1.2 使用 SOA 曲线和热特性的示例

在线性模式工作时考察下列应用：

- 器件为 HSM8N12-55B，方形电流脉冲：
  - $I_{\text{pulse}} = 20 \text{ A}$
  - $V_{\text{pulse}} = 40 \text{ V}$
  - $f = 2 \text{ kHz}$
  - $t_{\text{pulse}} = 100 \mu\text{s}$
  - $T_{\text{amb}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 3.1.2.1 计算步骤

最初检查 SOA 曲线，判断是否存在可能产生问题的单次脉冲。观察 SOA 曲线可发现，20 A、40 V 脉冲位于 100  $\mu\text{s}$  和 1 ms 直线之间。这表示脉冲位于可接受的限值范围内。

现在便采用 2 kHz 频率计算 100  $\mu\text{s}$  脉冲的占空比。根据这些值，算得占空比为 0.2。SOA 曲线显示，对于 100  $\mu\text{s}$ ，含占空比的直线 ( $\delta$ ) 具有 0.4 K/W 的瞬态热阻抗。

方形脉冲的功耗为  $20 \text{ A} \times 40 \text{ V}$ ，即 800 W。

通过[方程 8](#)，100  $\mu\text{s}$  脉冲的温度上升值由下式计算： $800 \text{ W} \times 0.4 \text{ K/W}$ ，等于 320 K。若初始温度为 25  $^\circ\text{C}$ ，则随着温度上升，最终温度将为 345  $^\circ\text{C}$ 。由于 MOSFET 结点温度不能超过 175  $^\circ\text{C}$ ，因此该 MOSFET 不适用于该应用。

若相关应用要求单次脉冲，则曲线表示 100  $\mu\text{s}$  脉冲时的瞬态热阻抗为 0.1 K/W。由此可得，温度上升值为  $800 \text{ W} \times 0.1 \text{ K/W}$ ，即 80 K。最终温度则为 105  $^\circ\text{C}$ （若初始温度为 25  $^\circ\text{C}$ ）。器件可承受该条件，从而验证了 SOA 曲线结论。

#### 3.1.2.2 针对较高的初始温度进行降额

在 25  $^\circ\text{C}$  的底座温度下进行了示例安全工作区域的计算。若底座温度较高，则必须降额 SOA 曲线，因此允许的温度上升值降低。允许的脉冲功耗与温度上升值成比例下降。例如，若底座温度为 25  $^\circ\text{C}$ ，则允许的温度上升值为 150  $^\circ\text{C}$ 。在 100  $^\circ\text{C}$  时，允许的温度上升值仅为一半 (75  $^\circ\text{C}$ )。允许的功耗相比 25  $^\circ\text{C}$  时，也降低了一半。

由于线性模式工作的影响，电流值保持不变，但允许的漏极 - 源极电压被降额。

针对 HSM8N12-55B 的 100  $^\circ\text{C}$  降额参见[图 14](#)。

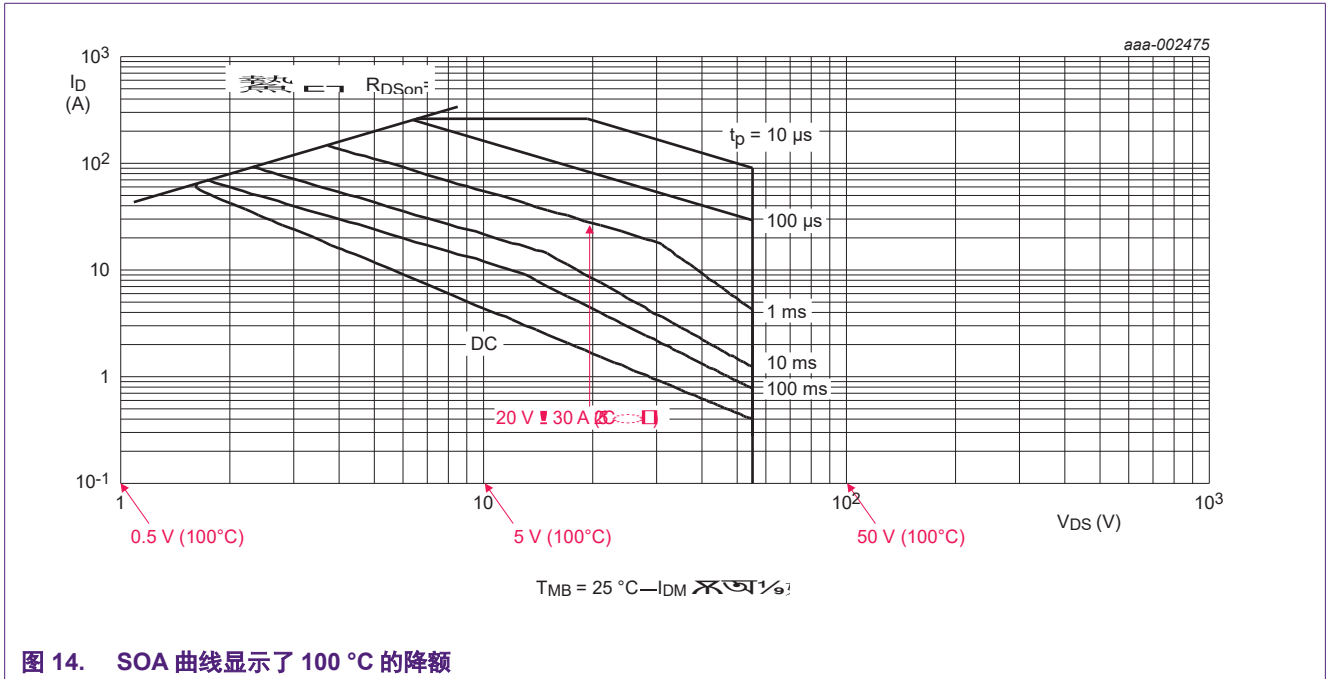


图 14. SOA 曲线显示了 100 °C 的降额

示例:

100 °C 时， HSM8N12-55B 允许 30 A、 15 V 的 1 ms 脉冲吗？

25 °C 时， 可以看到， 20 V 的  $V_{DS}$  允许 30 A 和 1 ms。 因此， 100 °C 时， 允许具有 10 V 的  $V_{DS}$ 。

100 °C 时， 1 ms 的 30 A、 15 V 脉冲超出允许的安全工作区域， 因此是不允许的。