

# ***TVS Surge Protection in High-Temperature Environments*** 译本

作者: *Benjamin Balazsi, Alec Forbes*

译者: 周始勇

## **1. 译者序**

本文翻译来自 TI 的 *Application Report: 《TVS Surge Protection in High-Temperature Environments》*。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**

为了确保在电源开关、热插拔、雷击和其他各种故障情况下的可靠性，系统必须考虑浪涌保护；然而，大多数常见的浪涌保护 TVS 二极管在温度上有很大的变化，而这种变化很少被考虑在内。这种变化会导致已发布产品出现实验室测试中未发现的故障；要最大限度地减少这些故障，就必须了解并考虑 TVS 二极管的性能。本报告研究了传统 SMA 和 SMB 型 TVS 二极管的温度变化，并将其与 TI flat-clamp 型浪涌保护进行了比较，然后展示了在实际系统中进行的实验室测试，突出显示了 TI flat-clamp 型器件改进的高温性能。

## **3. 简介**

在存在雷击、电源系统切换、负载变化或热插拔接口的环境中，为系统提供稳健的保护至关重要。最常见的浪涌保护方法是使用瞬态电压抑制器（TVS）二极管，在系统输入端将故障电压箝位到安全水平。

然而，为系统选择最佳二极管并非易事，尤其是在高温环境下。通常，TVS 二极管的箝位电压较高，温度变化较大，在工作温度范围内性能会明显下降。更为棘手的是，TVS 二极管的数据表很少讨论或指定其在 25°C 以外的任何温度下的性能，这使得系统设计人员不得不猜测或进行耗时的测试，以验证其系统在工作温度范围内是否受到保护。

TI 设计了一种新型钳位技术来防止瞬态浪涌事件，有助于确保在宽温度范围内提供稳健的保护。TI 的 flat-clamp 技术提供了一种消散瞬态浪涌的解决方案，同时在 -40°C 至 125°C 范围内提供精确的钳位电压，从而将受保护系统的残余电压降至最低。

本应用说明对这种新技术的浪涌保护能力进行了测试和评估，并与传统 TVS 器件进行了比较。在测试过程中，将一个浪涌脉冲引入一个受每种保护器件保护的系统，比较结果表明，TI FlatClamp 器件能为恶劣环境中的接口提供更好的保护。

## **4. 浪涌保护注意事项**

### **TVS 二极管规格**

在嘈杂的环境中，工程师在设计系统时必须通过 IEC 61000-4-5 系统级浪涌抗扰度标准，该标准规定了浪涌抗扰度测试的设置和程序。与 IEC 61000-4-2 标准涵盖的 ESD 事件相比，浪涌事件（通常发生在电源系统开关瞬态或雷电放电情况下）的脉冲持续时间长 200 倍，能量也高得多。有关 IEC 电磁

兼容性 (EMC) 标准和相关测试的详细信息，请参阅 IEC 61000-4-x Tests for TI's Protection Devices 。针对浪涌瞬态的保护通常由接口输入端的 TVS 二极管完成。设计人员必须绕过 TVS 保护级施加的限制和约束，以确保可靠的运行和保护。TVS 击穿电压  $V_{BR}$  定义了 TVS 开始传导电流的外加电压。在故障事件中，TVS 二极管会将大量电流分流至接地，达到最大 TVS 脉冲电流  $I_{PP}$ ，由于二极管的固有动态电阻 ( $R_{DYN}$ )，导致器件两端电压升高至  $V_{BR}$  以上。在保护系统时，必须考虑到这一额外电压。下游设备在浪涌事件中看到的电压为  $V_{CLAMP}$ ，其计算公式为公式 1。

$$V_{CLAMP} = V_{BR} + I_{PP} \times R_{DYN}$$

为实现最可靠的运行，TVS 二极管的最大  $V_{CLAMP}$  应低于下游设备的绝对最大额定值。任何违反绝对最大额定值的情况都可能导致元件损坏。这些规定的电压水平如图 1 所示：

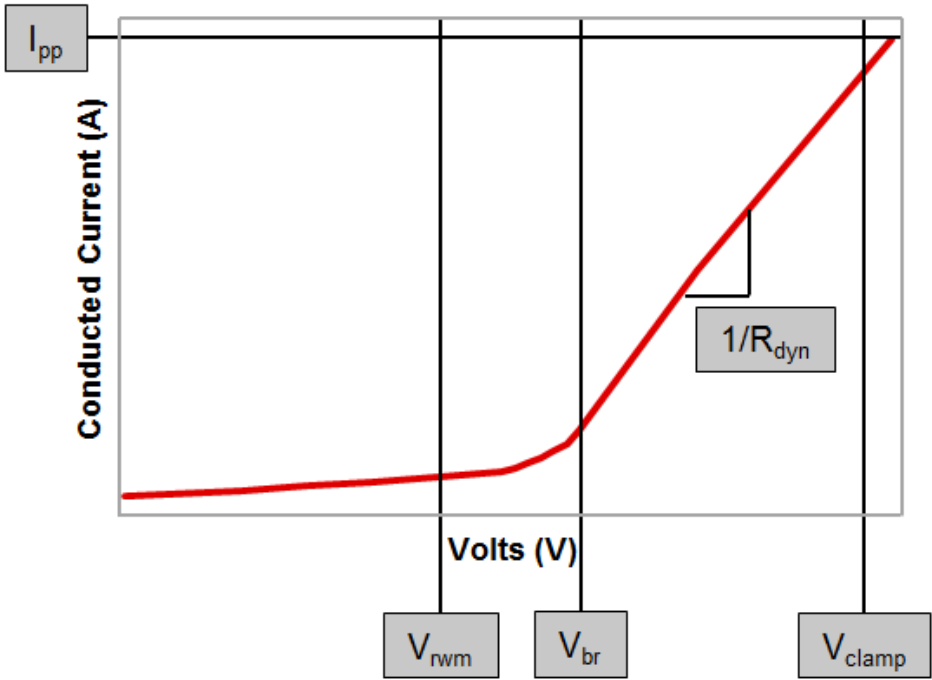


图 1 TVS 二极管规格

传统 TVS 二极管的  $R_{DYN}$  通常很高，产生的  $V_{CLAMP}$  大大高于  $V_{BR}$ 。为确保系统的稳健性，设计人员必须使用能承受高  $V_{CLAMP}$  电压的元件，或寻找  $R_{DYN}$  低得多的 TVS 二极管。这两种解决方案都存在问题：前者会导致系统元件更大、更昂贵，后者会导致 TVS 二极管漏电、电容、基底面和成本更高。

### 工艺和温度变化

此外，随着工艺和温度的变化， $V_{BR}$  和  $V_{CLAMP}$  也会发生显著变化。工艺变化通常在器件数据表中说明，而温度变化通常可以根据公式 2 计算出来。但是，如果数据表中没有确定热系数  $\alpha T$ ，则无法计算温度变化。

$$V_{BR@T_j} = V_{BR@25^{\circ}\text{C}} \times (1 + \alpha T \times (T_j - 25))$$

图 2 显示了 SMAJ33A TVS 二极管的 I/V 曲线随工艺和结温 ( $T_j$ ) 变化的情况。 $V_{RWM}$  下方的绿色区域是用于标称系统输入电压的区域。红色区域表示系统在浪涌事件中提供稳健保护所需的裕量。在此区域内，系统无法正常运行，但必须能够承受这些电压。紫色垂直虚线是受保护系统在浪涌事件中可检测到的最大电压。

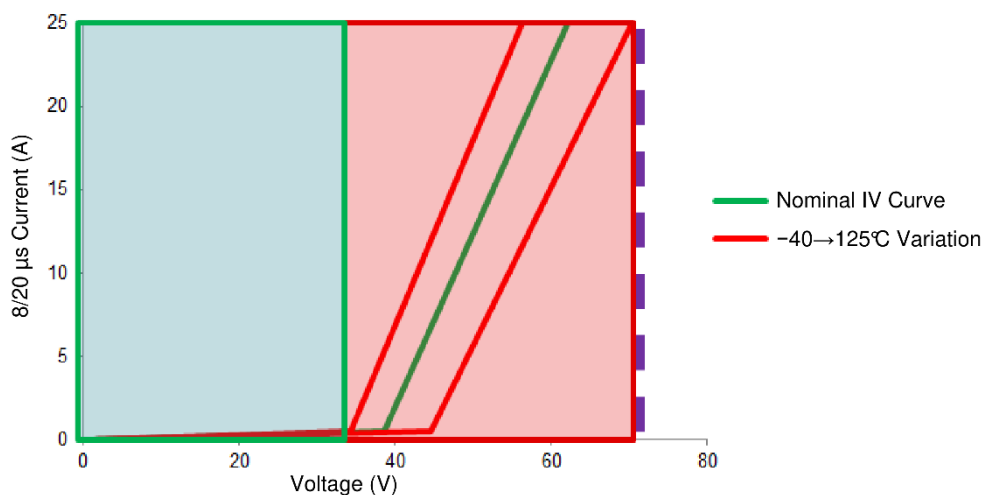


图 2 SMAJ33A 的工艺和温度变化

绿色曲线表示 SMAJ33A 的额定 I-V 曲线， $V_{BR}$  为 39 V， $V_{CLAMP}$  为 60 V。红色曲线表示在不同工艺和温度下的最大 I/V 曲线。如图 2 所示，在 125° C 时， $V_{CLAMP}$  上升到近 70 V，而在 -40° C 时， $V_{BR}$  下降到 34 V。要适应这些变化，就需要在系统中设计额外的裕量，从而进一步提高成本和复杂性，使 TVS 无法正常工作。

## 温度降额

除了  $V_{BR}$  和  $V_{CLAMP}$  的偏差之外，TVS 二极管的浪涌性能还经常受到严重的温度降额影响。IEC 61000-4-5 浪涌标准只要求在 25°C 下进行测试，但实际上，浪涌事件在更高温度下发生的概率与在室温下发生的概率相同。图 3 显示了 Littelfuse® SMAJ33A 的温度降额。25°C 时的最大耗散电流为 33 A；然而，器件的电流耗散随温度的升高而显著降低，直至 125°C 时耗散水平降至 6.6 A。

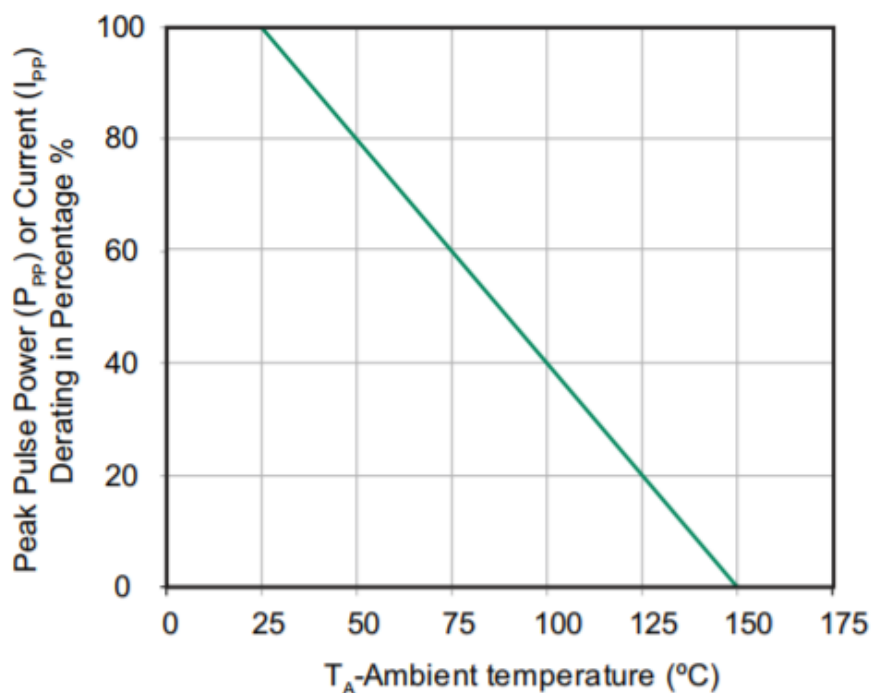


图 3 SMAJ33A 系列温度降额

这就是为什么在室温下通过 IEC 测试的系统仍会出现现场故障的原因之一。系统设计人员必须考虑到保护级随温度降低而降额的情况。

## 5. 系统浪涌保护示例

本节将举例说明 TI flat-clamp 器件在实际应用中如何提高系统的稳健性。

在此示例中，4-20 mA 环路输入设计中的 TPS7A4901 低压差稳压器需要输入保护。该设备工作在温度高达 85°C 的环境中，根据工业 PLC 的 IEC 61131-2 标准，该设备必须能承受通过  $42\Omega$  阻抗的  $\pm 1kV$  浪涌脉冲（波形由 IEC 61000-4-5 规定），产生接近 24 A 的浪涌电流。TPS7A4901 是正线性稳压器，输入电压范围为 3-35 V，输入引脚的绝对最大应用电压为 36 V。为确保可靠性，最好确保箝位电压尽可能接近低压差 (LDO) 的 36 V 绝对最大输入电压。由于瞬态事件很短，电压略高于绝对最大值不太可能对系统造成损害；但是，如果箝位电压大大高于绝对最大输入电压，即使瞬态时间很短，也会导致故障。在 25°C 时，满足故障事件期间的这一条件很简单，但随着温度的升高，传统 TVS 器件的 I-V 曲线会偏移得更高，从而增加  $V_{CLAMP}$ ，导致可靠性问题。二极管也会降额，降低其耗散故障能量的能力。

### TVS 二极管规格

TVS 制造商在数据表中说明了室温下的  $I_{PP}$  或  $V_{CLAMP}$  等特性，但很少有关于更高温度下工作的信息。例如，SMAJ33A 的数据表因供应商而异，但一般只说明  $T_A = 25^\circ\text{C}$  时的数据表，很少说明温度升高时的性能。经验丰富的设计人员会了解参数预计会如何变化，但缺乏经验的设计人员很容易忽视会发生的变化。即使是经验丰富的设计师也必须进行估计，这往往会导致系统设计过度。

相比之下，德州仪器的 flat-clamp 器件则规定了器件在工作温度范围内的性能。即使在高温条件下，设计人员也能自信地预测器件的箝位性能，从而提高系统设计效率。

在此示例中，比较了 TI TVS3300 和竞争对手 SMAJ33A（适用于此类应用的行业标准器件）之间的性能。由于 SMAJ33A 没有规定在温度条件下的性能，因此需要进行测试以确保稳健性。

### 测试设置

测试装置是经过改进的 TPS7A4901EVM，通过添加外部保护二极管进行调整，如图 4 所示，其中 U2 为 TPS7A49 LDO，输入 TVS 二极管突出显示。输入 TVS 采用 SMAJ33A TVS 二极管和 TVS3300 进行测试，以比较故障事件发生时的性能。

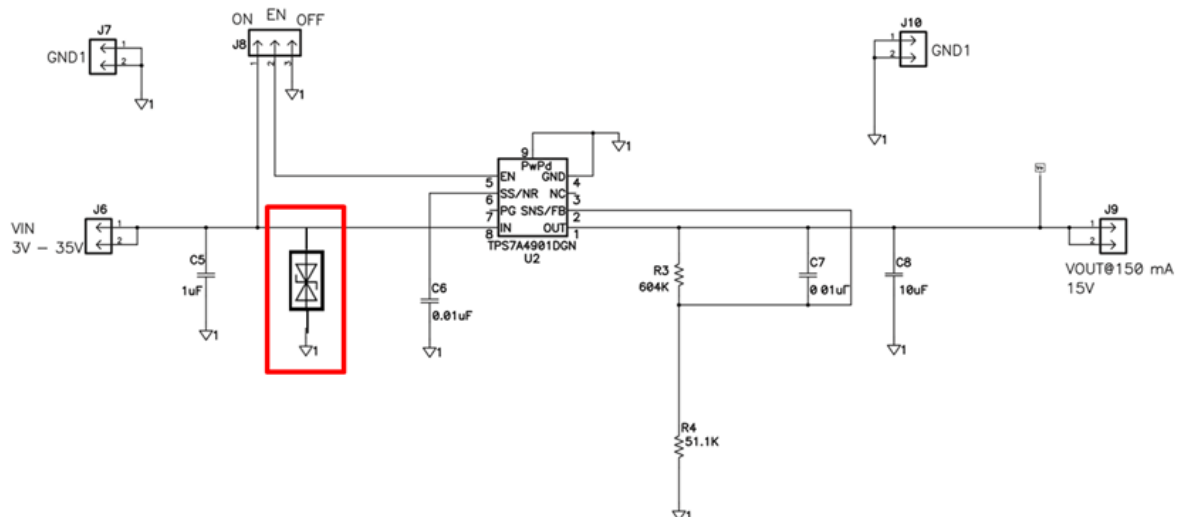


图 4 修改后的 TPS7A4901DGN EVM 原理图

图 5 显示了占位面积为  $13\text{ mm}^2$  的 SMAJ33A，图 6 显示了占位面积为  $1.2\text{ mm}^2$  的 TI TVS3300（在适配器板上）。这些适配器板的设计目的是在现有的行业标准 SMA 或 SMB 基底面上测试 WCSP 或 SON 封装，以方便评估，而无需新的 PCB 布局。二极管和 TVS3300 适配器板焊接在 TPS7A49 的

1 $\mu$ F 输入电容器顶部。除 TVS 外，两块电路板完全相同。



图 5 TPS7A4901DGN 在输入电压线上配有 SMAJ33A



图 6 TPS7A4901DGN 在输入电压线上配备 TVS3300

整体测试设置如图 7 所示，其中的被测设计（DUT）是修改后的 TPS7A49EVM。

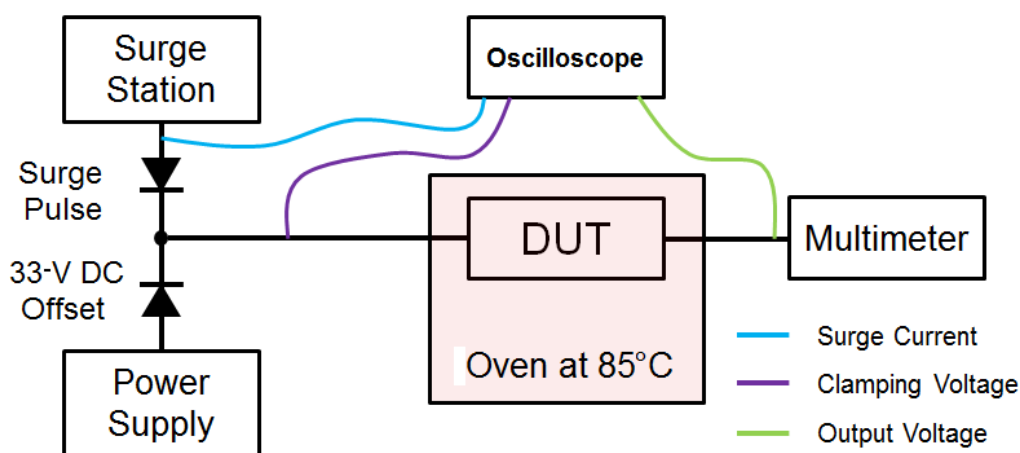


图 7 测试设置框图

在热流下将 DUT 加热到 85°C 以模拟高温工作区。在 TPS7A49 输入端施加直流偏移电压以模拟标准工作条件，并使用浪涌发生器产生 IEC 61000-4-5 浪涌脉冲。使用示波器测量浪涌脉冲的输入电流、箝位电压和 TPS7A49 输出电压。为冗余起见，使用万用表监控 LDO 的输出电压。

## 测试结果

将 DUT 放置在 85°C 的环境中，暴露在能量不断增加的浪涌事件中，直到发生故障。图 8 显示，在使用 SMAJ33A 进行保护时，TPS7A49 在 8.38 A 浪涌电流和 42.16 V  $V_{CLAMP}$  的测试期间发生断路。这远远低于所需的 24 A 浪涌抗扰度，表明在此温度范围内，尽管数据表标称规格，SMAJ33A 仍无法提供有效保护。出现故障的原因是 SMAJ33A 的高  $R_{DYN}$  导致浪涌期间电压调节能力差，使电压升至 42 V，大大高于 TPS7A49 器件的 36 V 绝对最大值。

然而，在使用 TVS3300 的相同浪涌期间， $V_{CLAMP}$  为 37.2 V，TPS7A49 没有受到任何损害。此波形如图 9 所示。由于该电压非常接近 TPS7A49 的最大额定输入电压，而且瞬态持续时间很短，因此不会对 TPS7A49 造成损坏。在波形中，蓝色曲线是浪涌事件造成的电流，紫色曲线是在 TPS7A49 输入端测得的电压，绿色曲线是 TPS7A49 的输出电压。

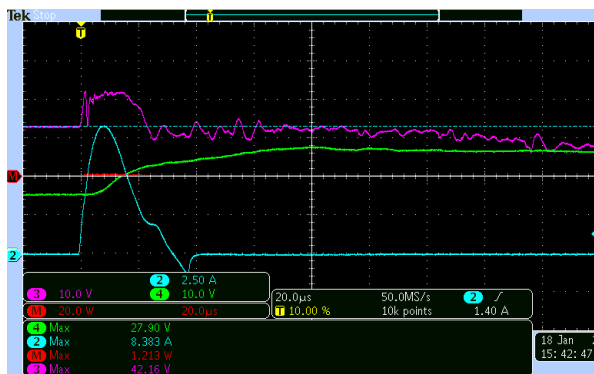


图 8 SMAJ33A 在 85°C 时的保护电流为 8.38A



图 9 TVS3300 由 TI 在 85°C 时提供 9A 保护

通过继续增加浪涌发生器的输出，可以发现 TVS3300 能够保护的浪涌电流是 SMAJ33A 的四倍。图 12 显示了 TVS3300 在所需 24 A 浪涌电流下的保护情况，图 13 显示了 TVS3300 在 33.7 A 浪涌电流下的最终合格水平。此外，在浪涌事件中，TPS7A49 的输出电压没有变化，这表明 TVS3300 能够在不影响正常系统运行的情况下提供保护。

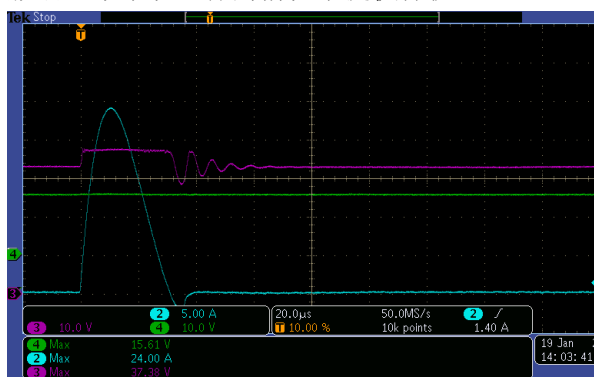


图 10 TVS3300 在 24 A,85°C时的钳位波形

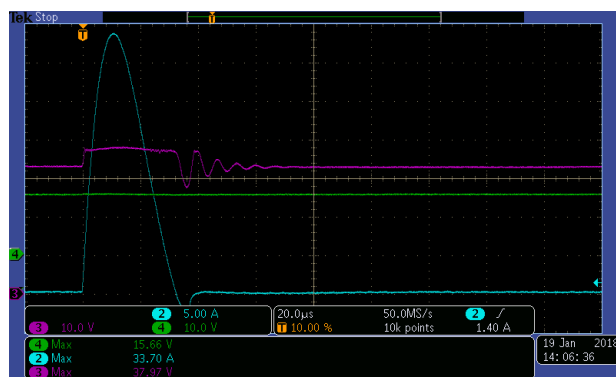


图 11 TVS3300 在85°C时最后通过电流的钳位波形

显然，与传统的 TVS 二极管相比，flat-clamp 型 TVS3300 为该设备的输入提供了更强大的保护。TVS3300 极低的  $R_{DYN}$  使其能够使用绝对最大值为 36 V 的 LDO。如果使用传统的 TVS 二极管，则必须将所选的 TPS7A49 器件与额定输入容差为 60 V 或更高的器件对调，从而增加设计的成本和复杂性。

## 6. 总结

与传统 TVS 二极管不同，TI Flat-Clamp 器件可在高温、苛刻的 EMC 环境中提供稳健的保护。传统 TVS 二极管在较高温度下的性能较差且难以预测，可能导致在实验室测试中无法看到的系统故障。使用传统 TVS 二极管进行正确的输入保护设计时，需要额外的裕量和耗时的实验室鉴定。然而，TI 扁平钳型二极管可确保性能随温度变化最小，并为设计人员提供了一个轻松的解决方案，以确保较长的系统寿命。

## 7. 译者

## 译者

周始勇/Joe Zhou[[zhou\\_shiyong@163.com](mailto: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

