

高压浪涌抑制器取代笨重的无源组件

High voltage surge stoppers ease MIL-STD-1275D compliance by replacing bulky passive components

□ Dan Eddleman 凌力尔特公司

1 MIL-STD-1275D 的要求

MIL-STD-1275D 定义了各种情况，最重要的是，对稳定状态工作、启动干扰、尖峰、浪涌和纹波情况做出了规定。MIL-STD-1275D 针对 3 种独立的“工作模式”制定了对上述每一种情况的要求：启动模式、正常运行模式和仅发动机模式。

在描述尖峰、浪涌、纹波以及其他要求的细节之前，先来看一下工作模式。毫不奇怪，“启动模式”描述的是引擎启动时发生的情况；“正常运行模式”描述的是系统无故障运行时的情况；“仅发动机模式”描述的是一种特别恶劣的情况，即电池断接和发电机直接给电子设备供电。

仅发动机模式是一种非常富挑战性的情况。通常，尽管发电机电源波动，但电池保持相对恒定的电压，因此掩盖了

发电机的不稳定性。可以预料，仅发动机模式设定的限制比正常工作模式严格。在大多数情况下，如果一个系统能够通过在“仅发动机模式”情况工作，那么该系统在正常运行模式时不会有任何问题。（一种可能的例外是，与处于正常运行模式的 $20\text{m}\Omega$ 源阻抗相比，仅发动机模式的 $500\text{m}\Omega$ 源阻抗在浪涌期间可以减轻负担。）

2 稳定状态

与任何标准都类似的是，MIL-STD-1275D 详细解释了各种情况和要求。本文的目的是，以更加容易理解的形式介绍这些要求以及建议采用的解决方案。

MIL-STD-1275D 给出的“稳定状态”定义是：“电路值保持基本恒定的情

况，这种情况在所有初始瞬态或波动情况平复之后出现。在这种情况下，还有一点也是明确的，即在系统正常运行期间仅发生固有或自然变化（即系统没发生故障，对系统的任何部分都未进行意外更改）。”

简言之，在稳定状态，输入电压保持相对恒定。如表 1 所示，在正常运行模式，稳定状态输入电压范围为 25V 至 30V。在仅发动机模式（发生电池断接情况），稳定状态电压范围稍微宽一些，为 23V 至 33V。

3 尖峰

这里我们不引用 MIL-STD-1275D 的“尖峰”定义，而是根据图 1 中所示例子。尖峰一般是震荡性的（振铃），并在

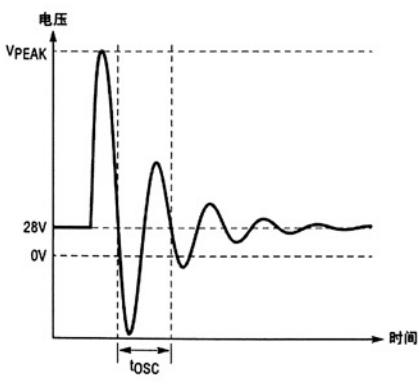


图 1 MIL-STD-1275D 尖峰

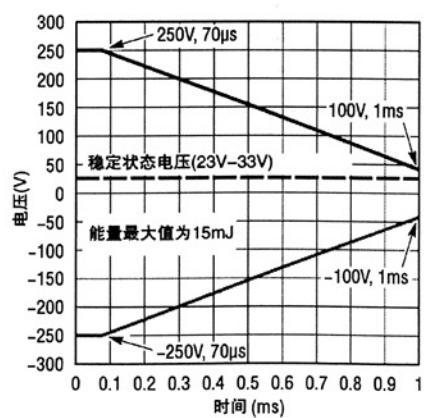


图 2 仅发动机模式的尖峰包络

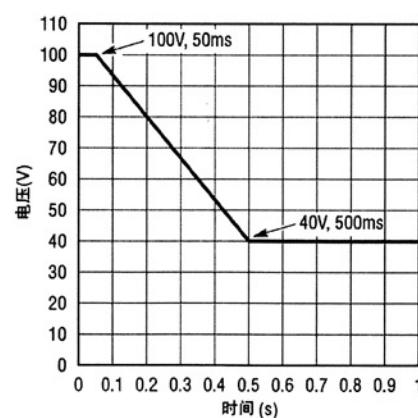


图 3 仅发动机模式的浪涌包络

表1 在正常运行模式和仅发动机模式，MIL-STD-1275D 的一些规格
 规格 正常运行模式 仅发动机模式
 稳定状态 $25V < V_{IN} < 30V$ $23V < V_{IN} < 33V$
 尖峰 250V，能量最大值 = 15mJ 与正常运行模式相同
 浪涌 最大值 40V，约 500ms，
 $R_{IN} = 20m\Omega$ 最大值 100V，约 500ms，
 $R_{IN} = 500m\Omega$
 纹波 幅度为 $\pm 2V$ 幅度为 $\pm 7V$

1ms 时间内逐步衰减到稳定状态电压。
 MIL-STD-1275D 申明，这类尖峰发生在切换电抗性负载之时，也可能发生在鸣响号角、操作舱底泵、启停引擎或旋转枪架期间。

尽管上述描述在理解尖峰时是有用的，但是实际要求是由图 2 定义的（就仅发动机模式而言）。此外，在小节“输入 EDUT 的电压尖峰”中，MIL-STD-1275D 描述了推荐的测试配置以及所需的上升时间和震荡频率。需要提到的一个重要事实是，能量最大值限制到 15mJ。对正常运行模式的尖峰要求与仅发动机模式类似，只是正常运行模式限制是 40V（在 1ms），而不是 100V（在 1ms）。

4 浪涌

尖峰是持续时间不到 1ms 的瞬态；浪涌则是持续时间较长的瞬态。图 3 显示了仅发动机模式的限制。MIL-STD-1275D 推

荐进行的测试规定，

应该以 1s 的重复时间，给系统输入加上 5 个持续时间 50ms 的 100V 脉冲。有趣的是，图 3 所示浪涌情况的包络要求比较难以满足，因为该浪涌未在全部 500ms 时间内保持 40V。本文所示解决方案满足了这些情况的要求。就浪涌而言，对正常运行模式的要求是较为容易；正常运行模式的浪涌包络类似，除了电压最大值是 40V 而不是 100V。

5 纹波

纹波这个术语指的是，输入电压相对于稳定状态 DC 电压的变化。纹波频率可能由 50Hz 至 200kHz 的频率组成。在仅发动机模式，纹波相对于 DC 稳定状态电压可能偏离多达 $\pm 7V$ 。在正常运行模式，纹波略低，相对于稳定状态 DC 电压偏离 $\pm 2V$ 。MIL-STD-1275D 规范规定了明确的测试条件，并推荐了一组测试频率。

6 启动模式

除了正常运行模式和仅发动机模式，

MIL-STD-1275D 规范还定义了启动模式，描述了引擎启动器和发动导致的电压变化。图 4 来自 MIL-STD-1275D 规范。曲线从稳定状态 DC 电压开始，然后在“初次啮合浪涌 (Initial Engagement Surge - IES)”期间降到低至 6V。在 1 秒时间内，该曲线上升至“发动级”，这时最低电压为 16V。该曲线在 30 秒时间内再次返回到稳定状态 DC 电压。

7 其他要求

MIL-STD-1275D 明确规定，系统必须承受极性反转而不被损坏。在迅速启动期间，如果启动器电缆反接了，就会出现这种情况。MIL-STD-1275D 接下来引用了另一个有关电磁兼容性要求的标准 MIL-STD-461，而该标准超出了本文讨论范围。

8 符合 MIL-STD-1275D 要求的浪涌抑制器解决方案

凌力尔特公司的浪涌抑制器产品可构成富有吸引力的 MIL-STD-1275D 兼容解决方案。其他设计一般在输入采用并联箝位，这在持续过压情况下，可能导致损坏

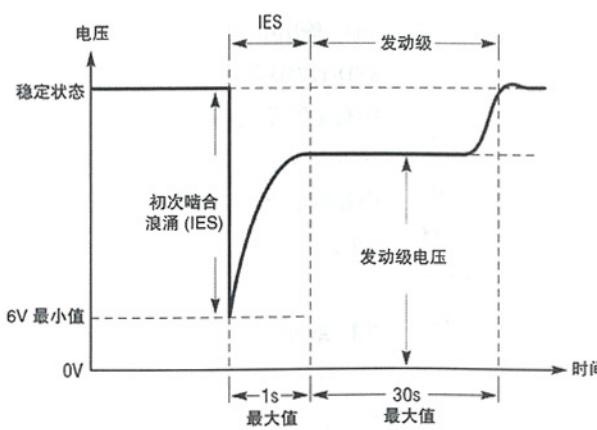


图 4 启动干扰

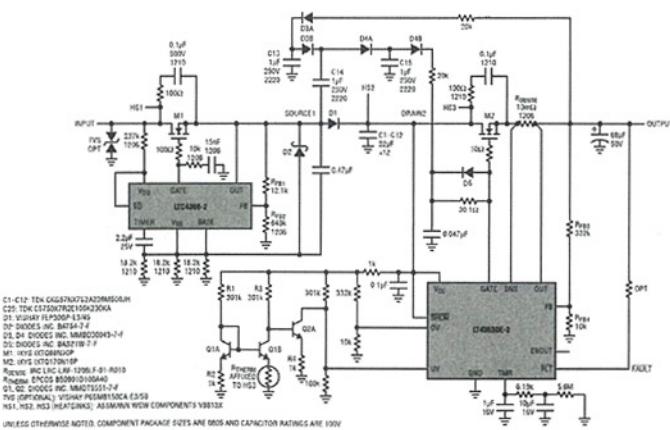


图 5 符合 MIL-STD-1275D 要求的 4A/28V 解决方案向 4A 负载不间断供电，同时在 MIL-STD-1275D 规定的 100V/500ms 浪涌和 $\pm 250V$ 尖峰时将输出电压限制到 44V；在 $\pm 7V$ 纹波时向 2.8A 负载供电

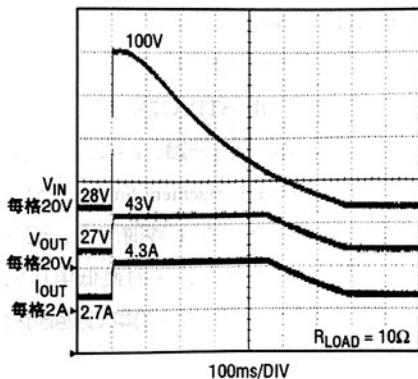


图6 MIL-STD-1275D 100V/500ms浪涌测试

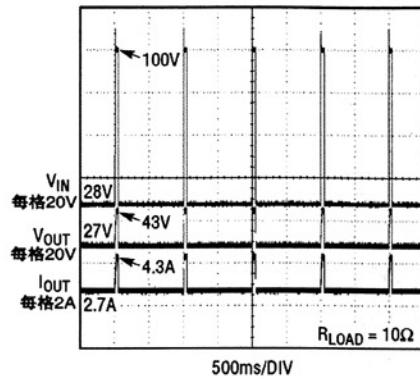


图7 MIL-STD-1275D 100V/50ms浪涌重复5次

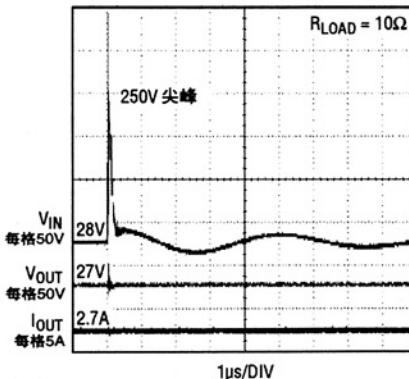


图8 正的输入尖峰

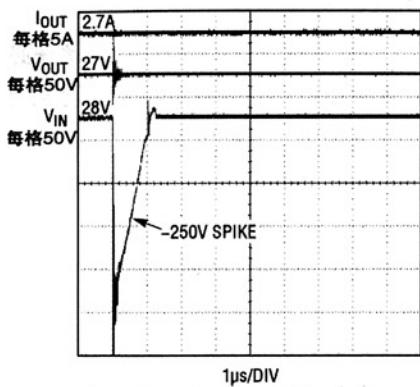


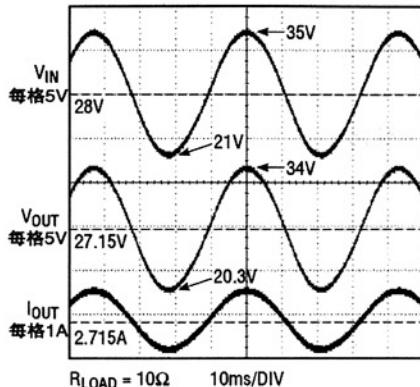
图9 负输入尖峰

或保险丝熔化。

当面对输入电压尖峰和浪涌时，LTC4366 和 LT4363 等高压浪涌抑制器用串联 MOSFET 限制输出电压，而不是用笨重的无源组件将很多能量分流到地。在正常运行时，MOSFET 得到全面改进以最大限度降低 MOSFET 的功耗。当浪涌或尖峰期间输入电压上升时，浪涌抑制器调节输出电压，以向负载提供安全、不间断的供电。电流限制和定时器功能保护外部 MOSFET 免受更严重情况的影响。

9 浪涌

在 MIL-STD-1275D 中，MOSFET 功耗最严重的情况发生在 100V 输入浪涌时。图 5 所示电路将输出电压调节至 44V。结果，该电路必须从 100V 输入下降 56V，降至 44V 输出。在这一符合 MIL-

图10 14V_{p-p}输入纹波情况

STD-1275D 要求的解决方案中，为了提高输出端可用功率，采用了两个串联 MOSFET。用 LTC4366 将第一个 MOSFET 的源极调节至 66V，同时用 LT4363 将第二个 MOSFET 的源极调节至 44V。这就降低了在两个 MOSFET 任意一个中必须消耗的功率。

图6和图7显示了浪涌测试时测得的结果。图6中的示波器波形显示，这个电路的工作满足之前描述的全部 100V/500ms MIL-STD-1275D 浪涌要求。图 7 显示，这个电路工作在描述于 MIL-STD-1275D 推荐测试中可经受不那么严格的 100V/50ms 脉冲情况。

10 尖峰

MOSFET M1 处理 +250V 尖峰情况，该 MOSFET 规定从漏极到源极承受超过

300V 的电压。MIL-STD-1275D 规定，输入能量限制到 15mJ，完全处于这个 MOSFET 能力范围之内。图 8 显示，输入端的 +250V 尖峰与输出之间隔离了。

类似地，-250V 尖峰测试结果如图 9 所示。在这种情况下，二极管 D1 在-250V 尖峰时反向偏置，隔离了来自 M2 的尖峰和输出。D1 也提供反向极性保护，从而防止负输入电压出现在输出端。(D1 前面的 LTC4366 浪涌抑制器无需额外保护，就能承受反向电压和-250V 尖峰。)

可选双向瞬态电压抑制器 (TVS) 放置在输入端以提供额外保护。其 150V 击穿电压不影响电路在低于 100V 时工作。对于输入端不想要 TVS 的应用而言，这种可选组件可以去除。请注意，在图8和图9中，输出电压曲线 (V_{OUT}) 显示，在 MIL-STD-1275D 尖峰期间有高频振铃，这是当所有电阻和电感都最大限度减小、0.1μF 测试电容器直接在电路输入端放电时，在电源和地走线中流动的大电流产生之测量干扰。

11 纹波

若要满足 MIL-STD-1275D 纹波规格要求，需要更多的组件。二极管 D1 与电容器 C1 - C12 构成一个 AC 整流器。整流后的信号出现在 DRAIN2 节点。

LT4363 与检测电阻器 R_{SENSE} 相结合，

将最大电流限制到 5A (典型值)。如果输入纹波波形的上升沿试图以超过 5A 的电流上拉输出电容器，那么 LT4363 通过下拉 M2 的栅极的瞬间地限制住该电流。

为了快速地恢复栅极电压，用组件 D3 - D4、C13 - C15 构成的小型充电泵补充 LT4363 的内部充电泵，以快速上拉 MOSFET M2 的栅极。即便如此，在这种纹波情况下，可用负载电流必须降至

2.8A。图 10 显示，在纹波测试时仍然给输出供电。

12 过热保护

最后，过热保护由组件 Q1、Q2、R1 - R4 和热敏电阻器 R_{THERM} 实现。如果 M2 散热器 (HS3) 的温度超过 $105^{\circ} C$ ，那么 Q2A 就下拉 LT3463 的 UV 引脚，强制 MOSFET M2 断开，限制其最高温度。

应该提到的是，如果采用这些规定的组件，那么在启动模式初次啮合浪涌时，该电路仅保证工作至 8V 最低电压，而不是 MIL-STD-1275D 规定的 6V 最低电压。

一般情况下，EMI 滤波器放置在 MIL-STD-1275D 兼容系统的输入端，而浪涌抑制器并未消除对滤波的需求，它们的线性模式工作未引入额外噪声。EW