

# 非常见问题第187期: 如何选择合适的电路保护

Diarmuid Carey, 应用工程师

## 问题:

有什么有源电路保护方案可以取代TVS二极管和保险丝?



## 答案:

可以试试浪涌抑制器。

### 摘要

所有行业的制造商都在不断推动提升高端性能, 同时试图在此类创新与成熟可靠的解决方案之间达成平衡。设计人员面临着平衡设计复杂性、可靠性和成本这一困难任务。以一个电子保护子系统为例, 受其特性限制, 无法进行创新。这些系统保护敏感且成本高昂的下游电子器件 (FPGA、ASIC和微处理器), 这些器件都要求保证零故障。

许多传统的可靠保护解决方案 (例如二极管、保险丝和TVS器件) 能够保持待保护状态, 但它们通常低效、体积庞大且需要维护。为了解决这些不足, 有源智能保护IC应运而生, 它们能够达到传统方法的保护要求, 而且从有些方面来看,

它们更加可靠。但是器件种类繁多, 所以, 设计人员面临的最困难的问题就是选择合适的解决方案。

为了帮助设计人员缩小选择范围, 本文对传统保护方法和ADI保护产品系列进行比较, 以展示这些产品和建议应用的特性。

### 简介

随着所有行业中电子器件的使用数量不断增加, 且成本高昂的FPGA和处理器的处理功能不断扩展, 人们越来越要求对这些在严苛环境中运行的器件提供保护。此外, 还需要它们体积小、可靠性高, 能够快速响应过压和过流浪涌事件。本文探讨了许多应用面临的挑战, 以及为何需要保护, 比较了传统的保护方法和更新的可替代解决方案, 后者具有更高的精度、可靠性和设计灵活性。

### 为何考虑使用电压和电流保护器件?

汽车、工业、通信和航空电子系统需经受一系列电源浪涌, 例如图1所示的这些。在这些市场中, 许多行业规范都对瞬态事件进行了定义。例如, ISO 7637-2和ISO 16750-2规范定义了汽车瞬态, 详细概述了预期瞬变, 以及确保持续验证这些瞬变的测试步骤。

浪涌事件的类型和所含能量会因电子器件的使用区域而异; 电路可能遭受过压、过流、反向电压和反向电流等情况。最后, 如果要直接经受图1所示的这些瞬变条件, 许多电路都无法维持, 更不用说独立运行, 所以设计人员必须考虑所有输入情况, 并采取可以保护电路不受电压和电流浪涌影响的机制。

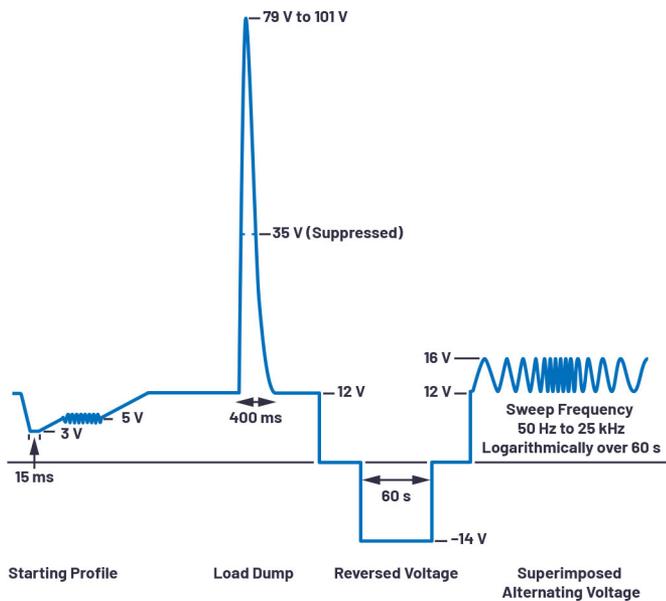


图1. 一些更严格的ISO 16750-2测试的概述。

## 设计挑战

有很多不同原因会引发电子系统中出现瞬变电压和电流，但有些电子环境比其他环境更容易发生瞬变事件。众所周知，汽车、工业和通信环境中的应用会经受过有潜在危害的事件，对下游电子器件造成严重损坏，但浪涌事件并不只是在这些环境下发生。其他可能需要浪涌保护电路的情况包括：需要高压或大电流电源的应用、采用热插拔电源连接的应用，或者包含电机或可能受到雷击感应瞬变影响的系统。高压事件持续的时间不等，从几微秒到几百毫秒都有可能，所以必须采用灵活可靠的保护机制来确保下游成本高昂的电子器件的使用寿命。

例如，当交流发电机（为电池充电）与电池暂时断开时，会发生汽车负载突降。发生这种断开后，交流发电机提供的满负荷充电电流会传输至电源轨，使电源轨电压在数百毫秒内攀升到极高(>100 V)水平。

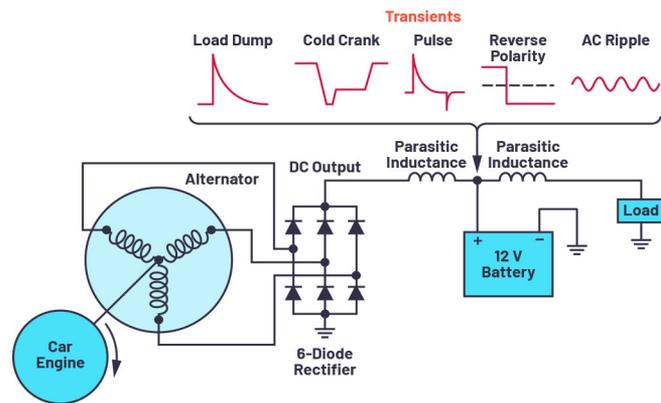
有多种原因可能导致通信应用发生浪涌，从热插拔通信卡到可能受到雷电影响的户外装置，涉及多种应用。大型设施中使用的长电缆也可能产生感应电压尖峰。

最终，设计人员必须充分了解器件的使用环境，并满足既有的规范要求，这有助于他们综合考虑所有故障类型以采用最佳的保护机制，使其可靠且不会产生干扰，但允许下游电子器件能够在安全电压范围内运行，且保证最低中断。

## 传统保护电路

在需要考虑如此多种不同类型的电子问题的情况下，电子工程师应如何保护敏感的下流电子器件？

传统保护方法基于多个器件提供保护，而不是基于一个，例



如，采用瞬变电压抑制器(TVS)提供过压保护，采用线路保险丝提供过流保护，采用串联二极管提供反向电池/电源保护，以及混合使用电容和电感来过滤更低的电能尖峰。虽然离散配置可以满足既定的规范要求（保护下游电路），但它实施起来很麻烦，需要进行多次选择来确定合适的滤波规格。

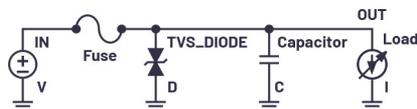


图2. 传统保护器件。

我们来仔细了解一下这些器件，弄清楚这种实施方法的优点和缺点。

## TVS——瞬变电压抑制器

这是一种相对简单的器件，可以保护下游电路不受电源上的高压尖峰影响。它们可以分为几种不同的类型，具有广泛的特性（表1按响应时间从最短到最长的顺序排列）。

表1. 不同瞬变电压抑制器件的响应时间

瞬变电压抑制器件	响应时间
TVS二极管	~1 ps
金属氧化物压敏电阻(MOV)	~1 ns
雪崩二极管/齐纳二极管	<1 μs
气体放电管(GDT)	<5 μs

虽然它们的结构和特性各异，但使用方式是相似的：当电压超过器件阈值时，分流多余的电流。TVS可以在极短时间内将输出电压固定在额定水平。例如，TVS二极管的响应时间可以低至皮秒，GDT的响应时间则可能有几微秒，但可以处理更大的浪涌。

图3显示了用于保护下游电路的TVS二极管的简单配置。在正常工作条件下，TVS具有高阻抗，输入电压会直接传输至输出。当输入端出现过压时，TVS开始导电，并将多余的电能分流到接地(GND)，从而箝位下游负载电压。电源轨电压升高到典型操作值以上，但被箝位到保证下游电路可以安全运行的值。

虽然TVS器件在抑制极高电压偏移方面很有效，但在遭受持续过压时，也不能避免损坏，因此需要定期监测或更换。另一个担心是TVS可能短路，导致输入电源断开。此外，根据涉及的电能大小，它们的尺寸可能需要很大才能满足裕量要求，导致解决方案的尺寸相应增大。即使TVS的尺寸正确，下游电路也必须能够处理箝位电压，对下游的电压额定要求也随之增高。

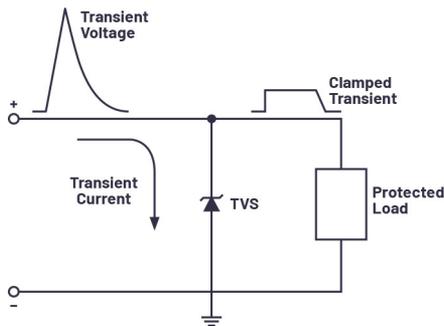


图3. 用传统的TVS解决方案保护电压浪涌。

### 线路保险丝

过流保护可以使用常见的线路保险丝实现，其熔断额定值高于标称值，例如，比最大额定电流高20%（百分比取决于电路类型以及预期的典型操作负载）。当然，保险丝最大的问题是一旦烧断就必须更换。保险丝设计相当简单，但维护相对复杂，特别是在难以接触的位置，所以后期还是会耗费时间和成本。使用备用保险丝（例如可复位保险丝）可以减少维护要求，它会在高于标称电流的电流流经器件时，利用正温度系数打开电路（电流增高之后会令温度增高，导致电阻急剧升高）。

除维护问题外，保险丝最大的问题之一是其反应时间，根据所选保险丝的类型，反应时间可能有很大差异。我们可以使用快速熔断保险丝，但熔断时间（打开电路的时间）仍然可能需要几百微秒到毫秒，所以电路设计人员必须考虑这些时间段内释放的电能大小，保证下游电子器件不被损坏。

### 串联二极管

在某些环境中，电路可能断开，然后重新连接——例如，在电池供电环境中。在这种情况下，电源重新连接时不能保证极性是正确的。我们可以通过在电路的正极供电线上增加一个串联二极管来实现极性保护。虽然这种简单的增加可以有效防止反向极性，但串联二极管的压降会导致相应的功率损耗。在电流相对较低的电路中，这种取舍很小，但对于许多现代化的高电

流电轨，则需要采用另一种解决方案。图4是对图3的更新，显示利用TVS和增加的串联二极管来防止出现反向极性连接。

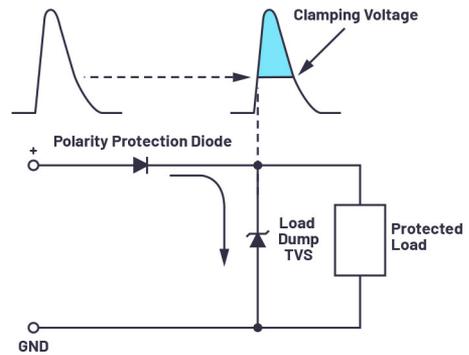


图4. 增加串联二极管可以防止反向极性连接，但在大电流系统中，二极管的压降可能是一大问题。

### 使用电感和电容的滤波器

目前所讨论的无源解决方案都是通过限制幅度，但通常只能捕捉更大的幅度，会放过更小的一些尖峰。这些较小的瞬变仍然会对下游电路造成损坏，因此需要使用额外的无源滤波器来平缓尖峰。这可以通过使用离散电感和电容来实现，通过调整它们的尺寸，让它们衰减超出频率范围的电压。在设计之前，需要对滤波器设计进行测试和测量，确定它们的尺寸和频率，然后才能正确确定滤波器的尺寸。这种方法的缺点在于，需要考虑物料成本和面积要求（元器件的板面积和成本要达到多少才能达到滤波水平），以及是否需要过度设计（确定元器件的公差，以能够在随时间和温度变化时提供补偿）。

### 使用浪涌抑制器提供有源保护

要克服所述的无源保护解决方案面临的挑战和存在的缺点，方法之一是转为使用浪涌抑制器IC。浪涌抑制器采用易于使用的控制器IC和串联N通道MOSFET，因此无需使用繁杂的分流电路（TVS器件、保险丝、电感和电容）。因为只需确定少数几个元器件的尺寸和让它们通过质量认证，所以浪涌抑制器控制器可以极大地简化系统设计。

浪涌抑制器持续监测输入电压和电流。在额定工作条件下，控制器驱动N通道MOSFET通路器件的栅极完全开启，提供一条从输入到输出的低阻抗路径。在发生过压或浪涌时（阈值由输出端的反馈网络给出），IC调节N通道MOSFET的栅极，将MOSFET的输出电压箝位到电阻分压器设定的电平。

图5显示了浪涌抑制器配置的简化示意图，以及标称12 V电源轨上出现100 V输入浪涌时的结果。在浪涌发生期间，浪涌抑制器电路的输出被箝位到27 V。一些浪涌抑制器也使用串联感应电阻（图5中的断路器）来监测过流情况，并调整N通道MOSFET的栅极，以限制输出负载端的电流。

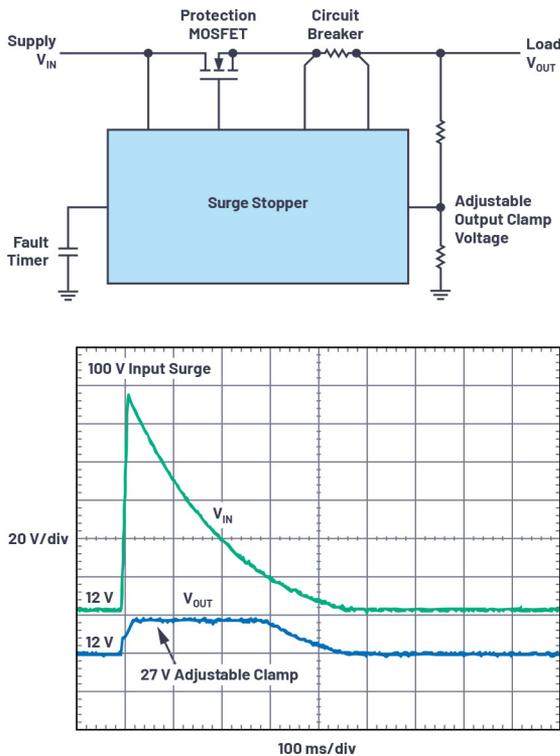


图5. 浪涌抑制器配置的详细示意图。

根据对过压事件的响应，可以将浪涌抑制器分为四大类：

- ▶ 线性浪涌抑制器
- ▶ 栅极箝位
- ▶ 开关浪涌抑制器
- ▶ 输出断开保护控制器

浪涌抑制器应基于应用进行选择，所以，我们来比较一下它们的操作和优点。

### 浪涌抑制器类型：线性

线性浪涌抑制器驱动串联MOSFET的方式和线性稳压器比较类似，是将输出电压限制在预先设置的安全值，并耗散MOSFET中的多余能量。为了保护MOSFET，该器件通过采用电容故障定时器来限制在高耗散区花费的时间。

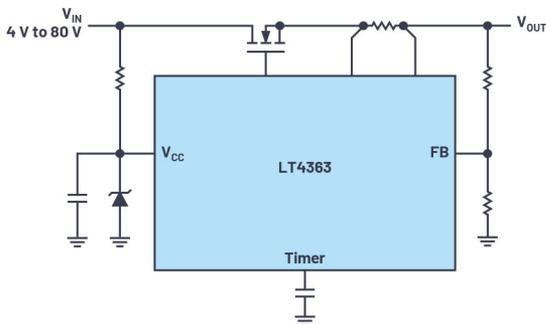


图6. LT4363线性浪涌抑制器。

### 浪涌抑制器类型：栅极箝位

栅极箝位浪涌抑制器利用内部或外部箝位（例如，31.5 V或50 V内部箝位，或可调的外部箝位）将栅极引脚的电压限制到这个电压值，然后，由MOSFET的阈值电压决定输出电压限值。例如，在使用内部31.5 V栅极箝位，且MOSFET阈值电压为5 V时，输出电压限制为26.5 V。或者，外部栅极箝位允许更广泛的电压选择范围。栅极箝位浪涌抑制器的示例如图7所示。

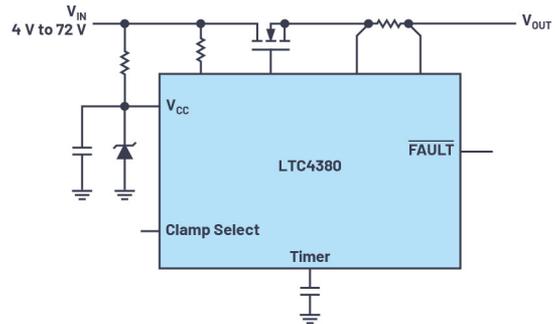


图7. LTC4380栅极箝位浪涌抑制器。

### 浪涌抑制器类型：开关

对于更高功率的应用，开关浪涌抑制器是一个很好的选择。与线性 and 栅极箝位浪涌抑制器一样，开关浪涌抑制器在正常操作条件下可以充分增强调整FET，以在输入和输出之间提供一个低阻路径（最小化功率损耗）。开关浪涌抑制器和线性或栅极箝位浪涌抑制器之间的主要区别出现在检测到浪涌事件时。在浪涌事件中，开关浪涌抑制器是通过开关外部MOSFET（比较类似于开关DC-DC转换器），将输出调节到箝位电压。

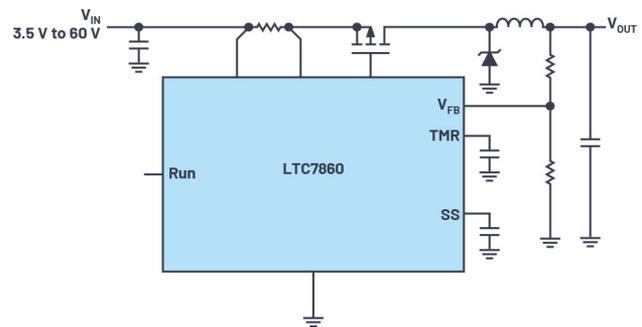


图8. LTC7860开关浪涌抑制器。

### 保护控制器：输出断开

保护控制器不是真正的浪涌抑制器，但它确实能停止浪涌。和浪涌抑制器一样，保护控制器监测过压和过流条件，但它不会箝位或调节输出，而是通过立即断开输出出来保护下游电子器件。这种简单保护电路的布局紧凑，非常适合由电池供电的便携式应用。LTC4368保护控制器的简化示意图，以及它对过压事件的响应如图9所示。保护控制器有许多版本。

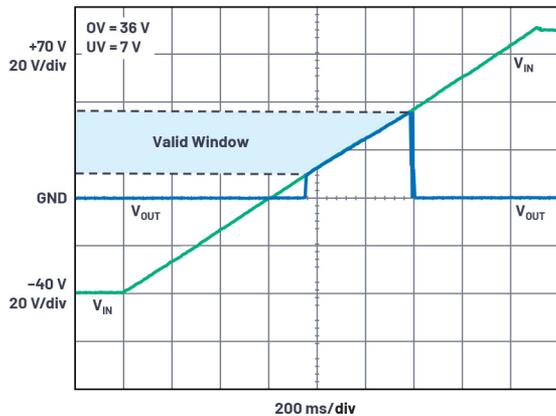
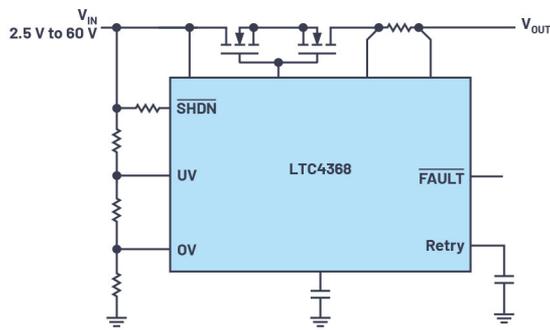


图9. LTC4368保护控制器。

保护控制器会监测输入电压，确保电压保持在OV/UV引脚的电阻分压器所配置的电压范围内，当输入电压超过这个范围时，利用背对背MOSFET断开输出，如图9所示。背对背MOSFET也可用于防止反向输入。输出端的感应电阻通过持续监测正向电流来实现过流保护，但不需要基于计时器的穿越操作。

## 浪涌抑制器特性

为了给您的应用选择最合适的浪涌抑制器，您需要知道有哪些可用特性，以及它们可以帮助解决哪些挑战。您可以在[参数表](#)中查找这些器件。

## 断开与穿越

一些应用要求在检测到浪涌事件时断开输出和输入的连接。在这种情况下，需要断开过压连接。如果您需要输出在浪涌事件发生时保持正常运行，从而最大限度减少下游电子设备的停机时间，则需要浪涌抑制器在发生浪涌时进行穿越。在这种情况下，使用线性或开关浪涌抑制器可以实现这一功能（前提是，对于拓扑和所选的FET，功率电平是合理的）。

## 故障定时器

实施穿越时，需要对MOSFET提供保护，以防它受到持续浪涌影响。为了确保留在FET的安全工作区(SOA)内，可以使用定时器。定时器本质上是一个接地电容。发生过压时，内部电流源开始为这个外部电容充电。电容达到一定的阈值电压时，数字故障引脚拉低，表明受时间延长的过压影响，调整管将很快关闭。如果定时器引脚电压继续上升到二级阈值，栅极引脚将拉低，以关闭MOSFET。

定时器电压的变化率随通过MOSFET的电压而变化，也就是说，电压越大，时间越短，电压越小，时间越长。这个有用特性使器件能够平稳度过短时过压事件，允许下游元器件保持运行，同时保护MOSFET不因持续时间更长的过压事件出现损坏。有些器件具有重试功能，使器件能在冷却之后再次打开输出。

## 过流保护

许多浪涌抑制器都能够监测电流和保护器件不受过流事件影响。这是通过监测串联感应电阻上的压降并作出适当响应来实现的。也可以通过监测和控制浪涌电流来保护MOSFET。其响应可能与过压情况类似，这是因为如果电路能够接受这种功率电平，那么它要么通过门锁断开，要么通过穿越事件来断开。

## 反向输入保护

浪涌抑制器具有广泛的操作能力（能够承受某些器件上高达60 V的地下电压），所以能够提供反向输入保护。图10显示了提供反向电流保护的背对背MOSFET配置。在正常运行期间，Q2和Q1由栅极引脚开启，Q3不产生任何影响。但是，出现反向电压连接时，Q3开启，将Q2的栅极下拉至负输入并隔离Q1，以保护输出。

也可以通过可靠的器件引脚保护来实现反向输出电压保护，根据所选的器件，可以承受高达20 V的接地电压。

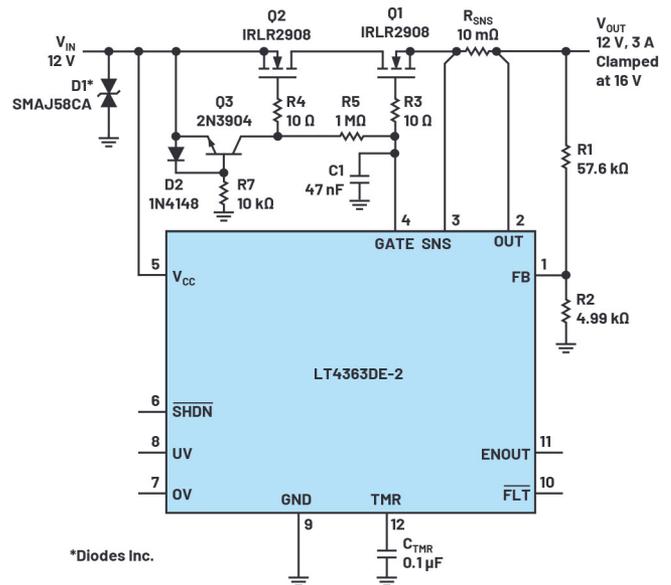


图10. LT4363反向输入保护电路。

对于需要宽输入电压范围的应用，可以使用浮动拓扑浪涌抑制器。发生浪涌事件时，浪涌抑制器IC会监控整个浪涌电压，由内部晶体管技术限制IC的电压范围。使用浮动浪涌抑制器（例如LTC4366）时，IC浮动刚好低于输出电压，为其提供更广泛的工作电压范围。电源回流线中包含一个电阻( $V_{SS}$ )，允许IC随电源电压浮动。如此，由外部元件和MOSFET的电压功能设置输入电压限值。图11显示的应用电路可以在保护后端负载时，使用极高的直流电源正常运行。

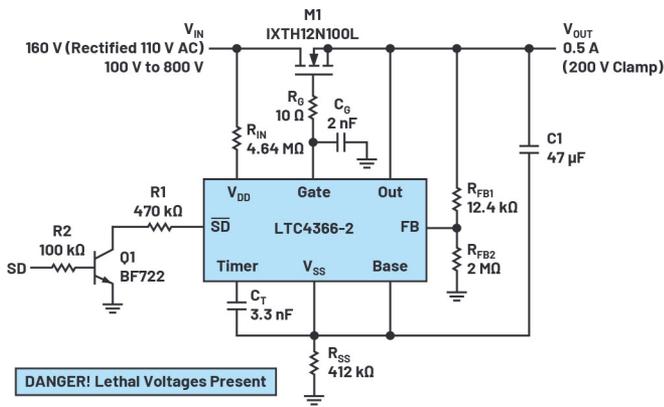


图11. LTC4366高压浮动拓扑。

## 为我的应用选择正确的器件

由于浪涌抑制器本身采用可靠设计，所以能从很多方面简化保护电路的设计。数据手册已显示许多可能的应用，在确定元器件尺寸时，能够提供很大帮助。最困难的部分可能是选择最适合的器件。您可以遵循以下几个步骤来缩小范围：

- ▶ 访问ADI的保护器件系列[参数表](#)。
- ▶ 选择输入电压范围。
- ▶ 选择通道数量。
- ▶ 筛选功能，缩小可行选项的范围。

和所有产品选型一样，在查找正确的器件前，您需要了解您的系统要求，这点非常重要。一些重要的考虑因素包括：预期的电源电压和下游电子器件的电压容限（在决定箝位电压时非常重要），以及对设计而言非常重要的一些特性。



## 作者简介

Diarmuid Carey是欧洲中央应用中心的应用工程师，工作地点在爱尔兰利默里克。他自2008年以来一直担任应用工程师，并于2017年加入ADI公司，为欧洲的众多市场客户提供Power by Linear产品组合的设计支持。他拥有利默里克大学计算机工程学士学位。联系方式：[diarmuid.carey@analog.com](mailto:diarmuid.carey@analog.com)。

以下是一些经过筛选的参数表示例，供大家参考。大家可以访问网站，在网站上进一步更改这些参数表，可以添加一些其他参数。

- ▶ 高压浪涌抑制器器件请参见[这里](#)。
- ▶ 具有过压断开功能的保护控制器请参见[这里](#)。

## 结论

无论采用哪种类型的浪涌抑制器，基于IC的有源浪涌抑制器设计都无需使用繁杂的TVS二极管，或使用大尺寸电感和电容来进行滤波。所以，解决方案的整体面积更小，体积也更小巧。相比TVS，其输出电压箝位精度可能高出1%至2%。如此可以防止过度设计，且能够选择公差更严格的下游器件。

ADI提供的系统保护器件系列让设计人员能够采用可靠、灵活且小巧的解决方案为下游器件提供保护，尤其是对于工业、汽车、航空航天和通信设计中可能面临严苛的过压和过流事件的器件。

## 参考资料

“AN-9768: 瞬变抑制器件和原则。” Littelfuse, 1998年1月。

“Fuseology。” 乘用车解决方案目录, Littelfuse, 2014年。

Jim Kalb. “总熔断时间” 技术简报, OptiFuse, 2010年1月。

David Megaw. “为汽车电子系统提供供电和保护，无开关噪声，效率高达99.9%。” 模拟对话, 第54卷第1期, 2020年2月。

Wu Bin、Zhongming Ye. “用于恶劣汽车环境的全面电源系统设计占用空间极小，可节约电池电量且具有低EMI特性。” 模拟对话, 第53卷第3期, 2019年8月。

