

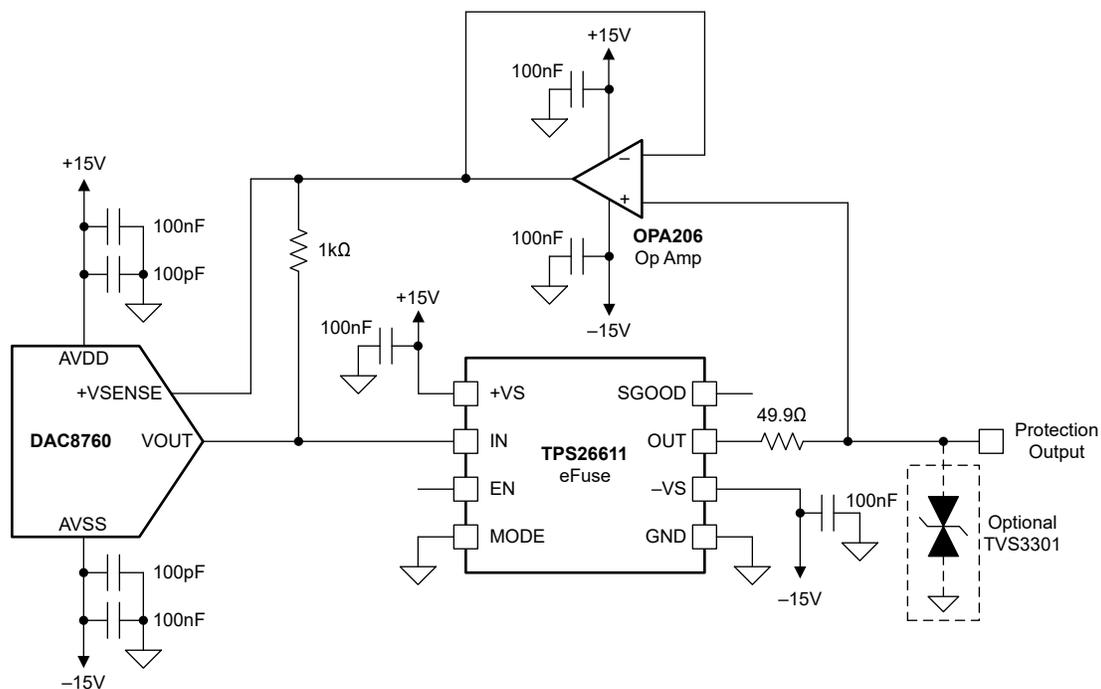
设计目标

主要输入参数	主要输出信号	推荐器件
通过 SPI 或 I ² C 通信控制 DAC 电压输出	$\pm 10\text{V}$ 输出 DAC 信号 ，具有过压保护功能	DAC8760、OPA206、TPS26611、 TVS3301 (可选)

目标：保护 $\pm 10\text{V}$ 输出信号免受持续 $\pm 32\text{V}$ 过压连接的影响，适用于带反馈检测引脚的输出缓冲器的数模转换器 (DAC)。

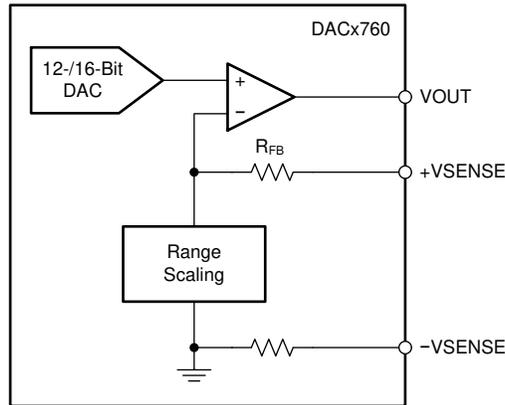
设计说明

该电路设计描述了用于精密 DAC 输出的过压保护电路。该电路可保护 DAC 输出免受高于最大电源电压和低于最小电源电压的持续过压的影响。在带有正向检测引脚的器件中，DAC 输出缓冲器包含在器件内，可对输出缓冲器的正向检测反馈引脚进行引脚访问。过压保护电路由以下部分组成：一个配置为单位增益、用于输出缓冲器反馈检测引脚的带输入保护的运算放大器，一个用于保护输出的电子保险丝 (eFuse)，以及一个可选的瞬态电压抑制 (TVS) 二极管。当 DAC 工作电压 $\pm 15\text{V}$ 时，输出受到 $\pm 32\text{V}$ 或更高保护，而不会损坏 DAC 和保护电路。这种类型的保护电路缓冲器可用于许多工业工厂自动化和控制应用。如果输出端在可编程逻辑控制器 (PLC) 等输出端子上遇到因接线错误而导致的过压事件，该电路会特别实用。



设计说明

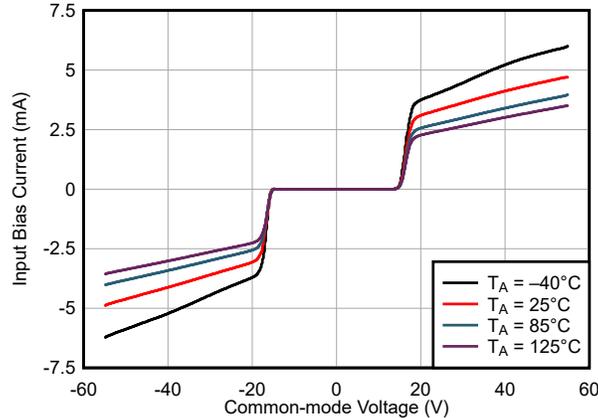
1. 该设计利用正向检测引脚作为反馈，保护 DAC 的输出免受持续过压事件的影响。正向检测引脚是电压 DAC 输出缓冲器的反馈引脚。下图为基本示意图。



该检测引脚用作开尔文连接，在存在长布线或电缆的情况下，可提供更高的精度。有许多 DAC 都配置了正向检测引脚，但本电路以 DAC8760 为例进行说明。DAC 输出设置为 $\pm 10V$ 的范围。

2. 如果 DAC 没有将正向检测引脚用作反馈，则可以采用 [无外部反馈引脚的电压 DAC 的输出过压保护电路](#) 中的电路来保护 DAC 输出。
3. DAC8760 具有三个独立的电源输入 (AVDD、VDD 和 AVSS)。DAC8760 数据表建议为每个电源引脚配备去耦电容器。在该电路中，100nF 和 100pF 的电容器并联，用作 AVDD 和 AVSS 的去耦电容器。DVDD 引脚使用一个 100nF 电容器，未在电路中显示。
4. REFOUT 是 DAC8760 内部基准的输出端。如果使用了内部基准，则在 REFOUT 引脚与接地引脚之间连接一个 100nF 电容器。REFOUT 同样未在电路中显示。
5. 通过将运算放大器配置为单位增益缓冲器，对 DAC 输出电压的 +VSENSE 反馈进行缓冲，从而保护 DAC 免受过压事件的影响。输出保护需要保护运算放大器的输入免受超出电源电压的持续过压影响，并且在过压事件发生时，保护 DAC 输出避免拉出或灌入过大电流。
6. 在 VOUT 和 +VSENSE 之间可选用一个 $1k\Omega$ 的电阻器。该电阻器用于防止在反馈检测信号中断时，DAC 的输出缓冲器反馈环路断开。

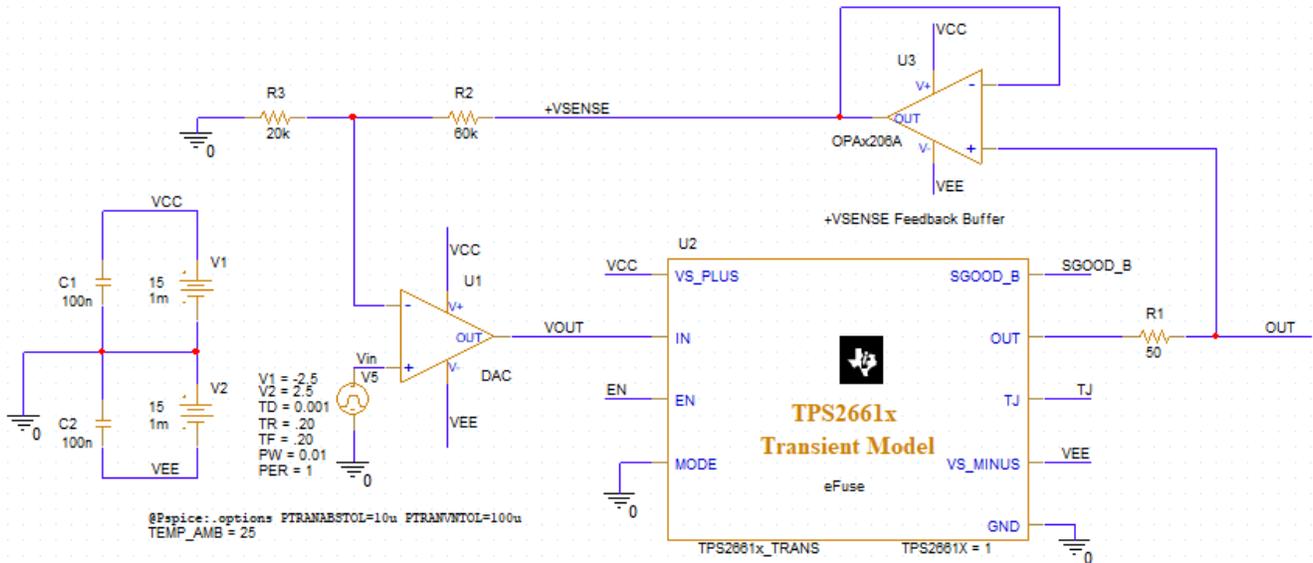
7. 在此电路中，为用于过压保护的运算放大器反馈缓冲器选用 **OPA206**。选择该运算放大器因其具有以下几个特性：
- 失调电压非常低，缓冲器对 DAC 检测反馈输出的误差很小。OPA206 的失调电压通常为 $\pm 4\mu\text{V}$ (25°C 处) 和 $\pm 55\mu\text{V}$ (从 -40°C 到 125°C)。
 - OPA206 具有集成的输入过压保护功能，可在运算放大器电源电压的基础上扩展至 $\pm 40\text{V}$ 。下图显示了相对于 OPA206 的输入共模电压的输入偏置电流。



- 如果使用没有集成输入过压保护功能的替代运算放大器，则可以使用输入的串联电阻进行保护，以限制输入电流。有关运算放大器中过压和电气过载的更多信息，请参阅有关 [电气过载](#) 的 TI 高精度实验室 - 运算放大器视频。
8. **TPS26611** 是一款电流环路保护器，充当电子保险丝来限制 DAC8760 在 VOUT 引脚处的电压输出电流。TPS26611 具有 32mA (I_{OL}) 的固定双极性电流限制。
- 在正常运行时，TPS26611 允许 DAC8760 的输出电流通过。即使 DAC8760 的短路电流限制通常为 30mA，但当输出电压被强制超过 DAC 的电源电压时，仍然无法限制通过 ESD 二极管流向输出端的电流。
 - TPS26611 的最大串联电阻为 $12.5\ \Omega$ 。由于有了额外的 $49.9\ \Omega$ 串联电阻，15mA 输出端电源输出所需的额外余量为 0.936V。在 $\pm 15\text{V}$ 电源和 $\pm 10\text{V}$ DAC 输出范围下，DAC 有足够的运行余量。
 - EN 和 $\overline{\text{SGOOD}}$ 引脚可保持悬空。
 - MODE 引脚设置为接地。在此设置下，器件行为取决于流经 TPS26611 的 I_{OUT} 电流。
 - 若 $I_{OUT} < I_{OL}$ ，电流 I_{OUT} 将通过 TPS26611。
 - 若 $I_{OUT} > I_{OL}$ ， I_{OUT} 会通过 TPS26611 快速限制在 I_{OL} ，持续时间为 100ms (t_{OL_Expiry})。若电流持续高于 I_{OL} ，器件会关闭输出，并在 800ms (t_{Retry1}) 后重试输出。
 - TPS26611 中的电流保护是双向的，对负电流的限制方式与之类似。
 - 如果输出电压被强制超过正电源或负电源电压，TPS26611 会切断输出，防止损坏。
 - 有关使用 TPS26611 作为模拟输出模块保护的更多信息，请参阅应用笔记《[使用 TPS2661x 的模拟输入和输出模块中的 HART I/O 保护](#)》。
9. 电路中可选用瞬态电压抑制 (TVS) 二极管，以提供额外的浪涌保护。如果使用 TVS 二极管，则所选的击穿电压必须高于任何可能的持续过压值。如果击穿电压低于持续过压，则过压可能会损坏 TVS 二极管。在此电路中、预期的持续过压为 $\pm 32\text{V}$ 、并使用具有双向 33V 击穿电压的可选 **TVS3301** 器件提供浪涌保护。

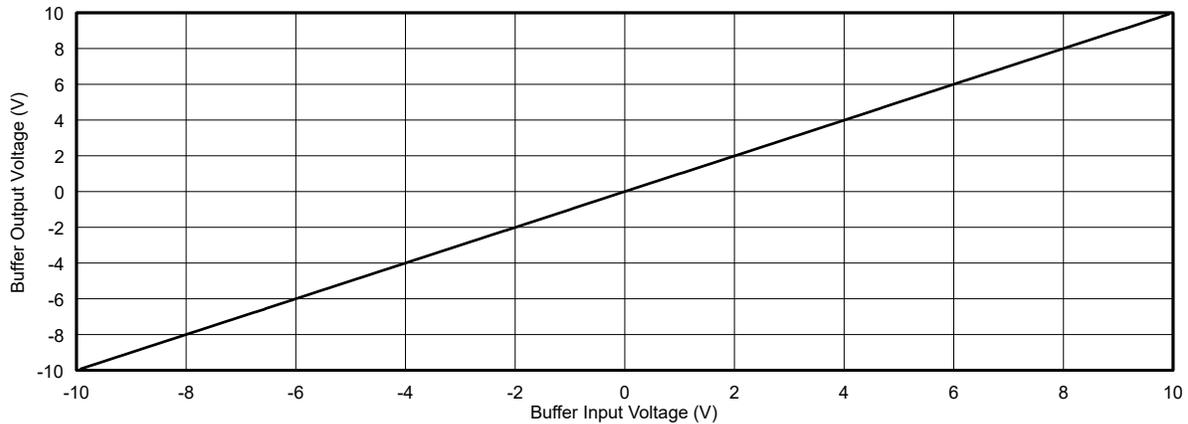
仿真

过压保护反馈缓冲器通过 PSpice® 进行仿真。首先、使用脉冲电压源作为 DAC 来模拟缓冲器的传递函数。反馈缓冲器的输入从 -10V 斜升至 +10V，显示了 DAC 的整个输出范围。另一个 OPA206 用作 DAC 输出缓冲器的模型。OPA206 的电流限制为 25mA，这是对 DAC8760 的近似模拟。该电流限制将在后续仿真中使用。

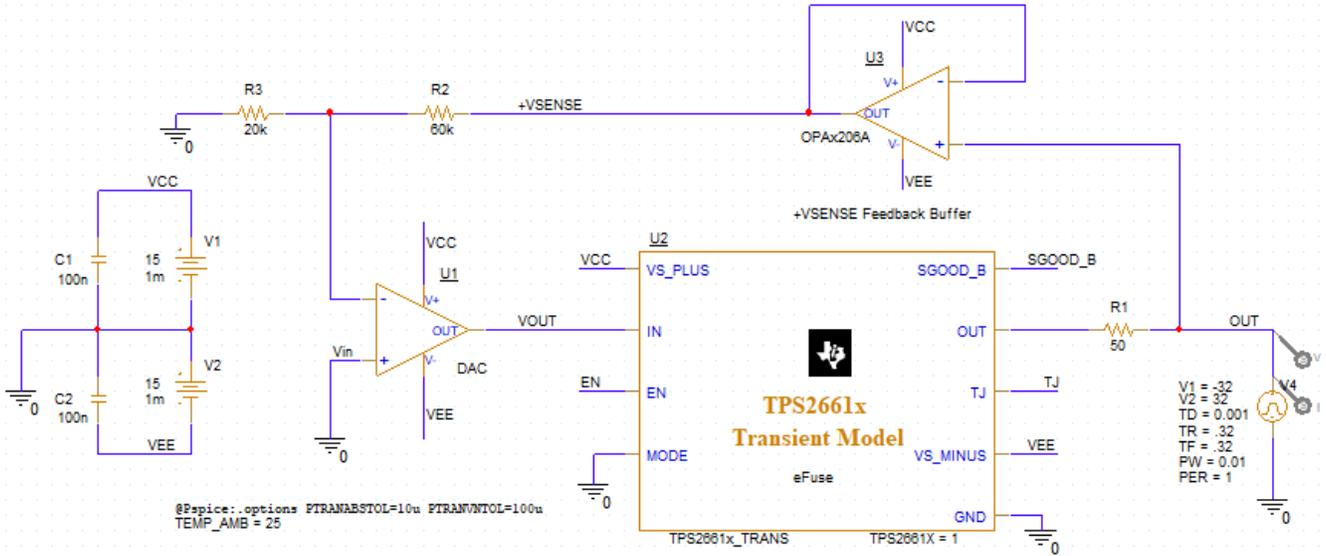


图左侧的运算放大器和电阻器网络代表电压 DAC 的输出和反馈。标记为 +VSENSE 和 VOUT 的节点是 DAC8760 的引脚。

从缓冲器输入到输出的传递函数源自瞬态仿真。

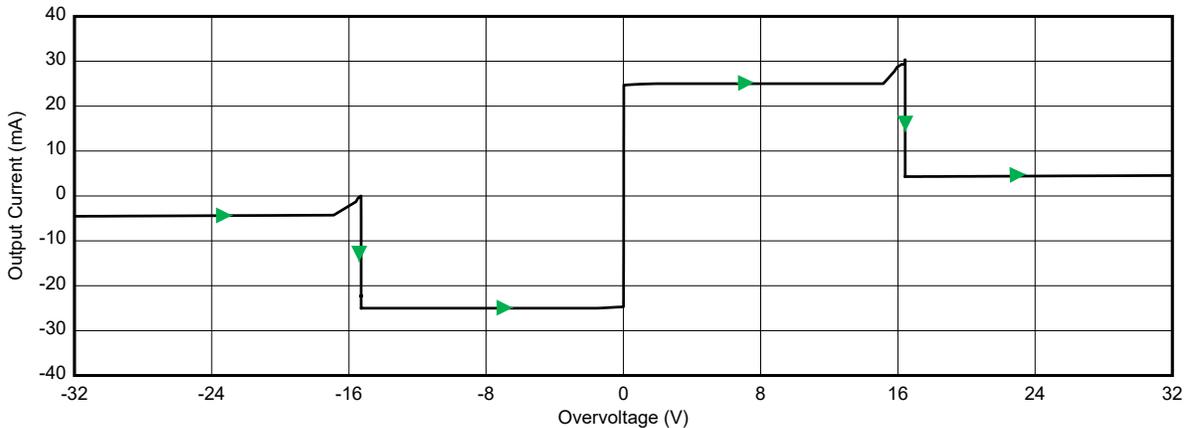


第二个瞬态仿真显示了过压事件期间的电流。



将 DAC 设置为 0V，并在缓冲器输出端接入一个电压源，以模拟由接线错误导致的过应力事件。电源斜坡模拟从 -32V 到 +32V 的过压变化过程。

仿真从 -32V 的输出开始，TPS26611 电子保险丝处于开路状态，从而防止从 DAC8760 的输出中获取任何电流。输出端的残余电流来自 OPA206 的输入端，其集成的输入保护将电流限制在约 5mA。随着电压降低，缓冲器输出端的电流保持为 5mA。



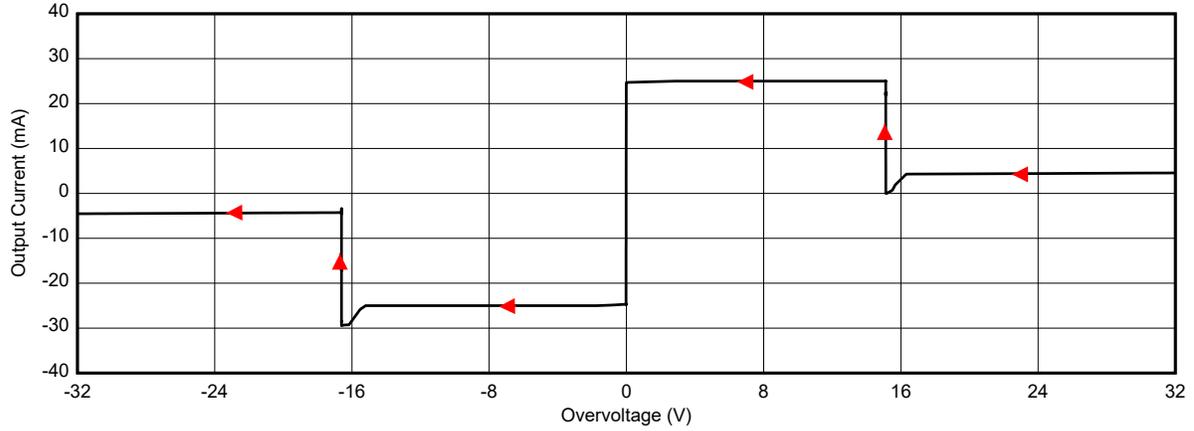
当电压升至接近 -15V 的较低电源电压时，TPS26611 开始从 DAC 输出端传导电流。在斜坡电压的驱动下，DAC 立即达到接近 30mA 的器件短路电流限制。此电流限制低于 TPS26611 的 32mA 电流限制水平，因此电流可以正常传导。DAC8760 在电流限制下持续工作不会造成损坏。

当斜坡电压升至 0V 以上时，DAC 的输出从拉电流变为灌电流。DAC 在相反方向被强制进入 30mA 的电流限制状态。

最后，斜坡电压上升至高于正电源。由于串联电阻和输出电流产生的附加电压，当斜坡电压升至 +16V 以上时，电子保险丝会检测到输出超出电源电压。检测到过压后，TPS26611 电子保险丝再次断开，DAC 输出停止灌入电流。此时，输出端仅存的电流来自 OPA206 的输入过压保护。

运行了类似的仿真，以显示反向电压转换过程。电源斜坡模拟从 +32V 到 -32V 的转换。仿真从 +32V 的输出开始，TPS26611 电子保险丝处于开路状态，从而防止从 DAC8760 的输出中获取任何电流。输出端的电流来自 OPA206 的输入端。随着输出电压下降，TPS26611 允许 DAC8760 的短路限制电流通过。

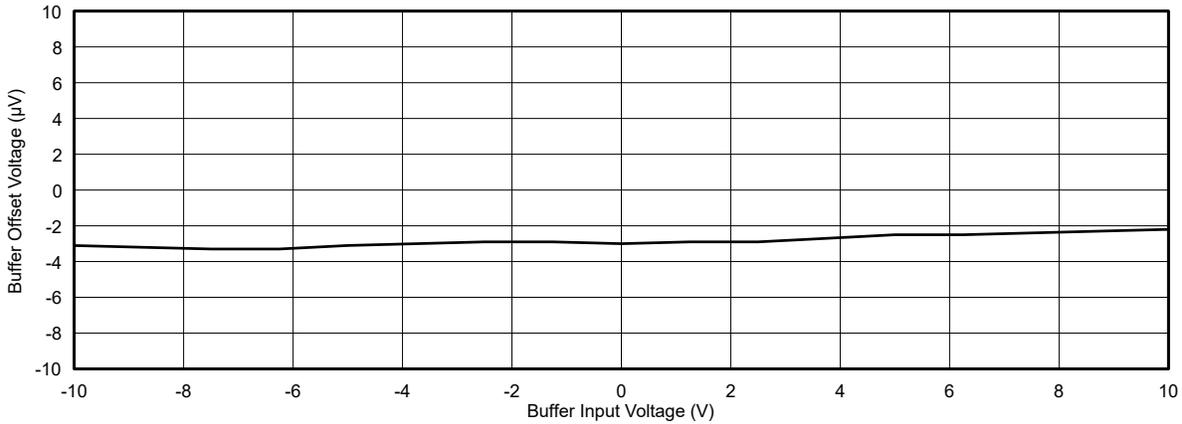
当电压降至 0V 以下时，DAC 的电流输出从灌电流变为拉电流。随着电压继续下降，当输出电压降至 -16V 以下时，TPS26611 关闭，电流来自 OPA206 的输入端。



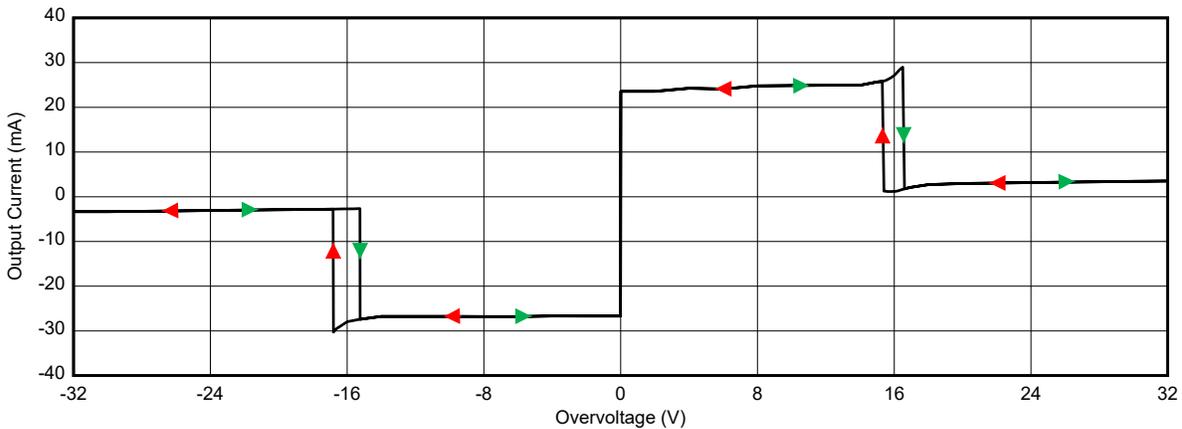
两个仿真中均未包含 TVS3301。仿真输出未超过 $\pm 33V$ 的保护阈值，该阈值会触发 TVS 导通。在 32V 的仿真电平下，TVS3301 不会影响保护缓冲器和 DAC 输出的工作。

测量结果

过压保护缓冲器为测试而构建，并连接到 [DAC8760EVM](#) 的输出端。首先，将 DAC 的输出从 -10V 斜升至 +10V，以驱动反馈缓冲器的输入。从缓冲器中测得的偏移在整个范围内小于 10 μ V。



将 DAC 设置为 0V，然后将输出连接到一个可变电源。当驱动输出时，会记录输出端的电流。测量开始时，电源电压为 -32V，可变电源电压升至 +32V。然后，输出从 +32V 改回 -32V。此设置与前面所述仿真中的原理图类似。



在测试中，OPA206 短路电流和输入保护电流略低于仿真值。TPS26611 电子保险丝的关闭和打开存在迟滞。这种迟滞在叠加正负过压仿真时可见，源于 TPS26611 输出端串联电阻器上的额外电压。在正常工作状态下，当 TPS26611 电子保险丝闭合且传导电流时，若输出上升并超过任一电源约 1.5V 至 2V，电子保险丝会断开。测量中，当输出被强制升至 16.5V 以上或降至 -16.8V 以下时，TPS26611 会关闭。若输出超出电源电压，当电压升至 -15.3V 以上或降至 +15.3V 以下时，TPS26611 会恢复工作。这一现象在两个过压仿真中均有体现，二者结合呈现出相同的迟滞特性。该迟滞源于 TPS26611 输出端串联电阻器上的附加电压。

寄存器设置

下表显示了此包含 DAC8760 的应用的示例寄存器映射。此处给出的值适用于在 [设计说明](#) 部分作出的设计选择。

DAC8760 的寄存器设置

寄存器地址	寄存器名称	设置	说明
0x56	复位	0x0001	[15:1] 0x0000 : 写入这些位不会导致任何变化 [0] 0b1 : 对所有寄存器执行软件复位
0x55	控制	0x1003	[15] 0b0 : 复位时, VOUT 清零并设置为 0V [14] 0b0 : 未使用 DAC 超量程功能 [13] 0b0 : 未使用外部 RSET 电阻器 [12] 0b1 : DAC 输出已使能 [11:8] 0b0000 : 压摆率时钟控制 (未使用) [7:5] 0b0 : 压摆率步长 (未使用) [4] 0b0 : 压摆率已禁用 [3] 0b0 : 保留, 必须设置为 0 [2:0] 0b011 : 电压输出设置为 $\pm 10V$ 范围
0x01	DAC 数据	0x8000	[15:0] 0x8000 : 设置 DAC 电压输出的新值为 0V (DAC 数据的默认设置为 0x0000, 在此 DAC 量程下, 该值会将 VOUT 设置为 10V)

伪代码示例

下面所示为将初始寄存器值设置到 DAC8760 的伪代码序列。以下伪代码将器件设置为一个通道以实现 $\pm 10V$ 输出。此处给出的值适用于在 [设计说明](#) 部分作出的设计选择。

DAC8760 伪代码示例

```

1: //SYNTAX: WRITE <REGISTER NAME (Hex code)>, <MSB DATA>, <LSB DATA>
2: //Perform a software reset to the device registers
3: WRITE RESET(0x56), 0x00, 0x01
4: //Set DAC to  $\pm 10V$  range and enable output
5: WRITE CONTROL(0x55), 0x10, 0x03
6: //Default output setting is to -10V, set output to 0V
7: WRITE DAC DATA Register(0x01), 0x80, 0x00

```

设计中采用的器件

使用 [参数搜索工具](#) 查找其他可能的器件。

器件	主要特性	链接
DAC8760	单通道、16 位可编程电流与电压输出数模转换器，适用于 4mA 至 20mA 电流环路应用	DAC8760
OPA206	具有输入过压保护功能的 4 μ V、0.08 μ V/ $^{\circ}$ C、低功耗超 β 型、电微调运算放大器	OPA206
TPS26611	50V、通用型 4 - 20mA、 \pm 20mA 电流环路保护器，具备输入和输出误接线保护功能	TPS26611
TVS3301	33V 双向平缓钳位浪涌保护器件	TVS3301

设计参考资料

有关 TI 综合电路库的信息，请参阅 [模拟工程师电路说明书](#)。

其他资源

- 德州仪器 (TI)，[DACx760EVM 和 DACx750EVM 用户指南](#)
- 德州仪器 (TI)，[无外部反馈引脚的电压 DAC 输出过压保护电路](#)
- 德州仪器 (TI)，[采用 TPS2661x 的模拟输入和输出模块中 HART I/O 保护应用报告](#)
- 德州仪器 (TI)，[高精度实验室系列：数模转换器 \(DAC\)](#)
- 德州仪器 (TI)，[高精度实验室系列：运算放大器](#)
- Planet Analog，[运算放大器输入保护可能存在噪声](#)

如需 TI 工程师的直接支持，请使用 E2E 社区：

e2e.ti.com

商标

PSpice[®] is a registered trademark of Cadence Design Systems, Inc..

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要通知和免责声明

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司