

Analog Engineer's Circuit  
适用于电压 **DAC** 且没有外部反馈引脚的输出过压保护电路



Precision DAC: Factory Automation and Control Joseph Wu and Art Kay

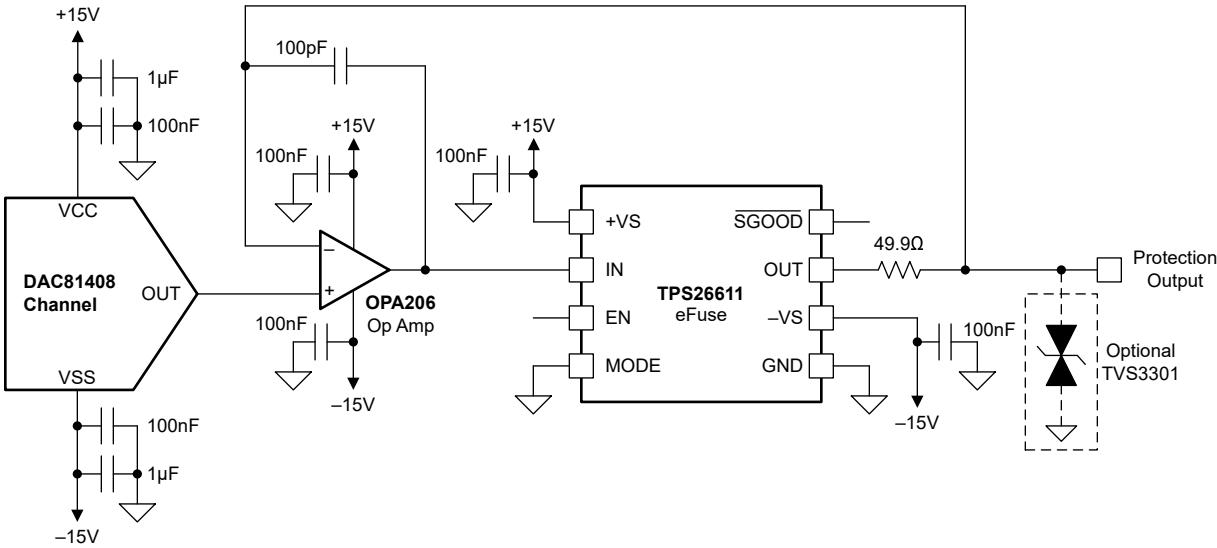
设计目标

| 主要输入参数                                    | 主要输出信号                     | 建议的器件                                      |
|-------------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------------|
| SPI 或 I <sup>2</sup> C 通信<br>来控制 DAC 电压输出 | ±10V 输出 DAC 信号<br>具有过压保护功能 | DAC81408、OPA206、TPS26611<br>TVS3301 ( 可选 ) |

目标：保护 ±10V 信号免受持续 ±32V 连接的影响，适用于不具有正检测引脚的数模转换器 (DAC)。

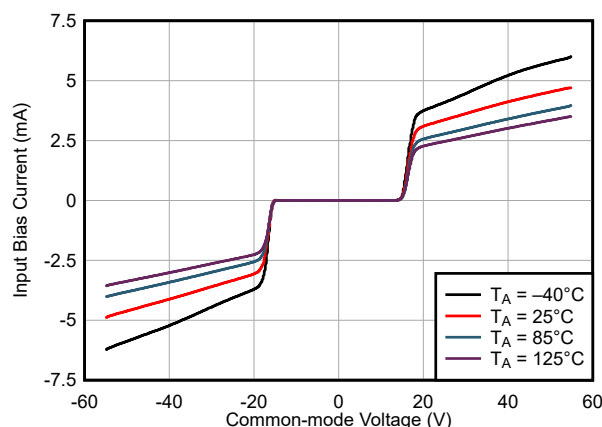
设计说明

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。在没有正 SENSE 引脚的器件中，DAC 输出缓冲器包含在器件内，无法对输出缓冲器的正 SENSE 反馈引脚进行引脚访问。过压保护电路包含一个采用单位增益设置的运算放大器，一个用于保护输出的电子保险丝以及一个可选的瞬变电压抑制 (TVS) 二极管。当 DAC 工作电压 ±15V 时，输出受到 ±32V 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，该电路特别实用。



## 设计说明

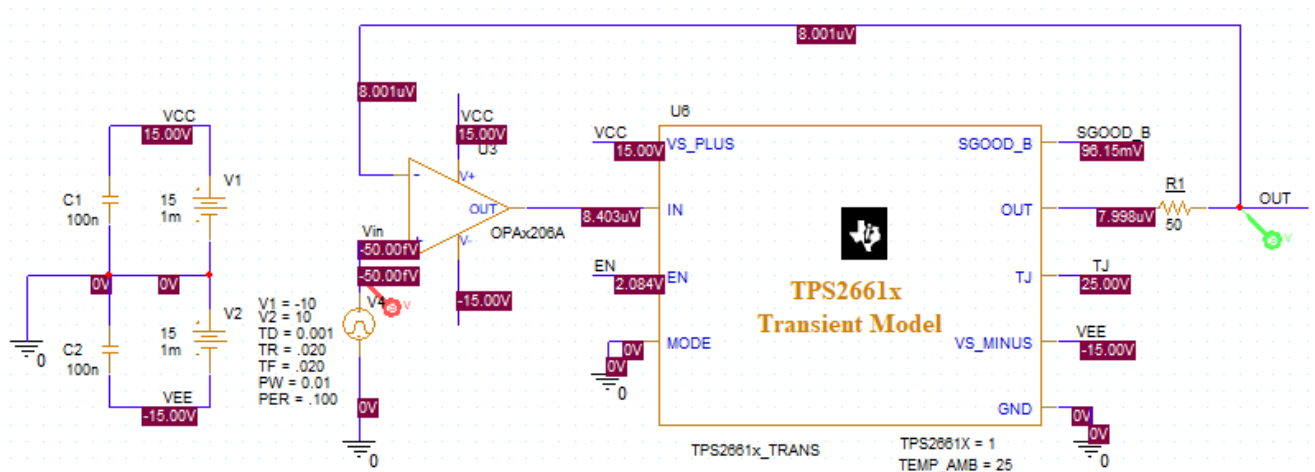
1. 这种设计在没有正 SENSE 引脚的情况下保护 DAC 的输出作为反馈。许多 DAC 配置了无 SENSE 引脚的情况、但该电路以 DAC81408 为例。DAC 输出设置为  $\pm 10V$  的范围。
2. DAC81408 具有五个独立的电源输入 (VIO、VDD、VAA、VCC 和 VSS)。DACx1408 具有内部基准的 8 通道、16/14/12 位高电压输出 DAC 数据表建议为每个电源引脚使用  $0.1\mu F$  去耦电容器。请注意，VCC 和 VSS (设置为  $\pm 15V$ ) 各有两个引脚。此外，建议每个电源使用  $4.7\mu F$  或  $10\mu F$  大容量电容器。可以为大容量电容器选择钽或铝电容器类型。
3. 如果使用了内部基准，则在 REF 引脚与接地引脚之间连接一个  $150nF$  电容器。从 REFCMP 引脚到 REFGND 引脚之间连接一个  $330pF$  电容器，作为附加的基准补偿电容器。
4. 使用配置为单位增益缓冲器的运算放大器来保护 DAC 免受受过压事件的影响。输出过压保护需要保护运算放大器输入免受超出电源电压的过压影响，并在这些事件期间保护输出免受拉出或灌入过大电流的影响。
5. 在此电路中，为用于过压保护的运算放大器缓冲器选择了 OPA206。选择该运算放大器因其具有以下几个特性：
  - a. 失调电压非常低，缓冲器对 DAC 输出的误差很小。OPA206 的失调电压通常为  $\pm 4\mu V$  ( $25^\circ C$  处) 和  $\pm 55\mu V$  (从  $-40^\circ C$  到  $125^\circ C$ )。
  - b. 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  $\pm 40V$ 。下图显示了相对于 OPA206 的输入共模电压的输入偏置电流。



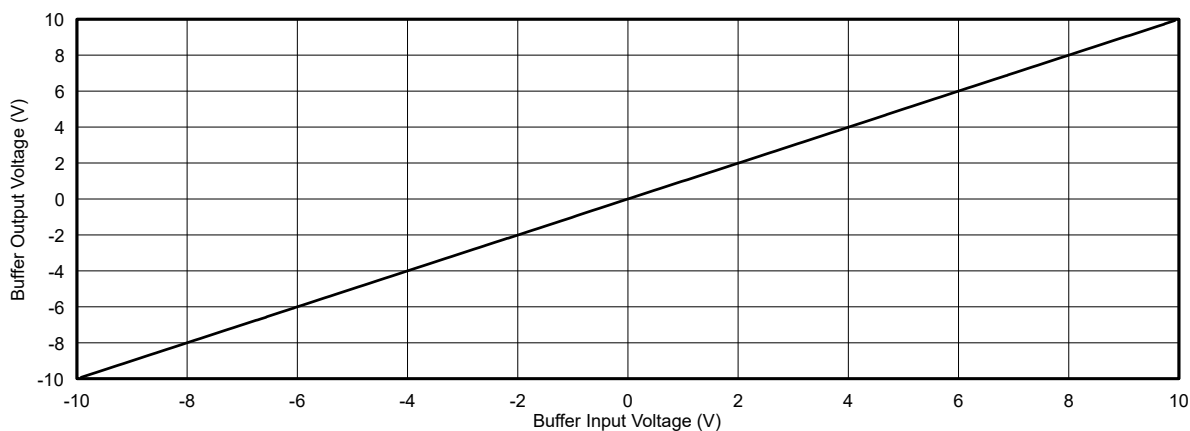
- c. OPA206 具有  $25mA$  的短路电流限值。但是，流经运算放大器内部 ESD 二极管的电流会过大。运算放大器输出端使用了电子保险丝，该保险丝位于输出反馈内部以限制电流。这种保护还会限制超过电源电压的输出电流。
  - d. 如果使用没有集成输入过压保护功能的替代运算放大器，则可以使用输入的串联电阻进行保护，以限制输入电流。有关运算放大器中过压和电气过载的更多信息，请参阅有关电气过载的 TI 高精度实验室 - 运算放大器视频。
6. TPS26611 是一款电流环路保护器，充当电子保险丝来限制运算放大器的输出电流。
    - a. 即使运算放大器的短路电流限制通常为  $25mA$ ，也不会限制通过 ESD 二极管流到输出端的电流，因为输出电压会强制超过运算放大器电源电压。
    - b. 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  $0.936V$ 。
    - c. EN 和 SGOOD 引脚可保持悬空。
    - d. 有关使用 TPS26611 作为模拟输出模块的保护的更多信息，请参阅使用 TPS2661x 的模拟输入和输出模块中的 HART I/O 保护数据表。
  7. 在电路中应用了一个可选的瞬态电压抑制二极管 (TVS)，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持续过压。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  $\pm 32V$ 、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

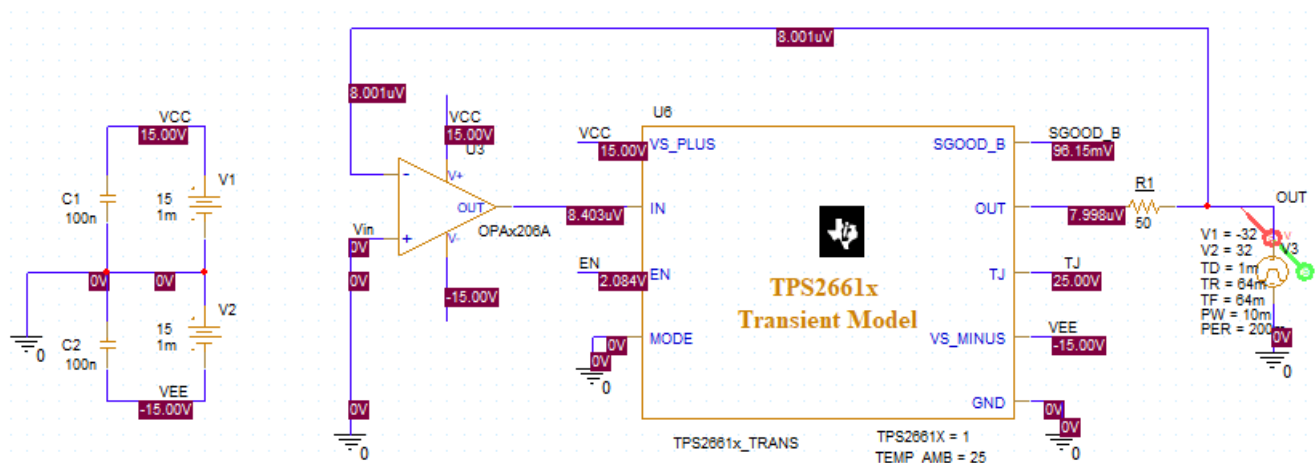
过压保护缓冲器通过 PSpice® 进行仿真。首先、使用脉冲电压源作为 DAC 来模拟缓冲器的传递函数。缓冲器的输入从 -10V 斜升至 +10V，显示了 DAC 的整个输出范围。缓冲器原理图是为了进行仿真而构建的。



从缓冲器输入到输出的传递函数源自瞬态仿真。

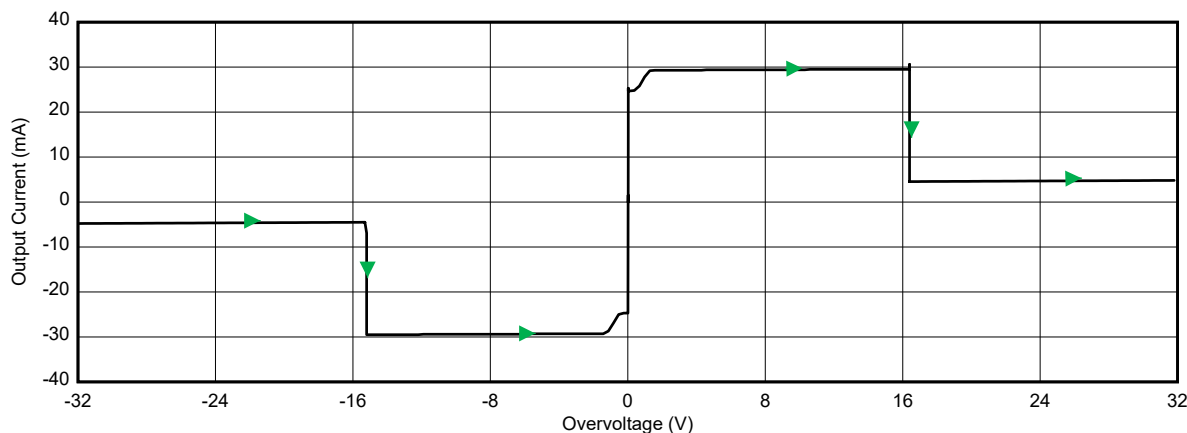


第二个瞬态仿真显示了过压事件期间的电流。



输入被设定为 0V，而一个电压电源被放置在缓冲器的输出上。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 OPA206 的输出中获取任何电流。剩余电流来自具有集成输入保护的 OPA206 的输入，该输入可将电流限制为约 5mA。随着电压降低，缓冲器输出端的电流保持为 5mA。



当电压增加到接近 -15V 的较低电源电压时，TPS26611 开始从 OPA206 输出端传导电流。由斜坡电压驱动的 OPA206 会立即达到 30mA 的器件电流限制。此电流限制低于 TPS26611 的 32mA 电流保护水平，并且允许传导电流。OPA206 持续电流限制没有破坏性。

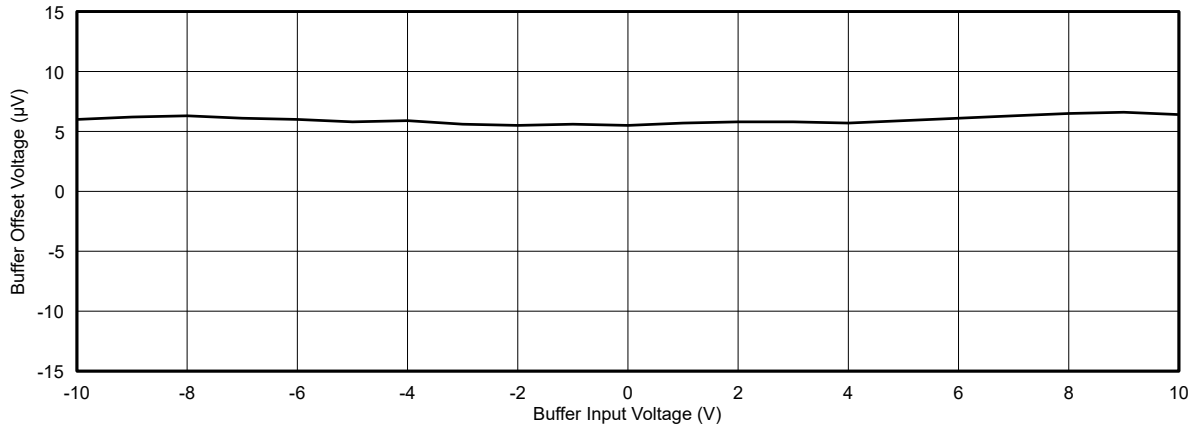
斜升电压上升并超过 0V，OPA206 的输出从拉电流变为灌电流。OPA206 在相反方向上被强制进入 30mA 电流限制状态。

最后，斜升的电压上升到高于 +15V 的正电源。TPS26611 电子保险丝再次打开，OPA206 输出停止灌入电流。在这里，唯一的输出电流来自 OPA206 输入保护。

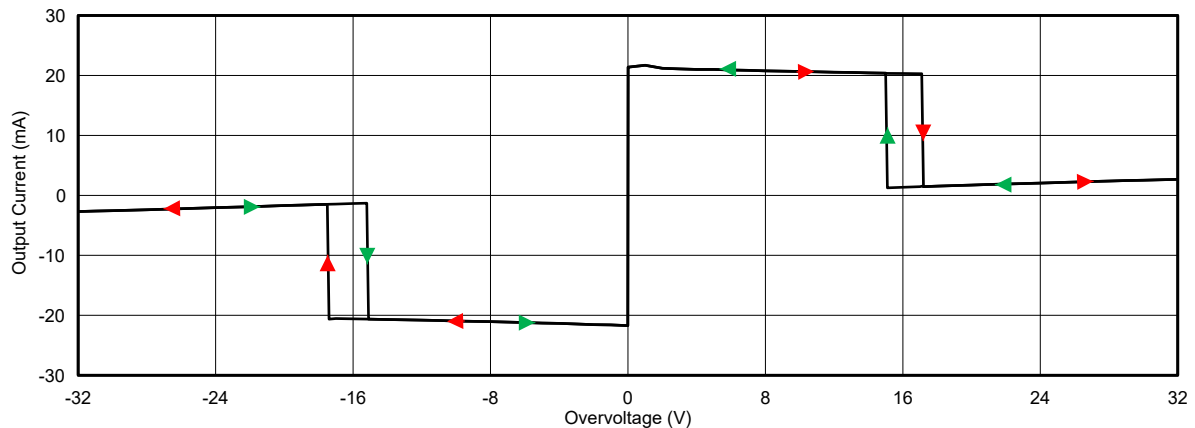
未对 TVS3301 进行仿真。但是，发送的输出未超过保护阈值 33V，即会开启 TVS 导通。在 32V 的仿真电平下，TVS3301 不会影响保护缓冲器和 DAC 输出的运行。

## 测量结果

过压保护缓冲器为测试而构建，并连接到 [DAC81416-08EVM](#) 的输出端。首先，DAC 的输出从  $-10\text{V}$  斜升至  $10\text{V}$ ，以驱动缓冲器输入。从缓冲器中测得的偏移在整个范围内小于  $10\mu\text{V}$ 。



然后，输出会连接到可变电源。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  $-32\text{V}$ ，可变电源电压升至  $+32\text{V}$ 。然后，输出从  $+32\text{V}$  改回  $-32\text{V}$ 。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。在 TPS26611 电子保险丝关闭并且在正常运行情况下传导电流的情况下启动时，电子保险丝会在输出上升时打开，并被驱动到超过任一电源的大约  $2.5\text{V}$ 。在这里，当输出被强制升高高于  $17.2\text{V}$  或低于  $-17.5\text{V}$  时，TPS26611 会关闭。这在仿真中可以看到一部分，在仿真中以从低电压到高电压的单次斜升运行。

## 寄存器设置

下表显示了此包含 DAC81408 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。

**DAC81408 的寄存器设置**

| 寄存器地址     | 寄存器名称                                          | 设置     | 说明                                                  |
|-----------|------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------|
| 0x03      | SPICONFIG                                      | 0x0A84 | [15:12] 0b0000 : 保留                                 |
|           |                                                |        | [11] 0b1 : 热警报会触发 $\overline{\text{ALMOUT}}$ 引脚     |
|           |                                                |        | [10] 0b0 : 在 DAC 更新之间不设置 $\overline{\text{ALMOUT}}$ |
|           |                                                |        | [9] 0b1 : CRC 错误会触发 $\overline{\text{ALMOUT}}$ 引脚   |
|           |                                                |        | [8:7] 0b01 : 保留                                     |
|           |                                                |        | [6] 0b0 : 已禁用软切换操作                                  |
|           |                                                |        | [5] 0b0 : 器件处于 ACTIVE 模式                            |
|           |                                                |        | [4] 0b0 : 已禁用 CRC                                   |
|           |                                                |        | [3] 0b0 : 已禁用流模式                                    |
|           |                                                |        | [2] 0b1 : SDO 引脚正常工作                                |
|           |                                                |        | [1] 0b0 : 在 SCLK 上升沿进行 SDO 更新                       |
|           |                                                |        | [0] 0b0 : 保留                                        |
| 0x04      | GENCONFIG                                      | 0x3F00 | [15] 0b0 : 保留                                       |
|           |                                                |        | [14] 0b0 : 启用内部基准                                   |
|           |                                                |        | [13:6] 0b11111100 : 保留                              |
|           |                                                |        | [5:2] 0b0000 : 已禁用所有通道的差分模式                         |
|           |                                                |        | [1:0] 0b00 : 保留                                     |
| 0x09      | DACPWDWN                                       | 0xF00F | [15:12] 0b1111 : 保留                                 |
|           |                                                |        | [11:4] 0b00000000 : 已启用所有通道, 不处于断电模式                |
|           |                                                |        | [3:0] 0b1111 : 保留                                   |
| 0x0B、0x0C | DACRANGE0<br>(通道 7:4)<br>DACRANGE1<br>(通道 3:0) | 0xAAAA | [15:12] 0b1010 : 将 DAC 输出范围设置为 $\pm 10\text{V}$     |
|           |                                                |        | [11:8] 0b1010 : 将 DAC 输出范围设置为 $\pm 10\text{V}$      |
|           |                                                |        | [7:4] 0b1010 : 将 DAC 输出范围设置为 $\pm 10\text{V}$       |
|           |                                                |        | [3:0] 0b1010 : 将 DAC 输出范围设置为 $\pm 10\text{V}$       |
| 0x14-0x1B | DAC0 - DAC7<br>(通道 0:7)                        | 0x8000 | [15:0] 为输出电压 0V 设置 DAC 数据代码                         |

## 伪代码示例

下面所示为将初始寄存器值设置到 DAC81408 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。

### DAC81408 伪代码示例

```
1: //SYNTAX: WRITE <REGISTER NAME (Hex code)>, <MSB DATA>, <LSB DATA>
2: //Set the device in active mode
3: WRITE SPICONFIG(0x3), 0x0A, 0x84
4: //Enable the internal reference
5: WRITE GENCONFIG(0x04), 0x3F, 0x00
6: //Enable all DAC channels, not in power-down mode
7: WRITE DACPWDWN(0x09), 0xF0, 0x0F
8: //Set Channels 7 to 4 to  $\pm 10V$  output range
9: WRITE DACRANGE0(0x0B), 0xAA, 0xAA
10: //Set Channels 3 to 0 to  $\pm 10V$  output range
11: WRITE DACRANGE1(0x0C), 0xAA, 0xAA
12: //Set DAC0 to output 0V
13: //Data is configured in straight binary, not two's complement notation
14: WRITE DAC0(0x14), 0x80, 0x00
15: //Channels 1 through 7 configured through registers 0x15 - 0x1B
```

## 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                       |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| DAC81408 | 具有内部基准电压的 8 通道 16 位高电压输出 DAC                                            | <a href="#">DAC81408</a> |
| OPA206   | 具有输入过压保护功能的 4 $\mu V$ 、0.08 $\mu V/^{\circ}C$ 低功耗超 $\beta$ e-trim 运算放大器 | <a href="#">OPA206</a>   |
| TPS26611 | 具有输入和输出误接线保护功能的 50V 通用 4-20mA、 $\pm 20mA$ 电流环路保护器                       | <a href="#">TPS26611</a> |
| TVS3301  | 33V 双向平缓钳位浪涌保护器件                                                        | <a href="#">TVS3301</a>  |

## 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), [DAC81416-08 评估模块用户指南](#)
- 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](https://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