

Analog Engineer's Circuit

使用 **DAC80501** 及 **XTR200** 的精密三线制模拟电流输出变送器



设计目标

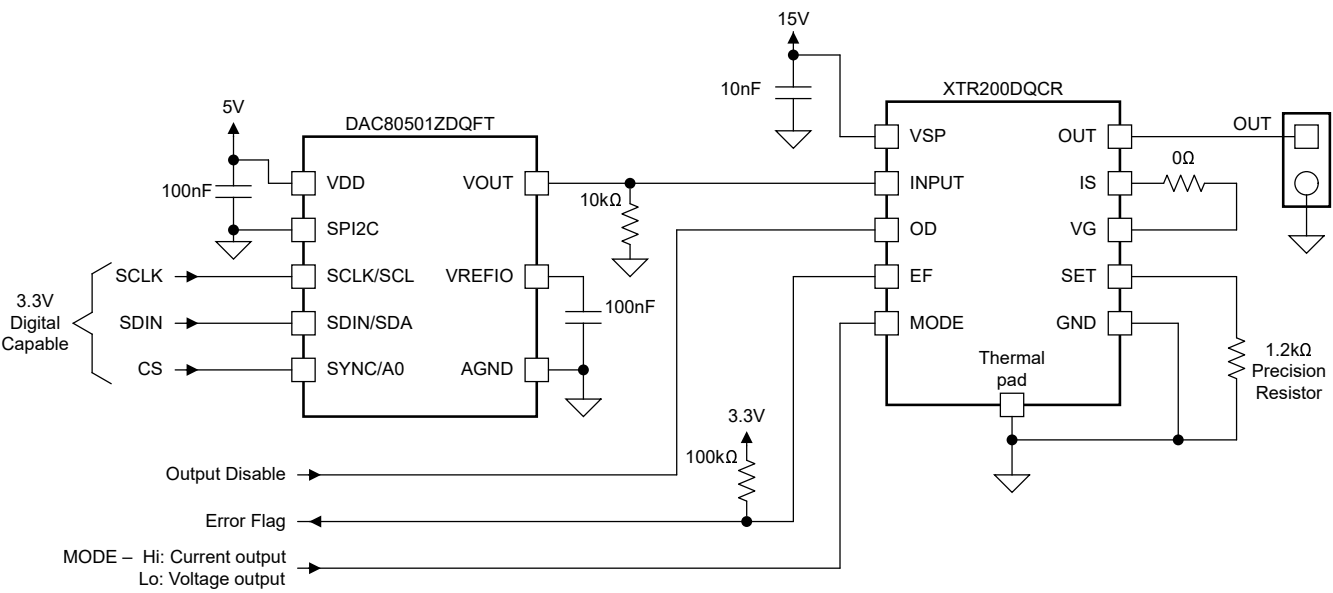
主要输入参数	主要输出信号	推荐器件
DAC 输出电压 工作范围：0V 至 2.4V 满标量程：0V 至 2.5V	XTR 输出电流 工作范围：0mA 至 20mA 满标量程：0mA 至 20.833mA	DAC80501、XTR200

目标

使用变送器 (XTR) 器件从精密数模转换器 (DAC) 输出生成 0mA 至 20mA 的模拟电流输出。在输出中设计了更高的满标量程设置，以便在需要时进行校准。

设计说明

在该电路中，DAC80501 电压输出驱动 XTR200，以将精密模拟电流输出设置为 0mA 至 20mA 的工作范围，并将更大的满标量程设置为 20.833mA 以进行校准。XTR200 使用精密 1.2kΩ 电阻器来精确地设置电流范围。此电路使用 DAC80502-01EVM 及 XTR200EVM 进行构建和测试。XTR200 具有引脚可选模式，可输出电流或电压。以下电路被描述为电流输出，但也可以配置为电压输出而无需更改原理图。该简单电路用于执行器及可编程逻辑控制器 (PLC) 等模拟输出的工业自动化和过程控制。



规格

DAC80501 输出	XTR200 MODE 引脚	XTR200 输出	精度
0V 至 2.5V	Hi (电流输出)	0mA 至 20.833mA	±0.2%

设计说明

- 绘制的示例电路供微控制器通过 SPI 通信配置 [DAC80501](#)，以设置 DAC 输出电压。如果需要，可以采用 I²C 协议，通过将 SPI2C 引脚设置为高电平来控制 DAC80501。
- [XTR200](#) MODE 引脚将器件输出设置为电流输出 (MODE = Hi) 或电压输出 (MODE = Lo)。如果需要两个输出，则可以通过微控制器的 GPIO 设置该引脚，如果只需要一种类型的输出，则可以连接高电平或低电平。通过设置 MODE = Lo，可以使用相同的原理图实现高范围电压输出。
- XTR200 SET 引脚通过精密电阻器接地。在电流模式下，该精密电阻器会调节电流电平。如果此电路也用于电压模式，则该电阻器未使用，但可以保留在电路中。
- DAC80501 由 5V 电源供电。如果只需要电流输出，则可以将 3.3V 用于 DAC80501 电源。
- 使用 5V 电源时，DAC80501 数字输入引脚支持 3.3V 工作电压。V_{IH} 电压为 1.62V，V_{IL} 为 0.45V。DAC80501 没有用来读回寄存器配置的 SDO 引脚。
- 此外，XTR200 MODE 数字引脚也设计用于 3.3V 运行。请注意，V_{IH} 电压电平为 1.65V，V_{IL} 电压为 0.8V。MODE 引脚的内部上拉电流为 4μA。
- 该电路中的 XTR200 显示成使用 15V 电源。不过，该器件可在 8V 至 60V 的电源电压下提供更大的电压范围。
- DAC80501 及 XTR200 器件都使用靠近相应电源引脚的去耦电容器。DAC80501 在 VDD 引脚上使用 100nF 电容器，而 XTR200 在 VSP 引脚上使用该电容器。为 DAC80501 使用额定电压为 10V 或更高的去耦电容器，并为 XTR200 使用额定电压为 25V 或更高的去耦电容器。
- 在该电路中，DAC80501 使用 DAC 的内部基准。首次加电时，默认启用该内部基准。VREFIO 引脚在引脚附近使用另一个 100nF 去耦电容器。如果需要外部基准来实现更高的精度，请在 VREFIO 引脚上串联一个 1kΩ 电阻器，以减少电流争用并在启动后通过将 CONFIG 寄存器 (0x03) 中的 REF_PWDWN 位 [8] 设置为 1 来禁用内部基准。
- XTR200 具有一条内部电路，可检测器件中的错误状态。在 $\overline{\text{EF}}$ 引脚上检测到的警报条件指示器件是否存在以下电路故障之一：
 - 在电压输出模式下，输出已达到短路电流限制
 - 负载电压和电源电压之间没有足够的余量来实现正确的电压或电流输出，仅在输入电压大于 350mV 且电源电压大于 10V 时可检测到
 - 在电流输出模式下，输出为开路，仅当输入电压电源电压大于 10V 时可检测到
 - SET 引脚电流短路或超过输出短路电流限制的 1/10
 - 电源电压低于 8V
 - 芯片温度超过 150°C
- [该原理图](#)显示了 DAC80501Z。“Z”选项的 DAC 代码默认设置为 0x0000。此器件的“M”选项的默认设置为中标度，DAC 代码为 0x8000。
- 如前所述，该[电路](#)还可用于模拟电压输出，而不会发生变化。[使用 DAC80501 和 XTR200 的精密三线模拟电压输出变送器](#)介绍了该功能。

设计步骤

对于在电流输出模式下运行，XTR200 MODE 引脚设置为高电平。输出电流的公式如下：

$$I_{OUT} = \frac{10 \times V_{IN}}{R_{SET}}$$

DAC80501 可以将输入电压设置为 XTR200。DAC CONFIG 寄存器设置为 REF-DIV = 1b 及 BUFF-GAIN = 1b。这些设置在内部将基准除以二，将输出缓冲器增益增加到二，以将 DAC 范围设置为 0V 至 2.5V。XTR200 在 SET 引脚上使用具有高精度及低漂移的精密 1.2kΩ 电阻器。此 R_{SET} 电阻器可设置电流输出。DAC 输入电压范围及电阻器值决定了最终的电流输出范围。

$$\text{Full-Scale Current Range} = \frac{10 \times 2.5V}{1.2k\Omega} = 20.833mA$$

该输出为标称值，校准可用于精确设置输出。可以使用以下公式根据 DAC 代码计算 XTR 的输出电流：

$$\text{Current output} = \left(\frac{\text{DAC code}}{2^{16}} \right) \times 20.833mA$$

在这种配置下，20.833mA 范围的 LSB 大小为 0.32μA。如果需要不同的电流范围，XTR200 上的 SET 电阻器可以调整为与前一个公式不同的值。如果 DAC 不需要高分辨率，则在此应用中可以使用 14 位 DAC70501 或 12 位 DAC60501。

DAC80501 的可选设置是设置 REF-DIV = 0b 和 BUFF-GAIN = 1b，以使基准增益为 1，并使输出缓冲器增益为 2。该配置将 DAC 满量程电压设置成 5V。然后将 SET 电阻器设置为 2.4kΩ，以保持输出电流范围。但请注意，5V 范围取决于 DAC 电源。如果电源减少 10%，则在选择 SET 电阻器时必须考虑这种额外变化，以避免 DAC 输出余量限制。在本节第一部分所述的设置（使用 REF-DIV = 1b 将基准除以二）中，DAC 输出不会因输出缓冲器的电源余量而降低。

TUE 分析

总体未调整误差 (TUE) 通过对总输出误差的影响误差的平方和根加法计算得出。此计算通常由增益误差、增益误差漂移、偏移电压误差、偏移电压误差漂移及非线性误差组成。有关 XTR200 电流输出的 TUE 分析，请先从 DAC80501 输出的 TUE 计算开始。

DACx0501 具有精密内部基准的 16 位、14 位和 12 位 1LSB INL 电压输出 DAC 数据表方便地指定了 DAC80501 的 TUE 误差，并在 *电气特性* 表中将这些误差合并为一个最大值。对于该电路，DAC 设置为 REF-DIV = 1b 和 BUFF-GAIN = 1b。该器件采用 WSON-8 封装，其比 VSSOP 封装的 TUE 误差略小。

请注意，规格表中 ±0.06% 的 DAC80501 (REF-DIV = 1b) 的 TUE 误差不包括基准误差或基准漂移。要计算 DAC 中的总误差，请对这些误差进行平方和根加法。

$$\text{Err}_{\text{DAC REF-DIV1}} = \sqrt{\text{Err}_{\text{REF}}^2 + \text{Err}_{\text{REF Drift}}^2 + \text{Err}_{\text{TUE}}^2}$$

当基准误差为 ±0.1%（在 2.5V 基准电压下为 2.5mV）且漂移为 ±0.05%（从 25°C 到 125°C，100°C 以上 5ppm/°C，与室温的最大漂移）时，得出以下结果：

$$\text{Err}_{\text{DAC REF-DIV1}} = \sqrt{0.1^2 + 0.05^2 + 0.06^2} = 0.127\%$$

从 DAC80501 计算 TUE 后，DAC 误差可以包含在 XTR200 的 TUE 计算中。XTR200 电流模式造成的误差是偏移电流误差、偏移电流漂移、跨度（增益）误差、跨度漂移误差、非线性以及 R_{SET} 的误差。误差与 DAC80501 TUE 结合，以确定电流模式输出的总 TUE。

误差 (%)						
XTR 电流偏移	XTR 电流温漂	XTR 电流增益误差	XTR 电流增益漂移	非线性度	R_{SET} 电阻器容差	DAC80501 TUE 误差
±0.067	±0.0288	±0.07	±0.02	±0.003	±0.1	±0.127

在 [XTR200 精密 3 线电流和电压变送器](#) 数据表电气特性表中，最大电流模式偏移为 14μA。根据 20.833mA 满量程电流范围，此值会转换为百分比。漂移误差基于室温变化 100°C，偏移的最大漂移为 60nA/°C，增益误差漂移为 2ppm/°C。将分量的值平方并求和。平方根表示电流输出的 TUE 值。

$$TUE_{IOUT} = \sqrt{Err_{IOS}^2 + Err_{IOS\ Drift}^2 + Err_{IGE}^2 + Err_{IGE\ Drift}^2 + Err_{INonLin}^2 + Err_{RSET}^2 + Err_{DAC}^2}$$

插入误差值后，可计算电流输出 TUE 的以下结果：

$$TUE_{IOUT} = \sqrt{0.67^2 + 0.029^2 + 0.07^2 + 0.02^2 + 0.003^2 + 0.1^2 + 0.127^2}$$

$$TUE_{IOUT} = \sqrt{0.0367} = 0.192\%$$

零代码误差

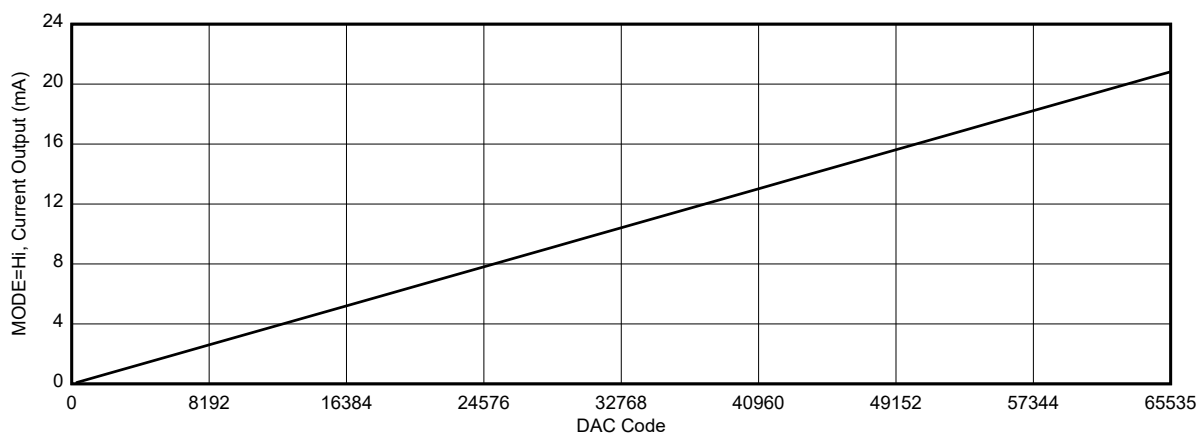
为 DAC80501 输入 0x0000 的 DAC 代码不会将输出刚好设置为 0V。对于单极电源 DAC，零代码误差与输出缓冲器相关。当输出缓冲器无法将输出驱动至 0V 时，就会产生此端点错误。对于 DAC80501，零代码误差最大为 1.5mV。该电压表示 XTR200 的 12.5μA 输出。

如果使用具有较低零代码误差的不同 DAC，则 XTR200 在 0V 输入附近有额外的限制。当电流低于 10μA 时，XTR200 的电流输出是非线性的。该值列为输出电流线性范围的下限。

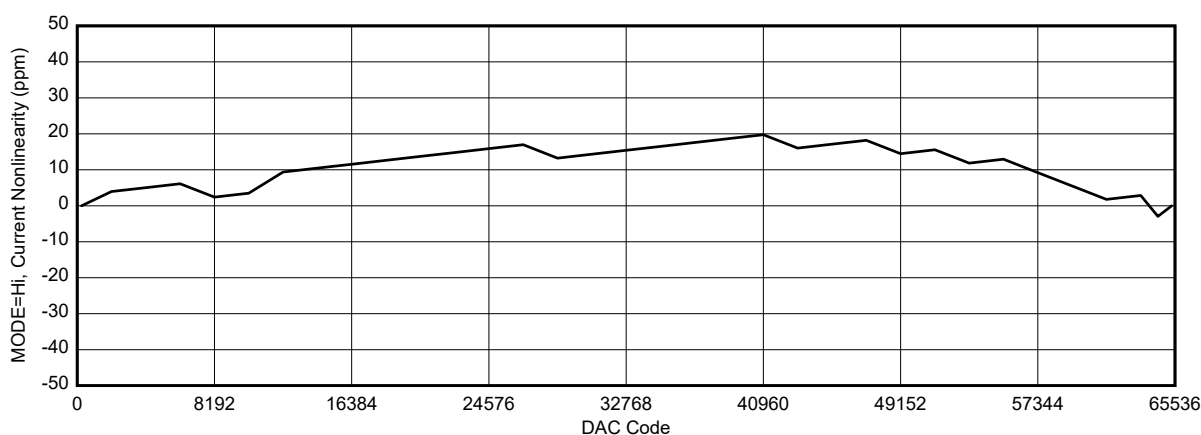
无论如何，电路都会使用 256d 至 65535d 的 DAC80501 数据代码进行测试，以作为端点限制，如数据表中电气特性表的注释所述。下端点表示 XTR200 的 81μA 输出电流，而上端点表示 20.833mA。

测量结果

该电路使用 DAC80502-01EVM 及 XTR200EVM 构建。DAC80502-01EVM 设置成使用从 USB 电源获取的 5V VDD 电源。XTR200EVM 由外部 15V 电源在 VSP 上供电。使用 Agilent® 34410A 执行测量。下图显示了在 MODE = Hi 时的电流输出模式下，从 DAC 代码到输出电流测得的传递函数：



通过输出范围的测量值计算并且绘制非线性度。端点时基故障根据 DAC 代码 256d 至 65535d 计算得出。



下表显示了相对于构建电路的总增益误差、偏移电压及非线性度。

参数	测量值
增益误差	-0.027%
偏移	0.66 μ A
非线性度	19.8ppm

寄存器设置

此应用的 DAC80501 设置的寄存器映射如下表所示。

DAC80501 的寄存器设置

寄存器地址	寄存器名称	设置	说明
0x03	CONFIG	0x0000	[15:9] 0000000b : 保留
			[8] 0b : REF_PWDWN, 如果使用外部基准, 则将该位设置为 1
			[7:1] 0000000b : 保留
			[1] 0b : DAC_PWDWN, 将该位设置为 1 以关闭 DAC 的电源
0x04	增益	0x0101	[15:9] 0000000b : 保留
			[8] 1b : REF-DIV, 将基准电压除以二
			[7:1] 0000000b : 保留
			[0] 1b : BUFF-GAIN, 将缓冲放大器的增益设置为二
0x08	DAC	0x0000	[15:0] 00000000b : DAC-DATA, 设置 DAC 输出代码

伪代码示例

以下伪代码序列显示了设置 DAC80501 及 XTR200 以实现电流输出所需的步骤。这些示例示出了使用 SPI 通信的 DAC 配置。请注意, DAC80501 具有使用 I²C 进行通信的选项。

```

Configure the SPI communication of the microcontroller to SPI mode 1 (CPOL = 0, CPHA =1 );
// Current mode
{Set microcontroller GPIO output to set MODE pin Hi for the XTR200;
}
// Internal reference and DAC output are enabled at start by default
// If using external reference, add series 1kΩ resistance at VREFIO to reduce contention current
// and disable internal reference, else skip this step
{Set CS to device Lo;
  Send 24 SCLKs, Write 0x030100;
  // Set DAC REF_PWDWN = 1b [8] in CONFIG register, disables internal reference
  // DAC output can also be disabled in this register with DAC_PWDWN = 1b [0]
Set CS to device Hi;
}
// Configure DAC80501 output gain
{Set CS to device Lo;
  Send 24 SCLKs, Write 0x040101;
  // DAC80501 output range 0V to 2.5V
  // Set DAC REF-DIV = 1b [8], BUFF-GAIN = 1b [0] in GAIN register
  // DAC output full-scale range set to reference voltage
Set CS to device Hi;
}
// Set DAC80501 Data Code
{Set CS to device Lo;
  Send 24 SCLKs, Write 0x083127;
  // write DAC output code to 0x3127 (12583d), sets output current to 4mA
Set CS to device Hi;
}

```

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
DAC80501	DACx0501 具有精密内部基准的 16 位、14 位和 12 位 1LSB INL 电压输出 DAC	DAC80501
XTR200	XTR200 精密 3 线电流和电压变送器	XTR200
DAC80502-01EVM	DAC80502 和 DAC80501 评估模块	DAC80502-01EVM
XTR200EVM	XTR200 评估模块	XTR200EVM

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)，[DAC80502-01 评估模块用户指南](#)
- 德州仪器 (TI)，[XTR200 评估模块用户指南](#)
- 德州仪器 (TI)，[使用 XTR200 简化 4-20mA 电流和电压输出 3 线变送器产品概述](#)
- 德州仪器 (TI)，[使用 DAC80501 和 XTR200 的精密三线制模拟电压输出变送器](#) 中介绍了该功能

如需 TI 工程师的直接支持，请使用 **E2E** 社区：

e2e.ti.com

商标

Agilent® is a registered trademark of Agilent Technologies, 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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月