

Application Note

PLC 模拟输出模块架构

Ahmed Noeman

摘要

模拟输出 (AOUT) 模块是驱动模拟传动器必不可少的 PLC 模块。在所有 IO 模块中，模拟输出的每通道成本最高，并且可能是最难保护的。这里有多种拓扑结构，可实现模拟输出模块，以合理成本实现所需的性能。了解这些拓扑以及为何设计人员可以选择它们是为您的 AOUT 项目选择合适部件的关键因素。

该概述包括 AOUT 模块的关键参数，了解 AOUT 如何影响拓扑选择，以及有哪些不同的拓扑可供选择。

内容

1 引言	2
2 模拟输出模块规格	2
3 模拟输入模块结构	3
4 多通道输出架构	4
4.1 完全集成的 DAC 架构.....	4
4.2 低压 DAC 加一个输出缓冲器架构.....	5
4.3 跟踪保持多路复用输出架构.....	6
5 单通道输出架构	7
5.1 完全集成式 DAC.....	7
5.2 低电压 DAC 加输出缓冲器架构.....	7
5.3 脉宽调制加缓冲器架构.....	8
6 输出缓冲器	9
6.1 单向电流缓冲器.....	9
6.2 双向电流缓冲器.....	10
6.3 电压缓冲器.....	11
6.4 组合电压或电流缓冲器.....	11
7 总结	13
8 参考资料	13

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

模拟输出 (AOUT) 模块是驱动模拟传动器必不可少的 PLC 模块。模拟输出在所有输入/输出 (IO) 模块中每通道的成本最高, 并且可能是最难保护的。这里有多种拓扑结构, 可实现模拟输出模块, 以合理成本实现所需的性能。了解这些拓扑以及为何设计人员可以选择模块是为您的 AOUT 项目选择正确器件的关键因素。

2 模拟输出模块规格

与模拟输入模块一样, 输出模块具有大量的性能规格, 这导致模块类型多样化。单个架构无法覆盖这种多样性。

<p>Output Signal</p> <ul style="list-style-type: none"> • Output Type: I, V, ... • Output Range <ul style="list-style-type: none"> – V: 0-5 V, 0-10 V, ± 5 V, ± 10 V – I: 4-20 mA, 0-20 mA, ± 20 mA • Maximum Current (V) • HART Support (I) 	<p>Accuracy</p> <ul style="list-style-type: none"> • Offset/Gain/Linearity Error • Thermal Deviation • Total Unadjusted Error 	<p>Reliability and Protection</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operating Temperature Range • Isolation Voltage • Overvoltage output protection • Surge protection • Reverse Polarity (I) • Supply OV/UV (supply range) • Supply reverse polarity • Maximum power loss/derating
<p>Interface</p> <ul style="list-style-type: none"> • Connection: separate or combined VI • Number of Channels: 1,2,4,8,16 • Resistive Load (V:min, I:max) • Max load: Capacitive(V), Inductive(I) • Channel/Group Isolation 	<p>Precision</p> <ul style="list-style-type: none"> • Resolution (Quantization Error) • Noise Error, ENOB, Repeat Accuracy • Reference Error • Channel to Channel Crosstalk 	<p>Diagnostics and Fault Detection</p> <ul style="list-style-type: none"> • Broken Wire • Short Circuit • Over Temperature • No Supply Voltage
	<p>Speed</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conversion time (per channel) • Scan time (all channels), timestamp • Bandwidth and Settling time • Channel synchronization 	

图 2-1. AOUT 模块规格

如图 2-1 所示, 规格可分为多组, 涵盖输出信号和接口、精度、精度、速度、可靠性和诊断。虽然规格非常多, 但在决定选择的架构设计时, 重要参数很少。AOUT 模块最重要的规格包括:

- 输出类型 (电压或电流) 和范围 (± 10 V 或 4-20mA 常见) 以及负载范围
- 通道数和通道隔离
- 转换时间和输出噪声。

3 模拟输入模块结构

图 3-1 TI.com 上的应用页面提供了有关适用于 PLC 模拟输出的 TI 参考设计的大量信息。此页面支持 AOUI 模块的通用结构，如下图所示。

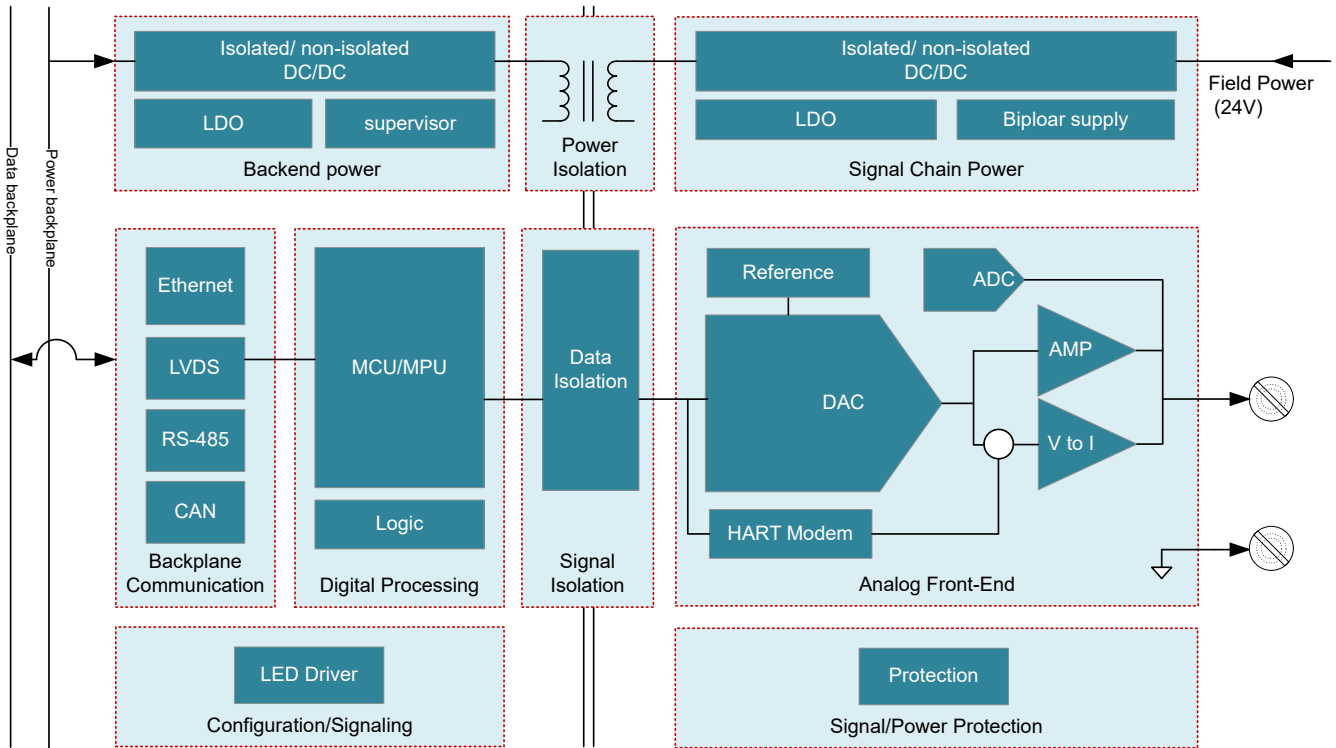


图 3-1. 模拟输入模块结构

AOUI 模块前端的核心是数模 DAC 转换器，它驱动输出缓冲器电压或电流。DAC 需要参考基准，而 HART 调制解调器对于电流输出是可选的。AOUI 前端的电源来自现场侧，或者较不常见于隔离级的背板。这是一个功能图，不同的功能可以集成到一个器件中，也可以分布在多个器件中。

本文重点介绍前端架构，以及可以根据不同要求使用的正确架构。

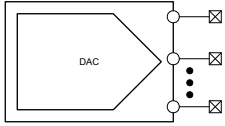
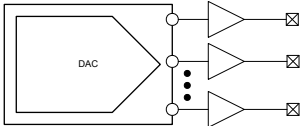
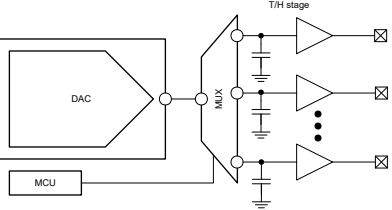
4 多通道输出架构

原则上，多通道 AOUT 模块有三种常见架构。

1. 完全集成式 DAC：由于此方法需要高电压 DAC，因此每通道成本最高，这种方法提供的面积最小，可能也是最高性能。
2. 低电压 DAC 加一个输出缓冲器：与集成设计相比，此方法在通道数量方面提供了可扩展性，并且能够以更低的成本灵活选择 DAC 和缓冲器功能。
3. 跟踪保持多路复用单通道 DAC：由于信道定序需要 MCU，这种方法将每信道的成本降至最低，所需的设计更为复杂。与其他实现相比，此实现通常具有更长的趋稳时间和更高的噪声。

选择为特定架构设计的方案是性能、成本和速度目标共同作用的结果

表 4-1. 多通道 AOUT 架构

	完全集成式 DAC	电压 DAC+ 缓冲级	多路复用采样保持电路
方框图			
特性	高集成度、高精度、更小面积，但每通道成本更高	可扩展的性能和通道数以及较低的每通道成本，但面积更大	每通道成本最低，但需要 MCU 和复杂的设计以及更慢的趋稳
器件	DAC8775, DAC8140x	DAC8050x、XTR111、XTR305、TLV9302、OPA2990S	DAC80501+TMUX1108/4、DAC8760+TMUX6208

4.1 完全集成的 DAC 架构

DAC8755 提供适用于 4 通道 16b 双极性电压和电流（趋稳时间为 10us）的单芯片设计，具有高度集成的输出前端，包括 DAC、基准、缓冲器以及降压/升压级，可通过 12-65V 的宽输入电压单电源为电流输出实现自适应电源。具有自适应电源管理功能低于 1W 四通道模拟输出模块的参考设计展示了该器件的强大功能、而四通道工业电压和电流输出驱动器(经过 EMC/EMI 测试)详细介绍了通过该设计的 EMC/EMI 测试。

图 4-1 显示了这一集成 DAC 如何简化电路板设计（仅显示了一个通道），同时仍然提供软件输出配置的灵活性和自适应电源管理。

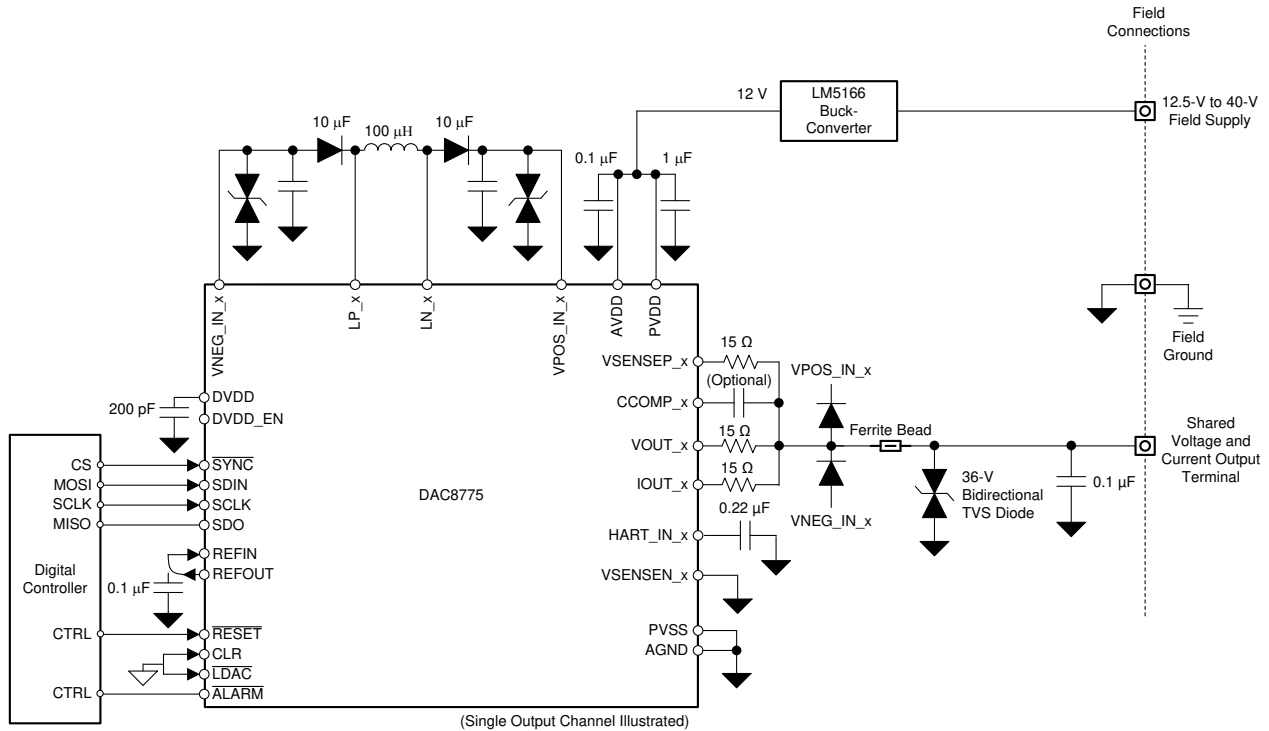


图 4-1. DAC8775 AOUT 电路的原理图

当只需要电压输出时，DAC81404 提供了广泛的分辨率和通道数供您选择。凭借集成参考和 12us 趋稳时间，DAC814xx 系列能够满足最高的电压 AOUT 需求。DAC814xx 系列能够提供特殊应用所需的高达 ±20V 或单极 40V 的高压输出。4 通道器件 DAC81404 提供电压检测引脚，当保护器件串联时，有助于保持输出精度。

表 4-2. DAC81408 器件系列

通道	12 位	14 位	16 位
2	DAC61402		
4			DAC81404
8	DAC61408	DAC71408	DAC81408
16	DAC61416	DAC71416	DAC81416

4.2 低压 DAC 加一个输出缓冲器架构

这是一种流行的架构，因为低压 DAC 是现成的。即使使用非缓冲 DAC，也有更多元件可供选择。DAC80504 是一款针对此类应用的出色 DAC。DAC80504 是一款单极 5V 缓冲电压输出 DAC 系列，采用小型封装，具有集成基准电压 (2ppm/°C)，稳定时间仅为 5us，具有可编程输出范围和 INL=1LSB。DAC 没有检测引脚，但对于输出缓冲器，这不是必需的，因为输出补偿由缓冲器反馈环路完成。

丰富的器件系列可确保设计人员能够找到所需的分辨率和通道数量。后续章节将详细讨论输出缓冲器选项。

表 4-3. DAC80508 器件系列

通道	12 位	14 位	16 位
1	DAC60501	DAC70501	DAC80501
2	DAC60502	DAC70502	DAC80502
4	DAC60504	DAC70504	DAC80504
8	DAC60508	DAC70508	DAC80508

如果需要更高的输出电流驱动，则必须采用 DAC 加缓冲器架构，因为大多数集成式 DAC 的电流驱动有限。此外，若要求极快的建立时间，设计师可以结合快速低电压 DAC 和宽带宽缓冲器，但很难找到任何建立时间短于 10 μ s 的集成式高压 DAC。

4.3 跟踪保持多路复用输出架构

在该架构中，单通道电压 DAC 连接到多路解复用器，在每个输出通道上均配备保持电容器。除保持电容外，MUX 开关还用作跟踪保持电路。如果 DAC 输出与多路复用器同步有序变化，则可以从单通道 DAC 输出生成独立的静态或动态输出。

此方案成本效益高，但需要仔细设计，因为 DAC 输出的稳定时间以及多路复用器泄漏设置了多路复用器保持时间和扫描频率的最小和最大限值。这些权衡在 [用于 PLC 的多路复用单通道 DAC 的多通道模拟输出模块](#) 参考设计中详细说明。

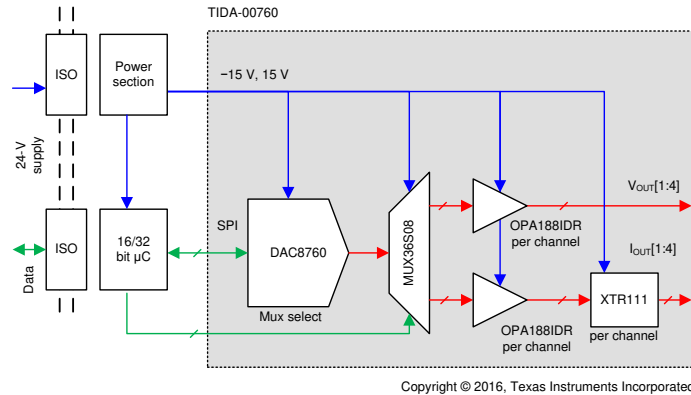


图 4-2. 跟踪保持多路复用输出架构的方框图

在此架构中可以同时使用 DAC80501 (16b)、DAC70501 (14b)、DAC60501 (12b) 等低压 DAC 或者 DAC8760 (16b) 或 DAC7760 (12b) 等高压 DAC。使用低电压 DAC 时，所需的增益由输出缓冲器提供。此架构使用电压和电流缓冲器，与后续章节中描述的先前架构类似。

5 单通道输出架构

当只需要单通道输出时，例如通道间隔式模块，虽然与多通道情况不完全相同，且选择器件也有所不同，但仍存在三种类似的选择方案。

1. 完全集成式 DAC：此方案占用面积最小，可能在每通道成本最高的前提下提供最高性能，因为此方案需要高压 DAC。
2. 低电压 DAC 加输出缓冲器：与集成设计相比，此方案在选择 DAC 和缓冲器特性时提供了可扩展性和灵活性。
3. 脉宽调制 (PWM DAC) 加缓冲器：此方案的每通道成本最低，但与其他实现方式相比、建立时间更长、噪声更高。

表 5-1. 单通道 AOUT 架构

	完全集成式 DAC	电压 DAC 加缓冲器级	PWM DAC 加缓冲器
方框图			
特性	高集成度、高精度、更小面积、但每通道成本更高	更低的成本、并且可以实现更高的驱动和更快的稳定。	每通道成本最低、但稳定速度更慢、噪声更高
器件	DAC8760、DAC7760、DAC8750	AFE882H1/201、DAC80501、DAC70501、DAC60501	MSPM0L、MSPM0G

5.1 完全集成式 DAC

如前所述，完全集成式 DAC 提供了紧凑、精确的设计，但成本略高。单通道高压 DAC (如 **DAC8760**) 能够实现双极电压 (+/-10V) 和单极电流输出 (0 -20mA)，其中 TUE = 0.1%DAC FSR 且 DNL = 1LSB。该 DAC 可接受最高为 ±20V 的电源供电。**DAC7760** 是适用于要求较低的应用的 12 位版本。

应用手册 [DACx760 的组合电压和电流输出](#) 展示了如何使用 DAC8760 实现 [工业应用中](#) 参考设计的组合电压和电流输出、以及 [用于模拟输出 \(AO\) 的组合电压和电流输出端子](#)。该参考设计“[单通道工业电压和电流输出驱动器 \(隔离式, 经过 EMC/EMI 测试\)](#)”显示了单独的 V/I 输出。

如果需要单通道仅电流输出，则 **DAC8750** (16b) 或 **DAC7750** (12b) 器件会是理想选择。

5.2 低电压 DAC 加输出缓冲器架构

单通道 DAC **AFE882H1** 系列在 14b 和 16b 版本中提供功能丰富的集成参考和 HART 调制解调器选项。**AFE882H1** 对于安全相关应用尤其重要。TUE = 0.08 %TUE FSR，此系列可为此类实现提供最高精度。

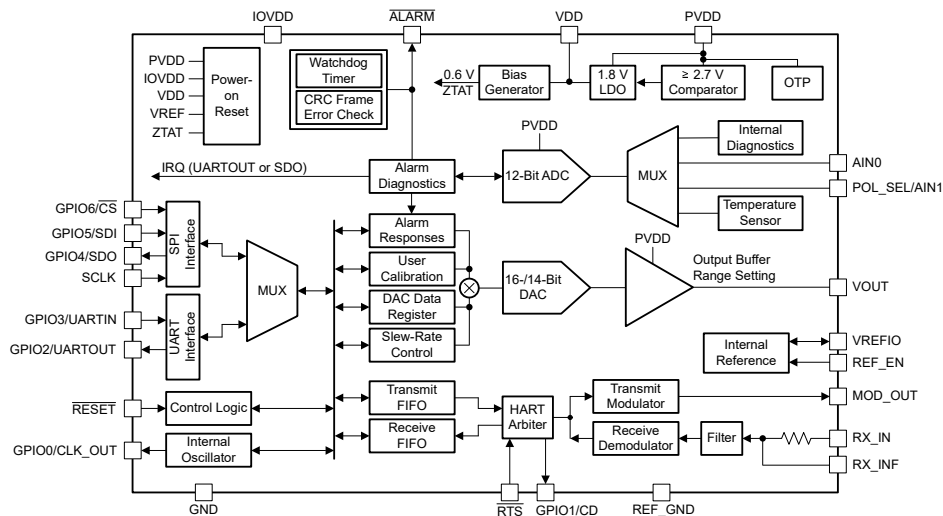


图 5-1. AFE882H1 器件方框图

表 5-2. AFE882H1 器件系列

	14 位	16 位
具有 HART	AFE782H1	AFE882H1
无 HART	AFE78201	AFE88201

DAC80501 系列 (包括 12b、14b 和 16b 型号的单通道 ADC) 采用极小封装, 可提供高线性度 (INL=1LSB)、快速稳定 (5us) 和出色的基准漂移 (2ppm/°C), 因此在不需安全或 HART 支持的情况下, **DAC80501** 成为这种架构的首选器件。

5.3 脉宽调制加缓冲器架构

脉宽调制 (PWM DAC) 是一种特殊的架构, 其适用于需要避免使用独立式 DAC 且在系统中已有 MCU 的情况。可以使用低通滤波器将 PWM 转换为模拟电压信号。先进的技术可以达到 16 位分辨率和相对较快的输出趋稳时间, 如 [设计用于现场变送器的高性能 PWM DAC](#) 和 [用于现场变送器的高性能 16 位 PWM 到 4-20 mA DAC](#) 中所述。

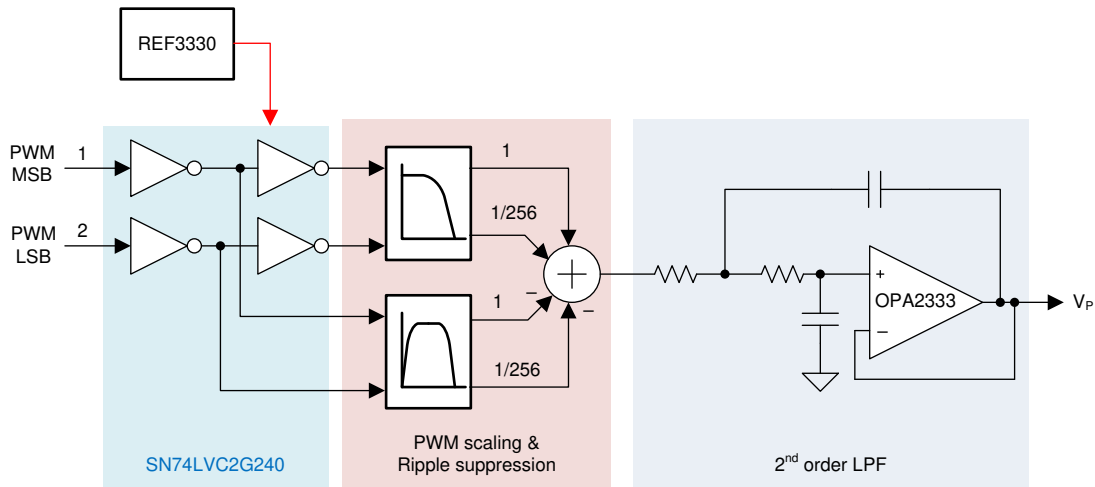


图 5-2. 双路径 PWM 基 DAC 方框图

6 输出缓冲器

本节提供了输出缓冲器目录，其中涵盖了各种类型的输出信号需求。输出缓冲器通常与低电压单电源 DAC 搭配使用，该 DAC 可以提供 5V 或 2.5V 输出，甚至更低的 1.25V 输出。

6.1 单向电流缓冲器

当需要源电流缓冲器时，会使用单向电流缓冲器。双运算放大器是理想之选，可实现低成本、低噪声的实现。对于这一实现，运算放大器 U1 需要允许输入到负电源轨，而 U1 允许输入到正电源轨，则运算放大器由 VSUP (通常为 24V) 供电，因此需要高压低失调电压运算放大器。TLV9302、和 OPA2990 是此电路的几个很好的选择。此外还需要 3 个精密电阻器。有关此电路的更多设计细节，请参见 [可编程两级高侧电流源电路](#)。

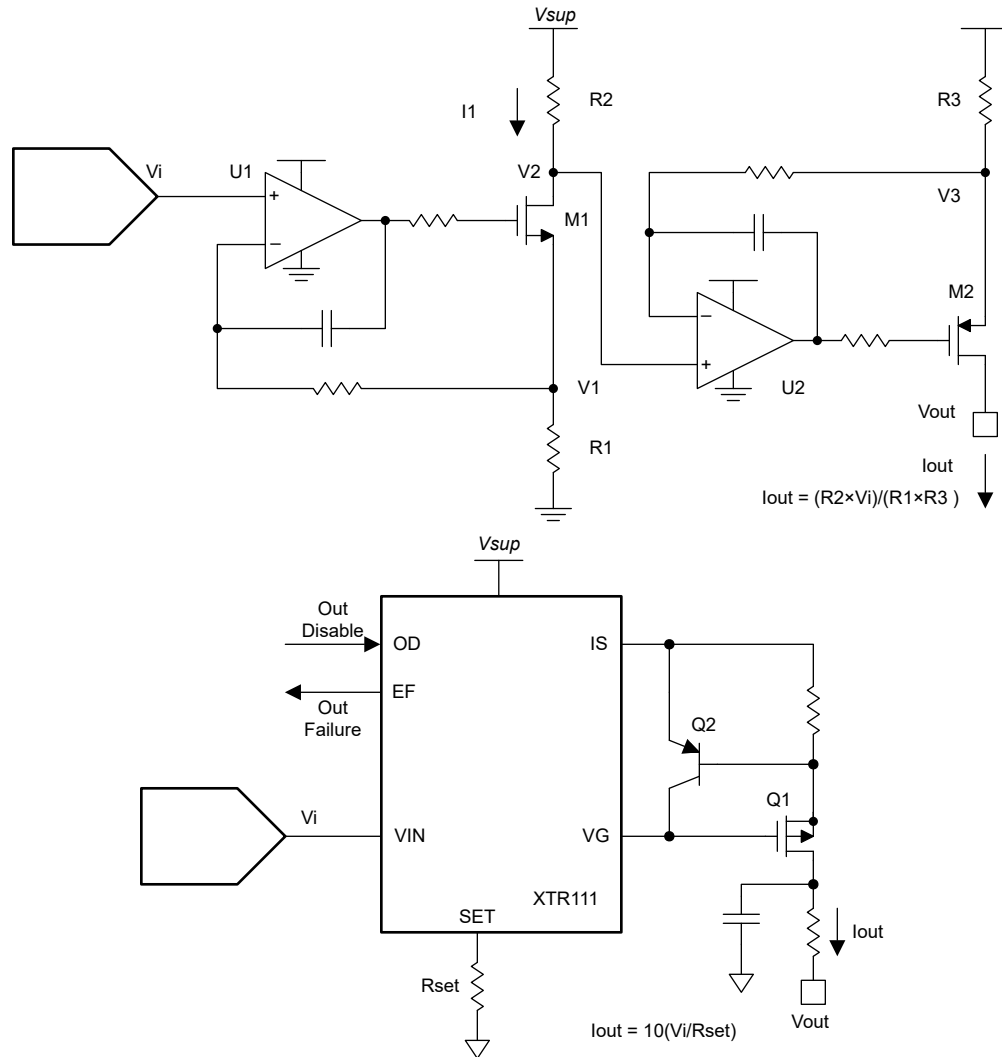


图 6-1. 单向电流缓冲器

另一种实现是使用 XTR111，它提供了更多的集成，输出禁用选项和输出故障诊断反馈信号。XTR111 仅需一个单精度电阻，最大失调电压在 1mV 范围内，且可在高达 40V 的电源电压下工作。

6.2 双向电流缓冲器

双向电流输出在 AOUT 模块中不太常见。当需要双向电流输出时，可使用修改后的 Howland 电路。

INA592 等集成式差分放大器方案提供电阻器匹配以实现高输出精度，仅需要一个外部精密电阻器。该放大器的偏移极低，在微伏范围内，且带宽相对较高，达到 2MHz。有关更多详细信息，请查看[适用于工业应用的高侧电流源](#)。

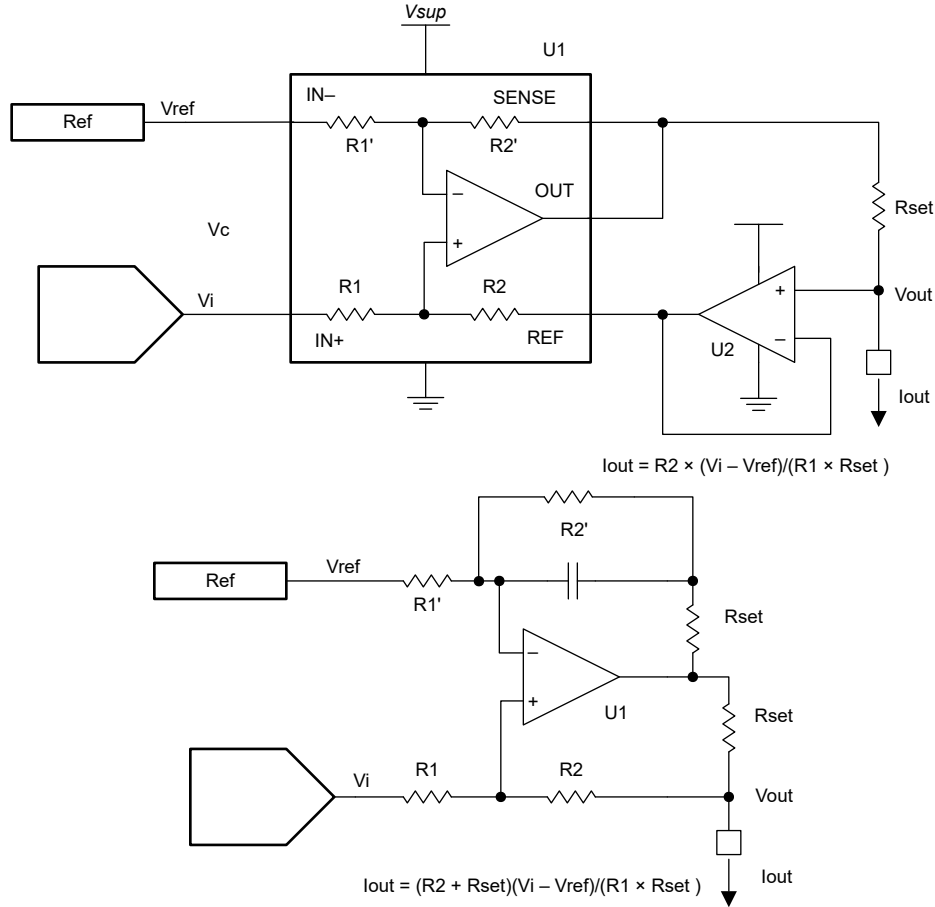


图 6-2. 双向电流缓冲器

差分放大器也可以使用 OPA196 等运算放大器构建分立式放大器，但这需要精确匹配的电阻器来实现合理的精度。

在这两种实现中，除了电压输入外，还需要输入范围中间的参考输入来生成双向电流。有关此设计的更多详细信息，请参见[《改进型 Howland 电流泵配置分析》](#)。

6.3 电压缓冲器

电压缓冲器更简单明了，可为低电压 DAC 信号提供达到 $\pm 10V$ 所需的增益。根据可用的电源和最大输出电压，不需要轨至轨输出运算放大器。低失调电压对于实现高精度非常重要。为了实现精确的增益，需要使用具有低漂移的精密匹配电阻器。

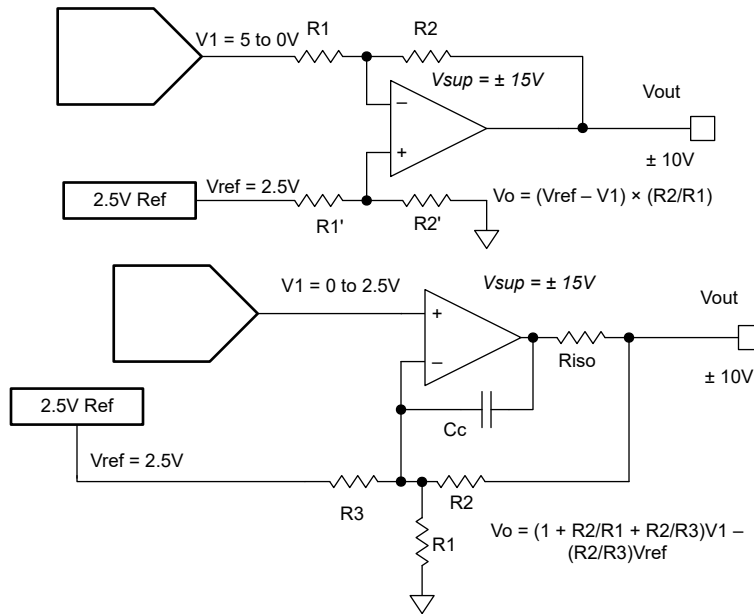


图 6-3. 电压缓冲器

反向差分放大器可如图 6-3 中所，示从而可以使用现成的匹配电阻器。反相放大器的输入阻抗是有限的，设计人员需要确保 DAC 能够驱动所选的电阻。

图 6-3 中显示的第二种实施方法是非反相加法放大器。该放大器具有高输入阻抗，但需要精密电阻器，并且可能需要校准。该放大器还允许使用低于 5V 的 DAC。

6.4 组合电压或电流缓冲器

为了实现输出通道的最大灵活性，可以使用组合式电压和电流缓冲器。如图 6-4 所示的第一种实施方案是使用一对具有禁用功能的双路运算放大器（如 OPA2990S）的分立式实施方案。图 6-4 展示了如何使用 TPS26614 环路保护器来保护电路免受过流或过压影响。此电路具有双向电压输出和单向（拉电流）电流。有关此电路和设计过程的更多信息，请检查受保护的[低噪声组合 V-I 输出级作为模拟输出构建块](#)。

图 6-4 中的第二种实现方式是使用集成式 XTR305，器件该器件提供更高的精度，需要更少的精密电阻器，并具有一定的输出误差信号反馈。该器件需要 3V 的余量和下余量才能运行。有关使用 XTR305 进行设计的[更多详细信息](#)，请参阅[用于交流/伺服驱动器 D 的紧凑可编程 4mA 至 20mA 和 ±10V 模拟输出参考设计](#)。

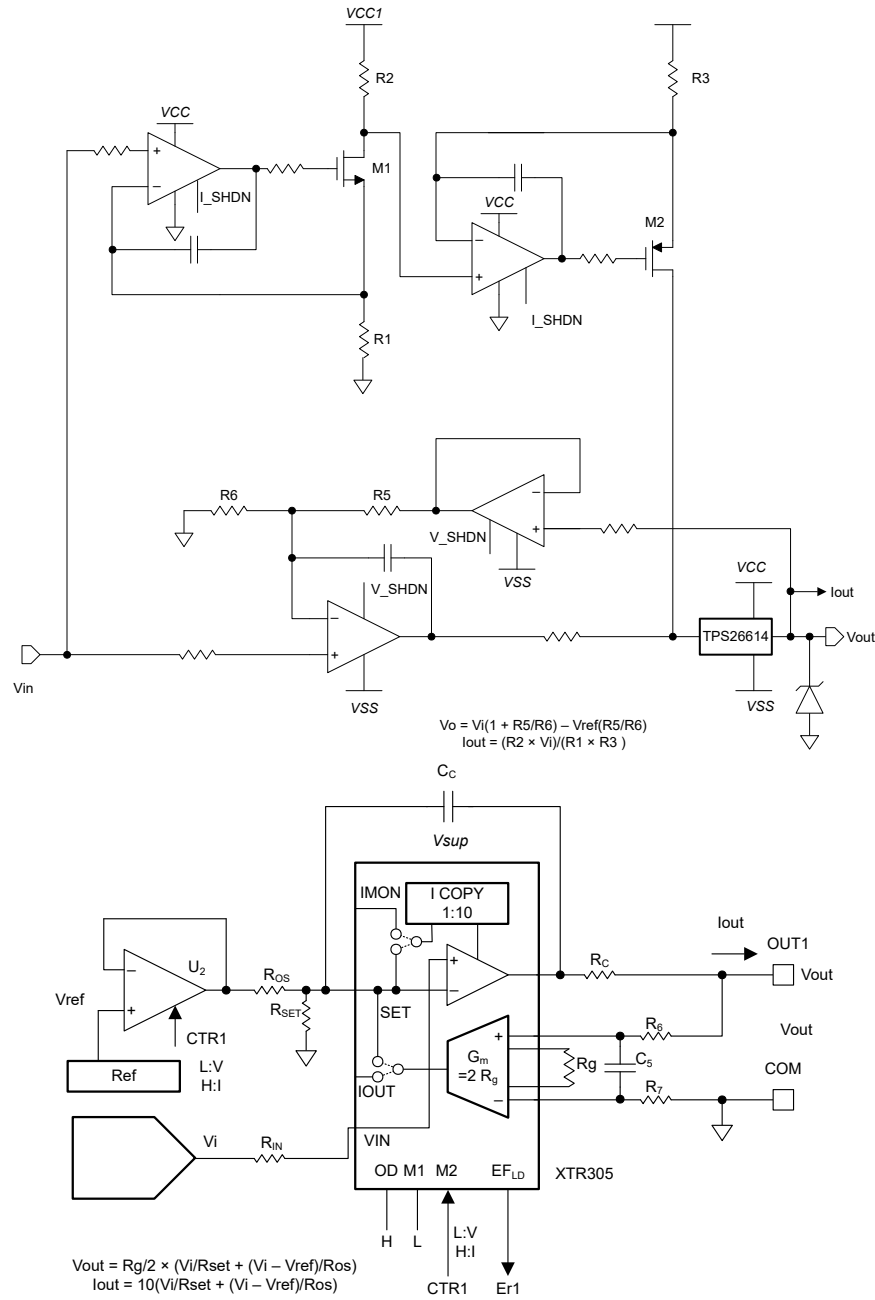


图 6-4. 组合的 VI 缓冲器

7 总结

在为 PLC AO 模块选择正确的架构时，了解设计目标至关重要。通常，更高的集成度可提供更高的精度并具有更高的成本，而集成度更低的架构可降低成本并在器件选择方面具有更大的灵活性。从指定目标通道数，分辨率和转换时间（或速度）开始，设计人员可以快速选择合适的 DAC。然后通过指定输出类型，范围和驱动强度，选择输出缓冲器。当应用需要更高的精度或安全特性时，集成设计具有优势。当应用具有特殊要求（例如高输出电压、高电流驱动或高压摆率）时，通常需要非集成式设计。

8 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[四通道工业电压和电流输出驱动器参考设计 \(经过 EMC/EMI 测试\)](#)，设计指南。
- 德州仪器 (TI)，[具有自适应电源管理功能、功耗低于 1W 的四通道模拟输出模块参考设计](#)，设计指南。
- 德州仪器 (TI)，[适用于 PLC 且具有多路复用单通道 DAC 的多通道模拟输出模块参考设计](#)设计指南。
- 德州仪器 (TI)，[使用 DACx760 实现组合电压和电流输出](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[工业应用中用于模拟输出 \(AO\) 的组合电压和电流输出端子](#)，设计指南。
- 德州仪器 (TI)，[通过 EMC/EMI 测试的隔离式单通道工业电压和电流输出驱动器设计指南](#)。
- 德州仪器 (TI)，[设计适用于现场变送器的高性能 PWM DAC](#)，技术文章。
- 德州仪器 (TI)，[可编程两级高侧电流源电路](#)，模拟工程师电路。
- 德州仪器 (TI)，[适用于工业应用的高侧电流源](#)，模拟设计期刊文章。
- 德州仪器 (TI)，[改进型 Howland 电流泵配置分析](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[用作模拟输出构建块、具有保护功能的低噪声组合式 V-I 输出级](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[适用于交流/伺服驱动器的紧凑可编程 4mA 至 20mA 和 ±10V 模拟输出参考设计 D](#)，设计指南。

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