

设计 4-20mA 环路供电式变送器

Ahmed Noeman
System Engineer
SEM FAC, Freising

引言

在任何过程控制系统中，传感器变送器收集压力、温度、流量和液位等数据，并将这些信息发送到可编程逻辑控制器 (PLC) 或分布式控制系统。

这些变送器依靠 4-20mA 的信号将数据发送到控制器。尽管出现 IO-Link 和 Profibus 等标准，但 4-20mA 信号可提供长距离恢复、可靠性、抗噪声功能以及与每个 PLC 系统的通用兼容性。

在本文中，我将概述 4-20mA 变送器结构及其工作原理，以及使用通用半导体产品实现此类变送器的设计替代方案。

4-20mA 变送器基础知识

4-20mA 变送器按功率和导线数量分为四线制、三线制和两线制等类型。在本文中，我将重点介绍两线制类型。

图 1 中的两线制现场变送器连接现场电源和模拟输入模块，由此形成一个电流环路。现场变送器中的第一个子系统是传感子系统，它连接物理传感器、调节其输出并将信号转换为数字代码来进行处理（包括线性化和校准）。第二个子系统是发送子系统，它通过从环路中提取电源为变送器供电，通过将数字信号转换回模拟信号来发送处理数据，并控制环路电流。变送器通过将环路内的电流调节为压控电流源来传输信号。

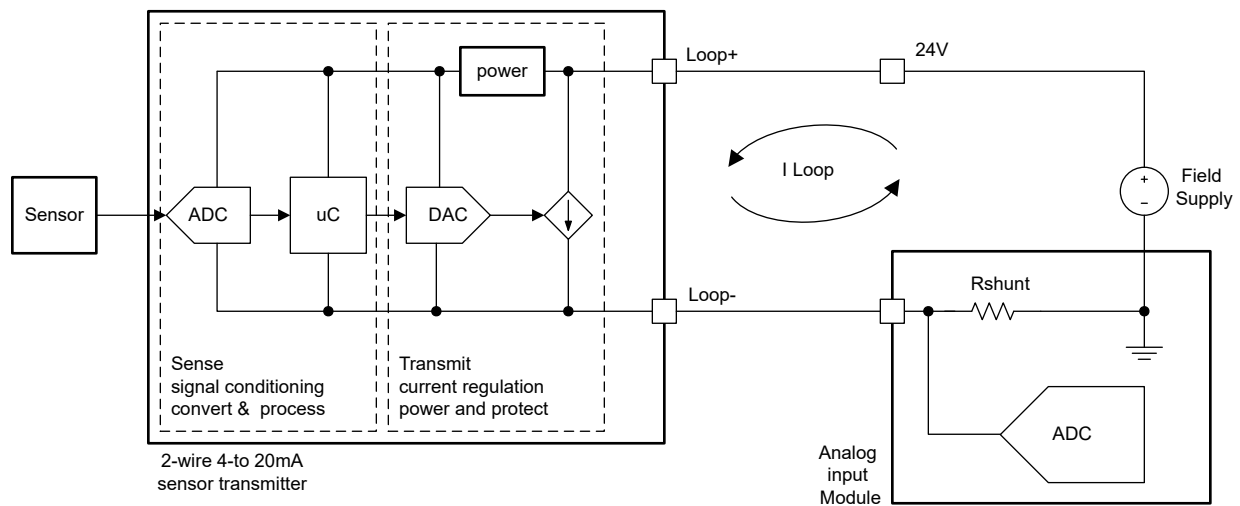


图 1. 通用两线制 4-20mA 传感器变送器。

在图 2 中，一个 NPN 型晶体管（即 N 沟道-P 沟道-N 沟道）提供电流并对电流进行调节，晶体管基极通过由数模转换器 (DAC) 驱动的放大器控制。宽输入电压低压降 (LDO) 稳压器将环路电压降至变送器电源等级，从而为不同的元件供电。如果 DAC 没有集成基准，则可以使用电压基准；而支持高速可寻址远程传感器 (HART) 的变送器需要 HART 调制解调器。

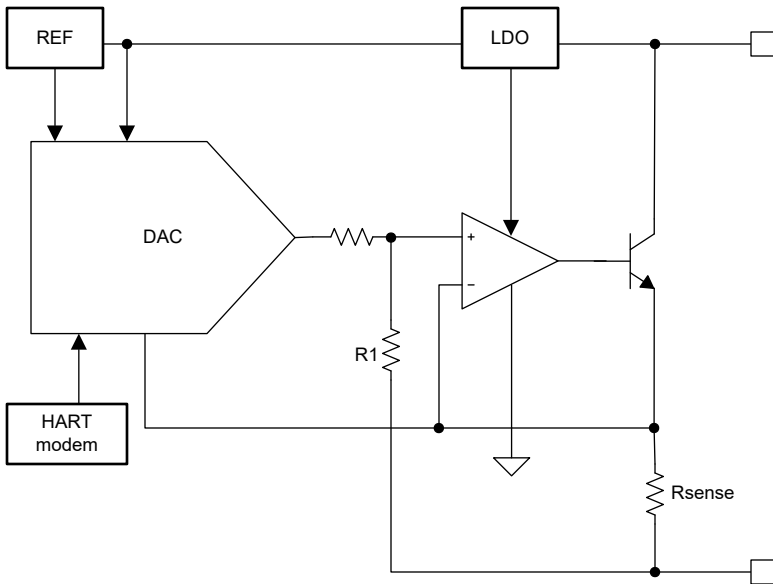


图2. 两线制 4-20mA 变送器电路。

工作原理非常简单：将运算放大器的两个输入端保持虚拟本地接地。R1 两端的电压是多少，Rsense 的电压也是多少。经过适当调节，Rsense 会传输调节版本的 R1 电流。考虑到 Rsense 电流几乎是现场变送器的总电流（即使是图 2 中和线性度性能传感部分也如此），DAC 输出控制整个变送器的电流。NPN 晶体管和放大器环路会旁路必要的电流以补充变送器本身使用的任何电流，从而达到所需的输出电流。

4-20mA 变送器设计考量

4-20mA 变送器设计注意事项包括：

- 低功耗运行。
- 小封装尺寸。
- 在整个工业温度范围内提供高精度和低噪声。
- 支持 HART 协议。
- 低成本。

设计性能指标

有几个变送器性能指标需要评估：

环路合规电压是变送器正常工作时的环路电压范围，主要由 LDO 限值决定，并受环路内的串联元件（包括保护器件）的影响。典型的环路合规电压范围为 12V 至 36V。

分辨率是变送器可以生成的不同电流输出值的数量，它与 DAC 原生分辨率直接关联。商用 4-20mA 变送器的分辨率介于 12 位和 16 位之间。

线性误差主要由 DAC 的积分非线性决定，是整个输出范围内的最大误差（以最低有效位 [LSB] 为单位）。

噪声通过输出噪声电流的均方根 (RMS) 来测量。这种噪声会使一些输出电平无法区分，从而降低有效分辨率。在这种情况下，有效分辨率是对噪声性能的度量。对于 16 位分辨率系统，有效分辨率预计在 13 位和 15 位之间，具体取决于信号带宽。

精度用于测量电流输出与理想电流值的偏差。其中包括偏移量误差、增益误差和非线性误差的 RMS 总和，以及这些值的温度漂移。总体未调误差表示不准确的程度。

动态性能包括信号带宽和变送器稳定性。带宽是指可通过环路传输的最大电流信号带宽。该带宽由 DAC 稳定时间和放大器电路带宽以及旁路晶体管的跨导决定。使用退化电阻可以消除晶体管跨导 (g_m) 变化所产生的影响。通常，也会对放大器电路进行外部补偿。稳定性与环路带宽和补偿电容器值有关。减少环路关键节点上的电容值将提高稳定性。有关环路稳定性及其要求的详细分析，请参阅 [DAC161S997 数据表](#)。对于支持 HART 的变送器，使用外部元件来减小带宽有助于防止对 HART 信号的干扰。

电路保护功能可保护变送器免受反向环路极性和浪涌事件等异常情况的影响。二极管可阻断反极性。如果变送器采用反极性运行，请使用整流桥，如图 3 所示。浪涌保护需要使用瞬态电压抑制器二极管（例如 [TVS3301](#)）和无源元件在高压事件期间限制电流。这些保护元件在运行期间需要一些余量，并会增加最小合规电压值。

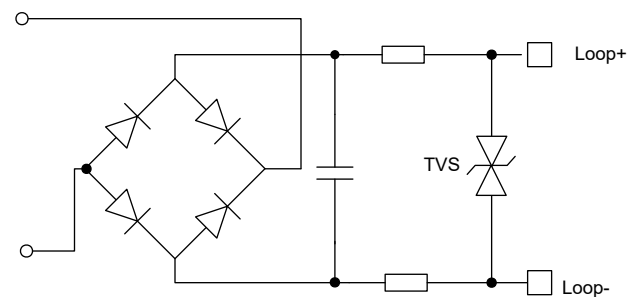


图3. 双线制变送器的典型保护部分。

变送器电路实现

图 2 中方框图实现之间的区别在于集成方法。旁路晶体管始终是分立式元件，用于实现更好的热管理。通过添加 HART 调制解调器（例如 DAC8740H），以下所有实施方案都可以支持 HART 协议。

专用环路转换器

一种方法是使用 DAC，如具有集成电压基准和输出放大器的 DAC161S997。该解决方案由 DAC、宽输入电压 LDO 和 NPN 晶体管组成，如图 4 所示。此实施方案消耗 130 μ A 的电流，具有出色的精度，而且无需校准。

DAC161S997 具有诊断功能，可在低电源电压或高电流负载的情况下检测电流环路误差，并发出低于 4mA 的低误差电流信号。

设计很简单，只需少量外部元件即可确保环路稳定性并限制浪涌电流。此方法的最高工作温度为 105 $^{\circ}$ C。

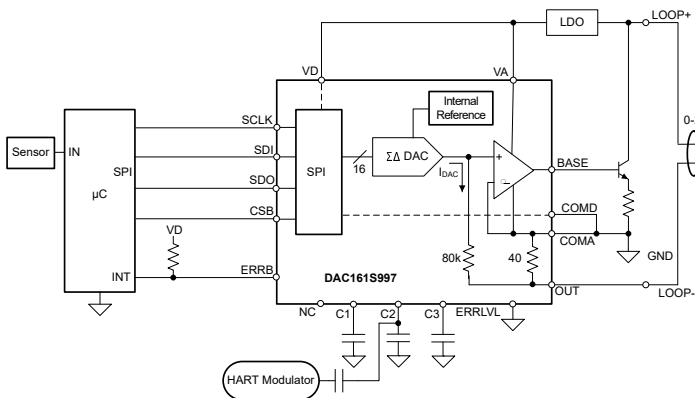


图 4. 使用 DAC161S997 的两线制 4-20mA 变送器。

环路变送器器件

另一种实施方案是采用 DAC8551 等低功耗 DAC，后跟 XTR115 等具有集成式 LDO、电压基准和输出放大器的专用环路变送器。这种方法可更大幅度地降低噪声，并具有不到 1% 的增益误差。

这里有几个限制条件：XTR115 的工作温度限制为 85 $^{\circ}$ C，集成式 LDO 的最大输入电压为 36V。作为替代方案，XTR117 具有更小的封装，消耗更低的静态电流，并且工作温度可高达 125 $^{\circ}$ C。XTR117 的集成式 LDO 可在高达 40V 的电压下工作。XTR117 未集成电压基准，因此依赖

于外部基准，从而成为一个三器件解决方案：包含一个 LDO、一个 DAC 和一个电压基准，如图 5 所示。

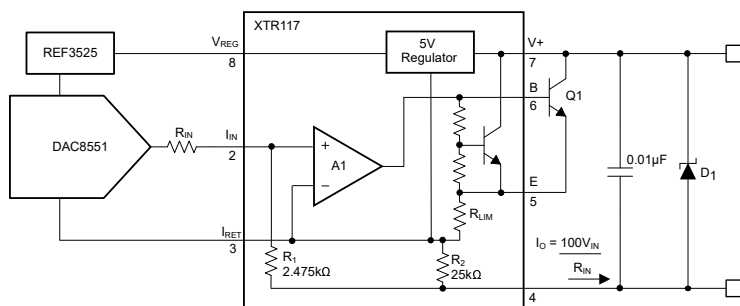


图 5. 使用 XTR117 的两线制 4-20mA 变送器。

集成 MCU 的 DAC

成本敏感型应用采用具有模拟资源的 MCU。MSPM0G MCU 可实现变送器级实施方案，包括集成式 12 位 DAC、内部基准和输出放大器。LDO 是唯一需要的外部器件，如图 6 所示。由于在 MCU 的数字处理中实现了模拟功能，因此与对应的专用模拟器件相比，它们的功耗相对较高。对于需要以非常低的成本实现 11 位有效分辨率的应用而言，这种方法极具吸引力。将 VREF- 引脚用作内部基准负引脚而不是地，可以提升性能。将 VREF- 引脚隔离，可将数字噪声与模拟基准隔离开来。

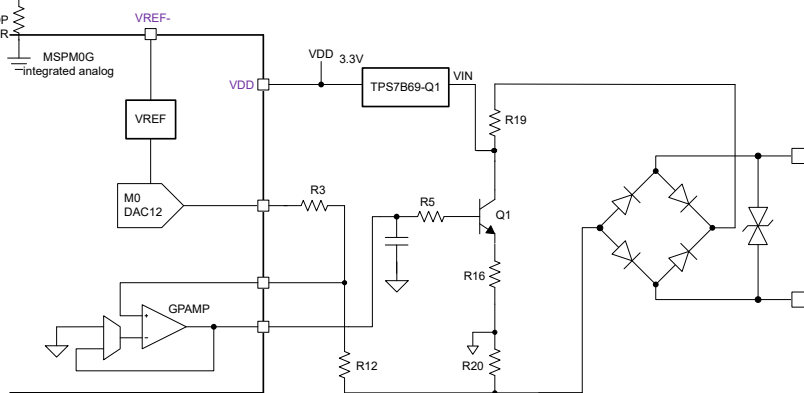


图 6. 使用 MSPM0G 实现的两线制 4-20mA 变送器。

基于 PWM 的 DAC

使用 MCU（无集成式 DAC）的一种更通用方法依靠脉宽调制 (PWM) 来生成 DAC 输出。简单的 PWM DAC 具有 10 位至 12 位的分辨率。不过，使用双路径 PWM 和有源纹波抑制等更先进的技术，也可以实现具有 16 位分辨率的 DAC。

为了实现高的有效分辨率，使用由电压基准供电的逻辑门对 PWM 信号进行缓冲；MCU 需要适当的旁路以避免数字噪声注入环路电流。图 7 中所示的实施方案具有低功耗，

在温度范围内保持稳定，并以非常低的成本实现 13 位以上的有效分辨率。

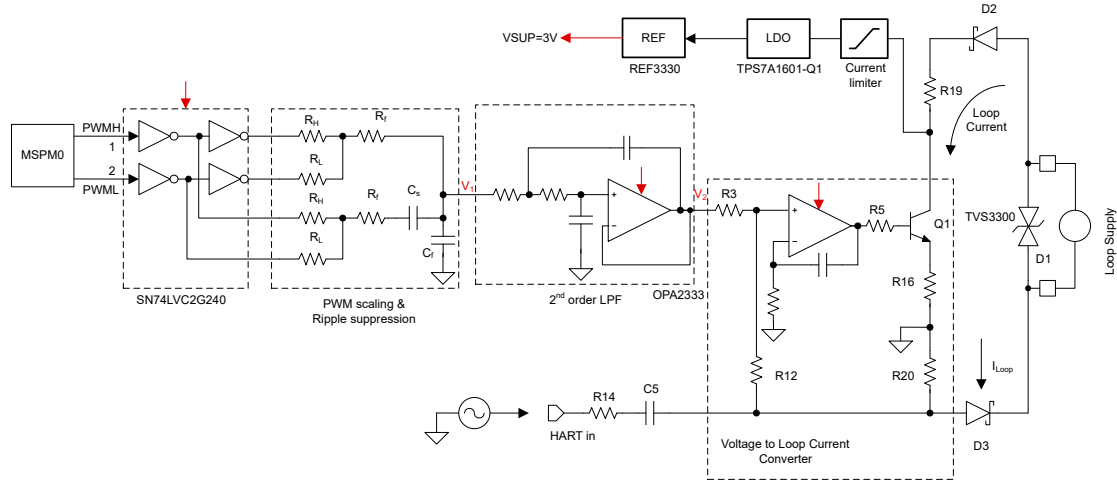


图 7. 使用 PWM DAC 实现的两线制 4-20mA 变送器。

独立式低功耗 DAC

使用低功耗、独立式 DAC 实现 4-20mA 变送器（如图 8 中的 AFE88101 等）时，可实现出色的分辨率和线性性能。为了进一步降低功耗，REF35125 等低功耗电压基准可将电流降至 180 μ A。此外，AFE88101 还具有丰富的诊断功能，并包括一个 12 位 ADC 和定义的失效防护模式。

AFE881H1 与 AFE88101 引脚对引脚兼容，具有集成式 HART 调制解调器，适用于支持 HART 的紧凑型变送器。启用 HART 时，AFE881H1 具有低电流消耗。HART 调制解调器在运行期间通常消耗 10 μ A 电流，因此对于支持 HART 的低功耗变送器而言，它是一款理想器件。

AFE88101 的另一个特性是与 1.8V 逻辑电平兼容，从而实现低电压数字运行，进一步降低 MCU 输入/输出侧的功耗，并减少电磁发射。

实施方案比较

表 1 和表 2 展示了每种实施方案及其建议的物料清单 (BOM) 和预期性能。性能数据通过有限的测量得到。

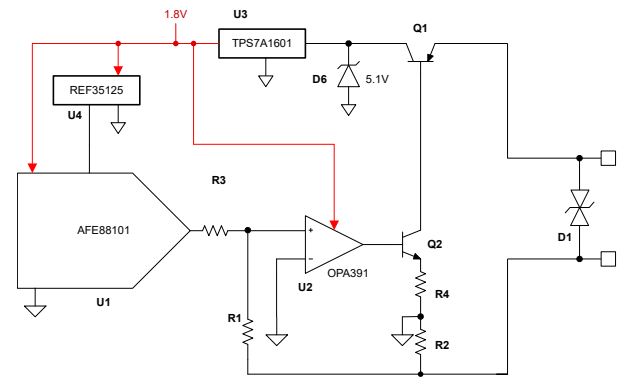


图 8. 使用 AFE88101 实现的两线制 4-20mA 变送器。

采用 DAC8311 DAC、LDO 和外部低功耗基准的低成本变体方案以 130 μ A 电流运行，而且仍能实现适当的性能。

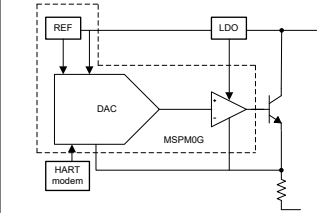
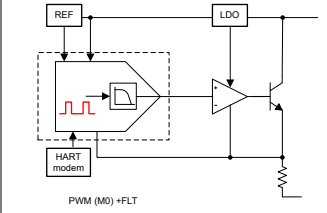
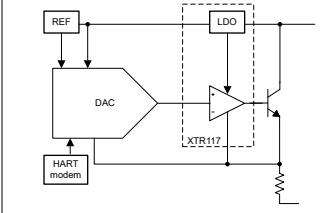
	MSPM0 DAC12	使用 M0 的 PWM	XTR117
			
BOM	MSPM0G、TPS7B69、DAC8740H	TPS7A1601、REF3330、TLV2333、DAC8740H	XTR117、DAC8551A、REF3525
合规电压 (伏特)	40	60	40
分辨率 (位)	12	16	16
线性度 (LSB)	2	<6	8
有效分辨率 (位)	11	13.4	14
精度	1% 满量程, 6uA	1% 满量程, 6uA	0.7% 满量程, 20uA
电流 (uA)	425	240	440
温度 (°C)	125	125	105
优势	低成本	低成本、高分辨率、低功耗	高分辨率

表 1. 4-20mA 变送器的设计方案、建议的 BOM 和性能 (MSPM0 DAC12、使用 M0 的 PWM、XTR117)。

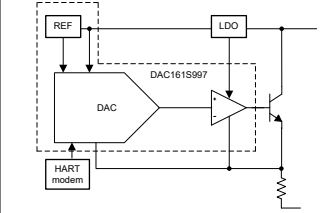
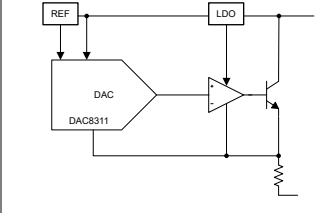
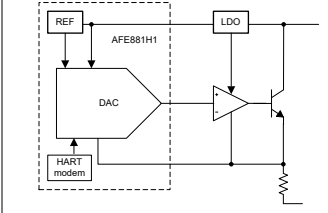
	DAC161S997	DAC8311	AFE881H1
			
BOM	DAC161S997、TPS7A1601、DAC8740H (1)	DAC8311、REF3525、OPA391、TPS7B69、DAC8740H	AFE88101 (1)、REF35125、OPA391、TPS7A1601
合规电压 (伏特)	60V	40	60
分辨率 (位)	16	14	16
线性度 (LSB)	5	4	4
有效分辨率 (位)	13.4	13.4	16
精度	0.01%、1uA	0.15%	0.07%
电流 (μA)	130	130	180 (具有内部基准时为 240)
温度 (°C)	105	125	125
合规电压 (伏特)	超低功耗、高分辨率、高精度	超低功耗、低成本	高分辨率和准确度、低功耗、低电压

表 2. 4-20mA 变送器的设计方案、建议的 BOM 和性能 (DAC161S997、DAC8311、AFE881H1)。

(1) DAC8740 的最大断电电流为 180μA；当与晶体振荡器一起工作时，约为 300μA。但是，AFE881H1 HART 调制解调器平均消耗 10μA。如果支持 HART，则增加相应电流。

结语

在设计 4-20mA 变送器时，此选择过程可帮助您确定正确的实施方案：

- 如果您在构建一个安全系统，并需要超高精度和超低噪声性能，或在寻找一个功率低于 200μA 且支持 HART 的变送器，那么 **AFE88101** 和 **AFE881H1** 应该是您的首选。
- 如果优先考虑性能而不是功耗，则 **DAC161S997** 实施方案的功耗和占用空间最低，其次是 **DAC8311** 实施方案、**XTR117** 实施方案。

- 如果需要成本最低，请选择 MSPM0G 实施方案。如果其性能欠佳，下一个低成本解决方案是 PWM 解决方案。

相关网站

- [4-20mA 电流环路变送器参考设计](#)
- [采用单电流环路、具有 FSK 调制的双传感器测量参考设计](#)
- [通过 EMC/EMI 测试的双线制 4-20mA 变送器参考设计](#)
- [适用于现场变送器的高性能 16 位 PWM 转 4-20mA DAC](#)
- [设计适用于现场变送器的高性能 PWM DAC](#)
- [使用 AFE881H1 的超低功耗、低电压、双线制 4-20mA 环路变送器](#)
- [采用 HART 调制解调器的高精度环路供电式 4-20mA 现场变送器参考设计](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司