

Circuits from the Lab® Reference Designs

Circuits from the Lab®参考设计是经过测试的参考设计，有助于加速设计，同时简化系统集成，帮助并解决当今模拟、混合信号和 RF 设计挑战。如需更多信息和/或技术支持，请访问 www.analog.com/cn/CN0418。

连接/参考器件

AD5755-1	四通道、16位、串行输入、4–20 mA和电压输出 DAC，提供动态功率控制和HART连接
AD5700-1	集成精密振荡器的低功耗HART调制解调器
ADG759	CMOS低压、3 Ω，4通道多路复用器
ADP2441	36 V、1 A同步降压DC/DC稳压器
LT8301	集成65 V/3.6 A开关的42V _{IN} 低功耗非光学隔离反激式转换器
ADR02	超紧凑、5.0 V精密基准电压源
ADuM3151	用于SPI的3.75 kV、7通道、SPIsolator数字隔离器（2/1辅助通道方向性）
ADuM3482	小型、四通道、3.75 kV RMS数字隔离器（2/2通道方向性）

适用于带 HART 的 PLC/DCS 系统的完全隔离的 4 通道模拟输出电路

评估和设计支持

电路评估板

[CN0418参考设计板\(EVAL-CN0418-ARDZ\)](#)

[超低功耗Arduino尺寸开发板\(EVAL-ADICUP3029\)](#)

设计和集成文件

[原理图、布局文件、物料清单、软件](#)

电路功能与优势

图1所示的电路提供了一个完整的完全隔离式高度灵活的4通道模拟输出系统，适合工业级可编程逻辑控制器(PLC)、分布式控制系统(DCS)和其他工业过程控制应用，这些应用要求采用±5 V或±10 V电压和4 mA至20 mA电流输出，且采用HART连接。

所有4通道输出和功率输入都具有瞬态过压和过流事件保护功能，适合最恶劣的工业环境。

CN0418电源输入电路包含板载滤波和保护功能，兼容12 V至36 V的直流电源电压，包括许多PLC和DCS应用中常见的标准24 V电源。

该模块兼容HART，提供了一个完整的现场通信解决方案，简单易用、低成本、低功耗且极其可靠。

片内动态功率控制功能最大限度地降低封装在电流输出模式下的功耗，对于使用多个电路的高通道数和高密度应用，可以帮助缓和热管理方面的问题。

地址选择逻辑支持最多堆叠4个电路，在单个节点上提供最多16个通道，让4个输出的电源之间保持隔离。板载电子可擦除可编程只读存储器(EEPROM)可以存储校准和标识数据。

Rev. 0

Circuits from the Lab® reference designs from Analog Devices have been designed and built by Analog Devices engineers. Standard engineering practices have been employed in the design and construction of each circuit, and their function and performance have been tested and verified in a lab environment at room temperature. However, you are solely responsible for testing the circuit and determining its suitability and applicability for your use and application. Accordingly, in no event shall Analog Devices be liable for direct, indirect, special, incidental, consequential or punitive damages due to any cause whatsoever connected to the use of any Circuits from the Lab circuits. (Continued on last page)

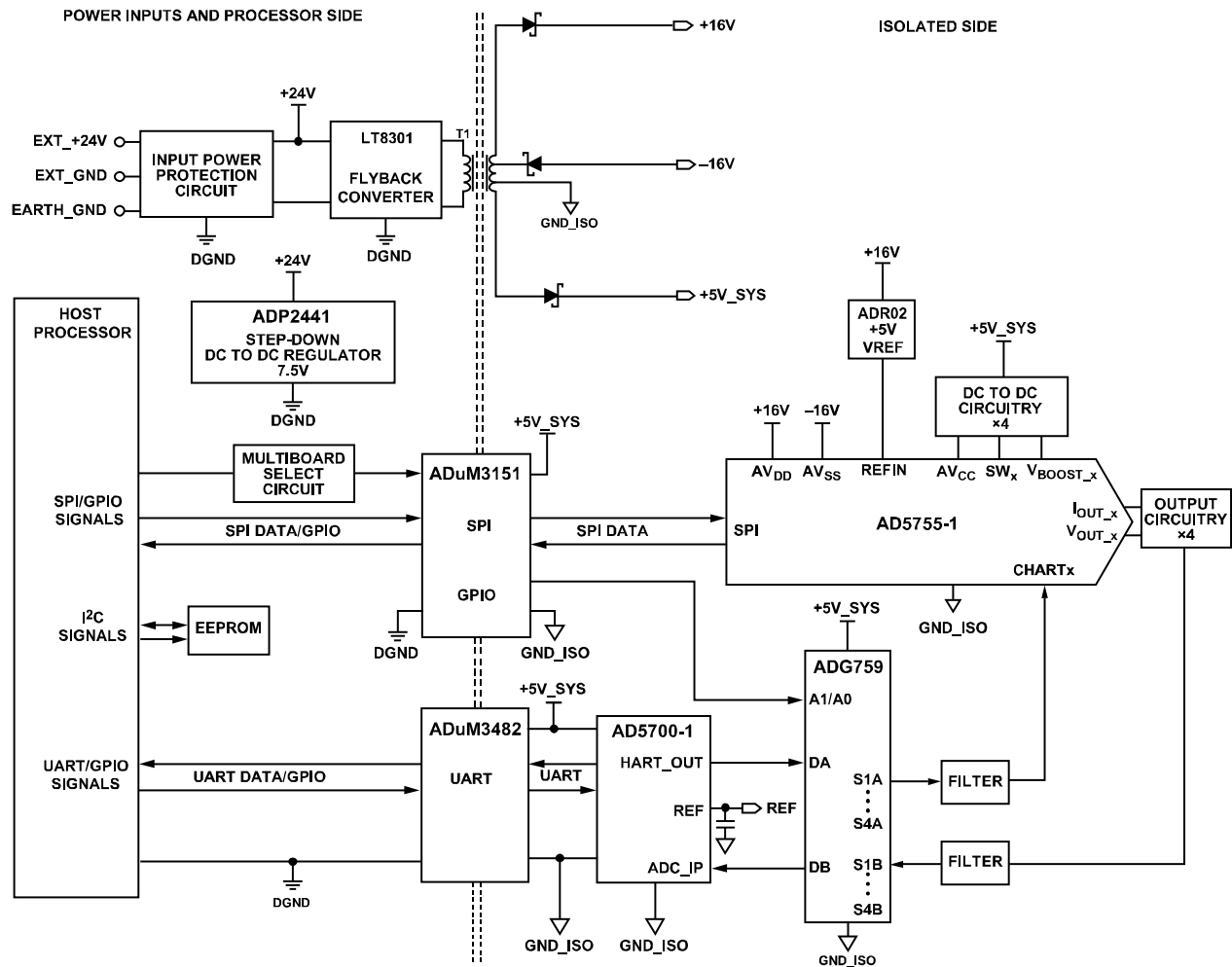


图1. 集成变压器隔离电源解决方案的4通道多路复用HART模拟输出电路
(简化原理图: 未显示所有连接和解耦)

17344-001

电路描述

工业控制模块中常用几种标准电压和电流范围，包括 $\pm 5\text{ V}$ 、 $\pm 10\text{ V}$ 、 0 V 至 5 V 、 0 V 至 10 V 、 4 mA 至 20 mA ，以及 0 mA 至 20 mA 。**AD5755-1**在全集成、低成本的单芯片解决方案中，以16位分辨率提供所有这些范围。电压输出范围还提供20%的超量程特性。每个DAC通道都有一个增益和失调寄存器，用于消除整个信号链的增益和失调误差。

电流输出和电压输出通过独立引脚提供，给定时间内仅一个输出类型处于有效状态，因而允许将两个输出引脚连在一起并接到单个端口上。当使能电流输出时，电压输出处于三态模式；当使能电压输出时，电流输出为三态模式。模拟输出受短路和开路保护。

AD5755-1支持内部或外部精密电流设置电阻用于电压-电流转换电路，如图2所示。输出电流值在全温度范围内的稳定性取决于电流设置电阻 R_{SET} 值的稳定性。作为提高输出电流在整个温度范围内的稳定性的一种方法，可将一个外部15 k Ω 低漂移电阻连接到**AD5755-1**的 R_{SET_X} 引脚，以取代内部电阻。外部电阻通过DAC控制寄存器进行选择。高精度测量通过两种选项进行评估，详见“电路评估与测试”部分。

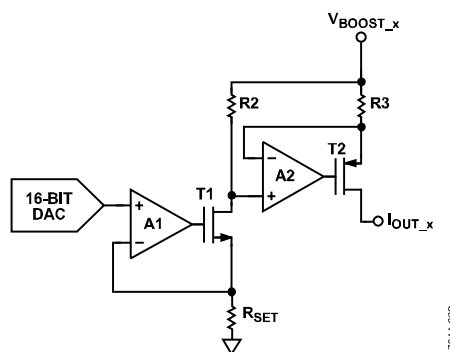


图2. 电压-电流转换电路

精密基准电压源的选择

AD5755-1有一个片内10 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ （最大值）基准电压源。为了提高在整个温度范围内的性能，该设计采用一个**ADR02**基准电压源，其最大漂移为3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ （B级，SOIC封装）。基准输入端的电压用于为DAC内核提供经缓冲的基准电压。因此，任何基准电压误差都会反应到输出端。

ADR02是一款5 V精密基准电压源，允许高达36 V的输入电压。**ADR02**的最大精度误差为0.06%，最大温度漂移为3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ （B级，SOIC封装）。该漂移在 -40°C 至 $+100^{\circ}\text{C}$ 工业温度范围内会贡献大约0.02%误差。

ADR02的长期漂移为50 ppm（典型值），0.1 Hz至10 Hz额定噪声为10 $\mu\text{V p-p}$ （典型值）。

动态功率控制

AD5755-1集成基于DC-DC升压转换器电路的动态功率控制功能，在电流输出模式下可降低功耗。多数PLC电流输出电路都采用一个固定电压源，以满足整个负载电阻值范围内的顺从输出电压要求。例如，在驱动20 mA时，一个负载为750 Ω 的4 mA至20 mA环路就要求顺从电压不低于15 V。但在将20 mA驱动至50 Ω 负载时，则只需要1 V的顺从电压。如果在驱动50 Ω 负载时，15 V的顺从电压保持不变，则会浪费 $20\text{ mA} \times 14\text{ V} = 280\text{ mW}$ 的功率。

AD5755-1电路通过检测输出电压，调节顺从电压，不论负载电阻有多大，只允许少量的裕量电压，由此大幅降低这种功率损失。**AD5755-1**最多可以将24 mA驱动至1 k Ω 的负载。

DC-DC转换器工作原理

AD5755-1内置4个独立的DC-DC转换器，用于为各个通道的 V_{BOOST_X} 电源电压提供动态控制。图3所示为**AD5755-1**与各通道相关的外部分立式组件。

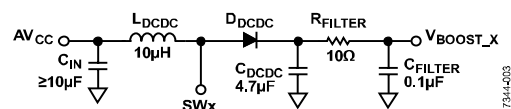


图3. DC-DC电路

建议在 C_{DCDC} 之后放置一个10 Ω 、100 nF低通RC滤波器。虽然该器件会消耗少量电能，但会减少 V_{BOOST_X} 电源上的纹波。

DC-DC转换器采用一种恒频、峰值电流模式控制方案，以将4.5 V至5.5 V的 AV_{CC} 输入升压，从而驱动**AD5755-1**输出通道。这些转换器设计用于工作在断续导通模式(DCM)，占空比小于90%（典型值）。

当通道被设置采用电流输出范围时，转换器将 V_{BOOST_X} 电源的值调节到7.4 V ($\pm 5\%$)或 $(I_{\text{OUT}_X} \times R_{\text{LOAD}} + \text{headroom})$ ，以较高者为准。在电流输出模式下，若输出被禁用，转换器将把 V_{BOOST_X} 电源调节至7.4 V ($\pm 5\%$)。在电压输出模式下，若输出被禁用，转换器将把 V_{BOOST_X} 电源调节至15 V ($\pm 5\%$)。有关DC-DC转换器工作情况的详情，请参见**AD5755-1**数据手册。

数字压摆率控制

AD5755-1的压摆率控制特性允许用户控制输出值的变化速率。这个特性适用于电流和电压输出，支持实现两种重要功能：当输出从低值摆动至高值时，它可以减低来自 AV_{CC} 的瞬变电流，它还可以降低对HART通信的干扰。

通过禁用压摆率控制特性，输出值以受输出驱动电路和所连负载限制的速率变化。通过压摆率控制寄存器的SREN位使能压摆率特性后，输出以压摆率控制寄存器可以访问的SR_CLOCK和SR_STEP两个参数所定义的速率，在两个电平值之间摆动。

在以下等式中，压摆率为步长、更新时钟频率和LSB大小的函数：

$$\text{压摆时间} = \frac{\text{输出变化}}{\text{步长} \times \text{更新时钟频率} \times \text{LSB 大小}}$$

其中：

压摆时间用秒表示。

输出变化表示为A（针对 $I_{OUT,y}$ ）或V（针对 $V_{OUT,y}$ ）。

更多信息请参考AD5755-1数据手册。

瞬态电压保护

AD5755-1内置ESD保护二极管，可防止器件在一般工作条件下受损。但是，工业控制环境可能会使输入/输出(I/O)电路遭受高得多的电压瞬变。为了防止**AD5755-1**受到过高的电压瞬变，需要把一个24 V瞬变电压抑制器(TVS)置于 $I_{OUT,x}/V_{OUT,x}$ 连接上，如图4所示。

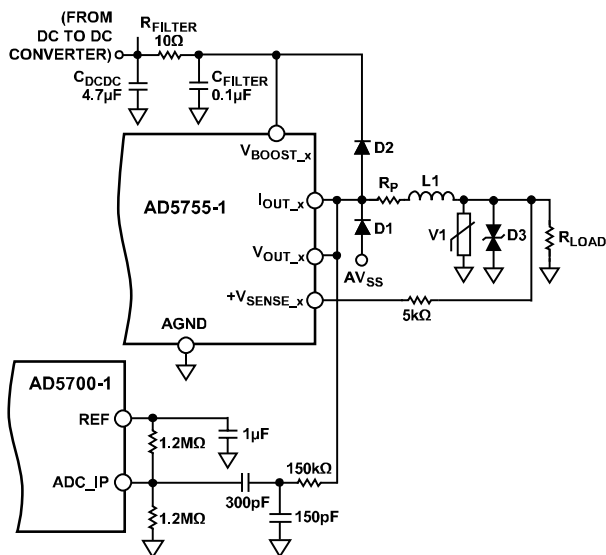


图4. 输出瞬态电压保护

为提供进一步保护， I_{OUT_X} 和 V_{OUT_X} 引脚与 V_{BOOST_X} 和 AV_{SS} 电源引脚之间连接有钳位二极管。另外还使用一个5 k Ω 限流电阻，它与 $+V_{SENSE_X}$ 输入端串联，用以将瞬变事件期间的电流限制在合理范围内。**AD5700** HART调制解调器建议采用包含150 k Ω 电阻的外部带通滤波器，这样可以将电流限制在足够低的水平，如此便无需采用额外的保护电路，即使在最严苛的工业环境下也是如此。

输入电源保护

通过一个2线或3线接口，把一个稳压工业标准电源（例如12 V或24 V直流电源）连接到EVAL-CN0418-ARDZ电路板。该电源必须采取故障和电磁干扰(EMI)保护措施，如图5所示。

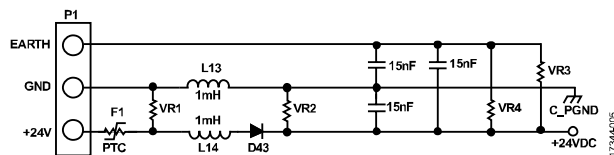


图5. 输入电源瞬变电压保护

VR1、VR2、VR3和VR4是金属氧化物压敏电阻浪涌抑制器，F1是1 A可复位保险丝。该电路确保参考设计系统能够承受电源端口可能产生的干扰和瞬变。参考《模拟对话》43-04，2009年4月发布的[PLC评估板简化工业过程控制系统的设计](#)，了解更多信息。

电源电路

EVAL-CN0418-ARDZ板由12 V至36 V直流供电, 利用板载开关稳压器向平台板提供7.5 V电源, 如图6和图7所示。在测试设置中, EVAL-ADICUP3029板的供电电源为7.5V。然后, EVAL-ADICUP3029板为IO_VREF引脚(参考图7)提供3.3 V调节电压, 为其余电路提供5 V电压。

ADP2441是36 V降压DC-DC稳压器，采用工业标准24 V电源，具有宽输入电压容差。ADP2441将输入电压降至7.5 V（1 A）用于平台板，并利用Arduino兼容平台通常带有的5 V稳压器为EVAL-CN0418-ARDZ其余部分提供5 V 电源。电路在24V电源端还提供了滤波和保护功能。

ADP2441的开关频率很高，因此，即使只用小型电感，输出电压的纹波也非常小。电感的大小需权衡效率和瞬态响应决定。小型电感会引起较大的电感电流纹波，能提供更出色的瞬态响应，但会降低系统效率。由于ADP2441的开关频率非常高，因此建议使用低磁芯损耗、低EMI的屏蔽铁氧体磁芯电感。

在图6所示电路中，外部电阻为162 kΩ时的开关频率约为550 kHz。根据ADP2441数据手册选择33 μH的电感值。该电路通过螺丝端子连接到12 V至36 V的现场电源。EARTH端子可以连接到外部大地连接，如若未使用外部大地连接，则可连接到GND端子。功率电感、压敏电阻、功率二极管和1.1 A保险丝为高压瞬变事件提供额外的输入保护。

隔离电源由LT8301非光学隔离反激式转换器产生。具有4抽头二次绕组的变压器提供隔离，并产生+16 V、-16 V和+5 V电源。通过对原边反激式波形采样来调节输出电压，无需采用光学隔离器、辅助检测绕组或其他隔离反馈方法。

LT8301 被用于调节多重输出电路中负载最大的输出。AD5755-1给出了+16 V电源、-16 V电源和+5 V供电轨的一系列加载条件。表1显示在各种负载条件下，满足AD5755-1要求的电源电压。

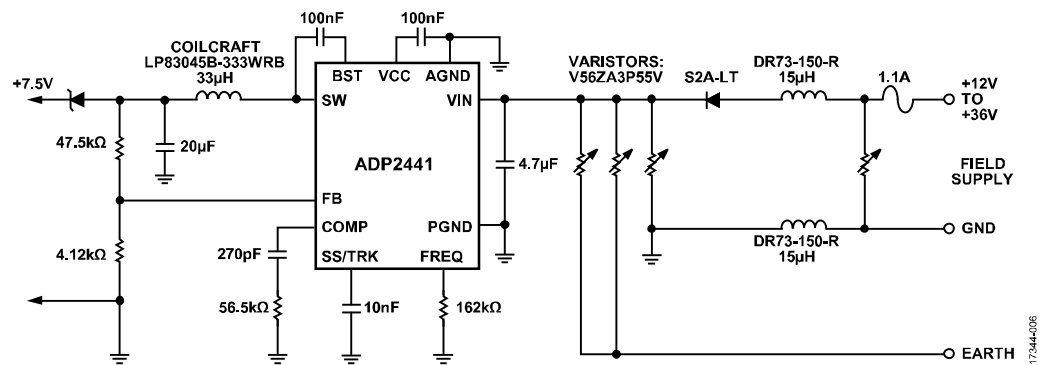


图6. 电源电路（简化原理图：未显示所有连接）

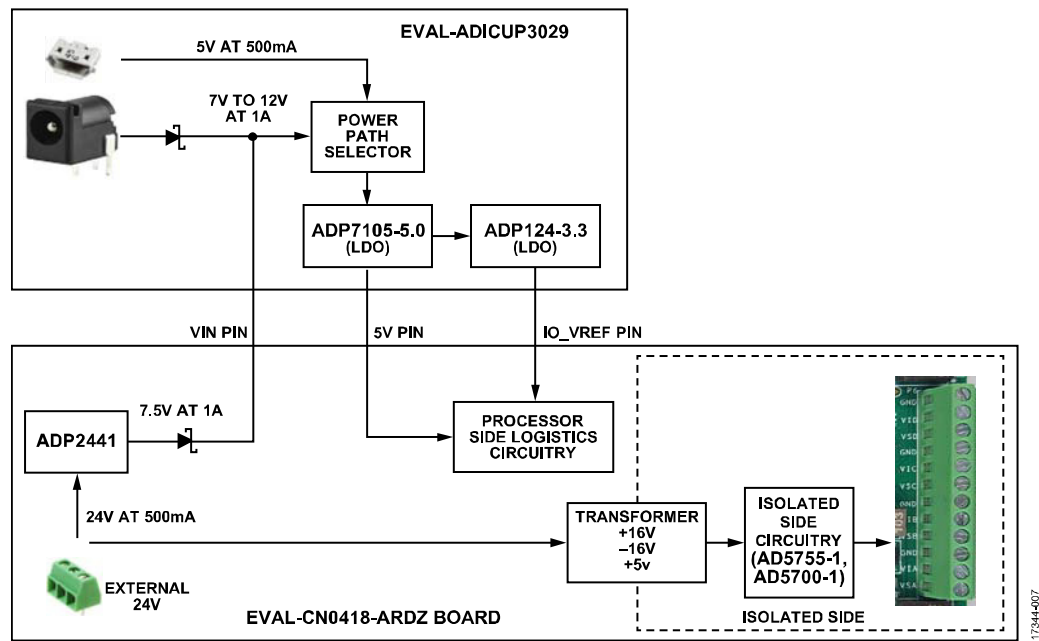


图7. EVAL-CN0418-ARDZ电路板的电源树和配置

表1. 变压器隔离式供电轨电压

设置	+16 V电源(V)	-16 V电源(V)	+5 V电源(V)
电源电路无负载，AD5755-1输出被禁用	16.15	-16.15	4.8750
在电流输出模式下的AD5755-1			
4个通道为20 mA（1 kΩ负载）	18.55	-20.93	4.8936
4个通道为24 mA（1 kΩ负载）	19.64	-22.11	4.8622
在电压输出模式下的AD5755-1，4个通道为10 V（500 Ω负载）	17.11	-17.11	4.9476

AD5755-1具有较宽的电源电压范围，但将电路集成到客户系统之前，必须先对其实施全面评估。验证LT8301在所有正常负载、故障条件下，以及在预期的输入电源电压范围内，在AD5755-1数据手册列出的允许范围内，保持隔离电源调节。

HART耦合

AD5755-1有四个CHARTx引脚，分别对应于四个输出通道。HART信号可以耦合至这些引脚，并出现在对应的电流输出端（如果该输出已使能）。表2给出了CHARTx引脚上的HART信号的推荐输入电压。如果使用这些电压，电流输出应符合HART幅度要求。图8所示为将HART信号衰减和耦合至AD5755-1 HART输入的推荐电路。

表2. CHARTx输入电压和HART输出电流

R _{SET}	CHARTx输入电压 (mV峰峰值)	HART电流输出 (mA峰峰值)
内部R _{SET}	150	1
外部R _{SET}	170	1

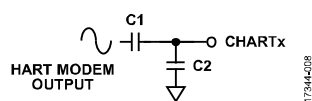


图8. 耦合HART信号

为了确保1.2 kHz和2.2 kHz HART频率不会在输出端大幅衰减，C1 + C2必须达到某一最小值。推荐值为：C1 = 22 nF，C2 = 47 nF。为了达到HART的模拟变化速率要求，必须以数字方式控制输出的压摆率。

数字隔离

ADuM3151和ADuM3482为3.75 kV四通道数字隔离器，采用小型20引脚SSOP封装(7.2 mm × 7.8 mm)。隔离器内核工作电压范围为3.0 V至5.5 V，而I/O电源范围为1.8 V至5.5 V。这些器件可用于直接与1.8 V逻辑器件接口。此设计中的ADuM3151隔离来自AD5755-1的SPI信号和和管控ADG759四通道多路复用器地址行的GPIO信号，ADUM3482则隔离AD5700-1 HART调制解调器的UART信号。拼接电容是通过重叠内部平面在印刷电路板(PCB)内部实现的，以减少EMI辐射和板噪声。有关EMI缓解技术的更多信息，请参考AN-0971应用笔记“isoPower器件的辐射控制建议”。

INL和DNL性能

使用变压器隔离开关电源，测试AD5755-1的积分非线性(INL)，如图9所示。AD5755-1数据手册将电流输出和电压输出在整个温度范围内的INL都规定为±0.006% FSR，无论采

用的是内部R_{SET}还是外部R_{SET}。图9和图10显示，实测结果完全在该规定范围之内。

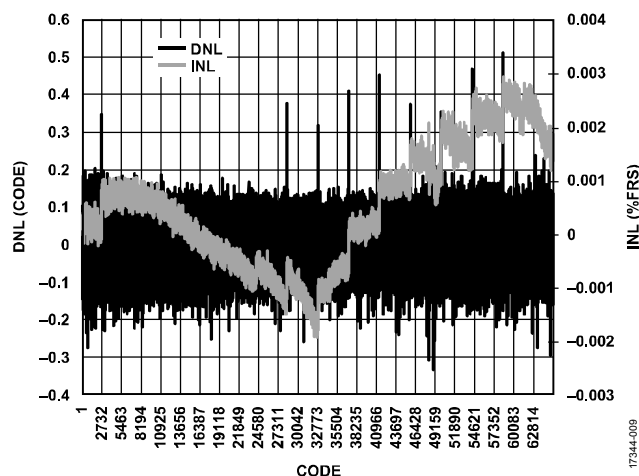


图9. 测量的电压输出INL/DNL，通道A

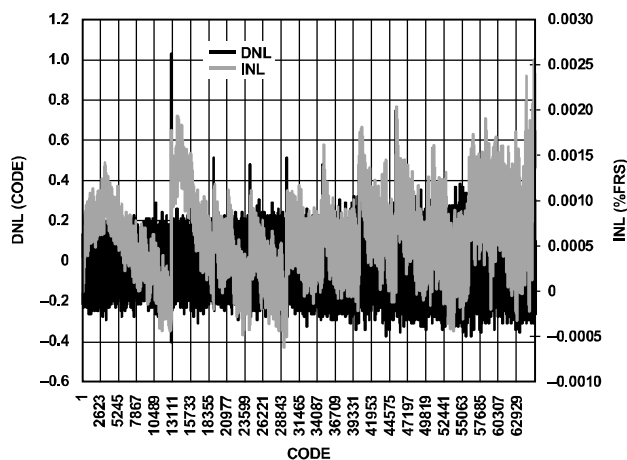


图10. 测量的电流输出INL/DNL，通道A

绝对精度性能

在电流输出模式下，使用内部R_{SET}时，AD5755-1的总非调整误差(TUE)为±0.11% FSR（最大值，25°C）。ADR02参考（B级）的总误差为0.06%（最大值，25°C）。

表3所示为通道A电路在4 mA至20 mA范围内的实测电流输出误差，其中，负载为500 Ω，使用的是内部R_{SET}。表3总结通道A的结果（使用内部R_{SET}），但它可代表所有4个通道。全部结果均位于预期值范围内。

表3. 实测 I_{OUT_A} 误差 (4 mA至20 mA范围)

数字码	I_{OUT} (mA)	误差(% FSR)
0x0000	4.0002	+0.0013
0x4000	7.9994	-0.0038
0x8000	11.9988	-0.0075
0xC000	15.9982	-0.0112
0xFFFF	19.9990	-0.0063

对电压输出模式进行了类似的测量，其中AD5755-1 TUE额定值为 $\pm 0.03\%$ FSR (最大值, 25°C)。表4所示为通道A的结果。剩下的三个通道结果与其相似。

表4. 实测 V_{OUT_A} 误差 (± 10 V范围)

数字码	V_{OUT} (V)	误差(% FSR)
0x0000	-9.996915	-0.000226
0x4000	-8.776362	-0.000179
0x8000	-7.555827	-0.000467
0xC000	5.001719	0.000766
0xFFFF	10.001078	0.001526

HART兼容性

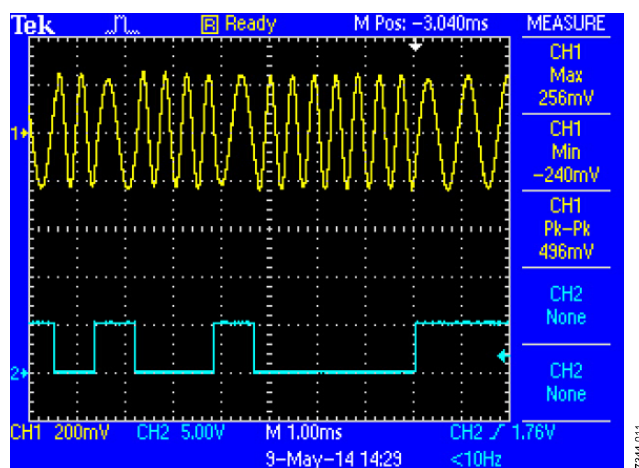
图11. 在500 Ω 负载下测得的FSK波形

图11所示为在500 Ω 负载电阻、 I_{OUT_A} 上测得的1200 Hz和2200 Hz频移键控(FSK)频率。通道1显示耦合至AD5755-1输出中的调制HART信号 (设置为4 mA)，通道2显示AD5700-1 TXD信号。

要与HART兼容，电路必须符合HART物理层规范。HART规范文档中包含了众多物理层规范。为了评估硬件性能，本电路笔记中考虑的两项规格为静默期间的输出噪声和模拟变化率。

静默期间的输出噪声测试

当HART器件没有进行传输 (静默) 时，不应将HART扩展频带中噪声耦合到网络上。噪声过高可能会干扰设备本身或网络上其它设备对HART信号的接收。

对于在500 Ω 负载上测得的电压噪声，其包含的HART扩展频带中的宽带噪声和相关噪声总和不能超过2.2 mV rms。此外，该频带外的噪声不应超过138 mV rms。

此噪声通过在500 Ω 负载上连接HCF_TOOL-31滤波器 (可从HART通信基金会获得) 并将滤波器输出连接到真均方根测量仪来测量。用示波器来检查输出波形。

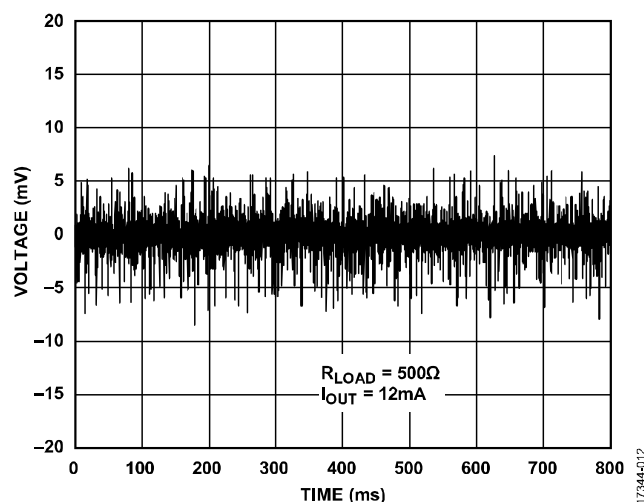
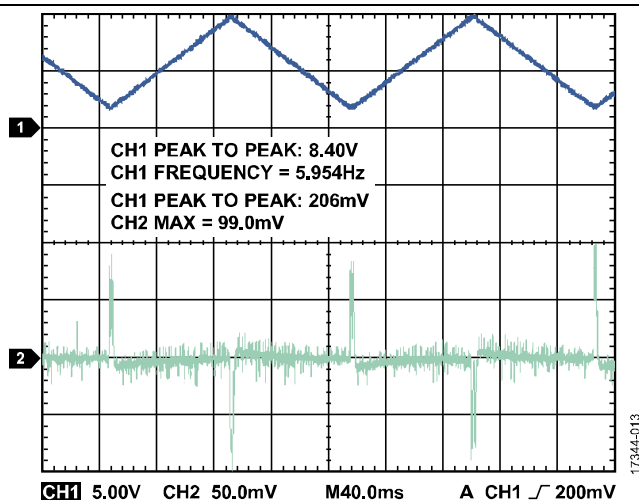


图12. HCF_TOOL-31输入端静默波形下的输出噪声

模拟变化率

这一技术规范可确保当设备调节电流时，模拟电流的最大变化率不会干扰HART通信。电流的阶跃变化会扰乱HART信号。最差情况下的模拟输出电流变化一定不能产生高于15 mV峰值电压的干扰，此数值在HART扩展频带下，通过对500 Ω 负载进行测量得到。符合这一要求可确保模拟信号的最大带宽处于规定的直流至25 Hz频带中。

对于该测试，HCF_TOOL-31再次连接500 Ω 负载，就如静默期间噪声测试中一样，同时将一个示波器连接至其输出端。这次，不是将AD5755-1输出设为一个固定的输出电流，而是将AD5755-1编程为输出周期波形，从4 mA切换至20 mA。为了达到要求的系统规格，通过AD5755-1的数字压摆率控制功能对输出电流变化幅度进行限制。关于此特性的详细说明，请参阅AD5755-1数据手册。在该测试中，SR_CLOCK和SR_STEP分别设为64 kHz和16 LSB，得到64 ms的压摆时间。结果如图13所示。通道1显示AD5755-1 I_{OUT_A} 在4 mA至20 mA范围内的信号阶跃，这是在500 Ω 负载下检测的，并且连接到带通滤波器的输入端。滤波器的输出 (增益系数为10) 可在通道2上看到。峰值在前面提到的150 mV峰值限值之内。

图13. 模拟变化率波形 I_{OUT_A}

常见变化

对于只要求电流输出的应用，[AD5757](#)可用于替代[AD5755-1](#)。如果需要的分辨率低于16位，则[AD5737](#)可使用12位的。

对于接近或以[AD5755-1](#)的最大电流运行的应用，请使用[DC2906A](#)演示手册中显示的电源解决方案（基于[LT8302](#)），它提供更高的输出功率。

可用[AD5700](#)调制解调器取代[AD5700-1](#)，但需要一个外部晶振或者CMOS时钟，因为[AD5700](#)并不具备[AD5700-1](#)提供的内部振荡器选项。详见[AD5700](#)数据手册和[AD5700-1](#)数据手册。

对于单通道应用，请参阅电路笔记CN0321“具有HART连接的完全隔离、单通道电压、4 mA至20 mA输出”。

电路评估与测试

所提供的软件面向[EVAL-ADICUP3029](#)平台，但其设计也可轻松移植到其他微控制器平台。移植到其他平台时，请务必全面检查硬件兼容性，包括电压电平和功能。

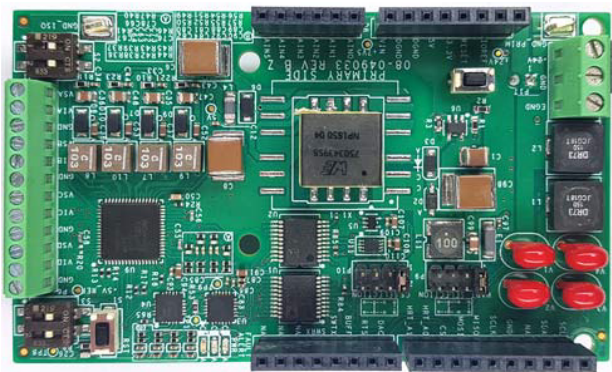


图14. EVAL-CN0418-ARDZ板

需要的设备

操作需要使用以下设备：

- EVAL-CN0418-ARDZ参考设计板
- 串行终端程序，如Tera Term或Putty
- [EVAL-ADICUP3029](#)开发板
- PC（Windows® 32位或64位）
- 24 V电源，例如Agilent E3631A
- 精密电压和电流表，例如Agilent 3458A
- 4个500 Ω 精密负载电阻
- 示波器（Tektronix TDS2024B或等效器件）
- USB A型转micro USB B型
- CN0418软件

开始使用

有关设置的更多信息和完整细节，请参阅[CN0418用户指南](#)。

软件安装

安装软件请遵循下列步骤：

1. 将EVAL-CN0418-ARDZ连接到[EVAL-ADICUP3029](#)板上。
2. 使用附带的电缆，通过PC的USB端口连接[EVAL-ADICUP3029](#)板。
3. 对端子板P1连接器施加24 V电压，使EVAL-CN0418-ARDZ上电。
4. 将固件上传至[EVAL-ADICUP3029](#)。

功能框图

图15所示为测试设置的功能框图。

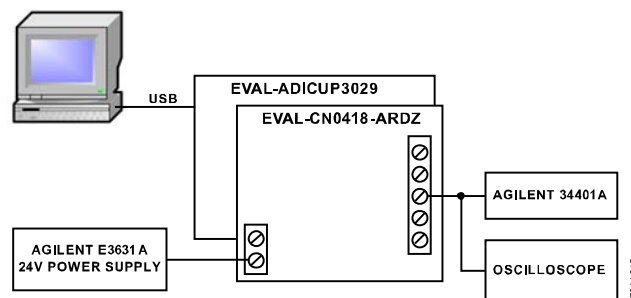


图15. 测试设置功能框图

遵循下方的基本设置步骤：

1. 将 EVAL-CN0418-ARDZ 连接到 [EVAL-ADICUP3029](#)，如图16所示。

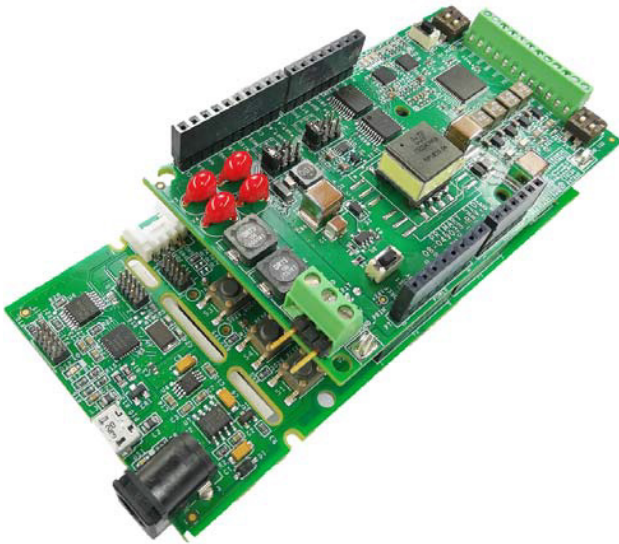


图16. EVAL-CN0418-ARDZ板连接至EVAL-ADICUP3029

2. 如果尚未安装跳线，请将盒中提供的跳线按照图17所示的相同配置进行安装。

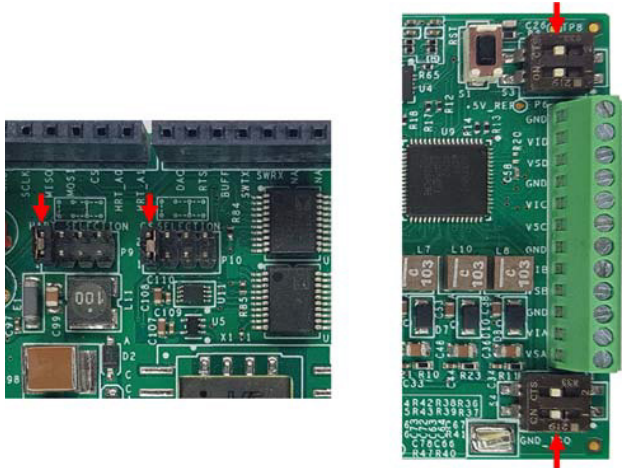


图17. P9和P10的默认并联跳线位置；双列直插式(DIP)开关，处于“开”位置

3. 对EVAL-CN0418-ARDZ的P17跳线施加24 V直流电压。
4. 将EVAL-ADICUP3029的micro USB电缆连接至PC。
5. 使用命令行中断程序（例如Putty、Telnet或Tera Term）打开串行终端窗口。

关于如何设置硬件和软件，并与计算机连接，请参考CN0418用户指南。

了解更多

CN-0418设计支持包。

电路笔记CN-0267：具有HART接口的完整4 mA至20 mA环路供电现场仪表，ADI公司。

电路笔记CN-0270：完整4 mA至20 mA HART解决方案，ADI公司。

电路笔记CN-0278：具有额外电压输出能力的完整4 mA至20 mA HART解决方案，ADI公司。

电路笔记CN-0321：具有HART的完全隔离、单通道电压、4 mA至20 mA输出，ADI公司。

电路笔记CN-0328：完全隔离式4通道多路复用HART模拟输出电路，ADI公司。

HART®通信基础

数据手册和评估板

[AD5755-1](#)数据手册和评估板。

[AD5700/AD5700-1](#)数据手册和评估板。

[ADG759](#)数据手册。

[ADP2441](#)数据手册

[LT8301](#)数据手册

[ADR02](#)数据手册

[ADuM3151](#)数据手册

[ADuM3482](#)数据手册

修订历史

2019年7月—修订版0：初始版



(Continued from first page) Circuits from the Lab reference designs are intended only for use with Analog Devices products and are the intellectual property of Analog Devices or its licensors. While you may use the Circuits from the Lab reference designs in the design of your product, no other license is granted by implication or otherwise under any patents or other intellectual property by application or use of the Circuits from the Lab reference designs. Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, Circuits from the Lab reference designs are supplied "as is" and without warranties of any kind, express, implied, or statutory including, but not limited to, any implied warranty of merchantability, noninfringement or fitness for a particular purpose and no responsibility is assumed by Analog Devices for their use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from their use. Analog Devices reserves the right to change any Circuits from the Lab reference designs at any time without notice but is under no obligation to do so.

©2019 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.
CN17344sc-0-7/19(0)



www.analog.com/cn