

Application Note

适用于 4-20mA 环路且支持 HART 的现场变送器的设计和测试



Joseph Wu

摘要

本应用手册介绍了如何将 AFE881H1 集成到适用于 4-20mA 环路仪表、支持 HART® 的现场变送器中。HART (可寻址远程传感器高速通道) 支持在传输主过程变量值的同时, 在电流环路进行双向数字通信。首先, 本文对 4-20mA 环路和 HART 协议进行了基本介绍。然后, 介绍了将 AFE881H1 作为具有 HART 调制解调器的超低功耗 16 位数模转换器 (DAC), 该器件还具有板载模数转换器 (ADC) 和用于系统监控的集成诊断传感器。此外, 还介绍了在 HART 注册方面对该变送器进行的测试。本文档还介绍了波形的物理层测试和测试设置以及针对 HART 信令和时序的数据链路层 (DLL) 测试。本文还介绍了针对 HART 通用命令 (UAL) 和常用命令 (CAL) 的应用层测试。最后, 展示了其他具有 HART 连接的 TI 器件。TI 提供多种 HART 调制解调器, 可将 HART 信号转换为 UART 或 SPI 通信。所有这些器件都将 HART 集成到许多工业产品中。

内容

1 简介.....	2
1.1 4-20mA 环路.....	2
1.2 HART 协议.....	2
2 AFE881H1 HART 调制解调器.....	5
2.1 AFE881H1 HART 变送器.....	5
2.2 详细的原理图.....	6
3 HART 测试和注册.....	12
3.1 HART 历史和 FieldComm Group.....	12
3.2 HART 测试概述.....	12
3.3 自动测试设备 (HART).....	13
3.4 HART 物理层测试.....	14
3.5 数据链路层测试.....	26
3.6 通用命令测试.....	30
3.7 常见做法命令测试.....	31
3.8 特定于器件的命令测试.....	33
3.9 HART 协议测试提交.....	33
3.10 HART 注册.....	34
4 其他 TI HART 调制解调器设计.....	35
5 总结.....	38
6 鸣谢.....	38
7 参考资料.....	38

商标

HART® is a registered trademark of FieldComm Group, Inc.

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

1.1 4-20mA 环路

对于说明如何在现场变送器中实现 HART 而言，了解 4-20mA 环路至关重要。4-20mA 环路是一种标准信令方法，通常在工厂自动化和控制中用于在电流环路上传输信息。位于远程位置的传感器测量过程变量，并设置通过环路的电流来指示测量值。图 1-1 显示了环路的基本示意图。

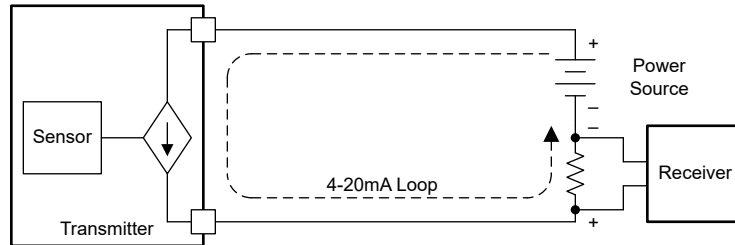


图 1-1. 4-20mA 环路的组成部分

4-20mA 环路具有四个基本组成部分。第一个组成部分是环路。每个变送器在一个单独的环路上运行，接收器测量环路中流经电阻器的电流。环路简单、耐用且易于调试。环路能够抵抗电气噪声，因此对于远距离传输而言，环路是可靠的。4-20mA 环路可扩展至 500 米或更长。环路也具有成本效益，并且已广泛应用于许多工厂自动化和控制系统中。

其次，环路具有一个变送器，其中包含用于过程控制的传感器。该传感器测量压力、温度、流量等参数或工业过程或工厂车间的任何其他输入。变送器将测量值转换为环路中的电流值。例如，变送器测量从 100°C 到 500°C 的烤箱温度。在 4-20mA 环路中，4mA 用作测量的最小值，20mA 用作测量的最大值。在本例中，4mA 转换为 100°C，20mA 转换为 500°C。所有测量值都以线性方式转换为该电流值。在某些系统中，低于 4mA 的环路电流和高于 20mA 的电流可用于指示变送器的某种错误。对于符合 NAMUR NE 43 标准的变送器，低于 3.6mA 或高于 21mA 的电流被视为传感器故障。对于这些系统的设计人员而言，噪声、分辨率和线性度都是变送器设计的重要参数。

接下来，环路具有至少能够提供 20mA 电流的电源。如果变送器支持 NAMUR 故障电平，则需要更高的电流电平来指示错误。该电源通常提供 24V 的标准电压。不过，可以看到 36V、15V、12V 或其他电压，具体取决于系统。该电源通过环路发送电流，通常还为变送器供电。

最后，还有一个接收器，用于测量环路上的电流。接收器测量串联电阻上的电压。电流经过计算并转换为主变量。会使用 ADC 测量负载电阻（典型值为 250 Ω），以将主变量转换回至变送器的测量结果。

1.2 HART 协议

HART 增强了 4-20mA 仪表的向后兼容性，可实现与基于微处理器的智能现场器件的双向通信。

HART 信号叠加到 4-20mA 环路电流上，并针对双向数字通信进行调制。这一点很重要，因为 4-20mA 环路已经是工厂自动化和控制领域中广泛采用的标准。该技术向后兼容并可与现有的基础设施配合使用，这意味着该技术易于采用且具有成本效益。

HART 是一种标准化通信协议，其中控制器发送命令，远程变送器返回标准化响应。命令接收到的应用层数据传达器件状态和诊断信息。可以发送过程数据以包括数据的浮点数字值、主变量的工程单位以及有关器件所测量数据的其他信息。

HART 协议有多个不同版本。本应用手册仅讨论 4-20mA 环路上远程变送器中的基本 HART 频移键控 (FSK) 信号。更多有关 HART 协议的详细信息，请参阅 [HART 协议基本指南](#)。

1.2.1 将 HART 添加到 4-20mA 环路

从图 1-1 中的 4-20mA 环路原始图开始，可以将 HART 添加到变送器和接收器。HART 通信使用原始 4-20mA 环路，并使用 HART 调制解调器向环路中添加双向数字信号。同样，这种向后兼容性使 HART 能够轻松添加到现有基础设施中。图 1-2 显示了如何将 HART 添加到基本 4-20mA 环路中。

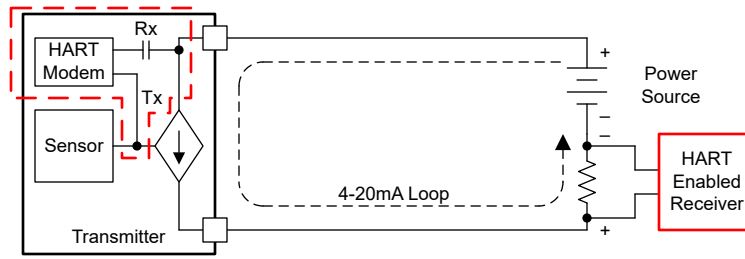


图 1-2. 将 HART 添加到 4-20mA 环路

HART FSK 被添加到控制环路中的电流的信号中。在变送器中，HART 调制解调器接收来自环路的信号。调制解调器容性耦合输入电压来接收 HART 信号。调制解调器还对电流进行调制，以发送 HART 信号。该传输的信号叠加在表示传感器测量的主变量的电流上。

同时，接收器测量电阻器两端的电压以测量主变量。在支持 HART 的接收器中，HART 调制解调器用于传输命令和从变送器接收 HART 通信。不过，主变量测量需要使用低通滤波器来滤除 HART 信号。使用一个电阻器来测量环路中表示主变量的电流。HART 通信的最小电阻是 230 Ω ，通常使用 250 Ω 。

1.2.2 HART FSK

HART 通信使用 FSK 信号来创建通信中的数字位。调制解调器发送两种不同的频率，以表示在数字通信中变为 0 或 1 的位。该数字通信在字节结构上类似于 UART，即使用 8 个数据位、奇校验和 1 个停止位。图 1-3 显示了用 HART 调制信号表示环路中的瞬时电流。该 HART 信号叠加到表示主变量的 4-20mA 电流上。

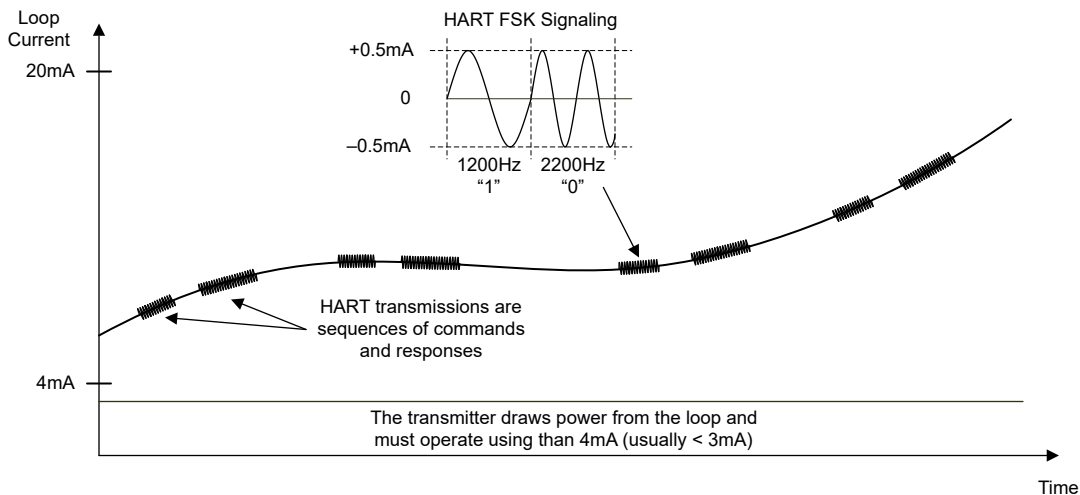


图 1-3. 被调制到 4-20mA 电流环路上的 HART FSK

变送器通常使用环路电源运行。施加到环路的电源也用于为变送器供电。由于没有其他电源，并且环路的零标度为 4mA，因此变送器运行时的电流预算必须低于此电流量。由于低于 3.6mA 的电流表示错误，变送器必须以 3mA 的最大预算有效运行。这显示在上一个图底部的阴影部分中。

用于 HART 传输的位表示为两种 FSK 信号。不同的频率表示 1 和 0。1200Hz 信号是数字 1，2200Hz 信号是数字 0。数据以 1200 波特发送，因此每个位为 833 μ s。主变量作为环路中的电流进行发送。该电流在低于 20Hz 的低频率下运行。图 1-4 显示了用于主变量和 HART FSK 频率的频段。

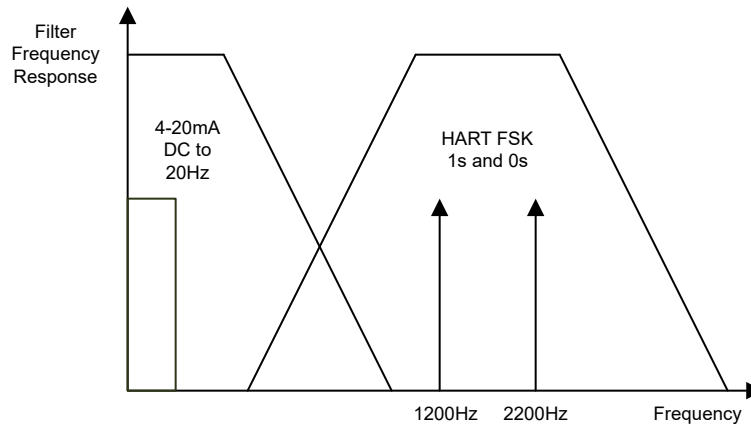


图 1-4. 4-20mA 电流环路上的主变量和 HART 频段

由于主变量和 HART 信号共享相同的传输，因此信号必须经过滤波才能被接收到。该图显示了主变量和 HART 信号的频率成分。

在支持 HART 的接收器中，使用低通滤波器来读取主变量，以测量电阻器两端的电压。该信号由图中的阴影区域表示，通常低于 20Hz，因此低通滤波器的截止频率约为 25Hz。HART 以更高的频率进行传输，FSK 位的频率为 1200Hz 和 2200Hz。此 HART 信号是使用一个工作频率通常为 500Hz 至 10kHz 的带通滤波器接收的。

2 AFE881H1 HART 调制解调器

此处介绍了 AFE881H1 HART 调制解调器 IC。该器件用作支持 HART 的变送器的核心器件。图 2-1 显示了 AFE881H1 功能方框图。

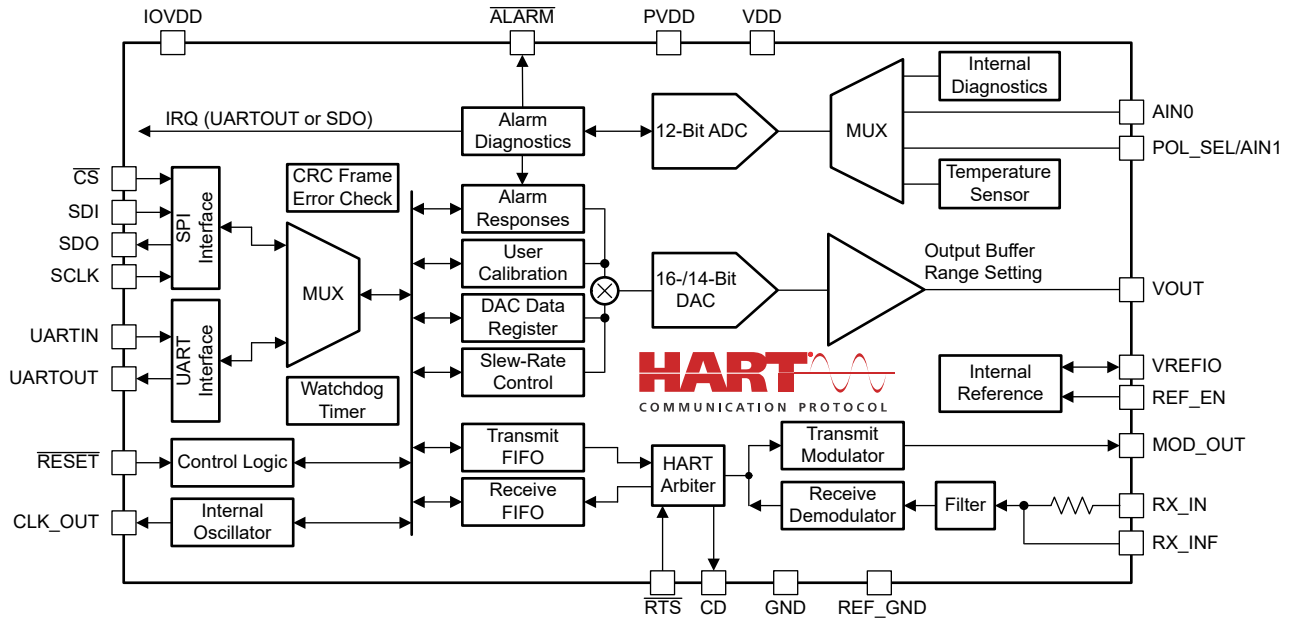


图 2-1. AFE881H1 方框图

该方框图显示了器件的许多特性。AFE881H1 具有一个用于设置环路电流的 16 位电压输出 DAC 并具有一个集成式 HART 调制解调器。该 DAC 具有用户校准功能，可以针对失调电压和增益误差进行调节。该 DAC 还具有压摆率控制功能，可以减慢 DAC 输出转换。压摆率控制可用于帮助调整 HART 测试的输出信号。

该器件还具有一个 12 位内部多路复用 ADC。可以对器件内部节点的 ADC 测量进行监测，以发出可编程警报，从而确保功能安全。内部精密基准可用于 DAC 和 ADC。

SPI 或 UART 通信可用于对器件进行编程，也可以将这两者的组合用于 HART 协议。该器件具有用于错误检查通信的可选循环冗余校验 (CRC) 功能，以及用于验证通信连接的看门狗计时器。

集成了 DAC、HART 调制解调器、ADC 和其他系统监控器功能，从而使 AFE881H1 成为远程变送器的核心器件。

2.1 AFE881H1 HART 变送器

为了测试器件的 HART 功能，我们构建了一个电路板，注册为 HART 变送器。图 2-2 显示了 AFE881H1 HART 变送器设计方框图。

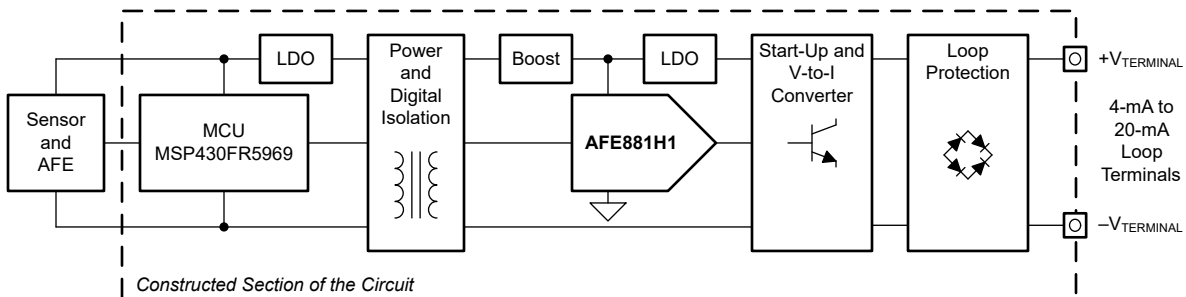


图 2-2. 使用 AFE881H1 的 2 线变送器设计方框图

连接到环路的端子显示在方框图的右侧。与环路的连接将为整个变送器供电。输入端的桥式整流器可防止与环路的反向连接。整流后的环路电压为启动电路供电，而启动电路为低压降稳压器 (LDO) 供电，进而为 AFE881H1 供电。LDO 为用作升压转换器的反激式转换器供电并穿过隔离栅供电。在隔离栅的另一侧，另一个 LDO 为 MCU 以及连接到变送器的所有传感器供电。LDO 还为隔离栅每一侧的数字信号隔离供电。

HART 通信使用 AFE881H1 HART 调制解调器进行转换。该器件通过电容耦合连接至电路板环路保护装置后的正极端子侧，接收 HART 信号。HART 信号通过电路板的电压转电流 (V 转 I) 级传输到环路。

请注意，该变送器板没有用于传输数据的传感器。环路电流的标称值设置为 4mA (作为输出)，但特定的 HART 测试除外。该板的主要用途是测试 AFE881H1 的 HART 通信功能。

2.2 详细的原理图

图 2-3 显示了 AFE881H1 HART 变送器设计的详细原理图。该图的右侧显示了环路电源连接。在输入端子和变送器电路之间设置了输入保护。然后正环路连接进入电路板的启动电路，为 LDO 供电。该 LDO 为 AFE 器件、运算放大器和 V 转 I 控制供电。

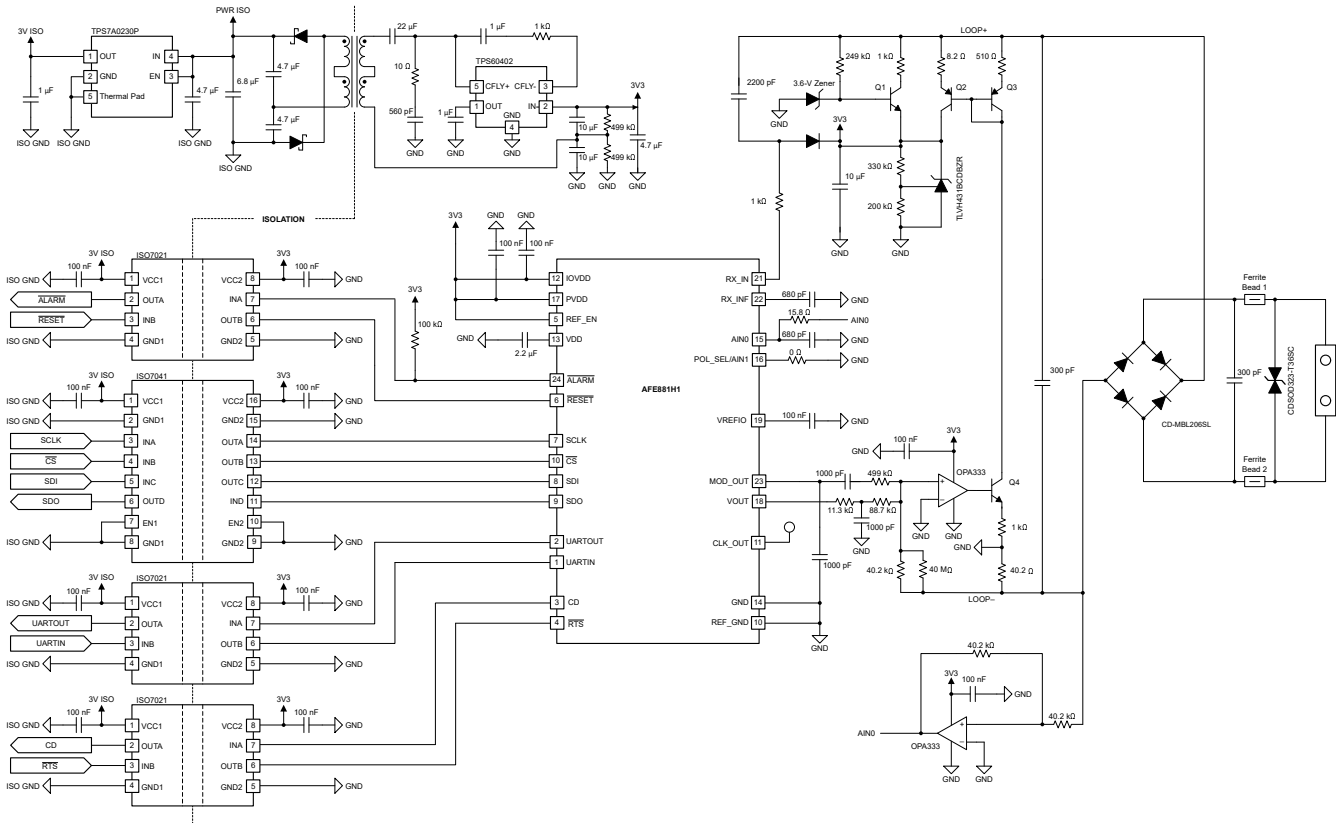


图 2-3. 使用 AFE881H1 的 2 线变送器电路原理图

LDO 还驱动用作升压转换器的反激式转换器，驱动电源穿过隔离栅。一组数字隔离器跨隔离栅发送通信。隔离电路的另一端是为微处理器供电的 LDO。

AFE881H1 控制流经 V 转 I 部分的环路电流。DAC 电压将输出设置为 0.3V 至 2.5V。输出通过使用 OPA333 和用于控制环路电流的 NPN 双极结型晶体管 (BJT) 的 V-I 转换器块进行发送。在构建的电路中，MSP430FR5969 用作微处理器，但未在图中显示。

2.2.1 输入保护

电路板的输入是图 2-3 所示的原理图右侧的环路连接。图 2-4 显示了从 TVS 二极管开始的电路板输入保护，用于防止过压事件造成损坏。铁氧体磁珠和输入电容还有助于减少输入端的任何高频瞬态。输入整流器可防止变送器在误接线时交换正负输入。

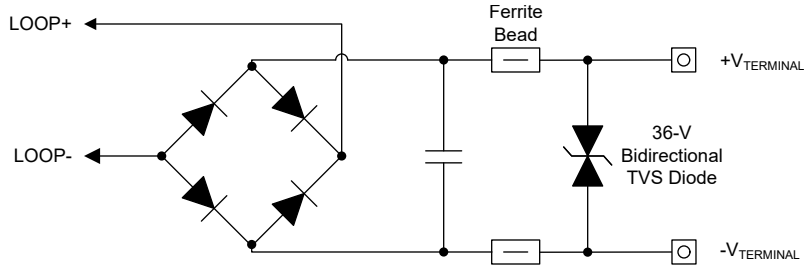


图 2-4. 电路板输入端子上的输入保护电路

当电压施加到输入端子时，电源通过 LOOP+ 和 LOOP- 输送到电路中，从而在 4-20mA 环路中设置电流。

2.2.2 启动电路

图 2-5 中的原理图显示了 HART 变送器的启动电路。通电后，LOOP+ 上的电压上拉，以启动 TLV431B LDO 为电路板供电。

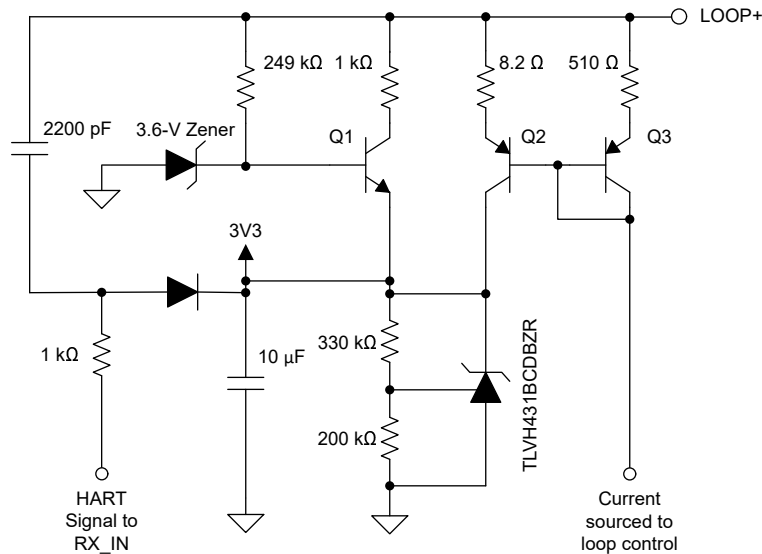


图 2-5. 变送器板启动电路

249k Ω 电阻器使电流能够流过 3.6V 齐纳二极管，在 Q1 的基极上电压上拉。齐纳电压启动电流通过 Q1，从而开启 LDO。TLV431B LDO 设置 3.3V 电源。

当 3.3V 电源启动时，控制电路从 Q3 拉取电流。这将使 Q2 导通，从而接管向 LDO 提供电流的任务。

当 3.3V LDO 输出达到最终值时，Q1 发射极上的电压会上升。驱动 Q1 基极的电压为 3.6V，发射极上的电压为 3.3V，该电压差将 Q1 的基极-发射极电压降低至 0.3V。在低基极-发射极电压下，Q1 关断。Q2 保持驱动 LDO 输出并分流额外环路电流所需的电流。由于 Q2 是流经变送器的电流的主要路径，因此晶体管必须是支持高功率耗散的 PNP。

选择齐纳二极管时要小心。齐纳二极管上的电压随环路电压和电路温度的变化而变化。这种变化会改变 Q1 两端的 V_{BE} 并改变流经启动电路的总电流。如果电压过高，则齐纳二极管会将 Q1 设置为在电路启动后继续提供电流。如果电压过低，则齐纳二极管会阻止 TLV431B 开启。通过在运行期间检查 3.3V 电源是否启动以及 Q1 是否关断，验证是否正确启动。

2.2.3 电压转电流级

图 2-6 显示了变送器 V 转 I 级的简化原理图。该级根据 DAC 的电压输出来设置环路的电流。

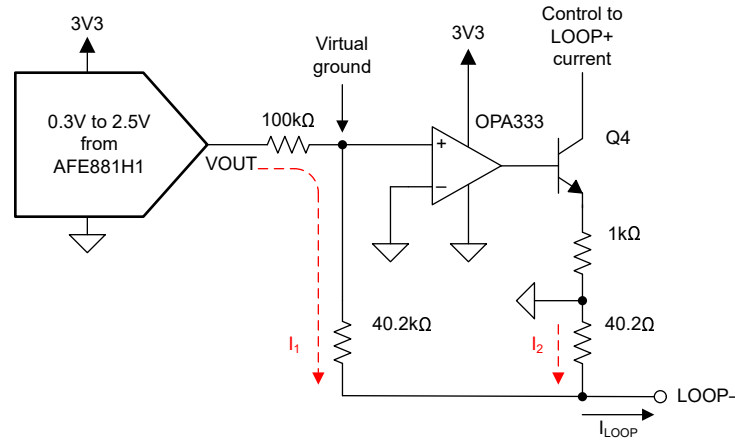


图 2-6. 适用于变送器板的电压至电流转换器级

在该电路中，DAC 电压设置在等效电阻 $100\text{k}\Omega$ 上。 $100\text{k}\Omega$ 另一端的电压是由 OPA333 的反馈设置的虚拟接地。OPA333 的输出驱动 Q4，而 Q4 设置环路电流控制。

电流 I_1 流经 $40.2\text{k}\Omega$ 电阻器，将 LOOP - 设置为低于接地的电压。

$$I_1 = V_{\text{OUT}} / 100\text{k}\Omega \quad (1)$$

$$V_{\text{LOOP-}} = I_1 \times 40.2\text{k}\Omega \quad (2)$$

流经 $40.2\text{k}\Omega$ 电阻器的电流通过 40.2Ω 电阻器以 1000:1 的增益放大， I_2 从接地端被拉至 LOOP -。

$$I_2 = V_{\text{LOOP-}} / 40.2\Omega = I_1 \times 40.2\text{k}\Omega / 40.2\Omega = I_1 \times 1000 \quad (3)$$

$$I_{\text{LOOP-}} = I_1 + I_2 = 1001 \times I_1 = 1001 \times V_{\text{OUT}} / 100\text{k}\Omega \quad (4)$$

2.2.4 电压转电流计算

OPA333 驱动对 LOOP+ 电流的控制并设置 I_2 来保持 LOOP - 电压。由于电阻器的比率， i_2 是 i_1 的 1000 倍。 $I_{\text{LOOP-}}$ 等于 I_1 加 I_2 ， $I_{\text{LOOP-}}$ 是 I_1 的 1001 倍。

请注意，原始原理图具有与 $40.2\text{k}\Omega$ 电阻器并联的大电阻。并联电阻可将电流增益轻微减小至 999 比 1， $I_{\text{LOOP-}}$ 等于 $V_{\text{OUT}}/100$ 。

DAC 代码直接映射到流经环路的电流。由于 DAC 的输出电压范围为 0.3V 至 2.5V，因此该电压将映射到 3mA 至 25mA 的环路电流。由于环路电流基于 DAC 电压，因此可以将该电流设置为 DAC_CODE 的函数。

$$I_{\text{LOOP-}} = V_{\text{OUT}} / 100 \quad (5)$$

$$I_{\text{LOOP-}} = [(DAC_CODE / 2^{16}) \times 2.2\text{V} + 0.3\text{V}] / 100 \quad (6)$$

表 2-1 显示了不同的 DAC 代码值以及这些值如何映射到以毫安为单位的环路电流。选择环路电流 3.375mA 和 21.75mA 作为传感器错误指示器电平。

表 2-1. 转换为电压输出的 DAC 代码值和环路电流设置

输出条件	DAC 编码	DAC 输出 (V)	环路电流 (mA)
DAC 最小值	0x0000	0.3	3
误差低	0x045D	0.3375	3.375
范围内的最小值	0x0BA2	0.4	4
范围内的中标度	0x68BA	1.2	12
范围内的最大值	0xC5D1	2.0	20
误差高	0xDA2E	2.175	21.75
DAC 最大值	0xFFFF	2.5	25

2.2.5 HART 信号传输

HART 信号通过 OPA333 求和点叠加添加到环路电流中，如图 2-7 所示。

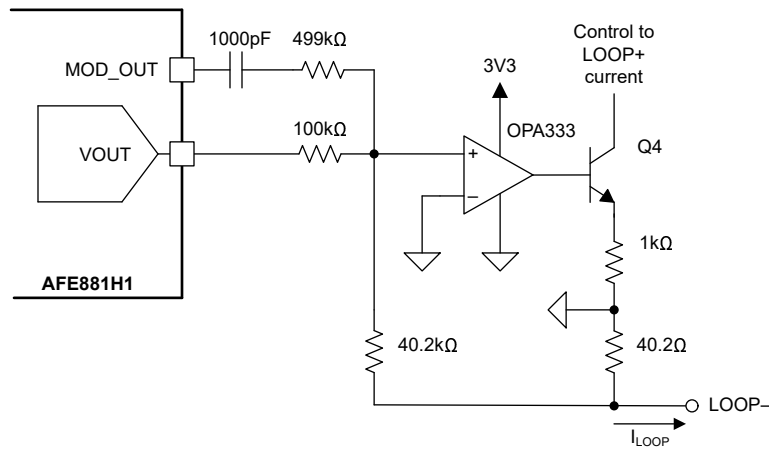


图 2-7. 将来自 MOD_OUT 的 HART 信号添加到 V 转 I 级

MOD_OUT 信号的标称值为 500mV_{pp}。该电压通过直流阻断 1000pF 电容器和 499kΩ 电阻器加入到环路电流中。499kΩ 是标准的 1% 电阻器阻值。

与 V 转 I 级的 VOUT 计算类似，HART 电流经计算为 1.002mA_{pp}，其中 HART 信号振幅为 1mA_{pp}。

2.2.6 HART 输入保护

AFE881H1 的 HART 输入容性耦合到 LOOP+，LOOP+ 在接近正电源的电压下运行。当工作电压较高时，需要对 HART RX_IN 引脚进行保护，使其免受这些电压的影响。图 2-8 显示了电路中用于防止引脚暴露在高环路电压下的钳位设计。

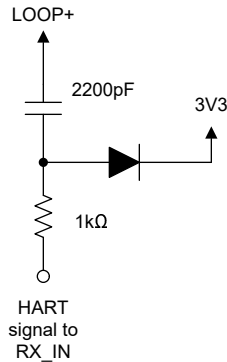


图 2-8. 用于过压保护的 RX_IN 钳位电路

为了检测 HART 信号，RX_IN 引脚通过直流阻断电容器连接到 LOOP+，从而使 RX_IN 引脚保持低电压。但在启动时，LOOP+ 变为高电压，电容器的起始电压为 0V。这会将 RX_IN 引脚上拉至高电压，并通过低电容快速下降。

钳位电路可以保护 HART 输入引脚。串联 1kΩ 电阻器可限制任何流入该引脚的电流，而二极管可将电阻器钳位至 3.3V。

2.2.7 电流消耗

表 2-2 显示了电路板上各种元件的电流消耗。特别是 AFE881H1 以非常低的功耗运行，也可以在低至 1.8V 的电源下运行。节省功耗特别重要，因为变送器必须能够以低于 3mA 的电流运行，并且节省的这部分功耗可用于传感器。

表 2-2. 设计元件电流消耗

器件	说明	典型电流 (μA)
TPS7A0533	LDO	4
AFE881H1	16 位 DAC	180
OPA333 (2)	运算放大器	17 (每个)
TLVH431B	并联稳压器	60
MSP430	微控制器	取决于固件
ISO7021D (2)、ISO7041F	数字隔离	取决于通信

2.2.8 HART 变送器板

图 2-9 显示了 AFE881H1 HART 变送器设计图片。环路电源通过电路板右侧的端子施加到电路板。一个 499 Ω 电阻器与该连接串联。该电阻器上的黑色夹式引线用于连接两个 HART 调制解调器，这些调制解调器又连接至 HART 测试系统。然后导线连接至通常以 24V 电压运行的电源。

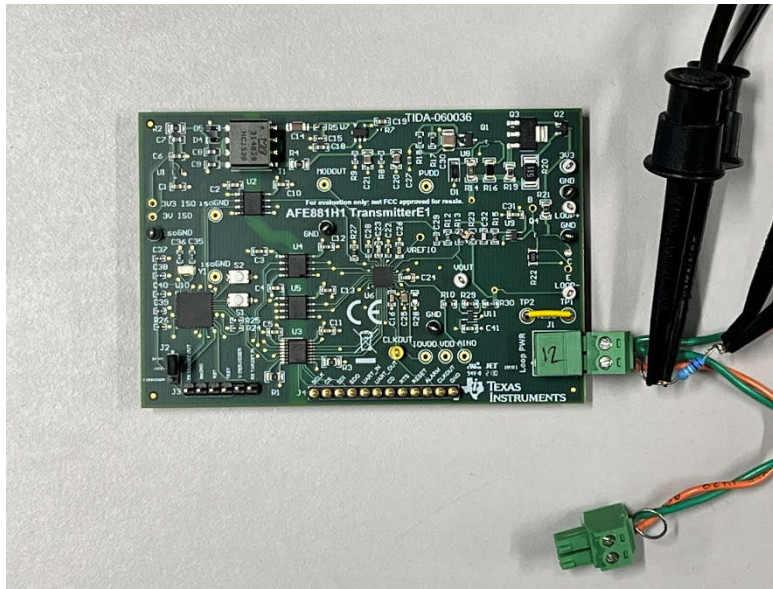


图 2-9. 测试电阻器周围带有调制解调器夹式引线的变送器电路

第二个端子连接器与该系统并联，在图中显示为未连接状态。该连接器用于在 HART 多点模式下同时测试两个变送器，不用于标准 4-20mA 环路。

2.2.9 HART 协议栈

作为 HART 调制解调器，AFE881H1 组织传输的物理层。物理层是指叠加在 4-20mA 环路上的 HART FSK 信号。AFE881H1 为微处理器将该信号转换为 UART 或 SPI。然而，编程到微处理器中的固件会设置通信组帧或解释 HART 命令。该固件称为 HART 协议栈。

HART 栈管理采用该协议器件之间的通信。固件会检查消息是否正确传送并处理错误检查和纠正。该栈还负责对采用 HART 协议的应用程序命令做出正确的响应。

对于该设计，HART 栈是为 MSP430FR5969 编写的。该变送器的固件是由位于加利福尼亚州普莱森顿的 Smart Embedded Systems (SES) 开发的。有关 SES 服务的更多信息，请访问 www.smartembeddedsystems.com。

3 HART 测试和注册

3.1 HART 历史和 FieldComm Group

HART 是由 Rosemount Incorporated 于 20 世纪 80 年代中期制定的。该协议基于 Bell 202 调制解调器通信标准。Rosemount 现在是 Emerson Electric Company 的子公司。

Rosemount 开发了 HART 作为专有的通信标准，为现场仪表添加智能功能。随着该通信标准逐渐流行，该标准发展成为 HART，并成为一种开放协议。自 2015 年起，HART 协议一直由 FieldComm Group 管理。FieldComm 负责维护该协议并监督任何更改或修改。HART 的最新版本为修订版 7。

符合 HART 标准的器件也由 FieldComm Group 进行注册。在器件经测试符合协议并支付注册费用后，即完成注册。

3.2 HART 测试概述

前面的图 2-1 显示了 AFE881H1 器件的方框图。图的中间显示了 HART 通信协议标识。为了使用该标识，器件被设计成 HART 注册器件中的变送器。

要进行 HART 注册，器件首先由创建器件的公司进行测试。测试结果用于生成一份报告，该报告随注册申请一起发送给 FieldComm Group。测试结果包括物理层测试，这些测试验证波形，检查 HART FSK 载波信号的时序，以及使用 HART 调制解调器中内置的一些特定于 HART 的数字线路来验证时序。此外，还有许多测试用于验证 HART 协议，以检查器件是否对来自 HART 控制器的命令做出正确的响应。

3.2.1 HART 协议规范

以下是 HART 协议规范列表。这些规范概述了 HART 器件如何响应命令并描述了协议的物理层。

- HART 通信协议规范 (HCF_SPEC-13 FCG TS20013)
- 令牌传递数据链路层规范 (HCF_SPEC-81 FCG TS20081)
- 命令摘要规范 (HCF_SPEC-99 FCG TS20099)
- 通用命令规范 (HCF_SPEC-127 FCG TS20127)
- 常见做法命令规范 (HCF_SPEC-151 FCG TS20151)

可以在 [FieldComm Group](#) 网站上在线查看这些规范。非成员公司无法下载这些规范，但这些规范可以作为装订册出售。成员公司可以下载 PDF 格式的协议规范电子副本。公司从 FieldComm Group 购买会员资格。

3.2.2 HART 协议测试规范

以下是 HART 协议 *测试* 规范列表。以下文档介绍了 HART 测试的详细信息。这些文档描述了测试的构成以及不同测试故障是什么样的。

- FSK 物理层测试规范 (HCF_TEST-2 FCG TT20002)
- 令牌传递数据链路层测试规范 (HCF_TEST-1 FCG TT20001)
- 通用命令测试规范 (HCF_TEST-3 FCG TT20003)
- 常见做法命令测试规范 (HCF_TEST-4 FCG TT20004)

虽然可以在线查看整个 HART 协议规范，但只能在 [FieldComm Group](#) 网站上在线查看这些测试规范的 *目录*。非成员公司必须购买装订册。成员公司可以下载 PDF 格式的规范电子副本。

3.2.3 远程变送器器件测试

有多种不同的物理器件类型与 HART 通信兼容。器件按阻抗水平进行分类。这些器件可以是连接到 4-20mA 环路的高阻抗器件（例如电流输出、电压输入）或远程两线制变送器器件。其他器件可以是低阻抗器件（例如电流输入、电压输出）或执行器，它们必须在 HART 工作频段内具有 230 Ω 至 600 Ω 的阻抗。

这些不同的物理器件类型各自需要不同的测试和不同的测试设置。本应用手册讨论了远程变送器器件的测试。

3.3 自动测试设备 (HART)

以下是为现场变送器运行 HART 测试所需的一些设备。

- 环路中使用的测试负载电阻器。该电阻器通常是 500 Ω，具体取决于特定的测试。
- 需要使用示波器来观察 HART 信号。物理层测试要求 FSK 具有特定的波形和幅度，并且具有特定的上升和下降时间。
- 需要使用频率计数器来观察 FSK 位的频率。在这些测试中，使用示波器来验证频率。
- 最大电压约为 40V 的直流电源为环路供电。
- 信号发生器用于产生不同频率和振幅的干扰噪声，以在存在噪声的情况下验证 HART 通信。

运行 HART 物理层测试还需要一些专用设备。图 3-1 显示了这些器件。



图 3-1. 具有 HCF_TOOL-31、HCF_TOOL-32 和 FSK 物理测试接口的 HART 测试系统

HART 协议测试需要使用 HART 测试系统。虽然该系统主要用于数据链路层和命令测试，但该测试系统可用于从变送器生成 HART 响应，以查看特定的 FSK 位和响应。HART 测试系统基于 Linux®，使用 FieldComm 设计的一组命令来运行测试。HART 测试系统需要使用两个经 HART 注册的 RS-232 调制解调器。

物理层测试需要使用 HCF_TOOL-31 滤波器。该滤波器是一种传递 HART FSK 数字信号的通带巴特沃斯滤波器。该滤波器具有低于 500Hz 的二阶滚降、高于 10kHz 的一阶滚降以及通带增益 10。该滤波器传递 HART FSK 信号，但会去除主变量的较低频率以及较高频率产生的任何噪声。

还需要使用 HCF_TOOL-32 滤波器。该滤波器是一种低通巴特沃斯滤波器，具有高于 25Hz 的二阶滚降以及通带增益 10。该低通滤波器传递来自现场变送器的模拟主变量并抑制 HART FSK 信号和较高的频率。

最后，使用 FSK 物理层测试接口来增加和减少传输中来自 HART 测试系统的 HART 正弦波。该器件用于确定现场变送器检测 HART 信号的灵敏度。

可以从 FieldComm 购买 HART 测试系统、HCF_TOOL-31 滤波器、HCF_TOOL-32 滤波器和 FSK 物理层测试接口。

3.4 HART 物理层测试

HCF TEST-2 中描述了 HART 物理层测试。该文档定义了测试 HART 器件是否符合 HART FSK 物理层规范的要求。这些测试验证 HART 通信的许多不同参数。

- 验证 HART 传输的比特率和信号频率。
- 验证是否在 HART 传输启动或停止后的最短时间内发送了载波检测信号。
- 测量低通主变量信号，以检查载波检测启动或停止是否不中断主变量的传输。
- 检查 HART 不传输时的输出噪声是否低于最大水平。
- 测试当主变量的电流在 4mA 最小值和 20mA 最大值之间循环时 HART 通信是否仍然可用（模拟变化率测试）。
- 测量 HART 器件，以验证主变量频率和 HART 频段上的高接收阻抗。
- 测试存在带内和带外正弦噪声的情况下的 HART 传输。
- 检查载波检测电平，以确保在信号处于最小振幅时检测到 HART 信号，并且不会在低于较低振幅时检测到，同时保持载波检测时序。

作为 HART 协议物理层的一部分，这些测试涵盖 AFE881H1 和周围电路生成的 HART 信号的时序和振幅。以下各节介绍了 HART 物理层测试和测试设置。

3.4.1 FSK 正弦波测试

图 3-2 显示了 HART FSK 正弦波测试的方框图。大多数 HART 测试需要采用与受测器件类似的变送器设置。FSK 正弦波测试验证 HART 信号是否具有正确的传输频率和波形。

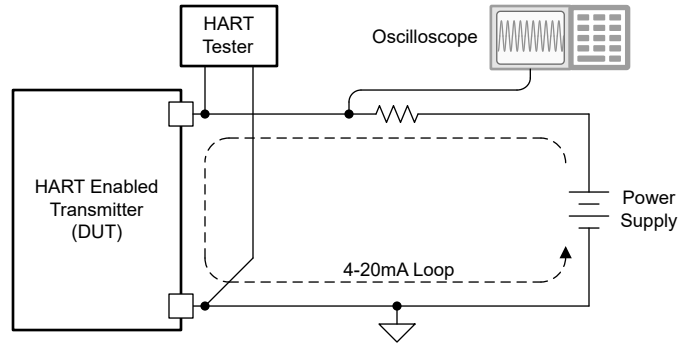


图 3-2. HART FSK 正弦波测试方框图

Keysight E36313A 用作 24V 电源。电源为环路供电，变送器设置流经环路的电流。一个串联电阻器用于测量流经环路的电流，但也会通过调制解调器连接到 HART 测试系统。

对于 HART FSK 正弦波测试，使用示波器来测量 HART 发送的信号。HART 测试仪发送命令，示波器绘制响应图以找到一系列 1 和 0 来测量 HART 位。可以使用频率计数器来测量 FSK 位的频率，但也可以使用示波器来验证时序。

图 3-3 和图 3-4 定义了 HART FSK 信号的容差。如前所述，两种 FSK 信号为 1200Hz 和 2200Hz。不过，信号存在一些可以接受的变化。

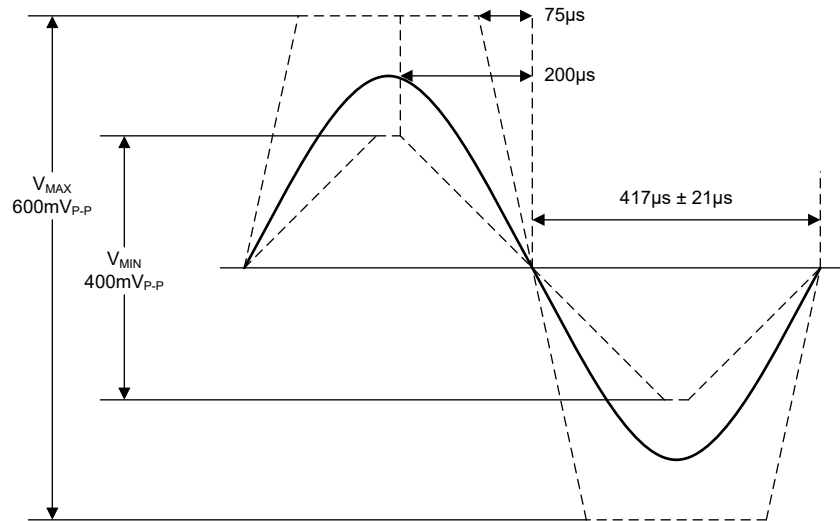


图 3-3. HART 1200Hz FSK 波形限制

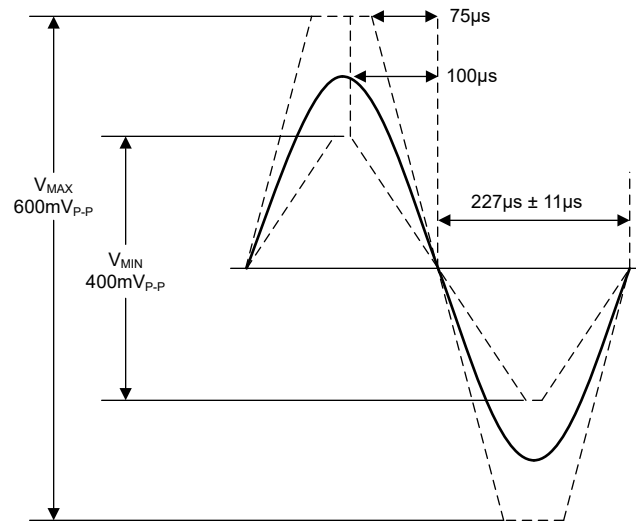


图 3-4. HART 2200Hz FSK 波形限制

这些测量定义了允许的 FSK 频率变化、最小和最大电压以及 HART 信号所需的上升时间。除两种 FSK 频率的波形要求之外，还对图 3-5 中所示的波形有转换要求。

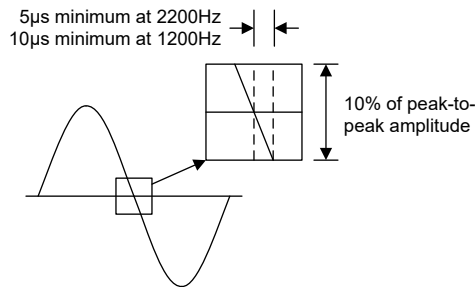


图 3-5. HART 正弦信号转换

这些图显示了 HART 信号振幅、频率变化和信号上升时间的容差。要通过测试，HART 正弦波必须适合图中所示的这些梯形窗口。

这些波形是使用示波器从 AFE881H1 变送器测试装置中获取的。图 3-6 显示了为两个 HART FSK 正弦波拍摄的示波器照片，表 3-1 显示了从测量中获取的测试数据。

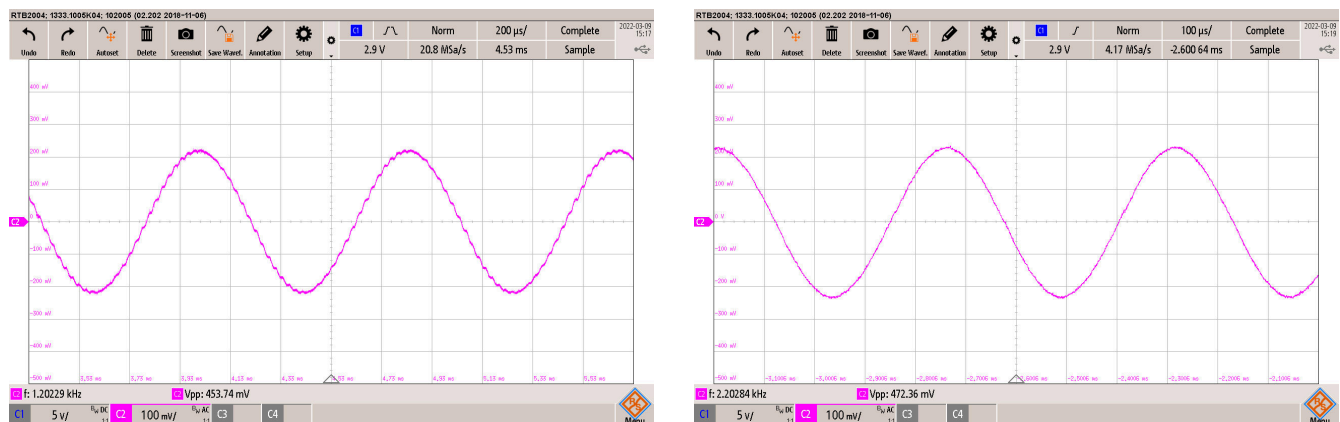


图 3-6. FSK 正弦波测试示波器结果

表 3-1. FSK 正弦波形测试数据

FSK 频率	测试	测量值	最小值	最大值	结果
1200Hz	频率	1202Hz	1188Hz	1212Hz	通过
	振幅	454mV _{PP}	400mV _{PP}	600mV _{PP}	通过
	波形上升时间	130μs	80μs	200μs	通过
	波形下降时间	130μs	80μs	200μs	通过
2200Hz	频率	1202Hz	1188Hz	1212Hz	通过
	振幅	472mV _{PP}	400mV _{PP}	600mV _{PP}	通过
	波形上升时间	80μs	75μs	200μs	通过
	波形下降时间	80μs	75μs	200μs	通过

虽然 4-20mA 环路中通常使用 250 Ω 电阻器，但该测试和其他物理层测试则需要 500 Ω 电流检测电阻器。

3.4.2 载波启动和停止时间测试

除 FSK 特性之外，物理层测试还测量来自变送器的载波启动和停止时间。图 3-7 显示了为载波启动和停止时间测试设置图。当 HART 变送器中的微处理器发送传输时，AFE881H1 上的请求发送 (RTS) 引脚被设置为低电平，从而触发启用 FSK 的调制器。调制器为 HART 通信生成正弦波信号。

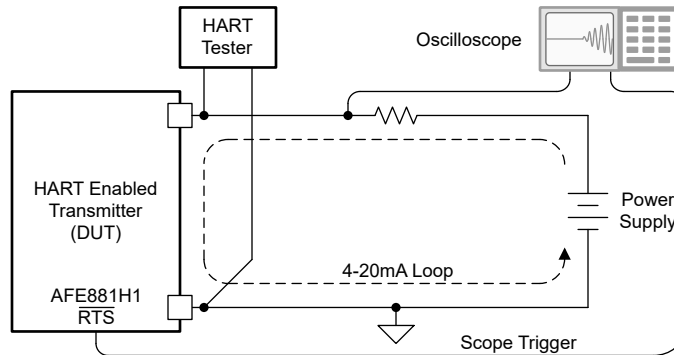


图 3-7. HART 载波启动和停止时间测试设置

当 AFE881H1 上的低电平有效 $\overline{\text{RTS}}$ 引脚设置为低电平时，调制器启用，HART 正弦波出现在器件的 MOD_OUT 引脚上。部分物理层测试测量当 $\overline{\text{RTS}}$ 信号被设置为低电平时启用调制器的时间，以及当 $\overline{\text{RTS}}$ 信号返回高电平时禁用调制器的时间。

在该设置中，来自微处理器的 $\overline{\text{RTS}}$ 信号触发示波器绘制 HART 信号的启用和禁用时间。图 3-8 和图 3-9 显示了 HART 载波启动和停止测试所需的时序。

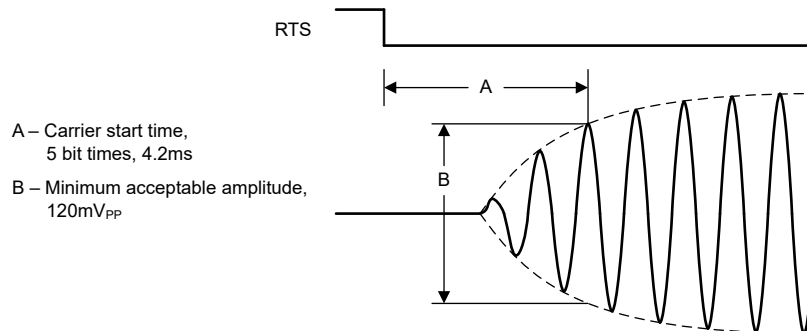


图 3-8. 载波启动时序

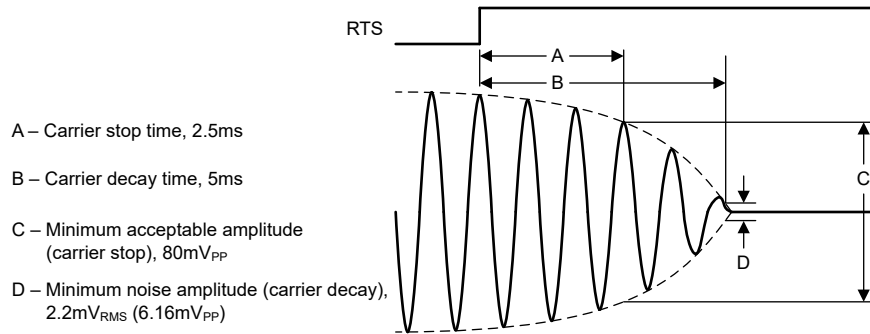


图 3-9. 载波停止时序

对于 \overline{RTS} 启用，启动调制器所允许的最长时间为 5 个 HART 位时间或 4.2ms。这是正弦波达到最小振幅 120mV_{PP} 的时间。对于 \overline{RTS} 禁用，最长载波停止时间为 2.5ms，用于验证载波振幅是否低于 80mV_{PP}。允许的衰减时间一共为 5ms。在该时间段之后，来自 HART 信号的最大噪声振幅为 2.2mV_{RMS} (或大约 6.16mV_{PP})。图 3-10 显示了 HART 载波启动和停止时序的示波器图，表 3-2 报告了测量数据。

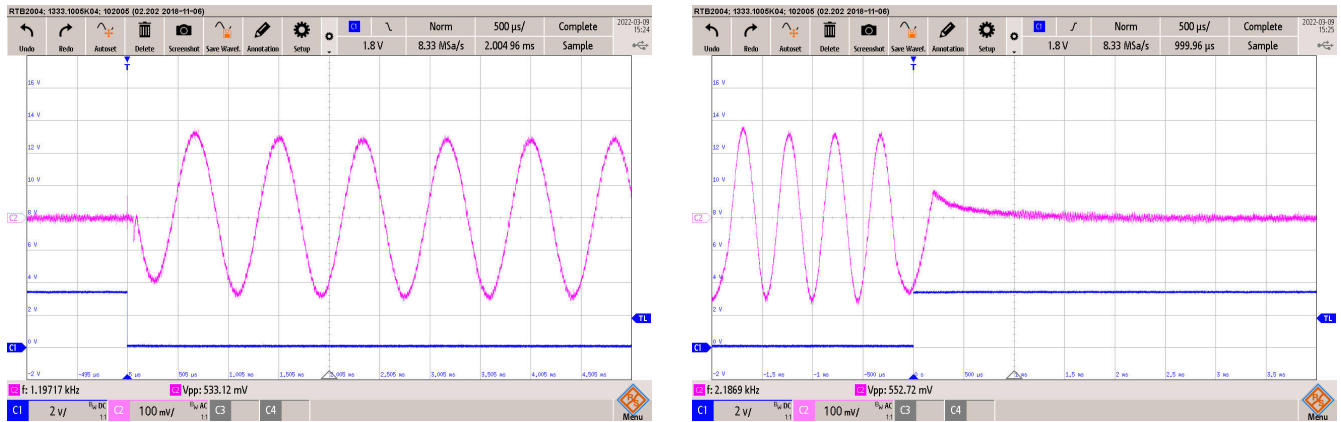


图 3-10. HART 载波启动和停止时间测试示波器结果

表 3-2. FSK 正弦波启动和停止时间测试结果

测试	测量值	最大值	结果
载波启动时间	120μs	4.2ms	通过
载波停止时间	0.4ms	2.5ms	通过
载波衰减时间	1.8ms	5.0ms	通过

3.4.3 载波启动和停止瞬态测试

下一项测试是载波启动和停止瞬态测量。图 3-11 中的测试设置与前一项测量载波启动和停止的测试类似。在该测试设置中，HCF_TOOL-32 滤波器由示波器的另一个通道进行测量。该低通滤波器可消除较高频率的 HART 信号频带并传递任何低于 25Hz 的信号。滤波后的信号显示主变量的电流测量值。该测试验证 HART 传输启动和停止是否不产生任何干扰主变量测量的噪声。

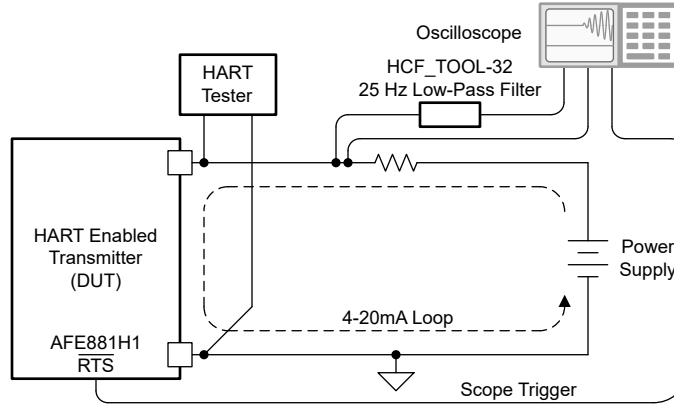


图 3-11. HART 载波启动和停止时间测试设置

图 3-11 显示了启用和禁用 HART 信号时的示波器图。此外，示波器还测量通过 HCF_TOOL-32 进行滤波的相同信号。HCF_TOOL-32 容性耦合阻性负载。蓝色的低通滤波信号显示变送器的输出噪声振幅。在此处，规范要求峰值振幅最大为 100mV。变送器最大值显示转换噪声的 22.1mV_{P-P} 噪声振幅。表 3-3 报告示波器测量的结果。

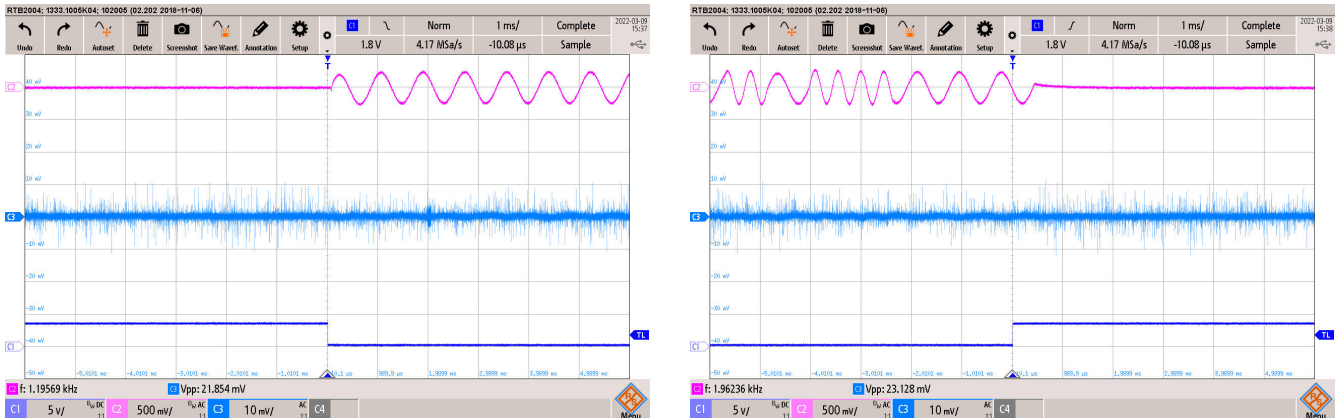


图 3-12. HART 载波启动和停止时间瞬态测试示波器结果

表 3-3. 通过 HCF_TOOL-32 进行滤波的载波启动和停止测量结果

测试	测量	最大值	结果
载波启动峰值模拟滤波器输出	21.8mV _{PP}	100mV _{PP}	通过
载波停止峰值模拟滤波器输出	22.1mV _{PP}	100mV _{PP}	通过

3.4.4 静音期间的输出噪声

与前一项测试类似，该测试测量通过滤波器的 HART 信号频带。此处使用 HCF_TOOL-31 滤波器。该滤波器是 500Hz 至 10kHz 带通滤波器，允许所有带内 HART 信号通过。该测试旨在查看 HART 信号无效时的噪声并验证是否没有可能错误地被作为 HART 信号接收的带内噪声。图 3-13 显示了静音期间输出噪声的测试设置。

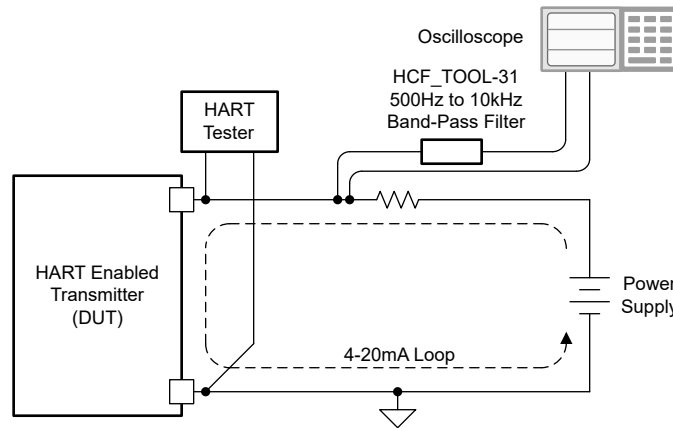


图 3-13. 静音期间的 HART 输出噪声测试设置

图 3-14 显示了静音期间输出噪声测量的示波器快照。这在示波器图顶部显示 HART 被禁用后的无效 HART 信号。图中的中间迹线显示了通过 HCF_TOOL-31 进行滤波的相同信号，其中显示了主变量的带内噪声。示波器的底部迹线是 RTS，该信号为高电平，指示 HART 无效。表 3-4 显示了静音期间测量的噪声结果。

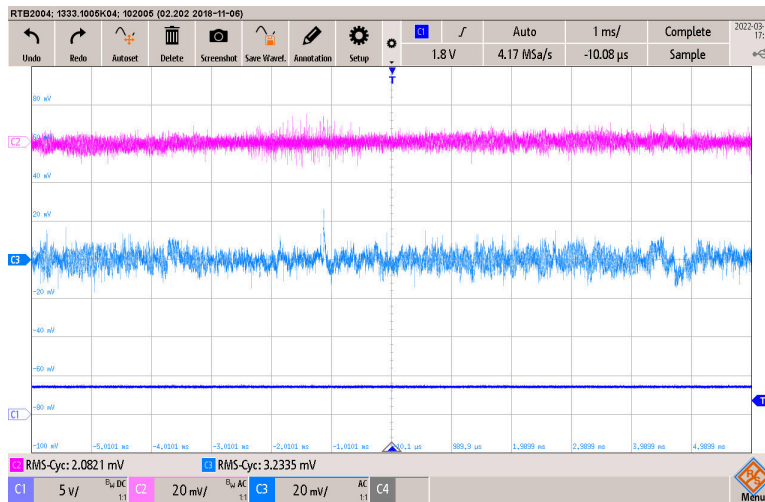


图 3-14. 静音期间的输出噪声示波器测试

表 3-4. 静音期间的输出噪声测试结果

测试	测量	最大值	结果
无滤波器的宽带噪声	2.08mV _{RMS}	138mV _{RMS}	通过
使用 HCF_TOOL-31 带通滤波器的带内噪声	3.23 _{RMS}	22mV _{RMS}	通过

3.4.5 模拟变化率测试

模拟变化率测试显示主变量从最小值变为最大值，然后再变为最小值的速度。对于该测试，在器件中编码了一种特殊测试模式，以大约 18Hz 的速率使输出在 4mA 和 20mA 之间循环。可以通过变送器板上的开关来启用该测试模式。在变送器中，AFE881H1 设置为正弦压摆率模式，以便从最小值到最大值的转换近似为正弦波形状。正弦压摆率模式可在低通主变量频带中最大限度地增大信号。

然后，通过 HCF_TOOL-31 滤波器对该信号进行滤波。该滤波器是 500Hz 至 10kHz 带通滤波器，可以使所有带内 HART 信号通过。该测试经过设计，表明当主变量发生变化时，转换不会导致任何大到足以触发 HART 接收的噪声。图 3-15 显示了模拟变化率测试的测试设置。

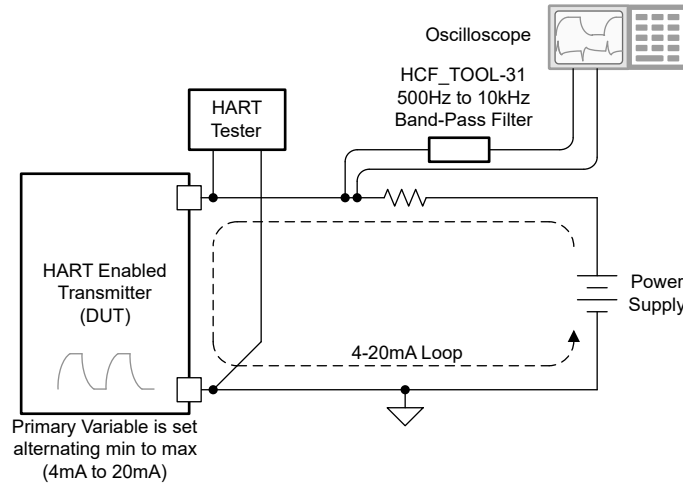


图 3-15. HART 模拟变化率测试设置

图 3-16 显示了模拟变化率测试图。顶部迹线表示在最小值和最大值之间来回转换的主变量。这是 4mA 到 20mA 的转换。在 500 Ω 电阻器上，这是 8V 的转换。表 3-5 报告了模拟变化率测试的测量结果。

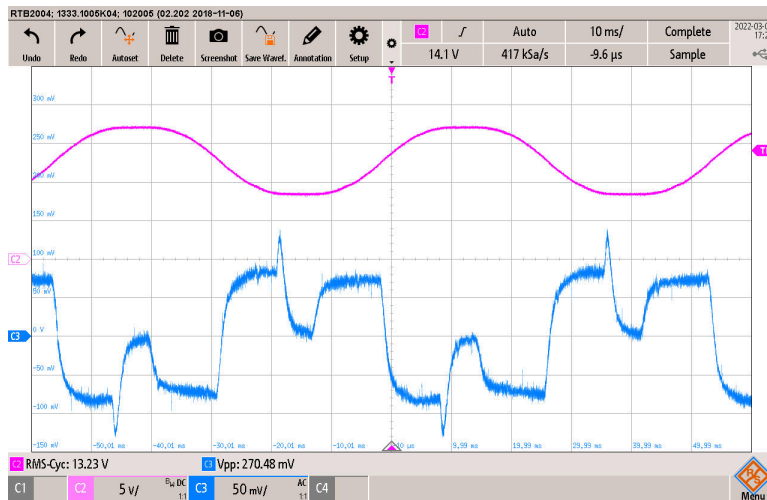


图 3-16. 模拟变化率测试示波器结果

底部迹线显示了通过 HCF_TOOL-31 进行滤波的相同信号。该信号必须小于 150mV_{PEAK}。对于该测试，270mV_{PP} 结果相当于 135mV_{PEAK}，器件通过了该测试。

表 3-5. HART 模拟变化率测量结果

测试	测量	最大值	结果
模拟信号发送滤波信号振幅	270mV _{PP}	150mV _{PEAK}	通过
模拟信号发送期间出现通信错误	100 次尝试	0 次错误	通过

在测试过程中，HART 测试系统还用于测试该周期性输出转换期间的有效传输。使用 HART 测试系统，*comtest* 命令发送一组连续命令。当器件在最小值和最大值之间循环时，HART 测试系统发送 100 条命令，变送器响应这些命令以验证传输中是否没有错误。

3.4.6 接收阻抗测试

另一项物理层测试是测量变送器的接收阻抗。AFE881H1 内置于高阻抗变送器中，接收阻抗必须在主变量和 HART 传输频率上高于最低水平。在该测试中，环路中使用了一个 5kΩ 串联测试电阻器来测量变送器的接收阻抗。该测试需要高得多的电源电压。变送器的正常启动电流为 4mA。5kΩ 上的该电流相当于 20V，需要使用高于 40V 的电源来运行该测试。图 3-17 显示了用于测量变送器接收阻抗的测试设置的方框图。

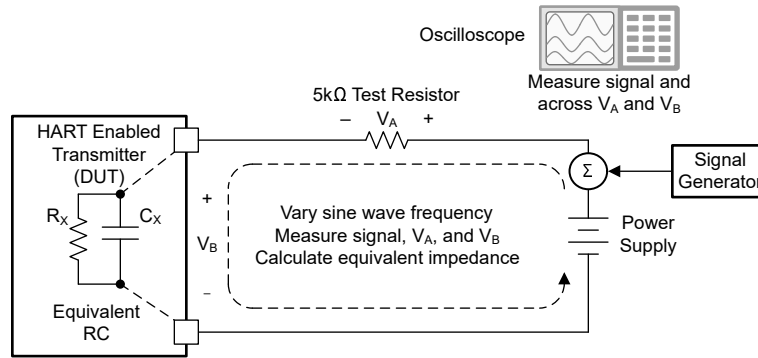


图 3-17. HART 接收阻抗测试设置

信号发生器将不同频率的正弦波输入到环路中。示波器测量信号发生器的电压、测试电阻器上的电压和变送器上的压降。通过示波器上的这三个测量值并使用测试电阻器的已知 5kΩ 电阻，可以计算出变送器的等效阻抗。可计算并绘制不同频率下的等效电阻和电容 (R_x 和 C_x)。

表 3-6 列出了 V_A 和 V_B 的测量值以及计算出的变送器 Z_M 的等效阻抗。

表 3-6. 接收阻抗测试的测量结果和计算结果

频率	V_A (V)	V_B (V)	Z_M (Ω, 计算值)
200Hz	0.018	1	277778
500Hz	0.025	1	200000
950Hz	0.05	0.99	99000
1.6kHz	0.09	0.98	54444
2.5kHz	0.13	0.96	36923
5kHz	0.26	0.95	18289
10kHz	0.48	0.87	9063
20kHz	0.73	0.65	4452
50kHz	0.93	0.33	1774

然后图 3-18 中绘制了阻抗与频率间的关系图。

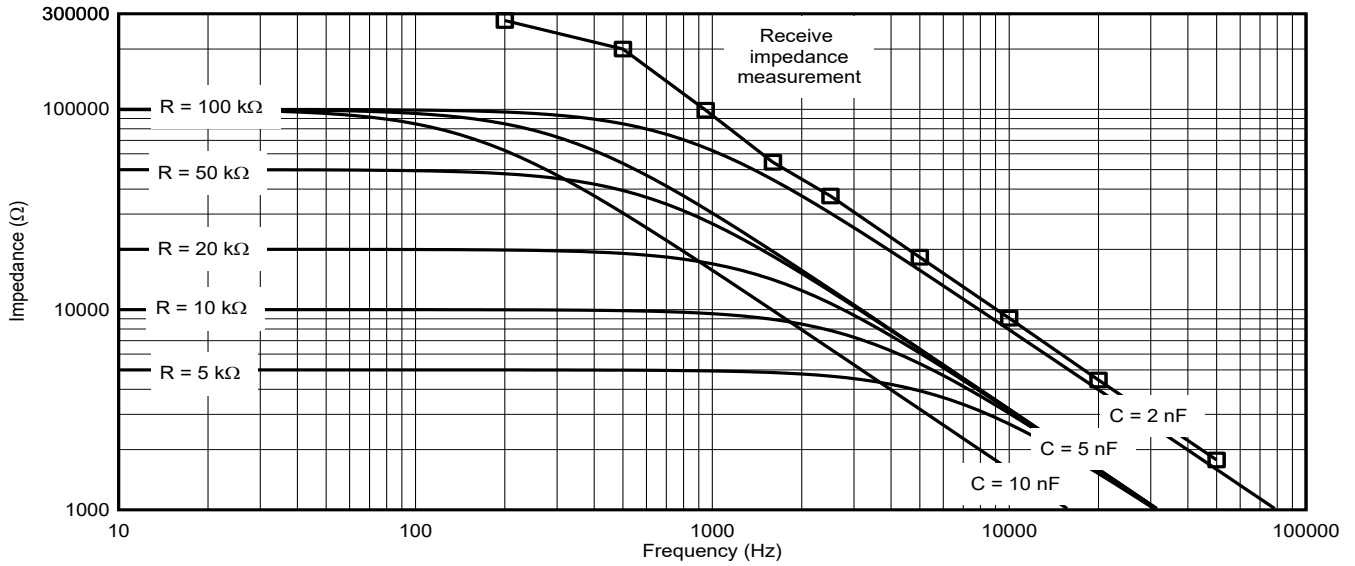


图 3-18. 接收阻抗测试结果与频率间的关系图

对于该测试，测量和计算频率范围为 200Hz 至 50kHz 的信号。变送器接收阻抗的等效电阻和电容为 278kΩ 和 1800pF。对于高阻抗变送器，最小等效电阻为 100kΩ，最大电容为 5nF。

3.4.7 噪声敏感度测试

还在存在不同频率噪声的情况下对变送器进行了 HART 传输测试。在该测试中，信号发生器以不同的幅度和频率改变电源电压，以对噪声进行仿真。

噪声敏感度测试验证是否尽管存在带外噪声，甚至一些低信号带内噪声，仍然可以接收到 HART 信号。图 3-19 显示了 HART 噪声敏感度测试的测试设置。

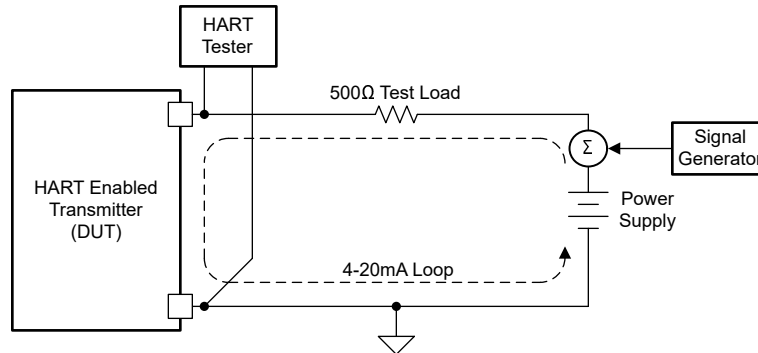


图 3-19. 噪声敏感度测试

信号发生器经过设置，使产生的频率和振幅模拟 HART 传输期间的噪声。该测试使用了五种频率和振幅组合。表 3-7 列出了信号发生器用于对噪声进行仿真的不同频率和振幅组合。

表 3-7. 来自噪声敏感度测试的测量数据

干扰类型	频率	等级	丢失命令错误数	结果
带内	1700Hz	55mV _{PP}	0	通过
带外	250Hz	220mV _{PP}	0	通过
带外	125Hz	880mV _{PP}	0	通过
带外	63Hz	3.52V _{PP}	0	通过
带外	29Hz	16V _{PP}	0	通过

当信号发生器工作时，HART 测试系统向变送器连续发送 100 条命令。变送器向命令发送响应。任何缺失的命令或中断的传输都会被视为错误。

3.4.8 载波检测测试

最后一项物理层测试是载波检测测试。在这些测试期间，调制解调器被替换为 HCF_TOOL-35 物理层测试接口。该工具是一种 HART 调制解调器接口，具有可以改变测试仪 HART 信号振幅的可调输出。图 3-20 显示了 HART 载波检测测试设置。

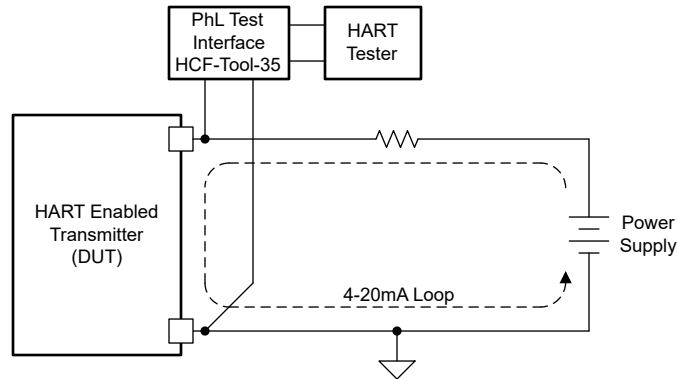


图 3-20. HART 载波检测测试设置

载波检测测试验证将信号识别为 HART 信号所需的最小传输振幅是多大。该测试还确定未被识别为 HART 信号的最大带内信号。使用示波器来验证信号的振幅。该测试还验证在传输 HART 最小振幅时进行启动和停止所需的时间。

对于载波检测测试，信号电平从典型值 500mV_{PP} 降至 120mV_{PP} 。变送器仍必须接收 HART 调制解调器通信。完成后，信号电平进一步下降至 80mV_{PP} ，此时变送器必须拒绝任何命令。最后，信号电平再回升至 120mV_{PP} 。器件必须再次从测试系统接收 HART 通信。这些测试中的每一项都是在向变送器发送 100 条 HART 命令的同时执行的。

这些测试完成后，使用 120mV_{PP} 信号重新测试启动和停止时间，以验证传输。表 3-8 报告了载波检测测试的结果。

表 3-8. 载波检测测试结果

测试	信号振幅	测量	最大值	结果
成功的无错误通信	120mV_{PP}	100 次通信尝试	0 次错误	通过
失败的通信	80mV_{PP}	100 次通信尝试	0 次成功的通信	通过
成功的无错误通信 (返回)	120mV_{PP}	100 次通信尝试	0 次错误	通过

该测试使用 $250\ \Omega$ 电流检测电阻器。载波启动和停止时间必须小于 5ms (小于 6 位时间)。

3.5 数据链路层测试

在物理层测试之后，数据链路层 (DLL) 测试验证命令的语法和 HART 通信帧的结构。这些测试检查帧的构造，包括前导码、定界符、寻址和字节计数。测试还检查变送器帧的生成，即将响应数据构建为控制器可以理解的适当格式。DLL 测试还验证总线仲裁的不同情况，其中包含变送器在请求-响应模式和突发模式下的特定时间响应。

3.5.1 数据链路层测试规范

HCF_SPEC-081 定义令牌传递数据链路层规范。DLL 负责在兼容 HART 的器件之间实现可靠的无差错数据通信。本文档指定了 HART 产品通过物理链路传递数字信息时使用的规则。

为了测试 DLL，HCF_TEST-1 概述了测试规范。这些测试涵盖：

- 变送器进行 HART 通信帧检测和识别
- 变送器生成帧，供控制器接收
- 总线仲裁，用于检查变送器是否在接收到命令后立即响应并以突发模式发送命令
- 数据链路层服务，用于控制应用层的数据帧中发送的字节

基于 Linux 的 HART 测试系统具有一组预编程的测试来验证数据链路层。对于所有 DLL 测试，HART 测试系统会运行测试并记录测试和结果的日志。在 HART 测试系统中，*hartmenu* 命令提供可用的不同测试列表。这些测试可以连续运行，此时这些测试会一个接一个地运行，直到需要用户干预。或者，测试可以单独运行，此时用户可以在选择特定的测试。

表 3-9 显示了数据链路层测试列表。

表 3-9. DLL 测试列表和结果

测试编号	说明	结果
DLL001	FSK 前导码检查	通过
DLL002	定界符检查	通过
DLL003	帧扩展检查	通过
DLL004	短帧检查	通过
DLL005	HART 控制器地址位检查	通过
DLL006	突发模式位检查	通过
DLL007	长帧地址检查	通过
DLL009	错误字节计数检查	通过
DLL010	垂直奇偶校验	通过
DLL011	组帧错误检查	通过
DLL012	检查字节测试	通过
DLL013	FSK 间隙接收超时测试	通过
DLL014	长消息测试	通过
DLL015	数据字段中的消息开始检查	通过
DLL016	BACK 帧的前导码检查	通过
DLL017	ACK 帧的前导码检查	通过
DLL018	ACK 帧中的间隙错误检查	通过
DLL019	BACK 帧的间隙检查	通过
DLL020	ACK 帧的 dribble 字节检查	通过
DLL021	BACK 帧的 dribble 字节检查	通过
DLL022	BACK 帧的主机地址位测试	通过
DLL023	突发模式变送器器件帧的突发模式位测试	通过
DLL024	变送器器件在 STO 内的响应测试	通过
DLL025	HART 控制器前导码期间的突发保持	通过
DLL026	DUT ACK 之后的突发响应时间测试	通过
DLL027	连续突发之间的响应时间测试	通过
DLL028	发生 STX 错误时的 BACK 时序	通过
DLL029	其他变送器器件上的突发模式超时	通过
DLL030	其他变送器器件响应之后的突发	通过
DLL032	读取唯一标识符	通过
DLL033	写入轮询地址	通过
DLL034	读取带标签的唯一标识符 (命令 11)	通过
DLL035	写入响应前导码的数量	通过
DLL038	读取带标签的唯一标识符 (命令 21)	通过
DLL039	变送器器件超时应力测试	通过
DLL040	唯一地址测试	通过
DLL041	组帧连续消息	通过
DLL042	命令编号扩展	通过

除 DLL039 之外，完成 DLL 测试大约需要 13 个小时。在运行快结束时，有几项测试需要用户干预，对器件执行下电上电。

DLL039 是要运行的最终 DLL 测试。在该超时应力测试中，测试仪会发送 200 万条连续命令并记录包含器件响应中的任何错误的日志。由于 HART 通信以大约每秒 1 条命令的速率响应，因此完成该测试需要大约 19 天。强烈建议在运行该测试时使用不间断电源。

3.5.2 数据链路层测试日志

运行数据链路层测试时，HART 测试系统打开一个 HART 监听器窗口来查看测试仪向变送器器件发出的命令和响应。图 3-21 显示了该 HART 实用程序窗口，并提供了信号发生时 HART 通信的有效读取。“Msg Sent from queue 1”表示有前导码作为与器件的通信发送。前导码后跟来自 HART 测试系统的定界符、地址、命令和误差校正字节。

```

Test-1 DLL001 CaseA 3.4

KIT-192 v3.2A

Msg sent from queue 1 :
5*FF: 82 A3 7B 03 03 03 00 00 59
Msg received in queue 1 :
6*FF: 86 A3 7B 03 03 03 00 18 00 48 FE E3 7B 05 07 01 01 00 01 03 03 03 05 08 00 5D 00 60 01 E1

Msg sent from queue 1 :
5*FF: 02 80 00 00 82
Msg received in queue 1 :
6*FF: 06 80 00 18 00 48 FE E3 7B 05 07 01 01 00 01 03 03 03 05 08 00 5D 00 60 01 E1

Msg sent from queue 1 :
5*FF: 82 A3 7B 03 03 03 01 00 58
Msg received in queue 1 :
6*FF: 86 A3 7B 03 03 03 01 07 00 48 20 41 C8 00 00 BA

Msg sent from queue 1 :
6*FF: 02 80 00 00 82
Msg received in queue 1 :
6*FF: 06 80 00 18 00 48 FE E3 7B 05 07 01 01 00 01 03 03 03 05 08 00 5D 00 60 01 E1

Msg sent from queue 1 :
6*FF: 82 A3 7B 03 03 03 01 00 58
Msg received in queue 1 :
6*FF: 86 A3 7B 03 03 03 01 07 00 48 20 41 C8 00 00 BA

Msg received in queue 1 :
6*FF: 06 80 00 18 00 48 FE E3 7B 05 07 01 01 00 01 03 03 03 05 08 00 5D 00 60 01 E1

Msg sent from queue 1 :
29*FF: 82 A3 7B 03 03 03 01 00 58
Msg received in queue 1 :
6*FF: 86 A3 7B 03 03 03 01 07 00 48 20 41 C8 00 00 BA

Test complete

```

图 3-21. HART 测试仪的 HART 监听器显示

当运行每项数据链路层测试时，HART 测试系统会生成一个日志，用于显示通信情况，并可以由 FieldComm Group 查看。图 3-22 显示了其中一个日志的一小部分。

```

HART Quality Assurance Log
KIT-192 v3.2A
-----
      No.           Chk Byt      Data
  Ticks FFs DEL M/B --Address-- Cmd Byt Cnt RC DS
269fd0 0e 02 1/0 00          00 82 00
26a210 06 06 1/0 00          00 e1 18 00 48 fee3 7b05 0701 0100 0103 0303
                                           0508 005d 0060 b060 b001
DEVICE: FEE37B0507010100010303030508005D0060B060B001

Expanded device type      0xE37B
HART Universal Revision Number 7
Device ID                 0x030303
Configuration Change Counter 0x005D
Manufacturer ID           0x60B0
Device Profile            0x01

TEST:  Test-1 DLL001 CaseA 3.4
START:  Fri Jul 2 11:42:09 2021

26a5cd 04 82 0/0 2fea 012345 7e 5d 1e          0000 5465 7374 2d31 2044 4c4c
                                           3030 3120 4361 7365 4120 332e
                                           342e 3020 2020
26ac6b 04 82 1/0 237b 030303 00 59 00
26ae2a 06 86 1/0 237b 030303 00 3a 18 00 48 fee3 7b05 0701 0100 0103 0303
                                           0508 005d 0060 b060 b001
26b238 04 02 1/0 00          00 82 00
26b3a0 06 06 1/0 00          00 e1 18 00 48 fee3 7b05 0701 0100 0103 0303
                                           0508 005d 0060 b060 b001
                                           0508 005d 0060 b060 b001
27ca8a 1c 82 1/0 237b 030303 01 58 00
27ce4a 06 86 1/0 237b 030303 01 ba 07 00 48 2041 c800 00
27d0e6 04 82 0/0 2646 dead99 78 51 03          0220 00

RESULT: Pass    d11001a 0      Test completed successfully
  
```

图 3-22. DLL 测试系统日志

这些测试日志记录运行的测试、器件信息、带有时间戳的通信事务，验证通信并标记任何故障。所有测试完成后，HART 测试系统会生成一整套日志文件。这些日志文件被压缩在一起，并与器件注册请求一起发送至 FieldComm。

3.6 通用命令测试

HART 测试系统还从 *hartmenu* 应用程序开始运行应用层的通用命令测试 (UAL)。通用命令规范在 HCF_SPEC-127 下定义。这些测试验证协议的应用层并检查变送器支持的通用 HART 命令。UAL 测试规范由 HCF_TEST_3 定义。测试设置与 DLL 测试设置相同，也使用 HART 测试系统向变送器发送命令。这些测试验证应用层的以下功能：

- 验证是否支持所有通用命令。这些测试扫描从 0 到 31 的通用命令范围，并寻找正确的响应。
- 读取动态变量。这些测试检查对针对动态变量的命令 1、2、3 和 9 的响应。
- 验证写入命令。写入测试检查初始值和后续写入值。这测试不同数据字段的结果。
- 验证配置读取命令。
- 确认写保护。这是变送器写保护测试（如果支持该功能）。
- 测试冷启动位。控制器必须能够检测冷启动（即电源故障）。
- 读取器件变量。该测试验证命令 9 是否正常运行。
- 测试配置更改位。该测试验证命令 38 是否受支持和正常运行，并检查配置更改计数器以复位状态位。
- 命令 48 支持，读取其他器件状态。该测试验证是否支持命令 48 并检查是否能够复位“更多可用状态”位。

可用测试的结束需要一些用户干预来设置冷启动位并检查“更多可用状态”位。

表 3-10 列出了 HART 测试系统运行的用于验证通用命令是否受支持的测试以及测试结果。

表 3-10. UAL 命令测试列表和结果

测试编号	说明	结果
UAL000	确认所有通用命令均受支持	通过
UAL001	读取动态变量（命令 1、2 和 3）	通过
UAL005	写入消息	通过
UAL006	写入标签描述符和日期	通过
UAL007	验证命令 14 和 15 响应	通过
UAL008	验证最终装配号	通过
UAL009	验证写保护	不适用
UAL010	验证冷启动位	通过
UAL011	读取器件变量（命令 9）	通过
UAL012	读取动态变量分类	通过
UAL013	写入长标签	通过
UAL038	复位配置更改标志	通过
UAL048	读取其他器件状态	通过

编程到变送器中的 HART 栈通过了这些测试，只是写保护未编程到功能中。对于该验证写保护测试 (UAL009)，测试被检查为 *不适用*。完成一整套 UAL 测试需要大约 30 分钟。与 DLL 测试一样，运行 UAL 测试会启用 HART 监听器窗口，并为这些测试生成一组测试日志，以用于提交申请。

3.7 常见做法命令测试

最后一项 HART 测试验证变送器中是否实现了应用层的常见做法命令 (CAL)。HCF_TEST_4 说明了 CAL 测试规范。这些测试检查是否存在许多 HART 器件中实现的强烈建议的命令。以下是可以在 HART 器件中实现并作为 CAL 测试的一部分进行测试的常见做法命令的基本列表：

- 读取最多四个动态变量的选择
- 写入阻尼时间常数
- 写入器件范围值
- 校准 (设置零点, 设置跨度)
- 设置固定输出电流
- 执行自检
- 执行主机复位
- 修整主变量零点
- 写入主变量单位
- 修整 DAC 零点和增益
- 写入传递函数 (平方根/线性)
- 编写序列号
- 读取或写入动态变量赋值

表 3-11 显示了 HART 测试仪运行的一组常见做法命令测试。虽然本应用手册中设计的变送器使用展示器件功能的 HART 栈, 但本设计不是用作应用中真正变送器的功能完备的器件。许多命令已经实现, 但并非所有命令都受此测试列表的支持。完成这组完整的 CAL 测试大约需要 4 小时。

表 3-11. CAL 命令测试结果

测试编号	说明	结果
CAL000	检查常见做法命令是否存在	通过
CAL001	写保护测试	未执行
CAL033	读取器件变量	通过
CAL034	写入主变量阻尼值	通过
CAL035	写入主变量范围值	通过
	主变量单位代码不受命令 35 影响	通过
CAL036	设置主变量上限值	不适用
CAL037	设置主变量下限值	不适用
CAL040	进入/退出固定电流模式	通过
CAL041	执行自检	通过
CAL042	执行器件复位	通过
CAL043	设置主变量零点	不适用
CAL044	写入主变量单位	通过
CAL045	修整环路电流零点	通过
CAL046	修整环路电流增益	通过
CAL047	编写主变量传递函数	不适用
CAL049	写入主变量传感器序列号	不适用
CAL050	读取动态变量赋值	不适用
CAL051	写入动态变量赋值	不适用
CAL052	设置器件变量零点	不适用
CAL053	写入器件变量单位	不适用
CAL054	读取器件变量信息	通过
CAL055	写入器件变量阻尼值	不适用
CAL056	写入器件变量传感器序列号	不适用
CAL060	读取模拟通道和范围百分比	不适用
CAL062	读取模拟通道	不适用

表 3-11. CAL 命令测试结果 (续)

测试编号	说明	结果
CAL063	读取模拟通道信息	不适用
CAL064	写入模拟通道额外阻尼值	不适用
CAL065	写入模拟通道范围值	不适用
CAL066	进入/退出固定模拟通道模式	不适用
CAL067	修整模拟通道零点	不适用
CAL068	修整模拟通道增益	不适用
CAL069	写入模拟通道传递函数	不适用
CAL070	读取模拟通道端点值	不适用
CAL071	锁定器件	不适用
CAL072	Squawk	通过
CAL073	查找器件	不适用
CAL074	验证 I/O 系统命令	不适用
CAL078	命令聚合	不适用
CAL079	写入器件变量	不适用
CAL080	验证器件变量修整命令	不适用
CAL091	趋向	不适用
CAL101	子系统突发模式	不适用
CAL103	多条突发消息支持	通过
CAL104	智能数据发布	通过
CAL107	写入突发器件变量	通过
CAL108	写入突发模式命令编号	通过
CAL109	突发模式控制	通过
CAL115	事件通知	不适用
CAL512	国家/地区代码	不适用
CAL518	位置说明	不适用
CAL520	处理单元标签	不适用
CAL523	读取压缩状态映射阵列	不适用
CAL524	操作压缩状态映射	不适用
CAL526	状态仿真	不适用

与 DLL 和 UAL 测试一样，通过 *hartmenu* 运行 CAL 测试将为注册提交生成一组日志。

3.8 特定于器件的命令测试

除通用命令和常见做法命令之外，制造商还可以在器件中实现特定于器件的命令。以下列表显示了一些可以实现的特定于器件的命令。

- 读取或写入低流量切除
- 启动、停止或清零累计器
- 读取或写入密度校准因子
- 选择 PV (质量、流量或密度)
- 读取或写入材料或构造信息
- 修整传感器校准
- PID 启用
- 写入 PID 设定点
- 阀表征
- 阀设定点
- 行程限值
- 用户单位
- 本地显示信息

同样，这些命令可以由器件制造商实现，但不是必需的。特定于器件的命令不会通过 HART 规范进行测试，也不会作为测试在 HART 测试系统中实现。

3.9 HART 协议测试提交

完成所有物理层测试以及 DLL、UAL 和 CAL 测试后，就可以提交器件以进行注册了。FieldComm HART 注册申请需要以下文档：

- 完成 HART 现场器件测试报告
- 撰写介绍器件设置和测试过程的测试文档
- 填写 FieldComm 营销表，以说明该器件的使用和营销方式
- 在现场器件测试报告中编写物理层测试结果
- 从测试日志中压缩 DLL、UAL 和 CAL 测试的结果并提交

3.10 HART 注册

提交后，FieldComm 会审核测试结果和日志文件。审核提交并检查结果后，FieldComm 会要求提供几个变送器来验证测试。

只要测试中没有发现问题，完成测试和注册需要大约六周的时间。只要在测试中发现任何问题，就需要重新提交器件。如果设计审核通过，FieldComm 会通知您器件已注册。

完成后，FieldComm 会发送一封信，确认设计现在已进行 HART 注册。回复会附带设计注册证书，可以在数据表中使用 HART 注册标识。图 3-23 显示了 AFE881H1 变送器器件的注册证书。



Certificate of Registration
FieldComm Group Verified

Texas Instruments Manufacturer	AFE881H1-TI-Design (TIDA-060036) Product Name
6080 Manufacturer ID (Hex)	E54B Expanded Device Type (Hex)
7 HART Protocol Revision	01 Device Revision (Hex)
00 Hardware Revision (Hex)	01 Software Revision (Hex)
03/18/2022 Test Date	FieldComm Group Verification Method

The above product has successfully completed the validation process and meets the requirements to be "HART REGISTERED".

"HART REGISTERED" products conform to GB/T 29910.1-6-2013 and IEC 61158 standards.

Registration Number: L2-06-1000-987.3	Registration Issue Date: May 31, 2022	Approval: <i>T. J. Mastus</i>
---------------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------



FIELDCOMM GROUP™
Connecting the World of
Process Automation

HART® is a registered trademark of FieldComm Group

图 3-23. 基于 AFE881H1 的变送器设计的 HART 注册

4 其他 TI HART 调制解调器设计

我们创建了一些 TI 设计来演示 HART 通信。首先，DAC8740H 器件是 TI 的首款 HART 调制解调器器件，用于工厂自动化和控制。DAC8740H 是 HART 调制解调器系列中的一款器件，详见表 4-1。

表 4-1. DAC874xH HART 调制解调器器件

器件	通信
DAC8740H	UART
DAC8741H	SPI
DAC8742H	UART/SPI

DAC8740H 具有两款采用 HART 实现的相关设计。第一款设计是[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](#)。该设计在 FieldComm 中注册为 HART 器件。图 4-1 显示了用于该 TI 设计的电路板。

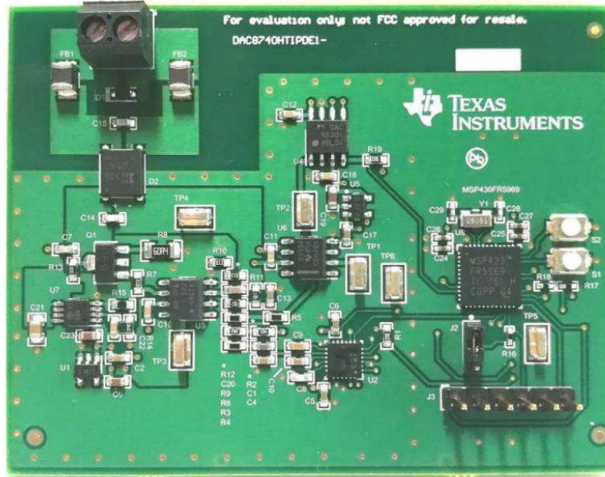


图 4-1. 用于采用 HART 调制解调器的高精度环路供电式 4-20mA 现场变送器参考设计的电路板

第二款设计是[支持 HART 的 PLC 模拟输入模块参考设计](#)。该设计未在 FieldComm 中注册，但该设计指南包含测量和测试程序，用于证明该设计通过了各种 HART 测试。

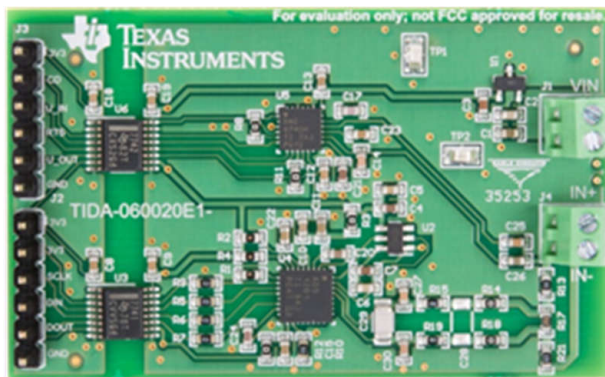


图 4-2. 用于支持 HART 的 PLC 模拟输入模块参考设计的电路板

如之前的变送器设计中所示，AFE881H1 是一款具有集成 DAC 的 HART 调制解调器。AFE881H1 是 HART 调制解调器系列的一部分，详见表 4-2。

表 4-2. AFE881H1 系列 HART 调制解调器器件

器件	DAC 分辨率	DAC 输出范围
AFE881H1	16 位	0.3V 至 2.5V
AFE781H1	14 位	0.3V 至 2.5V
AFE882H1	16 位	0V 至 2.5V
AFE782H1	14 位	0V 至 2.5V

为 AFE881H1 和 AFE882H1 提供了评估模块 (EVM)。对于 AFE881H1EVM，电路板输出 DAC 电压以用于评估。对于 AFE882H1EVM (这是一款类似的器件，但 DAC 输出为 0V 至 2.5V)，EVM 使用 XTR305 来生成电压或电流输出。

可以发布包含 V 至 I 转换级的前端电路板 EVM。当施加电源电压时，这些前端电路板作为 4-20mA 环路上的变送器运行。图 4-3 显示了 AFE881H1 模块化前端电路板。



图 4-3. AFE881H1 模块化前端电路板

电路板右侧的连接器连接到环路电源，并且可以在环路连接的任一侧添加负载电阻器。该 EVM 的左侧连接到数字后端电路板。对于通过 PC 实现的 GUI 控制，数字后端电路板配有 USB 连接。FTDI 器件在器件和 PC 之间来回发送 SPI 或 UART 信号。

此外，还使用 LaunchPad 连接器创建了数字后端电路板。可以使用 TI LaunchPad 套件来编写固件并控制器件。

作为对前端/后端电路板生态系统的测试，这些电路板用作对 AFE882H1 运行 HART 测试的工具。图 4-4 显示了用于 AFE882H1 的模块化 EVM。



图 4-4. 用作 HART 变送器的 AFE882H1 前端电路板以及数字后端电路板和 MSP430FR5969 LaunchPad

和以前一样，前端电路板连接到电源，充当 4-20mA 环路的控制器。在该模块化设置中，对 EXP-MSP430FR5969 LaunchPad 电路板进行了 HART 栈编程。AFE881H1 变送器设计中的 HART 栈重复用于 AFE882H1。该 LaunchPad 连接到数字后端 (LP-DBE) 接口板，并连接到包含 AFE882H1 器件的前端电路板。与 AFE881H1 变送器板类似，环路电源通过连接到板右侧的连接器提供。HART 测试已在该电路板上成功运行，FieldComm 还已完成该电路板的测试。使用该设置，AFE882H1 设计被注册为 HART 变送器。

5 总结

本应用手册介绍了如何使用 AFE881H1 HART 调制解调器作为支持 HART 的变送器设计的基础。本应用手册介绍了构造的详细信息，展示了操作、输入保护、电压至电流转换和 HART 信号传输。本应用手册还介绍了 HART 协议测试和注册的基础知识。首先展示了物理层测试，介绍了对 FSK 形状、频率以及带内和带外噪声的不同测试。HART 测试系统用于检查器件中的数据链路层、通用命令和常用的命令。对于任何开发人员，这些测试都在支持 HART 的器件上运行，经过编写并发送至 FieldComm 以进行 HART 器件注册。

最后，还介绍了其他 TI HART 调制解调器器件和设计配套资料。DAC8740H 和 AFE881H1 是两个 TI HART 调制解调器产品系列中的器件，具有可用于验证这些器件的 EVM 板。

6 鸣谢

TI 感谢位于加利福尼亚州普莱森顿的 Smart Embedded Systems (SES) 开发了本设计中使用的 HART 栈。SES 在实现向 FieldComm Group 注册器件方面发挥了重要作用。要联系 SES，请访问 [SES](#)。

7 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[AFE881H1 具有内部 HART® 调制解调器、电压基准和诊断 ADC 的 16 位和 14 位低功耗 DAC，适用于 4-20mA 环路供电应用](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI)，[AFE882H1 具有内部 HART® 调制解调器、电压基准和诊断 ADC 的 16 位和 14 位低功耗 DAC，适用于 4-20mA 环路供电应用](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI)，[DAC874xH、HART 和 FOUNDATION 现场总线/PROFIBUS PA 调制解调器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI)，[DAC8742H、HART 和 FOUNDATION 现场总线/PROFIBUS PA 调制解调器](#) 数据表。
- 德州仪器 (TI)，[AFE881H1EVM 用户指南](#)。
- 德州仪器 (TI)，[AFE882H1EVM 用户指南](#)。
- 德州仪器 (TI)，[HART 协议基本指南](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[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。
- 德州仪器 (TI)，[支持 HART 的 PLC 模拟输入模块参考设计](#)，参考设计。

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