

Application Note

4-20mA 电流环路变送器的高精度惠斯通电桥放大器电路



Brittany Hertneky

摘要

本应用手册提出了一种使用精密电压放大器来调节惠斯通电桥传感器输出的现场变送器设计。本文档还将介绍如何使用电流环路变送器将放大器的电压输出转换为 4-20mA 信号。所有传感器和放大器电路都由电流环路变送器供电。此外，本应用手册还介绍如何选择放大器和无源器件来实现所需的增益以及电压/电流转换。同时，还将讨论误差源、PCB 布局注意事项以及测量结果。

内容

| | |
|---------------------------|----|
| 1 引言..... | 2 |
| 2 工作原理..... | 3 |
| 2.1 惠斯通电桥传感器..... | 3 |
| 2.2 2A INA..... | 5 |
| 2.3 4-20mA 电流环路变送器接口..... | 6 |
| 3 仿真..... | 7 |
| 4 PCB 设计..... | 8 |
| 5 验证和测量的性能..... | 8 |
| 6 总结..... | 9 |
| 7 参考资料..... | 9 |
| 附录..... | 10 |

插图清单

| | |
|---|----|
| 图 1-1. 测得输出电流与重量的传递函数..... | 2 |
| 图 1-2. 4-20mA 电流环路变送器的惠斯通电桥 PCB 设计..... | 2 |
| 图 2-1. 电桥放大简化为 4-20mA 电路..... | 3 |
| 图 2-2. 惠斯通电桥基本配置..... | 4 |
| 图 2-3. 限流的惠斯通电桥配置..... | 4 |
| 图 2-4. 分立式 2A INA 配置..... | 5 |
| 图 2-5. 电流环路变送器周边电路..... | 6 |
| 图 3-1. 输入为 0 磅时的 TINA TI 原理图和仿真..... | 7 |
| 图 5-1. 测得输出电流与重量的传递函数..... | 8 |
| 图 5-2. 输出电流误差与重量间的关系..... | 8 |
| 图 8-1. 选择的 SparkFun 称重传感器..... | 10 |
| 图 8-2. 称重传感器的机械设置..... | 10 |
| 图 8-3. PCB 顶层..... | 11 |
| 图 8-4. PCB 信号层 1..... | 11 |
| 图 8-5. PCB 信号层 2..... | 11 |
| 图 8-6. PCB 底层..... | 11 |
| 图 8-7. PCB Altium 原理图..... | 12 |

表格清单

| | |
|---------------------------------|---|
| 表 1-1. 设计目标与计算性能、仿真性能和测得性能..... | 2 |
| 表 2-1. 桥式放大器器件的主要规格..... | 5 |
| 表 5-1. 设计目标与计算性能、仿真性能和测得性能..... | 8 |
| 表 6-1. 主要设计标准和结果摘要..... | 9 |

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

设计要求如下：

- 使用电流环路变送器的基准电压为传感器和放大器电路供电
- 总电流消耗小于 3.5mA
- 重量范围 = 0 至 20 磅 → 输出电流 = 4mA 至 20mA
- $\pm 0.1\%$ 精度

表 1-1 中汇总了设计目标和性能。下面显示了测量的传递函数和完成的 PCB 设计。

表 1-1. 设计目标与计算性能、仿真性能和测得性能

| | 重量 | 目标值 | 计算值 | 仿真值 | 测得值 |
|------------------------------|------|------|-----------|-----------|-----------|
| I_{out} (最小值) | 0 磅 | 4mA | 4.0959mA | 4.0963mA | 4.0994mA |
| I_{out} (最大值) | 20 磅 | 20mA | 20.1404mA | 20.1397mA | 20.1545mA |

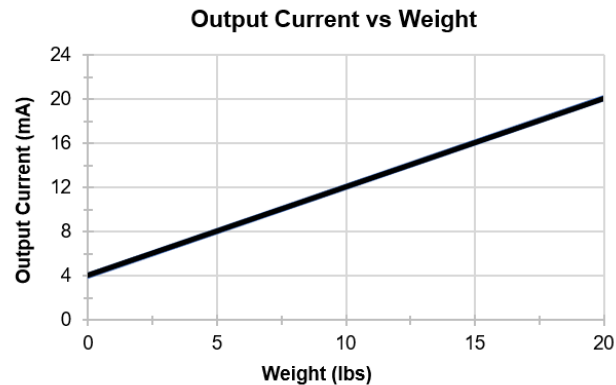


图 1-1. 测得输出电流与重量的传递函数

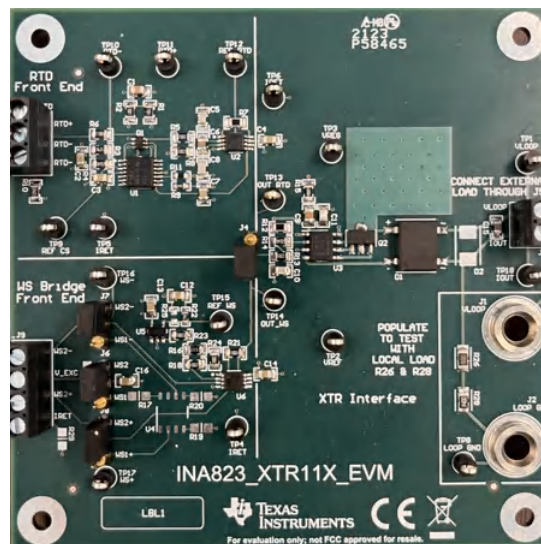


图 1-2. 4-20mA 电流环路变送器的惠斯通电桥 PCB 设计

2 工作原理

为了确保正常运转，工厂自动化和控制系统通常需要监测多个过程的状态并将这些状态传输给控制站。通常的做法是，将许多传感器分散安装在工厂车间内，从而将压力、温度和重量等过程变量转换为可以发送到中央位置的电信号。4-20mA 电流环路变送器非常适合此应用，因为通过这些变送器，只需使用两根线就能监测远程过程：传感器或周边电路的电源线路以及与目标传感器变量相对应的输出电流线路。建议将 4-20mA 电流环路变送器的惠斯通电桥式放大器电路作为高精度工厂自动化信号链解决方案。

该电路可分为三部分：

1. 惠斯通电桥传感器
2. 分立式 2A 仪表放大器 (INA)
3. 4-20mA 电流环路变送器 (XTR) 接口

图 2-1 展示了完整电路的简化版。TI XTR116 的基准电压和本地接地 (I_{RET}) 用于为所有电桥和传感器电路供电。由 XTR 供电的电路所消耗的所有电流必须通过电流环路 (I_{RET}) 返回；因此，监测电路的电流消耗必须低于 4mA，以避免干扰 4-20mA 目标输出电流。考虑到器件、温度和电源的差异，最好将电流消耗限制在 3.5mA。XTR116 由两线制电源 (V_{LOOP}) 供电。

信号链始于惠斯通电桥两个输出之间产生的与目标变量相对应的微小差分电压。这些电压会馈入分立式 2A INA，INA 可以放大这些电压的差异，并且输出电压可以通过电阻 (R_{IN}) 转换为电流。然后，电流环路变送器获取输入端 (I_{IN}) 的电流，在输出端 (I_{OUT}) 返回乘以 100 后的电流值。以下各节将提供有关电路各个部分的更多详细信息。

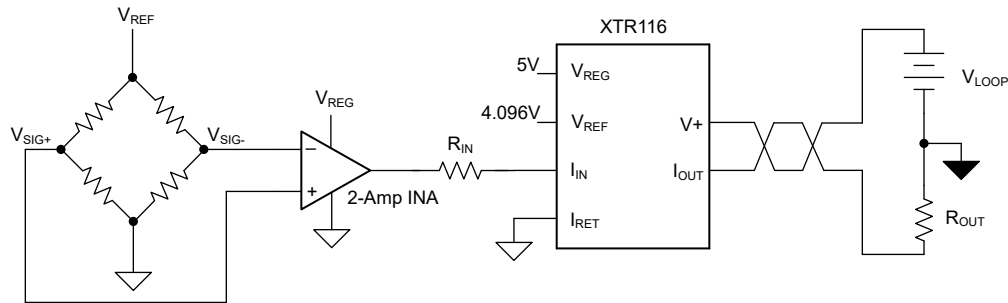


图 2-1. 电桥放大简化为 4-20mA 电路

2.1 惠斯通电桥传感器

惠斯通电桥是实现高精度传感器测量的常用电路配置。该电桥由四个电阻元件组成，而这些元件在激励电压 (V_{EXC}) 和地之间形成两个并联的分压器。在最基本的形式中，只有一种元件的电阻可以改变。这种电阻变化会在两个分压器 V_{SIG+} 与 V_{SIG-} 之间产生电压差。需要测量这两个点之间的电压差 (V_{DIFF})。电压差越大，电阻变化就越大，因此测量到的传感器值变化也就越大。图 2-2 展示了典型的惠斯通电桥配置，方程式 1 描述了 V_{DIFF} 、 V_{EXC} 和电阻式电桥元件之间相对于地的关系。

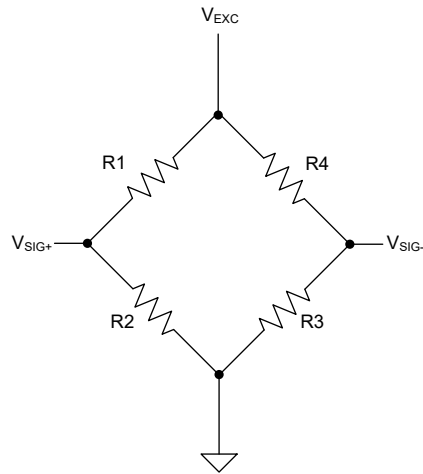


图 2-2. 惠斯通电桥基本配置

$$V_{DIFF} = V_{SIG+} - V_{SIG-} = V_{EXC} \times \left(\frac{R2}{R1 + R2} - \frac{R3}{R3 + R4} \right) \quad (1)$$

所选传感器的输入电阻约为 $1\text{k}\Omega$ ，在 V_{EXC} 为 4.096V 时会消耗超过 4mA 的电流。因此，在电桥的两侧串联放置了两个 500Ω 电阻，使电流限制为 2mA ，同时保持信号接近 $1/2V_s$ ，以避免后续 INA 级中的共模限制。限流电阻 (R_{LIMIT}) 的大小设定为可在惠斯通电桥上产生 2.096V 的激励电压。较大的限流电阻会降低有效激励电压，从而降低电桥灵敏度。图 2-3、方程式 2 和方程式 3 描述了修改后的惠斯通电桥，并显示了 R_{LIMIT} 的计算公式。

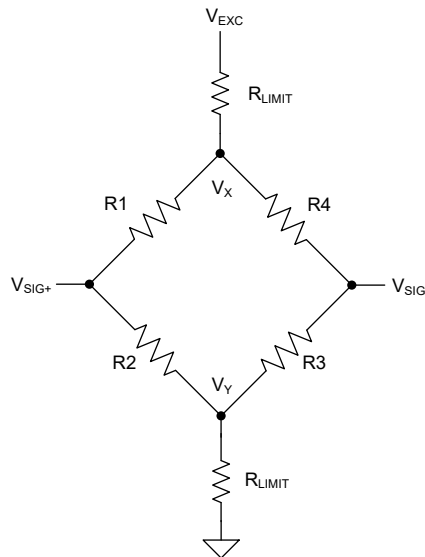


图 2-3. 限流的惠斯通电桥配置

$$\frac{V_{BRIDGE}}{I_{BRIDGE}} = \frac{4.096\text{V}}{2\text{mA}} = 2R_{LIMIT} + R_{BRIDGE} = 2R_{LIMIT} + 1\text{k}\Omega \rightarrow R_{LIMIT} = 500\Omega \quad (2)$$

$$V_{EFF_EXC} = V_X - V_Y = V_{EXC} - 2I_{BRIDGE}R_{LIMIT} = 4.096\text{V} - (2 \times 2\text{mA} \times 500\Omega) \rightarrow V_{EFF_EXC} = 2.096\text{V} \quad (3)$$

该设计使用惠斯通电桥称重传感器，但可配置到惠斯通电桥中的任何传感器都适用。施加到称重传感器的重量增加时， V_{DIFF} 上产生的差分电压也会随之增加。有关所选称重传感器的更多详细信息，请参阅附录 1：称重传感器和实验设置。

2.2 2A INA

该设计选择分立式 2A INA 来放大电桥产生的差分电压。之所以选择分立式解决方案而不是集成式 INA，是因为需要宽增益范围和零漂移技术，以便在温度范围内实现高精度。电路配置和传递函数分别如图 2-4 和方程式 4 所示。

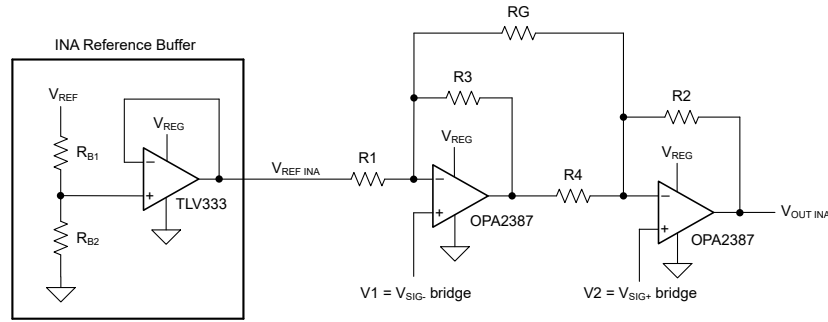


图 2-4. 分立式 2A INA 配置

$$V_{out_INA} = \left(1 + \frac{R3}{R2} + \frac{2R2}{RG}\right) * (V2 - V1) + V_{REF}, \quad \text{Where } R1 = R2 \text{ and } R3 = R4 \quad (4)$$

称重传感器实验显示 V_{DIFF} 的变化大概为 $95 \mu V/lb$ 。因此，需要一个增益级将输出电压增加到适当的范围，以馈入 4-20mA 变送器。2A INA 的增益计算公式如下。所需的 INA 输出电压在 0 磅时为 0.5V，在 20 磅时为 4.5V。

$$V_{DIFF_MAX} = sensitivity \times max\ load = 95\mu V/lb \times 20lbs \rightarrow V_{DIFF_MAX} = 1.9mV \quad (5)$$

$$Gain = \frac{(V_{outmax_INA} - V_{outmin_INA})}{V_{DIFF_MAX}} = \frac{4.5V - 0.5V}{1.9mV} \rightarrow Gain = 2105 V/V \quad (6)$$

所需增益用于计算 2A INA 的电阻值。R1 和 R2 设置为 $100k\Omega$ ，R3 和 R4 设置为 $10k\Omega$ 。

$$RG = \frac{2 * R2}{Gain - 1 - \frac{R3}{R2}} = \frac{2 * 100k\Omega}{2105V/V - 1 - \frac{10k\Omega}{100k\Omega}} = 95.511\Omega \rightarrow RG = 95.3\Omega \left(standard\ value\right) \quad (7)$$

$$Gain = \left(1 + \frac{R3}{R2} + \frac{2R2}{RG}\right), \quad \text{Where } R1 = R2 \text{ and } R3 = R4 \quad (8)$$

选择用于电桥检测的放大器时，直流精度和噪声是关键考虑因素。低输入失调电压、漂移和输入偏置电流对于实现高精度输出至关重要。1/f 噪声低的放大器非常重要，因为桥式传感器通常用于低信号频率。对于 2A INA，该设计选择 OPA2387（请参阅 [零漂移放大器：特性和优势](#) 应用简介）。表 2-1 总结了桥式放大器级的主要规格，并推荐了为此应用而设计的其他精密放大器。

表 2-1. 桥式放大器器件的主要规格

| 器件 | OPAx387 | OPAx333 | OPAx186 |
|------------------------------------|-----------|-----------|----------|
| (V) | 1.7 至 5.5 | 1.8 至 5.5 | 4.5 至 24 |
| Vos (最大值, μV) | 2 | 10 | 5 |
| Vos 漂移 (典型值, $nV/^{\circ}C$) | 3 | 20 | 1 |
| 输入偏置电流 (典型值, pA) | 30 | 70 | 100 |
| 噪声 (0.1Hz 至 10Hz, nV/\sqrt{Hz}) | 27 | 170 | 125 |
| 每通道 I_q (典型值, μA) | 570 | 17 | 90 |

当称重传感器上未施加重量时，2A INA 的输出电压约为 0.345V。因此，采用了 0.155V 基准电压将 0 磅时的输出电压升压至 0.5V。[TI 的模拟工程师计算器](#) 可用于计算提供尽可能低的基准电压误差的标准电阻值。

INA 的基准电压 (即 V_{REF_INA}) 由 4.096V XTR 基准与本地接地端之间的分压器进行设置, 其中的串联电阻必须在数十 $k\Omega$ 范围内, 以便限制电流消耗。为防止输入电阻 R_1 造成的降压, V_{REF_INA} 必须由低阻抗源驱动。选择 TLV333 来缓冲基准电压的原因是其功耗低, 直流精度高。

$$V_{REF_INA} = 0.155V = V_{REF_XTR} \times \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \rightarrow R_{B1} = 76.8k\Omega, R_{B2} = 3.01k\Omega \quad (9)$$

2.3 4-20mA 电流环路变送器接口

4-20mA 电流环路变送器负责为所有电桥和 INA 电路供电, 还负责提供精确的电流调节。该器件需要一些外部电路才能正常工作, 如图 2-5 所示。

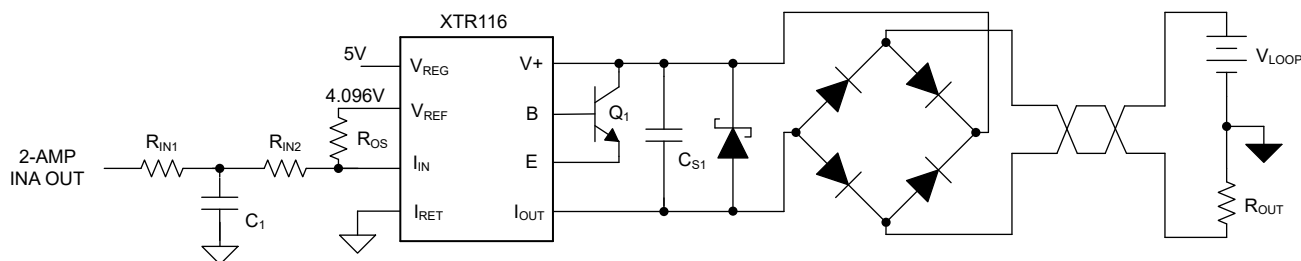


图 2-5. 电流环路变送器周边电路

XTR 5V 片上稳压器 (V_{REG}) 为 2A INA 供电, 而 4.096V 精密基准 (V_{REF}) 为电桥和 INA 基准分压器供电。 V_{REG} 可能会出现数百 mV 的电压偏移, 具体取决于其灌电流或拉电流大小, 因此当需要精确的电压时, 务必使用 V_{REF} (请参阅 XTR116 数据表中的图 6-5)。从 V_{REG} 或 V_{REF} 汲取的电流必须返回到本地接地引脚 (I_{RET})。

电阻 R_{IN1} 和 R_{IN2} 负责将 INA 的输出电压转换为可馈入 I_{IN} 引脚的电流。失调电流电阻 (R_{OS}) 用于为 I_{IN} 额外增加 $20\mu A$ 电流, 从而将输入电流提升至所需的 $40\mu A$ 至 $200\mu A$ 。XTR 提供增益 100, 在输出电流引脚上可以看到这一点 ($I_{OUT} = 100 \cdot I_{IN}$)。电容器 C_{IN} 和 R_{IN1} 在 INA 的输出端构成一个低通滤波器, 用以限制噪声。这些无源器件的计算公式如下。

$$R_{IN} = \frac{V_{IN_MAX} - V_{IN_MIN}}{I_{IN_MAX} - I_{IN_MIN}} = \frac{4V}{160\mu A} = 25k\Omega \quad (10)$$

$$I_{INmin} = 40\mu A = \frac{0.5V}{25k\Omega} + \frac{4.096V}{R_{OS}} \rightarrow R_{OS} = 204.8k\Omega \quad (11)$$

$$\text{Closest standard resistor values: } R_{IN1} = 10.2k\Omega, R_{IN2} = 14.7k\Omega, R_{OS} = 205k\Omega \quad (12)$$

$$f_C = \frac{1}{2\pi \times R \times C} = \frac{1}{2\pi \times 10.2k\Omega \times 10nF} \rightarrow f_C = 1.56kHz \quad (13)$$

建议在环路电源电压 ($V+$) 与输出电流引脚 (I_{OUT}) 之间使用一个 10nF 去耦电容器 (C_{S1})。电容器和输出负载电阻形成低通滤波器, 用于限制系统的带宽。需要一个外部晶体管 (Q_1) 来传导大部分输出电流, 以避免片上出现热致误差。在最大环路电压和输出电流下, 该晶体管的功率耗散可接近 1W。要采取额外的保护措施, 可以考虑使用二极管电桥和钳位二极管, 分别用于反向电压和过压浪涌保护。

3 仿真

该设计在 TINA TI 仿真软件中进行构建和验证。电路在 INA 的一个输入端使用直流电压源来模拟电桥上产生的差分电压。图 3-1 展示了在输入端施加对应于 0 磅的差分电压时的电路原理图和直流工作点。

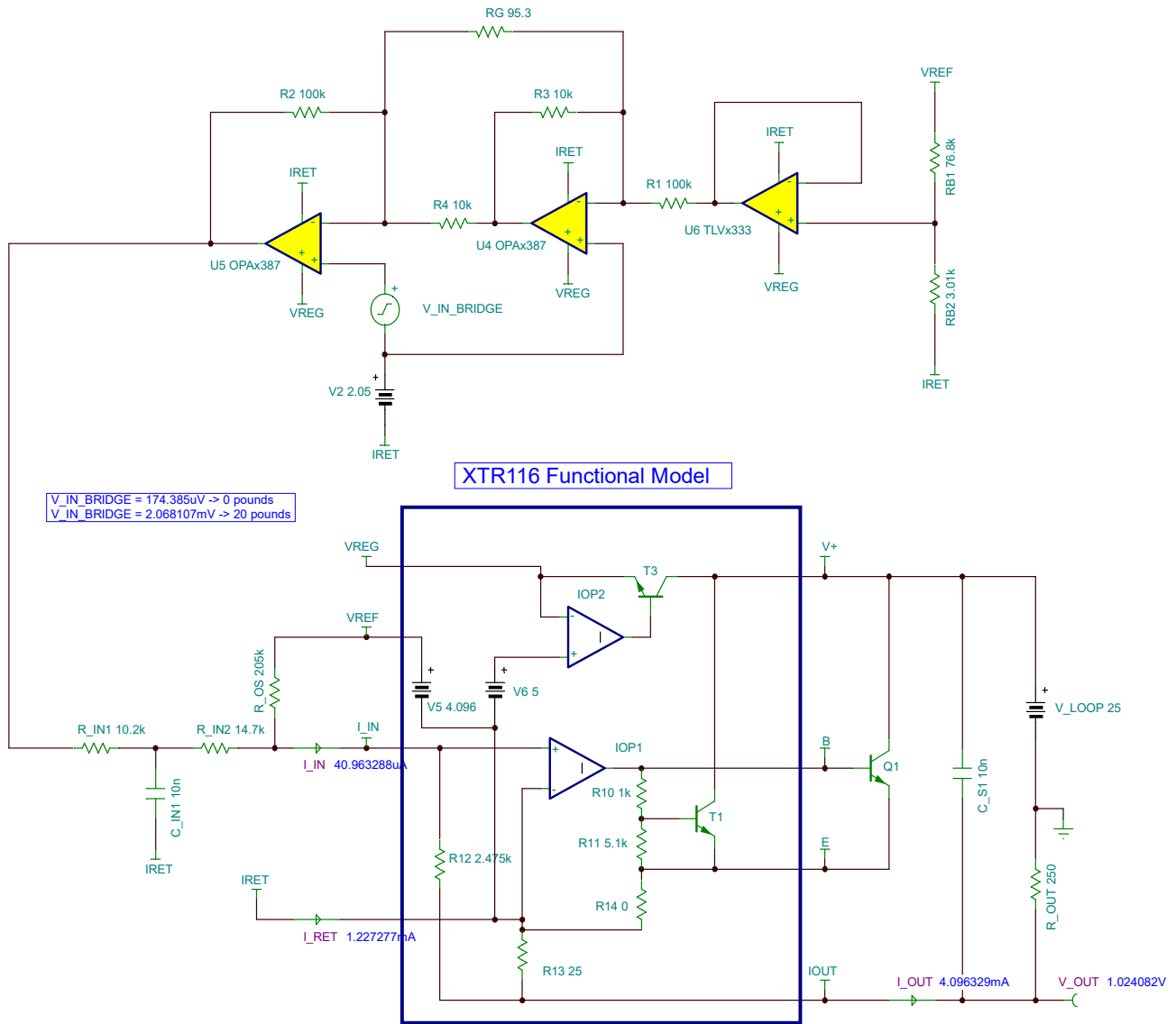


图 3-1. 输入为 0 磅时的 TINA TI 原理图和仿真

4 PCB 设计

在附录 2：PCB 详细信息中可以找到 PCB 电路原理图、电路层和物料清单。

该设计采用 0.1% 薄膜电阻和 X7R 陶瓷旁路电容器。用于滤波的所有电容器均为 C0G 陶瓷电容器。

此 PCB 设计遵循通用布局指导原则（例如，短布线、低阻抗接地连接、近距离去耦电容器）。在外部晶体管 (Q₁) 周围放置额外的覆铜可以帮助散热。

5 验证和测量的性能

图 5-1 展示了测得的输出电流与重量间的关系。测量结果与表 5-1 中的仿真值及计算值进行比较。测量结果的精度为 ±0.1%，如图 5-2 所示。附录 1：称重传感器和实验设置中详细介绍了称重传感器的实验设置。总电流消耗的计算公式如方程式 14 所示。

$$I_{TOTAL} = I_{BRIDGE} + I_{2AMP INA} + I_{INA REF} + I_{XTR} = (2mA) + (1.14mA) + (0.05mA) + (0.2mA) \rightarrow I_{TOTAL} = 3.39mA \quad (14)$$

表 5-1. 设计目标与计算性能、仿真性能和测得性能

| | 重量 | 目标值 | 计算值 | 仿真值 | 测得值 |
|------------------------|------|------|-----------|-----------|-----------|
| I _{out} (最小值) | 0 磅 | 4mA | 4.0959mA | 4.0963mA | 4.0994mA |
| I _{out} (最大值) | 20 磅 | 20mA | 20.1404mA | 20.1397mA | 20.1545mA |

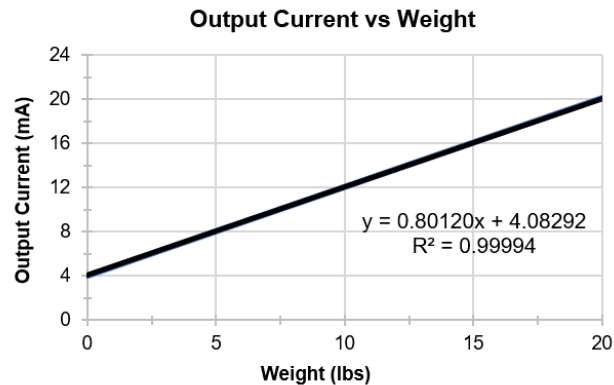


图 5-1. 测得输出电流与重量的传递函数

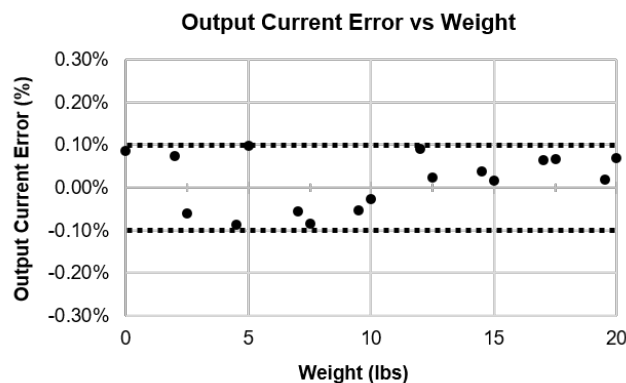


图 5-2. 输出电流误差与重量间的关系

6 总结

我们成功设计并测量了 4-20mA 电流环路变送器的高精度桥式放大器。表 6-1 提供了最终结果的摘要。

表 6-1. 主要设计标准和结果摘要

| 设计标准 | 结果和注释 |
|--|---|
| 使用 XTR 基准 (4.096V 和 5V) 为传感器和放大器电路供电 | 设计中仅使用 XTR 基准电压 |
| 总电流消耗小于 3.5mA | 总电流消耗 = 3.39mA |
| 重量范围 = 0 至 20 磅 → 输出电流 = 4mA 至 20mA | 重量范围 = 0 至 20 磅 → 输出电流 = 4.0994mA 至 20.1545mA。由于标准电阻值的限制，大约有 0.1mA 的失调电流。 |
| ±0.1% 精度 | 设计误差在 ±0.1% 以内 |

7 参考资料

- 德州仪器 (TI), [电桥测量基本指南](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [两线制 4-20mA 传感器变送器：背景和顺从电压 \(第 1 部分\)](#) 博客文章。
- 德州仪器 (TI), [TI 的模拟工程师计算器](#)。
- 德州仪器 (TI), [零漂移放大器：特性和优势](#) 应用简报。
- 德州仪器 (TI), [XTR11x 4-20mA 电流环路变送器](#) 数据表。

附录

附录 1：称重传感器和实验设置

惠斯通电桥传感器采用了 SparkFun Electronics SEN-13329 10kg 称重传感器。在图 8-1 所示的传感器上，红色、黑色、绿色和白色导线分别对应到各个惠斯通输出。

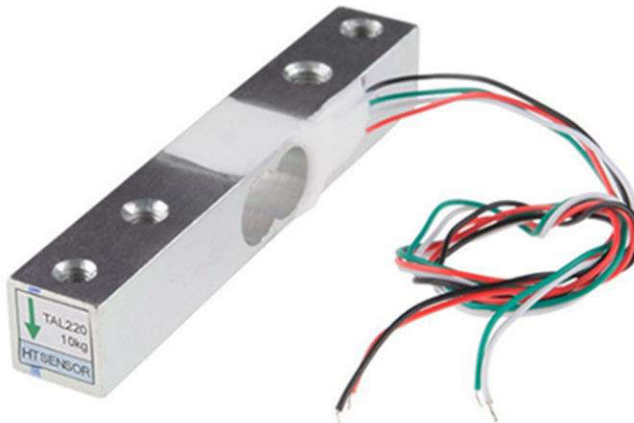


图 8-1. 选择的 SparkFun 称重传感器

称重传感器用螺钉固定在两块木头之间，确保传感器可以自由压紧。此步骤还构建了一个用于放置配重片和哑铃的稳定平台。称重传感器的导线通过一个 4 输入端子块连接到 PCB。图 8-2 展示了称重传感器设置。

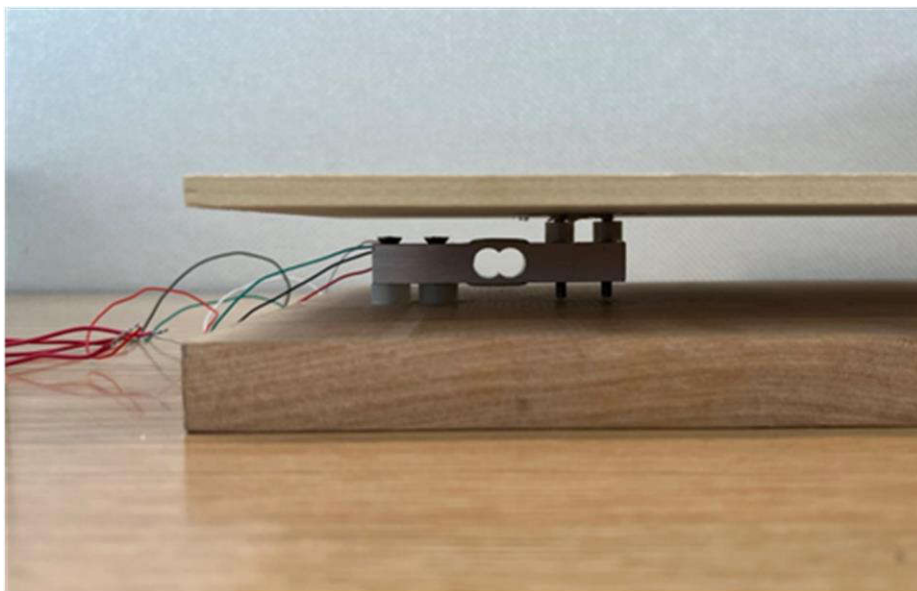


图 8-2. 称重传感器的机械设置

施加重量后，测量电桥的两个输出端 (INA 输出端和 XTR 输出端) 之间的电压。HP 3458A 万用表的程序设计为读取 100 个读数，对每个数据点均采用平均值。在每次测量后，务必移除所有重物，让称重传感器归零，以此来复位称重传感器，这一点至关重要。

附录 2 : PCB 详细信息

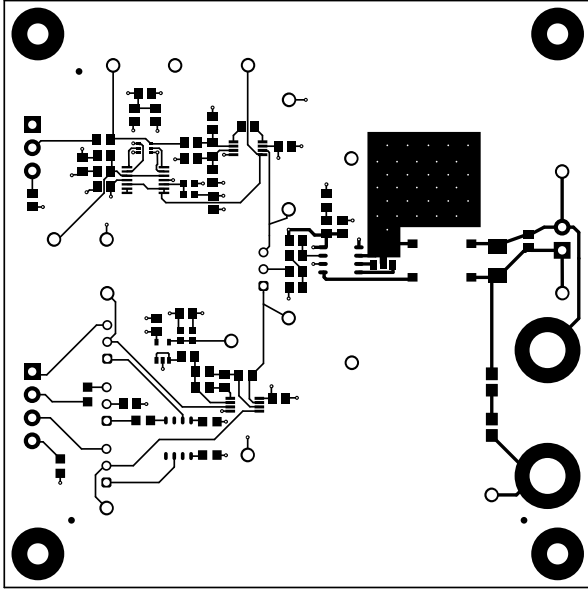


图 8-3. PCB 顶层

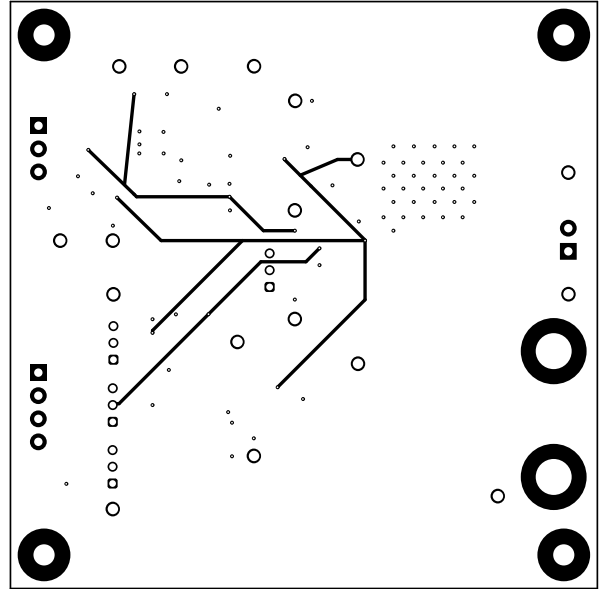


图 8-4. PCB 信号层 1

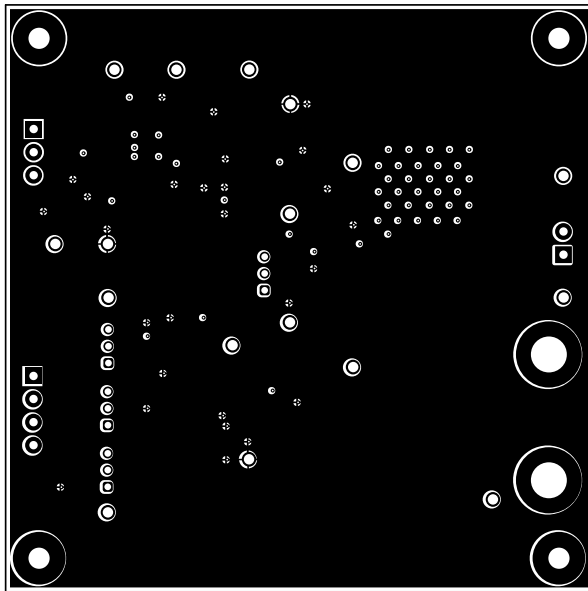


图 8-5. PCB 信号层 2

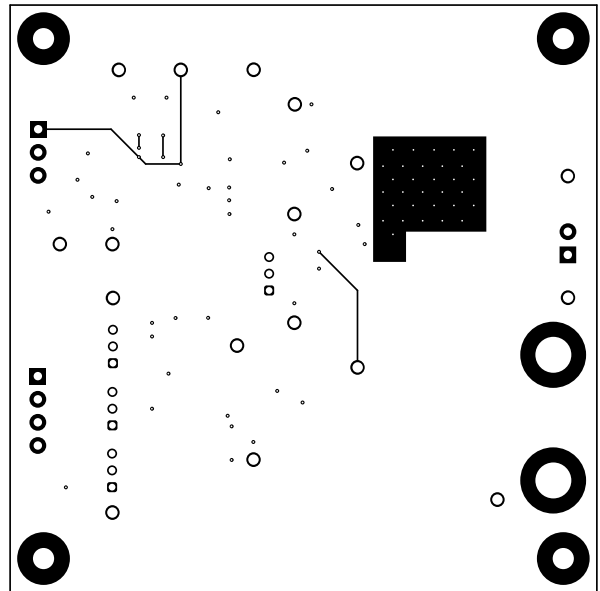


图 8-6. PCB 底层

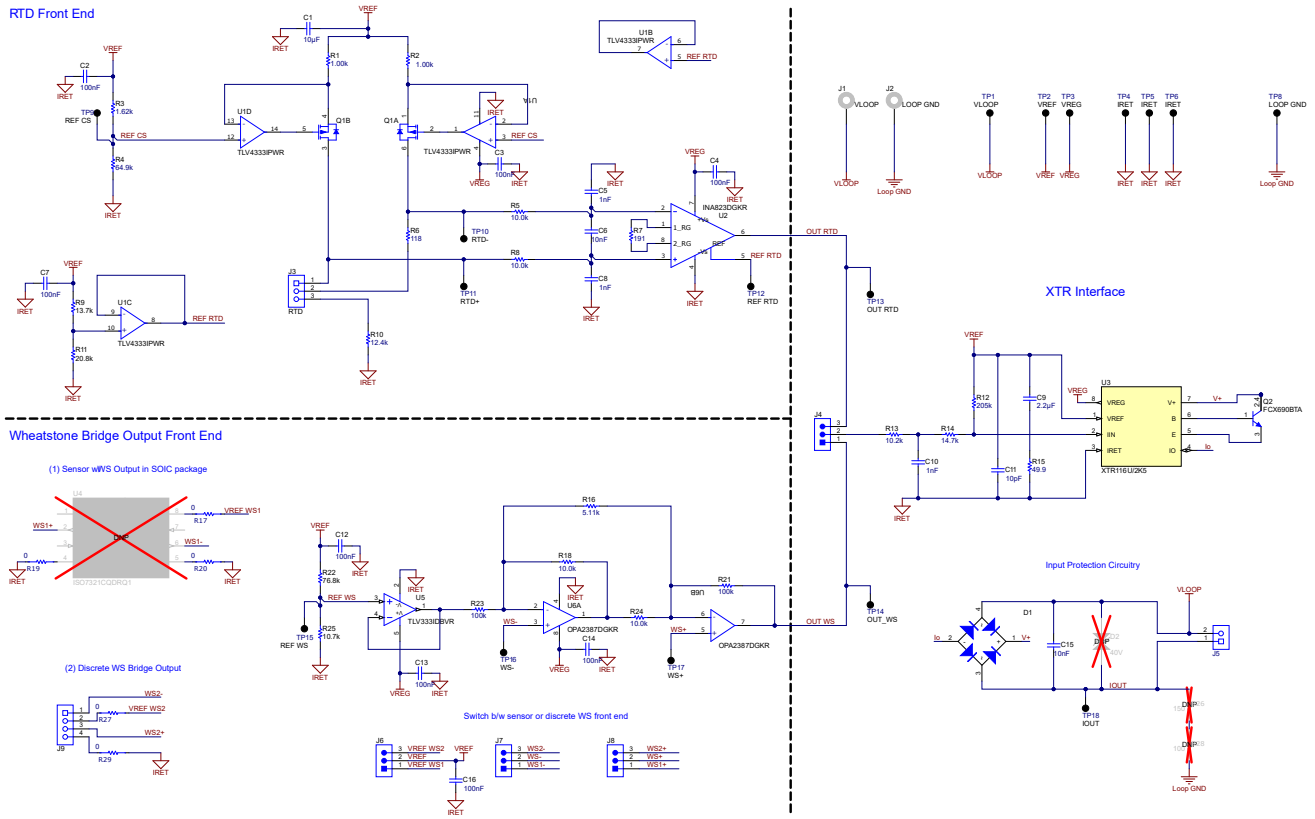


图 8-7. PCB Altium 原理图

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司