

摘要

本文档介绍了基于 TI 超声波技术的氧浓度感应解决方案。此装置能够在 21%-96% 的范围内感应读数值在 0.8% 以内的氧浓度，响应时间为 78ms，每秒采集 10 个样本时的功耗为 660 μ W，并使用便携式脉冲制氧机来产生测试所需的高氧气流。

此外，文中还提供了演示源代码和原理图，用于加快各种超声波应用的开发。可以从 [USSSW_Lib_Gas](#) 下载源文件。有关 MSP430™ MCU 以及如何用其实现各种终端设备的概述，请参阅 [MSP430 超低功耗感应和测量 MCU 概述](#)。

有关本应用报告中使用的示例代码和 GUI 的更多信息，请参阅 [适用于燃气流量测量的超声波感应子系统参考设计](#)。本应用报告中呈现的结果基于无修改的标准示例和 GUI。

[200kHz Jiakang 换能器](#) 可提供足够的灵敏度来检测各种流速下氧浓度的微小变化。

内容

| | |
|--------------------------------|---|
| 1 引言 | 2 |
| 2 设置和配置 | 4 |
| 2.1 EVM430-FR6043 GUI 配置 | 5 |
| 3 测试结果 | 6 |
| 4 提取 O ₂ 浓度 | 7 |
| 4.1 有关实现精度的说明 | 8 |
| 5 OpenSCAD 3D 测试装置 | 8 |
| 6 参考文献 | 9 |

插图清单

| | |
|-----------------------------------|---|
| 图 1-1. 超声波管 | 3 |
| 图 2-1. 打印装置和 EVM 实现 | 4 |
| 图 2-2. 系统图 | 4 |
| 图 2-3. EVM430-FR6043 GUI 配置 | 5 |
| 图 2-4. EVM-FR6043 GUI 高级配置 | 5 |
| 图 3-1. ADC 捕获和实验结果 | 6 |
| 图 3-2. 波形结果 | 6 |
| 图 4-1. 氧浓度提取 | 7 |

表格清单

| | |
|---------------------|---|
| 表 4-1. 电子表格示例 | 7 |
| 表 4-2. 性能和比较 | 8 |

商标

MSP430™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

现有的氧浓度传感器通常基于电化学或锆技术。虽然这是一项成熟的技术，但近期的技术趋势是提高集成度、减小尺寸和降低功耗，因此，设备制造商开始寻找可更好地满足这些新要求的其他实现方式。超声波传感器使用寿命长，不需要像电化学或锆传感器那样每 1-3 年更换或重新校准一次。此技术不仅限于氧感应，它还可以用于其他气体，如氮气、氢气、一氧化二氮、二氧化碳、氩气和氦气。这些传感器常见于通风机、浓缩器和燃烧监测器中。

TI 的 MSP430FR6043 超声波感应解决方案可在从小于 1LPM 到大于 190LPM 的流量范围内实现高精度，测量周期小于 10ms，提高了脉冲氧气应用的精度。

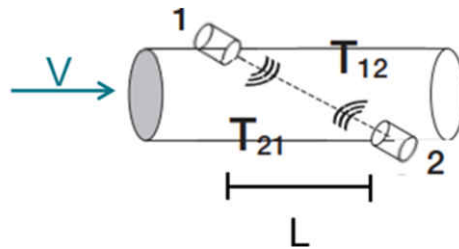
超声波浓度感应依赖于气体介质的声速与其摩尔量之间的关系（请参阅[方程式 3](#)）。这个原理可以外推到二元气体组分。如果存在的两种气体的摩尔量是已知的（在本应用中简化为氧气和氮气），则可以从混合样品的特定声速中提取每种气体的体积浓度（请参阅[方程式 4](#)）。

$$T_{12} = \frac{L}{C + V} \quad T_{21} = \frac{L}{C - V} \quad (1)$$

$$V = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{T_{12}} - \frac{1}{T_{21}} \right) \quad (2)$$

$$C = \sqrt{\frac{kRT}{M}} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{\frac{kRT}{C^2} - M_N}{M_{O_2} - M_N} \quad (4)$$



C = 气体介质中的声速

k = 特定热容比，对于空气约为 1.4

R = 通用气体常数

T = 温度，在此示例中约为 295.85 K

M = 混合气体的摩尔量

M_{O_2} = 摩尔量，约为 32

M_N = 摩尔量，约为 28

ρ = 体积浓度

L = 传感器距离，在此示例中约为 4.4cm

V = 气流速度

二元混合气体中的声速是使用 TOF 方程 (1) 确定的。对于低流速应用，例如制氧机或流速为 1LPM - 15LPM 的 CPAP 机器中的应用，气流速度 V 可忽略不计。在这些情况下， $C \gg V$ 。

TI 的超声波感应技术包括一种基于模数转换器 (ADC) 的交叉相关方法，使用频率信息来确定超声波飞行时间，其精度比现有的基于 TDC 的技术高得多。如需详细了解此独特算法的工作原理以及 TI 的超声波感应子系统 (USS)，请参阅 [TIDM-02003](#)。

TI 的超声波感应子系统支持单芯片解决方案，该解决方案可连接到超声波换能器以及运算放大器和多路复用器，以进行高分辨率流量测量。TI 的 USS 与低功耗加速器 (LEA) 和 MSP CPU 集成在一起，可实现平均电流消耗小于 20 μ A（每秒测量一次）的自主低功耗运行。

TI 的超声波感应子系统 (如图 1-1 所示) 包括一个可编程脉冲发生器 (PPG) 和一个带有可编程增益放大器 (PGA) 的高速 Σ - Δ 模数转换器, 该放大器可以自主激发和捕获超声波波形, 以便通过集成式低功耗加速器 (LEA) 进行后续处理。

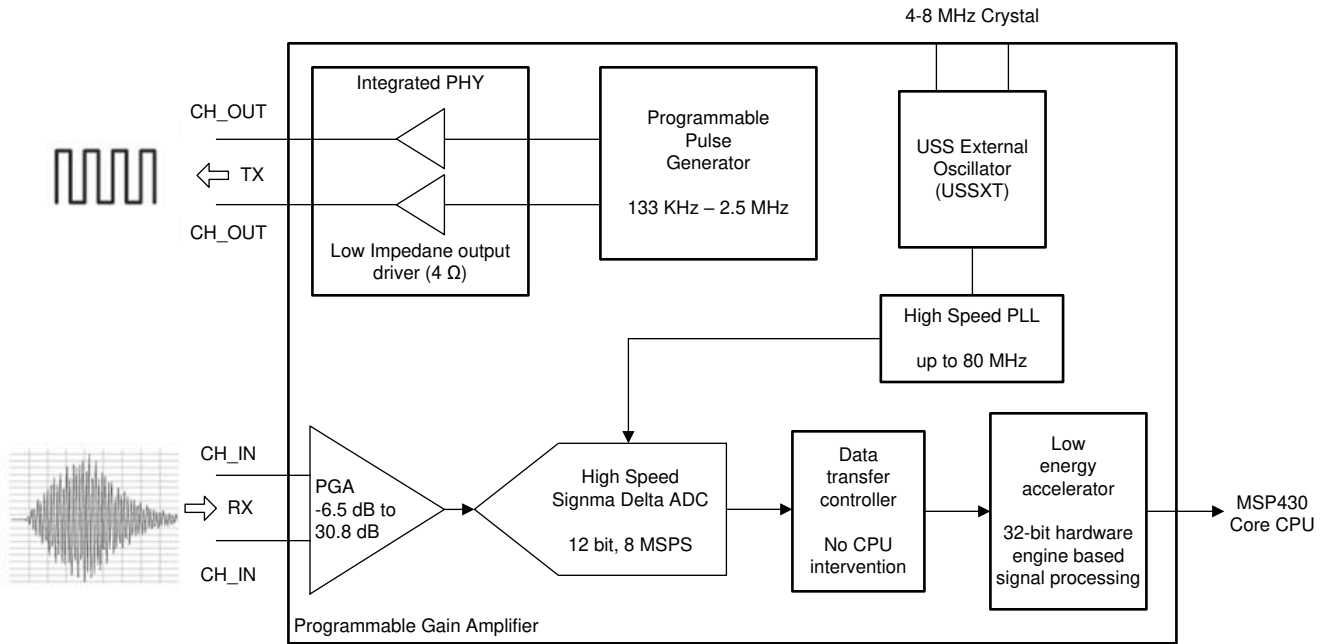


图 1-1. 超声波管

该超声波子系统 (如图 1-1 所示) 首先激发连接到 CH0_OUT 的“上行”换能器, 同时捕获来自连接到 CH0_IN 的“下行”换能器的波形。随后, 它激发连接到 CH1_OUT 的“下行”换能器, 同时捕获来自连接到 CH1_IN 的“上行”换能器的波形。然后, 低功耗加速器处理这些波形, 来确定上行飞行时间与下行飞行时间之间的差值。

2 设置和配置

EVM430-FR6043 与两个 Jiakang 200kHz 换能器搭配使用。本实验采用 3D 打印装置来安装换能器。

图 2-2 中描绘的系统图显示了使用 TMP117EVM 来测量温度。从方程式 3 中可以看出浓度取决于温度。事实上，对于系统中每 1°C 的测量误差，氧浓度读数就会产生约 2.75% 的误差。因此，推荐使用 TMP117 等精确度为 0.1°C 的温度传感器。

本实验中的温度是恒定的，为简单起见，温度仅采样一次。经核实，该实验中的温度为 22.7°C (295.85K)。使用本文档中所述的方程计算气体介质中的浓度或声速时，请务必使用开尔文度数作为温度单位。

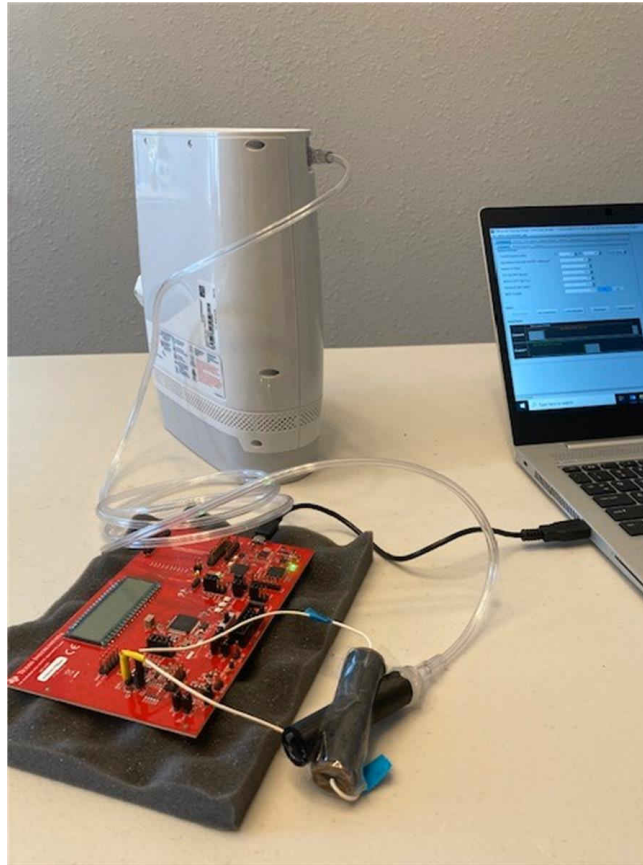


图 2-1. 打印装置和 EVM 实现

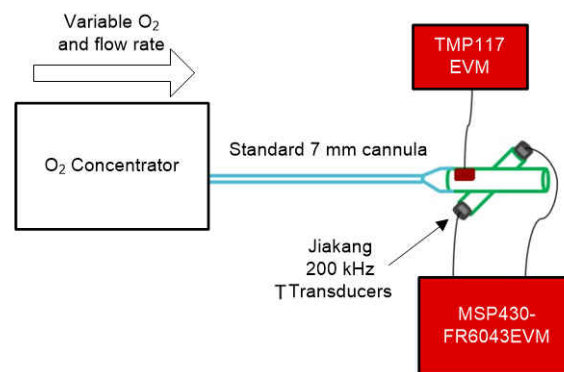


图 2-2. 系统图

2.1 EVM430-FR6043 GUI 配置

图 2-3 中显示了用于此氧浓度设置的超声波 GUI 配置。在此配置中，FR6043 配置为 200kHz 扫描 频率和 1MHz 信号采样频率。有关正确设置 GUI 参数以及确定所用换能器的激发频带的更多信息，请参阅《[燃气流量计用户快速入门指南](#)》。

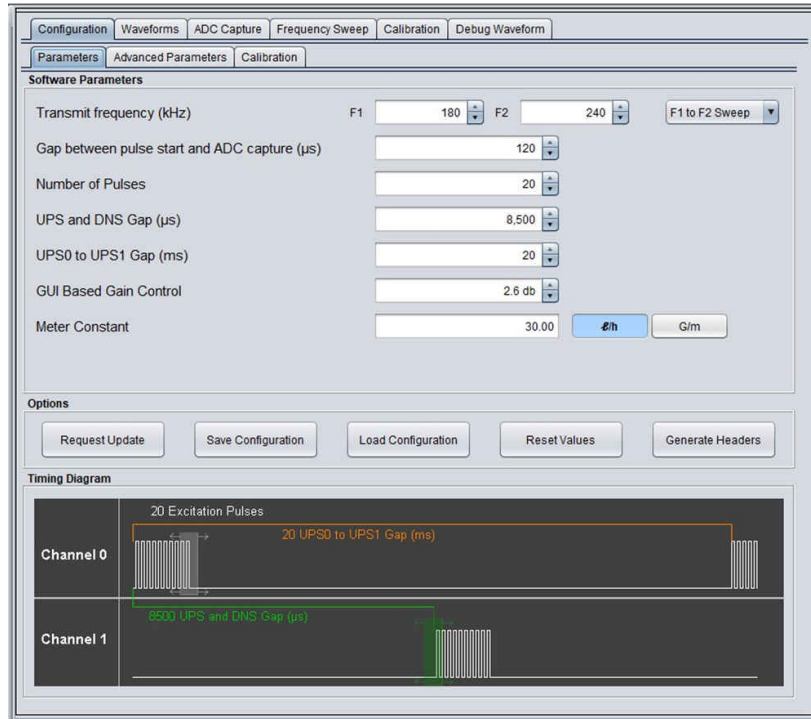


图 2-3. EVM430-FR6043 GUI 配置

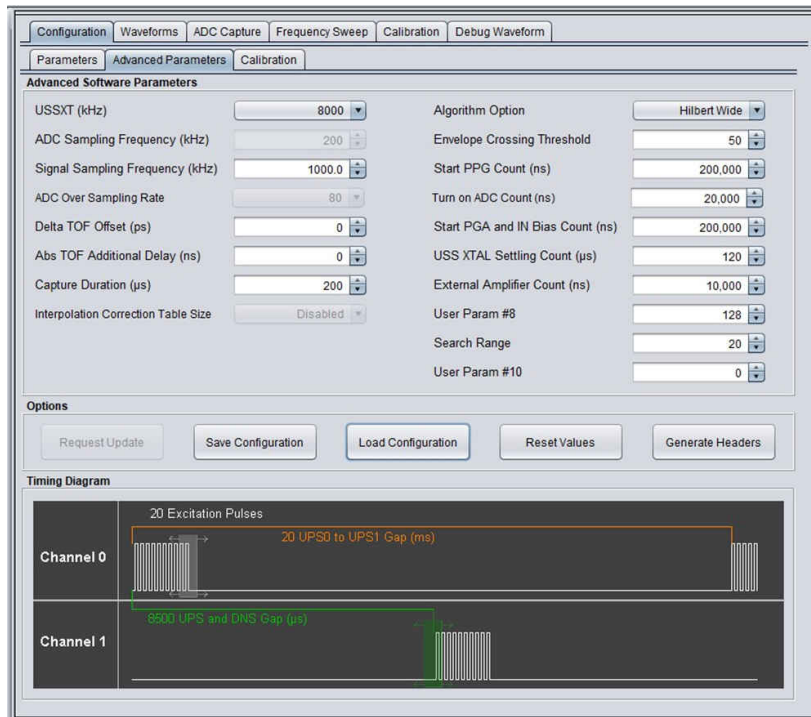


图 2-4. EVM-FR6043 GUI 高级配置

3 测试结果

图 3-1 中的测试结果显示了捕获的 ADC 波形，图 3-2 显示了器件从初始关闭状态开始运行时的传感器读数。圆圈部分显示了机器关闭时的绝对 TOF 值。此时，管道内的气体只有空气。空气中大约含有 21% 的氧气，因此用户可以将其用作系统的校准点。

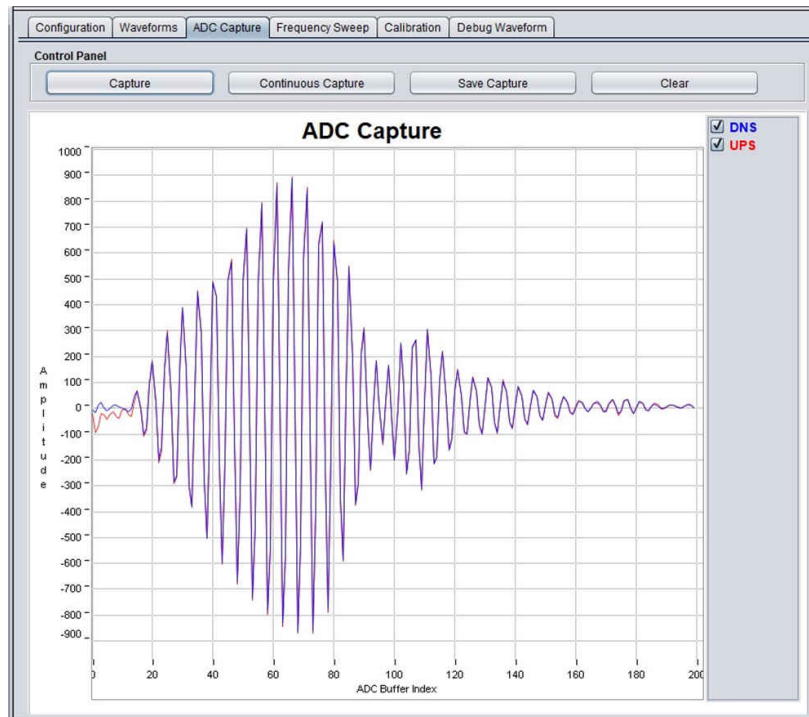


图 3-1. ADC 捕获和实验结果



图 3-2. 波形结果

可以在波形窗口中看到来自脉冲式制氧机的脉冲。为了提取氧浓度，将数据保存为 .csv 文件并在电子表格中进行转换。

4 提取 O₂ 浓度

表 4-1. 电子表格示例

| | A | B | C | D | E | F |
|---|--------------------------|--------------------------|------------|-------------------|-------------|------|
| 1 | 绝对 TOF UPS (μ s) | 绝对 TOF DNS (μ s) | 气流速度 (m/s) | 气体介质中的声速 (m/s) | 氧浓度 (%) | 校准参数 |
| 2 | 132.9382 | 132.9738 | -0.04426 | 330.936511 | 21.04397223 | 14.6 |

- 使用 TOF 值计算气流速度。
 - 对于单元 C2 “ $= (0.044/2) * (1/(B2*0.000001) - 1/(A2*0.000001))$ ” - 使用[方程式 2](#)。
- 使用 TOF 值计算气体介质中的声速。
 - 对于单元 D2 “ $= (0.044/(B2*0.000001) - C2)$ ”
 - 在 (1) $\rightarrow C = (L / T_{12}) - V$ 中求解 C
- 计算氧浓度。
 - 对于单元 E2 “ $= 100 * ((1.4 * 8.314 * 295.85 / (D2 + F2)^2) - (28 / 1000)) / (4 / 1000)$ ” - 使用[方程式 4](#)。
- 校准测量。
 - 已知此次测量中的氧浓度为 21% (空气)，因此更改单元 F2 的值，直到单元 E2 等于 21%。在本例中，许多采样点是用空气采集的并取平均值。
 - 校准参数“14.6”现在可以应用于整个数据集。
 - 此校准参数是此特定装置所特有的。任何新的实现方案都必须始终执行校准程序。
- 对数据集应用校准后的方程。

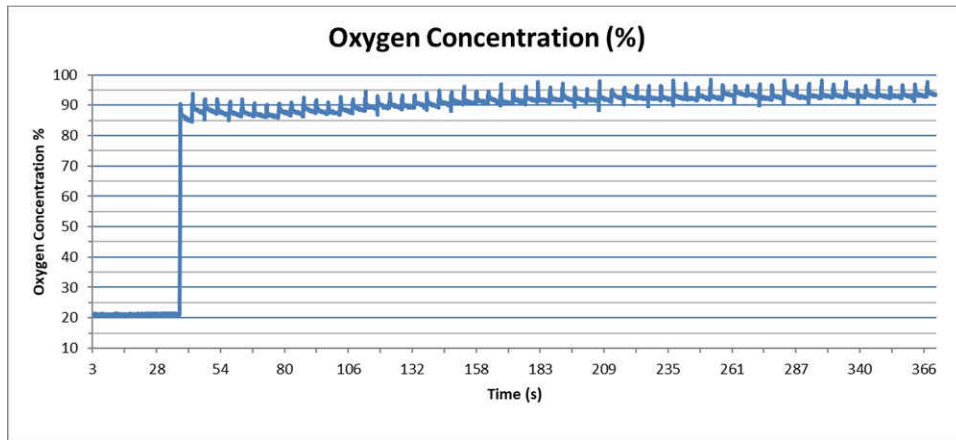


图 4-1. 氧浓度提取

从图 4-1 中可以看出，氧浓度从 21% 上升到 93.4%。根据制造商针对所用具体单元认证报告，我们的系统比指定的氧浓度低 0.8%。这一切都是使用空气作为单个校准点来实现的，并且可以通过 MSP430FR6043 轻松实现。

表 4-2. 性能和比较

| 参数 | 铅传感器 | 竞争对手的 USS 解决方案 | TI 的 USS |
|--------|----------------|----------------|------------------|
| 测量范围 | 0.1% - 100% | 0% - 100% | 0% - 100% |
| 精度 | ± 3% - 0.5% FS | ±3 - 1.8% FS | ± 1.7% - 0.5% RD |
| 功耗 | 1 - 10W | 0.6W | 660µW @10SPS |
| 唤醒时间 | 约为 60s | 不适用 | 不适用 |
| 响应时间 | 4s - 30s | 0.5s | 78ms |
| 输出稳定时间 | 2 - 10 分钟 | 不适用 | 不适用 |
| 使用寿命 | 1-3 年 | > 5 年 | > 5 年 |

4.1 有关实现精度的说明

在此特定实验中，使用空气作为单个校准点实现了 0.8% 的精度。精度规格范围为 ± 1.7% - 0.5% RD 的原因是精度非常依赖于换能器装置的几何形状和架构。因此，这些是在一定的流速和浓度范围内使用不同尺寸的管道通过实验获得的精度值。这些值应可以视作可实现的精度。

5 OpenSCAD 3D 测试装置

OpenSCAD 是一款免费提供的 CAD 工具，可以参数化生成 3D 模型，并将其导出以用于 3D 打印。本文档中使用的参数化 3D 测试装置可从 TI 获取。

这些实验中使用的 OpenSCAD 参数化设计如下所示：

```

TRANSDUCER_RADIUS=8.25;
PIPE_RADIUS=8.5;
PIPE_LENGTH=70;
CHANNEL_WIDTH=6;
CHANNEL_HEIGHT=12;
ULTRASONIC_ANGLE=35;
ULTRASONIC_LENGTH=60;

union(){
  difference(){
    union(){
      translate ([0, 0, -25])
      rotate([0, 0, 0])
      cylinder (h = PIPE_LENGTH, r = PIPE_RADIUS);

      translate ([-(PIPE_RADIUS+9), .1, -14.9])
      rotate([0, ULTRASONIC_ANGLE, 0])
      cylinder (h = ULTRASONIC_LENGTH, r = TRANSDUCER_RADIUS+2);
    }
  }
  union(){
    translate ([-(CHANNEL_HEIGHT/2), -CHANNEL_WIDTH/2, -25])
    rotate([0, 0, 0])
    cube ([CHANNEL_HEIGHT,CHANNEL_WIDTH,PIPE_LENGTH]);

    translate ([-(PIPE_RADIUS+9), 0, -15])
    rotate([0, ULTRASONIC_ANGLE, 0])
    cylinder (h = 150, r = TRANSDUCER_RADIUS);
  }
  union(){
    translate ([-(CHANNEL_HEIGHT/2), -CHANNEL_WIDTH, -15])
    rotate([0, 0, 0])
    cube ([CHANNEL_HEIGHT,CHANNEL_WIDTH/2,PIPE_LENGTH-20]);

    translate ([-(CHANNEL_HEIGHT/2), CHANNEL_WIDTH/2, -15])
    rotate([0, 0, 0])
    cube ([CHANNEL_HEIGHT,CHANNEL_WIDTH/2,PIPE_LENGTH-20]);
  }
}

```


6 参考文献

- 德州仪器 (TI) : [燃气流量计用户快速入门指南](#)
- 德州仪器 (TI) : [适用于气体流量测量的超声波感应子系统参考设计](#)
- [超声波流量换能器](#)
- [OpenSCAD](#)

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司