

### 摘要

本文档描述了使用 TI 超声波解决方案设计和测试燃气表的过程。该过程包括换能器选择、迭代管设计和配置以及涉及灵敏度和功耗优化的校准后流量测试。

此外，文中还提供了演示源代码和原理图，用以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](#)。

### 内容

1 引言 .....	2
1.1 TI 的超声波感应解决方案 .....	2
2 设计过程 .....	2
2.1 传感器选择 .....	3
2.2 流量管设计 .....	3
2.3 优化脉冲数和激发频率 .....	4
3 设计指标和校准后流量测试 .....	5
3.1 可重复性 .....	5
3.2 精度 .....	5
3.3 灵敏度和功耗优化 .....	6
4 OpenSCAD 设计文件 .....	7
5 参考文献 .....	7

### 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

目前，燃气表通常依靠机械隔膜来测量流速。这类仪表的结构导致无法检测到微小气流（或泄漏），并且制造成本通常较高。

超声波技术非常适合燃气表，因为流量管中声速的差异可提供足够的分辨率来检测小流量，这是基于振膜的解决方案无法检测到的。市场上常见的超声波气体计量方法有两种：基于时间数字转换 (TDC) 和基于模数转换 (ADC)。

基于 ADC 的方法与 TDC 过零方法相比具有以下优势：

- 更高的精度。相关方法可用作抑制噪声的数字滤波器，从而使标准偏差降低约三倍。类似地，相关方法也可用作抑制其他干扰（如线路噪声）的低通滤波器。
- 更小的零流量漂移。在一系列发射频率（而不是仅一个频率）上激励换能器可以解决温度引起的共振偏移并减少燃气表的零流量漂移。

### 1.1 TI 的超声波感应解决方案

TI 的超声波感应技术包括一种基于 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定。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 $\mu$ 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（请参阅图 1-1）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  $\Sigma$ - $\Delta$  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。

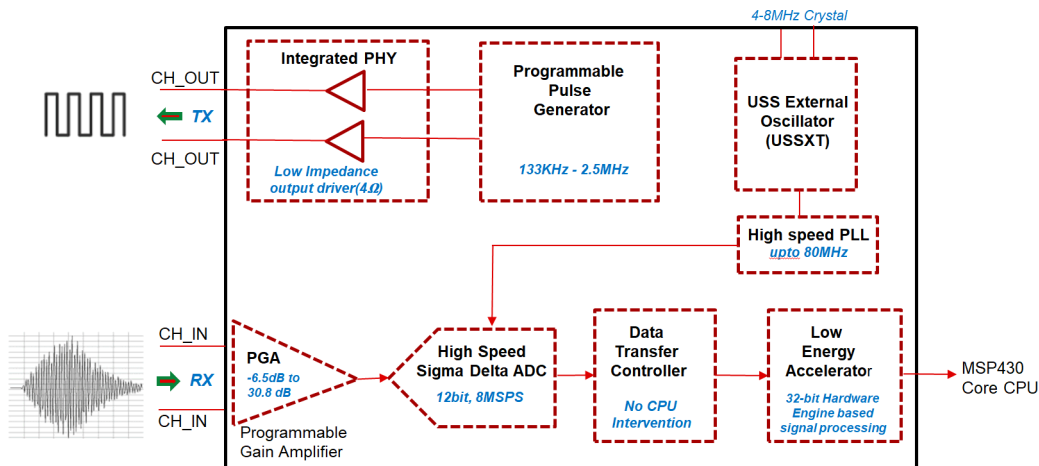


图 1-1. TI 的超声波子系统

该超声波子系统首先激发连接到 CH0\_OUT 的“上行” (UPS) 换能器，同时捕获来自连接到 CH0\_IN 的“下行” (DNS) 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，低功耗加速器会处理这些波形，以确定上行飞行时间与下行飞行时间之间的差值。

## 2 设计过程

图 2-1 显示了采用 TI 超声波解决方案的 7000l/h（升/小时）燃气表系统的整体设计过程。该过程从低流速下的换能器评估开始，然后在更高的流速下进行迭代管优化和配置调优，最后通过涉及灵敏度和功耗优化的校准后加热室测试完成。

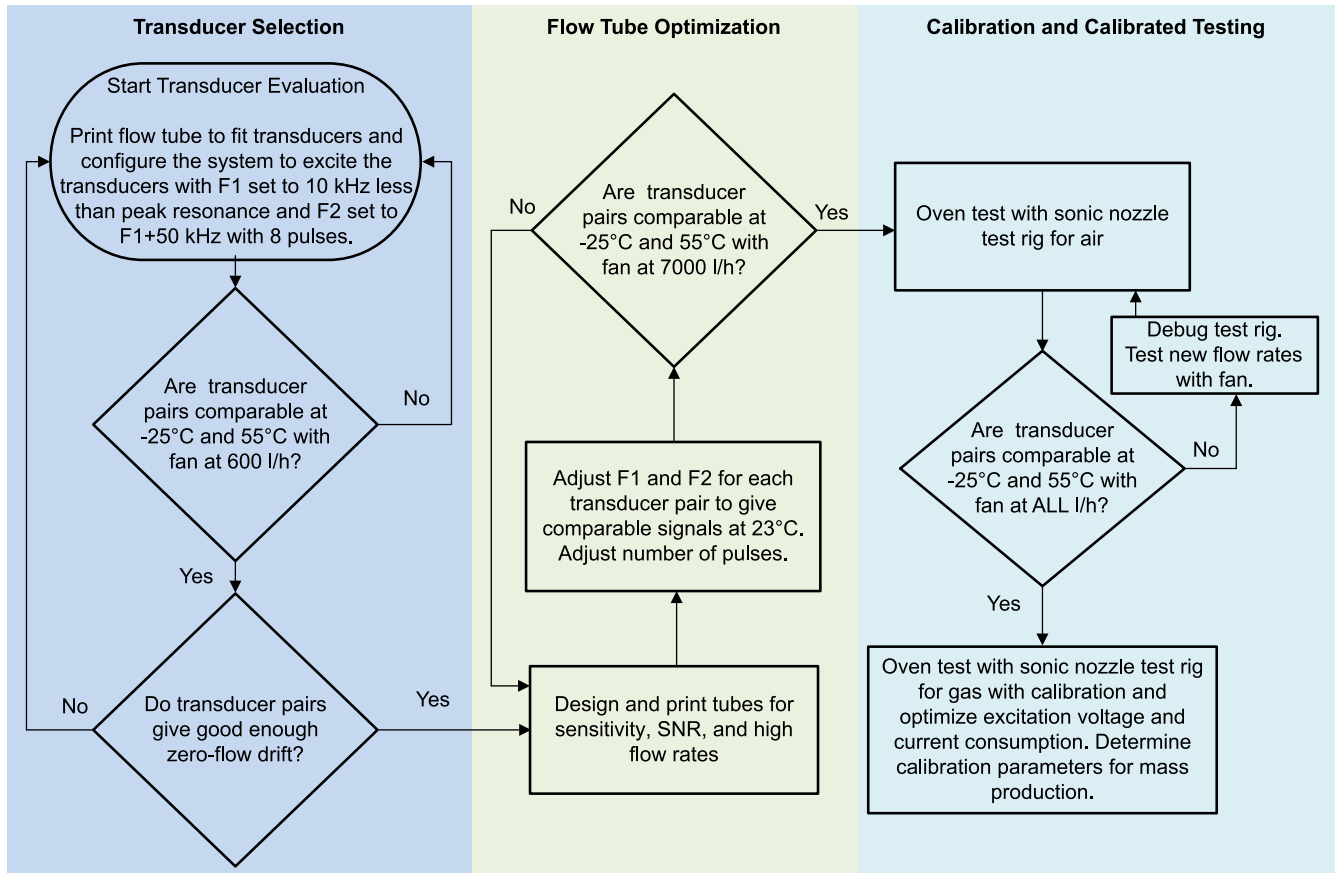


图 2-1. 设计过程

## 2.1 传感器选择

换能器对之间的可重复性对于能否进行大规模生产至关重要。在选择换能器时，频率响应随温度的变化是关键考虑因素，因为在整个工作温度范围内校准每个单独的仪表成本过高。校准后气体测试成本高昂，应在完成换能器评估测试后进行。因此，最好选择在温度范围内表现出更类似的频率响应的换能器。在评估频率响应随温度的变化后，给定管道设计中换能器的灵敏度、带宽和零流量漂移也是应予以评估的关键方面。有关换能器频率响应变化的简单对比加热室测试，请参阅《换能器选择指南》。

为选择理想换能器，可将次优管道设计用于低流速测试（例如 600lph）。使用 TI 的 3D 可打印设计时，修改 TRANSDUCER\_RADIUS 参数以适应被评估的换能器。一旦确定了足够好的换能器，就应该探索管道设计的优化以获得更高的流速。。

## 2.2 流量管设计

市场上常见的超声波管设计有两种类型：跨轴式和反射式。跨轴式管设计的位置换能器与气体流过的通道以一定的角度彼此面对。反射式管的位置换能器旨在在到达另一个换能器之前将超声波能量从管内的表面反射出去。

虽然跨轴式管设计可以在较短的超声波路径上实现更强的超声波信号，但反射式管设计能够在较长的超声波路径上实现更高的灵敏度，以牺牲超声波信号强度为代价。图 2-2 显示了这两种类型的超声波管设计。

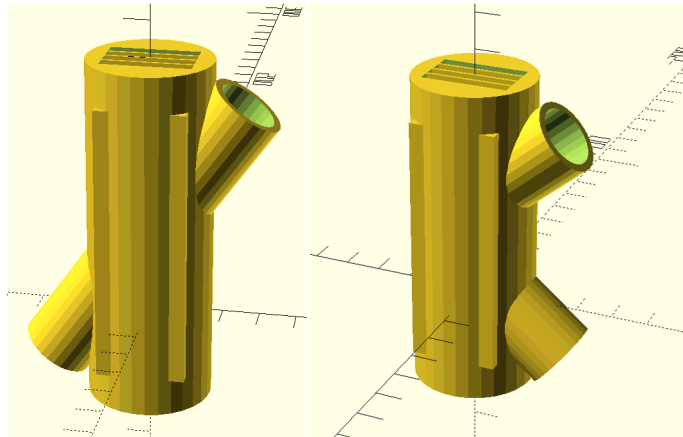


图 2-2. 跨轴式和反射式流量管道设计

在这两种设计中，有四个关键设计考虑因素会显著影响设计特性：流道尺寸、超声波角度、准直元件和接管板。表 2-1 显示了这四个元素如何与给定设计的精度、灵敏度和信号强度相关联。

表 2-1. 管道设计注意事项

属性	精度	灵敏度	信号强度
超声波角度	✓	✓	
通道尺寸		✓	✓
接管板	✓		✓
准直元件	✓		✓

流道的高度和宽度显著影响给定管设计的特性。虽然减少通道的宽度可以提升气体通过管道时的流动速度以提供更大的灵敏度，但这样做也会降低超声波信号的强度。增加通道的高度也可以增加管道的灵敏度，但以牺牲超声波信号强度为代价。

超声波信号与气体接触的角度也会对管道的灵敏度产生重大影响。与流量密切相关的超声波角度会提供更高的灵敏度，但以牺牲超声波信号强度为代价。如果超声波角度太小，测量的准确性也会受到影响。

通常引入准直元件以衰减管道内的超声波反射，同时给出气体通过管道时的流动速度的代表性测量值。添加这些元素可以提高给定设计的准确性，但以牺牲信号强度为代价。

接管板通常用于最大限度地减少与换能器表面的流动相互作用。虽然它们可以在更高的流速下提供更准确的测量，但也会降低超声波信号强度。

### 2.3 优化脉冲数和激发频率

有多种配置参数可以针对功耗、流量性能、标准偏差和零流量漂移进行优化。这四个方面的关系以及相关的配置参数见表 2-2。发射频率和脉冲数是非常关键的参数，因为它们对流量性能（和精度）的影响非常大。有关如何配置这些参数和其他非关键参数的详细信息，请参阅《燃气流量计快速入门指南》。

给定换能器对的发射频率会显著影响温度范围内的精度。该频率可能需要偏移几 kHz，以确保超声波信号在 23°C 时具有可比性。这基于这样一个假设，即每个换能器的频率响应在工作温度范围内可能会发生几 kHz 的变化。阻抗未随温度发生显著变化的换能器对可能不需要进行这种发射频率调谐。

表 2-2. 调谐配置

参数	参数的变化影响...			
	功耗	流量性能	标准差	零流量漂移
Number of Pulses ( 脉冲数量 )	✓	✓	✓	✓

表 2-2. 调谐配置 (continued)

参数	参数的变化影响...			
	功耗	流量性能	标准差	零流量漂移
UPS0 to UPS1 Gap ( UPS0 至 UPS1 间隔时间 )	✓			
GUI Based Gain Control ( 基于 GUI 的增益控制 )			✓	✓
Transmit Frequency ( 发射频率 )		✓	✓	✓
Envelope Crossing Threshold ( 包络交叉阈值 )		✓		
Capture Duration ( 捕获持续时间 )	✓	✓		✓

确定理想发射频率后，可以增加脉冲数，以在低流量测量中提供较低的标准偏差。额外的超声波能量会对高流量测量的准确性产生负面影响，因此在进行更高级的测试之前，应在极端温度和更高流速下测试脉冲数量的增加。

### 3 设计指标和校准后流量测试

完整燃气表的关键设计指标包括可重复性、准确性、灵敏度和电流消耗。

#### 3.1 可重复性

仪表的可重复性与在大规模生产线上经济高效地制造、校准和鉴定这些仪表有关。燃气表必须在宽温度范围内（从  $-25^{\circ}\text{C}$  到  $55^{\circ}\text{C}$ ）运行，因此换能器在该温度范围内的频率响应是可重复性的一个关键方面。如果频率响应的变化太大，则无法在室温下采用具有成本效益的校准方法。《换能器选择指南》中介绍了一种用于确定给定换能器在代表性生产批次中的可重复性的简单方法。

#### 3.2 精度

仪表的精度与在给定流速随温度变化时可以测量的误差百分比有关。燃气表具有三个流量范围，其精度要求可能会有所不同。管道设计中给定换能器的零流量漂移决定了仪表能够检测到的最小流量（或泄漏），通常精度要求为  $\pm 10\%$ 。有关零流量漂移测试的详细信息，请参阅《TIDM-02003 用户指南》。对于欧洲市场，燃气表的低流量范围通常在每小时 40 升 (lph) 和 600lph 之间，精度要求为  $\pm 3\%$ 。燃气表的高流量范围通常在 600lph 和 7000lph 之间，精度要求为  $\pm 1.5\%$ 。

给定管设计的精度测试通常首先在有空气的加热室内进行，加热室设置为工作温度限值（除室温之外的），并使用校准后的音速喷嘴测试装置提供通过燃气表的确定性流量。在足够多的仪表上进行代表性温度测试后，大规模生产校准仅限于室温下的流量测试。在 40lph 到 7000lph 的流速范围内进行持续几分钟的测量，温度通常在  $-25^{\circ}\text{C}$  到  $55^{\circ}\text{C}$  之间，以确定在多个仪表中报告的流量变化。图 3-1 显示了一个音速喷嘴流量测试系统。

该系统涉及多个气动阀和一个可同时测试多个仪表的大型加热室，因此测试设备经常会产生噪音，从而对超声波测量结果产生不利影响。建议使用高精度风扇进行初步测试，然后在温度稳定后关闭加热室以区分燃气表和测试装置问题。

在用空气进行充分的测试后，使用一个单独（更复杂）的测试装置，引入各种压缩天然气混合物。由于甲烷衰减的增加和飞行时间的缩短（这可以将接收到的超声波信号移动到发射换能器的激发“振铃”时区），经常会在空气测试中未发现的问题。由于甲烷的飞行时间缩短，如图 3-2 所示的二次反射可能会更早发生，并且需要对上游和下游测量之间的时间进行一些调整。



图 3-1. 音速喷嘴测试和校准系统

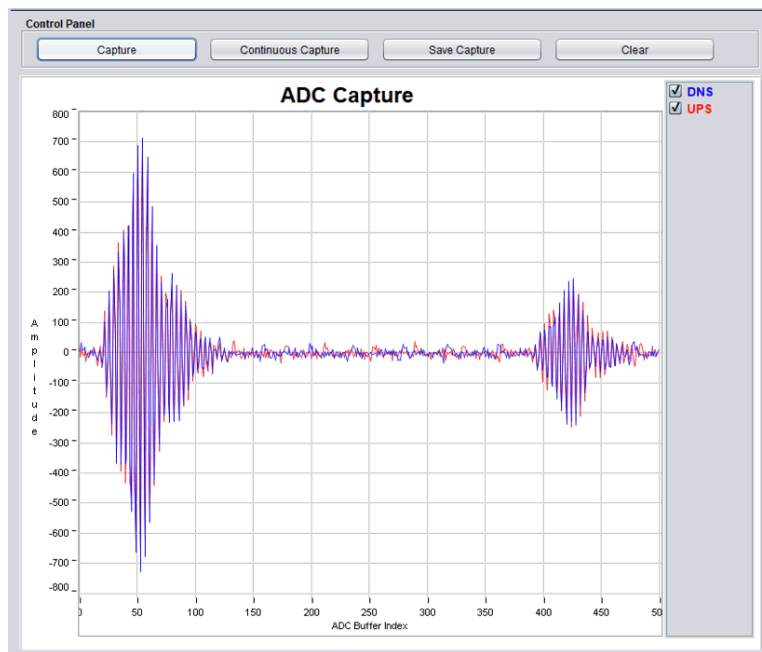


图 3-2. 二次反射

### 3.3 灵敏度和功耗优化

仪表的灵敏度与测量的标准偏差有关。如前所述，基于 ADC 的方法提供的标准偏差可能只有 TDC 方法的三分之一。具有更长超声波路径（或更低超声波角度）的管道设计可以提供更高的灵敏度，前提是超声波信号强度足以克服环境噪音。《TIDM-02003 用户指南》介绍了如何测量标准偏差。可以增加换能器的激发电压来降低在较低流速和高浓度甲烷应用中测量的标准偏差。

燃气表的电流消耗通常用功率分析仪测量。《TIDM-02003 用户指南》提供了测量的典型电流曲线，在 1 秒测量周期内平均消耗小于 20 $\mu$ A。通过降低进行绝对飞行时间测量的频率，可以进一步降低电流消耗。需要进行多次测量才能在低流速下获得平均值，因此具有更高灵敏度（和更低标准偏差）的管道设计可以通过减少测量次数（和降低电流消耗）来提供更准确的结果。

## 4 OpenSCAD 设计文件

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。本文中使用的参数化 3D 流量管可从 <https://www.ti.com/cn/lit/zip/slaa974> 获得。

## 5 参考文献

1. [USSSW\\_Lib\\_Gas](#)
2. [适用于气体流量测量的超声波感应子系统参考设计 \(TIDM-02003\)](#)
3. [适用于燃气流量测量的超声波感应子系统参考设计用户指南](#)
4. [换能器选择指南](#)
5. [OpenSCAD](#)
6. [MSP430 MCU 超声波感应设计中心](#)

## 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