

Application Report

USS 水流流速校准



Eddie LaCost, Srinivas Lingam

MSP430 Applications

摘要

超声波水流计量的测量精度受温度影响，尤其是在流速低于 100lph 时。在 5-55°C 温度范围内，这些误差可高达 10-15%，而目标规格的精度约为 $\pm 1\%$ 。

流速大于 100lph 时，温度敏感性较低，大概是因为水流已经变为湍流。本应用报告介绍了使用 MSP430FR604x 超声波感应微控制器在 5-55°C 范围内的所有温度和流速下满足 $\pm 1\%$ 精度要求的离线校准和在线补偿技术。此精度是由不同温度和流量下的二维多项式查找表实现的。这些系数是使用四边形双线性拟合方法（包括使用多个仪表进行测量）生成的。然后，本文档提出了一种有效的光线投射算法，可在运行时用于搜索相应的插值系数。测量结果表明，这些算法均能达到目标精度。本文档中讨论的校准在 USSLib 2.30.00.xx 版或更高版本中提供，并可从以下位置下载：

内容

1 不带温度补偿的流量校准.....	2
2 校准算法.....	2
3 校准过程.....	8
4 结果和结论.....	8
5 参考文献.....	11

插图清单

图 2-1. 典型的超声波水表.....	2
图 2-2. 典型波形到达和绝对飞行时间定义.....	2
图 2-3. DN20 流量计在 10°C 和 45°C 下的流量误差曲线.....	3
图 2-4. 温度与水中的声速间的关系.....	4
图 2-5. 代表性四边形图.....	5
图 2-6. 测试了多个 Spool 的 3D 视图.....	6
图 4-1. 校准四边形.....	9
图 4-2. 30°C 时的校准和未校准体积流量误差.....	10

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 不带温度补偿的流量校准

在温度范围很小或温度变化相对流量精度影响不大的应用中，可实施多点或单点校准，不必使用温度补偿。

《USS 设计中心用户指南》中的校准部分详细介绍了此实现方案。

2 校准算法

图 2-1 所示为一个典型的超声波水流量计。

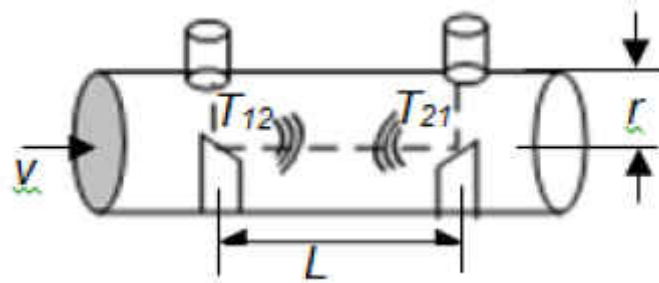


图 2-1. 典型的超声波水表

方程式 1 中给出了绝对飞行时间的基本流量计公式。

$$T_{12} = \frac{L}{c + v \cos(\theta)} \quad T_{21} = \frac{L}{c - v \cos(\theta)} \quad (1)$$

其中， T_{12} 是传感器 1→2 方向的绝对飞行时间， T_{21} 是传感器 2→1 方向的绝对飞行时间， c 是介质（水）中的声速， L 是传感器之间的间距， v 是介质的流速。

德州仪器 (TI) 开发了一种使用 ADC 方法捕获所接收波形的水流量计量解决方案。图 2-2 所示为超声波水流量计由模数 (ADC) 捕获的典型接收波形，采用了 1MHz 传感器和 20 个传输脉冲。

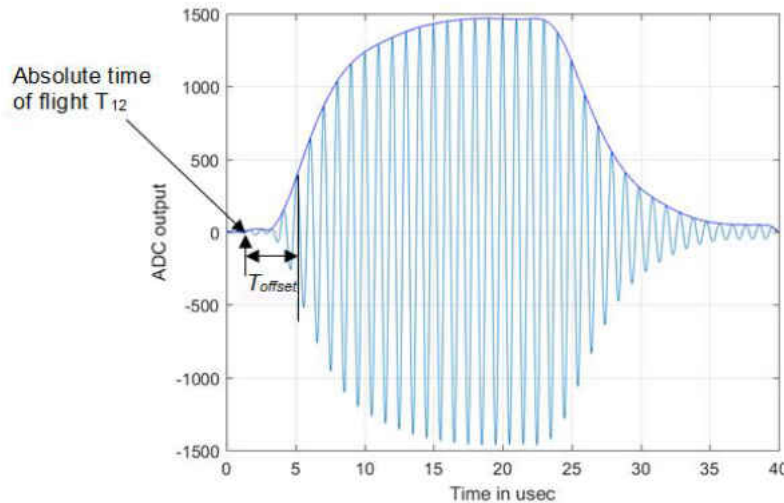


图 2-2. 典型波形到达和绝对飞行时间定义

水流速度可通过方程式 2 求解。

$$v = \frac{L}{2} \times \left(\frac{1}{T_{12}} - \frac{1}{T_{21}} \right) = \frac{L}{2} \times \left(\frac{T_{21} - T_{12}}{T_{21} T_{12}} \right) = \frac{L}{2} \times \left(\frac{\Delta T}{T_{21} T_{12}} \right) \quad (2)$$

根据横截面积，体积流速 (F) 现在与流体的速度 v 成正比。该比例常数可在室温 (25°C) 下根据校准速度计算得出。

同样，水中的声速可通过 [方程式 3](#) 求解。

$$C = \frac{L}{2} \times \left(\frac{1}{T_{12}} + \frac{1}{T_{21}} \right) \quad (3)$$

水流量规范 [2] 要求体积流量计算误差在大约 100lph 的低流速下为 $\pm 5\%$ ，在更高的流速下为 $\pm 2\%$ 。但是，某些应用和标准可能有更严格的要求，例如低流速下为 $\pm 2\%$ ，高流速下为 $\pm 1\%$ 。我们提出了可提高最终精度的常规方法。一般来说，为了满足更严格的要求，此处使用的校准表会更大。

图 2-3 给出了 20mm 直径 DN20 流量计的体积流量测量值在不同温度下与流量的函数关系。

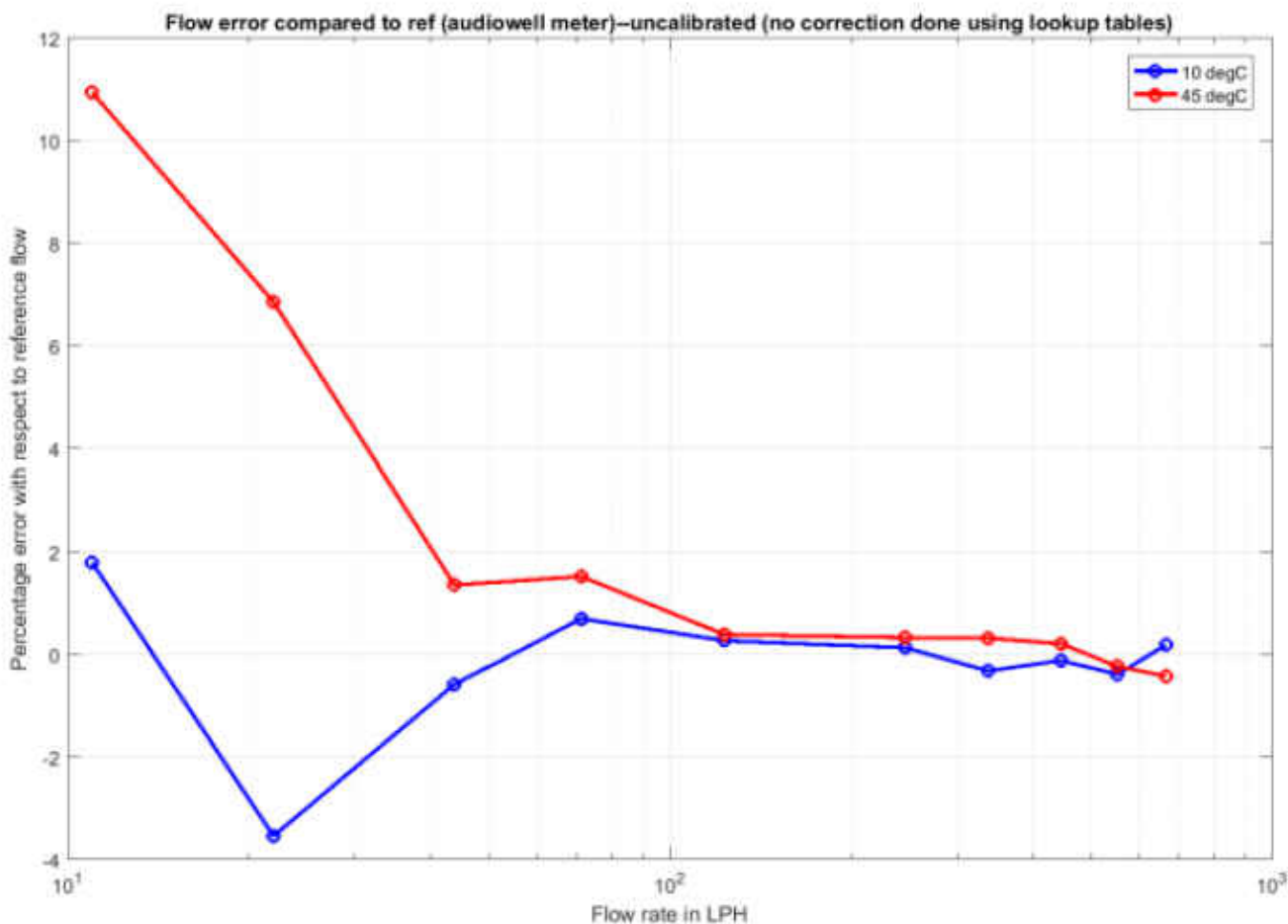


图 2-3. DN20 流量计在 10°C 和 45°C 下的流量误差曲线

NOTE

通常，误差曲线取决于水表主体设计的细节。误差曲线适用于测试中使用的特定仪表主体，大致反映了误差曲线对流量和温度的依赖性，应通过其了解校准所需的一般步骤。不同的流量计可具有看起来不同的误差曲线。

从图 2-3 中可知，当流速低于大约 100lph 时，误差会显著增大，而对于更高的流速，误差仍然非常小。出现上述效果是因为，根据温度的不同，速率高于 100lph 的水流会变成湍流，而在较低的流速下仍然是层流。从图 2-3 中可知，在不同温度下针对低流速的误差较大，因此采用了基于温度和基于流量的补偿。作为温度函数的水流速度由图 2-4 中给出的 Bilaniuk and Wong [3] 5 阶多项式方程进行近似计算。一般情况下，可使用温度传感器来获取介质的温度，但如果没有温度传感器，则可使用 T12、T21 来估计温度。使用方程式 3 可计算水中的声速，然后可使用查找表来计算温度；考虑到该区域内曲线的单调性质，温度最高约为 60°C。然后使用该估计温度连同估计流速来补偿在测得温度下测出的流量。

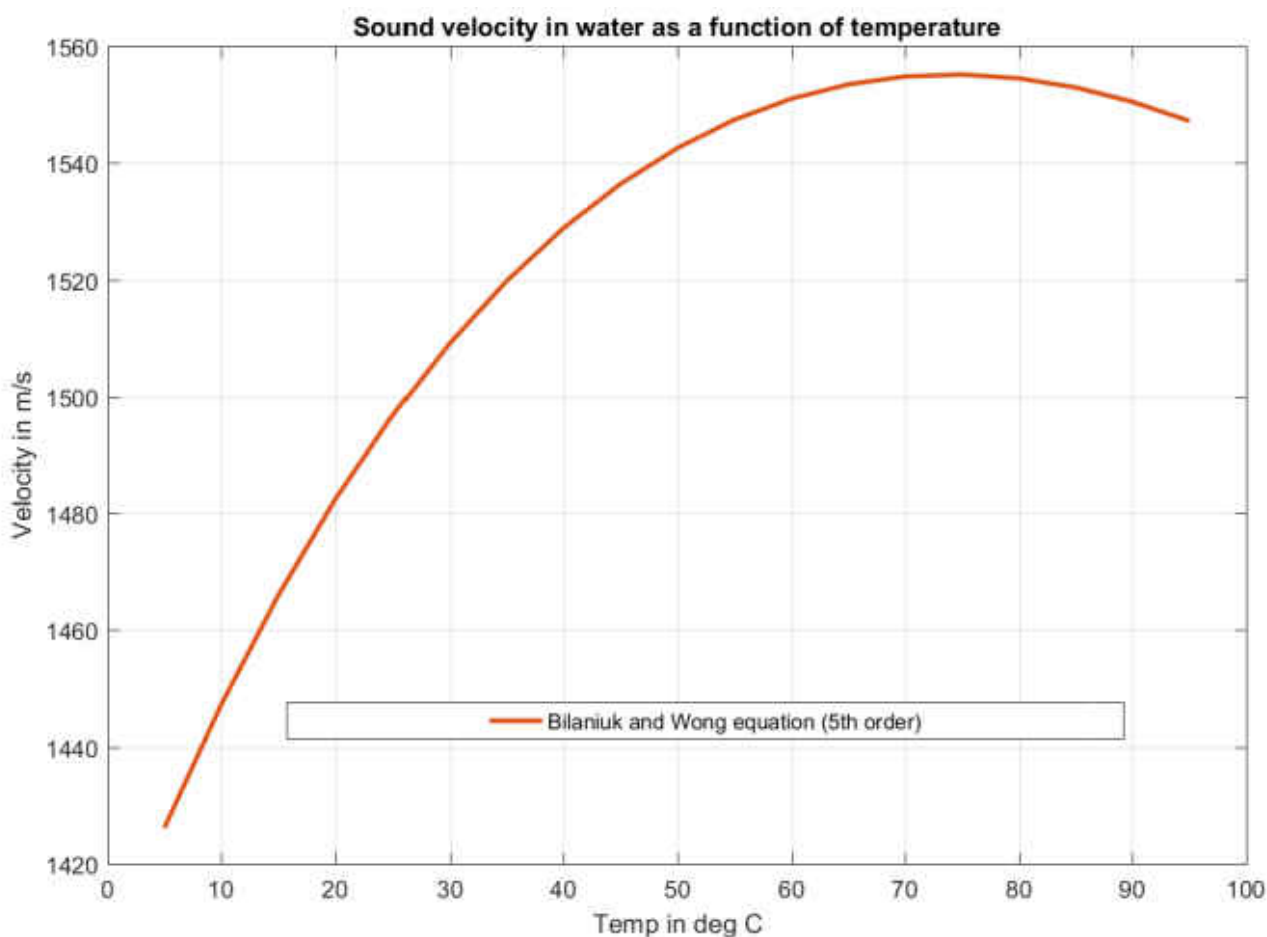


图 2-4. 温度与水中的声速间的关系

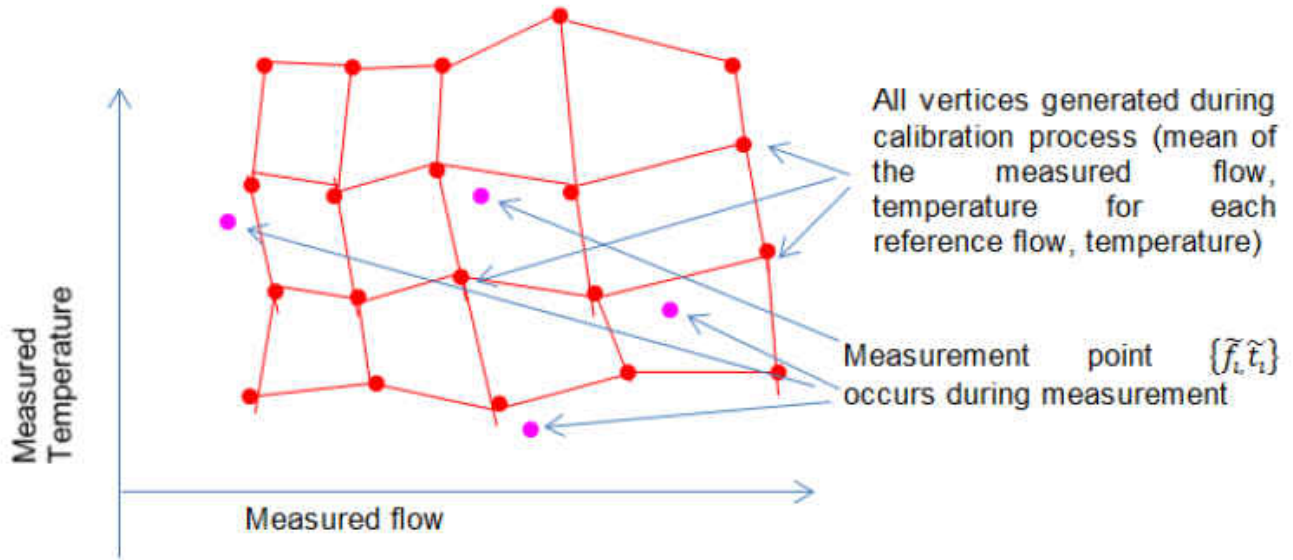
以下几节描述了温度、基于流量的校准表的生成以及补偿算法，旨在降低图 2-3 中给出的体积计算误差。

A. 水流量校准表

为了生成二维校准表，对于给定的流量计设计，这里使用多种流速、不同温度和多个 spool 完成了参考流量测量。给定校准 spool 的二维误差（请参阅图 2-5）如下所示，测得的温度（在 MSP430FR60xx 上）为 T_0 、...、 T_N ，测得的流量（在 MSP430FR60xx 上）为 f_0 、 f_1 、...、 f_M （在位于 Z 轴的参考流量下完成这些测量）。表 T_N 中的最高温度预计小于 60 摄氏度，这是因为温度速度曲线的形状如图 2-4 所示，无法识别超出此值的温度。

NOTE

水表主体也称为 **spool**，这些术语在本文档中可替换使用。



NOTE

此图是在校准过程中针对测得的流量与测得的温度 (参考流量位于 Z 轴) 生成的。

图 2-5. 代表性四边形图

对于 M 个参考流量测量值和 L 个参考温度测量值，这样的四边形将有 $(L-1)*(M-1)$ 个。可能有多个用于校准的 **spool** (例如 20 个)。即使是给定的水表主体设计，每个单独的水表主体 (即 **spool**) 也可能有很小的变化，重要的是应当在几个 **spool** 上进行足够多的测量，以便获得对于相同水表主体设计的大量 **spool** 均适用的良好校准表。图 2-6 给出了一个 3D 图像视图。

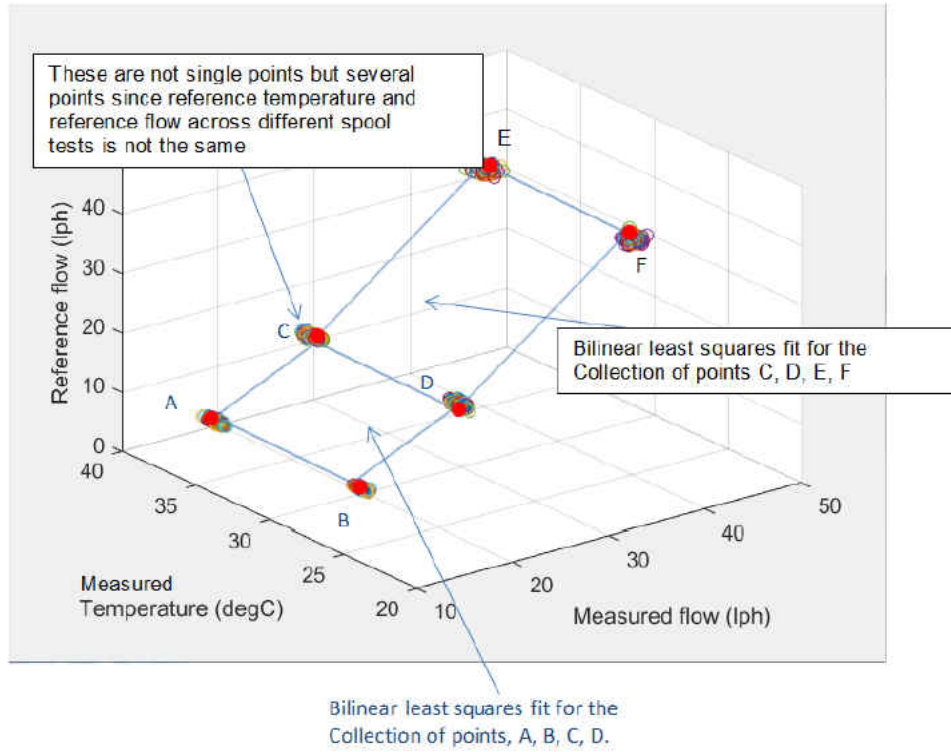


图 2-6. 测试了多个 Spool 的 3D 视图

对于每个这样的四边形 (例如 A、B、C、D 或 C、D、E、F)，在给定参考流量和温度测量值时，假设 $\{f_1^1, f_2^1, \dots, f_N^1, f_1^2, f_2^2, \dots, f_N^2, f_1^3, f_2^3, \dots, f_N^3, f_1^4, f_2^4, \dots, f_N^4\}$ 是流量测量值。

假设 $\{t_1^1, t_2^1, \dots, t_N^1, t_1^2, t_2^2, \dots, t_N^2, t_1^3, t_2^3, \dots, t_N^3, t_1^4, t_2^4, \dots, t_N^4\}$ 是测量的温度。

假设 $z = \{z_1^1, z_2^1, \dots, z_N^1, z_1^2, z_2^2, \dots, z_N^2, z_1^3, z_2^3, \dots, z_N^3, z_1^4, z_2^4, \dots, z_N^4\}$ 是流量的相应实际 (参考) 值，使用的表示法为 f_i^j ，其中 i 为 spool 编号， j 为四边形上的顶点编号。(N 为 spool 的总数，我们假设给定流速和温度下给定 spool 的测量值为平均值。因此，N 为对应于特定四边形的测量点数)。系数 m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 由广义形式的标准双线性拟合 [4] 使用最小二乘方程计算得出：

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^4 \left(\left(z_i^j - (m_0 + m_1 f_i^j + m_2 t_i^j + m_3 f_i^j t_i^j) \right)^2 \right) \quad (4)$$

该方程可通过将关于常数 m_0 、 m_1 、 m_2 、 m_3 的导数等化为零来求解，并由 [方程式 5](#) 得出。

$$\begin{bmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix} = M^{-1} V \quad (5)$$

其中，

$$M = \begin{bmatrix} 4N & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} t_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j t_i^j \\ \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^{j^2} & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j t_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^{j^2} t_i^j \\ \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} t_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j t_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} t_i^{j^2} & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} t_i^{j^2} f_i^j \\ \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j t_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^{j^2} t_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} t_i^{j^2} f_i^j & \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^{j^2} t_i^{j^2} \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{bmatrix} \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} z_i^j \\ \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j z_i^j \\ \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} t_i^j z_i^j \\ \sum_{i=1, j=1}^{i=N, j=4} f_i^j t_i^j z_i^j \end{bmatrix}$$

B. 基于实时操作期间测量值的流量计算

对于给定的流量测量值，现在可通过以下步骤计算估计的流量：

- (1) 按照公式 1、公式 2，使用给定的测量值计算流速 v_i 、声速 C_i 和体积 F_i 。i 表示单个测量值。
- (2) 然后使用图 2-4 计算温度 $\tilde{t}_i$ (对应于声速 C_i)。
- (3) 我们现在有了温度 $\tilde{t}_i$ 和体积流量 $\tilde{f}_i$ 。请注意，如果有可用的外部温度传感器，则可跳过步骤 (1) 和 (2)，直接使用来自传感器的温度估计值/值。
- (4) 测量流量和测量温度的每个测量值填入图 2-5 中的相应四边形，然后测量点 $\{\tilde{f}_i, \tilde{t}_i\}$ 的校正流量由方程式 6 给出。

$$m_0 + m_1 \tilde{f}_i + m_2 \tilde{t}_i + m_3 \tilde{f}_i \tilde{t}_i \quad (6)$$

C. 填入、查找给定测量点的四边形的算法

我们现在考虑使用算法来找出对于给定的流量和温度测量值 $\{\tilde{f}_i, \tilde{t}_i\}$ (请参阅图 2-5 以了解此类示例点)，该点位于哪个四边形内。如果该点落在所有四边形之外，则将找到最接近的一个四边形。该算法的核心是解决关键问题：对于给定的点和四边形的顶点，如何找出该点是否在四边形中。这个问题可用光线投射算法 [5] 来解决。光线投射算法的基本思想是，确定从给定方向上的给定点发出的光线与多项式的偶数点或奇数点相交，以分别确定该点是在多项式外还是在多项式内。然而，普通的光线投射算法有一个缺点，即四边形的边缘和顶点上的点将被声明为在它之外。因此，我们将修改算法以首先核查这种情况。该算法搜索与给定点最近的最上面和最左边的四边形，工作原理如下所述。请参阅图 4-1，其中最左边的四边形点代表最小流量，最上面的四边形点代表最高温度。

假定：

- 测量点为 $(\tilde{f}_i, \tilde{t}_i)$
- M 为流量测量值，L 为温度测量值
- row=0 且 col=0

- 让 FT[NxL] 包含 (流量, 温度) 点。
- $F(\text{row}, \text{col}) = \text{FT}[\text{row} \times \text{N} + \text{col}]$
- $F(\text{row}, \text{col})[0] = \text{flow}$ 且 $F(\text{row}, \text{col})[1] = \text{temp}$
- API rcMethod(meas_point, 4 个角点) 返回 true 或 false

则该算法为：

1. 根据四边形顶边查找列，其中以下陈述之一成立：

$F_p < F(0,0)[0]$ then $\text{col}' = 0$ ，行 0 是顶边行吗？
 $F_p > F(0, N-1)[0]$ then $\text{col}' = N-2$
 Col' where $F(\text{row}, \text{col}')[0] \leq F_p < F(\text{row}, \text{col}'+1)[0]$

2. 根据四边形左边查找行，其中以下陈述之一成立：

$T_p > F(0, \text{row})[1]$ then $\text{row}' = 0$
 $T_p > F(L-1, \text{row})[1]$ then $\text{row}' = L-2$
 row where $F(\text{row}', \text{col}')[1] \leq T_p < F(\text{row}' + 1, \text{col}')[1]$

3. 在找到的 $\{\text{row}', \text{col}'\}$ 周围，搜索相邻的行和列，使得 $\min(\text{col}_i) \leq x_0 \leq \max(\text{col}_i)$ 且 $(\min(\text{row}_j) \leq y_0 \leq \max(\text{row}_j))$ ，其中 col_i 和 row_j 是与 row' 和 col' 相邻的行和列。
4. 对所有满足步骤 3 条件的行、列执行“光线投射”方法。

如果在步骤 (3) 中选择的多边形都不满足光线投射，则该点位于多边形之外，然后选择满足步骤 (3) 的多边形之一。

3 校准过程

《USS 设计中心用户指南》中描述了流量和温度 VFR 校准。

NOTE

流量和温度 VFR 校准仅在 USS Water Demo 应用程序 2.30.00.xx 或更高版本中可用。

4 结果和结论

在 Audiowell DN20 管道上以 10°C、25°C 和 55°C 的温度和不同流速完成了校准测量，如图 4-1 所示。然后以 30°C 的温度进行流量测量，图 4-2 显示了在校准和未校准时相对于参考流量测量值的结果误差。从图中可以看出，在 100-150lph 时，校准可将测量流量的误差显著降低到大约 $\pm 3\%$ 。

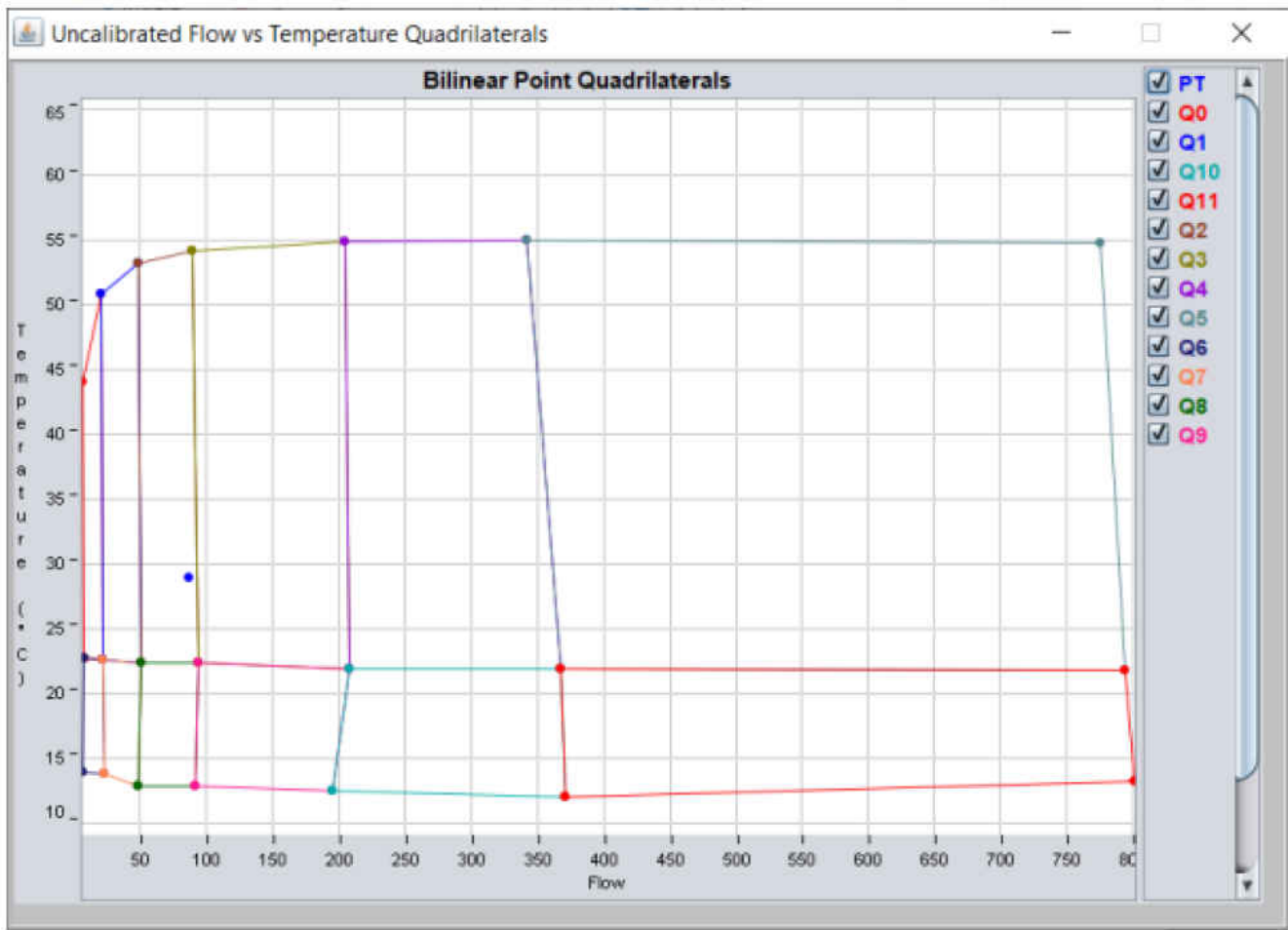


图 4-1. 校准四边形

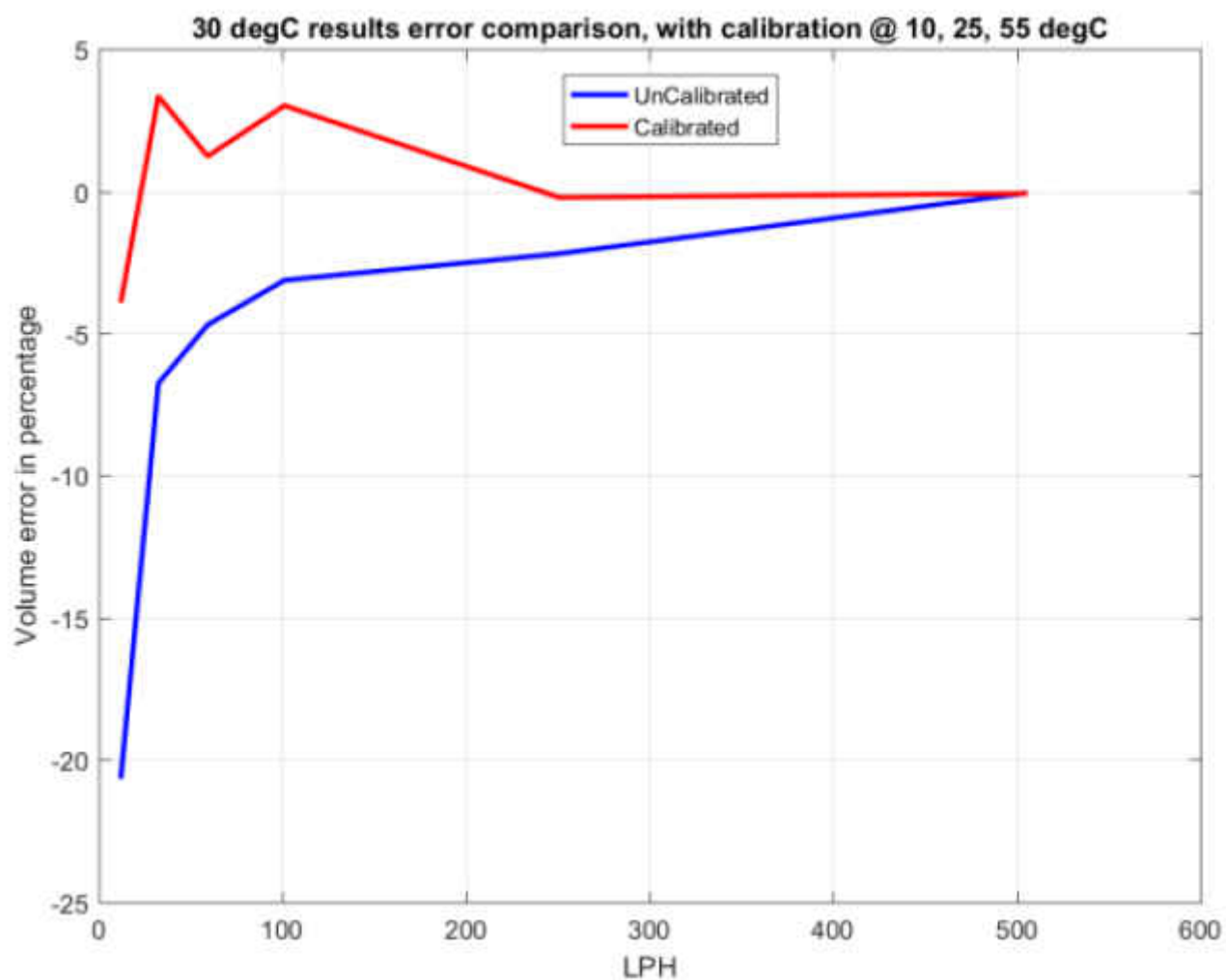


图 4-2. 30°C 时的校准和未校准体积流量误差

5 参考文献

1. <http://www.ti.com/product/MSP430FR6047>
2. ISO 4064-1/EEC 指令 75/33
3. <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundpurewater/speedpw.pdf>
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation
5. <https://www.cs.princeton.edu/~rs/AlgsDS07/16Geometric.pdf>
6. 《USS 设计中心用户指南》

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