

GigaDevice Semiconductor Inc.

提高 GD32 温度传感器使用精度的方法

应用笔记

AN095

1.2 版本

(2024 年 06 月)

目录

目录	1
图索引	2
表索引	3
1. 前言.....	4
1.1. 温度传感器测量过程中的理论分析	4
1.2. 用户校准	5
2. 提高采样精度的几种方法	7
2.1. MCU 选用高精度的供电电源	7
2.2. 通过数据处理以提高准确度	7
3. 版本历史	8

图索引

图 1-1. GD32F103VET6 样品温度传感器测试结果	5
图 2-1. 电源对 ADC 采样的影响.....	7

表索引

表 1-1. GD32xx 温度传感器校准值示例	5
表 1-2. 用户自采集数据表	6
表 3-1. 版本历史	8

1. 前言

GD32 MCU 内部温度传感器产生随芯片结温而线性变化的电压，被连接到 ADC 的内部输入通道上，用于将输出电压转换为数字量。本应用笔记讲述通过校准与用户程序提高温度传感器精度的方法。

1.1. 温度传感器测量过程中的理论分析

芯片集成的温度传感器具有良好的线性特性，温度范围等于器件的工作温度范围，未经校准的温度传感器不适合于要求高精度的应用。温度传感器输出在芯片内部连接至 ADC 输入通道，ADC 通道用于采样转换温度传感器的输出电压数据，经进一步处理该原始数据得到温度值。一般通过数据手册中的常温典型电压值 (V_{room}) 以及温度与温度传感器电压曲线的均值斜率 (Avg_Slope) 可计算：

$$\text{温度 (}^{\circ}\text{C)} = \{V_{\text{temperature}} - V_{\text{room}}\} / Avg_Slope + T_{\text{room}} \quad (1-1)$$

$V_{\text{temperature}}$ ：从 ADC 数据寄存器获取并计算的温度传感器电压数据。

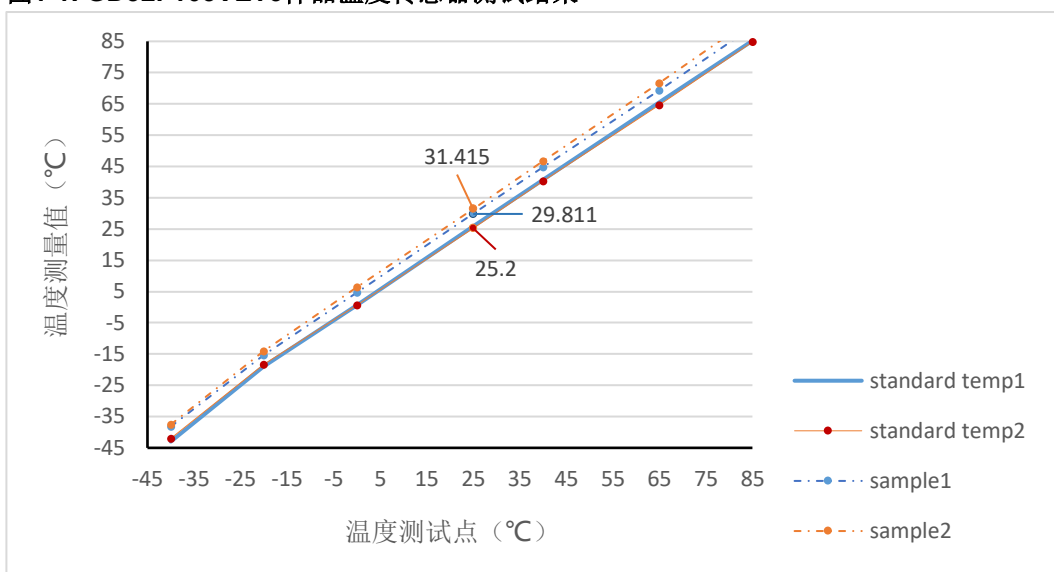
T_{room} ：常温典型电压值对应的温度。

注意：

1. 不同系列计算公式可能略有不同，请对照相关型号用户手册；
2. 使用高精度温度传感器对 ADC 时钟频率有要求，应不大于 5MHz。有高精度温度传感器的系列包括 GD32L23x、GD32A503xx、GD32H759xx 等；
3. 使用 ADC 采集温度时，应保证足够的采样时间，推荐最小采样时间见数据手册 t_{s_temp} ；
4. 温度传感器使能后，需等待至少 3 个采样周期，ADC 转换码值才认为有效，前 3 个转换数据应舍弃；
5. 可通过硬件过采样或软件求均值的方式提高温度传感器采样精度。

V_{room} 为基于温度传感器特性的统计数据，由于制造过程中个体的差异，相同温度时的电压采样值在片与片之间差距比较大（最大可达 45°C ），所以使用该典型电压值会导致精度较差。为了直观看出未校准的内部温度传感器与标准高精度温度传感器的差异，选取样片两颗 GD32F103VET6，VREFP 内部连接到 VDDA，系统频率 72MHz，工作电压为 3.3V。随机测量了样片给定的几个温度测量点，在每个温度测量点的温度稳定后，样片等待 5 分钟后，ADC 采样内部温度传感器的电压值，连续测 100 次取平均得到温度测量值。测试时采用的标准高精度温度传感器精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。将数据点绘制成折线图如 [图1-1. GD32F103VET6 样品温度传感器测试结果](#)，从图中折线趋势可以看出，内部温度传感器的变化趋势与标准高精度温度传感器基本一致，但存在一定的偏移量，所以未校准的温度传感器只适合测量相对温度变化，而不适合测量绝对的温度。

图1-1. GD32F103VET6样品温度传感器测试结果



温度值的误差值与温度传感器输出信号的噪声以及 ADC 采样误差有关。ADC 采样误差以及提高精度的方法见 AN059，温度传感器的误差与供电电压以及温度传感器的特性变化有关。

为了提高 GD32 MCU 的温度传感器使用精度，在部分 GD32 MCU 系列提供了温度校准值，工厂校准的偏移量存放于内存只读区，该地址在数据手册中提供。例如 GD32F527xx、GD32L23x、GD32H759xx（高精度温度传感器），提供了一个常温校准点，该常温校准点为 12 位的无符号数（存储于 2 个字节中），可替代典型值 V_{room} 带入公式 (1-1) 计算，在 GD32A503xx、GD32H759xx（普通温度传感器），提供了两个校准点。查阅数据手册，如表 1-1. GD32xx 温度传感器校准值示例所示，根据两个校准点可计算出当前 MCU 温度与温度传感器电压曲线斜率，此时：

$$Avg_Slope = \frac{(TS_CAL2 - TS_CAL1) * 3.3}{4095 * (105 - 30)} \quad (1-2)$$

$$\{V_{room}, T_{room}\} = \left\{ \frac{TS_CAL1 * 3.3}{4095}, 30 \right\} \quad (1-3)$$

将(1-2)、(1-3)带入公式(1-1)进行计算。

表1-1. GD32xx 温度传感器校准值示例

符号	参数	地址
TS_CAL1	在 30 °C (± 3 °C), $V_{DD} = V_{DDA} = V_{REFP} = 3.3V$ (± 1.5 mV) 获取的温度传感器原始数据值	0x1FFF F7F8 - 0x1FFF F7F9
TS_CAL2	在 105 °C (± 3 °C), $V_{DD} = V_{DDA} = V_{REFP} = 3.3V$ (± 1.5 mV) 获取的温度传感器原始数据值	0x1FFF F7FA - 0x1FFF F7FB

1.2. 用户校准

在没有工厂校准值确定公式与计算温度时，用户也可以根据自己采集到的数据进行用户校准，温度 $f(x)$ 与 ADC 采样值 x 是一种线性关系，假设这种线性关系为：

$$f(x)=ax+b \quad (1-4)$$

用户可以根据采集到的已知 ADC 采样值与对应的温度值进行用户校准：

表1-2. 用户自采集数据表

ADC采样值	实际温度
x_0	y_0
x_1	y_1
x_2	y_2
.....
x_n	y_n

根据最小二乘法原理，将误差的平方和 $\epsilon = \sum (f(x_i) - y_i)^2 = \sum (ax_i + b - y_i)^2$ 最小作为“优化判据”。根据多元微积分的知识，当 ϵ 对 a 、 b 偏导数等于0时， ϵ 达到最小值：

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a} \epsilon = 2 \sum (ax_i + b - y_i)x_i = 0 \\ \frac{\partial}{\partial b} \epsilon = 2 \sum (ax_i + b - y_i) = 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

求得

$$\begin{cases} a = \frac{n \sum (x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ b = \frac{\sum y_i - \sum x_i a}{n} \end{cases} \quad (1-6)$$

当 $n=2$ 时，上述公式转换为两点校准公式

$$\begin{cases} a = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \\ b = \frac{y_1 + y_0 - (x_1 + x_0)a}{2} \end{cases} \quad (1-7)$$

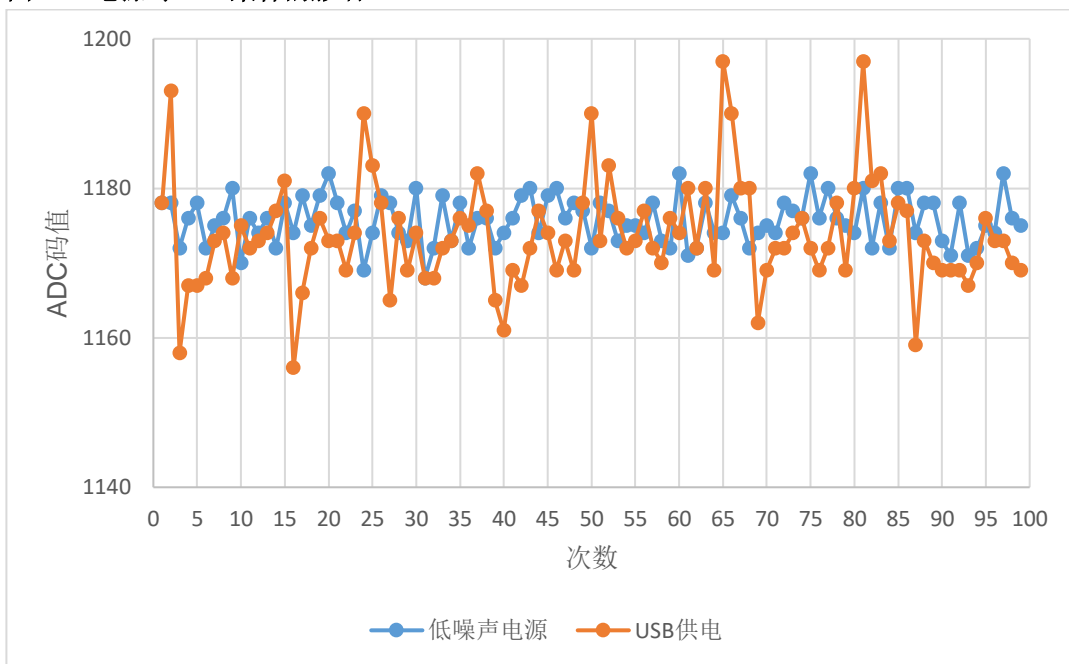
用户可以多采集几组数据，根据公式(1-6)计算出最佳拟合直线。

2. 提高采样精度的几种方法

2.1. MCU 选用高精度的供电电源

不同质量的电压源输入对 ADC 采样结果影响,如下图所示,采样 100 次时,低噪声电源($\pm 2\text{mV}$)与 USB 供电 ($\pm 20\text{mV}$) 比较下,后者波动范围较大。采用低噪声电源可以提高采样的稳定性与精度。

图2-1. 电源对ADC采样的影响



2.2. 通过数据处理以提高准确度

由于温度传感器在芯片内部为弱电电压源,ADC 需要足够的时间使得采样电路达到充放电平衡而稳定,操作者需根据相关型号手册确定适合的采样周期与 ADC 频率。例如,在代码中,每两秒,从温度传感器电压获取 100 个采样值,将这 100 个值从大到小顺序排列,去除最大的 5 个值与最小的 5 个值,得到 90 个值的平均值。根据这个平均值得到当前温度的 ADC 采样值,并根据公式计算得出当前温度。

3. 版本历史

表3-1. 版本历史

版本号.	说明	日期
1.0	首次发布	2023 年 01 月
1.1	更新部分描述	2023 年 04 月
1.2	增加对第一章的内容规范	2024 年 06 月

Important Notice

This document is the property of GigaDevice Semiconductor Inc. and its subsidiaries (the "Company"). This document, including any product of the Company described in this document (the "Product"), is owned by the Company under the intellectual property laws and treaties of the People's Republic of China and other jurisdictions worldwide. The Company reserves all rights under such laws and treaties and does not grant any license under its patents, copyrights, trademarks, or other intellectual property rights. The names and brands of third party referred thereto (if any) are the property of their respective owner and referred to for identification purposes only.

The Company makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this document or any Product, including, but not limited to, the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. The Company does not assume any liability arising out of the application or use of any Product described in this document. Any information provided in this document is provided only for reference purposes. It is the responsibility of the user of this document to properly design, program, and test the functionality and safety of any application made of this information and any resulting product. Except for customized products which has been expressly identified in the applicable agreement, the Products are designed, developed, and/or manufactured for ordinary business, industrial, personal, and/or household applications only. The Products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems designed or intended for the operation of weapons, weapons systems, nuclear installations, atomic energy control instruments, combustion control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, life-support devices or systems, other medical devices or systems (including resuscitation equipment and surgical implants), pollution control or hazardous substances management, or other uses where the failure of the device or Product could cause personal injury, death, property or environmental damage ("Unintended Uses"). Customers shall take any and all actions to ensure using and selling the Products in accordance with the applicable laws and regulations. The Company is not liable, in whole or in part, and customers shall and hereby do release the Company as well as its suppliers and/or distributors from any claim, damage, or other liability arising from or related to all Unintended Uses of the Products. Customers shall indemnify and hold the Company as well as its suppliers and/or distributors harmless from and against all claims, costs, damages, and other liabilities, including claims for personal injury or death, arising from or related to any Unintended Uses of the Products.

Information in this document is provided solely in connection with the Products. The Company reserves the right to make changes, corrections, modifications or improvements to this document and Products and services described herein at any time, without notice.