

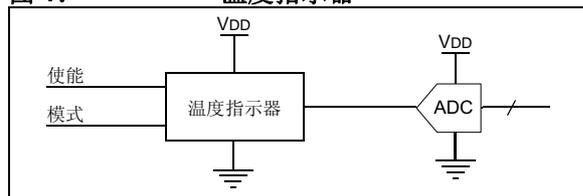
内部温度指示器的使用与校准

作者: Jonathan Dillon
Microchip Technology Inc.

简介

许多 PIC16 系列器件都含有一个内部温度指示器。这些器件包括 PIC16F72X 器件系列、PIC16F1XXX 器件系列和 PIC12F1XXX 器件系列。温度指示器在内部与 ADC 的输入多路开关连接 (图 1)。更多详细信息, 请参见特定器件的数据手册。

图 1: 温度指示器



这些器件具有一个内部电路, 该电路可以基于不同内部晶体管结点阈值电压产生对应于温度的可变输出电压。该指示器可用于测量介于 -40°C 到 $+85^{\circ}\text{C}$ 之间的器件温度。要获得精确的结果, 用户必须对电路进行校准。

使用温度指示器

在器件数据手册的温度指示器章节中会详细介绍用于使能温度指示器和选择其工作模式的控制位。

指示器利用晶体管结点阈值电压 (V_t) 的温度系数来产生对应于温度的电压。高量程模式会增加结点的数量, 对于温度变化可以产生更好的响应。低量程模式使用的结点较少, 从而允许在更宽的器件工作电压范围内使用温度指示电路 (见图 3)。

在单个样片器件上测量时, V_t 变化与温度的关系为:

公式 1:

$$V_t = 0.659 - (\text{温度}^{\circ}\text{C} + 40) * (0.00132)$$

图 2: 样片 PIC16F1937 器件的二极管正向电压 — 温度曲线

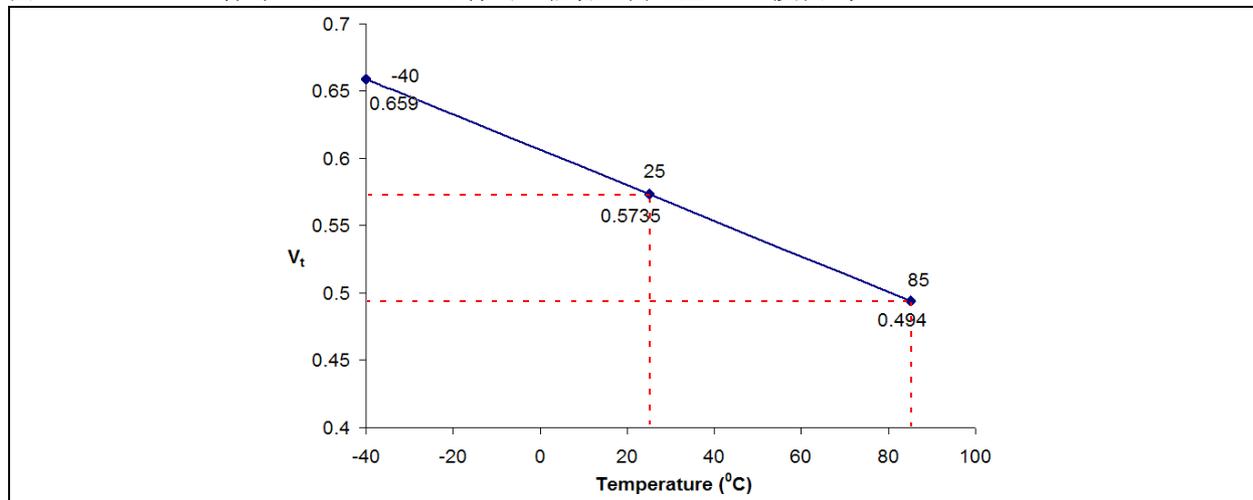
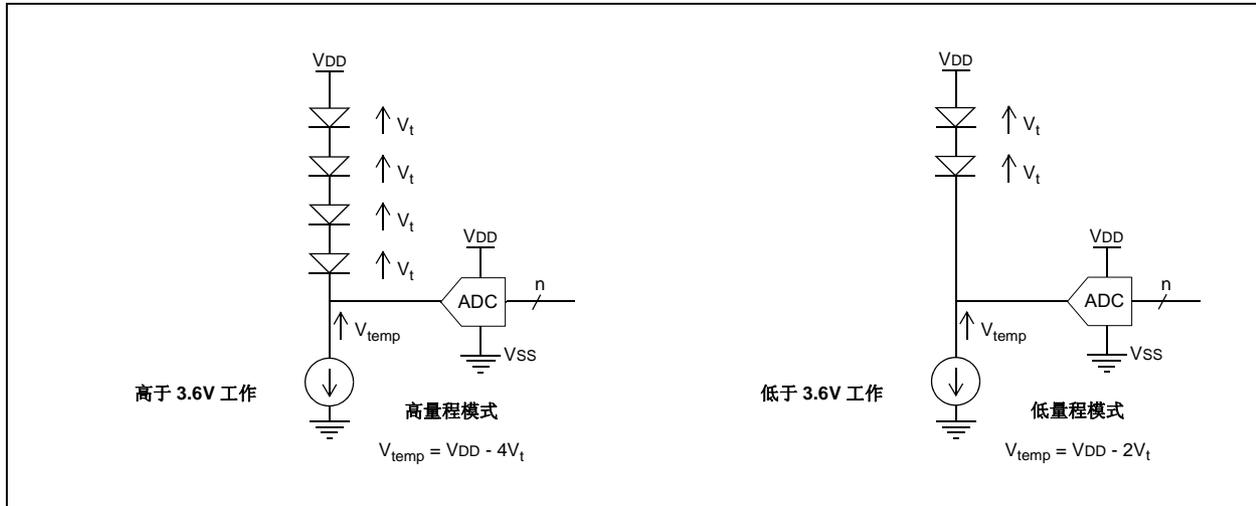


图 3:



两种工作模式的输出公式为:

- 低量程
 $V_{temp} = VDD - 2 * V_t$
- 高量程
 $V_{temp} = VDD - 4 * V_t$

其中:

V_{temp} 是指示器的模拟电压输出

VDD 是为器件提供的正电压

V_t 是晶体管的阈值电压, 它取决于器件的制造工艺

根据公式 1 和指示器的工作模式, 可以得到公式 3。

注: 在选择模式时需要小心, 因为在低温时, V_t 最高可能达到 0.75V, 而一些器件的最小 VDD 会低至 1.8V。器件以低电压工作时, 必须选择低量程, 因为 V_{temp} 只能为正电压。当电源电压允许使用高量程模式时, 高量程模式是首选的工作模式, 因为它的温度响应更好, 可以提高温度分辨率。

电压 V_{temp} 使用内部模数转换器进行测量, 它在内部与模拟通道选择多路开关 (MUX) 连接。要确定输入通道, 请参见器件数据手册的 ADC 章节。

在数据手册的温度指示器章节中对模式选择和温度指示器使能进行了介绍。

在选择通道选择多路开关 (MUX) 的温度指示器时, 必须让 ADC 有足够的时间可以在转换启动之前采集电压。

公式 2 给出了模数转换器的传递函数。转换结果取决于模数转换器参考电压的电源电压, 对于本文档, 正参考电压是电源电压, 而负参考电压是地电压。

公式 2:

$$ADC_{Result} = \frac{V_{temp}}{VDD} * (2^n - 1)$$

其中:

n = ADC 分辨率的位数 (8 或 10 位)

在工作期间, 可以通过对固定参考电压执行模数转换来确定电源电压。但是, 如果对 VDD 进行稳压, 或者将外部参考电压与 ADC 连接, 则可以简化计算, 因为可以假设它为恒量。

公式 3: 通过串联二极管而获得的 V_{TEMP} 电压 (根据公式 1)

$$V_{temp} = V_{DD} - \text{模式} * [0.659 - ((\text{温度}^{\circ}\text{C} + 40) * 0.0132)]$$

其中:

高量程模式 = 4

低量程模式 = 2

结合公式 2 和公式 3, 可以得到温度指示器电路输出电压的 ADC 转换结果与温度的关系:

公式 4: 重新调整公式以计算温度:

$$ADC_{Result} = \frac{V_{DD} - \text{模式} * [0.659 - ((\text{温度}^{\circ}\text{C} + 40) * 0.0132)]}{V_{DD}} * (2^n - 1)$$

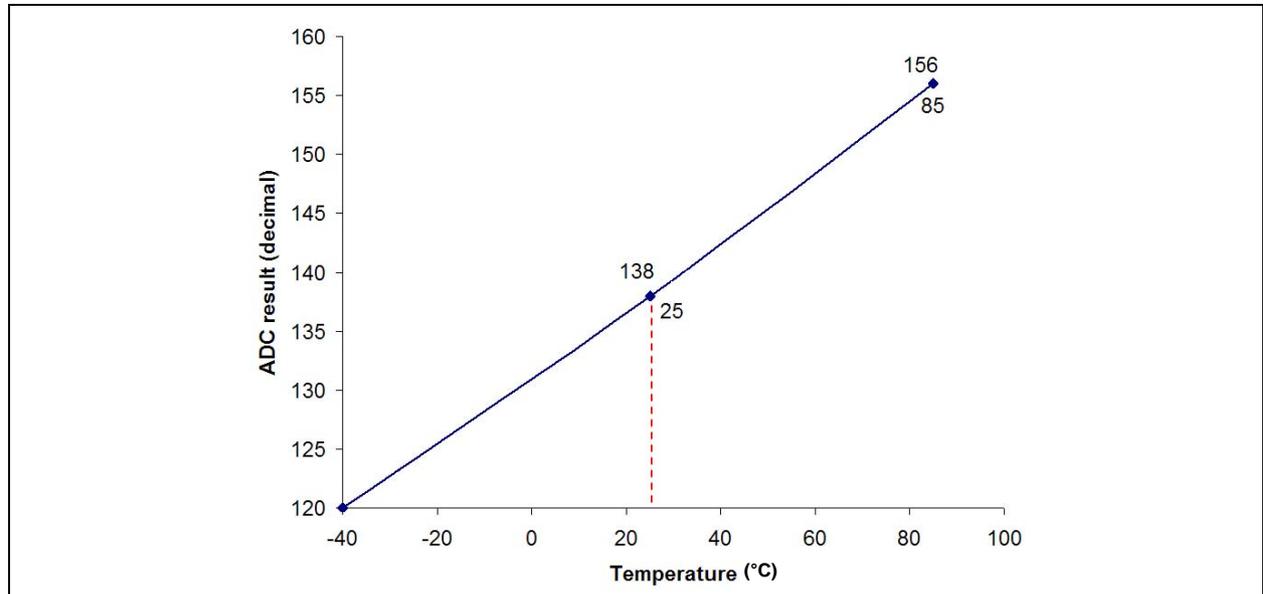
公式 5:

$$\text{温度}^{\circ}\text{C} = \frac{0.659 - \frac{V_{DD}}{\text{模式}} \left(1 - \frac{ADC_{Result}}{(2^n - 1)} \right)}{0.00132} - 40$$

如果电源电压不变, 当温度发生变化时, 温度指示器通道的 ADC 转换结果会发生如图 4 所示的线性变化。

根据应用, 模数转换器的结果可以直接与特定跳变点进行比较, 也可以用于通过计算、查找表或两者结合来确定实际温度。

图 4: ADC 结果 (十进制) — 温度 (稳压电源电压) 曲线



校准

由于器件之间的失调和斜率存在差异，为了获得更高的精度，需要对温度指示器进行校准。指示器依靠器件的晶体管阈值电压 V_t 工作，该电压会在生产容差范围内变化。

温度指示器可以在目标应用生产过程中通过两种方法进行校准：

单点校准

在单个温度下进行校准，并假定器件之间的斜率差异是相对稳定的。该方法仅仅针对失调执行校准，器件之间该参数的差异通常较大。

双点校准

在两个温度下执行校准，并且可以根据它们确定失调和斜率。因此，该方法更为精确，但需要两个存在明显差异的温度。

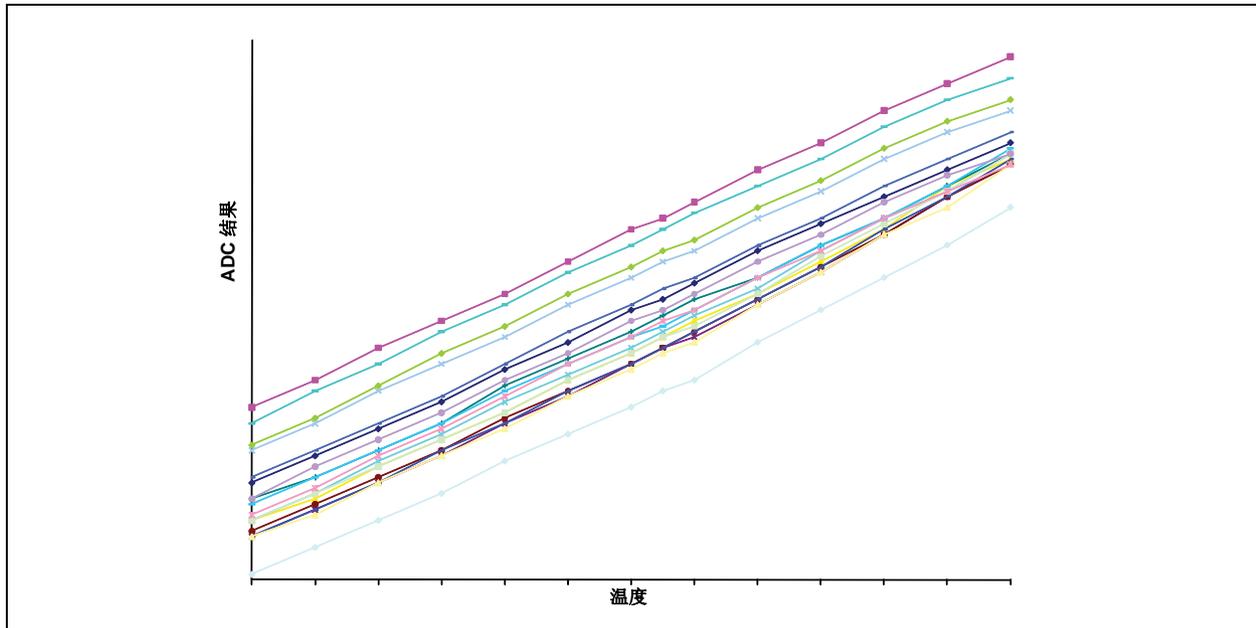
对于以上两种方法，温度可以强制设定（保持为特定值），也可以在校准时通过外部测量方法测量。强制设定温度可以简化校准过程中所需的计算，但从生产角度

来说较为困难，并且可能需要一些时间来让器件达到指定温度。强制设定温度或测量温度中的误差会导致所有温度下的温度精度都降低。

所需的校准程度取决于应用，一些应用并不需要精确的温度，因而适合使用单点方式进行校准且校准速度更快。同时避免了让设备去改变温度。要进行更精确的温度测量，建议使用双点校准方法。

注： 来自温度指示器的电压取决于器件的电源电压，在对该电压进行稳压的情况下，校准过程最为简单。对于非稳压电源，还必须通过对内部固定参考电压进行 A/D 转换来计算电压。应用笔记 AN1072, “*Measuring VDD Using the 0.6V Reference*” 中介绍了使用固定参考电压来确定 VDD 的技术。

图 5: 12 个样片器件的温度数据



单点校准

如图 5 所示，对有限数量的样片器件的测试结果表明，温度发生变化时 V_{temp} 的响应相对恒定，但是器件之间的失调差异较大。单点校准可以修正这种失调差异，但未考虑到器件之间温度响应斜率的差异。

对于这种校准，需要具有对应于强制设定温度或测量温度的理想 ADC 结果值。各个器件由于温度而产生的 V_t 变化会有所不同，因此单点校准可能仅仅在校准温度下是精确的，且离校准温度越远，误差就越大（见图 6）。在所绘制的 ADC 结果中出现的领结形状是由于温度响应中可能存在的差异而产生的。

测量温度后，公式 3 给出了获得理想 ADC 结果值需要进行的计算；而对于强制设定温度，结果可以和与之对应的恒理想值进行比较。理想情况下，温度位于应用所见工作范围的中点，因为它是领结形状的中心，并且可以最大程度降低应用工作范围内的温度误差。对于只需要知道特定温度（例如温度极限）的应用，可以通过在该温度下进行校准来获得最精确的结果。

对于模式和电压的一些组合，ADC 转换结果具有接近 8 位的动态范围，因此建议使用双字节的 ADC 结果数据类型。以较高电压工作时，ADC 结果的动态范围介于 -40°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$ 之间，该范围足够小，可以按比例转换为一个 8 位数值。

样片 PIC16F1937 器件的条件为：

- 电源电压为 5V
- 工作于高量程 $4V_t$ 模式
- 温度强制设定为 25°C

模数转换产生的结果为十进制值 561。

25°C 时使用公式 3 计算的典型模数转换结果为十进制值 554。

对于单点校准，转换结果和理想 A/D 转换结果值之间的差就是校准值。

因而：

公式 6:

$$\text{理想值} - \text{测量值} = \text{校准值}$$

$$554 - 561 = 7$$

因此对于该器件，校准值为 7。将该值存储在器件的非易失性程序存储器或数据 EEPROM 存储器中，以备在执行温度测量时使用。

单点校准假定所有器件具有相似的斜率，但在温度离校准温度越远时，潜在误差就越大，如图 6 所示。

进行温度测量时，需要用校准值来修正 ADC 结果，以对失调进行调节。

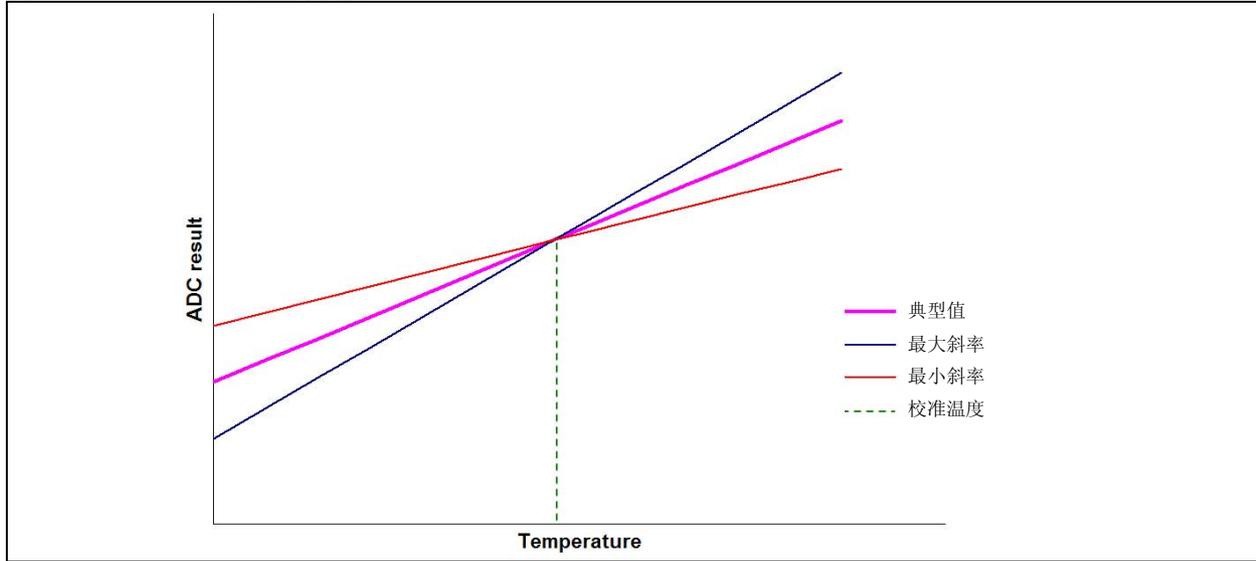
公式 7:

$$\text{校准结果} = \text{ADC 结果} - \text{校准值}$$

公式 8:

$$\text{温度} = (\text{ADC 结果} - \text{校准值})K$$

图 6: 单点温度校准

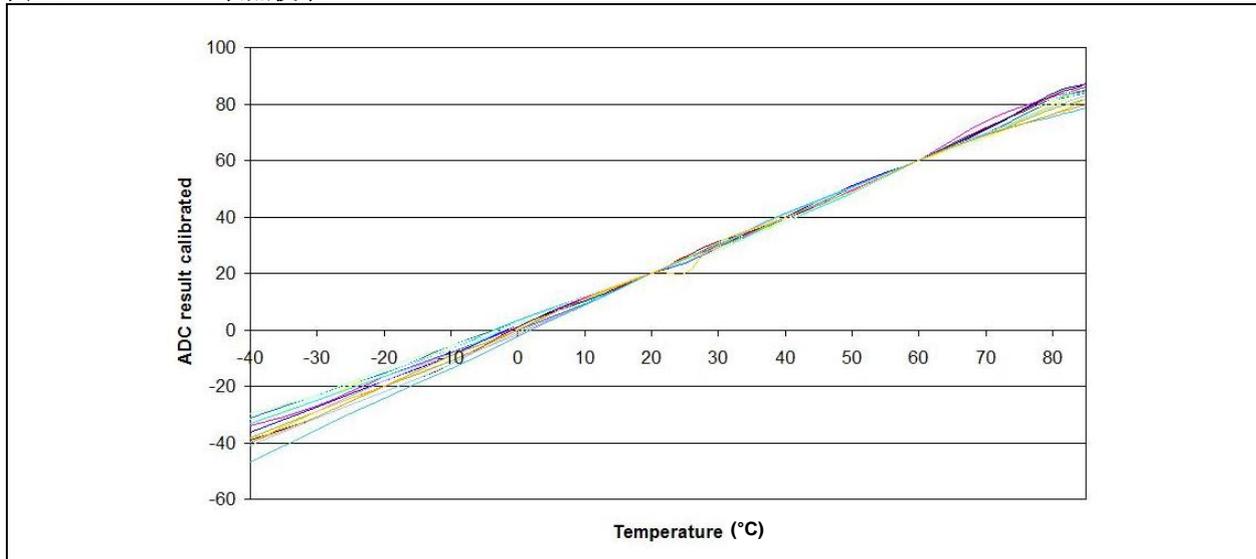


双点校准

双点校准可以测量该器件的温度响应与失调。因此，它可以克服单点校准假设（即所有器件具有相同的温度响应）的缺陷，提高温度精度。

双点校准需要应用温度范围内两个存在明显差异的温度。与单点校准一样，这两个温度可以是强制设定温度，也可以是测量温度，但强制设定温度同样可以简化需要进行的计算。

图 7: 双点校准



对于非稳压电源电压，设计人员必须计算二极管的温度响应，这需要一些额外的步骤。

公式 9:

$$\text{校准的 ADC 结果} = A + (B * \text{ADC 结果})$$

校准需要确定 A 和 B，从而可以针对二极管 V_f 和温度响应的差异来修正 ADC 结果。如果将温度强制设定为已知温度，则可以将每个校准温度的理想 ADC 结果存储为常量，否则如果是在校准过程中通过外部测量温度，则必须计算理想值。然后，可以在公式 5 中使用校准结果来计算温度。

公式 10:

$$A = \frac{(T1 \text{ 时的理想值} - T2 \text{ 时的理想值})}{(T1 \text{ 时的实际值} - T2 \text{ 时的实际值})}$$

$$B = T1 \text{ 时的实际值} - (A * T1 \text{ 时的理想值})$$

其中:

T1 校准温度 1

T2 校准温度 2

这种双点校准可以显著降低二极管温度响应差异的影响，但它依赖于是否能够精确地计算响应。

非稳压电压的零点校准

对于稳压电压，校准可以简化为调节 ADC 结果。

对于非稳压电源，由于 VDD 会导致 ADC 结果发生变化，所以校准值也是 VDD 的函数，并且必须计算 V_t 温

度失调。这要求知道 VDD、校准温度和 ADC 结果。根据公式 3，代入 α 作为 V_t 失调：

V_t 失调可以通过在已知温度和电压下执行单次 ADC 转换而计算得到。对于非稳压应用，电源电压可以通过转换内部固定参考电压或通过在校准过程中提供已知电压来确定。

在测量温度时，还必须计算电源电压，以及使用通过校准得到的 V_t 失调。

在校准过程中，需要计算 α 并存储到非易失性存储器中，以备工作期间使用。A/D 转换的结果将与电源电压一起代入公式 10，以获得工作温度。

公式 11:

$$\text{温度} = \frac{\alpha - \frac{V_{DD}}{4} * \left(1 - \frac{ADC_{Result}}{1023}\right)}{0.00132} - 40$$

公式 12:

$$ADC_{Result} = \frac{V_{DD} - 4 * [\alpha - ((\text{温度}^{\circ}\text{C} + 40) * 0.0132)]}{V_{DD}} * 1023$$

重新调整:

公式 13:

$$\alpha = \left[\frac{V_{DD}}{4} * \left(1 - \frac{ADC_{Result}}{1023}\right) \right] + [(\text{温度}^{\circ}\text{C} + 40) * 0.00132]$$

非稳压电压的双点校准

对于非稳压电源（例如直接连接电池），将需要计算 VDD 一次或两次（如果 VDD 在两个校准温度下不同，例如电池电压随温度下降）。

根据温度指示器的工作原理，可以得到：

公式 14:

$$V_{temp} = V_{DD} - 4 * (\alpha - (\text{温度}^{\circ}\text{C} + 40)\beta)$$

$$ADC_{Result} = \frac{V_{temp}}{V_{DD}} * (2^n - 1)$$

$$V_{temp} = \frac{ADC_{Result}}{1023} * V_{DD}$$

其中，对于使用非稳压电压的双点校准，将需要计算 α 和 β 。重新调整公式，并在两个温度下进行校准（公式 15）：

需要考虑的关键点：

- 介于两个校准温度之间时，结果最为精确。
- 两个校准温度之间的距离需要适当，以便可以在给定 ADC 分辨率下精确地计算斜率。建议两个校准温度分别大约为工作温度范围的 20% 和 80%。
- 校准温度或电压中的任何误差都会使由于斜率和失调的不精确而产生的读数误差显著增大。
- 对于稳压电压，在 20°C 和 60°C 下进行校准。

AN1333

如图 8 所示，对于一个样片批次的器件，处于校准温度时的温度误差最小，并且处于两个校准温度之间时，最大温度误差为 5°C。

公式 15:

$$\alpha = \frac{\left[V_1 * (Temp_2 + 40) * \left(1 - \frac{ADC_{Result1}}{1023} \right) \right] - \left[V_2 * (Temp_1 + 40) * \left(1 - \frac{ADC_{Result2}}{1023} \right) \right]}{4 * (Temp_2 - Temp_1)}$$
$$\beta = \frac{V_1 - V_2 + \frac{1}{1023} * [(V_2 * ADC_{Result2}) - (V_1 * ADC_{Result1})]}{4 * (Temp_2 - Temp_1)}$$

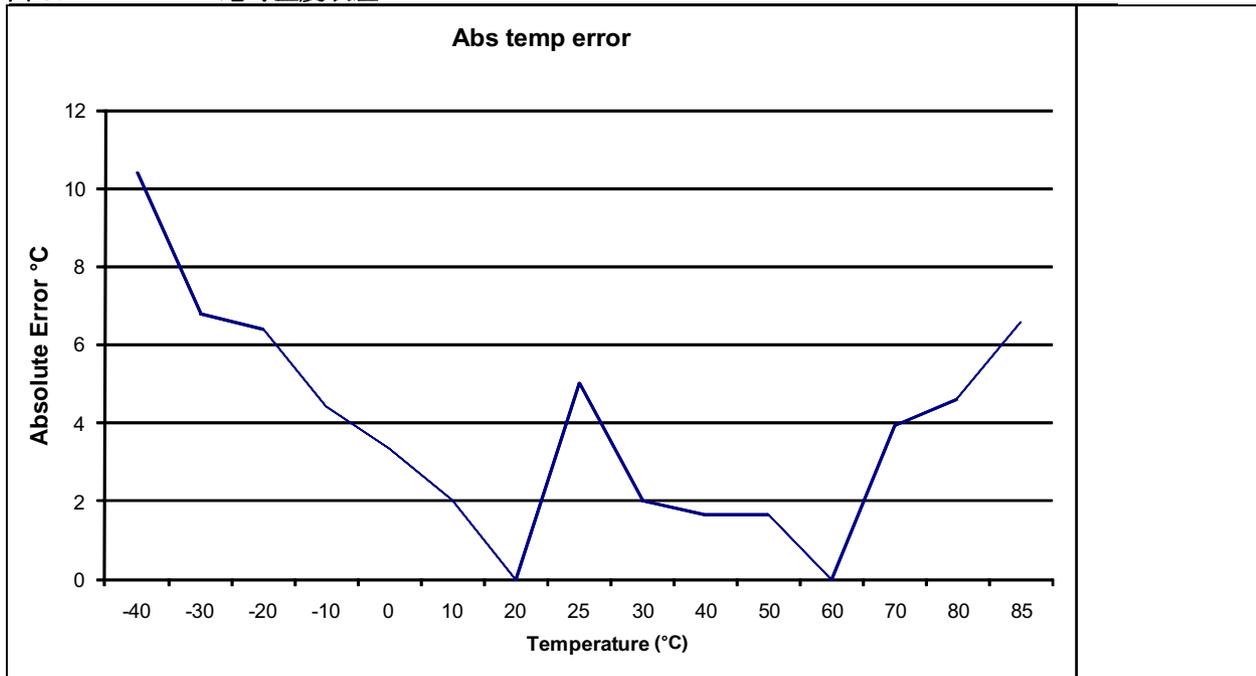
其中:

Temp1 和 Temp2 校准温度
V1 和 V2 Temp1 和 Temp2 下的 VDD 电压
ADCresult1 和 ADCresult2 Temp1 和 Temp2 下的 A/D 转换器结果

公式 16:

$$\text{温度 } ^\circ\text{C} = \frac{\alpha - \frac{V_{DD}}{4} * \left(1 - \frac{ADC_{Result}}{1023} \right)}{\beta} - 40$$

图 8: 绝对温度误差



结论

板载温度指示器可用于测量器件温度，器件温度会与其环境中的温度相对应，但存在一定延时。指示器使用 ADC 进行测量，可以在不经校准的情况下用于粗略的温度测量。对于更精确的温度测量，需要通过校准来消除器件参数差异。根据应用，可能需要在 一个或两个温度下进行校准测量。由于 ADC 结果取决于它所提供的参考电压，所以需要通过使用板载固定参考电压或使用稳压电源来提供固定参考电压。否则，必须使用固定参考电压来计算器件电源电压。

AN1333

注:

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点:

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信: 在正常使用的情况下, Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前, 仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知, 所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。

代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案 (Digital Millennium Copyright Act)》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下, 能访问您的软件或其他受版权保护的成果, 您有权依据该法案提起诉讼, 从而制止这种行为。

提供本文档的中文版本仅为为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分, 因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为为您提供便利, 它们可能由更新之信息所替代。确保应用符合技术规范, 是您自身应负的责任。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保, 包括但不限于针对其使用情况、质量、性能、适销性或特定用途的适用性的声明或担保。Microchip 对因这些信息及使用这些信息而引起的后果不承担任何责任。如果将 Microchip 器件用于生命维持和 / 或生命安全应用, 一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切伤害、索赔、诉讼或费用时, 会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任, 并加以赔偿。在 Microchip 知识产权保护下, 不得暗或以其他方式转让任何许可证。

商标

Microchip 的名称和徽标组合、Microchip 徽标、dsPIC、KEELOQ、KEELOQ 徽标、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、PIC³² 徽标、rfPIC 和 UNI/O 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的注册商标。

FilterLab、Hampshire、HI-TECH C、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL 和 The Embedded Control Solutions Company 均为 Microchip Technology Inc. 在美国的注册商标。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、HI-TIDE、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、mTouch、Omniscient Code Generation、PICC、PICC-18、PICDEM、PICDEM.net、PICKIT、PICKITtail、REAL ICE、rfLAB、Select Mode、Total Endurance、TSHARC、UniWinDriver、WiperLock 和 ZENA 均为 Microchip Technology Inc. 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 是 Microchip Technology Inc. 在美国的服务标记。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2010, Microchip Technology Inc. 版权所有。

ISBN: 978-1-60932-772-9

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip 位于美国亚利桑那州 Chandler 和 Tempe 与位于俄勒冈州 Gresham 的全球总部, 设计和晶圆生产厂及位于美国加利福尼亚州和印度的设计中心均通过了 ISO/TS-16949:2002 认证。公司在 PIC[®] MCU 与 dsPIC[®] DSC、KEELOQ[®] 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器和模拟产品方面的质量体系流程均符合 ISO/TS-16949:2002。此外, Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。

全球销售及服务中心

美洲

公司总部 **Corporate Office**
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1-480-792-7200
Fax: 1-480-792-7277

技术支持:
<http://support.microchip.com>
网址: www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
Duluth, GA
Tel: 1-678-957-9614
Fax: 1-678-957-1455

波士顿 Boston
Westborough, MA
Tel: 1-774-760-0087
Fax: 1-774-760-0088

芝加哥 Chicago
Itasca, IL
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

克里夫兰 Cleveland
Independence, OH
Tel: 1-216-447-0464
Fax: 1-216-447-0643

达拉斯 Dallas
Addison, TX
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Farmington Hills, MI
Tel: 1-248-538-2250
Fax: 1-248-538-2260

科科莫 Kokomo
Kokomo, IN
Tel: 1-765-864-8360
Fax: 1-765-864-8387

洛杉矶 Los Angeles
Mission Viejo, CA
Tel: 1-949-462-9523
Fax: 1-949-462-9608

圣克拉拉 Santa Clara
Santa Clara, CA
Tel: 1-408-961-6444
Fax: 1-408-961-6445

加拿大多伦多 Toronto
Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 1-905-673-0699
Fax: 1-905-673-6509

亚太地区

亚太总部 **Asia Pacific Office**
Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 北京
Tel: 86-10-8528-2100
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都
Tel: 86-28-8665-5511
Fax: 86-28-8665-7889

中国 - 重庆
Tel: 86-23-8980-9588
Fax: 86-23-8980-9500

中国 - 香港特别行政区
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 南京
Tel: 86-25-8473-2460
Fax: 86-25-8473-2470

中国 - 青岛
Tel: 86-532-8502-7355
Fax: 86-532-8502-7205

中国 - 上海
Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

中国 - 沈阳
Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

中国 - 深圳
Tel: 86-755-8203-2660
Fax: 86-755-8203-1760

中国 - 武汉
Tel: 86-27-5980-5300
Fax: 86-27-5980-5118

中国 - 西安
Tel: 86-29-8833-7252
Fax: 86-29-8833-7256

中国 - 厦门
Tel: 86-592-238-8138
Fax: 86-592-238-8130

中国 - 珠海
Tel: 86-756-321-0040
Fax: 86-756-321-0049

台湾地区 - 高雄
Tel: 886-7-213-7830
Fax: 886-7-330-9305

台湾地区 - 台北
Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

亚太地区

台湾地区 - 新竹
Tel: 886-3-6578-300
Fax: 886-3-6578-370

澳大利亚 Australia - Sydney
Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

印度 India - Bangalore
Tel: 91-80-3090-4444
Fax: 91-80-3090-4123

印度 India - New Delhi
Tel: 91-11-4160-8631
Fax: 91-11-4160-8632

印度 India - Pune
Tel: 91-20-2566-1512
Fax: 91-20-2566-1513

日本 Japan - Yokohama
Tel: 81-45-471- 6166
Fax: 81-45-471-6122

韩国 Korea - Daegu
Tel: 82-53-744-4301
Fax: 82-53-744-4302

韩国 Korea - Seoul
Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 或
82-2-558-5934

马来西亚 Malaysia - Kuala Lumpur
Tel: 60-3-6201-9857
Fax: 60-3-6201-9859

马来西亚 Malaysia - Penang
Tel: 60-4-227-8870
Fax: 60-4-227-4068

菲律宾 Philippines - Manila
Tel: 63-2-634-9065
Fax: 63-2-634-9069

新加坡 Singapore
Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

泰国 Thailand - Bangkok
Tel: 66-2-694-1351
Fax: 66-2-694-1350

欧洲

奥地利 Austria - Wels
Tel: 43-7242-2244-39
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦 Denmark-Copenhagen
Tel: 45-4450-2828
Fax: 45-4485-2829

法国 France - Paris
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 Germany - Munich
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

意大利 Italy - Milan
Tel: 39-0331-742611
Fax: 39-0331-466781

荷兰 Netherlands - Drunen
Tel: 31-416-690399
Fax: 31-416-690340

西班牙 Spain - Madrid
Tel: 34-91-708-08-90
Fax: 34-91-708-08-91

英国 UK - Wokingham
Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820