

---

---

## 基于PIC32CZ CA70/CG70单片机的AFE校准

---

---

### 简介

---

Microchip PIC32CZ CA70/GC70系列器件是基于Arm® Cortex®-M7处理器的高性能、高效嵌入式MCU。

模数转换器（Analog-to-digital converters, ADC）将模拟测量值（真实世界中大多数现象的特征）转换为数字格式，用于信息处理、计算、数据传输和控制系统。

本应用笔记旨在提出一种使用数字处理（包括平均值和校准寄存器）实现失调和增益校准的方法。

此外，还提出了生成用于校准的模拟电压的有效方式。

---

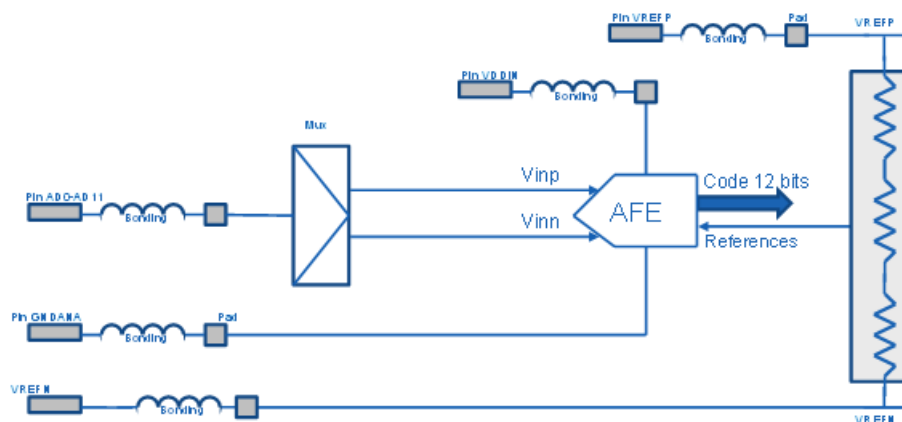
## 目录

---

简介.....	1
1. 框图.....	3
2. AFE处理.....	5
2.1 ADC平均值计算.....	6
2.2 ADC自动误差校正.....	6
2.3 硬件校正.....	7
2.4 软件校正.....	8
3. 在无外部电压的情况下创建两个校准点V1和V2.....	9
4. 版本历史.....	11
Microchip网站.....	12
变更通知客户服务.....	12
客户支持.....	12
Microchip器件代码保护功能.....	12
法律声明.....	13
商标.....	13
DNV认证的质量管理体系.....	14
全球销售及服务网点.....	15

## 1. 框图

图1-1. AFE框图（BGA144封装）



AFE实现了循环ADC架构。在输入采样后，ADC使用23个AFE时钟周期分12步处理电压。如上图所示，AFE被构建为差分AFE。此功能可有效抑制共模噪声，这对于工作在高时钟频率下的单片机而言至关重要。如果不采用这种差分设计，ADC会混淆单片机数字活动的噪声，进而大幅降低性能。

通过ADC的差分模式，实现了单端模式。该模式将信号 $V_{INP}$ 和 $V_{DAC}$ 的所有正输入 $AD_{x,y}$ 作为连接到ADC负输入 $V_{INN}$ 的参考。

图1-2. 单端模式下采样的功能图

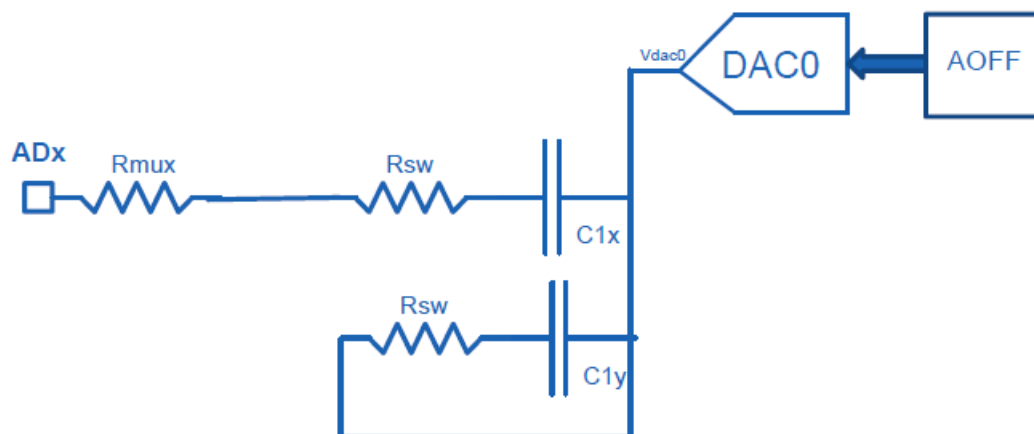


图1-3. 差分模式下采样的功能图

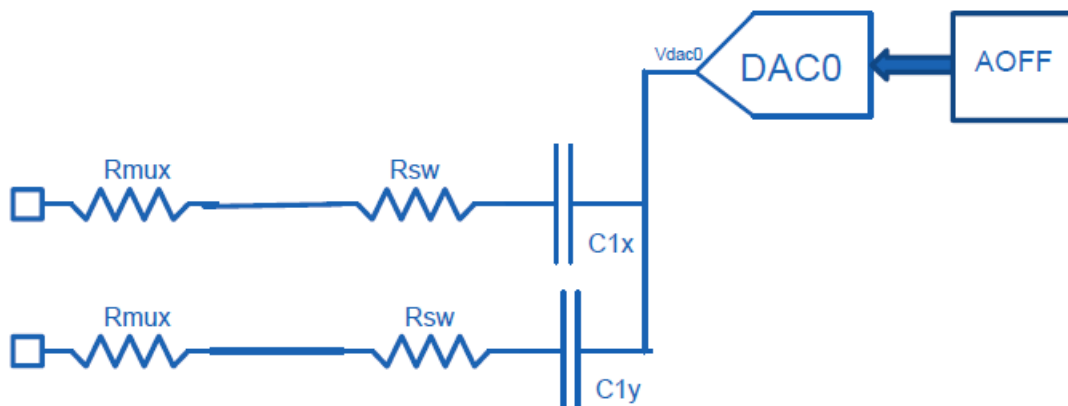
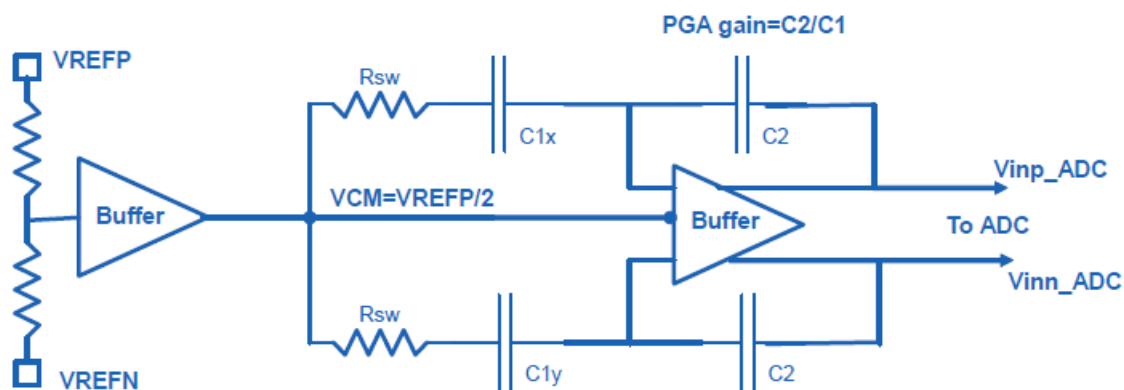


图1-4. 单端和差分模式下保持的功能图

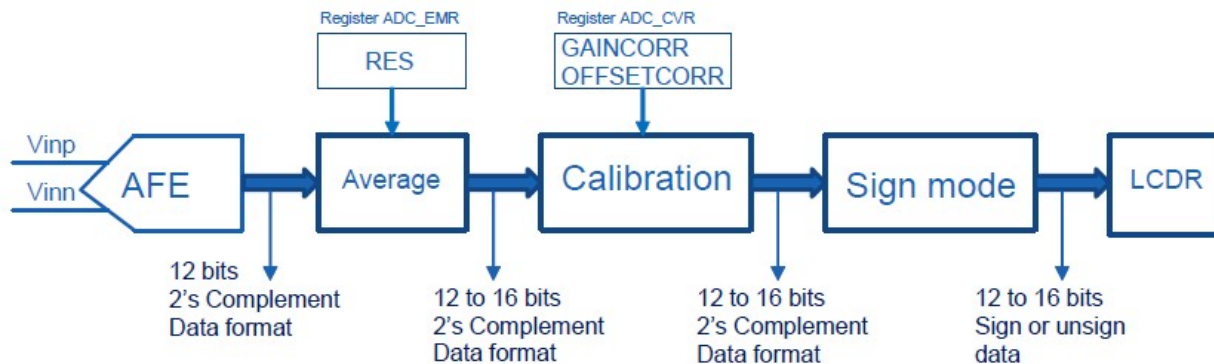


如果以这种方式构建，则单端模式可保持差分模式的良好噪声抑制功能。此外，还通过专用电源轨  $V_{DDANA}$ - $GNDANA$  和参考  $V_{REFP}$ - $V_{REFN}$  的专用引脚增强了抗噪能力。

## 2. AFE处理

在AFE之后会进行一些数字处理（平均值、失调和增益校正，以及符号格式输出），随后是传入AFE最后转换数据寄存器（AFEC\_LCDR）和AFE通道数据寄存器（AFEC\_CDR）。

图2-1. AFE数字处理



ADC中的数据采用12位二进制补码格式。在符号模式模块之前的所有处理均基于有符号运算。符号模式模块向DATA加2047以获得无符号输出。

AFEC\_COFR.AOFF字段的合适值为512（复位值为零）。每个通道的值可能不同。在具有多个选定通道的定序器中，在第一个通道后按数字顺序读取和更新AOFF。如果仅选择一个通道，则AOFF会在启动时被读取一次，且无法被更新。AOFF的新值可更新为重新启动AFEC或运行两次转换的条件；后者将具有正确的AOFF。

AFEC\_ACR.IBCTL应为10。

AFEC\_MR.TRANSFER = 2且AFEC\_MR.TRACKTIM = 0时，转换时间为23个ADC时钟周期。支持的跟踪时间始终为15个ADC时钟周期。只能通过降低ADC时钟频率来增加跟踪时间。



**重要提示：** 建议以较低频率运行ADCLOCK，即避免采用40 MHz频率。10 MHz或20 MHz频率可降低因噪声而改变输出代码的风险。



**重要提示：** 选择通道时，IO上拉电阻不会自动禁止，因此需要先在PIO控制器中执行此操作。



**重要提示：** 连续转换无中断；每个通道都存在一个单独的中断。

## 2.1 ADC平均值计算

平均值计算模块对ADC 12位DATA进行滤波以抑制噪声。这种技术并不能减少所有类型的噪声。在白噪声（如热噪声和量化噪声）下可实现最高效率。

OSR表示平均采样数。最终代码是以下公式的计算结果：

$$\text{平均代码} = \frac{1}{\sqrt{\text{OSR}}} \sum_{k=1}^{\text{OSR}} \text{采样}(k)$$

该代码针对4个平均采样获得额外的一位分辨率。

如果噪音不是白噪声，则该结果不正确。当数字活动或者地面或电源中的时钟噪声产生寄生噪声时，通常会出现这种情况。对于每4个平均采样，分辨率的增益可降至0.8。12位模式下的实际测量结果给出10.2位有效分辨率，这主要由于数字活动噪声而引起，并且可能会因应用而异。

实际实现情况如下：

OSR	额外位	分辨率
4	0.8	11
16	1.6	11.8
64	2.4	12.6
256	3.2	13.4

使用平均值时，该代码乘以动态增强因子M：

OSR	M	代码最大值
4	2	8191
16	4	16383
64	8	32767
256	16	65535

采用公式  $R = 12 + \frac{\log_2(\text{OSR})}{2}$

其中R是支持平均值计算（OSR）的ADC的分辨率。

## 2.2 ADC自动误差校正

ADC被构建为差分ADC，因而即使在单端模式下，也仍在中点ADVREFP/2处测量失调误差。因此，所有模式均具有相同的失调和增益误差定义以及相同的校正方法。

### 2.2.1 增益和失调误差

对于12位分辨率的 $E_O$ （LSB）的给定失调，此失调值为 $M \times E_O$  LSB（使用OSR时）。

对于给定增益误差 $E_G$  (%)，无论OSR如何，此增益误差均保持不变。AFE引入失调误差，然后将其乘以增益。不过，我们将最终数学方程体现为 $y=ax+b$ 的形式。

$$\text{实际代码 } C_A = (1+E_G/100) \times (C_i + \text{失调值}) = (1+E_G/100) \times C_i + E_O$$

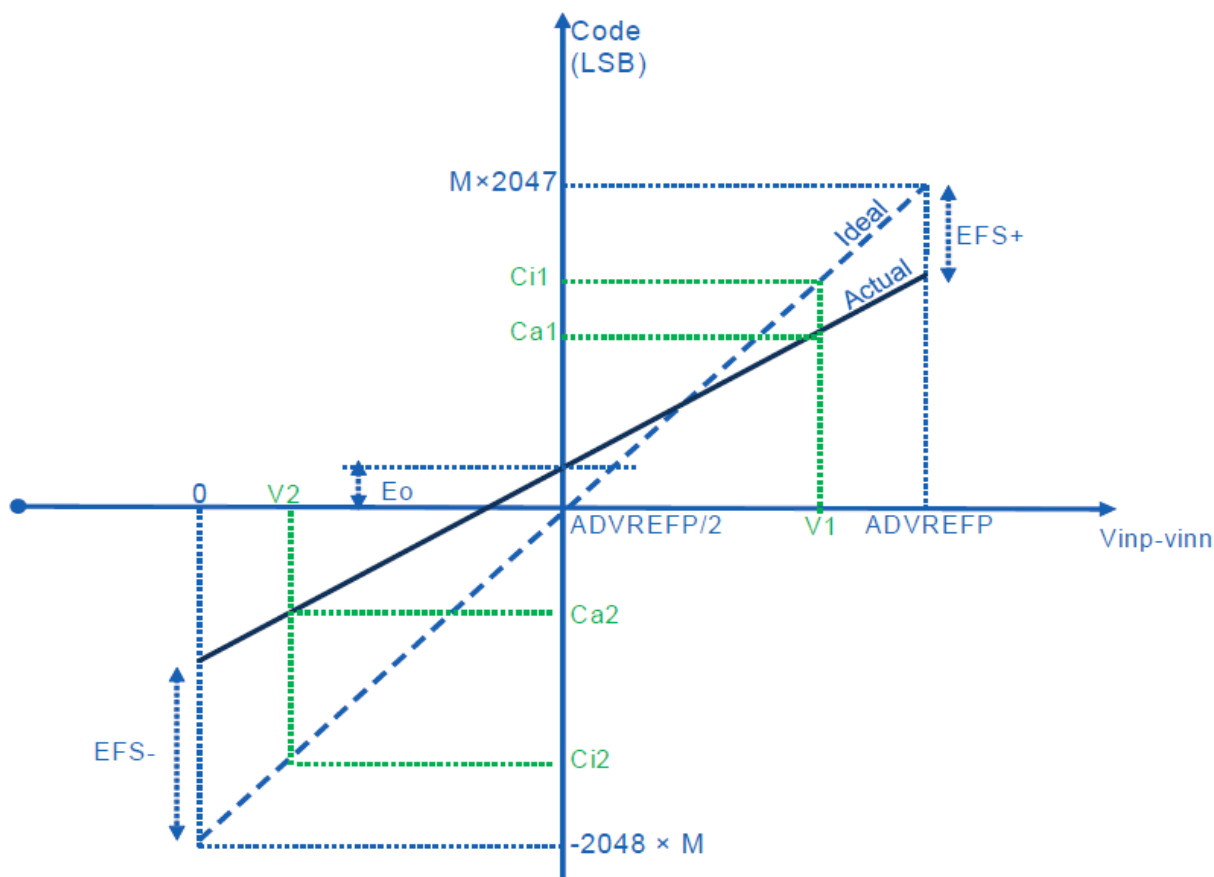
$$\text{其中 } E_O = (1+E_G/100) \times \text{失调值}$$

$$E_G \text{ 为增益误差, } E_G(\%) = 100 \times E_{FS} / (M \times 4096)$$

$$\text{满量程增益误差 } E_{FS} = (E_{FS+}) - (E_{FS-})$$

$C_i$ 为理想代码。

图2-2. 增益和失调误差



在单端模式下， $V_{INP}$  = 输入信号， $V_{INN} = V_{DAC}$ 。

在差分模式下， $V_{INP}$  = 正输入信号， $V_{INN}$  = 负输入信号。

在消除来自应用系统的失调和增益误差（而不仅仅是ADC内部的误差）方面，此自动校正功能对于用户会十分有用。

### 2.3 硬件校正

需要用校正数据对AFE校正寄存器（AFEC\_CVR）中的OFFSETCORR和GAINCORR字段进行填充。此数据根据两个有符号格式的测量点计算得出。所有功能模式的校正均相同。

选择两个输入电压V1和V2，并提供实际测量点C<sub>A1</sub>和C<sub>A2</sub>，使该数据包含对相应理想点C<sub>i1</sub>和C<sub>i2</sub>添加的失调误差和增益误差。使用有符号输出代码获取正确格式的数据。建议使用平均值来减小对校准值的噪声干扰。

增益误差由以下公式计算得出： $E_G = 100 \times ((C_{A2} - C_{A1}) / ((C_{i2} - C_{i1}) - 1))$

失调误差由以下公式计算得出： $E_O = C_{A2} - (1 + E_G/100) \times C_{i2}$



**提示：**如果代码是以无符号格式测量的，则计算必须转为有符号格式，如 $E_O = (C_{A2} - 2047) - (1 + E_G/100) \times (C_{i2} - 2047)$

字段OFFSETCORR =  $-E_O$

字段GAINCORR =  $2^{15} \times (C_{i2} - C_{i1}) / (C_{A2} - C_{A1})$ 的舍入结果

自动校正的计算公式如下：

校正后的代码 =  $(\text{代码} + \text{OFFSETCORR}) \times \text{GAINCORR} / 2^{15}$

要实现正确校准，必须测量一个外部稳定且准确的电压，如带隙电压。

该电压在外部提供给AFE。如果无法保证VREFP精度（例如+/-3%），则校准也会校正此误差。前提是，VREFP随时间、温度和功耗的变化而保持稳定。

如果校准针对单端模式执行，则会对差分模式保持有效。

## 2.4 软件校正

硬件校正可由软件校正取代。使用与硬件校正相同的 $E_O$ 估算和校正方程时，注意失调和增益的校正顺序至关重要：在这种情况下，先校正失调，后校正增益，不能反过来。



### 3. 在无外部电压的情况下创建两个校准点V1和V2

AFE具有一个反馈所有输入的10位DAC。校准方法包括利用此DAC创建计算失调和增益误差所使用的V1和V2电压。不过，这种方法不能校正VREFP的内部变化，因为V1和V2取决于VREFP。

主要误差来自PGA0或PGA1。PGA0的输入必须接地（或采用测量电压值可能为零伏的任何输入）。这同样适用于PGA1的校准。10位DAC AFEC\_COCCR.AOFF字段将被编程为AOFF1和AOFF2两个值。

$$V1 = \text{GND-VAOFF1}$$

$$V2 = \text{GND-VAOFF2}$$

计算示例：

选择AOFF1=100和AOFF2=400。

假设VDDIN = 3.3V = VREFP（举例）：

$$V1 = \text{VREFP} \times \text{AOFF1}/1024 = 0.322266\text{V}$$

$$V2 = \text{VREFP} \times \text{AOFF2}/1024 = 1.289063\text{V}$$

表3-1. OSR = 256、分辨率R = 16位的计算示例

步骤	参数	值	单位	公式
理想	C <sub>i1</sub>	-6400	LSB	$2^R \times (0-V1) / \text{VREFP}$
理想	C <sub>i2</sub>	-25600	LSB	$2^R \times (0-V2) / \text{VREFP}$
实际	C <sub>A1</sub>	-6434	LSB	
实际	C <sub>A2</sub>	-25826	LSB	
求增益和失调值：				
误差	增益	1.01	-	增益 = (C <sub>A2</sub> -C <sub>A1</sub> ) / (C <sub>i2</sub> -C <sub>i1</sub> )
误差	失调	30	-	失调 = (C <sub>A2</sub> -C <sub>i2</sub> ) x 增益
此后，可应用校正：				
寄存器	OFFSETCORR	-30	LSB	OFFSETCORR = -失调值
寄存器	GAINCORR	32443	LSB	GAINCORR = FLOOR( $2^{15}/\text{Gain}$ ,1)
验证				
已校正	C1	-6400	LSB	C1 = FLOOR((C <sub>A1</sub> +OFFSETCORR) × GAINCORR/ $2^{15}$ ,1)
已校正	C2	-25600	LSB	C2 = FLOOR((C <sub>A2</sub> +OFFSETCORR) × GAINCORR/ $2^{15}$ ,1)

**注：**转换后的数据必须采用有符号格式。

此方法适用于所有VREFP值。如果VREFP变化范围为+/-3%，则校准数据不受影响，并且会对AFEC就其自身的增益和失调误差进行补偿。DAC INL、增益和失调误差会引入校准误差。如果最终精度不够，则需要外部电压V1和V2。

遗憾的是，绝对精度（包括VREFP变化）未被校正。为对此进行改善，需补偿VREFP的变化。



**提示：** 这种方法的优点是，可在线应用，且如果定期重复校准，可用于补偿失调和增益误差的温度变化。

---

## 4. 版本历史

**版本A——2017年7月**

这是本文档的初始版本。

---

## Microchip网站

---

Microchip网站 (<http://www.microchip.com/>) 为客户提供在线支持。客户可通过该网站方便地获取文件和信息。只要使用常用的互联网浏览器即可访问，网站提供以下信息：

- **产品支持**——数据手册和勘误表、应用笔记和示例程序、设计资源、用户指南以及硬件支持文档、最新的软件版本以及归档软件
- **一般技术支持**——常见问题（FAQ）、技术支持请求、在线讨论组以及Microchip顾问计划成员名单
- **Microchip业务**——产品选型和订购指南、最新Microchip新闻稿、研讨会和活动安排表、Microchip销售办事处、代理商以及工厂代表列表

---

## 变更通知客户服务

---

Microchip的变更通知客户服务有助于客户了解Microchip产品的最新信息。注册客户可在他们感兴趣的某个产品系列或开发工具发生变更、更新、发布新版本或勘误表时，收到电子邮件通知。

欲注册，请登录Microchip网站<http://www.microchip.com/>。在“支持”（Support）下，点击“变更通知客户”（Customer Change Notification）服务后按照注册说明完成注册。

---

## 客户支持

---

Microchip产品的用户可通过以下渠道获得帮助：

- 代理商或代表
- 当地销售办事处
- 应用工程师（FAE）
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或应用工程师（FAE）寻求支持。当地销售办事处也可为客户提供帮助。本文档后附有销售办事处的联系方式。

也可通过以下网站获得技术支持：<http://www.microchip.com/support>

---

## Microchip器件代码保护功能

---

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愿意与关心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。

## 法律声明

本出版物中所述的器件应用信息及其他类似内容仅为您提供便利，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。除非另外声明，否则在**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、AnyRate、AVR、AVR徽标、AVR Freaks、BeaconThings、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、Heldo、JukeBlox、KeeLoq、KeeLoq徽标、Kleer、LANCheck、LINK MD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、MOST、MOST徽标、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32徽标、Prochip Designer、QTouch、RightTouch、SAM-BA、SpyNIC、SST、SST徽标、SuperFlash、tinyAVR、UNI/O和XMEGA是**Microchip Technology Incorporated**在美国和其他国家或地区的注册商标。

ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、mTouch、Precision Edge和Quiet-Wire为**Microchip Technology Incorporated**在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、BodyCom、chipKIT、chipKIT徽标、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、EtherGREEN、In-Circuit Serial Programming、ICSP、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、KleerNet、KleerNet徽标、Mindi、MiWi、motorBench、MPASM、MPF、MPLAB Certified徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICtail、PureSilicon、QMatrix、RightTouch徽标、REAL ICE、Ripple Blocker、SAM-ICE、Serial Quad I/O、SMART-I.S.、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、ViewSpan、WiperLock、Wireless DNA和ZENA为**Microchip Technology Incorporated**在美国和其他国家或地区的商标。

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

Silicon Storage Technology为**Microchip Technology Inc.**在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC是**Microchip Technology Inc.**的子公司**Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG**在除美国外的国家或地区的注册商标。

在此提及的所有其他商标均为各持有公司所有。

© 2018, **Microchip Technology Incorporated**, 美国印刷, 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-2959-3

## **DNV认证的质量管理体系**

---

### **ISO/TS 16949**

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-16949:2009认证。Microchip的PIC<sup>®</sup> MCU和dsPIC<sup>®</sup> DSC、KEELOQ<sup>®</sup>跳码器件、串行EEPROM、单片机外设、非易失性存储器和模拟产品严格遵守公司的质量体系流程。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。



## 全球销售及及服务网点

### 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://www.microchip.com/support>

网址: [www.microchip.com](http://www.microchip.com)

**亚特兰大 Atlanta**  
Duluth, GA

Tel: 1-678-957-9614  
Fax: 1-678-957-1455

**奥斯汀 Austin, TX**  
Tel: 1-512-257-3370

**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

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

**底特律 Detroit**  
Novi, MI  
Tel: 1-248-848-4000

**休斯敦 Houston, TX**  
Tel: 1-281-894-5983

**印第安纳波利斯 Indianapolis**  
Noblesville, IN  
Tel: 1-317-773-8323  
Fax: 1-317-773-5453  
Tel: 1-317-536-2380

**洛杉矶 Los Angeles**  
Mission Viejo, CA  
Tel: 1-949-462-9523  
Fax: 1-949-462-9608  
Tel: 1-951-273-7800

**罗利 Raleigh, NC**  
Tel: 1-919-844-7510

**纽约 New York, NY**  
Tel: 1-631-435-6000

**圣何塞 San Jose, CA**  
Tel: 1-408-735-9110  
Tel: 1-408-436-4270

**加拿大多伦多 Toronto**  
Tel: 1-905-695-1980  
Fax: 1-905-695-2078

### 亚太地区

中国 - 北京  
Tel: 86-10-8569-7000

中国 - 成都  
Tel: 86-28-8665-5511

中国 - 重庆  
Tel: 86-23-8980-9588

中国 - 东莞  
Tel: 86-769-8702-9880

中国 - 广州  
Tel: 86-20-8755-8029

中国 - 杭州  
Tel: 86-571-8792-8115

中国 - 南京  
Tel: 86-25-8473-2460

中国 - 青岛  
Tel: 86-532-8502-7355

中国 - 上海  
Tel: 86-21-3326-8000

中国 - 沈阳  
Tel: 86-24-2334-2829

中国 - 深圳  
Tel: 86-755-8864-2200

中国 - 苏州  
Tel: 86-186-6233-1526

中国 - 武汉  
Tel: 86-27-5980-5300

中国 - 西安  
Tel: 86-29-8833-7252

中国 - 厦门  
Tel: 86-592-238-8138

中国 - 香港特别行政区  
Tel: 852-2943-5100

中国 - 珠海  
Tel: 86-756-321-0040

台湾地区 - 高雄  
Tel: 886-7-213-7830

台湾地区 - 台北  
Tel: 886-2-2508-8600

台湾地区 - 新竹  
Tel: 886-3-577-8366

### 亚太地区

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

印度 **India - Bangalore**  
Tel: 91-80-3090-4444

印度 **India - New Delhi**  
Tel: 91-11-4160-8631

印度 **India - Pune**  
Tel: 91-20-4121-0141

日本 **Japan - Osaka**  
Tel: 81-6-6152-7160

日本 **Japan - Tokyo**  
Tel: 81-3-6880-3770

韩国 **Korea - Daegu**  
Tel: 82-53-744-4301

韩国 **Korea - Seoul**  
Tel: 82-2-554-7200

马来西亚  
**Malaysia - Kuala Lumpur**  
Tel: 60-3-7651-7906

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

菲律宾 **Philippines - Manila**  
Tel: 63-2-634-9065

新加坡 **Singapore**  
Tel: 65-6334-8870

泰国 **Thailand - Bangkok**  
Tel: 66-2-694-1351

越南 **Vietnam - Ho Chi Minh**  
Tel: 84-28-5448-2100

### 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

芬兰 **Finland - Espoo**  
Tel: 358-9-4520-820

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

德国 **Germany - Garching**  
Tel: 49-8931-9700

德国 **Germany - Haan**  
Tel: 49-2129-3766400

德国 **Germany - Heilbronn**  
Tel: 49-7131-67-3636

德国 **Germany - Karlsruhe**  
Tel: 49-721-625370

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

德国 **Germany - Rosenheim**  
Tel: 49-8031-354-560

以色列 **Israel - Ra'anana**  
Tel: 972-9-744-7705

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

意大利 **Italy - Padova**  
Tel: 39-049-7625286

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

挪威 **Norway - Trondheim**  
Tel: 47-7289-7561

波兰 **Poland - Warsaw**  
Tel: 48-22-3325737

罗马尼亚  
**Romania - Bucharest**  
Tel: 40-21-407-87-50

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

瑞典 **Sweden - Gothenberg**  
Tel: 46-31-704-60-40

瑞典 **Sweden - Stockholm**  
Tel: 46-8-5090-4654

英国 **UK - Wokingham**  
Tel: 44-118-921-5800  
Fax: 44-118-921-5820