
模拟信号调理（OPAMP）外设的增益和失调校准

简介

作者：Lloyd D. Clark 博士，Microchip Technology Inc.

模拟信号调理（OPAMP）外设可配置为可编程增益放大器（Programmable Gain Amplifier, PGA），使用内部梯形电阻网络选择增益值。由于内部梯形电阻网络中的电阻具有一定容差，并且可能会受温度或其他参数的影响而发生变化，因此实际增益可能与选定的增益值略有不同。在某些应用中，精确定义 PGA 的增益和输入失调可能会比较有利。本文档介绍了如何使用单片机（MCU）的内部数模转换器（Digital-to-Analog Converter, DAC）和模数转换器（Analog-to-Digital Converter, ADC）来校准 PGA 的增益和失调。DAC 用于控制 PGA 输入端的电压，而 ADC 则用于测量 PGA 输入端和输出端的电压。ADC 测得的值可用于计算 PGA 的增益和输入失调。无需外部元件。

特性

- 使用 MCU 的内部 DAC 和 ADC 执行增益和失调校准
- 无需外部元件

目录

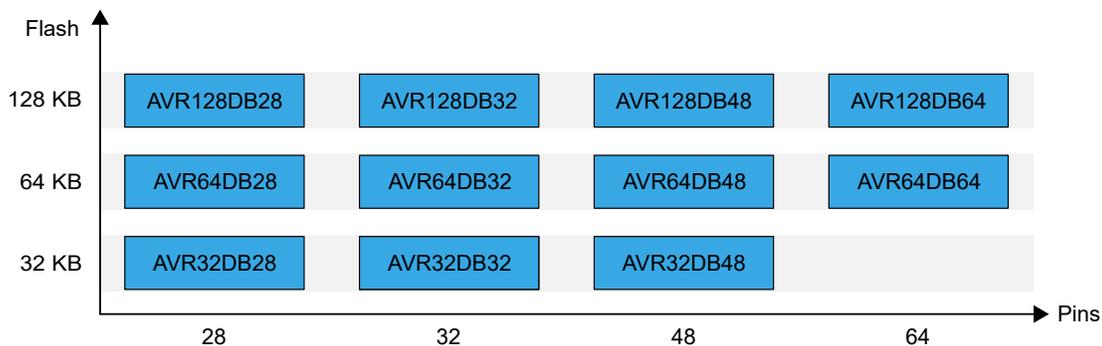
简介.....	1
特性.....	1
1. 相关器件.....	3
2. 校准理论.....	4
3. 基于 MCU 的校准实现.....	5
4. 版本历史.....	9
Microchip 网站.....	10
产品变更通知服务.....	10
客户支持.....	10
Microchip 器件代码保护功能.....	10
法律声明.....	10
商标.....	11
质量管理体系.....	11
全球销售及服务网点.....	12

1. 相关器件

本节列出了本文档涉及的相关器件。下图给出了不同系列的器件，并注明了不同的引脚数与存储器大小：

- 从下到上迁移无需修改代码，因为这些器件的引脚彼此兼容，后者可提供相同甚至更多的功能
- 从右到左迁移会减少引脚数，进而减少可用的功能
- 具有不同闪存大小的器件通常也具有不同的 SRAM 和 EEPROM

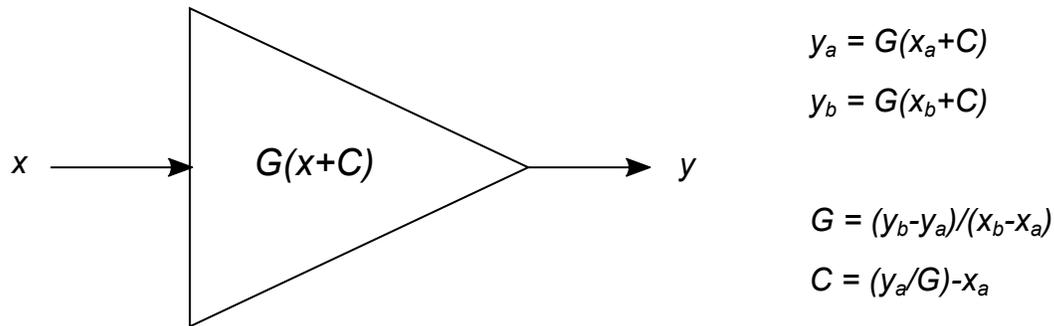
图 1-1. AVR® DB 系列概览



2. 校准理论

理想的可编程增益放大器（PGA）可按照精确的可编程增益值 G 来放大输入电压。如果 PGA 是理想的放大器，则将输出端测得的电压除以 G 即可确定输入电压。但是，许多 PGA 实现有两个缺陷，必须在应用中的加以考虑。首先，输入失调电压在放大前被有效地添加到了输入信号中。其次，由于模拟元件容差等原因，实际增益可能与设定值略有不同。

图 2-1. PGA 及其增益和失调公式



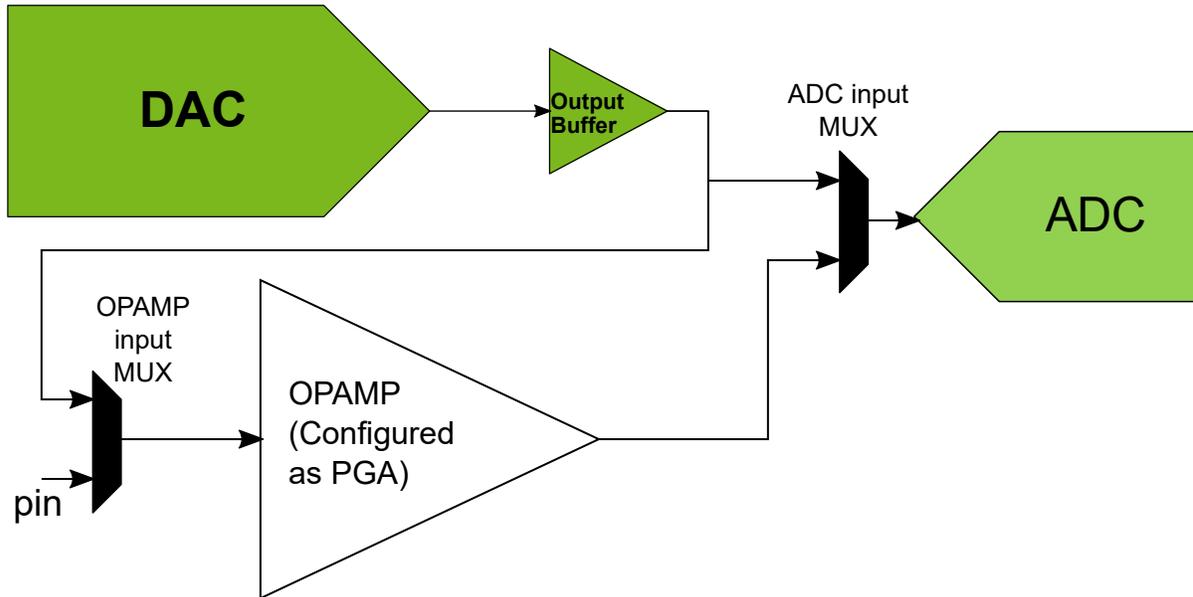
上图给出了 PGA 的高级表示（包含增益和失调公式）。输入信号 x 首先与失调值 C 相加，二者之和 $(x+C)$ 随后与增益值 G 相乘得到输出信号 y 。增益和失调校准的基本原理是通过输入两个不同的值 (x_a 和 x_b) 来获得两个不同的输出值 (y_a 和 y_b)。如果通过测量精准确定了 x_a 、 x_b 、 y_a 和 y_b ，则求解前两个方程可得出 G 和 C ，从而计算出增益和输入失调。

举一个实际的例子，假设 PGA 经过编程后设定为标称增益 16。首先，输入 60 mV 电压，测得输出电压为 986 mV，因此 x_a 为 60 mV， y_a 为 986 mV。接下来，输入 120 mV 电压，测得输出电压为 1940 mV，因此 x_b 为 120 mV， y_b 为 1940 mV。将这四个值代入到 G 和 C 的方程中得出增益 G 为 15.9，输入失调 C 为 2.0 mV。

3. 基于 MCU 的校准实现

由于单片机（MCU）包含数模转换器（DAC）和模数转换器（ADC）以及模拟多路开关（支持灵活互连），因此无需使用外部元件即可执行可编程增益放大器（PGA）的增益和失调校准。

图 3-1. 用于校准的 DAC、OPAMP 和 ADC 互连框图



上图显示了用于校准的 DAC、OPAMP 和 ADC 之间的互连。DAC 输出经过缓冲后馈入 ADC 输入多路开关和 OPAMP 输入多路开关。OPAMP 输入多路开关可以在经过缓冲的 DAC 输出与器件引脚之间进行选择。ADC 输入多路开关可以在 DAC 输出与 OPAMP 输出之间进行选择。

在 OPAMP、DAC 和 ADC 都经过初始化并使能后，可按照以下步骤来执行增益和失调校准过程：

1. 配置 OPAMP 输入多路开关以选择 DAC 输出。
2. 将第一个值 (x_a) 写入 DAC。
3. 配置 ADC 输入多路开关以选择 DAC 输出。
4. 为 DAC 输出和 ADC 输入留出用于稳定的时间。
5. 启动 ADC 转换。
6. 等待 ADC 转换完成。
7. 将 ADC 结果保存为 x_a 。
8. 配置 ADC 输入多路开关以选择 OPAMP 输出。
9. 为 ADC 输入留出用于稳定的时间。
10. 启动 ADC 转换。
11. 等待 ADC 转换完成。
12. 将 ADC 结果保存为 y_a 。
13. 将第二个值 (x_b) 写入 DAC。
14. 配置 ADC 输入多路开关以选择 DAC 输出。
15. 为 DAC 输出和 ADC 输入留出用于稳定的时间。
16. 启动 ADC 转换。
17. 等待 ADC 转换完成。
18. 将 ADC 转换结果保存为 x_b 。
19. 配置 ADC 输入多路开关以选择 OPAMP 输出。
20. 为 ADC 输入留出用于稳定的时间。

21. 启动 ADC 转换。
22. 等待 ADC 转换完成。
23. 将 ADC 转换结果保存为 y_b 。
24. 可以多次重复执行第 2 步至第 23 步，然后对 ADC 结果取平均值以获得更为准确的 x_a 、 y_a 、 x_b 和 y_b 的值。
25. 计算校准后的增益值： $G = (y_b - y_a) / (x_b - x_a)$ 。
26. 计算校准后的输入失调值： $C = (y_a / G) - x_a$ 。
27. 校准完成，OPAMP（配置为 PGA）已就绪，可供应用使用。配置 OPAMP 输入多路开关以选择器件引脚。

对于所有涉及增益和/或失调的计算，应用程序代码都应使用校准后的增益和输入失调值。

以下代码实现了上述增益和失调校准过程：

```
#define F_CPU 4000000UL // 4 MHz 为默认的 CPU 和外设频率

#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>

// VREF（参考电压）外设将设置为生成
// 2.5V 参考电压
#define VREF_REFSEL_CONTROL VREF_REFSEL_2V500_gc
#define VREF_MV 2500.0 // 参考电压的浮点值（以 mV 为单位）

// DAC（数模转换器）具有 10 位分辨率，因此  $2^{10} = 1024$  个
// 可能的输入值
// DAC 输出（约 60 mV 和 120 mV）将用于执行
// 运放增益级的两点增益和失调测量/校准
// 以下是产生上述输出电压所需的两个
// DAC 数据值的计算结果：
//  $(60 \text{ mV} / 2500 \text{ mV}) * 1024 = 25$ 
//  $(120 \text{ mV} / 2500 \text{ mV}) * 1024 = 49$ 
#define DAC_DATA_A 25
#define DAC_DATA_B 49

// AVR-DB ADC（模数转换器）具有 12 位分辨率，因此
//  $2^{12} = 4096$  个可能的输出值
// 确定 ADC 输出中的一个 LSB 变化所对应的 mV 数：
#define MV_PER_ADC_LSB (VREF_MV/4096)

// 平均测量次数
#define N_AVERAGE 100

void measure(uint16_t dac_data, uint8_t muxpos_dacout, uint8_t muxpos_opout,
             int16_t *dac_meas, int16_t *opout_meas){

    // 给定 DAC 设置，该函数用于测量运放输入和输出值

    DAC0.DATA = dac_data << DAC_DATA0_bp; // 向 DAC 写入一个新值
    ADC0.MUXPOS = muxpos_dacout; // 配置 ADC 输入多路开关以选择 DAC 输出
    _delay_ms(1); // 为 DAC 输出和 ADC 输入留出用于稳定的时间

    ADC0.COMMAND = ADC_STCONV_bm; // 启动 ADC 转换
    while(ADC0.COMMAND & ADC_STCONV_bm); // 等待 ADC 转换完成
    *dac_meas = ADC0.RES; // 将 ADC 结果保存为 DAC 输出值的测量值

    ADC0.MUXPOS = muxpos_opout; // 配置 ADC 输入多路开关以选择 OPAMP 输出
    _delay_ms(1); // 为 ADC 输入留出用于稳定的时间

    ADC0.COMMAND = ADC_STCONV_bm; // 启动 ADC 转换
    while(ADC0.COMMAND & ADC_STCONV_bm); // 等待 ADC 转换完成
    *opout_meas = ADC0.RES; // 将 ADC 结果保存为 OPAMP 输出的测量值

    return;
}

volatile float meas_gain = 0; // 测得的增益
volatile float meas_offset = 0; // 测得的输入失调（ADC 单元中）
```

```

volatile float meas_offset_mv = 0; // 测得的输入失调 (以 mV 为单位)

int main(void)
{
    uint8_t n;
    int16_t xa, ya, xb, yb;
    int32_t accum_xa, accum_ya, accum_xb, accum_yb;
    float avg_xa, avg_ya, avg_xb, avg_yb;

    // 禁止 OP0 输入和输出引脚上的数字输入
    PORTD.PIN1CTRL = PORT_ISC_INPUT_DISABLE_gc;
    PORTD.PIN2CTRL = PORT_ISC_INPUT_DISABLE_gc;
    PORTD.PIN3CTRL = PORT_ISC_INPUT_DISABLE_gc;

    // 禁止 DAC 输出引脚上的数字输入
    PORTD.PIN6CTRL = PORT_ISC_INPUT_DISABLE_gc;

    // 设置 OPAMP 外设的时基
    OPAMP.TIMEBASE = 3; // CLK_PER 周期 (等于 1 μs) 数减去 1 (4-1=3)

    // 将 OP0 配置为同相增益 16, DAC 为输入
    OPAMP.OP0INMUX = OPAMP_OP0INMUX_MUXPOS_DAC_gc | OPAMP_OP0INMUX_MUXNEG_WIP_gc;
    OPAMP.OP0RESMUX = OPAMP_OP0RESMUX_MUXBOT_GND_gc | OPAMP_OP0RESMUX_MUXWIP_WIP7_gc |
    OPAMP_OP0RESMUX_MUXTOP_OUT_gc;
    // 配置 OP0 控制 A
    OPAMP.OP0CTRLA = OPAMP_RUNSTBY_bm | OPAMP_OP0CTRLA_OUTMODE_NORMAL_gc | OPAMP_ALWAYS_ON_bm;

    // 使能 OPAMP 外设
    OPAMP.CTRLA = OPAMP_ENABLE_bm;

    // 设置 VREF 外设, 为 ADC 和 DAC 生成相同的参考电压
    VREF.ADCOREF = VREF_ALWAYS_ON_bm | VREF_REFSEL_CONTROL;
    VREF.DACOREF = VREF_ALWAYS_ON_bm | VREF_REFSEL_CONTROL;

    // 使能 DAC 外设及其输出引脚
    DAC0.CTRLA = DAC_OUTEN_bm | DAC_ENABLE_bm;

    // 设置 ADC 外设
    ADC0.CTRLC = ADC_PRESC_DIV4_gc; // 将 ADC 预分频比设置为 DIV4
    // 因此 CLK_ADC = 4 MHz / 4 = 1 MHz
    ADC0.CTRLA = ADC_ENABLE_bm; // 将 ADC 使能为单端模式

    accum_xa = 0; accum_ya = 0; accum_xb = 0; accum_yb = 0; // 复位累加器
    for (n = 0; n < N_AVERAGE; n++){
        measure(DAC_DATA_A, ADC_MUXPOS_AIN6_gc, ADC_MUXPOS_AIN2_gc, &xa, &ya);
        // DACOUT OP0OUT
        measure(DAC_DATA_B, ADC_MUXPOS_AIN6_gc, ADC_MUXPOS_AIN2_gc, &xb, &yb);
        // DACOUT OP0OUT
        accum_xa += xa; accum_ya += ya; accum_xb += xb; accum_yb += yb; // 加到累加器中
    }
    avg_xa = ((float) accum_xa) / ((float) N_AVERAGE);
    avg_ya = ((float) accum_ya) / ((float) N_AVERAGE);
    avg_xb = ((float) accum_xb) / ((float) N_AVERAGE);
    avg_yb = ((float) accum_yb) / ((float) N_AVERAGE);

    meas_gain = (avg_yb - avg_ya) / (avg_xb - avg_xa); // 测得的增益
    meas_offset = (avg_ya / meas_gain) - avg_xa; // 测得的输入失调 (ADC 单元中)
    meas_offset_mv = meas_offset * MV_PER_ADC_LSB; // 测得的输入失调 (以 mV 为单位)

    // 校准完成, OPAMP 已就绪, 可供应用程序使用,
    // 接下来配置 OPAMP 输入多路开关以选择输入引脚。
    OPAMP.OP0INMUX = OPAMP_OP0INMUX_MUXPOS_INP_gc | OPAMP_OP0INMUX_MUXNEG_WIP_gc;

    while(1){
        // 将应用程序置于此处
    }
}

```



[View Code Example on GitHub](#)
Click to browse repository

4. 版本历史

文档版本	日期	备注
A	2020 年 9 月	文档初始版本

Microchip 网站

Microchip 网站 (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。我们的网站提供以下内容：

- **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**——常见问题解答 (FAQ)、技术支持请求、在线讨论组以及 Microchip 设计伙伴计划成员名单
- **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

产品变更通知服务

Microchip 的产品变更通知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，请访问 www.microchip.com/pcn，然后按照注册说明进行操作。

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 (ESE)
- 技术支持

客户应联系其代理商、代表或 ESE 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 www.microchip.com/support 获得网上技术支持。

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规范。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- 目前，仍存在着用恶意、甚至是非法的方法来试图破坏代码保护功能的行为。我们确信，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。这种试图破坏代码保护功能的行为极可能侵犯 Microchip 的知识产权。
- 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。

法律声明

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。

本出版物中提供的信息仅仅是为方便您使用 Microchip 产品或使用这些产品来进行设计。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 “按原样”提供这些信息。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，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或间接的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。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损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，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、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR 徽标、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、chipKIT、chipKIT 徽标、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、FlashFlex、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi 徽标、MOST、MOST 徽标、MPLAB、OptoLyzer、PackeTime、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 徽标、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST 徽标、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron 及 XMEGA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的注册商标。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、FlashTec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus 徽标、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、WinPath 和 ZL 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国的注册商标。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified 徽标、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect 和 ZENA 均为 Microchip Technology Incorporated 在美国和其他国家或地区的商标。

SQTP 为 Microchip Technology Incorporated 在美国的服务标记。

Adaptec 徽标、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology 和 Symmcom 均为 Microchip Technology Inc. 在除美国外的国家或地区的注册商标。

GestIC 为 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。

© 2021, Microchip Technology Incorporated 版权所有。

ISBN: 978-1-5224-8820-0

质量管理体系

有关 Microchip 的质量管理体系的信息，请访问 www.microchip.com/quality。

全球销售及服务中心

美洲	亚太地区	亚太地区	欧洲
公司总部 2355 West Chandler Blvd. Chandler, AZ 85224-6199 电话: 480-792-7200 传真: 480-792-7277 技术支持: www.microchip.com/support 网址: www.microchip.com	澳大利亚 - 悉尼 电话: 61-2-9868-6733 中国 - 北京 电话: 86-10-8569-7000 中国 - 成都 电话: 86-28-8665-5511 中国 - 重庆 电话: 86-23-8980-9588 中国 - 东莞 电话: 86-769-8702-9880 中国 - 广州 电话: 86-20-8755-8029 中国 - 杭州 电话: 86-571-8792-8115 中国 - 香港特别行政区 电话: 852-2943-5100 中国 - 南京 电话: 86-25-8473-2460 中国 - 青岛 电话: 86-532-8502-7355 中国 - 上海 电话: 86-21-3326-8000 中国 - 沈阳 电话: 86-24-2334-2829 中国 - 深圳 电话: 86-755-8864-2200 中国 - 苏州 电话: 86-186-6233-1526 中国 - 武汉 电话: 86-27-5980-5300 中国 - 西安 电话: 86-29-8833-7252 中国 - 厦门 电话: 86-592-2388138 中国 - 珠海 电话: 86-756-3210040	印度 - 班加罗尔 电话: 91-80-3090-4444 印度 - 新德里 电话: 91-11-4160-8631 印度 - 浦那 电话: 91-20-4121-0141 日本 - 大阪 电话: 81-6-6152-7160 日本 - 东京 电话: 81-3-6880-3770 韩国 - 大邱 电话: 82-53-744-4301 韩国 - 首尔 电话: 82-2-554-7200 马来西亚 - 吉隆坡 电话: 60-3-7651-7906 马来西亚 - 槟榔屿 电话: 60-4-227-8870 菲律宾 - 马尼拉 电话: 63-2-634-9065 新加坡 电话: 65-6334-8870 台湾地区 - 新竹 电话: 886-3-577-8366 台湾地区 - 高雄 电话: 886-7-213-7830 台湾地区 - 台北 电话: 886-2-2508-8600 泰国 - 曼谷 电话: 66-2-694-1351 越南 - 胡志明市 电话: 84-28-5448-2100	奥地利 - 韦尔斯 电话: 43-7242-2244-39 传真: 43-7242-2244-393 丹麦 - 哥本哈根 电话: 45-4485-5910 传真: 45-4485-2829 芬兰 - 埃斯波 电话: 358-9-4520-820 法国 - 巴黎 电话: 33-1-69-53-63-20 传真: 33-1-69-30-90-79 德国 - 加兴 电话: 49-8931-9700 德国 - 哈恩 电话: 49-2129-3766400 德国 - 海尔布隆 电话: 49-7131-72400 德国 - 卡尔斯鲁厄 电话: 49-721-625370 德国 - 慕尼黑 电话: 49-89-627-144-0 传真: 49-89-627-144-44 德国 - 罗森海姆 电话: 49-8031-354-560 以色列 - 若那那市 电话: 972-9-744-7705 意大利 - 米兰 电话: 39-0331-742611 传真: 39-0331-466781 意大利 - 帕多瓦 电话: 39-049-7625286 荷兰 - 德卢内市 电话: 31-416-690399 传真: 31-416-690340 挪威 - 特隆赫姆 电话: 47-72884388 波兰 - 华沙 电话: 48-22-3325737 罗马尼亚 - 布加勒斯特 电话: 40-21-407-87-50 西班牙 - 马德里 电话: 34-91-708-08-90 传真: 34-91-708-08-91 瑞典 - 哥德堡 电话: 46-31-704-60-40 瑞典 - 斯德哥尔摩 电话: 46-8-5090-4654 英国 - 沃金厄姆 电话: 44-118-921-5800 传真: 44-118-921-5820
亚特兰大 德卢斯, 佐治亚州 电话: 678-957-9614 传真: 678-957-1455 奥斯汀, 德克萨斯州 电话: 512-257-3370 波士顿 韦斯特伯鲁, 马萨诸塞州 电话: 774-760-0087 传真: 774-760-0088 芝加哥 艾塔斯卡, 伊利诺伊州 电话: 630-285-0071 传真: 630-285-0075 达拉斯 阿迪森, 德克萨斯州 电话: 972-818-7423 传真: 972-818-2924 底特律 诺维, 密歇根州 电话: 248-848-4000 休斯顿, 德克萨斯州 电话: 281-894-5983 印第安纳波利斯 诺布尔斯特维尔, 印第安纳州 电话: 317-773-8323 传真: 317-773-5453 电话: 317-536-2380 洛杉矶 米慎维荷, 加利福尼亚州 电话: 949-462-9523 传真: 949-462-9608 电话: 951-273-7800 罗利, 北卡罗来纳州 电话: 919-844-7510 纽约, 纽约州 电话: 631-435-6000 圣何塞, 加利福尼亚州 电话: 408-735-9110 电话: 408-436-4270 加拿大 - 多伦多 电话: 905-695-1980 传真: 905-695-2078			