

---

## 利用 MPLAB® Harmony v3 在 Cortex®-M7 MCU 上 在运行时使用高速缓存维护操作处理高速缓存一致性问题

---

### 简介

---

对于使用直接存储器访问（Direct Memory Access, DMA）进行数据传输操作的应用程序，当其运行在具有可高速缓存存储区的单片机（MCU）上时，难以避免地会出现高速缓存一致性问题。这是因为当 DMA 在外设与物理存储器之间传输数据时，CPU 会通过高速缓存执行读/写操作。

其中一种处理高速缓存一致性的方法要求应用程序在运行时使用 Cortex-M7 高速缓存维护操作来管理高速缓存。Arm® Cortex 单片机软件接口标准（Arm Cortex Microcontroller Software Interface Standard, CMSIS）提供了高速缓存维护应用程序接口（Application Program Interface, API）。

本文档介绍了应用程序如何在 MPLAB Harmony v3 下使用 CMSIS 提供的高速缓存管理 API 在运行时管理高速缓存一致性问题。

**注：** 本文中讨论的概念对于所有 Arm Cortex-M7 MCU 通用，并以 SAM E70 MCU 为例来讨论这些概念。

---

## 目录

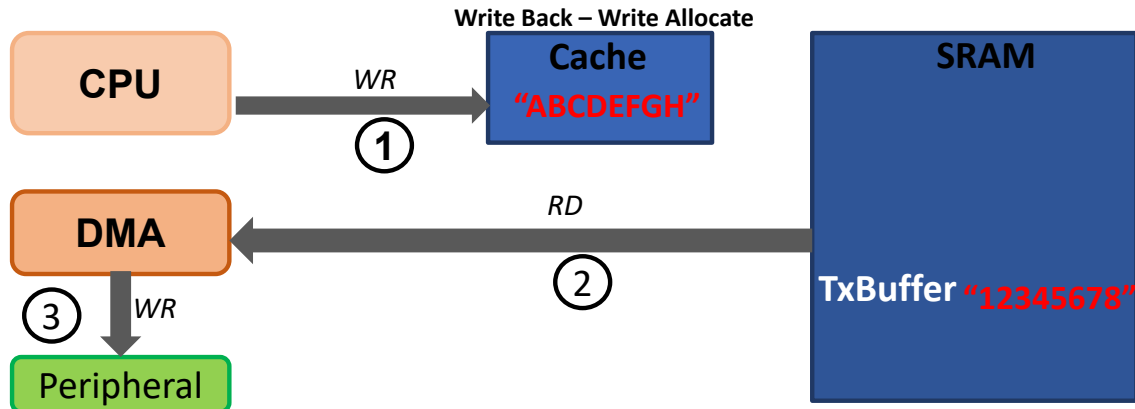
---

简介.....	1
1. 说明.....	3
1.1. 处理高速缓存一致性.....	4
2. 实现.....	6
2.1. 配置.....	6
2.2. CMSIS 数据高速缓存维护 API.....	6
2.3. 示例.....	7
3. 参考资料.....	8
Microchip 网站.....	9
产品变更通知服务.....	9
客户支持.....	9
Microchip 器件代码保护功能.....	9
法律声明.....	9
商标.....	10
质量管理体系.....	11
全球销售及服务网点.....	12

## 1. 说明

下图给出了 DMA 从 SAME70 MCU 上的 SRAM 读取时出现的高速缓存一致性问题。

图 1-1. 存储器到外设的传输 (DMA 从 SRAM 读取)

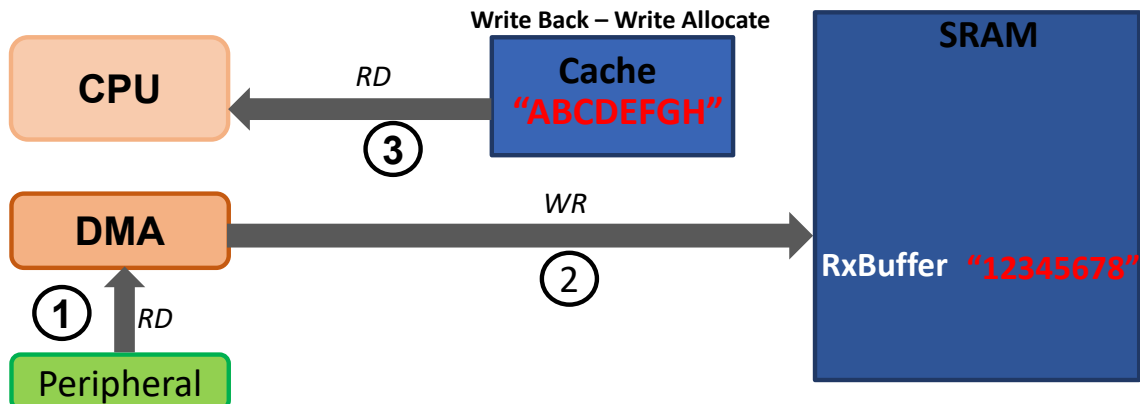


应用程序提交向外设传输数据缓冲区 *TxBuffer* (值“ABCDEFGH”) 的请求。CPU 以要写入外设的数据 (值“ABCDEFGH”) 填充 DMA 写缓冲区 (*TxBuffer*)。但是, 由于设置了高速缓存策略“回写式和写分配”, DMA 写缓冲区 (*TxBuffer*) 可能不会立即写入到主存储器, 写入的数据可能会保留在数据高速缓存中。主存储器中的 DMA 写缓冲区 (*TxBuffer*) 仍保留旧值 (12345678)。

当触发 DMA 以发起存储器到外设的传输时, DMA 从主存储器读取缓冲区 (*TxBuffer*) 中的旧值 (12345678)。结果是, DMA 最后将过期数据传输到了外设。

下图说明了 DMA 写入 SRAM 时出现的高速缓存一致性问题。

图 1-2. 外设到存储器的传输 (DMA 写入 SRAM)



应用程序提交从外设接收 *RxBuffer* 中的数据 (值“12345678”) 的请求。DMA 在 SRAM 中用值“12345678”填充 *RxBuffer*。但是, 数据高速缓存不会更新, 而是继续保存先前的数据。当 CPU 读取 *RxBuffer* 时, 最终会读取缓冲区中包含的先前值 (值“ABCDEFGH”)。

## 1.1 处理高速缓存一致性

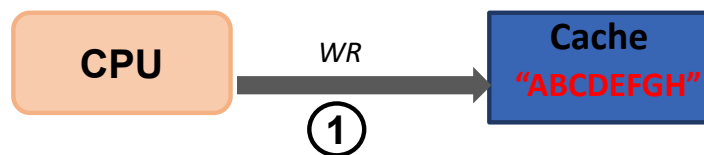
用于处理高速缓存一致性问题（如图高速缓存一致性（DMA 从 SRAM 读取）和高速缓存一致性（DMA 写入 SRAM）中所示）的方法涉及在运行时使用 Cortex-M7 高速缓存维护操作管理高速缓存的应用程序。上述操作要求能够执行以下操作：

- 使能或禁止高速缓存
- 使高速缓存无效——将高速缓存行标记为无效。后续访问会强制将数据从主存储器复制到高速缓存。
- 清理高速缓存——将标记为脏的高速缓存行回写到主存储器

要处理高速缓存一致性（DMA 从 SRAM 读取）中所述的高速缓存一致性，需执行以下操作：

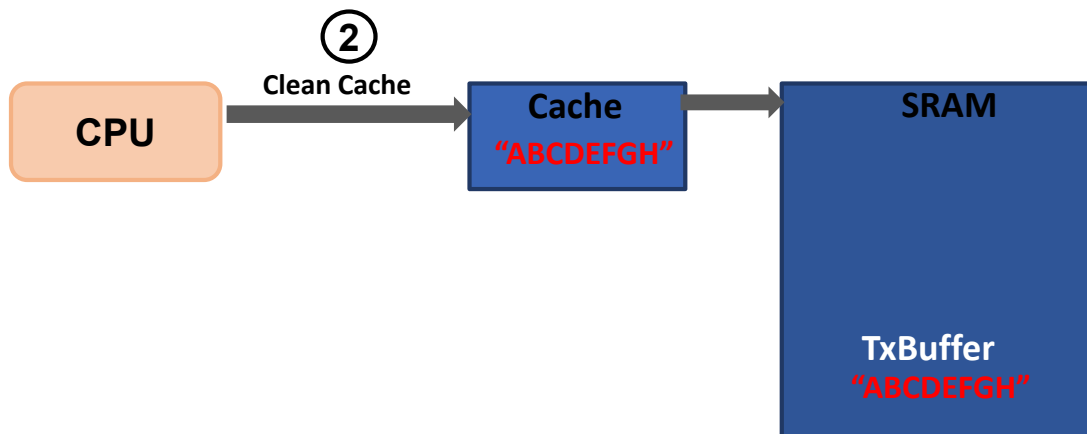
1. 应用程序填充写数据缓冲区 *TxBuffer*（值“ABCDEF GH”）。由于默认设置了高速缓存策略（回写式——写分配），写入的数据可能位于高速缓存中。

图 1-3. 填充写缓冲区



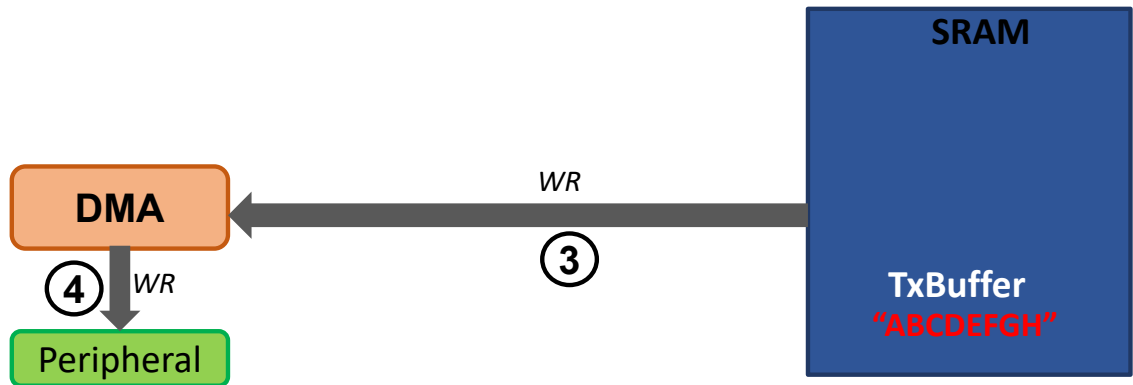
2. 通过调用清理高速缓存 API 将写数据缓冲区 *TxBuffer*（值“ABCDEF GH”）刷新到主存储器。

图 1-4. 刷新写缓冲区



3. 应用程序提交向外设传输 *TxBuffer* 中的数据（值“ABCDEF GH”）的请求。

图 1-5. 写入外设



要处理高速缓存一致性（DMA 写入 SRAM）中所述的高速缓存一致性，需执行以下步骤：

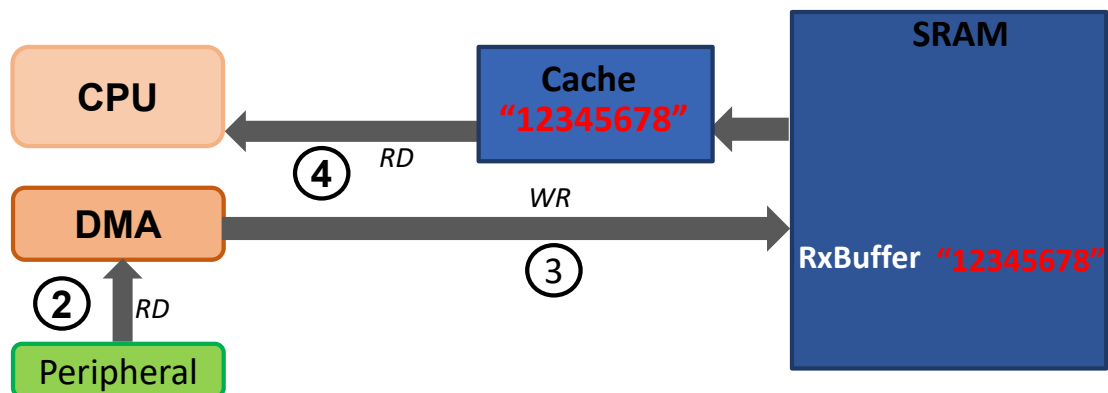
1. 应用程序调用“使高速缓存无效”API 来将高速缓存行标记为无效。

图 1-6. 使高速缓存无效



2. 应用程序提交从外设接收 *RxBuffer* 中的数据（值“12345678”）的请求。
3. DMA 在 SRAM 中用值“12345678”填充 *RxBuffer*。
4. 由于 *RxBuffer* 对应的高速缓存行处于无效状态，因此 CPU 的读访问会导致将 *RxBuffer* 从主存储器复制到数据高速缓存中。

图 1-7. 处理外设到存储器传输的高速缓存一致性

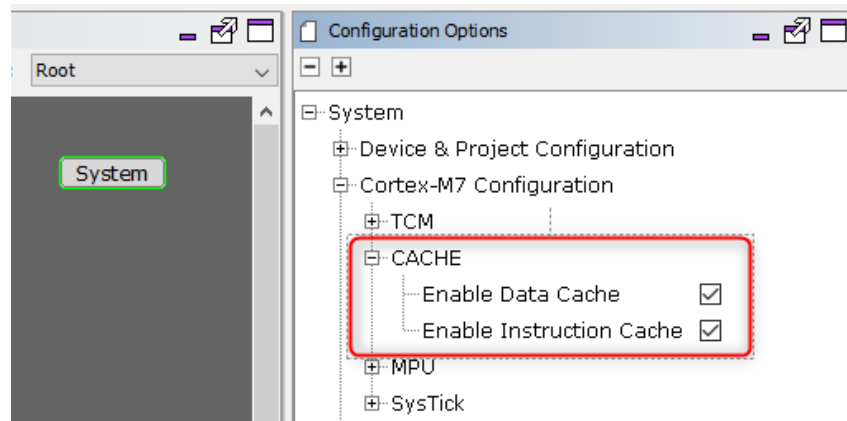


## 2. 实现

### 2.1 配置

在 SAM E70 MCU 的 MPLAB Harmony v3 项目中，MPLAB Harmony 配置器（MPLAB Harmony Configurator, MHC）默认会使能高速缓存。在 MHC 中，可以在 *MHC project graph > System*（MHC 项目图 > 系统）下找到配置设置。

图 2-1. MHC 高速缓存配置



### 2.2 CMSIS 数据高速缓存维护 API

Cortex 单片机软件接口标准（CMSIS）提供了以下数据高速缓存维护 API：

表 2-1. CMSIS 数据高速缓存维护 API

名称	说明
SCB_EnableDCache (void)	启用数据高速缓存。启用之前，整个数据高速缓存无效。
SCB_DisableDCache (void)	禁用数据高速缓存。禁用高速缓存之前，对数据高速缓存进行清理，将脏数据刷新到主存储器。
SCB_InvalidateDCache(void)	使整个数据高速缓存无效。
SCB_InvalidateDCache_by_Addr (uint32_t * addr, int32_t dsize)	按地址使数据高速缓存行无效。
SCB_CleanDCache(void)	清理数据高速缓存。
SCB_CleanDCache_by_Addr (uint32_t *addr, int32_t dsize)	按地址清理数据高速缓存行。
SCB_CleanInvalidateDCache(void)	清理并使整个数据高速缓存无效。
SCB_CleanInvalidateDCache_by_Addr(uint32_t *addr, int32_t dsize)	按地址清理并使数据高速缓存行无效。

**注：** 在使用 *按地址清理并使数据高速缓存无效的 API* 时：

- **addr**——必须与高速缓存行大小边界对齐。这意味着 DMA 缓冲区地址必须与 32 字节边界对齐。
- **dsize**——必须是高速缓存行大小的倍数。这意味着 DMA 缓冲区大小必须是 32 字节的倍数。

## 2.3 示例

以下代码示例说明了如何使用 CMSIS 数据高速缓存维护 API 与 MPLAB Harmony v3 DMA 外设库 API 通过 USART 接口读写数据。

```
/* 缓冲区必须与高速缓存行边界对齐，并且必须是高速缓存行大小（32）的倍数*/
char __attribute__((aligned(32))) TxBuffer[32];
char __attribute__((aligned(32))) RxBuffer[32];
int main ( void )
{
    /* 初始化所有外设和模块*/

    /* 用要发送的数据填充 TxBuffer。
       TxBuffer 可能位于 D-cache 中*/
    memcpy((void *)TxBuffer, (const void *)"Microchip", sizeof("Microchip"));

    /* 将 TxBuffer 从 D-cache 刷新到 SRAM */
    SCB_CleanDCache_by_Addr((uint32_t *)TxBuffer, 32);

    /* 提交传输 TxBuffer 中的数据的数据的 DMA 请求*/
    XDMAC_ChannelTransfer(XDMAC_CHANNEL_0, TxBuffer,
        (Const void *) USART1_TRANSMIT_ADDRESS, sizeof("Microchip"));

    /* 使 D-cache 中的 RxBuffer 无效*/
    SCB_CleanInvalidatedDCache_by_Addr((uint32_t *)RxBuffer, 32);

    /* 提交在 RxBuffer 中接收 20 个字符的 DMA 请求*/
    XDMAC_ChannelTransfer(XDMAC_CHANNEL_1, (const void *) USART1_RECEIVE_ADDRESS,
        RxBuffer, 20);

    while ( true )
    {
        /* 应用程序代码*/
    }
    /* 正常运行期间不应执行 */

    return ( EXIT_FAILURE );
}
```

### 3. 参考资料

1. 如何使用 MPLAB Harmony v3 在 Cortex-M7 (SAM S70/E70/V70/V71) MCU 上创建不可高速缓存的存储区
2. 管理基于 Cortex-M7 的 MCU 上的高速缓存一致性
3. 在 SAM S/SAM E/SAM V 上使用 XDMAC
4. MPLAB Harmony v3 Quick Docs 软件包为用户提供了独立的帮助页面, 可帮助用户着手基于 Microchip 的 32 位 SAM 和 PIC32 MCU 开发应用程序。下载 quick\_docs repo, 从 docs 文件夹中的 index.html 文件开始。  
可访问以下位置获取在线版本: [microchip-mplab-harmony.github.io/quick\\_docs/](https://microchip-mplab-harmony.github.io/quick_docs/)。
5. MPLAB Harmony v3 登录网页:  
[www.microchip.com/mplab/mplab-harmony](http://www.microchip.com/mplab/mplab-harmony)。



---

## Microchip 网站

---

Microchip 网站 ([www.microchip.com/](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。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](http://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](http://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、PacTime、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、Liberio、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: 978-1-5224-8439-4

AMBA、Arm、Arm7、Arm7TDMI、Arm9、Arm11、Artisan、big.LITTLE、Cordio、CoreLink、CoreSight、Cortex、DesignStart、DynamIQ、Jazelle、Keil、Mali、Mbed、Mbed Enabled、NEON、POP、RealView、SecurCore、Socrates、Thumb、TrustZone、ULINK、ULINK2、ULINK-ME、ULINK-PLUS、ULINKpro、µVision 和 Versatile 是 Arm Limited（或其子公司）在美国和/或其他国家/地区的商标或注册商标。

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