

---

---

## 通过 MPLAB® Harmony v3 将 XDMAC 与 Arm® Cortex®-M7 MCU 上的 QSPI 搭配使用

---

---

### 简介

---

本文档介绍了如何将直接存储器访问控制器（XDMAC）与基于 Arm® Cortex®-M7 的 MCU（SAM E70）上的四通道串行外设接口（Quad Serial Peripheral Interface, QSPI）搭配使用，还介绍了如何使用 MPLAB® Harmony v3 软件框架实现应用程序，并评估了使用或不使用 XDMAC 时 QSPI 读写操作的性能。

## 目录

简介.....	1
1. 硬件和软件要求.....	3
1.1. SAM E70 Xplained Ultra 评估工具包.....	3
1.2. 逻辑分析器或示波器.....	3
1.3. MPLAB X 集成开发环境和 XC 编译器.....	3
1.4. MPLAB Harmony v3.....	3
2. QSPI 简介.....	4
3. 直接存储器访问控制器.....	5
3.1. 外设到存储器传输.....	5
3.2. 存储器到外设传输.....	5
3.3. 存储器到存储器传输.....	6
4. QSPI 的 MPU 配置.....	9
5. 通过 MPLAB Harmony v3 将 XDMAC 与 Cortex-M7 (SAM E70) 上的 QSPI 搭配使用.....	10
5.1. QSPI XDMAC 读/写 MPLAB Harmony v3 应用程序.....	10
5.2. QSPI XDMAC 读写应用程序流程图.....	13
5.3. 运行 QSPI XDMAC 读/写应用程序.....	18
6. QSPI 性能评估.....	20
6.1. 不使用 DMA 时的 QSPI 写操作.....	20
6.2. 使用 DMA 时的 QSPI 写操作.....	20
6.3. 不使用 DMA 时的 QSPI 读操作.....	21
6.4. 使用 DMA 时的 QSPI 读操作.....	21
7. 结论.....	22
8. 参考资料.....	23
Microchip 网站.....	24
产品变更通知服务.....	24
客户支持.....	24
Microchip 器件代码保护功能.....	24
法律声明.....	24
商标.....	25
质量管理体系.....	26
全球销售及服务网点.....	27

## 1. 硬件和软件要求

### 1.1 SAM E70 Xplained Ultra 评估工具包

SAM E70 Xplained Ultra 评估工具包是一款用于评估 SAME70 单片机（MCU）的开发工具包。SAM E70 基于 Cortex-M7，能够以 300 MHz 运行。该 Ultra 评估工具包包括一个板上嵌入式调试器，无需借助外部工具即可对 SAME70 进行编程或调试。该工具包还提供外部连接器以扩展电路板的功能，并简化定制设计的开发过程。

SAM E70 Xplained Ultra 评估工具包可从 [Microchip 直销网站](#) 获取。

### 1.2 逻辑分析器或示波器

将 GPIO 引脚配置为在使用和不使用 XDMAC 的情况下测量 QSPI 读写操作的性能时，需要使用逻辑分析器或示波器来分析这些引脚。

### 1.3 MPLAB X 集成开发环境和 XC 编译器

MPLAB X 集成开发环境（Integrated Development Environment, IDE）是一款可扩展且高度可配置的软件程序，包含多种功能强大的工具，可帮助发现、配置、开发、调试和验证大多数 Microchip 单片机的嵌入式设计。

MPLAB X IDE 可从 [Microchip 网站](#) 下载。本文档使用 MPLAB X IDE 版本 5.35。MPLAB XC 编译器可从 [Microchip 网站](#) 下载。本文档使用 MPLAB XC32 版本 2.40。

### 1.4 MPLAB Harmony v3

MPLAB Harmony v3 是一款完全集成的嵌入式软件开发框架，能够提供灵活且可互操作的软件模块，可使用户将资源专注于创建 32 位 PIC® 和 SAM 单片机应用程序的开发，而无需处理器件详细信息、复杂协议和库集成等挑战。

它包括 MPLAB Harmony 配置器（MPLAB Harmony Configurator, MHC），这是一种易于使用的开发工具，带有图形用户界面（Graphical User Interface, GUI），可简化器件设置、库选择、配置和应用程序开发。MHC 可作为插件与 MPLAB X IDE 集成，它具有单独的 Java 可执行文件，可独立用于其他开发环境。

本文档中介绍的示例使用以下 MPLAB Harmony v3 资源库。用户需要从 [GitHub](#) 下载下列资源库：

- [csp](#)（芯片支持包）
- [dev\\_packs](#)（MPLAB Harmony v3 产品数据库）
- [mhc](#)（MPLAB Harmony v3 配置器）

或

使用 [MPLAB Harmony v3 内容管理器](#) 下载资源库。

## 2. QSPI 简介

四通道 SPI 接口（QSPI）是一种同步串行接口，用于与外部器件或存储器进行通信。它具有四条数据线，除此之外与串行外设接口（Serial Peripheral Interface, SPI）协议基本相同。由于数据通过多条线路发送，因此与标准 SPI 协议相比，带宽和性能都有所增加。

QSPI 支持单、双或四 I/O，具体取决于所选模式。

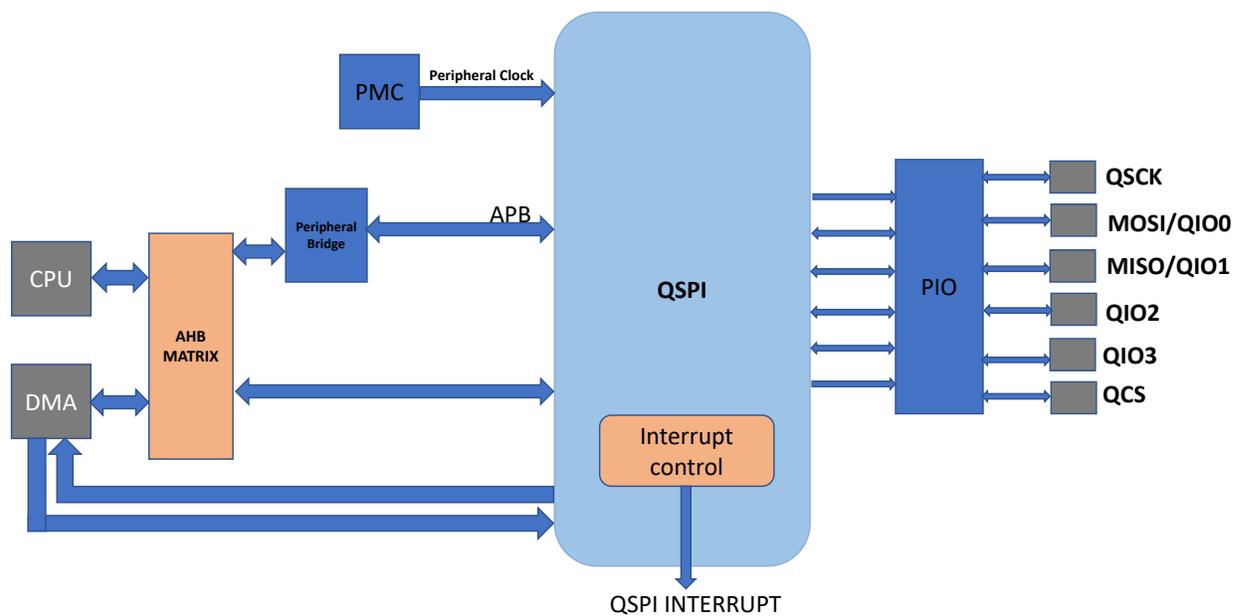
QSPI 可用于：

- SPI 模式——用作常规 SPI 主模式。连接串行外设，例如 ADC、DAC、LCD 控制器、CAN 控制器和传感器  
注：本文档仅介绍 QSPI 串行存储器模式。有关 SPI 模式下 QSPI 的操作和配置的详细说明，请参见产品数据手册。
- 串行存储器模式——连接串行闪存

QSPI 使得系统能够使用尺寸小巧且价格低廉的高性能串行闪存，以代替尺寸较大且更为昂贵的并行闪存。

下图给出了 QSPI 的框图。

图 2-1. QSPI 框图

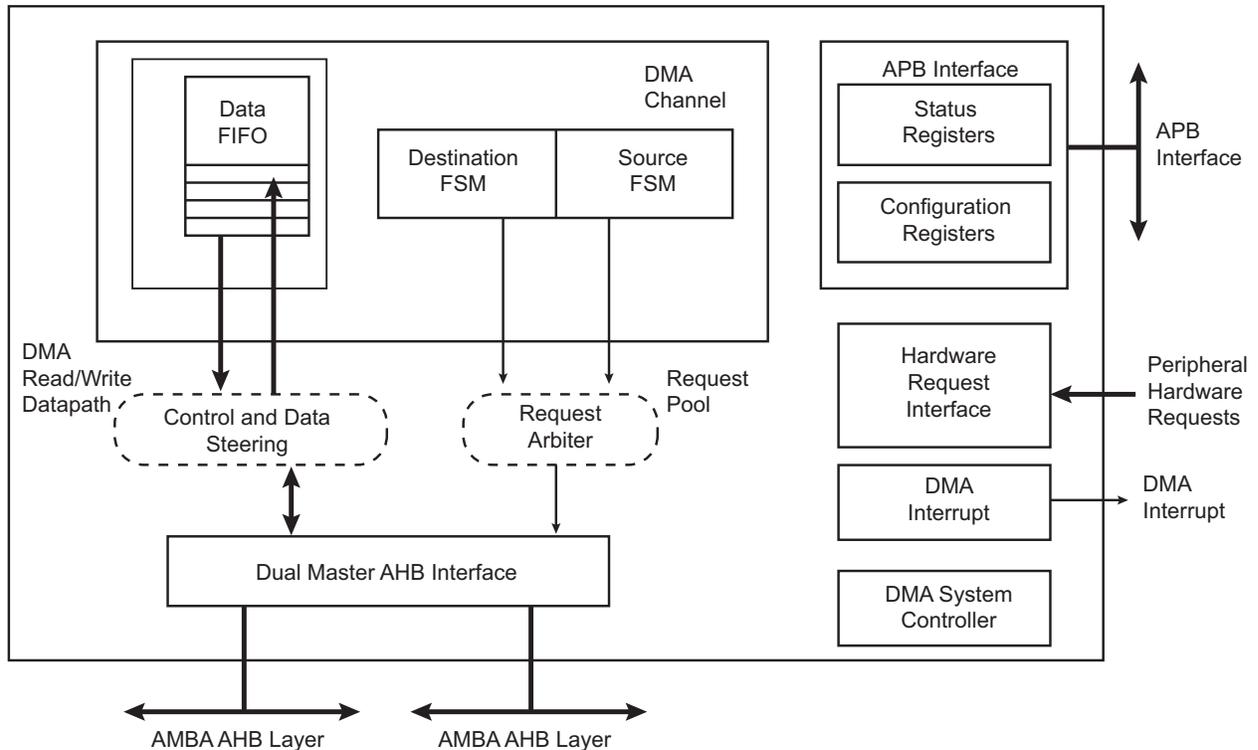


### 3. 直接存储器访问控制器

直接存储器访问控制器（XDMAC）是 AHB 协议中央直接存储器访问控制器。它可以在存储器和外设之间传输数据，因此可以将 CPU 从这些任务中解放出来。XDMAC 可在最少的 CPU 干预下实现高数据传输速率，并释放 CPU 时间。通过访问所有外设，XDMAC 可以处理通信模块之间的数据自动传输。XDMAC 具有多个 DMA 通道，每个通道均可完全编程并提供外设到存储器、存储器到外设或存储器到存储器的传输。

下图给出了 XDMAC 控制器的框图。

图 3-1. XDMAC 控制器框图



XDMAC 支持以下数据传输：

- 外设到存储器传输
- 存储器到外设传输
- 存储器到存储器传输

#### 3.1 外设到存储器传输

XDMAC 从源外设地址传输数据并将其写入目标存储单元。该传输为外设同步传输，这意味着存储器事务与生成 DMA 请求的外设同步。此外，也可以通过软件发起 DMA 请求。

外设到存储器传输有五个数据事务级别：主传输、块、微块、突发和分块级事务。主传输、块、微块和突发级事务的工作方式与“存储器到存储器数据传输”一节中所述的工作方式相同。在外设到存储器数据传输中，突发级事务将被进一步拆分为分块级数据事务，以实现更高的粒度。

#### 3.2 存储器到外设传输

XDMAC 从源存储器地址传输数据并将其写入目标外设单元。该传输也是外设同步传输。

该传输具有四个数据事务级别：主传输、块、微块和分块级事务。主传输、块和微块级事务的工作方式与“存储器到存储器数据传输”一节中所述的工作方式完全相同。在存储器到外设数据传输中，不存在突发级事务。微块将拆分为分块级数据事务。

### 3.3 存储器到存储器传输

XDMAC 从源存储单元读取数据并将其写入目标存储单元。存储器到存储器数据传输有四个数据事务级别：主传输、块、微块和突发级事务。

**XDMAC 主传输：**主传输是多块数据传输，使用描述符（块）链表来执行。链表中的每个描述符均配置为执行块传输。在多块传输模式下，可以在块间边界（两个描述符之间）修改 XDMAC 通道配置参数，并且可以基于每个块或在链表事件结束时产生中断。

- 要配置 XDMAC 主传输模式，应在 MHC 中的 XDMAC 配置下使能“Use Linked List Mode”（使用链表模式），这将生成相应的代码来配置第一个描述符控制（XDMAC\_CNDC）和地址（XDMAC\_CNDA）寄存器。  
**注：**该应用程序未配置为使用 XDMAC 的主传输模式。

**XDMAC 块：**XDMAC 块由可编程数量的微块组成。块长度（微块数）在 XDMAC 通道块控制寄存器（XDMAC\_CBCx）的 BLEN 位域中配置。

- 默认情况下，MHC 会生成 XDMAC 块代码。  
**注：**该应用程序不使用 XDMAC 块模式在存储器与存储器之间传输数据。

**XDMAC 微块：**微块由可编程数据组成。微块长度在 XDMAC 通道微块控制寄存器（XDMAC\_CUBCx）的 UBLEN 位域中配置。微块长度（UBLEN）指示微块中存在的数量（以字节、半字或字为单位，具体取决于数据宽度设置）。XDMAC 通道配置参数在数据边界处保持不变。

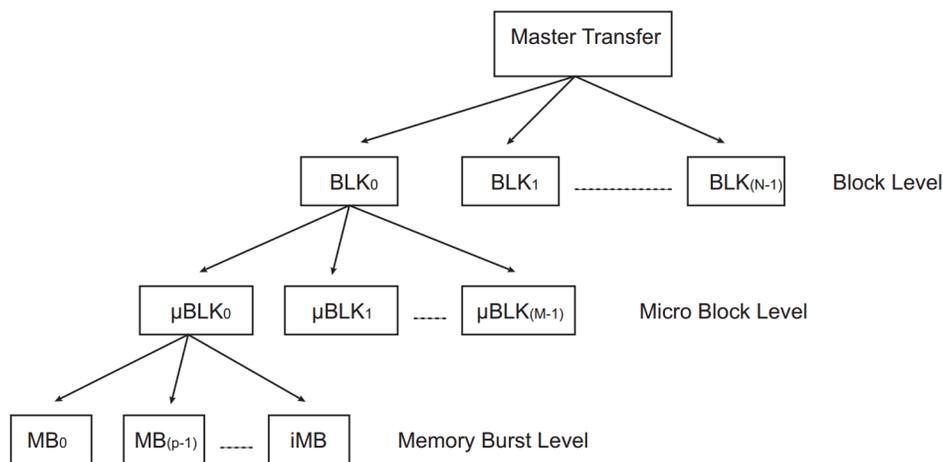
- 可以通过在 MHC 中的 XDMAC 通道设置下设置数据宽度来配置 XDMAC 微块模式。数据宽度可以是 8 位、16 位或 32 位。  
**注：**该应用程序的写操作数据宽度配置为 8 位，读操作数据宽度配置为 32 位。

**XDMAC 突发和不完整突发：**为提高在访问动态外部存储器时的整体性能，必须执行突发访问。微块的每个数据单元均被视为存储器突发的一部分。可编程突发值指示每个通道允许的最大存储器突发。突发大小（以字为单位）在 XDMAC 通道配置寄存器（XDMAC\_CCx）的 MBSIZE 位域中配置。当微块长度不是突发大小的整数倍时，将执行不完整突发以读取或写入最后的尾随字节。

- 可以在 MHC 中的 XDMAC 通道设置下为存储器到存储器传输配置 XDMAC 突发大小。突发大小可以是每次突发进行 1、4、8 或 16 次传输。  
**注：**该应用程序的写操作配置为每次突发进行 1 次传输，读操作配置为每次突发进行 16 次传输。

下图给出了存储器传输的层级结构。

图 3-2. 存储器传输的层级结构



在 SAM E70 Xplained Ultra 评估工具包中，外部串行闪存（SST26VF032BA）将映射到 QSPI 存储区域，并且 QSPI 配置为在串行存储器模式下运行。源（应用程序缓冲区）和目标（串行闪存）均为存储器件，因此将 XDMAC 传输类型配置为存储器到存储器，而不是外设到存储器或存储器到外设。

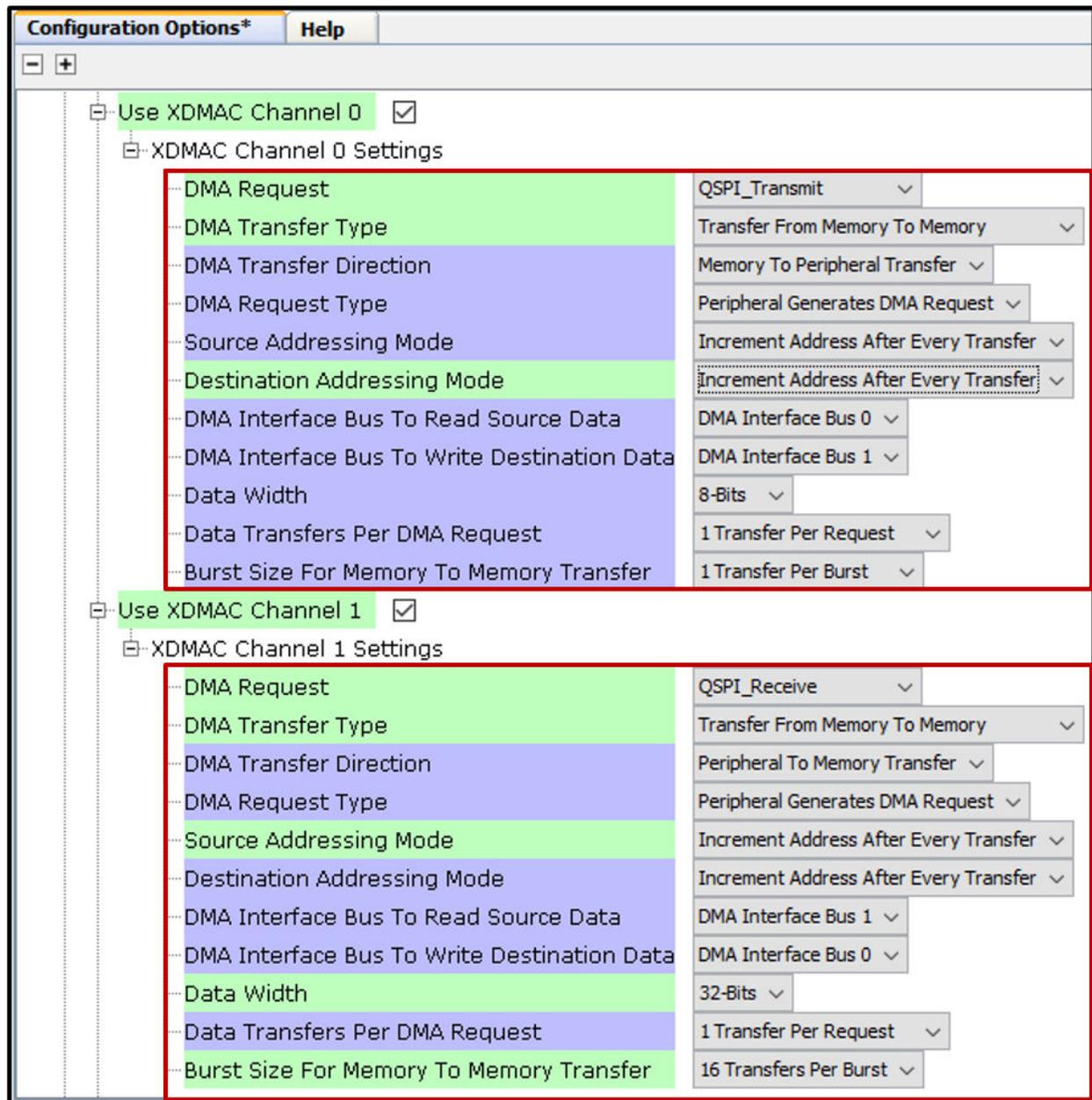
如前文所述，为了提高使用 XDMAC 读取外部串行闪存时的整体性能，用于读操作的数据事务级别是 XDMAC 微块（宽度配置为 32 位）和突发（大小配置为每次突发进行 16 次传输），而写入外部串行闪存的 XDMAC 微块宽度配置为 8 位，并且突发大小配置为每次突发进行 1 次传输。这是由于写操作缓慢，一次只能写入一页（见 SST26VF032BA 文档）。

#### XDMAC 配置:

可以通过选择系统模块并在树形视图中遍历到 DMA（XDMAC）来配置 XDMAC，然后在 Configuration Option（配置选项）窗口中完成 XDMAC 发送和接收通道配置。

下图给出了 MHC（MPLAB Harmony 3 配置器）中 QSPI 发送和接收通道的 XDMAC 配置。

图 3-3. MPLAB Harmony v3 XDMAC QSPI 通道配置



---

**XDMAC 通道配置：**每次触发 XDMAC 写操作时，DMA 都会将一个字节从应用程序缓冲区传输到 QSPI 存储器地址；而每次触发 XDMAC 读操作时，DMA 都会将一个字从应用程序缓冲区传输到 QSPI 存储器地址，并且 XDMAC 会保持 AHB 总线，直到在突发中完成 16 次传输为止。这有助于提高 XDMAC 读操作的整体性能。

- **源地址和目标地址模式：**选择是否在每次传输后增加源地址和目标地址。
  - 由于是存储器到存储器传输类型，因此 QSPI 接收和发送通道每次传输后都会递增源地址和目标地址
- **数据宽度：**一次传输的大小。默认值为 8 位。
  - 为提高读操作性能，将数据宽度配置为 32 位
- **DMA 接口总线：**配置源或目标接口总线以通过系统总线读取或写入数据。
  - 如果触发源是 QSPI 发送，则读取源数据的 DMA 接口总线是系统总线接口 0，而写入目标数据的是系统总线接口 1。
  - 如果触发源是 QSPI 接收，则读取源数据的 DMA 接口总线是系统总线接口 1，而写入目标数据的是系统总线接口 0。
- **存储器突发大小：**一种快速数据传输模式。在将系统总线的控制权释放回 CPU 之前，最多可执行 16 次传输（节拍）。突发长度的值配置为每次突发进行 16 次传输，以提高性能。

如果 DMA 传输方向、请求类型和分块大小仅适用于存储器到外设传输类型或外设到存储器传输类型，则可以忽略这些配置。

## 4. QSPI 的 MPU 配置

Cortex-M7 处理器有一个存储器保护单元（Memory Protection Unit, MPU），可根据权限和访问规则将存储器映射划分为多个区域。这有助于提供精细的存储器控制，允许应用程序使用多级权限，以任务为单位对代码、数据和堆栈进行分离与保护。

SAM E70 器件使用 MPU 管理最多 16 个区域，适用于安全关键型应用。下表总结了 Cortex-M7 中可用的 MPU 属性。

**表 4-1. MPU 属性**

存储器类型	共用性	属性	说明
强排序	N/A	N/A	所有访问按程序顺序进行。不支持并发访问，必须等到当前访问完成之后才能进行下一次访问。
器件	共用	N/A	所有访问按程序顺序进行。存储器映射的外设由多个主器件共用。
	非共用	N/A	所有访问按程序顺序进行。存储器映射的外设由单个主器件使用。
正常	共用	不可高速缓存 可高速缓存的直写 可高速缓存的回写	常规存储器由多个主器件共用。
	非共用	不可高速缓存 可高速缓存的直写 可高速缓存的回写	常规存储器由单个主器件使用。

当 Cortex-M7 处理器访问 QSPI 进行编程操作时，必须在 Cortex-M7 MPU 中定义 QSPI 存储空间。

对于编程操作，必须在 MPU 中使用属性“器件”或“强排序”定义 QSPI 存储空间。对于取/读操作，必须在 MPU 中使用属性“常规”定义 QSPI 存储空间，以便对内部高速缓存善加利用。

下图使用 MHC 中的“MPU Settings”（MPU 设置）窗口显示了 QSPI 存储区域的 MPU 配置。

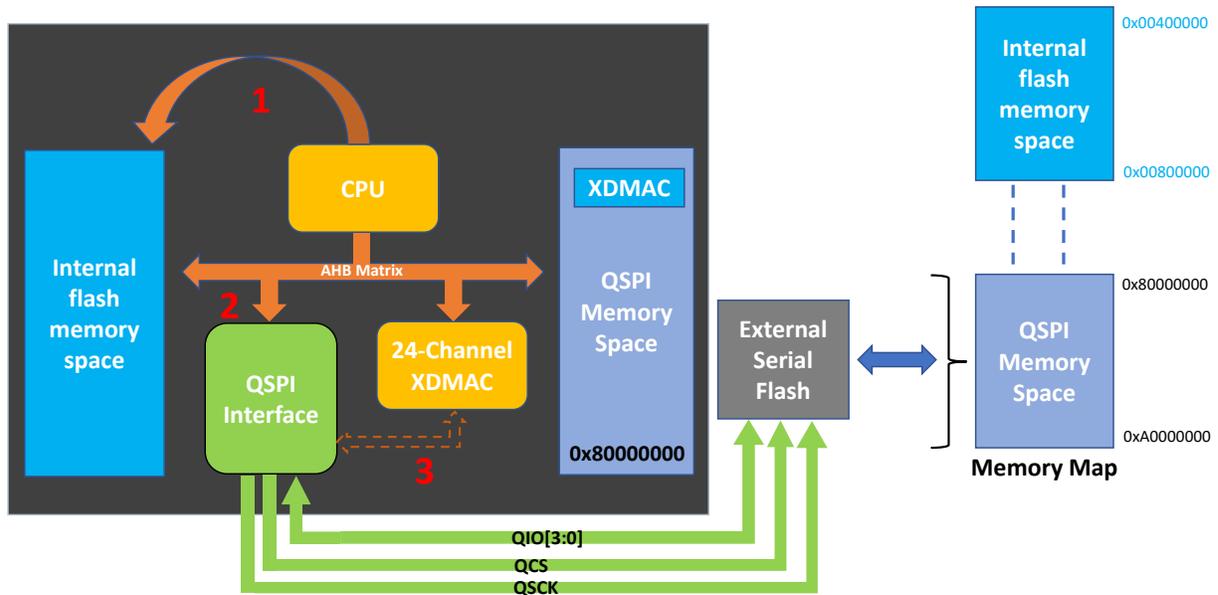
**图 4-1. MPLAB Harmony v3 MPU 设置**

Region	Enable	Memory Space	Region Name	Start Address (Hex)	Region Size	Memory Type	Data Access	Instruction Fetch	Shareable
0	<input checked="" type="checkbox"/>	QSPI	QSPI	0x80000000	256 MB	Strongly-Ordered Memory	User: Read/Write, Privileged: Read/Write	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	<input type="checkbox"/>			0x0	32 Bytes	Strongly-Ordered Memory	User: No Access, Privileged: No Access	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>			0x0	32 Bytes	Strongly-Ordered Memory	User: No Access, Privileged: No Access	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>			0x0	32 Bytes	Strongly-Ordered Memory	User: No Access, Privileged: No Access	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>			0x0	32 Bytes	Strongly-Ordered Memory	User: No Access, Privileged: No Access	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## 5. 通过 MPLAB Harmony v3 将 XDMAC 与 Cortex-M7 (SAM E70) 上的 QSPI 搭配使用

要通过 MPLAB Harmony v3 将 XDMAC 与 QSPI 搭配使用，请参见“硬件和软件要求”一章。SAM E70 Xplained Ultra 板包含一个与 QSPI 线连接的 4 MB QSPI 闪存 (SST26VF032BA)。有关可用于与串行闪存通信的命令和指令，请参见 [SST26VF032BA](#) 数据手册。

图 5-1. QSPI XDMAC 读写应用框图



- **初始化:** CPU 从内部 MCU 闪存开始执行，将 QSPI 初始化为串行存储器模式，将 XDMAC 初始化为存储器到存储器传输模式，并配置 QSPI 发送和接收通道。
- **不使用 DMA:** 在串行存储器模式下，串行闪存将映射到 0x80000000，并显示为 CPU 的存储器地址。CPU 从 QSPI 存储区域（即 0x80000000）开始执行。它会逐页写入 QSPI 存储区域，这将依次写入外部串行闪存并从中读取数据。对外部串行闪存的读/写操作要求 CPU 轮询或定期监视读/写事务的完成情况。因此，CPU 将始终忙于检查 QSPI 读/写操作的状态。
- **使用 DMA:** CPU 设置 QSPI 并发送读/写命令。实际的读/写操作由 XDMAC 处理，这会将 CPU 从这些任务中解放出来。XDMAC 可在最少的 CPU 干预下实现数据传输，并在读/写传输完成后通过回调通知应用程序。

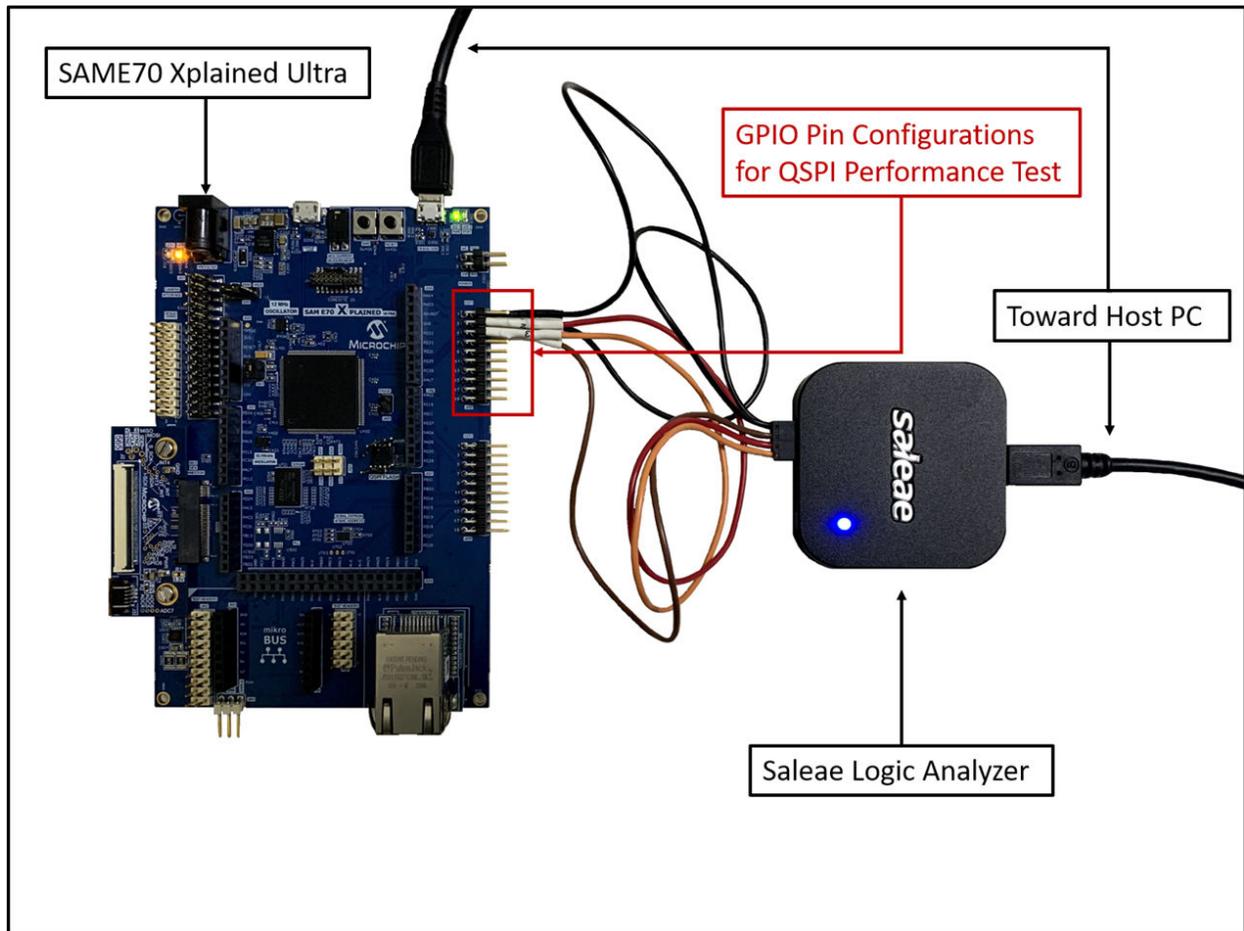
用于将 XDMAC 与 QSPI 搭配使用的应用程序是 `qspi_xdmac_read_write`，该应用程序基于 MPLAB Harmony v3。

### 5.1 QSPI XDMAC 读/写 MPLAB Harmony v3 应用程序

无论是否使用 XDMAC，QSPI XDMAC 读/写应用程序均使用 QSPI 对外部串行闪存读/写 80 KB 数据。通过比较在使用和不使用 XDMAC 的情况下对外部串行存储器进行读/写操作所花费的时间，可以评估 QSPI 读/写操作的性能。

下图给出了该应用程序的硬件设置。

图 5-2. QSPI XDMAC 读写硬件设置



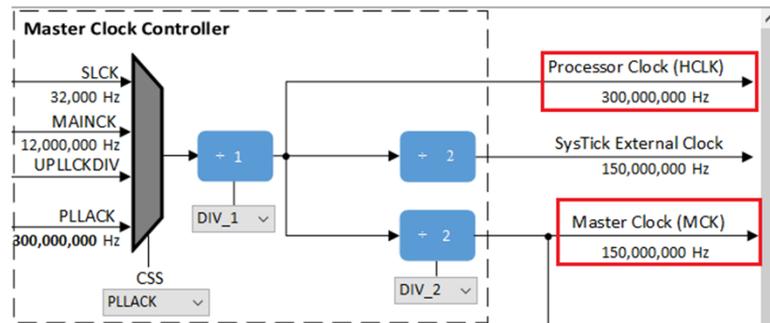
该应用程序配置以下模块：

- 配置四个 GPIO 引脚以测试 QSPI 读/写操作的性能：
  - 配置四个独立的 GPIO 引脚以测量使用和不使用 DMA 进行数据传输所花费的时间。这些引脚在读/写操作之前置 1，并在读/写操作之后清零。
- QSPI MPU 存储区域为强排序，这将禁止高速缓存。
- 将 QSPI 配置为串行存储器读模式以对串行闪存进行读/写操作，并将 QSPI 时钟频率设置为 50.0 MHz。
- 使能 XDMAC，并将 QSPI 发送和接收通道配置为使用 DMA 执行读/写操作。
- 使能 SysTick 的中断模式，每 500 ms 切换一次用户 LED1。该 LED 用于指示应用程序成功与否。

请按照以下步骤为 QSPI XDMAC 读/写应用程序配置 MHC：

1. 为 QSPI 存储区域配置 MPU。QSPI 必须按照 [MPLAB Harmony v3 MPU 设置](#) 所示配置为“强排序”才能编程操作。
2. 从 MHC **Clock Configuration**（时钟配置）窗口验证主器件时钟和处理器时钟。

图 5-3. QSPI XDMAC 读写时钟配置



- 将 LED 引脚配置为 GPIO。

图 5-4. QSPI XDMAC 读写 LED 引脚配置

Pin Number	Pin ID	Custom Name	Function	Direction	Latch	Open Drain	PIO Interrupt	Pull Up	Pull Down	Glitch/Debounce Filter	Drive
102	PA0		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
99	PA1		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
93	PA2		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
91	PA3		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
77	PA4		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
73	PA5	LED	GPIO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
114	PA6		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
35	PA7		Available	In	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low

- 配置 GPIO 引脚 (PB2、PB3、PC31 和 PA19) 以测试 QSPI 性能：
  - PERF\_TEST\_QSPI\_Read 引脚：用于在不使用 DMA 进行的 QSPI 读操作之前/之后将引脚置 1/清零
  - PERF\_TEST\_QSPI\_Write 引脚：用于在不使用 DMA 进行的 QSPI 写操作之前/之后将引脚置 1/清零
  - PERF\_TEST\_QSPI\_DMA\_Read 引脚：用于在使用 DMA 进行的 QSPI 读操作之前/之后将引脚置 1/清零
  - PERF\_TEST\_QSPI\_DMA\_Write 引脚：用于在使用 DMA 进行的 QSPI 写操作之前/之后将引脚置 1/清零

图 5-5. QSPI XDMAC 读/写 GPIO 引脚配置

Pin Number	Pin ID	Custom Name	Function	Direction	Latch	Open Drain	PIO Interrupt	Pull Up	Pull Down	Glitch/Debounce Filter	Drive
26	PB2	PERF_TEST_QSPI_Read	GPIO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
31	PB3	PERF_TEST_QSPI_DMA_Read	GPIO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
14	PC31	PERF_TEST_QSPI_DMA_Write	GPIO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
23	PA19	PERF_TEST_QSPI_Write	GPIO	Out	Low	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low

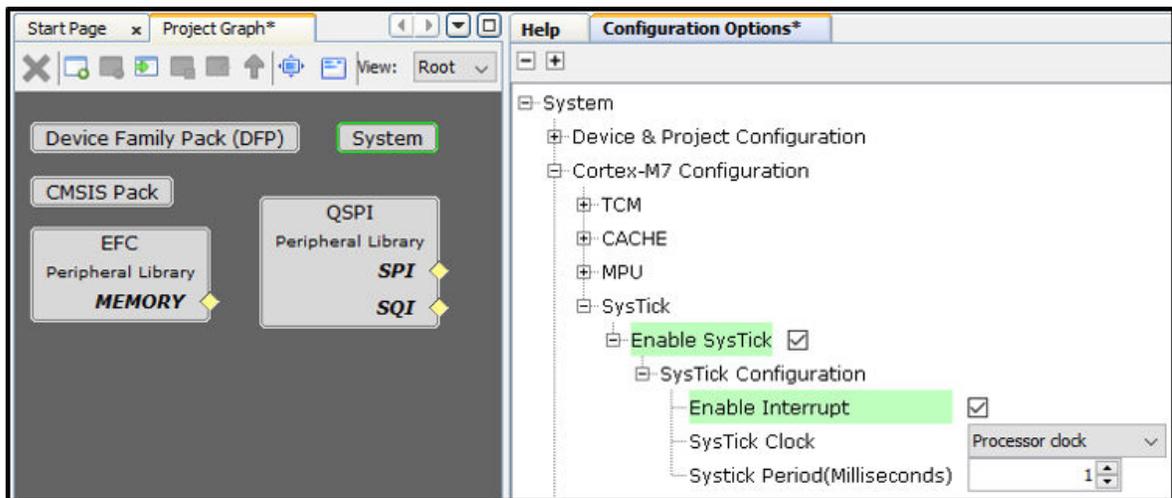
- 从 MHC Pin Settings (引脚设置) 窗口配置 QSPI 外设的 GPIO 引脚 (QSCK、QCS 和 QIO [3:0])。

图 5-6. QSPI XDMAC 读/写 QSPI 引脚配置

Pin Number	Pin ID	Custom Name	Function	Direction	Latch	Open Drain	PIO Interrupt	Pull Up	Pull Down	Glitch/Debounce Filter	Drive
64	PA11	QSPI_QCS	QSPI_QCS	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
68	PA12	QSPI_QIO1	QSPI_QIO1	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
42	PA13	QSPI_QIO0	QSPI_QIO0	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
51	PA14	QSPI_QSCK	QSPI_QSCK	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
25	PA17	QSPI_QIO2	QSPI_QIO2	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low
2	PD31	QSPI_QIO3	QSPI_QIO3	n/a	n/a	<input type="checkbox"/>	Disabled	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Disabled	Low

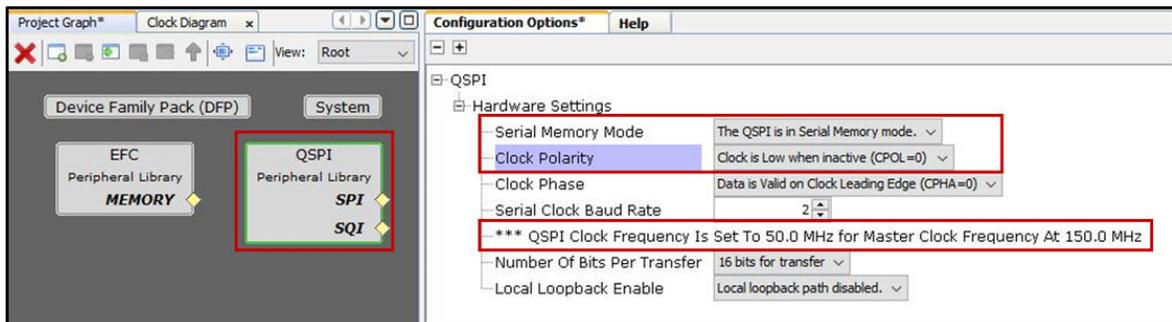
- 使能 SysTick 的中断模式。

图 5-7. QSPI XDMAC 读/写 CACHE 和 SysTick 配置



7. 为 QSPI 配置时钟和极性。

图 5-8. QSPI XDMAC 读写 QSPI 配置

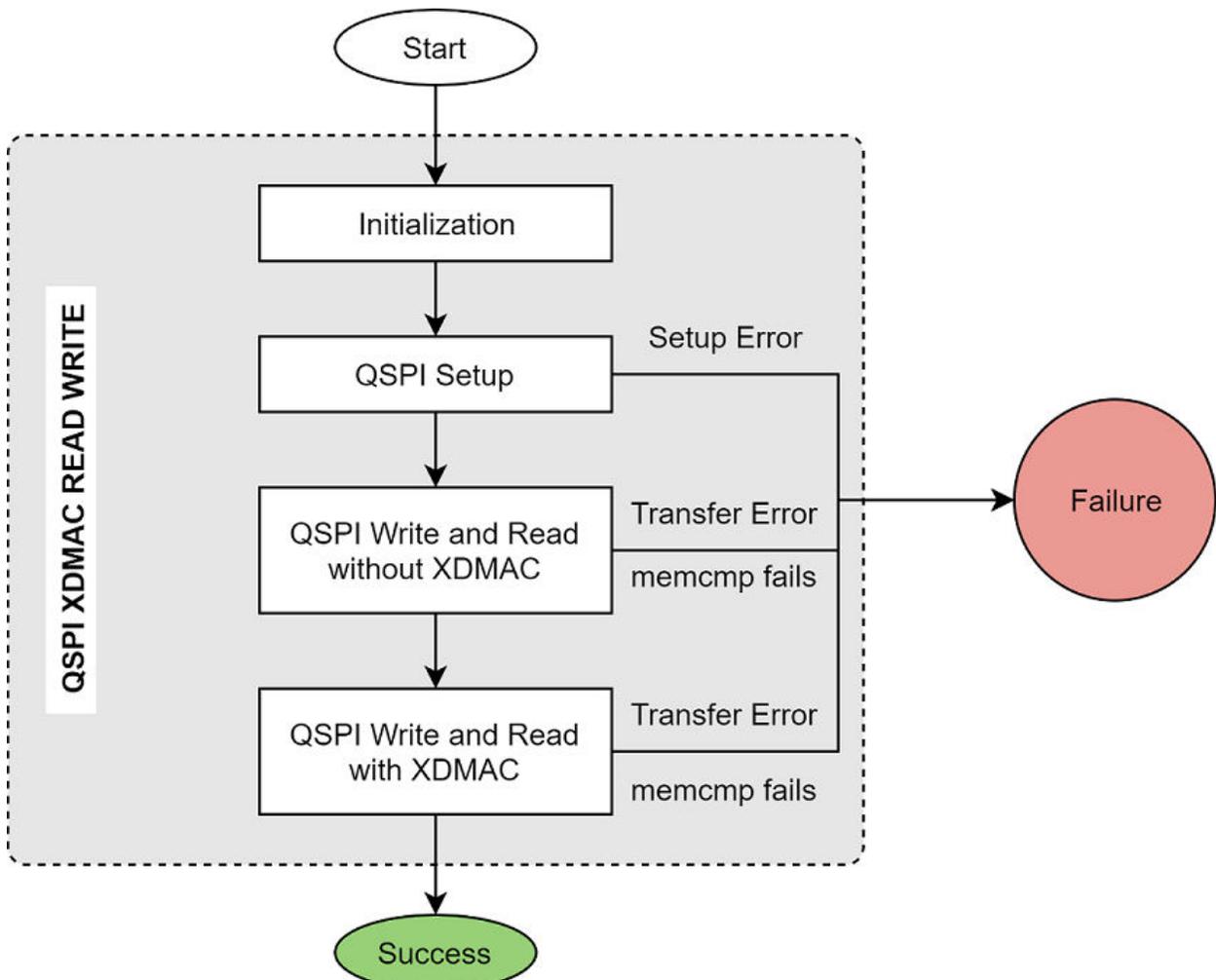


8. 在存储器到存储器模式下配置 XDMAC QSPI 发送和接收通道。有关 XDMAC 配置的详细信息，请参见 [MPLAB Harmony v3 XDMAC QSPI 通道配置](#)。
9. 点击 **Generate Code** (生成代码) 按钮以生成 MPLAB Harmony v3 代码。

## 5.2 QSPI XDMAC 读写应用程序流程图

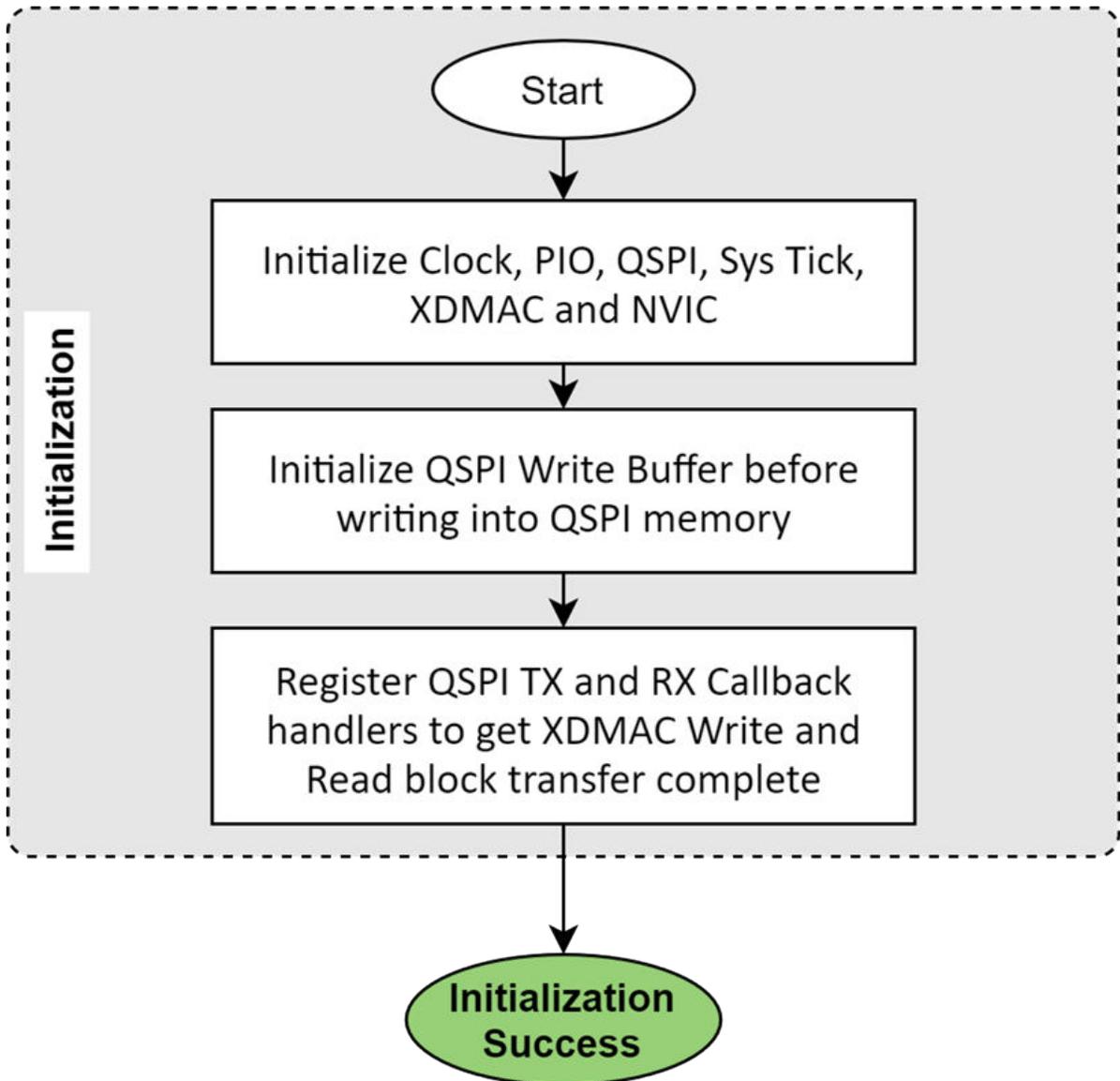
在执行读/写操作之前，QSPI XDMAC 读/写应用程序会对 QSPI 外设执行低级初始化和设置。随后评估在使能或未使能 XDMAC 的情况下的性能。下图给出了 QSPI XDMAC 读/写应用程序的高级流程图。

图 5-9. QSPI XDMAC 读/写吞吐量测量流程图



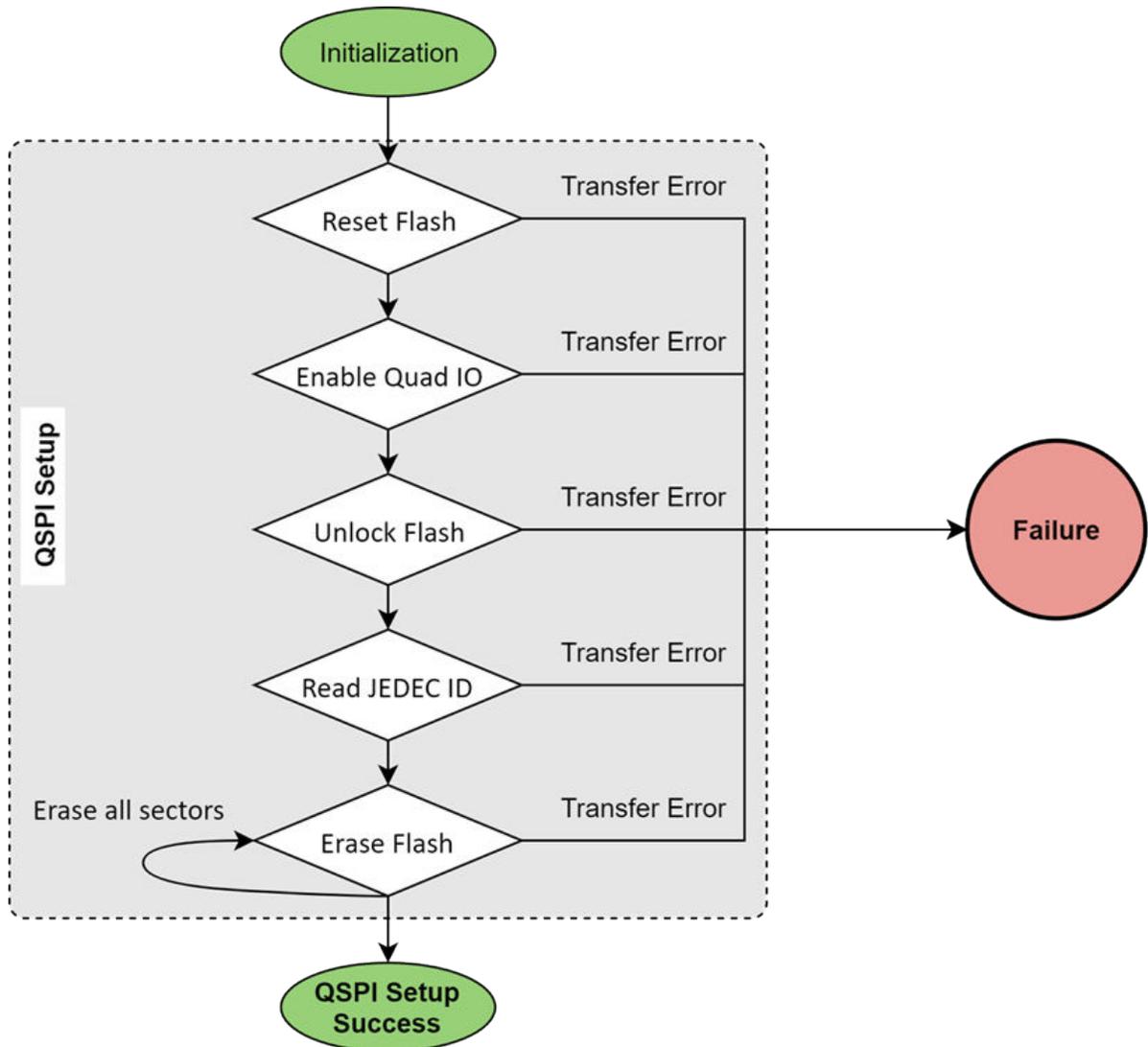
- **初始化:** 应用程序初始化低级外设并注册到 QSPI RX/TX 回调函数，以获取传输完成状态。初始化序列如下图所示。

图 5-10. QSPI XDMAC 读/写初始化流程图



- **QSPI 设置:** QSPI 设置序列包括复位、使能四 I/O、解锁、读取 JEDEC ID 和擦除闪存，之后才能进行读/写操作。下图给出了 QSPI XDMAC 读/写设置流程图。

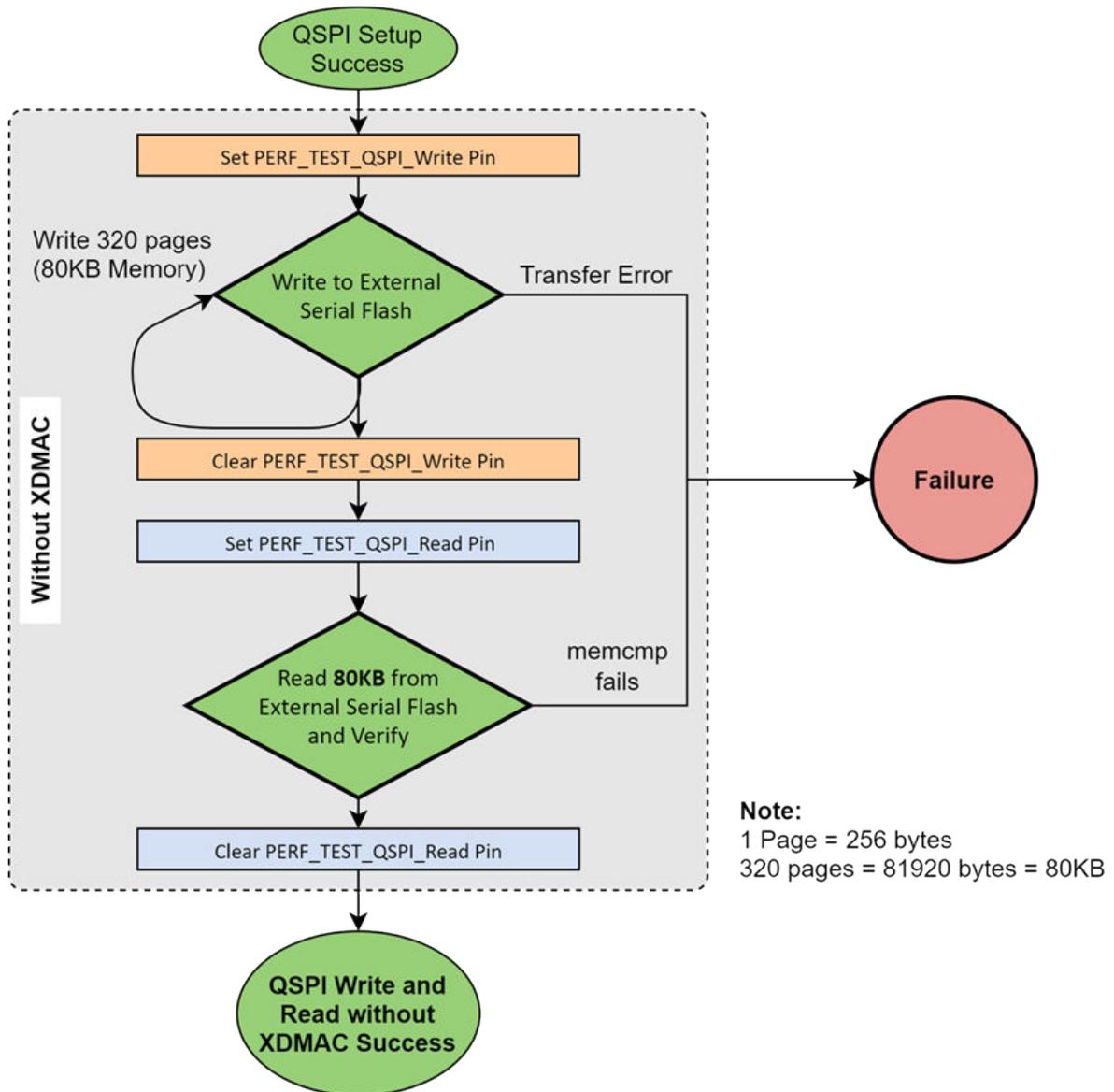
图 5-11. QSPI XDMAC 读/写设置流程图



- **不使用 XDMAC 时的 QSPI 读/写操作：**应用程序在将数据写入外部串行存储器之前会将写引脚置 1，并在成功执行写操作之后将其清零。读操作同样如此。这些引脚用作评估不使用 XDMAC 时读/写操作所花费的总时间的标记。

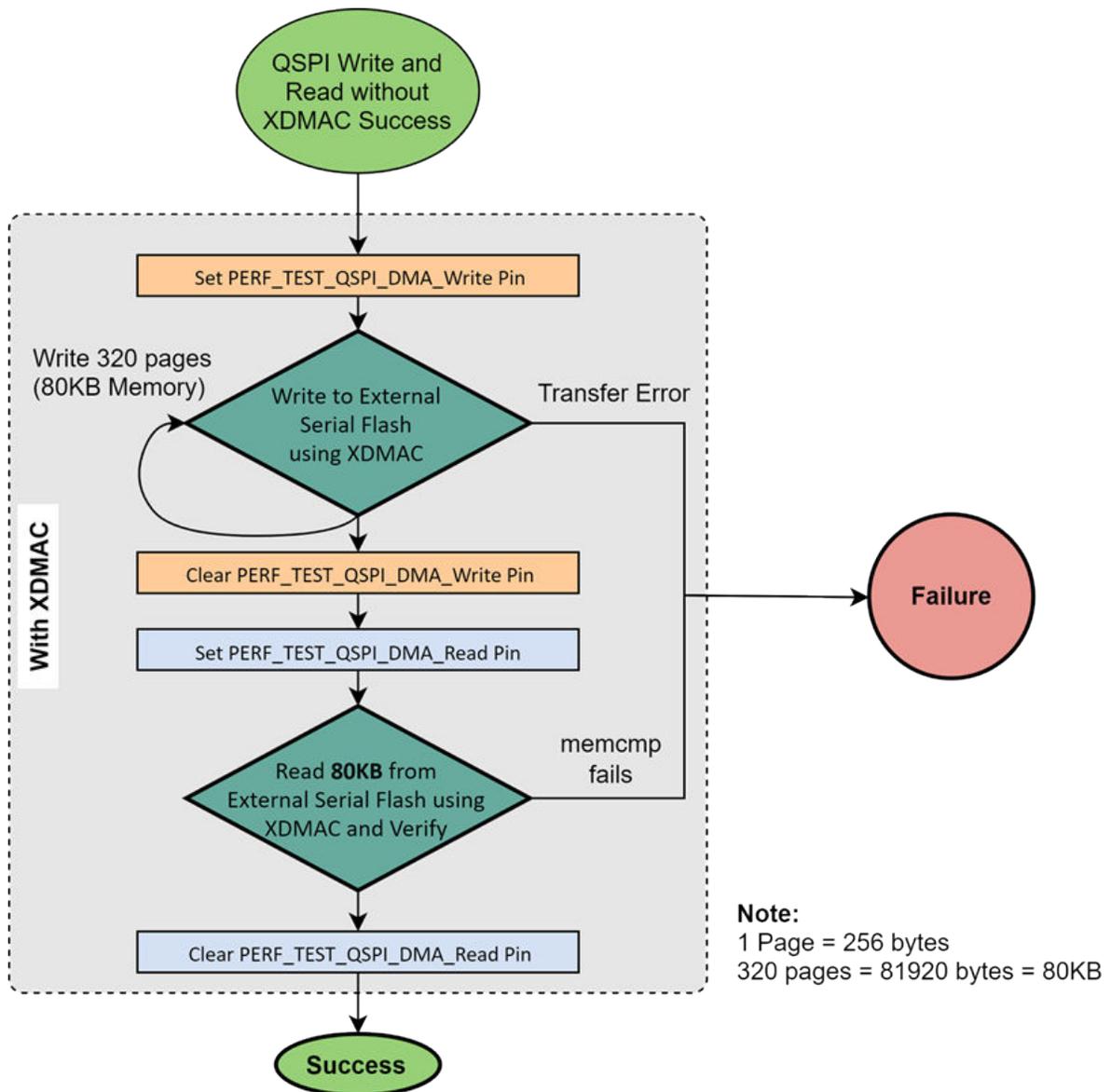
下图说明了不使用 XDMAC 时的 QSPI 读/写操作。

图 5-12. 不使用 XDMAC 时的 QSPI XDMAC 读/写操作流程



- **使用 XDMAC 时的 QSPI 读/写操作：**应用程序在使用 XDMAC 将数据写入外部串行存储器之前会将写引脚置 1，并在成功执行写操作之后将其清零。使用 XDMAC 进行的读操作同样如此。这些引脚用作评估使用 XDMAC 时读/写操作所花费的总时间的标记。下图说明了使用 XDMAC 时的 QSPI 读/写操作。

图 5-13. 使用 XDMAC 时的 QSPI XDMAC 读/写操作流程



### 5.3 运行 QSPI XDMAC 读/写应用程序

1. 按 [QSPI XDMAC 读写硬件设置](#) 所示执行硬件设置。
2. 将 micro USB 连接到主机计算机。
3. 连接 Saleae 逻辑分析器并与主机 PC 建立连接。配置以下通道以测量 QSPI 吞吐量，具体如下：
  - 通道 0 为 PA19，配置为在不使用 DMA 进行的 QSPI 写操作之前/之后“置 1/清零”。
  - 通道 1 为 PB2，配置为在不使用 DMA 进行的 QSPI 读操作之前/之后“置 1/清零”。
  - 通道 2 为 PC31，配置为在使用 DMA 进行的 QSPI 写操作之前/之后“置 1/清零”。
  - 通道 3 为 PB3，配置为在使用 DMA 进行的 QSPI 读操作之前/之后“置 1/清零”。
4. 在 MPLAB X IDE 中打开 QSPI XDMAC 读/写项目 (< downloaded folder>/qspi\_xdmac\_read\_write/firmware/sam\_e70\_xult.X)。
5. 使用 MPLAB X IDE 编译项目并将其编程到目标。

6. 开始使用逻辑分析器软件捕捉采样。
7. 复位硬件以从头开始运行应用程序。
8. 停止在逻辑分析器软件中捕捉采样。
9. 切换 LED1 指示 QSPI 读/写操作（无论是否使用 DMA）成功。
10. 检查上述四个 GPIO 引脚的波形和时间戳，以查看使用/不使用 XDMAC 时 QSPI 的性能。有关详细分析，请参见 [QSPI 性能评估](#)。

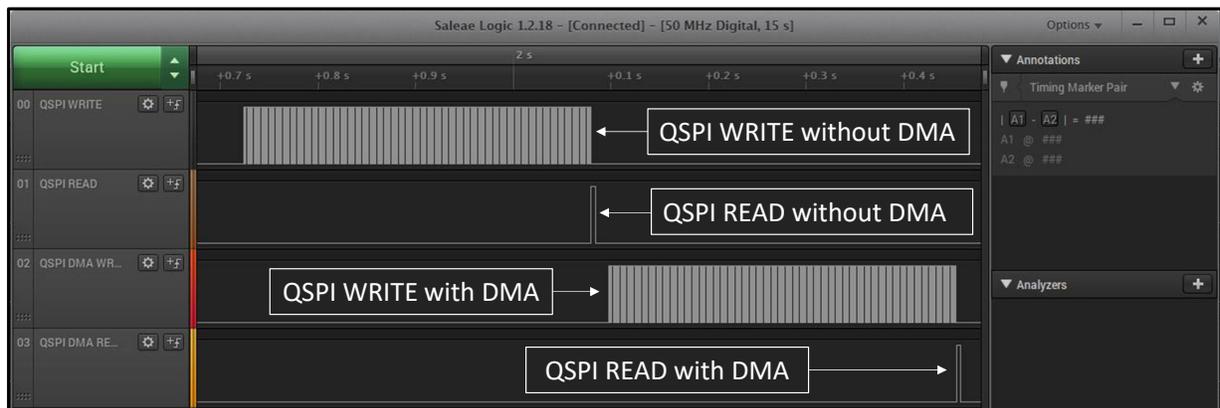
## 6. QSPI 性能评估

在使用/不使用 XDMAC 的情况下对 QSPI 读/写操作的性能进行评估。执行以下用例以捕捉以 50 MHz 运行的 QSPI 的吞吐量。在执行该操作之前，通过切换 GPIO 线来捕捉实际读/写外部串行存储器所花费的时间。

- 不使用 DMA 向外部串行闪存写入 80 KB 数据
- 不使用 DMA 从外部串行闪存读取 80 KB 数据
- 使用 DMA 向外部串行闪存写入 80 KB 数据
- 使用 DMA 从外部串行闪存读取 80 KB 数据

下图显示了这些操作。

图 6-1. QSPI XDMAC 读/写吞吐量测量概览



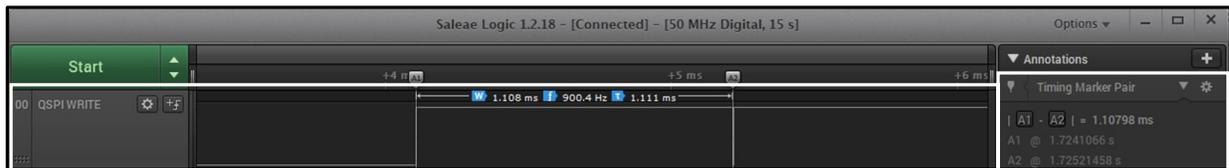
### 6.1 不使用 DMA 时的 QSPI 写操作

不使用 DMA 时 QSPI 写一页（256 字节）所花费的时间为：1.10798 ms。

写入 80 KB（即 320 页）数据所花费的总时间为： $320 * 1.10798 \text{ ms} = 354.5536 \text{ ms}$ 。

有关在不使用 DMA 时向外部串行存储器写一页所花费的时间，请参见下图。

图 6-2. 不使用 DMA 时的 QSPI XDMAC 写吞吐量测量



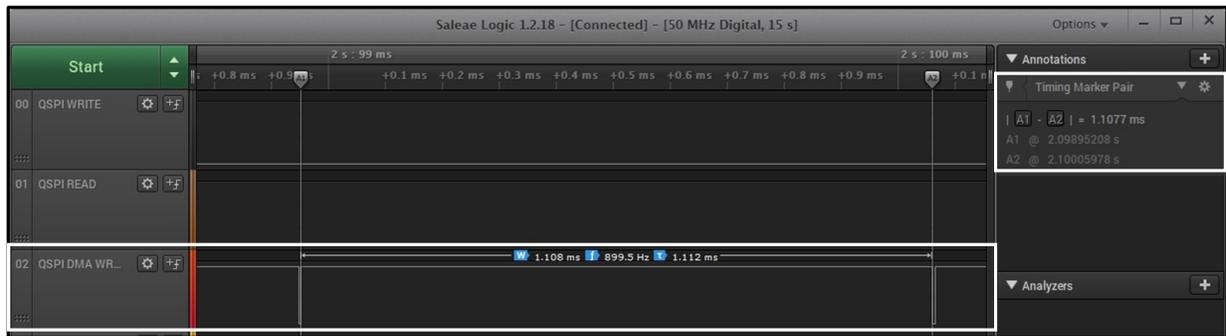
### 6.2 使用 DMA 时的 QSPI 写操作

使用 DMA 时 QSPI 写一页（256 字节）所花费的时间为：1.1077 ms。

写入 80 KB（即 320 页）数据所花费的总时间为： $320 * 1.1077 \text{ ms} = 354.464 \text{ ms}$ 。

有关在使用 DMA 时向外部串行存储器写一页所花费的时间，请参见下图。

图 6-3. 使用 DMA 时的 QSPI XDMAC 写吞吐量测量



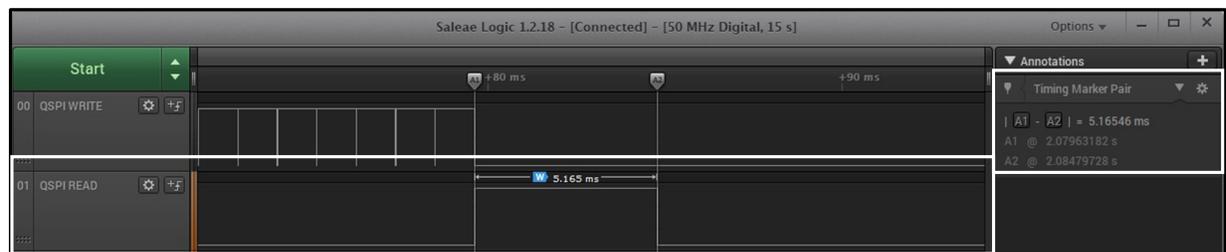
使用 XDMAC 进行 QSPI 写操作所节省的时间为  $354.5536 - 354.464 = 0.0896$  ms。

### 6.3 不使用 DMA 时的 QSPI 读操作

不使用 DMA 时 QSPI 读取 80 KB 数据所花费的时间为：5.16546 ms。

有关时间戳，请参见下图。

图 6-4. 不使用 DMA 时的 QSPI XDMAC 读吞吐量测量



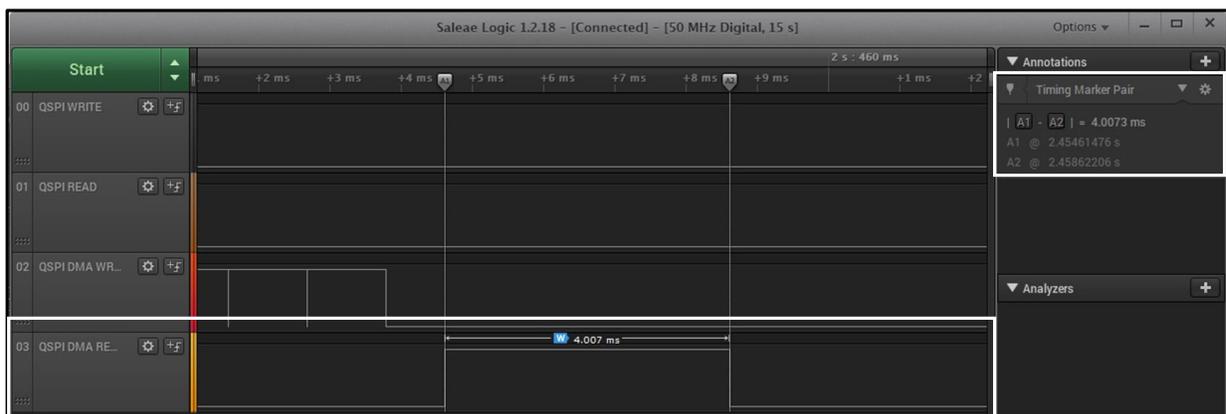
### 6.4 使用 DMA 时的 QSPI 读操作

使用 DMA 时 QSPI 读取 80 KB 数据所花费的时间为：4.0073 ms。

使用 DMA 进行 QSPI 读操作所节省的时间为  $5.16546 - 4.0073 = 1.15816$  ms。

有关时间戳，请参见下图。

图 6-5. 使用 DMA 时的 QSPI XDMAC 读吞吐量测量



---

---

## 7. 结论

将 QSPI 与直接存储器访问控制器 (XDMAC) 搭配使用可以降低处理器开销。

使用 DMA 时的 QSPI 写操作：性能评估测试结果表明，使用 XDMAC 进行 QSPI 写操作不会显著改善性能。由于 QSPI 被配置为高速运行（即 50.0 MHz）并且每次写操作均为一次写入一页（即 256 字节），因此除了 CPU 可以从写任务中解放出来（卸载到 XDMAC）去执行其他高优先级任务之外，使用 DMA 时的 QSPI 写操作吞吐量并未得到显著改善。

使用 DMA 时的 QSPI 读操作：性能评估测试结果表明，使用 XDMAC 从外部串行存储器读取数据时，QSPI 读操作吞吐量得到了显著改善。同样，CPU 可以从读任务中解放出来（卸载到 XDMAC）去执行其他高优先级任务。

## 8. 参考资料

1. 使用 ASF 通过 QSPI 就地执行：  
[ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-44065-Execute-in-Place-XIP-with-Quad-SPI-Interface-SAM-V7-SAM-E7-SAM-S7\\_Application-Note.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-44065-Execute-in-Place-XIP-with-Quad-SPI-Interface-SAM-V7-SAM-E7-SAM-S7_Application-Note.pdf)
2. AT17417: 在 SAM S/SAM E/SAM V 上使用 XDMAC：  
[ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-42761-Usage-of-XDMAC-on-SAMS-SAME-SAMV\\_ApplicationNote\\_AT17417.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Atmel-42761-Usage-of-XDMAC-on-SAMS-SAME-SAMV_ApplicationNote_AT17417.pdf)
3. 使用 MPLAB Harmony 3 通过 QSPI 就地执行
4. SAM E70 Xplained Ultra 用户指南：  
[ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-Xplained-Ultra-User-Guide-70005389A.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-Xplained-Ultra-User-Guide-70005389A.pdf)
5. SAM E70/S70/V70/V71 系列数据手册：  
[ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-S70-V70-V71-Family-Data-Sheet-DS60001527D.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-S70-V70-V71-Family-Data-Sheet-DS60001527D.pdf)

---

## 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、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、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: 978-1-5224-7880-5

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 均为 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			