



智能汽车对智能存储器架构的需求

对就地执行(XIP)的需求

汽车如何变得智能，
这对存储器架构意味着什么？

Donnie Garcia—恩智浦半导体，无线MCU产品营销经理

Johnny Chien—美国集成硅公司，Flash产品营销经理



引言

这些年来，通过采用电子元件，汽车变得更清洁、更安全、更便捷。随着可以感知、计算和无线连接的半导体器件的加入，汽车越来越智能。用于交通工具的微控制器(MCU)和微处理器(MPU)依赖于专用软件，无法在多个计算机芯片之间轻松移植，限制了半导体组件在汽车电子设备的应用。这就是为什么需要通过设计来规划内存扩展性的原因之一。

MCU和MPU都是通过中央处理器(CPU)执行存储于存储器中的机器代码来运行。特定处理器执行存储器中软件的架构可以分为两类：封闭架构和开放架构。通常，软件仅在内置于封闭架构设备的片上系统存储器中运行，虽然简单但是嵌入式设备依赖内置集成式的非易失性存储器(NVM)的MCU来执行软件。相比之下，开放式架构设备可以利用外部器件扩展存储器架构。微处理器(MPU)的主流存储器架构是开放架构，而微控制器(MCU)的典型架构则是封闭架构的集成存储器。但在过去几年里，市场上引入了更多混合架构的产品，包括恩智浦的i.MX RT跨界MCU系列。

外部存储器有易失性和非易失性两种。易失性存储器的一种就是DRAM，常用于个人电脑或智能手机。而非易失性存储器类型则有NAND Flash和NOR Flash。NOR Flash的特性是可以快速随机访问，而这是软件运行必需的。NOR Flash的优势是坚固、能量特性和可靠，为开放架构设计提供了NVM的选择。MCU或MPU通过外部Flash执行软件时，与软件执行相关的术语是就地执行，也称为XIP。支持XIP的MCU或MPU可以从外部NOR Flash设备读取机器代码并执行软件。

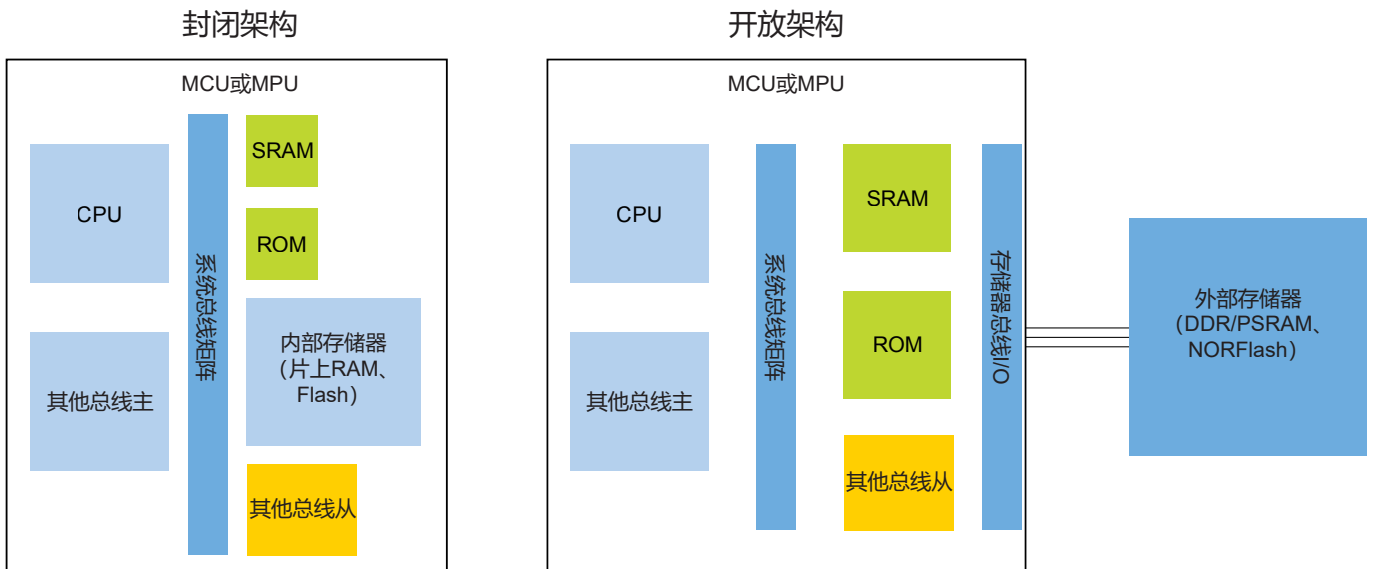


图1. 封闭架构与开放架构

存储器结构的发展

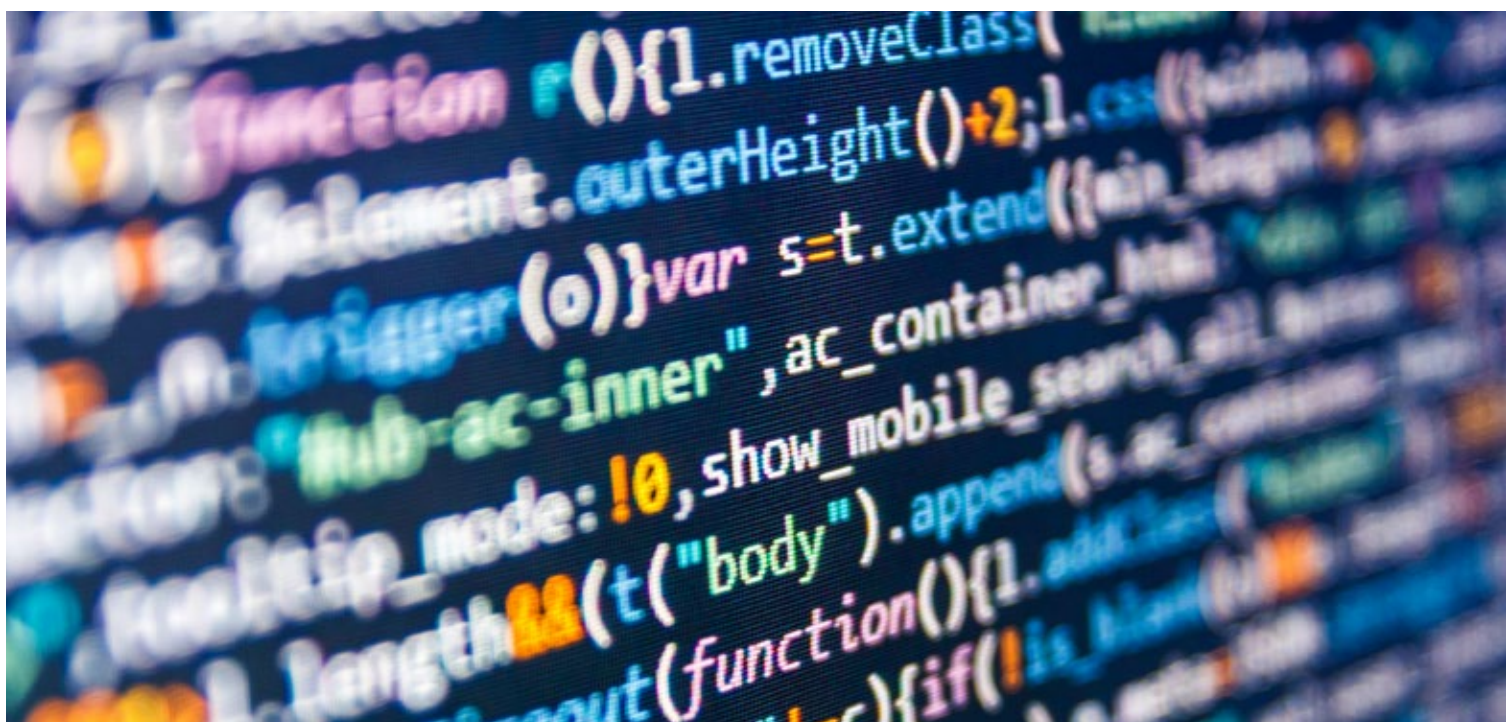
通过集成NVM来运行代码的封闭架构并不是一个新概念。市场上推出的第一代MCU就是基于封闭式架构的，通过NVM只读存储器(ROM)执行软件，通过嵌入式软件读写系统存储器(RAM)存储变量和数据。

随着并行NOR Flash的普及，开放架构的XIP变得广为人知。内置RAM和Flash的封闭架构至今仍在使用，但一般仅用于Flash尺寸较小的嵌入式系统。一般来说，高性能系统优先选择开放架构，因为Flash的发展无法跟上CPU的最新技术发展。

对于需要限制功耗的应用（如手机）来说，DRAM进行大量代码运算会导致效率低下。因为DRAM的高频刷新，需要消耗更多功率，因此在手机设计的早期采用了外部并行NOR Flash设备。另外，NOR Flash的存储能力很强；通过从NOR Flash读取和执行代码意味着DRAM密度更小（早期用于手机的蜂窝RAM或PSRAM），进而降低了系统总成本。

另一个需要考虑的关键因素是启动时间：大量代码从NVM传输到DRAM，并在DRAM中执行代码，导致启动时间更长。与将针对特定操作的代码复制到DRAM相比，XIP明显缩短了启动时间，例如PCI-e启动时间至少需要100ms左右。通过XIP，可以直接从外部存储器执行关键系统功能，而无需浪费时间将代码拷贝到DRAM。

通过引入多通道（四通道或八通道）串行接口，NOR Flash的XIP应用在嵌入式开放架构系统中变得十分普遍。与并行NOR Flash相比，串行NOR Flash明显减少了引脚，而减少了控制器的引脚数量，最终降低了封装成本。此外，在相同的时钟频率下，四通道串行Flash传输数据的速度比单通道快4倍，而八通道Flash快8倍。因此，节省了功耗和成本的同时缩短了启动时间，在通用嵌入式系统的XIP开放架构中，串行NOR Flash是优选项。



汽车中的串行NORFlashXIP

Flash的传统用途是数据存储，而工程师们正在将其应用扩展到可以满足智能汽车需求。网络连接和边缘智能的发展趋势也对此有所要求。

现在的智能汽车需求大量新功能，包括LTE、无线摄像头和蓝牙辅助访问控制。智能汽车的发展离不开无线连接的支持。LTE、Wi-Fi和其他无线连接功能的标准化协议都需要占用存储器和代码空间。

除了网络连接，同时还有其他与边缘智能相关的大量代码。增强型人机界面(HMI)和神经网络机器学习相关应用要求必须能快速访问大型数据阵列。开放架构和串行NOR Flash设备的优势能满足这种需求。

本页面探讨了为什么XIP获得汽车行业的追捧，以及它对汽车架构的诸多好处。

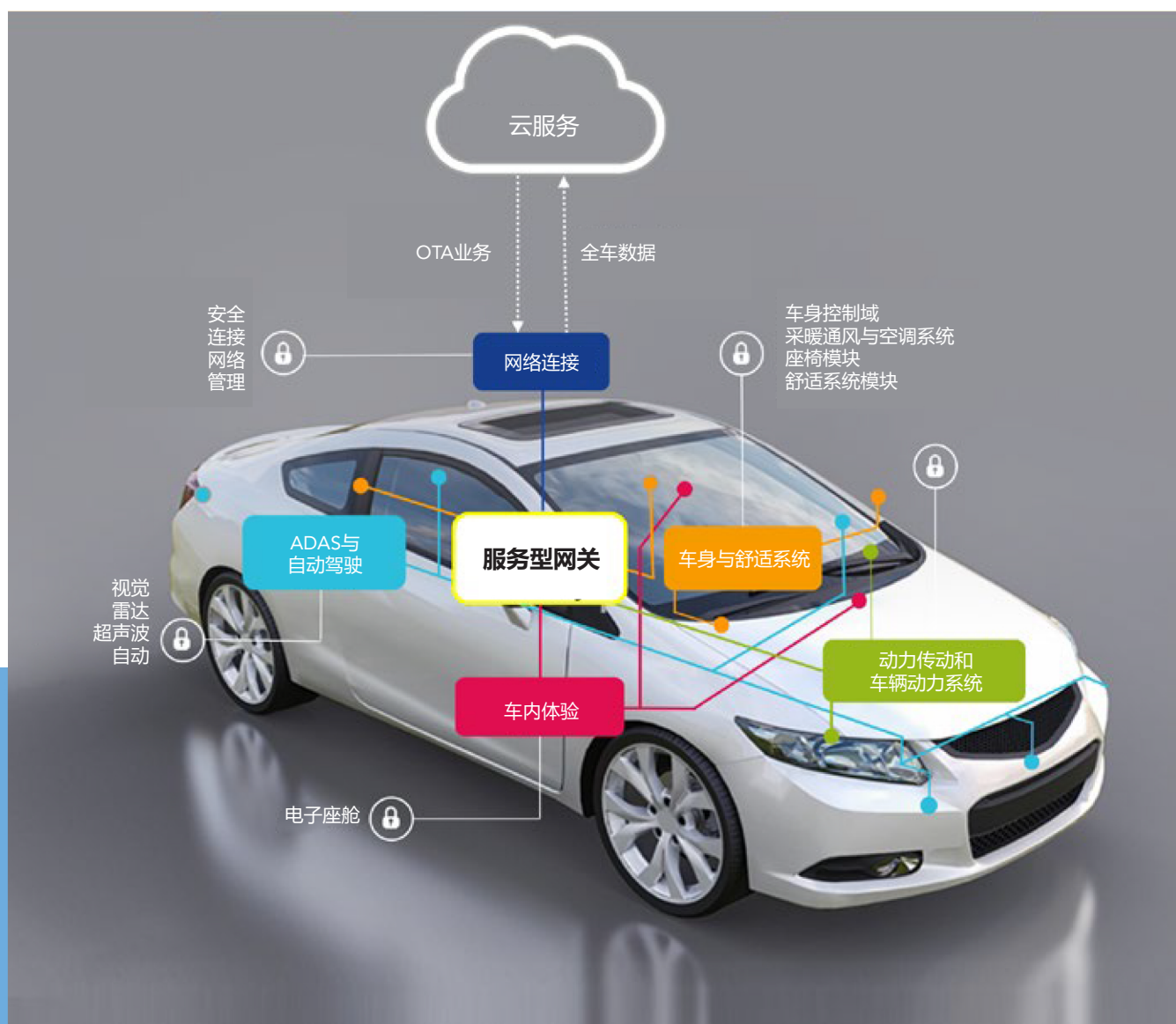


图2. 连接和远程信息处理

智能汽车：丰富的用户界面和连接

智能汽车的新功能，如智能汽车接入和辅助驾驶等，推动了市场对XIP的需求。我们可以仔细看一下为什么每个新功能都需求XIP的功能。此外，许多的应用案例还有系统综合要求，包括持续软件改进、连接性和安全性。¹ 使用XIP构建的嵌入式系统允许存储器增大，可以支持不断的软件改进。此外，系统存储器通常会随着的固件更新扩充，并且扩充通常是加倍的，用于备份或后备镜像。

网络连接的实现使得智能车辆必要的无线接口的数量和类型增加。首先，是汽车的用户体验，随着手机成为我们日常生活的核心组成部分，驾驶员和乘客可以通过Wi-Fi和蓝牙连接到车。其次，则是汽车利用远程信息处理提供的服务，车辆本身嵌入了LTE调制解调器，并将其直接链接到在线监控和服务，需要占用大量代码空间的软件堆栈。²

最后，满足其他综合要求时均需要严肃对待安全性问题，因为必须在嵌入式设计时必须针对多方面进行考虑。当前的加密算法正在增加代码体量，因此也对嵌入式系统有额外的要求。尽管基于硬件的加密技术在过去几年里取得了长足的进步，建立安全连接所涉及的协议以及确保可靠性的步骤和程序仍是必须的。对于上述两种情况，完全基于软件的加密和安全算法或通过增强硬件的做法都需要额外的代码空间。这些集成要求增加了通过开放结构以及XIP扩展存储器的需求。

从软件的角度来看，持续改进的方法依赖基于开源社区的软件组件。开源对于图形库、连接和安全堆栈来说是必不可少。它们强调的是通过不同的平台的工作，而不是优化体量，这进一步导致了存储器扩展的需求。加上需要依赖开源的软件进行设计选择，与主要智能手机操作系统提供商提供的生态系统合作是潜在的需求。

开放架构的优势

无论是为了增加网络连接还是应对机器学习挑战，不可否认，存储器扩展是嵌入式设计的共同需求。存储器可以在内部添加到设备中，还是使用具有XIP功能的外部存储器的替代方案，因此MCU/MPU的存储器架构的选择是必须要探索的。

那么，是什么让带有XIP的开放架构更有吸引力呢？从嵌入式系统设计者的角度来看，XIP最关键的方面是它的可扩展性，因为外部存储器可以在性能和集成方面进行扩展，让相同处理器可以处理多项任务。此外，如果需要更大的存储器或更快的存储器，只需更换外部存储器设备，而不是更换主MCU或MPU。

随着产品需求的变化，硬件和软件设计的各个方面得以充分利用，与选择扩展外部存储器的封闭架构形成对比。例如，制造商可以利用常见的外部串行NOR Flash PCB封装，在生产多个产品偏差或添加新功能时，可以轻松升级到从Mbits到Gbit的最新存储器，确保更快的上市时间，以及降低开发成本。

此外，市场上的外部串行非易失性存储器可以针对晶圆能力进行优化，可以使每比特存储器的成本低于内部存储器。换句话说，采用XIP存储器的系统 will 比集成存储器的处理器更实惠。此外，当系统需要外部NVM时，因为许多设计依赖串行NOR Flash进行数据存储，成本效益会随之增加。因此，当仅需要更大的存储器空间来支持代码体量要求时，利用XIP就是代码存储的额外系统成本。简而言之：由于串行NOR Flash已在系统中，因此不会因PCB设计或电源管理设计而增加成本。

与质量和稳健性相关的功能与串行NOR Flash带来的优化技术的成本优势相结合，提供了很多价值。串行NOR Flash产品的温度范围较宽、数据保留时间较长和写擦除周期充足。此外，串行NOR Flash设备比当今处理器的制造尺寸更大。这使得诸

如串行NOR Flash类型的NVM可用于恶劣的汽车环境。由于处理器通常会突破硅晶圆设计的极限，因此无法集成NVM，属性也无法与专用串行NOR Flash设备相同。

考虑到成本、稳健性和系统可扩展性，处理器架构和性能，趋向采用XIP。在过去几年中，行业标准CPU（例如Arm®提供的CPU）增强了其架构以更好地与基于缓存的系统（XIP的一个相关方面）配合使用。此外，随着处理器集成到更小的制造过程中，它们的相关操作频率正在提升至千兆赫兹速度；基于缓存的架构和高CPU速度降低了由序列化存储器接口引入的延迟。因此，存储器访问时间不再是嵌入式系统性能的制约因素。因此，串行NOR Flash和XIP为当今嵌入式系统所需的能效和性能的正确组合提供了途径。

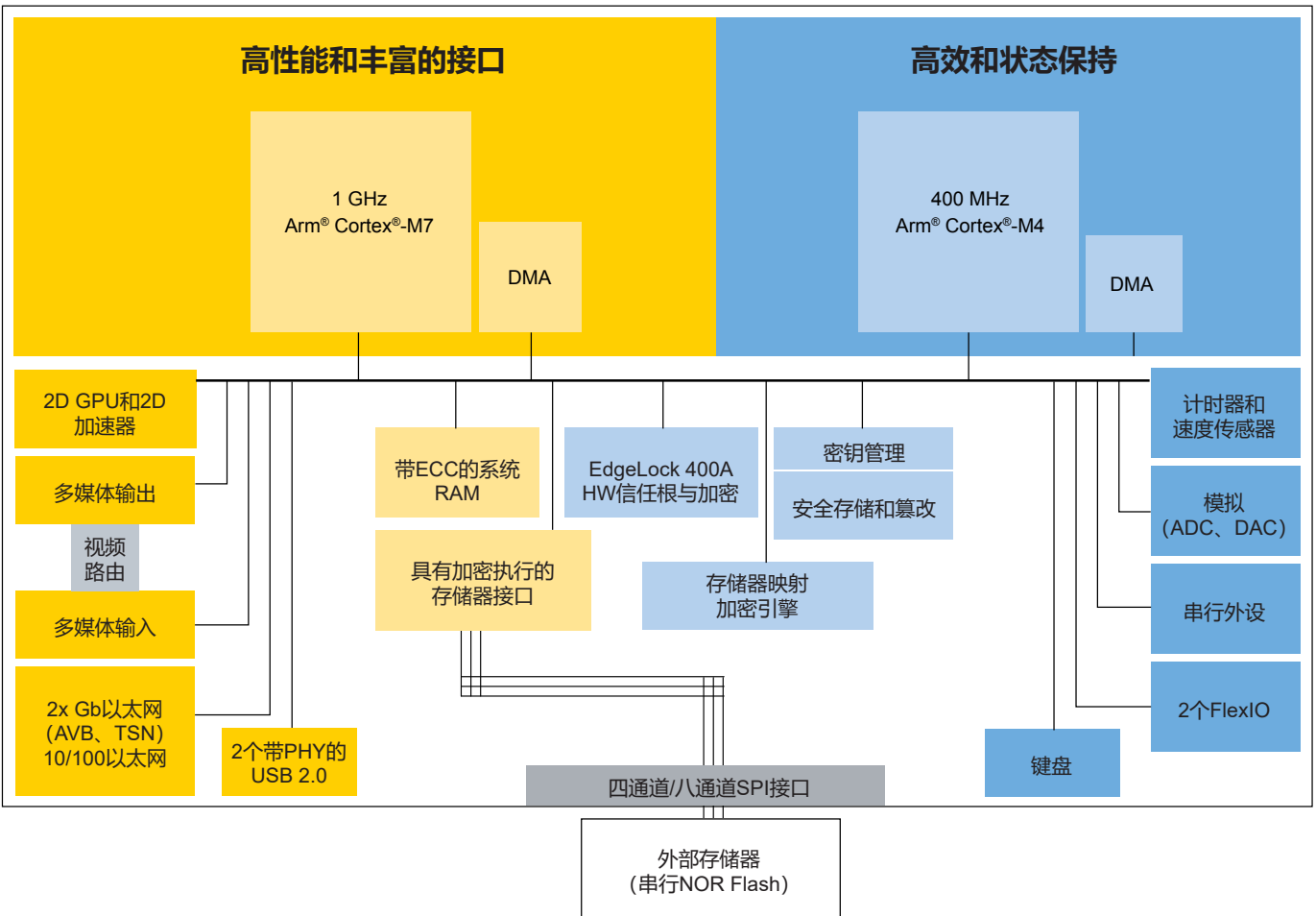


图3. 示例处理器架构

如今的汽车包含超过2亿行代码



图4. 代码行与现代汽车的对比

选择NORFlash的原因

NOR Flash是一种强大可靠的存储设备，具有快速读取速度和随机存取能力，非常适合代码存储和执行，尤其适合XIP。最近几年，逻辑处理节点萎缩，但Flash处理节点并没有以同样的速度萎缩：嵌入式Flash很难超越逻辑处理节点的特定进程节点。由于系统变得更加复杂，代码体量的增加和对更大代码存储的需求，推动对Flash作为外部设备的市场需求，所以也快速适应了开放架构存储器系统。因为今天的汽车必须以数量惊人代码行来集成功能，所以对嵌入式系统性能和代码空间的需求很高。³如前图所示，汽车中的代码行实际上比飞机、宇宙飞船甚至操作系统都多。在汽车、工业应用和其他领域，这种趋势都很明显。这导致了市场对串行NOR Flash功能和处理器的需求。

因此，外部NOR Flash的引脚数少，市场需求也增加了，其中串行NOR Flash已成为了默认选项。同时，串行NOR已从单通道读取发展到多通道读取功能，如四通道（4通道）和八通道（8通道）。这一性能升级极大地实现了XIP功能及优势：除了提升启动时间，还节省了消耗和成本。

开放式架构需要增加安全性要求，大多数汽车应用都希望增加一层可靠和性能。Integrated Silicon Solution Inc. (ISSI)发行的串行NOR Flash系列，增加了纠错码、AX模式和安全性，优化了Flash访问指令和功能。他们的IS25系列串行NOR Flash设备为满足这些要求提供了一种行之有效的解决方案。‘请注意，并非所有产品都支持上述所有功能。请联系flash@issi.com了解更多信息。



图5. 用于汽车的ISSI SPI Flash



误差校正码(ECC)

ISSI提供的串行NOR Flash设备，自带内嵌ECC功能，可以向后兼容标准存储器，从而显著增强数据鲁棒性和质量，简化系统级设计，节省功耗，并减少电路板上的存储器占用。增加的ECC功能使其非常适合高可靠性应用，尤其是汽车领域的安全关键应用，有助于实现ISO 26262定义的所需功能安全性。



AX读取模式

ISSI串行NOR Flash设备提供从Flash读取数据的AX读取和自动引导模式。两者用于快速执行，只需要一个地址即可输出数据进行随机访问。在通电期间，无法直接访问AX读取模式。相反，AutoBoot模式允许顺序读取引导代码，而不需要起始地址或读取命令。通过寄存器设置分配预选地址，可以省略起始地址。AX读取模式操作是通过在虚拟周期应用模式位来启动的。模式位由8位组成（M7至M0）。启用AX读取操作，其中当M[7: 4]=1010 (Ah) 和M[3: 0]=X（其中X不重要）时，后续读取执行跳过命令代码，并且当模式位不是AXh时，Flash设备退出AX读取操作。AutoBoot模式和AX读取模式都旨在增强开放架构存储器子系统的性能。⁷



安全和防护¹

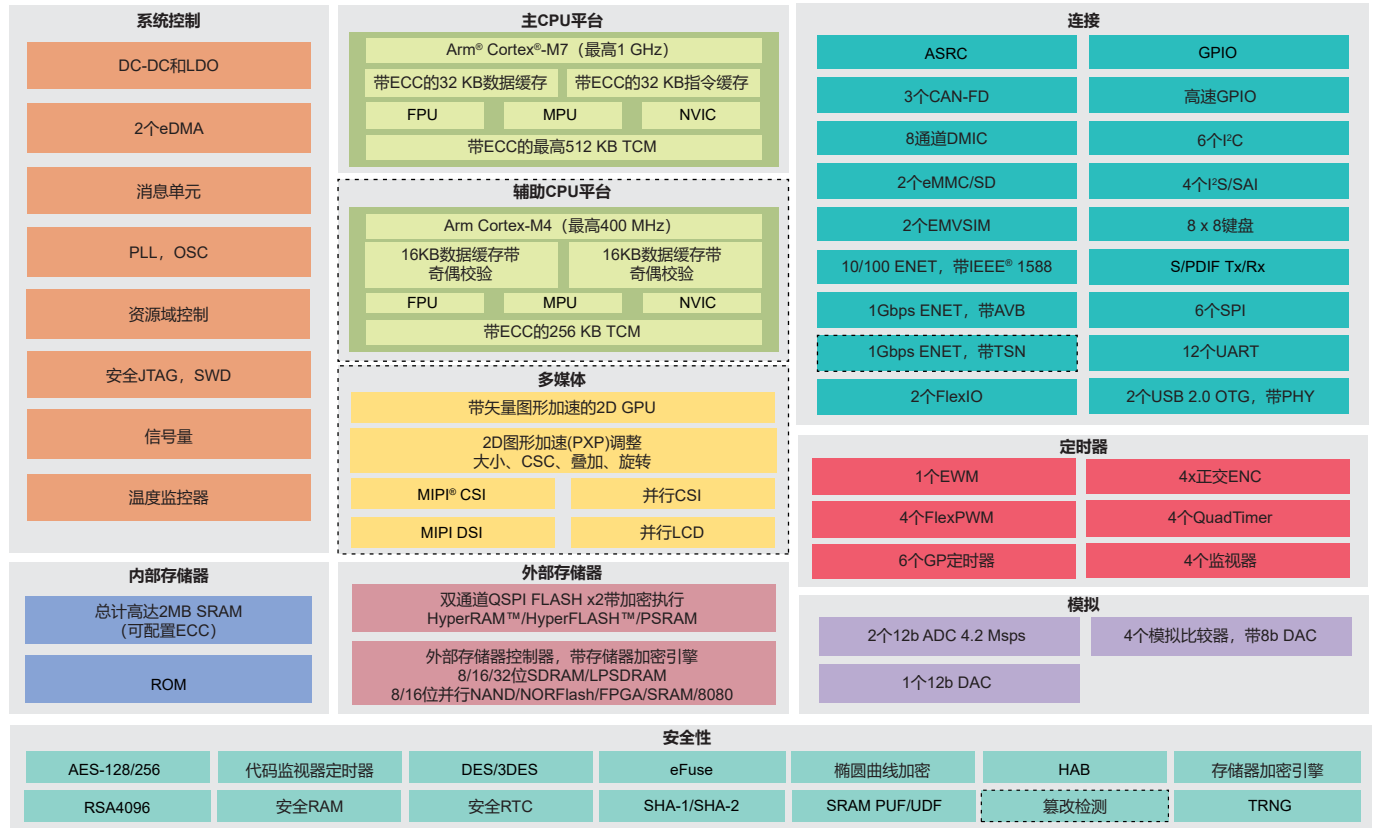
随着对安全Flash解决方案的需求不断扩大，为了跟上最新的复杂黑客技术的步伐，ISSI通过利用内置于QSPI/xSPI Flash设备中的关键安全功能来解决系统漏洞。它们的主要安全特性是：

- **BGA封装：**保护设备免受不良意图的用户的恶意探测。BGA封装的焊球位于器件底部，直接焊接在PCB上。这些焊球的走线可以嵌入整个多层PCB，以防止恶意的访问。ISSI提供两种类型的24球TFBGA封装以支持SPI NOR设备：4x6球和5x5球阵列。
- **硬件写入保护：**在ISSI的所有SPI Flash中为USON、WSON、SOIC和BGA封装提供专用WP#引脚。WP#引脚可保护状态寄存器免受写入。状态寄存器位包含对四线模式使能、块保护和允写锁存控制。
- **唯一ID：**使用ISSI实施的128位序列号来验证组件真实性，该序列号无法更改，但可与微处理器等其他关键系统组件一起使用，以减少组件交换的威胁。
- **OTP区域：**允许系统设计人员在存储器阵列上实施散列型算法，以生成可存储在一次性可编程区域(OTP)中的原始值，从而验证代码真实性。系统使用相同的算法重新计算该值，并将其与存储在OTP中的原始值进行比较。如果此类值不匹配，系统可能会受到损害，需要采取后续行动，直至问题得到解决。
- **块保护：**防止意外或恶意编程，并通过用户可选的锁定块进行擦除。此类区域受到临时锁定，防止对设备进行未经授权的更改。
- **高级扇区保护(ASP)：**允许单个扇区锁定，可由易失性寄存器位（动态保护位）NOR易失性寄存器位（持久保护位）控制。组扇区/块锁定和解锁指令提供了一种快速一次性清除或设置所有动态保护位（DYB）位的方法。64位一次性可编程密码可进一步保护持久保护位(PPB)更改。
- **重放保护单调计数器(RPMC)：**提供额外安全性的构建块，为引导存储器中的代码和数据存储增加增量单调计数，保持唯一性，同时帮助系统更好地抵御回滚和重放攻击。

¹并非所有产品均支持所有功能。请联系Flash@issi.com了解更多信息

基本处理器功能

根据存储器扩展需求，恩智浦开发了整个交叉微控制器产品线。近期示例为i.MX RT1170交叉MCU，结合了高级计算能力和外设：



适用于某些家用产品

图6. i.MX RT1170框图

i.MX RT1170中的存储器架构允许串行NOR Flash的XIP来补充其功能。微控制器与智能串行外设接口（双通道QSPI）外部存储器控制器的集成是XIP支持的核心。此存储器控制器外设支持同步串行协议，该协议与标准SPI一样依赖于数据和时钟信号。除作为传统SPI运行外，此类增强外设还可充当系统存储器控制器，以更好地支持XIP用例。并可接受i.MXRT1170交叉MCU中产生的内部总线传输，将其转换为与外部存储器交互所需的适当串行命令；硬件可通过此方式加速外部存储器的数据传输。基于芯片微架构内部发生的存储器传输，驻留在外部串行NOR Flash中的指令和数据可直接馈送至CPU线路或其他芯片外设。其中一个存储器控制器为FlexSPI，这是恩智浦最新一代的串行Flash控制器。i.MX RT交叉处理器集成了FlexSPI技术，有助于增强XIP—如下框图所示。⁷

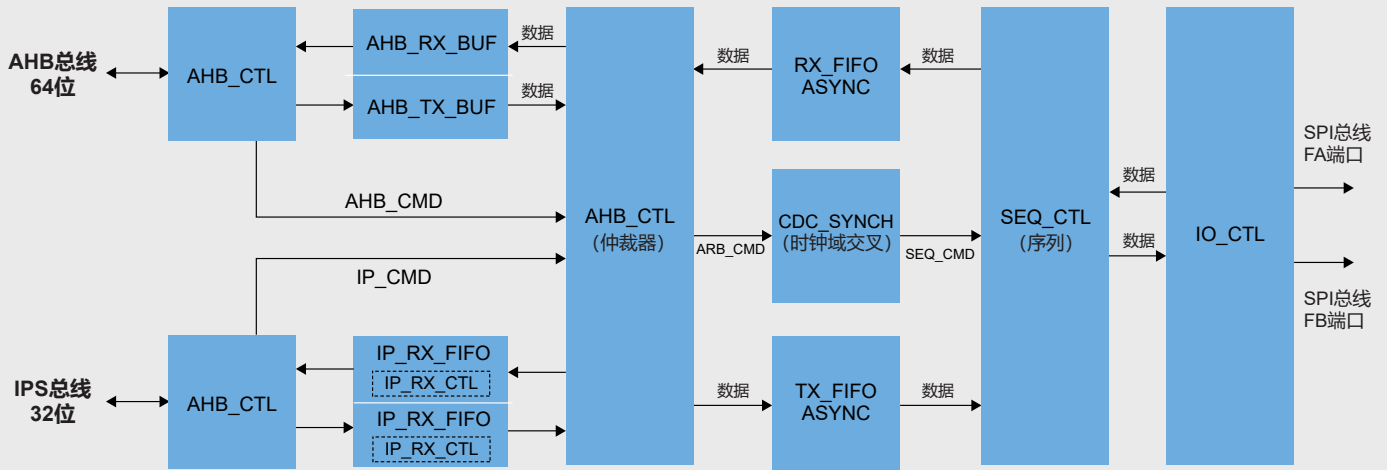


图7. FlexSPI框图

64位AHB总线是系统总线的接口，系统总线将来自CPU或其他片上主设备（如LCD控制器）。

IPS总线是一个外部接口，但允许软件通过FlexSPI寄存器模型直接向NOR Flash设备发送命令。该接口还用于初始化和配置外部串行Flash，因其可用于启动发送命令流程。

连接至AHB_CTL块，发送(TX)和接收(RX)缓冲区在读取外部存储器时预取数据，以改善XIP操作的延迟和整体计算性能。

序列控制块(SEQ_CTL)是一个大型查找表，保存不同串行Flash操作（如读取、擦除和编程）的预设指令。SEQ_CTL将从64位AHB总线的访问链接至读取命令序列，该序列将发送至外部串行Flash。并非每个Flash均有相同的命令集或I/O接口。

序列控制引擎可编程，用于根据串行Flash定义的命令集调整SPI传输，允许处理器（如i.MX RT1170）与各种外部Flash类型和功能接口。此外，此灵活性使交叉处理器能够利用Flash属性，在支持最强大的XIP嵌入式系统方面发挥着至关重要的作用。

结论

在汽车领域和整个电子世界，消费者对创新和有用功能的需求不断变化，这为工程师创造了新的工作趋势。更丰富的人机交互影响着嵌入式设计的方方面面。

随着车辆变得越来越智能，对资源的需求越来越多，考虑存储器架构和可扩展性规划对于可靠、成功和稳健的系统至关重要。借助开放架构和直接执行(XIP)操作，嵌入式设计可足够灵活地满足此类需求并确保设计效率。

参考资料

1. <https://eleks.com/blog/vehicle-infotainment-systems-automotive-industry/>
2. <http://www.globenewswire.com/en/news-release/2020/12/28/2150968/28124/en/Growing-Advancement-in-Infotainment-Systems-in-the-World-Automotive-Infotainment-Systems-Market.html>
3. <https://www.choice.com.au/transport/cars/general/articles/accessible-text-files/millions-of-lines-of-code-in-modern-aircraft-and-cars-compared>
4. <https://www.nxp.com.cn/products/processors-and-microcontrollers/arm-microcontrollers/i-mx-rt-crossover-mcus/i-mx-rt1170-crossover-mcu-family-first-ghz-mcu-with-arm-cortex-m7-and-cortex-m4-cores:i.MX-RT1170?cid=pr>
5. <https://www.issi.com/WW/pdf/IS25LE-WE-512M.pdf>
6. ISSI应用笔记, AN25R002: “XIP模式转换为ISSI SPI NOR” 请联系Flash@issi.com了解更多信息