

Technical White Paper

适用于 **MSP** 微控制器的 **MCAL** 和 **AUTOSAR**



Ethan Bloom

摘要

随着汽车嵌入式系统日益复杂并对可移植性提出更高要求，在不同供应商的 ECU 之间采用标准化软件架构已变得至关重要。本白皮书详细介绍德州仪器 (TI) 面向 MSP 微控制器的 MCAL 软件包如何在 MSPM0 和 MSPM33 微控制器系列上实现 AUTOSAR® 合规性。通过提供核心微控制器功能的标准化抽象，TI 的 MSP-MCAL 软件包允许开发人员将应用逻辑与硬件特定实现解耦，有助于与 AUTOSAR 的分层软件组件无缝集成，从而降低开发复杂性并加快产品上市速度。最终，TI 的 MSP-MCAL 软件包为现代汽车嵌入式系统提供了基于标准的可扩展基础。

内容

1 简介.....2

2 MCAL 和 AUTOSAR 基础知识.....2

 2.1 什么是 MCAL 和 AUTOSAR ? 2

 2.2 MCAL 应用.....3

 2.3 AUTOSAR 应用.....3

3 适用于 MSP 微控制器的 MCAL 软件包.....4

 3.1 许可模式.....4

 3.2 支持模式.....4

4 MSP 可扩展性和生态系统.....4

 4.1 平台可扩展性.....4

 4.2 软件生态系统与集成.....4

5 入门.....5

 5.1 安装和设置.....5

 5.2 实施建议.....5

资源.....5

商标

AUTOSAR® is a registered trademark of AUTOSAR GbR.
Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.
tresos® is a registered trademark of Elektrobit Automotive GmbH.
所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

汽车应用日益复杂，对软件可移植性和功能安全的需求不断增长。为了满足这些要求，汽车行业采用了标准化抽象层，以弥合高层应用代码与底层硬件驱动程序之间的差距。AUTOSAR 是解决此问题的业界标准方案之一，支持可扩展的硬件独立性和无缝的软件集成。本文档介绍德州仪器 (TI) 的标准化 MCAL 软件包产品，并探讨在德州仪器 (TI) 的 MSPM0 和 MSPM33 微控制器上部署符合 AUTOSAR 标准的软件。本文的讨论围绕四个主要方面展开：

- **基础：** AUTOSAR 架构概述以及微控制器抽象层 (MCAL) 的关键作用
- **TI 的 MSP-MCAL 产品：** 深入探讨 TI 面向 MSP 的专用 MCAL 软件包所提供的功能、安全合规性和许可模式
- **生态系统集成：** 分析 MSP-MCAL 及 MSP 软件生态系统中的其他工具如何在整个 MSP 微控制器产品系列中扩展
- **入门：** 关于快速上手 MSP-MCAL 并成功实现软件集成与部署的宏观指导

2 MCAL 和 AUTOSAR 基础知识

现代汽车集成了数百个电子控制单元 (ECU)，涵盖车身电子、ADAS 和照明等各种车辆系统和域。每个系统都有不同级别的安全要求，这些要求分布在来自多个供应商的 ECU 中。要应对这种复杂性，需要标准化的软件框架来实现可移植性、互操作性和高效的开发周期。这种需求由业界标准分层框架 AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture，汽车开放系统架构) 及其最底层组件 *微控制器抽象层 (MCAL)* 来解决。

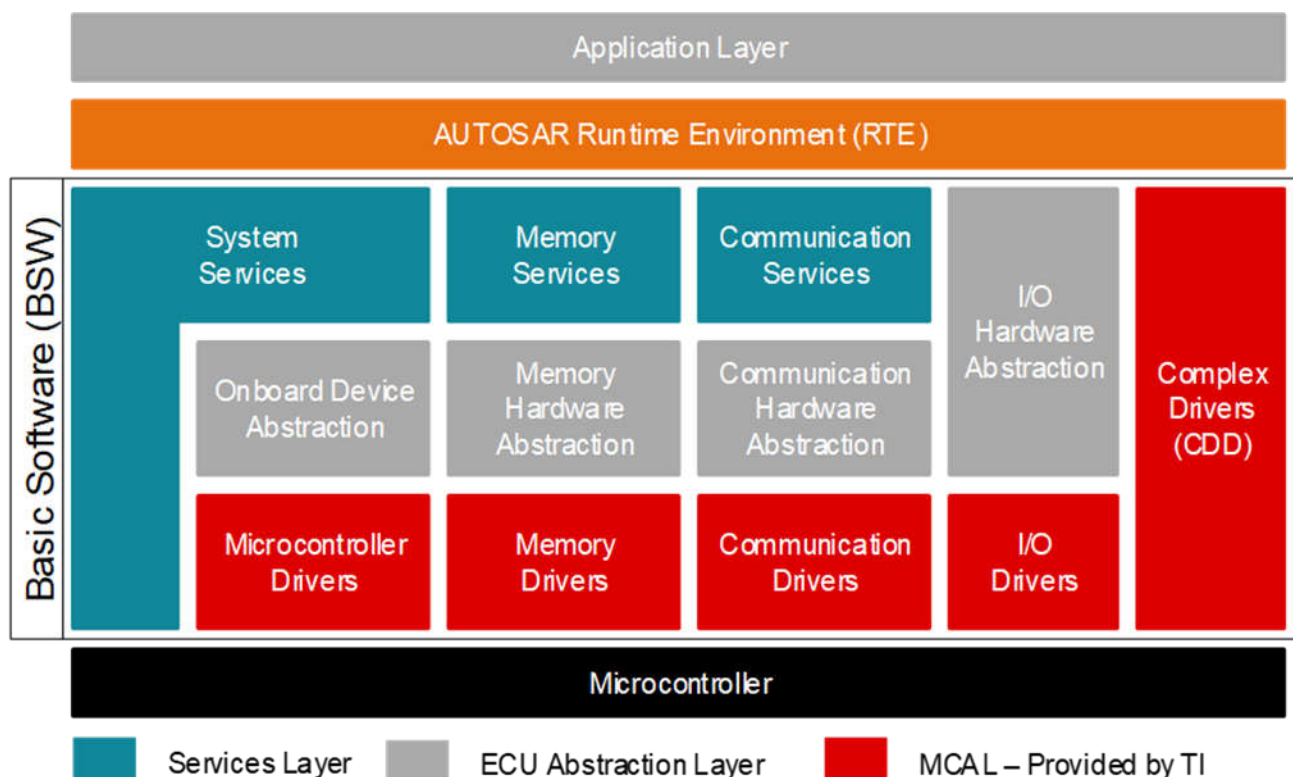


图 2-1. AUTOSAR 堆栈的方框图

2.1 什么是 MCAL 和 AUTOSAR ？

AUTOSAR 由汽车 OEM 和供应商联盟于 2003 年创立，旨在为汽车系统构建标准化的软件框架；它定义了分层软件架构，将应用逻辑与硬件特定实现分离。图 2-1 以可视化方式展示了此分层软件架构。AUTOSAR 架构的三个主要层是：

1. 应用层：独立于硬件编写的车辆级功能
2. 运行时环境 (RTE)：支持可移植通信的中间件接口

3. 基本软件 (BSW)：依赖于硬件的驱动程序和服务，包括 MCAL

备注

AUTOSAR 提供两种平台变体：

- **Classic**，面向资源受限或安全关键型 ECU，其静态、确定性架构符合 ISO 26262；这是 AUTOSAR 标准中严格但轻量级的版本
- **Adaptive**，专为支持 OTA 更新、机器学习和动态面向服务架构的高性能计算平台而设计；通常保留给较大的处理器和 SoC

本文的讨论范围主要聚焦于 AUTOSAR Classic，对于 MSPM0 和 MSPM33 等较简单的汽车微控制器，它仍然是传统汽车 ECU 开发中的主导平台。

MCAL 位于 BSW 层的最底层，直接位于微控制器硬件之上，并为核心外设提供标准化的、独立于硬件的 API，包括 ADC、PWM、SPI、CAN、LIN、GPIO、定时器、中断控制器以及存储器和时钟管理单元。通过将硬件特定细节抽象在 AUTOSAR 规范定义的统一接口之后，MCAL 确保上层软件在不同 MCU 系列之间完全可移植。MCAL 驱动程序通常由微控制器供应商提供，并经过预先验证，以减少开发工作量和安全认证负担。德州仪器 (TI) 为基于 Arm® Cortex® 的平台 MSPM0 和 MSPM33 提供 MCAL 支持，从而在这些器件上实现 AUTOSAR Classic 合规性。

如图 2-1 所示，复杂设备驱动程序 (CDD) 是 MCAL 层的关键组件，从 MCU 硬件一直延伸到 AUTOSAR 运行环境。这些 TI 专有模块未由 MCAL 标准定义，用于暴露标准 MCAL 框架未涵盖的硬件功能。不过，这些模块通过实现应用层对这些外设的 API 访问发挥着关键作用。

AUTOSAR 和 MCAL 共同构成互补的一对：AUTOSAR 定义了架构框架和接口标准，而 MCAL 提供了硬件特定的实现方案，使这些标准能够在给定 MCU 上落地。

2.2 MCAL 应用

MCAL 主要用于需要标准化硬件抽象的汽车应用，包括底盘和安全系统、热管理、内部/外部照明以及车身电子。该软件也已被应用于一些具有类似可移植性和确定性要求的工业场景。

推动采用 MCAL 的关键因素包括：

1. **硬件独立性**：MCAL 将应用代码与微控制器特定细节隔离开来，从而可以将车辆系统迁移到新的 MCU 系列，而只需极少的软件返工，在跨平台或跨代产品扩展设计时降低开发风险和成本。
2. **功能安全支持**：MCAL 驱动程序经过预先验证，并根据 AUTOSAR 规范编制文档，可直接支持 ISO 26262 合规性工作，减少可能给各项目团队带来负担的认证开销。
3. **实时确定性和供应商灵活性**：MCAL 提供对硬件外设的可预测、低延迟访问，同时支持与多个第三方硬件和软件供应商集成，从而避免依赖单一供应商生态系统。

值得注意的是，MCAL 的价值并不取决于是否部署完整的 AUTOSAR 堆栈。开发人员可以独立采用 MCAL 的标准化硬件抽象层，在上层架构中保持灵活性，同时仍可从预先验证的驱动程序中获益，减少开发工作量，简化项目间的代码移植。因此，即使对于在严格 AUTOSAR 环境之外运作的团队，MCAL 也是一个实用的选择，尤其适用于快速迭代设计或在资源受限场景中开发软件。

2.3 AUTOSAR 应用

AUTOSAR 是现代汽车软件开发的支柱。AUTOSAR 的安全合规架构和确定性调度对于动力总成和底盘控制等任务关键型系统至关重要。对于 ADAS 和自动驾驶，AUTOSAR 可实现结构化的传感器融合和高效的高带宽数据管理。此外，车身电子和照明应用可显著受益于采用这种标准化软件架构所带来的成本优势。功能安全、确定性和多供应商互操作性等因素，是 OEM 可以要求特定 ECU 或车辆系统实施 AUTOSAR 的关键原因。

从 OEM 的角度来看，在整个供应链中强制要求 AUTOSAR 合规性是一种风险缓解和成本控制策略。共享的架构标准为接口定义和集成提供了通用语言，减少了供应商锁定，并简化了将新组件整合到现有车辆平台所需的工程工作。此外，AUTOSAR 联盟的协作结构可确保该标准随行业挑战同步演进，同时在不同组织和技术堆栈中保持可实施性。

3 适用于 MSP 微控制器的 MCAL 软件包

德州仪器 (TI) 提供了符合 AUTOSAR Classic 4.3.1 标准的全面 MCAL 软件包, 旨在加速整个 MSP MCU 产品系列 (包括 Arm Cortex-M0+ 和 Arm Cortex-M33 平台) 的汽车软件开发。该软件包涵盖标准 AUTOSAR MCAL 模块的完整范围, 包括通信协议 (CAN、LIN)、I/O 控制 (GPIO、PWM)、定时、模拟处理 (ADC) 以及内存和时钟管理; 在这些标准 MCAL 模块之外, 还有独特的复杂设备驱动程序 (CDD), 用于暴露标准 AUTOSAR 规范未涵盖的 TI 特定硬件功能。针对 MSP 器件的 CDD 包括 I2C、UART 和 DMA。CAN 驱动程序支持标准 CAN 和 CAN-FD 协议, 具有完整的协议栈集成, 而 LIN 驱动程序支持主控模式和从属模式, 从而实现灵活的网络配置。所有驱动程序均经过预先验证, 与 AUTOSAR Classic BSW 堆栈兼容, 并可与业界标准工具链集成。MSP-MCAL 软件包符合 ISO 26262 标准, 最高可达 ASIL-B 级别。

3.1 许可模式

德州仪器 (TI) 的 MSP-MCAL 软件包作为完全免版税的驱动程序库交付。在第三方供应商的 MCAL 和 BSW 许可成本可能构成显著且经常性单位费用的行业中, TI 的免版税模式彻底消除了这一负担。对于默认的按原样提供的 MCAL 软件包, 无论产量如何均不收取单位费用, 不产生经常性许可成本, 不承担版税义务, 也没有任何形式的许可上限或阈值。客户可以从原型阶段扩展到全面量产, 而无需向 TI 支付任何额外的软件许可费用, 从而使总拥有成本更低且从一开始就完全可预测。

这种免版税模式对项目经济效益具有切实的影响。对于 ECU 产量可达数百万台的大批量汽车项目, 无需按单位支付 MCAL 许可费意味着直接且可随规模扩大的成本节省, 并且节省幅度会随产量增加而累积放大。结合预先验证的 MCAL 驱动程序所减少的开发和认证工作量, TI MCAL 软件包既能带来前期工程成本节省, 又能实现长期生产成本优势, 同时不影响 AUTOSAR 合规性、安全认证支持或硬件抽象质量。

3.2 支持模式

TI 通过 MCAL 至 BSW 集成边界为 MCAL 层提供全面的直接技术支持。在此范围内, TI 涵盖符合 AUTOSAR 4.3.1 规范的 MCAL 驱动程序功能、通过 EB tresos® 插件进行配置、API 与 AUTOSAR SWS 文档的合规性、错误修复、器件特定勘误表规避措施、性能优化以及 MCAL 配置的存储器占用指导。TI 还针对将 TI MCAL 驱动程序集成到主要第三方 BSW 堆栈中提供一定程度的尽力而为指导, 使客户能够灵活选择 AUTOSAR 堆栈, 同时保持受良好支持的集成路径。

MCAL 至 BSW 集成边界之外的支持明确不在 TI 的范围内。BSW 模块开发和支持 (例如 CanIf、ComM、NvM、DEM、DCM) 由所选的 AUTOSAR BSW 供应商或集成商负责。RTE 生成和配置、应用软件开发以及整体系统集成、验证和 ISO 26262 系统认证仍由最终开发人员负责。

4 MSP 可扩展性和生态系统

德州仪器 (TI) 提供了统一的软件基础, 旨在弥合成本优化型入门级微控制器与注重安全性的高性能平台之间的差距。通过将 MCAL 集成到 MSP 产品生态系统中, TI 实现了不同处理器架构之间的无缝过渡。这样一来, 随着项目需求从简单的控制任务演进到复杂的安全关键型汽车或工业应用, 开发人员可以保持一致的软件方案。

4.1 平台可扩展性

MSP-MCAL 软件包通过跨 MSPM0 和 MSPM33 架构的简化抽象层实现平台可扩展性。目前, MSPM0 和 MSPM33 各有独立的软件包。每个 MSP-MCAL 软件包都允许开发人员在成本优化型和高性能器件变体之间复用应用代码, 从而在不同产品系列之间迁移设计时大幅减少工程返工。

两大核心支柱推动了这种可扩展性。首先, 软件可移植性通过标准化外设接口实现, 这些接口对硬件特定细节进行抽象, 确保应用层独立于底层实现差异。其次, MSP 产品系列在 IP 级和引脚对引脚封装选项方面的硬件一致性降低了进入门槛并简化了迁移路径。这些能力共同加快了产品上市速度, 降低了总体开发成本, 并实现了从入门级设计到高性能、功能丰富系统的无缝产品线扩展。

4.2 软件生态系统与集成

整个 MSP 微控制器生态系统主要由 MSP SDK 组成, MSP SDK 为常规嵌入式开发提供驱动程序库、中间件、代码示例和 RTOS 支持。在此生态系统中, MCAL 发挥着专门的作用, 提供依赖硬件的驱动程序来抽象处理外设访问, 从而使更高层的软件完全独立于硬件。

务必注意，**MSP-MCAL** 是一个独立的软件包，与标准 **MSP SDK** 不同。虽然 **SDK** 旨在用于通用嵌入式开发，但 **MCAL** 软件包专为符合 **AUTOSAR** 的应用而设计。

5 入门

要成功将 **MCAL** 集成到汽车软件栈中，需要仔细规划工具链、内存分配和架构边界。本节提供关于查找软件包、搭建开发环境以及优化系统资源的宏观指导。

5.1 安装和设置

MSP-MCAL 软件包可作为安全资源从 **TI.com** 下载。有关安装和设置过程中的详细指导，请参阅 **MCAL** 软件包下载中包含的 **MCAL** 用户指南。

为了提供可预测的行为和最优的代码生成，**MCAL** 使用业界标准编译器进行了验证。用户必须确保其工具链支持必要的优化标志（例如函数段消除和短枚举支持），以使链接器去除未使用的代码，这对于在资源受限的汽车 **ECU** 中保持精简的存储器占用至关重要。

MSP-MCAL 软件包具有高度模块化特性，允许开发人员根据 **ECU** 的特定要求定制软件占用空间。开发人员不应启用整个套件，而只需激活应用所需的特定模块。此外，必须策略性地在 **PRE-COMPILE** 和 **POST-BUILD** 配置变体之间进行选择，以平衡运行时灵活性的需求与最低闪存消耗的要求。

备注

TI 建议使用 **Elektrobit** 的 **EB tresos** 工具来评估 **MSP MCAL** 软件包并基于其进行开发。安装和设置此工具需要首先从 **TI** 获取许可证。有关详细信息，请参阅 **MCAL** 用户指南。

5.2 实施建议

有效的存储器管理对于确保汽车系统既能容纳主要功能，又能适应未来更新（例如 **OTA** 更新或诊断扩展）至关重要。

为了维持可扩展的架构并优化代码占用空间，开发人员必须采用若干关键优化技术：

- **选择性模块激活**：仅启用设计中特定外设集所需的驱动程序。
- **优化标志**：利用编译器特定的标志进行段消除和数据压缩，以尽量减少代码对闪存和 **RAM** 的影响。
- **功能调优**：在 **AUTOSAR** 规范允许的情况下，在生产构建中禁用非必要的诊断或错误检测功能（例如 **DET**），以回收存储器。
- **DMA 利用率**：对于 **SPI** 或 **ADC** 等高带宽外设，可利用支持 **DMA** 的驱动程序变体来优化 **CPU** 利用率和吞吐量，同时考虑 **RAM** 分配的增量增加。

在对新设计进行可行性研究时，工程师必须制定“存储器预算”，涵盖 **MCAL**、所选的 **AUTOSAR BSW** 堆栈、应用逻辑，以及为校准数据和引导加载程序需求预留的充足缓冲区。一种明智的做法是设定闪存利用率阈值目标，为现场更新留出足够余量，从而在产品整个生命周期内保持产品的持久性。

资源

- [MSPM0 MCAL 软件包下载](#)
- [MSPM33 MCAL 软件包下载](#)
- [EB tresos® 工具下载页面](#)
- [EB tresos® 许可证申请](#)

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月