

无软件电池包 BMS 应用白皮书

01 摘要

02 概念定义与适用边界

无软件电池包 BMS 的产业价值

无软件 BMS 的技术能力边界

03 目标应用场景

典型技术架构

05 关键硬件设计要点

功能安全与法规合规

06 器件推荐

专属 Software free GTW 的概念

07 系统参考验证

参考文献

摘要

无软件电池包 BMS (Software Free BMS) 的核心架构可以概括为 “Domain or Zonal Controller + SWF GTW + AFE/BJB/Pack sensor”。其中，域控制器通过 CAN 或以太网与 SWF 网关通信，由 SWF 专用网关完成与 AFE、HSD/LSD、EEPROM、安全器件、压力传感器及其他包内资源的连接和转发。

在高压应用中，无软件方案的思路是：将传统 BMS 本地 MCU 的大部分决策迁移到域控制器，只保留包内必要的测量、通信桥接和执行器接口能力。这样，BMS 由“本地独立控制器”转向“域控制器管理下的高可靠采样/执行节点”。

在低压应用中，该思路也可用于 LVBMS，通过替代传统 MCU+SBC 结构，覆盖 12 V、24 V 乃至进一步 48 V 电池管理场景。

因此，本白皮书的核心结论是：无软件电池包 BMS 适合于功能边界清晰、成本敏感、整体采用域控制器的架构体系；对于动力电池、高压储能和需要高等级功能安全、网络/数据闭环的系统，推荐“无软件电池包 BMS + 域控监督”的架构。这一应用与当前主流器件和完整高压 BMS 参考设计的功能分布依然高度一致。

概念定义与适用边界

什么是“无软件电池包 BMS

无软件电池包 BMS，是指在电池包内部部署用户编写的 MCU 应用层/控制层软件，电池包主要依靠 BMS 芯片内部的硬件保护链、状态机、比较器、OTP/EEPROM 参数表和固定逻辑完成核心监控保护动作。它通常不是“零数字化”，因为部分芯片内部依然带有寄存器、数字滤波、ADC 和可配置逻辑，只是不依赖用户持续运行的固件闭环控制。NXP 明确指出，在电池包内部不需要 MCU 及其相关供电 BOM，但也允许外部 MCU 作为可选项。这样不仅大大降低电池包内部 BMS 的成本，每套成本约下降约 8.5%，而且简化了电池包内软件调试烧录的繁琐流程。

与传统 BMS 的差异

传统 BMS，尤其在 EV/ESS 领域，通常不仅监测电压、电流、温度，还执行 SOC、SOH、SOP、SOL 等估算、均衡策略优化、热管理协同、故障分级、日志记录、网络通信、诊断服务、OTA 和功能安全诊断。NXP 将完整 BMS 典型结构定义为 BMU(MCU+SBC) + BJB + CMU(AFE). 并配套软件驱动与安全资料。而无软件电池包 BMS 与之相对最高的不同在于，在保持传统 BMS 完整功能的基础上，将 MCU 及软件部分上移，在电池包内部没有运算单元，仅保留执行及采样部分。

无软件电池包 BMS 的产业价值

NXP 将 Software Free BMS 的价值概括为成本下降、复杂度下降、可靠性提升、软件维护减负。这说明其目标不是“功能阉割”，而是“功能重定位”。贴近整车/整机集中式计算架构，由域控制器承担更多电池管理决策。

价值一：降低开发复杂度和缩短量产周期

在不需要复杂算法和车载网络的场景中，无软件架构可显著减少 MCU 固件开发、Bootloader、通信协议栈、软件测试和软件功能安全流程的工作量。将保护阈值、延时和恢复机制保存

在 EEPROM 中，并通过内部状态机自动执行基础包控；也支持自主均衡和保护动作，从而能以更少的软件介入实现量产。器件数量减少，MCU 和 SBC 被缩减；包内软件版本管理负担降低；制造流程更适配自动化产线，减少烧录、版本防呆和人工干预。

价值二：待机功耗低、结构简单、BOM 更可控

无软件方案通常不需要持续运行 MCU 和外部高频外围，待机功耗可很低。通常无软件电池包 BMS 给出的睡眠/巡检模式电流可低至 60 μ A；NXP 拥有多种低功耗模式，Deep Sleep 模式典型电流低于 5 μ A。这类特性对电压电池包应用，如 12 V, 24 V, 48 V 汽车电池包以及小型 ESS 等场景极具吸引力。

价值三：硬件保护路径更直接

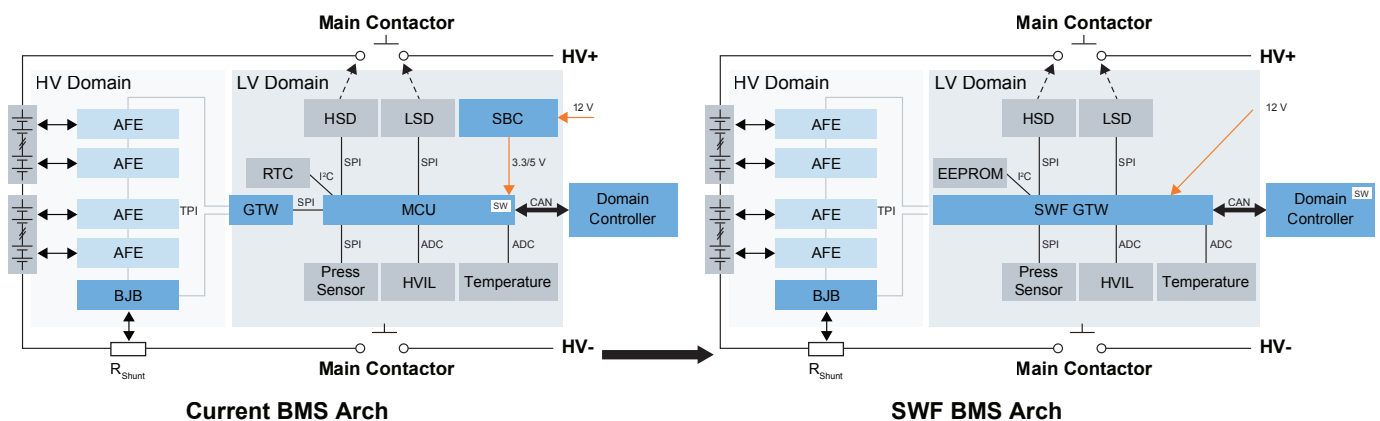
NXP 指出，将故障控制执行更多放在 AFE 侧而不是 MCU 侧，可以缩短反应路径并减少 MCU 资源占用；先进 AFE 会直接用 ADC 读数和配置值检测故障，随后通过硬件方式执行保护，如过流去关断 MOSFET，HSD&LSD 的控制，绝缘检测，高压互锁检测等。

无软件 BMS 的技术能力边界

能做什么

无软件电池包 BMS 通常可以稳定完成以下任务：

- 单体电压、总压、电流、温度采集与阈值比较保护，以及单体均衡。
- 过充、过放、过流、短路、过温、欠温、开线等异常检测与硬件关断。
- 绝缘检测，高压互锁检测，压力，碰撞信号，冷却水温等传感器采集。
- 高边或低边 MOSFET 控制，EEPROM 数据存储。
- 化学熔断器/二次保护链驱动、故障自恢复、低功耗休眠。
- 快慢充电控制以及电池加热控制。



传统 BMS 与无软件电池包 BMS 的架构对比

不能替代什么

无软件 BMS 的短板主要体现在高阶状态估算和系统协同上：

- 精确 SOC/SOH/SOP 估算通常需要电芯模型、同步电压电流采样、温度补偿、SOC 库仑计量、OCV/模型/滤波算法等。SOC/SOH 的高精度实现依赖 MCU / 算法配合，而不是单纯阈值保护。
- 复杂通信（UDS、远程升级、日志追溯、云平台数据）通常不属于无软件电池包 BMS 的强项。NXP 的高压方案都把这些系统级能力视为无软件电池包 BMS 上层控制器的标准配置。

目标应用场景

高适配场景

以下场景通常建议无软件电池包 BMS 的应用：

- 高压动力电池包（400V/800V EV），兼容 BMU/CMU/BJB 分层、ASIL 架构、软件驱动与系统级通信。SOC/SOH 估算模型与算法上移
- 储能系统（ESS），兼容复杂的热管理、并机协调、绝缘监测、告警分级、站级 EMS 通信和运维数据闭环。
- 商用车的分布式 BMS：即使整个电池系统最终有主控，也可先在从板用硬件自治监控，去除从板的 MC，把基础软件，算法前移。NXP 支持这种“自治监控 + 总控监督”的分层实现。

其他适配场景

无软件电池包 BMS 也适合如下场景：

- 电动工具、园林工具、吸尘器、可穿戴/便携设备：串数中低、成本敏感、强保护需求高于复杂算法需求。
- 轻型电动车（E-bike/E-scooter/LEV）：需要电压/电流/温度保护、基础均衡和低功耗待机，但未必需要动力电池级复杂状态估算。
- 备电、UPS、医疗便携设备、小型储能模块：强调可靠保护与超低功耗静态策略。

典型技术架构

对于已经规划集中式计算平台、希望减少包内软件版本、并且愿意让域控制器承担更多 BMS 决策职责的客户，NXP 无软件电池包 BMS 方案尤其具有吸引力。

从客户场景适配角度，建议优先评估以下项目：第一，高压动力电池包中需要简化 BMU 的软件与硬件复杂度的项目；第二，低压或辅助电池管理中希望以更低 BOM 实现基础 BMS 功能的项目；第三，自动化制造程度较高、希望减少产线软件烧录和版本管理成本的项目。

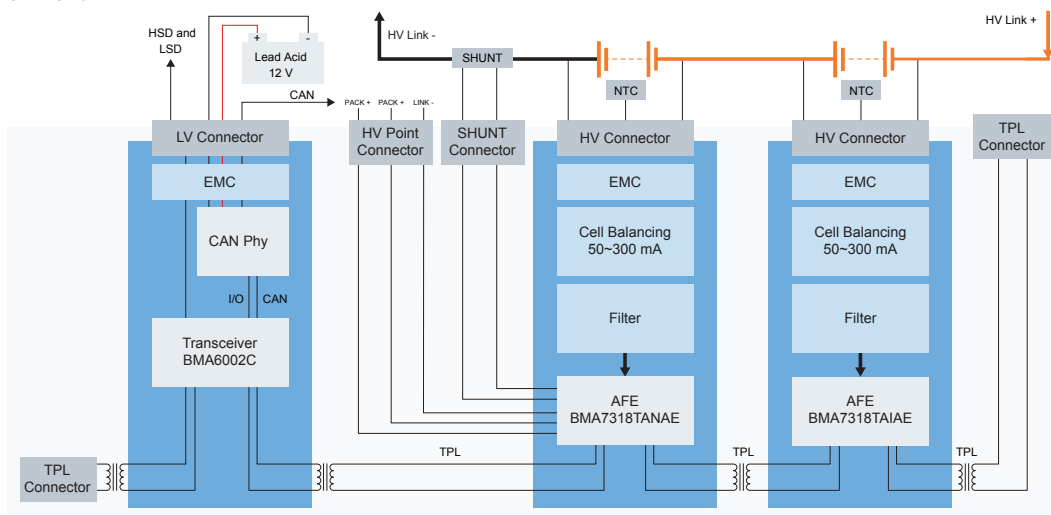
根据系统功能安全要求、通信失效风险评估以及接触器是否需要 MCU 强闭环控制等具体需求细节，选择合适的 BMS 系统架构或者无软件电池包 BMS 架构。

简化型 Software Free 方案

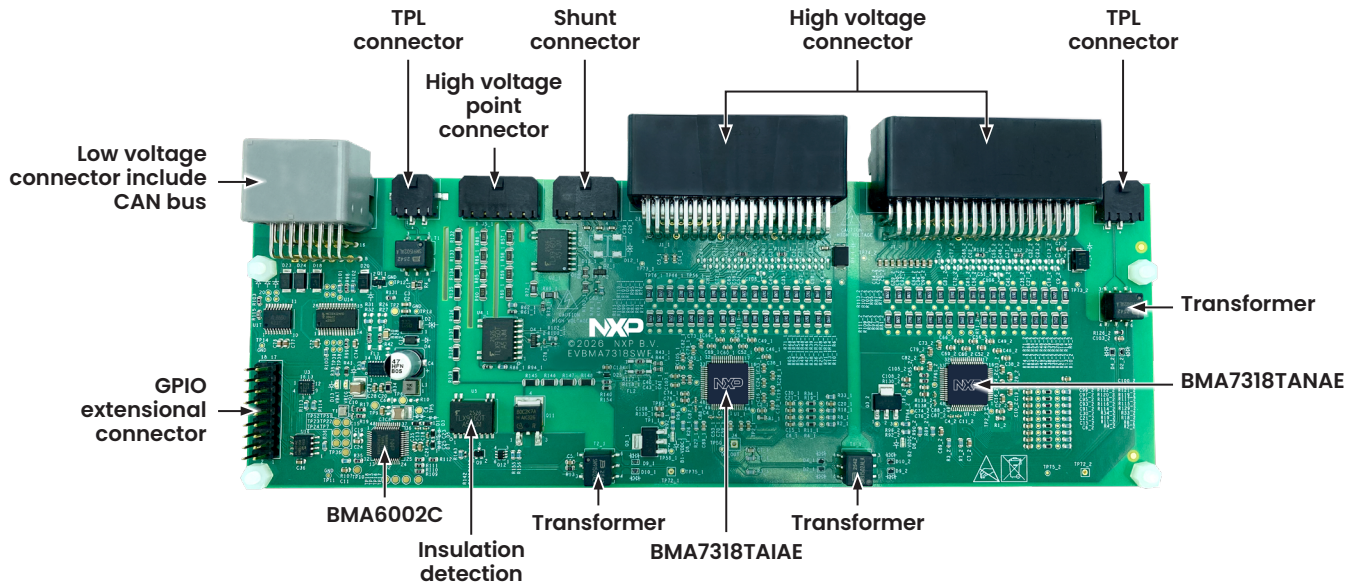
第一类是“简化型 Software Free 方案”，其目标是极致降本：由第一颗 AFE 兼顾部分 BJB 功能，尽量去掉隔离电源，并利用 EEPROM 或 Secure IC 存储分流器校准数据、制造信息、工厂安全密钥、电池状态数据和事件日志。

如下图是一个典型的简化型 Software Free BMS 方案，基于 NXP BMS 套件，BMA6002C, BMA7318TAIAE, BMA7318TANAE。

- EEPROM/安全芯片用于存储：分流电阻（SHUNT）校准数据、制造信息、工厂安全密钥、电池状态数据、事件日志
- 绝缘检测：使用 6002 的 I/O 控制 optMOS，AFE 的模拟（AIN）用于测量
- 执行 BJB 功能，第一个 AFE 功耗略高，可获得更好的电压和电流同步性能
- 6002 的供电可由外部 KL30 提供，支持 KL15 唤醒
- 通过 IO 扩展器处理内部信号或其他 LSD&HSD 外设
- 整个系统无 MCU，由 BMA6002C 的 CAN 进行对外通讯



简化型 Software Free BMS 系统框图



简化型 Software Free BMS 实物 PCB

全功能 Software Free 方案

第二类是“全功能 Software Free 方案”，其目标是保留更多高压电池包级BMS能力，如 Pyro Fuse 支持、绝缘检测、压力传感器接口、Secure IC、更多 ADC/GPIO 资源，甚至可扩展到带EIS或不带EIS的不同组合。

如果选择 Software free +EIS 的方案，建议采用 NXP 套件，BMA602C, BMA8420, BMA7418, MC33776的组合；如果不需要EIS,可以采用套件 BMA6002C, MC33777, BMA7118, MC33776 的套件。

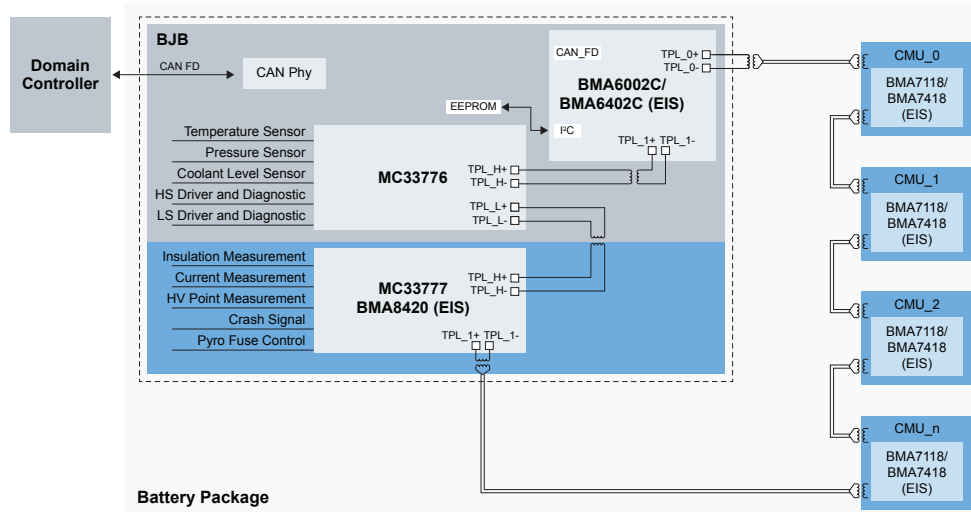
优势

- 支持 Pyro Fuse 驱动
- 功能安全目标为 ASIL-D，网关支持 E2E (QM)；MC33776 支持 E2E 校验，ASIL-D
- 支持 EIS (与非 EIS 芯片 pin2pin兼容)
- 支持碰撞触发 Pyrofuse

- 支持绝缘检测
- 支持压力传感器 (SPI 接口)
- 通过安全芯片 (SPI 接口) 支持数据安全
- BJB 具备 16 路 ADC/GPIO 引脚 + 5 个额外 GPIO 资源

限制

- 尚不支持PWM信号采集 (HVIL、传感器)
- 网关仅有一个 SPI Master 端口，连接设备存在共因失效风险 (common cause failure)
- 任然依赖智能 HSD/LSD 实现接触器控制与维持
- IO 资源有限，需额外 MC33776 进行 IO 扩展
- 隔离 DCDC 输出需要控制在 21-25 V 范围内
- SPI 主机支持奇偶校验，但在功能安全 (FuSa) 方面能力有限
- CAN BUS 开路会导致电池包失去控制



全功能 Software Free BMS 系统框图

关键硬件设计要点

接触器控制链路必须优先定义

Software Free BMS 架构最关键的不是采样精度，而是“失联时谁来做最后决策”。

包内存储职责需要明确

即便本地软件大幅减少，数据完整性、可追溯性和安全存储要求仍然存在。

通信设计要按功能安全思维处理

按功能安全思维处理，不能只看带宽。冗余 CAN FD、E2E 校验、奇偶校验、故障中断输入和特殊复位命令等都应尽早纳入系统设计。

I/O 与外设资源要从系统级评估

由于无软件电池包 BMS 是新的架构，同时需要兼顾传统 BMS 架构中 BMU 的几乎所有功能，所以对于 I/O 等外设资源需要重新规划。Software free BMS 方案极易触及 GPIO、SPI master、PWM 和传感接口上限，因此在项目早期必须把温度、HVIL、压力、绝缘、接触器、预充、故障输入等全部列入资源清单。

把“安全动作”留在 pack 硬件侧

过充、过放、短路、过流、过温、开线、FET 失效保护等应尽量由 BMS 监控芯片驱动硬件执行，不要把最关键安全动作依赖到外部控制器的轮询和通信上。

把“智能与数据”留给上层域控

如果系统需要真实可用的 SOC/SOH、日志、联网或客户可视化，不要勉强在无软件电池包内实现，而应交给上层主机或系统控制器。这样能够获得更好的可维护性与算法升级空间。高阶功能普遍由上层处理器承担。

器件参数选择合理

电压采样精度，电流采样精度，温度采样精度，器件功能安全等级等基础 BMS 的功能参数需要根据系统要求合理选择。另外，

均衡电流、均衡电阻、测量时序和同时均衡节数会影响器件温升和测量准确度，所以均衡设计必须同时考虑热、精度和时间。

产线配置与防误配置要制度化

无软件电池包 BMS 方案高度依赖本地 OTP/EEPROM/寄存器配置，产线烧录、版本管理、阈值表单、抽测验证和失配防呆。需要以制度化的流程来保障。

功能安全与法规合规

功能安全的设计

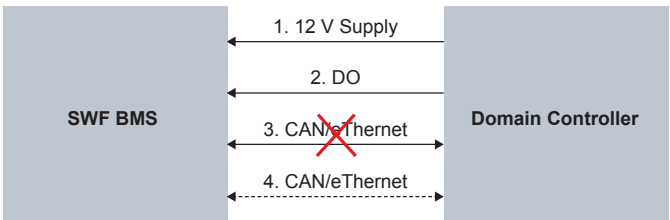
IEC /ISO 对功能安全的定义是：通过电子与相关软件中的安全机制，把风险降低到可容忍水平；IEC 61508/ISO26262 针对 E/E/PE 系统提供全生命周期框架，并定义 SIL 1~4/ASIL A~D。这说明只要系统承担安全功能，就应从危害分析、风险评估、系统分解、诊断覆盖、验证确认等维度进行设计，而不是只看“有没有 MCU”。

无软件电池包 BMS 功能安全的设计重点是如何保证通讯的可靠和接触器控制的功能安全，其他部分如电压，电流，温度采样等的功能安全保证可以依赖 AFE/BJB 等芯片本身的功能安全机制。

在无 MCU 在本地的条件下，对 HSD&LSD 的功能安全保证，主要依赖于以下措施：1-对于 SPI 通讯的 HSD，主要采用 SPI 的奇偶校验，确保下发指令的可靠正确；2-对 I/O 控制的 LSD，主要采用上级控制器，回读配置结果，二次校验的方法。

对于电池包内部的菊花链通讯（TPL）以及出电池包的 CAN 通讯，均采用 E2E（end to end）的校验方式，可达到 ISO26262 ASIL-D 的等级。

但是在电池包内无 MCU 的条件下，一旦电池包与外部通讯的 CAN 或 Ethernet 信息丢失，与上一级的域控或者控制器失联，电池包内部的功能安全将受到影响。



针对以上问题，NXP 提出如下解决方案

安全目标	安全状态	安全等级	应对措施 (Workaround)
避免因过充导致热失控	断开接触器	ASIL C	在 CAN/ 以太网通信中断，但系统仍需要断开接触器时： 1. ② DO 直接驱动 HSD 断开接触器 2. 关闭① 12 V 电源 3. 采用冗余 CAN/ 以太网保持通信
避免因过放导致热失控	断开接触器	ASIL C	
避免因过温导致热失控	断开接触器	ASIL C	
避免因过流导致热失控	断开接触器	ASIL C	
避免接触器误断开	接触器保持（保持闭合）	ASIL A	在通信丢失但系统需要保持接触器闭合时： 1. ② DO 直接驱动 HSD 控制接触器状态 2. 设置10秒内，BMS 芯片状态保持不变 3. 采用冗余 CAN/ 以太网保持通信

车用法规约束

联合国法规 UN R100 对车辆电驱系统和 REESS 安全提出明确要求，附件涵盖振动、热冲击与循环、机械冲击、机械完整性、火烧、外部短路、过充、过放、过温、过流等测试项目，并定义了 REESS、SOC、thermal runaway、thermal propagation 等关键术语。

采用无软件电池包BMS的架构，电池包仍必须从电安全、热安全、机械安全和异常测试层面满足法规要求；无软件并不意味着测试要求降低。相反，如果没有软件，硬件设计与故障树闭环必须更扎实。

器件推荐

Software free GTW

MC33665

- MCU 侧，支持 CAN/CAN-FD (5Mbps max), SPI (10Mbps max), UART(6Mbps max)
- TPL 接口，4 个
- 数字 I/O, 8个，兼容 I²C 主机接口
- 内置 FIFO
- 兼容 ASIL-D 系统设计

BMA6002C/6402C

- MCU 侧，支持 CAN/CAN-FD(5Mbps max)
- TPL 接口，2个
- 数字 I/O, 8个，可复用为 I²C 主机接口, SPI 主机接口
- 内置 FIFO
- 兼容 ASIL-D 系统设计
- 6402C 为兼容 EIS 测试的版本

AFE

BMx7318

- 4~18 通道；
- 10/12 GPIO,可复用为 I²C 主机，OC 保护通路；
- 电芯电压，电流高精度采样、被动均衡兼容外置均衡；
- TPL 通讯，2Mbps; 兼容 SPI 通讯
- 功能安全等级 ASIL-C

BMA7118/7418

- 8~18 通道；
- 9 GPIO,可复用为 I²C 主机接口，SPI 主机接口；
- 电芯电压高精度采样、被动均衡兼容外置均衡；

- TPL 通讯，2Mbps; 兼容 SPI 通讯
- 功能安全等级 ASIL-D
- BMA7418 为兼容 EIS 测试的版本

BJB

MC33777/33776

- 16 GPIO, 可复用为 I²C 主机，SPI 主机接口；
- 4 电流采样通道；
- TPL 通讯，2Mbps; 兼容 SPI 通讯
- 功能安全等级 ASIL-D
- MC33777 具有 Pyrofuse driver，MC33776 无

BMA8420

- 16 GPIO, 可复用为 I²C 主机，SPI 主机接口；
- 4 电流采样通道；
- TPL 通讯，2Mbps; 兼容 SPI 通讯
- 功能安全等级 ASIL-D
- 具有 Pyrofuse driver
- BMA8420 为兼容 EIS 测试的版本

专属 Software free GTW 的概念

在无软件电池包BMS的应用中，software free gateway 对于系统架构起到了至关重要的作用。在无 MCU 的情况下，不仅需要几乎承接 MCU 除了运算以外的所有功能，还需要支持向外部的数据路由，需要支持直接输出 CAN 或 Ethernet。一般通讯的数据量较大，在保证足够实时性的前提下，还需要足够的通讯带宽。

为满足下一代电池管理系统（BMS）向集中式电子电气架（E/E Architecture）演进的需求，NXP 提出全新的 SWF Gateway 概念，通过引入专用功能模块，实现系统集成度与可靠性的全面提升：

- **集成专用 BMS 处理核心**
在域控制器内部提供独立运行的 BMS 功能单元，支持关键测量与控制任务，降低对整车中央计算资源的依赖。
- **冗余 CAN FD 通信架构**
支持双路 CAN FD 设计，实现：
 - 开路检测（Open Load Detection）
 - 通信冗余
 - 高带宽数据传输能力，提升系统功能安全等级与通信可靠性（支持 ISO 26262 架构设计）。

- **多通道高精度数据采集 (ADC)**
集成 ADC 模块, 支持以下信号的统一采集, 提高测量一致性与系统集成度:
 - 电池总压
 - 温度测量
 - 高压互锁 (HVIL)
 - 各类模拟传感器信号
- **外设接口与执行能力**
SWF Gateway 提供丰富的标准接口, 实现对电池包关键执行部件与外围器件的直接控制:
 - SPI 主机接口, 用于连接: 高侧驱动 (HSD), 低侧驱动 (LSD), 压力传感器等外设
 - I²C 主机接口, 支持连接: EEPROM (参数存储), 安全芯片 (Secure IC / HSM 扩展)
 - PWM 控制模块, 支持: HVIL 信号完整性监控, 模拟/数字传感器驱动, 提供灵活的调制能力。
- **通用 IO & 唤醒管理机制**
 - 支持多源唤醒识别 (Wake-up source detection)
 - IO 电平可配置, 并可在复位期间处于保持状态 (IO Retention), 有效支持低功耗场景与系统状态管理。
- **功能安全与诊断能力**
针对车规系统设计, SWF Gateway 需提供多层级安全与诊断机制:
 - 故障中断输入与快速响应机制
支持外部 failure interrupt 输入, 并通过硬件路径实现向域控制器的快速直通响应 (Direct Connection), 减少延迟。
 - 基于 CAN 的远程诊断与控制
支持通过专用 CAN 指令实现, 设备复位与状态控制, 提高系统可维护性与远程诊断能力。
- **支持 TPL 通信**
用于: AFE 回环 (Loopback) 通讯与 BJB 的通讯

系统参考验证

电气验证

- 电池单体 OV/UV 门限、公差、迟滞、去抖时间。
- OCP/SCD 动作阈值与不同温度下重复性。
- FET 导通/关断、预充与异常恢复行为。
- 均衡电流、均衡热、均衡时测量偏差。

环境与滥用验证

- 热冲击、振动、机械冲击、外部短路、过充、过放、过温、火烧等, 建议按目标市场对应标准执行。UN R100 附件已明确给出 REESS 安全试验框架。

功能安全与失效分析

- 失效模式与影响分析 (FMEA/FMEDA);
- 数据通讯的实时性与可靠性;
- 开线、采样漂移、FET 黏连、温度探头失效、参考源异常、供电掉电的诊断策略;
- 关键保护链冗余与故障注入测试。IEC 功能安全框架强调全生命周期风险分析与验证确认。

参考文献

1. NXP, BMx7318—Standalone 4 to 8 Cell Li-Ion Battery Pack Monitor
2. NXP, BMA6002C Datasheet
3. NXP, Cell Balancing With BMx7318 Battery Monitors
4. Monolithic Power Systems, How to Design a Battery Management System (BMS)
5. NXP, MC33777 Product Information
6. NXP, BMA8420 Product Information
7. NXP, High Voltage Battery Management System (HVBMS)
8. Analog Devices, Automotive Battery Management Systems
9. IEC, Safety and functional safety/IEC 61508 overview
10. UN/ECE, UN Regulation No. 100.
11. Analog Devices, A Closer Look at SOC and SOH Estimation Techniques for Batteries
12. MDPI Batteries, State of Charge and State of Health Estimation in Electric Vehicles
13. NXP Semiconductors, EIS HVBMS reference design