

Application Note

汽车车门碰撞电源模块 CPM 设计指南



王丙洋 Daniel Wang

FAE Auto Tier1

摘要

汽车碰撞电源模块 CPM (Crash Power Module) 是车辆在碰撞瞬间提供紧急电源、信号和控制的安全子系统。它通过双电源冗余实现毫秒级响应和故障切换，确保车门解锁等关键功能在极端冲击下可靠工作，方便车内乘员快速逃生。伴随着新能源汽车的电动门和隐藏/半隐藏式门把手的广泛运用，CPM 有着越发重要的现实意义。本文将结合 CPM 模块中超级电容和解锁电机的特性，介绍基本架构和系统方案，并基于 3 节和 5 节超级电容串联 (3s 和 5s) 的电气特性，分别给出方案设计和实验验证。

内容

1 引言	2
1.1 功能与意义	2
1.2 法规要求	2
2 系统架构	3
2.1 CPM 结构和应用挑战	3
2.2 主要功能单元	3
3 CPM 关键参数	4
3.1 3s 与 5s 超级电容基本参数	4
3.2 车门解锁电机参数与功耗计算	4
3.3 充电时间要求	5
4 5s 系统方案	6
5 3s 系统方案	8
6 小结	9
7 参考文献	9

插图清单

图 2-1. H 桥驱动 DRV8244-Q1 方案	3
图 2-2. 高边开关 TPS2HC16-Q1 方案	3
图 3-1. 解锁电机电流随时间变化示意图	4
图 3-2. 超级电容充电过程示意图	5
图 4-1. 5s 超级电容系统框图	6
图 4-2. VIN=12V 时充电过程	7
图 4-3. VIN=16V 时充电过程	7
图 4-4. VIN=9V 时充电过程	7
图 5-1. 3s 超级电容系统框图	8
图 5-2. VIN=12V 时充电过程	8
图 5-3. VIN=16V 时充电过程	8
图 5-4. VIN=9V 时充电过程	9

1 引言

1.1 功能与意义

CPM 是碰撞保护模块，主要用于保障车辆碰撞后低压电池断电情况下车门的冗余解锁，通过与传感器、控制模块和执行机构的协同工作实现，是汽车安全系统的一部分。

- 保障乘客安全：碰撞后车门可解锁，便于乘客迅速撤离，提高逃生成功率。
- 提升救援效率：车门解锁后，救援人员可快速进入车内，减少伤亡风险。

1.2 法规要求

GB 20072-2024 (乘用车后碰撞安全要求) 明确要求自动激活式车门锁止系统在碰撞试验中需满足特定条件，如碰撞后车门应处于解锁状态，且在碰撞前自动锁止。

GB 20071-2025 (汽车侧面碰撞乘员保护) 新增了自动激活式车门锁止系统的要求，碰撞后需确保车门可解锁以方便救援，2026 年 7 月 1 日施行。

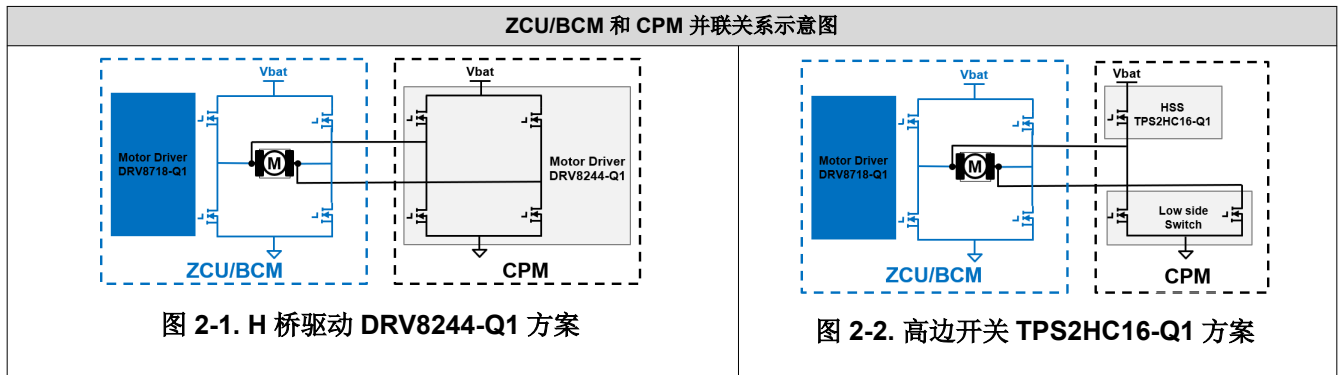
2 系统架构

2.1 CPM 结构和应用挑战

CPM 模块可以按照在车身的位置划分为中央式和分布式，如果在汽车的中心位置，用一个模块连接四个门的锁止机构，即为中央式架构。如果有两个 ECU 单元分别对左右侧门控制，或者四个单元与四个门一一对应，则属于分布式布局。

	中央式	分布式
优点	单个 ECU，5s/3s 电容，经济性更好 位置灵活，模块碰撞损坏概率低	可与 ZCU 左右域融合，集成度更高，响应速度更快 线缆更少，电气风险更低，可靠性高
缺点	离车门更远，响应速度慢 线缆长易磨损，开路/短路风险更大	多个 ECU 单元，成本增加 各控制单元的之间协调控制难度高

中央式 CPM 是独立的 ECU 单元，需要通过 CAN 总线与 ZCU 通讯并确认其功能状态，由于控制对象是同一个车门解锁电机，CPM 与 ZCU 在控制电路上是并联关系，下图为分别用 H 桥驱动芯片和高边开关芯片驱动电机的结构示意图。



并联拓扑下的冗余控制会带来电气耦合问题，潜在风险包括以下几点，需要设计相应的规避措施。

1. 当 CPM 尝试解锁电机，若此时 ZCU 中的 H 桥为锁死电机而处于下管导通状态，可能造成超级电容输出直通到地。
2. CPM 在驱动电机时，反向电动势会通过 ZCU 的 H 桥体二极管向低压电池反向充电。ZCU 到 CPM 的方向亦然。
3. 车门解锁电机一般需要进行周期性离线诊断，以确认电机和线缆的健康状态，离线诊断的原理是驱动芯片通过内部电流源给出激励信号，检测各个 MOS 的电压状态。如果 ZCU 和 CPM 同时做离线诊断，可能会出现错误的诊断结果，或直接损坏驱动芯片。
4. ZCU 控制电机通断过程中，可能会在开关节点产生电压尖峰或脉冲，存在冲击损坏 CPM 单元中控制芯片的风险，需要 CPM 驱动芯片具备足够的耐压，或者设计者额外增加 TVS 瞬态抑制二极管吸收能量。

2.2 主要功能单元

1. 碰撞检测与触发单元：通过碰撞传感器如加速度计、惯性测量单元检测碰撞事件，产生触发信号并传输至 ZCU 和 CPM。
2. 冗余供电及其监测单元：由超级电容、充放电拓扑和电量监测模块构成，作为车载低压电池的备份供电系统，确保电机能够在碰撞事故发生后有足够能量完成解锁。
3. 解锁执行单元：包括电磁锁、电机驱动或机械式解锁机构，需满足快速响应（<1 秒）和高可靠性的要求。
4. 控制与通讯单元：MCU 监听碰撞触发信号，并负责电机驱动的控制和诊断。同时要通过 CAN 总线向 ZCU 汇报功能状态。

3 CPM 关键参数

3.1 3s 与 5s 超级电容基本参数

超级电容是一种介于传统电容器与电池之间的储能元件，主要通过双电层和氧化还原反应储存电能，具有功率密度高、循环寿命长、温度范围宽，且充放电快速的优点。常用于 CPM 的超级电容有 25F 或 30F 容量，额定电压 2.7V 或 3V，超级电容之间为串联关系，节数递增，电压递增、容量递减，以额定电压 2.7V，容量 25F 为例：

	3s	5s
电容值	8.33F	5F
额定电压	8.1V	13.5V
工作电压范围	3V -7.5V	9V-12.5V
存储能量	196.79J	188.12J

结合公式 $W = 1/2 CU^2$ 可以计算出 3s 和 5s 能存储的能量，分别为 196.79J 和 188.12J，整体上 3s 比 5s 的储能略高。在工作电压范围上，5s 超级电容电压可充至 12.5V，与电机负载工作电压相近，通常为 9-16V，所以 5s 电容可以直接给电机供电，如果要放电低于 9V 以获取更多的能量输出，则需要在超级电容到电机负载之间添加升压电路；3s 超级电容最高只能充至 7.5V，因此需要 boost 升压电路以满足电机工作电压要求，所以 3s 方案可以支持到更低的电容放电电压，但是 boost 输入电压越低，输入电流就越高，受 boost 输入端电流和超级电容最大放电电流的限制，设定最低放电电压为 3V。

3.2 车门解锁电机参数与功耗计算

车门锁系统中常见至少有四把门锁，根据汽车类型也可能会有四个门把手锁和两个安全锁。电机类型为有刷解锁电机，单方向工作，电机驱动可以使用半桥拓扑。

门锁电机最大电流从 7A 到 20A 不等，下图为典型的车门解锁电机工作过程电流随时间变化示意图，从启动到停止分为四个阶段：上电过冲电流 7A，持续约 3ms；电机正常工作 5A，持续 60ms；重载电流 7.5A，持续 40ms；堵转电流 8A，持续 150ms。

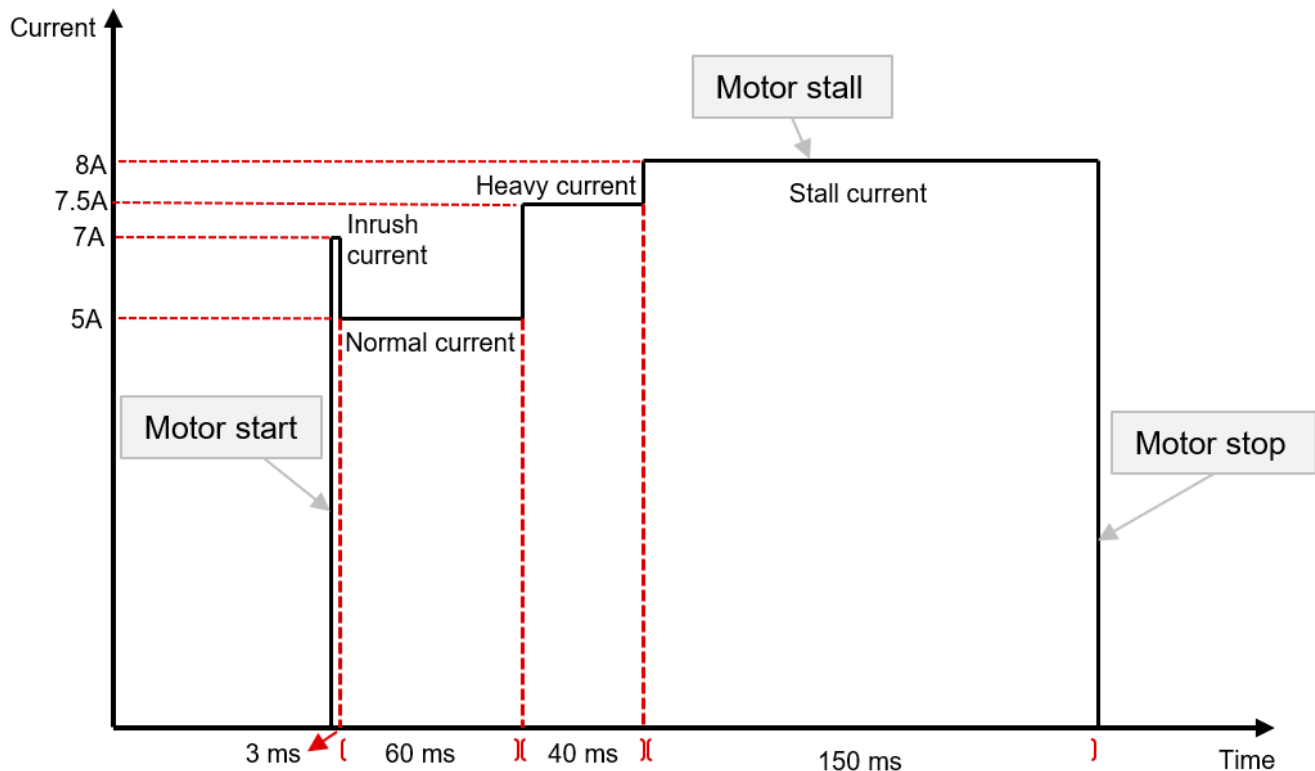


图 3-1. 解锁电机电流随时间变化示意图

下面以 5s 超级电容为例，计算电机工作过程中的能量消耗和电压变化情况，包括四个门锁和两个安全锁，初始电容值 5F，电压值 12.5V。由于电机分时启动，且每个电机解锁过程中的电压都是在持续降低的，为了计算方便，近似处理单个电机解锁过程中电压保持不变，即不随着启动、转动、堵转等动作而变化，另外电机 PWM 控制的占空比近似以 50% 做计算，可以得到一轮放电的计算过程如下：

$\Delta W = UI \times t$	W	$U = \sqrt{2W/C}$
	390.63J	12.50V
$12.50V \times 50\% \times (7A \times 3ms + 5A \times 60ms + 7.5A \times 40ms + 8A \times 150ms) = 11.38$	379.25J	12.32V
$12.32V \times 50\% \times (7A \times 3ms + 5A \times 60ms + 7.5A \times 40ms + 8A \times 150ms) = 11.21J$	368.04J	12.13V
$12.13V \times 50\% \times (7A \times 3ms + 5A \times 60ms + 7.5A \times 40ms + 8A \times 150ms) = 11.05J$	356.99J	11.95V
$11.95V \times 50\% \times (7A \times 3ms + 5A \times 60ms + 7.5A \times 40ms + 8A \times 150ms) = 10.88J$	346.11J	11.77V
$11.95V \times 50\% \times (7A \times 3ms + 5A \times 60ms + 7.5A \times 40ms + 8A \times 150ms) = 10.71J$	335.40J	11.58V
$11.58V \times 50\% \times (7A \times 3ms + 5A \times 60ms + 7.5A \times 40ms + 8A \times 150ms) = 10.54J$	324.85J	11.40V

六把锁一轮放电总共消耗 65.78J，放电完成后的剩余电压为 11.40V，为达到冗余安全的需求，一般要求支持至少两轮放电的能力，3s 和 5s 的储能分别为 196.79J 和 188.12J，都可以支持至少两轮放电。

3.3 充电时间要求

超级电容和电池的充电曲线存在差异，主要体现在初始充电环节，电池要先经过涓流充电和预充再进入恒流充电，而超级电容直接进入恒流充电。超级电容充电过程如下图：

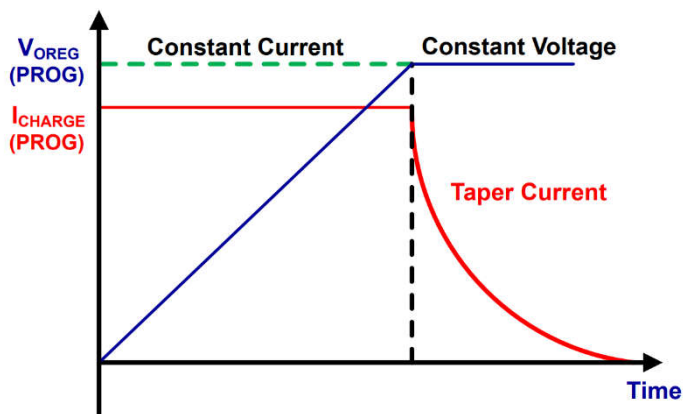


图 3-2. 超级电容充电过程示意图

不同主机厂对于场景设定和充电时间要求不同，常见充电时间从十几秒到数分钟不等，充电时间越短，意味着充电电流越大，会影响到充电拓扑的选择，对于几百毫安的充电电流，可以选择线性充电拓扑，1A 及以上选择开关电源类充电拓扑。

4 5s 系统方案

下表为 5s 超级电容 CPM 系统需求示例，超级电容工作电压变化范围满足电机电压需求，可以直接连接到电机的供电端。CPM 模块包括 charger，AFE，Motor driver, MCU 和 SBC 等芯片，推荐系统框图如图 4-1 所示。

充电时间	120s
超级电容总容量	5F
超级电容工作电压范围	9~12.5V
系统输入电压范围	9~16V
电机工作电压范围	9~16V

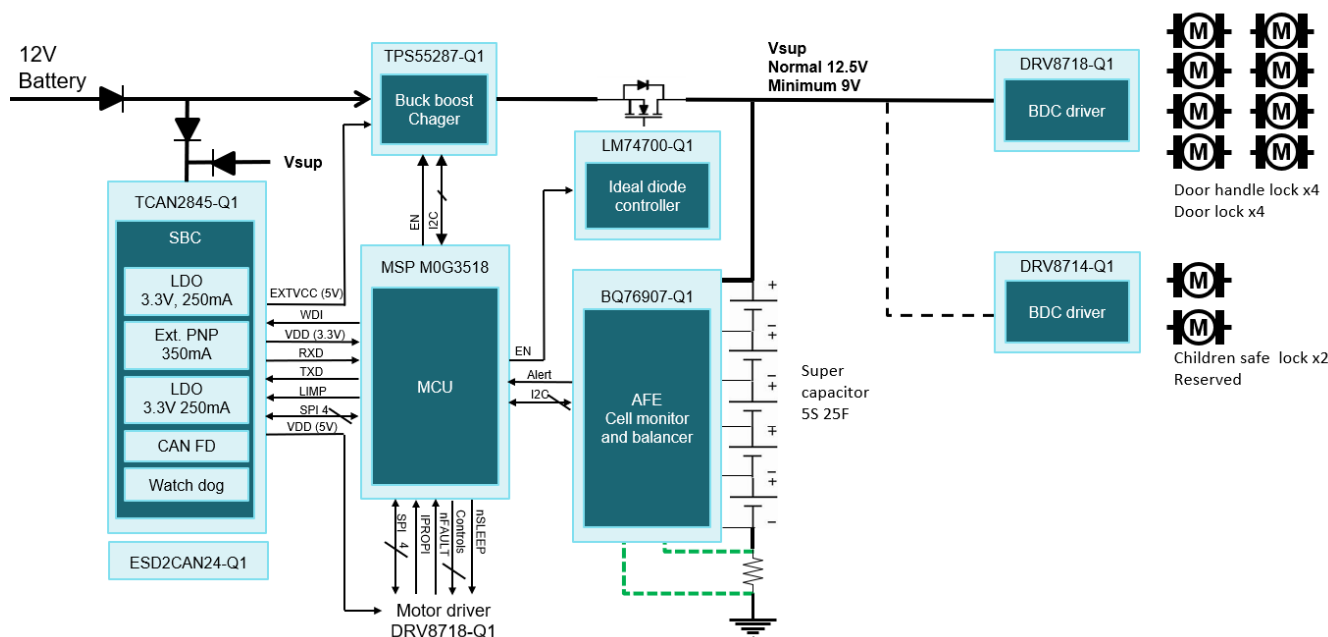


图 4-1.5s 超级电容系统框图

BQ76907-Q1 作为 AFE 芯片，可以监测超级电容各节电压，通过 I2C 和 Alert 输出实时向 MCU 反应电容的状态。另外该芯片还支持 **cell balance** 功能，通过被动均衡的方式保证各节电容电压保持一致；集成的 **shunt** 输入可以用作充电电流监测和系统小电流唤醒。

建议在 charger 的输出侧设置二极管，LM74700-Q1 作为理想二极管控制器在此有以下作用：

1. 超级电容易过充电而超过 12V 电池的电压，LM74700-Q1 可以提供反极性保护和反电流保护。
2. Buck-boost charger 的输出侧有分压电阻电路，如果与超级电容直接相连，会有接近 100uA 的损耗电流，而拉低电容储能能力和整个系统的功耗。LM74700-Q1 可以阻断这个电流损耗路径。

首次充电考虑从 0V 充到 12.5V，在 120s 的充电时间要求下，需要的充电电流不低于 520.83mA。Charger 芯片选用 TPS55287-Q1，电感平均电流能力是 4A。通过 current sense resistor 设定恒流输出电流值，

$I_{OUT\_LIMIT} = \frac{V_{SNS}}{R_{SNS}}$ ， V_{SNS} 为 50mV，20mΩ 电阻对应于 2.5A 的充电电流；分压电阻串设定恒定输出电压值， $R_{top} = 95k\Omega$ ， $R_{bot} = 10k\Omega$ ，芯片上电并使能后，内部电流环开始工作，将输出钳位在设点电流值，并且输出电压从 0 开始线性增加，直至达到设定值，此时电流开始降低，直至衰减值接近 0。

DRV8718-Q1 为电机驱动芯片，集成 8 通道半桥驱动功能，可以同时控制 4 个 H 桥驱动 4 个解锁电机。用户可以根据解锁电机的工作电流选择不同的 MOSFET，以覆盖不同车型的需求。

MSPM0G3518-Q1 为 M0+核 MCU 芯片，主频为 80MHz，具有 128KB RAM 和 256KB Flash，集成 CAN-FD controller，负责控制 CPM 系统运行。

下表 4-1 为在不同输入电压下，输出电流、电压随时间变化的波形，上电后电流高于设定的输出限流值是因为触发限流有 128us 的 delay，电感电流 ripple 原因在于软起动期间工作 PFM 模式。

表 4-1. TPS55287-Q1 不同输入电压下充电过程电压电流波形

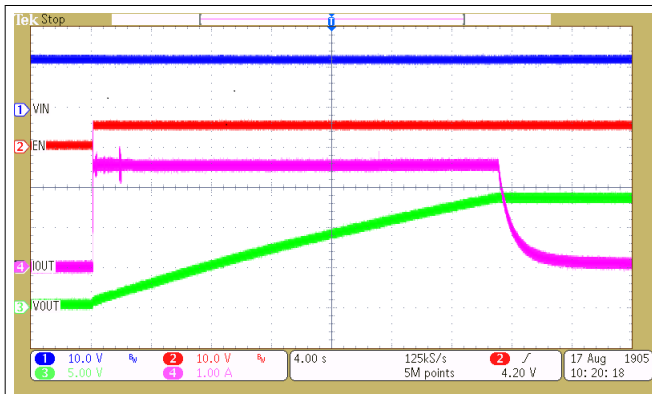


图 4-2. VIN=12V 时充电过程

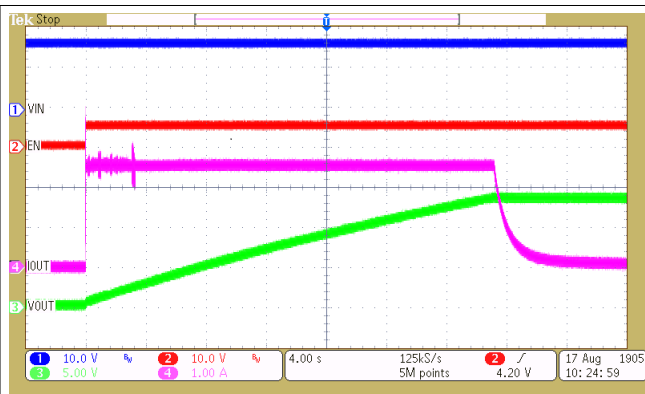


图 4-3. VIN=16V 时充电过程



图 4-4. VIN=9V 时充电过程

5 3s 系统方案

下表为 3s 超级电容 CPM 系统需求示例：

充电时间	60s
超级电容总容量	8.33F
超级电容工作电压范围	3~7.5V
系统输入电压范围	9~16V
电机工作电压范围	9~16V

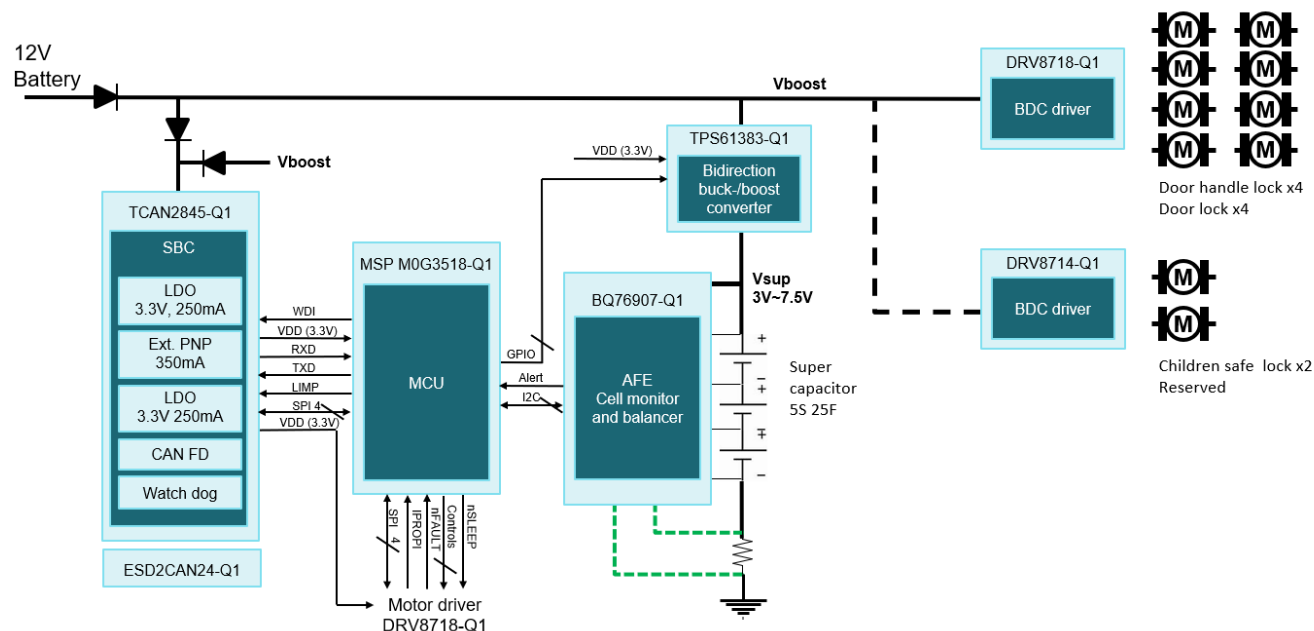


图 5-1. 3s 超级电容系统框图

TPS61383-Q1 是一颗双向升压/降压芯片，并且带有电池健康监测功能。备用电池侧可以支持到 12V 输入电压，最高支持 4 串超级电容。当 12V 主电池正常工作时，可以通过 TPS61383-Q1 的降压模式给超级电容进行充电，最大充电电流为 7A。当 12V 主电池发生故障后，TPS61383-Q1 通过检测主电池端电压的掉落自动切换至升压模式，将超级电容的电压提升到 12V 给电机进行供电，输入端最大电流为 30A。同时，TPS61383-Q1 还支持电池健康监测功能，可以检测超级电容的容量，从而判断超级电容的健康情况。与分立方案相比，TPS61383-Q1 集成度更高，解决方案面积更小，设计更加简单。

表 5-1. TPS61383-Q1 不同输入电压下充电过程电压电流波形

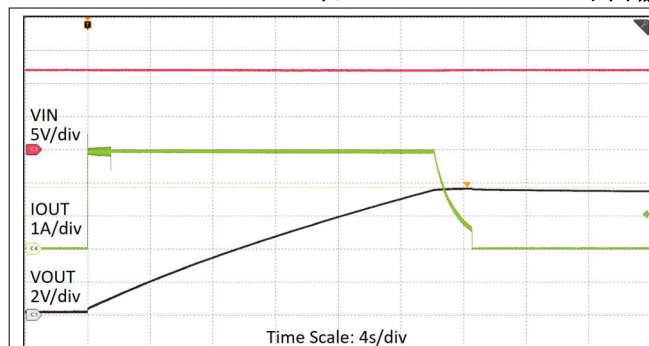


图 5-2. VIN=12V 时充电过程

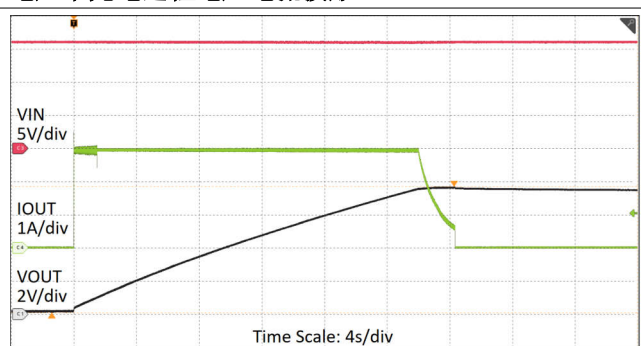


图 5-3. VIN=16V 时充电过程

表 5-1. TPS61383-Q1 不同输入电压下充电过程电压电流波形 (续)

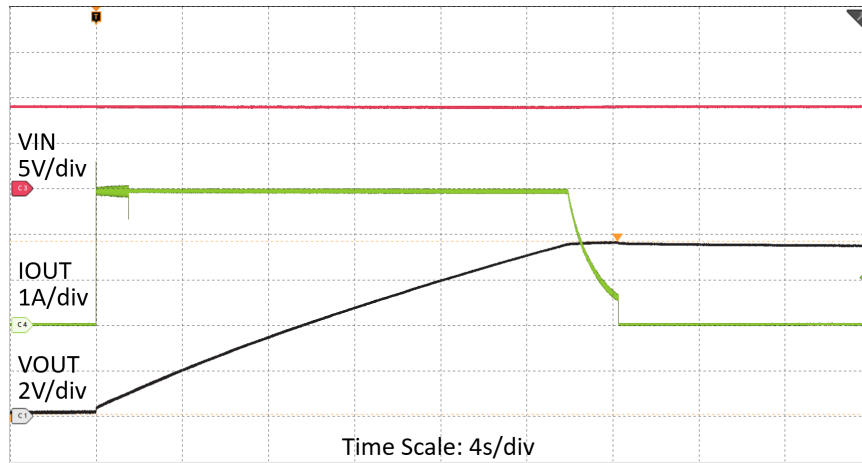


图 5-4. VIN=9V 时充电过程

表 5-1 为 12V 主电池电压分别在 12V, 16V, 9V 时 TPS61383-Q1 给超级电容充电的电流波形。可以看出 TPS61383-Q1 充电模式分为恒流充电和恒压充电两个阶段，在恒流模式下 TPS61383-Q1 以 3A 的恒定电流向超级电容充电，直至电压达到约 7.5V，随后芯片进入恒压模式，充电电流逐渐减小，整个充电过程持续约 25s，满足充电时间需求。

6 小结

CPM 是车身系统中新兴的应用需求，可以给车内乘员提供安全冗余保证。通过超级电容作为备份电源，在车载低压电池断电时启动工作，为车门解锁电机提供动力来源，保证车门能够迅速、有效地打开。本文首先阐述了 CPM 与域控制器 ZCU 的功能和位置关系，然后介绍了各个模块的功能；进一步分析了超级电容充电特性，结合常见的 3s 和 5s 两种超级电容，计算并实验验证了充放电过程和储能能力。根据需求提供了系统解决方案，包含 MCU、AFE、电源轨、通讯芯片、电机驱动芯片等，可以用于实际应用设计。

7 参考文献

1. Datasheet "TPS55287-Q1 36V, 4A Buck-Boost Converter with I2C Interface datasheet"
2. Datasheet "TPS55289-Q1 36V, 8A Buck-Boost Converter with I2C Interface datasheet"
3. Datasheet "BQ76907-Q1 2-Series to 7-Series High Accuracy Automotive Battery Monitor and Protector for Li-Ion, Li-Polymer, LiFePO4 (LFP), and LTO Battery Packs and Supercaps datasheet"
4. Datasheet "MSPM0Gx51x Mixed-Signal Microcontrollers With CAN-FD Interface datasheet (Rev. B)"
5. Application note "使用 BQ25756 对磷酸铁锂电池和超级电容器充电"

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