

Technical White Paper

碰撞电源模块电源管理设计分析



Miya Zhang, Travis Wang, Colin Chen, Mulin Yuan, Jing Ji

APP-SR-BCC

摘要

在新能源汽车时代，汽车碰撞后车门可能无法解锁，从而延误关键的救援时间。碰撞电源模块 (CPM) 是专为车辆设计的关键冗余系统，其核心功能是在发生碰撞或汽车主电池失效时作为应急电源装置，为车辆安全建立最后一道防线。

本文主要对 CPM 系统进行系统性研究，介绍 CPM 的主要功能，并针对不同架构提供电源管理解决方案，为客户在 CPM 工程开发和解决方案选型中提供参考。

内容

1 碰撞电源模块简介.....2

2 CPM 系统方框图 and 设计要求.....2

2.1 系统方框图.....2

2.2 设计要求.....4

2.3 系统架构.....5

3 超级电容器参数和门锁负载曲线.....6

3.1 超级电容器参数.....6

3.2 充电时间要求.....7

3.3 门锁负载曲线.....8

4 电源管理设计.....9

4.1 5s 超级电容器设计.....9

4.2 3s 超级电容器设计.....11

4.3 1s 超级电容器设计.....12

4.4 不同设计方案的比较与总结.....14

5 总结.....14

6 参考资料.....14

1 碰撞电源模块简介

碰撞电源模块 (CPM) 是车辆安全系统最重要的组成部分之一。CPM 在碰撞后快速打开车门，为救生救援打开通道发挥着关键作用。汽车碰撞后，CPM 与车身传感器、控制系统和执行器协同工作，在极短时间内快速完成车门解锁，确保乘员失去意识时车门也能打开，从而降低外部救援难度。为了应对极端情况，CPM 通常采用双冗余电源设计。如图 1-1 所示。在正常情况下，使用 12V 汽车电池驱动电机解锁。发生碰撞时，12V 汽车电池可能因碰撞损坏或电路故障而失效。此时，超级电容器等备用电源可作为独立电源为电机驱动器供电，确保紧急情况下车门能够打开。

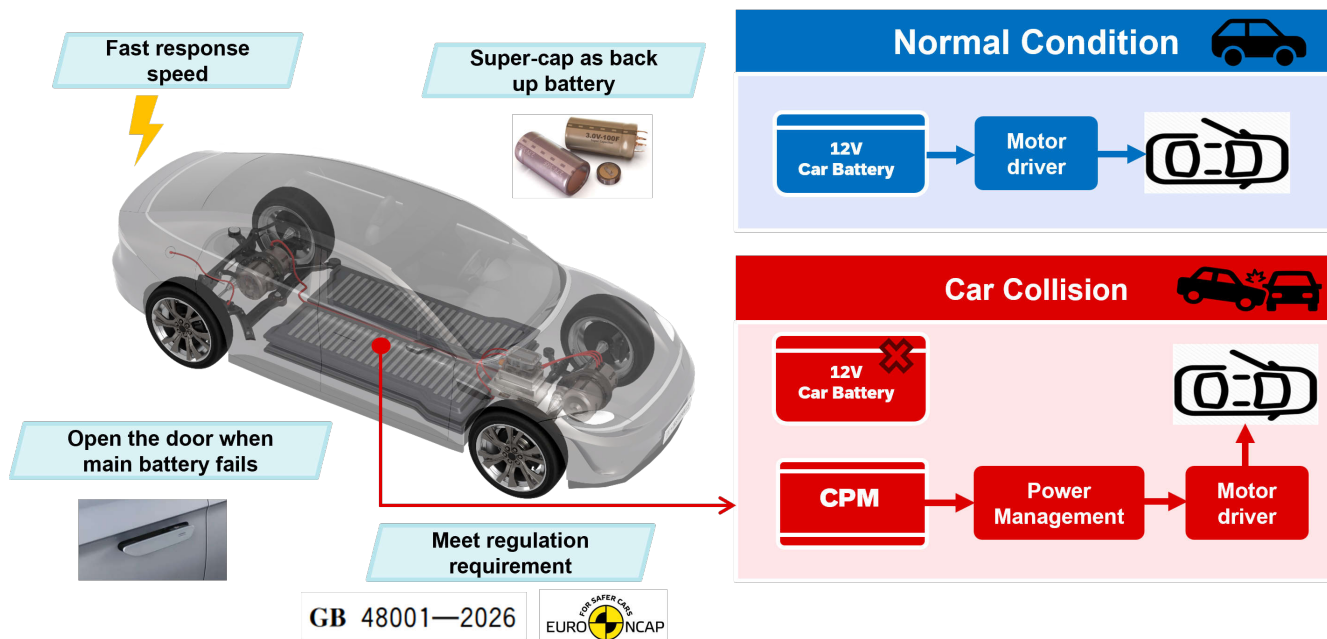


图 1-1. CPM 简介

在法规方面，欧盟、美国和中国都有相应法规要求碰撞后车门能够正常打开。中国于 2026 年制定了强制性国家标准汽车车门把手安全技术要求，要求碰撞后能够手动打开车门。这推动了 CPM 中双冗余电源设计的采用，并加速了 CPM 市场发展。

CPM 不仅属于法规要求，也是保障乘客安全、提高救援效率的关键模块。CPM 推动了汽车安全从基本防护向全场景可靠保障升级，成为衡量车辆安全水平的重要指标。

2 CPM 系统方框图 and 设计要求

2.1 系统方框图

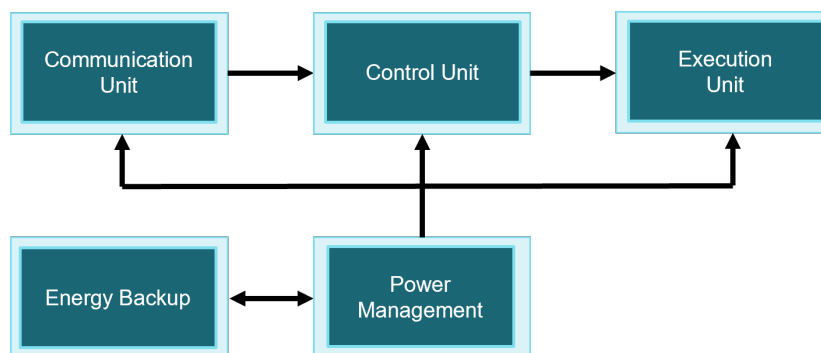


图 2-1. CPM 系统方框图

图 2-1 是 CPM 的系统方框图，由五个单元组成。

通信单元负责数据分发和命令协调。它通过 CAN/LIN 等车载总线将接收到的触发信号传输到控制单元，驱动控制单元启动电源切换和解锁；同时，它还实时监测模块内各单元的工作状态。

备用能量单元是超级电容器。在正常情况下，主电池为系统供电。如果碰撞导致主电池断开连接，备用电源会快速接入，以确保解锁能量稳定输出。

电源管理单元对超级电容器进行充电和放电。正常情况下，汽车主电池为超级电容器充电并在其中储存能量。发生碰撞后，它释放超级电容器的能量，同时还会考虑电芯均衡和电池健康检测。

控制单元是系统的中心。它接收碰撞信号，同时根据超级电容器的剩余能量动态计算解锁循环次数，并实时反馈电压和能耗数据。

执行单元根据门锁、儿童锁和门把手锁组件的不同电流和时间要求，依次驱动不同锁进行解锁。

2.2 设计要求

作为车辆被动安全系统的关键组成部分，CPM 必须围绕“极端条件下可靠解锁”这一核心目标进行设计，同时还要考虑对车载环境的适应性以及整车系统的协同作用。在技术实施过程中，电源可靠性、响应时间和环境适应性等问题构成了模块设计的核心挑战。

a) 高可靠性和冗余度：双电源冗余设计和功能安全

CPM 必须支持双电源架构。正常情况下，主电源（12V 低压电池）为系统供电。碰撞导致主电源短路或断电时，超级电容器等备用电池需要无缝切入。此外，备用电源必须满足“低自耗”要求，在车辆整个生命周期内保持供电能力，同时具有足够的能量输出以支持多次解锁操作。CPM 必须通过严格的可靠性测试，如 50 万次充放电循环，在 -40°C~85°C 宽温度范围内、振动、电磁干扰等复杂汽车环境中稳定工作。主电池和备用电池切换及解锁执行的成功率都必须达到 100%。

b) 响应迅速：毫秒级速度

从检测到碰撞信号到解锁所有车门锁、儿童锁和门把手锁的总响应时间必须控制在 200ms 以内，电源切换时间不超过 10ms。驱动执行单元必须按照预设时序快速驱动多种类型的锁，以确保碰撞后在黄金逃生窗口内有效解锁。

c) 成本与可靠性：权衡

CPM 需要在成本与可靠性之间取得平衡。冗余设计会显著增加模块成本和尺寸；因此，需要通过选择高度集成的芯片和简化冗余逻辑来优化电路架构，在满足功能安全和可靠性要求的同时控制成本和尺寸。

2.3 系统架构

CPM 根据其安装位置可分为三种架构：集中式、半分布式和分布式，分别如图 2-2、图 2-3 和图 2-4 所示

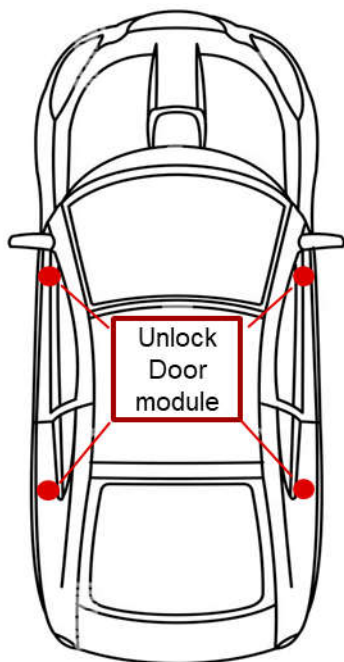


图 2-2. 集中式

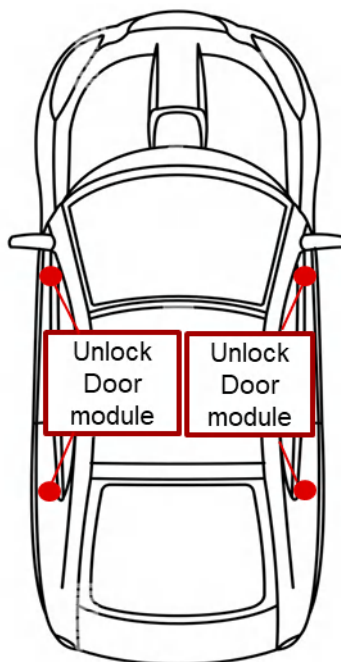


图 2-3. 半分布式

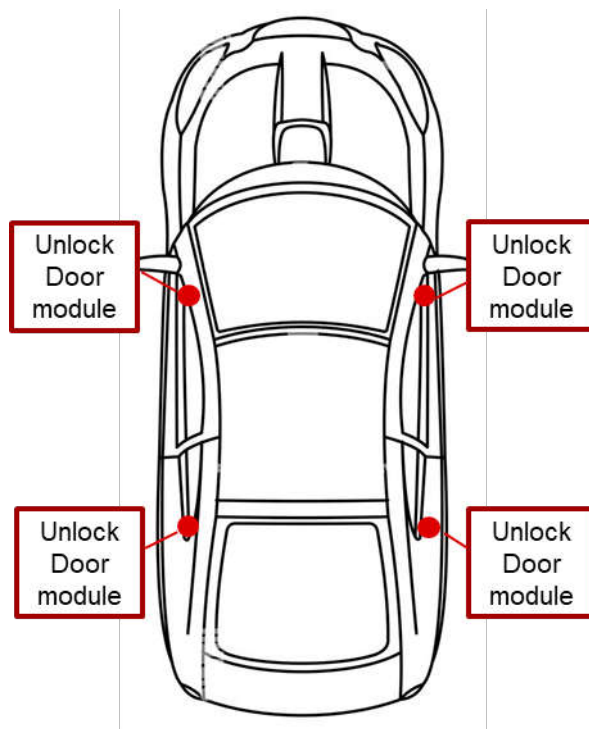


图 2-4. 分布式

如果 CPM 布置在汽车中央，并使用一个模块解锁四个车门，则称为集中式架构。集中式架构结构简单、易于开发、成本低，可布置在车内任意位置而不受空间限制，并且在碰撞中不易损坏。但是，CPM 离车门较远，导致响应速度较慢。发生碰撞后电缆容易损坏，单点故障风险较高，冗余度较低。

如果 CPM 布置在每个车门上，则称为分布式架构。在分布式架构中，模块靠近车门，响应速度很快。当一个模块因碰撞损坏时，其他模块仍可正常工作，因此分布式架构具有高可靠性和高冗余度。但由于需要四个 CPM，因此成本会增加。此外，四个门锁需要相互协调，使得协同逻辑较为复杂。

最后是半分布式架构。半分布式架构分为左域和右域，每个域包含一个控制锁的模块。其成本和冗余度均介于集中式和分布式架构之间，是一种折中方案。

表 2-1 对这三种架构进行了比较。集中式架构适合对成本敏感且系统集成要求较高的汽车。分布式架构更适合需要高响应速度和高冗余度，以及车辆配置多样化的场景。

表 2-1. CPM 的不同系统架构比较

架构	集中式	半分布式	分布式
优势	结构简单。 开发难度低 成本低 布置灵活 碰撞概率低。	成本适中 可靠性适中。	冗余度高 可靠性高。 响应速度快。
劣势	响应速度慢。 单点故障率高。	可扩展性差。	成本高。 协调控制困难。

3 超级电容器参数和门锁负载曲线

3.1 超级电容器参数

在 CPM 中，超级电容器作为核心储能组件，其选型直接决定了解锁操作的可靠性、及时性和安全性。与锂电池相比，超级电容器基于双层物理储能机制，无需化学反应即可实现毫秒级充放电。其在极端条件下的稳定性和瞬时功率输出能力，更能满足碰撞解锁的核心要求，因此成为该场景的首选储能方案。

选择超级电容器时，关键考虑因素应是解锁所需的能量。首先需要考虑的是超级电容器的电容、电压和数量。考虑到超级电容器的尺寸，通常可选的电容为 25F 和 30F；额定电压为 2.5V、2.7V 或 3V。超级电容器可串联以增加能量，常见串联数量为 1 至 5 颗。能量计算公式为：

$$E = \frac{1}{2}CV^2 \quad (1)$$

以三个 2.7V、25F 超级电容器串联为例，计算可释放的能量。

等效电容：

$$25F/3 = 8.33F$$

工作电压范围：

$$8.1V \text{ 至 } 3V$$

释放的能量：

$$E = \frac{1}{2}C(V_1^2 - V_2^2) = 236J \quad (2)$$

当超级电容器放电时，考虑到内部电阻的影响，电压可能降至 3V。因此，工作电压范围为 8.1V 至 3V。在不同电压下，不同容量和串联组合可以满足不同的能量需求。因此，选择超级电容器时，需要根据系统所需能量进行选择，同时留出一定裕量（通常认为约为 30%）。

超级电容器的等效串联电阻 (ESR) 也是影响解锁响应速度的关键因素。碰撞解锁需要驱动门锁电机产生瞬时大电流，而低 ESR 可以减少能量损耗和发热。在汽车级选型中，应优先选择室温下 ESR 小于 30mΩ 的产品，确保瞬时放电电流达到 15A 以上，即使在 -40℃ 低温环境中仍能保持超过 10A 的输出能力，以满足门锁电机的正常驱动要求。

在选择型号时，超级电容器必须满足汽车级可靠性和安全标准。CPM 需要在车辆的整个生命周期内正常工作；因此，超级电容器的循环寿命应达到 50 万次以上。温度适应性也至关重要，超级电容器需要覆盖 -40°C 至 105°C 的宽工作温度范围。

3.2 充电时间要求

作为碰撞解锁的应急电源，超级电容器需要在车辆通电后的极短时间内充电至额定电压的 90% 以上，确保车辆在整个行程中保持*随时可应急解锁*的状态。不同 OEM 对充电时间的要求不同，一般在 10 秒到 60 秒内。图 3-1 展示了超级电容器的充电特性曲线，分为两个阶段：恒流 (CC) 充电和恒压 (CV) 充电。在 CC 阶段，主电源以恒定电流为超级电容器充电，使电容器电压快速升高。当超级电容器电压接近恒定值时，自动切换到恒压模式，限制充电电流以防止过压损坏电容器，同时保持满充状态。超级电容器充电电流与充电时间之间的关系如下：

$$I = C \frac{dU}{dt} \quad (3)$$

充电电流越大，充电时间越短。以 3s、2.7V、25F 电容器为例，等效电容为 8.3F。如果需要在 10 秒内将超级电容器从 0V 充电至额定电压 8.1V，所需充电电流应为 6.7A。考虑到这一裕度，有必要选择能够支持 7A 恒流充电的 IC，例如 [TPS552892-Q1](#)。

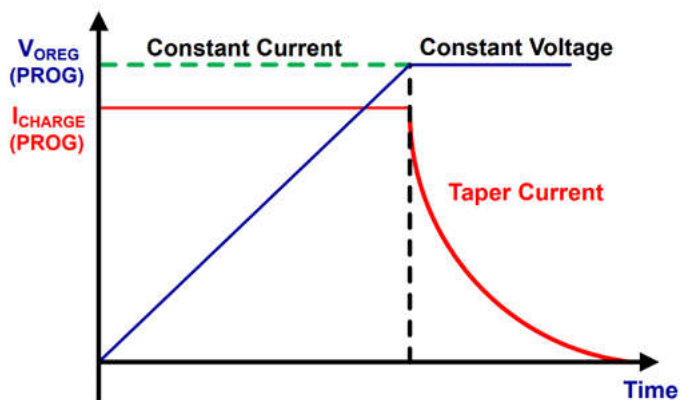


图 3-1. 超级电容器充电特性

3.3 门锁负载曲线

在车门系统中，常见的锁包括门锁、门把手锁和儿童锁。CPM 中需要解锁的锁数量取决于系统架构。如果采用集中式架构，则一个 CPM 需要驱动所有锁，包括四个门锁、两个儿童锁和四个门把手锁。如果采用分布式架构，每个 CPM 只需驱动一个门锁、一个儿童锁和一个门把手锁。锁的数量不同，所需能量也不同。

解锁过程中，电机工作电压通常设为 12V，电流随时间变化，分为启动阶段、稳定状态阶段和堵转阶段。图 3-2 显示了典型车门解锁电机工作期间的电流变化。在启动阶段，反电动势尚未建立，电流迅速升至额定电流的 2 倍，最高可达 5A，形成瞬态浪涌尖峰。该阶段仅持续 10ms。浪涌电流过后，电机反电动势建立，电流迅速回落并稳定在额定电流范围内，一般为 3A 左右，持续时间为 150ms。最坏的情况是电机堵转，电流达到 8A 并持续 50ms。因此，解锁该电机所需的总能量为：

$$E = UIt = 12V \times (5A \times 10ms + 3A \times 150ms + 8A \times 50ms) = 10.8J \quad (4)$$

如果需要用 1 个 CPM 解锁所有车门，考虑到锁的数量为 10、解锁轮次为 2，则所需总能量为：

$$E_{total} = 10 \times 2 \times 10.8J = 216J \quad (5)$$

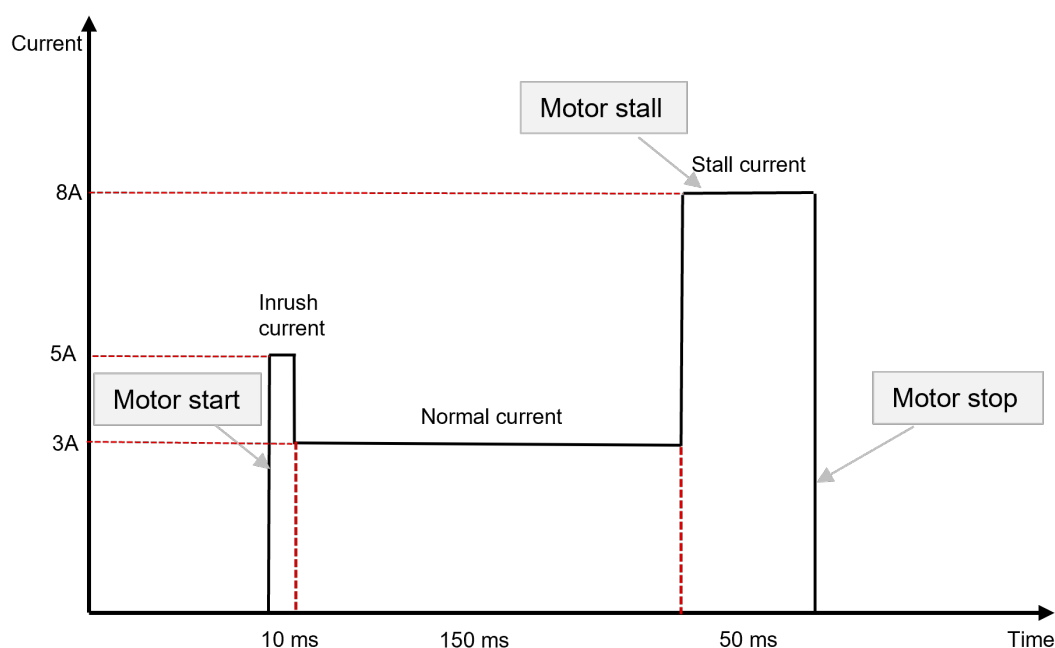


图 3-2. 车门锁电机工作期间电流随时间变化的典型图

4 电源管理设计

4.1 5s 超级电容器设计

5s 超级电容器设计可提供更多能量，因此主要用于集中式架构。下一节将展示 5s 超级电容器的三种不同的电源管理设计。

- 降压/升压充电 + 二极管放电

使用降压/升压转换器为超级电容器充电。使用二极管将超级电容器的能量释放到电机驱动器。以 5s、2.7V、25F 超级电容器为例，超级电容器额定电压为 13.5V。汽车 12V 主电池的工作电压范围为 9V-16V，因此需要降压/升压充电器，例如 [TPS552892-Q1](#)。使用二极管 [LM74700-Q1](#) 进行放电，以便为电机供电。由于电机工作电压范围为 9V 至 16V，超级电容器只能放电至 9V，无法利用低于 9V 的能量。由于超级电容器在生产制造上的差异，当超级电容器串联时，各串联单体的电压可能不平衡。因此，需要 [BQ79607-Q1/BQ78709-Q1](#) (ASIL-B 版本) 之类的电芯均衡 IC，实时监测每个电芯的电压并进行被动放电，以均衡各电芯电压并延长超级电容器寿命。

CPM 还需要 MCU、SBC 和电机驱动器。MCU 作为控制 CPM 的中央系统运行，建议使用 [MSPM0G3107-Q1](#)。SBC 可选用 [TCAN2845-Q1](#)，它集成了 CAN-FD 收发器和 3.3V LDO，用于为 MCU 供电并与 ZCU 通信。使用电机驱动器驱动电机，例如 [DRV8244-Q1](#)。推荐系统的方框图如图 4-1 所示。

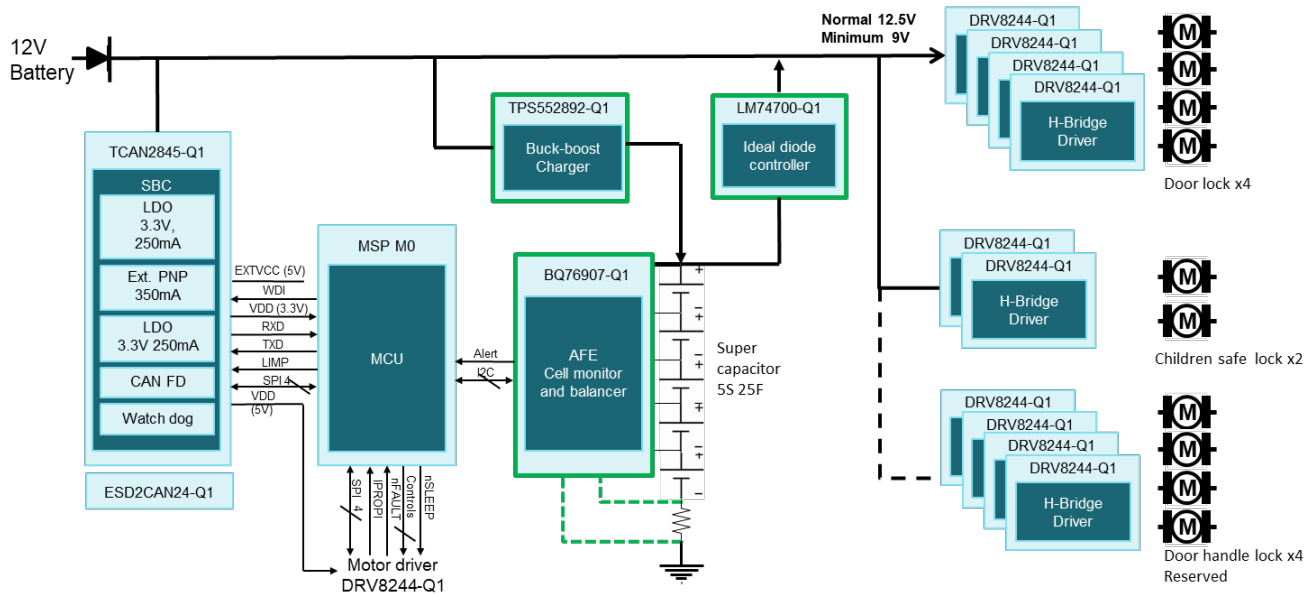


图 4-1. 5s 超级电容器系统方框图：降压/升压充电和二极管理电

图 4-2 是 [TPS552892-Q1](#) 为超级电容器充电的测试波形。通道 1-3 分别为使能引脚 EN、超级电容器电压 VOUT、充电电流 IOUT。从波形可以看出，使能引脚变为高电平后，[TPS552892-Q1](#) 进入恒流充电阶段，以 2.5A 恒流为超级电容器充电，直到电压达到约 12.5V。随后 IC 进入恒压充电阶段，在此期间充电电流逐渐减小。整个充电过程持续 25 秒。有关更详细的应用信息，请参阅[采用带降压/升压转换器的 5S 超级电容器解决方案的电子门锁](#)。

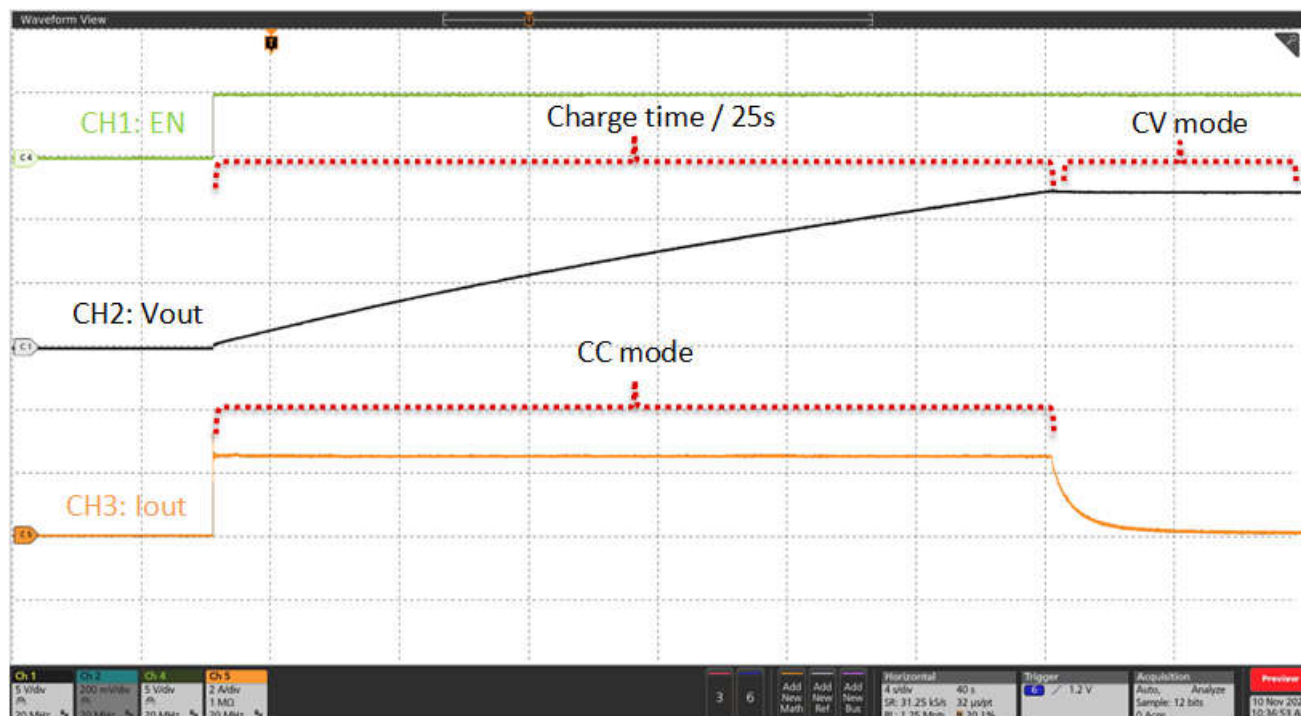


图 4-2. 使用 TPS552892-Q1 为超级电容器充电的测试波形

- 降压/升压充电 + 升压放电

在放电期间，使用 LM5122-Q1 之类的升压控制器替代二极管，可以充分利用超级电容器的能量。当超级电容器电压低于 9V 时，可通过升压控制器将输出升至 12V 来驱动电机。系统方框图如图 4-3 所示。

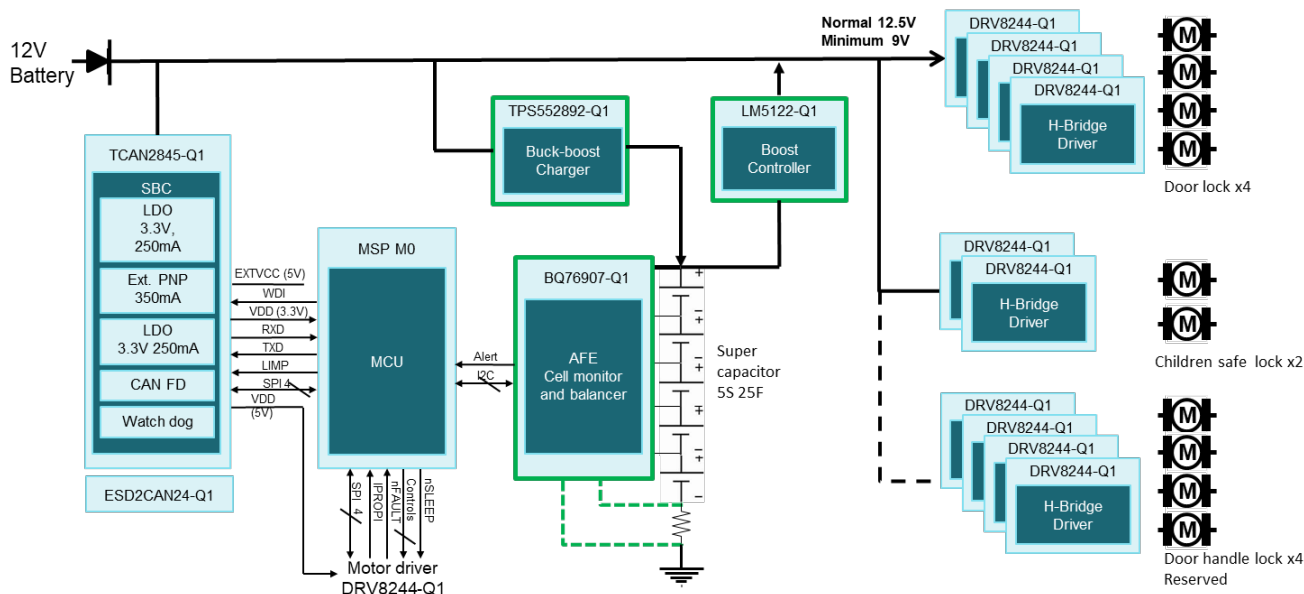


图 4-3. 5s 超级电容器系统方框图：降压/升压充电 + 升压放电

- 使用双向降压/升压控制器进行充电和放电

在下面的设计中，需要降压/升压充电器和升压控制器来实现放电。TI 推出了一款双向降压/升压控制器 LM51772-Q1，其使用同一电路进行充电和放电。它具有更高的集成度，可显著降低系统成本。系统方框图如图 4-4 所示。详细的应用手册请参阅使用 LM51772 的电池或电容器备用操作。

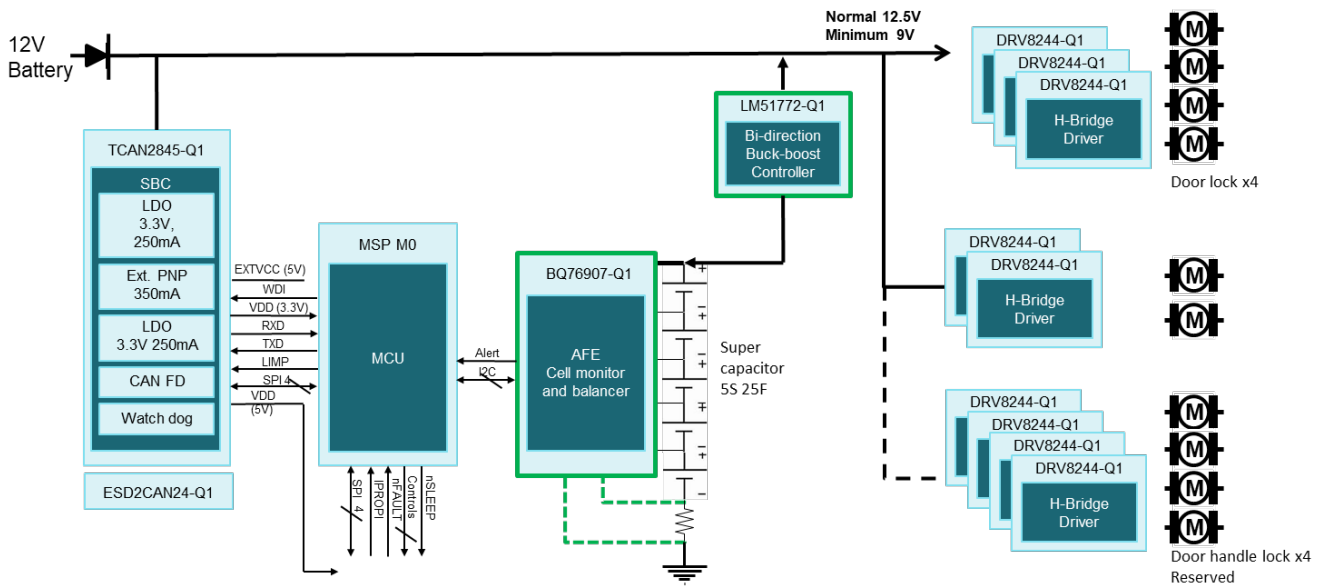


图 4-4. 5s 超级电容器系统方框图：使用双向降压/升压控制器进行充电和放电

4.2 3s 超级电容器设计

3s 超级电容器设计能够在减少超级电容器数量的同时均衡能量。该设计同时适用于集中式和分布式架构。以下是 3s 超级电容器的两种不同的电源管理设计。

- 降压充电 + 升压放电

以 3s、2.7V、25F 超级电容器为例，超级电容器额定电压为 8.1V，因此需要 LM5190-Q1 之类的降压充电器。在放电期间，使用升压控制器 LM5152-Q1 将电压升高到 12V 以驱动电机。同样，系统仍需要电芯均衡 IC、MCU、SBC 和电机驱动器。推荐系统的方框图如图 4-5 所示。

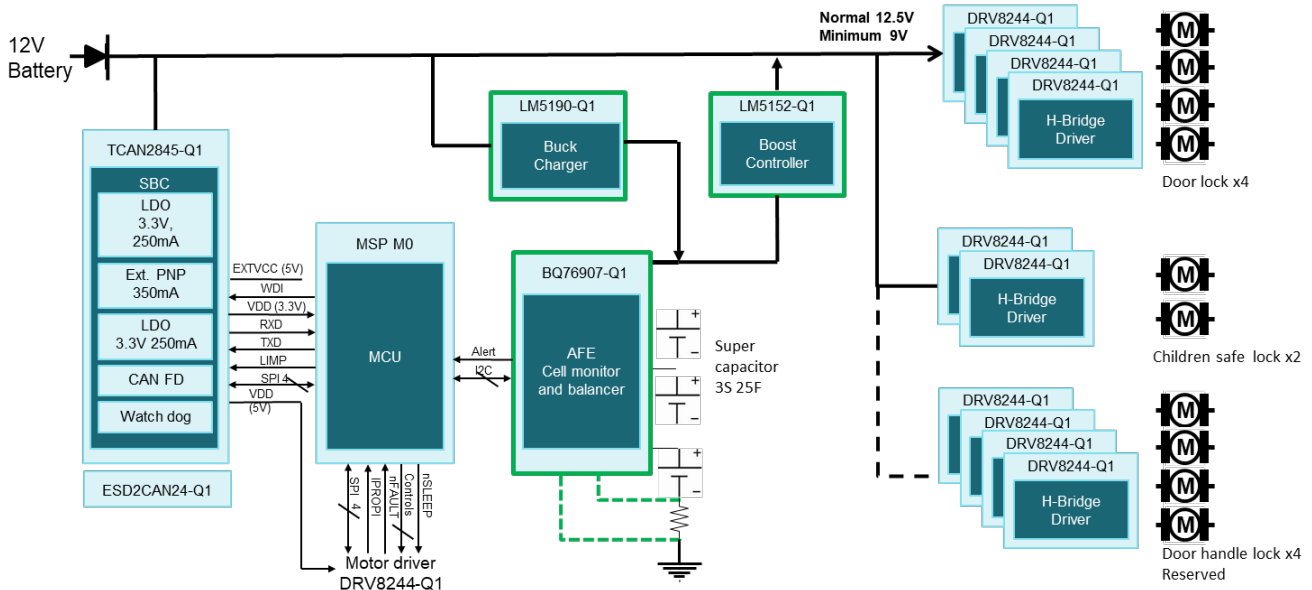


图 4-5. 3s 超级电容器系统方框图：降压充电 + 升压放电

- 使用双向降压/升压转换器进行充电和放电

第二种设计采用高度集成的双向降压/升压转换器 TPS61383-Q1，它集成了降压充电器、升压放电器和电池健康检测功能。当 12V 主电池正常工作时，可通过降压模式为超级电容器充电，最大充电电流为 7A。当主电池失效

时，它会在检测到主电池端电压下降时自动切换到升压模式，将超级电容器电压升至 12V 来为电机供电，最大输入电流为 30A。此外，该器件还具有电池健康检测功能，可检测超级电容器的运行状态。与分立式设计相比，TPS61383-Q1 集成度更高、尺寸更小、更易于设计。推荐系统的方框为图 4-6。有关更多详细的应用信息，请参阅使用 TPS61383-Q1 的汽车电子门锁系统设计指南。

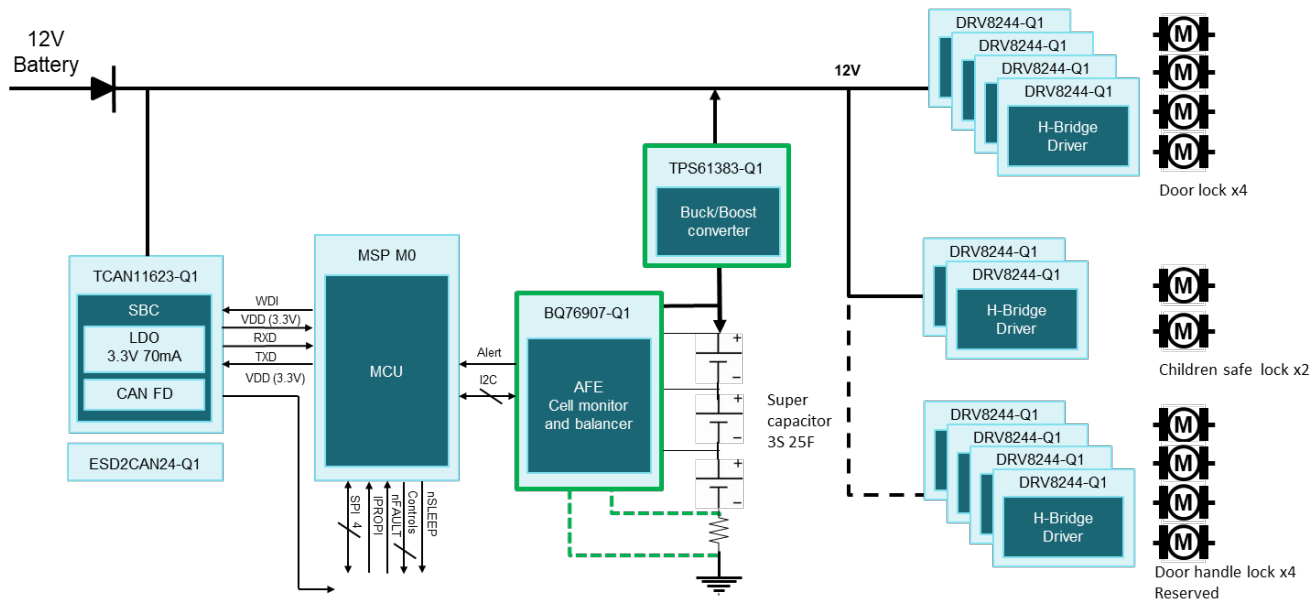


图 4-6. 3s 超级电容器系统方框图：双向降压/升压转换器

图 4-7 和图 4-8 是测试波形。图 4-7 展示了充电过程中的波形，通道 1 和 2 分别表示超级电容器的电压和充电电流。TPS61383-Q1 使用 3A 充电电流，仅需 25 秒即可将超级电容器电压从 0V 充至 8.1V。图 4-8 展示了放电过程的波形，通道 1-4 分别表示超级电容器电压、IC SW 电压、负载电压和负载电流。该负载模拟了真实解锁过程：锁的电压设为 10V，启动电流为 5A 并持续 10ms；稳定状态电流为 2.5A 并持续 200ms；堵转电流为 8A 并持续 20ms。锁的数量是 10 个，分两轮解锁。从图 4-7 和图 4-8 可以看出，该器件能够支持整个解锁过程。

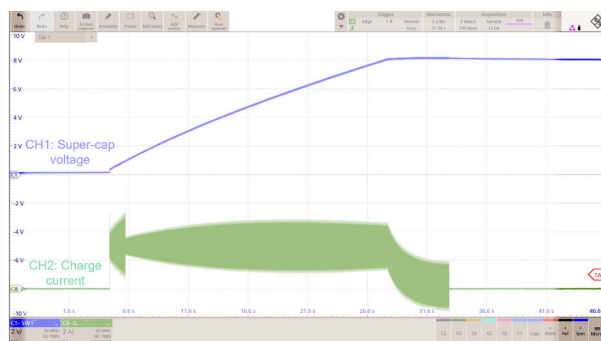


图 4-7. TPS61383-Q1 充电波形

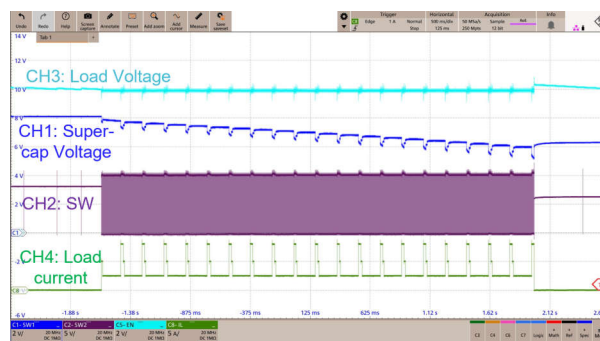


图 4-8. TPS61383-Q1 放电波形

4.3 1s 超级电容器设计

当 CPM 采用分布式架构时，每个模块只需解锁一个车门，因此可使用 1s 超级电容器。以下是 1s 超级电容器的设计。

- 降压充电 + 升压放电

以 1s、2.7V、25F 超级电容器为例，推荐的系统方框图如图 4-9 所示。LM5190-Q1 是降压充电器，LM5152-Q1 是用于放电的升压控制器。LM5152-Q1 的最低工作电压为 3.8V。当偏置电压大于 3.8V 时，其最低输入电压为 0.8V。因此，需要额外增加一个具有低压启动能力的升压转换器 TPS61299-Q1，为 LM5152-Q1 提供偏置。

TPS61299-Q1 的静态电流 (I_q) 仅为 95nA，几乎不会消耗超级电容器的能量。使用 1s 超级电容器时，无需电芯均衡，但仍需要 MCU、SBC 和电机驱动器。

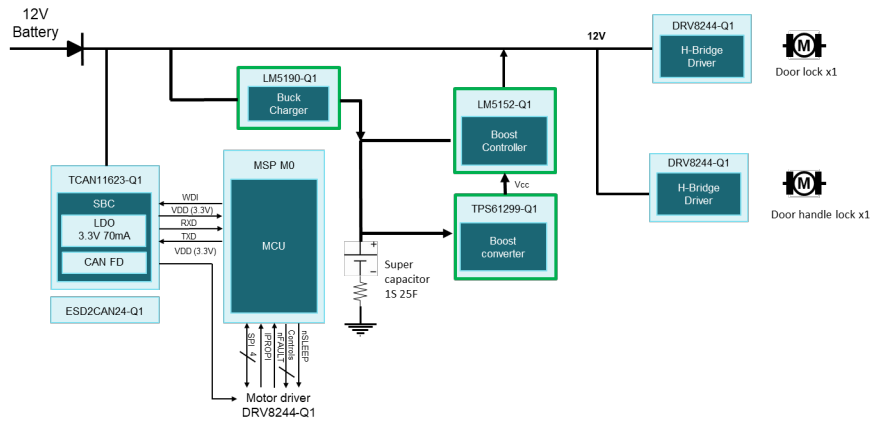


图 4-9. 1s 超级电容器系统方框图：降压充电和升压放电

- 使用双向降压/升压转换器进行充电和放电

图 4-10 展示了使用双向降压/升压转换器 TPS61383-Q1 作为充电和放电芯片的系统方框图。与分立式设计相比，集成设计成本更低、集成度更高，也是未来的趋势。

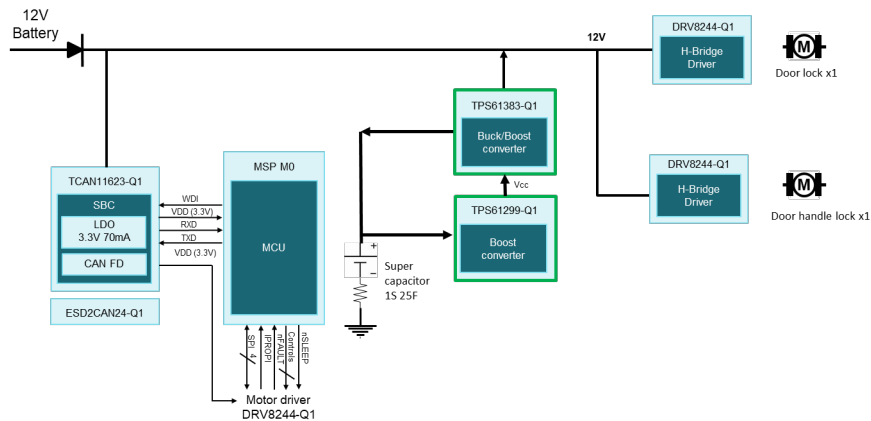


图 4-10. 1s 超级电容器系统方框图：双向降压/升压转换器

4.4 不同设计方案的比较与总结

前文分别给出了 5s 超级电容器、3s 超级电容器和 1s 超级电容器的设计。表 4-1 列出了不同设计的优缺点。5s 超级电容器设计能量更高，适用于集中式架构。3s 超级电容器设计在减少超级电容器数量的同时平衡能量，具有成本优势且尺寸更小，对集中式和分布式架构均适合。1s 超级电容器设计冗余更高、成本更高，适用于安全要求更高的分布式架构。与分立式设计相比，双向设计解决方案尺寸更小、BOM 成本更低，是未来的设计趋势。

表 4-1. 不同设计方案比较

		5s 超级电容器	3s 超级电容器	1s 超级电容器
分立式设计	电荷	降压/升压： TPS552892-Q1	降压：LM5190-Q1	降压：LM5190-Q1
	放电	二极管：LM74700-Q1/ 升压：LM5122-Q1	升压：LM5152-Q1	升压：LM5152-Q1
双向设计		双向降压/升压控制器：LM51772-Q1	双向降压/升压转换器： TPS61383-Q1	双向降压/升压转换器： TPS61383-Q1
优势		能耗更高，可扩展性更好	具有成本优势且尺寸较小	不需要电芯均衡，具有高冗余度
劣势		需要电芯均衡	需要电芯均衡	成本高
应用		集中式架构	集中式/半分布式/分布式架构	分布式架构

5 总结

作为新能源汽车碰撞场景中的生命支持系统，CPM 的核心价值在于主电池失效后由备用电池提供电力以解锁车门，为乘客逃生建立最后一道防线。随着电子门锁 (E-latch) 的普及和安全法规的升级，CPM 已成为不可或缺的安全要求，市场规模预计将呈稳步增长趋势。未来，CPM 将朝着更高集成度、更长寿命和更低成本的方向发展。

6 参考资料

- 德州仪器 (TI)，[电子门锁设计资源](#)，网页。
- 德州仪器 (TI)，[采用带降压/升压转换器的 5S 超级电容器解决方案的电子门锁](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[使用 LM51772 的电池或电容器备用操作](#)，应用手册。
- 德州仪器 (TI)，[使用 TPS61383-Q1 的汽车电子门锁系统设计指南](#)，应用手册。

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