

Technical White Paper

电子门锁设计概述



摘要

汽车行业正面临着一个趋势，即从传统的高度机械门锁系统转向电子控制设计，通常称为电子门锁。本文介绍了电子门锁的架构、功能、优势和实现。

内容

1 简介.....2

2 电子门锁系统架构.....3

3 典型设计.....3

 3.1 电机驱动器.....4

 3.2 网络连接.....5

 3.3 微控制器.....6

 3.4 备用电源.....7

 3.5 位置传感器.....11

4 未来趋势和创新.....11

5 结语.....11

6 参考资料.....11

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

首先让我们来看看一些术语的定义。在车门中，锁扣通过保持车门关闭来提供安全，而锁通过防止锁扣被释放来提供安全。锁扣是一种机械装置，与车门框架上的撞锁接合以保持车门关闭。锁通常与锁扣机构集成在一起，它使用钥匙或电子系统来防止锁扣脱离，从而固定车门。

传统的汽车车门依靠复杂的机械连杆与撞锁爪接合和分离，从而实现车门的打开和关闭。电动锁已普及多年，但它们通常只是添加一个小型电机来驱动现有的机械连杆。

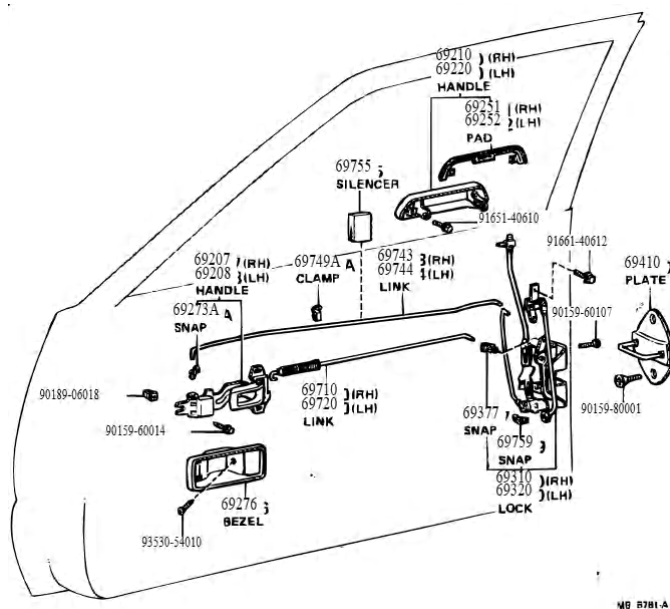


图 1-1. 典型的机械复杂车门锁扣和锁示例

相比之下，电子门锁系统往往会用电子器件和电线取代机械连杆。这些“电子门锁”提供了超越前代机械产品能力的新功能和设计可能性。随着汽车中电子产品和高级功能的集成度越来越高，向电子控制门锁的过渡越来越受欢迎。

随着锁扣和锁的电气化，这些功能变得依赖于通常由汽车电池提供的电力。出于安全原因，备用电源通常是电子门锁系统的一部分。

2 电子门锁系统架构

典型的电子门锁系统由多个元件组成，可以排列为集中式系统或分布式系统。在集中式系统中，单个模块提供备用电源和可选的冗余驱动器，这是整个车辆所有锁扣和锁运行所必需的。这种排列通常称为碰撞保护模块 (CPM) 或碰撞解锁保护模块 (CUPM)。在分布式系统中，每扇门的能量存储和驱动器均在本地控制和驱动。

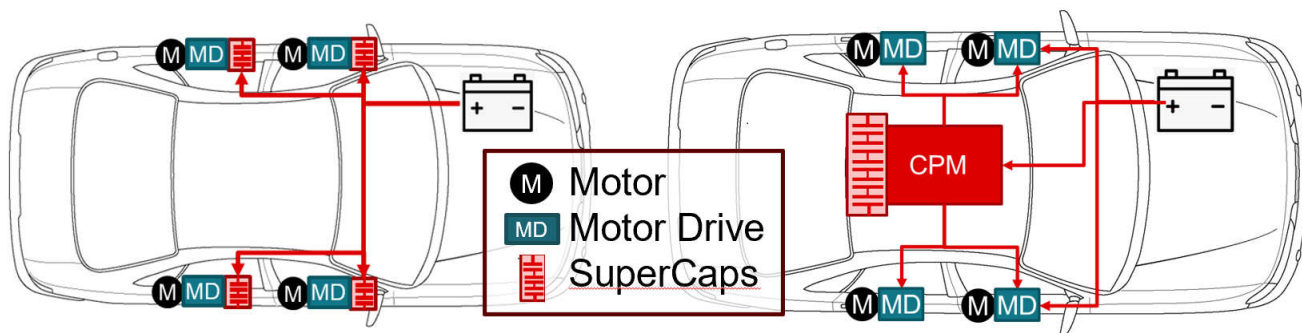


图 2-1. 分布式 (左) 和集中式 (右) 电子门锁架构

也可以采用混合排列，例如车辆的每一侧都设有电子门锁系统以控制车门。

3 典型设计

图 3-1 展示了典型电子门锁系统的方框图。此图也可以在[电子门锁设计资源 | TI.com](#) 上在线查阅，其中还提供了适用元件、技术文档和工具的链接。

以下各部分讨论了设计的关键元件。

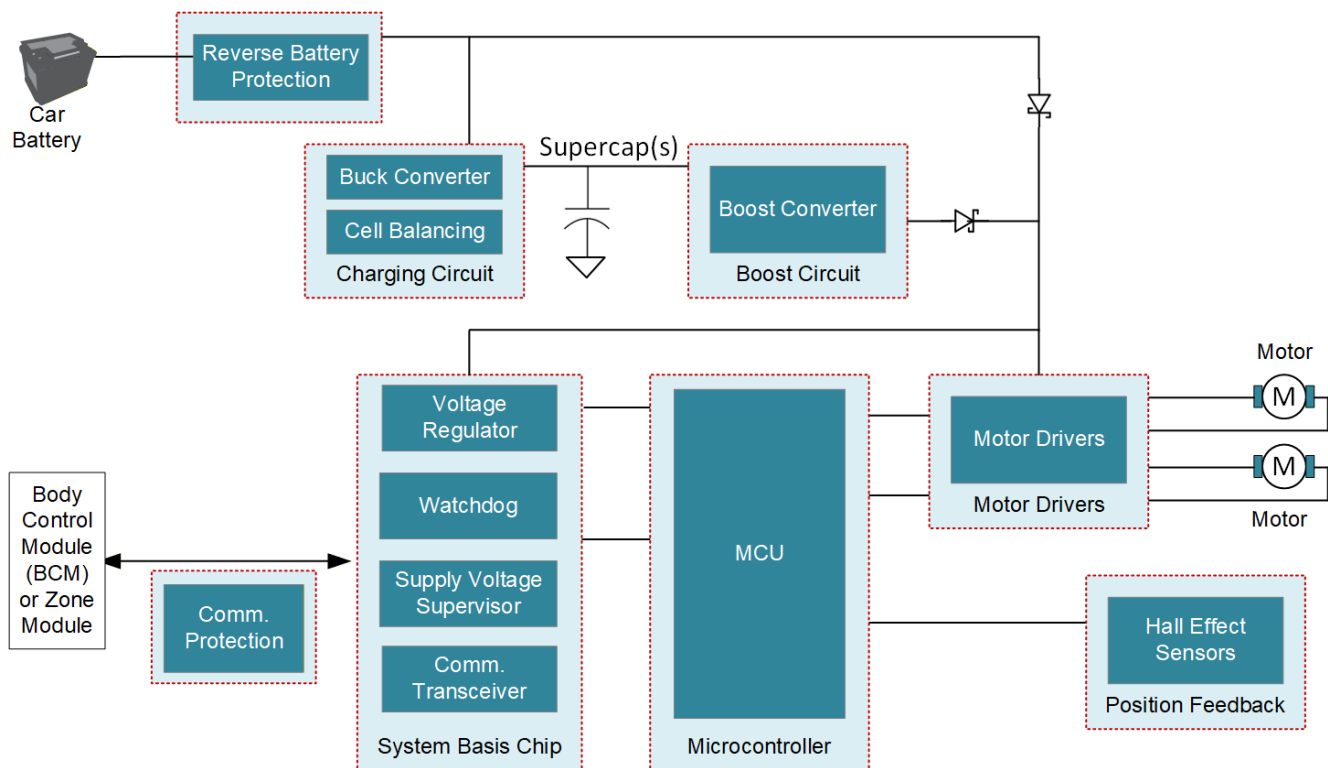


图 3-1. 电子门锁的方框图

3.1 电机驱动器

每个电机都需要一个电机驱动器；每扇门可配备一个锁定电机或多个电机，从而提供安全锁、儿童锁、把手控制器、软关闭或车门控制器等功能。每个电机通常为有刷直流类型，需要一个全桥（两个半桥）驱动器来提供双向操作，例如锁定和解锁。在某些情况下，会使用无刷直流 (BLDC) 电机，需要具有三个半桥的驱动器。

电机驱动电路有多种布置方式；图 3-2 至 图 3-4 展示了三个示例。对于分布式电子门锁系统，每个电机均由一个全桥晶体管驱动，从而实现双向运动。本地超级电容器仅为本地电路提供冗余电源。

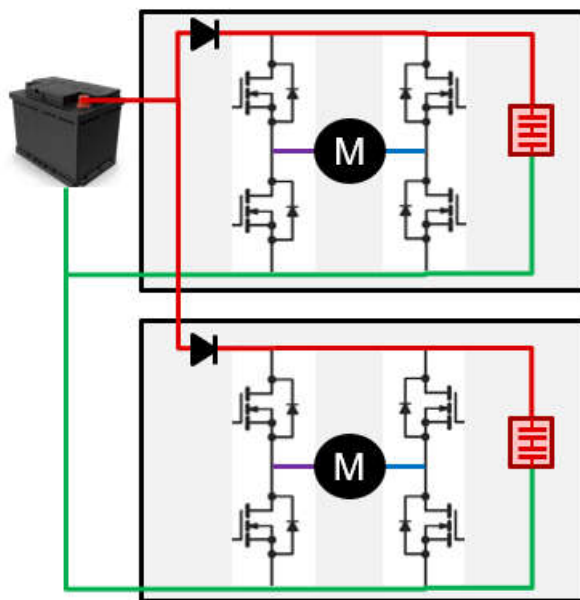


图 3-2. 具有本地备用电源和电机驱动器的分布式电子门锁系统

对于具有集中式备用电源的系统，每扇门中的本地电机驱动器全桥可实现双向运动，并在正常运行期间由主电池供电，在电池断开时由集中式备用超级电容器供电。

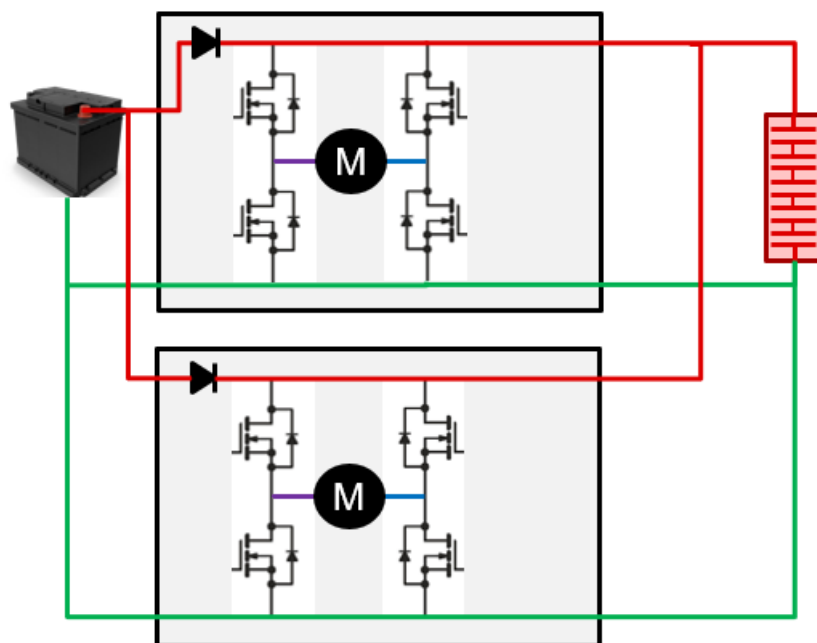


图 3-3. 集中式备用电源和本地电机驱动器

在中央 CPUM 中使用冗余驱动器的设计中，解锁电机驱动电压（而不是备用电源）会连接到每个电机。

请注意，这些电路中需要使用二极管，以防止通过晶体管的体二极管从一个电源反向驱动到另一个电源。设计人员还必须考虑这些增强电路对电机驱动器诊断功能的影响。

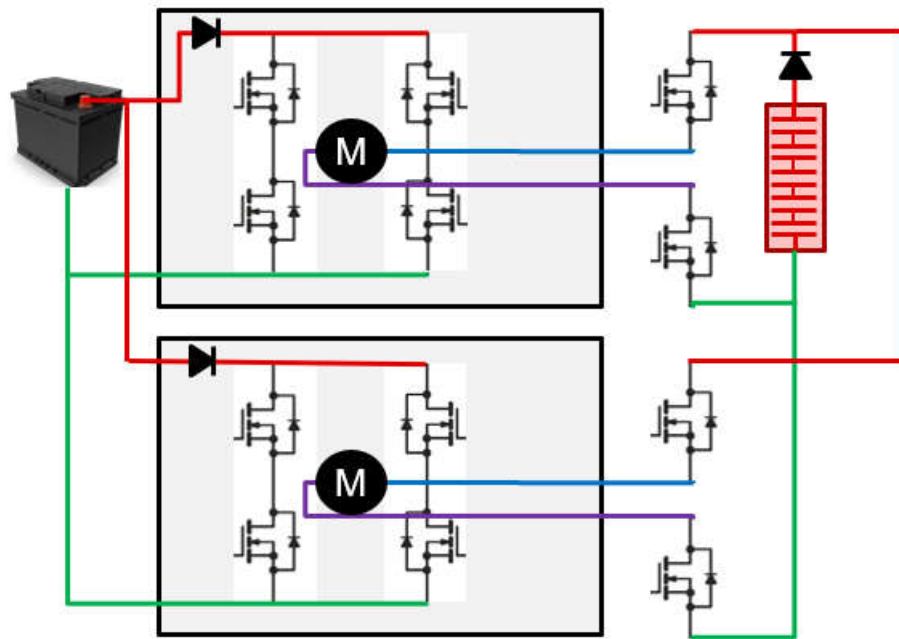


图 3-4. 集中式备用电源和冗余电机驱动器

德州仪器 (TI) 拥有丰富的汽车电机驱动器产品系列，适用于这些应用。有关更多信息，请访问[电机驱动器](https://www.ti.com) | [TI.com](https://www.ti.com)。

3.2 网络连接

电子门锁电路通常通过 CAN 或 LIN 连接来连接到汽车网络。电子门锁电路接收有关执行操作的命令，并提供状态和诊断信息。通常，单个器件（系统基础芯片 (SBC)）包括网络收发器、12V 转逻辑稳压器（降压转换器或线性 LDO），以及看门狗计时器、电压监控器等常见功能。

德州仪器 (TI) 拥有丰富的 SBC 产品系列，有关更多信息，请参阅 [ti.com](https://www.ti.com) 上的系统基础芯片。

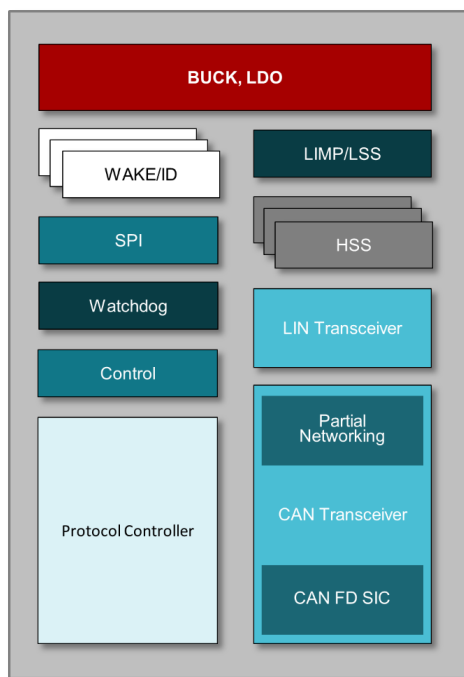


图 3-5. 通用 SBC 方框图

3.3 微控制器

微控制器 (MCU) 接收来自车辆网络的消息，并对要采取的操作进行逻辑决策，例如为超级电容器充电或解锁车门。MCU 通常还会配置设计中的其他集成电路、监控超级电容器的健康状态 (SOH)，并在电机驱动器电路上运行诊断例程。图 3-6 中对此进行了说明，显示了电子门锁功能的典型信号。

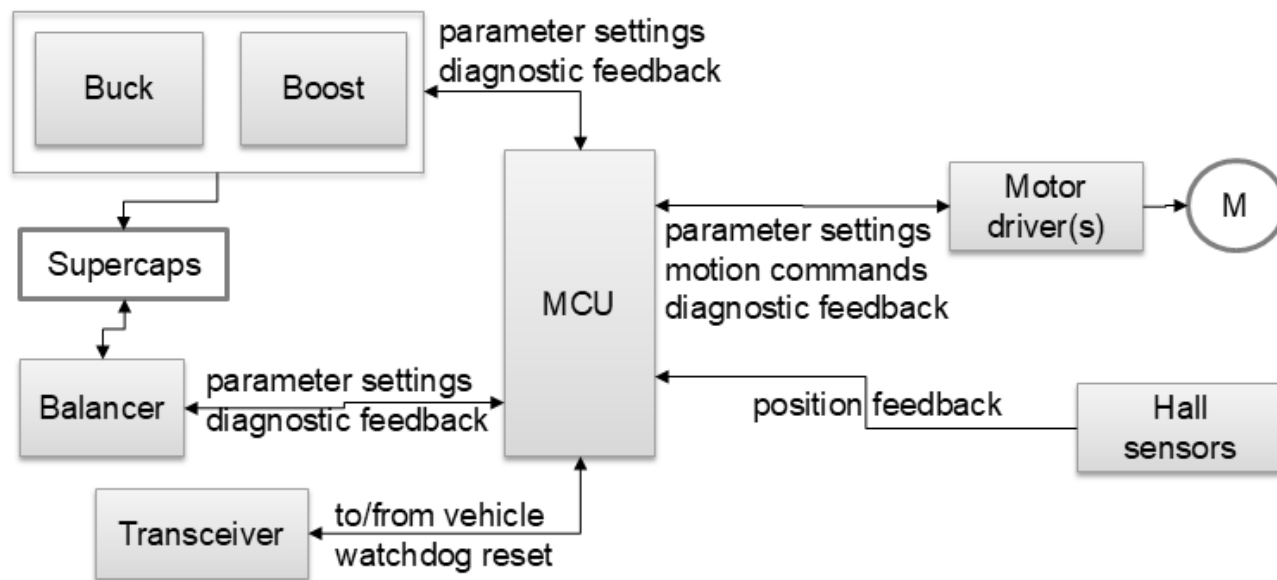


图 3-6. 电子门锁功能所需的微控制器输入和输出信号

如果电子门锁功能是较大电子控制单元（例如车门控制单元）的一部分，则 MCU 可以控制除电子门锁之外的许多其他功能。在这些情况下，对 MCU 的要求可能包括更高水平的处理能力和扩展外设。

根据对处理能力、存储器和车辆网络功能的典型要求，TI 的 MSP 微控制器系列使工程师能够简化设计、降低系统成本并缩短下一代汽车系统的上市时间。请参阅 ti.com 上的汽车车身和照明 MCU 中针对车身应用的丰富汽车微控制器选择。

3.4 备用电源

如果碰撞切断了车辆主蓄电池的连接，仍必须有解锁车门的方法。一种实现方式是提供机械手柄来开锁。然而，这增加了机械复杂性，与减少与系统相关的连杆件、重量和成本的期望背道而驰。此外，如果驾驶员失去行为能力，紧急救援人员可能无法接近内部机械手柄。因此，另一种方法是提供备用电源来提供车门解锁所需的能量，并在发生碰撞时自动启动解锁。

超级电容器通常用于此本地电源，因为超级电容器可以快速充电并存储高电平的能量。由于超级电容器的额定电压通常约为 3V，因此超级电容器可以串联电容组以存储更高的电压。对于分布式系统，由三个或更少的超级电容器构成典型电容组，串联电压约为 3V 至 9V。因此，使用降压转换器通过 12V 电池电源为超级电容器充电。还需要一个升压转换器来提供驱动锁定电机所需的电压。

对于集中式 CPM 系统，电容组中可能有多个串联的超级电容器，在充满电时会产生高于 12V 的电容组电压，因此可能需要降压/升压转换器来为超级电容器充电。放电侧不需要升压转换器，因为超级电容器电容组电压足以在不升高电压的情况下驱动电机。

3.4.1 能量需求讨论

系统能量要求的考虑涉及多个因素，包括可靠激活相关负载（电机、照明等）所需的能量、备用电源中的可用能量容量，以及由于温度、电压应力和老化而降低超级电容器的需求。

3.4.1.1 单个电机所需的能量

为了设计备用电源电路，我们需要查看电机和其他要驱动的负载的电压和电流要求。锁定机构中的电机是相对较小的有刷直流电机，通常为 12V 额定电压，最大电流为几安培。运行时间较短，通常明显不到一秒。驱动每个电机所需的总能量为：

$$E_{\text{total}} = \int v(t) \times i(t) dt \quad (1)$$

其中 $v(t)$ 是提供给电机的电压， $i(t)$ 是电机电流，积分是在电机激活总时间内的值。

例如，图 3-7 显示了使用 12V 电源和 500mΩ 检测电阻且比例因子为 2A/V 的锁定电机激活的电流曲线。该曲线可分为两部分，第一部分（黄色）显示在向电机施加电压时的初始高电流，随着电机转速和反 EMF 的增加而减小。第二部分（红色）是机构达到机械限值时，电机在初始反弹后失速。未显示的是当控制电路识别到锁已达到限值且驱动关闭时，电机停用。请注意，在这种情况下，电机仅旋转约 25ms，然后失速至少 55ms。失速电流约为 2.4A。

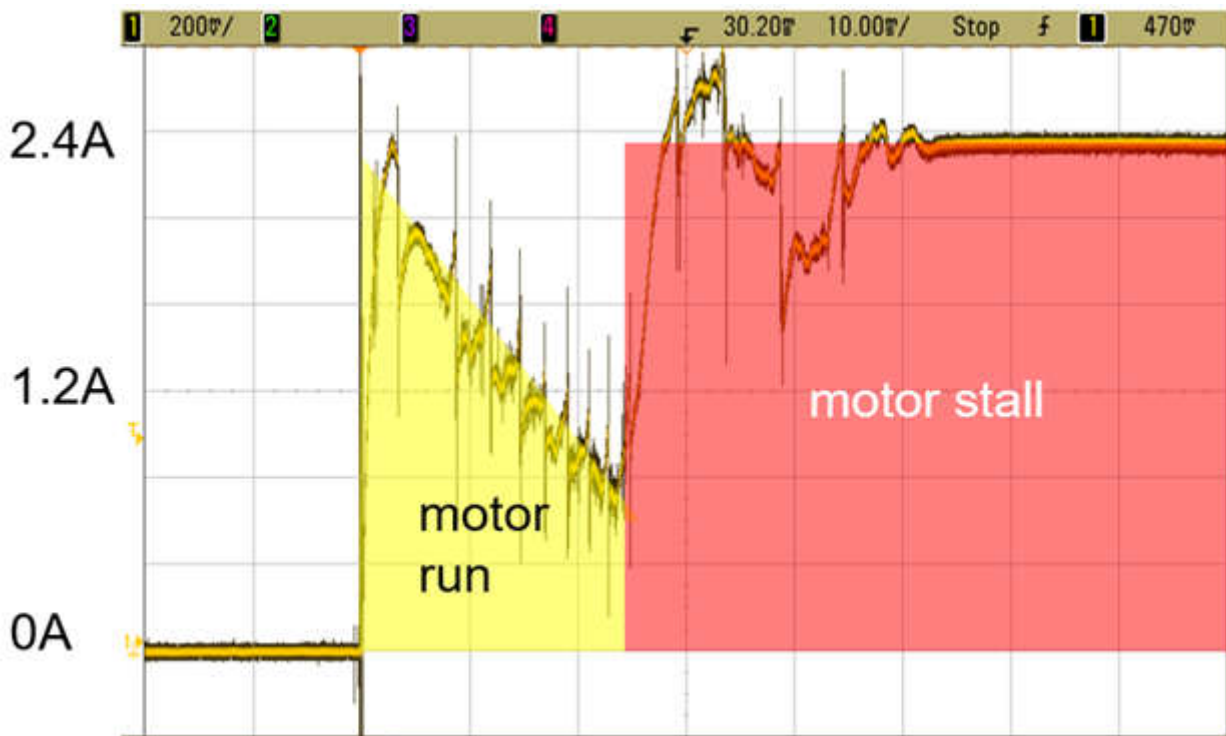


图 3-7. 锁定电机激活的当前配置文件

在本示例中，解锁事件期间耗散的能量可近似为电机旋转期间的能量与电机失速期间的能量之和。电机旋转期间的能量为：

$$E_{\text{rotation}} = 12V \times \frac{24A + 0.8A}{2} \times 25ms = 0.48J \quad (2)$$

电机失速期间的能量取决于电机在达到机械限值后停用的速度；对于本示例，假设电机在示波器迹线结束时在电机停止转动大约 55ms 时关闭。由此得出失速能量为：

$$E_{\text{stall}} = 12V \times 24A \times 55ms = 1.58J \quad (3)$$

这些总和可得出本例所需的总能量约为 2 焦耳。请注意，电机失速相位的持续时间会显著影响所需的总能量。因此，检测移动终点位置以及随后禁用电机驱动器所需的时间会对设计产生重大影响。

3.4.1.2 多电机要求

在许多情况下，尤其是对于集中式 CPM，有多个负载（电机，照明等）可能需要从备用能源供电。每个电机所需的能量可按 节 3.4.1.1 中所述计算。总能量则是碰撞后要驱动的所有电机的总和。在初始激活不成功的情况下，也可能需要多次尝试激活电机。

除了所需的总能量，另一个考虑因素是所需的最大电流；在设计电源转换电路时，这是一个重要参数。如上所述，每个电机的最大电流在激活的第一阶段以及电机在移动结束失速时出现；在这两种情况下，电机旋转实际上为零。

如果要激活多个电机，在时间方面有两种选择：同时激活或顺序激活。在同时激活的情况下，所有电机同时激活，所需的最大电流是所有最大电机电流之和。这种方法的优点是能够以最快的速度激活电机，并且易于实施。

按顺序激活的情况下，电机按顺序激活，因此所需的最大电流只是一个电机的最大电流。这样做的优势是可以降低使用超级电容器为电机供电的任何升压电路的峰值电流要求。但是，这种方法激活所有电机的时间更长，并且在控制激活序列方面更为复杂。

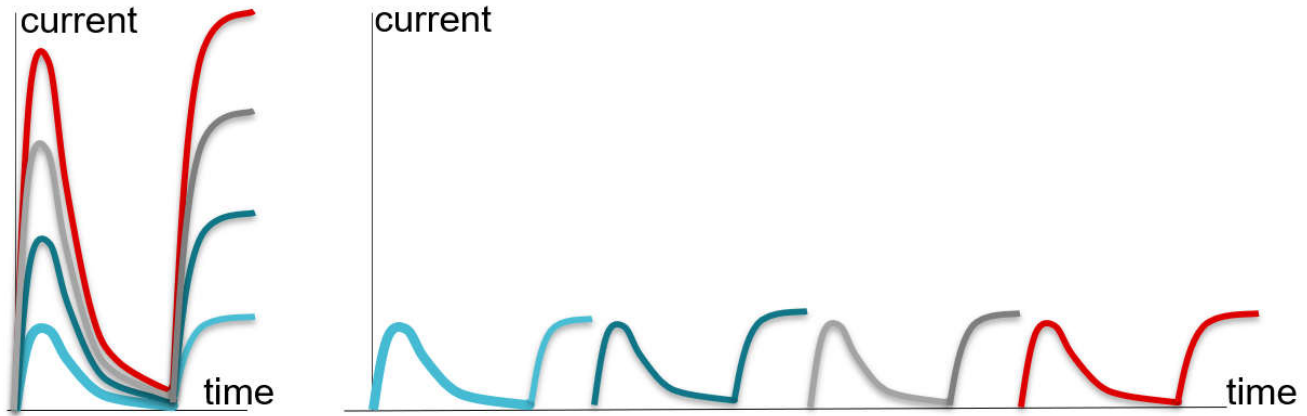


图 3-8. 同步 (左) 和顺序 (右) 当前配置文件

3.4.1.3 存储的可用能量

超级电容器中存储的总能量由以下公式得出：

$$E = \frac{1}{2}C \times V^2 \quad (4)$$

其中 C 是电容组总电容， V 是电容组电压。但是，并非所有这些存储的能量都可用，因为随着电容组电压的降低，在某些时候放电电路和负载驱动器将不再有效运行。因此，*可用* 能量为：

$$E = \frac{1}{2}(V_{full}^2 - V_{min}^2) \quad (5)$$

例如，五个 25F 超级电容器电容组在充满电时可以具有 13.5V 的电压，并且可以可靠地驱动锁定电机，直到电容组电压降至 9V。这将提供以下可用存储能量：

$$E = \frac{1}{2}5F \times (13.5V^2 - 9V^2) = 253J \quad (6)$$

如果添加了升压电路以允许电机进行驱动，直到电容组电压降至 3V，则可用的存储能量将增加至：

$$E = \frac{1}{2}5F \times (13.5V^2 - 3V^2) = 433J \quad (7)$$

因此，升压电路会增加任何给定电容值可提供的可用能量。

3.4.1.4 降额电容

在根据负载要求和放电电路来确定超级电容器的大小时，必须考虑老化、电压应力和温度的影响。根据超级电容器供应商的分析，有效电容必须显著降额；图 3-9 展示了一项此类调查的结果。

请注意，随着温度升高，超级电容器的老化会加速。超级电容器充电的电压也会影响老化效应；将电压降至额定 2.7V 以下会延长电容保持接近初始值的时间。

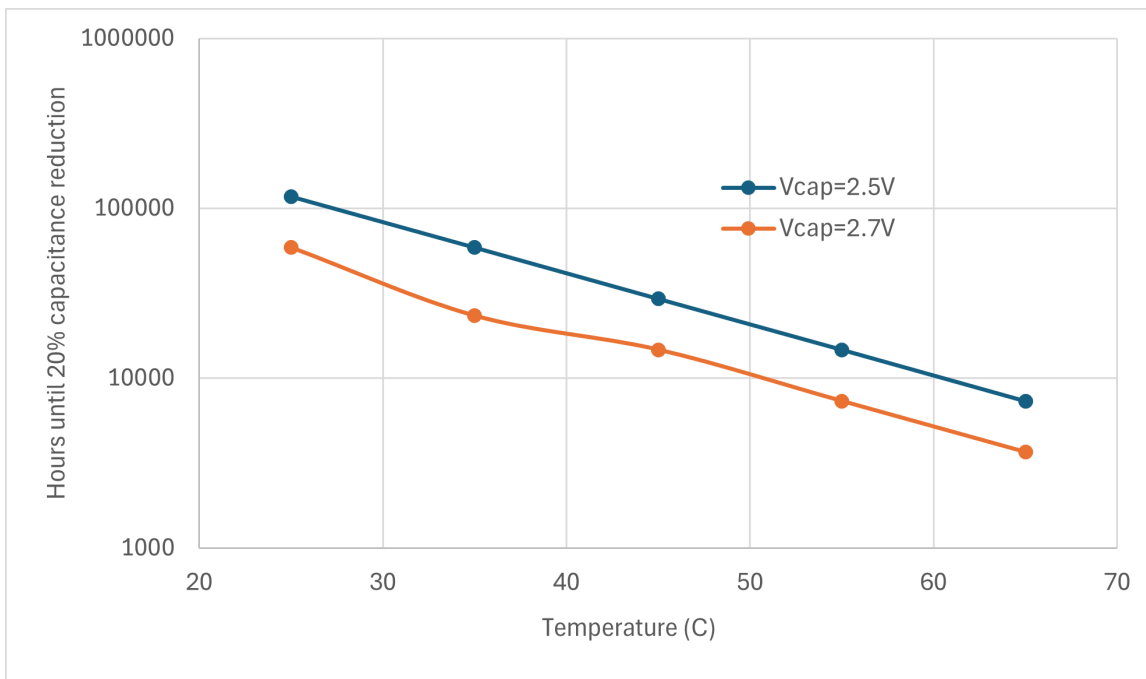


图 3-9. 超级电容器退化取决于温度和电压

对于汽车电子门锁应用，设计人员必须考虑过大的电容，以应对有效电容退化以及等效串联电阻和自放电速率等其他参数。

3.4.2 充电电路

本地存储超级电容器充电的电路取决于多个参数，例如串联超级电容器的数量和电容以及充电所允许的时间。如果充满电的超级电容器电容组的最高电压低于电源电压，例如三个 **2.7V** 超级电容器电容组搭配 **12V** 电池，则需要降压稳压器。如果充满电的电容组的电压可能高于电源电压，例如五个 **2.7V** 超级电容器电容组搭配 **12V** 电池，则需要使用降压/升压稳压器为电容组充满电。

为超级电容器充电所需的电流取决于电容、最终电压和充电所允许的时间：

$$I_{\text{charge}} = C_{\text{stack}} \times \frac{V_{\text{charge}}}{t_{\text{charge}}} \quad (8)$$

例如，如果两个 **30F** 超级电容器电容组必须在 **15** 秒内充电至 **5V**，则充电电流为：

$$I_{\text{charge}} = C_{\text{stack}} \times \frac{V_{\text{charge}}}{t_{\text{charge}}} = 15\text{F} \times \frac{5\text{V}}{15\text{s}} = 5\text{A} \quad (9)$$

这假设在充电期间，电流在超级电容器电压的整个范围内恒定，这就需要一个恒定电流降压或降压/升压器件。

一旦确定了充电电路的设计参数，德州仪器 (TI) 就有多种降压和降压/升压芯片可供选择，以及 [WEBENCH-CIRCUIT-DESIGNER](#) 和 [POWERSTAGE-DESIGNER](#) 等工具。

3.4.3 放电电路

如果超级电容器电容组提供足够的电压来驱动电机，则可使用二极管或开关电路将备用电源直接连接到电机驱动器电路。例如，五个超级电容器串联可充电至约 **13.5V**，足以为专为 **12V** 电池系统设计的电机供电。但是，如上所述，超级电容器的可用能量受可靠驱动电机所需的最低电压的限制。

为了更有效地使用存储的能量，并在超级电容器充电电压低于最低电机电压的情况下，放电电路可以使用升压配置。升压电路元件的选择取决于超级电容器最低电压和最高电压以及驱动电机所需的最大电流。

一旦确定了放电电路的设计参数，德州仪器 (TI) 就有多种降压和降压/升压芯片可供选择，以及 [WEBENCH-CIRCUIT-DESIGNER](#) 和 [POWERSTAGE-DESIGNER](#) 等工具。

3.4.4 双向充电和放电电路

除了用于充电的独立降压电路和用于放电的升压电路之外，德州仪器 (TI) 还提供同时具有充电和放电功能的芯片。[TPS61383-Q1](#)、[LM51772-Q1](#) 和 [BQ25853-Q1](#) 等芯片具有单个电感器而不是一个降压电感器和一个升压电感器的优势，并且还具有根据需要从充电到放电自动切换等功能。

3.4.5 电芯均衡电路

在多个超级电容器串联电容组的电子门锁设计中，建议使用电芯均衡电路在超级电容器之间平均分配总电容组电压。电芯均衡对于串联的超级电容器至关重要，因为超级电容器之间即使是电容、漏电流或内部电阻的微小变化也会导致电压分布不均。如果不均衡，某些超级电容器可能会在充电期间驱动至高于额定电压，从而导致老化加速、容量降低甚至严重故障。均衡功能可确保每个超级电容器在安全电压限制内运行，从而提高可靠性、延长使用寿命并保持一致的性能。这种预防措施在汽车应用中尤为重要，因为在这些应用中故障或维护成本非常高。

对于使用多达七个超级电容器串联的设计，[BQ76907-Q1](#) 提供了一个高度集成的高精度设计，用于对串联电容组中的各个电容器进行监控、保护和平衡。如果需要符合安全等级要求的器件，[BQ78709-Q1](#) 是 ASIL-B 等级的类似器件。

3.5 位置传感器

在整个锁闭和锁定系统中都需要传感器，以验证在收到命令时是否发生了预期的启动，或提醒驾驶员存在故障。霍尔效应传感器通常与磁体结合使用来检测电机旋转和机构位置。这些传感器不仅可以验证该机构是否按预期运行，还可以指示该机构何时达到限值，从而发出电机驱动电路可以关断并与其他电机节省能源的信号。

德州仪器 (TI) 拥有品类丰富的霍尔效应传感器，是这些应用的理想选择，请参阅[霍尔效应门锁和开关 | TI.com](#)。

4 未来趋势和创新

电子门锁技术有望持续创新。未来的发展可能包括适应 48V 电气标准、与 ADAS 系统更紧密集成，以及与自动驾驶技术进行交互以提升安全性和功能性。智能门锁系统在与远程访问应用和高级安全功能交互方面也取得了进步。

5 结语

电子门锁代表着汽车车门技术的显著进步，在安全性、便利性、防盗性和设计灵活性方面均带来了优势。德州仪器 (TI) 拥有丰富的集成电路产品系列，专为电子门锁和 CPM 设计而设计。

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，<https://www.ti.com/solution/e-latch>，电子门锁设计资源页面。
2. 德州仪器 (TI)，[WEBENCH-CIRCUIT-DESIGNER 设计工具 | TI.com](#)，Webench 电路设计人员。
3. 德州仪器 (TI)，<https://www.ti.com/tool/POWERSTAGE-DESIGNER>，功率级设计人员。
4. 德州仪器 (TI)，[汽车车门碰撞电源模块 \(CPM\) 设计指南](#)，应用手册。
5. 德州仪器 (TI)，[采用带降压/升压转换器的 5S 超级电容器设计的电子门锁](#)，应用手册。
6. 德州仪器 (TI)，[满足汽车应用中 12V 辅助电池与超级电容器电池的电源需求](#)，应用简报。
7. 德州仪器 (TI)，[用于断电保护应用的超级电容器备用电源](#)，应用手册。
8. 德州仪器 (TI)，[使用 LM51772 的电池或电容器备用操作](#)，应用手册。
9. 德州仪器 (TI)，[使用 BQ25756 为 LiFePO₄ 电池和超级电容器充电](#)，应用手册。
10. 德州仪器 (TI)，[如何快速安全地为超级电容器充电](#)，应用手册。
11. 德州仪器 (TI)，[为汽车应用设计稳健的备用电源系统](#)，应用简报。
12. 德州仪器 (TI)，[使用 BQ7690x 电池监控器实现电芯均衡](#)，应用手册。
13. 中国国家标准，[“汽车侧面碰撞的乘员保护”](#)。
14. 中国国家标准，[汽车追尾时的安全要求](#)。
15. AVX Corporation，[超级电容器的可靠性：第 1 部分 85°C 时的独特性能与自平衡](#)，白皮书。
16. AVX Corporation，[超级电容器的可靠性：第 2 部分长期可靠性测试数据](#)，白皮书。
17. Würth Elektronik，[超级电容器 - 设计过程指南](#)，应用手册。

18. “基于电压、温度和 RMS 电流的超级电容器老化和寿命估算研究”，P. Kreczanik、P. Venet、A. Hijazi and G. Clerc，IEEE 工业电子学汇刊，第 61 卷，第 9 期，第 4895 至 4902 页，2014 年 9 月

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