

Application Note

采用带降压/升压转换器的 5S 超级电容器设计的电子门锁



Colin Chen, Mulin Yuan, Miya Zhang, Andrew Xiong, Lei Zhong

摘要

本应用手册介绍了使用五个串联超级电容器 (5S) 的电子门锁 (E-latch) 紧急备用电源系统。本手册还详细介绍了对超级电容器进行恒流/恒压 (CC/CV) 充电的降压/升压转换器的设计和注意事项。此设计通过确保在发生碰撞或主电池故障时车门仍可解锁，为汽车应用提供了至关重要的安全冗余。

内容

1 电子门锁系统简介.....	2
1.1 超级电容器特性.....	2
1.2 电子门锁系统的典型方框图.....	2
2 通过基于 CC/CV 控制的降压/升压转换器为超级电容器充电.....	3
2.1 CC/CV 调节器进行超级电容器充电的优势.....	3
2.2 具有 CC/CV 功能的降压/升压双环路.....	4
2.3 输出电流监测.....	5
3 设计过程.....	7
3.1 TPS5528x 系列器件选择.....	7
3.2 充电电压和充电电流设置.....	8
4 实验结果.....	9
5 总结.....	10
6 参考资料.....	10

插图清单

图 1-1. 电子门锁系统的典型方框图.....	2
图 2-1. 传统电压源的方框图和充电曲线.....	3
图 2-2. CC/CV 调节器的方框图和充电曲线.....	4
图 2-3. TPS5528X 的内部电压控制环路.....	4
图 2-4. TPS5528X 的内部电流控制环路.....	5
图 2-5. TPS5528x 的 CC-CV 性能特性.....	5
图 2-6. TPS5528X 输出电流监测电路.....	5
图 3-1. TPS5528X 超级电容器充电的典型应用电路.....	7
图 4-1. TPS552892 : $V_{in} = 9V$, $V_{charge} = 12V$, $I_{charge} = 2.5A$, 超级电容 = 5.4F.....	9
图 4-2. TPS552892 : $V_{in} = 9V$, $V_{charge} = 12V$, $I_{charge} = 5A$, 超级电容 = 5.4F.....	9
图 4-3. TPS55289 : $V_{in} = 9V$, $V_{charge} = 12V$, $I_{charge} = 5A$, 超级电容 = 5.4F.....	10

表格清单

表 3-1. TPS5528X 的平均电感器电流.....	7
-------------------------------	---

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 电子门锁系统简介

电子门锁系统是一个关键的汽车安全组件，旨在应对车辆主电池失效的紧急情况。现代车辆，尤其是那些带有隐藏式车门把手和电子门锁机构的车辆，需要可靠的备用电源来确保乘客在紧急情况下能够逃生。

1.1 超级电容器特性

作为备用电源，超级电容器（也称为双电层电容器或 EDLC）相比传统电池具有显著优势，因此成为电子门锁备用电源采用的主流设计。

- 更高的功率密度 (W/L)：与电池相比数值为 10^2 至 10^4 级
- 更长的生命周期：50 万至 100 万次循环 (电池为 30 万至 1 万次)
- 更宽的工作温度范围：-40°C 至 +85°C (电池为 -20°C 至 +60°C)
- 更快的充电/放电能力
- 简单的 CC/CV 充电，无任何特殊要求

1.2 电子门锁系统的典型方框图

图 1-1 是具有超级电容器系统的电子门锁系统的典型图。典型的 12V 汽车电池为电机供电并为超级电容器充电。当发生碰撞等紧急情况时，超级电容器会通过功率二极管向电机放电。

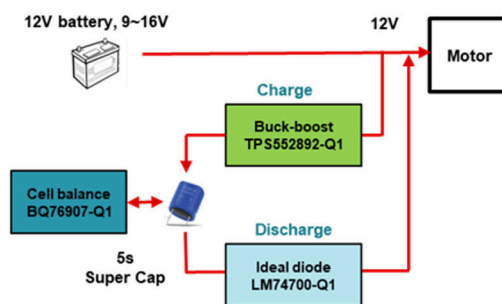


图 1-1. 电子门锁系统的典型方框图

随着电动汽车对电机集中供电需求的增加，对超级电容器能量容量的要求也随之提高。采用 5S 超级电容器以获得更宽的工作电压和更大的能量已成为主流趋势。由于单个超级电容器的典型电压为 2.5V 至 3V，因此 5S 超级电容器的总充电电压可高达 12V。具有 CC/CV 充电功能的降压/升压转换器是此应用的首选。

2 通过基于 CC/CV 控制的降压/升压转换器为超级电容器充电

2.1 CC/CV 调节器进行超级电容器充电的优势

使用传统电压源为超级电容器充电时，初期可能会导致较大的浪涌电流。然后，充电电流会随着充电电压的增加而减小，从而导致充电时间较长，如图 2-1 所示。

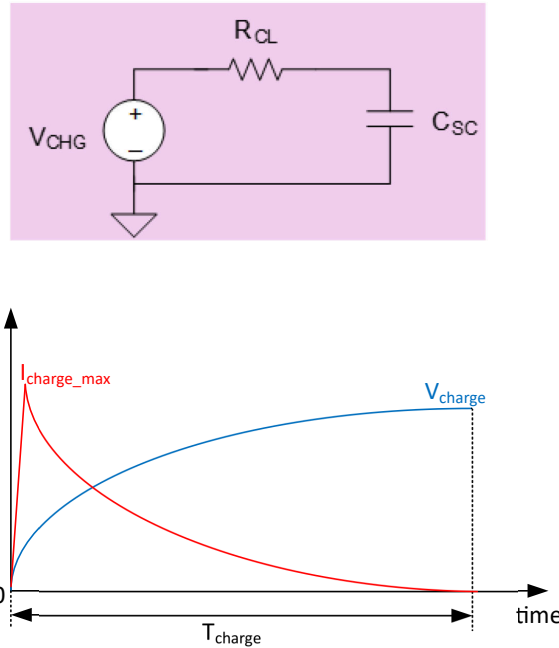


图 2-1. 传统电压源的方框图和充电曲线

为限制浪涌电流，会使用限流电阻器 R_{CL} 来缓解浪涌电流，该浪涌电流如图所示。可通过方程式 1 计算最大充电电流：

$$I_{\text{chargemax}} = \frac{V_{\text{CHG}}}{R_{\text{CL}}} \quad (1)$$

可通过方程式 2 计算充电时间：

$$T_{\text{CHG_PASSIVE}} = 4.6 \times C_{\text{SC}} \times \frac{V_{\text{CHG}}}{I_{\text{chargemax}}} \quad (2)$$

此计算基于达到最终电压 99% 的充电时间近似值。使用 CC/CV 调节器可以解决使用典型电压源为超级电容器充电的问题。图 2-2 显示了 CC/CV 调节器的方框图和充电曲线。超级电容器会经历恒定的充电电流，然后在达到设定的充电电压后保持恒定电压。

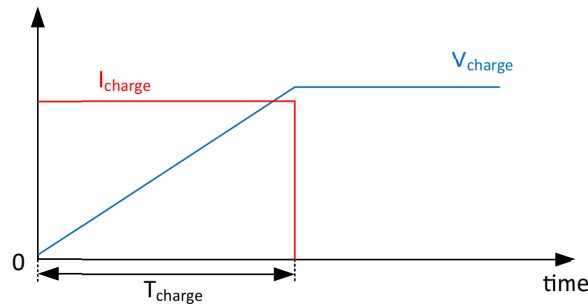
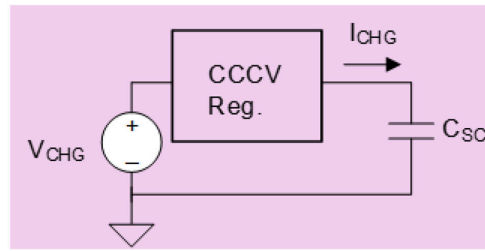


图 2-2. CC/CV 调节器的方框图和充电曲线

可通过方程式 3 计算充电时间：

$$T_{\text{CHG_CCCV}} = C_{\text{SC}} \times \frac{V_{\text{CHG}}}{I_{\text{charge}}} \quad (3)$$

公式对比表明，使用 CC/CV 电路可使充电时间比使用恒定电压源快 4.6 倍。充电时间更短意味着在发生事故时，超级电容器可以更快地为电机提供能量，从而提高安全性。

2.2 具有 CC/CV 功能的降压/升压双环路

TPS5528x-Q1 是一款汽车级四开关降压/升压转换器，具有独立 CC/CV (恒流/恒压) 双环路控制，可实现精确的输出电压和电流调节。这种先进的控制架构使其更适合汽车电子门锁系统中的超级电容器充电应用。

图 2-3 展示了 TPS5528X 的内部电压控制环路。在正常工作期间，输出电流由输出路径中的电阻器 R_{sense} 检测。当检测电阻器上的电压低于内部电流限制基准电压时，电流环路误差放大器 EA2 的输出为零，从而有效地禁用电流调节环路。在这种情况下，只有电压控制环路保持激活状态。电压环路误差放大器 EA1 将输出反馈电压 (V_{FB}) 与内部基准电压 (V_{ref}) 进行比较，以生成补偿电压 (COMP)，进而调制转换器的占空比，以保持稳定和精确的输出电压调节。

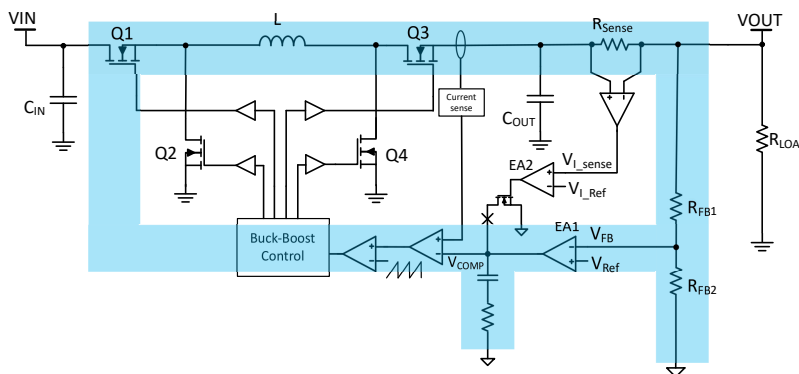


图 2-3. TPS5528X 的内部电压控制环路

图 2-4 展示了 TPS5528X 的内部电流控制环路。当电流检测电阻上采样的电压 (V_{sense}) 超过内部电流限制基准电压 (V_{Iref}) 时，电流环路误差放大器 EA2 开始工作，吸收补偿网络电流。这会导致 COMP 电压下降，输出电

压随之降低，从而导致电压环路误差放大器 EA1 逐渐饱和。因此，电压调节环路被有效禁用。此时，电流控制环路会接管并确定补偿电压 (COMP)，进而调制占空比以保持稳定精确的输出电流调节。

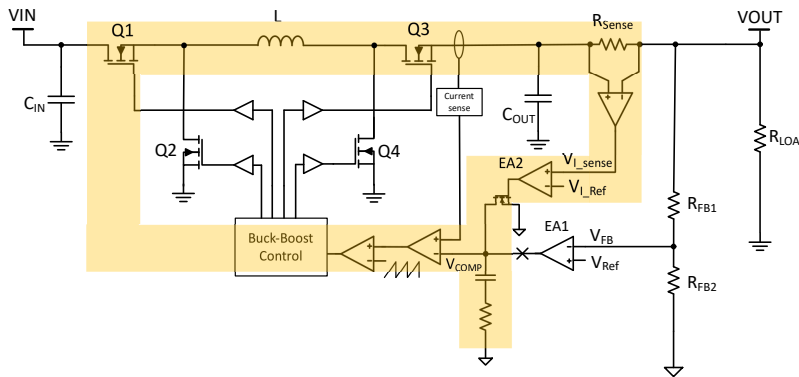


图 2-4. TPS5528X 的内部电流控制环路

图 2-5 显示了 TPS5528X 的 CC-CV 性能特性，展示了输出电压和输出电流之间独特的 *砖墙型* 曲线。该特性曲线表明，输出电压和电流调节环路独立运行，互不干扰，同时可在 CC 和 CV 运行模式之间实现无缝转换。

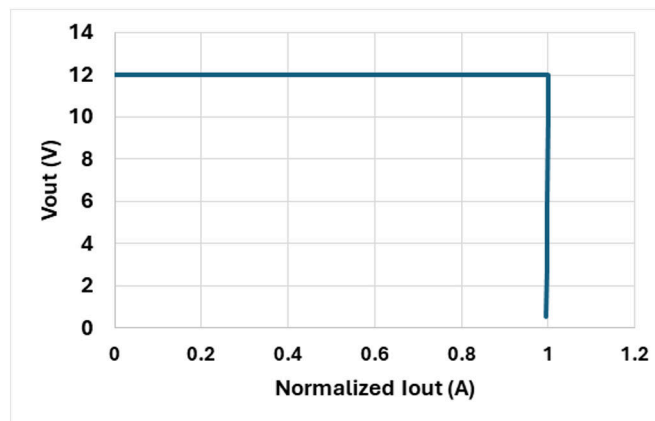


图 2-5. TPS5528x 的 CC-CV 性能特性

2.3 输出电流监测

TPS5528x 在 CDC 引脚处输出的电压与 ISP 和 ISN 引脚之间检测到的输出电流检测电阻成正比，如图 2-6 所示。这使 MCU 能够通过 CDC 输出电压进行采样来实时监测输出电流，从而确保为超级电容器安全充电。

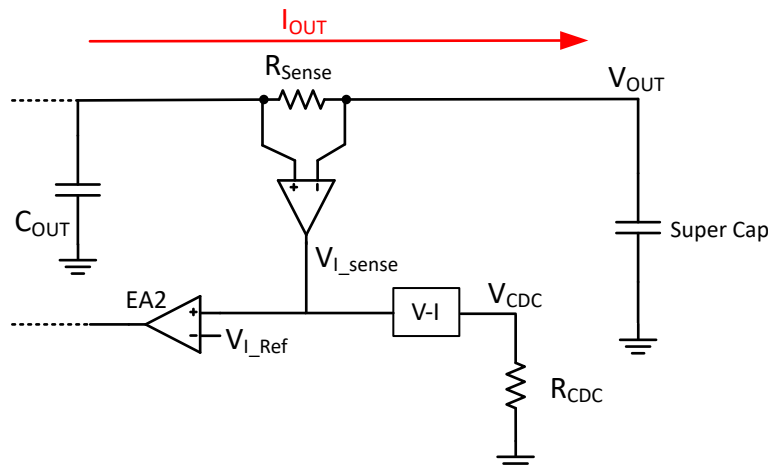


图 2-6. TPS5528X 输出电流监测电路

方程式 4 显示了与检测到的输出电流、CDC 引脚处的电阻以及输出电压反馈电阻分压器的上拉电阻相关的输出电压上升值。

$$V_{\text{OUT_CDC}} = 3 \times R_{\text{FB_UP}} \times \left(\frac{V_{\text{ISP}} - V_{\text{ISN}}}{R_{\text{CDC}}} \right) \quad (4)$$

3 设计过程

本章介绍如何根据客户电路的超级电容器电容、设定输出电压和所需充电时间来计算和选择相应的降压/升压转换器型号，以及如何设置充电电压和充电电流。

基于 TPS5528X 的超级电容器充电的典型应用电路如图 3-1 所示。

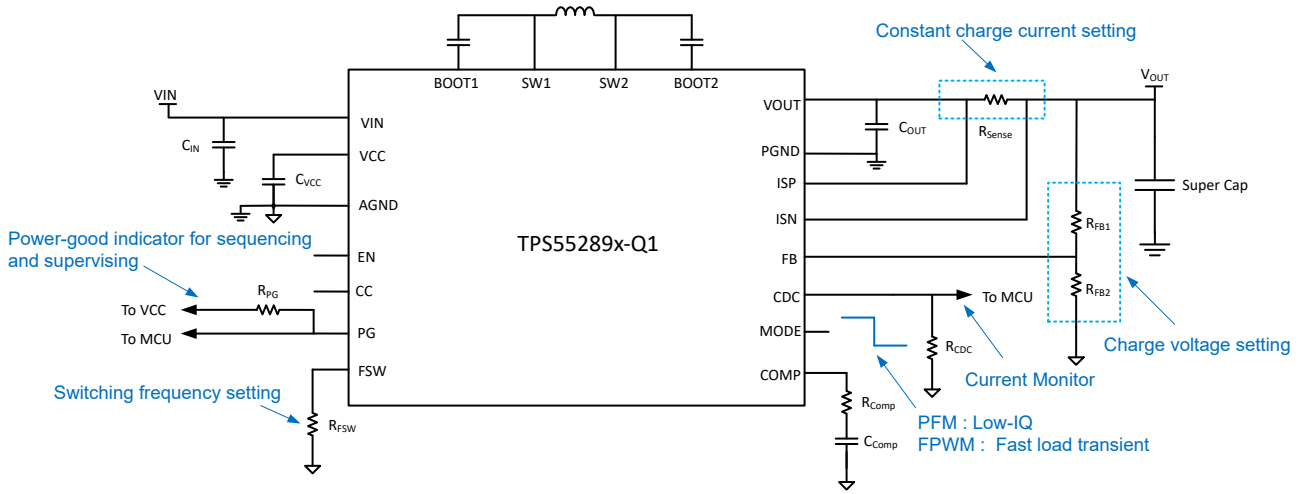


图 3-1. TPS5528X 超级电容器充电的典型应用电路

3.1 TPS5528x 系列器件选择

3.1.1 电流功能

TPS5528x 提供平均电感器电流保护功能，要求平均电感器电流不超过电流限值。

表 3-1 显示了器件型号 TPS55287/288/289 的电感器电流差异。

表 3-1. TPS5528X 的平均电感器电流

器件型号	平均电感器电流限值
TPS55287x	4A
TPS55289x	8A
TPS55288x	16A

3.1.2 I2C 版本和非 I2C 版本

超级电容器的充电电流等于降压/升压转换器的输出电流。TPS5528x-Q1 系列使用输出电流限制功能来设置充电电流。

TPS5528x-Q1 系列有 I2C 版本和非 I2C 版本。对于非 I2C 版本，VISP-VISN 电压固定为 50mV。对于 I2C 版本，VISP-VISN 限值可在 0mV 至 63.5mV 之间调节。

使用非 I2C 版本时，客户必须根据可用的电流检测电阻值设置输出电流限值。使用 I2C 版本时，该限值可通过配置 ISP-ISN 电压限值无缝调节。

3.1.3 器件选型

为计算所需的充电电流并选择合适的 IC，客户需要提供以下参数：超级电容器电容 (C)、目标充电电压 (U)、所需充电时间 (T) 和最小输入电压 (VIN_{min})、估算效率 (eff)。充电电流可使用方程式 5 确定：

$$I_{charge} = \frac{C \times U}{T} \quad (5)$$

则最大平均电感器电流 I_{Lmax} 应为方程式 6：

$$I_{Lmax} = \frac{U \times I_{charge}}{V_{INmin} \times eff} \quad (6)$$

通过比较 I_{Lmax} 与表格，选择相应的降压/升压转换器型号。以下为示例：

最小输入电压 (V_{INmin}) : 9V

目标充电电压 (U) : 12.5V

超级电容器 (C) : 5.4F

- 充电时间 (T) = 10s

$$I_{charge} = \frac{5.4 \times 12.5}{10} = 6.75A \quad (7)$$

$$I_{Lmax} = \frac{12.5 \times 6.75}{9 \times 0.9} = 10.42A \quad (8)$$

选择 TPS55288x-Q1。

- 充电时间 (T) = 15s

$$I_{charge} = \frac{5.4 \times 12.5}{15} = 4.5A \quad (9)$$

$$I_{Lmax} = \frac{12.5 \times 4.5}{9 \times 0.9} = 6.9A \quad (10)$$

选择 TPS55289x-Q1。

- 充电时间 (T) = 60s

$$I_{charge} = \frac{5.4 \times 12.5}{60} = 1.125A \quad (11)$$

$$I_{Lmax} = \frac{12.5 \times 1.125}{9 \times 0.9} = 1.73A \quad (12)$$

选择 TPS55287x-Q1。

3.2 充电电压和充电电流设置

已知目标充电电压 (U) 后，使用 [方程式 13](#) 设置 IC 输出电压：

$$U = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_{FB1}}{R_{FB2}} \right) \quad (13)$$

通过前面的公式得出充电电流后，根据 [方程式 14](#) 计算检测电阻值：

$$R_{sense} = \frac{V_{ISP_ISN}}{I_{charge}} \quad (14)$$

对于非 I2C 版本， $V_{ISP_ISN} = 50mV$ 。对于 I2C 版本，可在 0mV 至 63.5mV 之间进行调节。

4 实验结果

本章介绍 TPS55289(2)-Q1 在超级电容器应用中的充电波形。此外，本章还重点介绍了进入断续模式的非 I2C 版本与禁用断续模式的 I2C 版本之间的运行差异。

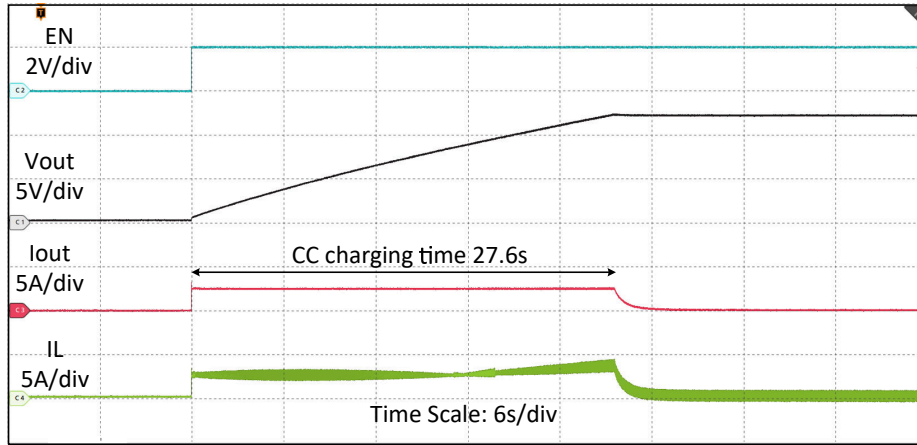


图 4-1. TPS552892 : $V_{in} = 9V$, $V_{charge} = 12V$, $I_{charge} = 2.5A$, 超级电容 = 5.4F

图 4-1 展示了 TPS552892-Q1 在配置为 2.5A 输出电流时的超级电容器充电波形。由于电流限制设置为较低值，因此该器件可避免在充电初始阶段进入断续模式。

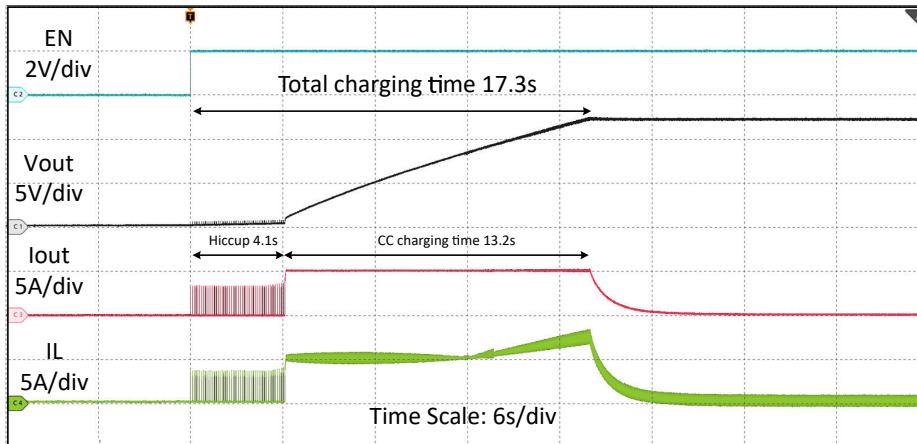


图 4-2. TPS552892 : $V_{in} = 9V$, $V_{charge} = 12V$, $I_{charge} = 5A$, 超级电容 = 5.4F

输出电流设置为 5A 时，在初始充电阶段即会触发断续模式，如图 4-2 所示。一旦电容器电压充电至 0.8V 以上，TPS552892-Q1 就会退出断续模式，并继续进行 CCCV 充电。

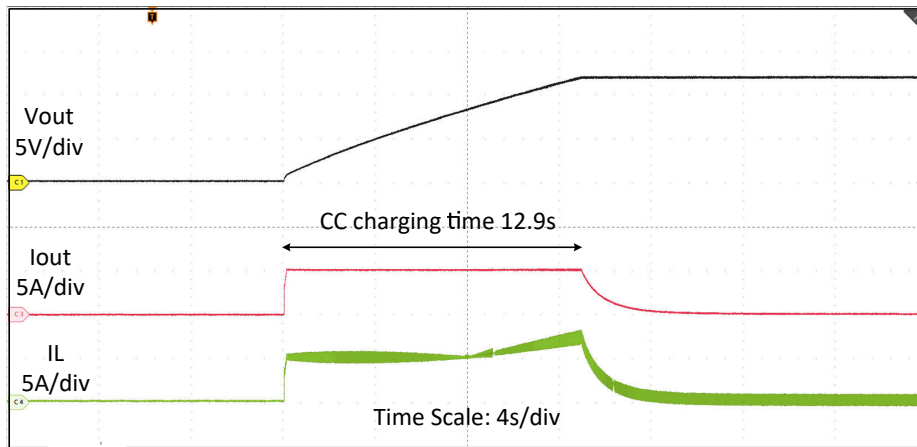


图 4-3. TPS55289 : $V_{in} = 9V$, $V_{charge} = 12V$, $I_{charge} = 5A$, 超级电容 = 5.4F

通过 I2C 接口停用断续模式后，一旦使能该器件，TPS55289-Q1 就会立即开始 5A 恒流充电，如图 4-3 所示。

5 总结

带 5S 超级电容器的电子门锁设计为汽车门锁机构提供了一个稳健可靠的紧急备用电源系统。通过将先进的降压/升压转换器技术与 CC/CV 控制集成，可实现超级电容器的高效充电，同时保持系统简单性和成本效益。

此设计的主要优势包括：

- 符合汽车安全标准
- 具备快速紧急响应能力
- 使用寿命长且极少需要维护
- 提供可扩展架构，适用于各种车辆配置

6 参考资料

1. 德州仪器 (TI) , [碰撞电源模块全球市场趋势和电源管理设计分析](#) , 技术白皮书。
2. 德州仪器 (TI) , [TPS552892-Q1 汽车级、36V、8A 完全集成式降压/升压转换器](#) , 数据表。
3. 德州仪器 (TI) , [TPS552892EVM-111 EVM 用户指南](#) , 用户指南

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