

Application Note

使用 F29x 实现直流/直流转换器的功能安全目标



Shawn Li, Sifan You, Hely Zhang

摘要

机电制动 (EMB) 系统代表了线控制动技术的终极设计。每个制动节点上的电子元件均可满足 ASIL-D 安全完整性等级要求。对于电源器件，传统设计是使用外部电压监测器，以直接使用 ASIL-D 级电源管理 IC (PMIC) 或降压转换器。然而，此类器件在市场上的供应有限，并且成本高昂。

本文提出了一种系统级功能安全设计：采用 TI F29x MCU 作为监测装置，利用比较器子系统 (CMPSS) 对 ASIL-C 级 LM686x5-Q1 的输出电压进行实时监测。在检测到欠压或过压故障时，MCU 会主动发出关断信号以快速切断故障，从而帮助整个电源系统实现 ASIL-D 合规性。

内容

1 简介.....	2
2 硬件设计.....	3
3 软件设计	6
4 测试结果.....	7
5 总结.....	10
6 关于作者.....	11
7 参考资料.....	12

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

在 EMB 系统中，电源的可靠性对于系统安全至关重要，会直接影响车辆和驾驶员的安全。ISO 26262 标准将汽车安全完整性等级分为从 ASIL-A 到 ASIL-D 四个等级，其中 ASIL-D 为最高等级。LM686x5-Q1 是一款 ASIL-C 级降压转换器，包含过压保护 (OVP)、过流保护 (OCP) 和热关断 (TSD) 等多项内置硬件保护功能。但该器件不包括输出欠压保护 (UVP)，因此无法覆盖由同步降压转换器的突增负载浪涌、电源不稳定或低侧开关短路等因素引起的输出压降故障。必须通过外部安全机制来弥补这一差距。

为解决这些安全盲点，F29x 内置的多个 CMPSS 模块提供了理想的外部独立安全监测设计。CMPSS 包含两个独立的模拟比较器：一个高侧比较器 (CMPH) 和一个低侧比较器 (CMPL)。每个比较器均与一个专用的 12 位内部 DAC 配对，构成一个硬件窗口比较器，从而能够连续实时监测 VOUT 的分压信号。一旦 CMPSS 检测到 OV 或 UV 事件，该输出就可以通过输出 X-BAR 直接路由到 GPIO 引脚。无需任何 CPU 干预，即可在几微秒内在 GPIO 上驱动低电平信号，以下拉信号链中其他器件的 EN 或 nSTB 引脚，从而完成主动关断保护。该机制与 LM686x5-Q1 配合使用，构成一个符合 ASIL-D 要求的电源系统。

2 硬件设计

在传统电源系统中，通常会在降压转换器的输出端放置一个额外的电压监测器。如图 2-1 所示，TPS3762-Q1 是一款 65V 输入电压监测器，精度高、检测时间短并具有内置自检功能。此器件可直接连接到 12V/24V 系统，以持续监测过压和欠压情况，并可帮助 LM68645-Q1 实现 ASIL-D 合规性。不过，此设计会增加系统成本和设计复杂性。因此，本文介绍了一种可降低系统成本和简化设计的优化解决方案。

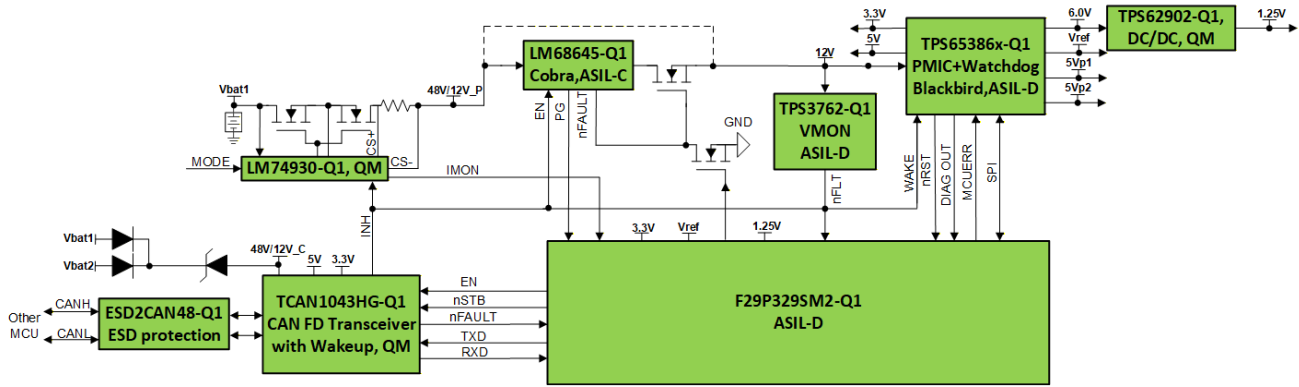


图 2-1. 传统设计方框图

图 2-2 所示为优化的电源系统的方框图。TCAN1043HG-Q1 是一款具有 INH 输出的 CAN FD 收发器，可用于选择性地使能节点上可能存在的各种电源。LM74930-Q1 是一款理想的二极管控制器，可驱动和控制一对外部背对背 NMOS，从而提供反极性保护和反向电流阻断。LM68645-Q1 是本文重点介绍的直流/直流转换器；该转换器具备可控制的 EN 引脚，允许通过外部控制进行关断。F29P32-Q1 是本文重点介绍的 MCU：其不仅支持最高 ASIL-D 级的 [YS1]，而且集成了能够监测和保护 LM68645-Q1 输出电压的 CMPSS 比较器。

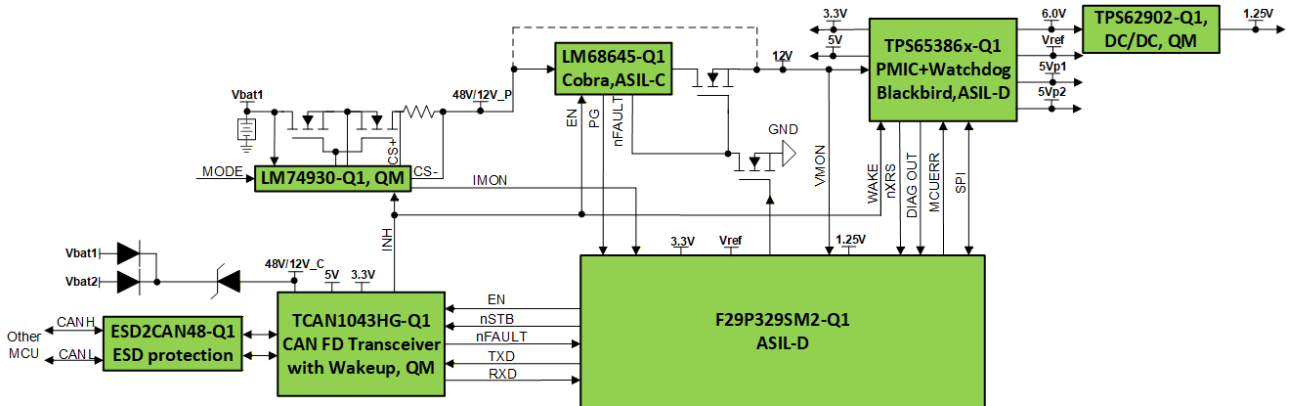


图 2-2. 优化的设计方框图

图 2-3 展示了 TCAN1043HG-Q1 的原理图。TCAN1043xx-Q1 满足 ISO 11898-2 (2016) 高速控制器局域网 (CAN) 规范的物理层要求，提供 CAN 总线和 CAN 协议控制器之间的接口。这些器件支持经典 CAN 和 CAN FD 协议，数据速率高达 2Mbps。EN_CAN 是 MCU 用于控制收发器 EN 引脚的信号。在早期上电阶段，MCU 完成初始化之前，EN_CAN 保持低电平。但是，在 tUV 时间窗口内，INH 引脚默认为高电平输出，该输出使能直流/直流转换器和 PMIC，确保所有电源轨输出正常，以使 MCU 能够正常运行。然后，MCU 使用该 tUV 时间窗口将 EN_CAN 置为高电平，从而将 INH_CAN 保持在高电平。

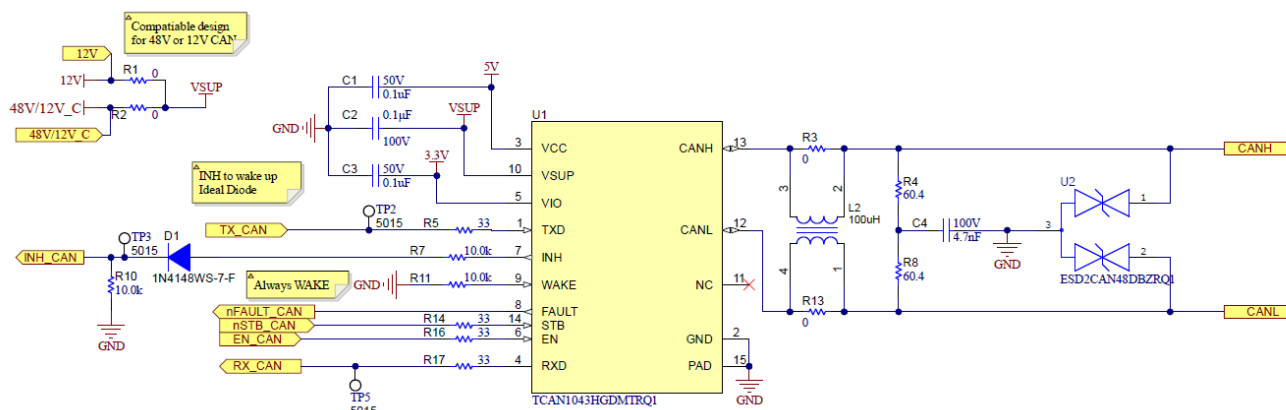


图 2-3. TCAN1043HG-Q1 原理图

图 2-4 展示了 LM74930-Q1 的原理图，该器件控制 Q1 和 Q2 以实现对下游降压转换器输入电压的开关控制，同时还提供过流和过压保护。4V 至 65V 的宽输入电源电压范围使其能够保护和控制由 12V 和 24V 汽车电池供电的 ECU。该器件可以承受低至 -65V 的负电源电压并保护负载免受这些电压的影响。其 EN 引脚由 INH_CAN 控制；将其拉至 V(ENF) 以下会关断驱动输出。

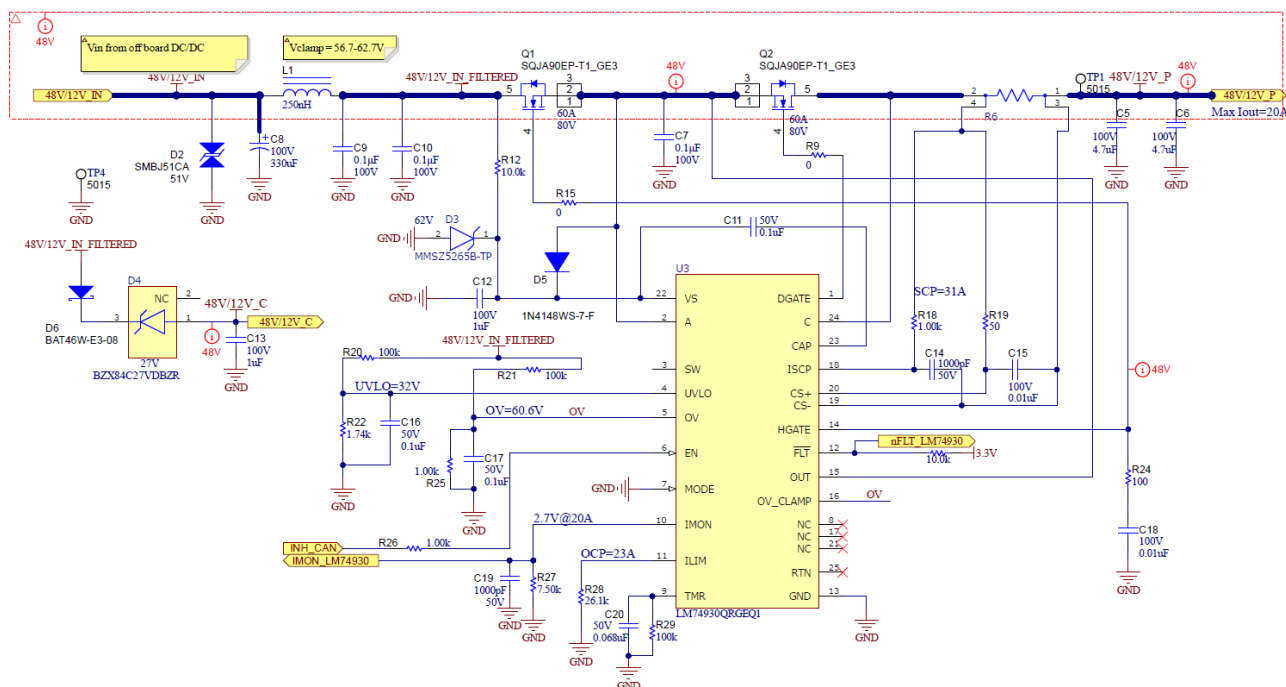


图 2-4. LM74930-Q1 原理图

图 2-5 展示了 LM68645-Q1 的原理图。在此系统中，该转换器用于将 48V 降至 12V。其 EN 引脚同样由 INH_CAN 控制。此外，还添加了 Q3，以便当芯片检测到故障时，nFAULT 引脚立即输出低电平信号，从而关闭 Q3 以保护下游元件。同时，输出电压由电阻器 R42 和 R43 分压以产生 V_{MON}，该电压馈送到 MCU 的 CMPSS 模块进行监测和诊断。如果 CMPSS 模块检测到过压或欠压故障，它会立即将 nSTB 拉至低电平，从而使

图 2-6 展示了 F29P329SM2-Q1 的 AIO (模拟输入/输出) 引脚分配图。请注意, VMON 必须同时分配给 CMPSS 模块的高侧正输入 (HP) 和低侧正输入 (LP), 才能同时监测 12V 电源轨的过压和欠压。在此设计中, 选择引脚 34 作为 VMON 的输入端, 并分配为 CMP4 HP3 和 CMP4 LP3。

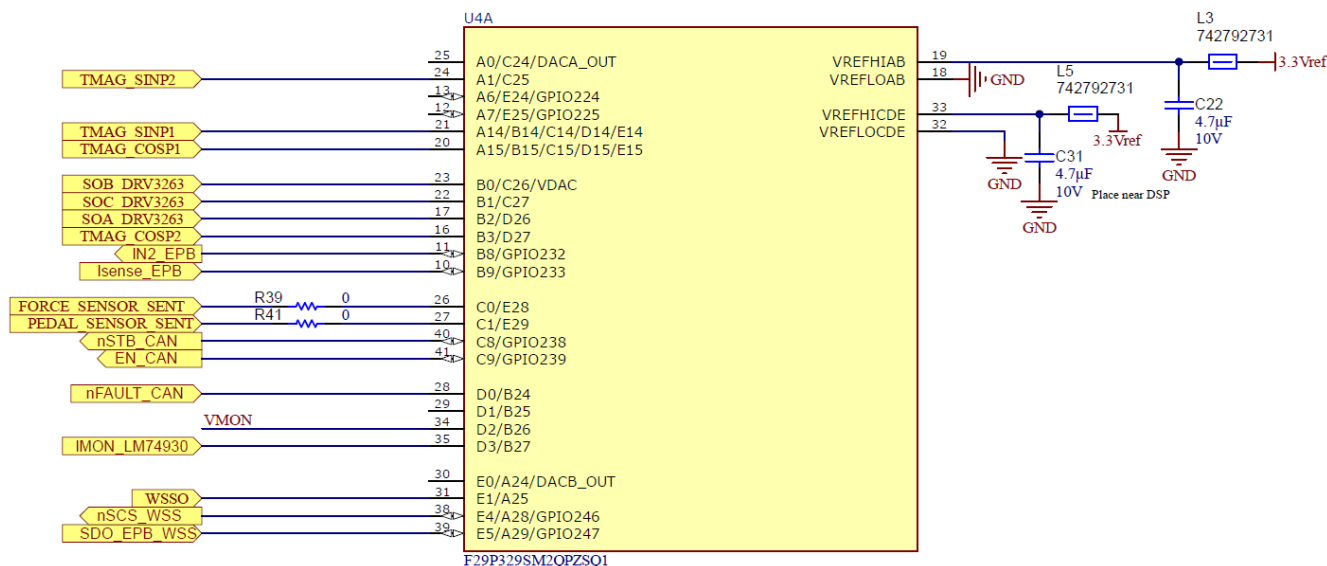


图 2-6. F29P329SM2-Q1 AIO 引脚分配图

3 软件设计

图 3-1 显示了 F29x 内部 CMPSS 模块的功能方框图。每个模块均配备两个独立可编程的基准 12 位 DAC，它们可以分别在 HN 和 LN 上生成数字输出，用作过压阈值和欠压阈值。每个比较器输出都会通过一个可编程的数字滤波器，该滤波器可以去除伪跳变信号。CTRIPOUTx (x=“H”或“L”) 信号连接到输出 X-BAR，用于外部命令，如图 3-2 所示。在此设计中，CTRIPOUTH 和 CTRIPOUTL 均布线至引脚 40，该引脚被分配为 OUTPUTXBAR6。引脚 40 最终输出 nSTB_CAN 信号。

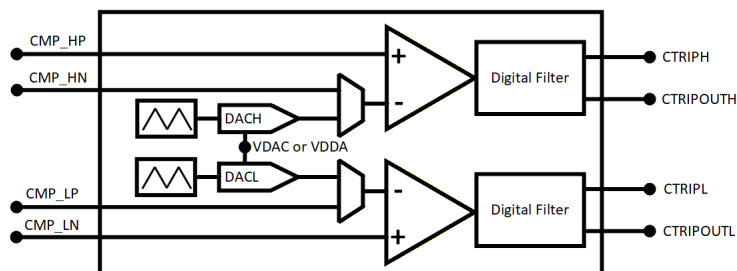


图 3-1. CMPSS 模块功能方框图

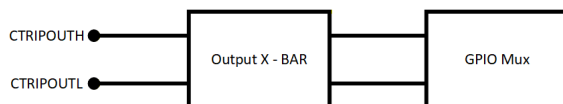


图 3-2. CMPSS 模块连接

在此设计中，降压转换器的额定输出电压为 12V。过压和欠压阈值均设置为与额定电压 $\pm 10\%$ 的偏差，分别对应 13.2V 和 10.8V。根据图 5 中所示的分压器采样网络，计算得出的对应 12 位 DAC 值为 1489 和 1218。为验证 CMPSS 模块是否能够正确检测欠压和过压事件，可使用以下代码，将 nSTB_CAN 拉至低电平，从而使 TCAN1043HG-Q1 将 INH 拉至低电平并禁用下游器件。

```
(1)
vTimer0[0]++;
if (vTimer0[0]==10000)
CMPSS_setDACValueHigh(CMPSS4_12V_BASE,1489U);

CMPSS_setDACValueLow(CMPSS4_12V_BASE,1400U);
vTimer0[0]=0;
(2)
vTimer0[0]++;
if (vTimer0[0]==10000)
CMPSS_setDACValueHigh(CMPSS4_12V_BASE,1300U);
CMPSS_setDACValueLow(CMPSS4_12V_BASE,1218U);
vTimer0[0]=0;
}
```

在此设计中，降压转换器的输出电压保持恒定的 12V。代码段 (1) 的功能是：在计时器累加到 10000 后将 LN 值从其初始设置的 1218 更改为 1400。这会将相应的电压阈值从 10.8V 更改为 12.4V，从而模拟输出欠压条件。代码段 (2) 的功能是：在计时器累加到 10000 后将 HN 值从初始设置的 1489 更改为 1300。这会将相应的电压阈值从 13.2V 更改为 11.5V，从而模拟输出过压条件。

4 测试结果

本文设计了 LM68645-Q1 的两项功能安全要求 (FSR)：

- FSR1：LM68645-Q1 应避免输出电压超出 10% 的最大相对误差。
- FSR2：LM68645-Q1 应避免输出电压超出 -10% 的最大相对误差。

这两项 FSR 的安全状态均为关断 12V 输出，FTTI 为 5ms。

本文介绍了针对 12V 欠压和过压事件的实验验证。测试条件如下：额定输入电压为 48V，额定输出电压为 12V，额定输出电流为 0.5A。图 4-1、图 4-2 和图 4-3 显示了 12V 欠压事件后测得的波形：nSTB_CAN，INH 和 12V 按顺序关断。F29x CMPSS 模块的最大输出延迟为 60ns，nSTB_CAN 和 INH 的总低电平时间为 52.9μs。由于 12V 电压轨具有 188μF 电解电容器，故 12V 关断时间较慢（为 1.77ms），因此从发生欠压事件到完成 12V 关断的总时间为 1.82ms。

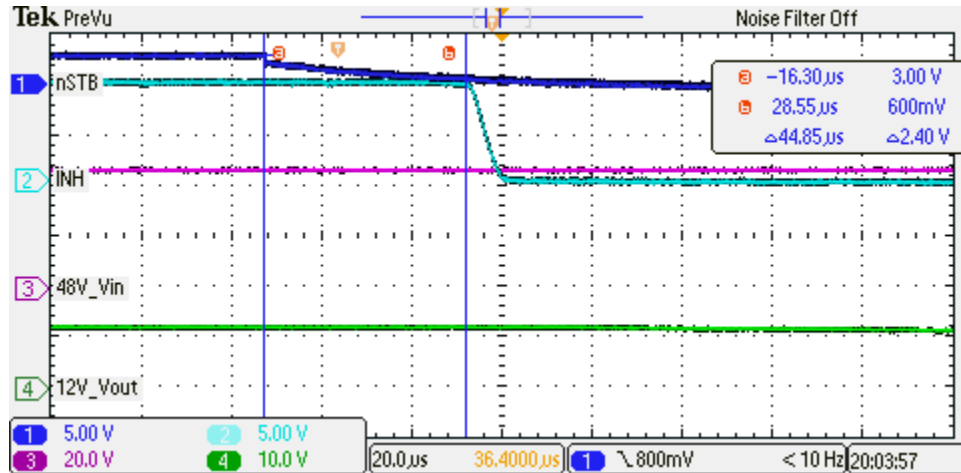


图 4-1. nSTB 触发 INH 实现 UV 保护的时间

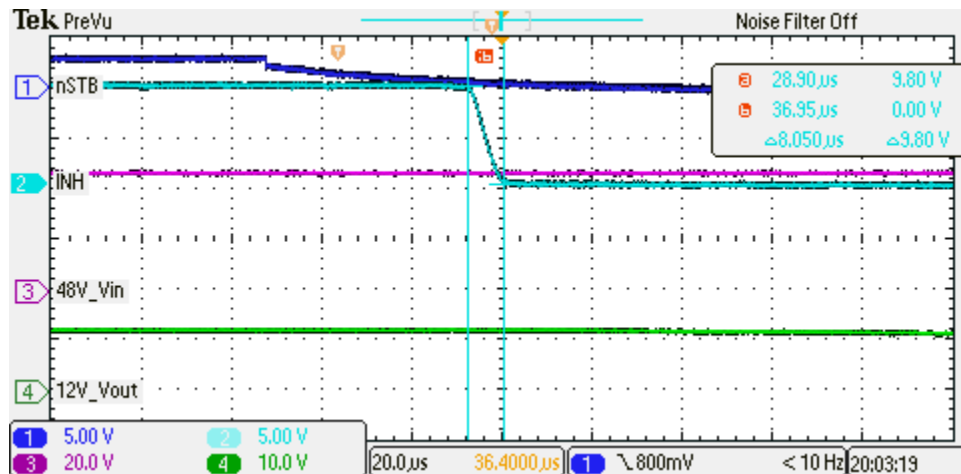


图 4-2. INH 实现 UV 保护的下降时间

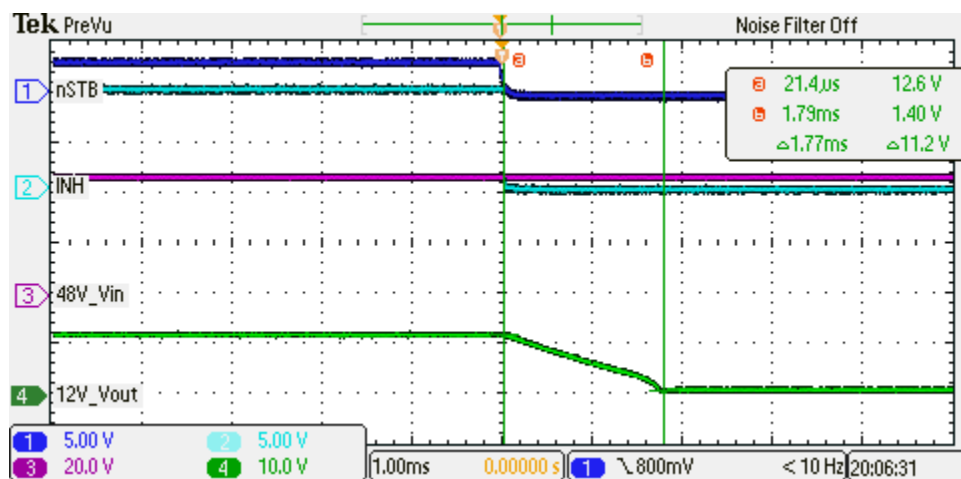


图 4-3. 12V 实现 UV 保护的下降时间

图 4-4、图 4-5 和图 4-6 显示了 12V 过压事件后的波形；信号时序与欠压事件完全相同，整个过程持续 1.98ms。结果表明，设计中的安全机已得到验证，系统在目标 FTTI 内达到了预期的安全状态。

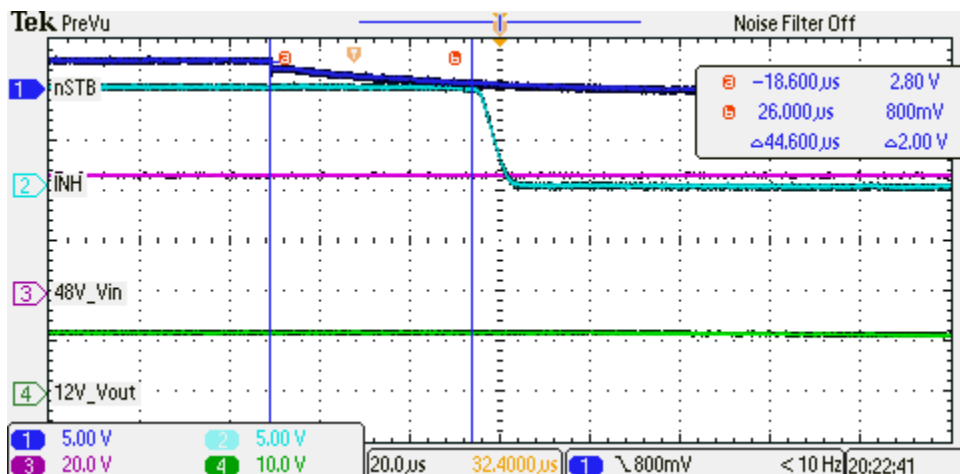


图 4-4. nSTB 触发 INH 实现 OV 保护的时间

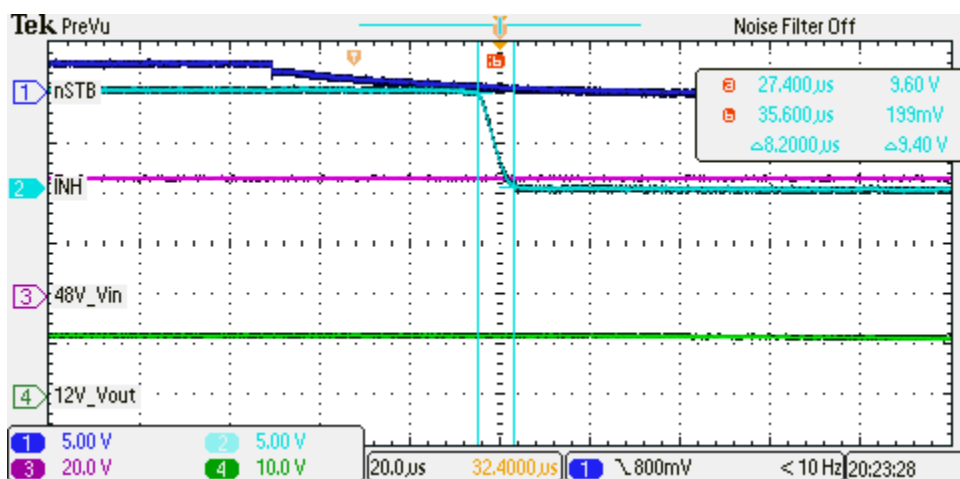


图 4-5. INH 实现 OV 保护的下降时间

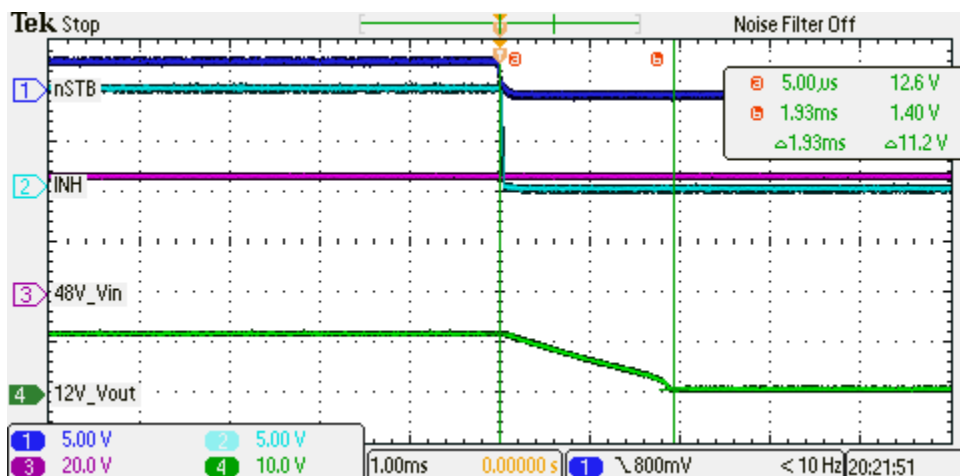


图 4-6. 12V 实现 OV 保护的下降时间

5 总结

机电制动 (EMB) 系统是一种新型制动技术，它使用电机直接驱动制动执行器，取代了传统的液压制动。该系统具有响应快、制动精度高以及易于与自动驾驶控制系统集成等优势，使其成为下一代智能车辆底盘技术的重要开发方向。由于 EMB 与车辆驾驶安全直接相关，因此对系统硬件架构、故障检测和响应能力提出了极其严格的要求。为此，本文提出了一种面向 EMB 应用的系统级功能安全设计。通过利用 F29x 的 CMPSS 模块，我们设计了针对直流/直流转换器的故障诊断和安全响应机制，用于满足 ASIL-D 等级下的所有安全指标要求，同时降低系统成本并简化设计复杂性。

6 关于作者

SHAWN LI 是德州仪器 (TI) 中国汽车一级供应商团队的现场应用工程师，专攻汽车底盘、车身和照明应用领域。他于 2022 年和 2025 年分别在华南理工大学获得了电力电子与电力传动专业的学士学位和硕士学位，并于 2025 年加入 TI。

SIFAN YOU 是德州仪器 (TI) 汽车系统功能安全与网络安全团队的系统工程师，专攻 HEV/EV 功能安全应用领域。她于 2019 年和 2022 年分别在北京交通大学获得了信息工程与控制专业的学士学位和硕士学位，并于 2025 年加入 TI。

HELY ZHANG 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责家用电器和汽车底盘参考设计的开发，特别是与电力电子和电机逆变器相关的设计。Hely 于 2002 年获得了安徽理工大学电力电子与电力传动专业的硕士学位。在加入 TI 之前，他曾就职于通用电气和 SolarEdge。

7 参考资料

- ISO , [ISO - ISO 26262 road vehicles functional safety](#) , 网页。
- 德州仪器 (TI) , [F29H85x](#)、[F29P58x](#) 和 [F29P32x](#) 实时微控制器数据表 , 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [F29H85x](#) 和 [F29P58x](#) 实时微控制器技术参考手册 , 技术参考手册。
- 德州仪器 (TI) , [LM686x5-Q1](#) 具有针对功能安全应用优化的低 EMI 开关技术的 65V 2.5A/3.5A/4.5A 汽车级同步降压直流/直流转换器 , 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [TCAN1043xx-Q1](#) 具有 CAN FD 和唤醒功能的汽车级低功耗故障保护 CAN 收发器 , 数据表。
- 德州仪器 (TI) , [LM74930-Q1](#) 具有断路器、过压保护和故障输出功能的汽车级理想二极管浪涌抑制器 , 数据表。

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