Application Note

TBOX 备用电池系统的高度集成化设计与应用设计

Shelly Xie, Shipeng Cheng, Miya Zhang

摘要

TBOX 备用电池系统正逐步从分立式设计向集成化设计转变。TPS6138x-Q1 系列通过架构创新实现了单芯片高度集成，主要包括堆叠式 MOSFET 负载突降保护、集成功率 MOSFET 以及智能模式管理等功能，从而突破了传统分立式方案的设计局限。本应用手册对单片集成架构、工作机制及关键设计难点进行了全面的技术分析，为下一代高度集成化备用电池系统的开发提供详细的技术参考。

内容

1 TBOX 备用电池解决方案简介 2
2 备用电池系统的分立式方案与集成式方案 4
3 TPS6138x-Q1 的应用设计注意事项 6
3.1 TPS6138x-Q1 原理图要点 6
3.2 环路补偿优化设计，避免输出电压过冲过大 6
3.3 TPS6138x-Q1 布局设计要点 8
4 总结 11
5 参考资料 12

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 TBOX 备用电池解决方案简介

TBOX 系统是车联网 (IoV) 的核心组成部分，在外部世界与汽车平台之间发挥着至关重要的桥梁作用。该系统集成了多种外部无线服务，包括 4G/5G 调制解调器、GPS、BLE、WiFi 和 V2X，并负责实现车载信息服务应用处理器与汽车内部网络之间的信息交互（汽车内部网络采用 CAN、以太网和 LIN 等协议）。

从技术演进的角度来看，如图 1-1 所示，TBOX 系统正朝着更高级别的算法数据处理能力、更先进的定位技术以及更完善的网络安全合规性方向发展。从 5G 向 5G-A 的演进，使 TBOX 系统能够支持海量数据传输，满足高精度融合定位的需求，同时进一步强化端到端加密能力，并满足相关法规和合规性要求。与此同时，技术迭代也在推动 TBOX 与座舱平台的融合，通过共享计算资源和硬件资源，提升整个系统的综合性能。

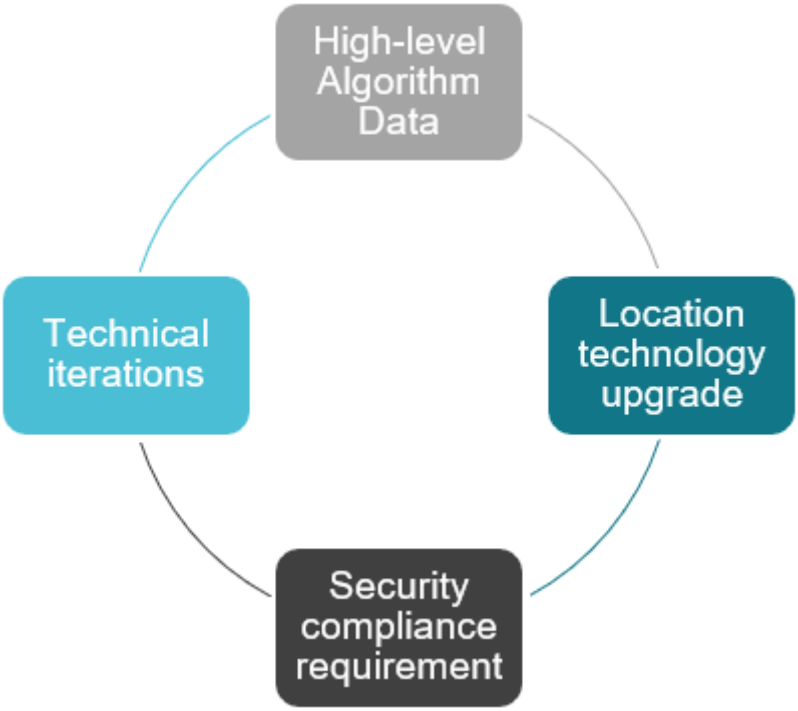

图 1-1. TBOX 发展趋势

图 1-2 展示了新一代智能座舱平台中备用电池系统的架构演进。传统方案主要依赖高度分散的分立器件，而集成化方案能够更好地满足系统需求，同时提高电源效率。

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

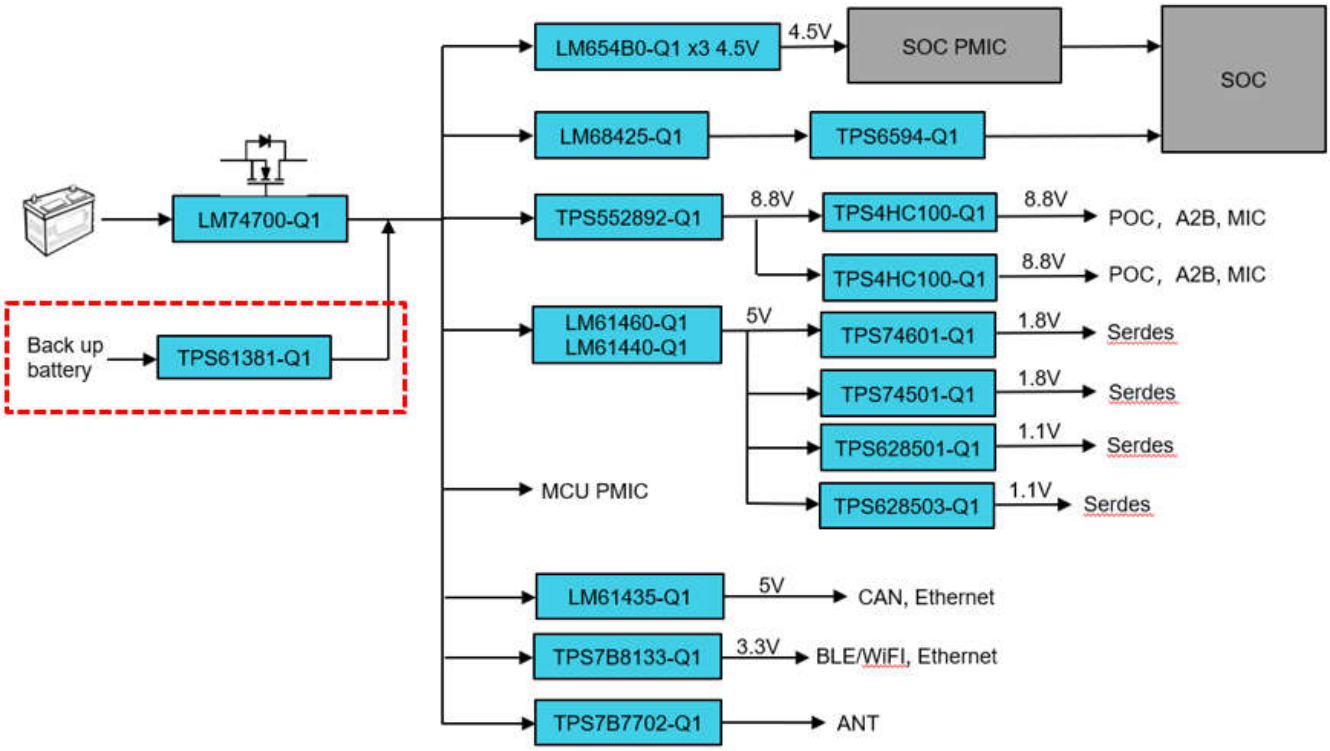

图 1-2. 座舱与 TBOX 的集成

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 备用电池系统的分立式方案与集成式方案

在汽车远程信息处理系统 (T-BOX) 中，当主电源发生故障时，辅助电池必须确保紧急呼叫 (eCall)、空中下载 (OTA) 升级和位置上报等关键功能继续正常运行。充放电管理方案的集成度直接决定了物料清单 (BOM) 成本、印刷电路板 (PCB) 占用面积以及整个系统的可靠性。

分立器件方案存在器件数量多、静态电流消耗大以及控制复杂度高等固有局限。如图图 2-1 所示，该方案由多个分立器件组成，包括一颗 BQ25171-Q1 线性充电器、LM5152-Q1/TPS61088-Q1 升压转换器、三颗功率 MOSFET 以及两个 I²C 接口。此外，还需要占用运算放大器或微控制器 (MCU) 的模数转换器 (ADC) 资源，以实现电压和电流采样。在这种分立式方案中，充电器集成的低压差稳压器 (LDO) 无法支持超过 1A 的充电电流，因此难以满足快速充电需求。放电、充电和电池健康状态监测等模式之间的切换完全依赖 MCU 控制，导致模式切换速度受限。此外，高侧 MOSFET 的漏电流过大，可达 200nA，导致静态功耗过高，难以满足设计要求。

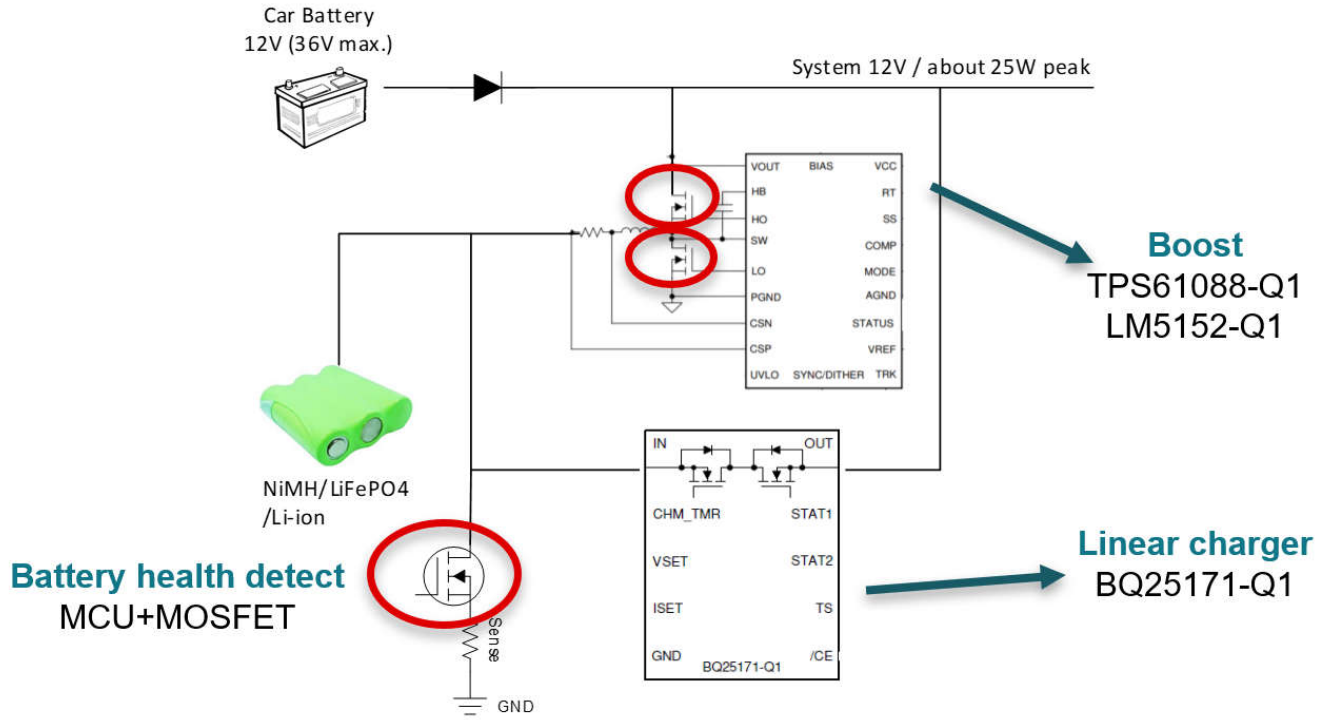

图 2-1. 分立式解决方案

与目前市场上已有的封装级集成方案相比，TPS6138x-Q1 系列实现了功能级集成，并从架构层面进行了优化。该器件将升压、充电和电池健康状态 (SOH) 检测三项独立功能集成于单颗芯片中。

如图 2-2 所示，该器件集成了隔离 MOSFET，并支持多种备用电池体系，包括镍氢电池 (NiMH)、磷酸铁锂电池 ($LiFePO_4$) 和锂离子电池 (Li-ion)。与分立器件方案相比，TPS6138x-Q1 所需的 PCB 面积显著减小，仅为 0.799 平方英寸，而分立式方案需要 1.428 平方英寸。充电模式支持 LDO 和降压两种配置，可提供完善的充电架构，并集成多级充电保护和基于 NTC 热敏电阻的温度监测功能。在升压模式下，其最低输入电压可低至 1V。

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

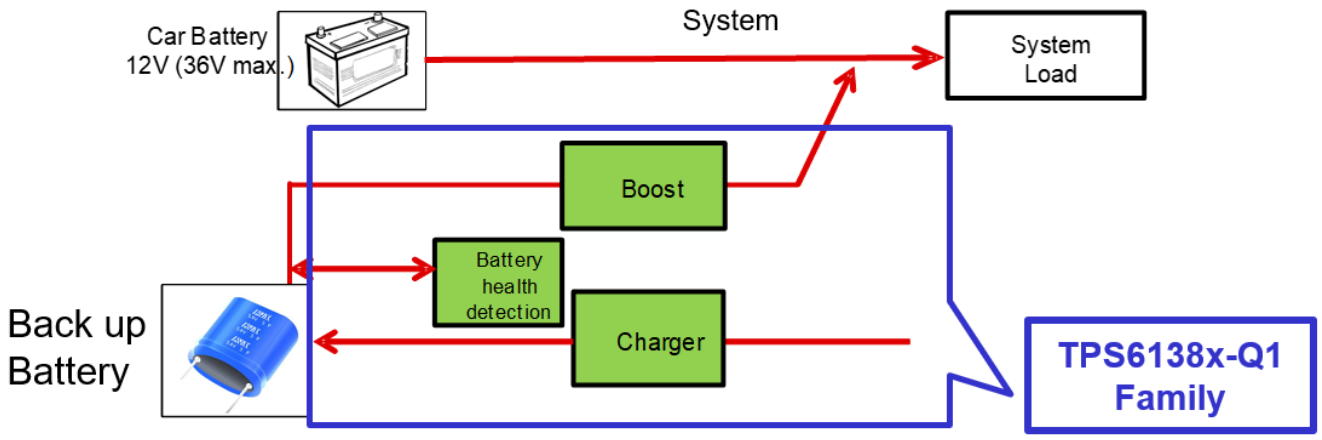

图 2-2. TPS6138x-Q1 集成式方案

在模式转换与切换能力方面，当车辆主电池正常工作时，系统可运行于待机、充电或 SOH 监测模式，从而实现高效的电源管理和电池健康状态评估。当主电池发生故障、电压下降时，芯片能够通过快速响应机制，在 20µs 内自动切换至升压模式，利用备用电池持续为系统负载供电，确保各项关键功能正常运行，从而显著提高系统可靠性。

通过采用新型工艺技术，该设计不仅满足了汽车严苛电气环境下的应用要求，还使芯片成本降低了 30%，在性能与成本之间取得了良好的平衡。因此，该器件尤其适用于对空间和成本敏感的汽车备用电池管理系统。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 TPS6138x-Q1 的应用设计注意事项

3.1 TPS6138x-Q1 原理图要点

TPS6138x-Q1 是一款高度集成的电源管理 IC，其原理图设计涉及多项关键注意事项，如图 3-1 所示。在接地架构方面，模拟地 (AGND) 和功率地 (PGND) 必须分开布线，并采用单点连接方式。采用这种接地隔离策略至关重要，因为它可以防止功率电路中的大电流在接地回流路径上产生压降，避免由此对敏感模拟电路造成不利干扰。此外，应将 VCC、COMP、AGND 引脚及散热焊盘连接至 AGND，以确保模拟信号的稳定性，因为这些部件均与芯片内部模拟电路有密切关联。将这些部分统一接地，可以有效降低地电位差所引入的噪声。

在驱动设计中，电阻 R5 用于驱动 Q1，其阻值范围为 1-3Ω，主要作用是限制驱动电流并抑制栅极电压振荡。MOSFET 封装尺寸建议选用 3mm × 3mm，以兼顾散热能力和布局便利性。

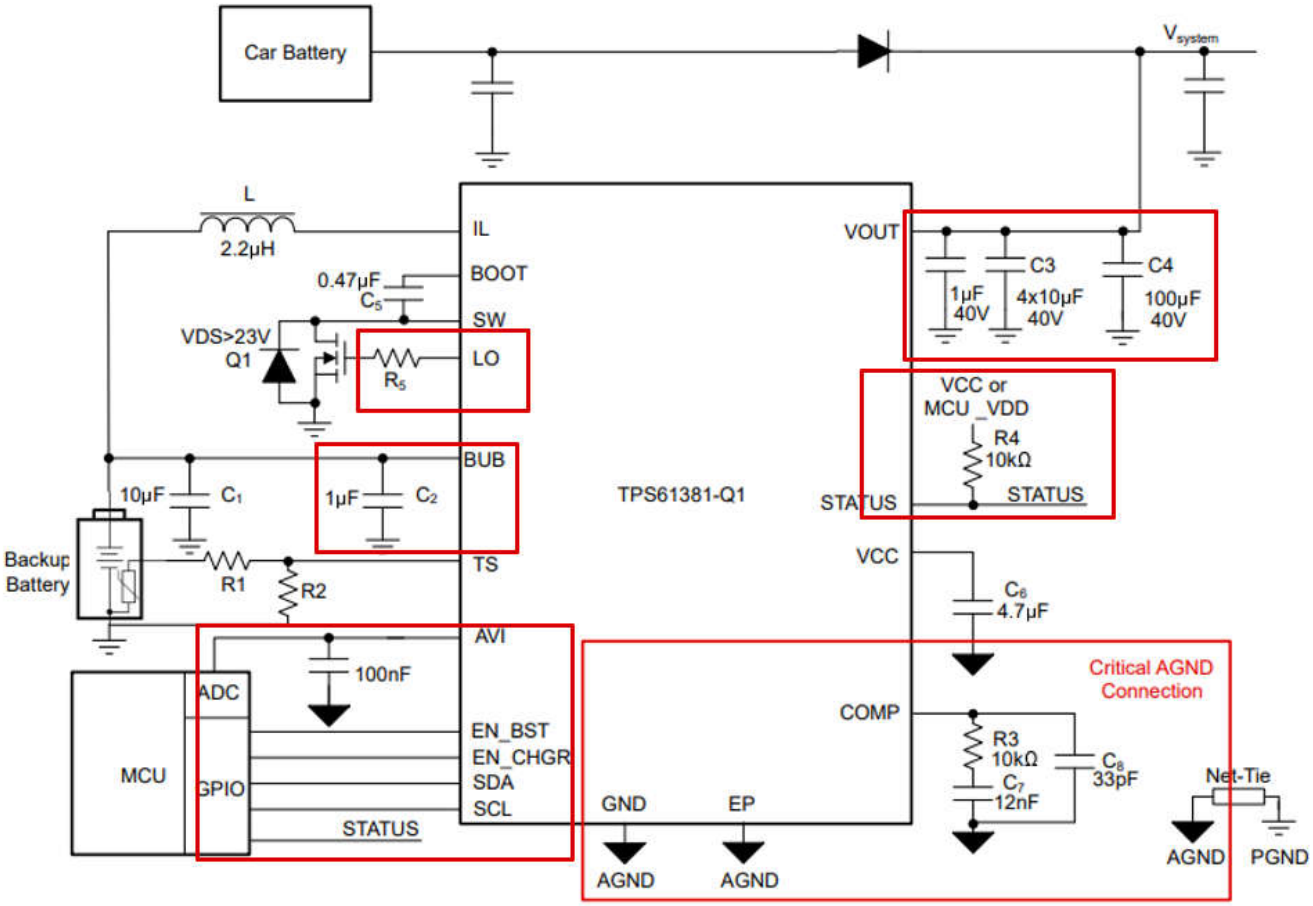

图 3-1. 原理图要点

检测与诊断引脚的设计主要涉及 AVI、BUB 和 STATUS 引脚。AVI 引脚应连接一个 100pF 的去耦电容，以滤除高频噪声并稳定引脚电压。STATUS 引脚采用开漏输出配置，便于将多个器件的状态信号进行线或连接，从而方便系统监测芯片的工作状态。BUB 引脚连接至备用电池，用于检测其电压，并接有一个 1 µ F 电容，用于滤除干扰、稳定备用电池电压。通过上述设计，芯片能够准确检测备用电池的电压状态，并在主电池发生故障时自动切换至备用电池供电，从而确保系统持续运行。

3.2 环路补偿优化设计，避免输出电压过冲过大

瞬态过冲可能触发系统的待机阈值，如图 3-2 所示。当输出电压过冲超过规定阈值时，IC 可能会错误地将其识别为满足待机条件，从而意外地从升压模式切换至待机模式。随后，在待机模式下，输出电压可能逐渐下降。当电压降至某一阈值以下时，IC 又会重新进入升压模式，导致升压模式与待机模式之间反复振荡切换。这种持续的模式切换不仅会影响系统稳定性，还会增加功耗和噪声，进而降低电源转换效率。

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

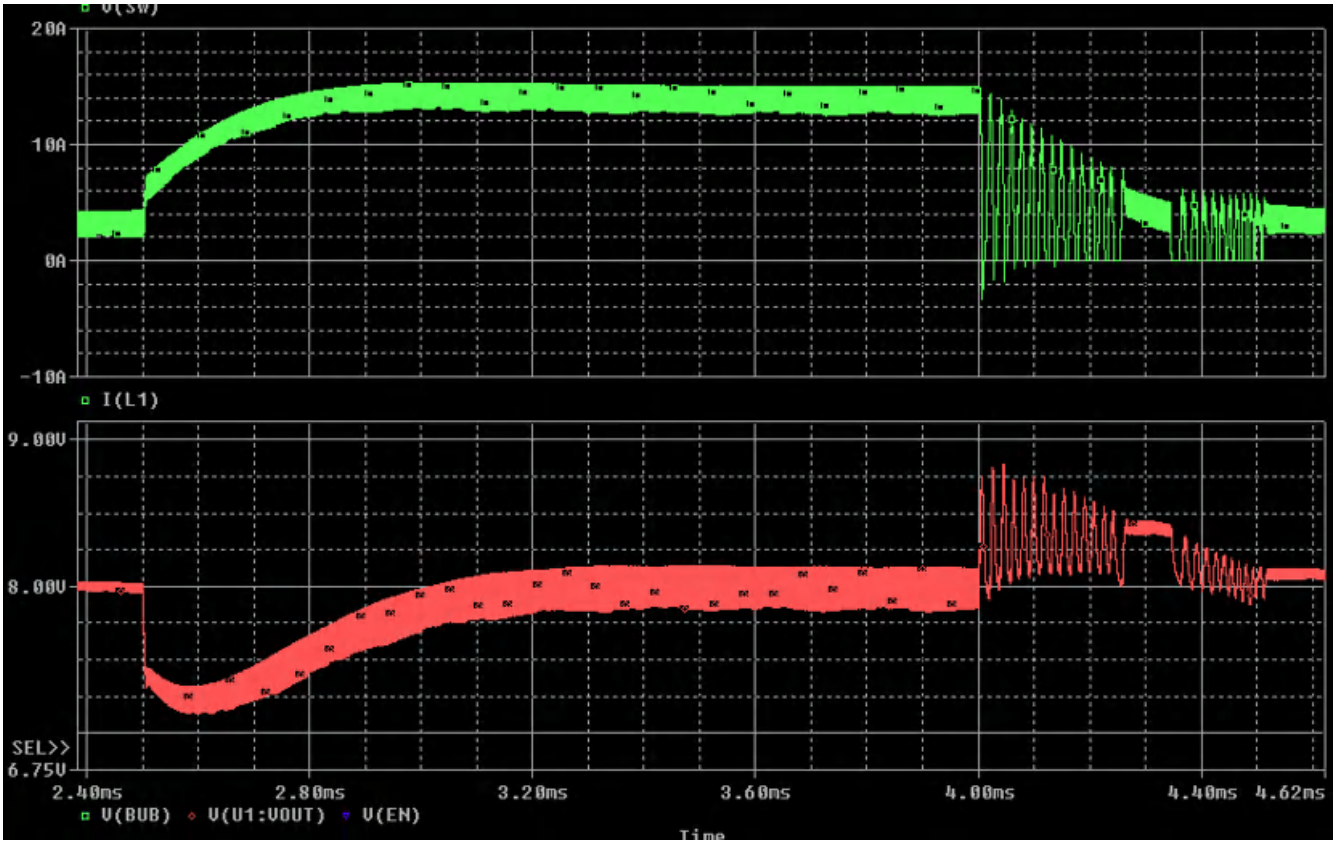

图 3-2. 环路补偿不当导致过冲

在电源设计中，功率级的传递函数 H(s) 会受到输出电容等效串联电阻 (ESR) 的显著影响。输出电容的阻抗可表示为$Z_C(s) = \frac{1}{sC} + R_{ESR}$，其中$s = j\omega$表示复频率，C 为电容值，$R_{ESR}$为等效串联电阻。在高频条件下，当角频率 ω 较大时，项$\frac{1}{sC}$的影响可以忽略，因此$Z_C(s) \approx R_{ESR}$.由此，ESR 会在功率级传递函数中引入一个零点，其频率为$\omega_Z = \frac{1}{R_{ESR}C_{OUT}}$.该零点会显著改变系统的相位裕度。当$R_{ESR}$较大时，$\omega_Z$会降低至更低的频率。如图 3-3 所示，这意味着相位变化会在较低频率处引入，从而降低相位裕度，并可能导致振荡等系统不稳定现象。

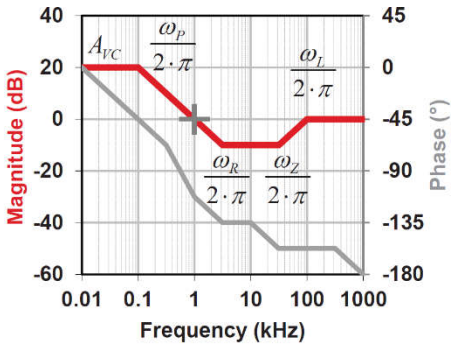

图 3-3. 功率级的极点与零点

为抑制瞬态过冲，需要对环路补偿进行优化设计。设计目标是确保系统具有足够的相位裕度，从而维持稳定运行。相位裕度定义为：在增益交越频率处 (例如增益等于 0dB 的频率) ，开环传递函数的相位与 −180° 之间的差值。为补偿 ESR 引入的相位滞后，可以通过适当调整补偿网络来引入一个补偿零点。例如，对于常用的 II 型补偿网络，其传递函数可表示为$\frac{1+sR_2C_2}{sR_1\left(C_1\frac{1+R_2C_2}{sR_2C_1C_2}\right)}$，通过合理选择$R_1$,$R_2$,$C_1$和$C_2$的数值，可以引入一个高频补偿零点

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

$\omega_{HF} = \frac{1}{R_{COMP}C_{HF}}$以补偿 ESR 零点引起的相位变化。这种补偿机制能够有效提高系统的相位裕度，增强整个系统的稳定性。

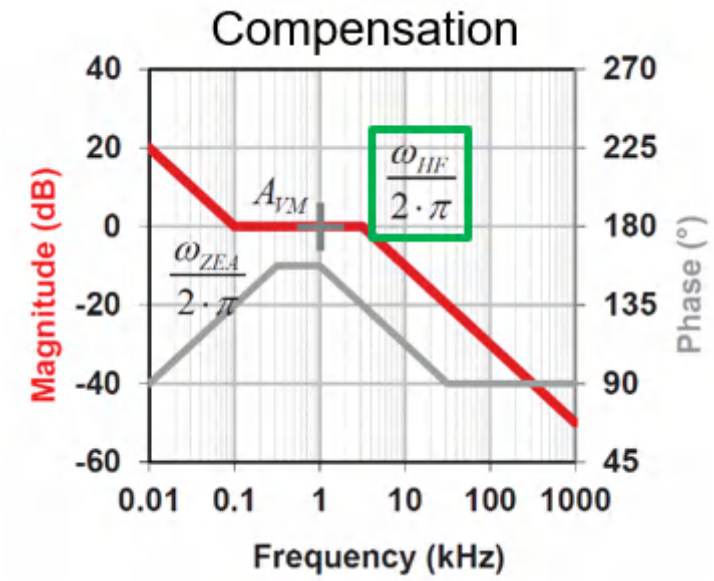

图 3-4. 补偿电路的极点与零点

3.3 TPS6138x-Q1 布局设计要点

在驱动电路布局方面，如图 3-5 所示，当 IC 启用 MOSFET 时，电流会从 VCC 电容流出，经过内部驱动器和栅极电阻，为 MOSFET 的栅极充电。回流电流则从 MOSFET 的源极 (PGND) 流出，经电路网络返回 VCC 电容的 AGND 端。这一电流瞬态过程仅持续数纳秒，峰值电流可达 2A。因此，合理设计布局、尽可能缩短电流路径，对于降低环路电感至关重要。与此同时，还必须特别注意 PGND 和 AGND 的连接拓扑，确保回流电流能够顺畅地返回 VCC 电容的 AGND 端，避免形成过大的接地环路或多条接地回流路径。这样可以防止地电位差引起的噪声干扰，避免其影响 MOSFET 的开关速度和效率，以及整个电路的电磁兼容性 (EMC)。

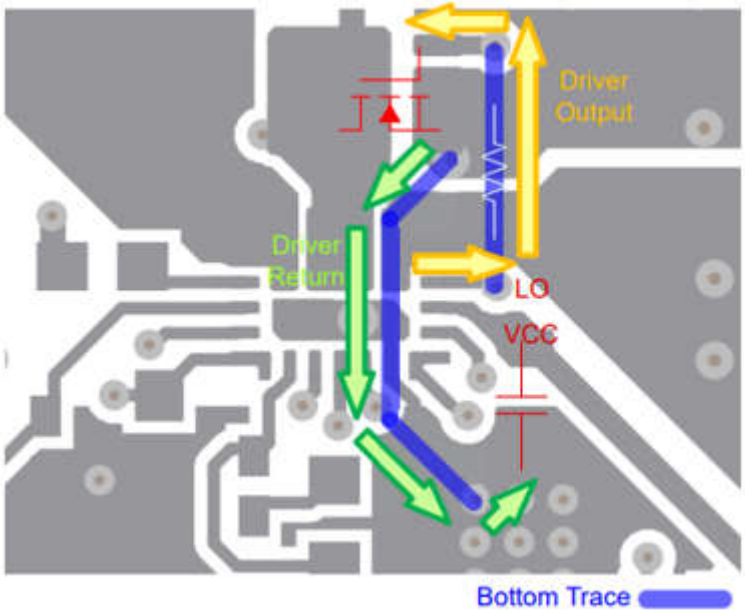

图 3-5. 驱动环路布局

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

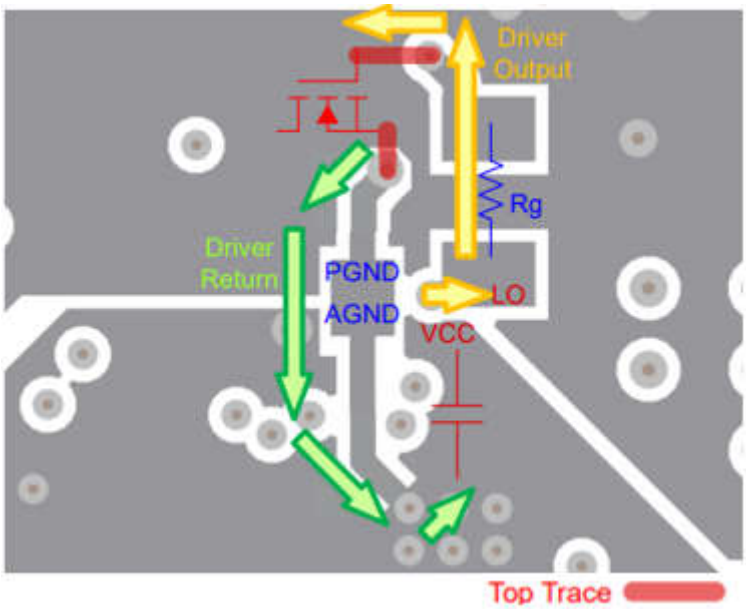

图 3-6. 标题

升压电路的布局同样有严格要求，如图 3-7 所示。升压电流不会流经 IC 的 GND 引脚或散热焊盘。为尽可能缩短电流路径，多层陶瓷电容 (MLCC) 应尽量靠近 VOUT 引脚放置（1mm 以内）。低侧 MOSFET Q1 也必须尽可能靠近 SW 引脚放置。此外，建议在 VOUT 引脚附近放置容量相对较小的输出电容（100nF - 1μF，0603 封装），以旁路高频噪声。

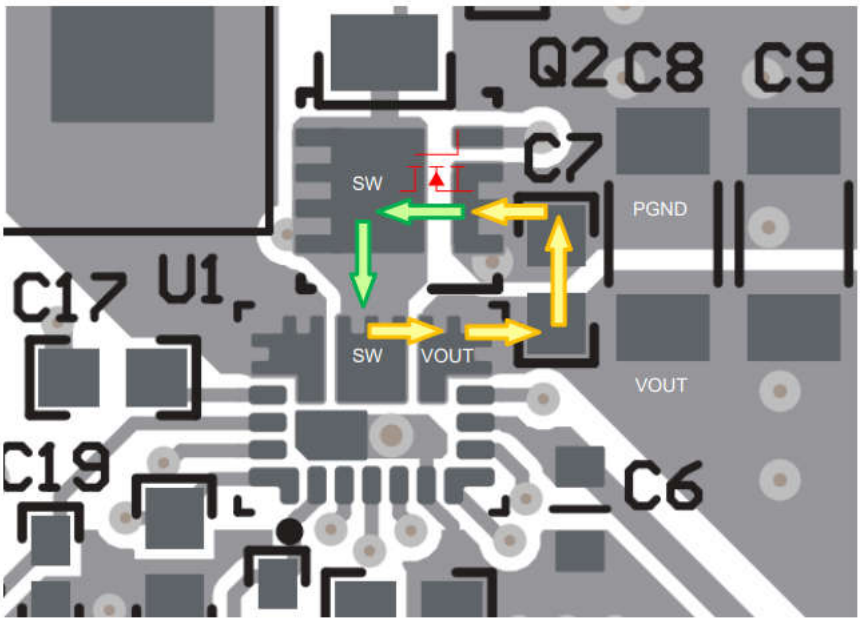

图 3-7. 升压环路布局

图 3-8 展示了噪声耦合至芯片内部的测试结果。PGND 上的噪声会通过散热焊盘以电容耦合的方式传递至控制地 (AGND)，影响带隙基准电压，进而降低 IC 的性能。从布局设计层面，可将散热焊盘直接连接至 AGND，从而消除 PGND 与控制地 AGND 之间通过散热焊盘形成的、易于传导的噪声耦合路径。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

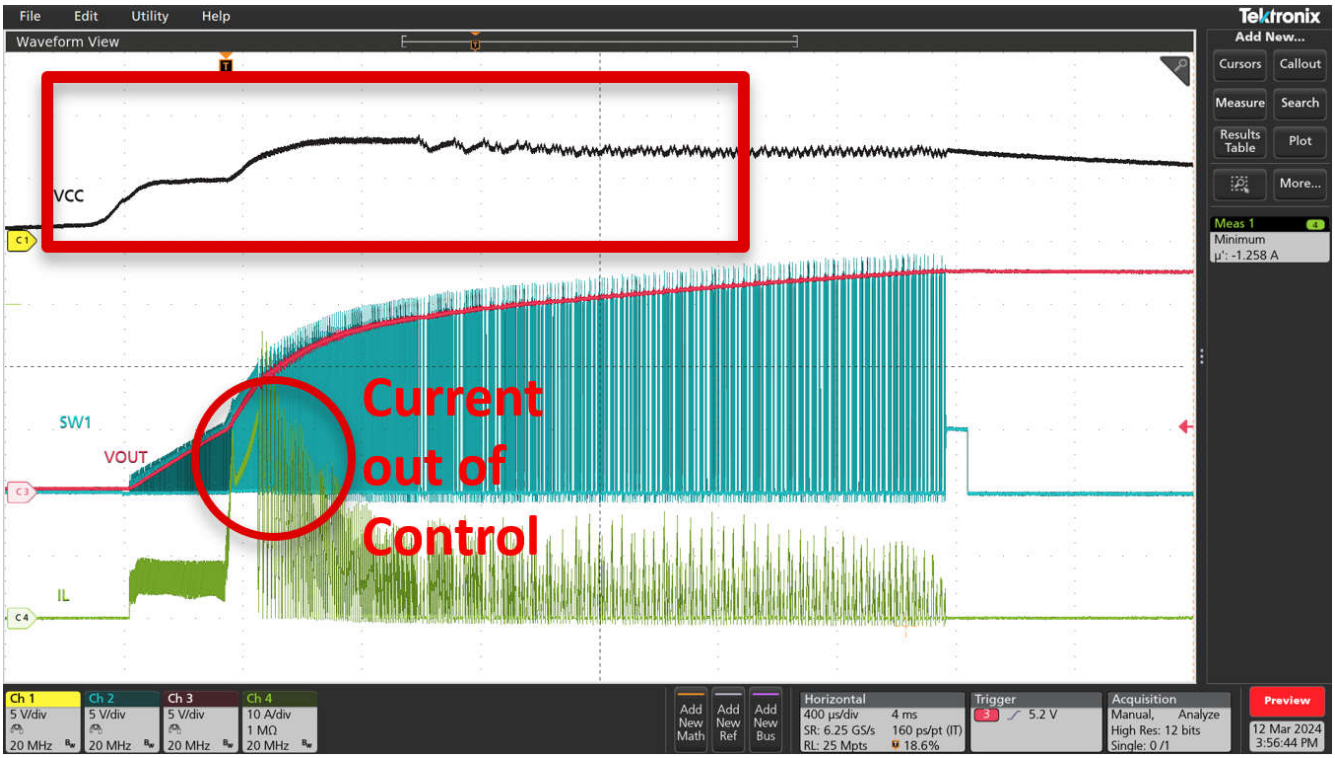

图 3-8. 噪声耦合波形

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 总结

随着 T-BOX（车载远程信息处理终端）系统逐步融入智能座舱架构，其备用电池管理方案也正在经历从传统分立器件堆叠式架构向功能集成化架构的演进。德州仪器 (TI) 新一代 TPS6138x-Q1 系列器件针对高 ESR 电容稳定性、驱动环路电磁干扰 (EMI) 以及多层隔离接地架构等关键技术难题进行了优化，实现了显著的性能提升：物料清单 (BOM) 成本降低 20%，印刷电路板 (PCB) 面积减少 30%。与此同时，该器件还具备 20µs 超快速启动能力和多级可靠性保护机制，为现代汽车应用中的备用电源管理集成电路提供了一套全面、系统的工程解决方案。

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 参考资料

德州仪器 (TI)，TPS61382A-Q1 汽车级 2.2MHz、36V、15A 升压转换器，带降压/LDO 充电器和电池健康状态检测功能数据表

德州仪器 (TI)，Vout 低于 VIN 时的升压工作行为：启动与输出短路保护

德州仪器 (TI)，使用 TPS61383 的汽车电子闩锁系统设计指南

English Document: SDAA603
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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